

6-3-2020

Closed-Loop Feedback Simulation to Process of Ram Blowout Preventer Shut-in Locking

Fangzhou Zhang

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Ruixue Sun

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Wenjing Zhang

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Li Long

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Closed-Loop Feedback Simulation to Process of Ram Blowout Preventer Shut-in Locking

Abstract

Abstract: Well control training was explained mainly by teacher in recent years. Virtual simulation made it difficult for students to understand the actual operation. Application of drilling well control simulation training system solved effectively the problem of the scene seldom repetition and high cost of well control training. For the simulation of the process of ram blowout preventer shut-in locking in the well controlled physical simulation training system, the stepping motor driver and the stepping motor were installed in ram blowout preventer, and locking operation of the lock device was realized by using speed and torque of the stepping motor for the ram blowout preventer. *The closed-loop feedback control system of the stepping motor based on the lock of the ram blowout preventer was proposed.* To verify the feasibility of the method, the well control equipment was taken as the background of simulation calculation. Experimental results show the technique reliability and practicability.

Keywords

ram blowout preventer, lock device, the stepping motor, closed-loop, simulation

Authors

Fangzhou Zhang, Ruixue Sun, Wenjing Zhang, Li Long, and Li Qiang

Recommended Citation

Zhang Fangzhou, Sun Ruixue, Zhang Wenjing, Li Long, Li Qiang. Closed-Loop Feedback Simulation to Process of Ram Blowout Preventer Shut-in Locking[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 894-901.

闸板防喷器关井锁紧过程的闭环回馈仿真

张方舟, 孙瑞雪, 张文晶, 李龙, 李强

(东北石油大学计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 近年井控培训多以教师讲解为主, 虚拟仿真使学员难以理解实际操作。钻井井控实物仿真培训系统的应用, 可有效解决井控培训中场景不易复现、培训成本高等问题。针对井控实物仿真培训系统中关井时闸板防喷器锁紧操作的仿真化, 在闸板防喷器中加装步进电机驱动器和步进电机, 利用步进电机速度及转矩控制实现闸板防喷器锁紧装置的锁紧操作, 提出基于闸板防喷器锁紧过程步进电机的闭环回馈控制系统。为验证方法可行性, 利用井控设备进行仿真计算, 实验结果证明其可靠性及实用性。

关键词: 闸板防喷器; 锁紧装置; 步进电机; 闭环; 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)04-0894-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704026

Closed-Loop Feedback Simulation to Process of Ram Blowout Preventer Shut-in Locking

Zhang Fangzhou, Sun Ruixue, Zhang Wenjing, Li Long, Li Qiang

(College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Well control training was explained mainly by teacher in recent years. Virtual simulation made it difficult for students to understand the actual operation. Application of drilling well control simulation training system solved effectively the problem of the scene seldom repetition and high cost of well control training. For the simulation of the process of ram blowout preventer shut-in locking in the well controlled physical simulation training system, the stepping motor driver and the stepping motor were installed in ram blowout preventer, and locking operation of the lock device was realized by using speed and torque of the stepping motor for the ram blowout preventer. *The closed-loop feedback control system of the stepping motor based on the lock of the ram blowout preventer was proposed.* To verify the feasibility of the method, the well control equipment was taken as the background of simulation calculation. Experimental results show the technique reliability and practicability.

Key words: ram blowout preventer; lock device; the stepping motor; closed-loop; simulation

引言

井控工作是石油和天然气勘探开发过程中的

重要环节, 于安全生产工作中发挥重要作用。钻井及井控是一项投资大、风险大、技术知识覆盖面广的作业, 对司钻的培训和考核极为重要^[1]。目前, 利用钻井及井控仿真系统模拟钻井平台操作的培训设备已被广泛应用于石油天然气行业, 用以对钻井技术人员进行实验、培训及考核等。传统的钻井及井控仿真系统设计多采用代码文本式开发环境, 属虚拟仿真, 其存在编程繁琐、调试困难、仿真设



收稿日期: 2015-06-17 修回日期: 2015-09-09;
基金项目: 国家自然科学基金(61402099), 中国石油天然气集团公司重大专项(2013E-38-09);
作者简介: 张方舟(1973-), 男, 河南商丘, 博士, 教授, 研究方向为计算机网络与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

备与系统间交互性和灵活性低以及开发效率低等问题。相对井控虚拟仿真, 井控实物仿真具有实用性强、可重复操作、操作环境完全真实等优点^[2]。

在钻井井控培训仿真系统设计过程中, 为模拟开关动作在闸板防喷器内加装步进电机, 为接收手动锁紧的圈数信号在阀门内安装传感器等, 进行机械锁紧的仿真培训, 进而对锁紧过程中的关键部件步进电机建立回馈仿真算法, 以实现步进电机对锁紧过程中锁紧轴位移及旋转的精确操作。

