

基于虚拟现实的海洋无隔水管修井作业设计

侯春来, 王文明*, 武振宇, 乔振铭, 郭建强, 郭岩宝

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

* 通信作者, wangwenming@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-03-17

国家自然科学基金(No.51309237)资助

摘要 传统海上修井通常需要利用隔水管完成修井作业, 该方法在作业过程中存在一定局限性, 其布置和维护成本较高, 且对海洋环境的适应性较差。海洋无隔水管修井作业通过消除传统隔水管的使用, 降低了修井作业成本和风险。然而, 该方法在操作复杂性和技术培训方面仍面临挑战。虚拟现实技术提供了一种创新的解决方案, 通过模拟真实环境和设备, 使得作业人员可在虚拟环境中进行修井作业的实时模拟, 提前了解作业流程和设备操作, 进而提高修井作业的安全性和效率。因此, 本文以虚拟现实技术为基础, 安全作业为导向, 针对海洋无隔水管修井作业设计了一种创新的修井虚拟现实系统, 实现了对修井设备的动态模拟仿真, 为作业人员提供一种全新的训练和操作支持方式。首先, 对海洋无隔水管修井设备的系统组成、设备布局以及运动规律进行了详细分析。依据分析结果, 通过SolidWorks和3D MAX等软件, 成功构建了修井设备的虚拟模型, 并进行了精细化处理, 虚拟模型能够近似地表征修井设备的外观和结构, 包括各个组件和连接方式。其次, 采用Unity 3D三维虚拟引擎工具, 借助其内置的脚本编程语言, 实现了海洋修井设备信息查询、动态三维交互、作业流程仿真以及虚实交互控制等功能。通过第一人称视角和VR漫游视角, 作业人员可在虚拟环境中与修井设备进行直接交互。以虚拟现实的方式使得作业人员能够提前进行操作训练和流程优化, 进而提高修井作业的安全性和修井效率。然后, 为实现修井设备的实时监测和数据管理, 基于OPC UA协议采集传感器的实时数据, 并利用MySQL数据库对修井设备信息进行统一管理。通过该方法可实时获取修井设备的各项参数和状态信息, 并进行数据分析和故障诊断, 进而提高修井作业的可靠性和可维护性。最后, 通过实际案例进行应用分析, 验证了基于虚拟现实的海洋无隔水管修井系统的优势和应用价值。相较于传统的操作方式, 该系统能够显著提升作业效率和安全性, 降低操作风险, 并减少设备损坏和事故发生的概率。

关键词 虚拟现实; 无隔水管修井; Unity 3D; 修井作业; 模拟仿真

Operation analysis of marine riserless light well intervention based on virtual reality technology

HOU Chunlai, WANG Wenming, WU Zhenyu, QIAO Zhenming, GUO Jianqiang, GUO Yanbao

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Traditional offshore workover usually requires the use of risers to complete workover operations. This method has

引用格式: 侯春来, 王文明, 武振宇, 乔振铭, 郭建强, 郭岩宝. 基于虚拟现实的海洋无隔水管修井作业设计. 石油科学通报, 2023, 03: 360-368
HOU Chunlai, WANG Wenming, WU Zhenyu, QIAO Zhenming, GUO Jianqiang, GUO Yanbao. Operation analysis of marine riserless light well intervention based on virtual reality technology. Petroleum Science Bulletin, 2023, 03: 360-368. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.026

certain limitations in the process of operation, high layout and maintenance costs, and poor adaptability to the marine environment. Marine riserless light well intervention operations reduce the cost and risk of workover operations by eliminating the use of conventional risers. However, this method still faces challenges in terms of operational complexity and technical training. Virtual reality technology provides an innovative solution that enables operators to simulate the real environment and equipment in a virtual environment to perform workover operations in real time, understand the operation process and equipment operation in advance, and then improve the safety and efficiency of workover operations. Therefore, based on virtual reality technology and safety-oriented, this paper designs an innovative workover virtual reality system for marine riserless light well intervention operation, realizes the dynamic simulation of workover equipment, and provides a new training and operation support method for operators. Firstly, the system composition, equipment layout and movement law of marine riser workover equipment are analyzed in detail. Based on the analysis results, the virtual model of the workover equipment was successfully constructed and refined by SolidWorks and 3D MAX software. The virtual model can approximately characterize the appearance and structure of the workover equipment, including each component and connection mode. Secondly, using Unity 3D virtual engine tool, with the help of its built-in script programming language, the functions of offshore workover equipment information query, dynamic interaction, operation process simulation and virtual and real interaction control were realized. The operator can interact directly with the workover equipment in a virtual environment through a first-person perspective and a VR walkthrough perspective. The use of virtual reality enables operators to conduct training and process optimization in advance, thereby improving safety and efficiency of workover operations. Then, in order to realize the real-time monitoring and data management of workover equipment, the real-time data of sensors were collected based on the OPC UA protocol, and the MySQL database was used to manage the workover equipment information uniformly. Through this method, the parameters and status information of workover equipment can be obtained in real time, and the data analysis and fault diagnosis can be carried out, so as to improve the reliability and maintainability of workover operations. Finally, through the application analysis of actual cases, the advantages and application value of the marine riserless light well intervention system based on virtual reality are verified. Compared with the traditional operation mode, the system can significantly improve the operation efficiency and safety, reduce the operation risk, and reduce the probability of equipment damage and accidents.

