

小型污水处理站数字孪生基座的构建

刘爱军, 姜浩, 徐润喆, 胡宇宁, 张新佳, 许飞扬

北京农业职业学院水利与土木工程学院, 北京

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

针对小型老旧污水处理站普遍存在的图纸缺失、运维困难及实训安全隐患等问题, 本研究集成背包三维激光扫描、无人船水下测量及建筑信息模型(BIM)逆向建模技术, 构建了一套高精度数字孪生基座。项目实现了地上地下一体化、室内室外全要素、水上水下全覆盖的毫米级实景三维复制, 并开发了沉浸式虚拟现实(VR)实训平台。通过详细的成本与效率对比分析, 本方案较传统方法在数据采集效率上提升约4倍, 建模精度达 ± 5 mm, 预计可使故障定位时间缩短50%以上, 为同类中小型水务设施的轻量化、低成本数字化转型提供了可推广的技术路径。

关键词

数字孪生, 污水处理站, 智慧水务, 逆向建模, 虚拟实训

Construction of a Digital Twin Foundation for Small Wastewater Treatment Stations

Aijun Liu, Hao Jiang, Runzhe Xu, Yuning Hu, Xinjia Zhang, Feiyang Xu

College of Water Resources and Civil Engineering, Beijing Agricultural Vocational College, Beijing

Received: March 3, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Addressing the prevalent issues of missing blueprints, operational difficulties, and safety risks in small, aged wastewater treatment plants, this research integrates backpack 3D laser scanning, unmanned surface vessel (USV) bathymetry, and Building Information Modeling (BIM) reverse engineering to construct a high-precision digital twin foundation. The project achieves millimeter-level, holistic 3D replication encompassing aboveground and underground structures, indoor and outdoor environments, and both above and below the water surface of an artificial lake. An immersive Virtual Reality (VR) training platform was also developed. Through detailed cost and efficiency

comparative analysis, this approach demonstrates approximately a 4-fold increase in data acquisition efficiency compared to traditional methods, achieves a modeling accuracy of ± 5 mm, and is projected to reduce fault localization time by over 50%. This provides a replicable, lightweight, and cost-effective digital transformation pathway for similar small and medium-sized water utilities.

Keywords

Digital Twin, Wastewater Treatment Station, Smart Water Management, Reverse Modeling, Virtual Reality Training

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

城镇化进程加速与水环境标准提升,对污水处理设施的精细化、智能化运营提出了更高要求。然而,我国现存大量建于上世纪末至本世纪初的小型污水处理站(日处理量通常为千吨级),普遍面临严峻挑战:设备设施经年运行,原始设计图纸与竣工资料严重遗失;站内环境潮湿、腐蚀严重,结构遮挡多,且地下池体、狭窄管道等受限空间存在缺氧、有毒有害气体等高危作业风险,传统人工巡检与测量方式不仅效率低下,更存在安全隐患。与此同时,作为水利、环境工程等专业关键的实践教学场景,实体污水处理站因安全限制,学生难以深入核心工艺区域实操,导致理论与实践脱节。

数字孪生技术作为工业 4.0 的核心技术之一,通过创建物理实体的虚拟镜像,为基础设施的智慧化管理开辟了新路径。在智慧水务领域,数字孪生已在大型污水处理厂展现出在工艺优化、预测性维护和能效管理方面的巨大潜力。然而,现有研究与应用多聚焦于新建或大型项目,针对数量庞大但基础数据几乎为零的小型、老旧污水处理站,如何以合理成本构建高精度、可用的数字孪生基座,仍面临技术选型、流程标准化与成果普适性等挑战。

区别于静态的建筑信息模型(BIM),数字孪生是一个与物理实体持续交互的动态系统。构建数字孪生的首要与基础环节,是创建一个与实体高度一致、信息完备的“数字底版”,即数字孪生基座。本研究围绕这一目标,旨在探索一套适用于小型污水处理站的数字孪生基座构建方法。研究以北京农业职业学院内一座典型小型污水处理站及毗邻人工湖为具体案例,系统集成多种新型测绘与信息化技术,旨在:1) 复现遗失资料,建立全要素毫米级精度数字档案;2) 实现隐蔽设施与高危空间的安全、直观可视化;3) 打通空间形态与运行数据,提升运维效能;4) 构建沉浸式虚拟实训环境,赋能职业教育。本研究旨在为破解小型水务设施管理难题提供切实方案,并为数字孪生技术在水务行业的纵深应用奠定数据与实践基础。

