



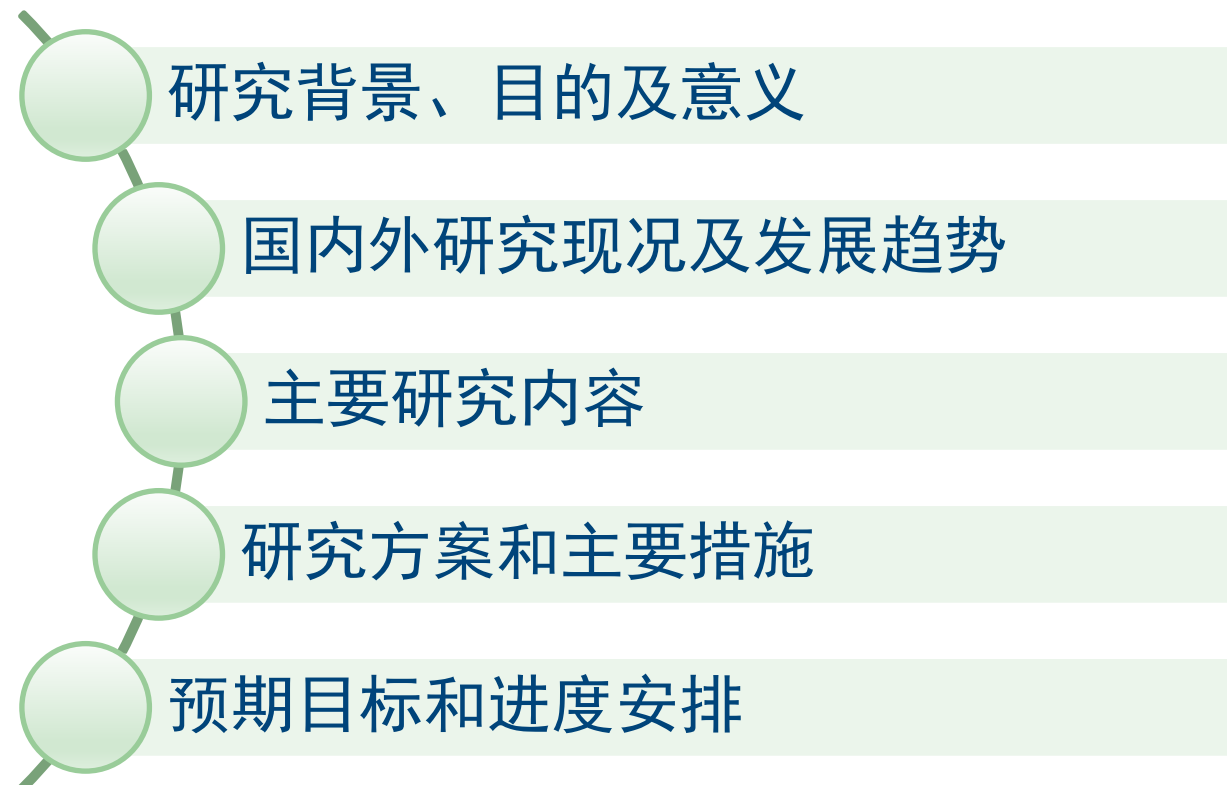
煤矿井下钻进过程煤岩强度感知与 操作参数优化

汇报人： 曾康慧

指导老师： 吴 敏 教 授

陆承达 教 授

目录



第一部分



研究背景、目的及意义

➤ 研究背景

- ❑ 煤炭是我国主体能源，支撑国民经济发展
- ❑ 瓦斯事故长期威胁煤矿安全开采，事故占比超40%
- ❑ 深部开采致低瓦斯矿井向高瓦斯转化，治理难度陡增
- ❑ 煤矿井下钻进技术是瓦斯抽采的重要手段
- ❑ 煤岩强度是影响钻进参数选择的关键因素
- ❑ 煤矿井下钻机自动化程度低，无法实时优化参数

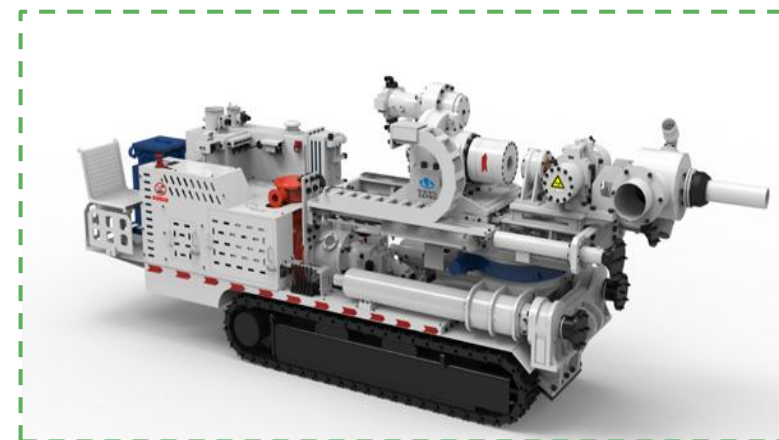


图1 煤矿井下钻机

➤ 研究意义

- ❑ 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，开发具有工程应用价值的优化系统
- ❑ 提高钻进效率和孔眼质量，避免井下事故，减少钻头磨损，提升煤矿井下钻进的自动化与智能化水平

