

海底钻井液举升钻井系统监测与控制

何新霞¹, 闫加亮¹, 徐长航²

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东青岛 266580;

2. 中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580)

摘要:海底钻井液举升钻井(SMD)技术可以有效地解决常规深水钻井压力梯度区间较窄的问题,复杂的海洋钻井环境为其实现造成了一系列的控制难题。结合 SMD 系统的组成和基本功能,选择 PXI 系统作为海底钻井液举升钻井监、控系统的硬件平台,基于 Labview 开发 SMD 系统监控程序。结合 SMD 的作业流程和工况特点,根据模糊控制理论,设计实现 SMD 系统模糊控制器,解决 SMD 系统大惯性、大时滞的控制难题。通过海底钻井液举升钻井试验平台对所开发的监控系统性能进行验证。试验结果表明:监测模块可精确测量 SMD 系统的各项运行参数;模糊控制器能够快速有效地保证泵的入口压力维持在某一恒定值附近,系统能可靠地应对井涌、井漏等异常工况的发生。

关键词:深水钻井;海底钻井液举升;圆盘泵;模糊控制;监测

中图分类号:TE 953; TP 272

文献标志码:A

Monitoring and control for subsea mudlift drilling system

HE Xin-xia¹, YAN Jia-liang¹, XU Chang-hang²

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Centre for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Subsea mudlift drilling (SMD) technique may be applied effectively in deep water drilling operation where the difference between the formation pore pressure and fracture pressure is small. A monitoring and control method for SMD was presented. The method is effective in both suppressing interferences which come from various factors in the complex deep water environment, and in proving the robustness of system. Taking into consideration the components and basic functions of SMD systems, PXI module is selected as the hardware platform for monitoring and control sub-system of SMD systems, in which the monitoring and control program is developed based on Labview. By applying fuzzy control method, a new fuzzy controller is designed as the operation procedure to overcome the large inertia and delay time problems in SMD systems. The performance of monitoring and control system is tested and verified in experimental platforms for SMD. Experiment results show that the parameters of the operation processes for SMD systems may be precisely measured by the monitoring module, and the pump inlet pressure can be maintained at nearly a constant level, a crucial property of fast responding systems to critical conditions such as well kick and circulation loss.

Key words: deepwater drilling; subsea mudlift; disk pump; fuzzy control; monitoring

深水常规钻井作业的钻井液密度窗口很窄,增加了钻井工程设计及作业的难度。为了解决这一难题,双梯度钻井技术采取某些措施使同尺寸的井眼中产生两个液柱梯度,从而增大了地层破裂压力和孔隙压力之间的钻井液密度余量,使得在相同液柱压力情况下,钻井深度大大增加^[1-2]。海底钻井液举

升钻井(SMD)系统是双梯度钻井技术的一种实现方式^[3-6],能够消除水深对井底压力的影响,在深水钻井中非常具有优势。但由于海洋钻井具有风险大、环境多变、工况复杂的特点,使得 SMD 钻井过程对监测与控制系统的依赖性非常强,对其可靠性和速动性要求也比一般的钻井过程苛刻^[7-8]。笔者结

合 SMD 的作业流程,针对深水海底钻井液举升系统,设计相应的监测和海底钻井液举升泵控制方案,通过深水海底钻井液举升钻井(SMD)试验平台,对其性能进行验证。

1 SMD 监测与控制系统硬件构成

海底钻井液举升钻井(SMD)主要工作流程如下:隔水管和井眼之间装有一个旋转分离装置,将隔水管和井眼内的两个不同密度的液体隔开,进行钻井作业时,钻井平台上的钻井液泵通过钻杆、钻杆阀、钻头向井眼中打入钻井液,钻井液进入井眼环空并返回井眼上部。由于旋转分离装置的存在,钻井液无法继续进入到隔水管,而是通过与旋转分离装置相连的管线进入海底泵,从旁路管线返回钻井液循环池。只要控制好海底泵的入口压力,即可控制井眼底部液柱压力。根据实际需要,还可增加多路钻井液返回管线或多级泵^[3-6]。

