文章编号：1674—8247(2024)01—0068—06
DOI:10. 12098/j. issn. 1674－8247. 2024. 01. 013

数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用发展

方 宜[1] 卓建成[1] 杜梦飞[2]

（1. 中铁二院工程集团有限责任公司， 成都 610031；2. 北京交通大学， 北京 100044）

摘 要：数字孪生作为智能轨道建设的关键技术之一，逐渐成为业内研究热点。根据轨道交通智能建造业应用情况，本文从规划设计、加工生产、施工管理和运营维护4个维度，对数字孪生的阶段性成果进行梳理阐述。针对既有研究不足，提出数字孪生技术未来研究方向和重点指向建议。研究结果表明：数字孪生技术能够提高工程质量、降低成本、提高效率，并能提供实时决策支持和全生命周期数据实时共享。数字孪生技术在轨道交通智能建造业中具有广阔的应用前景，将对行业的发展和进步产生积极的推动作用。

关键词：数字孪生；轨道交通；智能化；智能建造；数字化协同

中图分类号：U213. 2 **文献标志码**：A

Application and Development of Digital Twin in Intelligent Construction of Rail Transit

FANG Yi[1] ZHUO Jiancheng[1] DU Mengfei[2]

（1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. , Chengdu 610031 , China；
2. Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China ）

Abstract: As one of the important technologies for intelligent construction of rail transit, digital twin has gradually become a research hotspot in the industry. According to the practice of applying intelligent construction of rail transit, this paper reviewed the phased achievements of digital twin from four dimensions: planning and design, machining and fabrication, construction management, and operation and maintenance. Aiming at the gaps in existing research, this paper suggested future research directions and focal points for digital twin technology. The findings reveal that the digital twin technology can improve project quality, reduce costs and increase efficiency, and it offers real-time supports for making decisions and enables real-time data sharing in the entire lifecycle. It has a broad application prospect in the intelligent construction of rail transit, and will play a positive role in promoting the development of the industry.

Key words: digital twin; rail transit; intelligence; intelligent construction; digital collaboration

我国正处于建造方式转型的关键时期，为了提升建筑行业的精细化管理水平，迫切需要推动新一代信息技术（如5G、大数据、云计算、人工智能等）与建设领域的深度融合。这样的融合将加速推进基于数字化、网络化和智能化的新型基础设施建设，促进智能建造与新型建筑工业化的协同发展。重点发展数字化设计、智能生产、智能施工和智慧运维等领域，以实现建造行业的全面智能化和数字化转型[1]。

数字化是进一步驱动铁路智能建造业创新的关键，它为运营合理化、提高结构安全性、可靠性和改善

收稿日期：2023-12-05
作者简介：方宜（1984-），女，高级工程师。
引文格式：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．
FANG Yi, ZHUO Jiancheng, DU Mengfei. Application and Development of Digital Twin in Intelligent Construction of Rail Transit［J］. High Speed Railway Technology, 2024, 15（1）：68－73.

客运、货运服务提供了思路,同时降低了设计、施工、运维各阶段成本。在数字化的过程中,现实世界和虚拟世界相互作用的可能性为工业4.0框架下的工业和物流带来了创新、新的商业模式和巨大的优化潜力。为了实现这一潜力,必须利用物联网和云技术以及人工智能等其他数字技术实现生产和物流的数字化联网。

数字孪生是一项先进的数字化技术,其在智能制造领域被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段[2]。现如今,数字孪生技术的实施应用范围日益广泛,除了最早的航空航天领域外,数字孪生技术现已应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗、环境保护等多个行业。轨道结构基础设施的全寿命周期中,各个业务板块都可以根据其独特的业务特点和需求,采用数字孪生技术,实现各系统乃至全过程协同数字化智能化,从而提升工程质量及建造效率。

为此,本文对数字孪生技术在轨道工程中的应用进行研究。首先,对数字孪生的形成背景、核心原理、技术特点进行综述;其次,结合目前数字孪生技术在轨道工程中的应用情况,从全生命周期的角度,调研数字孪生技术在设计、加工、施工和运维阶段的应用情况;最后,对当前数字孪生技术在轨道工程中的应用进行分析与评价,指出目前应用中存在的问题,并对数字孪生技术未来在轨道工程智能建造领域的发展提出建议和展望。

