

调制式旋转导向钻井工具稳定平台控制机构研究

汤楠 穆向阳

(西安石油大学电子工程学院, 陕西西安 710065)

摘要 深入研究了调制式旋转导向钻井工具中的稳定平台控制机构的结构原理和控制原理。介绍和分析了一种用井下涡轮发电机作为力矩发生器, 通过调节其电磁力矩的方法来实现稳定平台控制的方法。在推导控制对象数学模型的基础上对控制系统进行了相应的计算机仿真, 仿真结果表明了该控制方案的可行性和有效性。

关键词 旋转导向钻井 稳定平台 力矩发生器 模拟

旋转导向钻井在现代钻井技术中占有非常重要的地位, 其研究工作起始于 20 世纪 80 年代。目前国外的一些著名石油公司已经有几种不同的商业化产品进入市场并得到了良好的现场应用效果^{1~3}。为了开发研制具有自主知识产权的技术和理论, 国内也有不少单位一直在从事这方面的工作⁴。调制式旋转导向钻井工具的研究工作正是这一大前提下的产物。

调制式旋转导向是指导向工具调整导向块在指定方位的伸缩动作, 对钻头产生相应的推靠力, 从而达到调整井斜和方位的目的。在调制式旋转导向钻井工具中设置一个稳定平台, 其目的是为了在钻井工具中产生一个能保证不受钻杆旋转影响的相对稳定的平台。从而能够使全旋转导向的工具, 在钻柱与工具及其导向块都在旋转时, 能够具有稳定的造斜方位和作用力。这也是调制式旋转导向钻井系统的特色。

1 控制方案研究

1.1 稳定平台特点

稳定平台是整个导向工具中的关键部件, 与现在已经得到实际应用的如航海、航空系统中的稳定平台控制机构相比较, 旋转导向钻井工具中的稳定平台有以下几个主要特点:

(1) 井下工作环境比较特殊, 特别是对耐高温和抗振动的要求高。安装时还要求考虑耐高压的动密封联接问题。

(2) 连续工作时间较长, 有长时间的供电要求, 且不允许有较大的累计误差。

(3) 钻柱内工作区域狭小细长, 对元器件的外形尺寸有特殊要求。

(4) 现有的井下与地面间通讯能力十分有限, 数据传输率低, 造成地面对平台工作状态的实时监控能力弱。

(5) 在全旋转工作方式下, 平台稳定在高速旋转的钻杆内。为了保证平台工作的可靠性, 在相对稳定的平台和相对转动的钻柱及涡轮之间不宜采用直接的电气联接。

(6) 对于钻井工程来说, 由于井眼轨迹的变化相对于工具作用角变化的响应时间长, 灵敏度也不高。所以系统对稳定平台的控制指标要求也不会过高。

(7) 整个稳定平台通过固定轴承被安装在导向工具内部, 沿钻柱纵向没有控制要求。即只有工具横截面所在的一个平面的控制要求。

1.2 控制系统构成

根据以上原则对稳定平台及其控制结构进行整体设计, 其基本结构由一个轴承固定在工具内部的可以自由转动的平台, 平台轴上装有涡轮发电机及平台的控制电路。为了使稳定平台在旋转的钻柱内能够维持稳定, 必须使施加到平台上的力矩平衡。工作中平台受到的一个主要力矩是由钻柱旋转带来的机械力矩和作为电能发生器的涡轮发电机本身的电磁力矩之和 M_T , 如图 1 所示, 该力矩大小与轴承摩擦力及电机的特性及其负载有关, M_T 的存在使

平台产生与钻柱旋转同向的旋转趋势。作为力矩发生器的井下涡轮电机电枢在磁场中也会产生一个电磁力矩 M_E 。 M_E 是 1 个与 M_T 方向相反且系统可控的连续可调的量。所以在电机的设计和安装时必须注意涡轮叶片的方向,要使得由涡轮旋转方向所确定的 M_E 与 M_T 反向。根据控制要求该 M_E 不仅需要随时按 M_T 的变化而变化,而且还要能够根据给定命令调节与 M_T 的关系,从而达到调控井身轨迹的目的。

