

文章编号:1673-5005(2012)05-0100-05

一种新型节流压力控制系统原理及试验

刘 刚¹, 常 鑫¹, 刘志国², 赵永斌¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875)

摘/要:针对基于 PID 和比例伺服阀的控制装备存在过冲、反应时间长等问题,研发基于 PLC 和高速开关电磁阀的节流压力控制系统。介绍系统的主要组成及功能,建立压力控制数学模型,分析系统动态响应特性,并通过压力控制试验和压力阶跃试验检验系统的灵敏度与可靠性。结果表明:压力控制误差在 ± 0.3 MPa 以内,压力跟随效果优异;在改变控制压力和流量的试验条件下系统具有较高的灵敏度和可靠性。

关键词:节流压力; 高速开关电磁阀; 数值仿真; 试验

中图分类号:TE 831.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.05.018

Principle and experiment of a novel throttle pressure control system

LIU Gang¹, CHANG Xin¹, LIU Zhi-guo², ZHAO Yong-bin¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Nuclear Science and Technology Institute in Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The control system with PID and proportional servo valve has the defects of overshooting and long response time. A PLC and high-speed switch electromagnetic valve were used in the improved design. The components and its function of newly designed throttle pressure control device were introduced. A pressure control mathematical model was presented, and the dynamic response characteristics of this system were analyzed. The sensitivity and reliability of this system were tested and verified by pressure control and pressure step experiments. The results show that the pressure control fluctuations are less than ± 0.3 MPa. The pressure following effect is good. The pressure control system has high sensitivity and reliability under the experimental conditions of changing control pressure and flow rate.

Key words: throttle pressure; high-speed switch electromagnetic valve; numerical simulation; experiment

节流压力控制系统在油气井压井、欠平衡钻井及控压钻井过程中有着广泛的应用,它主要通过调节节流阀开度来控制井筒压力^[1-4]。以往研发的节流压力控制系统采用 PID+比例伺服阀的控制方式^[5],此类系统易产生压力过冲导致井筒压力波动,难以满足精细控压钻井及窄密度窗口地层的压力控制需求。笔者采用高速开关阀+PLC+间歇脉冲的控制方式,设计一种新型的节流压力控制系统。

1 系统整体设计

控制系统主要包括信号采集与显示(传感器与

计算机)、电液控制系统(PLC 控制器与电液转换元件)、执行装置(液压执行元件与液动节流阀)与控制软件 4 部分(图 1)。系统通过比对传感器采集到的实际压力数据与设置控制压力数据的差异,指令高速开关阀与换向阀的动作,实现对液动节流阀运动方向及开关时间的调节,完成自动控制节流压力的目标。

1.1 信号采集与显示

为了解工艺过程中主要参数的变化,需要对表征被控对象特征的关键参数进行采集和显示,该部分由传感器、PLC、工控机、连接电缆等组成(图 2)。

收稿日期:2012-03-12

基金项目:国家科技支撑计划(2008BAB37B02)

作者简介:刘刚(1960-),男(汉族),安徽利辛人,教授,博士,主要从事油气井工程方面的教学和科研工作。

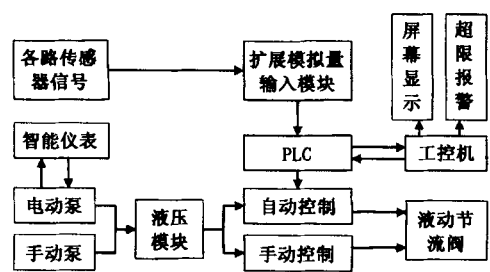


图 1 节流压力控制系统主要组成

Fig.1 Main components of throttle pressure control system

系统采集的钻井参数包括:①立管压力、套管压力、分离器出口压力、油源压力;②分离器出口气体流量、分离器出口液体流量;③一号节流阀开度、二号节流阀开度;④一号泵冲、二号泵冲、三号泵冲;⑤钻井液出口温度。

数据显示:①将采集的各路传感器信号通过 PLC 扩展模块 EM231 进行 A/D 转化后进入 PLC 进行处理;②PLC 利用 RS-232 与工控机通讯,通过组态软件将各路参数显示到控制系统电脑屏幕上;③通过局域网将各路采集参数传送到其他计算机,使得钻台及钻井监督等区域的主要人员能够实时观测相关参数变化。

