控制与决策
Control and Decision

基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制

黄恒宇, 吴敏, 陆承达, 周洋

引用本文:
黄恒宇, 吴敏, 陆承达, 等. 基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制[J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2409-2418.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1375

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于改进指令整形的四旋翼吊装负载摆动抑制

Load swing suppression of quadrotor slung system based on improved command shaping

控制与决策. 2021, 36(8): 1947-1954 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1733

线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529-1536 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893-900 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693-698 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774

高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627-2636 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483

基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制

黄恒宇[1,2,3]，吴 敏[1,2,3]，陆承达[1,2,3†]，周 洋[1,2,3]

(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自动化湖北省重点实验室，武汉 430074；
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心，武汉 430074)

摘 要: 提出一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制 (DF-MRAC) 的钻柱振动抑制方法, 克服地层变化对钻柱振动抑制的影响. 首先, 设计一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制方案, 处理状态相关的钻头-岩石作用扰动对钻柱振动抑制的影响, 通过广义扩张状态观测器 (GESO) 估计包含地层信息的钻头-岩石作用扰动; 然后, 将没有钻头-岩石作用扰动的钻柱振动模型作为参考模型, 进行基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制方法的钻柱振动抑制控制器参数设计, 克服地层变化对钻柱振动抑制的影响; 最后, 通过仿真实验验证所提方法在处理地层变化对钻柱振动抑制影响方面的有效性, 相比 GESO 和 MRAC 方法, 所提基于 DF-MRAC 的钻柱振动抑制方法能够更加快速和稳定地抑制钻柱振动.

关键词: 钻进过程；钻柱振动；钻头-岩石作用；振动抑制；扰动估计；模型参考自适应控制

中图分类号: P634；TP273；O328 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1375

引用格式: 黄恒宇, 吴敏, 陆承达, 等. 基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2409-2418.

Drill-string vibration suppression based on disturbance estimation and DF-MRAC methods

HUANG Heng-yu[1,2,3]，*WU Min*[1,2,3]，*LU Cheng-da*[1,2,3†]，*ZHOU Yang*[1,2,3]

(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；3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration of Ministry of Education，Wuhan 430074，China)

Abstract: This paper presents a drill-string vibration suppression method based on disturbance estimation and derivative-free model reference adaptive control (DF-MRAC) methods to address the impact of formation changing on drill-string vibration. First, a vibration suppression scheme is designed that combines disturbance estimation and DF-MRAC to counteract the effects of state-related bit-rock interaction disturbance. The bit-rock interaction disturbance containing formation information is estimated by a generalized extended state observer (GESO). Then, the drill-string vibration model without bit-rock interaction disturbance is used as the reference model. The parameters of the vibration suppression controller based on disturbance estimation and DF-MRAC are then designed, which can mitigate the effects of formation changing on vibration suppression. Finally, simulation experiments are used to illustrate the effectiveness of the proposed method in dealing with the influence of formation changing on drill-string vibration suppression. Compared to the GESO and MRAC methods, the proposed method based on DF-MRAC offers a faster and more stable vibration suppression effect.

Keywords: drilling process； drill-string vibration； bit-rock interaction； vibration suppression； disturbance estimation；model reference adaptive control

收稿日期: 2024-11-25；**录用日期:** 2025-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62273317, 62373332)；湖北省自然科学基金项目 (2023AFB044)；中国博士后科学基金项目 (2023TQ0337, 2024M763061)；高等学校学科创新引智计划 111 项目 (B17040)；中国地质大学 (武汉) 中央高校基本科研业务费专项资金项目.

†通信作者. E-mail: luchengda@cug.edu.cn.

0 引 言

地质钻进是实现深部资源能源勘探开发的必要环节. 深部钻探面临软硬交替、断层伴生、产状陡缓不一等不同构造的地层, 钻头破岩过程十分剧烈, 导致深部钻探过程中不确定性、强干扰、非线性等问题突出[1]. 深部地质钻探过程所需的钻柱长度极长, 在剧烈的钻头-岩石作用下极易发生钻柱振动, 导致钻具疲劳, 降低井眼质量和钻进效率[2], 甚至带来严重的安全问题[3-4]. 因此, 考虑不同地层变化情况, 设计钻进过程钻柱振动抑制系统, 对实现安全、稳定、高效的钻进过程具有重要意义.

目前国内外学者对不同地层下钻柱振动特性进行了研究. Ma 等[5] 通过轴向阻尼系数描述了软、中、硬地层可钻性, 并分析了这些地层下的轴向钻柱运动特性; Ritto[6]、Castello 等[7] 描述了不同地层下扭转钻头-岩石作用模型参数的变化, 并分析了扭转钻头-岩石作用模型参数变化对钻柱振动的影响. 一些研究人员通过贝叶斯估计方法识别了扭转钻头-岩石作用模型参数, 并分析了扭转钻头-岩石作用参数对扭转钻柱振动的影响. Ritto 等[8] 讨论了一种识别钻头-岩石作用模型中不确定概率参数的策略; Pires 等[9] 结合灰箱和黑箱建模方法来识别钻柱和钻头-岩石作用模型参数, 提高了模型预测精度; Huang 等[10] 研究了地层突变对轴向-扭转耦合钻柱振动的影响. 地层变化会增加钻柱振动抑制难度, 有必要制定地层变化下的钻柱振动抑制策略.

地层变化信息包含在钻头-岩石作用模型参数中, 针对地层变化对钻头破岩和钻柱振动的影响, 将钻头-岩石作用视为一种扰动, 部分学者开展了基于钻头-岩石作用扰动估计的钻柱振动主动抑制研究. 等价输入干扰 (EID)[11]、广义扩张状态观测器 (GESO)[12-13] 等方法能够估计并补偿与控制输入不在同个通道的扰动, 对扰动具有很好的抑制效果. Lu 等[14] 利用扰动估计方法开发了一种时滞相关控制方案, 可以通过井上测量的时变输出量来抑制扭转钻柱振动; Wu 等[15] 建立了中立时滞扭转钻柱振动模型, 将 Smith 预测器和扰动估计器相结合, 提出了基于鲁棒控制的扭转钻柱振动抑制方案. 这些研究主要将钻头-岩石作用扰动视为周期性扰动, 虽然通过扰动估计方法估计了钻头-岩石作用扰动并进行补偿, 但是没有考虑钻头-岩石作用扰动扭矩与钻头转速之间的状态相关特性. 因此, 实际钻进过程中的扰动抑制性能有待提高.

