水电闸门液压启闭机故障诊断与状态评估研究

邓开文

（国能大渡河检修安装有限公司，四川 成都 610041）

摘 要 水电闸门液压启闭机承担着水流调节和防洪调度的主要任务，设备长期处在潮湿多尘的工况中，易出现液压元件磨损、油路污染、控制信号偏移等状况，传统的手工巡检方式存在故障发现迟缓、评价标准不明、运维成本过高的缺点。本文围绕启闭机故障类型识别诊断技术路径、状态评估体系构建开展系统性探究，梳理液压动力、执行、控制三大核心单元的常见故障诱因，结合多源传感信号采集与时频分析方法搭建逐层递进的分层故障诊断流程，构建涵盖运行性能、元件损耗、油液品质、环境适应性的综合评价体系，形成故障处置与状态分级运维的配套方案。研究成果旨在提高水电闸门启闭设备隐患识别的效率，使设备运维从事后抢修转变为预判式管护，为水利枢纽机电设施长效安全运行提供技术参考。

关键词 水电闸门；液压启闭机；故障诊断；状态评价；智能运维

中图分类号：TV664 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.038

0 引言

随着水利水电工程体系不断完善，液压启闭机凭借驱动力稳定、精度高、适合大跨度闸门作业的特点，已经成为各类泄洪取水闸门的主要驱动装置。启闭机集成了液压泵站、油缸、阀组、传感、控制等多种结构，各个部分之间相互联系，任何部件出现故障都会导致闸门启闭受阻，同步偏差甚至造成设备停机，极端情况下还会干扰枢纽防洪供水调度的秩序。随着传感采集、边缘计算、数字仿真技术在水利机电领域应用的落地，用实时运行数据进行精准的故障诊断以及全生命周期状态评价已有实践基础。本文根据液压启闭机结构运行特点，对各个模块的故障表现进行分析，挖掘故障演变的内在规律，建立适合工程现场的诊断操作路径，创建多维度量化评价体系，提出适合不同设备健康等级的运维改进措施，推动水电机电设备智能化管护体系的建设。

1 水电闸门液压启闭机典型故障类型及形成机理

1.1 液压动力单元故障及诱因

液压动力单元给整个启闭设备提供压力油源，主要由驱动电机、液压泵、溢流阀、滤油装置、油箱等组成，长期连续工作和外界潮湿的环境都会造成各种运行故障。电机长时间超负荷工作，绕组温度上升超过额定值，导致动力不足、启停失灵；液压泵内部配合面磨损间隙增大时，会形成内泄，使系统压力偏低不能带动闸门动作；溢流阀阀芯上附着的油泥、锈蚀物容易造成卡滞，使油压剧烈波动冲击管路和油缸；滤油滤芯堵塞会造成油路循环受阻，杂质不断进入阀组、油缸，加速元件磨损；油箱密封防护失效后水汽粉尘侵入液压油，加速油品变质腐蚀整套液压回路。各种动力单元故障都会直接减少设备的驱动力，使闸门启闭迟缓、动作无力，是现场故障高发的模块。

1.2 液压执行单元故障及诱因

执行单元以液压缸活塞杆密封组件同步调节机构为主，直接完成闸门升降的机械动作，故障主要集中在密封磨损和机械配合失衡这两类方向。密封件在高压油的长期作用下，被介质腐蚀、往复运动、摩擦等逐渐老化、破损，造成油缸内外泄漏，油液损耗增大，两腔压力不平衡引起闸门抖动、爬行；油缸缸体内壁锈蚀拉伤会增大活塞配合间隙，加大内部泄压，降低动作稳定性；双吊点启闭设备同步调节元件积污卡阻后，两侧油缸行程差值不断增大，闸门运行出现倾斜偏移，加重门体导轨和止水结构磨损；活塞杆长期裸露接触水汽泥沙会产生表层锈蚀，破坏密封结构形成故障循环。执行单元出现故障时，闸门的运行状况也

作者简介：邓开文（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：大坝机电。

会受到直接影响，而且发展速度很快，会对闸门本体结构造成较大的损害。

1.3 传感控制单元故障及诱因

传感控制单元完成运行参数采集、指令传输、工况调节工作，有压力位移温度传感器信号传输线路、控制处理器、报警模块。现场潮湿腐蚀环境容易造成线路绝缘层破损、接头氧化，引起信号中断、数据失真；各种传感器长期受到振动冲击会造成零点漂移、精度下降、数据失真，导致错误的油压、开度、油温数据造成误报警或者无预警失效；控制处理器长时间连续工作会出现程序逻辑混乱、元件老化、不能正常发出启闭控制指令的现象；报警模块线路接触不良会造成故障提醒失灵，微小隐患不能被及时传递给运维班组。控制单元故障不会直接导致设备停机，但会掩盖设备真实的运行状态，延误故障的处理时间，间接提高重大故障的发生概率。