2. 文献综述与理论框架

数字孪生的概念源于航空航天领域,其核心在于通过虚实交互实现系统的监控、模拟与优化。在水利市政领域,其应用已涵盖管网监测、洪水模拟、水厂优化调度等(张璐晶等, 2024) [1]。例如,新加坡和哥德堡的案例表明,基于数字孪生的污水管网优化系统能有效减少溢流。然而,这些成功案例多基于数据基础良好的系统。对于缺乏基础信息的老旧站点,数字孪生构建的首个瓶颈在于高精度空间数据获取。传统全站仪测量在复杂、高危的室内外一体化场景中效率极低。近年来,移动测量技术快速发展,

如集成同步定位与地图构建(SLAM)算法的背包式三维激光扫描仪,能在无全球导航卫星系统(GNSS)信号环境中快速获取高密度点云(Guo Ziyu et al., 2025) [2],极大提升了复杂室内空间的采集效率。同时,无人船搭载多波束测深系统已成为水域地形测量的重要工具(安徽省第二测绘院, 2025) [3],其自动化、高密度的测量模式,正逐步取代传统断面测量,实现对水下地形的“模型化重构”。

获取数据后,多源数据的融合与高保真建模是构建可信数字基座的关键。研究显示,结合固定式与移动扫描数据,利用自动化建模软件,可以显著加速模型创建过程。基于点云的 BIM 逆向建模技术,是恢复无图纸设施几何与语义信息的有效途径(Sensors, 2024) [4]。最终,数字孪生的价值需通过应用体现。虚拟现实技术为高危环境下的巡检培训、工艺教学提供了安全且沉浸的解决方案(张璐晶等, 2024) [1]。

本研究的理论贡献在于:第一,提出了一个针对“老旧、小型、多遮挡、缺资料”水务设施的“精准感知-数字重构-智能应用”分层构建框架,该框架强调技术流程的标准化与轻量化,填补了现有数字孪生研究多聚焦于新建或大型项目的空白。第二,验证了“天-地-水”多源异构数据(RTK 控制测量、背包 SLAM 点云、无人船多波束数据)在复杂小型站点环境下的高精度融合方法,解决了单一技术无法覆盖全要素的难题。第三,明确了静态数字孪生基座(“骨架”与“皮肤”)在“运维-教学”双驱模式中的基础性作用,并为其后续向动态、智能的数字孪生体演进预留了接口,丰富了数字孪生在水务领域应用层次的理论内涵。

3. 总体思路与技术路线

本项目核心目标是构建一个涵盖污水处理站“地上地下、室内室外”及人工湖“水上水下”的全要素、真三维、可交互的数字孪生基座。总体思路确定为“数据驱动、分层构建、应用导向”。

技术路线分为四个层次清晰的阶段:感知采集层、数据处理层、模型构建层和应用服务层。

1) 感知采集层:采用“天-地-水”协同作业模式。利用 RTK 技术建立高精度控制网,获取 2486 个地形特征点;采用背包式三维激光扫描仪对污水处理站内部复杂环境进行毫米级点云采集;运用无人船多波束系统对人工湖进行全覆盖水下地形扫描。

2) 数据处理层:对多源点云数据进行去噪、配准与融合,生成统一坐标系的实景三维点云模型。基于点云和 RTK 测量数据,利用 CAD 软件进行逆向设计,复原竣工图纸、工艺流程图及设备布置图。

3) 模型构建层:以融合点云为参照,进行 BIM 逆向参数化建模,精确重建厂房结构及 14 台关键设备(包括 7 个罐体、2 个池体)。同时,基于点云开发 VR 全景交互系统。

4) 应用服务层:将 BIM 模型、VR 系统与复原图纸等成果整合,形成数字孪生基座,直接服务于设施管理、改造设计、安全培训与沉浸式教学。

整个技术路线的设计强调标准化与轻量化,确保方法可复制、成本可承受,以适应小型污水处理站的普遍需求。

4. 关键技术方法与实施过程

4.1. 多源协同的空间数据采集技术

面对站内外复杂环境,单一技术无法满足全要素采集需求。本项目创新性地采用了三种技术协同的作业方案。

4.1.1. RTK 高精度控制测量与地形测绘

依据《全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范》,作业采用“基站+移动站”模式。首先,在测区均匀布设 3 个永久性控制点,使用三脚架架设基站进行不少于 2 小时的静态观测,并通过与附近城市连续运行参考站(CORS)系统联测,求取转换参数,将测量成果统一至 CGCS2000 国家大地坐标系。在

历时两天的外业中,利用 RTK 移动站,以碎部点测量模式,对站区所有地形特征点(道路、建筑物角点、井盖、管线出地点)及人工湖岸线进行精准采集,累计采集 2486 个特征点。这些点位不仅用于绘制 1:500 高精度数字地形图,更重要的是为后续点云数据提供了高精度空间基准,是多源数据融合的关键。

