水利工程金属结构运行管理存在的问题及对策研究

杨淇帆

黄河水利水电开发集团有限公司，中国·河南 济源 459000

摘要：水利工程金属结构是水利枢纽的核心部分，担负挡水、泄洪、输水、调控水位等重要任务，其安全稳定运行直接影响水利工程整体效能的发挥、流域防洪排涝安全以及水资源的合理调配。本文通过对水利工程金属结构的定义、分类及运行管理的主要内容进行梳理，结合行业调研数据，对设备本体、日常运维、人员制度、应急改造四个方面存在的问题进行分析，提出精细化、标准化、智能化的运维管理优化对策，并通过具体的工程案例，验证对策的可行性。

关键词：水利工程；金属结构；运行管理；设备维护；安全防控；优化对策

Research on the Problems and Countermeasures in the Operation and Management of Metal Structures in Water Conservancy Projects

Yang Qifan

Yellow River Water Conservancy and Hydropower Development Group Co., Ltd., China Henan Jiyuan 459000

Abstract: The metal structure of hydraulic engineering is the core component of hydraulic hubs, responsible for important tasks such as water retaining, flood discharge, water conveyance, and water level regulation. Its safe and stable operation directly affects the overall efficiency of hydraulic engineering, the safety of flood control and drainage in the basin, and the rational allocation of water resources. This article summarizes the definition, classification, and main aspects of operation management of the metal structure of hydraulic engineering. Based on industry research data, it analyzes the problems existing in four aspects: equipment body, daily operation and maintenance, personnel system, and emergency transformation. It proposes refined, standardized, and intelligent optimization measures for operation and maintenance management, and verifies the feasibility of these measures through specific engineering cases.

Keywords: Water conservancy project; Metal structure; Operation management; Equipment maintenance; Safety prevention and control; Optimization countermeasures

0 引言

水利工程是国民经济基础设施的重要组成，在防洪减灾、水资源调度、农业灌溉、生态补水、发电供水等领域发挥着不可替代的作用。金属结构是水利工程的重要组成部分，与土建结构的固定属性不同，具有可操作、可调控、可启闭的特点。近些年，我国水利基础设施建设规模不断增大，建成各类水库、水闸、泵站、堤防工程数万座，配套金属结构设备数量众多、种类繁杂。为此，针对水利工程金属结构运行管理短板进行梳理，精准解决现存问题，建立科学完善的运维管理体系，对防范水利安全事故、提高水利工程运维质量、保障流域水安全具有重要的现实意义。

1 水利工程金属结构定义与分类

水利工程金属结构重要指在水利枢纽及配套工程中，承担挡水、控水、启闭、输水、防护等功能的专用设备及附属结构，由钢材、铸铁等金属材料制成。

根据设备功能、结构形式、应用场景，可以将水利工程金属结构分为四大类，各类设备运行特点及常见应用场景如表 1 所示。

2 水利金属结构运行管理的主要内容

2.1 日常巡检与监测

日常巡检、状态监测是金属结构运行管理的基础工作，其中，日常巡检以人工巡查为主、设备监测为辅的方式，主要针对闸门启闭灵活性、结构锈蚀情况、螺栓紧固度、止水装置密封性、启闭机运行异响、钢丝绳磨损等直观状态进行检查。状态监测通过专业设备，对结构应力、位移变形、振动频率、腐蚀速率、启闭参数等重要指标展开常态化采集，主要针对弧形闸门支臂应力、平面闸门面板变形、启闭机荷载变化等关键数据展开监测，给设备状态评价赋予数据支撑[1]。

表1 各类设备运行特点及常见应用场景

结构分类	核心设备类型	主要功能	典型应用场景	高发病害类型	运维管控重点	检测周期
闸门类结构	平面钢闸门、弧形闸门、叠梁闸门、检修闸门、人字门	挡水、泄洪、调控水位、隔断水流，保障工程检修安全	水库溢洪道、水闸、输水洞、泵站进水口、船闸	面板锈蚀穿孔、主梁变形、焊缝开裂、止水橡胶老化漏水、支铰卡阻	防腐涂层完整性、结构应力与变形、止水密封性、启闭灵活性	日常每日巡检；年度全面检测；汛期加密
启闭设备结构	卷扬式启闭机、螺杆式启闭机、液压启闭机、门式启闭机	为闸门、拦污栅提供启闭动力，实现设备自动化操控	各类闸门配套设施，水利工程核心操控设备	钢丝绳断丝磨损、制动器失灵、减速机渗漏、液压缸内泄、电气元件老化	启闭力校验、制动系统可靠性、钢丝绳安全系数、液压系统密封性	月度维保；季度性能检测；年度大修评估
拦污防护结构	金属拦污栅、清污机、防护格栅、拦冰索	拦截水体漂浮物、杂物，保护输水、发电设备安全	泵站、水电站、输水管道进水口、取水口	栅条锈蚀断裂、栅体变形卡阻、清污机链条磨损、杂物淤积堵塞	栅条完整性、过流能力、清污机运行可靠性、堵塞预警	每周巡查；汛期每日清污检查；半年除锈养护
附属金属结构	金属爬梯、操作平台、栏杆、输水钢管、预埋件、检修吊点	保障运维操作安全、辅助输水、固定主体设备	全品类水利工程配套场景、坝顶、闸室、输水廊道	栏杆锈蚀断裂、爬梯踏步磨损、钢管外壁腐蚀、预埋件松动脱落	结构承载安全性、防腐状态、连接紧固度、防滑防坠落措施	季度安全检查；年度防腐养护；三年结构安全鉴定

