

智能控制在给排水系统优化运行中的应用

梁 晔 邓卓方

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘要：本文系统阐述了智能控制在给排水系统优化运行中的核心价值与应用框架。研究首先剖析了传统运行模式的固有缺陷，继而从数据感知层、分析决策层和执行控制层三个维度，深入探讨了以物联网（IoT）为基础的全域感知网络、以大数据与人工智能（AI）为核心的智能分析引擎，以及以先进控制算法为驱动的动态优化策略。重点论述了模糊逻辑控制、神经网络、专家系统、模型预测控制（MPC）等典型智能算法在泵站优化调度、管网压力管理、污水处理过程控制及漏损预警等关键场景中的作用机理。研究表明，智能控制技术通过构建“感知-分析-决策-执行”的闭环优化体系，能够显著降低系统能耗、提升供水水质与服务可靠性、延长设备使用寿命，并为水务系统的韧性管理和科学决策提供强大的数据支撑，是推动水务行业数字化转型与高质量发展的核心驱动力。

关键词：给排水系统；智能控制；物联网；人工智能；优化运行；节能降耗

引言

给排水系统是城市运行的生命线，涵盖取水、处理、输配、污水收集与回用等环节，对保障民生、工业及生态可持续至关重要。传统运行模式依赖固定调度、阈值控制和人工经验，难以应对用水波动、管网老化、能耗高企及极端气候等挑战：水泵常因未随需调节而浪费能源；地下管网状态难感知，导致漏损难定位、爆管预警滞后；污水处理则受限于单一参数控制，难以精准调控水质与药耗。在此背景下，物联网、大数据、云计算与人工智能等技术正推动给排水系统向智慧化转型。通过构建“自我感知—诊断—优化”的智能控制体系，实现从经验驱动到数据驱动、从被动响应到主动预测的转变，为打造安全、高效、绿色、韧性的现代化水务基础设施提供关键支撑。

1 传统给排水系统运行模式的局限性

1.1 运行策略僵化，能源效率低下

传统给排水系统的泵站调度通常采用“多工况”模式，即根据历史日用水曲线，将一天划分为几个固定的时段，每个时段开启固定数量的水泵并设定固定的转速或出口阀门开度。这种策略完全忽略了当日实际用水需求的随机性和不确定性。在用水低谷期，系统仍维持较高的压力，导致大量电能被消耗在无谓的管网摩擦损失上；而在用水高峰期，又可能因调度不及时而导致局部区域水压不足。这种“大马拉小车”或“小马拉大车”的现象，是造成给排水系统能耗居高不下的主要原因。

1.2 信息感知能力薄弱，系统透明度不足

传统系统依赖于稀疏分布的压力表、流量计和水质监测点，数据采集频率低、覆盖面窄，无法形成对整个

管网状态的全景式、动态化感知。这使得运营管理人员对管网内部的真实运行状况知之甚少，系统处于一种“半盲”状态。当发生管道泄漏时，往往只能通过月度水费账单的异常或市民报修才能被动发现，此时漏损水量可能已经非常巨大^[1]。同样，对于管网末梢的水质恶化、水龄过长等问题，也缺乏有效的在线监测和预警手段。

1.3 控制逻辑简单，难以应对复杂工况

在过程控制层面，无论是供水管网的压力控制还是污水处理厂的曝气控制，大多采用经典的PID（比例-积分-微分）控制器。PID控制器虽然结构简单、易于实现，但其参数整定困难，且仅适用于线性、时不变的系统。给排水系统是一个典型的强耦合、大时滞、非线性的复杂动态系统，其特性会随着季节、天气、用户行为等因素不断变化。固定的PID参数在这种环境下很难保证始终最优的控制性能，常常出现超调、振荡或响应迟缓等问题。

1.4 缺乏前瞻性与自适应性

传统运行模式本质上是一种“事后补救”型的管理方式。无论是设备故障、水质事故还是管网爆裂，都是在问题发生后才启动应急响应程序。这种模式不仅代价高昂，而且容易对用户服务造成严重影响。系统缺乏基于历史数据和实时状态对未来趋势进行预测的能力，也无法根据外部环境的变化（如暴雨、干旱、大型活动等）自动调整运行策略，表现出明显的脆弱性和低韧性。

2 智能控制技术的体系架构与核心组件

为克服上述局限，一个完整的智能给排水系统应构建起一个由“感知层-网络层-平台层-应用层”组成的多层次技术架构，其中智能控制的核心在于平台层的数据分析与应用层的优化决策。

2.1 全域感知层：构建水务系统的“神经末梢”