1　数字孪生技术内涵

1.1　形成背景

在20世纪50年代的航天工业中,人们迫切需要一种能够在计算机上模拟飞行器飞行的方法,以减少实际试飞中可能发生的意外事故对人员和财产的损失。为了解决这一问题,美国航空航天局(NASA)提出了“数字孪生计划”,为数字孪生技术的发展揭开了序幕。

数字孪生有多种形式、多种目的和不同的优势。迄今为止被大多数人认可和使用的数字孪生的一般定义是由Glaessegen和Stargel[3]在2012年提出的:数字孪生是对一个复杂产品进行集成的多物理场、多尺度、概率模拟,并利用现有的最佳物理模型、传感器更新等来反映其对应的孪生体的生命。数字孪生由3部分组成:物理产品、虚拟产品、以及连接物理产品和虚拟产品的连接数据。

随着计算机技术的发展,数字孪生技术在工程技术领域得到了广泛应用,铁路行业必然朝数字化多方面协同方向发展。在数字孪生技术应用研究方面,轨道领域还在起步阶段,未来几年内也必将成为轨道智能建造研究热点。

1.2　核心原理

数字孪生作为一种先进的技术手段,通过建立物理世界和数字世界之间的映射关系,创造了物理系统的虚拟副本。其原理基于数据收集、模型建立、仿真分析和决策优化4部分核心要素展开。

数据收集是数字孪生的基础。通过传感器和其他数据源,实时获取物理系统的各种物理参数,例如温度、压力和振动等。这些数据作为输入,构建物理系统的完整数据集。

在数据收集的基础上,模型建立是实现数字孪生的关键步骤。通过数据处理和机器学习等算法,将收集到的数据进行处理和分析,建立准确的物理系统模型。该模型可以基于物理原理的数学模型、统计模型或深度学习模型。优化模型的准确性和可靠性,对于实现有效的数字孪生至关重要。

随后是仿真分析阶段,根据物理系统模型和实时数据,进行系统行为的仿真模拟。通过模拟不同工作条件下的运行情景,数字孪生可以预测物理系统的性能、状况和需求。仿真分析可以帮助决策者了解物理系统的强弱点、优化潜力和可能的风险。

最后,数字孪生为优化决策和性能监控提供了平台。基于数字孪生的模型和仿真分析结果,决策者可以根据实际情况做出精确和迅速的决策。基于数字孪生预测和优化物理系统的运行状态,提高设备的效率和可靠性。数字孪生还为设备维护和故障排除提供指导,减少停机时间和维修成本。

通过数字孪生技术,可以实现对复杂物理系统的实时监测、预测和优化。它提供了一种高度可视化和交互式的环境,帮助决策者更好地理解、分析和管理物理系统。数字孪生不仅在工业领域有广泛的应用,还对于城市规划、交通管理和医疗保健等领域具有潜力。在未来,数字孪生将持续发展,并对各行各业的创新和进步发挥重要作用。

1.3　技术特点

根据数字孪生的解释和定义,总结了数字孪生的以下技术特点:

(1)实时反射。数字孪生中存在2个空间:物理空间和虚拟空间。虚拟空间是物理空间的真实反映,能够与物理空间保持超高的同步性和保真度。

(2)互动与融合。这一特点可以从3个方面来

解释:

① 物理空间的相互作用和汇合。数字孪生是一种全流程、全要素、全服务的集成。这样,物理空间中各个阶段产生的数据就可以相互连接。

② 历史数据和实时数据之间的相互作用和融合。数字孪生数据更全面。它不仅依赖于历史经验信息,还能实时收集所有部署系统的数据。因此,通过收敛合并可以对数据进行更深入的挖掘和更充分的利用。

③ 物理空间和虚拟空间之间的相互作用和汇合。在数字孪生中,物理空间和虚拟空间并不是隔离的。两个空间之间存在平滑的连接通道,使其易于相互作用[4]。

(3)自我进化。数字孪生可以实时更新数据,通过虚拟空间与物理空间的并行比较,使虚拟模型不断改进,这也是数字孪生作为新兴数字技术最具竞争力的优势之一,通过不断迭代进化逐渐逼近结构理想最优解[5]。

