

旋转导向钻井稳定平台控制系统仿真研究

薛启龙¹ 韩来聚² 杨锦舟² 黄蕾蕾¹ 施斌全²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 东营 257061;2. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院,山东 东营 257017)

摘要:深入分析了调制式旋转导向钻井系统稳定平台的控制原理,在 MATLAB/SUMULINK 中建立了其控制系统模拟模型。该模型充分考虑了井下复杂状况,引入了一系列影响控制系统的因素,如上下涡轮电机的相互影响、轴承对平台的摩擦扭矩、旋转的钻井液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等。采用传统的 PID 控制算法,即使在采用最优 PID 参数的情况下,仍然无法得到令人满意的效果。鉴于此,提出了一种采用偏差模糊控制和微调增量的新型模糊控制算法。模拟结果表明,所采用的模糊控制方法能够更快地跟随控制信号,并且超调量较小,提高了系统的抗干扰能力。

关键词:旋转导向;稳定平台;模糊控制;模拟;数学模型

中图分类号:TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0010-05

Study on Controlling Simulation System for Stabilizing Platform in Rotary Steering Drilling System

Xue Qilong¹ Han Laiju² Yang Jinzhou² Huang Leilei¹ Shi Binquan²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Drilling Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: This paper analyzed the controlling principle of Rotary Modulation Steering Drilling System for stabilizing platform, and established a controlling simulation model using MATLAB/SUMULINK. Given the complex downhole conditions, a series of factors affecting the control system were introduced, including the interaction between the upper and lower turbine motor, bearing friction torque on the platform, viscous friction torque transferred to the platform by rotating drilling fluids, the friction torque of disc valve system to platform. Using optimal PID parameters, the results are not satisfactory. In view of this, a novel fuzzy control algorithm which uses fuzzy control errors and fine-tuning increments was introduced. The simulating results show that it follows the control signal quickly, has small overshoot, and improves system's anti-jamming ability.

Key words: rotary steering; stabilized platform; fuzzy controlling; simulation; mathematical model

1 概 述

旋转导向钻井技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一项尖端自动化钻井新技术,该技术的发展,促使自动控制理论被广泛应用到钻井工程技术研究中,一方面促使钻井技术朝着更高的自动化智能化方向发展,另一方面也为现代控制理论,特别是近期被广泛应用的智能控制算法提供了研究与应用的平

台^[1-2]。国外许多石油公司已经形成了能够应用于现场的旋转导向钻井系统及应用技术,并取得了明

收稿日期:2010-02-01; **改回日期:**2010-06-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“旋转导向钻井系统关键技术研究”(编号:2003AA602013)部分研究内容

作者简介:薛启龙(1983—),男,2006年毕业于中国石油大学(华东)电气工程及其自动化专业,油气井工程专业在读硕士研究生,助理工程师,主要从事油气井工程信息、机械和控制方面的研究工作。

联系方式:13561053294, xqilong2008@163.com

显的效益^[3-5]。

旋转导向钻井系统控制的最终目的,是通过控制旋转导向钻井系统导向力的大小和方向,实现对井眼轨迹的控制。旋转导向钻井过程中,钻柱一直处于旋转状态,因此,为了实现导向力大小及方向的精确控制,作为控制系统核心的稳定平台必须具有保持自身稳定的能力,并能根据需要按一定的速度转动或摆动。由于井下工况复杂,扰动因素多,致使稳定平台具有非线性和时变性,控制系统的精确模型难以建立,这些都为旋转导向钻井系统稳定平台的精确控制提出了很大的挑战。国外对相关控制的技术细节报道较少,国内西安石油大学、胜利油田钻井工艺研究院分别对稳定平台的控制性能、控制方法做了初步分析和试验论证。从相关文献^[6-8]可以看出,旋转导向钻井稳定平台的控制,正在朝着智能化的方向发展,利用现代智能控制方法,有望解决在稳定平台控制过程中井下参数多变、扰动因素多等因素所造成的控制精度低、控制

