

赋能“蜀韵宜居”

——跨社区智慧水系统集成设计与 AI 运维应用研究

饶传富

(中国五冶集团有限公司, 四川成都 610011)

【摘要】 为响应四川省“好房子、好小区、好社区”建设号召,旨在构建一套赋能“蜀韵宜居”目标的跨社区级智慧水系统整体的解决方案。研究突破了传统市政与社区水系统割裂管理的范畴,提出了“宏观统筹、中观集成、微观赋能”的“市政-社区”水系统一体化集成设计理念。进而,创新性地搭建了基于数字孪生与人工智能(AI)的智慧运维平台,通过深度融合机器学习算法,实现了从水源优化调度、管网精准输配与漏损控制、社区节水防灾,到排水管网高效运维与污水厂提质增效的全流程智能化管理。以成都市天府新区某 50 万 m^2 宜居社区为实证案例,量化分析了该模式下的应用效益。实践结果表明,管网漏损率降至 4.7%,内涝防治能力提升至 50 年一遇标准,污水厂能耗降低 15.2%,年节电 15.8 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,年碳减排 124 t,取得了显著的安全、经济与环境效益。最终从技术集成、管理机制、政策创新三个维度,总结形成了可复制、可推广的“四川经验”,为高品质宜居社区建设提供了完整的技术路径与模式参考。

【关键词】 蜀韵宜居;智慧水系统;厂网协同;人工智能;系统集成;数字孪生;四川经验

【中图分类号】 TU991

【文献标志码】 B

1 绪论——迈向“蜀韵宜居”的社区水系统变革

1.1 研究背景与意义

党的二十大三中全会强调,“在发展中保障和改善民生是中国式现代化的重大任务”。“好房子建设”是这一思想的具体实践,而其内涵正从单一建筑向“好小区、好社区、好城区”的体系化建设演进。水系统作为社区的“生命线”,其品质直接决定了居民的幸福、安全感与获得感。“蜀韵宜居”愿景的实现,离不开一个韧性、高效、绿色、智能的社区水系统的支撑^[1]。

然而,传统水系统建设与管理存在显著痛点:市政给水厂、管网与社区二次供水系统之间缺乏水力与水质数据的联动,常导致二次污染风险与能耗浪费^[2];市政排水管网、污水处理厂与社区内部排水系统在规划、设计和运维上脱节,暴雨期间易导致内涝风险转移、污水厂运行冲击负荷大等问题^[3];消防系统多为被动响应,缺乏基于市政水源实时状态的预判与调度。这些“系统孤岛”现象已成为提升社区品质的瓶颈。因此,本研究旨在通过集成设计与 AI 运维,打通市政与社区的壁垒,构建一个一体化的智慧水系统,对四川省乃至全国的高品质人居建设具有重大的理论价值和实践指导意义。

1.2 国内外研究现状

近年来,智慧水务(Water 4.0)在全球范围内引起广泛关注,成为行业研究的热点。在技术应用方面,数字孪生(Digital Twin)技术逐步应用于城市级水务系统的虚拟映射与动态仿真,为系统运行优化提供了重要工具与可视化支持^[4]。人工智能(AI)技术,尤其是机器学习(ML)与深度学习(DL)算法,在管网漏损诊断^[5]、用水需求预测^[6]以及污水处理工艺控制^[7]等多个方面取得了实际成效。

尽管如此,现有研究仍存在一定局限,多集中于两类尺度:一类是宏观层面的城市智慧水务平台构建,侧重于区域水资源调度与统筹管理;另一类则是微观层面建筑单体的节水与节能技术应用。而在介于二者之间的社区尺度上,尚缺乏将市政输入与社区输出进行系统性整合,并实现人工智能深度赋能的相关研究^[8]。刘洪波等^[8]学者也指出,当前智慧水务在社区层面的实践仍以独立设备监控与单项技术应用为主,未能实现跨系统协同与整体智能决策。本研究旨在弥补这一研究空白,积极探索在社区层级实现“厂—网—站—户”全流程智慧联动的新型路径。

1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容包含两大板块:

“市政-社区”水系统一体化集成设计:构建一个从市政源头到用户龙头,再从排放口到污水厂的无缝衔接物理系统。

全流程 AI 智慧运维应用:开发一个基于数字孪生的 AI 平台,实现对该物理系统的实时监控、模拟预测和优化控制。

技术路线为:问题剖析→提出集成设计框架→研发 AI 赋能技术→案例实证→效益分析与经验提炼。

2 “市政-社区”水系统一体化集成设计构建

2.1 设计理念与原则

城市市政智慧水务系统见图 1。本设计遵循“系统协同、全域统筹、安全韧性、高效低碳”的总体原则。其核心理念

[定稿日期] 2025-09-30

[作者简介] 饶传富(1988—),男,本科,高级工程师,从事市政工程、综合管廊、给排水消防工作。

念是将社区水系统视为城市大水务系统的一个有机“细胞”，而非孤立的单元，强调物质流、能量流与信息流在市政与社区边界上的高效、双向交换。

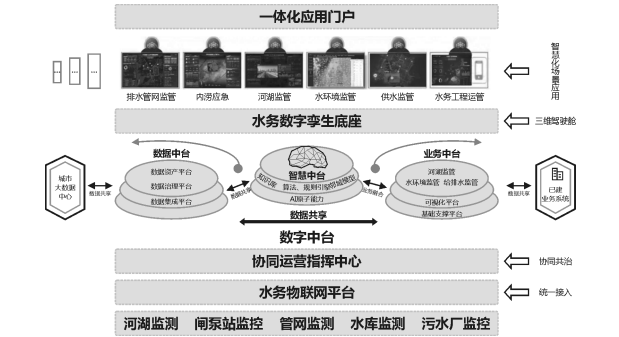


图1 城市市政智慧水务系统

2.2 市政给水系统的支撑作用

市政给水系统是社区用水的根本保障。自来水厂的工艺升级（如深度处理工艺）是提升入户水质、保障饮用水安全的起点^[9]。其出厂水压的稳定性直接关系到市政管网的运行工况。

市政给水管网的布局、管径和压力监测点数据，是社区二次供水泵房选址和选型的关键性依据。例如，在市政管网压力充足且稳定的区域，可采用箱式无负压供水设备，充分利用市政压力节能；在压力波动大或末端区域，则需采用传统的“水池+水泵”方式，并合理设置加压分区，以确保建筑高层用户的用水压力稳定可靠。

2.3 市政排水系统的接纳与调控作用

市政排水系统决定了社区排水的最终去向和效果。市政排水管网作为社区径流的“收纳血管”与“传输通道”，其设计标准（如重现期 $P=2$ 年或3年）、管底高程、埋深和下游容量，是社区内部排水管网和海绵城市设施设计的边界条件。社区排水能力不能超越市政管网的接纳能力，否则即使在社区内部实现了快速排水，也只是将内涝风险转移到了市政管网上，造成更大的社会影响。设计中必须进行严格的竖向衔接与水力计算匹配。

市政污水处理厂作为污水的“净化终端”与“资源工厂”，其运行效能深受社区源头的影响。社区严格的雨污分流是减轻污水厂雨季处理负荷、保障其生化处理单元稳定运行的前提。社区内餐饮预处理（隔油池）、美容美发预处理（毛发收集器）等设施的完善，能从源头减少油脂、毛发等对污水厂泵站和工艺的干扰。此外，社区中水回用系统的建立，可与污水厂再生水利用相结合，构成区域水资源循环利用的完整链条。

2.4 社区水系统的集成化设计与响应

社区内部水系统应积极对接并响应市政系统的运行要求，具体体现在几个方面。

- 1) 给水系统。在市政与社区给水接口处安装高性能阀门、计量水表及安全泄压装置。二次供水泵房选用节能型变频泵组，生活水箱配备液位传感器及水质在线监测设备（如余氯、浊度传感器），监测数据实时远传至中央监控平台。
- 2) 排水系统。严格执行雨污分流制度，于雨水管网末端

布设智能截流井与调蓄设施（如PP模块水池），确保调蓄池排放速率与市政管网输送能力相协调。结合绿色基础设施（如下沉式绿地、透水铺装）与灰色管网系统协同运行，实现雨水源头减排。

3) 消防系统。消防水池与生活水池分别独立设置，其中消防补水管可直接接入市政给水系统，并设置实时液位监测。消防泵房控制单元应具备接收智慧平台指令的功能，当平台通过智能分析判断市政管网压力在火灾发生时可能出现不足时，可提前启动消防泵或调整运行策略，以保障灭火供水的可靠性。

