

基于扩张状态观测器的滑动定向钻进 轨迹跟踪模型预测控制

陆承达^{1,3,4}, 段炜涛^{2,3,4}, 吴加俊^{2,3,4}, 张幼振⁵, 吴敏^{1,3,4*}

1. 中国地质大学(武汉)人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074
2. 中国地质大学(武汉)未来技术学院, 湖北 武汉 430074
3. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074
4. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074
5. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077

摘要: 滑动定向钻进作为定向钻进中常用的钻进技术, 已广泛应用于工作面超前探查、地质灾害异常体识别与瓦斯抽采等任务, 以提升地质识别精度与钻进作业效率。本文针对滑动定向钻进过程中复杂地层扰动导致轨迹跟踪精度下降的问题, 提出一种基于扩张状态观测器的轨迹跟踪模型预测控制方法。首先, 分析钻具运动学特性, 建立滑动定向钻进轨迹延伸模型, 在此基础上构建钻进轨迹预测模型和以最小轨迹偏差作为控制目标的目标函数, 并设计模型预测控制器。然后, 为补偿地层扰动带来的稳态误差, 设计具备扰动观测能力的扩张状态观测器, 实现最优控制输入的求解, 从而实现轨迹跟踪控制。最后, 通过仿真实验证明了所提方法具有扰动反馈补偿、轨迹控制精度高及鲁棒性强等特点, 在提升勘探效率以及降低作业风险等方面具有良好的应用价值。

关键词: 滑动定向钻进; 轨迹延伸模型; 轨迹跟踪; 扩张状态观测器; 模型预测控制

中图分类号: TD712.6

收稿日期: 2026-2-2

Extended-State-Observer-Based Trajectory-Tracking Model Predictive Control for Sliding Directional Drilling

Lu Chengda^{1,3,4}, Duan Weitao^{2,3,4}, Wu Jiajun^{2,3,4}, Zhang Youzhen⁵, Wu Min^{1,3,4*}

1. School of Artificial Intelligence and Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
2. School of Future Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
3. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China
4. Engineering Research Center of Geo-Detection Intelligence Technology, Ministry of Education, Wuhan 430074, China
5. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China

Abstract: Sliding directional drilling is widely used in directional boreholes for tasks such as advance probing, detection of abnormal bodies related to geological hazards, and gas drainage, helping improve geological interpretation and drilling efficiency. This paper addresses the problem of reduced trajectory tracking accuracy caused by complex formation disturbances during sliding directional drilling, and proposes an extended-state-observer-based model predictive

基金项目: 国家自然科学基金项目(62373332, 62273317); 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。

作者简介: 陆承达(1991—), 男, 博士, 教授, 从事智能系统技术、鲁棒控制、时滞系统控制等方面的研究。ORCID: 0000-0002-9452-4053. E-mail: luchengda@cug.edu.cn

***通讯作者:** 吴敏(1963—), 博士, 教授, 从事过程控制、鲁棒控制和智能系统等方面的研究。ORCID: 0000-0002-0668-8315. E-mail: wumin@cug.edu.cn

control method for trajectory tracking. First, the kinematic behavior of the drilling tool is analyzed and a trajectory extension model for sliding drilling is built. Based on this model, a trajectory prediction model is constructed, and an objective function that minimizes trajectory error is designed to develop the MPC controller. Then, to reduce steady tracking errors caused by formation disturbances, an extended state observer with disturbance estimation is designed to compensate the control input. Simulation results show that the proposed provides disturbance compensation, high tracking accuracy, and strong robustness, with practical value for improving exploration efficiency and reducing designed to operational risk.

Key words: Sliding directional drilling; trajectory extension model; trajectory tracking; extended state observer; model predictive control

0 引言

在资源勘探与地下工程施工等场景中, 钻进作业往往需要在空间受限、地层条件复杂且不确定性强的环境下, 实现按预设轨迹钻进并准确命中目标构造。为满足轨迹可控与靶向钻进的工程需求, 定向钻进逐渐成为煤矿巷道超前探查、油田开发以及断层构造识别等任务中的关键技术手段 (Gurina, 2022; 房培洪, 2024)。相较于传统钻进方式, 定向钻进能够在钻进过程中持续调节钻具走向, 使钻进覆盖范围更大、目标指向性更强。现有轨迹控制方式主要包括滑动导向与旋转导向两类, 其中滑动导向依靠定向工具面在非旋转状态下实现造斜调向, 装备成熟、适用广泛, 是复杂地层下定向钻进的常用选择 (秦永和, 2024)。然而在实际作业中, 地下介质非均质与各向异性显著、软硬互层频繁, 再叠加地层倾斜、孔壁摩阻变化等因素, 使钻进过程易受到复杂地层扰动影响, 进而产生稳态偏差与误差累积, 导致钻进精度大幅下降 (闫燕强, 2025; 鞠玮, 2025)。

