

控制与决策

Control and Decision

定向钻具姿态的双线性补偿控制策略

蔡振, 赖旭芝, 吴敏y, 曹卫华, 陈鑫

引用本文:

蔡振, 赖旭芝, 吴敏y, 等. 定向钻具姿态的双线性补偿控制策略[J]. *控制与决策*, 2020, 35(7): 1758–1764.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1528>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于神经网络的小型无人直升机非线性鲁棒控制设计

Nonlinear robust control for a small unmanned helicopter based on neural network
控制与决策. 2018, 33(4): 627–632 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0350>

倾转式三旋翼无人飞行器抗扰非线性控制设计

Nonlinear disturbance–rejection control design for tilting tri–rotor UAV
控制与决策. 2018, 33(2): 263–268 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1593>

不确定扰动下双起升桥吊双吊具鲁棒自适应滑模同步协调控制

Robust adaptive sliding mode synchronous control of double–container for twin–lift overhead cranes with uncertain disturbances
控制与决策. 2016, 31(7): 1192–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0621>

RLV抗扰动非线性最优控制器设计

Anti–disturbance nonlinear optimal controller design for RLV
控制与决策. 2015(3): 513–518 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0927>

无刷双馈电机自抗扰控制方法

Active disturbance rejection control strategy for brushless doubly–fed machine
控制与决策. 2015, 30(12): 2293–2297 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1625>

定向钻具姿态的双线性补偿控制策略

蔡 振, 赖旭芝, 吴 敏[†], 曹卫华, 陈 鑫

(1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 武汉 430074; 2. 复杂系统
先进控制与智能化湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 在地质钻进过程中, 钻具运动具有复杂非线性特性, 因而很难有效实现钻具姿态的控制. 对此, 提出一种面向定向钻具姿态的双线性补偿控制策略, 以实现非线性钻具运动的准确控制. 首先, 通过分析定向钻具运动特性, 建立定向钻具的运动模型, 针对运动模型存在非线性和耦合特性, 利用泰勒展开法和双线性逼近变换技术对钻具运动模型进行变换; 然后, 运用双线性补偿控制思想扩展局部线性控制范围和优化控制效果. 仿真结果表明, 所提出的控制策略能够简化定向钻具控制过程, 提高定向钻具控制的准确性, 具有较好的稳定性.

关键词: 定向钻进; 钻具姿态; 双线性; 补偿控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Bilinear compensation control for attitude of directional drilling tools

CAI Zhen, LAI Xu-zhi, WU Min[†], CAO Wei-hua, CHEN Xin

(1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the geological drilling process, the movement of drilling tools has the characteristic of nonlinear. Therefore, it is difficult to control the attitude of drilling tools effectively. In this research, a bilinear compensation control strategy based on directional drilling tools is proposed, and the precise control of the non-linear motion is achieved. Through the analysis of the motion characteristic of directional tools, the model of directional drilling motion is established. The motion model has partial linearity and coupling characteristics. To transform the drilling motion model, Taylor expansion method and bilinear approximation transformation technology are applied. To extend the local linear control range and optimize the linear control effect, the compensation control method in the process industry is used. The simulation results show that the control strategy proposed in this research has better stability. It can simplify the control process of the directional drilling tools, and improve the accuracy of directional drilling tools control.

Keywords: directional drilling; drilling tools attitude; bilinear; compensation control

0 引 言

在地质钻探发展过程中, 钻进自动化是地质钻探的发展趋势^[1]. 定向钻进是实现钻进自动化的重要途径, 也是最先进的钻进方式之一^[2-3]. 与垂直钻进不同, 定向钻进在钻进过程中可以改变钻进轨迹方向, 有利于实时调整钻进轨迹. 在实际工程中, 定向钻进通常使用滑动导向或旋转导向的转向工具来调整钻进轨迹方向^[4].

定向钻进系统结构示意图如图 1 所示^[5], 主要由底部钻具组合 (button hole assembly, BHA)、钻柱和地面装置组成. BHA 包括钻头、转向执行器、随钻测量装置等部件, 它通过钻柱和地面上的顶驱相连. 地面装

置中大钩通过悬挂式电缆组件与顶驱连接, 顶驱直接驱动钻柱旋转, 沿着专用导轨向井下送钻. 驱动钻机的扭矩由井下泥浆马达提供, 泥浆从钻柱中心泵入井下钻头, 并通过井眼、钻柱和 BHA 之间的环形间隙返回地面, BHA 和钻柱相对于地面是不旋转的. 在定向钻进系统中, 推靠式钻进系统使用的钻具因摩阻和扭矩小、井眼净化效果好等优点被广泛使用^[6], 它通过转向执行器装置改变钻头方位, 进而按照规划轨迹进行钻进.

钻进轨迹的调整主要通过改变钻具姿态实现, 其中, 钻具姿态是通过定向钻具的倾斜角和方位角来描述的. 建立合适的关于井斜角和方位角的钻具运

收稿日期: 2018-11-06; 修回日期: 2019-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61733016); 湖北省科技创新专项重大项目 (2018AA035); 111 计划项目 (B17040); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (2015CFA010); 中央高校基础研究基金项目 (CUG160705).