3 赋能全域智慧运维的AI技术融合与创新应用

3.1 全域水系统数字孪生体的构建

数字孪生体作为人工智能应用的核心基础（图2），依托BIM技术对社区内部水系统（包括管道、设备及相关构筑物）进行精细化建模，并借助GIS技术整合市政厂网的空间地理信息。通过物联网（IoT）技术，实时采集压力、流量、水质及水位等运行数据，最终在云端搭建起与物理系统同步映射、虚实交互的水系统数字孪生平台^[4]。该平台全面提升了水系统的可视化水平与分析模拟能力。



图2 数字孪生体示意

3.2 AI算法在全流程核心场景的深度赋能

3.2.1 智慧供水：从水厂到龙头

1) 厂网协同调度AI。建立基于LSTM（长短期记忆网络）的社区用水量预测模型^[6]。该模型输入历史用水数据、天气、节假日等因素，精准预测未来24h社区每小时用水量。将此预测值作为边界条件，反馈至市政水厂的调度AI模型，从而优化水泵机组的启停和频率，实现全局节能，避免水厂“大马拉小车”的无效能耗。

2) 社区级漏损AI诊断。在社区引入DMA（独立计量分区）技术，夜间最小流量分析法结合AI。采用支持向量机（SVM）或随机森林（RandomForest）算法，分析各DMA分区内的压力-流量时序数据，识别异常模式，可精准定位漏损点，将漏损率从行业平均的10%~15%降至5%以下^[5]。

3.2.2 智慧排水与防涝：从源头到末端

1) 市政-社区联合防汛AI预警。构建SWMM等水力模型与AI融合的混合模型。输入实时气象雷达预报数据、市政管网关键节点的水位监测数据、社区调蓄池的剩余容量数据，利用AI算法（如XGBoost）快速动态模拟未来1~3h内的内涝积水情况。当预测积水深度超过阈值时，平台可自

动提前指令社区调蓄池开始放空,为迎接暴雨腾空容量;同时向市政管理部门发出预警,实现联防联控。

2) 污水厂进水水质预警。在社区管网关键窨井、化粪池出水口部署在线水质监测仪(监测 COD、NH₃-N 等)。利用时间序列预测算法(如 ARIMA 或 Prophet),根据社区水质数据和流速,预测污染物抵达污水厂的时间及浓度变化^[10]。该预测结果可提前 2~4 h 通知污水厂中控室,使其有时间调整曝气量、碳源投加量等工艺参数,平稳应对冲击负荷,节约药剂消耗,降低能耗。

3.2.3 智慧消防

通过实时监测市政消防栓压力数据,并引入人工智能分析手段,构建压力正常波动模型。一旦系统识别到压力出现异常下降(可能因其他区域大规模用水或管道爆裂导致),立即评估该变化对社区消防供水可靠性的潜在影响,并及时向社区智慧消防系统发送预警信息,为应急预案的制定提供关键数据支持。

4 案例实证与效益分析——以成都某宜居社区为例

4.1 项目概况与集成设计方案

实证项目位于成都市天府新区,总建筑面积约 50 万 m^2 ,属于集居住、商业与公共服务为一体的综合社区。市政供水来源为某自来水厂(日设计规模 30 万 t),社区采用南北侧各 1 根 DN400 市政给水管道实现双路供水。市政排水系统实行雨污分流,污水最终汇入下游一座日处理能力 20 万 t 的污水处理厂。

在系统设计方面,社区二次供水实行分区加压;低区采用无负压供水设备,高区采用“水箱+变频泵组”方式。雨水系统按5年重现期设计,配套建设500 m²调蓄池;污水系统严格分流,餐饮商业区域单独设置预处理设施。所有关键节点均预埋传感器,保障数据实时采集与传输。

4.2 智慧运维平台建设与运行效果

搭建了基于阿里云 IoT 平台的数字孪生系统,试运行期间取得了一些典型成效。

4.2.1 精准调度案例

2024年7月20日,平台基于LSTM模型预测社区次日最高时用水量将达到 $486\text{ m}^3/\text{h}$ (较平日增长22%),该预测结果提前4h推送至市政水厂。水厂据此提前增开一台额定功率110 kW的泵组并优化运行频率。实际最高用水量为 $478\text{ m}^3/\text{h}$,通过精准调度,管网最不利点压力波动控制在 $\pm 0.03\text{ MPa}$ 以内,当日节约电约8%。