4.1.2. 背包式三维激光扫描技术

针对站内地下 8 米深处、温度超 40℃、设备管道密集、GNSS 信号全无的高危复杂环境,项目选用搭载了 Velodyne VLP-16 激光扫描仪和惯性测量单元(IMU)的背包式三维激光扫描系统(如 Leica BLK2GO)。该设备集成 SLAM 算法,无需 GNSS 信号,依托 IMU 和点云特征进行实时定位与建图,标称测程 25 米,点云精度 ± 10 mm,每秒可采集 42 万点云数据。作业前进行严格安全交底(含气体检测、通风要求),制定手势通讯规范。操作人员背负扫描系统,以 0.5~1.0 m/s 的匀速,沿污水处理工艺流程路线(格栅间 → 调节池 → 生化池 → 二沉池 → 泵房)行进扫描,并在关键设备、拐角和连接处做短暂停留以增加点云密度。往返扫描形成闭合环路,用于后续误差检核。完整获取了所有区域的高密度彩色点云,有效解决了“看不见、测不准”的难题,相较传统固定站式扫描(需频繁设站、标靶拼接)在同等条件下,外业效率提升约 5 倍。

4.1.3. 无人船多波束水下地形测量

人工湖水域面积约 12000 平方米。项目采用轻量化无人船(如华微 3 号 Pro),搭载多波束测深系统(如 Norbit iWBMS),依据《无人船水下地形测量技术规程》作业。在湖岸布设 3 个 RTK 基站,通过电台向无人船播发差分信号,实现厘米级定位。作业前进行声速剖面仪测量,获取水体声速分层数据,并对船体吃水深度、横纵摇进行精确校准。无人船按照预设的 2 米间距“弓字形”测线自动航行,船速控制在 3 m/s 以内,多波束发射频率设为 40 Hz,确保 200%测线重叠覆盖。最终获取了高密度、全覆盖的水下地形点云,成功构建了水下数字高程模型(DEM)。

4.2. 点云处理与 VR 全景系统开发

外业采集的原始点云数据量巨大(背包扫描原始数据约 80 GB,无人船数据约 5 GB)且包含噪声。内业处理首先利用专业软件(如 Geomagic Wrap、CloudCompare)进行:1) 去噪:剔除离群点和明显错误点;2) 坐标统一:以 RTK 控制点为依据,将背包扫描和无人船点云的坐标系转换至 CGCS2000 坐标系;3) 精细配准:利用迭代最近点(ICP)算法,对两种点云的重叠区域进行自动精确配准,使整体拼接误差小于 2 cm。最终生成一个总数据量约 1200 亿点、全局精度优于 ± 15 mm 的“实景数字工厂”彩色点云模型。

以此全景点云为基础,项目开发了“交互式 VR 全景系统”。将点云模型进行抽稀、网格化(Poisson 重建)和纹理映射等轻量化处理后,导入 Unity 3D 或 Unreal Engine 开发平台。系统不仅构建了高度逼真的虚拟环境,还集成了交互功能:用户佩戴 VR 头显(如 HTC Vive)后,可通过手柄进行第一人称漫游,深入地下池体等高风险区域。系统内置了测量工具(可量取任意两点距离、管道直径)、剖切工具(动态剖切实体观察内部结构)和透明化显示功能,将高危的实地考察转化为安全的、可重复的沉浸式教学与培训体验。

4.3. BIM 逆向建模与数字档案复原

4.3.1. 基于点云的图纸复原

针对竣工图缺失的核心痛点,团队以高精度点云为“底版”,在 AutoCAD 中新建图纸,通过外部参照功能插入点云切片(或使用 Autodesk ReCap Pro 直接关联点云)。工程师依据点云显示的轮廓、位置和尺寸,精确描摹复原了污水处理站的平面布置图、工艺流程图、主要工艺管线综合图及各单体构筑物的平、立、剖面图。共复原 CAD 图纸 15 张,形成了一套与现状完全一致的数字化图纸库。

4.3.2. 参数化 BIM 逆向建模

为实现设施的数字化管理与分析，项目进行了深入的 BIM 逆向建模。以关键设备“引水真空罐”为例，建模流程如下：

1) 尺寸提取：在点云处理软件(如 Autodesk ReCap Pro)中，通过切片和测量工具，精确量取罐体总高(2350 mm)、直径(1200 mm)、壁厚(8 mm)、法兰盘位置、直径及螺栓孔数量(8 个)与间距等关键尺寸。

