 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9979

Optimization and Application of Electro-hydraulic Control System for Hydraulic Support in Fully Mechanized Mining Face

Yuxiao Wang Zhiwen Xue

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

To address challenges in hydraulic support electro-hydraulic control systems for fully mechanized coal mining faces—including insufficient control accuracy, suboptimal reliability, and unstable transmission—this paper conducts comprehensive research to ensure safe and efficient coal mining operations. The study first elucidates the theoretical foundations of the electro-hydraulic control system, analyzing its operational mechanisms, structural composition, dynamic models, and control principles. Subsequently, the research focuses on optimization strategies, examining three key dimensions: adaptive algorithms for control delay adjustment, multi-sensor redundancy design with fault detection, and industrial Ethernet protocol enhancements for interference-resistant transmission. Finally, through theoretical analysis and practical case studies, the paper refines the theoretical framework of the electro-hydraulic control system for hydraulic supports.

Keywords

hydraulic support; electro-hydraulic control system; adaptive algorithm; sensor redundancy; ethernet upgrade

综采工作面液压支架电液控制系统优化与应用

王宇宵 薛志文

陕西中能煤田有限公司，中国·陕西 榆林 719000

摘　要

为处理综合机械化采煤工作面上液压支架电液控制系统在控制精准度方面不够、可靠程度欠佳、传输状况不稳定等事项，确保煤炭开采工作能够安全且高效地进行，本篇论文开展了相关方面的研究。首先对液压支架电液控制系统的理论根基进行说明，对该系统的工作机理、构造构成以及动力学模型和控制原理进行剖析；接着将研究重点放在系统的优化策略上，分别从自适应算法对控制延时进行调整、多传感器冗余设计与故障判断、工业以太网协议提升与抗干扰传输这三个层面展开研究，最后通过理论层面的分析与事例中的应用，让液压支架电液控制系统的理论架构得到完善。

关键词

液压支架；电液控制系统；自适应算法；传感器冗余；以太网升级

1 引言

在煤炭开采朝着智能化、高效化方向转变的过程中，液压支架电液控制系统的控制精准度与可靠程度成为了限制综合机械化采煤安全性的关键因素。目前现有的系统存在着延时较长、故障较多、传输不稳定等情况，所以开展对该系统的理论研究与优化设计工作，对于推动智能化综合机械化采煤的发展、保障开采作业的安全有着重要的现实意义。

2 液压支架电液控制系统的理论基础

2.1 电液控制系统工作原理与结构组成

作为综采工作面支护设备达成精准高效运作关键的液压支架电液控制系统，其工作机制建立在液压传动与电液伺服技术充分结合的基础上，以帕斯卡定律为液压传动核心要素，借助电信号实现对液压能的精确调节与控制，进而推动支架完成升降、推移、护帮等支护操作，形成“电信号指令—液压动力输出—动作执行—状态反馈”的闭环控制流程，确保支架及时适应顶板围岩动态改变，为采煤作业安全稳定提供保障。 在系统结构组成方面，与井下实际工作状况相契合的该系统主要包含五个核心部分：采用额定压力 31.5MPa 双变量柱塞泵、承担提供高压乳化液动力任务的液压动力源，包含双伸缩式立柱、推移缸等并可将液压能转化为机械能的液压执行元件，以响应时间不超过 50ms 的电液比例阀为核心、能够实现流量压力连续调节的电液控制元件，由 PLC 控制器及压力、位移、倾角传感器组成的监测网络构成、可实时收集系统运行参数的电控监测单元，包括油箱、过滤器、冷却器等、用于确保油液清洁度和系统工作温度稳定的辅助保障系统，各部件相互配合共同工作构成高效可靠的控

【作者简介】王宇宵（1994–），男，中国陕西靖边人，助理工程师，从事煤矿综采研究。

制体系，解决传统液压控制精度不高、响应迟缓的问题。

2.2 液压支架动力学模型与控制理论

液压支架动力学模型的构造需契合其机械构造特征与矿井复杂受力状况，舍弃以往静态力的简单化假定，依靠闭环矢量办法创立运动学等式，推导出各运动零部件质心在 XOY 坐标体系下的位置表达公式，通过对时间求二阶微分获得系统加速度方程组，再结合牛顿 - 欧拉等式构建完整动力学模型，以精确体现支架与围岩间的动态相互作用关系，并可借助 MATLAB/Simulink 与 ADAMS 进行仿真比较，来检验模型的正确性。控制原理以闭环控制为重点，把 PID 控制算法和负载敏感控制策略相融合，针对支架上升下降、推移等不同的动作，利用传感器及时反馈立柱压力、支架位置姿态等参量，控制器将实际数值和设定数值的差异进行对比，输出调节信号来带动电液比例阀，达成压力、流量的精确调节控制，控制精准程度能够达到 ±0.5MPa。与此同时，引入机械、电气、液压耦合原理，结合数字孪生技术构建高保真模型，实现对支架运行状态的预先判断和优化，为复杂地质条件下支架的自适应支护提供理论方面的支持，有效地提高系统的稳定性和控制的可靠性。

