

鹤壁市关于“基于数字孪生的工业园区水资源智慧配置系统”的构建研究

王珂^{1*}, 贾兵强²

¹华北水利水电大学公共管理学院, 河南 郑州

²华北水利水电大学马克思主义学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年12月16日; 录用日期: 2026年1月5日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

为解决中原城市工业发展与水资源短缺之间的矛盾, 本文构建了基于数字孪生的工业园区水资源智慧配置系统。该系统通过数据采集层、数据孪生层、模型仿真层与应用服务层的四层架构, 形成“监测-模拟-优化-调控”一体化智能闭环系统。该系统的核心在于建立虚实交互的水资源数字孪生体, 集成多源数据融合、智能分析模型与动态决策引擎, 实现从全局视角对鹤壁市工业园区水资源的精准感知、动态模拟与协同优化。经研究表明, 该系统可为水资源高效配置、应急调度与可持续管理提供科学支撑, 对推动类似工业城市的水资源集约化利用具有示范意义。

关键词

数字孪生, 工业发展, 水资源配置

A Research on the Construction of “An Intelligent Water Resource Allocation System for Industrial Parks Based on Digital Twin” of Hebi City

Ke Wang^{1*}, Bingqiang Jia²

¹School of Public Administration, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²School of Marxism, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: December 16, 2025; accepted: January 5, 2026; published: February 26, 2026

*通讯作者简介: 王珂, 硕士研究生, Email: shengbinpiao@163.com

文章引用: 王珂, 贾兵强. 鹤壁市关于“基于数字孪生的工业园区水资源智慧配置系统”的构建研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(1): 52-58. DOI: 10.12677/jwrr.2026.151007

Abstract

To address the contradiction between industrial development and water resource shortage in Central Plains cities, this paper constructs an intelligent water resource allocation system for industrial zones based on digital twins. This system forms an integrated intelligent closed-loop system of “monitoring-simulation-optimization-regulation” through a four-layer architecture of data acquisition layer, data twin layer, model simulation layer and application service layer. The core of this system lies in establishing a virtual and real interactive digital twin of water resources, integrating multi-source data fusion, intelligent analysis models and dynamic decision-making engines, to achieve precise perception, dynamic simulation and collaborative optimization of water resources in the industrial zone of Hebi City from a global view. Research shows that this system can provide scientific support for the efficient allocation, emergency dispatch and sustainable management of water resources, and has a demonstration significance for promoting the intensive utilization of water resources in similar industrial cities.

Keywords

Digital Twin, Industrial Development, Water Resources Allocation

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

作为我国中原地区的重要工业基地，河南省鹤壁市面临着工业发展与水资源短缺不协调的主要问题[1]，例如该市的工业园区普遍依赖于“低成本再生水”，电力等产业多将再生水作为冷却水使用，以缓解水资源紧缺和成本压力。然而，传统的水资源配置方案存在着结构性瓶颈：部分区域(如鹤山区)的工业与农业长期过度依赖地下水开采，已引发地下水超采等不可持续问题。现有配置模式已难以适应复杂多变的工业用水需求，亟需通过数字化手段以提升水资源管理效率[2] [3]。数字孪生技术通过创建物理系统的虚拟映射，为水资源动态监控、模拟预测和优化配置提供了新路径[4]-[6]。

《“十四五”智慧水利建设规划》与《国家水网建设规划纲要》提出，要“建设数字孪生流域”、“推进智慧水利建设”，提升水情监测、预报、调度和管理智能化水平。工业园区水资源作为流域和城市水资源系统的一部分，其智慧配置是题中应有之义。以鹤壁市为例，水资源智慧配置系统可以有效地分析鹤壁市工业园区水资源供需现状与问题。设计是基于数字孪生的水资源智慧配置系统架构，根据该系统，可构建出多尺度水资源动态模拟与优化配置模型，并根据实际情况提出具体解决方案与实施路径。

本文旨在构建鹤壁市工业园区水资源智慧配置系统，对推动该区域工业水资源可持续利用、支撑黄河流域生态保护和高质量发展战略具有重要实践价值。

2. 总体框架

2.1. 总体框架基本模型

本研究框架的核心思想是建立一个从物理世界到数字世界的智能闭环，该闭环具备双向映射、动态交互、持续优化的特点。它并不是简单的数据可视化或模拟，而是一个具有感知、分析、决策、执行能力的共生系统。物理世界的状态实时驱动数字模型的演化，而数字世界的仿真与优化结果，反过来指导物理世界的调度与操作。