第二部分



国内外研究现状及发展趋势

➤ 钻柱系统动力学模型

□ 集总参数模型

- ✓ 基于单自由度集总参数模型，将钻柱在扭转方向被建模为一个扭摆的钻柱模型
(Yigit A S et al. *Journal of Sound and Vibration*, 1996)
- ✓ 基于二自由度集总参数模型，建立的钻柱的扭转-轴向耦合系统
(Shor R et al. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2022)
- ✓ 基于拉格朗日方法求解系统参数的三自由度集总参数模型
(Pournazari P, et al. *ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*, 2017)

- ✓ 优点：计算效率高，适用于实时控制和快速仿真
- ✓ 缺点：忽略了分布效应，不能准确描述钻柱的空间变形，难以精确描述钻柱振动的复杂特性

国内外研究现状及发展趋势

➤ 钻柱系统动力学模型

□ 分布式参数模型

- ✓ 针对钻柱扭转运动，考虑钻柱摩阻，建立适用于水平井的分布式参数模型，分析摩擦系数对粘滑振动的影响

(Aarsnes U J F. *et al. Journal of Sound and Vibration*, 2018)

- ✓ 针对钻柱纵向运动，引入库伦摩擦源项，基于波动方程的分布式参数钻柱模型

(Kandala S S. *et al. Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022.)

- ✓ 优点：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
- ✓ 缺点：计算复杂度高，边界条件处理难度大

国内外研究现状及发展趋势

➤ 钻柱系统动力学模型

□ 有限元模型

- ✓ 考虑井壁摩阻和钻柱屈曲行为的钻柱有限元模型

(刘建勋. 西南石油大学, 2021)

- ✓ 考虑每个离散质量单元随机摩擦力的有限元模型

(Liu W. *et al. Tribology International*, 2023)

- ✓ 优点：能够更好地反映钻柱全频段的运动规律

- ✓ 缺点：计算复杂度高，实时性受限

建立上述模型可以更好地用于煤岩强度感知算法的设计

国内外研究现状及发展趋势

➤ 钻进过程操作参数优化

□ 基于数据回归的钻探速度模型

- ✓ 杨格模型

(程伟. 中国矿业大学, 2018.)

- ✓ 修正杨格模型

(沈琮. 中国矿业大学, 2023.)

- ✓ 钻探速度的多元回归模型

(Zribi F , et al. *Journal of Sound and Vibration*, 2023.)

- ✓ 优点：数学表达简洁，通过调整方程系数即可适应不同钻探场景

- ✓ 缺点：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

国内外研究现状及发展趋势

➤ 钻进过程操作参数优化

□ 基于机器学习的钻探速度模型

✓ 基于随机森林的钻速预测

(Liu Y, et al. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018)

✓ 基于混合蝙蝠算法的钻速优化结构

(Gan, et al. *Journal of Process Control*, 2021.)