2 水电闸门液压启闭机分层故障诊断技术路径

2.1 多传感运行数据同步采集

依靠分布式传感网络对启闭机的全部运行参数进行不间断的采集，在液压泵站油缸阀组电气控制柜的关键位置安装相应的采集装置，持续得到系统油压、油温、油液清洁度、油缸行程、设备振动幅值、电机运行温度等实时信息。采集装置具有分级采样的功能，在设备静止待机时减小采集的频次，在闸门启闭动态作业时增加采集的频率，从而全面地记录下工况切换期间的各项参数变化[1]。采集的数据经由边缘处理单元实施初步的降噪过滤，去除环境干扰造成的无效杂波信号，标准化之后再传送到后台分析平台，给故障特征提取提供完整的、可靠的原始数据，防止因为单一参数采集而导致的故障识别片面化问题。

2.2 故障特征时频域联合提取

对预处理过的多维运行数据进行时频域联合解析，时域上提取出压力波动幅值、油温变化速率、油缸动作平稳度等直观的特征，快速找到明显的运行异常；频域上利用信号分解技术将振动、油压信号频谱拆解开来，把元件磨损、油路气蚀、阀芯卡滞对应到的专属频谱特征挑出来，从而分辨不同的故障类型所表现出的信号差异。同步整理各种故障的发展规律，创建故障特征参数对应关系库，确定轻度、中度、重度故障各自的特征阈值区间，利用特征参数偏移程度来判定故障发展程度，从而完成从单个异常信号到故障源头的逆向推理，打破传统故障诊断只依靠肉眼观察的束缚。

2.3 分级故障定位与溯源排查

搭建起三级故障溯源诊断流程，准确地找到故障原因。一级诊断依靠后台数据平台对比特征阈值，快速判定故障所在的单元区分动力执行控制三大模块；二级诊断调取故障时段完整的参数曲线，匹配特征数据库锁定故障的主要构件缩小排查范围；三级诊断结合设备现场运行工况进行实地核验，核对元件的外观、油路渗漏、线路连通情况，确定故障产生的根本原因[2]。整套分级诊断流程由宏观模块定位逐步细化到单一构件，缩短现场故障排查的时间，避免无目的拆解设备造成的二次损耗，提高故障处置的整体效率。

3 水电闸门液压启闭机多维度状态评估体系构建

3.1 状态评估指标分层选取

根据设备全生命周期运行健康状况选择四个评价指标。第一类为系统油压稳定、闸门启闭同步、动作平稳、作业耗时；第二类为密封件磨损、液压泵内泄量、传感元件精度衰减、机械连接部件间隙；第三类为油品清洁度、含水量、黏度、氧化程度；第四类为设备运行环境温湿度、防腐防护层完整性、管路抗振动防护效果。四类指标彼此独立但又有内在联系，可以全面反映液压启闭机动力执行控制全过程的运行状况，避免单一维度评价造成评估结果失真的问题。水利机电设备全天候值守运行，设备各个模块的寿命老化速度不一样，单一指标很难反映整个设备的健康状况，所以分层分类选取指标是保证评价科学性的前提[3]。液压启闭机属于机液电一体化复合设备，机械结构、液压回路、电气控制系统三者之间存在耦合关系，任何维度的指标出现劣化现象，都会导致其它模块的运行状态受到影响，如油液清洁度不合格会造成液压泵阀芯密封件等机械部件的磨损，环境高湿度会加快线路的老化从而影响到传感信号的传输。本次指标选取坚持全面性、层次性、可检测性三大原则，剔除掉不能在线监测、现场采集难度大的无效指标，全部采用可以依靠传感设备自动采集或者现场无损检测的方式获取的参数，符合水利现场无人值守、少人工巡检的运维状况。将核心指标和辅助指标分开，运行性能、油液品质属于核心一级指标，直接影响到设备能否安全地进行启闭作业，元件损耗、环境适配属于辅助二级指标，体现设备可能存在的老化趋向，主次结合再进一步加强整套评价指标体系的落地实用性，使后续量化评价的结果更贴近现场真实的运维需求。