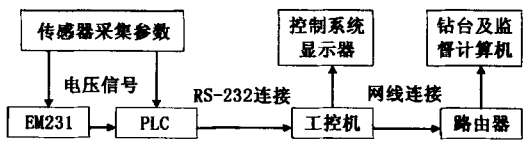


图 2 数据采集、传输及显示流程

Fig.2 Flow chart of data acquisition, transmission, display

1.2 电液控制

可编程控制器 PLC 作为节流压力控制系统的核心控制器对压力变化做出反应,对传感器采集到的数据和设定值进行比较,根据压差控制高速开关阀与换向阀的动作,以控制液压回路中液压油的流向与流量,实现自动控制液动节流阀开关和控制节流压力的目的。

1.3 执行机构

利用液压系统提供的液压能,通过电液转换元件控制进出液动节流阀液压缸的液压油流量,控制液动节流阀液压缸活塞杆的位移改变液动节流阀的钻井液通道开度,通过控制井口回压,达到控制井筒压力的目的。

1.4 控制软件

系统的控制软件由 PLC 控制程序及力控组态

程序构成,其主要作用是:①利用 PLC 完成对采集信号的处理并传至组态软件;②通过界面实现控压钻井关键参数的实时数据及曲线显示;③利用 PLC 实现实际数据和目标数据比较、分析和控制电液转换元件工作;④系统具有多重自动保护功能,实施危险操作和参数超限的自动报警和控制。

2 压力控制模型

节流压力控制原理见图 3。

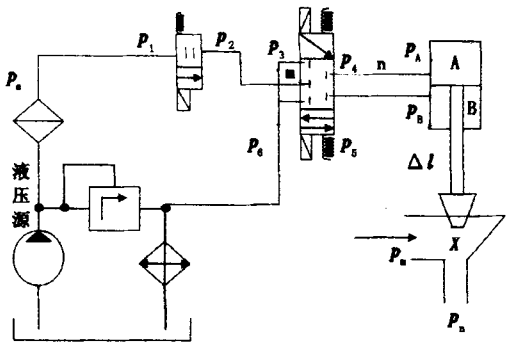


图 3 节流压力控制原理简图

Fig.3 Principle diagram of throttle pressure control system

2.1 基本原理

用 PLC 输出导通时间为 Δt 的脉冲来控制高速开关电磁阀的开闭,使液压油流量产生变化 ΔQ_A ,导致双向液压缸高压腔的流体体积发生改变,从而推动活塞移动 Δl ,带动液动节流阀的运动使液动节流阀钻井液出口面积变化,进而改变流经节流阀的钻井液的流阻,使控制压力产生 Δp 的变化。

2.2 假设条件

- (1) 设液压源的供油压力为 p_s ,由于管路较短,忽略其沿程摩阻损失。
- (2) 高速开关电磁阀运行周期为 T ,在 Δt 时间内导通^[6]。
- (3) 三位四通电磁换向阀在整个液压系统当中只起到改变液压油流向的作用,在收到换向信号后处于全开状态,对所输入的液压油流量不产生影响。
- (4) 选取液动节流阀为锥形阀^[7]。
- (5) 因为阀杆密封和液压缸活塞摩擦以及阀心自身重力的问题,要求液压缸推力 $F_p \geq KF$, K 取 1.1 ~ 1.2。

2.3 控制方程

根据上述基本原理和假设条件可以建立如下的控制方程组:

$$\begin{cases} \Delta Q = \frac{\Delta t}{T} c_d A_p \sqrt{\frac{2\Delta p_s}{\rho}}, \\ \Delta l = \frac{\Delta Q \Delta t}{S}, \\ F = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_m^2) p_m + \frac{\pi}{4} d_1^2 p_n + C_q C_v \pi \times \\ \Delta l (p_m - p_n) \sin 2\alpha, \\ F_y = p_A S_A - p_B S_B, \\ F_y \geq KF, \\ \Delta p = p_m - p_n. \end{cases}$$

联立求解,得控制压差 Δp ,即

$$\Delta p = p_m - \left[\frac{S_A}{K} \left(p_3 - \frac{\Delta t A_p}{T A_{SA}} \sqrt{\frac{2\Delta p_s}{\rho}} \right) - \left(p_6 - \frac{\Delta t A_p}{T A_{SB}} \sqrt{\frac{2\Delta p_s}{\rho}} \right) S_B + \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_m^2) + C_q C_v \pi \Delta l p_m \sin 2\alpha \right] \left(\frac{\pi}{4} d_1^2 - C_q C_v \pi \Delta l \sin 2\alpha \right)^{-1}.$$

