

智慧水务系统在大型水利枢纽污水监控中的创新应用

张 宇

内蒙古呼和浩特市供排水服务中心 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要：智慧水务在污水监控领域将向“AI深度决策、资源闭环利用、全域韧性防控”演进，但需优先攻克数据融合壁垒、安全防护与长效经济性难题。通过政策-技术-资本协同（如中央特别国债支持管网改造，推动水务管理从“被动响应”迈向“主动智治”。智慧水务系统在大型水利枢纽污水监控中具有显著的创新重要性，智慧水务系统通过技术创新重构了大型水利枢纽的污水监控模式，从被动治理转向主动防控，实现“监测-分析-决策-执行”的闭环管理，为水资源可持续利用与生态保护提供核心支撑。

关键词：智慧水务系统；大型水利枢纽；污水监控；创新应用

智慧水务系统是以新一代信息技术（如物联网、大数据、人工智能、云计算等）与水务基础设施深度融合为核心，通过构建全域感知网络与智能决策平台，实现供水、排水、污水处理、防洪等水务环节的精细化、智能化管理与服务的新型系统模式。其本质是通过数据驱动的动态优化，提升水资源利用效率与管理效能。

1 智慧水务系统在大型水利枢纽污水监控中的创新重要性

（1）实时精准监测与污染溯源。水质多参数动态监控：通过部署物联网传感器网络（如pH、溶解氧、浊度、氨氮等传感器），对污水流量、污染物浓度等关键指标进行秒级采集，实现全流程实时监控，确保异常水质事件被即时发现。智能污染溯源：结合GIS地理信息系统与数字孪生技术，系统可快速定位污染源并模拟扩散路径，大幅提升污染事件响应速度与处置精准度。

（2）智能化决策与工艺优化。工艺自适应调控：基于深度学习的算法分析历史与实时数据，动态优化曝气时长、药剂投加量等工艺参数，降低能耗15%-30%的同时提升处理效率。预测性维护与应急管理：通过设备运行状态监测与故障预测模型，提前预警设备故障风险；结合气象与水文数据，预判洪涝或水质突发事件，自动生成应急预案。

（3）资源整合与系统协同。多环节联动控制：打破供水、排水、污水处理等业务壁垒，实现管网压力调控、泵站启停、污水处理厂负荷分配的跨系统协同调度，减少管网漏损率达20%以上。数据驱动全链管理：构建覆盖水源地-管网-处理厂-排放口的全链条数据平台，支持水资源调配、污泥资源化利用等决策，推动水务闭环管理。

（4）生态与经济双重效益。环保减排增效：智能曝

气与加药系统减少碳排放，污泥资源化技术（如转化生物肥料）降低二次污染，助力碳中和目标。降本提质：远程监控与自动化控制减少人工依赖，运营成本降低约25%；水质达标率提升至98%以上，保障下游生态安全与用水健康。

2 大型水利枢纽污水监控需求分析

（1）全流程精准监测需求。关键参数实时采集，需覆盖水位、流量、水质（pH、溶解氧、氨氮、总磷、浊度等）、气象数据等，通过高精度传感器（如超声波水位计、电磁流量计、多参数水质仪）实现毫米级水位监测及秒级数据更新，确保动态过程可追溯。多级预警机制，设定低水位、警戒水位、超高报警水位等多级阈值，联动水泵启停与备用设备切换；水质超标或设备故障时，通过短信、平台弹窗等多渠道实时报警。

（2）智能化运行管理需求。设备自动化控制，支持水泵轮换、阀门远程调控、曝气量优化等，根据液位或水质变化自动调整工艺参数，低人工干预强度。能效与运维优化，能耗管理：实时监测水泵电流、电压、频率，通过算法优化曝气与污泥回流比，降低电耗；预测性维护：基于设备运行数据与AI模型，预判故障（如格栅堵塞、泵机损坏），减少非计划停机。

（3）安全与合规性需求。全流程安防监控，在进水口、排水口、泵站等关键节点部署智能摄像头，实现人脸识别、行为检测、非法入侵报警，并支持24小时录像追溯。环保合规保障，严格符合《地下水管理条例》及地方排放标准，实时监测污染物指标，生成合规报告，支撑环保执法取证。