1 闸板防喷器

闸板防喷器主要由壳体、侧门、闸板轴、油缸、活塞、锁紧轴、缸盖、二次密封装置、锁紧装置等组成, 闸板防喷器壳体上方以双头螺栓连接环形防喷器或直接连接防溢管, 壳体下方以双头螺栓连接四通。

闸板防喷器液压锁紧装置:

闸板防喷器的液压锁紧装置是一种机械锁紧装置, 不过闸板锁紧和解锁动作都是利用液压完成的。因此这种机构常称为液压锁紧装置, 主要有离合器自动锁紧、横向锁紧、活塞锁紧等。

液压锁紧过程: 液压锁紧装置在关井时, 液控压力油进入油缸的关井油腔, 推动主活塞向井口中心移动, 当主活塞移动到位时闸板将井封住。此时, 主活塞上的四个锁紧块对准油缸台阶部位, 锁紧活塞在液控压力油以及压缩弹簧的联合作用下向井口中心移动, 从而将锁紧块挤压在油缸台阶部位。如此, 主活塞被固定, 闸板即被锁紧。当液控压力油卸压后仅靠弹簧力的作用仍能将四个锁紧块牢牢地卡在油缸台阶部位, 维持锁紧状态^[3]。

2 基于闸板防喷器锁紧过程步进电机的闭环回馈控制系统

针对钻井井控设备闸板防喷器上锁紧轴位置、闸门位置、视角等操作动作的信息采集过程, 将信息通过 PLC 控制系统进行设备参数的整理、分析

以及逻辑判断, 进而在教师计算机上进行数据运算、控制输出、结果显示过程以及闸板锁紧轴位置控制结果显示过程。为使仿真工况过程能够逼近真实操作工况, 设计一种适合闸板防喷器关井锁紧过程中步进电机的闭环回馈仿真算法。

2.1 步进电机闭环控制系统研究现状

钻井井控设备闸板防喷器内安装的步进电机是数字式控制电机, 其控制系统具有闭环、开环两种方式, 维持恒定的变量不同是两者主要区别。步进电机开环控制系统中, 无需对转子的速度或者位置进行回馈, 因此, 步进电机必须准确且迅速响应励磁变化^[4]。如若励磁变化速度太快, 步进电机易出现丢步现象, 则不能到达要求的新位置, 不可逆误差会存在于实际负载位置与计算理论位置之间。鉴于此, 步进电机闭环控制方式即体现出优越性。

目前, 步进电机闭环控制系统处于新兴研究领域。大体上步进电机闭环控制方法分为以下两种, 其中一种是以步校验为主由不同传感器组成的回馈闭环控制方法; 另一种则是以反电动势为主不带传感器形成闭环控制方法^[5]。图 1 为模拟闭环回馈控制原理图。

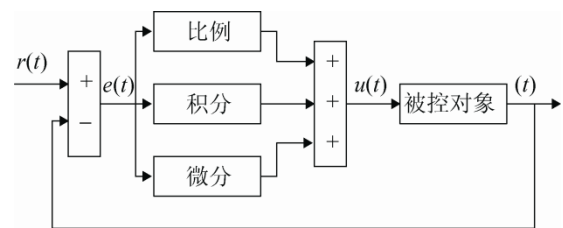


图 1 模拟闭环回馈控制原理图

Fig. 1 Simulation of Closed-Loop Feedback Control Principle Diagram

2.2 闸板防喷器关井锁紧过程 PID 算法的建立

在钻井井控培训过程中, 关井是最为重要的一个培训项目, 关井迅速、精准性都关系到井控操作的安全性, 在关井锁紧过程中, 模拟 PID 调节器的控制原则为:

$$u = K_p(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t edt + T_D \frac{de}{dt}) + u_0 \quad (1)$$

式中： T_I 是积分常数； T_D 是微分常数； K_P 则是比例系数。

式(1)中积分的作用是用以提高 PID 系统的无差度，消除此控制系统的静态误差。在闸板防喷器锁紧过程的 PID 回馈系统中对 T_I 的设置为：于控制初始阶段，恰当减小 T_I 以避免积分饱和，进而减小系统超调。

式(1)中微分的作用是改善具有较大惯性的被控对象即闸板防喷器锁紧轴的动态性能。在闸板防喷器锁紧过程的 PID 回馈系统中对 T_D 的设置为：于初始阶段增大系统的微分作用，减小超调；于过程中期恰当减小系统微分作用，以防影响系统动态稳定；于控制末期减小系统微分作用，进而提高此系统抗干扰的能力。

