团队编号：A20200902

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 10 月 12 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

作品名称	新型点吸收式波浪能发电装置
主要功能	本文设计了一种新型点吸收式波浪能发电装置，其主要部分由基于摩擦纳米发电原理的浮标机构和基于电磁感应发电原理的线性发电机机构组成。本装置既能收集垂荡方向上的能量，同时也能收集浮体纵摇方向上的波浪能量，能够将低频的波浪能大量持续的转化为电能。浮标与发电机之间不再有机械、液压或其他任何能量转换的繁琐步骤，而是随着海浪的运动而运动，并与直接驱动的线性发电机和摩擦纳米发电机相连接将海浪运动的机械能转换为电能。这样的特点在于运动部件少，续航能力强，维护方便，采用以浮标体为载体可搭载多种传感器与仪器设备，能够实现水质、水文、气象一体化实时观测。
创新点	1.采用摩擦纳米发电技术并结合电磁感应发电技术，多发电模块耦合作业，提高装置的整体发电效率。2.装置结构合理、成本低、续航能力高、可靠性强、维护与安装方便，采用点吸收式结构在海浪作用下保证装置搭载多能互补发电部件的功能，并提升装置在恶劣海况下的工作鲁棒性。
国内外水平对比	Whittaker 等人设计的一种名为牡蛎 1 号（Oyster 1）的波浪能发电装置由 5 个直径 1.8 m 的钢管构成，额定功率高达 315kW；俄勒冈州立大学开发使用线性发电机作为直接驱动的能源转换系统，名为“L10”，可以产生 10 kW 的最大功率输出；王中林院士等研制了一种独立层式且完全封闭的滚动摩擦纳米发电机，直径为 6 cm 的 RF-TENG 瞬时输出功率高达 10 MW。
应用前景	1.**开发高效、可靠、经济、环保的海洋波浪能利用装置。**为海洋观测设备等中小型海洋装备提供能源支持或参与海洋区域微电网的构建。2.**响应国家“海洋强国”战略。**本装置将综合提升我国对海洋的掌控与利用能力，并有利于我国海洋经济发展与海洋生态文明建设。3.**推动我国海洋产业发展。**本装置有望成为我国各种海洋产业的基础支持产业，提供稳定、持续、高效和优质的能源供给，提升我国海洋产业的投产比与市场竞争能力，推动我国海洋产业快速发展。

目录

1.研究背景.....1
1.1 海洋监测与无线传感网络.....1
1.2 国外技术发展现状及应用情况.....1
1.2.1 基于电磁发电机技术的波浪能发电装置.....1
1.2.2 基于压电发电机技术的波浪能发电装置.....2
1.2.3 基于摩擦纳米发电机技术的波浪能发电装置.....2
1.3 研究意义.....3
2.实验方案.....4
2.1 摩擦纳米发电机装置设计方案.....4
2.1.1 摩擦纳米发电机发电原理.....4
2.1.2 摩擦纳米发电机浮体结构设计.....6
2.2 线性发电机装置设计方案.....8
2.2.1 线性发电机装置发电原理.....9
2.2.2 线性发电机装置结构设计.....11
3. 结构设计与实施方式.....14
3.1 装置组成.....14
3.2 具体实施方式.....14
4. 实验数据与分析.....18
4.1 摩擦纳米发电机实验数据与功率计算.....18
4.1.1 摩擦纳米发电机实验数据.....18
4.1.2 摩擦纳米发电机功率计算.....19
4.2 线性电机实验数据.....19
4.3 波浪能发电装置能效分析.....20
5.可行性分析与展望.....22
5.1 可行性分析.....22
5.2 创新点.....23
5.2.1 发电装置功能原理创新.....23
5.2.2 总体布局创新.....23
5.3 展望.....24
6.附录.....25
6.1 参考文献.....25

1.研究背景

1.1 海洋监测与无线传感网络

伴随现阶段工业、旅游和城市的快速发展，在过去的十年里，海洋监测已经成为一个重要的科学研究领域[1-5]。最近，一些研究者通过将传感器与浮标集成，提出一种海事装备实时监测海洋环境的解决方案[1, 14-16]。通过这种方法，可以在传感网络中部署以浮标为基础的传感节点，从而实现对测量的海洋变量的精确空间表示。因此必须在足够大的空间和时间尺度上收集信息，以确保进行有效监测。但是由于无线传感器网络采用有限的电池能源作为传感器的供能来源，从而大大降低了海事监测设备的续航性能，同时也增加了设备的安装和维护工作的难度。因此，在海洋监测中部署无线传感网络目前是一项挑战，并且海洋环境对传感器、电子和机械设备功能的影响不可小觑。现有的解决方案通常是短时效性的，因为它们的设计取决于各种因素，例如海洋环境的特征（深水而不是浅滩或沿海泻湖、气候条件等）、部署的时间尺度、部署的空间范围和数据收集的时间分辨率[17]。由于所有这些不同的工作场景，必须对装备的设计进行预先分析，并将部署和维护网络的成本降至最低。在物联网传感与海洋监测多元融合的大背景下，亟需研究面向海洋监测设备供能的新型高效的能量采集技术，以确保海事设备安全可靠的运行。

1.2 国外技术发展现状及应用情况

1.2.1 基于电磁发电机技术的波浪能发电装置

振荡浪涌式波浪能转换装置（OWSC）是其中一种波浪能发电技术，它利用在水深 10-20 m 的近岸沿海地区中较强的水平波浪流体的粒子运动来进行发电。国外 Whittaker 等人开发了一种名为牡蛎 1 号（Oyster 1）的波浪能发电装置[18]。牡蛎这样的 OWSCs 主要在工作频率范围内对水平波浪流体的加速度做出响应，水动力特性主要由惯性决定为主。发电站将由具有公共二次电源转换的襟翼线阵组成，每 5-10 个为一个发电单元。俄勒冈州立大学与哥伦比亚动力技术公司和海军合作设计了一种简单结构的海洋波浪能源的转换系统。该设备使用线性发电机作为驱动来源并于 2008 年 9 月在新港进行了测试，命名为“ L10”（线性 10 kW）[19]，在后期实验测试中他们发现当相位电流控制在每相位输出 6 A 的峰值电流时，1 分钟内 L10 平均输出功率可达 1.5 kW，峰值输出功率高达 5 kW。研究者认为，海上实验和数据采集与分析将有助于这些类型的可再生能源利用设备与未来微电网的连接[20]，以实现对海洋实时有效的进行全方位监测。乌普萨拉大学（Uppsala University）也注意到了这种关于波浪能发电装置的简化设计理念[20]。这样设备的优势更在于，

浮标与发电机之间不再有机械、液压或其他任何能量转换的繁琐步骤，而是随着海浪的运动而运动，并与直接驱动的线性发电机相连接将海浪运动的机械能转换为电能。因此，乌普萨拉（Uppsala）具有运动部件少，续航时间长和维护周期长的优点[21]。因此，在海洋传感器网络的自供电领域，简单的机械系统更有可能解决复杂的机械系统问题。

1.2.2 基于压电发电机技术的波浪能发电装置

日本广岛大学 Mutsuda 等人的工作中，制作了一种柔性压电器件（Flexible Piezoelectric Device, FPED）FPED 用于采集海洋中的波浪能[22, 23]。其采用新颖的喷涂技术在薄膜上涂有压电涂层，使得压电层具有极高的耐用性，可以承受由波浪和海流引起的极端弯曲和风化[22]，具有重量轻、外形尺寸无限制、安装维护方便、环保、成本低等特点。在柔性压电 FPED 的器件基础之上，Mutsuda 等人又设计了一种新型的波浪发电机并将其命名为带有悬挂结构的柔性浮标节点(Elastic Floating unit with Hanging Structures, EFHAS)[24]。EFHAS 由六个 FPED 连接，垂直放置的FPED也可以收集洋流能和涡流能，水平放置的FPED可以收集海面波浪能。与之前的海洋波浪能发电机相比，其能够吸收多种海洋能量，如波浪、洋流、涡流和破碎波。A.S. Zurkinden 等人采用多物理模拟方法，从自由表面波浪、流体-结构相互作用、压电材料的机械能输入以及等效电路模型等方面进行了研究，并提出了一个有用的数值分析模型，用于分析采用 PVDF 材料的海藻式压电发电机。研究者表明，这种模式可以替代传统上由电池供电的信号发射器等便携式电子设备的低功耗系统。

1.2.3 基于摩擦纳米发电机技术的波浪能发电装置

王中林院士等人研制了一个独立层式（Freestanding-mode）且完全封闭的滚动摩擦纳米发电机(Rolling Freestanding Triboelectric Nanogenerator, RF-TENG)[25, 26]。这种装置可依靠传统材料聚合物之间的表面接触起电效应，具有重量轻、成本低、在低振幅振动下也能保证良好的电荷转移效率等优点。实验发现在波浪驱动作用下，直径为 6 cm 的 RF-TENG 可以在从短路状态到 10 GΩ 的负载范围内提供 1 μA 的峰值电流，其瞬时输出功率高达 10 MW，可在几个小时内直接驱动数十个 LED，并将一系列超级电容器充电至额定电压。在此基础上，Zhang 等人提出了一种基于海蛇（Sea Snake TENG, SS-TENG）的摩擦纳米发电机[27]。作者认为外壳与外界海洋之间的气隙是影响 TENG 输出性能的最重要因素[27]，并进一步揭示由于其独特的气隙结构 SS-TENG 可以在实际海洋条件下使用，例如在高盐度水环境中使用。为了避免海水腐蚀及静电干扰对 TENG 的影响，且进一步提高 TENG 的波浪能采集效率。新加坡国立大学 Lee 等人，提出了一种基于摩擦纳米发电技术的高对称

性三维球形水基波浪能发电机（Highly symmetric 3D spherical-shaped water based triboelectric nanogenerator, SW-TENG）。有趣的是其内部 PTFE 薄膜上有含有水，由于水波的流体性质，内部水作为可流动的物质是一种理想的从低频和随机方向/振幅的波浪中获取能量的方法，从而使其能有效的采集三维方向上的波浪能。Li 等人也设计制作了固液接触式摩擦电纳米发电机（Liquid-solid triboelectric nanogenerator, LS-TENG）。浮标式 LS-TENG 与相同面积的固体-固体接触式 TENG 相比，LS-TENG 的能量输出放大了 48.7 倍。此外，通过仿真计算 LS-TENGs 网络的输出最高可以达到 290 μA、16725 nC 和 300 V，LS-TENGs 网络可以直接为数百个 LED 供电，并驱动一个射频发射器，形成一个自供电的海上救援（SOS）搜救系统，以应对海洋紧急情况。

1.3 研究意义

针对上述背景，电磁发电机（electromagnetic generator , EMG）是当今收集波浪能装置中一种较为先进的技术，然而现阶段面临的新问题是与监测设备连接的大量电缆的布置以及海水侵蚀海生物附着等更严峻的挑战。其次，与 EMG 技术相比，压电式波浪能发电技术主要基于流体与压电元件之间的流致振动和压电元件与机械结构之间的耦合来进行发电。压电纳米发电机（Piezoelectric nanogenerator, PENG）与传统的 EMG 相比优势在于其独特的柔性材料与结构。虽然与 EMG 相比压电式波浪能发电装置的功率密度少了一个数量级，但是随着海洋进入物联网、传感器大量分布的大数据网络时代，PENG 可用作于海洋无线传感器，如环境监测、机械传感和结构诊断中的能量来源。再次，基于压电式波浪能采集装置，王中林院士等人发明了一种利用摩擦起电原理与静电感应原理的摩擦纳米发电技术（Triboelectric Nanogenerator, TENG）。与 PENG 有所不同的是 TENG 利用交变的电场使电极上产生极化电荷进而产生感应电流。而 PENG 是利用材料本身的特性，受外界激励作用致使压电元件产生形变进而使电极产生极化电荷来产生电流。因此 TENG 较 PENG 具有较高的输出电压，可以与市面上各种类型的商用传感器相匹配。因此，随着物联网大数据时代的来临，诸如 TENG 或 PENG 这种可持续、高效、可靠、低成本和环保型的波浪能发电技术的开发和商业化受到了广泛的关注。该类波浪能采集方式非常适合作为分布式海事监测设备的能量自驱动来源，能够保证设备长续航、实时的监测海事活动进而实现海洋监测与传感器网络的自驱动化。因此，亟需结合波浪能本身与新型波浪能发电技术的优势，设计一种面向海洋多方向波浪能采集的结构简单、成本低廉、续航能力强、高效稳定的新型波浪能发电装置。

2.实验方案

2.1 摩擦纳米发电机装置设计方案

摩擦纳米发电装置（Triboelectric nanogenerator,TENG）最主要的优势是在低频时也能具有很高的能量转换效率。在 wang et al.等人的工作中，相同尺寸的波浪能发电装置在 5Hz 的频率下，TENG 输出大于 EMG 输出。此外，EMG 通过二极管整流，从交流到直流的电压阈值操作，会导致生成的低频率的输出电压在 0-0.5V 以下，从而没有有效的输出功率。相比之下，TENG 即使在很低的频率下，通常也有很高的输出电压，通常在 20-50V 之间，因此二极管 0.5V 左右的整流几乎不会导致输出功率的损失。所以，在小于 5Hz 的低频下，TENG 的输出功率会远远高于 EMG。基于摩擦起电效应和静电感应效应，通过介电材料运动产生交变的电场进而产生电流。TENG 结构简单、重量轻、成本低、对环境友好，在海洋中可以漂浮在海面上，对于不规则、随机的机械波浪运动具有较强的适应性，通过并联组网可以同时搭载多个发电装置，能够有效提高整体装置的发电效率。

2.1.1 摩擦纳米发电机发电原理

由麦克斯韦位移电流原理：

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \tag{2-1}$$

式中，E 为电场，P 为极化场，D 为电位移场，诱发电位 ε_0 为真空介电常数。对于各向同性介质 $P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E$， $D = \varepsilon E$ 其中 ε 为介质的介电常数，所以位移电流:

$$J_D = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \tag{2-2}$$

然而，在存在表面极化电荷的介质中，如压电材料或者摩擦电材料，表面静电荷的极化密度对位移电流的影响是不能忽略的，此时位移电流可以写成:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P_S}{\partial t} \tag{2-3}$$

式中，第一项为变化电场引起的感应电流，第二项为表面静电荷场引起的感应电流。第二项是摩擦纳米发电机的理论起源，也是位移电流在能量和传感器上的应用。对于 TENG 来说，两种介质在物理接触后会在表面产生正负相反的静电电荷。表面电荷密度经过几个接触循环后达到饱和。摩擦电荷形成的静电场驱动电子通过外部负载流动。内部电路以位移电流为主，外部电路中观察到的电流为电容传导电流。内部电路和外部电路可以在两个电极上相遇。因此，位移电流是

电流产生的内在物理核心，外部电路中的电容模型是位移电流的外在表现形式。在 TENG 中，表面电荷密度是固定的，但是系统的电容在机械触发时发生了变化。

假设模型的两种介质分别为ε_1和ε_2，厚度分别为d_1和d_2，引入摩擦电表面电荷密度为$\sigma_c(t)$，电极表面自由运动的电子密度为$\sigma_I(z,t)$，为两介质之间间隙距离$z(t)$的函数。那么两种介质和间隙中的电场为：$E_{z1}=\frac{\sigma_I(z,t)}{\varepsilon_1}$，$E_{z2}=\frac{\sigma_I(z,t)}{\varepsilon_2}$，$E_z=\frac{(\sigma_I(z,t)-\sigma_C)}{\varepsilon_0}$。

则两电极之间的电位降为：

$$V=\sigma_1(z,t)[\frac{d_1}{\varepsilon_1}+\frac{d_2}{\varepsilon_2}]+z\frac{\sigma_I(z,t)-\sigma_C}{\varepsilon_0} \tag{2-4}$$

短路时，V=0，有：

$$\sigma_I(z,t)=\frac{z\sigma_C}{d_1\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}+d_2\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_2}+z} \tag{2-5}$$

因此，介质内部位移电流为：

$$J_D=\frac{\partial D_z}{\partial t}=\frac{\partial\sigma_I(z,t)}{\partial t}=\sigma_C\frac{d_Z}{d_t}\frac{d_1\varepsilon_0/\varepsilon_1+d_2\varepsilon_0/\varepsilon_2}{(d_1\varepsilon_0/\varepsilon_1+d_2\varepsilon_0/\varepsilon_2+z)^2}+\frac{d\sigma_C}{dt}\frac{z}{d_1\varepsilon_0/\varepsilon_1+d_2\varepsilon_0/\varepsilon_2+z} \tag{2-6}$$

式中，第一项表示位移电流大小与两介质接触或分离的速度成正比；第二项表示位移电流大小与表面电荷密度增加的速率有关，一般情况下，大约接触十次后，σ_C达到饱和，第二项消失。

若有外载荷 R，则根据欧姆定律，TENG 的控制微分方程为

$$RA\frac{d\sigma_I(z,t)}{dt}=z\frac{\sigma_C}{\varepsilon_0}-\sigma_I(z,t)(\frac{d_1}{\varepsilon_1}+\frac{d_2}{\varepsilon_2}+\frac{z}{\varepsilon_0}) \tag{2-7}$$

在摩擦纳米发电机波浪能采集研究工作中，发电单元两个电极之间的电荷转移量 Q 与负载无关，仅仅依靠于装置的材料、结构以及外界环境条件所带来的影响使 TENG 发电单元本身存储电荷和转移电荷的能力增长或降低。因此 TENG (I_{TENG})也可以被视为理想的电流源。因此当各个摩擦纳米发电机发电单元以相同相位移动时，依据欧姆定律，具有 N 个并联发电单元的 TENG(I_{TENG})装置的电流可以是单个发电单元(I_1)的电流的 N 倍。

$$I_{\mathrm{TENG}}=\sum_{i=1}^{N}I_i=NI_1 \tag{2-8}$$

因此，T-TENG 在外电阻两端的电压($V_{\mathrm{T\text{-}TENG}}$)也是单个发电单元电压($V_1$)的 N

倍。

$$V_{\mathrm{TENG}} = I_{\mathrm{TENG}} R = NI_1R = \sum_{i=1}^{N} V_1 \quad (2\text{-}9)$$

此外，功率密度(P_{TENG})可以通过如下公式获得，

$$P_{TENG} = \frac{V_{TENG}\, I_{TENG} R}{NA_1} = \frac{N^2 {I_1}^2 R}{NA_1} = NP_1 \quad (2\text{-}10)$$

式中，A_1是体积，P_1是一个 TENG 发电单元的功率密度。理论结果表明，当将 TENG 视为电流源时，整个摩擦纳米发电机装置的功率密度是单个发电单元功率密度 P_1 的 N 倍。

2.1.2 摩擦纳米发电机浮体结构设计

装置由内部发电单元和外壳、配重这三部分组成，模型具体数据与比尺如图所示：

（1）外壳：外径 0.4m、内径 0.39m、壁厚 0.005m、高度（由于对装置进行初步设计今后对于试验可能还需进行调整）暂定 0.4m、制作材料为亚克力。

（2）体积 0.01 立方米，中心位置 0.86m，

（3）浮子结构选择：锥底，球身。用于提高浮体垂荡幅度与纵/横摇频率

（4）比尺λ=1。

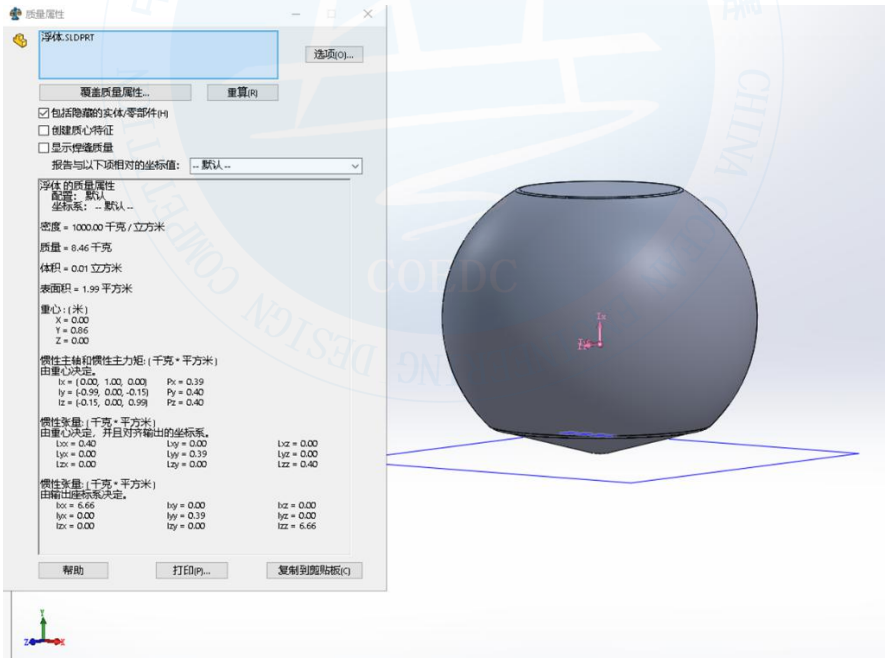


图 1 浮体结构模型及具体数据

如图 2 通过利用 Star CCM 进行模拟计算，得到了浮体受力、重心位置角速度、垂荡位移以及系泊力等水动力参数。

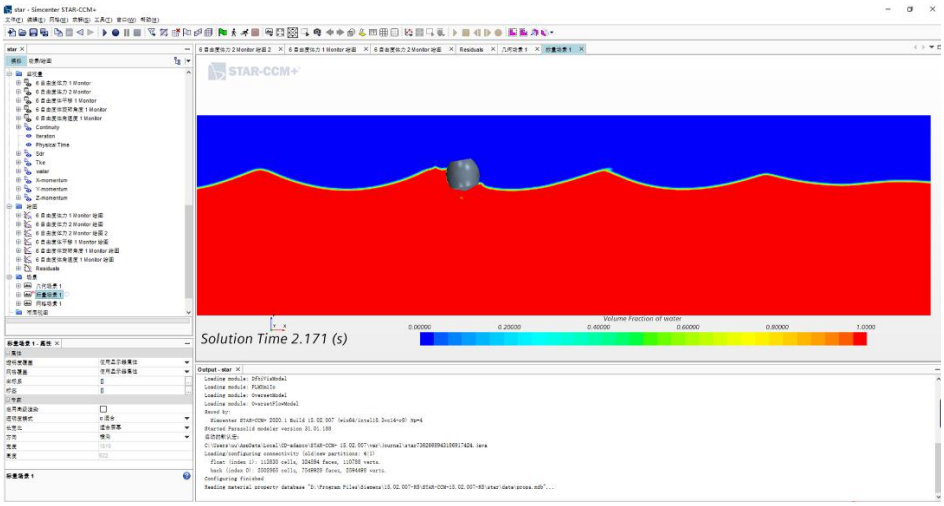


图 2 StarCCM 浮体仿真计算界面

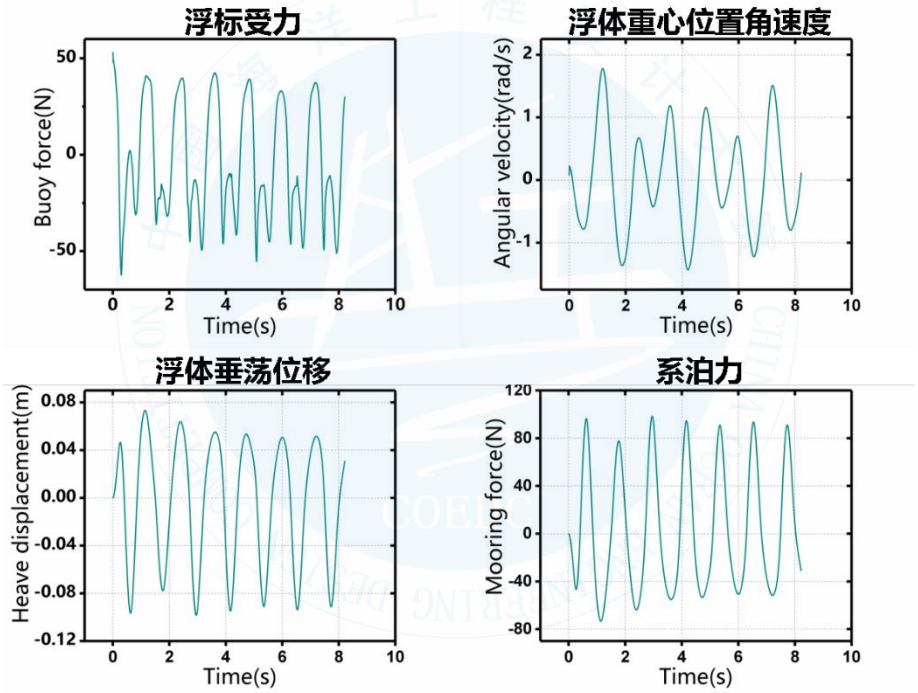


图 3 浮体受波浪激励作用数据

如图 3 所示，通过分析可以得到浮体受力最大为 50 N，重心角速度最大值为 1.8 rad/s，垂荡位移最大值为 0.01 m，系泊力最大值为 90 N。

此外针对摩擦纳米发电机在波浪激励作用下纵摇的运动，一般采用浮子纵摇的频域运动方程:

$$(I_1 + \mu_{55})\ddot{\theta}_1(t) + \lambda_{55}\dot{\theta}_1(t) + C_{55}\theta_1(t) = m_{55} \tag{2-11}$$

式中I_1为浮子的纵摇惯量，μ_{55}为浮子纵摇引起的附加惯量，λ_{55}为浮子纵摇引起的阻尼系数，C_{55}为静水纵摇恢复力系数，m_{55}为浮子纵摇引起的波浪激振力力矩。由于摆动体m_3运动作用到浮子 m_1上的作用力矩记为f_{13}，f_{13}可表示为：

$$f_{13} = C_{13}(\dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_3(t)) \tag{2-12}$$

式中C_{13}为摆体运动对浮子产生的阻尼项。系泊系统对浮子的力矩记为M_1，M_1可表示为：

$$M_1 = k^{'}\theta_1(t) \tag{2-13}$$

式中$k^{'}$为系泊系统的刚度系数将运动方程进行整理得到：

$$(I_{11} + \mu_{55})\ddot{\theta}_1(t) + \lambda_{55}\dot{\theta}_1(t) + C_{13}\left(\dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_3(t)\right) + C_{55}\theta_1(t) + k^{'}\theta_1(t) = m_{55} \tag{2-14}$$

将摆体平衡方程联立得到:

$$I_3\ddot{\theta}_3(t) = C_{31}(\dot{\theta}_3(t) - \dot{\theta}_1(t)) \tag{2-15}$$

与整理后的浮子运动方程进行联立，设：

$$\begin{cases} \theta_1 = Re(\psi_1 e^{-i\omega t}) \\ \theta_3 = Re(\psi_3 e^{-i\omega t}) \\ m_{55} = Re(M_5 e^{-i\omega t}) \end{cases} \tag{2-16}$$

可得：

$$\psi_1 - \psi_3 = \frac{M_5}{|B|}(-\omega^2 I_3)^2 \tag{2-17}$$

其中：

$$B = \begin{pmatrix} -\omega^2(I_1 + \mu_{55}) + i\omega(\lambda_{55} + C_{13}) + (C_{55} + k^{'}) & -i\omega C_{13} \\ i\omega C_{13} & -\omega^2 I_2 - i\omega C_{13} \end{pmatrix} \tag{2-18}$$

当在一定的时间 t 内，浮子与摆动体之间吸收的能量可表示为浮子与摆动体相对角速度的函数；当时间取为波浪周期 T 时，进行傅里叶变换可得到频域范围的波浪能装置的吸收能量

$$P = \frac{1}{2}C_{PTO}^{'}\omega^2|\psi_1 - \psi_3|^2 \tag{2-19}$$

其中$C_{PTO}^{'} = C_{13}$。

2.2 线性发电机装置设计方案

垂荡式线性发电机与摩擦纳米发电浮体机构装置通过缆绳相连。主要发电装置为线性永磁发电机。永磁式磁铁随波浪做垂荡运动，内部由相连接的弹簧提供往复力，磁铁四周包裹有磁感线圈，通过切割磁感线完成由机械能到电能的转换。同时在装置顶部设计有密封圈，能够有效提升装置的防水性能。与传统发电装置相比，本文设计的垂荡式线性发电机装置具有结构简单，能量转换效率高，成本低等优势。本文通过仿真和研究计算，选取了最佳弹簧的弹性模量、圈数以及直

径，同时在不同运动状态下计算出理论上线性发电机的最大输出功率。无论装置所处水域环境波浪较强或者较弱，垂荡式发电装置和摩擦纳米发电装置可以同时借助波浪能进行发电，既可以为遥感仪器、海水数据观测仪器等精密设备供电，也可为水下机器人、水面无人艇、水下滑翔机等设备供电，具有较为广阔的应用前景。

2.2.1 线性发电机装置发电原理

为了计算磁铁在重心直线上下运动时所能提供的功率，首先考虑电磁转换部分，通过弹簧连接。

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2}+(b_e+b_m+b_{pz})\frac{dx(t)}{dt}+kx(t)=-m\frac{d^2y(t)}{dt^2} \tag{2-1}$$

式中，b_e为电磁阻尼系数，b_m为机械阻尼系数，$x(t)$为弹簧挠度，y 为输入位移，m 为证明质量，k 为弹簧常数。电功率等于电磁阻尼系数总机械系统中除去的功率。

$$P=\int_0^v F_e dv \qquad F_e=b_e\frac{dx}{dt}=b_e v \tag{2-2}$$

式中 F_e为电诱导力，带入到 P 中，有：

$$P=\frac{1}{2}b_e(\frac{dx}{dt})^2 \tag{2-3}$$

假设初始条件为 0，对式 1 进行拉普拉斯变换，有：

$$ms^2X(s)+(b_e+b_m+b_{pz})sX(s)+kX(s)=-ms^2Y(s) \tag{2-4}$$

$$Laplace[\frac{dx(t)}{dt}]=-\frac{ms^3Y(s)}{ms^2+(b_e+b_m+b_{pz})s+k} \tag{2-5}$$

式中，$X(s)$为浮体机构带动缆绳位移引起的弹簧位移变形的拉普拉斯变换；$Y(s)$为浮体位移的拉普拉斯变换。

定义阻尼比（无单位）：

$$\varsigma_e=\frac{b_e}{2m\omega_n};\quad \varsigma_m=\frac{b_m}{2m\omega_n};\quad \varsigma_{pz}=\frac{b_{pz}}{2m\omega_n} \tag{2-6}$$

令$k=m\omega_n^2$，电磁阻尼系数取决于所使用的的换能器和负载电阻，对于换能器，通过换能器施加在物体上的阻尼力来求得阻尼系数。通过洛伦兹力定律，在磁场 B 中移动的电阻负载（R）上的导线所受到的力为：$F=nBli$

式中：n 为匝数，B 为磁通密度，l 为导线长度，i 为通过动圈的电流，V 为感

应电压（$i=V/R$）。根据法拉第定律，线圈中的感应电压为：$V=nBlv$。其中 v 为线圈的速度。

故电磁阻尼因子为：

$$b_e=\frac{F}{v}=\frac{(nBl)^2}{R} \tag{2-7}$$

对于海洋波浪的正弦运动：$y(t)=Y_0\cos(\omega t)$，有：

$$X(j\omega)=-\frac{-\omega^2}{-\omega^2+j2(\varsigma_e+\varsigma_m+\varsigma_{pz})\omega\omega_n+\omega_n^2}Y(j\omega) \tag{2-9}$$

$$\text{则}\left|X(j\omega)\right|=\left|-\frac{-\omega^2}{-\omega^2+j2(\varsigma_e+\varsigma_m+\varsigma_{pz})\omega\omega_n+\omega_n^2}\right|\left|Y(j\omega)\right| \tag{2-10}$$

式中，$\varsigma_T=\varsigma_e+\varsigma_m+\varsigma_{pz}$ 为总阻尼比，则该机构提取的总电能为 $\left|P\right|=\frac{1}{2}b_e\left|(\frac{dx}{dt})^2\right|$，

由 $\left|Laplace[\frac{dx(t)}{dt}]\right|=\frac{(\frac{\omega}{\omega_n})^2\omega}{\sqrt{(1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2+(2\varsigma_T\frac{\omega}{\omega_n})^2}}\left|Y(j\omega)\right|$ 有：

$$|p|=\frac{1}{2}b_e\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4\omega^2}{\left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2+\left(2\varsigma_r\frac{\omega}{\omega_n}\right)}\cdot|Y(j\omega)|^2 \tag{2-11}$$

P 是输入为 y（t）的线性系统的输出，当弹簧质量系统的谐振频率与输入频率相匹配时，其最大输出功率为：

$$\left|P\right|=\frac{m\varsigma_e\omega_n^3}{4\varsigma_T^2}\left|Y\right|^2 \tag{2-12}$$

2.2.2 线性发电机装置结构设计

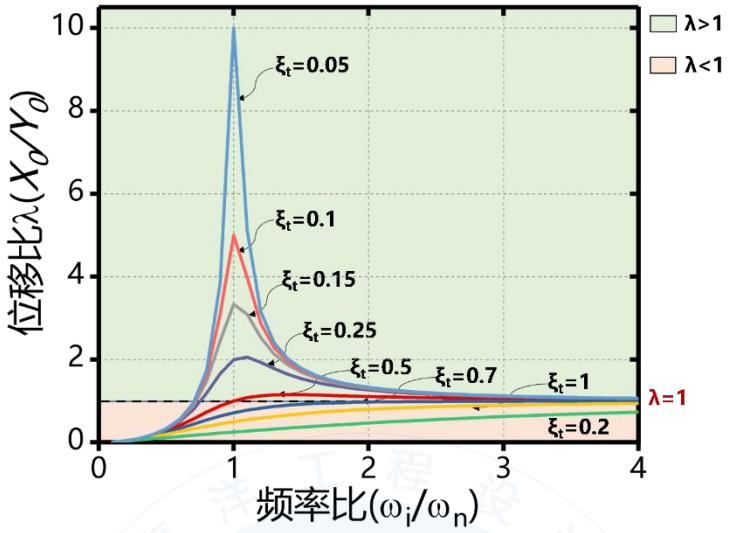


图 4 振幅响应曲线

根据(2-10),在低阻尼比的情况下（$0<\xi t<1/\sqrt{2}$），驱动振动接近 ω_m 时，将发生共振，位移幅度将接近其最大值 x_{max}。由式(2-10)，可以得到关于频率比$\frac{\omega}{\omega_n}$的等价方程为：

$$\left[1-\left(\frac{x_{max}}{Y_0}\right)^{-2}\right]\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4+2\left(2\xi_t{}^2-1\right)\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2+1=0 \tag{2-13}$$

如图 4 绘制了发电机装置的垂荡振幅响应曲线，可以明显看出方程 2-13 的解可以讨论线性电磁发电机的三种运行状态。当 $\lambda=1$ 时为极限位移比状态，$\lambda<1$ 时为压缩位移比状态，$\lambda>1$ 时为膨胀位移比状态。水池的造波高度为 30~50 mm, 频率约为 0.2~1Hz。由于水池条件的尺寸限制，将动子相对于线性发电机定子的位移设定为 6cm。由因此，本文所提出的永磁线性发电机的基本设计参数于表 1。

表 1 永磁线性发电机的基本设计参数

Tab.1 Basic design parameters of the linear generator

m(kg)	f (Hz)	ω (rad/s)	x_{max} (cm)	Y_0 (mm)	k(N/m)
1.5	0.2 ~ 1	1.256 ~ 6.28	6	30 ~ 50	1333.3

当 $\lambda=1$ 时，公式（2-13）$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4$前的系数为 0，可以得到装置的固有频率$\omega_n$和输出功率 P_1：

$$\omega_n=\omega\sqrt{2(1-2\xi_t{}^2)} \tag{2-14}$$

$$P_1 = m\omega_i{}^3 x_{max}{}^2 \xi_e \sqrt{2(1-2\xi_t{}^2)} \tag{2-15}$$

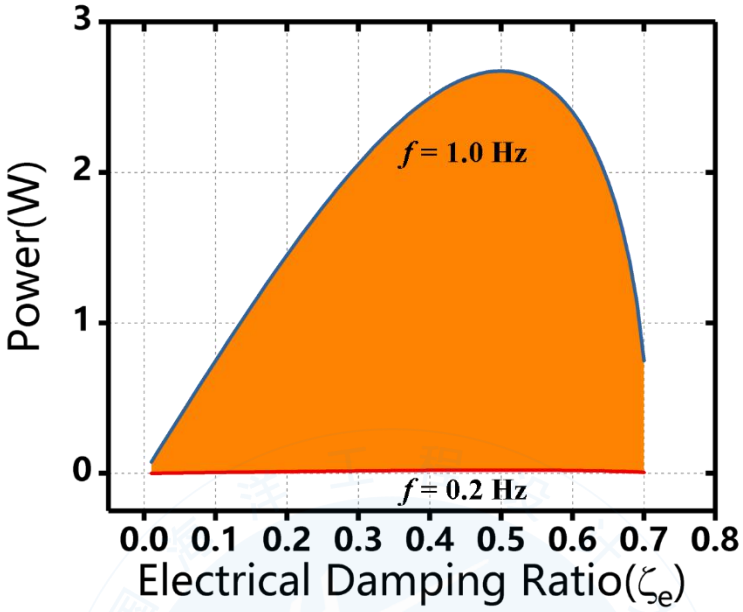


图 5 电磁阻尼系数对装置输出功率的影响

从方程(2-15)中可以看出，假定线性发电机无机械摩擦且$\xi_t = \xi_e = 1/2$时，输出功率P_{1max}达到最大，在此状态外部浮体运动输入的角频率 ω 与装置的固有频率ω_n产生共振效应。如图 5，在浮体运动频率为 1.0 Hz 的情况下，最大输出功率可以达到 2.67514 W；在浮体运动频率为 0.2 Hz 的情况下，最大输出功率可以达到 0.0214W。

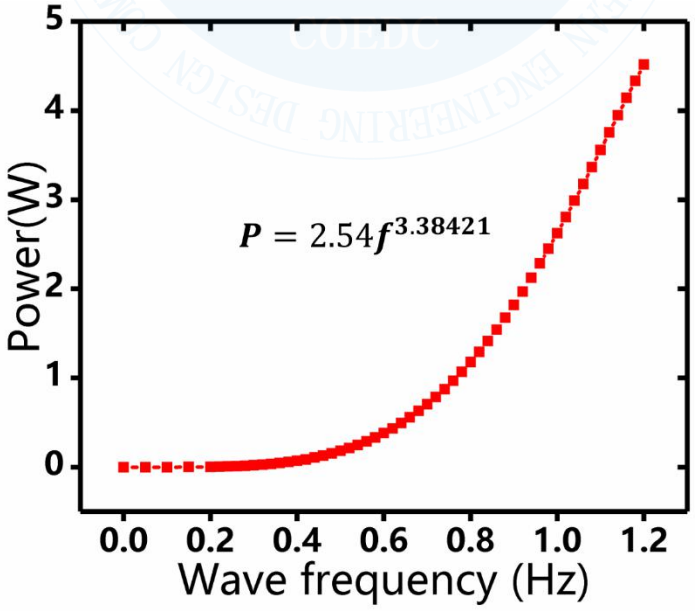


图 6 浮体运动频率对装置输出功率的影响

同样本文也考察了浮体运动频率对装置输出功率的影响，如图 6，运用 origin 软件对数据点进行拟合，得到了输出功率与浮体运动之间的关系为幂函数（$P = 2.54f^{3.38421}$）。在浮体运动频率 0.5 Hz 后，输出功率增长速率大大提高。

当 λ < 1 时为压缩位移比状态，如图 6 所示，只有频率比（$\frac{\omega}{\omega_n}$）与位移比 λ 相关。因此，方程（1)只有一个根为：

$$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = \frac{\sqrt{(2\xi_t{}^2-1)^2+\left[\left(\frac{x_{max}}{Y_0}\right)^{-2}-1\right]}+\left(2\xi_t{}^2-1\right)}{\left[\left(\frac{x_{max}}{Y_0}\right)^{-2}-1\right]} \tag{2-16}$$

在方程（2-16）中，$0 < \xi_t < \infty$，因此可以得到在压缩位移比阶段下装置的输出功率 P_3 为：

$$P_3 = m\omega_i{}^3 x_{max}{}^2 \xi_e \left\{\frac{\sqrt{(2\xi_t{}^2-1)^2+\left[\left(\frac{x_{max}}{Y_0}\right)^{-2}-1\right]}+\left(2\xi_t{}^2-1\right)}{\left[\left(\frac{x_{max}}{Y_0}\right)^{-2}-1\right]}\right\}^{-\frac{1}{2}} \tag{2-17}$$

由表 1 给出的线性发电机基本设计参数，图 7 绘制了该压缩位移比阶段下的输出功率曲线。在最优阻尼系数 $\xi_t = \xi_e$ =5.8 时装置的输出功率达到最大为 31.41257W。

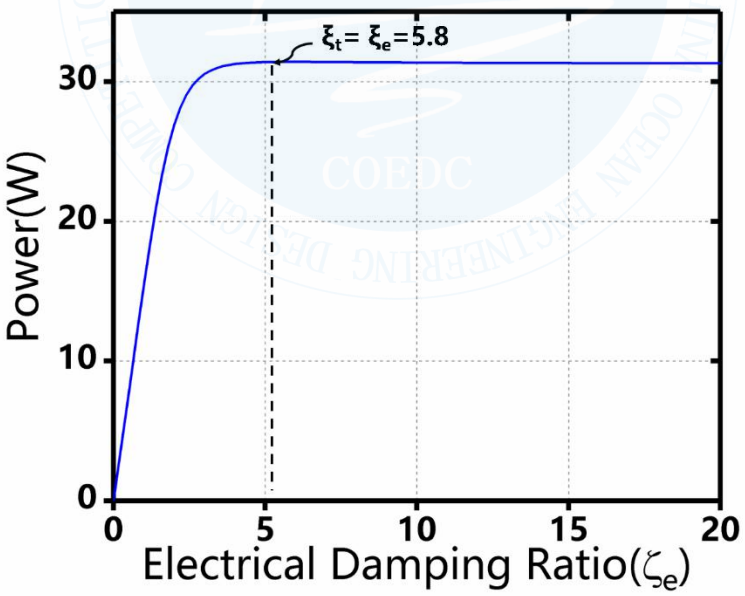


图 7　λ ＜ 1（压缩位移比阶段）下的输出功率曲线

3. 结构设计与实施方式

3.1 装置组成

本文提出的一种新型点吸收式波浪能发电装置其主要部分由基于摩擦纳米发电原理的浮标机构 1，缆绳 2 以及基于电磁感应发电原理的线性发电机机构 3 组成。缆绳 2 分别系于浮标底部以及线性发电机机构的活塞杆尾部。在海浪的作用下，装置既能收集垂荡方向下的能量，同时也能收集浮体纵摇方向上的波浪能量，能够将低频的波浪能大量的持续的转化为电能。

图中：1、浮标机构，2、缆绳，3、线性发电机机构，4、活塞杆，5、防水盖，6、限位弹簧，7、线性电机机盖，8、线性电机外壳，9、卡池，10、金属线圈，11、磁铁保护壳，12、线圈支架，13、动子（磁铁），14、从动弹簧，15、蓄电池/超级电容器，16、浮体圆盘，17、圆盘，18、惯性球，19、浮体支架，20、配重块，21、电源管理模块，22、浮体外壳，23、塑料管，24、配重仓，25、金属电极，26、支架，27、金属导线。

3.2 具体实施方式

如图 8，9，10 所示，本文的新型点吸收式波浪能发电装置其主要部分由基于摩擦纳米发电原理的浮标机构 1，缆绳 2 以及基于电磁感应发电原理的线性发电机机构 3 组成。线性发电机机构 3 用螺栓固定在海床，缆绳 2 分别系于配重仓 24 底部以及线性发电机机构的活塞杆 4 顶部。在海浪的作用下，线性发电机机构能收集垂荡方向下的能量，同时浮标机构也能收集浮体纵摇方向上的波浪能量，能够将低频的波浪能大量的持续的转化为电能。

如图 9 所示，本文的线性发电机机构安装在海床上，包括装有活塞杆 4、防水盖 5、限位弹簧 6、线性电机机盖 7、线性电机外壳 8、卡池 9、金属线圈 10、动子（磁铁）保护壳 11、线圈支架 12、动子（磁铁）13、从动弹簧 14。所述从动弹簧 14 焊于线性电机底部，金属线圈 10 通过卡池 9 固定安装在线圈支架 12 上作为定子。当波浪作用于浮体机构 1 上时，浮体受迫振动并带动缆绳 2、活塞杆 4 以及动子保护壳 11 一起做垂荡运动。动子保护壳 11 安装在活塞杆端口处，内部装有磁铁 13 作为动子在垂荡运动中切割磁感线从而在金属线圈 10 中产生交流电。在暴风雨期间，浮标可能在某个阶段被淹没，从而限制了线性发电机机构的功率输出，因此所述限位弹簧 6 作抵消作用可避免装置的过劳损坏，同时浮标机构也能提供一定的电能输出。

如图 10 所示，本文的浮标机构系于缆绳的一端，包括装有蓄电池/超级电容器 15、浮体圆盘 16、圆盘 17、惯性球 18、浮体支架 19、配重块 20、电源管理模块

21、浮体外壳 22、塑料管 23、配重仓 24。各个摩擦纳米发电机通过并联嵌入浮体支架 19，配重块 20 附于支架下方配重室 24 内；浮体圆盘 16 安装在摩擦纳米发电机上方，金属导线通过浮体圆盘 15 连接至电源管理模块 21。外界波浪作用于浮体时，在波浪拖曳力、惯性力、缆绳系泊力以及阻尼的共同影响下，浮体内部摩擦纳米发电机装置的惯性球 18 往复滚动摩擦，基于静电感应与摩擦生电原理能够产生持续电能输出，并通过电源管理模块 21 进行整流处理，最终存储到蓄电池或超级电容器 15 中。

如图 11 所示，所述单个摩擦纳米发电机包括装有：圆盘 17、惯性球 18、金属电极 25、支架 26、金属导线 27。金属电极 25 分别镀在圆盘 17 两侧，中间留有一定空隙；上下两个圆盘 17 内放置惯性球 18 并通过支架 26 粘结嵌入塑料管 23 内；各个层级之间的金属电极采用并联方式用金属导线 27 进行连接。所述摩擦纳米发电机原理为：利用摩擦起电和静电感应产生电流当两个电极序列不同的材料（惯性球 18 与金属电极 25）在海浪的激发下相互摩擦滚动时，材料表面会感应摩擦电荷，随着波浪外力的激励作用，圆盘两侧的金属电极会由于惯性球的运动位置而感应出不同数量的电荷并形成电势差。在波浪力、重力、浮力和阻尼的共同作用下，惯性球可以产生连续交流电输出。

所述电源管理电路如图 12 所示，左方虚线框代表电磁发电机、摩擦纳米发电机和其他海洋可再生能源发电机的等效电路图。当发电机工作产生交流电输出后，经过整流器和滤波器进行处理，再次通过功率测量模块输出功率信号给 MPPT 和 PI 控制器，经过计算处理控制器输出反馈信号给 RS 触发器来控制 MOS 管的通断，进而实现升降压电路的功能，最终能持续的为蓄电池或超级电容器进行供能。

所述一种新型点吸收式波浪能发电装置浮体 1 可以集成其他海洋可再生能源发电装置。如图 13，风电发电机机构 28、太阳能发电机机构 29、发电机基座 30。面对极端天气以及恶劣海况等条件下，单一品种的能源收集方式并不能满足海事设备的连续供电需求，所以利用风能和太阳能等多能互补的能源收集方式能够提升装置的生存能力、可靠性和能量转换效率。

以上也证明一种新型点吸收式波浪能发电装置作为一种低成本、长续航、能量转换效率高、结构简单、易安装维护拆卸以及防海水腐蚀等多个优点的波浪能采集装置，不但能够应用在海洋中广泛分布的自驱动监测设备中作为能源供给模块使用，而且针对极端天气等特殊海况条件设计了一种具有一定可靠性的波浪能发电装置。本装置可以应用于波浪能采集，海洋传感节点自供能，海洋牧场以及海洋能源岛等多个领域，此外，可以连接更多的点吸收式波浪能发电装置以形成拓扑网络，为大规模蓝色海洋能量收集提供了一种创新而有效的方法。

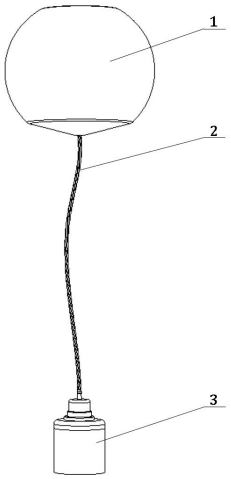


图 8 点吸收式波浪能发电装置图

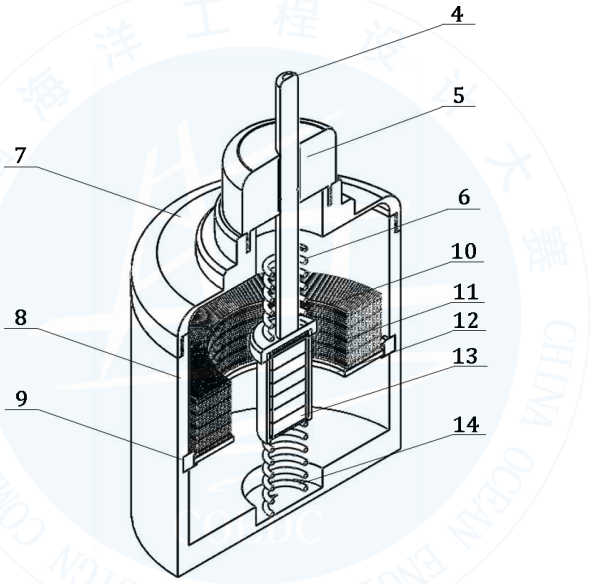


图 9 线性发电机机构

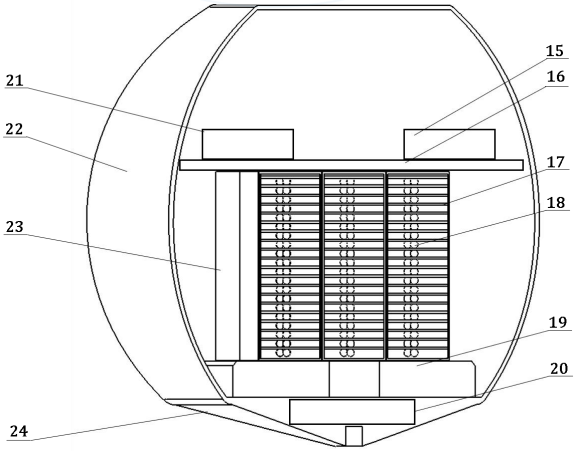


图 10 摩擦纳米发电装置

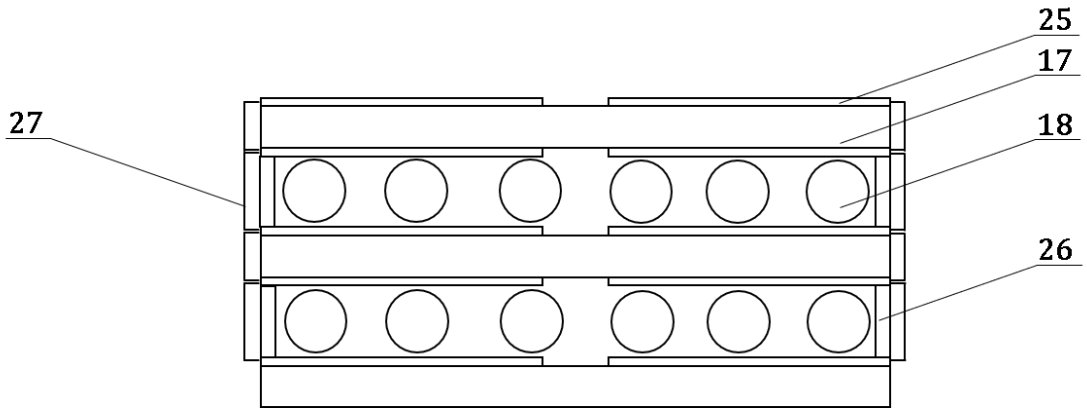


图 11 摩擦纳米发电原理

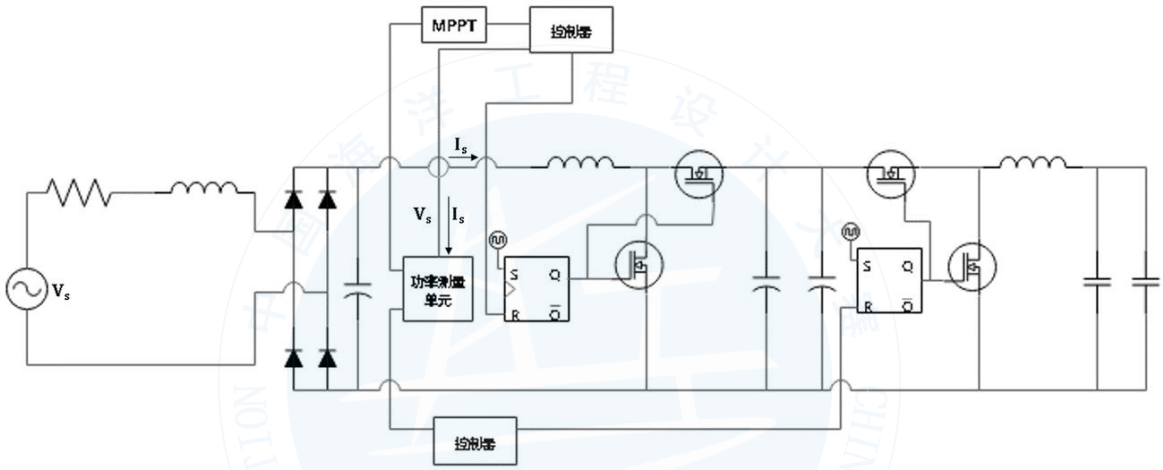


图 12 电源管理模块

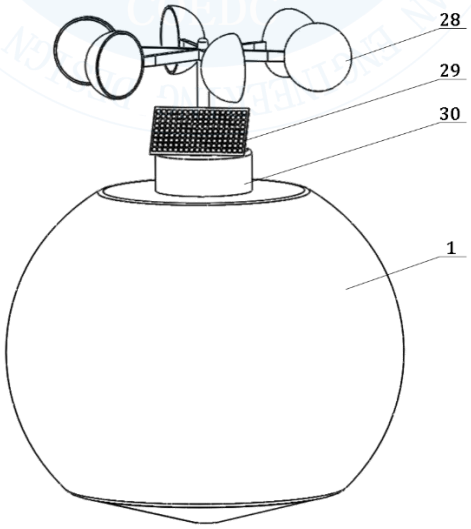


图 13 点吸收式浮标

4. 实验数据与分析

4.1 摩擦纳米发电机实验数据与功率计算

4.1.1 摩擦纳米发电机实验数据

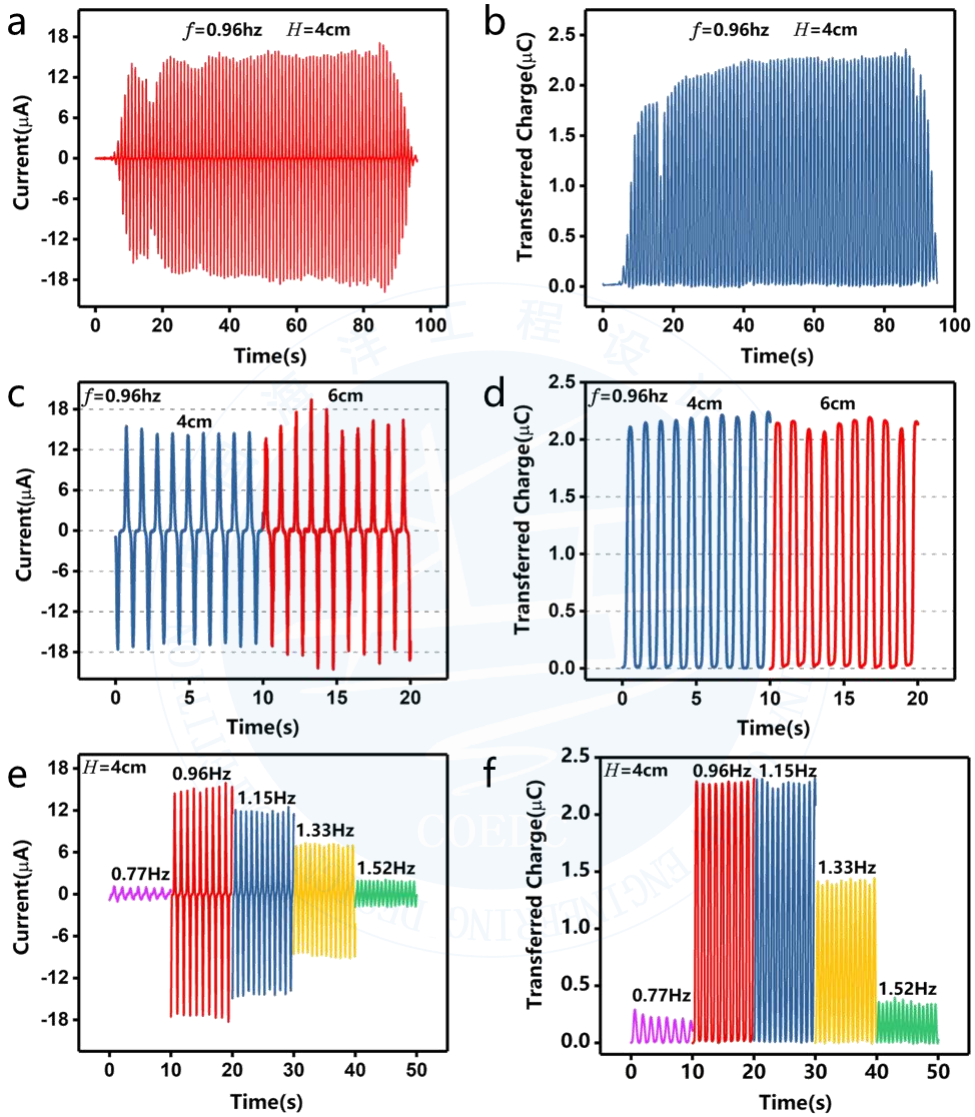


图 14 摩擦纳米发电机浮体水池实验数据

如图 14(a,b)，通过水池实验分析，在波浪条件：f = 0.96 Hz, H = 4cm 的波浪条件下，摩擦纳米发电机的最大电流能够达到 16μA，转移电荷量最大值能达到 2.28μC。c,d 图表明适当增加波浪的振幅并不能有效地提高装置的输出性能。其次 e,f 图显示出摩擦纳米发电机浮体在 f = 0.96 Hz 时它的短路电流与转移电荷量能够达到最大，趋近于装置本身的固有频率。

4.1.2 摩擦纳米发电机功率计算

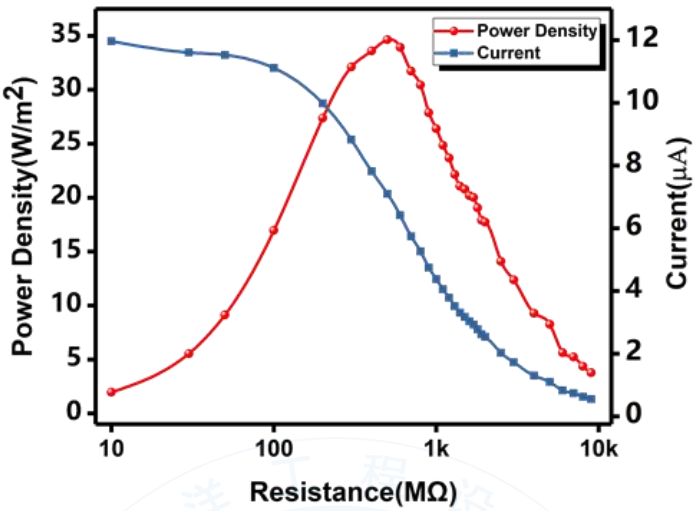


图 15 摩擦纳米发电机功率负载曲线

如图 15 是摩擦纳米发电机的功率负载曲线，当负载电阻为 900MΩ时，装置的功率密度达到最大值为 35W/m²，这是由于负载电阻趋近于装置的内阻。由试验数据分析，当电阻取 900 MΩ，即电流取 6μA 时，装置的发电功率达到最大值，此时：

$$P_{摩擦} = I^2 \times R = (6 \times 10^{-6})^2 \times 900 \times 10^6 = 0.0324\ w$$

4.2 线性电机实验数据

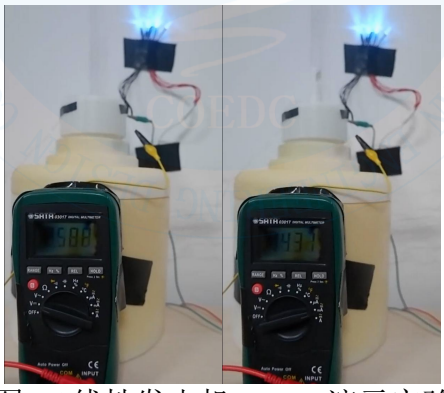


图 16 线性发电机 Demo 演示实验

表 2 线性电机基本结构参数

m(kg)	D(m)	H(m)	d(m)	n	k(N/m)	$d_{磁铁}$(m)
1.5	0.2	0.35	0.01	170	1333.3	0.03

表 2 为线性电机的基本结构参数，整体外壳采用 3D 打印的树脂材料，总重量 1.5kg，装置外径 0.2m，高 0.35m，内部磁铁数量为 6，厚度为 0.01m，直径为 0.03m，线圈匝数为 170，相应的弹簧弹性模量由文中第二部分浮体系泊力计算得出为 1333.3N/m。如图 16，为线性发电机 Demo 演示实验，在实验过程中用万用表测量

线性电机输出的电压与电流。在起初状态，由于线性电机输出为交流电，首先测得了发电机在不进行整流条件下装置的最大输出电压 V=9.8V，电流 I=71.44mA。为实现持续供电，我们采用升压-降压电路将交流电整流经电源管理电路输出电压为 3.3V 的直流电，能够实现为用电器设备边充边放的功能。

由公式(2-15)，假定线性发电机无机械摩擦且$\xi_t = \xi_e = 1/2$ 时，输出功率P_{1max}达到最大，在此状态外部浮体运动输入的角频率 ω 与装置的固有频率ω_n产生共振效应。在浮体运动频率为 1.0 Hz 的情况下，最大输出功率可以达到 2.67514 W；在浮体运动频率为 0.2 Hz 的情况下，最大输出功率可以达到 0.0214W。

在最优阻尼系数 ξ t = ξ e =5.8 时，装置的输出功率达到最大：31.41257W。

4.3 波浪能发电装置能效分析

为了计算功率传输，需要得到波中每纵向单位长度的能量。那么单位长度的能量和能量传输速度的简单乘积将产生能量通量（传递的功率）。

$$P = J_\lambda \times V_g \tag{4-1}$$

式中，J_λ为每个波长的能量，V_g为群速度，它是相速度的一半。为了计算每个波长的能量J_λ，有必要沿着波长对将每个不同的水粒子从波谷中的一点移动到波峰中的对称位置所需的能量进行积分。这给出了每单位波峰长度在一个波长内的势能总量。然后利用能量均分，势能等于动能，因此是总能量的一半。

$$J_\lambda = \frac{1}{2}\rho g a^2 \tag{4-2}$$

其中，ρ是水的密度，约为 1025 kg/m3，a 是波幅。根据现有装置参数与水池造波条件，可求得每单位波峰的功率如下：

$$P_{wave,mcl} = \frac{\rho g a^2 \sqrt{g\lambda}}{8\pi} \tag{4-3}$$

其中，a 为振幅，T 为周期，ρ为水密度(i.e., per meter crest length, mcl 即每米波峰长度)。通过线性波浪理论的色散关系式进行计算，如下：

$$\omega^2 = gk\tanh(kh) \tag{4-4}$$

其中ω为波浪圆角速度，k 为波数，h 为水深。波数的计算公式参考：

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{4-5}$$

得到线性波对应波长λ的计算公式为：

$$\lambda = \frac{gT\hat{}2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \tag{4-6}$$

因此根据现有装置参数与水池造波条件，可求得每单位波峰的功率为：17.8 W

考虑装置的俘获宽度，俘获宽度在某些方面类似于功率系数的概念。它被定义为“在给定的频率下，物体吸收的总平均功率与入射波列每单位波峰宽度的平均功率之比。俘获宽度(有时也称为“吸收宽度”)是 WEC 尺寸和转换能力的量度。(Falcão 2010)

$$CW = P_{rated}/P_{wave,mcl}$$

(4-7)

对于一个限制在单一运动的轴对称波浪能发电装置（WEC）(例：圆柱形浮标被限制为上下垂荡运动)，其俘获宽度的理论最大值为λ/(2π)（Falcão 2010)

$$CW_{圆柱\ ave} = \frac{\lambda}{2\pi} . 50\%$$

(4-8)

因此根据实验与说明书相关参数得到物体吸收的总平均功率为：

$$P_{rated} = P_{wave,mcl} . CW_{圆柱\ ave} = 43.2245\ \mathrm{W}$$

(4-9)

$$\eta = \frac{P_{摩擦} + P_{线电\ ave}}{P_{rated}} = 39.5\ \%$$

(4-10)

5.可行性分析与展望

5.1 可行性分析

本装置采用的摩擦纳米发电技术与电磁感应发电技术相耦合的发电模式能够带来较高的能量转化效率。既能收集垂荡方向下的能量，也能收集浮体纵/横摇方向上的波浪能量，能够将低频的波浪能大量的持续的转化为电能，同时能够保证装置发电的稳定性与电能质量。因而相比于传统的波浪能发电装置将具有更高的投入产出比，在市场竞争方面具有更大的竞争优势。同时，装置采用的发电技术还具有加工工艺简单、维护周期低、长续航的技术特点，因而令装置具有更高的市场竞争力与工作寿命。除此之外，由于本装置能够有效替代电池等传统的、高污染的装备供电模式，高效持续的为装备供电，因而相较而言具有更高的经济效益的同时还具有着保护海洋环境、提高装备工作年限等众多的附加效益。

在理论方面，传统基于电磁发电的波浪能转换装置主要是针对单方向长峰波的波浪环境进行设计，主要用于大规模波浪发电。而低级海况更多呈现出多方向的短峰波，这对设计微型波浪能转换装置带来挑战。本项目所研究的新型点吸收式波浪能发电装置，涉及一种基于摩擦纳米发电与电磁发电原理的多耦合发电模式，通过建立风浪流作用下的浮体系泊模型与线性发电机动子阻尼模型，阐明发电机组之间的耦合作用机理、影响规律以及力学特征，进一步根据以上基础，合理设计装置内部发电单元的介电材料、表面微纳加工、电极分布、磁极间距、线圈匝数。

因此，本项目在理论上是可行的。此外，项目组前期在摩擦纳米发电机、流体机械、系统优化等领域开展了大量基础研究工作，熟练掌握了摩擦纳米发电机加工与测试方法、计算和实验流体力学分析方法以及复杂系统优化方法。这些为研究基于摩擦纳米发电机的微型波浪能采集提供了理论和技术保证。

在数值计算方面，拥有“天河二号”且是国际上唯一获得世界超级计算机Top500 榜单“六连冠”的超算系统，具备完善的图形输入、输出设备和齐全的三维数值仿真、结构设计、性能计算程序和工程绘图软件， 包括 FLUENT、ANSYS-CFX、COMSOL、STAR CCM 等。这些为本项目开展浮体运动与发电特性的数值分析，以及装置参数优化分析提供良好的计算平台。

在研究人员配备方面，本项目参与者具有不同的专业特长，在摩擦纳米发电机、流体机械、材料工程、系统优化等领域开展了大量基础研究工作，有着丰富的研究经验和实际工程经验；博士研究生、硕士研究生具有扎实的理论基础和实践经验，有能力完成预定的研究任务。

5.2 创新点

5.2.1 发电装置功能原理创新

装置的浮体结构采用摩擦纳米发电技术（T-TENG），通过摩擦起电效应和静电感应效应，装置的两种介质材料之间通过物理接触在两表面产生摩擦电荷；同时由于机械运动，两材料之间产生相对分离和滑动，导致电势下降，横跨下方的两个电极，从而驱动电子在两者之间产生流动以平衡静电系统。该装置可以漂浮在水面上，对于不规则、随机的机械运动具有较强的适应性，同时桶状的结构可以同时搭载多个发电装置，能够有效提高整体装置的发电效率。该技术的特点在于：即使在波浪能较小，频率很低下，通常也有很高的输出电压，通常在 20-50V 之间，因此二极管 0.5V 左右的整流几乎不会导致输出功率的损失。所以，在小于 5Hz 的低频下，TENG 的输出功率会远远高于 EMG。

（1）优越的电能转换效率与电能质量

本装置采用摩擦发电技术与电磁感应发电技术进行互补发电，提高装置对海洋波浪能的整体捕能效率；摩擦发电模块通过诸多单元的并联提高装置发电效率；装置内设置相应的整流模块用于对两个发电模块输出的电能进行整流，保证装置输出电能具有良好的质量。我们通过以上方面设计实现综合提升装置的能量转换效率，保证装置在实际应用中具有优越的电能转换能力与稳定、可靠、优质的电能质量。

(2)良好的应用普适性与续航性

本装置的外形设计可以充分支持装置在高海况下稳定运行，因而本装置可以广泛应用于多种海况进行作业。相较于其他的波浪能发电装置而言，本装置采用的摩擦发电技术可以令装置作为电源时提供更加高额的电压，进而广泛适用于各种海洋设备，提高装置在实际应用中的普适性。此外，本装置作为电源能够稳定输出优质电能，相较于当前多数海洋装备中采用的传统电池供能方案，供能能力更为稳定、高效的同时，还能极大延长供能时间，综合提升作业系统的续航能力；同时，装置的外形设计保证了装置的鲁棒性较强，维护需求小、维护难度低，即装置本身的续航能力也有相当的保障。

5.2.2 总体布局创新

在技术布局方面，本装置采用摩擦纳米发电技术与电磁感应发电技术相耦合的发电模式，在能源转化方面具有较大的技术优势。

在结构布局方面，本装置采用桶式漂浮部分结合水下塔式部分的构造。首先，桶式的漂浮部分对于不规则、随机的机械运动具有较强的适应性和较高的能量捕

获能力，同时也可以同时搭载多组发电装置，能够有效提高整体装置整体的发电效率。其次，水下的塔式结构装载电磁感应发电模块，在进行能量转换的同时，也能极大地提升装置的整体稳定性。

在战略布局方面，本装置的未来应用旨在逐步替代多数海洋装备采用的传统电池供电模式与柴油供电模式，在提供高质、稳定、经济的能源供给的同时极大地降低海洋装备对海洋环境的污染水平。既推动我国海洋产业的蓬勃发展，也促进我国海洋产业形成环境友好型的绿色发展模式。

5.3 展望

(1)响应国家“海洋强国”战略

近些年，我国提出了海洋强国的发展战略，例如习近平主席在党的十九大报告中指出：“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国。”建设海洋强国已成为了中国特色社会主义事业的一个重要部分。而本装置的研发充分响应了国家“海洋强国”的发展战略，既能单独应用于多种海洋设备，参与构建我国海洋监测网络等海洋基建，推动国家海洋战略布局，也能规模化布置并入微电网为我国的海岛、舰艇、水下探测器以及海防设备、工事提供充足可靠的能源支持，提升我国对海洋的掌控与利用能力，此外也有利于我国海洋经济发展与海洋生态文明建设。同时，得益于国家的海洋发展政策，本装置进一步的研究、开发与应用也能得到充足的保障，具有较大的发展空间。

(2)推动海洋产业发展

作为海洋大国，我国的海洋产业具有广阔的市场前景与强大的发展潜力，然而，当前例如能源供应等基本问题阻碍着我国海洋产业向着深海化、市场化、经济化进一步发展。而本装置可以广泛的为中小型海洋设备提供更为稳定、高效、持续和优质的能源供给选择，极大提高我国海洋产业的投产比与市场竞争能力，解决当前我国海洋产业在民用领域持续亏损的窘境，吸引更多民营资本投入到海洋产业之中，综合推动我国海洋产业的快速发展。因而本装置在未来将有希望成为各种海洋产业的基础支持产业，具有极为广阔的市场前景。我们在未来将不断寻求新的突破，进一步完善、提升本装置的综合性能。希望在未来的一天，本装置能够作为海洋装备能源供给的一项新选择，促进我国海洋产业繁荣发展，助力加快建设海洋强国，为我国广阔海洋领土的开发事业尽一份绵薄之力。

6.附录

6.1 参考文献

[1] 王波, 李民, 刘世萱, et al. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 2401-2414.
[2] 李颖虹, 王凡 and 任小波. 海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J]. 地球科学进展, 2010, 25: 715-722.
[3] 朱光文. 我国海洋观测技术的现状,差距及其发展[J]. 海洋技术学报, 1991, 1-22.
[4] 李健, 陈荣裕, 王盛安, et al. 国际海洋观测技术发展趋势与中国深海台站建设实践[J]. 热带海洋学报, 2012, 31: 123-133.
[5] 朱光文. 海洋监测技术的国内外现状及发展趋势[J]. 气象水文海洋仪器, 1997, 1-14.
[6] ALBALADEJO C, SANCHEZ P, IBORRA A, et al. Wireless Sensor Networks for oceanographic monitoring: a systematic review[J]. Sensors (Basel), 2010, 10: 6948-6968.
[7] 高艳波, 李慧青, 柴玉萍, et al. 深海高技术发展现状及趋势[J]. 海洋技术学报, 2010, 29: 119-124.
[8] LIU K, LIU Y, YANG Z, et al. Oceansense[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2010, 14: .
[9] LLORET J, SENDRA S, GARCIA M, et al. Group-based underwater wireless sensor network for marine fish farms[C]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011: 115-119.
[10] VOIGT T, OSTERLIND F, FINNE N, et al. Sensor Networking in Aquatic Environments - Experiences and New Challenges[C]. 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007), 2007: 793-798.
[11] SEAH W K G, EU Z A and TAN H-P. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges[C]. 2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009: 1-5.
[12] BAHREPOUR M, MERATNIA N, POEL M, et al. Distributed Event Detection in Wireless Sensor Networks for Disaster Management[C]. 2010 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, 2010: 507-512.
[13] QURESHI H K, RIZVI S, SALEEM M, et al. Poly: A reliable and energy efficient topology control protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2011, 34: 1235-1242.
[14] ALBALADEJO C, SOTO F, TORRES R, et al. A low-cost sensor buoy system for monitoring shallow marine environments[J]. Sensors (Basel), 2012, 12: 9613-9634.
[15] MUELLER P, THOSS H, KAEMPF L, et al. A buoy for continuous monitoring of Suspended Sediment Dynamics[J]. Sensors (Basel), 2013, 13: 13779-13801.
[16] 邹吉武, 孙大军 and 吕云飞. 海洋矢量声场观测浮标与潜标系统[J]. 声学技术, 2010, 29: 153-157.
[17] 朱心科, 金翔龙, 陶春辉, et al. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人, 2013, 35: 376-384.

[18] WHITTAKER T and FOLLEY M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster[J]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2012, 370: 345-364.
[19] LEIJON M, DANIELSSON O, ERIKSSON M, et al. An electrical approach to wave energy conversion[J]. 2006, 31: 1309-1319.
[20] BREKKEN T K A, JOUANNE A V and HAN H Y. Ocean wave energy overview and research at Oregon State University[C]. 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Lincoln, NE, USA, 2009: 1-7.
[21] LANGHAMER O, HAIKONEN K, SUNDBERG J J R, et al. Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters[J]. 2010, 14: 1329-1335.
[22] MUTSUDA H, TANAKA Y, PATEL R, et al. A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting[J]. Applied Ocean Research, 2017, 68: 182-193.
[23] RAHMAWATI S, MUTSUDA H, DOI Y, et al. Characteristics of a fish aggregating device with ocean energy harvester[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 23: 435-452.
[24] MUTSUDA H, WATANABE R, HIRATA M, et al. Elastic Floating Unit With Piezoelectric Device for Harvesting Ocean Wave Energy[C]. ASME 2012 International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2012: 233-240.
[25] WANG X, NIU S, YIN Y, et al. Triboelectric Nanogenerator Based on Fully Enclosed Rolling Spherical Structure for Harvesting Low-Frequency Water Wave Energy[J]. Adv. Energy Mater., 2015, 5: 1501467.
[26] WANG S, XIE Y, NIU S, et al. Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes[J]. Adv Mater, 2014, 26: 2818-2824.
[27] ZHANG S L, XU M, ZHANG C, et al. Rationally designed sea snake structure based triboelectric nanogenerators for effectively and efficiently harvesting ocean wave energy with minimized water screening effect[J]. Nano Energy, 2018, 48: 421-429.

团队编号：A20200401

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 10 月 18 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

走向深海是世界趋势，更是中国战略，随着我国海工业务逐步向深海迈进，海工装备的重要性日益凸显，其中海洋平台为在海上进行钻井、采油、集运、观测、导航、施工等活动提供了生产和生活设施，但是平台空间资源紧张，设备工作的同时也要消耗能源，因此，我们团队依托海洋能源为基础，设计了可以综合利用海洋能源满足或补充海岛开发、海上设备运行、沿海地区用电等需求的浮体发电装置，这对于保护海洋生态环境、发展海洋经济、推进生态文明建设具有重要战略意义。

海洋环境较为特殊，但又极具发展潜力，通过调研现有的相关海洋发电装置，发现仍然存在发电效率低、持续性能差、空间利用率低以及安装成本高等问题；于是我们自主设计了本次的浮体发电装置，该装置具有多项创新点：可综合利用海洋能源，充分的利用了海洋波浪能、海流能、风能以及太阳能，极尽可能地收集并转化成我们所需要的电能；模块化的设计理念，注重在现实应用中的灵活性、便捷性；发电能力持续高效，在提高综合利用海洋能力的同时，也保障了其抵御极端环境条件的能力；造型新颖，将多种发电模块集成到一个稳定的浮体上，合理布置，提高空间利用率。以上的突出特点对于实际应用具有重要的指导意义，也保证了该装置的广阔应用前景。

目 录

第 1 章 总论 1
1.1 设计背景及意义 1
1.2 现有技术调研 1
1.2.1 近海海洋可再生能源资源统计 1
1.2.2 现有装置及其问题 2
1.3 设计创新点 3
1.4 研究技术路线 4
第 2 章 装置设计原理及模块化组装 5
2.1 浮体设计原理 5
2.2 力学分析 5
2.2.1 浮体受力分析 5
2.2.2 水动力学分析 6
2.3 模块化组装 8
第 3 章 发电效率分析 10
3.1 赛题分析 10
3.2 各组件参数 10
3.3 发电装置电路图 11
3.4 各模块发电量分析 11
3.5 组合发电效率及优化 12
3.5.1 理想工况发电效率分析 13
3.5.2 复杂工况发电效率分析 13
第 4 章 装置应用前景 15
4.1 发电模块应用前景 15
4.1.1 波浪能发电模块应用前景 15
4.1.2 风能发电模块应用前景 16
4.1.3 海流能发电模块应用前景 16
4.1.4 太阳能发电模块应用前景 17

4.1.5 电能的储存 18
4.5 成果转化及潜在应用 18
4.5.1 成果转化 18
4.5.2 装置潜在应用 18
附录 19
附录I. 我国近海再生能源利用率计算过程 19
附录II. 波浪功率推导过程 20
附录III. 各模块发电量计算过程 21
附录IV. 各工况条件下发电效率计算过程 22
附录V. 参考文献 23

第 1 章 总论

1.1 设计背景及意义

随着全球经济快速发展，石油作为世界各国重要战略物资，在国家能源体系中的地位和作用日益凸显，海洋石油资源以其丰富的储量得到各国广泛关注。当前，高投入、高科技、高风险仍然是我国海洋石油行业的特点，其中海洋钻井平台为在海上进行钻井、采油、集运、观测、导航、施工等活动提供了生产和生活设施。海洋钻井平台的功能性极强，在开采能源的同时，平台上的多种设备也在消耗着能源，因此，持续高效地利用海洋平台，保障其安全舒适的工作环境是我们追求的目标。

一般的海洋钻井平台均采用柴油机发电，这样不仅是对能源的浪费，而且长期使用会造成海洋的污染，不利于节能减排，并且会产生噪音，对平台上工作人员的休息有一定的影响且不利于环保。但是，海洋本身就蕴含着巨大可再生能源，具有绿色清洁、可持续利用、开发潜力大等优势，我们可以通过发展海洋可再生能源开发与利用技术，满足或补充海岛开发、海上设备运行、沿海地区用电等需求，这对于保护海洋生态环境、发展海洋经济、推进生态文明建设具有重要战略意义。

1.2 现有技术调研

1.2.1 近海海洋可再生能源资源统计

908 专项“我国近海海洋可再生能源调查与研究”项目研究结果显示，我国近海（台湾海域除外）海洋可再生能源总蕴藏量为 15.80×10^{8}kW，理论年发电量为 13.84×10^{2}kW·h；总技术可开发装机容量为 6.47×10^{8}kW，年发电量为 3.94×10^{2}kW·h。

其中：潮汐能蕴藏量 19286×10^{4}kW，技术可开发量 2283×l0kW；海流能蕴藏量 833×10kW，技术可开发量 166×10^{4}kW；波浪能蕴藏量 1600×10^{4}kW，技术可开发量 1471×10^{4}kW；温差能蕴藏量 36713×10^{4}kW，技术可开发量 2570×10^{4}kW；盐差能蕴藏量 11309×10^{4}kW，技术可开发量 1131×10^{4}kW；海洋风能蕴藏量 88300×10^{4}kW，技术可开发量 57034×10^{4}kW（计算过程见附录Ⅰ）。我国近海海洋可再生能源蕴藏量和技术可开发量见表 1.1。

表 1.1 我国近海海洋可再生能源资源统计

序号	能源	蕴藏量		技术可开发量	
		理论装机容量（10^4kW）	理论年发电量（10^8kW·h）	装机容量（10^4kW）	年发电量（10^8kW·h）
1	潮汐能	19286	16887	2283	626
2	海流能	833	730	166	146
3	波浪能	1600	1401	1471	1288
4	温差能	36713	32161	2570	2251
5	盐差能	11309	9907	1131	991
6	海洋风能	88300	77351	57034	34126
合计		158041	138437	64655	39428

根据上表可知，各海洋能源的实际年发电量占理论年发电量的比例差距很大，侧面反映了对该能源发电效率的高低，以及技术的成熟程度。其中：

温差能的年发电量只能达到理论年发电量的 0.07%；潮汐能的年发电量只能达到理论年发电量的 3.7%；盐差能的年发电量只能达到理论年发电量的 10%。这三种能源的发电虽有一定的蕴藏量，但发电效率极低，技术不够成熟，可行性较低。但潮流能，海洋风能以及波浪能的年发电量分别能达到理论年发电量的 20%；44.1%；91.9%。

这三种近海海洋能源的整体发电效率较高，也是本文选择海流能，波浪能，海洋风能以及太阳能发电的原因。

1.2.2 现有装置及其问题

通过调研发现，现在已有利用太阳能、风能、波浪能等海洋能源的发电装置[1]，但是限制于海上发电的特殊环境，现有装置还存在多种问题。

一种波浪发电装置[8]。装置通过漂浮在海面上的浮板与曲轴相连，曲轴与一个单向轴承的内圈固连，单向轴承通过一个加速齿轮组带动切割磁场的发电机进行发电。这种装置虽然利用了波浪产生的能量，结构也相对简单，但是发电量和发电效率较低，持续发电性能较差。

一种海洋风力发电装置[10]。装置通过固定装上的转叶将风能转化为机械能，最终通过转动产生的离心力驱动转叶上下移动带动发电装置形成电能。这种装置的优点是可以避免在海洋风力发电过程中由于风力过大而导致发电装置损坏，但是该装置需要固定在海洋平台上或者是浅海地区，可能会影响海洋平台上的空间利用并且有一定的施工安装成本。

一种海洋钻井平台用发电装置[9]。装置设置有风力发电机和太阳能板，综合利用了风能以及太阳能，并且可以将电能储存，效率相对较高。但是持续发电性能会相对较差，同时也会对海洋平台的空间利用造成一定的影响。

一种简易光伏-波浪能发电装置[11]。综合利用了波浪能和光能，但是该装置漂浮在海平面上，因此面对较为恶劣的海洋环境有一定的不稳定性。

海洋发电装置对于满足或补充海上用电需求有重要的现实意义，因此，发电效率高，结构简单方便，适应海洋环境需求是我们追求和改进的目标。

1.3 设计创新点

通过分析现有相关装置的问题，我们逐渐明确了设计目标，通过实物组装以及模拟分析确定了我们的发电装置，相较于现有的海洋发电装置，主要有以下创新点：

1）综合利用多种可再生能源

海洋蕴藏着丰富的能量，海面之上广阔无边，独特的环境造就了其具有绿色清洁、可持续利用开发潜力大等优势，因此我们充分的利用了海洋波浪能、海流能、风能以及太阳能，极尽可能地收集并转化成我们所需要的电能，提高综合利用海洋能的能力。

2）模块化设计理念

在综合利用海洋能的同时，我们也非常注重在现实应用中的便捷性，因此我们采用了模块化的设计理念，比如可以调整位置和高度的海流能发电模块；可以调整方向的风能发电模块；可以自由增减、调节朝向的太阳能发电模块。同时装置的组装也相对便捷，便于维修以及增添部件，这对于模型的应用前景具有非常重要的现实意义。

3）发电稳定高效

本装置无论是对多种海洋能的综合利用，还是可以自由调节的发电模块，都保证了装置整体发电的稳定性以及对海洋能的高效利用，在提高综合利用海洋能力的同时，也保障了其抵御极端环境条件的能力。

4）造型新颖，空间利用率高

本次我们将多种发电模块集成到一个稳定的浮体上，可以作为一个独立的单元依附在海洋平台上或者漂浮在海上用电设备附近，因此装置不占用海洋平台的空间，并且便携灵活；浮体上面空间也进行了合理的分配，并对发电模块进行对称布置，以求对于空间的最高利用率；装置前部的“双角”造型也进行了独特的设计，目的是将水流赶入窄道，增加冲击水轮机的流速，以求实现水轮机的高效发电。

1.4 研究技术路线

本次研究的技术路线图如下图 1.1 所示：

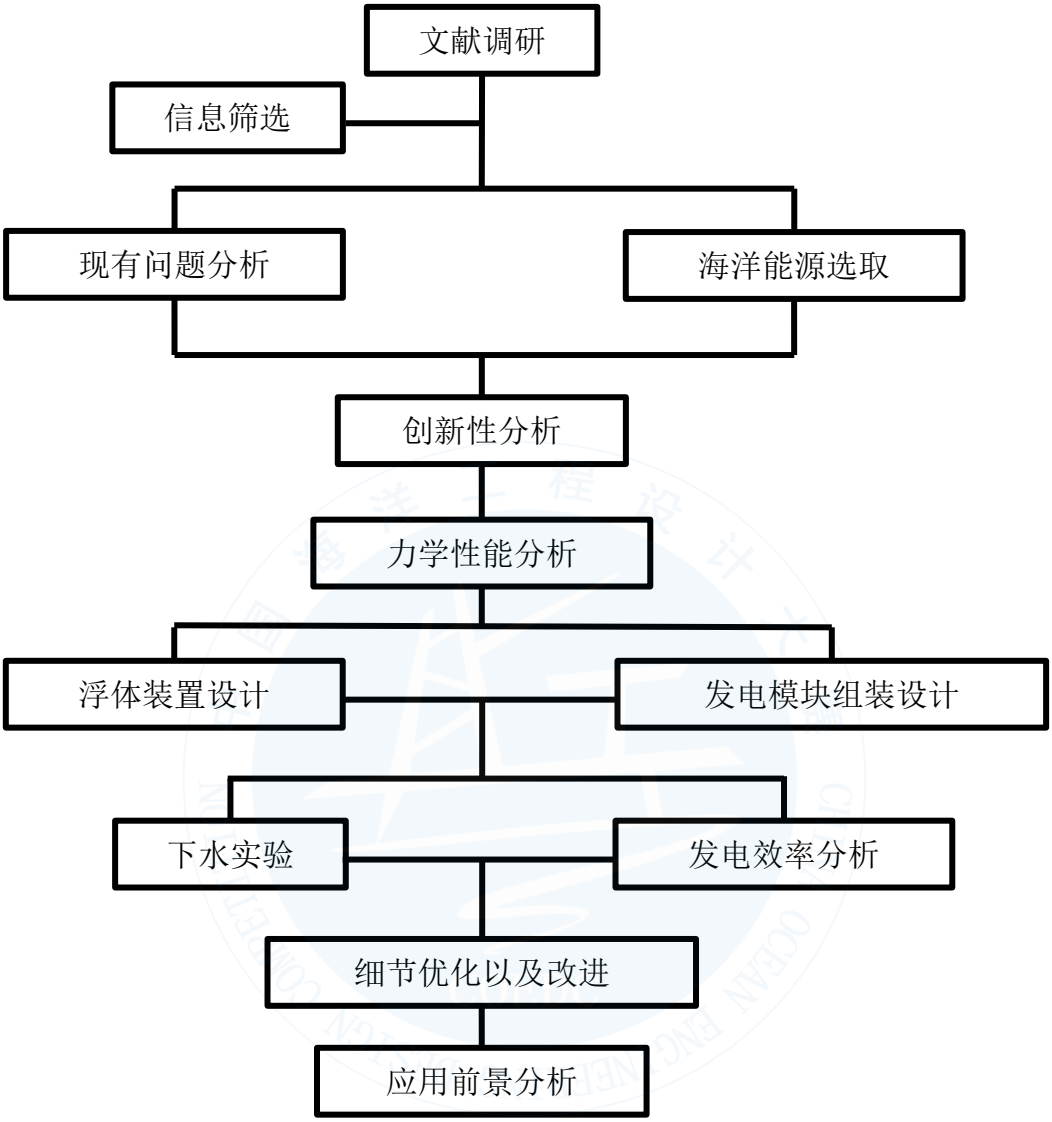


图 1.1 技术路线图

第 2 章 装置设计原理及模块化组装

2.1 浮体设计原理

浮体由上层的 KT 板与下层的浮力箱组成。上层的 KT 板用于安装固定风能发电装置，太阳能发电装置，波浪、潮汐能发电装置以及水下发电装置。下层的浮力箱用于提供和调整福利大小，降低整个装置重心，加强装置的稳定性。

浮体前方通过两边的三棱柱构造出一喇叭型入口，这样的造型是依据伯努利原理，即过流面积越小，流体流速越大。较高的水流速度利于提升水下发电装置的功率。

浮体的结构三视图如图 2.1 所示：

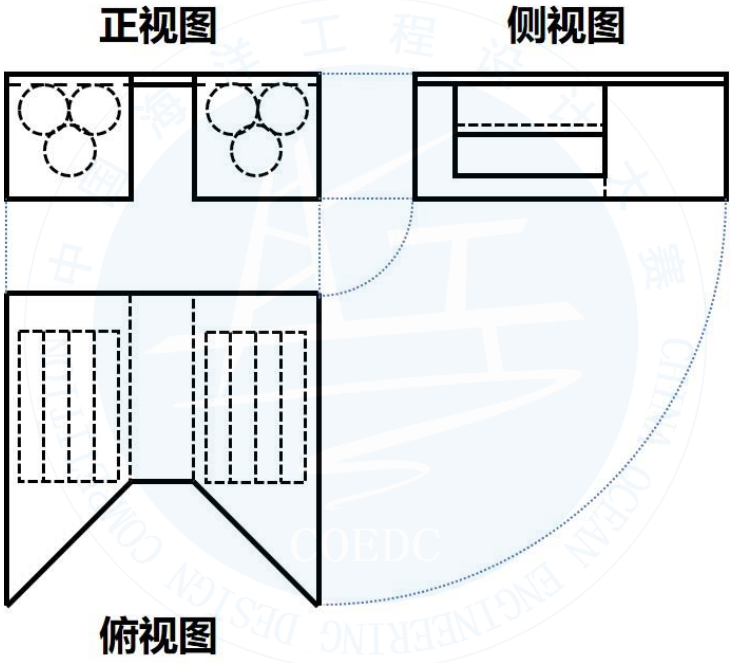


图 2.1 浮体结构三视图

2.2 力学分析

2.2.1 浮体受力分析

装置的浮力大部分由浮力箱提供，由于浮力箱自重小，排水体积大能提供很大的支持力，同时能够在浮力箱中添加充填物（如陶粒）使装置一部分浸没在水中，降低整个装置的重心，让装置的稳定性大大增强。浮力的计算公式如下：

$$F_{浮} = \rho g V_{排}$$

式中：

$F_{浮}$—装置受到的浮力；

ρ—水的密度；

g—重力加速度；

$V_{排}$—装置排开水的体积。

所有的发电组件对称布置在浮体上，使装置的重心落在整体的对称线上。通过调整浮力箱的配重及位置，使装置的浮心与重心位于同一条铅垂线上，且重心低于浮心，以确保装置的稳定不会倾覆。

2.2.2 水动力学分析

利用 Fluent 数值模拟软件，模拟了来流速度 5 m/s，入口角度 α 分别为 30°，45°，60°的浮体。装置的模型示意图如图 2.2 所示，装置的喇叭口正对来流，固定流道宽度为 10 cm。

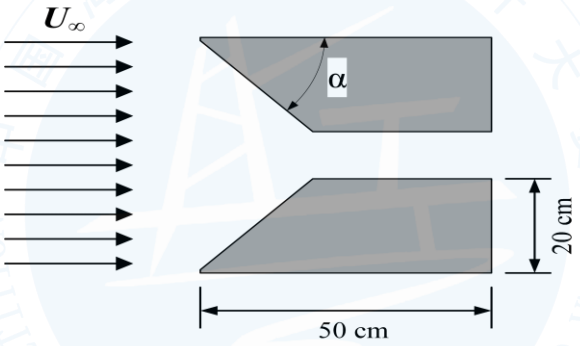


图 2.2 模型示意图

网格划分如图 2.3，2.4 所示，对模型的尖角进行了网格加密处理，固体边界使用结构化网格，提高计算精度。

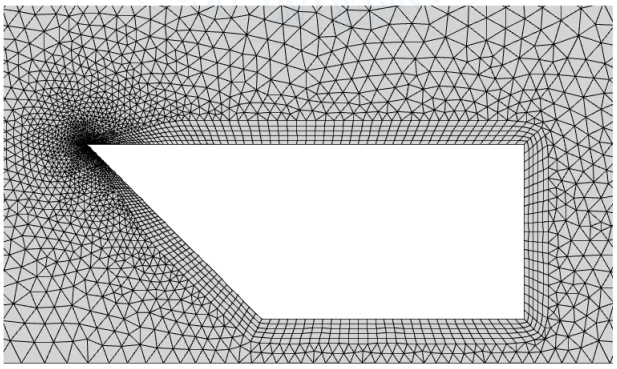


图 2.3 局部网格

整体流域为 550cm×125cm，满足阻塞率要求，使流体能充分发展。

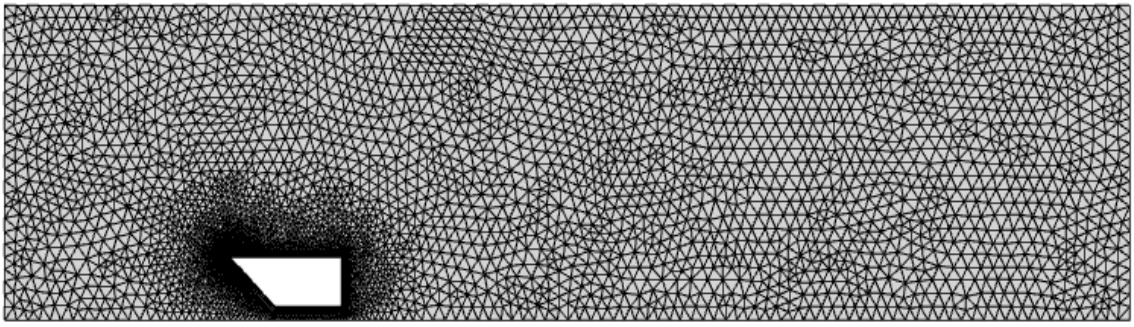


图 2.4 整体网格

图 2.5，2.6，2.7 展示了数值模拟的计算结果，经过后处理得到了压力场云图与速度场云图。

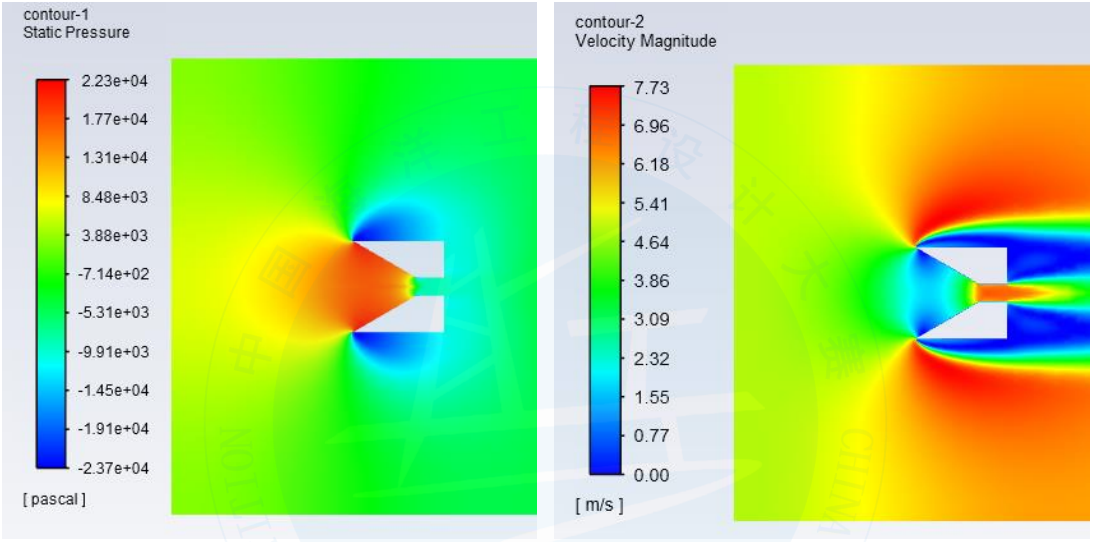


图 2.5 角度为 30° 的浮体的压力场（左图）与速度场（右图）

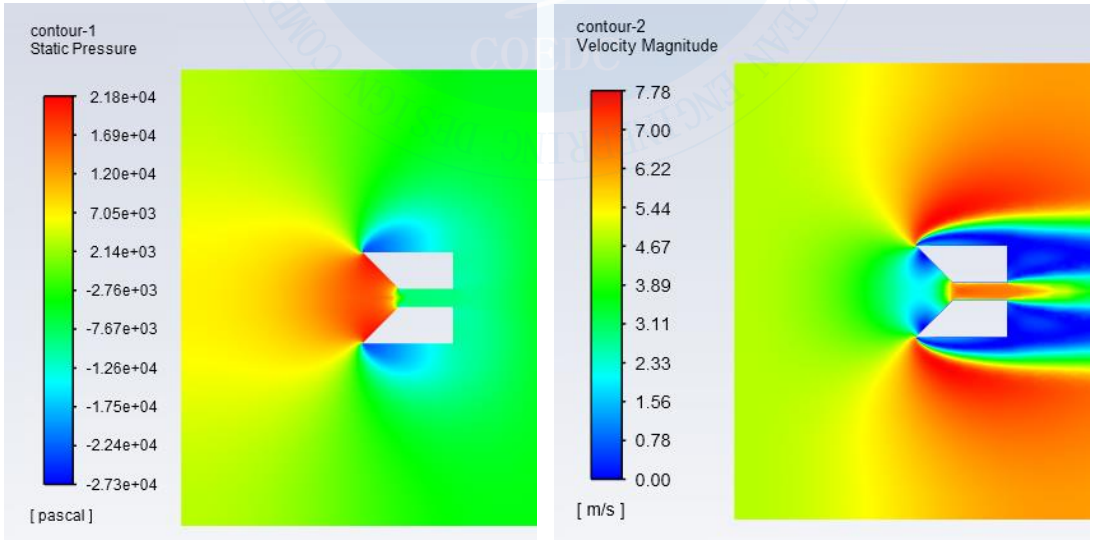


图 2.6 角度为 45° 的浮体的压力场（左图）与速度场（右图）

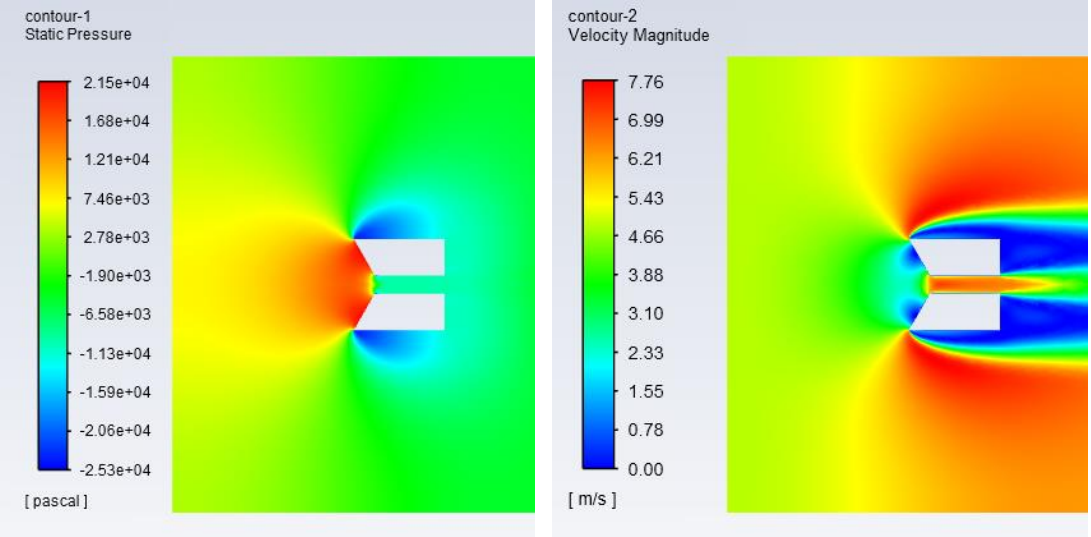


图 2.7 角度为 60° 的浮体的压力场（左图）与速度场（右图）

由计算结果可知，随着入口角度增大迎流面的压力逐渐降低，且迎流面积减小，所以迎流面受到的作用力逐渐减小；但随着入口角度增大压力分布逐渐集中不利于浮体的稳定；且不同入口角度中心流道的流速大致相等，因此选取 45° 入口最为合适。

2.3 模块化组装

通过调研，我们团队选取了海流能、波浪能、风能以及太阳能作为主要的发电来源，并且经过力学分析进行合理布局，将发电模块对称分布在浮体装置上，其中：风能发电模块分别放置于附体两边中心位置，并且可以调节水平垂直角度以求将风能最大化利用；太阳能发电模块置于浮体上端，可以平铺，也可以仰起一定的角度，并且下端安置铰链以及支架，还可以调节朝向，以求最大化利用太阳能；波浪、潮汐能发电装置位于浮体前端两个“犄角”处，此处压力波动较大，可以放大波浪能和潮汐能，保证了波浪频率以及波高大小，同时避免波浪较大造成的不稳定性；海流能发电装置位于浮体下端窄道处，窄道处可以将水流放大，水轮机可以更好的发挥作用，充分利用海流能进行发电。

装置整体设计如图 2.8、2.9 所示：

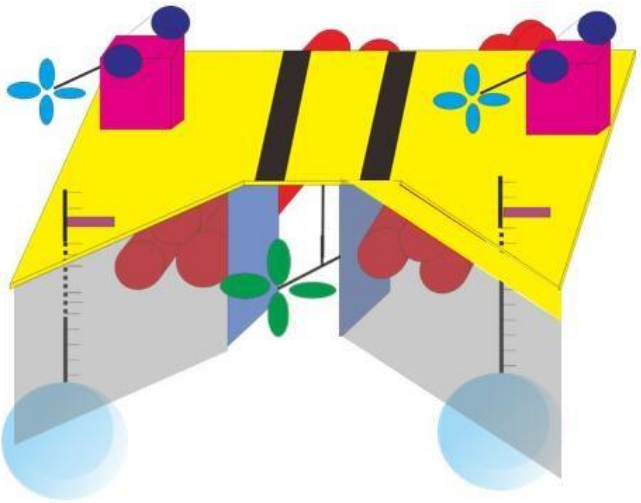


图 2.8 装置整体简图

图 2.9 装置实际效果图

第 3 章 发电效率分析

3.1 赛题分析

实施方案给定的波浪参数为，波高范围 30-50 mm，波周期为 5-20 Hz，水深 0.3 m。海面上常见的波陡（指波高与波长之比）范围为十分之一到三十分之一。

由此算出波长范围 300-1500 mm，当波长小于 600 mm 时属于深水前进波，当波长大于 600 mm 时属于浅水前进波。根据波长和波周期可推算出波速范围 1.5~30 m/s，可估算波浪功率为 2.25~225 w/m（推导过程见附录Ⅱ），因此只要经过合理转化可以收集到客观的能量。

3.2 各组件参数

模块化发电组主要由微型转子发电机，灯泡，叶轮，齿轮，齿条，电线以及数显表组成，发电组在浮体平台上模块化安装，浮体可单独工作或锚泊固定，利用海洋环境下的波浪能，潮流能，风能以及太阳能发电，各组件具体参数如下：

1）微型转子发电机，5 个

尺寸：直径 2.5cm，长度 3cm

电压：1~12V

轴径：2mm

2）白色发光二极管，2 只

额定电压：3V

额定功率：0.09W

3）白色 LED 灯，1 支

额定电压：5V

额定功率：0.1W

4）叶轮，2 个

材料：注塑 PP　ABS 材质

直径：80mm/2 个，40mm/1 个

孔径：2mm

5）水轮机，1 个

最大输出电压：5V

最大输出电流：20mA

6）齿轮/齿条

模数：0.5 模数

齿条尺寸：长 125mm，宽 4mm，高 7mm

齿轮尺寸：齿数 15，孔径 2mm

7）太阳能板，4 块

电压：0~5V

电流：220mA

8）电线

外径：1.3mm，内含 7 根铜丝

重量：2g/m

9）数显表，1 件

电压：5.5V~100V

电流：0~10A

误差：±1%

3.3 发电装置电路图

由于各发电部件的安装角度，转子个数，潮流能流道的入口角度以及选取的灯泡额定功率等因素都会影响最后的发电功率，因此本文在第二章进行了一系列水动力学的优化设计，并且通过调整太阳能板的角度，转子个数，灯泡规格并且合理布线降低电线损耗，最终确定了如图 3.1 所示的电路图，上述材料可以在浮体上模块化安装。

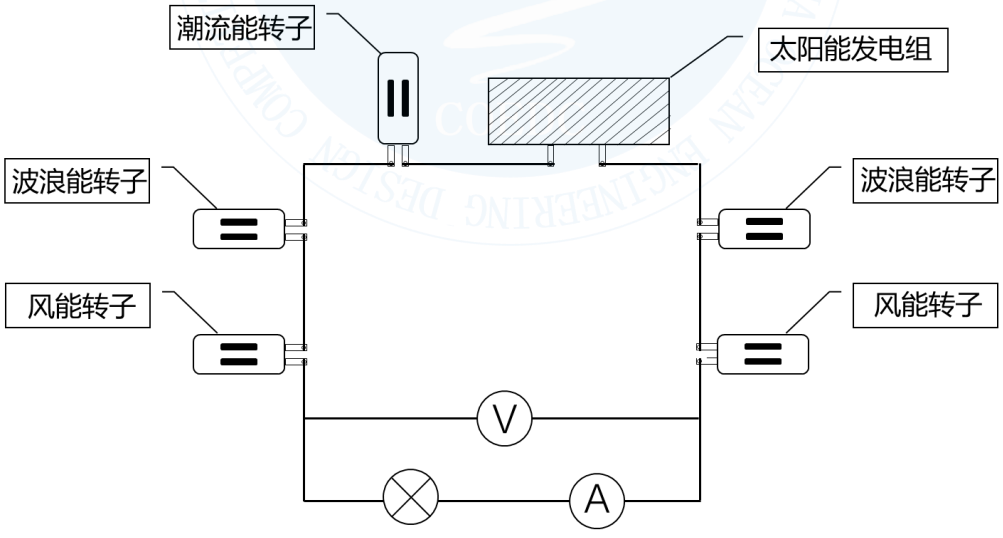


图 3.1 模块化发电装置电路图

3.4 各模块发电量分析

本节详解各个发电模块的能量转化途径，以及在实验水槽中实测的各项数据

和计算得出每个模块的 1 分钟发电量。发电量采用以下公式计算：

$$W = P_i T = U_i I_i T$$

式中：

W—发电量，*J*；

Pi—模块发电功率，*W*；

T—时间，60*s*；

Ui—模块发电电压，*V*；

Ii—模块发电电流，*A*。

波浪能发电模块采用的是浮子带动发电机转子转动实现机械能向电能的转化，风能发电模块采用的是风力带动发电机转子转动实现机械能向电能的转化，海流能发电模块采用的是水轮机上下压差和水流带动发电机转子转动实现机械能向电能的转化，太阳能发电模块采用的是光能到电能的转化。各个模块在实验条件下测得的 1 分钟发电量如表 3.1 所示（计算过程见附录III），可以看到满足各模块稳定工作的环境中，太阳能发电模块发电量最大，波浪能发电模块发电量最小。

表 3.1 各模块发电量实测数据

模块名称	额定电压 (V)	实测电压 (V)	实测电流 (mA)	发电量 (J)
波浪模块	12	3.8	23.5	5.358
风能模块	12	8.4	51.9	26.157
海流能模块	12	4.6	28.4	7.838
太阳能模块	5	5	220	66

3.5 组合发电效率及优化

发电效率表征了上述利用的四种自然能量转化为电能的转化效率，本模块化发电组的发电效率采用以下公式计算：

$$\eta = P / P_0$$

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i = UI$$

式中：

η—发电效率；

P—发电功率，*W*；

P₀—装机功率，*W*；

U—测量电压，V；

I—测量电流，A；

$n=4$。

根据各模块的额定功率计算平台整体发电组的装机功率，由于整个电路有 2 支额定功率为 0.09W 的白色发光二极管，1 支额定功率为 0.1W 的白色 LED 灯，所以发电组装机功率为 0.28W。

3.5.1 理想工况发电效率分析

假设在理想工况条件下，风能、波浪能、海流能以及太阳能均参与发电。

在极尽可能地满足理想工况的实验条件下，进行下水测试，发电功率为稳定性测试结束后 1 分钟内，测得的发电电压乘以发电电流的最大值。根据电流表测得装置稳定发电 1 分钟内的最大电流为 87mA，最大电压为 1.386V（由于模型测试视频是第二次拍摄，因此视频中的数值与上文中的稍有偏差），计算得出发电功率为 0.121W。由公式计算得出接近理想工况下模块化发电组的发电效率为 43.1%（计算过程见附录Ⅳ）。

3.5.2 复杂工况发电效率分析

考虑到现实情况中工况较为复杂，比如说会出现阴雨，大风等特殊天气环境，可能会导致相关的发电模块发电量低甚至不发电的情况出现，因此我们特别考虑到以下几种复杂工况，并且进行发电效率分析，以便指导现实情况应用。

1）假设工况一，太阳能模块发电量极低，可忽略不计，海面风、浪、流条件较好，风能、波浪能、海流能将作为主要发电来源；

2）假设工况二，风能、波浪能发电量极低，可忽略不计，太阳能、海流能将作为主要发电来源；

3）假设工况三，太阳能、风能模块发电量极低，可忽略不计，波浪能、海流能将作为主要发电来源。

在实验条件下控制各个模块的工作条件，用来模拟以上三种工况，发电功率同样为稳性测试结束后 1 分钟内，测得的发电电压乘积发电电流的最大值。三种工况模拟条件下的实测最大电压和最大电流，分别计算得出实际最大功率，由公式计算三种复杂工况下发电组的发电效率如下表 3.2 所示（计算过程见附录Ⅳ）。

表 3.2 复杂工况下发电效率表

工况种类	额定功率 (W)	实测最大电压 (V)	实测最大电流 (mA)	实际最大功率 (W)	发电效率 (%)
工况一	0.28	1.095	68.8	0.0753	26.9
工况二	0.28	1.045	65.6	0.0686	24.5
工况三	0.28	0.773	48.5	0.0375	13.4

通过分析复杂工况条件下的发电效率，我们可以看出即使在恶劣的环境中，装置仍然可以稳定的进行发电，发电效率对比现有的浮体发电装置仍是可观的，并且在实际应用中我们可以设置蓄电池，将发电条件好的时候的电能储存起来，以备不时之需，这样更加保证了装置发电的稳定性。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 4 章 装置应用前景

4.1 发电模块应用前景

我们团队在设计该浮体发电装置时，始终立足于实际应用环境，保证了装置的实际意义，保证了“研而有用”、“为用而研”。

4.1.1 波浪能发电模块应用前景

波浪能利用装置的种类繁多，有关波浪能装置的发明专利超过 1500 种，虽然波浪能发电装置种类繁多，波浪能发电装置的研究与开发已取得了一定的成果，但是相比于太阳能、风能等清洁能源，并没有在生活中普及开来，主要是存在可靠性、稳定性、发电效率以及发电成本高等问题。

针对波浪能发电存在的问题，本团队根据波浪的振动，开发出合理搜集波浪能，并进行有效利用其能量的发电实验装置模块，具有架构简单，容易实现，可实现性强等特点，通过控制系统将乒乓球的往复摆动转换为发电机轴单向旋转，从而发电。

本波浪发电模块转化成实物具有可实现性，来提高波浪能发电装置的生存能力、发电效率和可靠性，降低发电成本。实现转化如表 4.1 所示：

表 4.1 波浪发电模块转化对应关系表

模型	实物
乒乓球	浮子
塑料齿条	链条
塑料齿轮	皮带轮（链轮）
电机	发电机

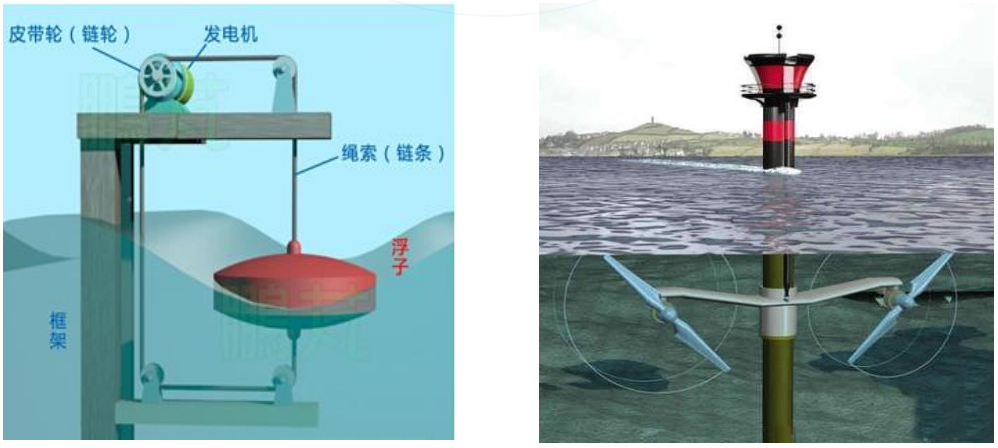


图 4.1 波浪发电模块成果实现图

4.1.2 风能发电模块应用前景

风力发电具有不稳定和不可控随机性的特点。自然界的风能的产生会受到诸如温度、气压等各种因素的影响，这也导致了发电机的输入功率的不断变化。风力发电量大，利用率提高，发电成本降低。目前，风力发电的增长速度惊人，发电量显著增加。

根据目前在海洋风能发电存在的问题，本团队进行风能发电模块设计，模型中有两个发电装置，成果转化时根据浮体大小以及形状进行调整发电装置的数量以及方位角，并改变电机功率和风叶大小，实现对风能有效利用以及空间的高效使用。

图 4.2 风能发电模块成果实现图

4.1.3 海流能发电模块应用前景

海流能发电模块由连接系统、机组、电能变换系统等子系统组成。在对海流能发电装置进行选型和设计时，需充分考虑所在海岛海域的环境因素，包括海流流速、海流流向、水深、海地质、气象条件等情况。根据目前海流发电的特殊性，本团队进行海流发电模块设计，模型中通过海流带动水下叶轮转动，进而带动电机转动发电。成果转化时可以根据实际发电功率进行配置电机以及水下叶轮，改变电机功率和叶轮大小，并进行浮体形状设计以及优化出最高效利用海流的实际角度，实现对海流的有效利用以及浮体下空间的高效使用。

通过文献调研发现，实际成果转化中，水轮机直径与当地海域最大海流流速密切相关。对于设计容量为 100Kw 的海流能发电装置，若流速为 1.77m/s，则水轮机直径约为 14.0m；若流速达到 2.0m/s，则水轮机直径可大幅减小，相应装置所占用的海域面积也能得到有效减小。

图 4.3 海流发电模块成果实现图

4.1.4 太阳能发电模块应用前景

太阳光照射地球表面，无论陆地、海洋、高山或是平地，都可以开发利用，虽然照射时间和强度不同，但其分布广泛，太阳能资源取之不尽用之不竭，不同于其他化学能源，太阳能是一种可再生的清洁能源，具有无限性和再生性，在生态污染愈加严峻的今天，不会污染环境的太阳能资源极其宝贵。

目前，我国太阳能发电产业通过多年努力，已经得到了较好的成果。作为我国发电产业中较为先进的技术，太阳能发电直接将太阳能转换为电能，中间不需要经过任何其他过程，电能转换率较高，发电的形式也简单、快捷。由于建设一个太阳能发电系统所需周期较短、干净环保，因此，太阳能发电技术在我国发电技术中占有很重要的地位。

本次太阳能发电模块设计中，根据高效利用浮体空间原则，合理布置太阳能板位置，实现发电。成果转化过程中，将模型中的太阳能板依据现实浮体尺寸，安装满足适用于现场发电的太阳能板。

图 4.4 太阳能发电模块成果实现图

4.1.5 电能的储存

由于海洋能源发电受天气影响很大， 不可控性强，因此需要对能量进行存储，充分利用夜间时间发电。若遇极端天气，部分发电模块遭受影响，此时就能够利用存储的部分电能进行补充，以平衡用电需求。

4.5 成果转化及潜在应用

4.5.1 成果转化

本团队通过对波浪能、风能、海流能以及太阳能等海洋可再生能源进行合理开发和利用，进行模块化设计，包括浮体模块、波浪发电模块、风能发电模块、海流发电模块以及太阳能发电模块，通过以上分析可以看出，每个模块均可实现发电，实现模型向成果转化。

成果转化过程中，模块化实体的制作可以参考目前相关领域以取得的成果，通过借鉴并对其进行合理的优化与设计，加工出不同模块实体。

4.5.2 装置潜在应用

海洋能是以海水为介质，由潮汐、波浪和海流等物理海洋过程，具有储量大、清洁和可持续等优势，越来越受到沿海国家的重视，并将其作为战略资源进行技术储备。

本设计综合波浪能、风能、海流能以及太阳能，实现对海洋能的充分利用，绿色清洁、可持续利用，可以应用于海洋钻井平台、生产平台以及 FPSO 等油气领域，替代部分海洋平台利用石油与天然气发电装置，实现环境友好型资源开发以及经济效益最大化。除此以外，还可以应用于近海地区发电，通过对海洋能合理开发利用与应用，海洋能产业将促进我国海洋经济新的增长。

附录

附录Ⅰ. 我国近海再生能源利用率计算过程

近海能源利用率数据来自国家 908 专项“我国近海海洋可再生能源调查与研究”的项目研究结果，由该统计结果中每种能源的年发电量与理论年发电量的比值可以求得每种近海能源的利用率。计算过程如下：

温差能发电效率：$\eta_{温差}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{2251\times10^{8}kW□h}{32161\times10^{8}kW□h}\times100\%=0.07\%$

潮汐能发电效率：$\eta_{潮汐}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{626\times10^{8}kW□h}{16887\times10^{8}kW□h}\times100\%=3.7\%$

盐差能发电效率：$\eta_{盐差}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{991\times10^{8}kW□h}{9907\times10^{8}kW□h}\times100\%=10\%$

潮流能发电效率：$\eta_{潮流}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{146\times10^{8}kW□h}{730\times10^{8}kW□h}\times100\%=20\%$

海洋风能发电效率：$\eta_{海洋风}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{34126\times10^{8}kW□h}{77351\times10^{8}kW□h}\times100\%=44.1\%$

波浪能发电效率：$\eta_{波浪}=\frac{W_{实际}}{W_{理论}}=\frac{1288\times10^{8}kW□h}{1401\times10^{8}kW□h}\times100\%=91.9\%$

六种近海可再生能源的利用率分别为温差能（0.07%），潮汐能（3.7%），盐差能（10%），潮流能（20%），海洋风能（44.1%），波浪能（91.9%），本文选取利用率最高的潮流能（20%），海洋风能（44.1%），波浪能（91.9%）进行实验。

附录 II．波浪功率推导过程

根据经验公式可估算波浪功率为 2.25-225 w/m，推导过程如下：

$$\frac{1}{30} \leq \frac{H}{\lambda} \leq \frac{1}{10}$$

$$30 \leq H \leq 50 \text{ mm}$$

$$300 \leq \lambda \leq 1500 \text{ mm}$$

$$v = \lambda f$$

$$1.5 \leq v \leq 30 \, m/s$$

$$P = 0.5 \times TH^2$$

$$2.25 \leq P \leq 225 \, w/m$$

附录Ⅲ. 各模块发电量计算过程

通过计算每个模块的发电量，验证各个模块的发电能力。

1）波浪能发电模块单独发电时的实测电压为 3.8V，实测电流为 23.5mA，发电时间为 60s，波浪能模块单独发电的发电量计算过程如下：

$$W_{波浪能}=\mathrm{U}_{波浪能}\times I_{波浪能}\times \mathrm{t}=3.8\mathrm{V}\times 0.0235A\times 60\mathrm{s}=5.358J$$

2）风能发电模块单独发电时的实测电压为 8.4V，实测电流为 51.9mA，发电时间为 60s，风能模块单独发电的发电量计算过程如下：

$$W_{风能}=\mathrm{U}_{风能}\times I_{风能}\times \mathrm{t}=8.4\mathrm{V}\times 0.0519A\times 60\mathrm{s}=26.157\mathrm{J}$$

3）海流能发电模块单独发电时的实测电压为 8.4V，实测电流为 51.9mA，发电时间为 60s，波浪能模块单独发电的发电量计算过程如下：

$$W_{海流能}=\mathrm{U}_{海流能}\times I_{海流能}\times \mathrm{t}=4.6\mathrm{V}\times 0.0284A\times 60\mathrm{s}=7.838\mathrm{J}$$

4）太阳能发电模块单独发电时的实测电压为 5V，实测电流为 220mA，发电时间为 60s，太阳能模块单独发电的发电量计算过程如下：

$$W_{太阳能}=\mathrm{U}_{太阳能}\times I_{太阳能}\times \mathrm{t}=5\mathrm{V}\times 0.22A\times 60\mathrm{s}=66\mathrm{J}$$

附录Ⅳ. 各工况条件下发电效率计算过程

本文发电效率由发电功率与装机功率的比值计算，发电功率为稳性测试结束后 1 分钟内，测得的发电电压与电流乘积的最大值。

1）理想工况条件下（接近），实验测得发电电流为 87mA，电压为 1.21V，三只灯泡额定功率为 0.28W，发电效率 η 计算过程如下：

$$\eta = \frac{P}{P_0} \times 100\% = \frac{UI}{P_0} \times 100\% = \frac{1.386 \times 0.087}{0.28} \times 100\% = 43.1\%$$

2）复杂工况一：太阳能模块发电量忽略不计，风能、波浪能、海流能发电。其实测最大电压为 1.095V，实测最大电流为 68.8mA，三只灯泡额定功率为 0.28W，工况一发电效率 η 计算过程如下：

$$\eta_1 = \frac{P_1}{P_0} \times 100\% = \frac{U_1 I_1}{P_0} \times 100\% = \frac{1.095 \times 0.0688}{0.28} \times 100\% = 26.9\%$$

3）复杂工况二：风能、波浪能模块发电量忽略不计，太阳能、海流能发电。其实测最大电压为 1.045V，实测最大电流为 65.6mA，三只灯泡额定功率为 0.28W，工况二发电效率 η 计算过程如下：

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_0} \times 100\% = \frac{U_2 I_2}{P_0} \times 100\% = \frac{1.045 \times 0.0656}{0.28} \times 100\% = 24.5\%$$

4）复杂工况三：太阳能、风能模块发电量忽略不计，波浪能、海流能发电。其实测最大电压为 1.095V，实测最大电流为 68.8mA，三只灯泡额定功率为 0.28W，工况一发电效率 η 计算过程如下：

$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_0} \times 100\% = \frac{U_3 I_3}{P_0} \times 100\% = \frac{0.773 \times 0.0485}{0.28} \times 100\% = 13.4\%$$

附录Ⅴ. 参考文献

[1]. 南映寿. 一种波浪发电装置[P]. 甘肃省：CN211082123U,2020-07-24.

[2]. 许亮,其他发明人请求不公开姓名. 一种波浪能发电装置[P]. 北京市：CN109469577B,2020-07-31.

[3]. 王旭,王胜,谢双全,王宇飞,赵俊森. 海洋波浪能浮力发电装置[P]. 天津市：CN211343200U,2020-08-25.

[4]. 李庆雨,杨浩琳,刘新. 一种互补式海洋能与太阳能发电装置[P]. 山东：CN208143134U,2018-11-23.

[5]. 黄雨薇,陆宇烨,黄金纬,普月,姚文亮,吴淳,杨晓伟. 一种简易光伏—波浪能发电装置[P]. 江苏省：CN211352100U,2020-08-25.

[6]. 席文奎,姜辛,任俊楠,姜东,方帅军. 一种海洋波浪发电设备[P]. 陕西省：CN211314443U,2020-08-21.

[7]. 黄元峰,王海峰,赵威,艾程柳,杨阳,刘腾,边晖. 一种海洋能浪流一体化发电装置[P]. 北京市：CN111502899A,2020-08-07.

[8]. 章海. 一种波浪发电装置[P]. 浙江省：CN203321741U, 2013-12-04.

[9]. 陈建宏,陈百年,王瑞祥,丁志奇. 一种海洋钻井平台用发电装置[P]. 四川省：CN208522673U,2019-02-19.

[10]. 闫烨洋,史晓敏. 一种海洋风力发电装置[P]. 浙江省：CN111237128A,2020-06-05.

[11]. 黄雨薇,陆宇烨,黄金纬,普月,姚文亮,吴淳,杨晓伟. 一种简易光伏—波浪能发电装置[P]. 江苏省：CN211352100U, 2020-08-25.

