

文章编号:1005-0523(2021)04-0027-18



# 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用

陈华鹏<sup>1,2</sup>, 鹿守山<sup>1,2,3</sup>, 雷晓燕<sup>1</sup>, 伍伟斌<sup>3</sup>

(1. 华东交通大学土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省智能交通基础设施工程研究中心, 江西 南昌 330013;  
3. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330200)

**摘要:**我国铁路基础设施建设正在从“建设为主”向“建管并用”发展,传统运维技术存在诸多弊端,亟需建立新的智能运维技术体系。数字孪生是实现虚实空间交互的先进技术,该技术突破了传统仿真及试验条件限制,实现以最快速度、最优成本掌握结构的实际运行状态。数字孪生能够将物联网、建筑信息模型、结构健康监测、数值仿真与人工智能等先进技术通过虚实数据交互,形成对物理实体有效地监控、模拟、预测、诊断与决策。针对数字孪生的发展、基本原理及技术方法进行归纳总结,阐述了数字孪生与建筑信息模型、结构健康监测、人工智能等技术的融合应用,总结了数字孪生在铁路运维场景下的技术方法及研究现状,包括智能检(监)测、数字孪生模型构建方法、结构性能退化模拟及维护策略确定。提出并详细阐述了基于数字孪生的铁路基础设施的智能运维技术框架,指出了当前数字孪生在铁路基础设施智能运维应用中存在的主要问题及解决方案,为铁路基础设施智能运维管理提供新的理论方法。

**关键词:**数字孪生;铁路智能运维;建筑信息模型;结构健康监测;新一代信息技术;人工智能

中图分类号:U2

文献标志码:A

本文引用格式:陈华鹏,鹿守山,雷晓燕,等.数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J].华东交通大学学报,2021,38(4):27-44.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.005

## Advance in Research on Applications of Digital Twin in Intelligent Railway Operation Management

Chen Huapeng<sup>1,2</sup>, Lu Shoushan<sup>1,2,3</sup>, Lei Xiaoyan<sup>1</sup>, Wu Weibin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architectural, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;  
2. Engineering Research Center for Smart Transportation Infrastructure of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China;  
3. Jiangxi Transportation Research Institute, Nanchang 330020, China)

**Abstract:** China's railway infrastructure construction is developing from "construction-oriented" to "construction and management balanced." Traditional operation and maintenance methods have many drawbacks, and there is an urgent need to establish an innovative intelligent operation and maintenance system. Digital Twin (DT), a technology of interacting between the real physical system and virtual counterpart, overcomes the limitations of traditional simulations and test conditions, and can offer the accurate assessment for actual operating condition at the fastest speed and optimal cost. digital twin can interact with Internet of Things, Building Information Modelling, Structural Health Monitoring, numerical simulation and artificial intelligence through the integration of re-

收稿日期:2021-05-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0105600);国家自然科学基金面上项目(51978263);江西省自然科学基金重点项目(20192ACB120008);江西省交通运输科技项目(2020Z0003, 2020X0013) All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介:陈华鹏(1964—),男,教授,博士,研究方向为结构健康监测,智能运维,结构可靠性与性能评估以及运行维护策略优化。E-mail:hp.chen@ecjtu.edu.cn.

al physical system and the associated virtual model in order to realize the real-time monitoring, simulation, prediction, diagnosis and decision-making of the system. This paper reviews critically the research progress, basic principles and technical methods of digital twin, and discusses the applications of Digital Twin integrating with Building Information Modelling, structural health monitoring, artificial intelligence, New Information Technology, etc. Then, the research advances of the applications of digital twin in railway operation and maintenance are summarized, including intelligent inspection (monitoring) testing, digital twin virtual modeling, performance degradation modeling, and optimized maintenance strategy determination. Finally, this paper presents the framework for intelligent operation and maintenance of railway infrastructure by using digital twin technology, and discusses the main problems and solutions of its applications in railway maintenance. From the critical review, the digital twin technology can provide a methodology for intelligent railway operation and maintenance management.

**Key words:** digital twin; intelligent railway operation management; building information modelling; structural health monitoring; new Information Technology; artificial intelligence

**Citation format:** CHEN H P, LU S S, LEI X Y, et al. Advance in research on applications of digital twin in intelligent railway operation management[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 27-44.

截止 2020 年底,我国铁路运营总里程 14.63 万 km (高铁 3.8 万 km)<sup>[1]</sup>。我国已成为世界上铁路基础设施建设规模最大、运营总里程最长的国家,正在由“建设为主”向“建养并重”发展。与设计及建造阶段相比,铁路基础设施服役时间跨度大,结构性能演变复杂,影响因素较多;因此,建立科学化、智能化的运维技术体系是交通运输工程领域今后研究的重点<sup>[2]</sup>。

目前运维评估主要依赖人工巡检(包括无损检测),存在检测效率低、主观性大、实时性差等问题,难以满足现有交通运输工程运维面临的严峻挑战。近年来,结构健康监测(structural health monitoring, SHM)技术快速发展,已成为人工检测的必要补充,并有取代的趋势。SHM 在结构关键位置布设传感器,对环境作用、结构响应及实时变化监测,以提高损伤发现速度及状态感知能力,为结构评估及寿命预测提供科学依据<sup>[3]</sup>。但当前 SHM 在损伤识别、状态评估以及维护决策优化等方面还存在着问题。

计算机辅助设计(computer aided design, CAD)经历了半个世纪发展,从二维制图向三维(3D)建模发展,但绘图效率低,协同性差。建筑信息模型(building information modeling, BIM)在三维可视化、协同设计、信息管理等方

面存在优势,在土建设计、施工阶段应用较多,但运维阶段应用受到限制。国内 BIM 应用常以 CAD 翻模为主,把 BIM 当作 3D 模型展示工具,没有发挥出 BIM 信息集成共享、多方协同合作的技术价值。通常,有限单元法(finite element method, FEM)建模存在大量假设,导致计算结果与实际不符, BIM 模型为 FEM 分析提供几何与物理参量,但目前 BIM 与 FEM 不能有效融合,需要进一步开发接口。地理信息系统(geographic information system, GIS)是处理地理空间信息的常用工具,但 GIS 在结构几何物理信息管理方面比 BIM 弱。目前上述仿真建模软件缺乏有效融合,不具备数据实时更新能力,导致分析准确性、可靠性降低。

鉴于多数发达国家的基础设施正面临严重老化<sup>[4]</sup>,及我国交通强国、智能建造、新型基础设施建设等相关政策提出,开展科学化、信息化、智能化运维技术研究是保障基础设施安全运营的关键。人工智能(artificial intelligence, AI)及大数据、物联网(internet of things, IoT)、工业互联网等新一代信息技术(new IT)发展,特别是数字孪生(digital twin, DT),为运维领域提供了有力的技术支撑。数字孪生是工业 4.0 的核心技术,具有虚实空间交互、多源数据融合的特点,可实现结构的动态监控、模拟、预测、诊断与决策,为铁路运维管理提供了新的理论基础和技术方法。但数字孪生在铁路运维中的应用研究至今极其有限,目前尚没有相关系统性阐述。本文针对数字孪生的起源发展、基本概念、及其在铁路智能运维管理中的研究应用现状及发展趋势

进行归纳,提出并阐述了基于数字孪生的铁路智能运维技术框架,明确了数字孪生在铁路运维应用发展中存在的问题及未来发展方向。

## 1 数字孪生发展

数字孪生是指基于传感器数据更新及历史信息等,建立物理实体在虚拟空间中映射(孪生模型),通过虚拟模型对实体进行模拟、指导、控制、优化、预测等全生命周期管理应用。数字孪生技术

发展时间轴如图1所示,其发展大致经历3个阶段:①概念形成期:从美国航空航天局(NASA)的Apollo13到数字孪生概念正式提出,数字孪生理论框架基本形成;②应用探索期:军事航空航天领域最早提出及应用数字孪生,随后向工业制造领域拓展;③智能发展期:数字孪生与AI及大数据、物联网等New IT技术融合,应用场景向民用领域拓展,推动各领域数字化、智能化转型。

