

基于数字孪生的高速公路基础设施全生命周期管理研究

于子涵

山东高速威海发展有限公司 山东 威海 264200

摘 要：本文聚焦基于数字孪生的高速公路基础设施全生命周期管理。先阐述全生命周期管理概述，接着从框架设计、物理实体与虚拟模型构建、数据采集融合等方面构建数字孪生模型。随后探讨其在规划、设计、建设、运营、维护各阶段的管理应用。最后分析该技术带来的经济效益、社会效益与环境效益，为高速公路基础设施智能化管理提供理论支撑与实践参考。

关键词：数字孪生；高速公路基础设施；全生命周期管理

1 高速公路基础设施全生命周期管理概述

高速公路基础设施全生命周期管理是贯穿规划、设计、建设、运营、维护至报废回收的系统性管理模式，核心在于实现各阶段协同联动与全流程高效管控。该模式打破传统分段管理导致的信息割裂问题，通过整合各阶段数据资源与管理需求，构建闭环管理体系。在管理过程中，需统筹考虑基础设施功能性、安全性、经济性与可持续性，针对不同阶段特点制定差异化管理策略。规划阶段聚焦布局合理性与需求匹配度，设计阶段注重技术可行性与方案优化，建设阶段强化质量与进度管控，运营阶段侧重通行效率与安全保障，维护阶段突出预防性养护与故障处置^[1]。随着数字化技术发展，全生命周期管理已从传统经验驱动转向数据驱动，通过引入先进技术手段实现管理精准化、智能化，为高速公路基础设施长期稳定运行提供全方位支撑。

2 高速公路基础设施数字孪生模型构建

2.1 模型构建框架设计

高速公路基础设施数字孪生模型构建框架设计需遵循系统性、兼容性与扩展性原则，构建“物理实体-数据链路-虚拟模型-应用服务”四层架构体系。物理实体层明确需建模的基础设施范围，涵盖道路、桥梁、隧道、立交设施等核心要素，界定各要素属性与关联关系。数据链路层设计多源数据传输与处理通道，规划数据采集、传输、存储、处理的标准流程，保障数据实时性与准确性。虚拟模型层制定多尺度、多精度建模规范，明确不同阶段模型精度要求与建模方法，实现物理实体的精准数字化映射。应用服务层搭建模型应用接口，对接全生命周期各阶段管理需求，提供数据查询、模拟分析、决策支持等功能。

2.2 物理实体建模

物理实体建模是数字孪生模型构建的基础环节，需

基于高速公路基础设施实际特征开展精细化建模工作。建模前需开展全面实地勘测，采用激光扫描、无人机航拍、地质勘察等技术手段，获取道路线形、路面结构、桥梁桩基、隧道衬砌等核心结构参数，同时记录交通标志、护栏、照明等附属设施的位置与属性信息。建模过程中，按照“分要素、分层次”原则，先完成道路、桥梁等主体结构的几何建模，精确还原实体的尺寸、形状与空间位置关系；再进行物理属性建模，录入材料强度、承载能力、使用寿命等关键参数。针对桥梁、隧道等复杂结构，需建立力学特性模型，反映结构在荷载作用下的变形与受力规律。

2.3 虚拟模型构建

虚拟模型构建是实现物理实体数字化映射的核心步骤，需在物理实体建模基础上，通过数字化技术构建具备可视化、可交互、可分析功能的虚拟模型。采用BIM、GIS等技术融合几何模型与地理空间信息，构建三维可视化虚拟场景，实现高速公路基础设施全范围直观呈现。针对不同管理需求，构建多精度虚拟模型，规划设计阶段采用高精度模型支撑方案论证，运营维护阶段采用轻量化模型满足实时监控需求。在模型中嵌入传感器数据接口，实现物理实体状态数据与虚拟模型的实时同步，使虚拟模型能够动态反映物理实体的运行状态。同时，开发模型交互功能，支持管理人员通过缩放、旋转、剖切等操作查看模型细节，通过点击模型要素查询属性信息与历史数据。

2.4 数据采集与融合

数据采集与融合是保障数字孪生模型有效性的关键支撑，需构建多源数据采集体系并实现数据高效融合处理。数据采集采用“固定监测+移动采集+人工录入”相结合的方式，固定监测通过部署路面传感器、结构健康监测设备、交通流量检测器等获取实时运行数据；移

动采集通过无人机巡检、检测车探测等获取路面病害、结构损伤等动态数据；人工录入补充设计图纸、施工记录、养护档案等静态数据^[2]。采集数据类型涵盖几何数据、物理数据、运行数据、管理数据等，统一采用标准化格式存储。数据融合过程中，先通过数据清洗剔除异常值、补全缺失数据，再采用数据关联、数据融合算法实现多源数据的整合。利用大数据分析技术挖掘数据间的关联关系，建立数据与模型要素的映射关系，实现数据对虚拟模型的驱动。

