

捷联式自动垂直钻井稳定平台控制系统仿真研究

孙 峰^{1,2}, 吕官云², 陈 威², 王义峰²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266555; 2. 中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

摘 要: 自动垂直钻井系统是一种能够自动有效控制井斜、保证钻头始终沿垂直方向钻进机电液一体化集成钻井装置, 可有效解决高陡构造地层防斜打快问题。以胜利石油管理局钻井工艺研究院自主研发的捷联式自动垂直钻井系统为背景, 对其稳定平台的结构和工作原理进行分析, 在钻进和纠斜 2 种不同的工作模式下稳定平台采用不同的控制结构, 并在 Ansoft/Simplorer 环境中建立了控制系统的仿真模型。仿真分析结果表明, 所设计的控制方法动态跟踪特性良好, 稳态偏差较小, 具有较强的抗干扰特性, 为捷联式稳定平台控制系统的进一步开发和优化提供了理论基础。

关键词: 垂直钻井 稳定平台 井斜控制 数学模型

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)05-0091-05

Research on Strap-Down Automatic Vertical Drilling System with the Simulation of Stable Platform Control

Sun Feng^{1,2}, Lü Guanyun², Chen Wei², Wang Yifeng²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: The automatic vertical drilling system is a hydromechatronics integrated device, which automatically keeps the drill bit to drill vertically for controlling well deviation, it is the developing trend of controlling wellbore inclination. Based on the strap-down automatic vertical drilling system developed by Shengli Drilling Technology Research Institute, this paper analyzed the structure and principle of the stabilized platform, and established two different controlling methods according to the working modes both usual drilling and controlling of well inclination respectively. An simulation model for control system has been established by means of Ansoft/Simplorer, the results show that the design has a good dynamic tracking features, small steady-state error and strong anti-jamming. The research of this paper provides a theoretical basis for further developing the stable platform with strap-down control system.

Key words: vertical drilling; stable platform; deviation control; mathematical model

高陡构造地层的防斜打快是国内尚未完全解决的一项技术难题。常规的降斜防斜技术存在许多问题, 如钟摆钻具组合的降斜能力受钻压的影响较大^[1-3], 只能采取吊打的方式, 是一种以牺牲钻速换取井眼质量的消极方法。从目前石油钻探技术发展的状况来看, 自动垂直钻井技术^[4-9]是解决该问题的一种有效方法。自动垂直钻井系统是一种能够自动控制井斜、保证钻头始终沿垂直方向钻进的机电液一体化钻井装置, 特别适用于解决高陡构造

及易井斜地区的防斜打快问题。其特点和作用具

收稿日期: 2011-04-01; **改回日期:** 2011-07-04。
作者简介: 孙峰(1975—), 男, 山东邹平人, 1997年毕业于石油大学(华东)化机专业, 高级工程师, 主要从事钻井工程井下工具及仪器方面的研究工作。
联系方式: 13561053021, sunfeng271.slyt@sinopec.com。
基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“自动垂直钻井技术”(编号: 2009AA093501)和中国石油化工集团公司重大攻关项目“自动垂直钻井系统”(编号: JP05011)部分研究内容。

体表现在:1)释放钻压,提高机械钻速;2)井下闭环控制,无需人工干预,钻井效率高;3)狗腿度小,钻柱摩擦/扭矩小,钻井风险低。目前只有国外少数几家公司掌握了该项技术^[10-13],他们对外实施技术保密,而且租赁费用昂贵,使该项技术难以在我国大面积推广应用。为了从根本上满足国内油气勘探开发的需要,国内各石油科研机构开展了自动垂直钻井技术研究,研制出了具有自主知识产权的自动垂直钻井系统,并进行了相关现场试验。胜利石油管理局钻井工艺研究院自主研发的捷联式自动垂直钻井系统在宁深1井现场的成功应用^[14-15],标志着国内自动垂直钻井技术获得了重大突破。笔者对该系统稳定平台结构及工作原