总体框架模型详见图 1。

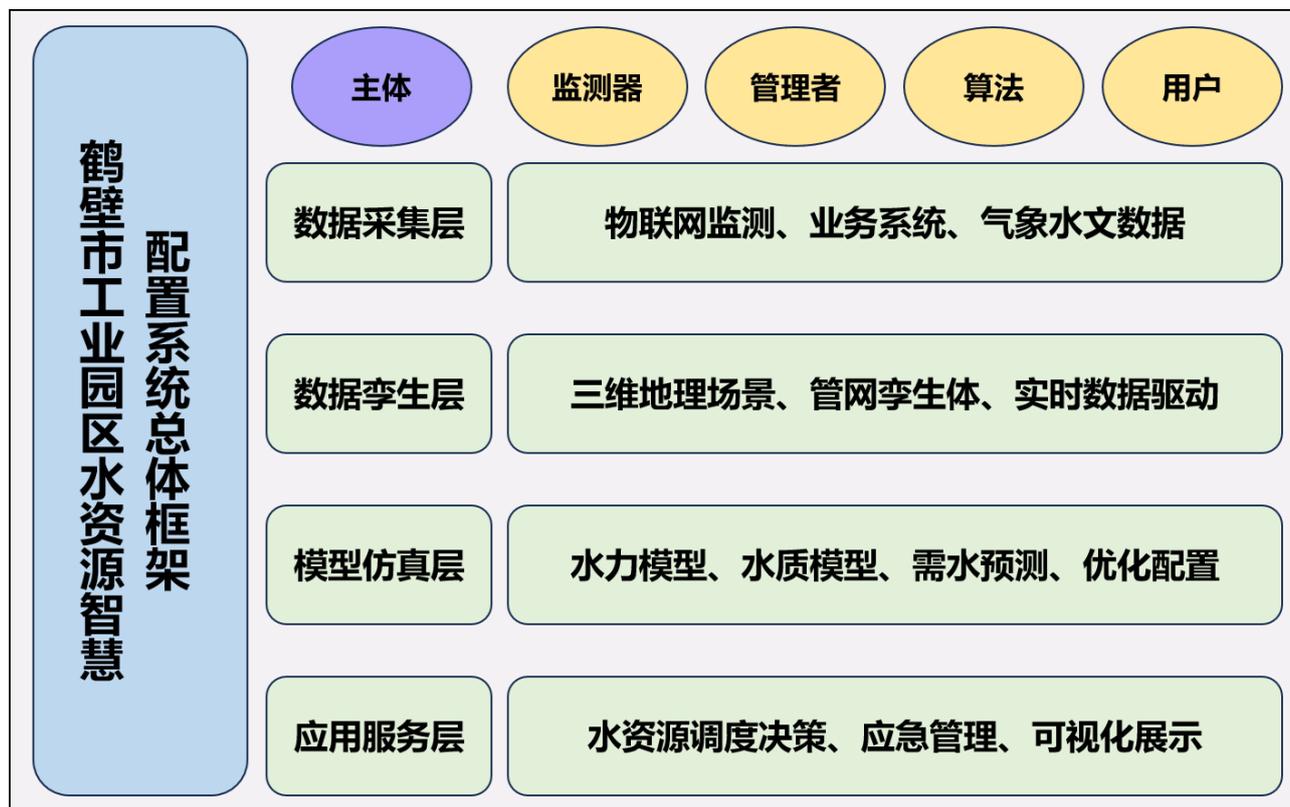


图 1. 鹤壁市工业园区水资源智慧配置系统总体框架

2.2. 各层框架分析

2.2.1. 数据采集层

作为该系统的感官与神经末梢，数据采集是与物理世界最直接的交互接口，其任务为获取实时、准确的“水循环”全要素状态数据。其构成要素为：

- ① 物联网感知网络：在关键节点(水源地、水厂、泵站、企业取水口、退水口等)部署智能传感器，以监测水的流量、压强、水量、水质、水位等信息；
- ② 业务系统数据：对接企业用水统计直报系统，水利部门的取水许可管理系统，以及环保部门的排污监测系统，从而获取工业园区的取水许可量、计划用水量、实际取水量、排污许可量、水质报告等管理数据；
- ③ 环境与空间数据：集成气象部门的降雨、蒸发、温度预报与实况数据，自然资源部门的地理信息(GIS)、遥感影像，以及水文部门的地下水监测井数据。

