

# 深水水下连接器国产化设计关键技术

张康<sup>1</sup>, 洪毅<sup>2</sup>, 段梦兰<sup>1\*</sup>, 罗晓兰<sup>1</sup>, 侯广信<sup>2</sup>, 徐晓磊<sup>3</sup>

1 中国石油大学(北京)海洋工程研究院, 北京 102249

2 中海油研究总院, 北京 100027

3 南阳二机石油装备集团股份有限公司, 南阳 473006

\* 通信作者, mlduan@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-09-07

国家重点研发计划课题(2016YFC0303700)和国家科技重大专项子课题(2016ZX05028-003-005)资助

**摘要** 水下生产设施的国产化是我国深海油气勘探开发的重大战略之一。本文以水下生产系统中关键的连接设备——水下连接器为研究对象, 依据结构功能和使用特点提炼出水下连接器通用技术问题。结合“十二五”期间对水下连接器的研制工作, 从密封、锁紧、定位对中和液压控制四个方面探讨了水下连接器国产化所需解决的设计关键技术, 并重点阐述了密封关键技术与锁紧关键技术问题。归纳总结了亟待解决的问题, 并给出了相关解决方案的建议, 对下一步水下连接器的“十三五”国产化自主研制具有重要的指导意义。

**关键词** 水下卡爪式连接器; 国产化设计; 密封技术; 锁紧技术

## 0 引言

随着各大石油公司对深水油气资源的勘探开采, 作为深水油气田开发的主要模式之一的水下生产系统得到广泛应用。水下生产系统包括水下井口、采油树、管汇、跨接管、水下控制系统、脐带缆和海底管线等<sup>[1]</sup>。而水下连接器位于跨接管的末端, 是水下生产系统的关键连接设施, 其可以实现跨接管与管汇、采油树、管道终端(PLET)等设施的连接<sup>[2]</sup>。因此, 深水水下连接器是深水油气资源开发的核心关键装备之一。

早期的浅水油气田开采中, 水下设备的连接通常采用螺栓法兰连接系统, 依靠潜水员来完成。但是随着深水油气田的不断开发, 螺栓法兰连接系统受到限制, 因此深水无潜连接系统(Diverless Connection System)顺势而生。无潜连接系统是依靠ROV机器人(Remotely Operated Vehicle)完成水下连接器的连接。目前, 国外已有多家公司掌握水下连接器的研发技术, 世界范围内的水下连接器产品基本上出自

FMC、Cameron、Oil States、GE VetcoGrey以及Aker Solutions等水下设备供应商<sup>[3]</sup>, 而且核心技术只有企业内部人员掌握, 鲜有公开发表物对深水水下连接器关键技术进行阐述, 只能从各公司官方网站<sup>[4-8]</sup>了解产品的部分特点。国内的水下连接器研发技术尚处于起步阶段, 深水油气田所需的水下连接器仍然需要进口。仅中国第一个深水气田LW3-1项目所需的水下连接器数量就超过88套, 全部由Cameron公司提供。国外连接器不仅价格昂贵, 而且索取巨额的服务费用, 对核心技术进行封锁。从长远来看, 迫切需要进行水下连接器的国产化研制, 而这也符合深水油气开发的国家战略以及水下装备国产化的趋势。

本文以水下卡爪式连接器为研究对象, 详细介绍了其结构特点及功能原理, 提出了相关的通用技术问题。以“十二五”期间对水下连接器研制工作为基础, 对国产化研制过程所形成的设计关键技术进行了阐述, 其中重点分析了密封关键技术和锁紧关键技术。对国产化亟待解决的关键技术问题进行了总结, 并提出了

引用格式: 张康, 洪毅, 段梦兰, 罗晓兰, 侯广信, 徐晓磊. 深水水下连接器国产化设计关键技术. 石油科学通报, 2017, 01: 123-132

ZHANG Kang, HONG Yi, DUAN Menglan, LUO Xiaolan, HOU Guangxin, XU Xiaolei. Key design technologies of developing China's own subsea connectors. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 123-132. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.012

解决相关问题的建议和思路, 以期为“十三五”水下连接器的国产化研制提供指导。

## 1 水下连接器结构功能特点及通用技术问题分析

卡爪式连接器属于纯机械式的连接器, 本身不带液压结构, 安全可靠性能较高并且应用较为广泛, 是国产化研制的重点。本文以卡爪式连接器为研究对象开展相关分析工作, 首先对其结构和工作原理进行详细阐述, 然后根据其结构特点和功能要求, 提出水下连接器通用的关键技术问题。

### 1.1 水下卡爪式连接器结构组成

图1所示为一垂直式卡爪连接器, 主要由公接头和母接头上下两部分组成。其中公接头包括1个上毂座、20个卡爪、1个驱动环、2个紧固螺栓、1个密封环。母接头包括1个下毂座和1个对中底座组成。公接头的顶端与跨接管焊接在一起, 母接头坐落在管汇或者采油树等水下生产设施上, 两部分对接后通过挤压中间的密封环形成密封通道, 从而实现不同生产设施之间的连接。由此可见, 水下连接器的核心功能是实现不同生产设施连接并且实现密封。

水下卡爪式连接器需要配备专门的安装工具进行锁紧和解锁, 如图2所示, 该安装工具由起吊环板、控制面板、液压阀件、二次锁紧工具、连接液压缸、连接环板、驱动液压缸、驱动环板、底座等零部件组