已有研究围绕定向钻进轨迹跟踪控制提出了从经验调控到模型驱动再到智能优化的多类方法, 以提升长距离钻进条件下的轨迹控制精度与稳定性。针对外部扰动与参数不确定耦合引起的轨迹偏差问题, Mahdianfar *et al.* (2016) 提出的 1 优化轨迹跟踪控制器, 通过构建包含参数摄动上界的动态性能指标, 将不确定性因素纳入优化框架, 实现了对时变扰动的前馈补偿。该方法通过在线更新控制器参数匹配度权重, 显著降低了钻具姿态振荡幅度。针对钻进系统的强非线性特性, Zhang *et al.* (2018) 开发的模糊逻辑控制器创新性地 将轨迹偏差、地层硬度等模糊化变量映射至工具面向角调节规则库, 利用专家经验驱动的模糊推理机制, 有效缓解了参数漂移引起的控制滞后问题。Wan *et al.* (2024) 进

一步设计了多模态模糊控制器, 通过引入孔内振动强度、泥浆压力等辅助反馈变量, 构建了适应复杂工况的模糊规则切换逻辑, 在硬岩层与破碎带的交替区域验证了其抗干扰能力。

然而, 上述控制方法在工程应用中往往难以同时兼顾约束处理与复杂工况下的过程控制。像 1 优化等智能控制方法虽能抑制参数不确定性, 但对随钻测量工具的精度与刷新率要求苛刻, 在定点测量场景中易引发控制量过调, 因此不能很好的处理约束优化控制问题 (Wang, 2023)。模型预测控制理论的提出, 为此类问题提供了新的解决办法。相比于其它控制方法, 模型预测控制能够凭借其滚动优化、反馈校正的核心机制, 处理路径跟踪中的硬约束与动态目标, 在满足工程需求和地质条件限制的前提下, 优化纠偏参数, 以实现轨迹的快速跟踪和规则化。

模型预测控制具有显式处理约束的能力和较优的控制性能, 对于解决约束优化控制问题具有先天优势, 因此逐渐在各种工程上得到广泛的应用 (Bonzanini, 2024)。Hong *et al.* (2024) 提出了一种基于长短期记忆神经网络短期海浪预测的模型预测姿态控制方法, 用于解决高海况下无人水面艇受随机海浪干扰导致的姿态稳定性问题。Basheer *et al.* (2025) 设计了一种协调有限控制集模型预测控制策略, 整合扭矩、变桨与偏航控制, 验证了其在风力涡轮机系统中提升能量捕获效率和运行稳定性的优越性。Zhao *et al.* (2024) 通过自适应扩张卡尔曼滤波估计模型失配项并进行补偿, 提出了自动驾驶车辆路径跟踪的实时参数变化模型预测控制方法, 有效解决了参数不确定性和模型失配带来的路径跟踪精度问题。

在长距离定向钻进施工中, 面向安全保障与异常区验证等任务需求时, 钻进轨迹的控制评价往往并不强调进尺方向的偏差, 而是更关注轨迹在空间

中的左右偏差与上下偏差（郭旭升，2022）。针对此问题，李浩等（2025）基于螺杆钻具运动学模型，采用线性化与模型预测控制方法处理轨迹偏差，但未将工程上关注的轨迹状态设为直接控制量，并且未考虑复杂地层非均质和孔壁摩阻引起的动态扰动，存在偏差反馈间接、纠偏能力不足的问题。扩张状态观测器能够参数摄动以及外部扰动统一等效为扩张状态，并利用系统输入输出信息进行在线估计（杨金山，2025）。与依赖精确扰动模型的方法相比，该方法不需要预先准确获知地层扰动形式，更适合处理滑动定向钻进过程中复杂地层影响。基于此，本文建立含地层扰动项的滑动定向钻进轨迹延伸模型，并设计一种基于扩张状态观测器的轨迹跟踪模型预测控制方法。该方法以轨迹状态作为核心控制输出，在滚动优化过程中结合扰动估计结果对控制量进行补偿，从而提升复杂变化地层下的轨迹跟踪精度与鲁棒性。数值仿真结果表明，本文方法在复杂地层条件下具有更好的抗扰能力和轨迹控制效果，可为滑动定向钻进轨迹跟踪提供理论依据与方法支持。

1 定向钻进轨迹延伸模型

为实现滑动定向钻进的轨迹跟踪控制，需要分析滑动导向钻具的姿态结构，建立适用复杂地层下的定向钻进轨迹延伸模型。为描述定向钻进轨迹跟踪控制过程中的钻进轨迹延伸情况，受限于测量条件，孔底参数很难直接从实际工程中获取，这使得建立的动力学模型难以在实际工程中得以应用，因此需要从运动学的角度进行模型构建。

