

综采工作面液压支架电液控制系统故障分析与改进

张 鹏 柳民富

山东新陶阳矿业有限责任公司 山东 泰安 肥城 271624

【摘要】：综采工作面液压支架电液控制系统在高湿、高粉尘及强振动环境中长期运行，易出现传感失灵、控制指令异常、液压执行迟滞等故障，直接影响支架动作协调性与顶板控制效果。围绕电液控制系统结构组成与运行特点，梳理典型故障表现，结合现场工况分析电气干扰、液压污染、信号传输衰减及元件老化等成因。在此基础上，从系统结构优化、抗干扰能力提升、密封与过滤强化、智能诊断引入及维护制度完善等方面提出针对性改进措施。通过故障机理分析与技术改进路径构建，形成较为完整的优化思路，为提升综采工作面支架控制系统运行稳定性与安全水平提供技术支撑。

【关键词】：综采工作面；液压支架；电液控制系统；故障分析；系统改进

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.026

引言

综采工作面作为煤矿高效开采的重要场所，设备运行状态直接关系到生产连续性与顶板控制质量。液压支架电液控制系统承担支架动作协调与群控管理任务，一旦出现异常，极易引发支护失稳与生产中斷。在复杂井下环境中，电气元件受潮失效、液压回路污染堵塞、信号传输不稳定等问题频繁出现，故障呈现出多源叠加与隐蔽性增强的特征。单一维修方式已难以满足高强度生产需求，有必要从系统层面对故障规律与改进路径进行梳理与分析，为稳定运行提供更加可靠的技术思路。

1 电液控制系统结构与运行特征

1.1 系统组成与控制原理

液压支架电液控制系统由电控主机、控制器模块、电磁先导阀组、压力与位移传感器、液压泵站及通讯网络等部分构成。电控单元通过采集支架位移、工作阻力及压力变化信号，完成数据处理与逻辑判断，并向电磁阀发出驱动指令，实现立柱升降、移架和推溜等动作控制。系统内部采用分布式控制架构，各支架控制器具备独立运算与互联通信能力，依托总线传输完成群组协调。控制原理基于电信号触发液压执行元件动作，通过比例控制与压力反馈形成闭环调节，提高动作精度与响应速度，确保支架支护阻力满足顶板控制要求。

1.2 电液协同运行机制

电液协同运行依赖电气控制逻辑与液压执行系统之间的精确匹配。控制器根据采煤机位置与邻架状态生成动作序列，通过驱动电磁阀改变液压油流向，使立柱油腔压力发生变化，从而完成支架伸缩与推移^[1]。液压回路中设置单向阀、平衡阀与安全阀，保证动作过程中的压力稳定与防倒流功能。信号采集与执行动作之间形成实时反馈链路，当检测到支护阻力偏差或位移异常时，系统自动修正控制指令。协同机制强调动作时序控制与压力曲线匹配，避免因响应滞后或流量分配不均引起支架姿态失稳。

1.3 井下工况对系统运行的影响

井下环境湿度大、粉尘浓度高且伴随持续振动，对电液控制系统运行产生显著干扰。高湿条件易导致电路板绝缘性能下降，接插件接触电阻增大，影响信号稳定传输；粉尘进入阀组与油路后可能造成阀芯卡滞与节流孔堵塞，引发液压动作迟缓或失灵。顶板压力波动与地质构造变化使支架承载负荷频繁调整，液压系统承受周期性冲击压力，密封件磨损加剧。复杂工况叠加使电气与液压系统故障呈现交互性特征，对控制精度与运行可靠性提出更高要求。

2 典型故障表现及问题归类

2.1 电气控制类故障现象

电气控制类故障多集中在控制器模块、电源系统及驱动电路环节。控制器内部元件老化或程序存储异常时，可能出现指令输出紊乱、动作逻辑错位或控制失响应现象。电源波动或接地不良会导致 PLC 运行不稳定，表现为支架动作间歇性中断。驱动电路中继电器触点烧蚀、电磁阀线圈绝缘下降，也会造成阀组无法正常开启。传感器接口接触电阻增大时，采集信号发生漂移，控制系统误判支架姿态，产生误动作或拒动。电气类故障往往具有突发性与隐蔽性，排查过程中需结合程序自检记录与实时数据曲线进行综合判断。

2.2 液压执行类异常表现

液压执行系统异常主要体现在支架动作迟缓、立柱下沉或推移不同步等现象。液压油污染度升高时，阀芯运动阻力增大，导致控制油路响应时间延长。密封圈磨损或缸体划伤会引发内泄漏，使支架工作阻力下降，出现支护力不足情况^[2]。安全阀调定压力偏离设计值时，系统压力波动明显，动作过程伴随冲击震动。液压泵站供液不足或油温异常升高，也会影响流量稳定性，造成群架推移节奏紊乱。此类问题多与油液清洁度、元件配合间隙及压力调节参数密切相关，需通过压力测试与流量检测进行定位。

