

◀海洋石油装备▶

基于虚拟现实技术的深水钻机虚拟操作系统*

林 康^{1,2} 张宜阳³ 罗 磊^{1,2} 于兴军^{1,2} 王 议^{1,2} 金志雄⁴ 王 飞^{1,2}

(1. 宝鸡石油机械有限责任公司 2. 国家油气钻井装备工程技术研究中心 3. 陕西省电力科学研究院 4. 西部钻探工程有限公司设备处)

摘要：自动化钻井装备在国产化研制中，若各设备控制系统的软件在逻辑保护和运动轨迹解算等方面出现错误，则容易导致设备在联调试验过程中出现安全事故。为此，研制了深水钻机虚拟操作系统。该系统以 3DVIA Virtools 作为虚拟现实技术开发平台，并综合应用工业自动化、工业网络通信和大屏拼接等技术，可对石油钻井装备的联合作业流程进行仿真，从而对钻机总体配置方案和布局进行优化；在新开发设备未进行机电液联调试验前，可通过各设备的虚拟样机提前进行控制程序的辅助测试，降低机电液联调试验风险。该系统在现场应用中缩短了试验调试时间，降低了产品研制成本，取得了良好的效果。最后指出，基于交互式的深水钻机虚拟操作系统是一种全新的钻井司钻培训模式。

关键词：虚拟操作系统；深水钻机；虚拟现实；辅助测试；虚拟培训；仿真

中图分类号：TE951 **文献标识码：**A **doi：**10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.06.013

Virtual Driller’s Operating System for Deepwater Drilling Based on Virtual Reality

Lin Kang^{1,2} Zhang Yiyang³ Luo Lei^{1,2} Yu Xingjun^{1,2} Wang Yi^{1,2} Jin Zhixiong⁴ Wang Fei^{1,2}

(1. CNPC Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd.; 2. National Engineering Research Center for Oil and Gas Drilling Equipment; 3. Shaanxi Province Electric Power Research Institute; 4. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited)

Abstract: During domestic development of automated drilling equipment, if the control system software for each device shows error in the protection logic and trajectory solver, safety incident of device could be easily raised in joint debugging test. To address the issue, a virtual driller’s operating system for deepwater drilling rig has been developed. Adopting 3DVIA Virtools as the virtual reality technology development platform, combined with industrial automation, industrial networking communications and large-screen technology, the system could simulate the joint work flow of drilling equipment, thus optimize the rig overall configuration and layout. Before the joint test of newly developed electro-hydraulic device, assist test of control program of each device’s virtual prototype could be conducted to reduce the risk of electro-hydraulic joint test. The field application of the system has achieved good results with shortened test debug time and reduced product development costs. Finally, it is indicated that, the interaction-based virtual driller’s operating system for deepwater drilling is a novel driller training mode.

Key words: virtual driller’s operating system; deepwater drilling rig; virtual reality; assisting test; virtual training; simulation

0 引 言

随着常规陆地油气资源的枯竭，钻井作业已经

逐步向海洋深水区域发展，深水石油钻机由于其配备了抓管机、动力猫道、排管机、铁钻工和顶驱等多种自动化钻井装备，作业效率等较常规钻机都有大幅提升，并朝着自动化、信息化和集成化的方向

* 基金项目：国家 863 计划项目“深水钻机与钻柱自动化处理关键技术研究”（2012AA09A203）。

发展^[1]。目前上述自动化钻井装备还大多被国外公司所垄断^[2]。由于上述装备都具有体积大、动作复杂以及运动幅度大等特点，在国产化研制过程中，若各设备控制系统的软件在逻辑保护和运动轨迹解算等方面出现错误及不合理，则容易导致设备在联调试验过程中出现安全事故，进而延长研发周期并增加研制成本。同时，在设备研制成功交付用户使用前的上岗培训，也可能由于对设备不熟悉而导致操作不当出现安全隐患。

目前，在军事、航空航天和轨道交通等工业领域广泛应用虚拟现实技术开发虚拟培训装置，用于虚拟培训操作人员，提高培训安全度及降低成本投入^[3]。笔者结合国家高技术研究发展（863）计划项目“深水钻机与钻柱自动化处理关键技术研究”的任务要求，开展了基于 3DVIA Virtools 虚拟现实技术平台的深水钻机虚拟操作系统研制工作。该系统不仅可用于深水钻机司钻人员的虚拟培训，更重要的作用是在各个自动化钻井装备控制系统研制过程中，用于机电液联调试验前辅助测试电气控制系统的 PLC 控制程序及 WinCC 人机界面程序的正确性与合理性，降低联调试验的风险，缩短研制周期，降低研制成本。