根据已有的定向钻进钻具运动学模型（Panchal *et al.*, 2010），可以得到

$$\begin{cases} \dot{l} \cos \theta_{ff} \\ \dot{l} \sin \theta_{inc} - \theta_{dls} \sin \theta_{ff} \end{cases}, \quad (1)$$

其中， θ_{ff} 为工具面向角， θ_{dls} 为孔底钻具组合的造斜率， k_{dls} 为可导向钻具的开环造斜能力。

为了描述定向钻进的三维轨迹，还需要对钻进轨迹进行准确的描述。

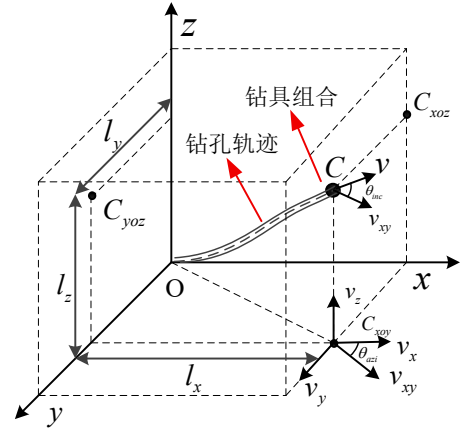


图 1 定向钻进三维轨迹延伸示意图
Fig. 1 Schematic Chart of the Extension of the Directional Drilling Trajectory

图中 O 表示孔口位置， C 表示孔底钻具组合位置即钻头位置，曲线 OC 表示钻进轨迹。规定水平钻进方向为 x 方向，并且钻进速度记为 v ，孔底轨迹方向与速度矢量 v 的正方向一致。

根据矢量分量定义，钻进速度分量 v_x, v_y, v_z 与钻进速度 v 倾角 θ_{inc} 、方位角 θ_{azi} 的姿态关系为

$$\begin{cases} v_x = v \cos \theta_{inc} \cos \theta_{azi} \\ v_y = v \cos \theta_{inc} \sin \theta_{azi} \\ v_z = v \sin \theta_{inc} \end{cases}$$

将时间域转为孔深域分析，将轨迹方程两侧同时除以钻进速度，得到简化孔轨迹模型

$$\begin{cases} \dot{l} \cos \theta_{azi} \\ \dot{l} \sin \theta_{azi} \end{cases}$$

其中， \dot{l} 为钻进速度， θ_{azi} 为方位角。

实际钻进过程中，方位角可通过由工具面转角减去基准方位角 φ 得到，因此轨迹模型修正为

$$\begin{cases} \dot{l} \cos(\theta_{azi} - \varphi) \\ \dot{l} \sin(\theta_{azi} - \varphi) \end{cases}, \quad (2)$$

建立三维轨迹延伸模型是为了描述钻具姿态与空间轨迹延伸之间的几何关系，但在目前的滑动定向钻进过程中，水平位移 l_x 与钻进前进方向一致，主要反映钻进进尺累积，而不是轨迹偏离目标层位和目标方位的横向误差，相较于左右位移和上下位移，水平位移对工具面向角调整的敏感性较弱，对本文所关注的纠偏控制性能影响较小。因此结合式 (1) 和式 (2)，建立定向钻进轨迹延伸模型为

对运动学方程求偏导后，线性化系统矩阵为

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & A_3 & 0 & 0 \\ A_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, E_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中，非零元素为

$$\begin{aligned} A_1 &= -k_{dls} u_{r_{azi}} \csc \theta_{r_{inc}} \cot \theta_{r_{inc}}, \\ A_2 &= -\sin \theta_{r_{inc}} \sin(\theta_{r_{azi}} - \varphi), \\ A_3 &= \cos \theta_{r_{inc}} \cos(\theta_{r_{azi}} - \varphi), A_4 = \cos \theta_{r_{inc}}, \\ B_1 &= k_{dls}, B_2 = k_{dls} \csc \theta_{r_{inc}}. \end{aligned}$$

考虑到滑动定向过程视为基于孔深间隔的离散系统，需对其进行离散化

$$A_d = e^{A_c L}, B_d = \int_0^L e^{A_c \tau} B_c d\tau, E_d = \int_0^L e^{A_c \tau} E_c d\tau. \quad (4)$$