3 基于数字孪生的高速公路基础设施全生命周期各阶段管理应用

3.1 规划阶段管理应用

规划阶段引入数字孪生技术可显著提升规划方案的科学性与可行性。通过整合区域交通流量数据、地形地貌数据、经济发展数据等多源信息，在虚拟模型中构建规划区域交通场景，模拟不同规划方案下的交通运行状态。利用虚拟仿真技术分析规划路线的通行能力、车辆绕行距离、交通拥堵点分布等关键指标，对比不同路线方案的技术经济性。针对规划路线穿越的复杂地质区域，通过虚拟模型模拟地质条件对工程建设的影响，提前识别滑坡、泥石流等地质风险，优化路线走向与工程防护方案。在虚拟模型中开展公众参与调研，通过可视化展示规划方案，直观呈现规划项目对周边环境、居民生活的影响，收集公众意见并融入方案优化过程。利用虚拟模型开展投资估算与效益预测，基于模型中的工程数量与技术参数，精准计算建设成本，结合交通流量预测数据分析项目运营收益，为规划决策提供数据支撑。

3.2 设计阶段管理应用

设计阶段数字孪生模型可实现设计方案的精细化优化与协同设计。基于虚拟模型开展三维协同设计，设计人员通过模型实时共享设计成果，实现道路、桥梁、隧道等专业的同步设计与碰撞检测，及时发现并解决管线冲突、结构干涉等设计问题，减少设计变更。在模型中嵌入设计规范与标准，通过参数化设计工具确保设计成果符合技术要求，自动校验结构尺寸、材料选型等关键参数的合理性。针对桥梁、隧道等复杂结构，利用虚拟模型开展结构力学仿真分析，模拟不同荷载工况下的结构受力情况，优化结构设计方案，提升结构安全性与经济性。同时，将设计模型与成本估算模型关联，设计过程中实时计算工程成本，根据成本变化调整设计方案，实现设计与造价的协同管控。设计完成后，将设计模型与数据同步至后续建设阶段，为施工交底与施工指导提供数字化依据，减少设计与施工之间的信息偏差。

3.3 建设阶段管理应用

建设阶段数字孪生模型可实现施工过程的精准管控与协同管理。将设计模型导入施工管理平台，生成施工进度计划与工序安排，通过虚拟模型可视化展示施工流程，指导现场施工人员规范作业。在施工过程中，通过施工现场部署的传感器、监控设备实时采集施工数据，同步至虚拟模型，实现施工进度、质量、安全等状态的实时监控。利用模型开展施工进度模拟，对比实际进度与计划进度的偏差，分析偏差原因并调整施工方案，确保工程按期完工。针对混凝土浇筑、桥梁吊装等关键工序，通过虚拟模型开展施工模拟，优化施工工艺与人员设备配置，提升施工效率。质量管控方面，通过模型对比施工成果与设计要求，利用图像识别技术检测路面平整度、结构尺寸等指标，及时发现质量问题并督促整改。安全管理方面，在虚拟模型中标识危险作业区域，设置电子围栏，当人员设备进入危险区域时自动预警，同时模拟施工风险场景，开展安全培训，提升施工安全管理水平。

3.4 运营阶段管理应用

运营阶段数字孪生模型可实现高速公路通行效率与安全的智能化管控。通过虚拟模型整合交通流量、车速、天气、事故等实时数据，构建智能交通管控系统，实时监测路段通行状态。当检测到交通拥堵时，通过模型模拟不同疏导方案的效果，自动生成最优疏导策略，通过可变车道、交通诱导屏等设施引导车辆通行，提升通行效率^[3]。针对交通事故，利用模型快速定位事故位置，模拟事故救援路线，协调救援车辆与人员调度，缩短事故处置时间。建立驾驶员行为分析模型，通过监控数据识别超速、疲劳驾驶等危险行为，及时发出预警信息。同时，利用虚拟模型开展收费系统智能化管理，通过车牌识别、ETC数据与模型关联，实现收费数据实时核对与异常交易监测，提升收费管理效率。另外，基于模型开展运营数据分析，挖掘交通流量变化规律、路段通行瓶颈等信息，为运营策略优化、养护计划制定提供数据支撑，提升运营管理的精细化水平。

3.5 维护阶段管理应用

维护阶段数字孪生模型可推动高速公路养护从“事后修复”向“预防性养护”转变。通过虚拟模型整合基础设施结构健康监测数据、养护历史记录、环境监测数据等，建立设施性能评估模型，实时分析路面、桥梁、隧道等结构的性能衰减趋势。针对路面裂缝、桥梁支座老化等常见病害，利用模型模拟病害发展过程，预测病害对结构安全的影响，提前制定预防性养护方案。养护

