

# 中国地质大学（武汉）未来技术学院 本科毕业论文（设计）中期报告

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 4 月 1 日



## 一、研究内容及任务

煤矿井下钻探是实现瓦斯抽采和地质探测的关键工艺，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。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深入分析，导致钻进效率低下、设备过载风险增加以及钻探过程智能化程度不足。针对上述问题，本课题充分考虑钻进过程煤岩强度的动态变化，研究基于模糊推理的操作参数优化方法，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，设计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煤矿井下操作参数智能优化系统。

### 1.1 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。

## 1.2 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

## 1.3 关键理论技术

基于煤岩强度感知的煤矿井下钻进过程给进速度优化与控制研究需要的关键理论和技术包括：钻柱动力学、有限元法、煤岩强度描述、模糊推理、MATLAB/Simulink 仿真技术等。

## 二、研究进展情况

本课题的研究目的是考虑钻进过程煤岩强度不确定性问题，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操作参数智能优化系统。研究主要从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方法与煤矿作业现场应用三个方面展开，

目前已经建立了基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型，初步基于模糊推理的操作参数优化方法的设计，本节对具体的建模过程和初步的操作参数优化方法设计进行阐述。

### 2.1 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。

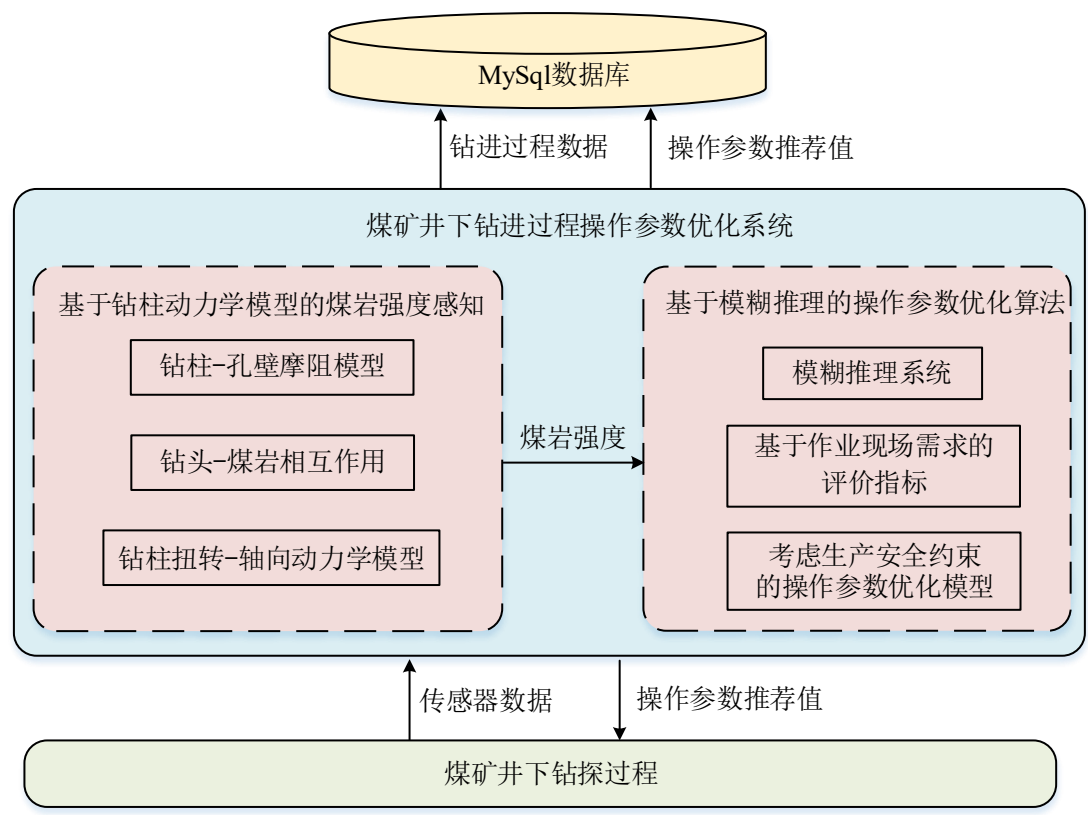


图 1 研究方案

## 2.2 主要措施

本课题的主要研究内容为考虑煤岩强度变化的钻柱动力学模型、煤岩强度感知与给进速度优化算法、给进速度控制器设计，具体的实施措施如下。

### (1) 考虑煤岩强度变化的钻柱动力学模型

煤矿井下钻探过程使用全液压坑道钻机钻制钻孔，按照具体功能，煤矿井下钻探过程可以被划分为三个子过程：钻头破碎煤岩、冲洗介质排出煤岩屑、钻机加卸钻杆。其中，钻头破碎煤岩发生在钻孔底部，钻头与未知煤岩层接触的区域；冲洗介质排出煤岩屑发生在钻孔与钻杆之间的空隙；钻机加卸钻杆发生在钻机动头与钻杆连接的部分。煤矿井下钻探过程的示意图如图 2 所示，

