

数字孪生技术在高速公路智能化施工中的应用研究

黄都¹, 李文平¹, 范彦斌¹, 钟文轩¹, 吴远见¹, 徐雨佳², 丁玲²

(1. 中铁七局集团武汉工程有限公司; 2. 湖北第二师范学院 计算机学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着我国基础设施建设向信息化和智能化方向转型, 传统的施工管理方式已无法满足现代化高速公路的建设需求。数字孪生技术通过虚实结合的方式实现对施工过程的实时监控与动态反馈, 为高速公路智能化施工提供了全新的解决方案。以数字孪生技术在高速公路施工中的应用为研究对象, 构建适用于高速公路施工的数字孪生模型, 设计包括物理层、交互层和虚拟层在内的施工安全管理技术架构, 分析架构中涉及到的关键技术。同时, 对数字孪生技术在高速公路施工阶段的应用前景进行了探讨, 认为在5G、物联网等新兴技术的助力下, 该技术将推动高速公路建设向更高效、更安全的方向发展。

关键词: 数字孪生; 高速公路; 智能化施工; 施工安全管理

DOI: 10.11907/rjtk.251082

中图分类号: TP18

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2025)006-0113-07



Research on Digital Twin Technology under the Background of Intelligent Construction of Highway

HUANG Du¹, LI Wenping¹, FAN Yanbin¹, ZHONG Wenxuan¹, WU Yuanjian¹, XU Yujia², DING Ling²

(1. Wuhan Engineering Co., Ltd of China Railway Seventh Group;

2. School of Computer & Communication Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the transformation of infrastructure construction in China towards informatization and intelligence, traditional construction management methods in highway construction can no longer meet modern needs. The digital twin technology achieves real-time monitoring and dynamic feedback of the construction process through the combination of virtual and real, providing a new solution for intelligent construction of highways. Taking the application of digital twin technology in highway construction as the research object, constructing a digital twin model suitable for highway construction, designing a construction safety management technology architecture including physical layer, interaction layer, and virtual layer, and analyzing the key technologies involved in the architecture. At the same time, the application prospects of digital twin technology in the construction stage of highways are discussed, and it is believed that with the help of emerging technologies such as 5G and the Internet of Things, this technology will promote the development of highway construction towards a more efficient and safer direction.

Key Words: digital twin; highway; intelligent construction; construction safety management

0 引言

近年来,我国交通基础设施建设进入快速发展阶段,高速公路作为现代交通系统的核心组成部分,其施工与管

理需求日益复杂。传统施工管理方式通常依赖人工经验,面临着施工现场环境复杂、多源数据交互需求高、安全保障压力大等一系列挑战。这些问题不仅影响施工效率,而且可能造成严重的安全隐患。如何通过智能化手段优化施工管理、提升施工效率、保障施工安全,已成为当前高速

收稿日期: 2025-02-13

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 湖北省自然科学基金面上项目(2024AFB953)

作者简介: 黄都(1988-),男,中铁七局集团武汉工程有限公司高级工程师,研究方向为工程测量领域新技术、新设备、新工艺的推广与应用;丁玲(1979-),女,博士,湖北第二师范学院计算机学院副教授,研究方向为图像识别、人工智能等。本文通讯作者: 丁玲。



公路建设中的重要研究课题。

数字孪生技术通过将物理世界中的对象、系统或过程实时映射到虚拟模型中,实现了虚实结合的双向互动。其结合物联网、大数据分析、云计算与人工智能等技术,能够对物理实体进行实时监控、优化与预测,并为决策者提供数据驱动的科学依据。与传统的静态模型和人工经验相比,数字孪生技术具有高度动态、实时反馈和自动优化的优势,在建筑领域具有巨大的应用潜力。例如,刘占省等^[1]从物理实体、虚拟建模、虚实交互的角度进行数字孪生建模,有效提高了装配式吊装过程的信息化和智能化水平。杨雪等^[2]为有效进行高边坡施工过程中不利工况的检测与动态反馈,提出一种结合建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)与有限元分析的稳定性检算方案。Li等^[3]系统讨论了数字孪生技术在智能隧道建设中的应用、研究现状和局限性,从实时数据采集、物理—虚拟连接和高保真建模的角度阐述了如何有效推动隧道工程向智能化方向迈进。

