

DOI:10.13196/j.cims.2022.07.003

基于数字孪生的高端装备智能运维研究现状与展望

高士根¹, 周敏¹⁺, 郑伟², 张林鎰³, 张斌⁴, 宋海锋⁵, 吴兴堂⁶, 李妮⁶, 王昆玉⁶

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学 国家轨道交通安全评估研究中心, 北京 100044;

3. 清华大学 国家计算机集成制造系统工程技术研究中心, 北京 100084;

4. 中国铁道科学研究院 金属及化学研究所, 北京 100081;

5. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083;

6. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 大数据、工业物联网、人工智能等使能技术的发展促进了数字孪生与高端装备运维的深度融合, 使得传统的“定期修”“故障修”运维模式向“预防修”“状态修”智能运维模式的升级, 成为高端装备智能运维领域的研究热点。数字孪生充分利用机理模型、实时传感数据、历史数据以及专家知识等信息, 集成多学科、多变量、多层次、多尺度、多粒度、多概率的建模仿真过程, 准确表征数据特征并进行高效精准的计算分析, 实现虚实空间的高精度、高可靠、高可信的映射及演化, 为实际物理系统的状态评估、故障预警与运维决策提供支持。对数字孪生技术在高端装备智能运维领域的发展现状、关键技术及工程应用等进行了梳理, 并对未来的挑战与难点进行了总结展望。

关键词: 数字孪生; 高端装备; 智能运维; 故障诊断; 故障预警**中图分类号:** TP391.9**文献标识码:** A**Intelligent operation and maintenance for advanced equipment based on digital twin:****Challenges and future**GAO Shigen¹, ZHOU Min¹⁺, ZHENG Wei², ZHANG Linxuan³, ZHANG Bin⁴,SONG Haifeng⁵, WU Xingtang⁶, LI Ni⁶, WANG Kunyu⁶

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. National Research Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. State Engineering Research Center of Computer Integrated Manufacturing Systems, Tsinghua University,

Beijing 100084, China;

4. Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited,

Beijing 100081, China;

5. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

6. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of enabling technologies including big data, industrial Internet of things and artificial intelligence has promoted the deep integration of digital twins and high-end equipment operation and maintenance, which make the traditional regular-repair and failure-repair operation and maintenance mode upgrade to intelligent mode preventive-repair and state-repair, and has become a research hotspot in the field of intelligent operation and maintenance of high-end equipment. By fully using information such as mechanism models, real-time sensor data, historical data and expert knowledge and integrating modeling and simulation processes of multi-disciplinary, multi-

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2022-06-22。Received 06 Aug. 2021; accepted 22 June 2022.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61925302, 61790573, 62073027)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 61925302, 61790573, 62073027).

variable, multi-level, multi-scale, multi-granularity and multi-probability, digital twin could accurately characterize data characteristics and perform efficient and accurate calculations, which achieved high-precision, high-reliability and high-credibility mapping and evolution of virtual and real space. It provided support for state assessment, fault warning and operation and maintenance decision-making of actual physical systems. The development status, key technologies and engineering applications of digital twin technology in high-end equipment intelligent operation and maintenance were reviewed, and the future challenges and difficulties were summarized.

Keywords: digital twin; advanced equipment; intelligent operation and maintenance; fault diagnosis; fault warning

0 引言

高端装备具有研发周期长、技术含量高、资本投入高、附加价值高、信息密度大等特点,“十三五”期间,我国高端装备成果丰硕,在航空航天、高速铁路、深海工程、超级计算、量子信息等领域取得了一批重大科技成果。国家“十四五”规划纲要指出^[1],“大力发展高端装备制造相关产业,是提升我国产业核心竞争力的必然要求,是抢占未来经济和科技发展制高点,提升国际影响力与地位的战略选择,对于加快转变经济发展方式、实现由制造业大国向强国转变具有重要战略意义”。

在高端装备结构设计、加工制造、运维管理等全生命周期过程中,运行维护环节对于高端装备的可持续安全运行发挥了重要作用。当前高端装备的运维环节主要以“计划维修”模式为主,存在维修机理依据不足、维修周期不科学、数据利用差、维修过剩与维修不足并存、维修成效低等难题,导致运维成本在全生命周期费用中的占比越来越高,尤其在轨道交通、能源装备等领域,运维费用支出达到采购投入支出的数倍以上。因此,寻求效率更高、更经济、更科学的运维方式成为高端装备运维领域的共同目标。