表2 目前水利工程金属结构运行管理各维度具体问题及数据统计

问题维度	具体问题表现	调研发生占比	严重程度	主要诱发因素	潜在安全风险	整改优先级
设备本体问题	结构锈蚀穿孔、面板变形、焊缝开裂、止水老化漏水、钢丝绳断丝、启闭机传动部件磨损	82.3%	高危	服役年限长、水环境腐蚀、荷载交变、防腐涂层失效、超期服役	闸门溃决、启闭失灵、结构承载力不足、汛期泄洪失控	最高
日常运维问题	巡检流于形式、维保不及时、监测数据缺失、清洁不到位、病害处理滞后、档案记录混乱	76.5%	中高	运维人员不足、缺乏标准化流程、智能化监测设备缺失、重使用轻养护	早期隐患遗漏、病害持续扩大、设备寿命缩短、故障频发	高
人员制度问题	专业人员短缺、技能不足、管理制度不健全、考核缺失、岗位责任不清、人员老龄化	68.2%	中高	基层编制受限、培训体系缺失、薪酬激励不足、制度建设滞后	运维操作不规范、管理混乱、责任落实不到位、应急处置失当	高
应急改造问题	应急预案照搬模板、演练不足、应急物资短缺、老旧设备更新滞后、智能化改造推进慢	71.8%	高危	资金投入不足、改造审批繁琐、缺乏全生命周期规划、被动维修模式	突发险情处置迟缓、超期设备运行风险极高、汛期安全事故	最高

2.2 维护保养与检修

维护保养和检修是延长金属结构服役年限、保证设备稳定运行的主要方法，主要分为日常保养、定期检修、专项大修三类。

日常保养主要指设备清洁、螺栓紧固、润滑油加注、杂物清理、表层防腐修补等日常保养工作。

定期检修主要指按照季度、年度周期进行，主要检测设备部件损耗、焊缝完整性、防腐涂层状态、机电系统运行性能，对轻微损耗部件进行更换、调试。

专项大修主要指针对服役年限较长、病害较严重的设备，进行整体除锈防腐、结构加固、部件更换、系统调试等深度修复工作，全面恢复设备运行性能。

2.3 安全隐患排查与应急管理

安全隐患排查主要是针对设备运行风险点，定期对金属结构结构稳定性、运行安全性、防护完整性进行排查，重点梳理闸门漏水、启闭卡阻、结构变形、部件失效、防腐脱落等安全隐患，建立隐患台账，明确整改时限、责任人员及整改措施，实现隐患闭环管理[2]。

应急管理主要是针对汛期泄洪、设备突发故障、极端天气等突发情况，制定专项应急预案，储备应急物资，定期开展应急演练，保证设备突发故障、险情时能够快速处置，避免出现溃水、设备损毁、工程停运等安全事故，保障水利工程运行安全。

3 水利工程金属结构运行管理现存问题调研分析

根据中小型水利工程运维现状调研数据，目前水利工程金属结构运行管理存在设备病害多发、运维粗放、制度不健全、应急能力弱等问题，各维度具体问题及数据统计如表 2，通过表格直观地呈现行业普遍病害和管理短板。

3.1 设备本体存在的常见问题

一是腐蚀病害问题，指金属结构长期浸泡在水体中、暴露在潮湿环境中，再加上部分区域水质酸碱度偏高，极易出现电化学腐蚀、氧化腐蚀，造成设备表层防腐涂层脱落、钢材锈蚀起皮、穿孔，服役超 10 年的设备锈蚀发生率高达 90% 以上[2]。

二是结构变形和破损，闸门长期受水流荷载、水压冲

击，容易出现面板凹陷、主梁变形、支臂偏移等问题，部分弧形闸门支座应力超标，超过规范允许范围，影响结构稳定性。

三是焊缝开裂、螺栓锈蚀松动、止水橡胶老化皲裂等问题也时有发生，容易导致闸门闭合不严、漏水严重，启闭过程中出现卡阻、晃动等故障。启闭机钢丝绳断丝、磨损，传动部件老化磨损、制动系统失灵等设备损耗问题，造成启闭力不足、操控失灵，严重影响设备正常运行。

