

数字化背景下南水北调泵站机电设备维修养护策略

康 晴 任庆旺 苏 阳

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250109

摘 要：在数字化技术深度渗透背景下，南水北调工程作为国家战略性水资源调配工程，其泵站机电设备的稳定运行直接关乎调水系统效率与安全。当前传统维修模式存在过度依赖人工经验、数据滞后、资源错配及应急响应不足等问题，难以适配工程高质量运维需求。本文基于设备全生命周期管理理念，整合实时监控、预测性维护及数字孪生等技术，构建“感知-分析-决策-执行”数字化运维体系，通过标准化数据采集、智能化故障预警、动态化资源调配等策略，实现从被动维修向主动养护的转型，为南水北调泵站机电设备智能化运维提供实践范式，亦为同类大型水利工程设备管理升级提供参考。

关键词：南水北调；泵站机电设备；维修养护；数字化技术；预测性维护

引言

南水北调工程作为我国战略性跨流域调水工程，对解决水资源分布不均、保障民生具有不可替代的作用。泵站机电设备作为工程核心枢纽，其运行状态直接决定调水系统的稳定性与效率。随着工程规模扩大和技术升级，传统人工维修养护模式逐渐暴露短板：过度依赖经验导致故障误判率高，技能传承困难；人工巡检数据滞后，难以及时捕捉设备潜在隐患；定期检修易造成资源浪费，应急响应能力不足。

数字化技术的飞速发展破解了上述难题提供了新路径。物联网、大数据、人工智能及数字孪生等技术的融合应用，可实现设备状态实时监控、故障精准预测和运维智能决策。本文立足数字化背景，系统分析南水北调泵站机电设备维修养护现状与问题，提出针对性优化策略，旨在为设备长效稳定运行提供理论支撑与技术指导，其成果亦可为同类大型水利工程及工业领域的智能化运维提供借鉴。

1 南水北调泵站机电设备维修养护的现状

南水北调工程是我国重要的战略性水资源调配项目，东线工程建设了13级大型泵站，仅山东境内干线设7级大型泵站和3座中型水库入库泵站。这些泵站历经十几年运行，内部机电设备繁杂，涵盖水泵机组、电气控制系统、监测仪表及辅助系统等。长期运行中，设备易因磨损、老化或受外部环境干扰而出现故障，维修养护工作至关重要。当前，传统维修养护模式已难以适应南水北调工程对设备可靠性和运行效率的高要求，引入数字化技术实现智能化运维迫在眉睫^[1]。

1.1 过度依赖人工经验

传统维修严重依赖维修人员的个体经验，维修水平

因人员而异。像设备异响判断、故障点定位这类核心技能，难以通过标准化流程传承，导致新员工成长缓慢，主观性经验还容易引发故障误判。

1.2 缺乏实时数据支持

目前设备状态监测多依靠人工巡检，数据采集不仅间隔长，覆盖范围也有限。像轴承温度、振动频率等关键参数，无法做到实时追踪，致使潜在故障难以及时察觉。

1.3 资源浪费严重

定期检修遵循“到期必修”，易造成“过度维修”。例如一些阀门密封件和电机轴承在状态良好、未达磨损阈值时就被提前更换或拆卸，这不仅浪费了大量备件成本，频繁拆装还可能引发新故障，降低设备的稳定性和使用寿命。

1.4 应急响应能力不足

面对突发故障，传统模式依赖人工排查和临时调配资源，响应迟缓。例如某泵站水泵电机突发跳闸，因缺乏历史数据和故障知识库支持，维修人员花费4h才定位到电缆绝缘老化问题，导致调水中断超6h，对区域供水调度产生极大影响。

2 数字化技术在泵站机电设备维修养护中的应用

数字化技术为南水北调泵站机电设备维修养护提供了系统性解决方案，通过设备全生命周期管理、实时监控与数据分析、预测性维护及数字孪生技术的协同应用，构建起“数据驱动、智能决策、动态优化”的现代化运维体系，显著提升了设备管理的精准性与高效性，为工程的高效运行提供了有力支撑^[2]。

2.1 设备全生命周期管理

设备全生命周期管理依托数字化平台，对泵站机电设备从规划设计到报废淘汰的全流程实施动态化管控，

实现资源配置最优化与运行风险最小化。

(1) 规划阶段。基于历史运行大数据与水文预测模型,构建设备选型决策系统。通过分析泵站所在区域近十年水位波动、季节用水量变化等数据,结合不同厂商设备的能耗系数、故障概率等参数,生成适配性评分矩阵,为水泵流量、电机功率等核心参数的确定提供量化依据,避免因选型偏差导致的运行效率低下^[3-6]。