成。其液动力源由ROV提供, 依靠ROV操作相关的阀件控制开关完成一系列安装动作。安装工具将连接器公接头和母接头对接锁紧后撤离, 无液压系统置留海底。

### 1.2 水下卡爪式连接器工作原理

安装工具将水下连接器的公接头和母接头对接锁紧后, 还需脱离连接器主体结构, 其具体的工作原理<sup>[9]</sup>为:

①准备工作。把公接头端与安装工具装配在一起, 然后用吊机将其共同下放至母接头端上方(母接头端事先固定在某一基座平面上)。

②粗对中。继续下放安装工具和公接头, 通过安装工具下端的底座与母接头端的对中底座相配合, 实现粗对中。

③精对中。连接液压缸开始工作, 推动连接环板移动, 连接环板带动公接头端、卡扣杆同时向下运动。随着卡扣杆向下运动, 底座上的卡扣卡在母接头端的凹槽上, 使安装工具与母接头端约束在一起, 不会发生相对位移。通过上毂座和下毂座的榫槽配合结构, 实现精对中过程。

④锁紧卡爪。驱动液压缸推动驱动环板向下运动, 同时驱动环板将带动连接器上的驱动环运动。驱动环促使卡爪收拢, 卡爪将母接头和公接头锁紧。在此过程中, 公接头端的上毂座和母接头端的下毂座同时挤压位于中间的密封环, 使密封环发生变形, 实现密封功能。

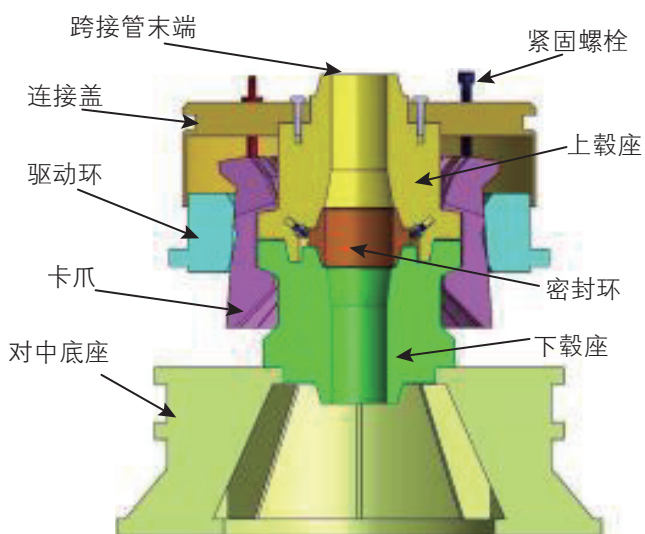


图1 垂直卡爪式连接器结构示意图

Fig. 1 vertical collet connector structure

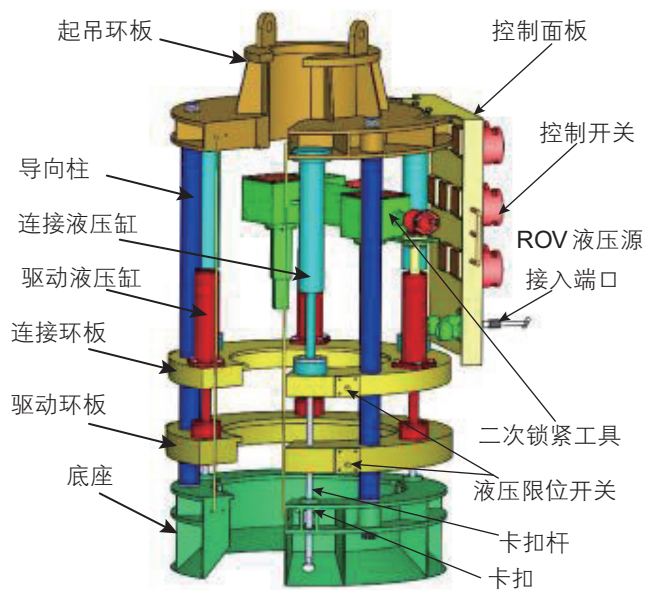


图2 卡爪式连接器的安装工具

Fig. 2 Running tool of vertical collet connector

⑤安装紧固螺栓。ROV旋转安装工具上的二次锁紧工具手柄,将紧固螺栓安装到位,实现连接器的二次锁紧。

⑥解除驱动环与驱动环板的约束。开启驱动环板上的液压限位开关,限位块开始向外运动,驱动环与驱动环板解除约束。

⑦撤离驱动环板。开启驱动液压缸控制开关,驱动液压缸开始缩回,带动驱动环板向上运动。

⑧解除连接盖与连接环板的约束。开启连接环板上的液压限位开关,限位块开始向外运动,连接盖与连接环板解除约束。

⑨撤离连接环板。开启连接液压缸控制开关,连接液压缸开始缩回,带动连接环板、驱动环板、卡扣杆向上运动。随着卡扣杆向上运动,卡扣解锁,安装工具与母接头端解除约束。

⑩收回安装工具。ROV撤去液压源,启动吊机将安装工具收回。

### 1.3 通用技术问题分析

从卡爪式连接器的结构功能以及工作原理来看,为了实现水下连接器特定功能要求,保证水下连接器高可靠性、高寿命运行,通用的设计技术至少包含以下几方面:

①密封设计:水下连接器结构最核心的功能是密封,而实现密封的关键零部件是金属密封环,但水下连接器的金属密封环不属于标准密封件,因此需要研究金属密封机理,探究密封设计方法与设计准则;