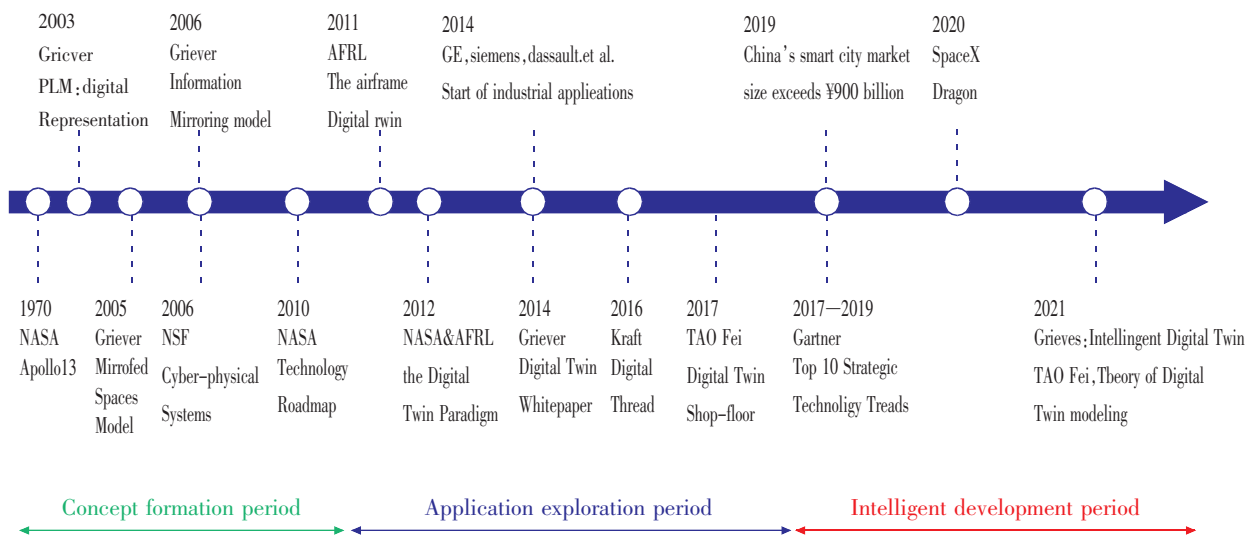


图1 数字孪生技术发展时间轴

Fig.1 Timeline of the technology development of digital twin

### 1.1 概念形成期

1970年,美国航空航天局(NASA)最早使用孪生体(物理实体)模拟 Apollo13 登月过程中的突发状况,指导太空宇航员做出科学决策<sup>[5]</sup>。2003年,美国密歇根大学的 Grieves 提出“物理实体的等价数字化表达”,引入虚拟空间概念<sup>[6]</sup>。随后 Grieves 对虚拟空间概念深化,相继提出镜像空间模型<sup>[7]</sup>与信息镜像模型<sup>[8]</sup>。信息镜像模型由物理空间、虚拟空间及两者之间信息连接三部分组成<sup>[9]</sup>,因而,数字孪生的概念雏形基本形成。2010年,NASA 在《NASA 空间技术路线图》中正式提出数字孪生,并将其列入飞行器维护的长期发展战略,计划在 2027 年实现数字孪生技术的发展目标<sup>[10-11]</sup>。

2006年,美国国家科学基金会提出信息物理系统(cyber-physical systems, CPS),与数字孪生技术相似,CPS 也是实现物理世界与信息世界融合的有

效技术。我国王飞跃 2004 年提出平行系统,基于实际系统构建人工系统,并构建实际系统与人工系统之间的连接,用于复杂系统控制管理<sup>[12-13]</sup>。由此可见,国内外学者在建立虚拟模型,实现物理空间与信息空间交互的发展理念基本相同。但由于当时科技发展限制,数字孪生理念并没有引起广泛关注。

### 1.2 应用探索期

#### 1.2.1 航空航天应用探索

数字孪生最早应用于美国国防,NASA 与美国空军研究实验室(AFRL)是早期主要的研究机构,研究内容有数字孪生理论模型、航天飞行器设计、健康维护与状态评估等<sup>[14]</sup>。2011年,AFRL 将数字孪生列入未来 30 年中长期发展规划,探索数字孪生在飞机健康管理中的应用<sup>[15]</sup>。2012年,NASA 与 AFRL 联合提出美国航天飞行器及空军装备的数字孪生发展范式,将数字孪生作为推动飞行器发展的关键

技术之一<sup>[16]</sup>。AFRL 基于 F-15 战斗机开展试验研究,提出飞行器的数字孪生模型架构<sup>[17]</sup>。Cerrone 建立了 FEM-DT 模型,进行裂缝扩展损伤分析,指出数字孪生是推动 3D 仿真发展的新浪潮<sup>[18]</sup>。2015 年,Grievess 阐述了 NASA 的数字孪生技术架构<sup>[19]</sup>,指出数字孪生 在应用中需要重点关注物理实体和虚拟模型之间的数据连接,虚实空间数据同步会使数字孪生技术发展达到新高度。Kraft 提出数字线索 (Digital Thread, 也称数字线程、数字纽带、数字主线等),将数字线索与数字孪生结合,用于飞行器全生命周期管理<sup>[20-21]</sup>。Grievess 与 Vickers(NASA)介绍了数字孪生在产品全生命周期管理 (product lifecycle management, PLM) 中应用及 NASA 数字孪生研究进展。2020 年,SpaceX 载人龙飞船成功发射,标志 NASA 提前实现 2027 年数字孪生战略发展目标。

### 1.2.2 工业制造应用探索

2014 年左右,数字孪生从军事航空航天领域向工业领域拓展。美、德、英、法等少数欧美发达国家将数字孪生技术作为工业制造数字化转型的关键。美国通用电气及 ANSYS、德国西门子、法国达索等知名公司开始探索数字孪生的工业应用。陶飞等<sup>[22-23]</sup>国内学者从 2017 年开始研究数字孪生,起步虽晚,但发展较快。

1) 产品设计研发。数字孪生可检验产品设计的合理性,实现产品的快速更新迭代。Uhlemann 等提出中小企业产品生产系统的数字孪生概念模型<sup>[24]</sup>。Schleich 等基于 skin model shapes 提出数字孪生参考模型,用于产品研发及生产过程<sup>[25]</sup>。在国内,庄存波提出产品数字孪生体及其技术框架,阐述了数字孪生体在产品 设计研发中的应用<sup>[26]</sup>。郭安建立了智能车间在信息物理空间 (CPS) 感知层的应用模型,实现了物理空间向虚拟空间的数据传递和故障诊断<sup>[27]</sup>。李浩等介绍了数字孪生在复杂产品设计、制造中的应用<sup>[28]</sup>。

2) 车间加工制造。基于数字孪生的加工制造是一个高度协同的过程,通过数字化手段构建虚拟生产线,将产品的数字孪生模型与生产设备、生产过程等其它形态的数字孪生模型高度集成,进而提高生产效率,降低生产成本。Hasan 基于增强现实研究了施工机械(塔吊)在建设过程中的数字孪生应用,但作者研究对象是模型而非实际设备<sup>[29]</sup>。陶飞提出并阐述了数字孪生车间 (digital twin shop-floor) 的

模型架构及其应用方法<sup>[30]</sup>,并对数字孪生模型拓展,加入服务及交互映射连接,提出数字孪生五维结构模型与指导数字孪生车间应用的技术准则<sup>[31]</sup>。丁凯等从逻辑关联视角提出智能制造空间的数字孪生建模方法,但没有阐述制造车间与虚拟车间的信息交互<sup>[32]</sup>。

3) 产品服务管理。数字孪生与物联网结合可以降低系统故障,减少维修成本,提升用户体验,优化产品运行状态。Magargle 等使用 ANSYS 建立汽车制动系统的数字孪生模型,对汽车热量监控,实现汽车制动系统的预防性维护<sup>[33]</sup>。Ivanov 和 Dolgui 提出供应链数字孪生模型,构建数字供应链的风险管理决策系统。但作者没有阐述数据分析方法及数字孪生应用效果<sup>[34]</sup>。

### 1.3 智能发展期

新一代信息技术为数字孪生落地应用提供了技术支持。当前数字孪生正在与人工智能及大数据、物联网等技术深度融合,形成智能数字孪生 (intelligent digital twin, IDT)。Grievess 指出智能数字孪生与传统数字孪生相比,可变被动管理为主动管理,离线分析变在线分析,从目标给定到目标搜索,在历史经验学习、预防性维护等方面具有广阔发展前景<sup>[35]</sup>。美国著名咨询公司高德纳 (Gartner) 连续 3 年 (2017—2019 年) 将数字孪生评为年度十大战略科技之一<sup>[36]</sup>。数字孪生从航天及制造领域向农业、医疗、土木、交通、电力等民用领域拓展,具体应用场景有智慧医院、智能建筑、智慧城市、智能交通等。Tao 等结合自行车设计、汽车制造、电力变压器服务 3 个具体应用场景,提出数字孪生驱动的产品全生命周期应用框架及其发展趋势<sup>[37]</sup>。

数字孪生技术在智慧城市与智能建造发展研究中得到广泛关注。智慧城市是城市信息化的高级表现形式,它基于新一代信息技术,创新驱动理念对城市建筑、道路、社会服务等设施集成,用于城市规划、政策制定,以提高社会服务效率、公共管理能力。2019 年,我国智慧城市市场规模超过 9 000 亿元,试点建设城市已全面覆盖全国。White 等使用 Unity3D 软件建立爱尔兰都柏林的智慧城市模型,分析了数字孪生在城市规划、用户协同合作方面的应用<sup>[38]</sup>。Zaballos 等提出智慧校园,将 BIM 和 IoT 无线传感技术结合,基于 Azure 构建校园环境的数字孪生监测系统,对舒适度、温度、噪音、室内空气质

量等环境指标进行可视化评估<sup>[39]</sup>。Yu 等基于多源时空监测数据,提出城市道路的智能运维方案<sup>[40]</sup>。

数字孪生技术已经开始用于智能建造与运维管理。Taraben 将建筑外观损伤特征转换为基于像素变化的 BIM 展示,对裂纹、缺失等损伤的几何特征进行自动匹配和损伤程度自动比较<sup>[41]</sup>。Tagliabue 等基于 BIM 及传感器数据对建筑室内环境质量(舒适度)进行可持续性评估<sup>[42]</sup>。Rausch 等通过 3D 激光扫描,建立参数化 BIM 模型,利用 BIM 模型动态更新中丰富的语义信息构建几何数字孪生体(geometric digital twin, GDT),研究了数字孪生在构件生产装配过程中的质量控制<sup>[43]</sup>。刘占省等研究了数字孪生五维结构模型在智能建造中的应用,结合 BIM、FEM 与 IoT 等技术,提出基于智能建造的数字孪生五维模型框架<sup>[44]</sup>。