模型参考自适应控制 (MRAC) 方法[16-18] 可以抑制系统的有界状态相关扰动, 利用原始系统与参考模型之间的广义误差来设计参数更新律, 然后实时调整控制器参数. 这一特性可以有效处理钻头-岩石作用扰动, 提高钻柱振动抑制效果. 现有方法将钻头-岩石作用作为一个整体, 自适应律的设计没有考虑钻头-岩石作用参数信息. Yucelen 等[19] 对系统参数不确定性引入一种新的假设, 并提出了无微分模型参考自适应控制 (DF-MRAC) 方法, 使用梯度下降迭代学习算法代替一阶常微分方程作为参数更新律, 提高 MRAC 系统处理参数不确定性的能力. 高东旭等[20] 设计了一种基于扰动补偿的无微分模型参考自适应控制系统, 该方法控制器参数设计过程包含状态参数变化信息. 无微分模型参考自适应控制方法能够处理状态参数变化, 钻头-岩石作用状态相关扰动随地层变化满足这一特性, 该方法符合钻柱振动抑制控制器设计需求.

本文提出一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制方法, 克服地层变化对钻柱振动抑制的影响. 首先, 根据现场钻具参数建立扭转钻柱振动模型, 并转化为状态空间方程. 然后, 添加内部模型控制器, 并通过 LQR 方法求解状态反馈控制器增益. 地层变化信息包含在钻头-岩石作用参数中, 设计广义扩张状态观测器, 进行钻头-岩石作用扰动估计, 在此基础上进行控制器参数设计, 采用 DF-MRAC 方法进行扭转维度钻柱振动抑制. 通过仿真实验验证了所提方法在抑制钻柱振动方面的有效性. 本文的贡献点如下:

1) 提出一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制方案, 有效处理状态相关的钻头-岩石作用扰动对钻柱振动抑制的影响;

2) 通过广义扩张状态观测器估计包含地层信息的钻头-岩石作用扰动, 在此基础上设计适应地层变化的 DF-MRAC 控制器;

3) 所提基于 DF-MRAC 的钻柱振动抑制方法相比 GESO 和 MRAC 方法能更加快速和稳定抑制钻柱振动.

1 钻柱系统模型

本节主要介绍钻柱系统模型, 包括钻柱振动模型和钻柱系统状态空间模型. 在此研究中, 将钻头-岩石作用当作扰动进行处理, 地层变化信息包含在钻头-岩石作用扰动扭矩中, 下面将具体介绍.

1.1 钻柱系统建模

图 1 为钻柱系统结构图, 钻柱运动可分为轴向和扭转两个方向, 钻柱运动规律满足材料力学理论. 从图 1 可以看到钻柱系统由井上转盘、尺寸不一的

钻杆、钻铤、钻头等组成, 钻柱运动的过程中除了与地层发生相互作用, 也受到钻井液阻尼的影响. 相关研究表明扭转方向振动得到抑制时, 轴向方向钻柱振动也将得到有效抑制, 这与钻进机理相符合. 本文主要建立扭转方向钻柱振动模型, 基于此模型开展后续钻柱振动抑制工作.

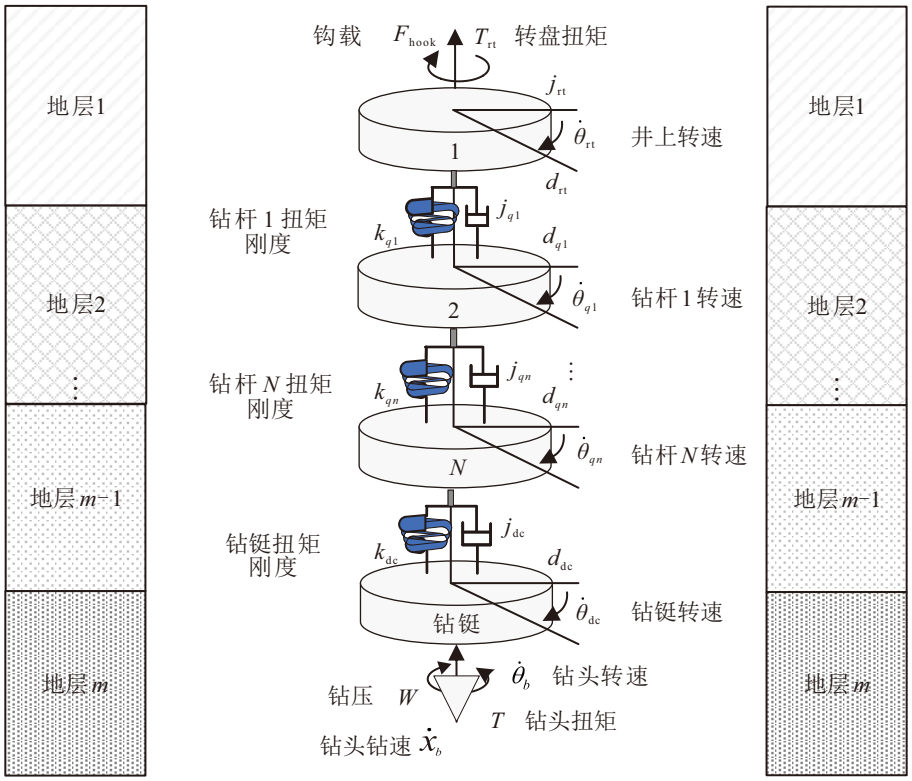

图1　钻柱系统结构图

根据钻柱运动多自由度 (DOF) 理论, 钻柱系统模型通过下式进行表示[1]:

$$J_1\ddot{\theta}+C_1\dot{\theta}+K_1\theta=S_1T_{\text{rt}}+S_2T. \tag{1}$$

其中: $\theta=[\theta_{\text{rt}},\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n,\theta_{\text{dc}}]^{\text{T}}\in\mathbb{R}^{n+2}$是$n+2$个扭转角位移矩阵, 包括 1 个转盘单元、$n$个钻杆单元 ($n$DOFs($n\geqslant 2$))、1 个钻铤单元 (1DOF); J_1、C_1分别表示转动惯量矩阵、扭转阻尼矩阵, 公式为

$$J_1=\text{diag}\{j_{\text{rt}},j_{q1},\ldots,j_{qn},j_{\text{dc}}\}, \tag{2}$$

$$C_1=\text{diag}\{d_{\text{rt}},d_{q1},\ldots,d_{qn},d_{\text{dc}}\}; \tag{3}$$

扭转方向的刚度矩阵K_1为

$$\begin{bmatrix} k_{q1} & -k_{q1} & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ -k_{q1} & k_{q1}+k_{q2} & -k_{q2} & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ 0 & -k_{q2} & k_{q2}+k_{q3} & -k_{q3} & \ldots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & k_{qn}+k_{\text{dc}} & -k_{\text{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{dc}} & k_{\text{dc}} \end{bmatrix};$$

此外, $S_1=[1,0,0,\ldots,0]^{\text{T}}\in\mathbb{R}^{n+2}$、$S_2=[0,0,\ldots,-1]^{\text{T}}\in\mathbb{R}^{n+2}$为控制和扰动输入矩阵; $T_{\text{rt}}\in\mathbb{R}$为转盘扭矩, $T\in\mathbb{R}$为钻头扭矩.

