

文章编号: 0253-2697(2014)05-0952-06 DOI:10.7623/syxb201405016

导向钻井稳定控制平台的反馈线性化控制

汪跃龙¹ 王海皎² 康思民¹ 汤楠¹ 霍爱清¹

(1. 西安石油大学陕西省钻机控制技术重点实验室 陕西西安 710065; 2. 中国石油天然气管道局国际事业部 河北廊坊 065000)

摘要: 旋转导向钻井的稳定控制平台单纯采用 PID 控制时,控制性能与工具面角度的给定值有关。在某些角度下,平台会产生振荡旋转现象,无法实现工具面角度的稳定,使导向工具失去导向控制功能。分析表明,导致这种现象的主要原因是系统存在非线性偏心作用力矩,该力矩与工具面角度成正弦函数关系。基于反馈线性化原理,提出了平台系统的输出反馈线性化控制方法,消除了非线性因素的影响,实现了线性的闭环系统。仿真表明该方法可实现平台系统在钻井过程强扰动作用条件下的任意角度位置稳定控制。针对非线性偏心作用力矩不可直接测量问题,提出了一种基于系统运动姿态测量的偏心作用力矩在线估计方法,可有效减小估计误差所导致的控制性能劣化,并给出了一个在线估计的应用实例。水力驱动条件下的控制测试验证了基于偏心作用力矩在线估计的反馈线性化控制方法的有效性。

关键词: 导向钻井;角度位置;反馈线性化控制;偏心力矩;水力驱动测试

中图分类号: TE242

文献标识码: A

Output feedback linearization of servo platform for rotary steering drilling system

Wang Yue-long¹ Wang Hai-jiao² Kang Simin¹ Tang Nan¹ Huo Ai-qing¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Oil-drilling Rigs Controlling Technique, Xi'an Shiyou University, Shaanxi Xi'an 710065, China; 2. China Petroleum Pipeline Bureau International, Hebei Langfang 065000, China)

Abstract: When controlled by a simple PID strategy, the performance of servo platform for rotary steerable drilling systems is related to the given value of its tool-face angle. At certain angular positions, the platform would oscillate or rotate and fails to maintain the stability of tool-face angle, leading to the loss of steerable tool's control ability. Simulation results show that the primary cause of platform oscillation or rotation is nonlinear eccentric torque present in the platform system, which has a sine function relationship with tool-face angle. Based on the feedback linearization theory, an output feedback linearizing control method of the platform system is proposed to eliminate the effect of nonlinear eccentric torque and change the closed-loop system into a linear one. Simulation data indicate that the proposed method enables to control the platform system stably at any angular positions during the drilling process under strong disturbance. To address the problem of directly measuring nonlinear eccentric torque, an online estimating method based on motion attitude measurement is proposed. This estimation method can effectively attenuate the deterioration of control performance caused by estimation errors, and an application example of online estimation is given. The validity of output feedback linearization based on the proposed online estimation method of nonlinear eccentric torque is verified via a control test under hydraulic driven condition.

Key words: steerable drilling; angular position; feedback linearization; eccentric torque; test under hydraulic drive

旋转导向钻井是一种在钻柱旋转状态下用近钻头处的自动控制装置(导向钻井工具)控制钻头钻进方向的钻井技术^[1,2]。在导向工具与钻柱同步旋转情况下,必须设置一个不受外钻柱旋转影响的、可以自动保持或调整工具面角度的稳定控制平台(以下简称平台),使工具中的导向块在给定方位产生导向所需的矢量力,达到稳斜或增斜的目的^[3-7]。因此,平台角度位置的稳定控制问题是系统能否实现导向钻进的关键。

对于平台角度位置控制问题,汤楠等先后研究了 PID、状态空间、模糊 PID 和基于间接专家智能的依偏差和偏差梯度改变控制参数的智能 PID 等控制方

法^[8-11];霍爱清提出了模糊控制与滑模变结构控制相结合的控制方法^[12]。这些方法提高了控制系统的控制精度和稳定性,实现了对平台的稳定控制。

汪跃龙等通过对平台系统的动力学分析表明,平台的安装偏心误差和质量分布不均会产生偏心作用力矩,这一非线性因素导致平台产生旋转振荡和角度摆动,不利于平台的稳定控制^[13,14]。笔者通过对非线性偏心作用力矩的分析,基于输出反馈线性化原理提出了一种平台角度位置控制的非线性系统综合方法,将非线性的稳定平台系统动态特性变换为线性的,从而实现平台系统在任意角度位置的稳定控制。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61174191)和陕西省工业攻关项目(2014K06-35)资助。