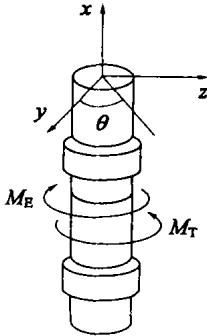


图1 稳定平台受力示意图

在图1所示的转动系统中有

$$\Delta M = M_T - M_E = J\alpha = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1)$$

式中, ΔM 为不平衡转矩, $N \cdot m$; α 为旋转角加速度, rad/s^2 ; Ω 为旋转角速度 rad/s ; J 为转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

工作时 M_T 可以看作是反馈控制系统中的干扰量,它的变化可以直接影响被控参数。 M_E 则是用来控制转动物体的转动角速度和角位置的控制量,它由控制器根据偏差变化随时调整。根据电机原理,电磁转矩的数值是由式(2)确定的

$$M_E = \frac{1}{2}FD = C_T \theta I_a = K_m I_a \quad (2)$$

式中, F ($F = BI_a L$) 为安培力, N ; B 为磁通密度, T ; L 为电枢导体有效长度, m ; I_a 为电枢电流, A ; D 为电枢直径, mm ; $C_T = PN / (2a\pi)$, 为电机常数。

由于电机定型以后 C_T 和 θ 均为常数,所以 I_a 和 M_E 关系线性,即只要调节 I_a 就可以调节电机的电磁转矩。因此控制器的输出值经过数模转换和驱动电路后,是一个根据地面指令和平台检测信号的变化而变化的电流。

图2就是按照上述原则设计的控制系统构成示意图。由检测电路得到的测量值和由通讯电路得到的给定值作为控制运算的输入,控制运算的输出经相应的驱动硬件电路来改变电机电枢绕组上的电

流,利用电磁转矩的变化来改变平台的角位置或角速度,从而达到最终控制目的。

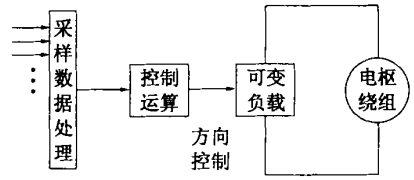


图2 控制系统构成原理示意图

2 控制机构设计

从功能上分,稳定平台控制机构由涡轮发电机、控制电路、检测电路、通讯电路和驱动电路 6 大部分组成。

2 个井下涡轮发电机除了利用钻井液的流动为平台中的电气设备提供能源外,还要作为平台稳定控制的执行器。其中位置靠上的上涡轮发电机主要用来作为电能发生器,它输出的交流电能经过整流稳压等处理后,向平台中的所有电子和电气设备等提供各种所需要的电源。发电机本身也要作为下传通讯的接受设备,下传指令是通过调节钻井液排量的形式送到井下的,由下传指令的接受电路检测发电机交流频率或电压的变化,从而得到地面监控系统控制指令。位置靠下的 1 台下涡轮发电机主要用来作为力矩发生器,由控制器的控制输出通过驱动电路使其产生平台稳定所需要的平衡力矩。

根据上述控制方案,在稳定平台中设计有 2 台交流电机。电机的基本结构相同,但在系统中的作用有所区别。在工作时平台的稳定和调节主要就是由该力矩发生器通过调节作用在平台上的总力矩而实现的。

井下电机的结构见图3。其工作原理和一般的电机相同,由于工作条件和目的的特殊性,其结构上也有着很大的特殊性。首先与一般的电机不同的是它的磁钢是固定在涡轮上的,涡轮的位置在电机的最外圈,工作时由涡轮的旋转而得到一个旋转的磁场,是一种外转子式的永磁电机。其次它的电枢绕组是固定在平台上,因此在平台工作正常时,电枢绕

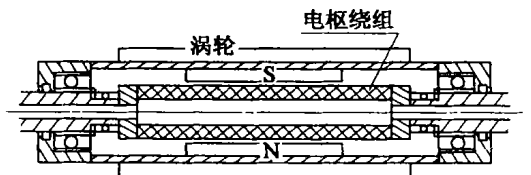


图3 井下电机结构示意图

组也是相对稳定的。而且井下电机使用的是固定的永磁磁极。这样的设计可以使旋转的涡轮和稳定的平台之间不需要任何电气连线, 绕组与平台之间又没有相对运动的关系, 这种设计构思还可以避免在平台的设计中考虑转动部分和不转动部分之间的电气连接问题, 提高系统的可靠性和可实现性。

