

三维激光扫描辅助下的污水处理站BIM逆向建模

张彦清*, 王瑞雪, 邓荣泽, 姜浩#, 刘爱军, 吕要宗

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2月26日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年3月27日

摘要

针对既有的工业设施存在的物理实体与设计信息脱节的普遍现象, 本文选取复杂的校园污水处理站作为研究对象, 提出了一套基于移动式三维激光扫描的BIM逆向建模的方法。研究详细阐述了从精细化扫描规划、点云融合处理到信息化模型重构的全流程关键技术。结果表明, 逆向构建的BIM模型, 在实际应用中的碰撞检测与资产盘点等典型运维场景有很高的工程实用价值。该方法不仅可以显著提高数据获取的全面性与建模效率, 且相较于传统测量手段, 可大幅减少外业数据采集时间, 为既有污水处理站的数字化改造与智慧运维提供了高精度的“数字孪生”底座。研究表明了三维激光扫描与BIM技术在工业设施逆向工程中的可靠性与应用价值, 对推动水务基础设施的数字化转型具有重要的实践指导意义。

关键词

三维激光扫描, BIM技术, Revit软件, 逆向建模, 污水处理站

BIM Reverse Modeling of a Wastewater Treatment Plant Assisted by 3D Laser Scanning

Yanqing Zhang*, Ruixue Wang, Rongze Deng, Hao Jiang#, Aijun Liu, Yaozong Lyu

School of Water Conservancy and Civil Engineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

Received: February 26, 2026; accepted: March 19, 2026; published: March 27, 2026

Abstract

Given the widespread issue of disconnect between physical entities and design information in

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张彦清, 王瑞雪, 邓荣泽, 姜浩, 刘爱军, 吕要宗. 三维激光扫描辅助下的污水处理站 BIM 逆向建模[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 477-482. DOI: 10.12677/aep.2026.164047

existing industrial facilities, this paper selects a complex campus sewage treatment station as the research object and proposes a BIM reverse modeling method based on mobile 3D laser scanning. The study elaborates on the key technologies involved in the entire process, from refined scanning planning and point cloud fusion processing to the reconstruction of informational models. The results indicate that the reverse-engineered BIM model holds significant practical engineering value in typical operational and maintenance scenarios such as collision detection and asset inventory. This method not only significantly enhances the comprehensiveness of data acquisition and modeling efficiency but also substantially reduces field data collection time. Moreover, compared to traditional measurement approaches, providing a high-precision “digital twin” foundation for the digital transformation and intelligent operation and maintenance of existing sewage treatment stations. The research demonstrates the reliability and application value of 3D laser scanning and BIM technology in the reverse engineering of industrial facilities, providing important practical guidance for promoting the digital transformation of water infrastructure.

Keywords

Three-Dimensional Laser Scanning, BIM Technology, Revit Software, Reverse Modeling, Sewage Treatment Plant

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

1.1. 背景：数字化运维的需求驱动

在智慧水务与城市基础设施数字转型的时代背景下，对既有的市政基础设施进行高精度的数字改造的紧迫性日益凸显[1]。随着城市化进程的持续加快，水资源的管理与利用面临着越来越大的挑战。为了提高水资源的利用效率，确保供水安全，对市政基础设施进行数字改造势在必行。然而，传统的二维图纸已难以满足复杂管线、现代改造、运维与安全分析的严苛要求[2]，尤其是在管线交错、设备老化且空间受限的污水处理站等复杂场所中。

在这种背景下，迫切需要一种能够提供高精度数字模型的技术手段来支撑设施的管理与维护工作。BIM(建筑信息模型，Building Information Modeling)技术正是解决上述问题的关键工具。作为一种先进的设施全生命周期信息管理工具[3]，BIM 不仅能够提供精确的三维模型，还可以通过集成丰富的属性信息，如设备规格、材质、维护数据等，为设施的运维、改造和安全分析提供强有力的支撑。

BIM 在新建项目中的成功应用已经得到了广泛的认可。通过 BIM 技术，新建项目不仅可以显著提高设计效率，减少设计错误和施工变更，还能够在施工阶段通过碰撞检测与进度模拟提高施工质量，显著降低建设成本[4]。这些成功经验为将 BIM 技术应用于既有市政基础设施的数字化改造提供了坚实的理论基础与实践范例。将 BIM 应用于既有市政基础设施的数字改造，不仅可以提高设施的管理水平[5]，还可以延长设施的使用寿命，确保供水安全，提高城市的整体运行效率。