3.2 日常运行管理存在的问题

一是巡检监测体系不健全，超 60% 的中小型水利工程仍然通过人工经验巡检，缺少智能化的实时监测设备，仅有少数大型工程配备了应力、位移监测系统，而且监测数据零散，存在数据孤岛现象，难以实现设备状态的实时研判。巡检工作存在走过场、记录不规范、隐患排查不细致的问题，大量早期隐性病害难以及时发现。

二是维护保养不规范，普遍存在重使用、轻保养的现象，日常清洁、润滑、防腐保养频次不够，季度、年度检修流于形式，对轻微病害不及时处理，造成病害不断累积扩大。

三是运维档案管理混乱，大多数单位未能建立完整的设备运维台账，设备检修记录、病害记录、监测数据归档不完整，难以为设备状态评估、改造升级提供数据支撑。

3.3 人员和制度管理问题

一是在人员方面，基层水利运维岗位人员老龄化严重，年轻专业技术人员短缺，大部分运维人员未能接受过系统的金属结构运维专业培训，仅掌握基础操作技能，对设备病害识别、专业维保、监测数据分析、故障处置等专业能力不足，难以满足精细化、智能化运维需求[4]。

二是在制度上，大多数基层管理单位未能建立标准化的金属结构运维管理制度，巡检、维保、隐患排查、考核奖惩等工作未能明确的规范标准，工作开展未能章可循。

3.4 应急管理与改造更新问题

一是在应急管理层面，大多数基层单位的应急预案照搬通用模板，未能结合本工程设备工况、区域水文特点制定针对性处置方案，预案实用性、可操作性差。

二是在改造更新层面，大量的老旧水利工程金属结构超期服役，设备性能严重衰减，但是由于资金投入不足、改造审批流程繁琐等原因，设备更新改造滞后，带病运行现象普遍。设备改造缺少科学规划，未能建立依照服役年限、病害程度的分级更新机制，智能化升级改造推进缓慢，传统老旧设备难以满足现代水利安全运行标准。

4 提高水利工程金属结构运行管理水平的对策

4.1 加强设备本体管理

一是加强防腐管控，根据设备运行区域环境的不同，选用合适的防腐涂料体系，水位变动区优先选用环氧富锌底漆、耐磨面漆组合，定期开展涂层检测和补涂作业，每年开展 1 次全面除锈防腐养护，从源头降低金属腐蚀速率。

二是常态化开展结构检测修复，定期对闸门面板、主梁、支臂、焊缝等关键部位进行无损检测，及时修复开裂、变形、破损部位，紧固或更换锈蚀螺栓、老化止水橡胶，保证闸门密封性、结构稳定性。对启闭机、钢丝绳、制动系统等传动设备进行定期检测，及时更换磨损超标的部件，定期加注专用润滑油，保证设备启闭灵活、运行稳定。

三是建立设备分级管控机制，根据设备服役年限、病害程度、运行重要性将设备分为优良、一般、隐患、报废四个等级，针对性开展养护、修复、改造、报废处置，杜绝超期设备带病运行。

4.2 加强设备日常运行管理

一是完善巡检监测体系，制定标准化巡检流程，明确巡检点位、巡检内容、巡检频次、记录标准，杜绝巡检形式化。推进智慧监测体系建设，重点工程金属结构加装应力、位移、振动、腐蚀速率等实时监测设备，建立统一的数据管理平台，打破数据孤岛，实现设备状态实时监测、数据自动分析、隐患智能预警。

二是规范维保工作流程，制定年度、季度、月度维保计划，细化清洁、润滑、防腐、调试、检修各项工作标准，落实专人负责、台账记录制度，实现维保工作全程可追溯[5]。

三是健全设备运维档案，对设备安装、检修、病害、监测、改造等全生命周期数据进行完整记录，为设备状态评价、运维方案优化、更新改造提供精准的数据支撑。

4.3 加强人员和制度管理

一是在制度上结合工程实际，制定完善的金属结构巡检管理、维护保养、隐患排查、安全管理、考核奖惩等专项管理制度，细化各岗位工作职责、工作标准，实现运维工作制度化。

二是人员方面加强专业人才队伍建设，定期组织运维人员开展金属结构病害识别、防腐养护、设备调试、智能监测设备操作、故障处置等专项培训，邀请行业专家授课，提高人员专业技能。

