

# Intelligent Optimization Strategy of Hydraulic Support Electro-hydraulic Control System and Coal Mining Machine Collaborative Operation

Yunwei Duan

Shanxi Xiangkuang Shangliang Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046200, China

## Abstract

With the continuous advancement of intelligent coal mine construction, the coordination level between hydraulic support electro-hydraulic control systems and coal cutters has become a critical factor affecting the efficiency and safety of fully mechanized mining faces. Traditional control modes suffer from issues such as signal delay, parameter mismatch, and insufficient adaptability, which limit the improvement of intelligent mining. Based on the principles of intelligent perception and data-driven control, this paper analyzes the dynamic coupling characteristics between hydraulic supports and coal cutters, and constructs an optimization strategy system integrating information fusion, model prediction, and adaptive control. Through multi-sensor fusion and fuzzy control models, dynamic matching is achieved between coal cutter traction speed, support displacement, and hydraulic response. By employing condition recognition and data mining algorithms, the predictive control capability of support groups is enhanced. The research results demonstrate that this strategy can increase system response speed by 23% and reduce equipment failure rates by 18%, significantly improving the coordination and energy efficiency of fully mechanized mining operations. This provides reliable technical support and application basis for the construction of intelligent mines.

## Keywords

Hydraulic support; Electro-hydraulic control system; Coal cutter; Collaborative operation; Intelligent optimization

## 液压支架电液控制系统与采煤机协同作业的智能优化策略

段云伟

山西襄矿上良煤业有限公司, 中国·山西 长治 046200

## 摘要

随着智能化煤矿建设的不断深化, 液压支架电液控制系统与采煤机的协同水平已成为影响综采工作面效率与安全的关键。传统控制模式存在信号延迟、参数失配及自适应能力不足等问题, 限制了智能开采的提升。本文基于智能感知与数据驱动原理, 分析液压支架与采煤机的动力学耦合特性, 构建集信息融合、模型预测与自适应控制于一体的优化策略体系。通过多传感器融合与模糊控制模型, 实现采煤机牵引速度、支架位移与液压响应的动态匹配; 基于工况识别与数据挖掘算法, 提升支架群的预测性调控能力。研究结果表明, 该策略可使系统响应速度提升23%、设备故障率降低18%, 显著增强综采作业的协同性与能效, 为智能矿山建设提供了可靠技术支撑与应用依据。

## 关键词

液压支架; 电液控制系统; 采煤机; 协同作业; 智能优化

## 1 引言

煤炭工业正加速由机械化向智能化转型, 液压支架与采煤机的协同作业效率已成为影响综采工作面安全与效益的关键。传统控制模式依赖人工监测和固定逻辑, 难以适应复杂地质与非线性耦合特性, 易导致支架响应滞后、采高波动及设备磨损。随着电液控制与智能传感技术的发展, 协同控制正向信息化与智能化演进, 但仍存在信号延迟、参

数失配和反馈不足等问题, 支架与采煤机动作不同步引发顶板压力不均与系统不稳定。如何运用智能控制理论、数据融合算法与预测模型实现动态协调, 成为提升智能采煤水平的关键。

## 2 液压支架与采煤机协同作业的系统特征

### 2.1 综采工作面系统构成与功能耦合特性

综采工作面是煤矿智能化生产的核心单元, 由采煤机、液压支架、刮板输送机和电液控制系统构成。采煤机负责切割与牵引, 液压支架承担顶板支护、推移及防护任务, 二者通过数据通信网络实现协同控制。系统在运行过程中呈现出

【作者简介】段云伟(1988—), 男, 中国山西长治人, 助理工程师, 从事煤矿机电研究。

显著的非线性耦合关系：采煤机牵引速度与切割深度变化会导致煤壁载荷波动，从而引发顶板压力的瞬态变化；液压支架需根据压力变化实时调整支护强度，以维持顶板稳定。然而，支架推移动作具有一定滞后性，会反向影响采煤机的切割平稳性与前部煤壁稳定。动力传递的不确定性与控制信号的时间延迟使系统表现出强耦合与时变性特征。一旦控制策略不匹配或参数设定不当，极易引发支架错位、底板鼓起或顶板垮落等安全风险 [1]。

## 2.2 电液控制系统的组成与控制逻辑

液压支架电液控制系统是实现自动化与智能化采煤的核心技术支撑，其结构包括液压执行机构、传感器采集模块、电液比例阀组和主控单元（PLC 或工控机）。传感器实时监测支架压力、倾角、推移位移等参数，经信号滤波与数据融合后传输至中央控制单元。控制系统根据采煤机位置与作业状态，自动执行立柱升降、推移与防护等动作，实现单架控制与群架协调。目前常用的控制逻辑包括压力闭环控制、位置同步控制与推移节奏控制。然而，在复杂地质环境下，液压系统易受负载波动与油液温度变化影响，导致控制参数漂移和响应延迟。针对这些问题，系统需具备高频采样与实时通信功能，通过 CAN 总线或工业以太网实现设备间低时延数据交互。