第一作者及通信作者: 汪跃龙,男,1965年9月生,1985年获西安石油大学学士学位,2012年获西北工业大学博士学位,现为西安石油大学副教授、硕士生导师,主要从事智能控制、导向钻井井下控制技术等方面的研究。Email: ylwang@xsyu.edu.cn

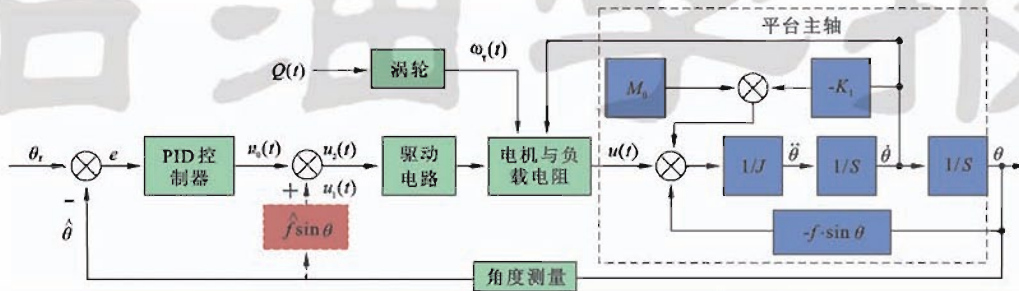
1 偏心作用力矩对平台控制的影响

1.1 平台角度位置控制系统结构

平台的工具面角度位置是通过调节涡轮电机的电磁力矩实现控制的,通过脉宽调制电路改变负载电阻通断状态可对力矩大小进行调节^[15,16]。控制系统结构如图 1 所示(不含虚线连接部分)。

平台动力学方程^[13]为:

$$J\ddot{\theta} + K_1\dot{\theta} + f\sin\theta = M_0 + u(t) + \Delta(t) \quad (1)$$



注: $Q(t)$ 为钻井液流量, L/s; ω_T 为涡轮(转子)的转速, rad/s; θ 为平台角度, rad; $\dot{\theta}$ 为平台的角速度, rad/s; $\ddot{\theta}$ 为平台的角加速度, rad/s²; θ_r 为角度位置设定值, $\hat{\theta}$ 为角度位置的测量值; e 为角度位置控制误差; J 为平台转动惯量, kg·m²; K_1 为钻井液对平台的黏滞摩擦系数, kg·m²/s; f 为平台等效偏心力矩系数, N·m; \hat{f} 为偏心作用力矩 f 的估计; M_0 为固定偏置力矩, N·m; $u(t)$ 为涡轮电机电磁转矩, N·m; $\Delta(t)$ 为扰动力矩, N·m。

图 1 平台 PID 控制系统结构框图

Fig. 1 PID control system of the platform's angle position

采用临界比例度法进行 PID 参数整定,在设定值 $\theta_r = 0.50\pi$ 时,整定得控制参数为 $K_p = 0.35$ 、 $K_i = 0.35$ 、 $K_d = 0.10$ 。

1.2 偏心作用力矩对平台运动的影响

系统在一定装配条件下,平台的稳定性与控制目标位置(角度位置的设定值)相关。机械驱动和水力驱动试验研究均发现:在相同的控制方法和控制参数时,系统在某些角度范围是稳定的,而在其他位置则可能是不稳定的。对于系统典型参数^[13],设定值在 0.50π 、 0.60π 时稳定,但在 0.61π 与 1.00π 之间,系统常常是不稳定的,故分别取设定值为 0.50π 、 0.60π 、 0.61π 、 1.00π 进行仿真分析,得系统阶跃响应如图 2 所示(为方便起见,除设定值外,其余角度单位均由弧度转换为°)。