以上研究为数字孪生技术在建筑工程领域的广泛应用与创新发展奠定了基础。目前,数字孪生在高速公路施工领域的应用发展较为迅速,但与其他建筑领域(如桥梁建设、隧道施工等)相比还处于相对较新的阶段。为此,本文以高速公路施工为研究背景,结合数字孪生五维模型的理论框架,构建了适用于施工管理的数字孪生模型,设计了包括物理层、交互层和虚拟层在内的施工安全管理技术架构,对施工现场的安全、进度和质量进行实时监控与优化。随后讨论了施工安全管理技术架构中需要使用到的一些关键技术,并对数字孪生在高速公路施工阶段的应用前景进行了思考。本研究旨在为高速公路施工的智能化

管理提供理论支持与技术参考,推动数字孪生技术在建筑工程领域中的广泛应用。

1 数字孪生相关理论

1.1 数字孪生技术简介

孪生体概念最早源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的阿波罗计划,NASA制造了两架相同的太空飞行器,其中一架作为“孪生体”留在地球,用于模拟任务中飞行器的状态,以帮助航天员决策^[4]。2003年,Michael Grieves在密歇根大学提出“等同于物理产品的虚拟数字化表达”的概念,是指以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,并通过传感器集成实时数据,以反映其整个生命周期中的状态、性能和行为^[5]。其是一个虚实结合的映射,能够实时同步物理实体的状态和变化,用于对物理实体进行监测、分析、预测、优化和控制。2005年,Grieves与Githens将这个概念抽象得到的模型命名为“镜像空间模型”,并在2006年改为“信息镜像模型”^[6]。2011年,Grieves正式提出“数字孪生”一词^[7]。同年,美国空军研究实验室提出机身数字孪生的概念,在美国空军的战斗机维护中得到应用^[8]。2012年,NASA发布技术路线图,将数字孪生定义为通过多物理场和多尺度仿真反映实体设备状态的系统^[9]。这一概念迅速扩展到智能制造、智慧城市和医疗健康等领域。在制造业中,数字孪生可优化生产流程、实时监控设备状态;在智慧城市中,数字孪生可用于城市基础设施虚拟化管理;在医疗领域中,数字孪生可创建患者虚拟副本,辅助个性化治疗。数字孪生概念历程如图1所示。

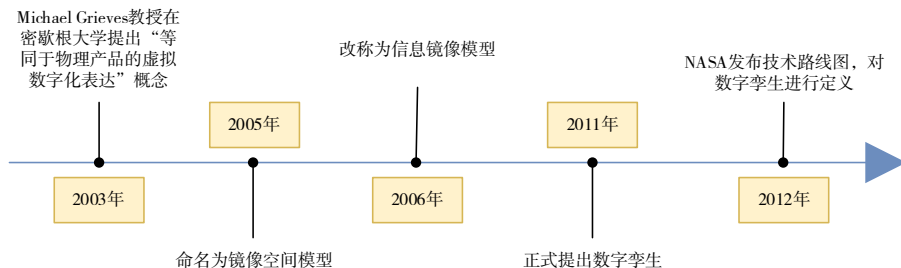


Fig. 1 Conceptual history of digital twin

图1 数字孪生概念历程

目前,数字孪生技术成为一种能够通过实时数据和传感器信息,在虚拟空间中建立物理世界中对象、系统或过程的精确数字模型,并通过双向互动实时同步的技术^[10]。其不仅能反映物理实体状态,而且能通过虚拟模型对物理实体的行为进行预测、优化与模拟。数字孪生的核心在于实时数据采集与反馈,依托物联网、传感器等技术持续获取物理世界的的数据并更新虚拟模型,从而形成动态的虚拟复制品^[11]。与传统静态模型不同,数字孪生技术可以通过不断获取数据进行自我更新与优化,以实现物理实体的全面监控与精细化管理。该技术的最大优势在于双向反

馈机制,即虚拟模型不仅能够反映物理实体的当前状态,而且能根据虚拟模型的模拟和预测结果对物理实体进行反馈,调整其运行参数或行为,实现决策优化^[12]。

数字孪生技术最早用于航空航天和制造业领域,目前在建筑领域的应用十分广泛,尤其是在高速公路施工管理中展现出巨大的应用潜力^[13]。该技术可以在高速公路施工过程监控、质量与安全管理、预测性维护及全生命周期管理中发挥作用,通过实时监控、数据驱动和虚拟仿真等方式提升施工效率、保障安全,并为高速公路的智能化发展提供理论框架。