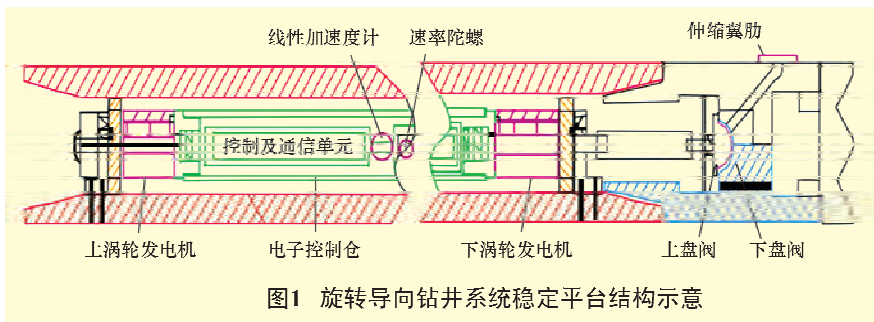
难度大等问题。

笔者充分考虑井下参数变化,建立了较为接近实际的模拟模型,并利用该模型模拟分析了 PID 控制的局限性和智能模糊控制的优越性,提出了进一步的研究重点与发展方向。

2 稳定平台工作原理及数学模型

2.1 工作原理

旋转导向钻井系统的稳定平台由上涡轮发电机、下涡轮发电机、电子控制仓及上盘阀、下盘阀组成(见图 1)。上涡轮发电机为井下的各种电子设备供电,下涡轮发电机为电枢电流可控的扭矩发生器,是稳定平台控制系统的主要执行机构。上、下涡轮电机的设计结构基本相同,属于外转子式的永磁同步电机,由于磁通 Φ 为恒值,所以电机输出力矩与电枢电流成正比。电子控制仓完成系统输出信号的检测并输出相应控制指令。



在电子控制仓中,由线性加速度计检测稳定平台的工具面角和井斜角,速率陀螺用于检测稳定平台的转动趋势及角速度。上涡轮发电机与下涡轮发电机以相反的方向旋转,分别产生方向相反的电磁扭矩,通过控制下涡轮发电机的电枢电流使其产生的扭矩与上涡轮发电机、上盘阀、下盘阀及转动摩擦所产生的扭矩相平衡,即实现稳定平台的滚动稳定,从而使稳定平台带动的上盘阀稳定到预置工具面角^[7-9]。

2.2 控制系统数学模型

上涡轮发电机主要为系统提供电能,其所带负载恒定,所以其电磁转矩可以由下式确定^[10]。

$$M_{E1} = \frac{2p_1^2 \Phi^2 Z_{R1}^2 W_{R1}^2}{135} \frac{n_B - n}{R_1} \quad (1)$$

式中: M_{E1} 为涡轮的电磁转矩, $N \cdot m$; p_1 为定子磁场极对数; Φ 为永磁磁场磁通, Wb ; $Z_{R1} W_{R1}$ 为转子绕

组串联总匝数; n_B 为永磁磁场旋转速度, r/min ; n 为稳定平台旋转速度, r/min ; R_1 为上涡轮电机负载电阻, Ω 。

下涡轮电机通过 MOS 管控制定子电枢电流,进而控制输出的电磁扭矩,电磁转矩可由下式确定。

$$M_{E2} = \frac{1}{2}FD = C_T \Phi I_a \quad (2)$$

式中: F 为安培力, N ; I_a 为电枢电流, A ; D 为电枢直径, mm ; C_T 为电机常数。

由于电机定型以后 C_T 和 Φ 均为常数,所以 I_a 和 M_{E2} 呈线性关系,即只要调节 I_a 就可以调节电机的电磁转矩。

稳定平台除受上、下涡轮电机电磁扭矩以外,还受到轴承对平台的摩擦扭矩、旋转的钻井液传递给平台的黏滞摩擦扭矩及盘阀系统传递给平台的摩擦扭矩等其他扭矩。将这些扭矩均视作干扰扭矩,由文献^[10]可知干扰扭矩 M_T 的计算公式为:

$$M_T = 0.1\mu(n_0 - n)\text{sign}(n_0 - n) + 23.39\text{sign}(n_0 - n)(0.008\sin\theta + 0.020\sin\theta) \quad (3)$$