②锁紧机构设计:实现锁紧是密封的前提,而水下连接器锁紧机构的关键零部件是卡爪。卡爪在锁紧过程是运动零部件,因此保证卡爪在锁紧过程运动无卡阻,锁紧到位后稳固可靠运行是要解决的关键问题;

③定位对中设计:实现精准定位和对中是锁紧和密封的前提,水下连接器母接头端随管汇或采油树等设施首先下放到位,紧接着公接头端随跨接管下放,此过程需要完成两个对接体的定位对中。因此需要研究水下连接器的定位对中设计方案,以保证顺利安装;

④液压控制设计:水下连接器的一系列安装动作均需要安装工具上的液压机构来执行,因此需要研究适用于水下连接器所实现特定动作的液压控制系统,并合理布局管路系统;

⑤防腐设计:水下连接器要长期承受内部高温高压介质流体和外部低温高压海水侵蚀,对防腐材料和防腐措施提出了极高的要求。因此需要研究特殊材料选型以及专门的防腐设计方案,保证连接器的使用寿命。

## 2 国产化设计关键技术

针对上述通用技术问题,本课题组进行了科研攻关,突破了一系列设计、制造、测试、安装技术难题,形成了水下连接器国产化的关键技术。本文将从密封、锁紧、定位对中、液压控制四个方面重点阐述所形成的设计关键技术。

### 2.1 密封关键技术

在形成独特的密封结构总体设计方案的基础上,探究与密封相关的物理量之间的关系,用以指导密封设计,最终形成以下关键技术:

#### 1) “三段式密封面”双重密封结构设计

水下连接器采用两级密封,第一级为金属密封,是主密封,采用双锥面或透镜曲面结构形式,依靠金属密封环直接接触壳体结构实现可靠密封;第二级为非金属密封,是副密封,依靠O型橡胶圈与壳体结构相接触实现。非金属密封区域与金属密封区域配合形成密闭空间,以保证金属密封面与外界隔断,同时可以用来检测金属密封性能。如图3所示为锥面结构的密封面,共分为三段,红色1段与壳体密封面有一定角度差,一般取 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ;绿色2段为密封测试空间段;洋红色3段与壳体密封面平行以保证O型圈的密封性。密封实现过程依次为O型橡胶圈首先与壳体密封面接触,其次红色1段逐渐与壳体密封面接触,最后红色1段被压平,O型橡胶圈被压进槽内,详细描述参见

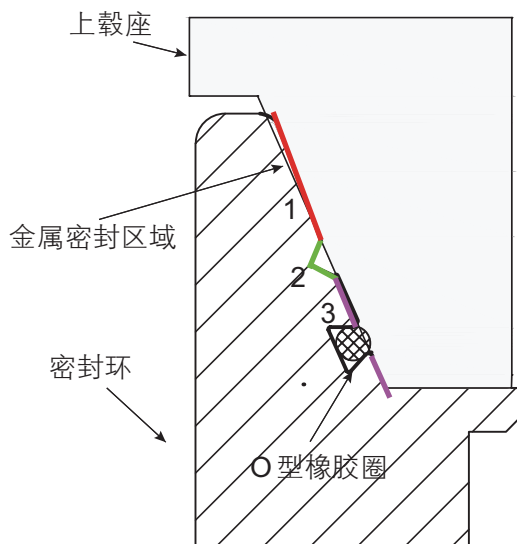


图3 水下连接器密封结构示意图

Fig. 3 Seal structures of subsea connector

文献[10-12]。

2) 结构变形分析与设计技术

上述密封结构形式是依靠接触面间的相互挤压变形实现密封的。就锥形密封和透镜密封两种常见的密封形式而言，其密封原理均是面密封，即在狭窄的环带状接触区域上形成密封<sup>[13]</sup>(如图4所示)。一般用两个参数衡量带状区域的密封效果，分别为接触压力和接触宽度，这两个参数直接反映了密封件的受力与变形特点，关乎密封是否可以实现。通过建立的密封接触有限元计算模型，分析不同载荷工况下密封接触宽度以及接触压力的变化情况，可以间接指导密封结构设计<sup>[14-18]</sup>。

3) 密封泄漏量计算理论

泄漏量是衡量密封效果的直接参数。影响泄漏量的因素有很多，比如作用在接触面上的密封力与机械载荷、流体压力作用下的内压力、密封垫片尺寸以及密封面加工精度与粗糙度等。通过建立的不可压缩流体的狭缝一维层流流动模型(如图5所示)，考虑密封圈的结构尺寸和接触情况，可以推导出水下连接器的泄漏计算公式<sup>[19]</sup>，如式1所示。根据建立的泄漏量判断标准，可以直接衡量密封是否有效。

$$Q = -\frac{b^3(p_1 - p_2)}{3\mu} \left( \frac{R_0}{L} + \sin \beta \right) \quad (1)$$

式中， $Q$ 为泄漏量， $m^3/s$ ； $b_0$ 为密封间隙， $m$ ； $p_1$ 为内压， $Pa$ ； $p_2$ 为外压， $Pa$ ； $\mu$ 为介质黏性系数， $Pa \cdot s$ ；