当设定值为 0.50π 时,系统经过大约 3 s 的振荡收敛过程,终态稳定于 90° ,无超调;在设定值为 0.60π 时,系统经过一个 25 s 的振荡收敛过程,终态稳定收敛于 108° ;而在设定值为 0.61π 时,角度振荡幅度逐渐收窄,但终态为等幅振荡,振荡幅度为 $\pm 15^\circ$,振荡频率 0.3 Hz,300 s 后仍然保持为等幅振荡状态;在设定值为 1.00π 时,平台出现旋转摆动,平台角度的振荡范围为 $5^\circ \sim 355^\circ$,振荡幅度约为 175° ,频率 0.3 Hz。

考虑到模型结构和模型参数的不确定性,平台角度控制采用不需要精确描述模型的 PID 控制,取控制律为:

$$u_n(t) = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制的比例、积分和微分增益系数; e 为角度位置控制误差,为角度位置设定值 θ_r 与测量值 $\theta(t)$ 之差,即 $e = \theta_r - \theta(t)$;忽略扰动力矩,按式(1)建立仿真分析系统,仿真参数取典型值^[13],钻井液流量为 $Q = 36$ L/s。

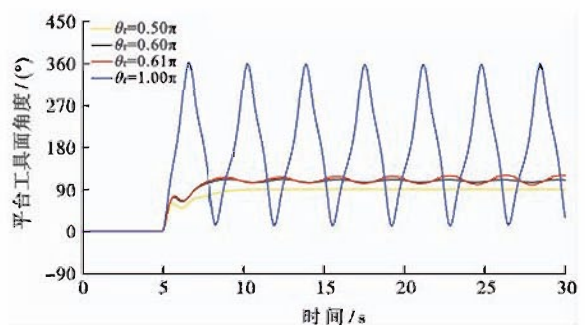


图 2 不同设定值时单纯 PID 控制阶跃响应曲线

Fig. 2 Step response of PID control at different angle positions

更多仿真分析表明,系统参数取典型值时,在 $0 \sim 2\pi$ 的设定值域范围内,设定值与系统终态之间存在如下规律: $\theta_r \in (0, 0.60\pi]$,振荡收敛,终态稳定于设定值; $\theta_r \in (0.60\pi, 1.00\pi]$,终态为等幅振荡,且振荡幅度随设定值的增大而增大; $\theta_r \in (1.00\pi, 1.45\pi]$,终态为等幅振荡,但振荡幅度随设定值的增大而逐渐减小; $\theta_r \in (1.45\pi, 2.00\pi)$,振荡收敛,终态稳定于设定值。设定值与系统状态的关系可用跟踪控制动态曲线来反映,如图 3。

考虑到设定值在 $\theta_r \in (\theta_{r1}, \theta_{r2})$ 的范围内,平台角度位置绕设定值 θ_r 来回振荡,呈现出正偏差—逼近—旋

转—负偏差一再逼近的循环振荡过程,因此,将该设定值范围称为不稳定域;同时,将平台系统能实现稳定控制设定值的最小、最大值分别称为下临界稳定点 θ_{r1} 和上临界稳定点 θ_{r2} 。

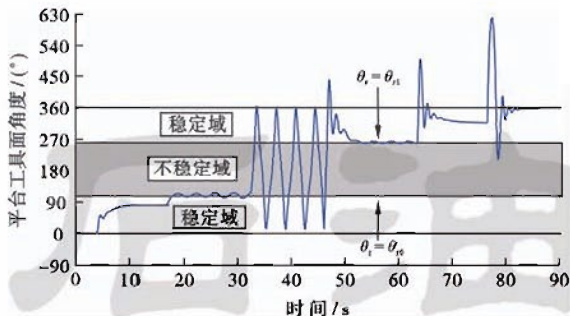


图3 不同设定值跟踪控制的系统动态曲线

Fig. 3 System dynamic curve at different angle positions

上、下临界稳定点 θ_{r1} 、 θ_{r2} 与系统参数相关。仿真研究发现,存在如下规律:随着 J 、 k_1 的增大,临界稳定点 θ_{r1} 逐步上移、 θ_{r2} 逐步下降,不稳定域范围逐渐减小,但在 J 、 k_1 的值域范围内,不稳定域一直存在;随着 f 减小,临界稳定点 θ_{r1} 逐步上移、 θ_{r2} 逐步下降,不稳定域范围逐渐减小,当 f 减小到一定程度时,系统振荡收敛,终态稳定,不稳定域消失。例如,在 $f = 0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $\theta_r = 1.00\pi$ 时,开始时振荡收敛,终态为等幅振荡,振荡范围为 $165^\circ \sim 195^\circ$,振荡幅度约为 15° ;而在 $f = 0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $\theta_r = 1.00\pi$ 时,系统经过大约 28 s 的过渡过程后振荡收敛。分析表明偏心作用力矩 f 是导致系统角度位置在不稳定域内出现振荡摆动、系统运动呈现混沌特征的主要原因。