式中： μ 为钻井液黏性系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； θ 为井斜角， rad 。
 n_0 为钻杆转速， r/min ； n 为稳定平台转速， r/min 。

从式(3)可以看出，干扰转矩受稳定平台转速的影响，是一个时刻变化的量，并且将随控制量的变化而变化，这就为控制算法提出了更为严格的要求。

系统的控制对象可认为是一个沿自身中心轴自由旋转的刚体。控制的目的是通过调整下涡轮电机的控制力矩，平衡上涡轮电机的电磁转矩和干扰扭矩，使被控刚体的空间角稳定在给定值，并且在稳定的同时能够围绕给定值进行一定角度的摆动。

平台的传递函数为：

$$\frac{G(s)}{M(s)} = \frac{K_m}{1 + T_m s} \quad (4)$$

式中： T_m 为时间常数， $T_m = J/f, \text{s}$ ； K_m 为放大系数， $K_m = 1/f, \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ； J 为平台转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； f 为平台转动阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。模拟试验中取 $f = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ ， $J = 0.0016 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

综合以上分析，将上涡轮发电机的电磁扭矩也认为是干扰信号，控制器控制下涡轮发电机输出平衡扭矩，确定稳定平台控制系统结构模型，如图2所

示（ $\frac{1}{s}$ 表示由速度积分至位移的传递函数）。

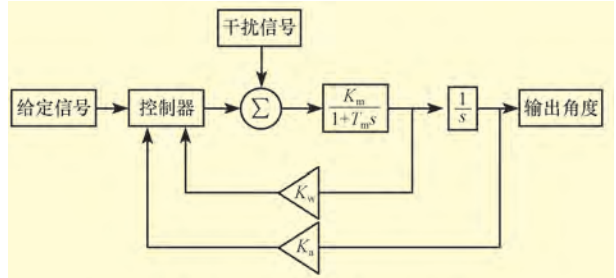


图2 稳定平台控制系统结构模型

3 PID 控制系统模拟分析

按照上面分析的稳定平台数学模型，在 MATLAB/SUMULINK 搭建了控制系统模拟模型(如图3所示， M^+ 为顺时针方向的正扭矩， M^- 为相应反扭矩， M_e 为合扭矩， K 为仿真参数)，控制器先采用角度和速度的PID双闭环控制方法。由前面的分析可知，系统的干扰信号受到钻井工艺参数的影响，在模拟模型中尽可能地模拟系统参数的变化，加入随机变化信号，设定：钻杆转速为 $(80 \pm 6) \text{ r}/\text{min}$ ；钻井液排量为 $0.0315 \sim 0.0385 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$ 。由于井斜角对于系统影响较小，假定井斜角不变，恒为 0° ，即忽略了重力因素对稳定平台的影响。