（4）系统扩展与兼容性需求。异构数据融合，整合水质监测、视频安防、设备运行等多源数据，构建统一数据底板，支持GIS/BIM空间可视化与数字孪生应用。

通信与架构弹性，采用4G/5G/NB-IoT无线传输与光纤有线网络混合组网，适应偏远环境；支持边缘计算实时处理，降低云端负载。

(5) 政策与标准化需求。适配最新行业规范，遵循新颁《水利水电工程单元工程施工质量验收标准》(SL/T 631.8)、《小型水库监测技术规范》(SL/T 828)等，强化安全监测工程质量控制与数据校验流程。数字孪生水利要求，响应“天空地水工一体化监测”政策，构建与实体工程同步的数字孪生平台，支撑洪水预报、调度仿真等智能应用。

(6) 长效经济性需求。降低综合成本，通过远程值守与自动化控制减少人工巡检成本；农村分散式站点采用低成本无线监测方案，提升偏远区域覆盖率。投资回报可量化，需明确智能化改造的ROI(如某项目曝气优化节能30%)，结合政府补贴(如长三角生态示范区)设计可持续商业模式。

3 大型水利枢纽污水监控面临的挑战

(1) 基础设施与运维瓶颈。管网老化与溢流污染，雨污分流不彻底、管网覆盖率虚高(实际运输能力不足)、设备老化等问题突出，极端天气下溢流污染频发，导致未经处理的污水直排环境。老旧管网渗漏率高达18%以上，加剧地下水污染风险。清淤与维护困难，大管径管网(直径超2米)清淤面临环境复杂、流量大等难题：水下暗流、障碍物阻碍机器人作业，传统人工清淤效率低且安全风险高。部分枢纽缺少自动化清淤设备，依赖人工导致响应滞后。

(2) 技术应用与数据管理短板。监测精度与实时性不足，水质波动：工业与生活污水混合导致成分复杂，传统监测设备难以实时捕捉突发污染物(如重金属)，且易受油污、泡沫干扰。定位与感知缺陷：水下GPS信号失效，声呐与惯性导航融合定位误差大(需厘米级精度)，淤泥特性识别传感器技术不成熟。系统孤岛与智能化落地难，数据分散于供水、排水、处理等独立系统，协议不统一形成“信息孤岛”。部分智慧水务项目沦为“摆设”，因技术适配性差(如算法未针对本地水质优化)、运维人才短缺导致系统闲置。

(3) 成本压力与资源约束。能耗与药剂成本高企，曝气环节占污水处理总能耗50%以上，但多数枢纽缺少智能变频调控系统；药剂投加依赖人工经验，过度使用现象普遍(如聚丙烯酰胺成本达0.21元/立方米)。投资与维护资金缺口，设备更新周期长(寿命20-30年)，单次大修费用超80万元；中小型枢纽因财政投入不足，被迫延缓设施升级，故障率提升40%。

(4) 环境与外部风险加剧。极端气候冲击，暴雨频发致污水量骤增，超出处理能力。洪涝冲击围堰安全，增加基坑溃坝风险。二次污染与合规压力，污泥处置不当引发重金属渗透(占污泥总量15%)，且回用率低于30%；环保法规趋严(如氨氮排放标准提升)，但实时监测手段滞后导致超标风险。

4 智慧水务在污水监控中的创新应用

智慧水务在污水监控领域的创新应用已形成技术融合与场景落地的双重突破，以下从核心技术、应用场景及效能维度进行系统分析，重点标注关键创新点及数据支撑来源：

(1) 核心技术创新。全域智能感知层，高精度传感网络：采用微型光谱仪实时监测余氯、重金属等指标($\pm 3\%$ 误差范围)，结合雷达水位计(精度 $\pm 3\text{mm}$)与多普勒流量计，实现 -35°C 至 80°C 严苛环境下的数据连续采集。边缘智能决策：通过边缘计算网关实现本地化漏水判定与压力调节，降低云端依赖，提升响应速度至毫秒级。AI驱动决策层，智能工艺优化：基于LSTM模型预测水质波动趋势，强化学习算法动态优化泵站调度(如深圳案例降低曝气能耗12%)。数字孪生协同：融合BIM+GIS+IoT数据构建三维动态仿真平台，预演管网压力分布与溢流风险。

