综采工作面液压支架电液控制系统故障诊断与容错控制研究

贾雨晨

陕西陕煤韩城矿业公司象山矿井，中国 ·陕西 韩城 715400

摘要：综采工作面液压支架电液控制系统的运行状态关系到工作面生产效率和支护安全。井下工作环境潮湿、粉尘大、设备振动频繁，电液控制系统容易出现各类故障。本文结合现场实际情况，分析了液压支架电液控制系统的组成结构和常见故障类型，讨论了基于多源数据融合的故障诊断方法，并提出了相应的容错控制策略。现场应用情况表明，合理的故障诊断和容错措施能够降低系统故障率，减少停机时间。

关键词：综采工作面；液压支架；电液控制系统；故障诊断；容错控制

Research on Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control of Electro-hydraulic Control System for Hydraulic Supports in Fully Mechanized Working Faces

Jia Yuchen

Xiangshan Mine of Shaanxi Shaanxi Coal Hancheng Mining Company, China Shaanxi Hancheng 715400

Abstract: The operation state of the electro-hydraulic control system for hydraulic supports in fully mechanized working faces is directly related to the production efficiency and support safety of the working face. The underground working environment is characterized by high humidity, heavy dust and frequent equipment vibration, which makes the electro-hydraulic control system prone to various faults. Combined with actual field conditions, this paper analyzes the structural composition and common fault types of the electro-hydraulic control system of hydraulic supports, discusses the fault diagnosis method based on multi-source data fusion, and puts forward corresponding fault-tolerant control strategies. Field application results show that reasonable fault diagnosis and fault-tolerant measures can reduce the system failure rate and shorten production downtime.

Keywords: Fully mechanized working face; Hydraulic support; Electro-hydraulic control system; Fault diagnosis; Fault-tolerant control

0 引言

煤炭开采过程中，综采工作面的生产效率和安全状况与液压支架的工作状态关系较大。液压支架电液控制系统是实现支架自动跟机、自动支护的常用设备。随着综采工作面自动化程度不断提高，电液控制系统的应用范围越来越广。井下工作条件比较恶劣。巷道空间狭小，空气湿度大，煤尘浓度高，设备运行时振动大。这些因素都会对电液控制系统的正常工作产生影响。传感器漂移、电磁阀卡滞、通信中断等故障时有发生。如果故障不能及时发现和处理，可能导致支架动作不到位，影响顶板管理，甚至引发安全事故。目前，很多煤矿在电液控制系统维护方面还停留在事后维修阶段。故障发生后，维修人员需要逐台排查支架，花费时间较长[1]。对于长工作面来说，一台支架控制器出现问题，可能影响整个跟机工艺的正常进行。因此，研究故障诊断方法和容错控制策略，对提高系统运行可靠性有实际意义。

1 液压支架电液控制系统故障特性分析

根据现场调研和文献资料，液压支架电液控制系统的故障可以分为电气故障、液压故障和通信故障三类。

电气故障主要集中于传感器和控制器这两类部件上，在井下的潮湿环境中长时间工作，密封件的老化破损会导致乳化液进入元件内造成测量误差或者断线现象；其中压力传感器常见的故障是零点漂移，即输出值不等于真实的压力值；行程传感器常见故障是由滑动接触不良造成的，会出现数据跳变或是没有输出的现象；而控制器中按键失灵、显示异常、程序跑飞等情况也都是电气故障的表现形式之一[2]。从故障发生的数量上看，传感器故障占了电气故障总量的一半以上。压力传感器寿命一般是 2 到 3 年左

右，由于受机械磨损的影响，行程传感器寿命相对较短一些。控制器的整体故障率较低，一般在使用 3 到 5 年后会逐渐出现各种故障问题。

液压故障与阀组和管路有关。电磁先导阀由于阀芯磨损或污物卡滞，出现动作迟缓或不动作。主阀密封件损坏后发生窜液，立柱保压性能下降。供液管路接头泄漏会导致系统压力不足，支架动作速度变慢。安全阀整定压力变化也会引起支护阻力异常。液压故障的产生与乳化液的质量关系较大。如果乳化液的配比不符合要求，或者过滤不充分，杂质进入阀组后会加速阀芯和密封件的磨损。现场经验表明，乳化液管理较好的工作面，阀组的更换周期可以延长 30% 以上。