1.2. 问题陈述：从“物理”到“数字”的桥梁缺失

在既有工业化设施数字化转型的过程中，“物理实体 - 数字模型”的转化断层日益突出，以工艺复杂的污水处理站为例，痛点尤为突出，主要体现在以下几个方面：一是基础资料缺失。许多投运多年的

污水站存在原始设计图纸缺失、改扩建变更未归档等问题，这导致物理设施的管线走向、设备布局与纸面信息完全脱节，BIM 建模缺乏可靠的依据，难以为后期的精细化管理和运维提供支撑[6]；二是传统测量手段失效。在污水站狭窄管廊、高空管道区域，全站仪、水准仪、卷尺等工具进行人工测量不仅效率低，而且作业风险较高，易引发坠伤、中毒事故。此外，传统测量通常仅能采集离散点位数据，无法覆盖管道交错、设备密集的复杂空间，导致测量数据难以满足完整性需求；三是 GNSS 定位失效。污水处理站多处于室内或构筑物遮蔽环境中，卫星信号衰减严重，导致 GNSS 定位误差较大，甚至无法定位，从而无法满足 BIM 建模的精度要求。

这种“物理实体 - 数字模型”转化的核心矛盾，迫切需要一种高效、高精度、全域捕捉空间信息的技术，而三维激光扫描仪正是填补这一空白的关键工具。它通过高速激光束对物体表面进行非接触式扫描，能够在极短的时间内获取被测对象的海量三维坐标点云数据及 RGB 信息，这些数据不仅精度极高，且完整度强，能够真实地还原现场的复杂几何形状和表面纹理。在建筑工程领域，利用三维激光扫描仪获取的点云数据与 BIM 技术深度融合，已成为实现工程逆向建模和竣工实测实量的核心技术路径[7]。通过高速激光扫描获取密集点云数据，经数据处理后重建为参数化 BIM 模型，在建筑遗产保护、既有建筑改造及机电工程运维等领域展现出显著优势[8]。在模型重构方面，通过定义基本参数、几何图元、组件及其关系，实现对不同风格建筑形式的自适应重构，显著提升了历史建筑 BIM 模型的生成效率[9]。与传统测量方式相比，三维激光扫描仪主要表现如下优势。

对比项目	传统测量	三维激光扫描技术
测量方式	单点、接触式	面扫描、非接触式
数据量	离散点	数百万点云
安全性	人员需进入高危区域	非接触式，安全性提高
成果形式	二维图纸	三维可视化
每秒采集点数	传统全站仪为单点测量	每秒可达百万点

基于上述背景，本研究聚焦于污水处理站的数字化改造。通过三维激光扫描仪获取污水处理站全站点的点云数据，随后利用点云数据与 BIM 建模软件(如 Revit 软件)进行重建，最终实现对污水处理站的逆向建模。该方法不仅显著提升了模型的真实性和细部精度，也为后续的管线改造、设备维护和设施管理提供了可靠的数字化基础。点云图纸见图 1。



Figure 1. Point cloud map of sewage treatment station
图 1. 污水处理站点云图

2. 逆向建模步骤

逆向建模是一种基于实测数据重建数字模型的技术路径，针对高职院校污水处理站这一复杂场景，逆向建模过程可系统划分为扫描规划与数据采集、点云数据处理与优化、BIM 模型逆向重构三个关键阶段。该过程不仅是信息采集的技术实现，更是物理空间向数字空间转换的核心环节。

2.1. 第一阶段：扫描规划与数据采集

该阶段的核心目标是通过物理空间的分解，获取完整且高保真度的三维空间数据。以某高职院校污水处理站为例，该处理站的处理规模约 1000 m³/d，预处理单元主要包括格栅，初沉池和沉砂池等设施，二级处理单元采用 AAO 与 MBR 工艺的组合，深度处理工艺主要包括混凝、沉淀、过滤等单元，并辅以加药单元、污泥处理单元等设施。整体工艺布局复杂，布置紧凑，管线繁多。

为了更准确地复刻现有处理设施，需要在实地勘察阶段投入较多的前期准备工作，尤其针对复杂的工业现场环境。首先，必须在进入现场前进行详尽的勘察，综合分析现场的空间约束、结构分布以及潜在的遮挡因素，从而确定扫描仪的最佳布设路线。为了确保后期点云数据的完整性，扫描时必须设置合理的重叠度，以确保在管道交叉、阀门密集或光线变化剧烈的区域获取足够的点云数据。在扫描前期规划中，优先规划难以到达的区域或关键结构的扫描点位，例如二级处理单元中管道交叉复杂的区域、加药单元中细小阀门及管线等部位。通过移动式三维激光扫描仪对处理站进行高密度数据采集，并将获取的点云数据导入专业建模软件中。采集完成后，将获取的海量点云数据导入专业建模软件中进行后期处理。