团队编号：A20200901

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期 2020 年 11 月 16 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

作品名称	一种基于直线电机的振荡浮子式波浪能发电装置	
发电原理	通过波浪上下振动带动浮子产生竖直方向位移，进而带动直线电机的动子运动，使得定子与动子之间产生相对运动，从而由于电磁感应现象产生电流	
创新点	本装置的创新主要在于浮子外形优化设方法的创新以及一种将理论方法应用于实践的实验室验证	
比赛要求与指标完成情况	装置尺寸(L*W*H)（mm^3）	600*400*400
	装机功率(W)	9.7
	小灯泡持续发电时间(s)	>60
	电压（有效值）/U（V）	2.631
	电流（有效值）/I（A）	0.1
	发电效率	27.52%
应用前景概述	本装置目的在于验证一种浮子外形优化设计的方法，对于任何采用浮子作为驱动进行发电的波浪能发电装置，均可采用此方法进行浮子外形的优化设计，目前由于能力所限，只设计出对于浮子外形的一维优化，未来可继续进行浮子的多维优化，从而更大地提高发电效率，属于一种有助于在能量摄取的源头减少能量损失的设计方法。	

目录

1. 总论 4
2. 研究的背景及意义 5
2.1.研究背景 5
2.2.作品的提出与思路 5
3. 作品说明 6
3.1 装置的组成结构 6
3.2 装置的工作原理及设计方案 6
3.3 使用方法及注意事项 7
4. 理论设计计算 8
4.1 外形及浮子尺寸设计 8
4.2 波浪能发电功率计算 9
5. 创新点及创新优势 10
5.1 创新点 10
5.2 创新优势 10
6. 实验室测试 11
6.1 实验材料及实景图 11
6.2 实验过程 16
6.3 实验结果 18
7. 装置不足与改进期望 21
7.1 不足：关于本实验发电效率的讨论 21
7.2 改进：关于稳定性处理方面的改进想法 21
8. 参考文献 23
9. 附录（附前面内容的详细计算过程） 24
9.1 第 7 章不足与改进中计算过程 24

1．总论

世界能源危机背景下，寻找新能源替代已有能源势在必行，并且经过一些文章的有效性论证，未来水力发电有着十分广阔的前景，无论是从可再生能源对于供电稳定性的需求来看，还是从能量总体规模来看，水力发电都有着十分明显的优势，但是在目前基于水力发电的可再生能源发电技术尚未十分成熟的情况下，发电装置依旧存在许多亟待解决的问题，例如如何提高获能效率并且减少能量输出的波动等。

针对这一现状，本文设计了一种浮子外形经过挑选设计的基于直线电机的震荡浮子式波浪能发电装置，对外形进行优化设计以提高发电效率，最终为制作一种相对高效的震荡浮子式波浪能发电装置提供一种具有可行性的方案。

2．研究的背景及意义

2.1. 研究背景

机械化生产在第二次工业革命之后极大地提高了人们的工作效率，随之而来的便是大量的石油、煤炭等化石能源的消耗，由此产生的环境污染日益严重，人类的肆意发展对世界上其他生物的生存产生了不可挽回的恶劣影响。为了摆脱对化石能源的依赖，世界各国纷纷大力发展可再生能源。太阳能、风能发电技术已经相当成熟，早已运用于生产实践中，产生了巨大的经济效益[1]。波浪能属于新能源的后起之秀，目前大部分波浪能发电的研究多停留在实验验证阶段，尚未投入大规模的商业应用[2]。中国东南沿海波浪能资源丰富[3]，东南沿海恰是我国人口分布最为密集的地区之一，若能有效应用波浪能，将有效缓解此地区供能紧张问题。振荡浮子式波能发电装置结构简单，发电效率较高，有较高的发展前景[4]。影响震荡浮子式波能发电装置的发电效率的最重要因素之一便是浮子的外形。本研究试图找到一种相对最优的浮子外形，以提高振荡浮子式波浪能装置的发电效率。

2.2. 作品的提出与思路

本装置为一单自由度运动的振荡浮子式波浪能发电装置，其中浮子部分历经基于势流理论的水动力学软件优化设计而成。

本装置提出的思路主要基于：目前波浪能发电装置少有对浮子外形进行细致的优化，并且由于波浪存在周期性，对于所输出电流的稳定性会产生一定的影响，在大规模发电的过程中，如果能量波动较大，对于能量的损耗以及对于发电系统的破坏性都是非常大的，因此本装置基于解决以上问题而被设计提出。利用算法调用水动力学软件求解相对优的外形以及通过实地水池实验进行不同种类浮子发电效率对比验证，是本设计的重点所在。

3．作品说明

3.1 装置的组成结构

本装置由支架（3）、直线电机（1、2）组成。支架用于支持固定直线电机，直线电机的定子固定在支架上。直线电机与浮（4）刚性连接，在波浪的激励下浮子发生上下运动，从而使直线电机的动子（1）和定子（2）发生相对运动。由于实验中波浪和水流的作用力较小，且装置自重较大，所以装置可以在水池中保持稳定。当在实海中安装时，可用钢筋混泥土制造支架，依靠自身重力稳坐于海底，还可以使用导管架和钢桩将装置固定在海底。

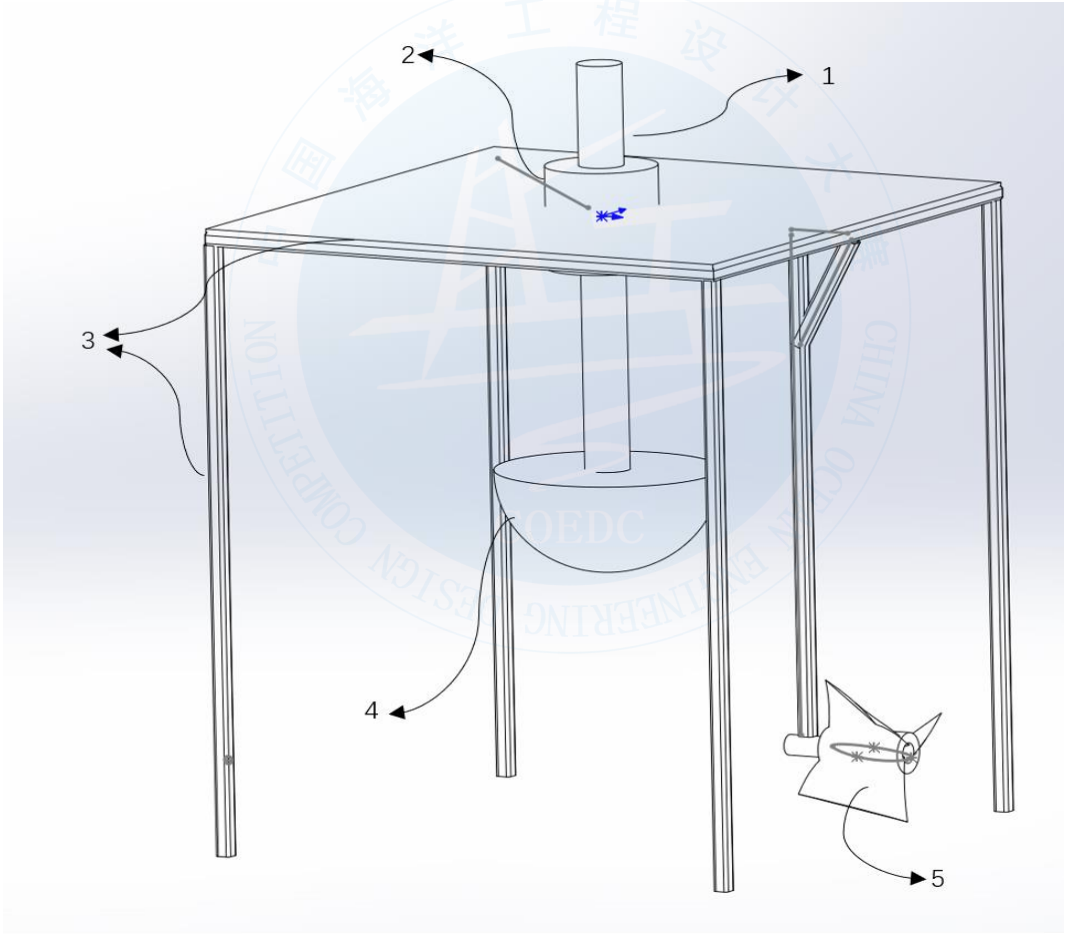


图 3.1.1

3.2 装置的工作原理及设计方案

本装置为一种基于直线电机的波浪能发电装置，利用波浪带动浮子产生竖直

方向的位移，从而带动直线电机进行升沉运动，进而达到发电的目的。

我们将此装置放置在一个 1000*800*500(mm³)的水池里，在水池的一侧使用造波机产生一定频率和周期的规则波，水池的另一侧放置消波器以消除波浪打击到池壁从而形成驻波而对于装置的性能检验产生影响，此波主要作用于浮子，并且通过浮子上下运动从而带动直线电机发电。发电装置外部框架置于水池中央，其上固定直线电机，电机与其下方浮子通过刚性杆相连接。

关于检验发电效果的电路设计如下：

将电机接线与小灯泡连接恰当，并将示波器与小灯泡并联，电流表与小灯泡串联用于测量产生的稳定电压及电流从而计算装置的发电功率。

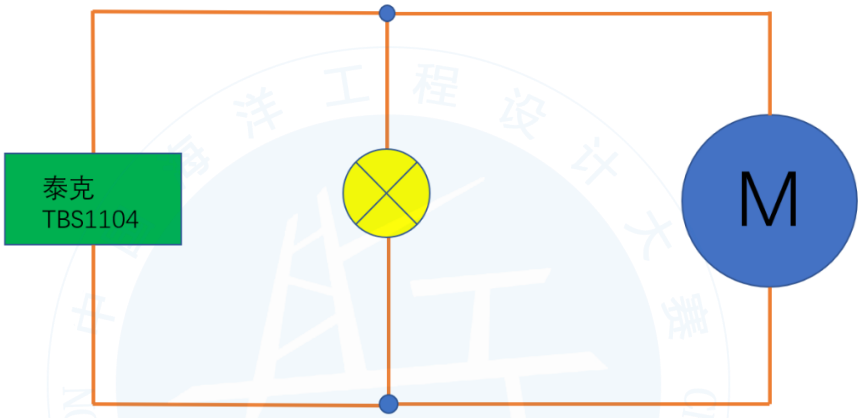


图 3.2.1

3.3 使用方法及注意事项

首先将水池中注入深度为 h 的水，并且将水泵通过外管连接好，检查装置在造波器工作产生简谐波以及水泵工作产生模拟潮流的情况下水池是否漏水以及波形是否达到稳定，若不漏水且波形稳定，关闭以上两装置，进行发电装置的安装及电路检验，首先将整个发电装置按图 6.7 方式摆放好，并按照上述电路图连接好电路。以上工作结束后，打开造波器以及水泵，在产生稳定波浪条件之后，开启发电装置，并在装置运行达到稳定后，测试输出稳定性以及发电功率。

注意事项：在保证波浪能发电部分与潮流能发电部分均稳定运行时才进行对于计算功率所需相关参数的采集。

4. 理论设计计算

4.1 外形及浮子尺寸设计

利用水动力学计算软件 Wamit 结合 Matlab 对于浮子外形的优化，首先我们假设其形状为一柱体，对于其底面形状进行改进优化，优化过程中，我们采用一维优化的方式，即通过对于不同系数下的多项式曲线形状作为 x 轴方向浮子底面的形状，y 方向浮子的形状没有起伏，并将浮子在相同海浪参数下的平均发电功率作为目标函数，通过遗传算法寻求在目标函数达到最大值时浮子形状曲线，即得到性能相对较优的振荡浮子式波能发电装置。

具体过程如下：

首先给定浮子的长度，宽度以及高度的限制，并对于最高次幂为 7 次的多项式随机生成系数，如此得到一条多项式曲线，将此曲线作为从垂直于波浪传播方向看去的浮子底面形状，接入水动力学软件，在已经输入波浪情况（波高，周期，电机阻尼系数）下计算其相关水动力学系数从而计算得出平均发电功率，接下来进行遗传算法的迭代，设定合适的变异系数，使得产生更多不同的多项式参数组合，从而生成更多不同形状的曲线作为浮子底面形状，重复以上代入 wamit 进行计算求得平均功率的过程，最终经过若干次寻找，找到几乎全局最优的浮子底面形状，如此，整个浮子外形优化的过程结束。

有关遗传算法过程如下：根据遗传算法设定预设进化代数 P、预设每代个体数 Q，随机生成 Q 条染色体作为初始值，每一染色体包含待优化的波浪能吸收体中浮子的形状参数；

计算每一染色体对应的适应性函数并由高到低进行排序，排序越前的染色体给予更高的概率成为候选染色体；其中，适应性函数对应波浪能吸收体的总发电功率的时间平均值；

将候选染色体进行 P 次进化，在最后一代候选染色体中选择适应性函数最高的染色体作为最优染色体，得到所述波浪能发电装置的发电功率最大时浮子的最优形状参数；其中，每一代候选染色体的数量相同。

在本发装置中，使用计算软件（如 MATLAB）对每条染色体进行二进制编码，每条染色体上有 n 个基因，每个基因由二进制编码表示一个波浪能吸收中浮子的几何参数信息（x），则每个染色体可表示为 A（xi），i=1，2，...n。预设进化代数为 P，并生成 Q 条染色体。系统在最初设定的 Q 条染色体中，通过选择、突变、交叉染色体中的基因，产生新的染色体。将目标函数值较大的 Q 条染色体进行保留，并继续进行进化，继续上述过程直至完成初始设定的进化代数。完成最后一次交配

后，通过选择函数选出目标函数值最大的染色体，即使波浪能吸收体的总发电功率的时间平均值全局最大。通过其所带基因，得出波浪能发电装置中浮子的最优几何参数。

使用 WAMIT 以及波浪能吸收体中浮子的几何参数计算得到水动力系数，具体为：以 WAMIT 用户手册规定的相关文件为输入，WAMIT 将自动输出所需要的水动力系数。自动输出需要的水动力系数包括但不限于附加质量$A(w)$，附加阻尼系数$B(w)$，静水刚度系数τ，激励力$F_{ext}(w)$。

4.2 波浪能发电功率计算

波浪能流密度，又称波能功率，指垂直于波向的每米宽度所通过的能量功率。在规则波的情况下，波能量密度可由以下公式得出：

$$P_r = \frac{1}{8}\rho g H^2 c_g \qquad (1)$$

其中c_g为群速度，在深水中可以表示为：

$$c_g = \frac{g}{2\omega} \qquad (2)$$

对于非规则波，需要通过谱能量密度函数得到波浪能流密度：

$$P_{ir} = \rho g \iint c_g S(\omega,\theta) d\omega d\theta \qquad (3)$$

上式中θ为波的传播方向。然而，公式(3)往往难以计算，而且所需的数据量往往过于庞大。由此引入有效波高H_s，平均周期T_m，和谱峰周期T_p，可将公式(3)简化为：

$$P_{ir} = 0.42 {H_s}^2 T_p \approx 0.5 {H_s}^2 T_m \qquad (4)$$

有效波高H_s指将给定波列中的波高由大到小依次排列，其中最大的$1/3$部分波高的平均值称为有效波高。谱峰周期T_p则为海浪谱$S(\omega)$中最大谱值所对应的周期。

算得波浪能流密度后，理论上波浪能发电装置的发电功率为：

$$P = P_r * D \qquad (5)$$

5．创新点及创新优势

5.1 创新点

所采用的基于直线电机的振荡浮子式波浪能发电装置中的浮子外形历经了优化，基于势流理论，针对特定海况通过 matlab 结合遗传算法调用 wamit 对于浮子外形进行优化。

5.2 创新优势

本装置的优势在于实践了一种浮子外形的设计方法，以及一种对基于遗传算法的浮子外形优化方式的理论转向实践验证的思路。

本设计具有很广阔的应用前景，在对浮子外形进行优化时，可以利用编程软件运载算法调用水动力学软件进行全局优化，例如本设计采用 Matlab 软件编写遗传算法，外部调用水动力学软件 Wamit 进行相关水动力学系数的计算，但目前本实验由于实验者能力有限，仅限与对于浮子外形的一维优化，并未做到三维的优化，未来设计出一种三维优化并且在运行时间上具有较小负担的优化方法，对于设计出水动力学性能更优的波浪能发电装置具有很大帮助。

6. 实验室测试

6.1 实验材料及实景图

如下设备实物图

电机结构图

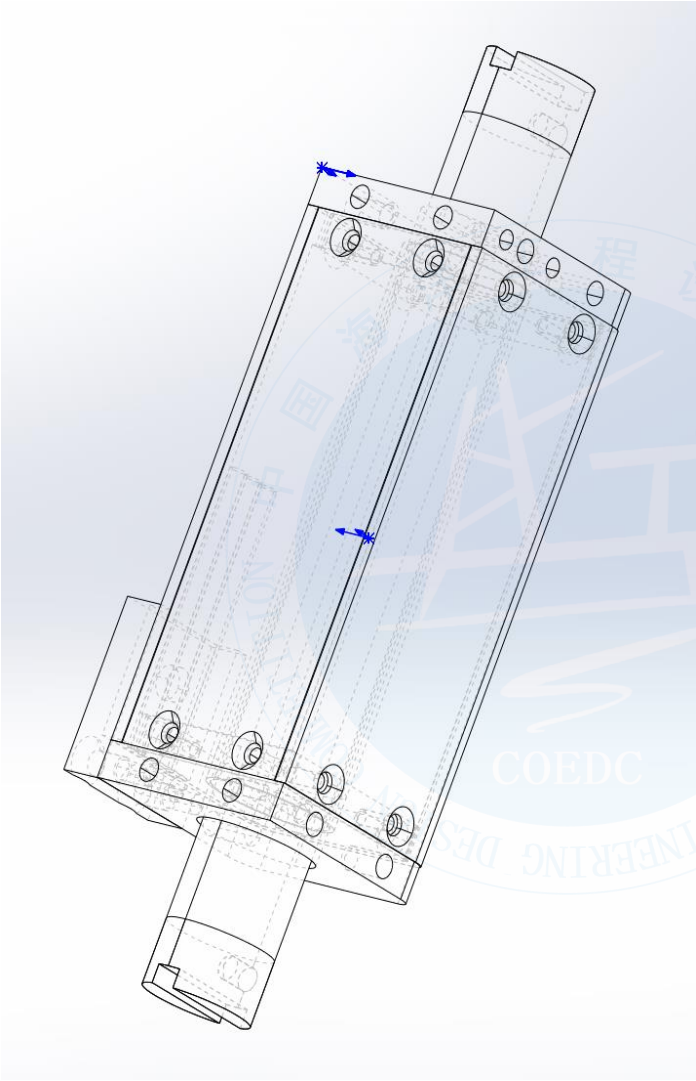


图 6.1.1

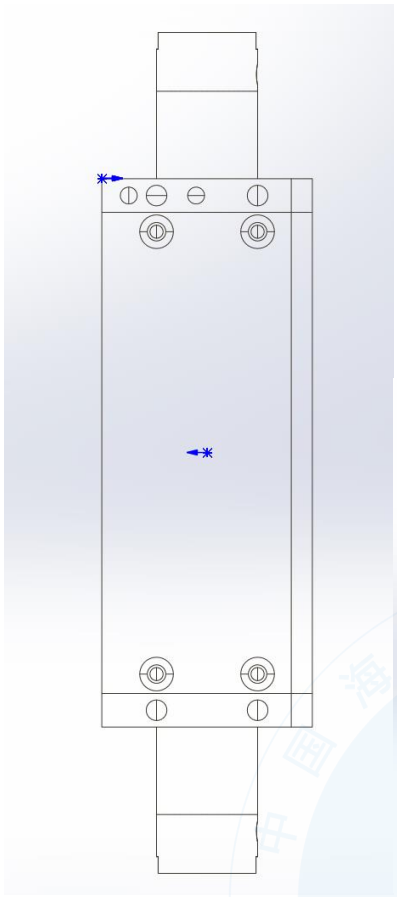


图 6.1.2

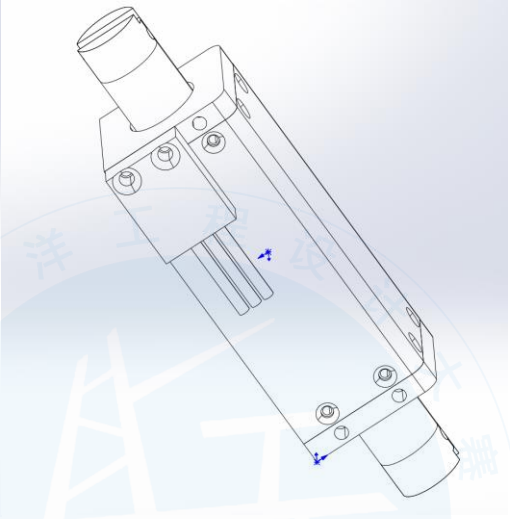


图 6.1.3

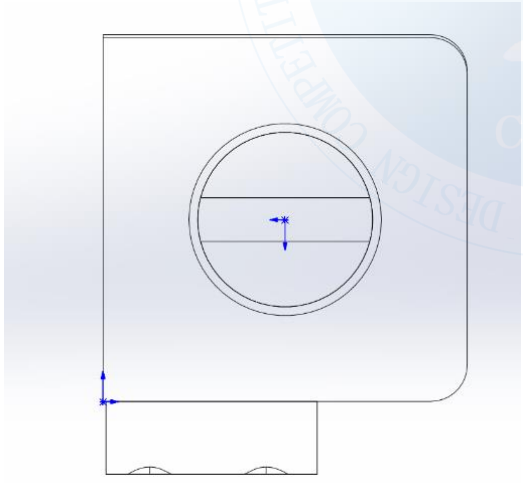


图 6.1.4

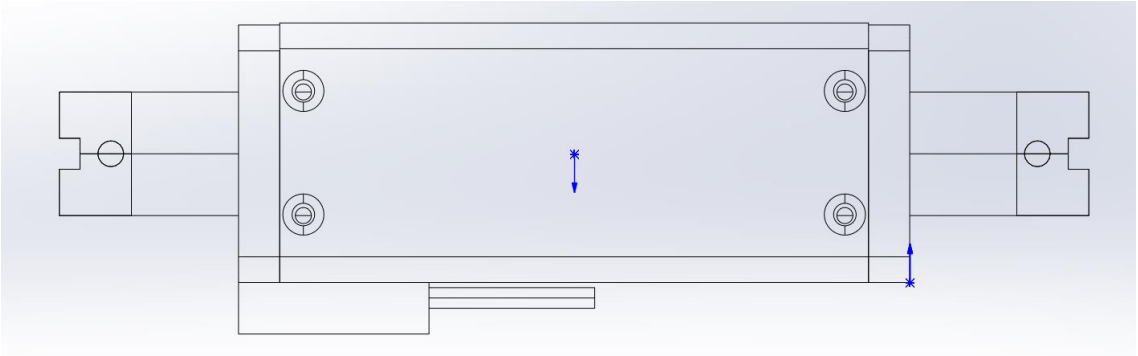


图 6.1.5

实验布局图

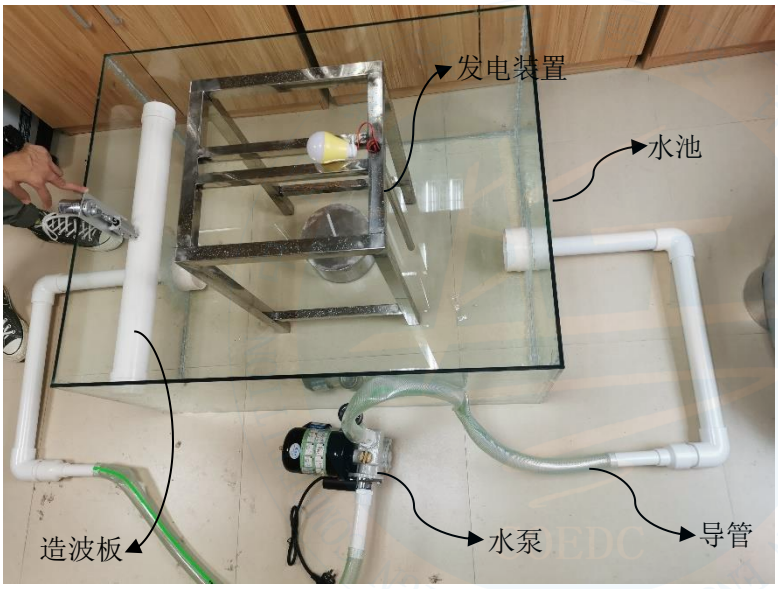
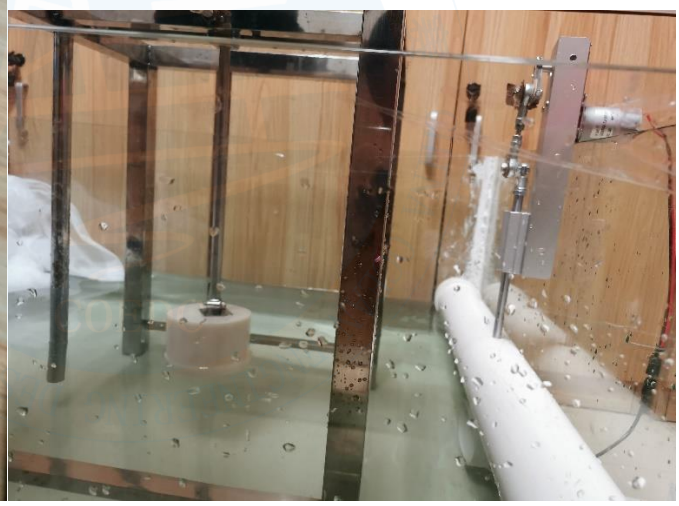


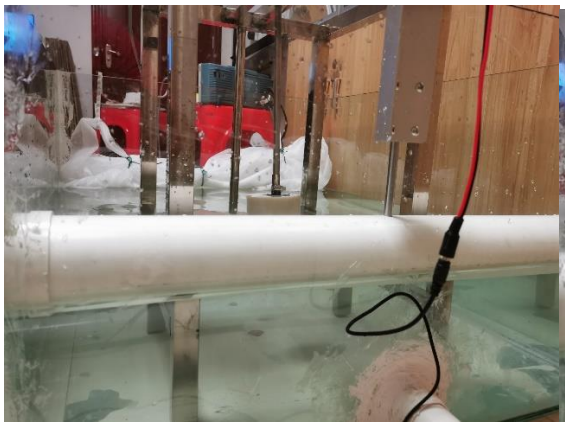
图 6.1.6

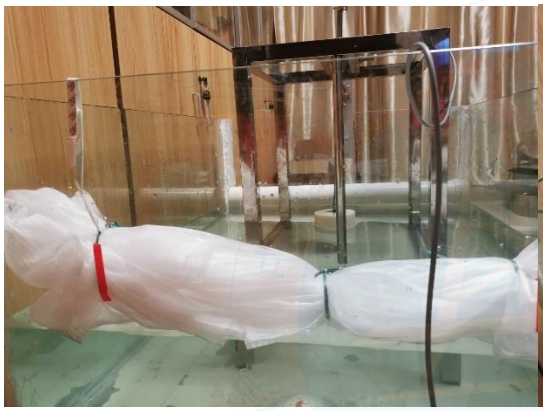
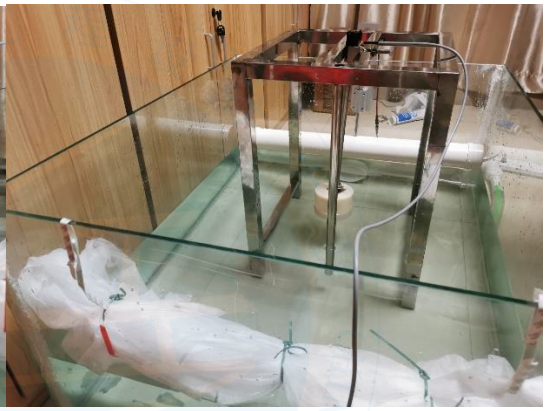
学院拖曳水池

图 6.1.7

学院拖曳水池位于中山大学南校区，可供我们之后进行进一步的实验验证。





图群 6.1.8-6.1.21

6.2 实验过程

首先我们选出 10 种（如图）形状的浮子，利用水动力学软件对其理想情况下在一定波浪条件下所能达到的最优性能进行比较，并最终挑选出最优的三种，制作成实物模型进行水池实验。

浮子选择流程如下：

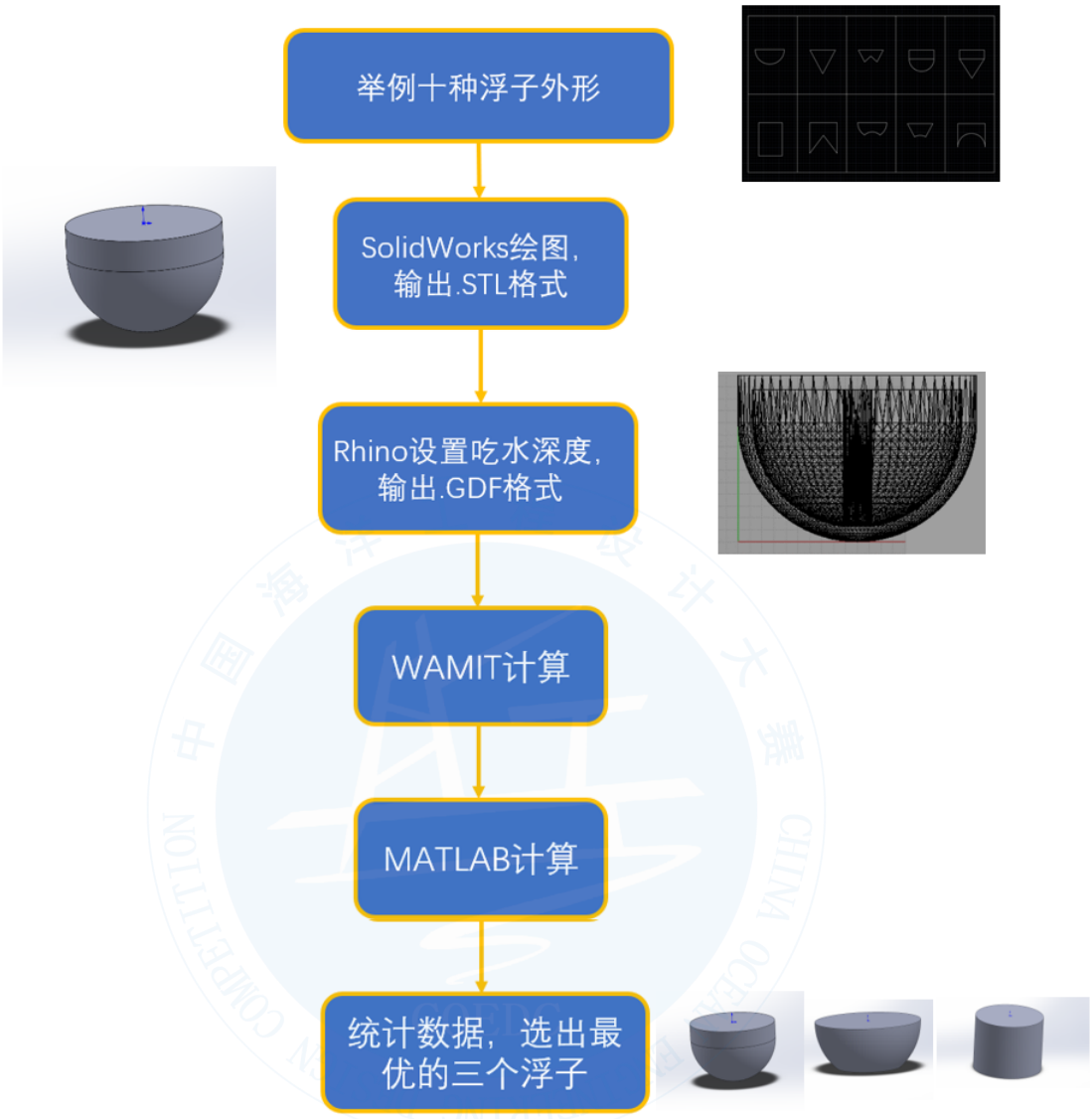


图 6.2.1

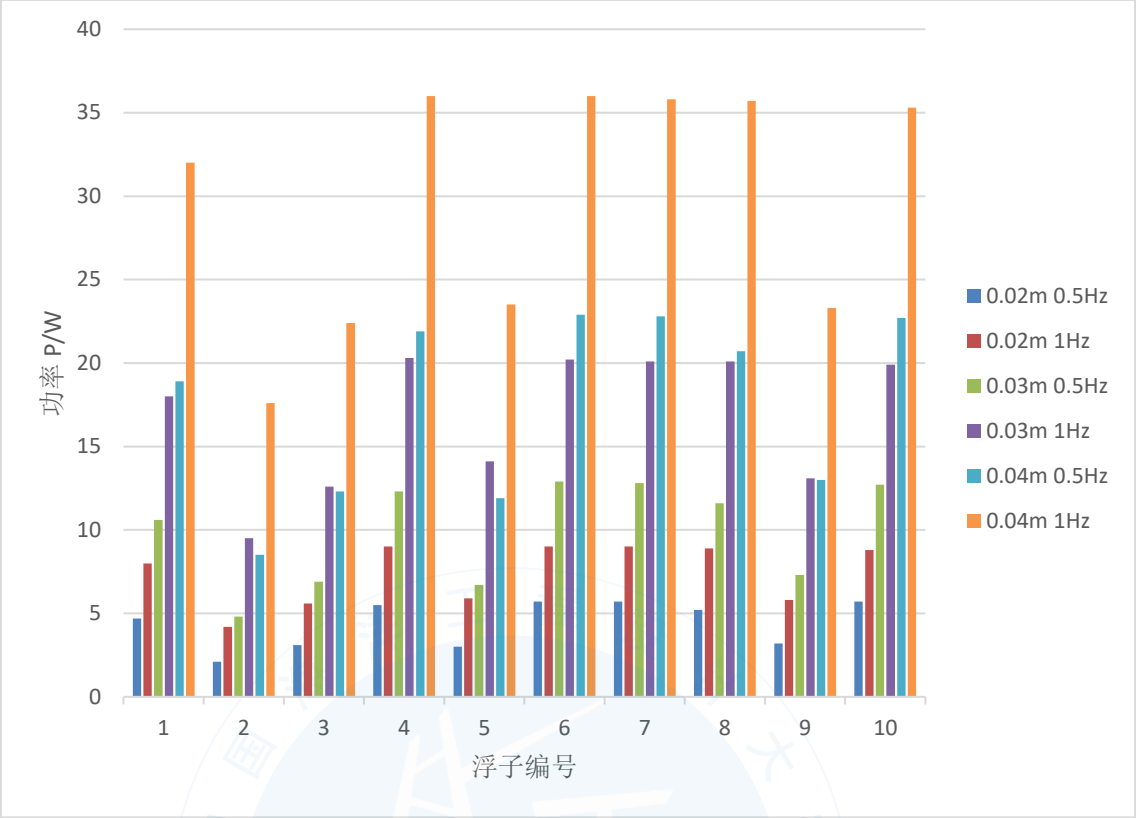


图 6.2.2

水池实验操作过程如下：对于任一浮子，将整个装置连接完好之后，开启造波机产生规则波，浮子在波浪的作用下带动直杆进行上下运动，所发出的电流经灯泡使得灯泡发光，与此同时通过示波器测量直线电机所产生的电压，以及电流的测量。对于三个浮子均重复以上过程。

6.3 实验结果

实验结果如下：经过我们的实验比较得出，三个所选择的浮子中，水动力学性能最优的浮子为圆柱与半球结合的浮子。

图 6.3.1

在大赛实施方案中规定的发电效率公式为：$\eta = \frac{\text{发电功率}}{\text{装机功率}} \times 100\%$，但我们认为此计算公式并不合理，目前被广泛认可的发电效率计算公式[5]为：$\eta = \frac{\text{发电功率}}{\text{理论发电功率}} \times 100\%$。以下给出发电效率的计算过程。

在规则波的情况下，波能量密度可由以下公式得出：

$$P_r = \frac{1}{8}\rho g H^2 c_g$$

其中c_g为群速度，在深水中可以表示为：

$$c_g = \frac{g}{2\omega}$$

算得波浪能流密度后，理论上波浪能发电装置的发电功率为：

$$P_0 = P_r * D$$

本实验中，我们取水的密度$\rho = 1 \times 10^3\ kg/m^3$, 重力加速度$g = 9.8\ m/s^2$, 波高$H = 0.1m$，角速度$\omega = 6.28\ rad/s$，浮子直径为$D = 0.1m$。由以上数据可得本实验条件下理论波浪能发电装置的发电功率约为$P_0 = 0.956w$。

由此计算发电功率：

$$P = UI$$

发电效率：

$$\eta = \frac{P}{P_0} \times 100\%$$

测得采用浮子一的发电装置的发电电压峰值为$U_{max1} = 3.72V$，则有效值为$U_1 = 2.631V$，测得电流值$I_1 = 0.1A$。

$$P_1 = U_1 I_1$$

$$\eta_1 = \frac{P_1}{P_0} \times 100\%$$

由以上得：

$$\eta_1 = 27.52\%$$

测得采用浮子二的发电装置的发电电压峰值为$U_{max2} = 1.84V$，则有效值为$U_2 = 1.301V$，测得电流值$I_2 = 0.07A$。

$$P_2 = U_2 I_2$$

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_0} \times 100\%$$

由以上得：

$$\eta_2 = 9.53\%$$

测得采用浮子三的发电装置的发电电压峰值为$U_{max3} = 1.92V$，则有效值为$U_3 = 1.358V$，测得电流值$I_3 = 0.09A$。

$$P_3 = U_3 I_3$$

$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_0} \times 100\%$$

由以上得：

$$\eta_3 = 12.78\%$$

7. 装置不足与改进期望

对于本装置的设计，我们只是对于外部因素，即浮子的外形这种物理条件以及能量输出的稳定性进行考虑，并未从电机控制的角度来解决优化问题。也就是说如果将可再生能源发电装置的发电过程分为三个部分，能量吸收，能量转化，能量输出，那么我们仅仅考虑了一三部分，并没有深入考虑第二部分。

进而我们存在一种从 PTO 力控制角度的一种思路，通过优化阻尼系数，从而使得电机更好地对于波浪能量进行转化。详细理论计算过程见附录。

7.1 不足：关于本实验发电效率的讨论

关于本实验发电效率最高计算值约为 27%，远小于现存波浪能发电装置（50%左右）的原因有以下几点：

1. 对于摩擦的处理不是十分恰当，本装置缺乏一种轴承式的装置用来更好地抵消由于波浪对浮子产生左右方向的力而使得直杆左右晃动并与定子之间产生摩擦的影响，虽然本实验中采用了向定子与动子之间涂抹润滑油以减小摩擦的方式，但仍旧无法很好地减小摩擦对于发电效率所带来的影响。
2. 关于效率的计算方式也会对于结果产生一定的影响，比如，本实验用实际的发电功率除以波浪的输入功率，对于输入功率的计算，会存在一定的误差，这是由于我们采用上文所提到的公式：$P_{ir} = 0.42{H_s}^2T_p \approx 0.5{H_s}^2T_m$ ，$P_1 = P_r * D$ ，其中H_s为有效波高，T_m为平均周期，T_p为谱峰周期，P_1为波浪输入功率，如此简化所得公式存在一定的误差，且由于造波器所产生的波浪在传播过程中的各种损失均会影响需要代入公式的有效波高，以上种种损失均会导致最终所计算发电效率偏小。

7.2 改进：关于稳定性处理方面的改进想法

关于稳定性的处理，我们有两种设想：

1. 与潮流能进行结合

   我们在实验之初设想将波浪能与潮流能发电进行结合，从而产生一种在其中一种能量处于较低值时另一种能量可以以其较高值进行补充，对于本装置来说，在同时存在两种能量的情况下，对相位进行控制便可达到目的，但由于我们所购买的抽水机在运行过程中出现一系列问题，并且所产

生的潮流在诸多因素的影响下，最终传导到旋转电机的部分已经非常微弱，故我们暂时放弃了对于二者进行结合的实验操作，但不失为一种在未来可以尝试的设想。

2. 利用稳压器进行处理

考虑利用稳压器提高装置发电的稳定性，但这种方案仅仅适用于在发电峰值已经达到一定规模，并且要把更多精力放在控制稳定性的装置。而对于本实验组所制作的装置，发电峰值并未达到一定规模，因此利用稳压器只会大大削弱发电效果，故在发电量与发电稳定性二者之间追求平衡的时候，本实验组选择了更倾向于前者。

3. 利用相变电流进行处理

可将交流电利用三相整流变换为直流电流[6]，从而大大提高稳定性。

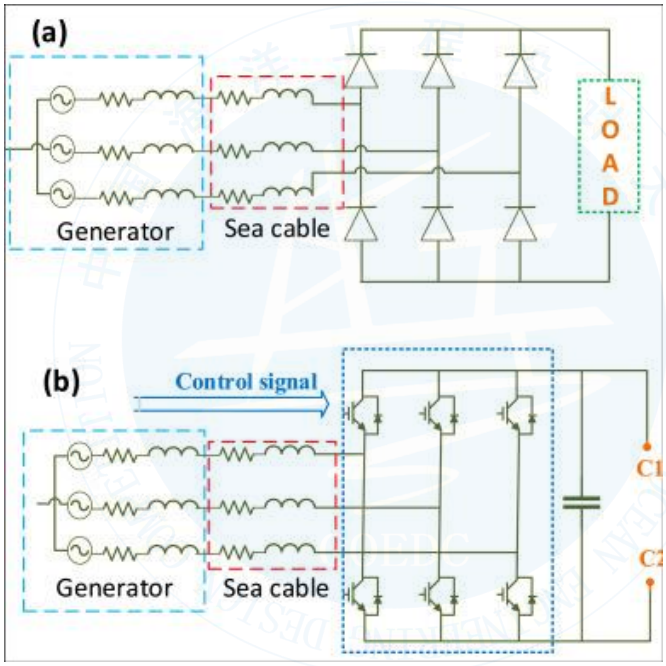


图 7.2.1

8．参考文献

[1] Iraide López, Jon Andreu, Salvador Ceballos, Iñigo Martínez de Alegría, Iñigo Kortabarria. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 413-434.

[2] Tunde A, Hua L.Ocean Wave Energy Converters: Status and Challenges[J]. Energies, 2018, 11(5):1250-.

[3] Qiu S.A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113((2019)109271).

[4] Raju Ahamed, Kristoffer McKee, Ian Howard. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review[J]. Ocean Engineering, 2020, 204(107248).

[5] Mahdi Nazari Berenjkoob, Mahmoud Ghiasi, C. Guedes Soares. Influence of the shape of a buoy on the efficiency of its dual-motion wave energy conversion. 2020.

[6] LiGuo Wang, MaoFeng Lin, Elisabetta Tedeschi, Jens Engström, Jan Isberg,Improving electric power generation of a standalone wave energy converter via optimal electric load control,Energy,Volume 211,2020.

9．附录（附前面内容的详细计算过程）

9.1 第 7 章不足与改进中计算过程

输入：

基于全局坐标系，（采用直角坐标系，在船尾设一坐标原点，x 轴指向船首，y 轴指向左弦，z 轴垂直于 x-y 平面并指向船体的反方向。），入射波以通用的形式可设为

$W\cos(\omega t+\delta)$（1）

其中，相位δ沿 z 轴，且在 X=Y=0 处有δ=0，此时入射波可写作$A\cos(\omega t)$（2）

其中，满足势流理论

$\nabla^2\Phi=0$（3）

$\Phi=\mathrm{Re}\left(\varphi e^{i\omega t}\right)$（4）

$\varphi_0=\frac{igA}{\omega}\frac{\cosh[k(z+H)]}{\cosh kH}e^{-ikx\cos\beta-iky\sin\beta}$（5）

求 RAO（幅值响应算子）

RAO=$(\frac{\xi_j}{A})^2$（6）

本文的传递函数定义为与某频率下的规则波的波高与该频率下的浮子位移响应的比值的倒数：

$\frac{\xi_j}{A}$（7）

且有，

$\overline{X}_i=\frac{X_i}{\rho gAL^m}$（8）

$\sum_{j=1}^{6}[-\omega^2(M_{ij}+M_{ij}^E+A_{ij})+i\omega(B_{ij}+B_{i,j}^E)+(C_{ij}+C_{ij}^E)]\xi_j=X_i$（9）

其中，M_{ij}^{E}、$C_{ij}+C_{ij}^{E}$均为 0，$B_{i,j}^{E}$为待优化系数，$L^{m}=1$。故有：

$$\frac{\xi_j}{A}=\frac{\overline{X}_i\rho g*1}{\sum_{j=1}^{6}[-\omega^2(M_{ij}+A_{ij})+i\omega\left(B_{ij}+B_{i,j}^{E}\right)+C_{ij}]}\quad(10)$$

(3) 求ζ_{z_n}

$$\zeta_{z_n}=\sqrt{2S_z(\omega)*\mathrm{d}\omega_n}\quad(11)$$

其中，

$$S_z(\omega)=|RAO|^2S_{PM}(\omega)\quad(12)$$

$$S_{\mathrm{PM}}(\omega)=\frac{1.25\omega_{\mathrm{p}}^{4}\mathrm{H}_{\mathrm{s}}^{2}}{4\omega^{5}}\exp\left(\frac{-1.25\omega_{\mathrm{p}}^{4}}{\omega^{4}}\right)\quad(13)$$

求平均功率$\overline{P}$：

由前面所设的波浪输入及运动输出响应可得浮子位移表达式为：

$$\zeta_{zi}=\sum_{n=1}^{N}\zeta_{z_n}\cos\left(\omega_n t_i+\epsilon_n\right)$$，其中 $$\epsilon_n=\arctan\left(\frac{-mb\omega_n^3}{(c-a\omega_n^2)[c-(m+a)\omega_n^2]+(b\omega_n)^2}\right)0\le\epsilon_n\le2\pi\quad(14)$$

其中，由于本文选择处理方式是对每个时间点进行计算（例如：for t=1:1:150），故不涉及对 t 的积分.

$$\dot{\zeta}_{zi}=\sum_{n=1}^{N}-\zeta_{z_n}\omega_n\sin\left(\omega_n t_i+\epsilon_n\right)\quad(15)$$

对于每个线性阻尼项，都有一个

$$\overline{P}=\frac{\sum_{i=1}^{150}\mathrm{b}*\dot{\zeta}_{zi}^{2}}{150}\quad(16)$$

最大平均功率对应的阻尼即为最优线性阻尼项。

2.波浪能发电装置平均功率详细计算

首先，设置环境参数，即规则波下的周期及波高；

接着，根据波浪能装置中浮子的几何参数，利用势流理论及波浪理论，计算得到波浪能装置中浮子的水动力系数；

然后，利用所述水动力系数、运动方程计算得到波浪能装置的总发电功率的时间平均值的最大值；

最后，采用优化算法，以总发电功率的时间平均值的最大值为评价标准对所述浮子形状参数进行优化

其中，浮子的形状参数包括浮子的尺寸参数、吃水深度参数。本案例所采用的优化算法为遗传算法。

在前一小节中，已设置环境参数，即设置规则波波高$\mathrm{H}=0.05\mathrm{m}$，周期$T=1s$。根据每个波浪能吸收体中浮子的初始几何参数，利用水动力学软件 WAMIT 计算得到每个波浪能吸收体中浮子的水动力系数。

将所得出的水动力系数代入以下公式，可以得到浮子在频域下的位移函数：

$$\xi_j(w)=\frac{A*F_{ext}(w)}{\sum_{j=1}^{6}[-\omega^2(M_{ij}+A_{ij})+i\omega\left(B_{ij}+B_{i,j}^{F}\right)+\tau_{ij}]} \qquad (17)$$

上式中A为振幅，即波高的一半，为 0.025m。对于本案例设置的周期$T=1s$，$\omega=2\pi\ \mathrm{rad/s}$。将浮子在频域下的位移函数求一次导数，得到波浪能装置在频域下的速度：

$$v(w)=i\omega*\xi_j(w) \qquad (18)$$

根据以下公式，将频域下的速度转换为时域下的速度：

$$v(\mathrm{t})=\mathrm{Re}[v(w)*\exp(i\omega t) \qquad (19)$$

根据每个能量转换系统的线性阻尼项，计算波浪能发电装置的发电功率的时间平均值$\overline{P}$：

$$\overline{P}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T b*v(t)^2\,dt \qquad (20)$$

其中$\overline{P}$为每个波浪能吸收体的发电功率的时间平均值，b为能量转换系统的控制阻尼。将每个波浪能吸收体的发电功率的时间平均值累加，得到一基多体式波浪能发电装置所输出的总发电功率的时间平均值。采用优化算法同步得到一基多体式波浪能发电装置所输出的总发电功率的时间平均值最大时各个浮子对应的最优控制阻尼。

最后，采用优化算法，以总发电功率的时间平均值的最大值为评价指标对浮子

的几何参数进行全局优化，得到总发电功率的时间平均值最大时浮子的最优形状参数。

团队编号：__A20200705_____

第二届中国海洋工程设计大赛

决赛设计说明书

设计制作组

完成日期　　2020　年　11 月　18　日

中国海洋工程设计大赛组委会制

目　录

第 1 章　发展现状及发展前景.....1

1.1　发展现状.....2

1.2　发展前景.....2

第 2 章　设计图纸与实施方案.....3

第 3 章　发电功能原理创新.....1　1

第 4 章　设计成果的实现及应用的可行性.....1　7

附　录　振荡水柱装置发电原理的势流理论解释.....1　8

一．发展现状及发展前景

1.1 发展现状

振荡水柱式波浪能发电装置内的水柱在波浪的作用下做上下往复运动，水柱的作用类似于活塞，水柱的不停运动导致水柱自由表面上部的空气柱产生振荡运动，空气在气室上方的出气孔流经一个往复透平，从而将高速空气的动能转换为电能。振荡水柱式波浪能装置较其他波浪能装置最大的区别就是具有气室。所谓气室就是指一个结构，其下部有一开口浸在海水里，使海水能够自由地进入气室内。本设计提出的振荡水柱式发电装置主要由四个放置于四周的浮筒、气室结构及顶部的新型发电装置构成。外部波浪的作用将激励气室内俘获流体发生周期性的运动并形成振荡水柱，进而驱动气室内外气体进行交换并带动空气透平进行旋转运动，发电机在空气透平的带动下旋转发电。

相比于其他的新能源发电领域，波浪能发电发展的较为缓慢。法国是最早对波浪能发电开展研究的国家，随后多个国家和地区相继开展对波浪能的研究工作，其中日本已经具有波浪能发电装置的发电站在日本已达 1000 余座。由日本海洋科学技术中心研制的“巨鲸”号波浪发电装置为可动式浮体型，也是波浪能发电装置中的佼佼者。英国是世界上具有最好波浪能源的国家之一，英国的波浪发电装置每年可以从英国的周边海域收集高达 50TW·h 的能源。出众的地理资源优势，再加上因政府对海洋能源前瞻性认识而加大的研究力度，使英国在 20 世纪 80 年代时就已成为世界波浪能及其发电装置研究制造领域的领头羊。挪威是对海洋波浪发电展开研究与探索较早的国家之一，由该国发现并提出的相位控制原理以及创造的喇叭形收缩波道式发电装置等，都对波浪发电装置的理论研究及其设计制造做出了不可磨灭的贡献。

中国海域广阔，波浪能资源丰富，但是波浪能的分布不均匀，不同海域季节变化亦很大。我国近代的波浪能研究始于 1968 年，航空工业部 623 所的樊世荣研

究了基于水翼原理的波浪能资源发电装置。1980 年开始波浪能资源发电装置的研究发展迅速，中国科学院广州能源研究所、中国海洋大学、华南理工大学、国家海洋技术中心和中船重工第 710 研究所等开始从事波浪能利用技术研究，其中研究的波能装置主要包括：固定式振荡水柱、漂浮式和摆式等波能装置**错误!未找到引用源。**。其中小型固定式和用于航标灯的波浪能发电装置已进入商业化运行阶段。

现实中振荡水柱主要有三种存在方式。在浅水区域振荡水柱装置主要为岸壁式和与防波堤集成式，比如在重力沉箱基础上进行集成、在单桩基础上进行集成等。在深水区域，由于成本的限制，传统的固定式不再适用，主要为漂浮式。所以提出了一种漂浮式的振荡水柱发电装置。

1.2 发展前景

海洋波浪能是取之不尽、用之不竭的清洁能源，具有资源分布广泛、能流密度大、技术环境友好等优点。开发和利用海洋波浪能对缓解能源危机和环境污染问题具有重要的意义，随着化石燃料的日益枯竭，可再生能洋波浪能开发利用发电领域走进了人们的视野。目前世界上多个国家都对波浪能的开发和利用投入了大量的人力物力，并开发出了不同形式的波浪能发电装置。特别是海洋波浪能资源丰富的国家，大力鼓励海洋波浪能发电技术的发展。由于海洋波浪能能发电系统的运行环境恶劣，与其他可再生能源发电系统，如风电、光伏发电，相比发展相对滞后，甚至滞后于潮汐能和潮流能技术。但是随着相关技术的发展，以及各国科技工作者的努力，近年来，海洋波浪能发电技术取得了长足的进步，已有试验电站进入商业化运行。可以预见，不远的将来，随着海洋波浪能发电技术日益成熟，将会有越来越多的海洋波浪能发电系统接入电网运行。由于海洋波浪能蕴藏量巨大，必将成为能源供给的重要组成部分。

高效的开发和利用波浪能对偏远岛屿的居民及海洋设备来说具有重要的意义。波浪能发电装置通常可以分为振荡浮子式、摆动式、越浪式以及振荡水柱式等。其中振荡水柱式波浪能发电是目前最为成熟的波浪能发电装置之一。基于振荡水

柱式波浪能发电原理，本文设计了一种新型的波浪能发电装置。

该装置可以让振荡水柱装置在不借助蓄能系统的情况下达到连续稳定发电。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

二．实施方案与设计图纸

2.1 设计方案：

如下图所示，该漂浮式波浪能发装置其结构包括新型的发电装置、气室结构、浮筒组成；图中个标号表示含义如下：

1 表示浮筒

2 表示发电装置

3 表示气室

4 表示连接板

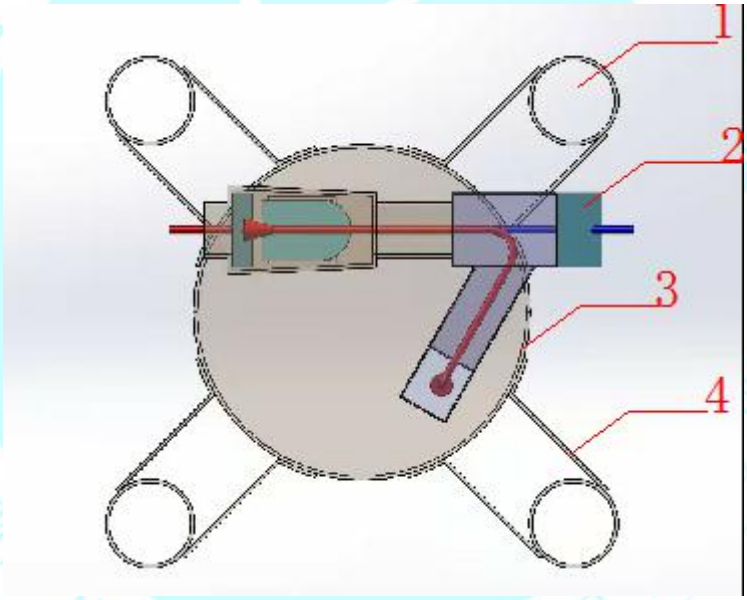


图 2.1 结构示意图

结构的长度和宽度均为 64 厘米，高度为 58 厘米. 浮筒与气室之间通过连接板连接，浮筒、气室结构及连接板均采用亚克力板制作，强度满足要求。连接板为长 20 厘米，宽 5 厘米，后 0.5 厘米的亚克力板，在距离一端 5 厘米处加热折为 L 型板。浮筒为直径 12 厘米，高 30 厘米，底部密封，上部开口并备有盖子。可以通过装压载水，来调整吃水。

图 2.2 结构的长度和宽度总体尺寸

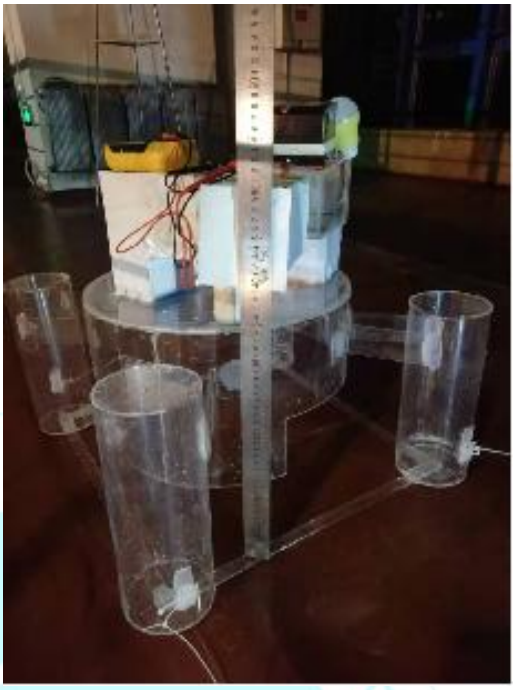


图 2.3 结构的高度尺寸

气室结构为直径 45 厘米，变高度的圆管，上部与直径 45 厘米，后 0.5 厘米的圆板拼接，圆板上开有两个矩形孔与发电装置连接。气室结构一半为 15 厘米高，一半结构为 25 厘米高（置于背浪侧，充当聚波板）

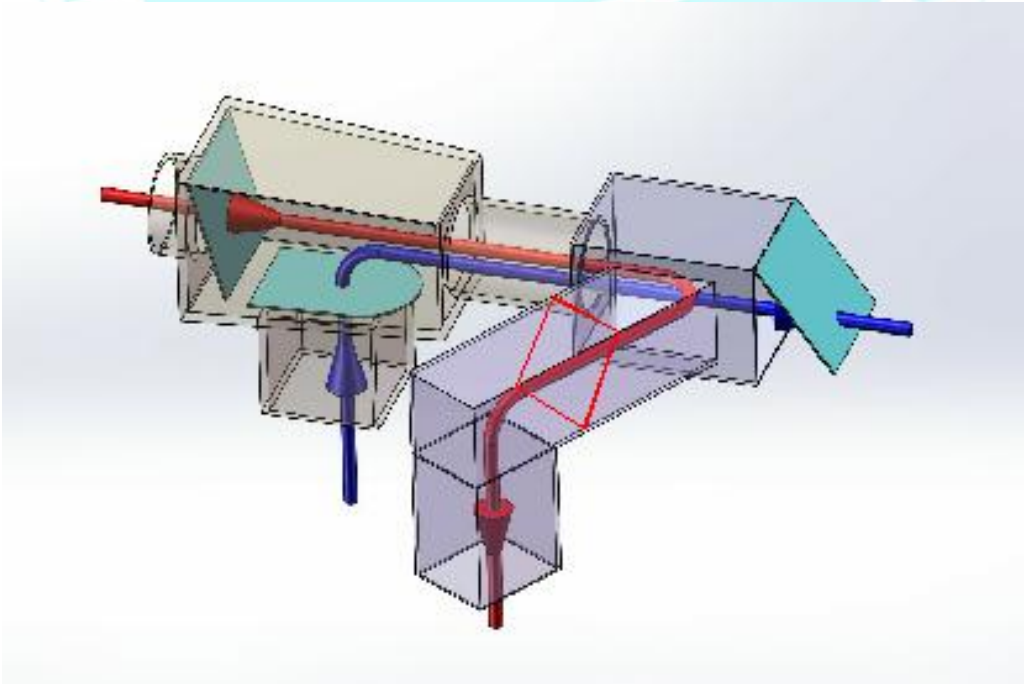


图 2.4 通气管道整体示意图

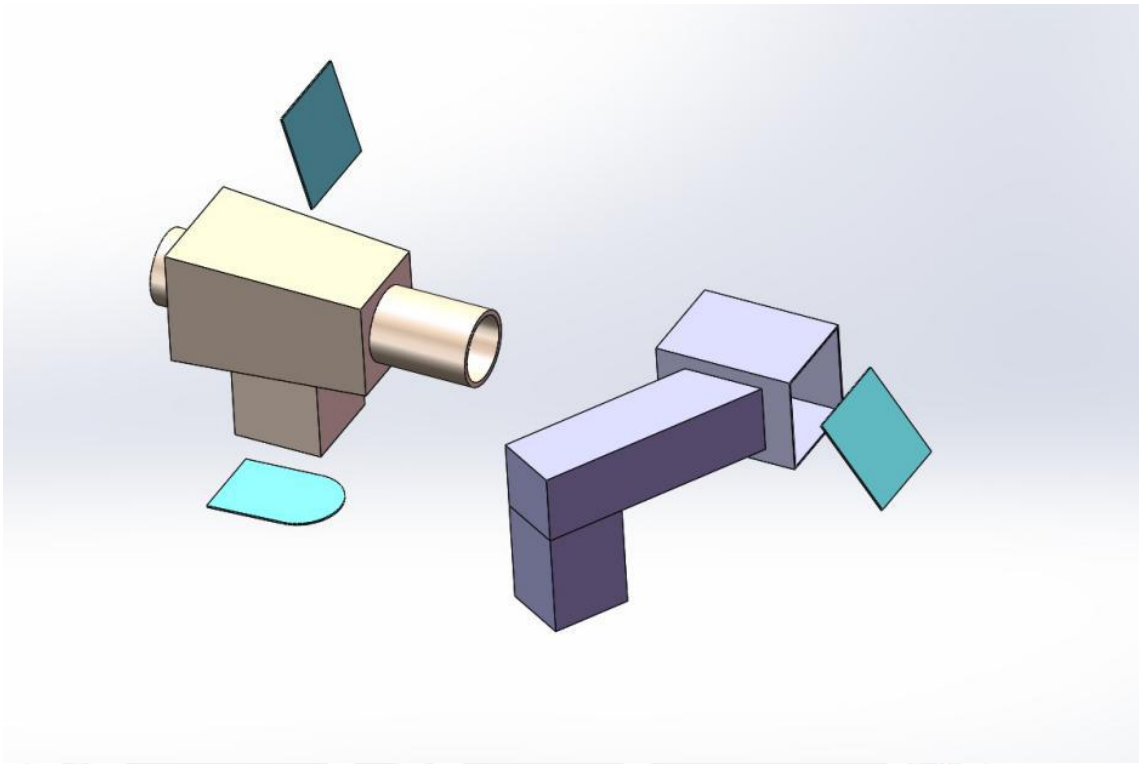


图 2.5 通气管道分开示意图

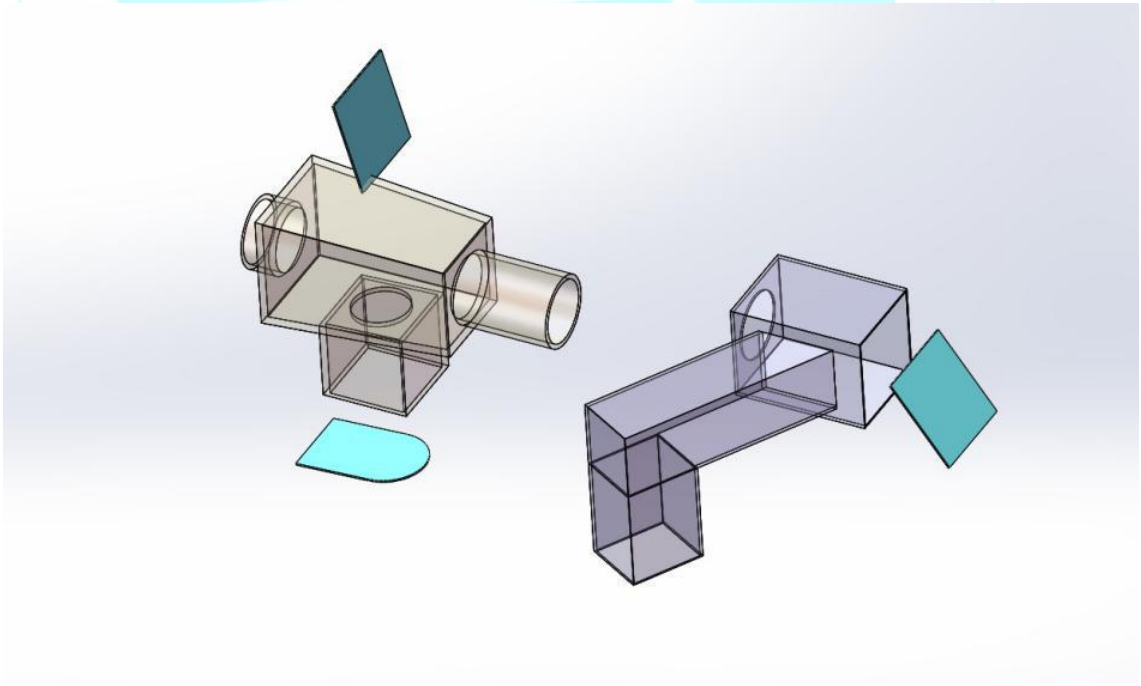


图 2.6 通气管道分开透视示意图

上部的发电装置由多个零部件组成：如图 2.5 所示，通气管道可以分为以下两

部分。左面部分使用亚克力板制作，右面部分使用铝塑板制作将左右两个部分结合在一块，就是完整的发电装置的整体构架。

左边可主要拆分如下：

1. 由一个长 10 厘米，宽 10 厘米，高 10 厘米的立方体壳组成，底部敞开，上部开直径 8 厘米圆孔。

2. 由一个变截面长方体壳组成，一端截面为边长为 12 厘米正方形，中间开孔 8 厘米，一端为边长 10 厘米正方形，中间开孔 8 厘米。一侧边开直径 10 厘米圆孔。在该结构的左边连接由一直径为 8 厘米的圆筒，圆筒内放有发电机。

图 2.6 的右半部分可分为两部分组成，第一部分由为长方体壳，右边敞开，左边一面开直径 8 厘米圆孔，正面开 7 cm × 9 cm 开矩形孔。另一部分可以是一个 L 型的截面为矩形的管道，以上就是整个装置的构成组件的细部图。

2.2 实施方案：

气室位于水面并部分浸没在水中。通过对浮筒进行加压载水进而调整结构的吃水。

本发电装置的能量转化工作主要有三次： (1)第一次能量转换，主要通过气室将波浪能转换为空气流的能量; (2)第二次能量转换，主要通过空气透平将气流能量转换为电机.转轴的轴功; (3) 第三次能量转换，主要通过发电机将转轴轴功转换为电能。而在波能转换的过程中最关键的第一次能量转换和第二次能量转换。

本装置工作过程如下：受入射波浪的影响，振荡水柱装置气室内俘获流体将发生周期性的运动并形成振荡水柱，气室内波浪的往复运动将驱动气室内外气体进行交换进而带动空气透平进行旋转运动，安装于通气管道内部的发电机在气流的带动下旋转发电。

我们可以根据入射波浪，科学优化选取振荡水柱装置的相关性能设计参数，如气室截面尺寸、输气管道截面尺寸、发电机转速以及攻角等。

气室内水面有一个固定的波动频率，冲入气室的水碰到气室后壁反射回来，

如能和下降水面同向，将会与波浪共振，选择合适的气室尺寸可以使室内水面振荡与外面波浪频率相近，共振的水面波动幅度会远高出波浪的幅度，大大提高气体的流量从而提高系统效率。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

三．发电功能原理创新

本设计最成功的的地方在于让发电机始终处于高速转动状态，可以使得振荡水柱式波浪能发电装置实现不间断发电，在脱离蓄能系统的情况下能够比较稳定的供电。

该漂浮式波浪能发装置其结构包括新型的发电装置、气室、浮筒组成；

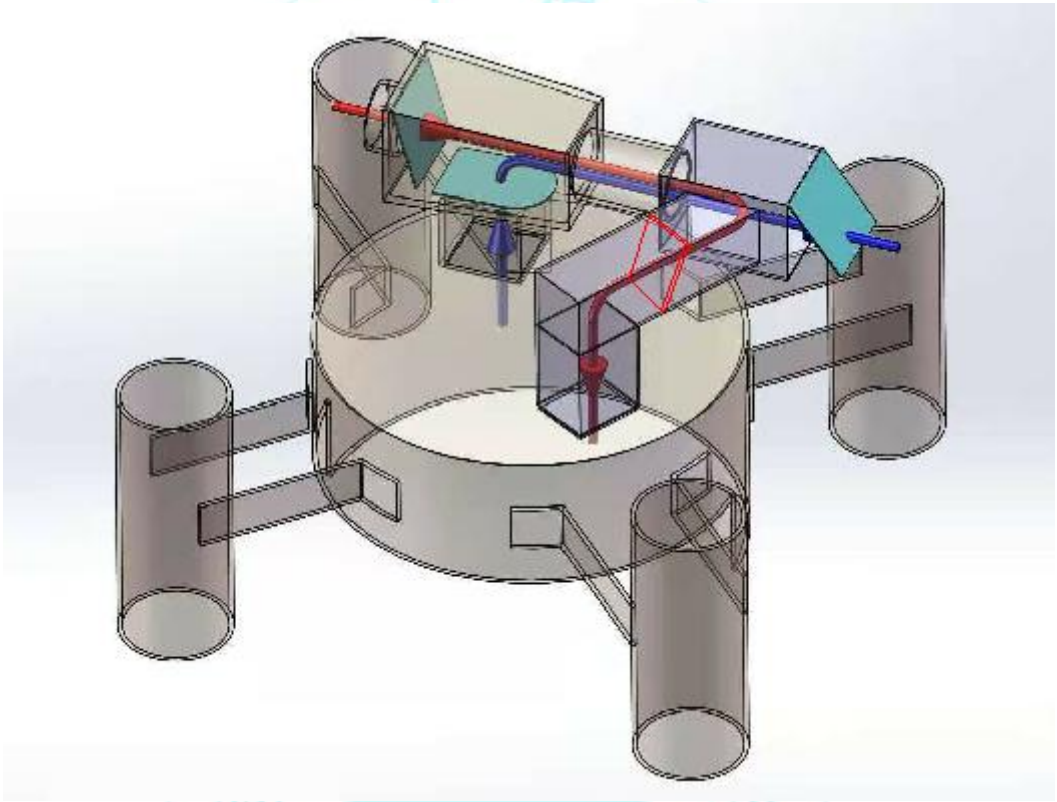


图 3.1 振荡水柱式波浪能发电装置示意图

在这个模型中，我们采用了新型的发电装置，使得发电机能始终保持相当高的转速而没有停歇。新型发电装置相比于传统的威尔士透平大大减少了能量损失。

威尔士透平原理：当入射波浪向着气室移动，当波峰接近气室前壁时，水进入气室，推动气室内水位上升，上升的水位使气室内气压增加，气室内空气通过出入孔排出，由于气孔狭小，气体高流速喷出。在波谷接近气室前壁时，水从气室内抽出，气室内水位下降，下降的水位使气室内气压降低，外面空气通过出入

孔高速进入气室，流出流进的气体将足以推动涡轮机旋转，这就把波浪能转换为机械能。

我们分析一个波浪周期内的威尔士透平的工作状态：当气室内波面升高时，气室内部气体受压向外部流动，假设此时威尔士透平顺时针旋转发电。当气室内部水面下降时，外部气体流入气室，此时威尔士透平在由于上半个周期内做顺时针旋转，由于惯性的作用，仍处于顺时针旋转的状态，此时外部气体进入气室需要消耗一部分能量使得发电机叶片停止顺时针旋转，然后在驱动发电机叶片逆时针旋转发电。这是一个周期内的状态，之后每一次气流方向改变都会损失很多的能量。如此累加就耗费的能量非常可观。

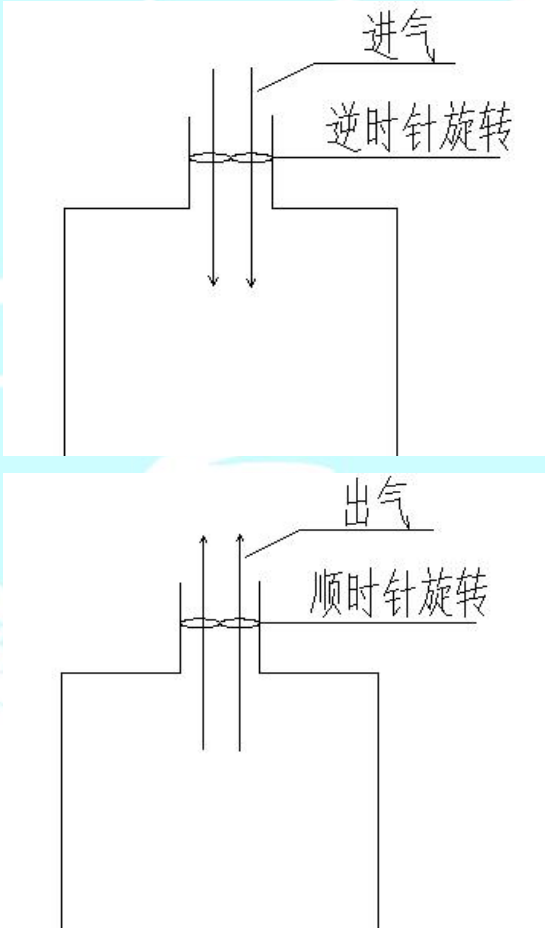


图 3.2 威尔士透平示意图

相比于传统的威尔士透平会有转向的改变，新型的发电装置没有转向的改变，发电机始终保持一个方向的连续高速转动。将以下图为例进行说明：

以图 3.3 为例分析，有四个挡板，这四个挡板是单向通气板，只允许气体单向通过。以挡板 3 为例，挡板 3 尺寸略大于左侧通气管道尺寸，只能向右打开，允许气流出来，不能向左打开，允许气流进去。其他三块挡板也同理。这里我们以一个波浪周期去分析。首先，水面平静时，内外气体均等于大气压。当波浪到来，气室内波面升高，气室内气压增大，大于大气压，在压力差的作用下，挡板 2 打开，气体进入通气管道，此时管道内气压大于外界大气压，挡板 1 紧闭，不允许气体通过，气体只能向右流动通过发电机，此时挡板 4 下部气压约等于气室内气压，大于管道内气压，挡板 4 紧闭，不允许气流通过。挡板 3 左侧气压大于右侧气压，挡板 3 打开，气流出去。当气室内波面下降时，气压低于管道内气压，挡板 1 紧闭，不允许气流通过。挡板 4 打开，允许气流进入气室。挡板 3 左侧气压低于右侧气压，挡板 3 紧闭，不允许气流进入。挡板 2 左侧气压高于右侧气压，挡板 2 打开，气体进入。这样就实现了进出气流均使得发电机同向旋转。能有效利用进出气流的能量，提高发电系统的整体经济价值。

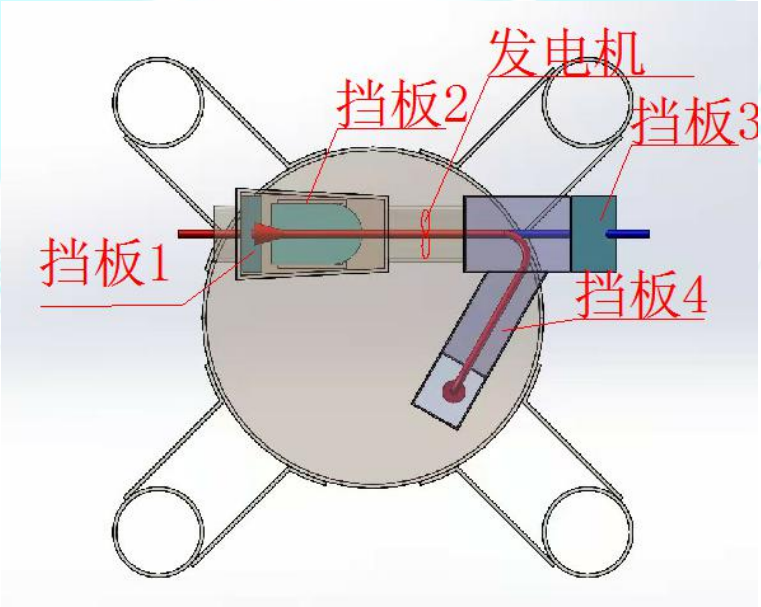


图 3.3 振荡水柱式波浪能发电装置细部结构示意图

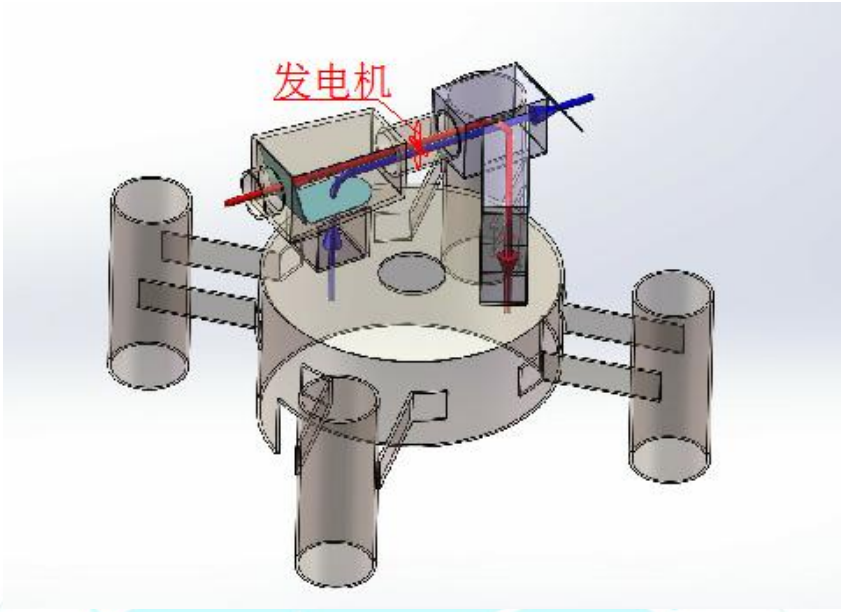


图 3.4 振荡水柱式波浪能发电装置气体流向示意图

图 3.4 中蓝色线条表示气流流出路径，红色线条表示气流流入路径。可以看出流出气流与流入气流均同向通过发电机。

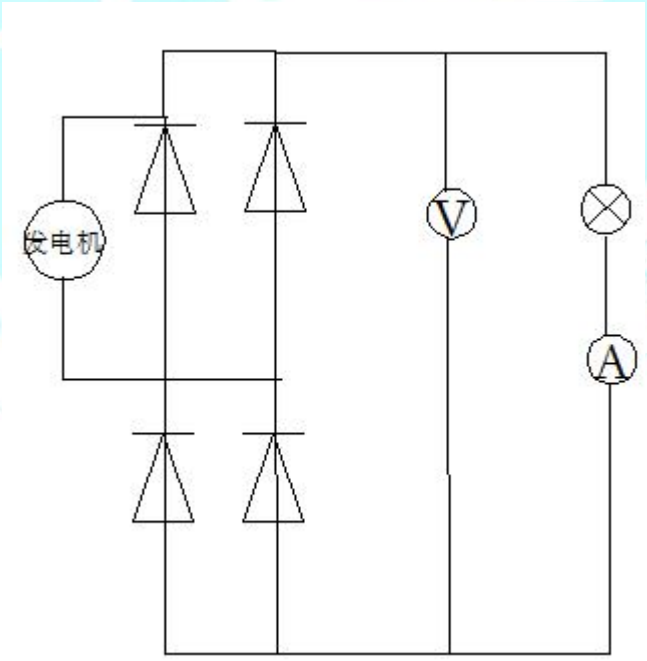


图 3.5 电路连接示意图

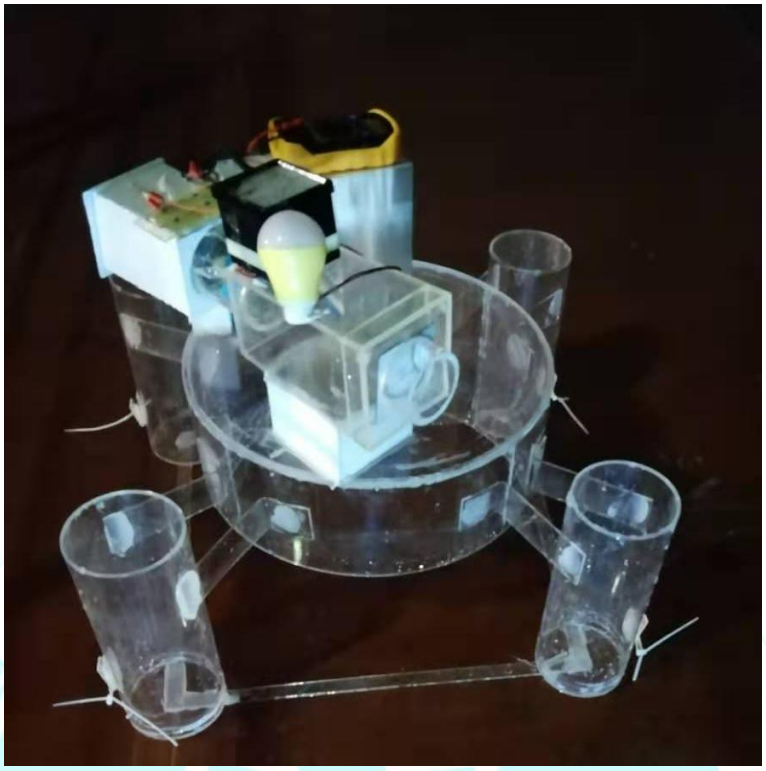


图 3.6 电路连接实物图

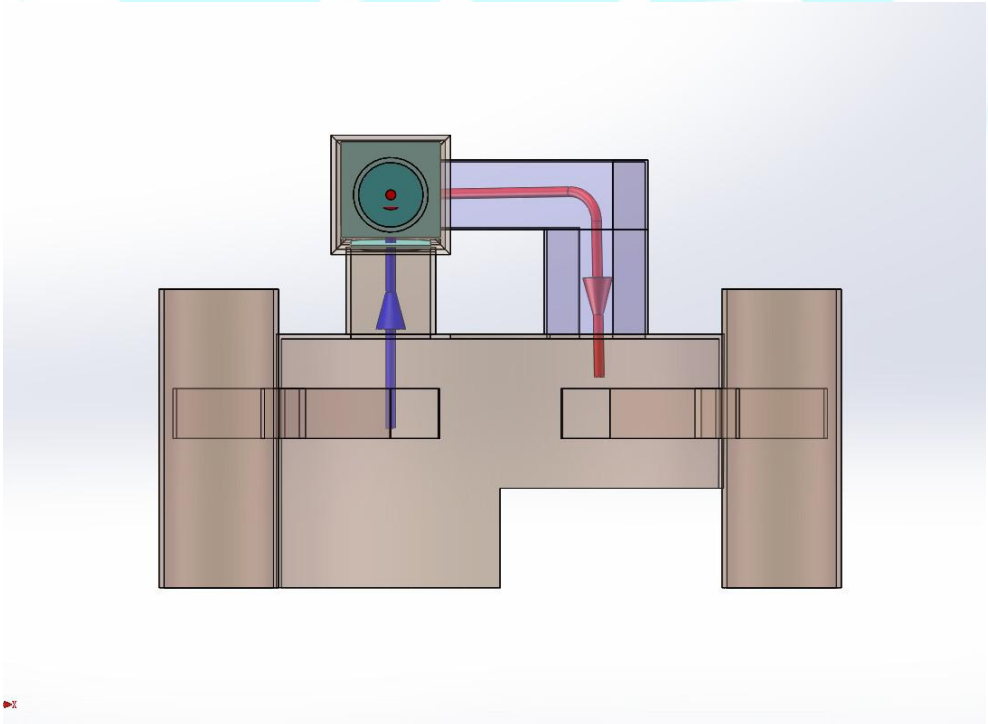


图 3.7 发电装置侧面示意图

图 3.5 中连接有四个二极管，因为是交流电机，发出的电是交流电，这里我们

运用二极管的单向导电性将电压函数由$U = E\sin\omega t$变成了$U = E|\sin\omega t|$，可以有效消除因为交流电电压正负变化导致灯泡明暗变化。其次，我们通过增大发电机叶片的转动惯量，有效解决了因为波浪周期性变化产生的进出气流转换期间发电机转速下降过快的问题，经过试验发现进出气流转换期间，发电机转速存速良好。

为了提高对波能的俘获效率，在这个模型中增加了聚波板，当波浪从右侧入射时，由于聚波板的作用，波面会大幅升高，挤压气室内的空气，加速发电机的转动。能有效提高波能转化效率。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

四．设计成果的实现及潜在应用的可行性分析

应用了新型发电装置的漂浮式波浪能发电装置，与传统的威尔士透平相比，在波能转化方面拥有绝对的优势，可广泛应用于我国东部沿海丰富波浪能的开发，并且适合于中小型偏远海岛的电力供给。其优点在于结构简单，方便于维护，不用考虑海底地形条件，在海水中适应性好，对于近海和远海条件均适用。

图 4.1 南海永暑礁

像这种远离大陆的岛屿采用远距离输电成本相高昂，发展新能源是一个不错的解决办法。该新型的波浪能发电装置发电相对稳定，与太阳能发电相结合不失为解决供电难的一个好办法。

附录：振荡水柱装置发电原理的势流理论解释

假定流体是无粘性的、不可压缩的，具有恒定的密度 ρ，流体运动是无旋转的，并且波陡较小。然后利用线性势流理论，存在速度势 ϕ 在整个流域内满足拉普拉斯方程。系统的入射波沿着 x 轴正向传播，波幅为 A, 频率为 ω，波数为 k_0. 波数 k_0 和角频率 ω 间满足色散方程, 速度势可以分离时间因子，速度势将有如下形式

$$\Phi(\mathbf{x};\, t) = \mathrm{Re}\left[\phi^{(1)}(\mathbf{x})\, e^{-i\omega t}\right], \tag{A1}$$

除满足拉普拉斯方程外，速度势还必须满足适当的边界条件。气室内包围了一个内部自由表面 S_i。S_i 上分布的气体压强为 $P_0 + P_c(t)$，其中 P_0 为大气压强，$P_c(t)$ 为与入射波频率相同的振荡气压。$P_c(t)$可以写成如下形式

$$P_c(t) = \mathrm{Re}\left[p_c e^{-i\omega t}\right]. \tag{A2}$$

与此同时，在外部自由表面上只有恒定的大气压 P_0。在水动力分析中，应考虑振荡空气压力的影响。在平均自由表面 $z = 0$ 上，可以得到以下运动学和动力学组合边界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi = \frac{i\omega}{\rho g} p_c, \quad \text{在} S_i \text{上;} \tag{A3a}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi = 0, \quad \text{在} S_e \text{上.} \tag{A3b}$$

在发电系统的物体表面 S_b 上，应满足的边界条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad \text{在} S_b \text{上,} \tag{A4}$$

其中，$\mathbf{n}$ 为物体表面的单位法向量。同理，在不透水海床($z = -d$)上的边界条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{在} z = 0 \text{上.} \tag{A5}$$

在距离结构较远时，必须满足 Sommerfeld 辐射条件, 即为

$$\lim_{r\to\infty} \sqrt{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}(\phi - \phi_I) - i\kappa_0(\phi - \phi_I)\right] = 0, \tag{A6}$$

其中，$\phi_I(\mathbf{x})$表示入射速度势，其表达式为

$$\phi_I(\mathbf{x}) = -\frac{iAg}{\omega}\frac{\cosh\kappa_0(z+d)}{\cosh\kappa_0 d}\mathrm{e}^{i\kappa_0 x}. \tag{A7}$$

气动压强p_c在气室内部可以认为是均匀分布的。我们假设p_c是线性依赖于腔内的体积通量，进而可以得到

$$q_c = -i\omega\iint_{S_i}\eta ds = \iint_{S_i}\frac{\partial\phi}{\partial z}ds, \tag{A8}$$

以及

$$p_c = \Lambda q_c. \tag{A9}$$

Λ是气室内部的空气体积流量通过空气透平的气动阻尼系数，我们考虑气动阻尼系数Λ是一个实数，这意味着体积通量和气动压力间不会存在明显的相位差。式(A3a)进而可表示为

$$\frac{\partial\phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g}\phi = \frac{i\omega\Lambda}{\rho g}\iint_{S_i}\frac{\partial\phi}{\partial z}ds, \quad \text{on } S_i. \tag{A10}$$

装置的波浪能俘获效率W_c可根据单位时间由振荡空气压力推动空气通过空气透平所做的功来确定，即为

$$W_c = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[p_c q_c\right] = \frac{1}{2}\Lambda\left|q_c\right|^2. \tag{A11}$$

团队编号：A20200114

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

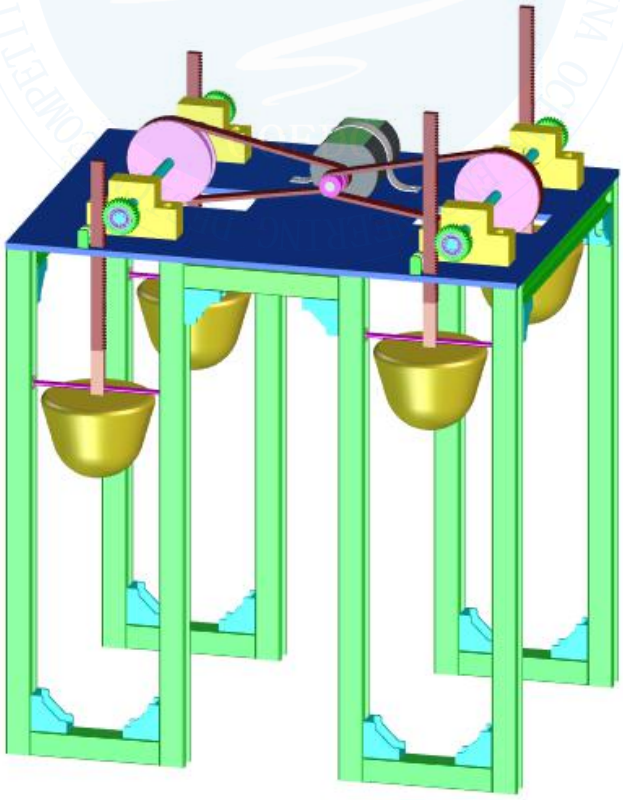
设计制作组

完成日期　2020 年 11 月 16 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本作品主要由支架平台、锥形浮子、传动结构和稳压电路等部分组成，整体装置尺寸为 0.4m*0.3m*0.45m。其中支架平台模仿导管架平台设计，若运用于实际工程中，可将该发电装置直接安装在导管架平台上；运用 AQWA 软件对不同浮子形状进行水动力学分析，得出锥形浮子适用于高频率水域；在浮子上增加横杆用来抵消连杆运动时受到的弯矩，在横杆两端安装轴承，减小横杆运动时与支架之间的摩擦阻力；传动机构包括齿轮齿条、单向轴承和啮合型带传动结构，将四个浮子吸收的波能传递给发电机进行发电，齿轮齿条结构将直线运动转化为旋转运动，单向轴承能够避免浮子下降时对传动轴动能的抵消，啮合型带传动结构能够增大传动比，其中大带轮还起到飞轮作用；稳压电路能够稳定和调节输出电压，对用电器起到保护作用；为减小齿条与平台之间的摩擦，在齿轮与齿条啮合的另一侧设置一轴承。



目 录

第 1 章 总 论 1
1.1 研究背景及意义 1
1.2 国内外发展现状 1
1.2.1 国外典型的波浪能发电装置及发展现状 1
1.2.2 国内典型的波浪能发电装置及研究进展 3
第 2 章 常见的波浪能发电装置原理简介 5
2.1 摆式波浪能发电装置 5
2.2 筏式波浪能发电装置 5
2.3 振荡浮子式波浪能发电装置 5
2.4 点头鸭式波浪能发电装置 5
2.5 振荡水柱式波浪能发电装置 6
2.6 越浪式波浪能发电装置 6
2.7 海蛇式波浪能发电装置 7
2.8 海上发电船 7
第 3 章 方案论证与水动力学分析 8
3.1 浮子摇摆运动发电装置 9
3.2 “天平式”发电装置 9
3.3 浮子上下运动发电装置 11
3.4 浮子形状选择 12
第 4 章 模型数字化样机设计 14
4.1 支架平台设计 14
4.2 浮子设计 14
4.3 传动结构设计 15
4.4 稳压电路的设计 16
4.5 整体模型 18
第 5 章 波浪能与发电效率计算 20
5.1 波浪能吸收效率计算 20
5.2 装置发电效率计算 21
总 结 23
参考文献 24

第 1 章 总　论

1.1 研究背景及意义

波浪能是海洋能中最主要的能源之一，其波能能量密度高，是风能的 4~30 倍，且其受天气影响较小。中国沿海波浪能平均理论功率高，约是中国电力常量一半。但是现有的波浪能发电设备往往只能对波浪能的某一种形式进行收集，且多是早期的设计，结构笨重，转换效率低，约为 10%~35%[1]。

海洋浮标等离岸海洋观测设备无法通过电缆供电，大部分是靠蓄电池或者是太阳能供电。而蓄电池的容量有限，不能够实现长时间稳定供电；太阳能依赖于海上天气情况，如果长时间阴天则不能储能供电。这些已有的供电设备不能满足海洋观测设备长时间稳定的供电要求，维护使用时间短。因此，为海洋观测设备提供稳定且长时间供电的问题需要亟待解决。

1.2 国内外发展现状

波浪能利用技术最早可追溯到 1799 年，法国的吉拉德父子获得了第一个波浪能转换系统的专利。1940 年，日本的 Yoshio Masuda 第一个将漂浮的振荡水柱并入航海浮标灯中，这也是现代波浪能系统的先驱随着能源需求的增长，许多国家越来越重视波浪能发电技术的研发。据统计，自 2015 年以来，全球在欧洲、美国、日本、中国和亚洲开发的项目超过 100 个，专利超过 1000 项目。随着新概念和新技术的发展，这一数字还在不断增加[2]。

1.2.1 国外典型的波浪能发电装置及发展现状

超过 50%的波浪能发电装置是由欧洲国家研发的，大部分集中在点吸收式系统上。此外，美国、新西兰、智利、日本等国家也在大力研发波浪能发电技术。振荡水柱式波能发电装置因其结构简单，可靠性高而被广泛研究。到目前为止，已经有很多振荡水柱式装置被开发出来。其中比较著名的有 Mighty Whale、LIMPET、Mk3 等。Mighty Whale 由日本海洋科学技术中心研发，是一种具有面向入射波进水导管的振荡水柱式装置，于 1998 年 9 月至 2002 年 3 月进行了约 3.5 年的海上试验；第一台商用的 LIMPET 装置于 2000 年安装在苏格兰的 Islay 岛海岸线上，自安装以来，它能够为国家电网提供每月 500kW 的电力日；澳大利亚 Oceanlinx 公司于 2010 年 2 月至 5 月在澳大利亚 Kembla 港附近部署了一个 2.5 MW 全尺寸 Mk3 装置的并网模型，Mk3 是一个浮动平台，拥有几个气室，每个室都有一个空气涡轮机。在试验期间，只安装了 2 台不同类型的涡轮机。此外，荷兰波浪能开发公司基于阿基米德波浪摆(AWS)开发了一种新型波浪能转换装置，

称为 Symphony。新开发的 Symphony 由一个多功能膜和一个新型涡轮组成。目前，Symphony 系统仍在开发中，正在等待部署。BBDB 是在传统振荡水柱技术的基础上发展起来的一种漂浮式装置，最早由 Masuda 于 1986 年提出。该装置由一个 L 形导管、一个浮力模块、一个气室、一个空气涡轮和一个发电机组成。与其他的波浪能转换装置相比，BBDB 具有单浮体结构简单、成本低、转换效率高等优点。近些年来，很多国外的研究者都对不同模型的 BBDB 做了二维及三维的水槽试验。常规波浪试验结果表明，基本 BBDB 模型在二维波浪水槽中的捕能宽度比可达 70%，在三维波浪水槽中的捕能宽度比可达 108%。2006 年，基于 BBDB 原理开发的 OE Buoy 在爱尔兰海岸用一个 28t 重的 1：4 比例的模型进行了海试，海试时间超过 3 年，其从空气动能到电能的转换效率约为 30%。国外比较典型的振荡体式装置有 CETO6、Wave Roller、SINN 等。CETO6 是一种广泛应用的点吸收式系统，它是直径为 20 m 的漂浮式波能发电装置,其容量从 2011 年的 80 kW 逐渐增加到 2015 年的 240 kW。该装置在毛里求斯 Rodrigues 岛、澳大利亚西部的 Garden 岛和英格兰西南部的 Cornwall 等沿海进行了部署。AW 能源有限公司开发了一系列 Wave Roller 装置，并于 2007 年和 2012 年分别在葡萄牙部署了 100kW 和 300kW 的设备，进行了测试。另一个比较受欢迎的装置是 SINN 波能转换装置，其动力输出系统采用直线电机驱动的方式，该装置已经在希腊的 Heraklion Crete 港口进行了部署，并于 2015 年开始测试。除此之外，还有 Pelamis、 SEAREV 等。WaveDragon 是一个非常典型的越浪式波能发电装置，第一个原型于 2003 年在丹麦的 Nissem Bredning 海湾部署，并进行了近 2 年的实海况并网发电实验，这也是世界上第一个海上漂浮松弛系泊的波能装置。装置由两个手臂组成，聚集波浪到蓄水池中，蓄水池的水位高于海水表面，在中间位置设置通道并安装水轮机，储存的水通过该通道驱动水轮机后流回大海。另一个 Wave Dragon 项目于 2007 年在 Wales 西南海岸的 Milford 港口部署。基于 Wave Dragon 的工作原理，Fermandez 等人提出了一种新的越浪式装置 WaveCat。WaveCat 是一种海上漂浮式装置，采用斜坡式。它由两个船体组成,船体不是平行的，而是会聚在一起，在平面上形成一个楔形，船尾铰接在一起，两个船体之间的角度随着海况变化。装置采用单点系泊，当波浪的方向改变时，装置的方向随之改变，所以入射波总是传播到船体之间的楔形物中。近些年来，有些研究者将越浪式波能装置集成到传统或新的海岸或港口的防波结构中，组成了越浪式防波堤。这个概念是由意大利坎帕尼亚大学 Vicinanza 教授领导研究小组 Luigi Vanvitelli 于 10 年前提出的。为了研究越浪式防波堤影响设备性能的物理现象及其具体限制，分别于 2012 和 2014 年在丹麦的奥丁堡大学与 2015 年在意大利的坎帕尼亚大学进行了 1：30 的物理模型实验。对越浪式防波堤更深一步的研究还在进行当中。

1.2.2 国内典型的波浪能发电装置及研究进展

我国波浪能技术研究开始于 20 世纪 70 年代。为了推进波浪能资源的开发利用，我国将波浪能发电研究列入了国家重点科技计划。尽管我国波浪能研究起步较晚，但发展较为迅速。目前我国从事波浪能发电研究的单位主要有广州能源研究所、浙江大学、山东大学、集美大学、中国海洋大学、国家海洋技术中心、武汉大学等。近些年来，随着国家对波浪能开发利用的大力支持以及科研院所及高校加大对波浪能发电研究的力度，我国在波浪能利用方面也取得了很多成就。

我国在波浪能研究早期，主要以振荡水柱技术为主，在 20 世纪 80、90 年代也开发了一些振荡水柱装置。随着 BBDB 概念的提出，以及 BBDB 突出的优点，我国对其进行了广泛的研究。1996 年，建成了额定功率为 5kW 的 BBDB-OWC 电站,最大记录功率为 5.7kWDd。近些年来，中国海洋大学对长方体 BBDB 的腔体结构进行了研究，并建立了三维数学模型来分析其水力性能。广州能源研究所开发了几种不同形状的 BBDB 模型，并进行了二维和三维波浪水槽试验，结果表明，在条件相同的情况下，其捕能宽度比远大于以往文献所述的其他类型装置。广州能源研究所还提出了一种基于 BBDB 原理的波浪动力船，并将其电力成本与文献中的 MightyWhale 进行了比较，结果显示，在同等规模下，BBDB 波浪动力船的建造费用约为“巨鲸”的 1/3。从 2007 年开始，广州能源研究所对鸭式装置开展了研究。2009 年，一个装机容量 10 kW 的鸭式装置正式下水，进行了第一次实海况试验，验证了装置的高效性。2010 年对改造后的装置进行了第二次实海况试验，解决了浮态问题。2013 年，又采用多级液压模型系统开发了一套 100 kW 鸭式波能转换系统，并进行了测试。当波浪较小时，启动 30 kW 发电机组；在中等波浪条件下，启动 70kw 发电机组；当波浪较大时，启动 2 台机组，额定功率为 100 kW 另一种较为典型的振荡体式装置是由广州能源研究所研发的鹰式装置。2012 至 2014 年，鹰式波浪能发电装置概念样机 10 kW“鹰式一号”装置在珠海万山海域开展海试，初步验证该型半潜式装置具有较高的效率，良好的环境适应性和工程便利性。2015 年 11 月，鹰式波浪能发电装置工程样机 100 kW“万山号”装置在珠海万山海域开展试验，截至 2016 年 6 月 27 日，“万山号”已开展不同海况的试验，历经小浪、中浪、和大浪多种海况，取得了阶段性试验数据与成果。中国海洋大学设计了一种新型的波能装置，称为圆形斜坡越浪式波能转换装置(CircularRampOver-topping Wave Energy Converter ， CROWN)。该装置由一个圆形的蓄水池组成，蓄水池周围围绕着一个环形斜坡，用于波浪爬升和越过。在斜坡上设置导叶，用于聚集波浪,提高流量。波浪可以从所有入射方向越过斜坡进入蓄水池，水池底部开有通道与海水相连，通道内设置低水头轴流式水轮机用于发

电。该装置在中国海洋大学山东省重点实验室波浪水槽中进行了物理模型实验，为进一步的研究提供了依据。

第 2 章　常见的波浪能发电装置原理简介

当前各国都在研究波浪发电，而海浪能发电装置的种类也是不可胜举，但这些发电装置均源于几种基本的原理：将波浪作用下物体的上下左右运动转化为电能；将波浪压力变化转化为电能；将波浪的势能转化为动能等。以下是当前几种常见发电装置的发电原理[3]。

2.1 摆式波浪能发电装置

摆式发电装置如图 2.1 所示，主要部件是浮力摆，浮力摆下方与液压装置相接。在波浪的推动作用下，浮力摆不停地做往复的前后摆动，在压缸加以收集后，再由发电机将机械能转换成可直接利用的电能，从而实现波浪能的转化。

2.2 筏式波浪能发电装置

筏式波浪能转换装置如图 2.2 所示，主要是利用其铰接处的液压能来转化为电能的，此类装置主要有液压系统和铰接阀体，铰接处安置有液压转化系统，包括活塞杆、液压缸以及液压控制柜。当有波浪时，波浪会带动筏体上下运动进而使铰接处往复弯曲，往复运动产生的机械能经液压装置收集后用于发电机发电，实现波浪能量的转化。

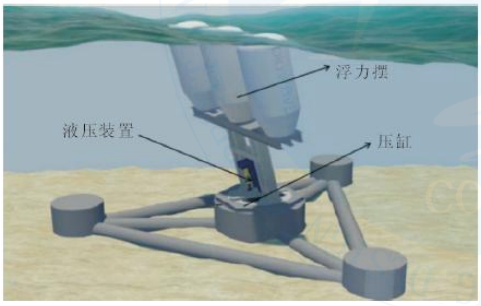


图 2.1 摆式波浪能发电装置

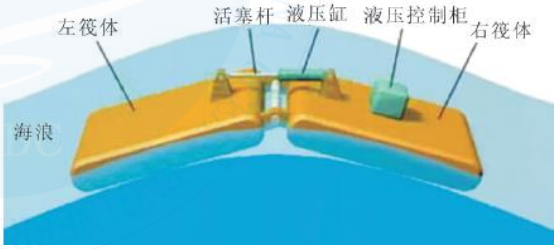


图 2.2 筏式波浪能发电装置

2.3 振荡浮子式波浪能发电装置

振荡浮子式发电装置如图 2.3 所示，由振荡水柱式发电装置发展演变而来，主要结构包括浮体、质量体和发电机等。其工作原理主要是通过波浪能的运动，带动浮子不断进行上下垂荡，与质量体产生相对运动，再通过液压装置等将收集到的动能和势能储存起来进行发电。

2.4 点头鸭式波浪能发电装置

点头鸭式波浪能发电装置如图 2.4 所示，形状和工作状态类似鸭子的运动。该类装置主要是利用波浪运动来促使浮子绕装置回转轴旋转，利用旋转运动来进

行发电的。在波浪入射波的作用下，浮子鸭嘴部分产生了水平位移，而在入射波过去后，鸭嘴又回到了垂直状态。浮子绕回转轴往复摇摆运动的能量经液压装置收集后，通过电力系统转化为可直接利用的电能，从而实现能量的转化。

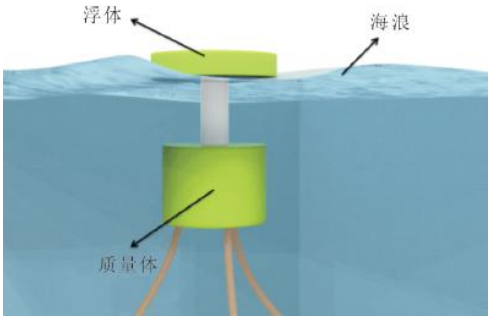


图 2.3 振荡浮子式波浪能发电装置

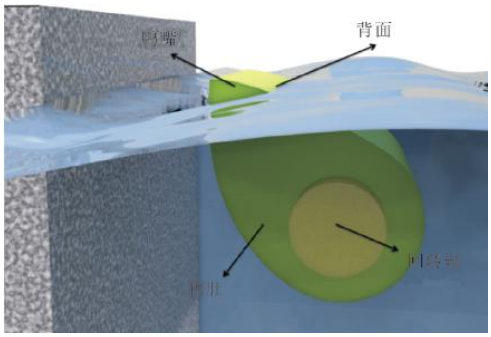


图 2.4 点头鸭式波浪能发电装置

2.5 振荡水柱式波浪能发电装置

该装置主要是由气室和空气涡轮机组成，如图 2.5 所示，通过波浪的运动来使得气室中的水柱上下运动，水柱的上下运动挤压了气室内部的空气，进而转换为发电机的转动实现发电的。装置内部的空气涡轮机在空气的作用下来回正反运动，实现波浪能量较为高效的转化。

2.6 越浪式波浪能发电装置

越浪式波浪能发电装置如图 2.6 所示，其工作原理和堤坝水利工程的很相似，主要是利用水面高度差产生的势能进行发电。越浪式波浪能发电装置通常建立在岸边上，使用多个蓄水池放在彼此的顶部，波浪入射波迎来的方向上设有特殊开口用以捕捉入射波，波浪从开口涌进蓄水装置中与自由水平面产生高度差，接着利用涡轮机将水的势能转化为电能。越浪式波能装置主要包括收缩波道技术(tapered channel)、槽式技术(seaslot-cone generator)和波龙(wave dragon)。

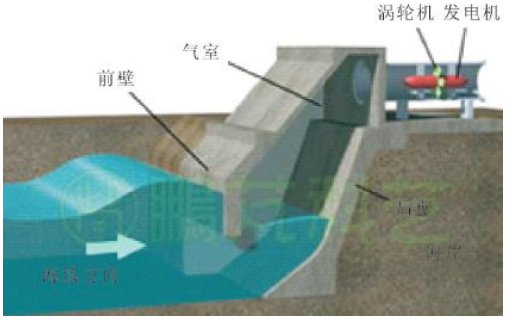


图 2.5 振荡水柱式波浪能发电装置

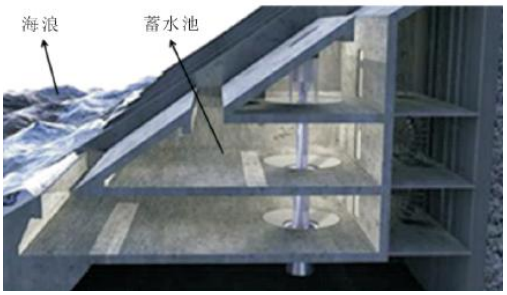


图 2.6 越浪式波浪能发电装置

2.7 海蛇式波浪能发电装置

海蛇式波浪能发电装置属于一种半潜式系统，如图 2.7 所示，此类发电装置由数个圆柱体衔接组成。相互连接的圆柱体间安装有液压缸和发电机等结构。当圆柱体随波浪作相对运动时，圆筒间将会产生扭矩来驱动装置里面的活塞杆做拉伸和压缩运动。接着液压缸里的压力油在液压缸的高压作用下将泵出推动液压马达旋转，进而实现能量的转化。该类发电装置的系统以及整流电路都位于结构内部，封闭性较好。

2.8 海上发电船

海上发电船是将发电结构和海上船舶结合在一起的新型发电装置，如图 2.8 所示。该类发电装置常采用液压发电的形式，在船的两边安装有多个吸收波浪能的浮体和液压杆。当有波浪时，波浪会带动浮体上下运动进而拉伸压缩液压杆，液压能经液压装置收集后促使发电机发电,实现能量的转化。发电船舶必须从港口低能区行驶到高能量区，产生的电能将被送入电网。这种发电形式提高了发电能力，但也增加了燃料成本，且船员在发电期间不能随意离开发电船。

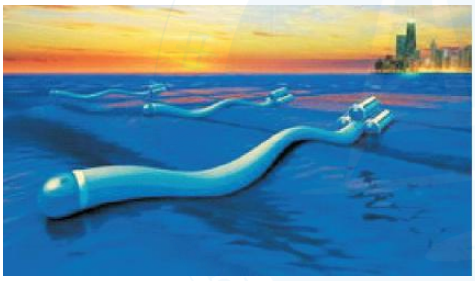


图 2.7 海蛇式波浪能发电装置

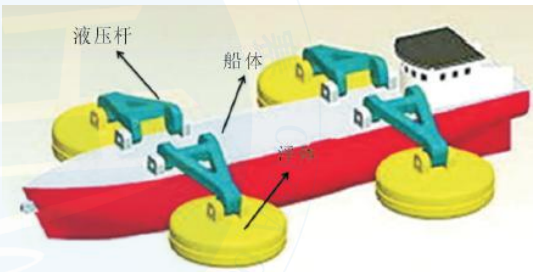


图 2.8 海上发电船

第 3 章 方案论证与水动力学分析

通过小组讨论，设计三种波浪发电装置进行方案对比。首先，利用solidworks画出每种发电装置的三维模型，将模型进行合理的简化后，保存成“.x-t”格式，将其导入ANSYS AQWA中进行水动力分析，通过提取幅值相应因子，比较各装置运动响应大小。

ANSYS AQWA在近海工程领域有着广泛的应用，能全面满足近海工业设计的需求[4]。AQWA是一个由六个模块组成：LINE，用于入射绕射分析；LIBRIUM，用于计算系泊索的初始静、动稳定性；FER，采用不规则波进行频域计算；DRIFT，考虑非线性的随机波时域动力分析计算；NAUT，考虑非线性的规则波和不规则波时域计算；Cable Dynamics，进行耦合缆索动力求解分析。这六个模块被统一的封装在AQWA-GS中，以实现AQWA的图形化用户界面操作。

AQWA软件用于计算船舶与海洋工程的水动力性能问题功能完备，计算精度高，界面友好，影响广泛。其大致有如下特点：

（1）可以计算任意水深；

（2）计算浮体结构的波浪力，同时考虑波浪的衍射/辐射（包括浅水效应）；

（3）计算浮体结构的平衡位置，可以考虑多个浮体结构通过缆绳的连接；

（4）传递压力和速度结果到ASAS或ANSYS进行结构响应分析。

（5）停泊线的初始静/动稳定性；

（6）浮体结构的初步设计；

（7）频域线性分析模块；

（8）时域非线性分析模块；

（9）外力载荷动态库联接。

对于本次设计，在 AQWA 中将海况参数设置为水深 30cm，海域面积 3 平方米，如图 3.1 所示，装置整体进行频域计算时，设置波浪频域分为 20 份，波高为 30mm。导入模型后进行必要的前处理，然后添加质量点、划分网格和设置分析参数后进行求解。

Sea Geometry	
Water Depth	0.3 m
Water Density	1025 kg/m³
Water Size X	2 m
Water Size Y	1.5 m

图 3.1 海况参数设置

下面将对每种方案进行原理阐述并进行水动力分析，根据分析结果选择合理的装置，然后根据幅值相应因子对浮子形状进行选择。

3.1 浮子摇摆运动发电装置

浮子摇摆运动发电装置三维模型如图 3.2 所示，中间长方体为简化后的发电船，用锚链进行系泊定位，受到波浪作用时能够保证不发生大位移。船体左右两边为连杆，连杆一端与浮子连接，另一端与船体铰接。浮子在波浪作用下发生上下运动，带动连杆绕铰接点往复转动，在铰接点处安装齿轮带动发电机轴旋转进行发电。

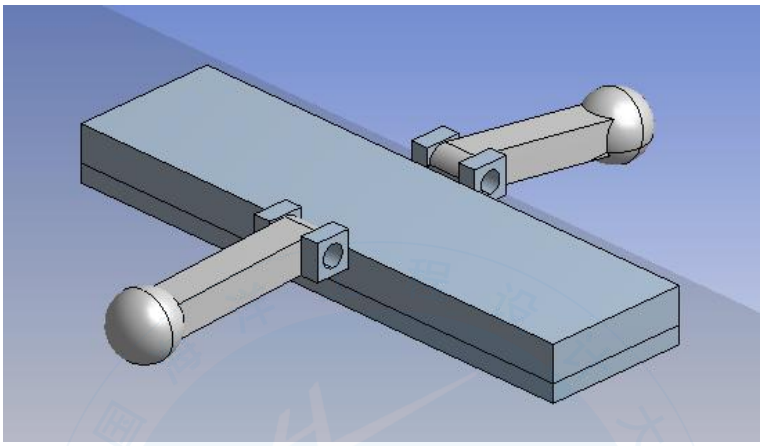


图 3.2 浮子摇摆运动发电装置三维图

在 AQWA 中进行运动响应分析，运行结果如图 3.3 所示。通过分析结果发现，添加锚链能够将中间船体进行固定，但由于设计要求中波高范围为 30mm~50mm，浮子上下运动的最大距离只有 5cm，转化为连杆的旋转运动后，连杆转动角度较小，发电效率低，在只设置一组连杆的情况下，无法达到连续发电的效果。

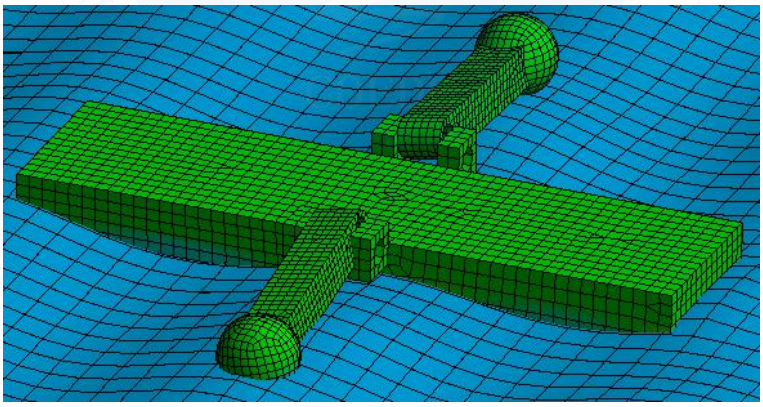


图 3.3 浮体压力和运动响应图

3.2 “天平式”发电装置

“天平式”发电装置三维模型如图 3.4 所示。装置整体形状类似于天平，底部长方体为简化后的浮体，在浮体上固定支架，将发电机固定在支架顶部，电机轴与连杆固接，连杆两端添加重物增加连杆的惯性。浮体在波浪作用下会发生左右摇摆，天平连杆在两端重物的作用下由于惯性会保持原有运动状态，在底座发

生摇摆时，连杆在惯性作用下会与电机轴发生相对转动，利用相对转动带动发电机轴旋转发电。添加两根锚链对浮体进行系泊定位，锚链与浮体的两个连接点连线与顶部连杆垂直，既能防止浮体随波浪发生大位移飘动，又能使浮体随波浪发生摆动。

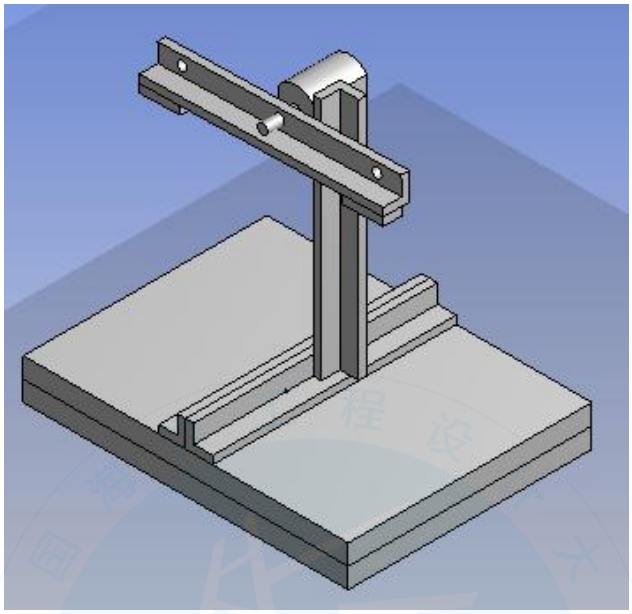


图 3.4 “天平式”发电装置三维图

导入 AQWA 中进行运动响应分析时，发电装置压力和运动响应如图 3.5 所示。通过仿真分析结果发现，装置整体运动幅度较小，连杆摆动角度较小甚至摆动角度与底座运动角度相同，即不发生相对转动，主要原因有：此装置底座尺寸较大，在波浪频率较低和波高较大的海域效果较理想，而此次设计要求波浪频率为 5Hz~20Hz、波高为 30mm~50mm，波浪频率较高且波高较小；顶部连杆长度和连杆左右配重的重量无法准确计算，无法确定连杆摆动周期，与底座摆动周期相同时就不会发生相对转动。若减小底座尺寸，装置稳性则无法保证。

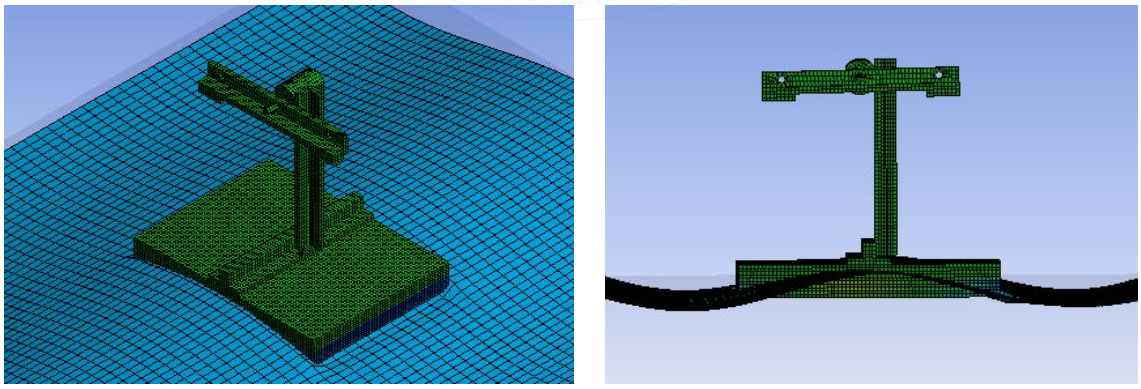


图 3.5 “天平式”装置压力和运动响应图

3.3 浮子上下运动发电装置

浮子上下运动发电装置三维模型如图 3.6 所示。整体装置类似于导管架平台，在平台上设置四组上下运动的装置，每一组上下运动装置由一个下部的浮子和一个上部的连杆组成，浮子在波浪的作用下上下运动，带动连杆相对于平台上下运动，在连杆与平台接触的位置设置齿轮齿条传动幅，连杆上设置齿条，平台上安装齿轮，通过机械传功装置将四组上下运动装置的机械能传递给发电机轴，带动发电机轴旋转。波浪发电装置设计水深为 30cm，水深较浅，直接在平台底部设置四条支撑腿，将整个装置放在实验水槽中，无需设置锚链系泊。

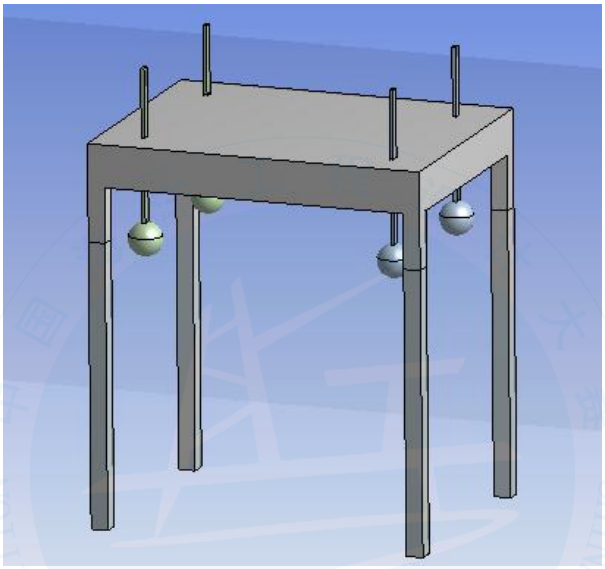
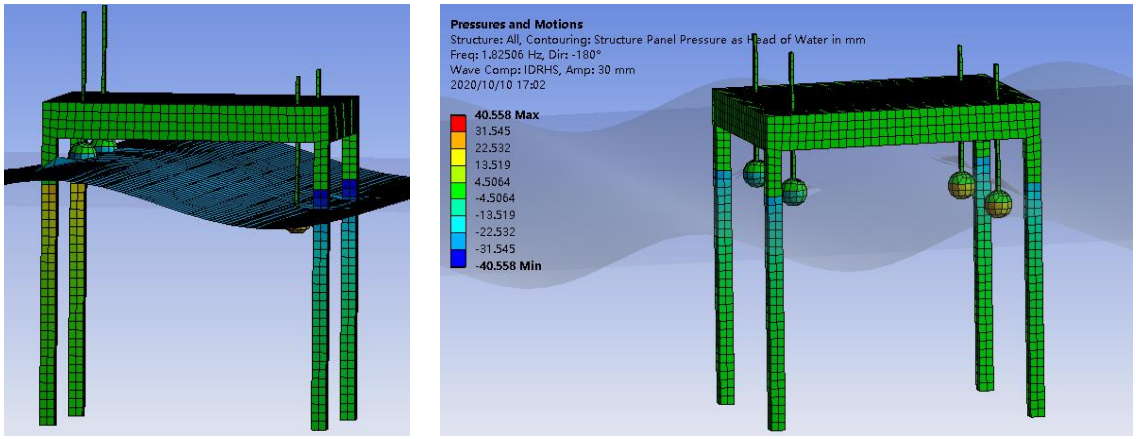


图 3.6 浮子上下运动发电装置三维图

将整个模型导入 AQWA 中进行水动力分析，发电装置压力和运动响应如图 3.7 所示。通过仿真分析结果发现，四组连杆能够垂直于平台平面上下运动，运动幅度大致与波高一致，浮体垂荡振幅较大，更有利于装置采集波浪能，同时波浪对导管架平台的压力符合设计要求。



（a）浮子运动振幅　　（b）平台表面压力

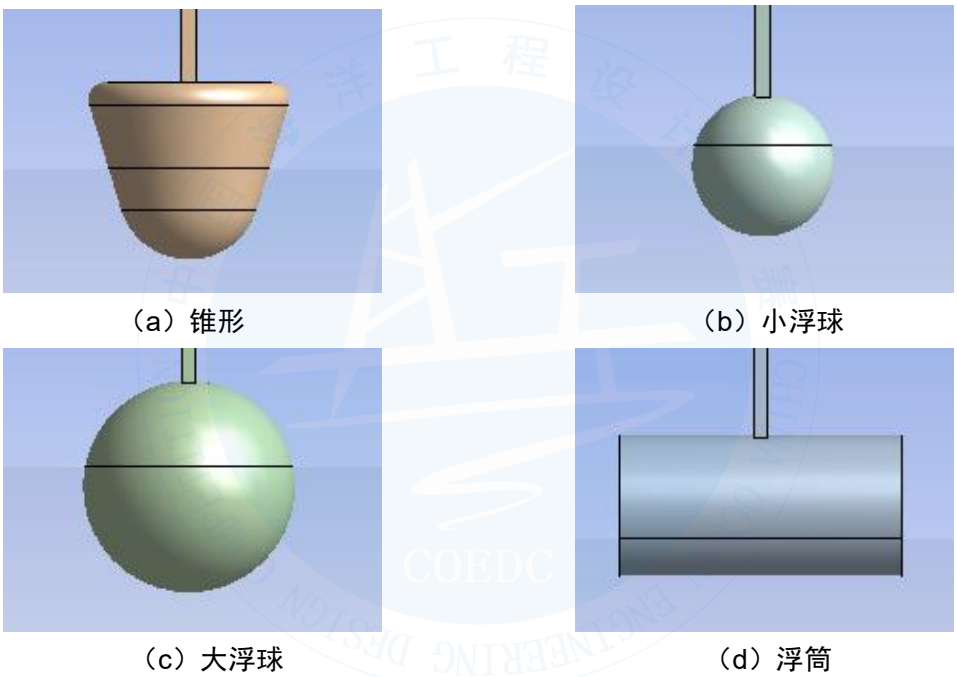
图 3.7 水动力学仿真分析结果

浮子上下运动发电装置与前两种方案相比，省去了锚链系泊，无需校核系泊绳的强度，直线运动代替小幅度的旋转运动，使发电机轴运动行程较大，能够收集更多的波浪能进行发电，故选用方案三进行下一步设计。

3.4 浮子形状选择

浮子与波浪直接接触，是吸收波能的主要对象，其形状和质量对整体发电装置有重要的影响[5]。浮子在海洋中自由振荡时可以做六个自由度的运动，由于导管架平台对浮子的限制，使得浮子仅做单自由度垂荡运动，所以浮子在 Z 方向上的运动响应为主要研究对象，因此在进行 RAO 分析时，只计算浮子的垂荡运动。

分析装置水动力性能与浮子形状的关系时，要确保浮子的质量不变，取浮子质量为 0.1kg，设计四种形状不同的浮子，如图 3.8 所示。



（a）锥形　（b）小浮球

（c）大浮球　（d）浮筒

图 3.8 不同形状浮子模型

由于该发电装置包含四组上下运动的浮子，为了方便对仿真结果进行对比分析，将四组浮子分别设置为上述四种形状，整体计算模型如图 3.9 所示。

对整体装置从-180°到 180°，每隔 45°进行波浪方向的设置，如图 3.10 所示。

利用 AQWA 软件对波浪能发电装置进行网格划分，取最大网格尺寸为 10mm，最小网格尺寸为 2mm，划分网格之后的模型如图 3.11 所示。

幅值响应算子 RAO（response amplitude operator）是输出与输入幅值比的平方，其本质是波浪到船体运动的传递函数[6]。对本装置在-90°波浪方向下垂荡的幅值响应算子 RAO 计算结果如图 3.12 所示。

从图 3.12 垂荡 RAO 值与浮子形状的关系表明，随着浮子与水面接触面积的增加，浮子 RAO 的峰值增大并且达到峰值的频率随之减小，所以在波浪频率较低的地区适合采用浮球形浮子，而在波浪频率较高地区应当采用锥形浮子，从而提升装置的波浪能采集效率。

本设计要求波浪频率较高，故采用锥形浮子。

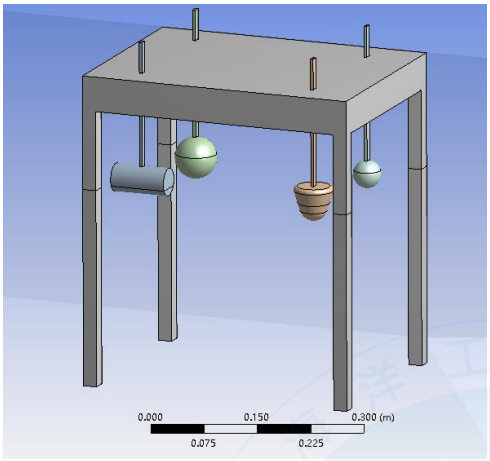


图 3.9 计算模型图

3.10 波浪方向设置

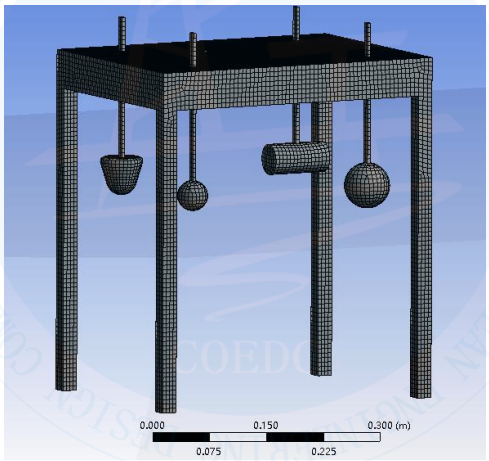


图 3.11 水动力计算网格模型

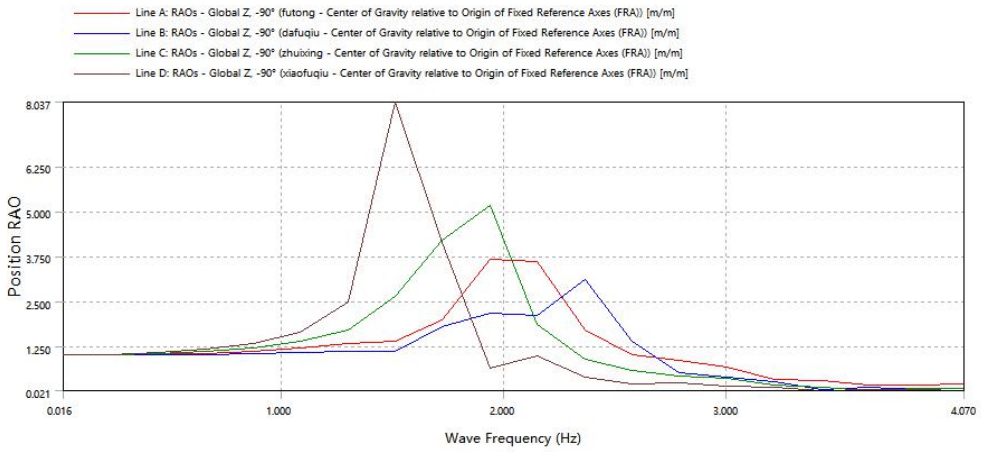


图 3.12 垂荡 RAO

第 4 章 模型数字化样机设计

4.1 支架平台设计

支架平台总体尺寸为长 0.4m、宽 0.3m、高 0.4m，如图 4.1 所示。其中支架部分使用标准的铝材组合而成，直角连接处使用角码连接增加支架强度，每相邻两立柱之间安装一浮子上下运动，浮子安装方式将在下节说明。设计有四组浮子，即需要八根立柱，安装浮子的两立柱之间由于浮子会发生上下运动，因此在相邻两立柱底部增加一横梁连接，防止在波浪作用下发生变形。不安装浮子的两立柱之间在顶部增加横梁连接，顶部横梁同时与平台连接，增加整个支架平台的稳定性。平台部分设计为一矩形薄板，在平台上设置合理的安装孔，用来安装机械传动部分和发电机等。

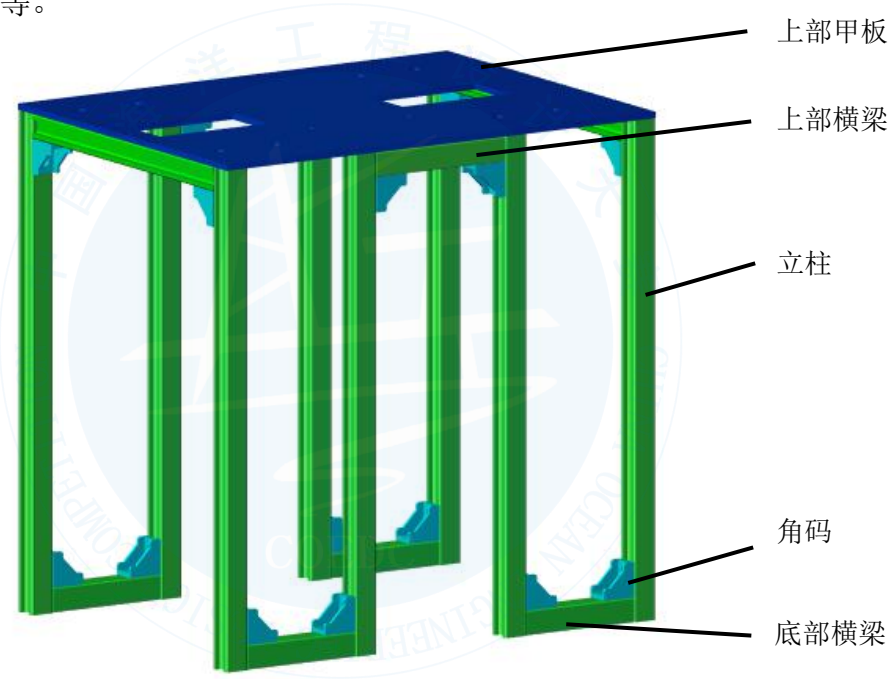


图 4.1 支架平台三维图

4.2 浮子设计

由 3.4 节根据水动力学分析结果选择锥形浮子形状，浮子捕获的波浪能通过连杆上的齿条与平台上的齿轮啮合并通过传动机构输送给发电机转化为电能。浮子连杆三维图如图 4.2 所示，底部为锥形浮子，连杆与浮子固接，连杆上部为齿条。相关文献表明由于波浪力施加在浮子上并不是直上直下的，浮子上下运动时连杆与平台之间会产生一定的弯矩，为了减小弯矩，在与浮子相连的连杆上设置一横杆，横杆两端安装轴承，减小横杆运动时与支架之间的摩擦阻力，如图 4.3 所示。

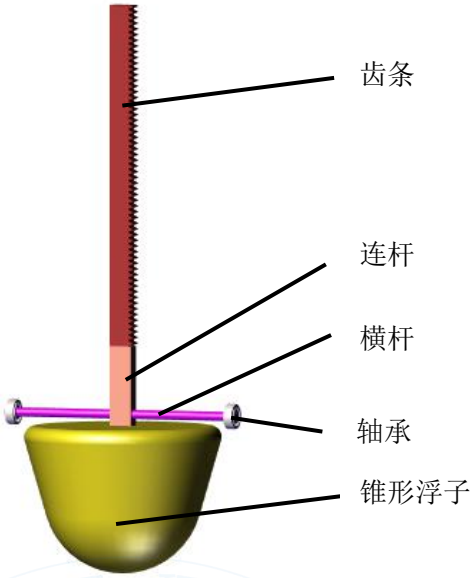


图 4.2 浮子连杆三维图

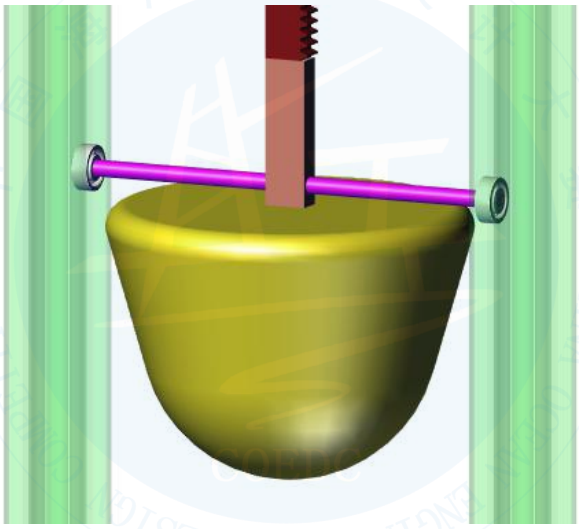


图 4.3 横杆与支架连接示意图

4.3 传动结构设计

发电装置传动机构如图 4.4 所示，主要结构有齿轮齿条、单向轴承、传动轴、皮带轮等。浮子捕获的波浪能转化为连杆上下运动的动能，通过齿轮齿条结构将连杆的直线运动转化为齿轮的旋转运动，齿轮通过单向轴承与传动轴连接，浮子上升运动时使传动轴转动，浮子在自身重力作用下下降，单向轴承使浮体下降时不会对传动轴的转动产生反向抵消。传动轴上安装大带轮，大带轮与小带轮之间为啮合型带传动，带动发电机轴旋转发电。为减小齿条与平台之间的摩擦，在齿轮与齿条啮合的另一侧设置一轴承。

齿轮传动是机械传动中最重要的传动之，形式很多，齿轮传动的主要特点如下：

（1）效率高。在常用的机械传动中，以齿轮传动的效率为最高。

（2）结构紧凑。在同样的使用条件下，齿轮传动所需的空间尺寸一般较小。

（3）工作可靠、寿命长。

（4）传动比稳定。

带传动具有结构简单、传动平稳、价格低廉、缓冲吸震等特点，在传动中心距较大的情况下应用较多[7]。啮合型带传动一般也称为同步带传动，它通过传动带内表面上等距分布的横向齿和带轮上的相应齿槽的啮合来传递运动，同步带传动的带轮和传动带之间没有相对滑动，能够保证严格传动比。本设计中传动轴上的大带轮能起到飞轮的作用，具有储存和释放能量的作用，能够确保传动结构平稳运行。

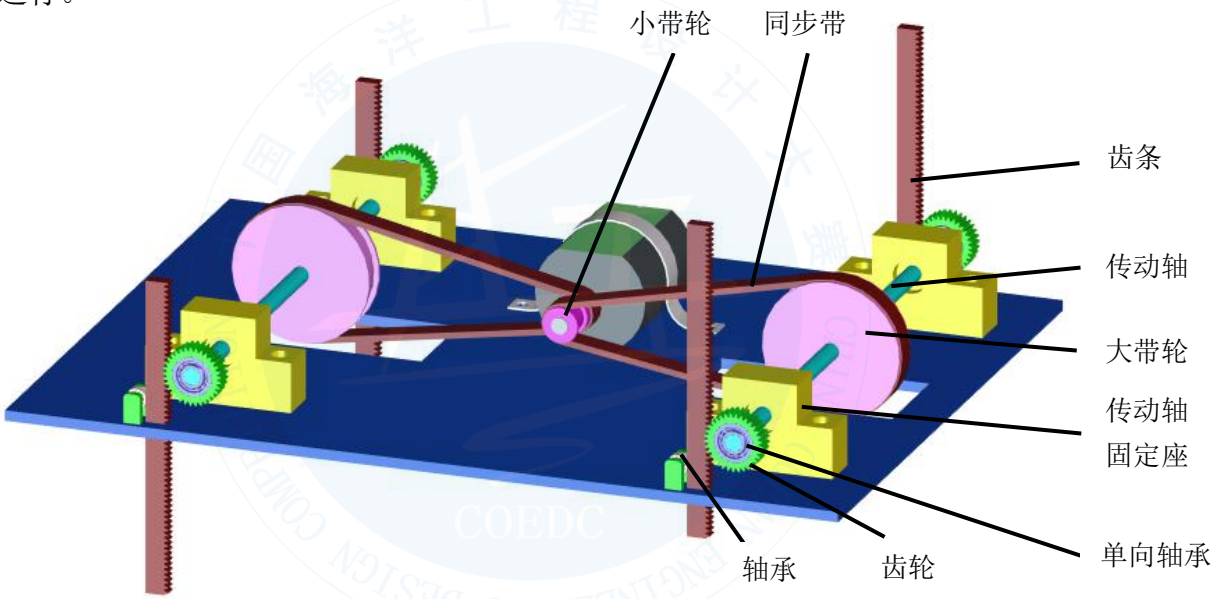


图 4.4 机械传动示意图

4.4 稳压电路的设计

稳压电路用来保持输出电压的稳定，因为在波浪能转化成动能并传递到发电机并产生电能过程中，由于波浪本身的不稳定性导致发电机产生电压的稳定性较低，电压的波动容易引起灯泡损坏，由此稳压电路的设计必不可少[8]。

基于以上要求，可采用应用技术比较可靠的 LM2596s 开关电压调节器，LM2596s 开关电压调节器是降压型电源管理单片集成电路。能够输出 3A 的驱动电流，同时具有很好的线性和负载调节特性。固定输出版本有 3.3V、5V、12V，可调版本可以输出小于 37V 的各种电压。

该器件内部集成频率补偿和固定频率发生器，开关频率为 150KHz，与低频开关调节器相比较，可以使用更小规格的滤波元件。由干该器件只需 4 个外接元件，可以使用通用的标准电感，这更优化了 LM2596s 的使用，极大地简化了开关电源电路的设计。

该器件还有其他一些特点：在特定的输入电压和输出负载的条件下，输出电压的误差可以保证在±4%的范围内，振荡频率误差在±15%的范围内；可以用仅 80uA 的待机电流，实现外部断电；具有自我保护电路(一个两级降频限流保护和一个在异常情况下断电的过温完全保护电路)。

对于电阻和电感我们通过相应的图表以及公式计算获得所需要的电阻及电容。对于输出电容来说，在大多数的使用中，使用 82uF 至 820uF 之间的低等效电阻的电解电容和固态钽电容效果最好，电容要靠近 IC，管脚要短，连接的铜线要短。不能使用大于 820uF 的电容。故电容的耐压至少应是输出电压的 1.5 倍，有时为了得到纹波低的输出电压需要更高的电压耐压值，此次设计采用 35V 220uF 的贴片固态钽电容作为输出电容。

对于前馈电容来说，当输出电压大于 10V 时，就需要一个补偿电容，这个电容的典型值在 100pF 至 33nF 之间，同时，与输出电压设置电阻 R2 并联。对于高输出电压、低输入输出电压时，或等效电阻的输出电容等情况，这个电容可以使电路格外稳定。这个电容可以是瓷片电容、塑胶或云母电容等，此次设计采用 1uF 贴片电容。

对于吸纳二极管来说，吸纳二极管的最大承受电流能力至少要为最大负载电流的 1.3 倍，如果设计的电源要承受连续的短路输出，则吸纳二极管的最大承受电流能力要等于 LM2596s 的极限输出电流。对吸纳二极管来说，最坏的情况是过载或输出短路。吸纳二极管的反向耐压至少要为最大输入电压的 1.25 倍。 吸纳二极管必须是快恢复的且必须靠近 LM2596s。此二极管的管脚要短。连接的铜线也要短。由干所需的二极管开关速度快、正向压隆低。所以，肖特基二极管是首选，同时.它的性能和效率都很好。特别是在低输出电压情况下更是如此。使用超快恢复或高效整流二极管效果也很好。但是，一些有突然关断性能的器件可能会引起不稳定或电磁感应的问题。超快恢复二极管的典型恢复时间为 50ns 或更快，但 IN5400 系列的整流二极管速度很慢，通常不用。此时设计采用贴片肖特基二极管 SS34。

对于输入电容来说，为了防止在输入端出现大的瞬态电压。在输入端和地之间要加一个低等效电阻(LowESR)的铝或钽电容作为旁路电容，这个电容要靠近 IC。另外，输入电容电流的均方根值至少要为直流负载电流的一半。 要确保所选

的电容的这个参数不能低于直流负载电流的一半。故采用 35V 220uF 的贴片钽电容。

综上，对所有电路元件进行了确定，并通过 Proteus 对电路进行仿真分析，得到最终的电路图，电路图如图 4.5 所示。

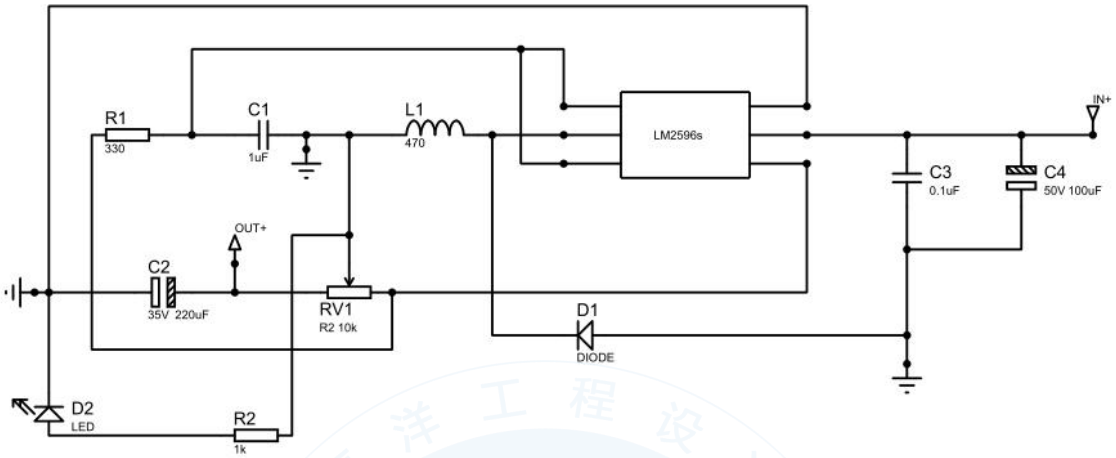
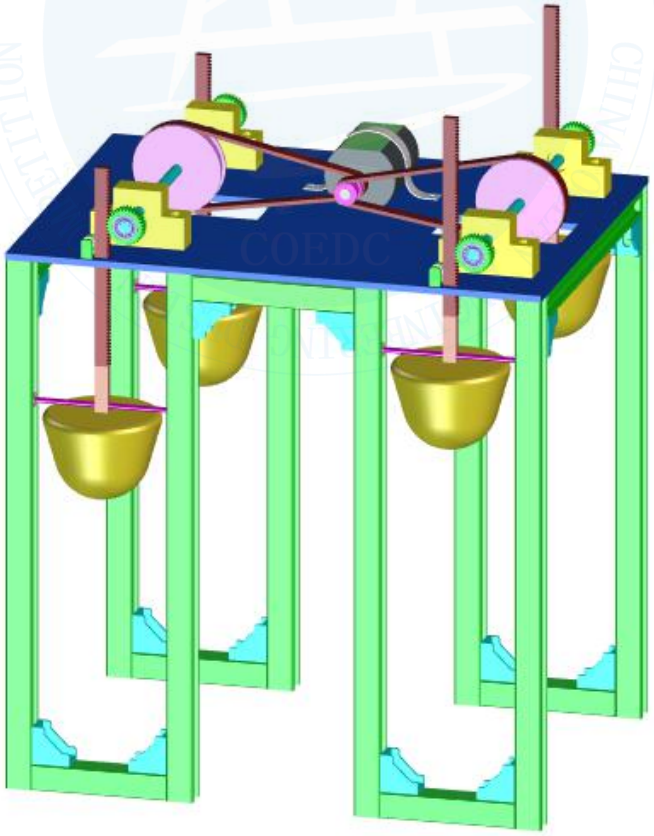


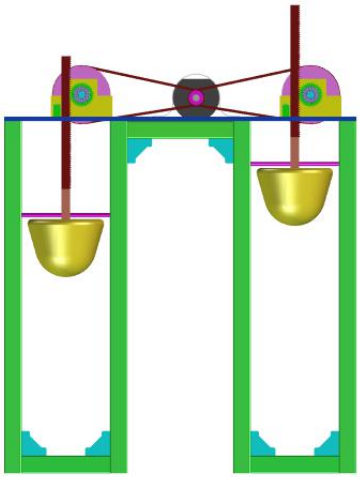
图 4.5 稳压电路示意图

4.5 整体模型

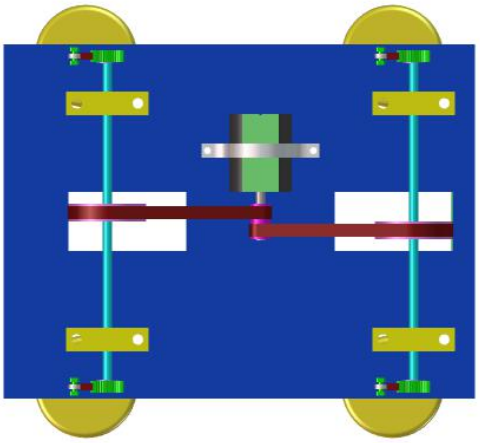
装置整体结构如图 4.6 所示。



（a）斜视图



（b）正视图



（c）俯视图

图 4.6 整体模型三维图

第 5 章 波浪能与发电效率计算

5.1 波浪能吸收效率计算

波能转换装置是由三级能量转换机构组成的，第一级转化主要是与波浪直接接触的浮子实体进行波浪能的采集，是能量转化过程中最为核心的阶段，将直接影响最后的能量输出，因此探讨影响浮子初级能量吸收效率的关键因素[9]。

假设流体是理想不可压缩的、无粘性，重力为主要作用力；波长远远大于波高且运动是无旋的。根据试验条件，水槽自由液面高度为有限水深，对于有限水深，对于水深浅水波波长计算为：

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{1}$$

式中：g 为重力加速度；T 为波浪周期；k 为波浪波数。

从自由水面至水槽底部部分的流体动能为：

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{k}} = \frac{\mathrm{d}mv^2}{2} = \frac{\rho \mathrm{d}\tau v^2}{2} \tag{2}$$

式中：v 为流体质点振动速度；ρ为水质量密度。

根据微幅波假定，在 z=0 处对该式进行积分可得该进行波的动能：

$$E_{\mathrm{k}} = \frac{\rho}{2}\int_{OAB} \varphi v_n \mathrm{d}l \approx \frac{\rho}{20}\int^{\lambda} \varphi v_n \mathrm{d}x = \frac{\rho g \lambda H^2}{16} \tag{3}$$

式中：H 为波高。

在一个波长范围内，波动动能与势能相等，则每单位波长宽度波浪总能力为：

$$E = E_{\mathrm{k}} + E_{\mathrm{p}} = \frac{\rho g \lambda H^2}{8} \tag{4}$$

根据假设入射波为规则波，则在浮子宽度 R 域内波浪所输入的能量为：

$$E_i = \frac{2RE}{\lambda} \tag{5}$$

当浮子垂荡固有频率与入射波振荡频率相同，即浮子与波浪发生共振时，纯垂荡系统总能量为：

$$E_x = \frac{1}{2}\left[m + m_w\right)\omega^2 + \rho g A_{wP}\Big]z_0^2 \tag{6}$$

式中：m 为物体质量；m_w为附加质量；ω为波浪圆频率；A_{wp}为浮体水面截面积；z_0为浮体垂荡运动振幅，则浮子系统吸收效率为：

$$\eta_1 = \frac{E_z}{E_i} \tag{7}$$

针对浮子的波浪能俘获效率进行研究，发电装置受波浪冲击的功率可由下式计算：

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot H_{m0}{}^2 \cdot T \cdot l \tag{8}$$

式中：P 为波浪单位长度线 (垂直于波传播线，或沿波面上) 上波浪的平均功率；Hm0 为波浪高度；T 为波浪周期；L 为振荡浮子半径。在本次设计中，波浪高度为 0.06m，重力加速度为 9.8 m/s2，水的密度为 1025kg/m3，波浪周期为 2.4s，浮子宽度为 0.3m。代入公式（8）可得冲击发电装置的波浪的平均功率约为 1.27W。

5.2 装置发电效率计算

浮子捕获的能量通过齿轮机构和带轮机构传递给发电机，各传动机构均有摩擦损耗，故浮子发电量计算公式为：

$$P_0 = P \cdot \eta_{齿轮} \cdot \eta_{带轮} \cdot \eta_{电机} \cdot k \tag{9}$$

其中齿轮机构传动效率较高，可达 $\eta_{齿轮}$=99%，带传动效率略低，取 $\eta_{带轮}$=95%，发电机效率取 $\eta_{电机}$=80%。考虑到装置在运行过程中各运动副存在摩擦，故修正系数取 k=0.9。代入公式（9）可求得单个浮子发电量为 0.86W。

造波实验测得 10 秒内实际电压、电流示数分别如图 5.1 和 5.2 所示：

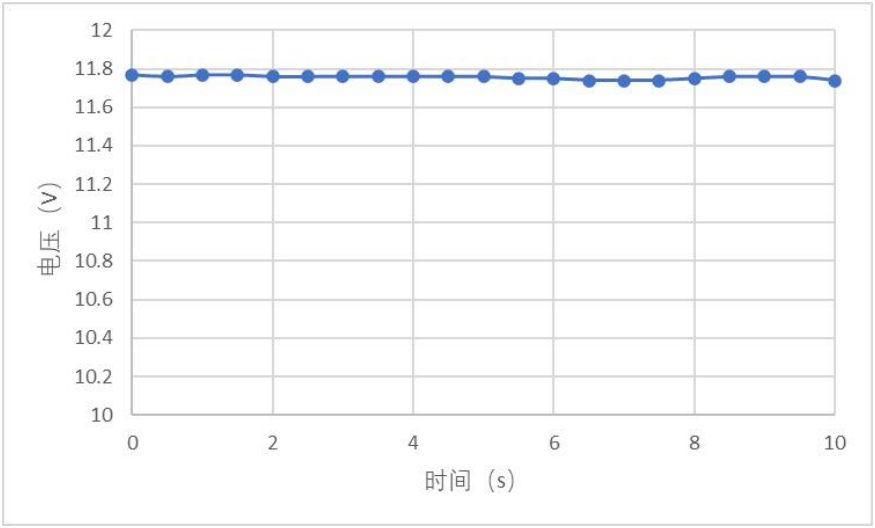


图 5.1 实际电压示数

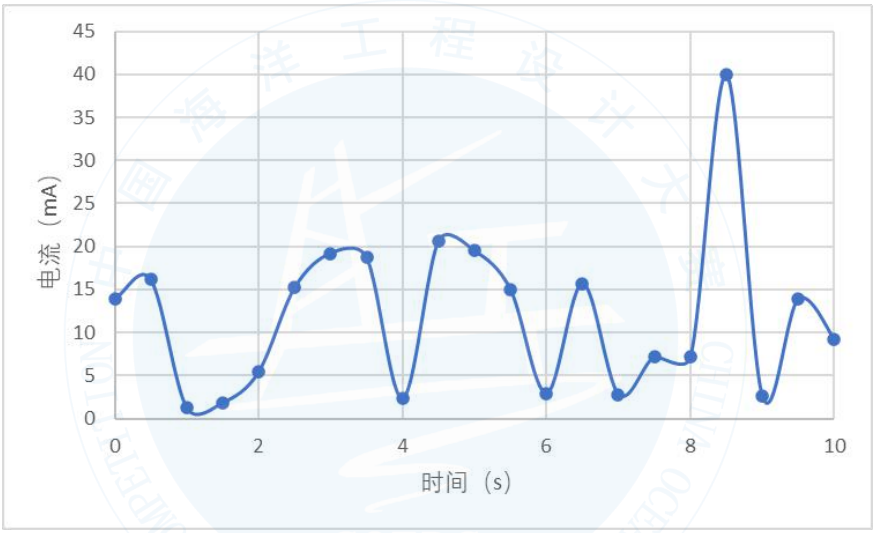


图 5.2 实际电流示数

算得平均电压为 11.75V，平均电流为 14.145mA，实际平均功率为 $P_{实际}=0.166\text{W}$。

装置波浪能发电效率计算公式为：

$$\eta=\frac{P_{实际}}{P_0}\times 100\% \qquad (10)$$

代入公式计算得发电效率为 19.3%。

总　结

海洋波浪能发电是一种无污染的、清洁的、可再生的新能源，具有得天独厚的优势。对目前的已有装置进行调研，振荡浮子式波浪能发电装置具有明显的优势，因为其效率高、成本低、可靠性好，因此是今后波浪能发电装置的重要发展方向。英国、美国、荷兰、瑞典、丹麦、中国均开展了振荡浮子式波浪能装置的研究。虽然波浪能发电装置与太阳能、风能等清洁能源利用装置相比，具有发电成本更高、总效率较低、工程性较差等不利条件，但相信经过我们的努力与奋斗，利用波浪能发电这一新型的方式会普及到人们的生活中去，能够真正做到为人们的生活、工作谋福利。

参考文献

[1] 徐丙州,臧天朔,王泽豪,张文博.综合利用波浪势能与流能的发电装置[J].科技与创新,2020(07):32-33.