(2) 采购与安装阶段。搭建数字化采购中台,整合供应商资质审核、产品质量追溯、履约能力评估等功能,实现采购流程透明化。安装调试环节引入BIM技术构建三维模型,对泵组与管道的连接精度、电气线路布局等进行虚拟预演,提前发现空间干涉、荷载失衡等潜在问题,如东湖水库入库泵站通过该技术使安装工期缩短15%。

(3) 运行维护阶段。建立设备电子健康档案,通过物联网终端自动记录运行参数、维修记录、备件更换等信息,形成动态更新的数字画像。运维人员通过移动终端扫描设备唯一标识,即可调取完整历史数据,如某水泵近三年的振动峰值变化、历次轴承更换周期等,为故障诊断提供数据支撑。

(4) 报废阶段。基于全生命周期成本分析模型,综合设备剩余寿命、维修成本与技术迭代速度,生成最优更新方案。例如对运行超15年的高压开关柜,通过对比继续运维的年均费用与新型智能柜的节能效益,科学决策淘汰时机,避免资源浪费。

2.2 实时监控与数据分析

通过构建“感知层-传输层-应用层”三级监控体系,实现设备状态的全天候感知与深度解析。

(1) 感知层部署。在关键设备节点安装高精度传感器网络,包括水泵轴承座的压电式振动传感器(采样频率达1kHz)、电机绕组的光纤温度传感器(测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)等,实现振动频谱、温升速率、绝缘状态等参数的实时采集。

(2) 数据传输与处理。采用5G+光纤混合组网,确保海量数据(单泵站日均采集量超50GB)的低延迟传输。监控中心部署边缘计算网关,对数据进行预处理,将异常值识别、阈值判断等简单运算本地化处理,减轻云端压力,使预警响应速度提升至秒级。

(3) 智能分析应用:运用时序数据挖掘算法,识别设备运行规律。某泵站通过分析电机电流曲线发现,夏季高温时段电流波动与冷却塔效率存在强相关性,据此调整冷却水流量,使电机温升降低 4°C ,月节电2.3万度。同时建立跨泵站数据比对模型,通过同类设备的性能参数横向对

比,快速定位隐性故障,如发现某泵站水泵效率低于同类设备均值8%,排查后确认是叶轮气蚀导致。

2.3 预测性维护

预测性维护通过人工智能算法构建故障演化模型,将传统的“事后抢修”转变为“事前干预”,显著降低非计划停机时间。

(1) 模型构建。基于长短期记忆网络(LSTM),对设备振动、温度、压力等多维数据进行训练,生成故障概率预测曲线。针对水泵轴承磨损故障,通过提取振动信号中的128Hz特征频率变化率,结合润滑油铁谱分析数据,构建剩余寿命预测模型,误差可控制在 $\pm 3\text{d}$ 内。

(2) 预警机制。设置三级预警阈值,一级预警(轻微异常)触发系统自动记录,二级预警(趋势恶化)推送至运维班组,三级预警(紧急状态)联动应急指挥平台。某泵站曾通过振动信号的早期异常(3倍频幅值突增),提前72小时预警水泵叶轮磨损,避免了叶片断裂事故。

(3) 维护优化。根据预测结果制定动态维护计划,如针对夏季负荷高峰前的电机绝缘老化趋势,提前安排预防性试验;依据雨季前水泵密封件的磨损预测,储备适配备件,使应急备件库存降低30%。

2.4 数字孪生技术

数字孪生技术构建物理设备的虚拟镜像,实现虚实交互、模拟仿真与优化决策。

(1) 仿真应用。在虚拟环境中模拟极端工况下的设备响应,如模拟电网电压骤降时电机的动态转矩变化,评估机械传动系统的耐受能力;通过模拟不同开度下阀门的流场分布,优化调节策略以减少气蚀损伤。某泵站通过孪生模型测试,将阀门调节能耗降低8%。

(2) 维修演练。对大型检修作业进行虚拟预演,同时搭建远程协同平台,专家可通过AR眼镜实时标注虚拟模型中的故障点,指导现场维修。

3 数字化技术在泵站机电设备维修养护中应用的优化策略与建议

数字化技术在泵站机电设备维修养护中的深度应用,需构建“技术-数据-人才-实施”四位一体的保障体系,通过系统性优化打破应用壁垒,确保数字化运维模式落地见效,为南水北调工程的高效运行提供可持续支撑。

