

中国地质大学（武汉）未来技术学院 本科毕业论文（设计）开题报告

题目：煤矿井下钻进过程煤岩强度感知与操作参数优化

姓 名：曾康慧

班 级：220211

专 业：自动化

指导老师：吴 敏 教授

指导老师：陆承达 教授

2025 年 2 月 20 日

一、研究背景、目的及意义

煤炭作为我国主要能源，在国民经济发展中发挥着关键作用^[1]。然而，我国煤矿地质条件复杂，煤矿安全生产长期面临严峻挑战，瓦斯灾害更是主要威胁。据统计，2013-2023 年，瓦斯事故占煤矿事故的 40.14%，致死率达 46.88%，威胁矿工生命安全并造成巨大的经济损失^[2]。近年来，随着开采深度的不断增加，超 130 处矿井深度已超过 700m，低瓦斯的矿井逐渐转变为高瓦斯矿井^[3]，而高瓦斯矿井的开采强度持续加大，使得煤矿瓦斯治理面临更加严峻的挑战^[4]。因此，提高煤矿瓦斯抽采效率、降低瓦斯灾害风险成为煤矿安全生产的核心任务^[5]。

煤矿井下钻探是实现瓦斯抽采和地质探测的关键工艺，通过钻取瓦斯抽放孔、放水孔等，释放煤层中的瓦斯和地下水，保障安全生产^[7]。全液压坑道钻机的给进速度和动力头转速是影响钻探效率和安全性的核心操作参数^[8]。然而，目前参数选择主要依赖司钻人员的经验判断，缺乏对煤岩强度等关键地质特性的理论指导^[9]。这种经验驱动的方式存在以下局限：一是难以适应煤岩强度的动态变化，导致钻进效率低下或设备过载；二是无法实时优化参数，增加了钻头磨损和井下事故风险；三是阻碍了钻探过程向自动化和智能化的发展^[10]。因此，研究基于煤岩强度感知的操作参数优化方法，不仅能为科学选择参数提供理论依据，还可降低司钻人员劳动强度，推动我国煤矿钻探的智能化进程。

煤岩强度是影响钻进参数选择的关键因素。随着钻孔深度的增加，钻头接触的煤岩强度不断变化，破碎难度和最优参数随之改变^[11]。然而，受限于井下环境的复杂性和感知技术的不足，现有钻探过程难以实时量化煤岩强度，司钻人员通常仅通过钻机运行状态（如噪声、振动）间接判断，调整参数的时机和幅度缺乏科学依据^[12]。近年来，基于钻柱动力学模型的煤岩强度感知方法逐渐受到关注，通过分析钻头-煤岩相互作用的力学特性，可较为准确地表征煤岩强度，为参数优化提供量化依据^[13]。同时，模糊推理等智能控制技术在处理非线性、不确定性问题上展现出优势，适合用于构建适应煤岩强度变化的参数优化模型^[14]。

针对上述问题，本研究响应国家新一轮找矿突破战略行动，以煤矿井下钻探为对象，聚焦操作参数选择依赖经验、缺乏煤岩强度理论指导的难题，提出基于煤岩强度感知的操作参数优化方法。具体而言，通过建立钻柱动力学模型和固有比能感知方法，量化煤岩强度；基于模糊推理系统，优化给进速度和动力头转速；最终开发具有工程应用价值的优化系统。该研究不仅为提升钻探效率 and 安全性提供了技术支持，还为我国煤矿井下钻探的自动化、智能化发展奠定了基础，具有重要的理论意义和工程价值。

二、国内外研究现状及发展趋势

为实现煤矿井下钻探过程的安全高效运行并降低灾害风险,国内外学者在煤岩强度感知、钻柱系统动力学建模及操作参数优化等方面开展了广泛研究,取得了一系列成果。本节围绕钻柱系统动力学模型和操作参数优化模型两个核心方面,系统梳理国内外研究现状,分析现有技术的优势与不足,为本文基于煤岩强度感知的操作参数优化研究奠定理论基础。

2.1 钻柱系统模型

钻柱系统动力学模型是煤岩强度感知与操作参数优化的重要理论基础。钻柱在钻进过程中负责传递动力并将钻头送至井底,其动力学特性直接影响钻进效率和安全性^[15]。随着钻进深度的增加,复杂地质环境和孔底信息获取的困难性显著提高了煤岩强度感知的挑战性^[16]。因此,精确的钻柱动力学模型对优化操作参数、控制钻柱运动、优化井眼轨迹及预防井下事故具有重要工程意义^[17]。

目前,钻柱动力学建模主要采用以下三种方法:集总参数模型、分布式参数模型和有限元模型^[18]:集总参数模型、分布式参数模型和有限元模型。

(1) 集总参数模型

集总参数模型(Lumped Parameter Model, LPM)将钻杆与底部钻具组合视为具有一个或多个自由度的集总质量-弹簧-阻尼系统,以此来描述钻柱过长表现出来的柔性^[19]。按照钻柱划分为质量弹簧阻尼系统数量的不同,钻柱可以分为不同自由度。

单自由度模型主要用于扭转振动分析,Yigit 等^[20]基于单自由度集总质量模型将钻柱在扭转方向被建模为一个扭摆,钻杆被表示为一个扭转弹簧,并通过钻柱的直径和弹性模量求得等效刚度,连接顶部旋转系统和底部组合钻具,其中旋转系统以固定速度旋转,BHA 被建模为一个集总质量。

除了将钻柱整体看成一个自由度以外,还可以针对钻柱不同组成部分集总成多个自由度。二自由度模型进一步耦合轴向和扭转动力,Shor 等^[21]基于二自由度集总参数模型来表示钻柱在轴向和扭转中的刚度和惯性特征,将顶驱视为一个集总质量,将钻柱和井底钻具组合视为另一个集总质量,建立了钻柱的扭转-轴向耦合系统,结合 Stribeck 摩擦模型,描述了静态与动态摩擦力的过渡,并考虑了钻柱质量、惯性、刚度、摩擦力、井眼弯曲轨迹等关键参数,使其能够在不同的石油定向钻井条件下快速求解钻柱的动力学响应,从而得出井底钻头轴向给进速度和扭转速度的开环响应。