Keywords virtual reality; riserless light well intervention; unity 3D; intervention operation; simulation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.026

0 引言

随着全球海底油气井数量的不断增加,为避免油气井达到使用年限造成开采事故,需要对油气井进行作业维护^[1-2]。修井发生在整个油气井生命周期中,传统的修井作业是以半潜式钻井平台为载体,修井管柱经由隔水管完成修井作业^[3-4]。为显著降低修井作业成本,提高修井作业效率,通过使用基于连续油管的无隔水管轻型修井方法(Riserless Light Well Intervention, RLWI)进行作业;该方法用轻型作业船代替昂贵的半潜式钻井平台,免去了钻井隔水管,通过连续油管完成修井作业,并且连续油管进行桥塞、增产和射孔等多种修井作业更为有效,作业优势明显^[5-6]。目前,我国海上油气井已超过5000口,未来的大部分海底油气井同样存在需要修井作业的问题^[7]。因此,建立可靠完善的RLWI修井作业系统具有十分重要的意义。

由于海上作业环境复杂,修井作业工艺繁琐,为更加清晰地认知RLWI修井系统,更有效的模拟作业工况,以保证多种工况下的RLWI修井安全作业,因此有必要建立RLWI修井虚拟现实系统。该系统能够

实现设备作业仿真、工艺流程模拟、运行状态分析、操作人员培训等一系列工业应用。虚拟现实(Virtual Reality, VR)是一种发生在虚拟环境中通过计算机形成的一种交互式体验,它包含了听觉、视觉、触觉等其他类型的感官反馈^[8]。随着各种技术的深度融合,相互促进,使得虚拟现实技术在国内外都得到广泛应用。Hardlight VR Suit、Haptika、Axon VR和谷歌Haptic Helpers等公司都在致力于对虚拟现实技术的研究^[9];意大利能源巨头埃尼公司与塞班公司基于虚拟现实技术开发了钻井虚拟现实系统,实现了钻机设备演练、钻井交互控制、作业回放等^[10];壳牌利用VR技术,完成管道检查和连接海底机器人水下勘察的作业画面,通过远程协助的方式,更加快速地获得管道维修解决方案^[11];卡塔尔德州农工大学建立虚拟钻井培训平台,使学生们对钻井作业、钻机部件、钻井液、定向钻井等方面有了更多的了解^[12];青岛杰瑞工控技术有限公司开展了基于VR技术的虚拟设计与虚拟试验,用于钻井船关键部件的虚拟装配^[13]。由此可见,在海洋油气领域中,利用VR技术可以建立动态的、三维的、实时可交互的三维虚拟仿真模型,直观地进

行数据交互、训练培训、显著改善过程安全风险以及提高整个油气行业的运营效率^[4]。虚拟现实技术可进一步优化海洋修井业务流程和工艺流程等,但目前海洋修井领域这项技术还应用较少^[5]。

因此,本文利用SolidWorks、Unity 3D等软件构建RLWI修井虚拟现实系统,实现作业过程监控、数据采集存储、设备实时信息可视化等;并借助HTC Vive、PLC等硬件实现虚实数据连接与虚实交互控制;RLWI修井虚拟现实系统使操作人员可以直观、实时地发现修井作业问题,并且及时地做出决策,降低发生安全事故的概率。

1 虚拟现实系统结构框架

基于Unity 3D的RLWI修井虚拟现实系统,利用计算机模拟实际修井作业场景,构建修井设备虚拟实体,建立虚实数据交互通道,形成数据传输流,根据不同修井工况采集海浪信号、压力信号等传感信号,并进行异常数据分析从而对设备进行故障诊断与智能决策等,系统主要包括修井场景虚拟漫游、修井数据

采集存储、修井数据实时显示以及修井虚实交互控制4个模块,虚拟现实结构框架如图1所示。其中:1)修井场景虚拟漫游模块实现以第一人称视角和VR视角在不同作业环境下的虚拟漫游;2)修井数据采集存储模块是通过OPC UA协议采集连续油管等关键设备的状态数据,并将实时数据与静态数据存储于数据库中;3)修井数据实时显示模块通过调用数据库内容,对作业船偏移量、连续油管应力应变以及卷筒转速等作业参数进行实时显示;4)修井虚实交互控制模块是通过对PLC内存的读取与写入实现对修井关键设备模型的虚实交互控制。

2 虚拟模型的构建

虚拟模型包括三维模型和虚拟场景,三维模型的构建与精细化处理是构建RLWI修井虚拟模型的第一步,虚拟场景搭建为第二步。虚拟模型的制作效果将直接影响用户在修井虚拟现实系统中的交互体验^[6],因此,需要建立的设备虚拟模型与现实模型应尽量逼真。根据不同的三维建模软件的性能、建模效果、难

