

水电工程运行常见问题及解决对策研究

杨聪颖

中国葛洲坝集团第二工程有限公司，四川 成都 610091

DOI:10.61369/ME.2026070032

摘 要： 以一座运行18年的中小型引水式水电站为研究对象，基于2019—2023年运行台账、缺陷记录和检修资料，分析设备老化、运行管理及环境因素引发的运行问题，并提出针对性改进措施。结果表明，转轮气蚀、定子绝缘老化、继电保护元器件衰减和压力明管锈蚀分别发生16次、7次、9次和11次，其中定子绝缘故障单次平均弃水电量达21.8万 kW · h。通过实施抗磨蚀处理、绝缘在线监测、保护装置更新、管道防腐、管理闭环优化及环境风险防护，2024年环境类异常由实施前的年均15次降至7次，降低53.3%，发电效益保障率由94.6%提升至97.1%。研究表明，技术升级、责任落实与环境协同治理能够有效提高老旧水电站运行可靠性和综合效益。

关 键 词： 引水式水电站；设备老化；运行管理；环境风险；技术改造

Research on Common Problems and Solutions in the Operation of Hydroelectric Engineering

Yang Congying

China Gezhouba Group Second Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610091

Abstract： Taking a small and medium-sized water diversion hydropower station that has been in operation for 18 years as the research object, based on the operation ledger, defect records, and maintenance data from 2019 to 2023, this paper analyzes the operational problems caused by equipment aging, operation management, and environmental factors, and proposes targeted improvement measures. The results showed that there were 16, 7, 9, and 11 occurrences of rotor cavitation, stator insulation aging, relay protection component attenuation, and pressure tube corrosion, respectively. The average amount of abandoned water per stator insulation fault was 218000 kW · h. By implementing anti-abrasion treatment, insulation online monitoring, protection device updates, pipeline anti-corrosion, management closed-loop optimization, and environmental risk protection, the number of environmental anomalies will decrease from an average of 15 per year before implementation to 7 per year in 2024, a reduction of 53.3%, and the power generation benefit guarantee rate will increase from 94.6% to 97.1%. Research has shown that technological upgrades, responsibility implementation, and coordinated environmental governance can effectively improve the operational reliability and comprehensive benefits of old hydropower stations.

Keywords： water diversion hydropower station; equipment aging; operation management; environmental risks; technical transformation

中小型水电站是区域清洁能源供应和电网调节体系的重要组成部分，其运行可靠性直接关系流域水能资源利用效率、电力供应稳定性及生态保护成效。部分投运年限较长的引水式水电站已进入设备性能衰减和故障集中暴露阶段，水轮机过流部件磨损、发电机绝缘劣化、保护装置性能下降及压力输水设施锈蚀等问题相互叠加，传统定期检修和经验型值守模式难以及时识别隐蔽缺陷。同时，山区流域的高含沙洪水、松散边坡、低温冻融和生态流量约束进一步增加了运行控制难度。现有研究多聚焦单类设备改造或局部风险治理，对设备、管理和环境因素之间的关联关注不足。为此，本文以连续投运18年的引水式水电站为对象，系统识别其主要运行问题，分析故障频次、停机损失及管理薄弱环节，并实施转轮抗磨蚀处理、绝缘在线监测、继电保护更新、压力明管防腐、全生命周期责任管理和环境风险防护，结合运行指标评价干预效果，为同类型老旧水电站改造决策和精细化运维提供参考。

一、水电站工程概况

本文选取一座已连续投运18年的中小型引水式水电站作为研究对象。电站装设3台单机容量16 MW的混流式水轮发电机

组，总装机容量为3×16 MW，设计多年平均发电量为1.92亿 kW · h。工程枢纽由挡水坝、引水隧洞、压力前池、发电厂房以及升压站构成，引水系统承担径流汇集与水能输送任务，所发电能经110 kV升压站接入区域电网^[1]。现有运维团队共28人，其中