## 2 基本原理与方法

### 2.1 基本原理

数字孪生是实际工程项目的数字化表达。与传统 CAD、BIM、FEM 等建模技术手段不同,工程结构的数字孪生模型包含 3D 几何形状与语义信息(材料、功能、构件关联等)<sup>[45]</sup>。如图 2 所示。数字孪生基于传感器实时采集数据建立物理世界与虚拟世界的动态连接。在 BIM、GIS 与 FEM 等高精度建模基

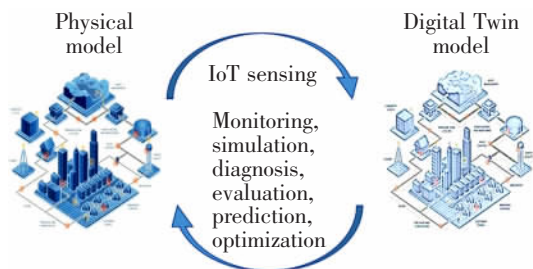


图 2 数字孪生基本功能

Fig.2 Basic functions of digital twin

础上,结合 IoT 监测数据,对结构进行动态模拟、损伤诊断预警、评估预测。

数字孪生的核心要素是模型及数据。在数字孪生模型与物理实体之间数据交互过程中会产生新的数据(分析结果),用于反映系统当前运营状态,并根据 IoT 监测数据、历史数据、工程经验等对结构性能演化趋势及安全状态做出科学预测。分析结果可以用于反馈、优化、指导、控制实际工程<sup>[46]</sup>。随着 AI、大数据等新兴信息技术的应用发展,数字孪生概念仍正在不断深化拓展。

### 2.2 数字孪生技术特点

信息物理系统、数字线索、建模仿真等与数字孪生概念相近,表 1 针对数字孪生及其相关技术的特点进行对比分析。

表 1 数字孪生及其相关技术的特点对比<sup>[47]</sup>

Tab.1 Comparison of the characteristics of digital twin and its related technologies

Technology	Principle	Basic Functions	Real and Imaginary Relationship	Features
Digital twin	Digital representation of physical entities	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Monitoring simulation, prediction, diagnosis, decision making. (Model-based)</li> <li>* Realizing the interaction between the physical world and the information world</li> <li>* Integration with New IT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Linking virtual models to physical entities through perception systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Fusion of reality and reality</li> <li>*High fidelity</li> <li>*Real time interaction</li> </ul>
Cyber-physical systems(CPS)	Systems that integrate computational, cyber and physical processes	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Realizing the interaction between the physical world and the information world</li> <li>* Integration with New IT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Focus on scientific research, not directly related to implementation methods and specific applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Computing, communication, control (3C)</li> </ul>
Digital thread	Dynamic connection between physical entities and virtual models	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Linking product usage data information</li> <li>*Improve data integration capability</li> <li>*Enables dynamic real-time management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Data links, exchange interfaces</li> <li>*Through the system value chain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Element modeling definition</li> <li>*Data collection analysis</li> <li>*Decision Simulation Evaluation</li> </ul>
Modeling Simulation	Simulation and analysis of objects using software	<ul style="list-style-type: none"> <li>*The main modeling tools for numerical simulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*One-way static stage-specific mapping of physical entities in virtual space</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Easy analysis and low cost</li> <li>*Calculated results subject to correction</li> </ul>

1) 信息物理系统。数字孪生与信息物理系统均是基于传感器状态感知、实时分析、建立虚实空间连接,都可以和 New IT 结合进行数据分析,但两者侧重点不同。CPS 侧重理论研究,CPS 的核心是传感器及执行器,通过计算、交流、控制实现虚实空间交互<sup>[47]</sup>。数字孪生侧重基于虚拟模型指导工业实践,其技术核心是模型及数据,为工程项目提供直观、快速的迭代优化技术和高效管理方法。数字孪生可作为 CPS 的构建基础及关键技术<sup>[48]</sup>。

2) 数字线索。数字线索是数字孪生的关键技术之一,指物理实体与虚拟模型之间动态互动。数字线索连接不同阶段的数据信息,为数字孪生提供访问、整合及转换的能力,提高数字孪生在产品全生命周期中的数据流通、集成能力。

3) 仿真模拟。传统仿真模拟方法(BIM、FEM 等)是数字孪生建模的常用手段,存在实时同步性差(静态)、模型精度低、结果准确性差等缺点,不能满足数字孪生模型的高精度、实时更新等需求,建模技术有待提升。

### 2.3 数字孪生与现有技术融合

现有的产品生命周期管理,难以实现精准预测。New IT 与数字孪生相结合,基于 IoT 监测数据,使用机器学习及深度学习等智能算法,创建高保真数字孪生模型,可实现对当前状态的诊断评估、以及对未来趋势的预测,提供更全面的决策支持。

#### 2.3.1 数字孪生与 BIM 的融合

信息管理(数据库)是 BIM 的技术优势,BIM 可实现几何信息及属性信息(物理、结构等)的 3D 数字化表达<sup>[49]</sup>。BIM 在结构内部信息管理方面存在优势,在地理环境数据分析处理方面存在不足,BIM 和 GIS 结合可实现优势互补,但当前 BIM 与 GIS 集成方面存在操作复杂、信息易丢失等问题。张文胜等将 BIM(Revit)用于结构几何物理信息集成管理,三维 GIS(Skyline)用于环境空间数据处理,研究了 BIM 与 GIS 模型转换集成<sup>[50]</sup>。

将 IoT 与 BIM 相结合,可弥补 BIM 数据实时更新能力的不足,实现 BIM 多源数据的实时更新与可视化展示。Kaewunruen 等基于 BIM 建立损伤风险评估的数字孪生检查方案,考虑结构失效概率及结构破坏后果,优化桥梁维护策略<sup>[51]</sup>。Lu 等使用 3D 点云数据,研究了桥梁运维场景下的几何数字孪生模型的建模精度问题,指出建模精度定义的几何偏差

及数据不确定性是阻碍自动化建模技术发展的关键<sup>[52]</sup>。Yu 等使用 Revit 和 Dynamo 建立高速公路路面的数字孪生分析模型,引入智能算法对路面的性能预测结果进行可视化展示<sup>[53]</sup>。

#### 2.3.2 数字孪生与 SHM 的融合

数字孪生与 SHM 相结合,可提高 SHM 的损伤识别效率和评估质量。Kang 等将 SHM 数据驱动和模型驱动分析方法相结合,提出基于多媒体信息的数字孪生应用框架。使用机器学习建立数据分析模型,对有限元模型动态修正,建立高精度数字孪生模型。当环境或结构状态发生改变,数据驱动的分析方法不适用时,使用 FEM 进行多工况模拟,实现 SHM 数据分析和 FEM 模型分析两种方法优势互补<sup>[54]</sup>。

将 BIM 用于 SHM 系统运维管理,建立模型数据库对监测数据进行集成管控,可实现 SHM 数据的可视化展示<sup>[55]</sup>。Dang 等基于 BIM 建立桥梁管理系统,使用机器视觉对桥梁表观损伤识别,通过构件编码进行数据传递、归档,保障了数据交换过程中准确性<sup>[56]</sup>。但图像采集需要现场与办公室双方配合,没有实现自动化采集。Shim 等研究了数字孪生在中小跨径桥梁运维中的应用,提出基于 3D 数字孪生模型的桥梁养护技术框架,由 3 部分组成:① 数字孪生模型:基于开源 BIM 平台建立桥梁几何模型,实现多方协同管理和数据精准传递;② 实体孪生模型:使用无人机与 3D 激光扫描对结构表观损伤自动化采集,结合计算机视觉技术对图像损伤自动分析;③ 力学孪生模型:建立 FEM 模型,与数字孪生模型及实体孪生模型连接,根据监测数据修正模型参数,对桥梁当前状态分析评估。

#### 2.3.3 数字孪生与 FEM 的融合

有限元分析也是数字孪生建模的主要方法之一。由于有限元建模过程中,单元、边界条件、参数取值等存在假定,影响分析结果的准确性,需结合监测数据进行模型修正。Lin 等基于数字孪生研究了大跨斜拉桥在强震作用下的易损性评估,通过 MATLAB、MSC.Marc、Python 3 个软件交互,编制 FEM 动态修正程序,对比分析了 3 种建模复杂程度的 FEM 模型即基于设计文件的 FEM 模型、FEM 线性修正模型、FEM 非线性修正模型,验证易损性评估数字孪生的有效性<sup>[57]</sup>。

### 2.3.4 数字孪生与贝叶斯方法的融合

工程结构在服役过程中存在环境、荷载、突发事故等不确定因素。贝叶斯网络能够有效的对不确定性量化;因此 Bayesian 方法常用于数字孪生建模。Zhu 等提出基于数字孪生的 SHM 模态参数实时修正方法,采用 Bayesian 识别,引入中间模型进行环境评估、散度分析,以提高模型修正的实时交互效率<sup>[58]</sup>。Song 等基于非参数贝叶斯网络建立 SHM 的数字孪生模型,分析结构状态动态退化过程,将不确定因素量化,增强了 SHM 数据分析的准确度和实时自学能力<sup>[59]</sup>。