3 控制系统研究

根据总体设计思想, 稳定平台有角位置和角速度控制 2 种工作方式。下面就以图 4 所示的角位置控制方式为例来分析其控制原理。由图 4 可知, 此时实际上就是一个闭环负反馈的位置控制系统。它根据角位置给定指令来工作, 当没有新指令到来时系统按照定值系统工作, 自动克服闭环内的各种干扰, 维持导向工具指向固定的工具面角。当接到新的指令后, 稳定平台将按照位置随动系统原理工作, 它将带动导向工具旋转指向给定角度。

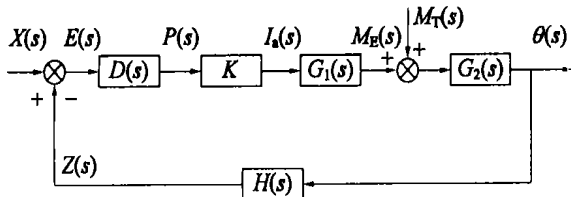


图 4 控制系统框图

设计中是采用电机作为执行器, 在图 4 中 $G_1(s)$ 为电枢电路对象传递函数, K 为驱动电路放大系数, $G_2(s)$ 为电机对象传递函数, $D(s)$ 为控制器控制算法, $H(s)$ 为反馈回路传递函数, $\Phi(s)$ 为整个系统的闭环传递函数, 则有

$$\Phi(s) = \frac{\theta(s)}{X(s)} = \frac{KD(s)G_1(s)G_2(s)}{1 + KD(s)G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (3)$$

由于钻井过程的特殊性, 导向控制中对系统响应超调量和调整时间的要求相对不会太高, 所以控制算法可以 P 或 PI 为主^[3]。考虑到钻井过程中的钻井液脉冲压力不可能保持为一个固定值, 由此会带来过程对象模型的某些不确定性。设计中应该充分考虑到系统的鲁棒性, 必要时还可以考虑在简单控制的基础上适当加入如自调整、变结构乃至模糊控制等高级算法以保证控制指标。

根据设计系统的执行部分是一个单相永磁电机, 而闭环系统广义控制对象的数学模型应该是电机电枢电路与一个电机惯性负载之和。

由基尔霍夫电压定律列出电枢电路的方程

$$I_a(R_1 + R_0) = e_0 \quad (4)$$

式中, R_1 为电机负载等效电阻, Ω ; I_a 为电枢绕组电流, A; R_0 为电枢绕组等效电阻, Ω ; e_0 为电枢的输出电压, V。而 R_1 实际上就是可变的恒流源电路的等效电阻, 一般的情况下应该有 $R_1 \gg R_0$ 。所以有

$$I_a R_1 = e_0 \quad (5)$$

由牛顿定律可以列出电机转矩的微分方程

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = M_E \quad (6)$$

式中, J 为稳定平台的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; f 为平台转动的摩擦系数; θ 为平台的角位移, ($^\circ$)。

而 $M_E = K_m \cdot i_a$ 是电机的输出转矩, K_m 的取值由式(2)确定。

则执行机构的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\theta(s)}{I_a(s)} = \frac{K_m}{s(1 + T_1 s)} \quad (7)$$

考虑到式(5)和图 4 中的 K , 整个广义对象可以用 1 个传递函数 $G(s)$ 来描述

$$G(s) = \frac{K_m}{s(1 + T_1 s)} \quad (8)$$

式中 K_m 是广义对象总的放大系数, 等效时间常数 T_1 ($T_1 = J/f$) 主要取决于平台本身转动的摩擦系数和转动惯量等机械参数。实际上 e_0 本身应该是个受到平台和涡轮间相对速度影响的量, 但是由于平台旋转的速度相对较低, 在设计中充分考虑系统鲁棒性的前提下, 上述过程对系统的影响不大。系统模拟的结果证明, 在多数情况下可以用这样一个简化的被控对象对系统的特性进行研究。

在闭环控制系统中, 设 K_p 和 K_i 分别为 PI 调节器的比例系数和积分系数。可以得到闭环系统的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{K_p K_m s + K_i K_m}{T_1 s^3 + s^2 + K_p K_m s + K_i K_m} \quad (9)$$