式中, p_s 为液压油源压力, MPa; p_1 和 p_2 分别为高速开关阀入口和出口压力, MPa; p_3 和 p_4 分别为三位四通电磁换向阀入口和出口压力, MPa; p_6 为液压源油箱压力, MPa; p_m 为节流阀入口压力, MPa; p_n 为节流阀出口压力, MPa; p_A 为液压缸 A 腔压力, MPa; S_A 为液压缸 A 腔压力作用面积, m^2 ; S_B 为液压缸 B 腔压力作用面积, m^2 ; A_p 为流通面积, m^2 ; A_{SA} 为三位四通电磁换向阀 $m \rightarrow n$ 路全开时的面积, m^2 ; A_{SB} 为三位四通电磁换向阀 $o \rightarrow p$ 全开时的面积, m^2 ; d_0 为液压缸活塞直径, m; d_1 为节流阀出口直径, m; d_2 为锥形阀心最大直径, m; $d_m = \frac{d_1 + d_2}{2}$; Δl 为液压缸活塞位移, m; F 为节流阀轴向作用力, N; Δt 为导通时间, s; ΔQ 为导通时间内注入的液压油流量, m^3/s ; C_d 为开关阀的流量系数; C_q 为节流阀流量系数; C_v 为返出钻井液流量系数; α 为锥形角, rad.

3 系统动态响应特性

控制系统主要由压力传感器、高速开关电磁阀、三位四通换向阀、液动节流阀等组成。由于高速开关电磁阀的启闭延迟效应,可将其简化为一个一阶惯性环节,其传递函数为

$$W_s = \frac{K_0}{\tau s + 1}.$$

式中, τ 为占空比, s; s 为拉氏变换量; K_0 为增益系数。

液动节流阀是一个阀控液压缸直线位移控制系

统,可近似认为是振荡环节,根据流量连续性原理可以确定液压缸两腔的流量连续方程与活塞上的力平衡方程,忽略其弹性影响,得到液压缸的输出位移 G_s ,其拉氏变换为

$$G_s = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^3 + \frac{2\xi}{\omega_n} s^2 + s}.$$

式中, ω_n 为无阻尼振动频率, Hz; ξ 为液压阻尼比。

压力传感器的时间常数一般很小,所以检测反馈环节可将其看作比例系数为 K_f 的比例环节^[8-11]。

依据图 3 压力控制原理简图,建立系统的闭环传递函数方框图(图 4)。

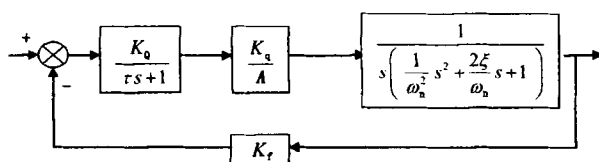


图 4 系统闭环传递函数方框图

Fig. 4 Closed-loop transfer function block diagram

其中,液压系统的 $\omega_n = 80$ Hz, $\xi = 0.2$, 占空比 $\tau = 0.1$ s, 系统开环增益 $K_0 = 1$, K_f 为传感器增益。

利用 Matlab/simulink 软件绘制系统的单位阶跃响应,得到系统的上升时间 $t_r = 0.1$ s; 调节时间 $t_s = 0.6$ s; 计算超调量 $\sigma = 22\%$ 。可见系统能够满足稳定、迅速、准确的要求。

4 试验结果分析

2010 年 8 月 26 日至 9 月 2 日在中海油服天津塘沽基地,对节流压力控制系统的参数指标及可靠性进行了试验。本次试验的工况:采用固井泵转速为 900 ~ 1 400 r/min,常用试验排量为 1 200 L/min;液动节流阀阀芯直径 $\Phi 50$ mm, 45° 锥面长度 10 mm, 100% 开度时阀芯位移 50 mm。

4.1 可靠性验证

评价系统可靠性的一个重要指标就是判断节流阀产生的压降是否接近标准值。采用理论计算和数值模拟两种方法求解节流阀开度与压降曲线,并将其与实测曲线进行比较。

(1) 理论计算。节流阀压降计算可由如下经验公式求解^[12]:

$$\Delta p = 0.25 \times 9.81 \times 10^{-6} \xi \frac{\rho v^2}{2}.$$

(2) 数值模拟。根据实际节流阀结构用 Pro/E 建立三维 CAD 模型,使用面向 CFD 的前处理器软件 Gambit 对内部流道进行网格划分,在 Fluent 软件