### 2.3.5 数字孪生与 New IT 的融合

1) 数字孪生中的物联网。物联网技术通过无线传感、光纤光栅等先进采集传输技术获取监测数据,为后续数据挖掘分析提供主要数据源、特定应用场景及学习训练基础。

2) 数字孪生中的大数据。大数据是数据分析的有效技术,它利用先进的数理统计与 AI 等分析手段,从海量数据中挖掘、提取有效信息<sup>[60]</sup>。SHM 数据满足大数据特征,其数据结构具有体量大、增速快、种类多、有效信息低的特点。将大数据技术应用到 SHM 数据分析,对实现智能化监测具有重要工程意义<sup>[61]</sup>。

### 2.3.6 数字孪生与 AI 的融合

如图 3 所示,人工智能也是数字孪生数据挖掘的重要工具之一。机器学习(machine learning, ML)和深度学习(deep learning, DL)是 AI 的主要算法,其中机器学习算法用于在历史数据中搜寻特定模式,以指导决策。机器学习也是大数据分析的常用技术。深度学习是有多层神经网络结构的机器学习算法,数据经多层次迭代训练以获得最佳结果。常用的有卷积神经网络(convolution neural networks, CNN)和递归神经网络(recurrent neural network, RNN)。

在传统的工业设计、制造和服务领域,经验往往是一种模糊但行之有效的概念,很难将其作为精准判决依据。数字孪生可通过数字化手段,将原本无法保留的专家经验进行数字化,并提供了保存、复制、修改和转移的能力。基于数据构建智能数字孪生模型,可实现结构在特定场景下的风险评估、性能预测、维护管理等。国内外学者开展了结构智能检(监)测及智能损伤识别研究。将机器学习、深度学习、计算机视觉与结构健康监测<sup>[62]</sup>、无人机及

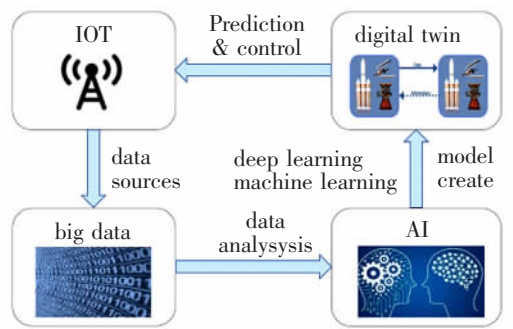


图3 数字孪生与物联网、大数据、人工智能的相互关系  
Fig.3 The relationship between digital twin and Internet of things, big data and artificial intelligence

3D 激光扫描等融合,使用激光扫描建立数字孪生高保真模型、无人机及计算机视觉用于结构表观损伤智能识别,使用智能算法实现数据特征提取和深入挖掘,提供改进和优化策略<sup>[63]</sup>。

### 2.4 数字孪生主要技术平台

建立高保真的虚拟模型是数字孪生技术应用的前提基础及重要载体,也是数字孪生技术的重难点之一。数字孪生建模常用的软件平台如表 2 所示,各平台对数字孪生的应用侧重点不同,呈多元化发展。

表 2 表明,数字孪生平台主要集中在美、德、英、法等少数欧美发达国家,缺乏国产数字孪生平台。目前国内工业软件及数字孪生平台基础薄弱, CAD/CAE、传感器、虚拟仿真及增强现实等数字孪生核心技术多数被国外垄断,目前国内还没有与达索、通用电气、西门子等竞争的软件平台,亟需增强国产工业软件开发<sup>[66]</sup>。

## 3 铁路智能运维应用

铁路线路呈线状分布,跨度大,传统人工巡检属于“头痛医头、脚痛医脚”的被动式管理,工作量大、效率低、成本高,维护效果不理想。数字孪生为铁路运维技术智能化发展提供了新的契机,将数字孪生、New IT、人工智能、BIM 及 GIS 等技术交叉融合,实现结构检(监)测智能化及管理决策智能化。结构检(监)测智能化是指使用无人机及机器人等智能装备实现结构的远程、非接触、自动化监测。管理决策智能化是指基于数字孪生,结合物联网、大数据和人工智能分析,实现损伤诊断、状态评估、故障预警、优化维护等,提供更科学的决策支持。

表2 数字孪生主要软件平台及其应用侧重点<sup>[64-65]</sup>

Tab.2 Major software platforms of Digital Twin and its main applications

Platforms	Manufacturers	Countries	Introduction	Application focus
Siemens NX	Siemens	Germany	Providing full product lifecycle management software technology solutions	Focus on improving product production efficiency and quality
3D Experience	Dassault	France	3D design, engineering modeling, simulation, data and process management	Focus on performance optimization in product design
Predix	GE	USA	The world's first cloud service platform for industrial Internet	Focus on device health management and performance optimization prediction
Twin Builder	ANSYS	USA	Engineering simulation-based, compatible with common IoT platforms, suitable for complex digital twin model development	Focus on simulation to achieve equipment optimization, condition maintenance (prediction)
iTwin Services	Bentley	USA	Extensible cloud platform for digital asset management of large volume, multi-projects	Digital Twin Cloud Services for Infrastructure and Assets
Azure	Microsoft	USA	Applying to any physical environment, providing digital models and sensing solutions based on cloud, IoT and AI	Improving product and customer service experience based on IoT

### 3.1 铁路基础结构智能检(监)测

计算机视觉提供结构的非接触检(监)测,结合图像识别及智能算法对涉水、峡谷、高空等人工难检或隐蔽部位进行有效检测,减少检管人员投入,提高监测效率,提高检测结果准确性。铁路基础结构的检(监)测按构件可大致分为:钢轨、扣件、轨道板、路基、桥梁、隧道等,分别介绍如下。

#### 3.1.1 钢轨与扣件方面

西南交通大学设计的轨道缺陷自动检测系统,采用线阵 CCD 相机采集高铁轨道表面图像,检测精度为 0.5 mm<sup>[67]</sup>。陈华鹏等与英国 TWI 合作利用特定导波模态特征对传感器优化布置和缺陷识别进行数值仿真和实验验证<sup>[68]</sup>。Xu 等利用深度学习神经网络,精确识别钢材表面疲劳微小裂缝<sup>[69]</sup>。代先星等提出一种基于图像融合特征和贝叶斯压缩感知的图像分类识别方法,从轨道图像中分割出扣件子图像,自动识别轨道扣件缺陷<sup>[70]</sup>。

#### 3.1.2 混凝土轨道板方面

轨道板结构层次多、材料属性差别大、空间跨度广、服役环境复杂,必须具有高平顺性。列车荷载及环境因素耦合作用会加速轨道板破坏,降低结构耐久性及承载力。Erkal 基于表面法线的损伤检测对激光扫描数据中的裂纹、腐蚀、破裂和剥落等缺陷自动分类<sup>[71]</sup>。Hoskere 等利用多尺度像素 DCNN 和全卷积神经网络,对混凝土裂缝剥落、钢筋外露、锈蚀及疲劳裂纹进行分类评估<sup>[72]</sup>。

#### 3.1.3 路基方面

铁路路基在列车载荷重复作用和自然水温环境交替变化下,路基土工材料易累积塑性变形,导致路基出现不均匀沉降。张兆旭分别在京沪高铁静海段、常州市某地下工程等工程中应用 PS-InSAR 技术监测地面沉降,并验证了 PS-InSAR 监测结果的可靠性<sup>[73]</sup>。夏艳军利用激光雷达提出高速铁路测量方法<sup>[74]</sup>。张宇昕建立高速铁路路基变形的 BIM 模型,对路基沿线沉降进行评估和数据可视化<sup>[75]</sup>。

#### 3.1.4 桥梁方面

铁路桥梁表观缺陷、局部损伤、挠度过大等会危及列车的安全运营。Hoskere 等提出一种新型网络配置和由结构图像组成的数据集,以提高桥梁损伤探测效率。Ghahremani 等基于视觉图像,根据点云变化进行损伤的自动识别、定位及量化,应用于结构的有限元模型修正<sup>[76]</sup>。Shao 等使用全息视觉传感技术对大跨桥梁振动、位移变形的非接触式监测方法<sup>[77]</sup>。Yoon 等利用无人机捕获的视觉数据对实验结构进行了系统识别,并结合静态坐标来测量动态位移<sup>[78]</sup>。郑明新等基于 BIM 建立桥梁施工安全的智能监测平台,对框架桥梁下穿既有铁路线的施工过程进行监测预警<sup>[79]</sup>。

#### 3.1.5 隧道方面

高速铁路隧道衬砌空洞、掉块、渗透水等病害严重威胁行车安全,降低舒适性。传统隧道质量检测设备自动化、功能集成度低。智能检测技术及智



能检测设备可以提高检测效率,对结构隐蔽及人工难检部位有效检测。黄震等归纳总结了国内外隧道检测设备发展现状,指出智能检测机器人、隧道VR、检修一体车等隧道检测设备智能化发展方向<sup>[80]</sup>。智能巡检机器人研发,需土木、通信、控制等专业配合,目前实际工程应用还很有限。

综上所述,研发智能检(监)设备,开展基于计算机视觉的损伤识别与状态评估技术研究是铁路智能运维的研究热点及发展趋势。但无人机抗风稳定性差,易坠毁。目前图像智能分析方面的理论方法较多,如深度学习、机器学习等,但图像智能识别技术仍处于理论层面,识别准确率及自动化处理水平较低,实际现场情况复杂,工程应用过程中仍需依靠人工图像处理。研究基于计算机视觉的结构损伤自动化识别方法、结合多源异构监测数据进行损伤智能定量与状态评估,是当前亟待解决的主要问题之一。