3 液压支架电液控制系统优化策略与应用

3.1 基于自适应算法的控制延时优化

液压支架电液控制系统的控制滞后情况主要由电液比例阀反应迟缓、信号传送拖延、负载干扰等要素导致，严重对支架运作的同步状况和控制精准程度产生不良作用，尤其在厚煤层综合机械化开采的工作面上，滞后时间过长易使支架和采煤机的运作出现不协调，进而引发顶板支护失效等安全方面的潜在风险。自适应运算方法借助对系统运行相关参量的动态改变进行实时辨别，自动对控制参量做出调整，不需要人工参与就能适应不同工作状况下的滞后特性，有效克服了传统固定参量控制运算方法的不足。在优化进程中，以模糊自适应 PID 运算方法为关键，建立滞后预测模型，通过收集电液比例阀的输入输出信号、立柱压力变化速率等参量，运用模糊规则对 PID 控制器的比例系数、积分时间常量、微分时间常量实施动态调整，同时引入史密斯预估装置对信号传送滞后进行补偿，减轻负载干扰对滞后的影响，实现对控制滞后的精确补偿和优化，保证滞后控制在 20 毫秒以内，提高系统的动态反应性能和控制精准程度。

某煤矿 3102 综合机械化开采工作面主要开采厚度处于 6.8 至 8.2 米之间、倾斜角度为 12 至 18 度的 3 号厚煤层，其原有液压支架电液控制系统因采用传统 PID 控制运算方法而使控制滞后时间通常在 60 至 80 毫秒，导致支架升降和推移运作与采煤机牵引速度不匹配，多次出现支架护帮不及时、顶板下沉量超过标准等影响采煤效率和作业安全的问题；为此采用基于模糊自适应 PID 运算方法的控制滞后优化方案，通过搭建由信号收集模块、滞后预测模块、自适应控制模块构成的优化系统，收集工作面上不同采煤速度、顶板压力条件下的系统运行参量并建立模糊规则库，再通过史密斯预估装置对信号传送滞后进行补偿及对 PID 控制参量实施动态自适应调整；该优化方案实施后经连续 72 小时监测系统运行参量表明，控制滞后时间稳定在 15 至 18 毫秒，支架运作同步性提高 42%，顶板下沉量控制在 8 毫米以内，采煤机有效作业时间增加 18%，彻底解决了因控制滞后时间过长导致的支护不协调问题，既保障了工作面安全高效开采，又验证了该优化策略的可行性和实用性。

3.2 多传感器冗余设计与故障诊断

在液压支架电液控制系统里，作为参数收集关键元件的传感器，其工作是否稳定，会直接对系统的控制精准程度和运行安全状况产生影响。矿井下存在高粉尘、高压力以及强振动的糟糕工作环境，这很容易让传感器出现漂移、短路或者信号丢失等问题。仅使用单个传感器的设计，没办法满足系统对容错能力的要求，还容易造成控制失灵。多传感器冗余设计借助设置多个相同类型或者不同类型的传感器来收集同一个参数，运用数据融合技术对收集到的多组数据进行挑选、校正和融合，去除异常数据，留下有效信息，进而提高参数收集的准确程度和可靠程度。同时，构建故障诊断模型，通过对传感器数据的偏差、变化趋势等特点进行分析，实现对故障的精确识别、定位和预警，为故障排查和维护提供依据，减少故障导致的停机时间。

某规模大的煤矿 2205 综合机械化采煤工作面配备 ZFY12000/28/63 型号的液压支架，该工作面原本的传感器运用单一的配置方式，在开采作业时，由于矿井下粉尘聚积、振动冲击等状况，每个月平均产生 8 至 10 次传感器故障，其中压力传感器发生故障的比例为 60%，使得支架立柱的压力监测结果不准确，多次出现立柱负荷过大、支架倾斜等安全隐患，平均每回故障停机维护的时长达到 2.5 小时，极大地干扰了工作面的生产效能。针对这一情况，运用多传感器冗余设计和故障诊断策略，对支架立柱压力、推移位移、护帮角度等关键参量的采集环节进行改进，每个参量配备 3 个相同类型的传感器，采用主 - 备 - 冗余的三级体系结构，主传感器及时传送数据，备用传感器处于待机状态以备使用，冗余传感器用于数据校正，同时构建基于贝叶斯推理的故障诊断体系，通过分析多组传感器数据的偏差数值、变化速度等特点，实现对故障类型、故障位置的精确辨认和预警。该方案实施以后，连续运行 6 个月的监测表明，传感器故障发生的频率降低到每月 1 至 2 次，故障诊断的准确程度达到 98% 以上，每回故障停机维护的时长缩短到 30 分钟以内，支架运行出现故障的概率下降 75%，有效地增强了系统的可靠程度和稳定程度，降低了故障对生产的影响，为工作面的高效开采提供了支撑。