[2] 陈映彬,黄技,赖寿荣,赖佳亿,林樾荣.波浪能发电现状及关键技术综述[J].水电与新能源,2020,34(01):33-35+43.

[3] 陈启卷,高功正,岳旭辉,耿大洲,徐磊.水电与新能源机遇与挑战:波浪能发电技术研究进展[J].水电与新能源,2020,34(08):1-6.

[4] 栾政晓,何广华,刘朝纲,黄欣. 振荡浮子式波能发电装置的水动力响应分析[A]. 《水动力学研究与进展》编委会（Editorial Board of Journal of Hydrodynamics）、中国力学学会(Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics)、中国造船工程学会(Chinese Society of Naval Archetecture and Marine Engineering)、合肥工业大学(Hefei University of Technology)、中国科技技术大学(University of Science of Technology of China).第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(下册)[C].《水动力学研究与进展》编委会（Editorial Board of Journal of Hydrodynamics）、中国力学学会(Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics)、中国造船工程学会(Chinese Society of Naval Archetecture and Marine Engineering)、合肥工业大学(Hefei University of Technology)、中国科技技术大学(University of Science of Technology of China):上海《水动力学研究与进展》杂志社,2019:6.

[5] 陈映彬,黄技,林樾荣,陈炜鑫.筏式波浪能发电装置水动力分析与能量俘获研究[J].中国水运(下半月),2020,20(06):98-100+107.

[6] 钟小龙,叶荣春,熊正烨.摇摆式波浪能发电装置模型研究[J].中国水能及电气化,2019(08):41-43.

[7] 张步恩,郑源,付士凤,刘惠文,赵梦晌,李超.一种新型波浪能发电转换装置试验研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7263-7271+7499.

[8] 秦筝. 宽输入高效率 BUCK 型 DC-DC 转换器关键模块的研究[D].电子科技大学,2019.

[9] 胡缘,杨绍辉,何宏舟,陈沪,郑松根,张迪.半潜式多浮体波浪能发电装置的水动力性能分析[J].水力发电学报,2019,38(09):91-101.

团队编号：A20200311

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年　10 月　12 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本设计以海底波浪能高效利用为主要研究思路，以新型发电系统为研究对象，对波浪发电系统基本机构、电机的结构、电机内的电磁场及输出能量变换单元进行了优化设计;同时对浮体及发电装置稳定性、发电效率及发电稳定性影响进行了分析，并结合自主研究的波浪谱，对发电装置转换效率及转换能力进行计算，确定了发电装置最佳发电效率及最佳作业水深。

同时改进了受波装置，采用螺旋冲击式涡轮机及横向挡板相结合的方式，最大效率的应用了海底波浪能，螺旋冲击式涡轮机通过波浪冲击螺旋式结构带动内部转子转动，从而进行发电，横向挡板结构通过增大受浪面积，来增加波浪能的转化率，来进一步带动转子转动。

优化后的固定装置及锚链装置及浮体和平台的链接装置，能够提供较大的拖拽力来降低其与风、浪、流作用力合力的矢量和，在浮体及发电装置质量不变的前提下较小的合力使得平台的瞬时加速度减小，从而使得发电装置的单位时间内获得的有效位移较小。

最后加入新型发电装置，此装置由定子在外侧沿轴向开有槽，在内侧沿周向开有槽，定子内侧槽中嵌有直线绕组，外侧槽中嵌有旋转绕组;外转子内侧贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 极交错分布;内动子表面贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 交错分布，以达到最大能量转化率。

目录

第 1 章 设计背景.....2
1.1 国内外研究现状.....2
1.1.1 国内研究现状.....2
1.1.2 国外研究现状.....3
1.2 波浪能发电装置发展前景.....4
第 2 章 创新型半潜式平台设计方案.....6
第 3 章 可行性分析.....12
3.1 施工安全的可行性分析.....12
3.1.1 借助钻杆安装.....12
3.1.2 借助钢丝绳安装.....12
3.1.3 借助绞车安装.....13
3.1.4 借助滑轮安装.....15
3.1.5 安装方式优选.....15
3.2 环境安全的可行性分析.....15
3.2.1 基于最大熵值法编制波浪谱的研究.....16
3.2.2 基于最大熵值法的波浪谱耦合.....17
3.3 创新型发电装置结构稳定性分析.....19
3.4 创新型发电装置发电稳定性分析.....21
第 4 章 创新型发电装置创新点.....25
第 5 章 HES 及经济评价.....26
5.1 创新型发电装置 HSE.....26
5.2 创新型发电装置经济评价.....28
参考文献.....30

第 1 章 设计背景

为了全面深入进行波浪能发电装置综合性能测试系统的研究，必须先将波浪能发电装置的研究作为基础与重点，包括波浪能发电装置的原理、种类及其运行方式等。因此在开展本设计前需要对国内外波浪发电装置的发展研究现状进行归纳与总结。

1.1 国内外研究现状

波浪能发电装置根据其能量转换环节转换方式原理的不同，总体上可以分为三种类型：1. 海洋波浪的上下运动导致空气流的上下运动，进而使汽轮机转动，从而带动发电机进行发电；2. 海洋运动带动装置的直线往复运动或转动，再将装置机械运动的机械能转换化为电能；3. 利用波浪能将水引入高位水池蓄积起来，再通过水头冲击水轮机转化为电能[1]。针对三种不同类型的发电装置，国内外研究学者开展了相应的研究工作。

1.1.1 国内研究现状

我国对波浪能发电装置的研究起于 1950 年之后，晚于欧美日本等发达国家近 20 年，但在 80 年代之后国家投入增加、发电技术不断取得优化更新。我国虽然起步较晚但是发展迅速，而且近年来波浪发电装置的受重视程度也愈来愈高。2010 年我国启动了海洋可再生能源开发利用项目，进一步推动了波浪能发电装置、潮流能发电装置的研究发展[2]，波浪发电装置的研究不断取得新突破。

2011 年 11 月，由能源所七一二所自主承担设计的“哪吒 1 号”波浪能发电装置投入实海况测试。“哪吒 1 号”波浪能发电装置设计发电功率 10kW，采用永磁直线发电机，成功投放于广东珠海大万山岛海域海洋现场，海试测试现场电压输出平稳，最高输出相电压 381V。2013 年 2 月，七一二所承担研制的国家海洋局 20kW 波浪能永磁直线发电机“哪吒 2 号”顺利完成出所试验，“哪吒 2 号”整体结构采用漂浮式直驱波浪能发电系统，相较上一代采用的永磁直流发电机，“哪吒 2 号”采用整流-蓄电池-逆变系统直接为风速仪供电，不仅发电功率提高了一倍，装置结构及表面材料防腐结构都得到进一步优化，可以更长时间在海洋环境内可靠运行。

2012 年由中国科学院广州能源所海洋研究中心研制的“100kW 鹰式波浪能发电装置工程样机”在实海况情况下圆满完成了验收试验，达到了设计初期易投放、易维修、易移动等一系列设计要求，并且在接下来的实验周期内成功发电。相比于之前的发电装置而言，“鹰式一号”提高了发电的可靠性和稳定性，实现了小波浪情况

下间断发电、大波浪情况下稳定发电，并可满足高效稳定运行[3]。除此之外，当“鹰式一号”需要根据具体情况在海洋环境中航行或者拖行时，由于其特殊设计结构具有水阻小、稳定性高的优点，可以满足长距离拖行要求。并在“鹰式一号”装置实海况测试的 18 个月中，经历了强台风“海燕”，但在台风过后，装置仍可以正常运行，证明了装置运行的稳定性与可靠性[4]。2015 年 12 月，在 2013 年海洋能专项资金支持下，在中海工业有限公司和中科院广州能源研究所合作研制开发的“100kW 鹰式波浪能发电装置工程样机”即“鹰式一号”的基础上，“鹰式波浪能发电装置”已优化升级为一台海上漂浮式多功能互补平台——鹰式装置“万山号”并成功投放海试[5]，“万山号”如图 1-1 所示。该装置装机近 300kW，波浪能液压发电机组总装机 240kW，其中 120kW 为备用机组，专用于应对风暴工况，平时不工作；光伏装机峰值功率近 60kWp[6]。本文提出波浪能发电装置综合性能测试系统，并基于“万山号”鹰式发电装置进行了海试试验。

综上所述，我国波浪能发电装置已经取得了一些成果，技术上也取得了关键突破，随着参与研发的企业和高校不断增多，国家投入也在增加，各种新型波浪发电装置投入试验。但总体来说我国的波浪能发电装置领域仍处于示范试验阶段，并且距离商业化应用或者商业化应用前的论证阶段仍有一段距离。造成这种问题的主要原因是因为我国研发的波浪能发电装置普遍还存在发电效率低、发电成本高、可靠性不高、发电量少等问题。

1.1.2 国外研究现状

相比我国，欧美日本等发达国家对于波浪能利用和发电的研究起步早，技术应用也更加成熟[7]。近年来国外的海洋波浪能发电技术也愈发成熟，各种新型波浪能发电装置相继投入海试和并网发电。英国 OPD 公司设计并研制出的“Pelamis”波浪能发电装置，国内亦称为“海蛇”波浪能发电装置[8]。“海蛇”工作状态漂浮于水面上，由于型号的不同，不同的海蛇长度可从 15 米至 180 米不等。“海蛇”的输出功率与装置长度相关，长度越长，发电装置可配载更多的波浪发电浮体。当“海蛇”波浪能发电装置长度为 15m 时，输出电功率可达 750kW，“海蛇”发电浮体之间通过铰链式组件连接，可自由转动或小范围平动。在装置海试过程中要注意装置布置方式与海洋环境的配合，即装置的布放角度与方向要顺着海浪的主浪向方向。“海蛇”浮体在波浪的推动下往复运动产生机械能，从而带动浮体间铰链关节产生转动，浮体圆筒内部液压结构在推动力的作用下机械运动，液压油不断被吸入液压储能器中，蓄能器内部压力随着液压油流入不断增加，储存的高压液压油带动液压马达旋转进而带动电机做功输出电能，“海蛇”波浪能发电装置结构如图 1-2。

“Oyster”是由英国 Aquamarine Power 公司和 Belfast Queen’s University 联合开发的一种浮力摆波能转换装置，如图 1-4 所示。2009 年七月 Aquamarine Power 公司签订了 250 万英镑的订单开始在欧洲海洋能测试中心 Billia Croo 测试海域安装“Oyster”波浪能发电装置。同年 11 月“Oyester”装置成功完成海测阶段并成功并网，开始向英国电网供电[9]。“Oyster”装置由固定在海底的震荡浮力摆和液压缸组成，电能转换处理部分分布于岸上。“Oyster”装置具有如下优点：由于有部分可移动部分布置于水下，在面对波浪较大等极端天气时，装置可以方便的移动或者下潜来躲避大波浪；由于电能转换部分全部布置于岸上，水轮发电机等部件可以随时进行维护；供电能力较强，Aquamarine Power 公司预估 20 个“Oyster”组成的发电站可以足够支撑 9000 户家庭的电力需求等。2015 年澳大利亚的卡内基海浪波能公司(CWE)设计并制造出了新型波浪能发电装置“CETO 5”，并在同年“CETO 5”便成功经过现场海测试验，成功并网开始发电[10]。直到 2016 年一月，“CETO 5”所发的电能都由澳大利亚斯特灵岛 HMAS 海军基地购买用于基地的用电需求，其中还有部分电能直接用于装置海水淡化过程。“CETO 5”波浪能发电装置相比于世界上其他波浪能发电装置有许多优点，“CETO”的设计原理简单、发电鲁棒性强，并且区别于其他波能转换装置，“CETO”是目前唯一发电结构全部潜驳于水下的装置，完美地解决了漂浮海面上的浮标影响美观的问题，结构效果图如下图 a 所示。在工作状态时，位于水下的浮标会随着洋流的运动而往复机械运动，机械运动驱动水泵通过不断加压将海水通过水下管道运输到岸上，当高压海水运输到岸上后便利用海水冲击水轮机涡轮开始发电。加压海水到达岸上后还可以利用反渗透膜对其进行海水淡化处理，“CETO”各部分工作原理如图 b 所示。2016 年“CETO 6”波浪能发电装置的设计也在进展中，与“CETO 5”相比，新一代发电装置的水下浮标体积变得更大，能量转换发电环节通过电缆与岸上装置进行连接。通过这些设计的优化改变，“CETO 5”波浪能发电装置可以在更深水域以及更远离岸海域内进行发电。

1.2 波浪能发电装置发展前景

波浪能资源能量密度大、资源丰富、广泛分布在全球各个海域。如何能够高效合理的对波浪能实现利用，并转化为电能，是一个综合性的难题，涉及到众多科学领域-机械、数学、物理、生物、海洋科学等[11]。目前波浪能的发展方向正逐渐多元化，但总的发展趋势保持不变，即提升装置能量转换效率，提高装置可靠性，增加经济性。最终可以以更加成熟的技术、更加合理的成本投入来实现波浪能的大规模利用，进一步增加波浪能在可再生能源中所占的比例。

波浪能的综合利用也是目前波浪能发电装置的一个新的发展方向。传统浮式防

波堤或其他海洋结构物可以与波浪能发电装置相结合，为波浪能的利用开辟一条崭新的道路。与防波堤相结合的波浪能发电装置既可以达到防波堤的设计需求，对海洋工程建筑或设备提供保护，减少波浪对建筑的破坏，同时可以捕获波浪能，将波浪能转化为电能供海洋工程建筑或设备使用。同时传统的波浪能发电装置也可以与其他类型的新能源装置相结合，如海洋风能，太阳能，潮汐能。通过综合研发可以制造出综合能源供应设施，提高整个能源系统的可靠性，降低成本，提高发电稳定性，增大装机功率。与波浪能发电相结合的波浪能船舶，波浪能发电航行器等设备也是波浪能综合利用的一种途径，波浪能发电航行器可以在脱离母船的情况下在海域中长时间的执行任务，极大地降低了水下航行器使用成本。相信随着波浪能发电技术的不断提高，波浪能将会在社会多个重要领域发挥着不可替代的作用。

第 2 章 创新型发电装置设计方案

基于海洋能产业技术创新体系构建原则及可持续发展思想，针对远离海岸的环境，海中作业情况，进行一种全方位捕捉波浪能的、绿色环保的、满足深海作业的波浪发电设计。

由于波浪的能量与波浪的高度、波浪的运动周期以及迎波面的宽度等多种因素有关。因此，波浪能是各种海洋能源中能量最不稳定的一种。本次设机主要围绕提高波浪能利用效率的思路开展，针对捕捉浪能的方式，浪能转化为电能的方式进行创新优化设计。本次设计技术路线流程如图 2.1 所示。

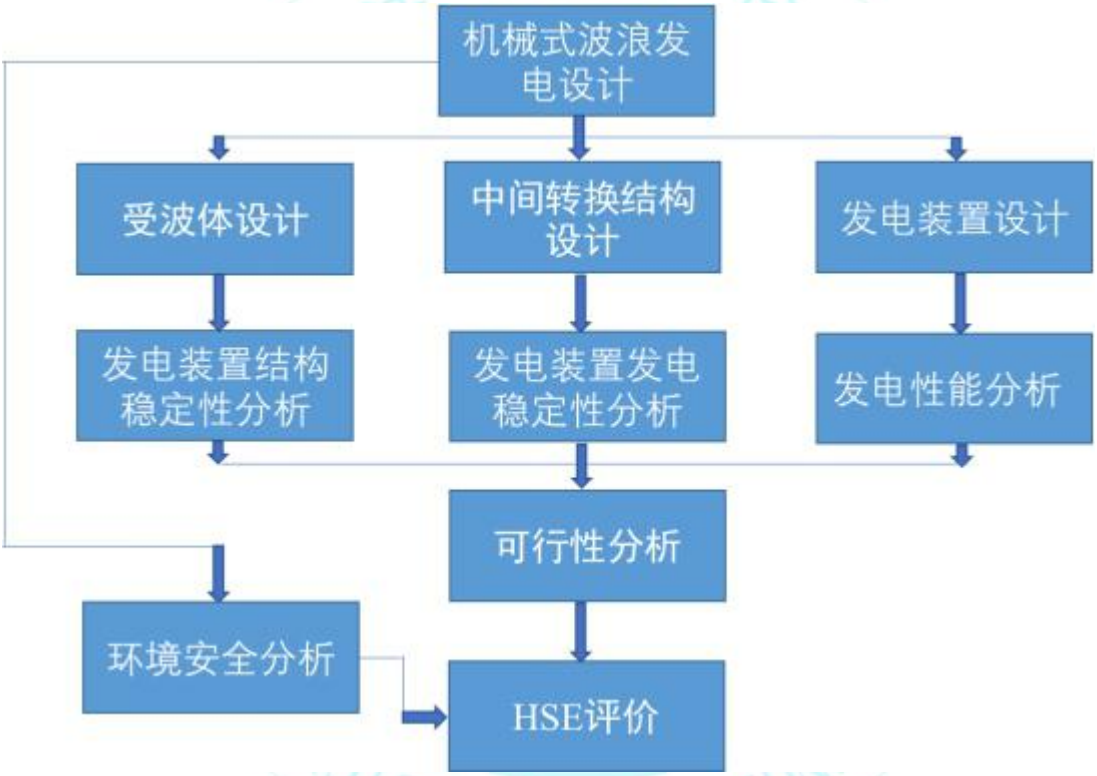


图 2.1 技术路线设计

波浪发电的原理是通过转换装置，先把波浪能转换为机械能，再最终转换成电能。能量的传递形式有以下三级：（1）接受能量；（2）转换能量；（3）传输能量。根据能量的传递形式，针对发电装置的基本构成进行发电装置的结构设计，设计思路如下：

（1）受波体设计

受波体用于接收波浪起伏，采用螺纹加挡板式结构，如图 2.2 所示，螺纹式受波体包附于转子外壳与发电装置为一体式结构，螺型条纹增加与波浪受力面积并对

四面波浪进行全方位接收，并带动装置旋转，挡板式结构上下各 4 片，共有 8 片挡板，大幅度增加与波浪接触面积，并与螺纹式结构为相互带动关系，共同作用。

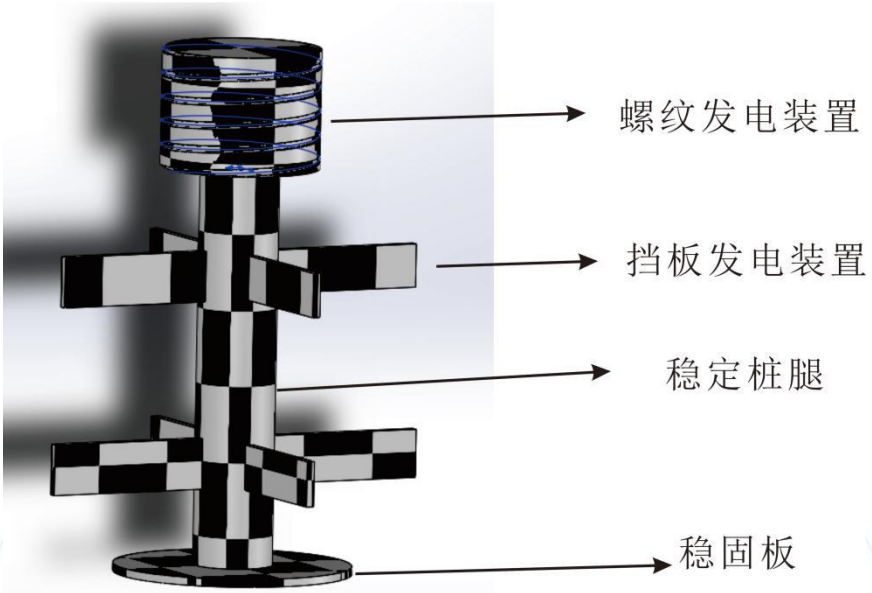


图 2.2 受波体结构

（2）挡板式受波体结构设计

由于挡板式受波体的结构对受波面积及波浪摩阻较大，因此我组通过模型计算及 ansys 有限元分析，对受波体结构进行进一步优化。

分别对弯曲强度及扭曲强度进行计算：

$$R_y = EI_y = \sum_{i=1}^{n} E_i\left[\left(I_{yo}\right) + y_{0_i}^2 A_i\right]$$

$$S_{ij}^c = \frac{C_{x_i}^j - C_{x_i+\Delta x}^j}{\Delta x}$$

确定结构

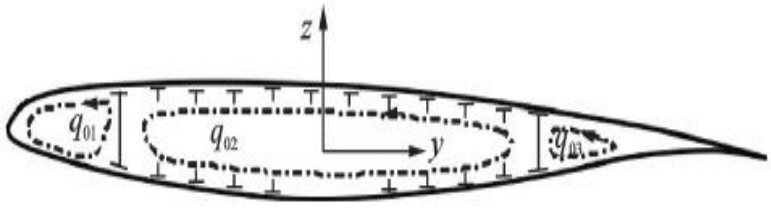


图 2.3 受波体结构

最后通过 ansys 进行力学分析，确定类翼形结构。

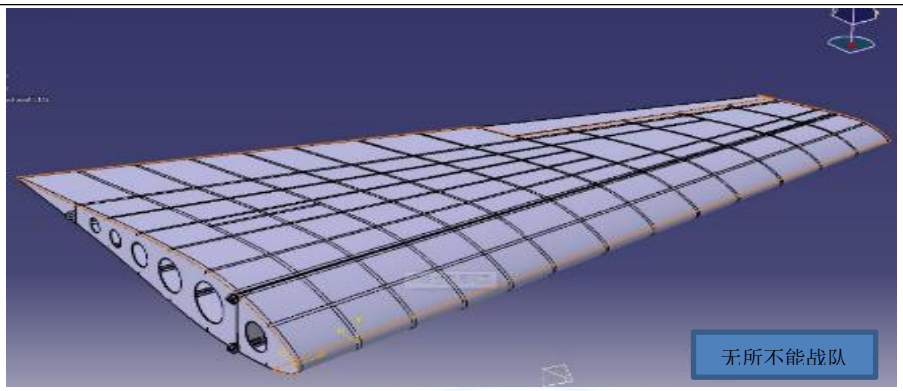


图 2.4 受波体结构

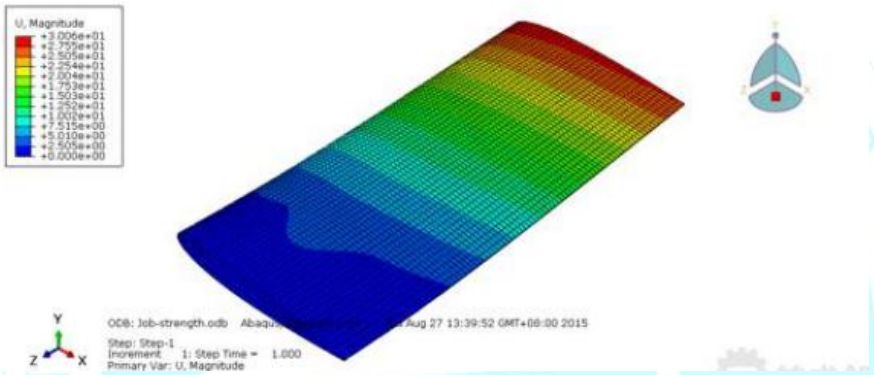


图 2.5 受波体力学分析

（2）连接传动装置设计结构

传动装置与转换装置将波浪起伏转换成旋转运动，发电机的转轴与转换装置固定连接，连接发电装置的桩腿为圆柱体结构，稳定性更强，转腿连接螺纹式受波体与挡板式守波体。当受波体接收波浪后，受力驱动带动转子旋转运动，带动发电机发电。装置与浮体连接部分设计固定式连接结构，提高水下装置的稳定性，在装置下部安装锚链，在水下连接进一步增加装置稳定性。

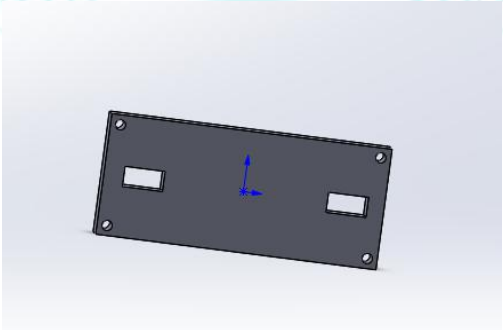


图 2.6 连接装置结构

（3）发电装置设计

直线旋转永磁发电机是将波浪能转换为电能，是新型波浪组合发电系统的核心部件。本文提出的一种新型波浪组合发电系统用直线旋转永磁发电机，如图 2.4 所示，主要包括定子、外转子、内动子、直线单元绕组、旋转单元绕组、直线单元永磁体和旋转单元永磁体。定子在外侧沿轴向开有槽，在内侧沿周向开有槽，定子内侧槽中嵌有直线绕组，外侧槽中嵌有旋转绕组;外转子内侧贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 极交错分布;内动子表面贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 交错分布。LRPMG 可以分为直线单元和旋转单元，其中直线单元包括定子、内动子、直线单元绕组和直线单元永磁体;旋转单元包括定子、外转子、旋转单元绕组和旋转单元永磁体。直线单元的轴向截面图如图 2.5，旋转单元的径向截面如图 2.5 所示。外转子在风力机的驱动下做旋转运动，旋转单元永磁体产生的磁场切割旋转单元绕组，从而将风能转换为电能;内动子在浮筒的驱动下做轴向的直线运动,直线单元永磁体产生的磁场切割直线单元绕组，从而将波浪能转换为电能。

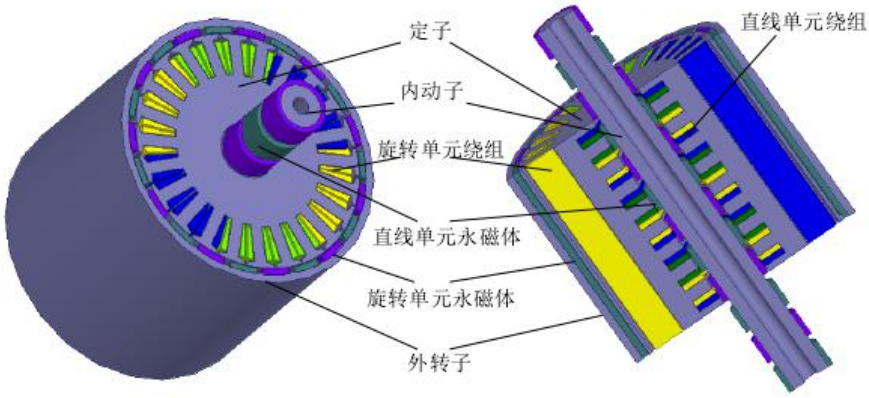


图 2.7　直线旋转永磁发电机

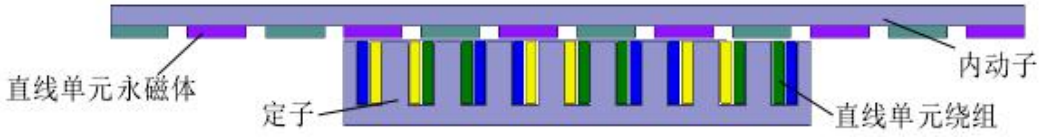


图 2.8　直线旋转永磁发电机轴向截面图

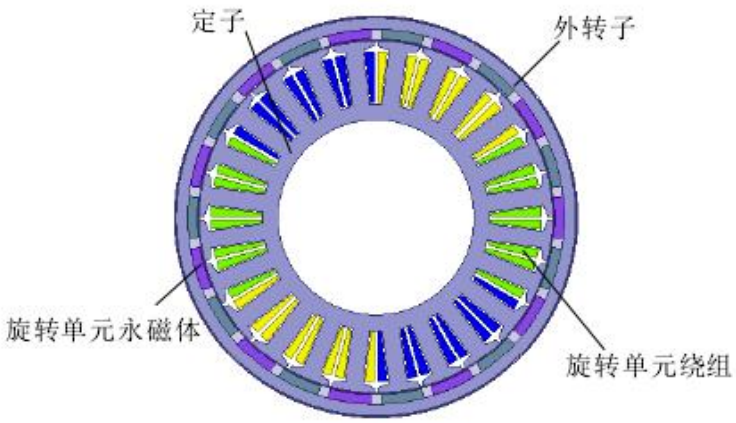


图 2.9　直线旋转永磁发电机径向截面图

（4）蓄电装置设计

当极板浸入电解液时，在负极板处，金属铅受到两方面的作用，一方面它有溶解于电解液的倾向，因而有少量铅进入溶液，生成 Pb2+，在极板上留下两个电子 2e，使极板带负电；另一方面，由于正、负电荷的吸引，Pb2+有沉附于极板表面的倾向。当两者达到平衡时，溶解便停止，此时极板具有负电位，约为-0.1V。

正极板处，少量 Pb02 溶入电解液，与水生成 Pb(OH)：，再分离成四价铅离子和氢氧根离子。即

$$PbO_2+2H_2O\longrightarrow Pb(OH)_4$$

$$Pb(OH)_4=Pb^{4+}+4(OH)^-$$

在负极板处，Pb2+与电解液中的 SO42-结合也生成 PbS04 沉附在负极板上，而极板上的金属铅继续溶解，生成 Pb2+和电子。如果电路不中断，上述化学反应将继续进行，使正极板上的 Pb02 和负极板上的 Pb 都逐渐转变为 PbS04，电解液中的 PbS04 逐渐减少而水增多，故电解液相对密度下降。

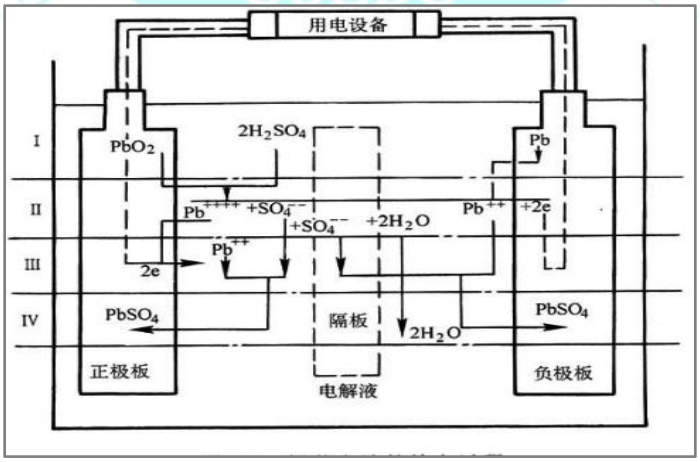


图 2.10　蓄电装置原理图

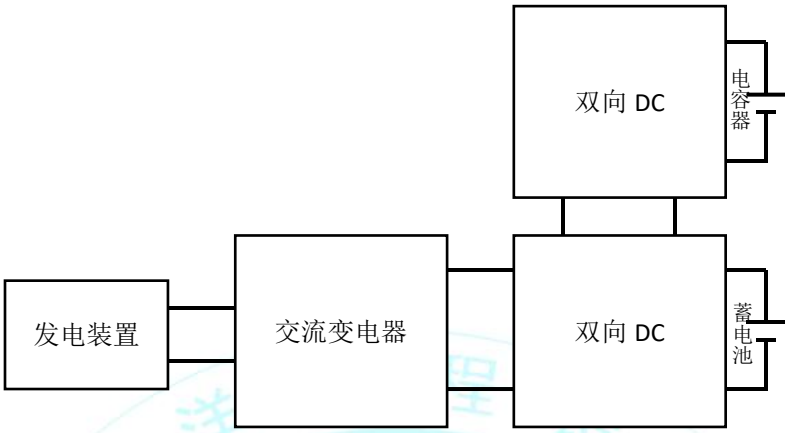


图 2.11　蓄电装置结构图

第 3 章 可行性分析

3.1 施工安全的可行性分析

3.1.1 借助钻杆安装

钻杆直接安装法是指在平台上用钻杆或完井立管下放安装发电装置，将发电装置由运输船吊装到平台上，使用运移滑轨将发电装置移动到月池，然后将发电装置下放工具固定在发电装置上，钻杆连接发电装置下放工具，在平台上下放钻杆，发电装置坐放到井口上，锁紧、测试完成后，回收钻杆和下放工具，在整个下放安装过程钻井平台上的升沉补偿装置对下放管柱和发电装置组成的悬挂系统进行升沉补偿。如图所示，钻杆安装法就是采用钻杆直接完成相应结构物安装的方法。采用钻杆安装法进行发电装置的安装，可以直接选用钻井船作为作业平台，这样就节省了重新选用作业平台的时间，因为海上作业每日的花费都非常高，所以采用此方法不但以节省时间还相应的减少了成本的消耗。采用钻杆安装法安装发电装置，一般先将发电装置系统由驳船运输到作业平台月池的下方并进行固定，然后用接单根的方法逐步将发电装置下放至海底井口，并通过下放工具完成发电装置的坐放、锁紧。此外可以进行海上深水钻井作业的钻井船大都安装有动力定位系统，可以对发电装置系统下放安装过程提供可靠的支持。由于在海上钻井过程中也需要用到升沉补偿装置，可以为发电装置系统下放过程中所要求的受力和下放速度提供保障，确保下放管柱的受力稳定，达到安全稳定快速的完成发电装置系统安装的目标。

图 3.1　借助钻杆安装

3.1.2 借助钢丝绳安装

传统钢丝绳吊装安装法是将发电装置系统通过钢丝绳直接连接在作业平台的吊机或绞车上，缓慢吊放至海底的安装方法，如图所示。常见的作业平台有普通的锚

固浮吊和动力定位浮吊。若采用锚固浮吊，则在动力定位方面很难满足要求；若选择动力定位浮吊，则花费较高，并且该方法主要应用于水深小于 1000m 的情况。深水发电装置的安装对安装设备和方法有比较苛刻的要求，首先发电装置的下放需要准确的定位和稳定的受力,这就要求作业平台同时具有升沉补偿和动力定位的能力；其次由于发电装置本身的体积和重量都较大，这就给作业平台提出了更高的要求，如足够的甲板面积、较大的提升能力等诸多条件；再次钢丝绳本身结构的限制，随着水深的增加，需要更长的钢丝绳，使绞车或吊装设备负载显著增加，这就要求绞车或吊装设备能够承受更大的载荷。对作业平台要求的提高，会使安装费用产生较大的增加，从而使的该法具有经济性差的缺点，因此该方法主要应用于水深较浅的安装作业中。

图 3.2　传统钢丝绳吊装安装法

3.1.3 借助绞车安装

借助绞车安装方式是指发电装置通过钢丝绳或者是纤维绳等承重绳索下放，承重索的下放控制由绞车或者是起重机下放。一般来讲，发电装置的重量较轻，通常情况下小于 30 吨，普通船上的绞车或者起重机都可以承受其重力。图 3.3 为一发电装置通过承重绳下放的照片。

图 3.3　承重索下放发电装置

借助绞车/起重机安装方式，即起重机工作水深满足的情况下，可以直接用起重机进行下放，当水深超出起重机的工作水深范围，则使用起重机起吊，绞车下放到海床。下面以在挪威 Ormen Lange 油田安装的水下基盘为例，介绍水下系统通过承重索下放的方法。如图是其具体安装过程：

① 利用吊机将水下基盘从码头放在驳船上，并运输到安装地点；

② 与平台上绞车的缆绳连接之后，悬吊一定距离，移开驳船，并定位到安装位置；

③ 垂直下放缆绳，通过飞溅区，同时使用 ROV 进行跟踪检测，直至海底安装。

图 3.4 起重机安装步骤一

图 3.5 起重机安装步骤二

图 3.6 起重机安装步骤三

3.1.4 借助滑轮安装

借助滑轮安装方式即起重机或是绞车缆绳承载能力不足时，在连接缆绳与水下管汇之处加一个滑轮，从而满足承载力要求，如图

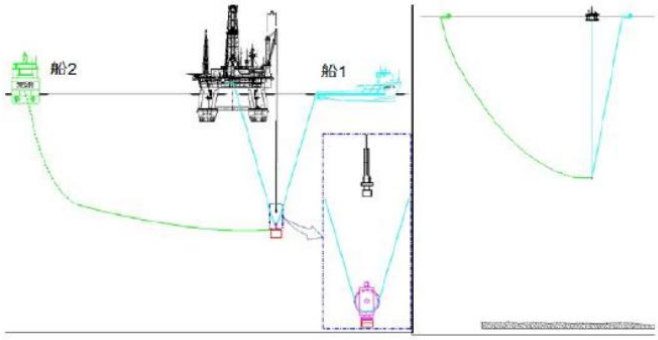


图 3.7　借助滑轮安装示意图

3.1.5 安装方式优选

表 3-1　优选结构

	效率	经济	稳定性	环境污染
钻杆	中	中	良	良
钢丝	优	良	良	优
绞车	劣	劣	优	劣
滑轮	良	优	劣	中

在综合考虑发电装置安装过程中的工作效率、经济效益、安装稳定性、及环境污染等方面优选出本次发电装置以钢丝下放作为主要安装方法。

3.2 环境安全的可行性分析

针对环境安全的可行性分析，首先我们要基于真实海上环境进行研究，开展影响因素分析，从下放质量、高度、风强度、浪高、波浪周期、水深等角度开展单因素分析，其次依据风载、波浪和流载荷等实际数据，编制耦合工况载荷谱。最后运用倾斜函数估计法和最大熵值法对接收的风、浪和海流信号，编制耦合工况载荷谱，完成基于材料、几何非线性的采油树下放系统动力学研究。以 DongShang 附近海域数据为基础建立波浪谱。DongShang 测点如下图所示：

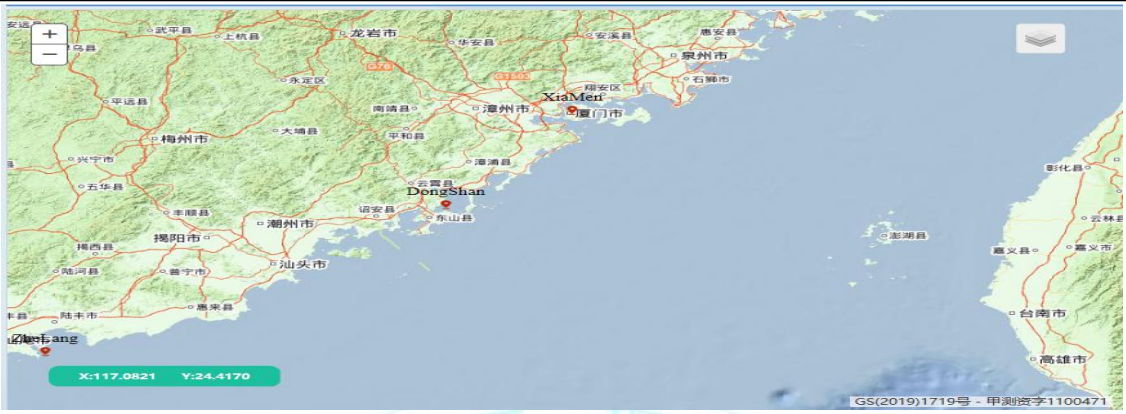


图 3.8　DongShang 测点

3.2.1 基于最大熵值法编制波浪谱的研究

（1）最大熵值法求解波高

采样间隔对谱估计的影响分析与 FIA 法一样，熵值过大，信息量减小，折叠频率明显。对于同一组数据，当采样时段即熵值采样隔分别取时，用法得到的谱形曲线见图，相关参数的计算结果见表。可见：

平均波高：

$$\overline{H} = \sqrt{2\Pi M}$$

平均周期：

$$\overline{T} = 2\Pi\sqrt{M/M}$$

通过调研的波浪数据采用熵值法计算 2019-2013 年度的放浪数据编制月波浪谱如下：

表 3-2　最大嫡方法法计算结果

年份	月均值 X	年均值 P*	周期 T
2013	1.43、1.31、0.96、0.78、1.1、1.2 、1.53、0.85、1.36、0.77、1.12、0.98	1.12	12
2014	1.21、1.31、1.2、1.71、1.51、0.99、0.88、0.97、1.11、1.3、0.71、1.11	1.17	12
2015	1.28、1.18、1.2 、1.41、1.51、1.0 、0.88、0.97、0.89、1.23、0.81、1.31	1.15	12
2016	0.92、1.38、1.13、1.41、1.55、1.0 、0.88、1.03、0.86、1.11、0.83、1.21	1.11	12

2017	0.77、0.91、1.13、0.87、1.25、1.0 、0.87、1.13、0.86、1.32、0.96、1.21	1.02	12
2018	0.93、0.91、1.13、0.76、1.25、1.0 、0.87、1.65、0.96、1.32、1.43、1.32	1.13	12
2019	1.35、1.31、1.41、0.78、1.33、1.0 、10.3、0.85、0.95、1.32、1.12、1.23	1.14	12

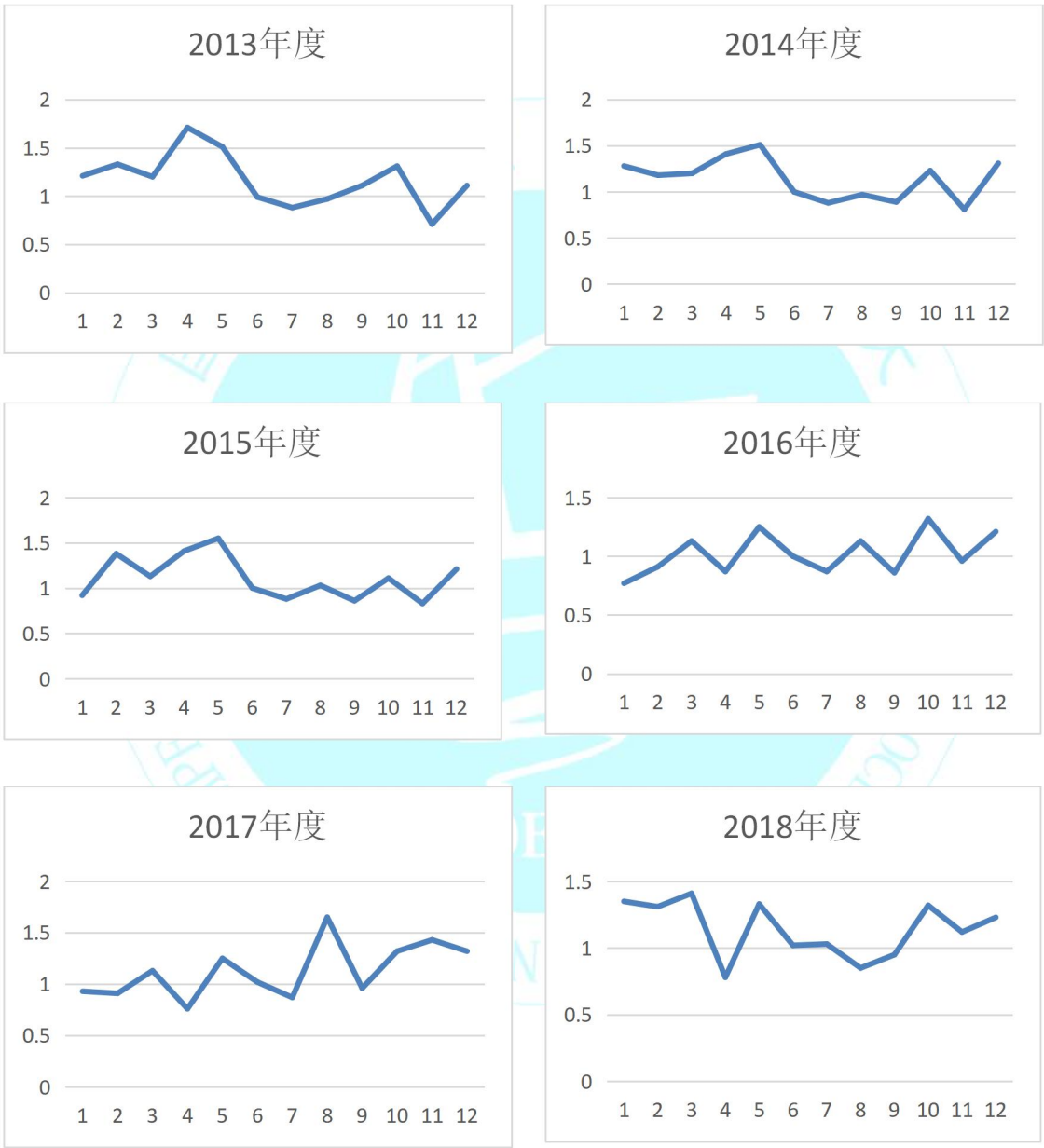


图 3.9　2019-2013 年度波浪谱

3.2.2 基于最大熵值法的波浪谱耦合

根据上述的分析比较得到法不同年度波浪谱，从而减少了谱泄漏，分辨率较高，因此本此研究应用波浪谱的耦合从而建立更为准确的波浪谱。

采用熵值法计算结果：

$$\frac{S(\mathrm{w})\overline{\mathrm{w}}}{m}=5.928\left(\frac{w}{T}\right)\exp\left[-\left(\frac{w}{T}\right)\right]$$

通过计算年度峰值的最大值与最小值从而确定年平均度来耦合不同年度数据，从而确定真实准确的波浪数据建立波浪皮

表 3-3　熵值法计算结果

年份	最大值	最小值	平均值
2013	1.53	0.77	1.12
2014	1.71	0.71	1.17
2015	1.51	0.88	1.15
2016	1.55	0.83	1.11
2017	1.32	0.77	1.02
2018	1.65	0.76	1.13
2019	1.41	0.85	1.14

最终进行熵值曲线的耦合：

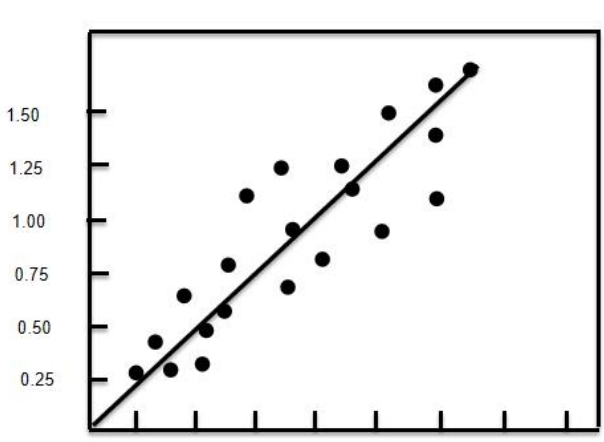


图 3.10　2013-2019 年度波浪耦合曲线

根据熵值曲线建立 2019-2013 年度的波浪谱曲线如下图：

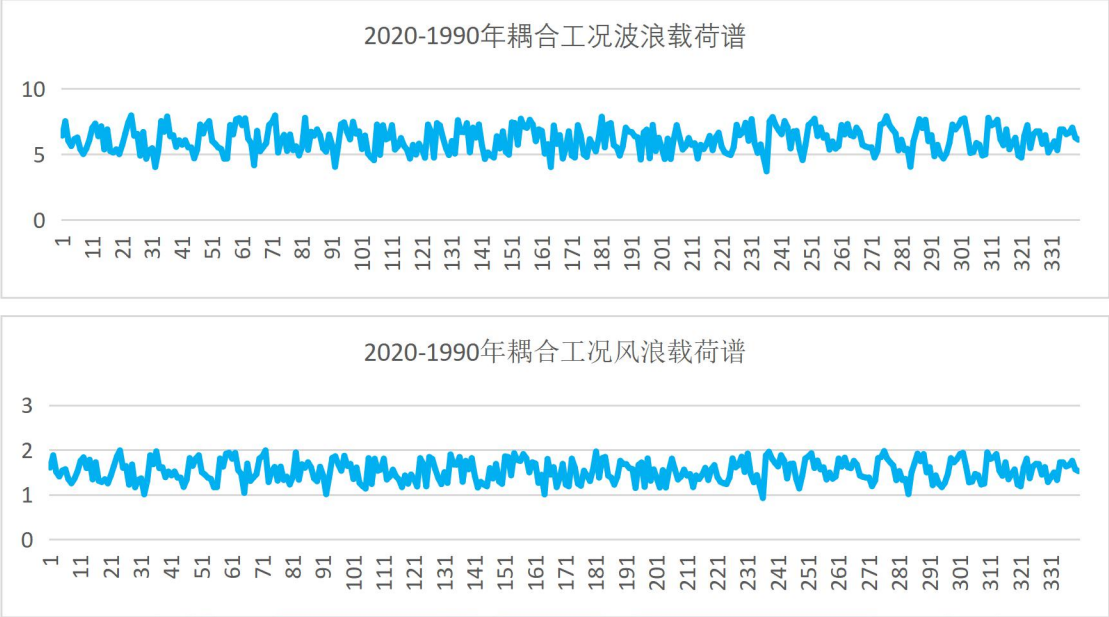


图 3.11　2013-2019 年度耦合波浪偶

3.3 创新型发电装置结构稳定性分析

选择对潮流能发电实验平台稳定性影响最大的横摇和纵摇进行分析，分别计算波浪、海流、风载荷下的最大响应，然后按照各个最大响应情况进行叠加分析。转了在建模中简化为直径相当的圆柱体，密封的圆柱体受力显然要大于开放的叶片式转了，保证了分析结果的可靠性。同时，通过数值模拟的方式，分析不同水深下发电装置的受力情况，充分保证了，发电装置深水作业的稳定性

（1）数值模拟显示，当水深处在 50-60m 时，发电装置表面受力均匀，且未出现受力不均而造成的形变。

通过公式 $p = \rho g h$ 可以确定此时平台受力大约在 5-6mpa。

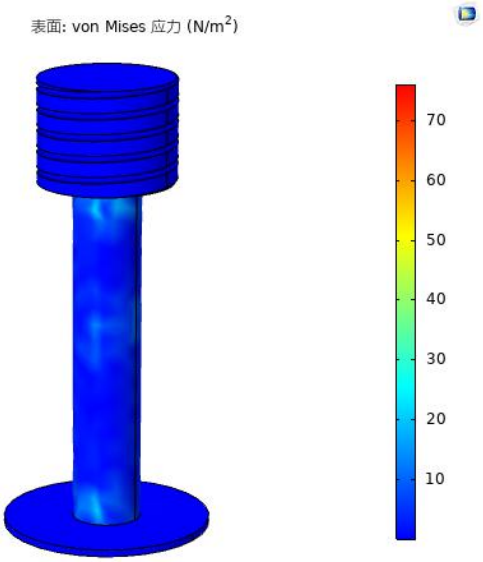


图 3.11　50-60m 水深时发电装置受力情况

因此确定，发电装置在 50-60m 水深时能满足特定工况条件下的作业，同时能够降低平台主体及附属结构因过大的慢漂运动而遭到破坏。

（2）当水深处在 70-80m 时，发电装置表面出现受力均匀现象，但未出现受力不均而造成的形变。

通过公式 $p = \rho gh$ 可以确定此时平台受力大约在 7-8mpa。

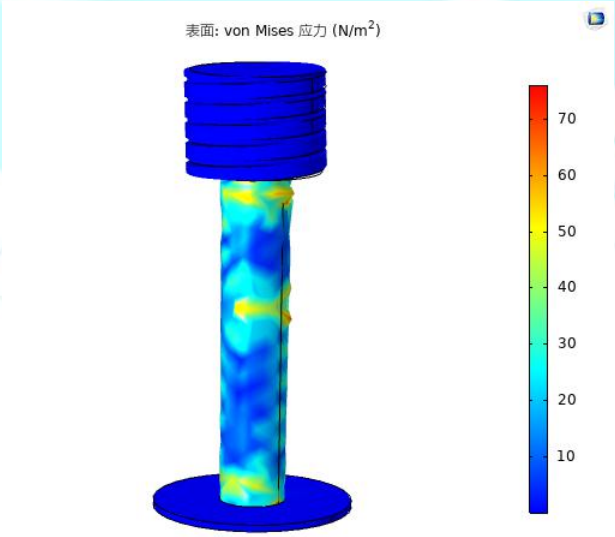


图 3.12　70-80m 水深时发电装置受力情况

因此确定，发电装置在 70-80m 水深时能满足特定工况条件下的作业，同时能够降低平台主体及附属结构因过大的慢漂运动而遭到破坏，但长时间处于此条件下作

业会减少发电装置寿命。

（3）当水深处在 90-100m 时，发电装置表面大面积出现均匀，且出现由于受力不均而造成的形变。

通过公式 $p = \rho gh$ 可以确定此时平台受力大约在 9-10mpa。

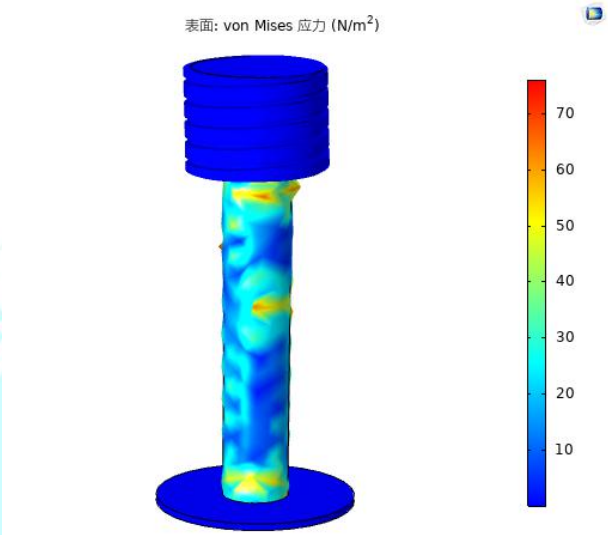


图 3.13　90-100m 水深时发电装置受力情况

因此确定，发电装置在 90-100m 水深时未能满足特定工况条件下的作业，同时未能够降低平台主体及附属结构因过大的慢漂运动而遭到破坏。

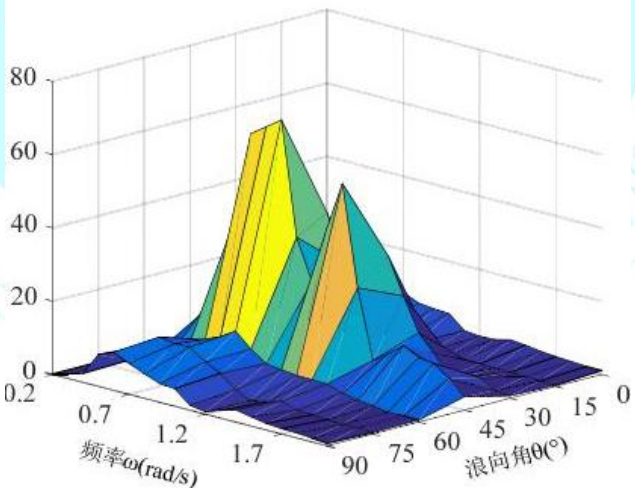


图 3.14　发电装置总体受力情况

因此通过数值模拟确定，在既要满足发电装置的稳定工作，又要保证结构稳定的前提下，发电装置最佳作业水深为在 50-60m。

3.4 创新型发电装置发电稳定性分析

目前的波浪组合发电系统大体可以分为两种类型:一种是用两台发电,机械能然后将这两种电能集中处理;另一种是首先利用风能和波浪能发电机分别利用风能和波浪能收集装置将这两种能量转换为然后利用动力藕合结构将两种动能藕合，再利用一台发电机发电。虽然这两种类型的波浪组合发电系统同时利用风能和波浪建设成本高、材料利用率低等问题能进行发电，提高了系统的发电量，但是也存在着系统结构复杂、建设成本高、材料利用率低等问题。

针对目前波浪组合发电系统存在的问题，并根据现有的波浪发电装置，本文提出一种新型波浪发电系统，该系统的原理示意图如图 3.15 所示。在无机械藕合的情况下，该系统利用一台直线旋转永磁发电机实现波浪能发电。系统结构如图 3.16 所示。该系统主要包括横向轴波浪机、浮筒、直线旋转电机和固定桩，其中横向旋转永磁电机可以分为用于波浪发电的旋转单元和用于波浪发电的挡板单元。波浪机吸收风能并转换为机械能,带动旋转单元的转子转动从而发出电;挡板吸收波浪能并转换为机械能，带动直线单元的动子做旋转运动从而发出波浪电。横向旋转永磁电机发出的电能通过电力电子装置一部分转换为标准交流电，一部分转换为直流电存入储能设备作为系统用电和就近用电。

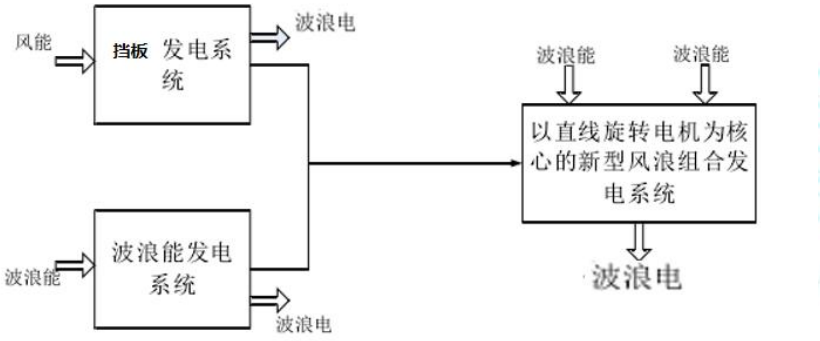


图 3.15　发电装置设计思路

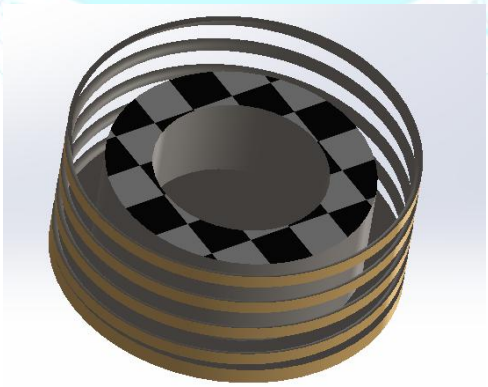


图 3.16　发电装置结构图

（1）稳定阶段磁场变化

通过 comsol 模拟发现，磁密和磁链在电机中的分布情况，可以判断电机设计的合理性。旋转单元在负载和空载时的时的磁密分布、空载时的磁链分布以及剖分图如图 3.17 所示。从图 3.17 可知，旋转单元在定子齿的磁密的稳定值大约为 0.5T。与空载运行时相比，负载运行时的磁密值有所降低，这是由于电枢反应的去磁作用。

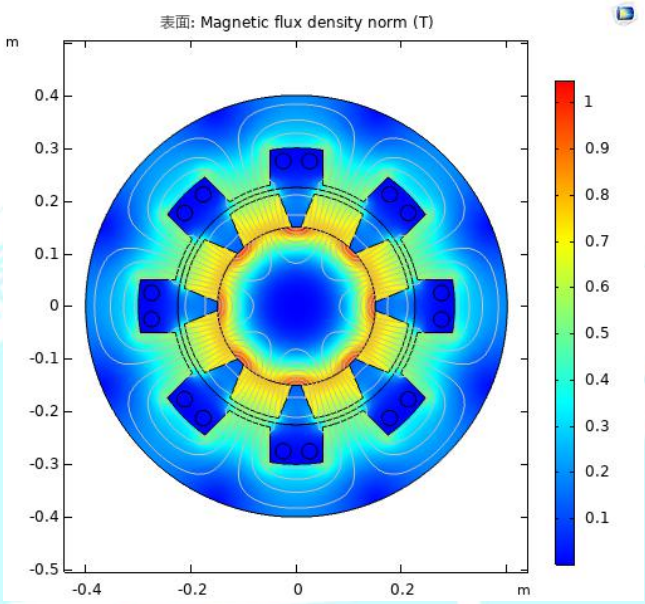


图 3.17　发电装置稳定状态下磁场变化

（2）发电阶段磁场变化

直线单元在空载和负载时的磁密分布、空载时的磁力线分布及剖分图如图 3.18 所示。从图中 3.18 可知，直线单元定子齿的磁密最大值约为 25000T，且在负载时齿部磁密并没有出现明显的减小，说明直线单元电枢反应的影响较弱。磁力线分布如图 3.19 所示，直线单元定子齿的磁密最小值约为 20000T，且在负载时齿部磁密并没有出现明显的减小，说明直线单元电枢反应的影响较弱。

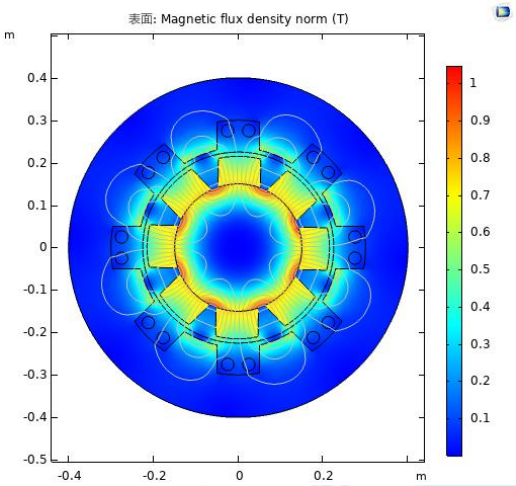


图 3.18　发电装置变化下磁场最小值

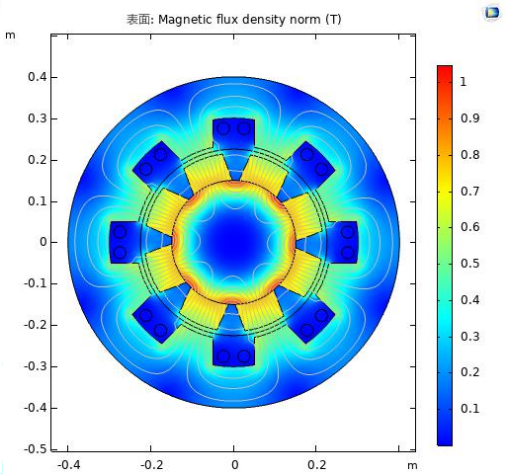


图 3.19　发电装置变化下磁场最大值

因此通过数值模拟确定，发电装置在最小磁密的情况下依旧能够有效、稳定的持续发电。

第 4 章 创新型发电装置创新点

本次设计以海洋可再生能源的开发及利用为主线，综合考虑海上波浪条件，设备稳定性，设备磨损性及发电装置的优化设计为研究主线。较为全面的分析了海上波浪的发电能力及影响发电效率的影响因素，以便最大效率的开采海洋波浪能。本次设计通过综合考虑波浪发电装置结构，受波体结构优化，中间转换装置设计及发电装置设计等 4 方面，设计出了发电效率较高、电流稳定性较强结构强度较大的创新型发电装置。

1.优化了受波体结构，改进冲击式涡轮机，建立全方位波浪捕捉装置，最大限度的依靠海底波浪能进行涡轮发电，同时依靠浪、流作用力合力的矢量和，在附体质量不变的前提下较小的合力使得涡轮的瞬时加速度达到最大，从而使得发电装置在单位时间内获得的有效位移最大。

2.在冲击式涡轮机上增加新型“挡板式”受波体结构，既在原有的稳定结构基础上，在其桩腿中间增加 8 个“挡板式”受波体，从而以增加平台的受波面积来增加涡轮发电效率，受波体以横线挡板为主，从而增加发电装置的受流面积，增加发电效率。

3.建立新型支架连接结构，以锁扣、销及母扣进行连接，从而增加平台浮体及发电装置连接的稳定性，提高平台及发电装置连接强度。

4.设计了新型发电装置，此装置由定子在外侧沿轴向开有槽，在内侧沿周向开有槽,定子内侧槽中嵌有直线绕组,外侧槽中嵌有旋转绕组;外转子内侧贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 极交错分布;内动子表面贴有永磁体，沿轴向方向 N,S 交错分布。以达到最大发电效率。

5.建立了相应的数学模型，并通过模拟实验与推导证明了该理论是正确的可行的。对钻井平台设计具有重要的理论指导作用。

6.结合已有的波浪发电装置的设计理念，同时考虑到优化设计思路和方法，设计出了高效率的冲击涡轮发电装置，并对其进行理论加数值模拟分析得出了，最优构型的发电装置，为以后的波浪发电设计提出了重要的理论加构型的参考。

第 5 章 HES 及经济评价

波浪能发电系统性能评估的目的是通过对入射波浪能量和发电系统输出功率的测量和计算，衡量发电系统的设计优劣并促进其产业化进程。本文主要从发电功率评估、效率评估和经济性评估三个方面给出了波浪能发电系统的性能评估指标。其中功率指标包括功率矩阵和性能矩阵，效率指标包括系统转换效率和俘获宽度比，经济性指标包括容量系数和可利用率。

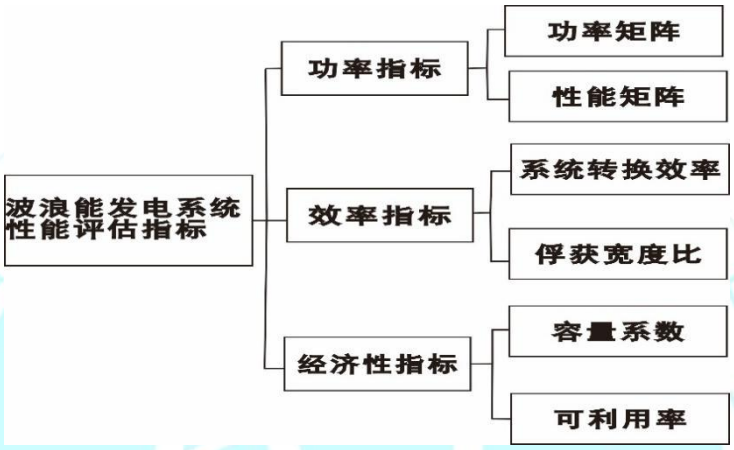


图 5.1 波浪能发电系统系统性能评估指标

5.1 创新型发电装置 HSE

5.1.1 功率指标

功率矩阵是目前评估波浪能发电系统性能的常用指标，它描述了不同海况下波浪能发电系统的输出功率大小。其纵坐标为有效波高H_m，横坐标通常为能量周期T_e(或谱峰周期)。纵坐标步长 AH 一般取 0.5m，横坐标步长ΔH_m。可取 0.5s 或 1.0s，根据测试海域的实际海况选择。假设某矩阵单元对应的有效波高下限值和上限值分别为 HL 和 HH，能量周期下限值和上限值分别为 TL 和 TH，则该单元的标号由坐标上限值来确定。如果某组测量数据的入射波要素满足 HL＜H_m。≤HH 且 TL＜T_e≤TH，则将其对应的发电系统平均输出功率值分派到该矩阵单元内。如此反复，将 N 个平均输出功率值分派到相匹配的矩阵单元中，对每个单元内的多个功率值取简单算术平均即得到功率矩阵。给出了波浪能发电系统的功率矩阵示意图。然而，功率矩阵并不能反映除了有效波高和能量周期之外的海况参数(如海浪谱型和方向分布等)对波浪能发电系统性能的影响。在具有相同的有效波高和能量周期的不同海况下，由于海浪谱型的变化(可能出现双峰或多峰谱)会造成同一波浪能发电系统性能的明显差异。只有当海浪谱能较好地匹配发电系统的响应特性时，才

能够获取预期的发电性能。因此，仅给出功率矩阵是不全面的，还需要通过性能矩阵来进一步评估波向和海浪谱型变化等因素对波浪能发电系统性能的影响程度。

5.1.2 性能矩阵

性能矩阵为一系列形如功率矩阵的图表，其中除了平均功率矩阵之外，还包括最大功率矩阵、最小功率矩阵和功率标准差矩阵等，这些矩阵的统计过程类似于功率矩阵，不同的是最后对分派到每个矩阵单元内的输出功率分别取其最大值、最小值和标准差等。给出了波浪能发电系统的性能矩阵示意图(图中简化了矩阵单元的数量)。通过性能矩阵可以判断波浪能发电系统的性能对波向和海浪谱型变化的敏感程度:如果性能矩阵每个单元内对应的平均功率、最大功率值和最小功率值比较接近，且相应的标准差也比较小，说明波浪能发电系统对波向和海浪谱型的变化不敏感，这意味着平均功率矩阵可以准确地描述该区域海况与波浪能发电系统输出功率之间的关系;相反地，如果性能矩阵每个单元内对应的平均功率、最大功率值和最小功率值之间差别较大，且具有相对较高的标准差，则说明波浪能发电系统的性能对波向和海浪谱型的变化较为敏感，还需要引入相应参数进一步分析研究。

5.1.3 效率指标

系统转换效率η定义为测试期间波浪能发电系统的平均输出功率 E_{OUT} 与可利用的总波浪能 E_A 的比值：

$$\eta = \frac{E_{OUT}}{E_A} \times 100\%$$

式中：E_A 为测试期间 N 组数据对应的入射波浪能量的总和：

$$E_A = \sum_{i=1}^{N} (P_{sea} L_m) i$$

式中：P_{sea} 为Δt 时间内波浪能入射波浪功率；L_m 为理论极限俘获宽度。

对于不用类型的波浪能发电系统，其波浪能俘获装置的运动模态不同，对应的理论极限俘获宽度 L_m 也不同。表 1 给出了不用能量俘获方式的波浪能发电系统对应的理论极限俘获宽度（其中λ为入射波长）。

表 5-1 不同能量俘获方式的波浪能发电系统的理论极限俘获宽度

运动模态	理论极限俘获宽度
垂荡	$\lambda/2\pi \approx 0.46\lambda$
纵荡/纵摇	$\lambda/\pi \approx 0.32\lambda$

垂荡和纵荡/垂荡和纵摇	3λ/2 π ≈0.48 λ
线吸收式（长度=λ）	0.50 λ
线吸收式（长度=2 λ）	0.73 λ

5.2 创新型发电装置经济评价

5.2.1 容量系数

容量系数表征了波浪能发电系统在测试期间能否连续高效运行的特性，决定了波浪能发电系统的发电成本，是衡量其设计优劣的主要指标之一。容量系数 CF 定义为：

$$CF = \frac{P_{WECS}}{P_r}$$

式中，P_{WECS} 为Δt 时间内波浪能发电系统的平均输出功率；P_r 为波浪能发电系统的额定功率。测试期间 N 组数据对应的容量系数的平均值即平均容量系数。

5.2.2 可利用率

可利用率表征了波浪能发电系统在测试期间无障碍、免维护正常运行的能力，从可靠性的角度也体现了波浪能发电系统运行的经济性。可利用率通常可由下式得到：

$$可利用率 = \frac{发电系统正常运行的时间}{测试期总时间} \times 100\%$$

需要注意的是，波浪能发电系统正常运行的时间包含了系统因极端海况进入生存模式（系统输出功率为 0）但没有故障发生时的运行时间。

表 5-2 费用评估

说明	船舶名称	动员	码头装船	往返航行	海上施工	码头吊装卸船	码头清驳	总计/天
半潜伏钻井平台安装费用	3000 吨自航驳工期（天）	2	1	2	5	0.5	0.5	9
	3000 吨自航驳单价（万）	3	2.5	3	2.5	2.5	2.5	
	3000 吨自航驳总价（万）	3	2.5	6	12.5	1.25	1.25	26.5
	2000HP 抛锚艇工期（天）			2	4			
	3000 吨自航驳单价（万）			2	2			

	3000 吨自航驳工期（万）			4	8			12
	气囊购置费（万）	5						
	合计（万）	8	2.5	10	20.5	1.25	1.25	43.5

5.2.3 结论

本次设计基于实测数据从效率和经济性两个方面给出并解析了波浪能发电系统的性能指标，为波浪能发电系统的性能评估提供了理论参考依据。基于实测数据而非计算数据，因此对应较大有效波高和能量周期的实测值较少，因此结果的可靠性较差。而且由于影响波浪能资源的因素较为复杂，波浪能发电系统对其他因素敏感时，需进一步研究。

参考文献

[1]王晓冬, 薛占璞, 李占岭. 波浪发电装置: CN205207043U[P]. 2016.

[2] 杨磊, 王项南, 王鑫,等. 波浪能、潮流能海上试验场现场监测系统设计[J]. 海洋技术学报, 2013, 32(2):16-22.

[3] 盛松伟, 张亚群, 王坤林,等. “鹰式一号”波浪能发电装置研究[J]. 船舶工程, 2015(9):104-108.

[4] 张亚群 我国海洋能发电技术获新突破[J]. 中国电业(技术版), 2013(2).

[5] 盛松伟, 张亚群, 王坤林,等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015(s1):10-14.

[6] 盛松伟, 张亚群, 王坤林,等. 鹰式波浪能发电装置发电系统研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(9):1422-1426.

[7] 刘延俊, 贺彤彤. 波浪能利用发展历史与关键技术[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4):76-81.

[8] Rusu E, Soares C G. Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the Portuguese nearshore[J]. Renewable Energy, 2013, 58(10):34-49.

[9] Whittaker T, Folley M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster[J]. Philosophical Transactions, 2012, 370(1959):345.

[10] Henriques J C C, Gomes R P F, Gato L M C, et al. Testing and control of a power take-off system for an oscillating-water-column wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2016, 85:714-724.

[11]陈韦, 余顺年, 詹立垒, 等. 波浪能发电技术研究现状与发展趋势[J].能源与环境,2014(03):83-84.

[12] 杨大艳. 双基地高频雷达海杂波模拟及基于 SVD 的抑制[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.

[13] 岳晓瑞, 徐海祥, 罗薇, et al. 海洋工程结构物风载荷计算方法比较[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 41(3):99-100.

[14] 波流共同作用下多自由度截头圆柱群的绕射辐射分析[D]. 中国科学院大学, 2015.

[15] 深水锚泊半潜式钻井平台运动及动力特性研究[D]. 上海交通大学, 2011.

[16] 别社安, 时忠民. 气浮结构的运动特性研究[J]. 中国港湾建设, 2001(2):18-21.

[17] 王莉. 半潜式钻井平台锚泊辅助动力定位控制研究[D]. 江苏科技大学, 2016.

[18] 半潜式钻井平台的综合水动力性能分析与优化设计[D]. 兰州理工大学,

2017.

[19] 新型半潜式平台的运动特性研究及整体强度评估[D]. 中国海洋大学, 2015.

[20] 李开孟. 我国海洋资源的开发及可持续利用[J]. 中国投资, 2009(1):102-105.

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

·团队编号：A20200308

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年　10 月　13 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本作品设计了一种浮体——电机一体式海洋多能源发电装置，该装置整体由三部分组成，分为浮体部分、固定体部分和连接体部分。

整套装置的工作过程大致是，海面波浪上的漂浮平台跟随波浪进行上下起伏运动，由于重力，球形永磁体沿滑道滑动，改变磁通量，产生电流；并通过万向节级联轴传动机构带动深处稳定区中的发电机永磁体（动子）在垂直方向上也上下起伏运动，同样改变磁通量进行发电，达到固定体中永磁体（动子）跟随浮体上下起伏运动的过程中都能往复垂直运动，持续改变磁通量，实现连续地发电。为充分利用海洋能量，将浮体表面安装太阳能板，利用光伏发电。万向节级联轴传动机构为三相发电机利用电磁感应现象的闭合导线切割磁感线产生感应电动势的原理，潮流运行，推动叶轮旋转，切割磁感线，进行发电。一体式海洋多能源发电装置，可单独使用，也可联排使用，可提高装置的稳定性及发电功率。该装置充分利用了海洋中各种形式的能量，将其转化为电能，可行性较高，符合可持续发展要求。

目录

第 1 章 绪论.....1
1.1 海洋能.....3
1.2 可再生能源的特点.....3
1.3 多能源互补发电技术的优点.....3
1.4 多能源互补发电技术的研究现状和趋势.....3
第 2 章 海洋多能源发电装置结构设计和工作过程.....5
2.1 装置整体设计.....5
2.2 第一部分—浮体.....6
2.2.1 波浪能重力发电系统的设计.....6
2.2.2 工作原理分析.....8
2.2.3 三相桥式整流原理.....9
2.2.4 效率分析.....10
2.2.5 太阳能发电.....25
2.3 定体部分.....12
2.3.1 波浪能液压发电系统的设计.....12
2.3.2 工作原理分析.....13
2.4 第三部分—连接体.....13
2.4.1 潮流能转轮发电系统的设计.....13
2.4.2 转轮电机结构.....17
2.4.3 运行原理.....19
第 3 章 优化设计.....21
参考文献.....29

第 1 章 绪论

我国是资源大国，其中海洋资源非常丰富，三百多万平方公里的海域蕴含着大量石油、天然气等资源。我国现阶段正处于经济结构深度转型期，海洋能资源的发展得到全面重视，“大力发展海洋能经济”在党的十八大被明确提出，“21 世纪海上丝绸之路”的构建，更使我国逐步成为海洋强国。我国紧跟世界能源技术发展潮流，建设海洋能服务平台和示范基地，在全国范围内逐渐形成成熟完善的产业配套链，争取早日达到世界先进水平。

1.1 海洋能

海洋能是指主要利用海洋资源所开发出的绿色持续可再生能源，包括：潮流能、温差能、波浪能、潮汐能、盐差能。目前，潮汐能技术已经趋向于成熟，全球已建成多所商业化发电站，但存在环境等因素的影响，该技术受到一定的区域性限制。温差能、盐差能技术还在实验阶段，技术设备不是非常成熟，还需要不断研发。潮流能、波浪能资源丰富，技术日益完善，技术原理各不相同，预计是下一个投入商业化的海洋能产业。

1.2 可再生能源的特点

太阳能、风能、潮流能、波浪能等海洋可再生能源，虽然取之不尽、用之不竭，但是，这些能源具有分布间歇性、不连续性、不稳定性等特点。

1.3 多能源互补发电技术的优点

我国岛礁主权争议区域目前迫切需要进行安全防护和综合监管，但是受限于电能供应不足，大功率监视探测设备无法长期布置于中远海域。同时，在电网无法覆盖的海岛地区，电能的短缺严重限制了生产生活的进行。多能源互补发电技术充分利用海上可再生能源丰富的特点，将风能、太阳能和潮流能等发电方式配合运行，利用各自的优点，克服单一发电装置运行所带来的电能输出稳定性差和供给不足等问题，并由控制系统统一维护和管理，具备运行成本低、能源利用效率高、电能输出稳定等优点。

1.4 多能源互补发电技术的研究现状和趋势

目前，国外对多能源高效互补智能发电技术的研究技术专栏 Technical Column 主要致力于系统结构和容量的优化设计、稳定供电等。美国和澳大利亚学者研究了互补发电系统的储能方式的实现，并且评价了性能；加拿大学者研究了小型风光互补发电系统的运行成本、可靠性和扩容性能；希腊学者以成本最小

为目标，研究了互补发电场容量的优化配置。当前我国多能源高效互补智能供电技术的研究主要集中在系统的优化设计以及监控管理等内容。位于我国长江源自然保护站的两座风光互补发电站最早采用了互补发电技术；广东南澳岛第一个实现了商业化运行的多能互补发电系统，并运行了大型风光互补发电系统。

综上所述，目前多能源高效互补智能供电技术面临的主要挑战，是提升系统效率、降低成本、提高稳定性与可靠性及系统使用寿命，同时还需要增强能源管控研究，提升电能输出质量。海洋能优势十分明显，不仅绿色环保、可再生重复循环利用、能量密度稳定，而且由于安装在海洋，节约了大量的陆地空间。潮流能资源的充分开发，不仅是新能源的未来发展趋势，也是国家能源战略的重要一项。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 2 章 海洋多能源发电装置结构设计和工作过程

目前最为常见的是由三级转化结构构成的海洋能发电装置，即海洋中某种形式的能转化成某种形式的机械能，然后次机械能再转化为电能，发电装置将产生的三相电压进行整流滤波，稳定后进入蓄电装置储存。能量在转化的过程中存在转化效率的问题，即在转化过程中：能级的转化次数越多，损耗的能量就越多；机械结构越复杂，损耗的能量就越多。考虑到此问题的影响，最为核心的思想就是将复杂的传动结构简化，充分利用海洋中以各种形式存在的能量，由此产生了电机与波浪特性、潮流特性相结合的思想，达到简化传动结构的目的。

2.1 装置整体设计

海洋能以多种形式存在，为更加全面地捕捉能量、利用能量，设计了一种浮体——电机一体式海洋多能源发电装置，其结构如图 2.1 所示。

装置主要由海洋表面漂浮浮体、浮体内部安置的变速机构和发电机、万向节级联轴传动机构与能量转换旋转叶轮发电机、固定箱体及发电机构成。发电装置位置分布图如图 2.2 所示。

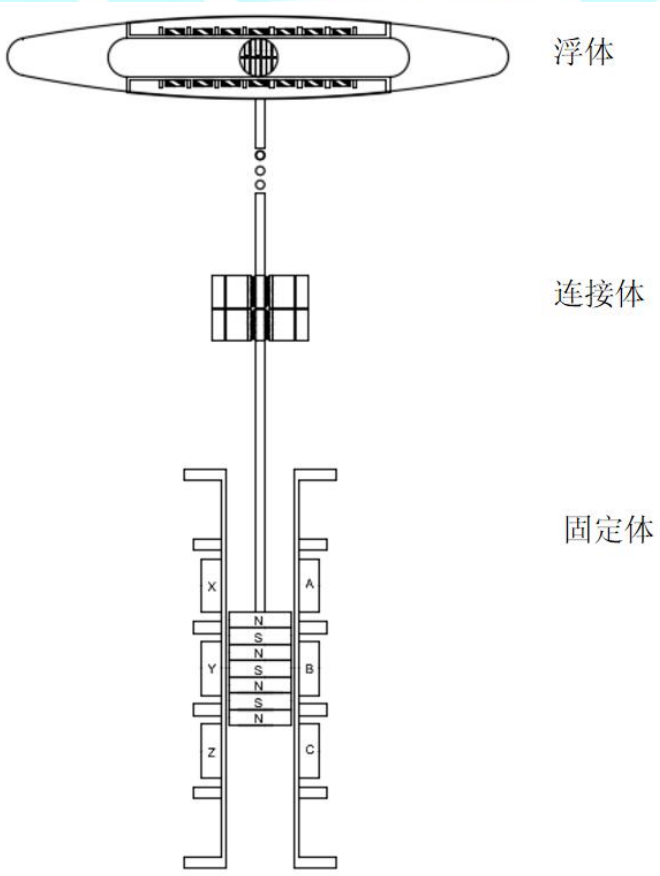


图 2.1 发电装置结构示意图

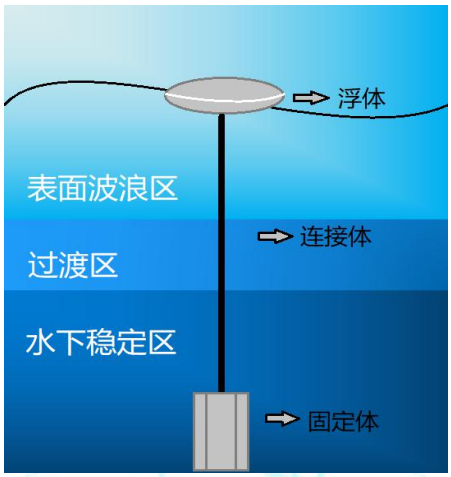


图 2.2 发电装置位置分布图

整套装置的工作过程大致是：

海面上的漂浮浮体跟随波浪进行周期起伏运动，浮体两端存在高度差，由于重力球形永磁体沿滑道滑动，通过改变磁通量，产生电流。

浮体通过万向节级联轴传动机构与水下稳定区中的固定体相连，利用波浪能和潮汐能带来的海面距海底的高度差的改变，其中中心杆固定的重物经过精密地调整重量后，中心杆、重物以及永磁体组成的系统（动子整体）密度略轻于海水密度，此时以海底为参照物，动子整体是静止，浮子受海浪的影响相对海或动子整体是静止不动，永磁体相对于定子上下运动，导致定子内部的磁通量生了变化，产生了感应电动势 E。固定体中安置弹簧，使永磁体（动子）跟随浮体上下起伏运动可往复周期完成，持续改变磁通量，实现连续地发电。

连接体部分由万向节级联轴传动机构与能量转换旋转叶轮发电机构成，其发电为三相发电机利用电磁感应现象的闭合导线切割磁感线产生感应电动势的原理。潮流运动，推动叶轮旋转，切割磁感线，进行发电。

2.2 多能源发电装置——浮体部分

2.2.1 波浪能重力发电系统的设计

其中浮体的设计思路来自海洋中的漂流瓶，漂流瓶漂浮在海面上随着海浪上下起伏运动，瓶口与瓶底在海浪的周期起伏作用下，存在一定的高度差 h，即存在势能趋势，将一小球放入瓶中，小球会以自身重力在瓶中滚动。若将瓶身拉长，以寻求最佳长度以适应海浪周期，使瓶口与瓶底的高度差保持较大值，在小球质量一定的前提下，小球在瓶中滚动所具有的势能最大。将漂流瓶看成发电机的定子，小球看成发电机的动子，小球在漂流瓶中的滑动看成切割磁感线运动或者改变磁通量运动，这样就构成了一个捕捉波浪能的发电装置。

其结构如图 2.3、图 2.4、图 2.5 所示。该发电装置由 3 部分组成，分别是机

械结构、定子结构、动子结构。

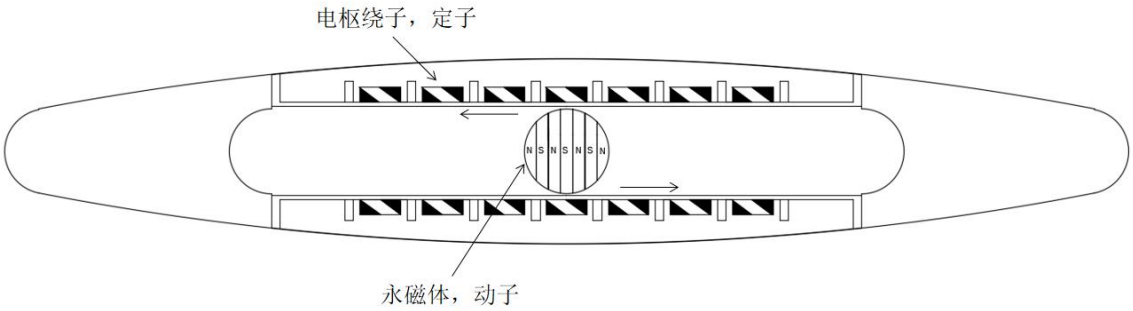


图 2.3　浮体部分永磁发电装置剖面图

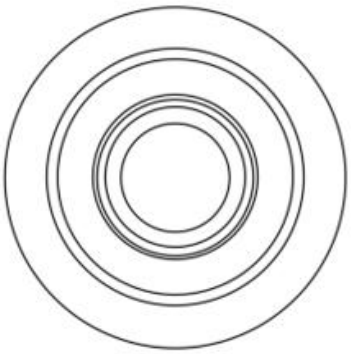
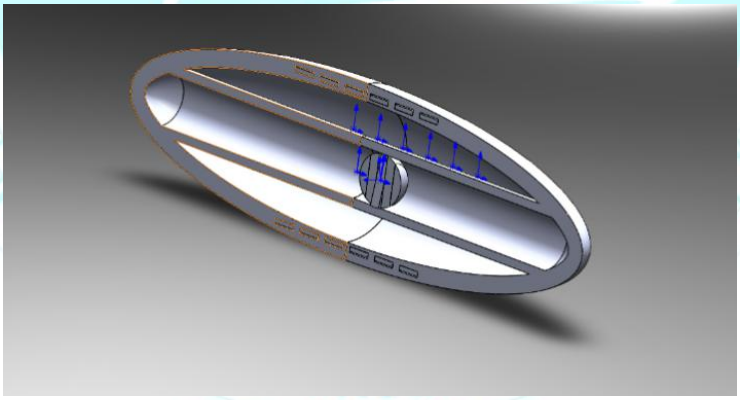
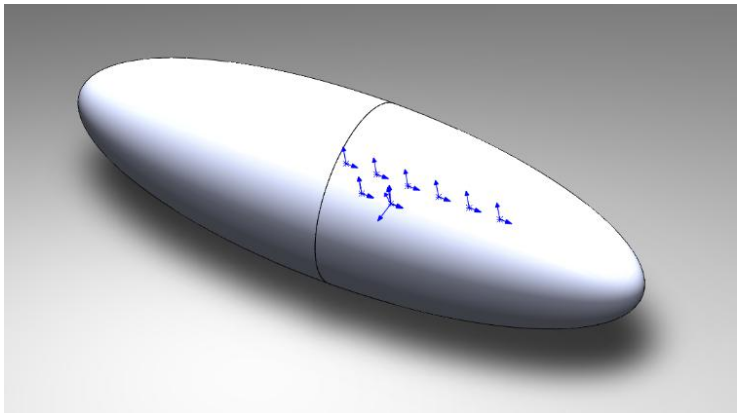


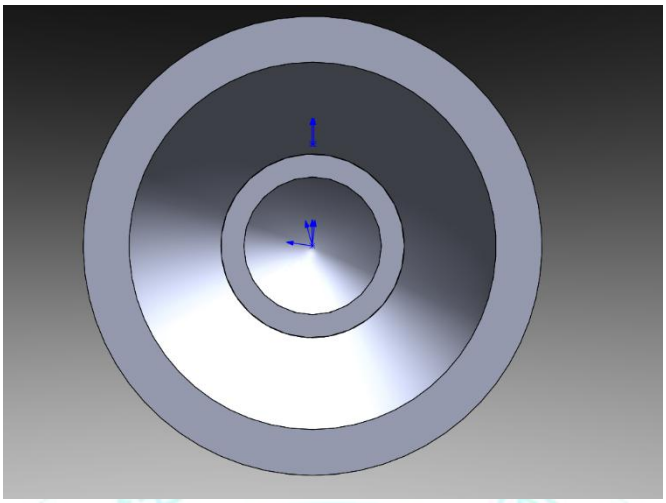
图 2.4　浮体部分永磁发电装置剖面图



（a）



（b）



（c）

图 2.5　浮体三维结构图

2.2.2　浮体部分工作原理分析

根据电磁感应定律可知发电原理，当闭合线圈的面积不变时，通过改变磁场强度，可以使闭合线圈内的磁通量发生变化，从而使得导体中产生感应电动势。基于这一原理，设计浮体动圈式永磁发电装置。永磁体为薄片形式竖向叠加在一起，构成一个球体，称为中心球，如图 2.6 所示，该中心球为永磁体和配重的组合体充当动子。中心球处于由电枢饶子缠绕的滑道中，电枢饶子与浮体外壳构成一系统（定子整体）。浮体外壳采用流线设计，形似一颗胶囊，在海面受波浪周期运动影响，以胶囊几何中心为轴，胶囊两端上下起伏运动，中心球由于自身重力产生势能，在滑道中往复滑动，改变磁通量，产生电能。此外，浮体外壳安装太阳能板，充分利用海洋中的太阳能进行发电。

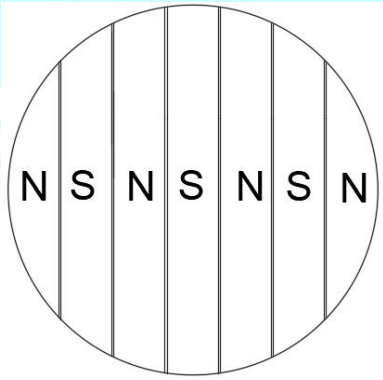


图 2.6　中心球

中心球（动子）相对于电枢饶子（定子）往复运动，导致定子内部的磁通量生了变化，产生了感应电动势 E。电动势 E 与Φ的关系方程为:

$$E = n\frac{d\phi}{dt}$$

由于在一个时间运动周期内，速度的变化是比较缓慢的。所以，可以认为中心球（动子）以恒定的速度 v 做匀速运动，则 $ds = vdt$ 。由电动势 E 与Φ的关系方程两边同时除以 v 可得：

$$\frac{E}{v} = n\frac{d\phi}{vdt}$$

将 $ds = vdt$ 代入上述方程，可以得出感应电动势 E 与位移 S 的关系：

$$E = nv\frac{d\phi}{ds}$$

2.2.3 三相桥式整流原理

由于波浪的运动特性的不稳定性，发电机产生的三相电动势会含有较多的谐波，造成产生的电能品质较差，若直接供给电力设备使用，会造成该电力设备寿命缩短；一些对电能品质要求较高的用电设备可能会出现无法运行的情况；对整个电力系统的运行也会产生相应危害。

为了解决上述问题，该发电装置采用三相桥式整流滤波电路，三相桥式整流电容滤波电路如图 2.7 所示，对发电机产生的三相电压进行整流滤波，即将产生的交流电源转化为较稳定的直流电源输出。即利用二极管的单向导通性，对产生的交流电进行整流，输出为单一方向的电压，并由于电容具有通高频阻低频的工作特性，可利用此特性对整流后的电压进行滤波，采用多个滤波电容并联滤波，可输出更为稳定的直流电压。

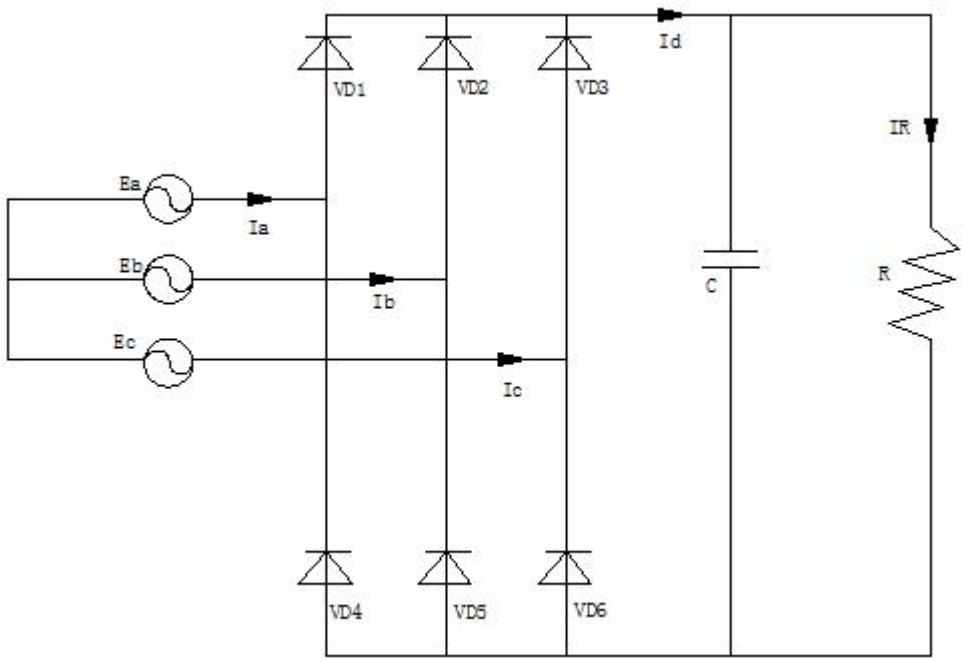
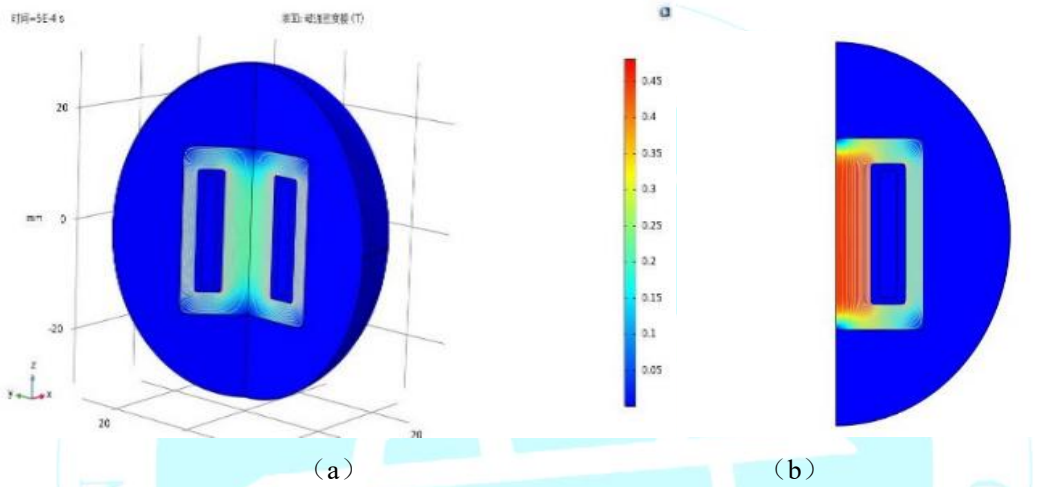


图 2.7　三桥式整流滤波电路图

E_a，E_b，E_c 为发电机产生的三相电动势，I_a，I_b，I_c 分别为三相绕组电流，$VD_1 \sim VD_6$ 为二极管，I_d 为整流后的直流电流，C_1，C_2，C_3 为滤波电容，R 为负载电阻。

利用 comsol multiphysics 软件对于浮体内部的中心球体进行数值模拟，将球体剖分，其模拟如图 2.8 所示，看其内部的磁通密度，其随着海浪的推动在浮体滑道中进行运动，模拟交变电压如图 2.9 所示，能够看出其图像是周期函数，产生了稳定的交变电流。



（a）　　（b）

图 2.8　中心球磁通密度模拟图

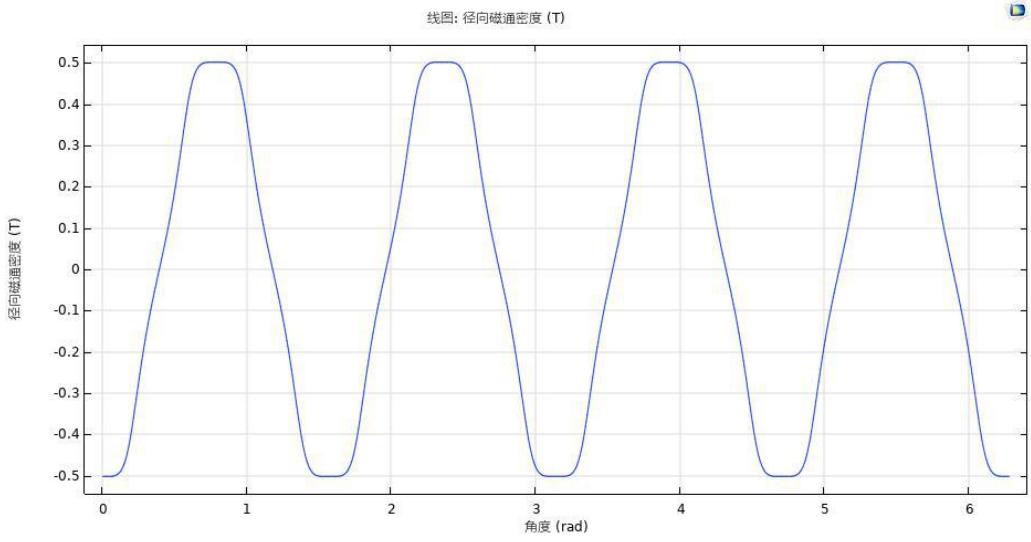


图 2.9　交变电压周期

2.2.4　装置发电效率分析

理想状态下，海浪的运动波形可以看作是水面周期性的上下波动运动，并且向岸边冲击的现象，波浪可看似为正弦波形。但实际上海浪的运动波形是不规则且不稳定的。海浪的波形具有较多毛刺，且波峰近似于尖顶的形状，每一个波浪

周期波峰与波谷的高度差值 H 也不相同，这样的波浪能在分析与计算上比较困难。在此文分析中，利用折线逼近法可将波浪波形近似等效成正弦波形，等效过程中存在细微误差，但由于海浪中存储着丰富的能源，故此误差可忽略不计。

记录多个波浪周期下 H 值，平均求值，将其等效为每一个波浪周期的 H 值，进而求出波浪能（这是理想状态下波浪能的分析方法，台风天气等异常环境状况除外）。根据波浪理论可画出理想状态下海浪的运动轨迹如图 2.10 所示。

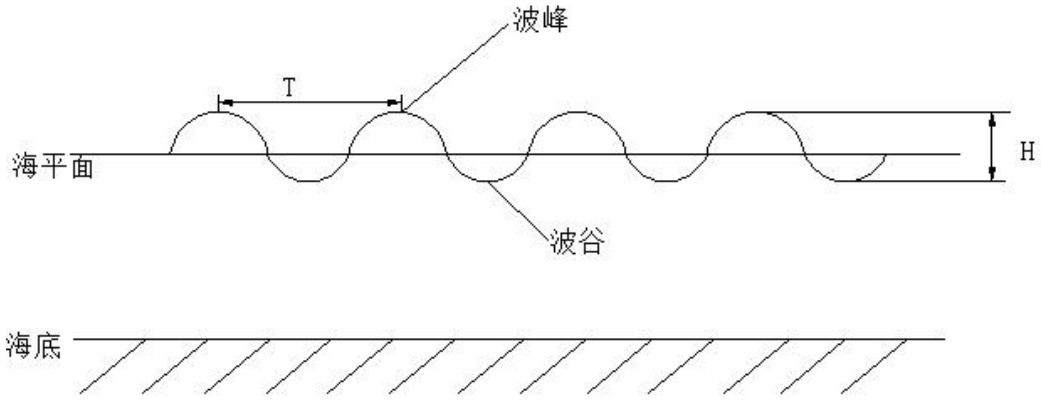


图 2.10　理想状波浪波形

分析可知，波浪能由纵向势能和横向动能组成。由 Kinsman 公式结合理想状态下的波浪运动特性，可以近似求出总波浪能总海浪能 P_w:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T$$

式中：ρ——海水密度，其值通常设为 1.02×10^3 kg /m^3；

g——重力加速度；

H——波峰与波谷之间的垂直距离；

T——波浪周期。

若负载为 R，则输出电流为 I_R，输出功率 P_1 与负载 R 以及输出电流 I_R 的关系方程：

$$P_1 = I_R{}^2 R$$

求出理想状态下波浪的总能量 P_w，以及发电机的输出功率 P_1，即可求出该动圈式发电机的效率η：

$$\eta = \frac{P_1}{P_w}$$

2.3 多能源发电装置——固定体部分

2.3.1 波浪能起伏发电系统的设计

该部分发电装置由 3 部分组成，分别是机械结构、定子结构、动子结构。具体如图 2.11、图 2.12、图 2.13 所示。装置处于海底，一端通过万向节级联轴与连接体、浮体相连，一端固定在海床上。其三相桥式整流原理与效率分析与浮体部分相似。

目前，发电机的绕组形式可按绕组层数、每极每相槽数和节距大小区分。按绕组层数可分为单层绕组和双层绕组。与双层绕组对比，单层绕组的定子凹槽利用率较高，只有单层边，无须考虑击穿问题。按每极每相槽数可分为分数槽绕组和整数槽绕组。分数槽绕组可削减高次谐波电势，也可以改善电动势的波形，得到更加接近于正弦波的电动势。因此，该动圈式发电机的定子结构采用整距的单层分数槽绕组，剖面如图 2.11 所示。定子槽每相绕线 5200 匝，由上至下分别为 A 相，B 相，C 相。目前，永磁材料的综合性能最强的是汝铁硼。因此本次设计选用汝铁硼永磁铁作为动子，充磁方向为径向充磁。动子结构如图 2.11 所示，由 7 块汝铁硼永磁体构成。

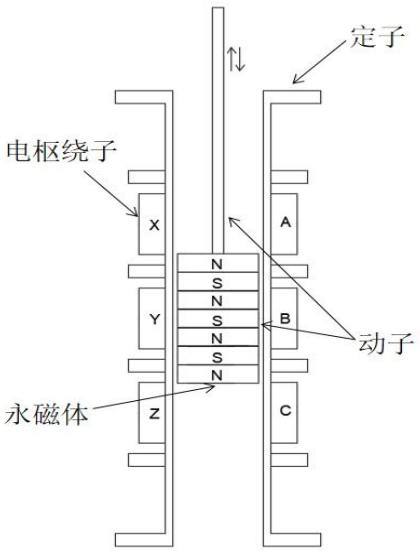


图 2.11 固定体永磁发电装置剖面图

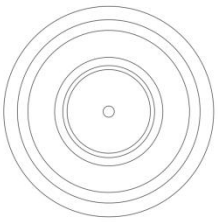


图 2.12　固定体永磁发电装置剖面图

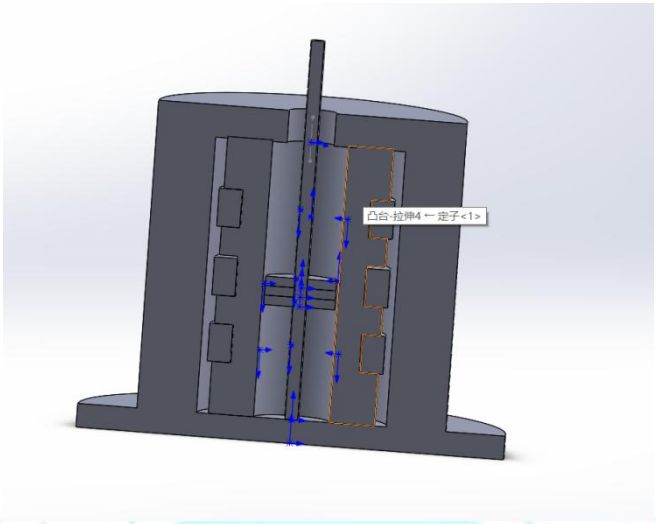


图 2.13　固定体三位结构图

2.3.2　固定体部分工作原理分析

基于电磁感应定律及发电原理，设计固定体—动圈式永磁发电装置。此时，以海底为参照物，定子整体是静止。然而，浮体受海浪及潮汐的影响发生起伏运动，通过连接体与固定体的中心杆相连传动位移，中心杆带动动子运动。动子相对于定子上下运动，导致固定体内部的磁通量生了变化，产生了感应电动势 E。固定体中安置弹簧，使永磁体（动子）跟随浮体上下起伏运动可往复周期完成，持续改变磁通量，实现连续地发电。

由于浮体及连接体受风、波浪及潮流的影响，会产生纵向偏移，为保证固定体发电装置的发电效率及稳定性，中心杆应垂直运动，故在固定体外壳装有滑轮。

2.4　多能源发电装置—连接体部分

2.4.1　潮流能转轮发电系统的设计

万向节级联轴连接浮体与固定体，为充分利用海洋的潮流能，对其进行设计改进，同轴外套转轮，设计出转轮发电系统。如图 2.14、图 2.15 所示。

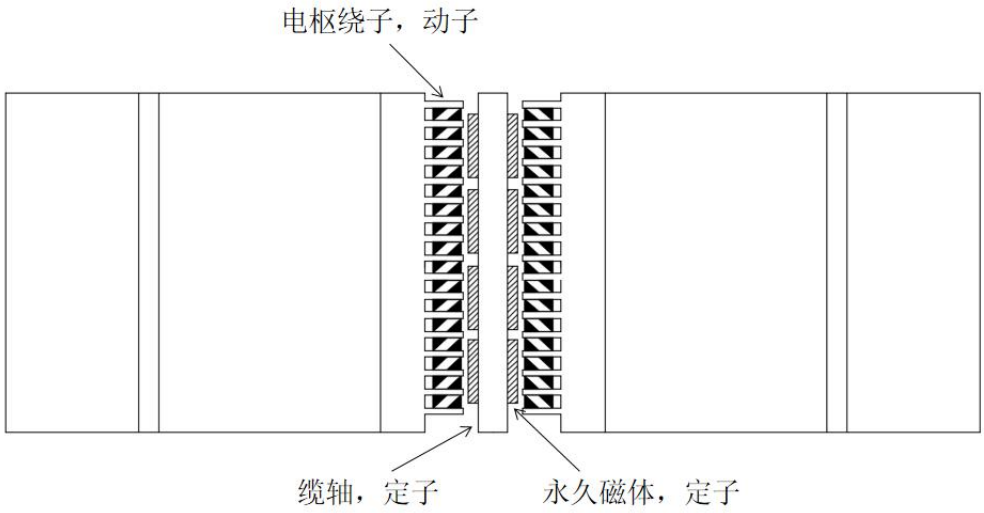
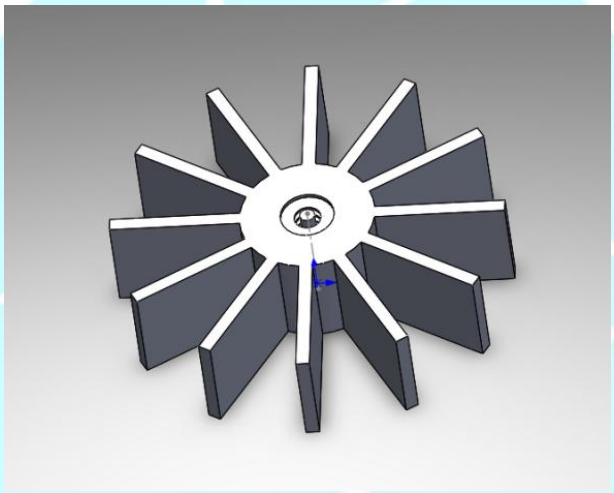
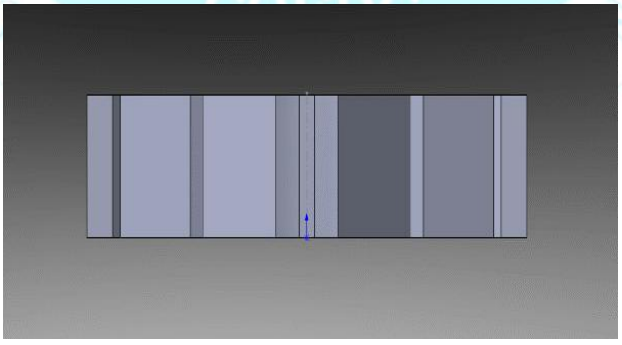


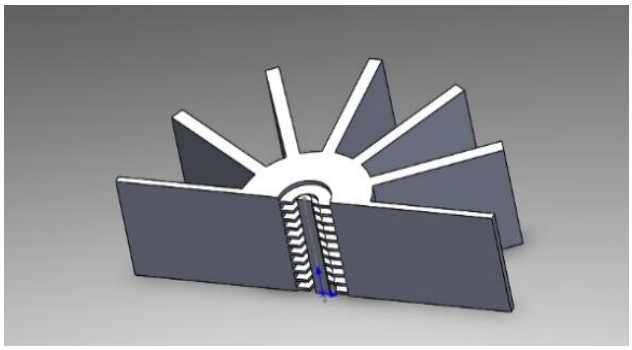
图 2.14　直线圆筒型无刷永磁电机截面图



（a）



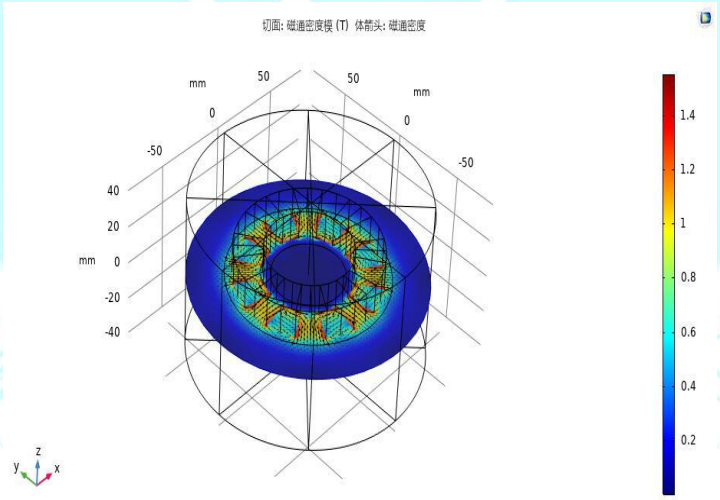
（b）



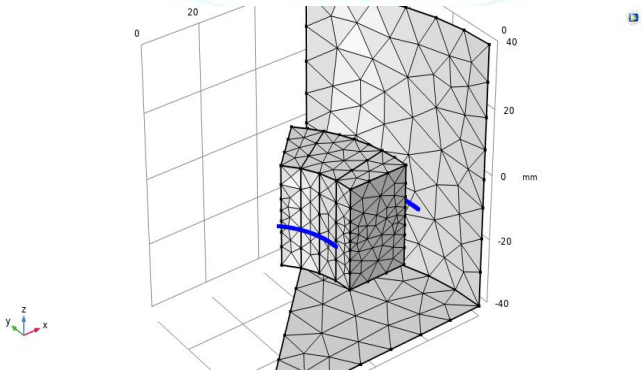
（c）

图 2.15　转轮三维结构体

如图 2.16 所示，利用 comsol multiphysics 软件对中间位置的转轮进行电磁场模拟如图（a），其中参数定义：转子的外半径为 50mm，内半径为 30mm，转子长度为 30mm，旋转角为 11.25°。加入了一个电磁场。网格剖分如图（b）所示。可以看出其中的磁通密度与磁通密度模的关系，潮流推动涡轮旋转，切割磁感线，中间径向部分产生的电流大于外环部分。验证了我们的设计满足法拉第电磁感应定律。



（a）



（b）

图 2.16　转轮进行电磁场模拟

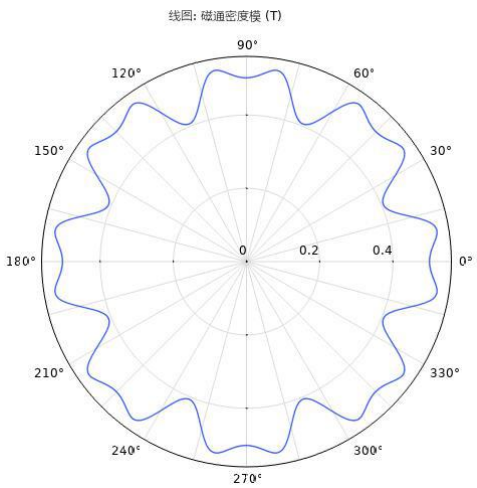


图 2.17　转轮方位角

图 2.17 是经过模型建立，划分网格之后数值模拟出来的涡轮周向随着方位角的变化，他的磁通密度模是均匀分布的，证明了我们的涡轮周围可以均匀切割磁感线，产生稳定的交变电流。

利用导线切割磁力线感应出电势的电磁感应原理，将潮流能推动转轮的机械能变为电能输出。同步发电机由定子和转子两部分组成：动子是发出电力的电枢，定子是磁极。动子由电枢铁芯、均匀排放的三相绕组、机座和端盖等组成。定子通常为隐极式，由励磁绕组、铁芯和轴、护环、中心环等组成。

定子的励磁绕组通入直流电流，产生接近于正弦分布磁场（称为定子磁场），其有效励磁磁通与静止的电枢绕组相交链。动子旋转时，动子磁场随同一起旋转，每转一周，动子的每相绕组顺序切割磁感线，在三相动子绕组内感应出三相交流电势。

需要注意的是：发电机带对称负载运行时，三相电枢电流合成产生一个同步转速的旋转磁场，定子磁场和转子磁场相互作用，会产生制动转矩；转子磁场的强弱直接影响定子绕组的电压。所以，调发电机端电压或调发电机的无功功率必须调节转子电流。发电机示意图如图 2.18 所示。

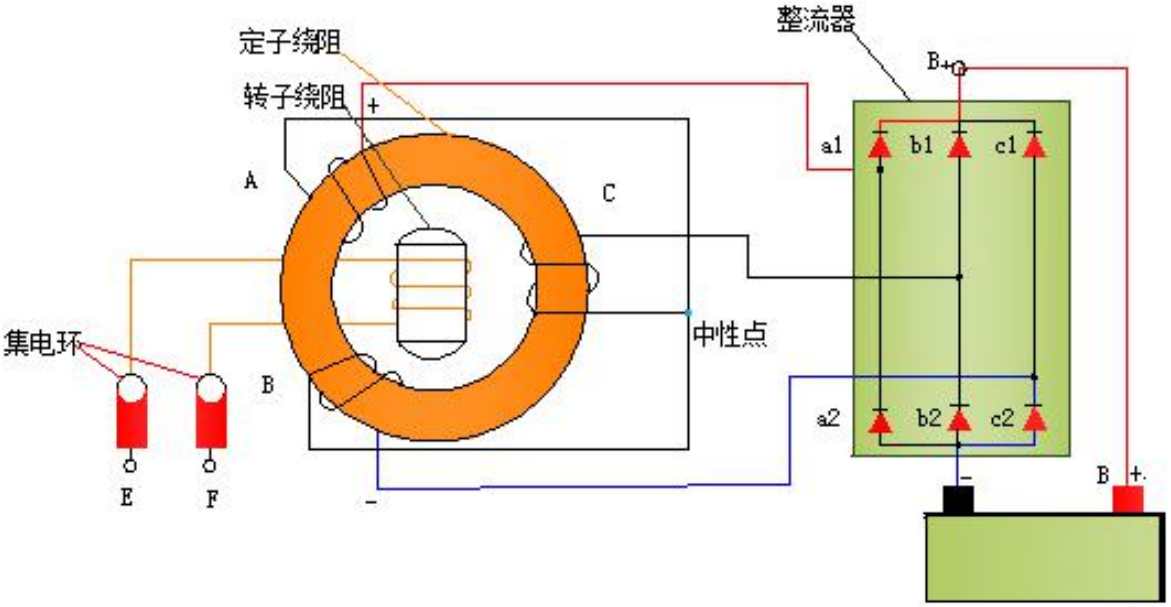
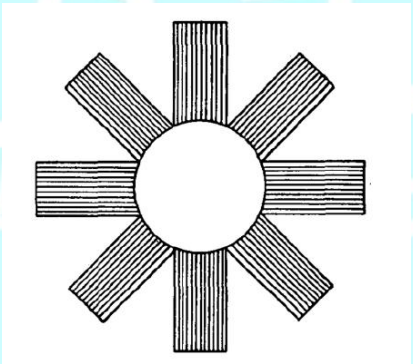
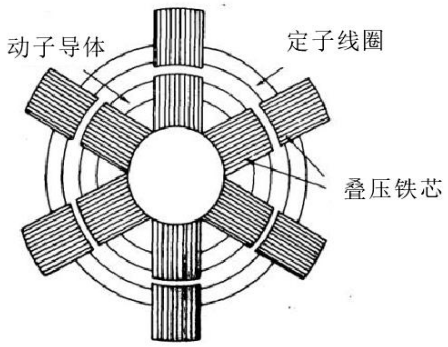


图 2.18　发电机示意图

电机定子由四个铁芯叠片组成，6 个线圈组成两极三相绕组；环形永磁体位于中间动子上，采用斜极的方式，减小电机的定位力。如图 2.19 所示。



（a）定子铁芯截面图



（b）整体截面图

图 2.19　圆筒型直线感应电机示意图

2.4.2　转轮电机结构

在旋转电机中，若电机级数为奇数，转子会产生偏心力，因此会造成电机产

生震动、噪声等问题，但在直线电机中不存在这种问题，因此直线电机极数可以采用奇数极。如图 2.20 所示。

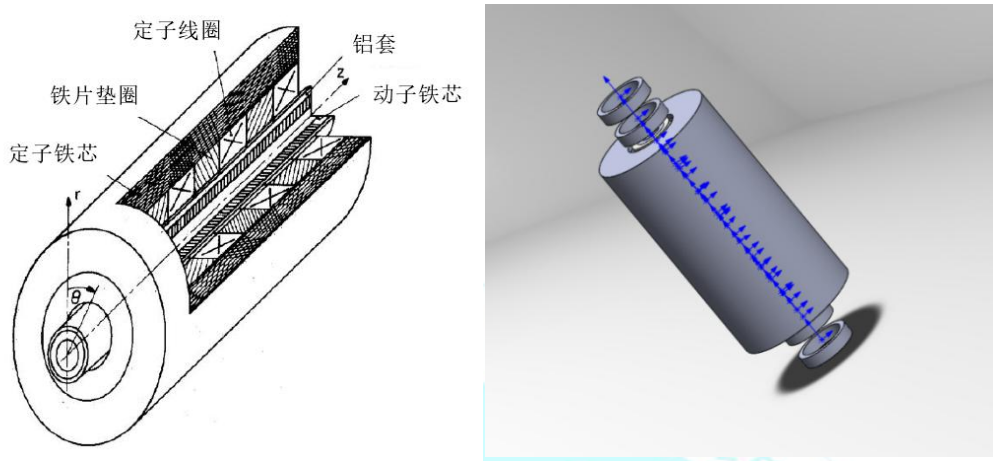
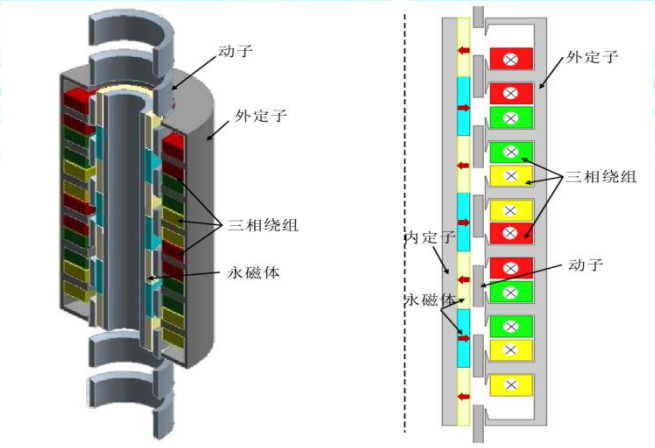
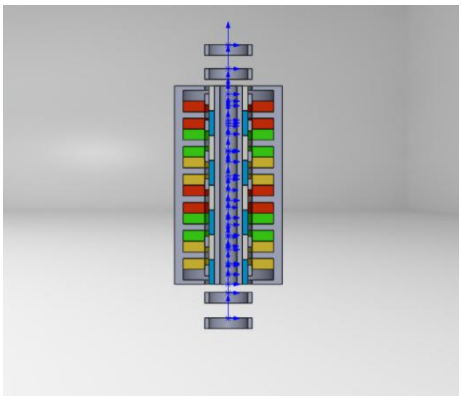


图 2.20　圆筒型直线感应电机三维结构图

该结构电机由三部分组成，包括内定子、动子和外定子。其中向内、向外径向充磁的永磁体以表贴的方式依次置于内定子的背铁上；电机动子位于内外定子之间，仅由调磁铁块构成，结构简单易于维护；三相电枢绕组则置于电机的外定子中，分别用红黄绿三种颜色标出。如图 2.21 所示。采用初级分裂式的结构将电枢绕组和永磁体分别置于内外定子中，避免了两者在空间上的相互约束，而且可以解决传统反向磁通永磁电机中由于永磁体表贴在定子齿上导致定子铁芯容易出现饱和的问题。除此之外，由于圆筒型结构绕组采用饼式线圈，因此整个线圈边都是有效边，不存在绕组端部，减小了铜耗且提高了绕组利用效率。



（a）　　（b）



（c）

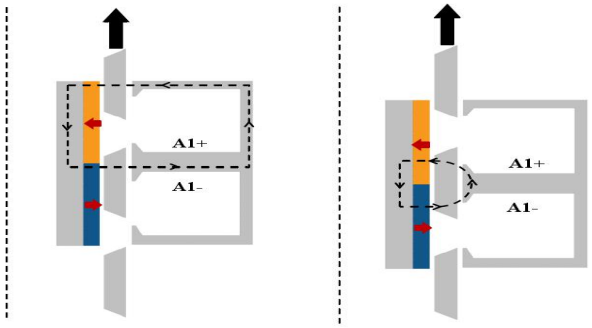
图 2.21　电机结构示意图

除此之外，由于圆筒型结构的对称性，该结构电机不存在法向吸力，因此降低了轴承安装的难度。

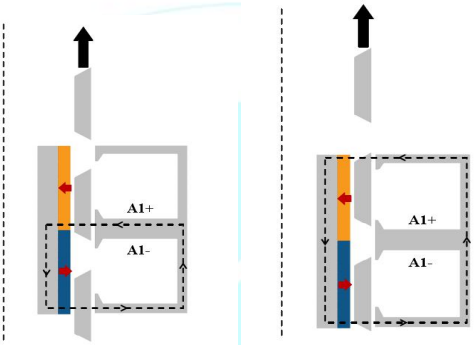
2.4.3　转轮工作原理分析

遵循凸极电机主磁路磁阻最小的原理，其运行过程简单说明如图 2.24 所示。其中（a）到（d）为动子运动过程中电机内部磁力线路径变化示意图，图（e）则为空载情况下 A 相绕组磁链随动子运行的关系图，（a）到（d）所示 ABCD 四个位置的磁链值则分别对应标注为图（e）的 ABCD 四个点。由图（e）可见绕组的磁链波形为双极性波形。规定磁链向外为正方向，当动子运动到 A 位置时，A 相磁链达到正向最大值；当动子从 A 位置继续运动 90°电角度后来到 B 位置，此时 A 相交链磁链为 0；之后继续运行过 90°电角度，到达 C 位置，A 相磁链达到反向最小值；最后从 C 位置再运行 90°电角度，到达 D 位置，A 相磁链再次为 0，从 D 位置再运行第四个 90°电角度回到 A 位置则完成一个周期的运动过程。