3.2 量化评估标准与健康等级划分

根据水利机电设备运维规范和长期现场运行经验，对各项评估指标进行分级量化评判标准的制定，将各

项指标分为正常、轻微劣化、中度劣化、重度劣化四个等级，给每项指标分配相应的评价权重，用加权求和的方法得出设备综合健康分值[4]。根据综合分值划分四类设备的健康等级，一级健康等级代表设备的各项指标都在标准范围内不需要特别的处理，只需要进行常规的巡检保养即可；二级预警等级代表一些指标出现轻微的偏移，存在一定的隐患，需要缩短巡检周期并准备好备件；三级关注等级代表多项指标严重劣化，故障发生的概率增大，择机停机进行有针对性的检修；四级故障等级代表设备的综合性能大幅度下降，存在严重的安全隐患，必须立即停机进行全面检修。量化标准可以消除人工主观评价的误差，使设备的健康状况可以被客观地判断出来。传统的设备状态评估完全依靠运维人员的主观判断，不同运维人员的判定标准存在较大差异，同款设备会得到截然不同的状态评价结果，容易造成隐患漏判或者过度检修。本次权重分配使用层次分析法进行客观赋值，根据液压启闭机故障统计规律，把与设备安全运行直接有关的油压稳定性、油液含水量、油缸密封损耗指标设置较高的权重，把环境温湿度等间接影响指标设置较低的权重，符合设备故障高发规律。等级区间的划分不能采用固定的固定阈值方式，在闸门平时的工作频率、工作时间上做小幅度的适应性调整，适应常规工况和汛期高频次启闭的特殊要求。整套量化标准完全符合水利行业机电设备运维通用准则的要求，不需要运维人员二次解读就可以直接使用，降低状态评估的门槛，提高基层运维班组操作设备健康自测的便捷性，提高设备健康自测的普适性和规范化程度。

3.3 评估结果导向型运维实施策略

根据设备状态评价的健康等级来匹配不同的管护方案，对一级健康设备进行月度常规巡检、季度油品检测、年度元件校准、标准化管护，控制运维投入成本；对二级预警设备加大关键参数在线监测频次，定期取样检测液压油品质，提前储备损耗备件跟踪指标变化趋势；对三级关注设备制定短期停机检修计划，更换劣化密封滤芯等易损件，校正传感参数消除性能偏移；对四级故障设备进行全面拆解检测动力执行控制单元，更换重度损耗构件完成系统调试后方可恢复投运。根据评价结果对运维资源进行精准投放，防止出现过度维护或者管理缺失的两种极端状况。以往水利启闭机运维大多采取固定周期检修方式，不管设备的实际健康状况怎样，都会依照统一周期展开拆机检修、油品更换、部件更换等工作，健康度较好的设备经常被拆机检修，这会破坏原有的管路密封结构，从而带来新的运行隐患，而且会造成人力、物力、备件资源的无端浪费。健康状况不佳的设备统一周期检修不能及时消除渐进性老化的隐患，小故障将逐渐演变为重大停机事故，危及汛期闸门调度的安全[5]。本次分级运维策略完全契合设备的实际健康状况，推行按需运维的新式管护模式，建立运维台账联动机制，每一个巡检检修的数据都会被同步输入后台系统，反向更新状态评价指标的阈值，达成评估体系和运维工作双方面动态改善的目的。除此之外，根据汛期枯水期设备运行负荷的差别，同步微调不同时段的运维频次，汛期设备高负荷运行时提高巡检频次，枯水期低负荷运行时减少运维流程，在保证设备安全运行的基础上，最大限度地压缩整体运维成本，满足水利工程全季节运维管理的需求。

4 结束语

水电闸门液压启闭机属于水利枢纽水流调节的重要机电设备，对其故障进行准确诊断并开展全生命周期的状态评定，是保证工程安全稳定运行的关键手段。本文整理启闭机动力执行控制单元常见的故障类型及其内在形成机理，建立时频特征解析分级溯源的标准化故障诊断流程，构建起运行性能、元件损耗、油液品质、环境适应性四个维度的量化状态评价体系，并提出分级健康状态对应的差异化运维措施。目前水利机电智能化管护技术还处在不断更新换代的过程中，未来可以依托数字孪生、人工智能等技术手段来加强故障发展趋向预估的功能，改进状态评定的动态修正机制，使水电闸门液压启闭机的管护模式朝着预判式的数字化方向迈进，持续提升水利工程机电设备的安全管控水平。

参考文献：

[1] 王魏堃，王雪丽．液压启闭机技术在水力发电站泄水闸门中的应用与思考[J]．治淮，2024(07):55-57.
[2] 王博，孙瑞阳，钱路，等．基于数字孪生和贝叶斯网络的液压启闭机故障诊断研究[J]．人民珠江，2024,45(10):124-137.
[3] 冯亚鹏，马峰，吴锐．三河口大坝表孔液压启闭机安装与调试技术探讨[J]．水电站机电技术，2023,46(03):82-85.
[4] 杨银兵．水轮发电机组快速闸门异常下滑故障分析及处理研究[J]．云南水力发电，2022,38(S1):66-67,70.
[5] 余德沙，周益，毛延翩，等．浅谈水电站闸门启闭机液压系统现场调试及维护[J]．水电与新能源，2021,35(08):61-64.