## 3.2 铁路数字孪生模型

### 3.2.1 几何数字孪生模型

几何特征是铁路实体结构的表观特征,几何数字孪生模型是反应结构3D几何特征变化的数字孪生模型。Ariyachandra等基于3D点云数据建立铁路接触网的几何数字孪生模型,使用改进RANSAC算法提取3D点云,生成铁路接触网的工业基础类模型(industry foundation classes,IFC),实现铁路接触网几何特征模型的自动化建立<sup>[81]</sup>。鲍跃全和李慧研究了计算机视觉技术在结构裂缝、位移、车辆荷载及模态参数识别中的应用。Lu等基于3D标签点云,使用切片拟合方法,研究了IFC格式的桥梁几何数字孪生模型建模方法。Lu等使用点云数据建立桥梁几何数字孪生模型,可省去人工点云处理,提高数据处理效率<sup>[82]</sup>,但文中技术只对混凝土梁板桥的主要构件有效,技术框架适用范围有待拓展。

### 3.2.2 基于SHM的数字孪生模型

随着光纤光栅、无线等传感技术发展,SHM积累了海量数据,但多源异构数据的管理、分析挖掘能力不足,无法有效提取结构损伤信息。Febrianto等在铁路桥建设过程中埋入FBG光纤传感系统,基于统计有限元statFEM<sup>[83]</sup>建立数字孪生模型,使用贝叶斯方法将监测数据和FEM模型参数中的不确定性进行量化,对桥梁应变变化进行预测<sup>[84]</sup>。To等基于无人机扫描研究了结构3D重建和卷积神经网络

图像识别技术,将AI、3D重建与数字孪生相结合,提出弥补BIM数据融合能力的多源数据融合技术框架<sup>[85]</sup>。Ye等基于BIM建立桥梁的SHM数字孪生模型,将SHM数据分析的两种常用方法:数据驱动(统计模型)和模型驱动(数值仿真模型)相结合对监测数据进行挖掘<sup>[86]</sup>。智能运维还需要对成本进行精细化管理。段晓晨等研究了智能控制技术在桥梁运维成本管控中的应用,使用人工智能算法及Navisworks软件建立成本数字孪生模型,实现运营成本的3D动态可视化管控<sup>[87]</sup>。

## 3.3 铁路性能退化及优化维护

由于列车载荷及环境因素耦合影响,铁路基础结构的运营状态会不可避免地发生退化,进而影响行车安全、旅客舒适性及维护成本<sup>[88]</sup>;因此,构建铁路数字孪生模型,分析结构性能评估及演化规律,并以此来制定预防性维护策略,是实现铁路智能运维的关键。

### 3.3.1 基础结构动态性能演化

翟婉明等探讨了环境与动载耦合作用下基础结构关键工程材料与结构动态性能演化规律<sup>[89]</sup>。卢春房等研究了铁路工程结构耐久性的影响因素,并应用于工程实际<sup>[90]</sup>。赵国堂等基于轮轨系统动力学分析了轨道板和CA砂浆间离缝状态下车辆和轨道的动力学响应,研究了不同离缝量、离缝范围以及对车辆行车速度的影响<sup>[91]</sup>。杨国静等针对高速铁路混凝土拱桥运维管理问题,提出桥面线形监测预警系统。Chen提出适用于模态不完备及结构损伤较大情况下的损伤评估新方法即动力摄动法(dynamic perturbation method),该方法能够精准给出结构参数变化与结构损伤或模态参数之间的变化关系<sup>[92]</sup>。Ye和Chen等使用子结构识别算法与有限元模型灵敏度分析,提出新型轨道动力系统的参数识别方法,该方法可显著提高结构参数识别的计算效率<sup>[93]</sup>。

### 3.3.2 随机性能演化模拟

铁路基础结构性能会随着时间而演化,由于材料和几何特性的不确定性,需要利用不确定性的概率方法对演化过程进行随机模拟。目前,结构性能演化模拟的典型概率方法包括:失效率函数、马尔可夫过程及gamma过程。Chen利用随机gamma过程研究了由钢筋锈蚀引起的混凝土桥梁承载力退化,并预测了结构的剩余寿命<sup>[94]</sup>。Chen基于动力摄动法与Tikhonov正则化方法,提出在实测不完备模

态数据条件下的有限元模型更新方法<sup>[95]</sup>。

### 3.3.3 时变可靠度分析及剩余寿命估算

铁路基础结构可靠度分析是基于与结构失效模式相关的极限状态方程,由于基础结构的载荷状况和结构承载力往往会随时间变化;因此时变可靠度分析对于结构性能退化评估和剩余服役寿命预测是很有必要的<sup>[96]</sup>。Biondini 等提出了劣化模型的概率模拟原理,针对钢结构中腐蚀、疲劳的影响以及混凝土结构的钢筋腐蚀,引入概率性能指标来研究时变结构性能与结构剩余寿命<sup>[97]</sup>。Chen 等提出钢筋锈蚀引起的混凝土可靠性分析方法,分析表明腐蚀率大小严重影响混凝土剩余服役寿命<sup>[98]</sup>。Feng 等建立了考虑 CA 砂浆离缝的车辆-轨道耦合动力学模型,运用响应面法分析了 CA 砂浆离缝条件下的无砟轨道结构长期服役性能的可靠性<sup>[99]</sup>。Jiang 等提出数字孪生驱动的钢桥疲劳剩余寿命的概率评估方法,将钢桥检(监)测与试件疲劳实验结合,分别建立钢桥面板的微观裂缝与宏观裂缝的数字孪生模型,对疲劳裂缝拓展过程进行模拟与剩余寿命预测<sup>[100]</sup>。

### 3.3.4 维护策略优化

铁路线路目前按照“严检慎修”的维修原则,但根据经验制定的周期性检修方案,无法科学合理地配置维修资源,容易造成维修资源的浪费(过修)或检修不及时(失修)<sup>[101]</sup>。Chen 等基于 Gamma 过程提出结构随机退化模型,用于评估结构承载能力失效概率,并综合考虑结构失效概率与维修成本确定结构最优维护时间<sup>[102]</sup>。Chen 等根据土堤全寿命周期的失效率分布和成本分析,建立成本最小化和风险最小化双重目标函数,得到土堤维护策略的最优解集<sup>[103]</sup>。

### 3.3.5 维修后结构性能变化

铁路基础结构在病害修复前后的服役性能及演化规律具有一定差异。Chen 考虑了检测、维修对混凝土桥梁服役性能的影响,利用贝叶斯更新方法得到了结构维修后失效概率分布,并确定了最优维护策略<sup>[104]</sup>。尽管目前针对铁路基础结构的病害修复进行了一定的研究,但病害修复后基础结构服役性能演化规律尚有待进一步研究<sup>[105]</sup>。

综上所述,国内外结构性能演化研究常采用概率方法,没有充分利用检(监)测数据与仿真模型,难以实现可靠的性能演化预测与预防型维护。数字

孪生驱动的故障诊断和预测,以及基于时变可靠度和多目标优化等方法的性能演化模型与维护策略制定,将形成铁路智能运维的新模式。

## 4 铁路智能运维框架及未来发展

铁路基础设施的数字孪生模型是一种面向结构物的多尺度模型,能够利用历史数据、感知数据和虚拟模型等反映与该模型对应的结构功能、实时状态及演化趋势等,从而实现铁路基础设施全寿命周期过程中的服役状态实时监测、性能评估与演化预测以及维护策略优化等智能运维要求,保证高速铁路基础设施的高效、可靠、安全运行。

### 4.1 铁路数字孪生运维技术框架

图 4 展示了基于数字孪生的铁路基础设施智能运维框架,技术框架可以分为现场层、平台层、应用层 3 个层次。

#### 4.1.1 现场层

将物联网传感技术与计算机视觉相结合,获取建立数字孪生模型所需的数据基础。计算机视觉能从图像中自动提取目标特征信息,从光谱特性、精度等角度筛选结构物表观损伤表征指标。利用 SHM 监测铁路基础设施的服役状态。对于钢轨监测,采用安装应变、光纤和加速度等传感器监测系统;对于轨道板监测,采用位移、光纤和应变等传感器监测系统以及探地雷达等技术;对于路基监测,采用激光扫描技术及光纤传感器等监测系统;对于桥梁监测,采用无人机检测技术、雷达扫描技术及光纤传感器等监测系统。最后,将这些监测数据集成、融合到统一的数据管理平台。

#### 4.1.2 平台层

基于前面介绍的数字孪生技术平台,将多源数据融合集成,建立数字孪生模型,利用大数据挖掘进行损伤诊断分析。

1) 多源数据融合集成。数字孪生模型构建需要集成与融合多种数据源。数字孪生克服了 BIM 仅包含结构物理特性与功能特性的不足,能够融合集成结构的几何、物理、行为及规则四维模型,其中,几何模型描述几何形状、装配关系等;物理模型描述材料的强度、刚度、耐久性等特性;行为模型响应荷载及自然因素的作用;规则模型反应构件实体与系统的联系规则,利用语义定义规范,融合所集成的多源实测数据。从而构建全生命周期多感知源、多