责任编辑: 刘向杰.

[†]通讯作者. E-mail: wumin@cug.edu.cn.

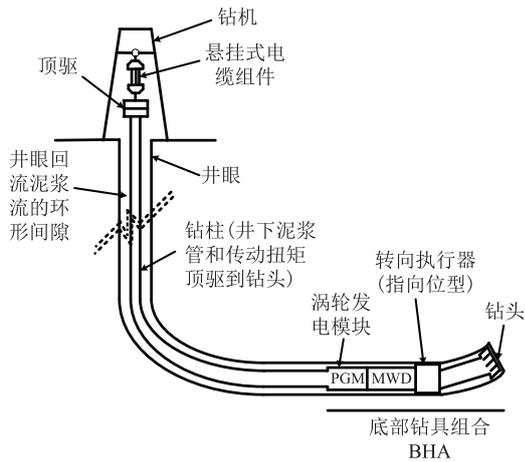


图1 定向钻进系统结构

动模型,并基于此提出有效的控制方法,是实现钻具姿态控制的关键。

在早期钻具模型运动研究中,大部分模型都使用数值描述,但数学方程太复杂而无法被直接使用。Peneder等^[7]将BHA视为欧拉-伯努利梁,描述BHA和钻孔方位的角度,但该模型限制条件较多且适用于大口径的井眼。Bayliss等^[8]提出了一种用于钻孔传播的BHA状态空间模型,但没有涉及到井眼传播动力学的延迟性质。上述模型偏力学描述,表现形式复杂,涉及的变量无法直接用于控制系统中。

为使建立的运动模型能应用于控制系统中,Panchal等^[9]通过分析钻具运动过程,建立了井斜角和方位角的关联性微分方程,在此基础上进行控制输入变换,提出了线性控制方法并进行鲁棒稳定性分析。为改善控制效果,部分学者对控制方法进行了集中研究。Genevois等^[10]强调方位角控制的重要性,提出了控制姿态角度而保持工具面向角不变的控制策略。Wouw等^[11]提出了一种定向钻进的方位角输出反馈控制策略。Liu等^[12]提出了一种用于旋转钻孔的自动倾角控制方法。Kuwana等^[13]提出了一种利用双向遥测通信链路来控制姿态的方法。但是,上述方法的约束限制条件很多,目的各不相同,通用性不强。

为了提高控制方法的通用性,Panchal等^[5]使用单位矢量描述钻头姿态方位,并提出了3种控制策略。Bayliss等^[14-15]提出 H_∞ 控制器和线性二次高斯控制方法,分析了非结构化和结构化不确定性情况下控制系统的鲁棒稳定性。这些控制方法比较复杂,且都停留在理论探索阶段,实践控制效果未知,在工程实践中,姿态控制需要一种简单且有效的方法来提高控制准确度。

由于钻具运动模型具有非线性,而模型简化技术可以降低模型计算的复杂度^[16-17],为此,使用简单

实用的模型符合解决工程问题的需求。双线性补偿控制方法能有效降低非线性系统的控制复杂度,较好地解决实际工业现场的非线性控制问题,同时,双线性补偿控制方法在高温工业炉中得到了成功应用^[18-19]。因此,在保证钻具运动特性不变的情况下,本文运用模型简化技术简化钻具运动模型,在简化模型基础上使用双线性补偿控制方法来达到提高钻具姿态控制效果的目的。

本文首先从实践需求的角度分析定向钻具非线性运动特性,建立钻具的运动模型;其次,针对运动模型存在非线性和耦合特性,进行初步简化;再次,根据简化后的钻具运动模型建立控制系统结构,为使模型能够直接应用,运用泰勒展开法和双线性逼近变换技术对钻具运动模型进行逼近变换;最后,在模型变换基础上引入流程工业中补偿控制的思想,优化姿态控制效果。

1 定向钻具运动模型

定向钻具运动模型的建立离不开定向钻具运动特性的分析,本节主要对钻具运动特性进行分析并建立钻具运动模型。

1.1 运动特性分析

定向钻具在运动过程中具有多因素耦合特性,体现在以下几个方面。

1) 钻速。钻速(rate of penetration, ROP)是影响钻进非常关键的参数之一,ROP的选择取决于多种因素,包括井的直径、目标深度、当前的地质构造、水深、井眼清洁等。目前,钻速可以使用钻头上的重量间接获取,它直接影响钻具姿态的准确控制。

2) 曲率。为保证钻具的正常使用,曲率不能超过最大值 K_{dis} 。将钻进周期分成中性期和偏置期,中性时间与偏置时间的比率称为转向比率^[20]。这样,曲率 U_{dis} 等于转向比率与最大曲率 K_{dis} 的乘积,但最大曲率 K_{dis} 无法直接获取,需要结合人工操作经验和钻进数据分析近似描述。