式(1)中比例系数的作用主要是控制系统偏差信号。增大 K_P 可减小系统稳态误差，同时减少控制系统响应时间以提高系统的控制精度。但是 K_P 过大系统则会产生超调现象而降低系统稳定性； K_P 过小则会增大此控制系统的稳定度，降低系统超调量，但系统过渡时延变大，则会降低系统稳态精度。

在关井锁紧过程中计算机的控制是数字式采样控制，它并不能像模拟控制器一样做到连续输出控制量，从而实现对闸板防喷器锁紧轴的连续控制，只能基于采样时刻的偏差值计算出系统控制量，从而对闸板防喷器锁紧轴进行离散控制。因此，在式(1)中涉及到的微分项与积分项，在计算机上可利用数值计算进行无限近似值计算，很难直接进行计算求值。若采样周期为时间 T ，连续时间 t 由离散采样时刻点 iT 来代替，积分由和式来代替，式中微分项由增量来替换，即可做如下变换：

$$\left\{ \begin{array}{l} t = iT \quad i = 0, 1, 2, \Lambda \\ \int_0^t e(t)dt = T \sum_{j=0}^i e_j \\ \frac{de(t)}{dt} = \frac{e_i - e_{i-1}}{T} \end{array} \right. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)，得离散控制近似公式：

$$u_i = K_p[e_i + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^i e_j + \frac{T_D}{T}(e_i - e_{i-1})] + u_0 \quad (3)$$

式中： e_i 为 PID 系统第 i 个采样时刻的输出偏差； u_0 为初始控制常量； u_i 为第 i 个采样时刻的输出值。

如果系统采样周期 T 足够小，则连续控制过程与被控制过程无限接近，使上述近似过程的计算相对准确。基于式(3)，计算出 PID 控制器第 $i-1$ 个采样时刻的值 u_{i-1} ，则可由此计算出增量式 PID 算法。

$$u_{i-1} = K_p[e_{i-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{i-1} e_j + \frac{T_D}{T}(e_{i-1} - e_{i-2})] + u_0 \quad (4)$$

将式(3)与式(4)相减且进行整理，则可计算出增量式 PID 控制算法应用公式。

$$\Delta u_i = u_i - u_{i-1} = K_p[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_I} e_i + \frac{T_D}{T}(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})] \quad (5)$$

由于电机控制需要反应迅速、计算时间短，是实时性很强的快速控制。为减少计算时间，可将式(5)进行整理并改写成为：

$$\Delta u_i = K_p[1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}]e_i - K_p[1 + \frac{2T_D}{T}]e_{i-1} + K_p \frac{T_D}{T} e_{i-2} = a_0 e_i - a_1 e_{i-1} + a_2 e_{i-2} \quad (6)$$

需进行 PID 参数调整时，每次调整都需要计算一次 a_0 、 a_1 和 a_2 。因此，还可将式(5)写作如下形式：

$$\Delta u_i = K_p[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_I} e_i + \frac{T_D}{T}(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})] = K_p \Delta e_i + K_I e_i + K_D \Delta^2 e_i \quad (7)$$

由上式可得，增量式算法相比位置式算法，工作量较小、计算时间较短，进行推导计算只需保留所求值前三个时刻的偏差值，对于复杂的闸板防喷器关井锁紧过程，适合进行回馈仿真。

2.3 闸板防喷器关井锁紧过程中步进电机闭环控制系统的建立

闸板防喷器关井锁紧过程中步进电机主要控制锁紧轴的旋转及位移变化，是决定锁紧过程精准完成的关键所在，因步进电机结构简单、可靠性高、无积累误差和成本低等特点，所以被广泛用于各类开环控制系统^[6]。但当步进电机负载过大或启动频率过高时，则容易出现堵转、丢步现象，停止时转

速过高容易导致过冲现象, 为保证系统控制精度, 需加入反馈电路组建成高性能的闭环反馈控制系统, 依据此实际需要, 建立闸板防喷器锁紧过程步进电机闭环反馈控制系统, 其原理图如图 2 所示。

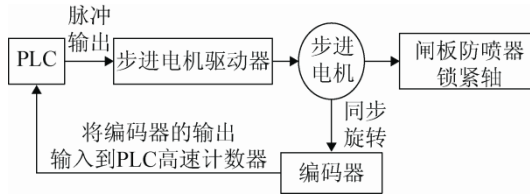


图 2 步进电机闭环控制系统原理图

Fig. 2 Closed-Loop Control System Principle of the Stepping Motor Diagram

由图 2 可知, PLC 的方向信号以及高速输出脉冲信号先经驱动放大, 然后送往步进电机, 进而控制其工作; 闸板防喷器内步进电机带动编码器同轴旋转, 此过程中旋转角度由编码器检测, 然后以脉冲形式反馈到 PLC 的高速计数器中; 最后 PLC 将脉冲反馈当量值与预定脉冲值相比较, 进而发出脉冲控制指令, 从而实现闸板防喷器锁紧过程中步进电机的闭环反馈控制。