$R_0$ 为初始密封面接触位置的半径， $m$ ； $L$ 为密封接触区域宽度， $m$ ； $\beta$ 为接触面倾斜角， $rad$ 。

4) 密封参数与设计参数的理论关系模型

接触宽度和接触压力反映了密封圈结构的受力变形特点，其不仅与密封面的接触载荷有关，同时也与密封圈结构尺寸参数有必然的联系。由于金属密封是面对面的直接接触，所以无法直接测定接触面的压力分布以及接触宽度。大多数情况下，工程设计人员会采用有限元的方法计算接触力及宽度，进而判断结构设计是否合理，密封是否能实现，但有限元方法结构设计具有很大的盲目性。因此，量化结构设计参数与密封参数之间的理论关系对结构设计起着至关重要的作用。如图6所示，通过建立的金属密封接触的数学模型，可以推导出结构设计参数与密封宽度、最大接触压力、接触载荷之间的解析计算关系式，并结合所提出的满足密封和强度要求的设计准则，形成了一种水下连接器金属透镜式密封结构理论设计方法，如式2所示<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} b = \sqrt{-2m_1 / \text{LambertW}(-1, \frac{-2m_1}{m_2^3} e^{2m_3})} \\ m_1 = \frac{2R^* E_1 \delta}{E^* (1 - \nu_1^2)}, m_2 = \frac{2h}{\cos \theta}, m_3 = \frac{\nu_1}{2(1 - \nu_1)} \\ p_{\max} = \frac{E^* b}{2R^*} \\ H_B \leq p_{\max} \leq \sigma_s / 0.9 \ \& \ b \geq 0.001 \end{cases} \quad (2)$$

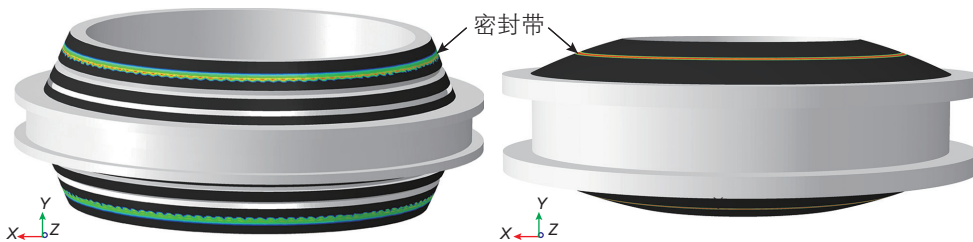


图4 锥形密封环和透镜密封环的带状密封区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the annulus sealing region on VX gasket and lenticular gasket

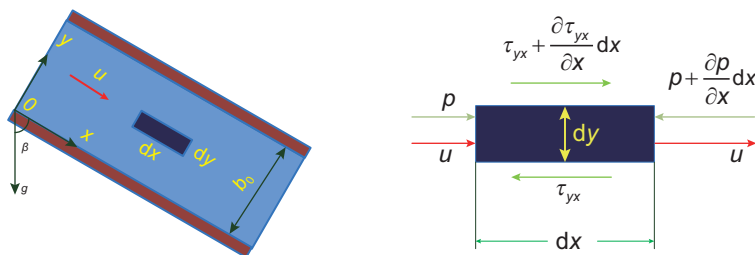


图5 两平壁间的层流流动分析模型

Fig. 5 Analysis model of one-dimensional slit laminar flow

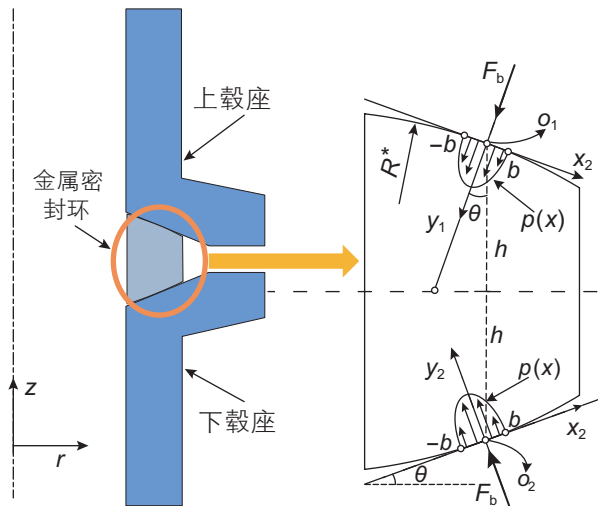


图 6 接触模型简化示意图  
Fig. 6 Simplified diagram of contact model

式中， $b$  为接触半宽度， $m$ ； $p_{max}$  为最大接触压力， $Pa$ ； $E^*$  为两接触物体的等效弹性模量， $Pa$ ； $R^*$  为透镜曲率半径， $m$ ； $E_1$  为透镜金属密封环弹性模量， $Pa$ ； $\nu_1$  为泊松比，无量纲； $h$  为密封环中径高， $m$ ； $\theta$  为密封接触面倾斜角， $rad$ ； $H_B$  为金属密封环硬度， $Pa$ ； $\sigma_s$  为金属密封环材料屈服强度， $Pa$ 。

2.2 锁紧关键技术

围绕如何实现锁紧以及如何达到最优锁紧效果两类问题，进行了锁紧结构的防干涉设计与二次锁紧设计，分析了预紧载荷与密封接触载荷理论关系，提出以降低预紧力为目的的结构参数优化模型，形成以下

