

# 深水闸阀液压执行机构可视化位置指示器的设计及仿真

彭飞<sup>1</sup>,王珏<sup>2</sup>,段梦兰<sup>1</sup>,朱春丽<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(北京)海洋油气研究中心,北京 102249;2.中海石油研究总院,北京 100027)

**摘要:**深水油气的开采已日益成为各国关注的重点,对于深水闸板阀,由于其在无潜条件下由液压执行机构操作,可视化位置指示器是其重要组成部分,国内对于该项技术的研究还处于空白阶段。设计的闸板阀可视化位置指示器可以在1500m水深条件下实现闸板位置实时指示,可视性好,可靠性高,便于水上操作人员进行相应的控制。通过ADAMS和Abaqus对其进行了运动学、动力学仿真和强度分析,对关键结构进行了强度分析验证其满足强度要求,并通过运动学仿真验证了机构在运动中无阻滞现象,进一步验证设计的合理性,为其传动机构的设计及样机的研制提供了理论依据。

**关键词:**闸板阀;可视化位置指示器;ADAMS;Abaqus;强度分析;动力学

**中图分类号:**TH16 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2014)03-0071-04

## Design and Simulation of the Visual Position Indicator for the Hydraulic Actuator of a Deep-Water Gate Valve

PENG Fei<sup>1</sup>, WANG Jue<sup>2</sup>, DUAN Meng-lan<sup>1</sup>, ZHU Chun-li<sup>2</sup>

(1.Offshore Oil and Gas Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2.CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** The exploitation of deep-water oil and gas has increasingly become the focus of concern in all countries. For deep-water gate valves, due to its operation by the hydraulic actuator in the condition of no diving people, the visual position indicator is one of the most important parts, and research on this technology in our country is still blank. The visual position indicator for the gate valve can be in 1500m depth conditions to realize real-time position indication which has good visibility and high reliability, so that operation-persons on the surface can carry on the corresponding control. Based on the kinematics, simulation and strength analysis with ADAMS and Abaqus, strength analysis for the key structures has been made to verify to meet the strength requirement, and no blocking phenomenon has been also verified in the operation process through the kinematics simulation, which further proves the rationality of the design and provides a theoretical basis for the hydraulic system design and the prototype development.

**Key Words:** Gate Valve; Visual Position Indicator; ADAMS; Abaqus; Strength Analysis; Kinematics; Dynamics

## 1 引言

随着海洋石油天然气工业的发展,深水区域的油气资源不断地被勘探和发现,水下生产系统已经成为一种重要的深水开发模式。与此同时,水下控制系统占据重要的地位,尤其是深水阀门的应用和需求量日趋增加<sup>[1-3]</sup>。由于深水闸板阀长期工作在海水环境,在深水环境中操作人员无法进行现场操作,因此有时需要ROV辅助液压执行机构控制水下闸板阀的开启和关闭。目前对水下闸板阀进行远程控制应用最广泛的是液压执行机构。

水下闸板阀液压执行机构与陆地闸板阀的液压执行机构相比,结构原理基本相同,但由于工作环境不同,因此应主要考虑海水腐蚀及深水压力对执行机构的影响<sup>[4]</sup>。另外考虑水下闸板阀执行机构的故障安全性,多数闸阀还要为执行机构配备标准的ROV接口,以便于水下机器人对水下闸板阀进行操作。此时闸板阀需要配置相应的可视化位置指示器,以便于工作人员根据指示

机构位置来进行接下来的相应操作<sup>[4-7]</sup>。

相比国外来讲,我国对深水闸板阀的研究起步较晚,目前在国内研究仍属空白。通过对国内外产品的分析研究,结果表明阀门ROV接口多为移动式,且指示机构指针为直行程运动,其运动空间较大,且不易观察。针对应用于深水1500m、油气压力为5000psi的6英寸管道的闸板阀,笔者设计了一种新型闸板阀可视化位置指示器,主要针对以下三个方面进行了自主设计:(1)在满足密封要求的条件下,设计的可视化位置指示器将不随ROV接口一起运动,保证指示机构固定。(2)设计的可视化位置指示器位于ROV便于观察的位置,保证其可视性。(3)避免了指针的大范围移动,防止与其他部件发生干涉。(4)要求指示机构可以在10s的操作时间下实现开启或关闭工作。

