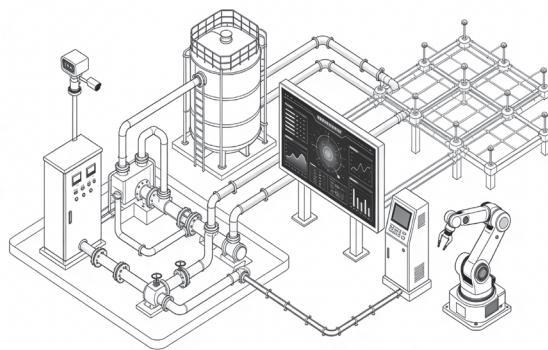


大数据驱动水厂智能化运营管理研究

文 | 王莹

城市供水安全属于民生保障方面的基础命题，水厂运营管理水平直接关系到供水质量与城市韧性。目前，传统水厂依靠人工经验、单点控制的运营模式，已难以应对原水水质波动加剧、能耗管控趋严、智慧城市建设提速等多重现实压力。伴随物联网、机器学习与数字孪生技术的加速成熟，大数据驱动的智能化管理为解决上述困境提供了可行途径。怎样把数据能力有效转化成水厂运营效能，是当下智慧水务建设急需厘清的核心问题。



(配图由 AI 生成)

水厂运营管理的现实困境与大数据转型契机

城市供水系统承担着保障公众饮水安全和维持城市正常运转两大职能。水厂作为该系统核心生产节点，其运营管理水平直接影响供水质量与运营成本。然而，当下多数水厂日常运营主要依赖两种模式：一种是依靠运行人员长期积累的操作经验进行工艺判断与参数调整；另一种是在设备出现明显故障或水质发生偏离后才开展干预。这两种模式在应对原水水质季节性波动、设备性能渐进式衰减及供水需求动态变化时，都难以实现实时精准协同调控，致使药剂投加失准、电能无效损耗、出厂水质稳定性不足等结构性问题长期存在。

更深层的矛盾之处在于，混凝、沉淀、过滤、消毒等核心工艺单元长久处于单点独立控制状态，各环节参数之间缺少联动优化机制，导致工艺响应一直滞后于水质变化。随着物联网传感网络规模化部署、机器学习算法工程化成熟及云边协同计算能力持续提升，用大数据技术重构水厂感知体系与决策逻辑已具备现实可行性，水厂运营正迎来从“经验驱动”向“数据驱动”跨越的关键窗口期。

大数据驱动的水厂智能化运营管理体系构建

多源异构数据的全域采集与融合平台

水厂智能化运营的底层逻辑，取决于数据能不能完整、准确且实时地采集与整合。水厂日常运营会涉及三类核心数据源：部署于混凝、沉淀、过滤、消毒各工艺段的在线水质传感器，持续采集浊度、pH 值、余氯、溶解氧等关键指标；SCADA 系统，实时回传水泵启停状态、阀门开度、电机电流及振动频率等设备参数；能耗计量仪表，同步记录各单元用电量与药耗量。这三类数据源在采集频率、数据格式与传输

协议上存在显著差异，要是直接接入后不加以处理，就会产生大量噪声与缺失值。所以，平台必须建立针对传感器漂移与通信中断的自动识别修正机制，并且要通过时序对齐与语义统一实现多源数据的有效融合，最终按照原始层、清洗层、特征层、指标层构建分层数据湖，从而为上层分析模型提供稳定、高质量的数据输入。

多模型协同的智能分析与决策支撑能力

在数据平台上面，单一算法模型没办法应对水厂多工艺、多变量且强耦合的分析需求，多模型协同运行是达成智能决策的关键路径。预测类模型以历史工艺数据当作训练基础，运用长短期记忆网络捕捉水质变化的时序规律，结合 XGBoost 算法对设备剩余寿命与膜污染发展进程进行建模，实测平均绝对百分比误差能够控制在 6.45% 以内。在实时运行这个层面，机理模型与数据驱动模型并行开展计算，对混凝加药、排泥、消毒等 9 个核心生产单元同步进行监控，当多个模型交叉验证都识别出参数偏移或者异常预兆时，系统自动把优化指令下达至对应执行机构，形成“感知—分析—决策—执行”完整闭环，将人工判断环节从实时控制流程当中逐步剥离。值得强调的是，这种多模型协同架构并非一次性部署之后静态运行，而是随着生产数据的持续积累不断迭代优化，各模型的预测边界与协同规则在实际运营反馈当中动态修正，让整体分析能力随水厂运行经验的沉淀而持续增强。

数字孪生与元宇宙技术的集成应用

在数据采集和智能分析能力成熟的基础上，数字孪生技术承担着把上述能力可视化、可交互、可推演的关键职能。水厂数字孪生体通过整合 BIM 建筑信息模型、IoT 实时数据流及机理预测模型，在虚拟空间里构建和物理水厂一一映射