矩阵J_1、C_1和K_1中的参数可以通过现场钻具参数计算得到, 具体的计算公式如下:

$$\begin{cases} j_\alpha=\rho l_\alpha I_\alpha, \\ k_\alpha=\dfrac{G_sI_\alpha}{l_\alpha}, \\ d_\alpha=l_\alpha\tilde{c}, \\ I_\alpha=\dfrac{\pi(D_{o_\alpha}^4-D_{i_\alpha}^4)}{32}. \end{cases} \tag{4}$$

其中: $\alpha\in[\text{rt},q1,q2,\ldots qn,\text{dc}]$表示转盘、第$i$个钻杆、钻铤单元, ρ为钻具刚体密度, G_s为剪切模量, D_{i_α}、D_{o_α}、l_α和I_α为钻具的内径、外径、长度和极惯性矩, $\tilde{c}$为每单元钻杆长度所受的钻井液阻尼系数.

在此钻柱振动模型中, 钻头-岩石作用扭矩T被当作扰动, 然后将该钻柱系统模型转化为系统状态空间方程.

1.2　钻柱系统状态空间模型

钻柱振动模型中钻头-岩石作用被当作扰动处理, 将钻柱系统转化为状态空间方程, 选择$x(t)=[\dot{\theta}_{\text{rt}},\dot{\theta}_{q1},\dot{\theta}_{q2},\ldots,\dot{\theta}_{qn},\dot{\theta}_{\text{dc}},\theta_{\text{rt}}-\theta_{q1},\theta_{q1}-\theta_{q2},\ldots,\theta_{qn}-\theta_{\text{dc}}]^{\text{T}}$为系统的状态变量 (每个钻柱系统单元的角速度、相邻两个单元的角位移差), 输入量为井上扭矩$u(t)$, 扰动输入为钻头-岩石作用扭矩$d(t)$. 钻柱振动模型的状态空间方程表示为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=A_tx(t)+B_uu(t)+B_dd(t),\\ y(t)=C_tx(t).\end{cases}\tag{5}$$

其中系统参数如下所示:

$$A_t=\begin{bmatrix}-J_1^{-1}C_r & J_1^{-1}a_{12}\\ A_{21} & O_{(n+1)\times(n+1)}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{(2n+3)\times(2n+3)},\tag{6}$$

$$B_u=\begin{bmatrix}J_1^{-1}S_1\\ O_{(n+1)\times1}\end{bmatrix},\ B_d=\begin{bmatrix}J_1^{-1}S_2\\ O_{(n+1)\times1}\end{bmatrix},\tag{7}$$

$$C_t=[\ 1\quad O_{(n+1)\times1}\quad O_{(n+1)\times1}\ ],\tag{8}$$

$$a_{12}=\begin{bmatrix}-k_{q1} & 0 & \cdots & 0\\ k_{q1} & -k_{q2} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & k_{qn} & -k_{\rm dc}\\ 0 & \cdots & 0 & k_{\rm dc}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{(n+2)\times(n+1)},\tag{9}$$

$$A_{21}=\begin{bmatrix}1 & -1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0\\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0\\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -1\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{(n+1)\times(n+2)}.\tag{10}$$

在扭转钻柱运动系统基础上, 进行基于钻头-岩石作用扰动估计的扭转钻柱振动抑制系统控制器参数的设计.

2 钻柱振动抑制系统设计

本节主要介绍一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制系统.

2.1 钻柱振动抑制方案

首先, 钻头-岩石作用模型中包含不同地层的参数信息. 如图 2 所示, 针对地层变化对钻柱振动抑制的影响, 设计一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制策略, 抑制钻头-岩石作用扰动对钻柱振动的影响. 结合扰动估计和无微分模型参考自适应控制方法进行钻柱振动抑制. 首先, 添加内部模型控制器, 并采用 LQR 方法求解状态反馈控制器增益; 然后, 通过广义扩张状态观测器估计钻头-岩石作用扰动; 接着, 将没有钻头-岩石作用扰动的钻柱振动模型作为参考模型, 结合估计的钻头-岩石作用扰动信息设计无微分模型参考自适应控制器参数.

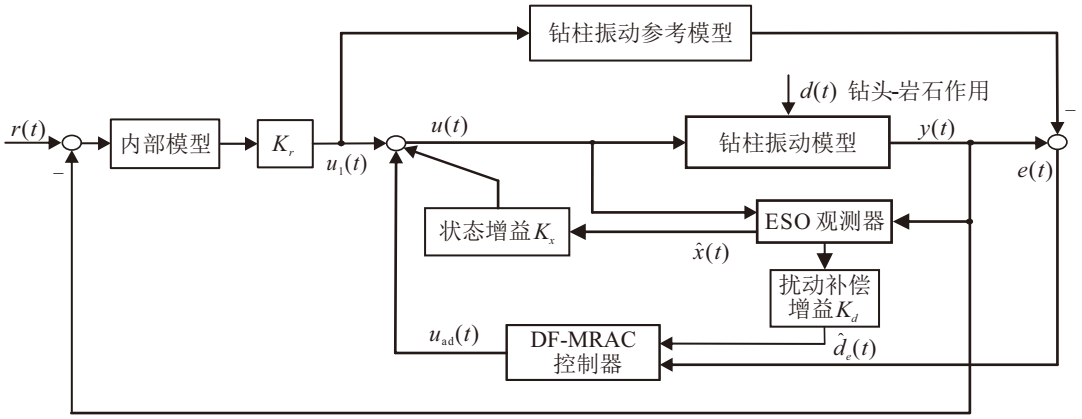

图2 钻柱振动抑制控制框图

在此过程中, 由于控制输入和扰动输入不在同一通道, 通过广义扩张状态观测器估计钻头-岩石作用扰动, 将钻头-岩石作用扰动估计到控制输入端. 将该扰动作为自适应律设计的输入, 结合无微分模型参考自适应控制方法, 可以克服包含地层信息的钻头-岩石作用扰动对钻柱振动的影响.

2.2 钻头-岩石作用扰动估计

钻柱振动模型状态空间方程如下所示:

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=A_tx(t)+B_uu(t)+B_dd(t),\\ y(t)=C_tx(t).\end{cases}\tag{11}$$

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^{(2n+3)\times1}$, $u(t)\in\mathbb{R}$, $C_t\in\mathbb{R}^{1\times(2n+3)}$, $y(t)\in\mathbb{R}$, 分别为钻柱系统状态矩阵、输入、输出矩阵、输出; $u(t)$为井上扭矩控制输入$T_{\rm rt}$, $d(t)$为钻头-岩石作用扰动扭矩T, 控制输入$T_{\rm rt}$和扰动T处于不同的输入通道.

在实际工程中, 钻柱系统通过井上操作参数控制, 钻柱系统状态变量能控且能观, 系统钻头-岩石作用扰动状态相关, 可微分且有界, 满足$d(t)=f(x(t),t)$. 钻柱系统满足两个假设条件.

假设 1 (A_t,B_u)能控, 且状态$x(t)$可观测.

假设 2 非线性扰动$f(x(t),t)$及其一阶导数

$$h(t)=\frac{{\rm d}(f(x(t),t))}{{\rm d}t}\tag{12}$$

有界, 且满足$\|h(t)\|_\infty\leqslant\delta_f$, $\delta_f>0$.