3) 扰动。在钻进过程中,存在一些如钻具因重量在井斜角的垂直方向上有向下的作用力,以及钻具姿态在方位调整过程中出现转向偏差等情况,这些情况对钻具姿态的调整有一定的影响,在建模过程中可以将其视为扰动项。

1.2 运动模型

推靠式钻进系统的钻具以力作为工作方式,通过导向装置使钻头处产生侧向切削力,从而实现导向钻进,适用于复杂地层环境下的高难度井。本文所涉及的钻具都是推靠式钻进系统的钻具。

在钻进过程中,定向钻具始终处于旋转状态.将钻具整体当成一个旋转的刚体,同时忽略钻柱和BHA的侧向及扭转动力学,钻具运动学方程^[9]则可表述为

$$\dot{\theta}_{\text{inc}} = V_{\text{rop}}(U_{\text{dls}} \cos U_{\text{tf}} - V_{\text{dr}}), \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{\text{azi}} = \frac{V_{\text{rop}}}{\sin \theta_{\text{inc}}}(U_{\text{dls}} \sin U_{\text{tf}} - V_{\text{tr}}). \quad (2)$$

其中: θ_{inc} 为井斜角; θ_{azi} 为方位角; U_{tf} 为工具面向角; U_{dls} 为井眼曲率; V_{dr} 为下坠率扰动; V_{tr} 为转向率偏差扰动; V_{rop} 为钻速,它是一个不受控制的参数.

运动学方程有两个状态变量(井斜角 θ_{inc} 和方位角 θ_{azi})以及两个输入量(工具面向角 U_{tf} 和曲率 U_{dls}),它们之间是非线性关系,同时,方位角响应与井斜角之间有耦合情况.

钻具运动学方程的假设是基于开环装置的边际稳定和不振荡.结合地层环境变化考虑,扰动项 V_{tr} 和 V_{dr} 的变化相对于钻具姿态响应变化是缓慢的,因此,方程中扰动项 V_{tr} 和 V_{dr} 可以忽略.

通过上述分析,式(1)和(2)可以变换为

$$\dot{\theta}_{\text{inc}} = V_{\text{rop}} U_{\text{dls}} \cos U_{\text{tf}}, \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_{\text{azi}} = \frac{V_{\text{rop}}}{\sin \theta_{\text{inc}}} U_{\text{dls}} \sin U_{\text{tf}}. \quad (4)$$

这里,等价控制输入被定义为

$$U_{\text{inc}} = \frac{U_{\text{dls}}}{K_{\text{dls}}} \cos U_{\text{tf}}, \quad (5)$$

$$U_{\text{azi}} = \frac{U_{\text{dls}}}{K_{\text{dls}}} \sin U_{\text{tf}}. \quad (6)$$

其中: U_{inc} 是井斜角的虚拟控制量, U_{azi} 是方位角的虚拟控制量, K_{dls} 是曲率 U_{dls} 的最大值.

基于所定义的等效输入变换,输入量工具面向角 U_{tf} 和曲率 U_{dls} 为

$$U_{\text{tf}} = \arctan\left(\frac{U_{\text{azi}}}{U_{\text{inc}}}\right), \quad (7)$$

$$U_{\text{dls}} = K_{\text{dls}} \sqrt{(U_{\text{azi}})^2 + (U_{\text{inc}})^2}. \quad (8)$$

将式(5)~(8)代入(3)和(4)中,有

$$\dot{\theta}_{\text{inc}} = V_{\text{rop}} K_{\text{dls}} U_{\text{inc}}, \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_{\text{azi}} = \frac{V_{\text{rop}}}{\sin \theta_{\text{inc}}} K_{\text{dls}} U_{\text{azi}}. \quad (10)$$

上述公式为推靠式钻具运动模型,其中模型输入量为 U_{inc} 和 U_{azi} .

2 控制设计

本节首先给出控制系统的总体框架,然后对系统模型进行卡尔曼双线性变换,在此基础上提出双线性补偿控制策略.

2.1 控制系统结构

钻具姿态控制系统结构如图2所示,系统主要包括一个双线性补偿器、两个PI控制器、控制转换模块、钻具模块以及相关延迟环节.

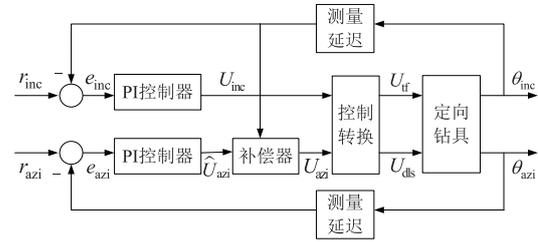


图2 控制系统结构示意图

这种结构设计是建立在推靠式钻具运动模型基础上.钻具运动模型的输入量为井斜角和方位角的虚拟控制量,而实际的输入量为工具面向角和曲率,因此,需要在钻具模块前加入控制转换模块,将 U_{inc} 和 U_{azi} 转换为 U_{tf} 和 U_{dls} .这里,为简化运算,转向比率总被认为100%(即 $U_{\text{dls}} = K_{\text{dls}}$),即 U_{dls} 是固定值,有效的输入量就是工具面向角 U_{tf} ,同时设定 V_{rop} 为定值.在双通道控制回路中引入补偿器,主要用于解决钻具运动学模型中非线性问题.