对式(3)进行泰勒展开，结合式(4)得到离散轨迹偏差模型为

$$\tilde{x}(k+1) = A_d \tilde{x}(k) + B_d u(k) + E_d \tilde{w}(k), \quad (5)$$

其中，系数矩阵为

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ A_1 L & 1 & 0 & 0 \\ A_2 L & A_3 L & 1 & 0 \\ A_4 L & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} B_1 L & 0 \\ 0 & B_2 L \\ \frac{L^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{L^2}{2} \end{bmatrix}, E_d = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \\ \frac{L^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{L^2}{2} \end{bmatrix}.$$

2.2 模型预测控制器设计

为构造可在线求解的预测模型，采用无扰动的标称偏差模型进行控制器设计。根据式(5)设定理想状态下的标称离散偏差系统模型为

$$\tilde{x}(k+i) = A_d \tilde{x}(k+i-1) + B_d u(k+i-1), \quad i=0,1,\dots,N-1.$$

其中， $\tilde{x}(k+i)$ 表示 k 时刻基于当前轨迹偏差状态对 $k+i$ 时刻轨迹偏差的预测值， $u(k+i-1)$ 表示对应的预测控制量。

设定预测和控制的时域长度都为 N ，并满足

$$\tilde{x}(k) = \tilde{x}(k) + \tilde{w}(k)$$

则可由上式递推得到预测时域内的轨迹偏差状态为

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A_d \tilde{x}(k) + B_d u(k) + E_d \tilde{w}(k) \\ \tilde{x}(k+2) &= A_d^2 \tilde{x}(k) + 2A_d B_d u(k) + B_d u(k+1) + E_d \tilde{w}(k) \\ &\vdots \\ \tilde{x}(k+N) &= A_d^N \tilde{x}(k) + \sum_{i=0}^{N-1} A_d^{N-1-i} B_d u(k+i) + E_d \tilde{w}(k). \end{aligned}$$

通过对预测时域 N 内的轨迹偏差状态的推导，可以进一步得到轨迹偏差预测模型

$$X(k) = \Psi \tilde{x}(k) + \Phi U(k),$$

其中，

$$\begin{aligned} X(k) &= \begin{bmatrix} \tilde{x}(k+1) \\ \tilde{x}(k+2) \\ \vdots \\ \tilde{x}(k+N) \end{bmatrix}, U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix} \\ \Psi &= \begin{bmatrix} A_d & 0 & \dots & 0 \\ A_d^2 & B_d & 0 & \dots \\ \vdots & A_d B_d & B_d & \dots \\ A_d^N & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} B_d & 0 & \dots & 0 \\ A_d B_d & B_d & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_d^{N-1} B_d & A_d^{N-2} B_d & \dots & B_d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$X(k)$ 由未来 N 个轨迹偏差状态构成， $U(k)$ 由未来 N 个控制输入构成， Ψ 和 Φ 是预测模型的系数矩阵。基于所构建的预测模型，构造以轨迹偏差最小化为目标的二次型性能指标函数

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^N \tilde{x}(k+i)^T Q \tilde{x}(k+i) + \sum_{i=0}^{N-1} u(k+i)^T R u(k+i) \\ &= \sum_{i=1}^N \|\tilde{x}(k+i)\|_{Q_i}^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|u(k+i)\|_{R_i}^2 \\ &= X^T \zeta \end{aligned}$$

其中，

$$\zeta = \begin{bmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R \end{bmatrix}, \tilde{w}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{w}(k) \\ \tilde{w}(k) \\ \vdots \\ \tilde{w}(k) \end{bmatrix}$$

J 为目标函数， $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 分别为系统状态权重矩阵和控制权重矩阵，且 $Q > 0$ ， $R > 0$ 。 ζ 与 $\tilde{w}(k)$ 分别为相应的块对角加权矩阵， $\|\cdot\|$ 表示带权欧氏范数的平方。

考虑滑动定向系统在造斜工况下存在执行输入幅值限制。在标称模型预测控制器设计中，暂不考虑扰动补偿项，仅基于参考输入与纠偏控制量构建滚动优化问题。此时，标称执行输入可表示为

$$u(k) = u_r(k) + \tilde{i}$$

并满足输入幅值约束

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}.$$

将目标函数与约束条件结合, 可得当前采样时刻的滚动优化问题如下

$$\begin{aligned} \min_{U(k)} J(k) &= X(k)^T \zeta \quad (k)^T \tilde{i} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} u_{\min} - u_r(k+i) \leq \tilde{i} \\ u_{\max} - u_r(k+i) \end{cases} \\ &i = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned}$$

通过最小化目标函数 $J(k)$ 求得局部最优解, 每个采样点求解得到最优控制序列为

$$U^*(k) = \begin{bmatrix} \tilde{i} \\ \tilde{i} \\ \vdots \\ \tilde{i} \quad -1 | k \end{bmatrix}$$