多自由度模型进一步提高了钻柱动力学的建模精度，Pournazari 等^[22]提出了三自由度模型，并采用拉格朗日方法从连续模型中求解系统参数。在此基础上，Hovda 等^[23]在直井和定向井环境下，考虑了钻井液阻尼作用，并采用时间依赖性的 Couette-Poiseuille 流体表面摩擦阻尼描述集总质量之间的阻尼系数，以研究海洋钻井平台上钻柱的升沉运动。此外，Choe 等^[24]通过耦合钻头-岩石相互作用，还可进一步拓展集总参数模型，以描述钻柱的扭转动力学行为。Moraes 等^[25]研究了钻柱振动及其耦合效应，分析了钻头-地层及钻柱-井壁之间的相互作用对振动特性的影响。

总体而言，集总参数模型是最早用于分析钻柱运动的方法。它计算效率高，适用于实时控制和快速仿真，物理意义清晰，容易调整模型参数，适用于定性研究钻柱动力学特性，能够反映系统变化趋势。然而，该方法不能准确描述钻柱的空间变形，忽略了分布效应，且误差较大，难以精确描述钻柱振动的复杂特性。

（2）分布式参数模型

分布式参数模型（Distributed Parameter Model, DPM）不同于集总参数模型，其通过分析钻柱微元的受力情况，使用偏微分方程描述钻柱运动，以考虑钻柱任意位置的质点在任意时刻的位移。这种方法的挑战主要在于边界条件的处理及动力学方程的求解^[26]。

针对钻柱的扭转运动，Aarsnes 等人^[27]考虑近水平钻柱的扭转运动，基于钻柱的倾角建立钻柱每一个微元受到的摩擦力，通过在钻柱的波动方程中考虑摩擦力建立了适用于水平井的分布式参数模型，并分析了摩擦系数对粘滑振动的影响，为水平井钻柱的振动抑制提供指导。Wu 等^[29]考虑到扭矩从地面传递到井下的延迟，和钻柱高精度模型的需求，引入了钻柱的分布式参数模型并将其转化为中立型时滞模型。

针对钻柱的纵向运动，李等^[30]为不同钻杆段建立分布式参数模型，并利用边界条件推导出整个钻柱的纵向振动动力学方程，便于分析振动状态及振动成因。Kandala 等^[31]考虑到钻头在离地的情况下同样会发生粘滑振动，集总参数模型难以解释这一现象，因此作者利用库伦摩擦作为源项的一维度波动方程实现钻柱系统的建模，并基于表面的钻速和扭矩实现对井下钻速和摩擦系数的估计。吴等^[32]基于弹性杆理论建立钻柱运动方程，采用差分法求解研究钻柱的动态特性。

总体而言，分布式参数模型能够更准确地描述钻柱的动态特性，适合研究钻柱在不同深度处的动态特性和局部响应。但是由于系统受时间和位移的双重影响，其计算复杂度较高，求解难度大，尤其在涉及复杂边界条件时，推导和求解过程更具挑战性。

（3）有限元模型

有限元方法（Finite Element Method, FEM）是一种强大的数值分析工具，广泛用于油气井管柱的静动态分析。基于拉格朗日有限元公式^[33]，该方法特别适用于不规则区域和复杂约束下的力学问题建模。与集总参数模型相比，有限元模型不仅计算精度更高，且能捕捉到高阶振动模态^[34]。有限元模型通过将钻柱离散为有限个梁单元，以广义节点位移为状态变量建立代数方程组。

运用有限元法对定向井钻进行建模时，需要将钻柱与井壁之间的摩擦力引入有限元的受力分析，建立考虑钻柱与井壁的摩擦阻力和钻柱屈曲的钻柱模型，以适应定向钻进。刘等^[35]将钻柱受到的摩擦力分为正交的轴向和扭转方法摩擦力，建立钻柱与钻孔系统的有限元模型，并分析了摩擦力对钻柱屈曲行为，如临界屈曲力，弯矩和轴向力传递的影响。Tian 等^[36]结合了摩擦系数随机模型和钻柱的有限元模型，建立了水平井钻柱的轴向振动模型和钻进效率分析模型，并通过实验获取模型相关参数，准确描述了钻柱摩擦力的随机性。Khulief 等^[37]提出了一种具有六自由度的有限元钻柱模型，并利用拉格朗日方程推导出质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。在水平定向井研究中，Liu 等^[38]提出了一种考虑动态摩擦和屈曲效应的钻柱有限元模型，以预测纵向振动传播距离，并分析激振力、钻井液密度、轴向力、摩擦系数及钻柱尺寸对钻柱振动特性的影响。

有限元法因其较高的建模精度和边界条件适应性，在钻柱送钻过程的研究中具有较大优势。然而，该方法对计算资源需求较高，在离散单元划分时需权衡计算精度与复杂度，以确保模型的实用性。

综上，集总参数模型计算效率高但精度有限，分布式参数模型和有限元模型精度较高但计算复杂。现有研究在煤岩强度感知方面较少结合钻柱动力学特性，难以适应不同机械参数的井下环境，亟需开发兼顾精度与效率的建模方法。

2.2 钻进过程操作参数优化

操作参数优化是提升煤矿井下钻探效率和安全性的核心环节，其目标是通过合理选择决策变量（如钻压和转速），在满足设备功率、钻头寿命等约束条件的前提下，实现钻速最大化或机械比能最小化^[39]。针对煤矿井下钻探的复杂地质环境和煤岩强度的动态变化，国内外学者围绕钻速模型开展了深入研究，主要分为基于数据回归和基于机器学习的两种建模方法。这些研究为操作参数优化提供了理论基础，但仍需进一步结合煤岩强度感知以适应井下复杂工况。

（1）基于数据回归的钻探速度模型

基于数据回归的钻探速度模型通过代数方程描述操作参数（如给进压力、动

力头转速)与钻探速度之间的映射关系,常称为钻速方程,因其结构简单、计算效率高而广泛应用于工程实践。杨格模型^[41]是最早的代表性模型,通过考虑门限钻压和钻头牙齿磨损量建立钻速预测方程。修正杨格模型进一步引入井底压差和水力因素影响系数,提升了模型对复杂地质环境的适应性,目前在煤矿井下钻探现场具有较高应用价值^[40]。近年来,针对煤矿井下钻探的具体场景,学者们对数据回归模型进行了改进。例如,孙维丽等^[41]针对煤矿掘进场景,采用试验设计法构建仿真模型,通过多项式回归方法得到钻探速度的多元回归模型。李崑岩等^[42]通过分析牙轮钻头的现场数据,发现对数函数能更准确地描述钻压与钻探速度的关系,提出了一种新型钻速模型,并基于此实现了煤岩可钻性估计。

