

调制式可控偏心器伺服平台的滚动稳定控制系统仿真*

周 静 付鑫生 姜东霞 荐志清

(西安石油学院电子工程系·西安, 710065)

摘要: 所涉及的是可应用于旋转钻井的导向工具——调制式可控偏心器, 主要介绍其伺服平台的滚动稳定控制方法与结果。通过仿真可见, 在比较大的范围内改变钻井工艺参数和井眼参数时, 应用所给出的滚动稳定控制方法可以保持伺服平台的滚动稳定性, 从而可以控制施加在钻头上的侧向力的方位, 进而可以控制井眼轨迹。

关键词: 可控偏心器; 旋转导向; 滚动稳定; 仿真

文献标识码: A

The Roll Stable Control Simulation of the Servo Platform in Modular Controllable Stabilizer

ZHOU Jing, FU Xingsheng, JIANG Dongxia and JIAN Zhiqing

(Electronic Engineering Department, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an, 710065, P. R. China)

Abstract: Rotary steering drilling equipment - modular controllable stabilizer is discussed. The roll stability of its servo platform are modeled and simulated. The simulation result appears that using the given control method the servo platform can keep the state of roll stability, when we change the drill operating parameter. With this characteristic we can control the lateral force bearing on the bit, thus the well profile can be controlled.

Key words: controllable stabilizer; rotary steering drilling; roll stability; simulation

1 引言(Introduction)

进入 90 年代中期以来, 石油工业越来越意识到大位移井和水平井在提高产量和降低成本上的经济效益。在南海就有一口大位移井控制一个含油构造的先例。采用传统的定向钻井方法时, 由于滑动导向段大段不旋转的钻柱与井壁之间摩阻过大, 限制了大位移井水平位移的进一步延伸。为了增加水平位移, 必须尽量缩短滑动段的距离, 最好的办法是完全摆脱滑动模式, 采用在旋转模式下进行造斜的定向钻井技术, 这就要求采用一种适合于旋转模式下工作的新型造斜导向工具。

Barr 在 1992 年提出了旋转导向系统(steering rotary drilling)理论, 并预计在 1995 年以后旋转导向系统将成为定向钻井的关键技术。所谓旋转导向, 就是在旋转方式下进行定向钻井。旋转导向系统的核心, 就是井下可调的带偏心翼片的偏心稳定器, 或称可控偏心器。可控偏心器的优点包括有能力调整方位, 可钻出非常光滑的、精确地沿预定轨迹前进的井眼, 以有利于后序作业、没有轴向冲击、不产生台阶

以及可以连续旋转导向钻井, 使岩屑一直处于悬浮状态, 减小了摩阻, 并同时实现井眼轨迹预测以及井眼轨迹控制, 从而达到井眼轨迹自动控制的目的。本文所涉及的就是可控偏心器的一种——调制式可控偏心器, 它以泥浆为导向控制的动力, 结构简单, 可以在控制井斜的同时控制方位^[1-4]。本文主要介绍其核心部件伺服平台的滚动稳定控制方法与结果。

2 工作原理和结构设计(Principle and structural design of the controllable stabilizer)

调制式可控偏心器主要包括三个空间相位相差 120°的可伸缩翼片及盘阀机构及伺服控制平台, 它安装在图 1 所示的结构中。伺服平台的功能是控制翼片伸出并推靠井壁的方向, 也即控制造斜的方向。在钻井过程中, 翼片是随着钻头一起旋转的。这样, 当造斜方向一定时, 钻头每旋转一周, 三个翼片依次要在造斜方向相反的方向上做一次伸缩运动。翼片的伸缩由钻井液提供动力, 并由控制阀来分配。控制阀由上下两部分组成: 上盘阀与伺服平台输出控制轴相连, 与伺服平台保持同步运动。下盘阀与导向机