通信类故障主要表现为数据传输中断，或是传输的数据出现错误。总线接头松动、线缆破损时，会导致对应区段的支架控制器无法与端头控制器正常通信。井下电磁干扰易造成数据帧出错，控制系统接收到错误信息后可能产生误动作。长工作面传输距离远，总线信号随链路衰减，也是通信故障的诱发因素之一。通信故障在电液控制系统总故障中占比偏高，约占总故障数的四分之一。其中，接头松动与线缆破损是这类故障的主要成因。工作面推进过程中，线缆随支架不断移动弯折，反复受力后容易出现内部线芯断裂。

系统故障的出现与井下工作环境有直接关联。井下温度高、湿度大，电气元件长期处于潮湿环境中容易损坏。乳化液内的杂质进入阀组后，会加快内部部件的磨损速度。设备随工作面推进不断移动，线缆和接头持续受到拉扯、挤压。多重因素共同影响，使得电液控制系统的故障率相对偏高。

2 基于多源数据融合的电液控制系统故障诊断方法

2.1 数据采集与特征提取

电液控制系统的运行过程中产生大量的实时数据，在压力数据上可以反映出支架实际受到的受力情况，在行程数据上则能体现出支架的动作执行过程，并且电流数据也可以反映出电磁阀工作的情况[3]。其中蕴含着故障特征的信息，需要有针对性地进行分析和挖掘。对于压力数据来说其典型的特征包括：平均压力值、压力波动幅度以及压力上升时长等等。当支架立柱完成一次升降动作后，正常的压力变化曲线有固定的规律性。如果电磁阀出现了卡滞，则压力上升的时长就会明显的变大，而如果密封件发生了泄漏，则保压阶段的压力下降速度也会变得非常快。例如，以升柱为例，正常情况下立柱下腔压力由 0 到达到额定压力的时间一般都在 3~5s 之间，一旦这个时间超过了 8s 就可以判断系统存在一定的异常隐患，原因一般是电磁阀开度过小或者是供液管路出现了泄漏现象。通过对相邻两个支架的压力变化曲线进行比较，能够大致划定故障影响范围。

行程数据的核心特征涵盖动作执行时长、行进速度、最终到位精度。正常移架作业中，推移千斤顶从收缩位运行至伸出位的时长处于固定区间内。若动作时长出现明显延长，大概率是液压系统供压不足，或是机械结构出现卡滞。通信数据的特征包括通信成功率、数据更新频率、错误帧数量。当某台支架控制器的通信失败率升高时，说明该节点的通信线路可能存在问题。除了上述直接测量的数据，还可以计算一些派生特征。比如压力变化率、行程与压力的比值、两次动作之间的时间间隔等。这些派生特征往往能更灵敏地反映故障状态。

2.2 分级诊断策略

根据故障的明显程度，可以将诊断分为三个层次。

第一层次是阈值判断。为各项监测参数划定正常取值区间，参数数值超出区间即触发报警。这种方法实现逻辑简单，适合检测特征明显的故障。常见应用场景包括压力传感器读数超量程、行程数据长时间无变动、通信链路中断等。阈值判断的优点是运算量小，可直接在支架控制器中实现[4]。缺点是对渐变发展的故障敏感度较低，误报警率相对较高。阈值的设定需要结合现场实际工况确定。不同矿井地质条件不同，支架的工作阻力范围也存在差异。阈值设置过宽，会出现较多故障漏报；设置过严，又会产生大量误报。通常需要积累一段时间的运行统计数据，才能确定适配的合理阈值。

第二层次是趋势分析。对参数的变化趋势进行监测，判断性能劣化的程度。比如压力传感器的零点漂移是一个缓慢过程，通过比较历史数据，可以发现测量值的偏移趋势。行程传感器的磨损也是逐渐加重的，动作时间会慢慢变长。趋势分析能够在故障还没有完全发生时就发出预警，给维护留出时间。趋势分析的实现方法比较简单。可以记录每个参数最近若干天的平均值，计算变化速率。如果变化速率超过预设的限值，就发出预警。比如压力传感器的零点每月漂移超过 0.5MPa，就提示可能需要校准或更换。