2 角度位置控制的反馈线性化

针对导致平台失控的非线性影响因素,采用仿真分析方法研究平台角度位置控制的输出反馈线性化方法,分析估计误差对控制性能的影响。针对非线性作用力矩不可直接测量的问题,研究其与平台运动的关系,以平台运动测量为基础,提出其在线估计方法。采用水力驱动测试试验以验证在线估计方法和控制方法的有效性。

2.1 输出反馈线性化

仿真分析表明,平台动力学方程中的非线性项 $f\sin\theta$ 是导致系统振荡的原因之一。依据输出反馈线性化控制原理^[17],如果在 PID 反馈控制的基础上增加输出反馈线性化环节,则可以将非线性的系统变换为线性的,增加的部分如图 1 中的虚线部分。取输出反馈线性化环节的控制律为:

$$u_1(t) = f\sin\theta \quad (3)$$

即取控制律为:

$$u_2(t) = u_0(t) + u_1(t) \quad (4)$$

则系统的动力学方程式(1)将变为线性方程:

$$J\ddot{\theta} + K_1\dot{\theta} = M_0 + u_0(t) + \Delta(t) \quad (5)$$

考虑到只能得到平台偏心作用力矩 f 的估计值,故实际控制律取为:

$$u_2(t) = u_0(t) + \hat{f}\sin\hat{\theta} \quad (6)$$

式中: \hat{f} 为偏心作用力矩 f 的估计, $\hat{\theta}$ 为角度位置的测量值,忽略测量误差和测量滞后,有 $\hat{\theta} = \theta$ 。

设 $\hat{f} = f$, $\hat{\theta}_r$ 系统其他参数保持不变,仍分别取 0.50π 、 0.60π 、 0.61π 、 1.00π 进行仿真,所得系统动态过程曲线如图 4。

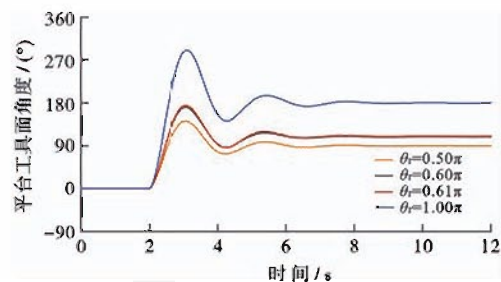


图4 反馈线性化控制的系统动态过程

Fig. 4 System dynamic curve of feedback linearizing control

对比图 4 和图 2 可得,采用反馈线性化控制时系统在所有设定值均振荡收敛,终态保持稳定,说明该方法可从根本上消除非线性项 $f\sin\theta$ 对控制性能的不利影响。

2.2 偏心作用力矩估计误差对控制性能的影响

设偏心作用力矩的估计值 \hat{f} 与实际值 f 之间存在估计误差 Δf ,记 $\Delta f = f - \hat{f}$,则反馈线性化后的系统动力学方程为:

$$J\ddot{\theta} + K_1\dot{\theta} + \Delta f\sin\theta = M_0 + \mu_0(t) + \Delta(t) \quad (7)$$

对比式(7)和式(1),两者具有完全相同的结构,因此,存在估计误差情况下,由估计误差导致的残留 $\Delta f\sin\theta$ 项仍然会影响系统控制的稳定性,只是影响的程度不同而已。分别取不同 Δf 进行仿真,设定值为 1.00π 时的系统动态响应曲线如图 5, $\Delta f = 0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