仿真是一系列基于模型(物理或数字化模型)的活动,被认为是人们认识和改造客观世界的第三种手段,它可以不受时空限制,研究或观察已在发生或尚未发生的现象。随着人类探索边界的不断扩张、工业系统的不断复杂,充分利用仿真技术,为装备制造领域赋能,实现提质降本增效,是长久以来人们一直努力的方向。传感器、物联网、大数据、人工智能等新一代信息通信技术的发展,使得仿真技术也进入到了一个新的阶段,并由此产生了数字孪生的概念。

数字孪生技术最早可以追溯到 20 世纪初,1991 年,耶鲁大学 GELERNTER 在《Mirror Worlds》里

提出数字孪生(Digital Twin)的基本想法^[2]。2002 年,密歇根大学 GRIEVES 提出了产品全生命周期管理的概念模型^[3]。2010 年,美国国家航空航天局(NASA)发布了“Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap”报告(TA 11),首次使用 Digital Twin 一词^[4]。2012 年,NASA 提出了面向 Future NASA 和 U. S. Air Force Vehicles 的数字孪生规划^[5]。数字孪生是物理对象的数字模型,该模型通过接收来自物理对象的数据而实时演化,从而与物理对象在全生命周期保持一致。基于数字孪生可进行分析、预测、诊断、训练等(即仿真),并将仿真结果反馈给物理对象,从而帮助物理对象进行优化和决策。物理对象、数字孪生以及基于数字孪生的仿真及反馈一起构成一个信息物理系统(cyber physical systems)^[6-7]。2004 年,王飞跃^[8]提出了基于计算实验和人工交通系统的 TransWorld 平行系统架构,宁滨和董海荣等在轨道交通系统领域推广应用^[9-12],建立了人在环人工轨道交通系统,并实施计算实验对列车运行控制、调度优化和运维决策等进行分析与评估,通过实际系统与人工系统之间的虚实互动和平行执行实现对实际轨道交通系统的优化管理与控制。

近年来,随着工业物联网、大数据、人工智能、云计算、机器学习等使能技术的快速发展,数字孪生技术逐渐在能源、轨道交通、航空航天、船舶、机械、医疗等领域展现了广泛的应用前景和潜在的应用价值^[13],尤其在高端装备智能运维方面受到人们的广泛关注,促使传统的计划运维模式向数字化、网络化和智能化运维模式转型,IEEE P 3144 也已经启动了 Standard for Digital Twin Maturity Model and Assessment Methodology in Industry 标准的规划和制定^[14]。数字孪生在高端装备智能运维方面的应用,促使传统的计划运维模式向数字化、网络化和智能化运维模式的转型,受到人们的广泛关注。基于数字孪生的智能运维是集合建模、工业物联网、大

数据、人工智能等技术手段实现物理世界的虚拟化与数字化,创建与现实世界物理实体完全对应和一致的虚拟模型,实时模拟物理实体在现实环境中的行为和性能,借助实时运行数据、历史数据及算法模型持续完善更新数字孪生体,实现孪生体与物理实体同生共长。同时,数字孪生体模型能够根据物理实体运行的实时反馈信息,对物理实体的运行状态进行监控,实现物理实体未来态势的推演,揭示物理实体发展规律,预测预防潜在风险,有针对性地制定运维方案,实现资源配置、系统性能最优,最大限度地保持高效、低成本、稳定的系统运行。

本文基于数字孪生的高端装备智能运维体系框架,阐述了高端装备运维关键技术的发展历程,面向

能源领域梳理了基于数字孪生的智能运维应用现状,探讨了数字孪生在高端装备智能运维领域的技术发展方向及应用前景,为促进高效率、高可靠、低成本智能运维新模式提供借鉴。

1 基于数字孪生的高端装备智能运维体系框架

基于数字孪生的高端装备智能运维体系框架如图1所示,主要由物理层、感知层、数据层、孪生层、应用层和可视化层等模块组成,通过服务接口和传输协议实现各层之间的数据和信息实时、高效交互,通过各模块协同运行与闭环反馈,以实现能源装备、轨道交通等领域高端装备的智能运行与维护服务。