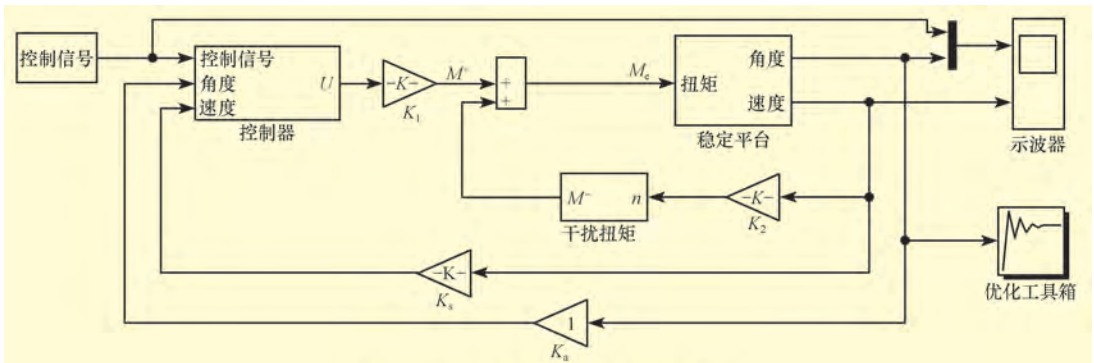


图3 控制系统MATLAB仿真模型

利用 MATLAB 中 Simulink Response Optimization 工具箱对系统的PID参数进行优化，图4、图5分别为系统阶跃响应时角度控制器和速度控制器的PID参数优化过程曲线。约束条件设定为上升时间15%、稳定时间30%、超调量10%，优化完成后得到角度控制器的PID参数分别为： $K_p = 15.39$ 、 $K_i = 1.79$ 、 $K_d = 1.23$ ；速度控制器的PID参数分别为： $K_p = 0.5509$ 、 $K_i = 0.3113$ 、 $K_d = 0.0008753$ 。

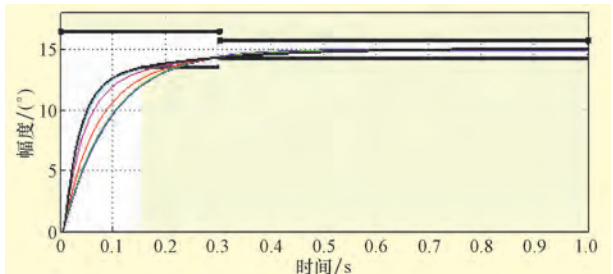


图4 角度控制器PID参数优化过程曲线

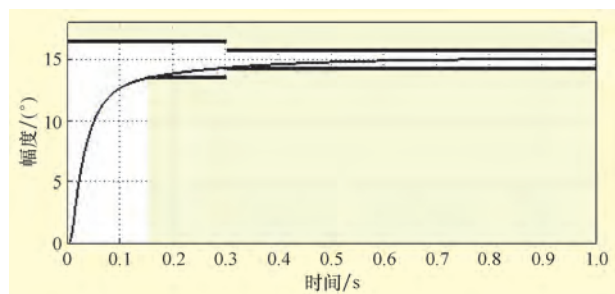


图5 速度控制器PID参数优化过程曲线

利用优化后的 PID 参数建立双闭环控制器,制定系统输入信号对系统进行模拟,图 6 为系统的响应曲线,上半部分为角度跟踪曲线,下半部分为速度变化曲线。由于导向力的大小要求通过稳定平台的摆动来控制,所以输入的给定控制信号拟定为在保持一定角度的基础上实现正弦变化,对于角度摆动的控制信号给定问题,笔者提出采用角度正弦变化的控制方法,对于相关细节,由于还将涉及到液压、井壁作用等其他模块,在此不再赘述。

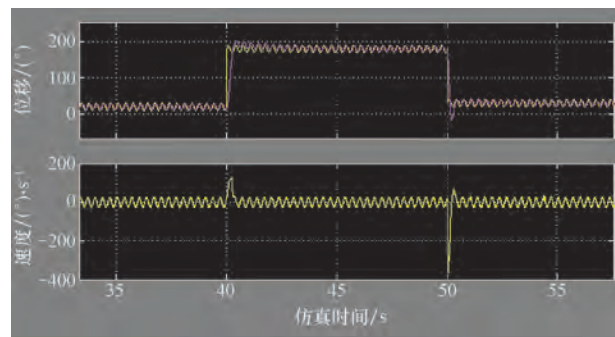


图6 PID控制系统响应曲线

从图 6 可以看出,系统的正负阶跃响应有所不同,正阶跃响应接近稳态时间较长,而负阶跃响应超调又过大。从速度相应曲线局部放大图(见图 7)可以看出,稳定平台在速度变化过程中一直处于“颤动”状态,分析控制系统模拟模型可知,造成这种控制效果的原因主要有:1)PID 控制系统控制参数一旦确定,便无法更改,不能很好地适应井下参数变化;2)稳定平台输出速度将影响干扰力矩的变化,干扰力矩又反过来影响输出速度,这样形成一个闭环

