

基于数字化孪生的 BIM 技术为市政道路与管道协同设计赋能

张明敏¹, 王 爽²

(1. 新疆交通职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 北京跨世纪软件技术有限公司, 北京 100080)

摘 要 传统市政道路与管道协同设计受限于二维模式的表达维度局限、数据割裂及全生命周期管理断链等问题, 导致设计冲突频发、施工返工率高、运维数据脱节。基于此, 本文提出基于数字化孪生与 BIM 技术的协同设计框架, 通过“数据层—模型层—应用层”三层架构整合多源异构数据, 构建全要素参数化模型, 并融合 AI 算法与动态模拟技术实现智能决策优化, 从而减少设计冲突、降低施工返工率, 并延长基础设施生命周期, 以期智慧城市建设提供可参考的技术路径。

关键词 数字化孪生; BIM 技术; 市政工程协同设计; 全生命周期管理

中图分类号: TP3; U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.026

0 引言

2023 年 9 月, 交通运输部印发《关于推进公路数字化转型 加快智慧公路建设发展的意见》(以下简称《意见》), 明确提出以数字技术为核心引擎, 推动公路全要素、全链条的智能化升级。这一政策是应对公路行业效率提升、服务优化和可持续发展挑战的必然选择。基于数字化孪生的 BIM 技术为市政道路与管道协同设计赋能, 为市政道路与管道建设提供了契合智慧公路建设的技术支持。

1 传统市政道路与管道协同设计二维设计模式的不足

1.1 空间表达维度局限, 竖向协同能力缺失

二维设计模式以平面投影为核心, 难以精准表达道路与管线的三维空间关系。道路纵断面标高、管线埋深、交叉点竖向避让等关键信息仅通过文字标注或局部剖面图示意, 缺乏全局立体可视化呈现。尤其在复杂地形或密集管网区域, 管线与道路结构层(如路基、桥梁基础)的竖向冲突无法通过平面图纸充分暴露, 导致设计阶段遗留大量隐蔽碰撞风险^[1]。

1.2 数据割裂与协同低效, 动态调整能力不足

在传统设计模式下, 道路与管线专业采用分离的图纸体系与数据标准, 形成“信息孤岛”。道路设计以横纵断面为核心, 管线设计则依赖平面坐标与属性表单, 两者缺乏统一的数据关联机制。在协同设计过

程中, 任一专业的局部修改无法实时传递至其他专业图纸, 需依赖人工比对与手动更新, 效率低下且易遗漏关键信息。

1.3 全生命周期管理断链, 动态反馈机制缺位

二维图纸作为静态设计成果, 无法承载道路与管线的全生命周期信息。施工过程中的设计变更与现场调整信息往往以纸质文档或孤立电子文件留存, 无法与原始设计模型关联, 造成“数据断链”。运维阶段更是缺乏对设计数据的追溯能力, 管线的老化状态、维修记录无法与原始设计条件形成闭环反馈, 制约基础设施的预防性维护与智能化升级^[2]。

2 BIM 技术框架与核心方法

2.1 技术框架设计

如图 1 所示, BIM 技术在市政道路与管道协同设计中的技术框架以“数据驱动、模型融合、智能协同”为核心理念, 构建“三层阶段一体化”体系。

2.1.1 数据层

数据层作为基础支撑, 整合道路工程的地理信息、管线属性参数、施工实时数据及运维历史记录等多元信息。通过建立统一编码规则与数据交换格式, 打破传统设计中的数据孤岛^[3]。