✓ 优点：精度优于数据回归模型

✓ 缺点：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

国内外研究现状及发展趋势

➤ 现存问题分析

❑ 煤岩强度感知模型缺乏钻柱动力学基础

- ✓ 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

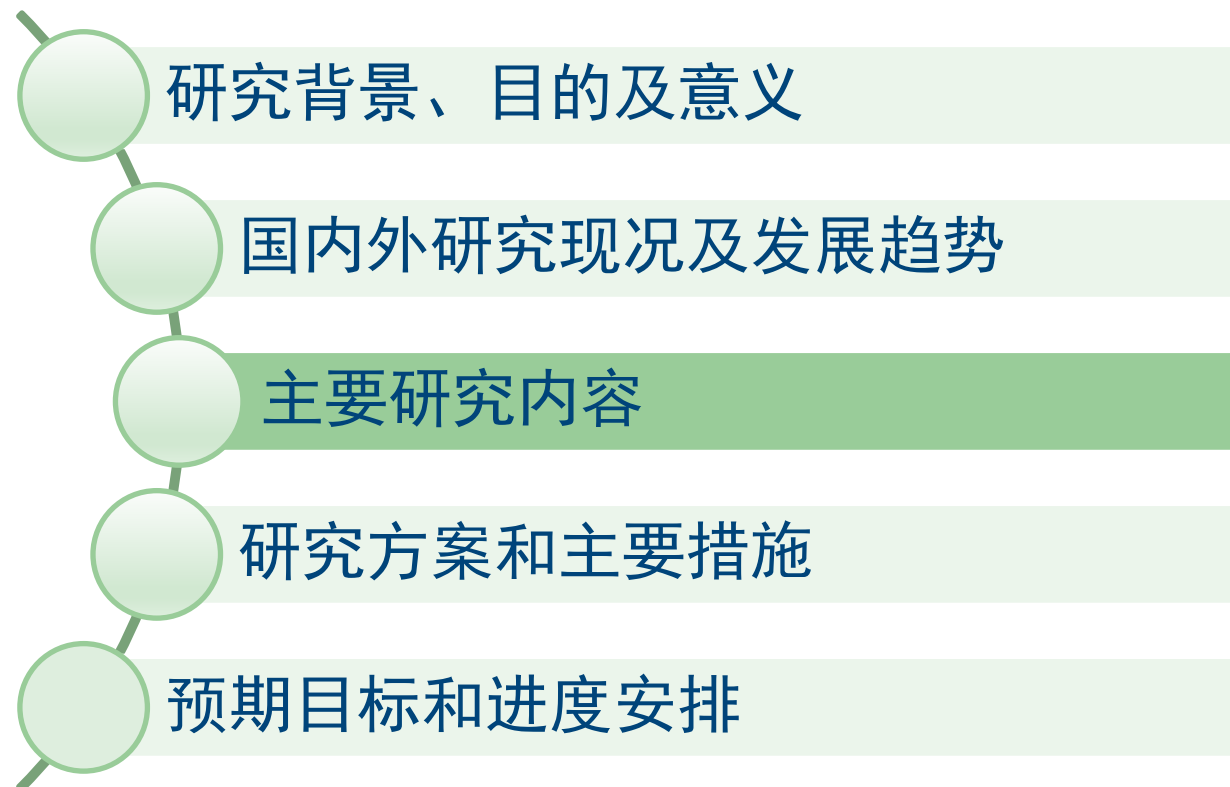
❑ 操作参数优化模型未充分考虑生产安全

- ✓ 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

❑ 模型精度与实时性之间的矛盾