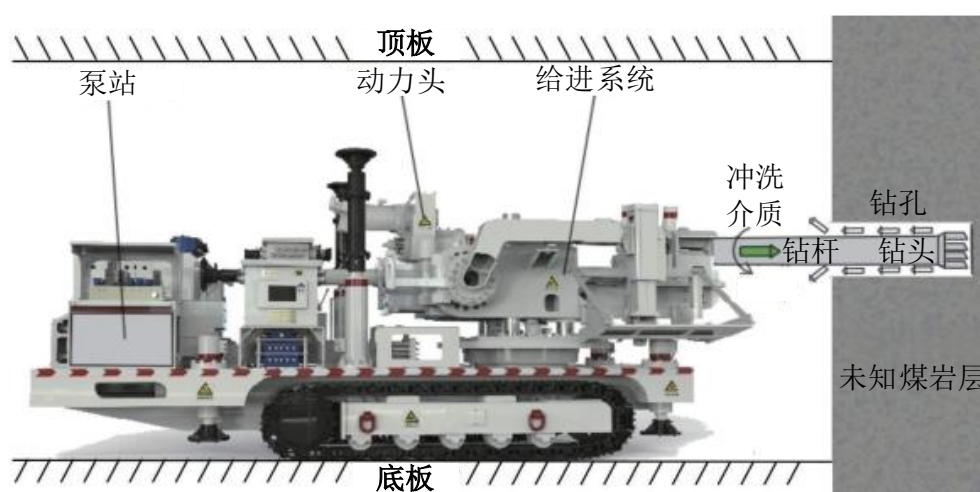


图 2 煤矿井下钻进过程的示意图

如图 3 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。

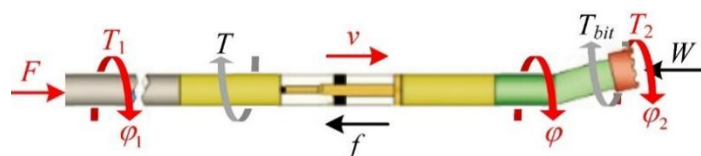


图 3 钻柱受力示意图

钻机回转系统结构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。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：

$$J_L \dot{\phi} = D_m P_L - T_L, \quad (1)$$

其中,  $J_L$  为液压马达的转动惯量,  $\phi$  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, 钻机的给进系统如图 4 所示。

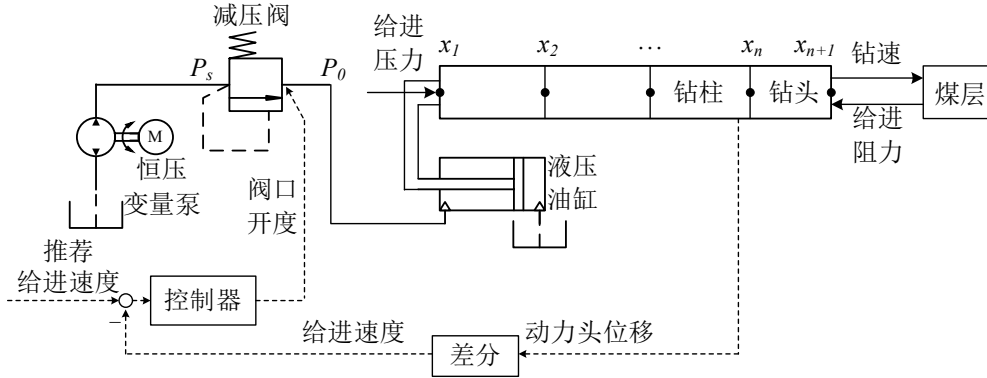


图 4 钻机给进系统结构图

钻柱的动力学模型可以表示为:

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

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,  $F_m$  为弯曲的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。其中,  $F_m$  和  $f$  是造成钻柱托压问题的主要因素。

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:

$$F_a = P_{in} S, \quad (4)$$

式中,  $P_{in}$  为给进液压油缸的给进压力,  $S$  为液压油缸的有效面积。

弯曲的钻柱在竖直方向上的重力分量可表示为:

$$F_m = \sum_{i=1}^n M_i g \cos \theta_i, \quad (5)$$

式中,  $\theta_i$  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。

钻头-煤岩相互作用是煤岩强度感知的核心。孔底作用于钻头的给进阻力可表示为:

$$W = W_c + W_f, \quad (6)$$

式中,  $W_c$  和  $W_f$  分别表示推力的切削分量和摩擦分量, 与常规回转钻进工艺不同, 煤矿井下复合定向钻进工艺中的钻柱系统包括螺杆马达钻具总成, 破岩动力由动力头传递给螺杆马达钻具总成的扭矩和螺杆马达带动钻头回转的扭矩组成。钻头与煤岩之间的相互作用由螺杆马达弯曲段角速度  $\dot{\phi}$ 、钻头角速度  $\dot{\phi}_2$  与钻速  $v$  之间的关系来表征, 它描述了钻头上的扭矩  $T_{bit}$  和轴向作用力  $W$ 。因此, (5) 式中的切削和摩擦分量可以表示为:

$$W_c = \varepsilon \zeta r d_c, \quad (7)$$

$$W_f = r \ell \sigma, \quad (8)$$

$$d_c \approx \frac{2\pi v}{\max\{\dot{\phi}, \kappa\}}, \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon$  为固有比能, 用于描述钻头所破碎煤层的硬度;  $\zeta$  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;  $\kappa$  是一个非常小的正数;  $\sigma$  表示作用在磨损面上的正应力的值,  $\sigma = 2\varepsilon$ ;  $\ell$  表示等效磨损面;  $\mu$  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，表明煤岩强度越高；反之，则强度越低。该公式通过实时传感器数据量化煤岩强度，为后续参数优化提供了关键输入。

摩擦模型通过有限元方法离散钻柱单元，精确捕捉孔壁摩擦对钻柱运动的影响。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， $k_f$  为粘性摩擦系数。

$f_c$  是钻柱和孔壁之间产生的库伦摩擦力，可表示为：

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

这里， $\mu_b$  为钻柱与孔壁之间的干摩擦系数，可表示为：

$$\mu_b(v) = \mu_{cb} + (\mu_{cb} - \mu_{sb}) e^{-\gamma_b |v|}, \quad (14)$$

其中  $\mu_{cb}$  和  $\mu_{sb}$  分别为库伦摩擦系数和静摩擦系数， $\gamma_b$  为速度衰减率。

$B_f$  为浮力系数，浮力系数可表示为：

$$B_f = \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_s}. \quad (15)$$

式中， $\rho_s$  为钻杆和 BHA 材料的密度， $\rho_m$  为钻井液泥浆密度。

本次试验数据采集于安徽淮北许图疃矿场，施工目的是实现煤矿井下瓦斯抽采的自动化和智能化。钻机的钻进数据通过上位机监视并记录，钻进现场的钻机和开孔情况如图 5 所示，施工采用 ZDY6500 型煤矿用履带式全液压坑道钻机。



图 5 钻进现场的钻机和开孔情况

根据前两节的推导，进行模型仿真需要用到的参数有钻机参数、钻柱参数和 PRC，以安徽淮北许图矸矿场钻机为例，使用到的钻进参数如表 1 所示。

表 1 井场钻机参数

符号	参数	数值
$M$	单根钻杆质量	10 kg
$k_f$	粘性摩擦系数	5800 Ns/m
$\varepsilon$	固有比能	[1, 100] MPa
$\zeta$	岩石与刀具接触面之间的垂直力与水平力之比	0.7
$r$	钻头半径	0.0825 m
$\sigma$	作用在磨损平面上的法向应力的大小	$2\varepsilon$
$\ell$	等效磨损平面	0.002 m
$\mu_{cb}$	动摩擦系数	0.5
$\mu_{cb}$	静摩擦系数	0.8
$B_f$	浮力因子	0.8
$S$	液压油缸面积	9499 mm <sup>2</sup>
$\theta$	钻孔倾角	60°

通过对许矸矿钻进现场的岩屑进行岩性分析，现场的地层岩性主要为煤，煤矸石和砂岩，如图 7 所示，其硬度依次递增。

基于 2023 年 2 月 28 日 15:30 至 18:30 在安徽淮北许矸矿场采集的钻进数据，利用前文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 2.7 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3 许疃矿钻进现场的岩屑