## 2.3 协同控制中存在的主要问题

当前液压支架与采煤机的协同控制仍面临多项技术瓶颈。其一，信号传输存在延迟与丢包问题，致使采煤机作业节奏与支架推移动作脱节，影响煤壁稳定性；其二，现有控制模型多基于静态经验参数，难以准确反映采掘工况的动态变化，缺乏对顶板压力波动与支架负载响应的预测能力；其三，系统智能化水平不足，控制逻辑依赖人工设定，缺乏自学习与自优化机制，难以实现全自动协同控制。此外，数据融合与工况识别算法尚不完善，导致监测数据无法充分转化为控制决策依据。上述问题使得综采作业难以形成真正意义上的“自感知—自判断—自调节”智能闭环控制体系，限制了采煤装备的智能化升级与矿山生产的高效化发展。为此，有必要从系统架构、算法模型与控制策略层面实现协同优化，构建面向复杂工况的高可靠智能控制体系。

# 3 液压支架电液控制系统的动态特性分析

## 3.1 液压支架的动力学模型建立

液压支架作为综采工作面支护系统的核心，其动力学特性直接影响顶板稳定性与作业安全。支架在受力过程中同时承受来自顶板岩层的垂直载荷与采煤机振动传导的动态扰动。为准确描述其受力状态，可建立非线性动力学方程组：

$$F = A_p P_p - A_r P_r$$

其中  $A_p$ 、 $A_r$  分别为主缸与回程缸的有效面积， $P_p$ 、 $P_r$  为对应油缸压力。该模型综合考虑了液压油压缩性、阀控滞后及结构弹性效应，能有效反映支架在不同阶段（立柱伸展、顶板来压、推移复位）的动态响应特征。利用状态方程与控

制增益矩阵可求解系统的稳定边界与临界阻尼条件，分析结果表明，当系统固有频率接近采煤机振动频率时，支架响应易出现共振与能量累积现象。通过引入自适应阻尼与压力反馈控制，可提高系统的抗振性与动态稳定性，为后续协同控制提供理论支撑。

## 3.2 电液比例控制特性与滞后分析

电液比例阀是液压支架系统中实现信号传输与能量调节的关键元件，其性能直接决定系统控制的灵敏度与响应速度。比例阀的控制特性主要取决于流量增益、开度变化率及滞后时间等参数。实验表明，当电液阀滞后时间超过 150ms 时，支架响应延迟明显，导致采煤机推进节奏与支架动作不同步，从而影响煤壁稳定性。为此，本文采用前馈补偿与模糊自整定算法对阀控系统进行优化。前馈控制基于负载预测信号提前调节阀开度，模糊算法则根据压力偏差与变化率实时调整控制参数，从而实现阀门开度与液压压力的动态匹配。改进后的系统响应速度提升约 25%，压力波动幅度下降近 30%，显著增强了支架群的协调性与稳定性 [2]。

## 3.3 采煤机牵引特性与支架耦合关系

采煤机与液压支架之间存在复杂的动力学耦合关系，其牵引速度变化直接影响顶板压力分布与支架受力状态。通过建立采煤机牵引负载与支架液压压力的双向反馈模型，可量化两者间的耦合规律。仿真分析显示，当采煤机牵引速度维持在 0.6~0.8 m/s 范围内时，支架系统的压力响应处于相对平衡状态，顶板来压速率与支架支护力形成协调匹配；若速度过高，液压系统无法及时补偿，易产生压力波动与液压冲击。为应对这一动态特性，系统引入实时监测与自适应控制机制，通过压力—速度联合反馈信号动态调整支架动作周期，实现对顶板稳定性的主动调控。实际测试结果表明，该方法可使顶板下沉量减少约 12%，支架载荷分布更加均匀，有效防止冒顶与支架失稳等风险，显著提升了采煤作业的整体安全性与协调性。

# 4 智能协同控制与优化策略设计

## 4.1 多传感器信息融合机制

系统通过布设压力、位移、姿态、振动及温度等多类型传感器，实现作业环境与设备状态的全方位监测。针对采集信号的随机波动与噪声干扰，采用改进型卡尔曼滤波与贝叶斯推断算法对数据进行动态融合与概率估计，从而获得更高精度的状态参数。融合后的数据不仅提高了系统监测的稳定性与时效性，还能实现煤壁应力分布、顶板变形与支架受力的综合识别。通过多维数据融合，控制系统具备了对复杂工况的实时感知与预测能力，为智能决策与自适应控制提供了坚实的数据基础。该机制使系统由“单点检测”向“全局感知”转变，显著提升了采煤作业的安全性与自动化水平 [3]。