2) 参数化建模：在 Autodesk Revit 中，根据设备类型创建“自适应公制常规模型”族。首先创建主体圆柱，将高度和直径设置为实例参数。接着创建法兰盘族，并嵌套入主体，通过阵列命令精确布置 8 个螺栓孔，孔间距由法兰盘直径参数驱动。最后根据点云中管道的走向、连接关系和管径，创建连接的管道族，并设置相应坡度(如 0.5%)。

3) 模型校准与整合：将初步建成的引水真空罐 BIM 模型导出为通用格式，再导入至包含彩色点云的环境中进行叠加比对。通过调整模型的尺寸参数和位置，直至与点云轮廓在各视角下均高度吻合。经多点抽样测量，模型与点云间的误差控制在 ± 5 mm 以内。最终，完成全站 14 台主要工艺设备及厂房土建结构的 BIM 建模，累计耗时 76 工时，构建出包含丰富语义信息(如设备型号“2BV5111”、材质“Q235B”、生产厂家、安装日期、维护记录链接)的污水处理站全专业 BIM 模型。

5. 主要成果

通过上述技术流程，项目取得了以下四个维度的丰硕成果：

(一) 数据成果

毫米级全场景彩色实景三维点云模型(覆盖站区 0.02 km² 地上地下、人工湖 0.012 km² 水域及周边)，点云密度平均达 5000 点/m²，全局精度 ± 15 mm。

人工湖高分辨率水下 DEM (格网尺寸 0.2 m \times 0.2 m)及基于此计算的“水位 - 库容”关系曲线(每 10 cm 水位间隔提供对应库容)。

1:500 数字地形图与全套复原竣工设计图纸(15 张)。

(二) 模型成果

包含 14 台关键设备的污水处理站全专业 LOD300 BIM 模型。

支持沉浸式交互、测量与剖切的 VR 全景实训系统，包含 3 种预设实训场景(工艺流程认知、设备巡检、应急演练)。

(三) 档案成果

建立了设施全生命周期数字资产库，将几何模型、属性信息(设备参数、型号)、运维历史文档(维修记录、说明书)进行关联存储。

(四) 应用成果

1) 运维效率提升

传统方式：故障排查需携带图纸现场逐一比对，平均耗时约 2 小时。

本方案：基于精准 BIM 模型，可将设备实时传感器数据(压力、流量)进行三维挂接，一旦数据异常，系统可高亮定位故障设备并显示其关联管道阀门。预估单次故障排查时间缩短至 1 小时内，效率提升超过 50%。人工湖精准库容曲线(相对传统估算，精度提升至 95%以上)为校区水资源精准调度与景观水位控制提供了科学依据。

2) 技术经济对比

数据采集效率：若采用传统全站仪 + 测深杆方式，完成同等复杂度的全要素测量预估需 12 个工作日；本方案采用多技术协同，仅用 3 个工作日，效率提升 4 倍。

建模精度与成本：本方案 BIM 逆向建模精度达 ± 5 mm，远超传统目测皮尺方式(误差常达 5~10 cm)。虽然前期技术投入(设备与人力)约 8 万元，但形成的数字基座可直接用于后续所有改造设计、虚拟展示与管理应用，避免了因图纸不全而导致的重复现场测绘(单次预估 1 万元)，预计在后续 1~2 次改造中即可收回前期增量成本。

3) 教学改革效益

传统实训：受安全规定限制，学生每年仅能组织 2 次，每次 10 人分批进入地下空间观摩，无法动手操作。

本方案：VR 系统建成后，已支撑 4 个班级共 160 人次进行“零风险”的高危空间作业与工艺认知实训，年服务能力提升至 800 人次以上。学生可系统掌握从 RTK 测量、点云处理到 BIM 建模的 10 项核心技能。

4) 经济效益预估

数字基座可直接用于未来工艺改造设计，避免重复测绘。按行业经验，类似规模站点进行工艺改造前的勘测设计费约为 10 万~15 万元，本方案形成的数字基座可完全覆盖该部分成本，预计单座站点可节约前期勘测设计成本约 10 万元，并缩短设计周期约 20%。

6. 特色、创新与应用价值

6.1. 特色与创新

1) 多技术融合的轻量化基座构建路径：针对中小型项目预算有限的特点，创新性整合了消费级 RTK、背包式 SLAM 扫描、轻量化无人船等装备，形成了从“快速采集(天-地-水协同)”到“精准建模(BIM 逆向)”再到“高效应用(VR 交互)”的标准化、低成本工作流程，显著降低了中小水务设施迈入数字孪生的门槛。