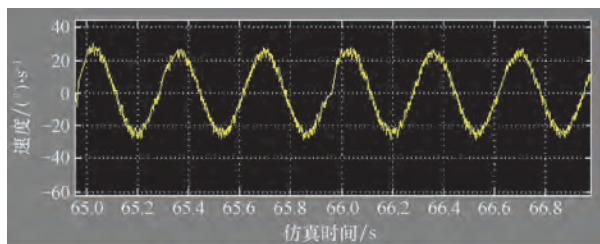


图7 速度响应曲线局部放大图

叠加过程,势必放大干扰信号的影响作用。

4 模糊控制器的设计与模拟分析

通过以上分析可知,PID 控制算法在稳定平台这样具有非线性、时变性的系统中,有其固有的局限性,可以尝试采用目前较为流行的模糊控制算法,以提高系统的抗干扰性。在文献[6]和[8]中,对于稳定平台的模糊控制均进行了相关设计与模拟,结果表明模糊控制具有一定的优越性,但是由于其控制模型过于简化,对于干扰信号的影响考虑不足,所以有必要对于稳定平台的模糊控制器进行更为精细的设计。根据模拟试验,由图 2 和式(4)可知,如果不考虑干扰因素的情况下,系统被控对象就变为一个简单的二阶系统,传统的 PID 控制完全能够满足要求。

普通的模糊控制器一般采用偏差和偏差的变化率作为输入,由于稳定平台旋转角速度的积分便是稳定平台的稳定角度,所以稳定平台角度的偏差变化率便是稳定平台的旋转角速度。模糊控制器的设计中,综合考虑角度偏差、速度偏差以及速度偏差变化率,整个模糊控制系统为 3 输入单输出的系统,内部含有两个模糊控制器,一个是角度调整控制器,一个是增量微调控制器,其结构如图 8 所示。利用 MATLAB 中的 Fuzzy Logic 工具箱建立模糊控制器,控制器 1 的模糊控制规则曲面如图 9 所示。

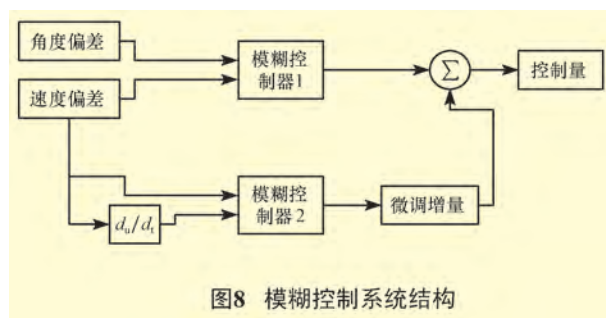


图8 模糊控制系统结构

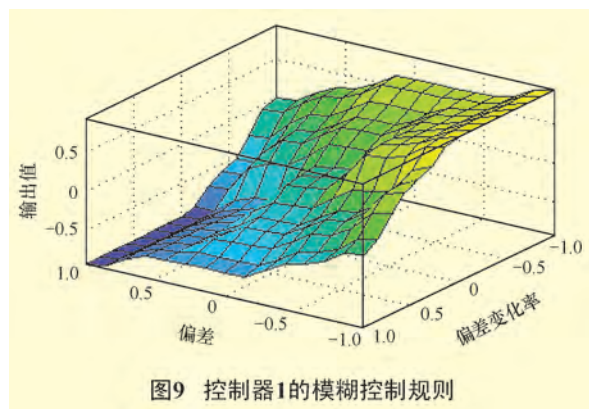


图9 控制器1的模糊控制规则

利用前面建立的模拟模型,给定相同的控制给定信号,响应曲线如图10所示。从图10可以看出,设计的模糊控制系统能够更为快速地跟随控制信号,并且超调量较小,能够更好地提高系统的抗干扰能力。

