

矿山机械电子设备的液压系统故障与处理技术

李宗华

广西佛子矿业有限公司 广西 岑溪 543102

【摘要】：随着矿山机械电子设备中液压系统日益复杂化、智能化，在此情况下依靠以往经验进行液压系统故障维修已不能适应目前高端电液控制系统的要求。鉴于矿山恶劣的工作环境造成液压系统经常出现故障并且难以修理而使生产停工时间较长带来的损失较大问题，本文首先介绍了矿山机械电子设备液压系统的基本组成和工作原理，确定了进行故障诊断的方向；然后根据油液污染引起阀芯卡死磨损加剧、系统温度过高导致密封圈老化和油液氧化、气穴发生时产生噪声并对零部件造成侵蚀还有电信号异常造成动作错误四个方面阐述液压系统出现的问题；最后结合以上几种情况提出采用油液污染程度实时监控并强制过滤、改善冷却系统的设计以及设置温度过高报警的方法来解决这些问题从而达到准确判断故障位置并及时排除的目的保证机械设备正常运行保障人员安全。

【关键词】：矿山机械电子设备；液压系统；故障；油液污染；系统过热

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.052

前言

随着矿山开采规模日益增大以及智能化程度不断提高，矿山机械朝着大功率、高效化、电液一体化方向发展。而现代矿山工作条件差，有大量灰尘，负荷大，持续运转等特征，对其中起着“肌肉”和“神经”作用液压系统提出很高要求。液压系统不但要完成能量传输和动力供给任务，而且还要同电气控制系统结合起来，决定整个机器的工作能力和安全性。但是，在复杂地下或露天矿环境中，传统定期保养加上出现问题后再修理方式已经不能满足高精度电液控制设备保养要求，由于系统问题造成意外停机会给生产和安全带来很大危害。所以研究矿山机械上电子元件所用液压系统出现各种问题原因并制定合理有效预防措施，对于保证矿山安全运行、减少维护费用具有重要意义。

1 矿山机械电子设备液压系统的结构

矿山机械电子设备液压系统是集机、电、液一体化的动力传递以及控制装置。它的工作目的是将原动机产生的机械能转换成液压能，并按电子控制器的要求提供相应大小的动力。该系统主要包括动力部分、执行部分、控制部分、辅助部分以及电子控制部分^[1]。其中动力部分是以液压泵为主，从油箱吸取油液后送到整个系统的各个部位，它是系统的“心脏”。而执行部分主要有液压缸和液压马达，它们接受来自泵的压力油，再把它转变为机械能，用来带动挖掘机的工作装置如挖斗、破碎锤或者行走履带等。

控制元件是各种液压阀构成的重要部件，有方向阀、压力阀以及流量阀，用来改变油液流动的方向、压力和流量从而达到不同的速度与力量的要求；辅助元件包含油箱、滤油器、冷

却器、蓄能器、管路和管件等，虽然不起主要的作用，但是它们对于保持系统清洁、温度恒定和正常工作非常重要。而且在现在的矿山机械中，电子控制单元（ECU）已经融入液压系统中，利用传感器实时检测压力、流量和位置信息，然后由微处理器进行计算产生电信号来控制比例阀或者伺服阀，从而实现整个液压系统数字化、智能化闭环控制，大幅地提高了机器的工作效率及精确度^[2]。

2 矿山机械电子设备的液压系统故障原因分析

2.1 油液污染导致的阀芯卡滞与磨损加剧

油液污染是矿山机械液压系统故障最常见的原因，而污染来源有外部带入的固体颗粒、水分以及系统内部产生的磨粒和氧化物，在矿山工作环境中存在着大量的灰尘，当密封圈损坏或者加注润滑油不当都容易使灰尘进入油箱内，这些坚硬的颗粒随着油液流动到细小间隙中的精密元件如液压阀上时就会卡入阀芯与阀体之间的小缝隙之中从而破坏原来的润滑膜形成研磨作用，这种磨损会导致阀芯被刮花使阀芯不能在阀孔内移动甚至被卡住引起换向失败或者是压力过高，另外这些颗粒也会在高压油流带动下对泵、马达的配流盘、柱塞等重要部位造成冲蚀磨损^[3]。

2.2 系统过热引发的密封件老化与油液氧化

液压系统过热是系统在工作时油温高于额定温度（一般为60℃~70℃）并且不断上升情况，在矿山机械长期处于超载状态或者散热器效率降低条件下，会有较多机械功以节流、溢流等形式转换成热量，在高温环境下，会使液压油中的碳氢化合物进行加速氧化而使油质变稠、酸度增大，还会生成一些胶状物质以及沥青质等物质。

这些物质很容易堵塞到阀门上的节流小孔或者是细缝当中，从而影响整个系统的正常工作；另一方面过高温度也会使丁腈橡胶、氟橡胶等密封圈发生热老化现象而导致它们出现物理性质变化即变硬失去弹性和缩小体积，在接触面上形成微小裂缝或者是永久性变形^[4]。

