

水库启闭设备常见故障分析与运维养护措施研究

帅永奎

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250000

摘要: 水库启闭设备是水库防洪调度与输水调控的核心设施,其运行状态直接决定水利工程安全稳定性。本文依托卷扬式、液压式、螺杆式三类主流启闭设备,阐述设备结构构成与规范运行技术要求,系统梳理机械、电气、液压系统的常见故障类型,深入剖析环境、操作、运维等多维度故障诱因。针对性制定常态化运维、分周期养护、故障快速处置策略,优化运维管理体系,可为水库启闭设备安全长效运行提供可靠技术支持。

关键词: 水库启闭设备;常见故障;运维养护措施

引言: 水库启闭设备作为水利枢纽的关键机电设备,承担闸门启闭、水位调节、防汛排涝等重要工作,是保障水库正常运行的基础。设备长期暴露在复杂户外环境中,受荷载往复作用、环境侵蚀、运维疏漏等因素影响,极易出现部件磨损、系统渗漏、控制失灵等故障。为有效降低设备故障率、规避水利运行风险,本文系统开展设备故障分析,优化运维养护方案,为提升水库设备运维标准化水平提供参考。

1 水库启闭设备类型及运行原理

1.1 主流启闭设备分类及适用场景

(1) 卷扬式启闭机:适用于大中型水库溢洪道、泄洪洞闸门,承载能力强、运行行程大,是水库应用最广泛的启闭设备,主要承担大吨位闸门启闭作业。其启闭速度较快,便于远程集控操作。(2) 液压式启闭机:具备运行平稳、噪音低、自锁性好的特点,多用于小型水库、输水洞闸门及精密调控闸门,适配小行程、高精度启闭工况。液压系统可实现无级调速,便于闸门开度精准控制。(3) 螺杆式启闭机:结构简单、造价低廉、操作便捷,广泛应用于中小型水库小型闸门,适用于低吨位、低频率启闭作业场景。其采用螺旋传动自锁,可有效防止闸门下滑,但在大荷载、长行程工况下应用受限。

1.2 启闭设备核心结构组成

(1) 机械传动结构:包含齿轮、轴承、螺杆、卷扬卷筒、钢丝绳等核心部件,负责动力传输与闸门升降执行,是设备运行的基础结构。卷扬式以钢丝绳卷绕实现升降,螺杆式依靠螺旋副传递动力,结构差异决定其适用工况。(2) 电气控制系统:由电机、控制柜、传感器、限位装置、线路等组成,承担设备启停、调速、限

位保护、运行监测等控制功能。现代系统多集成 PLC 与触摸屏,支持数据采集与远程监控,提升运行可靠性。(3) 液压动力结构:仅液压启闭设备配备,包含液压泵、电磁阀、液压缸、油路管道、液压油储箱等,为闸门启闭提供稳定液压动力。通过调节阀组可精确控制活塞杆伸缩速度与方向,实现闸门平稳启闭^[1]。

1.3 启闭设备正常运行技术要求

(1) 运行稳定性要求:设备启闭过程无卡顿、异响、抖动,升降速度均匀,闸门对位精准,无偏移、卡滞现象。卷扬式需确保钢丝绳排列整齐、受力均衡;液压式需保持系统压力稳定、无爬行现象。(2) 安全防护要求:限位保护、过载保护、紧急制动等安全装置灵敏有效,电气系统绝缘达标,液压系统无渗漏、压力稳定。定期检测制动器制动力矩、钢丝绳磨损量及液压油清洁度,确保安全装置始终处于可靠状态。(3) 工况适配要求:设备运行参数匹配水库水位、荷载工况,极端天气、高负荷运行状态下可保持稳定工作,满足防洪、输水调度需求。启闭机选型需综合考虑最大启门力、行程、启闭频率及环境温度,确保全工况下裕度充足、响应及时。

2 水库启闭设备常见故障及成因分析

2.1 机械系统常见故障及诱因

(1) 传动部件磨损故障。齿轮齿面磨损、轴承锈蚀卡滞、螺杆变形是常见失效形式。一是长期高负荷使齿面接触应力超限,产生疲劳点蚀与剥落;二是润滑不及时或油质变质,导致干磨或半干磨,加速损耗;三是泥沙粉尘经密封间隙侵入,形成磨粒磨损,降低啮合与旋转精度。(2) 钢丝绳故障。锈蚀、断丝、变形、松弛在卷扬式启闭机中突出。一是潮湿环境及雨

水冲刷破坏防锈层,产生电化学腐蚀,减小有效截面积;二是超载拉伸或频繁弯曲缠绕引起累加性疲劳断丝;三是日常巡检对断丝数、直径缩减率、绳股挤出等查验不到位,隐患发展至临界。(3) 闸门启闭卡滞故障。运行卡顿、升降受阻影响启闭成功率。一是轨道积泥积垢未清理,增大摩擦阻力;二是拦污栅失效致树枝、杂物进入门槽,形成物理堵塞;三是长期不均匀水压产生变形偏移,导向部件磨损错位,门体与轨道配合间隙丧失,造成多点卡阻。