关键技术：

1) 卡爪防干涉设计技术

卡爪是运动部件，由张开状态到收拢状态极易与其他零部件接触面发生干涉(如图 7 所示)。在结构设计时需要考虑：卡爪在锁紧前与上鞍座紧密接触，要保证卡爪的位置稳定。卡爪与驱动环在整个接触过程均应实现平稳过渡，防止出现干涉。卡爪与卡爪之间增加限位装置保证间隙分布均匀，防止卡爪之间出现干涉。锁紧后卡爪与驱动环的接触面具备自锁功能。结构初步设计完成后，可运用 Adams 软件对连接器的锁紧过程进行虚拟仿真分析(仿真模型见图 8)，检验连接器能否实现锁紧以及是否有干涉现象<sup>[21]</sup>。

2) 二次锁紧设计技术

在工作状态下，为了防止偶然的外载荷引起驱动环移动，可在驱动环上安装紧固螺栓以限制其偶然移动，如此便可实现稳固的锁紧，基于此种设计理念的锁紧称为二次锁紧。如图 9 所示，二次锁紧过程依靠 ROV 转动水平转杆，动力通过一对啮合的直齿圆锥齿轮传递到垂直转杆，然后转动紧固螺栓直到紧固螺栓旋进到指定位置，顶紧驱动环。解锁时，二次锁紧工具的垂直转杆需要与紧固螺栓实现精确对中，配合在一起后反向旋转将紧固螺栓旋出，方可完成解锁任务。

3) 不同零部件接触面之间的载荷传递关系

水下连接器是依靠配套的安装工具提供液动力将其锁紧。锁紧力通过水下连接器结构相互接触面进行传递，最终加载到金属密封环上，进而挤压金属密封环，在实现锁紧的同时也实现了密封。通过对结构零部件进行受力分析，研究接触面之间的载荷传递关系，可以建立预紧力与密封接触载荷之间的理论关系，



图 7 干涉的卡爪  
Fig. 7 Claws in the interference state

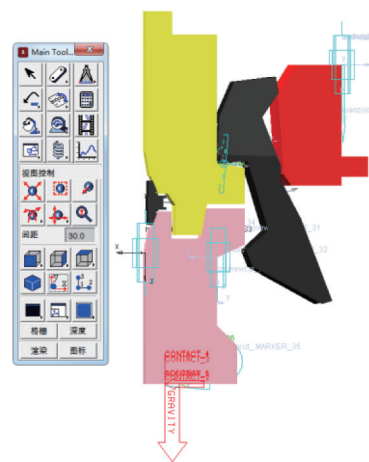


图 8 卡爪运动虚拟仿真模型  
Fig. 8 Simulation model of claw's motion

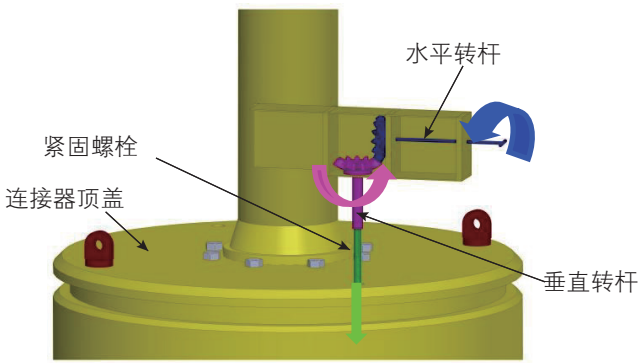


图9 二次锁紧机构  
Fig. 9 Re-locking mechanism

如式3所示<sup>[20]</sup>,用以指导液压参数设计以及毂座卡爪结构设计。

$$F = \pi D_q \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi b p_{\max} \cos(\alpha_1 - \varphi_1)}{2 \cos \varphi_1} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{1 + \tan(\alpha_4 + \varphi_4) \tan(\alpha_5 + \varphi_5)}{[\tan(\alpha_3 + \varphi_3) + \tan(\alpha_4 + \varphi_4)] \tan(\alpha_5 + \varphi_5)}$$

式中,  $F$  为预紧力, N;  $D_q$  为驱动环外直径, m;  $b$  为接触半宽度, m;  $p_{\max}$  为最大接触压力, Pa;  $\alpha$  为接触面之间的倾斜角, rad;  $\varphi$  为摩擦角, rad;  $\eta$  为机械传递效益比, 无量纲。

4) 以降低锁紧力为目标的 结构参数优化模型

调整结构参数使所提供的预紧力尽可能小但同时又能实现密封, 是工程设计所追求的目标。根据所建立的力学传递关系模型, 选取适当的结构参数作为待

优化变量, 加以约束条件, 选取机械传递效益比为优化目标函数, 使结构在满足密封性要求的前提下尽可能减小锁紧力, 最终建立起的优化数学模型如式4所示<sup>[22]</sup>。

$$\min \left( \tan(\alpha_{2g} + 8.53) + \tan(\alpha_2 + 8.53) \right) \tan(\alpha_3 + 8.53)$$

$$s.t. \begin{cases} \frac{1}{(\tan \alpha_2 + \tan \alpha_{2g}) \tan \alpha_3} \leq \frac{20}{1.2} \\ \alpha_3 < 8.53 \\ \frac{\tan(\alpha_{2g} + \mu_2)}{\tan(\alpha_2 + \mu_2)} = 1.2 \\ \alpha_2 - \mu_2 > 5, \alpha_{2g} - \mu_2 > 5 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_{2g}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  为待优化的角度设计变量, °;  $\mu_2$  为摩擦角, °。