1 系统设计

深水钻机虚拟操作系统以 3DVIA Virtools 作为虚拟现实技术开发平台，并综合应用工业自动化、工业网络通信和大屏拼接等技术。3DVIA Virtools 是法国达索公司旗下虚拟现实技术平台，Virtools Dev 为其开发环境，不仅提供 450 多个行为交互模块（Building Blocks，简称 BBs），用于拖放方式的快速构成仿真程序，同时提供 VSL 脚本语言以及结合 C++ 语言的 SDK 编程方法，程序开发简便灵活，比基于 OpenGL 技术更容易上手且开发速度更快^[4-5]。

结合深水钻机产品控制系统涵盖的 3 个架构层级：现场设备层、现场控制层及过程监控层^[6]，本系统总体上相应地架构为 3 个子系统：虚拟样机子系统、集成控制子系统和集成司钻子系统。其中，集成司钻子系统和集成控制子系统均为所开发的深水钻机工程化产品，只是控制对象变成虚拟样机；虚拟样机是在 3DVIA Virtools 平台下，基于与实际深水钻机设备等比例三维模型而开发的仿真程序，不仅可通过集成控制子系统的控制输出而三维地模拟深水钻机各装备的行为功能，还可向集成控

制子系统以虚拟传感器的形式返回各装备的运动状态信息。

1.1 系统主要功能

1.1.1 辅助测试控制系统

在新开发的深水钻机各自动化装备控制系统进行实物产品联调试验前，可通过本系统预先进行基于数字样机程序的辅助测试。辅助测试具体流程如图 1 所示。

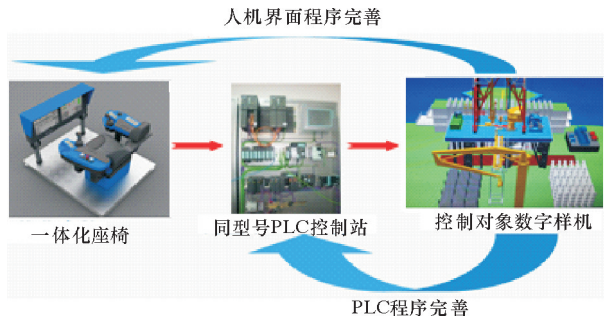


图 1 辅助测试流程图

Fig. 1 Aided test flowchart

首先通过操控与实际产品一致的一体化司钻座椅，司钻座椅上的 WinCC 人机界面程序输出相应的操控指令至集成控制子系统；接着集成控制子系统内的 PLC 控制程序依据功能需求进行逻辑控制和运动控制等处理，并输出相应的控制输出信号至虚拟样机子系统；紧接着虚拟样机子系统内的数字样机根据控制输出进行相应的运动，并将运动状态以虚拟传感器信号返回至集成控制子系统；最后集成控制子系统再将设备的运动状态信息返回至集成司钻子系统，并进行相应显示。

当集成控制子系统中待测试程序的逻辑控制和运动控制等出现不合理或错误时，虚拟样机子系统的数字样机则会显现出与操控指令所不一致的动作和状态。此时就可逐级修改 PLC 控制程序及人机界面程序。修改完成后，可再次测试，直至数字样机的动作正确为止。

1.1.2 虚拟培训司钻操作人员

由于司钻操作人员操控深水钻机钻井系统各个自动化设备的工作过程，并且动力猫道、桥式排管机、铁钻工和顶驱等各设备都具有自动化程度高、远程操控以及交叉作业等特点，所以对司钻操作人员的素质要求特别高，岗前操作培训就显得尤为重要。深水钻机虚拟操作系统在研制成功后，可提供基于数字样机的交互式虚拟司钻操作培训^[7]。

结合行业内深水钻机双司钻的设计理念，系统采用与实际产品一致的主、副双司钻操作台。该双司钻操作台互为备用，可互相切换使用。主司钻以

操作顶驱、绞车、钻井泵、转盘、动力卡瓦和吊卡等常规钻井装备为主；副司钻以操作桥式排管机、动力猫道、鹰爪机、轨道式铁钻工和动力鼠洞等管柱自动化设备为主。

系统不仅可以实现各个单元设备的独立操作培训，还可以完成管柱输送、接立根和起下钻等钻井工艺过程的虚拟培训。同时为提高用户体验，在集成司钻子系统中增加虚拟工业电视监控（虚拟 CCTV）功能，用于模拟实际的工业电视监控系统，提供单路或 4 路摄像头的实时画面显示。