第三层次是模式识别。通过多个参数的组合特征，识别各类复杂故障。例如支架动作迟缓，可能是供液压力不足导致，可能是主阀卡滞引发，也可能是机械阻力过大造

成。仅靠单一参数很难区分故障根源，需要结合压力、流量、动作时间等多项参数综合判断。可采用模糊逻辑或神经网络算法，基于已知的故障样本训练诊断模型，实现故障类型的自动分类。这类方法对样本数量的要求较高。只有积累足够多的故障案例，才能训练出准确度较高的模型。实际应用中，可先从简单的规则方法起步，随着运行数据不断积累，再逐步引入更复杂的诊断算法。

2.3 故障定位方法

当故障发生时，准确找到故障位置很重要。对于通信故障，可以采用分段排查的方法。端头控制器记录各节点的通信状态，当某一段支架同时出现通信异常时，故障点大概率在这一段的总线干线上。如果单台支架通信异常，故障可能在该支架的通信接口或分支线缆上。现场排查通信故障时，可以使用替换法。用一台正常的支架控制器替换疑似故障的控制器，如果故障消失，说明是控制器的问题。如果故障仍然存在，说明问题在线缆或接头上。对于传感器故障，可以通过交叉验证来判断。同一台支架的压力传感器有上腔和下腔两个测量点，正常工作时两者的比值在一定范围内。如果其中一个点的数据明显偏离，可以判断是该传感器出了问题。行程传感器可以通过支架动作后的实际位置与相邻支架的比较来校验。对于液压故障，可以结合动作指令和执行结果来分析。控制器发出升柱指令后，如果压力没有上升，说明电磁阀可能没有打开。如果压力上升但行程没有变化，可能是机械部分卡滞。故障定位的准确性影响维修效率。如果诊断系统能够指出故障位置和类型，维修人员到达现场后就可以带着相应的备件，一次完成更换。这样可以减少往返时间，提高维修效率。

3 液压支架电液控制系统主动容错控制策略

3.1 硬件冗余设计

硬件冗余是比较常用的容错方法[5]。容易出故障的部件一般采用冗余配置，当一个部件出现故障时，另一个部件自动接替工作。传感器冗余方面，对自动控制影响较大的监测点可以配置两个传感器。比如立柱下腔压力可以安装两个压力传感器，正常情况下两个数据相互校验。当其中一个传感器的数据明显偏离时，控制系统自动采用另一个传感器的数据，并发出维修提示。这种方法增加了成本，但可靠性提高比较明显。实际应用中，并不是所有传感器都需要冗余。考虑到成本因素，通常只对影响安全和自动控制的传感器采用冗余设计。比如用于判断支架接顶状态的压力传感器，用于检测采煤机位置的红外线传感器，这些传感器一旦故障，自动跟机就无法进行，所以需要冗余配置。控制器冗余方面，端头控制器可以采用双机热备。主控制器出现故障时，备用控制器自动切换，保证系统继续运行。对于支架控制器，考虑到每台支架都配置冗余控制器成本太高，通常采用标准化设计，所有支架控制器型号相同，出现故障时可以快速更换备用控制器。通信冗余方面，总线可以采用双回路设计。当某一段线路断开时，数据可以从另一个方向传输。环网结构比总线结构的通信可靠性更高，因为每个节点有两条通信路径。双回路通信的实现方式有两种。一种是物理上布置两条独立的总线，另一种是在软件上实现环网协议。两种方法各有优缺点，物理双总线的可靠性更高，但成本也更高。环网协议的成本较低，但需要控制器支持相应的协议。