2.3.1 步进电机系统数学模型

由于闸板防喷器内安装的步进电机高度非线性, 为进行较为精确地步进电机建模, 需进行一定的假设与简化, 其中不计永磁体回路漏磁现象、端部和定子极间的漏磁, 忽略涡流、磁滞以及饱和的影响^[7]。于是在井控设备闸板防喷器内安装的两相混合式步进电机, 其电压方程即可以表示为:

$$\begin{cases} U_A = r_A i_A + (L_0 - L_2 \cos 2\theta) \frac{di_A}{dt} - L_2 \sin 2\theta \frac{di_B}{dt} + \\ \quad 2L_2 (i_A \sin 2\theta - i_B \cos 2\theta) - k_e \omega_r \cos \theta \\ U_B = r_B i_B + (L_0 + L_2 \cos 2\theta) \frac{di_B}{dt} - L_2 \sin 2\theta \frac{di_A}{dt} - \\ \quad 2L_2 (i_B \sin 2\theta + i_A \cos 2\theta) + k_e \omega_r \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_A 和 U_B 是两相绕组上施加的电压, ω_r 为转子机械角, r_A 和 r_B 是两相绕组内部的电阻, k_e 是步进电机的反电动势, L_2 和 L_0 则分别是绕组基波分量与自感的平均分量。

闸板防喷器关井锁紧过程中步进电机转矩方程如式(9)所示。

$$T_e = B \cdot \omega_r + J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + T_L \quad (9)$$

式中: B 为电机粘滞摩擦的系数, J 为转动惯量, T_L 是电机的负载转矩。

反应转矩 T_s 由定子绕组磁动势 F_s 激发, 一相绕组在通电时, 它在步进电机中的输入磁能为:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (10)$$

式中: L 为电机绕组自感; I 为电机绕组中通入电流。

由于存在绕组间互感, 当两相绕组都存在电流时, 感应磁能为:

$$W_s = p \left[\frac{1}{2} i_A^2 L_{AA} + \frac{1}{2} i_B^2 L_{BB} + i_A i_B M_{AB} \right] \quad (11)$$

反应转矩:

$$T_s = \frac{dW_s}{d\theta} = p \left[\frac{1}{2} i_A^2 \frac{\partial L_{AA}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{\partial L_{BB}}{\partial \theta} + i_A i_B \frac{\partial M_{AB}}{\partial \theta} \right] \quad (12)$$

若将转子电流 I_m 励磁建立的磁场等效成永磁体, 则有:

$$T_m = \frac{dW_m}{d\theta} = p \left[I_m i_A \frac{\partial M_{Am}}{\partial \theta} + I_m i_B \frac{\partial M_{Bm}}{\partial \theta} \right] \quad (13)$$

鉴于此, 若不计磁导空间谐波, 闸板防喷器内两相混合式步进电动机电磁转矩可以表示为:

$$T_e = T_s + T_m \quad (14)$$

将永磁转矩 T_m 和反应转矩 T_s 叠加, 可得:

$$T_e = T_s + T_m = p \left[\frac{1}{2} i_A^2 \frac{\partial L_{AA}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{\partial L_{BB}}{\partial \theta} + i_A i_B \frac{\partial M_{AB}}{\partial \theta} \right] + p \left[I_m i_A \frac{\partial M_{Am}}{\partial \theta} + I_m i_B \frac{\partial M_{Bm}}{\partial \theta} \right] \quad (15)$$

又有

$$\begin{cases} L_{AA} = L_0 - L_2 \times \cos(2\theta) \\ L_{BB} = L_0 + L_2 \times \sin(2\theta) \\ M_{AB} = M_{BA} = -L_2 \times \sin(2\theta) \\ M_{Am} = M_{sr} \times \cos \theta \\ M_{Bm} = M_{sr} \times \sin \theta \end{cases} \quad (16)$$

式中: P 是转子齿数, L_{AA} 、 L_{BB} 是绕组的自感; M_{AB} 是绕组的互感; I_m 是永磁体等效励磁的电流; M_{Am} 、 M_{Bm} 是 A、B 永磁体等效励磁与相绕组的电流互感。

将式(16)代入式(15), 可得:

$$T_e = p \left[L_2 \sin 2\theta \cdot (i_A^2 - i_B^2) - 2i_A i_B L_2 \cos 2\theta \right] + p I_m M_{sr} (-i_A \sin \theta + i_B \cos \theta) \quad (17)$$