1.2 系统硬件物理架构

深水钻机虚拟操作系统的 3 个子系统硬件采用模块化设计，模块之间通过集成控制子系统内的工业以太网交换机完成连接，实现彼此之间数据通信，系统总的硬件物理架构如图 2 所示。

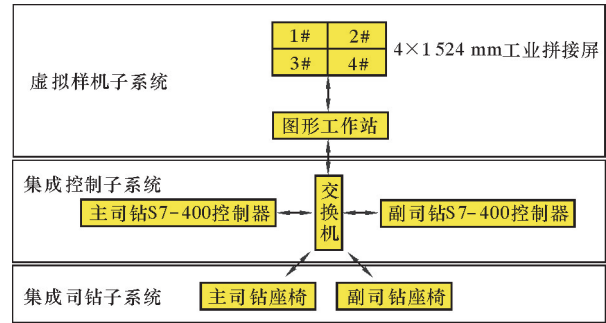


图 2 系统硬件物理架构图

Fig. 2 Physical structure chart of system hardware

虚拟样机子系统硬件主要由 1 台高性能图形工作站及 4 台 1 524 mm（60 in）工业拼接屏组成（见图 3）。集成控制子系统主要由 2 套西门子 S7-400 控制器和 1 套工业以太网交换机组成。集成司钻子系统硬件主要由 2 套司钻座椅和 1 套公共台组成。每套司钻座椅配套 2 个 483 mm（19 in）工业操作显示屏、2 套手柄、3 个工业键盘、1 个轨迹球以及急停开关等元器件。为了使系统整体整齐美观、拆装方便，将虚拟样机子系统的图形工作站、



图 3 虚拟样机子系统硬件图

Fig. 3 The hardware virtual sub system

集成控制子系统硬件及其他辅助电气元件都安装在拼接屏背后的柜体内部。经过系列组装接线和调试，最终系统产品如图 4 所示。



图 4 深水钻机虚拟操作系统产品图

Fig. 4 Virtual operating system product for deepwater drilling rig

1.3 系统软件逻辑架构

按照系统总体功能需求分析，对系统软件进行各个功能模块设计，如图 5 所示。

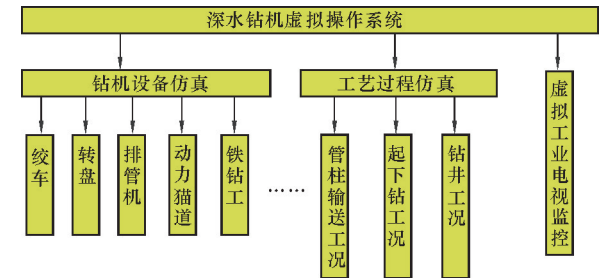


图 5 深水钻机虚拟操作系统软件功能模块图

Fig. 5 Software function block chart of virtual operating system

基于以上系统软件功能模块需求分析，对 3 个子系统的程序进行总体逻辑架构，如图 6 所示。

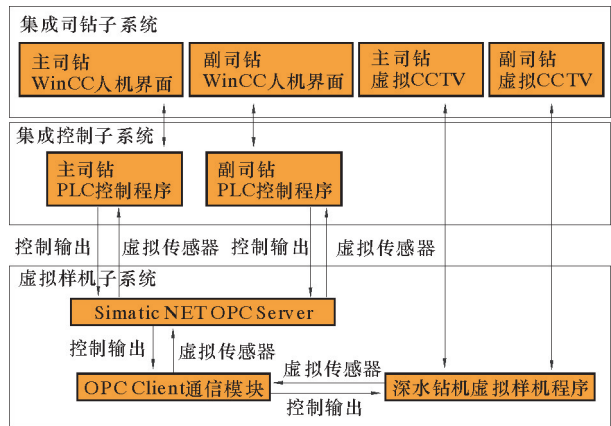


图 6 系统软件逻辑架构图

Fig. 6 The logic chart of system software

1.3.1 集成司钻子系统

每套司钻座椅上都开发同样的 WinCC 人机界面程序和虚拟工业电视监控程序（虚拟 CCTV），

并可根据模式选择当前座椅角色是主司钻还是副司钻。WinCC 人机界面程序通过 S7 通信的 TCP/IP 通道与 PLC 控制程序完成通信。虚拟 CCTV 与深水钻机虚拟样机程序采用 C/S 架构，通过 3DVIA Virtools 软件的 Multiuser Server 模块实现数据通信^[8]。

1.3.2 集成控制子系统

集成控制子系统的 PLC 控制程序由 2 套 PLC 控制程序组成，即主、副司钻 PLC 控制程序。主司钻 PLC 控制程序包括顶驱、绞车、转盘、吊卡和动力卡瓦等主司钻操控设备的控制程序；副司钻 PLC 控制程序包括桥式排管机、鹰爪机、铁钻工、鼠洞和动力猫道等副司钻操控设备的控制程序。