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。

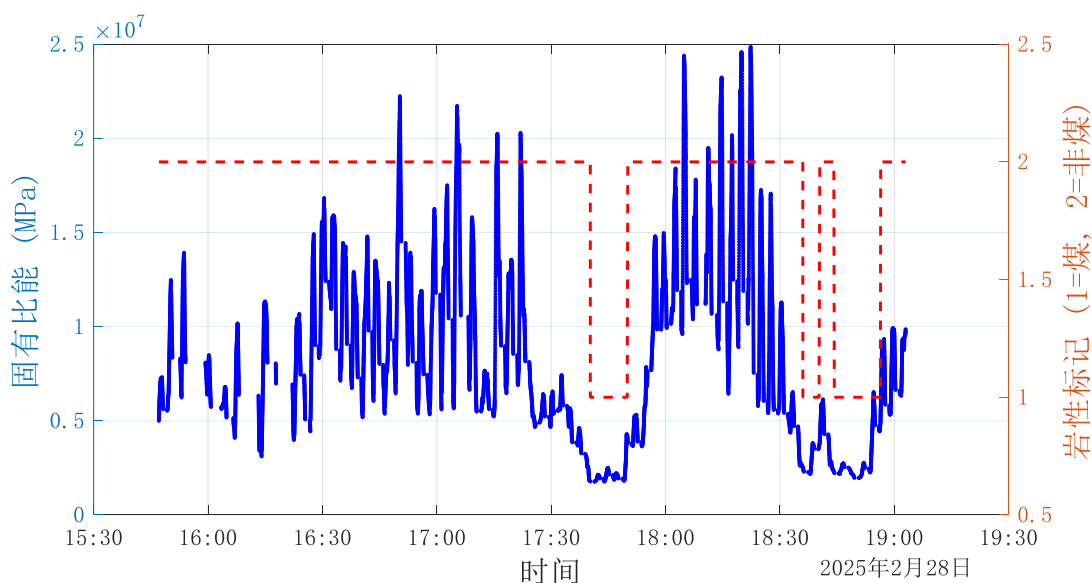


图4 煤岩强度感知验证

## (2) 基于模糊推理的操作参数优化方法

在钻进过程中，随着煤岩层性质、钻机运行状态的变化，钻机的操作参数也需要随之调节。目前，这一过程严重依赖现场司钻人员的专家经验和人工操作，这大大限制了钻机自动化、智能化水平的进一步提高。针对这一现状，本项目提出利用模糊推理系统模拟司钻人员的决策行为，进而使用计算机程序代替繁琐的人力劳动，从而提高钻机的自动化、智能化水平。

操作参数优化系统的核心目标是根据实时的煤岩强度、给进压力和扭矩数据，动态调整给进速度和动力头转速，以实现高效、安全的钻进过程。考虑到给进速度和转速的控制逻辑相对独立，本系统采用模块化设计，分为两个模糊推理

子系统：

- 1) 给进速度优化模块（fis\_feed）：以煤岩强度（固有比能，单位：MPa）和给进压力（单位：MPa）为输入，输出给进速度的推荐值（单位：mm/s）。
- 2) 动力头转速优化模块（fis\_rotary）：以煤岩强度（单位：MPa）和扭矩（单位：kN·m）为输入，输出动力头转速的推荐值（单位：r/min）。

每个子系统基于 Mamdani 型模糊推理模型，通过定义隶属度函数、模糊规则和解模糊化过程，将输入变量映射到输出参数。系统总体框架如图 8 所示。

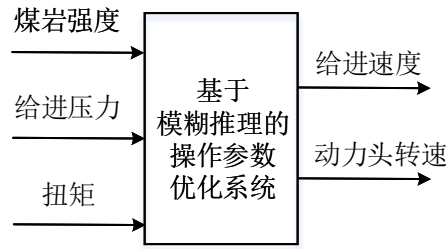


图 8 基于模糊推理的操作参数优化系统

为提高系统的实时适应性，本系统引入了基于煤岩强度突变的条件触发机制。具体而言，当煤岩强度的变化率（相邻采样点之间的差值）超过预设阈值（例如 0.5 MPa/s）时，系统触发参数推荐值的更新，以快速响应地质条件的突变。该机制的实现逻辑如下：

- 1) 计算煤岩强度的变化率：

$$\Delta\epsilon(t) = |\epsilon(t) - \epsilon(t-1)| \quad (16)$$

其中， $\epsilon(t)$ 为当前时刻的煤岩强度， $\epsilon(t-1)$ 为上一时刻的煤岩强度。

- 2) 设置触发阈值  $\theta = 0.5 \text{ MPa/s}$ ，当  $\Delta\epsilon(t) > \theta$  时，执行模糊推理并更新推荐参数。
- 3) 若未触发条件，则保持上一时刻的推荐参数不变，以避免频繁调整导致的设备振动。

该机制能够有效应对煤岩强度突变（如遇到硬岩夹层）的情况，确保参数调整的及时性和稳定性。

隶属度函数用于将输入和输出变量的数值映射到模糊集。本系统为每个输入和输出变量定义了三个模糊集：low（低）、middle（中）、high（高），并采用梯形隶属度函数（trapmf）以简化计算并保证平滑过渡。