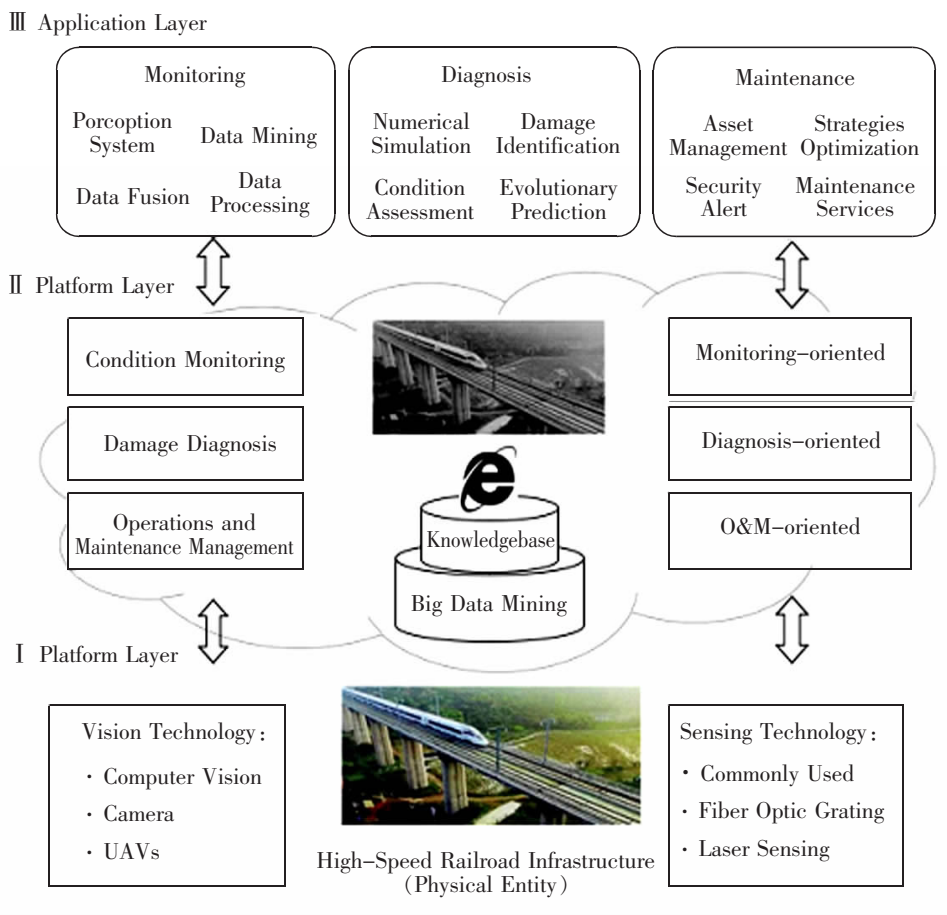


图 4 基于数字孪生的铁路智能运维技术框架

Fig.4 Digital twin based framework for intelligent railway operation and maintenance

物理场、多维数据集成融合的数据管理云平台,实现数字资料、检测信息与监测数据的统一管理。

2) 高保真数字孪生模型构建。针对钢轨、轨道板/道床、路基、典型桥梁等各类结构物,建立包括力学分析(动力响应、模态分析、轮轨动力学等)及性能演化分析(刚度、抗拉压强度、疲劳强度、耐久性)的仿真模型。利用物联网、移动互联技术,将运维数据关联、映射至仿真模型,与已获得的基础结构动态服役性能紧密耦合,构成铁路基础设施的数字孪生模型。

4.1.3 应用层

铁路基础设施的数字孪生技术应用主要由结构健康监测系统、结构损伤诊断与状态评估、维护策略优化与运维管理 3 部分组成。

1) 基于大数据的 SHM 数据挖掘。使用大数据对 SHM 数据进行聚类分析和关联性分析,提取有价值的信息用于后期结构损伤识别及性能评估。采

用动态贝叶斯方法、虚实交互反馈、机器学习等手段,构建全生命周期数据集成融合的大数据云管理平台,通过大数据挖掘实现结构状态监测、损伤诊断和运维管理。

2) 铁路基础设施故障智能诊断。针对铁路基础结构(如钢轨、轨道板、道岔及扣件等),将计算机视觉巡检与 SHM 相结合,通过 IoT 实现数据的实时传输,运用大数据挖掘、虚实交互、人工智能等方法,对结构损伤进行智能诊断。

3) 铁路基础设施智能运维管理。结合安全运营报警阈值,提出基础结构服役状态的实时预警及报警方法,同时对运维成本进行资产管理,指导结构及时维修与更新。

4.2 数字孪生交互建模

结合实际工程特点,建立特定应用场景的高精度数字孪生模型是实现智能运维的基础。BIM 模型是 FEM 分析的理想模型,但目前 BIM 软件与 FEM

软件之间的数据交互性差,模型转换效果不理想,影响分析结果准确性及建模效率<sup>[106]</sup>。BIM与有限元交互存在较多难点,比如BIM是刚性几何模型,如何反应结构柔度与结构非线性。加强BIM、GIS、FEM之间软件接口开发<sup>[107-108]</sup>,实现不同软件模型数据流通与优势互补,可以提高建模效率。

#### 4.3 运维大数据的融合集成和分析挖掘

通过人工检查、SHM等手段获取图像视频、纸质记录、设备检测数据、传感器监测数据等状态相关信息。如何将这些多源异构、时空离散数据集成管理,使用有效的数据分析手段对运维大数据进行分析挖掘,是当前智能运维发展面临的难题,也是变传统被动式运维为主动预防式管理的关键。

#### 4.4 虚实空间数据有效融合

物理实体是连续变化的,虚拟空间的数据是离散片面的。虚拟模型与物理实体之间在数据类型、维度、大小等方面差异较大,导致虚实空间数据缺乏有效连接,不同应用阶段之间的数据相互割裂,缺乏整合。如何实现虚实空间的有效融合、信息无缝对接是数字孪生落地应用亟待解决的难题<sup>[109]</sup>。

#### 4.5 国产软件平台缺乏

数字孪生建模依靠高水平软件平台,缺乏国产数字孪生建模软件是制约我国数字孪生技术发展的“卡脖子”问题。建模仿真软件国产化对于我国数字孪生技术发展意义重大。上海优也、树根科技等公司已推出国产工业互联网数字孪生平台。长安大学韩万水研发出BDANS软件用于桥梁运维分析<sup>[110]</sup>。国内BIM软件商鲁班与中望软件合作,广联达也与国内多家企业联合研发国产BIM软件。但是,国产软件平台需要深入地研发,并实现在实际工程项目中运用。

#### 4.6 数字孪生建模缺乏规范标准

数字孪生建模需要统一的建模语言和管理标准,但国内外数字孪生标准体系有待完善。现有规范标准只介绍了概念术语<sup>[111]</sup>,缺乏建模语言、文件格式、数据连接与集成、服务等相关标准。国内外学者在不同行业领域提出多种数字孪生模型框架,但建模规范缺乏导致模型与模型之间、不同阶段数据之间、模型与数据之间连接差异,不利于数字孪生模型的集成转化。数字孪生相关标准正逐步完善,陶飞等提出由“建模、组装、融合、验证、校正、管理”组成的数字孪生建模理论体系。目前,BIM应用范

围不断扩大,国内多地发布BIM规范标准推进BIM应用。

#### 4.7 多专业协作建立完整数字孪生平台

数字孪生是一个宏观平台概念,具有多学科交叉属性。目前尝试将数字孪生引入相关研究领域的学者,在数字孪生应用过程中,通常仅局限于原有的研究方向,忽视了数字孪生多学科交叉属性。导致目前大部分数字孪生研究成果仍然未脱离传统监控与数值模拟的范畴,没有真正建立物理世界和虚拟世界的有效连接。因而需要与计算机、控制、通信、软硬件开发等专业合作,建立完整的数字孪生技术平台,包括基础支撑层、建模仿真及数据互动层、功能层、应用层等。

### 5 结束语

对数字孪生的发展、基本原理及技术方法进行总结,分析了当前数字孪生在铁路基础设施运维管理中的应用,提出了基于数字孪生的铁路智能运维技术框架,得出以下结论。

1) 数字孪生在铁路基础设施的运维技术智能化发展中具有重大的发展潜力和应用前景。将New IT、SHM、GIS、BIM与数字孪生相结合,发挥IoT、人工智能、大数据、物联网的技术优势,建立基础设施智能运维管理平台,可有效提高基础设施运维的质量和效率,实现铁路基础设施进行动态监测、实时预警、在线评估、智能管控,推动运维智能化发展<sup>[112]</sup>。

2) 数据挖掘与分析是实现智能化转型的关键。基于BIM与SHM建立数字孪生模型,结合AI、大数据等技术对检(监)测数据充分挖掘,将物理模型驱动与数据驱动方法相融合,提高数据分析能力,从海量数据提取结构状态信息,对结构服役状态进行科学诊断决策。

3) 数字孪生的发展为铁路基础设施的运维智能化提供了新的途径和契机。但数字孪生在铁路基础设施中的应用研究才刚起步,在交互建模、数据集成分析、建模规范等方面有待深入研究。亟需利用数字孪生技术,开展铁路基础设施健康监测及智能运维研究。

#### 参考文献:

[1] 国家铁路局. 2020年铁道统计公报[R]. 北京, 2021.