理进行了分析,建立其控制系统仿真模型,并进行了仿真研究,验证其自动垂直钻井控制系统的有效性。

1 捷联式稳定平台的结构及原理

捷联式是指将惯性敏感元件直接捆绑在系统的稳定平台上与钻铤固联,随钻铤同步旋转并完成对井斜角与工具面角的测量。捷联式稳定平台是自动垂直钻井系统(auto vertical drilling system, AVDS)的核心^[15-16],主要由基于旋转基座的测控短节、电源短节、伺服短节和防斜纠斜执行机构等组成(见图1)。

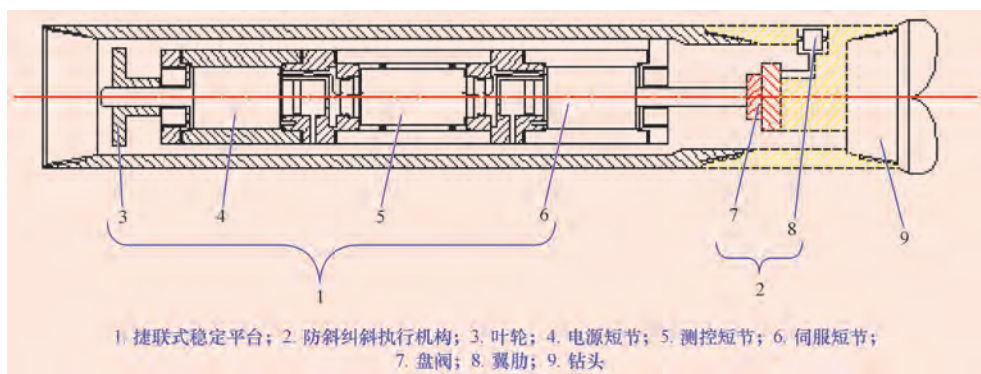


图1 捷联式自动垂直钻井稳定平台结构示意图

Fig.1 Sketch of the structure for stable platform with automatic vertical drilling system

AVDS在工作过程中,过滤后的钻井液推动叶轮旋转,带动电源短节工作,为测控短节和伺服短节提供电能。测控短节是测量控制单元,含有微处理器、加速度计等惯性器件及相关的各种电路,可以实时检测、接收各种传感器信号并进行相应的处理,发出相应的控制指令;伺服短节由旋转变压器和无刷力矩电机组成。对位于测控短节中的磁通门等传感器件测得的数据进行处理,得到动态条件下的井斜角、方位角以及装置的状态参数;然后将这些信息传送至微处理器分析判断,如果工作状态与设定值存在偏差,就发出控制指令给伺服短节,力矩电机作为驱动单元,驱动执行机构中的盘阀对流过的钻井液进行控制,利用活塞驱动翼肋推靠井壁,产生具有纠斜作用的侧向推靠力实现防斜、纠斜。力矩电机的输出轴直接控制上盘阀,与下盘阀组成开关阀,控制活塞推靠井壁提供侧向力纠斜。

由以上分析可知,捷联式自动垂直钻井系统的稳定平台结构及导向原理与 Power Driver SRD 系

统类似^[17],均采用基于盘阀控制的翼肋支出结构,同时支撑翼肋支出的动力均为钻井过程中自然存在的钻柱内外的钻井液压差。不同之处在于,捷联式自动垂直钻井系统的稳定平台与钻铤固联在一起,具有相同的运动状态,机械结构简单,易于实现;同时,区别于 Power V 系统上下涡轮发电机式结构,AVDS 系统采用上涡轮发电机和力矩电机的稳定平台结构形式,上盘阀直接通过力矩电机实现控制,不受上涡轮发电机电力矩的影响,具有控制简单、输出转矩大的优点。

2 捷联式稳定平台控制系统

捷联式稳定平台上的测控系统由数据采集模块、定向管理模块及伺服控制模块3部分组成,其中数据采集模块和定向管理模块合称为数据采集及处理模块。测控系统在井下为全闭环控制,各模块间通过工业用 CAN 总线进行交互通信,测控系统控制框图见图2。伺服控制模块由 DC/DC 电源控制