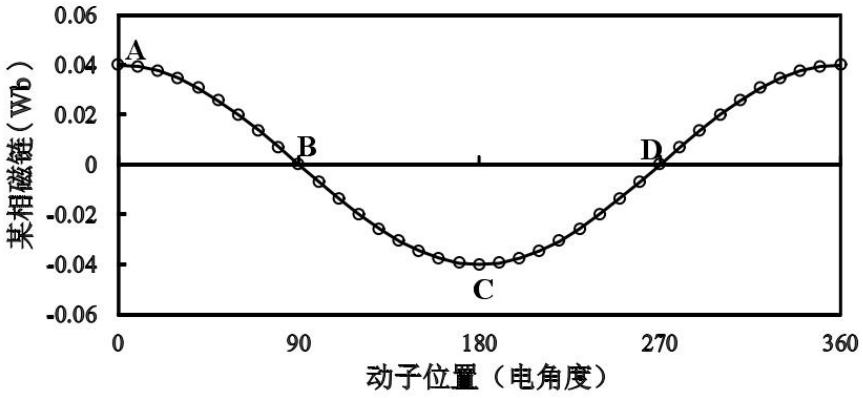
由于交变的磁链可感生出电动势，因此当动子随着海浪连续上下运动之后，三相绕组中即可感应出三相感应电动势，将海浪运动的机械能转换成电能输出。在理想情况下，磁链波形为正弦波，因此感应出的电动势波形也为正弦波。与此同时，还可由磁链图看出与传统永磁同步电机动子运动一个极距，磁链变化 180°不同，磁通反向永磁电机随着动子运动一个极距，磁链变化 360°。因此在磁通反向永磁电机中极对数与极数相等，由此也可推断其极数可为奇数。



（a）位置 A　　（b）位置 B



（c）位置 C　　（d）位置 D



（e）绕组磁链波形

图 2.24　运行原理示意图

第 3 章 优化设计

3.1 最大功率跟踪控制策略

波浪的方向具有时变性，波浪发电系统受到的波浪推力也不断变化，直驱式波浪发电系统主要是利用波浪垂直上下运动所产生的能量。如图 3.1 为直驱式波浪发电系统的示意图。

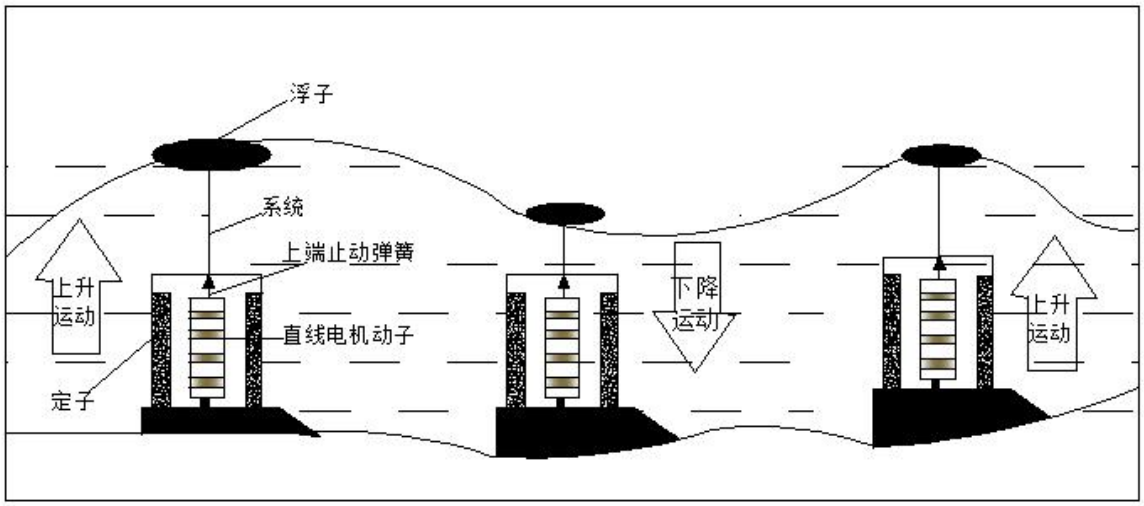


图 3.1 直驱式波浪发电系统的示意图

分析波浪能转换装置的受力，可得转换装置的水动力方程，同时也是 PMSLM 的机械运动方程。

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+K_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+Kx+F_{\mathrm{e}}=F_{\mathrm{d}}$$

式中：m 为运动部件的质量和辐射力产生的附加质量之和，kg；

K_n 为流体的动力阻尼系数，kg/s^2；

F_e 为 PMSLM 电磁力，N；

K 为波浪能转换装置的弹簧常数，N/m；

x 为浮子的运动位移，m；

F_d 为浮体受到的波浪激励力，N。

直线电机的电磁力可用 $F_e=R_g dx/dt$ 代替，为分析方便，可将波浪激励力近似看作正弦波形。波浪能转换装置可看作线性弹簧、质量块和线性阻尼器的组合，其等效模型如图 3.2 所示。

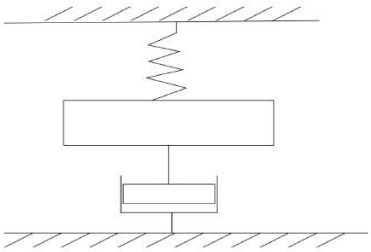


图 3.2　波浪装换装置的等效模型

波浪能转换装置的运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\left(K_{\mathrm{n}}+R_{\mathrm{g}}\right)\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+Kx=F_0\sin\omega t$$

式中：R_g 为电机产生有功功率的阻尼系数，kg/s；

F_0 为波浪激励力的幅值，N；

ω为波浪激励力的角速度，rad/s。

求解式公式并经变换，可得：

$$A_0/A_{\mathrm{st}}=1/\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\varphi=\arctan\left\{\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_0}\right)/\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]\right\}$$

式中：$\omega_0=(K/m)^{1/2}$ 为振荡角频率临界值 ，rad/s；

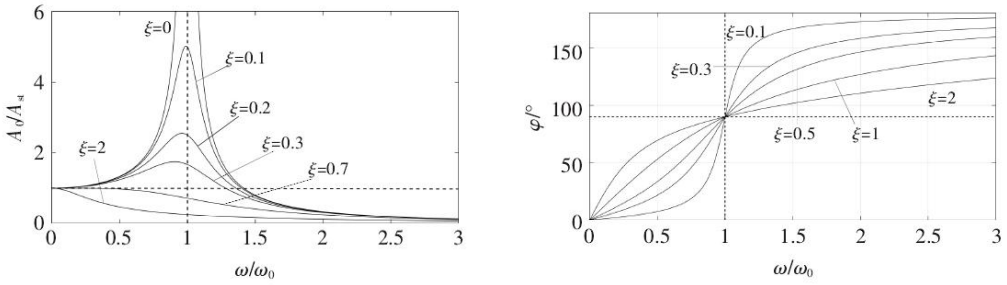
$\xi=(K_n+R_g)/[2(mK)^{1/2}]$为阻尼比；

A_0 为波浪能转换装置的振幅，m；

$A_{st}=F_0/K$ 为振幅初始值，m；

φ为相位。

由公式可知，电机动子以正弦形式移动，与波浪激励力同频率并有一个相位差φ。运动位移无量纲的幅频特性曲线如图所示。从图 3.3 可以看出，当浮子的运动频率与波浪能捕获装置的固有频率相同且相位滞后于波浪激励力 90°时，两者发生机械共振，此时的能量转换效率最大。



（a）振幅比特性　　（b）相位滞后量特性

图 3.3　运动位移无量纲的幅频特性曲线

发电机的瞬时功率为：

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

式中，u_a，u_b 和 u_c 分别为电机 a，b 和 c 的三相输出电压，V；i_a，i_b 和 i_c 分别为电机 a，b 和 c 三相输出电流，A。

浮子和波浪能捕获装置发生共振时，$A_0/A_{st}=1/(2\xi)=m\omega/(R_g+K_n)$，$K=m\omega^2$，忽略 PMSLG 的损耗，若发电机只输出有功功率，则：

$$P = F_e \frac{dx}{dt} = -K_n \omega^2 \sin^2(\omega t)\left(A_0 - \frac{m\omega A_{st}}{2K_n}\right) + \frac{m^2\omega^2 A_{st}^2}{4K_n}$$

当 $A_0=m\omega A_{st}/(2K_n)$，即 $R_g=K_n$，$K=m\omega^2$ 时，P 有最大值。通过调节弹簧常数 K，使波浪能装换装置始终处于不同波浪周期工况下的共振状态，从而捕获最大波浪功率。

3.2　蓄电池最长发电寿命的参数确定

利用 comsol multiphysics 软件对于蓄电池的容量损失进行数值模拟，演示如何使用“蓄电池”接口对电池容量损失建模，在假设电池电极的内部结构或设计以及材料选择都未知的前提下，使用一组集总参数来描述电池的寄生反应引起的容量损失。老化分析包括日历寿命和循环寿命研究。

因为海洋中拆卸工具十分不方便，并且影响我们的施工，浪费无用时间，更换设备也需要一定的投资，影响我们作业效率。因此我们必须选择更适合的蓄电池，保证蓄电池能够有尽量长的寿命，而且电容损失的速度最慢，这样我们的发电效率也就达到了最高。不同 SOC 下的蓄电池寿命变化如图 3.4 所示。

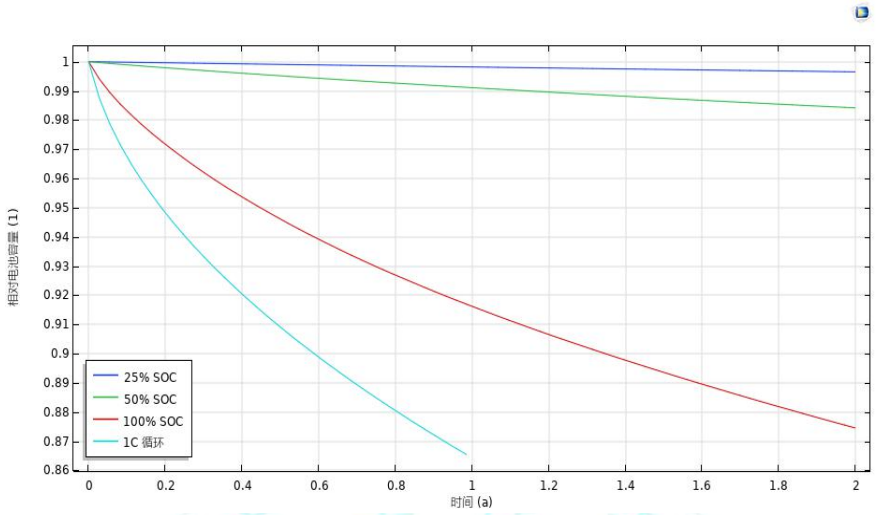


图 3.4　不同 SOC 下的蓄电池寿命变化图

其中 SOC 为初始荷电状态，由上图可以分析出，25%的 SOC，相对电池容量随着时间的推移损失的最少，100%的 SOC，随着时间的推移，损失的最多，其中用 1C 的循环作为对照。因此我们在设计蓄电池的时候应该让 SOC 处于 25%-50%之间，在这个范围之间，电容损失最少。考虑发电效率的影响，我们选用 50%的初始荷电状态。

3.3　发电装置防腐

氯化海水系统中使用的高合金不锈钢在某些操作条件下可能容易腐蚀。传统的阴极保护技术不太适合不锈钢，这是因为，阳极消耗率不可接受，并且在高负电位下容易发生氢脆。如图 3.5、图 3.6、图 3.7 进行模拟。

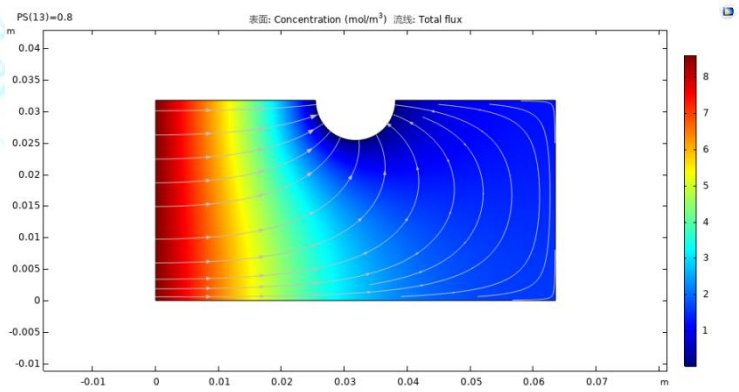


图 3.5　阳极周围离子浓度模拟图

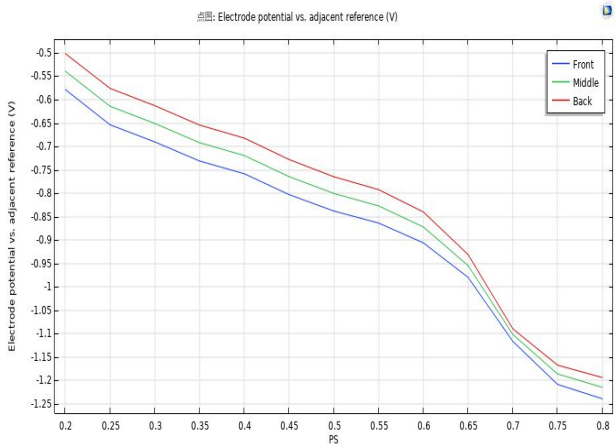


图 3.6　电极电位与相邻参比图

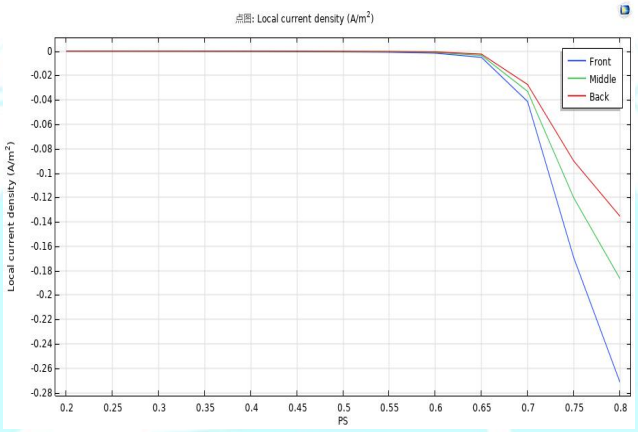


图 3.7　局部电流密度图

基于电阻控制阴极保护替代腐蚀保护技术，建立模型研究了耦合电阻对腐蚀防护水平的影响：无限元域用于描述海洋的无限扩展，说明了由于反应产物在牺牲阳极上形成电阻膜，钢的腐蚀速度随时间而增大。该模型还包含受保护的钢结构上的二次电流分布电极动力学，同时定义了金属溶解和氧还原（混合电位）。对发电装置采用的阴极保护建模。考虑钢表面的三个不同的电化学反应。

3.4　太阳能发电

太阳能光伏发电系统是一种新型发电系统，产生直流电，根据不同的使用要求，既可以完成独立供电，也可以并入其他电网一起供电或者是进行混合供电。本次设计我们选择的是并入其他电网进行混合供电，当光线照射在太阳能电池上时，太阳能电池上面的材料物质吸收光子，导致内部产生电动势和电流，从而实现把光能转变为电能，该过程称为光伏效应。能产生光伏效应的材料有非晶硅、单晶硅、多品硅、硒铟铜和砷化镓等，本次主要对硅半导体太阳能电池进行设计。

3.2.1　硅半导体太阳能电池

单个硅原子内部包含 14 个电子，这些电子分布在 3 个电子层中，第一层包含 2 个电子，第二层含 8 个电子，处于填满状态，而最外层处于半满状态，只有

4 个电子，如图 3.8 所示。纯硅中的电子被全部锁在晶体结构中，不能自由移动，它们是由 P 型和 N 型半导体结合组成的。

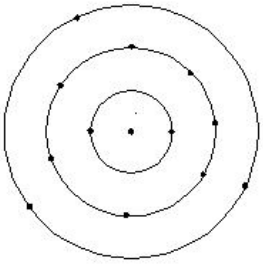


图 3.8　硅原子电子分布图

如图 3.9 所示为硅半导体主结构图。

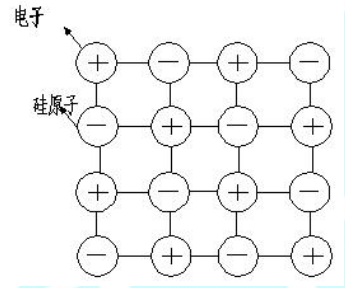


图 3.9　硅半导体结构图

如果把较少部分的五价元素（如磷等）加入到单晶体硅里面，那么在该导体内部就会产生带负电的自由电子，从而形成型半导体，如图 3.10、图 3.11 所示。

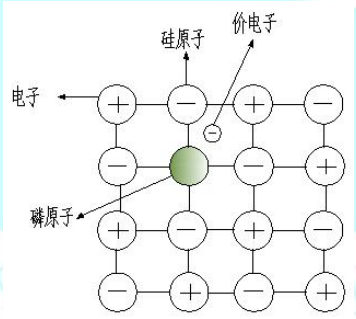


图 3.10　N 型半导体结构图

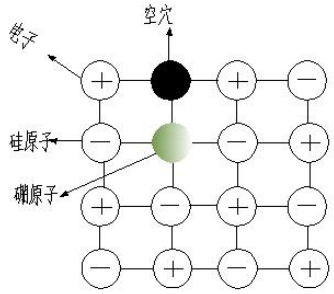


图 3.11　P 型半导体结构图

当 P 型和 N 型这两种半导体结合在一起时，N 区的带负电的自由电子就会

游离到 P 区，P 区的带正电的空穴会游离到 N 区，从而产生由 N 指向 P 的内电场，以抵抗自由电子的空穴运动，达到平衡后，在 P 型和 N 型这两种半导体的接触面上会形成特殊薄层，这就是 PN 结，如图 3.12 所示。

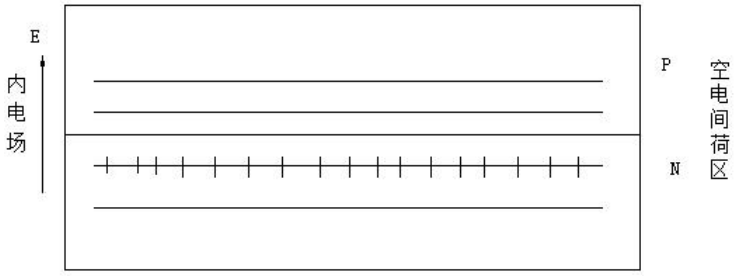


图 3.12　PN 结结构示意图

当掺杂的硅品片受到光照后，PN 结中的会产生从 N 区到 P 区的电流，从而产生电动势，可以当作电源，如图 3.13 所示。

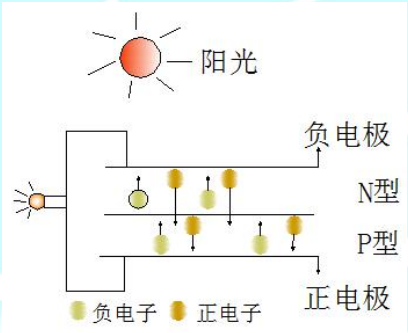


图 3.13　PN 结形成电源原理图

3.2.2　光伏电池的等效电路

如图 3.14 所示为太能光伏电池单体的等效电路图。

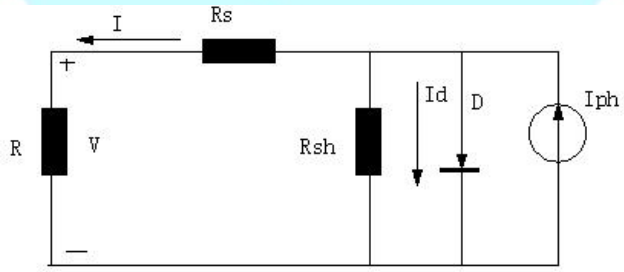


图 3.14　太阳能光伏电池单体的等效电路图

由太阳能光伏电池单体的等效电路图可以得出：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

而式中

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\}$$

$$I_{sh}=\frac{V+IR_s}{R_{sh}}$$

其中：I——流过负载的电流；

I_{ph}——光生电流；

I_d——流过二极管的电流；

I_{sh}——漏电流；

I_0——反向饱和电流（数量级约$10^{-4}A$）；

q——电子电荷（$1.6\times10^{-10}C$）；

A——PN 结理想因子；

K——波尔兹曼常数（$1.38\times10^{-21}J/K$）；

T——绝对温度（$T=t+273K$）；

R_s——串联电阻；

R_{sh}——并联电阻（数量级为$10^3\Omega$）。

所以综合可得：

$$I=I_{\rho h}-I_0\left\{\exp\left[\frac{q(V+IR_{s)}}{AKT}\right]-1\right\}-\frac{V+IR_s}{R_{sh}}$$

参考文献

[1].曹宇,刘安东,贾巧娇,赵永旗,崔海朋.一种新型海洋能发电轮机的水动力特性[J].船舶工程,2020,42(08):16-22.

[2].许贞贞. 基于全功率变流器的可变速潮汐发电系统建模与仿真[D].西安理工大学,2020.

[3].赵淑莉,王冬海,郭明瑞,赵茁.海上多能源高效互补智能供电系统技术研究[J].环境技术,2020,38(02):123-126.

[4].马德柱,王龙旭,刘佶岩,张龙旭,于鸿宇.海浪发电装置的创新型研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2020(04):186-187.

[5].黄宝洲,杨俊华,卢思灵,陈海峰.基于卡尔曼滤波的波浪发电系统反步法最优功率跟踪控制[J].可再生能源,2020,38(03):347-352.

[6].赵磊.直驱式海浪发电系统圆筒型磁通反向直线电机的性能分析与研究[D].浙江大学,2020.

[7].杨钧达,陈卫兴,谢敏怡,刘俊笙,房伟权,丁南,胡佩菊.往复式海浪发电系统力学分析[J].科学技术创新,2020(06):153-154.

[8].晏美青.海洋波浪能“解锁”发电新姿势[J].中国高新科技,2019(21):70.

[9].黄志成,蔡鑫,杨钧达,胡佩菊.往复式海浪发电系统设计[J].中外企业家,2019(21):137-138.

[10].刘晓,陈淑玲.振荡浮子式波能俘获装置模型试验研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2019,33(03):9-17.

[11].邱国福,汤志成.我国海洋能发电的现状及前瞻——写在舟山 LHD 模块化潮流发电并网试运行三周年之际[J].中国电力企业管理,2019(16):54-56.

[12].李牧. 基于带轮-叶片传动原理的新型海洋能发电装置设计及其关键技术研究[D].青岛理工大学,2019.

[13].王世明,李泽宇,申玉,王家之,赵永旗.一种基于海浪发电的浮式消波堤设计与试验研究[J].水利水电技术,2019,50(07):216-221.

[14].梁灿棉. 漂浮式海洋波浪垂直差动能发电装置的波轮机的研究[D].武汉大学,2019.

[15].王慧,陈志豪,黄浩恩,冯润贵,刘敏聪,严谨,陈春雷.浮子——电机一体式动圈式永磁直线海浪发电机[J].无线互联科技,2019,16(07):123-125.

[16].周羿廷.助推海洋能量的崛起——龙卷海洋波浪能发电系统[J].中国高新科技,2019(06):8.

[17].刘永谋.高能社会的科学运行:斯科特技术治理思想述评[J].科学技术哲学研究,2019,36(01):72-76.

[18].李亚军. 浮体绳轮波浪发电效率提升技术的研究[D].山东大学,2018.

[19].赵旭冉. 太阳能发电技术在船舶电力系统中的仿真研究[D].哈尔滨工程大学,2018.

[20].张雅洁,赵强,褚温家.海洋能发电技术发展现状及发展路线图[J].中国电力,2018,51(03):94-99.

[21].E.奥博曼,林谋.加拿大海洋能发电概述[J].水利水电快报,2018,39(02):49-50.

[22].郑崇伟，贾本凯，郭随平，等.全球海域波浪能资储量分析[J].资源科学，2013（8）：1611-1616.

[23].游亚戈，李伟，刘伟民，等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化，2（14）：1-12.

[24].闻耀保.海洋波浪能综合利用：发电原理与装置[M].上海：上海科学技术出版社，2013.

[25.]DELLICOLLI V，CANCELLIERE P，MARIGNETTI F，et al.A tubular-generator drive for wave energy conversion[J].Transactions on Industrial Electronics，2006（4）：1152-1159.

[26].宋保维，丁文俊，毛昭勇.基于波浪能的海洋浮标发电系统[J].机械工程学报，2012（12）：6-8.

[27].苏斌.浮体绳轮波浪发电机的研究[D].济南：山东大学，2015.

[28].司纪凯，苏鹏，封海潮，等.圆筒永磁直线波浪发电机设计方法与性能分析[J].微特电机2014（9）：15-19.

[29].周志宏.直线发电机的方案设计—自由活塞式内燃直线发电机研究进展（二）[J].石油机械，2003（11）：7-10.

[30].罗德荣，闫伟伟，刘旺，等.单相和三相整流系统统一控制策略的研究[J].电力电子技术，2015（1）：11-14.

[31] 陈春雷.大学物理基础教程[M].北京：中国农业出版社，2014.

团队编号：A20200116

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期 2020 年 10 月 10 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本小组设计的多浮子直驱式波浪能发电装置是一种新型的利用海洋波浪能进行发电的装置。装置整体长 400mm，宽 300mm，高 500mm，装置主要由立柱、传动索、固定重物、发电机舱、滑轮、转轴、弹簧和浮子阵列等部分组成。其中单个振荡浮子通过绕经固定重物的传动索与转轴上的大滑轮连接，转轴将机械能传递到发电机舱内，立柱固定于基座，使发电机舱位于水面之上，振荡浮子在波浪力的作用下上下运动，带动传动索移动，将能量储存在弹簧阻尼当中，传动索绕经与固定重物固定的定滑轮，其末端缠绕在传动轴的大滑轮上。当波浪上升时，振荡浮子上浮，配重体随之上升，传动索上产生的拉力带动与超越离合器键连接的转轴旋转，再带动发电机进行发电工作。本小组设计的发电装置采用双排浮子进行发电，可减小单个振荡浮子的体积和重量，便于浮子模型的制造；同时可利用多个振荡浮子收集波浪能，大规模发电；波浪能收集也更为连续、均匀，能够实现高效率、稳定的发电工作。

目　录

第 1 章　总论 1
1.1 研究背景和研究意义 1
1.2 工作环境和工作条件 2
1.3 波浪能的特点和其分布 3
1.4 波浪能发电装置研究现状 4
第 2 章　工作原理 7
第 3 章　结构设计 8
3.1 浮子的设计 8
3.2 传动索以及滑轮的设计 8
3.3 固定重物以及沉块的设计 9
3.4 滑轮以及传动轴连接设计 10
3.5 总体结构设计 11
第 4 章　理论分析 12
4.1 静力学分析 12
4.1.1 排水量计算 12
4.1.2 浮体浮心与重心的位置确定 12
4.2 浮子波浪力计算 13
4.2.1 理论假定 13
4.2.2 数学模型 13
4.3 浮子受力计算 15
4.4 有限元分析 15
4.5 装置发电效率计算 17
第 5 章　参考文献 18
第 6 章　附录 19

第 1 章　总论

1.1 研究背景和研究意义

海洋波浪能是清洁且不具有污染能力的可再生能源，利用波浪能进行发电以获取资源是解决我国能源短缺的重要措施之一[1]。有效的利用波浪能量对缓解能源危机、减轻环境污染具有重要的作用和意义。海洋具有丰富的资源，其中海洋能作为一种可再生，富有前景的可代替能源，其开发和利用的规模也日益增大。海洋能主要包括：潮汐能、海流能、波浪能等[3]。其中波浪能相比于其它形式的海洋能量应用范围更广泛，因为波浪能非常容易预测并且其能量密度较高，并且开发利用相对方便。近年来，海洋波浪能的开发技术领域的研究也日趋活跃[2]。波浪能发电是开发和利用波浪能最主要的形式，自第一台波浪发电机在 1955 年被制造出后，世界各国先后设计除了上百种不同形式的发电装置，这些装置通常可以分为三部分：波浪能捕获系统、机械能转换系统发电系统[3]。其中波浪能捕获系统的作用是捕获波浪能量，到目前为止已经出现了摆式、鸭式、蚌式、振荡水柱式、浮子式等多种形式；机械能转换系统的作用式将捕获的波浪能转化为某种特定形式的机械能，如空气或水的压力能等；发电系统式利用透平或机械传动等设备将机械能传递给发电机转化未电能。此外有些装置只包含了波浪能捕获系统和发电系统两部分，省去了机械能转换装置。下图是击中典型的波浪能发电装置。

由于日益增加的资源需求和现有石油等不清洁能源的过度使用，对于海洋能等清洁可再生能源的需求也日益增加，所以对于利用海洋波浪能发电的研究具有一定的能源战略意义，对于海洋波浪能的发电装置的研究与攻关，不仅能够解决我国现有资源紧张的问题，也能在一定程度上保护环境，建设文明生态。

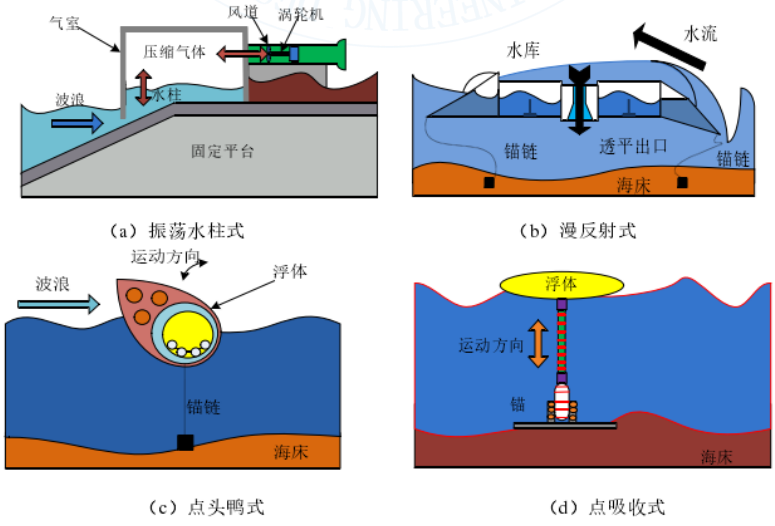


图 1.1　几种典型的波浪能发电装置

1.2 工作环境和工作条件

工程上通常使用多种不同的仪器在特定位置测量波浪能的工作环境及条件，采用沿着海面并记录其自身垂直位移的小型浮标，然后将该数据记录在船上，并通过相应的的遥测系统将信息传输到岸上。这些设备通常大约 20 到 30 分钟进行一次记录，以获得波浪的情况及工作环境。然后，我们就可以根据这些测量结果的频谱或海浪高度和海浪周期统计数据来表征特定的“海况”。由于气候每年都在变化，因此需要更长的测量时间，一般测量时间至少为一年，可以反映海况的季节性变化。

在全球范围内采用上述方法测量以及分析统计和计算，得出如图 2.1 所示的全球波浪资源分布图。由图可知，大西洋和南太平洋等地区的平均功率水平较高，而其他地区的平均功率水平较低，但仍然可以利用。

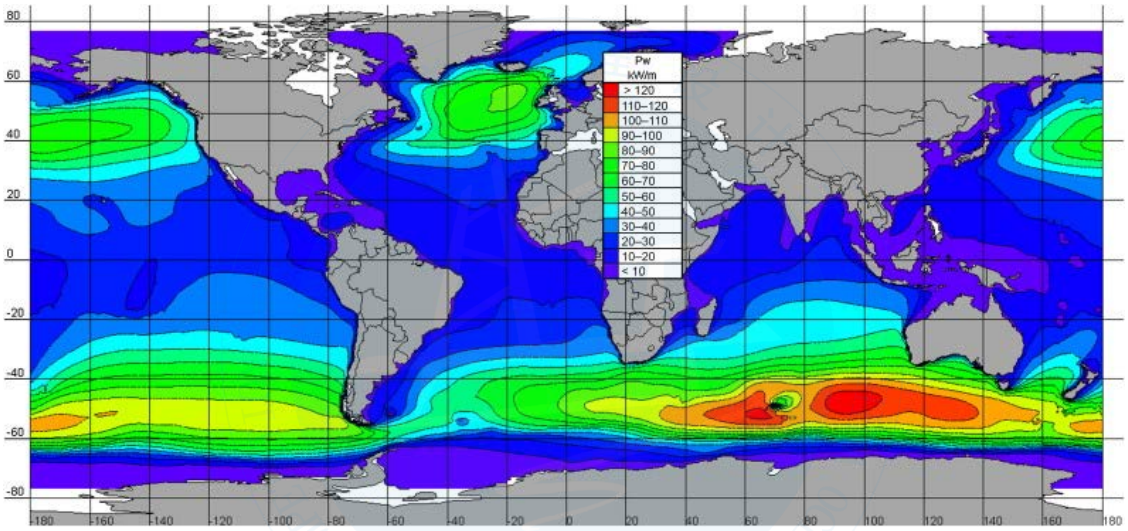


图 1.2　世界能源理事会统计的全球平均波浪功率分布图

我国海域具有波浪周期短、能流密度低且台风易发的特点，我国各地沿岸的年平均周期分布是：渤海为 2.0~3.0s；渤海海峡为 3.6s 左右；山东半岛南岸、苏北和长江口为 3.0~4.4s；浙江、福建和台湾为 4.5~6.4s；粤东和粤西为 3.0~5.4s；海南岛和北部湾为 2.5~3.0s；西沙地区为 3.5s 左右[4]。图 2.2 显示了我国近海海域波浪能分布。分布的大体趋势：浙江中部、台湾、福建平潭岛以北，渤海海峡和西沙地区沿岸最高；其次，是浙江南部和北部、广东东部、福建平潭岛以南、山东半岛南部沿岸；渤海、黄海北部和北部湾北部沿岸最低；波浪能能量密度同样受季风影响，具有明显的季节变化，全国沿岸多数地区季节变化的总趋势是，秋冬季较高，春夏季较低[5]。不过值得注意的是，浙江及其以南地区，因受台风影响，春末和夏季(南海 5-6 月，东海 7-9 月)波浪能能量密度也较高，甚至出现全年最高值。

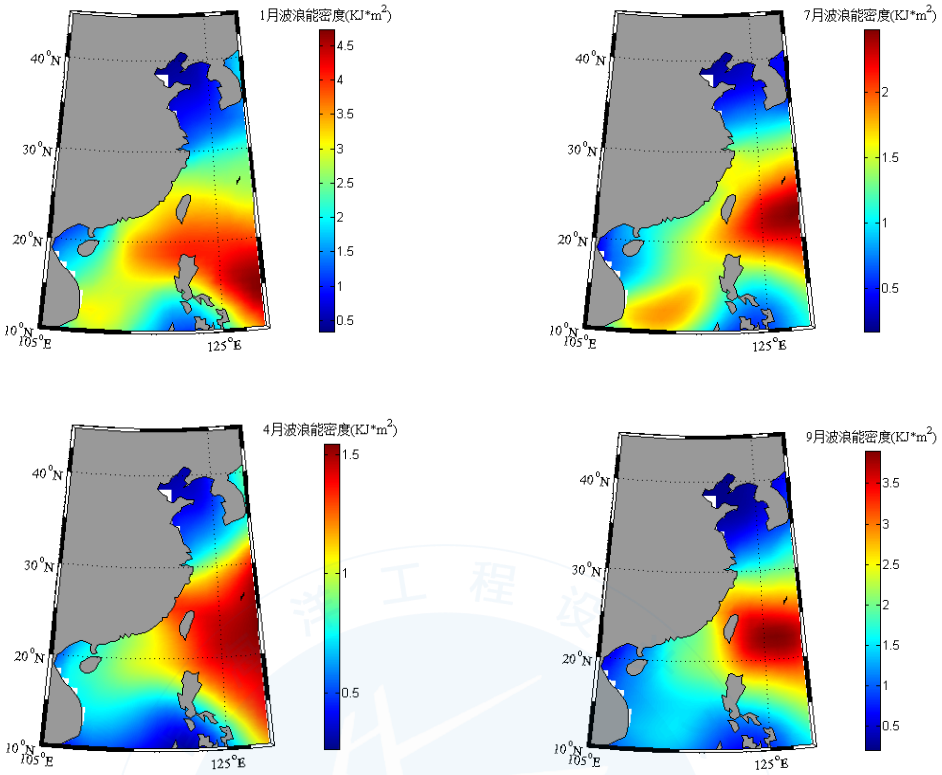


图 1.3　我国近海岸波浪能分布图

1.3 波浪能的特点和其分布

波浪能的两个显著特征是运动方向的多维度和高随机性，由于空间高度的不均匀，加上时间上的随机，是的波浪能的控制和利用存在着一定的难度。波浪是，外力海面共同作用下产生的，所以它的运动过程必然会受到地形、风向、洋流等条件影响而不断发生变化[6]。全球大部分的海域年平均波浪能密度大概在 10kW/m 左右，可供能源开发的波浪高度出现频率高达 90%，所以全球海域的波浪能资源储量十分丰富，尽管我国根据波浪高度和储量方面判断，不处于优势区域，但是在南海北部，东海中南部依然可以利用波浪能[7]。

图 1.4　中科院南海波浪能发电装置

波高和波浪周期是决定波浪能资源是否丰富的两个主要因素[11]。波浪能够对人类环境造成巨大的破坏，但也反映出其具有巨大的能量。因此对于波浪能发电装置的设计和研究也是重中之重，目前全球将近 30 多个国家和地区正在进行波浪能发电装置的研发。

1.4 波浪能发电装置研究现状

YoshioMasuda 被誉为现代波能技术之父，早在 20 世纪 40 年代，他就提出波能导航浮标，后来被评为振荡水柱式波能发电装置，这是最早的商业化生产的波能发电装置。在 1976 年，Masuda[8]提高了施工工艺，研发出了新型的振荡水柱式波能发电装置，但输出功率未能达到一定的要求。在同一时期，英国 Salter 提出了鸭式结构的波浪能发电装置[9]，该装置的提出，引发了一系列的海洋能源的探讨和研究。

2008 年，美国俄勒冈州立大学研发了 10kw 原型样机 L-10，浮子直径为 3.5m，立柱长度为 6.7m 的发电装置在俄勒冈州新港附近完成海试[10]。该波浪能发电装置包括一个蝶形浮子和一个通过锚链锚固的立柱，立柱内的直线轴承系统现之了浮子，让浮子只能上下移动，其中，能量主要通过浮子相对于立柱的运动转化为内部永磁直线电机的电能。

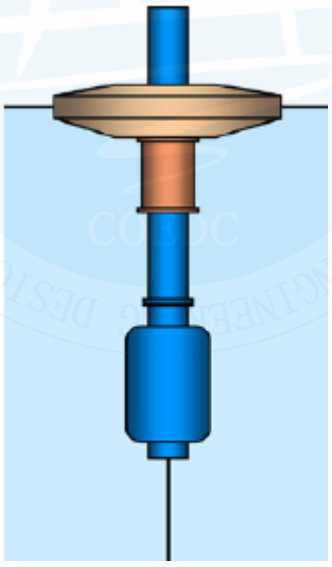


图 1.5　L-10 浮子

瑞典的诺尔 •斯文提出了 IPS 浮标，它包括了上部浮子结构和刚性连接的两端打开的水下垂直加速管。管内存在一个活塞，活塞的运动主要源自波浪的漂浮作用和水的惯性。

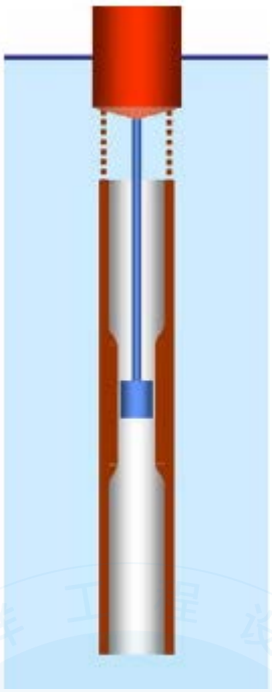


图 1.6　瑞典 IPS 浮标

英国研发的 Pelamis 装置，是一种由四个援助相互组成的蛇形发电装置，通过圆柱之间的连接运动来驱使高压油泵发电。2004 年，Pelamis 的研发经过了多年后，在苏格兰完成测试，原型的尺寸为 120m，直径为 3.5m，额定功率 750kW。2008 年，在葡萄牙北部该发电装置得到使用。

图 1.7　Pelamis 发电装置

相较于国外的波浪能发电装置，国内的波浪能发电装置发展较晚，在十九世纪八十年代才开始波浪能发电的研究。1985 年，中国科学院广州能源所在 1985 年开发出一种对称翼，透平发电装置。

2009 年，中国海洋大学开始研究碟型越浪式波能发电装置，其主题结构式碟型蓄水池，蓄水池外侧四周为引浪坡面，其上由 10 个导流叶片。该装置的工作原理见图 1.7。当波浪达到引浪面后，顺着引浪面爬高，最终进入蓄水池种，蓄水池将不太稳定的入射波能转换为蓄水池内水体的势能，水体顺出水管流出装之外，势

能转换为稳定的淹没出流动能，带动安装在出水管内的水轮机的转动，同时水轮机带动同一转轴上的发电机。

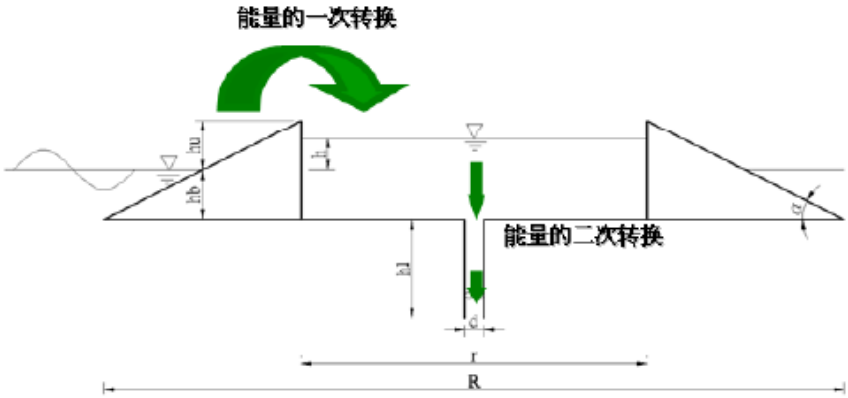


图 1.8　碟型装置原理图

2012 年，中科院广州能源所、中国海洋大学、大连理工大学等科研机构均已成功研发出了单点吸收式波浪能发电装置[11]。

振荡水柱式波能转换装置是目前研究最为广泛的波能发电装置，它的形式有很多。振荡水柱式波能转换装置，依靠压缩气体推动涡轮机运动。但是近年来，振荡浮体式的波能装置越来越多，包括上述提到的英国 Peliams 装置以及，Oyster 波能转换装置和美国的 Powerbuoy 装置[12]。

第 2 章　工作原理

本小组设计的多浮子直驱式波浪能发电装置主要采用波浪能-机械能-电能的转换方式。首先，直接与海水接触的浮体随着波浪做起伏运动，将波浪能转换为浮体所持有的机械能;其次，浮体的运动带动中间的机械传动装置运动，机械传动装置除了起到增速以及传递能量的作用外还有更为重要的一个作用，就是将浮体的往复运动转换为单向的旋转运动;最后，通过发电机将机械传动装置传递过来的机械能转换为电能。

该装置具体的工作原理如下：其中单个振荡浮子通过绕经固定重物的传动索与转轴上的大滑轮连接，转轴将机械能传递到发电机舱内，立柱固定于基座，使发电机舱位于水面之上，振荡浮子在波浪力的作用下上下运动，带动传动索移动，将能量储存在弹簧阻尼当中，传动索绕经与固定重物固定的定滑轮，其末端缠绕在传动轴的大滑轮上。当波浪上升时，振荡浮子上浮，配重体随之上升，传动索上产生的拉力带动与超越离合器键连接的转轴旋转，再带动发电机进行发电工作。发电装置采用双排浮子进行发电，可减小单个振荡浮子的体积和重量，便于浮子模型的制造；同时可利用多个振荡浮子收集波浪能，大规模发电；波浪能收集也更为连续、均匀，能够实现高效率、稳定的发电工作。

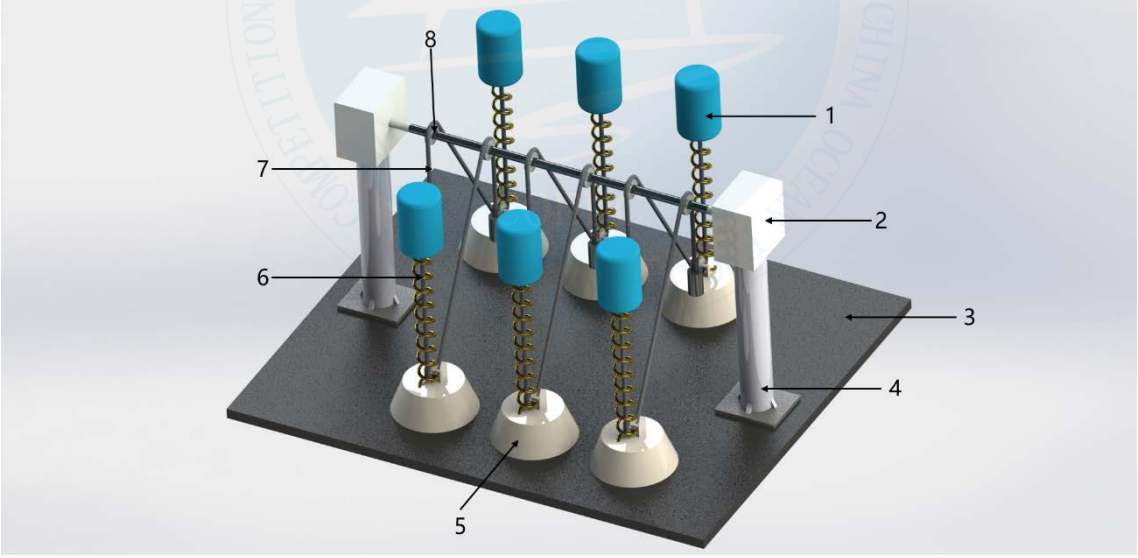


图 2.1　多浮子直驱式波浪能发电装置原理图

1-浮子；2-发电机传动箱；3-底板；4-立柱；5-固定重物；6-蓄能弹簧；7-传动索

第 3 章　结构设计

3.1 浮子的设计

在实际海洋波浪能发电装置中，浮子是直接与海水接触随着波浪做起伏运动的装置，浮子能够将波浪能转换为所需要的机械能;接着将浮体的机械能转化为传动装置运动所需要的能量。

本次设计浮子的主要性能：

主要材质：泡沫板、小水瓶；

主要功能：通过与水面接触，将波浪的起伏转化为驱动发电装置所需要的机械能；

性能要求：单位体积下浮子提供尽可能大的浮力，即单位体积下浮子排开尽可能多的水量；浮子在波浪流作用下受载时应稳定漂浮在水面上，不能过早失稳；浮子应具有一定的表面强度，在水中作业时表面不能发生过大的形变。

根据以上性能要求，对下壳体进行如下设计：

通过查阅资料得目前工业生产的浮子主要采用圆柱形，圆柱形在周围受载时不仅可以将载荷均匀分布，同时在尺寸大致相同的情况下其排水量是最多的，因此首先采用圆柱形下壳体，如图 3.1 所示。

图 3.1　浮子结构示意图

浮子整体为圆柱形，浮子底部有连接传动索的接口。

3.2 传动索以及滑轮的设计

在实际海洋波浪能发电装置中，传动索以及滑轮是连接浮子以及重物的连接装置，是将重物、浮子共同产生能量转化为发电装置所需要机械能的关键部件。

本次设计传动索以及滑轮的主要性能：

主要材质：棉绳，塑料或者金属滑轮；

主要功能：连接浮子以及重物，将波浪能转化为机械能，再传递给发电装置；

性能要求：传动索必须有足够大的抗拉性，能够将浮子、重物共同产生的力全部转化为所需要的能量；在水的浸泡下不会发生腐蚀、断丝；能够改变力的方向，将重物的拉力与浮子受到的浮力叠加。

根据以上性能要求，对传动索以及滑轮进行如图 3.2 设计：

图 3.2　传动索以及滑轮结构示意图

传动索呈“Z”字形分布，能够很好的将两个力进行叠加。

3.3 固定重物以及沉块的设计

在实际海洋波浪能发电装置中，固定重物是固定整个发电装置的关键部件，固定重物通过焊接固定在底板上，再通过焊接固定滑轮进行传递拉力；沉块通过滑轮连接在传动索的另一端，并通过自身的重力产生一定的拉力，与浮子提供的浮力共同作用。

本次设计固定重物以及沉块的主要性能：

主要材质：铁块、秤砣；

主要功能：重物固定整个发电装置，沉块提供所需的拉力；

性能要求：重物必须有足够大的重量以及稳定性，能够整个发电装置稳定地固定在底板上；沉块除了要有一定的重力以外，所采用的材料要有比较大的密度，能够保证在有一定的质量的同时体积不是太大。

根据以上性能要求，对固定重物以及沉块进行如图 3.3 设计：

图 3.3　固定重物以及沉块结构示意图

3. 4 滑轮以及传动轴连接设计

在实际海洋波浪能发电装置中，传动轴会受到来自滑轮较大的径向力，另外传动轴传递给发电机的机械能需要较大的周向力。根据现存的机械连接方式，采用键连接将滑轮跟传动轴固定在一起，通过键实现轴和滑轮的周向固定以传递运动和转矩。

根据以上性能要求，对滑轮以及传动轴连接方式进行如图 3.5 设计：

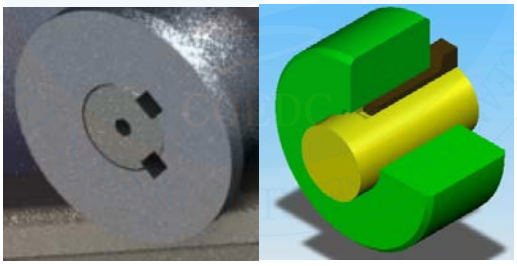


图 3.4　键连接示意图

图 3.5　滑轮以及传动轴示意图

底部滑轮通过传动轴固定在底部重物上，滑轮通过键连接将周向力传递给传动轴进而带动电机进行转动。

3.5 总体结构设计

综上所述，针对多浮子直驱式波浪能发电装置的整体设计如图 3.6 所示，六个单体发电装置呈错开对称的分布在底座两边，由于浮子阵列的各个浮子在波浪中因为浮力的作用分别做上下起伏运动，当某一个浮子做功完成时，其它浮子可继续对转轴做功，保证不同时间内都会有浮子对转轴做功，从而使波浪能输入更为稳定。通滑轮、传动轴等装置，最终将波浪能转换为电能输出。

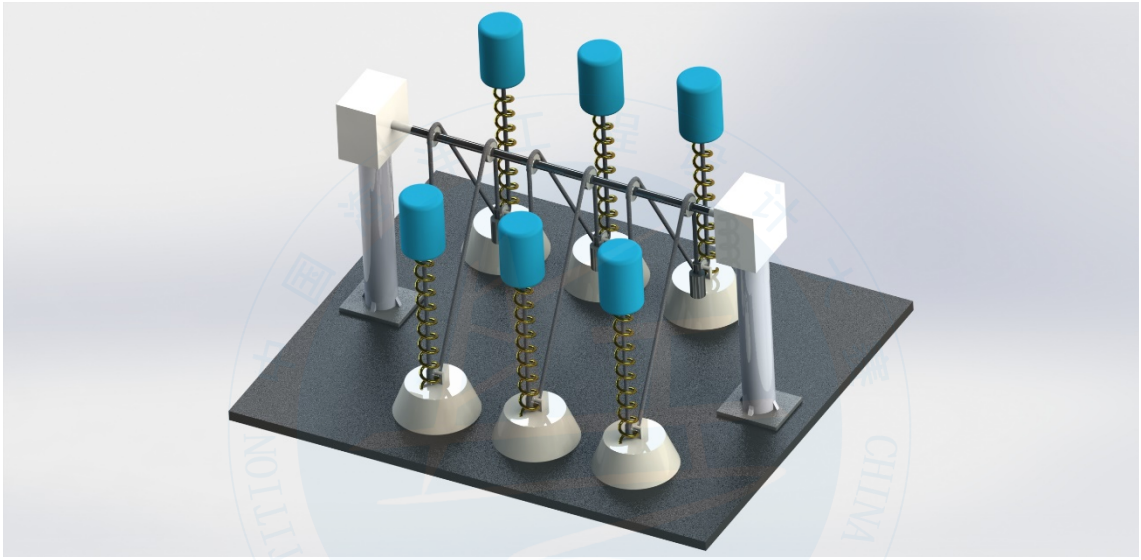


图 3.6　内部结构示意图

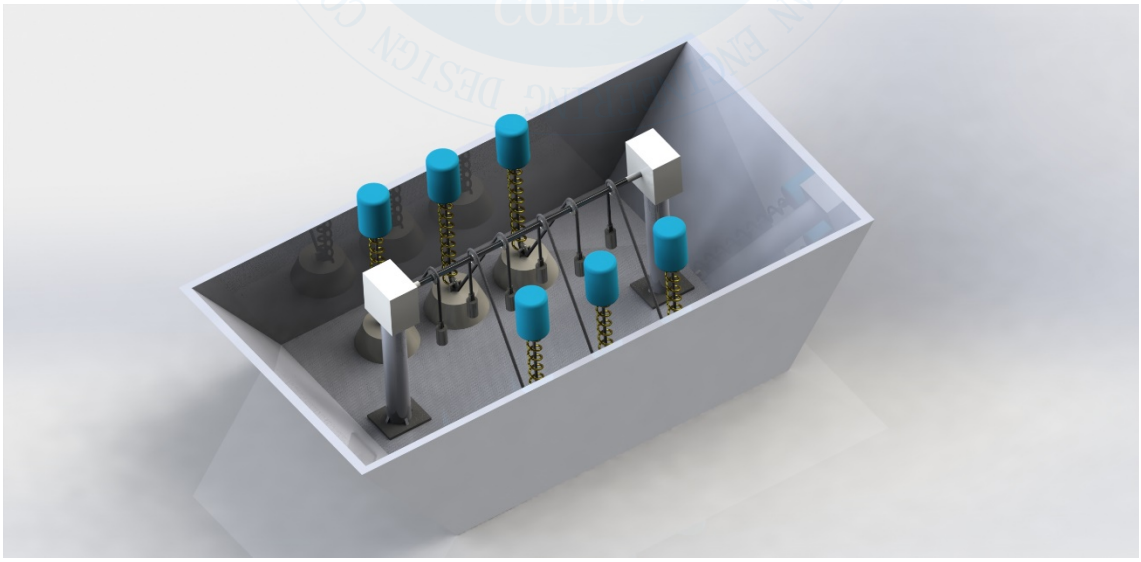


图 3.7　总体结构示意图

第 4 章　理论分析

4.1 静力学分析

4.1.1 排水量计算

以板下船体部分计算浮体的最大满载排水量[13]：

$$V_1 = 2V_0 = 2\times\frac{3\sqrt{3}}{2}\times a^2\times l = 2\times\frac{3\sqrt{3}}{2}\times 40^2\times 297 = 2469211.6mm^3 \approx 2469.2cm^3$$

$$V_2 = \frac{(80+215)\times 115}{2}\times 297 = 5037862.5mm^3 \approx 5038cm^3$$

$$V_3 = V_1 + V_2 = 2469.2 + 5038 = 7507.2cm^3$$

$$m_{水} = V_3\times\rho = 7507.2cm^3\times 1g/cm^3 = 7507.2g = 7.5kg$$

其中 V_0 表示单个浮筒的体积，V_1 表示两个浮筒的总体积，V_2 表示货仓在干舷为 3cm 时的排水体积，V_3 表示浮体总排水体积，$m_{水}$ 表示满载排水的质量。

4.1.2 浮体浮心与重心的位置确定

通过阅读参考文献[14-17]，我们知道对于浮体而言，存在两种情况：一种是悬浮体（如水面下的潜艇），一种是漂浮体（如轮船）。对于悬浮体，其稳定平衡的条件是浮心在重心之上；而对于漂浮体，即使重心在浮心以上，也能处于稳定平衡状态；因为浮体平衡与否，不完全取决于平衡时浮体的重心与浮心的相对位置，主要与转动以后浮心位置有关。

这是因为，浮体受外力距发生较小倾斜时，其重力大小不变，且重心也不会因为倾斜而改变在物体上的位置，但是浮体倾斜时，浮力的大小及作用点会发生改变，当倾斜角度很小的时候，浮力的大小变化可以忽略，但其作用点位置发生改变，只要定倾半径 d>0，浮体仍然可以保持稳定，也即重心高于浮心不超过$\frac{b^2}{12e}$（b 为浮体宽度，e 为正浮时吃水深度）时，浮体仍然保持稳定,这就是浮体稳定的判断依据。

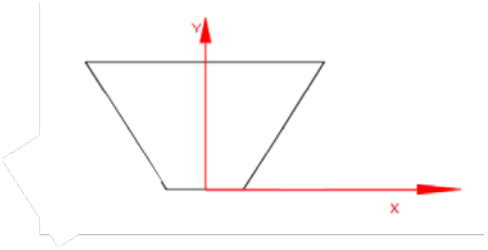


图 4.1　船体简化截面示意图

经过计算，当船体满载后，具有良好的平衡稳定性。

4.2 浮子波浪力计算

在波浪能装置受力计算方面，前人总结过许多方法，包括格林函数法、特征函数展开法、切片理论法、能量动量守恒法和压力计分法等[18-20]。但是由于振荡水柱式波能发电装置发展较早，西方发展波浪能较早的国家主要运用这些计算方法对振荡水柱波能发电装置进行计算验证。振荡浮子波能发电装置和振荡水柱式波能发电装置具有相似性，即浮子的振荡与水柱的振荡相类似，所以格林函数法可以应用到浮子波能发电装置中。由于格林函数表达式相当复杂，并且还需在浮子的表面进行面积分，用解析的方式很难解决，所以通常将浮子表面切成非常小的面，然后将每个面连接起来代替原有浮子表面，通过多次积分叠加得出最终的结果，但是这种方法计算量非常大，在生产实际中应用起来十分不方便。

考虑到浮子在波浪中的受力情况类似于船舶的运动，弗汝德—克雷洛夫假定法曾经应用于船舶在波浪中的受力情况。相对于格林函数法，该方法的计算相对简单，把这种方法引入到浮子所受波浪力的计算当中，可以得到一定精度的计算结果。

4.2.1 理论假定

浮体在波浪作用下，产生六自由度运动，浮体在海浪作用下,产生六自由度运动,为了简化研究,首先对浮体和波浪做出如下简化：

1) 认为浮体完全刚性,暂时不考虑水弹性。
2) 浮体运动为微幅运动。
3) 流体无粘、不可以压缩、无旋，且仅考虑一阶微幅波。
4) 暂时不考虑空气与水的耦合作用。

5）流体是均质不可压缩的，密度为常数。

6）流体运动是无旋的。

7）波浪为微幅波。

8）浮子仅在垂直海平面方向运动。

9）入射波为规则波。

10）海平面无限大且海底为均匀等深的。

4.2.2 数学模型

弗汝德一克雷洛夫假定法[20]假设了入射波的波压力分布不随浮体的存在而改变。计算过程中，先算出未受扰动的入射波对浮子的作用力，然后乘以附加质量效应的绕射系数 C 进行修正(C 需要通过模型试验来确定)。

根据弗汝德一克雷洛夫假定法，作用在浮子上的波浪为：

$$F_w = CF_k$$

$$F_k = \rho\bar{V}_0\left(\frac{dv}{dt}\right)$$

其中，$\frac{dv}{dt}$为浮子不存在时，排水体积$\bar{V}_0$内水体的平均全加速度。

在无旋、无粘性、不可压缩的理想流体当中，流场的波压力可由下式表达：

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\frac{v^2}{2}+\frac{p}{\rho}+gz=0$$

其中，φ为速度势，$v=\nabla\varphi$，∇为哈密顿算子，考虑到波浪假定为微幅波，波压力即可用下式表达

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\frac{p}{\rho}+gz=0$$

由上式可以导出，只要知道流场中速度势分布就可以得到流场压力分布，从而的出波浪力。

由于入射波为规则波，因此速度势只考虑入射波速度势，绕射式由绕射系数进行修正，得到入射势为：

$$\phi=-\frac{igH}{2\omega}\frac{cosh\left[k\left(z+h\right)\right]}{cosh\left(kh\right)}exp(ikx)$$

接下来分析浮子运动，由于浮子做简谐运动，因此可以得到浮子的相关物理量：

$$\begin{cases} z(t)=Z_0+\zeta e^{-iwt} \\ p(t)=P_0+Pe^{-iwt} \\ \varphi=\Phi e^{-iwt} \\ \dfrac{P_0}{P}+gZ_0=0 \end{cases}$$

其中，$z(t)$为浮子任一点的 Z 坐标，$p(t)$为任一点的压力，φ为任一点的速度势。

综上可知：由波浪引起的波压力 P 为：

$$p=ipw\Phi-\rho g\xi$$

右侧实部物理压力为：

$$p=\frac{\rho gH}{2}\frac{cosh\left[k\left(z+h\right)\right]}{cosh\left(kh\right)}cos(kx-wt)$$

其中，p为任一点波压力(N/m^3)，ρ为海水密度，g 为重力加速度，h、H 分别为海水水深和波高，k 为波数，λ为波长，z 为浮子起伏位移，ω为波浪圆频率。

由于需要根据浮子的形状尺寸才能确定波浪力，浮子尺寸通过发电功率来计算，得到具体尺寸即可确定波浪力。

4.3 浮子受力计算

浮子在波浪作用下进行运动，本节[21]对单个浮子系统的受力情况进行了具体分析，发电部分进行了适当的简化，将其等效成线性系统便于进行控制。当入射波来临时，浮子在波浪的作用下运动，运动应该是具有六个自由度的，也就是具有六个运动模态，分别是振动(纵荡、横荡、垂荡)和旋转(横摇、纵摇、垂摇)，本文主要考虑浮子的垂荡运动。在波浪作用下，浮子做垂荡运动即振荡，在单个浮子模型并且小范围运动下，可以将系统近似视为线性的，由文献可知其受力平衡关系式为：

$$F_e + F_g + F_r + F_h = m\ddot{z}(t)$$

其中，F_e为波浪入射波的激励力；F_g为系统的功率输出部分即电机的电机力；F_r为浮子产生的辐射波所引起的辐射力；F_h为浮力；m 为浮子质量，t 为时间；z 为浮子位移。

浮力F_h由海水水浮力的等效弹性刚度决定，其和浮子半径以及海水密度有关，可表示为：

$$F_h = -K_h z(t)$$

辐射力F_r由附加质量以及辐射阻尼有关，可表示为：

$$F_r = -m(w)\ddot{z}(t) - \int_{-\infty}^{t} \dot{h}_r(\tau)\,\dot{z}(t-\tau)d\tau$$

由以上推导可以得到一个新的运动方程为：

$$F_e + F_g = (m + m_a)\ddot{z}(t) + C\dot{z}(t) + K_h z(t)$$

4.4 有限元分析

对模型的关键部位进行有限元分析，分析结果如下：

对框架型材在受到水流力作用下的位移进行计算，如图 4.2 所示，最大位移为 1.72cm，说明装置有良好的稳定性。

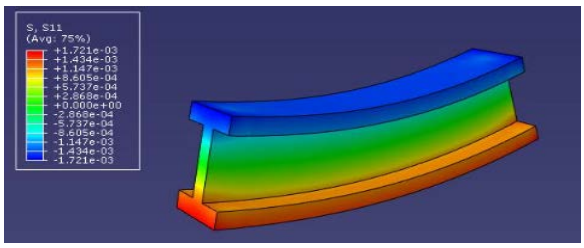


图 4.2　型材位移示意图

对连接型材的角铁所能承受的最大应力进行计算，如图 4.3 所示，可承受最大应力为 1.37×10^9N，有足够的强度，完全符合要求。

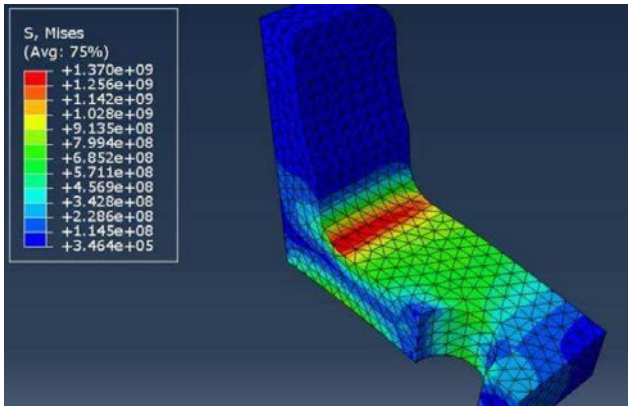


图 4.3　角铁应力示意图

对传动带轮在传动时所受的力进行计算，如图 4.4 所示，沿带轮周向所受的力很小，有足够的安全性。

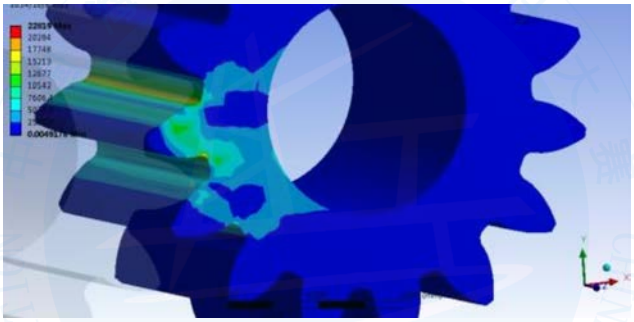


图 4.4　带轮应力示意图

对浮力球施加在实际工况中所受的载荷，得到浮力球的受载示意图，如图 4.5 所示。

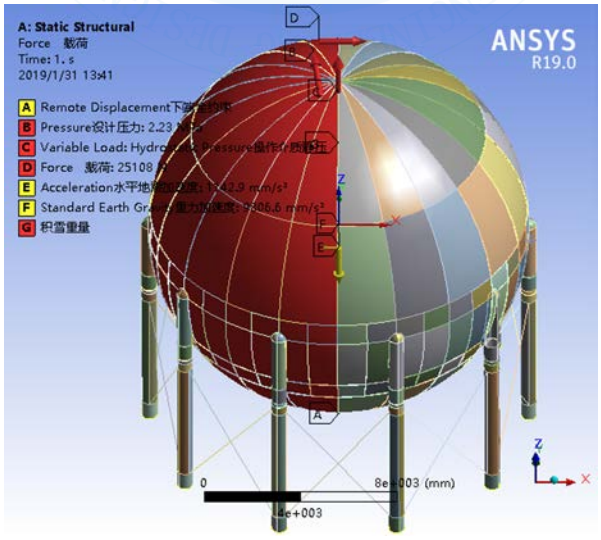


图 4.5　浮力球受载示意图

4.5 装置发电效率计算

由于入射波振幅 A=0.03-0.05m 远小于 h=0.3m，所以采用线性化的微幅波理论。微幅波理论[22]中提到，对于单宽波峰线长度一个波长 L 内波长具有的动能为：

$$E_k = \int_0^L \int_{-h}^{\eta} \frac{\rho}{2}(u^2 + w^2)dxdz$$

根据势流理论可知任一点处水质点的水平速度 u 和垂直速度 w，积分得：

$$E_k = \frac{1}{16}\rho g H^2 L$$

同时在微幅波中，存在势能来自水质点偏离平衡位置所具有的能量。微元体 dxdz 具有的势能为$\rho g z dx dz$，沿水深积分得单宽波峰线长度一个波峰线范围内具有的势能：

$$E_p = \int_0^L \frac{\rho g}{2}\eta^2 dx = \frac{1}{16}\rho g H^2 L$$

对于单宽波峰线一个波长范围内入射波总能量为：

$$E_0 = E_k + E_p = \frac{1}{8}\rho g H^2 L$$

对于浮子宽度 B 范围内入射波波浪能则即装机功率为：

$$E = BE_0 = \frac{1}{8}\rho g H^2 LB$$

由于本试验水深为 0.3m，波高为 0.03-0.05m，为有限水深，因此波长 L 为：

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} tanh kh$$

浅水波的波长与周期成正比，与水深成反比；浅水波的波速仅与水深成正比，所以微幅波传播到浅水区之后，在未破碎之间波浪传播速度仅与水深有关。

浮子波能发电装置的最大发电功率为：

$$E_i = UIt$$

其中，U为测得电压最大值，I 为测得电流最大值，t 为单位时间。

最终得到装置发电效率为：

$$\eta = \frac{E_i}{E} = \frac{UIt}{\frac{1}{8}\rho g H^2 LB} = 29.8\%$$

第 5 章　参考文献

[1] Zhang D , Li W , Lin Y . Wave energy in China: Current status and perspectives[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10):2089-2092.

[2] 张丽珍, 羊晓晟, 王世明, et al. 海洋波浪能发电装置的研究现状与发展前景[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(001):161-164.

[3] 邓隐北, 熊雯. 海洋能的开发与利用[J]. 可再生能源, 2004, 000(003):70-72.

[4] Cruz J . Ocean Wave Energy: Current Status and Future Prespectives[J]. Green Energy and Technology, 2008.

[5] 程友良, 党岳, 吴英杰. 波力发电技术现状及发展趋势[J]. 应用能源技术, 2009, 000(012):26-30.

[6] 游亚戈. 我国海洋能进展[J]. 中国科技成果, 2007, 000(016):18-20.

[7] 任建莉, 钟英杰, 张雪梅, et al. 海洋波能发电的现状与前景[J]. 浙江工业大学学报, 2006(01):69-73.

[8] Alain Clément and Pat McCullen et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002.

[9] Johanning L , Smith G H . Improved measurement technologies for floating wave energy converter (WEC) mooring arrangements[J]. Underwater Technology the International Journal of the Society for Underwater, 2008, 27(4):175-184.

[10] 郑崇伟, 贾本凯, 郭随平,等. 全球海域波浪能资源储量分析[J]. 资源科学, 2013(08):79-84.

[11] Kamensky M , Guglielmi M , Formal'Skii A . Optimal switching control of an absorber ocean wave energy device[C]// Conference on Control & Automation. IEEE, 2008.

[12] Masuda Y. Wave-activated generator. Int. Colloq Exposition Oceans. France: Bordeaux; 1971.

[13] Salter, S. H . Wave power[J]. Nature, 1974, 249(5459):720-724.

[14] Bostroem C , Lejerskog E , Stalberg M , et al. Experimental results of rectification and filtration from an offshore wave energy system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(5):1381-1387.

[15] 吴必军, 刁向红, 王坤林, et al. 10kW 漂浮点吸收直线发电波力装置[J]. 海洋技术, 2012(03):72-77.

[16] Henderson R . Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2):271-283.

[17] Henry A , Doherty K , Cameron L , et al. Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter[C]// Marine Renewables & Offshore Wind Conference. 2010.

[18] Rij J V , Yu Y H , Edwards K , et al. Ocean Power Technology Design Optimization[J]. International Journal of Marine Energy, 2017.

[19] Babarit A，Duclos G，Clement A H．Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea[J]．Applied Ocean Research 2004，26(5)：227-238．

[20] Korde U A ． Control system applications in wave energy conversion[J] OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition ，Conference Proceedings，2000，3：1817-1824．

[21] 刘臻. 岸式振荡水柱波能发电装置的试验及数值模拟研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2008.

[22] 王传崑、卢苇.海洋能资源分析方法及储量评估.北京：海洋出版社.2009：106-129.

第 6 章　附录

浮体重心与浮心的计算

（1）浮心

$$S_{六边形}=\frac{3\sqrt{3}}{2}\times a^2=\frac{3\sqrt{3}}{2}\times 40^2=2400\sqrt{3}mm^2$$

$$y_{六边形}=20\sqrt{3}$$

$$S_{水下梯形}=\frac{(215+80)}{2}\times 115=16962.5mm^2$$

$$y_{水下梯形}=\frac{h}{3}\times\frac{2b+a}{a+b}=\frac{115}{3}\times\frac{2\times 215+80}{80+215}=66.27$$

$$y_{浮心}=\frac{y_{六边形}\times S_{六边形}+y_{六边形}\times S_{六边形}+S_{水下梯形}\times y_{水下梯形}}{S_{六边形}+S_{六边形}+S_{水下梯形}}$$

即 $$y_{浮心}=\frac{20\sqrt{3}\times 2400\sqrt{3}+20\sqrt{3}\times 2400\sqrt{3}+16962.5\times 66.27}{2400\sqrt{3}+2400\sqrt{3}+16962.5}=25.87$$

（2）重心

$$\overline{S}_{梯形}=\frac{(250+80)}{2}\times 147=24255mm^2$$

$$\overline{y}_{梯形}=\frac{h}{3}\times\frac{2b+a}{a+b}=\frac{147}{3}\times\frac{2\times 250+80}{250+80}=86.12$$

$$\overline{S}_{六边形}=\frac{3\sqrt{3}}{2}\times a^2=\frac{3\sqrt{3}}{2}\times 40^2=2400\sqrt{3}mm^2$$

$$\overline{y}_{六边形}=20\sqrt{3}$$

$$\overline{y}_{重心}=\frac{\overline{y}_{六边形}\times\overline{S}_{六边形}+\overline{y}_{六边形}\times\overline{S}_{六边形}+\overline{S}_{梯形}\times\overline{y}_{梯形}}{\overline{S}_{六边形}+\overline{S}_{六边形}+\overline{S}_{梯形}}$$

$$=\frac{2400\sqrt{3}\times 20\sqrt{3}+2400\sqrt{3}\times 20\sqrt{3}+24255\times 86.12}{2400\sqrt{3}+2400\sqrt{3}+24255}=40\sqrt{3}\approx 29.24$$

团队编号：__A20200611__

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 10 月 13 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本次设计选用波浪能作为能量来源，设计出一个小型海上发电装置，经现场实地测得，该装置的发电效率可达 39.6%，紧密切合了大赛“海洋可再生能源的开发和利用”的主题，整个发电过程清洁无污染，符合当下绿色环保的理念。

作品主要由发电部分、浮体部分、传动部分和聚浪部分组成且所有装置设在水平浮体上，这是一种在水面工作的聚浪浮板发电装置。通过聚浪斜板收集波浪能，浮块与齿轮和连杆相连接，当波浪拍打在聚浪斜板上时，聚浪斜板对波浪产生一个反向作用力，使得浮块带动连杆上下运动，连杆带动齿轮转动，齿轮与微型发电机相连，发电机发出电能，此步骤将波浪能转化为机械能，然后再转化为电能，发电机发出电能通过导线使灯泡变亮。设计中改进了发电机接线方式，使得中心转轴正、反转的情况下，都可以发出电能。

本设计中首次提出聚浪浮板理念，在装置下方增添聚浪斜板，左右增加聚浪挡板，能够将波浪能更好的聚集在一起，尽可能使浮块获得较多的波浪能，使波浪能更好的转化为机械能，进而提高效率使其更好的发电。

本设计对浮体结构进行了优化，将浮体外壳做成弧形结构，左右两边增加浮块，用来感知波浪的方向，具有转向能力，使得装置总是面对不同方向的最大波浪，提高了装置的环境适应性。

整个发电装置创意新颖，原理清晰，结构简单，布局合理，发电机部分被放置在浮体上，有效防止了发电机被海水腐蚀，从而延长了装置的使用年限，整个装置的经济效益高，清洁环保，具有广阔的应用前景。

目录

第 1 章 总论.....1
第 2 章 聚浪浮板发电装置设计方案.....2
2.1 能量形式选取.....2
2.2 波浪能利用技术的分类与发展前景.....2
2.3 聚浪浮板发电浮体设计方案.....3
2.3.1 设计原理.....3
2.3.2 聚浪浮板发电装置结构设计与布置.....4
第 3 章 聚浪浮板发电装置浮体受力与发电分析.....12
3.1 浮体受力分析.....12
3.2 稳定性分析及校核.....14
3.2.1 风载荷的影响.....14
3.2.2 波浪力的影响.....15
3.2.3 海流力的影响.....15
3.3 聚浪浮板发电装置相关电力分析.....15
3.4 作品应用性分析.....16
3.4.1 工作状况分析.....16
3.4.2 应用的可行性分析.....16
第 4 章 聚浪浮板发电装置特点及创新点.....18
4.1 聚浪浮板发电装置特点.....18
4.2 聚浪浮板发电装置创新点.....18
参考文献.....**错误！未定义书签。**
附录 I 浮心位置的计算.....21
附录 II 装置实物图.....22

第 1 章 总论

能源工业作为国民经济的基础，对提高人类生活质量和促进社会经济发展都极为重要。近年来，随着全球经济的飞速发展，伴随的却是不可再生能源的逐渐枯竭，环境问题也日益严重。可以判断，如果新的能源体系尚未建立，能源危机将席卷全球。

海洋覆盖了地球表面 70% 以上的面积，被认为是储量最大的可再生能源之一，海洋能储量丰富，可循环利用，低碳清洁，且其开发不污染环境[1]。波浪能作为海洋能源中重要的组成部分，对其进行利用开发具有广阔的应用前景。波浪能发电装置是采集和转化波浪能的重要设备，在波浪能开发方面起着不可替代的作用。

本作品利用海水波浪上下起伏运动产生的能量，设计一个与波浪运动频率有交集的发电装置，此装置以研究转换效率高、成本低的浮子式波浪发电技术为目的，以水波传递为基础，通过对波浪能的利用，找到一种获取海洋能源并将其转换为高效环保的电能，因此具有广阔的应用前景。

作品主要由发电部分、浮体部分、传动部分和聚浪部分组成，上方为发电机及机械传动的安装位置，下方为聚浪斜板。在下方增添聚浪斜板是为了使波浪能能够有效的利用，在装置整体左右增加聚浪挡板是为了尽可能使浮块获得较多的波浪能，从而更好的转化为机械能，使其高效率发电，从而达到灯亮的效果。

第 2 章 聚浪浮板发电装置设计方案

2.1 能量形式选取

海洋能主要包括波浪能、潮汐能、海流能、温差能、盐差能、海洋生物质能以及海底地热能等自然资源[2]。

潮汐能是从海水面昼夜间的涨落中获得的能量，潮汐发电的主要的原理是利用天体引潮力导致海水发生水平流动的动能来制造电能[3]。海流能是指海水流动的动能，主要是指海底水道和海峡中较为稳定的流动以及由于潮汐导致的有规律的海水流动所产生的能量，是另一种以动能形态出现的海洋能。温差能是指海洋表层海水和深层海水之间的温差储存的热能，利用这种热能可以实现热力循环并发电，此外，系统发电的同时还可生产淡水、提供空调冷源等。盐差能是指海水和淡水之间或两种含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能，是以化学能形态出现的海洋能[4]。

在各种清洁能源中，波浪能因具有能量密度高、易于被采集且分布广泛等优点而受到高度关注。

波浪能是指海洋表面所具有的动能和势能的总和，其能量大小与波高的平方、波浪的运动周期以及迎波面的宽度成正比[5]。全球波浪能潜力达到 10 TW，年均波浪能估计接近 93000 TWh，远远大于太阳能和风能，具有广阔的应用前景[6]。

因此，作为一种可再生能源，波浪能发电不仅符合当下所提倡的可持续发展理念，还具有无可比拟的开发潜能。对波浪能进行有效的利用不仅能够缓解当下化石能源日益减少的窘况，解决当下能源短缺的一种正确措施，还可以对环境进行有效地保护。同时，在开发波浪能的过程中既不消耗其他燃料，又对环境影响较小。因此，波浪能的开发利用越来越成为诸多国家研究的热点。利用波浪能发电，可为海上孤岛、海洋牧场及海上开发平台等设施提供清洁优质的电能，此外，波浪能还可以用于海洋环境监测、海水淡化、制氢、抽水等[7]。

2.2 波浪能利用技术的分类与发展前景

根据目前国际上最新的分类方式，将波浪能技术分为：振荡水柱技术、振荡浮子技术和越浪技术三种[8]，分别如下：

振荡水柱技术：利用与海水相通的气室捕获波浪能，气室里的水柱在波浪作用下驱动空气通过空气叶轮，从而使发电装置发电，可靠性较好但效率较低[9]。

振荡浮子技术：通过液压、机械或直驱的动力俘获波浪能，效率较高，装置尺寸较小，具有一定的可靠性，大浪环境下需要停机保护[10]。

越浪技术：利用倾斜的水道将波浪动能转化为势能，带动水轮发电机发电。优点是可靠性较好，且大浪时可持续满负荷发电，故年发电量大，但是固定式装置受地形影响大，而漂浮式尺寸较大，投放比较困难[11]。

对比三种波浪能利用技术优缺点，由于造波器所产生的波高和波的频率较小，因此考虑利用振荡浮子技术来完成本次波浪能发电装置实验。

近年来国外研究的波浪能发电装置不胜枚举，其中有美国俄勒冈州立大学波能研究团队开发的浮筒式永磁直线波能发电装置，利用了电磁感应原理，将波浪能转化为电能的浮标式波能发电装置，活塞式波能发电装置，垂直轴双浮体液压式波能转换装置等。

我国波浪能发电技术研究自 20 世纪 70 年代开始至今，虽然相较于其它国家起步较晚，但发展很快，逐步取得了成熟的微型波浪能利用成果，如小型岸式波浪能发电技术已经进入世界先进行列[12]。

从国际上来看，尽管个别国家波浪能利用技术趋于成熟，但此项技术研发仍还有很长的路要走，发展潜力还非常大，高效率、高可靠性、低造价的波浪能发电技术必将不断涌现，发电成本仍有很大的降低空间，波浪能商用价值将有很大提高。

2.3 聚浪浮板发电浮体设计方案

2.3.1 设计原理

波浪能发电装置的组成一般分为三个部分：第一部分为波浪能的采集部分；第二部分是能量传递转换机构；第三部分是发电装置[13]。

本设计作品通过浮体及聚浪斜板和挡板收集波浪能，再将波浪能通过我们所设计的简易齿轮加连杆机构来实现驱动发电机发电的目的。

利用简单的机械传动方式，使得检验，安装，维修等工作更加简单方便。聚浪斜板与两边聚浪挡板有一定的聚集波浪能的作用，通过聚浪挡板使得波浪能传递到与水面接触的浮块，使得浮块上下运动，带动连杆运动，将机械能传递到大齿轮上，通过齿轮的传递和变速，带动微型发电机上的小齿轮转动，加大发电功率。

聚浪浮板发电装置实现了在一定的波浪、风等载荷下稳定承载、在波浪能作用下稳定发电、环境友好等功能。

2.3.2 聚浪浮板发电装置结构设计与布置

(1)实物整体示意图

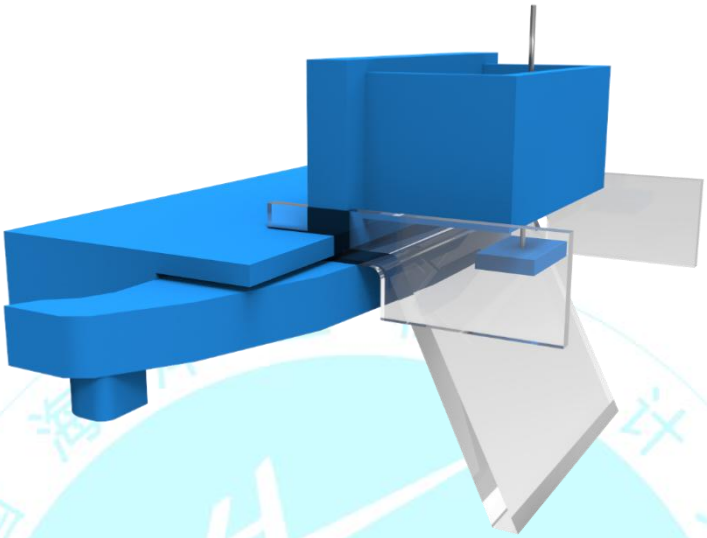


图 2.1 发电装置模型图

图中两侧透明部分为聚浪挡板，主要作用是防止波浪损失，提高波浪能捕获率。

（2）实物三视图

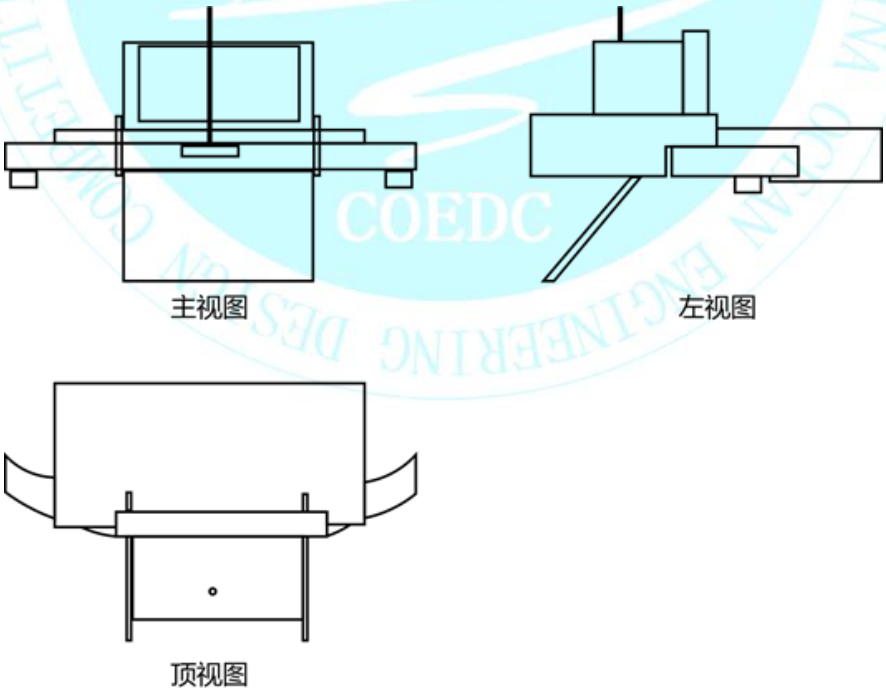


图 2.2 实物三视图

（3）发电部分详细布置图

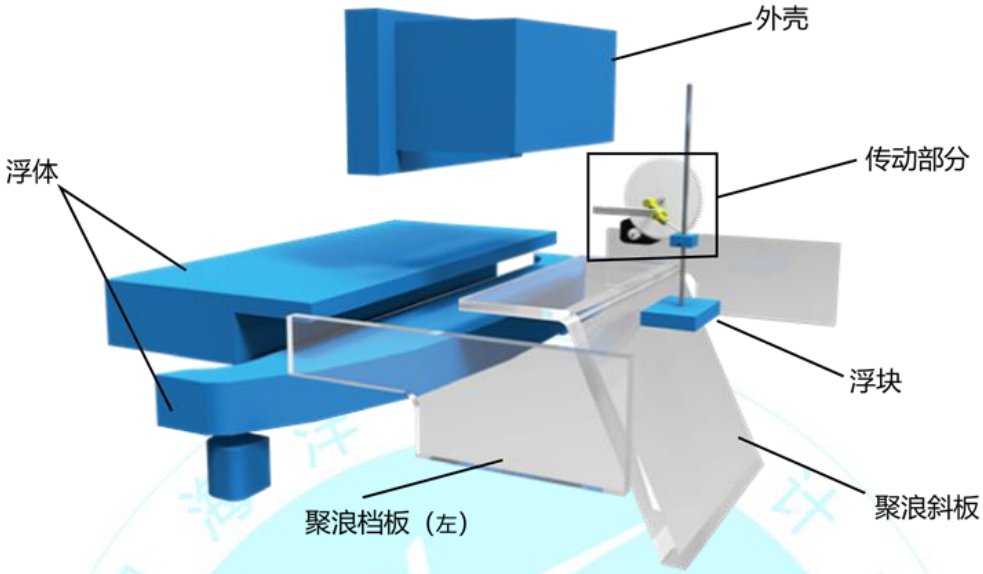


图 2.3 发电部分分解模块

图 2.3 主要由聚浪挡板、聚浪斜板、传动部分、外壳、浮体和浮块组成。其中各部分的作用如下：

聚浪挡板：主要防止波浪损失，提高波浪能捕获率。

外壳：固定传动装置，在波浪冲击下保持正常传动工作。主要起保护传动装置的作用。

传动部分：发电装置的核心部分，将海水的波浪能转化为机械能，然后再将机械能转化为电能。

聚浪斜板：阻止波浪从浮块下方穿过，从而提高波浪能捕获效率。

弧形浮体：可以随波浪来向的改变而改变，接收不同方向的波浪，提高波浪能的捕获率。

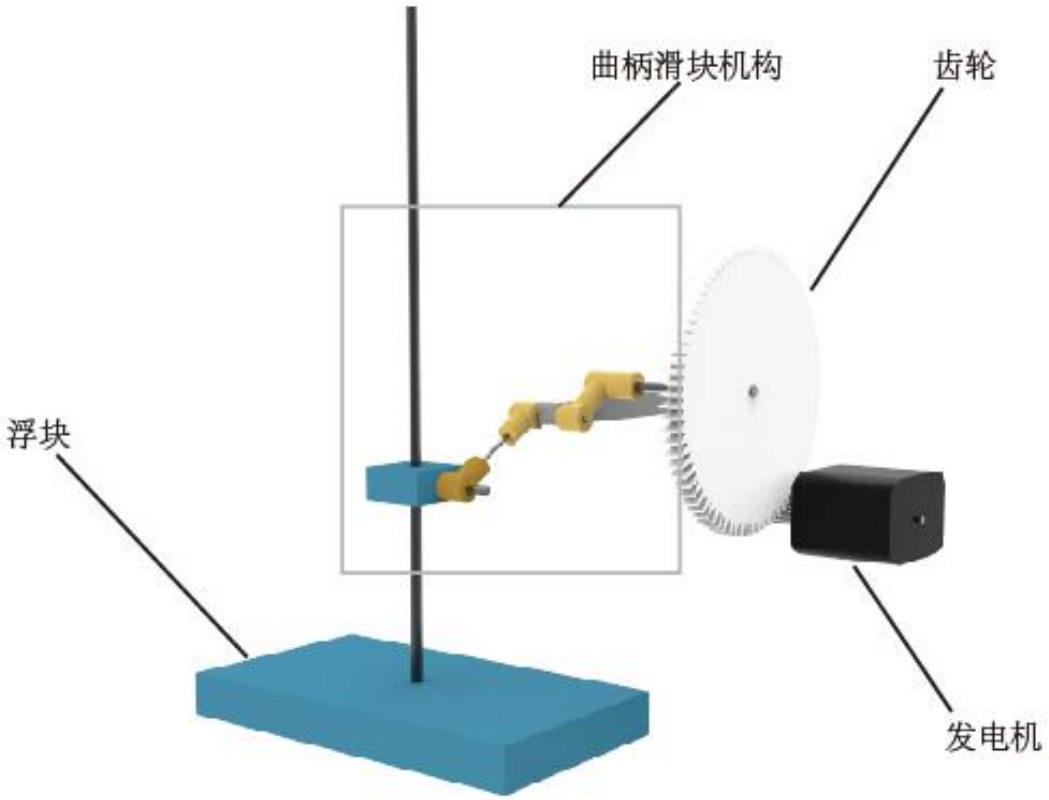


图 2.4 传动装置放大图

传动装置主要由浮块、连杆、曲柄滑块机构、齿轮和微型发电机组成。

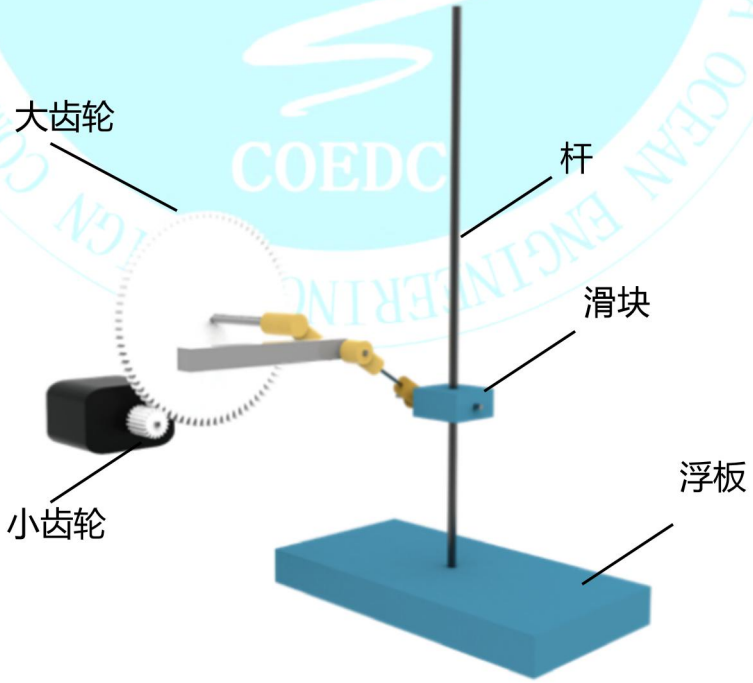


图 2.5 曲柄滑块机构各结构图说明

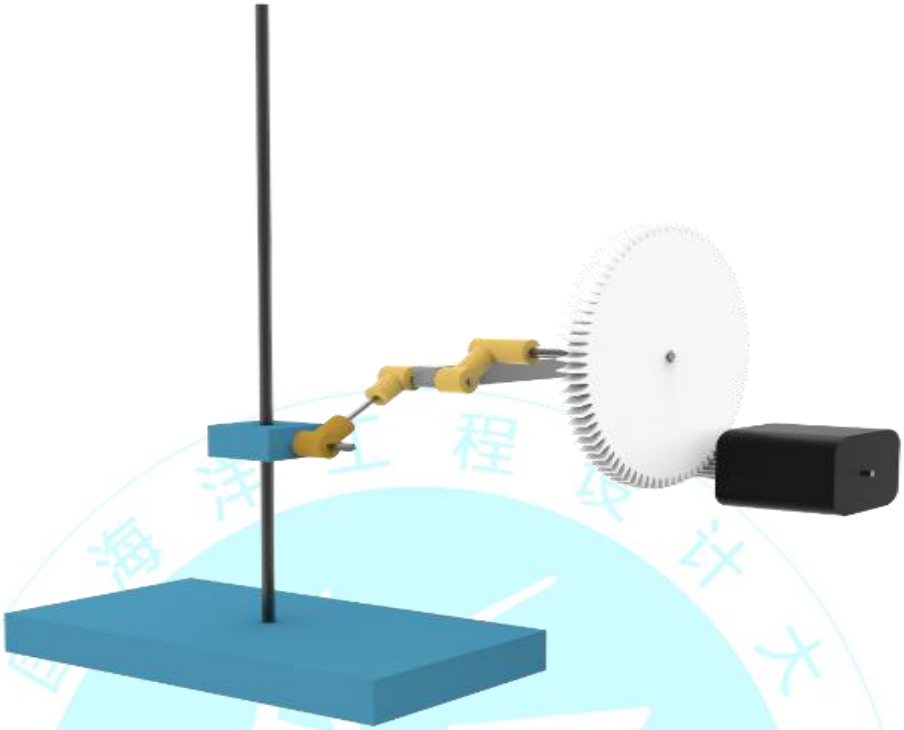


图 2.6 曲柄滑块机构放大图正面

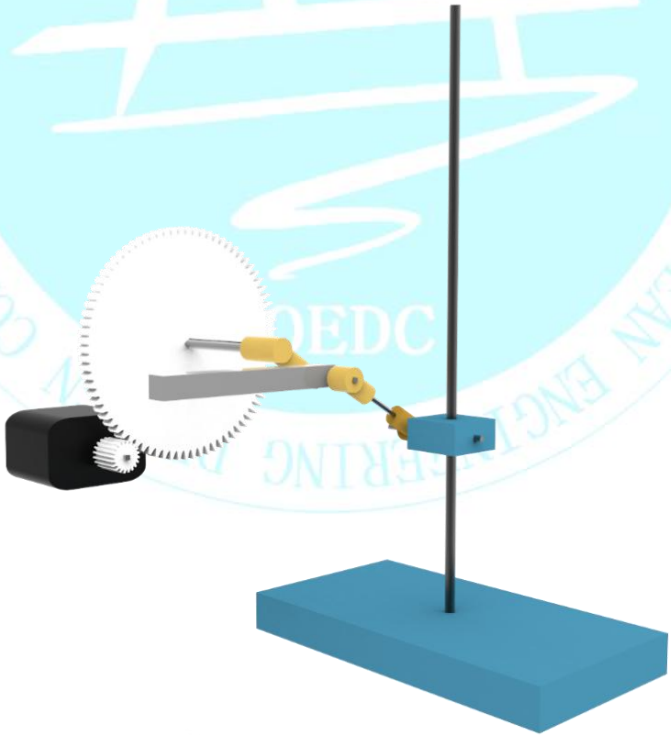


图 2.7 曲柄滑块机构放大图背面

（4）传动结构运动示意图

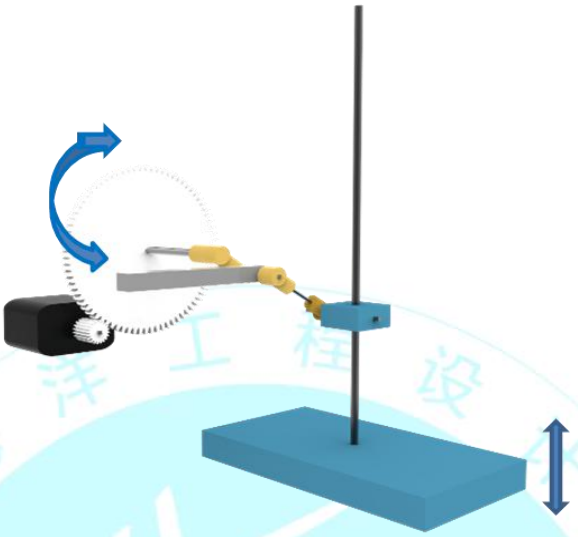


图 2.8 传动结构运动示意图

（5）波浪能捕获示意图

根据流体力学理论可知，深水波水质点速度随水深的增加迅速减小，主要的波浪能分布在水面附近。当水中有波浪产生时，水面推动浮块向上运动，将波浪能转化为连杆的机械能，连杆带动齿轮转动，齿轮连接发电机从而将机械能转化为电能。

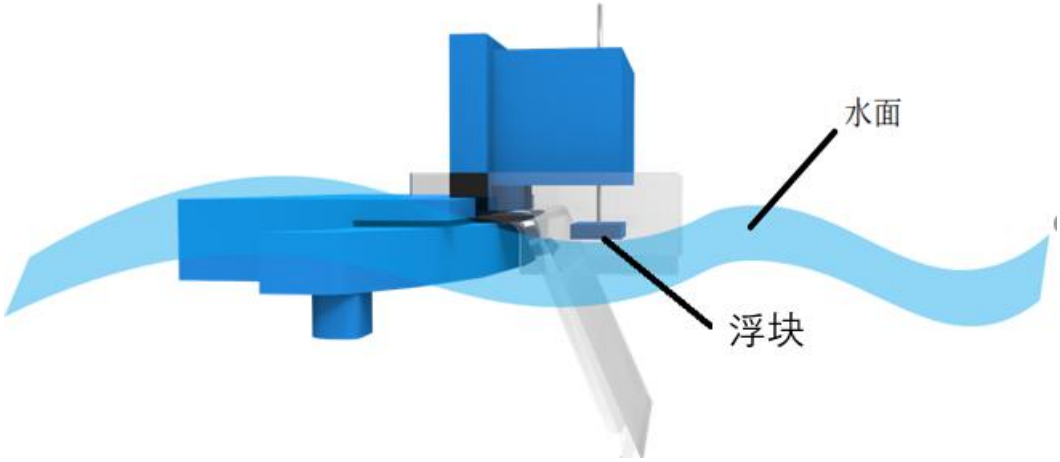


图 2.9 波浪推动浮块初始阶段示意图

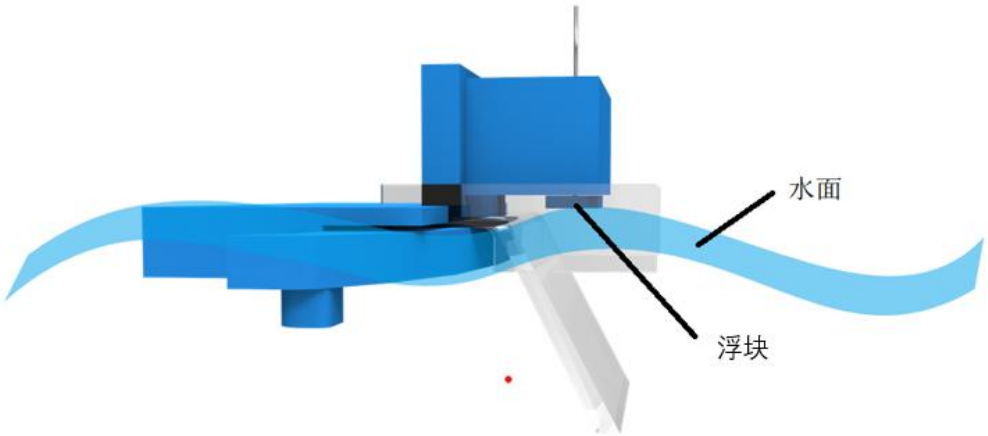


图 2.10 波浪推动浮块至顶部示意图

（6）曲柄滑块结构简介

曲柄滑块机构主要由曲柄、连杆、机架和滑块等组成。机械能之间的传动选用曲柄滑块机构，将浮块与滑块的直线运动转换为齿轮的传动。用曲柄和滑块来实现转动和移动相互转换的平面连杆机构，也称曲柄连杆机构。如下图所示。

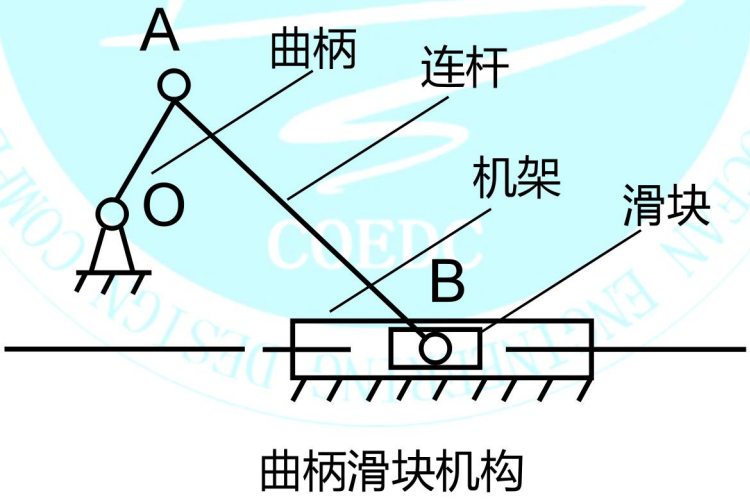


图 2.11 曲柄滑块结构图

（7）浮体结构示意图

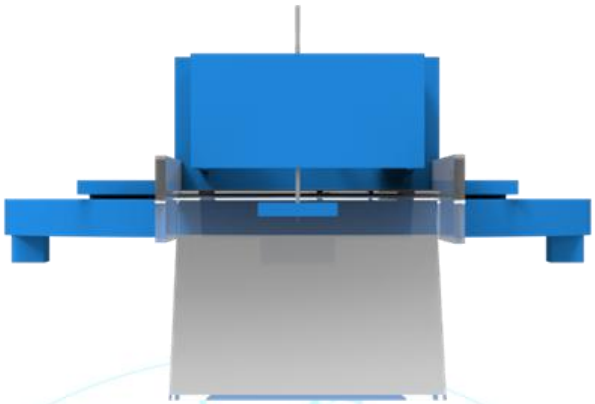


图 2.12　聚浪浮板发电装置浮体主视图

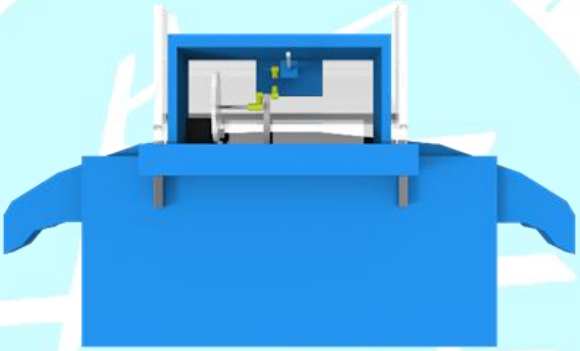


图 2.13　聚浪浮板发电装置浮体俯视图

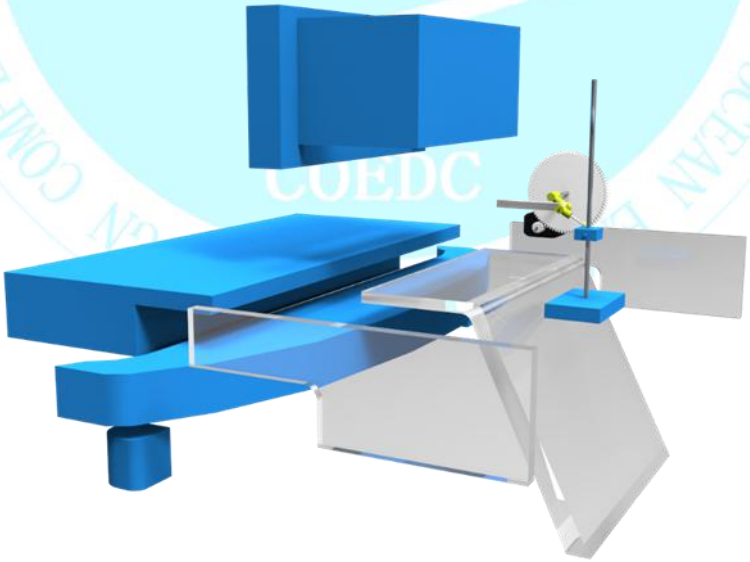


图 2.14 聚浪浮板发电装置浮体整体效果图（分解）

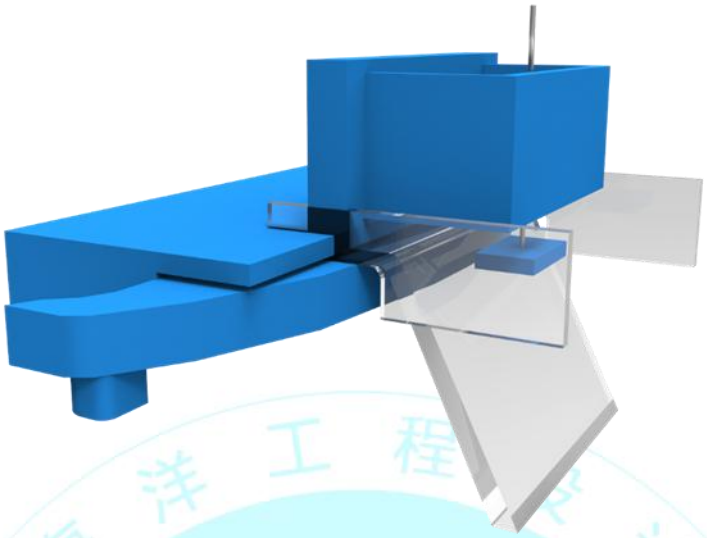


图 2.15 聚浪浮板发电装置浮体整体效果图（组合）

本作品采用的是一个小型发电机，将发电机的中心齿轮处连接一个曲柄连杆，波浪给浮块的力带动曲柄连杆运动，从而使发电机中心齿轮转动，发电机发出电能。

第 3 章　聚浪浮板发电装置浮体受力与发电分析

3.1 浮体受力分析

在模型制作中，浮体由 58*30*35 cm 的长方体构成，即一层蓝色的聚苯乙烯泡沫板和“PMMA”组成。下浮体制作简单，底面为长方形，与水接触面积大，能够抵御各个方向的波浪，厚度较大，因此排开水体积大，能够提供主要浮力。

浮体在一定载荷情况下，漂浮于水面（或浸没于水中）一定位置时，始终是处于平衡状态的。这时，作用在浮体上的力，有浮体本身的重力，还有浮力。浮体的重力由各个配件如外壳、浮板等的重量形成，浮体的重力 W 作用点 G 称为浮体的重心。

浮体浸水表面的每一点都受到水的静压力，这些静压力都垂直于浮体表面，其大小随浸水深度增加而增加，如图 3.1 所示。可见，静水压力的水平分量互相抵消，垂直方向形成一个垂直向上的合力，这个合力就是浮力 F，它支撑船舶漂浮在一定位置。浮力的作用点 B 称为浮体的浮心。

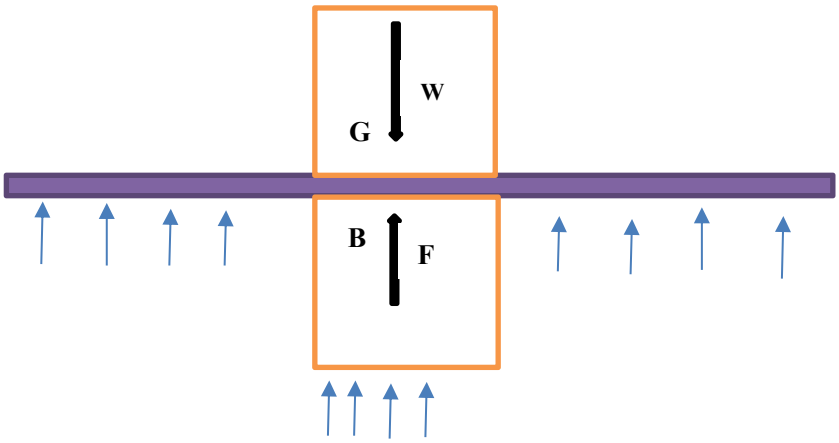


图 3.1：浮体重力、浮力平衡示意图

在实际工作中，发电机被固定在垂直方向上，分析时仅需分析浮体在垂直方向上的直线运动，根据牛顿第二定律得：

$$ma = f_e + f_r + f_b + f_v + f_f + f_g - mg$$

其中：m 为系统中垂直方向上做振动运动部件的总质量，单位 kg；a 为浮体上下运动的加速度,单位 m/s^2；f_e为海浪作用于浮体上产生的力；f_r为浮体振动和海水相互作用产生的力；f_b为浮体的静浮力;f_v和f_f分别为流体黏性和摩擦产生的阻力，一般情况下忽略不计；f_g为电机的电磁力。

浮体的总重为固定质量与变动质量之和，固定质量包括下浮体、发电装置；变动质量包括所加的重物。

总长=最大长度：58cm；

最大高度：35cm；

型宽：30cm；

空载吃水：3mm；

满载吃水：2.6cm；

干舷：3.4cm；

下浮体的重量：

$$W_s = 0.64 \times 9.8 = 6.272\text{N}$$

空载排水量：

$$0.58 \times 0.3 \times 0.003 \times 1000 + 2 \times 0.07 \times 0.04 \times 0.03 \times 1000 = 0.69\text{kg}$$

满载排水量：

$$0.58 \times 0.3 \times 0.026 \times 1000 + 2 \times 0.07 \times 0.04 \times 0.03 \times 1000 = 4.692\text{kg}$$

重心计算公式为：

$$X_G = \frac{\sum W_i x_i}{\sum W_i} \qquad Y_G = \frac{\sum W_i y_i}{\sum W_i} \qquad Z_G = \frac{\sum W_i Z_i}{\sum W_i}$$

其中W_i为各组成部分的质量。

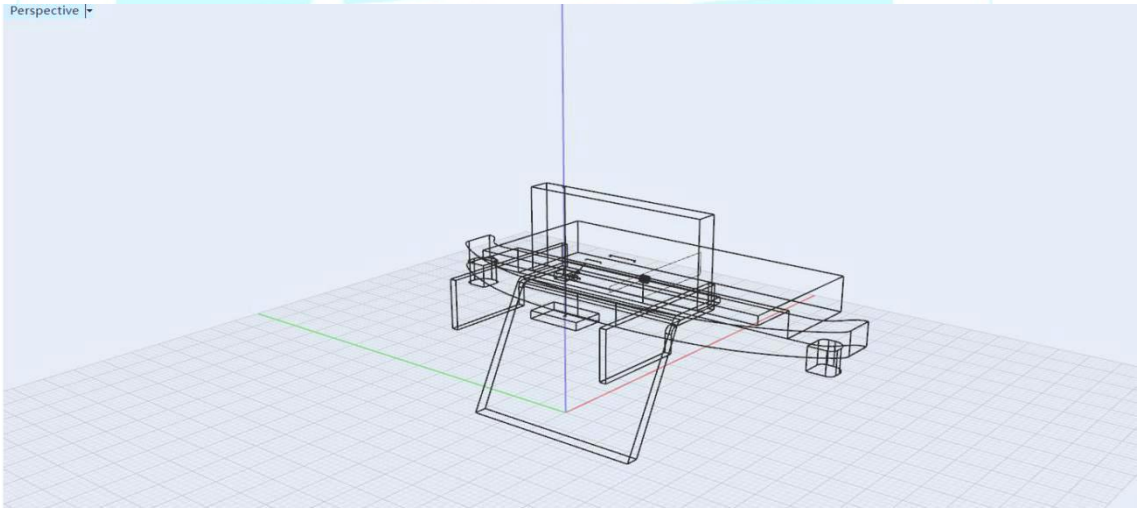


图 3.2 重心坐标示意图

空载时，建立图示坐标系，坐标原点取在发电装置与下浮体上表面平齐的位置，通过公式计算以及实验测得重心为（-2.5,-2.4,1.2），重心与浮心在同一直线上，保证浮体的稳定性。满载时，浮体承受重物向下运动，当浮体静止漂浮在水面上，此时重心位置在（1，-8，-16.8）。

浮心计算：由浮心计算公式（见附录）及实验测得浮心 Z = -16.2，浮心在重

心之上，且基本属于同一竖直线上，偏移角度很小，抗倾覆能力强。

3.2 稳定性分析及校核

浮体要满足以下两个条件才能平衡：（1）受水的浮力等于浮体的重量；（2）浮心（浮力的作用点）与浮体重心的连线和水平面垂直，如图 3.3（a）所示。浮体平衡位置还要满足稳定性条件才能具体实现。

图 3.3（b）表示一个长方形物块平躺和竖立平衡位置发生了微小的扰动，其中，左边的物块上作用的重力和浮力阻碍了物块进一步偏离其平衡位置，因此平衡是稳定，而右边的物块则相反，其上作用的重力和浮力加剧了偏离其平衡位置，平衡是不稳定。

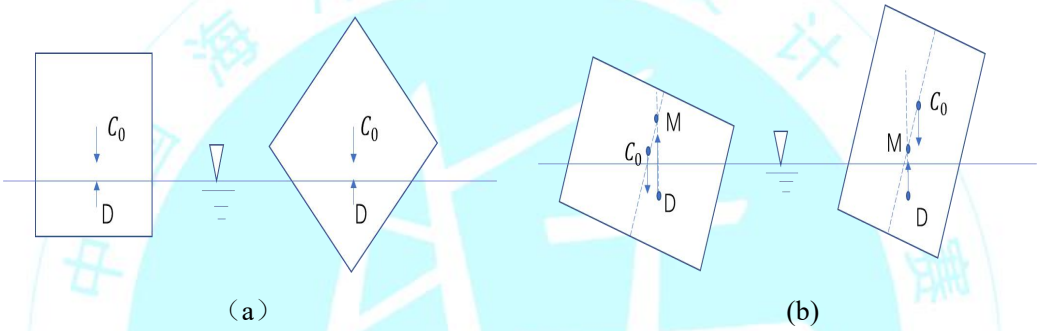


图 3.3 浮体稳定性分析示意图

在考虑浮体的稳定性时需要考虑多种环境载荷的影响，例如风载荷，波浪载荷，海流载荷，海冰载荷，地震载荷等[14]。

若浮体在水面上空载时，所受载荷可能有：风载荷，波浪载荷，海流载荷等，故在稳定性的分析中需要对相关载荷进行分析。

3.2.1 风载荷的影响

作用于浮体上风载荷 F 的计算公式：

$$F = C_f C_s C_H V^2 A$$

式中

C_f——风压系数，船级社之间有所区别，ABS 船级社取 0.611；

C_S——构件的形状系数，其值根据规范值确定；

C_H——暴露在风中平台构件的高度系数，其值可根据构件形心至设计水面的垂直距离按规范确定；

V——设计风速，单位 m/s；

A——平台受风构件在迎风向的投影面积，单位m^2。

3.2.2 波浪力的影响

在海洋工程实际工程应用中，当物体的尺度与波长相比是微小量的情况下，可忽略物体对波浪运动的影响，这个比值一般定为 D/L≤0.2（其中 D 是物体的特征长度，如圆柱体则 D 是直径，L 是波长），此构件一般称为小尺度构件。对于小尺度构件上的波浪力，通常采用著名的 Morison 公式计算，此折架式平台可看作小尺度构件。

Morison 公式给出，作用于垂直柱体一微小长度上的水平波浪力为：

$$df = \frac{1}{2}\rho C_d D|V_x|V_x dz + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} V_x dz$$

式中

ρ——水的密度，单位 g/cm³；

C_d——阻尼系数，亦称拖拽系数；

C_M——惯性系数；

D——柱体直径，单位 cm；

V_x——dz 段中点处水质点的水平速度，单位 cm/s；

Dz——柱体微元长度，单位 cm。

3.2.3 海流力的影响

根据海流的特征可以分为：潮流和风海流。潮流是海水在引潮力作用下周期性水平流动，存在往复运动和旋转流。海流水质点的速度分布特征为：方向相同，大小沿水深随指数分布。风海流是风对海面的切应力的推动使海水产生水平运动在，在风力、地转向心力和紊流阻力共同作用下达到平衡稳定。风海流水质点不在同一平面内，呈螺旋形状。海流载荷在 z 轴的计算公式为：

$$f = \frac{1}{2}\rho C_d A_\rho u^2$$

3.3 聚浪浮板发电装置相关电力分析

发电装置的效率计算根据公式：

发电效率 = 发电功率/装机功率

在发电装置性能稳定的情况下测出装置的发电功率，发电功率为所测得的发

电电压与电流的乘积的最大值。

由实验测得电阻为 190Ω，电压为 1.3V。

发电功率：

$$P=\frac{U^2}{R}=\frac{1.3^2}{190}=0.0089W$$

装机功率：

$$P_{额}=U_{额}I_{额}=1.5\times0.015=0.0225W$$

发电效率：

$$\eta=\frac{P}{P_{额}}\times100\%=\frac{0.0089}{0.0225}\times100\%=39.6\%$$

3.4 作品应用性分析

3.4.1 工作状况分析

实验过程中，发现浮块的质量与体积对整体机械运动有重要影响。浮块面积及质量较小时，波浪的能量严重影响浮块原本的上下往复运动，严重时导致浮块偏移使内部曲柄滑块运动受阻，无法完成完整的齿轮传动，从而使发电失败；当浮块质量与体积过大时，会使有限的波浪能在浮块上的损耗过大，或是无法使浮块上下往复运动，从而导致发电效率过低或发电失败。

在给定的环境条件下，装置能够持续稳定发电的同时保持稳性，可以通过小灯泡发光来判定装置是否持续稳定发电。

通过实验结果可发现，在给定的环境条件下，随着波浪的高低起伏，发电机连接的小灯泡出现闪烁的情况，灯泡不能持续发光说明了此发电装置具有不稳定性。分析原因可能如下：

（1）发电机功率较小，不能满足小灯泡持续稳定发光所需要的功率需求。

（2）外部所处的环境影响，比如风力大小、波浪高度、波的频率影响等。

3.4.2 应用的可行性分析

（1）优化方案

在发电机功率限制的情况下，只有通过改善外部的条件来提高发电装置的稳定性。例如，提高造波器的工作频率，以提高波浪的传播频率，这样使得在一定的时间内，发电机的中心转轴转动的越快，定子线圈切割磁感线运动也就越快，电灯泡发光持续时间越长，以此发电装置的稳定性越高。

（2）经济效益分析

由以上计算可知，此装置的实际发电功率为 0.0089W，即每小时 32.04W，按

每天发电 24h 计算，发电量为 768.96W，1 元/kWh，每天节省电费为 0.769 元，年节省费用为 230.7 元。

若装机功率达到工业级别，单个发电机每天产生 160KW 功率，聚浪浮板发电装置的波浪传动效率仍达到实验的效果，则每日发电达到 63.36KW，按照每日发电 15 小时，每年 300 天计算，可节约电能 19008KW。若海上发电机组包括 3 个单个发电机，则每年可节约 57024KW。

由此看出，该装置具有良好的经济效益。除此之外，该装置发出的电能可供给海上工业设施，避免了海上用电难的困扰，具有良好的社会效益。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 4 章 聚浪浮板发电装置特点及创新点

4.1 聚浪浮板发电装置特点

整个发电装置创意新颖、结构简单、原理清晰，且与现场工程应用有较大的联系，装置特点如下：

（1）原理有效性：利用浮块将波浪能转化为连杆机构的机械能，连杆带动发电机转轴旋转，发电机内部做切割磁感线运动，将转轴的机械能转化为电能，发电机发出交流电。

（2）布局合理性：浮体外壳做成弧形结构可根据波浪的来向适当调节装置方向，使得装置稳定于水面。此外，大小齿轮的相互连接可以提高发电机转轴的转动频率，从而提高了发电效率。发电机部分被放置在浮体上面，有效防止了发电机装置被海水腐蚀，从而延长了装置的使用年限。

（3）方式新颖性：浮体底部安装聚浪浮板可以捕获并收集波浪能，提高了能量的利用率。整个发电过程实现了零污染，符合当下绿色环保的发展理念。

（4）整体可行性：总体装置的安装和投放不受水的深浅的影响，可适用于绝大部分有波浪的海面，且装置的经济效益高，应用前景广阔，具有较高的可行性。

4.2 聚浪浮板发电装置创新点

（1）设计提出聚浪浮板结构

本发电装置巧妙利用了海洋波浪呈正弦波形式传递的水文特点，因此考虑是否可以在浮体上安装一个聚浪浮板来收集波浪能，实现波浪能向机械能的有效转换。

通过实验，在未安装聚浪浮板的情况下，测得小灯泡两端电压为 0.8V，电阻为 190Ω，计算得出装置的发电功率为 0.0034W。

当安装了聚浪浮板后，测得小灯泡两端工作电压为 1.3V，计算得出装置的发电功率为 0.0089W。

通过两次不同条件下装置发电功率的测量，对比分析出聚浪浮板确实具有收集波浪能的作用

因此，作品亮点在于通过安装一个聚浪斜板且板两边加聚浪挡板的方式来起到收集波能的作用，并进行能量转换，从而实现发电机发出电能，加装的聚浪挡板也能够防止波浪损失，提高波浪能的捕获率。

（2）弧形结构转向器设计

本发电装置巧妙地将浮体外壳设计成弧形结构，当波浪从各个方向传递过来

时，弧形结构可以根据各方向波浪能量的大小灵活的调节整个装置的正方向，即正向面对波浪传递的方向。因此，弧形结构在装置中很好的起到了一个转向器的作用，有效提高了波浪能的捕获率。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

参考文献

[1]肖惠民,于波，蔡维由.世界海洋波浪能发电技术的发展现状与前景[J]. 水电与新能源,2011(1):67-69.

[2]古云蛟. 海洋能发电技术的比较与分析[J].装备机械, 2015, 000(004):69-74.

[3] 李鸿斌.潮汐发电的原理及其发展状况[J].大众用电, 2001(01):27.

[4] 贾红星.基于压力延迟渗透原理的盐差能发电技术研究[D]. 中国海洋大学, 2014.

[5]佚名.海洋波浪能[J].能源与节能,2013(7):115-115.

[6]陈仁文,刘川,张宇翔.直接式波浪能采集的研究现状与展望[J].数据采集与处理, 2019, 34(02):5-14.

[7]刘延俊,贾瑞,张健.波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J].海洋技术学报,2016, 35(005):100-104.

[8]丁曦.多种形态浮子对波能转换效率影响的研究[D]. 2020.

[9] 马立志,黄向荣,梁家日.振荡水柱式波浪发电装置:, 2019.

[10] 黄鹏.振荡浮子式波浪能发电装置研究[D]. 2015.

[11]焦永芳,刘寅立.海浪发电的现状及前景展望[J]. 中国高新技术企业, 2010(8):89-90.

[12]高大晓,王方杰,史宏达,等.国外波浪能发电装置的研究进展[J].海洋开发与管理,2012(11):21-26.

[13]郑雄波,张亮,马勇.双浮体波能装置的水动力计算与能量转换特性分析[J].科技导报, 2014, 32(019):26-30.

[14]叶寅.鸭式波能装置动力摄取系统的建模与优化[D]. 2011.