2.3.2 步进电机闭环控制系统

利用矢量转换技术对闸板防喷器锁紧过程中步进电机建立一个电流闭环与转速闭环的两相混合式步进电机的闭环回馈控制系统^[8]。在建立的闭环回馈控制系统中，主要包含两个闭环控制：一个是电流矢量闭环，另一个是速度闭环；两次矢量转换：一是电压矢量反转换，二是电流矢量转换^[9]。

为实现控制输出电磁转矩，将两相绕组上的电流转变为直轴和交轴上的矢量电流，即可控制直轴及交轴上的电流。鉴于此，将电机两相绕组电流变换矢量坐标，定子电流即变换到 d, q 轴上，于是得：

$$\begin{cases} i_d = i_A \cos \theta + i_B \sin \theta \\ i_q = -i_A \sin \theta + i_B \cos \theta \end{cases} \quad (18)$$

同时可求出 d, q 轴电压进行静止坐标变换的公式：

$$\begin{cases} u_A = u_d \cos \theta - u_q \sin \theta \\ u_B = u_d \sin \theta + u_q \cos \theta \end{cases} \quad (19)$$

为使两相混合式步进电机磁阻转矩被充分利用，采用在相应转速限度内按照最大电流/转矩曲线对其做最大电流/转矩控制的策略是较为理想的^[10]。因而在电流闭环控制中，对速度控制器中获得的电流给定值进行最大电流/转矩控制，并比较反馈电流的矢量形式，同时进行相关转化与计算，经过电压矢量反转换对两相混合式步进电机进行控制^[11]。在速度闭环控制中，首先对速度给定值与闭环系统速度反馈值进行比较，最后再进行转化以及计算^[12]。根据速度闭环回馈控制以及电流闭环回馈控制，建立闸板防喷器锁紧过程中步进电机的闭环控制系统，系统结构如图 3 所示。

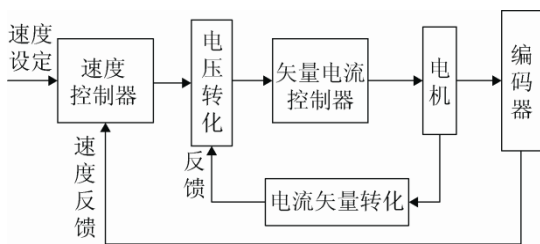


图 3 步进电机闭环控制系统

Fig. 3 Closed-Loop Control System of the Stepping Motor

3 关井应用及仿真

3.1 关井流程

发现溢流后迅速关井是防止发生井喷最关键的措施。发现溢流后迅速关井有利于取得井控工作的主动权，有利于防止地层流体继续进入井内、井内保持较多的钻井液、减小关井套管压力和准确计算地层压力及钻井液密度。

闸板防喷器在关井锁紧过程中，步进电机驱动器驱动步进电机使锁紧轴移动实现闸板防喷器锁紧状态，从而实现关井，这是仿真培训操作非常关键的培训项目。

3.2 仿真结果

由式(18)和式(19)得电压矢量反转换与电流矢量转换模型，运用 MATLAB/Simulink 建立仿真图如图 4 和图 5 所示。

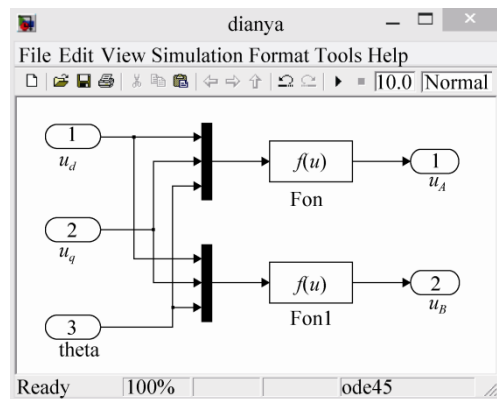


图 4 电压矢量反转换模型

Fig. 4 Voltage Vector Inverse Transformation Model

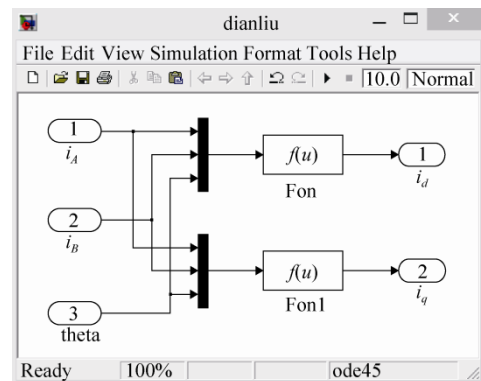


图 5 电流矢量转换模型

Fig. 5 Current Vector Transformation Model

PID 模块采用模糊参数自适应 PID 设计法。模糊规则给出的是在不同实时状态下对 PID 参数的推理结果。控制过程中, 把偏差和偏差变化率当作输入量, 然后模糊化处理输入量, 并按照步进电机特点设定的模糊控制规则进行相对应的模糊处理, 经解模糊处理以及比例变换, 得到 PID 控制器相