分析表明,当 $\Delta f < 0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,系统振荡收敛;当 $\Delta f > 0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,系统终态等幅振荡,振荡幅度随 Δf 的增大而增大;当 $\Delta f = 0.20 \text{ N}\cdot\text{m}$,振荡范围为 $77^\circ \sim 263^\circ$,幅度约为 83° , $\Delta f = 0.50 \text{ N}\cdot\text{m}$,振荡范围为 $5^\circ \sim 355^\circ$,振荡幅度达到 175° ,平台控制失稳。因此,要减小平台终态时的振荡幅度,就要求偏心作用力矩的估计越准确越好。

2.3 偏心作用力矩 f 的估计方法

受井下工作条件和空间环境的制约,在井下直接

测量偏心作用力矩非常困难,需要研究一种利用系统运动状态的测量值在线估计的方法。

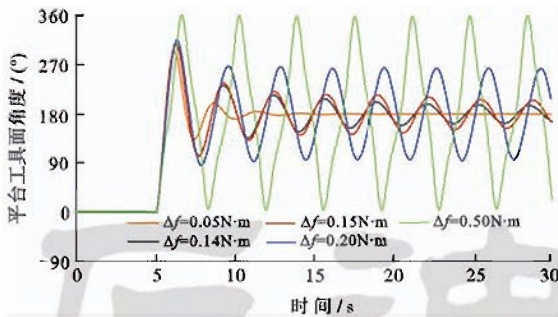


图 5 不同估计误差时系统动态过程

Fig. 5 System dynamic curve with different estimation errors about eccentric torque f

平台的偏心作用力矩 f 是由平台安装误差和质量分布不均等所导致的,考虑井下近钻头振动所导致的挠曲变形,可认为其在一定时间范围内为定值,其大小可由平台系统的运动反映。

设平台角度位置与角速度可测,在某段时间内,将系统设置为开环控制形式,施加一个固定不变的控制作用 U_1 ,使平台保持为旋转运动状态,即取 $u_2(t) = U_1$ 。由式(1),当 $\theta = 0.50\pi$ 时,有:

$$J\ddot{\theta}(1) + K_1\dot{\theta}(1) = -f + M_0 + U_1 \quad (8)$$

而当 $\theta = \pi$ 或 $\theta = 0$ 时,对应有:

$$J\ddot{\theta}(2) + K_1\dot{\theta}(2) = M_0 + U_1 \quad (9)$$

式中: $\ddot{\theta}(1)$ 、 $\dot{\theta}(1)$ 、 $\ddot{\theta}(2)$ 、 $\dot{\theta}(2)$ 分别为 $\theta = 0.50\pi$ 和 $\theta = \pi(\theta = 0)$ 时的平台角加速度、角速度。两式相减,得:

$$\dot{f} = J[\ddot{\theta}(2) - \ddot{\theta}(1)] + K_1[\dot{\theta}(2) - \dot{\theta}(1)] \quad (10)$$

因此,偏心作用力矩 f 的在线估计方法就是在钻井泵水力驱动状态下,给平台施加一个恒定不变的控制作用 U_1 使平台保持为旋转状态,测量并记录平台旋转到各角度时的瞬时角速度和角加速度,由式(10)计算出 f 的估计值 \hat{f} 。考虑到测量误差,可多次测量后采用最小二乘方法得到 f 的最优估计。

这种估计方法需要中断平台系统正常的闭环角度位置控制,改为开环控制,且需要平台保持旋转运动状态,这将影响导向工具的导向能力和导向钻进质量。但因为偏心作用力矩 f 的值是相对固定的,不需要在每一个控制采样周期都作估计,因此可以采用一定时间间隔的定时启动方式。例如,在导向钻井工具下井初期和每隔 1 h 进行一次估计,估计的测试时间和运算处理时间一般在 10~20 s 内。在实际钻井工程条件下,这种短时间不导向对导向功能影响是非常微小的。

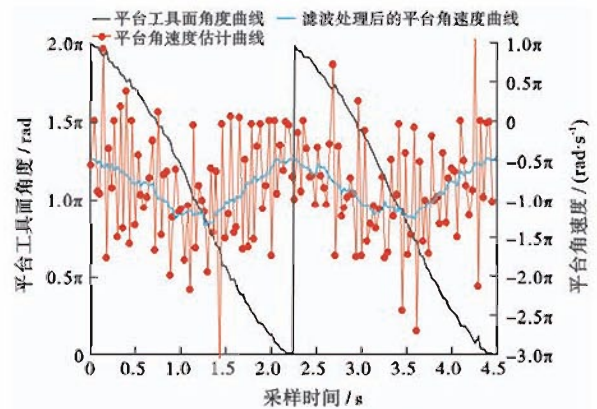
某型导向钻井工具的转动惯量为 $0.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,在