1.2 数字孪生模型搭建

数字孪生五维模型是一种系统化和全面化的框架,通常包含物理实体、虚拟模型、数据、服务、连接 5 个维度^[14]。本文将数字孪生五维模型的思想与高速公路施工阶段的数字孪生模型框架结合起来,构建高速公路施工安全数字孪生模型(Highway Construction Safety Digital Twin, HCS-DT),确保高速公路建设中的安全问题能够得到有效解决。如图 2 所示,该模型主要由高速公路施工安全管理物

理实体(Highway Construction Physical Entity, HCPE)、高速公路施工安全管理虚拟模型(Highway Construction Virtual Model, HCV)、高速公路施工服务平台(Highway Construction Service Platform, HCSP)、高速公路施工安全管理数据(Highway Construction Data, HCD)、实现各维度通信与数据处理的方法(Data Management Method, DMM) 5 个部分组成,可以定义为五元组:

$$HCS-DT = \{ HCPE, HCV, HCSP, HCD, DMM \} \quad (1)$$

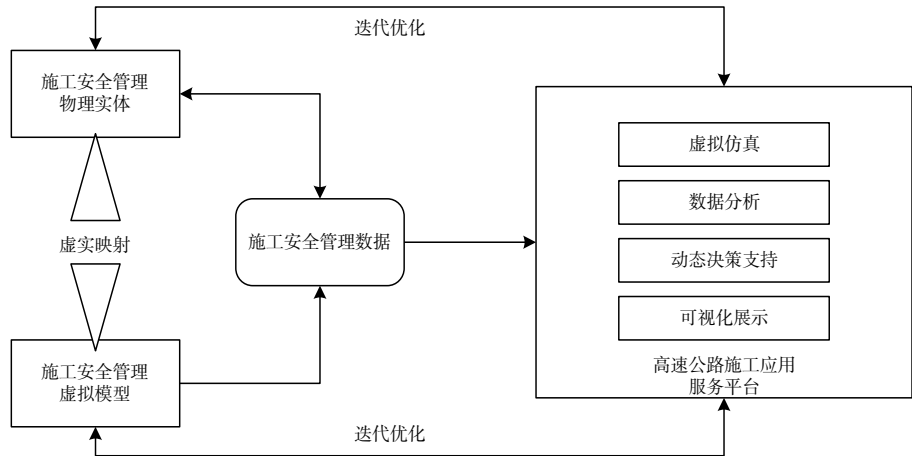


Fig. 2 Digital twin model of highway construction safety
图2 高速公路施工安全数字孪生模型

HCS-DT 模型结合了数字孪生五维模型的思想,通过 5 个维度的深度融合为高速公路施工安全管理提供了一个全面且智能化的解决方案。该方案通过实时监控、智能分析、数据融合和预警机制有效保障施工安全、提升施工效率,为智能化施工提供强有力的支持。该模型主要包括以下几个方面的内容:

- (1)HCPE。该部分指施工现场的真实环境和参与者,包括施工设备、机械、材料、人员、传感器和监控设施等。在 HCS-DT 模型中,HCPE 不仅包括硬件设施,而且涉及施工现场的环境条件、工作人员等,通过对这些物理实体进行精确监控,能够实时预警施工过程中潜在的安全隐患。
- (2)HCV。该部分指对施工过程的数字化映射,为模拟施工安全管理过程的核心。该模型能够通过实时数据与物理实体进行动态比较,实时监控施工过程中的安全风险、资源调配及工作进展。
- (3)HCSP。该部分提供一系列基于 HCD 和 HCV 的智能服务,包括仿真、数据分析、决策支持、可视化等功能,是数字孪生模型提供实际应用价值的核心部分。HCSP 支持实时监控施工进度、安全状况、设备状态等,确保工程顺利进行;同时提供智能决策支持,帮助调整施工进度、实行安全预警和优化资源调度。
- (4)HCD。该部分能够真实、准确地反映施工过程中的各类安全管理活动情况,不仅包括设备运行状态、人员位置等实时数据,而且涉及环境监控数据、施工进度数据和安全事故数据等。

(5)DMM。该部分为 HCS-DT 模型的关键环节,确保了各个维度之间的实时信息传输。有效的数据处理和通信协议能够实现虚拟模型与物理实体之间的数据交互,确保信息流的实时同步。

2 高速公路施工安全管理技术架构

基于数字孪生技术的高速公路施工安全管理技术架构在 HCS-DT 模型的基础上构造而成,其通过物理层、交互层和虚拟层的紧密协作实时监控施工现场的安全状况,预测潜在风险,并为管理人员提供科学的决策支持。通过这一框架,施工过程中的安全隐患能够被及时发现,既提升了施工效率,又减少了安全事故。高速公路施工安全管理技术架构如图 3 所示。