在随钻过程中,重力和磁场传感器对井斜角和方位角进行连续测量,而复杂地层环境存在强干扰、非线性、强耦合等情况,使传感器数据和惯性数据在空间上出现不重合的情况,因此,姿态测量存在固有延迟.在系统设计中需要考虑这一固有特性,因而在反馈回路中加入了延迟环节.

2.2 模型变换与分析

在复杂地层钻进过程中,钻具运动复杂且为非线性,传统PID控制难度大且效果欠佳.因此,将钻具运动模型转化为双线性模型来改善控制效果.

2.2.1 模型变换

将式(9)和(10)变换为

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\text{inc}} &= aU_{\text{inc}}, \\ \dot{\theta}_{\text{azi}} &= \frac{a}{\sin \theta_{\text{inc}}} U_{\text{azi}} = aU_{\text{azi}} \sec\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{inc}}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $a = V_{\text{rop}} K_{\text{dls}}$.

$\sec(x)$ 函数的泰勒级数展开式为

$$\sec(x) = 1 + \frac{x^2}{2} + \frac{5x^4}{24} + \frac{61x^6}{720} + \dots + \frac{E_{2n}x^{2n}}{(2n)!}, \quad (12)$$

其中 $-\pi/2 < x < \pi/2$.为了对式(11)中方位角控制方程进行变换,令 $x = (\pi/2 - \theta_{\text{inc}})$,有

$$\sec\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{inc}}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{E_{2n}(\pi/2 - \theta_{\text{inc}})^{2n}}{(2n)!}. \quad (13)$$

其中: $0 < \theta_{\text{inc}} < \pi$, E_{2n} 是欧拉系数, $(\pi/2 - \theta_{\text{inc}})^{2n}$ 项的展开式是关于 θ_{inc} 的各阶表达式. θ_{inc} 的取值范围可以保证式(11)中分母不为零. 事实上在实际定向钻进中, 井斜角 θ_{inc} 也不可能为零, 其取值范围符合定向传感器测量范畴.

如果将式(13)简单处理为一阶泰勒级数, 则在较宽的工作范围内可能不准确, 这里使用卡尔曼双线性技术进行变换.

为了获取 θ_{inc} 的各阶表达式, 定义钻具姿态的卡尔曼双线性增广状态向量 $\theta^{\text{®}}$ 为

$$\theta^{\text{®}} = [\theta_{\text{inc}}, \theta_{\text{inc}}^{(2)}, \theta_{\text{inc}}^{(3)}, \dots, \theta_{\text{inc}}^{(\alpha)}, \theta_{\text{azi}}]^T,$$

其中 $\theta_{\text{inc}}^{(\alpha)} = \frac{d}{dt}[(\theta_{\text{inc}})^\alpha] = \alpha\theta_{\text{inc}}^{\alpha-1}\dot{\theta}_{\text{inc}}$. $\theta_{\text{inc}}^{(\alpha)}$ 项不仅描述 θ_{inc} 各阶次导数, 同时也扩展了钻具姿态的状态空间方程. 这样, 式(11)可转换为

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\text{inc}} &= aU_{\text{inc}}, \\ \dot{\theta}_{\text{azi}} &= aU_{\text{azi}} \sec\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{inc}}\right) = aU_{\text{azi}} \sum_{i=0}^{\infty} b_i \theta_{\text{inc}}^i, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 b_i 表示 $\sec(\pi/2 - \theta_{\text{inc}})$ 的泰勒级数展开关于 θ_{inc} 各阶次项的系数.

由于泰勒级数的极值为无穷大, 在实际工程中不可能为无限值, 这里 i 取有限值 N . 对式(14)进行扩展, 则系统状态方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\text{inc}} &= aU_{\text{inc}}, \\ \dot{\theta}_{\text{inc}}^{(2)} &= 2\theta_{\text{inc}}\dot{\theta}_{\text{inc}} = 2a\theta_{\text{inc}}U_{\text{inc}}, \\ &\vdots \\ \dot{\theta}_{\text{inc}}^{(N)} &= N\theta_{\text{inc}}^{N-1}\dot{\theta}_{\text{inc}} = Na\theta_{\text{inc}}^{N-1}U_{\text{inc}}, \\ \dot{\theta}_{\text{azi}} &= aU_{\text{azi}} \sum_{i=0}^N b_i \theta_{\text{inc}}^i. \end{aligned} \quad (15)$$

上述状态方程中状态变量与控制输入量相乘, 符合双线性状态空间表达形式. 而多输入多输出(MIMO)双线性系统的状态空间标准式为

$$\dot{z} = Az + \left(B + \sum_{i=0}^N z_i M_i\right)u. \quad (16)$$

其中: $z \in R^{n \times 1}$ 为状态变量的向量, $u \in R^{m \times 1}$ 为控制向量, A 、 B 和 M_i 为一定维数的常量矩阵. 同时, A 为零矩阵, 状态向量 $z = \theta^{\text{®}}$, 控制向量 $u = [U_{\text{inc}}, U_{\text{azi}}]^T$.