1.3.3 虚拟样机子系统

虚拟样机子系统主要三维仿真水平动力猫道、轨道式铁钻工、桥式排管机、鹰爪机、鼠洞、顶驱、卡瓦和抓管机等装备。图 7 为轨道式铁钻工虚拟样机图。系统虚拟样机总体图如图 8 所示。

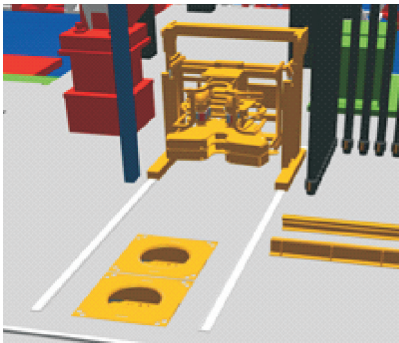


图 7 轨道式铁钻工虚拟样机图

Fig. 7 Rail type iron roughneck virtual prototype

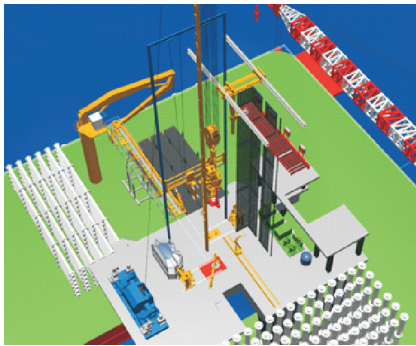


图 8 系统虚拟样机总体图

Fig. 8 Overall view of system virtual prototype

虚拟样机子系统在软件上主要由 Simatic NET OPC Server、OPC Client 通信模块和深水钻机虚拟样机程序等构成。Simatic NET OPC Server 和 OPC Client 通信模块构成 OPC 通信，用于和集成控制子系统的 PLC 控制程序完成数据通信。Simatic NET

OPC Server 通过西门子的 Simatic NET 软件包安装获得。OPC Client 是基于 3DVIA Virtools SDK 和 OPC 规范进行二次开发而得的插件。深水钻机虚拟样机程序通过 OPC Client 通信模块读取来自 PLC 控制程序的输出信号，模拟设备实际的行为功能，并将运动状态以虚拟传感器信号通过 OPC Client 通信模块返回至 PLC 控制程序。深水钻机虚拟样机程序开发时，首先通过 3DS MAX 平台进行深水钻机三维建模，接着导出模型至 3DVIA Virtools 平台上进行虚拟样机程序开发。

2 关键技术

2.1 设备之间碰撞检测

虚拟样机子系统中涉及到大量的碰撞检测问题，如管柱输送过程，管柱与猫道、抓管机、桥式排管机等设备之间的交互就涉及大量碰撞检测。在 3DVIA Virtools 平台上可采用基于球形包围盒检测法的碰撞检测、基于 AABB 检测法的碰撞检测、基于 Grid（网格）碰撞检测等方法来实现碰撞检测^[9]。在虚拟样机子系统中主要采用基于 AABB 检测法的碰撞检测技术解决涉及碰撞检测的问题，主要步骤包括：①将一个运动物体在运动过程中会发生碰撞的其他物体添加到碰撞名单中；②采用基于 AABB 检测方法，实时检测运动物体与碰撞名单中物体的位置关系；③当发生碰撞时，采取停止运动和报警提示等方式处理碰撞问题。

2.2 虚拟 CCTV 的分布式通信

3DVIA Virtools 的 Multiuser Server 模块提供独立网络服务器及点对点局域网服务器 2 种方式来构建通信服务器^[10]。系统中虚拟 CCTV 只需在局域网内通信，因此使用点对点局域网服务器构建通信服务器。Multiuser Server 模块支持使用 TCP、UDP 及 Predicted（预估算法）3 种通信协议方式实现 C/S 之间分布式对象的数据通信。在系统研制过程中，分别采用 3 种方式实现，根据试验得出使用 UDP 协议的效果更好，具有 TCP 协议不具有的速度优势及 Predicted 不具有的实时性。

2.3 钻井钢丝绳的柔性线缆建模及运动仿真

钻井钢丝绳在绞车滚筒缠绕过程中，涉及到虚拟现实中柔性线缆建模及运动仿真技术。钻井钢丝绳的柔性线缆建模过程：首先将连续的钢丝绳离散化为一系列接头控制节点；接着将这些接头控制节点进行曲线平滑连接处理^[11]。为了得到更好的运行性能及曲线平滑效果，应合理处理节点之间的距