运行值守人员15人，机械以及电气检修人员8人，生产管理及安全技术人员5人，实行少人值守、集中检修的组织方式。2019—2023年运行台账显示，电站累计发电量为9.18亿kW·h，年均发电量为1.84亿kW·h，平均设备可用率为97.2%，年利用小时数约3830h。受来水偏枯、设备检修以及汛期含沙量波动影响，各年度发电量处于1.71亿至1.96亿kW·h之间，整体运行保持稳定，但设备老化故障以及环境风险已逐渐显现。

二、水电站运行常见问题分析

（一）设备老化引发的运行故障问题

研究电站投运已达18年，机电设备以及压力输水设施逐步进入老化故障集中显现阶段。调取2019—2023年缺陷记录、故障处置单以及检修报告后发现，水轮机转轮气蚀磨损最为频繁。气蚀是过流表面受到空泡溃灭冲击而产生材料剥蚀的现象，主要集中于叶片出水边以及下环区域^[2]。受表面麻坑扩大和叶型偏差影响，机组在额定水头附近的出力效率持续下降，近5年共处置16次，单次平均弃水电量为8.6万kW·h，平均抢修时间达到17.4h。

表1 某水电站2019—2023年设备老化类故障分类统计表

故障类别	核心影响对象	2019年频次/次	2020年频次/次	2021年频次/次	2022年频次/次	2023年频次/次	5年合计/次	单次平均弃水电量/万kW·h	平均抢修时长/h	危害程度
水轮机转轮气蚀磨损	转轮叶片、下环以及机组出力效率	2	3	3	4	4	16	8.6	17.4	较高
发电机定子绝缘老化	定子线棒、绝缘系统以及机组安全	1	1	1	2	2	7	21.8	39.6	高
继电保护元件衰减	保护测量、动作出口以及故障隔离	1	1	2	2	3	9	5.4	11.8	较高
压力明管锈蚀渗漏	管壁、焊缝以及压力输水系统	1	2	2	3	3	11	12.7	25.3	高

（二）运行管理体系不完善问题

结合该电站现行运行管理制度、岗位责任清单以及2019—2023年巡检资料来看，管理制度虽然覆盖运行值守、设备维护以及安全监督等业务，但制度条款未能随在线监测系统投运同步调整。现有运维团队共32人，其中50岁以上人员占46.9%，机械检修经验较为丰富，而能够独立完成振摆监测、局部放电监测以及数据趋势研判的人员仅有7人^[4]。人员技能档案仍以传统检修项目作为主要考核内容，新增监测设备操作尚未纳入年度能力评价，导致异常信号识别依赖设备厂家远程协助，延长了缺陷确认时间。

巡检记录反映，厂房机电设备以及升压站电气设备已形成按班检查机制，但压力前池排水廊道、引水隧洞进入孔、压力明管支墩背侧等隐蔽部位主要依靠汛前专项检查，常态巡检频次不足。2023年抽查的186份记录中，27份存在测点数据缺项，19份仅填写设备正常，未记录渗水量、锈蚀面积以及裂缝宽度等可比参数。此类记录难以支撑缺陷发展趋势判断，也容易把边坡位移、管道渗漏等早期征兆滞留在现场^[5]。

定子绝缘老化对发电机组安全运行的影响更具隐蔽性。检修记录显示，线棒端部防晕层破损、槽口松动以及绝缘电阻下降等缺陷共出现7次，潮湿工况下局部放电量增大，可能把单点绝缘缺陷扩展为定子接地故障。此类故障发生频次虽低，单次平均弃水电量却达到21.8万kW·h，抢修时间为39.6h。同期，投运年限超过15年的继电保护装置出现采样漂移、出口继电器接点氧化以及电源模块性能衰减，5年累计发生9次异常。元器件灵敏度降低会把保护动作偏差传递至主设备控制环节，形成误动或拒动隐患，单次处置平均需要11.8h^[3]。