2.1 物理层

在高速公路施工项目中,物理层是数字孪生技术应用的基础。该层需要配置信息采集和传输装置,提取与施工安全管理相关的物理因素信息,并进行有效的实时反馈^[15]。信息采集和传输装置主要由各种传感器、设备、视频监控和位置跟踪系统组成,负责实时采集与监控施工现场的各种数据,可称其为物理感知单元(Physical Perception Unit, PPU)。需要采集和监控的数据主要包括施工现场环境变化、施工机械状态、施工材料和结构质量以及工人的安全状况,这些数据的主体可称为物理对象单元(Physical Object Unit, POU)。实现实时反馈的设备可以称

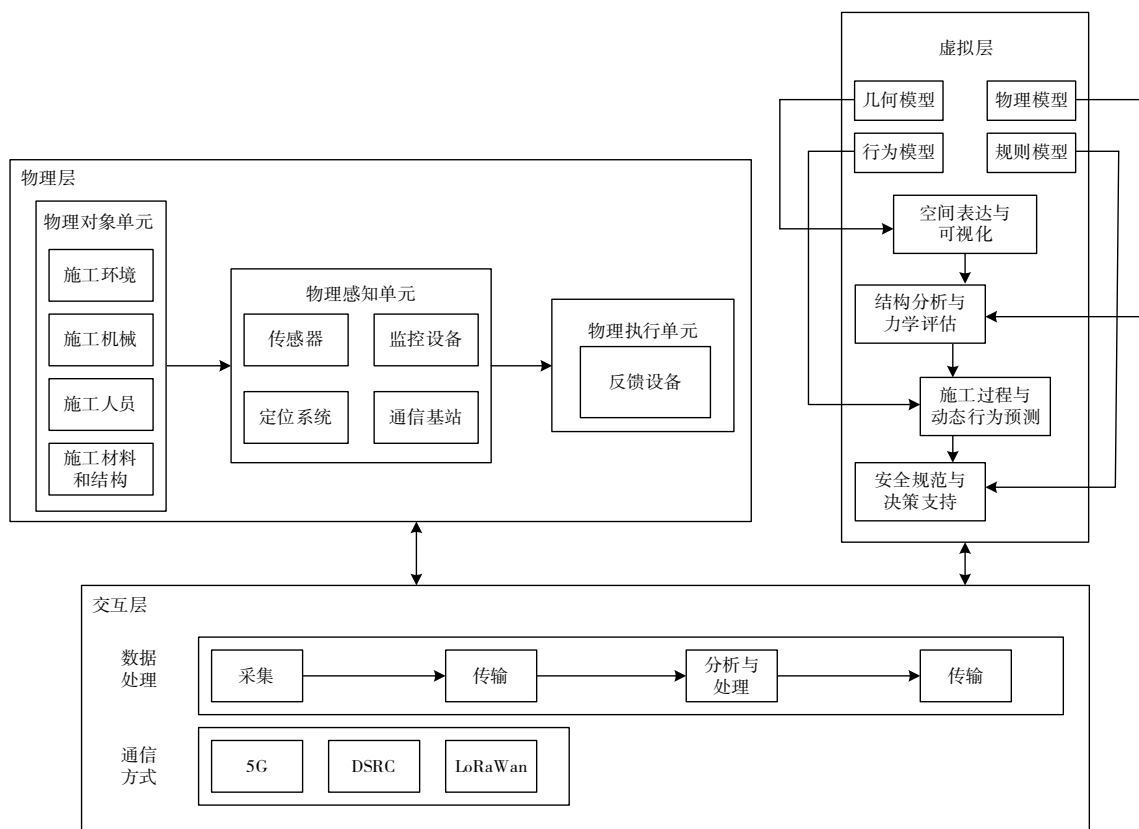


Fig. 3 Technical architecture of highway construction safety management

图3 高速公路施工安全管理技术架构

为物理执行单元(Physical Execution Unit, PEU)。因此,物理层模型可以由三元组表示为:

$$PLM = \{POU, PPU, PEU\} \quad (2)$$

在强风或大雨的天气条件下,施工现场可能面临设备倾斜或工人滑倒等风险。为避免恶劣天气对施工造成影响,可在施工现场安装环境监测传感器,负责监测气象条件,如风速、温度、降水量等,这些数据对于评估恶劣天气对施工进度与安全的影响至关重要。

