

# 控压钻井分级智能控制系统设计与室内试验

杨雄文,周英操,方世良,刘伟

(中国石油钻井工程技术研究院,北京 100195)

**摘要:**自动控制系统是控压钻井的核心技术,是控压钻井作业成功的关键。在控压钻井自动控制系统中引入了分级递阶智能控制的概念,将控制系统分为反馈控制、预测和监测控制和多目标优化控制3个层次,建立了分级智能控制的概念设计,并论证了多级控制策略的可靠性和工作特点;同时在参数预测与监测控制中引入了模型预测控制算法(MPC),结合实时数据测量、流动模型和控制回路的系统分析,提出了一种持续对井眼流动模型和钻井力学模型进行数据更新的方法,并给出了控压钻井井底压力实时模型预测控制的方法和流程。

**关键词:**控制压力钻井 自动控制 物理模型 井底压力 实验室试验

**中图分类号:**TE928    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2011)04-0013-06

## Design and Laboratory Test of Hierarchical Intelligent Control System for Managed Pressure Drilling

Yang Xiongwen, Zhou Yingcao, Fang Shiliang, Liu Wei

(CNPC Drilling Engineering Research Institute, Beijing, 100195, China)

**Abstract:** Automatic control system is the core technology of managed pressure drilling (MPD). Multi-level hierarchical logic control strategy was introduced into MPD control system. There are three control levels, feedback control (level I), forecasting and monitoring control (level II) and multi-objective optimization (level III). A multi-level hierarchical intelligent control strategy was designed. The paper demonstrated the reliability of multi-level hierarchical control strategy and work characteristics. A model predictive control (MPC) algorithm was introduced in level II. Combined with real-time data, flow model and the control loop system analysis, the paper developed a continuous data updating method for drilling borehole flow model and mechanics model. The method and process the control real-time bottom-hole pressure was provided, which established a solid foundation for speeding up of MPD automatic control system development.

**Key words:** managed pressure drilling; automatic control; physical model; bottomhole pressure; laboratory testing

控压钻井(MPD)是近年来发展起来的一种先进的钻井技术,通过动态压力控制或自动节流控制系统,精确控制整个井眼环空压力剖面,有效避免井涌、井漏、井塌和卡钻等井下故障<sup>[1-13]</sup>。由于MPD必须要求几种工具(泵、节流阀和平板阀等)协同操作<sup>[2-3]</sup>,因此,如何保证控压钻井各部件和装置协同操作的有效性就变得至关重要。国外Weatherford、Atbalance和Halliburton等石油技术服务公司<sup>[5]</sup>针对控压钻井的协同操作已经成功研制出了较成熟的控制系统,并且取得了良好的应用效果。国

内在“十一五”期间也陆续开展了控压钻井的相关研

---

收稿日期:2010-12-19;改回日期:2011-06-14。

**作者简介:**杨雄文(1979—),男,湖北天门人,2002年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2005年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2008年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,高级工程师,主要从事控压钻井、水力学模拟和井筒压力控制方面的研究工作。

**联系方式:**(010)52781859, yangxiongwendri@cnpc.com.cn。

**基金项目:**国家科技重大专项项目之课题“窄密度窗口钻完井技术与装备”(编号:2008ZX05021-03)部分研究内容。

究工作,取得了一定的进展,但尚未形成一套控压钻井自动控制系统及软件<sup>[4-5]</sup>。笔者在控压钻井自动控制系统中引入分级递阶智能控制的概念,提出了一种控压钻井分级控制策略和方法,将 MPD 相关操作集成起来,自动化工具执行低阶的自动连锁操作,容许人工进行更高等级的过程控制和操作,大大降低了控压钻井操作的难度和复杂性,优化了钻井作业,降低了钻井成本。

## 1 分级智能控制系统总体设计

### 1.1 MPD 控制系统的特殊性

控压钻井技术是一项综合控制技术,必须具备一整套压力、流量、温度采集装置,地面节流管汇,计算机控制系统和回压泵系统等设备。在钻井过程中,由于受钻井工况、施工操作、钻进参数以及地层压力等因素的影响,井眼环空压力经常发生变化,并且各影响因素(如井眼轨迹、钻压、钻柱转速、钻井模式)之间相互关联,相互作用,是一个典型的复杂巨系统范畴。并且由于控压钻井涉及多种工具(泵、节流阀、平板阀和自控系统等)的协同响应和多种工况的切換作业,同时也属于一个典型的多目标、多任务

