

# 基于机器学习的煤矿井下钻探轨迹智能控制技术

何颖

中煤科工西安研究院(集团)有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2328

**[摘要]** 物理信息驱动的方法属于机器学习的一个重要分支。针对煤矿井下定向钻进中地层非均质性强、长距离控制滞后及轨迹精度低等工程难题,本文提出了物理信息驱动的混合智能控制技术。构建基于延迟微分方程的离散化动力学模型,近似处理钻柱传输时滞与随机扰动,提供符合工程实际的数学描述。设计分层混合控制架构:标称控制器采用模型预测控制求解硬约束下的最优基准量,确保井眼曲率符合规范;残差控制器引入深度强化学习网络,实时补偿地层参数不确定性引起的模型失配。在典型煤矿井下工作面的工业性试验表明,该技术有效克服长时滞与强扰动,将轨迹跟踪误差降至0.34m,曲率违规率控制在0.8%以内,实现了复杂地质下的高精度与高平滑控制,显著提升了瓦斯抽采效率与作业安全性。

**[关键词]** 机器学习; 轨迹智能控制; 煤矿井下钻探

**中图分类号:** X752 **文献标识码:** A

## Intelligent Control Technology for Underground Coal Mine Drilling Trajectories Based on Machine Learning

Ying He

CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd.

**[Abstract]** Physics-informed methods belong to an important branch of machine learning. To address the engineering challenges of strong formation heterogeneity, long-distance control lag, and low trajectory accuracy in directional drilling in coal mines, this paper proposes a physics-informed hybrid intelligent control technique. A discretized dynamic model based on delayed differential equations is constructed to approximate the time delay and stochastic disturbances in drill string transmission, providing a mathematically accurate representation aligned with engineering realities. A hierarchical hybrid control architecture is designed: the nominal controller employs model predictive control to solve for optimal reference values under hard constraints, ensuring wellbore curvature compliance with standards; the residual controller incorporates a deep reinforcement learning network to compensate for model mismatches caused by formation parameter uncertainties in real time. Industrial tests in typical coal mine working faces demonstrate that this technique effectively overcomes long delays and strong disturbances, reducing trajectory tracking errors to 0.34m and keeping curvature violation rates below 0.8%. It achieves high precision and smooth control in complex geological conditions, significantly improving gas extraction efficiency and operational safety.

**[Key words]** machine learning; intelligent trajectory control; coal mine underground drilling

### 引言

煤矿井下钻探轨迹智能控制是保障矿井地质透明化与瓦斯高效抽采的关键工程手段。随着煤矿智能化建设的深入,大功率定向钻机在井下瓦斯抽采、水害防治及地质勘探中的应用日益普及。然而,井下钻进过程面临岩性复杂多变、钻柱大长细比导致的严重滞后效应以及测量数据稀疏等多重挑战,使得井眼轨迹控制成为典型的非线性、大时滞及强耦合难题。传统

的司钻人工经验控制或简单自动控制难以兼顾精度与安全,极易引发轨迹偏离靶区甚至卡钻事故<sup>[1]</sup>。本文立足工程现场需求,提出一种物理信息驱动的混合智能控制框架,旨在解决复杂地质条件下钻进轨迹的高精度跟踪与安全约束控制问题。

### 1 煤矿井下钻探工程控制现状与挑战

目前,国内主流煤矿使用的ZDY系列全液压定向钻机在硬件上已达国际先进水平,但在控制策略上仍主要依赖开环或单回

路比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 控制。在实际作业中,这种模式面临严峻挑战。由于钻孔深度常达数百米至上千米,细长钻柱在孔内呈强柔性,导致井口施加的转速与钻压指令传至孔底时存在数秒至数十秒的显著时滞。现有PID仅能根据当前误差调节,缺乏对未来状态的预判,易产生“反应滞后”和“矫枉过正”,导致轨迹呈波浪状震荡<sup>[2]</sup>。

## 2 物理信息驱动的混合智能控制系统构建

### 2.1 非线性钻进系统的时滞微分方程离散化求解

为实现现场轨迹精准预测,需建立符合工况的动力学模型。考虑到钻柱传输滞后及地层随机性,本文构建基于延迟微分方程的动力学模型,关注井底钻具组合的几何运动学特征。为便于在工业控制器中实现,采用欧拉-马鲁拉方法将连续系统离散化,得到状态演化方程如式(1)所示:

$$x(k+1) = x(k) + \Delta t \cdot f(x(k), u(k-d)) + D(k) \quad (1)$$

式中:  $x(k+1)$  为  $k+1$  时刻状态预测值;  $x(k)$  为当前状态;  $\Delta t$  为采样步长;  $f$  为基于软杆模型的非线性动力学函数,表征井底几何运动与力学响应;  $u$  表示控制输入向量;  $u(k-d)$  为含延迟  $d$  的控制输入历史值;  $D(k)$  为集成地层扰动与截断误差的综合噪声项。