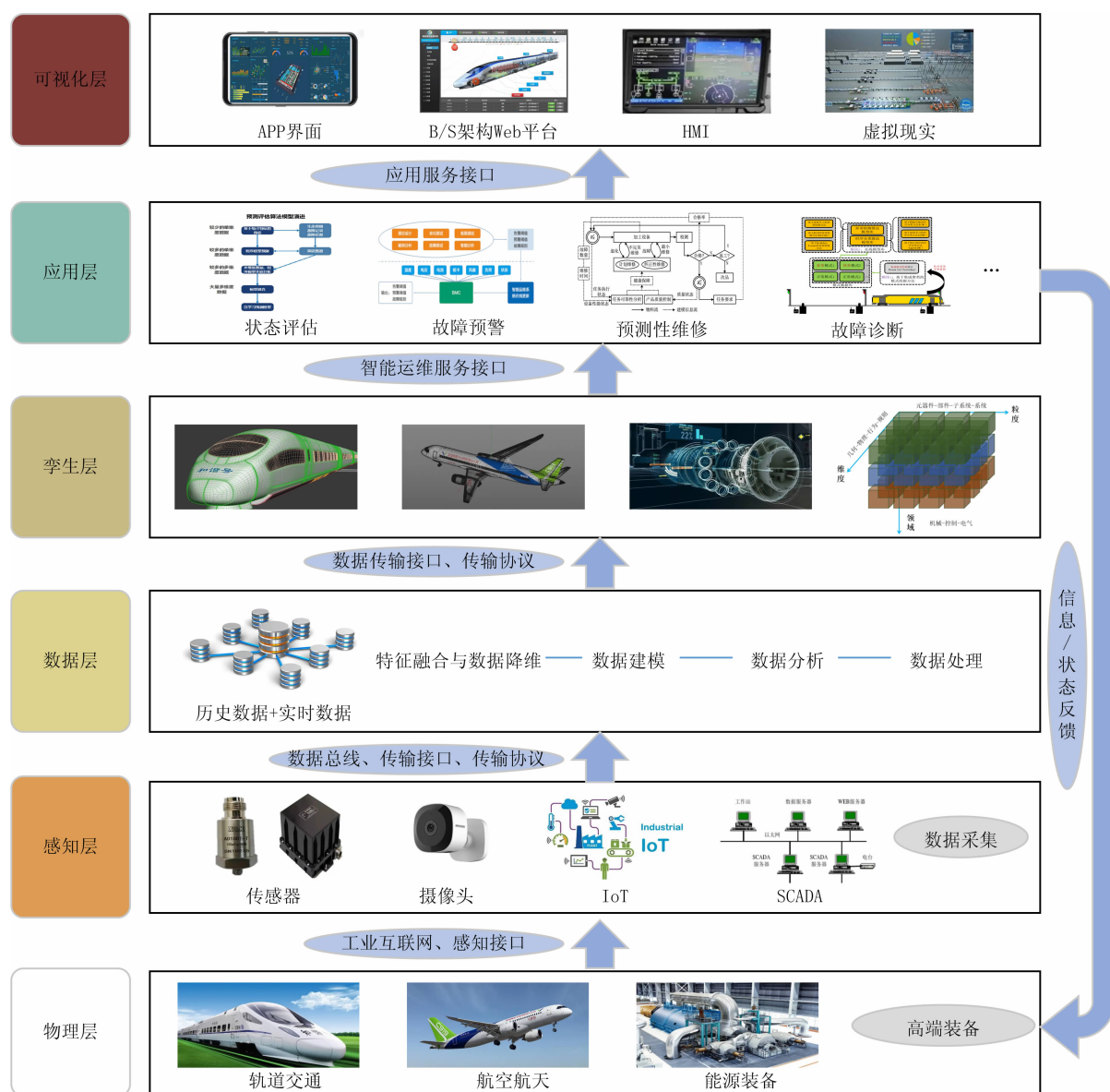


图1 基于数字孪生的高端装备智能运维体系框架

2 基于数字孪生的智能运维关键技术

高端装备正在从“建设为主”向“建管并用”发展,传统运维技术在智能化时代不合时宜,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,实现以最快速度和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,形成对物理实体的有效监控、模拟、预测、诊断与决策。美国国家航空航天局给出了面向 Future NASA 和 U. S. Air Force Vehicles 的数字孪生规划及其 4 个关键组成技术,包括高可信建模与仿真开发、设计和验证方法、态势感知、寿命预测和延寿方法。智能制造、工业 4.0 等领域在相关技术也展开了研究与探讨^[6,15-16]。