机械驱动测试条件下,采用手持式扭矩仪测得偏心力矩约为 $0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$,给定控制量占空比为 70%,对平台的运动快速测量采样,数据记录频率为 30 Hz,抽取其中的平台旋转两周的角度位置并绘制成曲线[图 6(a)]。求出角度变化对时间的数值微分,得平台的角速度估计 $\hat{\theta}$ (以下简称角速度)。由于加速度计的测量信号受到环境干扰,由此计算得出的角速度存在较大误差,对其进行了惯性滤波处理,取滤波算法为:

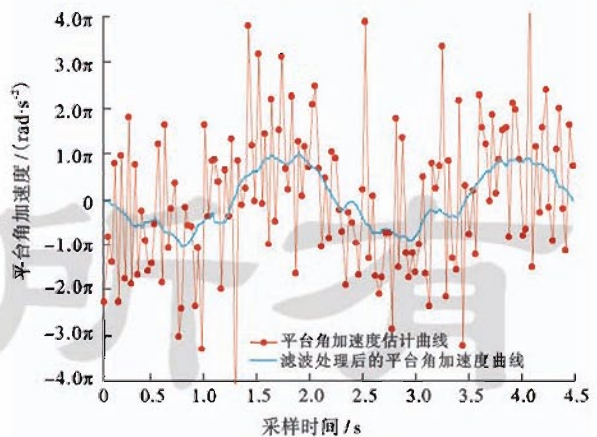
$$\hat{\theta}(kT) = \alpha\dot{\theta}(kT) + (1-\alpha)\hat{\theta}[(k-1)T] \quad (11)$$

式中: $\dot{\theta}(kT)$ 为当前时刻的角速度, rad/s ; $\hat{\theta}(kT)$ 为滤波前的当前角速度, rad/s ; $\hat{\theta}[(k-1)T]$ 为前一个采样周期的角速度, rad/s ; α 为滤波系数,取 $\alpha = 0.30$ 。

按计算结果绘制平台的角速度曲线如图 6(a)。对角速度再次微分,并按与式(11)相同的滤波算法处理,取滤波系数 $\alpha = 0.22$,得平台的角加速度曲线如图 6(b)。



(a) 角度、角速度测试曲线



(b) 角加速度测试曲线

图 6 平台运动测试曲线

Fig. 6 Test curves of platform motion

由式(10)可计算得 \hat{f} 分别为 $0.724 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $0.652 \text{ N}\cdot\text{m}$,与手动测得的 f 相比,估计误差为 9.5%、19.6%。

2.4 模拟钻井条件下的反馈线性化控制仿真

平台系统在实际钻井工程条件下将受到水力冲

击、交变摩擦、近钻头振动冲击等多种扰动作用的影响,这些作用力矩可分别采用脉冲扰动 $\Delta_1(t)$ 、余弦形式扰动 $\Delta_2(t)$ 和随机扰动 $\Delta_3(t)$ 来描述^[13]。

设平台系统受到强扰动作用,取脉冲扰动 $\Delta_1(t)$ 幅度为 $0.46 \text{ N}\cdot\text{m}$,脉冲宽度为 $\pi/24 \text{ s}$,交变频率为 6 Hz ; $\Delta_2(t) = 0.35\cos\omega t \text{ N}\cdot\text{m}$; $\Delta_3(t) = 0.35 \text{ rand}(t) \text{ N}\cdot\text{m}$;取偏心作用力矩 f 的估计误差为 20% ($0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$),设外钻铤的旋转角速度 $\omega = 4\pi \text{ rad/s}$ 。