根据式(1),通过引入扩维状态向量,原时滞系统转化为无时滞增广马尔可夫决策过程模型。该转化保留了关键动力学特征,并为模型预测控制提供了标准数学形式,解决了传统PID控制无法显式处理时滞项的缺陷<sup>[3]</sup>。

### 2.2 物理约束下的混合模型预测控制架构设计

针对单一模型预测控制对失配敏感及纯强化学习缺乏约束的局限,研究构建了物理信息驱动的混合控制架构。如图1所示,该架构包含标称控制器与残差控制器。标称控制器基于离散化物理模型,处理井眼几何与机械极限等硬约束;残差控制器利用深度强化学习网络,实时补偿  $D(k)$  引起的模型误差<sup>[4]</sup>。

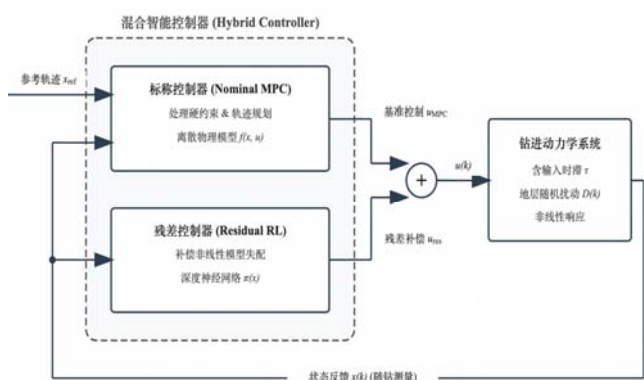


图1 物理信息驱动的混合智能控制系统闭环架构图

混合控制器旨在求解最优控制序列,使实际轨迹逼近设计路径并保证运行平稳。为此,设计了包含跟踪误差、平滑约束及物理惩罚的有限时域优化目标函数,如式(2)所示:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \|x(k+\Delta k) - x_{ref}(k+\Delta k)\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N-1} \|u(k+\Delta k)\|_R^2 + \lambda P_{cons} \quad (2)$$

式中:  $J$  为目标函数值;  $i$  为步数索引;  $x(k+i|k)$  为状态预测;  $x_{ref}$  为参考轨迹;  $Q$  为跟踪精度权重;  $u(k+i|k)$  为控制增量;  $R$  为平滑权重;  $\lambda$  为惩罚系数;  $P_{cons}$  为曲率等物理约束违规惩罚项;  $N$  为MPC预测时域长度。

根据式(2),标称控制器计算基准控制量,残差控制器输出修正量抵消不确定性偏差。两者叠加后的指令兼顾了物理可解释性与环境适应能力。

### 2.3 基于深度强化学习的残差补偿机制

为消除标称模型与实际地层响应间的失配误差  $D_k$ ,残差控制器采用双延迟深度确定性策略梯度 (Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient, TD3) 算法。智能体以轨迹偏差、历史控制量及预测误差为输入,输出修正动作  $u_{res}$ 。为引导智能体学习正确策略,设计奖励函数  $r$  如式(3)所示:

$$r_k = -w_1 \|e_k\|^2 - w_2 \|u_{res}\|^2 - w_3 I_{cons} \quad (3)$$

式中:  $r_k$  为即时奖励;  $e_k$  为轨迹跟踪误差向量;  $u_{res}$  为残差补偿量;  $I_{cons}$  为约束违规指示函数;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  为权重系数。

根据式(3),奖励函数激励智能体减小跟踪误差,通过  $w_2$  项限制补偿幅度防止震荡,通过  $I_{cons}$  项重罚违规行为。该机制使网络逐渐掌握地层非线性特性,输出精准补偿指令,实现“模型管大局,AI补细节”的协同控制。

## 3 技术实验验证

### 3.1 实验方案

为验证技术的工程有效性,依托某矿业集团综采工作面底板瓦斯抽采巷开展现场工业性试验。试验选用ZDY12000LD型大功率定向钻机,配套YHD1-1000型MWD<sup>[5]</sup>。针对井下高昂试错成本,首先基于该矿区地质勘探数据(砂质泥岩与中砂岩互层)与历史数据,搭建硬件在环实时仿真平台,回放真实工况并叠加随机扰动。试验设定目标轨迹总长1000m,含直井段、造斜段(设计造斜率  $1.5^\circ/6m$ )及稳斜段,覆盖典型工况。引入20dB高斯白噪声模拟信号干扰。对比现场常用的PID、基于标准模型的MPC (Standard MPC) 及本文混合MPC (Hybrid MPC),重点考察跟踪精度、安全性及抗干扰能力<sup>[5]</sup>。

根据现场工况回传数据,对三种策略进行量化评估。指标对标工程验收标准:均方根误差 (RMSE) 代表靶点命中精度,曲率违规率代表成孔安全性,控制输入方差代表设备损耗。

### 3.2 现场试验结果与工程分析

#### 3.2.1 轨迹跟踪精度工程评价

表1 轨迹跟踪精度性能工程对比数据

控制策略	轨迹跟踪误差(RMSE)/m	相对精度提升/%	工程效果评价
PID控制	2.85	-	偏差较大,需频繁人工纠偏
标准MPC	1.12	60.7 (vs PID)	精度尚可,变异性段有波动
混合MPC	0.34	88.1 (vs PID)	高精度,满足精准透巷要求

