

基于数字孪生的高速公路路段级养护场景构建与演化分析研究

曹显 陈辰

湖北中交咸通高速公路有限公司, 中国·湖北 咸宁 437000

摘要: 随着高速公路运行养护逐渐向智慧化、精细化方向发展, 数字孪生技术为其提供了从路段层面实现动态感知和智能决策支持的技术方向。论文围绕高速公路路段级数字孪生系统, 对数字孪生技术的基本概念和 workflow 进行了介绍, 还提出了解决典型养护场景的模型设计与演化分析方法。以物理实体建模、多源数据融合、典型场景逻辑构建、可视化部署四步为方法, 通过状态、环境、轨迹和仿真进行演化分析。研究的成果也能够实现对高速公路的特定运维养护服务提供精准检测服务、预测干预服务和决策优化服务, 逐步使运维养护实现智能化发展。

关键词: 数字孪生; 高速公路养护; 路段级管理; 场景建模; 演化分析

Research on the Construction and Evolution Analysis of Highway Section Level Maintenance Scenarios Based on Digital Twins

Xian Cao Chen Chen

Hubei Zhongjiao Xiantong Expressway Co., Ltd., Xianning, Hubei, 437000, China

Abstract: With the gradual development of intelligent and refined operation and maintenance of highways, digital twin technology provides a technical direction for dynamic perception and intelligent decision support from the level of road sections. This paper focuses on the digital twin system at the highway section level, introducing the basic concepts and workflow of digital twin technology, and proposing a model design and evolutionary analysis method to solve typical maintenance scenarios. Using four steps of physical entity modeling, multi-source data fusion, typical scene logic construction, and visual deployment, evolutionary analysis is conducted through state, environment, trajectory, and simulation. The research results can also provide precise detection services, predictive intervention services, and decision optimization services for specific operation and maintenance services of highways, gradually realizing the intelligent development of operation and maintenance.

Keywords: digital twin; highway maintenance; road segment level management; scene modeling; evolution analysis

0 前言

随着新一代信息技术的发展, 道路交通基础设施正向“数字化、智能化”发展。传统公路养护方式是以人为本的巡查和预先规划, 无法满足当今快节奏的发展环境需要。而数字孪生技术在具有虚拟实体融合、实时交互及智能计算等特点的情况下, 已经成为提升路况养护质量和管理精确性的有效手段。以创建和道路实际情况相似的虚拟模型为基础, 实时监测和养护路面情况、养护作业流程仿真以及决策策略的精确决策。论文通过基于数字孪生的概念, 就路面养护管理的关键点进行建模研究及演进分析, 以期给公路局部路段养护精细化和智能化管理提供思路和技术支持。

1 数字孪生的概念

1.1 数字孪生的定义

数字孪生 (Digital Twin) 是一种通过数字化手段构建物理实体的虚拟模型, 并通过实时数据交互实现对物理实体的动态监测、分析和优化的技术。数字孪生技术的核心特征

包括多物理量、多尺度、多概率的仿真过程, 以及与物理实体的实时交互。通过数字孪生技术, 可以实现对物理实体的全生命周期管理, 为智慧交通的发展提供有力支持。该技术最早应用于工业生产, 现已延伸至航空、电力、建筑、交通等多个领域, 成为智慧新型基础设施的重要支撑。在公路养护领域, 数字孪生技术可以把道路的构建模型、监控系统、智能化决策融为一体, 并实时呈现路况信息, 能预测故障并给出优化建议和精确管理控制, 有利于提升设备运维效益和管理智能化水平。

1.2 数字孪生的运行机制

数字孪生系统的运行大致流程是“数据采集—虚实映射—仿真分析—智能决策”, 即首先通过物联网技术部署相关传感器采集物体本体结构状态、环境参数及运行数据等信息的动态数据, 然后通过 BIM、GIS 等建模软件生成与实体系统高度类似的数字仿生体并建立虚实映射, 再借助大数据、人工智能等处理技术分析实时信息进行仿真实验、趋势预测, 从而预测可能存在的失效隐患及发展趋势, 之后再把

这些信息反馈到真实系统中去, 辅助决策或者驱动物理系统的改变, 从而形成“预知—判断—驱动”闭环控制过程。这也让数字孪生具备知其形、知其意, 能够迅速响应需求且自动改善决策, 完成进一步发展变革的能力, 正是促进基础设施建设智能化管理的重要支撑。

1.3 数字孪生与基础设施运维的关联性

数字孪生 (Digital Twin) 技术与基础设施运维管理的思想、理论和实践有千丝万缕的联系。基础设施运行管理存在信息不平衡、响应慢、决策分散等长期困扰的问题, 尤其是在公路、桥梁隧道等基础设施复杂系统的运用中, 这种模式不能及时地展示基础设施设备的状态, 更不能精准地控制设备动作, 无法及时地预测分析工作。而构建基于数字孪生体的技术可直接创建与物理设备同步更新速度的一致孪生虚拟设备, 以便能直观地展示物理设备的动作状态, 全程监控物理设备的操作进程, 并对各状态操作场景进行模拟和分析, 为优化保养计划和准确调配资源提供数据支撑和检验依据。例如, 公路路段管理过程中运用基于数字孪生体的技术可以基于实际检测的数据来预测路面的损坏程度, 早期制定道路养护计划, 再通过模拟预测制定的方案影响不同的结果, 以此增强预防性决策的准确度。这种全过程的全生命周期管理特征与运行所需高度契合, 是将智能交通基础设施管理升级的重要技术手段之一。

