

基于数字孪生的高速公路智慧运维技术研究

刘卫刚 万成刚 徐 达

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：基于数字孪生技术，高速公路智慧运维系统实现了对高速公路运行状态的实时监测与高效管理。该系统通过感知层收集数据，经数据传输与处理层分析后，构建数字孪生模型。该模型结合多源数据融合、高精度建模、实时仿真与预测等关键技术，为运维人员提供精准决策支持。应用层则根据模型预测结果，实施智能运维策略，确保高速公路安全、畅通。本研究为高速公路智慧运维提供了创新思路和技术路径。

关键词：数字孪生；高速公路；智慧运维；技术研究

引言

随着高速公路网络的不断扩展，其运维管理面临诸多挑战。传统运维方式存在响应慢、效率低等问题，难以满足现代高速公路管理的需求。数字孪生技术作为一种新兴的数字建模与仿真方法，为高速公路智慧运维提供了新的解决方案。该技术通过构建与实际高速公路一一对应的虚拟模型，实现对高速公路运行状态的实时监测与预测。本文旨在探讨基于数字孪生的高速公路智慧运维技术研究，以为高速公路管理提供科学依据和技术支持。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生的概念

数字孪生技术是一种前沿的数字化方法，它基于物理模型、传感器数据、运行历史等多源信息，通过高度集成的多学科、多物理量、多尺度、多概率仿真过程，在虚拟空间中构建出与实体对象相对应的镜像模型^[1]。这一技术不仅实现了对实体对象的全面映射，还能够在虚拟环境中对其全生命周期过程进行精准模拟和预测。在高速公路领域，数字孪生技术的应用尤为关键。通过数字化手段，我们可以构建一个与真实高速公路在几何形状、物理属性、运行状态等方面高度一致的虚拟模型。这个虚拟模型不仅具备实时反映真实高速公路当前状态的能力，更重要的是，它还能基于历史数据和实时传感器信息，对未来的发展趋势进行预测和模拟。数字孪生高速公路模型能够整合来自多个渠道的数据，包括交通流量、车辆速度、道路状况、天气条件等，通过先进的算法和模型，这些数据被转化为对高速公路运行状态的深入理解。这种理解不仅限于当前的交通状况，还包括对潜在交通拥堵、事故风险、设备故障等问题的预测。数字孪生技术还为高速公路的运维管理提供了强大的支持。通过模拟不同的运维策略，管理者可以评估其对高

速公路运行状态的潜在影响，从而制定出更加科学合理的运维计划。这种基于数据的决策方式不仅提高了运维效率，还降低了运维成本，为高速公路的长期可持续发展提供了有力保障。

1.2 数字孪生的特点

数字孪生技术作为一种先进的数字化手段，具有实时性、精准映射、预测性和交互性等显著特点，这些特点使其在多个领域，特别是高速公路运维管理中展现出巨大的应用潜力。（1）实时性是数字孪生技术的一大亮点。通过与物理实体相连的传感器等设备，数字孪生模型能够实时获取并更新物理实体的运行状态信息。这种实时数据交互确保了数字孪生模型与物理实体之间的同步性，使得管理者能够随时掌握物理实体的最新状态，为及时采取运维措施提供了可能。（2）精准映射是数字孪生技术的核心。数字孪生模型不仅涵盖了物理实体的几何结构信息，还深入到了材料特性、力学性能等多个层面，实现了对物理实体的全面、精准数字化映射。这种映射不仅提高了模型的准确性，还为后续的分析、预测和决策提供了坚实的基础。（3）预测性是数字孪生技术的又一重要特点。基于数字孪生模型和大数据分析、人工智能等先进技术，我们可以对物理实体的未来运行状态进行精准预测。这种预测能力使得我们能够提前发现潜在的问题和风险，为运维决策提供科学依据，从而有效避免或减少事故的发生。（4）交互性则赋予了用户与数字孪生模型进行互动的能力。用户可以通过数字孪生模型对物理实体进行远程控制、优化调整等操作，这种交互性不仅提高了运维管理的效率和灵活性，还为用户提供了更加直观、便捷的管理手段。

2 基于数字孪生的高速公路智慧运维系统架构

2.1 感知层

感知层是数字孪生高速公路智慧运维系统的基础，

主要负责采集高速公路物理实体的各种数据信息。通过在高速公路沿线部署各类传感器，如交通流量传感器、气象传感器、结构健康监测传感器、视频监控摄像头等，实现对高速公路交通流量、气象条件、道路结构状态、路面状况等信息的实时采集。利用物联网技术，将这些传感器采集到的数据传输到数据传输层。