煤岩强度、给进压力、扭矩、给进速度和动力头转速的隶属度函数的可视化

结果分别如图 9 至图 13 所示。

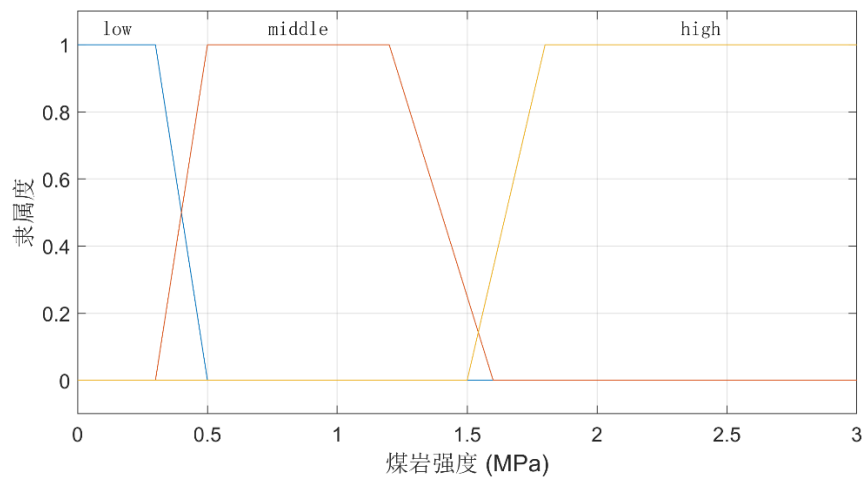


图 9 煤岩强度隶属度函数

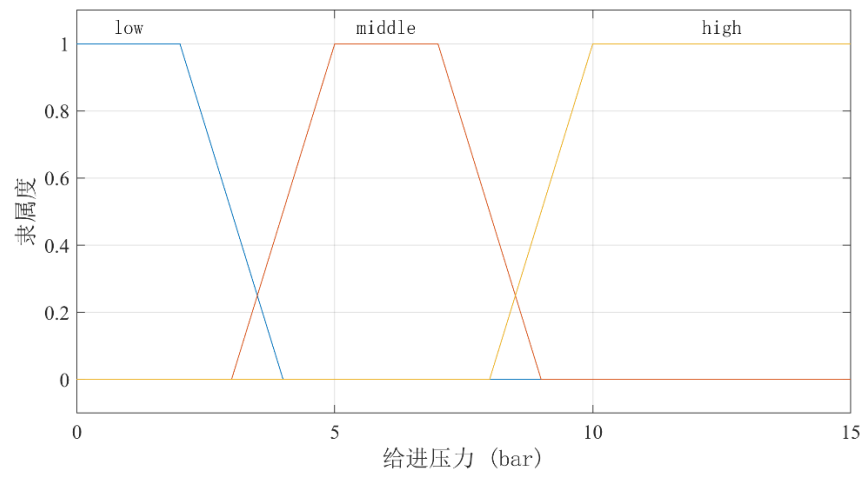


图 10 给进压力隶属度函数

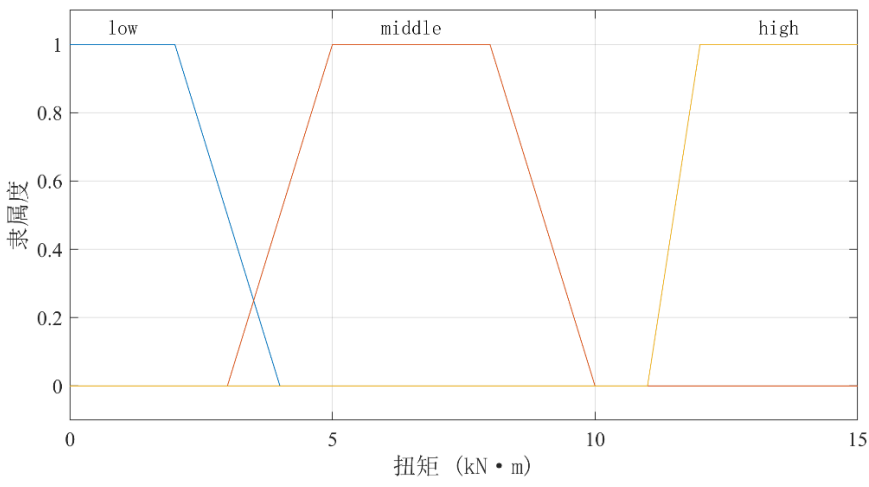


图 11 扭矩隶属度函数

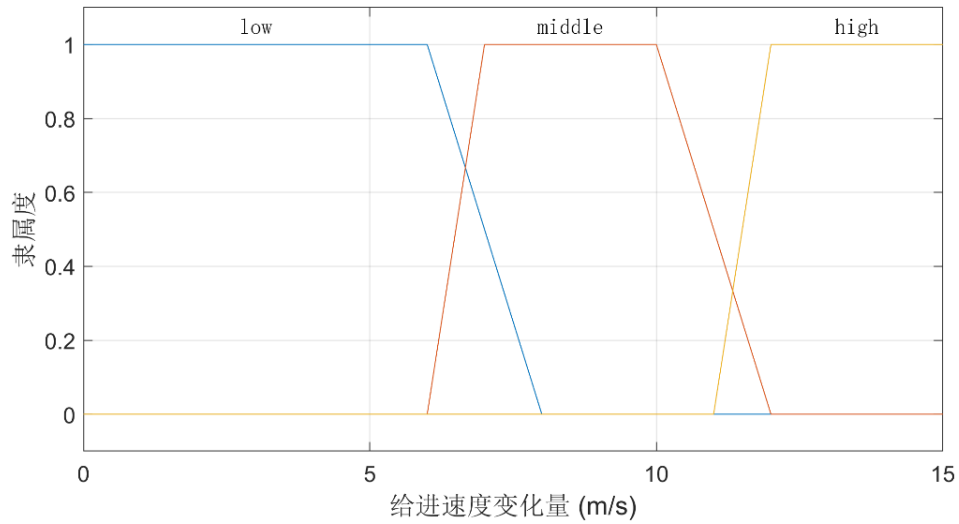


图 12 给进速度隶属度函数

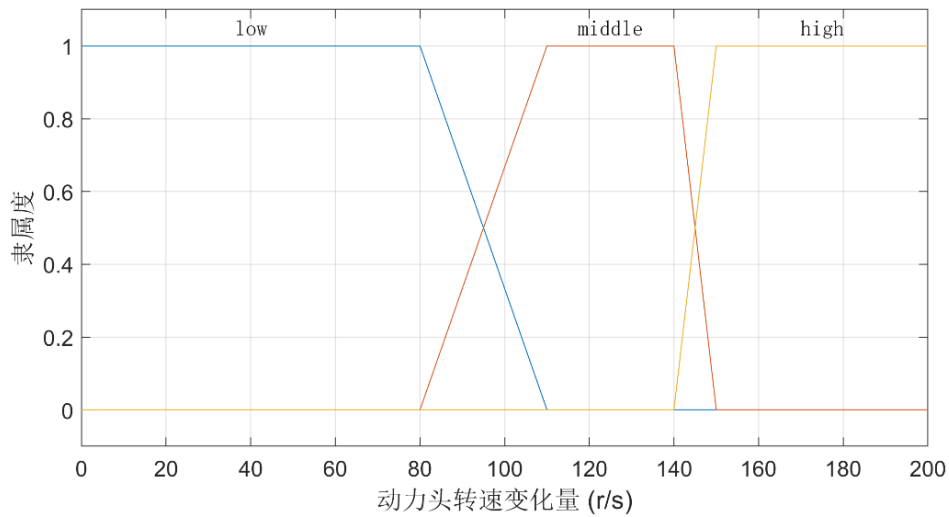


图 13 动力头转速隶属度函数

模糊规则是模糊推理系统的核心，决定了输入变量与输出变量之间的映射关系。根据工程实践和司钻经验，本系统为 `fis_feed` 和 `fis_rotary` 分别设计了 9 条规则，覆盖所有输入组合，确保规则的完备性。规则设计遵循以下原则：

- 1) 低强度、低负载时优先效率：当煤岩强度和给进压力/扭矩较低时，推荐较高的给进速度或转速，以提高钻进效率。
- 2) 高强度或高负载时优先安全：当煤岩强度或给进压力/扭矩较高时，推荐较低的给进速度或转速，以避免设备过载。
- 3) 中强度、中负载时保持平衡：在中等地质条件和负载下，推荐适中的参数，兼顾效率和安全。

给进速度和回转速度的模糊规则分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 给进速度优化模糊规则