电路、功率开关电路、RDC 接口电路、DSP 控制单元以及智能管理单元组成;数据采集模块由 ADC 模数控制芯片、DSP 控制单元和相应的存储芯片组成。其中,数据采集模块 1 和数据采集模块 2 采集安装在载体上的磁通门、加速度及角速率陀螺等传感器的信号,根据建立的捷联数学模型,求出钻铤实时磁工具面角、井斜角及高边工具面角等信息,并通过 CAN 总线发送至伺服控制模块和定向管理模块;定向管理模块根据发送来的井斜角信息确定系统工作模式,并通过 CAN 总线控制伺服控制模块实现防斜、纠斜功能。

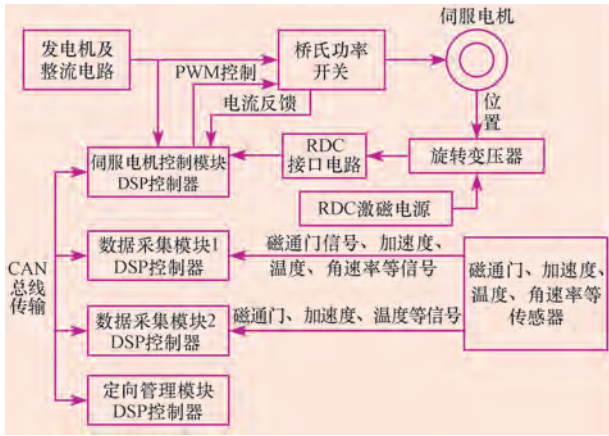


图 2 测控系统组成框图

Fig. 2 The block diagram of measurement and control system

定向管理模块根据来自数据采集模块 1 和数据采集模块 2 的角度信息,计算出载体实时的纠斜工具面角信息,包括井斜角、偏心轴的相对转角、偏心轴的磁工具面角、偏心轴的相对转速、偏心轴的相对转角指令、偏心轴的相对转速指令。然后根据这些角度信息,来确定稳定平台的工作模式,即纠斜模式或钻进模式。

2.1 纠斜与钻进模式

井斜角超过 1° 后,系统转入纠斜模式。根据井斜角、高边工具面角和钻铤的转动角速度等参数,确定纠斜工具面角。纠斜模式下,捷联式稳定平台通过无刷力矩电机使偏心轴隔离钻铤的转动,此时稳定平台控制系统的控制目标是控制偏心轴稳定在纠斜工具面角上,是一个典型的位置伺服系统,偏心轴的空间位置角度(也就是磁工具面角)难以通过惯性器件测量得到,因此需要通过电机定子随钻铤一起旋转以及电机定子、转子相对转角来得到偏心轴的实际磁工具面角。显然,此时无刷力矩电机控制系统是一个在动基座上的

反捷联跟踪,即钻铤是时刻旋转的,对于电机控制系统来说,其相对转角指令是时刻变化的,是一个典型的位置随动系统,需要电机具有良好的动态特性才能够快速跟踪给定相对转角指令。同时,由于井下环境的变化以及工作状态的改变,钻铤转速会产生一定程度的波动,这对于位置随动系统来说,是一个较大的干扰,会造成偏心轴在纠斜工具面上摆动。所以必须增加转速跟踪回路,相对转速紧紧跟随相对转速指令,才能使相对转角跟上相对转角指令抑制摆动,达到像陀螺式单轴稳定平台一样的稳定效果。

当井斜角小于 1° 后,系统转入钻进模式。钻进模式下,捷联式稳定平台使偏心轴相对钻铤匀速转动,不产生侧向力,即要求电机定子、转子始终保持一定的转速,此时电机控制系统是一个典型的速度伺服系统,需要克服钻铤转速波动的干扰。

2.2 无刷力矩电机的数学模型

稳定平台采用低速永磁同步力矩电机。为便于分析,将其作如下假设:1)忽略转子铁心饱和;2)不计涡流和磁滞损耗;3)永磁材料的电导率为零;4)相绕组中感应电动势波形是正弦。在 $d-q$ 坐标系下的数学模型为:

$$U_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad (1)$$

$$U_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} + B\Omega + T_L \quad (4)$$