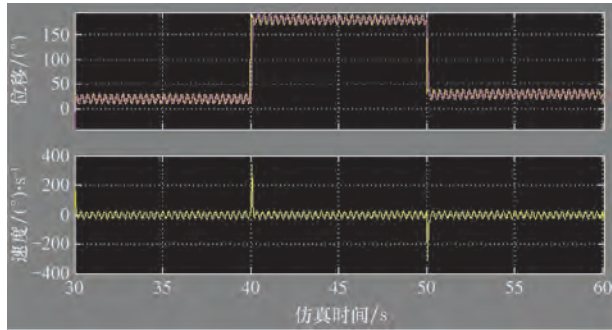


图10 模糊控制系统响应曲线

5 结论

1) 钻井井下工况极其复杂,相关参数不断变化且难以测定,而一些数学模型也是在很多假设前提下建立的,这就为相关控制系统的设计与研究提出了很大的挑战,对于这样一个灰色系统,采用智能控制方法将是提高系统控制效果、增强系统抗干扰能力的一条重要途径。

2) 稳定平台是旋转导向钻井系统中的一个主要控制环节,采用传统的PID控制算法,由于控制对象的时变性与非线性,即使PID参数最优,依然无法达到令人满意的控制效果。

3) 模糊控制系统是近代发展起来的一种智能控制方法,对于旋转导向钻井稳定平台这样的复杂控制系统来说,能够较好地提高系统的抗干扰能力。

4) 在建立被控系统的模拟模型时,不可避免地进行了一定程度的假设与理想化,而且将稳定平台孤立地进行研究也有其不合理性,因为稳定平台控制的最终目的是控制导向力完成一个预定的井眼轨迹,这个大系统在一系列复杂的串级控制过程中,会有很多耦合作用,很多参数都是相互影响的。只有结合不同的仿真软件,建立起一个多学科的系统级模拟模型,才能帮我们完成整个控制系统的设计,缩短研发周期,推动钻井自动化的进程。

参 考 文 献

- [1] 李继博,彭勇,李军强,等. 旋转导向钻井工具控制轴刚度分析[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):52-54.
- [2] 李军强,彭勇,张绍槐,等. 旋转导向钻井工具稳定平台静力学有限元计算[J]. 石油钻探技术,2006,34(5):14-17.
- [3] Poli S, Franco D, Joachim O, et al. Advanced tools for advanced wells; rotary closed loop drilling system—results of prototype field testing[J]. SPE Drilling & Completion,1998,13(2):67-72.
- [4] 李松林,苏义脑,董海平. 美国自动旋转导向钻井工具结构原理及特点[J]. 石油机械,2000,28(1):42-44,45.
- [5] Edmondson J. 旋转导向闭环钻井技术在Janice油田的应用[J]. 姚晓喻,译. 国外油田工程,2003,19(5):22-26.
- [6] 王艳丽,汤楠,霍爱清,等. 旋转导向钻井稳定平台模糊PID算法研究[J]. 石油仪器,2009,23(1):84-87.
- [7] 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.
- [8] 汤楠,汪跃龙,霍爱清,等. 旋转体圆周角位置控制方法[J]. 信息与控制,2009,38(4):496-500.
- [9] 韩来聚,狄勤丰,孙铭新. 调制式旋转导向钻井系统工作原理研究[J]. 石油机械,2002,30(3):7-9,35.
- [10] 姜东霞,周静,付鑫生. 内置式可控偏心器伺服平台稳定控制模型[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,2000,15(1):44-49.

[审稿 狄勤丰]

中国石化东北油气分公司钻井速度大幅提高

2010年,中国石化东北油气分公司针对松南地区地层形成年代早、地温梯度高、研磨性强、可钻性差的特点,开展了技术攻关,优选引进PDC钻头,应用复合钻进、旋冲钻井、充气钻井和涡轮钻井等技术,取得了较好的提速效果:十屋8-5-4井试用新型PDC钻头,单只钻头进尺1 775 m;十屋8-5-1井完钻井深1 985 m,钻井周期只有12.75 d,与2009年相比,缩短了9.25 d,创造了该地区钻井周期最短纪录;十屋30井应用旋冲钻井技术,平均机械钻速提高44%。

2010年上半年,东北油气分公司钻井进尺82 969 m,平均井深2 388.26 m,平均机械钻速4.99 m/h,与2009年相比提高25.89%。井身质量、固井质量合格率100%,其中固井质量优良率提高14.55%,钻井费用降低约10%。