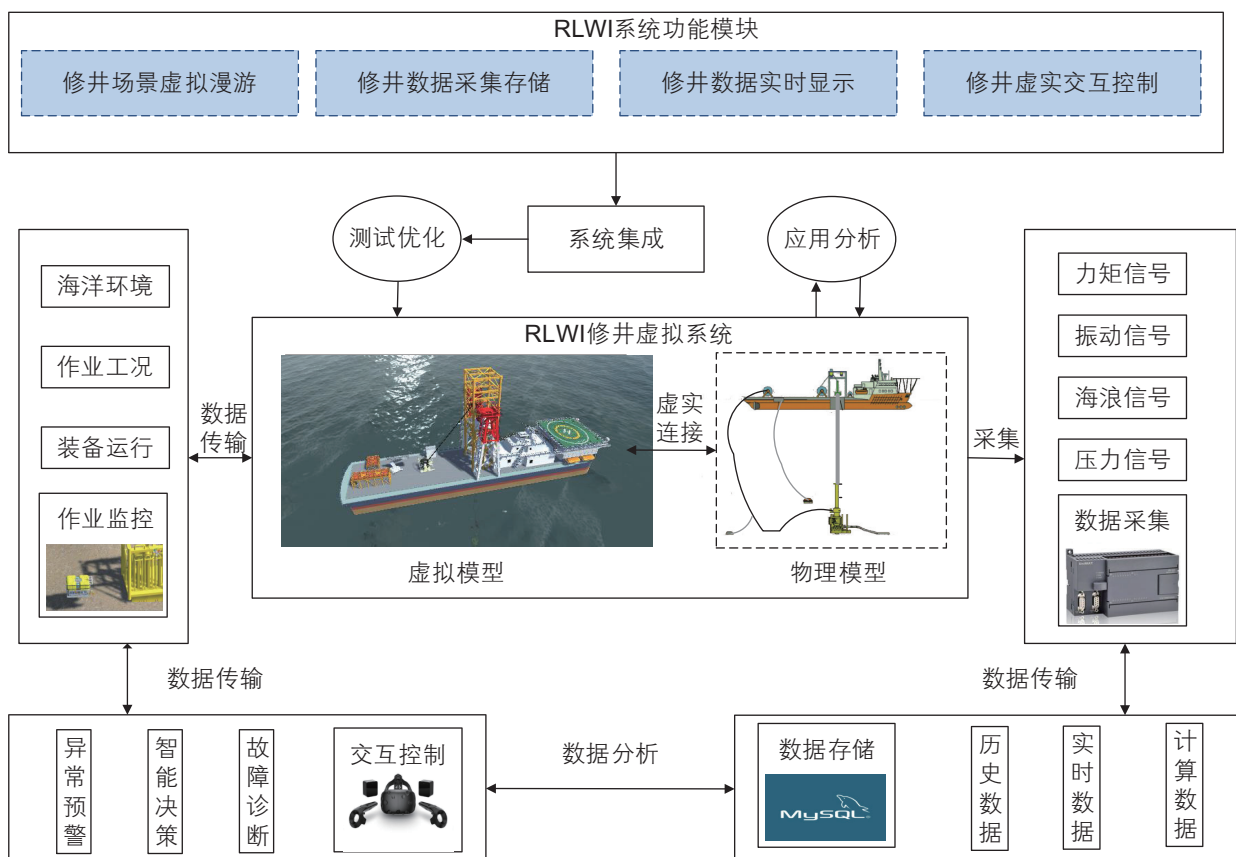


图1 虚拟现实系统结构框架

Fig. 1 Virtual reality system architecture framework

易程度,选择SolidWorks与3D MAX结合的方式对修井设备进行三维建模^[17];通过使用Unity 3D对不同修井作业虚拟场景进行搭建,并将处理后的三维模型进行整合,最终完成虚拟模型的构建。

2.1 三维模型构建

三维模型构建包括对修井设备结构的分析、零件几何尺寸等信息的收集以及机械装配体的设计等。RLWI修井作业设备结构复杂主要包括水上和水下两部分:水上部分主要由作业船、卷筒、连续油管、上注入器等组成;水下部分主要由下注入器、井控装置、防喷器等组成。其中上、下注入器为连续油管的下入和起出提供作用力,并通过滚筒的刹车机构和辅助刹车控制连续油管的下放速度;井控装置用于存放修井工具以及起到安全屏障的作用等。在虚拟现实系统建立时,需要利用数据采集技术收集设备的尺寸、公差和工艺等原始数据;在收集设备数据时,部分设备需采用FARO三维激光扫描仪采集点云图,来实现设备的外部轮廓和局部细节图的采集;数据采集完毕后,利用SolidWorks、3D MAX软件和设备的原始数据建

立修井设备的三维模型,并进行机械装配。修井作业设备建模是整个虚拟现实系统必不可少的一部分,部分设备SolidWorks模型如图2(a)—图2(d)所示。

2.2 三维模型精细化处理

修井设备三维模型构建仅仅只是完成了修井系统的轮廓,这与实际修井设备相比,真实程度相差很多,并且修井操作过程是一个相当复杂的过程,需要集成连续油管卷筒、鹅颈、上注入器、下注入器、防喷器等设备联合作业。为了使模型更加逼真,需要对所建模型进行精细化处理,以提高模型的整体效果,因此,将建立好的模型以Step或者IGS格式导入3D Max软件中,对所建三维模型进行压缩、贴图、渲染等处理;为了降低场景的复杂度,对于环境的细节,比如船体等并没有单独建模,而是采用纹理贴图,用纹理图片替代复杂的模型结构,模型减面优化后的卷筒和作业船三维模型如图3所示;为使RLWI修井虚拟现实系统中设备运动更加与实际相符,需要根据实际修井作业运动过程(主要运动状态有“连续油管起升”、“连续油管下放”和“滚筒旋转”动作),为关键零件添加