式中: U_d, U_q 分别为 d, q 轴定子电压分量, V; i_d, i_q 分别为 d, q 轴定子电流分量, A; R 为定子相电阻, Ω ; L_d, L_q 为 L 相电感, $L_d = L_q$, mH; p 为转子极对数; ω 为电角速度, rad/s; Ω 为机械角速度, $\omega = p\Omega$, rad/s; ψ_f 为转子磁通量, Wb; T_e 为电磁转矩, N·m; T_L 为负载转矩, N·m; J 为转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

电机负载主要包括滚动轴承对平台的摩擦扭矩、钻铤旋转带动钻井液旋转传递给平台的黏滞摩擦扭矩、盘阀系统传递给平台的摩擦扭矩及钻井液流过上下盘阀过孔导通时产生的切向液动力。

2.3 稳定平台控制系统的仿真

根据上述分析,捷联式稳定平台控制系统在纠

斜工作模式时,是一个位置伺服系统,同时需克服来自于负载的扰动以及钻铤转速的扰动。为了提高抗干扰性,保证控制系统在运行过程中的稳定性,采用三环(位置环、速度环和电流环)控制结构(见图 3)。这与旋转导向系统稳定平台控制^[18-19]中的控制方法类似,外环为位置环,相对转角指令即为定子、转子之间位置角度的给定,相对转角位置由旋转变压器

测得,位置环的偏差经过位置调节器得出速度环的给定,转速的反馈则由位置反馈的差分得到,速度环的偏差经过速度调节器得出电流环的给定,电流环的反馈由霍尔电流传感器测得,电流偏差经过电流调节器得出功率变换器的占空比,进而实现对电机的控制。图 3 中, K_t 为转矩常数, $N \cdot m/A$; s 为拉普拉斯算子。

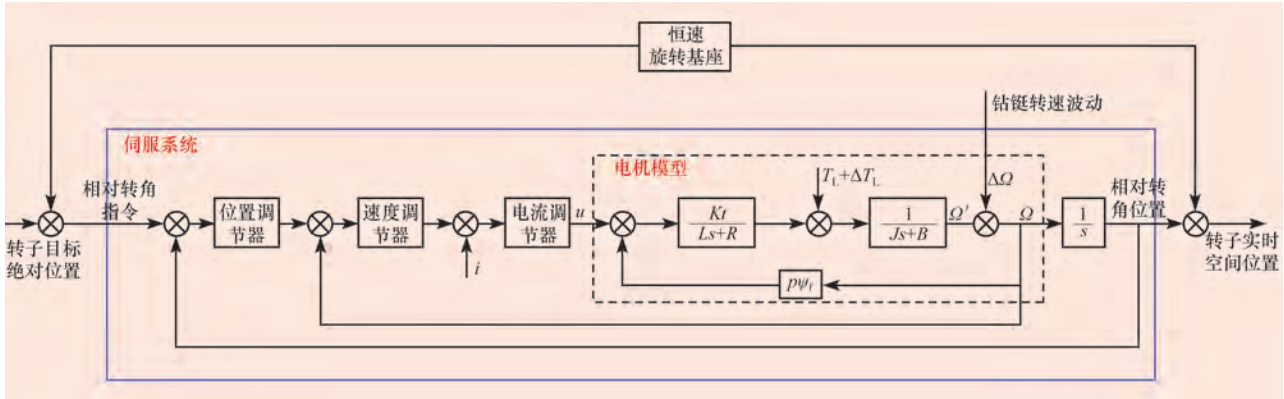


图 3 纠斜模式下稳定平台控制系统框图

Fig. 3 The block diagram of the control system for stable platform under hole-straightening model