2.2. 第二阶段：点云数据处理与优化

1) 数据预处理

在外业扫描阶段，移动式激光扫描仪依托搭载平台(如车载、背包式)高速运行。为确保数据质量。借助设备自带的 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 或 GNSS/IMU 融合技术，采集过程中即完成连续帧的粗配准，形成初步拼接模型。

2) 点云语义分割。

在移动扫描生成的连续带状点云中，语义分割是将点云转换为可理解的 BIM 模型的关键步骤。为实现对墙体、管道、设备等构件的识别，采用基于几何特征与机器学习相结合的语义分割流程，其实现过程主要包括点云预处理、特征提取、分类器训练及后处理优化等环节。在面对大规模点云数据时，可以引入基于深度学习的点云 AI 分割模型；对管线密集区、建筑入口等复杂交错区域的误识别部分，手动修正标签分类，确保整体分类准确率 $\geq 90\%$ ，为后续分段精细化建模提供精准数据基础。

3) 点云去噪

利用点云采集的时间连续性，在移动扫描中，静态结构(如墙体、道路)在连续的扫描帧中位置基本不变，而移动物体(如行人、车辆)只能出现在单帧或极少数帧中，从而过滤行人、车辆等环境移动物体噪点。用振动补偿算法消除移动平台自身产生的离散噪点，保障静态场景数据纯净度。

2.3. 第三阶段：BIM 模型逆向重构

得到点云数据后，本阶段主要任务是精确还原物理形态，赋能全生命周期信息，通过差异化建模策略完成构筑物、管线与设备的数字化复刻，具体如下：

1) 规则几何体的逆向重构

处理站主要的规则几何体主要包括预处理单元的初沉池、沉砂池，二级处理单元的反应池等处。针对这些规则的矩形、圆形池体，通过软件沿池体垂直高度方向按 50 cm 间距生成切片，自动提取每个切

片的边界轮廓，智能剔除点云噪声、地面杂物干扰的不规则局部；将净化后的轮廓导入 Revit 软件中，以点云提取的池体底部标高为基准，匹配切片高度差执行参数化拉伸建模，同步修正池体侧壁坡度、顶部倒角等细节，最终模型与点云的尺寸偏差控制在 ≤ 2 cm，完整还原池体实际结构形态。点云与 BIM 模型对比图如图 2 所示。



Figure 2. Comparison diagram of point cloud and BIM model
图 2. 点云与 BIM 建模对比图

2) 管道系统的逆向重构

第一，直管段按 30 cm 间距切片，弯管、三通等节点进行加密处理，提取各切片的圆形轮廓；第二，在点云圆环中心处确认一个初始点，然后沿管道方向按照固定间隔截取截面，并在每个截面上标定中心点，通过这些中心点生成连续管道中心线，并手动修正弯头处的中心线偏移误差；第三，通过点云轮廓拟合管径，偏差超 0.5 cm 时对照现场标注或设备铭牌数据校准；第四，参数化建模，在 Revit 软件中创建对应管径的可载入管族，沿中心线路径生成管道，根据介质类型赋予污水管、空气管、加药管等系统类型，通过“管道连接”工具自动匹配管件，确保管线连接逻辑与现场完全一致。

3) 工艺设备逆向重构

工艺设备主要分两类：第一，标准设备，如水泵，阀门等，可以直接调用 BIM 族库中的同型号族文件，通过点云对齐设备底座、进出口法兰等特征点，将族精确定位至实际安装位置；第二，BIM 族库中没有的设备，先通过点云拟合设备的最小包围盒简化外轮廓，再通过 Revit 软件新建可载入族，同时关联设备设计图纸、材质等核心信息，兼顾模型精度与性能。

4) 全维度信息集成

在 Revit 软件中自定义属性栏，附加设备的 ID、型号、制造商、安装日期等基础信息，针对运维需求，补充设备维护记录、检修周期、备件型号等动态属性，构建“三维可视化模型 + 全生命周期数据”的集成化 BIM 载体，为后期设备管理、管线改造提供精准数据支撑。

3. 建模成果交付

1) BIM 模型可视化成果。通过移动式激光扫描点云重构的全场景 BIM 总览模型，全景漫游视频。漫游视频预设核心区域自动巡航路径，直观呈现构筑物、管道系统与工艺设备的整体空间布局，便于快速掌握项目全貌。自动巡航路径主要包括预处理单元、反应池单元、污泥处理单元、消毒及处理单元、辅助设施等。