海底钻井液举升系统由海底钻井液举升泵、动力供应、监控系统、钻井液返回管线4部分组成。海底钻井液举升泵采用圆盘泵,圆盘泵不受液体脉动的影响,可用于大颗粒状的液体^[9-10]。动力供应由变频器和水下电机组成。钻井液返回管路是钻井液和岩屑从海底泵返回钻井液回收池的通道,同时可作为水下设备电线电缆的附着体。监控系统是 SMD 系统稳定、协调运行的枢纽,一方面负责对 SMD 系统各项运行参数进行信号采集和处理;另一方面负责对海底钻井液举升泵和各类阀件的启停、运行状态进行控制,主要完成泵的流量调节,使泵的入口压力稳定在某一特定值,确保在钻机钻进、停钻、起下钻过程中泵的入口压力满足作业要求,并能协调系统有效应对井涌、井喷等意外事故。

监控系统硬件平台基于 PXI(PXI extensions for instrumentation)系统来实现,其构成框图^[11]如图1所示。压力变送器安装在旋转分离装置的出口处,

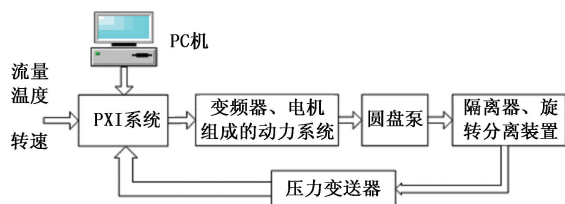


图1 监控系统构成框图

Fig.1 SMD monitoring & control system

对钻井液举升泵的入口压力进行检测,并通过 PXI 板卡反馈给 PXI 系统控制器。控制器根据压力偏差

信号,基于相应的控制算法,通过变频器控制水下电机调节泵的流量和扬程,从而调节泵的入口压力保持在某一恒定值附近。温度、流量、压力、电机的转速转矩信号等 SMD 系统相关运行参数通过 PXI 板卡进行采集。

2 SMD 监测与控制系统软件设计

软件设计基于 LabVIEW 软件来实现,包括监测和控制两大模块。监测模块主要完成对 SMD 系统各项运行参数的采集、信号处理、显示和数据存储功能;控制模块主要完成相应的控制算法编程,实现对钻井液举升泵入口压力的闭环控制。

2.1 监测模块

监测模块主要由系统初始化、串口通信、数据采集、信号处理、数据显示、数据存储和信号输出等子模块构成。

系统初始化模块完成信号采集所需各项参数的设置,包括待采集信号的物理通道、采样率、采样数、物理量转换系数及串口通信指令。转矩转速仪串口通信模块用来监测电动机的转矩与转速,该模块包括两个子 VI:串口通信子 VI 完成对转矩转速仪串口的读写;数据转换子 VI 将接收到的十六进制数按照转矩转速仪的通信协议提取转矩、转速信号,并转换成十进制数据进行显示。数据采集模块接收初始化参数,通过 LabVIEW 软件直接与采集卡进行通信,对相应通道的数据进行采集。信号处理模块完成对所采集信号的分离提取、软件滤波。信号显示模块实现对信号的多样化显示,含两个重要的子 VI:单路选通子 VI 接收按钮组(簇类型)的值选通某一路信号,并在选通该路信号的同时,关断之前已选通的另一路信号;多路选择子 VI 可设定几路信号同时显示在示波器控件中。数据存储模块可根据需要选择不同的模式对运行数据进行存储。信号输出模块输出电磁阀所需的控制信号,通过 3 个 DAQ 助手来完成。

2.2 控制模块

海底钻井液举升泵是一个复杂的被控对象,从控制过程来分析,对钻井液举升泵的控制过程就是对水下电机的控制,间接控制泵的转速,调节泵的流量和扬程,以达到调节泵的入口压力的目的。由于泵输送钻井液本身具有很大的惯性,动态响应慢,使得 SMD 系统成为一个大惯性时滞系统,而且由于工况和工作环境的影响,存在着较多随机不确定性干扰,难以构建精确的数学模型。采用传统的控制策略,不能保证系统的控制品质和有效满足过渡过程短、超调量小、

稳态精度高的控制要求。模糊控制算法具有较强的鲁棒性,干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱,对大惯性、大时滞系统具有较好的控制效果,故选用模糊控制器作为 SMD 系统控制器。

2.2.1 SMD 系统模糊控制器

SMD 钻井液举升系统为双输入-单输出控制系统,将泵的入口压力设定值与实测值之间的偏差 e 和偏差的变化率 de/dt 作为控制器的输入,电机转速的控制量作为输出。模糊控制器结构^[12]如图2