在高速公路建设中,重型机械(如挖掘机、压路机等)设备常常面临高负荷作业,通过安装施工设备监控传感器可以实时监测机械设备的状态,如运行负载、温度、振动频率等,可有效避免因设备故障导致的工期延误或安全事故。

施工材料和结构的状态也是物理层采集数据的范畴。材料的属性,如混凝土和钢筋的质量、温湿度、应力等需要被持续监测,确保其符合设计要求;同时,结构的沉降、变形、裂缝等也需要通过传感器实时检测,以确保施工安全。这些数据通过物理层传输至数字孪生系统,辅助管理人员及时监测施工材料和结构的有效性和安全性,确保施工质量。

工作人员的身体状况也是施工安全的重要一环。人员安全监测传感器可以实时追踪员工的位置信息与生理状态,及时检测疲劳程度、心率变化等健康指标,防止因健康问题造成安全事故。人员相关信息可采用主动式射频

识别(Radio Frequency Identification, RFID)标签进行存储,将其上传至存储设备以便随时调用。

视频监控系统可以利用高清摄像头监视现场施工进度,自动识别安全隐患,如工人未佩戴安全防护设备或设备操作不当等。定位系统可以实时追踪施工设备和人员位置,尤其是在大型高速公路施工项目中,能够准确了解每个工人的活动范围,确保他们在安全区域内工作。一旦发生安全事故,系统能迅速定位问题区域并启动应急响应机制。

在获得各类传感器、监控系统和定位系统的数据后,为了及时得到反馈信息,还需要配备终端、预警器和移动端应用等设备执行反馈任务。

2.2 交互层

交互层在架构中发挥着至关重要的作用,其负责连接物理层与虚拟层,保障两者数据的传输与互动。该层的主要功能为实时接收来自物理层的数据,并进行处理与分析,然后将分析结果传输至虚拟层进行深入的模拟与预测,同时将虚拟层生成的决策与优化建议反馈给物理层,形成闭环管理。

在数据处理方面,从物理层获得的原始数据需要经过采集、传输、分析与处理等步骤。首先,在数据采集阶段,施工现场的各种传感器、监控设备以及物联网手段实时采集施工现场的各类数据。其中,传感器可细分为以下3类:①环境感知类。包括温湿度传感器、气体浓度探测器、

噪声监测仪等,用于实时监测施工环境安全;②设备状态类。包括振动传感器、倾角传感器、液压传感器等,用于监控机械的运行状态与异常行为;③人员定位类。基于UWB或RFID的定位系统,结合安全帽内置传感器,实时追踪人员位置与行为轨迹。以上数据通过配套的网关和通信协议上传至孪生数据库。在数据传输阶段,采集到的信息被传输到虚拟孪生系统的实时数据库,对多源数据进行融合,上传至历史数据库进行存储与归档。多源数据融合技术通过本体建模与语义网络实现异构数据的语义对齐。例如,将BIM模型中的几何特征与传感器实时数据结合,通过改进的SICP(Sparse Iterative Closest Point)配准算法实现三维实景模型与动态数据的融合。这些实时和历史数据为后续的安全风险评估与控制奠定了基础。在数据分析与处理阶段,虚拟孪生系统通过调用历史数据库中的安全风险评估规则,并利用云计算平台对数据进行处理与分析。系统会结合施工现场的实时数据与历史数据,通过数据质量评估机制动态筛选异常值,对可能出现的施工安全风险进行评估与处理,并生成安全风险报告。最后,将实时数据和安全风险报告一并传输到虚拟层,获得可视化的实时监测数据,安全管理人员可以通过显示终端或移动端应用查看分析结果。

在通信方面,交互层通过无线通信技术(如5G、DSRC、LoRaWan)将物理层的实时数据传送至虚拟层进行汇总与处理,确保了施工现场的实时数据流动,提升了数字孪生系统在安全管理、施工监控等方面的智能化水平。