2) 非图像信息成果。

设备属性表。通过 Revit 软件明细表导出设备属性表，包含设备唯一 ID、型号、制造商、安装日期、额定参数等基础信息，以及维护周期、历史检修记录、备件型号等运维属性，导出记录，直接对接项目资产管理台账。

管道属性表。第一,几何属性。包含从点云拟合提取的管径、管线总长度、敷设坡度,以及现场标注的管材类型(如无缝钢管、PE管)、壁厚,同步附有点云数据,确保数据可溯源、精度可验证。第二,系统与安装属性。明确标注管道所属系统类型(污水管/空气管/加药管)、敷设方式(架空/埋地/管廊)、连接管件规格(弯头/三通/阀门型号),以及实际安装标高、起止点构筑物,还原管线现场布局逻辑。第三,运维关联属性。补充管道投用日期、上次检修时间、维护周期及过往故障记录。

4. 模型应用场景探讨与讨论

第一,碰撞检查。依托逆向 BIM 模型,可高效开展新增管线的预碰撞验证。针对工艺升级或改造需求模拟新增管道(如加药管、污水回流管),将待布设管道的参数化族导入逆向 BIM 模型,预设管线间距、与构筑物/现有管线的最小安全距离,系统自动识别空间冲突点,生成可视化碰撞报告,明确标注冲突位置、类型(硬碰撞/间隙不足)及偏差值。

第二,虚拟巡检与资产清查。通过 Revit 软件一键生成资产报表,自动统计管线总长、管径、材质,以及设备型号、制造商、安装日期等核心数据,替代传统人工现场清点模式,提高数据准确率及清查效率。借助漫游功能,结合现场空间布局自动生成最优路线,避开设备密集区与危险区域,标注阀门、弯头、泵体等关键巡检点,工作人员可通过移动端同步查看模型位置与待检内容,还能关联维护记录自动推送到期检修提醒,大幅降低巡检遗漏率,提升运维响应速度。

5. 结论与未来展望

本研究分析了移动式三维激光扫描与 BIM 结合的逆向建模工作流程,针对复杂污水处理站“构筑物空间交错、管线密集复杂、设备布局零散”的建模痛点,通过从高精度点云采集、智能预处理到 BIM 精准重构的全流程落地,解决了传统人工建模精度低、效率慢、细节缺失的核心问题。

三维激光扫描逆向 BIM 建模在复杂管线工程中虽具有显著优势,但是在数据采集过程中,遮挡问题仍是制约建模精度的主要瓶颈。尤其在管线密集、遮挡严重的区域,容易形成大面积扫描盲区,导致点云数据局部缺失,进而需要投入大量人工进行数据修补。基于此,后续研究可重点探索地面激光扫描与 SLAM 手持扫描等技术相结合的路径,通过优势互补提升复杂环境下点云数据的完整性与建模效率。

逆向重构的 BIM 模型是构建项目数字孪生体的核心静态基础:它以移动式激光扫描的高精度点云为依托,1:1 复刻了构筑物、管线、设备的几何形态与空间关系,同时整合了全站非图形属性信息,为数字孪生的动态仿真、预测分析提供了精准的物理映射载体,是实现“虚实交互、实时同步”的核心底座,能让后续数字孪生的动态数据有明确的附着节点与空间参照。

参考文献

- [1] 尹勇,陈小旭,刘威. 基于智慧水务视角下的水务数字化转型策略[J]. 智慧中国, 2023(9): 88-89.
- [2] 陈红,曾伟鑫. BIM 技术应用于市政工程管线综合优化[J]. 深圳职业技术学院学报, 2021, 20(5): 9-14.
- [3] 刘晓奇,赵军甫. 加快 BIM 技术创新应用构建标准化、智能化设计体系[J]. 中国建设信息化, 2023(14): 34-37.
- [4] 龙腾,唐红,吴念,袁凤英. BIM 技术在武汉某高架桥工程施工中的应用研究[J]. 施工技术, 2014, 43(3): 80-83.
- [5] 梅瓚义,傅星宇. BIM 在新型智能化市政基础设施建设中的集成应用研究[J]. 建设科技, 2025(20): 30-33.
- [6] 王晓杰,徐亚男,等. 基于三维实景技术的既有污水厂逆向建模 BIM 应用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(2): 58-63.
- [7] 姚习红,周业梅,加松,赵玮. 基于三维激光扫描的建筑物逆向建模实现方法及应用[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 178-181+189.
- [8] 伍根,熊小龙. 基于三维激光扫描测绘技术的 BIM 逆向建筑建模方法研究[J]. 城市勘测, 2023(5): 33-37.
- [9] 孙竹青,许鹏程,张大宝. 基于密集三维点云的历史建筑 BIM 自动建模算法研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(13): 1630-1634.