- NATIONAL RAILWAYS ADMINISTRATION OF THE PEOPLES'S REPUBLIC OF CHINA. National railways statistical bulletin:2020[R]. Beijing, 2021.
- [2] 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2):1-97.  
Review on China's bridge engineering research:2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2):1-97.
- [3] CHEN H P. Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures[M]. Chichester, UK:John Wiley & Sons, Ltd, 2018.
- [4] CHANG SU SHIM N-S D, SOKANYA LON, CHI-HO JEON. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10):1319-1332.
- [5] STEFAN BOSCHERT R R. Digital Twin the Simulation Aspect[M]. Mechatronic Futures Switzerland:Springer, Cham, 2016.
- [6] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin:mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems Berlin, Germany:Springer International Publishing, 2017.
- [7] GRIEVES M. Digital twin:manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. (2020-04-01)[2021-04-20], [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication).
- [8] GRIEVES M. Product Lifecycle Management—Driving the Extgeneration of Lean Thinking[M]. New York:McGraw-Hill, 2006.
- [9] GRIEVES M. PLM—beyond lean manufacturing[J]. Manufacturing Engineering, 2003, 130(3):23-5.
- [10] BOB PIASCIK J V, DAVE L, STEVE S, et al. Technology area 12:materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map[R]. Washington DC:NASA Office of Chief Technologist, 2010.
- [11] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. NASA technology roadmap: DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap technology area 11[R]. Washington DC:National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [12] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004(5):485-9.  
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004(5):485-514.
- [13] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11):2001-31.  
YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. ACTA Automatica Sinica, 2019, 45(11):2001-2031.
- [14] AYDEMIR H, ZENGİN U, DURAK U. The digital twin paradigm for aircraft review and outlook[C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, FL, 2020.
- [15] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011:1687-5966.
- [16] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Honolulu, USA: AIAA, 2012.
- [17] TUEGEL E. The airframe digital twin:some challenges to realization[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, 2012.
- [18] CERRONE A, HOCHHALTER J, HEBER G, et al. On the effects of modeling asmanufactured geometry:toward digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2014:1-10.
- [19] GRIEVES M. Mitigating systems complexity & unintended systems emergent behaviors through NASA's digital twin strategy[C]//PI Congress Dusseldorf, 2015.
- [20] KRAFT E. The air force digital thread/digital twin life cycle integration and use of computational and experimental knowledge[C]//54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA 2016.
- [21] KRAFT E M. HPCMP CREATE—AV and the air force digital thread[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, 2015.
- [22] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8):1603-1611.  
TAO F, CHENG Y, CHENG J F, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8):1603-1611.
- [23] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1):1-9.  
TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop:a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1):1-9.
- [24] UHLEMANN H J, LEHMANN C, STEINHILPER R. The

- digital twin:realizing the cyber-physical production system for industry4.0[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 61:335-340.
- [25] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2017, 66(1):141-144.
- [26] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4):753-768.
- ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4):753-768.
- [27] 郭安. 智能车间信息物理系统关键技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2018.
- GUO A. Research on key technologies of cyber-physical systems for intelligent workshop[D]. Shenyang: Chinese Academy of Sciences(Shenyang Institute of Computing Technology), 2018.
- [28] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6):1320-1336.
- LI H, TAO F, WANG H Q, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing based on digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6):1320-1336.
- [29] SYED MOBEEN HASAN K L, DAEYOON M, SOON W K, et al. Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2021.
- [30] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. *Ieee Access*, 2017, 5:20418-20427.
- [31] 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.
- 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.
- [32] 丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6):1491-1504.
- DING K, ZHANG X D, ZHOU G H, et al. Digital twin-based multi-dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6):1491-1504.
- [33] MAGARCLE R, JOHNSON L, MANDLOF P, et al. A simulation-based digital twin for model-driven health monitoring and predictive maintenance of an automotive braking system[C]//*Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, 2017*.
- [34] IVANOV D, DOLGUI A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry4.0[J]. *Production Planning & Control*, 2020, 32(9):775-788.
- [35] GRIEVES M. Intelligent digital twins: the role of AI and ML in the Future of digital twins [EB/OL]. (2021-03-10) [2021-04-20], [https://www.researchgate.net/publication/349042364\\_Intelligent\\_Digital\\_Twins\\_The\\_Role\\_of\\_AI\\_and\\_ML\\_in\\_the\\_Future\\_of\\_Digital\\_Twins\\_Chief\\_Scientist\\_of\\_Advanced\\_Manufacturing\\_Florida\\_Institute\\_of\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/349042364_Intelligent_Digital_Twins_The_Role_of_AI_and_ML_in_the_Future_of_Digital_Twins_Chief_Scientist_of_Advanced_Manufacturing_Florida_Institute_of_Technology).
- [36] SHEN Z J M, LU DENG T H. Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges, and Research Opportunities for Operations Research [EB/OL]. (2021-03-24) [2021-04-23], <https://ssrn.com/abstract=3777695>.
- [37] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9/12):3563-3576.
- [38] WHITE G, ZINK A, CODECÀ L, et al. A digital twin smart city for citizen feedback[J]. *Cities*, 2021, 110:1-12.
- [39] ZABALLOS A, BRIONES A, MASSA A, et al. A Smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21):1-33.
- [40] YU G, WANG Y, HU M, et al. RIOMS: an intelligent system for operation and maintenance of urban roads using spatio-temporal data in smart cities[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2021, 115:583-609.
- [41] TARABEN J, MORGENTHAL G. Methods for the automated assignment and comparison of building damage geometries [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 47:1-10.
- [42] TAGLIABUE L C, CECCONI F R, MALTESE S, et al. Leveraging digital twin for sustainability assessment of an educational building[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2):1-16.
- [43] RAUSCH C, LU R, TALEBI S, et al. Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing[J]. *International Journal of Construction Management*, 2021:1-14.
- [44] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6):26-36.
- LIU Z S, LIU Z S, SUN J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6):26-36.
- [45] LU R, BRILAKIS I. Digital twinning of existing reinforced

- concrete bridges from labelled point clusters[J]. *Automation in Construction*, 2019, 105: 1-16.
- [46] 陶飞,张贺,戚庆林,等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 1-15.  
TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(1): 1-15.
- [47] 陶飞,戚庆林,王力羣,等. 数字孪生与信息物理系统——比较与联系[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 132-149.  
TAO F, QI Q L, WANG L H, et al. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 132-149.
- [48] 李洪阳,魏慕恒,黄洁,等. 信息物理系统技术综述[J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 37-50.  
LI H Y, WEI M H, HUANG J, et al. Survey on cyber-physical systems[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 37-50.
- [49] PAN Y, ZHANG L. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management[J]. *Automation in Construction*, 2021, 124: 1-15.
- [50] 张文胜,吴强,祁平利,等. BIM与3DGIS的集成技术及在铁路桥梁施工中的应用[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(6): 45-51.  
ZHANG W S, WU Q, QI P L, et al. Integration technology of BIM and 3DGIS and its application in railway bridge construction[J]. *China Railway Science*, 2019, 40(6): 45-51.
- [51] KAEWUNRUEN S, SRESAKOOLCHAI J, MA W T, et al. Digital twin aided vulnerability assessment and risk-based maintenance planning of bridge infrastructures exposed to extreme conditions[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1-18.
- [52] LU R, RAUSCH C, BOLPAGNI M, et al. Geometric Accuracy of Digital Twins for Structural Health Monitoring[M]. London, UK: Loughborough University, 2021.
- [53] YU G, ZHANG S, HU M, et al. Prediction of highway tunnel pavement performance based on digital twin and multiple time series stacking[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 1-21.
- [54] KANG J S, CHUNG K, HONG E. Multimedia knowledge-based bridge health monitoring using digital twin[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021: 1-16.
- [55] PANAH R S, KIOUMARSI M. Application of building information modelling (BIM) in the health monitoring and maintenance process: a systematic review[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(3): 1-26.
- [56] DANG N S, SHIM C S. BIM authoring for an imagebased bridge maintenance system of existing cablesupported bridges[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 143: 12-32.
- [57] LIN K Q, XU Y L, LU X Z, et al. Digital twinbased collapse fragility assessment of a longspan cablestayed bridge under strong earthquakes[J]. *Automation in Construction*, 2021, 123: 1-13.
- [58] ZHU Y C, WAGG D, CROSS E, et al. Realtime Digital Twin Updating Strategy Based on Structural Health Monitoring Systems[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2021.
- [59] YU J, SONG Y, TANG D, et al. A digital twin approach based on nonparametric bayesian network for complex system health monitoring[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 293-304.
- [60] RATHORE M M, SHAH S A, SHUKLA D, et al. The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: a systematic literature review, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32030-32052.
- [61] 孙利民,尚志强,夏焯. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 1-20.  
SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y. Development and prospect of bridge structural health monitoring in the context of big data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 1-20.
- [62] FARRAR C, WORDEN K. *Structural Health Monitoring A Machine Learning Perspective*[M]. UK, John Wiley & Sons, LTD, Chichester, 2013.
- [63] 鲍跃全,李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1-11.  
BAO H Q, LI H. Artificial Intelligence for civil engineering[J]. *China Cmilengeerng Journal*, 2019, 52(5): 1-11.
- [64] 工信部中国电子技术标准化研究院, 树根互联科技有限公司. 数字孪生应用白皮书[R], 2020.  
CHINA ELECTRONICS STANDARDIZATION INSTITUTE, ROOTCLOUD. Digital twins application white paper[R]. 2020.
- [65] QI Q, TAO F, HU T, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 3-21.
- [66] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(4): 1-10.  
ZHANG L. Calm thinking about digital twin and its modeling and simulation technology[J]. *Journal of System Sim-*