的动态镜像。运行人员能够在其中模拟不同加药策略与调度方案对水质、能耗、设备寿命的综合影响，选出最优方案之后再同步到物理系统去执行，从根本上规避了直接在生产系统上进行试错的风险。元宇宙技术的引入进一步延伸了孪生平台的运维边界：搭载AI视觉与声纹识别技术的四足机器狗、轨道机器人在厂区自主巡检，将多模态感知数据实时回传到孪生平台，技术人员在远程就可以完成隐患标注、维修方案模拟及现场作业同步指导，实现虚实协同的新型运维模式。从更长远的视角来看，数字孪生平台所积累的仿真推演记录与运营决策数据，将逐步构成水厂专属的知识资产库，为后续AI大模型在水务领域的深度训练与场景落地提供高质量的数据基础。

大数据驱动下水厂运营管理的效能提升

水质安全管控的全流程智能化

大数据体系落地以后，水质管控最根本的改变不是监测手段叠加，而是管控逻辑进行了重构——从“定时抽检、事后处置”转变为“全时在线、事前预警”。以某装备制造区水厂为例，智慧管网建成之后，流量、压力与水质监测站点接近1200个，远传普及率超过95%，对供水区域管网实现全面实时覆盖，漏损率稳定控制在6%以下，达到全国同行业领先水平。在工艺精准管控这个层面，智能加药系统接入大数据分析模型以后，依据实时水质数据动态计算药剂投加量，混凝剂与消毒剂单耗分别降低6.22%与13.04%，出厂水余氯稳定性显著提升，水质安全保障能力得到实质性增强。值得重点关注的是，这套管控体系并非处于孤立运行状态，而是通过数据回流机制持续修正预警阈值与投药模型参数，让系统随着运行时间积累变得愈加精准，形成自我优化的良性闭环。大数据驱动之下的水质管控已经从被动纠偏演进成主动干预的闭环体系，管控边界也从出厂水质延伸到整个供水管网的实时状态感知。

设备全生命周期的预测性维护管理

上述构建的设备健康画像和多维特征融合机制，其核心价值在这一节具体展现出来。传统计划性检修按固定周期执行，既存在“维修不足”引发突发停机的风险，又面临“过度维修”造成资源浪费的矛盾。大数据驱动的预测性维护模式持续采集水泵温度分布、电机电流波动和声纹特征，结合历史故障数据建立动态评分模型，能提前数周识别轴承磨损或叶轮结垢的风险，把维修时机从“故障发生后”提前到“劣化趋势显现时”。这种模式实质是以数据流替代时间周期作为维护触发条件，让设备管理从被动应对转变为状态驱动，系统积累的设备故障特征数据不断丰富预测模型的训练样本，使不同机型、不同工况下的故障识别精度随数据量增长

持续提升，形成越用越准的数据资产积累路径。备品备件管理也从“安全库存”模式转向基于剩余寿命预测的动态采购，系统自动生成采购计划并与供应商系统对接，实现维修保障与库存成本的双向优化，让设备综合可用率得到持续提升。

能耗精细调度与节能降碳管控

能耗管控是水厂运营成本优化的关键核心战场，泵站运行、曝气系统及污泥处理的电耗占比决定节能潜力上限，大数据技术在这个场景中的贡献在于，把能耗调度从“经验排班”推向“算法驱动的动态优化”。系统会依据原水水质、处理水量、实时电价动态生成最优运行方案，在峰谷电价差异显著时段自动调整泵组启停策略，以此有效降低高峰时段的用能成本。在此基础上，制水单位能耗基准线的建立将进一步将节能管理从“事后统计”推向“实时管控”：系统依据工艺组合与处理规模动态计算能耗基准值，实际能耗一旦偏离阈值便自动预警，督促运行人员排查异常根源并触发参数优化指令。这一机制的深层意义在于，能耗数据不再只是成本核算的统计依据，而是转化为驱动工艺持续优化的反馈信号，推动水厂在日常运营中逐步逼近能效最优边界。大数据驱动的能耗管控已从单点节能延伸至全流程系统性降碳，为水厂绿色低碳转型提供可量化、可持续的技术路径。

结束语

大数据技术深度介入让水厂运营管理从依赖经验到依靠数据实现实质性跨越，全域数据采集平台为智能化运营的感知基础进行了有力夯实，多模型协同分析体系构建了支撑精准决策的重要能力，数字孪生与元宇宙技术拓展了运维管理的空间边界范围。在水质管控、设备维护与能耗调度这三大核心场景里，智能化管理模式带来可量化效能改善，面向未来持续完善数据治理能力与深化跨系统协同机制是水厂智能化运营迈向更高水平的关键。

作者简介：王莹 诸暨市暨阳水业勘测设计有限公司