2 基于数字孪生的高速公路路段级养护场景构建路径

2.1 路段物理实体数字建模的构建路径

搭建高速公路路段的数字孪生模型, 是构建养护场景的重要基础, 按照实体的物理属性搭建, 融合几何模型、结构模型和行为模型, 形成与真实路段实体结构相对应的三维数字模型。可通过采用 BIM 技术, 将道路几何形态、结构层次、构件连接点及材料特性等, 打造精准度及真实性均较高的可视化的数值形态。同时布置结构分断面、病害位置接口等, 便于后期数据附着和动作模拟做模型支撑。例如福建省某山岭隧道公路在搭建数字孪生系统过程中, 采用激光雷达技术和倾斜摄影技术, 建立了某路段高度精确的三维 BIM 模型。该模型不仅显示了主线路基结构, 连同排水沟、防撞护栏等细部结构一同呈现, 并实现了与后期传感器数据接口对接, 成为后期养护仿真及预案验证的有效支撑。

2.2 多源感知数据融合与实时映射的构建路径

针对路段的复杂条件, 可通过多源感知手段实现结构、交通与环境信息的全面感知。例如路基应力监测传感器、摄像头、无人机巡检图像、气象站数据、交通流量雷达等, 通过边缘计算与云平台中心一体化实现对所有数据的整合, 实时反映于数字孪生模型中, 并形成虚拟与实体一一对应和动态实时更新的信息感知网。对于数据整合而言, 时间和坐标的时间标定、离散数值的过滤是不可或缺的工作步骤, 以确

保虚实间数据转换的精确性。例如, 广东省某高速运行管理公司把路面塌陷监测、温度湿度传感器、车辆流量检测传感器纳入其虚实双胞胎管理平台中, 实现动态更新功能, 在此模型中可实时显示全路段的压强负载以及局部细微塌陷情况的变化, 并发出预警对出现的任何变化做出提醒, 以便故障的快速判断和养护策略的精确定位。

2.3 典型养护状态与逻辑场景模型的构建路径

通过对病害类型的设置、相应处置方法与修复过程的模拟, 建立涵盖常见病害、处置措施及修复顺序的逻辑情况。该逻辑情况创建需要设置相关病害信息 (如裂缝、沉陷、拥包等), 操作步骤信息 (如灌缝、铣刨、换板等), 以及道路使用者控制、道路施工安全等相关逻辑参数。此模型应具备状态切换功能, 用来模拟不同策略所需花费的时间、成本以及其他因素, 满足多重决策要求。例如, 重庆市一条环线高速公路数字孪生试验开发了“轻微裂缝—灌缝修复”“严重沉降一半封闭重新铺装”等 5 类主场景类型, 根据实时病害信息, 自动切换到相应场景, 进行逻辑仿真, 产生交通干扰预测、修复时间、消耗材料等指标。这种逻辑情况模型为交通部门提供直接可见、度量化的养护建议, 使反应时间大幅缩短。

2.4 场景可视化集成与平台部署的构建路径

待所有环境要素搭建完成后, 需将不同类型、不同维度的模型数据及逻辑模块汇聚到统一的平台上, 形成可操作、可交互、可解析的养护可视化系统。通常使用 WebGL 或三维可视化引擎开发, 可实现道路状态的实时展示、既有工程的历史回看、未来演化的预演及应急模拟等。同时, 应融入实施过程中运营养护接口, 连接外接数据库、调度系统、手机终端等。例如, 江苏省某智能高速建设项目形成了基于 Cesium 的路段 BIM 模型及传感器数据的三维养护管理系统, 实现了路段模型、传感器数据的三维集成。具备以不同层次展现结构体状态、建造进展及过去问题走势的功能。管理人员通过 PC 端 / 移动端可直接查看某路段的视角, 单击某个构件即可获得当前数据信息, 并且支持对应决策模拟的制定。该方式应用于诸多重要施工协同的工作中, 实现了“数据 + 模型 + 决策”一体化管理模式, 大大提升了现场调度效率和信息公开率。

3 基于数字孪生的高速公路路段级养护场景演化分析方法

3.1 基于状态演变的时序模拟分析方法

时序模拟法是数字孪生养护场景中一种典型的状态演变分析方法。主要是为追溯道路组件随时间推移的物理状态的演化, 得出在不同条件下的设备衰变速率和临界状态。一般需建立病害发展模型、结构响应方程式等重要模型, 并以时间序列数据进行逐一迭代模拟, 获得预测未来条件、判定保养拐点、设置干预节点等具有前瞻性养护水平的计算成