故适当调节上述 PI 调节器参数, 就可以使整个闭环系统达到所期望的传递函数。设式中 $K_m = 2$; $T_1 = 0.8$; 对系统进行模拟仿真, 并调节使 $K_p = 1.16$; $K_i = 0.69$; 得:

$$\Phi(s) = \frac{2.16s + 0.38}{0.8s^3 + s^2 + 2.16s + 0.38} \quad (10)$$

由上述模拟结果可知, 只要调节参数整定得当, 系统就可以得到较好的动态和静态响应结果, 而且也可以得到较好的抗干扰能力。

由图 5 可以看出, 系统可以调节为 1 个超调为 30% 左右; 衰减比小于 1/4; 调节时间约为 5s; 稳态

误差几乎为零的比较理想的阶跃响应。系统的动态静态均可以通过适当调整控制参数来改变。

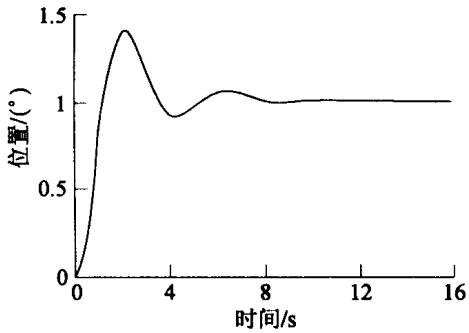


图5 模拟系统阶跃响应

图6曲线全部都在左半平面内,说明式(9)系统只要控制参数整定合适,系统就会是稳定的。但是值得注意的是($-K_i/K_p$ 和 $-1/T_i$)在坐标轴上的位置。特别是如果调整的结果使系统开环的极点位置移到非零极点的左面,其闭环就变成本质不稳定系统。另外图6曲线除系统开环增益等于0时外,总有2个极点不在实轴上,因此闭环系统应该是1个欠阻尼系统,即其阶跃响应时1个阻尼振荡过程。

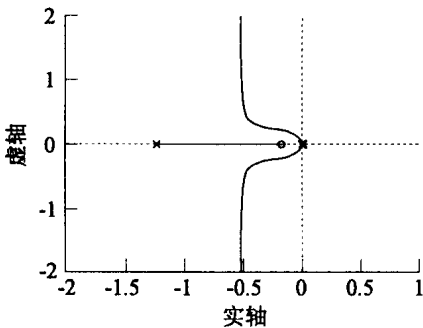


图6 模拟系统根轨迹

4 结论

(1)利用力矩发生器的电磁力矩可以实现全旋转导向钻井工具中稳定平台的稳定控制。而电磁力矩的值可以通过改变电枢电流的大小来完成调节。

(2)为了保证在井下旋转的钻柱内的可实现性和工作可靠性,力矩发生器需采用外转子永磁单相交流发电机结构形式。

(3)尽管在井下工具中完成平台的稳定控制难度较大,但由于平台的稳定控制是一个典型的闭环负反馈系统,可以应用现有的成熟控制理论来实现。

艺, 2003, 25(1): 1~5

- [2] 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. 石油机械, 2000, 28(1): 43~44
- [3] 韩来聚, 孙铭新. 石油钻井闭环自动导向机器人系统. 机器人技术与应用, 2001, 20(2): 16~20
- [4] 狄勤丰. 旋转导向井下闭环钻井技术. 陕西西安: 陕西科学出版社, 1999: 49~133
- [5] 韩来聚, 孙铭新, 狄勤丰. 调制式旋转导向钻井系统工作原理研究. 石油机械, 2002, 30(3): 7~9
- [6] 张绍槐, 狄勤丰. 用旋转导向钻井技术钻大位移井. 石油学报, 2000, 21(1)

(收稿日期 2003-02-14)

[编辑 张振清]

过油管多旁通管砾石充填工具

多旁通管充填工具能覆盖整个射孔段。它包括一组导管, 在每根导管上都有1个将砾石砂浆导入导管内的输入孔和一定数目的输出孔。这些输出孔分布在导管上, 使砾石砂浆可以进入环状空间和射孔孔眼中。根据地层渗透率、产层段长度、工具中的导管数量和砾石砂浆浓度来确定输出孔的直径及分布在导管上的各输出孔之间的距离。1次下入井中的导管数目可以调整, 以适应具体的完井类型和尺寸。目前已经成功地试验了同时使用7根导管。在树脂涂敷砾石充填作业且砾石固化之后, 过套管下入钻具将多余的砾石及充填工具钻掉, 留下具有有效控砂能力的射孔孔眼。