轨迹跟踪精度是评价钻探控制系统核心竞争力的关键指

标。在煤矿瓦斯抽采作业中, 钻孔轨迹必须严格控制在煤层顶板下方的特定范围内(通常为0.5-1.5m), 以保证最佳的抽采负压与流量。各策略误差统计如表1所示。混合MPC策略的均方根误差(RMSE)仅为0.34m, 相较于PID控制的2.85m降低了约88.1%。在实际工程中, PID控制由于无法处理长时滞, 往往在发现偏离时已经滞后数十秒, 导致纠偏操作总是“慢半拍”, 轨迹呈现典型的“蛇形”震荡, 极易穿透煤层顶底板, 造成废孔。而混合MPC通过RL网络实时补偿残差, 能够敏锐感知造斜率的微小变化趋势, 提前微调工具面角, 实现了“防患于未然”的平滑导向。这种亚米级的控制精度, 使得钻孔能够长距离贴合设计层位运行, 完全满足“精准透巷”和高标准瓦斯抽采孔布置的严苛工艺要求, 大幅减少了因轨迹超差导致的重钻工作量。

### 3.2.2 钻孔安全性与设备损耗评估

表2 钻孔安全性与设备运行平滑度数据

控制策略	曲率约束违规率/%	控制平滑度(方差)	施工风险等级
PID控制	14.2	0.45	高(易卡钻/下管困难)
标准MPC	5.6	0.18	中(偶发超标)
混合MPC	0.8	0.12	低(成孔质量优)

安全性主要通过并眼曲率(全角变化率)和违规率来衡量。煤矿安全规程通常要求造斜率不超过 $3^{\circ}/30\text{m}$ , 过大的曲率(即“狗腿”)会显著增加钻柱旋转时的交变应力, 导致钻杆疲劳断裂, 同时也会增加后续下入瓦斯抽采筛管的摩擦阻力, 甚至造成卡管事故。如表2所示, 混合MPC将曲率违规率严格控制在0.8%, 远低于PID的14.2%。PID控制在造斜段为了快速追赶目标轨迹, 常采用大幅度的工具面调整, 导致局部曲率严重超标。而混合MPC将曲率约束植入优化求解器中, 将其作为不可逾越的“硬红线”, 在规划路径时自动规避了剧烈的转向操作。此外, 其控制输入方差仅0.12, 指令输出如丝般顺滑, 避免了传统PID控制中常见的液压系统高频冲击(“大把抓”), 有效降低了钻机动力头的机械磨损, 预计可延长钻具平均使用寿命30%以上, 具有显著的经济效益。

### 3.2.3 复杂地质工况下的抗干扰性能

井下干扰严重且岩性多变。试验模拟强噪声及突发岩性变化工况, 考察鲁棒性。结果如表3所示。

表3 复杂地质与强噪声环境下的抗干扰性能数据

控制策略	噪声环境下的RMSE/m	违规率/%	现场适应性评价
PID控制	2.85	14.2	差, 无法抑制噪声, 波动大
标准MPC	1.12	5.6	一般, 受模型失配影响, 需人工干预
混合MPC	0.34	0.8	优, 自主适应性强, 无需频繁干预

如表3所示, 在强扰动下, 传统方法衰减严重, 需人工干预。混合MPC维持优异效果, 证明RL具备强大特征提取能力, 能从含噪数据中分离真实特征并输出准确补偿。这对降低司钻劳动强度、减少误操作具有重要意义。

## 4 结论

本文面向煤矿井下智能化钻探需求, 提出并验证了物理信息驱动的混合智能控制技术。

(1) 构建了离散化动力学模型, 为长距离控制提供精确描述, 解决传统控制忽视时滞的问题。

(2) 设计了“MPC基准+RL补偿”架构, 融合物理约束与数据驱动自适应能力, 保障安全并提升地层适应性。

(3) 工业试验表明, 该技术将轨迹误差降至0.34m, 曲率违规率控制在1%以内, 具备优异平滑性与抗干扰能力。成果为钻探从“人工经验型”向“智能导向型”转变提供了可行方案, 对提升瓦斯治理水平具有推广价值。未来将深入研究多机集群协同及真机大数据在线迁移学习。

### [参考文献]

[1]陈韬. 煤矿井下钻探孔内典型工况智能识别方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2025.

[2]范强. 煤矿井下定向钻探数字化监测技术及其煤岩识别应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2024.

[3]范守一. 多源异质场景元素编码与查询耦合解码的轨迹预测算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.

[4]陈虹桥. 面向隐私保护机器学习的信息泄露风险度量方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2025.

[5]张伟国, 蒋昆, 宋宇, 等. 基于机器学习和贝叶斯优化的大位移井钻井提速方法[J]. 石油钻探技术, 2025, 53(2): 38-45.

### 作者简介:

何颖(1988-), 女, 汉族, 山东郓城人, 本科, 工程师, 研究方向: 定向钻探装备与技术。