2.2 数据传输层

数据传输层主要负责将感知层采集到的数据安全、可靠地传输到数据处理层。采用有线通信（如光纤通信）和无线通信（如4G/5G通信）相结合的方式，构建高速、稳定的数据传输网络。对于实时性要求较高的数据，如交通流量数据、结构健康监测数据等，优先采用有线通信方式进行传输；对于一些分布范围广、安装条件受限的传感器数据，如气象传感器数据等，则采用无线通信方式进行传输。

2.3 数据处理层

数据处理层是系统的核心，主要负责对传输过来的数据进行清洗、存储、分析和挖掘。首先，对采集到的原始数据进行清洗和预处理，去除噪声数据和异常数据，提高数据质量。然后，将处理后的数据存储到数据库中，为后续的数据分析和应用提供数据支持。利用大数据分析技术、机器学习算法等，对存储的数据进行深度挖掘和分析，提取出与高速公路运行状态、运维需求相关的有价值信息，如交通流量变化趋势、道路结构病害发展规律等。

2.4 数字孪生模型层

数字孪生模型层是基于数据处理层的分析结果构建的，包括高速公路的几何模型、物理模型、行为模型等。几何模型主要描述高速公路的道路线形、桥梁结构、隧道结构等几何形状信息；物理模型则反映高速公路各组成部分的材料特性、力学性能等物理属性；行为模型用于模拟高速公路在不同交通荷载、环境条件下的运行行为和响应。通过将这些模型进行有机融合，构建出能够准确反映真实高速公路全生命周期状态的数字孪生模型。

3 基于数字孪生的高速公路智慧运维关键技术

3.1 多源数据融合技术

高速公路智慧运维是一个复杂而精细的系统工程，它依赖于多种类型的数据来支撑决策和优化管理。这些数据涵盖了交通流量、气象条件、结构健康状态等多个方面，且往往来源于不同的系统和设备，格式多样，信息丰富但也可能存在矛盾或冲突^[2]。（1）为了充分利用这些数据，多源数据融合技术应运而生。这一技术的

核心在于将来自不同源头、类型各异的数据进行有机整合，通过消除数据间的矛盾和冲突，提高数据的完整性和准确性。这一过程不仅涉及到数据的预处理、清洗和校准，还需要运用先进的算法和模型来实现数据的深度融合。（2）在高速公路桥梁结构健康评估中，多源数据融合技术发挥着至关重要的作用。通过将应变传感器、位移传感器、振动传感器等多种设备采集到的数据进行融合分析，我们可以更全面、准确地了解桥梁的结构健康状况。这些数据能够揭示桥梁在不同荷载和环境条件下的响应特征，为运维决策提供科学依据。（3）常用的数据融合方法包括基于规则的融合方法、基于统计的融合方法和基于神经网络的融合方法等。基于规则的融合方法通过预设的规则和逻辑来判断数据的合理性和有效性；基于统计的融合方法则利用统计学原理对数据进行分析和融合；而基于神经网络的融合方法则通过训练神经网络模型来实现数据的自动融合和预测。这些方法各有优劣，应根据实际需求和数据特点进行选择和应用。

3.2 高精度建模技术

高速公路智慧运维，作为一个复杂而精细的系统工程，其高效运作依赖于对多种类型数据的精准分析与决策。这些数据，涵盖交通流量、气象条件、结构健康状态等多个关键领域，源于不同的监测系统和设备，格式多样且信息量大，但同时也可能伴随着矛盾或冲突。为了最大化利用这些宝贵的数据资源，多源数据融合技术成为了高速公路智慧运维的核心支撑。该技术通过有机整合来自不同源头、类型各异的数据，有效消除了数据间的矛盾与冲突，显著提升了数据的完整性和准确性。这一过程不仅涉及数据的预处理、清洗和校准，更依赖于先进的算法和模型，以实现数据的深度融合与高效利用。在高速公路桥梁结构健康评估领域，多源数据融合技术更是发挥了举足轻重的作用。通过将应变传感器、位移传感器、振动传感器等多种设备采集的数据进行融合分析，我们得以更全面、准确地掌握桥梁的结构健康状况。这些数据能够精准揭示桥梁在不同荷载和环境条件下的响应特征，为运维决策提供坚实的数据支撑和科学依据。在实现数据融合的过程中，常用的方法包括基于规则的融合方法、基于统计的融合方法和基于神经网络的融合方法等。这些方法各有千秋，应根据实际需求和数据特点进行灵活选择和应用。基于规则的融合方法通过预设的规则和逻辑来判断数据的合理性和有效性；基于统计的融合方法则充分利用统计学原理对数据进行深入分析；而基于神经网络的融合方法则通过训练神经网络模型，实现数据的自动融合与智能预测^[3]。