当稳定平台运行于钻井模式时,是一个速度伺服系统(控制系统框图见图 4),其干扰来自于钻铤

转速的波动以及负载的扰动。
基于上述分析,在 Ansoft/Simplorer 环境中搭

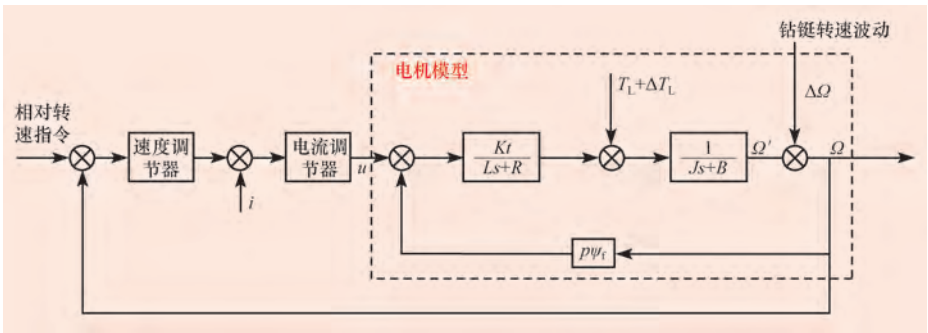


图 4 钻进模式下稳定平台控制系统框图

Fig. 4 The block diagram of the control system for stable platform under drilling condition

建仿真模型,对其跟踪特性和抗干扰特性进行分析。
设纠斜工具面角为 40° ($40^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 0.698 \text{ rad}$),三环控制算法均采用 PID,转速限速为 600 r/min,电流环限流为 13 A,负载为恒定 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$,钻铤转速为 60 r/min,仿真结果如图 5 所示,偏心轴能够快速稳定在纠斜工具面角附近,具有较小的稳态偏差,同时电机控制系统具有较好的随动跟踪特性。图 6 为电机控制系统在运行过程中受到负载 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扰动时定子相对转角位置的变化情况,可以看出,在受到负载扰动时,相对转角位置受到了一定的扰动,但系统能够在较短时间内恢复到给定状态,具有一定的抗干扰性。

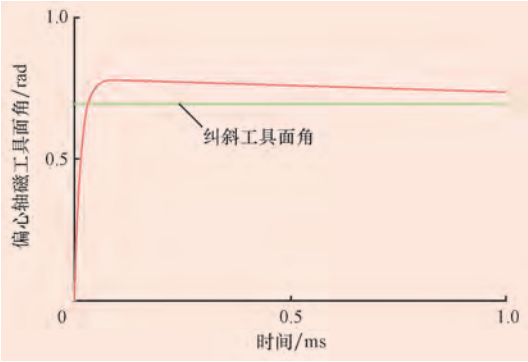


图 5 纠斜模式下的跟踪特性

Fig. 5 The tracing property under hole-straightening model

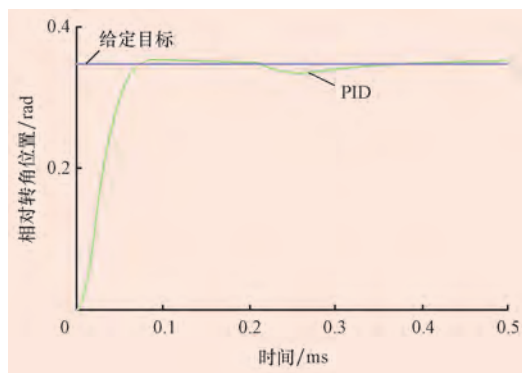


图 6 负载扰动下的相对转角位置

Fig. 6 The relative angular position with the load disturbance

3 结论与建议

1) 捷联式自动垂直钻井系统稳定平台的仿真结果表明,所设计的控制方法动态跟踪特性良好,稳态偏差较小,具有较强的抗干扰特性。

2) 在实际钻井条件下,测控系统所受干扰因素众多,对于捷联式稳定平台控制系统的抗干扰能力还需要进一步研究;在三环控制结构中,控制器采用 PID 控制方法并不是最佳选择,尝试采用智能控制方法提高系统的抗干扰能力是下一步需要研究的工作。