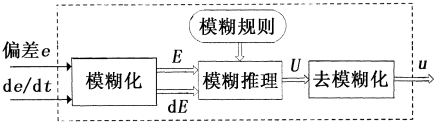


图 2 模糊控制器结构图
Fig.2 Structure of fuzzy controller for SMD system

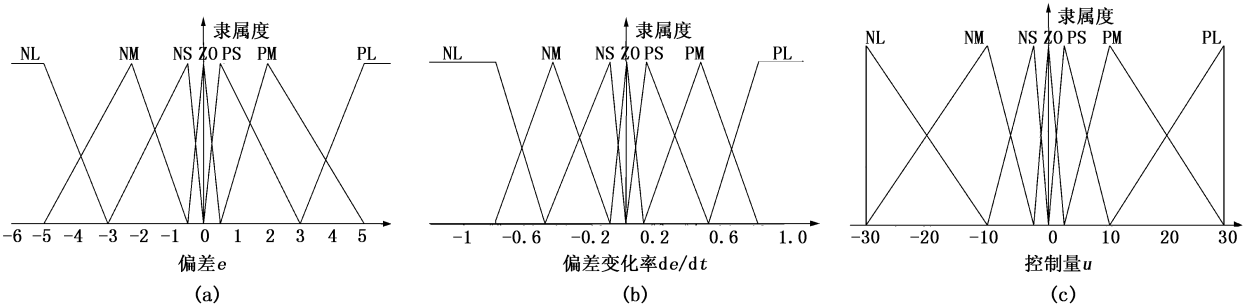


图 3 各变量的隶属度函数
Fig.3 Membership funninn of variable

(2)编写模糊规则库。系统中有两个输入和一个输出,模糊规则写为如下格式:

IF...(条件1) AND...(条件2) THEN...(结果)

规则库采用根据经验形成的一组规则^[13],如表1所示,输入模糊变量 E 和 dE 均有 7 级语言变量,输出模糊变量 U 共有 49 条模糊规则。

表 1 控制系统的模糊规则库(U 值)

Table 1 Fuzzy rules bases of control system(U)							
E	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NL	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PL
PL	ZE	PS	PS	PM	PM	PL	PL

(3)去模糊化。去模糊化常用方法有最大隶属度法、中位数法和重心法。重心法的实质是找出控制作用可能分布的重心,在实际工程中经常使用。采用 LabVIEW 模糊逻辑工具箱提供的重心法对模

所示,模糊控制器的输入量经过模糊化处理,转换为模糊变量值 E 和 dE 。经模糊推理得到模糊输出量 U ,模糊量 U 经去模糊化处理转化为清晰量,得到可操作的确定值 u 。

(1)模糊化接口。模糊化是将模糊控制器输入量的确定值转换为相应模糊语言变量值的过程。控制系统中,设定模糊变量 E 的模糊论域为 $[-6,6]$,模糊变量 dE 的模糊论域为 $[-1,1]$,输出模糊变量 U 的模糊论域为 $[-30,30]$,模糊变量 E 、 dE 及 U 的语言值集合均取: $\{NL(负大),NM(负中),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PM(正中),PL(正大)\}$ 。

将数值转化为上述模糊语言变量值须指定各语言变量值的隶属度函数,经过反复实验和修正,本系统中偏差 e 和偏差变化率 de/dt 的隶属度函数分别如图3(a)、3(b)所示,输出量 u 的隶属度函数如图3(c)所示。