2.3 虚拟层

在高速公路施工安全管理中,虚拟层是框架的核心部分,其通过创建与实际施工现场高度一致的数字模型,辅助施工团队在虚拟环境中进行施工过程的模拟与预测,为管理决策提供支持。按照数字孪生虚拟模型的构造方式,虚拟层包括几何模型(Geometric Model, GM)、物理模型(Physical Model, PM)、行为模型(Behavioral Model, BM)和规则模型(Rule Model, RM),可以从多个时间和空间尺度描绘物理实体^[16]。因此,虚拟层模型可以由四元组表示为:

$$VLM = \{GM, PM, BM, RM\} \quad (3)$$

GM为虚拟层的基础,负责施工现场空间布局与三维结构的建模。通过三维建模技术(如BIM与GIS),GM可精确再现高速公路的地形、路面、桥梁、隧道等各类基础设施,并在虚拟环境中进行可视化呈现。管理人员、施工团队和安全人员可以通过数字化三维模型清晰了解施工现场的空间结构,进而优化施工方案、提高施工效率。在施工过程中,GM还可结合虚拟现实和增强现实技术为施工人员提供沉浸式体验,更加细致地了解施工现场。

PM负责对高速公路施工过程中的物理现象和力学行为进行建模与分析,主要涉及对施工材料、结构、环境条件的物理属性和性能进行静态评估。PM通过模拟土壤、路

基、桥梁、隧道等施工要素的力学特性,辅助预测可能产生的风险和问题,确保施工结构的稳定性与安全性。

BM主要模拟和预测施工过程中各类实体(如人员、设备、材料等)的动态行为与相互作用。与GM和PM侧重空间与力学分析不同,BM着眼于施工活动的动态管理,包括施工任务的协调、人员作业、设备操作、资源调度等。BM能够优化施工过程中的行为流,确保工程顺利进行,并提高施工效率和安全性。通过对人员行为的实时监控,虚拟层可及时发现不规范操作或安全隐患,并采取相应的预警或纠正措施。BM可预测设备的使用效率,避免资源冲突和设备闲置,实现设备与人员的智能调度与高效利用。此外,BM还可用于模拟施工过程中不同任务之间的相互影响,优化施工方案,确保每个环节顺利进行,减少施工延误。

RM在虚拟层中扮演着决策支持与行为规范的重要角色。其将安全管理、质量控制、资源调度等方面的标准和规定嵌入虚拟环境中,确保施工活动按照既定规范进行。通过RM,虚拟层可以实时监测施工过程是否符合安全规定、质量标准以及环保要求。例如,在施工过程中,如果工人未佩戴安全装备,或设备使用不符合操作规范,RM可以自动触发警报,提醒管理人员及时纠正。在资源调度方面,RM可优化施工任务与资源分配,确保各类资源得到合理配置,避免浪费或冲突。此外,RM还能自动调整施工计划,根据实时数据优化任务顺序与资源配置,保证施工进度,并最大限度地减少安全隐患和质量问题。

综上所述,虚拟层通过几何、物理、行为和规则类模型的协同作用提供全面的管理支持。其中,GM确保施工现场空间的精确表达与可视化;PM提供结构分析与力学评估;BM优化施工过程中的人员与设备状态;RM通过实时监控和规范约束确保施工过程的安全性与高效性。

3 架构涉及的关键技术

3.1 数据采集与传输

在高速公路施工阶段,数字孪生技术的应用依赖于高效、准确的数据采集与传输系统。实时采集的各类数据是支持数字孪生系统实时监控、分析和优化决策的基础。为实现这一目标,该阶段采用多种现代传感器技术和智能设备。

视频监控与图像处理技术可在施工现场提供视觉化的进度监控,自动检测施工质量并及时反馈。传感器的测量数据则用于监测环境因素和机械设备的运行状态,确保施工环境符合标准并及时发现潜在故障。射频识别技术通过对施工材料、设备及人员进行实时追踪,能够高效管理施工现场的物资和人员流动^[17]。这些传感器和设备不断地采集数据,并通过高速、可靠的通信网络将其实时传输至数字孪生系统。

数据传输部分的核心要求为低延迟和高带宽,即能够支持海量数据的实时传输。目前,5G 通信技术被广泛应用于施工现场,可以快速传输现场传感器数据、图像和视频,确保施工进度和环境信息能够被实时反馈到决策系统。此外,专用短程通信(Dedicated Short Range Communications, DSRC)和低功耗广域网(LoRaWAN)凭借可靠的实时通信能力、超长的通信距离以及极低的功耗,被应用于施工现场的短距离数据传输与设备间的实时通信。通过以上技术,施工现场的数据能够快速、稳定地上传至云平台进行处理分析,并通过边缘计算进一步减少传输延迟,提高系统反应速度。随着大数据与云计算的融合,施工现场采集的数据可以实现实时同步,确保数字孪生系统能够精准反映施工过程中的各项变化,为施工管理提供动态支持。数据采集与传输系统不仅为数字孪生模型的构建提供了基础数据,而且为后续的施工质量管理、安全保障和决策优化提供了强有力的支持。