数字孪生技术为多个领域的运营、运行和装备的运维提供了新思路,相关的研究框架、思路和方法等也被陆续提出,如 AIVALIOTIS 等^[17]提出了基于物理仿真模型和数字孪生相融合的剩余寿命计算方法,以支撑利用预测和健康管理技术的预测性运维;KHAN 等^[18]探讨了数字孪生驱动的自治运维的前置条件和在运维模型中集成数字孪生技术的框架;LIU 等^[19]探讨了基于数字孪生的预测性维护的数据融合技术,认为数字孪生框架下要从粗糙数据到高阶决策过程需要实现传感到传感,传感到模型,模型到模型的数据融合过程;ERRANDONEA 等^[20]详细介绍了面向运维的数字孪生体系、方法、技术和框架。在航空发动机、多部件系统、综合决策等领域^[21-23],国内外学者也探讨了数字孪生框架下的预测性运维方案。下面主要针对基于数字孪生的智能运维,从高可信建模、状态评估、故障诊断与预警、寿命预测等方面进行阐述。

2.1 高可信建模

数字孪生系统能够再现实际物理系统的属性、机理、原理、演化、行为、功能等,其首要步骤是建立全属性一致的高可信模型。当前对于高可信的数字孪生模型尚未形成共识,国内外学者围绕如何面向不同领域、不同工程建立高可信的数字孪生模型开展了研究。

ZHANG 等^[24]从模型工程的角度阐述了如何定义和构建一个正确的数字孪生模型,提出数字孪生进化并发建模方法体系,该方法不仅继承了传统

建模仿真的方法理论,与传统模型相比,还突出了数字孪生的特点,系统地指导了数字孪生的建模过程,并提出一种数字孪生进化并发建模方法,如图 2 所示;ZHANG 等^[6]从逼真度、可信度、成熟度、标准化程度、模型开发能力成熟度等方面构建了数字孪生模型的评价指标体系;丁凯等^[25]从逻辑关联的视角提出了多维多尺度智能制造空间的内涵与特征,结合数字孪生技术的实现逻辑,研究了智能制造空间的虚实映射建模方法、复杂多维时空域下智能制造过程及数据建模方法;WU 等^[26]提出一种映射数字孪生对象及属性的五维数字孪生概念框架,引入了 TRIZ 函数模型以改进系统构建过程;陶飞等^[27]探讨了数字孪生模型构建准则和理论体系,给出了数字孪生车间的实例;JIANG 等^[28]探讨了如何为数字孪生的应用建立物理和虚拟模型之间的模型和应用方法;WANG 等^[29]提出了基于知识系统设计的数字孪生一致性建模方法。上述研究主要围绕数字孪生高可信建模的框架设计与实现方法展开讨论。

针对如何在不同领域与工程应用建立高可信的数字孪生模型,SCHROEDER 等^[30]提出一种基于 AutomationML 的数字孪生建模方法及数据交换方法,实现了数字孪生多个子系统间的数据实时交互;肖静华等^[31]认为基于数字孪生构建的战略场景模型可以为企业提供一种适当的战略设计来影响战略实践进程;LIU 等^[32]提出一种基于仿生学的航空部件加工数字孪生建模方法,实现了多物理实体的数字孪生体自适应构建;ZHANG 等^[33]提出一种面向智能制造系统的数字孪生使能的可重构建模方法,实现了在生产任务中的弹性配置灵活性;GLATT 等^[34]提出一种基于物理仿真的材料流数字孪生建模方法,避免了复杂运行环境导致的扰动;SCHROEDER 等^[35]提出一种基于模型驱动工程的灵活、通用式工业 4.0 数字孪生建模方法,并利用 AutomationML 给出了其一般性架构;ZHANG 等^[36]提出了工作场所的多尺度数字孪生建模方法,支撑了单元层、系统层、系统的系统层的模型构建。随着数字孪生相关理论与建模技术的研究,如何形成面向高端装备智能运维的多学科、多变量、多层次、多尺度、多粒度、多概率的高可信建模理论、方法与技术体系,是数字孪生技术在高端装备智能运维领域的重要方向与待解决的问题与难题。