计划制定过程中,通过模型模拟不同养护方案的实施效果与成本,选择最优养护方案。养护施工时,将养护任务与虚拟模型关联,明确养护范围、技术要求与施工流程,指导施工人员规范作业。养护完成后,在模型中更新养护记录与设施性能数据,形成养护闭环管理。针对突发故障,利用模型快速定位故障位置与原因,模拟故障处置流程,制定应急抢修方案,调配养护设备与材料,缩短故障修复时间,保障高速公路连续稳定运行。

4 数字孪生在高速公路基础设施全生命周期管理中的效益分析

4.1 经济效益

数字孪生技术在高速公路基础设施全生命周期管理中的应用可产生显著经济效益。规划设计阶段,通过虚拟仿真优化方案,减少设计变更与返工成本,据统计可降低设计阶段成本5%-10%;精准的投资估算与效益预测可避免盲目投资,提升资金使用效率。建设阶段,通过施工进度与质量的精准管控,缩短工期10%-15%,减少人工与设备闲置成本,同时降低质量返工成本。运营阶段,智能化交通管控可提升通行效率20%以上,减少车辆燃油消耗与通行时间成本,同时通过智能收费管理降低运营人力成本。维护阶段,预防性养护可延长基础设施使用寿命15%-20%,减少大修成本,据测算可降低年度养护成本20%-30%;突发故障的快速处置可减少道路封闭时间,降低因交通中断造成的经济损失。

4.2 社会效益

数字孪生技术的应用为高速公路基础设施管理带来良好社会效益。安全保障方面,通过实时监测与风险预警,可降低交通事故发生率30%以上,尤其是针对桥梁、隧道等危险路段的精准管控,能有效减少重特大事故发生;交通事故的快速处置可缩短救援时间,提升伤员救治成功率,保障人民生命财产安全。出行服务方面,智能化交通诱导与通行管控可显著减少交通拥堵,缩短群众出行时间,提升出行体验;通过模型整合的路况信息可实时推送至导航软件,为群众提供精准出行指引。行业发展方面,数字化管理模式推动高速公路行业从传统管理向智能化管理转型,提升行业管理水平;虚拟建模与仿真技术的应用培养了一批复合型技术人才,促进相关产业技术升级。公众参与方面,规划阶段的可视化公

众调研增强了项目透明度,提升公众参与度,减少项目建设与运营过程中的矛盾纠纷,促进社会和谐稳定。

4.3 环境效益

数字孪生技术在高速公路管理中的应用可有效提升环境效益,助力绿色交通发展。规划设计阶段,通过虚拟仿真优化路线走向,避开生态敏感区域,减少对植被、水体等生态环境的破坏;优化桥梁、隧道等工程设计,减少土方开挖量,降低对地形地貌的扰动。建设阶段,通过精准的施工组织与材料管控,减少施工废料产生,同时利用模型模拟施工扬尘、噪声扩散范围,制定针对性防控措施,降低施工对周边环境的影响;优化施工设备调度,减少设备怠速运行时间,降低燃油消耗与废气排放。运营阶段,智能化交通管控减少车辆怠速与急加速,降低机动车尾气排放,据测算可使路段尾气排放量降低15%-20%;通过模型分析优化照明、通风等设施运行方案,采用智能调控技术减少能源消耗^[4]。维护阶段,预防性养护减少养护施工频率与范围,降低养护过程中的材料消耗与环境扰动;养护废料的分类管理与回收利用可提升资源利用率,减少固体废弃物污染,实现高速公路基础设施全生命周期的绿色发展。

结束语

基于数字孪生的高速公路基础设施全生命周期管理,实现了从规划到报废回收各阶段的高效协同与精准管控。其在经济效益上降低成本、提升回报率,社会效益上保障安全、改善出行,环境效益上推动绿色发展。未来,随着技术不断进步,数字孪生将在高速公路管理中发挥更大作用,助力行业迈向更高水平的智能化与可持续发展。

参考文献

- [1]李华,张伟,王明.数字孪生技术在交通基础设施管理中的应用探索[J].交通运输工程学报,2022,22(3):123-132.
- [2]左明.高速公路项目全过程成本控制与管理措施探究[J].大陆桥视野,2024,(02):128-130.
- [3]姜博.探讨高速公路建设项目全过程成本控制与管理措施[J].大众投资指南,2023,(23):161-163.
- [4]刘涛,赵磊,陈静.基于数字孪生的智能交通系统构建框架研究[J].智能交通系统,2023,19(1):45-53.