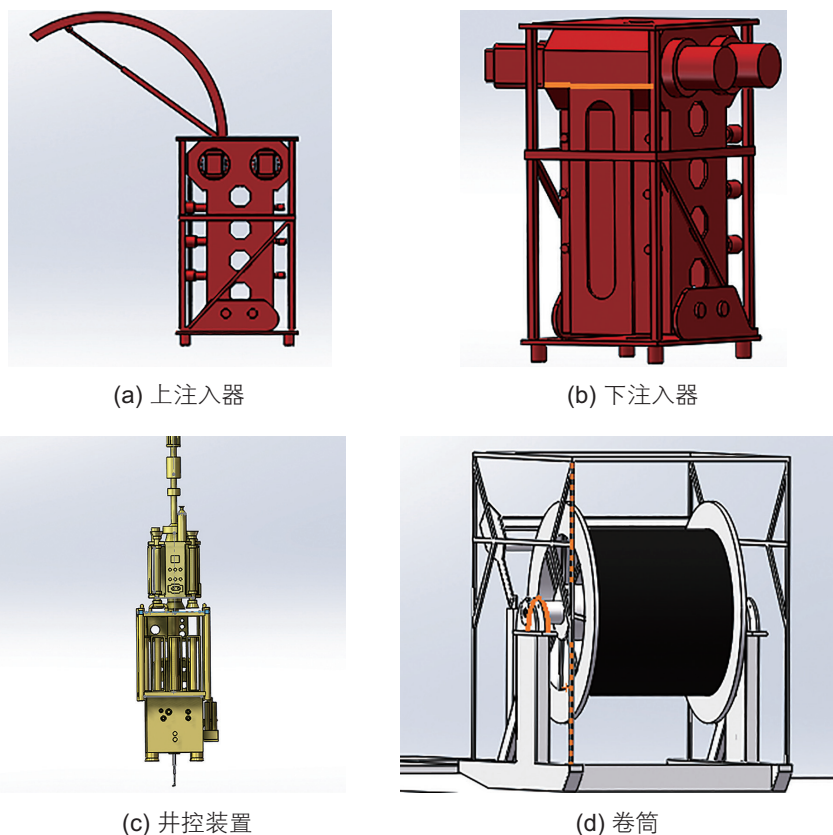


图2 修井部分设备模型

Fig. 2 Model of workover equipment

骨骼，制作骨骼动画，产生真实设备的运动效果；最终，将处理好的三维模型导出为FBX格式文件，为将虚拟模型导入Unity 3D平台中做好准备。

2.3 虚拟场景搭建

由于RLWI修井作业受到海洋环境限制，操作人员无法对水下设备进行现场查看，因虚拟场景具有高沉浸感的特点，所以现实世界能够真实的表现于虚拟世界中，且在虚拟场景中可反应设备的真实运行状态并对其进行监控。为使RLWI系统具有高沉浸感，需要在Unity 3D中对修井作业场景进行整体布局，并在场景细节上进行处理。首先，将转化格式后的修井设备三维模型导入Unity 3D虚拟场景中，对坐标轴、尺寸进行调整并且设置修井模型为可动属性以实现模型动画的显示；其次，通过Unity 3D本身的命令在场景中添加海洋地形、海洋生物等可提高沉浸感的虚拟元素，并对添加的元素结构、类别等进行选择；最后，添加Box Collider, Rigid Body等组件，实现真实世界的碰撞和重力效果，完成整个虚拟场景的建立，RLWI

修井虚拟现实系统海底环境设备效果如图4(a)—图4(b)所示。

3 RLWI 修井虚实交互的实现

虚实交互性是虚拟现实的一大特点，也是整个RLWI修井虚拟现实系统最重要的部分。为提高修井工作的安全性，将虚拟现实技术与数据采集技术、决策分析技术等各项技术融合，利用Unity 3D平台对模型进行二次开发；借助HTC Vive、PLC等硬件实现修井作业数据采集存储、作业数据实时显示、作业过程监控以及虚实交互控制等功能，开发出环境代入感高、操作沉浸感强、实时交互性好的RLWI修井虚拟现实系统。