2.3 定位对关键 技术

水下连接器公接头随管汇、采油树等设施首先下放到位, 紧接着母接头随跨接管下放, 此过程需要完成两个对接体的定位, 实现初步配合。随后, 需要完成公接头的轴心线和母接头的轴心线对中。定位对 中完成后, 连接器才能顺利实现锁紧和密封。因此, 结 构设计采用了双重对中方案(见图10), 第一重为喇叭 口结构的安装工具底座与对中座配合以实现粗对中, 第二重为上下毂座榫槽结构配合以实现精对中。

2.4 液压控制关键 技术

驱动环板的运动依靠安装工具上的3~4个液压缸

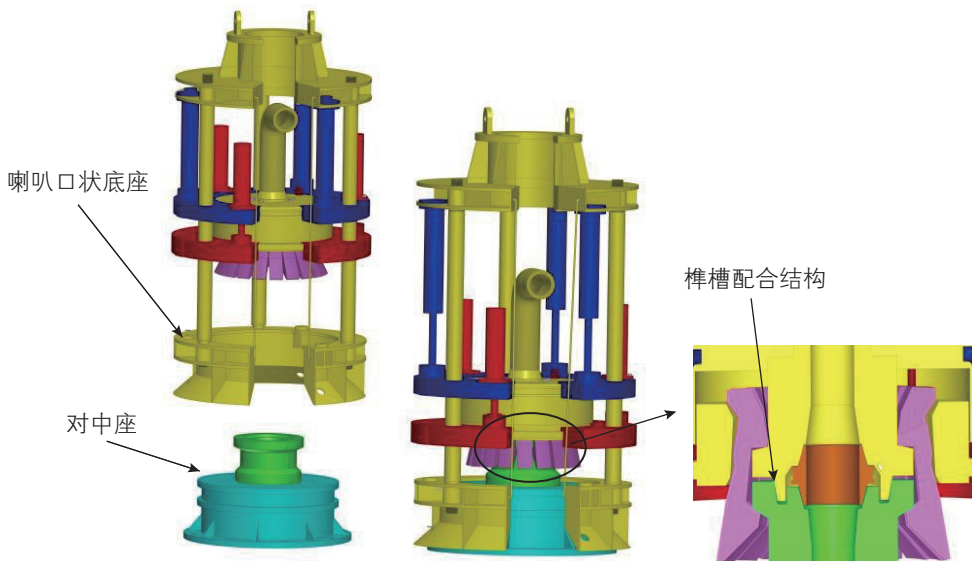


图10 粗对中与精度中  
Fig. 10 Coarse alignment and Accurate alignment

共同推动, 必须保证液压缸组能够同步运动, 否则驱动环板将会倾斜运动, 与导向柱发生干涉致使无法锁紧连接器(如图 11 所示)。通过仿真软件AMESim建立了驱动环液压系统仿真模型(如图 12 所示), 分析了分流集流阀的使用对液压缸同步动作的影响, 利用结构设计仿真相结合的方法, 提出增强液压执行机构同步性能的方案和措施<sup>[23]</sup>。

### 3 待解决技术问题探讨

从已有的研究工作来看, 水下连接器的国产化研制仍需从设计方面考虑解决以下技术问题:

#### 3.1 密封技术问题

①接触面间微观泄漏量是判定密封效果的最直接参数指标, 虽然已对泄漏量计算公式进行了推导, 但是并未进行试验验证。下一步的研究工作应当依据标准规范设计试验方案, 以实测值验证理论计算, 并探究泄漏量与结构设计参数的关系;