数据是孪生体的“血液”，其质量直接决定该模型的准确性，因此要求数据采集过程的高覆盖率、高频率以及高可靠性。

2.2.2. 数据孪生层

作为该系统的镜像与骨架，数据孪生层是数字孪生体的本体，即物理实体在虚拟空间的精确数字化映射。其构成要素为：

- ① 三维地理场景：利用倾斜摄影、激光雷达(LiDAR)等技术，构建覆盖鹤壁工业园区的高精度、可量算的真实三维地形和建筑模型，作为所有水资源要素的空间承载基底；

② 管网系统孪生体：

主要包括几何模型和状态模型。其中几何模型是基于 CAD、GIS 图纸构建的城市供水管网、排水管网、再生水管网的三维管网模型，该模型包含管径、材质、埋深、连接关系等属性；状态模型是将数据采集层传来的实时数据(流量、压强)绑定到对应的管网模型节点和管段上，使虚拟管网具备与物理管网一致的实时“水力状态”；

③ 数据驱动引擎：建立一套实时接口，即使物理世界中的数据发生任何变化，数字模型中对应参数均可实现自动、即时地更新，从而确保孪生体的实时性。

2.2.3. 模型仿真层

作为系统的大脑与智慧核心，模型仿真层是系统的分析与预测中心。基于孪生体的实时状态，它通过机理与数据混合模型，模拟、预测并优化水资源配置。其构成要素为：

① 机理模型：即水力/水质模型，通过输入管网拓扑、用水需求，可仿真计算全管网各点的压力分布、流速、水龄、余氯衰减、污染物扩散等，用于诊断管网健康、模拟事故影响；

② 数据驱动模型：即需水预测模型：结合企业生产计划、历史用水数据、天气因素，利用时间序列分析或机器学习算法，预测未来短期和长期的工业需水量；

③ 优化决策模型：即多目标优化模型：以经济成本最低、供水安全最高、环境冲击最小等多个目标，在复杂的约束条件下，利用智能优化算法，求解出最优的水源调配方案、水厂调度方案、压力控制方案。

2.2.4. 应用服务层

作为系统的交互与价值输出，应用服务层是系统与管理者、决策者、用户的交互界面，将上层复杂的数据和模型结果转化为直观、可操作的决策支持服务；同时，该层还肩负着控制指令的生成、下达、监控与反馈的关键职责，形成“决策-执行-验证”的完整闭环。其构成要素为：

① 智能调度决策舱：面向调度人员，该系统可自动生成或推荐每日、每时段的优化调度方案，并可进行“一键式方案下发”至水厂、泵站等自控系统；同时提供控制指令执行状态的实时监控面板，反馈阀门开度、机组启停、流量调整等执行结果，支持对未正确执行的指令进行人工干预或自动重发；

② 三维可视化全景监控：面向各级管理人员，在三维地理场景上，以热力图、动态流线、数据标签等形式，清晰展示全市水资源“从哪里来”、“到哪里去”以及“状态如何”。系统可同步集成并高亮显示正在执行中的控制指令及其影响范围，实现运行状态与控制动作的可视化关联监视；

③ 情景模拟与应急推演：面向决策者，面对突发事件(如旱情、污染事故等)，启动“沙盘推演”功能，并提供最佳解决方案。推演确认后的处置方案(如关闭污染源阀门、启动备用水源等)可直接转化为一系列具体的控制指令序列，经授权后批量下发至相关场站设备，实现从模拟推演到实际执行的快速转换；

④ 移动应用与预警推送：向企业用户推送其用水分析报告、节水建议、异常用水预警；向管理人员推送管网爆管、水质超标报警等信息。集成远程控制接口，授权用户在移动端对关联的阀门、水泵等设备进行紧急启停或限流操作，并实时接收指令执行反馈，提升应急响应速度；

⑤ 控制执行闭环管理：作为对上述功能的支撑与整合，提供统一的控制指令生命周期管理。涵盖指令的生成、审核、签名加密下发、执行状态跟踪、执行效果评估与归档的全过程，确保每一条控制指令的可追溯、可审计与安全可靠，保障系统决策能够准确、及时地作用于物理世界。

2.3. 总体框架的系统性特征

鹤壁市工业园区水资源智慧配置系统总体框架具有如下系统性特征：

① 动态闭环性：该系统不是单向的“监测-展示”模型，而是形成一个“感知→孪生更新→模型分析→决

策生成→控制执行→效果再感知”的完整闭环模型，并不断自我学习和调整；

② 预见性与主动性：通过该模型仿真模拟，可做到“未来可视性”，能从“被动响应”转向“主动预警”和“预先调度”；

③ 协同性与全局最优：该模型打破常规的“水源管理”、“管网调度”以及“企业用水”之间的信息孤岛，从整个工业园区水系统的全局视角进行协同优化，最终实现“1+1>2”的整体效益；