数据回归模型的优势在于其数学表达简洁,通过调整方程系数即可适应不同钻探场景。然而,煤矿井下钻探过程受煤岩强度、孔壁摩擦等非线性因素影响,简单代数方程难以全面捕捉这些复杂特性,导致模型预测精度有限,尤其在煤岩强度突变(如从软煤层到砂岩层)时,模型的适应性较差。

(2) 基于机器学习的钻探速度模型

随着人工智能技术的快速发展,机器学习方法因其强大的非线性建模能力和高精度预测性能,成为钻探速度模型研究的热点。赵颖等^[43]利用极限学习机的快速训练特性,构建了实时在线预测钻探速度的模型,适用于动态调整操作参数。柳军等^[44]基于灰色系统理论改进马尔可夫模型,提出灰色一加权马尔可夫动态预测模型,增强了模型对时序数据的处理能力。许明泽等^[45]通过融合支持向量回归和随机森林,构建了集成模型,进一步提升了预测精度。

在国际研究中,Encinas 等^[46]利用递归神经网络和全连接神经网络,针对钻探数据的时序特性构建钻速模型,适用于长期钻进场景。Bizhani 等^[47]通过贝叶斯神经网络和长短期记忆网络,对影响钻速的因素进行不确定性量化,提升了模型的鲁棒性。Hazbeh 等^[48]对比了人工神经网络、支持向量回归、梯度提升决策树和随机森林等多种方法的泛化能力,发现随机森林在预测钻探速度方面表现优异。Mahmoodzadeh 等^[49]使用灰狼优化算法优化的 LSTM 深度神经网络对钻速进行时序预测。Gan 等^[50]提出一种基于混合蝙蝠算法的钻速优化结构,将上述算法应用于钻速优化,同时考虑地层条件变化、钻头磨损等各类等式或不等式非线性约束,同四种当前知名优化算法的对比结果验证了所提方法的先进性,为保障钻进过程高效运行提供钻进操作参数推荐值。

尽管机器学习模型在精度上优于数据回归模型,但其主要局限在于对煤岩强度等关键地质特性的直接建模不足。现有研究多以传感器数据(如给进速度、转

速)作为输入,忽略了煤岩强度的动态变化对钻速的影响,导致模型在不同矿场或地质条件下的泛化能力较弱。

综上所述,国内外学者在煤岩强度感知、操作参数优化模型、寻优算法方面开展广泛的研究与应用,在一定程度上解决煤矿井下钻探过程操作参数优化问题,为煤矿企业选取合适的操作参数提供一定的理论依据。但现有技术方案仍存在一些问题,这些待进一步解决的问题具体如下:

(1) 煤岩强度感知模型缺乏钻柱动力学基础

煤矿井下钻探过程中,煤岩强度的动态变化(如从软煤层到硬砂岩层的突变)对操作参数的选择具有重要影响。现有煤岩强度感知模型多以给进速度、动力头转速等传感器数据作为输入,直接通过回归或机器学习方法建立预测模型,缺乏对钻柱动力学特性的深入分析。这种方法在机械参数(如钻柱长度、钻头类型)不同的矿场中难以保持一致的感知精度,限制了模型的工程应用价值。例如,现有模型难以准确量化钻柱柔性模态和孔壁摩擦对煤岩强度感知的影响,导致在复杂井眼轨迹下感知结果偏差较大。

(2) 操作参数优化模型未充分考虑生产安全

煤矿井下钻探对操作参数的需求包括提高作业效率和保障生产安全两个方面。现有研究多聚焦于优化钻探速度或机械比能,以降低生产成本和提高效率,但较少考虑钻机抖动程度、钻柱长度等影响生产安全的因素。例如,现有优化模型往往忽略钻柱柔性模态引起的振动或地层突变对钻机稳定性的影响,导致在高强度煤岩层或复杂井眼轨迹下,优化参数可能引发设备过载或井下事故。此外,现有模型多依赖司钻经验或静态数据,难以实时响应煤岩强度的动态变化,限制了钻探过程的智能化发展。

(3) 模型精度与实时性之间的矛盾

现有钻探速度模型在精度与实时性之间存在显著矛盾。基于数据回归的模型计算效率高,适合实时应用,但精度较低,难以适应煤岩强度的动态变化;基于机器学习的模型精度较高,但训练和推理过程计算复杂度高,难以满足井下实时控制的需求。此外,现有模型在处理地层不确定性(如煤岩强度突变)时,往往需要手动调整参数或重新训练,缺乏自适应能力。这与煤矿井下钻探对快速响应和鲁棒控制的需求不符。

三、预期目标和研究内容

针对上节所述目前煤岩强度感知模型与操作参数优化模型中存在的不足,本

研究深入分析煤矿井下钻进过程的操作参数优化需求,设计一种基于煤岩强度感知的煤矿井下钻进过程操作参数优化方法,旨在通过理论建模与智能优化相结合,实现钻探效率与生产安全的动态平衡,开发具有工程应用价值的智能优化系统。本节将阐述课题的预期目标与研究内容。

3.1 预期目标

本课题研究基于煤岩强度感知的煤矿井下钻进过程操作参数优化问题,依托于 MATLAB/Simulink 仿真和现场试验进行正确性和实用性验证,主要目标如下:

(1) 针对煤岩强度的动态变化,采用集总参数模型建立钻柱扭向-轴向耦合动力学模型,融合有限元方法构建钻柱与孔壁的摩擦力模型,提出基于固有比能的煤岩强度感知方法,通过实时计算给进速度、回转速度和给进压力的力学关系,量化煤岩强度的动态变化。

(2) 以作业效率和生产安全为优化目标,设计基于模糊推理的操作参数优化模型。以感知的煤岩强度、给进压力和扭矩为输入,构建以给进速度和动力头转速推荐值为输出的模糊推理系统,引入条件触发机制以快速响应煤岩强度突变。

(3) 利用 MATLAB/Simulink 进行操作参数优化的仿真分析,验证模型的准确性和鲁棒性。在地面实验基地利用不同强度混凝土岩样验证模型的普适性,在煤矿井下作业现场开展工程应用,分析系统在复杂地质环境中的运行效果。

3.2 研究内容

本课题旨在通过理论建模与智能优化相结合,实现钻探效率与生产安全的动态平衡。具体而言,首先结合集总参数模型和有限元方法,构建钻柱扭向-轴向耦合动力学模型,分析钻柱与孔壁摩擦力及钻头-煤岩相互作用的力学特性,提出基于固有比能的煤岩强度感知方法;然后基于模糊推理系统,设计以煤岩强度、给进压力和扭矩为输入,以给进速度和动力头转速推荐值为输出的优化模型,引入条件触发机制以响应煤岩强度突变;最后利用 MATLAB/Simulink 进行仿真分析,在井下作业现场验证所提方法的有效性和实用性。主要研究内容包括:

(1) 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

建立基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型。针对现有煤岩强度感知模型缺乏钻柱动力学基础的不足,结合集总参数模型和有限元方法,构建钻柱扭向-轴向耦合动力学模型,分析钻柱与孔壁摩擦力及钻头-煤岩相互作用的力学特性。在此基础上,提出基于固有比能的煤岩强度感知方法,通过实时计算给进速度、回转速度和给进压力的力学关系,量化煤岩强度的动态变化。固有比能值越大,反

映煤岩强度越高，反之则越低。通过 MATLAB/Simulink 仿真和安徽淮北许疃矿场实测数据验证模型的有效性，为后续操作参数优化提供可靠的输入数据。

（2）基于模糊推理的操作参数优化模型

以作业效率和生产安全为优化目标，设计基于模糊推理的操作参数优化模型。结合煤岩强度感知结果，通过梯形法构造固有比能和扭矩的隶属度函数，作为模糊推理系统的输入，构建以给进速度和动力头转速推荐值为输出的优化模型。模糊推理系统通过融合司钻经验和现场数据，动态响应煤岩强度的变化，实现效率与安全的平衡。通过 MATLAB 模糊逻辑工具箱进行仿真分析，验证优化结果的稳定性和与专家经验的一致性，为后续的工程应用奠定方法基础。

（3）仿真分析与工程应用

基于上述的研究成果，在 Qt 上位机中开发集煤岩强度感知与操作参数优化功能于一体的智能化系统。首先在地面实验基地利用不同强度混凝土岩样验证模型的普适性，随后在安徽省亳州市某煤矿井下作业现场开展工程应用，分析系统在复杂地质环境中的运行效果。通过统计煤岩强度感知和操作参数优化的运行数据，验证方法的有效性和实用性。

四、研究方案和主要措施

本课题研究基于煤岩强度感知的煤矿井下钻进过程操作参数优化。研究方案和主要措施从以下三个方面展开：基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型、基于模糊推理的操作参数优化模型以及仿真分析与工程应用。

4.1 研究方案

结合国内外研究背景、预期研究目标和研究内容，本课题的研究方案如图 1 所示。

首先，通过建立钻柱动力学模型和固有比能感知方法量化煤岩强度，基于模糊推理系统优化给进速度和动力头转速，最终在 Qt 上位机中实现操作参数优化方案首先结合集总参数模型和有限元方法，构建钻柱扭向-轴向耦合动力学模型，分析钻柱与孔壁摩擦力及钻头-煤岩相互作用的力学特性，提出基于固有比能的煤岩强度感知方法；然后基于模糊推理系统，设计以煤岩强度、给进压力和扭矩为输入，以给进速度和动力头转速推荐值为输出的优化模型，引入条件触发机制以响应煤岩强度突变；最后利用 MATLAB/Simulink 进行仿真分析，在井下作业现场验证所提方法的有效性和实用性。

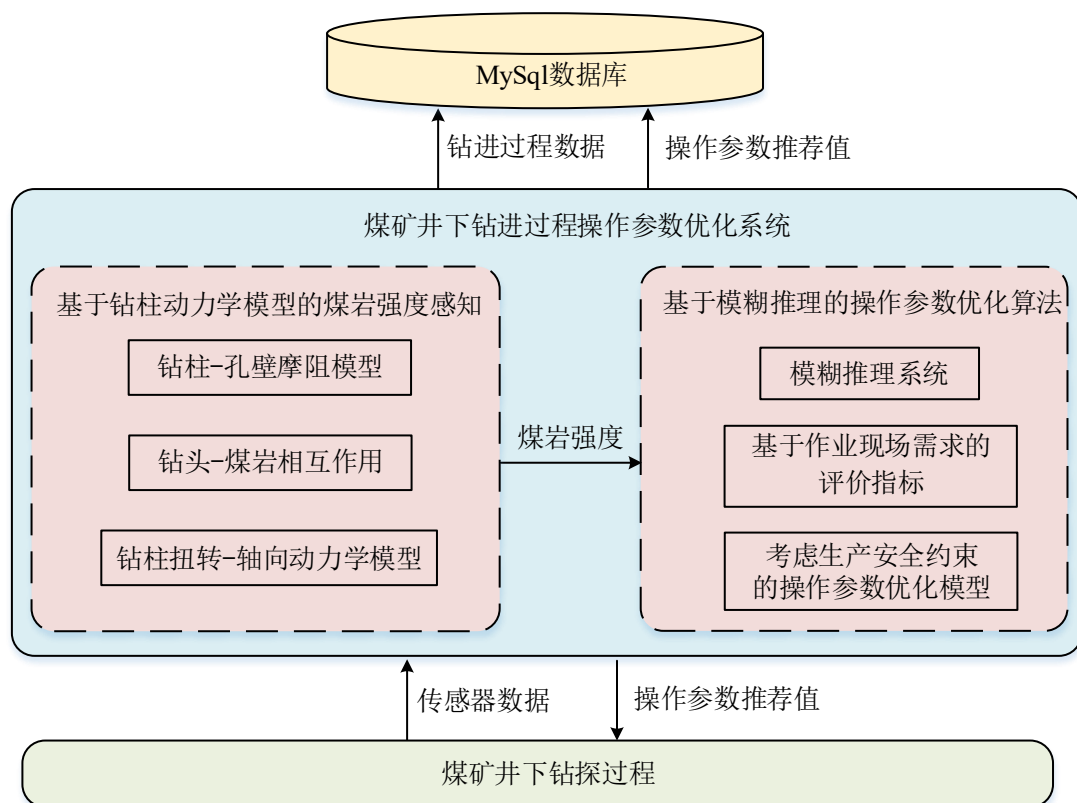


图1 研究方案

4.2 主要措施

本课题的主要研究内容为基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型、基于模糊推理的操作参数优化模型以及仿真分析与工程应用，具体的实施措施如下。