糊量 U 进行去模糊化处理。

2.2.2 基于 LabVIEW 的 SMD 系统模糊控制器

基于 LabVIEW 设计 SMD 系统模糊控制器,其框图程序如图4所示,主要由信号输入/输出通道、小于阈值切换 VI、模糊控制器 VI 和两个时间计数

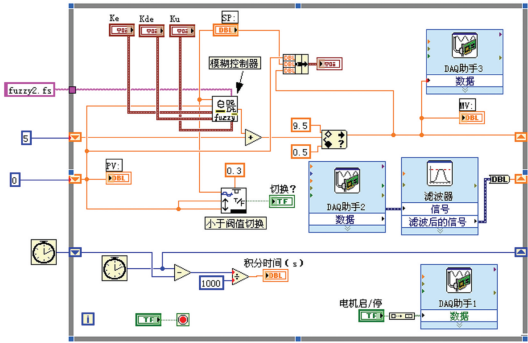


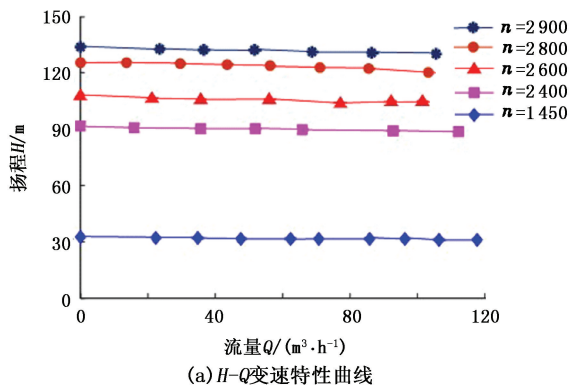
图 4 模糊控制器框图程序
Fig.4 Program of fuzzy controller

器四部分组成。信号输入、输出通道由 3 个 DAQ 助手和 1 个软件滤波器组成,负责与数据采集卡进行

通信,并对接收到的信号进行滤波;小于阈值切换VI的主要功能是当压力偏差 e 的绝对值在足够长的时间内小于设定阈值时,输出一个布尔值True来完成模糊控制器与PID控制器的切换,以构成模糊-PID复合控制器,使得两者优势互补;模糊控制器VI利用LabVIEW的模糊控制工具箱编程实现。首先设置SMD系统模糊控制器输入、输出变量的基本论域和模糊论域,确定偏差 e 和偏差变化率 de 的量化因子 K_e 、 K_{de} 及输出控制量 u 的比例因子 K_u 。根据压力实测值 PV 和给定值 SP ,计算压力偏差 $E(k)$ 和偏差变化率 $Ed(k)$ 。利用量化因子进行模糊化,求出输入变量的模糊量 E 和 dE 。然后查模糊控制表,得输出量的模糊量。最后进行去模糊化处理,得到输出变量的精确量 $u(k)$,并由输出通道输出;两个时间计数器主要完成对循环时间的计时。

3 基于SMD试验平台的试验验证

SMD试验平台是海底钻井液举升系统的综合



试验装置,结合深水钻井作业的工作条件,模拟实际作业压力和流量工况。SMD试验平台包括工控机、变频器、电机、圆盘举升泵、储液罐(相当于吸入模块)、玻璃罐、仪表和管路,用来模拟SMD系统在各种工况下各部件和参数在控制系统协调下的运行情况。将上述所设计的测控系统应用于SMD试验平台,得到一系列的试验结果。

图5所示为测试的圆盘泵工作性能曲线,其中图5(a)为不同转速下对应的圆盘举升泵的扬程和流量之间的关系曲线,图5(b)为出口压力一定情况下对应的圆盘举升泵的转速和流量之间的关系曲线。由试验结果可知,所设计的监测模块可对诸如压力、流量、输入轴的扭矩、转速等SMD试验平台相关运行参数进行有效监测,进而计算得出泵效、扬程等性能参数,为海底钻井液举升钻井提供检测数据。另一方面,一系列试验结果也进一步验证了圆盘泵能很好地满足SMD系统对海底钻井液举升泵的性能要求。

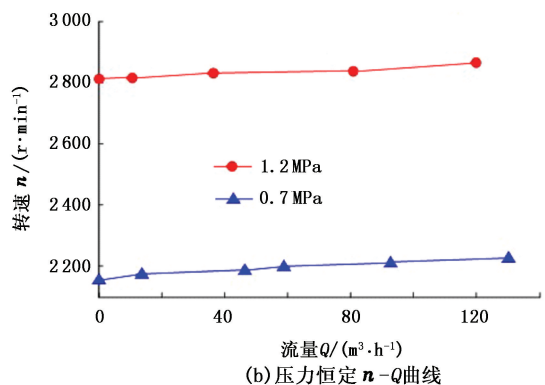


图5 圆盘泵性能曲线

Fig. 5 Performance curves for disk pump

图6、图7为验证SMD系统模糊控制器控制效果的响应曲线,图中给出泵的入口压力设定值和实测值,由模糊控制器输出给变频器模拟量输入端子的电压信号,此电压信号与电机转速成线性关系,可表示电机转速和泵的流量。