2　数字孪生技术在轨道交通智能建造中的应用发展

在过去的几十年里,传统的铁路行业发生了巨大的变化,从一个由国家运营商组成的领域变成了一个国际竞争的领域。竞争形势的变化迫使各国寻求新的创新机遇——传统建造模式已经不再能够满足工程各方要求。

数字孪生技术在智能制造领域被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。轨道工程中,数字孪生技术的应用目标是实现工程建设的全寿命周期、全要素以及参建各方的信息化、数字化、可视化以及智能化。在物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的发展推动下,并在不同信息系统上进行数据共享和协同运行,实现互联协同、智能生产、决策辅助等功能。轨道交通智能建造各业务板块都可根据其业务特点和业务需求,采用先进的信息化技术,实现本领域数字孪生技术的典型应用,从而提升作业效率和作业质量。

目前,受技术手段的限制,数字孪生技术在轨道工程一个完整的生命周期中实施应用难以实现,但是在生命周期的某一阶段已经有了一定程度的应用。为此,本文从设计、生产、施工和运维 4 个阶段对数字孪生技术在轨道交通智能建造中的应用展开研究。

2.1　规划设计

数字孪生技术可以通过建立轨道的虚拟模型,模拟和评估轨道的性能特征。通过结合地理信息系统(GIS)数据、气象数据、交通流量等信息,数字孪生可以预测轨道在不同运营条件下的性能表现,如列车运行稳定性、疲劳寿命和振动特性等。这有助于工程师评估不同轨道设计变量(如轨道几何、材料和固定方式)对性能的影响,以制定最佳的设计策略。

通过数字孪生技术,工程师可以在虚拟环境中进行轨道设计的仿真和优化。数字孪生可以利用轨道材料和固定方式、地形和气象数据,模拟轨道在不同运行条件下的响应、疲劳寿命和维修需求。工程师可以通过观察和分析这些仿真结果,针对不同设计方案进行比较和优化,最大程度地提高轨道的性能和安全性。

数字孪生可以在列车与轨道之间的相互作用上起到关键作用。通过模拟列车 – 轨道系统的动力学行为和振动特性,数字孪生可以提供有关列车行驶的运行参数和轨道的响应信息。这有助于设计和优化列车与轨道之间的匹配性,最大程度地减少振动、摩擦和噪音,从而提高列车的运行平稳性和乘客舒适度。

数字孪生在轨道设计方面的应用可以提供性能评估、仿真和优化、列车 – 轨道系统优化的支持,可以帮助工程师制定更优化、可持续的轨道设计方案,并提高轨道设施的性能、安全性和可靠性。尽管目前数字孪生在轨道前期设计方面的应用案例相对较少,但其在轨道规划设计中的潜力是不可忽视的,主要原因是数字孪生技术在国内的认知水平还相对较低,并需要克服一些技术难题。

2.2　加工生产

在生产方面,数字孪生能够实时监测和控制复杂的生产过程,并通过及时调整来优化过程[6]。Zheng[7]等开发了一个框架,用于在生产线的产品生命周期用例中实现数字孪生,解决了真实和虚拟空间的交互以及信息处理的连接层。他们将这些功能总结为数据存储、处理和映射,构成了数字孪生框架的核心。Jiang[8]等专注于开发一种实现数字孪生的框架,以满足生产和物流同步运行的要求。在此过程中,他们的目标是将数字孪生的服务功能与产品服务系统相结合。

数字孪生技术可以建立轨道交通生产工艺的虚拟模型,并进行仿真和优化。通过模拟不同流程和工艺参数的变化,可以评估生产效率、资源利用率和产品质量等指标,并优化生产过程以实现最佳结果。通过数字孪生技术,可以提前预测生产线上的潜在问题,并进行调整和优化,提高生产线的运行效率和产

品质量。

通过在轨道设备上安装传感器,可以实时监测设备的工作状态和健康状况。数字孪生技术可以将传感器数据与模型进行结合,实现设备的远程监测和预测性维护。基于模拟和数据分析,可以提前识别潜在故障,并采取相应的维护预防措施,避免设备故障造成生产中断。