规则编号	煤岩强度	给进压力	给进速度	权重
1	low	low	high	1.0
2	low	middle	high	1.0
3	low	high	low	1.0
4	middle	low	middle	1.0
5	middle	middle	middle	1.0
6	middle	high	low	1.0
7	high	low	low	1.0
8	high	middle	low	1.0
9	high	high	low	1.0

表 3 动力头转速优化模糊规则

规则编号	煤岩强度	扭矩	动力头转速	权重
1	low	low	high	1.0
2	low	middle	high	1.0
3	low	high	low	1.0
4	middle	low	middle	1.0
5	middle	middle	middle	1.0
6	middle	high	low	1.0
7	high	low	low	1.0
8	high	middle	low	1.0
9	high	high	low	1.0

规则中的权重均为 1.0，后续可通过调优进一步调整。规则的逻辑通过 MATLAB 的 addRule 函数实现。

模糊推理过程包括模糊化、规则推理和解模糊化三个步骤：

- 1) 计算煤岩强度的变化率：模糊化：将输入变量（煤岩强度、给进压力/扭矩）映射到对应的模糊集，计算其隶属度。
- 2) 规则推理：根据模糊规则，采用 Mamdani 型推理方法，计算输出模糊集。
- 3) 解模糊化：采用重心法（Centroid Method）将输出模糊集转换为具体的数值，作为推荐参数。