图6(a)为泵的入口压力设定值由11变为13时系统的响应曲线。由于此时压力实测值小于给定值,模糊控制器为了消除此偏差,降低控制器输出量,即降低电机转速,从而降低泵向外送出的流量,使得储液罐内水位升高,实际压力升高,最终与设定值一致。图6(b)为设定值减少时的响应曲线,其调节过程与图6(a)相反。从图6所示的系统响应曲线可以看出,在设定值改变时,系统的被控量(泵的入口压力)能够很快稳定到新的状态,响应时间约

为6~7 s。

图7为扰动工况下系统的响应曲线。在压力设定值不变的情况下,通过改变储液罐的入口流量,分别模拟井漏、井涌等异常工况。图7(a)为某个时刻储液罐的入口流量从50 m³/h调至40 m³/h时模拟井漏工况时系统的响应曲线。当发生井漏时,举升泵入口压力实测值减少,小于压力给定值。模糊控制器为了消除此偏差,降低控制器的输出量,即降低电机的转速,从而降低泵向外送出的流量,使得储液罐内水位升高,实际压力逐渐升高,最终与设定值一致。图7(b)为某个时刻储液罐的入口流量从50 m³/h调至60 m³/h时模拟井涌工况时系统的响应曲线,调节过程与图7(a)相反。两种工况下,通过调节系统均能很快地恢复稳定到原来的状态,调节

时间约为 5 ~ 6 s。

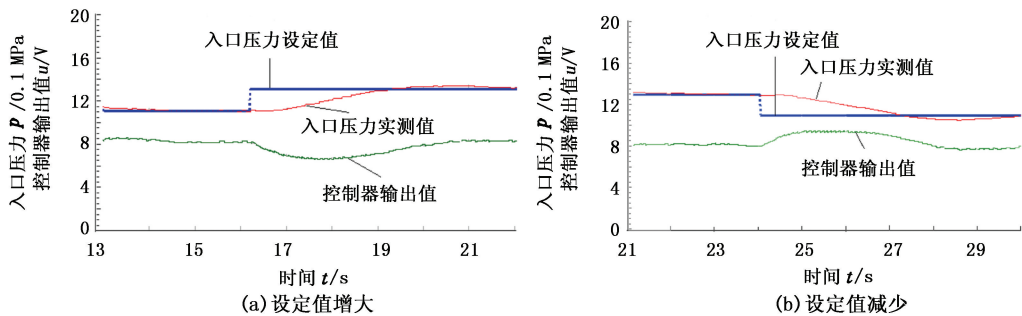


图 6 设定值变化时系统的响应曲线

Fig. 6 Response curves of control system while setpoint changes

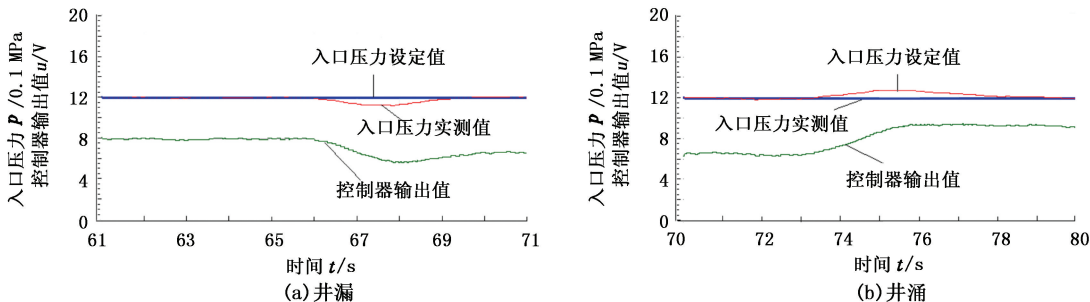


图 7 扰动工况下系统的响应曲线

Fig. 7 Response curves of control system while being disturbed

由试验结果可知,控制系统通过对举升泵的流量调节,使泵的入口压力稳定在某一特定值,确保在钻机钻进、停钻、起下钻过程中泵的入口压力满足作业要求,并能协调系统有效应对井漏、井涌等复杂钻井工况,根据井涌强度适当调整海底泵的转速,尽可能将涌入的流体循环出井眼,预防井喷等钻井事故的发生,将损失和风险降到最低。

4 结 论

(1)结合 SMD 系统的组成和基本功能,开发了一套完整的监测系统,可测量循环回路钻井液、海水分隔点压力变化情况;能够测量出泵(钻井液泵和举升泵)的进出口压力、流量、输入轴的扭矩、转速等参数,进而计算得出泵效、扬程等性能参数;能够测量举升管线内的流体介质分布、流速和压力。