(1) 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

在实际作业中，软煤层通常需要较高的给进速度和转速以提升效率，而硬砂岩层则要求降低参数以避免设备过载。然而，现有钻探过程主要依赖司钻人员通过钻机运行状态（如噪声、振动）间接判断煤岩强度，缺乏科学量化的依据。这种经验驱动的方式难以适应复杂地质条件，易导致钻进效率低下或井下事故。为此，亟需开发一种基于钻柱动力学的煤岩强度感知方法，通过实时分析钻头-煤岩相互作用的力学特性，量化煤岩强度，为操作参数优化提供理论支持。

为实现煤岩强度的动态感知，本节结合集总参数模型和有限元方法，构建钻柱扭向-轴向耦合动力学模型，分析钻柱与孔壁摩擦力及钻头-煤岩相互作用的力学特性，并提出基于固有比能的煤岩强度感知方法。如图2所示，本文建立的钻柱动力学模型主要由四个部分组成：钻柱扭转动力学、钻柱轴向动力学、钻柱-孔壁摩阻模型和钻头-岩石相互作用。

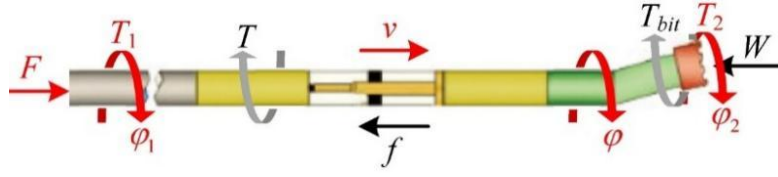


图2 钻柱受力示意图

钻机回转系统结构如图3所示，他由负载敏感泵提供回转压力，通过调整电液比例阀开度，改变进入液压马达的流量，进而实现回转速度的改变。负载敏感系统通过感知负载压力，改变主泵输出压力，克服钻头切削产生的负载扰动，维持转速稳定。

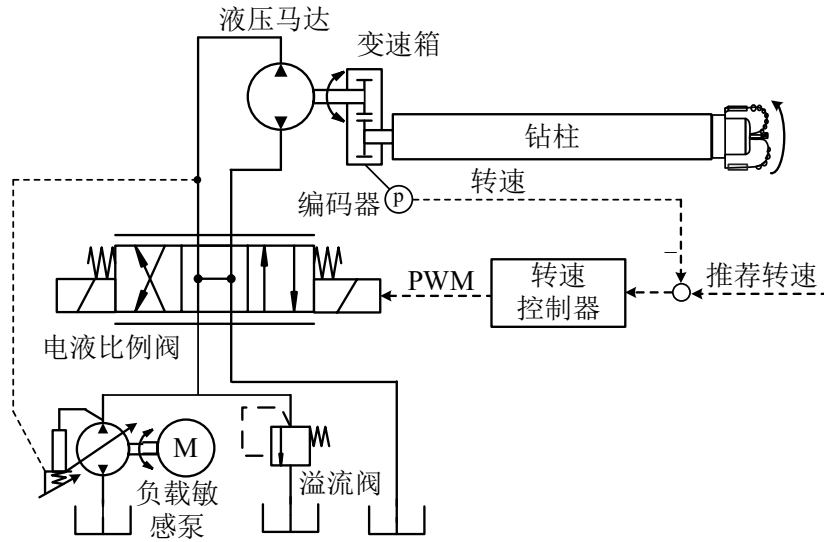


图3 钻机回转系统结构图

钻柱的扭转动力学是由钻机回转系统动力头的回转压力驱动的，钻柱所受的扭转阻力可等效为负载扭矩。钻柱的扭转动力学方程可表示为：

$$J_t \dot{\varphi} = D_m P_L - T_L, \quad (1)$$

其中， J_t 为液压马达的转动惯量， φ 为动力头的角位移， D_m 为液压马达的排量， P_L 为液压马达的负载压力， T_L 为负载扭矩。

钻机的给进系统通过滑台等机械结构将液压缸的给进压力传递到钻柱和钻头，使得钻头切入煤层，配合扭转方向的回转切削，实现煤层的破碎，孔洞的形成。钻机的给进系统主要由液压动力系统，钻柱和钻头岩石相互作用三部分组成，如图4所示。

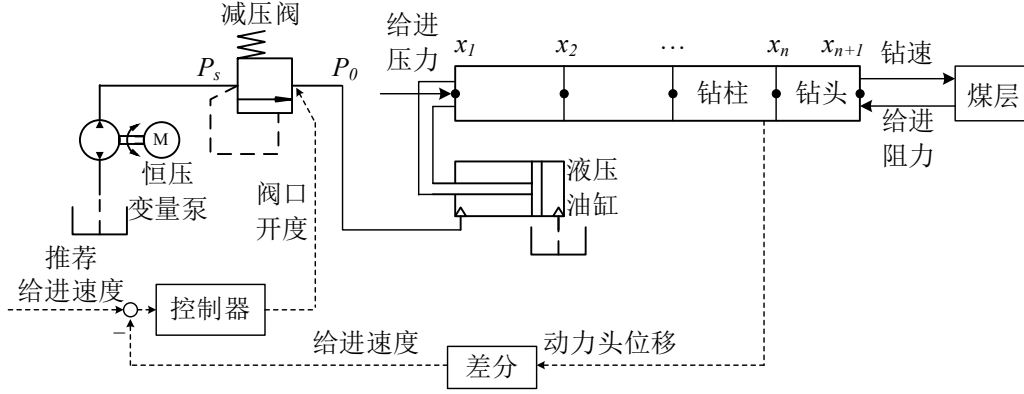


图4 钻机给进系统结构图

钻柱的轴向动力学由给进系统液压缸提供的给进压力驱动，其轴向阻力可等效为钻柱沿竖直方向的重力分量、钻头承受的孔底反力以及底部钻具组合与钻柱所受摩擦力的合力。钻柱轴向动力学模型的数学表达为：

$$M\dot{v} = F_a - F_m - W - f, \quad (2)$$

这里， v 为动力头的给进速度， M 为钻柱的总重量， F_a 为液压系统输出的轴向给进压力， F_m 为钻柱在竖直方向上的重力分量， W 为作用于钻头的孔底压力， f 为底部钻具组合和钻柱受到的摩擦力。

