

自来水行业设备全生命周期管理： 运行、维护与维修保养

宋子豪

北京市自来水集团有限责任公司长辛店分公司，北京 102412

DOI:10.61369/ME.2025040010

摘 要： 自来水行业设备全生命周期管理通过整合物联网监控、预测性维护与智能化维修技术，构建覆盖运行、维护与维修环节的闭环管理体系，显著提升供水系统可靠性与经济性。研究揭示了标准化流程、全生命周期成本（LCC）模型与数据驱动决策的协同作用，同时指出数据孤岛、技术标准缺失及人才短缺等应用瓶颈。未来需以智能化、绿色化与协同化为方向，推动设备管理向智慧水务转型，为行业可持续发展提供理论支撑与实践路径。

关 键 词： 全生命周期管理；EAM；物联网；动态调整

Life Cycle Management of Equipment in the Water Supply Industry: Operation, Maintenance, and Upkeep

Song Zihao

Changxindian Branch of Beijing Municipal Waterworks Group Co., Ltd. Beijing 102412

Abstract： The whole life cycle management of equipment in the water supply industry integrates IoT monitoring, predictive maintenance, and intelligent repair technologies to establish a closed-loop management system covering operation, maintenance, and repair, significantly enhancing system reliability and cost-effectiveness. The study highlights the synergy of standardized processes, life cycle cost (LCC) models, and data-driven decision-making, while identifying bottlenecks such as data silos, lack of technical standards, and talent shortages. Future development should focus on intelligence, green transformation, and collaboration to advance smart water management, providing theoretical and practical foundations for sustainable industry evolution.

Keywords： life cycle management; EAM; Internet of Things; dynamic adjustment

引言

自来水行业作为城市基础设施的核心组成部分，其设备管理效能直接关系到供水安全、资源利用效率及公共服务质量。随着城镇化进程加速与居民用水需求升级，传统分段式管理模式难以应对高可靠性、水质安全及设备复杂化的多重挑战。2023年国家多部委联合发布的《关于严格城镇给排水管网工程建设全生命周期质量管理工作的通知》，明确要求从设计、施工到运维的全链条质量管控，为行业向系统性管理转型提供了政策支撑。当前，物联网、大数据与人工智能技术的深度融合，推动了设备状态实时监控、预测性维护等技术的应用，但数据孤岛、技术标准缺失及复合型人才短缺等问题仍制约着管理效能的提升。在此背景下，探索设备全生命周期管理的创新路径，不仅是保障供水系统韧性的必然要求，更是实现行业智能化、绿色化转型的关键驱动力。

一、设备全生命周期管理的概念与框架

（一）全生命周期管理的定义与内涵

全生命周期管理（Life Cycle Management, LCM）是以设备从设计、采购、运行、维护到退役的完整生命周期为对象，通过系统性规划与动态调控实现资源优化配置的管理模式^[1]。其核心内涵在于打破传统分段式管理的局限，强调各阶段间的协同性与连续性。在设备设计阶段，需综合考虑功能需求、可维护性及环

境适应性；采购阶段注重成本效益分析与供应商全周期服务能力评估；运行阶段依托实时数据监测与性能分析优化操作效率；维护阶段结合预防性策略与预测性技术降低突发故障风险；退役阶段则通过残值评估与环保处置实现资源循环利用。全生命周期管理通过数据驱动决策，将技术、经济与环境目标整合，形成闭环管理体系，为设备效能最大化提供理论支撑。

（二）自来水行业设备管理的特殊性

自来水行业设备管理具有显著区别于其他工业领域的特征。

首先，设备运行需满足高可靠性要求，供水系统的连续性与稳定性直接影响民生保障与社会经济运转。其次，设备性能与水质安全高度关联，例如管网腐蚀或泵组效率下降可能导致二次污染风险。此外，设备环境适应性要求严苛，地下管网需应对土壤腐蚀、压力波动，水处理设备则需耐受化学药剂侵蚀与温湿度变化。同时，设备分布广、类型多样（如泵站、加氯系统、智能水表等）导致管理复杂度提升。这些特殊性要求管理策略必须融合技术标准、风险控制与应急响应机制，确保设备在全生命周期内满足水质、效率与安全三重目标^[2]。

二、设备运行阶段的管理策略

（一）设备运行状态实时监控

设备运行状态实时监控依托物联网（IoT）技术构建多层次传感器网络，通过压力、流量、振动、温度等参数的全方位采集，实现设备健康状态的动态感知。传感器数据经边缘计算节点预处理后，上传至云端平台进行整合分析，结合阈值预警与趋势预测算法，可精准识别设备异常（如水泵轴承磨损、管网泄漏）。数字孪生技术的引入进一步提升了监控可视化水平，通过虚拟模型与物理设备的实时映射，支持故障定位与影响评估^[3]。这一技术体系不仅降低人工巡检强度，还为后续维护决策提供数据支撑，显著提升供水系统运行的可靠性。

