

城市给排水系统低碳化与智慧化技术研究综述

田海燕 陈威屹 李漫 顾博文
北京师范大学 北京 100875

摘要: 随着水资源短缺、管网漏损、碳排放约束与内涝风险加剧,传统给排水系统已难以适配新型城镇化与“双碳”目标需求。本文聚焦智慧水务管控、低碳水处理、管网漏损控制、雨水资源化、再生水回用五大方向,结合国内典型工程实践与国外前沿研究成果,详细分析各技术的核心原理、应用现状与现存瓶颈,展望多技术融合发展路径。

关键词: 给排水系统; 低碳化; 智慧水务; 漏损控制; 资源化; 综述

引言

城市给排水系统是保障城市水安全、支撑生态循环的核心基础设施,其运行效率、能耗水平与资源化程度直接关系水资源合理利用、能源节约与城乡生态环境质量,是新型城镇化建设与“双碳”战略落地的重要支撑。当前,我国城镇化率已突破66%,给排水行业已进入规模化发展向高质量发展转型的关键阶段,但长期积累的短板仍较为突出。本文基于国内外近10年的最新研究成果与典型工程实践,系统综述给排水系统五大核心技术领域的技术进展,剖析各技术应用中的现存瓶颈,提出未来发展趋势与研究重点,为行业技术升级、工程应用等提供更全面的支撑。

1 智慧水务:给排水系统智能管控技术进展

智慧水务以物联网感知网络、大数据分析平台、人工智能算法与数字孪生仿真技术为核心,实现供排水全流程的实时监测、精准调度、预测性维护与应急处置,是提升给排水系统运行效率、降低运维成本、保障水安全的关键手段。

1.1 管网智能监测与漏损控制技术

供水管网漏损是给排水行业的共性难题,传统人工听音检漏、压力测试等方式效率低、覆盖范围有限,难以适配大规模、复杂管网的运维需求。现阶段,管网智能监测与漏损控制已形成“感知-分析-预警-处置”的全流程技术体系,核心技术主要包括以下三类。

多传感器融合监测技术是漏损识别的基础,通过在管网关键节点部署压力、流量、水质与声学传感器,构建全域感知网络,实时捕捉管网运行异常特征,实现漏损点快速识别与定位。其中,声学传感器可精准捕捉0.1~2 kHz的漏损声波,定位精度可达±5 m,已在上海、深圳等城市的独立计量区(DMA)广泛应用,使漏损检出率提升40%以上,定位时间从数天缩短至数小时^[1]。

人工智能漏损预测算法是漏损提前防控的核心,依托LSTM、随机森林等机器学习模型,融合管网运行、气象、拓扑结构等多维度数据,构建漏损预测模型,可提前7~30天预警潜在漏损点。例如,杭州全域智慧水务项目通过AI漏损预测模型,将供水管网漏损率从12.8%降至9.5%,运维成本降低22%,成效显著。

独立计量区(DMA)精细化管理是漏损控制的重要手段,通过划分独立计量分区、安装高精度流量计,结合最小夜间流量法,精准估算漏损量,实现分区治理^[2]。截至目前,我国已建成DMA超2万个,重点城市覆盖率超80%,可有效降低管网漏损率3~5%,部分城市DMA漏损率已控制在8%以下。

1.2 数字孪生与智能调度技术

数字孪生技术通过构建物理管网与虚拟仿真模型的实时映射关系,结合SWMM、EPANET等水力模型,整合多维度数据并动态校准,实现管网运行工况的精准仿真与推演。在供水系统中,可优化泵站运行参数与调度策略,降低能耗10%~15%,保障供水安全;在排水系统中,可动态模拟内涝扩散,联动调度相关设施,使内涝应急响应时间缩短50%以上,积水消退时间缩短30%,提升内涝防控能力。

1.3 智慧化应用现存瓶颈

当前智慧水务发展仍存在三大瓶颈:一、数据孤岛突出,不同设备与平台协议不兼容,各环节数据难以互通,无法实现全流程一体化管控;二、模型精度不足,复杂管网拓扑结构复杂、老旧管网资料不完善,导致数字孪生模型校准难度大,仿真精度难以满足精细化调度需求;三、建设与运维成本偏高,高端设备与平台前期投入大,中小城市因资金、技术不足,规模化推广受限。