在实际滚动优化实施的过程中, 即在每一采样点仅将最优控制序列中的首项施加于系统, 因此标称控制输入取为

$$\tilde{i}$$

模型预测系统在 $k+1$ 时刻根据更新后的偏差状态重复上述预测与优化过程。由此, 控制器可在每一采样点利用实时测量信息对预测初值进行持续修正, 避免预测误差随滚动过程累积, 实现了模型预测控制器的反馈校正机制。

2.3 扩张状态观测器设计

由于实际系统存在地层偏斜等扰动, 影响姿态控制精度, 根据考虑扰动的离散轨迹偏差模型, 引入扩张状态观测器, 通过在线估计扰动并构造补偿项抵消扰动对系统的影响。针对偏差系统而言, 控制输入增量为

$$\tilde{i} \quad \tilde{w}(k).$$

考虑到离散偏差模型中的扰动以加性形式进入姿态通道, 因此前馈补偿满足

$$B_d u_f(k) = -E_d \hat{w}(k).$$

因此, 可以得到

$$u_f(k) = K_f \hat{w}(k), \quad K_f = -(B_d^T B_d)^{-1} B_d^T E_d,$$

其中, $\hat{w}(k)$ 为观测器的输出的估计扰动。

为了便于设计观测器, 对扰动 $w(k)$ 视为缓变信号, 并在相邻采样时刻内近似认为其保持不变近, 即

$$w(k+1) = w(k).$$

定义扩张状态向量

$$z(k) = \begin{bmatrix} \tilde{i} \\ w(k) \end{bmatrix}, \quad \hat{z}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{w}(k) \end{bmatrix}.$$

根据系统方程可以构造扩张状态空间模型为

$$\begin{cases} z(k+1) = \tilde{A} z(k) + \tilde{B} u(k) \\ y(k) = \tilde{C} z(k) \end{cases}$$

其中, $y(k) = \tilde{i}$, 且

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

于是设计离散龙伯格观测器为

$$\hat{z}(k+1) = \tilde{A} \hat{z}(k) + \tilde{B} u(k) + L(y(k) - \tilde{C} \hat{z}(k)),$$

其中,

$$L = \begin{bmatrix} L_x \\ L_d \end{bmatrix},$$

L_x 和 L_d 为待设计的观测器增益矩阵。

定义估计误差系统为

$$e(k) = z(k) - \hat{z}(k) = \begin{bmatrix} e_x(k) \\ e_w(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i} \\ w(k) - \hat{w}(k) \end{bmatrix}.$$

因此观测器误差系统可写为

$$e(k+1) = (\tilde{A} - L \tilde{C}) e(k) + L(y(k) - \tilde{C} \hat{z}(k)).$$

以分块形式展开为

$$\begin{bmatrix} e_x(k+1) \\ e_w(k+1) \end{bmatrix} = \zeta \begin{bmatrix} e_x(k) \\ e_w(k) \end{bmatrix}, \quad \zeta = \begin{bmatrix} A_d - L_x & E_d \\ -L_d & I \end{bmatrix}.$$

定理: 若存在对称正定矩阵 $P > 0$ 和矩阵 Y_x, Y_d , 使得以下 LMI 成立

$$\begin{bmatrix} -P & P A_d^T - Y_x^T & P E_d^T & -Y_d^T \\ A_d P - Y_x & -P & 0 & 0 \\ E_d P & 0 & -P & 0 \\ -Y_d & 0 & 0 & -P \end{bmatrix} < 0.$$

则观测器误差系统 $e(k+1) = \zeta e(k)$ 渐近稳定, 且观测器增益为

$$L_x = P^{-1} Y_x, \quad L_d = P^{-1} Y_d. \quad (6)$$

证明: 取李雅普诺夫函数为 $V(k) = e(k)^T P e(k)$, 其中 $P > 0$ 。由误差系统得

$$V(k+1) - V(k) = e(k)^T (\zeta^T P \zeta - P) e(k).$$

若存在 $P > 0$ 使 $\zeta^T P \zeta - P < 0$, 则 $V(k)$ 严格递减且下界为 0, 从而使得 $e(k)$ 趋近于 0。根据 Schur 补定理, $\zeta^T P \zeta - P < 0$ 等价于

$$\begin{bmatrix} -P & \zeta^T \\ \zeta & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

将 ζ 代入分块矩阵中, 得到

$$\begin{bmatrix} -P & (A_d - L_x)^T & E_d^T & -L_d^T \\ A_d - L_x & -P^{-1} & 0 & 0 \\ E_d & 0 & -P^{-1} & 0 \\ -L_d & 0 & 0 & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

由于式 (6) 可以得到

$$\begin{bmatrix} -P & A_d^T - Y_x^T P^{-1} & E_d^T & -Y_d^T P^{-1} \\ A_d - P^{-1} Y_x & -P^{-1} & 0 & 0 \\ E_d & 0 & -P^{-1} & 0 \\ -P^{-1} Y_d & 0 & 0 & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