（二）预防性维护的规划与实施

预防性维护以设备劣化模型为核心，基于历史故障数据与实时运行参数构建退化曲线，量化关键部件（如电机绕组、阀门密封件）的性能衰减规律。维护周期通过蒙特卡洛模拟或贝叶斯网络动态优化，结合环境变量（如水质腐蚀性、负荷波动）调整干预阈值^[4]。例如，针对高浊度水源地区的离心泵，通过润滑油颗粒度监测数据动态缩短维护间隔。该策略突破传统固定周期维护的局限性，在保障设备可用性的同时减少过度维护成本，形成“监测－分析－决策－反馈”的闭环管理机制，有效平衡运维经济性与安全性。

三、设备维护阶段的优化方法

（一）定期维护与状态维护的融合

1. 定期维护的计划制定与执行流程

定期维护计划以标准化作业程序（SOP）为基础，依据设备类型、运行负荷与历史故障率制定差异化维护周期。SOP明确润滑、紧固、清洁等基础操作的技术规范与验收标准，结合甘特图与关键路径法优化人力、备件与工具的资源调度。例如，利用数字孪生技术模拟维护作业流程，可识别资源冲突节点并提前配置替代方案。执行过程中，通过移动终端记录维护数据并关联至设备档案，形成“计划－执行－反馈”闭环管理，确保维护行为的可追溯性与质量可控性，避免因操作偏差引发的二次故障风险^[5]。

2. 状态维护的预测性技术应用

状态维护通过振动频谱分析、润滑油金属颗粒检测与红外热

成像等技术捕捉设备劣化特征，结合机器学习算法（如LSTM神经网络、随机森林）建立故障预测模型^[6]。多源数据（运行参数、环境变量、维修记录）的融合分析可识别潜在故障模式，例如通过轴承振动信号频域特征判断疲劳裂纹发展阶段。预测性维护平台基于实时健康指数（HI）生成维护优先级清单，动态调整巡检频率与备件库存策略。此类技术将故障干预窗口从“事后修复”前移至“早期预警”，减少非计划停机对供水连续性的影响，提升维护资源利用效率。

（二）维护成本与效益的平衡分析

1. 维护成本模型构建

维护成本模型涵盖直接成本（人工工时、备件消耗、外包服务）与间接成本（停机导致的水量损失、客户投诉、品牌信誉损伤）。直接成本通过作业成本法（ABC）按维护活动细分核算；间接成本则需结合历史数据与行业基准量化，例如采用单位时间产水收益折算停机经济损失^[7]。模型引入风险权重因子，评估不同故障场景（如泵组突发损坏与阀门缓慢泄漏）对总成本的差异化影响，为维护预算分配提供量化依据，避免单一成本维度导致的决策偏差。

2. 维护策略的经济性评价

基于全生命周期成本（LCC）的维护方案决策框架，综合比较预防性、修复性及预测性维护策略的净现值（NPV）与内部收益率（IRR）^[8]。LCC模型覆盖设备购置、能源消耗、维护投入及退役处置成本，通过蒙特卡洛模拟量化不确定性因素（如备件价格波动、故障率变化）对经济性的影响。例如，对老旧管网采用高频次定期维护可能短期内降低爆管风险，但长期LCC显著高于局部更换方案。经济性评价通过帕累托最优分析权衡成本、安全与可持续性目标，支持从“经验决策”向“数据驱动决策”的范式转型。

四、设备维修保养的关键技术与实践

（一）机械类设备维修技术

1. 泵阀与管道系统的故障诊断与修复

泵阀与管道系统的故障诊断依托声波检测、光纤传感与压力梯度分析技术定位泄漏点，结合涡流检测与超声壁厚测量评估腐蚀程度。修复工艺采用复合材料修补、冷焊或热熔焊接技术恢复结构完整性，同步实施环氧涂层、阴极保护等防腐措施延长服役周期。例如，针对铸铁管网的硫酸盐腐蚀问题，通过内衬HDPE材料实现非开挖修复。此类技术兼顾修复效率与成本控制，减少因管网破裂导致的水资源浪费与二次污染风险。

2. 大型机电设备拆解与重组规范

大型机电设备（如离心泵机组、水处理反应器）拆解遵循锁定挂牌（LOTO）制度与能量隔离规范，确保作业安全^[9]。拆解流程采用激光对中仪与三维扫描技术记录原始装配参数，重组阶段通过扭矩分级控制与振动频谱比对验证安装精度。性能恢复标准涵盖空载试运行、负载效率测试与密封性检测，例如泵组重组后需满足流量－扬程曲线偏差小于5%。规范化操作降低人为失误概