附录 I 浮心位置的计算

满载时，浮体的排水量计算公式为：

$$d\nabla = A_w dz$$

因为 $dA_w = 2ydx$；所以$A_w = 2\int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} ydx$

$$则\nabla = \int_0^d A_w\, dz = 2\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} ydxdz$$

此时，浮心的位置为：

$$dM_{yoz} = x_F A_w dz$$

$$dM_{xoy} = zA_w dz$$

$$由\ M_{oy} = 2\int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} xydx\ 得，\ x_F = \frac{M_{oy}}{A_w} = \frac{2\int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} xydx}{2\int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} ydx}$$

将上式分别代入得，

$$M_{yoz} = \int_0^d x_F A_w dz = 2\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} xydxdz$$

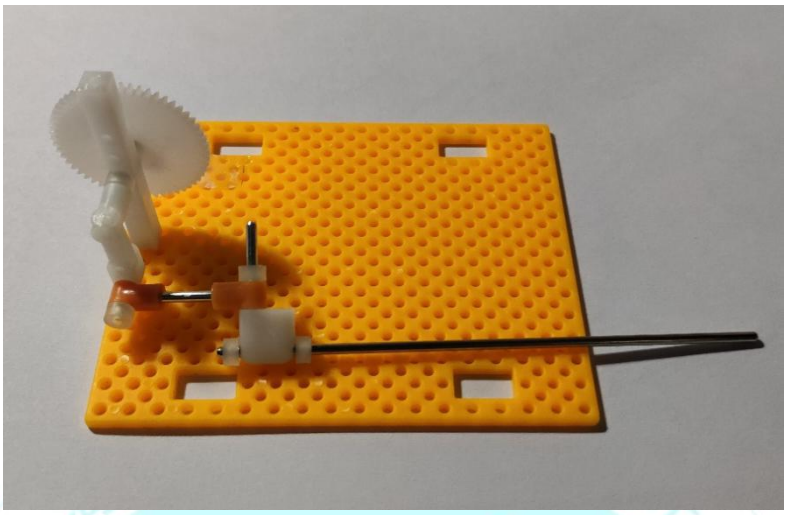
$$M_{xoy} = \int_0^d zA_w dz = 2\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} zydxdz$$

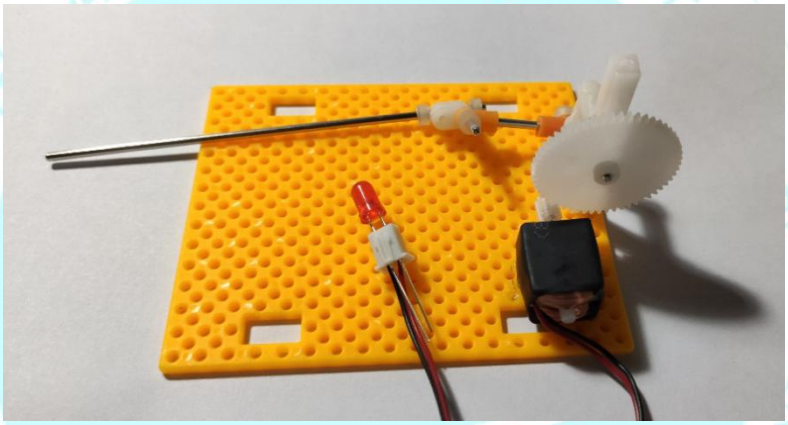
由以上两式和式得浮心计算公式为：

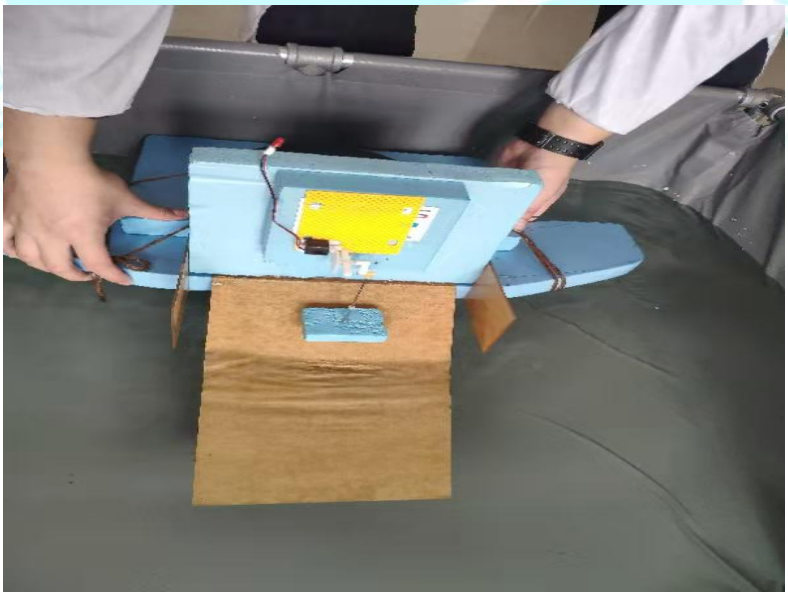
$$x_B = \frac{M_{yoz}}{\nabla} = \frac{\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} xydxdz}{\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} ydxdz}$$

$$z_B = \frac{M_{xoy}}{\nabla} = \frac{\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} zydxdz}{\int_0^d \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} ydxdz}$$

附录 II 装置实物图







团队编号：_A20201001_____

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　　2020　　年　　10　　月　　12　　日

中国海洋工程设计大赛组委会制

1 研究意义与设计背景

能源是人类生存和社会发展的重要物质基础。自从步入 21 世纪以来，随着全世界经济的迅猛发展，全球能源需求总量的增长也十分强劲，供需矛盾日益突出，能源消耗中占据主导地位的煤炭、石油与天然气等化石能源的争夺日趋激烈。受到需求预期、生产能力、储备水平种种因素的影响，国际能源价格，特别是石油的价格一直持续上涨，对全球经济、尤其是对国际能源市场依赖比较大的国家的经济发展形成一定制约。在未来较长一段时期内，保障能源的供应和环境的保护成为世界能源可持续发展需要共同研究的战略性课题。在这种状况下，开发新能源和可再生能源是能源可持续发展的必经之路。我国的能源供应结构里，煤炭、石油与天然气等不可再生能源占绝大部分，新能源和可再生能源开发不足，这不仅造成环境污染等一系列问题，也严重制约能源发展，必须下大力气加快发展开发新能源和可再生能源，优化能源组成结构，增强能源供给能力，缓解能源压力。

我国的近海风能资源十分丰富。根据资料显示，我国海上风能的量值可达 7.5 亿千瓦，超过陆上风能的 3 倍，因此具有很广阔的开发应用前景。据了解，“十一五”期间，我国已启动海上风电开发，首个海上项目上海东海大桥风电场安装 34 台国产 3.0MW 风电机组，并于 2010 年 6 月全部实现并网发电；2010 年 9 月，国家能源局组织完成了首轮海上风电特许权项目招标，项目总容量 100 万千瓦，位于江苏近海和潮间带地区。截止到 2012 年 2 月 7 日，全球海上风电场累计装机容量达到 238,000MW，比上年增加了 21％。但是整体海上风电的装机容量占国内风电装机总容量的比例不到 1%，市场潜力巨大。

但是与此同时，海上风电发展需要解决的问题也很多，海上风电场所处的海洋环境相当复杂，气象、水文以及海底地质等条件都给风电机组基础设计和建造带来了巨大的困难和挑战。由于我国海上风电起步比较晚，目前国内还没有相关规范与标准用于海上风机系统设计，各方面的研究工作还有待继续深入展开，实际工程经验也比较匮乏。风电浮式基础结构在海洋中除了承受静载荷的作用，还会受到风载荷与浪载荷等动力载荷的作用。根据世界上现有的风电场的经验表明，一般不是最大的载荷导致结构破坏，而是频率与结构自振频率相近的那些载荷，由于共振产生动力放大效应，使结构安全受到威胁。风电浮式基础长期受到空气动力载荷和波浪载荷等循环交变载荷的同时作用，因空气动力载荷与波浪载荷作用引起的交变应力循环次数在其设计寿命 20 年内可达到 10^9 之多，很容易发生疲劳破坏，部分海上风电场中风机运行时间不到 10 年，与 20 年的设计寿命相差很大。因此，对海上风电浮式基础结构进行疲劳分析对于保证其安全性，延长其使用寿命具有十分重要的现实意义。

2 海洋环境载荷计算

上部浮式平台载荷的分类：①自然环境引起的载荷：有风、浪、流、冰、地震等。②使用载荷分固定载荷和活载荷。固定载荷是设备重量、平台重量、平台浮力等；活载荷是上部风机和电能转换设备等（可变载荷）、动力机械和设备运转引起的周期性载荷（动力载荷）。③施工载荷。

2.1 冰载荷

上部浮式平台在渤海海域，受到冰流的影响。流动的冰在风力，浪流力等共同作用下不断的运动漂浮，因此流冰之间碰撞，流冰与平台碰撞，这些都会对设计的上部浮式平台造成影响。所以将冰载荷作为考虑工况的一部分。

冰载荷在上部浮式平台中作用主要为冰层移动时对平台结构产生的挤压、冰流对平台结构产生的冲击、冰层膨胀是对平台结构产生的挤压以及冰层与平台冻结在一起是产生的附加

重力和附加应力。

在工况中，采取计算极限应力作为冰载荷的最大值。在风和流的作用下，垂直桩柱被大面积冰层挤压产生的冰载荷：

$$P = mK_1K_2R_cbh \tag{1}$$

式中：m 表示桩的形状系数；

K_1 表示挤压系数;

K_2 表示接触系数;

B 表示桩柱的直径;

H 表示冰层的计算厚度;

R_c 表示极限抗冰强度。

2.2 风载荷

根据我国关于移动平台规范上规定：在自存状态时设计风速一般大于 51.5m/s；在正常工作状态时设计风速一般大于 36.0m/s。设计风速一般选用 50 年一遇或者一百年一遇的风速。平台设计选择最恶劣的工况，因此选择自存状态下的风速。平台所受到风载荷为：

$$F = pA \tag{2}$$

式中 p 表示风的压强；

A 表示平台的垂直风向的投影面积，载荷作用在其投影面积的中心。

标准高度为海平面上 10m，求得基本风压：

$$p_0 = \frac{1}{2g}rv^2 = 0.613v^2 \quad =0.613\times 51.5\text{m/s}^2=1625.83\ \text{N/m} \tag{3}$$

平台结构所承受的风压：

$$p = C_HC_Sp_0 \tag{4}$$

式中 C_H 表示风压的高度系数；

C_S 表示构件的形状系数。

根据下表 3.1 可知，海平面以上高度 h 为 10~14.2m; 高度系数 C_H 为 1.00；根据下表 3.2 可知，由于是甲板，形状系数 C_S 为 1.00。

当风向为 0° 时，作用在甲板上的风载荷：

$$p = C_HC_Sp_0 \quad =1625.83\ \text{N/m}^2\times 38\text{m}\times 4.2\text{m}=259482.47\text{N} \tag{5}$$

当风向为 45° 时，作用在甲板上的风载荷：

$$p = C_HC_Sp_0 \quad =1625.83\ \text{N/m}^2\times 45.14\text{m}\times 4.2\text{m}=308237.86\text{N} \tag{6}$$

当风向为 45°时，作用在甲板上的风载荷：

$$p = C_H C_S p_0 \quad =1625.83\ \text{N/m}^2 \times 34\text{m} \times 4.2\text{m} = 232168.52\text{N} \qquad (7)$$

表 3.1 高度系数 C_H

海平面以上高度 h(m)	C_H
0~15.3	1.00
15.3~30.5	1.10
30.5~46.0	1.12
46.0~61.0	1.30
61.0~76.0	1.37
76.0~91.5	1.43
91.5~106.5	1.48
106.5~122.0	1.52
122.0~137.0	1.56

表 3.2 形状系数 C_S

形状	C_S
球形	0.4
圆柱形	0.5
大的平板（船体、甲板室、甲板以下的光滑平板）	1.0
钻井架	1.25
甲板以下暴露的梁和桁材	1.30
孤立结构（起重机、梁材）	1.50

2.3 波浪载荷

2.3.1 波浪的描述以及波浪载荷计算

海浪是一种随机现象，具有一定的统计规律，可以采用概率统计理论进行研究。利用概率统计方法研究波浪现象的理论，称为随机波浪理论。为了研究方便，人们做出一些假定和简化，提出了多种规则波模型，如 Airy 波、有限振幅波、椭圆余弦波、孤立波等。各种规则波有其各自的适用范围，其中最常用、最简单的是 Airy 波浪理论，又称为简谐波理论或微幅波理论。

2.3.2 基本理论

1、线性随机波浪理论

线性随机波浪理论假定波浪是有多个波系叠加而相互不引起干扰；即在一般情况下，波浪视为无限多个频率不等、方向不同、振幅变化而相互杂乱的微幅简谐波叠加而成的不规则波系，对于空间 (x,y) 处、时间 t 时的波面位移 ζ 为：

$$\zeta(x,y,z) = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} a_{ij}\cos\left[k_i(x\cos\theta_j + y\sin\theta_j) - \omega_i + \varepsilon_{ij}\right] \qquad (8)$$

式中 a_{ij} 为组成波的振幅； k_i 为波数； θ_j 为波向； ω_i 为频率； ε_{ij} 为初始相位角。

各组成波浪在单位面积海域上提供的平均能量是与其振幅的平方成正比的，故这种谱密度可称为能量谱：

$$S(\omega,\theta)\Delta\omega\Delta\theta=\sum_{\substack{\omega\le\omega_i\le\omega+\Delta\omega\\ \theta\le\theta_i\le\theta+\Delta\theta}}\sum\frac{1}{2}\mathrm{a}_{ij}^2 \tag{9}$$

位移 ζ 为一个正态平稳随机过程，波浪谱密度(能量谱)恰与组成波的波幅平方成正比。故对应于风向在一个范围内变动时所生成的海浪，其波面方程变为：

$$\zeta(x,t)=\sum_i\sum_j\sqrt{2S(\omega_i,\theta_j)\Delta\omega_i\Delta\theta_j}\cos\left[k_i(x\cos\theta_j+y\sin\theta_j)-\omega_i t+\varepsilon_{ij}\right] \tag{10}$$

式中 $S(\omega_i,\theta_j)$ 称为方向谱。

为满足工程实际的需要，经过对海洋波浪长期观测并对数据资料进行数据统计分析，目前建立了一些常见的波浪谱表达式：

2、P-M 谱

Pierson和Moskowitz依据在北大西洋实测充分发展的海浪谱资料，提出了一种新的能量谱形式，该谱有如下的表达：

$$S(\omega)=\alpha g^2\omega^{-5}\exp\left[-\beta\left(\frac{g}{U\omega}\right)^4\right]\qquad 0\le\omega<+\infty \tag{11}$$

式中 $g=9.81\,m/s^2$ 为重力加速度； $\alpha=0.0081$和$\beta=0.74$ 为两个常数； U 为平静海平面上空19.5米处的风速；

如假定波浪谱为一窄谱，存在主频率 ω_m：根据 $\dfrac{\partial S(\omega)}{\partial\omega}=0$ 关系式将上式4代入得到：

$$\frac{\partial S(\omega)}{\partial\omega}=\frac{\alpha g^2}{\omega^{10}}\exp[-\beta(\frac{g}{u\omega})^4]\cdot[4\beta(\frac{g}{u})^4-5\omega^4]=0 \tag{12}$$

由此可解得：

$$\omega_m = (0.8\beta)^{1/4}\frac{g}{u} \tag{13}$$

将此关系式代入式4可以得到：

$$S(\omega) = 0.78\omega^{-5}\exp\left[-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_{\mathrm{m}}}\right)^{-4}\right] \tag{14}$$

为了工程实际需要，我们引进P-M双参数谱：

$$S(\omega) = \frac{H_S^2 T_Z}{8\pi^2}\left(\frac{\omega T_Z}{2\pi}\right)^{-5}\mathrm{e}\frac{-1}{\pi}\left(\frac{\omega T_Z}{2\pi}\right)^{-4} \tag{15}$$

式中有义波高 $H_S = 4\sqrt{m_0}$ 和谱峰周期 $T_Z = 2\pi\sqrt{\mathrm{m}_0/m_2}$ 。

3、三维浮体波浪载荷频率方法

在波浪与浮体相互作用的研究中，流体介质在绝大部分情况下的都可认为是均匀、不可压缩和无粘性的理想流体，因此可用势流理论解决浮体在波浪上的运动问题。流场中的速度势除应满足拉普拉斯方程外，还应满足非线性自由表面条件、底部条件、瞬时物面条件以及初始条件和远方辐射条件。由于非线性自由面条件和不可渗透瞬时物面条件求解困难，克服这一困难的途径之一是应用摄动理论，把这一非线性定解问题展开成为不同的 ε 阶次的一系列线性定解问题。在浮体耐波性理论问题中，我们一般可以取入射波的波陡为小参数 ε —微幅波假定，将位置不确定的非线性自由面条件展开成关于静水面的一阶、二阶以及更高阶次的各阶自由面条件；在浮体小振幅运动假定下，将原来在瞬时湿表面上满足的流体不可渗透物面条件转化为关于平均物面位置展开成各阶物面条件。

本文考虑线性频域解，频域方法认为波浪和浮体相互作用已经持续了相当长的时间，入射波的初始扰动和浮体初始摇荡的瞬态影响已经消失，场内流体运动已达到稳态。如果入射波为简谐的，则浮体运动也是简谐的，两者只是有相位差，因而可以在频率域内求稳态解。当浮体无航速时，流场周围的不定常速度势 $\phi(x,y,z,t)$ 由入射波速度势 $\Phi_I(x,y,z,t)$ 、辐射势 $\Phi_R(x,y,z,t)$ 和绕射势 $\Phi_D(x,y,z,t)$ ，那么流体周围总速度势由定常兴波势和不定常速度势组成，即

$$\begin{aligned}\phi(x,y,z,t) &= \bar{\phi}(x,y,z) + \Phi(x,y,z,t)\\ &= \bar{\phi}(x,y,z) + \Phi_I(x,y,z,t) + \Phi_R(x,y,z,t) + \Phi_D(x,y,z,t)\end{aligned} \tag{16}$$

3.1 非定常速度势满足的定解条件

假设浮体无航速、浮体摇荡和定常兴波势均为小量的前提下，浮体周围的流场不定常速度势满足的定解条件为：

$$\left.\begin{aligned}
&[L] \quad \nabla^2\Phi(x,y,z,t)=0, \qquad \text{流体域内}\\
&[F] \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}-2U_0\frac{\partial^2\Phi}{\partial t\partial x}+U_0\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+g\frac{\partial\Phi}{\partial y}=0 \qquad \text{在y}=0\text{上}\\
&[S] \quad \left.\frac{\partial\Phi}{\partial n}\right|_n=\dot{\xi}_j n_j+\xi_5 U_0 n_3-\xi_6 n_2 \qquad \text{在平均物面 } S_0\text{上}\\
&[B] \quad \lim_{y\to-\infty}\nabla\Phi=0 \qquad \text{无限水深}\\
&[R] \quad \text{无穷远方辐射条件}
\end{aligned}\right\} \tag{17}$$

3.2 入射波速度势的求解

斯托克斯一阶波—线性波浪（Airy 波）,斯托克斯波是一个规则的前进波，假设它的前进方向沿正 OX 方向，波速为 C，波峰与 OZ 轴平行。在以速度 C 移动的动坐标系中观察时，波形是定常不变的，

$$\Phi\ (\mathrm{x}_0,y_0,t)=\Phi(x_0-Ct,y_0)\equiv\phi(x,y) \tag{18}$$

将式 11 代入自由面方程得到自由面上的动力学方程和运动学方程分别入式 12 和式 13 得：

$$\mathrm{g}\eta(x)=C\frac{\partial\Phi}{\partial x}-\frac{1}{2}\nabla\Phi\cdot\nabla\Phi \tag{19}$$

$$\frac{\partial\Phi(x,\eta)}{\partial y}-\frac{\partial\Phi}{\partial x}\cdot\frac{\partial\eta}{\partial x}+C\frac{\partial\eta}{\partial x}=0 \tag{20}$$

将变量作摄动展开，令

$$\left.\begin{aligned}
\Phi&=\Phi^{(1)}+\Phi^{(2)}+\Phi^{(3)}+\cdots\cdots\\
\eta&=\eta^{(1)}+\eta^{(2)}+\eta^{(3)}+\cdots\cdots\\
C&=C^{(0)}+C^{(1)}+C^{(2)}+\cdots\cdots
\end{aligned}\right\} \tag{21}$$

将式 14 代入方程式 12 和式 13，然后按各阶次展开,得到一阶自由面条件为：

$$\left.\begin{aligned}
&C^{(0)}\frac{\partial\eta^{(1)}}{\partial\mathrm{x}}+\frac{\partial\Phi^{(1)}}{\partial y}=0\\
&g\eta^{(1)}-C^{(0)}\frac{\partial\Phi^{(1)}}{\partial x}=0
\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

同时满足拉普拉斯方程和池底条件（无限水深）

$$\left.\begin{aligned}&\nabla^2\Phi^{(1)}=0\\&\frac{\partial\Phi^{(1)}(\mathrm{x},\infty)}{\partial y}=0\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

联立方程(15)、（16）求得：

$$\left.\begin{aligned}&\Phi^{(1)}=C^{(0)}A\mathrm{e}^{ky}\sin kx\\&\eta^{(1)}=A\cos kx\\&C_{\infty}^{(0)}=\sqrt{\mathrm{g}/k}\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

3.3 辐射速度势的求解

本节讨论辐射问题时，流场中不存在入射波，也不考虑航速，只考虑浮体在平静水自由面上作强迫摇荡时的流体动力影响。现设浮体在平衡位置周围作微幅的简谐摇荡运动，其圆频率为ω，瞬时位移为：

$$\xi=\mathrm{Re}\left\{\bar{x}_j e^{-i\omega t}\right\} \tag{25}$$

式中：Re{}表示取其实部；j 表示运动模态，$\mathrm{j}=1,2\cdots6;\ \bar{x}_j$ 为某个 j 运动模态的复数运动幅值；那么浮体摇荡运动速度势[22]：

$$U_{\mathrm{j}}=\dot{\xi}=\mathrm{Re}\left\{-i\omega\bar{x}_j e^{-i\omega t}\right\} \tag{26}$$

相应的可设浮体摇荡速度势 $\Phi_R(x,y,z,t)$ 可设为[22]：

$$\Phi(x,y,z,t)=\mathrm{Re}\{\phi(x,y,z)e^{-i\omega t}\} \tag{27}$$

式中ω为波浪圆频率；$\Phi(x,y,z,t)$ 为空间速度势；

将式 19 和 20 代入式 10 可得辐射空间速度势满足下列定解条件：

$$\left.\begin{array}{ll}
[L] & \nabla^2\phi_R(x,y,z)=0 \qquad \text{流体域内} \\
[F] & \dfrac{\partial\phi_R}{\partial y}-\dfrac{\omega 2}{\mathrm{g}}\phi_R=0 \qquad \text{在y}=0\text{上} \\
[S] & \left.\dfrac{\partial\phi_R}{\partial n}\right|_n=\tilde{n}_j \qquad \text{在平均物面 } S_0\text{上} \\
[B] & \lim\limits_{y\to-\infty}\nabla\phi_R=0 \qquad \text{无限水深} \\
[R] & \lim\limits_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\dfrac{\partial\phi_R}{\partial R}-ik\phi_R\right)=0 \text{无穷远处辐射条件}
\end{array}\right\} \tag{28}$$

对于无限水深的格林函数：

$$G(x,y,z;\xi,\eta,\varsigma)=\frac{1}{r}+\frac{1}{r_1}+2kP.V.\int_0^{\infty}\frac{1}{m-k}e^{m(y+\eta)}J_0(mR)dm+\varepsilon_i\pi ie^{k(y+\eta)}J_0(kR) \tag{29}$$

式中 $r=[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z-\varsigma)^2]^{\frac{1}{2}}$，$r_1=[(x-\xi)^2+(y+\eta)^2+(z-\varsigma)^2]^{\frac{1}{2}}$；

$J_0(mR)=\dfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}e^{imR\cos\theta}\mathrm{d}\theta$；P.V.表示其积分取柯西主值；

利用格林函数，场内任一点速度势可按源分布求得,即：

$$\phi_{Ij}=\frac{1}{4\pi}\iint_{S_0}\sigma(Q)G(P,Q)dS_0,\quad j=1,2,\cdots 6; \tag{30}$$

式中 S_0 为平均物面；$\sigma_{(Q)}$ 为源强分布密度。

决定源强密度分布的积分方程为[22]：

$$\frac{1}{2}\sigma(P)+\frac{1}{4\pi}\iint_{S_0}\sigma(Q)\frac{\partial G(P,Q)}{\partial \mathrm{n}}dS=\frac{\partial\phi_{Ij}(P)}{\partial n},P\in S_0 \tag{31}$$

将式 24 在平均物面 S_0 离散化后组成代数方程组进行求解，例如将物面分成 N 块，在每一块上分布等强度的源，并在每一块面元上选取一控制点 P_n：

$$\frac{1}{2}\sigma_n(P_n)+\frac{1}{4\pi}\sum_{\substack{i=1\\ i\neq n}}^{N}\sigma_i(Q)\iint_{\Delta S_0}\frac{\partial G(P_n,Q_i)}{\partial \mathrm{n}}dS_{\mathrm{Q\,i}}=njn(Pn),(n=1,2,\cdots\cdots N) \tag{32}$$

3.4 绕射速度势的求解

本节讨论绕射问题时，浮体假定处于等速直线运动的平衡状态但无摇荡运动，从远处过来入射波，对浮体将产生一激励力促使物体产生摇荡运动。绕射问题中，不考虑物体的摇荡运动，

只计入波浪与定常速度移动的浮体之间的流体动力干扰。

当浮体以定常移动速度U_0运动时，则浮体将产生兴波速度势，相对于以速度U_0移动的参考坐标系来说，兴波速度势$\bar{\phi}(x,y,z)$为定常。那么将流场中总速度势在参考坐标系中记为$\hat{\phi}(x,y,z)$，它可以表示成：

$$\hat{\phi}(x,y,z,t)=\bar{\phi}(x,y,z)+\Phi(x,y,z,t)=\bar{\phi}(x,y,z)+\Phi_I+\Phi_D \tag{33}$$

式中Φ为散射势；Φ_I为入射波速度势；Φ_D为绕射速度势；

如果对浮体形状加以限制，要求它的定常兴波势$\bar{\phi}(x,y,z)$是小量，在一阶线性近似中，定常势$\bar{\phi}(x,y,z)$和散射势Φ的定解问题可截然分开，即认为两者间互不影响。

由于入射速度势Φ_I已求得，那么绕射速度势Φ_D满足的定解条件为：

$$\left.\begin{aligned}
&[L]\quad \nabla^2\phi_D(x,y,z)=0 \qquad \text{流体域内}\\
&[F]\quad -\omega^2\phi_D+2i\omega U_0\frac{\partial\phi_D}{\partial x}+U_0^2\frac{\partial^2\phi_D}{\partial x^2}+g\frac{\partial\phi_D}{\partial y}=0 \qquad \text{在}\mathrm{y}=0\text{上}\\
&[S]\quad \left.\frac{\partial\phi_D}{\partial n}\right|_{S0}=-\left.\frac{\partial\phi_I}{\partial n}\right|_{S0} \qquad \text{在平均物面}\ S_0\text{上}\\
&[B]\quad \lim_{y\to-\infty}\nabla\phi_D=0 \qquad \text{无限水深}\\
&[R]\quad \lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial\phi_D}{\partial R}-ik\phi_R\right)=0 \text{无穷远处辐射条件}
\end{aligned}\right\} \tag{34}$$

当考虑无航速时，绕射速度势Φ_D满足的定解条件为：

$$\left.\begin{aligned}
&[L]\quad \nabla^2\phi_D(x,y,z)=0 \qquad \text{流体域内}\\
&[F]\quad \frac{\partial\phi_D}{\partial y}-\frac{\omega^2}{g}\phi_D=0 \qquad \text{在}\mathrm{y}=0\text{上}\\
&[S]\quad \left.\frac{\partial\phi_D}{\partial n}\right|_{S0}=-\left.\frac{\partial\phi_I}{\partial n}\right|_{S0} \qquad \text{在平均物面}\ S_0\text{上}\\
&[B]\quad \lim_{y\to-\infty}\nabla\phi_D=0 \qquad \text{无限水深}\\
&[R]\quad \lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial\phi_D}{\partial R}-ik\phi_R\right)=0 \text{无穷远处辐射条件}
\end{aligned}\right\} \tag{35}$$

与式 3-31 相比较，绕射速度势Φ_D的定解条件差别就在于物面条件。这时的Φ_D可用格林

函数方法求得，但是哈斯金特对无航速的情形可以直接利用波浪速度势 Φ_I 和辐射势 Φ_R 求解波浪力。

由哈斯金特关系：

$$\iint_{S_0}\phi_D n_j \mathrm{d}S = \iint_{S_0}\phi_D \frac{\partial \phi_{R_j}}{\partial n}\mathrm{d}S = \iint_{S_0}\phi_{R_j}\frac{\partial \phi_D}{\partial n}\mathrm{d}S \tag{36}$$

易知浮体物面条件 $$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_D}{\partial n} \tag{37}$$

将物面条件代入式 29 得出：

$$\iint_{S_0}\phi_D n_j \mathrm{d}S = -\iint_{S_0}\phi_{R_j}\frac{\partial \phi_I}{\partial n}\mathrm{d}S \tag{38}$$

对于给定的入射波速度势 ϕ_I ,一旦求出辐射速度势 ϕ_R, 即可求出物体绕动速度势。

3.5 浮体运动方程的建立

浮体在波浪上的运动是以刚体在无限介质中的运动为基础，运用质心运动定理和绕质心的动量矩定理，可得：

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{G}}{dt} &= \vec{F}\\ \frac{d\vec{Q}}{dt} &= \vec{M}\end{aligned} \tag{39}$$

式中 $\vec{G}$ 是刚体运动的动量； $\vec{Q}$ 是绕质心的动量矩； $\vec{F}$ 和 $\vec{M}$ 分别为外力矢量和绕质心的外力矢量。

浮体在波浪上的摇荡运动时，考虑与浮体摇荡运动相关的那些流体作用力时，若假设流场中压力 p 为已知，则作用于浮体的外力和外力矩分别为：

$$\left.\begin{aligned}F_i &= \iint_S p n_i dS\\ M_i &= \iint_S p n_{i+3} dS\end{aligned}\right\} \quad i = 1,2,3 \tag{40}$$

式中 n_i 为广义法线矢量的分量，S 为物体的瞬时湿表面。这是浮体的运动方程可记为：

$$\left.\begin{aligned} M\left(\frac{\partial v_{0i}}{\partial t}+\varepsilon_{ijk}\omega_j v_{0k}\right) &= \iint_S pn_i dS \\ I_{ij}\frac{\partial \omega_j}{\partial t}+\varepsilon_{ijk}\omega_j I_{kl}\omega_l &= \iint_S pn_{i+3} dS \end{aligned}\right\} \tag{41}$$

式中 i, j, k=1, 2, 3。于是，精确到一阶，运动方程可记为：

$$\left.\begin{aligned} M\frac{\partial v_{0i}}{\partial t} &= \iint_S pn_i dS \\ I_{ij}\frac{\partial \omega_j}{\partial t} &= \iint_S pn_{i+3} dS \end{aligned}\right\} \quad i,j=1,2,3 \tag{42}$$

将式 35 进一步处理，引入表达式：

$$\{x_{0j}\}=\{\bar{x}_0,\bar{y}_0,\bar{z}_0,\alpha,\beta,\gamma\} \tag{43}$$

$$[m_{ij}]=\begin{Bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ 0 & 0 & 0 & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ 0 & 0 & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{Bmatrix} \tag{44}$$

式 35 可缩写成如下形式：

$$m_{ij}\ddot{x}_{0j}=\iint_{S0} pn_i dS, \quad i,j=1,2,\ldots,6 \tag{45}$$

对式 38 展开得到，考虑浮体摇荡运动对流场的影响，求解辐射势 Φ_I 带来的水动力系数，附加质量 μ_{ij} 和阻尼系数 λ_{ij}，以及浮体摇荡运动，流场对于浮体的恢复力之后，浮体运动方程为：

$$(m_{ij}+\mu_{ij})\ddot{x}_{0j}+\lambda_{ij}\dot{x}_{oj}+C_{ij}x_{oj}=F_{wi}^{k}+F_{wi}^{d}(i、j=1,2,\cdots,6) \tag{46}$$

式中 m_{ij} 为浮体质量；μ_{ij} 附加质量；λ_{ij} 为阻尼系数；C_{ij} 为恢复力系数；F_{wi}^{k} 为佛汝德—克雷洛夫力；F_{wi}^{d} 为波浪绕射力。

4、波浪载荷短期预报

波浪载荷预报，是以浮体在波浪中的波浪载荷响应为基础，通过理论计算，确定浮体在给定时间运行与实际海况中的波浪载荷变化特性。波浪载荷的预报通常分为短期预报和长期预报。短期预报的时间范围为半小时到数小时，在此过程中，浮体的装载状态、航速、航向角以及海况都可认为是固定不变的；

短期海浪可视为均值为零的平稳正态随机过程，浮体可看作是一个线性时不变系统。由随机过程理论可知，在海浪的作用下（输入），其响应——波浪载荷（输出）也将是一个均值为零的平稳正态随机过程，即响应谱等于波浪谱乘以系统响应幅算子[19]，即：

$$\mathrm{S}_{\omega}(\omega,H_{1/3},T_z,V,\beta+\theta)=H^2(\omega,\ V,\beta+\theta)\cdot S_{\xi}(\omega,\ H_{1/3},T_z,V,\theta) \tag{47}$$

式中：$\mathrm{S}_{\mathrm{w}}(\omega,H_{1/3},T_z,V,\beta+\theta)$ 波浪载荷谱密度；

$S_{\xi}(\omega,\ H_{1/3},T_z,V,\theta)$ 海浪谱密度；

$H(\omega,\ V,\beta+\theta)$ 系统传递函数的模；

波浪幅值及波浪诱导浮体运动幅值、载荷幅值、应力幅值符合 Rayleigh 分布，对应的概率密度函数为[19]：

$$\mathrm{f}_0(x)=\frac{2x}{2\sigma_x^2}\exp(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}) \tag{48}$$

概率累计函数为：

$$\mathrm{F}(x)=1-\exp(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}) \tag{49}$$

根据式 42 可以进一步得到波浪载荷的各种统计特征值。

第三章　浮式风机设计与模型建设

3.1 海上风机尺寸

数值模拟设计风机的尺寸如下：

浮式基础	尺寸
长	0.32m
宽	0.36m
高	0.16m
吃水	0.08m

机舱	尺寸
长	0.04m
宽	0.02m
高	0.02m

叶片	尺寸
直径	0.03m
个数	4 个
设计风速	3m/s

3.2 发电机型号

输出电压范围	3v-24v
输出功率	5w 左右
外径	0.025m

3.3 系泊系统设计

Free length	0.11m
Spring coefficient per unit length	2.4e+05
Diameter	0.005m

3.3 结构几何模型与有限元模型建立

根据设计的尺寸建立结构几何模型如下：

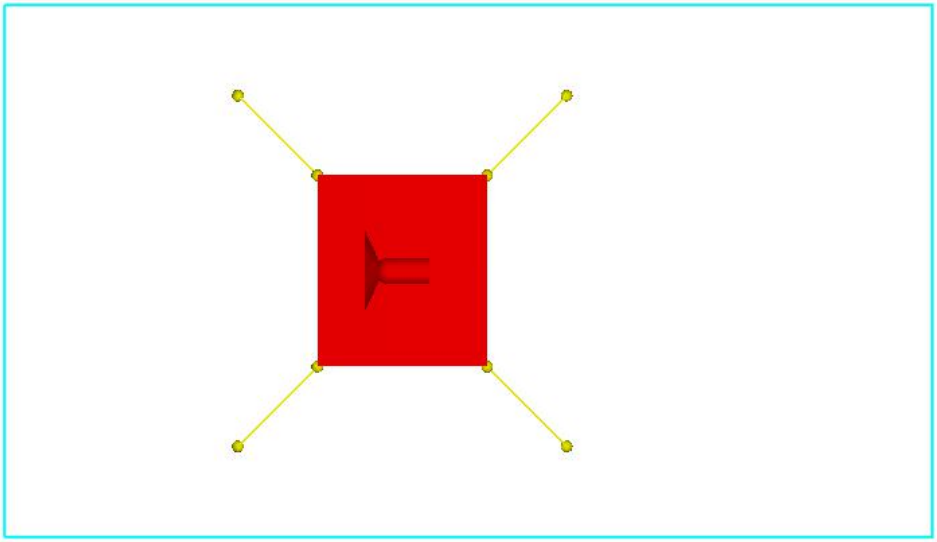


图 3.1 整体几何模型（俯视图）

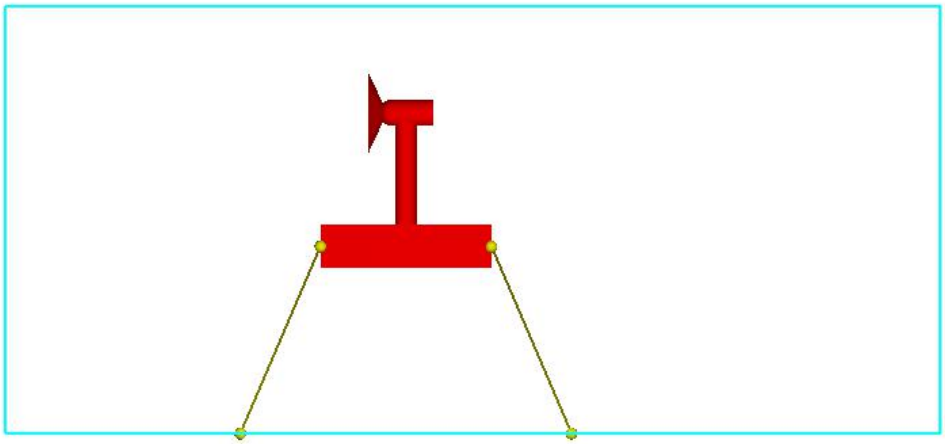


图 3.2 整体几何模型（侧视图）

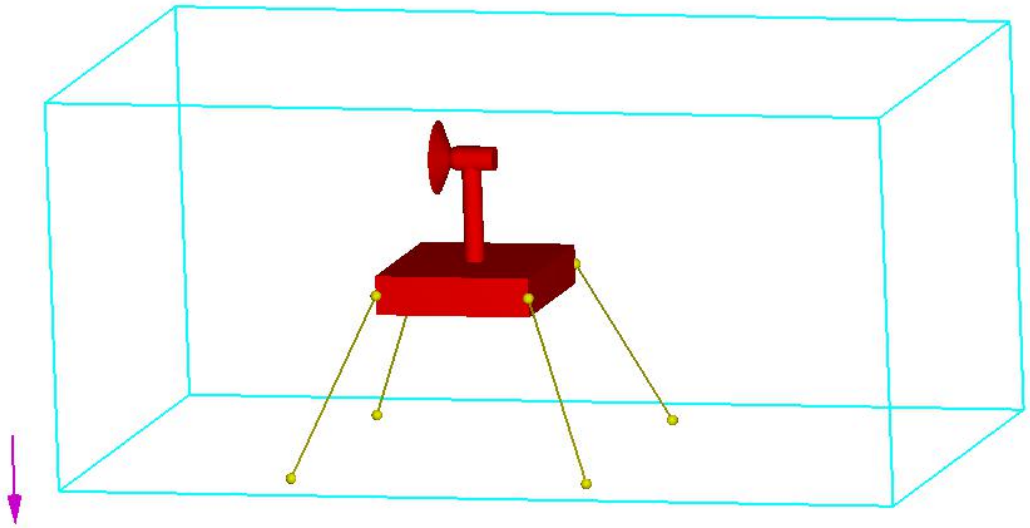


图 3.3 整体几何模型（等轴视图）

建立的有限元模型如下：

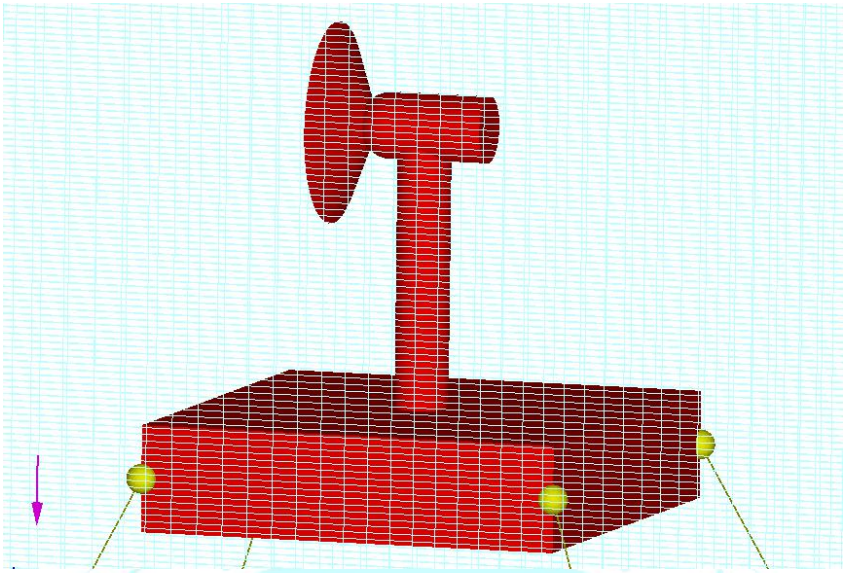


图 3.4 结构整体有限元模型

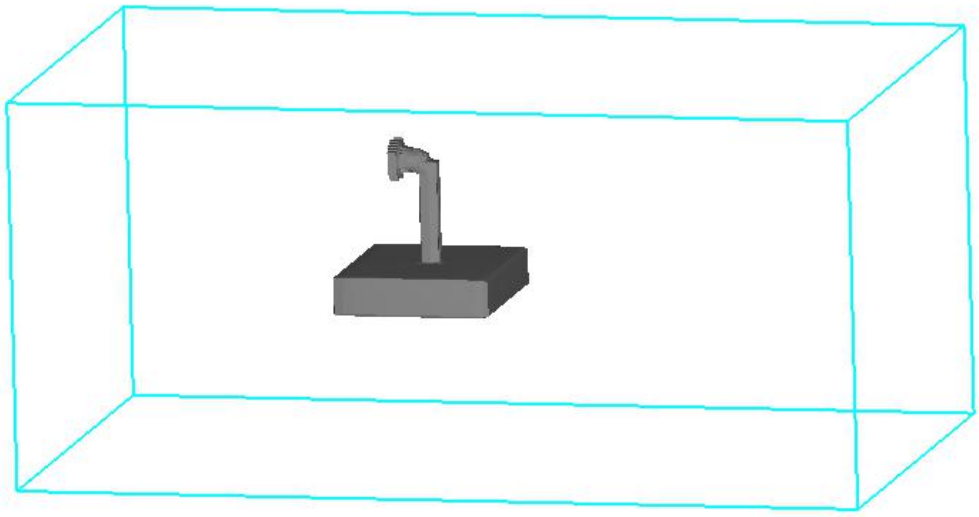


图 3.5 Favor 后模型

第四章 浮式风电系统在波浪上的运动

根据要求设定波高范围 30-50mm，波周期为 5-20Hz，水深 0.3m。风速为 3m/s。进行数值模拟计算

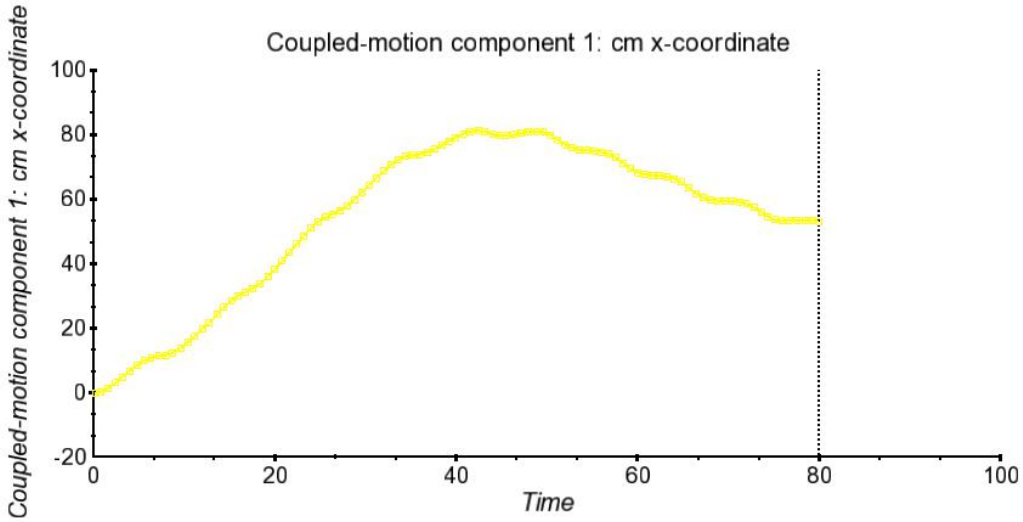


图 4.1 x 方向上的运动

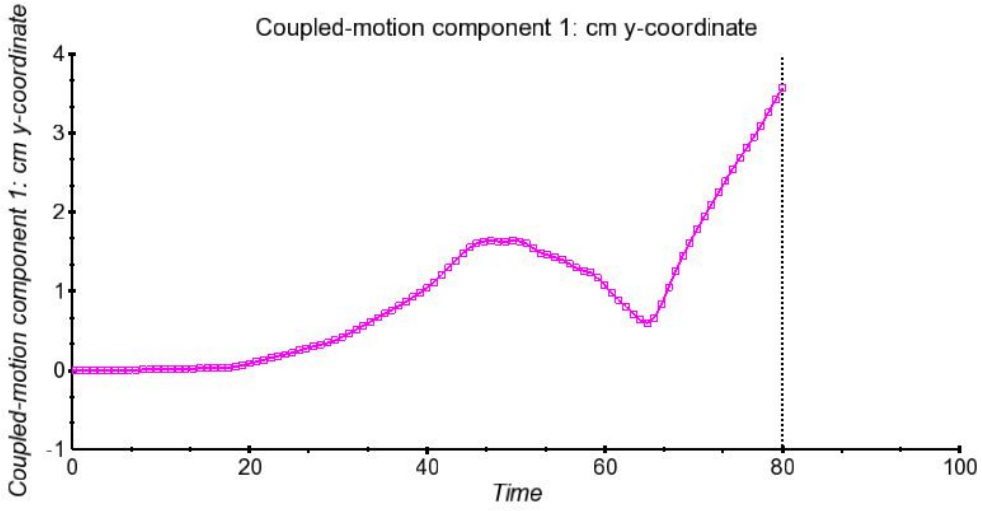


图 4.2 y 方向上的运动

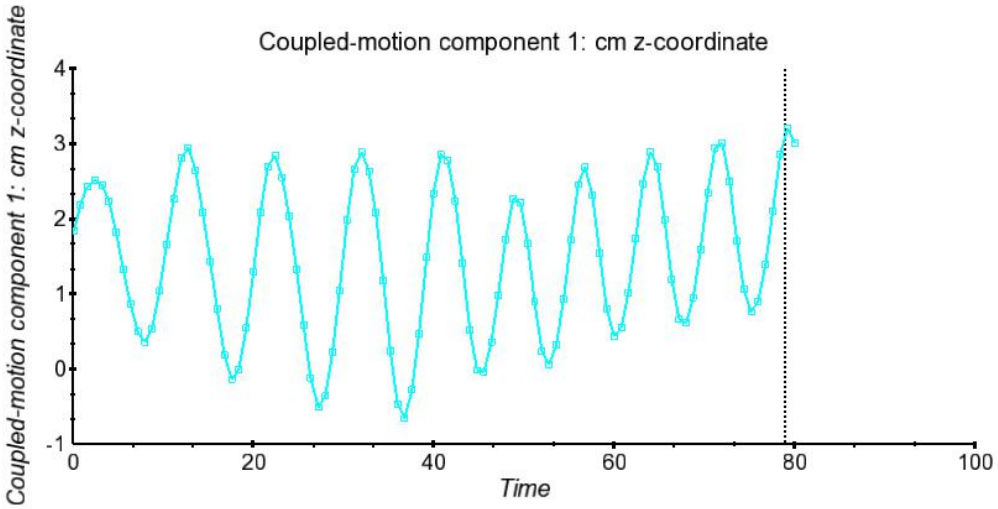


图 4.3 z 方向上的运动

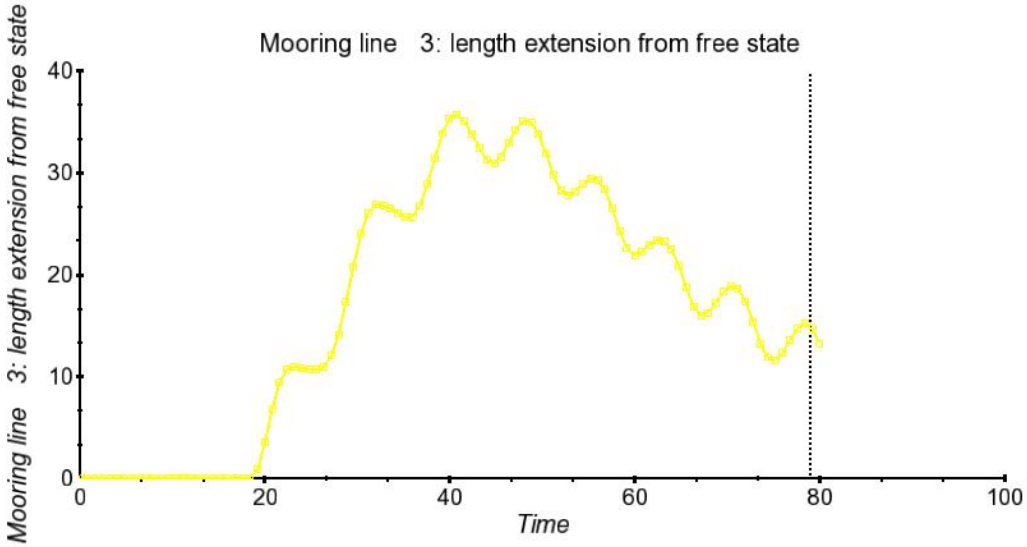


图 4.4 系泊绳上的拉力

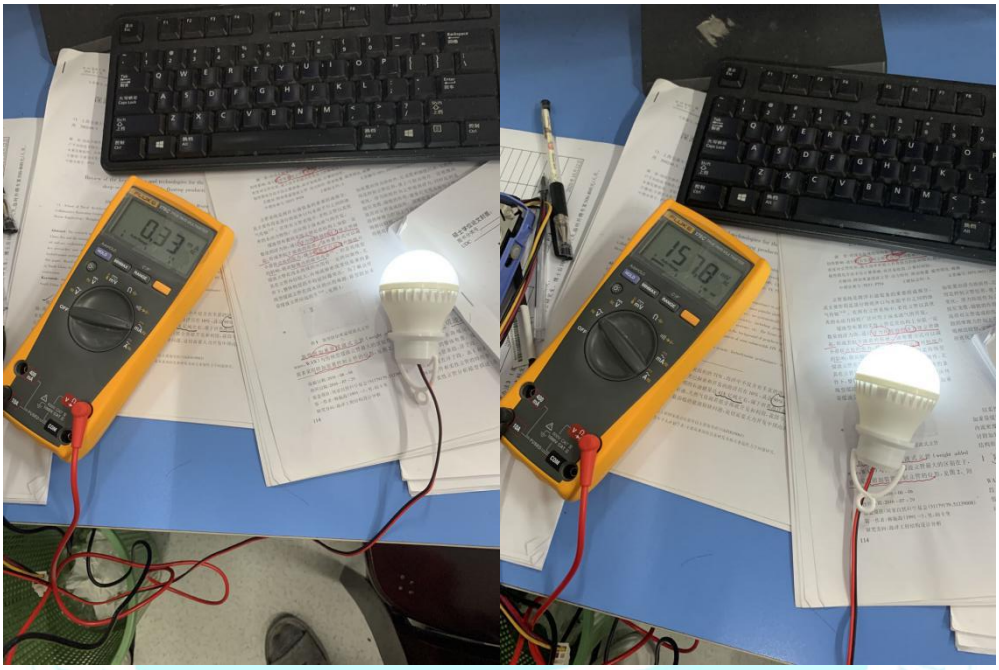
经过数值模拟发现浮体可以在环境下保持稳定性，整个装置在发电过程中能保持稳性。

第五章 海上风电模型发电实体模型试验及发电效率测算

发电效率=发电功率/装机功率，发电功率为稳性测试结束后 1 分钟内，测得的发电电压电流乘积的最大值。

5.1 试验模型

5.2 发电效率计算



测试电压为 15.7V 测试电流为 0.33A，输出功率为 3.75w，灯泡额定功率为 5w，发电效率达到 75%.

COEDC OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPANY

第六章 总结

经过试验后满足设计要求：

1、海上风电平台稳定

2、灯泡发光稳定

3、目前大多数海上风电都是单桩海上风电，本设计创新开发了了浮式海上风电，能够应用在深海及复杂的海况下运行。

4、符合浮体、发电装置设计原理

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

团队编号：A20200201

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年　10 月　12　日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介：

通过理论计算与实验设计了一套垂荡浮子式波浪能发电装置。该装置主要包括了与海底相连的固定基座，俘获波浪能量的浮子模块，将浮子垂荡运动传递给发电机的机械传动模块以及发电模块。

其中浮子模块通过随波做垂直方向上的简谐运动来俘获波浪的能量，该模块设计的主要工作在于浮子尺寸与形状的寻优，目的在于获取最大的俘能效率。传动装置模块通过圆柱蜗杆与齿轮实现空间交错的轴间运动与动力的传递与调速，该模块设计主要工作在于蜗杆与齿轮传动的主要参数及几何尺寸的计算，基于机械零部件的承载能力，失效形式的材料选型。固定基座依靠自身重量坐于海底，通过承重立柱连接甲板，甲板上固定传动模块与发电模块，该模块设计的主要工作在于装配的稳固与对可运动零件的位移约束。发电模块包括电机与整流稳压电路，该模块可以将浮子俘获的不均匀的能量转换为较为稳定的能量。

模型的特点在于紧凑的机械传动装置可以让模型在更复杂的海域中有更好的表现。对于浮子的尺寸与形状设计让浮子在比赛给出的波段中达到最大的俘能效率，浮子在制作完成之后可以通过注水与排水调节吃水深度，可以根据海况变化来进行调整。在电路之中进行了整流与稳压的电路设计，保证了小灯泡亮度的稳定性。

目录

第 1 章：总论 **1**

第 2 章：设计方案 **2**

浮子模块 2

浮子模块设计目标 2

浮子模块尺寸与材料设计 2

传动模块 3

传动模块结构目标 3

传动模块尺寸与材料设计 4

电路模块 4

器件说明 4

工作原理 4

第 3 章：附录 **5**

附录一：传动蜗杆承载能力计算 5

附录二：波浪作用力的计算 8

附录三：零部件清单 9

参考文献 **13**

第 1 章：总论

海洋面积占了地球面积的 71%，在其中蕴含了丰富的清洁可再生能源。在近海区域传播的波浪，作为一种能量源，在实际之中应用有着极大的前景。对于利用这种能量的可能性，在世界范围内引起了广泛的关注。我国拥有漫长的海岸线，其中东海和南海等海域波浪的能量密度都十分可观，根据文献[1]的计算，我国沿海理论波浪年平均功率超过$1.3\times10^{7}KW$。根据文献[2]的统计结果，波浪能功率密度最高的海域为舟山群岛海域、福建平潭以北的海域和渤海海峡等。目前，世界上很多国家在近海建成了多种类型的波浪能转换装置，典型的有浮力摆式海洋能波浪转换装置、垂荡浮子式波浪发电装置、越浪式波浪发电装置、点吸收式波浪能发电装置与鸭式波浪发电装置以及海蟒式波浪俘能装置。本文采用的垂荡浮子式波浪能发电装置是一种将浮子垂荡动能最终转换成电能的波能发电装置，具有技术较为成熟可靠、结构较为统一，极端海域生存能力强等优点。垂荡浮子发电过程中的能量转换通常分为 3 个阶段，浮子在波浪作用力下发生垂荡运动，将波浪的动能吸收为浮子垂荡动能，为第一级能量转换阶段；浮子的动能经过传动系统转化为发电机的旋转运动，为第二级能量转换阶段；最后为转子的旋转切割磁感线产生电能，为第三级能量转换阶段。传动方式一般有机械传动液压传动与气压传动三种方式，考虑到模型的大小，实现液压与气压传动较为困难，所以本文采取了机械传动。浮子在做垂荡运动时需要添加与其相配合的阻尼装置，才能产生相对运动。考虑到比赛的水深较浅，所以直接选取了坐底式的阻尼，依靠底部配重强大的重力来为浮子提供相对运动，同时在其基础之上搭建坐底式平台的上部模块，将传动模块与发电模块置于水面之上防止电路进水。

第 2 章：设计方案

1. 浮子模块

（1）浮子模块设计目标

浮子的作用是俘获波浪的能量，将波浪的动能转换为浮子上下做简谐运动的动能。通过线性波理论对波浪进行分析计算后可以知道波浪对浮子的作用力。浮体的几何形状是影响其运动特性及浮能性能的重要因素，开展几何形状优化，实现最大获能是波浪能装置研发的必要环节，通过文献[3]我们了解到在大赛给出的波浪频率的情况下，圆锥形底面形状的浮子的捕获能量的能力最强，所以最终确定浮子的底面形状为圆锥形。通过文献[4]我们可以知道在大赛给定的波浪频率下，浮子处于漂浮的状态下在垂荡方向的力最大，水平方向的力最小，所以浮子的淹没深度选择漂浮。浮子设计中包含了注水与排水的功能，吃水深度的选择应根据水况反复实验寻优。

（2）浮子模块尺寸与材料设计：

浮体上层为圆柱主体，下层为相应形状的底面，上下层的连接处为浮体的吃水线即底面部分与波浪接触而实现能量的俘获。考虑赛题给到的波浪环境数据以及参考文献的数据我们最终确定浮子的体积为$5.6\times10^{-4}m^3$，浮子的材料为增韧树脂，采用 3D 打印实现。浮子的具体数据如图所示：

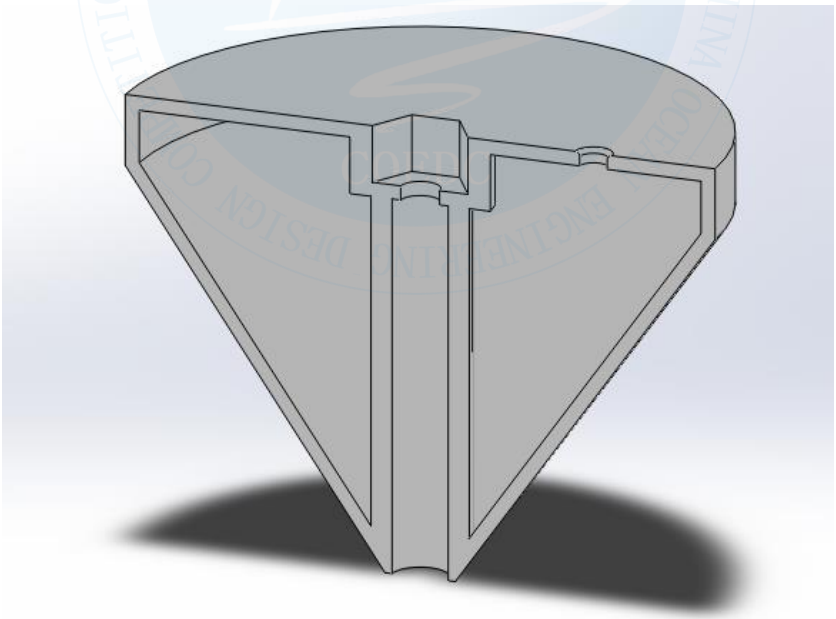


图 2.1 浮筒剖面图

浮子上部开有六角孔，可以固定一个与所选蜗杆相配合的螺母，从而实现蜗杆与浮子的装配。浮子中心开有滑道，用来与固定于海底的钢管相配合。浮子的中部中空，可以通过上部的注水口向浮子中注水来调节吃水线。

赛题给出的波浪的周期为 5-20s，波高为 0.03-0.05m，通过线性波理论的相关公式我们求得了波浪对浮子的水平作用力和垂直作用力，详细计算见附录。通过对作用力的计算我们可以得出浮子装置的强度符合设计。

2. 传动模块：

（1）传动模块结构设计：

浮子随波浪做垂直方向上的简谐运动，然而在模型中实现垂直式发电机较为复杂，所以需要将垂直方向上的简谐运动变为可以驱动发电机的转动。一般来说可以实现此功能的传动装置有连杆传动，齿轮条传动以及蜗轮蜗杆传动。连杆传动使用铰链与滑道等方式，将固件相互连接，如图所示的连杆系统就可以实现简谐运动向圆周运动的传递。

图 2.2 连杆传动

但是考虑到波浪的波高不能达到严格上的一致，即使是波浪生成器所生成的波浪，每个波的波高都会存在或大或小的误差，在真实的海域条件下波浪的情况更为复杂。连杆传动装置的缺陷在于滑块做简谐运动的周期与惯性圆盘做圆周运动的周期存在相关性。波浪条件下不能保证滑块每一次简谐运动能完成一次完整的周期，能量的传递连续性较差。所以本文采用的传动方式为蜗杆传动。

蜗杆传动与齿轮齿条传动类似，通过齿轮和蜗杆上的螺纹相啮合，蜗杆在垂直方向上的简谐运动可以直接传递为齿轮的转动。该方案中齿轮与蜗杆啮合的齿对较多，同时蜗轮齿可以逐渐进入啮合及逐渐退出啮合，所以冲击载荷小，传动平稳，并且传动比较大。该方案的实现的最大难点在于对蜗杆进行限位，保证其只能在垂直方向运动避免在波浪作用力的作用下发生横向运动。限位装置由两部分组成：

1、蜗杆与浮子通过螺纹进行配合，在浮子的垂直运动方向中心设计一个导轨，将浮子通过该导轨安装在固定于海底的钢管上，浮子只能通过导轨沿钢管做垂直方向运动。该限位系统保证了浮子与蜗杆不能产生水平方向上的位移。

2、在第一类限位装置下，由于钢管在海流的作用下会产生一定的挠度，以及导轨与钢管之间存在一定的空隙导致蜗杆会产生微量的摇荡，从而影响齿轮与蜗杆之间的啮合。所以在蜗杆的上部采用空转齿轮对蜗杆进行摇荡上的限位。具体方

式为在上部四个方位平台安装固定的齿轮使四个齿轮都可以和蜗杆啮合。

（2）传动模块尺寸与材料设计：

蜗杆选取为阿基米德蜗杆（ZA 蜗杆），ZA 蜗杆在端面上的齿廓为阿基米德螺旋线，在轴向的齿廓为直线，齿形角为 20° 。在中间平面上，其齿条与齿轮的啮合传动。故在设计蜗杆传动时，均取中间平面上的参数和尺寸为基准，并用齿轮传动的计算关系。

购买 ZA 蜗杆后通过游标卡尺测量并计算其主要参数如下：

模数 $m=\dfrac{\text{齿距}}{\pi}=\dfrac{1.58\text{mm}}{\pi}=0.5\ \text{mm}$

压力角 $\alpha=20^{\circ}$

蜗杆齿顶圆直径：$d_{a1}=11.50mm$

蜗杆齿根圆直径：$d_{a2}=9.40mm$

选择模数为 $0.5mm$ 的主轴齿轮与其配合。在计算承载能力之后，选择尼龙材质的涡轮与齿轮即可达到模型需求。详细计算见附录。

3、电路模块：

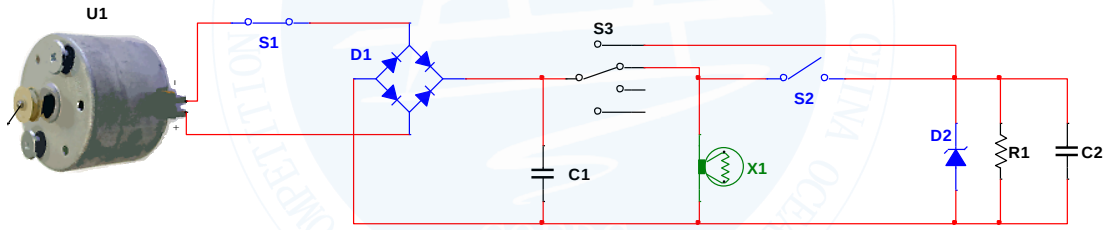


图 2.3 垂荡浮子式波浪发电装置原理图

器件说明：

U1：发电机，通过连杆齿轮等机械装置将水流波动的动能转化成电流输出 ；

D1：整流电桥，将发电机电流整流成直流电进行输出；

C1：电容，主要起滤波作用，将整流后直流电中的杂波进行一定程度的过滤；

X1：电路所带负载，此处用灯泡表示；

D2：稳压管，起稳压作用，防止电压过大对蓄电池造成损害，考虑到实际器件参数，此处选择 3.6V 的稳压管；

R1 和 C2,：共同组成蓄电池结构。

S1、S2、S3：开关器件。

工作原理：

（1）发电与整流

水面出现波动时，闭合开关 S1，则可通过机械装置将水流运动产生的能量放大并带动发电机转子旋转发电，产生电流，通过整流电桥 D1 的整流和 C1 的滤波，得到较为平整的直流电并输出，相当于一个直流电源；

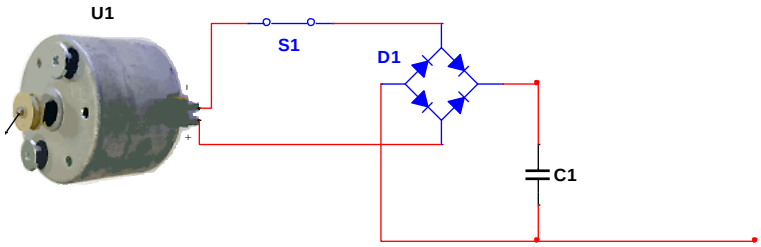


图 2.4 发电与整流部分原理图

（2）电能的利用

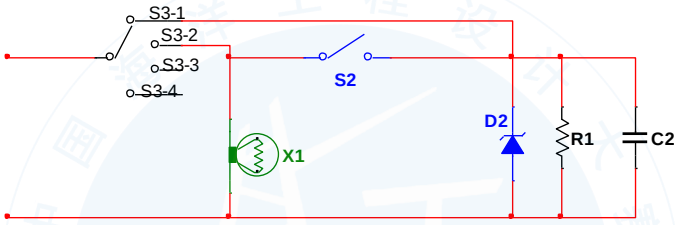


图 2.5 电能使用与存储部分原理图

上图所示为电能利用回路，整流滤波输出后输出的电流接在回路两端，通过开关控制实现如下功能：

S3-1 接通时，代表通过电源给蓄电池组充电，储存电能；

S3-2 接通时，通过电源直接给负载小灯泡供电；

S2 接通时，通过蓄电池组给负载供电。

S3-3 或 S3-4 接通时，电路不工作。

综上所述，我们结合所学知识并利用相关器件实现了一个简易的振子式波浪发电装置，并实现了直流电能的利用和存储。

第 3 章：附录

附录 1：传动蜗杆齿轮承载能力计算

蜗杆的失效形式主要为齿面接触点疲劳破坏、齿根折断、齿面胶合与过度磨损等，由于结构上的原因蜗杆螺旋齿轮部分强度总是高于齿轮轮齿强度，一般只对齿轮的轮齿进行承载能力的计算。

蜗杆齿轮传动受力分析：

正确的啮合条件：

$$m_1 = m_2 = 0.5mm\ ;\quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha\ ;\quad \beta_1 = \pm\beta_2$$

名称	蜗杆	齿轮
模数	0.5	0.5
压力角 α	20°	20°
螺旋角 β	12°	12°
变位系数 Xn	0	0

表 3.1 蜗杆与齿轮的主要参数

齿轮齿数：18

齿轮分度圆直径：

$$d = \frac{0.5\times 18}{\cos\beta_1} = 9.20mm$$

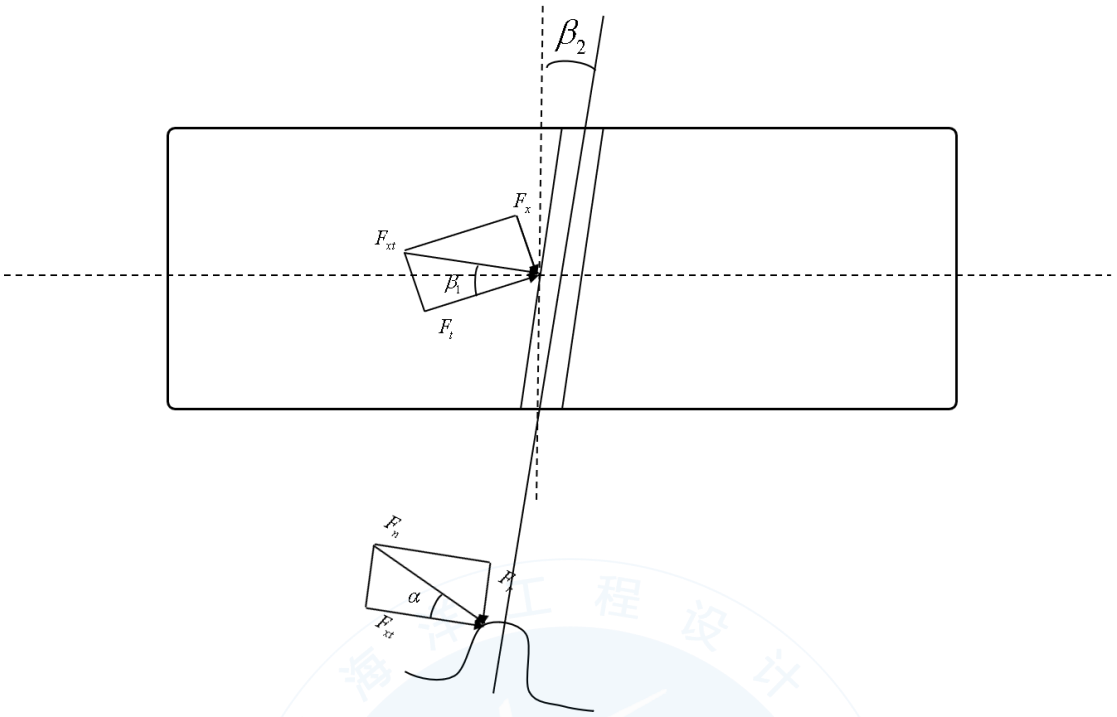


图 3.2：齿轮蜗杆受力分析

如图所示，作用于蜗杆齿面上的法向力F_n，将F_n分解成沿蜗杆径向的分力F_r沿齿轮周向的分力F_t，沿齿轮轴向的分力F_x。各个力之间的大小关系为：

$$\begin{cases} F_t = \dfrac{2\times T}{d} \\ F_r = F_t \times \dfrac{\tan\alpha}{\cos\beta_1} \\ F_x = \dfrac{F_t}{\tan\beta_1} \\ F_n = \dfrac{F_t}{\cos\alpha\times\cos\beta_1} \end{cases}$$

其中 T 为齿轮传递的扭矩。尼龙材料的屈服强度为 54.88MPa，根据之前的分析，齿轮的根部截面为危险截面。应满足：

$$\frac{F_t\times H}{W_z} \le [\sigma]$$

$[\sigma]$——许用应力，大小取屈服强度×0.6

W_z——抗弯截面系数，$W_z = \dfrac{bh^2}{6}$

b——齿轮齿宽度

h——齿轮齿长度

H ——齿轮齿高度

由此可以算出蜗杆与齿轮所能承受的最大的力

$$\begin{cases} F_{t\max} = 43.9N \\ F_{r\max} = 9.93N \\ F_{x\max} = 120.61N \\ F_{n\max} = 47.76N \\ T_{\max} = 0.2N\bullet m \end{cases}$$

由对波浪进行的计算可以得到波浪能够提供最大的力为 52.5N，远小于其对应的沿齿轮轴向的力能承受的最大值 120.61N，故该材料和尺寸可以满足模型需求。

附录 2：波浪作用力的计算

题设环境条件：波高$\lambda = 30\sim50mm$，周期 T=5~20s，水深 d=0.3m。

因为水深为 0.3m，所以为极浅水，有以下关系式：

波浪的色散关系式：$w^2 = kgth(kd)$；

波浪水平速度：$u = \frac{H}{2}\sqrt{\frac{g}{d}}cos\,\theta$；

波浪垂直速度：$w = \frac{H\pi}{T}\left(1+\frac{z}{d}\right)sin\,\theta$；

波长$\lambda = T\sqrt{gd}$；

其中$\theta = kx - wt; w = \frac{2\pi}{T}$；

因为研究一个周期内的最大荷载作用，所以相位 kx 取 0。

在二维波中，单宽波峰线长度的一个波中所储存的波浪总能量是在这个波中的动能E_k和位能E_p之和，一个波中的波浪动能E_k由下式计算得到：

$$E_k = \int_0^{\lambda}\int_{-d}^{0}\frac{\rho}{2}(u^2+w^2)d_x\,\mathrm{d}z$$

在微幅波中，可取：

$$E_k = \int_0^{\lambda}\int_{-d}^{0}\frac{\rho}{2}(u^2+w^2)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z = \frac{1}{16}\rho g H^2\lambda$$

将波长$\lambda = T\sqrt{gd}$，代入上式，得：

$$E_k = \frac{1}{16}\rho g H^2 T\sqrt{gd}$$

其中 d=0.3m，$\rho = 1000\,{}^{kg}/_{m^3}$，g=9.8${}^{m}/_{s^2}$

Matlab 计算程序如下：

```
H=[0.03:0.001:0.05];
T=[5:1:20]';
F=1/16*1000*9.8*H.^2.*T*(9.8*0.3)^0.5;
```

计算结果如下：

4.72598	5.0463	5.37712	5.71844	6.07026	6.43259	6.80542	7.18875	7.58258	7.98691	8.40175
5.67118	6.05556	6.45254	6.86213	7.28432	7.71911	8.1665	8.6265	9.0991	9.5843	10.0821
6.61638	7.06482	7.52797	8.00582	8.49837	9.00563	9.52758	10.0642	10.6156	11.1817	11.7624
7.56157	8.07408	8.60339	9.14951	9.71242	10.2921	10.8887	11.502	12.1321	12.7791	13.4428
8.50677	9.08334	9.67882	10.2932	10.9265	11.5787	12.2498	12.9397	13.6486	14.3764	15.1231
9.45197	10.0926	10.7542	11.4369	12.1405	12.8652	13.6108	14.3775	15.1652	15.9738	16.8035
10.3972	11.1019	11.8297	12.5806	13.3546	14.1517	14.9719	15.8152	16.6817	17.5712	18.4838
11.3424	12.1111	12.9051	13.7243	14.5686	15.4382	16.333	17.253	18.1982	19.1686	20.1642
12.2876	13.1204	13.9805	14.8679	15.7827	16.7247	17.6941	18.6907	19.7147	20.766	21.8445
13.2328	14.1296	15.0559	16.0116	16.9967	18.0113	19.0552	20.1285	21.2312	22.3634	23.5249
14.178	15.1389	16.1314	17.1553	18.2108	19.2978	20.4163	21.5662	22.7477	23.9607	25.2052
15.1231	16.1482	17.2068	18.299	19.4248	20.5843	21.7773	23.004	24.2643	25.5581	26.8856
16.0683	17.1574	18.2822	19.4427	20.6389	21.8708	23.1384	24.4417	25.7808	27.1555	28.5659
17.0135	18.1667	19.3576	20.5864	21.853	23.1573	24.4995	25.8795	27.2973	28.7529	30.2463
17.9587	19.1759	20.4331	21.7301	23.067	24.4438	25.8606	27.3172	28.8138	30.3503	31.9266
18.9039	20.1852	21.5085	22.8738	24.2811	25.7304	27.2217	28.755	30.3303	31.9477	33.607

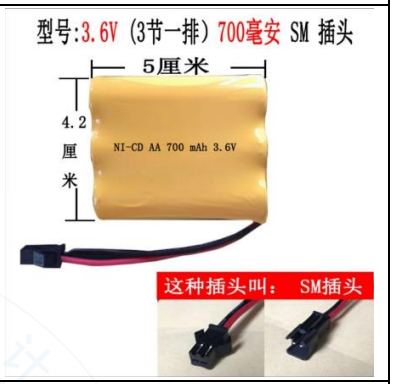
8.82709	9.26293	9.70927	10.1661	10.6335	11.1113	11.5997	12.0985	12.6079	13.1277
10.5925	11.1155	11.6511	12.1993	12.7602	13.3336	13.9196	14.5182	15.1295	15.7533
12.3579	12.9681	13.593	14.2326	14.8869	15.5558	16.2395	16.9379	17.651	18.3788
14.1233	14.8207	15.5348	16.2658	17.0135	17.7781	18.5595	19.3576	20.1726	21.0044
15.8888	16.6733	17.4767	18.299	19.1402	20.0004	20.8794	21.7773	22.6942	23.6299
17.6542	18.5259	19.4185	20.3322	21.2669	22.2226	23.1993	24.197	25.2158	26.2555
19.4196	20.3784	21.3604	22.3655	23.3936	24.4449	25.5193	26.6167	27.7373	28.881
21.185	22.231	23.3023	24.3987	25.5203	26.6672	27.8392	29.0364	30.2589	31.5066
22.9504	24.0836	25.2441	26.4319	27.647	28.8894	30.1591	31.4562	32.7805	34.1321
24.7158	25.9362	27.186	28.4651	29.7737	31.1117	32.4791	33.8759	35.3021	36.7577
26.4813	27.7888	29.1278	30.4984	31.9004	33.3339	34.799	36.2956	37.8236	39.3832
28.2467	29.6414	31.0697	32.5316	34.0271	35.5562	37.1189	38.7153	40.3452	42.0087
30.0121	31.494	33.0115	34.5648	36.1538	37.7785	39.4389	41.135	42.8668	44.6343
31.7775	33.3465	34.9534	36.598	38.2805	40.0007	41.7588	43.5547	45.3884	47.2598
33.5429	35.1991	36.8952	38.6312	40.4072	42.223	44.0787	45.9744	47.9099	49.8854
35.3084	37.0517	38.8371	40.6645	42.5339	44.4453	46.3987	48.3941	50.4315	52.5109

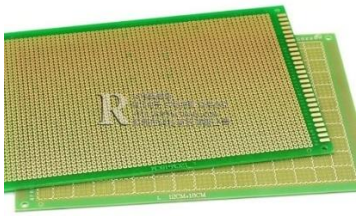
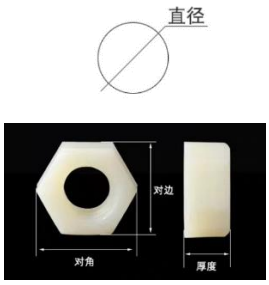
图 3.2.1 波浪对浮子作用力计算结果

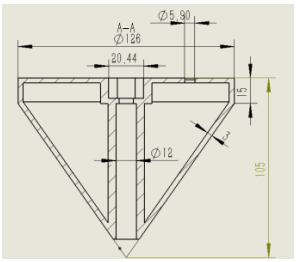
综上所述，波浪对浮筒的作用力范围为 4.73N~52.51N。

附录 3：零部件清单

零部件名称	备注	样图

手摇发电机模组	280 发电机电压：0~12V LED 灯额定功率 5×5W 齿轮模数：0.5m	
电池	额定电压：3.6V 额定电流 700mA 插头类型：SM 插头	
GBJ2510 整流桥	无	
直插铝电解电容	击穿电压：击穿电压 电容值：470μF	

面包板	无	
电线	家用	
发光二极管	工作电压：5~12V	
高强度 425 防水水泥	用于底部配重	
M12 尼龙螺杆螺栓	尺寸如之前理论计算所得	

浮子	采用 3D 打印定制 尺寸如图	
木板，木棒	采用定制	
其它装配与固定部件	2mm 孔角铁轴架	
	木胶	
	塑料胶水	
	亚克力板	
	10×30mm 钢管	
	镀锌螺丝	
	6×20mm 圆木榫	
	20×20×16mm 角码	
	50×50×20mm 角码	
	齿轮包	

参考文献：

[1]游亚戈.我国海洋能产业状况[J].高科技与产业化,2008(07):38-41.

[2]王传崑,施伟勇. 中国海洋能资源的储量及其评价[A]. 中国可再生能源学会海洋能专业委员会.中国可再生能源学会海洋能专业委员会成立大会暨第一届学术讨论会论文集[C].中国可再生能源学会海洋能专业委员会:中国可再生能源学会海洋能专业委员会,2008:11.

[3]刘延俊,王伟,陈志,王冬海,王登帅,薛钢.波浪能发电装置浮体形状参数对俘能性能影响[J/OL].山东大学学报(工学版):1-9[2020-10-12].http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20200909.1710.002.html.

[4]黄淑亭,翟晓宇,刘延俊,史宏达.淹没深度对三自由度波能浮子获能的影响[J/OL].山东大学学报(工学版):1-7[2020-10-12].http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20200701.0923.002.html.

团队编号：A20200305

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 11 月 18 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

综合利用海洋能发电成为目前的一种趋势，针对目前大多数发电装备无法应用于远海这一现实情况，提出了一种可适应远海较恶劣海况的半潜式风浪一体发电装置，并合理开发了“海上生明月”这一观景功能。

在设计过程中，采用 SolidWorks、3D Max、CorelDRAW 等软件对模型进行了构建、展示和说明。平台甲板为一圆环状，上面设置 3 台风力发电机，呈 120 度分布，设置 6 个振荡浮子发电系统，呈 60 度分布；甲板中心安装 1 个直径 26m 的巨型夜光球，采用有机荧光材料；甲板下部设置 6 个胶囊状浮体，呈六边形分布；甲板周围设置 3 个锚泊系统，呈 120 度分布。

根据振荡浮子的运动特性对模型的水动力性能进行了简要分析；采用 ANSYS 软件对模型在风浪流载荷下的受力情况进行了分析，验证其具有良好的抗风抗风浪能力，并将实物模型放入水槽中进行风浪发电测试，结果表明模型运行稳定，发电效率达到 50%。

本设计定位远海、机组分布均匀、具有“海上生明月”观景功能、方便电力集输，这些优良特性使得本设计具有良好的应用前景与经济效益。

目 录

第 1 章 总论 1
1.1 研究背景 1
1.2 风、浪能发电研究现状 1
1.3 研究目的及意义 3
1.4 研究内容与技术路线 3
第 2 章 装备设计 5
2.1 设计原则 5
2.2 设计方案 5
2.3 技术原理 8
2.4 防腐系统设计 8
2.5 装备工艺流程设计 9
第 3 章 可行性分析 10
3.1 水动力性能分析 10
3.2 安全性能分析 11
3.3 力学仿真模拟 11
第 4 章 发电效率 16
第 5 章 应用前景与经济效益评价 18
5.1 应用前景 18
5.2 经济效益评价 18
第 6 章 创新点 19
第 7 章 总结 20
致谢 21
参考文献 22

第 1 章 总论

1.1 研究背景

世界经济的高速发展使得人类对能源的需求与日俱增，传统化石能源的长期开发利用造成了能源短缺、环境污染、自然灾害发生率升高等一系列问题[1-3]。为此，世界各国开始纷纷将目光转向海洋能等新型清洁能源的开发利用[4]。目前我国仍以火力发电为主，在推动社会进步的同时也制约了可持续发展。我国海域面积广阔，海岸线漫长，海洋能资源蕴藏量巨大[5]。据估计，海洋的总能量密度约为 8 亿千瓦[6]，利用海洋能进行发电前景广阔。

海洋能主要包括波浪能、潮汐能、海流能，广义上还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能以及海洋生物质能等[7-9]，是一种清洁、无污染的可再生能源，但是目前海洋能发电技术仍处于研究试验阶段。如何能高效、安全、低成本、大面积应用成了各国关注的焦点。美国、挪威、英国、日本等国在海洋能发电技术研究方面起步较早，且积累了很多经验[10]。近年来，我国也积极专注于海洋科学先进技术，紧跟国际先进水平，努力加强海洋能发电研究，提升在海洋能源发展和技术装备领域的核心技术水平[11,12]。

2006 年，《中华人民共和国可持续发展国家报告》指出，要建立资源节约型和环境友好型社会作为推进可持续发展的重要着力点[13]。2008 年国家海洋技术中心提出“大管岛”项目，旨在建立风能、太阳能、波浪能三能互补的电力系统为岛上提供电力资源[14]。2015 年习近平总书记在国际气候会议上提出：我国将于 2030 年达到最高二氧化碳排放量，与 2005 年相比，森林蓄积量已增加近 45 亿立方米[15]。2017 年，《海洋可再生能源发展“十三五”规划》明确提出，要大力推进我国海洋能工程化应用，加强海洋能发展与“一带一路”建设相融合[16]。根据国家发改委、国家能源局印发的《能源生产和消费革命战略（2019-2030 年）》目标，到 2020 年，清洁能源成为能源增量主体，能源结构调整取得明显进展，非化石能源占比 15%[17,18]。国家政策的支持以及能源战略中心的转移极大地推动了我国海洋能发电技术的深入研究，对于我国发展低碳经济、实现节能减排以及应对气候变化意义重大。

1.2 风、浪能发电研究现状

近年来，清洁可再生能源的使用越来越受到人们的关注和欢迎，开发利用海洋能进行供电已逐步成为一种趋势[19]，并将在未来社会发展中扮演重要的角色。

海上风能发电因其稳定性良好以及发电功率高等特点在世界各地快速发展。

英法德等欧洲国家是世界上主要海上风电场的国家[20]，但是目前主要针对近岸、近海风能资源的开发利用。我国自 2004 年第一个海上风电场开始，大力发展海上风电[21]，国内专家学者也提出了众多海上风力发电装置。张如前[22]提出了一种新型储能海上风力发电系统，结构简单，应用前景较好；李海斌[23]、吴振鹏等[24]设计了不同类型的海上风力发电装置，但是只适用于近海；韩斌[25]提出了一种海上柔性风力发电技术，但是实施困难，对环境要求较高；冯仁超[26]设计了一种既能风力发电又能吹风的装置，提高了发电装置风扇的利用率，但是更适用于居民使用，不适宜在海上大面积发电。

波浪能在海洋能中占比最大[27]，因此高效开发利用波浪能进行发电成为世界各国的研究热点。波浪能发电装置主要由波浪能捕获系统、能量传递系统以及发电系统组成，而波浪能捕获系统作为波浪能发电装置的核心系统有着至关重要的作用[28]。日本“Mighty Whale”波浪能发电装置[29,30]采用振荡水柱式波浪能捕获技术，但是该技术对空气透平依赖度较高且转换效率低；英国“阿基米德”波浪能发电装置[31-33]利用浮筒在波浪下的起伏运动将波浪能转换为机械能，但是该装置适用于近岸；美国“Power buoy”波浪能发电装置[34]利用浮体在波浪力的作用下作垂荡运动采集波浪能，但是存在单机功率低、运动不稳定等弊端；英国“牡蛎号”波浪能发电装置[35,36]利用摆板在波浪的推动下做往复摆动，将波浪能转换为液压能，但是该装置同样只适用于近海岸；瑞典乌普萨拉直线电机 L9 浮子装置、瑞典 IPS 浮子装置、加拿大 Aqua Buoy、荷兰阿基米德波浪发电装置（AWS）[37]等采用振荡浮子捕获波浪能，能量转换率高，因此振荡浮子式具有良好的发展前景[38]。我国对于波浪能发电装置的研发进展较快，但目前大多处于实验测试阶段。2012 年，国家海洋技术中心研制的浮力摆式波能利用装置在大管岛运行试验，山东大学研制的漂浮式液压发电装置在山东省内进行测试，积累了一定的试验经验和理论数据[39]；2014 年，中国海洋大学研制的波浪能发电装置在青岛沙子口海域进行测试，同样证明振荡浮子式发电装置可以满足电能持续输出，同期“海灵”号振荡浮子式发电装置在青岛海域投放，在海上运行有效时间超过一年，具有良好的可靠性[40]。

风能与波浪能具有良好的同期性，将风能与波浪能互补利用，可以有效解决单一海洋能源发电不稳定的问题，是一种非常高效且具有广阔前景的海洋能利用形式。Peiffer[41]提出了 WindFloat 浮式风机与振荡水柱式波能装置结合的发电方式。Muliawan 等[42]提出将 Spar 类型的浮式风机与振荡浮子式波能装置结合进行发电；李恒屹等[43]提出了一种风能和波浪能一体化发电系统；柳博瀚等[44]设计了一种同时利用风能、波浪能、海流能三种不同能源的全新海洋能源发电装置；刘圣冠等[45]提出了一种能够综合利用风能、波浪能等多种能源的可迁移多能源供应系统。这些装置将风能与波浪综合利用，具有广阔的应用前景。

综上，利用海洋能发电已成为主要海洋国家的发展战略，但是目前大多装备研发还停留在近海区域。单一风能、波浪能发电装置存在能量利用率不高、电能无法持续输出等问题，综合利用多种能量进行发电成为未来的发展趋势。我国对海洋能发电装置的研发开展了很多工作，并积累了一定经验，但目前仍处于实验测试阶段，未大规模应用。

1.3 研究目的及意义

针对目前远海海洋能资源利用不足、单一能量发电装置运行不稳定等问题，同时结合振荡浮子能量转换效率高的优势，设计了一种新型半潜式风浪一体发电装置。该装置采用半潜式结构，可以适应远海较恶劣海况，综合利用海上风能、波浪能，可以保证电能的持续输出，同时合理开发了“海上生明月”娱乐功能。本设计集发电、观景于一身，为我国海上风、浪能混合发电装置的研发提供了新的方案和思路。

1.4 研究内容与技术路线

1.4.1 主要研究内容

文献调研。调研了大量关于海上风力发电、波浪能发电、风浪能混合发电装置的设计思路，明确了目前海洋能发电领域的不足与发展趋势，为本次装置设计提供了思路与参考。

装备设计。在调研的基础上设计了一种新型半潜式风浪一体发电装置，利用 SolidWorks、3D Max、CorelDRAW 软件展示了装置各个部分的结构，并对其设计原则、设计方案、技术原理、工艺流程以及防腐系统进行了详细说明。

可行性分析。简要分析了浮子自由振荡以及与连接部位铰接在一起时的水动力性能；分析了平台、振荡浮子受到的各种载荷，并利用 ANSYS 软件对本装置主体：平台结构、风力发电机与振荡浮子进行风浪流载荷下的受力模拟，验证其抗风浪能力；通过对实体模型进行风浪发电实验，测试发电性能，验证其实施可行性。

应用前景及经济效益评价。通过分析海洋能发电现状，结合本装置的结构特点与模拟结果，评价了本装置的应用前景和经济效益。

1.4.2 技术路线

本文采用的技术路线如图 1.1 所示。

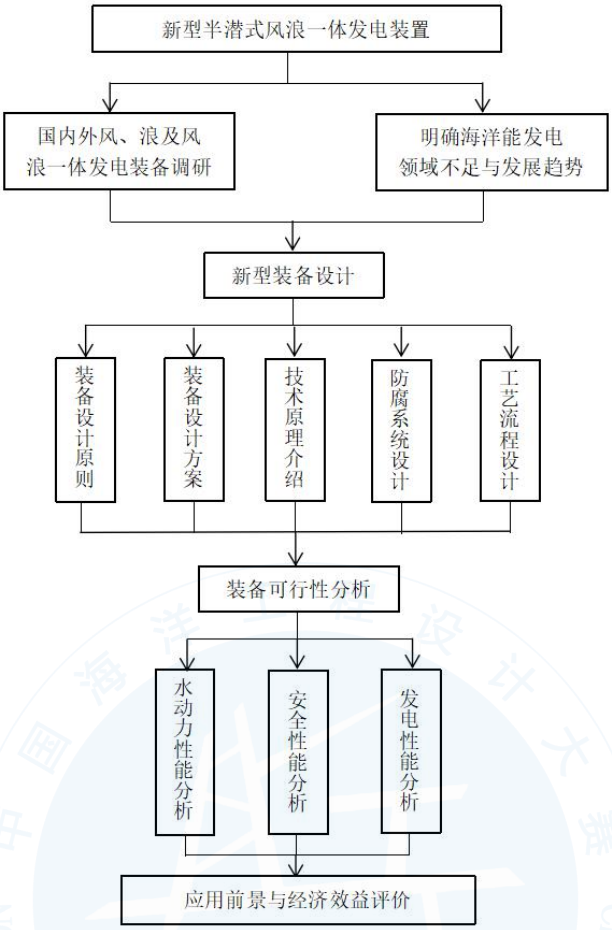

新型半潜式风浪一体发电装置
国内外风、浪及风浪一体发电装备调研
明确海洋能发电领域不足与发展趋势
新型装备设计
装备设计原则
装备设计方案
技术原理介绍
防腐系统设计
工艺流程设计
装备可行性分析
水动力性能分析
安全性能分析
发电性能分析
应用前景与经济效益评价

图 1.1 技术路线图

第 2 章 装备设计

2.1 设计原则

目前各国主要是利用近岸海域海洋能进行发电，而关于远海海洋能发电技术的研究较少。前文通过调研大量海上风、浪及其联合发电技术，发现存在能量利用率低、成本高、运行不稳定等弊端，本次提出的一种新型半潜式风浪一体发电装置，在设计过程中，遵循以下原则：

（1）适应性强。能适应远海较恶劣海况，具有良好的稳定性。

（2）高效平稳。综合利用风能与波浪能，提高能量利用率和发电效率，运行情况安全平稳。

（3）简单易行。结构简单，便于制造、移动、安装与维修。

（4）功能多样。在发电这一基本功能之外，合理开发娱乐观景功能。

2.2 设计方案

本设计平台甲板为一圆环状，上面设置 3 台风力发电机、6 个振荡浮子发电系统，甲板中心安装 1 个巨型夜光球，甲板下部设置 6 个胶囊状浮体，甲板周围设置 3 个锚泊系统。

模型整体构造如图 2.1 所示。

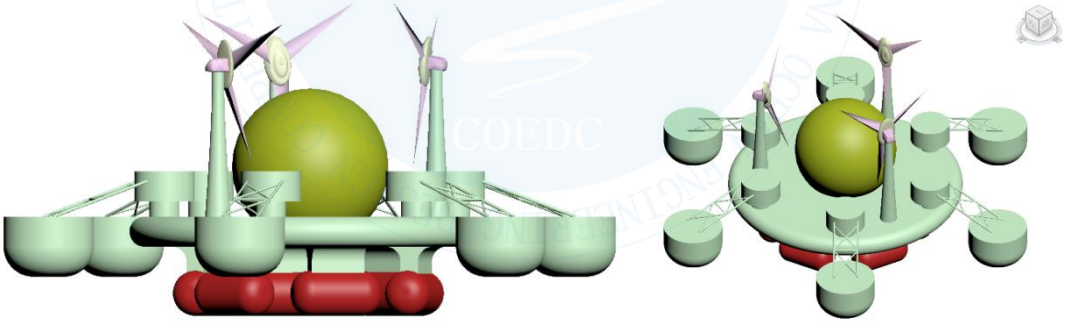


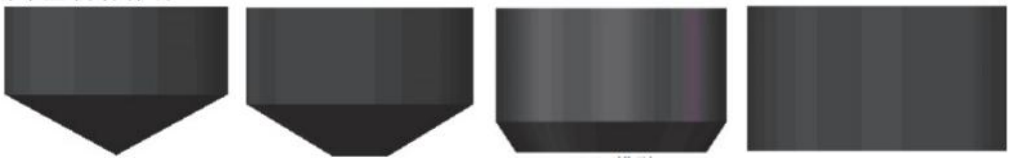
图 2.1 模型整体构造示意图

2.2.1 振荡浮子设计

研究表明，振荡浮子的外形结构（如图 2.2 所示）对于装置的波浪能采集效率有较大影响，因此采用合适的浮子结构能够有效提升装置的整体效率[46]。

对于波浪频率较高的海域，增加浮子直径，采用圆锥形浮子更有利于浮子捕获波浪能，而圆柱形浮子则适合于波浪频率较低的海域[47]。

实验室造波频率稳定且较低，因此本次装置设计采用式样 3 所示的浮子外形。



式样 1　　式样 2　　式样 3　　式样 4

图 2.2 浮子不同外形示意图

本设备采用 6 个振荡浮子，总体上按六边形均匀分布，如图 2.3 所示。浮子之间夹角为 60 度，每个浮子距离平台中心 45m。浮子的主要尺寸参数如表 2.1 所示。

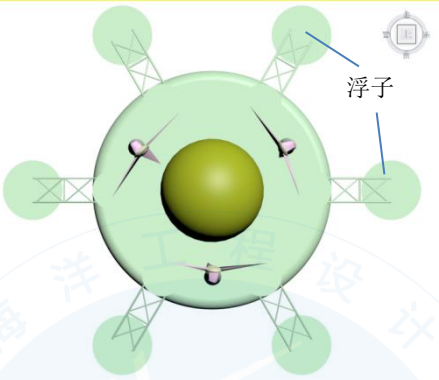


图 2.3 浮子相对位置示意图

表 2.1 浮子主要尺寸参数

名称	参数
直径	7.6m
总高度	3.8m
圆柱部分高度	2.8m
倒圆台下底面直径	1.0m

2.2.2 风力发电机设计

本设备安装 3 台海上风力发电机组，风机整体上按照三角形排布，风力发电机之间的夹角为 120 度，每台发电机组距离平台中心 23m。主要参数如表 2.2 所示。

表 2.2 风力发电机主要技术参数

部件	数值
额定功率	5000kW
轮毂高度	48m
额定风速	13m/s
极端风速	德国船级社海上I级风场要求
预期寿命	20 年
叶片长度	32m

2.2.3 浮体设计

本设备设置 6 个胶囊状浮体，整体上按照六边形排布，如图 2.4 中红色部位所示。每个浮体直径 3m，长度为 8m。

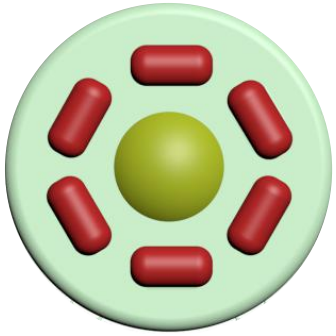


图 2.4 浮体相对位置示意图

2.2.4 巨型夜光球设计

本设备在平台中心部位安装一个巨型夜光球，用于观景与照明。球体直径为 26m，采用有机荧光材料, 模拟月球发光效果，如图 2.5 中黄色球体。

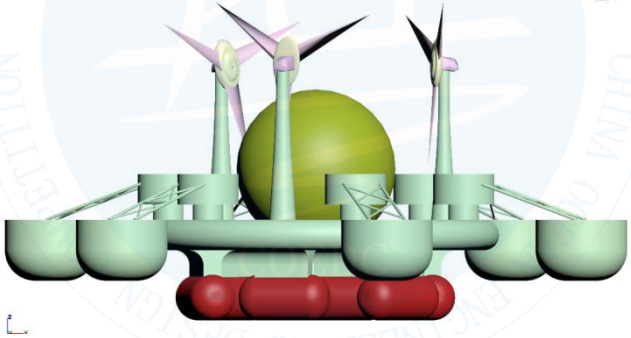


图 2.5 巨型夜光球效果图

2.2.5 平台主体设计

本设备平台主体采用圆环状，具体设计参数如表 2.3 所示。

表 2.3 平台主体设计参数

名称	参数
外圆直径	60m
内圆直径	16m
主体型深	6.4m
主体吃水	3.6m
作业潜深	7m

2.3 技术原理

2.3.1 振荡浮子捕获能量发电原理

波浪能发电主要采用波浪能—机械能—电能的转换方式。浮子直接与海水接触，随波浪起伏做垂直运动，将波浪能转换为浮子所持有的机械能；浮子的运动带动中间的机械传动装置运动，机械传动装置除了起到增速以及传递能量的作用外，还可以将浮体的往复运动转换为单向的旋转运动；发电机内的定子与转子在机械传动装置传递过来的机械能的作用下，切割磁感线，成功将机械能转换为电能。

2.3.2 风力发电原理

风力发电机由机头、转体、尾翼、叶片等部分组成。风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升；尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能；转体使机头灵活地转动，实现尾翼调整方向。机头内的转子是永磁体，定子绕组旋转切割磁感线从而产生电能。

2.4 防腐系统设计

2.4.1 外部防腐

本装备划分为 3 个腐蚀区域，即大气区、飞溅区和全浸区。大气区是指飞溅区以上的部分，金属构件组合在一起时应采用密封焊接，尽量避免采用容易产生大气腐蚀的结构形式。对钢结构，采用高性能防腐蚀涂料。飞溅区由于受潮汐、风和波浪影响，构件干湿交替，通常需要增加钢的壁厚，并采用高性能防腐涂料。全浸区指从飞溅区向下包括泥线以下的区域，腐蚀控制采用阴极保护防腐蚀措施。

2.4.2 涂层防腐

由于海洋大气腐蚀性较强，所以应使用高性能防腐蚀涂料。涂层系统包括底漆、中间涂层和面涂层。

2.4.3 阴极保护系统

牺牲阳极系统具有长期保护、安全、管理简便等特点，装备全浸区采用牺牲阳极系统，为了使阴极保护系统的保护效果更好，装备下水后应尽快达到保护电位。根据规范及经验，推荐平均保护电流密度如下：

表 2.4 电流密度表

位置	涂层部分	裸钢部分
电流密度	~20 mA/m^2	~55 mA/m^2

2.5 装备工艺流程设计

本装备主要包括平台主体、浮体结构、上层建筑、风力电机、振荡浮子、巨型夜光球等部位，根据本装备的工作特点和运行条件，设计了如下工艺流程。

（1）根据前期风、浪观测资料，确定装备投放的目标海域。

（2）在船坞内按照设计方案安装 6 个振荡浮子及其附属结构。

（3）将振荡浮子升起，使其位于平台上方，利用平台配备的推进系统航行至指定海域。

（4）平台自航同时，利用运输船将风力发电机组、巨型夜光球、建筑模块等一并运送到指定海域等待安装。

（5）平台和运输船到达后，将运输船上的设备卸下并安装在平台上。

（6）安装完成后测试各部分功能是否正常，运输船返回。

（7）在浮体内注入海水使得平台主体下沉至预设深度，按照相关操作规范下放重力锚。

（8）放下振荡浮子使其处于自由漂浮状态。

（9）装备开始运行。

第 3 章 可行性分析

3.1 水动力性能分析

由于本装置通过振荡浮子的上下运动来捕获波浪能，其他部位则处于相对静止状态，因此这里主要分析浮子自由振荡及与连接部位铰接在一起时的水动力性能。

浮子在波浪作用下的振荡方向主要为垂直方向[47]，因此以浮子在 Z 方向上的运动响应为主要研究对象，发电装置对浮子的约束使其仅做单自由度垂荡运动。因此浮子在流体中的频域运动方程[48]可简化为：

$$ma + \rho gSx = F_k + F_d + F_r + F_{PTO} \tag{3.1}$$

式中：m—浮子质量；a—浮子加速度；ρ—海水密度；g—重力加速度；

S—浮子与海水接触面积；x—浮子垂直位移；F_k—弗洛德-克雷洛夫力；

F_d—绕射力；F_r—辐射力；F_{PTO}—能量输出负载。

假设能量输出负载为线性阻尼器与线性弹簧组成：

$$F_{PTO} = -C\dot{x} - kx \tag{3.2}$$

假设波浪频率为ω，并将式 3.2 代入式 3.1，得：

$$x = \frac{F_d}{-\omega^2(m+A) + i\omega(B+C) + \rho gS + K} \tag{3.3}$$

式中：B—辐射阻尼系数；C—阻尼器系数；K—线性弹簧刚度。

由式 3.3 可以看出，振荡浮子的垂向位移主要受绕射力、浮子与水接触面积、能量输出负载、波浪频率、辐射阻尼系数等的影响。

Jefferys 基于傅里叶变换对振荡浮子形波浪能发电装置进行了时域分析，并推广了针对于船舶的水动力学理论，得出对于深沉式的振荡浮子，使用时域分析方法的运动方程为：

$$(m + A(\infty))\ddot{x}(t) + \rho gSx(t) + \int_{-\infty}^{T} L(T-\tau)\ddot{x}(\tau)d\tau = F_d(t) + F_{PTO} \tag{3.4}$$

式中：$L(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{B(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega$。

利用 RAO 来表示浮子在波浪中自由运动状态的运动响应[49]：

$$RAO = \frac{\eta_i}{\xi} \tag{3.5}$$

式中：η_i—浮子第 i 个自由度幅值；ξ—波浪高度幅值。

3.2 安全性能分析

本装置在风、波浪及锚泊等外部载荷的作用下进行运动，在计算各种载荷后将各载荷矢量相加，可得到作用在平台、振荡浮子上的合外力与合外力矩。将平台、振荡浮子受到的合外力 F_S、F_W 分解为：

$$F_S = F_{WAVA-S} + F_{WIND} + F_{MOOR} + G_S + F_{PTO-S} \tag{3.6}$$

$$F_W = F_{WAVE-W} + G_W + F_{PTO-W} \tag{3.7}$$

式中：G_S—平台重力；G_W—振荡浮子重力；F_{WAVE-S}—平台受到的波浪载荷；F_{WAVE-W}—振荡浮子受到的波浪载荷；F_{MOOR}—锚泊力；F_{WIND}—风载荷；F_{PTO-S}、F_{PTO-W} 平台、振荡浮子阻尼力。

对于锚泊力 F_{MOOR}，将锚泊线简化为不同刚度系数 K 的非线性弹簧：

$$F_{MOOR} = -K \cdot \Delta X_f \tag{3.8}$$

式中：K—刚度系数；ΔX_f—锚泊线长度变化量。

对于风载荷 F_{WIND}，基于 Statoil 对浮式风机风载荷的处理方法，将风载荷简化为作用在风机转子中心处的水平推力。

$$F_{WIND} = 0.5\rho_a A u_{rel}^2 C_T(u_{rel}) \tag{3.9}$$

式中：ρ_a—空气密度；A—转子扫掠面积；u_{rel}—转子中心处相对风速；$C_T(u_{rel})$—推力系数函数。

对于阻尼力 F_{PTO}，振荡浮子在波浪作用下的运动受到其连接部位对它的阻力，根据装备的整体结构可知，平台与振荡浮子受到的阻尼力为一对相互作用力。

$$F_{PTO-W} = -B_{PTO}u_b - K_{PTO}x_b \tag{3.10}$$

$$F_{PTO-S} = -F_{PTO-W} \tag{3.11}$$

3.3 力学仿真模拟

通过利用 ANSYS 模拟软件对模型分别进行 3 个工况的受力分析，评价各个工况下模型的安全性。

3.3.1 模型导入与网格划分

为减小模型运算量，在将模型导入 ANSYS 之前去掉风机叶片，在风力发电机基座最高处添加作用力，等效模拟风力作用于叶片时的受力状态。

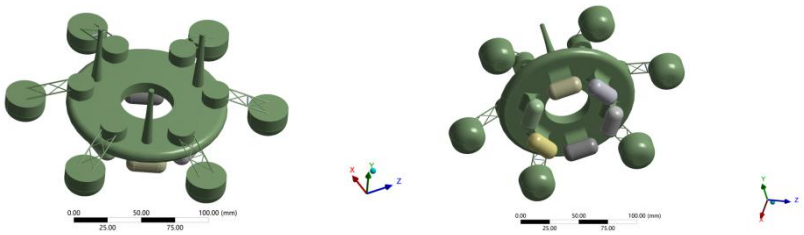


图 3.1 导入模型图

采用全局网格控制方法，指定网格尺寸为 2mm，网格平均质量为 0.8267，大于 0.7，满足仿真分析对网格的基本要求，仿真结果比较可靠。

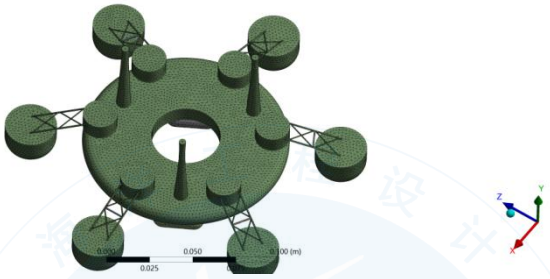


图 3.2 网格加密图

3.3.2 添加条件约束与力学模拟

平台整体采用结构钢材料，浮子采用聚丙乙烯材料，添加三种不同工况参数。

（1）常见工况：平台以下浸水，水压梯度 2.325MPa/m，每个叶轮处作用力 50N。

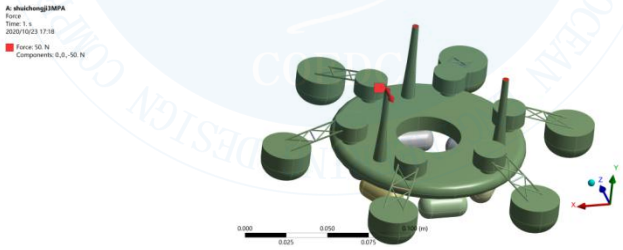


图 3.3 风力作用方向示意图

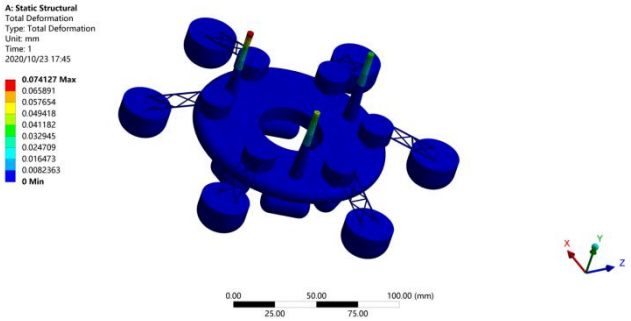


图 3.4 总变形图

图 3.4 表明最大变形量是 0.074127mm，出现在风力发电机基座上部。由于基

座采用结构钢，可认为该变形量对结构的影响甚微。

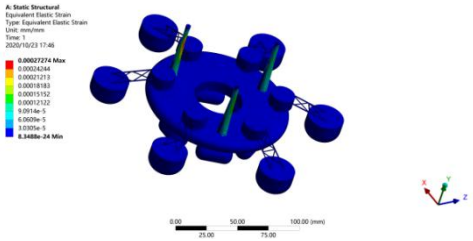


图 3.5 等效应变图

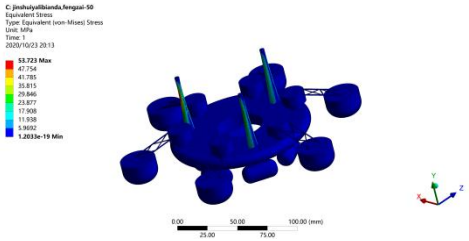


图 3.6 等效应力图

图 3.5 与 3.6 表明最大等效应变为 0.00027274mm/mm，最大等效应力为 53.723MPa，均出现在基座上部。由于基座采用结构钢，其屈服强度为 245MPa，抗拉强度为 410MPa，远小于结构钢的强度极限，结构稳定。

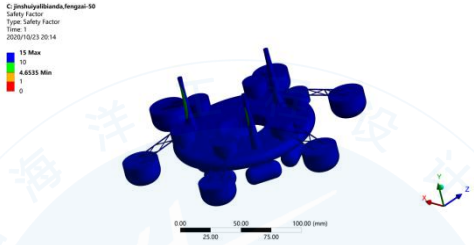


图 3.7 安全系数图

由图 3.7 看出，模拟结果表明该装置在平台以下浸水，水压梯度 2.325MPa/m，每个风扇处作用力 50N 的工况下作业极其安全。

（2）平台以下浸水，水压梯度 2.325MPa/m，每个风扇处作用 50N，并考虑有 2MPa 压力作用在平台上。

图 3.8 表明最大变形量是 0.14827mm，出现在风力发电机基座上部。由于基座采用结构钢，可认为该变形量不足以影响结构的稳定性。

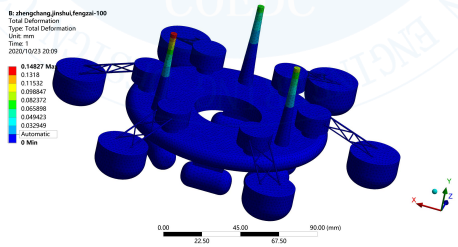


图 3.8 总变形图

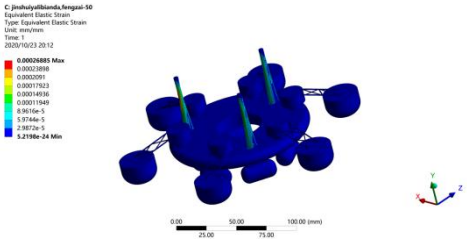


图 3.9 等效应变图

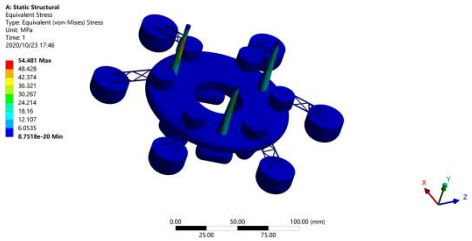


图 3.10 等效应力图

模拟结果表明最大等效应变为 0.00026885mm/mm，最大等效应力为

54.481MPa，均出现在基座上部，由于远小于结构钢的强度极限，认为结构稳定。

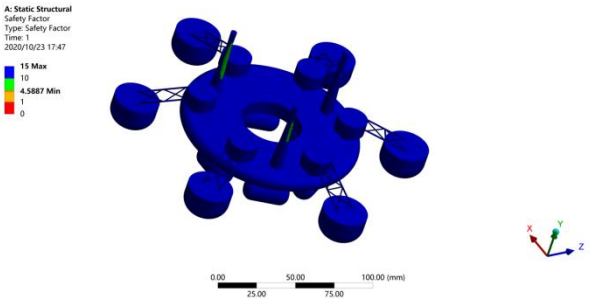


图 3.11 安全系数图

图 3.11 表明该装置在平台以下浸水，水压梯度 2.325MPa/m，每个风扇处作用 50N，并考虑有 2MPa 压力作用在平台上的工况下安全。

（3）平台以下浸水，水压梯度 20MPa/m，每个风扇处作用 100N，并考虑有 2MPA 压力作用在平台上。

图 3.12 表明最大变形量是 0.14827mm，出现在风力发电机基座上部。由于基座采用结构钢，可认为该变形量不足以影响结构的稳定性。

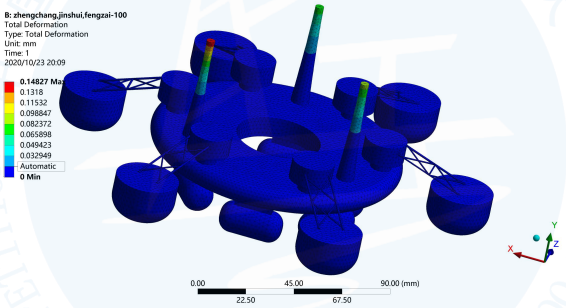


图 3.12 总变形图

图 3.13 与 3.14 表明最大等效应变为 0.0005377mm/mm，最大等效应力为 107.45MPa，均出现在基座上部，由于远小于结构钢的强度极限，认为结构稳定。

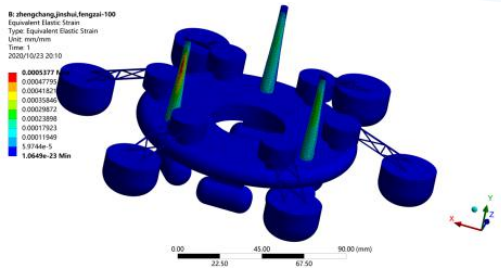


图 3.13 等效应变图

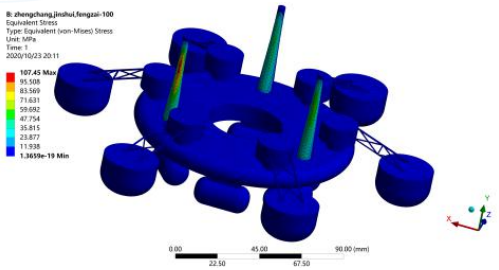


图 3.14 等效应力图

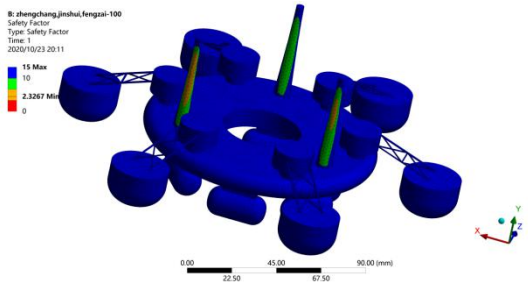


图 3.15 安全系数图

图3.15表明该装置在平台以下浸水，水压梯度20MPa/m，每个风扇处作用100N，并考虑有 2MPa 压力作用在平台上的工况下安全。

第 4 章 发电效率

本设备安装 3 台风力发电机，6 台波浪能发电机，每台发电机额定功率为 1W；实验采用的小灯泡额定功率为 3W。本设备选用的电机扇叶灯泡规格如下图 4.1 至图 4.3 所示。

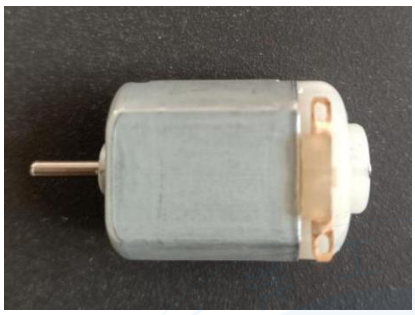


图 4.1 电机示意图

图 4.2 风车扇叶示意图

图 4.3 灯泡示意图

已知发电效率计算公式如下：

$$\eta = P_1 / P_2 \times 100\% \tag{4.1}$$

式中，P_1—实际功率；

P_2—装机功率。

在学校海油实验室将模型下水，造波参数如图 4.4 所示：

图 4.4 造波参数

模型下水之后，小灯泡可以稳定发光。经电流表测量，当小灯泡稳定发光时电流为 0.5A；经电压表测量，当小灯泡稳定发光时电压为 6V，所以发电功率为 3W。通过式 4.1 计算可得本设备发电效率为 50%。

第 5 章 应用前景与经济效益评价

5.1 应用前景

波浪能和风能因其可持续性、环保性等特点，具有很大的开发利用前景。近年来，海洋能发电技术成为世界新能源发展的一个主流方向[50]，但目前发电装置大多针对近海海洋能的利用，而对于利用远海海洋能进行发电的装置则研究较少。针对波浪能和风能功率密度低的特点，综合开发利用风能和波浪能可优化我国能源布局[51]。因此，如何成功设计适合于远海的风浪互补发电装置，对缓解我国能源供应短缺、提高供电可靠性等方面具有非常积极的意义。

本设计综合利用波浪能和风能清洁能源，将半潜式结构应用于发电装备，使其可适应远海较恶劣海况；风力发电机和振荡浮子在平台上交叉均匀分布，有效避免了平台受力不均；以“适应性强、高效平稳、简单易行、功能多样”为设计原则，集发电、观景于一体，为远海海洋能发电装置的研究提供了一种新的思路。通过受力分析和发电性能测试实验，验证了模型具有良好的可实施性，因此本设计具有广阔的应用前景。

5.2 经济效益评价

21 世纪是海洋资源开发的新世纪，海洋装备行业也进入快速发展时期。我国海域面积广阔，海洋能发电市场规模将不断扩大。

本设计定位远海海洋能发电，可以为同海域生产作业的海洋平台提供电力资源，减少了海底电缆的使用量。本设计合理开发了“海上生明月”观景功能，平台中间巨型夜光球在白天吸收存储光能，晚上发出黄色荧光不仅可以为周边海域提供照明，同时能够带动海边城市旅游业发展，增加当地收入。本设计可以自身独立作业，可以通过集群变电站对多台装备进行统一操作，有效减少人力、物力财力。本设计结构相对简单，适合模块化设计和建造，缩短了建造工期，降低了平台建造成本。

丰富的风、浪可再生能源吸引着世界各国研究人员的目光[52]。本设计凭借自身独特的优势，将极大地推动我国远海海洋能发电技术的发展，为我国创造巨大的经济效益。

第 6 章 创新点

相比于其他海上风、浪发电设备，本装备在设计过程中，具有如下创新点：

（1）设计定位。针对目前远海海洋能发电装置研究较少的局面，本装备在设计时定位于远海海洋能的开发利用。

（2）半潜结构。将半潜式结构应用于发电装备，使其可适应远海较恶劣海况。

（3）机组分布。3 台风力发电机与 6 个振荡浮子式波浪能发电系统在平台上交叉均匀布置，平台受力更均匀。

（4）娱乐功能。探索性提出“海上生明月”设计理念，平台中心的巨型夜光球在白天吸收光能，晚上发出黄色荧光，不仅可以为周边海域提供照明，远远望去犹如一轮满月浮于海面，更增添了一份诗意与美好。

（5）电力集输。装备自身独立，可以通过集群变电站对多台装备进行统一操作，并且在变电站控制下将电能汇聚起来进行集输。

第 7 章 总结

通过对风、浪能发电装备的调研分析，明确了目前该领域存在的不足与今后的发展方向。本文设计了一种新型半潜式风浪一体发电装置，并开发了“海上生明月”娱乐观景功能，结合 SolidWorks、CorelDRAW、3D Max 软件给出了较为详细的设计方案、技术原理以及工艺流程。利用 ANSYS 软件对模型进行了风浪流载荷下的受力分析，验证了模型具有良好的抗风浪能力。模型在实验室条件下发电稳定，发电效率达到 50%。由于时间和实验条件受限，研究工作存在以下不足：

（1）本装置是在实验室规则波的条件进行发电，而实际波浪是随机的、不可预测的，本次未进行不规则波的发电实验。

（2）本次设计注重方法创新，未给出真实海上发电装备各部分应选用的材料，同时也只是给出了装备主体的尺寸。

（3）模型在实验水槽中运行平稳，并采用 ANSYS 软件对平台主体在风浪流载荷下的受力进行了分析，但装备实施的可行性还需要结合多种算法进行综合评价才能确定。

致谢

时间犹如白驹过隙，但是这一段时间的努力让我们收获了很多。小组各成员之间相互协作，分工明确，为着相同的目标不懈拼搏，不仅收获了相关专业知识，同时还收获了友谊。

在报告完成之际，首先感谢海洋工程设计大赛组委会以及所有幕后工作人员，在疫情期间，能够有条不紊地组织这项赛事，保障比赛的顺利进行，让我们所有海洋工程爱好者能够有机会展示自己的才华，享受知识的盛宴，谢谢你们。

其次，向我们的指导教师李吉表示崇高的敬意与衷心的感谢。在生活中，老师无微不至的关怀让我们倍感温暖。在学习上，从设计思路到软件选择，老师都给予了我们细心的指导和无私的帮助。老师宽广的眼界、渊博的知识、敏锐的思维、别具匠心的创新精神、严瑾的治学态度和不懈探索的优良作风给我们留下了深刻的印象，让我们受益良多，再次向李吉老师表示深深的谢意。

感谢吕磊同学对我们的支持与帮助。通过比赛，我们在共同学习中所建立起来的深厚情谊，是我们人生中的宝贵财富。

最后，特别感谢本次比赛的评审教授、专家老师们，感谢您们在百忙之中抽出时间评审作品，谢谢您们。

参考文献

[1] 任方言.波浪能发电模拟试验台设计及发电实验系统研究[D]. 山东大学,2020.

[2] 邓智雯.浪流耦合发电装置水动力性能研究[D]. 上海海洋大学,2018.

[3] 余志文.悬臂式振荡浮子波浪能捕获装置的优化设计[D]. 华北电力大学(北京),2018.

[4] 吴亚楠,吴国伟,武贺,汪小勇.海岛海洋能应用需求和发展建议探讨[J]. 海洋开发与管理.2017,(9):39-44.

[5] 程友良,武凯.我国海洋能开发利用与海洋生态环境保护[C]// 中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会,2014.

[6] G. D. Egbert, R. D. Ray. Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data[J]. Nature: International weekly journal of science, 2000,405(6788).

[7] 刘伟民,刘蕾,陈凤云,麻常雷,葛云征,彭景平.中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报,2020,38(14):27-39.

[8] 曹志伟.一种综合利用海洋能的无人平台初步设计分析[D]. 江苏科技大学,2019.

[9] 张增宝.振荡浮子式波浪能发电系统捕能功率预测与多目标优化[D]. 山东大学,2020.

[10] 周丙浩.纵摇浮子式波浪能转换装置研究[D]. 哈尔滨工程大学,2018.

[11] 张多, 陈绍艳, 王芳,等. 英国潮流能产业发展现状及对我国的启示[C]// 第四届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛. 2015.

[12] 王项南,贾宁,夏海南,等.我国海洋能发电装置的测试和评价[J]. 海洋开发与管理,2018,35(06):87-90.

[13] 中国科学院可持续发展战略研究组.2006 中国可持续发展战略报告:建设资源节约型和环境友好型社会[M]. 科学出版社,2006.

[14] 熊焰,王海峰,崔琳,etal.大管岛多能互补独立发电系统的发电量设计[J]. 海洋技术,2009,28(1):101-101.

[15] 习近平．携手构建合作共赢、公平合理的气候变化治理机制[N]. 人民日报，2015-12-01(002).

[16] 国家海洋局.《海洋可再生能源发展“十三五”规划》[EB/OL]. http://www.cgs.gov.cn/gzdt/dzhy/201701/t20170117_421008.html.

[17] 王波.首个国家能源革命战略发布[J]. 能源研究与信息,2017(33):124.

[18] 程路,蒋莉萍,白建华,等.实现 2020 年 15%非化石能源目标路径研究[J]. 中国能

源,2010(08):9-12.
[19] 贺彤彤.锚泊浮台波浪能供电装置设计优化与水动力性能研究[D]. 2019.
[20] 陈玲娜.海上风电的发展现状和前景分析[J]. 中国高新科技,2020(13):75-76.
[21] 舟丹.我国海上风电发展目标[J]. 中外能源,2019,v.24(11):95-95.
[22] 张如前.一种新型储能海上风力发电系统[P]. 江苏省：CN211370618U,2020-08-28.
[23] 李海斌.一种海上风力发电装置[P]. 江苏省：CN211202204U,2020-08-07.
[24] 吴振鹏,李莉,李海朋,王大尉.一种海洋工程用海上风力发电装置[P]. 山东省：CN211174469U,2020-08-04.
[25] 韩斌.海上柔性风力发电技术[P]. 湖北省：CN111102137A,2020-05-05.
[26] 冯仁超.一种既能风力发电又能吹风的装置[P]. 浙江省：CN111594387A,2020-08-28.
[27] 欧阳锡钰.波能测试区波浪运动数学模型的研究[D]. 2017.
[28] 杨名.基于最优能量捕获的垂荡浮子式波浪发电装置研究[D]. 2019.
[29] António F. O. Falcão, JoãoC. C. Henriques. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review[J]. Renewable Energy, 2016,85.
[30] Bijun Wu, Tianxiang Chen, Jiaqiang Jiang, GangLi, Yunqiu Zhang, Yin Ye. Economic assessment of wave power boat based on the performance of “Mighty Whale” and BBDB[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,81.
[31] FALCAO A F O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010,14(3):899-918.
[32] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Modeling and control of AWS-based wave energy conversion system integrated into power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008,23(3):1196-1204.
[33] POLINDER H, MICHIELE C, GARDNER F. Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004,19(3):583-589.
[34] LEHMANN M, KARIMPOURA F,GOUDEYB C A, et al. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,74:1300-1313.
[35] ZHANG D H, LI W, LIN Y G, et al. An overview of hydraulic systems in wave energy application in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7):4522-4526.
[36] MCCABE A P, BRADSHAW A, MEADOWCROFT J A C, et al. Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006,31(2):141-151.
[37] 赵丽君.多点吸能浮子液压式波浪发电装置中液压系统的分析与试验[D]. 华

北电力大学,2012.
[38] 黄宇明.振荡浮子式波能装置水动力性能及优化控制[D]. 2019.
[39] 程波.海浪发电实验装置设计与研究[D]. 山东大学，2012.
[40] Y. Tang, P. Reed, K. van Werkhoven, T. Wagener. Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall‐runoff models using global sensitivity analysis[J]. Y. Tang; P. Reed; K. van Werkhoven; T. Wagener, 2007,43(6).
[41] PEIFFER A, RODDIER D, AUBAULT A. Design of a point absorber inside the WindFloat structure[C]// ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2011: 247-255.
[42] Made Jaya Muliawan, Madjid Karimirad, Torgeir Moan. Dynamic response and power performance of a combined Spar-type floating wind turbine and coaxial floating wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2013,50.
[43] 李恒屹,李玲玲,刘卫朋,周亚同,樊雪舰. 风能和海洋波浪能的一体化发电系统[P]. 天津市：CN211008943U,2020-07-14.
[44] 柳博瀚,新型海洋能综合利用发电平台设计科技创新与应用,2015(35):30-31.
[45] 刘圣冠.一种新型的海上浪风光综合发电船[J]. 海岸工程,2016(4):58-62.
[46] 蔡炳清.双浮体式振荡浮子波浪能捕获装置的研究[D]. 太原科技大学,2014.
[47] 胡缘,杨绍辉,何宏舟,陈沪,郑松根,张迪.半潜式多浮体波浪能发电装置的水动力性能分析[J]. 水力发电学报,2019,38(09):91-101.
[48] 马哲. 振荡浮子式波浪发电装置的水动力学特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
[49] 何光宇, 杨绍辉, 何宏舟, 等. 阵列式波浪能发电装置的水动力分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 118-124.
[50] 王琛,岳付昌,陈珉烁,等.基于波浪能和风能的多能发电系统建模及仿真分析[J]. 电气应用,2018,037(006):25-33.
[51] 张亚群,盛松伟,游亚戈,etal.波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. 新能源进展,2019,007(004):374-378.
[52] 王芳,葛清忠,宋士林.波浪能发电的研究现状与展望[C]// 第一届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛.2012.