2.2.2 模型分析

上述扩展的双线性模型(15)中, 由于井斜角控制方程中没有非线性项, 井斜角控制效果与原来模型的井斜角控制效果一致; 而方位角控制方程中随着 N 取值增加, 双线性模型的精度更高, 方位角控制效果更好.

由于线性模型无法真实地反映钻具运动特性, 非线性模型(11)对传统PID控制难度较大, 而双线性模型集合了非线性模型和线性模型各自的优点. 双线性模型既能直接用于线性控制, 又能较好地反映非线性模型特性, 因此, 钻具运动的双线性模型(15)可用于实际工业生产的PID控制, 同时, 随着 N 值增加, 能最大限度地表征钻具运动特性, 扩大系统性能的范围. 这样, 钻具姿态的双线性模型符合实际工程需求, 对复杂地质环境下的钻具姿态控制是十分必要的.

2.3 补偿控制策略

基于所获得的钻具姿态状态方程, 本小节主要提出双线性补偿控制策略.

2.3.1 PI控制器设计与分析

在钻进过程中, 出于对经济成本和钻具使用情况的考虑, 工程师会首要考虑控制系统的稳定性, 所以, 本系统采用PI控制器.

为控制井斜角和方位角, 系统建立了两个控制通道, 分别对井斜角和方位角进行PI控制. 根据系统结构(见图2), 两个PI控制的标准方程如下:

$$U_{\text{inc}} = k_{\text{pinc}}e_{\text{inc}} + k_{\text{iinc}} \int_0^t e_{\text{inc}} dt, \quad (17)$$

$$\hat{U}_{\text{azi}} = k_{\text{pazi}}e_{\text{azi}} + k_{\text{iazi}} \int_0^t e_{\text{azi}} dt. \quad (18)$$

其中: 井斜角误差 $e_{\text{inc}} = r_{\text{inc}} - \theta_{\text{inc}}$, 方位角误差 $e_{\text{azi}} = r_{\text{azi}} - \theta_{\text{azi}}$, r_{inc} 和 r_{azi} 分别为井斜角和方位角的给定输入; k_{pinc} 和 k_{iinc} 分别为井斜角PI控制的比例环节和积分环节增益; k_{pazi} 和 k_{iazi} 分别为方位角PI控制的比例环节和积分环节增益.

在井斜角控制回路中, 给定输入量 r_{inc} 与输出反馈量 θ_{inc} 形成误差 e_{inc} , 然后进入PI控制器后输出虚拟控制量(即钻具运动模型的输入量) U_{inc} , 进入双线性模型(15), 输出井斜角 θ_{inc} . 井斜角控制回路对井斜角形成跟踪处理, 通过PI控制减少井斜角的误差, 保证井斜角达到指定要求.

在方位角控制回路中, 给定输入量 r_{azi} 与输出反馈量 θ_{azi} 形成误差 e_{azi} , 进入PI控制器后输出虚拟控制量 \hat{U}_{azi} , 再经过补偿器处理得到 U_{azi} , 而补偿器的输入量为 θ_{inc} 和 \hat{U}_{azi} . 经过补偿器处理后的 U_{azi} 进入双线性模型, 输出方位角 θ_{azi} . 方位角控制回路中有额外的井斜角反馈输入, 在补偿器作用下, 通过PI控制器形成对方位角的跟踪控制.

在井斜角和方位角的反馈控制回路中, PI控制器的增益表达式可以从文献[9]中获取, 因此, 其增益表达式如下:

$$k_{\text{pinc}} = \frac{\sqrt{2}\omega_{\text{inc}}}{a}, \quad k_{\text{iinc}} = \frac{\omega_{\text{inc}}^2}{a}; \quad (19)$$

$$k_{\text{pazi}} = \frac{\sqrt{2}\omega_{\text{azi}}}{a \csc \theta_{\text{inc}}}, k_{\text{iazi}} = \frac{\omega_{\text{azi}}^2}{a \csc \theta_{\text{inc}}}. \quad (20)$$

其中 ω_{inc} 和 ω_{azi} 分别是井斜角和方位角在反馈回路中动态特性的固有频率. 在标称井斜角 θ_{inc} 下, 上述增益取决于 a 值以及井斜角和方位角反馈回路中系统的固有频率. 这里 $a = V_{\text{rop}}K_{\text{dls}}$, 涉及到钻速 V_{rop} 和最大曲率 K_{dls} 的不确定性讨论, 考虑到不确定性的复杂性, 本文不作不确定性描述.

2.3.2 补偿器设计

采用补偿控制, 系统的阶数将显著低于相应的线性模型, 可以有效降低非线性系统的复杂度. 补偿控制器主要由标准线性PI控制器和双线性补偿器组成, 其中补偿器的符号定义为 f_{azi} .