关参数, 以此得到 PID 控制器的输出参量^[13]。对模糊控制器的仿真模型进行封装, 建立 PID 仿真模型, 如图 6 所示。

根据两相混合式步进电机电压方程(8)和转矩方程(9), 可在 Matlab/Simulink 中搭建步进电机仿真模型, 如图 7 所示。

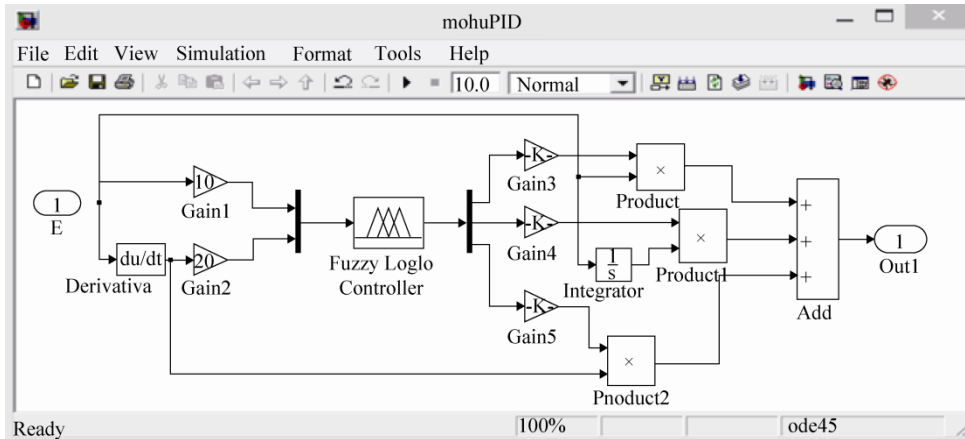


图 6 PID 仿真模型
Fig. 6 PID Simulation Model

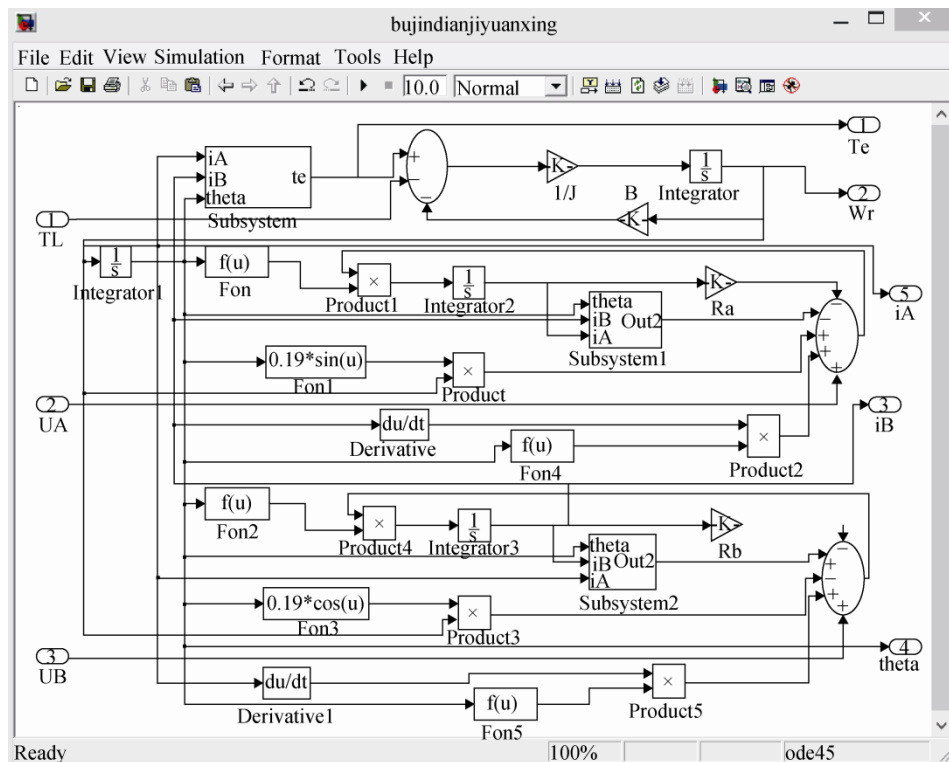


图 7 两相混合式步进电机仿真模型
Fig. 7 Two-Phase Hybrid Stepping Motor Simulation Model

对于闸板防喷器关井锁紧过程中的步进电机，参数设置如下：绕组电阻为 0.7Ω ，电感为 $0.0014 H$ ，最大磁链为 $0.005 Vs$ ，步进角为 1.8° ，最大起动转矩为 $0.002 N.m$ ，总惯量为 $1.2e^{-7} kg.m^2$ ，初始速度为 $0 r/min$ 。