感知层目标是实现对给排水系统全要素、全过程的实时、精准、低成本感知。(1) 智能传感器网络：大规模部署低成本、低功耗、高可靠性的智能传感器，包括压力、流量、水质(pH、浊度、余氯、COD、氨氮等)、噪声、振动等多种类型。这些传感器通过无线通信技术(如LoRa、NB-IoT)组成自组织网络，实现数据的自动采集与上传。(2) 智能水表与终端设备：推广使用具备远程抄表、双向通信、异常用水报警等功能的智能水表，获取用户端的精细化用水行为数据。同时，在泵站、阀门、加药设备等关键节点集成智能控制器，使其具备本地数据处理和执行能力。(3) 视频与声学监测：利用AI视频分析技术对泵房、水池等关键区域进行无人值守的安全监控；采用声学相关仪、负压波等技术对管网进行主动或被动的漏损监测，提高检漏的精度和效率。

2.2 智能分析与决策层：打造水务系统的“智慧大脑”

平台层负责对海量异构数据进行存储、处理、分析和挖掘，形成有价值的洞察和决策建议。(1) 大数据平台：构建水务专属的大数据平台，用于汇聚来自SCADA系统、GIS系统、客服系统、气象系统等多源数据，建立统一的数据湖或数据仓库，为上层应用提供坚实的数据底座。(2) 水力水质模型：建立高保真的管网水力模型和水质模型(如EPANET、InfoWorks WS等)，作为系统仿真的数字孪生体。该模型能够模拟不同调度方案下的管网压力、流量和水质分布，是进行优化决策的重要工具^[2]。(3) 人工智能算法引擎：机器学习用于用水负荷预测、设备故障预警及异常检测；深度学习通过CNN处理巡检图像、借助RNN/LSTM分析用水与水质时序数据；知识图谱则整合设备档案、维修记录与领域知识，支撑专家系统与智能问答，共同提升系统感知、诊断与决策能力。

2.3 优化执行与控制层：形成水务系统的“敏捷四肢”

应用层将分析决策的结果转化为具体的控制指令，下发至现场设备，形成闭环。(1) 先进过程控制(APC)：在污水处理厂等连续生产过程中，应用模型预测控制(MPC)、自适应控制等先进算法，实现对曝气量、回流比、加药量等关键工艺参数的多变量、前馈-反馈协同控制，确保出水水质稳定达标的同时，最小化能耗和药耗。(2) 动态优化调度：基于实时的用水预测和管网模型仿真，运用遗传算法、粒子群优化等智能优化算法，求解全局最优的泵组启停组合和变频调速策略，实现全网能耗最低、压力最均衡的运行目标。(3) 自适应压力管理：通过在管网关键节点设置远程可控的减压阀(PRV)，并结

合实时压力监测数据，动态调整各区域的供水压力，实施“压力随需而变”的管理策略，在保障用户服务水压的前提下，最大限度地减少背景漏损和爆管风险。

3 智能控制算法在关键场景中的应用机理

3.1 泵站群的优化调度与节能控制

泵站是给水系统的能耗大户，其优化调度是节能降耗的核心。智能控制在此场景的应用可概括为“预测-优化-执行”三步曲。(1) 精准负荷预测：利用LSTM等深度学习模型，融合历史用水数据、日类型(工作日/周末/节假日)、天气预报(温度、湿度、降雨)、特殊事件等多维特征，对未来数小时乃至数天的区域用水量进行高精度预测。(2) 多目标优化求解：以预测的负荷为输入，以管网水力模型为约束，构建一个多目标优化问题。目标函数通常包括最小化总能耗、最小化泵组启停次数(以延长设备寿命)、最大化水库蓄水量(以应对未来高峰)等。采用遗传算法(GA)或粒子群优化(PSO)等智能优化算法，求解出最优的泵组运行组合(哪些泵开/停)和各自的转速设定值^[3]。(3) 模型预测控制(MPC)执行：将优化结果作为MPC控制器的设定点。MPC控制器在每个控制周期内，都会基于当前的实际状态(而非预测状态)重新进行一次短时域的滚动优化，并只执行第一个控制动作。这种机制能够有效克服模型失配和外部扰动的影响，确保控制的鲁棒性和实时性。