分别取设定值 0.50π 、 0.60π 、 0.61π 、 1.00π 进行仿真,所得系统动态响应曲线如图7。

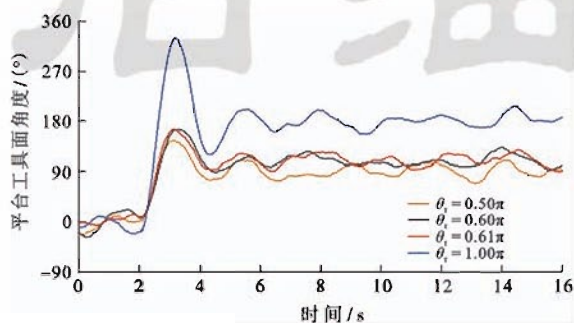


图7 强扰动作用下的系统动态曲线

Fig. 7 System dynamic curve under strong disturbance

图7的仿真试验表明,在模拟钻井工程条件的强扰动作用下,系统在不同设定值时终态稳定,振荡幅度小于 $\pm 18^\circ$,稳态误差均值为0,过渡过程时间 $5\sim 10 \text{ s}$,可满足系统稳定控制要求。

2.5 水力驱动条件下的控制测试

某型导向钻井工具采用了相互独立的双CPU(A和B)结构,其中A对平台进行控制,B完成数据记录,控制频率为 70 Hz ,记录周期为 1 s 。该系统在水力驱动测试装置上进行了反馈线性化控制方法的测试试验,由B记录的某次角度切换控制试验的部分数据如图8。

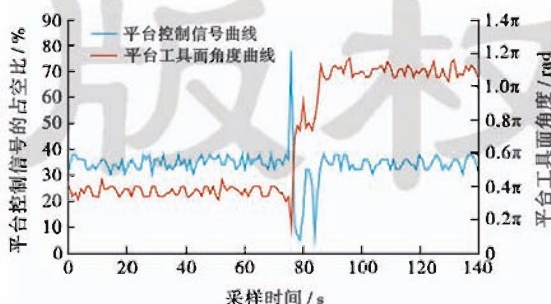


图8 平台控制信号与工具面角度曲线

Fig. 8 Curves of control signal and angle position

由图8可见,当平台角度位置由 0.4π 跳变到 1.1π 时,控制信号在 $78\%\sim 10\%$ 快速变化,经过约 20 s 的过渡过程,控制信号趋于稳定,终态时角度稳定,平台

速度近似为0,实现了平台角度位置从 0.4π 到 1.1π 的切换,控制效果良好,验证了偏心作用力矩在线估计方法和反馈线性化控制方法的有效性。

3 结论

(1) 仿真分析表明,稳定平台系统采用反馈线性化控制方法进行控制时,可以实现平台系统在任意角度位置的稳定控制。

(2) 提出了一种基于平台运动姿态测量的偏心作用力矩在线估计方法,应用实例表明该方法估计误差约为 20% ,解决了偏心作用力矩在井下不可直接测量的问题。

(3) 水力驱动条件下控制试验表明,在工具面角度由 0.4π 切换为 1.1π 时,平台实现了稳定控制,稳态振荡幅度小于 0.1π ,控制效果良好,验证了反馈线性化方法的有效性。

参考文献

- [1] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-89.
Zhang Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 82-89.
- [2] 熊继有, 温杰文, 荣继光, 等. 旋转导向钻井技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2010, 30(4): 87-90.
Xiong Jiyou, Wen Jiewen, Rong Jiguang, et al. New progress in the research of rotary steerable drilling technology[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 87-90.
- [3] 闫文辉, 彭勇, 张绍槐. 旋转导向钻井工具的研制原理[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 94-97.
Yan Wenhui, Peng Yong, Zhang Shaohuai. Mechanism of rotary steering drilling tool[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 94-97.
- [4] Dhaher K, Chia C R, Al-Amri K, et al. Ultrastim Rotary-Steerable system gives greater reservoir access in Saudi Arabia[R]. SPE 107597, 2007.
- [5] Molayee A, Teymoori A. Experience with rotary steerable system for reservoir drilling in Iranian offshore oilfields[R]. SPE 100917, 2006.
- [6] 韩来聚, 王瑞和, 刘新华, 等. 调制式旋转导向钻井系统稳定平台控制原理及性能分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(5): 49-51.
Han Laiju, Wang Ruihe, Liu Xinhua, et al. Control principle and servo platform performance analysis of modulated rotary steerable drilling system[J]. Journal of the University of Petroleum, 2004, 28(5): 49-51.
- [7] 汤楠, 霍爱清, 崔琪琳. 基于状态空间法的旋转导向钻井工具控