在供应链管理和协同生产方面,数字孪生技术可以构建整个轨道交通供应链的虚拟模型,并集成不同环节的数据。通过可视化和实时数据分析,可以追踪和优化物料的流动,提高供应链的可靠性和效率。此外,数字孪生还可以促进各环节之间的协同合作,实现实时的信息共享和沟通,减少生产中的物料短缺和延误等问题。

同时数字孪生可以帮助轨道交通生产企业对资源进行有效管理和规划。通过整合生产数据、供应链数据和市场需求数据,数字孪生技术可以提供全面的资源情况分析,包括原材料、设备和人力资源等。基于这些数据和模型,可以进行生产计划的优化和调整,以适应市场需求和资源约束,确保生产的高效运行和满足客户需求。

数字孪生在轨道交通生产方面的应用可以提高生产效率、优化资源利用和提高质量,实现智能化和可持续的生产。通过数字孪生技术,轨道交通生产企业可以实现更高效、灵活和可靠的生产运营,为行业的发展和竞争提供有力支持。

2.3　施工管理

数字孪生在轨道施工管理方面的应用可以提供实时监测、仿真和决策支持,以提高轨道施工的效率、质量和安全性。

通过数字孪生技术,可以在虚拟环境中建立轨道施工的动态模型,用于跟踪和管理施工进度。通过结合实时监测数据、物料供应链信息和施工进度计划,数字孪生可以提供实时的进度信息和预测,以帮助项目经理跟踪施工进展,及时识别潜在的延误和冲突,并采取相应的措施解决问题。

针对施工资源管理,数字孪生可以对轨道施工过程中的资源进行模拟和优化管理。它可以预测施工资源的需求,如人员、机械设备和材料,并优化资源的分配和调度。通过模拟不同方案的资源使用情况,数字孪生可以帮助项目经理优化施工过程,提高资源利用效率,减少浪费和成本,并确保施工进度和质量的达成。

在施工安全管理方面,通过数字孪生技术,可以模拟和预测轨道施工过程中的安全风险和潜在事故,可以根据施工计划、工程数据和安全规范,模拟施工场景,并进行安全性评估。它可以识别潜在的冲突点、危险区域和安全隐患,并提供针对性的安全措施和培训方案。通过数字孪生技术的支持,可以最大程度地降低施工过程中的事故风险,保障施工人员的安全。

数字孪生技术可以为施工管理人员提供实时的决策支持。通过模拟和分析不同决策方案的效果,数字孪生可以帮助人员进行预测、优化和验证。例如,模拟不同的工艺流程、施工顺序或施工方法,并提供性能、质量和成本方面的预测结果,以帮助决策者作出明智的决策。

2.4　运营维护

铁路运营方的主要目标是不断优化铁路网络的运营和维护系统,同时确保用于维护管理成本最少。数字孪生模型被认为是下一个技术和数字突破,使运营商能够有效地利用资源来维护铁路基础设施,为运营商提供了所需的网络健康所有关键方面的统一视图,因此可以轻松地管理实时决策;还有助于在未来为优化网络性能而采取的预防性和数据驱动决策更加准确。

在整个生命周期中,数字孪生技术可以为轨道运维带来很多好处[9]。在航天工业中,通过整合历史经验和传感器数据,将其与数字孪生技术相结合,可以改进飞机使用年限以及增强维护预测精准度,进以取代常规使用的实时监测方法。然而,上述的优点并不局限于航空航天工业,铁路行业同样适用[10]。

为了适应铁路网络和基础设施现代化的需求,必须对相关部件结构进行专业的运营监控和预测性维护。基于数据驱动的评估以及模拟和预测,对未来事件的早期预测可以优化操作和维护,提出对应预防措施,并规避病害事故带来的额外支出。

随着列车运营速度的提高和轴重的增大,铁路运输向科学研究提出一系列挑战,其中轮轨滚动接触疲劳损伤就是最复杂的问题之一,其被视为铁路更换、维护、故障和安全问题的主要原因。数字孪生技术的好处之一就是是否对钢轨进行维护取决于预测技术条件而不是常规检测手段,因此可以采用预测性维护[11]。有学者提出了一种基于数据驱动的方法来对轨道结构进行养护维修,这种系统依赖于轨检车对轨道的近似实时监控,通过传感器获得轨检数据,再进行预处理,以供系统基于机器学习算法进行维护预测[12]。数据驱动的基石就是海量数据,这些数据必须