压力明管老化主要表现为外壁涂层粉化、焊缝邻近区域点蚀以及支墩积水处局部锈蚀，2019—2023年累计发现11次渗漏类缺陷。其单次平均弃水电量为12.7万kW·h，平均抢修时间达到25.3h。结合表1可知，转轮气蚀具有发生频次高、影响逐年累积的特性，定子绝缘缺陷对应的停机损失和抢修周期更大，压力明管锈蚀则直接关联输水安全。继电保护异常虽然造成的即时弃水量相对较低，但会削弱故障隔离能力。因而，老化风险已从单一部件性能衰减转向水力机械、电气保护以及输水设施之间的关联影响。

设备定检方面，岗位清单按照运行、机械以及电气专业划分责任，却未把跨专业设备落实到具体责任人。调速器油压装置、励磁冷却回路以及闸门控制电源均存在多个班组共同检查而缺少牵头人的现象，缺陷登记、停机消缺以及验收销号之间容易发生责任脱节^[6]。应急预案则偏重原则性程序，近3年演练集中于防洪撤离以及消防处置，未开展机组甩负荷、继电保护拒动、压力管道突发渗漏等场景化演练。值班人员面对复合故障时需要临时确认汇报路径以及操作权限，容易扩大停机范围，并且会放大设备老化、汛期高含沙水流以及低温冻损等风险对连续发电的影响。

（三）环境因素导致的运行隐患问题

案例电站所在的西南山地流域具有汛期降雨集中、河道比降较大以及来水过程变化迅速等水文特性。每年5月至10月，上游强降雨容易把坡面细颗粒物以及河床推移质带入取水口，来水含沙量随洪峰明显增加。泥沙进入引水系统后，会对水轮机转轮、导叶以及蜗壳等过流部件形成冲蚀和磨粒磨损，细颗粒还可能进入密封间隙，加快止漏环损耗^[7]。该隐患在连续暴雨以及洪水消退阶段较为集中，可能造成机组效率下降、振动增大以及检修周期

缩短，潜在影响等级判定为较高。

从库区工程地质条件来看，右岸局部分布由碎石、粉质黏土以及风化岩屑构成的松散堆积体，结构密实度偏低，坡脚又受到库水位涨落作用。极端降雨期间，雨水入渗会把坡体含水率推高，使其抗剪强度下降；若同期出现库水位快速回落，坡体渗透压力难以及时消散，可能诱发局部滑移。滑落物进入引水渠后，易造成渠段过流断面收缩，严重时还会引起堵塞以及停机，风险易发时段集中于主汛期后半段，潜在影响等级为高。

案例流域冬季昼夜温差较大，12月至次年2月的寒潮过程会使背阴区外露管路、阀门以及户外变电设备承受低温冻融作用。管内静水结冰膨胀可能把接头密封面撑开，端子箱凝露结冰则会削弱二次回路绝缘性能，故障影响虽多局限于单套设备，但具有突发性，潜在影响等级为中等^[8]。与此同时，生态流量下泄监管已由定期核查转向连续监测，电站原有按峰谷电价集中调峰的运行方式，容易在停机或低负荷时段形成下泄流量波动。该矛盾全年存在，在枯水期更为突出，既可能限制可调出力，也会增加生态考核风险，其潜在影响等级为较高。

三、水电站运行问题解决对策及效果评估

（一）设备老化问题的技术升级对策

鉴于设备缺陷频次以及停机损失差异，技术改造宜纳入年度检修计划分阶段开展。针对转轮叶片出水边以及下环气蚀区域，可选用超音速火焰喷涂工艺，把碳化钨基抗磨涂层覆盖于修磨后的过流表面，单台投资控制在35万至45万元。施工期间需校核叶型尺寸、涂层厚度以及动平衡状态，避免局部增重引起振动。