- ✓ 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。

第三部分

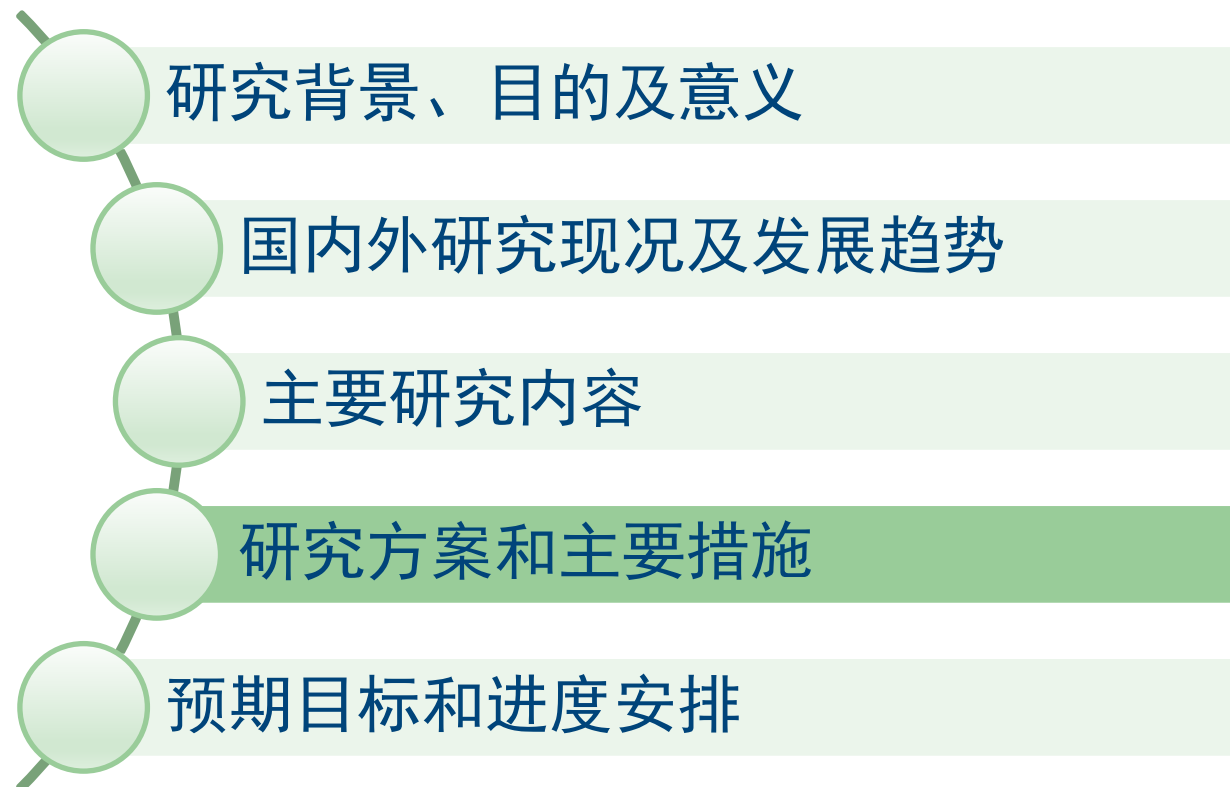




主要内容

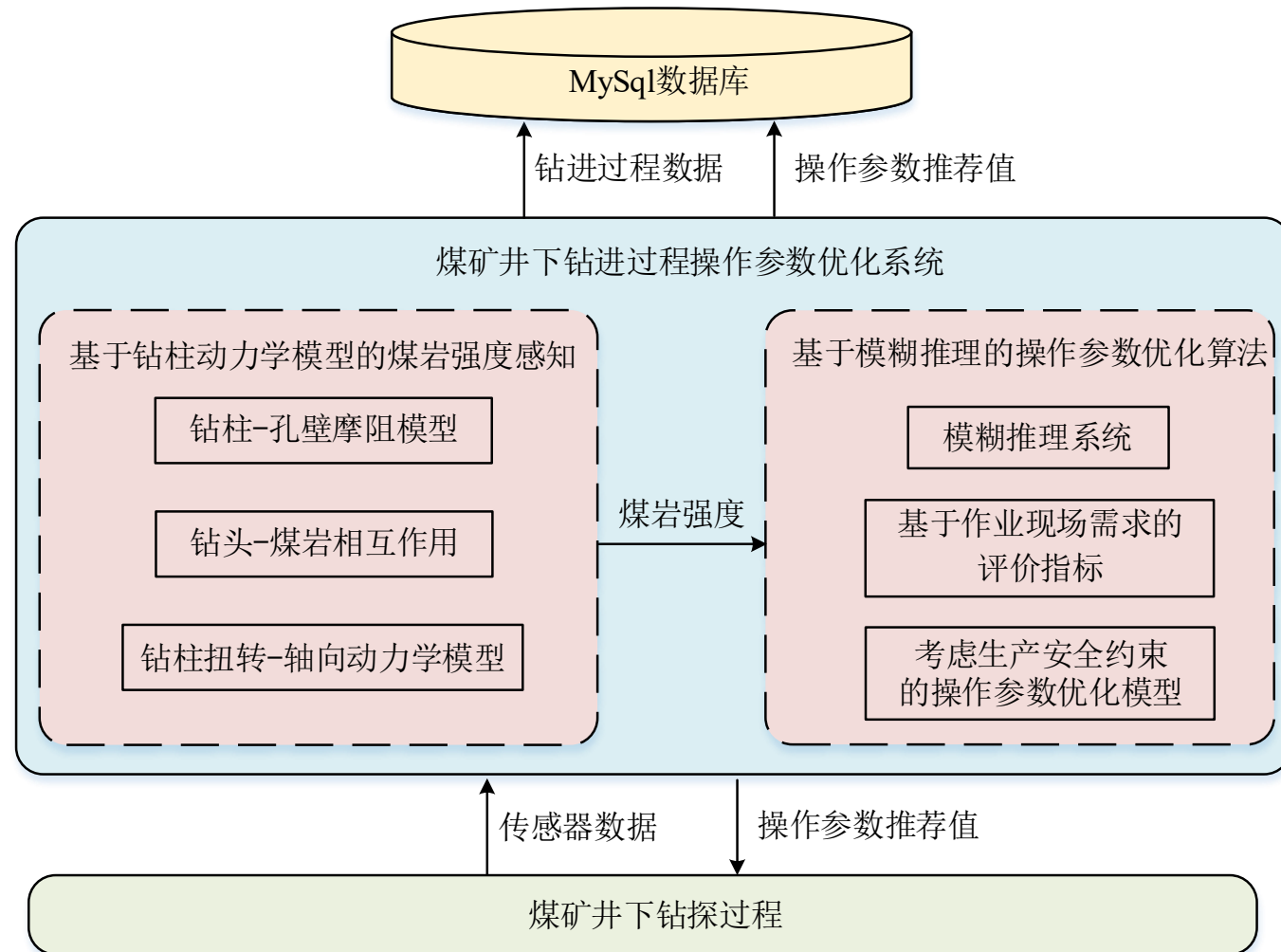
- 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型
 - 煤矿井下钻进过程与工艺分析
 - 钻柱扭向-轴向耦合动力学模型
 - 基于固有比能的煤岩强度感知算法
- 基于模糊推理的操作参数优化方法
 - 模糊推理系统设计
 - 模糊推理系统实现与仿真
- 煤矿作业现场应用
 - 操作参数优化系统
 - 地面实验情况

