

Research on the Response Characteristics of the Electro-Hydraulic Control System for Hydraulic Supports in Intelligent Coal Mining Faces

Shaojun Guo

Shanxi Shiquan Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046200, China

Abstract

In order to solve the problems of delayed response and insufficient stability of the hydraulic support electro-hydraulic control system in intelligent coal mining working face, and to improve the accuracy of support and coal mining efficiency, this paper conducts a study on the system response characteristics. Firstly, analyze the core components of the electro-hydraulic control system and clarify the impact mechanism of the electro-hydraulic proportional valve, actuator, and control strategy on the response characteristics; Secondly, based on fluid mechanics and control theory, a system dynamics model is constructed to reveal the coupling relationship between pressure transmission, flow regulation, and mechanical action; Finally, through simulation analysis and on-site experimental verification, an improvement path is proposed to optimize the valve core structure and improve the PID control algorithm. Research has shown that the optimized system has a response speed improvement of over 20% and stability error control within 5%, providing theoretical support and technical reference for efficient support of intelligent coal mining workfaces.

Keywords

intelligent coal mining; Hydraulic support; Electro hydraulic control system; Response characteristics; dynamic model

智能化采煤工作面液压支架电液控制系统响应特性研究

郭少军

山西石泉煤业有限责任公司, 中国山西 长治 046200

摘要

为解决智能化采煤工作面液压支架电液控制系统响应滞后、稳定性不足等问题,提升支架跟机支护精度与采煤效率,本文开展系统响应特性研究。首先剖析电液控制系统的核心构成,明确电液比例阀、执行机构及控制策略对响应特性的影响机制;其次基于流体力学与控制理论,构建系统动力学模型,揭示压力传递、流量调节与机械动作间的耦合关系;最后通过仿真分析与现场试验验证,提出优化阀芯结构、改进PID控制算法的提升路径。研究表明,优化后的系统响应速度提升20%以上,稳定性误差控制在5%以内,为智能化采煤工作面的高效支护提供理论支撑与技术参考。

关键词

智能化采煤; 液压支架; 电液控制系统; 响应特性; 动力学模型

1 引言

煤炭作为我国能源结构的重要支柱,其开采效率与安全保障直接关系到能源供给稳定性。随着智能化技术在采矿领域的深度应用,智能化采煤工作面已成为实现煤炭高效绿色开采的核心载体,而液压支架作为工作面的关键支护设备,其支护及时性与可靠性决定了采煤作业的安全与效率^[1]。电液控制系统作为液压支架的“大脑”与“神经中枢”,通过电信号实现对支架升、降、移等动作的精准控制,其响应特性直接影响支架跟机速度与支护精度。当前,在厚煤层、

大采高及复杂地质条件下,现有电液控制系统常存在响应滞后、超调量大等问题,导致支架与采煤机、刮板输送机的协同作业效率降低,甚至引发顶板坍塌等安全隐患。因此,深入研究液压支架电液控制系统的响应特性,揭示其响应延迟的内在机理,提出针对性的优化方案,对于提升智能化采煤工作面的综合效能具有重要的理论与工程意义。本文从系统构成解析入手,通过模型构建、仿真分析及试验验证,系统探究影响响应特性的关键因素,为电液控制系统的性能提升提供技术支撑^[2]。

2 智能化采煤工作面液压支架电液控制系统构成及响应特性内涵

2.1 系统核心构成

智能化采煤工作面液压支架电液控制系统采用“电液

【作者简介】郭少军(1987-),男,中国山西襄垣人,助理工程师,从事采矿工程研究。

融合”的控制模式，主要由控制单元、执行单元、检测单元及液压动力单元四部分组成，各单元协同作用实现支架的智能化控制。控制单元作为系统的核心，采用嵌入式微处理器架构，集成采煤机位置跟踪、顶板压力监测及协同控制算法，通过接收来自检测单元的信号与上位机的指令，输出精准的控制信号；执行单元以电液比例阀为核心，将控制单元输出的电信号转换为液压信号，驱动千斤顶等执行机构完成支架的升架、降架、移架等动作，其中电液比例阀的流量控制精度直接决定执行机构的动作响应速度；检测单元包括位移传感器、压力传感器及倾角传感器等，实时采集支架的行程、支护阻力、姿态等参数，为控制单元提供反馈信号，实现闭环控制；液压动力单元由乳化液泵站、高压胶管及过滤器等组成，为系统提供稳定的高压乳化液，其压力稳定性与流量供给能力是保障系统响应特性的基础^[3]。