基于步进电机参数设置搭建此动态系统闭环仿真模型，如图 8 所示。

根据建立的步进电机仿真模型，在开始时施加负载为 $0 N.m$ ，直到 $0.05 s$ ，施加一个负载转矩 $1 N.m$ ，驱动电压 $28 V$ 。步进电机速度与转矩仿真结果，如图 9 所示。

基于 PID 算法的步进电机速度与转矩仿真结果，如图 10 所示。

将 PID 算法中 T_D 的影响忽略不计，即改为 PI 算法，其余模块保持一致，其速度与转矩仿真结果，如图 11 所示。

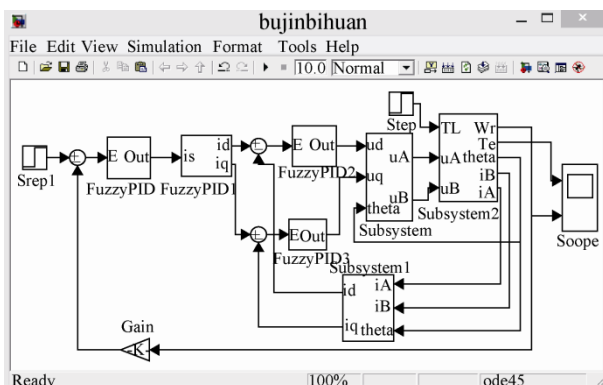


图 8 步进电机闭环仿真模型

Fig. 8 Stepping Motor Closed-Loop Simulation Model

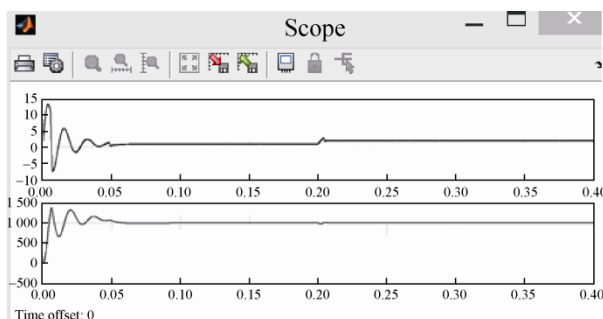


图 9 步进电机速度与转矩仿真结果

Fig. 9 Speed and Torque Simulation Results of the Stepping Motor

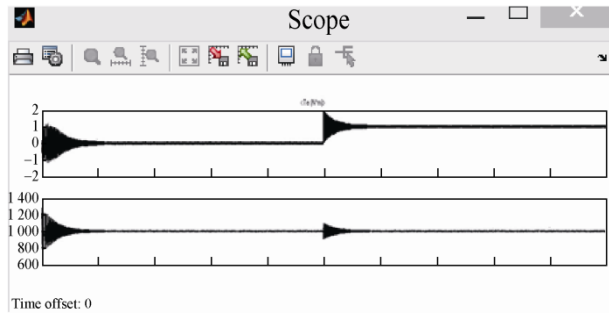


图 10 PID 算法速度与转矩仿真结果

Fig. 10 Speed and Torque Simulation Results Based on PID Algorithm

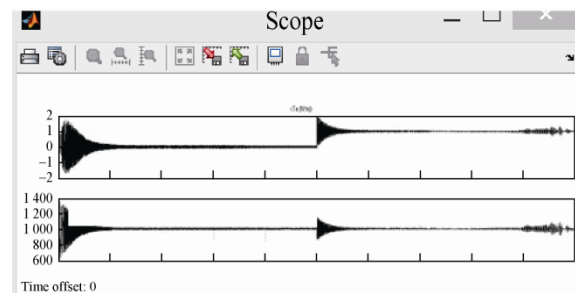


图 11 PI 算法速度与转矩仿真结果

Fig. 11 Speed and Torque Simulation Results Based on PI Algorithm

将图 9 与图 10、图 11 相比，可以看出：图 9 中速度与转矩在初始阶段波动幅度较大，但在系统稳定后，曲线较图 10、图 11 更为平滑，如此可证明建立的步进电机的模型具有良好的控制性能。将图 10 与图 11 进行对比，PID 算法步进闭环控制系统所得到仿真结果相较 PI 算法的仿真结果，扰动幅度小且响应时间短。