2.3 信号与通讯失稳问题

信号与通讯异常常见于总线传输系统与数据采集单元。井下电磁干扰增强或屏蔽措施不足时，控制信号在传输过程中产生畸变，导致数据包丢失或校验失败。通讯接口松动或接插件氧化，会使支架之间信息交换延迟，群控动作出现不同步现象。数据采集模块受潮后绝缘性能下降，采样值出现跳变，系统误判为压力突变或位移异常。通讯协议配置错误或地址冲突也会干扰网络稳定运行，使控制主机无法准确识别各支架状态。信号链路不稳定直接削弱电液系统整体协调能力，增加运行风险。

3 故障成因机理分析

3.1 环境因素引发的系统失效

综采工作面处于高湿度、高粉尘及强冲击振动条件下，环境负荷对电液控制系统构成持续影响。空气中含水量偏高时，控制箱内部易产生凝露，电路板绝缘电阻下降，导致信号串扰与短路风险增加。煤尘颗粒进入电磁阀腔体或液压油路后，会改变节流间隙配合状态，引起阀芯运动阻滞及压力调节迟滞。工作面顶板周期来压产生的冲击载荷传递至支架结构，使传感器安装位置产生微位移，采集数据出现偏差。井下电磁设备集中运行形成复杂电磁场，弱电信号易受干扰，控制指令出现误触发。多种环境因素叠加，使电气系统与液压系统同时承受物理与电磁双重扰动，降低整体运行稳定性。

3.2 元件老化与结构缺陷影响

长期高频动作使电磁阀线圈绝缘层逐步劣化，温升过高时线圈电阻变化明显，驱动电流不足，阀芯开启不彻底^[3]。液压缸密封件在高压往复运动中产生磨损，密封唇口弹性衰减后形成内泄漏通道，支架支护阻力下降。控制模块内部电子元件经历热循环后焊点产生微裂纹，信号输出稳定性减弱。结构设计若存在油路布置不合理或流道截面积偏小现象，会引发局部压降过大与流量分配不均。连接件强度储备不足时，在反复冲击载荷作用下产生松动，导致接触电阻上升或液压渗漏。材料疲劳与结构参数不匹配共同作用，使系统性能逐步衰减。

3.3 维护管理薄弱带来的隐患

现场维护制度执行不到位时，油液污染度未按标准检测，颗粒杂质长期积累，加速阀组与泵体磨损。滤芯更换周期延长或规格选型不当，使过滤精度达不到设计要求，液压回路清洁度下降。电气接插件未定期紧固，振动作用下接触不良，导致间歇性断路。控制程序参数未根据地质条件变化及时调整，支护阻力设定值偏离实际需求，增加系统负荷。故障记录与数据分析缺乏连续性，隐患难以及时识别。操作人员对电液控制系统原理掌握不充分，误操作现象时有发生，进一步加剧设备运行风险。

4 电液控制系统优化路径

4.1 控制结构与硬件优化措施

控制架构可采用分层分布式设计，将主控单元、支架子控制器与执行驱动模块进行功能划分，通过现场总线实现高速数据交换，降低单点故障对整体系统的影响。核心控制器选用工业级嵌入式处理平台，提高抗振动与宽温度适应能力，关键芯片采用冗余供电设计，保证电压波动条件下的持续运行能力。驱动模块中引入固态继电器与过流保护单元，提升电磁阀驱动回路的可靠性。液压部分在优化路径中同样占据重要位置。对阀组集成方式进行改进，减少外部连接管路数量，缩短控制油路响应距离，降低压降损失。关键液压元件选用耐高压冲击型结构，提高密封面硬度与耐磨性能。油路布局按照流量均衡原则重新配置，使推移与升降动作时的流量分配更加合理。通过结构优化与硬件升级，使控制信号传递路径更加清晰，液压执行响应更加稳定，从源头上降低系统运行风险。

4.2 抗干扰与密封性能提升方案

井下复杂电磁环境对控制信号稳定性影响显著，因此在优化过程中需强化抗干扰设计。电气系统布线采用屏蔽双绞线，并将动力线路与信号线路分区敷设，减少耦合干扰。控制箱内部增设滤波电路与浪涌吸收装置，削弱电网波动对控制器的冲击。通信接口增加隔离模块，提升总线抗共模干扰能力。接地系统实施等电位连接，形成稳定的参考电位环境，避免因电位差导致数据传输异常。密封性能提升同样关系到系统长期可靠运行。控制箱体采用防护等级较高的密封结构，接缝处使用耐老化橡胶密封圈，防止湿气侵入^[4]。液压系统密封件选用耐高温、耐磨损材料，提高在高压往复运动中的稳定性。对电磁阀与传感器接口部位进行密封加强处理，避免煤尘进入内部腔体。油液过滤系统升级为多级过滤结构，提高污染物拦截效率。通过电磁防护与物理密封双重强化，降低环境因素对系统运行造成的不利影响。