④ 虚实交互与迭代进化：该系统的运行数据为不断“训练”和“修正”的数字模型，从而使模型越来越精确，而日益精确的模型又能给出更优的调度策略，形成一个相互促进、共同进化的智能体。

总而言之，该框架旨在为鹤壁市工业园区水资源管理打造一个高度逼真、全时在线、智能决策的“数字平行世界”，让看不见的水流、水压、水质变得透明可视，让复杂的调度决策变得科学高效，最终实现水资源在时间、空间和用户间的精准、公平、可持续配置。

3. 核心模块设计

根据上述系统的核心架构模型，可构建出系统的具体核心模块组成。

3.1. 多源数据融合平台

多源数据融合平台作为系统的数据中枢，对数据采集层提供的原始、异构数据进行汇聚、治理与融合，将其转化为统一、高质量的数据基石，以支撑下层分析与应用。该平台通过部署覆盖水源、管网和用水端的物联网监测体系(如智能水表、水质传感器)，并整合气象、水文、企业申报等异构数据，构建起一个标准统一、高质量的水资源数据仓库。针对多源数据在格式、协议、更新频率等方面存在的异构性问题，平台建立了统一的数据接入与标准化处理机制，包括协议适配、数据清洗、格式转换、频率对齐等环节，并通过制定统一数据模型与编码规范，以确保各类数据在时空维度上的可关联、可融合性。这为上层数据分析提供了全面、实时、可靠的数据支撑，显著提升了数据融合的可行性与应用效能。

3.2. 工业园区水资源数字孪生体

工业园区水资源数字孪生体是该系统的核心数字化表达。它基于高精度三维地理信息基底，对物理世界的供水、排水及再生水管网进行几何与拓扑关系的精准建模，形成虚拟映射。通过实时数据驱动，该孪生体能够动态同步物理系统的状态变化，实现虚实交互与共生，为该系统的仿真模拟提供真实的数字环境。

3.3. 智能分析模型群

智能分析模型群是系统的智慧决策核心，它通过多模型协同机制实现有机联动与闭环优化。该集群集成了需水预测、管网仿真与多目标优化等一系列模型，形成了“预测-仿真-优化-调度”的一体化决策流程。多模型协同机制说明如下。

3.3.1. 需水预测结果向管网仿真模型的接入

需水预测模型基于生产计划、天气、季节、历史用水等多源数据，输出未来时段用水量时空分布预报。该预测结果作为边界条件动态输入管网水力水质模型，驱动仿真计算，从而实现对未来管网压力、流量、水质等状态的超前模拟，为优化调度提供前瞻性场景支撑。

3.3.2. 优化模型约束条件与孪生体的实时联动

多目标优化模型的约束条件(如管网压力上下限、水质标准、设备能力等)并非静态设置，而是与数字孪生体实时同步。孪生体持续感知实际管网运行状态，动态更新约束值域，确保优化模型始终在真实可靠的物理条件下进行求解，实现“仿真-优化”的闭环反馈。

3.3.3. 模型间数据流转逻辑与系统整体性强化

模型群依托统一数据平台实现高效协同，具体流转路径为：

- ① 实时/历史数据→需水预测模型→预测用水序列；
- ② 预测序列 + 管网拓扑 + 实时状态→管网仿真模型→水力水质模拟结果；
- ③ 模拟结果 + 实时约束 + 成本/安全/环保目标→多目标优化模型→生成调度指令集；
- ④ 调度指令→执行系统→实际运行数据反馈至孪生体与各模型，形成持续优化的决策闭环。

这一机制不仅强化了模型间的逻辑衔接与数据一致性，更通过孪生体实时交互确保了系统在动态环境中的适应性与鲁棒性，真正实现了从数据到决策、从仿真到执行的智慧化运维。

3.4. 智慧配置决策引擎

智慧配置决策引擎是系统从分析到行动的关键转化器。它基于模型群的输出，针对不同情景(如常态、干旱、突发污染)进行模拟推演，自动生成或推荐适应性配置方案与应急预案。该引擎具备自学习与自适应能力，能根据实时反馈动态调整策略，确保决策的时效性与科学性。

3.5. 可视化交互平台

可视化交互平台是系统面向用户的统一服务窗口。它通过三维全景视图、决策驾驶舱和移动应用，将复杂的数据、模型结果与调度方案转化为直观的图形、图表与预警信息。这极大地提升了不同层级用户(决策者、管理者、用户端)的态势感知能力、协同效率与操作便捷性，实现了“看得清、管得好、调得准”的最终目标。