给进速度和动力头转速的推理过程非线性映射关系通过表面图（gensurf）可可视化，如图 14 至图 15 所示。

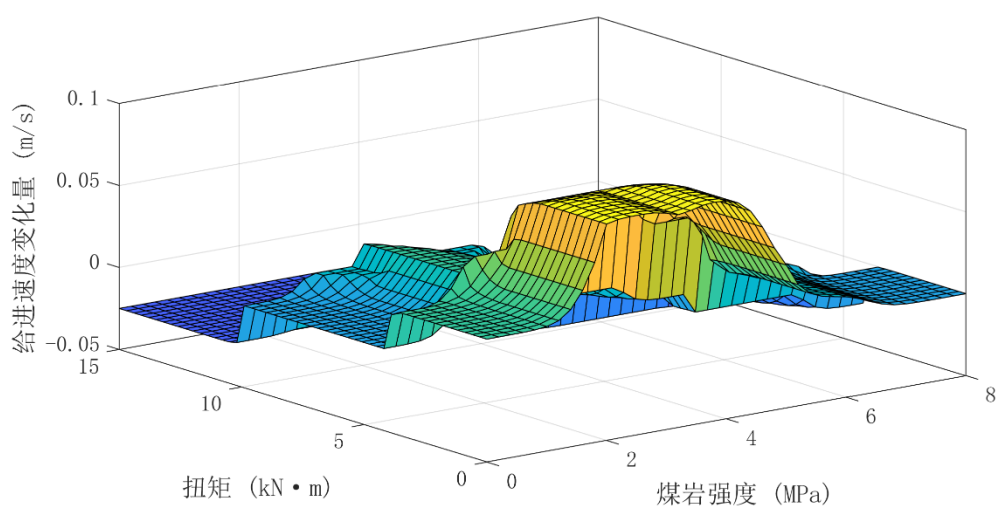


图 14 给进速度模糊推理的非线性映射关系

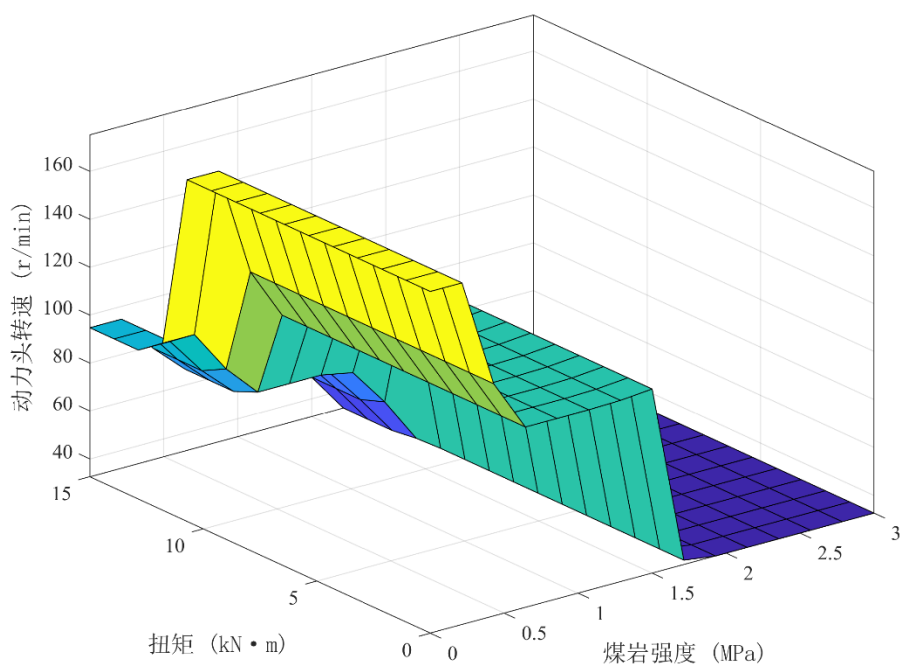


图 15 给进速度模糊推理的非线性映射关系

仿真基于许疃矿场 2023 年 3 月 6 日的钻进数据，共包含约 2000 个采样点。输入数据包括煤岩强度、给进压力和扭矩，输出为优化后的给进速度和动力头转速。仿真在 MATLAB R2023a 环境下运行，硬件配置为 Intel Core i7-12700H，16 GB 内存。