4.3 智能监测与预警机制构建

在优化路径中引入智能监测技术，可实现对液压支架电液控制系统运行状态的实时掌握。控制系统内嵌数据采集模块，对压力、位移、电流及温度参数进行连续监测，并通过工业以太网传输至上位机平台。利用数据分析算法建立运行参数阈值模型，对异常波动进行识别与预判。当检测到压力曲线异常或驱动电流偏离设定范围时，系统自动生成报警信息并记录故障时间节点。同时构建历史数据存储与趋势分析机制，对关键部件运行状态进行寿命评估。通过对比不同工况下的运行数据，可判断阀组磨损程度与密封性能衰减趋势。预警机制与现场控制系统联动，在异常达到设定等级时自动限制部分动作或调整控制参数，降低风险扩散概率。借助信息化手段实现由事后维修向状态预测转变，使系统运行管理更加精准化与数据化。

5 运行保障与效果提升措施

5.1 标准化检修流程完善

检修工作按照周期性检查与状态性检测相结合的方式开展,对控制器运行日志、输入输出信号状态及通信质量进行系统排查。电气部分应重点检测电源电压波动范围、接地电阻值及驱动回路绝缘性能,通过万用表与绝缘测试仪获取关键数据,确保控制信号输出准确可靠。液压系统检修内容涵盖油液污染度检测、压力表校验及阀组动作灵敏度测试,借助颗粒计数仪和压力校准装置对运行指标进行量化分析。检修流程中引入作业标准卡与风险辨识清单,对拆装步骤、紧固力矩及参数设定值进行明确规定,减少人为操作偏差。故障排查过程需记录故障现象、处理方法及恢复时间,形成可追溯档案。通过制度化管理与数据化记录,使电液控制系统维护工作具备可执行性与可监督性,保障检修质量稳定。

5.2 关键部件寿命管理策略

液压支架电液控制系统长期处于高频动作状态,电磁阀、传感器、密封组件及控制模块属于高磨损与高负荷部件。寿命管理需以运行数据为基础,对关键部件建立档案,记录累计动作次数、工作压力区间及温升变化情况。电磁阀线圈可通过电阻值变化趋势判断绝缘衰减程度,传感器则依据输出信号稳定性与零点漂移量进行性能评估^[5]。密封件根据油液泄漏量与支护阻力变化情况判断磨损状况,避免因内泄漏扩大引发支架承载能力下降。寿命预测模型可结合历史运行数据与工况参数,

设定预警阈值,当达到临界运行时间或动作次数时提前安排更换。备品备件管理应与寿命周期相匹配,保证关键元件库存合理。通过数据化与计划化管理手段,使部件更换由被动维修转向主动调度,降低突发故障对综采作业节奏的干扰。

5.3 系统稳定性综合提升路径

系统稳定性提升需要技术措施与管理措施协同推进。运行阶段对电液控制参数进行动态校核,根据采高变化与顶板压力情况适度调整支护阻力设定值,使控制逻辑与实际工况保持一致。通过优化动作顺序与延时参数,减少群架联动过程中产生的冲击负荷。对液压泵站供液能力与油温控制进行持续监测,保持压力输出与流量分配在合理范围内。管理层面强化岗位培训,提高操作人员对电液控制原理与故障征兆的识别能力,避免误操作对系统造成附加负荷。建立运行评估机制,对故障率、停机时间及维修成本进行统计分析,形成闭环改进流程。技术优化与规范管理共同作用,使液压支架电液控制系统在复杂井下环境中保持协调运行状态,支护动作更加平稳,生产组织更加有序。

6 结语

综采工作面液压支架电液控制系统在复杂井下条件下运行,对结构设计、控制精度及维护管理均提出较高要求。针对典型故障表现与成因机理,实施结构优化、抗干扰强化及寿命管理等措施,有助于提升系统运行可靠性与支护稳定水平,保障采煤作业安全有序推进。

参考文献:

- [1] 雷素波.液压支架电液控制系统的设计及应用[J].能源与节能,2025,(10):274-277.
- [2] 王钧,罗岩.基于全景视频的综采工作面智能控制系统与关键技术应用研究[J].山东煤炭科技,2025,43(09):88-92.
- [3] 刘晓强.煤矿综采工作面智能电液控制系统设计与应用试验[J].机械管理开发,2025,40(08):224-225+228.
- [4] 宋德伟.综采工作面液压支架电液控制系统的设计研究[J].石化技术,2025,32(08):387-388.
- [5] 孟强.薄煤层综采工作面液压支架电液控制系统设计[J].凿岩机械气动工具,2025,51(07):45-47.