3.2 系统建模

三维建模与 BIM 技术是构建数字孪生模型的基础,其通过创建精准的三维虚拟模型来详细描述施工现场的每个物理实体,对道路、桥梁、隧道、交通设施等进行全方位、细粒度的虚拟再现。BIM 技术不仅能够模拟设计方案,而且能对施工进度、资源分配和空间布局进行优化,确保各个环节的高效协同。

基于传感器的数据驱动建模是实现动态更新的关键,其通过实时采集施工现场的温度、湿度等数据来及时反馈施工进度与环境变化,确保模型与现实的高度一致。数据驱动的建模方法通过将现场传感器数据与虚拟模型相结合,能够动态修正模型,提供更精确的施工管理支持。

机器学习与大数据分析技术的引入使得模型不仅能够反映当前的施工状态,而且能够进行预测分析。通过对历史施工数据进行学习可挖掘出施工过程中存在的潜在规律,并预测可能出现的问题,进而优化现有施工方案与调度计划。虚拟仿真技术还能够结合网络分析法和物元可拓模型为施工现场的安全管理与风险评估提供支持,辅助施工人员在实际操作中规避潜在危险。

3.3 高性能运算

数字孪生技术需要依赖高性能计算来支撑其数据处理、分析和实时响应能力^[18]。高性能计算通过优化数据结构和算法架构提升系统的计算能力和处理速度,从而保证数字孪生系统高效运行。施工现场传感器、监控设备和管理系统的持续反馈会产生大量实时数据,利用深度学习算法对这些数据进行分析可自动识别施工中的模式与规律,对潜在风险进行预警,从而实现施工管理的智能化与精确化。

为了满足高速公路施工过程中对数据的实时分析需求,高性能的数据处理设备必不可少。基于分布式计算的云计算平台为数字孪生系统提供了必要的技术保障^[19]。

其可以按需调配计算资源,充分利用分布式计算模型来处理海量的施工数据,不仅支持高效的数据存储,而且能在大规模数据分析时提供足够的计算能力,满足高速公路施工管理、维护决策、应急响应等多方面的需求。

4 数字孪生在高速公路施工中的应用前景

高速公路施工作为一个涉及多个环节的大型工程,面临着进度控制、安全保障、资源管理等一系列挑战。数字孪生技术通过精准的数据采集、实时监控与动态优化,能够为高速公路施工提供强有力的支持。

4.1 自动化与无人化施工

数字孪生的未来发展趋势为与自动化和无人化施工技术的深度融合,通过智能化设备和机器人提升施工效率与精度^[20]。通过数字孪生平台,自动化设备(如无人驾驶施工机械、机器人等)能够在施工现场接收实时数据,智能调度完成各项施工任务。例如,在路基填筑过程中,数字孪生可以根据实时数据监控填筑材料的性能和压实过程,确保路基质量;在桥梁架设中,数字孪生技术能够模拟桥梁结构安装过程,自动优化吊装方案,提高架设效率 and 安全性;在隧道掘进过程中,数字孪生可预测地质条件变化,自动调整掘进参数,实现隧道掘进机的精准控制。通过这些自动化设备的协同作业,施工效率能大幅提高,同时减少人为错误,提升施工精度和安全性。

4.2 施工人员虚拟培训

数字孪生能够在施工人员培训方面发挥重要作用。其可以模拟不同施工场景,辅助新员工进行虚拟培训,提升其操作技能和安全意识^[21]。通过体验精准的模拟环境,工人能够在没有实际风险的情况下熟悉施工设备和操作流程,进一步减少施工阶段的安全事故。

4.3 多方协同与项目管理

高速公路施工项目一般涉及多个部门和团队的协作,数字孪生技术通过集成各方数据为施工项目提供全方位的管理支持。该技术可协助设计、施工、质量监控、安全管理等不同团队共享数据、协同工作,从而提高项目管理效率。施工进度、资源配置等信息可在系统中实时更新,确保各方掌握项目的最新状态,减少信息滞后和沟通误差。该技术还可通过数据推演模拟施工过程和环境变化,协助管理者优化资源使用,预测项目进度;同时通过模拟应急场景实现环保施工、精确进度管理和高效应急演练。