控制系统。因此,在确定控制规律、优化控制方案及选取控制算法方面,如何降低控压钻井这种多约束、多目标和多任务系统的复杂性,同时又保证人工干预和智能优化的可靠性是急需解决的问题。

### 1.2 总体概念设计

分级智能控制策略为解决这种整体复杂性提供了一种有效的控制方法。与常规的自动控制相比,分级智能控制能根据控制目标、制约因素和控制层级的不同,选择不同的控制策略进行优化控制。在控制底层采用反馈控制,确保普通任务执行可靠,同时也可根据需要引入人工干预和优化控制,有效提高管理任务的执行效率,降低整体控制的复杂性。

根据控压钻井的施工特点,引入分级智能控制策略,将 MPD 控制系统分为三级智能控制层,即反馈控制层、预测与监测控制层和多目标优化控制层,具体分级控制总体结构如图 1 所示。反馈控制是指泵、节流阀、平板阀等最基本的闭环控制回路。预测与监控控制是对反馈控制的协同响应,通过模拟计算和预测计算,输出一个预测控制参数指导反馈控制操作。优化决策控制层级最高,根据设定目标(经济目标、安全目标)进行优化决策和控制,最大限度地满足优化目标。

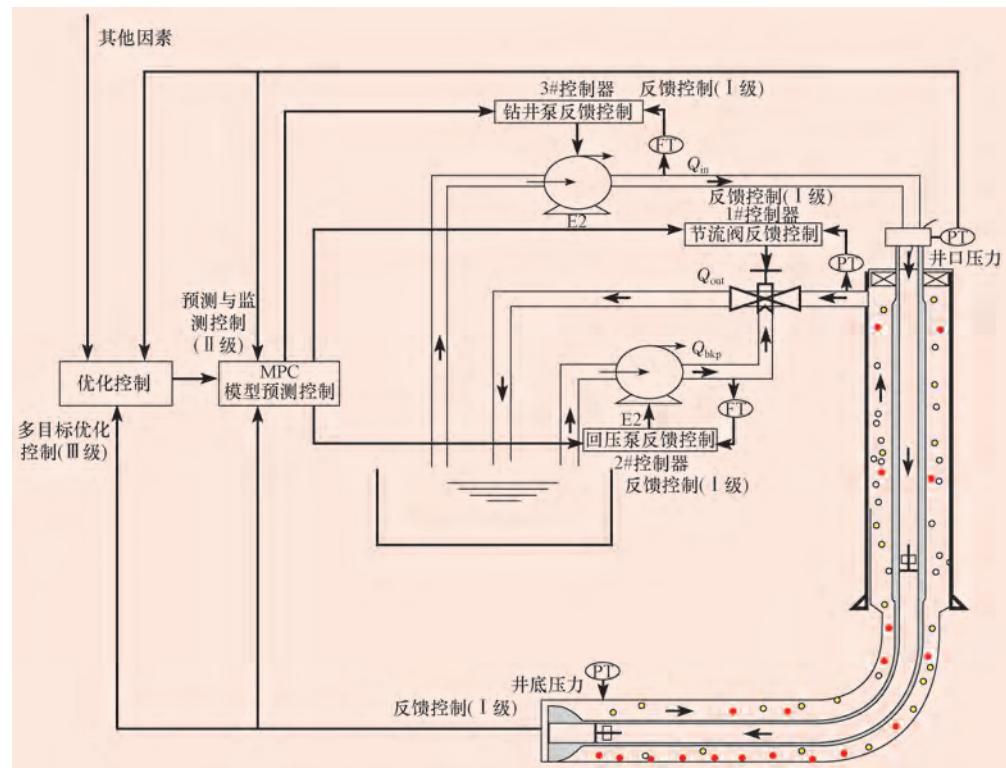


图 1 控压钻井分级控制总体设计

Fig. 1 MPD multi-level control hierarchical strategy

## 2 分级控制系统的结构组成

### 2.1 反馈控制层(I级)

反馈控制层属于MPD控制系统执行层,即常规动作执行单元,不需要进行任务的规划和协调,只需按照给定的指令执行规定的操作,或者根据下达的目标参数实现常规的闭环控制。在MPD控制系统中,执行层主要由节流压力控制回路、循环流量控制回路、回压泵流量控制回路和井口、井底压力控制回路等控制单元组成,采用常规的PID过程控制来实现,并保证其控制精度。节流压力控制回路是MPD控制系统最基本的循环回路,其性能受节流阀流量特性及阀执行器响应速度的影响。循环流量控制回路主要是根据钻速确保从钻井泵中得到所需要的流量。回压泵流量控制回路可以实现一个附加的控制循环,用于补偿井口因流量减少造成压力不足的损失。具体控制流程见图1中的1#、2#和3#控制器。