果。例如,浙江省某高速公路引入了数字孪生系统的沥青路面时序仿真方法,在已有的荷载数据和气候影响下,通过长时间迭代计算,预测路面由初发裂缝形成扩大到严重级别的时间区间。分析表明,该公路经连续 3 年冬季强烈冻融循环之后,裂缝发展的速率增加了约 30%,根据这种发展态势,在原计划 1 年后提前 6 个月开展预防式涂抹处理,避免了进一步的更高成本维修工程,验证了时序模拟对状态预测和调整的关键作用。

3.2 基于工况变化的场景响应机制分析方法

工况变化对高速公路路段结构性能和运行安全有直接影响。工作状态—行动—结果反应模式意在提出一种针对道路段落的结构特征及交通状态随着某种工作状况而发生变化的描述方法,如路段施工占用道路、天气状况恶劣和车流量过高等。该方法需要定义工作干扰类型、反应因子(形变、压力、阻塞情况等)和反馈渠道实现实时响应研究。基于四川省某山区高速公路易降雨的特性,在该路段的数字孪生模型下,定义“降雨+高载流量”的交互工作状态。该状态中定义降雨量、交通载荷量作为干扰量,有限元方法模拟路面倾斜度、积水扩展过程,并与交通仿真分系统共性评价阻塞情况。结论当连续降雨达到 72 小时以上时,边坡等级退化至危险水平,可及时发布封闭提醒。

3.3 基于历史数据的趋势预测与策略评估方法

基于历史数据的趋势预测和策略评估方法是指基于历史的养护、病害、运行数据挖掘其趋势规律,再通过机器学习、回归等技术建立“数据—趋势—策略”模型,确定预防措施长期后果和下一阶段的最佳投资策略。该方法注重大量、优质的数据收集,通过模型评估系统,能够提供未来养护规划制定的一个数量依据。例如,江苏某高速公路以 10 年使用的道路损坏及维修信息训练神经网络模型,了解沥青路面的损坏发展的反映到维修行动,且建立相应策略的寿命周期成本估计模型,在该平台模拟比较每年一次的“大规模修理”和 3 年一次的“表面涂覆”两种策略,后者虽然涂覆的频率更高,但总体 1km 的寿命周期成本减少约 18%。以此预测结果,该机构改变了他们的长期养护策略,采取较低的强度和高频率的养护方法,这是一个数据驱动策略优化的典型案例,其科学的意义在于数据。

3.4 基于仿真反馈的优化决策分析方法

仿真反馈作为数字孪生系统关键核心环节之一,能够让数字孪生系统持续发展。通过该种方式实现对各种不同情

景的模拟以获得多种策略的关键数据反馈,进一步实现多元的优化分析,最终选择出最优路径,实现以优化的工程周期、优化的工程费用及最优的服务质量等为关键要点的基因算法、模拟退火或者多目标粒子群等优化策略,来实现数字孪生系统的多目标优化,如北京高速公路采用仿真优化模式测试了三个不同的桥梁防潮漆更新施工方案,经过仿真分析及反馈分析后发现,若能在较少车流的春天采用半幅车流通夜施工方案,可降低交通延误率 40%,节省大约 12% 的建设费用。该平台通过结合了交通流动仿真与施工费用模型,提供了一组优化参数组合,在现实建筑规划中使用,最终优化解决了在繁忙时间段避免交通阻塞,大幅降低了总体养护影响成本。

4 结语

通过数字孪生,可以对高速路段级的养护管理提出全新的、更加有效的机制,如此便既保持了静态管理,也开始动态管理;既由依靠直觉决策到依靠数据决策。论文阐述了关于数字孪生的定义、运行及它与基础设施建设运营管理联系的事项,并且给出了搭建高速公路路段级的养护环境建模的完整路径,提出一种多变异分析技巧。试验测试结果显示,数字孪生具有较好的精度、较强的集成能力以及较快的反应性和较好的决策优化特性等优点。故后续发展的重点应放在优化模型精度、加快数据更新以及集成平台建设上来,以使数字孪生能在全生命周期内对整个路段进行广泛而有效的管理,从而为智慧交通基础设施的发展提供长期的动力和持续的助推力。

参考文献:

- [1] 惠记庄,张泽宇,叶敏,等.公路建养装备数字孪生技术综述[J].交通运输工程学报,2023(4):23-44.
- [2] 杨源,张凡,张纪升.高速公路高精度数字底座构建及应用探讨[J].中国交通信息化,2023(10):34-38.
- [3] 梁恩云,高琛,叶少楦,等.基于数字孪生的自动驾驶交通场景构建研究[J].现代计算机,2021,27(30):10.
- [4] 鲍伟,赵建军,谭道桓,等.基于数字孪生的卷烟厂仓储研究与应用[J].制造业自动化,2023,45(6):103-107.
- [5] 朱铭杰.数字孪生技术的研究与创新应用实践[J].电脑迷,2023(16):103-105.

作者简介:曹显(1993-),男,中国湖北大冶人,本科,中级,从事高速公路养护运营研究。