数字孪生技术在城市小型道路交通管控中的应用

马晓彪[1,2]
1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 311122
2. 雄安雄创数字技术有限公司，河北 雄安 070001
DOI: 10.61369/TACS.2026080025

摘　　要： 随着城市交通治理精细化、智能化需求不断提升，数字孪生技术的应用逐渐广泛，为解决小型道路通行难题带来更多新的可能。它凭借虚实映射、实时交互、模拟推演的特性，对小型道路交通运行状态进行全要素数字化映射，改变管控决策过程，解决了其中的感知滞后、过度依赖经验等问题。基于此，本文从数字孪生小型道路交通系统的核心运行逻辑入手，探讨数字孪生技术在日常信号优化、突发事件疏导、路网规划论证等场景的应用策略，而后针对策略落地过程中面临的挑战和解决路径，以供参考。

关 键 词： 数字孪生技术；城市小型道路；交通管控；应用策略

Application of Digital Twin Technology in Urban Small-Scale Road Traffic Control

Ma Xiaobiao[1,2]
1.PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122
2.Xiongan Xiongchuang Digital Technology Co., Ltd., Xiongan, Hebei 070001

Abstract: With the increasing demand for refined and intelligent urban traffic governance, the application of digital twin technology has become widespread, bringing new possibilities to address traffic challenges on small-scale roads. Leveraging its characteristics of virtual-real mapping, real-time interaction, and simulation deduction, this technology achieves full-element digital mapping of the traffic operation status on small-scale roads. It transforms the traffic control decision-making process and resolves issues such as perception lag and over-reliance on empirical experience. Based on this, this paper starts with the core operational logic of digital twin small-scale road traffic systems and explores application strategies in scenarios such as daily signal optimization, emergency incident guidance, and road network planning demonstration. Furthermore, it discusses the challenges encountered during the implementation of these strategies and proposes corresponding solutions for reference.

Keywords: digital twin technology; urban small-scale roads; traffic control; application strategies

引言

当前，城市主干路网的智慧化管控体系逐步成熟，为城市发展注入新活力，但在城市道路总里程中占据重要比例的小型道路仍是交通治理的薄弱环节。这些小型道路散落于社区、商圈、老旧街巷，承载着满足居民日常出行“最后一公里”通行需求的重要责任，却因空间资源有限、交通参与者构成复杂、管控资源投入不足等原因，长期处于“粗放式管理”状态，成为影响市民出行体验、制约城市交通发展的重要因素。近年来，数字孪生技术快速发展，为破解这一治理痛点问题提供了全新的技术支撑。以数字孪生技术为依托构建的城市小型道路交通管控系统，打通不同管控节点之间的数据壁垒，让管控决策从“经验判断”转向“数据驱动”，为提升小型道路交通管控水平提供了新的方向。

一、数字孪生小型道路交通系统的核心运行逻辑

数字孪生小型道路交通系统并非大型智慧交通平台的简单缩小版，而是针对小型道路的空间特征、运行规律，构建的轻量化、高适配性虚实联动体系，其核心运行逻辑可以拆解为四个层层递进的关键环节[1]。首先，是全域全要素的虚实映射环节。该系统的感知对象包括小型道路的机动车、非机动车、行人以及信号灯、路边停车泊位、路口渠化设施等，其感知范围覆盖所有交通参与要素、基础设施；需要依托多源感知设备将物理空间中的小型道路全要素信息进行数字化采集、标准化处理、动态建模，在数字空间构建出与物理道路一一对应的孪生副本，精准复现小型道路的物理特征与实时运行状态。其次，是毫秒级的实时同步环

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

节。数字孪生小型道路交通系统将数据处理下沉到道路现场，有效提升对实现物理世界交通状态变化的响应速度，使其达到毫秒级。毫秒级的信息同步更新，让管理者在虚拟空间中看到交通运行画面几乎完全与物理世界同步。再者，是多场景的仿真推演环节。系统可以基于完全同步的虚拟路网镜像、实时采集的交通流数据、历史同期的出行规律，对未来5分钟、15分钟、30分钟的交通状态变化趋势进行推演，为交通管理决策提供依据。最后，是闭环调控的反向执行环节[2]。形成交通管理决策之后，系统会向相关交通设施发出命令，控制其完成信号配时调整、限行管控等操作，并实时收集后续交通运行状态数据，进行数据分析，根据评估结果进一步优化管控参数。如此，就形成“感知－建模－推演－调控－复盘”的完整闭环[3]。