3.1 虚拟场景人机交互性设计

为提高用户和虚拟场景之间的交互性，根据虚拟现实技术的特点，借助Unity 3D软件自身的第一人称视角控制器实现RLWI修井虚拟现实系统的场景漫游

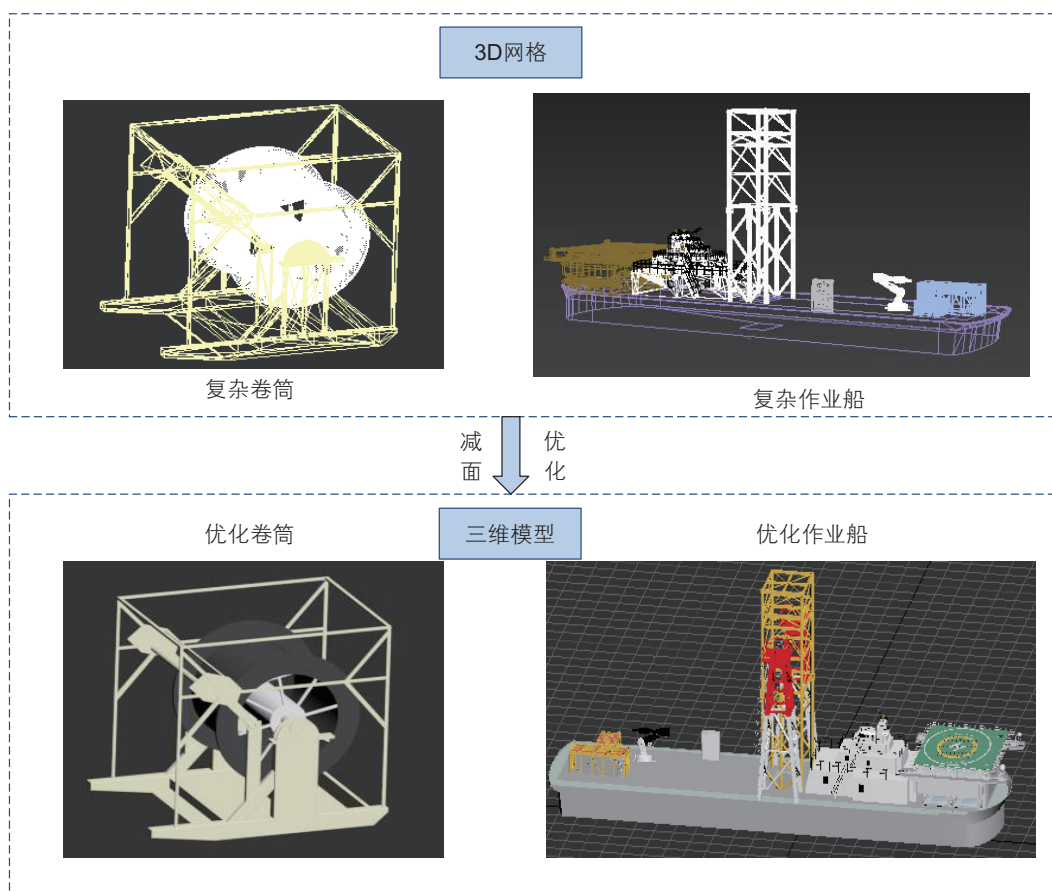
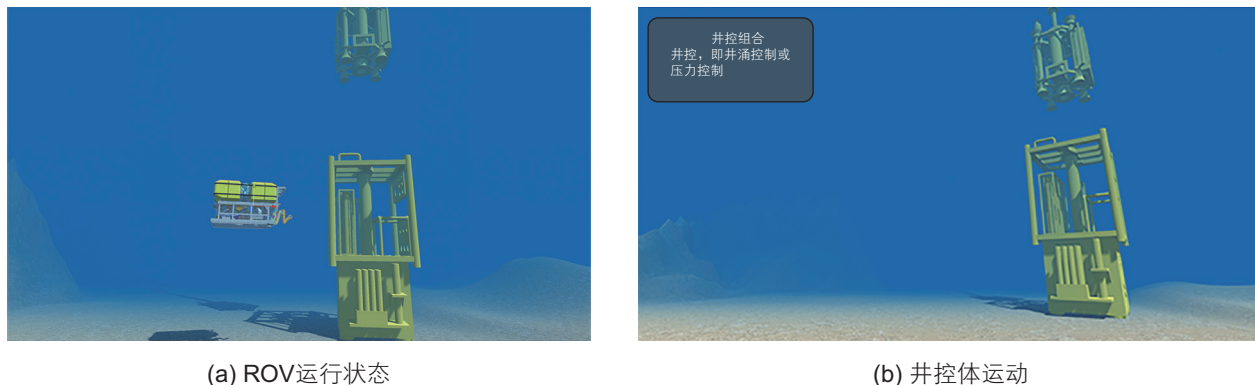