### 2.2 预测与监测控制层(II级)

预测与监测控制层作为MPD控制系统中间层,属于协调层,它接受从决策层传来的命令,经过实时信息处理,产生一系列可供过程执行的具体任务或操作指令,同时监督过程的执行情况,并随时反馈到决策层,为上层决策提供方案执行效果的重要信息。

MPD控制系统的预测和监测控制层采用了先进的模型预测控制(MPC)算法,该方法具有事前预测功能,与水力学模型相结合能提前预知井口回压调节值的大小,能够做到“事前预测”,这样能够有效解决控制响应时间滞后的问题,具有良好的自适应性,能全程监控井底压力、井口压力、入口流量、出口流量、回压泵流量以及其他钻井参数和施工工艺过程,根据相应情况进行有预见性的环空压力补偿或调节,保证未来一个或多个循环周内各个时刻环空压力剖面均在安全范围内。

### 2.3 多目标优化控制层(III级)

多目标优化控制层是MPD控制系统决策层,属于分级智能控制系统的最上层。它的作用是对于给定的目标或任务进行规划求解形成决策方案,并转化为完成该任务的子任务(或动作)的组合;再将这些子任务发送至协调层,通过协调处理,生成可执

行的具体操作或命令;执行层接收到这些操作或指令后,按要求执行规定的任务;最后对任务执行的结果进行评价,并将评估结果逐级向上反馈,同时对以前存储的知识和信息进行修正,从而起到学习的作用,进而提高决策水平。MPD控制系统中,决策层可以根据钻井工况、钻井模式和实现目标的不同进行分阶段、分目标和分任务的决策优化控制,具有单级优化、多级优化和分阶段目标优化的功能。

## 3 MPD分级控制策略的实现

### 3.1 物理模型

如前所述,控制井底压力时要考虑井筒内诸多因素的影响,如井内钻井液的密度和黏度、入口流量、溢流量、漏失量、井口回压、流道尺寸和井眼轨迹等,其相应的数学表达式为:

$$p_{bh} = f(Q_l, Q_g, \rho_l, \mu_l, p_c, \Delta Q_{KL}, H_{KL}), \quad (1)$$

\$T\_{KL}, D\_o, D\_i, L, \alpha, \dots\$

式中:\$p\_{bh}\$为井底压力;\$Q\_l, Q\_g\$分别为液相和气相流量;\$\rho\_l\$为液相密度;\$\mu\_l\$为液相黏度;\$p\_c\$为井口回压;\$\Delta Q\_{KL}\$为地层流体进入井筒量或钻井液漏失量;\$H\_{KL}\$为溢流或漏失的深度;\$D\_o\$为钻柱外径;\$D\_i\$为套管内径或裸眼井径;\$L\$井深;\$\alpha\$为井斜角。

所有影响因素中,现场最直接、最容易实时控制的参数是井口回压,其次是排量和钻井液密度等。而井口回压和节流阀开度、流量是直接关联的,即:

$$Q = KA_T \Delta p^m \quad (2)$$

式中:\$Q\$为流量;\$K\$为常数;\$A\_T\$为节流阀开度;\$\Delta p\$为节流阀两端压差;\$m\$为指数,\$0.5 < m < 1\$。

所以,节流阀开度的变化将直接影响井底压力,因此节流阀开度可以作为主要控制参数。

### 3.2 模型预测控制(MPC)

根据式(1),假定井筒系统中不确定可变参数为钻井液漏失量和溢流量,那么这两个参数变化时,井筒压力分布就要发生相应的变化,并假定通过调节节流阀可以达到控制目的。

根据模型预测控制原理,井筒压力与节流阀开度等参数的关系可表示为:

$$\begin{cases} \bar{x} = f_M[\bar{x}(k-1), \bar{u}(k), \bar{u}(k-1), \Delta \bar{Q}_{KL}] \\ \bar{y}(k) = g_M[\bar{x}(k)] \end{cases} \quad (3)$$