估计到等效的钻头-岩石作用扰动, 并补偿到控制输入端, 具体可以表示为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=A_t x(t)+B_u(u(t)+d_e(t)),\\ y(t)=C_t x(t).\end{cases}\tag{13}$$

钻柱振动模型状态观测器可以表示为

$$\dot{\hat{x}}(t)=A_t\hat{x}(t)+B_u u(t)+L[y(t)-C_t\hat{x}(t)].\tag{14}$$

使用广义扩张状态观测器 (GESO) 方法, 增加一个扩张状态变量, 用于估计钻头-岩石作用扰动, 有

$$x_{2n+4}(t)=d(t).\tag{15}$$

线性化系统 (13), 扩张状态系统方程表示为

$$\begin{cases}\dot{\bar{x}}(t)=\bar{A}\bar{x}(t)+\bar{B}_u u(t)+\bar{E}h(t),\\ \bar{y}(t)=\bar{C}\bar{x}(t).\end{cases}\tag{16}$$

其中

$$\bar{x}(t)=\begin{bmatrix}x(t)\\ x_{2n+4}(t)\end{bmatrix},\tag{17}$$

$$h(t)=\dot{d}(t);\tag{18}$$

扩张钻柱运动系统矩阵表示为

$$\bar{A}=\begin{bmatrix}A_t & B_d\\ O_{1\times(2n+3)} & O_{1\times1}\end{bmatrix},\tag{19}$$

$$\bar{B}_u=\begin{bmatrix}B_u\\ O_{1\times1}\end{bmatrix},\tag{20}$$

$$\bar{E}=\begin{bmatrix}O_{(2n+3)\times1}\\ 1\end{bmatrix},\tag{21}$$

$$\bar{C}=\begin{bmatrix}C_t & O_{1\times1}\end{bmatrix}.\tag{22}$$

此时, 钻柱系统扩张状态观测器可以表示为如下形式:

$$\begin{cases}\dot{\hat{\bar{x}}}(t)=\bar{A}\hat{\bar{x}}(t)+\bar{B}_u u(t)+\bar{L}(\bar{y}(t)-\hat{\bar{y}}(t)),\\ \hat{\bar{y}}(t)=\bar{C}\hat{\bar{x}}(t).\end{cases}\tag{23}$$

其中: $\hat{\bar{x}}(t)$为钻柱运动系统扩张后的状态估计值, $\bar{L}$为扩张状态观测矩阵, $\hat{y}(t)$为系统估计输出.

钻柱系统加入估计的钻头-岩石作用扰动后, 有

$$u(t)=u_1(t)+K_x\hat{x}(t)+K_d\hat{x}_{2n+4}(t).\tag{24}$$

其中: K_x为设计的状态反馈控制增益矩阵, $\hat{d}(t)=\hat{x}_{2n+4}(t)$, 通过 GESO 方法获得扰动补偿信号$\hat{d}_e(t)=K_d\hat{x}_{2n+4}(t)$.

当状态变量$\hat{\bar{x}}(t)$完全跟踪$\bar{x}(t)$时, 将$u(t)$代入到式 (11) 中, 有

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=(A_t+B_uK_x)x(t)+\\ \qquad B_u(u_1(t)+K_d\hat{x}_{2n+4})+B_d x_{2n+4},\\ y(t)=C_t x(t).\end{cases}\tag{25}$$

假设矩阵$A_m=A_t+B_uK_x$可逆, 根据式 (25) 可得

$$x(t)=A_m^{-1}[\dot{x}(t)-B_u u_1(t)-(B_d+B_uK_d)\hat{x}_{2n+4}],\tag{26}$$

将式 (26) 代入到 (25) 的$y(t)$得

$$y(t)=C_tA_m^{-1}\dot{x}_m(t)-C_tA_m^{-1}B_u u_1(t)-(C_tA_m^{-1}B_d+C_tA_m^{-1}B_uK_d)\hat{x}_{2n+4}.\tag{27}$$

在此基础上, 假设矩阵$C_t(A_t+B_uK_x)^{-1}B_u$可逆, 设计广义扩张状态观测器的扰动补偿矩阵

$$K_d=-[C_t(A_t+B_uK_x)^{-1}B_u]^{-1}C_t(A_t+B_uK_x)^{-1}B_d.\tag{28}$$

矩阵$C_t(A_t+B_uK_x)^{-1}B_u$中的$A_t+B_uK_x$为钻柱系统通过状态反馈得到的 Hurwitz 矩阵, 钻柱振动抑制系统为单输入输出控制系统, 扰动信号也为单输入. 因此, 钻柱系统中C_t和B_u矩阵不为空, 该矩阵为非零常值矩阵, 保证了矩阵$C_t(A_t+B_uK_x)^{-1}B_u$可逆.

将式 (28) 代入到 (27) 中, 有

$$y(t)=C_tA_m^{-1}(\dot{x}_m(t)-B_u u_1(t)),\tag{29}$$

通过选取合适的扰动补偿增益K_d, 消除了扰动对模型输出的影响, 因此采用 GESO 方法可以实现钻头-岩石作用扰动的有效估计.

综上, 可以估计得到控制输入等效的扰动补偿控制变量$\hat{d}_e(t)$.

2.3 基于无微分模型参考自适应控制方法的钻柱振动抑制

无微分模型参考自适应控制方法使用迭代算法代替一阶常微分方程作为参考自适应更新律, 提高了 MRAC 系统处理参数不确定性的能力. 钻头-岩石作用扰动扭矩与钻头转速状态相关, 在控制器设计过程中, DF-MRAC 方法设计自适应律的过程中采用了包含地层参数信息的钻头-岩石作用信号.

为克服地层变化对扭转钻柱振动抑制的影响, 对扭转方向的钻柱振动进行控制, 选取无钻头-岩石作用扰动的钻柱振动参考模型为

$$\begin{cases}\dot{\bar{x}}_m(t)=A_m\bar{x}_m(t)+B_m u(t),\\ \bar{y}_m(t)=C_m\bar{x}_m(t).\end{cases}\tag{30}$$

其中: $\bar{x}_m$为参考模型状态, $\bar{y}_m$为钻柱振动系统参考模型输出, 参考模型状态、输入矩阵表示为

$$\begin{cases}A_m=A_t+B_uK_x,\\ B_m=B_uK_r.\end{cases}\tag{31}$$

引入内部模型控制器

$$\acute{A}_r=0,\ \acute{B}_r=1.\tag{32}$$

忽略系统的钻头-岩石作用扰动, 包含内部模型和被控对象的系统阶跃响应可以表示为

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{x}(t) \\ \delta\dot{x}_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_t & 0 \\ -\acute{B}_r C_t & \acute{A}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta x_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_u \\ 0 \end{bmatrix} \delta u(t). \tag{33}$$

其中

$$\begin{cases} \delta x(t) = x(t) - x(+\infty), \\ \delta x_r(t) = x_r(t) - x_r(+\infty), \\ \delta u(t) = u(t) - u(+\infty). \end{cases} \tag{34}$$

系统优化指标为

$$J_K = \int_0^\infty \Big\{ [\delta x^{\mathrm{T}}(t) \delta x_r^{\mathrm{T}}(t)] Q_k \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta x_r(t) \end{bmatrix} + R_k \delta u^2(t) \Big\} \mathrm{d}t. \tag{35}$$

设计矩阵Q_k和R_k, 通过 LQR 方法可以得到状态反馈矩阵K_x和K_r.