2.3 气穴现象造成的泵体啸叫与元件腐蚀

气穴现象主要是出现在液压泵的吸油管道或者阀门节流部位，是由于这部分的压力低于该温度下液压油的空气分离压力或者是饱和蒸汽压力，在矿山机械高海拔工作环境或是吸油过滤器严重堵塞情况下，泵吸油口容易出现真空，使得溶于油液当中的气体大量溢出变成微小气泡，当这个气泡随着油液进入高压区后，在一瞬间就被压缩破裂，产生很高的局部温度以及冲击波，这样频繁的液压冲击会对面接触式的定子内圆面、齿轮啮合面以及阀芯棱边造成严重的微细腐蚀磨损，称为气蚀磨损，会造成零件表面呈蜂窝状麻点或者深层次剥落。

2.4 电气控制信号异常引起的执行机构误动作

目前，大多数现代矿山机械都使用电液比例控制技术，即用比例控制阀来实现对液压阀开度进行控制（电液比例控制阀结构如图 1）。但是由于其结构紧凑，在复杂的电磁环境中十分敏感。电气控制信号异常主要有以下几种原因：传感器损坏、导线受到干扰或者控制器出现问题。而在矿井中会有大量的大功率电机频繁启动停止、变频器产生的谐波以及各种无线通信装置都会发出很强的电磁干扰（EMI），如果信号电缆未经双绞屏蔽或者未做好接地措施的话，这些干扰就会耦入控制系统中，这样会使比例电磁铁接收到错误电流信号而造成阀芯位置偏离预定位置。

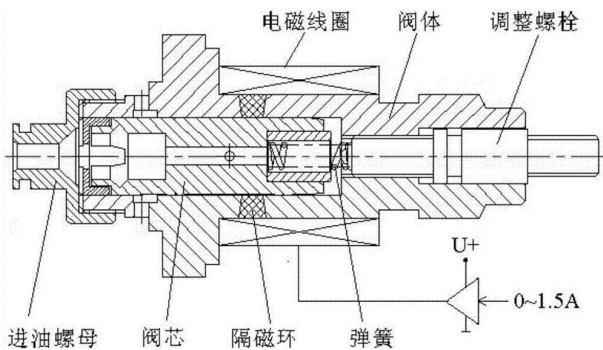


图 1 电液比例控制阀

3 矿山机械电子设备的液压系统故障处理策略

3.1 实施油液清洁度在线监测与强制过滤

为解决因油液污染造成阀芯卡死及磨损严重问题，应有一套完整的油液净化及检测手段。首先是在液压系统的回油管路上连接一个在线颗粒计数器，这个颗粒计数器要能够测量油液中的固体颗粒大小以及个数等信息。而这些信息又通过 CAN 总线发送到驾驶室内的显示器上，在油液清洁度下降到规定的

NAS 1638 10 级时就会响起警告的声音并且发光提醒司机注意。

维修人员可增加旁路过滤回路以及离线再生设备，在系统的主回油路上设置一条分支线路，连接一个过滤精度达到 $3\mu\text{m}$ 绝对精度的过滤器，此过滤器须有 β 值大于 200 的过滤能力以防止造成磨损的硬质颗粒进入系统。对含水量过高的润滑油使用真空脱水滤油机进行处理，利用水在真空状态下具有很低的沸点，在喷淋雾化后实现油水分离从而除去溶解水和游离水。并且要定期更换油箱呼吸器中的干燥剂滤芯以防外部湿空气进入油箱内。

同时，严格遵守取样化验规定，每周用专用无菌取样瓶，在系统正常工作状态下，在油箱中间取样孔取油 100ml，送到实验室做光谱分析，检测铁、铬、铜等金属含量变化情况，从而判断泵、阀、缸磨损情况，根据化验结果及时调整滤芯更换周期，当压差发讯器提示滤芯堵塞时，应立即更换，不能使其带病工作。

3.2 优化散热系统设计及温控保护程序

对由于系统过热造成密封圈老化以及润滑油氧化问题可以分别从硬件散热能力和软件控制上进行优化。首先维护人员需要查看现有的翅片式冷却器是否已经严重积灰，用高压气流从反方向吹扫散热片之间的缝隙，把灰尘、纤维等清理干净以恢复散热面积。如果发现冷却器内部管线因为结垢而降低传热效果，则需要把冷却器拆开，在专门的除垢剂中浸泡后再清洗，严重时可考虑更换更高效的板式冷却器。

对于液压回路改进，在主溢流阀溢流口增加一个较小流量的单独冷却回路。在系统溢流状态下，大量高压油从溢流阀回到油箱，会带来较大温升，可在该回路上增加一条通往板式换热器的支路，对这部分高温回油进行预冷后再送回油箱以减小油箱整体温升速度；另外要检查并维修冷却风扇驱动电机，使其能根据油温大小变化而相应改变转速，进而实现送风量随温度变化而变化。