式中:\$\bar{x}\$为\$k\$时刻的状态矢量;\$\bar{u}(k)\$为\$k\$时刻的节流阀开度;\$\Delta \bar{Q}\_{KL}\$为地层漏失或溢流矢量;\$\bar{y}(k)\$为\$k\$时刻的井底压力计算值。

由于噪声和模型失配等的影响,引起预测压力和实测压力存在一定的偏差,在模型预测控制中,需要通过一个预估器,对未来优化时域中的误差进行预测,并作为前馈量引入到参考预设轨迹加以补偿,即:

$$e(k+i) = y_p(k) - y_M(k) \quad (4)$$

式中: $e(k+i)$ 为未来的误差; $y_M(k)$ 为当前时刻模型输出值(立管压力、井口压力或井底压力); $y_p(k)$ 为当前时刻实测值(立管压力、井口压力或井底压力)。

为了避免压力波动,此时井底压力参考曲线为:

$$r(k+i | k) = y_{ref} - e^{-\frac{it_s}{t_{ref}}} \epsilon(k) \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, H_P$ ;  $t_s$  为采样时间; $t_{ref}$  为参考曲线指数时间。

$r(k+i | k)$ 是指在根据  $k$  时刻数据评价  $(k+i)$  时刻的参考曲线。通常情况下采用非线性模型来预测井底压力,超出模型预测范围时采用事前输入的曲线  $\hat{u}(k+i | k)$  来预测井底压力。

$$\hat{x}(k+i | k) = f_p[\hat{x}(k+i-1), \hat{u}(k+i | k),$$

$$\hat{u}(k+i-1 | k), \hat{u}(k+i-2 | k), \dots, \hat{u}(k | k)] \quad (6)$$

$$\hat{y}(k+i | k) = g_p[\hat{x}(k+i | k)] \quad (7)$$

在预测模型控制的滚动优化算法中,最优的未来控制作用输入曲线  $\hat{u}(k+i | k)$  通过迭代、最优化和约束等一系列步骤后得到:

$$\min J_p = \sum_{i=1}^m [y_r(k+i) - \hat{y}_M(k+i)]^2 \quad (8)$$

$$\hat{y}_M(k+i) = y_M(k+i) + e(k+i) \quad (9)$$

式中: $(k+i)$  为第  $(k+i)$  拟合时间点; $m$  为拟合点的个数; $\hat{y}_M(k+i)$  为过程的预测值; $y_M(k+i)$  为  $(k+i)$  时刻的模型预测输出; $e(k+i)$  为预测误差; $y_r(k+i)$  为  $(k+i)$  时刻的参考轨迹。

通过求解式(8)的极小值,得到实时控制的最优参数。节流阀最佳开度是指保持井底压力在参考压力状态下的开度。 $y_{ref}$  是通过最优化算法求极小值得到的。初始的节流阀开度已知,然后根据算法明确给出一组新的节流阀开度曲线,即利用式(8)计算。分析测定的结果,然后选出一组新节流阀开度曲线。重复该过程,直至求出与参考井底压力一致的最佳节流阀开度。

### 3.3 井底压力实时控制流程

图 2 为井底压力模型预测控制基本原理。在 MPD 过程中,全程监控井底压力、井口压力和入口流量、出口流量、回压泵流量,以及其他钻井参数和

施工工艺过程,达到一个循环周内最优的井筒压力实时优化控制的目的,根据相应情况进行有预见性的环空压力补偿或调节,保证未来一个或多个循环周内各个时刻环空压力剖面均在安全范围内。