对不等式左右两边同时乘以 $(P, P, P, P)^T$, 得到

$$\begin{bmatrix} -P^2 & P A_d^T - Y_x^T & P E_d^T & -Y_d^T \\ A_d P - Y_x & -P & 0 & 0 \\ E_d P & 0 & -P & 0 \\ -Y_d & 0 & 0 & -P \end{bmatrix} < 0.$$

根据李雅普诺夫稳定性理论, 若上述 LMI 有解, 则误差系统 $e(k)$ 渐近稳定。

考虑扰动补偿后, 实际端输入由参考输入、纠偏输入与扰动补偿项共同构成, 即

$$u(k) = u_r(k) + i^{\sim}(k).$$

由于执行机构的输入幅值约束始终作用于总控制输入, 因此补偿后的实际执行输入仍应满足

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}.$$

因此, 在参考输入、优化控制量与扰动补偿量共同作用下, 最终施加于执行机构的总控制输入始终满足既定约束限制, 增加了闭环实现的安全性与鲁棒性。

3 仿真与分析

为了验证所提基于扩张状态观测器的滑动定向钻进轨迹跟踪模型预测控制方法在复杂地层条件下的有效性, 本章基于实际钻进预设轨迹数据开展仿真实验。实验数据来源于某煤矿某孔, 孔深 300m, 预设轨迹部分数据如下表 1 所示。

表 1 定向钻进预设轨迹数据

Table 1 Preset Trajectory Data for Directional Boreholes

孔深 (m)	倾角 (°)	方位角 (°)	上下位移 (m)	左右位移 (m)
0	9.00	28.00	-2.00	0.00
2	9.00	28.00	-2.19	0.74
4	9.00	27.5	-1.87	1.47
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
298	-2.00	6.00	30.63	20.85
300	-2.00	6.00	30.56	20.85

在相同参考轨迹、相同扰动序列与相同约束条件下开展对比仿真实验, 主要仿真参数见表 2。分别采用标称模型预测控制 (MPC) 与基于扩张状态观测器的模型预测控制 (ESO-MPC) 进行仿真, 以验证所设计扰动观测环节的有效性以及轨迹跟踪控制器的准确性。

表 2 实验仿真参数

Table 2 Parameters of the Experimental Simulation

参数	取值	含义
L	2	孔深离散步长
K_{ds}	0.25°/m	造斜能力参数
N_p	5	预测步长
Q	(1698, 7000, 0.0704, 5.467) ^T	状态加权矩阵
R	[0.1304, 4000] ^T	控制加权矩阵
u_{\min}	[-1.5, -1.5] ^T	控制输入下限
u_{\max}	[1.5, 1.5] ^T	控制输入上限
L_x	(0.55, 0.55, 0.25, 0.25) ^T	状态观测增益
L_d	[0.12, 0.06] ^T	扰动观测增益
γ_d	0.003	遗忘系数
\hat{d}_{\max}	0.5	扰动估计限幅
$u_{f,\max}$	[1.5, 1.5] ^T	补偿输入限幅

将定向钻进过程中地层非均质与孔壁接触引起的姿态偏斜等效为附加扰动, 分别作用于倾角与方位角通道。为贴近孔段变化带来的扰动, 扰动信号沿孔深采用分段且随机起伏的形式构造, 并对幅值进行限幅以保证其物理合理性。倾角与方位角通道的真实扰动随孔深变化曲线如图 3 所示。

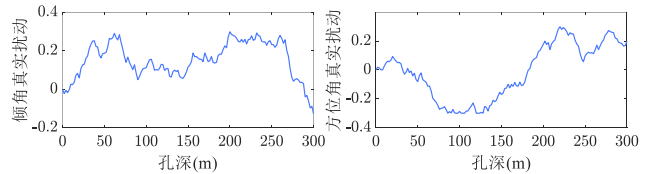


图 3 倾角与方位角真实扰动曲线

Fig. 3 True Disturbance Curves of Inclination and Azimuth

可以看到扰动整体为缓慢变化并叠加小幅随机波动, 不同孔段的均值水平存在差异, 表明地层或接触条件随孔深发生变化。

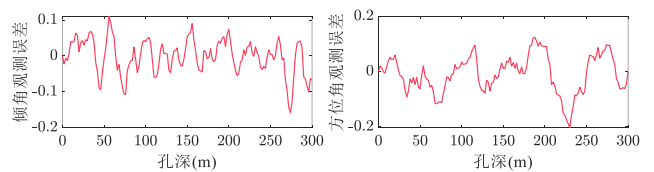


图 4 扩张状态观测器误差观测曲线

Fig. 4 Extended State Observer Error Observation Curves

在此基础上，引入扩张状态观测器对两通道扰动进行在线估计。定义观测误差为真实扰动与估计扰动之差，其随孔深的变化结果如图 4 所示。可以观察到两通道观测误差整体围绕零附近波动，说明观测器能够在扰动随孔深变化的情况下实现稳定误差观测，为后续轨迹跟踪控制器实现扰动补偿提供基础依据。