* 基金项目: 国家 863 计划(863-820-09)资助项目。

收稿日期: 1997-07-16; 收修稿日期: 2000-01-10。

构壳体相固联,其下的通道通向伸缩翼片的活塞缸。当需要定向时,伺服控制系统将伺服平台稳定在一个固定的方位上不动,钻井液流过固定上盘阀液压孔,旋转的下阀孔与上盘阀的液压孔眼位于同一轴线上时(两孔相对),与之相连的伸缩机构被高压钻井液推动,活塞外推,给井壁施加一作用力,于是钻头受到一个井壁的反作用力,导致井眼轨迹发生改变。

导向机构通过控制盘阀实现定向功能,而控制盘阀连接在伺服平台的输出控制轴上,它受伺服控制系统的控制,由此可见,在一个旋转的系统中保持伺服平台的滚动稳定控制是实现可控偏心器定向功能的关键。

伺服控制系统安装在伺服平台内部,其中包含

一套测斜系统。由于工作环境的影响,伺服平台受到很多干扰力矩的作用,使平台的转动状态无法控制。为了平衡掉这些干扰力矩,在伺服平台上设计了扭矩发生器 D_1 和扭矩发生器 D_2 两个装置。两个扭矩发生器均以钻井液作为的动力源。在钻井过程中,钻井液的冲击带动了扭矩发生器中永久磁场旋转,通过电磁感应的作用,在扭矩发生器的线圈中产生感应电流,感应电流又与旋转磁场相互作用产生电磁转矩,传递给伺服平台。通过对两个扭矩发生器机械结构的不同设计,可以使它们传递平台的电磁转矩方向相反。两扭矩发生器的结构原理如图 1 所示。图中,检测和控制单元的作用是调节两个扭矩发生器传递给平台的扭矩的大小,从而保证平台所受正、反扭矩相等,使平台始终处于稳定状态(即不旋转状态)。

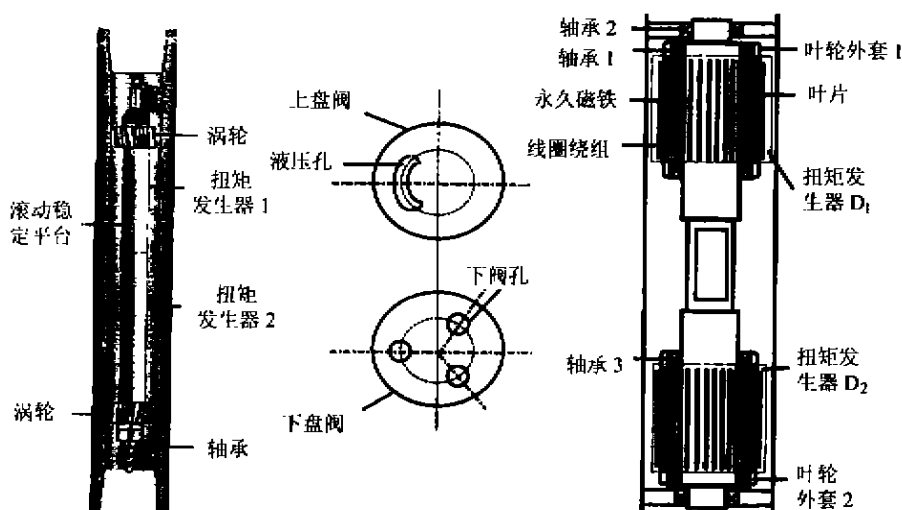


图 1 调制式可控偏心器的结构

Fig. 1 Structure of modular controllable stabilizer

3 可控偏心器的控制模型 (Control model of the controllable stabilizer)

系统的工作原理可用图 2 所示的框图来表示。用 M_0 表示伺服平台所受到的干扰力矩之和; M_{D1} 表示扭矩发生器 D_1 产生的电磁转矩; M_{D2} 表示扭矩发生器 D_2 产生的电磁转矩。

钻井工艺及井眼几何参数包括:泥浆排量 Q , 泥浆粘性系数 μ , 井斜角 DEV , 钻杆转速 n_0 ; 控制参数包括扭矩发生器 D_1 的电负载 R_{D1} , 扭矩发生器 D_2 的电负载 R_{D2} 。通过调节扭矩发生器的电负载可以改变其传递给伺服平台的电磁转矩的大小,使伺服平台所受到的合力矩为零,从而保证伺服平台在预计的方位上保持滚动稳定状态。