钻柱的总重量可表示为：

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (3)$$

式中， M_i 为每一个钻柱单元的质量， n 为钻柱单元的总数量。

液压系统输出的轴向给进压力可表示为：

$$F_a = P_{in} \cdot S_h \cdot 10^6, \quad (4)$$

这里， P_{in} 是液压系统输出的轴向给进压强， S_h 为液压油缸的有效面积，在钻进过程中，我们通过改变减压阀的数据信号 I_{in} 实现对给进压力 P_{in} 的调整，液压动力系统的数学模型为：

$$P_{in} = \frac{K}{Ts+1} I_{in}, \quad (5)$$

式中， K 和 T 为液压动力系统的增益和时间常数。

弯曲的钻柱在竖直方向上的重力分量可表示为：

$$F_m = \sum_{i=1}^n M_i g \cos \theta_i, \quad (6)$$

式中, θ_i 是每一个钻柱单元的弯曲倾角, 即与重力反方向的夹角, 如图 3 所示。当造斜的钻孔轨迹向上弯曲时, F_m 为正, 其作用方向与给进压力相反, 从而部分抵消给进压力; 当造斜的钻孔轨迹向下弯曲时, F_m 为负, 其作用方向与给进压力相同, 进而增强给进压力。

孔底作用于钻头的给进阻力可表示为:

$$W = W_c + W_f, \quad (7)$$

式中, W_c 和 W_f 分别表示推力的切削分量和摩擦分量, 可表示为:

$$W_c = \varepsilon \zeta (rd_{c1} + Rd_{c2}), \quad (8)$$

$$W_f = (r + R) \ell \sigma, \quad (9)$$

这里, ε 为固有比能, 用于描述钻头所破碎煤层的硬度; ζ 表示岩石与工具界面处的垂直力与水平力之比; r 为钻头的半径; d_c 表示钻头转动一圈时的切削深度; $\dot{\phi}$ 表示动力头角速度; κ 是一个非常小的正数; σ 表示作用在磨损面上的正应力的值, $\sigma = 2\varepsilon$; ℓ 表示等效磨损面; μ 表示扭转摩擦系数; r_1 代表空间方向和倒角/磨损表面分布的全局特征。

在钻进过程中, 煤岩强度的非均匀性通过固有比能的变化进行量化。固有比能 (specific energy) 定义为单位体积煤岩破碎所需的能量, 与煤岩的抗压强度密切相关。在正常钻进条件下, 根据钻进系统的力学平衡, 考虑给进加速度的影响, 结合给进速度、回转速度和给进压力的实时数据, 固有比能可表示为:

$$\varepsilon = \frac{(F_a - M\dot{v} - f - F_m)}{2r(\frac{\pi\zeta v}{\dot{\phi}} + \ell)}, \quad (10)$$

固有比能值越大表示煤岩强度越高, 反之则表示煤岩强度越低。

底部钻具组合和钻柱受到的摩擦力可表示为:

$$f = f_v + f_c, \quad (11)$$

f_v 是粘性摩擦力, 可表示为:

$$f_v = k_f v, \quad (12)$$

式中, k_f 为地层硬度系数, 随着地层硬度的变化而变化, 具有高度不确定性。

f_c 是钻柱和孔壁之间产生的库伦摩擦力, 可表示为:

$$f_c = \sum_{i=1}^n M_i g (\sin \theta_i \mu B_f \text{Sign}(v)), \quad (13)$$

这里, μ 为钻柱与孔壁之间的摩擦系数, B_f 为浮力系数, 浮力系数可表示为:

$$B_f = \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_s} \quad (14)$$

这里， ρ_s 为钻杆和 BHA 材料的密度， ρ_m 为钻井液泥浆密度。

基于 2023 年 2 月 28 日 15:30 至 18:30 在安徽淮北许疃矿场采集的钻进数据，利用提出的固有比能公式进行煤岩强度感知。通过对比固有比能曲线与现场记录的煤岩类型（如图 5 所示），发现固有比能显著下降的时段（如 17:38-17:49、18:35-18:38 以及 18:43-18:53）对应于软煤层，与现场岩性标记一致，验证了模型的准确性。

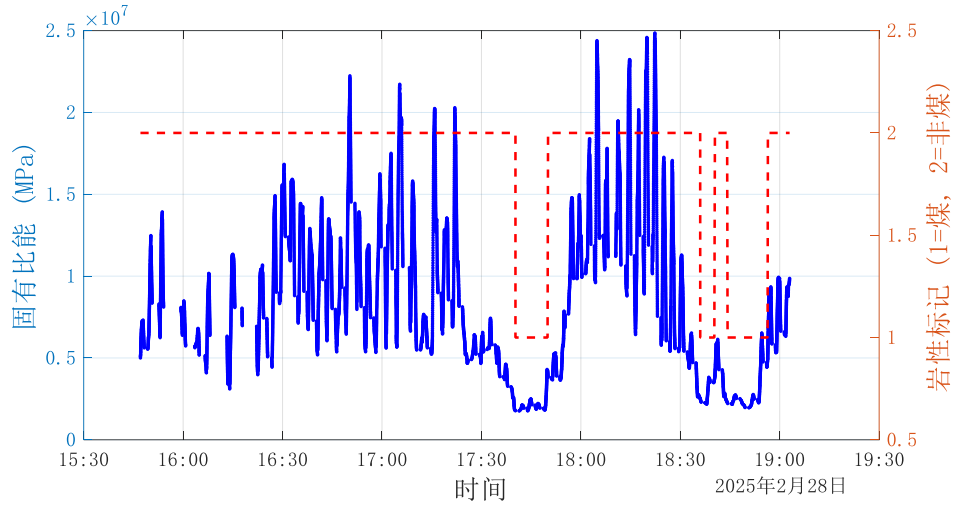


图 5 煤岩强度感知验证

仿真结果表明，该模型在软煤层和硬砂岩层等不同地质条件下均能有效感知煤岩强度，适用于复杂井下环境。模型的优势在于结合集总参数模型的计算效率和有限元方法的精度，适合实时应用，为后续的操作参数优化提供了可靠的输入数据。

（2）基于模糊推理的操作参数优化方法

在煤矿井下钻进过程中，操作参数（如给进速度和动力头转速）的合理选择对提高钻进效率、延长钻具寿命和保障施工安全至关重要。然而，由于煤岩强度的动态变化和井下环境的复杂性，传统基于经验的操作参数调节方法难以适应实时工况，导致钻进效率低下或设备过载风险增加。模糊推理系统（Fuzzy Inference System, FIS）作为一种基于模糊逻辑的智能控制方法，能够有效处理非线性、多变量的复杂系统，适用于操作参数的动态优化。

基于上文计算得到的煤岩强度（固有比能）数据，设计并实现一个基于模糊逻辑的操作参数优化系统。该系统通过构建两个独立的模糊推理模块（fis_feed 和 fis_rotary），分别优化给进速度和动力头转速，以煤岩强度、给进压力和扭矩