图3 卷筒、作业船减面优化操作

Fig. 3 Optimized operation of drum and vessel reduction

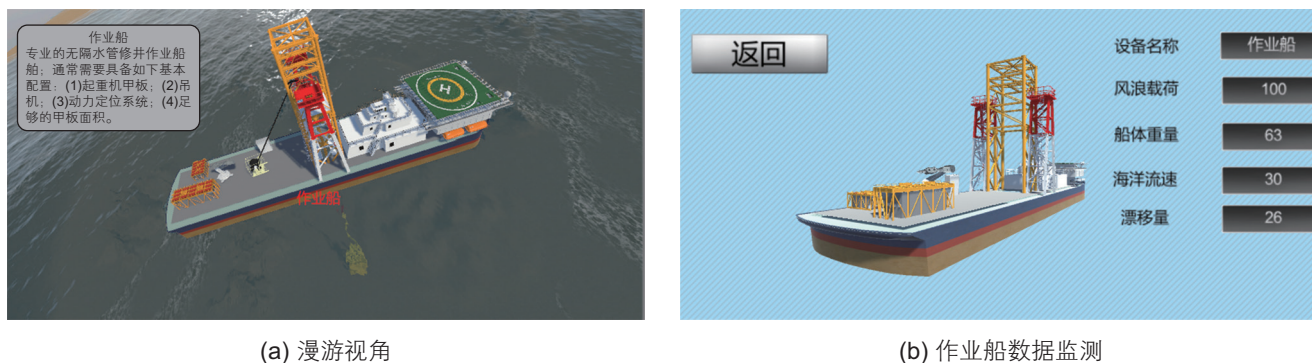


(a) ROV运行状态

(b) 井控体运动

图 4 虚拟现实系统海底环境

Fig. 4 Virtual reality system subsea environment



(a) 漫游视角

(b) 作业船数据监测

图 5 三维动态虚拟仿真系统

Fig. 5 Three dimensions dynamic virtual simulation system

功能，漫游视角如图 5(a)所示。RLWI 系统通过键盘的 W、A、S、D、空格键控制人物的行走、跳跃、鼠标控制视角方向的旋转；同时可以改变漫游速度和鼠标旋转的角度，以使操作者有更好的体验感，系统的自由漫游可以使操作人员随心所欲的在虚拟场景中任意行走，更加真实地模拟修井作业环境。为提高 RLWI 修井作业系统的安全性及智能性，需要对 RLWI 修井作业设备进行作业监控，作业船监控界面如图 5(b)所示。在虚拟环境中，系统将修井设备的静态数据与动态数据存储于 MySQL 数据库中，通过 NGUI 插件搭建系统监测界面，并在对应数据显示位置利用 C# 编程实现对数据库内容的读取，达到作业监控的目的。

3.2 VR 效果下的虚实交互实现

将多媒体技术、虚拟现实技术、网络通信技术等信息技术深度融合，基于 Steam VR Plugin 和 Virtual Reality Toolkit (VRTK) 两款插件对虚拟环境进行开发，以实现 RLWI 修井虚拟现实系统的 VR 效果。为给用户提供更好的虚拟现实体验，通过 SteamVR

Plugin 和 VRTK 工具包实现 Unity 3D 场景与 HTC Vive 设备连接，将 VRTK 中的不同功能脚本挂载到头显和左右控制器上完成 VR 效果下的虚实交互，其中主要通过 VRTK_Pointer, VRTK_Interactive_object、VRTK_Interact Grab 脚本共同实现不同功能设计；配置好监控软件开发工具包中的参数，即可以实现人物的瞬移、物体的抓取、场景的切换、菜单的交互等功能^[18]。VR 视角下的水下修井设备场景、海上修井设备场景和修井事故演练效果如图 6(a)—图 6(c)所示。

3.3 RLWI 修井的虚实交互控制

为进一步提高系统的虚实交互性，需要对虚拟设备和物理设备完成数据通信，实现数据信息的交互。
 ①数据采集：合理布置物理设备上的压力传感器、应力应变传感器的检测点，利用多物理场传感器实现对修井系统物理设备的数据采集(包括平台横移量、风速、管内液体压力、海流速度等参数)；
 ②Unity 3D 与 MATLAB 通讯：通过脚本编程实现 Unity 3D 和 MATLAB 之间的通信交互，Unity 3D 为服务端，MATLAB 为客户端，其原理是通过通信端口将实时数据传入