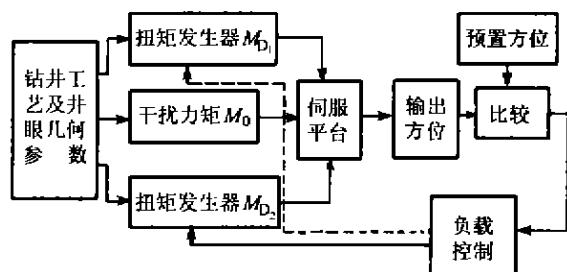


图 2 伺服控制系统工作原理

Fig. 2 Controlling method of servo platform

通过对可控偏心器进行受力分析,在此基础上对结构进行细化、确定参数(限于篇幅,本文不细致讨论),得到伺服平台所受到的力矩及表达式分别为:

① 轴承 1 对平台的摩擦扭矩 $M_{bearing1}$ 、轴承 1

用来将平台支撑在空心钻铤内部,由一对滚动轴承构成.式中 sgn 是符号函数

$$M_{\text{bearing1}} =$$

$$23.39\text{sgn}(n_0 - n)(0.008\sin DEV + 0.02\cos DEV).$$

② 扭矩发生器 D_1 传递给平台的电磁转矩 M_{D_1} ; 扭矩发生器由叶轮外套 1 内壁的永久磁铁与平台外表面的线圈绕组构成.

$$M_{D_1} = 0.4 \times \frac{19310 Q - n}{R_{I1}}.$$

③ 钻铤旋转带动泥浆旋转,旋转的泥浆传递给平台的粘滞摩擦转矩 M_{fluid} .

$$M_{\text{fluid}} = 0.0178\mu(n_0 - n)\text{sgn}(n_0 - n).$$

④ 扭矩发生器 D_2 传递给平台的电磁转矩 M_{D_2} ,

$$M_{D_2} = 0.4 \times \frac{-19310 Q - n}{R_{I2}}.$$

⑤ 盘阀系统传递给平台的摩擦转矩 M_{valve} .

$$M_{\text{valve}} = 0.033\mu(n_0 - n)\text{sgn}(n_0 - n).$$

根据作用在伺服平台上的动力学方程: $\sum M = J \frac{dn}{dt}$, 可以得到平台转速 n 与钻井工艺参数的关系可以用下式表示:

$$0.0146 \frac{dn}{dt} =$$

$$0.4 \times \frac{19310 Q - n}{R_{I1}} + 0.4 \times \frac{-19310 Q - n}{R_{I2}} +$$

$$0.05\mu(n_0 - n)\text{sgn}(n_0 - n) +$$

$$23.39\text{sgn}(n_0 - n)(0.008\sin DEV + 0.02\cos DEV).$$

上式中, DEV 表示井斜角, Q 表示泥浆排量, n_0 表示钻杆转速, μ 表示泥浆粘性系数, R_{I1}, R_{I2} 表示扭矩发生器的负载.

通过分析系统的传递函数,可知系统是二阶的,其特征方程不含常数项,而系统输出函数伺服平台的方位角是其转速的积分,因此为了增加系统的稳定性,改善系统的性能,将方位与预置方位的误差信号通过 PD 控制反馈,其输出用来控制扭矩发生器的负载 R_{I1}, R_{I2} , 就可以使伺服平台的输出方位稳定在预置方位上,并能对钻井工艺参数有一定的自适应能力.

4 实例与仿真结果(Examples and simulation results)

泥浆排量 Q , 泥浆粘性系数 μ , 钻杆转速 n_0 都可以在钻井的过程中随时调整; 井斜角 DEV 则(根

据所设计的并眼轨迹)随着井深的增加而变化.