第四部分



研究方案和主要措施

➤ 研究方案



研究方案和主要措施

➤ 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

❑ 煤矿井下钻进过程与工艺分析

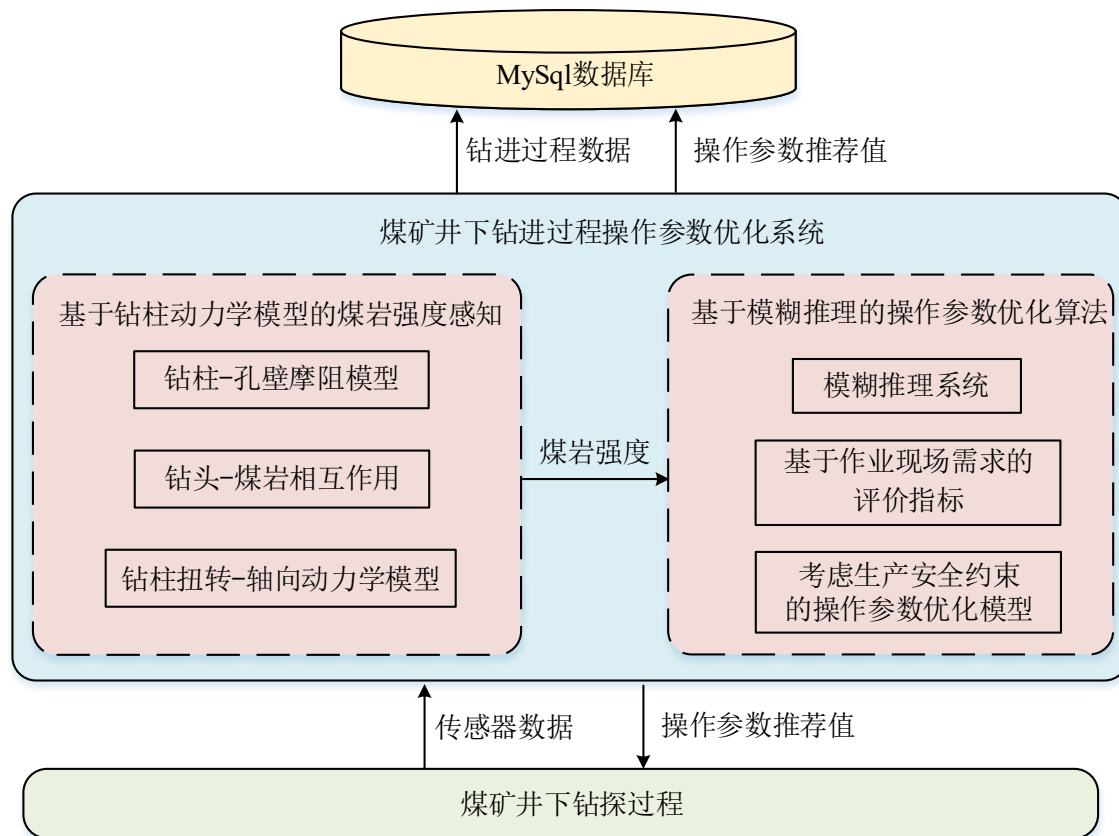
- ✓ 扭转动力学
- ✓ 轴向动力学
- ✓ 钻头-岩石相互作用

❑ 钻柱扭向-轴向耦合动力学模型

- ✓ 集总参数方法
- ✓ 有限元思想

❑ 基于固有比能的煤岩强度感知算法

- ✓ 固有比能值越大表示煤岩强度越高
- ✓ 固有比能值越小则表示煤岩强度越低



研究进展

基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

□ 钻柱扭向-轴向耦合动力学模型

$$M\dot{v} = F_a - F_m - W - f,$$

- ✓ v 为孔口的给进速度
- ✓ M 为钻柱的总重量，可表示为：

$$M = \sum_{i=1}^n M_i,$$

- ✓ M_i 为每一个钻柱单元的质量
- ✓ n 为钻柱单元的总数量
- ✓ F_a 为液压系统输出的轴向给进压力 $F_a = P_{in} S$,
- ✓ P_{in} 为给进液压油缸的给进压力
- ✓ S 为液压油缸的有效面积