添加模型参考自适应控制器后系统的控制律为

$$u(t) = u_1 + K_x x(t) + u_{\mathrm{ad}}(t). \tag{36}$$

定义钻柱振动抑制系统的误差为$e = x - x_m$, 如果钻柱振动参考模型的状态矩阵A_m为 Hurwitz 矩阵, 基于钻柱振动抑制系统参数不确定性的描述, 设计自适应反馈控制律为

$$u_{\mathrm{ad}}(t) = -\hat{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \Psi(x(t)). \tag{37}$$

其中: $\hat{K}_{\mathrm{ad}}(t)$为$K_{\mathrm{ad}}(t)$的估计值; $\Psi(x(t))$包含扰动补偿量, $\Psi(x(t)) = [S_2^{\mathrm{T}} \ \ O_{1\times(n+1)}]^{\mathrm{T}} \hat{d}_e(t)$.

与传统的 MRAC 方法采用微分方程求取控制律不同, 无微分模型参考自适应控制方法通过迭代法求取自适应律, 满足以下的自适应参数更新律:

$$\hat{K}_{\mathrm{ad}}(t) = \theta_1 \hat{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau) + \hat{\theta}_2(t). \tag{38}$$

其中: $\tau > 0$为迭代更新时间间隔; θ_1和$\hat{\theta}_2$表示为

$$0 \leqslant \theta_1^{\mathrm{T}} \theta_1 < \upsilon I, \tag{39}$$

$$\hat{\theta}_2(t) = k \Psi(x(t)) e^{\mathrm{T}}(t) P B_u. \tag{40}$$

这里: $0 < \upsilon < 1$, k为需要设计的增益系数, 矩阵P为满足 Lyapunov 方程

$$A_m^{\mathrm{T}} P + P A_m < 0 \tag{41}$$

的正定对称矩阵.

在基于无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制系统中, 设计自适应律的过程中引入了包含地层变化信息的钻头-岩石作用扰动. 钻头-岩石作用扰动通过 GESO 方法进行估计, 应用了地层变化的相关信息, 这提高了钻柱振动抑制效果.

3 钻柱振动抑制系统稳定性分析

根据第 2 节基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制系统结构, 结合状态反馈自适应控制律的设计, 钻柱振动抑制系统的内部信号最终一致有界. 系统稳定性证明将在本节展开.

定理 1 若基于扰动估计的 DF-MRAC 系统满足假设 1 和假设 2, 且以下条件同时成立: 1) 矩阵A_m为 Hurwitz 矩阵; 2) DF-MRAC 参数更新律 (38) 满足τ和$k > 0$, 同时θ_1和$\hat{\theta}_2$满足式 (39) 和 (40).则在图 2 所示的基于扰动估计的 DF-MRAC 钻柱振动抑制系统在自适应控制律 (37) 的作用下, 闭环系统内部误差信号最终一致有界.

证明 加入控制方法后, 钻柱系统状态空间方程可以表示为

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + B_u [u_1 + \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) \Psi(x(t))], \tag{42}$$

其中$\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) = K_{\mathrm{ad}}(t) - \hat{K}_{\mathrm{ad}}(t)$为参数估计误差.

设$\theta_2(t) = K_{\mathrm{ad}}(t) - \theta_1 K_{\mathrm{ad}}(t-\tau)$, $\|\theta_2(t)\| \leqslant \chi_*$, $\chi_* = \omega_*(1 + |\theta_1|)$, ω_*为正值, 表示$\|\theta_2(t)\|$有界,

$$\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) = \theta_1 \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau) + \theta_2(t) - \hat{\theta}_2(t). \tag{43}$$

因此, 可以得到参考模型和实际模型状态误差$e(t)$的一阶导数为

$$\dot{e}(t) = A_m e(t) + B_u \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \Psi(x(t)). \tag{44}$$

选取 Lyapunov 候选函数为

$$V(t) = e^{\mathrm{T}}(t) P e(t) + \sigma \mathrm{tr}\Big[\int_{t-\tau}^{t} \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(s) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(s) \mathrm{d}s \Big], \tag{45}$$

其中$\sigma > 0$. 在此 Lyapunov 候选函数下进行钻柱振动抑制系统稳定性分析.

对 Lyapunov 候选函数进行求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = {} & e^{\mathrm{T}}(t)(A_m^{\mathrm{T}} P + P A_m) e(t) + \\ & 2 e^{\mathrm{T}}(t) P B_u \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \Psi(x(t)) + \\ & \sigma \mathrm{tr}[-\varsigma \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) + \eta \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) - \\ & \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)]. \end{aligned} \tag{46}$$

其中: $\eta = 1 + \varsigma$, $\varsigma > 0$. 将式 (43) 代入到 (46) 中, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = {} & e^{\mathrm{T}}(t)(A_m^{\mathrm{T}} P + P A_m) e(t) + \\ & 2 e^{\mathrm{T}}(t) P B_u \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \Psi(x(t)) + \\ & \sigma \mathrm{tr}[-\varsigma \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t) - \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t- \\ & \tau) + \eta \hat{\theta}_2^{\mathrm{T}}(t) \hat{\theta}_2(t) + \eta \theta_2^{\mathrm{T}}(t) \theta_2(t) + \\ & \eta \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \hat{\theta}_1^{\mathrm{T}} \hat{\theta}_1 \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau) - \\ & 2\eta \hat{\theta}_2^{\mathrm{T}}(t) \theta_2(t) - 2\eta \hat{\theta}_2^{\mathrm{T}}(t) \theta_1 \tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau) + \\ & 2\eta \tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \theta_1^{\mathrm{T}} \theta_2(t)]. \end{aligned} \tag{47}$$

利用 Young 不等式可将上式中的最后 1 项求解, 具体表示为 ($\gamma > 0$)

$$\mathrm{tr}[2\eta\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_2(t)]\leqslant$$
$$\mathrm{tr}\Big[\frac{\eta^2}{\gamma}\theta_2^{\mathrm{T}}(t)\theta_2(t)\Big]+\mathrm{tr}[\gamma\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau)\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_1\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)]. \tag{48}$$