4.1 扭矩发生器开环且负载开路时,伺服平台的工作情况(Affection to the servo platform by the accidental disturb)

通过仿真可以看出,扭矩发生器的负载开路时,经过一定时间后,伺服平台的转速与钻杆转速相同.

4.2 闭环控制时,对伺服平台方位的跟踪情况(Case of azimuth tracing when closed-loop)

从图 3 中可以看出开钻后经过大约 4 秒钟,伺服平台的输出方位稳定到了 0° . 预置方位由 0° 变化到 60° 时,伺服平台的工作情况平台经过大约 7s 方位调整到位,而且调整时间随着方位差的增大而增大,随着钻杆转速的增加而减少.

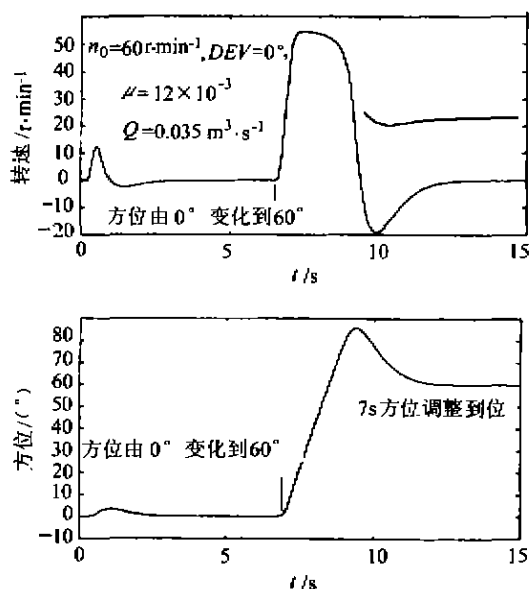


图 3 伺服平台对方位的跟踪能力

Fig. 3 Ability to trace the azimuth

4.3 在钻井工艺参数扰动时系统的输出特性分析(Cases of drilling parameter changed)

性能良好的系统,不仅能精确地跟踪输入信号,而且能尽可能地屏蔽掉扰动信号.在本套可控偏心器伺服控制系统中,除了平台的目标旋转方位角是有效的输入信号外,以下参数都包含干扰信号:泥浆排量 Q , 泥浆粘性系数 μ , 钻杆转速 n_0 . 因此当输入信号为零时,系统在干扰信号作用下其输出方位角应快速归零.经过仿真可知,钻杆转速在 $60\text{r} \cdot \text{min}^{-1} \pm 6\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围变化时,方位误差 $< 0.1\%$; 泥浆排量在 $0.0315\text{m}^3/\text{s} \sim 0.0385\text{m}^3/\text{s}$ 范围变化时,方位误差 $< 1\%$; 泥浆粘性系数有 10% 的变化时,方位误差 $< 0.1\%$. 因此在采用上述方法时,系统中钻井工艺参数扰动的影响可以忽略不计.

4.4 在意外的冲击干扰下系统的输出特性分析 (Cases of accident disturbance)

4.4.1 卡钻时系统的输出特性 (Characteristics when the drilling pipe being locked)