来自传感器或数字模拟,由于物理传感器存在测得数据量不足等局限性,为了弥补传感器的不足,可以使用数字建模来生成可用于预测性维护的额外传感器数据,同时也有利于应对测试在常规操作中无法测试的各种严峻情况。

同时铁路车辆在高速运行过程中,车轮在振动过程上下运动,可能会发生横向相对位移而导致脱轨,而车辆脱轨风险通常通过轮对垂直力与横向力之比或轮重减载率来评估,这些参数只能采用测力轮对来测量,再通过多体动力学仿真进行模拟。有学者针对脱轨风险系数预测展开研究,通过数字孪生实现了一个代理模型,该模型具有大量多体动力学数值程序和机器学习模型的结果,以预测列车瞬时脱轨风险[13]。与不涉及数据同步的数字模型或需要从物理列车到列车模型的单向数据传输的数字影子不同,数字孪生涉及动态模型和物理实体之间的数据传输闭环,列车模型和实体列车能够实时交换信息并修改彼此的性能参数,从而实现数据协同作用,减少脱轨风险、能源消耗等。数字孪生模型的列车模型组件预测未来动态行为的能力受到可用计算能力的限制。

数字孪生在轨道运维方面的应用可以提供实时监测、预测性维护、故障分析和决策支持:可以帮助维护人员及时识别和解决问题,优化维护计划和资源分配,提高轨道设施的可用性、可靠性和安全性。

3　分析与讨论

3.1　数字孪生在轨道交通智能建造中的挑战

数字孪生作为一种先进的技术方法,正在轨道交通智能建造领域崭露头角。然而,数字孪生在这一领域正面临着一些挑战。

(1)数据质量和一致性。数字孪生需要大量的数据来建立和维护模型,而数据的质量和一致性对数字孪生的准确性和有效性至关重要。然而,在实际应用中,数据的收集和整合可能受到限制。如今的铁路网络是由各种各样的工具和测量设备来管理的。他们使用的软件包、接口和数据是不同的。因此在整合各方数据方面面临困难,且数据质量不高或存在不一致性的情况,这可能导致数字孪生模型不准确,影响其应用效果。

(2)复杂性和技术要求。数字孪生建模和应用涉及到多个学科和技术领域的知识,需要跨越工程、计算机科学、数学等领域。对于轨道交通智能建造业来说,建立和操作数字孪生模型需要专业的技术知识和专长。此外,数字孪生模型的建立和使用需要使用高性能计算和大数据分析技术,对计算资源和技术设施有一定的要求。而现有的计算资源与能力有限,大大限制了数字孪生普及与应用程度。

(3)成本和资源投入。建立和维护数字孪生模型需要大量的成本和资源投入,包括硬件、软件、人力等。这对于一些资源有限或预算有限的组织和企业来说,可能是一个挑战。因此,需要评估投入和回报之间的平衡,找到适合可行的实施策略。

(4)技术标准和互操作性。数字孪生涉及多个软硬件系统和数据来源的集成,其中可能存在不同的技术标准和接口要求,目前数字孪生模型的建立方法并没有一个统一的框架,确保各个系统之间的互操作性和数据交换的一致性是一项挑战。需要建立统一的技术标准和规范,以促进不同系统之间的集成和信息共享,确保各个平台接口之间数据有效互通。

(5)建模精度和复杂性。数字孪生模型需要准确地反映实际的轨道交通系统和建筑结构,这对建模的精度和复杂性提出了较高的要求。特别是对于大型和复杂的轨道交通系统来说,建立一致、准确和可信的数字孪生模型是一个挑战。需要合适的建模方法和工具来处理系统的复杂性。

(6)不确定性处理。在轨道交通智能建造中,许多因素都存在不确定性,例如材料特性、环境条件和人员行为等随机因素。数字孪生模型在处理这些不确定性时可能面临挑战,需要采用适当的建模和分析方法来考虑不确定性,并提供可靠的结果和预测。