团队编号：A20200119

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 11 月 17 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

目　录

作品简介 4

第 1 章 总论 5

1.1 研究目的 5

1.2 研究范围 5

1.2.1 风能 5

1.2.2 波浪能 6

1.2.3 潮汐能 7

1.2.4 温差能 8

1.2.5 盐差能 8

1.3 海上多能集成发电平台研究及发展现状 8

第 2 章 综合发电平台设计 12

2.1 平台尺寸 12

2.2 平台模块 14

2.2.1 发电模块 14

2.2.2 控制模块 14

2.2.3 定位模块 15

2.3 平台发电条件 15

2.4 平台发电设计 16

第 3 章 人工智能模块应用 17

3.1 单模型预测及智能优化 17

3.1.1 风力发电参数智能优化 17

3.1.2 太阳能发电参数智能优化 17

3.2 多模型协同发电 19

3.2.1 单发电系统供电、蓄电协同优化模型 19

3.2.2 多发电系统供电、蓄电协同模型 20

第 4 章 结构稳性计算与可靠性分析 23

4.1 稳定性计算 23

4.2 可靠性分析 24

4.2.1 风力发电叶片 24

4.2.2 海流发电叶片 25

4.2.3 波浪发电浮子 26

4.2.4 平台特殊连接处的分析 27

第 5 章 发电效率计算 28

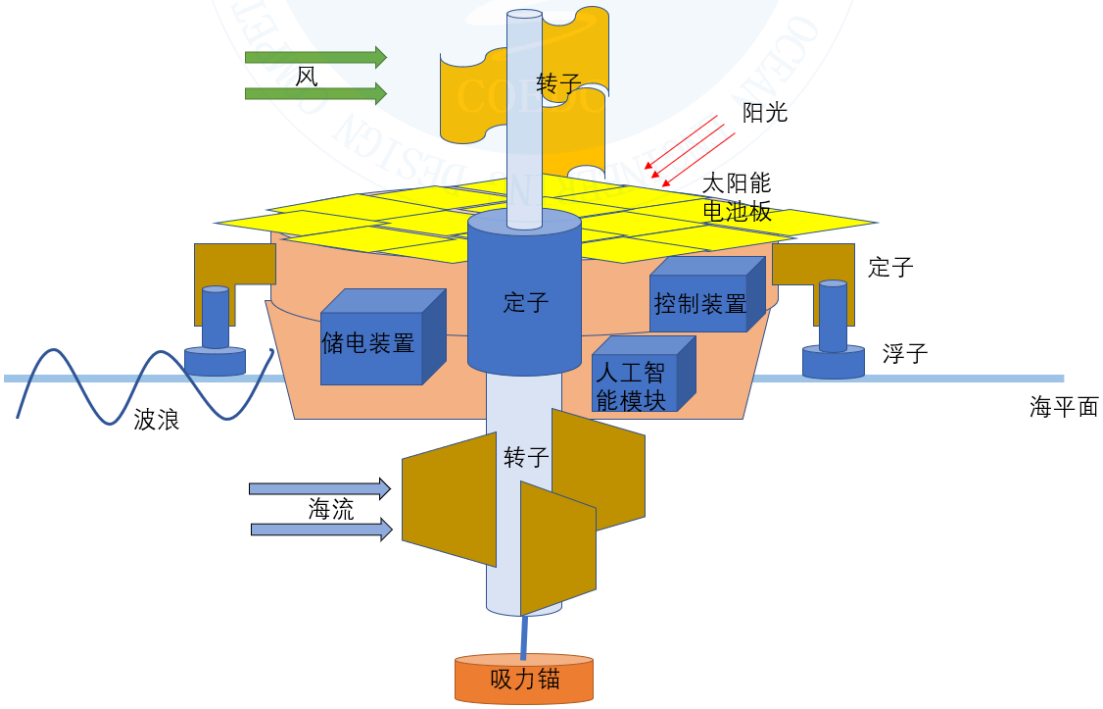
5.1 风力发电效率计算 28

第 6 章 结论及展望 29
参考文献 30

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

作品简介

本平台名称为海上人工智能发电平台 OAIPGP（Offshore Artificial Intelligence Power Generation Platform）。设计为海上多功能综合发电平台，综合利用了海上风能、太阳能、波浪能、海流能四种主要的发电形式实现对海洋能源利用最大化。创新点为平台可移动，并利用人工智能方法，结合各种海洋能源独有的特点进行海上风能、太阳能等能源优化筛选作为平台发电的主要动力，（比如夜间或阴天无法进行太阳能发电，就可以利用人工智能感光模块进行判断并关闭太阳能发电模块，提高电池板使用寿命）。本平台设计尺寸为直径为 10m，高 2m 的圆柱平台作为上部组块，内部布置发电必须的模块。下部组块为圆台结构为主要浮体结构，上部台面直径为 10m，下部端面直径为 6m，圆台高 3m。实际制作尺寸:设计尺寸为 1：20。



OAIPGP 平台结构简图

第 1 章 总论

1.1 研究目的

为深入贯彻落实习近平总书记关于“关心海洋、认识海洋、经略海洋”的重要讲话精神，深入实施教育部“卓越工程师教育培养计划”。通过大赛推进海洋可再生能源的开发与利用，达到“学、赛、研”三者的相互促进，锻炼和提高学生的综合素质和专业知识水平，适应我国海洋能源工业可持续发展需要培养科技创新型、工程实践型的卓越海洋工程人才。

1.2 研究范围

主要针对海上可再生清洁能源的利用进行研究，结合海上附体结构物的利用，对海上风能、波浪能、潮汐能、太阳能等可再生能源进行电力转化，为陆地提供充足的电力资源。

1.2.1 风能

海上风能是海洋上空气流动所产生的动能。海面上各处受太阳辐射后，气温不同，因而引起各处气压的差异，在水平方向上空气由高压地区向低压地区流动，形成海风。据估算，全世界的风能总量约为 1300 亿 kW，中国的风能总量约为 10 亿 kW，多于陆上风能资源，具有广阔的应用前景。

海上风能的主要特点有：海面粗糙度小，海上障碍物少，风力更强，发电功率更大；海上风湍流更小，风机设备寿命更长；海上风机可以降低风塔高度，降低阴影效应；经济效益高；不占用土地等等。

图 1.1 海上风机

海上风电机组基础通常由塔头和支撑结构组成，其中塔头指的是风轮和机舱，支撑结构包括塔架、水下结构和地基三个部分。目前，实际应用的基础结构有单桩结构、重力结构、多状结构、浮力结构等等。其具体基本原理是通过传动系统将转子的旋转动力传送至发电机，即将风的动能转化为旋转的力去推动发电机，以产生电能。

1.2.2 波浪能

海洋波浪是由太阳能源转换而成的，因为太阳辐射的不均匀加热与地壳冷却及地球自转造成风，风吹过海面又形成波浪，波浪所产生的能量与风速成一定比例。波浪发电技术基本原理是通过波浪能转化装置，主要将波力转换为压缩空气，来驱动透平发电机，即将波浪能首先转换为液压能，然后再转化为电能[4-6]。

据估计，全球波浪发电的理论蕴藏量为 29500TWh/年。波浪发电的关键技术是中间转换装置，经过 20 世纪 70 年代对多种波浪能装置的实验室研究和 20 世纪 80 年代的实海况试验及应用示范研究，波浪发电技术已逐步接近实际应用化水平。下面是几种波浪能转化装置的主要形式[1]：

（1）振荡水柱式波浪能装置。该装置利用一个在与海水接触的密闭空间内，由于波浪造成水位的变化从而引起压强的变化，进而推动发电机的转动；在波浪力的作用下，气室下部的水柱在气室内做强迫振动，压缩气室内的空气反复通过喷嘴，将波浪能转化为空气的压能和动能。

（2）摆式波浪能转化装置。摆式波浪能转化装置是通过摆体在波浪力的作用下发生的前后或上下摆动，将波浪能转化为摆轴的动能。与摆轴相连的通常是液压装置，它将摆的动能转化为液力泵的动能，再带动发电机发电。摆式装置的转化效率较高，而且可以方便的与相位技术结合。

（3）聚波水库式波浪能转化装置。聚波水库装置利用喇叭形的收缩波道作为一级能量转化机构，波道与海联通的一面开口宽然后逐渐收缩通至贮水库。波浪在逐渐变窄的波道中，波高被不断放大，直至波峰越过边墙，将波浪能转化成势能贮存起来。

（4）振荡浮子式波浪能转化装置。振荡浮子式波浪能转化装置是在振荡水柱式装置基础上发展起来的波浪能发电装置。通常的岸式装置是用一个放在港中的浮子作为波浪能的吸收装置，然后将浮子吸收的能量通过一个放在岸上的机械或液压装置转化出去，用来驱动发电机发电。装置主要由浮子、连杆、液压传动机构、发电机和保护装置几部分组成；其可以克服振荡水柱式波浪能转化装置效率低下的缺点，同时要更容易建造，大大降低了建造难度和生产成本[7]。

图 1.2 在海中漂浮式振荡浮子波浪能发电装置

（5）鸭式波浪能转化装置。鸭式波浪能转化装置是一种通过缜密计算推理计算设计出的一种具有特殊外形的波浪能转化装置，其效率较高，但该装置的抗浪能力还有待进一步提高。

（6）筏式波浪能转化装置。筏式波浪能转化装置由铰链连接的筏体和液压系统组成，它顺浪向布置，筏体随波而动，将波浪能转化为筏体运动的机械能；然后驱动液压泵，将机械能转化为液压能，驱动液压电动机转动，转化为机械能，最后通过轴驱动电机发电，将旋转机械能转化为电能。该技术的优点主要体现在：筏体之间仅有角位移，即使在大浪环境下，位移也不会过大，抗浪性能较好；缺点是装置需顺浪向布置，单位功率下材料的用量比垂直浪向布置的装置大，可能会提高装置的生产成本[6-8]。

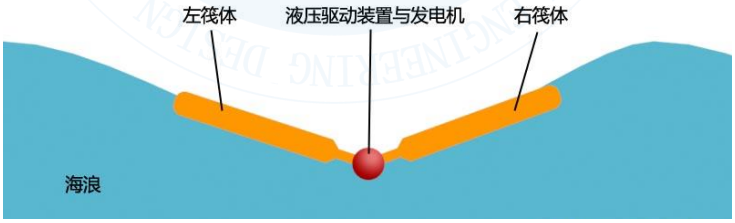


图 1.3 筏式波浪能装置示意图

1.2.3 潮汐能

潮汐是因为太阳、月亮作用于地球的万有引力与地球自转运动使得海洋水位形成高低变化的现象。潮汐发电技术基本原理是利用潮汐涨、落时潮位升、降与电站水库水位产生水位差，通流后推动水轮发电组进行发电。全世界仅有少数潮汐发电厂在运转，其中法国、中国、苏联与加拿大的潮汐电厂总容量合计约 263 百万瓦。

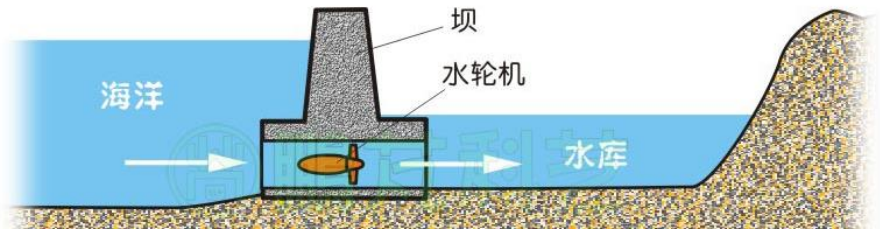


图 1.4 潮汐能发电原理示意图

1.2.4 温差能

温差能是指海洋表层海水与深层海水之间水温之差的热能，在部分海洋区域，由于海洋表层和深层吸收太阳辐射能量的不同，以及大洋环流的经向热量输送，从而形成了海水表层水温高，深层水温低的现象。温差发电目前处于试验和工程示范试验阶段，通常在热带地区才在利用温差发电方面具有一定的潜力。根据工质和流程的不同，海洋温差发电系统分为三种：闭式循环系统、开式闭式循环系统、混合式闭式循环系统[9]。

1.2.5 盐差能

盐差能是指海水和淡水之间或两种含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能，是以化学能形式出现的海洋能。根据国家海洋局 2015 年完成的我国近海海洋可再生能源资源统计，我国盐产能技术可开发量为 1131 万千瓦。

盐差能发电的原理，一般是利用浓溶液扩散到稀溶液时所释放出的能量；具体实现方式有主要有渗透压法、蒸汽压法、浓差电池法等，其中渗透压法最受重视。渗透压法，就是利用半透膜两侧的渗透压，将不同盐浓度的海水之间的化学电位差能转化为势能，使海水升高形成水位差，然后利用海水从高处流向低处时提供的能量来发电。

1.3 海上多能集成发电平台研究及发展现状

由于在诸多能源协同开发的过程中，不同能源系统彼此之间存在本质差异，能源捕获与利用往往都是单独设计、各自运行、闭环发展，相互之间联系缺少，由此会引发能源利用率低、供能不稳定等问题，因此如何加强多能互联、促进各个能源的能量耦合和协同作用，是目前研究的主要课题，海上多能集成发电平台的设计与建设便应运而生。海上多能集成发电技术主要在于将风、光、浪、流等能源的捕获、转换、发电和供电紧密融合到同一系统中，可以为不同海洋场景下的能源输入输出提供接口，是一种能够实现多能源的多级、高效利用的技术，因此已受到广大学者关注[11]。

施伟等人设计了一种基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统[1]，如图 1.5 所示，该系统在海洋中利用单桩式支撑结构建立了风能、振荡水柱式波浪能、水平轴潮流能系统于一体的集成系统，形成了一个整体的发电系统，这种新型多能集成发电系统可以提高单桩基础利用率并降低系统发电总成本，结构稳定合理，具有显著的技术效果；此外，他和其他学者还设计一种基于海上浮式平台的风能—波浪能联合发电装置及发电方法[2]，如图 1.6 所示，该装置包括风力发电机系统、漂浮式平台系统、波浪能发电系统和系泊系统，所述的风力发电机系统和波浪能发电系统安装在漂浮式平台系统，所述的系泊系统包括锚链和海床锚，锚链一端固连在漂浮式平台系统，另一端连接海床锚，并由海床锚和海床相连，该装置能够有效的提高整体的发电性能，增加了发电总量，降低了投资成本[10]。

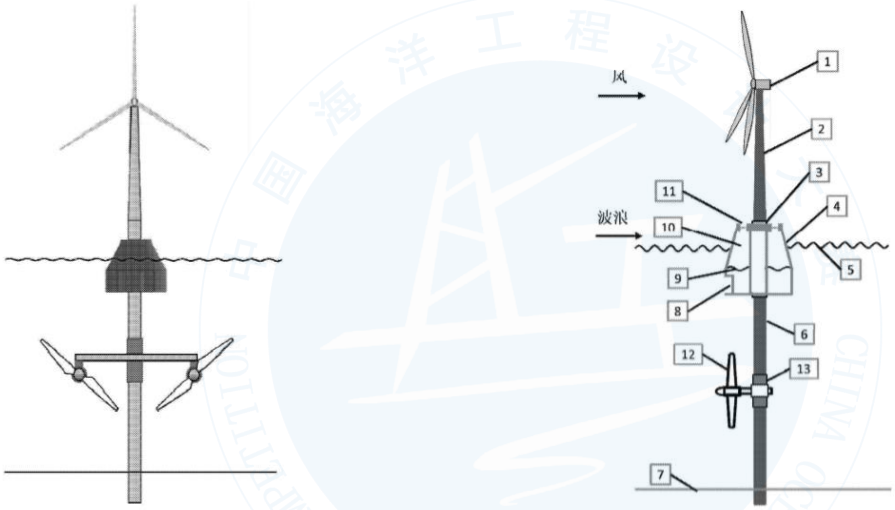


图 1.5 一种基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统结构示意图

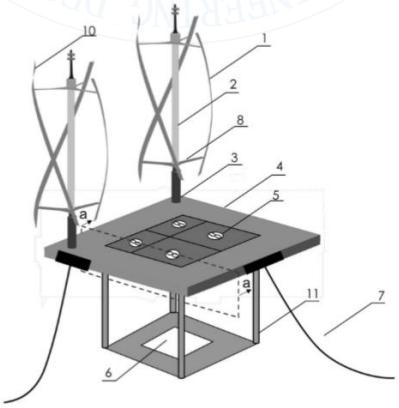


图 1.6 一种基于海上浮式平台的风能—波浪能联合发电装置

在以固定式海洋平台为载体的研究中，曾斌等人提出了一种基于导管架基础

的风能和波浪能联合发电装置[3]，如图 1.7 所示，该联合发电装置，包括主桩腿、导管架基础、风能发电平台、风力发电装置、波浪能发电平台和波浪能发电装置，波浪能发电平台设置在水面上方，波浪能发电装置的浮子漂浮在水面上，以导管架基础为支撑结构，为发电平台提供了优异的结构稳定性。

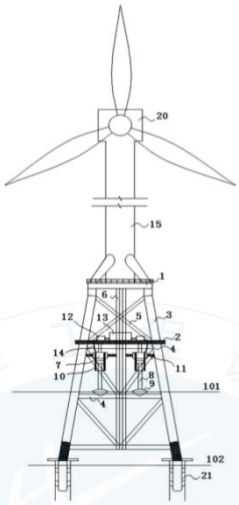


图 1.7 一种基于导管架基础的风能和波浪能联合发电装置结构示意图

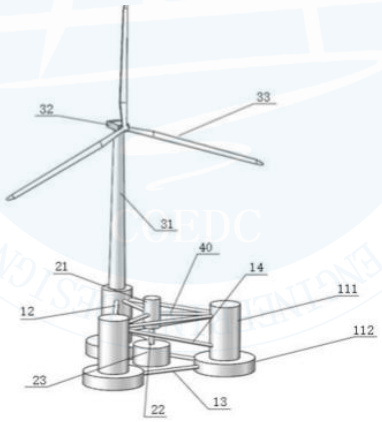


图 1.8 一种基于半潜式浮式风机和振荡浮子的风能-波浪能集成发电平台

陈明胜等学者提出了一种基于半潜式浮式风机和振荡浮子的风能-波浪能集成发电平台[4]，如图 1.8 所示，半潜式浮式平台包括三根呈三角形分布的立柱以及用于将三根立柱连接成一个整体的连接结构，振荡浮子式波浪能转换装置包括 PTO 系统、连接滑杆和浮子，PTO 系统设置于三根立柱之间，通过支撑杆与立柱的上浮筒连接，以固定 PTO 系统使其与半 潜式浮式平台形成整体，浮子位于 PTO 系统下方， 通过连接滑杆与 PTO 系统相连；风力发电系统安装于半潜式浮式平台其中一根立柱上，该装置利用平台三根立柱对于中心水域产生的聚波效应， 提高了

振荡浮子式波浪能发电装置发电效率，并将易被海水腐蚀的大部分机械结构布置在水面以上，一方面有效解决 PTO 装置的腐蚀问题，另一方面也便于服役期间的维修。

多能互补海洋能集成发电为海洋可再生能源的开发利用提供了一种新思路，在未来应用中将会有极为广阔的前景 。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 2 章 综合发电平台设计

通过调研发现，目前还没有利用太阳能、风能、波浪能、海流能量的四种海上发电方式的综合平台，所以本设计结合海上可再生清洁能源的多样性，将海上发电平台由传统的桩基固定式发电平台改进为移动式平台，可适应海上复杂多变的环境，也便于平台的维修和养护。

2.1 平台尺寸

考虑到模型的稳定性和重量最小，我们选择圆作为底面。为了防止模型在放重物后发生倾倒，我们计算了模型的浮心和重心，使它们之间的距离最大，得到了模型的最优基底面积、高度和模型外倾角。此外，模型内部还有一个环形结构，它不仅可以保持结构下部重量分布稳定，还可以使模型更加坚固，不会被水挤压。

根据该方案，设计了圆台形浮体的新概念，并与具有相同功能的圆柱形浮体(SevanMarine 提出)和八角形浮体(中国海洋石油总公司提出)进行了比较。通过对比相同材料下的模型的稳定性、结构强度和相同耗材下容积，可以发现，与圆柱形和八角形浮体模型相比，圆台形平台的形状设计可以显著提高平台的稳定性和水动力性能[9]。

我们将模型设计为最大载重量为 4kg 的浮体，也就是浮体在满载时最大排水量为 4000ml（假设水的密度是 1g/ml）。在同样的体积下，球的表面积最小，但由于制作材料限制，采用球面做底面不仅制作困难，而且材料的结构强度也会变差，所以我们选择使用圆台结构作为平台吃水结构，如图 2.1。

图 2.1 平台浮体结构示意图

确定完底面后，我们需要再确定底面直径 a，模型高度 h，外倾角 θ 三个变量。当 θ 角为 90 度时，通过浮体最大排水量为 4000ml 和最小表面积原则（最小质量），初步计算出底面直径 a=30，h=5（单位：cm），由此可以用 θ 表示出模型的浮心。由于载重物是密度为 1.2g/cm3，再按照浮体模型摆放，当载物分布均匀、最高面平齐时，我们可以用 θ 角表示出载物重心，通过计算浮心与载物重心的距离，可以得

出最优外倾角 θ =60°（详细计算过程见附录一）。考虑到浮体干舷需大于 10cm，我们在浮体最上层加上一个高度为 5cm 的外壳。如此，我们就得出以下模型主体：

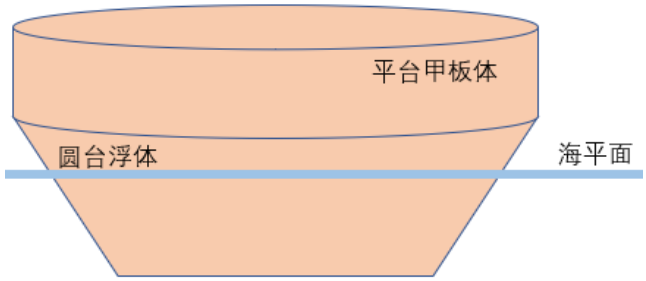


图 2.2 平台主体结构示意图

考虑到载物也具有一定流动性，当浮体模型在水箱中漂浮时，载物可能会随着浮体模型的晃动，重心会产生变化，从而影响浮心与载物重心差，会使浮体模型不稳定，发生倾倒现象，所以我们想在内部增加一个环形结构的装置，图 2.3，以载物最大高度为结构最低高度，同时上部做成下倾状，使载物全部进入浮体模型内部。同时，此结构还能够起到支撑作用，在增加载物时会在一定程度上减小浮体模型的变形。

如图所示，当载物进入模型内部时，随着模型在水中漂浮，载物也会在结构的作用下逐渐形成一个稳定的体形，使载物重心不再变化并且此时载物重心最低，最容易保持稳定。

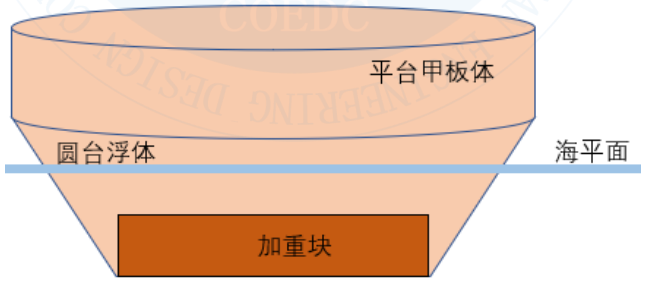


图 2.3 加重块示意图

得出平台实际尺寸如表 2.1 所示：

表 2.1 平台主要结构设计参数表

甲板直径	10m	设计吃水	3m
甲板体厚度	2m	风力发电叶片高度	5m
圆台浮体上端直径	10m	海流发电叶轮深度	5m

圆台浮体下端直径	6m	太阳能电池板面积	$50m^2$
圆台厚度	4m	船舷外圆筒直径	1m
浮子上下位移极限	1.5	浮子尺寸	直径 1m×厚 0.5m

2.2 平台模块

本平台主要分为 3 个模块，发电模块、稳定模块和控制模块

2.2.1 发电模块

发电模块是本平台的主要结构，平台的整体设计紧紧围绕海上可再生能源的电能转换，实现太阳能、风能、波浪能、海流能量向电能的转化。发电模块是海上综合发电平台的主要工作模块，是直接与海上能量进行相互作用的机械装置，在平台上示意图如 2.4 所示。

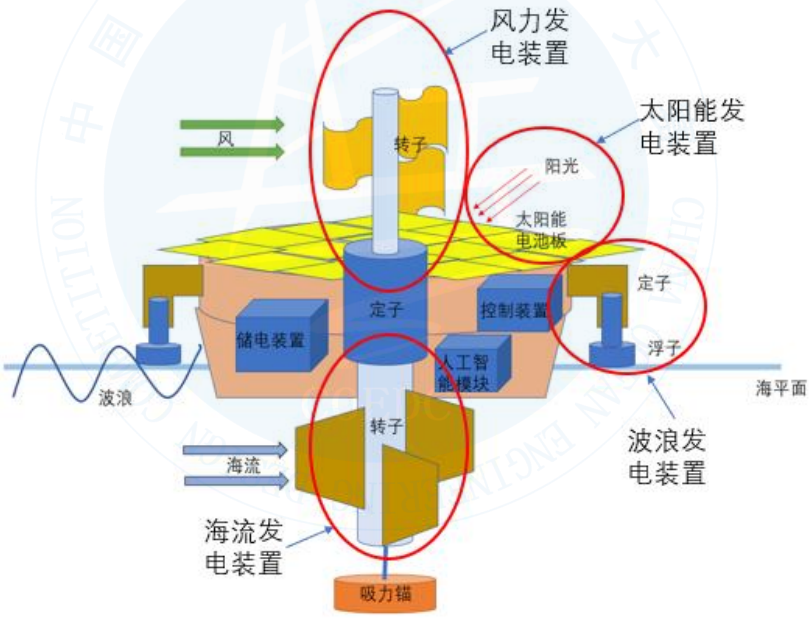


图 2.4 发电模块分布示意图

2.2.2 控制模块

控制模块的主要功能是将平台各种海上可再生能源发电产生的电能进行转化和储存，主要安装在平台甲板内部，隔离海洋环境确保安全稳定工作。其中人工智能模块的运用是本设计的重要创新点，在第 3 章中重点介绍。

2.2.3 定位模块

采用浮体加重降低重心，增加平台的稳定性。同时配合吸力锚固定的新方法，增加平台抵抗海洋环境载荷的能力，使得平台能够固定在预定位置，不发生平台漂移。为海上平台发电提供前提条件，否则平台将会发生倾覆风险。采用吸力桩固定作为桩基的方法最早在海上固定式风力发电中早已应用，传统海上风力发电平台主要是固定插入海底浅层的固定平台，本平台创新采用吸力锚的方法将平台重心固定，不产生大的移动，将平台稳定在以吸力锚为中心的小范围。

图 2.5 吸力锚示意图

2.3 平台发电条件

环境参数：环境参数根据《南中国海深水天然气开发研究气象、水文环境设计条件研究》选择，波浪参数选用有效波浪高及波浪周期，风速选用 10 分钟风速均值。参考 API RP 16Q、API RP 2RD、API RP 2A-WSD 规范和《海洋钻井手册》，环境载荷和安全系数选取如表所示，考虑海上工况，环境参数选南海一年一遇非台风期条件下波流载荷：

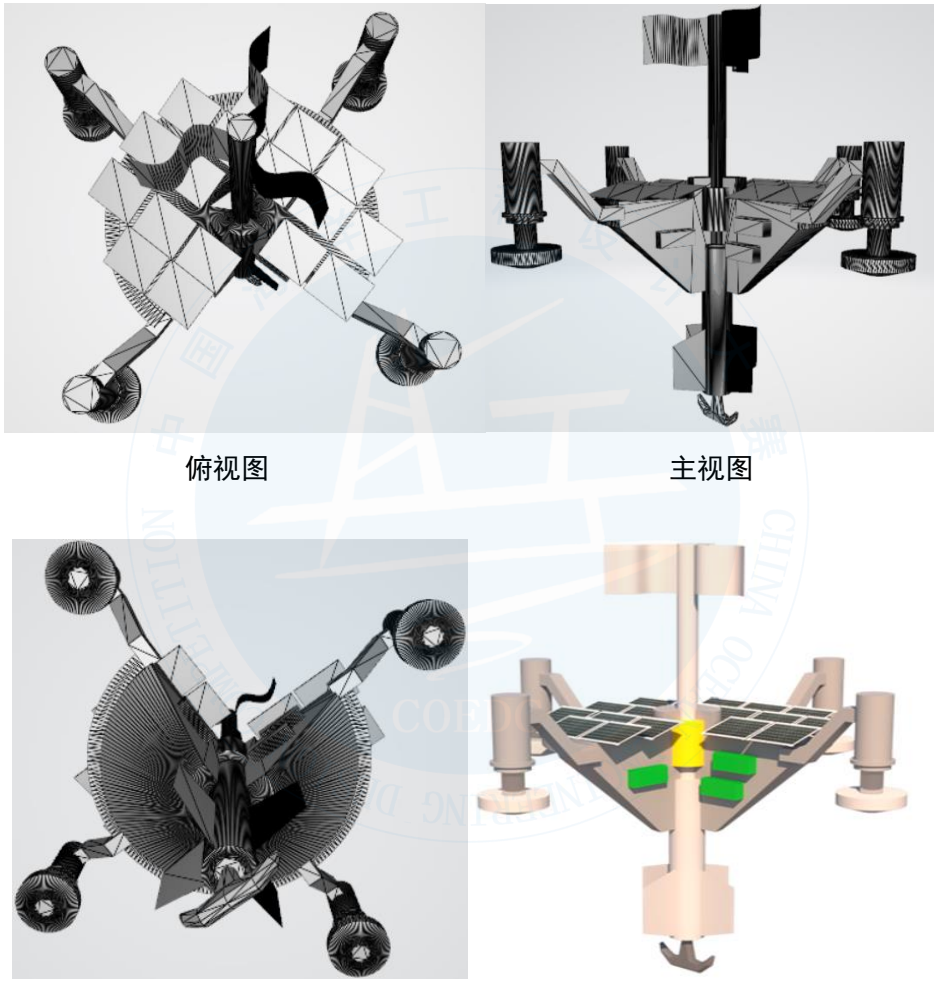
海域	波浪高	波浪周期	海水流速	风速
南海	3-4m	10s	1m/s	19m/s

综合海上环境条件，对平台设计以及发电装置设计提供设计依据，确定主要发电形式为海上风力发电，海流、波浪和太阳能为辅助发电的综合发电形式，设计风力发电机功率为 1000KW,海流发电机功率为 300KW，波浪发电机四个，每个功率 100KW，太阳能电池板光电转化率为 20%，

2.4 平台发电设计

平台综合利用了海上风、光、波浪、海流互补发电结构形式，综合利用了以上四种海上可再生能源。但目前有待解决的问题主要有对海上可再生能源的评估困难、多种能源的耦合获能装置的设计困难、海上发电机的密封性能以及海洋发电平台的防腐性能都是重要的考虑因素。

结合上述条件和设计模块，进行组合进行了平台 3D 模型的建立，并给出视图和整体结构如图 2.6：



俯视图　　主视图

仰视图　　平台 3D 设计图

图 2.6 平台结构模型视图

第 3 章 人工智能模块应用

3.1 单模型预测及智能优化

3.1.1 风力发电参数智能优化

自然风速存在随机性、间歇性以及季节性的显著特点，风电投入比重的提高会使电网的调峰、调频压力增大。当风电场发出的电量超过系统以及负荷的需求时，多余的风电无法即时消费，需要将风电通过储能装置进行储存，待到需要时再转换为电能输出使用，可以大大提高风电的利用率并改善风场经济性。

在海洋平台上风向和风速都是不断变化的，变化主要包括：风能随时间的变化（日变化、季节变化）；风能随高度的变化；风能随地区差异变化。因此我们有必要针对不同的时间，不同的高度，不同的地区的风电设备参数进行针对性智能分析，并决定最优发电参数。

建立风力发电参数智能优化模型首先需要大量的先验数据，如不同高度、不同地区，以及风速发电量等数据；将数据整理为统一格式并进行数据清洗形成风力发电专用数据库。利用主成分分析等算法分析各个参数之间的关联度以及对风力发电效率的贡献度。建立全连接神经网络模型并将优选得到的重要的参数作为神经网络的输入参数训练神经网络模型，从而预测不同参数下的风力发电装置的发电功率。基于非支配排序遗传算法建立单目标优化模型得到最优发电效率下的风力发电参数。

基于已经建立的风力发电效率预测模型和工作参数优化模型，测量装置测量目前工作参数并将其输入到预测模型中预测风力发电效率，再根据工作参数优化模型推荐最优的参数组合。将控制参数输入控制系统中，将控制执行机构改变工作参数从而达到最优发电效率。

3.1.2 太阳能发电参数智能优化

太阳能是一种低密度、间歇性、空间分布不断变化的能源，因此太阳能高效利用并不是一个简单的问题。要想提高太阳能的利用率有两个方法：提高光伏电池的能量转换率；提高设备的能量接收效率。前者属能量转换领域，技术难度大，目前进展缓慢；而后者利用现有的技术则可解决。香港大学建筑系的 KPCheng 和 SCMHui 教授研究了太阳光照角度与太阳能接收率的关系，理论分析表明对太阳光线运动的跟踪与非跟踪，太阳能设备能量的接收率相差 37.7%，可见精确地跟踪太阳可使太阳能设备的能量利用率大大提高。

光照强度是影响太阳能发电效率的重要因素之一，实现对光线方位的追踪，是

增加太阳能发电效率的重要途径，光线方位的识别则是其中的主要问题。通过在太阳能板上巧妙布置感光元件，实现对太阳光线方位的测量。如果可以构建一个光线检测系统并将测量信息输入到检测系统，使其能够自动追踪太阳光线的位置，使太阳光线直射太阳能板面，从而使得太阳能电池板时刻处于最优位置，以最大程度接收太阳辐射，捕捉更多的太阳辐射，提高发电量。

要想提高太阳能能量接受效率有两个关键因素：感光元件布置；精确的光线检测追踪系统。

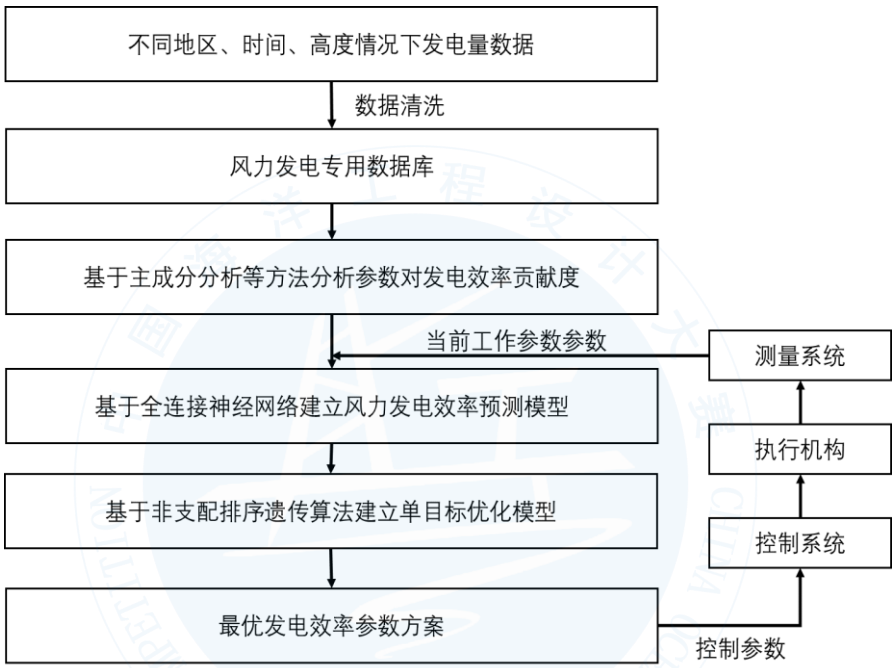


图 3.1 风力发电单目标参数智能优化系统

感光元件传感器的的布置由于实际场地条件和经济条件等因素,只能在空间结构的有限位置上布置相对较少的传感器,因此,传感器的布置应该满足以下 2 个目标:1)最大程度地反映空间结构的信息;2)对空间结构的状态变化足够敏感。将不同传感器的位置、数量，以及传感器的测量信息，光线角度数据进行数据清洗和特征工程并建立专用数据库。首先建立光线角度预测模型，由于太阳光在每天的角度变换是有一定的时序性质的，因此搭建长短期记忆循环神经网络模型，将传感器位置、传感器个数、传感器测量信息、光线角度作为参数输入模型，通过训练可以得到最优的预测模型，输出模型的预测精度。将预测模型的精度，传感器的个数、位置、经济性作为优化参数输入到建立好的粒子群模型和非支配遗传算法模型中，即可得到传感器最优数量、位置以及预测精度的参数，从而优化太阳能板发电的工作参数。采用智能优化算法与传统算法相比，速度快，精度高，也是未来的重要研

究方向之一。

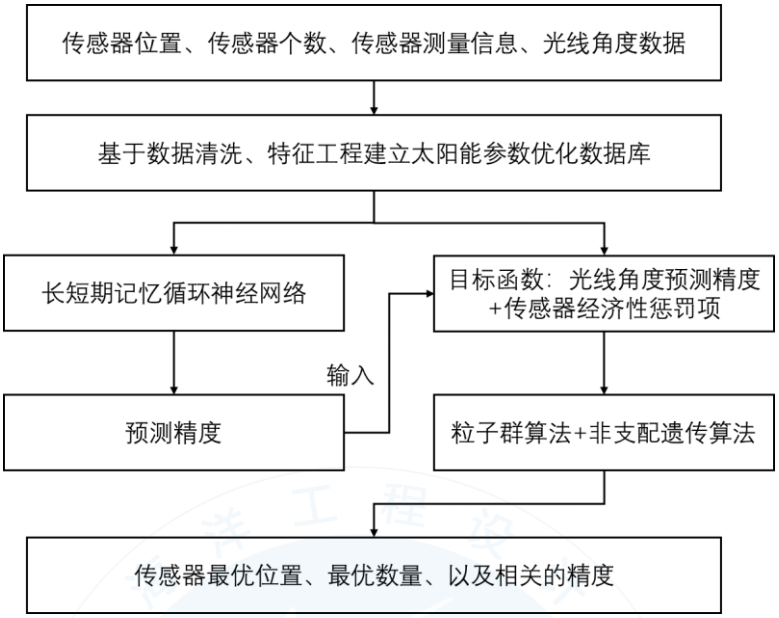


图 3.2 太阳能发电参数智能优化系统

3.2 多模型协同发电

3.2.1 单发电系统供电、蓄电协同优化模型

自然风速存在随机性、间歇性以及季节性的显著特点，风电投入比重的提高会使电网的调峰、调频压力增大。当风电场发出的电量超过系统以及负荷的需求时，多余的风电无法即时消费，需要将风电通过储能装置进行储存，待到需要时再转换为电能输出使用，可以大大提高风电的利用率并改善风场经济性。

同样，太阳的光照强度与所在地区、一天的时间、季节都有着显著的关系。太阳能投入比重的增加，将会导致白天发电量较大，夜晚发电量基本为 0 的巨大差异。然而一般情况下平台白天用电量较小，夜晚发电量较大，太阳能的巨大变化易导致电网调峰、调频压力的增大。因此需要对太阳能产生的电能进行储存从而保证平台作业的顺利进行。

波浪的动能和势能一般随着自然风的增大会有适度的增加，存在着一定的随机性和季节性，但相对来说波浪能是一种较为稳定的发电能量来源。

单发电系统供电、蓄电协同优化具体步骤如下：

①实时供电配额:根据多发电系统协同优化模型根据目前用电需求、蓄电装置的蓄电量根据风力、太阳能、潮汐能发电的能力分别制定各个发电系统上传到电网的配额。

②单系统发电：根据多发电系统分配的上传电网配额，各个发电系统根据配额上传电网。

③多余电能储存：若单发电系统发电量超过配额，则将剩余的电能输送到平台的储能装置中进行储存，从而提高能量的利用效率。

④电网波动补偿：若实时用电量小于总配额电量，则将多余的配额电量输送到平台储能装置进行储存；若实时用电量大于总配额电量，则将启动储能装置进行电能补充。

采用实施供电配额的目的是根据各个子发电系统的性质，合理的分配配额，高效利用，如在夜间应减少或者不分配太阳能发电的配额；在风较大的的时期增大风力发电配额等。通过发电系统和供电系统的直接连接可以减少电能转换为化学能在转换为电能的能量损失，从而使得能量得以高效利用。但由于风能、电能存在一定的不确定性，因此直接供电的比例不宜过大，在配额过多或者配额过少时可以启用储能装置，一方面提高了供电系统的稳定性，另一方面提高了能量的利用效率。

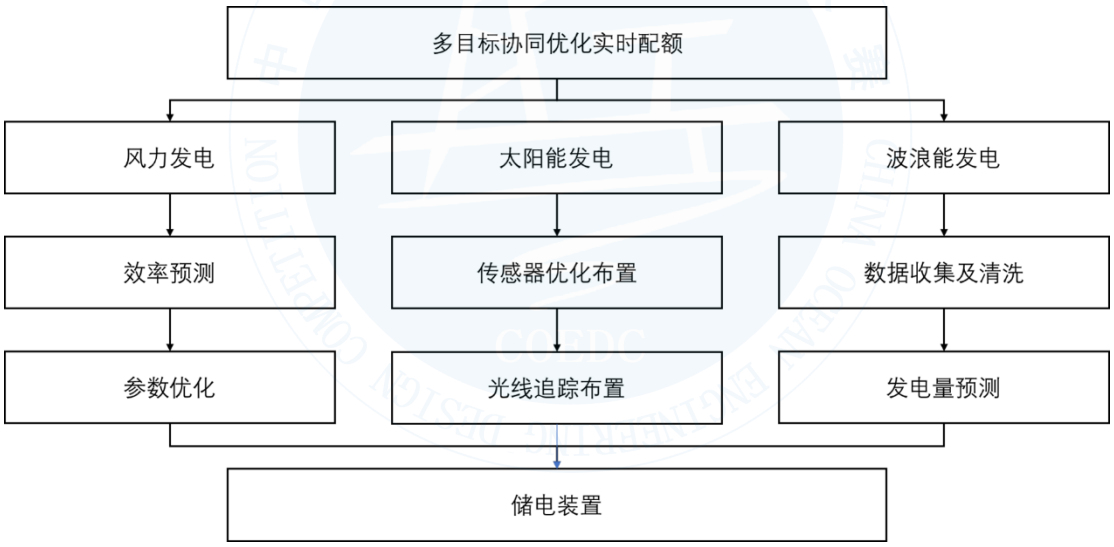


图 3.3 单发电系统供电、蓄电优化系统

3.2.2 多发电系统供电、蓄电协同模型

根据已经建立的单发电系统供电、蓄电协同优化模型，可以知道针对于多发电系统的供电、蓄电协同优化模型，主要有两个核心问题，分别时：实时智能分析多发电系统供电配额、多发点系统储电智能补偿。

（1）实时智能分析多发电系统供电配额

根据波浪能的状态可以通过理论计算并预测未来一段时间的发电量。基于波

浪能预测、风力发电预测模型、太阳能发电预测模型。结合不同发电系统的特点，如阴雨天太阳能光照强度弱，应减少配额；夜间太阳能发电装置配额设置为0；在风速较大时提高发电配额等。总的来说若某种能量在一定时间能趋于一个稳定的状态，则在稳定阈值一下可以尽可能的提高供电配额。之所以需要提高配额而不直接进行蓄电的原因是减少电力的转化步骤，提高能量利用率。

（2）多发电系统储电智能补偿

由于预测模型存在一定的误差，因此在进行配额的时候可能存在供电网络电量过多或者过少的情况。若供电网络的电量超过了实际电量需求则将剩余电量进行蓄电储存。若供电网络电量低于实际供电需求，如果差额较小，则在稳定发电阈值总额以下适当增大供电，进行临时调度；若差额较大，稳定发电阈值已经无法满足用电需求，则开启蓄电自动补偿装置，补偿装置根据供电差额进行智能调度，满足供电需求。

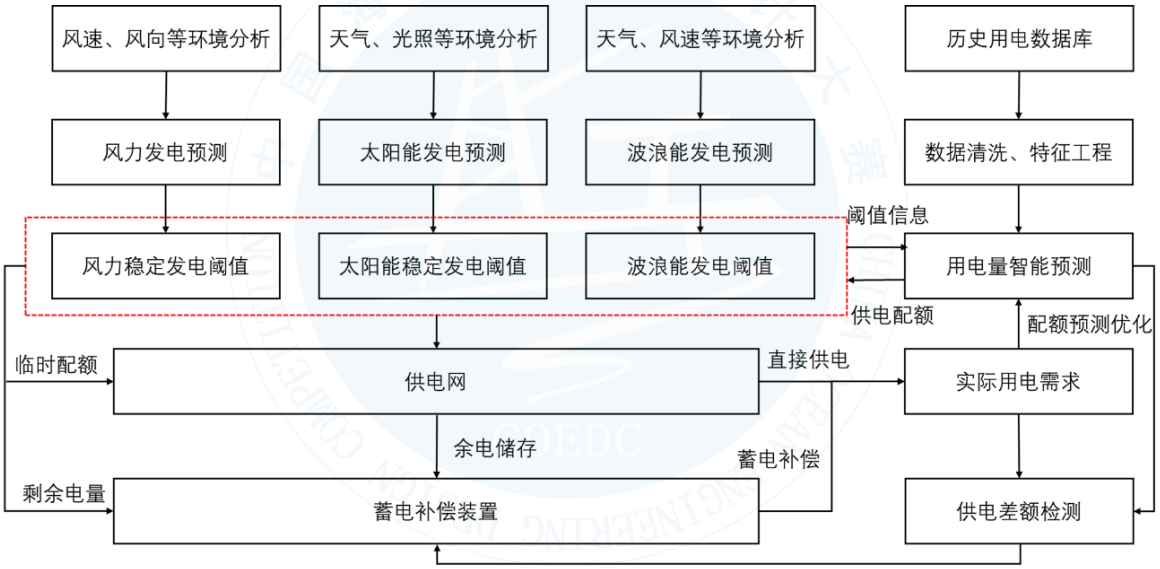


图 3.4 多发电系统供电、蓄电协同系统

综上所述，整个智能发电、供电、蓄电协同系统可分为子系统预测模块、子系统参数优化模块、系统配额模块、蓄电补偿模块四部分组成。

子系统预测模块主要有风力发电环境检测、太阳能发电环境检测、波浪能发电环境检测，以及各子系统数据库，各子系统智能预测模型，各子系统稳点发电阈值预测。子系统预测模块为子系统参数优化模块提供目标函数输入，为参数优化提供重要依据。

子系统参数优化模块主要有风力发电参数检测、太阳能发电参数检测、波浪能发电参数检测，各子系统发电数据入库，各子系统参数优化模型，各子系统控

制机构构成。子系统参数优化模块通过调整优化参数，使得子系统预测模块达到最适合的发电状态。

系统配额模块主要有用电数据库、用电数据入库，用电数据智能预测，供电配额智能调度，预测模型智能优化构成，供电差额计算。根据子系统预测的稳定发电阈值以及用电预测需求，系统配额模块智能制定分配方案，将发电量分配到供电网和蓄电模块中，保证供电的正常、稳定运行。

蓄电补偿模块主要包括电量储存，电量补偿组成。根据系统配额模块，系统配额模块将各发电子系统产生电量进行储存或释放，提高能量的利用效率，保持供电系统的稳定性。

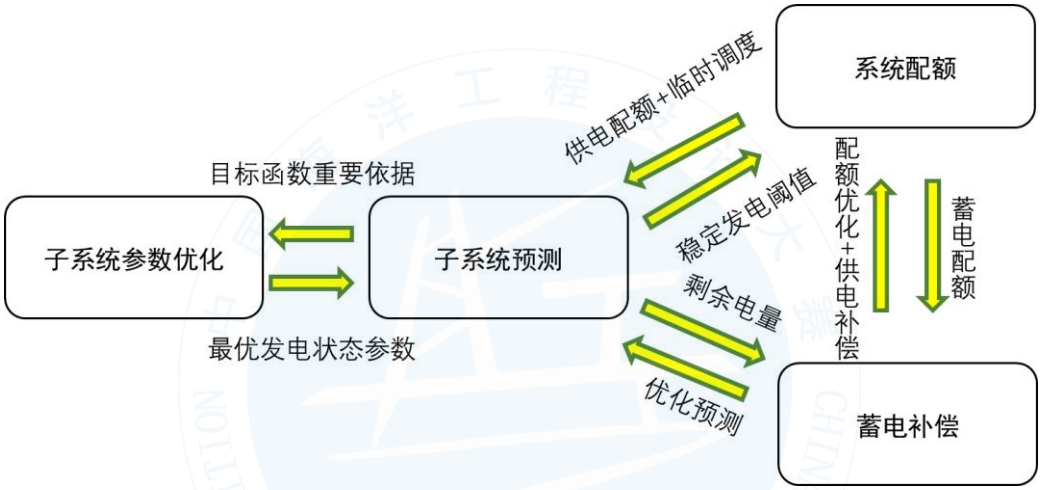


图 3.5 智能发电、供电蓄电系统模块关系图

第 4 章 结构稳性计算与可靠性分析

4.1 稳定性计算

平台的安全性是平台设计中要思考的首要问题。安全性较差的平台，不仅危及平台作业人员的生命安全，易造成生产事故，引起不必要的损失。因此，平台的安全性设计格外重要。

此设计较全面的考虑到平台的工作状态。通过分析该海域的海况，核算风力、海流、波浪对平台的动荷载，保证平台具有较好的稳定性，使平台即使位于海况较恶劣的南海，也具有在大多数天气下工作的能力，保障平台不侧翻。

分析下部浮体设计，主要分析圆台浮体的整体结构形式，满足的海上风浪条件的稳定性，给出圆台浮体的结构设计方案。

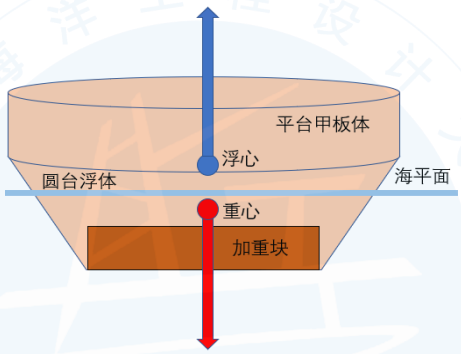


图 4.1 重心、浮心示意图

由力矩分析可知，保证该浮体模型能够维持稳定的要素之一在于浮心与载物重心的距离差，当浮心与重心的差值越大，模型在水中发生倾斜时也更容易回到原来的状态。

弯矩 $M=F\ h\ \sin\theta$，当 θ 一定时，h 越大，M 越大，更易使得在风浪条件下产生倾斜时，恢复水平状态。

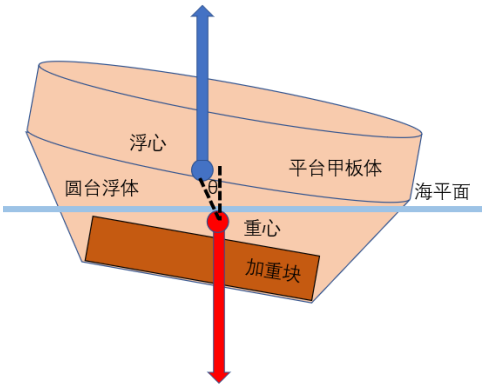


图 4.2 重心、浮心示意图

所以采用平台底部增加重物块的方式可以更好的降低平台重心，增加平台的稳定性。

关于圆台尺寸的设计考虑到平台重心、排水量等因素进行模型高度、圆台直径等关键参数进行计算。

设浮体在满载时的最大排水量为 4000ml，则有 $\frac{\pi a^2}{4}h=4000$，圆台的底面积与侧面积之和 $S=\frac{\pi a^2}{4}+2\pi ah$，计算得 $S=\frac{\pi a^2}{4}+\frac{32000}{a}$，要使得浮体重量最小，耗材最小，S 取得最小值，求的 $S'=\frac{\pi a^2}{2}-\frac{32000}{a^2}=0$，$a\approx 28$，所以设计 a 取 30cm。从而计算得出 $h\approx 5.6$，所以设计 h=6cm。

由于圆台的重心公式为 $L=\frac{\frac{1}{2}+\frac{2}{3}\mu+\frac{1}{4}\mu^2}{1+\mu+\frac{1}{3}\mu^2}\times h$，其中 $\mu=\frac{h}{a}\tan\theta$，由于设计排量和载物下水测试高度为 h'，得出 $h'\approx\frac{2}{3}h$。

根据圆台浮体加重设计原则，重心接近加重材料上部，由于设计加重材料的厚度为 2cm,所以浮心距底部高度为 4cm,所以浮心和重心的距离约 2cm，最大限度的确保了平台的稳定性。

4.2 可靠性分析

在确保平台稳定性的条件下，需要对主要发电装置结构的安全性进行分析，主要针对海上载荷最危险工况和一般工况进行分下，分别分析风力发电叶片、海流发电叶片、波浪发电浮子以及平台转子结构进行分析

4.2.1 风力发电叶片

分别针对风力发电叶片的迎风面受力以及叶片旋转两种特殊情况进行 ANSYS 受力分析。

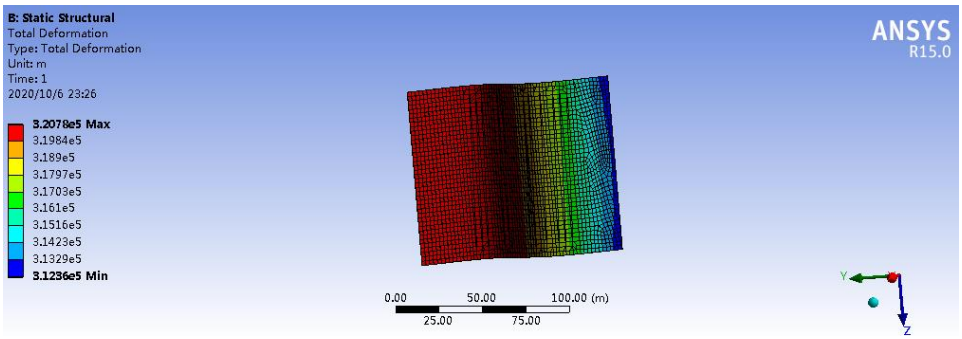


图 4.3 风力发电叶片迎风面受力分析

通过 ANSYS 分析发现，设计的“S”形状叶片可以在叶片端部凹陷部分可以更好的迎风受力，其海上风能利用率高于传统发电形式。海上风力发电的叶片采用轻质铝合金制作，其抗弯性能及承载力较好，同时方便制作和安装。

同时分析叶片在旋转过程中的受力情况，在满足上述海洋环境载荷风力条件下的旋转安全得到保证，分析发现旋转过程中叶片的两端中间部分受力情况比较集中，主要由于中间部位受到的位移限制比较多，承受较大的交变载荷。所以设计时采用叶片中部加厚或强度增加的处理方式来满足发电要求。

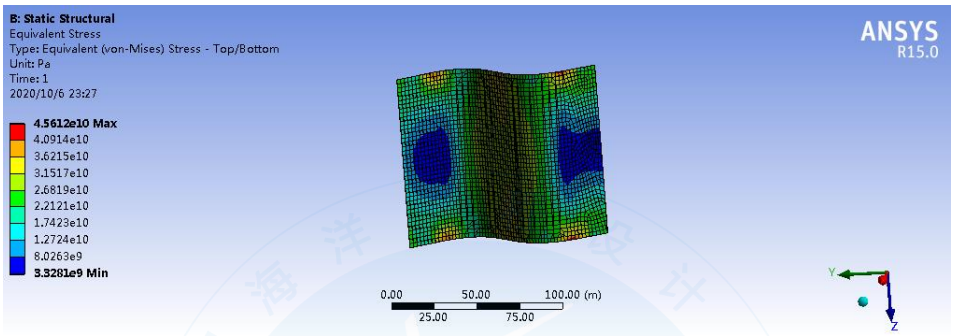


图 4.4 风力发电叶片旋转分析

4.2.2 海流发电叶片

分别针对海流发电叶片的迎流面受力以及叶片旋转两种特殊情况进行 ANSYS 受力分析。

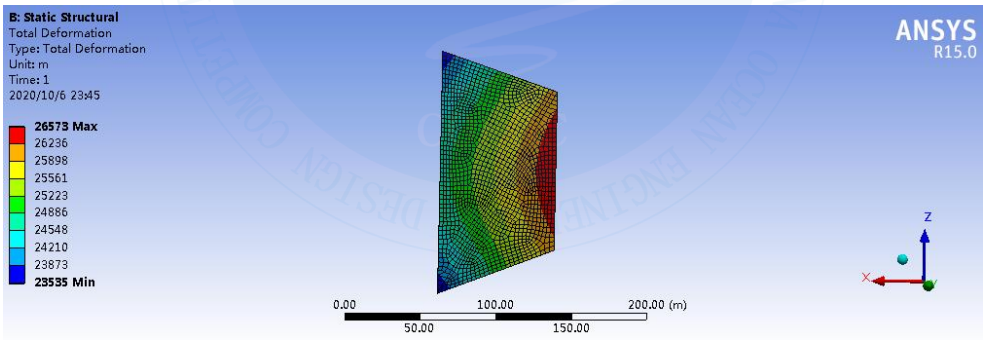


图 4.5 海流发电叶片迎流面受力分析

海流发电的叶片采用桨式叶片结构，由于海底腐蚀严重，叶片需要一直浸没在海底，所以海流发电叶片采取较厚的钢板。通过 ANSYS 分析发现，设计的梯形叶片在叶片端部向叶片中心迎流受力降低，且呈圆形波浪式，这复合迎流受力规律，梯形叶片也便于海流迎流流过，充分利用海流能量。海底海流发电的叶片采用硬质钢板制作，可增加平台的稳定性，也更加防腐，增加叶片寿命。

同时分析叶片在旋转过程中的受力情况，在满足上述海洋环境载荷海流条件

下的旋转安全得到保证，分析发现旋转过程中叶片的两端中间部分及叶片焊接边缘处受力情况比较集中，主要由于中间部位受到的位移限制比较多，承受较大的交变载荷，同时由于海底海流作用下叶片在水中的旋转难度比空气中更大，所以设计时采用边缘焊接处加厚处理，由于钢板的刚度大，设计时不考虑钢板的局部破坏，人为满足海流发电要求。

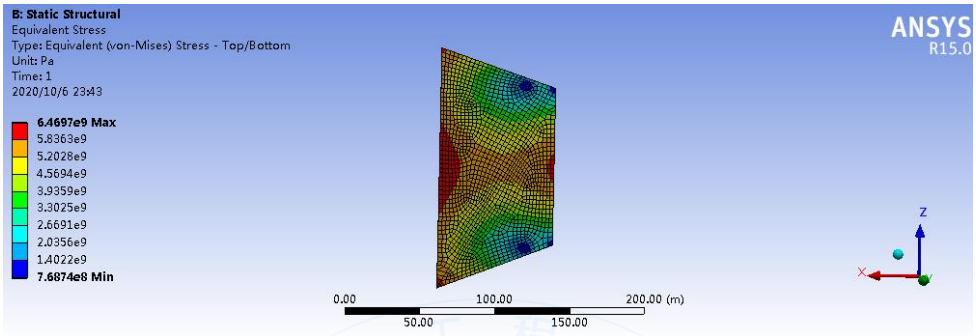


图 4.6 海流发电叶片旋转受力分析

4.2.3 波浪发电浮子

分别针对波浪发电浮子的受力面以及往复运动两种特殊情况进行 ANSYS 受力分析。

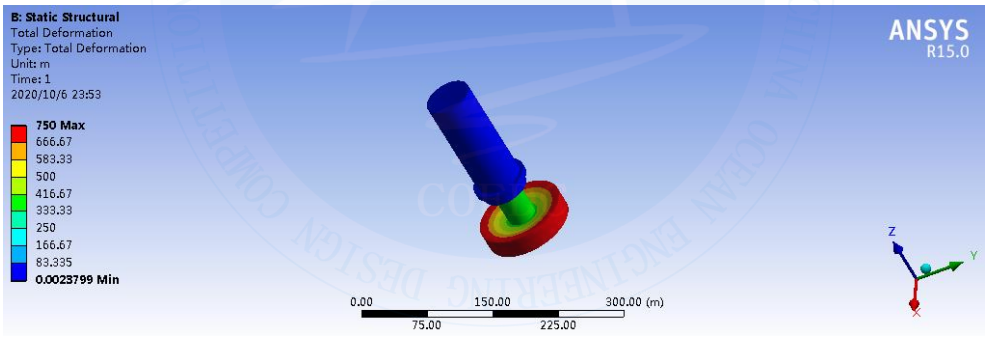


图 4.7 波浪发电浮子受力面分析

波浪发电的浮子采用空心柱体结构，由于海面腐蚀严重，浮子需要在海面上漂浮，承受海水和空气的腐蚀作用，所以浮子采取防腐性能好的轻质合金。通过 ANSYS 分析发现，设计的浮子在底面受力，且边缘也会受到冲击作用。所以浮子轴心处会有剪切受力。

同时分析浮子在上下往复运动过程中的受力情况发现，由于定子与浮子之间为液压连接，所以，受力主要为浮子与运动轴的连接处存在应力集中现象，所以设计时要注重连接处的焊接工艺，满足运动要求，同时要注意液压连接处的腔室的密封与润滑。

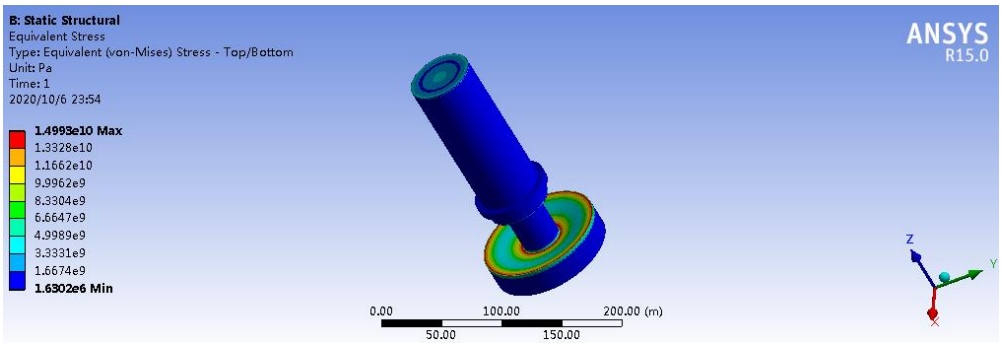


图 4.8 波浪发电浮子运动受力分析

4.2.4 平台特殊连接处的分析

由于综合发电平台设计主要为风力发电和海流发电公用一个定子，所以对这种平台特殊连接情况进行 ANSYS 受力分析。

分析发现平台特殊连接的情况可以满足工作需求，整体连接合理，静置受力和旋转受力情况均不会出现危险。

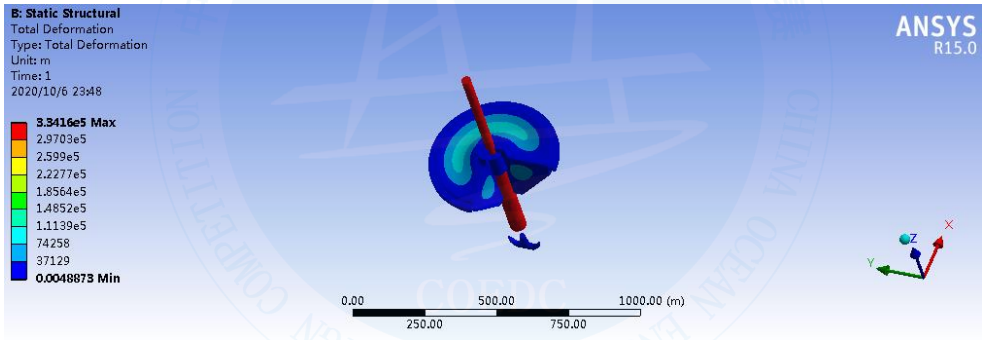


图 4.9 发电转子静置受力分析

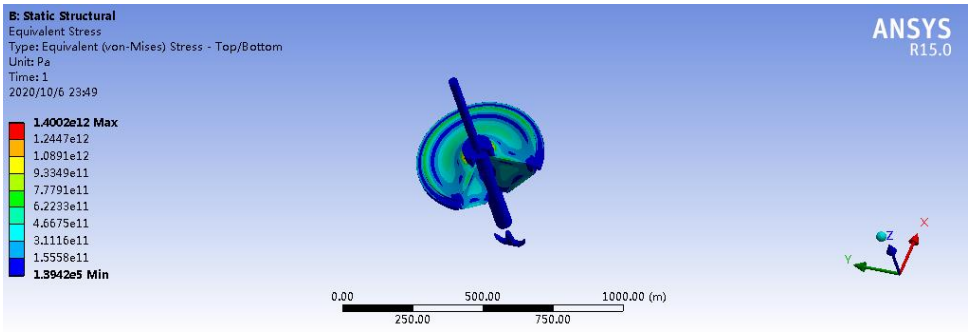


图 4.10 发电转子旋转受力分析

第 5 章 发电效率计算

5.1 风力发电效率计算

我们设计的是综合发电平台，主要测试结果为风力和太阳能发电。

风力发电的测试最大电流和最大电压如图：

风力发电测试最大电压　　风力发电测试最大电流

图 5.1 发力发电测试图

风力发电机功率为 2.5v×50mA，风力发电效率为 $\eta_1=\frac{2.14\times49.1}{2.5\times50}$=84.06%。

太阳能室内无法测试，室外测试最大电压 5.29v，最大电流 202.9mA。如图：

太阳能发电测试最大电压　　太阳能发电测试最大电流

图 5.2 太阳能发电测试图

太阳能电池板发电功率为 5.5v×300mA，发电效率为 $\eta_2=\frac{5.29\times202.9}{5.5\times300}$=65.05%。

综合发电效率为 $\eta=\frac{2.14\times49.1+5.29\times202.9}{2.5\times50+5.5\times300}$=66.39%。

第 6 章 结论及展望

结论：

本平台利用人工智能的方法，提高了平台的综合发电效率，使得海上风能、太阳能、波浪能、海流能得到高效利用，使得平台的综合发电量有较大提升，同时综合发电效率和电量利用率保守估计可以提高 10-20%。本平台设计思想可以作为指导海上综合发电平台的新方向和新方法，人工智能的应用可以更好的开发和利用海上可再生能源，为优化我国能源结构提供较大的帮助，同时摆脱海上能源利用单一，投入大的设备建设问题。

针对目前海上发电平台的发展趋势，本设计模型可以很好适应未来的发展方向，海上平台的离岸化、超导等新材料的应用、轮机容量大型化。本平台设计的浮体结构以及吸力锚的应用可以满足发电平台在深水海域作业，同时平台风力发电叶片以及太阳能电池板等材料的防水与防腐都需要用到新型轻质合金材料，同时人工智能模块的引入与设计思路，可以作为未来海上综合发电平台智能化奠定理论基础。

目前本平台设计处于概念阶段，还有很多技术难题有待解决，比如多种发电方式的耦合以及人工智能概念的程序化处理等技术手段有待后续探索。希望依托此次海洋工程设计大赛为背景，能够尽快实现人工智能控制下的多功能综合海上发电平台的成功设计与应用。

展望：

（1）不仅仅作为海上发电平台，也可以作为海洋环境的检测基站，利用风力、海流、波浪、太阳能发电装置对海洋环境变化进行捕捉和监测。为建立某一海域环境数据库提供支持。

（2）作为海洋油气勘探开发平台的辅助平台，若作业平台发生不可逆的作业事故，可以为作业人员救援，逃生提供临时场所，也可提供临时的救援救助信号发射装置和临时电力供应基站。

参考文献

[1]施伟,宁德志,周林,南洋海. 基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统[P]. 辽宁：CN207485595U,2018-06-12.8.

[2]施伟,周林,柴威,谭湘,由际昆,周波. 基于海上浮式平台的风能—波浪能联合发电装置及发电方法[P]. 辽宁省：CN109737009A,2019-05-10.

[3]曾斌,程卫民,陶铁铃,邹尤,赵鑫,曹龙,喻飞,李宇飞,汪顺吉,金乾. 一种基于导管架基础的风能和波浪能联合发电装置[P]. 湖北省：CN209586593U,2019-11-05.

[4]陈明胜,肖盼盼,王壬,刘瀚昱,朱凌,苑桂博. 一种基于半潜式浮式风机和振荡浮子的风能-波浪能集成发电平台[P]. 湖北省：CN111412102A,2020-07-14.

[5]王世明,李泽宇,于涛,马晨倍.多能互补海洋能集成发电技术研究综述[J].海洋通报,2019,38(03):241-249.

[6]赵伟国,刘玉田,王伟胜.海洋可再生能源发电现状与发展趋势[J].智能电网,2015,3(06):493-499.

[7]姚琦,王世明,胡海鹏.波浪能发电装置的发展与展望[J].海洋开发与管理,2016,33(01):86-92.

[8]史宏达,曹飞飞,马哲,刘臻.振荡浮子式波浪发电装置物理模型试验研究[J].海洋技术学报,2014,33(04):98-104.

[9]项翔,李俊飞.对我国海洋可再生能源开发利用的研究与探讨[J].海洋开发与管理,2014,31(06):33-37.

[10]宋文杰,刘鹏,史宏达.基于 ANSYS 的振荡浮子式波能发电装置主体结构的应力应变分析[J].制造业自动化,2015,37(07):38-39+44.

[11]贠亚杰,商庆彬.ANSYS Workbench 在船舶舱段有限元分析中的应用[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2014(Z1):95-98.

团队编号：A20200601

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 11　月　18　日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

作品主要分为上下两部分，上部分为工作装置，下部分为稳定装置。上部分主要由三部分组成，分别为发电部分、浮体部分及固定部分，利用波浪的流动带动装置内的空气高速流动，通过小孔带动叶轮转动从而使马达发电，运动装置工作时，在波峰状态，水室内的水位上升，空气被压缩，在波谷状态时，水室内的水位下降，压力下降，外界空气在压力作用下从水室口涌入，空气高速流动使叶轮转动从而产生电能，使灯泡发亮。以海洋工程中半潜式平台为参考设计下部分装置，半潜式台稳定性好、抗风能力强、可变载荷大、设计的结构简单牢固、实用。固定装置利用锚泊技术，将浮体用绳子与重物相连，使装置更加稳定。以海洋工程中半潜式平台和重力式平台为参考设计下部分装置，将浮体与重物用 4 根刚性杆件相连，在深海区域，浮体在重物作用下下潜到一定工作水深，成为半潜状态，主甲板的底面距离海平面尚有间隙，避免海浪拍击；在浅海区域，重物直接沉于海底，依靠平台自重稳定工作。平台底部与刚性杆件连接的重物可增可减，因此动力定位较好，移动性较好，可根据波浪能的强弱选择合适工作地点发电。

目录

作品简介.....1
第 1 章　总论.....2
第 2 章　作品设计理念.....3
第 3 章　作品模型图.....4
3.1 模型概念.....4
3.2 发电原理.....9
3.3 水下重物稳定装置.....9
第 4 章　模型的系统组成.....11
第 5 章　模型优缺点分析.....12
5.1 优点.....12
5.2 缺点.....14
第 6 章 模型性能分析.....15
6.1 发电装置.....15
6.2 平台稳定性.....15
6.3 分析与校核.....16
第 7 章 附录.....19
7.1 发电效率分析.....19
7.2 对模型进行浮力检验.....19
7.3 对模型的稳定性进行检验.....20

第 1 章　总论

随着"建设海洋强国"和"21 世纪海上丝绸之路"等战略的深入推进，"十三五"期间，我国海洋可再生能源发展迎来新的战略机遇期。随着我国海洋能核心及关键共性技术的解决，海洋能开发利用装备制造必将成长为对经济社会长远发展具有重大引领作用的战略性新兴产业，为构建我国清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系做出应有的贡献。

中国的大陆海岸线长 18400km。中国是一个海洋大国，拥有漫长的海岸线和丰富的海岸带资源。海岸带经济在中国经济总量中占有十分重要的地位。浩瀚的大海，有取之不尽，用之不竭的海洋能源，波浪能具有能量密度高、分布面广等优点。它是一种取之不竭的可再生清洁能源。尤其是在能源消耗较大的冬季，可以利用的波浪能能量也最大。小功率的波浪能发电，已在导航浮标、灯塔等获得推广应用。我国有广阔的海洋资源，波浪能的理论存储量为 7000 万千瓦左右，沿海波浪能能流密度大约为每米 2 千瓦~7 千瓦。在能流密度高的地方，每 1 米海岸线外波浪的能流就足以为 20 个家庭提供照明。

因此，本团队针对“海洋可再生能源的开发和利用”的赛题，利用海洋波浪能等发电装置进行创新设计。波浪能发电是通过波浪能装置将波浪能首先转换为机械能(液压能)，然后再转换成电能。按装置吸收波浪能的结构形式有振荡水柱式、点头鸭子式、浮子式等形式。本组作品采取的是振荡水柱式发电，根据其发电原理，不断设计，改进，优化模型，将在设计书的理念分析，模型图展示，系统组成等章节中一一体现。

针对模型在海洋环境下的稳定性，本团队结合海洋钻井半潜式平台的设计结构及特点，设计出适合模型自身要求的稳定装置。最后在模型性能分析章节，分析校核了发电装置的基本参数。

第 2 章　作品设计理念

随着时代的发展，人们对生活中的各种各样资源的需求量逐渐增大，我们本着环保和绿色的信念且与大自然和谐相处的原则，在生活中寻找到了海洋能的巨大能量。

海洋环境蕴藏着丰富巨大的能量，被大气吸收的 0.2%左右的太阳能可转换成风的运动能，风与海面相互作用产生波浪，合理利用波浪能可提高我国海上作业的效率，对于我国可持续发展能源战略有重要意义。

为了响应第二届海洋工程设计大赛，本团队设计符合大赛要求的作品，本着稳定性、平衡性、载重性等方面要求设计一个利用波浪能的发电模型，本作品设计理念主要利用一级装置（泡沫水室）收集波浪能，将波浪能转化为有一定速度的气流，气流通过二级装置（增速圆柱口）使叶轮转动带动马达发电转化为电能。本团队首先设计出一个稳定性极高的平台，使我们的装置能够稳定在波浪里面，使其能够保证平稳的发电环境，本团队采用上下两层设计理念，使其既能承载一定重量的物体还具有一定的结构坚固性，同时还可以保证其在海浪中的稳定性。上层为工作装置，也是浮力的产生源，下层为保证稳定而我组设计的海洋钻井平台的仿照平台，我们采用重物悬挂式使其能够牢牢地依靠泡沫水室的浮力稳定地浮在水面。在平台方面我们选择了我们选择了泡沫板，因其本身就具有很大的浮力，在海浪中不会沉陷下去。

第 3 章　作品模型图

3.1 模型概念

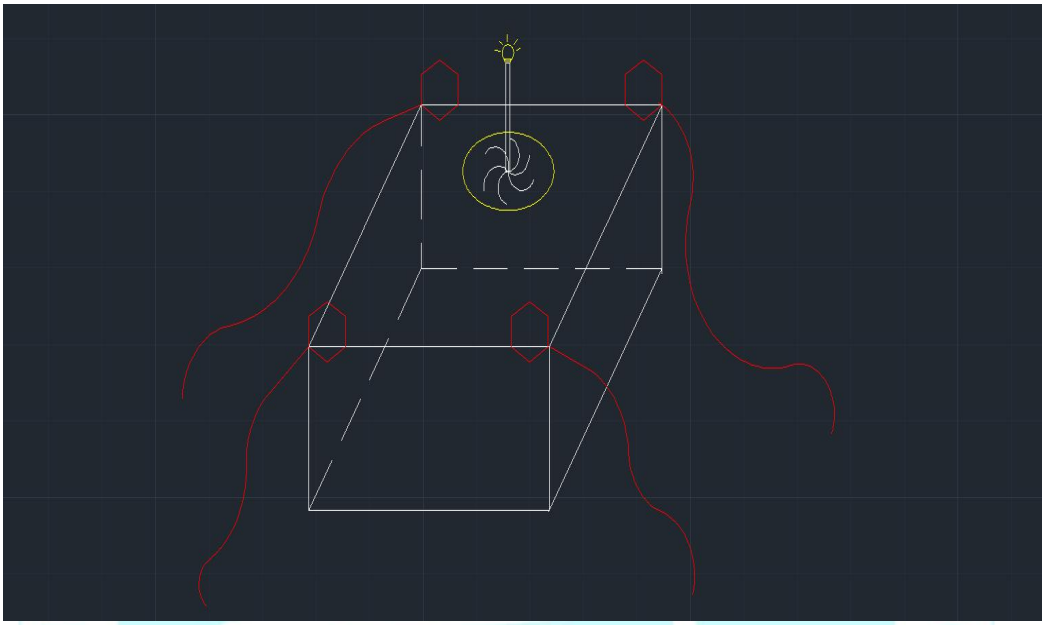


图 1 上部装置图

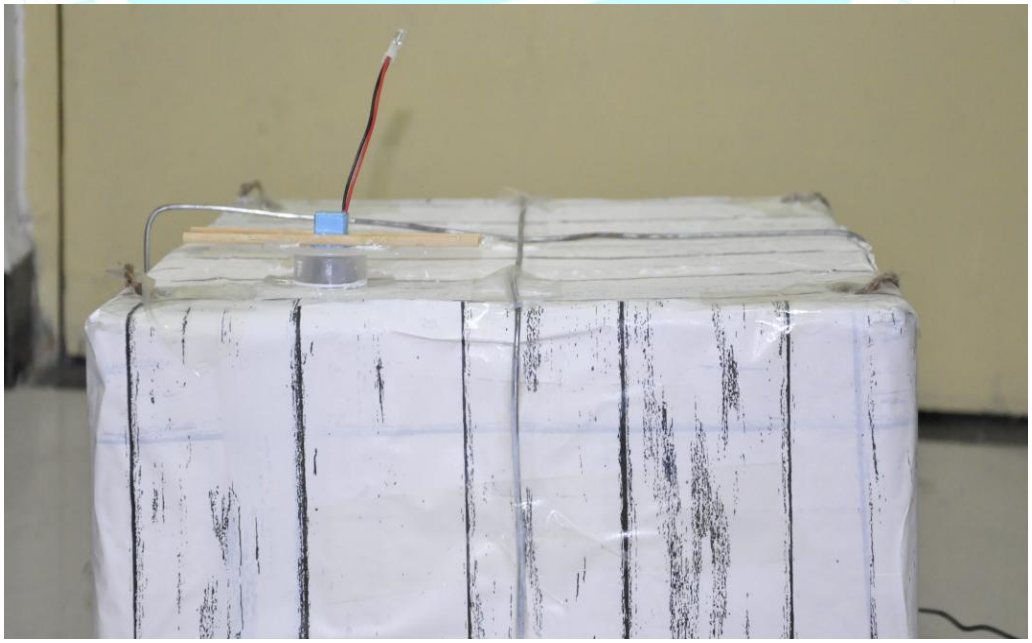


图 2 上部增速装置图

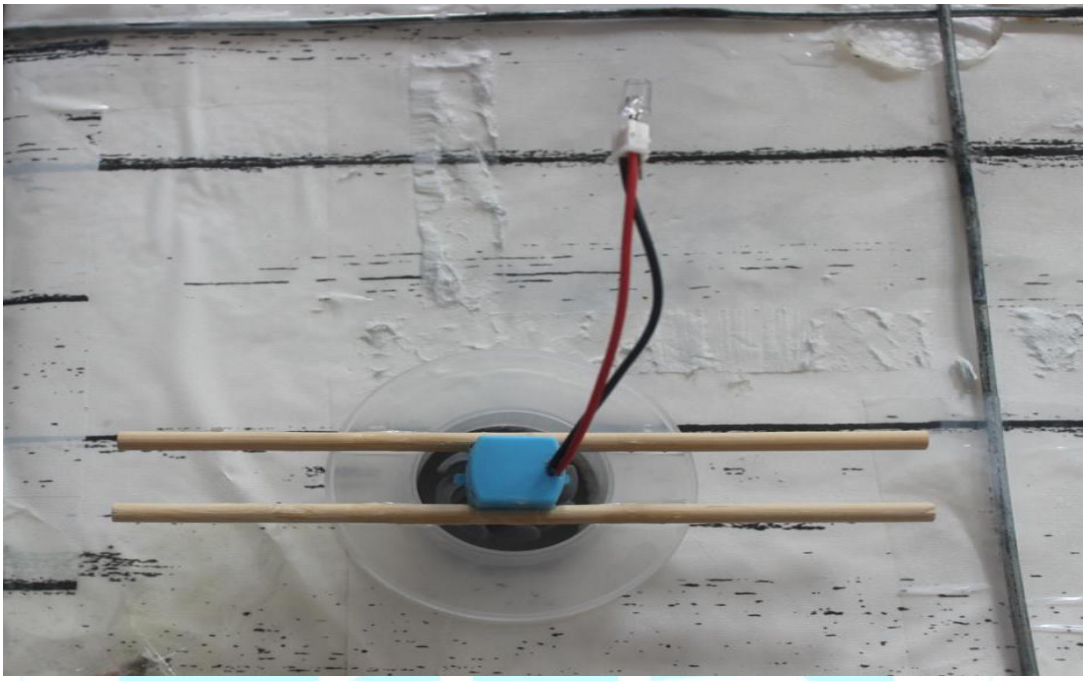


图 3 上部增速装置+发电装置图

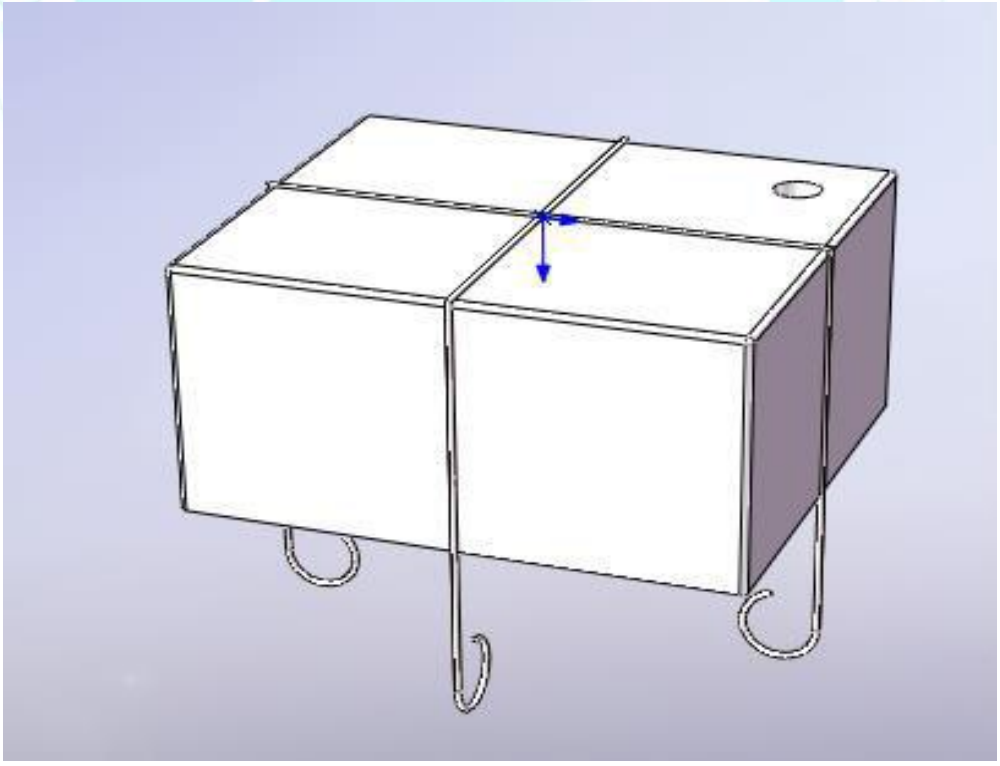


图 4 下部装置半潜设计图

图 5 下部装置泡沫水室图

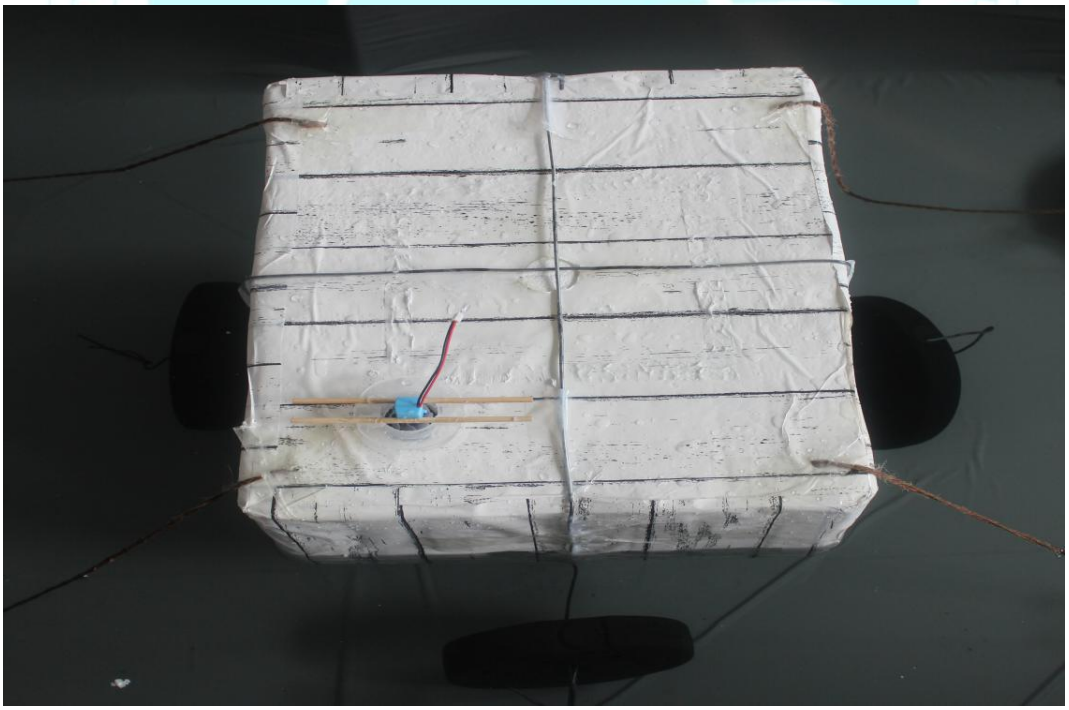


图 6 下部装置整体图

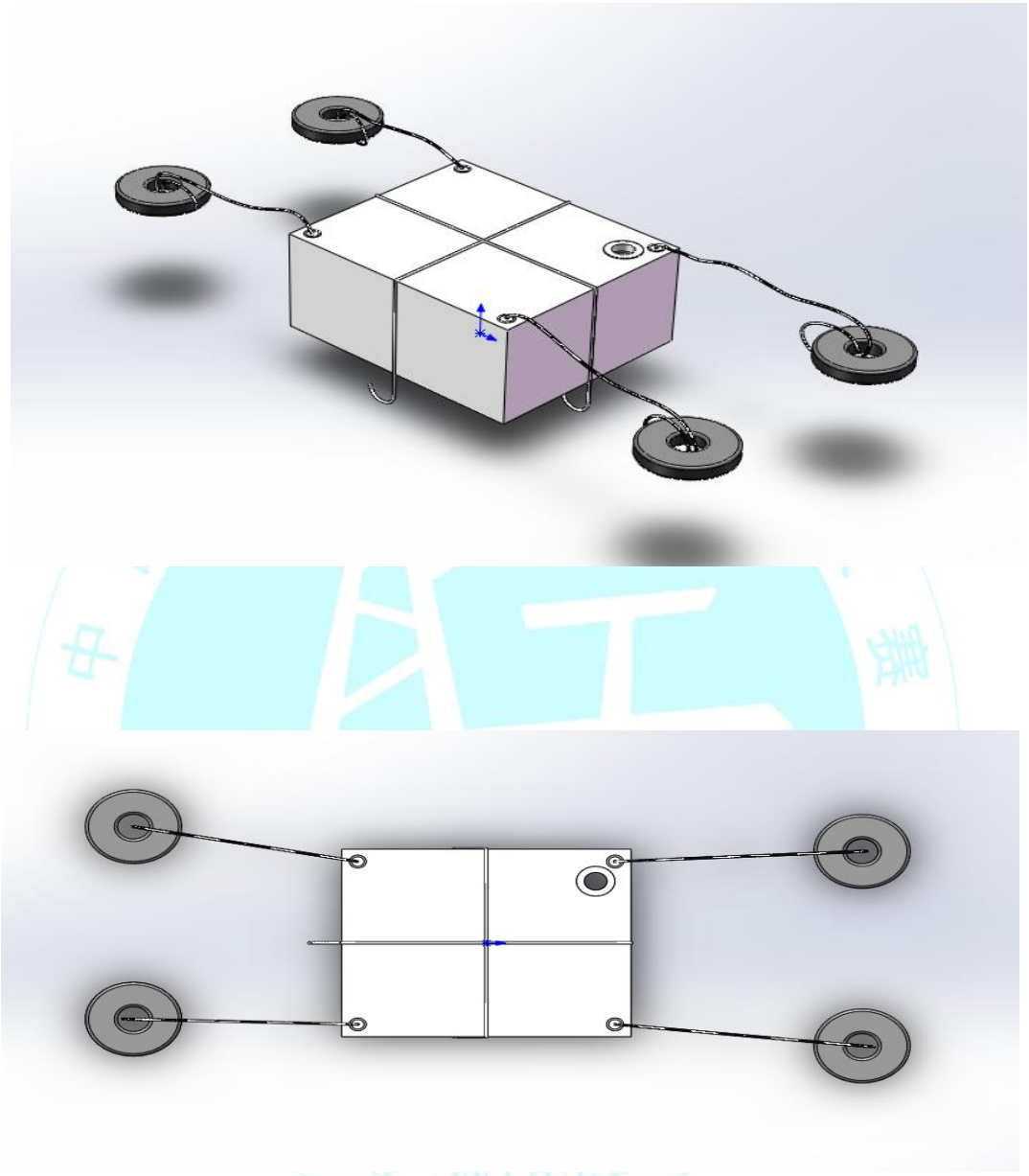


图 7 整体装置示意图

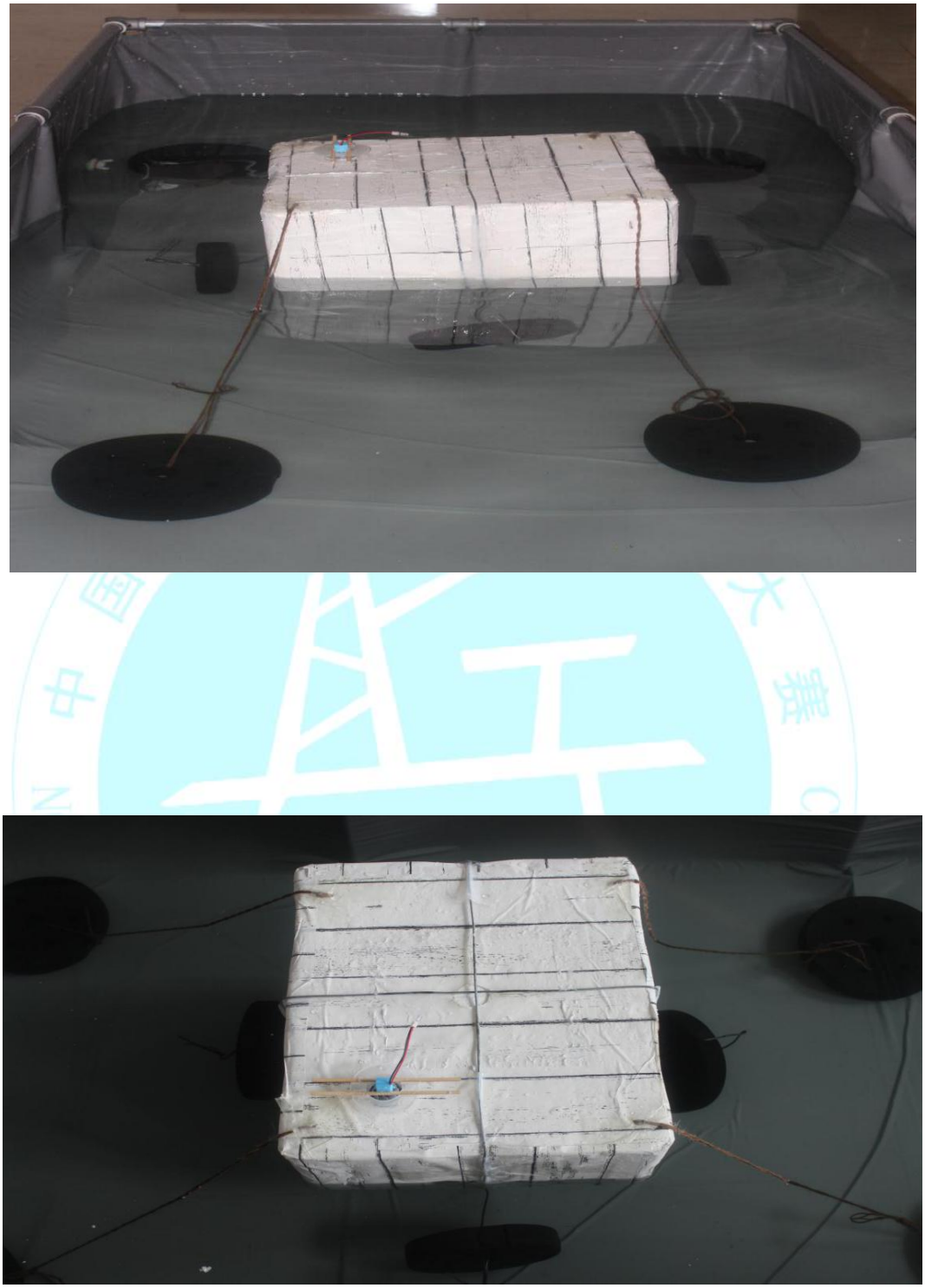


图 8 实物装置图

3.2 发电原理

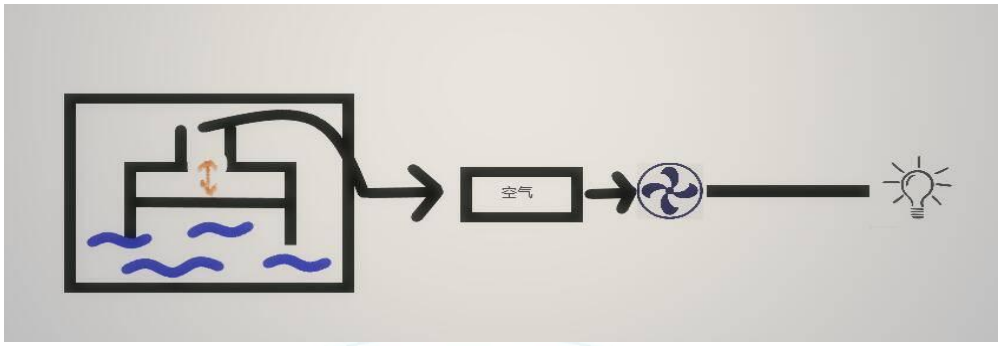


图 9

3.3 水下重物稳定装置

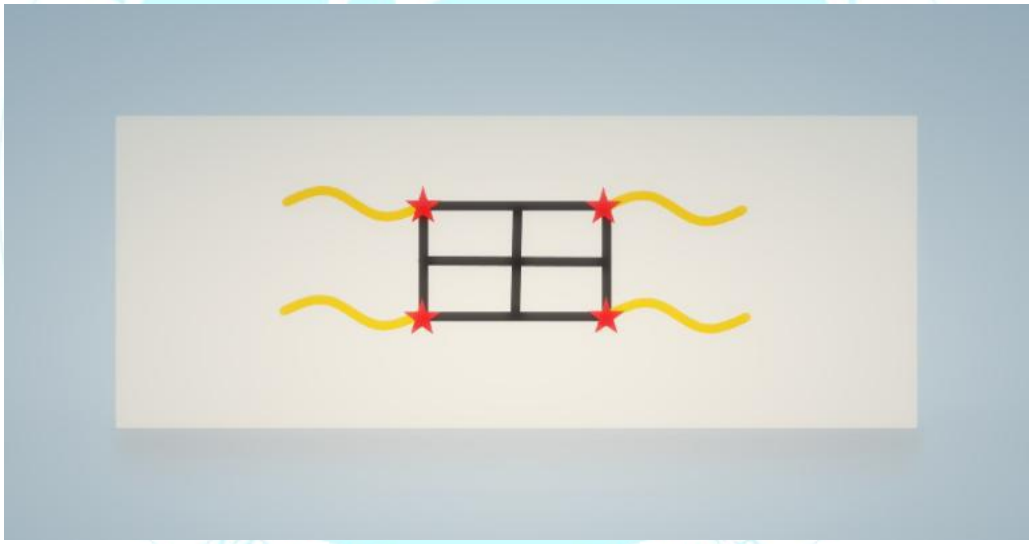


图 10

绳下挂着重量相等的重物，若取方形泡沫箱的中点为力矩的中心点，则四个重物对中心点产生的和力矩为 0，达到稳定状态。

浮体及气室尺寸

方形泡沫箱既起到浮体的作用，其内部的空心部分又充当气室的作用。

方形泡沫箱：长 45CM 宽 38CM 高 22CM 箱体厚度 2.5CM

气室上端开口直径 3.4CM,

发电装置尺寸

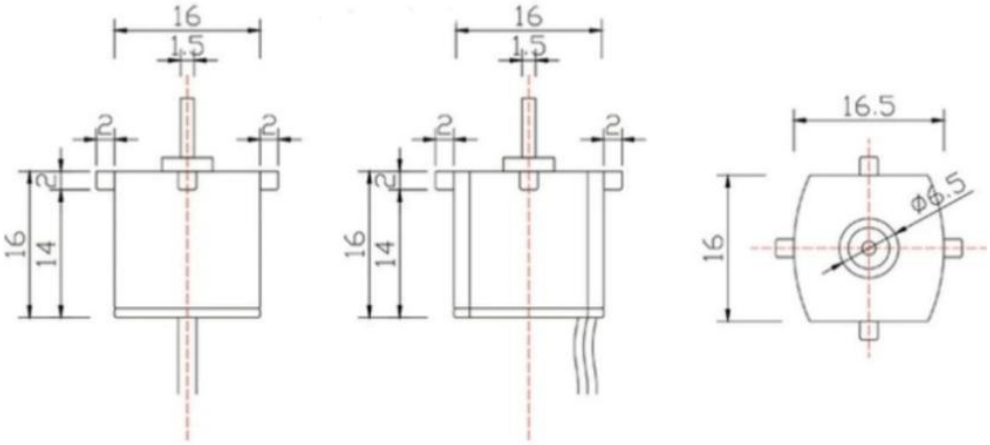


图 11

中国海洋大学 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 4 章　模型的系统组成

作品分为上下两部分，上部分为工作装置，下部分为稳定装置。

上部分主要由三部分组成，分别为发电部分、浮体部分及固定部分。利用最环保经济的泡沫作为主体部分，设计作为水室，经过本团队计算及测试气体流速，选择在水室上部距右端 5cm 处开直径为 3.4cm，高度约 2cm 的圆柱形出口，出口上方安装连着灯泡的叶轮。

发电部分由一个简易的马达和叶轮组成，当装置工作时，波浪运动带动水室中的气体快速流动，从而使叶轮迅速转动，将机械能转化为电能，使灯泡发亮。

下部分的稳定装置利用的是海洋钻井半潜式思想，其最大特点是在大波浪力作用下的摇摆角度小、稳定性好、运移性好。由连接体和重物组成，本模型连接体采用刚性杆件硬铁丝，重物就地取材用哑铃片代替，简单方便，易于计算装置的稳定性。一定程度上也参考重力式平台在浅海区域，重物直接沉于海底，依靠平台自重稳定工作。平台底部与刚性杆件连接的重物可增可减，平台可根据波浪能强度选择合适作业地点。固定部分利用海洋作业平台锚泊定位，在水室上部分的四个角用绳子于重物相连沉于水底，保证了上部装置的稳定性。

第 5 章　模型优缺点分析

5.1 优点

作品模型的优点主要在于上部分工作装置利用振荡水柱发电。下部分装置与海洋钻井半潜式平台特点结合实现装置稳定。

振荡水柱波能装置的优点是相对脆弱的机械部分只与往复流动的水流或空气流接触，不与海水接触，防腐性能好；通过气室将低速波浪能量转换成高速运动的气流，本作品上部分工作装置依据此原理，利用环保材料设计，制作简易，环保科学。

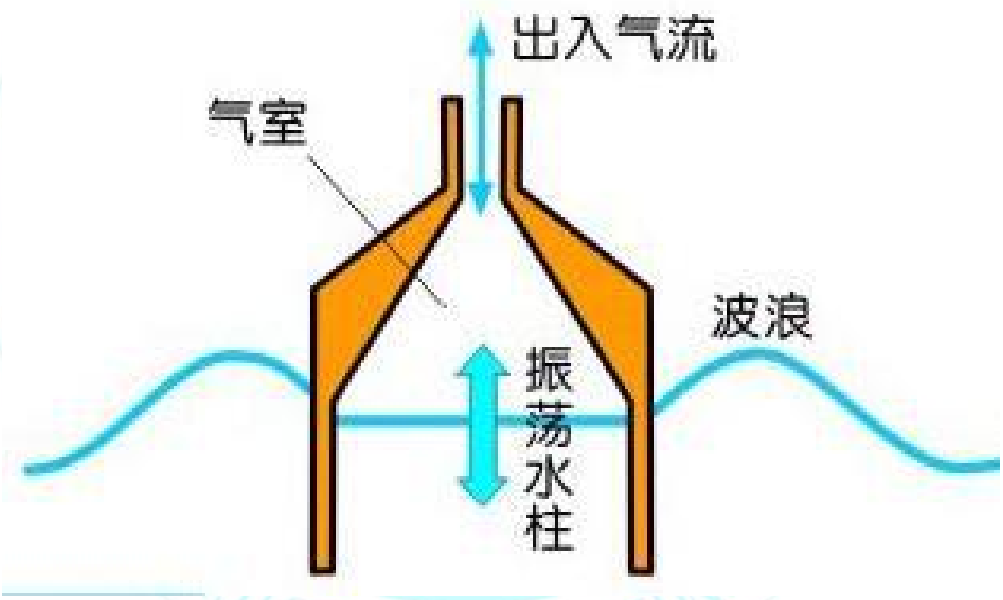


图 12

下部分装置针对海洋钻井半潜式平台特点，半潜式平台特点与锚泊特点结合，克服了半潜式平台的垂荡运动。所以在波浪上的运动响应较小，由于下体都浸没在水中，其横摇与纵摇的幅值都很小，有较大影响的是垂荡运动，参考平台图如下：

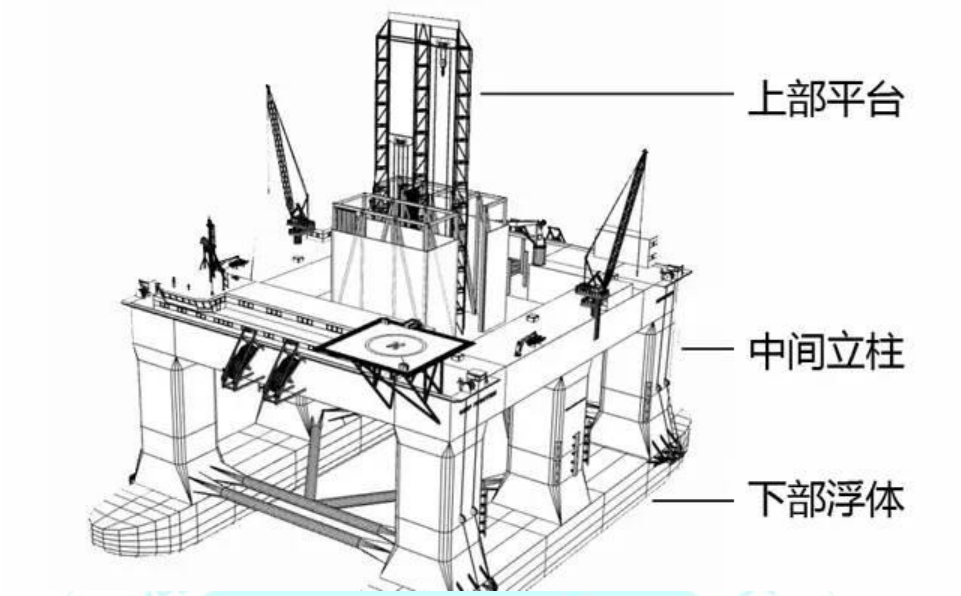


图 13

本作品利用半潜式平台的垂荡作用，使水室在收集转换波浪能的同时可以上下浮动，加速水室内水柱的变化，更好地使空气的流动速度增大，从而提高发电效率。对于如何提高波浪能的收集效率，使液体流动速度增大。

本设计作品底部的重物可增减，因此可灵活根据海洋环境作业，在深海区域，装置为半潜状态，实现稳定（如图 14）；在浅海区域，装置依靠自重稳定工作（如图 15）。除此之外，将本装置与固定工作平台或堤岸固定，将更好地实现能量的收集与转换（如图 16）。

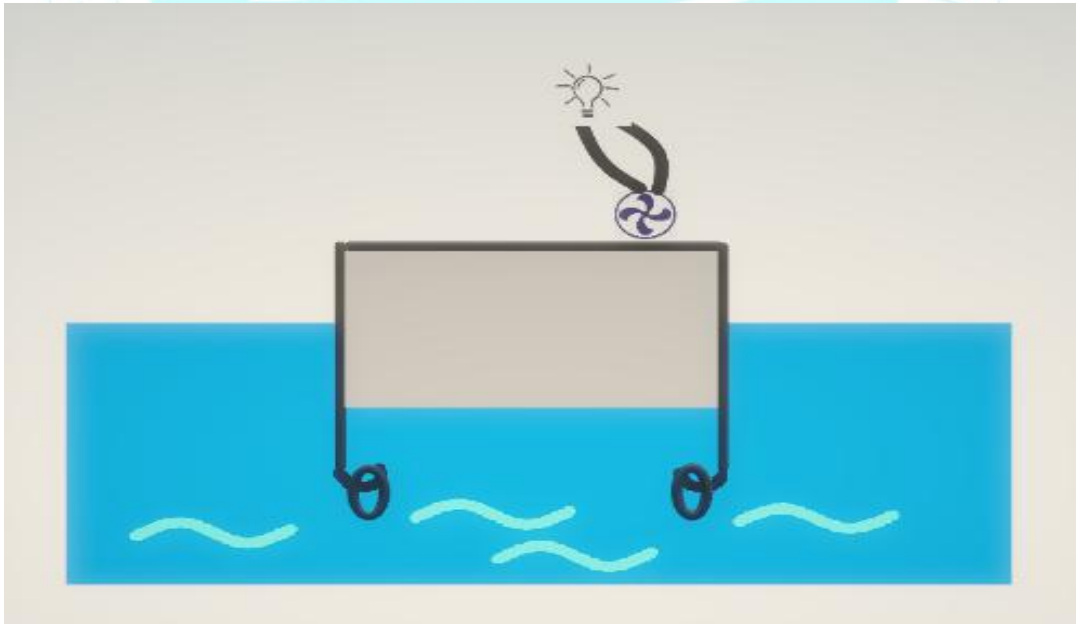


图 14

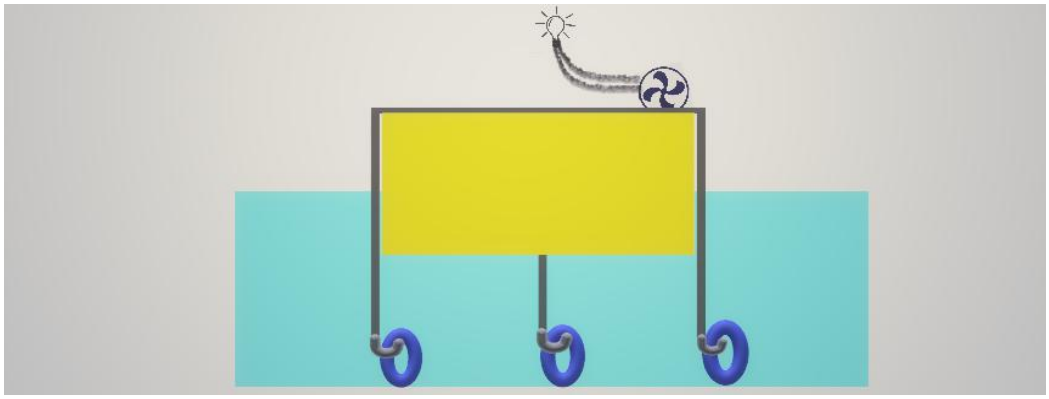


图 15

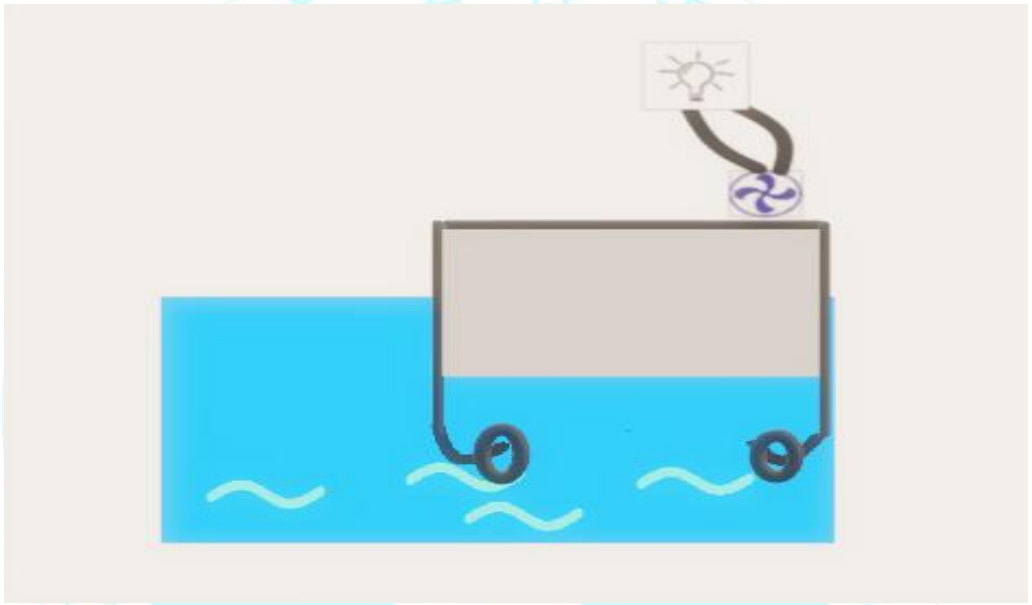


图 16

5.2 缺点

由于本团队技术知识水平有限，模型设计尚不完善，不能确保有足够应对较大风浪的条件；波浪运动的不稳定性，可能导致发电装置工作不稳定；模型设计对于波浪能的收集仍不够完善，可能出现没有足够大的空气能和涡旋能转换成电能的情况。此装置转换电的所损失能量过大，收集空气能和涡旋能时无法保证其旋转方向一致，导致能量转换低

第 6 章 模型性能分析

6.1 发电装置

波浪能是指海洋表面波浪所具有的动能与势能，是海面在风力作用下产生的波浪所具有的能量，它实质上吸收了风能而形成的。波浪的能量与波高的平方、波浪的运动周期以及迎风波面的宽度成正比。

该模型的发电装置是利用汽轮机原理，构造一个上端开口半径明显小于下端开口半径并与大气相连，下端开口与水面相通的充满气体的圆柱形塑料圆筒，并且与其大气相连的上端开口处设置与发电装置相连的叶轮。当水面上的波浪涌动时，与水面相通的开口也将存在同样做强迫震荡的水柱。水柱的不断运动导致管道内充盈的气体被不断的压缩与膨胀，由于气体体积变化的量较大，气体只能由上端开口出，上端开口设置的极小，从而导致进行补充和排出的气流在上端开口处的速度极快，有足够的速度推动上端开口处的叶轮转动以达到发电的目的。

电机发电方式：交流发电
电机尺寸：16.5mm*16mm*16mm
电机性能：低速无阻型，效率达 98%
电机材料：永磁
风叶直径：灰色 8 叶Φ26mm
风叶材料：塑料
输出电压：0.01—1V
输出电流：0.001—0.1A
额定速度：3（m/s）
额定转速：3000（rpm）
发电效率分析
经试水实地测量，U = 0.8 V , I = 0.01 A

$P_{发电}$ = U * I = 0.8 * 0.01 = 0.008 W

$P_{装机}$ = $U_{额定}$ * $I_{额定}$ = 1 * 0.1 = 0.1 W

η = $P_{发电}$ /$P_{装机}$ == 0.008 / 0.1 * 100 % = 8 %

6.2 平台稳定性

本模型下部分为箱式半潜平台，它作为一种非常重要的移动式结构物，由于环境条件的恶劣、作业的特殊要求，其安全性至关重要（特别是平台本身的稳性）。结合半潜式平台由于抗风浪能力强、甲板面积及可变载荷大、适用水深范围广，因而具有多种作业功能等特点设计出的基础模型。

通过对半潜式平台的稳性分析，可以总结出改善半潜式平台稳性、提高可变载荷的方法：

（1）风倾力矩的计算结果是影响半潜式平台稳性的一个非常重要因素。在设计初期，应当进行平台风洞试验，以便准确确定风倾力矩。

（2）半潜式平台又称为柱稳式平台，由立柱决定平台的稳性，应适当增加立柱水线面面积，增大立柱面积可有效提高平台的许用重心高度。

（3）擦损工况一般不是破舱稳性的决定性工况。适当减少联通上船体和浮体的通道面积，可有效提高半潜式平台的破损稳性。许用重心高度曲线是平台稳性结果的直接反应，应经船级社认可后写入操船手册；其在设计、运营中对平台稳性、安全都是至关重要的指导。

本团队所设计的装置，可为海上作业平台，海上工作装置等规模不等的平台供电，小到为海洋勘测定位的小型装置 GPS，雷达等，大到海洋钻井平台，勘探船等，可设计制作出与不同平台相匹配的发电装置的大小，也可以实现独立发电，根据海洋水深，将装置的底部改造，可实现半潜式稳定或重力式稳定的状态。

6.3 分析与校核

波浪能具有能量密度高、分布面广等有优点，它是一种取之不竭的可再生能源。但波浪能的利用并不容易，波浪能是可再生能源中最不稳定的能源，波浪不能定期产生，各地区波高也不一样，不利于大规模开发。按照装置的固定方式来划分，波浪能转化装置可以分为固定式和漂浮式两种，考虑到试验场地与制作难度，本次比赛选择漂浮式波浪能转化装置达到的最终效果最好。漂浮式波浪能转化模型建造难度较固定式的难度小，但其工作效率一般低于固定式装置，且稳定性比固定式装置稍差，最为重要的是漂浮式装置发展的前景远大于固定式装置，因为其可以适应深海海域工作，并为工作平台提供了源源不断的电能。该平台选择气动式作为能量的主要传递方式，气动式波浪能转化装置的其中一个环转化环节是通过气体来传递能量。发电装置作为电能转化环节，对波浪能发电系统的性能至关重要，但考虑的技术和制作的最终效果问题，最终还是选择在网上选购一个满足比赛要求的小型水利发电装置.

振荡水柱式波浪能转化装置是利用一个水下开的气室吸收波浪能的技术。波浪驱动气室内水柱反复运动，再通过水柱驱动气室内的空气，进而由空气驱动叶

轮，得到旋转机械能，或进一步驱动发电装置，得到电能。由于采用的是漂浮式装置，核心的水利发电装置不与水接触，可以有效的降低水中对叶轮的阻力，也不需要对发电装置进行防水处理，进一步增强了模型的可靠性。

对于浮体的可靠性分析，主要考虑在环境载荷的作用下，模型平台结构可能产生的多种破坏形式，比如波浪对平台模型的影响强度超过模型本身可接受的强度范围，会导致平台摇晃剧烈，甚至整个平台倾覆造成平台模型的严重破坏。为了提高平台模型的稳定性，选用底面积较大的正方形泡沫板，增强了平台模型的抗波浪击打能力，在方形浮体的下方添加了四个重物，增加了平台模型整体的重量，也能相应地提高平台的抗击打能力。当不加方形浮体下面的四个重物时，定倾中心与重力的作用点相重合，即使倾斜后两点仍在一条垂直线上而不产生力矩，如果没有波浪的干扰，即平台模型不受到任何外力的作用，浮体就会在新的位置上得到新的平衡，我们称之为随遇平衡。但是不受任何外力只是理想情况，真实中是无法实现的，即使平台模型不受波浪的影响，也会收到潮流能的影响，所以想要让平台模型真正的保持稳定必须使重心的作用点处于定倾中心的下方，实现稳定平衡。当方形浮体下方所挂的重物的质量大于浮体的重量时，模型的重心作用点一定会移到水面之下，浮体发生倾斜时，会产生一个新的浮心，通过新浮心的浮力作用线与浮体原来平衡时的浮轴的交点，即定倾中心一定会在水面之上，达到一种稳定平衡。

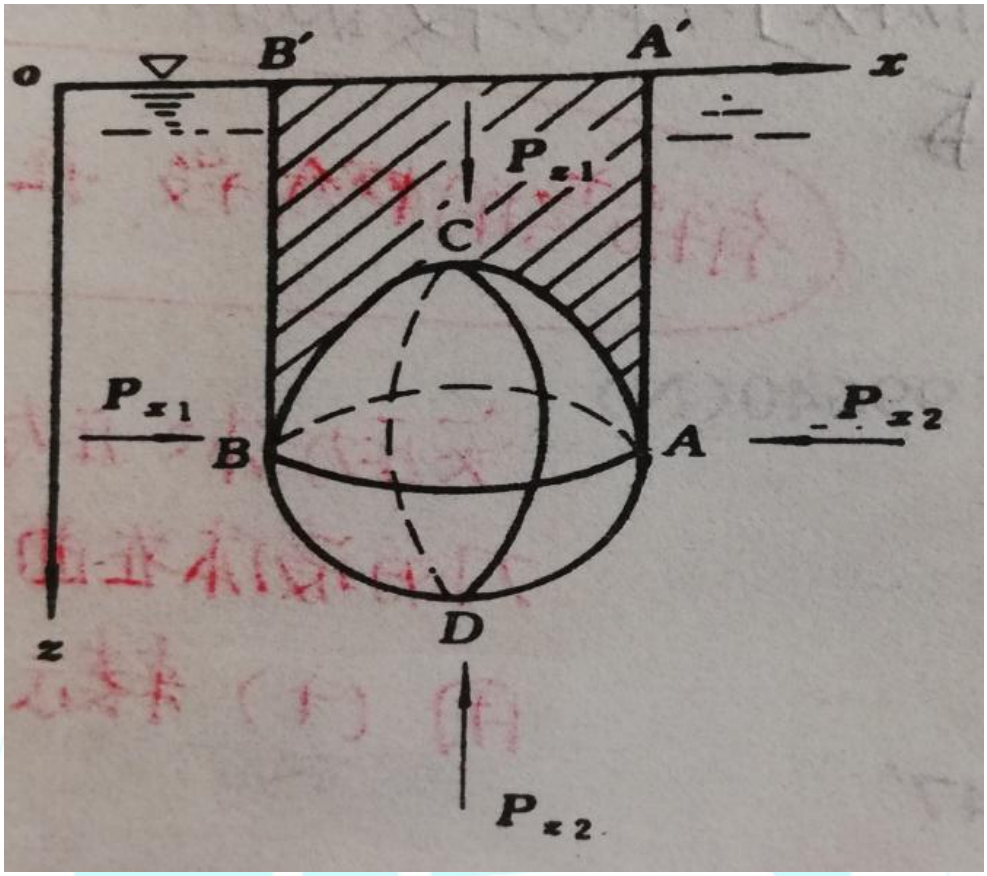


图 8

因为物体两侧表面上点均处于液体内部相等深度的位置，而且压力又总是沿着受压面各点的内法线方向，所以作用在物体两侧面上液体总水平分力大小相等，方向相反，互相抵消。浸没在液体中的物体所受的液体总压力是一个垂直压力，它的大小等于与物体同体积的液体重量，方向向上。

COEDC
OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPANY

第 7 章 附录

7.1 发电效率分析

经试水实地测量，U = 0.8 V , I = 0.01 A

$P_{发电}$ = U * I = 0.8 * 0.01 = 0.008 W

$P_{装机}$ = $U_{额定}$ * $I_{额定}$ = 1 * 0.1 = 0.1 W

η = $P_{发电}$ /$P_{装机}$ = 0.008 / 0.1 * 100 % = 8 %

7.2 对模型进行浮力检验

$M_{重物}$ = 1.25 * 4 = 5 Kg

经称重，$M_{平台}$ = 1,2 Kg

$G_{模型}$ =（$M_{重物}$ + $M_{平台}$）* g =（5 + 1.2）* 9.8 = 60.76 N

接触水面部分的面积：

$S_{触水}$ = 45 * 38 -（45 - 5）*（38 - 5）

= 45 * 38 – 40 * 33

= 390 cm^2

$G_{模型}$ =（$M_{重物}$ + $M_{平台}$）= $F_{浮力}$ = $S_{触水}$ * $\rho_{水}$ * g

设 h 为模型稳定时的吃水深度

（5 + 1.2）* 9.8 = 390 * 10^{-4} * h * 9.8

h = 0.158 m = 15.8 cm < H = 22 cm

模型在水中可以稳定的浮起

7.3 对模型的稳定性进行检验

假设波浪是理想化的模型，既波浪可以由正弦函数方程表示出来；波浪与模型碰撞时，波浪的动量全部传送给了模型，没有损耗。

设波浪的表达方程为

$Y = A \sin(\omega x+\varphi)$

试水现场环境，波高 10 cm, 周期为 2 s，浪速为 0.5 m/s

$T = \frac{2\pi}{\omega}$, $\omega = 2\pi / 2 = \pi$

$A = 5$

波浪的表达方程

$Y = 5 \sin(\pi x)$

要考虑模型的稳定性，只需分析模型收到的最大力即可，既只需考虑一个波峰对模型的冲击即可。在分析波浪对模型的冲击时，可将此过程简化为两个物体的撞击，撞击过程极短，满足动量定理。

波峰的质量：

$S_{侧面} = \int_0^1 5\sin(\pi x) = -\frac{5}{\pi}\cos(\pi x)|_0^1 = 3.18\ cm^2$

$V = S_{侧面} * H = 3.18 * 38 = 120.84\ cm^3$

$M_{波浪} = V * \rho = 120.84 * 10^{-6} * 1000 = 0.12$ Kg

$M_{波浪} * V_{波浪} = M_{模型} * V_{模型}$

$0.12 * 0.5 = 6.2 * V_{模型}$

$V_{模型} = 0.0096$ m/s

假设，波浪与模型碰撞的时间为 0.1s

$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0.0096}{0.1} = 0.096\ m/s^2$

$F_{冲击力} = M_{模型} * a = 6.2 * 0.096 = 0.59$ N, 模型收到的冲击力极小，远小于模型本身的重力，因此模型可以很好的抵抗住波浪的冲击，维持自身的稳定。

中国海洋工程设计大赛
CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION
COEDC

团队编号：___A20200509____

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

设计制作组

完成日期 2020 年 10 月 12 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

从调研结果可知，海洋发电装置与海洋环境，海水流速之间关系密切的几个参数，包括海流能，潮汐能，海洋温差能海流发电装置和风力发电装置的固定形式有很大的不同。主要通过三种支撑方式：重力支撑(gravity base)—由坚固钢和混凝土固定在海床底部；桩支撑(Mono．pile，Piled Jacket)—通过定位，转子 L，灌浆，单个或双个桩；浮体支撑(Floating)—在深海领域中，将其固定在浮体上。 英国 MCT 公司(Marine Current Turbines Ltd) 建立了单桩固定支撑技术，并认为是当前支撑海流发电机的最佳选择。但考虑安装时起重的驳船以及叶片直径的大小，一般所选海域的深度为 20~40m。

本产品将采用水平轴螺旋式发电方式，将海域深度提高了 20 多米，并将支撑海洋平台装置的材料全部改成悬浮式装置，使平台在海面上减少了重力，实现了更加轻便化的特点，此外该平台所发电的发电量约为海水能量的 56%，极大地减少了资源和能量的消耗，为海洋可持续发展做出了巨大的贡献。

目 录

第 1 章　赛题分析.....1
1.1 赛题背景.....1
1.2 海上能源分析.....1
1.2.1 潮汐能.....1
1.2.2 波浪能.....1
1.2.3 海流能.....1
1.2.4 温差能.....2
1.3 海洋环境分析.....2
1.3.1 网络时代海洋环境信息系统的发展趋势.....3
1.3.2 海洋信息快速反应系统、决策支持系统和专家系统.....3
1.4 海洋特点分析.....3
第 2 章　作品设计.....5
2.1 设计背景.....5
2.1.1 水平轴螺旋桨式发电装置的发展趋势.....5
2.1.2 内循环发电装置的优势.....6
2.1.3 内循环发电装置目前存在的问题.....6
2.2 设计构想.....7
2.2.1 以水平轴螺旋桨式发电装置为平台.....7
2.2.2 以海流能提供的能量为主，技术平台手段为辅.....7
第 3 章　作品概述.....9
3.1 作品简介.....9
3.2 作品服务功能.....9
第 4 章　作品创新及特点.....13
4.1 作品创新性.....13

4.2 作品特点.....13
第 5 章 项目设备.....15
5.1 目前海上的海流能发电装置.....15
5.1.1 海流发电机组设计关键.....15
5.1.2 海流能发电装置的结构形式.....15
5.2 海流能发电装置国内外发展和应用情况.....16
5.3 设计的海流能发电装置.....17
第 6 章 健康安全与环境管理（HSE）.....19
参考文献.....21
致谢.....22

第 1 章　赛题分析

1.1 赛题背景

海洋可再生能源具有绿色清洁，可持续利用，开发潜力较大等优势，发展海洋可再生能源开发与利用技术，可满足或补充海岛开发，海上设备运行，沿海地区用电等需求，如海洋波浪蕴藏着巨大的能量，以波浪的能量为动力生产电能的方式称为波浪发电，对于保护海洋生态环境，发展海洋经济，推进文明生态建设具有重要战略意义。通过此次赛题背景分析进行创新设计。

1.2 海上能源分析[1]

1.2.1 潮汐能

潮汐能（tide energy）是指海水周期性涨落运动中所具有的能量。其水位差表现为势能，其潮流的速度表现为动能。这两种能量都可以利用，是一种可再生能源。由于在海水的各种运动中潮汐最守信，最具规律性，又涨落于岸边，也最早为人们所认识和利用，在各种海洋能的利用中，潮汐能的利用是最成熟的。

优点：蕴藏量十分可观。不受洪水或枯水影响，没有污染，取之不竭。

缺点：收集能量的要求高。只有出现大潮，能量集中时，并且在地理条件适于建造潮汐电站的地方，从潮汐中提取能量才有可能。

利用潮汐能发电的两个物理条件：能产生潮汐的幅度必须大，至少要有几米。

海岸的地形必须能储蓄大量海水，并可进行土建工程。

1.2.2 波浪能

波浪能是海洋能的一种具体形态，也是海洋能中最主要的能源之一，它的开发和利用对缓解能源危机和减少环境污染是非常重要的。汹涌的海浪运动产生巨大的、永恒的和环保的能量，如果能将海浪的动能及其他水面的波浪能充分利用起来，则世界能源的前景会相当广阔和光明。

缺点：能量密度小、运动速度较慢。不稳定。工作环境恶劣。

波浪能可使用的环境：基岩港湾海岸的突出部位和外围海岛的向外海一侧海岸。前方无岛礁遮挡，且海域开阔的地方。地区平均潮差较小。

1.2.3 海流能

海洋中由于海水温度、盐度分布的不均匀而产生的海水密度和压力梯度，或

由于海面上风的作用等原因产生的海水大规模的方向基本稳定的流动，称为海流。海流所具有的动能称为海流能。海流的能量与流速的平方和流量成正比，因流量为流速和过流面积的乘积，故也可以说海流的能量与流速的立方成正比。

优点：规律性强，可预测且能量稳定；能量密度大。海流发电水轮机置于海平面下不占用陆地面积，不会影响景观，且对周围海洋生态影响较小。

缺点：存在着一系列的关键技术问题，包括安装维护、电力输送、防腐、 海洋环境中的载荷与安全性能等。

条件允许下，存在海流的地区都可使用。

1.2.4 温差能

在各种海洋能之中，海洋温差能属于海洋热能，其能量的主要来源是蕴藏在海洋中的太阳辐射能。海洋温差能具有储量巨大以及随时间变化相对稳定的特点，因此，利用海洋温差能发电有望为一些地区提供大规模的、稳定的电力。

优点：稳定性高。可再生性强，能量品位高，资源处于远离大陆的海洋环境。

缺点：目前，海洋温差发电仍是一项高科技项目，它涉及许多耐压、绝热、防腐材料问题，以及热能利用效率问题（效率现仅 2%），且投资巨大，一般国家无力支持。

1.3 海洋环境分析

海洋环境信息的特点 [2] ：

1. 海洋环境信息与陆地的信息相比有许多不同之处，如海水具有流体特点，海洋中的建筑物和人工地物较少，海洋中某些信息的改变主要受自然力的影响，诸如海水侵蚀和冲刷、海底地壳变迁等。概括起来，海洋环境信息主要具有如下特点：

2. 海洋信息具有陆地地貌信息的复杂性和流体信息的独特性双重特点。如海底地貌中的海盆类似于陆地和盆地；岛屿上的地貌特征用等高线表示等。海洋的主体是海水，这就决定了部分海洋信息的动态流动性。

3. 海洋信息直接获取难度大。海洋生物研究、海底地形测量等要借助海上交通工具、

4. 潜水设备和先进的测量设备。海洋信息多样性。包括丰富的地形信息、矿产资源信息、水产资源信息、水文气象信息和海洋大地物理信息等。

5. 海洋信息具有变化尺度多样性的特点。即有瞬时变化的信息，如海啸；也有年季变化的信息，如潮流；还有万年变化的信息，如地质构造等。

海洋边界信息的模糊性。海洋中地理区域的边界诸如领海界线、大陆架、海

名称	分布	流速	深度	方向

洋经济开发区、禁止捕捞区、养殖区等界限无法像陆地区界限那样精确和清晰，呈现出一定的模糊性。

1.3.1 网络时代海洋环境信息系统的发展趋势[3]

由于海洋信息数据量不断增大，数据处理的难度也随之增大。因此，目前各个国家均建立了通过网络联接的，以数据管理、分析、服务为主要宗旨的数据中心群，这些数据中心群构成了世界海洋资源环境信息基础工程的主要组成部分。针对网络化发展的特点，科研工作者们把研究的重点放到了网络环境下数据的传输、分析与互操作。通过增加网带宽度，改进算法与数据的存储方式以实现即时或接近即时获得异地信息。这种宽带网络还应是高速图形图像显示网络，以便在瞬息间了解世界各地资源分布、社会经济活动的地域空间分布与运行状态。同时进行数据互操性的研究、制定数据标准，对地理信息进行语义研究等，以实现数据最广泛的共享。随着 Internt 遍布全球，网络宽带的不断增加，使用户能够在国家或世界范围的分布式环境下实现资源环境数据的共享。

1.3.2 海洋信息快速反应系统、决策支持系统和专家系统[4,5]

信息的及时反馈是制定决策的前提，为满足决策支持的需要，海洋资源环境信息系统将准确、及时、快速地把海洋信息反映给决策者。海洋资源环境信息系统在两个方面具有快速反应能力：

1. 在信息数据处理方面，由于海洋资源环境信息系统的数据来源不同，有遥感获得的栅格图像、测深仪器得到的水深数据、专题地图上的专题信息、网上传输的数据等，因此需要及时的对来自不同渠道的数据进行整理，转化成系统存储形式，实现对系统数据的迅速更新；

2. 将不同学科的信息进行综合，以图形或图像的方式将海洋变化反映出来，表现出对外界变化的快速反映能。因此，海洋资源环境信息系统作为政府决策和预灾防灾的快速反应系统成为它的主要发展趋势之一。同时，随着人工智能、神经网络与 GIS 的结合，使海洋资源环境信息系统具有知识处理和进行启发式推理的能力，能够完成复杂的空间分析，从而作为决策支持系统帮助进行海洋开发与管理，也可以作为专家系统在海洋研究中发挥作用。

1.4 海洋特点分析[6-8]

海洋特点分析如表 1.1。海上流速和海洋方向分别如图 1.1 和 1.2 所示。

日本暖流又称“黑潮”	主流沿中国台湾岛东岸、琉球群岛西侧向北流，直达日本群岛东南岸。	流速最大时每昼夜 60~90 公里	400m	从中国台湾岛东岸、琉球群岛西侧往北流
黄海沿岸流	经山东和江苏沿岸的盐度较低的洋流。	流速 25cm/s 左右		
黄海暖流	东海东北部，济州岛以南。	平均流速只有 5cm/s，最大也不超过 10 cm/s		
北赤道暖流	在赤道北侧。			东向西流
北太平洋暖流	在东经 140～160°。	流速从西部海域 0.5m/s 减至东部 0.1m/s。		

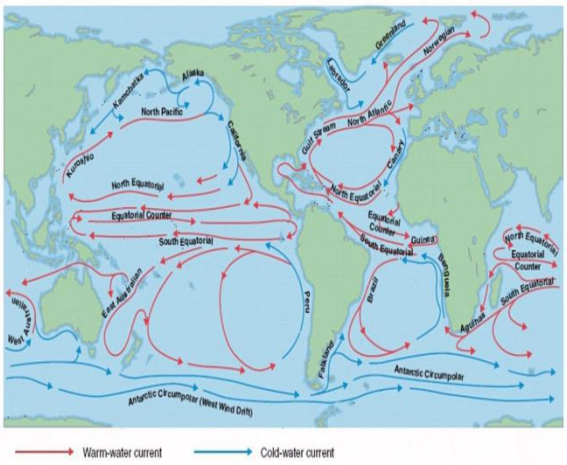


图 1.1 海洋流速

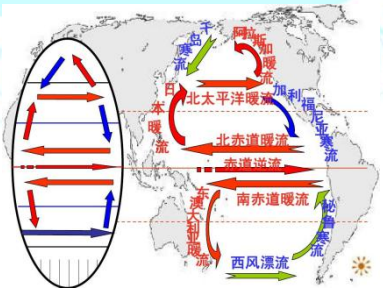


图 1.2 海上方向

第 2 章　作品设计

2.1 设计背景

2.1.1 水平轴螺旋桨式发电装置的发展趋势

海流能是指依附在海水中的能源。海洋通过各种物理过程或化学过程接收、存储和散发能量，这些能量以波浪、海流、潮汐、温差等形式存在于海洋之中。海洋面积占地球总面积的 71%, 到达地球的各种来自宇宙的能量，大部分落在海洋上空和海水中，部分转化为各种形式的海洋能，其动能称为海流能。

海流能是清洁的可再生能源。开发和利用海洋能对缓解能源危机和环境污染问题具有重要的意义，许多国家特别是海洋能资源丰富的国家，大力鼓励海洋能发电技术的发展。由于海洋能发电系统的运行环境恶劣，与其他可再生能源发电系统， 如风电、光伏发电相比，发展相对滞后，但是随着相关技术的发展，以及各国科技工作者的努力，近年来，海洋能发电技术取得了长足的进步，陆续有试验电站进入商业化运行。可以预见，不远的将来,随着海洋能发电技术日益成熟。将会有越来越多的海洋能发电系统接入电网运行。由于海洋蕴涵量巨大，海洋能必将成为能源供给的重要组成部分。

针对水平轴螺旋桨式海流能发电装置与现代风力机的异同点，分析其发电原理。依据风力机桨叶基本翼型，考虑海水密度和海流流速等特点，利用流场仿真方法，设计了“水下风车”发电机组的桨叶，并分析了机组的传动机构、密封、水下安装等关键技术的设计方案，真实搭建了 “水下风车”模型样机。通过海下发电试验表明“水下风车”机组及关键元器件的设计方案可行。

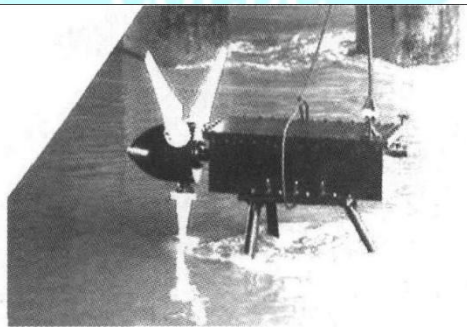


图 1.3 水下风车

为了提升海流能发电装置的的能量转换效率，研发了一种水平轴式 S 形叶轮海流发电装置。采用升力法设计叶轮结构,建立 CATIA 模型并开发了模具，以便于大规模的加工叶轮。设计了 9 槽 8 极绕组水下防腐永磁发电机，并进行了发电机系统结构的设计。导流罩的线性选择使得海流速度增加 14%~23%，但流速过大又

造成了装置不稳定.通过工程样机海上试验，验证了永磁发电机的发电性能,同时检测了发电装置实验阶段的防水及防腐效果.轮机在流速达到 0.32 m/s 时即实现无负载自起动。在海水流速为 2.5 m/s 时，轮机的获能功率可达到 1 150 W；在海水流速为 2 m/s 左右的海况下，轮机的实际获能功率在 900 W 上下，获能效率最高为 32%，提高了能量的转换效率。

2.1.2 内循环发电装置的优势

现如今，新型水平轴螺旋发电装置在海洋发电装置中已经占主导地位，在海洋流速，海潮，海浪这些事故频发的地段，我们的内循环装置可以发挥出巨大的优势，在能量转换和应用方面都极大的减少了能源的消耗，推动了我国海洋环境的发展，减少了海洋能源的消耗。

其次内循环发电装置技术涵盖了水平轴螺旋发电装置和其它发电装置技术的优点，是海洋发电装置技术中的进一步发展，同时扬长避短，内循环发电装置在未来的发展中，它将会成为所有海洋发电装置的一个新型理念，它将引领我们国家的海洋发电走向另一个新的高度。

2.1.3 内循环发电装置目前存在的问题

与此同时，目前我国在内循环领域产生的时间较短，技术并不完善，加上经验缺乏等因素，在建设过程中仍然存在着不少的问题，主要问题有一下几方面：

1. 维护问题

由于密封对于水下风车机组设计是十分重要，如直到机组安置到海水下时，才发现泄漏问题，将会造成电气元件的损坏，而且再次吊装维修的成本也相当高。

海水沙土会对密封面造成磨损，需设计防沙外罩或在机舱内安置水泵产生高于密封面周围水压两倍的水柱冲洗密封接触面。

2. 技术问题

由于海上内循环发电装置在我国科研领域内属于技术盲点，前期的技术不够成熟，目前只能适用于平台模型的制作，不能够大规模有效的推广。

3. 技术培养能力较难

基本的技术知识能够在较短的时间内有较大的提高，但是关键的核心技术就不是一朝一夕就可以培养出来的。这就增加了工作隐患，特别是海洋中一些浪潮比较大的地方。

4. 环境问题

工作地点在海上，容易受到海洋环境因素和海洋生物的影响，给工作带来了很大的困难。根据理论得出，物的安全态和环境的不稳定因素结合到一起是最容

易发生事故的。防微杜渐是防止事故发生的有效方法，就目前来说几乎不可能实现。

2.2 设计构想

2.2.1 以水平轴螺旋桨式发电装置为平台

在分析水平轴螺旋桨式潮流能发电装置的工作原理及特点的基础上，提出了25kW 潮流能发电原型样机的整体结构方案，设计了发电机齿轮箱一体化及功率分流合流式两级传动的机械结构，如图 2.1 所示。针对系统的一次能量捕获、传动系统及功率输出稳定性等关键问题进行了模型分析及仿真研究，仿真结果满足理论上的设计指标,验证了理论设计的有效性。对原型样机进行了海上试验，试验结果显示原型样机在海洋环境中运行良好，最大流速时的平均功率达到 23.8kW，验证了样机结构的合理性。

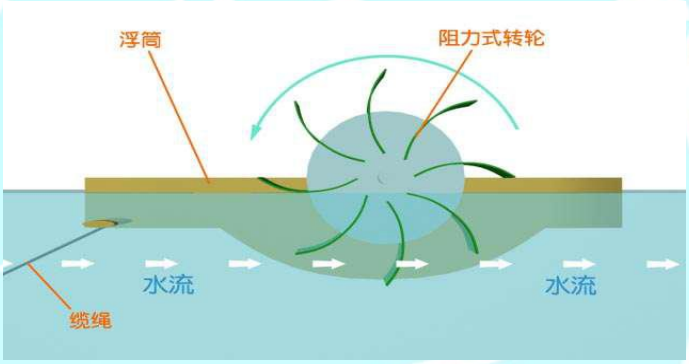


图 2.1 水平轴螺旋桨式装置

2.2.2 以海流能提供的能量为主，技术平台手段为辅

通过海洋流动产生的能量，通过技术平台进行转换，进行高效发电，其中主要功能有以下几个方面。

1. 能量内循环

通过海水的流速流进发电装置，进行循环利用，达到节约资源，保护环境。

2. 悬浮流动系统

该装置可以通过平台底部的漂浮装置进行移动，不需要太多的能量消耗。

3. 智能预测系统

该平台的智能预测系统可以通过海洋中的天气来自动判断海水的流速情况，并根据发电量的需求大小，进行快速预测，并指挥平台流向该海域。

4. 海域自动标识系统

每次在不同的海域中完成工作后，该系统将自动进行海域的标点，通过 GPS 进行精准定位，反馈到总控制系统并提交给上级。

5. 故障报警系统

在装置发生故障的第一时间反馈给上级，同时进行全面的平台自我检测，防止事故的发生，减少能源的损失。

6.蜂窝发电

分布式蜂窝发电是一种可灵活组合、可实现分布式布局的新型风力发电装置，从蜂巢布局得到启发，将风力发电单元进行小型化设计，采用横、纵向分级设计风力发电单元。每个发电机窝内，形成独立、稳定、灵活的运转结构。

海风吹动单个风轮叶片转动，多个叶片通过链条和传动轴叠加在一起，最终由发电机完成这个叠加在一起的机械能转化为电能，风利用率可达 80%以上，因而具有巨大的发展优势。

可实现能源梯级利用、环保性好，适合海上特殊场合钻井、采油作业。

第 3 章　作品概述

3.1 作品简介

内循环发电装置主要分为发电前，发电中，发电后三个部分。其中主要结构如图 3.1 所示。

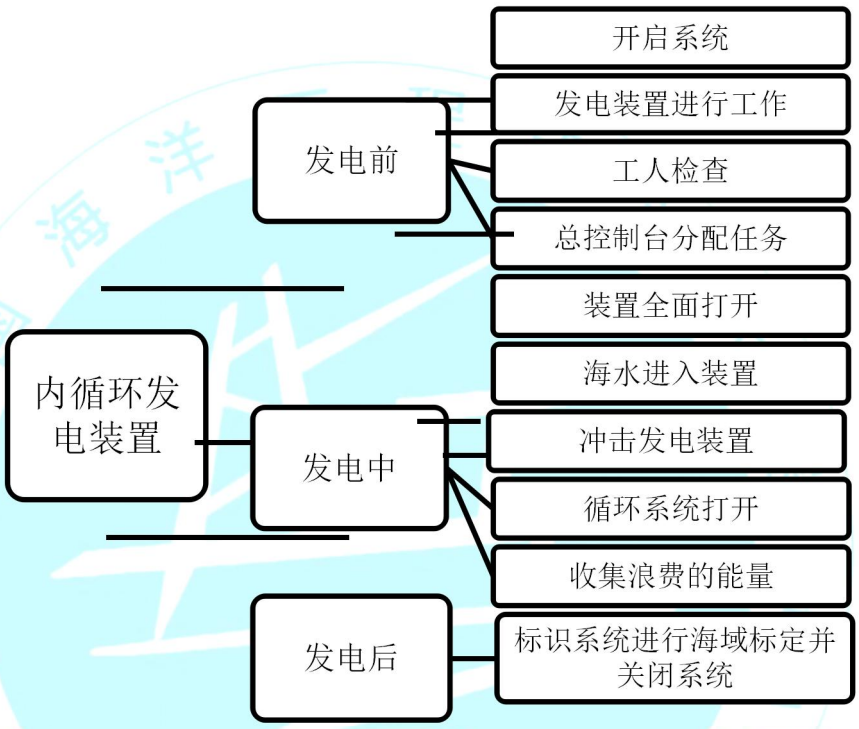


图 3.1 内循环发电装置结构

3.2 作品服务功能

本设备主要解决了不同海域发电模式的弊端，并且同时兼备了能源循环利用，自动标识海域，智能预测，故障报警，悬浮流动等功能：涉及范围广而多，因此我们将发电装置分为三种状态，其各部分功能如下所述。

1. 开启系统

内循环发电装置再发电前提前开启所有的系统，通过所有的系统配合进行发电前的准备工作，如图 3.2 所示。

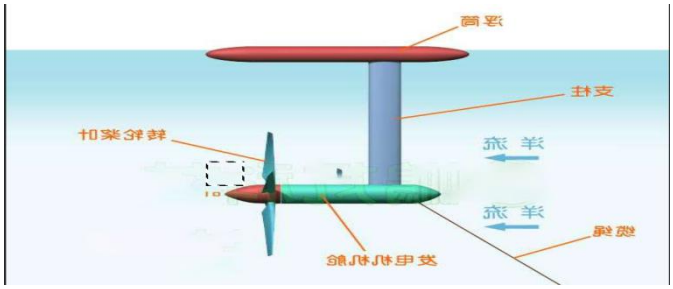


图 3.2 发电前装置简图

2. 发电装置进行工作

海水流动产生的能量进入发电装置带动转机进行发电，如图 3.3 所示。

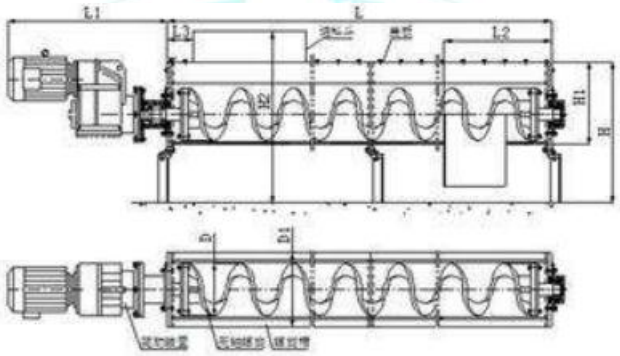


图 3.3 内循环装置内部结构

3. 工作人员检查

工人通过佩戴 MR 智能眼镜进行发电装置的系统检查是否存在异常，如图 3.4 所示。

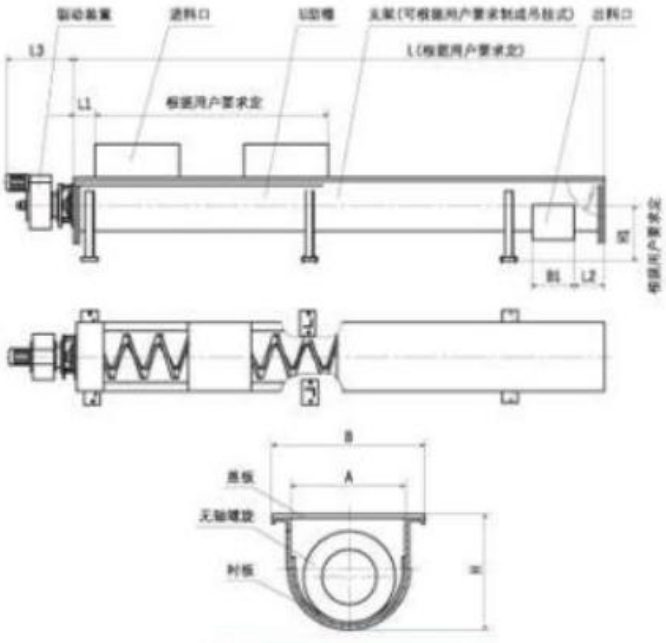


图 3.4 设备故障检测

4. 总控制台分配任务

总控制台如同发电装置中的指挥部，指挥部将进行各级任务的分配，计算出每一级系统所能工作的最大工作量，并通过其它系统的辅助完成工作，如图 3.5 所示。

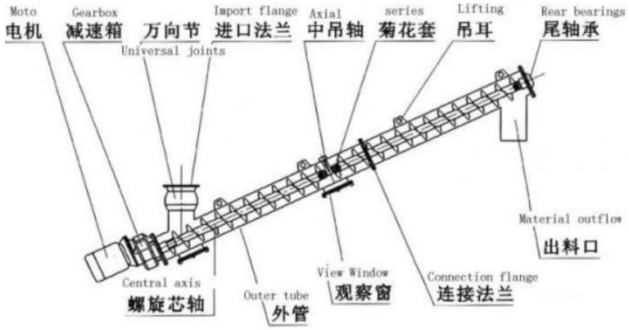


图 3.5 发电装置中的各级系统

5. 发电装置全面展开

在接受指挥部的命令后，发电装置中的所有系统都将全面展开，开始进行发电工作，如图 3.6 所示。

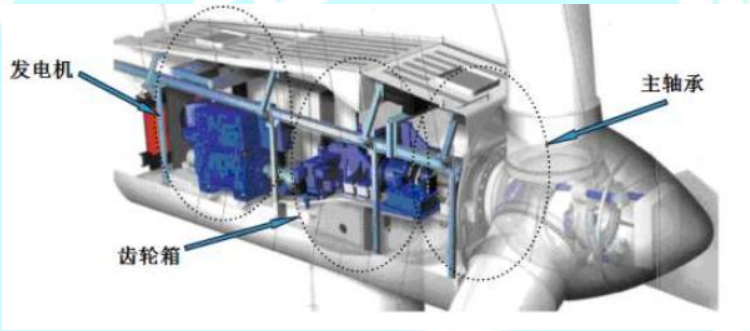


图 3.6 装置展开

以正常海上发电装置为例，来说明内循环发电装置工作过程

1. 包括设于水上的上端开口的悬浮箱、设于悬浮箱上的控制器、设于悬浮箱边缘上的环形浮、发电装置、设于悬浮箱内的平板、设于平板上的 2 个倾斜的导轨、用于分别支撑 2 条导轨上端的 2 个支撑柱、设于 2 条导轨上的中空的摆动体、设于悬浮箱上的若干条缆绳、设于摆动体上的拉绳和位于悬浮箱上方的杠杆；杠杆一端与拉绳连接，杠杆另一端通过连接绳与发电装置连接；每条缆绳下端均设有锚，如图 3.7 所示。

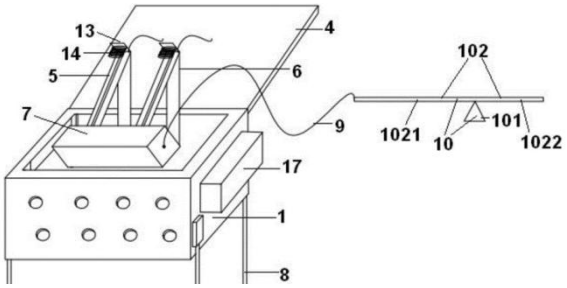


图 3.7 发电装置

2. 悬浮箱内壁上设有 m 条导向竖槽，平板上设有分别与各条导向竖槽配合的 m 块滑块，平板与设于悬浮箱的底板上的竖向丝杆转动连接，竖向丝杆下部通过轴承与悬浮箱的底板连接，竖向丝杆下端与设有悬浮箱的底板下表面上的伺服电机连接，还包括设于悬浮箱上的高度传感器，控制器分别与伺服电机和高度传感器电连接。

摆动体将波浪的作用力转化为对拉绳的拉伸力，通过杠杆将拉伸力放大，并通过发电装置将机械能转化为可以储存的电能。

3. 各个锚与水底土层或岩层固定，平台箱和 2 条支撑柱给 2 条导轨稳定的支撑，悬浮箱确保了 2 条导轨的安全，环形浮标使悬浮箱悬浮于水面上，高度传感器实时检测悬浮箱的高度，控制器中设有幅度阈值 W，控制器计算单位时间 t 内的高度变化幅度 B；

当 B≥W 时，控制器控制伺服电机带动丝杆转动，使支撑柱的高度降低至 75％A 至 80％A；

当 B＜W 时，控制器控制伺服电机带动丝杆转动，使支撑柱的高度升高至 110％A 至 115％A；

当 1.5W＜B≤2.5W 时，控制器控制伺服电机带动丝杆转动，使支撑柱的高度降低至 30％A 至 50％A；

当 B≥2.5W 时，控制器控制伺服电机带动丝杆转动，使支撑柱进入悬浮箱内。

第 4 章　作品创新及特点

4.1 作品创新性

1. 找到一种可以替代海水波浪发电装置和海域标识的一种新型发电装置

2. 建立了海上能源循环利用的系统

目前，我国海上发电装置主要采用波浪能进行发电，这种发电装置在海洋上没发一次电会造成大量的能量消耗，同时也需要很多的重力势能来冲刷发电机进行发电，即造成了发电装置外部形态变形，也造成了环境污染。我们的发电装置主要采用了海流能发电，及海水流动产生的能量，海流能在海洋中比较常见，况且取之不尽，用之不竭。同时我们的发电装置配备了内循环系统，可以实现回收的能量再利用的功能，完全解决了我国目前发电装置的弊端。

3. 应用了悬浮系统，可在不同的海域上进行移动。进行多出发电，即保护了海洋环境，也实现了资源利用最大化。

4. 智能预测系统

该平台可以通过天气情况确定出海洋中的各种情况。智能预测系统可以通过该天的温度，风向大小，湿度，判断出平台工作最好的工作地点。

5. 平台在完成当天的工作任务后可以对相应的海域进行自动标识，减少了能源的消耗。

6. 发电装置的自动检测技术

检查发电装置是基本任务之一，且该任务比较繁重。改作品将采取 MR 眼镜进行检查装置，既提高了工作效率，又减轻了工作强度。

4.2 作品特点

1. 工作平台数字化，可控化

系统将对不同发电装置过程进行工作分配，并且实时记录各个系统的工作过程，实现可控化平台管理，将所有平台发电装置进行数据整合，使得发电装置数据分析更加清晰。

2. 能量再利用化

借助内循环发电装置，将发电时产生的各种能量回收起来，并同时利用这些能量再次发电。

3. 作业安全化

该发电平台将会对各个系统的发电参数进行分析，并且自动生成故障处理方

法和功能图，帮助主管人员解决发电的难题，从而创造出更加安全的作业环境，通过将所有系统的调节运用，让整个发电装置安全可控.