根据图2所示的系统结构, 补偿器的输入输出分别设定为 \hat{U}_{azi} 和 U_{azi} , 建立 \hat{U}_{azi} 与 U_{azi} 之间的关系为

$$\hat{U}_{\text{azi}} \times f_{\text{azi}} = U_{\text{azi}}. \quad (21)$$

由系统双线性状态方程可知, 其方位角的微分方程可表述为

$$\dot{\theta}_{\text{azi}} = aU_{\text{azi}} \sum_{i=0}^N b_i \theta_{\text{inc}}^i. \quad (22)$$

系统加入补偿器是为了抵消钻具运动方程中非线性项所产生的影响. 由双线性状态表达式(15)可知, 式(22)可表示为

$$\dot{\theta}_{\text{azi}} = aU_{\text{azi}}(b_0 + b_1\theta_{\text{inc}} + b_2\theta_{\text{inc}}^2 + b_3\theta_{\text{inc}}^3 + \dots). \quad (23)$$

根据系统结构, 有

$$\hat{U}_{\text{azi}} = U_{\text{azi}}(b_0 + b_1\theta_{\text{inc}} + b_2\theta_{\text{inc}}^2 + b_3\theta_{\text{inc}}^3 + \dots). \quad (24)$$

结合工程实际情况, 式(24)中级数的前面项起主要作用, 因此, 在标称井斜角 θ_{inc} 下, 定义方位角反馈回路的双线性补偿器表达式为

$$f_{\text{azi}} = \frac{1}{b_0 + b_1\theta_{\text{inc}} + b_2\theta_{\text{inc}}^2 + b_3\theta_{\text{inc}}^3}, \quad (25)$$

其中 $0 < \theta_{\text{inc}} < \pi$. θ_{inc} 的取值范围避免了式(25)中分母为零的情况, 也避免了实际钻进的极值情况, 从而保证钻具在合理的范围内工作.

由于补偿器的设计只与井斜角 θ_{inc} 相关, 而与运动模型参数 V_{rop} 和 K_{dls} 无关, 加入补偿器有助于PI控制进行局部线性调整, 扩展PI控制在调谐点的操作范围, 提高方位角响应速度.

3 仿真分析

由于 V_{rop} 和 K_{dls} 是影响系统不确定性的的重要因素, 其取值非常关键, 而 V_{rop} 和 K_{dls} 的取值有一个

范围. 通过对钻进相关数据的分析, V_{rop} 的取值范围为150 ft/h ~ 250 ft/h, K_{dls} 取值范围为6°/100 ft ~ 10°/100 ft. 为使仿真效果符合实际情况, 同时保证实际钻进过程中安全和高效, V_{rop} 和 K_{dls} 取中间值, 即 V_{rop} 取200 ft/h, K_{dls} 取8°/100 ft. 关于 V_{rop} 和 K_{dls} 的系统鲁棒稳定性分析在有关研究中已有描述^[21], 这里不再赘述.

井斜角和方位角各自控制回路的固有频率 ω_a 和 ω_i , 其取值主要从钻进工程经验和机理特征参数中获取, 是实际数据经过统计分析后得出的有效数值. 在实际的定向钻进过程中, 井斜角 θ_{inc} 和方位角 θ_{azi} 的值不能太大, 均取常规值 $\pi/6$ rad. 考虑井眼的狭窄和钻具使用寿命, 钻具姿态的调整不能太大, 其参考变化量取0.02 rad. 具体相关姿态角度的设定值和系统参数见表1.

表1 相关参数及取值

参数	取值	参数	取值
θ_{inc}	$\pi/6$ rad	r_{inc}	$\pi/6 + 0.02$ rad
θ_{azi}	$\pi/6$ rad	r_{azi}	$\pi/6 + 0.02$ rad
V_{rop}	200 ft/h	ω_a	0.015 1 rad/min
K_{dls}	8°/100 ft	ω_i	0.012 1 rad/min

本文从未加补偿控制和加入补偿控制两方面进行仿真分析, 具体参数如表2所示.

表2 比较参数

类型	参数
姿态响应	超调量(σ)
	峰值时间(t_p), 响应时间(t_s)
姿态误差	过零幅值(ΔA)
	收敛时间($t_{\Delta A \rightarrow 0}$)

3.1 未加补偿处理分析

钻具姿态实现一次调整需要较长的时间, 是一个缓慢过程. 从安全角度出发, 钻具调整过程姿态角度变化不宜过大, 响应时间不宜过快, 应保持缓慢调整的节奏. 姿态调整过程中还存在工具面向角响应时滞情况, 在系统测量延迟模块中都有考虑, 这里延迟时间约为20 s. 钻具姿态实现调整后, 其测量值通过钻井液脉冲传送到地面装置. 由于上行通讯速率为5 ~ 10 bit/s, 速度比较缓慢, 还需等待接收下一次钻具姿态调整指令.

对钻具运动模型进行变换后, 在井斜角和方位角两条控制通道上使用PI控制, 此时不考虑反馈补偿处理情况.