(2)针对 SMD 系统设计的模糊控制器,通过调节泵的流量和扬程,可以保证泵的入口压力维持在某一恒定值附近;通过调整钻井液泵的压力和流量实现系统应对井涌、井漏等异常工况的有效控制,有效地解决了钻井液举升系统大惯性、大时滞、存在较多随机干扰等带来的控制难题。

(3)该监控系统可对 SMD 试验平台各相关设备的运行参数进行有效监测,对相关参数进行有选

择地存储;模糊控制器能够有效地克服复杂环境下系统的各种干扰,提高系统的鲁棒性。

参考文献:

[1] 许亮斌,蒋世全,殷志明,等. 双梯度钻井技术原理研究[J]. 中国海上油气, 2005,17(4):260-264.
XU Liang-bin, JIANG Shi-quan, YIN Zhi-ming, et al. Research on principle of dual gradient drilling technology [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(4): 260-264.

[2] 陈国明,殷志明,许亮斌,等. 深水双梯度钻井技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2007,34(2):246-251.
CHEN Guo-ming, YIN Zhi-ming, XU Liang-bin, et al. Review of deepwater dual gradient drilling technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2):246-251.

[3] 殷志明,陈国明,王卓显,等. 深水海底泥浆举升钻井技术及其应用前景[J]. 钻采工艺, 2006,29(5):1-3.
YIN Zhi-ming, CHEN Guo-ming, WANG Zhuo-xian, et al. Development and application prospect of deepwater subsea mud lift drilling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(5):1-3.

[4] SMITH K L, GAULT A D, WITT D E, et al. Subsea mudlift drilling joint industry project; delivering dual gradient drilling technology to industry [R]. SPE 71357,

- 2001.
- [5] SCHUMACHER J P, DOWELL J D, RIBBECK L R, et al. Subsea mudlift drilling (SMD): planning and preparation for the first subsea field test of a full scale dual gradient drilling system at green canyon 136, Gulf of Mexico [R]. SPE 71358, 2001.
- [6] EGGEMEYER J C, AKINS M E, BRAINARD P E, et al. SubSea mudlift drilling: design and implementation of a dual gradient drilling system[R]. SPE 71359, 2001.
- [7] SCHUBERT J J, JU VKAM-WOLD H C, WEDDLE C E, et al. HAZOP of well control procedures provides assurance of the safety of the subsea mudlift drilling system [R]. IADC/SPE 74482, 2003.
- [8] CHOE J, SCHUBERT J J, JU VKAM-WOLD H C. Analyses and procedures for kick detection in subsea mudlift drilling[R]. IADC/SPE 87114, 2004.
- [9] FROYEN J, ROMMETVEIT R, JAISING H. Riserless mud recovery(RMR) system evaluation for top hole drilling with shallow gas[R]. SPE 102579,2008.
- [10] 高本金. 海底泥浆举升圆盘泵流场仿真与性能研究[D]. 东营: 中国石油大学机电工程学院, 2009.
- GAO Ben-jin. Flowfield simulation and performance assessment for the subsea mudlift disc pump[D]. Dongying: College of Mechanical Electronic Enginneering in China University of Petroleum, 2009.
- [11] 闫加亮. 深水泥浆举升钻井系统控制策略研究[D]. 东营: 中国石油大学信息与控制工程学院, 2011.
- YAN Jia-liang. Control strategy for subsea mudlift drilling system [D]. Dongying: College of Information and Control Enginneering in China University of Petroleum, 2011.
- [12] 侯喜茹,柳贡慧,梁景伟,等. 基于 Matlab/Simulink 模糊工具箱的井眼轨迹模糊控制仿真[J]. 石油学报, 2006,27(3):108-111.
- HOU Xi-ru, LIU Gong-hui, LIANG Jing-wei, et al. Fuzzy control simulation of wellbore trajectory based on Matlab/Simulink fuzzy tool box[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(3):108-111.
- [13] 黄望军. 开关磁阻电动机调速系统的模糊控制器的设计[J]. 机床电器, 2002(2):37-39.
- HUANG Wang-jun. Design of fuzzy controller in switching reluctance motor's regulating system[J]. Machine Tool Electric Apparatas, 2002(2):37-39.

(编辑 修荣荣)