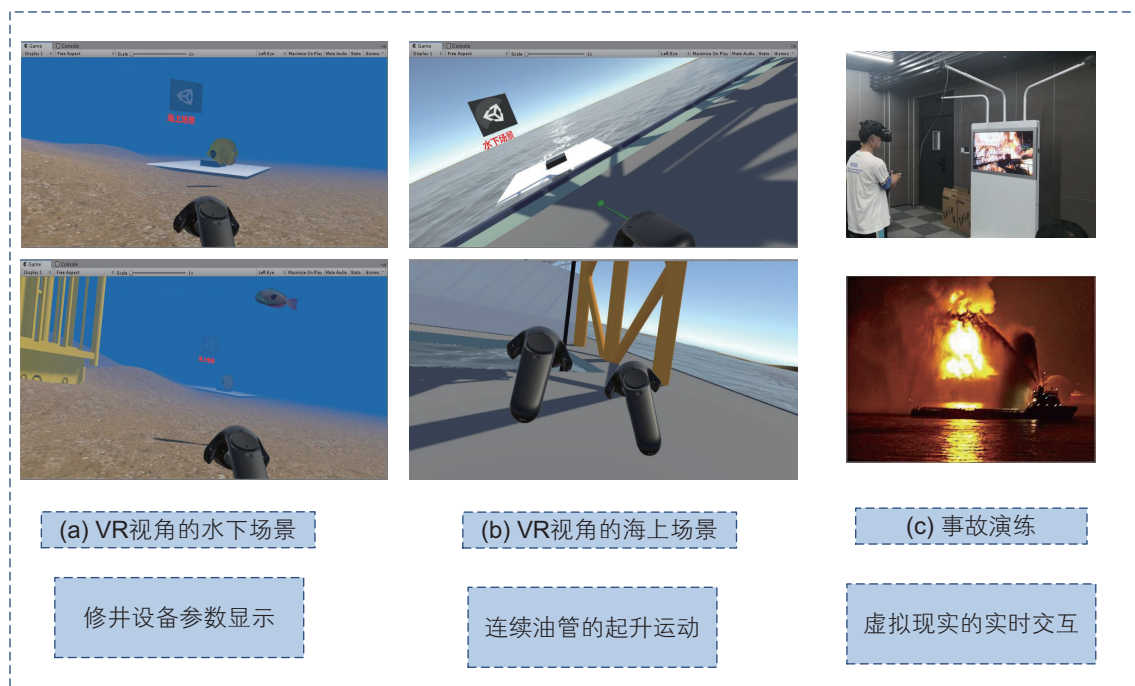


图6 交互主画面示意图

Fig. 6 Schematic of the interactive main screen

MATLAB, 利用MATLAB的Serial通信模块读取数据流, 并将实时数据结合历史数据形成物理空间传感数据库; ③PLC与Unity 3D的通信: 利用KEPServer搭建OPC UA服务器, 通过OPC UA协议建立PLC数据交互连接, 引入OPCDAuto.dll动态库, 通过C#调用库函数建立上位机客户端, 实现对PLC内存的写入与读取, 进而对连续油管卷筒的收放速度、上下注入器的注入速度进行联合控制。

4 修井虚拟现实系统的应用分析

根据提出的RLWI修井虚拟现实系统框架, 通过虚拟现实与仿真技术、数据存储与集成等各项技术的改进与融合, 实现了虚拟设备库显示、作业实时监控、故障诊断与服务决策功能, 并开展了RLWI修井虚拟现实系统的应用分析。

4.1 系统功能

RLWI修井虚拟现实系统具有交互性、沉浸感和构想性等特点^[19-20], 在VR应用中实现了以下功能:

①虚拟设备库显示: 该库包含了RLWI系统所有的虚拟设备, 并且提供搜索功能, 可以根据不同的搜索条件(例如, 设备类型、大小、名称、ID)找到所需的设备; 设备按类别分类, 可以随时查看设备参数,

以及快速定位到设备监控界面。

②作业实时监控: 在RLWI虚拟现实系统中, 所有关键设备都有独立的监控界面, 如当连续油管进行下入作业时, 操作者可利用HTC Vive设备实现工人的行走, 通过访问MySQL数据库, 显示设备性能参数、对应的工艺信息等; 在图形用户交互界面监控卷筒的转动速度、海流速度, 不同工况下作业船的偏移量、无隔水管的应力应变变化等。

③虚实交互控制: 系统通过搭建虚实数据交互通道, 实现虚拟实体与物理实体的交互控制, 形成系统控制闭环; 并利用物联网技术通过PLC控制器采集电机转速, 由OPC UA协议传输卷筒电机和注入器电机的控制数据, 通过控制卷筒的收放速度、上下注入器的注入速度, 从而控制连续油管的下放和起出速度。

④故障诊断: 利用深度学习算法构建修井作业响应模型, 根据不同的作业服务数据对不同修井工况进行故障预警与维护分析, 并将诊断信息通过C#脚本嵌入Unity 3D。通过云端服务器进行可视化, 来显示故障预警、常规维护分析结果, 从而使操作人员及时调整作业策略。

⑤服务决策: 结合MATLAB软件对修井设备异常数据做出分析决策, 可以根据分析结果及时向修井作业设备下达应急指令; 并且建立修井作业规则模型以制定安全评价方法, 完成修井作业危险源辨识评价,

并提出相应的控制措施。

4.2 应用场景

①作业远程监控：由于海洋RLWI修井作业存在一定风险，为保证人员安全，各大石油公司在远程监控方面都有巨大需求。基于数字孪生五维模型采用虚拟现实技术构建可视化的修井作业远程监控系统，通过读取修井设备传感器、控制系统等实时参数，建立设备历史数据库；根据设备历史数据，开展整个设备的健康度评价，并基于人工智能技术实现故障预测；基于预测结果，对修井设备维护策略进行优化，以降低因停机作业带来的损失，避免安全事故的发生。

②从业安全培训系统：由于RLWI修井虚拟现实系统功能特点，该系统在修井作业工作人员培训上应用居多。RLWI修井虚拟现实系统可为不同的石油企业提供符合培训要求的虚拟仿真模拟解决方案，利用虚拟现实技术开发修井工作人员从业安全培训系统，包括理论培训、实际作业操作培训和安全演练培训。在理论培训中，工作人员可对修井作业的相关理论知识进行学习，如修井相关工作的力学理论知识、起重知识、连续油管铺设知识等；在实际操作培训中，系统可以真实地模拟修井设备的运行，如滚筒转动、连续油管下放、井控装置回收等不同设备工作状态；在安全演练培训中，系统包含海洋修井常见的作业事故，如连续油管疲劳折断、火灾、井喷等场景，高度还原灾害发生时的状况。培训系统利用人机交互技术提高操作人员对修井设备的认知、提高工作人员灾害应急