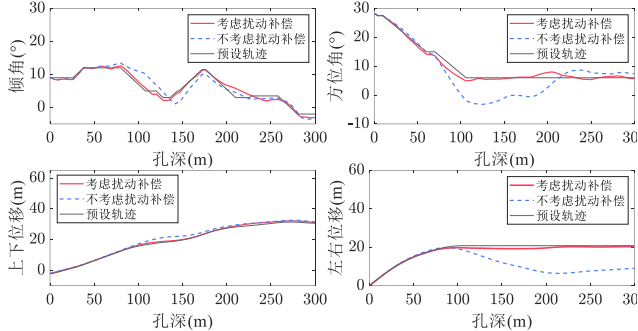


图 5 有无扰动观测补偿的轨迹跟踪曲线

Fig. 5 Trajectory Tracking Curves with and without Disturbance Observer Compensation

图 5 给出了有无扰动观测补偿条件下的轨迹跟踪结果。可以看出，与 MPC 相比，ESO-MPC 在倾角、方位角以及上下和左右位移通道上均表现出更好的跟踪效果，尤其在扰动持续偏置孔段，稳态误差得到明显抑制。定量结果如表 3 所示。ESO-MPC 将上下位移的 RMSE 和 MaxE 分别由 1.500m、3.220m 降至 0.607m、1.237m，将左右位移的 RMSE 和 MaxE 分别由 9.269m、14.392m 降至 0.912m、1.561m，表明该方法能够有效补偿扰动并提高轨迹跟踪精度。

表 3 轨迹跟踪控制效果评价

Table 3 Evaluation of Trajectory Tracking Control Performance

方法	目标	RMSE (m)	MaxE (m)
MPC	上下位移	1.500	3.220
	左右位移	9.269	14.392
Li <i>et al.</i> (2025)	上下位移	1.476	2.375
	左右位移	2.420	4.465
ESO-MPC	上下位移	0.607	1.237
	左右位移	0.912	1.561

为进一步验证所提方法的有效性，在相同的实验条件下，对 Li *et al.* (2025) 所提出的控制器与本文基于扩张状态观测器的模型预测控制器的轨迹跟踪控制效果进行对比分析，结果如图 6 所示。

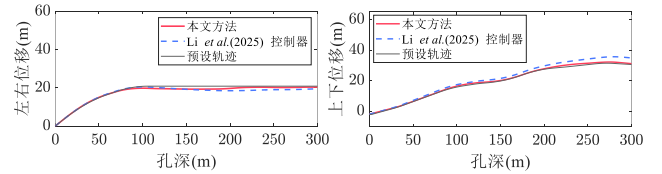


图 6 不同控制方法下的轨迹跟踪曲线

Fig. 6 Trajectory Tracking Curves of Different Control Methods

从图中可以看出，在相同扰动的情况下，Li *et al.* (2025) 控制器的轨迹跟踪误差比较明显；相比之下，本文所设计的控制器产生的轨迹偏差较小。表 3 进一步给出了定量比较结果，可以看出 RMSE 与 MaxE 均低于对比控制方法下的结果。

综上，在存在地层扰动且满足输入约束条件的情况下，所引入的扰动观测机制能够有效估计并补偿地层非均质和孔壁接触等因素引起的等效扰动，从而显著提高滑动定向钻进轨迹跟踪控制的精度与稳定性。特别是在左右位移通道中，跟踪误差由十米量级降至米量级，说明本文方法对复杂地层条件具有较强的适应能力，可为滑动定向钻进轨迹纠偏控制提供参考。

4 结论

(1) 基于滑动定向钻进的轨迹延伸运动学模型，建立了包含倾角、方位角及位移分量的轨迹偏差模型，并通过线性化与孔深间隔离散化得到便于在线求解的离散轨迹偏差预测模型，为后续滚动优化控制与约束处理提供了统一的模型基础。

(2) 提出了考虑扰动补偿的模型预测轨迹跟踪控制方法，采用无扰动标称模型进行预测与滚动优化，同时引入扰动扩张状态观测器进行扰动估计并在输入端进行前馈补偿，从而抑制预测失配带来的稳态误差与偏差累积，并给出了基于 LMI 的观测器稳定性条件与增益求解形式。