4. 能源利用最大化

该平台便于移动，装置操作简单，把海流能产生的能量大部分应用在发电装置上，即实现了能源应用最大化，又实现了能源的回收与再利用的功能，为我国海洋能源的发展提供了新的方法和方式。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 5 章　项目设备

5.1 目前海上的海流能发电装置

5.1.1 海流发电机组设计关键

海流发电机组设计关键有以下几个方面：

(1) 整机防腐能力，世界上海洋平均盐度为 3.5%，除了盐水侵蚀外还需考虑气蚀、泥沙及海 洋生物附着等影响，需要特种涂料或阳极保护等 技术。

(2)整机密封性，确保防护等级较高，特别 是轴承和密封系统。由于机组潜于海水中维护困 难，电机需要进行浸水耐水压试验，根据所在水 深计算需要承受的水压大小，确保无泄漏。一般 情况下，水深每增 jJll0 m，压力增 ijllO．1 MPa，若 水深 100 m，则为 1 MPa 的压力。

(3) 由于海水流速较低，发电机若设计成直 驱电机可能体积较大，若增加齿轮箱可采用中速 电机或高速电机。虽然海流速度较慢，但海水的 比重是空气的 800 倍，仍然可以产生与陆上风力 相当的电。而风力发电机扇叶大，重量大，材料 消耗巨大，同等功率的发电设备，海流发电机的 扇叶直径仅为风力发电机的三分之一，可以节约 设备成本。

(4) 海洋中水温的变化幅度不是很大，一般 从 0℃～+30℃。

(5) 控制系统。控制系统的难点除了实现发 电机的启动、停机及储能、放电等功能外，还需 要克服湍流对系统的影响。

(6) 传动系统。受工作环境及结构强度等方 面的约束，海流发电机一般要求在低速大扭矩的 工况下运行，可以采用直驱式或带有增速系统的 半直驱、高速发电机增速系统，考虑到维护性，通常选用半直驱机组偏多。

5.1.2 海流能发电装置的结构形式

海流发电机，俗称“海底风车”，由固定在海 底的涡轮机、叶片和电气部件等构成，利用海水流 动转动叶片，将动力能转为电能的发电装置，与陆 地上“风车”原理基本一致。

海流发电机常见的有轴流式和垂直式，一般 由叶片(TurbineRotor)、变速箱(GearbOX)、发电机 (Generator)和海底电缆四部分组成，图 5.1 是轴流 式海流发电机。叶片由海流能驱动旋转，能量可以通过调整叶片与进流方向的夹角达到最佳吸 收；变速箱将涡轮的转速转换到发电机所需的转 速；发电机将转轴能量转换成电能；海底电缆将电 能输送到近海岸上。在特定海域，多个海流发电 装置

即组成了海流发电场。

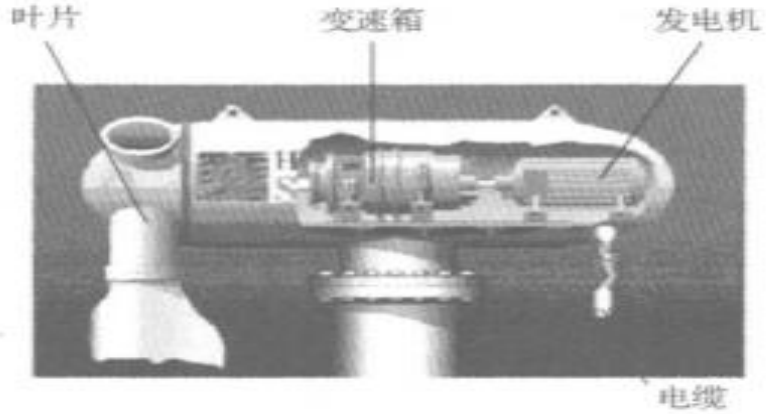


图 5.1 轴流式海流发电机装置

5.2 海流能发电装置国内外发展和应用情况

世界上第一台海洋流发电机样机由意大利人 马塔切纳和其他科研人员在 2001 年研制成功，当 时设计装机容量为 130 kW，并在墨西拿沿海地区 成功进行发电试验成功。从 20 世纪 90 年代初 起，“海洋流发电”项目得到欧盟的资助，逐步在 欧洲沿海地区的一些国家进行试验，取得了一定 成效。当今海流发电机技术已经成熟，欧盟将逐 步推动海流发电机产品产业化进程。 目前海流发电机技术最为先进和产业化进程 最为顺利的国家当属英国。近年来英国政府加大 了对海洋能源的投资，并且英国朝着未来国家电 力的五分之一都能从环绕的海洋中获取这一目标 努力，使其成为“海洋能源中的沙特阿拉伯”。 2008 年 4 月位于爱尔兰北部 Strangford Lough 的海 床下，英国 MCT 公司完成了 1.2 MW 的“SeaGen” 海流发电机安装（见图 5.2）。“SeaGen”运营标志着世界上第一个商业化规模的海流发电系统投入 使用。

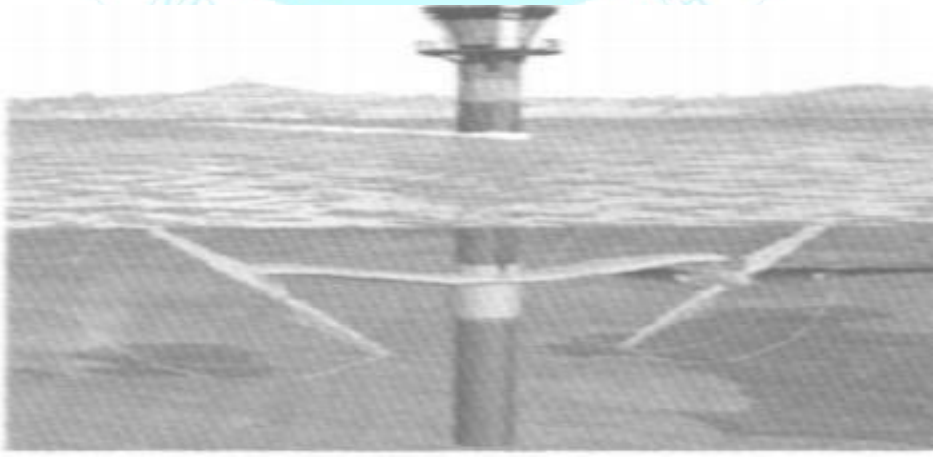


图 5.2 英国 MCT 公司的“SeaGen”海流发电机

5.3 设计的海流能发电装置

为了解决目前海流能发电装置所存在的缺点和不足，即将推出的海流能发电装置平台具有操作实践一体化功能，在不同海域，不同环境下都可以进行工作，在工作系统和工作平台上都克服海洋洋流的影响。控制系统将再一次更新，与更加先进的技术系统相结合，实现资源结合和数据整理一体化。

结合近年来对国内外有关海流发电设备研制进展的认识，海流发电机涉及的关键技术包括：叶 片设计、模型数值仿真、模型试验、叶片可调距系统、防腐蚀、安装支撑和机组布局等。

1. 叶片设计

国外研究机构对海流发电机叶片的设计采用 升力面方法。国内研究机构没有对海流发电机叶 片设计技术进行过系统研究。以海流速度和所需 叶片转矩为设计输入参数，通过升力面的设计方 法和一些预报方法相结合，可以完成最大输出功 率的叶片设计。

2. 模型数值仿真

建立以 CAD，CFD，CAE 和 CAM 等技术的数 值模拟仿真平台可以对海流发电机的造型设计、 水动力性能、强度振动及疲劳，声学特性以及环境 特性进行模拟，在初期设计阶段尽早发现问题，解 决问题，在方案实施阶段，降低试验成本。

3. 模型试验

在一些基础水动力实验室，如拖曳水池、空泡 水筒和风浪流水池等可以进行海流发电机模型样 机的试验。例如在整机系统模型试验时，在风浪 一忽一 流水池模拟不同风级，浪级和海流大小情况下，对 机械系统和电控系统联合调试，通过模型试验数 据和模型尺度和实尺度之间换算关系可以预报实 尺度下海流发电机的综合性能。

4. 叶片可调距系统

叶片可调距机系统在船舶螺旋桨应用广泛。海流发电机在实际应用中，为了充分吸收潮涨和 潮落时的海流能量，利用叶片可调距机系统可以随着潮涨和潮落时海水流动方向 180° 的变化而驱动叶片沿着其参考线方向 180° 旋转来适应海流方向流动的变化。同时，叶片可调距系统旋转叶片使叶片在最佳的攻角下工作，充分吸收海流能量，达到最佳的输出功率。除此之外，在遭受恶劣海况海流超过极限速度时，叶片可调距机系统可以限制叶片承受载荷达到保护叶片的功能。

5. 防腐蚀

许多安装在海底的装置变成人为的暗礁，寄生的各类海底生物覆盖支撑体和叶片。长期沉淀的污垢会导致移动部件生去灵敏从而影响装置的 正常工作。目

前海流发电机叶片采用玻璃纤维增 强复合材料或碳纤维增强复合材料，不仅具有重 量轻、力学性能好，而且防腐性能优越。

6. 安装支撑

海流发电机的安装和支撑方式需要根据海床地址、深浅、海流特征等综合因素加以考虑。不同支撑的安装是一项极富有挑战性的工作。例如桩 支撑采用驳船起重时，驳船的脚架遭受比较强的海流冲击，需要保持很好的稳定性，同时脚架下游 的泄出涡诱导的涡激振力可能引发整个结构物共振的危险。悬浮支撑安装时用的系泊绳索也会遇 到涡激振动的影响。无论采用何种形式支撑，都需对安装地点不同海况下结构物的力学特性进行 预估。海流发电机的安装和支撑方式可以借鉴海洋石油平台海上施工建造中的共性技术。

7. 机组布局

在建立海流发电场时，需要选择合适的海流场实施多个机组的安装。多个机组的运行需要考虑它们之间存在相互作用，单排机组时机组间的 距离和多排机组时排与排之间的距离的确定，需要在安装前进行多方案组合优化分析。当今可以采用计算流体力学的手段分析海流场区域多机组安装前后的流场品质，使机组间干扰对各自进流 场产生的扰动最小达到最合理的布局。

第 6 章　健康安全与环境管理（HSE）

安全控制是为满足生产安全，对生产过程中的危险进行控制的计划、组织、监控、调节和改进等一系列管理活动。安全控制的目标是减少和消除生产过程中事故，保证人员健康安全和财产损失。

施工安全控制的特点：

（1）控制面广

（2）控制的动态性

（3）控制系统交叉性

（4）控制的严谨性

（5）施工安全控制的程序

（6）建设工程项目施工安全控制的程序如图所示。

（7）确定建设工程项目施工的安全目标

（8）编制建设工程项目施工安全技术措施计划

（9）安全技术措施计划的实施

（10）施工安全技术措施计划的验证

（11）持续改进、直至完成建设工程项目的所有工作

工程施工安全控制的基本要求：

（1）施工单位在取得安全行政主管部门颁发的“安全施工许可证”后，才可开工。

（2）总承包单位和每一个分包单位都应经过安全资格审查认可。

（3）各类作业人员和管理人员必须具备相应的执业资格才能上岗。

（4）所有新员工必须经过三级安全教育，即进厂、进车间和进班组的安全教育。

（5）特殊工种作业人员必须持有特种作业操作证，并严格按规定定期进行复查。

（6）对查出的安全隐患要做到“五定”，即定整该责任人、定整改措施、定整改完成时间、定整改完成人、定整改验收人。

（7）必须把好安全生产“六关”，即措施关、交底关、教育关、防护关、检查关、改进关。

（8）施工现场安全设施齐全，并符合国家及地方有关规定

（9）施工机械（特别是现场安设的起重设备等）必须经安全检查合格后方可使用

（10）保证安全技术措施费用的落实，不得挪作他用。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

参考文献

[1] Blue Energy. Blue energy technology[EB/OL]. ht tp://www.bluenergy.com/technology.html

[2] 王国强, 盛振邦. 船舶推进[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.

[3] Marine current turbines[EB/OL].http://www.mari.neturbines.com

[4] ALLEN H. 美国研究者期望利用深水海样能发电[EB/OL]. http://www. In-en.com/newenergy/ht- ml/newenergy-1736173641183914.html

[5] Clean Current[EB/OL]. http://www.cleaneurrent. com.ndex.html

[6] 缪国平, 朱仁传. 海上风电场建设与海洋工程装备研发中若干水动力学关键技术问题[c]//第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会

[7] 叶杭冶. 海流能发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[8] 张希良. 海流能开发利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

致谢

首先十分感谢本届中国海洋石油工程设计大赛主办方为广大学子搭建的高水平、专业化竞技平台，为我们提供了一个展现自我、促进交流、提高专业素质的机会。

历时将近一个月时间终于将本次参赛作品设计完成，在设计的过程中曾遇到了无数的困难，但本团队的成员本着刻苦钻研，勤奋好学的精神，将这些困难一一克服。通过本次比赛，我们对专业知识进行了深入学习，提高了利用专业知识解决实际问题的能力，强化了“智慧平台，内循环发电”的设计观念，并积累了相关经验。

本方案是在老师的指导下完成的，从报名、前期准备、内容研究、方案设计到报告撰写，无不倾注了老师大量心血，在此真心感谢老师的悉心指导。

团队编号：A20201201

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期　2020 年 10 月 13 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

目录

双透平双自适应聚能潮流能发电装置 3
1 研制背景及意义 4
1.1 研制背景 4
1.2 研究目的及意义 6
2 设计方案 7
2.1 整体设计 7
2.2 自变距桨的原理 8
2.3 后掠变桨叶片设计 8
2.4 整体聚能收缩水道设计 10
3 模型搭建及功能实现 12
3.1 透平制作 12
3.2 舱室主体制作 13
3.3 收缩水道制作 14
3.4 发电检验装置制作 15
3.5 装置整体水动力模拟计算 16
4 创新点及应用 20
4.1 创新点 20
4.2 应用 20

双透平双自适应聚能潮流能发电装置

作品内容简介

双透平自适应聚能潮流能发电装置，主要由双向透平、发电机及支撑结构组成。透平叶片为后掠的平直叶片（无扭角）。透平叶片可绕旋转轴在桨距角最大值±θ 范围内随着流速和流向改实现透平的两个自适应功能--自适应流向和流速。

该发电装置有四大创新点：对流向的自适应、对流速的自适应、无变桨机构。（一）对流向的自适应指的是这种发电装置的透平能在往返潮时靠潮流的冲击力使叶片的桨距角随着流向的变化而变化，从而在不改变透平旋转方向的情况下满足该潮流能发电装置适应往返潮流双向运行的要求，与传统的电气驱动式变桨透平及液压驱动式变桨透平相比，减少了因大角度变桨引起的叶片承载过大及变桨能量消耗高等问题，使发电及输电环节变得简单可靠。（二）对流速的自适应指的是该透平有可在一定范围内活动的叶片，在不同的来流速度时叶片的桨距角能随着来流速度的变化而变化，能够实现桨距角与流速的最佳匹配，透平始终以较高效率运行。（三）非金属滚柱旋转轴承无需密封，无需变桨机构，完全依靠水动力完成变桨。解决了传统叶片变桨机构的动密封难题，这进一步提升了整机的运行可靠性及水下工作寿命。（四）避免水下滑环使用，叶片对流向自适应无需水下滑环。

1　研制背景及意义

1.1 研制背景

海洋能源是一种无任何污染的可再生能源，因其分布范围广、储量大及能量密度高而被认为是 21 世纪最重要最具开发潜力的新型能源[1]。它是以潮汐、波浪、海流、温度差、盐度差等形式表达的物理、化学能量，随着科技的发展，人类已具备利用现有技术将上述海洋能量转化为电能[2]的能力。

与发达国家相比，我国海洋能开发的投入相对较小，创新性缺乏，海洋能源的商业化还没有实践。随着我国对海洋能源开发的重视不断加强，在政策和资金的支持下，我国海洋能的发展进入了一个新的时期[3]。根据当前情况看，沿海地区经济发达，但传统能源缺乏、能源供需矛盾最为突出，但这里的海洋能资源丰富，海洋能的开发利用不仅可以为沿海工业及居民提供能源，还可以就近为海洋资源开发产业提供能源，具有其它能源无法比拟的优势。因此，通过对海洋能开发利用的不断探索和实践，可实现海洋可再生能源在我国能源消费结构的比例逐步提高，进而优化我国的能源结构[4]。另一方面海洋能也是解决我国南海边远海岛供电难题的有效途径。

随着海洋实时立体监测技术的进一步发展，海洋监测平台所携带的仪器数量多，工作时间长，功耗大。其中潜标和海床基等离岸海洋观测装备在恶劣的海洋环境下，长期无人值守，自动对海洋水文和气象要素进行全面综合监测。目前潜标和海床基等离岸海洋观测设备大多靠蓄电池或者太阳能提供电能，但是蓄电池容量有限，太阳能依赖天气。尤其是随着对实时数据传输与处理的要求越来越高，现有的供电方式很难满足需求，急需一个长期稳定的供电系统，使系统供电周期由原来的六个月大大延长，更重要的是可以减少系统布放打捞次数，这将极大地节省海洋观测的成本，减少暴露的危险，同时还能保证系统工作的连续性和测试数据的完整性，为这类海洋观测平台供电在国防建设上意义深远。

从海洋发电技术层面及能量转化层面综合考虑，潮流能发电是迄今最为成熟、最易实现的海洋能发电技术。与其它海洋能源相比，潮流能是因太阳及月球对地球产生引力而形成的，其流速和流向以半日、半月为周期变化，有着很强的规律性及可预见性。因此海洋潮流能的开发利用成为当今海洋能源研究的热点，国内外越来越多的科研单位投入到海洋潮流能开发利用的研究中来。

走在前列的是英国、欧盟、美国等。英国有世界上首个海洋能试验场，

它位于苏格兰奥克尼群岛。试验场的风能、波浪能、潮汐能都很丰富，工程样机在定型以前都可以在此试验场进行实验[5, 6]。

图 1-1 为英国 MCT 公司研发世界首个 MW 级水平轴潮流发电系统 Sea Gen[7, 8]。

图 1-1　Sea Gen 照片

图 1-2 为意大利阿基米德桥公司研制了垂直轴的潮流发电装置[9]。

图 1-2 意大利垂直轴潮汐发电装置效果图(120KW)

图 1-3 为哈尔滨工程大学 2009 开始研制的 150KW 垂直轴发电系统，是当时国际上装机容量最大的漂浮式垂直轴潮流能电站[10]。

图 1-3 漂浮式潮流电站（150KW）

图 1-4 为浙江大学于研制出的 300KW 的水平轴电气变桨发电机组[11]。

图 1-4 水平轴电气变桨发电机组（300KW）

上述潮流能发电装置均借助了电气或者液压的变桨机构来实现桨叶的变距以适应不同的潮流方向与流速。这些变桨机构虽然能帮助发电机组尽可能大的捕获潮流能，但它也会带来一定的技术难题和制造维护成本。尤其是在潮流中变桨，会因大角度变桨而引起的叶片承载过大、变桨能量消耗高的问题，同时变桨过程中的变桨机构动密封设计也是一大难题。为了解决以上难题我们设计了上述双向自适应潮流能发电装置。

1.2 研究目的及意义

目前开发潮流能主要有两种方式：水平轴透平方式和垂直轴透平方式。水平轴形式透平因其可得到较的大能量转换效率而最具商业化前景。但水平轴形式的透平又面临潮流流速变化及涨退潮时的双向周期性变化流向的难题。当今世界上主要采用变桨对流技术来应对这一问题，变桨对流技术是在双向流作用下仅调整叶片桨距角便可使透平与来流方向垂直并始终沿同一方向旋转。变桨对流技术分为电气变桨及液压变桨方式，这两种方式均存在消耗电能和动密封的问题。为了解决这一难题，本文设计了一种新型双透平自适应潮流能发电装置，该装置具有利用潮流能自动变距的功能，解决了发电机组调桨变距过程中的一系列问题，对于潮流发电走向实用化具有实际应用价值。

2　设计方案

2.1 整体设计

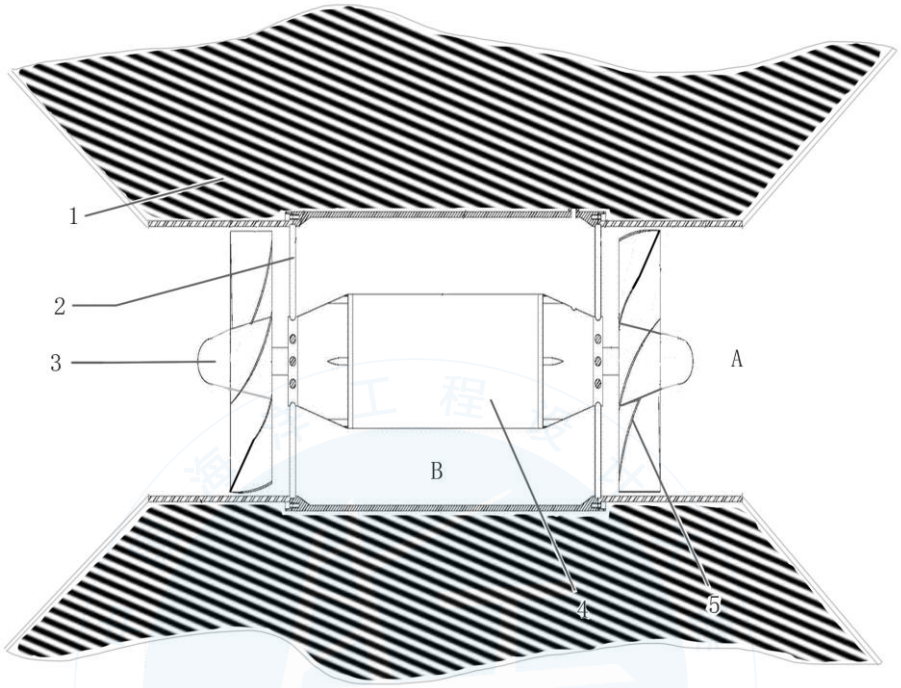


图 2-1 整体设计图

本设计方案图如图 2-1 所示。图中 1 是收缩水道，2 是支架，3 是整流罩，4 是发电机，5 是叶片。聚能双透平双自适应潮流能发电装置，主要由双向透平、发电机及支撑结构组成。透平叶片为后掠的平直叶片（无扭角）。透平叶片可绕旋转轴在桨距角最大值±θ 范围内随着流速和流向改实现透平的两个自适应功能--自适应流向和流速。装置放置在一个收缩水道之内，引导潮流能进行收缩，加快流速，从而获取更大的能量。

图 2-2 是单个透平及舱室的设计图，内部主要组成部分包含支撑轴承、传动轴固定装置、磁力耦合盘、发电机等。右边的发电机舱需要拥有良好的水密设计并留有电源输出线的孔及注油孔，整体装置的支撑支架固定在发电机舱外；左边的传动轴舱需要减小传动轴与舱盖之间的摩擦，同时需要对左边的透平具有良好的支撑作用；两舱之间的磁力耦合盘需要控制好磁力强度，放止因磁力不够而造成的的磁盘错相，从而无法实现同步旋转，也不能因为磁力的过强影响透平的旋转。

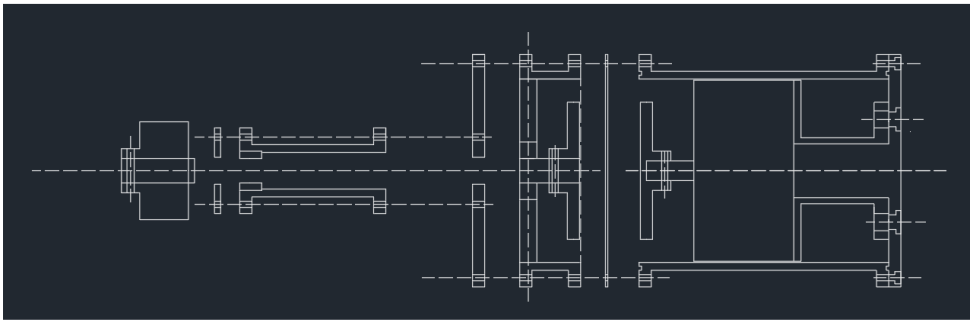


图 2-2 发电装置的整体设计图

2.2 自变距桨的原理

叶片能在水动力的作用下在固定的桨距角范围内±β 绕旋转轴转动。叶片翼型采用 NACA0012 对称翼型。叶片旋转轴与翼型截面相互垂直，且变桨旋转轴中心位于叶尖处翼型压力中心前。

当正向来流时，水流使桨叶迎水面产生偏转力矩，当偏转力矩足够大以克服变桨轴承处摩擦力矩时，叶片无需额外能量便可绕变桨轴旋转完成变距。在桨毂处安置有限位控制装置，使叶片可以在安装角±β 内调整角度，进而，使发电装置的透平在相应流速下保持最佳安装角 β 以从潮流中获取最大能量，实现自变桨过程。

当反向来流时，叶片在潮流的推动下克服阻力绕变桨轴转动。桨叶的安装角由+β 转化为-β，叶片完成变桨过程，透平开始缓慢旋转，旋转速度将随来流速度增加而增加。在整个往返流作用下，透平系统转向始终保持不变。整个变桨装置结构简单，工作可靠，变距过程无需额外能量，同时变桨装置也无需动密封的设计，故可在海水环境中长时间、持续稳定工作。[12, 13]

2.3 后掠变桨叶片设计

为了保证发电装置的透平在退潮和涨潮时具有相同的水动力性能，透平的叶片截面采用 NACA0012 对称翼型。这种翼型的气动中心在弦长 1/4 处，也就是说如果叶片的变桨旋转轴选定在气动中心所在的弦线位置处，叶片所受水动力的合力为零。而此次设计的变桨旋转轴位于叶片气动中心之前，这意味着当有潮流流向透平时，潮流的冲击力能推动叶片绕变桨旋转轴旋转，实现自变距的功能。叶片采用了后掠型的平直叶片，与无后掠的平直叶片相比，在同样的来流情况下，后掠型叶片能产生更大的扭转力矩，使叶片更快速的完成变桨。

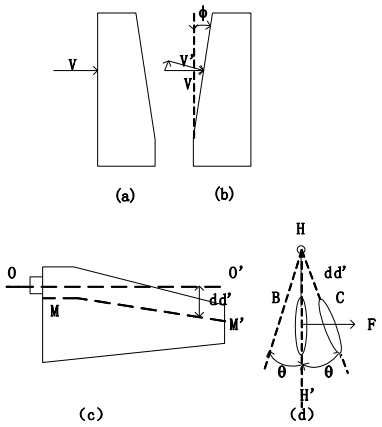


图 2-3 后掠叶片示意图

如图 2-3(b)所示。图中 L 与 L1 的夹角 φ 称为后掠角。如图 2-3(c)所示，OO′是叶片变桨旋转轴所在位置，在叶根截面弦线 1/6 的位置。如图 6d 所示，叶片能够偏转的最大角度是 θ，定义为桨距角最大值。具体的受力分析如图 2-3 所示。

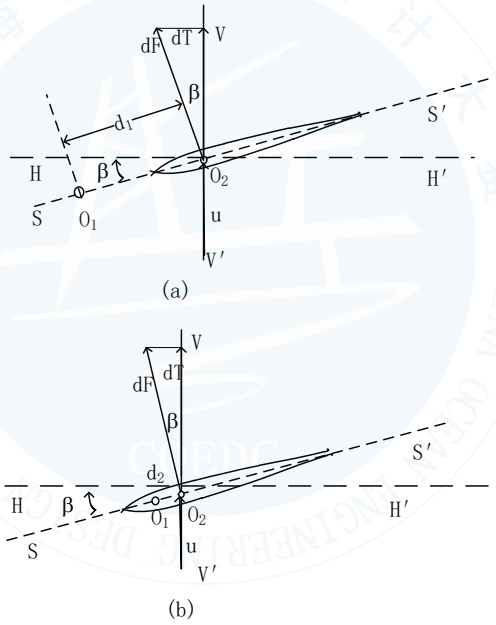


图 2-4 变桨时后掠叶片与平直叶片的受力

图 2-4(a)和图 2-4(b)分别是后掠叶片、平直叶片在变桨过程中所受水动力受力分析图。图 7(a)是后掠叶片的受力分析图。O1 是旋转中心，O2 是翼型压力中心，变桨时叶片受到的偏转力矩的力臂为：

$$d_1 = x * R\sin z + \frac{1}{4}l_x \qquad (1)$$

式中，x ——叶片截面所处位置。根据叶素动量理论，所受总的变桨力矩为：

$$Q_1 = \int_0^1 d_1 * \mathrm{d}F\mathrm{d}x = \int_0^1 (\mathrm{x}*\mathrm{sinz} + \frac{l_x}{4})\mathrm{d}F\mathrm{d}x \qquad (2)$$

图 2-4(b)是平直叶片的受力分析图。O_1 是旋转中心（1/6 处），O_2 是翼型压力中心，变桨时叶片受到的偏转力矩的力臂为：

$$d_2 = (\frac{1}{4} - \frac{1}{5}) l_x \quad (3)$$

变桨力矩为：

$$Q_2 = \int_0^1 d_2 * \mathrm{d}F\mathrm{d}x \quad (4)$$

两者安装角相同，转速相等时，每个截面的 dF 几乎相等，d1 > d2 所以 Q1 > Q2，即后掠叶片的变桨力矩大于平直叶片。

综上后掠叶片是最易变桨的叶片，且叶片的后掠角度越大越易实现变桨。

2.4 整体聚能收缩水道设计

潮流能具有相对其他能量来源动量小而作用时间长的特点，潮流能的集中性差，不利于进行大规模发电。一个良好的聚能装置能够有效的提升能量效率，降低能量损耗。

本装置采用前后收缩水道设计，引导潮流进行收缩。整体水道设计为两头宽而中段窄，利用潮流的流速双向性，重复利用。

假设流过装置的流体为无粘性无压缩的理想流体；定常流下，通过装置的流量相同。流通面积减小必然带来流速的增大，相同质量的流体就会拥有更大的动能，其推动桨叶的效能越大。有利于提升发电机载荷和促进发电效率的提升。

根据流体力学连续性方程：

$$V_1 A_1 = V_X A_X \quad (5)$$

V_1:波浪进口流速，V_X：波浪出口流速；

A_1:进口截面积，　A_X: 出口截面积

根据图 2-1，不同方案的计算得到的结果如表 1。

表 1.收缩管道出入口参数公式计算结果

项目	入口速度 m/s	入口面积 m2	管内速度 m/s	管内面积 m2
case1	0.5	0.5	0.65	0.38
case2	1	0.5	1.3	0.38
case3	1	0.5	1.78	0.28

数值计算假设流体为无粘性不可压缩的理想流体，实际上自然界并不存

在理想流体，真实流体运动时都会表现出黏性。引入理想流体的概念，对研究实际流体起着很重要的作用。理想流体运动的基本方程是欧拉方程。

其流体的流速有效提升，提升流体动能，改良了现有装置的发电环境。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

3　模型搭建及功能实现

3.1 透平制作

叶片采用的是 3D 打印的方法的方式制作的，利用了熔融沉积成型（Fused Deposition Modeling，FDM），FDM 技术的原理是将熔融状态的材料按照切片软件切出的薄片逐层堆叠起来，其具体实现方法是，将制作成丝材的打印材料 PLA 在 3D 喷头中加热到略高于其熔点，然后通过喷嘴挤出，同时，喷头在程序的控制下做 x-y 方向的联动，以实现单层薄片的打印，然后通过运动喷头或打印平面的 z 方向运动改变两者的相对距离，以实现不同层薄片的堆叠。三氯甲烷是 PLA 的良好溶剂，在打印后可使用三氯甲烷对工件进行抛光处理，增大表面光洁度，从而减小可能造成的摩擦损失。打印出长度为 240mm 的叶片如图 3-1 所示。

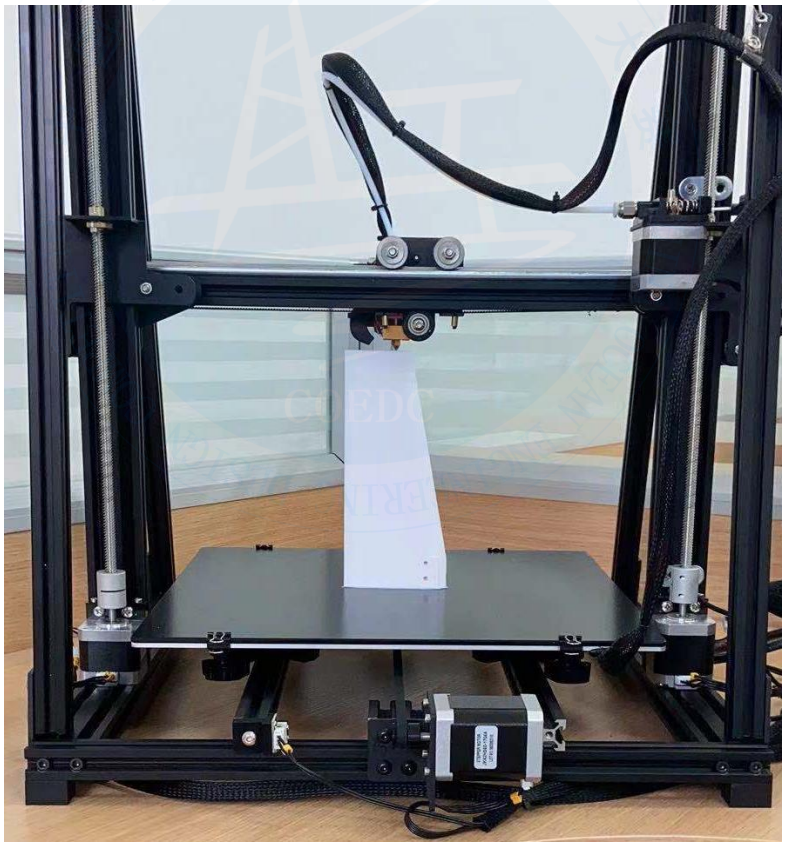


图 3-1 打印长度为 240mm 的叶片

叶片采用长度为 70mm 转轴固定在轮毂上，轮毂前配有整流罩。转轴如图 3-2 所示，转轴的上端采用凹型设计，用来插装叶片，并用螺丝锁紧。转轴的下端开

有长为 9mm 宽为 4mm 的长孔，放入轮毂中利用螺丝固定后利于实现叶片的自变桨，轮毂上装有四个叶片，透平整体的直径为 595mm，整体效果如图 3-3 所示。

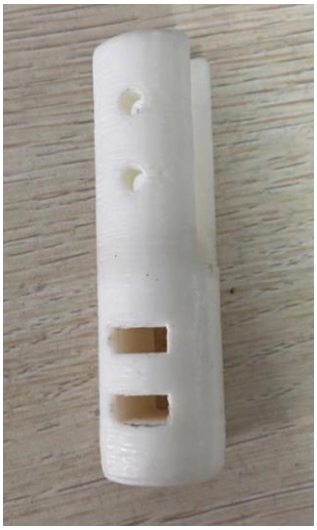


图 3-2 小转轴

图 3-3 透平整体外型

3.2 舱室主体制作

整体舱室分为传动舱和发电机舱两大部分，整体外形如图 3-4 所示，传动舱的主要功能是：①将潮流推动透平产生的能量通过传动轴传送到磁力耦合盘上，再带动发电机进行发电；②将透平与发电机之间间隔开，有利于发电机舱的整体密封。③透平发送故障检查时，可直接拆卸传动舱内的部件，不会对发电机舱造成影响，防止拆卸过程中因漏水对发电机造成损坏。

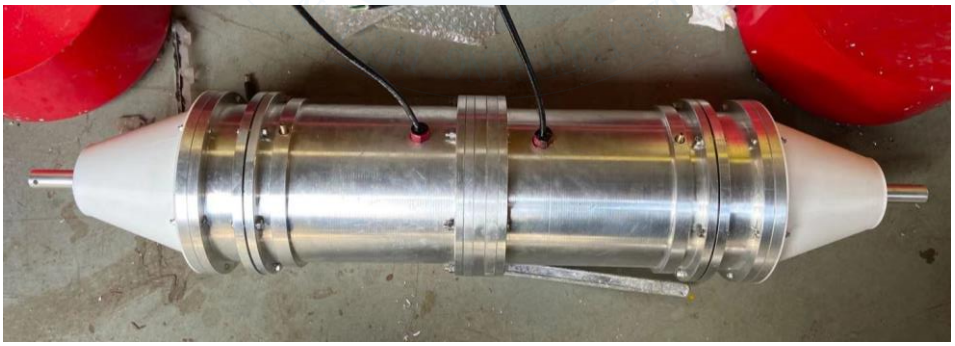


图 3-4 整体舱室设计图

发电机舱内各部件的功能包含：

① 舱室两边的法兰开有线槽，利用密封圈保证装置良好的水密性；

② 靠近两端法兰处开有油管进出口，当装置放置在深海时可以加入油来实现

舱室内外的压力平衡；

③ 舱壁的中间位置装有穿舱件，用于发电机的输出电源线的引出。

舱室整体装置的长度为 880mm；装上透平之后的长度为 970mm，高度为 60mm，宽度也为 60mm，整体效果图如图 3-5 所示。

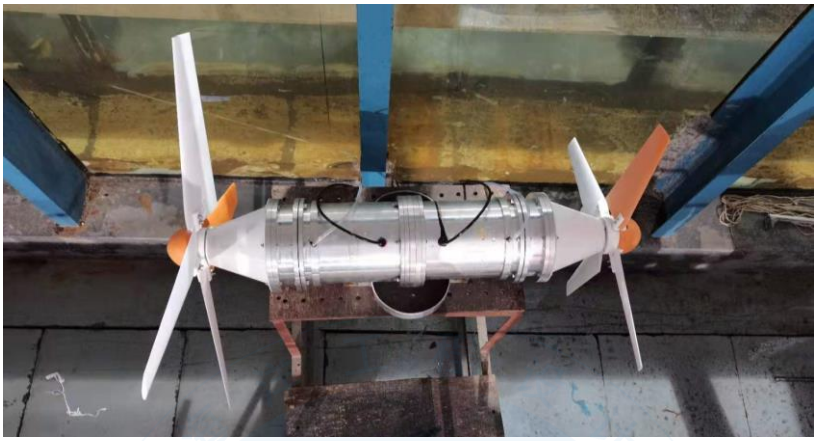


图 3-5 双透平双自适应潮流能发电装置

3.3 收缩水道制作

收缩水道如图 3-6 所示，中间窄的部分内径为 640mm，长为 1m；两边水道口的内径为 72mm，整体长度为 1.5m。

图 3-6 收缩水道

水道的内部的水流速度是进水口流速的 1.27 倍，整体舱室固定在水道的中间

部分，叶片距离水道内壁有 20mm 的距离，保证透平整体旋转时的平滑，如图 3-7 所示。

图 3-7 水道与叶片之间的距离图

3.4 发电检验装置制作

对于发电机发出来的交流电，需要将它整流成直流电才能利用它对灯珠供电并进行功率的测量，图 3-8 使用了六个整流二极管搭建的三相整流电路，并串联了一个电流表，并联了一个电压表实习时显示电流电压的数值，根据灯珠的亮度来判断发电的稳定情况。

图 3-8 发电检验装置

3.5 装置整体水动力模拟计算

在整体模型搭建成功后，进行结构数字模拟水动力计算，获得模拟值，其目的是为了与实验值进行对比计算误差和指导装置的调试。

根据 3D 打印的数据，进行组装搭建 1:1 数字模型，如图 3-9 所示：

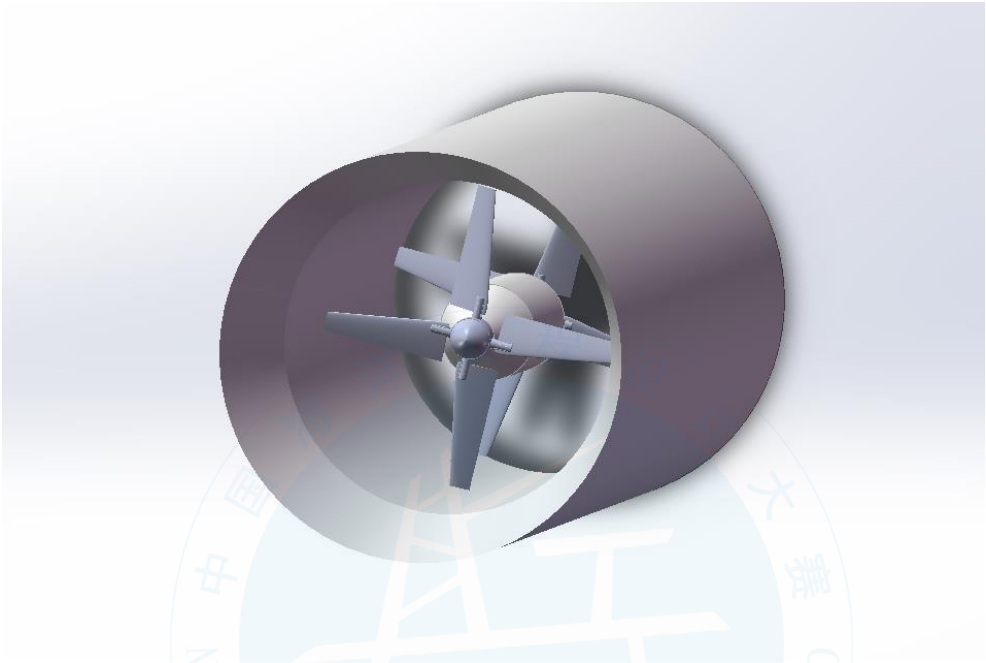


图 3-9 整体装置模拟图

两组桨叶分别独立，模拟水流冲击下前后两组叶片的后掠翼设计，计算额定工况下的理想活动转矩距下运行状况。其纵剖情况如图 3-10：

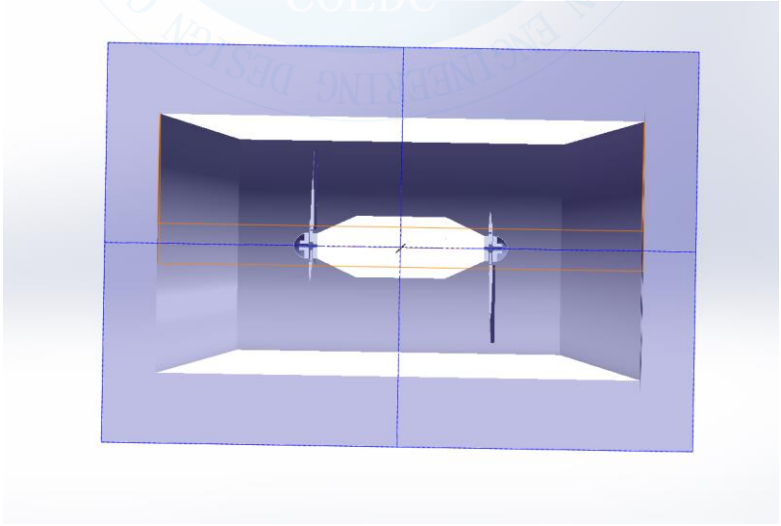


图 3-10 整体装置模拟图

其设置 25°常压无重力影响的理想牛顿流体进速为 0.3m/s，发电机组叶片除

流体压强扰动外，相互独立无干扰，达到理想转矩 15°。对如图 3-11 中类似的连结结构做理想化处理，忽略组件部分突出结构，如紧固件、支架、导线等；机组转速从 0 开始计算至稳定状态；设定发电机低载，阻力矩为 0.1N/m。装置随动成分其基本质量约为 500g。

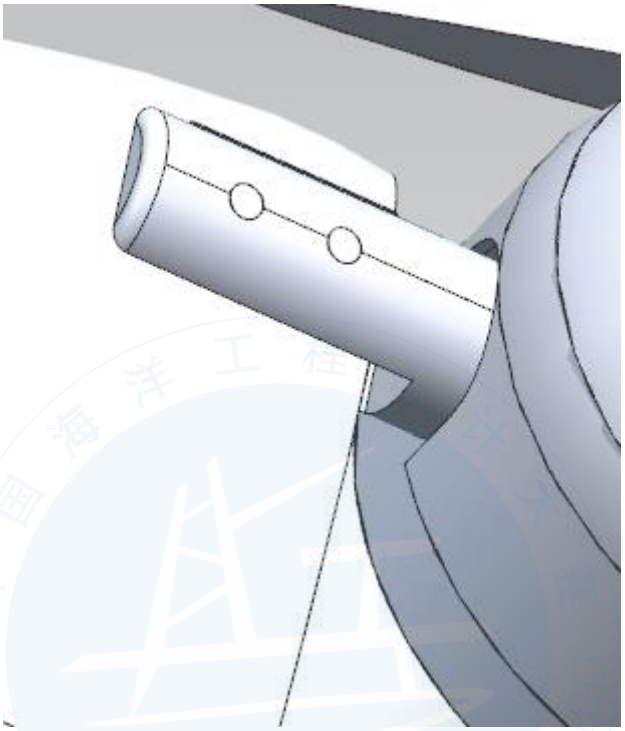


图 3-11 结构优化图

对收缩水道内进行网格加密处理，如图 3-12.并在叶片上设置压力检测，检测两组桨叶压力分布，如图 3-13.

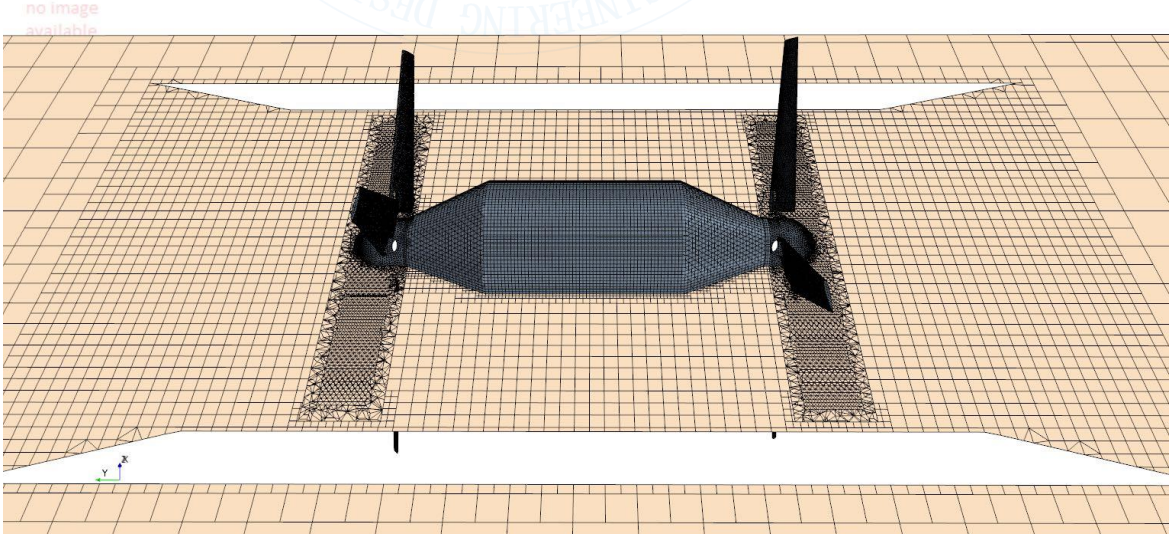


图 3-12 网格划分图

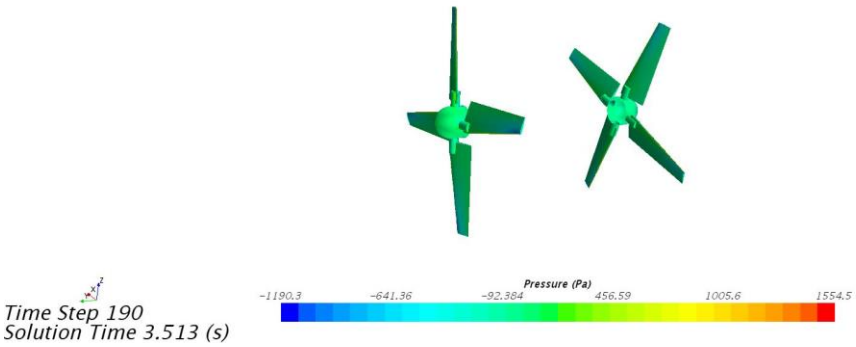


图 3-13 桨叶压力图

其中后桨叶机组，力矩变化如图 3-14，随水流的推动，力矩陡降，约 0.15s 达到稳定转矩。

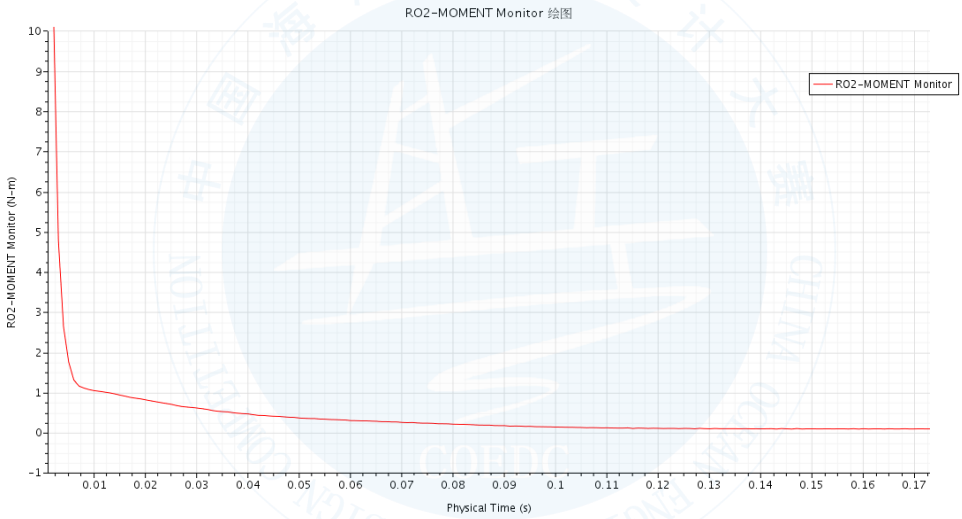


图 3-14 后桨叶力矩变化图

其转速随时间增大，增大速率先增大后减小，呈 S 状。约 0.15s 达至稳定水平。如图 3-15：

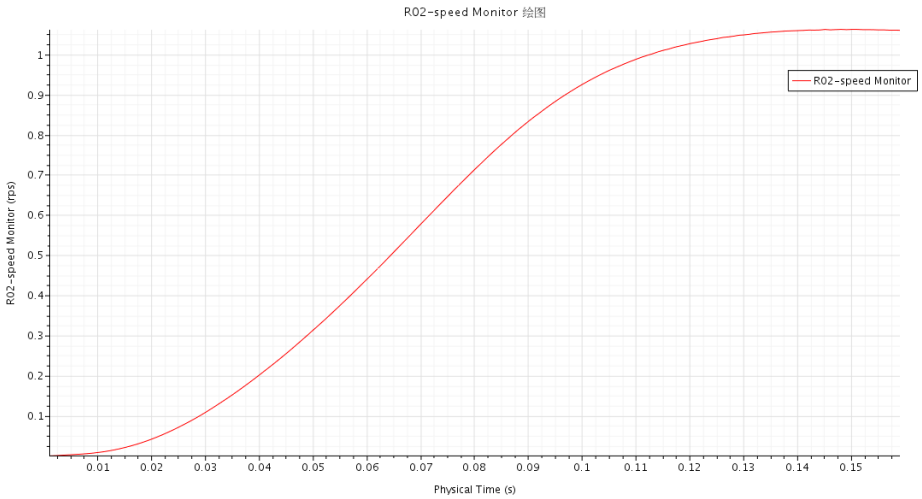


图 3-15 后桨叶转速变化图

证明其理想状态，数字模拟下的该装置能够在此环境下进行有效工作，而不达到发电机组极限状态。后者可进行增大来流速度和增大负荷阻力矩的方式提升工作效率。

4 创新点及应用

4.1 创新点

1） 对流向的自适应，涨潮落潮都可以发电，而且透平的转向不变，省去了变桨机构，避免了水下动密封的问题。

2） 对流速的自适应，使用可变桨设计，相比于传统的固定式叶片的潮流能发电装置，其在不同的来流速度时可以随流速的变化而改变桨距角，提高能量转化效率。

3） 具有简单聚能设置，提升发电效率。

4） 无变桨机构。

5） 无水下滑环。

6） 收缩水道的底部是向下倾斜的，这样减少了泥沙附着在水道的机会。

7） 发电机轴和传动轴之间利用磁力耦合盘实现同步旋转，解决了旋转轴与舱盖之间的密封问题，保证了发电机舱利好的水密性。

8） 双透平加大了对潮流能使用效率，能够对潮流能进行二次利用。

4.2 应用

该聚能双透平双自适应潮流能发电装置，具有对流向和流速的自适应功能，无论涨潮落潮都可以发电，而且透平的转向不变，避免了水下滑环的使用及变桨机构轴承的动密封问题。该发电装置的透平叶片桨距角依靠水动力实现变桨，简化了变桨机构、降低了制造成本。此技术方案为我国的海洋能的利用提供了经济、易行、可靠的技术储备。

该装置的发电舱内装有油管，利用油实现舱内外的液压平衡，克服了深海中的海水压强大的环境问题，加深了潮流能发电装置的使用深度。

该发电装置工程化以后还可以广泛应用于电网覆盖不到的偏远海岛地带，为岛上居民以及附近的海洋监测设备供电，改善居民的生活条件。为海洋监测和海洋国防提供电力供应，增加设备续航能力，减少维护成本和不必要的风险。

参考文献

[1] 王传崑. 海洋能知识讲座(2) 海洋能的特点 [J]. 太阳能, 2008, (10): 20-21.

[2] 张萧. 海流能发电及模拟装置的研制 [D]; 东北师范大学, 2009.

[3] 张斌键. 《海洋可再生能源专项资金管理暂行办法》出台 [N]. 2010-6-7-.

[4] 魏青山. 推进我国海洋能健康发展 [J]. 中国电力企业管理, 2010, (21): 37-39.

[5] Bahaj A B S. Generating electricity from the oceans [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(7): 3399-3416.

[6] Khan M J, Bhuyan G, Iqbal M T, et al. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review [J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 1823-1835.

[7] Katofsky R. Ocean energy: technology basics [J]. Renewable Energy Focus, 2009, 9(3): 34-36.

[8] Rourke F O, Boyle F, Reynolds A. Tidal energy update 2009 [J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 398-409.

[9] Rourke F O, Boyle F, Reynolds A. Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 1026-1036.

[10] 张亮, 李新仲, 耿敬, et al. 潮流能研究现状 2013 [J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 53-68.

[11] 高楚清. 浙大海流能发电装备创新记 [M]. 2018,04,28.

[12] 张雪明, 朱挽强, 张萧, et al. 自变距双向流海流电站专用透平 [M]. 2010.

[13] 张雪明, 张萧, 董永军, et al. 双浮力体摆式双向透平波浪能发电装置 [M]. 2013.

团队编号：_A20200107_

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

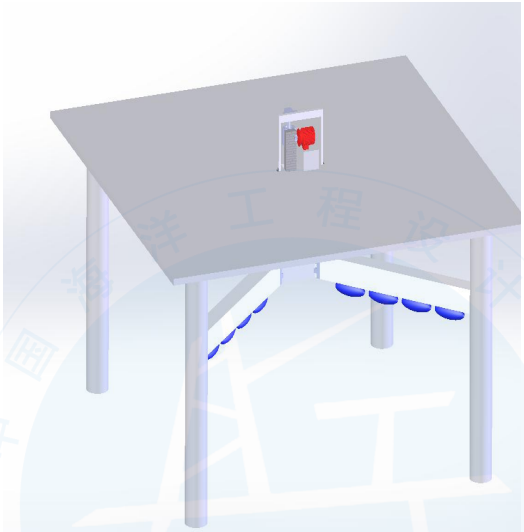
设计制作组

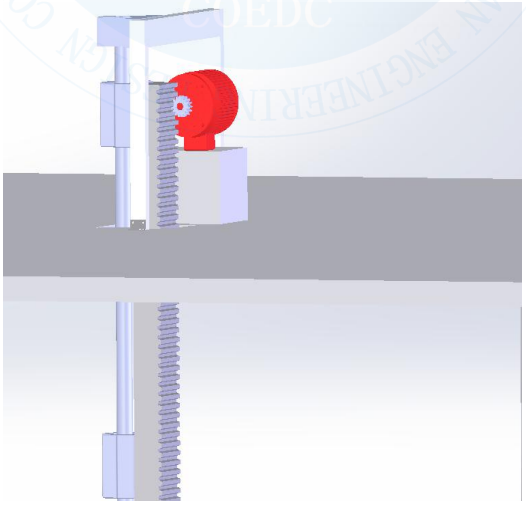
完成日期　　2020　年　10　月　13　日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

本振荡浮子波浪能转换装置采用了类似于圆规形状的浮体结构，最大限度的俘获波浪能，将波浪能转化为与之相固连的齿条的动能，再经由齿轮将齿条的上下运动转换成电机的旋转运动，从而带动发电机发电。发电机连接稳压电路使灯泡能够持续稳定的发光。





目录

第 1 章 总 论 2
1.1 研究背景 2
1.2 设计要求 2
1.3 研究概述 2
第 2 章 振荡浮子式波浪能发电装置简介 4
2.1 波浪能发电装置简介 4
2.2 国外振荡浮子式波浪能研究发展 4
2.3 国内振荡浮子式波浪能研究发展 4
2.4 振荡浮子式波浪能发电装置常见形式 5
第 3 章 整体结构设计和可行性分析 6
3.1 传动装置结构设计 6
3.1.1 单向轴承原理 6
3.1.2 传动方式示意图及原理 6
3.2 浮体设计 7
3.3 整体结构布置 10
3.4 电路设计 11
3.4.1 稳压电路设计 11
3.4.2 整流电路设计 11
3.5 装置创新性 14
3.6 可行性分析 14
第 4 章 浮体振动特性分析 15
4.1 浮体运动模型 15
4.2 浮体位移函数 15
4.3 影响浮体振幅因素 17
第 5 章 浮体受力分析和能量转换率 20
5.1 浮体受力分析 20
5.1.1 浮体的垂直加速度 20
5.1.2 浮体所受垂直作用力 20
5.1.3 浮体起伏位移 21
5.2 波能 22
5.2.1 波的势能 22
5.2.2 波的动能 23
5.3 浮体能量转换率 24
第 6 章 动态仿真分析 25
6.1 系统建模及仿真 25
6.1.1 简化模型 25
6.1.2 系统建模与仿真 25
6.1.3 仿真结果与分析 27
参考文献 28

第 1 章 总 论

1.1 研究背景

为深入贯彻落实习近平总书记关于“关心海洋、认识海洋、经略海洋”的重要讲话精神，深入实施教育部“卓越工程师教育培养计划”，海洋工程设计大赛组委会紧密结合行业高校优势和特色，发起中国海洋工程设计大赛。大赛以“海洋可再生能源的开发和利用”为主题，主要针对海洋波浪能、风能、潮汐能等发电装置进行创新设计。

海洋可再生能源具有绿色清洁、可持续利用、开发潜力大等优势，发展海洋可再生能源开发和利用技术，可满足或补充海岛开发、海上设备运行、沿海地区用电等需求。如海洋波浪中蕴藏着巨大的能量，以波浪的能量为动力生产电能的方式称为波浪能发电，对于保护海洋生态环境、发展海洋经济、推进生态文明建设具有重要的战略意义。

1.2 设计要求

根据组委会提供的实施方案总结模型设计要求如下：

1）海洋可再生能源发电装置形式不限，装置的装机功率不大于 5W，

2）持续发电时间不小于 1 分钟，

3）装置的整体尺寸（长*宽*高）控制在 1m*1m*1m 范围内。

环境条件要求为：

波高范围 30-50mm，波周期为 5-20Hz，水深 0.3m。装置中应包含浮体部分，以确保整个装置在发电过程中能保持稳性。

1.3 研究概述

根据设计要求，本波浪能发电装置设计主要分为机械结构设计、浮体设计、及仿真分析三部分。 机构设计主要包括整体结构设计、传动部件设计和电路设计。传动部分设计了两种方案，一种是采用多齿轮和单向轴承将齿条的上下传动转化为电机轴上齿轮的单向旋转，另一种是齿条直接与电机轴上齿轮啮合，带电机往复旋转。由于传动部分的两种方案使得电机后接电路也需要两种方案。对于第一种直接接入稳压电路即可，第二种稍显复杂，采用了四个单向导通的二极管，使灯泡在电机正反转时都能稳定发光。

对于浮体设计，主要包含了浮子形状的选择、浮子振动特性、浮子受力分析和能量转换率、浮体整体结构设计三方面。综合所查找已有的研究文献，选择了

橄榄形的浮子符合上大下小和吃水深度浅的设计要求。对浮子振动特性的分析得到了浮子的位移函数以及影响浮子振幅的因素，同时对浮子受力和能量转化率做了分析计算。浮体的整体结构采用了类似于圆规形状的结构，使得其可以根据波浪的方向和大小调整角度。

在仿真分析方面，将 SolidWorks 中传动部件的三维模型进行了简化，将简化后的模型导入 ANSYS 中，同时添加约束和驱动，对传动模型进行了运动仿真分析，得出了传动装置输出轴也就是发电机输入轴的转速以及齿条受力、起伏位移、速度和加速度的仿真结果，验证了理论分析的正确性。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

第 2 章 振荡浮子式波浪能发电装置简介

2.1 波浪能发电装置简介

波浪能发电装置主要包括波浪能采集部分、能量传递转换机构、发电装置等三部分。采集装置将采集到的波浪能转化为浮子的机械能、水的位能、介质的压能等；能量转换装置将采集的能量转化成旋转的机械能、液压能等；发电装置将机械能、液压能等转换成电能。由于振荡浮子具有效率高、可靠性好、成本低等优势，本文采用了振荡浮子式波浪能发电装置。

振荡浮子波浪能发电装置主要利用波浪的起伏运动推动采集装置的浮子产生动能，浮子所吸收的能量转换成机械传动机构的机械能或液压传动机构的液压能最后，能量再通过相连的发电机转化为电能。

2.2 国外振荡浮子式波浪能研究发展

在 1799 的法国出现了第一台波浪能发电装置，自此打开了对波浪能进行研究利用的大门。法国、英国和挪威是最早对利用波浪能的一批国家，美、日、瑞士、澳大利亚等也紧随其后开展了一系列对波浪能发电装置的开发和研究，且已经建立了多个大型示范电站。1983 年，挪威研发的振荡浮标式装置[1]在挪威西部的 Trondheimsfjorden 实海测试；瑞典乌普萨拉大学研发出了能量捕获浮子形状为扁柱体的 L9 振荡浮子装置[2]；20 世纪 80 年代，Sveb A. Noren 发明的 IPS 装置为双体振荡系统在瑞典海域进行了运行测试[3]；2000 年，Finavera Renewables Limited 公司研制出了 Aqua Buoy ；2004 年，荷兰 Teamwork Technology BV 公司研制的阿基米德波浪摆 Archimedes Wave Swing 通过海试[4]；美国 Ocean Power Technologies 公司研发了经典的双体振荡浮子系统的 power buoy 装置，并于 2008 年在西班牙进行了海试[5]；2006 年 wave energy 公司研发的 Wave Atar 陈列浮子装置在丹麦 Nissum Bredning 进行了 1/10 比尺的模型海试[6]，并于 2008 年该模型的一台 1：2 规模的样机在丹麦北海进行海试。

2.3 国内振荡浮子式波浪能研究发展

我国波浪能装置研究晚于欧美等发达国家，起步于 20 世纪 80 年代，但技术已取得飞快发展。1975 年我国在浙江省嵊山岛进行一台容量为 1KW 的波浪发电浮标的发电试验； 1999 年 9 月，国家海洋局天津海洋技术在青岛建立了一座摆式波浪能发电站，该电站装机容量为 100KW 已成功运行发电。2015 年，中国科

学院广州能源研究所成功建成我国首台 100 kW 鹰式装置工程样机“万山号”，于 2015 年 11 月在珠海市万山岛开始实海况试验，2017 年 4 月，“万山号”在珠海市万山岛并网发电。于 2018 年 8 月 31 日，其研制的“先导一号”海上可移动能源平台通过海底电缆成功并入三沙市永兴岛电网，“先导一号”可移动 能源平台也是全球首个海上波-光-储互补平台[7]。

目前，我国小型岸式波浪发电技术已相当成熟，但我国在装机容量方面的技术还远远不足。至今，我国研发建设的波浪能发电站是10^2kw～10^3kw 级，但国外先进波浪能发电水平已达到10^4kw 级水平，由此可知我国波浪能开发的规模远小于发达国家[8]。

2.4 振荡浮子式波浪能发电装置常见形式

振荡浮子式发电装置分类主要是依据采集装置的形式来进行分类。当前主要的振荡浮子式波浪能采集形式有：点吸收式、摆式、点头鸭式、筏式和海蛇式等。

（1） 点吸收式波浪能采集形式

点吸收式波浪能发电装置通过漂浮在海面上的浮子在波浪作用下的起伏运动获得能量，其采集装置由 1 个或多个浮子构成，主要包括漂浮式和固定式 2 种类型。漂浮式主要由浮子、连杆、能量转换装置、水下阻尼装置等部分构成。固定式主要部件和漂浮式相同，区别在于固定式在海底装有底架，能量转换部分安装在底架上，整个装置固定在海底[9]。

（2） 摆式波浪能采集形式

摆式波浪能发电装置原理是：浮力摆在波浪的推动下不停地做往复运动，带动与之相连的液压装置做功，进而带动发电机发电，其主要包括：悬挂摆式和浮力摆式 2 种形式。

（3） 点头鸭式波浪能采集形式

点头鸭式波浪能采集装置的形状和工作状态类似于鸭子的运动，利用波浪运动和促使浮子绕装置回转轴旋转，利用旋转运动进行发电。在波浪入射波作用下，浮子的鸭嘴部分产生水平位移，入射波过去后，鸭嘴又回到垂直状态。浮子绕回转轴往复摇摆运动的能量经液压装置收集后，通过电力系统转化为可直接利用的电能。

（4） 筏式波浪能采集形式

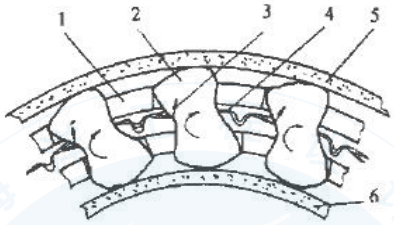
筏式波浪能转换装置主要利用其铰接处的液压能来转换为电能，主要有液压系统和铰接阀体，铰接处安置有液压系统，包括活塞杆、液压缸以及液压控制柜。当有波浪时，波浪会带动筏体上下运动进而使铰接处往复弯曲，往复运动产生的机械能经液压装置收集后用于发电机发电，实现波浪能量的转换[10]。

第 3 章 整体结构设计和可行性分析

3.1 传动装置结构设计

3.1.1 单向轴承原理

单向轴承一般以球轴承和楔形块组成，楔形块均匀且倾斜的分布在保持架的圆周上，其高度大于外圈与内圈之差的一半，始终与内外圈保持接触。其结构如下图 3.1 所示：



1—保持架；2—楔块；3—带状弹簧作用力；4—带状弹簧；5—内圈；6—外圈

图 3.1 单向轴承结构图

当内圈逆时针旋转时，内圈与各楔形块的接触面处产生了摩擦力，对各楔形块的中心产生力矩，使其与内外圈强力啮合而使内外圈保持静止，当内圈顺时针旋转时，各楔形块的中心向左倾斜，内外圈解锁，实现外圈空转。

3.1.2 传动方式示意图及原理

本文的波浪能发电装置的传动结构采用的是机械式齿轮传动，为了使灯泡能够稳定的放光，本文设计了两种方法，方案一是采用多级齿轮传动方式使电机能够保持一个方向旋转，其传动部分如图 3.2 所示。方案二是齿条直接和发电机轴上齿轮相连，此时齿条带动发电机正反转，在后面电路上加入整流电路，此时灯泡不论发电机正反转都能保持发光，其传动部分如图 3.3 所示。

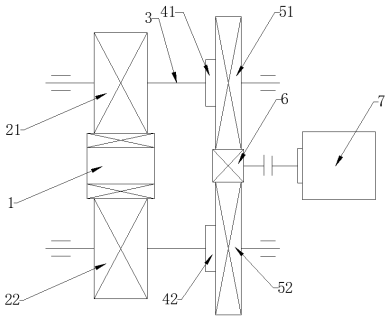


图 3.2 方案一传动结构

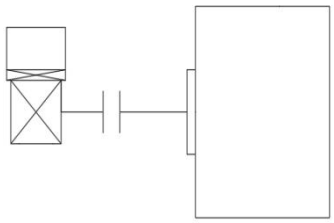


图 3.3 方案二传动结构

对于方案一而言，齿条 1 与浮体固定并随着浮体做起伏运动，当浮体向上运

动的时候齿条 1 也随之做向上运动，齿轮 22 顺时针旋转，此时单向轴承 42 空转，故齿轮 52 不跟随齿轮 22 旋转，齿轮 21 逆时针旋转，单向轴承 41 的内外圈相对静止，能传输大扭矩带动齿轮 51 逆时针旋转，齿轮 51 带动电动机 7 轴上的齿轮 6 顺时针旋转。当浮体向下运动时，齿条 1 也随之做向下运动，齿轮 21 顺时针旋转，此时单向轴承 41 空转。齿轮 22 逆时针旋转，单向轴承 42 的内外圈相对静止，能传输大扭矩带动齿轮 52 逆时针旋转，齿轮 52 带动电动机 7 轴上的齿轮 6 顺时针旋转。从而实现发电机持续的单向旋转运动，保证齿条上下运动时发电机能持续顺时针旋转。

在方案一中，当一个单向轴承可以传递扭矩时，另一个单向轴承空转，为了把这部分空转的能量利用起来，对称的放置了反方向的单向轴承。大齿轮也可充当飞轮的作用，用来稳定转速。如图 3.4 所示。

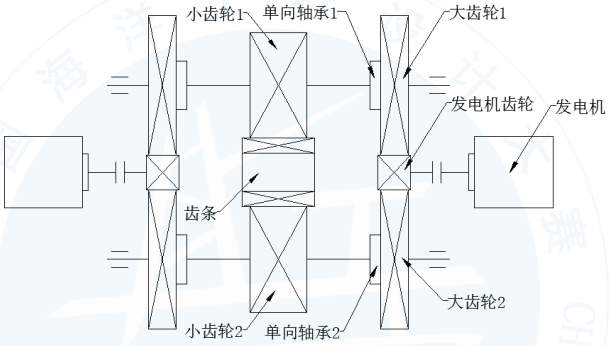


图 3.4 方案一传动结构改进

对于方案二而言，传动部分设计是齿条直接与电机轴上的齿轮相啮合，带动电动机正反转，电路的设计会在下文电路设计部分详述。

3.2 浮体设计

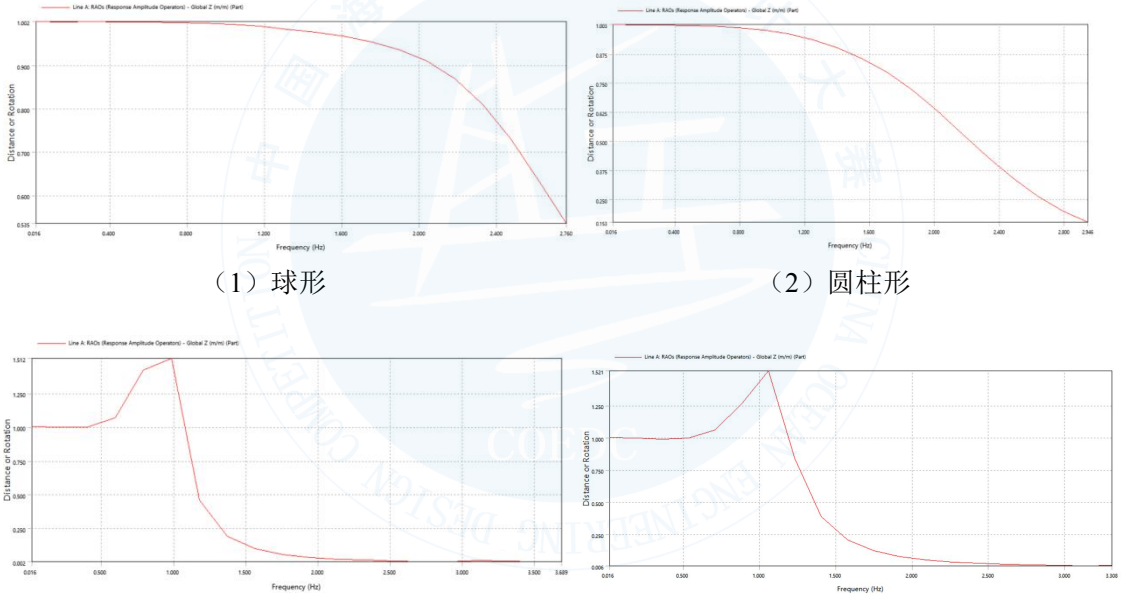
3.2.1 浮子形状选择

在振荡浮子式波浪能转换装置中，波浪把能量传递给运动的浮子，然后浮子将能量传递给机械装置将能量传递出来，因此在设计波浪能转换装置的过程中，浮子的形状和大小对于装置的运动特性及能量捕获非常重要。并且浮子的形状同时也应该保持运动的稳定性且易于维护。

当浮子的几何尺寸越大时，所受的波浪力越大，能够吸收的能量也就越多，但是浮子过大时，绕射力也会随之变得很大，此时浮子的运动将不会以垂荡运动为主[11]。浮子垂荡方向的运动对浮子吸收功率的影响比纵荡方向大，因此，需要选择合适尺寸的浮子，而不是一味的大。

波浪能俘获宽度是波浪能装置吸收的功率和波浪所携带能量之比，是评价波浪能转换装置吸收波浪能力的一个指标。在参考文献[11]中比较了圆柱体、球柱体和锥柱体浮子的波浪能俘获宽度。其结果为：在没有弹性系数和阻尼的情况下，三种形状的浮子的运动响应峰值均比较大；在低频区间范围内，三种形状的浮子运动幅值接近，在高频区锥柱体和球柱体的浮子的运动响应幅值稍高于圆柱形浮子；三种形状的浮子在最优阻尼下的波能俘获宽度接近，球柱体浮子的波浪能俘获宽度较大；在浮子排水量和直径相同的情况下，三种形状的浮子能量俘获宽度相差不大。参考文献[12]得到以下设计原则：尽量减小浮子吃水深度，设计上大下小的浮子形式，以增大浮子对波浪动能的捕获。

利用 ANSYS 的 AQWA 对不同形状的浮子（球形，圆柱形，锥形，橄榄形）进行了仿真。在保证质量相同（m=0.2kg）的情况下，得到了浮子的幅值响应算子 RAO 与波浪频率的关系，如图 3.5 所示。



（1）球形　　（2）圆柱形

（3）锥形　　（4）橄榄形

图 3.5 不同形状浮子的 RAO 曲线

由于橄榄形浮子在实验室的测试环境下具有较高的 RAO，所以我们选择了橄榄形的浮子。另外，我们还对多个浮子（图 3.6）的情况进行了仿真。在保证质量和总体积相同的情况下， 比较了多个浮子与单个浮子的垂荡 RAO（图 3.7）、横摇 RAO（图 3.8）以及绕射力（图 3.9）。发现多个浮子的垂荡 RAO 大，横摇 RAO 小（扭矩小），而单个浮子的绕射力比较小（能量损失小）。综合比较多个浮子和单个浮子的情况，本装置选用了多个浮子。

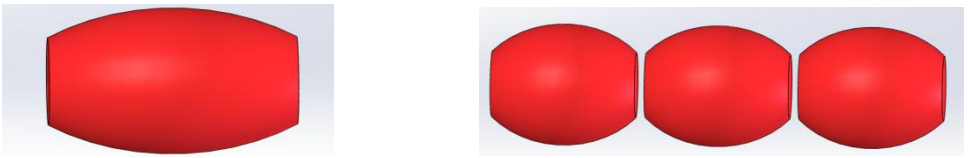


图 3.6 浮体形状（左图：单个浮体；右图：多个浮体）

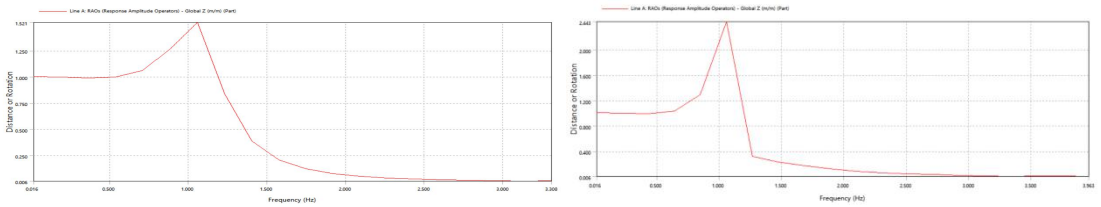


图 3.7 垂荡 RAO（左图：单个浮体；右图：多个浮体）

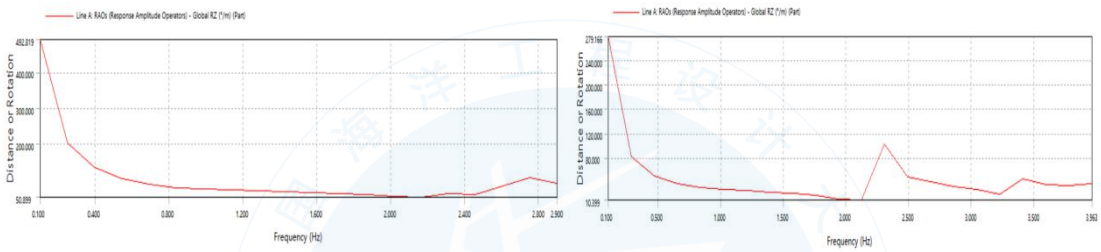


图 3.8 横摇 RAO（左图：单个浮体；右图：多个浮体）

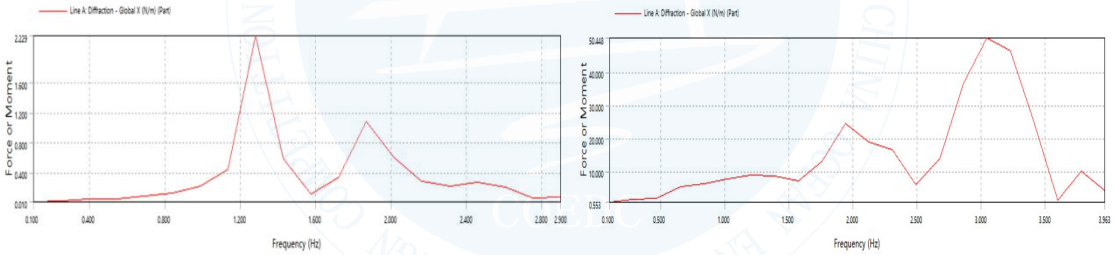


图 3.9 绕射力曲线（左图：单个浮体；右图：多个浮体）

3.2.2 浮体结构设计

对于浮体结构采用了类似于圆规的结构，两个支腿铰接在一起，其具体结构如图 3.10 所示。当波浪较大时，波浪推动两支腿缩小其夹角，既能够防止大风浪时毁坏结构，又能够在小风浪时扩大夹角以俘获更多的能量，浮体结构在风浪大和风浪小时的夹角示意如图 3.11 所示。

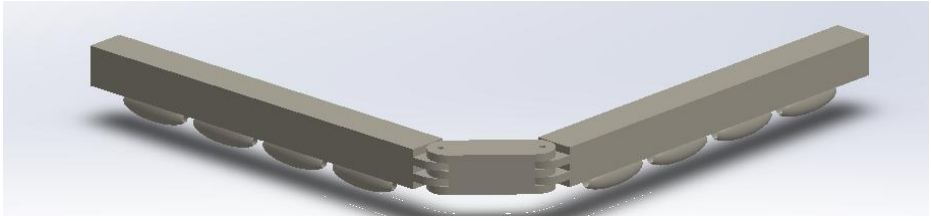


图 3.10 浮体结构图

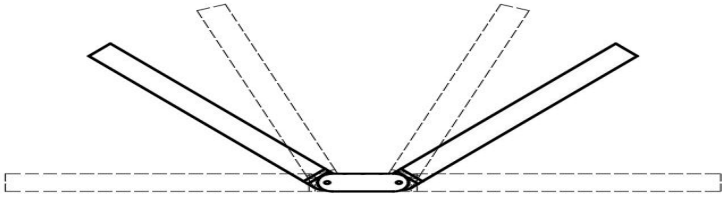
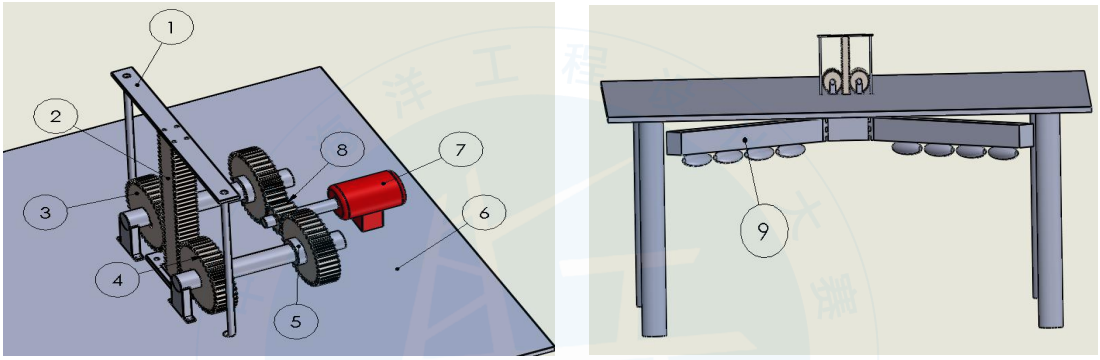


图 3.11 浮体夹角示意图

3.3 整体结构布置

在上文所述本文设计了两种方案的传动装置，方案一的整体结构布置如图 3.12 所示：



1—支架；2—双面齿条；3，4，8—齿轮；5—单向轴承；
6—工作平台；7—电机；9—浮体结构

图 3.12 方案一整体结构图

如上图所示，发电装置所处的工作平台由四立柱支撑，其具体结构下文将会提及。齿条和支架贯穿工作平台，齿条的下端与浮体、上端与支架相互固连。支架一方面可以进一步加强齿条与浮体间的连接，另一方面可以保证齿条的运动为垂直方向的运动。同时浮体架与工作平台之间连有弹簧，一方面能平衡浮体架的重量，另一方面也能缓冲浮体架和海洋平台之间的冲击力。为了适应深水环境，可将装置改成浮式结构，如图 3.13 所示。

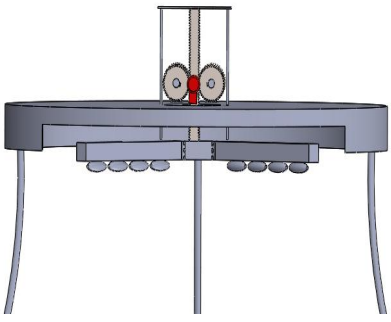
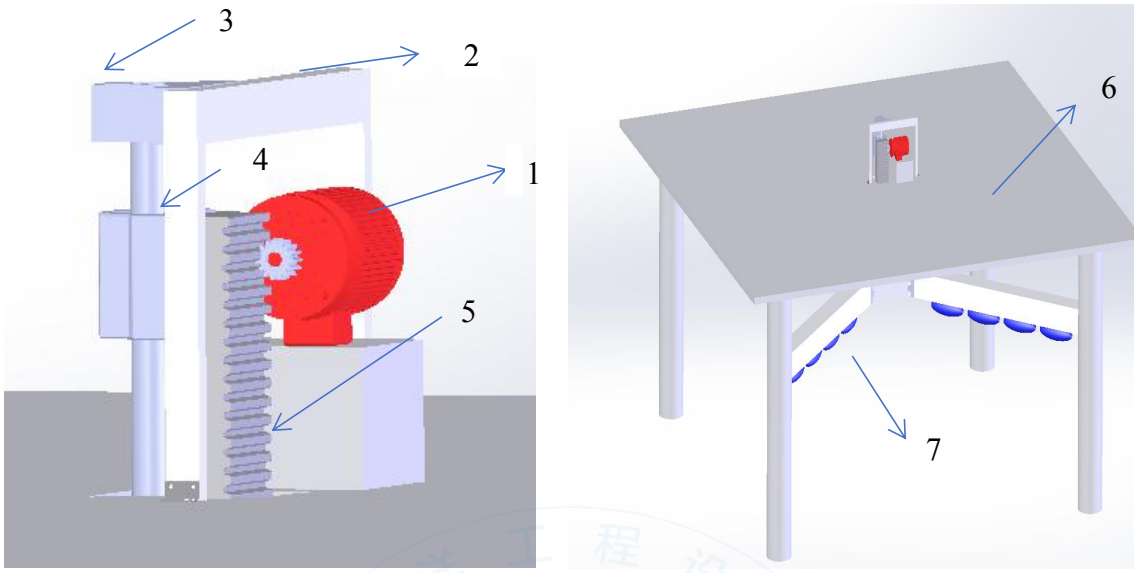


图 3.13 浮式结构

方案二的整体结构布置如图 3.14 所示：



1—电机；2—支架；3—滑轨支架；4—滑块；5—齿条；6—平台；7—浮体结构

图 3.14 方案二整体结构图

如上图所示，发电装置所处的工作平台由四立柱支撑。齿条和滑轨贯穿工作平台，齿条底部与浮体固定并与两个滑块固连。导轨两端分别固定于平台支架和浮体架上。同时浮体架与工作平台之间连有弹簧，一方面能平衡浮体架的重量，另一方面也能缓冲浮体架和海洋平台之间的冲击力。

3.4 电路设计

3.4.1 稳压电路设计

在方案一中，为了得到稳定的电流，采用如图 3.15 所示的二阶 RC 滤波电路。

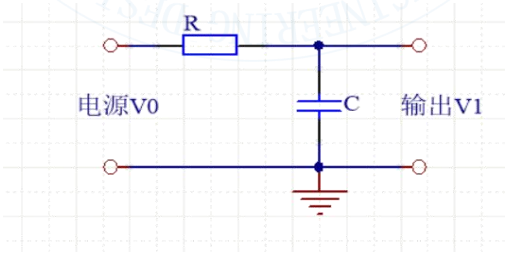


图 3.15 二阶 RC 滤波电路

3.4.2 整流电路设计

在方案二中为了得到持续的稳定的电流，采用二极管桥式整流电路可以将发电机产生的方向和大小周期性变化的交流电转化为稳定的直流电。其电路原理图如图 3.16 所示。其中整流电桥是由四个单向导通的二极管 D1、D2、D3、D4 构成。

当输入电压为正值时，二极管 D1、负载 R，二极管 D3 构成一个闭合回路；当输入电压为负值时，二极管 D2、负载 R、二极管 D4 构成一个闭合回路。从而使电机的正反转都能产生一个方向的电流。C 为滤波电容，通过其不断的充电和放电，达到减少电源电压波动的效果。

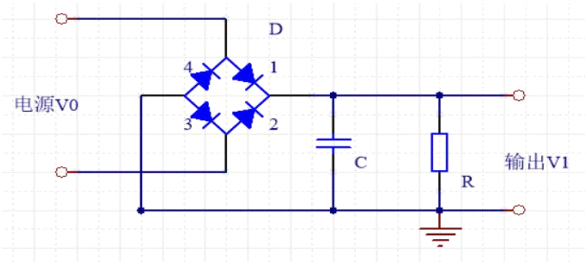


图 3.16 桥式整流电路与原理图

在 simulink 中建立电路模型，如图 3.17 所示。得到仿真结果如图 3.18 所示。可以看出在交流电通过整流电桥后，电压全部变为正值。在滤波电容的作用下，电压稳定在一个固定值。

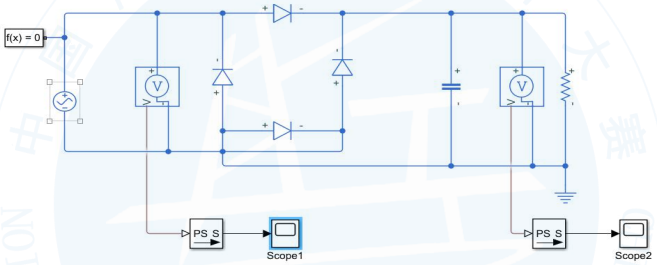
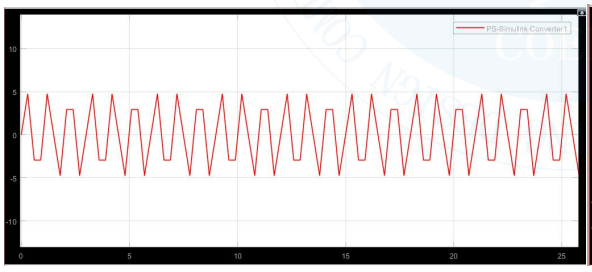
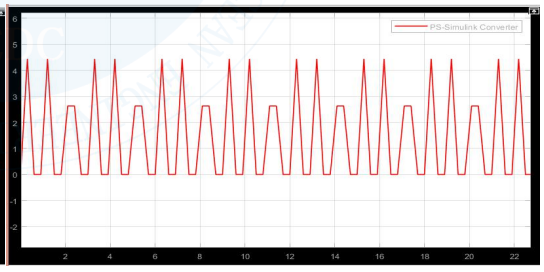


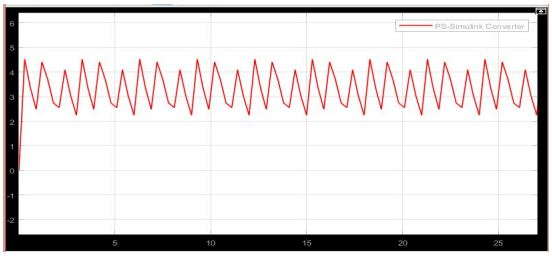
图 3.17 simulink 电路模型



（1）输入电压



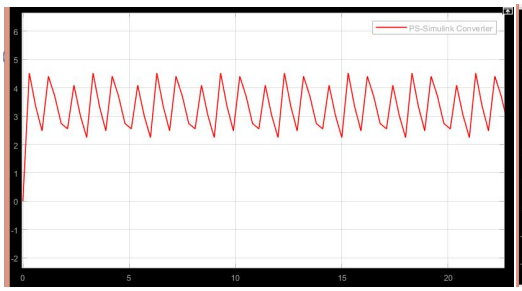
（2）输出电压（无电容）



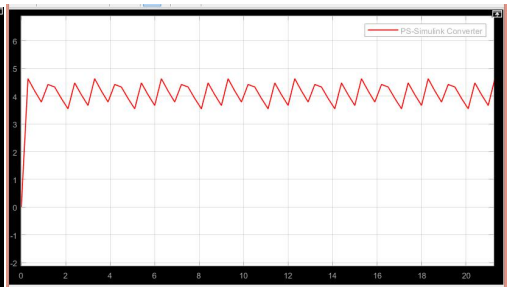
（3）输出电压（带电容）

图 3.18 simulink 仿真结果

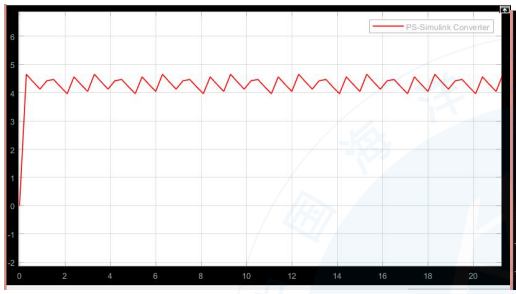
为了分析电容和电阻对输出电压的影响，选取不同的电容值和电阻值进行仿真，得到结果如图 3.19 所示。



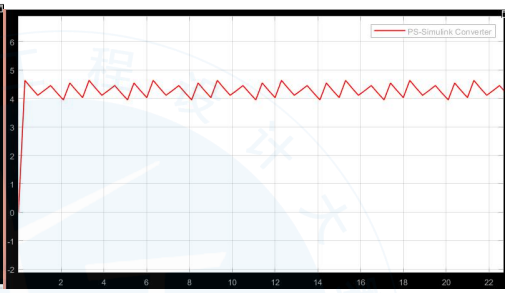
（1）C=0.01，R=100



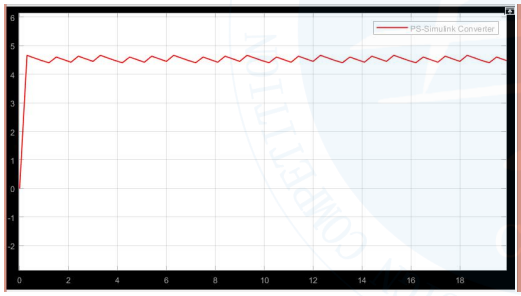
（2）C=0.01，R=300



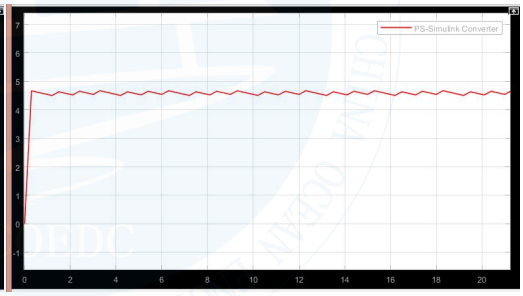
（3）C=0.01，R=500



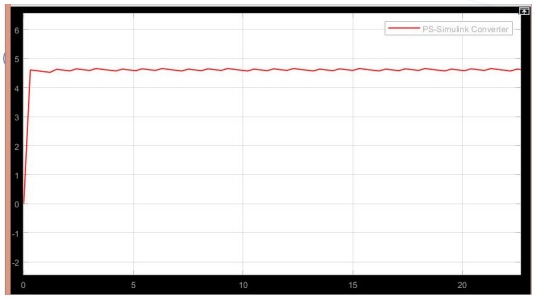
（4）C=0.05，R=100



（5）C=0.05，R=300



（6）C=0.05，R=500



（7）C=0.1，R=500

图 3.19 不同的电容值和电阻值的仿真结果

由仿真结果可以看出随着电容的增大，电压的稳定性明显提高，达到稳定的时间变化不大。随着电阻的增大，一方面稳定性提高，另一方面电压值增大。因

此为获得更稳定的电压，可以选用大电容和大电阻。

3.5 装置创新性

本文设计装置中采取齿条直接带动电动机轴上齿轮旋转的传动方案设计、将波浪能转化为齿轮的动能，再经由发电机将其转换为动能的装置，后辅助稳压电路使灯泡能够持续稳定的发光，主要创新点为：

（1）装置比较稳定，不用整个立架都上下动，能量损失也比较小；

（2）省去了复杂的传动机构，提高了传递效率；

（3）本装置构造简单维护方便，成本低；

（4）本装置中浮体装置采用了类似于圆规的结构，能根据风浪大小人为的调整角度，大大的减少了装置受风浪破坏的可能性，具有良好的应用前景。

3.6 可行性分析

本文设计了两种方案，但由于时间限制，对比两种方案，方案二大大减少了中间环节，传递效率更高，因此只做了方案二的实物模型。本装置除浮体外，其他装置处于平台之上，装置没有与海水的直接接触，避免了海水对装置的腐蚀，提高了装置的使用寿命；浮体结构采用了类似于圆规的结构，能根据风浪大小人为的调整角度，大大的减少了装置受风浪破坏的可能性，对于海上风浪环境变化有非常好的适应性，具有良好的应用前景；本装置造价低廉，且浮体通过与之相固连的齿条直接带动发动机轴上齿轮转动，省去了中间环节，大大提高了效率，具有成本低、效率高等有点，因此，本装置经济效益可观。

第 4 章 浮体振动特性分析

4.1 浮体运动模型

质量为 M 的浮体漂浮于海面上，随波浪做起伏运动，在粘性阻力和弹力的共同作用下，不断地将波浪能装换为浮体所持有的机械能。为了便于分析，假定波面是不可压并且流动无旋的。浮体即在线性波的作用下做微幅垂荡运动。根据振动学的相关知识，我们可以把浮体简化为如图 4.1 所示的有阻尼强迫振动系统，该振动统的强迫力来自于浮体所受的垂直波浪力[13]。

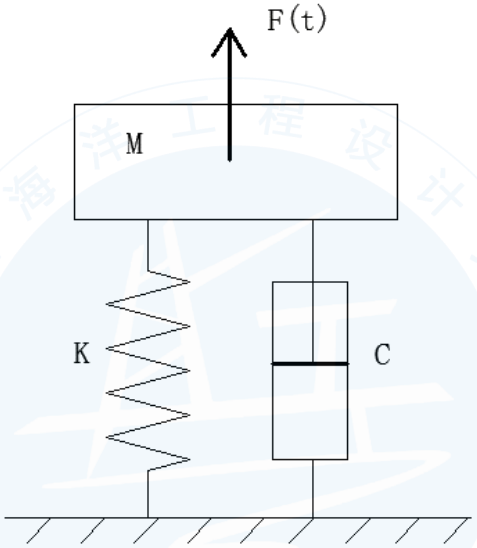


图 4.1 浮体运动简化模型

系统受到弹簧力、阻尼力以及波浪力这三个力的作用。当浮体漂浮在静水面上时，弹簧保持原长不变；当浮体离开静水面位置时，弹簧也随即被压缩或伸长，当浮体到达波峰时，弹簧也达到最大伸长或压缩长度。根据牛顿第二运动定律，我们可以列出浮体的运动方程式：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \qquad (4.1)$$

式中：M—浮子质量，单位 Kg；

F(t)—垂直波浪力，单位 N；

K—系统的弹性系数，N/m；

C—系统的阻尼系数。N·s/m。

4.2 浮体位移函数

在上一小节中，通过对发电装置进行简化，得到了浮体的运动方程式（4-1），

下面会对浮体的位移函数进行分析。 根据线性波理论，波浪力 F 可表示为

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t + \varphi) \tag{4.2}$$

将式（1-1）代入式（1-2）得到

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_0 \sin(\omega t + \varphi) \tag{4.3}$$

两边除以 M 后可得

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{M}\sin(\omega t + \varphi) \tag{4.4}$$

式中，$2n = \frac{C}{M}$，$\omega_n^2 = \frac{K}{M}$

由微分方程和振动学的相关知识可知，式（4.4）的解包括通解和特解。其中通解表示有阻尼自由振动，当阻尼非常小（$n < \omega_n$）时，方程的通解为：

$$x(t) = e^{-et}(A_1 \cos\omega_{nd} t + A_2 \sin\omega_{nd} t) \tag{4.5}$$

式中：

$\omega_{nd} = \sqrt{\omega_n^{\ 2} - n^2}$ —表示有粘性阻尼的系统自由振动的频率。

特解可表示为：

$$x(t) = A_3 \cos\omega_{nd} t + A_4 \sin\omega_{nd} t \tag{4.6}$$

经三角变换可得：

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi - \beta) \tag{4.7}$$

式中：$A = \sqrt{A_3^{\ 2} + A_4^{\ 2}}$，$\tan\beta = -\frac{A_4}{A_3}$。 （4.8）

将特解（4.6）代入运动方程（4.4），由于$\sin(\omega t + \varphi)$和$\cos(\omega t + \varphi)$不能恒等于零，故比较$\sin(\omega t + \varphi)$以及$\cos(\omega t + \varphi)$项前的系数可得：

$$\begin{cases} -A_4\omega^2 + 2nA_3\omega + \omega_n^{\ 2} A_4 = 0 \\ -A_3\omega^2 + 2nA_4\omega + \omega_n^{\ 2} A_3 = \dfrac{F_0}{M} \end{cases} \tag{4.9}$$

解得

$$\begin{cases} A_3 = \dfrac{F_0}{M}\dfrac{\omega_n^{\ 2} - \omega^2}{(\omega_n^{\ 2} - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \\ A_4 = \dfrac{F_0}{M}\dfrac{2n\omega}{(\omega_n^{\ 2} - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \end{cases} \tag{4.10}$$

代入式（4.8）得

$$\begin{cases} A=\dfrac{F_0}{K}\dfrac{1}{(\sqrt{1-\gamma^2)^2+(2\zeta\gamma)^2}}=x_{st}\alpha \\ \beta=\arctan\dfrac{2\zeta\gamma}{1-\gamma^2} \end{cases} \tag{4.11}$$

式中：$\gamma=\dfrac{\omega}{\omega_n}$，$\zeta=\dfrac{n}{\omega_n}$，分别表示频率比和阻尼比。

故浮体运动微分方程（4.4）的全解可以表示为：

$$x(t)=e^{-nt}(A_1\cos\omega_{nd}t+A_2\sin\omega_{nd}t)+A\sin(\omega t+\varphi-\beta) \tag{4.12}$$

假设初始条件为：$x(0)=0,\ \dot{x}(0)=\dot{x}_0$，则可以得到

$$\begin{aligned} x(t)=&e^{-\zeta\omega_n t}(x_0\cos\omega_{nd}t+\frac{\dot{x}_0+nx_0}{\omega_{nd}}\sin\omega_{nd}t) \\ &-e^{-\zeta\omega_n t}A[\sin(\varphi-\beta)\cos\omega_{nd}t+\frac{\omega\cos(\varphi-\beta)+n\sin(\varphi-\beta)}{\omega_{nd}}\sin\omega_{nd}t] \\ &+A\sin(\omega t+\varphi-\beta) \end{aligned} \tag{4.13}$$

4.3 影响浮体振幅因素

由式（4.13）可知，当浮体受到波浪激振力作用的时候，浮体便会做有阻尼强迫振动，也称之为简谐振动。浮体的简谐振动是一个稳态的过程，只要激振力不消失，浮体的简谐振动就将一直维持下去。浮体的有阻尼强迫振动的振动频率与波浪激振力的频率相同，且该振动频率不受外部阻尼的影响。

由式（4.11）可知，影响浮体振幅的因素包括激振力幅值F_0，频率比γ，以及阻尼比ζ。

（1）激振力幅值F_0对振幅的影响

由式（4.11）可知，浮体做有阻尼强迫振动的时候，其振幅与浮体在波浪激振力幅值F_0作用下的静位移成正比。设浮体做阻尼强迫振动时候的振幅为 A，浮体在波浪力幅值F_0的作用下所引起的静位移为x_{st}。由式（4.11）可知，A 为x_{st}的α倍，其中，α为有阻尼强迫振动的动力系数，可表示为：

$$\alpha = \frac{1}{(\sqrt{1-\gamma^2})^2 + (2\zeta\gamma)^2} \tag{4.14}$$

由式（4.14）可以看出，动力系数α只随频率比γ和阻尼比ζ的变化而变化，也就是说动力系数的大小只和频率比以及阻尼比的大小有关。由此可知，在系统的弹性系数保持不变的情况下，系统的振幅 A 与激振力幅值F_0成线性关系，即激振力幅值F_0增大，振幅 A 也会相应增大。

（2）频率比γ对振幅的影响

频率比γ是指激振力频率ω和系统固有频率ω_n之间的比值，根据式（4.14），我们可以绘制如图 4.2 所示的曲线图，以直观地反应α随γ以及ζ的变化规律。该曲线又被称为位移幅值的幅频响应曲线。

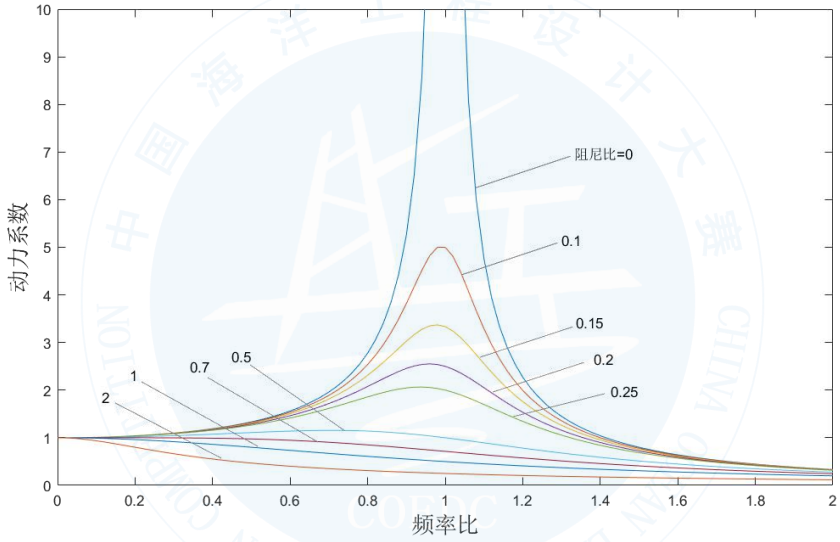


图 4.2 幅频响应曲线

从图 2 中可以看出：

若频率比γ非常小，也就是说当波浪激振力的振动频率ω远远小于系统的固有振动频率ω_n时，系统振动的动力系数α约等于 1，振幅 A 和静位移x_{st}相等，在这种情况下，波浪激振力相当于是静力。

当γ趋近于 1 时，即当ω趋近于ω_n时，振动的振幅 A 将迅速增加，当激振力的振动频率和系统的固有振动频率相等时，振动的振幅 A 达到最大值。激振力的振动频率和系统的固有振动频率相等的现象又被称为共振现象。系统共振时，系统的外部阻尼将对系统振幅的大小产生一定的影响。

当γ很大时，也就是说激振力的频率ω与系统的固有频率ω_n之间的比值比较大时，系统振动的动力系数趋向于 0，系统的振幅也会随之减小并趋近于零。

（3）阻尼比ζ对振幅的影响

由图 2 可知，对于一个振动系统，若阻尼比ζ不同，那么系统的共振曲线也不相同，即系统的振幅会随阻尼比的变化而变化。

阻尼比越大，系统的振幅则会相应减小，也就是说阻尼比的增大可以有效地减小共振区的振幅。

当ζ=0 时，由式（4.14）可知，在这种情况下得到的共振曲线又称为无阻尼的共振曲线此时，如果$\omega=\omega_n$，即γ=1 时，系统将产生共振，则系统振动的动力系数α趋近于 0，那么系统的振幅 A 也将会随之趋向于无穷大。

当系统的振动远离共振区域时，阻尼比ζ对振幅的影响也会逐渐变小。当频率比γ很大或趋近于零的时候，尽管阻尼比ζ的值不同，但其振动曲线却都非常接近于无阻尼时候的振动曲线，由此可见，在计算系统的振动时，如果不考虑系统的共振，那么阻尼对系统的影响也可以近似的不考虑。

阻尼比越大，系统产生共振时的振幅越低，而且随着阻尼比的不断增大，系统产生最大振幅的位置也会不断向左偏移，阻尼比ζ越大，偏移也就越大。可以先将式（4.14）对γ求导，可知当$\gamma=\sqrt{1-2\zeta^2}$时，动力系数α取到最大值$\alpha_{\max}=\dfrac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$。由此可知当系统在有阻尼的情况下振动时，当$\gamma$=1 时，系统并不能产生共振。但是，如果系统的阻尼非常小（ζ<0.2），此时共振发生在γ=1 附近，在实际工程应用中，系统所受的阻尼通常都比较小，因此一般情况下仍然近似认为当$\omega=\omega_n$时，系统发生共振。

第 5 章 浮体受力分析和能量转换率

5.1 浮体受力分析

5.1.1 浮体的垂直加速度

单独分析浮体的运动，浮体模型如图 5.1 所示

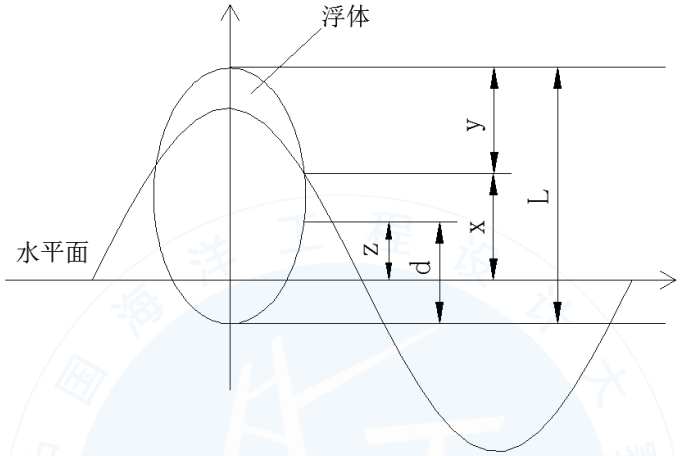


图 5.1 波浪中浮体模型

图 5 中，各字母分别表示： L —浮体的长度 ； d0 —浮体的初始吃水深度 ； A —浮体的水截面积 ； z —浮体的吃水面到水平面的距离（当吃水面低于水平面时，z 为正值；当吃水面高于水平面时，z 为负值） ；x —波面到水平面的距离 ；y —波面到浮体顶端的距离 。

由图 5 可知

$$x + y + z + d0 = L \tag{5.1}$$

对两边求二阶导有

$$\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z} = 0 \tag{5.2}$$

可得浮体的垂直加速度为$-\ddot{z}$。

5.1.2 浮体所受垂直作用力

浮体在随波浪做起伏运动的过程中，除了受到浮力的作用，还会受到辐射阻尼以及粘滞阻尼的影响，在不计阻尼的情况下，波浪对浮体的作用力为

$$F_{浮} = \rho g A(x + z + d0) \tag{5.3}$$

其中， ρ —海水密度；g —重力加速度； A —浮体水截面积

设浮体的质量为 m ，当浮体漂浮在海面上，且处于静止状态时，此时，浮体

所受到的海水浮力与浮体所受到的重力相等，即

$$mg = \rho gAd0 \tag{5.4}$$

由此可得，在忽略阻尼的情况下，浮体所受的垂直作用力为：

$$F_v = F_{浮} - G = \rho gA(x + z + d0) - mg = \rho gA(x + z) \tag{5.5}$$

浮体所受的阻尼力主要包括两部分：线性辐射阻尼力和非线性粘滞阻尼力。线性阻尼力可表示为

$$F_B = Bv = B\dot{z} \tag{5.6}$$

其中， B 为辐射阻尼系数常。

非线性粘滞阻尼力是由边界层分离引起的，它与速度的平方成正比，可表示为

$$F_C = C\dot{z}\left|\dot{z}\right| \tag{5.7}$$

因而在考虑阻尼的情况下，浮体所受的垂直作用力为

$$F = F_v + F_B + F_C = \rho gA(x+z) + B\dot{z} + C\dot{z}\left|\dot{z}\right| \tag{5.8}$$

5.1.3 浮体起伏位移

由波浪的运动公式可以推导预算浮体的起伏位移值，但这些公式一般都比较复杂，为了简化起见，一般情况下，浮体的起伏位移可用下式表示[14]

$$z(t) = \frac{(F_0 / \rho gA_{wp})\cos(\omega t + \gamma - \sigma_z)}{\sqrt{(1-\omega^2/\omega_z{}^2)^2 + (2\Delta_z\omega/\omega_z)^2}} = z_0\cos(\omega t + \gamma - \sigma_z) \tag{5.9}$$

其中，

$$z_0 = \frac{(F_0 / \rho gA_{wp})}{\sqrt{(1-\omega^2/\omega_z{}^2)^2 + (2\Delta_z\omega/\omega_z)^2}}$$

式中， z_0 为浮体的运动振幅； F_0 为浮体所受的垂直波浪力幅值； ρ 为水的密度； A_{wp} 为浮体的水截面积； ω 为波浪圆频率 ； ω_z 为浮体起伏自然圆频率，其值为：

$\omega_z = \sqrt{\dfrac{\rho gA_{wp}}{m+m_w}}$ ，其中， m_w 为浮体的附加质量。

γ 为取决于波力分量的相角，由于浮子是对称结构，因此相角恒为零； Δ_z 为无量纲起伏阻尼系数，由 ω 和 ω_z 的比值来确定； σ_z 为自由面位移和起伏位移间的相位角，由 ω 和 ω_z 的比值来确定。

5.2 波能

当波浪运动时，波能由两部分组成：波的动能以及波的势能。

5.2.1 波的势能

在波浪运动的过程中，组成流体的水质点也会在平衡位置附近做往复运动，波的势能便是由水质点远离平衡位置克服重力而做功时产生的。水面静止时，波的势能最小；当有波浪产生时，自由水面随水质点的运动而运动，水质点克服重力做功，波的势能随之增加，因此，计算波的势能时，可取水面静止时，即势能最小时为零势能参考面[15]。

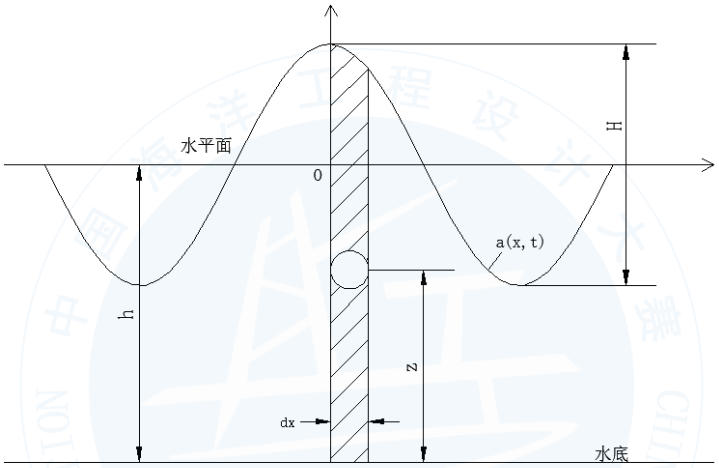


图 5.2 波动势能简图

波面方程可假设为：

$$\mathrm{a}(x,t)=\frac{H}{2}\cos(kx-\omega t) \qquad (5.10)$$

如图 5.2 所示，为了对波的势能进行分析，我们先对单位宽度的波进行分析，设单位宽度内，从水底到自由水面的流体柱的质量为 dm ，该单位宽度流体柱的势能为

$$dE_p=dmg\bar{z} \qquad (5.11)$$

式中，$\bar{z}$ —流体质心的高度，$\bar{z}=\frac{1}{2}(h+a)$

设单位宽度的流体柱的微分质量 dm 的定义为 $dm=\rho(h+a)dx$，所计算的波的波高为 H ，则在一个波长 λ 内，该波的平均势能为

$$\bar{E_p}=\int_x^{x+\lambda} dE_p=\frac{1}{\lambda}\int_x^{x+\lambda}\frac{1}{2}\rho g(h+a)^2dx=\frac{\rho g}{2\lambda}\int_x^{x+\lambda}[h^2+2ha+a^2]dx \qquad (5.12)$$

将式（5.9）代入上式，积分有

$$(\bar{E}_p)_t = \frac{1}{2}\rho g h^2 + \frac{1}{16}\rho g H^2 \lambda \tag{5.13}$$

无波动时，一个波长内进行波的势能为$(\bar{E}_p)_0 = \frac{1}{2}\rho g h^2$

由波的势能的定义，波的势能为

$$\bar{E}_p = (\bar{E}_p)_t - (\bar{E}_p)_0 = \frac{1}{16}\rho g H^2 \lambda \tag{5.14}$$

由式（5.3）可以看出，波的平均势能与波长及波高有关。

5.2.2 波的动能

波的动能是由组成流体的水质点的运动产生的，在波浪中，单位面积内质量为 dm 的流体柱的动能dE_k可表示为

$$dE_k = dm\frac{1}{2}(\mu^2 + v^2) = \frac{1}{2}\rho(\mu^2 + v^2)dxdz \tag{5.15}$$

式中，μ—波中水质点的水平速度，v—波中水质点的垂直速度可以根据微幅波理论得到 ：

$$\mu = \frac{H\omega}{2}\frac{\cosh[n(z+h)]}{\sinh(nh)}\cos(nx - \omega t) \tag{5.16}$$

$$v = \frac{H\omega}{2}\frac{\sinh[n(z+h)]}{\sinh(nh)}\sin(nx - \omega t) \tag{5.17}$$

式中，n 表示波数，$n = \frac{2\pi}{\lambda}$。ω表示波的圆频率，$\omega = \frac{2\pi}{T}$。

式（5.14）所求dE_k表示单位面积内波的动能，将该式分别对深度和波长进行积分，可得

$$\bar{E}_k = \int_x^{x+\lambda}\int_{-h}^{a}\frac{1}{2}\rho(\mu^2 + v^2)dzdx \tag{5.18}$$

将式（5.15）和式（5.16）代入，得

$$\bar{E}_k = \frac{\rho}{2\lambda}[\frac{gHn}{2\omega}\frac{1}{\cosh(nh)}]^2 \bullet \int_x^{x+\lambda}\int_{-h}^{a}\{\cosh^2[n(z+h)]\cos^2(kx-\omega t) + \sinh^2[n(z+h)]\sin^2(kx-\omega t)\}dzdx \tag{5.19}$$

根据双曲函数以及三角恒等式的性质，上式可变为

$$\bar{E}_k = \frac{\rho}{2\lambda}[\frac{gHn}{2\omega}\frac{1}{\cosh(nh)}]^2\int_x^{x+\lambda}\int_{-h}^{a\approx 0}\frac{1}{2}\{\cosh[2n(z+h)]+\cos[2(nx-\omega t)]\}dzdx$$
$$= \frac{1}{16}\rho g H^2\lambda \tag{5.20}$$

综上可得单位宽度上波的总能量为

$$\bar{E} = \bar{E}_p + \bar{E}_k = \frac{1}{16}\rho g H^2\lambda + \frac{1}{16}\rho g H^2\lambda = \frac{1}{8}\rho g H^2\lambda \tag{5.21}$$

5.3 浮体能量转换率

由式（5-9）可得浮体的速度为：

$$v_z = \frac{dz}{dt} = -\omega z_0 \sin(\omega t - \delta_z) \tag{5.22}$$

浮体的加速度为

$$v_z = \frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega^2 z_0 \cos(\omega t - \delta_z) \tag{5.23}$$

浮体的总能量包括浮体的动能 E_{kz} 和势能 E_{pz} 两部分。其中，

$$E_{kz} = \frac{1}{2}(m+m_w){v_z}^2 = \frac{1}{2}(m+m_w)\omega^2 {z_0}^2 \sin^2(\omega t - \sigma_z) \tag{5.24}$$

$$E_{pz} = \frac{1}{2}\rho g A_{wp} z^2 = \frac{1}{2}\rho g A_{wp} {z_0}^2 \cos^2(\omega t - \sigma_z) \tag{5.25}$$

所以浮体的总能量为：

$$E_z = E_{kz} + E_{pz} = \frac{1}{2}[(m+m_w)\omega^2 + \rho g A_{wp}] \tag{5.26}$$

可以得到浮体的能量转换率 η 为：

$$\eta = \frac{E_z}{\bar{E}B} = \frac{4[(m+m_w)\omega^2 + \rho g A_{wp}]}{\rho g H^2 \lambda B} \tag{5.27}$$

其中，B 表示波的宽度，即垂直于波的方向上浮体的长度。

第 6 章 动态仿真分析

6.1 系统建模及仿真

6.1.1 简化模型

由第二章可知，所设计的波浪能发电装置的传动部分是一个对称的机构，相对称的两部分装置随着波浪的起伏运动交替运行，为了便于分析，我们对该模型进行简化，只分析其中的一部分，由该部分的运动情况即可推知整个装置的情况。由于浮体与齿条直接接触并固连在一起，所以在用 ANSYS 对其进行动力学分析时，可将波浪力直接作用于浮体上，齿条的起伏位移及速度、加速度等运动情况也就反应了浮体的运动情况。

6.1.2 系统建模与仿真

打开 ansys workbench，打开一个瞬态的动力学模块“Transient Structural”，右击“A3 Geometory”，在弹出的菜单中选择“Import Geometry”，从而选择模型进行导入。导入后的简化模型如图 6.1 所示。

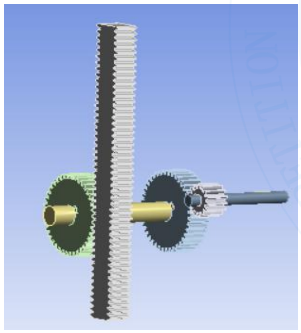


图 6.1 导入模型图

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Contact	1
Target	2
Contact Bodies	8.525mm齿条
Target Bodies	键槽大齿轮
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	5.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled

图 6.2 齿轮齿条摩擦接触

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Contact	3
Target	4
Contact Bodies	键槽大齿轮
Target Bodies	小齿轮
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	5.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled

图 6.3 大小齿轮摩擦接触

添加约束及载荷。软件会自动将零件互相用绑定接触进行连接，应先删除而后重新定义接触。在框选按钮和 Shift 键的配合下，将齿轮每个齿的正反面进行选择，并将其命名为 1 和 2。如下图 6.2 所示，将“Type”从刚刚默认的绑定修改为摩擦接触，设置摩擦系数“0.05”。同理，设置大齿轮与小齿轮的摩擦系数也为 0.05，如下图 6.3 所示。

网格划分。由于瞬态动力学分析的计算量极大，网格数量应尽量的小，此次将全局网格尺寸设置为 2mm 并刷新网格，后续再进行调整。划分后的网格如图 6.5 所示。

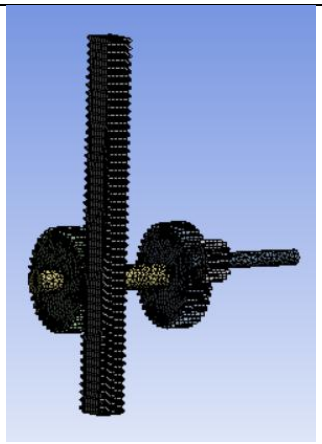


图 6.5 生成的网格

运动副设置。如下图 6.6 和 6.7 所示，基本方法是释放齿条的 X 方向平移自由度、限制其他自由度，和释放齿轮的轴向旋转自由度、限制其他自由度。

Definition	
Connection Type	Body-Ground
Type	General
Suppressed	No
Translation X	Free
Translation Y	Fixed
Translation Z	Fixed
Rotations	Fix All
Reference	
Coordinate System	Reference Coordinate System
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Face
Body	8.525mm齿条
Initial Position	Unchanged

图 6.6 设置齿条运动副

Definition	
Connection Type	Body-Ground
Type	General
Suppressed	No
Translation X	Fixed
Translation Y	Fixed
Translation Z	Fixed
Rotations	Free Z
Reference	
Coordinate System	Reference Coordinate System
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Face
Body	键槽大齿轮
Initial Position	Unchanged

图 6.7 设置齿轮运动副

求解设置。与静力学分析不同，在瞬态动力学分析中，求解时间为真实物理过程中所代表的时间。如下图 6.8 所示，将“Number of Steps”和“Current Step Number”设置为 1 个载荷步，将“Step End Time”需要模拟的真实时间过程修改为 0.1 秒，平衡迭代以子步（Substeps）的方式设置步数为 100、50、500。

Restart Analysis	
Restart Type	Program Controlled
Load Step	1
Substep	44
Time	2.6426e-002 s
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	0.1 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100.
Minimum Substeps	50.
Maximum Substeps	500.
Time Integration	On
Solver Controls	

图 6-8 求解设置

运动副载荷设置。对齿条设置为 X 方向的位移，大小设置为“Tabular Data”，即 0.1 秒的时间内运动 20mm。对齿轮施加力矩 10N·mm，如下图 6.9 和 6.10 所示。同理，也对另一对互相啮合的大小齿轮设置施加力矩。

Tabular Data

	Steps	Time [s]	Displacement [mm]
1	1	0.	0.
2	1	0.1	20.
*			

图 6.9 添加齿条运动副荷载

Tabular Data

	Steps	Time [s]	Moment [N·mm]
1	1	0.	= 10.
2	1	0.1	10.
*			

图 6.10 添加齿轮运动副荷载

6.1.3 仿真结果与分析

得到齿条的位移和速度，发动机输入轴的速度，如下图所示。

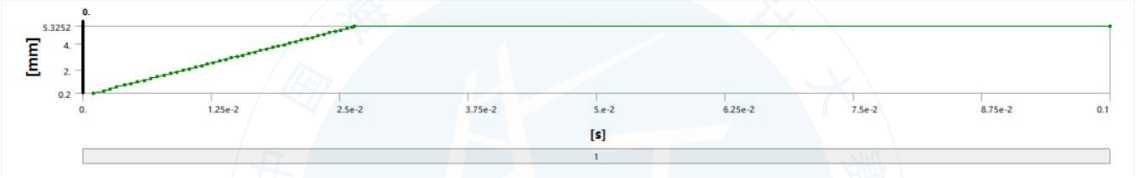


图 6.11 齿条的位移

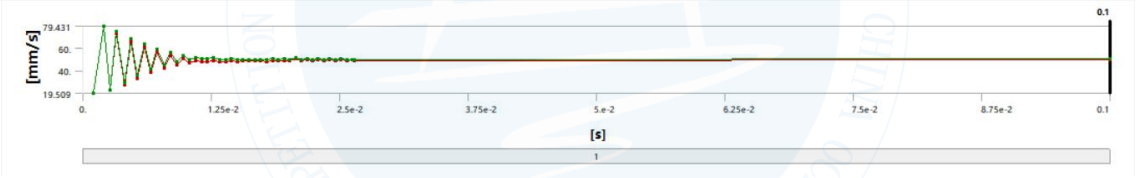


图 6.12 齿条的速度

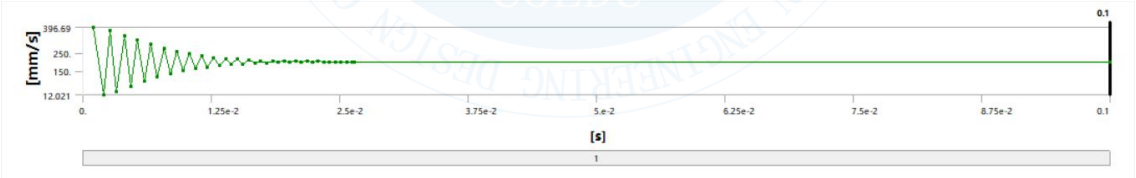


图 6.13 发电机输入轴的速度

在该发电装置中，浮体与齿条是固连在一起的，二者之间没有相对运动，因此在仿真结果中，齿条的运动规律也就反应了浮体的运动规律。这对验证所述模型以及理论计算的正确性有重要意义。

参考文献

[1] Nielsen K, Smed P F. Point absorberoptimization and survival testing

[2] PradoM.Archimedes wave swing [J] Oceaan wave energy. Berlin:Springer,2008:297-304

[3] WeberJ Mouwen F,Parish A,et al . Wavebob-research &development network and tools in the context of systems engineering

[4] Valerio D, Berio P, Sada CostaJ. Optimization of wave energy extraction with the Archimeedes wave swing

[5] Edward K,MekhicheM. Ocean Power Technologies Powerbuoy:System-Level design,Development and Validation Methodology

[6] Perez-CollazoC,GreavesD,Iglesias G.A review of combined wave and offshore wind energy

[7] 张亚群,盛松伟,游亚戈,王坤林,王振鹏.波浪能发电技术应用发展现状及方向[J].新能源进展,2019,7(04):374-378.

[8] 任建莉 ，钟英杰 ，张雪梅等.海洋波能发电的现状与前景.浙江工业大学学报,2006,34(1):70

[9] 胡珊,何宏舟.振荡浮子波浪能采集装置研究概述[J].能源与环境,2016(04):6-8.

[10] 张国贤.海蛇式波浪发电装置[J].流体传动与控制,2015(04):61-63.

[11] 于龙超. 振荡浮子式波浪能转换装置的性能研究[D].哈尔滨工程大学,2016.

[12] 历福伟. 浮子形状对振荡浮子式波浪发电装置发电效率的影响[D].哈尔滨工业大学,2011.