中采用求解压力耦合方程组的半隐式 SIMPLE 方法求解,紊流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 方程^[13]。

(3) 结果分析。根据试验记录数据,得到节流阀开度压降关系曲线以及数值拟合模型。将节流阀理论压降计算结果、CFD 软件数值模拟结果和试验拟合结果进行对比,见图 5。由图 5 可以看出:3 条

曲线吻合良好,其中试验拟合结果与理论计算结果的最大相对误差小于 19.3%;试验拟合结果与仿真结果的最大相对误差小于 12.2%,可见系统的控制精度较高,控制效果趋近标准值,说明该系统具有较高的可靠性。

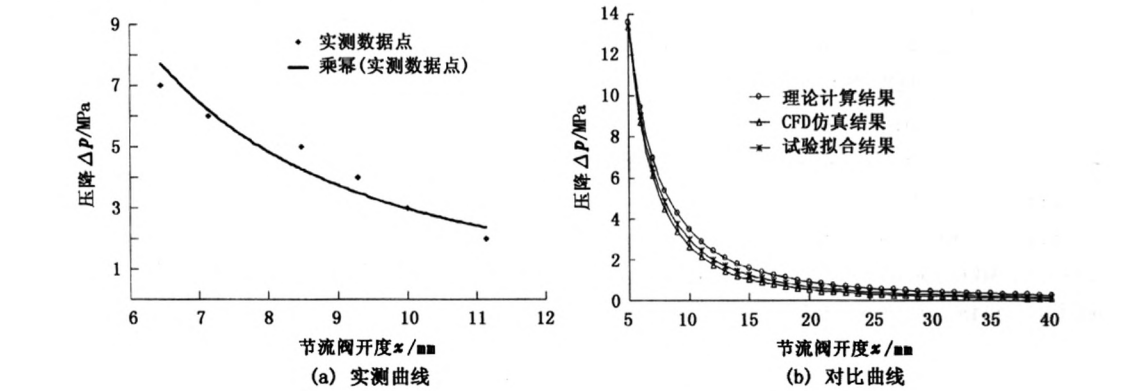


图 5 节流阀开度与压降关系曲线
Fig.5 Variation of pressure drop with throttle opening

4.2 压力控制试验

为了评价系统跟随目标压力的效果,进行了压力控制试验,结果见图 6。试验中,将控制套压从 1 MPa 依次提高至 7 MPa。

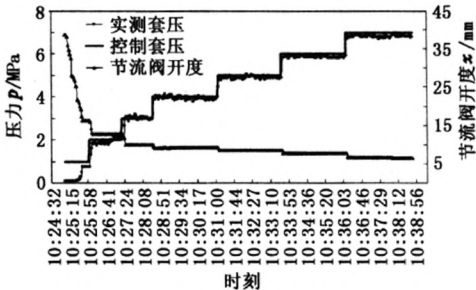


图 6 压力控制试验
Fig.6 Test of pressure control

从图 6 可以看出,控制过程中,系统反应迅速,节流阀开度逐渐减小,当压力值达到压力控制精确度范围后,节流阀停止动作。整个控制过程压力平稳,无过冲现象出现,压力波动为 $\pm 0.3\text{ MPa}$ 。由此可见,系统具有较好的压力跟随能力。

4.3 压力阶跃试验

为了评价系统在节流阀流量和控制压力发生较大改动时系统的控制敏感度和反应速度,进行了变排量(800 ~ 1 200 L/min)和变控制压力(0.5 ~ 7 MPa)试验,结果见图 7。试验中在 900 ~ 1 400 r/min 随机改变泵转速,不断随意改变泵排量的前提下,将控制套压由 7 MPa 降到 2 MPa 再提升到 6 MPa,又

降到 0.5 MPa 的变压力试验。从图 7 可以看出:节流阀在系统的控制下反应迅速,控制压力能够以较快速度达到控制要求,且很快趋于稳定;压力稳定后,节流阀开度基本不发生变化,压力控制准确,没有出现过冲现象。