将式 (48) 代入到 Lyapunov 候选函数导数中, 有

$$\begin{aligned}&\dot{V}(t)\leqslant\\&e^{\mathrm{T}}(t)(A_m^{\mathrm{T}}P+PA_m)e(t)+\\&2e^{\mathrm{T}}(t)PB_u\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t)\Psi(x(t))-\\&\sigma\mathrm{tr}\{\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau)[I-(\eta+\gamma)\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_1]\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)\}-\\&\sigma\varsigma\mathrm{tr}[\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)]+\sigma\Big(\eta+\frac{\eta^2}{\gamma}\Big)\mathrm{tr}[\theta_2^{\mathrm{T}}(\mathrm{t})\theta_2(\mathrm{t})]+\\&\sigma\eta\mathrm{tr}\{\hat{\theta}_2^{\mathrm{T}}(t)[\hat{\theta}_2(t)-2\theta_2(t)-2\theta_1\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(\mathrm{t}-\tau)\}.\end{aligned} \tag{49}$$

在式 (40) 中, 对于$\hat{\theta}_2$有$k\equiv 1/(\sigma\eta)$, 结合式 (49) 有

$$\begin{aligned}&\dot{V}(t)\leqslant\\&e^{\mathrm{T}}(t)(A_m^{\mathrm{T}}P+PA_m)e(t)-\\&ke^{\mathrm{T}}(t)PB_uB_u^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}e(t)\Psi^{\mathrm{T}}(x(t))\Psi(x(t))-\\&\sigma\varsigma\mathrm{tr}[\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)]+\sigma\Big(\eta+\frac{\eta^2}{\gamma}\Big)\mathrm{tr}[\theta_2^{\mathrm{T}}(t)\theta_2(t)]-\\&\sigma\mathrm{tr}\{\tilde{K}_{\mathrm{ad}}^{\mathrm{T}}(t-\tau)[I-(\eta+\gamma)\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_1]\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)]\}.\end{aligned} \tag{50}$$

其中: $\eta=1+\varsigma$, $k=\dfrac{1}{\sigma\eta}$. 对于式 (39), 存在$\upsilon\equiv 1/(\eta+\gamma)<1$. 在上述这些条件下, 式 (50) 可表示为

$$\begin{aligned}\dot{V}(t)\leqslant&-M_1\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|^2-M_2\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t-\tau)\|^2+\\&N_1-\|e(t)\|\lambda_{\min}(Q)\|e(t)\|.\end{aligned} \tag{51}$$

其中: $Q=-(A_m^{\mathrm{T}}P+PA_m)$, $\lambda_{\min}(*)$为矩阵的最小特征值, 系数M_1、M_2和N_1分别为

$$M_1=\sigma\varsigma>0, \tag{52}$$

$$M_2=\sigma\lambda_{\min}\Big(I-\frac{1}{\upsilon}\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_1\Big)\geqslant 0, \tag{53}$$

$$N_1=\sigma\Big(\eta+\frac{\eta^2}{\gamma}\Big)\chi_*^2\geqslant 0. \tag{54}$$

这里: $\sigma=1/k\eta$; 当系数υ和θ_1满足式 (39) 的条件时, 不等式$\mathrm{M}_2>0$成立. 于是, 由式 (51) 可得以下 Lyapunov 方程表达式:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t)\leqslant&-M_1\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|\Big[\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|-\frac{N_1}{M_1\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|}\Big]-\\&\|e(t)\|\lambda_{\min}(Q)\|e(t)\|.\end{aligned} \tag{55}$$

则$\dot{V}(t)<0$位于紧集$\Re$的外部, $\Re$表示为

$$\Re=\Big\{\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|\leqslant\sqrt{\frac{N_1}{M_1}}\Big\}. \tag{56}$$

此外, 为使得 Lyapunov 候选函数导数小于零, 需要满足如下的条件:

$$A_m^{\mathrm{T}}P+PA_m<0. \tag{57}$$

此时, 扰动估计误差$e(t)$、参数估计误差$\|\tilde{K}_{\mathrm{ad}}(t)\|$最终一致有界. □

通过广义扩张状态观测器 GESO 估计到钻头-岩石作用扰动后, 在此基础上开展考虑地层变化的钻柱振动主动抑制仿真实验.

4　钻柱振动抑制实验

在上述所提基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制方法基础上, 本节开展钻柱振动抑制实验, 包括钻柱振动模型与控制器参数设计、仿真实验与分析两部分内容.

4.1　模型与控制器参数设计

选取某井场现场钻具参数, 通过式 (4) 计算钻柱振动模型参数, 现场钻具参数如表 1 所示.

表1　现场钻具参数

名称	参数	数值
钻杆外径	$D_{o_\mathrm{pi}}/\mathrm{mm}$	140
加重钻杆外径	$D_{o_\mathrm{hp}}/\mathrm{mm}$	140
钻铤外径	$D_{o_\mathrm{dc}}/\mathrm{mm}$	178
钻杆内径	$D_{i_\mathrm{pi}}/\mathrm{mm}$	119
加重钻杆内径	$D_{i_\mathrm{hp}}/\mathrm{mm}$	76
钻铤内径	$D_{i_\mathrm{dc}}/\mathrm{mm}$	71
钢体密度	$\rho/(\mathrm{kg/m^3})$	7 800
剪切模量	$G/(\mathrm{N\cdot m^2})$	7.93×10^{10}
钻井液阻尼	$\tilde{c}/(\mathrm{N\cdot rad/s})$	0.063
钻头半径	R_b/m	0.155

单根钻杆的长度为 9 m, 根据以上钻具参数, 由于钻柱系统自由度过高, 会增加模型计算的复杂度, 因此对模型进行简化, 将井上转盘、钻杆、加重钻杆、钻铤作为 4 个自由度单元建立钻柱系统模型.

在此基础上, 进行钻柱振动主动抑制系统控制参数设计. 在控制的过程中, 轴向方向的钻压将会影响扭转方向的钻柱振动. 该部分的影响添加在扭转钻头-岩石作用扰动扭矩T中, 通过所提的方法可以有效抑制该参数的变化.

首先, 使用内部模型控制技术, 并采用 LQR 方法求解扭转方向钻柱控制系统状态反馈控制器增益, 选取

$$Q_k=[1,1,1,10,1,1,1,1\,000],\ R_k=0.001, \tag{58}$$

可以得到状态反馈控制器参数为

$$\begin{aligned}&[K_x|K_r]=\\&[-812.49\quad-164.54\quad-26.74\quad-115.93\quad\rightarrow\\&\leftarrow\quad 274.32\quad 102.58\quad 80.17\,|\,1\,000].\end{aligned}$$

然后, 基于此状态反馈控制器设计参考模型, 参考模型为不包含钻头-岩石作用扰动的钻柱振动模型.