2.2 电气系统常见故障及诱因

(1) 动力运行故障。电机过热、异响、无法启动是电气动力侧的主要表象。一是供电电压波动超出额定范围或缺相运行,导致电机定子电流失衡,绕组温升急剧增大;二是电机长期过载使绕组绝缘热老化加速,匝间短路风险上升;三是散热风扇堵塞或工作环境温度过高,热量积聚难以及时导出,进一步缩短绝缘寿命。(2) 控制元件故障。接触器触头烧蚀、传感器失灵、限位装置失效使控制系统可靠性下降。一是频繁启停操作使触头产生电弧灼伤,接触电阻增大后发热熔焊,影响主回路通断;二是潮湿、油污及振动环境加速电子元件参数漂移,接近开关、编码器等位置检测元件信号失真;三是限位开关机械动作次数达到寿命极限后回位不良,造成越位运行隐患^[2]。(3) 线路故障。线路破损、短路、接触不良多具隐蔽性。一是电缆防护层在雨水浸泡、阳光紫外线辐照下加速老化脆裂,绝缘性能下降;二是设备运行振动使接线端子松动,产生接触电阻过热甚至打火;三是检修作业中人为弯折、挤压线路,或接线不规范造成导线芯线受损,降低载流能力。

2.3 液压系统常见故障及诱因

(1) 压力异常故障。系统压力过高、过低或压力波动影响出力稳定性。一是液压油长期使用后氧化变质,粘度及抗磨性下降,泵内泄漏增大,输出流量不足;二是吸油滤网堵塞造成油泵吸空,压力建立困难;三是溢流阀阀芯卡滞或调压弹簧疲劳,使设定压力偏移,系统无法维持额定工作压力。(2) 渗漏故障。液压缸、管路、接头漏油是液压系统最直观的故障表现。一是密封件在反复高压作用下老化、磨损或挤出变形,静密封点逐渐转变为渗漏点;二是管接头因振动而松动,密封预紧力衰减;三是压力冲击频繁使钢管焊缝或软管接头承受交变应力,形成疲劳裂纹,最终导致外泄漏。(3) 液压执行故障。液压缸伸缩卡顿、启闭速度异常直接影响闸门运行平稳性。一是油液杂质含量超标后划伤缸筒内壁及活塞杆,导致摩擦力不均,运行中产生爬行现象;

二是油路进气形成气穴,使液压缸动作滞后或呈现非连续位移;三是换向阀阀芯磨损使内泄漏增大,流量分配失当,造成伸缩速度偏离设定值。

2.4 综合性故障及人为环境诱因

(1) 自然环境诱因。长期处于潮湿、高温、暴雨及风沙环境,设备金属结构件腐蚀速率加快,电气绝缘下降,润滑油膜易被破坏,综合故障概率显著提升。(2) 人为操作诱因。操作人员违规带载启停、超限运行或未按规定进行空载试机,直接加剧机械冲击与电气过载,使设备在非设计工况下运行,加速损耗进程。(3) 运维管理诱因。日常巡检流于形式,润滑、清洁、紧固等基础养护缺失,故障隐患发现不及时;对老旧设备未按期评估服役状态,超期运行且未实施针对性改造,导致同类故障重复发生,运维成本持续走高。

3 水库启闭设备运维养护优化措施

3.1 分类型设备常态化日常运维措施

(1) 机械设备运维。每日对钢丝绳、齿轮、轴承、螺杆等核心部件进行外观及运行状态检查,确认钢丝绳无断丝、压扁,齿轮啮合无异常噪声,轴承温升正常。及时清理轨道及传动部件表面积聚的泥沙杂物,防止磨粒侵入加速磨损。按规定周期补充或更换润滑油(脂),使用力矩扳手复紧各传动连接螺栓。每月排查齿轮齿面点蚀、螺杆螺纹磨损及轴承游隙变化,发现异常及时记录并纳入维修计划^[3]。(2) 电气设备运维。每日巡查控制柜仪表指示、接触器吸合状态及传感器输出信号是否稳定,检查限位开关动作是否灵敏可靠。每季度采用兆欧表检测绝缘电阻,阻值不应低于 $0.5M\Omega$ 。定期清扫电控柜内部积尘,更换失效防潮干燥剂,检查柜体密封性,杜绝凝露侵入。逐段检查电缆护套老化情况及接线端子是否松动发热,发现破损及时修复或更换。(3) 液压设备运维。每日开机前检查油箱液位、油温及系统压力,观察油液颜色是否正常、有无乳化发黑。运行中检查管路接头及阀组结合面有无渗漏,液压缸活塞杆有无划痕。每月从油箱底部排放沉积物及水分,清洗或更换回油滤芯。定期检查电磁阀阀芯动作灵活性及油泵运转噪声,压力波动超过设定值 $\pm 5\%$ 时及时排查调整,确保液压系统处于良好技术状态。

