

# 数字孪生技术在市政排水工程中的应用： 施工到运维的无缝对接

梁株银

身份证号：440981199501244610

DOI:10.61369/ME.2025030027

**摘要：** 介绍数字孪生技术在市政排水工程的应用，涵盖技术框架核心内容，如数据整合、模拟算法等。阐述 BIM 与 GIS 融合路径，施工信息标准化录入规则。还包括施工到运维阶段的数据处理，如清洗、知识提取等，以及智能化运维应用体系相关内容。

**关键词：** 数字孪生；市政排水；施工运维

## Application of Digital Twin Technology in Municipal Drainage Engineering: Seamless Connection from Construction to Operation and Maintenance

Liang Zhuyin

ID: 440981199501244610

**Abstract:** This paper introduces the application of digital twin technology in municipal drainage projects, covering key aspects of the technical framework, such as data integration and simulation algorithms. It also discusses the integration of BIM and GIS, along with standardized rules for entering construction information. Additionally, it covers data processing from construction to operation and maintenance, including cleaning and knowledge extraction, as well as the content related to intelligent operation and maintenance systems.

**Keywords:** digital twin; municipal drainage; construction and operation and maintenance

### 引言

随着城市化进程的加速，市政排水工程的高效建设与运维至关重要。2023年发布的相关政策强调了提升市政基础设施韧性和智能化水平的重要性。数字孪生技术为市政排水工程带来了新的契机。它涵盖多源异构数据整合、动态模拟算法和虚实交互机制等核心内容，可有效整合不同数据源的数据。同时，BIM与GIS的融合为其提供了新机遇，从施工到运维的各个阶段，如施工信息标准化录入、数据清洗与知识提取、物联网数据接口设计等，数字孪生技术都通过一系列关键技术路径实现了无缝对接，构建精准数字模型，整合数据，提升系统韧性，符合政策导向，具有重要研究价值。

### 一、数字孪生技术基础与排水工程适配性

#### (一) 数字孪生技术框架

数字孪生技术框架涵盖多源异构数据整合技术、动态模拟算法以及虚实交互机制等核心内容。多源异构数据整合技术是关键，它能够将来自不同数据源、具有不同结构的数据进行有效整合，为后续的分析 and 应用提供基础<sup>[1]</sup>。动态模拟算法可对市政排水系统的运行过程进行精确模拟，通过构建数学模型，模拟水流的运动、污染物的扩散等复杂过程。虚实交互机制实现了物理实体与虚拟模型之间的实时交互，使得虚拟模型能够及时反映物理实体的变化，同时物理实体也能根据虚拟模型的反馈进行调整，从而更好地映射市政排水系统的实际运行情况，为排水工程从施

工到运维的无缝对接提供技术支撑。

#### (二) BIM+GIS集成应用

建筑信息模型 (BIM) 与地理信息系统 (GIS) 的融合为市政排水工程带来了新的机遇。在融合路径方面，需考虑两者的数据结构和标准差异，通过建立统一的数据接口和转换机制实现数据的交互和共享。对于管网三维可视化建模，可利用 BIM 技术的参数化建模能力，精确构建排水管网的三维模型，包括管道的几何形状、材质等信息。同时，结合 GIS 的空间分析功能，为模型赋予空间属性，如地理位置、地形地貌等。在空间属性数据库构建方法上，可采用 GIS 的数据管理工具，对排水工程相关的地理空间数据进行分类、存储和管理，以便于后续的查询、分析和应用<sup>[2]</sup>。

## 二、施工阶段孪生数据采集与建模

### （一）施工信息标准化录入

为实现施工信息标准化录入，需建立一系列规则与模板。首先是材料参数编码规则，明确管道材质等关键属性的编码方式，确保材料信息的准确记录与识别<sup>[6]</sup>。其次，施工日志结构化模板的建立至关重要，它规范了施工过程中各项信息的记录格式，包括施工进度、质量检测结果等。最后，物探数据采集标准涵盖管径、坡度等关键属性，保证物探数据的一致性和准确性。通过这些规则和模板的建立，能够有效提高施工信息录入的标准化程度，为数字孪生模型的构建提供准确、可靠的数据基础。

### （二）时空数据融合建模

施工阶段涉及多种数据，其中施工进度数据与管网地理坐标的时空配准至关重要。通过先进的测量技术获取精确的管网地理坐标数据，同时记录施工各阶段的进度信息。利用时空配准方法，将二者在时间和空间维度上进行匹配，为后续分析提供准确基础<sup>[4]</sup>。对于隐蔽工程，由于其不可见性，逆向建模算法的开发成为关键。通过对施工过程中相关数据的收集，如施工工艺参数、材料使用情况等，结合数学模型和算法，实现对隐蔽工程的逆向建模，从而在数字孪生模型中准确呈现隐蔽工程的实际情况，为市政排水工程的施工阶段孪生数据采集与建模提供有力支持。