作为输入，输出相应的参数调整量。为了提高系统的适应性和鲁棒性，本研究在系统设计中引入条件触发机制（当煤岩强度突变超过一定阈值时触发推荐值更新）和模糊规则调优方法，通过 MATLAB 实现和仿真验证系统的有效性。

（3）煤矿作业现场应用

首先，介绍煤矿井下钻探过程操作参数优化系统的程序架构、具体功能，重点叙述煤岩强度感知模型、操作参数优化方案的实现方式。然后，利用操作参数优化系统的数据采集功能，在地面实验基地采集不同强度混凝土岩样下的钻探数据，借助这些数据开展本文的建模和仿真。最后，介绍操作参数优化系统在安徽省亳州市某煤矿的井下应用情况。

煤矿井下钻探过程操作参数优化系统以 Qt 上位机的形式与全液压坑道钻机进行数据交互，其程序架构具体如图 6 所示。

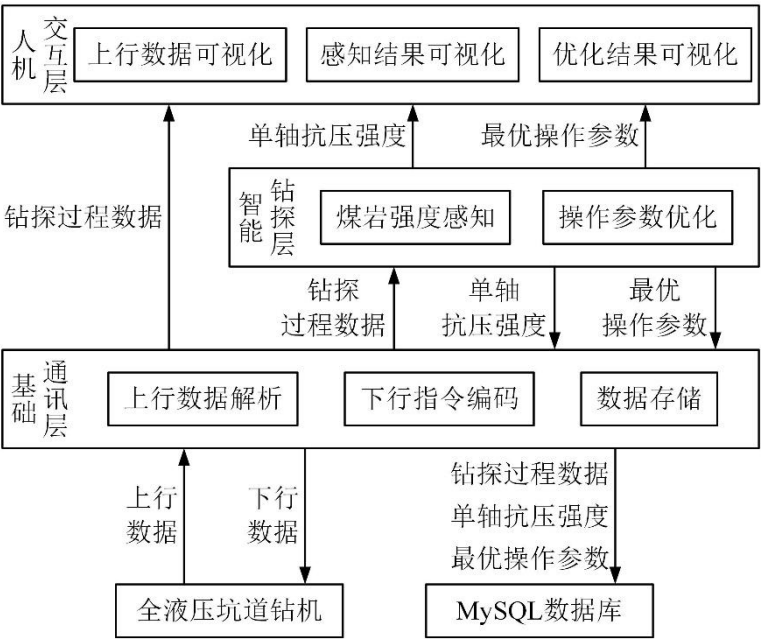


图 6 操作参数优化系统的程序架构

煤矿井下钻探过程操作参数优化系统由基础通讯层、智能钻探层、人机交互层三部分组成。

（1）基础通讯层。该部分负责上位机与全液压坑道钻机、MySQL 数据库之间的数据交互。具体的，该部分接收全液压坑道钻机发送的上行数据，将其解析为具有物理意义的钻探过程数据，这些过程数据包括传感器数据、钻机工序信息、阀口开度数据三类；该部分按照一定的帧格式将最优操作参数编码为下行数据，从而调整全液压坑道钻机的运行状态；该部分利用 SQL 语句将钻探过程数据、单轴抗压强度、最优操作参数保存到数据库中，以便开展后续研究。

（2）智能钻探层。该部分基于钻机工序信息、传感器数据开展煤岩强度感知、操作参数优化，得出当前煤岩的单轴抗压强度、最优操作参数。

（3）人机交互层。该部分负责在上位机可视化界面中显示重要的数据，具体包括钻机工序信息、传感器数据、单轴抗压强度、最优操作参数四类。

可视化界面显示钻机状态、全自动状态、程序执行状态三个钻机工序信息，动力头位移、给进速度、动力头转速三个传感器数据，以及单轴抗压强度、给进速度推荐值（最优给进速度）、动力头转速推荐值（最优动力头转速）。

五、研究进度安排

毕业相关进度安排如表 1 所示。

表 1 毕业进度安排表

时间	任务
第 1~2 周	进行方案设计并完成开题答辩，针对评委老师的意见，修改并完善开题报告，修正后期的研究计划
第 3~5 周	阅读大量文献，建立钻柱扭向-轴向耦合动力学模型，设计基于固有比能的煤岩强度感知方法。
第 6~7 周	基于现场采集的数据，使用 MATLAB/Simulink 对基于固有比能的煤岩强度感知方法进行仿真验证。
第 8~9 周	完成毕业设计中期答辩
第 10~12 周	设计基于模糊推理的操作参数优化模型，构建模糊隶属度函数和规则。
第 13~14 周	实现条件触发机制并基于 MATLAB/Simulink 进行仿真分析。通过地面实验基地开展不同强度混凝土岩样实验以及煤矿井下作业现场实验，验证模型普适性。
第 15 周	撰写毕业论文，完成毕业设计验收
第 16 周	完善毕业论文研究工作，制作毕业论文汇报 PPT 完成答辩

六、参考文献

[1] 杨方亮. 新型能源体系建设背景下煤炭产业发展前景分析[J]. 中国煤炭, 2024, 50 (12): 11-24.

[2] 王晓蕾, 程俊杰, 姬治岗. 我国煤矿安全形势变化特征——基于数理统计分析[J]. 数学的实践与认识, 2024, 54 (11): 54-62.

- [3] 杨科, 郭鹏慧, 袁亮, 曹安业, 张永将, 马衍坤, 李家卓. 深部开采煤矿典型动力灾害孕灾主控因素与机制研究进展[J]. 煤炭学报, 50 (03): 1443-1457.
- [4] 赵建国, 赵江鹏, 许超, 吴智峰. 煤矿井下复合定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46 (4): 202-206.
- [5] Li B, Zhu X, Dong L. Axial transfer characteristics of a drillstring in conjunction with bit penetration behavior in horizontal wells [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 240: 212989.
- [6] 李维均. 定向钻井摩阻分析及防托压新技术研究[D]. 西南石油大学, 2017.
- [7] 豆旭谦, 王力, 王毅. 张集煤矿灰岩顺层定向钻进托压效应及影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51 (3): 168-172.
- [8] 石智军, 李泉新, 姚克. 煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45 (6): 2217-2224.
- [9] 石智军, 姚克, 田宏亮. 煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47 (5): 22-28.
- [10] 赵亦辉, 赵友军, 周展. 综采工作面采煤机智能化技术研究现状[J]. 工矿自动化, 2022, 48 (2): 11-18.
- [11] 邢望, 姚克, 王龙鹏, 翁寅生. 煤矿坑道钻机电液控制方法综述[J]. 煤矿机械, 2023, 44 (2): 131-133.
- [12] 李泉新. 煤矿井下复合定向钻进及配套泥浆脉冲无线随钻测量技术研究[D]. 煤炭科学研究总院, 2018.
- [13] 王耀民. 煤矿井下定向钻进减阻技术研究与应用[D]. 煤炭科学研究总院, 2022.
- [14] 马斯科. 考虑地层变化不确定性的钻进过程钻压鲁棒控制[D]. 中国地质大学, 2023.
- [15] Cheng J, Wu M, Wu F, Lu C, Chen X, Cao W. 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.
- [16] Ghasemlooia A, Rideout D G, Butt S D. A review of drillstring vibration modeling and suppression methods [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 131: 150-164.

