面向城市交通安全的数字孪生数据可视化与决策支持平台

宋浩杰

中交第一公路勘察设计研究院有限公司　陕西　西安　710000

摘　要：城市交通安全管理面临数据来源分散、态势感知滞后、决策支持不足等问题，数字孪生技术通过构建物理交通系统的虚拟映射，为交通安全管理提供了新的技术路径。本文在分析城市交通安全管理需求与数字孪生技术特点的基础上，从数据采集层、数据传输层、孪生建模层、可视化层和决策支持层等方面探讨了面向城市交通安全的数字孪生数据可视化与决策支持平台的架构设计，重点阐述了多源交通数据融合、交通场景数字孪生建模、交通安全态势可视化、事故风险预警和应急决策支持等关键功能，并剖析了数据质量、模型精度、实时性和标准化等主要挑战。研究认为，构建“数据采集—孪生建模—态势可视化—风险预警—决策支持”一体化的数字孪生平台，是提升城市交通安全管理智能化水平的有效途径。

关键词：城市交通安全；数字孪生；数据可视化；决策支持；态势感知

引言

城市交通安全是城市运行管理的重要内容，关系到人民群众生命财产安全和社会稳定。随着城市化进程加快和机动车保有量持续增长，城市交通系统日益复杂，交通安全管理面临新的挑战。传统交通安全管理主要依靠人工巡查、事后统计和被动响应，存在态势感知不全面、风险识别不及时、决策支持不充分等问题，难以适应现代城市交通安全管理的需要。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射，实现虚实之间的实时交互和动态同步，为城市交通安全管理提供了新的技术手段。数字孪生城市交通系统可以实时反映交通运行状态，模拟交通事件演化过程，支持交通安全态势的可视化展示和智能决策。数据可视化技术将复杂的交通数据转化为直观的图形和图像，帮助管理者快速掌握交通态势。决策支持技术基于数据分析和模型推演，为交通安全管理提供科学依据。

1 城市交通安全管理需求与数字孪生技术

1.1 城市交通安全管理的主要需求

城市交通安全管理具有多方面需求。态势感知方面，需要实时掌握城市交通运行状态，包括交通流量、车速、拥堵状况和事故信息等。风险识别方面，需要及时发现交通安全隐患和高风险路段，预防事故发生。事故预警方面，需要对可能发生的事故进行预测预警，提前采取防范措施。应急响应方面，需要在事故发生后快速响应，协调救援力量，疏导交通。决策支持方面，需要为交通管理决策提供数据支撑和方案评估。事后分析方面，需要对事故原因进行深入分析，总结规律，改进管理。这些需求对交通安全管理的实时性、准确性和科学性提出了更高要求。

1.2 数字孪生技术的基本内涵

数字孪生是指通过数字技术构建物理实体的虚拟映射，实现物理实体与虚拟模型之间的实时交互和动态同步。数字孪生具有实时性、交互性、预测性和可视化等特征。实时性表现为虚拟模型能够实时反映物理实体的状态变化。交互性表现为物理实体与虚拟模型之间可以双向交互，虚拟模型可以反馈控制物理实体。预测性表现为虚拟模型可以模拟物理实体的未来状态，支持预测和优化。可视化表现为虚拟模型可以直观展示物理实体的状态和变化[1]。数字孪生技术已在智能制造、智慧城市、航空航天等领域得到应用，为城市交通安全管理提供了新的技术路径。

1.3 数字孪生在城市交通安全中的应用价值

数字孪生技术在城市交通安全中具有重要应用价值。态势感知方面，数字孪生可以整合多源交通数据，构建城市交通的虚拟镜像，实现交通态势的全面感知。风险识别方面，数字孪生可以模拟交通场景，分析事故风险因素，识别高风险路段和时段。事故预警方面，数字孪生可以基于实时数据和预测模型，对可能发生的事故进行预警。应急响应方面，数字孪生可以模拟事故演化过程，评估不同处置方案的效果，辅助应急决策。决策支持方面，数字孪生可以支持交通组织优化、信号配时调整和安全设施配置等决策。事后分析方面，数字孪

生可以重现事故过程，分析事故原因，为改进管理提供依据。

2 平台总体架构设计

2.1 平台架构的总体思路

面向城市交通安全的数字孪生数据可视化与决策支持平台采用分层架构，包括数据采集层、数据传输层、孪生建模层、可视化层和决策支持层。数据采集层负责多源交通数据的采集，包括交通流量、车速、事故、气象、路况等数据。数据传输层负责数据的可靠传输，采用有线 and 无线相结合的方式。孪生建模层负责构建城市交通的数字孪生模型，包括路网模型、交通流模型和事故模型等。可视化层负责交通态势的可视化展示，包括二维地图、三维场景和虚拟现实等。决策支持层负责数据分析和决策支持，包括风险预警、方案评估和应急指挥等。各层之间通过标准接口连接，形成完整的数据流和决策流。