4.4 加强应急管理与改造更新

全面提升应急处置能力，科学推进老旧设备更新改

表3 该水库管理单位针对金属结构改造前后设备运行及管理状态对比

评估维度	具体指标	改造前（2023年）	改造后（2024年）	提升幅度	行业优良标准
设备本体状态	设备病害发生率	81.2%（锈蚀、漏水、变形突出）	12.5%（仅轻微表层锈蚀）	↓84.6%	≤15%
	闸门止水漏水量	3.2 L/(m·s)，严重超标	0.3 L/(m·s)，符合规范	↓90.6%	≤0.5 L/(m·s)
	启闭机运行故障率	月均4.2次，卡阻、异响频发	月均0.3次，运行平稳	↓92.9%	月均≤0.5次
运维管理水平	巡检覆盖率与规范率	62%，记录不完整、走过场	100%，标准化记录、全程可追溯	↑38个百分点	≥95%
	智能监测点位覆盖率	0%，纯人工经验巡检	85%，应力/位移/启闭参数实时采集	从无到有	重点设备≥80%
	隐患整改闭环率	47%，大量隐患遗留未整改	100%，分级整改、验收销号	↑53个百分点	≥98%
应急处置能力	故障应急响应时间	平均125分钟，处置迟缓	平均22分钟，快速到场处置	↓82.4%	≤30分钟
	年度应急演练频次	0次，无专项预案演练	4次/年，实战化多场景演练	从无到有	≥2次/年
综合运行效益	设备完好率	58%，多台设备带病运行	96%，全部设备状态优良	↑38个百分点	≥90%
	年运维综合成本	约28.6万元（含故障抢修）	约19.2万元（预防性养护为主）	↓32.9%	预防性养护占比≥70%

造，筑牢工程安全防线。

一是在应急管理方面，根据工程工况、汛期运行特点，修订完善针对性、可操作的专项应急预案，细化设备故障、汛期险情、极端天气等场景的处置流程、责任分工、救援措施。

二是改造更新方面加大运维资金投入，建立金属结构全生命周期更新改造规划，根据设备分级管控结果对超期服役、病害严重、无法修复的设备及时报废更换，对性能衰减的老旧设备进行升级改造。

5 工程案例分析

本次以某中型水库金属结构运维改造工程为例，该水库建成运行 22 年，配套溢洪道弧形闸门、输水洞平面闸门、各类启闭机及附属金属结构设备，长期存在设备锈蚀严重、闸门漏水、启闭卡顿、运维管理粗放等问题，严重影响水库汛期安全运行。2024 年该水库管理单位针对金属结构存在的问题，全面落实上述优化对策，开展专项整治改造，改造前后设备运行及管理状态对比如表 3 所示。

该工程具体的整治措施有：一是对所有的闸门、金属结构进行整体除锈防腐，更换老化止水橡胶、锈蚀螺栓、磨损钢丝绳，对变形、开裂结构进行加固修复，更换超期服役的老旧启闭机；二是建立智能监测系统，安装应力、位移、启闭参数实时监测设备，实现设备状态智能预警；三是健全管理制度，制订标准化运维流程、考核制度，开展全员专业技能培训，规范日常运维工作；四是修订应急预案，储备应急物资，每季度开展应急演练，提高险情处置能力[6]。

经过半年的专项整治改造，该水库金属结构设备病害全部整改完毕，彻底解决了长期以来存在的粗放运维、设备带病运行、应急能力不足等问题，保证了汛期水库安全稳定运行。

6 结语

水利工程金属结构安全稳定运行是水利工程长效服役、安全赋能的重要保证，运行管理质量直接影响流域防洪安全、水资源调配效率和水利工程综合效益发挥。目前我国水利工程金属结构运行管理还存在着设备本体病害多发、日常运维粗放、人员制度体系不完善、应急改造滞后等诸多问题，是基层水利运维管理的薄弱环节。未来，水利管理单位要摒弃传统的粗放式运维模式，以全生命周期管理为理念，持续推进金属结构运维管理标准化，助力智慧水利、平安水利建设高质量发展。

参考文献：

[1] 郭万军. 水利工程金属闸门结构性能及应用研究[J]. 中国建筑金属结构，2026,25 (8):106-108.

[2] 魏玉超. 水利工程中水闸施工技术及管理研究[J]. 珠江水运，2026 (8):151-153.

[3] 王艳苓. 水利工程金属结构闸门安装精度调整与启闭运行调试管理研究[J]. 水上安全，2026 (5):32-34.

[4] 商千，袁希金. 浅析水利工程电气自动化系统防雷措施的应用[J]. 建筑与预算，2026 (2):73-75.

[5] 张晓英. 水利工程施工中水闸施工管理方法的应用探析[J]. 中国科技纵横，2026 (1):108-110.

[6] 刘永宝. 绿色理念引领下农田水利水闸施工管理控制新举措[J]. 农业开发与装备，2025 (8):185-187.

作者简介：杨淇帆（1992.10-），男，汉族，河南省郑州市人，本科，中级工程师，研究方向：水利工程运行管理。