## 2 闸板阀可视化位置指示器简介

从对国内外的产品对比分析情况来看,对于水下闸板阀液

来稿日期:2013-08-05

基金项目:国家重大科技专项中子课题《水下控制系统与水下阀门及执行机构关键技术》(2012ZX05026-003-01)

作者简介:彭飞,(1988-),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向:海洋石油设备设计制造;

段梦兰,(1966-),男,北京人,博士,教授,主要研究方向:海洋结构工程

压执行机构研发以及制造的技术国外已经比较成熟,许多知名的海洋工程设备制造公司均有属于自己知识产权的系列产品,并具有丰富的成功应用案例。如某公司的M3000系列<sup>[9]</sup>,某公司的Ring-O系列<sup>[10]</sup>以及某公司<sup>[10]</sup>的相关产品等。

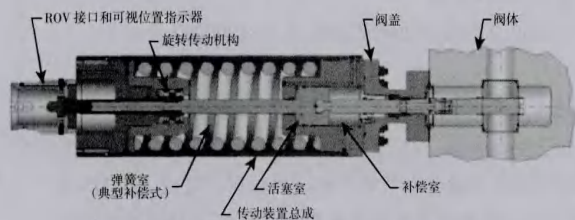


图1 某公司100系列闸板阀执行机构  
Fig.1 100 Series Gate Valve Actuator of A Company

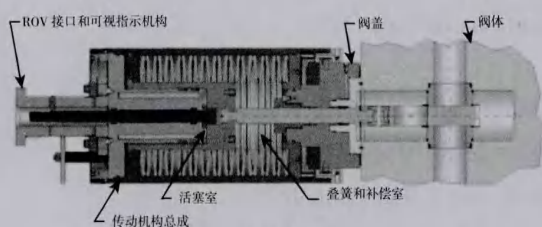


图2 某公司M3000闸板阀执行机构  
Fig.2 M3000 Series Gate Valve Actuator of A Company

目前闸板阀指示机构工作原理虽然各异,但功能大致相同。其目的是通过对水下指示器的观察,判断闸板阀闸板的实际相对位置,海面上的操作人员从而通过液压执行机构进行接下来的操作,以顺利完成闸板阀闸板开启或关闭操作。

### 3 可视化位置指示器方案设计

为了解决上述难点,针对应用于深水1500m、油气压力为5000psi的6英寸管道的闸板阀,设计了一种新型闸板阀液压执行机构可视化位置指示器,其安装状态,如图3所示。外观结构,如图4、图5所示。

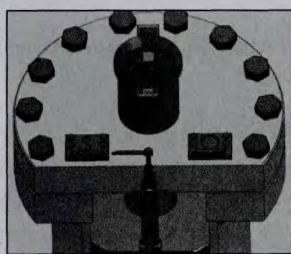
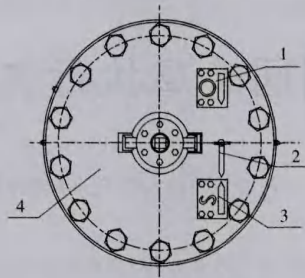


图3 可视化位置指示器装配图  
Fig.3 Assembling Drawing of a Visual Position Indicator



图4 可视化位置指示器整体图  
Fig.4 Visual Position Indicator Diagram as a Whole



1.打开指示块 2.指针 3.关闭指示块 4.上端盖。  
图5 可视化位置指示器装配上视图

Fig.5 Visual Position Indicator Diagram on the Assembling Top View  
设计的可视化位置指示器工作原理如下:

首先需要说明的是拉杆的下端通过特殊的机械结构已保证其与闸板运动一致,该特殊结构不作叙述。当处于关闭状态的闸板阀需要开启时,拉杆与闸板运动一致,随其同时向下运动相同的距离,从而带动嵌在拉杆里的传动销钉在开有垂向方形槽的定位筒中下移。由于旋转套筒被固定在固定套筒里,其只能相对固定套筒旋转,因此传动销钉的运动致使开有旋转槽的旋转套筒被迫转动,进而在连接销钉的作用下,带动上方的指针逆时针转动180°。指针从S显示方块逆时针旋转至O显示方块,表示闸板从关闭状态运动至开启状态,海面上的操作人员便可判断闸板阀相应的工作状态,实现了实时指示的功能。