②密封的间接指标为接触宽度和接触压力, 虽然已得到透镜式密封结构的设计参数与接触压力和接触宽度的理论关系, 但仍需实验验证。进一步的研究工



图 11 倾斜的环板导致干涉现象

Fig. 11 Interference induced by the inclined ring plate

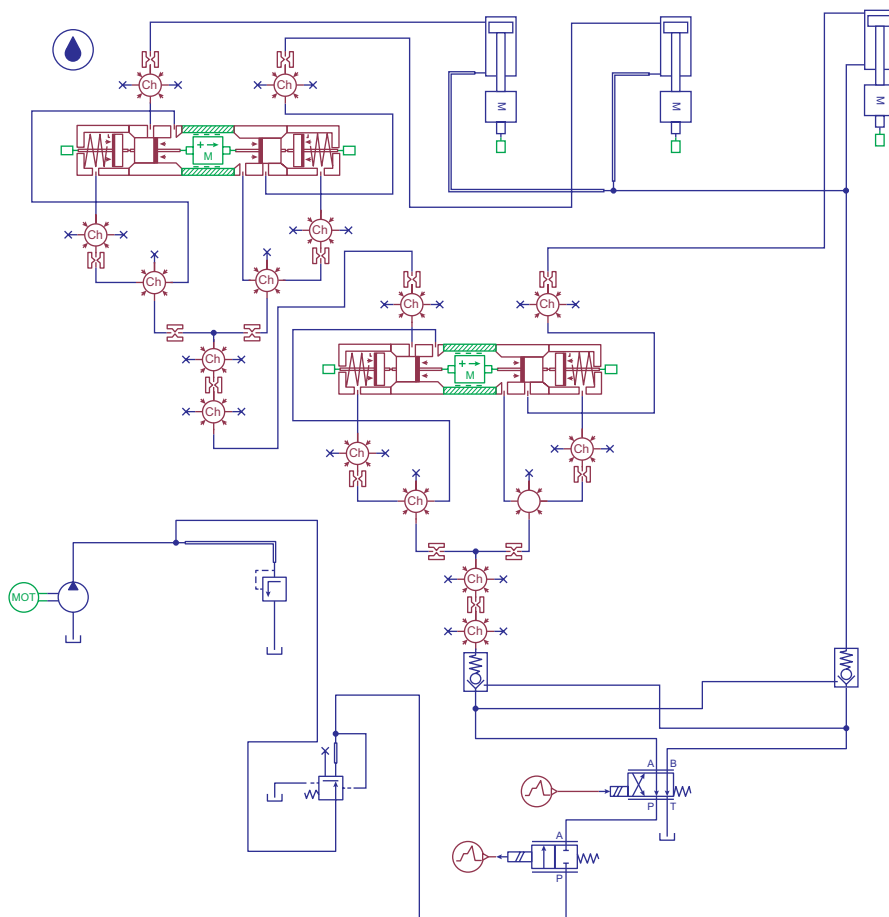


图 12 液压系统仿真模型图

Fig. 12 Simulation model of hydraulic system

作应当建立全尺寸实验台或缩比尺寸实验台,以实测值进行对比验证。由于金属密封是面对面直接接触,所以用实验方法直接测定接触面的压力分布以及接触宽度比较困难,能否寻找到替代方法是实验研究首先要解决的问题。此外,仅仅以加压、保压和测试压力变化的形式所开展的密封试验并不能用于验证参数理论关系,必须对结构变形进行测量;

③锥面密封结构的设计参数与接触宽度和接触压力的理论关系至今尚未获得,可通过简化接触区域压力分布形式,离散求解结构部件在假定压力载荷下的平衡方程,探究载荷与变形的理论关系,并辅以试验测试验证,形成锥形密封结构的理论设计方法;

④在形成的载荷变形理论基础上,提炼结构参数和密封参数的概率分布模型,建立密封功能函数方程,分析计算密封的可靠性;探究连接器工作状态下载荷时程变化,建立密封参数的疲劳累积损伤分析计算模型,预测水下连接器的密封寿命;

⑤对于双重密封,建立有限元分析模型,讨论不同的结构设计尺寸组合所能达到的密封效果,探究金属密封与非金属密封之间耦合效应。

### 3.2 锁紧技术问题

①进行预紧力与结构设计参数的理论关系研究,实现由结构设计参数直接计算得到预紧力,然后反馈到液压系统中,设定液压参数;

②进行系列化设计的参数选取问题研究,该问题的实质是要求水下连接器最外部的驱动环外径尺寸不变,只改变内部的密封环、毂座、卡爪的结构尺寸以实现不同尺寸管径的连接,针对该问题需要研究锁紧机构关键参数的设计方法,为系列化设计提供理论指导。

### 3.3 定位对中技术问题

①进行随机偏差参数对密封效果影响规律的研究。理想上公接头和母接头的轴心线在一条直线上,但实际安装过程中难免会出现一定偏差。在安装偏差存在时,结构的受力状态、密封性能、锁紧性能都会发生

变化,需要研究偏差参数与密封参数或变形参数之间的关系,进行密封可靠性分析。需要研究偏差参数存在情况下结构的受力变化状况,分析其对锁紧特性的影响。

②进行对中控制参数模型研究。建立对中过程下放深度与偏转角的函数关系,探讨结构的最大允许安装倾斜角以及最大允许偏差角,提出控制偏差参数的设计方案以及措施,保证顺利实现对中安装。建立毂座对接结构的对中偏离简化模型,提出偏差参数与结构参数的控制方程,优化相关的设计参数。

### 3.4 液压控制技术问题

通过锁紧结构理论计算,获得符合实际情况的力学参数,对液压系统进行仿真建模,研究系统的同步性能并提出改善同步性能的措施。构建液压控制系统闭环回路,提高执行机构的抗干扰能力以及精准控制能力。研究提高液压元器件稳定性的方案,保证液压缸组同步、平稳运动。

## 4 结束语

FMC、Cameron、Oil States、GE Vetco Grey以及Aker Solutions等国外五大公司的深水水下连接器技术成熟,产品类型呈现系列化和多样化特点,垄断全球市场。而国内水下连接器技术尚处于起步阶段,仅有个别科研院校和企业机构对此开展了技术研究,距离全面工业应用还任重道远。

随着深水油气田的不断开发,水下连接器的应用前景广阔,打破国外市场垄断,实现水下连接器国产化具有重大意义。在国产化的研制过程中,需要解决设计、制造、测试和安装等诸多方面的技术问题。本文着重探讨了设计研究方面的关键技术,并对亟待解决的关键技术问题进行了剖析。尤其值得强调的是在进行水下连接器产品系列化设计时,需要形成理论设计方法,而非只用有限元仿真方法进行模拟计算。此外,保证国产连接器的安全可靠性和使用寿命仍是研制工作的重中之重。

## 参考文献

- [1] 刘太元,霍成索,李清平,等.水下生产系统在我国南海深水油气田开发的应用与挑战[J].中国工程科学,2015(01):51-55.[LIU T Y, HUO C S, LI Q P, et al. Trends in subsea production system and its application in offshore oil and gas field development in South China Sea[J]. Engineering Sciences, 2015(1): 51-55.]
- [2] 周礼,段梦兰,张康,等.深水刚性跨接管安装控制作业及风险研究[J].石油矿场机械,2015,44(10):6-10.[ZHOU L, DUAN M L, ZHANG K, et al. Research on installation control and risk of deep-water rigid jumper [J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(10): 6-10.]