3.2 软件容错措施

软件容错主要通过算法和逻辑设计来实现。数据滤波是常用的软件容错方法。传感器数据经常受到干扰，出现毛刺和跳变。采用滑动平均滤波或中值滤波，可以滤除瞬时干扰，让数据更平稳。对于明显异常的点，可以直接剔除，不参与控制计算。滤波参数的选择需要根据现场情况调整。滤波窗口太大，数据滞后严重；窗口太小，又滤不掉干扰。通常需要经过现场调试，找到一个合适的平衡点。控制逻辑方面，设置安全联锁条件。当传感器数据异常时，控制系统不执行自动动作，转为手动模式。这样可以避免基于错误数据做出错误控制，造成更大的问题。比如压力传感器故障时，系统不能判断支架是否接顶，此时自动移架存在安全风险，应该暂停自动跟机，通知操作人员现场处理。故障隔离机制也很重要。当某一台支架出现故障时，控制系统应该能够将这台支架从自动跟机序列中排除，其余支架继续正常运行。长工作面通常有上百台支架，单台支架故障不应该导致整个工作面停产。通过软件设置，可以跳过故障支架，相邻支架调整动作顺序，维持基本生产。故障隔离的实现需要在控制系统中设置故障标志位。当某台支架被诊断为故障时，系统在自动跟机程序中跳过这台支架的动作指令。同时，在监控界面上显示故障支架的编号，提醒维修人员及时处理。

3.3 故障恢复与降级运行

有些故障是暂时的，可以自动恢复。比如通信干扰造成的数据错误，经过几次重试后可能恢复正常。控制器程序跑飞可以通过看门狗定时器自动复位。对于这类瞬时故障，系统设计时要考虑自动恢复的能力，减少人工干预。通信重试的次数和间隔需要合理设置。重试次数太少，可能错过恢复机会；太多，又会占用总线带宽，影响其他节

点的通信。通常设置为 3 到 5 次重试，每次间隔几百毫秒。当故障比较严重，无法自动恢复时，系统可以降级运行。比如自动跟机功能失效后，可以转为手动操作模式，由工人在支架旁手动控制。虽然效率降低了，但生产不会完全停止。这是一种比较务实的容错方式。降级运行的程度可以根据故障情况分级。轻度故障时，系统减少自动功能的范围，保留基本的监视和报警功能。中度故障时，自动跟机停止，转为邻架手动操作。重度故障时，整个电液控制系统停止，改为手动操作阀组。日常维护中，根据故障诊断系统提供的信息，有针对性地安排检修，也属于容错控制的范畴。预测性维护可以在故障发生前更换老化部件，避免突发停机。预测性维护的实施需要建立设备的寿命模型。根据传感器的使用时间、动作次数、工作环境等参数，预测部件的剩余寿命。在寿命到期前安排更换，既保证安全，又不会过早更换造成浪费。

4 结语

液压支架电液控制系统的故障诊断和容错控制是一个涉及多学科的问题。本文从现场实际出发，分析了系统的常见故障类型和产生原因，讨论了基于多源数据的诊断方法，提出了硬件冗余、软件容错和降级运行等容错措施。从现有应用情况来看，故障诊断系统能够帮助维修人员快速定位故障，减少排查时间。容错控制策略在一定程度上提高了系统的运行连续性。但目前的诊断准确率还有提升空间，特别是对于早期的、渐进性的故障，识别能力还不够。容错控制的水平也与系统的自动化程度有关，很多措施还需要人工参与。今后的工作可以从几个方面深入。一是积累更多的故障样本数据，训练更准确的诊断模型。二是研究更经济的冗余方案，在成本和可靠性之间找到平衡。三是结合井下实际情况，优化容错控制策略，让系统在故障条件下的运行更加合理。

参考文献：

[1] 宋单阳，宋建成，田慕琴等. 煤矿综采工作面液压支架电液控制技术的发展及应用[J]. 煤炭科学技术，2022.

[2] 赵攀. 电液控制系统在煤矿智能综采工作面液压支架中的研究与应用[J]. 煤炭技术，2023.

[3] 孟祥宇. 综采工作面液压支架电液控制系统应用[J]. 煤矿机械，2021.

[4] 田明. 某煤矿智能化综采工作面液压支架电液控制系统方案设计与实现[D]. 西安科技大学，2023.

[5] 王俊. 综采工作面液压支架电液控制系统的优化设计[J]. 工矿自动化，2022.