2.2 数据采集层设计

数据来源包括固定检测器和移动检测器。固定检测器包括线圈检测器、微波检测器、视频检测器和地磁检测器等，安装在城市道路关键节点。移动检测器包括浮动车、手机信令和车载终端等，覆盖城市道路网络。数据内容包括交通流量、车速、占有率、排队长度、事故信息和气象信息等[2]。数据采集应保证覆盖面和实时性，采样周期应根据数据类型和管理需求确定。数据采集层还应包括数据预处理功能，对采集数据进行清洗、校验和标准化，提高数据质量。

2.3 数据传输层设计

传输方式包括光纤通信、无线通信和互联网等。光纤通信适用于固定检测器和固定设备的数据传输，具有带宽大、稳定性好的优点。无线通信适用于移动检测器和移动设备的数据传输，具有灵活便捷的优点。互联网适用于与外部系统的数据交换。传输网络应采用冗余设计，关键节点设置备用通道，保证通信可靠性。传输协议应遵循标准，保证不同设备之间的互联互通。数据传输应保证安全性和实时性，采用加密和认证措施，防止数据泄露和篡改。

2.4 孪生建模层设计

孪生建模包括路网建模、交通流建模和事故建模。路网建模构建城市道路网络的几何模型和拓扑模型，反映道路的空间结构和连接关系。交通流建模构建交通流的动力学模型，反映交通流的运行规律和演化过程。事故建模构建交通事故的因果模型和风险模型，反映事故的发生机理和影响因素。孪生建模应采用多尺度建模方法，兼顾宏观交通流和微观车辆行为。孪生模型应具有实时更新能力，根据采集数据动态更新模型状态。孪生建模还应支持场景模拟，模拟不同交通管理措施的效果。

2.5 可视化层设计

可视化内容包括交通态势可视化、事故风险可视化和决策方案可视化。交通态势可视化以地图为基础，展示交通流量、车速、拥堵状况和事故信息等。事故风险可视化以热力图或风险地图形式，展示高风险路段和时段。决策方案可视化以对比图或模拟动画形式，展示不同方案的效果。可视化方式包括二维地图、三维场景和虚拟现实等。二维地图适用于宏观态势展示，三维场景适用于微观场景分析，虚拟现实适用于沉浸式体验。可视化设计应注重直观性、交互性和实时性，帮助管理者快速掌握交通态势。

2.6 决策支持层设计

决策支持内容包括风险预警、方案评估和应急指挥。风险预警基于实时数据和预测模型，对可能发生的事故进行预警，提示管理者采取防范措施。方案评估基于孪生模型和优化算法，评估不同交通管理方案的效果，辅助管理者决策。应急指挥基于事故场景和应急预案，协调救援力量，疏导交通，支持应急决策。决策支持应采用人机交互方式，管理者可以查询数据、调整参数和评估方案。决策支持还应支持多部门协同，实现信息共享和联动指挥。

3 平台关键技术与功能

3.1 多源交通数据融合技术

多源交通数据融合是平台的基础技术。交通数据来源多样，包括固定检测器数据、移动检测器数据、视频数据和气象数据等。数据融合包括数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合直接对原始数据进行融合，特征层融合对提取的特征进行融合，决策层融合对决策结果进行融合。融合方法包括加权平均、卡尔曼滤波、贝叶斯推理和神经网络等[3]。数据融合应解决数据异构、数据冲突和数据缺失等问题，提高数据质量和可用性。多源数据融合为孪生建模和决策支持提供高质量的数据基础。

3.2 交通场景数字孪生建模技术

交通场景数字孪生建模是平台的核心技术。建模内容包括静态建模和动态建模。静态建模构建道路、交叉口、交通设施等静态要素的几何模型和属性模

型。动态建模构建车辆、行人、信号等动态要素的行为模型和交互模型。建模方法包括基于物理的建模、基于数据的建模和混合建模。基于物理的建模依据交通流理论建立模型，基于数据的建模利用机器学习方法从数据中学习模型，混合建模结合两者优势。孪生建模应支持实时更新和场景模拟，能够反映交通系统的实时状态和演化趋势。