定子绝缘改造应结合停机试验定位缺陷线棒，对防晕层破损以及槽口松动部位开展局部绝缘补强，不宜直接更换整套定子绕组。同时布置局部放电在线监测装置，持续采集绝缘内部微弱放电信号，3台机组预计投入60万至80万元。安装时需加强传感器屏蔽以及接地处理，降低电磁干扰对趋势研判的影响^[9]。

继电保护装置可按故障频次分批替换，优先更新主变以及发电机保护屏，选用国产数字式保护装置并完成定值复核、回路核对以及整组传动试验，投资约90万元，计划在2个枯水期内完成。压力明管则结合年度停水检修清除外壁锈层，涂覆环氧富锌底漆以及耐候面漆，内壁增设牺牲阳极阴极保护系统，借助阳极优先腐蚀来减缓管壁损耗，预计投入70万至100万元。施工中应重点检测焊缝厚度、支墩积水以及绝缘接头状态，并把隐蔽部位纳入后续定期测厚范围。

（二）运行管理体系的完善对策

鉴于在线监测设备投运后岗位能力评价仍偏重传统检修项目，电站应把师带徒协作以及专项技能培训纳入年度计划，由机械、电气骨干带领青年人员完成振摆监测、局部放电监测以及数据趋势研判训练，每半年组织1次智能化运维设备操作考核，并把考核结果用于岗位授权。巡检流程需按照设备风险等级明确检查频次、点位、项目以及记录字段，把压力前池排水廊道、引水隧洞进人孔以及压力明管支墩背侧纳入常态清单，现场统一记录

渗水量、锈蚀面积以及裂缝宽度，异常数据应于当天完成复核与流转。

围绕核心设备建立全生命周期责任台账，把投运参数、缺陷记录、检修周期、备件更换以及验收销号归集至同一设备编码，明确机组、调速器以及闸门控制电源的运维责任人，由责任人牵头落实定检定修以及跨专业会签。结合机组甩负荷、继电保护拒动以及压力管道突发渗漏等工况编制场景化预案，每季度开展1次实操演练，核验汇报路径、操作权限以及物资调用时限。闭环式运行管理流程见图1，其以风险排查为入口，依次衔接问题处置、效果复盘以及流程优化，并把复盘结论回写培训、巡检和检修标准，使现场问题能够转化为制度修订依据。

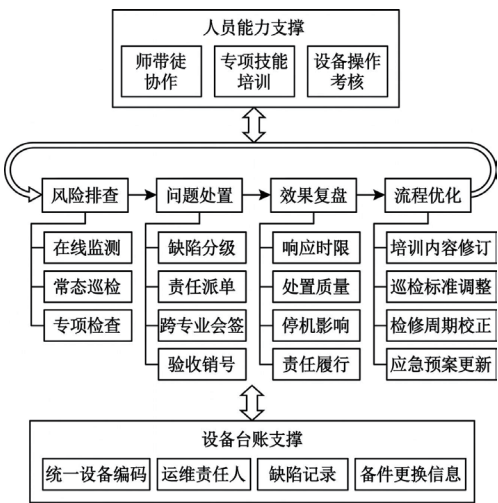


图1 水电站闭环式运行管理流程架构图

（三）环境因素影响的缓解对策及效果评估

针对汛期泥沙冲刷，可把低水位拉沙纳入洪水调度，即在洪峰前后降低取水水位并启用排沙孔，使富含沙水流优先下泄，同时依据含沙量调整机组负荷。右岸松散堆积体宜设置格构锚杆以及坡顶截水沟、坡脚排水沟，借助位移监测点识别滑移征兆。背阴区外露管路可敷设保温层以及自限温伴热带，户外端子箱配置加热除湿装置。调峰计划则需把生态流量约束纳入负荷分配模型，在枯水期预留稳定下泄流量，减少频繁启停引起的流量波动^[10]。