4.2.2 内涝防控案例

在一次强度为 45 mm/2 h 的暴雨中, AI 防汛模型提前 95 min 预测到商业街区域最大积水深度将达 18 cm(超过 15 cm 警戒值)。平台自动指令片区调蓄池提前 70 min 开启放空泵, 最终成功蓄滞雨水 283 m³, 该区域实测最大积水深度仅为 5 cm, 有效避免了内涝。

4.2.3 污水厂预警案例

系统根据社区管网水质监测数据,成功预警一次因餐饮街清洗导致的 COD 浓度异常升高事件,提前 150 min 通知下游污水厂。厂区据此提前增加了曝气量,平稳化解了此次冲

击负荷,避免了出水水质波动,估算节约碳源投加量 15%。

4.3 综合效益评估

通过对 2024 年 3 月至 8 月的运行数据进行统计分析, 该智慧水系统带来了一些综合效益:

1)安全效益。供水保证率 $>99.99\%$;消防系统响应时间缩短至30 s内;内涝防治标准有效提升至50年一遇。

2)经济效益。年节约电 158 000 kW·h(依据水厂电表及平台节能模块数据统计);年节水约 41 500 t(基于 DMA 分区计量,夜间最小流量同比降低 67%);运维成本下降约 28%(因实现预测性维护,人力巡检频次降低,故障率下降)。

3)环境效益。年碳减排约 124 t(按本地电网碳排放因子计算);雨水资源化利用率达到 32%。

4.4 “四川经验”提炼

本项目的成功实践,凝练出以下可供全省推广的“四川经验”:

1) 技术集成经验。确立了“BIM + GIS + IoT”的数字底座标准,形成了“感知层-网络层-平台层-应用层”的标准化技术架构,并探索了 AI 算法在多场景下的落地路径。市政-社区智慧水务系统见图 3。

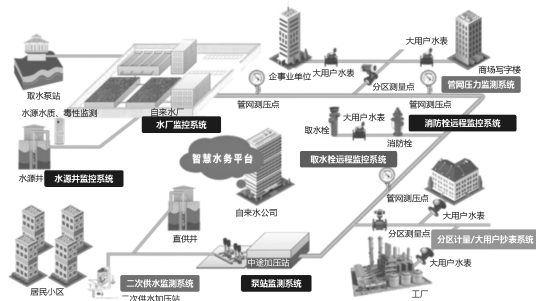


图3 市政-社区智慧水务系统

2)管理机制经验。创新性地建立了“政-企-研-用”多方联动的数据共享与应急响应机制。明确了市政水务公司、社区物业、技术供应商之间的数据接口标准、权责边界与协同流程,为跨系统联动提供了制度保障。

3) 政策与模式创新经验。建议将智慧水系统建设纳入绿色建筑评价及土地出让的前置条件。推行基于效益共享的合同节水管理(ESCO)模式,积极引导社会资本参与投资、建设和运营,有效化解项目初期投资高的难题,构建可持续的商业运行机制。

5 结束语

本研究设计并实施了一套支持“蜀韵宜居”社区建设的智慧水系统整体解决方案。通过一体化集成设计消除物理瓶颈,依托人工智能技术突破管理壁垒,显著提升社区水系统的整体运行效能,形成可复制、可推广的“四川经验”。

未来,随着传感器成本的下降、AI 算法的进一步演进以及数字孪生技术的成熟,社区智慧水系统将向更高层次的自治决策(AI-driven autonomy)迈进。同时,与电网(Energy Internet)、交通网(V2X)的跨系统联动优化,将是构建真正智慧城市、实现可持续发展的必然趋势。

(下转第 59 页)