4. 技术路线及应用场景

本研究以构建鹤壁市工业园区水资源智慧配置系统为核心，依托数字孪生技术，提出了一套系统的技术实现路径与预期应用场景。关键技术路线涵盖：利用 NB-IoT/5G 物联网技术实现水资源数据的全面采集与实时传输[7][8]；基于 BIM 与 GIS 融合技术构建高保真时空孪生模型，并依托时序数据库管理动态数据[9]；通过机器学习需水预测模型与水文水力机理模型耦合，实现精准模拟与预报；运用多目标遗传算法与深度强化学习对水资源配置进行多目标协同优化；最终采用微服务架构与云边协同模式(即云计算中心与边缘计算节点协同工作的分层处理架构)进行平台开发，确保系统的弹性扩展与高效运行[10]。

该系统的预期应用场景较为广泛，其中包括：① 工业、生活用水定额动态调整与精细化管理；② 干旱期的应急水量调度，以实现优先保障高效益、低耗水企业供水；③ 突发水污染事件的快速响应，通过关阀方案模拟与污染扩散预测辅助决策；④ 对新建项目进行事前水资源承载力评估，为鹤壁市工业园区可持续发展提供有效的科学依据。

为确保上述方案有效落实，建议采取分阶段实施策略，优先在 1~3 个典型工业园区开展试点示范；同时推进数据与模型接口的标准体系构建，保障系统互联与数据融合；完善“政府主导、企业协同、平台运营”的三方协同管理机制；并积极争取国家节水型城市、智慧水利等专项建设资金，为鹤壁市工业园区水资源数字孪生管理系统的长期运行与升级迭代提供可持续性的物质保障。

5. 结论与展望

综上所述，本研究初步构建了关于鹤壁市工业园区水资源数字孪生管理系统的基本框架，并提出了涵盖动态监测、模拟仿真与智能决策的系统性解决方案，为推动该地区工业用水精细化、管理水平智能化提供了理论与实践依据。

针对后续工作，建议从以下方面开展研究：① 深化数字孪生系统与真实系统的误差校正机制，提升模型的准确性与可靠性；② 在极端气候无规律变化的背景下，探索该系统的长期适应性配置策略，增强水资源管理的

韧性;③ 探索基于区块链的水权交易平台与现有系统的集成路径,以推动市场化手段与数字化管理的有机结合。

该水资源数字孪生管理系统框架不仅为鹤壁市工业园区水资源管理提供从理论到实践的完整性支撑,其构建思路与方法论也可对其他面临类似挑战的工业化地区提供有益借鉴。

基金项目

该项研究得到了华北水利水电大学——新时代治水社会科学研究院揭榜挂帅项目“中国历史上水环境变迁与跨流域调水技术应对实证研究(24JB-02-02)”的资助。

致谢

感谢贾兵强教授的指导,以及胡荣祥和李亚梦等同学的有益讨论。

参考文献

- [1] 刘强. 城市水资源短缺现状及对策[J]. 水利电力技术与应用, 2025, 7(18): 178-180.
- [2] ZHAO, X., YANG, D. and ZHOU, Y. The impact of digital technology on water resources management: Evidence from China. *Water*, 2024, 16: 2867. <https://doi.org/10.3390/w16192867>
- [3] 曹江涛, 高平平. 数智化技术驱动水资源节约集约利用模式创新[C]//河海大学, 浙江省水利学会. 2025 (第九届)中国水资源高效利用与节水技术交流会论文集. 2025: 16-22.
- [4] 王坤, 王宗志, 于常旺, 等. 数字孪生流域水资源“预演”模型研究及应用[J]. 水利水运工程学报, 2025: 1-12.
- [5] BROCCA, L., ZUCCO, G., CIABATTA, L., et al. A digital twin of the terrestrial water cycle: A glimpse into the future through high-resolution Earth observations. *Frontiers in Science*, 2024, 1: 1190191. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1190191>
- [6] 李慧婧, 王高丹, 赖杭, 等. 数字孪生灌区水资源精细化调配系统实现路径[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心). 第十五届防汛抗旱信息化技术交流会论文集. 2025: 367-372.
- [7] 周远举. 基于 NB-IoT 的无线水文监测系统设计[J]. 物联网技术, 2025, 15(5): 9-11, 3.
- [8] 王伟. 5G 通信技术在水利工程管理中的应用研究[J]. 长江信息通信, 2024, 37(12): 207-209.
- [9] 刘维佳, 崔博洋, 王雪, 等. 线性交通工程 BIM + GIS 专题地图平台研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2025, 17(1): 21-25.
- [10] 苑洁. 面向云边端环境的可信协同关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2022.