2.1.2 模型层

模型层以 BIM 软件为核心工具, 构建涵盖道路、管线、附属设施的三维参数化模型。道路模型通过横

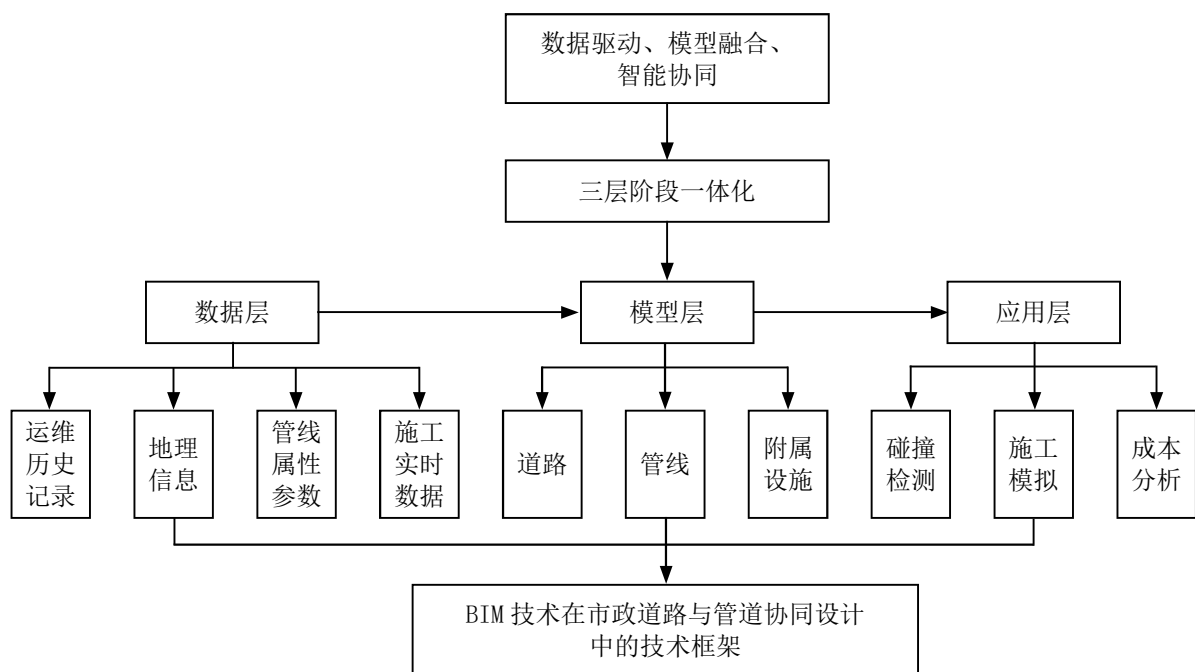


图 1 BIM 技术“三层阶段一体化”技术框架

纵断面参数化设计，动态关联路基、路面结构层与边坡几何参数；管线模型基于流体力学原理与工程规范，自动生成坡度、埋深及交叉节点三维避让方案。

2.1.3 应用层

应用层集成碰撞检测、施工模拟、成本分析等功能模块，依托 AI 算法与云计算实现智能决策。基于 BIM 模型的自动碰撞检测工具，可快速识别道路结构与管线的空间冲突；施工进度模拟模块结合 4D 时间轴，优化机械调度与工序衔接；能耗分析引擎则评估管网的运行效率与全生命周期碳排放。

2.2 核心方法创新

2.2.1 全要素参数化建模方法

采用“自顶向下”的建模逻辑，以道路线形为基准，通过参数化驱动管线布局。例如：定义道路纵坡为全局变量，重力流管线的坡度自动关联道路标高变化，非重力管线则通过最小净距约束动态调整水平位置。模型参数与设计规范库绑定，确保方案合规性。

2.2.2 动态模拟与 AI 优化算法

以管线避让为例，AI 算法基于冲突区域的空间拓扑关系，生成管线绕行路径的帕累托最优解集，综合评估施工成本、运维便捷性等指标。同时，结合数字孪生实时数据，动态修正模型预测偏差，提升设计方案的鲁棒性。

2.2.3 多专业协同机制

建立“一模到底”的协同规则，通过 IFC 标准实

现道路、管线、景观等专业模型的语义互操作。设计变更触发自动校验机制，确保各专业模型的几何与属性一致性。协同平台内置冲突预警与责任矩阵，明确专业分工与数据权限，降低沟通成本。

3 基于数字化孪生的 BIM 技术市政道路与管道协同设计应用路径与实践案例

3.1 全要素数据整合与可视化协同

在技术层面，依托 BIMe 等国产化平台，建立统一数据标准与编码规则，将道路几何参数、管线属性、地质勘察数据及施工实时信息集成至云端数据库，通过语义互操作实现多源异构数据的动态关联。在可视化协同层面，以三维数字孪生模型为载体，将道路与管线的空间关系、设计参数及业务数据分层叠加至 GIS 底图，形成“规划—设计—施工”全链条可视化管理界面。

举例而言，在广西某灌区项目中，平台通过 BIM+GIS 融合，将 54 万亩灌区的道路网络与输水管线三维模型与卫星影像叠加，并钻取至局部标段实时监控管道焊接合格率、路基压实度等微观指标；同时，系统内置动态校验规则，自动标记坡度偏差超限区域并生成优化建议，避免传统设计中因人工计算疏漏导致的施工返工^[4]。