(2) 创新应用场景落地。1) 污涝协同防控，内涝预警联动：建立排水管网-外江水位联动模型，通过液位阈值预警触发泵站智能调度，雨季溢流减少65%。管网堵塞预测：图神经网络(GNN)分析管网淤积规律，自动生成清淤指令。2) 水质精准调控，智能加药系统：根据实时进水COD、氨氮浓度自动计算药剂投加量，药耗降低15%。污染源快速溯源：微型光谱仪结合动态知识图谱，工业偷排溯源效率提升40%。3) 污泥处理增效，沉降性能AI识别：图像识别技术分析污泥性状，联动时序模型调整脱水周期，脱水效率提升30%。压滤自适应控制：板框压滤机通过压力-转速闭环调节，稳定泥饼含水率 $\leq 60\%$ 。

(3) 效能验证与挑战。应用效果量化，运维效率，人力成本下降35.6%。能耗，曝气电耗降低12%。漏损管控，管网漏损率降低8%。现存挑战，数据壁垒：老旧系统兼容性差，多源异构数据整合困难(如农村分散站点)。安全风险：传感器网络易受攻击，需量子加密强化传输(亚控KingWater平台实践)。人才缺口：兼具水务工艺与AI技能的复合型人才稀缺。

(4) 未来突破方向。技术纵深融合：探索“5G+量子通信”保障数据传输安全，仿生自修复管道材料降低维

护成本。政策机制创新：推动智慧水务纳入城市级数字孪生平台，建立跨部门数据共享标准。

5 智慧水务在污水监控中的未来发展趋势与挑战

智慧水务在污水监控领域的未来发展将呈现技术深化与系统整合并行的趋势，但仍面临数据整合、安全防护等核心挑战。以下是具体分析：

（1）未来发展趋势。技术融合纵深突破，AI与大模型赋能决策：水利部“水利标准AI大模型”已集成1800余项标准数据，支持污水处理工艺优化与风险预判，标准编制效率提升2.5倍¹⁰；矢量智控开发的L3级智能平台通过动态优化曝气与加药策略，实现污水处理环节能耗降低30%。量子通信保障安全：5G+量子加密技术将强化水务数据传输安全性，解决传感器网络攻击风险，南京“城市生命线”工程已试点应用。仿生材料应用：自修复管道材料可降低管网维护成本，延长设施寿命，成为管网智能化升级的关键方向，政策驱动的系统整合，数字孪生全域覆盖：国家政策要求2030年前建成“韧性城市”，推动供排水系统纳入城市级数字孪生平台，实现“天空地水工一体化监测”。跨部门数据共享机制：中央财政1万亿元特别国债支持地下管网改造，要求打破数据孤岛，建立水务、环保、气象多源数据协同平台。资源循环与低碳转型，再生水高效利用：政策目标要求2025年地级缺水城市再生水利用率超25%，智慧水务平台通过优化中水回用调度，支撑污泥沼气发电与营养物回收。低碳标杆厂建设：推广“光伏+水源热泵”技术，全国规划建成100座能源高效循环的绿色污水厂。

（2）核心挑战。数据壁垒与系统兼容性，老旧水务系统与新建智能设备存在协议差异，农村分散站点多源

数据整合困难，影响全域分析精度。跨部门数据共享机制尚未健全，部分区域仍存在“信息孤岛”。网络安全风险升级，物联网传感器易受网络攻击，需部署量子加密等前沿技术强化防护，但目前仅少数标杆项目应用。长效运营与经济性瓶颈，智慧化改造投资回报周期长，中小水厂资金压力大（如智能水表部署成本高、维护复杂）。兼具水务工艺与AI技术的复合型人才稀缺，制约技术落地效率。标准与法规滞后，ISO 25407《污水系统智能管理导则》等国际标准仍处于制定阶段，国内细分领域技术规范尚未全覆盖。

大型水利枢纽污水监控需以“精准感知-智能控制-全域协同-政策合规”为核心逻辑，通过技术迭代（如AI+IoT）与管理创新（如数字孪生）应对规模化、分散化、高标准化的挑战，最终实现水安全、水环境、水生态的综合目标。智慧水务通过“感知-决策-执行”闭环重构污水监控范式，显著提升大型水利枢纽的精细化管控能力。后续需攻克数据孤岛与安全瓶颈，深化AI与物理系统的融合创新，以实现水环境治理的可持续目标。

参考文献

- [1]宗才.智慧水务系统在城市供水中的运用[J].智能建筑与智慧城市,2022(5):178-180.
- [2]朱子才.基于数据分析与监测的智慧水务系统设计与实现[D].青岛:青岛科技大学,2022.
- [3]崔越.智慧水务系统在城市供水中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019(12):181.
- [4]马南.智慧水务系统在城市供水中的运用研究[J].科技与创新,2021(7):158-159.