(7)模型验证。数字孪生模型在建立之后需要进行验证,以确保其准确性和可靠性。这需要开发相应的验证方法和评估指标,并进行实地测试和对比分析。然而,在实践中验证数字孪生模型可能会受到资源、时间和操作限制,这可能限制了模型的鲁棒性和适用性。

(8)应用案例较少。在工业 4.0 工具中,数字孪生是一种趋势方法。虽然近年来数字孪生已经流行,引起了工业界和科学界的高度关注,但最相关的数字孪生应用经验主要来自特定行业,如航空航天和制造业,很少有实例应用于已建成基础设施,在建造过程中完全实现数字孪生的案例非常罕见。

总体而言,数字孪生在轨道交通智能建造中的应用潜力巨大,可以提高建造和维护效率和质量。然而,要充分发挥数字孪生的优势,需要克服一些技术、管理和组织上的挑战,并不断改进和创新。通过持续的研究和实践,可以逐渐解决这些问题,并在轨道交通行业实现数字孪生的成功应用。

3.2　发展方向及展望

数字孪生在铁路智能建造业的发展方向是非常广阔且潜力巨大的。

(1)全生命周期管理。数字孪生可以实现对铁路建造项目从规划设计阶段到施工、运营和维护阶段全生命周期的管理。通过数字孪生模型,可以集成各类数据和信息,包括地理信息、施工方案、设备和材料信息等,以支持项目的决策和优化。这可以减少建造过程中的风险和变更,并提高项目交付质量和效率。

(2)智能化施工和监控。数字孪生可以应用于铁路建造项目中的施工管理和监控。通过数字化建造场景和传感器技术,可以实时监测施工过程的状态和进展,并进行智能化的调度和协调。例如,实时追踪设备和人员的位置和工作状态,优化施工流程,提高安全性和效率。

(3)虚拟培训和协作。数字孪生可以用于提供虚拟培训和协作环境,以支持铁路建造工人和管理人员的培训和协作。通过数字孪生模型和虚拟现实技术,可以创建逼真的建造场景,并模拟不同的施工任务和操作。这有助于提高工人的技能和安全意识,降低培训成本和风险。

(4)数据驱动决策和优化。数字孪生可以提供大量的数据和信息,支持铁路智能建造业的决策和优化。通过数据分析和建模,可以识别潜在的问题和风险,并预测建造和运营中的性能和需求。这有助于制定更有效的施工计划、资源管理和维护策略,提高项目和系统的整体性能。使用智能传感器和物联网技术,数字孪生可以实时监测和收集大量的工程和设备数据。这些数据可以被用于实时分析和反馈,帮助优化施工方案和预测潜在问题,从而提高工程质量和安全性。数字孪生还可以促进铁路建设领域的协同合作和信息共享,通过建立云平台和数据共享机制,实现不同部门和企业之间的无缝协作,提高整体施工效率。

(5)创新技术整合。随着物联网、人工智能和大数据等技术的不断进步,数字孪生可以与这些创新技术相结合,推动铁路智能建造业的创新和发展。例如,通过与无人机、机器人和自动驾驶等技术的集成,可以实现自动化的勘测、施工和监测,提高安全性和效率。还可以利用人工智能和机器学习技术,数字孪生可以分析海量数据,发现隐藏的模式和规律,进一步优化施工工艺、资源配置和运营策略。这样的智能决策支持系统有助于提高铁路智能建造的效率和可持续性。再者数字孪生与虚拟现实(VR)和增强现实(AR)的融合,有助于实现更直观、沉浸式的建造场景模拟和人机交互体验。工程师和施工人员可以通过虚拟现实技术参与建造过程,进行训练和规划,减少人为失误和事故风险。

总体而言,数字孪生将大大改善铁路智能建造业的效率、可靠性和可持续性。通过数字化和智能化的方法,铁路建造项目可以更加高效地进行规划、设计、施工和运营,并有效地管理和维护,从而提供更安全、可靠和环保的铁路系统。