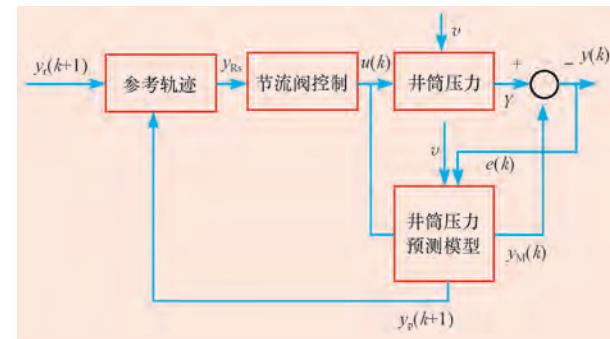


图 2 井底压力模型预测控制基本原理

Fig. 2 Basic schematic of bottom pressure predictive control model

图 3、4 分别为压力模型预测控制原理和井筒压力实时模型预测优化控制流程。如图 3 所示,应用离散化时间设置  $k$  时刻的时间序列,图中垂线为当前时间,图中给出了当前时间之前的实际压力曲线、模拟压力曲线。模拟所得参数通过实际数据反馈校正后,当前时刻模拟曲线与控制点不重合,根据这个差值设置参考曲线,促使预测曲线与参考曲线的差值最小,求得最优的节流阀开度预测曲线。

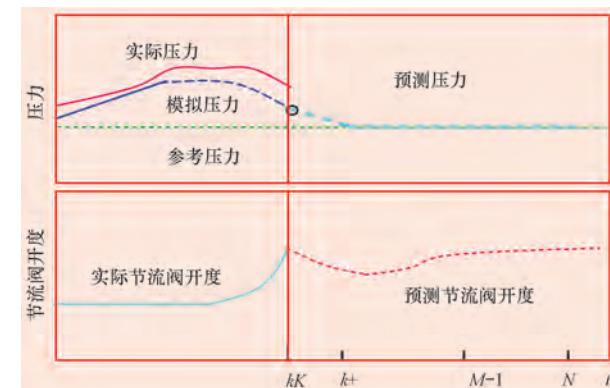


图 3 压力模型预测控制原理

Fig. 3 Pressure model predictive control principle

### 3.4 室内模拟试验

笔者在中国石油钻井工程技术研究院的控压钻井实验室进行了模拟试验,试验设备主要包括压力循环系统(回压泵、钻井液罐、空气包,节流管汇、配套工具及管线)、数据采集和传输系统、钻井模拟器和远程控制系统 4 个系统,可进行环空压降模拟试验、节流控压性能测试以及控压钻井装置各单项和整体性能测试等试验。笔者针对 MPD 分级智能控

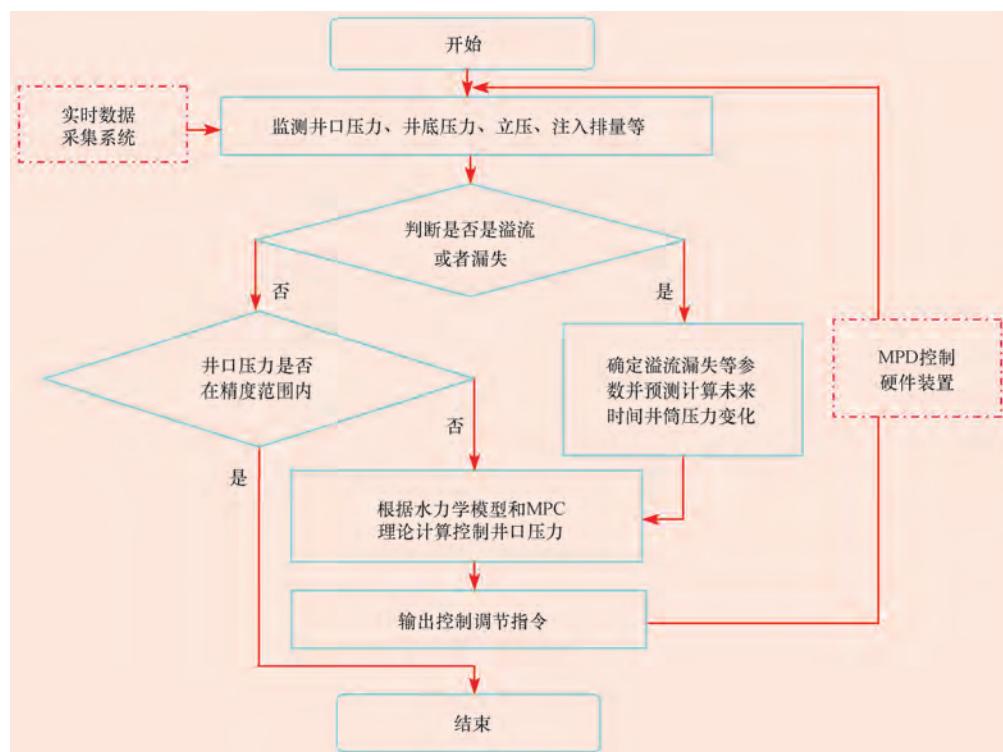


图4 井筒压力实时模型预测优化控制流程

Fig. 4 Optimization of real-time wellbore pressure model predictive control process