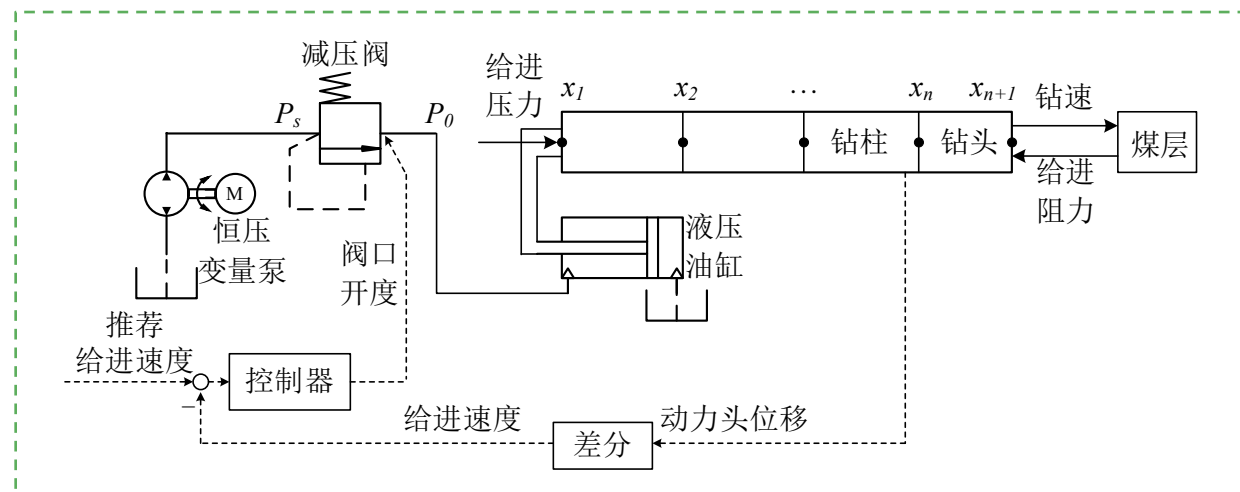


图2 钻机给进系统结构图

研究进展

➤ 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

□ 基于固有比能的煤岩强度感知算法

$$M\dot{v} = F_a - F_m - W - f,$$

✓ F_m 为弯曲的钻柱在竖直方向上的重力分量 $F_m = \sum_{i=1}^n M_i g \cos \theta_i,$

✓ θ_i 是每一个钻柱单元的弯曲倾角

✓ f 为钻柱受到的摩擦力 $f = f_v + f_c,$

✓ f_v 是粘性摩擦力 $f_v = k_f v,$

✓ f_c 是库伦摩擦力 $f_c = \sum_{i=1}^n M_i g (\sin \theta_i \mu B_f \text{Sign}(v)),$

✓ W 是孔底作用于钻头的给进阻力 $W = 2r\varepsilon(\frac{\pi\zeta v}{\dot{\phi}} + \ell)$

✓ ε 为固有比能, 用于描述钻头所破碎煤岩的强度

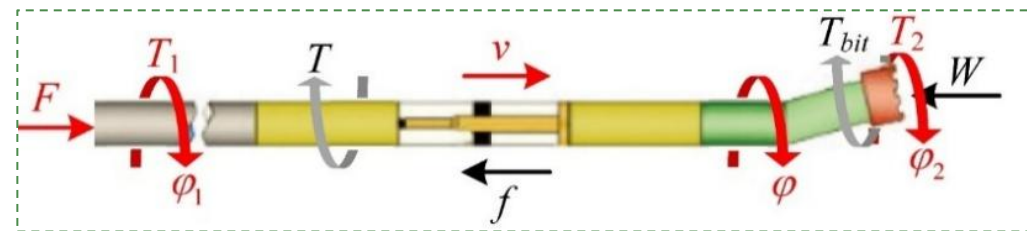


图3 钻柱受力示意图

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

研究进展

➤ 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型

□ 基于固有比能的煤岩强度感知算法验证

- ✓ 验证数据集：安徽淮北许图疃矿场2025年3月6日钻进数据
- ✓ 钻进深度：60-70m
- ✓ 钻进参数：动力头给进压力、动力头给进速度、动力头转速、煤岩类型等
- ✓ 数据量：165985条
- ✓ 钻进现场的岩屑进行煤岩强度分析：砂岩 > 煤矸石 > 煤



煤



泥岩



砂岩

研究进展

- 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型
 - ❑ 基于固有比能的煤岩强度感知算法验证
 - ✓ 当固有比能下降时，此时的地层有极大可能为煤层