设计状态观测器极点为

$$\begin{aligned}&p=\\&[-5.12+0.50i\quad -5.12-0.50i\quad \rightarrow\\&\leftarrow\quad -7.12+0.60i\quad -7.12-0.60i\quad -15.92\quad \rightarrow\\&\leftarrow\quad -4.57+0.31i\quad -4.57-0.31i\quad -4].\end{aligned}$$

通过极点配置, 选取广义扩张状态观测器 GESO 的观测矩阵

$$\begin{aligned}\bar{L}=[&52.32\quad -61\,943.92\quad 1\,107\,298.37\quad \rightarrow\\&\leftarrow\quad -167\,718.25\quad 37.27\quad -646.16\quad \rightarrow\\&\leftarrow\quad 650.42\quad -12\,678.31].\end{aligned}$$

在此基础上, 根据式 (28), 设计并得到 GESO 输入补偿增益矩阵$K_d=0.614$. 由此, 估计得到钻头-岩石作用扭矩T.

τ为 DF-MRAC 的自适应律的更新时间, 该参数为采样时间的整数倍, τ越小则系统的更新速度越快, 理论上的跟踪速度越快. k参数类似于 PID 控制器的比例控制参数, k作为比例增益参数, 随着k增大系统跟踪性能得到明显提高, 但是高增益会带来系统的振荡. θ_1作为更新过程中上一阶段的权重参数, θ_1越大跟踪性能越好, 但是需要满足式 (39) 中$0\leqslant\theta_1^{\mathrm{T}}\theta_1<\upsilon I$的条件, 避免系统出现不稳定的情况.

设计无微分模型参考自适应控制器参数为

$$\theta_1=0.8,\ \tau=0.001,\ k=0.001. \tag{59}$$

在上述参数的基础上, 开展基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动主动抑制仿真实验.

4.2 仿真实验与分析

本节主要进行基于无微分模型参考自适应控制的钻柱振动主动抑制实验与分析, 并通过实验对比说明本文所提方法的有效性.

采用 GESO 方法进行钻头-岩石作用扰动估计, 并将该扰动作为自适应律设计输入, 进行基于无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制实验. 首先, 根据现场钻具参数建立钻柱振动模型, 并建立扭转钻柱系统状态空间方程; 其次, 根据钻柱系统状态空间方程, 设计内部模型控制器, 并采用 LQR 方法求解系统状态反馈控制器增益; 再次, 设计 GESO 广义扩张状态观测器, 估计钻头-岩石作用扰动; 最后, 设计无微分模型参考自适应控制律, 对扭转方向钻柱振动进行抑制.

钻头-岩石作用关键参数包括钻压W、转速$\dot{\theta}_b$、钻头扭矩T、钻井液阻尼等. 为获得扭转钻柱振动模型扰动, 采用 Karnopp 钻头-岩石作用模型进行实验:

$$T(\dot{\theta}_b)=\begin{cases}k_{\mathrm{dc}}(\theta_{\mathrm{np}}-\theta_b),\ |\dot{\theta}_b|<\varphi,|T_1|\leqslant|T_2|;\\T_2\mathrm{sgn}(T_1(\dot{\theta}_b)),\ |\dot{\theta}_b|<\varphi,|T_1|>|T_2|;\\T_b(\dot{\theta}_b),\ |\dot{\theta}_b|\geqslant\varphi.\end{cases} \tag{60}$$

其中: $T_2=WR_b\mu_{\mathrm{sb}}$为静力矩, φ为非常小的正值, $T_1=k_{\mathrm{dc}}(\theta_{\mathrm{np}}-\theta_b)$为接触力矩, $\dot{\theta}_{\mathrm{np}}$为加重钻杆转速, $\dot{\theta}_b$为钻头处转速, $T_b(\dot{\theta}_b)$为正常钻进情况下扭矩.

$$T_b(\dot{\theta}_b)=u_b(\dot{\theta}_b)WR_b\mathrm{sgn}(\dot{\theta}_b), \tag{61}$$

其中: R_b和$u_b(\dot{\theta}_b)$为钻头半径和摩擦阻尼, $W\in\mathbb{R}$为钻压, 摩擦阻尼$u_b(\dot{\theta}_b)$可以表示为

$$u_b(\dot{\theta}_b)=u_{\mathrm{cb}}+(u_{\mathrm{sb}}-u_{\mathrm{cb}})\mathrm{e}^{-r_b\dot{\theta}_b}. \tag{62}$$

其中: u_{cb}和u_{sb}分别为库伦摩擦系数和静摩擦系数, r_b为速度衰减率.

在地层复杂多变情况下, 容易发生扭转钻柱振动现象. 钻柱振动会影响钻进过程稳定性和安全性, 降低钻进效率. 因此, 需要对地层变化下钻柱振动进行抑制.

首先, 采用状态反馈控制器进行钻柱振动主动抑制, 并与没有钻头-岩石作用扰动下的振动抑制效果进行对比. 具体效果如图 3 所示.

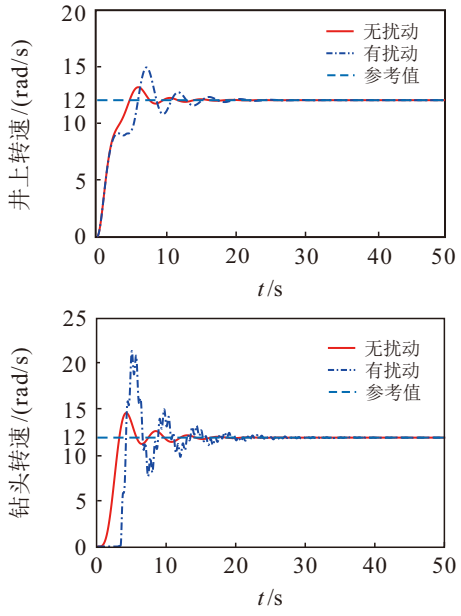

图3 有无钻头-岩石作用扰动下控制效果

如图 3 所示, 相比有钻头-岩石作用扰动, 无扰动情况井上转速可以在 5.9 s 附近达到较小的峰值 13.1 rad/s, 井上转速可以在控制作用下快速达到稳定. 与此同时, 相比有钻头-岩石作用扰动, 无扰动情况钻头转速可在 4.0 s 以后峰值达到 15.0 rad/s 附近, 并能够快速达到给定转速稳定值 12 rad/s. 这说明通过补偿具有地层信息的钻头-岩石作用扰动, 钻柱振

动抑制效果可以得到有效提升.

地层信息包含在钻头-岩石作用扰动中, 具体体现在式 (62) 参数中, 为了验证所提方法的钻柱振动抑制的有效性, 开展不同方法下钻柱振动主动抑制实验, 实验效果如图 4 所示. 通过实验结果分析, 在估计钻头-岩石作用扰动之后, 基于 DF-MRAC 的钻柱振动抑制方法取得更好的振动抑制效果. 井上转速在 6.5 s 左右达到最大超调, 初始阶段虽然具有较高的超调量, 但是井上转速能够在 10.0 s 附近快速稳定, 能够满足快速稳定的需求.