对比优化参数与实际参数的动态变化仿真结果如图 16 和 17 所示：



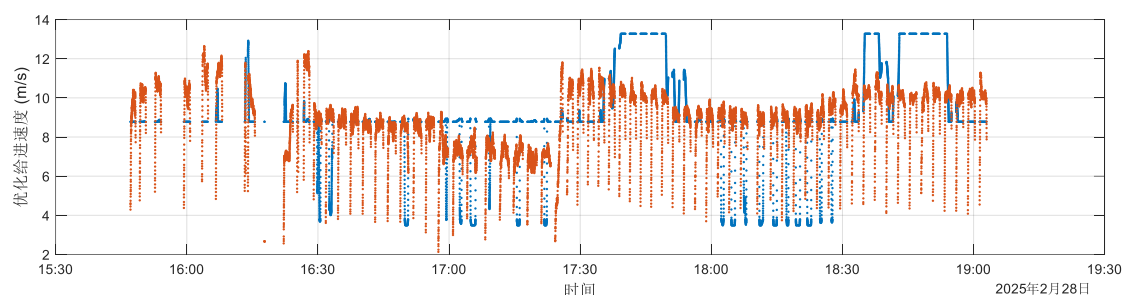


图 16 给进速度优化结果

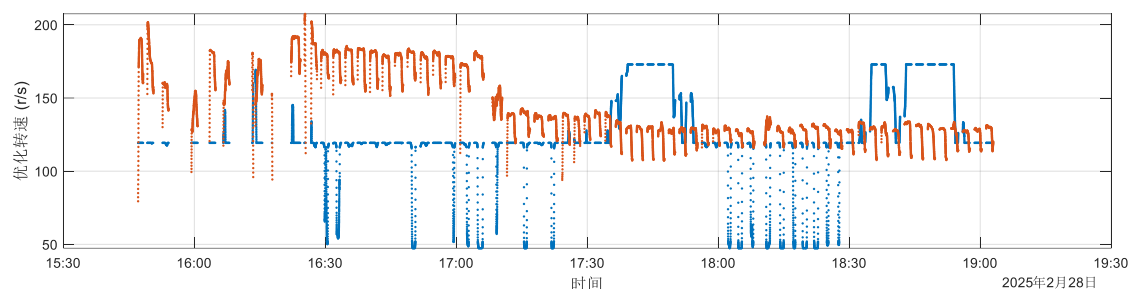


图 17 动力头转速优化结果

仿真结果表明，优化系统能够在不同工况下提供合理的参数推荐：

- 1) 低强度工况：当煤岩强度低于 0.5 MPa 时，系统推荐较高的给进速度（约 12-15 mm/s）和转速（约 180-200 r/min），与实际高效钻进参数一致。
- 2) 高强度工况：当煤岩强度超过 1.8 MPa 或给进压力/扭矩较高时，系统推荐较低参数（给进速度约 0-5 mm/s，转速约 0-80 r/min），有效避免了设备过载。
- 3) 突变工况：在煤岩强度突变点（如强度从 0.5 MPa 突增至 2 MPa），条件触发机制确保参数在 1-2 个采样周期内完成调整，响应时间小于 1 秒。

当前规则数量较少，可能无法完全覆盖复杂工况，系统未考虑多参数间的耦合效应（如给进速度与转速的相互影响）。实时性需进一步优化，以适应井下防爆平板的计算能力。

### 三、下一步工作安排及计划

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。前期的工作内容主要为建立考虑煤岩强度变化的钻柱动力学模型和初步设计出基于模糊推理的操作参数优化方法，后续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，应用于煤矿作业现场，后续的工作将与指导老师进行沟通，进度安排如表 4 所示。

表 4 毕业进度安排表

时间	任务
2025.04.03~2025.04.30	设计基于模糊推理的操作参数优化方法
2025.05.01~2025.05.10	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
2025.05.11~2025.05.25	撰写毕业论文，完成毕业设计验收
2025.05.26~2025.06.06	完善毕业论文研究工作，完成毕业论文、汇报 PPT 并答辩

#### 四、毕业论文提纲及完成情况

目前拟定的论文提纲如下所示，总体分为五章进行论述，目前已完成第一章、第二章和第三章部分内容的撰写工作，后附完成情况表。

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 钻柱系统动力学模型.....	2
1.2.2 钻进过程操作参数优化.....	5
1.3 现有研究存在的问题及分析.....	6
1.4 主要研究内容及组织结构.....	7
第二章 基于钻柱动力学的煤岩强度感知模型 .....	10
2.1 煤矿井下钻进过程与工艺分析.....	10
2.2 钻柱扭向-轴向耦合动力学模型 .....	12
2.2.1 钻柱扭转动力学.....	13
2.2.2 钻柱轴向动力学.....	13
2.2.3 钻头-煤岩相互作用与固有比能 .....	15
2.2.4 钻柱-孔壁摩擦模型 .....	15
2.3 煤岩强度感知模型.....	16
2.3.1 感知模型的实现流程.....	16
2.3.2 模型的工程实现.....	17
2.3.3 模型的仿真验证与分析.....	18

2.5 本章小结.....	21
第三章 基于模糊推理的操作参数优化方法 .....	19
3.1 模糊推理系统的设计思路.....	19
3.1.1 系统总体框架.....	19
3.1.2 输入与输出变量的选择.....	20
3.1.3 条件触发机制.....	20
3.2 模糊推理系统设计 .....	21
3.2.1 模糊隶属度函数设计.....	21
3.2.2 模糊推理规则设计.....	24
3.2.3 模糊推理与解模糊化.....	25
3.3 模糊推理系统实现与仿真.....	27
3.3.1 仿真设置.....	27
3.3.2 仿真结果.....	27
3.3.3 仿真分析.....	27
3.4 本章小结.....	29
第四章 煤矿作业现场应用 .....	30
4.1 操作参数优化系统.....	30
4.1.1 系统架构与功能.....	30
4.1.2 系统运行环境.....	31
4.2 地面实验情况.....	32
4.2.1 地面实验设置.....	32
4.2.2 地面实验结果及分析.....	32
4.3 井下应用情况.....	33
4.3.1 井下应用设置.....	33
4.3.2 井下应用结果及分析.....	34
4.4 本章小结.....	35
第五章 总结与展望 .....	36
5.1 研究工作总结.....	36
5.2 研究局限性与不足.....	37
5.3 未来工作展望.....	38
致 谢 .....	38
参考文献 .....	39

附：完成情况如表 5 所示

表 5 完成情况表

任务		完成情况
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	完成
	钻柱扭向-轴向耦合动力学模型	完成
	轴向动力学模型	完成
	煤岩强度感知仿真分析	完成
基于模糊推理的操作参数优化方法	模糊推理系统框架设计	完成
	模糊推理系统隶属度函数与推理规则设计	进行中
	模糊推理系统实现与仿真	进行中
煤矿作业现场应用	操作参数优化系统	进行中
	地面实验情况	未完成