图3描述了钻具运动模型被线性化处理, 井斜角和方位角在PI控制下的响应情况. 根据实际情况,

井斜角仅受传感器测量延迟影响,因此,井斜角响应快速地达到设定值;而方位角的改变需通过偏置执行结构控制钻头偏转来完成,同时受传感器测量延迟的影响,方位角响应迟缓,收敛时间长。

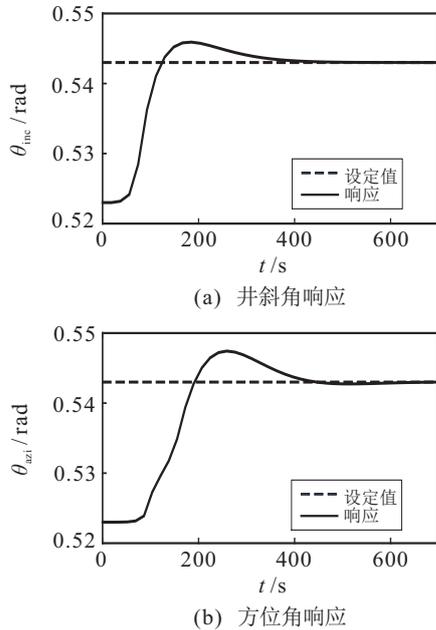


图3 井斜角和方位角的响应比较

由于钻头与井壁之间存在作用力和反作用力,使得方位角响应的幅值较井斜角响应要大,因而其超调量也较大,说明方位角控制效果在线性化处理效果上还有待提升。

通过分析,井斜角的响应和收敛速度快于方位角,说明钻具运动模型的井斜角自身线性性能表现要好于方位角线性变换后的效果. 总体来说,线性化变换实现了方位角的线性控制,基本达到了预期效果,但还存在性能提升空间。

3.2 补偿控制分析

根据表达式(19)和(20),结合表1中的参数及取值,控制增益如下所示: $k_{pinc} = 3.6665, k_{iinc} = 0.0315, k_{pazi} = 2.2877, k_{iazi} = 0.0245$ 。

从图4(a)中可以看出,加入补偿器前后在井斜角的控制响应上较为相似,但补偿后的井斜角响应效果稍微好一点. PI控制具有响应速度快、超调量小的优点,可以快速达到稳定状态,控制效果更好。

从图4(b)中可以看出,补偿器对方位角的控制响应影响较大. 由于方位角方程中存在非线性项,未加补偿器的方位角响应经历较大波动才收敛到0.543 rad的预定值,这不利于钻机稳步向前推进. 加入补偿器后方位角响应可以收敛到设定值,幅值变化不大,经过补偿器双线性处理后,控制效果更好。

图5显示了井斜角和方位角的误差情况. 加入补

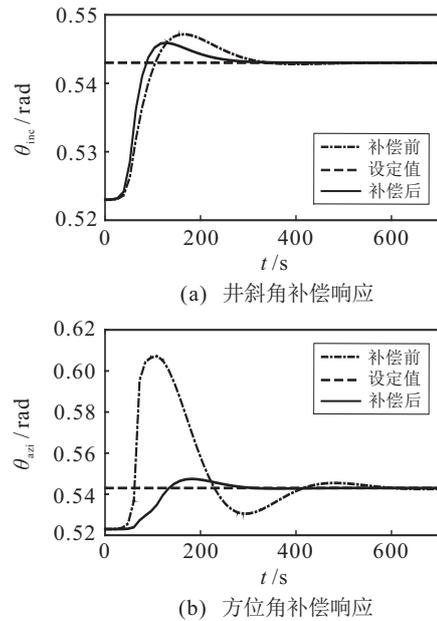


图4 井斜角和方位角的补偿响应比较

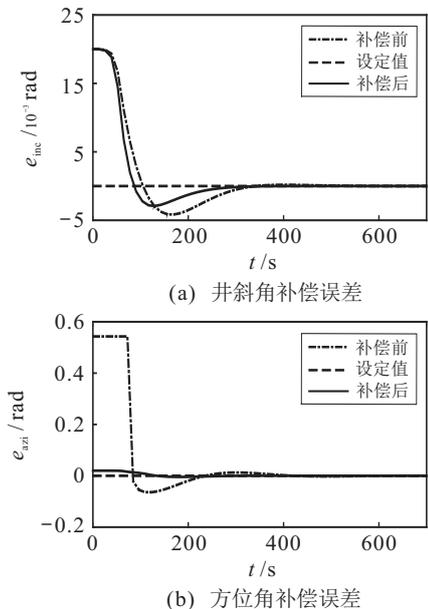


图5 井斜角和方位角的补偿误差比较

偿器后PI控制在误差控制方面效果较好,能快速收敛到零,振动幅值不大. 由于钻具运动模型在方位角控制上存在非线性特性,方位角误差在补偿器引入上差异较大. 虽然PI控制会收敛到零,但方位误差的幅度变化很大,控制效果不好,在实际中表现为对钻具磨损较大. 加入补偿器后PI控制的误差变换较小,符合实际钻具姿态变化的情况. 显然,尽管这两种控制方法的方位角误差都能收敛到零,但控制效果存在较大差距. 实际上,方位角变化对钻进轨迹至关重要,其误差变化不能太大。