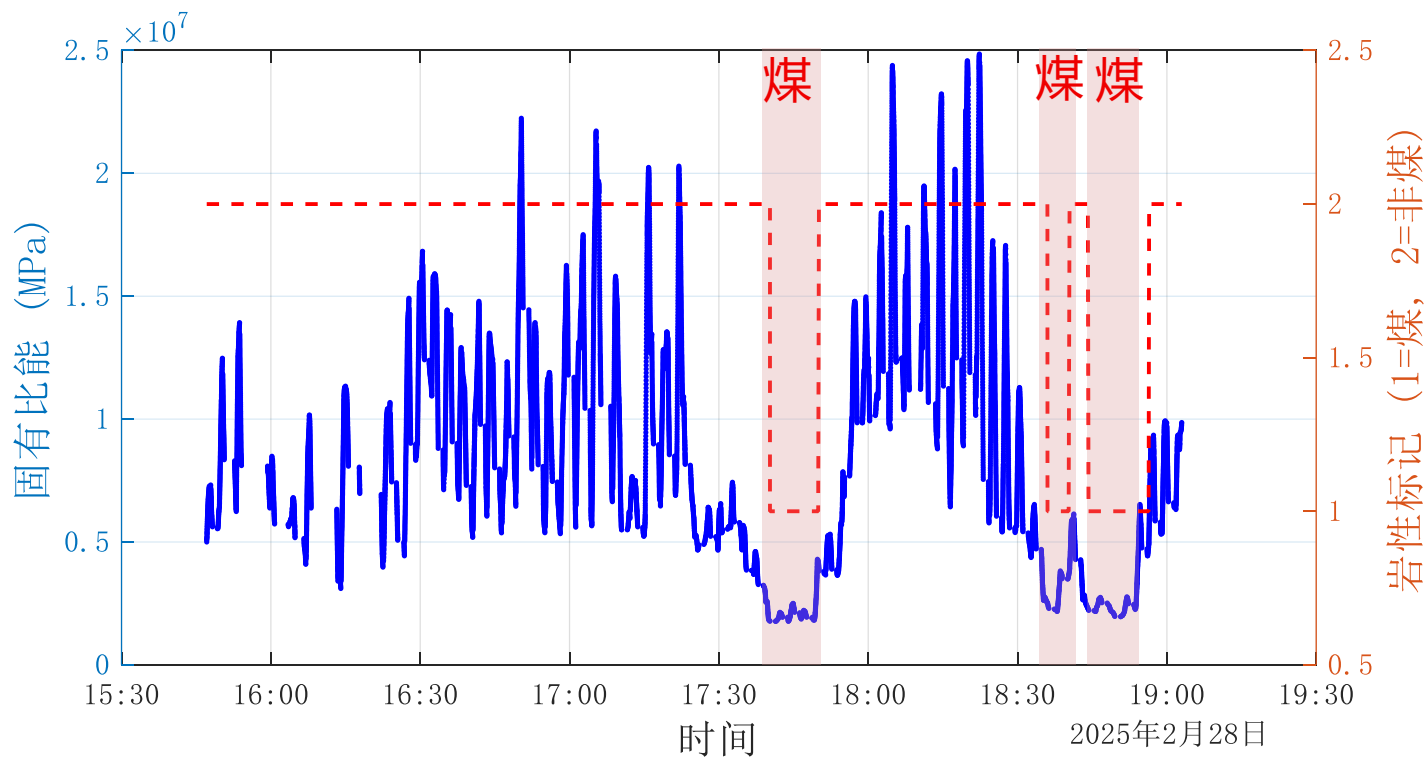


图4 煤岩强度感知验证

研究方案和主要措施

➤ 基于模糊推理的操作参数优化方法

❑ 钻进过程煤岩强度评价指标设计

✓ 基于固有比能

❑ 模糊推理系统

✓ 模糊推理隶属度函数

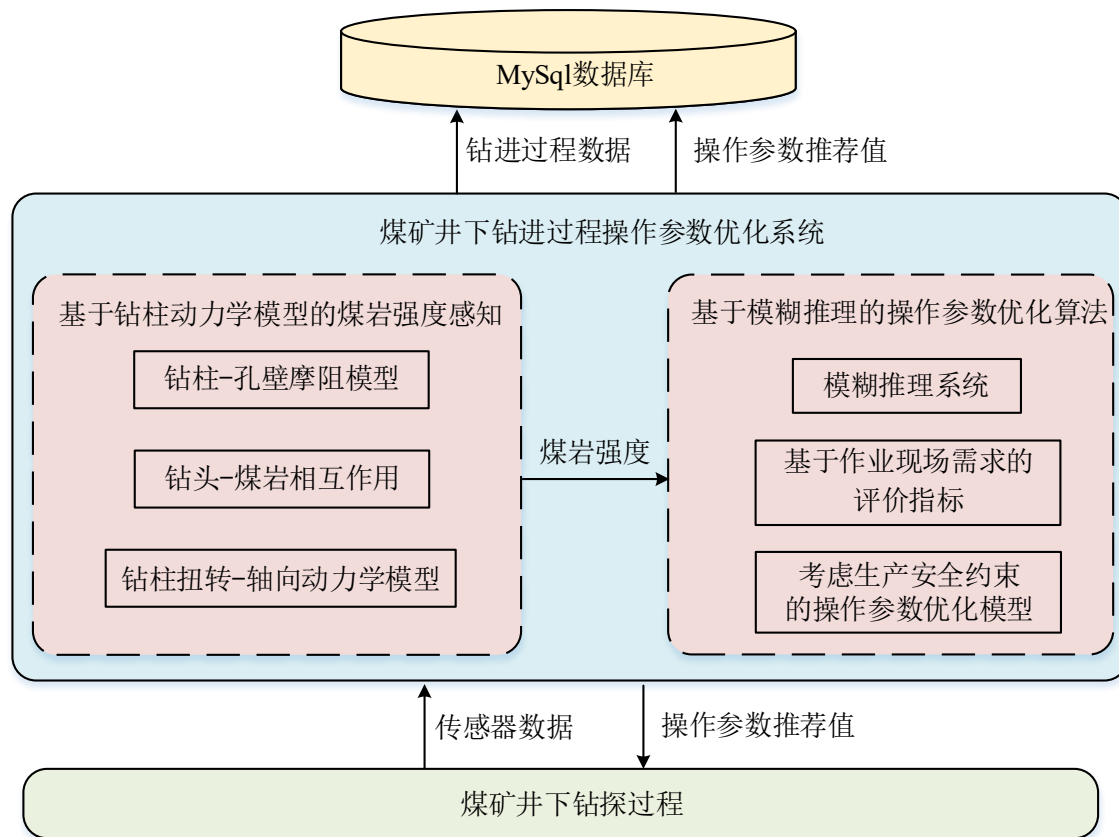
✓ 模糊推理规则

➤ 煤矿现场应用实验

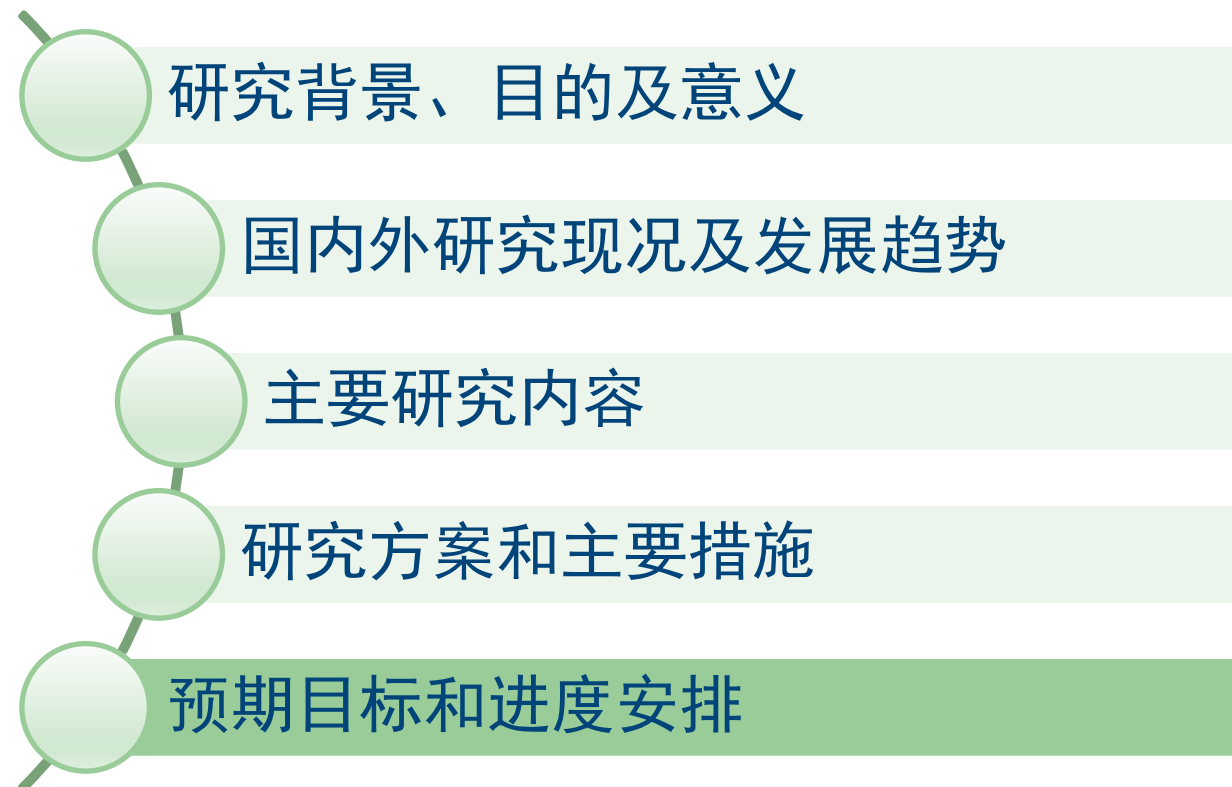
❑ 操作参数优化系统

❑ 现场实验方案设计

❑ 现场实验及结果分析



第五部分



预期目标和进度安排

➤ 预期目标

- ❑ 建立基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型
- ❑ 设计基于模糊推理的操作参数优化方法
- ❑ 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

➤ 进度安排

- ❑ 3月底前，完成煤岩强度感知模型的建立
- ❑ 4月底前，完成操作参数优化方法的初步设计
- ❑ 5月底前，将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，并完成毕业论文



谢谢
恳请老师批评指正！