离,距离过大会导致曲线平滑不逼真,距离过小会降低运行性能。经过试验测试,节点之间的距离在10 cm左右较合理。

钢丝绳的运动仿真过程:首先将离散化的控制节点集以螺旋线形式组成钢丝绳缠绕在绞车上;接着根据绞车的旋转运动,增减螺旋线上的控制节点,进而模拟出钢丝绳在绞车滚筒中的缠绕过程。

3 应用

通过软硬件联调,深水钻机虚拟操作系统已经实现深水钻机各个设备的虚拟操作培训功能,各参数满足国家863计划项目“深水钻机与钻柱自动化处理关键技术研究”中对该系统的各项技术指标要求。

在系统研制过程中,动力猫道、铁钻工和平台抓管机等设备的电气控制系统都首先使用深水钻机虚拟操作系统进行辅助测试,排除逻辑控制和运动控制解算中出现的错误及不合理;接着进行实物联调试验,以完善控制系统的各项功能。

宝鸡石油机械有限责任公司积极地将深水钻机虚拟操作系统涉及到的技术应用到陆地钻机管柱自动化设备的研制中,进而研制出陆地钻机虚拟操作系统,包括动力猫道、伸缩式铁钻工、二层台自动化井架工、动力卡瓦、吊卡、井口扶正手和顶驱等钻井设备。由于首先通过虚拟操作系统辅助测试控制系统,同样极大地降低了陆地管柱自动化设备联调试验的风险,缩短了研制周期,降低了成本。目前已累计实现了10余套此类钻机产品的商业化配套,包括川庆钻探、大庆钻探和渤海钻探等;同时,基于该平台,也已经为川庆钻探和渤海钻探等用户提供了钻机司钻虚拟培训服务,均取得了良好的效果。

4 结论

(1)应用虚拟现实技术,可对石油钻井装备的联合作业流程进行仿真,从而对钻机总体配置方案和布局进行优化。

(2)在新开发设备未进行机电液联调试验前,可通过各设备的虚拟样机提前进行控制程序的辅助测试,从而降低机电液联调试验过程中由于控制逻辑错误或功能不完善而导致的试验风险,提高系统安全性,同时缩短试验调试时间,降低产品研制

成本。

(3)在基于交互式的深水钻机虚拟操作系统上,通过操控与实际产品一样的司钻座椅终端及设备执行逻辑过程,并通过大屏拼接屏实时地三维形象显示,这种全新的钻井司钻培训模式可取得良好的培训效果。

参考文献

- [1] 王定亚,丁莉萍.海洋钻井平台技术现状与发展趋势[J].石油机械,2010,38(4):69-72.
- [2] 于兴军,宋志刚,魏培静,等.国内石油钻机自动化技术现状与建议[J].石油机械,2014,42(11):25-29.
- [3] 胡小强.虚拟现实技术与应用[M].北京:高等教育出版社,2004:13-24.
- [4] 王武礼,李瑞民,王延江.基于Virtools技术的钻井三维场景动态仿真[J].科学技术与工程,2010,10(30):7554-7558.
- [5] 陈浩,张桂香,张庆洪.基于Virtools的机械装备虚拟拆卸系统研究[J].现代制造工程,2010(1):30-34.
- [6] 崔坚.西门子工业网络通信指南(上册)[M].北京:机械工业出版社,2004:1-6.
- [7] 任伟建,滕飞,周庆,等.基于虚拟现实技术的油田钻井系统仿真研究[J].科学技术与工程,2011,11(13):2981-2985.
- [8] 王乐,陈定方,李勋祥.基于Virtools的分布式虚拟驾驶研究[J].交通与计算机,2005,23(6):72-75.
- [9] 彭巧梅,彭双根,陈玉德.基于Virtools的碰撞检测技术的研究与应用[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2007,25(3):325-329.
- [10] 陆春雨,王忠芝.基于Virtools的双人联机协作系统的研究[J].微计算机应用,2009,30(2):53-59.
- [11] 杨琳,朱元昌,邸彦强.基于Virtools的柔性线缆建模及其运动仿真[J].微电子学与计算机,2009,26(9):153-156.

第一作者简介:林康,工程师,生于1984年,2008年毕业于大庆石油学院电气信息工程学院自动化专业,现从事钻机电气自动化控制及其相关产品的设计开发工作。地址:(721002)陕西省宝鸡市。电话:(0917)3462721。E-mail:linkang1985@163.com。

收稿日期:2016-03-07

(本文编辑 刘峰)