## 三、施工向运维阶段数据价值转换

### （一）数据清洗与知识提取

#### 1. 异常数据过滤机制

施工向运维阶段的数据清洗与知识提取中，异常数据过滤机制至关重要。构建基于统计分布与深度学习的数据质量评估模型是基础<sup>[6]</sup>。通过统计分布原理，分析数据的分布特征，识别出与正常分布模式偏离较大的数据点。同时，利用深度学习算法挖掘数据中的复杂模式和潜在关系，进一步提高异常数据的检测能力。在此基础上，设计施工误差的自动修正流程。当检测到异常数据可能是由施工误差导致时，系统根据预设的规则和算法，自动对误差进行修正，确保数据的准确性和可靠性，为后续的运维阶段提供高质量的数据支持。

#### 2. 运维知识图谱构建

在施工向运维阶段的数据价值转换中，数据清洗与知识提取后需进行运维知识图谱构建。通过实体关系抽取技术建立管网拓扑规则库至关重要。该技术能精准识别管网中各实体及其相互关系，例如管道之间的连接关系、泵站与管道的关联等，进而构建规则库。基于此规则库，可形成运维决策支持知识体系。这个知识体系涵盖了排水管网在运维过程中的各种关键信息和决策规则，为运维人员提供了科学的决策依据，有助于提高市政排水工

程运维的效率和准确性，实现从施工到运维的无缝对接，充分发挥数字孪生技术在市政排水工程中的应用价值<sup>[6]</sup>。

### （二）动态数据驱动机制

#### 1. 物联网数据接口设计

施工向运维阶段的物联网数据接口设计对于实现数据价值转换至关重要。在市政排水工程中，施工阶段预置传感器与后期运维监测设备可能存在协议不兼容的问题。因此，需要开发协议转换中间件<sup>[7]</sup>。该中间件能够对不同协议的数据进行解析和转换，确保施工阶段采集的数据能够在运维阶段被有效利用。通过统一的数据接口，实现数据的无缝传输和交互，为动态数据驱动机制提供支持。这不仅提高了数据的可用性和准确性，还为市政排水工程从施工到运维的顺利过渡提供了保障，进一步提升了工程的整体管理水平和运行效率。

#### 2. 参数化模型更新算法

在施工向运维阶段数据价值转换中，动态数据驱动机制下的参数化模型更新算法至关重要。基于实时监测数据的管网水力模型动态校准是关键方法之一<sup>[8]</sup>。通过实时获取排水管网运行中的各项数据，如流量、水位等，利用算法对参数化模型进行更新。首先需建立准确的初始模型，然后根据监测数据与模型预测数据的差异，采用合适的算法调整模型参数。这可能涉及到复杂的数学计算和算法优化，以确保模型能够准确反映实际管网的水力状态。同时，要考虑数据的不确定性和噪声影响，提高模型的鲁棒性和可靠性，从而实现从施工到运维阶段数据价值的有效转换，为市政排水工程的高效运维提供有力支持。

## 四、智能化运维应用体系

### （一）全生命周期资产管理

#### 1. 设施健康度评估模型

融合施工材料数据与运维监测指标对建立管网老化预测数学模型至关重要。施工材料数据包含管材材质、管径、壁厚等信息，这些数据影响着管网的初始性能和耐用性<sup>[9]</sup>。运维监测指标则涵盖了流量、压力、水质等方面，能实时反映管网的运行状态。通过对这些数据和指标的深入分析与融合，可以挖掘出它们与管网老化之间的潜在关系。例如，某些材料在特定水质和压力条件下可能更容易发生腐蚀和老化。利用数学模型可以量化这些关系，从而实现对管网老化的准确预测，为市政排水工程的运维管理提供科学依据，提前采取维护和修复措施，保障管网的正常运行。

#### 2. 预防性维护决策支持

基于历史维修数据与实时工况开发养护策略优化算法，对市政排水工程的预防性维护决策支持至关重要。历史维修数据包含以往故障类型、维修措施及时间等关键信息，可分析出设备或设施的薄弱环节及故障周期规律<sup>[10]</sup>。实时工况数据则反映当前运行状态，如水位、流量、水质等。通过整合这两类数据，利用先进的数据分析技术和算法模型，能够精准预测潜在故障发生的可能性和时间节点。进而制定出具有针对性的养护策略，合理安排维