3.3 实时仿真与预测技术

实时仿真与预测技术，作为高速公路智慧运维的重要组成部分，其核心在于利用数字孪生模型对高速公路的未来运行状态进行即时、精准的模拟与预测。这一技术不仅依赖于先进的数值计算方法和有限元分析技术，还紧密结合了大数据分析和人工智能算法，从而实现了在高速公路运行状态的深度洞察和前瞻预判。（1）在高速公路智慧运维中，实时仿真技术能够模拟高速公路在不同交通荷载和环境条件下的响应情况。通过精确的数值计算和有限元分析，我们可以深入了解高速公路在不同工况下的受力状态、变形情况等关键信息，为运维决策提供科学依据。（2）预测技术则通过对历史数据和实时监测数据的深度学习和分析，建立起精准的预测模型。这些模型能够预测高速公路的交通流量变化、结构病害发展趋势等关键指标，为交通管理和运维决策提供了有力的数据支持。我们可以利用时间序列分析算法对历史交通流量数据和实时交通流量数据进行分析，从而准确预测未来一段时间内高速公路的交通流量，为交通疏导、事故预警等提供及时、有效的决策依据。（3）实时仿真与预测技术的结合应用，不仅提升了高速公路运维管理的智能化水平，还显著增强了运维决策的针对性和实效性。

3.4 智能决策技术

智能决策技术，作为高速公路智慧运维体系中的智慧大脑，其核心在于利用数字孪生模型提供的信息和预测结果，为运维管理人员提供科学、精准的决策建议^[4]。这一技术的引入，标志着高速公路运维管理向智能化、精细化方向的重大迈进。在智能决策技术的支撑下，我们利用专家系统、决策树算法、多目标优化算法等先进技术，建立了智能决策模型。该模型能够根据高速公路的实时运行状态、运维目标和资源约束条件，自动生成最优的运维策略。这些策略涵盖了养护计划的制定、维修方案的选择、应急响应措施的部署等多个方面，为运

维管理人员提供了全面、系统的决策支持。以高速公路养护计划的制定为例，智能决策模型能够综合考虑道路病害的严重程度、交通流量的变化情况、养护成本的经济性等多个因素，通过多目标优化算法，制定出既能有效保障道路质量，又能合理控制养护成本的养护计划。这种决策方式不仅提高了养护工作的科学性和针对性，还显著降低了运维成本，提升了运维效率。智能决策技术的应用，不仅为高速公路运维管理人员提供了便捷、高效的决策工具，还推动了运维管理的智能化、精细化发展。通过这一技术，我们能够更加精准地把握高速公路的运行状态和发展趋势，为运维决策提供更加科学、精准的支撑。智能决策技术还能够根据运维目标和资源约束条件的变化，动态调整运维策略，确保运维工作的持续优化和改进。

结语

综上，基于数字孪生的高速公路智慧运维技术为高速公路管理带来了革命性的变革。通过构建数字孪生模型，实现了对高速公路运行状态的实时监测与精准预测，为运维人员提供了科学、高效的决策支持。未来，随着技术的不断发展，基于数字孪生的高速公路智慧运维系统将更加完善，为高速公路的安全、畅通提供更加有力的保障。该技术也可与其他领域的智慧运维提供借鉴与参考，推动智慧城市建设与发展。

参考文献

- [1]陈志涛,李朋,陆艳铭.智慧高速公路数字孪生平台的设计与实现[J].价值工程,2023,42(28):141-143.
- [2]陈泰中,吴玥含.基于三维模型可视化的高速公路运维管理平台建设[J].中国交通信息化,2024,295(4):36-39.
- [3]徐欣,周宇.高速公路收费场景数字孪生技术应用探究[J].中国交通信息化,2024,300(9):65-69.
- [4]何建华.高速公路预制梁场数字孪生协同管理平台构建[J].福建理工大学学报,2024,22(6):535-541.