予了更多样的需求场景,如图 16 所示。

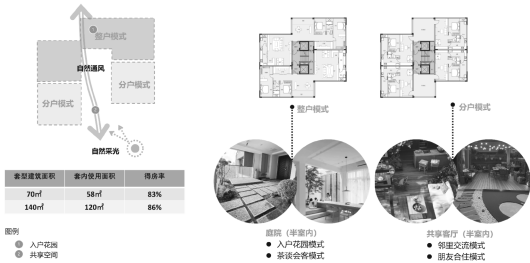


图 16 退台叠院产品示意

3.2.4 增强建设可实施性,实现产品全生命周期

3.2.4.1 绿色低碳,安全耐久

方案设计紧扣双碳时代主题,从社区建筑、社区配套设施以及家庭住户等三个维度出发,采取节水、节能、节材、节地等绿色策略,让绿色技术为社区做功。

3.2.4.2 智慧居住,运维经济

通过科技创新带给住户便利也是好房子的一大特点^[5]。设计从社区管理智能化、社区安全智能化、智慧公共服务三个维度出发,植入智慧门禁、视频监控、社区警务、安全巡更、智慧停车、智慧医疗、智慧商业、智慧社交、智慧家居等功能,让智慧成果为社区赋能如图 17 所示。

4 结束语

本设计从城市原始工业区肌理出发,探寻在公园城市语境下针对工业旧城改造背景下“好房子”的建筑学解答,以“聚

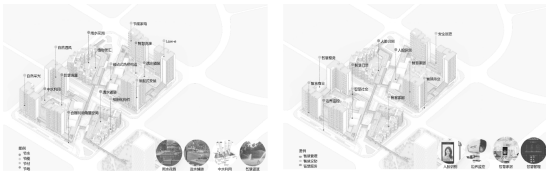


图 17 绿建策略与智慧居住分析

场”为设计理念,采用生活(LIVE) - 工作(WORK) - 娱乐(PLAY)的混合型社区模式,三区融合,联动发展,通过产业聚集、社群聚合、人才聚居创造居住与多元城市功能交融的混合聚居社区。在人民群众对住房的需求从“有没有”向“好不好”的转变过程中,交出了探寻的答卷。

参 考 文 献

[1] 洪田芬,江凯达,贾萍芳. 建设全年龄段共享的美好社区:“美丽杭州”行动规划之服务均等行动编制探索[J]. 城市规划, 2015,39(S1):32-37.

[2] 陈方耀. 陆家桥未来公园社区项目启动[N]. 成都日报,2023-10-29(003).

[3] 董珂,李焯,叶竹. 规划视角下“好房子”的建设思考[J]. 城市规划,2024,48(S1):87-93.

[4] 成都市规划和自然资源局. 成都市城市规划管理技术规定[Z]. 2024.

[5] 武振,冯仕章,刁宁. 高品质住宅评价指标体系研究[J]. 建筑经济,2022,43(3):5-13.

(上接第 55 页)

参 考 文 献

[1] 中共中央办公厅. 党的二十大三中全会公报[R]. 北京,2024.

[2] 张晓,王磊,李静. 二次供水系统水质安全风险及保障技术研究进展[J]. 给水排水,2022,58(1):1-10.

[3] 谢映霞,朱建国. 城市洪涝防治与海绵城市建设系统化方案研究[J]. 中国给水排水,2021,37(22):1-8.

[4] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.

[5] Wu ZY, Liu J, Liu H. Deep Learning for Water Distribution System Leak Detection and Localization[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(9): 04021059.

[6] Brentan BM, Meirelles G, Luvizotto E, et al. Hybrid Water Demand Forecasting Model Coupling Singular Spectrum Analysis with Machine Learning[J].

Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(3): 04020109.

[7] Guo Z, Yang C, Wang X, et al. A novel deep learning-based approach for wastewater treatment process control[J]. Water Research, 2022, 209: 117939.

[8] 刘洪波,孙博,曾捷. 智慧水务框架下的智慧节水社区建设探讨[J]. 给水排水,2020,56(S1):285-289.

[9] 曲久辉. 饮用水水质深度处理技术与工程应用[M]. 北京: 科学出版社,2018.

[10] Wang J, Li X, Fu G, et al. Real-time forecasting of influent flow-rate and quality in wastewater treatment plants using deep learning[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2022, 8(3): 512-525.

[11] 四川省住房和城乡建设厅. 四川省城市节水专项规划(2021—2035年)[Z]. 2021.

[12] 成都市人民政府. 成都市海绵城市专项规划(2021—2035)[Z]. 2022.