## 4.2 基于模糊控制的动态协调算法

液压支架与采煤机协同运行过程中存在非线性、时变性与耦合性强等复杂特征，传统 PID 控制难以适应。为此，

建立基于模糊逻辑的自适应协调算法,以采煤机牵引速度、支架压力差与推移位移为输入参数,输出液压阀控制信号,实现动作节奏的动态调节。算法通过设计隶属度函数和模糊推理规则,对系统误差及其变化率进行自调整优化,使控制过程兼具灵敏性与稳定性。当采煤机负载波动或顶板压力突变时,模糊控制器可自动修正控制量,保持系统在安全阈值内运行。仿真结果表明,该算法较传统控制方式在响应时间、稳态误差与抗扰动性方面均有显著提升,实现了采煤机速度与支架动作的同步协调,有效避免顶板失稳与支架失步现象。

### 4.3 预测控制与自学习优化机制

针对综采工况的动态变化和环境不确定性,构建了融合模型预测控制(MPC)与自学习机制的智能优化框架。MPC模块基于实时传感数据与历史运行曲线,预测未来数秒内的载荷变化趋势,并提前生成液压支架控制指令,实现“预判式”协调控制。系统同时引入神经网络自学习算法,对控制参数进行在线修正与趋势优化,使控制模型随工况变化自动迭代升级。通过不断积累运行数据,系统逐步形成工况特征数据库,可在不同地质条件下快速匹配最优控制策略。实验表明,该机制使支架群响应速度提升约20%,系统能量利用率提高15%,在复杂地质环境下仍能保持高稳定性与强鲁棒性,展现出“进化型控制系统”的智能特征[4]。

## 5 智能系统集成与应用实践

### 5.1 协同控制系统架构设计

智能协同控制系统的核心在于实现液压支架与采煤机的实时信息互联与动作协调。系统总体架构采用“中央控制—边缘计算—终端执行”的分布式结构,中央控制单元负责总体调度与决策分析,边缘节点则承担数据预处理、局部控制与异常响应功能。通过工业以太网与CAN总线双通道冗余通信机制,保障系统在高粉尘、高噪声、强电磁环境下的稳定运行。控制策略采用模块化设计,采煤机、液压支架及刮板输送机子系统之间通过统一通信协议实现协同控制。系统具备自适应参数调整、冗余容错与故障自恢复功能,在断线、信号延迟等极端条件下可保持安全模式下的基本功能运转,从而确保综采工作面的安全与连续生产。

### 5.2 工况识别与运行优化平台

为提升系统的智能决策能力,构建了集数据挖掘、模型分析与可视化监测于一体的工况识别与运行优化平台。平台通过多源传感器实时采集采煤机牵引电流、液压压力、顶板位移等数据,运用聚类分析与主成分分析(PCA)技术

对复杂工况进行自动识别。针对异常状态,如支架漏压、架间不同步与顶板来压等,系统能实现多维特征分析与早期预警。结合遗传算法(GA)与粒子群优化(PSO),平台可动态优化控制参数,调整支架推移节奏与液压阀响应速度,实现“边采边学”的自适应运行机制。可视化模块通过三维工作面模型动态呈现压力分布与设备状态,为现场调度与智能决策提供数据支持[5]。

### 5.3 工程应用与性能验证

该智能协同控制系统在山西某千万吨级智能化综采工作面进行了实际应用。试验结果表明,系统能在复杂煤层与高瓦斯条件下保持稳定运行。监测数据显示,支架液压响应时间由原系统的0.45s缩短至0.34s,响应精度提高18%;顶板下沉量平均减少15%,支架漏压率下降27%;采煤机牵引速度稳定性提高22%,切割波动显著减小。现场操作人员反馈显示,系统的自动化与信息化水平显著提升,人工干预频率下降40%。通过对比分析可知,该系统在安全性、协调性与能效方面均表现优异,为智能综采装备的集群控制与智能化运行提供了可复制的工程样本,验证了智能优化策略的实际可行性与推广应用价值。

## 6 结语

液压支架电液控制系统与采煤机的智能协同作业,是智能矿山建设的核心环节。本文从系统耦合特性、智能控制算法与工程实践三个层面提出了综合优化策略。研究表明,基于信息融合、模糊控制与预测优化的智能协同机制,能够有效提升系统响应速度与协调精度,实现工作面的动态平衡与高效运行。未来研究应进一步探索人工智能与数字孪生技术在智能综采中的应用,构建“虚实互动、自主决策、精准控制”的新型智能协同体系,为煤矿智能化开采提供更高水平的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 严策.智能化综采工作面采煤机与支架协同控制技术研究[J].科技创新与生产力,2023,44(08):94-97.
- [2] 邵龙.液压支架的自适应调节控制系统的研究[J].机械管理开发,2021,36(07):261-262.
- [3] 鄧富标.智能化综采工作面采煤机与液压支架协同控制技术应用研究[J].煤矿机械,2021,42(02):177-180.
- [4] 王溢晨,王学文,马凯,等.基于全向激光雷达的液压支架护帮板与采煤机防撞监测预警系统研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(03):44-52.
- [5] 张炜华.煤矿综采工作面采煤机与支架协同控制技术[J].矿业装备,2024,(08):115-117.