制系统的特点,分别进行了不同工况下的压力跟踪试验,包括主备阀切换、微溢微漏和启停泵压力等,取得了良好的控制效果。

图5为控压钻井自动节流控制系统不同级别压力跟踪和主备阀切换的室内试验数据。从图5可看出,设定井口压力1.26, 1.76, 2.76和3.76 MPa时,实际井口压力基本能在5 s以内达到控制误差,控制精度达0.10 MPa。

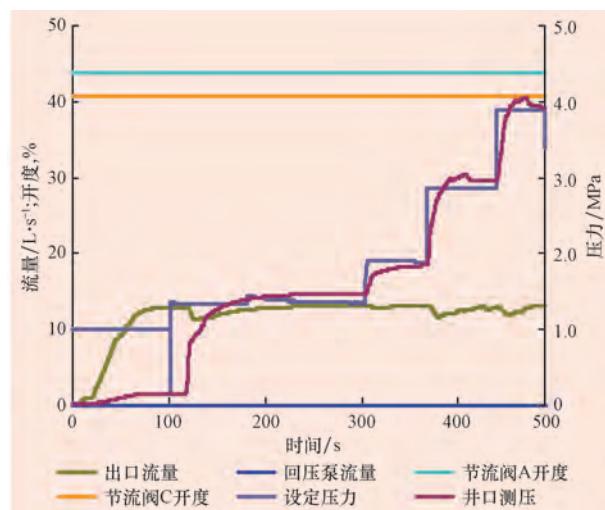


图5 不同级别压力跟踪和主备阀切换的室内试验结果

Fig. 5 Different levels of pressure tracking and chokes switching laboratory tests

图6为控压钻井启停泵期间压力跟随试验数据。在控压钻井操作中,钻井泵缓慢停止时,流量降低,同时井口回压要升至一个较高的压力级别,相反,钻井泵缓慢启动时,流量升高,同时井口回压要降至一个较低的压力级别,这就需要控制各阀件之间协调动作。图6较好地说明了这一特点,停泵时,主节流阀A迅速调至目标位置,确保快速进入设定

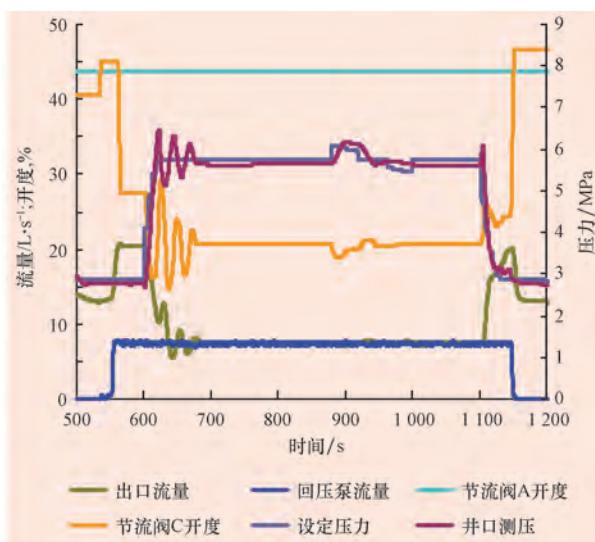


图6 控压钻井启停泵期间压力跟随试验结果

Fig. 6 MPD pressure tracking during pump start up-shut down period

压力区间,辅节流阀 C 则进行微调;相应的,开泵时也一样,主节流阀 A 迅速调至目标位置,确保快速进入压力设定区间,辅节流阀 C 则进行微调;整个开停泵过程最大压力波动控制在 0.50 MPa,压力控制精度高。

## 4 结论与建议

1) 在控压钻井自动控制系统中引入了分级智能控制的概念,将控制系统分为反馈控制、预测和监测控制和多目标优化控制 3 个层次,进行了分级智能控制的概念设计,分析了分级控制策略的工作特点,论证了其可靠性。