(3) 在相同参考轨迹、相同扰动序列和相同约束条件下，与普通模型预测控制方法及其他对比控制方法的仿真结果相比，所提控制方法能够有效估计地层扰动，观测误差整体较小并围绕零附近波动，观测器对扰动随孔深变化的跟踪效果较好。同时，在位移跟踪指标方面，所提方法的 RMSE 和 MaxE 均小于各对比方法，左右位移误差由十米量级降至米量级，表明该方法在复杂地层扰动条件下具有更高的轨迹跟踪精度和更强的鲁棒性，可为滑动定向钻进的轨迹纠偏与精确命中提供可靠依据。

References

- Gurina, E., Klyuchnikov, N., Antipova, K., 2022. Forecasting the Abnormal Events at Well Drilling with Machine Learning. *Applied Intelligence*, 52: 9980–9995. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03013-x>
- Inyang, I. J., Whidborne, J. F., 2019. Bilinear Modelling, Control and Stability of Directional Drilling. *Control Engineering Practice*, 82: 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.10.008>
- Mahdianfar, H., Hovakimyan, N., Pavlov, A., 2016. L1 Adaptive Output Regulator Design with Application to Managed Pressure Drilling. *Journal of Process Control*, 42: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.02.004>
- Zhang, C., Zou, W., Cheng, N. B., et al., 2018. Trajectory Tracking Control for Rotary Steerable Systems Using Interval Type-2 Fuzzy Logic and Reinforcement Learning. *Journal of the Franklin Institute*, 355(2): 803–826. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.12.001>
- Wan, M., Song, J., Wang, G., 2024. Observer-Based Adaptive Fuzzy Control of Stabilized Platform in Rotary Steerable System with Input Saturation and Output Constraint. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 238(10): 1785–1799. <https://doi.org/10.1177/09596518241256144>
- Wang, G., Huang, W. J., Gao, D., 2023. Real-Time Control Algorithm of Well Trajectory for Push-the-Bit Rotary Steering Drilling System. *SPE Journal*, 28(5): 2148–2164. <https://doi.org/10.2118/214703-PA>
- Bonzanini, A. D., Mesbah, A., Di Cairano, S., 2024. Perception-Aware Model Predictive Control for Constrained Control in Unknown Environments. *Automatica*, 160: 111418. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111418>
- Hong, L., Liu, H. T., Yang, Q. S., et al., 2024. Model Predictive Attitude Control of Unmanned Surface Vehicle Based on Short-Time Wave Prediction. *Ocean Engineering*, 314: 119727. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119727>
- Basheer, A. A., Jeong, J. H., 2025. Coordinated Optimization of Wind Turbine Energy Capture Efficiency Using Model Predictive Control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 172: 111361. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111361>
- Zhao, W. Q., Wei, H. Q., Ai, Q., et al., 2024. Real-Time Model Predictive Control of Path-Following for Autonomous Vehicles Towards Model Mismatch and Uncertainty. *Control Engineering Practice*, 153: 106126. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.106126>
- Panchal, N., Bayliss, M. T., Whidborne, J. F., 2010. Robust Linear Feedback Control of Attitude for Directional Drilling Tools (13th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing). *IFAC Proceedings Volumes*, 43(9): 92–97. <https://doi.org/10.3182/20100802-3-ZA-2014.00022>
- Li, L., Wang, D. P., Chen, Z. C., et al., 2025. Trajectory-Tracking Control of Autonomous Vehicles with Dynamic Nonlinear Coupling Characteristics and Parameter Uncertainty. *International Journal of Automotive Technology*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12239-025-00340-7>

中文参考文献

- 房培洪, 2024. 井下定向钻进技术在矿井地质勘探中的应用. *西部探矿工程*, 36(11): 191–192+195.
- 秦永和, 2024. 滑动导向与旋转导向钻井技术进展及发展对策. *石油钻探技术*, 52(6): 1–9.
- 闫燕强, 2025. 煤矿井下深孔定向钻进瓦斯抽采技术及应用. *西部探矿工程*, 37(5): 133–134+138.
- 鞠玮, 肖宇航, 田永净, 等, 2025. 深部煤层气储层地质力学研究与进展. *地球科学*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20251230.1510.016>.
- 李浩, 姚宁平, 陆承达, 等, 2025. 煤矿井下定向钻孔轨迹模型预测控制方法. *煤田地质与勘探*, 53(2): 205–212.
- 郭旭升, 2022. 我国陆上未来油气勘探领域探讨与攻关方向. *地球科学*, 47(10): 3511–3523.
- 杨金山, 卢伟涛, 孙青林, 等, 2025. 基于扩张状态观测器的翼伞系统滑模控制. *航天返回与遥感*, 46(6): 14–24.