3.2 模型精细化管理与动态映射

市政工程模型需支持从设计到运维的全生命周期迭代更新。新版 BIMe 平台通过“一模到底”机制，实

现模型数据的精细化解析与动态映射，为多阶段协同提供统一数据底座。

3.2.1 参数化建模与精细化解析

在模型创建阶段，平台采用“骨架驱动”的参数化建模方法，将道路与管线的关键参数定义为全局驱动变量，通过逻辑关系绑定实现联动设计。道路横断面模板中定义路基宽度、边坡坡率等参数，管线模型则依据《城市工程管线综合规划规范》自动生成最小覆土深度、水平净距等约束条件。模型解析阶段，平台内置语义分割引擎，将BIM模型构件与工程属性深度绑定，并按照IFC标准生成结构化数据包^[5]。

3.2.2 动态映射与多阶段协同

在施工阶段，平台通过GNSS定位仪、智能全站仪

等物联网设备（表1）实时采集现场数据，并与设计模型的几何属性（如检查井坐标）、工程属性（如管道材质、防渗等级）进行动态比对。通过多源数据融合（点云扫描、传感器监测、人工巡检），平台实现“物理实体—虚拟模型—运维需求”的全周期映射，支持设计、施工、运维多阶段协同，减少返工并提升工程精度（见表1）。

3.2.3 运维数据集成与模型活化

运维阶段，平台通过数字孪生引擎整合BIM模型与IoT实时监测数据，实现模型从“静态设计载体”向“动态运维工具”的转化。

3.3 动态模拟与智能决策优化

动态模拟与智能决策优化的开展需以“数据—模型—算法—反馈”四维协同为技术主线，构建从场景

表 1 施工阶段动态映射方法与多阶段协同技术

BIM 构件类型	关键属性字段	数据类型	属性来源	IFC 实体类型
管道 (PipeSegment)	材质	字符串 (ENUM)	设计规范 (如 PE100、球墨铸铁)	IfcPipeSegment
	施工工艺	字符串 (ENUM)	施工方案 (如明挖法、顶管法)	IfcConstructionMethod
	运维要求	数值 + 单位	运维手册 (如检测周期: 2 年 / 次; 最大承压: 1.6 MPa)	IfcPropertySet
检查井 (Manhole)	井盖材质	字符串 (ENUM)	材料库 (如铸铁、复合材料)	IfcManhole
	防渗等级	数值 (等级)	《地下工程防水技术规范》(GB 50108)	IfcPermeabilityMeasure
	定位坐标	三维坐标 (X, Y, Z)	BIM 模型几何中心点	

建模到自主决策的完整闭环。其核心实施路径可概括为以下五步：第一步，全要素数据集成与标准化，通过BIM+GIS融合技术整合道路线形、管线参数、地质条件、施工计划及历史工程数据库；第二步，多粒度场景建模，基于BIM参数化模型定义道路与管线的几何约束及施工逻辑规则；第三步，算法驱动动态推演，引入AI优化算法与物理引擎，针对工期、成本、质量、安全等多目标进行并行模拟；第四步，实时反馈与闭环优化，依托物联网设备采集施工进度、设备状态及环境数据，实现“模拟—实施—修正”的自主迭代；第五步，跨平台协同决策支持，基于国产化BIM协同平台构建可视化驾驶舱，将模拟结果转化为可交互的进度热力图、风险概率云图及资源消耗曲线。

4 结束语

基于数字化孪生的BIM技术为市政道路与管道协同设计注入革新动力，通过三维参数化建模与多源数据融合，有效破解传统二维模式的空间表达局限与协

同低效难题。其“数据—模型—应用”架构贯通设计、施工与运维全生命周期，推动工程管理向智能化、动态化升级，使智慧城市基础设施建设更加标准化。未来需深化AI算法与工程场景的融合创新，赋能新型城镇化高质量发展。

参考文献：

[1] 姬宏奎,田蒙.长距离输水管道智能建模系统研究与应用[J].水利技术监督,2025(04):54-56,78.

[2] 宋云柯.基于BIM技术的市政工程总承包项目施工研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(07):193-195.

[3] 高帷峻.BIM技术在市政管线数字化施工中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(02):28-30.

[4] 徐蕾蕾.基于BIM技术的城市排水管道设计与施工质量控制研究[J].工程建设与设计,2025(04):88-90.

[5] 田战锋.BIM技术在给排水管道和电缆桥架施工中的应用[J].人民黄河,2023,45(S1):160,162.