[13] 覃岭等.复杂圆柱型波能装置振动特性研究.振动与冲击,2010,29(4):188～192

[14] 麦考密克.海洋波浪能转换.许适译.广州:广州能源研究所,1982.53～69

[15] Hooft,J.P.Oscillatory Wave Force on Small Bodies. International Shipbuilding Progress, 1970:103～105

团队编号：A20200113

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组

完成日期 2020 年 10 月 12 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

振荡浮子式波能转换装置是一种较为新型的波能转换装置。设计的振荡浮子式波能转换装置的优点是：

1、容易建造，几乎没有水下混凝土，大大降低了建造难度、建造成本；

2、采用振荡浮子装置，转化效率高；

3、采用岸式装置，避免了能量输送以及装置系泊的问题，从而节约成本提高效率。

正是基于以上优点，振荡浮子式波能转换装置有望发展成为实用化的波能装置。本文设计的新型振荡浮子式发电装置由浮子、传动机构、发电机和保护装置等几部分组成，通过浮子吸收波浪能，产生起伏运动，再通过传动装置传输能量，最终驱动发电机进行发电。通过振荡浮子式波能转换装置典型的受能体与定体二者的相对运动来进行波浪能的采集。

本设计的发电装置相对其他波浪发电装置，利用更加方便，装置可以更加小巧成本更低，可以为沿海地区、海洋平台和远海领域提供便利的、低成本的电力能源。

目 录

第一章 总 论.....1
1.1 波浪能简介.....1
1.2 波浪能开发现状.....2
1.3 波浪能发电面临的问题.....3
第二章 波浪能发电技术.....4
2.1 波浪能发电技术概述.....4
2.2 波浪能发电装置.....5
2.2.1 振荡水柱式波浪能发电装置.....5
2.2.2 越浪式波浪能发电装置.....5
2.2.3 运动式波浪能发电装置.....6
2.2.4 筏式波浪能装换装置.....8
2.2.5 点吸收式波浪能发电装置.....9
第三章 发电装置设计.....10
3.1 原理简介.....10
3.1.1 浮子式波浪发电系统结构.....10
3.2 结构设计.....11
3.2.1 整体支架设计.....11
3.2.2 发电装置部件的选择及布置.....11
3.2.3 发电装置整体结构.....12
3.3 理论分析及计算.....13
3.3.1 波浪能转换数学模型.....13
3.3.2 线性波理论.....14
3.3.3 非线性波理论.....15
3.4 试验测试.....16
第四章 结 论.....19
附 录.....20
参考文献.....24

第一章 总 论

1.1 波浪能简介

随着经济的迅速发展，能源需求不断地增加，传统能源日益短缺，大量的化石原料的使用又引发出了严重生态环境问题，这些已经成为了全世界关注的焦点。为了应对资源枯竭和生态环境问题，解决能源供应在社会经济发展的瓶颈问题，寻找替代的可再生能源刻不容缓。海洋能是一种蕴藏在海洋中的可再生能源，包括温差能、海流能、波浪能、潮汐能以及海上的风能和太阳能等自然资源[1]。其中海洋波浪能在海洋中无处不在，汹涌澎湃的海洋波浪蕴藏着极大的能量，波浪能的能流密度最大，可通过较小的装置提供可观的廉价能源。合理利用海洋波浪发电，既不消耗任何燃料和资源，又不产生任何污染，具有投资少、见效快等优点；因此海洋波浪能可再生资源在许多国家日益受到重视，尤其是研究和开发波浪能发电技术。

在世界范围内，两个半球的波能最丰富的区域在 40°和 60°之间，如图 1.1 所示。但是，如果比较北半球（NH）和南半球（SH），则年平均波浪能量最大的地方在南半球，南半球波况季节变化引起的功率波动相比北半球要低得多。南半球的澳大利亚，新西兰等附近海域，波浪能源资源较为丰富，年平均功率大于 120 千瓦/米。

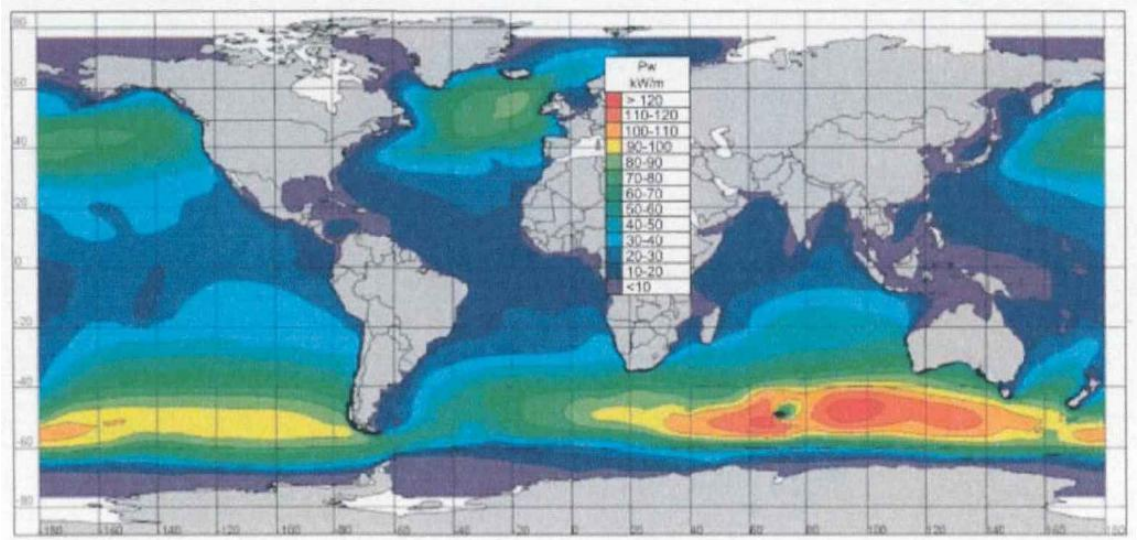


图 1.1 全球年均波能功率分布图

波浪是由于风、气压和水的重力作用等形成的起伏运动，波浪能的大小与波高和周期有关，具有间歇性、随机性和波动性的特点，是一种不稳定、无污染、可再生、储量大、分布广、利用难的能源。波浪能是海洋能的一种具体形态，也是海洋能中最主要的能源之一，它的开发和利用对缓解能源危机和减少环境污染

是非常重要的。汹涌的海浪运动产生巨大的、永恒的和环保的能量，如果能将海浪的动能及其他水面的波浪能充分利用起来，则世界能源的前景会相当广阔和光明。波浪能具有能量密度高、分布面广等优点[2]，是一种取之不竭的可再生清洁能源。尤其是在能源消耗较大的冬季，可以利用的波浪能能量也最大。小功率的波浪能发电，已在导航浮标、灯塔等方面获得推广应用。我国有广阔的海洋资源，沿海波浪能能流密度为 2~7kw/m，在能流密度高的地方，每 1m 海岸线外波浪的能流就足以为 20 个家庭提供照明。

1.2 波浪能开发现状

最早的波浪能利用机械发明专利是 1799 年法国人吉拉德父子获得的[3]。1854~1973 年的百余年间，英国登记了波浪能发明专利 340 项，美国为 61 项。在法国，则可查到有关波浪能利用技术的 600 种说明书。

我国拥有很多条件较好的区域可供波浪能开发利用，就地区而言有福建、浙江沿岸，广东东部、长江口、山东半岛南部的中段沿岸等地区；就海域而言有南海、东海、黄海等海域。这类区域平均波高较大，波功率密度较高，季节变化较小，有近岸条件或岛屿条件，且对电力有一定的需求[4]。

从波浪能功率密度来看，浙江中部、台湾、福建海坛岛以北等地波能密度较大，其次是浙江中北部、山东半岛南部沿岸、广东东部等地。渤海、北部湾北部沿岸等地区波能密度最低，从季节上看，我国多数海域受季风影响波功率有明显的季节性变化，秋冬季节波能密度高，春夏季节低。而且风暴等极端气候会对波功率密度甚至地区的波能资源功率密度有显著影响。总体来说，我国海域波能密度较低，且存在季节性变化，进行波浪能装置设计时需要考虑目标海域的平均波能功率，也要考虑该海域波况的变化，使得波浪能装置能在较宽的波况范围内高效率的工作，提高装置年均运行时间和波能转化效率。

我国是波浪能开发最早的国家之一，从 1980 年以来研究技术不断获得突破性发展。波浪能资源最丰富的省份是台湾省，以 429 万千瓦的发电功率占全国波浪能资源总量的 1 / 3，其次是浙江、广东、福建、山东等省沿海地区，发电功率在 160 万-250 万千瓦之间，发电量为 706 万千瓦，占波浪能总量的 55%。我国海域辽阔，漫长的海岸线，为波浪能的开发与利用提供了广阔的发展机遇。

目前我国在发电研究的基础上，运用成熟的机械制造及发电技术进行有效的组合，将广阔海岸取之不尽，用之不竭的波浪能低成本地转化为电能，为改善中国东部沿海地区能源短缺和环境改善开辟一条新的途径。同时，波浪能由于具有以下优点也保证了其良好的可开发性：

（1）波浪能是一种机械能，是海洋能中质量最好的能源，同时也使其能量转

化装置相对简单。

（2）尽管波浪能的能流密度偏低，但蕴藏量大。如太平洋、大西洋东岸中纬度 30~40°区域，波浪能可达 30~70kW/m，某些地方更高达 100kW/m，可以保证可开发利用能源的总量。

（3）冬季可利用的波浪能最大，可以有效缓解该季节能耗巨大的问题。

（4）波浪能是海洋中分布最广的可再生能源，因此波浪能可以成为海上偏远地区的能量来源。

1.3 波浪能发电面临的问题

目前波浪能发电成本高昂、发电功率小、质量差，所以降低发电成本，提高发电效率，增强发电的质量是波浪能发电普及的必经之路。

发电效率低是因为波浪时刻变化，波浪能量不集中，如何使发电装置适应这种工作状况，是目前波浪能发电亟待解决的问题。

稳定性问题。受技术限制，波浪能发电装置只能将吸收来的波浪能转化为不稳定的液压能，这样再转化的电能也是不稳定的。英国、葡萄牙等欧洲国家采用昂贵的发电设施，仍无法得到稳定的电能。

控制问题。由于波浪的运动没有规律性和周期性，浪大时能量有剩余，浪小时能量供应不足。这就需要一种设备在浪大时将多余的波浪能储存、再利用。

材料问题。现有的波浪能装置只是采用普通钢材，靠表面涂层提高抗腐蚀能力，耐久性不尽如人意。目前不存在专门为波浪能利用而开发的工业产品，在波浪能研究上改变设计，牺牲效率、合理性，用现有产品拼凑成波浪能发电设备 。

工作环境问题。因为发电装置放置在海中，工作环境恶劣，减少海水中的部件和抗风浪都是目前遇到的问题。

随着各国对能源需求量的提高，波浪能的发电开发面临的问题也亟待我们解决。因此，对波浪能发电装置的研究则成为了波浪能开发问题中的重中之重。

第二章 波浪能发电技术

2.1 波浪能发电技术概述

波浪能发电是通过波浪能装置，是将波浪能首先转换为机械能，然后再转换成电能的过程。波浪能来源于风和海面的相互作用，是风的一部分能量传给了海水。波浪能是以机械能形式存在的，是海洋能中品位最高的能量。具有能量密度高、分布面广等优点。它是一种取之不竭的可再生清洁能源。近年来，随着科技进步和化石能源短缺的加剧，波浪能这种清洁绿色的能源的开发利用已初具商业化趋势。

据统计，全世界有近万座小型波浪能发电装置在运行，主要用于航标灯、浮标等。目前利用海洋波浪发电的方法大致有三种：一是利用海洋波浪的上下运动所产生的空气流，使气轮机转动，从而带动发电机发电；二是利用海洋波浪能装置运动（直线运动、转动）的机械能转化为电能；三是利用波浪能将水引入高位水池积蓄起来，形成一个水头，再来冲击水轮机发电。按照波浪能俘获收集方法，可将其分为振荡水柱式、筏式、摆式、鸭式、越浪式和点吸收式等类型[5]。发电装置主要方式如图 2.1 所示。

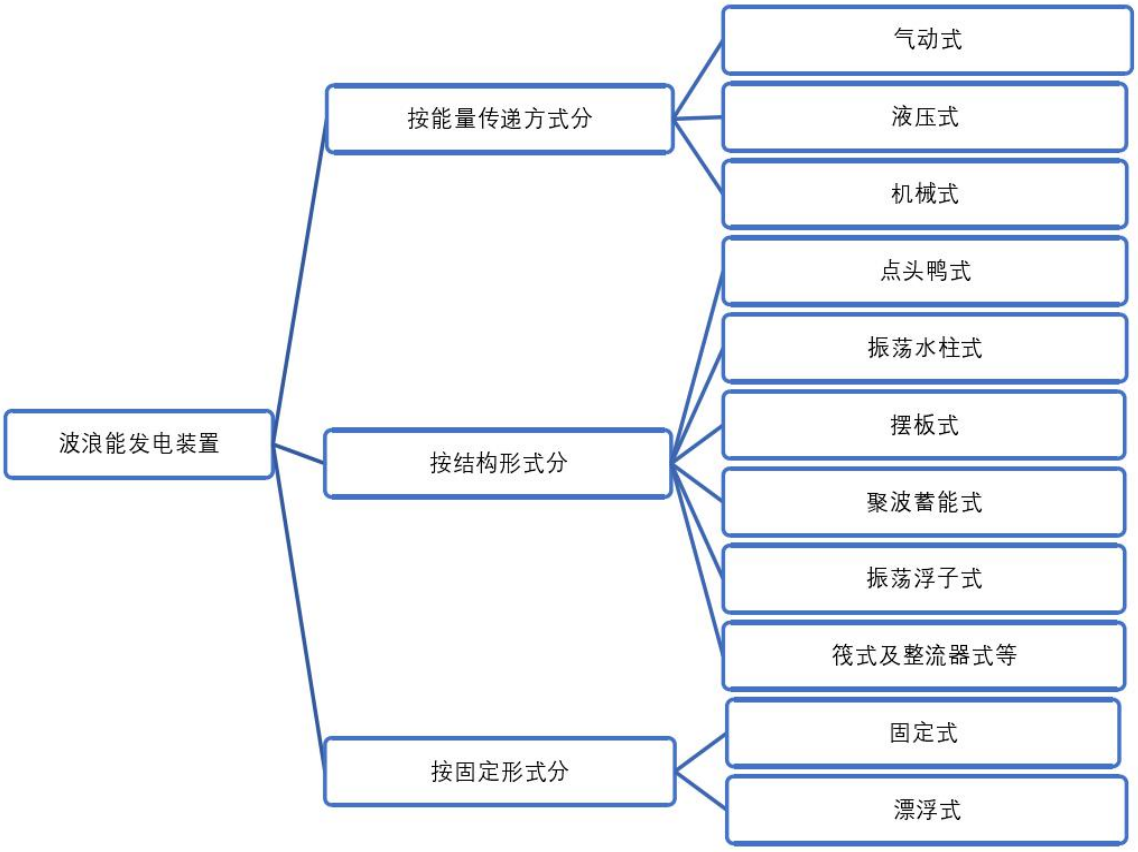


图 2.1 发电装置主要方式

2.2 波浪能发电装置

2.2.1 振荡水柱式波浪能发电装置

振荡水柱波浪能发电装置（Oscillating Water Column，OWC）利用一个与海水相通的气室，波浪作用下气室内的水柱往复运动，气室内空气容积发生变化，进而由空气驱动叶轮，带动发电机发电。优点是能量转换装置（气轮机等）不与海水接触，可靠性较高，缺点是效率较低。

振荡水柱波浪能发电装置包括固定式（Fixed-structure OWC）和漂浮式（Floating-structure OWC）[6]。固定式振荡水柱波浪能发电装置通常被安装于海底或岩石基上，如下图 2.2 所示。固定式振荡水柱装置由一个部分淹没于海底的混凝土或钢结构与自由水平面共同构成一个气室。波浪造成自由水平面的波动，从而使气室内的空气波动，空气流过涡轮机驱动发电机发电。

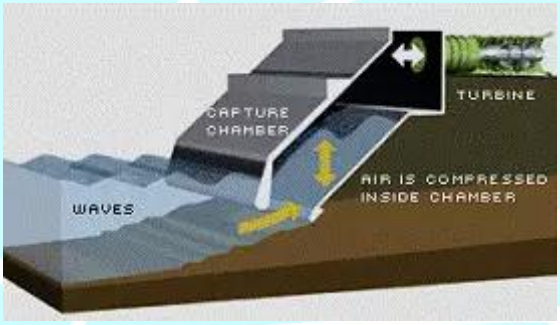


图 2.2 振荡水柱式发电装置

该装置发电具有代表性的有：

（1）英国的 LIMPET 500，1998 年开始建设 2000 年 8 月建成，装机功率 500kW；

（2）葡萄牙于 1996～1999 年建设 Pico，装机功率 400kW；

（3）印度于 1991 年建成 Vizhinjam，装机功率 150kW。

振荡水柱型波浪能设备降低了维护保养的难度及成本，并且该波浪发电装置采用空气传递能量，具有工作原理简单、维护方便、可靠性高等优点。缺点是其二级能量转换效率较低，发电效率不足 30%，并且装机成本也比较高。

2.2.2 越浪式波浪能发电装置

越浪式波浪发电装置又称漫反射式波浪发电装置，其通常利用一个坡度较高的水库将波浪聚集起来，然后利用涡轮机释放，即是通过依靠波浪的势能来推动涡轮机发电的，通常也被称作是聚波水库式或聚波蓄能式装置。典型的装置有丹麦设计的锥形槽漫反射装置，SSG 和 Wave Drago 漫反射装置。漫反射式装置的优点是可靠性好，系统出力比较稳定，受波浪高度和频率的影响很小，但是漫反射式波能变换装置，通常体积庞大，并且转换效率较低，并且传动机构位于海面下，

与海水直接接触，所以容易被腐蚀，降低了装置整体的可靠性。此外，建设这种类型的发电站对地势要求严格，给推广带来困难。挪威波能公司(Norwave A.S)于1986 年建造了一座装机容量为 350kW 的收缩波道式波浪能电站 TapChan，见下图 2.4。电站的技术关键是它的开口约 60m 的喇叭形聚波器和长约 30m 的逐渐变窄的楔形导槽。

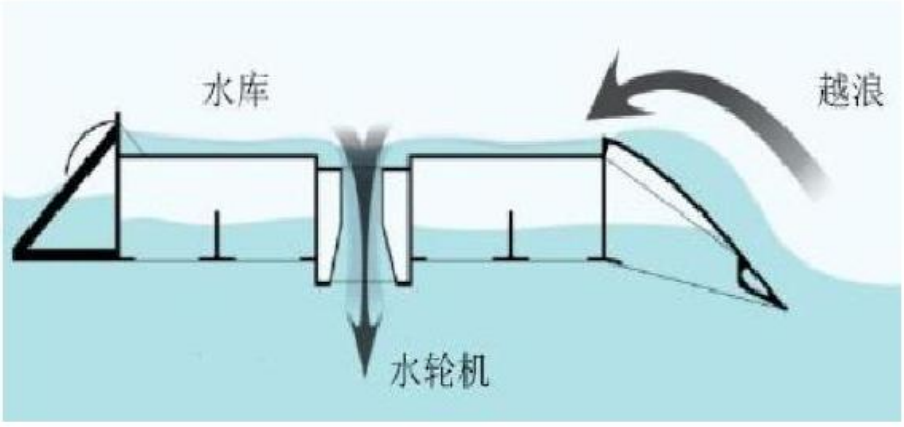


图 2.3 越浪式波浪发电装置原理图

图 2.4 挪威 TapChan 波浪能电站

2.2.3 运动式波浪能发电装置

运动式波浪能发电装置利用波浪的运动推动波浪能发电装置的活动部分产生往复运动（直线、转动），驱动机械系统或液压系统，最后驱动发电装置发电。

（1）振荡浮子式发电装置

振荡浮子式波浪能发电装置利用海洋波浪的运动推动浮子产生直线往复运动，驱动机械系统或以油、水等作为中间介质的液压系统，进而带动发电机发电。目

前国外已建成的振荡浮子式波浪能发电装置有：加拿大的 AquaBuoy 装置、荷兰的阿基米德波浪摆、美国的 PowerBuoy 装置及澳大利亚的 CETO。

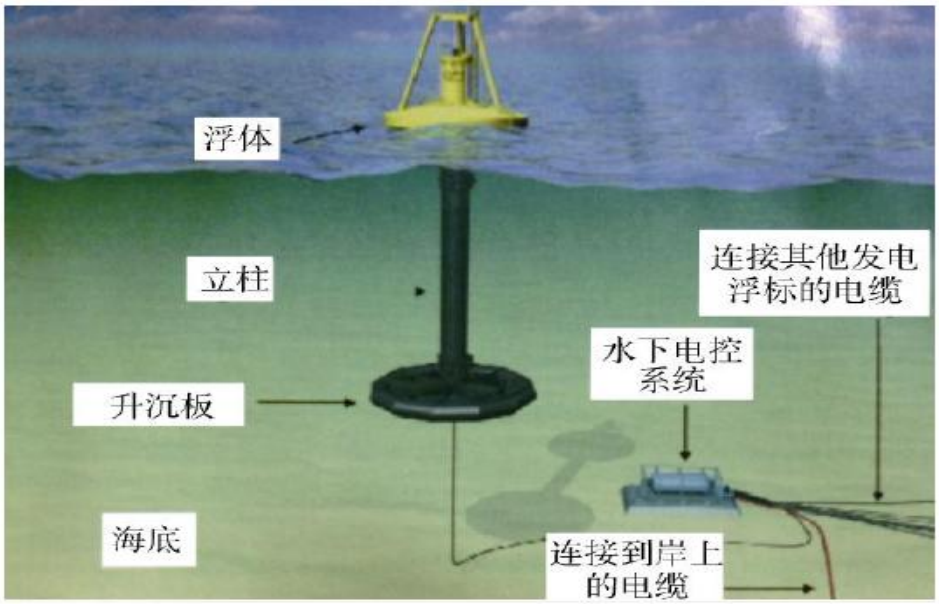


图 2.5 振荡浮子式波浪发电原理图

（2）点头鸭式发电装置

点头鸭式装置由英国 Salter 教授发明，见下图。鸭体在波浪作用下绕转动轴往复转动时，装置的后部因为圆弧形，不造出向后行进的波，故点头鸭式装置的背后往往为无浪区——这使得鸭式装置可以将所有的短波拦截下来，所以它具有较高的一次能量捕获效率。

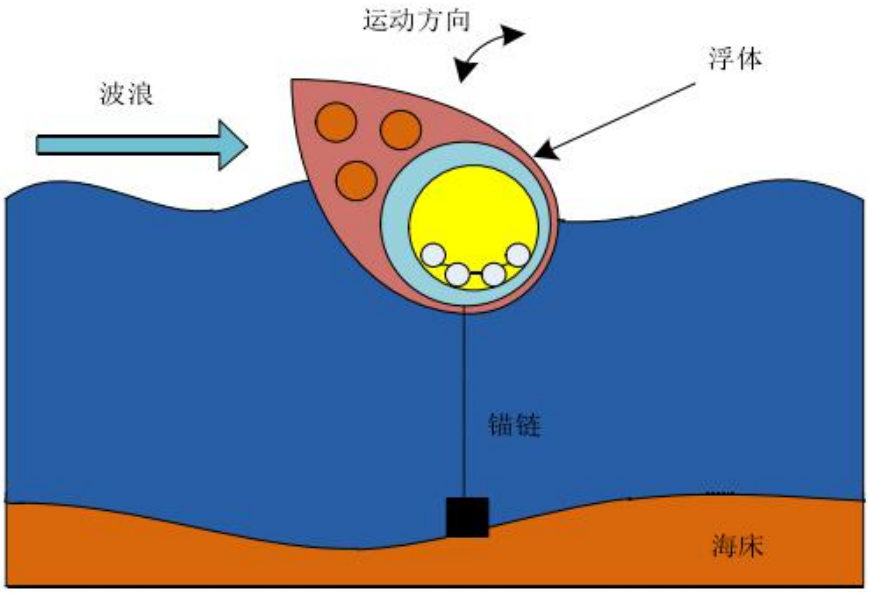


图 2.6 点头鸭式装置

（3）摆式发电装置

摆式波浪能发电装置发电原理为利用摆在波浪力的作用下作往复摆动从而捕获波浪能量，通过与摆相连的机械结构或液压系统转换将摆的动能和势能转换为机械能或液压能，进而转换为电能。

摆式波能装置也可分为悬挂摆式和浮力摆式两种[7]。日本的度部富治教授最早提出了摆式波浪能发电技术的概念，见下图。日本室兰工业大学于 1983 年建造了世界上首台悬挂摆式波浪能发电装置，其装机容量为 5KW。

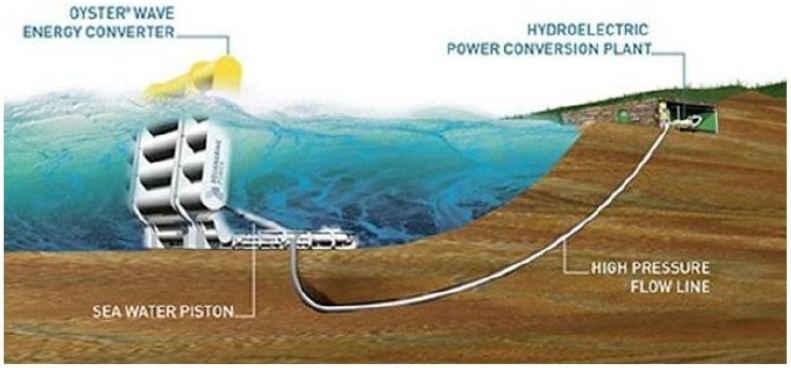


图 2.7 摆式发电装置

2.2.4 筏式波浪能装换装置

筏式波浪能装换装置由多节波面筏通过铰链铰接而成，且每一铰接处都接有能量装换器。随着波浪能的入射，两个波面筏之间将产生相对运动，并带动液压泵的活塞运动，将波浪能转化为液压能，最终转化为电能，其结构原理图如图所示。该装置的固有频率接近波浪能的频率时，转化效率较高，但是在大风浪时易损坏，故其可靠性能不好。目前筏式波能转换装置的代表是英国的 Pelamis，该装置 2004 年成功并网发电，是世界上第一台商用波浪能发电装置。

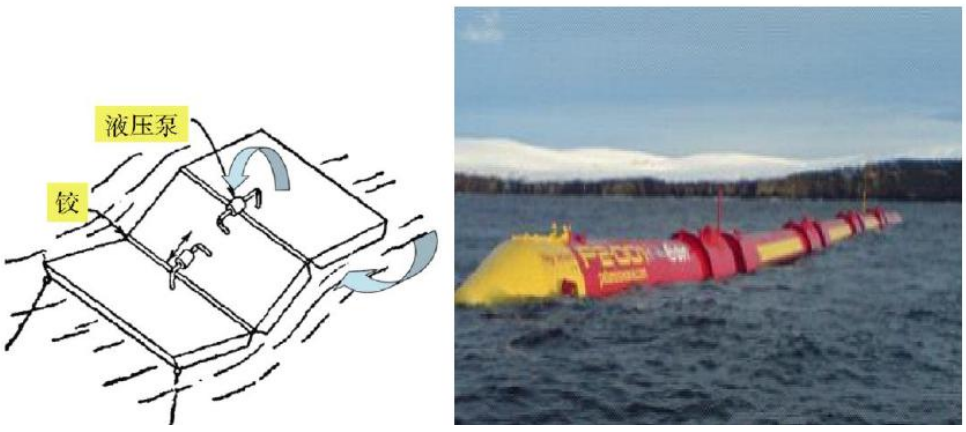


图 2.8 筏式波浪发电装置

2.2.5 点吸收式波浪能发电装置

点吸收式波浪能俘获技术主要利用振荡浮子在波浪力作用下的升沉运动收集波浪能，由于具有转化效率高、建造难度小、投资成本少、不受波浪方向影响等优点[8-9]，受到了广泛的重视。可按照其安装位置分为沿岸式、近岸式和离岸式；按照波浪能转化传递的方式可将其分为机械式、水压式、液压式、直线电机式、压电式和磁流体式等；按照同一套装置具有振荡浮子个数将其分为单点式、组合式和阵列式。

Wavebob 是由爱尔兰研发的点吸 收液压波浪能发电系统[10]。它包含两个轴对称的同轴浮体，上部的浮体与下部全淹没的浮体为刚性连接，设计的目的在于增大装置惯性并调节设备与平均入射波频率的匹配，两浮体之间的相互垂荡运动通过液压设备实现。

图 2.9 点吸收式波浪发电装置

第三章 发电装置设计

3.1 原理简介

通过第二章中对于各种波浪能发电装置的简单论述以及本设计所处实验环境，最终选择浮子式波浪发电系统结构。

3.1.1 浮子式波浪发电系统结构

浮体发电装置具有结构紧凑、制造维护成本低、极端气候下生存能力强的优势。点吸收装置的运行原理类似于机械系统中的吸振器，是依靠浮子随波上下运动而发电的一种方式[11]。浮子作为波浪能捕获的直接装置，把吸收的波浪能首先转化为浮子上下运动的动能，然后再驱动发电机，把机械能转换为电能，如图所示。浮子式波浪发电装置主要由波能转换装置和电力转换系统两部分组成，其中波能转换装置主要是指一些直接与波浪接触的能量提取机构，包括浮子、锚系等。电力转换系统主要是指用来把吸收的波浪能转化为电能的相关装置，像液压马达、发电机等。

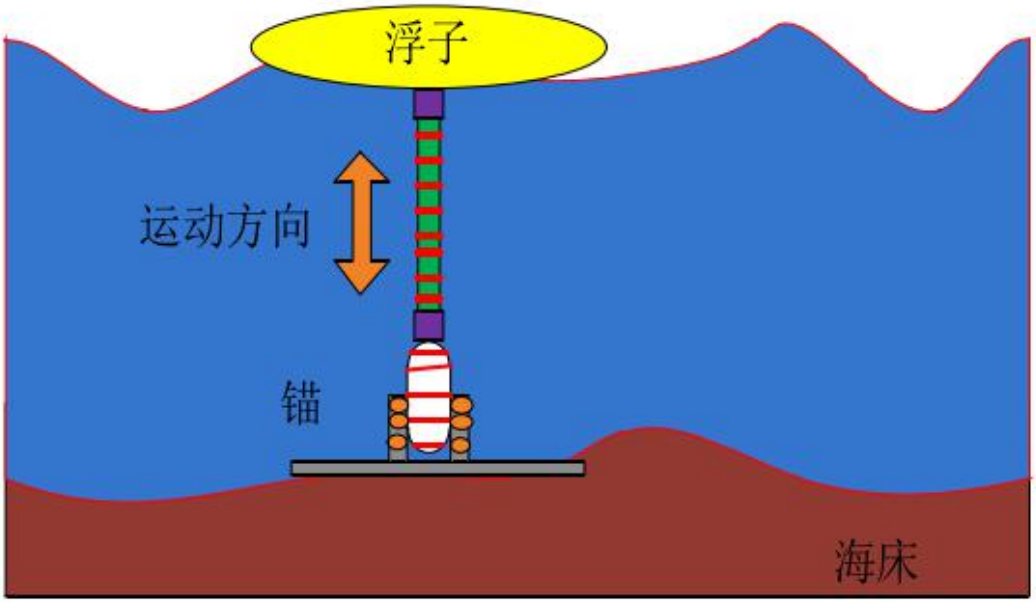


图 3.1 浮子式波浪发电结构

相对于其他波能变换器，点吸收式装置体积相对较小，可以吸收各个方向的波浪能，因此对波浪能的方向要求较低，入射波方向对装置吸收效率影响较小；所以从转换效率方面来看，该装置性能比较优异。当波峰到来时，由于水流的作用，使浮子向下移动；当波谷来临时，装置顶部的水压减小，浮子上升，利用入

射波的波峰和波谷对其的压力差来吸收波浪能。

3.2 结构设计

本设计实验所要求的环境条件为：波高范围 30-50mm 波周期为 5-20Hz，水深 0.3m。且装置的整体尺寸（长*宽*高）控制在 1m*1m*1m 范围内。

3.2.1 整体支架设计

根据本设计发电装置所处的实验环境及尺寸要求，本文通过 SOLIDWORKS 三维建模软件对发电装置的整体支架进行了三维设计建模，如下图所示。

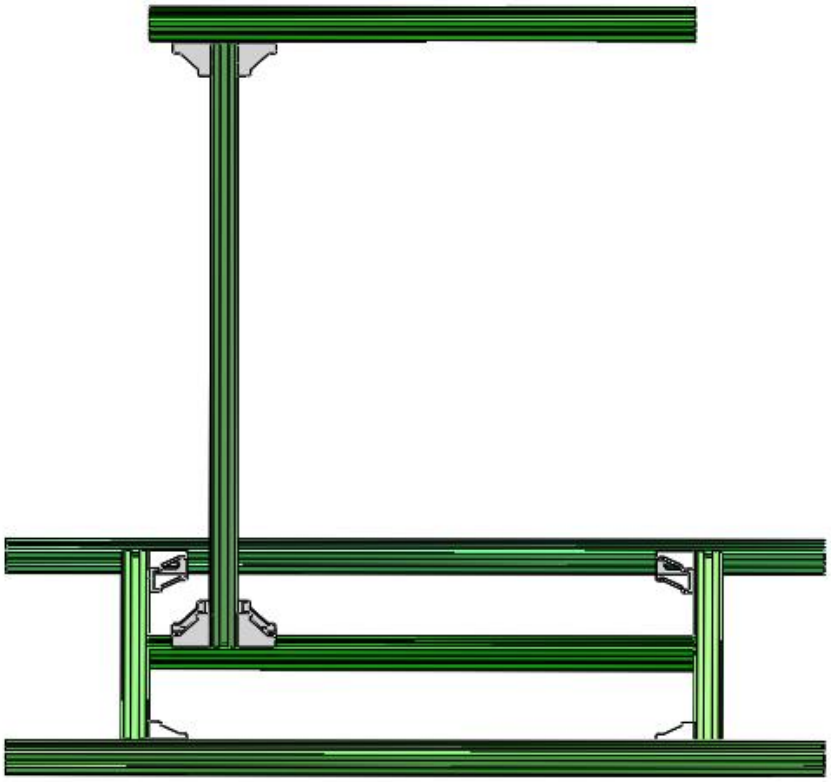


图 3.2 整体支架三维模型图

本设计的支架选用了工业铝材进行安装设计，为了满足实验环境下的波浪冲击以及在水中保持稳定，最终选用铝材截面尺寸为 20mm*20mm，以满足以上要求。铝材之间的连接使用了角铁和螺栓固定，以达到强度的要求。

3.2.2 发电装置部件的选择及布置

本发电装置选用了直线式发电机，通过发电机支架固定在装置整体支架的最上方。此外，发电机通过槽轮与绳缆和浮体相连，组成一个闭环结构，如图所示。

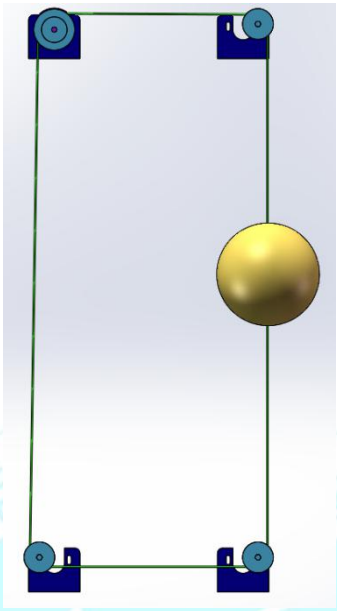


图 3.3 浮体与电机组成的闭环结构

该装置由一个浮体组成，当波浪通过时会带动浮子的上下运动，浮子则会通过绳缆拉动直线发电机进行发电。

3.2.3 发电装置整体结构

本设计的发电装置整体结构如下图所示。浮子以下部分浸入水中，以保证浮子能够漂浮在水平面上，以便于波浪能够带动浮子运动。发电机安置在支架最上方，保证发电机远离水源，以防止电路进水失效。

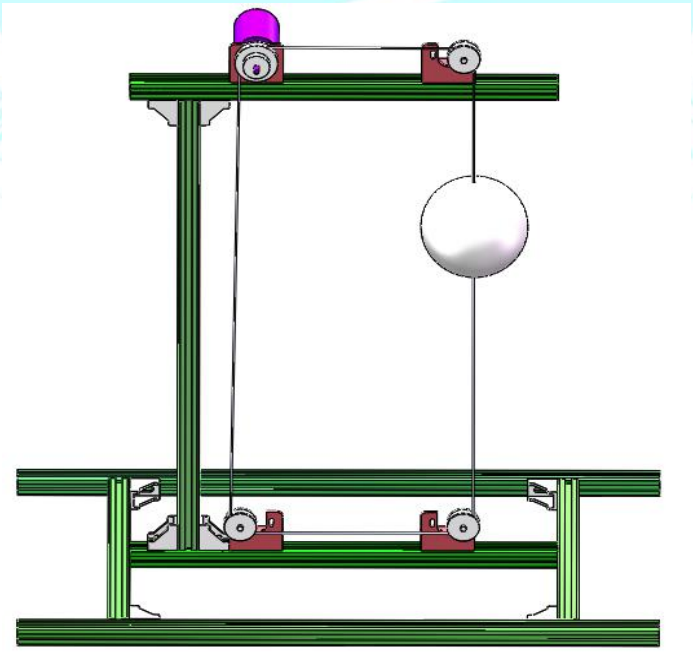


图 3.4 发电装置整体结构

本装置的能量转换流程图如下所示，

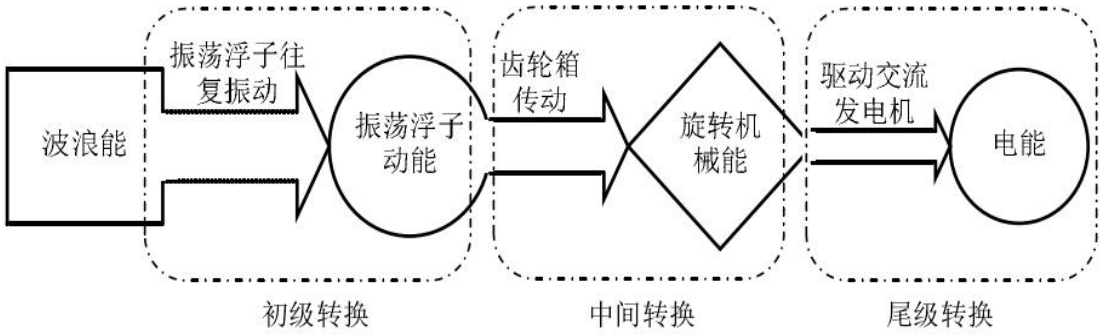


图 3.5 能源转换流程图

3.3 理论分析及计算

3.3.1 波浪能转换数学模型

单位宽度的一个波长内波浪的能量是由自由水面产生波形从而使位能变化。体积微元 dxdy 中流体的重力位能是ρgydxdy。故一个波长的重力位能，

$$E_g = \int_0^{\lambda}\int_3^{\zeta} \rho g y dx dy = \frac{1}{2}\rho g \int_0^{\lambda} \zeta^2 dx \tag{3.1}$$

式中$\zeta = \mathrm{A}e^{i(mx-wt)}$为波面位移。因积分号中出现的是非线性的平方运算，应先取实部然后运算。有，

$$E_g = \frac{1}{2}\rho g A^2 \int_0^{\lambda} cos^2(mx - wt)\, dx = \frac{1}{4}\rho g A^2 \lambda \tag{3.2}$$

在给定的不可压缩流体的无旋流场中，流体动能可表示为，

$$\mathrm{E} = \frac{\rho}{2}\iiint_{\tau} v^2\, d\tau \tag{3.3}$$

式中 v 为所讨论的流场体积，$v^2 = \nabla\varphi\nabla\varphi = \nabla(\varphi\nabla\varphi) - \varphi\nabla^2\varphi = \nabla(\varphi\nabla\varphi)$，于是动能公式可写成，

$$\mathrm{E} = \frac{\rho}{2}\iiint_{\tau} \nabla(\varphi\nabla\varphi)\, d\tau = \frac{\rho}{2}\oiint_{A} \varphi\nabla\varphi\vec{n} ds = \frac{\rho}{2}\oiint_{A} \varphi\frac{\partial\varphi}{\partial n} ds \tag{3.4}$$

另外，流畅中由于流体质点的运动具有动能，宽度的波浪动能为，

$$E_k = \frac{1}{2}\rho \iint \varphi\frac{\partial\varphi}{\partial n} ds \tag{3.5}$$

在线性化的前提下，再利用色散关系，所以，

$$E_k = \frac{1}{2}\rho \int_0^{\lambda} \left(\varphi\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_{y=0} dx = \frac{1}{4}\rho\left(g + \frac{m^2 T}{\rho}\right) A^2\lambda \tag{3.6}$$

如果不计表面张力，则波浪总能量即为重力位能与动能两者之和，总能量为，

$$\mathrm{E} = E_g + E_k = \frac{1}{2}\rho g A^2 \lambda \tag{3.7}$$

然而在有表面张力存在的情况下，自由面形状的变化不仅改变了质量的垂直分布，改变了重力位能，而且还抵抗表面张力做功。这部分能量也以位能的形式储存在流体中，称张力位能，记为E_t。

原来在水面上的 dx 微分段变形后为，

$$\mathrm{dx} \approx \mathrm{dx}\left[1+\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.8}$$

其实际伸长为，

$$\Delta \mathrm{x}=\mathrm{dx}\left[1+\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}-dx=\frac{1}{2} dx\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 \tag{3.9}$$

所以张力为 $\mathrm{T}\Delta \mathrm{x}=\frac{1}{2} T dx\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2$。

一个波长内的张力位能E_t为，

$$E_t=\frac{1}{2} T \int_0^{\lambda}\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 dx=\frac{1}{2} T m^2 A^2 \int_0^{\lambda} sin^2(mx-wt)\, dx=\frac{1}{4} T m^2 A^2 \lambda \tag{3.10}$$

总位能为，

$$\mathrm{E}=E_g+E_t=\frac{1}{4} \rho\left(g+\frac{m^2 T}{\rho}\right) A^2 \lambda \tag{3.11}$$

一个波长内的总能量就是，

$$\mathrm{E}=E_p+E_k=\frac{1}{2} \rho\left(g+\frac{m^2 T}{\rho}\right) A^2 \lambda \tag{3.12}$$

由此可见，无论计入或不计入表面张力，均有，

$$E_p=E_k=\frac{1}{2} E \tag{3.13}$$

在平面进行波中，一个波长内的动能和位能都不随时间而变。事实上，平面进行波的波形在传播过程中是不随时间变化的，所以位能不变，按总能量守恒，动能也就不变。

3.3.2 线性波理论

在小振幅波情况下，即自由表面振幅比波长远小于 1 的情况下，可以自由表面条件取首阶近似，得到线性化自由表面条件，

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}-\frac{\partial \varphi}{\partial z}=0，\ z=0 \tag{3.14}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}+g\zeta=0，\ z=0 \tag{3.15}$$

得，

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}+g\frac{\partial\varphi}{\partial z}=0，\ z=0 \tag{3.16}$$

假设流域在水平方向上无界，水深不变，并且把所讨论的问题的时间简谐的水波运动，所有变量都可以把时间因子按e^{-iwt}形式分离出来。

假定流场的速度势φ可以表示成，

$$\varphi(x，\ y，\ z，\ t)=Z(z)\emptyset(x,y)e^{-iwt} \tag{3.17}$$

Laplace 方程经变量分离后变为，

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+a\emptyset=0 \tag{3.18}$$

$$Z^n-aZ=0 \tag{3.19}$$

考虑到 a=k^2>0，那么∅所满足的方程变为，

$$\nabla^2\emptyset+k^2Z=0 \tag{3.20}$$

通常把此式称为 Helmholtz 波动方程，而 Z 所满足的方程，

$$Z^n-k^2Z=0 \tag{3.21}$$

得出解如下，

$$\mathrm{Z}=c_1e^{kz}+c_2e^{-kz} \tag{3.22}$$

根据底部条件，

$$\frac{\partial\varphi}{\partial z}=0，\ z=-h \tag{3.23}$$

可以得到，

$$\mathrm{Z}=c_1e^{-kh}\left[e^{k(z+h)}+e^{-k(z+h)}\right] \tag{3.24}$$

令 $2c_1e^{-kh}=A$，这样速度势就可以写成，

$$\varphi=\mathrm{A}\cos hk\,(z+h)\emptyset(x,y)e^{-iwt} \tag{3.25}$$

代人线性化自由表面条件式（3.16），得到如下关系式，

$$\mathrm{k}=\tan hkh=\frac{w^2}{g} \tag{3.26}$$

3.3.3 非线性波理论

我们在流体理想、无旋、不可压缩的假定下，利用小扰动方法，建立各个量阶波浪运动的边值问题。

速度势φ可展开为，

$$\varphi=\varphi^1+\varphi^2+\varphi^3 \tag{3.27}$$

自由表面高ζ可展开为，

$$\zeta=\zeta^1+\zeta^2+\zeta^3 \tag{3.28}$$

把式（3.27）和式（3.28）分别代人 Laplace 方程和自由表面条件，就可以得

到不同量阶问题必须满足的条件。

（1）Laplace 方程可以表述为，

$$\nabla^2\varphi^{(1)}=0 \quad \nabla^2\varphi^{(2)}=0 \quad \nabla^2\varphi^{(3)}=0 \tag{3.29}$$

（2）自由表面条件为，

$$\begin{cases}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}+2\nabla\varphi\nabla(\nabla\varphi\nabla\varphi)+g\frac{\partial\varphi}{\partial z}=0\\ \mathrm{z}=\zeta\end{cases} \tag{3.30}$$

一阶：

$$\zeta^{(1)}=\mathrm{a}\cos\theta \tag{3.31}$$

其中，a 为波幅，$\theta=\mathrm{kx}-\mathrm{wt}$ 为相位函数，

$$\zeta^{(1)}=\frac{ag}{w}X\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}\sin\theta=\frac{aw\cos hk(z+h)}{k\sin hkh}\sin\theta \tag{3.32}$$

二阶：

$$\varphi^{(2)}=\frac{3a^2w\cos 2\mathrm{h}(z+h)}{8\sin h^4kh}\sin 2\theta \tag{3.33}$$

$$\zeta^{(2)}=\frac{1}{2}a^2k\coth kh\left(1+\frac{3}{2\sin h^2kh}\right)\cos 2\theta \tag{3.34}$$

三阶：

$$\varphi^{(3)}=\frac{A_3}{3gk\tan h3kh-gw_0{}^2}\mathrm{X}\frac{\cosh 3k(z+h)}{\cosh 3kh}\sin\theta+O(a^3k^3) \tag{3.35}$$

$$\zeta^{(3)}=\frac{(ak)^3}{k}(B_3\cos 3\theta+B_1\cos\theta)+O\left(a^5k^5\right) \tag{3.36}$$

其中，

$$A_3=g(ak)^3c_1F_1(kh) \tag{3.37}$$

$$F_1(kh)=1+\frac{1}{\sin h^2kh}+\frac{9}{8\sin h^4kh}+O(a^2k^2) \tag{3.38}$$

$$w_0{}^2=gk\tanh kh$$

$$B_3=\frac{3}{8}-\frac{3}{16\sinh^2 kh}-\frac{3}{8\cosh^2 kh}+\frac{33}{64\sinh^4 kh}+\frac{15}{64\sinh^6 kh} \tag{3.39}$$

$$B_1=\frac{3}{8}-\frac{3}{2\sinh^2 kh}-\frac{3}{8\cosh^2 kh}-\frac{3}{8\sinh^4 kh} \tag{3.40}$$

当水无限深时，$\mathrm{kh}\to\infty$，波面表达式可以写成，

$$\zeta=\mathrm{a}\left(1-\frac{3}{8}k^2a^2\right)\cos\theta+\frac{a^2k}{2}\cos 2\theta+\frac{3}{8}a^3k^2\cos 3\theta \tag{3.41}$$

3.4 试验测试

在造波试验水池中进行试验测试，试验的环境参数为波高为 30-50mm，波周

期为 5-20Hz，此设计的振荡浮子发电装置尺寸为 60cm×30cm×50cm，为保证装置吸收的能量最大，将其设置为波高 50mm，波周期为 20Hz，水深 0.3m，利用电流表和电压表进行测量得到其电流和电压数据的变化曲线如图 3.6 和 3.7 所示

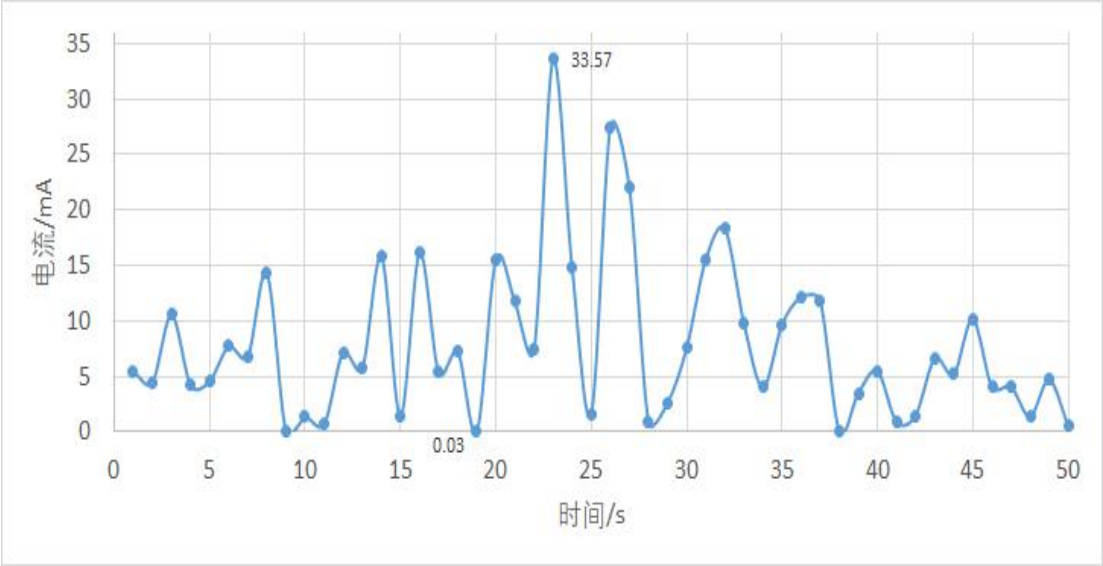


图 3.6 电流变化曲线图

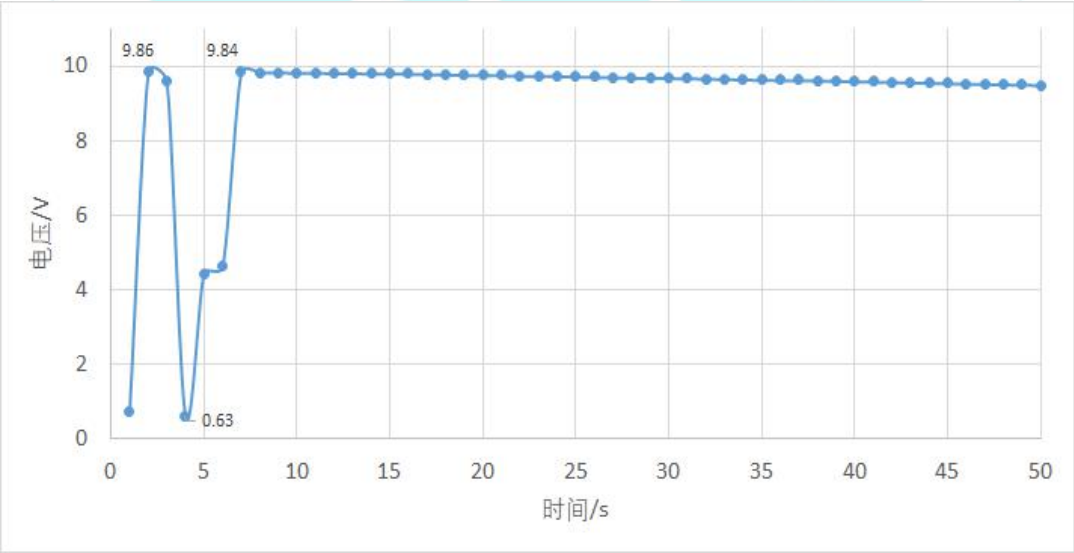


图 3.7 电压变化曲线图

由图 3.6 和 3.7 可知，电流可达到峰值 33.57mA，电压可达到 9.86V。

图 3.8 电压电流表峰值

$$发电功率 = 最大电压值 \times 最大电流值$$

$$P = UI = 9.86 \times 0.03357 = 0.3310002W$$

本设备装机功率为 2W，由比赛规则中提到发电效率计算公式为：

$$发电效率 = \frac{发电功率}{装机功率}$$

则，

$$发电效率 = \frac{0.3310002\mathrm{W}}{2\mathrm{W}} \times 100\% = 16.55\%$$

第四章 结 论

本文首先对波浪能以及对波浪能的开发现状进行了简要介绍，通过对国内外海域的波能密度比较，以及国内各大海域的比较，明确了我国各大海域对于电力的需要以及波浪发电的重要性。

基于我国海域年均波况较小，平均波能较低，适合高效率的中小型波浪能装置，适用于渤海湾地区的浪流发电。振荡浮体式装置具有“越小越好”的特点可在国内发展迅速，开发出多浮子装置等多种形式。我国海域的波况具有季节性变化特点，浮子振动装置在一定波况内效率较高。

本文基于我国的海洋波浪情况以及本设计所需的实验环境问题，最终本文提出了一种新型的浮子式波浪发电装置，并且对该发电装置的工作原理进行了分析和讨论，确定了该装置的发电方式以及结构形式。并通过本设计中的各部件尺寸、发电功率、发电原理以及实验环境等数据进行了发电量计算及结构的校核。并对浪流发电效率进行研究，使得装置效率达到最大。

附　录

1、载荷分析

为了保障发电装置的水中工作的稳定性，需计算其水平载荷，避免发电装置因波浪载荷倾倒。作用在平台上波浪诱导的载荷是由于波浪产生的压力场所致，一般波浪诱导载荷可以分为三种：拖曳力、惯性力和绕射力。在海洋工程结构中，通常是根据大尺度结构还是小尺度结构来决定选用哪种计算波浪载荷的方法。对于小尺度构件，波浪的拖曳力和惯性力是主要的；而对于大尺度机构，波浪的惯性力和绕射力是最主要的。考虑到所设计的发电装置的尺寸，只考虑拖曳力和惯性力的影响，并可以用莫里森(Morison)方程计算。

Morison 方程可表示为，

$$\mathrm{F} = F_D + F_M = \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2}\rho C_D A|u|u$$

式中：F—水平载荷力，N；

ρ—流体密度，kg/m^3；

V—物体体积，m^3；

A—物体的投影面积，m^2；

C_M—惯性系数；

C_D −阻力系数；

u −流体速度，m/s。

根据浮体和主浮筒的结构形式，取$C_M = 2.0$，$C_D = 0.5$。由线性微幅波理论，水质点的水平运动速度和加速度分别为，

$$\mathrm{u} = \frac{Hw}{2}\mathrm{x}\frac{\cosh ks}{\sinh kh}\cos\vartheta$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2}\mathrm{x}\frac{\cosh ks}{\sinh kh}\sin\vartheta$$

$$\vartheta = kx - wt$$

由上式得：

$$\mathrm{F} = C_M\rho A\left(\frac{2\pi^2 H}{T^2\sin hkh}\right)\int_{s_1}^{s_2} coshksds\sin\vartheta$$

$$+\frac{1}{2}C_D\rho D\left(\frac{\pi H}{T\sin hkD}\right)^2\int_{s_1}^{s_2} cosh^2 ksds\cos\vartheta\,|\cos\vartheta|$$

$$= F_M\sin\vartheta + F_D\cos\vartheta\,|\cos\vartheta|$$

由基本数学公式，

$$\cosh^2 ks = \frac{1}{2}(1+\cosh 2ks)$$

$$\int_{s_1}^{s_2} cosh^2 ksds = \frac{1}{2}(1+\cosh 2ks)ds = \frac{1}{4k}[2k(S_2-S_1)+\sin 2kS_2-\sinh 2kS_1]$$

则，

$$F_D = \frac{1}{2}C_D\rho D\left(\frac{\pi H}{T\sinh kh}\right)^2 \frac{2k(S_2-S_1)+\sinh 2kS_2-\sinh 2kS_1}{4k}$$

$$= \frac{1}{2}C_D\rho D\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{H^2}{4}\frac{2k(S_2-S_1)+\sinh 2kS_2-\sinh 2kS_1}{4ksinh^2 kh}$$

$$F_M = C_M A_I \frac{2\pi^2 H}{T^2\sinh kh}\int_{s_1}^{s_2} coshksds = C_M\rho A\frac{gH}{2}\frac{\sinh ks_2-\sinh ks_1}{coshkh}$$

式中定义了$\vartheta = kx - wt$，式中 x 的值与坐标的选取有关，为了方便起见，取 $x=0$，所以$\vartheta = -wt$，F 的表达式可改写为如下形式，

$$\mathrm{F} = F_D\cos wt|\cos wt| - F_M\sin wt$$

取极限情况为波高 50mm，频率为 20Hz，则周期为 0.05s。波长 L 为，

$$\mathrm{L} = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{L}$$

取水深 h 为 0.3m，代人数据迭代得波长 L 为 0.39m。则波速 $C = L/T = 0.39/0.05 = 7.8m/s$，波数 $k = 2\pi/L = 2X3.14/0.39 = 16.1$。

速度势为，

$$\varphi = \frac{ag}{wcoshkh}coshk(z+h)\sin kx - wt$$

代人数据得$\varphi = 0.014\cosh 16.1(z+0.3)\sin(16.1x-125.6t)$自由面形状(波面方程)为，

$$\eta = \mathrm{acos(kx\ 一\ wt)}$$

代人数据得η= 4cos(16.1x -125.6)。

对于浮体，平均截面积 A 由软件算得为 30.73m^2，S_1=-0.15，S_2=0 则可得，

$$F_D = \frac{1}{2}C_D\rho D\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2\frac{H^2}{4}\frac{2k(S_2-S_1)+\sinh 2kS_2-\sinh 2kS_1}{4ksinh^2 kh}$$

$$= 0.5\times 0.5\times 1000\times 0.2\times 15775.36\times 0.0065\times(4.83+40)$$

$$\div 252380.134 = 9.1\mathrm{N}$$

$$F_M = C_M A_I\frac{2\pi^2 H}{T^2\sin hkh}\int_{s_1}^{s_2} coshksds = C_M\rho A\frac{gH}{2}\frac{\sin hks_2-\sin hks_1}{coshkh}$$

$$= 2\times 0.5\times 1000\times 2.5\times 5.55\div 626 = 22.2N$$

2、振荡浮子能量吸收率

振荡浮子的能量吸收率是浮子吸收的总能量与波浪总能量之比，即，

$$\eta = \frac{E_1}{E_2}$$

能量吸收率的数学模型为：

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{1}{2}[(m + m_\omega)\omega^2 + \rho g A_{\omega p}]Z_0}{\frac{1}{8}\rho g H^2 \lambda B}$$

式中$A_{\omega p}$为振荡浮子的水截面积，m_ω为振荡浮子的附加质量，Z_0为起伏位移的振幅。振荡浮子对应的附加质量为：

$$m_\omega = \rho\frac{D^3}{6} = 0.1666kg$$

振荡浮子水横截面积为：

$$A_{\omega P} = \frac{\pi D^2}{4} = 0.00785m^2$$

振荡浮子的质量为 $m = 0.008kg$。

本装置的振荡浮子的起伏率套用麦考密克和布塔赫利耶推导出的浮体的起伏自然频率公式，则有：

$$f = \frac{\omega}{t} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho g A_{mP}}{m + m_\omega}}$$

则可知振荡浮子的起伏自然圆频率为：

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho g A_{\omega p}}{m + m_\omega}} = \sqrt{\frac{1000 \times 9.8 \times 0.00785}{0.008 + 0.1666}} = 20.99Hz$$

波浪圆频率ω_1为，

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 10$$

频率比，

$$\frac{\omega_1}{\omega} = \frac{10}{20.99} = 0.4764$$

取Δz=0.1，可得，

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right) + \left(2\Delta_\varepsilon\frac{\omega_1}{\omega}\right)}} = \frac{Z_0}{\left(\frac{F_0}{\rho g A_{\omega P}}\right)} = 1.131$$

因此，可求出起伏体的运动振幅为：

$$Z_0 = \frac{1.048 \times F_0}{\rho g A_{\omega p}} = 0.045m$$

式中，$F_0 = 3.3N$。

把求得的数值代入，可得振荡浮子吸收的总能量为：

$$E_1 = \frac{1}{2}\left[(m + m_\omega)\omega^2 + \rho g A_{\omega p}\right] Z_0 = 3.4617N \cdot m$$

波峰长度 $B = 0.1m$（等于浮体的有效直径），则波的总能量：

$$E_2 = \frac{1}{8}\rho g H^2 \lambda B = 6.8963N \cdot m$$

综合上述可得：

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} = \frac{3.4617}{6.8963} = 50.2\%$$

参考文献

[1]赵伟国，刘玉田，王伟胜．海洋可再生能源发电现状与发展趋势[J]．智能电网, 2015, 000(006):493-499.

[2]陈凯，何依然，郑聪聪．一种基于压电材料的波浪能发电装置[J]．科技与创新, 2020(5).

[3]冯宁. Semisubmersible double-pressure wave-power generating device: CN 2013.

[4]王燕，农云霞，刘邦凡． 发达国家海洋波浪能发展政策及其对我国的启示[J].科技管理研究. 2017, (10):48-53.

[5] 游亚戈，李伟，刘伟民，等.海洋能发电技术的现状与前景[J].电力系统自动化，2010，34（14）:1-12.

[6]戴佑明．一种漂浮式双浮体波浪能发电装置的研究[D]. 2015.

[7]李松剑，潘卫明，刘靖飙,等．摆式波浪能发电装置水动力学研究[J]．海洋技术, 2014.

[8] Zhang Dahai, Li Wei, Lin Yonggang. Wave Energy in China: Current Status and Perspectives [J]. Renewable Energy，2009, 28(3): 126-132.

[9] A S Zurkinden, F Ferri,S Beatty, etal. Non Linear Numerical Modeling and Experimental Testing of a Point Absorber Wave Energy Converter[J]. Ocean Engineering, 2014, 78, 11-21.

[10] Kramer M,Brorsen M,Frigaard P. WaveStar Hydrodynamisk Interaktion Mellem 5Flydere[J]. Hydraulicsand Coastal Engineering, 2004, 7:1603-9874

[11]王淑婧.振荡浮子式波浪能发电装置的设计及功率计算分析[D].中国海洋大学，2013.

团队编号：A20200417

第二届中国海洋工程设计大赛

设计说明书

设计制作组 A 类

完成日期　2020 年 11 月 15 日

中国海洋工程设计大赛组织委员会

作品简介

本设计是针对海洋潮流能运动规律性强，流速较低，动力较大，易于并网发电等特点进行分析，结合目前已有的一些专利成果所设计的一种新型悬浮式潮流能发电装置。初代作品以简易平台为基础，上部由叶轮、发电机和小灯泡组成，其中发电机和小灯泡固定到平台上，叶轮则通过轴承架在平台中部镂空部分，平台四角有四个半球体浮体提供浮力，装置采用锚泊定位。通过将装置置于一定流速的水槽内，装置将稳定漂浮，水流冲击叶轮带动发电机发电，从而实现小灯泡稳定发光。

在经过实际测试发现初代作品的不足之后，对初代作品进行了改进。二代作品的总体外型设计借鉴了无人机的四角对称结构，浮力装置由四个椭圆球组成，通过连接杆与主体部分连接成为一体式悬浮式潮流能发电装置。主体部分由一个扁球体组成，具有较小的风阻、浪阻，其中部的方形贯穿孔用于放置叶轮，内部为空腔结构，发电机、电路板以及储电装置固定于空腔内部。发电机采用了垂直轴发电系统，叶轮叶片比较平缓，有利于适应潮流环境中的大推力情景。发电机未直接与叶轮相连，叶轮转轴与电机转轴通过齿轮变速箱链接，叶轮轴的上的较大扭矩力通过齿轮变速箱之后使发电机高速旋转，以此来适应潮流环境中流速较低的特点。同时装置搭载含电容电路板，通过电路板的作用减小由于流速改变而引起的发电波动，装置发电能更加稳定。

通过一体式对称结构设计、平缓大叶轮、齿轮变速箱、电容电路板等细节设计，使本悬浮式潮流能发电装置能在复杂多变的海洋工况环境下具有稳定的发电表现。同时本悬浮式潮流能发电机不仅可以并

网发电还能适应多种发电场景，如网箱养鱼、船舶供电、海洋钻井平台供电，以及作为海上应急供电装置等。在成本造价方面，由于一体化设计及简洁的内部构造使得本发电装置的耐用性强、造价较低且安装维护成本低，具有较好的经济效益，能广泛地推广运用于我国潮汐能丰富的沿海地区。

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

目录

第 1 章 总论.....4
1.1 技术研究的背景.....4
1.2 技术研究的现状.....5
第 2 章 新型浮式潮流能发电装置设计机理.....7
2.1 外形设计原理.....7
2.2 平台受力原理.....8
2.3 装置电路分析.....9
第 3 章 新型浮式潮流能发电装置的创新点介绍.....10
3.1 功能原理创新.....10
3.2 总体布局创新.....11
第 4 章 作品升级与改进.....12
4.1 初代作品分析与改进.....12
4.2 二代作品创新点分析.....13
第 5 章 新型浮式潮流能发电装置的应用可行性分析.....15
5.1 现实可行性分析.....15
5.2 潜在应用可行性分析.....16
附录.....17
参考文献.....20

第 1 章 总论

1.1 技术研究的背景

海洋可再生能源利用是发展清洁能源的重要领城，开发利用可再生能源已成为人类文明得以持续发展的重要保障。我国海洋能资源丰富、海域广、岛屿众多，具备规模化开发利用海洋可再生能源的条件。在一系列重大战略规划的指导下，海洋可再生能源开发已经成为确保国家能源安全，实施节能减排和提升国际竞争力的重要举措，发展海洋可再生能源产业也是解决我国能源短缺的重要途径。海洋可再生能源技术创新将成为解决我国能源短缺和培育我国战略性新兴产业的着力点。海洋可再生能源包括潮汐能、波浪能、海流能、海洋温差能、盐差能等。海洋能有如下特点：(1) 可再生性，由于海水潮汐、海流和波浪等运动周而复始，永不休止，所以，海洋能是可再生能源；(2) 属于一种洁净能源；(3) 能量多变，具有不稳定性，运用起来比较困难；(4) 总量巨大，但分布分散、不均，能流密度低，利用效率不高，经济性差。目前，只有潮汐能发电技术比较成熟，其他形式海洋能的应用大都还停留在探索阶段。

中国拥有广阔的海岸线，资源丰富，其中浙江省沿海地区的潮流能占全国总量的 50%以上。潮流能水轮机发电装置的叶轮在潮流的冲击下，将潮流能转换成转子的机械能，从而带动发电机发电。潮流能水轮机发电装置形式多样化，从结构方面上看，主要分为水平轴潮流能水轮机和竖直轴潮流能水轮机，技术方面相对比较成熟，分别约占潮流能水轮机项目的 43%和 33%。水平轴潮流能水轮机设计简单，能量利用率高，稳定性好。垂直轴潮流能水轮机能量捕获效率高，结构方面易于调试和维修，可适应流量改变等优点，但其低速下启动较困难，流速大的水域也不太适用。合理开发利用潮流能有利于解决环境污染和现存能源不足的问题，特别对解决潮流能资源丰富的近海居民生活用电问题具有深远意义。目前，国际上高度重视潮流能的开发利用，积极推动海洋经济的发展和可再生能源结构的改善。

潮流能能量密度大且相对比较稳定，发电机组能够较好的实现能量转化，因此越来越多的国家将海洋能的开发焦点主要集中于潮流能开发。根据目前全球能源系统现状，顺应可再生清洁能源研究发展主流，同时潮流能研发是“十三五”

海洋能技术发展重点，因此潮流能成为未来海洋能装置产业中的发展重点。清洁、丰富、零碳排放的海洋能资源将能显著改变当前严峻的能源和环境危机。

1.2 技术研究的现状

我国对潮流能的开发利用相对较早，20 世纪 80 年代哈尔滨工程大学对垂直轴潮流能水轮机率先进行了理论和试验研究。1996 年—2005 年期间，哈尔滨工程大学先后自主研发了国内第一座漂浮式潮流能发电装置“万向 I”号、“万向 II”号 40kW 的潮流能发电站。自 2000 年起参与潮流能发电的单位逐渐增多，2010 年后，开始迅速发展。2006 年—2009 年，浙江大学在舟山先后完成了 5kW、25 kW 漂浮式潮流能装置；2012 年 8 月—2013 年 8 月一年内，哈尔滨工程大学先后又研发了“海能 I”号 2 座 150kW 漂浮式垂直轴潮流能发电装置、“海能 II”号 2 座 100 kw 和“海能 III”号 2 座 300 kW 潮流能发电装置；2013 年，中国海洋大学在青岛斋堂海域投放了装机容量为 50kW 的座底式潮流能发电装置；2014 年—2015 年，浙江大学在舟山摘箬山岛先后测试了 60 kW、120 kW 漂浮式潮流能发电装置。

国外潮流能的开发利用自上世纪 70 年代开始，与其他海洋能相比，起步较晚。1973 年，美国首先对潮流能和海流进行研究。1976 年，美国利用伞式巨型水轮机组的原理设计了“低速海流能转换器”；2003 年，英国 MCT(Marine Curet Turbine）公司研发的 Seaflow(300 kw）潮流能发电装置在英国 Bristol 海峡进行了海试，顺利发电。该公司 MeyGen 潮流能发电装置完成了 6MW 兆瓦潮流能发电陈列及并网发电的一期任务；2005 年，意大利 PDA(Ponte di Archimede SPA）公司设计了一款装机容量 120kW、叶片展长 5m、叶轮直径 6m 的 Kobold 型的漂浮式潮流水轮机发电装置。2011 年挪威 Hammerfest 公司研发了 1MW 的 HS100 在 EMEC 海试运行。目前，开发和研究潮流能发电的国家主要有英国、法国、加拿大、中国和俄罗斯等。

浮式潮流能发电装置作为常见的潮流能发电装置的一种，其主要由浮体结构、水轮机结构和发电机组构成，浮体结构用于支撑发电装置，水轮机结构用于采集潮流能，发电机组用于潮流能的转化，一般情况下，其装机功率可达数百千瓦。对比分析近年来国内外潮流能发电装置的进展，为促进海洋能的进一步发展，明确现有技术的先进性和不足之处的基础上，要最大限度地降低系统的制造、运营

和维护成本，提高潮流能发电装置的使用性能和可靠性，保证电力平稳输出和顺利并网使用。在海洋可再生能源领域中，潮流能和波浪能虽然占据我国海洋能开发利用的主流部分，就目前的发展状况来看，潮流能发电装置能量提取效率低、间歇供电不稳定、海洋服役环境可靠性等问题依然严峻，开发可持续发展的清洁新能源已经成为各国重点研究的领域，可开发的海洋能源中有潮流能、波浪能、盐差能等。波浪能不稳定并且研究技术还不够成熟，装置的能量转换效率较低。现在越来越多的国家也开始关注潮汐能发电，但在现实环境中机组装置容易出现腐蚀现象。与一般潮流能发电机相比，悬浮式潮流能发电装置具有安装方便、环境友好、抗逆性强等优点。在对浮式潮流能发电机的设计中，我们利用框架结构式浮体设计，使水轮机能够在浮体框架内收集潮流能，正是由于浮体框架的设计，使得水轮机吃水深度可调，尽可能地远离水底环境，达到环境友好的效果。同时，我们采用平缓的叶轮，利用其收集动力大转速低的特点配合齿轮变速箱结构实现低流速发电，从而实现一种能适应低流速环境的生态友好型新型浮式潮流能发电装置。

第 2 章 新型浮式潮流能发电装置设计机理

2.1 外形设计原理

1. 总体结构介绍

基于浮体平台和发电装置结合，我们设计出了一种新型浮试潮流发电装置。其下层结构由四个梨形浮球（3），通过四个铆钉与主板（2）固定连接，发电机（1）通过螺钉与主板（2）连接，叶轮（4）与发电机（1）连接。装个置整程一体化结构设计且采用了对称浮体设计，使主板（2）可以漂浮在水面上，并且保持主板（2）平稳。与传统的潮流能发电装置不同，本装置的悬浮式设计，使得装置在海洋中具有阻力小，适应性强，环境友好等特点。较为宽大的叶轮（4）与垂直轴发电机（1）的配合使用使本装置能在较低流速的海洋潮流环境中有出色的发电表现，从而提高了发电效率。

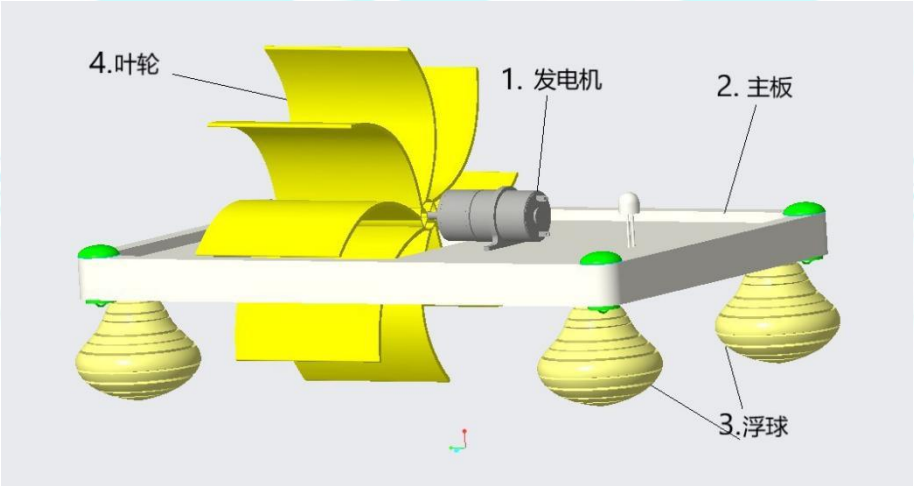


图 2.1 整体结构图

2. 具体零件介绍

浮体结构：有螺旋状凹槽的梨形浮球（3）位于主板的四个角，并且连接有四根锚。其作用是使框架稳定漂浮于水面上，通过与锚或固定装置连接，不会使得整个装置随海水的波动而四处飘动。

主体结构：位于浮求（3）之间，支撑着整个装置，为发电机（1）和叶片（4）提供固定点，使其能在海洋环境中能保持其结构整体性。

发电结构：位于整个装置的中部空腔，是整个装置的核心，由一个带叶轮的发电机和齿轮变速箱组成。能通过改变叶片吃水深度，适应不同流速的潮流，并

且能在低流速的潮流中稳定发电。

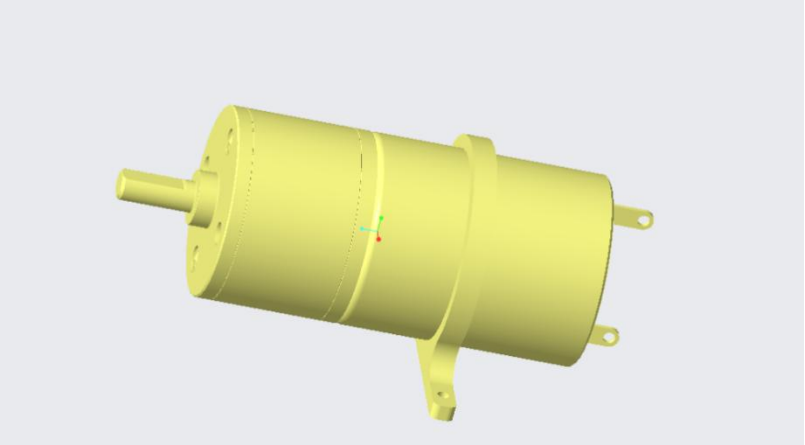


图 1.2 发电机图

叶轮叶片结构：水轮的叶片弧度为经典 15 弧度的八叶式水轮。

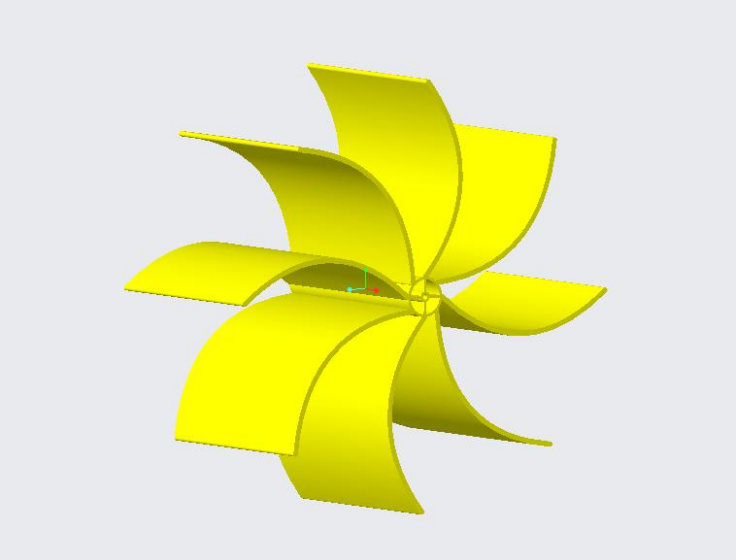


图 2.3 叶轮图

2.2 平台受力原理

此新型浮式潮流发电机，主要受自身重力，浮力以及潮流的推力。新型浮式潮流能发电装置自身重力约为 4.00N，四个椭球形浮球的浮力约 10.50N，因此该发电装置平台能位于水面之上。因浮力远超装置自身重力，所以采取锚链连接给与一定的预张力平衡过多的浮力。四点式半球形浮体支撑结构，与水面接触较小，且装置中心低，贴近于水面，因此在减小了水流作用效应的同时具有极佳的稳定性，受风浪影响较小。装置由新型高分子材料制作而成，强度足以抵抗风浪的冲击，进一步提升了装置的抗逆性。经计算可得，椭球形浮体的吃水深度为 3.52cm，

水轮机能贴近水面运行，以保证水轮机吃水深度。

除此之外，从流体的角度来分析，任何非流线型物体，在一定的恒定流速下，都会在物体两侧交替地产生脱离结构物表面的旋涡。这种交替发放的旋涡又会在柱体上生成顺流向及横流向周期性变化的脉动压力。如果此时是弹性支撑或是柔性管体，将会引发涡激振动。考虑到这点，我们在浮体上加了螺旋状结构，其原理是打乱旋涡脱落的周期规律。只要没有涡激振动产生的特定振动频率形成共振，根据 analysis 分析可得常态下倾向力是完全可以承受的。

2.3 装置电路分析

此装置采用了装机功率为 0.15W 减速发电机，搭载含电容储电的电路板系统。整个电路的发电原理为，水流推动水轮机旋转，水轮机转动轴经差速器带动发电机转子，从而使发电机发电。发电机发出的电流再经过电容储电电路板系统，可实现对外的平稳输出。当水流较小时，齿轮变速箱将起到关键作用，经过齿轮变速箱的作用，发电机转子转速可达水轮机转速的数倍，以此来达到低流速发电的效果。此外，含电容储电的电路板系统在应对不同流速的发电情景时，能够通过电容的充放电来减小发电机组因流速不稳而导致发电不稳的影响。最终实现在水流速度为 0.5m/s-5m/s 的条件下该装置能够有稳定的输出功率。

第 3 章 新型浮式潮流能发电装置的创新点介绍

3.1 功能原理创新

1. 框架式浮体支撑结构的创新

在该浮式潮流能发电装置的浮体设计中，我们采用了框架式的浮体构造特征。矩形的框型结构能最大程度上保持整个装置的稳定性，同时支撑模块采用了四点式椭球形浮体支撑，在确保整体装置稳定性的前提下尽可能减小水流的阻力。框架式主体设计还具有制造安装简便，成本价格低，有利于商业化推广。

2. 创新浮球抑涡激振动纹路设计

在对四点式椭球形浮体的浮体部进行流体力学分析后，我们通过激光雕刻技术在椭球形浮体上雕刻出纹路凹槽来抑制涡激振动。在实际的海洋环境中，这种抑涡激振动的设计能够大幅度地减小装置的涡激振动效应，从而提高装置稳定性与发电效率。

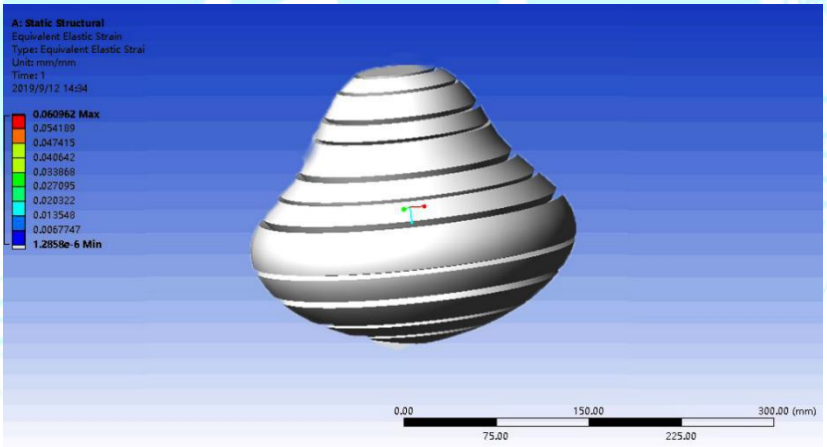


图 2.1 梨形浮体模拟分析

3. 减速发电机的创新设计

在该浮式潮流能发电装置的发电机板块，我们进行了三级减速设计，充分利用了齿轮变速箱的原理特点，使得该发电机组在低流速的潮流能环境也能正常进行发电工作，从而进一步提高了发电效率。

图 3.2 齿轮变速器

4. 创新储电单元电路设计

在发电模块的设计中，我们采用了创新性电容储电模块设计。在实际的海洋环境中，潮流能流速往往是多变的，因此在适应潮流流速多变的情境中，储电模块能在很大程度上保持装置发电的稳定性，进而提高发电装置的实际效用性。

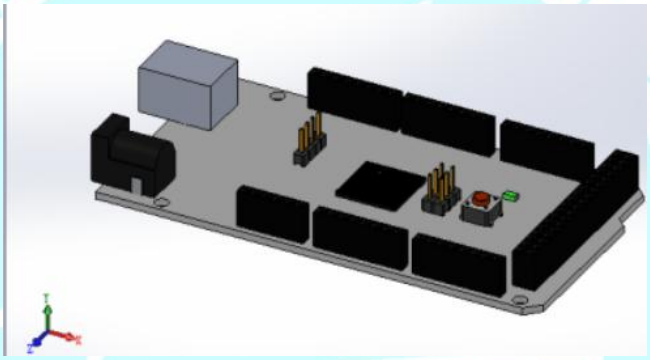


图 3.3 含电容器的稳流电路板

5. 装置材料选用的创新

该浮式潮流能发电装置的材料选择为环保型高分子有机材料，在腐蚀风化严重的海洋环境中，有机高分子材料所表现出的优越的抗腐蚀性与稳定性，能延长该装置的使用寿命，从而扩大该发电装置所带来的经济效益。同时，环保型有机高分子材料符合海洋生态保护的价值理念，有助于实现真正意义上的环保发电。

3.2 总体布局创新

该浮式潮流能发电装置结构简洁，由主体结构和发电模块两大部分组成。主体结构采用一体式浮体框架结构设计，没有许多结构零件的束缚，在恶劣的海洋环境中能具有较强稳定性和抗逆性。发电机组与主体结构通过嵌套式组合，使得发电机组能与主体结构紧密相连，进一步提升了装置的可靠性。同时该浮式发电装置除了定点抛锚还可与船舶、浮箱养鱼以及海洋钻井平台相结合，实现多场景的潮流能发电作用。

第 4 章 作品升级与改进

4.1 初代作品分析与改进

在对初代作品进行实验时，发现初代装置整体平衡性存在有一定重心偏移的现象、装置的防水性较差，且一体式直板结构在面对波长较长的波浪时倾斜度较大。所以针对初代作品的缺陷我们进行了改进设计。浮体装置由四个对称形椭球浮体（2）通过浮动连接杆（5）与扁球形主体外圈（1）连接，扁球形主体内圈（8）通过轴承与扁球形主体外圈（1）连接，发电机（6）与电池（7）固定于扁球形主体内圈（8）空腔内部。扁球形主体内圈（8）的中心呈长方形贯穿状，叶轮（3）通过转轴（4）与电机（6）和扁球形主体内圈（8）连接。

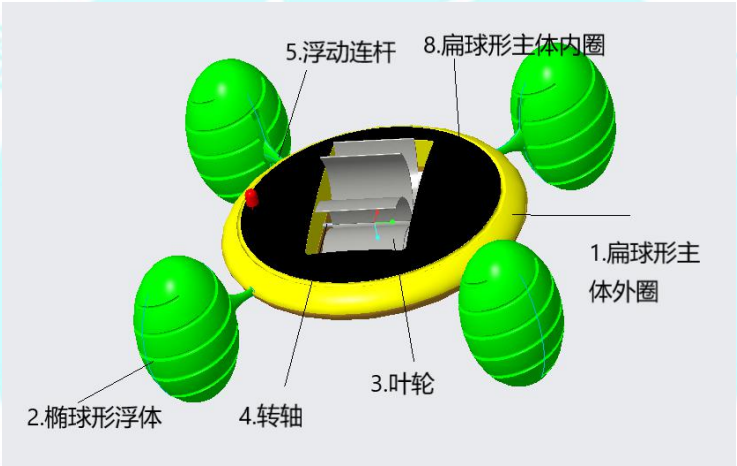


图 4.1 二代作品三维模型图

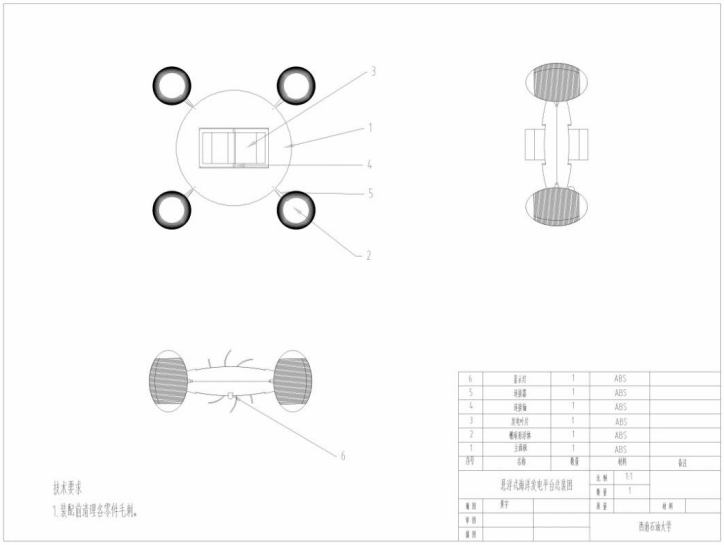


图 4.2 二代作品总体布局图

4.2 二代作品创新点分析

在保持原有一代作品创新点的前提下，二代作品具有以下创新点：

1. 仿无人机密闭空腔式悬浮结构：在原有的一体式结构基础上，借鉴了无人机与潜艇的设计思路，将装置主体外形改进为仿无人机密闭舱式悬浮结构，以增加其防水性能和稳定性能，即使在极端环境条件下被海浪卷入水下也能保持其内部结构的稳定性，并在环境条件好转时及时浮上水面。

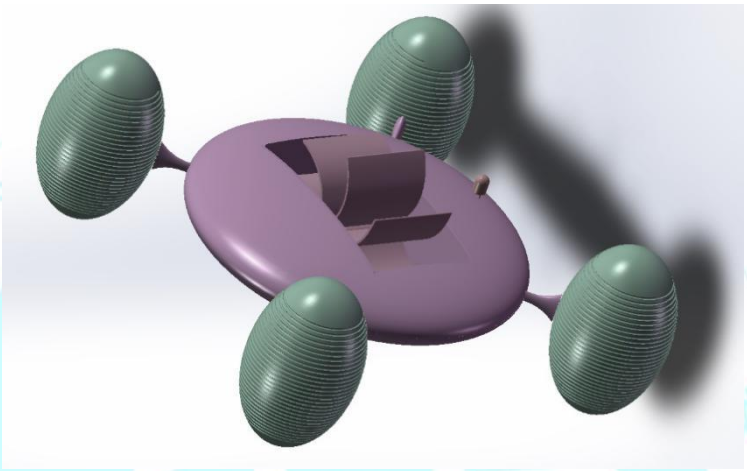


图 4.3 仿无人机密闭舱外形图

2. 水流方向自适应结构：通过水流方向感应器与轴承结构实现扁球形主体内圈能对水流方向进行自适应，当水流方向与叶轮受力面有夹角时，通过水流方向感应器与轴承配合作用使叶轮受力面一直保持垂直于水流方向的状态。

3. 对称无倾覆状态设计：整体结构在采用一体式的同时具有很强的对称性以及密闭性，同时结合水流方向自适应结构，能够使装置在水中不论是哪一面朝上都能进行发电作业，这种无倾覆式结构设计进一步提升了装置在恶劣海洋环境中的稳定性与抗逆性。

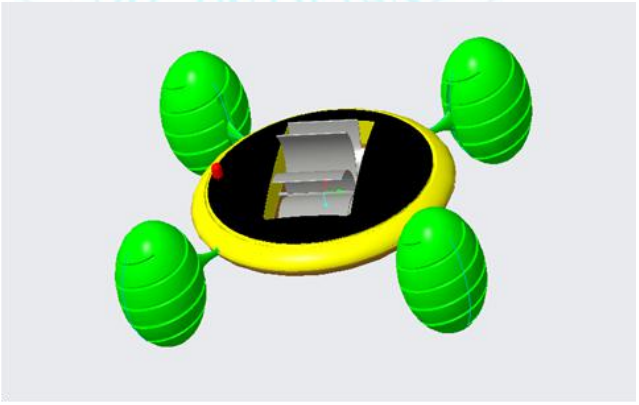


图 4.4 内圈可旋转设计与对无倾覆状态设计

4. 双重减震系统：浮体改进为仿鸡蛋式对称椭球结构，在采用抑制涡激振动纹路凹槽的同时，我们加入了浮动连杆结构，形成双重减震系统，当面对波长较长的海浪冲击时，通过浮动连杆的自适应调节，减小波浪带来的发点阻碍程度，在很大程度上减小了长波对于装置稳定性的影响。

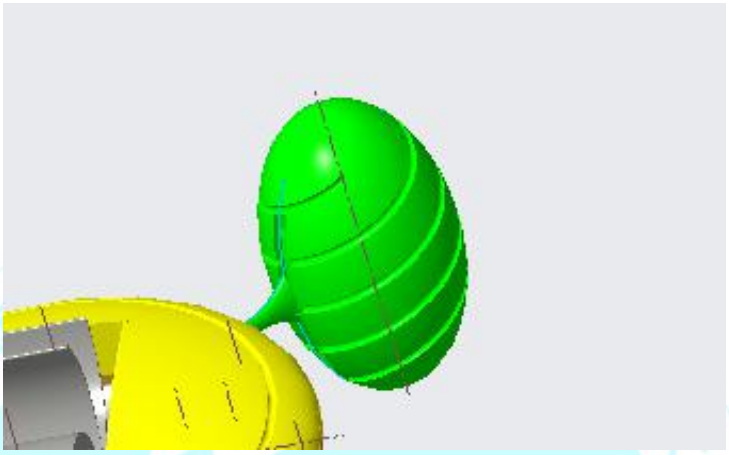


图 4.5 浮动连杆与椭球浮体

第 5 章 新型浮式潮流能发电装置的应用可行性分析

5.1 现实可行性分析

潮流能属于海洋可再生能源，清洁无污染且资源丰富，具有良好的开发前景。21 世纪以来，潮流能开发在世界范围内取得较大进步，装机规模呈上升趋势，多种潮流能转换装置进入示范研究或准商业化阶段。在此方面，人们将面临如何利用研制生产的各类转换装置提高对潮流能的利用效率这一关键力学问题。并且潮汐能有着如下特点。

（1）有较强的规律性和可预测性。由于潮汐的周期性，潮流能的变化具有较强的规律性，可进行预测性。

（2）潮流能的开发不排放任何污染物，是环境友好型绿色能源。

（3）潮流能开发装置一般安装在海底或漂浮在海面，无需建造大型水坝，对海洋境影响小，也不占用宝贵的土地资源。

（4）与风能和太阳能相比，潮流能的能量密度较高，约为风能的 4 倍，太阳能的 30 倍。

但潮流能开发同样也面临一些不利因素。例如，潮流能的能流密度随涨落潮的流速发生周期性变化，因而潮流能发电机输出的电能不稳定，需要经过后续处理后方能供给用户使用;潮流能开发装置工作在海水中，环境较为严酷，对装置的耐腐蚀、抗风浪、防渗漏等有严格要求，海上安装需要较高的施工技术和装备，以及高成本。我们设计新型潮流发电机完美的解决了以上困难。

本装置可以通过调节浮球的吃水深度改变叶轮的吃水深度，从而适应潮流能流速变化和潮起潮落，达到高效发电的效果。并且在该装置上安装有含电容稳压电路板，能够使得其发电电流保持稳定，可以直接提供给用户使用。同时抑制涡激振动浮球设计与浮动连接杆的设计，使得装置能适应不同波高与波长的波浪环境，增强其发电稳定性。此装置的材料全部采用新型高分子材料制作，具有质量轻，抗腐蚀性强，刚性强的特点，在恶劣的海洋环境能表现出很好的耐用性，其无倾覆式设计与水流方向自适应设计进一步加强了其在海洋环境中的抗逆性。同时，此装置漂浮在海洋上，对水下海洋生物的影响小，属于环境友好型发电装置。

5.2 潜在应用可行性分析

此装置不仅仅局限于发电给居民使用，可以与不同平台结合，更好的发挥其作用。例如:

（1）此装置与海洋钻井平台联合使用，可以稳定高效的为平台提供充足的电能，从而降低了海上平台的用电成本，提高经济效益。

（2）海洋中能源多种多样，因此该装置还可以加装其它设备，比如在装置下方加装振荡浮子，搜集波浪能，进行波浪发电；在装置表面上安装太阳能发电板，搜集太阳能；在整个装置侧面安装风力叶片，搜集风能等等。不同发电设备与装置的结合，更高效的利用了各种海洋能源，提高了发电效率。

（3）为了带来更高的价值，我们可以进一步扩大此装置，把其设计成一个海上漂浮舱，为海上行驶的船舶提供休息停靠补充电能的地点；同时可在装置空腔内存放一些应急物资，作为一个临时海上避难所，以及可以更快的处理海上突发事故。

（4）把此装置设计成可折叠化，方便携带式，放在出海船舶上，当遇到突发事件时，可以发电为其提供稳定的电流供其生活，直到度过困难。

（5）把该装置大众化，推向内陆，运用到溪流湖泊，形成一种大众化小型户外水流发电装置。

附录

A 受力计算

装置整体受力计算：

装置整体重量为 400g，由 $G=mg$ （A-1）

$$G=0.4\times10=4N \quad (A-2)$$

半球形浮体半径为 5cm，由 $F_{浮}=G=\rho g V_{排}$ （A-3）

$$V_{总}=\frac{4}{3}\pi5^3\times2=1.05dm^3 \quad (A-4)$$

$$F_{浮}=1\times g\times V_{总}=10.5N \quad (A-5)$$

吃水线计算：

由二力平衡得出微积分方程 $\rho g\iint_0^x\frac{4}{3}\pi r^3dx=G$ （A-6）

$$x=3.52cm \quad (A-7)$$

B 波浪潮流能利用效率

设波高为 50mm，波周期为 5Hz，根据波浪能计算公式

$$P=H^2T \quad (B-1)$$

可得该条件下波浪能为 $P_1=0.5W$ （B-2）

设海水密度为ρ，吃水部分叶片垂直于流动方向的投影面积为 A，流速为 u。

则 $f_D=\frac{1}{2}\rho Au^2$ （B-3）

$$p=f_D\cdot u \quad (B-4)$$

由于吃水叶片不同深度流速不同，故将波浪力沿不同深度对应的流速进行积分，故总机械功率 $P=\int pdx=\int_{u_1}^{u_2}\frac{1}{2}\rho Au^3dx=\frac{1}{8}\rho A(u_1^4-u_2^4)\Big|_{u_1}^{u_2}$ （B-5）

其中u_2为吃水叶片最深处流速u_1为水的流速，经计算得

$$P_2=0.32W \quad (B-6)$$

则波浪潮流能利用效率为：

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = 64\% \qquad (B\text{-}7)$$

C 发电效率

装置电路图如下：

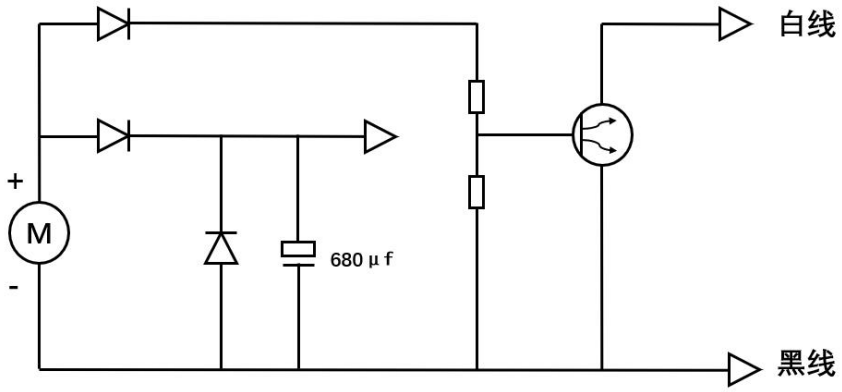


图 C1 装置电路图

假设水流流速为 1m/s，叶轮半径为 5cm，经实验测量得ω =20rad/s，即发电机转速为 20rad/s，该型号发电机转速与输出电压关系为

$$U = 0.15\omega \qquad (C\text{-}1)$$

得此时输出电压 U=3V

经测量可得，灯泡稳定发光时电流为 0.02A，根据

$$P_3 = UI \qquad (C\text{-}2)$$

可得发电机的输出功率 $P = 0.06W$ （C-3）

由该型号发电机型号以及空载测试可得电机装机功率为 $P_4 = 0.15W$ （C-4）

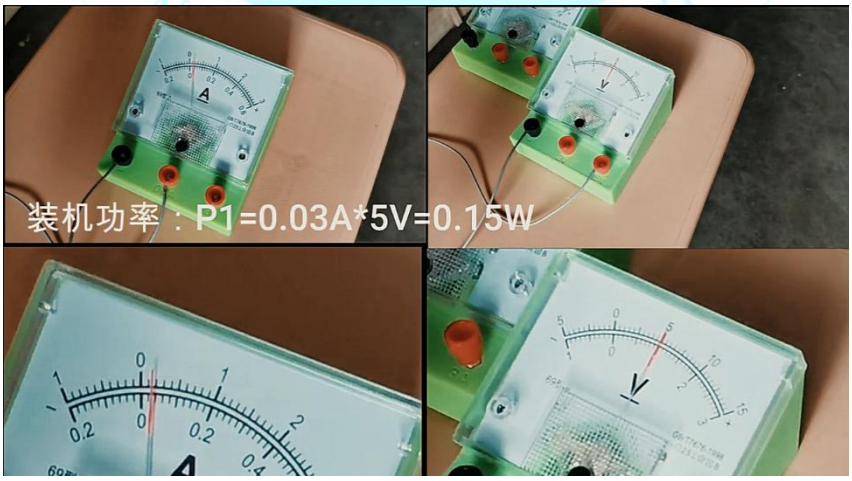


图 C2 空载时装机功率测试图

发电效率：

$$\mu = \frac{P_3}{P_4} \times 100\% = 40\% \qquad (C\text{-}5)$$

中国海洋工程设计大赛 CHINA OCEAN ENGINEERING DESIGN COMPETITION COEDC

参考文献

[1]张世龙，马尚平.海洋可再生能源技术创新定量分析及阶段评价[A].中国管理现代化研究会、复旦管理学奖励基金会.第十三届（2018）中国管理学年会论文集[C].中国管理现代化研究会、复旦管理学奖励基金会:中国管理现代化研究会，2018:8.

[2]李腾飞.竖轴双转子漂浮式潮流能发电装置水动力性能耦合预报研究[D].哈尔滨工程大学，2017.

[3]张理，李志川.潮流能开发现状、发展趋势及面临的力学问题[J].力学学报，2016，48(05):1019-1032.

[4]赵伟国，刘玉田，王伟胜.海洋可再生能源发电现状与发展趋势[J].智能电网，2015，3(06):493-499.

[5]周善元.21 世纪的新能源——海洋能[J].江西能源，2002(01):38-41.

团队编号：_A20200503_

第二届中国海洋工程设计大赛
设计说明书

设计制作组

完成日期 2020 年 10 月 12 日

中国海洋工程设计大赛组委会制

作品简介

半潜式平台是由立柱提供工作所需要的稳定性，所以又称为柱稳式平台。半潜式平台水线面很小，这使得它具有较大的固有周期，不大可能和波谱的主要成分波发生共振，达到减小运动响应的目的;它的浮体位于水面以下的深处，大大减小了波浪作用力。当波长和平台长度处于某些比值时，立柱和浮体上的波浪作用力能互相抵消,从而使作用在平台上的作用力很小，理论上甚至可以等于零。因而，半潜式海洋钻井平台具有极强的抗风浪能力、优良的运动性能、巨大的甲板面积和装载容量、高效的作业效率、易于改造并具备钻井、修井、生产等多种工作功能，无需海上安装，全球全天候的工作能力和自存能力等优点。其在深海能源开采中具有其他形式平台无法比拟的优势。

本半潜式海洋钻井平台以现代海洋石油理论为背景，以石油、天然气行业标准规范为准，结合船舶制造规范、海洋石油工程环境与坏境载荷，采用最优化科学理论与现代计算机技术对海洋钻井平台的创新设计进行了一系列论证。来确保海上石油钻井实现安全、高速、优质设计进行了规划与论证。以保证海上石油钻井实现高速、安全、优质和经济钻井。本作品严格按照本次大赛组委会的要求，并由本组成员并由本组成员独立完成。通过赛题数据包提供的一些制作材料， 充分利用所学专业知识，查阅相关的资料，对海上钻井平台浮体进行创作，在保证可行的前提下，进行了适当的创新。

通过本次大赛资料深入了解海上钻井平台的相关信息，本组成员以“南海 5 号”、“南海 6 号”为参照，并在“南海 5 号”的基础上进行了一些可行的创新，进而创作了本作品。

本作品设计中的主要创新点有：

（1）采用动力定位系统，结构设计条件高，抗风暴能力强。

（2）平台趋于简单化，平台主尺度增加内部空间增大，储存能力增加。

（3）配置多井口作业系统，提高工作效率。

（4）升沉补偿，在深海钻井作业过程中为了保持钻头恒定接触井底，必须设法补偿平台由于风浪作用而产生的升沉落差，本作品主要采用天车补偿、游车补偿以及绞车补偿等方法。

（5）平台设备集成控制平台设备集成控制技术研究是为航行、定位、钻井、完井作业创建一个数字化、智能化的控制平台。

该设计方案是立足于现场工程实际，融合了海洋钻井工程理论与技术领域的最新研究成果，继承与发展了传统海洋钻井工程设计方法，体现了钻井工程系统化、总体化的设计思想。

目 录

第 1 章　赛题分析.....1
1.1 赛题背景.....1
1.2 项目规划.....1
第 2 章　作品概述.....2
2.1 作品简介.....2
2.2 作品应用范围.....2
2.3 作品应用前景.....3
第 3 章　海洋平台设计.....4
3.1 平台优势.....4
3.2 平台工作设备.....4
3.2.1 动力设备.....4
3.2.2 钻井设备.....4
3.2.3 固并设备.....4
3.2.4 试油设备.....5
3.2.5 起重、锚泊设备.....5
3.2.6 平台或船体结构.....5
3.2.7 其它设备.....5
3.3 平台运行系统.....5
3.3.1 定位系统.....5
3.3.2 隔水管.....5
3.3.3 升沉补偿装置.....6
3.3.4 水下井口+防喷器组.....6
3.3.5 钻井泥浆循环系统.....6
3.4 平台数据结构.....6
3.4.1 设计标准及主要参数.....6
3.4.2 钻井设备.....7
3.4.3 浆配制及净化系统.....7
3.4.4 井控设备——防硫.....7
3.4.5 电站.....8
3.4.6 航海系统.....8
3.4.7 其它.....8

第 4 章　海上平台负荷 10
4.1 钻井系统负荷 10
4.2 动力定位系统负荷(仅用于浮式作业装置) 10
4.3 海洋环境载荷 10
4.3.1 风压和风载荷 10
4.3.2 海流力 11
第 5 章　海洋环境条件对采油的影响及应对方案 12
5.1 温度影响及应对方案 12
5.2 海水腐蚀及应对方案 12
5.3 海上平台运动问题及应对方案 13
第 6 章　风险分析及对策 14
6.1 平台稳定性分析 14
6.1.1 利用半潜原理减小平台的波浪力 14
6.1.2 利用稳定大立柱和立柱大间距原理增加平台稳性 14
6.2 平台故障及排除 15
6.2.1 平台钻井电机故障表现 15
6.2.2 海损事故 16
致谢 18

第 1 章　赛题分析

1.1 赛题背景

当今世界，科技引导社会发展。在改革开放三十年以来，科技影响中国的发展。随着中国的进步，人们越需要探索太空、海洋。因此，对海洋的资源探索任务是重中之重，作为科技社会下的大学生，关注、了解海洋知识是十分重要的。

1.2 项目规划

海洋可再生能源具有绿色清洁、可持续利用、开发潜力大等优势，发展海洋可再生能源开发与利用技术，可满足或补充海岛开发、海上 设备运行、沿海地区用电等需求，如海洋波浪蕴藏着巨大的能量，以波浪的能量为动力生产电能的方式称为波浪能发电，对于保护海洋生 态环境、发展海洋经济、推进生态文明建设具有重要战略意义。本次大赛以“海洋可再生能源的开发和利用”为主题，主要针对海洋波浪能、风能、潮汐能等发电装置进行创新设计。

第 2 章　作品概述

2.1 作品简介

海上平台是由甲板、围壁以及若干横向和纵向舱壁组成的空间箱形结构。其甲板可以分成多层，如主甲板、中间甲板、下甲板等。平台整体应具有储备浮力，即要求平台主体为水密或具有一定的水密性。平台本体可以是一个整体的箱型结构，也可是若干个纵横箱结构的组合体，如“田”字形、“井”字形、“△”字形。

本平台由主甲板、上甲板、前后和内外侧板、纵横框架和纵横骨架及相应内围壁组成，平台内挖掉四个大方孔，故实际可视为若干个箱型剖面组成的“田”字形平台。结构采用纵横混合骨架形式，每个区域内主向梁的方向不同，同时垂直于主向梁长度方向内设距离不等的强框架，所有主要侧壁骨架都采用水平布置，所有内壁均采用垂向扶强材。

本平台装有自航动力，原动机驱动螺旋桨，可以根据需要，从一个地点用自身的动力移动到另外一个地点。不需要额外借助拖船。

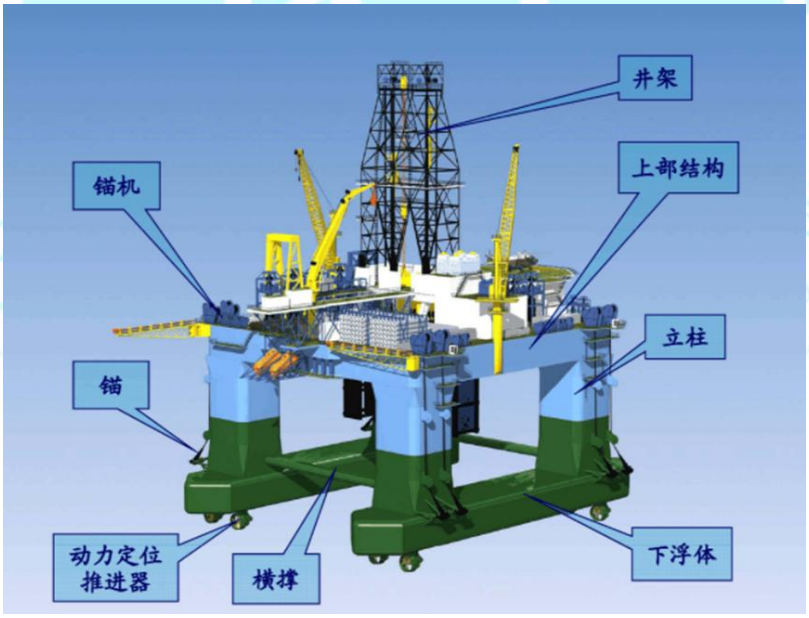


图 2.1 平台设计结构示意图

2.2 作品应用范围

海上钻井平台主要用于钻探井的海上结构物。上装钻井、动力、通讯、导航等设备，以及安全救生和人员生活设施。海上油气勘探开发不可缺少的手段。主要有自升式和半潜式钻井平台。

本平台为半潜式钻井平台，在波浪上的运动响应较小，在几种钻井平台中得

到很大发展，在海洋工程中，不仅可用于钻井，其他如生产平台、铺管船，供应船、海上起重船等都可采用。随着海洋开发逐渐由浅水向深水发展，这类平台的应用，将会日渐增多，诸如油与气的贮存，离岸较远的海上工厂，海上电站等都将是半潜式平台的发展应用。

本平台为满足深水开发需求，半潜式平台配备了精准的动力定位系统，自带浮力的隔水管、设计巧妙的升沉补偿装置等一系列先进设备。动力定位系统可以减少的锚泊的依赖，在海面有风浪的情况下可以实现平台固定在原地作业，基本不受风浪和潮流的影响深沉补偿装置可以在海浪和潮流的海况条件下保证钻井作业处于平稳状态，而不是处于颠簸状态。

2.3 作品应用前景

本平台为半潜式钻井平台，在波浪上的运动响应较小，在几种钻井平台中得到很大发展，在海洋工程中，不仅可用于钻井，其他如生产平台、铺管船，供应船、海上起重船等都可采用。随着海洋开发逐渐由浅水向深水发展，这类平台的应用，将会日渐增多，诸如油与气的贮存，离岸较远的海上工厂，海上电站等都将是半潜式平台的发展方向。

第 3 章　海洋平台设计

3.1 平台优势

半潜式平台由立柱提供工作所需的稳性，因此又称为柱稳式平台。半潜式平台水线面很小，这使得它具有较大的固有周期，不大可能和波谱的主要成分波发生共振，达到减小运动响应的目的;它的浮体位于水面以下的深处,大大减小了波浪作用力。当波长和平台长度处于某些比值时，立柱和浮体上的波浪作用力能互相抵消，从而使作用在平台.上的作用力很小，理论上甚至可以等于零。

因而，半潜式海洋钻井平台具有极强的抗风浪能力、优良的运动性能、巨大的甲板面积和装载容量、高效的作业效率、易于改造并具备钻井、修井、生产等多种工作功能,无需海上安装,全球全天候的工作能力和自存能力等优点。其在深海能源开采中具有其他形式平台无法比拟的优势。

与钻井船相比，半潜式平台因能浮动，浮力大，在钻井过程中能抵抗更强的风浪，稳定性更好，工作水深更大。与固定式钻井平台相比，半潜式平台不固定在某一地点，能够灵活移动，在一个海域施工作业完成之后，移动到另外一个海域进行施工，满足多海域钻井施工需求。而固定式钻井平台一旦建好，就不能移动。以及钻完井后，可迅速转为生产平台用于油田的早期开发。

3.2 平台工作设备

3.2.1 动力设备

浮船定位动力设备、升降桩腿动力设备、动力工作辅助动力设备等。

3.2.2 钻井设备

浮动钻井升沉补偿装置、钻井用水下井口设备、钻杆排放装置、泥浆配置装置、泥浆净化装置、测井设备等。

3.2.3 固井设备

为了在海上进行固井，需在平台上配备一套完整的固井设备，一般采用柴油机作为动力。包括有柴油机动力机组、注水泥泵机组、控制及计量设备、气动下灰装置、水泥搅拌和供水设备等。

3.2.4 试油设备

为了可以独立地在海上进行试油，平台上需配备有试油设备。包括油气水分离器、测量仪表、计量罐、加热装置、燃烧器、等。

3.2.5 起重、锚泊设备

主要有主甲板土的起重机以及其他辅助工作用的起重机，用以运送人员、物资、器材等。为了使半潜式钻井平台与钻井浮船定位，要配备锚泊设备，它主要包括链绞车、大抓力锚，锚缆绳、绞盘、缆桩、锚链、锚架等。

3.2.6 平台或船体结构

主要包括有固定平台的导管架、甲板等结构;移动平台的甲板，桩腿、沉垫(浮箱)、船舱、立柱等。

3.2.7 其它设备

如潜水作业用设备，直升飞机等运输等设备，海水淡化装置以及救生艇等安全设备等。

3.3 平台运行系统

3.3.1 定位系统

半潜式平台在海面定点作业时，需要采用动力定位系统与锚泊系统来防止其随波逐流。深水的平台如果采用锚泊来定位，需要很深的锚链，这就会增加平台的重量，也增加采购成本。所以采用动力定位系统，配备动力实现更加精准的定位。

深海风浪大，海底情况复杂多变，单一锚泊定位系统难以有效固定平台，而动力定位系统。它可以实时监测平台的位置偏差，综合外界干扰因素，自动控制装于自身的推进器，实现推力和推力方向的自动控制，使平台尽可能地固定于作业位置。

3.3.2 隔水管

相比与陆地，深海钻井作业中最困难的是上千米深的海水，钻入海床时，海水会阻碍钻头向下，因此隔水管向海底下送入时。随着钻井深度加深，相应隔水管的根数增加、重量增加隔水管配备了浮力块。浮力块可减轻水管 80-87%的重力，减轻了平台的重力负荷。在钻井作业过程中若外部海水压力大于隔水管内钻井液

压力，海水会挤毁隔水管，因此需要配备填充阀，它可以感应压差，在适当时机打开外部套筒，使海水进入隔水管，保持压力平衡。

3.3.3 升沉补偿装置

海上浮式钻井平台会受风浪作用一直摇晃，从而使钻头不能达到海底，升沉补偿装置也在有波浪的海况下保持钻头始终接触井底，无论风吹浪打，升沉补偿装置会固定平台不会晃动。

3.3.4 水下井口+防喷器组

（1）水下井口：深水钻井作业的水下井口是必备设施，在选择时要考虑海况、隔水管和上部防喷器组的重量以及可能存在的轴向力和弯矩等因素的影响。

（2）水下防喷器组 ：水下防喷器组，其作用是在发生井喷或井涌时控制井口压力，在台风等紧急情况下关闭井口，保证人员以及设备安全。水下防喷器组位于海床上，由多个环形防喷器和闸板防喷器和多个环形防喷器共同组成。

3.3.5 钻井泥浆循环系统

钻井泥浆被称为钻井工程的“血液”，在钻井作业过程中，十分重要。

3.4 平台数据结构

3.4.1 设计标准及主要参数

（1）风速：60.3 米/秒（100 节)；波高：27 米；工作水深：510 米；钻井深度：8120 米；主甲板长：71.32 米；主甲板宽：62.13 米；高（龙骨至主甲板）：29.11 米；作业吃水：21.12 米；拖航吃水：8.11 米；推进器深度：4.12 米；作业排水量：26130 吨；静水航速：4.1 米/秒（7 节）；立柱数量：6+2；大立柱直径：11.23 米；小立柱直径：8.99 米；额外立柱直径：3.11 米；浮箱:数量：2；总长：81.22 米；宽：16.41 米。

（2）船级：级立柱稳性装置、无限区作业。

（3）可变负荷能力

作业期间：3100 吨；拖航期间：1930 吨。

管子排放系统：用于操作 91.6 毫米和 138 毫米钻杆的 Varco 铁钻工和动力卡瓦，MaritmeHydraulics 半自动三臂机械排管系统。

（4）储存能力

钻杆排：910 吨(530m^3)；饮用水：617m^3。隔水管：长 510 米、直径 527.1 毫米（21 英寸)；袋装材料：310 吨；散装重品石：271m^3；钻井水：1900m^3；散装

搬土 110m^3；散装水泥：190m^3；液体泥浆：435m^3；燃油：1950m^3；

3.4.2 钻井设备

井架：Maritime Hydraulics，13.11 米×13.11 米×49.12 米，大钩负荷 3990 千牛(410 吨)。井架高度在安装顶部驱动装置时加高 4.57 米（15 英尺），现总高度为 410 米（321 英尺）。

钻机绞车：Continental Emsco C3 型，额定功率 2123 千瓦(2800 马力）配有 Elmagco 涡磁刹车，应急辅助刹车和自动防碰系统。滚筒槽适用于 40.1 毫米）大绳，由三台 GE588 千瓦(800 马力）电机驱动。

转盘：Continental Emsco T4950 型，转盘开口直径 1257.3 毫米由一台 GE588 千瓦(800 马力）电机驱动。

天车：Continental Emsco RA—60-7 型，负荷能力 6370 千牛（650 吨 E）。

游动滑车：Continental EmscoRA-60-7 型，负荷能力 6370 千牛（650 吨）。

顶部驱动：VARCO TDS-3S 型。

大钩：BJ550ODynaplex 型，负荷能力 5100 千牛（610 吨）。

水龙头：Continental Emsco LB-650 Bail 负荷能力 7100 千牛（690 吨）。

升沉补偿器：Rucker Shaffer，负荷能力 1782 千牛（191 吨），行程 5.49 米（18 英尺）。

泥浆泵：两台 Continental Emsco FB 一 1600 型三缸单作用泵。每台泵由两台 GE588 千瓦(800 马力）直流马达驱动。

一台离心式隔水管增压泵。

3.4.3 浆配制及净化系统

泥浆系统能处理水基和油基泥浆，配有自动泥浆混合系统。

振动筛：三台 SWACO 振动筛，能力 280 米 4/小时。

除泥器：Demco 414M 型锥体除砂器，能力 310 米 4/小时。

泥浆清洁器：一台 BANADT DE103 泥浆清洁器。

除砂器：一台 Demco 124 型 4×304.8 毫米锥体，能力 520 米 4/小时。

泥浆/气体分离器：能力 560 米 4/小时。

除气器：一台 Demco 4900 型，能力 310 米 4/小时。

3.4.4 井控设备——防硫

隔水管：长 421 米、直径 570.4 毫米（26 英寸）隔水管，部分配有浮力块。

隔水管张力器：六个 Rueker 张力器，每个负荷能力 355.84 千牛(36 吨)，行程

15.24 米（50 英尺）。

导向绳张力器：六个 Rucker 张力器，每个负荷能力 68.65 千牛(7 吨），行程 12.19 米(40 英尺）。

防喷器：476.25 毫米、103.42 兆帕（15000 磅/英寸 2）工作压力、防硫的“海锥尔”防喷器组，包括两套“海锥尔”103.42 兆帕（15000 磅/英寸 3)双闸板防喷器，两套“海锥尔”68.95 兆帕（10000 磅/英寸'）环形防喷器。

防喷器控制系统:“库美”气/电动力储能装置，储液能力 2271.2 升(600 加仑），工作压力 20.68 兆帕（3000 磅/英寸 2），储能器配备有小型主控板和转喷器控制板。

阻流和压井系统：一套 103.42 兆帕（15 000 磅/英寸 2）工作压力的防硫管汇。

水下电视系统：两套水下井口检验电视系统，配有一台显示器和两台摄像机。

3.4.5 电站

发动机：四台 NOHAB 2403.5 千瓦(3120 马力）柴油机，驱动四台 Siemens 发电机，2260kVA，60OVAC

应急动力：一台 MAN410 千瓦(571 马力）柴油机，驱动一台 Stamford 发电机 437kVA，440VAC。

直流电源分配：八个 2100A 可控硅系统，810V 直流输出。

3.4.6 航海系统

锚泊系统:八点锚泊系统，四台 Norwinch 双滚筒液压绞车，八根 86 毫米×1710 米 K4 锚链，八个 Stevin 17 吨锚。

推进器系统：3*1600 千瓦方位推进器。

导航设备：Sperry 航海雷达 MK104-14。

Sperry 航海雷达 MK4016；Simrad ED 测深仪，Steenhans；气象传真接收机；EMI 海浪雷达；Simrad 气象数据系统。

3.4.7 其它

辅助设备：吊车：两台 Liebnerr 294 千牛(41 吨）吊车，扒杆长 41.01 米，一台 Liebnerr 310 千牛(60 吨)吊车，扒杆长 27.4 米，一台铲车；直升飞机坪：适用于 S-61 或类似直升飞机；气体监测系统：在泥浆房、固井甲板、钻台、振动筛、通讯设备：生活区进气口装有经类和硫化氢气体监测器；无线电设备达到工业标准并且国际通用；造淡装置：两台 Nirex JMP 型造淡装置，每台造淡能力为 25 吨/天；安全设备：救生和消防设备符合船级社要求。生活区分上下二层，位于直升飞机甲板下，按单人、双人间可容纳 92 人，其中有娱乐室、电影电视室、健身房

及各办公室；

整体结构如图 3.2 所示

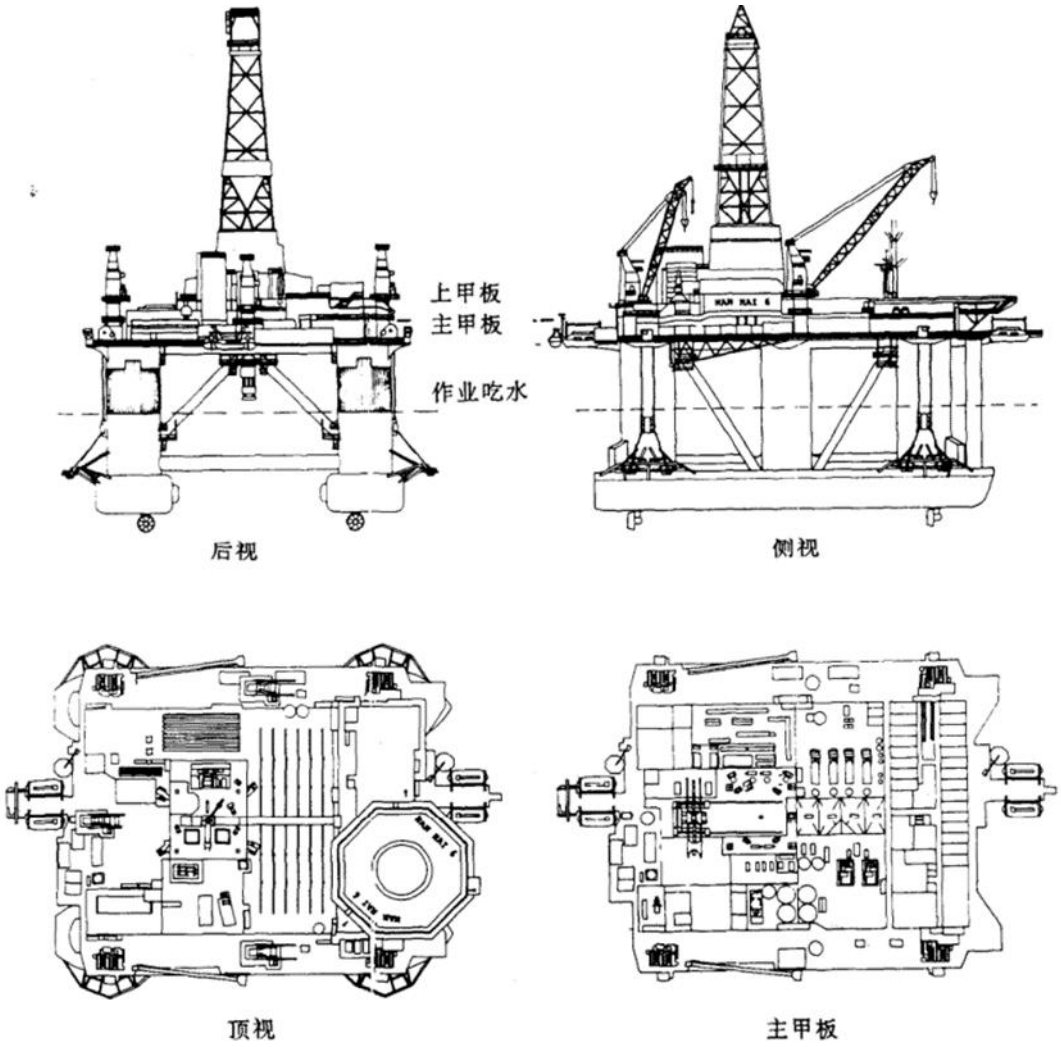


图 3.2 平台整体结构示意图

第 4 章　海上平台负荷

4.1 钻井系统负荷

钻井作业是近海钻井装置的一种主要工作状态，需要了解和掌握不同的钻井工况，来确定几种工况下不同设备的负荷情况，对于确定整个平台的负荷研究尤其重要。本文以钻井深度为 18000 英尺和 29000 英尺的自升式钻井平台为例，对主要钻井设备的配置情况和负荷投入情况进行总结和简要分析.

通常，一旦钻井深度确定，主要钻机（如：绞车、顶驱或转盘、泥浆泵）的参数就确定了。由于它们在整个钻井装置负荷所占比重很大；因此，掌握几台主要钻机不同工况的负荷情况，对计算整个钻井系统的负荷尤为重要。

对比可见，随着井深的增加，提升设备的能力明显增强，29000 英尺井深提升设备的能力，应该至少为 2800 马力、800 吨。

4.2 动力定位系统负荷(仅用于浮式作业装置)

根据海况的不同，所以动力定位系统电力负荷计算,可以分为恶劣海况动力与温和海况动力定位。所需负荷不仅要考虑全回转推进器的负荷，还应该包括为推进器服务的辅助设备。参考目前世界上第六代半潜式钻井平台的一些主要船型，大部分配备了 12 台全回转推进器。根据平台的主尺度和可变载荷不同，推进器的功率-般在 3.8MW- 4.8MW；通常在温和海况下，动力定位推进器的使用系数为 0.3~0.4；在恶劣海况下，动力定位推进器的使用系数约为 0.7~0.8；由于 DP2 以上定位级别冗余特性的要求，当有四台推进器故障时，要保持定位能力不降低;因此，剩余八台推进器可以在接近满负荷状态下工作。

4.3 海洋环境载荷

4.3.1 风压和风载荷

对于平台所在地的平均风速，垂直于该风向平面上受到的压强(N/m2),即为相应于该风速的风压，风压是海洋石油工程设计中的基本概念之一。设计平台中必须考虑包括风压在内的水平面推移力以及对固定端产生的倾覆力矩。

因为海面上空气运动变化无常十分复杂，所以作用于海洋石油工程表面的风压随着风向、风速和风的紊动结构的变化而不停地改变着，这就给设计中采用的风压值造成了困难。为解决这类问题，海洋工程上采取了将上述复杂的计算过程简化的方法，即将风的长期变化部分看成准静态载荷，将其能量很少的短周期变

化部分，看成准动态载荷，并将前者的风压称为稳定风压，后者称为脉动风压。风载荷即风的压力作用在工程结构、甲板上的水平推移力,还包括其对固定端产生的倾覆力矩。

风载荷对平台的稳定性和结构韧性、强度有很大影响。在计算海上平台风载荷时要依据总布置图，确定平台在不同风向时所受风面积(即垂直于风向的结构轮廓的投影面积)，按受风结构的形状和距水高度可求的风力。

4.3.2 海流力

在海洋中，海水从一个区域大规模转移到另一个区域称为海流。由于海流流速不会大幅度变动，故可将海流看作是是稳定的流动，这样，就可将他们作用于平台结构的力看做是拖曳力（阻力)。

波浪力计算中常根据该结构物的尺度与波长比值可分成小尺度波浪力的计算和大尺度波浪力的计算。当比值 D/L≤0.2 时，为小尺度物体(D 是物体的特征长度、圆柱体 D 为直径，L 是波长)；当 D/L>0.2 时，为大尺度物体，必须要考虑到物体自由表面效应和相对尺度效应，被合起来称为绕射效应。

第 5 章　海洋环境条件对采油的影响及应对方案

5.1 温度影响及应对方案

温度影响：当今世界人类开发海洋资源的规模日益扩大，海洋占地球总面积的 69.2%，与大陆环境相比，海洋环境有着明显的特点。海水的温度比大陆低，而且变化较小。海水的温度取决于大气、辐射过程与海水之间的热量交换和蒸发等因素。在地球的所有海洋中，北冰洋和南极海域最冷，表层水温为-2.1℃至－6℃。

应对方案：镁铝合金的抗腐蚀性极强,所以被广泛应用在船体建造当中,但是在应用过程中发现，环境温度的高低会影响其抗腐蚀的性能。因此为改善船体的质量,延长船体的使用寿命,研究环境温度对船体耐蚀镁铝合金的腐蚀行为的影响具有十分重要意义。通过实验方式,以环境温度作为变量,采用金相显微镜、扫描电镜、能谱分析仪和重量法分析镁铝合金在 20℃，30℃和 40℃下的腐蚀形貌、腐蚀产物和腐蚀速度。结果表明:环境温度越高,镁铝合金试样的腐蚀形貌呈胞状生长,一定程度后会造成腐蚀坑洼现象,最后表面出现大量的裂纹；镁铝合金试样块在不同温度下被腐蚀后，会产生由镁元素和氧元素构成的腐蚀产物，且镁元素与氧元素的比例会越来越大；随环境温度的慢慢升高。镁铝合金试样腐蚀速率越来越快。在实际海洋中，温度大概率不会超过 20 度，所以温度对平台影响可以不计。

5.2 海水腐蚀及应对方案

海水腐蚀：海水含盐量高，最主要的是氯化物。对平台有很大的腐蚀。其次是硫酸盐。

应对方案：

（1）选择耐腐蚀的材料

我国现在常用的耐腐蚀的金属材料有：高合金钢、低合金钢、复合合金钢。

（2）设计合理的结构

例如将外形设计成流线形，易腐蚀的地方加厚；尽量采用等强度设计；采用不同材料的焊接件以及铆接件，用来消除有害的阴极接触。

（3）采用先进的防腐工艺

我国常用的防腐工艺有：外加金属镀层的保护层、外加非金属涂层作为保护层、电化学防腐。常用阴极保护法。

5.3 海上平台运动问题及应对方案

海浪对平台冲击：海浪是海水的波动现象. 它们是由别的地方的风引起的海浪传播而来的。海浪,还包括火山爆发、塌陷滑坡、天体引力、海底地震、大气压力变化以及海水密度分布不均等外力和内力作用下形成的海啸、风暴潮和海洋内波等等。它们都会引起海水的波动,这是真正意义上的海上无风也起浪。海浪是海水起伏形状的传播，是水质点离开平衡点位置，作周期性振动,并向着一定方向传播而形成的一种波动，水质点的振动可以形成动能，海浪起伏可以产生势能，这两种能的累计数量是十分惊人的。

应对方案：本平台为满足对平台运动问题的需求，半潜式平台配备了精准的动力定位系统，自带浮力的隔水管以及设计巧妙的升沉补偿装置等一系列先进设备。动力定位系统可以减少的锚泊的依赖，在海面有风浪的情况下可以实现平台固定在原地作业，基本不受风浪和潮流的影响深沉补偿装置可以在海浪和潮流的海况条件下保证钻井作业处于平稳状态，而不是处于颠簸状态。

第 6 章　风险分析及对策

海洋平台的结构与设备的稳定性评估成为海洋油气能源开发的前提，进行良好的评估为长期的油气开采工作提供了良好的保障。本文主要从导管架平台极限承载力时变可靠性评估、爆炸条件下海洋结构平台所发出的结构响应分析、海洋平台爆炸风险评估等三个方面进行了较为详细的阐述。同时对于评估过程和评估方法进行了一系列研究与改进，旨在提高海洋平台结构与设备评估的准确性和有效性。

6.1 平台稳定性分析

半潜式平台是在海上浮动型的移动式平台,其稳性主要是靠具有稳性立柱，它也是柱稳式平台。柱稳式平台包括半潜式的平台和坐底式的平台,坐底式平台主要适用于浅水作业,半潜式平台主要适用于深水作业,但也同样可以在浅水作业,作业时与坐底式平台性能相同。

半潜式平台是用多个具有浮力的立柱将上壳体连接到下壳体,由其浮力支持的平台.在深水半潜作业时，下壳体潜入水中,立柱局部潜入水中,为半潜状态;浅水坐底作业时,下壳体坐在海底为坐底状态。半潜式钻井平台的产生晚于浮船式平台,它可以克服浮船式钻井平台的抗风浪性能差的缺点。它可以在深水海域以及恶劣的环境条件下作业,具有十分良好的运动特性,抗风浪性能好。半潜式平台在设计中巧妙地运用使其减小外力,增加稳性,具有良好的性能等特点。

6.1.1 利用半潜原理减小平台的波浪力

半潜式平台最大特点是半潜式作业,平台在半潜的状态下,将体积大的下壳体潜入到水下一定深度,从而使波浪力减小，避开了海面波浪作用区,因此,它比浮船式平台浮在海面所受的波浪力小很多。

6.1.2 利用稳定大立柱和立柱大间距原理增加平台稳性

半潜式平台另外一个特点是柱稳式平台,即就是利用立柱保证平台的稳定性。它在半潜的状态时,其水线面积主要指的是立柱的水线面积,水线面积虽然不大,但立柱之间的间距较大,因而使平台的惯性扭矩较大，使其具有较大的初稳性高度。它比浮船式平台惯性矩要大很多。

平台利用外力互相抑制的原理，从而减小了平台运动合理地选择平台立柱横向间距以及纵向间距，可以使外力互相抵消一部分，从而使平台运动大大减小。

例如对于具有两个下壳体、左右两排立柱的半潜式平台，当立柱横向间距设计为波浪的半波长时，作用在平台两边的立柱、下壳体的波浪惯性力大小相等，方向相反时，他们之间互相平衡，从而使平台运动减小。当波峰正位于平台的中心线时，左、右两边的立柱与下壳体同时受到向外作用的劈力,其力的方向相反、大小相等，互相平衡；反之，若波谷位于平台的中心线时，左、右两边的立柱、下壳体同时受到向内的挤压力，也互相平衡。当波长等于立柱的横向间距、波峰位于左、右两边立柱上时,立柱所增加的相上浮力，他们之间的力可以被抵消一部分，从而使平台运动的幅度减小；反之，当波谷位于左、右两侧立柱时，也可以产生相同效果。

6.2 平台故障及排除

6.2.1 平台钻井电机故障表现

海上油田钻井电机包括钻井绞车、转盘、顶驱和泥浆泵主电机。电机单台额定功率在 500~ 1000kW 之间。电机冷却方式分为水冷与强制风冷两种。水冷，即淡水冷却空气，空气闭式循环冷却电机的方式，电机水冷的方式系统复杂，使用的较少。强制风冷方式的结构比较简单，应用也占绝大多数。使用强制风冷的钻井主电机风机从外部安全区吸人冷风后，经电机后端进入，风冷却电机绕组后再从前端出风口排出。这种开放式的结构，其本体的防护等级为 IP43。大多数厂家为了解决前端轴承的散热问题，在前端盖上还开有散热孔等散热装置。其防护等级仅有 IP1987~71。典型的风冷钻井电机，故障形式主要表现为：

② 电机的散热性问题导致电机的温度过高发生故障；

②电机的防潮性能降低从而发生故障；

③电机的绝缘性能下降从而发生故障。

改进措施：

（1）钻井主电机绝缘设计和选型

由于海上油田钻井电机的工作环境较差，载荷冲击和突变大，电机绝缘设计必须按高标准执行，达到船用电机标准。电机绝缘需达到 H 级以上，绝缘要求采用高溶性环氧树脂，并用少胶和高云母含量的云母带来包扎绝缘，通过 2 次整体真空压力浸渍(VPI)处理。VPI 引入了真空和压力浸渍过程，从而最大限度地排除了绝缘中的气隙，处理后的线圈绝缘性能好，温升降低，机械强度增加，可以防止短路等绝缘故障，从而提高电机的防潮能力，延长了其使用寿命。同时 VPI 绝缘采用单面补强少胶云母带来包绕主绝缘，这种云母带的胶含量在 10%以下，云母含量则高达 80%，即使在浸渍无溶剂浸渍树脂后，绝缘中的云母含量仍然高达 60%以上，这样就极大地提高了绝缘的长期耐电性能。另外，对绕组 VPI 来说，

由于是对绕组铁心(即定子)整体进行 VPI 处理，在绕组绝缘内部得到充分浸渍的同时，绕组外部也同样被浸渍，使绕组槽部与铁心槽之间的间隙被浸渍树脂填充，从而加强了绕组在槽部的固定，改善了绕组的散热条件。绕组端部的固定也会有很大的增强。为防止外部流体和颗粒杂质进人电机内部，电机防护等级要求不低于 1P44;如因电机散热需要在电机前端开了散热孔，则电机前端出风口采用迷宫式风道设计，并加滤网和防雨装置，以避免雨水或污水进人电机。

（2）加装盐雾过滤器

加装盐雾过滤器的目的是过滤掉空气中的潮湿和盐雾，减少和去除冷却空气中的盐分和杂质，确保风机吸人的空气清洁干净，以达到冷却并保护主电机的目的;在电机不工作时，盐雾过滤器封住风机进风口，使电机内形成一个近似的密闭空间，可避免空间加热器热量的大量散失，提高加热效果。

1)盐雾过滤器结构：为了解决海上电机的通风问题而研制了盐雾滤器这一高效空气过滤装置，主.要由滤水装置、初效过滤器、高效过滤器、壳体 4 部分组成。

2)盐雾过滤器的工作原理通 风机运转时将混有水分、尘土等杂质的空气吸人滤水装置后，水雾遇到滤水装置时冷凝成水珠，水珠沿着过滤芯上的细小水槽流至排水区，最后流出过滤器。当有过滤器中存有雨水时，利用水和杂质在运动中的惯性以及重力大于气体的原理，通过迷宫式滤芯叶片的多层过滤，雨水及杂质的大部分被过滤在过滤芯外面，最后从排水区流出。空气中大部分的水分被迷宫式过滤叶片过滤后，开始第二道过滤，这就是初级过滤。经过板式初效过滤器过滤后，空气中的直径大于 0.5mm 的灰尘和含盐雾的固体颗粒均被初效过滤器挡住，而部分含有盐雾的细小颗粒随空气开始进人主过滤器。

经过主过滤器后，空气中的直径大于 4μm 的盐雾以及杂质被高效过滤器吸附后，清洁干净的空气被通风机吸人后，需要冷却的电机，达到冷却并保护主电机的目的，过滤效率≥98%。

（3）加大空间加热器

有些海上油田钻井电机风机与电机分开布置，也有些海上油田在加装盐雾过滤器时，将风道也一并进行了改装，使得电机加上进风道后，电机内部的气流空间增大较多，这样原厂配置的空间加热器加热量就不够用；这种情况下可通过在原空间加热器并联加装一个同类型的空间加热器，提高加热量，使得电机长期停用时内部温度高于环境 15C 以上。如果电机风道增加不多，可沿用原厂配置的空间加热器; 在实际应用中可根据电机内外温差来选择。

6.2.2 海损事故

随着世界石油需要量的不断增加及海洋石油和天然气的开发，平台数量亦随

之增多。与此同时，海损事故也愈来愈多。据有关资料统计，截止 1983 年，在已有的 718 台移动式平台中,平均每年发生事故的平台数占使用平台总数的 2%以上，其破损率要比一般焊接结构高得多。

在使用中，平台破损大致分为静力和脆性破坏等两种形式，而作用于平台上的各种载荷是遣成平台破损的主要原因。

改进措施：

（1）静力破坏

平台的静力破坏多数是由于超过设计载倘而造成的，如台风的袭击和船舶的碰撞等。在曼西哥湾海域，1964 年 10 月 的飓风使 30 多座平台倒塌。1967 年 10 月 的飓风又导致发生许多起

平台倒塌事故，其中一座固定式平台的弦杆和撑杆的连接处被拉出一个窟窿，其断面呈韧性破坏特征。平台遭受船舶撞击的比率也比较高，还有在寒冷海域中的流冰的撞击等。如 1967 年 10 月在墨西哥湾海域，一座固定式平 台被货船撞击,其构件受到很大损伤，但由于管结点采用了结点板补强，也由于地处温带使构件吸收了一部分冲击能量，故尚未造成平台的全部崩溃。

为了防止过大载荷引起的破坏，首先应掌握平台在作业海域的最大环境载荷，然后研究平台所能承受的极限力，以决定构件合适的连接方式和选择具有足够强度的高韧性材料。虽然过去对平台圆筒形接头形式所承受的极限力曾作过许多研究，但在弯曲、拉伸、剪切等应力综合条件下产生的静力破坏，加之接头形式、构件尺寸、钢材特性等的复杂变化，所以还有许多问题未能得到解决。诚然，对于简单的无补强焊接接头的构件，可按 AWS. API 冲

剪公式进行计算,还可参照 Kuang 等对 K、T、Y 型焊接接头形式所整理出的许多实验数据。但是，对于某些重要结构件，还应持慎重态度。

（2）脆性破坏

平台产生脆性破坏的主要因素有: (1) 许多构件使用了厚板和高强度钢；(2) 结构应力集中，并承受严酷的交变载荷作用和海水腐蚀的影响容易产生疲劳裂纹；(3) 任低温下使用的次数多，受船舶和流冰等撞击的机会亦多；(4) 焊接工作量大，施工困难，故容易产生各种焊接缺陷及残余应力，致使热影响区韧性降低；(5) 使用过程中不易检查和维修。

致谢

首先十分感谢本届中国海洋石油工程设计大赛主办方为广大学子搭建的高水平、专业化竞技平台，为我们提供了一个展现自我、促进交流、提高专业素质的机会。

本作品历时了将近一个月的时间，终于将本次的参赛作品设计完成。在设计的过程中曾遇到了无数的困难，但本团队的成员本着勤奋好学。刻苦钻研的精神，将这些困难一一克服。

通过本次比赛，我们对专业知识进行了深入学习，提高了利用专业知识解决实际问题的能力，强化了“智慧平台，内循环发电”的设计观念，并积累了相关经验。

本次的方案是在王金树老师的指导下完成的，从报名、前期准备、内容研究、方案设计到报告撰写，无不倾注了老师大量心血，在此真心感谢老师的悉心指导。