- 制系统研究[J]. 石油学报, 2004, 25(2): 89-92.
Tang Nan, Huo Aiqing, Cui Qilin. Control system in rotary steering drilling tool based on state space method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 89-92.
- [8] 汤楠, 穆向阳. 调制式旋转导向钻井工具稳定平台控制机构研究[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(3): 9-12.
Tang Nan, Mu Xiangyang. Study on the platform stabilizing control mechanism of modulating rotary steerable drilling tool [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3): 9-12.
- [9] 霍爱清, 汤楠. 全状态反馈电液伺服系统变增益模糊控制器的设计[J]. 机床与液压, 2003(5): 171-173.
Huo Aiqing, Tang Nan. A design on fuzzy controller using on full order state feedback Electro-Hydraulic servo system[J]. Hydro-mechatronics Engineering, 2003(5): 171-173.
- [10] 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.
Tang Nan, Wang Yuelong, Huo Aiqing, et al. Control method of angular position of a rotation object[J]. Information and Control, 2009, 38(4): 496-500.
- [11] 李耀东, 程为彬, 汤楠, 等. 旋转导向钻井工具智能 PID 控制[J]. 石油机械, 2010, 38(8): 13-16.
Li Yaodong, Cheng Weibin, Tang Nan, et al. The intelligent PID control of the rotary navigational drilling tool [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(8): 13-16.
- [12] 霍爱清, 贺昱曜, 汪跃龙, 等. 旋转导向钻井工具稳定平台模糊滑模控制研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 152-155.
Huo Aiqing, He Yuyao, Wang Yuelong, et al. Study of fuzzy adaptive sliding mode control for rotary steering drilling stable platform[J]. Computer Simulation, 2010, 27(10): 152-155.
- [13] 汪跃龙, 张璐, 汤楠, 等. 旋转导向钻井惯导平台动力学分析与运动研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 65-69.
Wang Yuelong, Zhang Lu, Tang Nan, et al. Dynamics and rotational movement analysis of servo for rotary steerable drilling system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 65-69.
- [14] 汤楠, 霍爱清, 汪跃龙, 等. 旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 284-287.
Tang Nan, Huo Aiqing, Wang Yuelong, et al. Experimental study on control function of stabilized platform for rotary steering drilling tool[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 284-287.
- [15] 王金, 程为彬, 郭颖娜. 旋转导向钻井工具发电机电磁转矩控制及其优化[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 1055-1060.
Jin Jin, Cheng Weibin, Guo Yingna. Control and optimization of the generator electromagnetic torque of rotary steering drilling tools[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1055-1060.
- [16] 程为彬, 傅钟炜, 钟彦儒. Boost 变换器中混沌行为参数敏感性分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 246-252.
Cheng Weibin, Fu Zhongwei, Zhong Yanru. Parameter sensitivity analysis of chaos in boost converter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 246-252.
- [17] Mayne D Q, Rakovic S V, Findeisen R, et al. Robust output feedback model predictive control of constrained linear systems [J]. Automatica, 2006, 45(9): 2082-2087.

(收稿日期 2014-03-12 改回日期 2014-06-27 编辑 宋宁)

《石油学报》2014 年第 6 期部分文章预告(II)

- | | |
|--|------|
| 二氧化碳气体辅助 SAGD 物理模拟实验 | 张运军等 |
| 热采过程中硫化氢成因机制 | 林日亿等 |
| 砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式——以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例 | 商晓飞等 |
| 致密气储层可压裂性测井评价方法 | 孙建孟等 |
| 水力压裂微地震粒子群差分进化定位算法 | 盛冠群等 |
| 超临界二氧化碳喷射压裂井筒流体相态控制 | 程宇雄等 |
| 固井水泥浆与钻井液接触污染作用机理 | 李明等 |
| 钻井泥浆泵失控/重载引发的波动压力 | 孔祥伟等 |
| 气侵过程井筒压力演变规律实验和模型 | 徐朝阳等 |
| 管道泄漏信号和干扰信号的数字化判别方法 | 林伟国等 |