4.4 宏观路网协调与施工干扰管理

在施工过程中往往需要对周围的交通流量进行管理。数字孪生技术能实时监控交通流,并在施工过程中动态调整交通管制措施。例如,系统能根据实时交通流量数据调整施工区域的开工时间,避开高峰时段,减少对公共交通的影响。此外,数字孪生技术还能协调不同施工区域之间的资源与任务,确保施工过程中的各个环节不会相互冲

突,从而提高施工效率。

5 结语

数字孪生作为新兴技术,在高速公路施工领域具有巨大的应用潜力,能够实现物理和虚拟世界的高度同步与互动,从而优化施工过程,提高施工效率和质量,推动建筑行业的数字化转型。本文以数字孪生五维模型为核心,将其深入应用到高速公路施工的各个阶段,剖析与之紧密相连的关键技术,并对未来的技术发展趋势进行了前瞻性探讨。尽管当前数字孪生技术在工程领域的应用仍然面临诸多理论和技术难题,例如数据集成和同步实现困难、实时数据处理能力有限、数据安全与保障欠缺等。相信随着相关技术的日益成熟以及跨学科的深入合作,数字孪生必将成为高效便捷的智能化施工管理工具,为我国的建筑业发展注入新的活力。

参考文献:

- [1] LIU Z S, XING Z Z, HUANG C, et al. Digital twin modeling method for construction process of assembled building[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 213-222.
刘占省, 邢泽众, 黄春, 等. 装配式建筑施工过程数字孪生建模方法[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 213-222.
- [2] YANG X, SU Q, NIU Y B, et al. Dynamic feedback method of high slope construction check calculation based on BIM+digital twin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8812-8819.
杨雪, 苏谦, 牛云彬, 等. 基于BIM+数字孪生的高边坡施工检算动态反馈方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8812-8819.
- [3] LI T, LI X, RUI Y, et al. Digital twin for intelligent tunnel construction[J]. Automation in Construction, 2024, 158: 105210.
- [4] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. Ifac-papersonline, 2015, 48(3): 567-572.
- [5] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [6] GITHENS G. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking by Michael Grieves[J]. Journal of Product Innovation Management, 2007, 24(3): 278-280.
- [7] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Florida: Space Coast Press, 2011.
- [8] NEJAD H T N, SUGIMURA N, IWAMURA K. Agent-based dynamic process planning and scheduling in flexible manufacturing system[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(5): 1373-1389.
- [9] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles[C]//Hawaii: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012.
- [10] CHEN Y, WANG Y F, QIAO M, et al. Review on key technologies and typical applications of digital twin in manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(11): 24-45.
陈燕, 王禹封, 淮木, 等. 数字孪生在制造业中实现的关键技术及典型应用综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(11): 24-45.
- [11] WU Z H, LIU Z Z, SHI K, et al. Review on the construction and application of digital twins in transportation scenes[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 295-305.
伍朝辉, 刘振正, 石可, 等. 交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(2): 295-305.
- [12] LIU Y P, LIU Y J, LIU G, et al. Digital twin conception of intelligent operation and maintenance of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8636-8651.
刘云鹏, 刘一瑾, 刘刚, 等. 电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8636-8651.
- [13] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>.
- [14] TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [15] LIU Z S, SHI G L, DU X L, et al. Theory system and realization method of intelligent operation and maintenance based on digital twins[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 46-57.
刘占省, 史国梁, 杜修力, 等. 基于数字孪生的智能运维理论体系与实现方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 46-57.
- [16] TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [17] WANG J W, GAO C, DONG S, et al. Current status and future prospects of existing research on digitalization of highway infrastructure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 101-124.
王建伟, 高超, 董是, 等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 101-124.
- [18] WANG Y, WANG H, WANG W, et al. Architecture, application, and prospect of digital twin for highway infrastructure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2024, 11(5): 835-852.
- [19] YUAN X, CHEN J, ZHANG N, et al. Digital twin-driven vehicular task offloading and IRS configuration in the Internet of Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24290-24304.
- [20] WU M, LI R, WANG P J, et al. Preliminary study on the parallel technology of fully mechanized roadway based on digital twin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 506-513.
吴森, 李瑞, 王鹏江, 等. 基于数字孪生的综掘巷道并行工艺技术初步研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 506-513.
- [21] FANG Y, ZHUO J C, DU M F. Application and development of digital twin in intelligent construction of rail transit[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1): 68-73.
方宜, 卓建成, 杜梦飞. 数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用发展[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(1): 68-73.

(责任编辑:尹晨茹)