2 低碳水处理:低能耗、低排放工艺技术进展

水处理环节是给排水系统能耗与碳排放的核心来

源,其中污水处理厂能耗占城市水系统总能耗的70%以上,碳排放占比超60%。低碳水处理的核心目标是通过工艺优化与技术创新,降低能耗、减少碳排放,实现能源与资源回收利用。

2.1 低碳污水处理核心工艺

厌氧氨氧化(ANAMMOX)技术是低碳脱氮主流技术,其核心是厌氧条件下厌氧氨氧化菌将氨氮与亚硝酸盐直接转化为氮气,无需投加有机碳源与曝气供氧,可使曝气能耗降低60%以上,剩余污泥产量减少90%^[3]。该技术已在高氨氮废水处理中规模化应用,处理成本较传统A²/O工艺降低30%~40%,碳排放强度降低50%以上。

曝气节能与智能控制技术是降低污水处理能耗的关键,通过高效曝气设备提升氧气传递效率,结合DO在线监测与AI模糊控制算法,动态调节曝气量,可使曝气能耗降低15%~25%。马军院士团队提出“分散式-源头分离-低碳技术”框架,减少污水长距离输送能耗,进一步削减系统碳排放。

污泥能源化与资源化利用是污水处理低碳化的重要途径,通过厌氧消化将污泥有机物转化为甲烷,回收沼气可满足污水处理厂30%~50%的电耗需求;污泥热解、碳化可转化为生物炭等资源化产品,减少碳排放。近年来,我国城镇污泥厌氧消化率从2015年的15%提升至2025年的35%,低碳成效逐步显现。

2.2 低碳给水处理技术

膜分离技术推动给水处理向低碳化、高品质转型,超滤、反渗透等工艺替代传统工艺,减少药剂投加量与碳排放^[4]。新型石墨烯膜、陶瓷膜等通水通量提升2~3倍,抗污染性能增强,运行能耗降低20%~30%,目前我国新建水厂中膜处理工艺占比已超50%。

2.3 低碳化发展瓶颈

当前低碳水处理技术应用仍面临瓶颈:一、ANAMMOX工艺运行稳定性不足,对温度、溶解氧等条件敏感,在低温、低氨氮的城市生活污水处理中难以稳定达标;二、膜材料成本偏高,运维成本高,限制中小城市推广;三、污泥能源化转化效率低,厌氧消化产甲烷率不高,热解、碳化技术设备投入大,规模化应用难度高。

3 管网系统优化:漏损控制与绿色管材技术

供排水管网是城市给排水系统的“血管”,其运行状态直接影响漏损水平、能耗与环境效益,优化核心是降低漏损、提升结构韧性、减少管材全生命周期碳排放,推动管网建设向绿色化、低碳化转型。

3.1 漏损控制综合技术体系

管网更新改造是解决老旧管网漏损的根本途径,非

开挖修复技术凭借施工便捷、效率高、扰动小等优势,已成为老旧管网改造的主流技术。常用的内衬修复、紫外光固化修复等技术,施工周期较传统开挖工艺缩短60%,成本降低30%,适配老旧城区等复杂场景。

3.2 绿色低碳管材应用

传统金属管材易腐蚀、碳排放高,已逐步被新型绿色低碳管材替代。高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)等高分子塑料管材,生产碳排放较传统钢管降低40%~50%,使用寿命达50年以上,国内普及率已超60%。

防腐改性球墨铸铁管强度高、耐腐蚀,使用寿命超百年,生产碳排放较传统灰口铸铁管降低30%以上,适配大口径主干管网,已广泛应用于城市主干供水管网建设。此外,玻璃钢夹砂管、钢塑复合管等新型管材的推广,进一步推动了管网建设低碳化。

3.3 管网优化现存瓶颈

我国管网优化仍面临瓶颈:一、老旧管网基数庞大,服役年限超30年的管网占比约30%,更新改造资金缺口大,中小城市难以开展大规模改造;二、非开挖修复技术适配性有限,复杂破损管网仍需传统开挖工艺;三、管材质量监管不完善,低端劣质管材易引发二次漏损,增加运维成本与碳排放。

4 雨水资源化与内涝防控:海绵城市技术进展

海绵城市以“渗、滞、蓄、净、用、排”为核心理念,通过构建低影响开发与生态修复设施,实现雨水就地消纳、净化与资源化,同步缓解内涝与水资源短缺,是给排水系统生态化、低碳化转型的关键路径^[5]。