3.2 分周期系统化养护措施

(1) 月度养护。集中排查制动器摩擦片、接触器触头、密封圈等易损件,发现磨损超限立即更换。复紧各连接螺栓,校准开度传感器零位及上下限位动作行程。清除设备表面积垢,对裸露金属部件补涂防锈油脂。将

启闭次数、荷载等运行数据录入档案,为劣化趋势分析提供依据。(2)季度养护。全面检测齿轮啮合间隙、卷筒径向跳动及轴承游隙等机械精度指标。测试电气保护装置动作阈值,校验过载保护整定值准确性。取样检测液压油粘度、酸值及水分含量,判定油品是否需更换。清洗阀组及油路块,对轻微磨损的导向环、防尘圈实施预防性更换,消除潜在隐患。(3)年度养护。安排在非汛期进行设备全面拆解检修,对减速箱、卷筒、液压缸等核心总成彻底清洗并检测尺寸精度。更换老化密封件、脆化破损线路及磨损超差的关键零件。液压系统排空旧油并清洗油箱管路,加注新油至规定液位。组装后开展带载试验,校验启闭力、速度、行程等参数恢复至设计指标^[4]。(4)汛前汛后专项养护。汛前完成应急启闭全行程试验,验证备用电源及手动机构可靠性,检查制动器紧急制动能力与过载保护灵敏度,确保防洪调度功能完备。汛后全面清理闸门槽及设备附着淤积物,检修受水流冲击受损部件,对锈蚀部位彻底除锈涂刷防腐涂层。

3.3 常见故障快速处置与维修方案

(1)机械故障处置。齿轮轴承磨损超限时立即更换同型号零件并调整啮合间隙;钢丝绳断丝达报废标准或直径缩减超7%时整绳更换,更换后空载及带载试运行至少三个行程,确认排绳整齐、张力均衡。闸门卡滞先清除轨道积泥异物,若因门体变形则于无水条件下校正,调整后全程测试启闭阻力,确认无卡点方可投运。(2)电气故障处置。电机无法启动或过热时用钳形表测量三相电流,判断是否缺相或过载,更换烧蚀接触器或老化绕组,绝缘检测达标后方可送电。限位失灵或传感器信号异常应检查安装间隙与感应面清洁度,重新标定零位并逐段排查线路导通性,修复破损处后固定线束,防止振动磨损引发二次故障。(3)液压故障处置。系统压力不足先检查吸油滤芯及油箱油量,油质乳化或污染超标则彻底更换,清洗溢流阀阀芯并重新调定压力。管路渗漏立即停机泄压,更换密封圈并紧固接头至规定力矩,打压保压30分钟无压降方可投运。液压缸爬行或速度异常应反复排气至无气泡,清洗或更换阀芯,调整平衡阀设定压力匹配负载。

3.4 运维管理体系优化与保障措施

(1)完善运维管理制度。制定覆盖巡检、养护、维修全流程的标准化作业指导书,明确各岗位职责与考核标准。建立一机一档数字化台账,完整记录设备投运、养护、维修信息,实现全生命周期可追溯管理。(2)强化人员专业培训。每年汛前汛后组织专题技术培训,涵盖设备结构原理、标准操作程序及典型故障诊断方法。开展现场实操考核,确保运维人员熟练掌握万用表检测、压力调试、制动调整等核心技能。(3)推进智能化运维升级。引入振动监测、油液在线分析、电流特征监测等智能传感系统,实时采集运行参数并设定阈值报警,实现轴承磨损、绝缘下降、压力异常等隐患自动预警,以数据驱动替代传统人工巡检,提升运维精准度与效率^[5]。(4)建立应急保障机制。编制应急预案,明确故障分级响应流程,每半年开展实战演练,模拟停电、卡闸、爆管等突发情形。按定额储备钢丝绳、密封件、接触器等易损备件,确保故障后快速响应,最大限度压缩停机时间,全力保障水库防洪调度与输水运行安全。

结束语

本文全面分析水库启闭设备各类常见故障及形成原因,结合设备运行工况,构建了常态化日常运维、分周期分级养护、故障快速处置的完整养护体系,同时完善运维管理与应急保障机制。通过规范化、精细化、智能化运维手段,可有效改善设备运行状态,减少故障频发问题,延长设备使用寿命,保障水库防洪、输水调度工作稳定开展,为水利设备运维管理提供实践参考。

参考文献

- [1] 李浩宇.基于机液联合仿真模型的闸门启闭机故障注入及诊断研究[J].振动与冲击,2024,43(13):198-209.
- [2] 李凯旋,张钰奇.基于多传感器信息融合的水工闸门故障诊断[J].中国农村水利水电,2024,15(2):96-102.
- [3] 孙龙臻.CPMS 陶瓷杆液压启闭机开度传感器的应用实践与故障处理[J].山东水利,2025,9(5):35-37.
- [4] 覃俊展.CPMS-JD 型液压油缸传感器故障分析及改进建议[J].水电站机电技术,2024,47(1):89-91.
- [5] 孙春龙.闸门启闭机液压阻尼调速自适应控制方法与故障优化[J].电子元器件与信息技术,2024,8(7):83-85.