率，保障设备重组后的运行稳定性。

（二）电气与自动化设备维护

1. 电机与变频器的保养策略

电机维护以绝缘电阻检测为核心，通过兆欧表定期监测绕组绝缘性能，配合红外热像仪识别局部过热隐患。变频器保养聚焦散热系统清洁与电解电容寿命评估，利用示波器校准输出波形畸变率。参数校准依据设备铭牌数据与负载特性优化载波频率、加速曲线等设定，例如针对恒压供水场景调整 PID 参数以减少压力波动。系统化保养策略可降低电机烧毁与变频器过载故障率，确保电气设备高效稳定运行。

2. 控制系统软硬件升级与兼容性管理

控制系统升级遵循“先仿真后实施”原则，利用虚拟 PLC 验证软件逻辑与硬件驱动的兼容性^[10]。硬件冗余通过双机热备、模块化插拔设计实现故障无缝切换，软件版本迭代采用灰度发布机制降低升级风险。网络安全防护整合防火墙、入侵检测与数据加密技术，例如 OPC UA 协议替代传统 Modbus 以提升通信安全性。兼容性管理需建立设备型号-驱动版本-通信协议的映射数据库，避免因组件不匹配导致的系统瘫痪。

（三）智能化维修保养技术应用

1. 数字孪生技术在维修仿真中的应用

数字孪生技术通过高保真建模复现设备物理特性与运行环境，支持虚拟调试与维修方案预演。例如，在更换供水泵叶轮前，通过孪生模型模拟不同转速下的应力分布，优化拆卸顺序与工具选型。故障模拟功能可生成轴承断裂、密封失效等场景，验

证应急维修流程的有效性。该技术缩短现场维修时间 30% 以上，同时降低实操训练对物理设备的依赖。

2. 大数据驱动的维修决策支持系统

维修决策系统集成 SCADA、ERP 与 CMMS 数据，通过关联规则挖掘（如 Apriori 算法）识别故障关联模式。故障模式库基于自然语言处理（NLP）结构化历史工单文本，构建故障-症状-解决方案的知识图谱。智能推荐算法（如随机森林、梯度提升树）结合设备实时状态与成本约束生成维修优先级清单，例如优先处理高故障传播风险的管网节点。此类系统推动维修决策从“被动响应”向“主动干预”转型，提升资源配置的科学性。

五、总结

全生命周期管理通过整合物联网监控、预测性维护与智能化维修技术，构建了覆盖设备运行、维护与维修环节的闭环管理体系，显著提升了供水系统可靠性、经济性与可持续性。标准化维护流程、数据驱动的决策框架与 LCC 成本模型的协同应用，为设备效能最大化提供方法论支撑。然而，当前技术应用仍面临数据孤岛阻碍跨系统信息共享、复合型技术人才短缺制约智能化转型、行业标准化不足导致管理碎片化等瓶颈。未来设备管理需聚焦智能化（数字孪生、AI 与区块链深度融合）、绿色化（低碳材料应用与退役设备循环利用）与协同化（跨部门数据平台与供应链协同）三大方向，通过强化数据治理、完善标准体系与产学研合作，推动自来水行业向智慧化、韧性化方向演进。

参考文献

- [1] 陈国扬. 供水管网漏损控制管理实践和体会 [J]. 城镇供水, 2017(4): 5.
- [2] 陈圣鹏, 钟煥良, 谢君亮, 等. 基于 GIS 的供水企业管理新模式的研究与实践 [C]// 全国测绘科技信息网中南分网第二十八次学术信息交流会议论文集. 2014: 99-106.
- [3] 田舒茜, 魏昕, 徐琳瑜. 基于生命周期的高校生活用水方案研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S2): 4.
- [4] 周家斌. 自来水厂机电设备技术管理的思考及实践 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2016, 000(015): 2767-2767.
- [5] 田振宝. 基于零代码的智慧水务平台设计与应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(5): 320-321.
- [6] 笕跃武, 于少亭, 胡淑圆. 城市自来水厂绿色发展路径探索与思考 [J]. 净水技术, 2022, 41(11): 1-6.
- [7] 陈栩云. 基于 EAM 的设备资产管理信息系统在供水企业的应用 [J]. 设备管理与维修, 2023(16): 18-20.
- [8] 笕跃武, 于少亭, 胡淑圆. 城市自来水厂绿色发展路径探索与思考 [J]. 净水技术, 2022, 41(11): 1-6, 54.
- [9] 石军. 探究城市自来水管道工程施工技术的应用 [J]. 建筑与装饰, 2020(13): 168, 173.
- [10] 齐珊珊, 段梦, 齐欣. 天津市芥园自来水厂的生命周期评价研究 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 4.