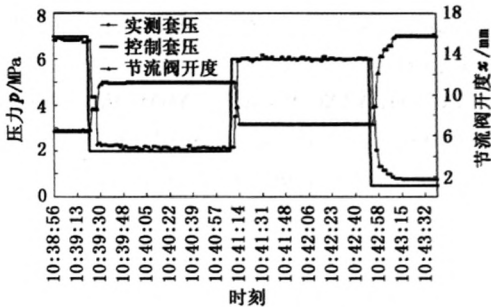


图 7 压力阶跃试验
Fig.7 Test of pressure step

5 结论及建议

- (1) 以 PLC+高速电磁阀开关的控制方式,提高了节流压力控制系统的控制精度,更好地满足了井筒压力控制反应速度,控制过程稳定。
- (2) 系统控制效果趋近标准值,压力控制误差在 $\pm 0.3\text{ MPa}$ 以内,压力跟随效果优异,在快速改变控制压力和频繁变化流量时仍具有较高的灵敏度和可靠性。
- (3) 系统的体积小,设备占用空间小,为海上平台面积受限条件下的控压钻井实践提供了手段。

(4)系统的制造成本低,可明显降低油气井节流压力自动控制设备的服务成本,适合于低成本控压钻井施工的需要。

参考文献:

- [1] RACHEL Johnson, JULIO Montilva, MOHAMED Sati, et al. Field demonstration of a new method for making drillpipe connections during managed pressure drilling operations [R]. SPE 147278, 2011.
- [2] FLORENCE F, GUGGARI M, KOEDERITZ W L, et al. Novel automation interface improves drilling efficiency and reliability [R]. IADC/SPE 112637, 2008.
- [3] JOHN Morten G, KJETIL Arne K. High performance and reliability for MPD control system ensured by extensive testing [R]. IADC/SPE 128222, 2010.
- [4] 刘刚,邢纪国,夏宏南. 欠平衡钻井节流压力控制技术[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(4): 53-54.
LIU Gang, XING Ji-guo, XIA Hong-nan. Underbalanced drilling throttle pressure control technology [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(4): 53-54.
- [5] 刘刚,杨忠峰,郑力会,等. 欠平衡钻井计算机伺服控制箱试验研究[J]. 石油矿场机械, 2001, 29(5): 9-11.
LIU Gang, YANG Zhong-feng, ZHENG Li-hui, et al. Underbalanced drilling computer servo control section control box test [J]. Oil Field Equipment, 2001, 29(5): 9-11.
- [6] YANG Ou, YANG Xiao-ping, YONG Hua. Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve [J]. Chinese Science Bulletin, 2008(17): 2706-2711.
- [7] 王德玉,刘清友,何霞. 高压节流阀的失效与受力分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 94-96.
WANG De-yu, LIU Qing-you, HE Xia. The failure of the high pressure throttle and stress analysis [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 94-96.
- [8] 王德玉,李才良,王启颜,等. 电液比例节流井控系统的动态分析[J]. 特种油气藏, 2006, 13(2): 101-104.
WANG De-yu, LI Cai-liang, WANG Qi-yan, et al. Dynamic analysis of battery-solution proportional throttle well control system [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(2): 101-104.
- [9] 张利平. 液压气动系统设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1977: 417-513.
- [10] 方昌林. 液压、气压传动与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2001: 116-130.
- [11] 于浩洋,初红霞,王希凤. MATLAB 实用教程-控制系统仿真与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2009: 4-55, 114-193.
- [12] 丁振龙. 平衡钻井井底压力自动控制技术研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(7): 63-65.
DING Zhen-long. Automatic control of bottomhole pressure during balanced drilling [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(7): 63-65.
- [13] 张晓东,李俊华. 基于 Fluent 的锥形节流阀流场数值模拟[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(9): 50-52.
ZHANG Xiao-dong, LI Jun-hua. Numerical simulation for flow field of conical wing valve based on fluent [J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(9): 50-52.

(编辑 李志芬)

(上接第 99 页)

- [6] 王安义,梁政,吴大飞. 连续管井下作业摩阻计算分析[J]. 石油机械, 2010, 38(1): 25-31.
WANG An-yi, LIANG Zheng, WU Da-fei. An analysis and calculation of the downhole operating friction of coiled tubing [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1): 25-31.
- [7] 高德利. 油气井管柱力学与工程[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2006: 16-68.
- [8] 于布,尹小玲. 水力学[M]. 2版. 广州:华南理工大学出版社, 2007: 151-155.
- [9] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1986: 45-75.
- [10] 张义,鲜保安,赵庆波,等. 煤层气欠平衡钻井环空注气工艺优化[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 398-402.
ZHANG Yi, XIAN Bao-an, ZHAO Qing-bo, et al. Optimization of annular gas injection technology in coalbed methane aerated under-balanced drilling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 398-402.

(编辑 李志芬)