处理能力、降低时间成本，并可实现对操作人员的远程培训。

5 结论

本文提出一种RLWI修井的虚拟现实系统框架，通过构建RLWI修井虚拟现实系统实现对修井作业流程的虚实交互等，从而降低修井成本、提高作业效率以及提高作业安全性和智能性。

针对海洋修井作业工况提出海洋RLWI修井虚拟现实系统解决方案，包括修井作业可视化、设备数据监控、虚拟现实交互控制、作业决策服务等。结合虚拟现实技术、装备相关参数和外形特征等，通过Unity 3D虚拟现实等软件研究并建立了海洋RLWI三维动态虚拟仿真模型，实现了海洋RLWI系统作业可视化；基于PLC硬件实现物理设备与RLWI修井虚拟现实系统之间的信息传递，实时地模拟海洋RLWI修井系统的运行状态以及运行参数的改变情况；同时，借助HTC Vive硬件，通过Unity 3D与MATLAB通信，完成了基于VR的海洋RLWI修井工程的沉浸式交互控制。

利用Unity 3D二次开发的海洋RLWI修井虚拟现实系统具有沉浸感强、三维性高、交互性强等特点。漫游以及动态仿真等功能对实现修井作业虚拟培训、海洋修井安全管理、智能决策等具有重要意义，同时也为其他行业的虚拟现实系统的开发提供参考。

参考文献

- [1] BAKKER S, VRALSTAD T, TOMASGARD A. An optimization model for the planning of offshore plug and abandonment campaigns[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, 180: 369–379.
- [2] HAHEIM S, HOEN C, HEIGRE B, et al. Riserless coiled-tubing well intervention[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OnePetro, 2003.
- [3] FJAERTOFT L, SONSTABO G. Success from subsea riserless well interventions[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [4] 李俊. 无隔水管修井作业装备发展概况及趋势[J]. 海洋工程装备与技术. 2019;6(1):429433. [LI J. Development overview and trend of rise-free workover equipment[J]. Marine Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(1): 429–433.]
- [5] HOEN C, HAHEIM S A. Coiled tubing and vessel motions for riserless coiled tubing systems[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas: OnePetro, 2004.
- [6] QIA T M. Futuristic approach to riserless plug and abandonment operations[D]. Stavanger: University of Stavanger, Norway, 2017.
- [7] 王文明, 侯春来, 武振宇, 等. 海洋无隔水管修井的数字孪生框架与可视化交互[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(02): 423–431. [WANG W M, HOU C L, WU Z Y, et al. Frame and visualization for digital twin of marine riserless well intervention[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(02): 423–431.]
- [8] TOFTE B L, VENNEMANN O, MITCHELL F, et al. How digital technology and standardisation can improve offshore operations[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OnePetro, 2019.

- [9] ABU HALEEQA A, MCINTYRE S, AL AFIFI S, et al. Incident command virtual reality ICVR immersive training system[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: OnePetro, 2018.
- [10] FERRARA P, RICCI MACCARINI G, POLONI R, et al. Virtual reality: New concepts for virtual drilling environment and well digital twin[C]//International Petroleum Technology Conference. Dhahran: OnePetro, 2020.
- [11] 王同良. 油气行业数字化转型实践与思考[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(01): 29–33.[WANG T L. Practice and thinking of oil and gas industrial digitalization transformation[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(01): 29–33.]
- [12] RETNANTO A, FADLELMULA M, ALYAFEI N, et al. Active student engagement in learning-using virtual reality technology to develop professional skills for petroleum engineering education[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Calgary: OnePetro, 2019.
- [13] 杜鹏, 石江超, 韩兵兵. 基于虚拟现实的钻井船设备关键部件装配系统的实现[J]. 中国水运, 2020, 02: 44–46.[DU P, SHI J C, HAN B B. Implementation of key components assembly system of drilling ship equipment based on virtual reality[J]. China Water Transport, 2020, 02: 44–46.]
- [14] 霍爱清, 李少辉, 李浩平. 基于Unity 3D的钻井工程三维动态仿真[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(06): 79–83. [HUO A Q, LI S H, LI H P. Three-dimensional dynamic simulation of drilling engineering based on Unity3D[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2018, 33(06): 79–83.]
- [15] BELLALOUNA F. Industrial case studies for digital transformation of engineering processes using the virtual reality technology[J]. Procedia CIRP, 2020, 90: 636–641.
- [16] 张萍萍. 基于Unity引擎的制造单元仿真系统的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2018. [ZHANG P P. Design and implementation of manufacturing unit simulation system based on Unity engine[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [17] 王蕾. 基于混合现实的虚拟拆装系统的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2020. [WANG L. Design and implementation of virtual disassembly system based on mixed reality[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [18] 温子燊, 刘莹. 基于Unity3D引擎的VR用户交互设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(03): 60–61. [WEN Z M, LIU Y. The design and implement of user interaction for VR based on Unity 3D[J]. Information and Computer, 2020, 32(03): 60–61.]
- [19] 舒俊. 基于Unity3D与HTC Vive的校园展示及交互系统实现[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019. [SHU J. Campus display and interactive system implementation based on Unity3D and HTC Vive[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.]
- [20] GAFFARY Y, GOUIS B L, MARCHAL M, et al. AR feels “softer” than VR: Haptic perception of stiffness in augmented versus virtual reality[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 1–1.

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)