3.3 交通安全态势可视化技术

交通安全态势可视化是平台的关键技术。可视化技术包括数据可视化、地理信息可视化和虚拟现实可视化。数据可视化将交通数据转化为图表、图形和动画，直观展示交通状态。地理信息可视化将交通数据与地理信息结合，在地图上展示交通态势。虚拟现实可视化构建三维虚拟场景，提供沉浸式体验。可视化技术应支持多尺度展示，从宏观路网到微观车辆。可视化技术应支持交互操作，用户可以查询、筛选和对比数据。可视化技术应支持实时更新，反映交通态势的动态变化。

3.4 事故风险预警技术

事故风险预警是平台的重要功能。预警技术包括风险识别、风险评估和风险预警。风险识别基于历史事故数据和实时交通数据，识别事故风险因素和高风险场景。风险评估基于风险模型，评估事故发生的概率和后果。风险预警基于评估结果，对超过阈值的风险发出预警[4]。预警方法包括统计方法、机器学习方法和深度学习方法。预警模型应具有实时性和准确性，能够及时识别风险并发出预警。预警信息应通过多种渠道发布，包括平台界面、短信和移动应用等。

3.5 应急决策支持技术

应急决策支持是平台的重要功能。决策支持技术包括方案生成、方案评估和方案推荐。方案生成基于事故场景和应急预案，自动生成多个处置方案。方案评估基于孪生模型和评估指标，评估各方案的效果。方案推荐基于评估结果，推荐最优方案。决策支持还应支持人工干预，管理者可以调整方案参数，评估调整效果。决策支持应采用人机交互方式，提供直观的决策界面和友好的操作体验。决策支持还应支持多部门协同，实现信息共享和联动指挥。

4 平台建设面临的挑战与保障措施

4.1 面临的主要挑战

平台建设面临多方面挑战。数据方面，数据来源分散、数据质量参差不齐、数据共享机制不健全，影响数据融合和孪生建模。模型方面，交通系统复杂，孪生模型精度和实时性难以兼顾，模型验证和校准困难。技术方面，数字孪生、数据可视化、决策支持等技术集成难度大，系统开发和运维复杂。标准方面，数字孪生相关标准规范不完善，平台建设缺乏统一指导。人才方面，既懂交通管理又懂信息技术的复合型人才短缺。资金方面，平台建设和运维投入大，资金保障不足。这些挑战需要通过技术创新和机制建设加以解决。

4.2 保障措施

平台建设需要多方面保障。组织保障方面，应建立平台建设领导机构，明确职责分工，统筹推进平台建设。资金保障方面，应加大投入力度，建立多元化投入机制，保障平台建设和运维经费。技术保障方面，应加强技术研发和集成创新，突破关键技术瓶颈。标准保障方面，应制定数字孪生交通相关标准规范，规范平台建设。人才保障方面，应加强复合型人才培养和引进，为平台建设提供人才支撑。安全保障方面，应建立网络安全和数据安全防护体系，保障平台安全运行。通过多方面保障，推动平台建设顺利实施。

结束语

面向城市交通安全的数字孪生数据可视化与决策支持平台是提升城市交通安全管理智能化水平的重要途径。本文从城市交通安全管理需求与数字孪生技术分析入手，从数据采集层、数据传输层、孪生建模层、可视化层和决策支持层等方面探讨了平台架构设计，从多源交通数据融合、交通场景数字孪生建模、交通安全态势可视化、事故风险预警和应急决策支持等方面分析了平台关键技术与功能，并剖析了平台建设面临的挑战和保障措施。研究表明，构建“数据采集—孪生建模—态势可视化—风险预警—决策支持”一体化的数字孪生平台，是提升城市交通安全管理智能化水平的有效途径。未来，应进一步加强数字孪生技术研究、数据共享机制建设和复合型人才培养，为城市交通安全管理提供有力支撑。

参考文献

[1] 王飞跃, 张俊, 王晓. 数字孪生城市交通系统研究进展与展望 [J]. 自动化学报,2021,47(8):1801-1815.

[2] 李德毅, 刘常昱, 张维明. 数字孪生技术与智能交通系统研究 [J]. 中国公路学报,2022,35(4):1-12.

[3] 张建平, 林佳瑞, 张洋. 数字孪生在城市交通管理中的应用研究 [J]. 交通运输系统工程与信息,2023,23(1):45-54.

[4] 刘占省, 赵雪锋, 王泽强. 数字孪生数据可视化技术研究进展 [J]. 图学学报,2021,42(3):345-353.