同理,当处于开启状态的闸板阀需要关闭时,拉杆随闸板同时向上运动相同的距离,从而带动嵌在在拉杆里的传动销钉在开有垂向方形槽的定位筒中上移,进而致使开有旋转槽的旋转套筒被迫转动,从而在连接销钉的作用下,带动上方的指针顺时针转动180°。指针从O显示方块逆时针旋转至S显示方块,表示闸板从开启状态运动至关闭状态,实现指示功能。

设计的新型可视化位置指示器具有以下优点:

(1)可以实时指示 ROV 传动机构的作用行程,它采用纯机械结构,且工作时不随 ROV 接口一起运动。

(2)设计了易于观察的 ROV 指示块。ROV 指示块位于闸板阀上端盖表面,在 ROV 操作端口附近,便于 ROV 观察。

(3)解决了指针的大范围移动而可能与其他部件干涉的问题。

对于深水闸板阀可视化位置指示器,在设计和应用时须特别注意以下事项:

(1)由于执行机构内腔为液体填充,因此应考虑液体流动不畅产生的阻尼对其功能的影响。

(2)由于旋转轴工作时旋转,因此应防止因摩擦损坏机构。

(3)由于1500m水深时压力较大,应在适当位置设置高压密封圈。

(4)在旋转套筒上设计了螺旋槽,根据设计需要的角度,其旋转套筒的螺距应与工作行程为一定的倍数关系。倍,保证其在 ROV 运动一个行程时,指针相应的。

### 4 基于 Adams 的可视化位置指示器运动仿真

由功能原理可知,我们主要关心两个问题。首先,在闸板运动的一个行程(开启到关闭,或者关闭到开启)中,可视化位置指

示器是否能按照预定的要求转动 180°以实现位置精确指示的功能;其次,作为危险部件的传动销钉和拉杆是否能在使用条件下承受工作载荷。因此有必要对其进行仿真以验证设计的合理性。可视化位置指示器的仿真分析采用 ADAMS 软件,ADAMS 软件向研究者提供一种集建模、求解、可视化于一体的数字化功能<sup>[1]</sup>。由于锁紧机构复杂,所以在 SolidWorks 建模后再导入 ADAMS 中<sup>[2]</sup>。在指示机构模型中,整体的位置预先在 SolidWorks 配合好,由于外套筒、开口销及连接销对运动无影响,以转动副代替。可视化位置指示器的仿真模型,如图 6 所示。定位筒固定在大地上,旋转套筒上端施加一定值的反扭矩以模拟密封及其他摩擦对转动的阻碍影响,旋转套筒与定位筒设置旋转约束,指针与连接轴锁定,连接轴与旋转套筒锁定,传动销钉与拉杆锁定,拉杆与旋转套筒移动副连接,且设置拉杆一定的速度,从而模拟闸板运动。



图 6 锁紧机构仿真模型

Fig.6 Simulation Model of the Locking Mechanism

在仿真中,首先希望了解指针转过的角度与拉杆运动一个行程时的对应关系;其次计算出在运动过程中销钉最大载荷和拉杆所受的拉力。对指示机构的开启和关闭过程进行仿真,由于设计要求阀门在 10s 到 20s 内关闭,且可知时间越短,部件受力越大,所以以 8s 操作时间为计算依据,且设置拉杆先匀加速运动,再匀速运动,最后匀减速运动,仿真结果,如图 7、图 8 所示。