由于地质参数、井眼以及钻井工艺参数的影响,有时会使钻杆瞬时速度为零,很快又恢复的情况,图

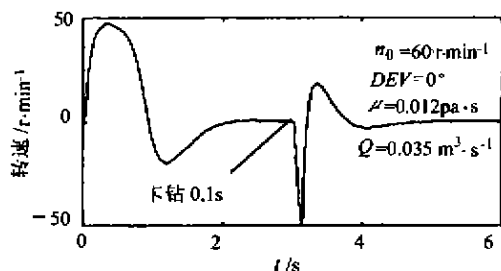


图 4 钻杆瞬时卡钻时平台的输出转速和方位

Fig. 4 Platform's rotary speed and azimuth when the collar getting stuck

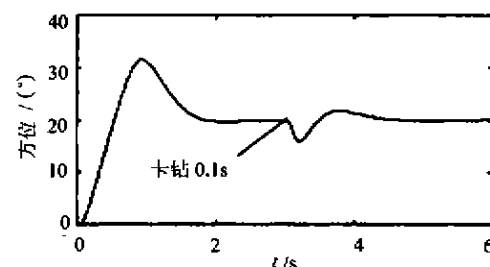
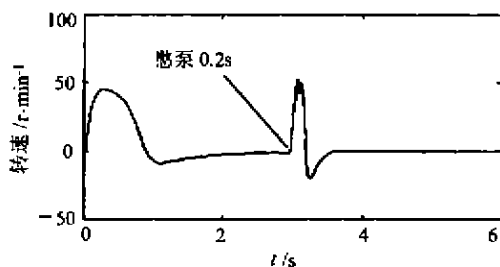


图 5 泥浆泵瞬时憋泵时平台的输出转速和方位

Fig. 5 Platform's rotary speed and azimuth when the pump holdback

5 应用与结论 (Application and conclusion)

基于上述原理研制出来的调制式可控偏心器已于 1999 年起由 Schlumberger 公司在国外投入现场试验,它在英国的 Wytch Farm 油田创造了大位移井水平位移的世界记录 35169 英尺,由此带来了巨大经济效益:一方面体现在减少了起下钻时间、改善井眼质量、减小了狗腿利于传递钻压、增加钻速等;同时大的水平位移可以开采以前不合适开采的剩余油藏和边际油田,因此本文所述的技术已越来越引起全世界的关注,被认为是下一世纪的钻井技术。

本文得到的动态响应过程,是理想状态下的用 MATLAB 中 Simulink 的仿真结果,由于可控偏心器工作环境的干扰因素很多,系统实际情况可能与仿真结果有出入,这些仿真结果旨在说明系统在各种扰动作用下,系统能够进行自我调整,从而保持了控制稳定性。另外,在仿真的过程中也发现系统的稳定性与钻杆转速和泥浆排量值有很大的关系,此如钻杆转速超过 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时系统就无法跟踪预置方位的变化,这些结论均反映了 PID 控制的局限性,实际上,对多输入多输出系统,采用现代控制理论的方法其效果也许会更好些,这将在以后的工作中做进一步研究。

4 所示就是卡钻 0.1s 时,平台能够及时响应钻杆速度的变化,达到滚动稳定状态。

4.4.2 憋泵时系统的输出特性 (Characteristics when the pump being heldback)

同理,图 5 是由于钻头水眼被岩屑塞堵时,平台能够及时响应泥浆排量的变化,达到滚动稳定状态。

参考文献 (References)

- [1] Barr J D and Russell M K. Steerable Rotary Drilling System [P]. Europe Patent: 0520733A1, 1992-03-02
- [2] Barr J D and Clegg J M. Steerable rotary drilling with an experimental system [A]. International Assembly Drilling Conference [C], Dallas, TX, SPE 29382, 1995, 435-450
- [3] Barr J D, Motion W C and Russell M K. Steerable Rotary Drilling System [P]. Europe Patent: 0 728 908, 1996-10-21
- [4] Yang G C. Automatic Control Theory [M]. Xi'an: Xi'an Electric Science Publishing House, 1997 (in Chinese)

本文作者简介

周 静 1964 年生, 1988 年获西安电子科技大学硕士学位, 现在西安石油学院电子工程系工作, 副教授, 目前主要从事国家“863”项目 820 主题以及石油天然气集团公司“九五”重点攻关项目关于井下闭环旋转导向控制系统的研究工作。

付鑫生 1938 年生, 1960 年毕业于莫斯科石油大学石油工程专业, 现在西安石油学院电子工程系工作, 教授, 目前负责国家“863”项目 820 主题以及石油天然气集团公司“九五”重点攻关项目关于井下闭环旋转导向控制系统的研究工作。

裴东霞 女, 1972 年生, 1998 年毕业于西安石油学院电子工程系, 获工学硕士学位, 现在上海宝山钢铁公司从事质量监督工作。

韩志清 女, 1964 年生, 讲师, 1988 年毕业于西安交通大学信息处理专业, 获工学硕士学位, 现在西安石油学院电子工程系从事教学科研工作。