3.3 工业以太网协议升级与抗干扰传输

液压支架电液控制系统的信号传递主要依靠工业以太

网，传统以太网协议存在传递速度慢、抵抗干扰能力不强、兼容性能不好等状况，难以符合井下众多装置、众多参量的高速传递要求，井下强烈的电磁干扰、电缆损耗等要素，容易造成信号传递出现失真、丢失数据包的情况，对系统的控制精准度和运行平稳性产生影响。工业以太网协议的升级以以太网 /IP 协议为核心部分，结合井下工作状况的特征进行优化处理，提高协议的传递速度和抵抗干扰的能力，同时运用差分传递技术、屏蔽接地技术等抗干扰办法，降低电磁干扰、电缆损耗对信号传递的作用，达成众多装置、众多参量的高速、平稳传递。在协议升级的过程中，对数据帧的构造进行优化，缩短数据传递的周期，将传递速度提高到 1000Mbps，同时增添数据校验、重新传递的机制，降低信号丢失数据包的比率，结合光纤传递技术，取代传统的电缆传递方式，进一步增强信号传递的抗干扰能力，保证系统中各装置之间的协同工作，实现液压支架电液控制系统与综合机械化采煤工作面其他装置的相互连接和通信。

某煤矿 1503 综合机械化采煤工作面属于智能化综合机械化采煤工作面，配备了 48 架液压支架，原有系统采用传统工业以太网协议，传递速度为 100Mbps，在开采过程中，受到井下强烈电磁干扰、电缆长度过长等要素的影响，信号丢失数据包的比率达到 8 - 12%，支架与采煤机、刮板输送机之间的信号传递延迟较大，使得智能化控制功能不能正常发挥作用，支架动作的响应出现滞后现象，对工作面智能化开采的效率产生影响。为解决这一问题，对工业以太网协议进行升级优化，采用以太网 /IP 协议替换传统协议，优化数据帧的构造，将传递速度提高到 1000Mbps，增加循环冗余校验、自动重新传递的机制，降低信号丢失数据包的比率，同时将传统的电缆传递方式更换为光纤传递方式，采用屏蔽接地技术，减少电磁干扰和电缆损耗，搭建工业以太网冗余网络，确保信号传递的可靠性。升级实施之后，对系统信号传递的参数进行连续监测，结果表明，信号传递速度稳定在 1000Mbps，信号丢失数据包的比率降低到 0.5% 以下，传递延迟控制在 5ms 以内，支架与其他装置的协同性得到显著提高，智能化控制功能能够正常发挥作用，工作面采煤效率提高了 25%，装置故障发生的比率下降了 60%，实现了液压支架电液控制系统的高速、平稳、抗干扰传递，满足了智能化综合机械化采煤工作面的运行需求，验证了协议升级与抗干扰传递优化策略的有效性。

4 结语

本文针对液压支架电液控制系统开展探究，讲述其理论根基，着重对控制延时状况、传感器冗余情形及以太网传输情况这三个关键事项进行优化，结合现实工作面实例对优化策略的可行程度加以验证。研究使该系统的理论架构得以完善，让系统控制精准程度与运行可靠程度得到有效提升，把井下实际开采过程中的技术难题解决掉，给智能化综采工作面支护设施的升级改良提供了理论方面和实践方面的支撑，对于推动煤炭开采智能化进程具有重要作用。

参考文献

[1] 杨志云,马开德,李士林,等.矿鸿项目无线数据传输的液压支架电液控制系统的开发[J].微型电脑应用, 2025, 41(7):280-283.

[2] 宋冲.基于矿鸿操作系统的液压支架电液控制软件系统研究[J].中阿科技论坛(中英文), 2025(11):118-122.

[3] 贾彦鹏.综采工作面液压支架电液控制系统优化[J].中国机械, 2025(16):140-143.

[4] 杨志云.基于矿鸿的液压支架电液自动化控制系统设计与应用研究[J].中国战略新兴产业, 2025(23):127-129.

[5] 武乔东,袁茵,路园园.一种液压支架电液控制器测试系统及其控制方法:CN202510365698.5[P].CN120255472A[2026-03-06].