3.1 加强基础设施建设

以“感知精准化、传输高速化、处理智能化”为目标,升级硬件支撑体系,筑牢数字化应用根基。

(1) 智能感知网络升级。按“关键参数全采集、重点设备无死角”原则,更换老旧传感器,选用具备自校

准、抗干扰功能的智能终端。建立传感器健康度评估模型,通过比对历史标定数据识别漂移传感器,保障数据精度。

(2) 通信网络优化。构建“光纤为主、5G为辅”的双冗余传输网络,主干链路采用万兆光纤环网(传输时延 $<10\text{ms}$),为偏远泵站增设边缘计算节点,实现数据本地预处理与断点续传,解决网络覆盖薄弱问题。

(3) 数据中心与配套设施。采用“分布式存储+集中式管理”架构,在区域调度中心部署模块化数据中心,按数据类型实施分级存储。配置搭载AR眼镜的移动运维终端,实现设备扫码查询、数据上传等功能,现场作业效率提升40%。

3.2 推动数据共享与整合

打破数据壁垒,构建“标准统一、多源融合、安全共享”的数据生态,释放数据要素价值。

(1) 建立全域数据标准。制定《南水北调泵站机电设备数据采集规范》,明确32类设备的156项参数标准,包括振动加速度(单位 mm/s^2 ,采样频率 2kHz)等。统一故障代码体系,将电机故障细分为8大类64小项,实现跨泵站故障信息识别^[14]。

(2) 多源数据融合应用。构建数据中台整合设备运行、水文气象、地理空间等7类数据,通过时空对齐算法建立关联模型。开发数据清洗工具,自动处理异常值与缺失值,数据完整性提升至98%。

(3) 安全共享平台搭建。采用“私有云+区块链”技术构建数据共享平台,设置三级访问权限,通过智能合约实现数据脱敏共享。建立操作追溯机制,所有数据操作均上链存证,平台试运行期间跨部门数据调用效率提升60%。

3.3 提升人员技术水平

构建“培训-培养-激励”全链条人才机制,打造适配数字化转型的专业队伍。

(1) 分层分类培训。针对管理层开展数字化战略培训,讲解数字孪生、预测性维护等技术价值;对运维人员实施“理论+实操”培训,采用虚拟仿真平台模拟故障场景,使培训考核通过率从65%提升至92%。每年组织跨泵站技术比武,激发学习热情。

(2) 复合型人才培养与激励:推行“双导师制”,由水利专家与数字化技术专家联合带教。建立人才库动态管理机制,对掌握数字孪生建模等技能的人员给予专项补贴。

3.4 分阶段实施数字化改造

遵循“试点先行、由点及面、持续优化”原则,稳步推进数字化转型。

(1) 试点阶段。选取3座代表性泵站,建设实时监控系统与预测性维护模块,部署500+智能传感器、搭建区域数据中台、开发水泵故障预测模型。从12项指标评估效果,形成可复制方案,某试点泵站非计划停机时间缩短70%。

(2) 推广阶段。按“先干线、后支线”顺序推广,优先覆盖干线上的泵站,增加数字孪生技术应用,实现泵组运行仿真与维修方案预演。建立技术支持团队,每季度召开推进会,确保改造质量^[15]。

(3) 完善阶段。构建数字化运维成熟度评估模型,跟踪技术趋势,适时引入新技术升级系统。建立运维效果追溯机制,通过对比改造前后5年数据持续优化策略,实现数字化技术长效应用。

4 结语

数字化技术为南水北调泵站机电设备维修养护带来了范式革新,通过设备全生命周期管理实现了资源配置最优化,依托实时监控与数据分析构建了全天候状态感知体系,借助预测性维护完成了从被动抢修到主动防控的转型,数字孪生技术更推动运维进入虚实融合的新阶段。这些技术的协同应用,显著提升了设备可靠性与运维效率,案例中也印证了其价值。然而,技术落地仍面临数据标准不统一、跨泵站协同不足、复合型人才短缺等挑战。未来需持续完善“技术-数据-人才”生态,深化5G与数字孪生的融合应用,推动运维体系向“自主决策、无人值守”演进。

参考文献

- [1] 吴伯锦.广播电视无线发射台站智慧运维系统建设策略[J].卫星电视与宽带多媒体,2024,21(22):40-42.
- [2] 王涛.机电一体化技术在工程机械设备中的应用[J].现代制造技术与装备,2024,60(12):158-160.
- [3] 康晴,孙启强,任泽俭.某泵站机电设备故障分析及维护策略[J].水电站机电技术,2024,47(07):108-111+141.
- [4] 郭凯.数字化与智能化的天然气站场设备管理与安全管理研究[J].化工管理,2025,(03):124-126.
- [5] 袁丰武,王维花.大中型水利工程机电设备维修养护工作分析[J].水电站机电技术,2024,47(02):77-80.
- [6] 彭澎,祝新意,许翔,等.基于数据湖原理的现有医疗设备管理方案改良[J].无线互联科技,2024,21(24):115-118.