3.2 供水管网的压力智能管理

智能控制通过构建一个分布式、自适应的压力控制系统来实现管网压力管理。(1) 分区计量与压力监测：首先，通过DMA(District Metered Area)分区计量技术，将庞大复杂的管网划分为若干个独立的计量区域。在每个DMA的入口处安装流量计和压力传感器，实时监控其夜间最小流量(NMF)，作为评估背景漏损水平的关键指标。(2) 模糊逻辑压力控制：在DMA入口处的减压阀(PRV)上部署模糊逻辑控制器。该控制器的输入变量可以是DMA内的实测压力与目标压力的偏差及其变化率，输出变量则是PRV的开度指令。模糊规则库可以根据专家经验或历史数据进行设计，例如“如果压力偏差为正且在增大，则大幅关小阀门”。模糊控制对模型精度要求不高，且能处理非线性关系，非常适合此类应用场景。(3) 基于强化学习的自适应调压：更进一步，可以引入强化学习(RL)框架。将压力控制系统视为一个智能体(Agent)，其状态(State)是管网的压力分布，动作(Action)是各PRV的开度，奖励(Reward)函数则综合考虑了用户服务满意度(压力达标率)和漏损水量(NMF)。通过与环境(即管网)的不断交互和试错，智

能够自主学习到一套最优的压力调控策略,实现动态、自适应的压力管理。

3.3 污水处理过程的智能优化

智能控制旨在实现对整个污水处理流程的协同优化。

(1) 基于神经网络的软测量:许多关键的水质参数(如BOD、TN、TP)难以在线实时测量。可以利用BP神经网络或径向基函数(RBF)网络,建立这些“硬”参数与易于在线测量的“软”参数(如DO、ORP、pH、MLSS)之间的非线性映射关系,实现对关键出水水质指标的实时软测量,为闭环控制提供依据。(2) 专家系统与规则库:针对污水处理厂运行中常见的异常工况(如污泥膨胀、硝化抑制),可以构建专家系统。该系统集成了领域专家的知识 and 经验,形成一系列“IF-THEN”规则。当在线监测数据触发某条规则的前提条件时,系统会自动给出相应的诊断结论和操作建议(如调整排泥量、增加碳源投加等),辅助甚至替代人工决策^[4]。(3) 多变量模型预测控制(MPC):对于AAO(厌氧-缺氧-好氧)等主流工艺,可以建立包含碳、氮、磷去除动力学的机理模型或数据驱动模型。在此基础上,设计多变量MPC控制器,同时以出水TN、TP、NH₃-N等作为被控变量,以内回流比、外回流比、曝气量、碳源投加量等作为操纵变量,进行协同优化控制,确保在满足严格排放标准的同时,实现能源和资源的高效利用。

3.4 管网漏损与风险的智能预警

(1) 基于机器学习的异常检测:利用孤立森林(Isolation Forest)、一类支持向量机(One-Class SVM)等无监督学习算法,对各DMA的夜间最小流量(NMF)时间序列进行建模。当NMF值显著偏离其正常模式时,算法会发出漏损预警。(2) 基于声学信号的漏点定位:在管网关键节点部署高灵敏度的声学传感器。当管道发生泄漏时,会产生特定频率的声波信号。通过分析多个传感器接收到的信号到达时间差(TDOA),可以利用三角定位原理精确

计算出漏点位置。深度学习模型(如CNN)可以用于从复杂的背景噪声中提取和识别微弱的泄漏特征信号,提高定位的准确性。(3) 基于数字孪生的风险评估:将管网的物理属性(管材、管龄、管径、埋深)、运行数据(压力、流量)和外部环境数据(土壤腐蚀性、交通荷载、地质活动)集成到管网的数字孪生模型中。利用该模型可以模拟不同工况下的管道应力状态,并结合管道失效概率模型,对全网的爆管风险进行动态评估和可视化展示,指导预防性维护工作的优先级排序。

4 结语

智能控制技术正推动给排水系统从经验依赖、被动响应的传统模式,向数据驱动、主动预测、自我优化的智慧体系转型。通过全域感知网络(“感官”)、人工智能引擎(“大脑”)和先进控制算法(“四肢”),在泵站节能调度、管网压力调控、污水厂优化及漏损预警等方面展现出显著优势,不仅降低能耗与药耗,更提升供水安全、节水效能与减碳水平。未来,随着5G/6G、边缘计算和数字孪生等技术成熟,给排水系统将深度融入智慧城市,与交通、能源、气象等系统协同联动,有效应对气候变化与人口增长挑战,为城市可持续发展和高品质生活提供坚实水务支撑。

参考文献

- [1] 马超云.基于智能管理的城市给排水工程施工技术[J].建材发展导向,2026,24(05):52-54.
- [2] 陈银年.智能控制技术在建筑给排水系统中的应用与前景[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.宁波钢铁有限公司,2025:162-163.
- [3] 郑荣明.基于智能控制的建筑给排水工程施工技术[J].建设科技,2024,(22):81-83.
- [4] 房海勇.给排水设备智能制造的技术创新与应用研究[J].水上安全,2026,(04):142-144.