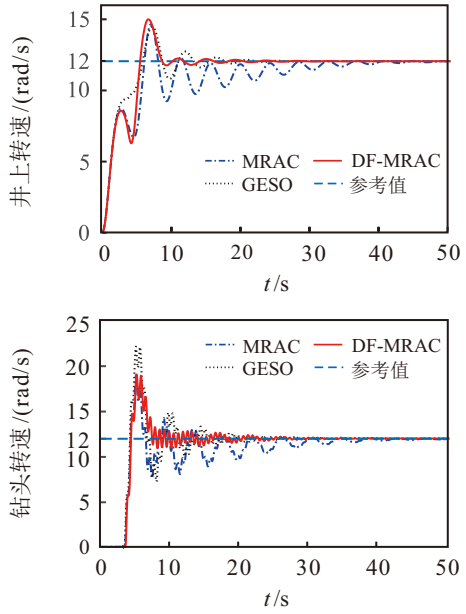

图4　控制方法效果对比

图 4 中, 通过所提方法抑制钻柱振动, 井下钻头转速超调量较小, 且能够快速达到稳定, 扭转钻柱振动被有效抑制. 在 5.0 s 附近, 所提方法钻头转速峰值为 19.1 rad/s, 相比于 MRAC 和 GESO 方法的控制效果, 所提方法具有较快的稳定时间, 表明了所提方法的有效性.

此外, 控制输入扭矩情况影响钻进的稳定和安全, 需要对不同方法下系统控制扭矩进行分析. 如图 5 所示, 所提方法控制扭矩能够快速稳定. 虽然超调量较大, 但与图 4 中井上转速控制效果相对应, 这在实际工程中属于可接受的范围.

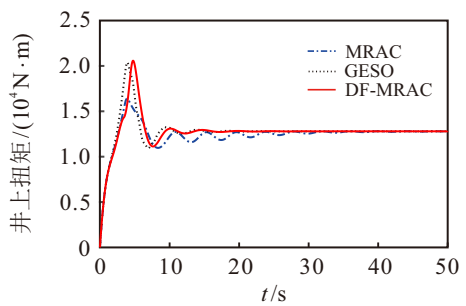

图5　井上控制输入扭矩对比

以上实验说明估计钻头-岩石作用扰动, 并在此基础上采用 DF-MRAC 方法抑制钻柱振动的必要性, 在实际的工程应用中, 该方法可以有效克服地层变化对钻柱振动主动抑制的影响.

5　结　论

本文提出了一种基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动主动抑制方法, 以克服地层变化对钻柱振动主动抑制的影响. 根据现场钻具参数建立扭转钻柱振动模型, 并转化为状态空间方程; 添加内部模型控制器, 并通过 LQR 方法求解状态反馈控制器增益; 设计 GESO 广义扩张状态观测器, 进行钻头-岩石作用扰动估计; 采用 DF-MRAC 方法进行扭转钻柱振动抑制, 设计 Lyapunov 候选函数证明了系统的稳定性. 通过仿真实验验证了所提方法在考虑地层变化下抑制钻柱振动方面的有效性.

在未来, 所提的钻柱振动主动抑制方法将被应用到钻进现场, 处理地层变化对钻柱振动抑制造成的影响.

参考文献 (References)

[1] Cheng J, Wu M, Wu F, et al. Modeling and control of drill-string system with stick-slip vibrations using LPV technique[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(2): 718-730.

[2] Hassan A, Elkatatny S, Al-Majed A. Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: 103558.

[3] Zhang Z, Lai X Z, Lu C D, et al. Bit bounce detection and alarm optimization based on domain generalization for drilling process[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3529211.

[4] 蔡振, 赖旭芝, 吴敏, 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.
(Cai Z, Lai X Z, Wu M, et al. Bilinear compensation control for attitude of directional drilling tools[J]. Control and Decision, 2020, 35(7): 1758-1764.)

[5] Ma S K, Wu M, Chen L F, et al. Design and application of weight-on-bit control system for drilling process: A variable-gain integrated controller with multiple-model parameter estimation[J]. Control Engineering Practice, 2023, 130: 105378.

[6] Ritto T G. Bayesian approach to identify the bit-rock interaction parameters of a drill-string dynamical model[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37(4): 1173-1182.

[7] Castello D A, Ritto T G. ABC for model selection and parameter estimation of drill-string bit-rock interaction models and stochastic stability[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 547: 117537.

[8] Ritto T G, Soize C, Sampaio R. Probabilistic model

identification of the bit-rock-interaction-model uncertainties in nonlinear dynamics of a drill-string[J]. Mechanics Research Communications, 2010, 37(6): 584-589.

[9] Pires I, Ayala H V H, Weber H I. Nonlinear ensemble gray and black-box system identification of friction induced vibrations in slender rotating structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 186: 109815.

[10] Huang H Y, Lu C D, Ma S K, et al. Analysis of coupled axial-torsional drill-string vibration based on fuzzy bit-rock interaction model considering bit balling condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(9): 9833-9842.

[11] She J H, Fang M X, Ohyama Y, et al. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 380-389.

[12] Li S H, Yang J, Chen W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4792-4802.

[13] 周兰, 姜福喜, 潘昌忠, 等. 基于降阶扩张状态观测器的重复控制系统设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 933-943.
(Zhou L, Jiang F X, Pan C Z, et al. A method of designing a reduced-order-extended-observer-based repetitive-control system[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 933-943.)

[14] Lu C D, Wu M, Chen X, et al. Torsional vibration control of drill-string systems with time-varying measurement delays[J]. Information Sciences, 2018, 467: 528-548.

[15] Wu M, Cheng J, Lu C D, et al. Disturbance estimator and Smith predictor-based active rejection of stick-slip vibrations in drill-string systems[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 51(5): 826-838.

[16] Roy S B, Bhasin S, Kar I N. Combined MRAC for unknown MIMO LTI systems with parameter convergence[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(1): 283-290.

[17] 白洪芬, 朱景伟, 秦俊峰, 等. 基于变结构模型参考自适应的双绕组永磁容错电机转子位置估计算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 27-36.
(Bai H F, Zhu J W, Qin J F, et al. Estimation algorithm of rotor position for dual-winding fault tolerant permanent magnet motor drive based on SMO-MRAS[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 27-36.)

[18] Lavretsky E. Combined/composite model reference adaptive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(11): 2692-2697.

[19] Yucelen T, Calise A J. Derivative-free model reference adaptive control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(4): 933-950.

[20] 高东旭, 周兰, 陈静, 等. 基于扰动补偿的无微分模型参考自适应控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(4): 735-743.
(Gao D X, Zhou L, Chen J, et al. Design of derivative-free model-reference adaptive control for a class of uncertain systems based on disturbance compensation[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(4): 735-743.)

作者简介

黄恒宇 (1996−), 男, 博士生, 主要研究方向为复杂系统建模与控制, E-mail: huanghengyu@cug.edn.cn;

吴敏 (1963−), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为过程控制、鲁棒控制和智能系统, E-mail: wumin@cug.edu.cn;

陆承达 (1991−), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为时滞系统控制、鲁棒控制、智能系统技术, E-mail: luchengda@cug.edu.cn;

周洋 (1993−), 男, 博士, 主要研究方向为数据驱动建模、优化算法, E-mail: zhouyang@cug.edu.cn.