2) “运维-教学”双驱模式创新：本项目构建的数字孪生基座，在设计之初就兼顾了设施精益管理与职业教育实训双重需求。同一套高精度数据资产，既服务于设备管理、故障三维定位，又直接转化为 VR 实训课程，实现了数据资产的复用与效益最大化，为职业教育产教融合提供了“以产促教、以教助产”的新范式。

3) 高危空间作业的数字化安全置换：通过 VR 技术，将长期存在高温、潮湿、有毒有害气体风险的地下巡检与教学实训活动，完全置换到安全、可控、可重复的虚拟空间中进行，从根源上保障了人员安全，解决了水务行业长期存在的安全培训“进不去、做不了、风险大”的难题。

6.2. 应用价值与推广前景

1) 管理效能提升：数字孪生基座将设施管理从基于残缺二维图纸的经验模式，升级为基于高精度三维实景的数据驱动模式，为未来实施预测性维护(如基于振动数据分析的鼓风机故障预警)、节能降耗(如基于工艺仿真的曝气量优化)奠定了坚实的几何与数据基础。据类比估算，可提升综合运维效率 30%以上。

2) 教育赋能变革：项目成果直接转化为学校国家级虚拟仿真实验教学项目的核心内容，有效破解了涉水专业学生实践教学“进不去、看不见、动不了、难再现”的困局，为行业培养适应智慧水务发展需求的复合型技术技能人才提供了有力支撑。

3) 广阔的推广前景：我国拥有数以万计的小型、老旧污水处理站、泵站及供水设施，其数字化改造需求巨大。本项目形成的基于轻量化装备和标准化流程的解决方案，具备极强的可复制性，可作为城市级、流域级智慧水务系统的“细胞级”数字底板，快速推广至全国，助力国家“智慧水利”与“数字中国”战略在基层的落地实施。

7. 局限性与展望

本研究虽成功构建了小型污水处理站的数字孪生基座,但仍存在一定局限性。首先,模型的静态性:当前模型主要为高精度几何与语义信息,尚未与实时物联网数据(如在线水质分析仪、变频器电流、水泵振动等)实现动态关联,是一个“静态”的数字镜像,而非完全意义上的“动态”数字孪生。其次,模型的复杂度:对管道内部、阀门内部等复杂结构未能实现完全重建,部分隐蔽性较强的管线连接关系仍需依赖推断。最后,方法的普适性验证:本方案仅在一个案例点得到验证,其在不同类型、不同规模、不同环境条件站点下的适应性和成本效益,仍需更多案例进行验证。

展望:数字孪生基座的活力在于数据的流动与智能的注入。下一步研究重点包括:

1) 动态数据融合与实时映射:计划集成物联网技术,将实时水质(COD、氨氮、pH)、设备状态(电流、振动、温度)、视频监控等数据流,通过标准接口(如 OPC UA、MQTT)与三维模型关联,实现污水处理厂运行状态的同步可视化与实时预警。

2) 智能分析升级与应用深化:引入人工智能与机理模型,在数字孪生平台上开发高级应用。例如,基于历史数据和实时数据,利用长短期记忆网络(LSTM)等算法对关键设备进行故障预测;或集成工艺机理模型(如活性污泥模型 ASM),进行工艺运行模拟与参数优化,从“数字镜像”走向具备辅助决策能力的“智慧推演”。

3) 平台化与微服务架构探索:探索基于微服务架构的数字孪生平台开发,将三维可视化、数据分析、报警管理、报表生成等功能模块化、松耦合,便于根据不同站点的具体需求进行灵活配置、扩展和维护,最终形成可广泛推广于中小型水务设施的标准化智慧水务解决方案。

参考文献

- [1] 张璐晶, 张伟, 谭澄, 等. 基于新型智能控制系统的污水智慧管理: 创新与实践[J]. 环境工程学报, 2024, 18(6): 1732-1737.
- [2] Guo, Z.Y., Gao, W.N., Qu, M., *et al.* (2025) Application of Unmanned Aerial Vehicle Information Collection in the Design Process of Wastewater Treatment Plant Expansion. *China Water & Wastewater*, **41**, 118-124.
- [3] 安徽省第二测绘院. 省第二测绘院完成三市水库水储量调查 水资源管理实现“模型化重构” [EB/OL]. <https://zrzyt.ah.gov.cn/ztlm/ahschj/zxdt/jndt/150354501.html>, 2025-12-09.
- [4] Rodríguez-Alonso, C., Pena-Regueiro, I. and García, Ó. (2024) Digital Twin Platform for Water Treatment Plants Using Microservices Architecture. *Sensors*, **24**, Article No. 1568. <https://doi.org/10.3390/s24051568>