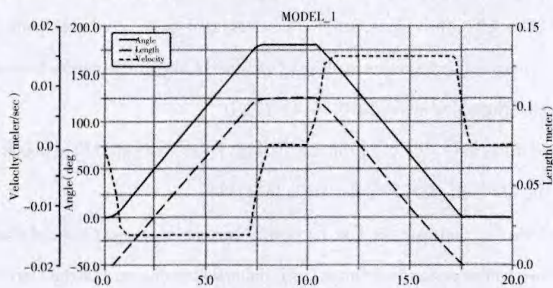


图 7 开启和关闭操作

Fig.7 Opening and Closing Operation

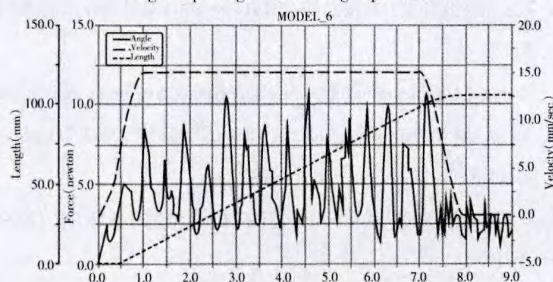


图 8 开启操作

Fig.8 Opening Operation

从图 7 中可以看出前 1s, 拉杆匀加速运动,(1~7)s 匀速运动,之后 1s 匀减速运动。在开启或关闭时,拉杆的行程是 105mm,且一个行程结束时指针正好转过 180°,且加速度值非常小,运动平稳无阻滞现象,满足设计要求。从图 8 中可以看出前 1s,拉杆匀加速运动,(1~7)s 匀速运动,之后 1s 匀减速运动。拉杆在匀速时受力达到最大,最大值为 11N。

### 5 可视化位置指示器强度分析

由设计可知,传动销钉在额定压力下工作时,其与拉杆的配合处是否会破坏是需要考虑的问题。因此,利用 Abaqus 对其进行有限元分析,设置拉杆的受力为上述仿真的最大载荷的二倍。先在 SolidWorks 建模,再导入 Abaqus 对其进行有限元分析,材料为低合金 Cr-Mo-V 钢,弹性模量为 2.10GPa,泊松比为 0.3,拉杆圆周边设置只可轴向运动,销钉外端面固定,且对其施加 15GPa 的外压,接触摩擦系数为 0.2,拉杆下端面施加相应的力,具体的约束和网格划分,如图 9 所示。分析得出的应力应变的结果,如图 10、图 11 所示。

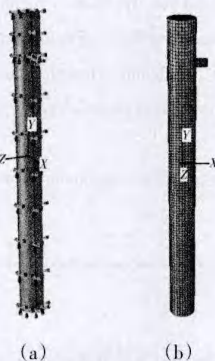


图 9 约束及网格划分

Fig.9 Constraints and Meshing

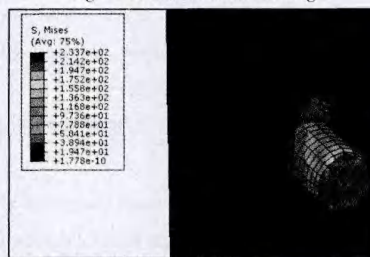


图 10 整体应力云图

Fig.10 The Overall Stress Nephogram

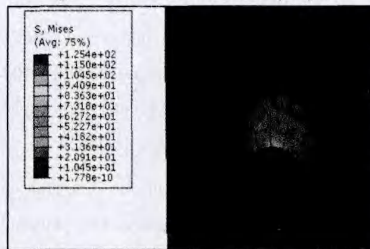


图 11 拉杆应力云图

Fig.11 Stress Nephogram of the Bar

从分析结果可以看出拉杆和销钉的最大应力为 233.7mm, 小于材料的许用应力,满足强度要求。最大变形量为 0.22mm, 相对行程 105mm 可以忽略不计, 因此对实时指示功能的实现没有影响,满足设计要求。

## 6 结论

针对应用于深水 1500m、油气压力为 5000 的 6 英寸管道的闸板阀,设计了一种新型闸板阀可视化位置指示器,该机构具有整体为纯机械结构、结构简单紧凑、便于观察,易于加工,实时指示,功能可靠等优点,解决了深水恶劣条件下的难以密封、难以将闸板的直行程转换为角行程等设计难点,提出了新型的可视化位置指示器设计方法,通过对可视化位置指示器整体的运动学和动力学仿真结果分析,并结合对拉杆和销钉进行有限元分析。可知其满足设计要求,进一步验证了设计的合理性和可行性。同时,可视化位置指示器的设计和分析方法为深水阀门的设计及样机的研制奠定了理论基础。