二、数字孪生在小型道路交通管控中的核心应用场景

（一）常态化智能管控

在日常交通常态化管控场景中，数字孪生技术展现出显著的应用优势。数字孪生系统具备可视化监测、全场景智能信号调控功能，可以针对小型道路交通运行特点进行精细化、动态化管控，为解决传统交通管控模式中的潮汐车流适配难题提供新方案。传统管理模式中，小型路口的交通管控采用固定时长的红绿灯配时方案，与小型道路的潮汐式车流之间存在较大矛盾，导致大量车辆拥堵在小区门口、支路。而搭载数字孪生管控系统的新模式，更加适配小型道路的潮汐式车流，能够从源头上改善交通运行状况。数字孪生管控系统会实时采集交通运行状态数据，分析每个车道的车辆等待时间、排队长度，根据分析结果预测车流变化趋势，推演不同配时方案下的通行效果，而后自动筛选出最为适配的配时策略，生成配时命令，令下达给信号灯。相比于按照预设的固定时长切换信号灯的交通管控方式，这种动态化管控方式，大幅度减少了潮汐车流高峰期的车辆怠速等待时间，有效解决了平峰时段的交通资源浪费问题[4-5]。在进行信号灯管控方式优化的同时，数字孪生系统还可以补齐小型道路人工巡查覆盖不足的短板。小型道路分布零散，而且包含一些空间布局复杂的街巷，如果仅依靠传统的小型道路交通管控模式，很难做到24小时不间断人工巡逻。巡逻覆盖不足的情况下，占道违停、非机动车逆行、行人随意横穿马路等违法行为时有发生，严重影响交通通行效率。而数字孪生系统的全要素实时监测功能，能够为一线执勤人员发现各类交通违法行为、异常通行事件提供技术支撑。该系统可以自动识别相关信息，将其及时发送给一线执勤人员，为执勤人员了解交通状况、作出管理决策提供依据[6]。

（二）突发应急疏导

在突发交通事件的应急疏导场景中，数字孪生技术的应用优势同样显著，其仿真推演能力较为强大，能够帮助管理者在拥堵发生前就完成预判干预。依托全域实时感知网络，数字孪生系统可以在突发事件发生后的1分钟之内自动识别异常，快速在虚拟空间中还原事故现场的实景，同时调取周边3公里范围内所有路网的实时车流数据，通过仿真模型快速模拟拥堵在10分钟、20分钟、30分钟之后的扩散趋势，精准预判出哪些路段会最先出现排队、哪些路口会最先出现通行溢出。接下来，系统会基于推演结果自动生成一套完整的最优疏导方案[7]。相比于需要人工赶赴现场、人工研判态势再逐步调整管控措施的传统应急模式，这种前置化的干预模式将处置窗口从拥堵发生后提前到拥堵扩散前，有效避免了小事件引发长时长大范围拥堵的问题。比如，老旧街巷由于车辆抛锚占用而仅剩一个通行车道时，系统会快速预判出周边小区出入口、衔接主干路的路口即将出现车流溢出，而后提前调整衔接路口的信号灯配比，引导车辆到周边其他支路绕行，并将车流溢出预判情况同步到周边导航平台，引导车辆提前规划绕行路线，从源头上减少涌入事发路段的车流量。如此，能够大幅缩短突发交通事件后的拥堵消散时间，有效降低事件对整个片区通行秩序的影响，减少市民出行的时间成本[8]。

（三）路网规划优化

在路网规划优化场景中，数字孪生技术的应用，能够有效降低小型道路改造的试错成本。由于空间条件复杂、改造后实际通行效果难以提前预判等问题，以往针对老旧片区、新建社区周边的小型道路改造往往试错成本较高。传统的小型道路改造模式下，需要先落地改造，再根据实际通行反馈逐步调整方案。该流程导致小型道路改造周期长，对方案设计人员的经验依赖程度较高。如果方案设计存在疏漏，需要投入大量资金返工整改。而小型道路网规划优化融入数字孪生技术之后，则可以直接在与现实完全对应的虚拟路网副本上模拟改造方案，对增设停车位、拓宽路口、新增渠化设施、调整支路走向等多种改造措施的效果进行验证，而后筛选出最优改造方案。比如，针对学校周边的小型道路进行改造时，设计人员可以在数字孪生模型中模拟路边泊位位置调整、放学时段通行缺口拓宽、临时等候区增设等方案，分析不同方案对上下学高峰期车流排队长度、行人通行安全性的影响；对这些方案进行组合，找到与通行需求、空间条件、改造预算最为适配的组合方案。小型道路进行改造方案的验证迁移到数字空间之后，既避免了占用物理道路资源测试带来的交通影响，又缩短了改造的整体周期，还降低了返工成本。小型道路网规划优化改造通过数字孪生技术的应用，实现决策方式从“经验拍板”向“模拟论证”的转变，是保证科学性与经济性的重要途径。