2.2 响应特性的核心内涵

响应特性是计量器具的核心技术指标，指在确定条件下输入量（激励）与输出量（响应）之间的对应关系。静态测量中表现为输入输出的代数函数关系，动态测量中则通过微分方程或传递函数描述随时间变化的响应规律。该特性通过灵敏度、时间常数、固有频率等参数量化表征，直接影响测量精度和仪器适用范围。数学描述包含拉普拉斯变换构建的传递函数模型与动态标定方法，为工程应用提供理论支撑。智能化传感器通过微处理器补偿动态误差的技术手段，是响应特性优化的重要实践方向。根据 JJF1001-1998 标准定义，该特性需在明确规定测量程序、设备、环境等条件下进行评价。电液控制系统的响应特性是指系统在输入控制信号作用下，输出参数（如千斤顶位移、支护压力）随时间变化的规律，主要通过响应速度、稳定性与精准度三个核心指标衡量。响应速度反映系统从接收控制指令到执行机构完成指定动作的时间，包括电信号转换时间、液压油传递时间及机械动作时间，其中液压油的压缩性与管路沿程阻力是影响响应速度的关键因素；稳定性反映系统在响应过程中避免超调、振荡的能力，当系统输入阶跃信号时，如果出现压力骤升骤降或机械动作往复波动，会造成支架支护状态不稳定，增加顶板冒落风险；精准度是指执行机构的实际动作与控制指令的偏差程度，如移架行程误差三者是相关的，太快的响应速度易于产生较低的稳定性，而过快的响应速度又会降低稳定性，因此要在三者之间寻求最优平衡^[4]。

3 液压支架电液控制系统响应特性影响因素分析

3.1 电液比例阀特性影响

电液比例阀是系统“电液转换”的核心部件，它的静态特性与动态特性直接影响系统的响应性能。从静态特性看，比例阀的流量—电流特性曲线的线性度是关键，如曲线出现明显非线性畸变，在同一电流变化量的情况下，流量的

变化量不一致，执行机构动作速度波动，影响响应精准度；死区特性则导致小信号输入时无流量输出，引起响应滞后，主要是因为阀芯与阀套的配合间隙、弹簧预紧力等因素造成的^[5]。从动态特性看，比例阀的阶跃响应时间与频率响应特性十分重要，阶跃响应时间越小，系统对控制指令的响应就越快，而频率响应特性决定了系统对高频动态指令的跟踪能力，采煤机牵引速度提高时，支架需高频次调整动作，若比例阀频率响应不足，跟机会滞后。此外，比例阀的抗污染能力也间接影响响应特性，煤矿井下乳化液中含有杂质，容易造成阀芯卡滞，导致响应延迟或动作失效。

3.2 液压动力传递特性影响

液压动力传递过程中的能量损失与动态特性是导致系统响应滞后的重要因素。一方面，液压管路的沿程阻力与局部阻力会引起压力损失，当乳化液流经管路时，管路长度越长、管径越小，沿程阻力越大，压力传递延迟越明显，特别是在远距离供液的大型采煤工作面，管路压力损失可导致支架升架速度降低 15% 以上；另一方面，管路的弹性变形会引起液压油的“容积滞后”，当控制信号指令比例阀开启时，液压油必须先填充管路弹性变形空间，另一方面，执行机构的负载特性对响应特性影响很大，支架升架过程中顶板压力的变化使千斤顶负载发生波动，当负载突然增大时，液压动力单元不能及时补充流量，导致升架速度骤降，出现响应延迟；移架过程中支架与底板摩擦力的变化，导致执行机构动作不稳定，影响响应精度。

3.3 控制策略优化程度影响

控制策略作为系统的“决策核心”，其算法合理与否直接决定响应特性的优劣。对于液压支架电液控制系统，目前多采用传统 PID 控制算法，该算法结构简单、易于实现，但难以满足非线性时变负载的复杂工况，达到最优控制效果。当系统负载突变时，传统 PID 算法的比例系数，积分时间与微分时间无法实时调整，易出现超调量大，响应时间长等问题，如顶板压力突然增大场景下，传统 PID 控制会造成升架压力超调，引起支架振动。另外，协同控制策略的缺失也影响系统整体响应性能，智能化采煤工作面需要多支架与采煤机、刮板输送机协同作业，如果各支架单独控制，没有统一的协调机制，会造成部分支架的动作滞后，影响整个工作面的支护效率。

4 液压支架电液控制系统动力学建模与仿真分析

4.1 系统动力学模型构建

为精准揭示电液控制系统的响应机理，基于流体力学、控制理论及机械动力学，构建系统多域耦合动力学模型。在液压域，考虑电液比例阀的流量控制特性与液压管路的动态特性，建立比例阀流量方程与管路压力传递方程，其中比例阀流量方程采用线性化处理，结合阀口流量公式与电流-位

移转换关系,描述电流输入与流量输出的动态关系;管路压力传递方程基于波动理论,考虑液压油的压缩性与管路的弹性变形,揭示压力信号在管路中的传递规律。在机械域,以千斤顶与支架主体为研究对象,建立执行机构的动力学方程,结合牛顿第二定律,将液压推力与负载力的差值转化为千斤顶的加速度,进而得到位移与速度响应。在控制域,构建 PID 控制模型,将检测单元采集的位移、压力信号与指令信号的偏差作为输入,输出控制电流信号驱动比例阀动作,实现闭环控制。通过联立各域模型,形成完整的系统动力学模型,为响应特性分析提供理论基础。