闸板防喷器锁紧过程中步进电机闭环仿真系统的相关仿真结果表明：此闭环反馈控制系统具有较好的动态响应能力和控制性能，即使在初始阶段速度和转矩有一定的不稳定波动，但是仍然能较快地达到稳定状态。并且在施加负载扰动之后，系统仍能较快地趋于稳定，因此对于闸板防喷器锁紧过程的仿真是切实可行的。

4 结论

本文针对井控实物仿真培训系统关井过程中

闸板防喷器锁紧操作的仿真化, 采用在闸板防喷器中加装步进电机驱动器和步进电机的方法, 利用步进电机的位移和旋转控制实现了闸板防喷器锁紧轴的锁紧操作。首先研究闸板防喷器工作原理以及锁紧过程的详细步骤; 然后对闭环反馈控制系统进行简要介绍, 对步进电机进行数学建模, 研究基于闸板防喷器锁紧过程的闭环反馈算法, 进而建立闸板防喷器关井锁紧过程中步进电机的闭环反馈控制系统; 最后以钻探工程公司真实井控设备为仿真背景, 根据井控实际操作流程进行 MATLAB/Simulink 仿真。仿真结果表明, 此方法有效地实现了闸板防喷器关井操作过程中锁紧装置的锁紧过程。

参考文献:

- [1] 石油天然气钻井井控编写组. 石油天然气钻井井控 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008. (Compile Group of Oil and Gas Drilling Well Control. Oil and Gas Drilling Well Control [M]. Beijing, China: Petroleum Industry Press, 2008.)
- [2] 田岚. 石油天然气钻井工程风险识别与评价方法 [J]. 钻采工艺, 2010, 33(2): 31-33. (Tian Lan. Risk Identification and Evaluation Method in Drilling Engineering [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(2): 31-33.)
- [3] 集团公司井控培训教材编写组. 井下作业技术、管理人员井控技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013. (Compilation of Group Company Well Control Training Teaching Materials. Drilling Technology and Manager and Well Control Technology [M]. Dongying, China: China University of Petroleum Press, 2013.)
- [4] Asgeir J Sorensen. Structural Properties in the Design and Operation of Marine Control Systems [J]. IFAC Journal on Annual Reviews in Control (S1367-5788), 2005, 29(1): 125-149.
- [5] 曾康玲. 两相混合步进电机开环性能优化与闭环控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014. (Zeng Kangling. Research on Open-Loop Performance Optimization and Closed-Loop Control for Two-Phase Hybrid Stepper Motor [D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2014.)
- [6] 刘宝志. 步进电机的精确控制方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010. (Liu Baozhi. The Study of Exactly Control Stepping Motor [D]. Jinan, China: Shandong University, 2010.)
- [7] 徐兆华. 高速高精度步进闭环控制系统的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013. (Xu Zhaohua. Research of High Performance Closed-Loop Control System for Stepper Motor [D]. Taiyuan, China: North University of China, 2013.)
- [8] 高琴, 刘淑聪, 彭宏伟. 步进电机控制系统的设计及应用 [J]. 制造业自动化, 2012, 34(1): 150-152. (Gao Qin, Liu Shucong, Peng Hongwei. Design and Application of the Stepper Motor Control System [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(1): 150-152.)
- [9] 张前毅. 一种提高步进电动机定位精度的方法 [J]. 工矿自动化, 2010, 36(4): 120-122. (Zhang Qianyi. A Method of Improving Locating Precision of Stepping Motor [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(4): 120-122.)
- [10] 吕帅. 一类半严格反馈型非线性参数化系统的自适应控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (Lv Shuai. Study on the Adaptive Control for a Class of Semi-Strict Feedback Nonlinearly Parameterized Systems [D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2012.)
- [11] J H Kim, S H Lee, Hongmei Wang. Similarity Measure Application to Fault Detection of Flight System [J]. Journal of Central South University of Technology (S2095-2899), 2009, 16(5): 789-793.
- [12] 孙爽. 基于模糊 PID 系统的自动控制器设计分析 [J]. 机电信息, 2012, 26(6): 145-147. (Sun Shuang. Design and Analysis of Automatic Controller Based on Fuzzy PID System [J]. Mechanical and Electrical Information, 2012, 26(6): 145-147.)
- [13] 田海, 李军. 基于 Matlab 的模糊自整定 PID 控制器仿真研究 [J]. 工业控制计算机, 2011, 24(6): 24-25. (Tian Hai, Li Jun. Simulation Study of Fuzzy Self-Tuning PID Controller Based on Matlab [J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(6): 24-25.)