从软件方面进行改善主要是通过电控系统温控保护逻辑实现。在 PLC 或者专门控制设备上需要有多个温控程序，当发现油温高于 65°C 时，控制系统自动减少发动机油门大小，减小泵工作量；而当温度进一步升高到 75°C 以上时，则禁止除行走以外的一切大负载动作，仅可低速运行直到温度降到正常范围内。同时必须有自锁机制以免被人为误操作。

3.3 排查吸油管路密封性并更换进气滤芯

对于气穴引起泵体啸叫以及元件锈蚀问题主要是解决泵吸空问题，使吸油管路完全封闭即可。

首先对液压泵吸油口法兰进行查漏，用扭矩扳手以对角线方式拧紧法兰连接螺栓至规定拧紧力矩，检查法兰密封圈材质是否合适以及尺寸是否正确，如发现密封圈有挤出、撕裂或者

永久性变形情况,则需更换为耐油丁腈橡胶材质 O 形圈,不能用一般橡胶代替。同时,对于吸油软管段检查要查看胶管外层是否有破裂或者鼓包,在机器停止工作情况下,在吸油管外面滴几滴检漏液,再启动发动机到正常工作转速,看有无气泡冒出,如果发现管子上有裂纹,整个单元要用符合 SAE 标准的钢丝编织加强型胶管来代替。

更换进气滤芯也是防止空气进入一个重要手段。维护人员可拆开油箱上方空气滤清器总成,查看里面滤芯是否被尘土堵住。更换时要选带有一个安全阀滤芯,这个安全阀在滤芯堵塞时会打开,以免造成泵吸空现象,在装上之前要在密封圈上抹一点机油起到润滑以及密封效果,拧紧时也要小心,切勿拧断螺纹或者损伤密封圈。

3.4 屏蔽电磁干扰并校准传感器信号链路

对于由于电气控制系统信号问题导致的动作错误,要采取信号隔离及精度校正。首先是加装硬件屏蔽层。将所有连接至比例阀以及传感器的信号线路全部更换为带有两层屏蔽的双绞线。施工时不得使信号线与动力线共管敷设或者绑扎在一起,两者距离应在 30cm 以上以防强电电缆产生的感生磁场进入信号回路。屏蔽层两端均须良好接地并且其接地电阻应小于 4Ω ,这样才能起到良好的法拉第笼作用。

其次,在电控柜内安装电源滤波器以及磁环扼流圈,将比例阀电源线穿过铁氧体磁环,用电感对高频干扰有较大阻抗作用,起到抑制变频器产生高次谐波的作用;另外,在 PLC 的模拟量输入端并联一个 RC 低通滤波器,其截止频率设置为 100Hz,以滤除由触点抖动或者电磁干扰而造成的高频尖峰噪

声,保证送至控制器的电压是平稳的。同时,传感器信号校准是保证控制系统准确的前提条件。维护人员可在高精度万用表、信号发生器下,对位移传感器、压力变送器逐一校准。先从零点开始校准,让传感器处于机械零位处,通过调整电位器使其输出电压为 0.5V 或者 4mA;再施加最大值信号,通过改变增益电位器使之输出为 4.5V 或者 20mA。此操作重复三次,以便消除由于机械原因造成的回程差影响,使得线性误差小于等于 $\pm 0.25\%FS$ 。

最后,在控制程序内加入信号合理性的检查。编写软件滤波算法,对接收到的信号进行中值平均滤波,去除偶然出现的异常值;另外还需有信号丢失检测,如果反馈信号瞬间大幅变化而没有任何操作引起,则认为是信号受到干扰,停止输出并且报警,直到信号恢复后才解除锁定,这样既具有硬件又具备软件的抗干扰措施。

4 结语

本文针对矿山机械电子设备液压系统进行分析研究,提出对油液清洁度进行在线检测以及强制过滤、改进冷却装置及温度控制软件、检查吸油管道是否漏气并更换进气滤芯、排除电磁干扰并调整传感器信号线等措施来解决阀芯卡滞、密封件老化、元件气蚀以及执行元件失控现象,使整个液压系统的工作性能得到很大提高,有利于矿山企业的预防性维修以及精细化管理。在以后的工作中,维护人员还可以进一步采用智能化传感器以及大数据故障预报方法加强对电液系统健康状况以及寿命的研究工作,从而促进矿山机械的发展向着无人化和智能化的方向发展。

参考文献:

- [1] 郝建行. 矿山机械液压系统故障诊断技术与优化策略[J]. 中国金属通报, 2026(1): 136-138.
- [2] 张俸铭. 矿山机械设备的液压故障分析与处理[J]. 矿业工程, 2025, 23(4): 55-57, 101.
- [3] 高晓国. 矿山机械设备液压系统故障浅析[J]. 机械与电子控制工程, 2025, 7(13).
- [4] 高伟彪. 矿山机械设备的维修与维护[J]. 机械与电子控制工程, 2025, 7(13).