4 结 论

本文介绍了一种面向定向钻具姿态的双线性建模方法和补偿控制策略,设计了相应的姿态控制系

统. 针对地质钻进过程中存在钻具难以有效控制的问题, 本文首先分析钻具运动特性, 建立钻具运动模型, 并对模型进行了合理简化; 然后, 对简化模型进行双线性变换, 同时建立井斜角和方位角两个控制回路, 并设计补偿控制器以降低系统的控制复杂度. 仿真系统考虑了信号测量延迟情况以及工具面向角响应滞后现象, 描述了钻具在姿态角度给定值情况下的响应情况. 实验结果显示姿态响应得到了改善, 姿态误差有所减小, 从而表明了该控制策略的有效性.

参考文献(References)

- [1] Macpherson J D, Wardt J P D, Florence F, et al. Drilling systems automation: Current state initiatives and potential impact[J]. SPE Drilling & Completion, 2013, 28(4): 296-308.
- [2] Downton G C. Challenges of modeling drilling systems for the purposes of automation and control[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(8): 201-210.
- [3] Pirovolou D, Chapman C D, Chau M, et al. Drilling automation: An automatic trajectory control system[J]. Journal of Petroleum Technology, 2011, 63(12): 84-87.
- [4] Kim J, Myung H. Development of a novel hybrid-type rotary steerable system for directional drilling[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24678-24687.
- [5] Panchal N, Bayliss M T, Whidborne J. Attitude control system for directional drilling bottom hole assemblies[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(7): 884-892.
- [6] 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 J Y, Wen J W, Rong J G, et al. New progress in the research of rotary steerable drilling technology[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 87-90.)
- [7] Perneder L, Detournay E. Equilibrium inclinations of straight boreholes[J]. SPE Journal, 2013, 18(3): 395-405.
- [8] Bayliss M, Matheus J. Directional drilling tool simulation and system design[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2009, 1(1): 675-689.
- [9] Panchal N, Bayliss M T, Whidborne J F. Robust linear feedback control of attitude for directional drilling tools[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(9): 92-97.
- [10] Genevois J, Boulet J, Simon C. Gyrostab project: The missing link azimuth and inclination mastered with new principles for standard rotary BHAs[C]. SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2003: 446-457.
- [11] Wouw N V D, Kremers N A H, Detournay E. Output-feedback inclination control of directional drilling systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(6): 260-265.
- [12] Liu Y H, Su Y A. Automatic inclination controller: A new inclination controlling tool for rotary drilling[C]. IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2000: 798-803.
- [13] Kuwana S, Yoshihide K, Akio I. Attitude control device and drilling-direction control device[P]. US: 5316090, 1994-05-31.
- [14] Bayliss M T, Whidborne J F, Panchal N. Structured uncertainty analysis of pole placement and H_∞ controllers for directional drilling attitude tracking[J]. IFAC World Congress, 2014, 19(1): 9283-9288.
- [15] Bayliss M T, Inyang I J, Whidborne J F. Application of LQG control to attitude control of directional drilling[C]. The 24th International Conference on Systems Engineering. Coventry: IEEE, 2015: 576-582.
- [16] Ghasemi M, Ibrahim A, Gildin E. Reduced order modeling in reservoir simulation using the bilinear approximation techniques[C]. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Maracaibo: Society of Petroleum Engineers, 2014: 1069-1078.
- [17] Kim B S, Lim M T. Robust H_∞ control method for bilinear systems[J]. Int Journal of Control, Automation and Systems, 2003, 1(2): 171-177.
- [18] Martineau S, Burnham K J, Minihan J A, et al. Application of a bilinear PID compensator to an industrial furnace[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2002, 35(1): 25-30.
- [19] Martineau S, Burnham K J, Minihan J A, et al. Design of a bilinear compensator for industrial furnaces[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Systems Science. Wroclaw: IEEE, 2001: 200-207.
- [20] Bayliss M T, Bogarth C B, Whidborne J F. MPC-based feedback delay compensation scheme for directional drilling attitude control[C]. SPE/IADC Drilling Conference. London: Society of Petroleum Engineers, 2015: 1-13.
- [21] Bayliss M T, Whidborne J F. Mixed uncertainty analysis of pole placement and H_∞ controllers for directional drilling attitude tracking[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015, 137(12): 1-8.

作者简介

蔡振(1981—), 男, 博士生, 从事复杂系统控制与优化的研究, E-mail: zcai2199@cug.edu.cn;

赖旭芝(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统控制、智能系统和机器人控制等研究, E-mail: laixz@cug.edu.cn;

吴敏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事过程控制、鲁棒控制和智能系统等研究, E-mail: wumin@cug.edu.cn;

曹卫华(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事过程控制、智能系统和机器人技术等研究, E-mail: weihuacao@cug.edu.cn;

陈鑫(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、过程控制、多机器人系统、智能装备等研究, E-mail: chenxin@cug.edu.cn.