护资源和时间,提高维护效率,降低维护成本,确保市政排水工程的稳定运行。

## (二) 智能化运行调控

### 1. 水力平衡动态优化

在智能化运维应用体系的智能化运行调控中,水力平衡动态优化至关重要。构建管网压力-流量耦合分析模型是基础,通过精确分析管网中压力与流量的关系,为后续调控提供数据支持。该模型可考虑多种复杂因素,如管道粗糙度、节点流量变化等。基于此模型,设计泵站联动控制策略。泵站作为排水系统的关键节点,其联动控制能有效调节水力平衡。通过合理设置泵站的启停时间、运行频率等参数,实现对管网中水流的动态优化调配,避免局部水力失衡导致的积水或排水不畅等问题,提高整个市政排水工程的运行效率和可靠性。

### 2. 暴雨积水模拟推演

在智能化运维应用体系中,智能化运行调控的暴雨积水模拟推演至关重要。它借助数字孪生技术,融合施工阶段地形数据与气象预报信息。通过对地形数据的精确分析,构建出与实际相符的排水系统模型。结合气象预报,可模拟不同降雨强度下的积水情况。这不仅能提前预测暴雨可能导致的积水区域,还能为排水设施的调控提供依据。在实际应用中,可根据模拟结果优化排水设施的运行策略,如调整泵站的排水功率、控制阀门的开闭等,从而提高市政排水工程在暴雨天气下的运行效率,实现智能化的运维管理,减少城市内涝的发生。

## (三) 应急事件智能处置

### 1. 渗漏定位溯源技术

在智能化运维应用体系的应急事件智能处置中,渗漏定位溯源技术至关重要。利用施工阶段获取的管线三维坐标与压力传感数据,能够建立起管网泄漏快速诊断模型。通过对三维坐标的精

确分析,可以确定管网的空間位置和布局,结合压力传感数据的动态变化,精准捕捉可能存在渗漏的区域。当压力出现异常波动时,借助模型可快速关联到对应的管线位置,从而实现渗漏的准确定位。同时,对历史数据的分析和学习,还能进一步优化模型,提高渗漏定位溯源的准确性和效率,为市政排水工程的运维提供有力保障。

### 2. 应急预案匹配机制

基于历史事故案例库开发应急方案智能推荐系统,可有效实现应急预案匹配。系统通过对大量历史案例的分析,提取关键特征和处置措施。利用机器学习算法对这些数据进行训练,使其能够识别当前应急事件的特征与历史案例的相似性。当新的应急事件发生时,系统迅速将事件特征与案例库进行比对,找出最匹配的案例及相应的应急预案。同时,系统还能根据当前事件的实际情况,对推荐的应急预案进行动态调整和优化,确保处置措施的有效性和针对性,提高应急事件的处置效率和成功率。

## 五、总结

数字孪生技术通过一系列关键技术路径实现了市政排水工程从施工到运维的无缝对接。其核心在于构建精准的数字模型,整合施工与运维阶段的数据,实现全生命周期数据贯通。这不仅提高了工程效率,更重要的是提升了市政排水系统的韧性。在面对复杂的环境变化和突发情况时,系统能够更快速、准确地做出响应。同时,随着人工智能与大模型技术的不断发展,其在设施智能诊断领域的应用具有广阔前景。未来有望进一步提升数字孪生模型的智能分析能力,为市政排水工程的长期稳定运行提供更强大的技术支持。

## 参考文献

- [1] 许志华. 数字孪生驱动的冲击桥智能运维方法研究 [D]. 河北科技大学, 2023.
- [2] 张辉辉. 面向智能运维的行车数字孪生系统数据驱动方法研究 [D]. 东华大学, 2023.
- [3] 蒋安桐. 基于数字孪生技术的轮辐式索桁架运维安全智能预测方法 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [4] 苏东鹏. 风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究 [D]. 长安大学, 2023.
- [5] 严张会. 基于数字孪生的船用智能胎架设计与运维方法研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.
- [6] 马俊松. 建筑电气智能化弱电工程施工技术及质量管理研究 [J]. 模型世界, 2024(9): 87-89.
- [7] 王乃洲. 数字孪生技术在广电运维管理中的应用研究 [J]. 广播电视网络, 2023, 30(5): 35-37.
- [8] 吴文豪, 陈国兵, 杨自春. 数字孪生技术在船舶装备运维中的应用及挑战 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 139-144.
- [9] 王思铭. 实测运维数字孪生系统在钻井船上的应用 [J]. 无线互联科技, 2022, 19(11): 85-88.
- [10] 李婷婷, 刘锐, 常青, 等. 浅析基于数字孪生技术的智慧医院后勤运维场景应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(2): 105-110.