- ulation, 2020, 32(4): 1-10.
- [67] 刘甲甲,熊鹰,李柏林,等. 基于计算机视觉的轨道扣件缺陷自动检测算法研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 73-80.  
LIU J J, XIONG Y, LI B L, et al. Research on automatic inspection algorithm for railway fastener defects based on computer vision[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 73-80.
- [68] DUAN W, CHEN H P, MARQUES H R. Excitation and propagation of torsional T(0,1) mode for guided wave testing of pipeline integrity[J]. Measurement, 2019, 131: 341-348.
- [69] XU Y, LI S, ZHANG D, et al. Identification framework for cracks on a steel structure surface by a restricted Boltzmann machines algorithm based on consumer-grade camera images[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2018, 25(2): 1-20.
- [70] 代先星, 阳恩慧, 丁世海, 等. 基于三维图像的铁路扣件缺陷自动识别算法[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 89-96.  
DAI X X, YANG E H, DING S H, et al. Automatic defect inspection algorithm of railway fasteners based on 3D images[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 89-96.
- [71] GüLDÜR ERKAL B, HAJJAR J. Laser-based surface damage detection and quantification using predicted surface properties[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 285-302.
- [72] HOSKERE V, NARAZAKI Y, HOANG T, et al. Vision-based structural inspection using multiscale deep convolutional neural networks[C]//3rd Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers. University of Illinois, Urbana-Champaign, United States, 2017.
- [73] 张兆旭. 基于 PS-InSAR 技术的高速铁路沉降监测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.  
ZHANG Z X. Research on settlement monitoring of high speed railway based on PS-InSAR technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [74] 夏艳军. 基于激光雷达的高铁路基正常高测量方法[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 7-10.  
XIA Y J. The measurement method of normal height for high-speed railway foundation based on laser radar[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 7-10.
- [75] 张宇昕. 运营高速铁路监测数据评估管理与可视化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
ZHANG Y X. Research on evaluation management and visualization of operational high speed railway monitoring data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [76] LATTANZI D, GHAHREMANI K, KHALOO A, et al. Damage detection and finite-element model updating of structural components through point cloud analysis[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 1-12.
- [77] SHAO S, ZHOU Z, DENG G, et al. Experiment of structural geometric morphology monitoring for bridges using holographic visual sensor[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(4): 1-24.
- [78] YOON H, HOSKERE V, PARK J W, et al. Cross-correlation-based structural system identification using unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2017, 17: 1-12.
- [79] 郑明新, 杜子真, 康蒙, 等. 基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 1-6.  
ZHENG M X, DU Z Z, KANG M, et al. Research on intelligent monitoring platform of frame bridge jacking railway based on BIM[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(2): 1-6.
- [80] 黄震, 张陈龙, 傅鹤林, 等. 隧道检测设备的发展及未来展望[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 98-109.  
HUANG Z, ZHANG C L, FU H L, et al. Development and future prospect of tunnel machine detection equipment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(2): 98-109.
- [81] ARIYACHANDRA M R M F, BRILAKIS I. Digital twinning of railway overhead line equipment from airborne lidar data[C]//Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Kitakyushu, Japan, 2020.
- [82] LU R, BRILAKIS I. A benchmarked framework for geometric digital twinning of slab and beam-and-slab bridges[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Smart Infrastructure and Construction, 2019, 172(1): 3-18.
- [83] GIROLAMI M, FEBRIANTO E, YIN G, et al. The statistical finite element method (statFEM) for coherent synthesis of observation data and model predictions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 375: 1-32.
- [84] FEBRIANTO E, BUTLER L, GIROLAMI M, et al. A self-sensing digital twin of a railway bridge using the statistical finite element method[EB/OL]. (2021-04-07)[2021-04-29], <https://arxiv.org/abs/2103.13729>.
- [85] TO A, LIU M, HAZEEQ M, et al. Drone-based AI and 3D Reconstruction for Digital Twin Augmentation[EB/OL].



- (2021-03-11)[2021-04-28],[https://www.researchgate.net/publication/349646903\\_Drone-based\\_AI\\_and\\_3D\\_Reconstruction\\_for\\_Digital\\_Twin-Augmentation](https://www.researchgate.net/publication/349646903_Drone-based_AI_and_3D_Reconstruction_for_Digital_Twin-Augmentation).
- [86] YE C, BUTLER L, CALKA B, et al. A digital twin of bridges for structural health monitoring[C]//Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring Stanford University, 2019.
- [87] 段晓晨, 喇海霞, 胡天明, 等. 桥梁工程运维成本三维非线性智能控制研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 102-107.  
DUAN X C, LA H X, HU T M, et al. Research on the 3D nonlinear intelligent control for bridge engineering operation and maintenance cost[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 102-107.
- [88] 杨国静, 陈列, 王珣, 等. 铁路大跨桥梁桥面线形监测预警系统的设计与应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(6): 13-17.  
YANG G J, CHEN L, WANG X, et al. Design and application of deformation monitoring and warning system for railway long-span bridges[J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(6): 13-17.
- [89] 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 645-660.  
ZHAI W M, ZHAO C F, XIA H, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety[J]. Science China Press, 2014, 44(7): 645-660.
- [90] 卢春房, 吴明友, 付建斌. 铁路工程结构耐久性影响因素研究与工程实践[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 1-10.  
LU C F, WU M Y, FU J B. Research on influencing factors of durability of railway structures and related engineering practice[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(5): 1-10.
- [91] 赵国堂, 高亮, 赵磊, 等. CRTS II型板式无砟轨道板下离缝动力影响分析及运营评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 1-10.  
ZHAO G T, GAO L, ZHAO L, et al. Analysis of dynamic effect of gap under CRTS II track slab and operation evaluation[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 1-10.
- [92] CHEN H P. Nonlinear perturbation theory for structural dynamic systems[J]. Aiaa Journal-AIAA J, 2005, 43(11): 2412-2421.
- [93] YE L, CHEN H P, WANG S N. Substructural identification methods for parameter estimation of railway track dynamic systems[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2021, 34(3): 1-12.
- [94] CHEN H P. Residual flexural capacity and performance assessment of corroded reinforced concrete beams[J]. Journal of Structural Engineering (United States), 2018, 144(12): 1-11.
- [95] CHEN H P, MAUNG T S. Regularised finite element model updating using measured incomplete modal data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(21): 5566-5582.
- [96] FRANGOPOL D M. Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(6): 389-413.
- [97] BIONDINI F, FRANGOPOL D M. Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: review[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): F4016001.
- [98] CHEN H P, XIAO N. Symptom-based reliability analyses and performance assessment of corroded reinforced concrete structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2015, 53(6): 1183-1200.
- [99] FENG Q, SUN K, CHEN H, et al. Lifetime performance assessment of railway ballastless track systems affected by a mortar interface defect[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(4): 1-10.
- [100] JIANG F, DING Y, SONG Y, et al. Digital twin-driven framework for fatigue life prediction of steel bridges using a probabilistic multiscale model: application to segmental orthotropic steel deck specimen[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 11-13.
- [101] 刘大玲, 黄小钢. 高速铁路无砟轨道系统状态监测及预防性维修[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 349-353.  
LIU D L, HUANG X G. Condition monitoring and preventive maintenance of ballastless track systems for high-speed railways [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 349-353.
- [102] NEPAL J, CHEN H P. Risk-based optimum repair planning of corroded reinforced concrete structures[J]. Structural Monitoring and Maintenance, 2015, 2(2): 133-143.
- [103] CHEN H P, BAHARI MEHRABANI M. (PE-AT) Reliability analysis and optimum maintenance of coastal flood defences using probabilistic deterioration modelling[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 185: 163-174.
- [104] CHEN H P. Monitoring-based reliability analysis of aging concrete structures by Bayesian updating[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 30: 1-8.

- [105] 王树国,王璞,赵磊,等. 高速铁路工务工程前沿基础理论与科学问题——轨道系统与运维机制[J]. 铁道建筑, 2018,58(11):5-12.  
WANG S G,WANG P,ZHAO L,et al. Durability theory and improvement method of concrete in railway engineering[J]. Railway Engineering, 2018, 58(11):5-12.
- [106] 兰南,刘天成,曲强龙,等. 预应力混凝土桥梁 BIM+FEM 一体化分析[J]. 公路,2019,64(9):22-6.  
LAN N,LIU T C,QU Q L,et al. Integrated BIM+FEM analysis of prestressed concrete bridges[J]. Highway, 2019, 64(9):22-26.
- [107] 王玄玄,黄玉林,赵金城,等. Revit-Abaqus 模型转换接口的开发与应用[J]. 上海交通大学学报,2020,54(2):135-143.  
WANG X X,HUANG Y L,ZHAO J C,et al. Development and application of revit-abaqus model exchange interface[J]. Journal of Shanghai Jiao tong University,2020,54(2):135-143.
- [108] 董卯,郭乃胜,王楠,等. 基于 Revit 与 MIDAS/CIVIL 的桥梁结构模型转换方法[J]. 大连海事大学学报,2020,46(3):101-108.  
DONG M,GUO N S,WANG N,et al. Bridge structure model conversion method based on Revit and MIDAS/CIVIL[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020,46(3):101-108.
- [109] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.  
LIU D T,GUO K,WANG B K,et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(11):1-10.
- [110] 韩万水,王涛,李永庆,等. 基于模型修正梁格法的车桥耦合振动分析系统[J]. 中国公路学报,2011,24(5):47-55.  
HAN W S,WANG T,LI Y Q,et al. Analysis system of vehicle bridge coupling vibration with grillage method based on model updating[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5):47-55.
- [111] DATA I T S I. Automation systems and integration-digital twin framework for manufacturing-part 1:overview and general principles[S]. Geneva, Switzerland:International Organization for standardization, 2020.
- [112] QI Q L,TAO F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0:360 degree comparison [J]. Ieee Access, 2018(6):3585-3593.

(责任编辑:刘棉玲)