- [17] Li Z, Zhang C, Song G. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells [J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, 151: 194-212.
- [18] Barreau M, Gouaisbaut F, Seuret A. Practical stability analysis of a drilling pipe under friction with a pi-controller [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29 (2): 620-634.
- [19] Sánchez L, Lapo M, Zorrilla O. Torque and drag analysis of a drill string using sequential monte carlos methods [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 1-12.
- [20] Yigit A S, Christoforou A P. Coupled axial and transverse vibrations of oilwell drillstrings [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 195 (4): 617-627.
- [21] Shor R J, Kandala S S, Gildin E. Progress toward an open source drilling community: Contributing and curating models [C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Galveston, Texas, USA, Mar. 1, 2022, 208794-MS.
- [22] Pournazari P, Fernández B R, Van Oort E. Robust weight-on-bit tracking in drilling operations: a stochastic, nonlinear approach [C]. *Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*, Tysons, Virginia, USA, Oct. 11-13, 2017, V003T43A003.
- [23] Hovda S. Semi-analytical model of the axial movements of an oil-well drillstring in vertical wellbores [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 417: 227-244.
- [24] Choe Y M, Jin H S, Kim G S. Axial-torsional mode correlation analysis of a drill string system with non-smooth characteristic [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 218: 110870.
- [25] Luciano P M, Marcelo A S. Drill-string vibration analysis considering an axial-torsional-lateral nonsmooth model [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 438: 220-237.
- [26] Aarsnes U J F, Shor R J. Torsional vibrations with bit off bottom: Modeling, characterization and field data validation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 712-721.
- [27] Aarsnes U J F, Wouw N. Axial and torsional self-excited vibrations of a distributed drill-string [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 444: 127-151.

- [28] Di Meglio F, Lamare P O, Aarsnes U J F. Robust output feedback stabilization of an ode–pde–ode interconnection [J]. *Automatica*, 2020, 119: 109-159.
- [29] Wu M, Cheng J, Lu C, Chen L, Chen X, Cao W. 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.
- [30] 李子丰, 张永贵, 侯绪田, 刘卫东, 徐国强. 钻柱纵向和扭转振动分析[J]. 工程力学, 2004, 21 (6): 203-210.
- [31] Kandala S S, Shor R. Evolution of static and kinetic friction in a horizontal well using an adaptive model-based observer: Field validation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109663.
- [32] 吴泽兵, 马德坤, 况雨春. 钻柱纵向振动仿真分析[J]. 石油学报, 2000, 21(3): 73-76.
- [33] 陈家琦. 滑动导向钻井系统动力学及钻进控制研究[D]. 清华大学, 2021.
- [34] Ke C, Song X. Computationally efficient down-hole drilling system dynamics modeling integrating finite element and transfer matrix [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2017, 139 (12): 121003.
- [35] 刘建勋. 复杂结构井钻柱系统动力学行为与提速提效机理研究[D]. 西南石油大学, 2021.
- [36] Tian J, Yang Y, Yang L. Vibration characteristics analysis and experimental study of horizontal drill string with wellbore random friction force [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2017, 87: 1439-1451.
- [37] Khulief Y A, Al-Naser H. Finite element dynamic analysis of drillstrings [J]. *Finite elements in analysis and design*, 2005, 41 (13): 1270-1288.
- [38] Liu W, Ni H, Wang Y, Guo Y, Gao Y, He P. Dynamic modeling and load transfer prediction of drill-string axial vibration in horizontal well drilling [J]. *Tribology International*, 2023, 177: 107986.
- [39] 程伟. 基于围岩感知的锚钻装备推进回转协同自适应控制研究[D]. 中国矿业大学, 2018.
- [40] 房昕, 于萍. 金刚石钻进机械钻速方程[J]. 四川水泥, 2017, 255(11): 320-322.
- [41] 孙维丽, 周淑芳, 马玉华, 等. 基于 DOE 模型的掘进机性能预测与优化研究

- [J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 146-150.
- [42] 李崑岩. 分形理论及修正钻速方程预测石膏夹层岩石可钻性[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(2): 52-54.
- [43] 赵颖, 孙挺, 杨进, 等. 基于极限学习机的海上钻井机械钻速监测及实时优化[J]. 中国海上油气, 2019, 31(6): 138-142.
- [44] 柳军, 严顾鑫, 郭晓强, 等. 基于灰色-加权马尔可夫的机械钻速动态预测[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(7): 1727-1739.
- [45] 许明泽, 韦明辉, 邓霜, 等. 多模型集成学习在机械钻速预测中的新应用[J]. 计算机科学, 2021, 48(S1): 619-622.
- [46] Encinas M A, Tunkiel A T, Sui D. Downhole data correction for data-driven rate of penetration prediction modeling [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 109904.
- [47] Bizhani M, Kuru E. Towards drilling rate of penetration prediction: Bayesian neural networks for uncertainty quantification [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219: 111068.
- [48] Hazbeh O, Aghdam S K, Ghorbani H, *et al.* Comparison of accuracy and computational performance between the machine learning algorithms for rate of penetration in directional drilling well [J]. *Petroleum Research*, 2021, 6(3): 271-282.
- [49] Mahmoodzadeh A, Nejati H R, Mohammadi M, *et al.* Forecasting tunnel boring machine penetration rate using LSTM deep neural network optimized by grey wolf optimization algorithm [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 209: 118303.
- [50] Gan C, Cao W H, Liu K Z, *et al.* A novel dynamic model for the online prediction of rate of penetration and its industrial application to a drilling process [J]. *Journal of Process Control*, 2022, 109: 83-92.