参 考 文 献

- [1] 白家祉,苏义脑.井斜控制理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1990:73-98.
Bai Jiazh, Su Yinao. Theory of borehole deviation control and practice[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 73-98.
- [2] 高宝奎,高德利.直井防斜原理综述[J].石油钻采工艺,1996, 18(2):8-13.
Gao Baokui, Gao Deli. Overview on controlling deviation in straight well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(2): 8-13.
- [3] 孙岩.防斜打快技术现状与对策[J].天然气工业,2003,23(3): 67-69.
Sun Kui. Characterization and development of techniques for deviation control & fast drilling[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(3): 67-69.
- [4] 苏义脑,李松林,葛云华,等.自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法[J].石油学报,2001,22(4):87-91.
Su Yinao, Li Songlin, Ge Yunhua, et al. The design and control ways of the downhole automatic closed loop of vertical drilling tool[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 87-91.
- [5] 韩来聚,倪红坚,赵金海,等.机械式自动垂直钻井工具的研制[J].石油学报,2008,29(5):766-768.
Han Laiju, Ni Hongjian, Zhao Jinhai, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 766-768.
- [6] 杨春旭,韩来聚,步玉环,等.现代垂直钻井技术的新进展及发

- 展方向[J].石油钻探技术,2007,35(1):16-19.
Yang Chunxu, Han Laiju, Bu Yuhuan, et al. New development and future direction of modern vertical drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(1): 16-19.
- [7] 张绍槐.深井、超深井和复杂结构井垂直钻井技术[J].石油钻探技术,2005,33(5):11-15.
Zhang Shaohuai. Vertical drilling technologies in deep, ultra-deep, and complex structure wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 11-15.
- [8] 薄和秋,赵永强. Verti Trak 垂直钻井系统在川科 1 井中的应用[J].石油钻探技术,2008,36(2):18-21.
Bo Heqiu, Zhao Yongqiang. Application of Verti Trak in Chuanke-1 Well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(2): 18-21.
- [9] 蒋祖军,肖国益,李群生.川西深井提高钻井速度配套技术[J].石油钻探技术,2010,38(4):30-34.
Jiang Zujun, Xiao Guoyi, Li Qunsheng. Technology to increase deep well drilling speed in Western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 30-34.
- [10] Oppelt J, Chur C, Feld D, et al. New concepts for vertical drilling of boreholes[R]. SPE 21905, 1991.
- [11] Chur C, Oppelt J. Vertical drilling technology: a milestone in directional drilling[R]. SPE 25759, 1993.
- [12] Ligrone A, Oppelt J, Calderoni A, et al. The fastest way to the bottom; straighthole drilling device-drilling concept, design considerations and field experience[R]. SPE 36826, 1996.
- [13] Matthias R, Marcus O, Hermilo M, et al. Straight down to success: performance review of a vertical drilling system[R]. SPE 84451, 2003.
- [14] 孙峰,吕官云,马清明.捷联式自动垂直钻井系统[J].石油学报,2011,32(2):360-363.
Sun Feng, Lü Guanyun, Ma Qingming. A strap-down automatic vertical drilling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 360-363.
- [15] 王锡洲.捷联式自动垂直钻井系统的研制及现场试验[J].石油钻探技术,2010,38(3):13-16.
Wang Xizhou. Development and field test of automated strap-down vertical drilling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3): 13-16.
- [16] 吕官云,孙峰,杨全进,等.一种捷联式稳定平台装置:中国,200510044509.7[P].2008-03-26.
Lü Guanyun, Sun Feng, Yang Quanjin, et al. A strap-down stabilization platform: China, 200510044509.7[P]. 2008-03-26.
- [17] 刘振宇,易明新,魏广建,等. Power V 垂直导向钻井技术在普光 7 井的应用[J].天然气工业,2007,27(3):58-59.
Liu Zhenyu, Yi Mingxin, Wei Guangjian, et al. Application of Power V steerable vertical drilling on Well Puguang-7[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(3): 58-59.
- [18] 薛启龙,韩来聚,杨锦舟,等.旋转导向钻井稳定平台控制系统仿真研究[J].石油钻探技术,2010,38(4):10-14.
Xue Qilong, Han Laiju, Yang Jinzhou, et al. Study on controlling simulation system for stabilizing platform in rotary steering drilling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 10-14.
- [19] 崔琪琳,张绍槐,刘于祥.旋转导向钻井系统稳定平台变结构控制研究[J].石油学报,2007,28(3):120-123.
Cui Qilin, Zhang Shaohuai, Liu Yuxiang. Study on controlling system for variable structure of stabilized platform in rotary steering drilling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 120-123.