4　结论

数字孪生在轨道交通智能建造业中展现出巨大的潜力,其在轨道交通智能建造业中的应用研究将对未来的轨道交通建设和运营产生重要影响。它不仅能够提升工程效率、降低成本,还可以改善施工质量、优化资源利用,甚至预测和避免潜在的故障和事故。数字孪生技术的普及将推动轨道交通建设向更智能、可持续的方向发展。然而,数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用也面临一些挑战。例如,数据收集、隐私和安全性等问题需要得到妥善解决;技术标准和规范的建立需要加强;以及组织文化和管理体系的适应性调整等。未来研究可着重关注数字孪生技术在轨道交通智能建造领域的持续推进。将更多的智能传感器和物联网技术引入建造过程,提高数据的准确性和时效性。同时,结合人工智能和机器学习技术,实现对大数据的深度分析和智能决策,进一步优化轨道交通建造的效率和质量。此外,还应加强各方之间的协同合作和信息共享,建立起全球范围内的数字孪生平台和数据标准,加快推动数字孪生技术在轨道交通智能建造业的大规模应用。总之,数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用研究具有重要的意义和广阔的发展前景。本研究为相关领域的学术界和业界提供了有价值的参考和启示,同时也为相关研究的深入探索和实践提供了方向和指导。

参考文献:

[1]　尤志嘉,郑莲琼,冯凌俊. 智能建造系统基础理论与体系结构[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(2): 105 – 111, 118.
YOU Zhijia, ZHENG Lianqiong, FENG Lingjun. Basic Theory and Architecture of Intelligent Construction System [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(2): 105 – 111, 118.

[2]　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.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension Digital

(下转第78页)

YANG Xiaoling. Application of Solar Photovoltaic Power Generation System in Railway Station Building[J]. Silicon Valley,2010,3(23): 133 – 134.

[10] 吴宗臻,王小锁,张凌云,等. 轨道交通光储直柔技术应用及展望[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 19 – 22.
WU Zongzhen, WANG Xiaosuo, ZHANG Lingyun, et al. Progress of PDEF Technology and Its Application Prospect in Rail Transit [J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 19 – 22.

[11] 康学东. 我国铁路智能建设与运营管理初探[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 84 – 89.
KANG Xuedong. Preliminary Exploration on the Intelligent Construction and Operation of China's High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 84 – 89.

(上接第 73 页)

Twin Model and Its Ten Applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1 – 18.

[3] GLAESSGEN E, STARGEL D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles [C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference< BR>20 th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference< BR>14 th AIAA. Honolulu, Hawaii. Reston, Virigina: AIAA, 2012 : AIAA2012 – 1818.

[4] GABOR T, BELZNER L, KIERMEIER M, et al. A Simulation-based Architecture for Smart Cyber-physical Systems [C]//2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC). Wuerzburg, Germany. IEEE, 2016 : 374 – 379.

[5] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011 : 154798.

[6] LIM K Y H, ZHENG Pai, CHEN C H. A State-of-the-art Survey of Digital Twin: Techniques, Engineering Product Lifecycle Management and Business Innovation Perspectives [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(6): 1313 – 1337.

[7] ZHENG Yu, YANG Sen, CHENG Huanchong. An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1141 – 1153.

[8] JIANG Hongfei, QU Ting, WAN Ming, et al. Digital-twin-based Implementation Framework of Production Service System for Highly Dynamic Production Logistics Operation [J]. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2020, 2(2): 74 – 80.

[9] MINERVA R, LEE G M, CRESPI N. Digital Twin in the IoT Context: a Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(10): 1785 – 1824.

[10] BARRICELLI B R, CASIRAGHI E, FOGLI D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications [J]. IEEE Access, 2019, 7 : 167653 – 167671.

[11] CHEREPOV O, ANTROPOV A, KARMATSKIY V, et al. Methodology for Estimating the Resource of the Friction Vibration Damper of a Freight Car Trolley [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094(5): 052064.

[12] VAN DINTER R, TEKINERDOGAN B, CATAL C. Predictive Maintenance Using Digital Twins: a Systematic Literature Review [J]. Information and Software Technology, 2022, 151 : 107008.

[13] BERNAL E, WU Qing, SPIRYAGIN M, et al. Augmented Digital Twin for Railway Systems [J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(1): 67 – 83.