新的砾石充填工具外径为111.76mm, 长度为9m, 包括7根内径25.4mm的导管, 除中心导管外, 其他导管上分布有24个孔径8.47mm的砾石砂浆输出孔。而中心导管只在工具的尾端有一个输出孔。在各种井斜角、泵排量、砾石砂浆浓度和携砂液粘度条件下对新工具进行了试验。新工具在井斜为 90° 、 60° 和 0° 条件下分别进行了水携砂液和稠化水携砂液的试验。新工具特殊的结构能产生自动调节流动机理, 引导导管中的砾石砂浆绕过砂桥填充到空隙和射孔孔眼中, 使砾石之间紧密接触, 对射孔孔眼形成有效充填。新工具的占用空间具有一定的灵活性; 而且如果防喷管的长度有限, 可以分几次用钢丝绳将充填工具下井。在砾石充填作业过程中, 井底总成(BHA)的分流效应改善了支撑剂与泵入到挠性管/井眼环形空间中的液体的混合效果。

(供稿 石 艺)

参 考 文 献

- [1] 杨剑锋, 张绍槐. 旋转导向闭环钻井系统. 石油钻采工

OIL DRILLING & PRODUCTION TECHNOLOGY

Vol. 25 No. 3 June 2003

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE THRUSTER

by Lin Yuanhua, Huang Wanzhi, Shi Taihe, (Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum Institute), Li Runfang

Abstract With the development of the petroleum industry, more and more re-entry wells, horizontal wells, slim hole and Extended Reach Well have appeared. For these wells, it is difficult for drill collars to provide WOB because of the high hole angle or big torque/drag. As a result, how to exert WOB is a problem concerned by drilling engineers. Hence two types of thruster which provide WOB by the drilling fluid have been developed. One can provide one kind of WOB named single-travel thruster and the other can provide two kinds of WOB named double-travel thruster. They have been used for hard formation, intermediate layer, re-entry and deep slim hole drilling in Tarim, Sichuan and Zhongyuan oil field etc.. Using the thrusters, the WOB is smoothly applied on the bit, the bit-made axial vibration of the drill string above the thruster is reduced, the fatigue failure of the drill string and drill collar is decreased, the service life of the bit can be longer, and the ROP can be increased.

Key words thruster single-travel double-travel fatigue failure

VARIABLE DIAMETER STABILIZER AND ITS APPLICATION

by Su Yi'nao, Dou Xiurong, Wang Jiajin, (Exploration and Development Research Institute of CNPC)

Abstract The variable diameter stabilizer is an important tool used in large extended reach drilling, and its functions, types and means of controlling were described in this paper. Taking several typical foreign products as examples, its working mechanism, typical

structure and important specifications, as well as their applications and results in drilling tests and field operations were illustrated. A positive displacement variable diameter stabilizer was developed in China, and its field tests and real drilling applications in Well QHD32-6-A26 was presented. The results showed that this tool has stable and reliable performances.

Key words variable diameter stabilizer mechanism structure application

STUDY ON THE PLATFORM STABILIZING CONTROL MECHANISM OF MODULATING ROTARY STEERABLE DRILLING TOOL

by Tang Nan, Mu Xiangyang, (Electronic Engineering Institute of Xi'an Petroleum University)

Abstract Study on the structure and control principles of the platform stabilizing control mechanism of the modulating rotary steerable drilling tool was conducted. A method of performing platform stabilization control was described by using the downhole turbine generator as the initiator of force moment and by adjusting its electromagnetic moment. Based on the derivation of the mathematical model of the controlled object, corresponding computer simulation was conducted on the control system. The results showed the feasibility and effectiveness of the controlling plan.

Key words rotary steerable drilling platform stabilization moment generator simulation

STUDY ON FORMATION PRESSURE PREDICTION WITH BP NETWORK AND ITS APPLICATION

by Yang Jin (Petroleum and Gas Engineering Institute of Petroleum University)

Abstract To further improve the prediction accuracy of the downhole formation pressure, the method of