三、当前落地面临的现实短板与优化路径

尽管数字孪生技术在小型道路交通管控中的应用价值较高，但在基层落地过程中仍然面临不少问题，导致其实际应用效果难以达到预期。整体而言，数字孪生系统的应用落地的现实短板主要体现在以下几个方面。首先，对街巷角落的感知覆盖存在不足。很多老旧街巷空间狭窄、周边建筑密集，而现有感知设备布设难度大、成本高，很难覆盖所有街巷角落。这导致部分盲区的交通要素数据无法被实时采集，数字孪生模型的虚实映射存在偏差，后续推演结果准确性不足，提供的调控方案适配性不高。其次，多源交通数据的融合难度较大。平台进行数据分析所需的路

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

口数据、共享单车运行数据、网约车轨迹数据、公交到站数据分属不同主体，但是不同部门之间的数据壁垒尚未完全打破，导致数字孪生模型的全域感知完整性不足。最后，很多时候，针对城市小型道路的交通管控系统是直接照搬大型数字孪生平台的算力架构，导致数字孪生系统部署和运行成本过高。较高的成本，让很多三、四线城市的基层交管部门望而却步。

针对这些现实痛点问题，数字孪生技术在城市小型道路交通管控的应用，需要走轻量化、低成本、协同化的发展路径。比如，探索“固定监测设备 + 移动感知终端”结合的低成本补盲方案，依托网格员、执勤民警的移动执法终端补充采集盲区数据，逐步实现全域感知覆盖；建立跨部门、跨主体的数据共享协同机制，搭建统一的小型道路交通数据共享交换平台，以打通交管、市政、互联网出行平台、公共交通运营企业之间的数据壁垒；大力研发适配小型道路场景的边缘计算轻量化模型，将大部分数据处理、仿真推演功能下沉到街巷现场的边缘节点中，避免所有数据回传云端处理带来的算力浪费，有效降低系统对云端带宽、运算能力的要求。

四、结语

城市交通治理的温度，最终要体现在居民日常出行的最后几百米街巷之中。城市交通发展要重视小型道路交通管控，通过引入数字孪生技术，将交通治理的重心逐步向末端微循环场景下沉，带给居民更好的出行体验。数字孪生技术具备虚实联动、智能推演等方面优势，以之为基础构建的小型道路交通管控系统能够更好地适配实际需求，推动小型道路交通管控实现从智能信号调控、突发应急疏导到路网规划优化的全方位优化。

参考文献

[1] 全国道路交通管理标准化技术委员会（SAC/TC 576）. 道路交通管控设施信息交互接口规范：GB/T 47002-2025[S]. 中国标准出版社 ,2025.

[2] 全国道路交通管理标准化技术委员会（SAC/TC 576）. 道路交通管控设施数字身份及认证通用规范：GB/T 46999-2025[S]. 中国标准出版社 ,2025.

[3] 林涵斌 . 在役道路改造或日常养护交通安全管控模式创新 [J]. 时代汽车 ,2026,(2):166-168.

[4] 揭宏博 , 刘钰 , 李恺 , 等 . 基于人工智能的云边协同城市交通管控系统 [J]. 软件 ,2025,46(12):23-31.

[5] 秦婧逸 . 节假日多车道高速公路枢纽互通密集区交通管控策略研究 [D]. 扬州大学 ,2025.

[6] 谢星 . 基于深度强化学习的全息快速路主动交通管控方法研究 [D]. 浙江师范大学 ,2025.

[7] 赵欣怡 . 城市合流车道交通流分析与交通管控手段研究 [D]. 重庆交通大学 ,2025.

[8] 甘杨阳 . 动态专用道设置下快速路分流区交通流协同管控研究 [D]. 合肥工业大学 ,2025.

[9] 薛璐璐 . 区域道路交通协同管控问题与对策分析——以京哈高速公路为例 [J]. 道路交通管理 ,2025,(4):58-61.

[10] 贺静 , 彭敏 , 王欢 . 高速公路典型事件场景下的交通协同管控逻辑研究 [J]. 公路 ,2025,70(4):345-349.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.