4.1 核心技术与工程应用

源头减排技术是海绵城市建设的基础,透水铺装、绿色屋顶、雨水花园等设施可减少雨水径流、净化水质,透水铺装可削减地表径流系数30%~50%,绿色屋顶可滞留雨水、隔热降噪。

截至目前,我国已建成海绵城市试点区超100个,试点区径流总量控制率达70%~85%,内涝频次降低60%以上。中途调蓄与传输技术(雨水调蓄池、渗透管渠等)可削峰延时,减少管网溢流,雨水调蓄池回用率可达30%~50%^[5]。

末端治理与回用技术通过沉淀、过滤、消毒等一体化工艺处理雨水,可用于绿化、道路冲洗等场景,替代自来水。例如,深圳光明新区海绵城市试点年雨水回用量达120万m³,节约自来水消耗约10%。

4.2 技术应用现存瓶颈

海绵城市技术应用仍面临瓶颈:一是设施运维复

杂,泥沙淤积、杂草生长易导致效能衰减;二是区域适配性不足,南北方气候差异大,通用设计标准难以完全适配;三是政策与市场机制不完善,雨水回用定价不明确、补贴不足,企业参与积极性不高。

5 再生水回用:水资源循环利用技术进展

再生水回用是缓解水资源短缺的核心路径,通过对污水处理厂出水深度处理,用于市政杂用、工业生产等领域,实现水资源循环利用,减少新鲜水消耗。我国再生水回用事业快速发展,但与发达国家相比仍有较大差距。

5.1 回用工艺与标准

再生水回用形成分级回用体系,市政杂用采用“二级处理+深度过滤+消毒”工艺,满足相关标准,成本低、易推广,占我国再生水回用总量的60%以上。

工业回用对水质要求高,采用MBR、双膜法等深度处理工艺,去除盐分与微量有机物,回用率达90%~95%,已在钢铁、化工等行业广泛应用。生态回用采用“二级处理+生态净化”工艺,用于河道补水、湿地修复,已在多个城市河道治理中应用。

5.2 回用现存瓶颈

我国再生水回用仍面临制约因素:一是水质安全风险突出,再生水中的微量新型污染物、病原微生物可能危害人体健康与生态环境;二是管网配套不足,专用输送管网滞后,易造成交叉污染,远距离输送成本高;三是公众接受度低,对水质安全存在疑虑;四是政策激励不完善,定价偏低,企业回用经济性不足^[6]。

6 发展趋势与展望

未来,给排水行业将呈现多技术深度融合趋势:一、智慧+低碳融合,通过AI优化低碳工艺参数,利用数字孪生模拟改造效果,实现协同增效;二、资源闭环利用,构建“水-能-碳-资源”一体化体系,推动污水处理厂向“资源能源工厂”转型^[7];三、集中式与分散式结合,新建城区推广分散式系统,老旧城区优化集中式系统,形成协同布局^[8]。

结束语

城市给排水系统正处于低碳化、智慧化、资源化协同转型的关键时期,智慧水务、低碳水处理、管网优化、雨水与再生水回用等核心技术,为行业高质量发展提供了重要支撑。智慧水务实现精准管控、降漏增效;低碳水处理降低能耗与碳排放;管网优化提升结构韧性;雨水与再生水回用缓解水资源短缺。未来需强化技术融合与协同创新,突破核心短板,完善标准与激励机制,推动集中式与分散式系统协同发展,构建安全、高效、低碳、循环、韧性的现代化给排水系统,为新型城镇化与“双碳”目标落地提供保障。

参考文献

- [1] 刘阔,赵顺萍,王璐,等.独立计量区(DMA)精细化管理研究和实践[J].给水排水,2017,43(5):117-120.
- [2] 王洪臣.城市污水处理厂运行控制与维护管理[M].4版.北京:科学出版社,2022.
- [3] 马军,潘辛禹,赵雨萌.迈向可持续的城市水系统——推进低碳水处理的战略路径[J].Engineering,2025,23(3):45-58.
- [4] 李圭白,张杰.水质工程学[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [5] 中国城市规划设计研究院.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 张辰,李棚.城镇污水处理厂低碳运行技术进展与展望[J].中国给水排水,2024,40(12):1-8.
- [7] GEP Research.全球给排水产业深度报告(2025)[R].北京:全球环保研究网,2025.
- [8] ALKASSEH J M A, ADLAN M N, ABUSTAN I, et al. Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical modeling[J]. Water Resources Management, 2013, 27(5): 1439-1455.