### 参考文献

- [1] Hansen R L, Rickey W P. Evolution of subsea production systems [J]. a worldwide overview. OTC 7628, 1994.
- [2] 李长春, 连琏. 水下生产系统在海洋石油开发中的应用 [J]. 海洋工程, 1995, 13(4): 25-30.  
(Li Chang-chun, Lian Lian. Application of subsea production system in offshore oil development [J]. Offshore Engineering, 1995, 13(4): 25-30.)
- [3] ISO 13628-6: 2006 petroleum and natural gas industries—Design and operation of subsea production systems—part6: subsea production control systems [S].
- [4] ISO 13628-4: 2006 petroleum and natural gas industries—Design and operation of subsea production systems—part4: subsea wellhead and tree equipment [S].
- [5] ISO 13628-8: 2006 petroleum and natural gas industries—Design and operation of subsea production systems—part8: remotely operated vehicle (ROV) interfaces on subsea production systems [S].
- [6] API SPEC 17D: 2011 design and operation of subsea production systems—subsea wellhead and tree equipment [S].
- [7] API SPEC 6D: 2008 petroleum and natural gas industries—specification for pipeline valves [S].
- [8] M3000 internal actuator overview [J]. FMC Technologies.
- [9] Ring-O valves and actuators for subsea service [J]. Cameron.
- [10] Magnum subsea gate valve [J]. Magnum Subsea Systems, 2010.
- [11] 赵玉侠, 狄杰建, 高德文. 基于 ADAMS 的微型管道机器人三维实体运动仿真 [J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(1): 26-27.  
(Zhao Yu-xia, Di Jie-jian, Gao De-wen. 3D Solid kinematics simulation of micro in-pipe robot based on ADAMS [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(1): 26-27.)
- [12] 朱和军, 许永根, 施琴. 基于 PRO/E 和 ADAMS 的并联机构设计与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2011(9): 208-210.  
(Zhu He-jun, Xu Yong-gen, Shi Qin. Design and simulation of parallel mechanism based on PRO/E and ADAMS [J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(9): 208-210.)
- (上接第 70 页)
- [2] 程明, 张运乾, 张建忠. 风力发电机发展现状及研究进展 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 2-3.  
(Cheng Ming, Zhang Yun-qian, Zhang Jian-zhong. Development and research progress of wind power generators [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(3): 2-3.)
- [3] 陈海萍, 孙文磊. 风力发电机叶片的动力特性分析 [J]. 机床与液压, 2010, 38(23): 101-102.  
(Chen Hai-ping, Sun Wen-lei. Dynamic analysis of wind generators blade [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(23): 101-102.)
- [4] 傅程, 王延荣. 风力发电机叶片损伤演化预测方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2009(1): 104-105.  
(Fu Cheng, Wang Yan-rong. Damage evolution prediction of wind turbine blades [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(1): 104-105.)
- [5] 吴玉厚, 宋国仓, 张珂. U 型高处作业平台提升吊点位置分布 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(3): 558.  
(Wu Yu-hou, Song Guo-cang, Zhang Ke. Research on the scattered location of lifting points lifted by U-high working platform [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(3): 558.)
- [6] Lang Jie, Guan Zhi-guang. Design of intelligent automatic leveling control system based on ultrasonic distance measuring technology [C]. Jinan Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007: 1620-1624.
- [7] Hattori K, Fukui M, Jinno M. PLC-based optical add/drop switch with automatic level control [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(17): 2562-2571.
- [8] 张珂, 赵亮, 孙佳. 14m 大型高空作业平台力学性能分析 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(4): 773.  
(Zhang Ke, Zhao Liang, Sun Jia. 14 meters large-scale aerial work platform mechanics performance analysis [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(4): 773.)
- [9] 吴玉厚, 孙佳, 樊玉言. 27m 大跨度作业平台力学性能分析 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2012, 28(2): 347.  
(Wu Yu-hou, Sun Jia, Fan Yu-yan. 27 meters large-span work platform mechanics performance analysis [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2012, 28(2): 347.)
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. GB19115—2003 高处作业吊篮国家标准 [S].  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB19115—2003 Temporarily installed SUS-pended access equipment [S].)
- [11] 吴剑. 振动机械结构优化设计的特性分析 [J]. 铸造设备与工艺, 2009, 6(3): 10.  
(Wu Jian. Optimal structure designing characteristic of vibrating machine [J]. Foundry Equipment and Technology, 2009, 6(3): 10.)