- [3] 董衍辉, 段梦兰, 王金龙, 等. 深水水下连接器的对比与选择[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4): 6-12.[DONG Y H, DUAN M L, WANG J L, et al. Comparison and selection of deepwater subsea connectors[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(4): 6-12.]
- [4] FMC Technologies. Products and services[EB/OL].[2016-09-05]. <http://www.fmctechnologies.com/>.
- [5] Cameron. Products and services[EB/OL].[2016-09-05]. <https://cameron.slb.com/>.
- [6] Oil States. Products[EB/OL]. [2016-09-05]. <http://oilstates.com/>.
- [7] GE Oil and Gas. Products by Industry Segment[EB/OL].[2016-09-05]. <https://www.geoilandgas.com/>.
- [8] Aker Solutions. Products and services[EB/OL]. [2016-09-05]. <http://akersolutions.com/>.
- [9] ZHANG K, DUAN M L, LUO X L, et al. A fuzzy risk matrix method and its application to the installation operation of subsea collet connector[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 45: 147-159.
- [10] 李博, 郭宏, 洪毅, 等. 用于深水垂直连接器的密封件: CN201310367299X[P]. 2016-01-20.[LI B, GUO H, HONG Y, et al. Gasket used for subsea vertical connector: CN201310367299X[P]. 2016-01-20.]
- [11] 罗晓兰, 段梦兰, 赵宏林, 等. 深水管道连接器密封件: CN2013206206600[P]. 2014-07-30.[LUO X L, DUAN M L, ZHAO H L, et al. Gasket of subsea pipeline connector: CN2013206206600[P]. 2014-07-30.]
- [12] 彭飞, 段梦兰, 范嘉堃, 等. 深水连接器锁紧机构双重密封设计研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 7-10.[PENG F, DUAN M L, FAN J K, et al. Research on design scheme for double seals of the locking mechanism for deep-water connector[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014 (4): 7-10.]
- [13] ZHANG K, DUAN M L, LUO X L, et al. A calculation method of ultimate torsional strength for subsea collet connector based on Finite Element Method[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [14] 安少军, 王立权. 金属透镜垫密封特性研究[J]. 流体机械, 2011, 39(9): 30-33.[AN S J, WANG L Q. Research on sealing characteristics of metallic lens ring[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(9): 30-33.]
- [15] WANG J L, DUAN M L, DONG Y H, et al. Design of the metal gasket of subsea connector for manifolds[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2012, 184: 140-145.
- [16] GONG H X, AN S J, LIU Y, et al. Seal characteristics and leakage model of metallic large-diameter lenticular gasket[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2014, 868: 730-736.
- [17] GONG H X, XU Z G, WANG S. A model for analysing the self-tightening coefficient of a metallic lenticular ring gasket joined by a bolted flange[J]. Material Research Innovations, 2015, 19(S6): 153-158.
- [18] 刘凯, 陈冰冰, 陈忠友. 透镜垫预紧时接触宽度的研究[J]. 压力容器, 2016, 33(6): 12-17.[LIU K, CHEN B B, CHEN Z Y. Contact surface width analysis in the lens gasket under preload condition[J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(6): 12-17.]
- [19] 周游. 深水套筒式连接器密封件泄漏研究与结构优化设计[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2013.[ZHOU Y. Research on leakage and structural design of deep-water collect connector sealing system[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing. 2013.]
- [20] ZHANG K, DUAN M L, HONG Y, et al. Theoretical investigation on compression limits of sealing structures in complex load transferring between subsea connector components. Journal of Natural Gas Science and Engineering (in press).
- [21] 彭飞, 段梦兰, 范嘉堃, 等. 深水连接器锁紧机构的设计及仿真[J]. 机械设计与制造, 2014(1): 37-39.[PENG F, DUAN M L, FAN J K, et al. Design and simulation of the locking mechanism for deep-water connector[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(1): 37-39.]
- [22] PENG F, DUAN M L, WANG J L, et al. Optimization method for mathematical model of deepwater collet connector locking mechanism[J]. Ships and Offshore Structures, 2016, 11(6): 575-590.
- [23] 任必为, 赵宏林, 洪毅, 等. 基于AMESim的深水连接器驱动环液压缸同步仿真[J]. 石油机械, 2012, 40(10): 49-53.[REN B W, ZHAO H L, HONG Y, et al. AMESim-based synchronous simulation of the drive-ring hydraulic cylinder on deep-water connector[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(10): 49-53.]

## Key design technologies for developing China's own subsea connectors

ZHANG Kang<sup>1</sup>, HONG Yi<sup>2</sup>, DUAN Menglan<sup>1</sup>, LUO Xiaolan<sup>1</sup>, HOU Guangxin<sup>2</sup>, XU Xiaolei<sup>3</sup>

*1 Institute for Ocean Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

*2 China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100028, China*

*3 RG Petro-machinery Group Co., Ltd., Nanyang 473000, China*

**Abstract** Developing Chinese subsea production facilities is one of the major strategies of the nation's exploration and development of deep-water oil and gas. The subsea connector is the key connection equipment of subsea production systems. Based on the structural functions and application features of subsea connectors, the common technical problems are presented here. The key technologies needed to be studied for developing Chinese subsea connectors are discussed around the four aspects of sealing technology, locking technology, alignment technology and hydraulic control technology. The key sealing and locking technologies are outlined. The unsolved technical issues are summarized and suggestions for some related solutions are proposed.

**Keywords** subsea connectors; design; key technologies; sealing; locking

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.012

(编辑 马桂霞)