2) 反馈控制是指泵、节流阀、平板阀等最基本的闭环控制回路,预测与监控控制是对反馈控制的协同响应,通过模拟计算和预测计算,输出一个预测控制参数指导反馈控制操作,优化决策控制级别最高,根据不同的设定目标(经济目标、安全目标)进行优化决策和控制,最大限度地满足设定目标。

3) 与常规的自动控制相比,分级智能控制能根据控制目标、制约因素和控制层级的不同,选择不同的控制策略进行优化控制。在控制底层采用反馈控制,确保普通任务执行可靠,同时也可根据控制需要引入人工干预和优化控制,有效提高管理任务的执行效率、降低整体控制的复杂性。

## 参 考 文 献

- [1] Asis Kumar Das. Simulation study evaluating alternative initial responses to formation fluid influx during managed pressure drilling [D]. United States, Eunice, Louisiana State University, 2006.
- [2] Saponja J, Adeleye A, Hucik B. Managed pressure drilling (MPD) field trials demonstrate technology value [R]. IADC/SPE 98787, 2006.
- [3] van Riet E J, Reitsma D, Vandecraen B. Development and testing of a fully automated system to accurately control downhole pressure during drilling operations [R]. SPE/IADC 85310, 2003.
- [4] 杨雄文,周英操,方世良,等.国内窄窗口钻井技术应用对策分析与实践[J].石油矿场机械,2010,39(8):7-11.  
Yang Xiongwen, Zhou Yingcao, Fang Shiliang, et al. Strategy analysis of narrow window drilling technology and practice[J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(8):7-11.
- [5] 周英操,崔猛,查永进.控压钻井技术探讨与展望[J].石油钻探技术,2008,36(4):1-4.  
Zhou Yingcao, Cui Meng, Zha Yongjin. Discussion and prospect of managed pressure drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4):1-4.
- [6] Martin M D. Managed pressure drilling techniques and tools [D]. United States, Bryan: Texas A & M University, 2006.
- [7] 严新新,陈永明,燕修良. MPD 技术及其在钻井中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2007,30(2):62-66.  
Yan Xinxin, Chen Yongming, Yan Xiuliang. MPD and its application to drilling[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2007, 30(2):62-66.
- [8] 王果,樊洪海,刘刚,等.控制压力钻井技术应用研究[J].石油钻探技术,2009,37(1):34-38.  
Wang Guo, Fan Honghai, Liu Gang, et al. Application of managed pressure drilling technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1):34-38.
- [9] 刘超,周玉海,吴红玲,等.控制压力钻井技术在衡 6 井的应用[J].石油钻采工艺,2009,31(3):34-37.  
Liu Chao, Zhou Yuhai, Wu Hongling, et al. Application of MPD technology to Heng 6 Well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3):34-37.
- [10] 张洪杰,张德友,刘亚斌.控制压力钻井在沙特气田的应用[J].石油钻采工艺,2009,31(5):36-39.  
Zhang Hongjie, Zhang Deyou, Liu Yabin. The field application of managed pressure drilling in Saudi Arabia Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5):36-39.
- [11] 秦疆,杨顺辉,宋战培,等.沙特 B 区块高温高压深气井配套钻井技术[J].石油钻探技术,2010,38(5):51-55.  
Qin Jiang, Yang Shunhui, Song Zhanpei, et al. Block B of Saudi Arabia HTHP gas well drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(5):51-55.
- [12] 张桂林.土库曼斯坦亚苏尔哲别油田控压钻井技术[J].石油钻探技术,2010,38(6):37-41.  
Zhang Guilin. Application of managed pressure drilling technology in Azorse Area, Turkmenistan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6):37-41.
- [13] 孙凯,梁海波,李黔,等.控压钻井泥浆帽设计方法研究[J].石油钻探技术,2011,39(1):36-39.  
Sun Kai, Liang Haibo, Li Qian, et al. Research mud cap design of managed pressure drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1):36-39.

## 吐哈油田火山碎屑岩储层中发现油藏

近日,吐哈油田三塘湖盆地马 52 井在二叠系条湖组 1 881~1 891 m 井段试油成功,获得 6.14 m<sup>3</sup>/d 的工业油流。这是该盆地继砂岩、碳酸盐岩和火山岩储层中发现规模型油气藏以来,首次在火山碎屑岩储层中发现油藏。