环境隐患管控成效可运用故障发生率降低率进行衡量，其计算式为：

$$R_f = \frac{N_b - N_a}{N_b} \times 100\%$$

其中， R_f 表示故障发生率降低率，单位为百分比， N_b 表示措施实施前的年均故障次数，单位为次每年， N_a 表示措施实施后的年均故障次数，单位为次每年。

以2021—2023年均值为实施前基准，并与2024年运行台账进行比较，相关指标见表2。环境类异常由年均15次降至7次，综合降低率为53.3%，风险管控等级由较高降为中等；发电效益保障率由94.6%提高至97.1%，增幅保持在合理范围，说明调度优化以及工程防护能够减轻环境扰动，但汛期泥沙以及边坡稳定仍需持续监测。

表2 环境隐患缓解对策实施前后运行风险指标对比表

隐患类型	核心评价指标	实施前指标值	实施后指标值	改善幅度	实施前管控评价	实施后管控评价
汛期高含沙水流	过机高含沙异常次数	4 次每年	3 次每年	降低 25.0%	较高风险	中等风险
库区松散边坡	位移超限以及渠段落石次数	2 次每年	1 次每年	降低 50.0%	高风险	中等风险
冬季低温冻融	管路以及户外设备冻损次数	3 次每年	1 次每年	降低 66.7%	中等风险	低风险
生态流量波动	下泄流量不达标次数	6 次每年	2 次每年	降低 66.7%	较高风险	低风险
环境隐患综合影响	环境类异常总次数	15 次每年	7 次每年	降低 53.3%	较高风险	中等风险
发电效益保障水平	发电效益保障率	94.6%	97.1%	提高 2.5 个百分点	一般保障	较高保障

结语

老旧引水式水电站的稳定运行不能仅依赖故障后的检修处置，而应形成设备状态识别、管理责任落实与流域风险防控相互衔接的治理体系。针对不同缺陷的发生频次、损失程度和安全后果分配改造资源，可避免整机更换造成的投资浪费，并提高检修计划的针对性。设备全生命周期台账、量化巡检记录、跨专业责

任人和场景化演练能够缩短异常确认及处置时间，使现场经验转化为可追溯的管理标准。泥沙、边坡、冻融及生态流量风险具有明显的季节性和动态性，后续仍需持续积累在线监测数据，完善风险阈值和负荷调度模型，同时加强关键部件状态评价及改造后性能复核。通过技术、管理和环境措施的持续协同，可进一步降低非计划停机风险，延长设备服役周期，并兼顾发电效益、输水安全与生态责任。

参考文献

[1] 温玉婷. 水泵运行常见问题与解决对策 [J]. 河北水利, 2024, (12): 42–43.

[2] 杨金莎. 水利水电设备运行管理方法探究 [J]. 中国设备工程, 2025, (22): 56–58.

[3] 石强强. 工业循环水常见问题及解决方案 [J]. 安徽化工, 2025, 51(05): 138–140.

[4] 陈长奔, 葛耀凯, 吴寿敬, 邵慧双, 许诚豪, 章辉. 阀门自动化应用中的常见问题及解决措施 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 7–9.

[5] 何福泰. 电气自动化在水利水电工程中的应用浅谈 [J]. 中国设备工程, 2024, (24): 236–238.

[6] 杨国平, 黄紫倩. 政府投资项目工程决算审计常见问题及其对策研究 [J]. 会计师, 2025, (11): 65–67.

[7] 冯全勇. 涡街流量计使用过程中的常见问题处理及日常维护保养 [J]. 中国有色金属, 2024, (S2): 164–165.

[8] 张院乐, 曹向阳. 油气储运安全管理的常见问题及解决策略 [J]. 石化技术, 2024, 31(12): 290–292.

[9] 谭龙斌, 刘春林, 王涛. 大中型水利工程移民安置资金使用管理常见问题处理研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56(S2): 86–90.

[10] 王文秀. 水电工程概算执行与造价管控技术分析 [J]. 财富时代, 2024, (12): 24–25.