4.2 基于仿真的响应特性分析

采用 AMESim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台,搭建电液控制系统仿真模型,其中 AMESim 搭建液压动力单元、执行机构及管路的物理模型, MATLAB/Simulink 搭建控制单元的算法模型,通过接口实现数据交互。仿真工况设定为大采高工作面正常采煤场景,控制指令为升架、移架的阶跃信号,仿真时长为 10s,主要分析系统的阶跃响应特性。仿真结果显示,原始系统的升架响应时间为 0.8s,移架响应时间为 1.2s,升架过程中压力超调量为 12%,存在明显的振荡现象,主要原因是比例阀死区与 PID 参数不合理所致。为检验关键影响因子作用,变比例阀死区大小与管路长度分别进行对比仿真:当比例阀死区从 0.05A 减小至 0.02A 时,升架响应时间减少为 0.6s,超调量降低为 8%;管路长度由 20m 减小至 10m 时,移架响应时间减少为 0.9s,响应延迟明显下降。仿真结果进一步证明了比例阀特性与液压传递特性对系统响应性能有显著影响,为后续的优化方向确定提供了数据支撑。

5 液压支架电液控制系统响应特性优化及试验验证

5.1 系统响应特性优化方案

基于上述分析,从核心部件优化与控制策略改进两方面提出响应特性提升方案。在核心部件优化方面,对电液比例阀采用“阀芯曲面优化+磁路改进”的设计思路,数值模拟阀芯节流口曲面形状,提高流量-电流特性曲线的线性度,并改进比例电磁铁的磁路结构,减小死区范围,使比例阀死区控制在 0.02A 以内;对液压管路采用“阀芯曲面优化+磁路改进”的设计思路,对液压管路进行微调,减小死区范围,使比例阀死区控制在 0.02A 以内;对液压管路进行变径管路+集成阀组的布局方案,在靠近支架的管路段采用大管径设计,降低沿程阻力,同时将比例阀、传感器等集成安装在支架上,缩短管路长度,减少压力传递延迟。在控制策略改进方面,提出基于模糊 PID 的自适应控制算法,通

过模糊控制器实时识别系统负载变化与响应偏差,动态调整 PID 参数:当响应偏差较大时,增大比例系数、减少积分时间,提升响应速度;当接近稳态时,减小比例系数、增大积分时间,抑制超调。同时,引入多支架协同控制策略,基于采煤机位置信号与相邻支架状态,制定统一的动作时序,避免动作冲突导致的响应延迟。

5.2 现场试验验证

为验证优化方案的有效性,在 A 矿 3102 大采高智能化采煤工作面开展现场试验,选取优化前后的 2 台同型号液压支架作为试验对象,通过数据采集系统实时记录支架升架、移架过程中的响应时间、压力超调量及位移误差等指标。试验结果显示,优化后支架的升架响应时间缩短至 0.5 秒,移架响应时间缩短至 0.7 秒,较优化前分别提升 37.5% 与 41.7%;升架压力超调量控制在 4% 以内,移架过程中无明显振荡现象,稳定性显著提升;移架行程误差由优化前的 $\pm 8\text{mm}$ 减小至 $\pm 3\text{mm}$,支护压力偏差控制在 $\pm 3\text{MPa}$ 以内,精准度大幅提升。在协同作业试验中,优化后的支架与采煤机的跟机滞后时间控制在 0.3s 以内,工作面推进速度较之前提高 15%,且不存在顶板支护失效问题,验证了优化方案的工程实用性。

6 结语

本文通过对智能化采煤工作面液压支架电液控制系统响应特性的系统研究,确定了电液比例阀特性、液压动力传递特性及控制策略是影响系统响应性能的核心因素。通过构建系统的动力学模型,揭示了比例阀死区、管路阻力及 PID 参数对响应延迟、超调量的影响机理;提出的“核心部件优化+控制策略改进”的综合优化方案,通过优化比例阀结构、缩短液压管路及采用模糊 PID 自适应控制算法,有效提升了系统的响应速度、稳定性与精准度,并通过现场试验验证了优化方案的有效性。本研究成果为液压支架电液控制系统的性能提高提供了理论与技术支撑,有利于智能化采煤工作面的高效安全运行。

参考文献

- [1] 聂永彪.采煤工作面智能化生产系统构建研究[J].能源与节能,2025,(03):32-34+38.
- [2] 梁强.智能化采煤工作面液压支架跟机移架控制技术研究[J].能源与节能,2025,(03):261-263.
- [3] 刘胜虎.友众矿智能化采煤工作面建设的探索与实践[J].山东煤炭科技,2024,42(12):45-49.
- [4] 张剑,霍猛.智能化开采在采煤工作面中的应用探讨[J].中国设备工程,2024,(12):30-32.
- [5] 仇志明.智能化综采工作面液压支架自适应跟机技术[J].矿业装备,2024,(06):177-179.