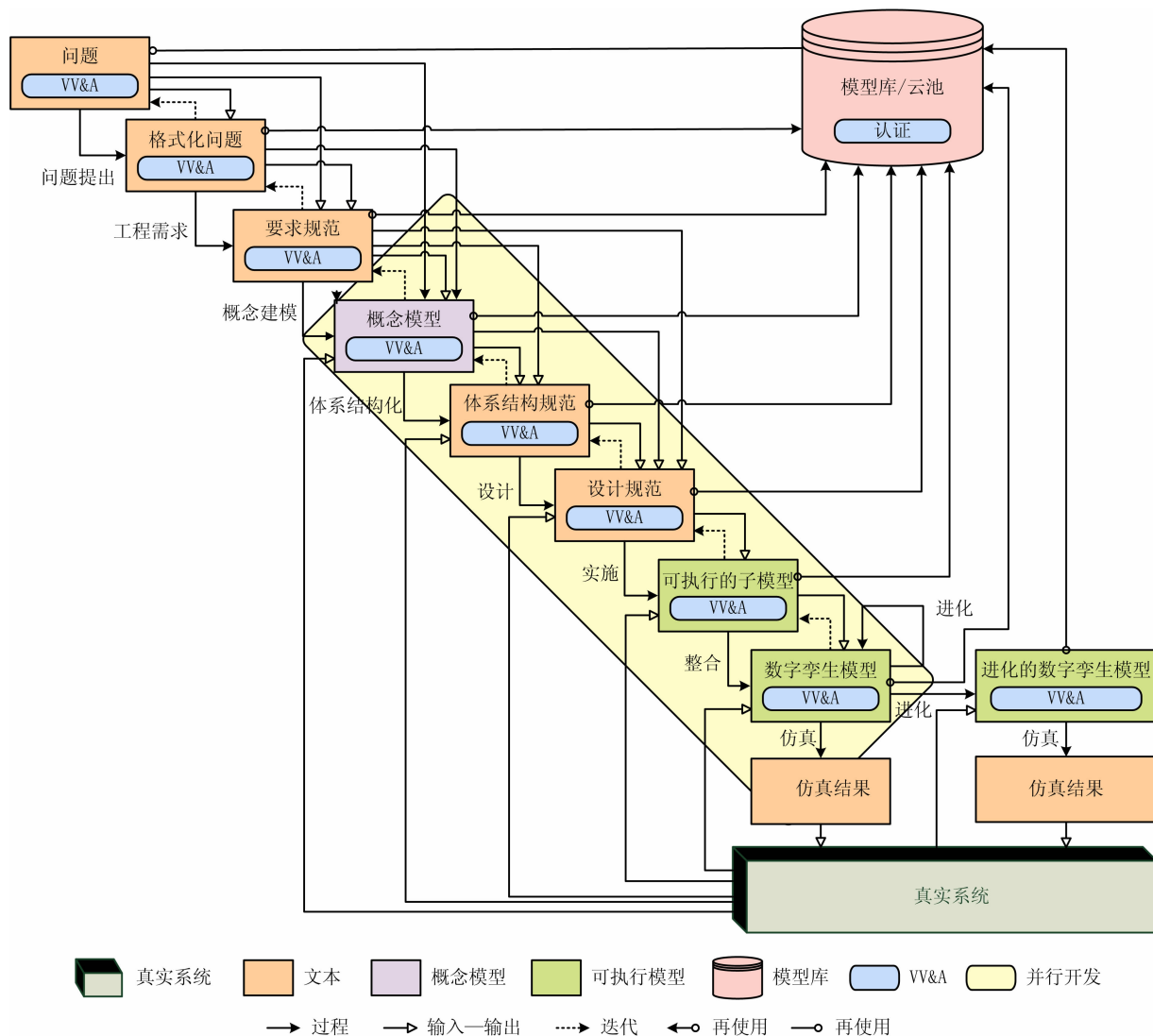


图2 数字孪生建模框架

2.2 状态评估

基于数字孪生对物理系统的状态进行监控和估计,及时捕捉微小异常状态,能够有效地降低产品故障次数并延长其寿命。基于物理系统的性能演化机理及不同状态之间的内在联系,可有效地对物理系统的状态进行评估。TOOTHMAN等^[37]考虑现有针对机械系统健康状态评估方法侧重于识别单一类别故障的问题,提出适用于机械制造系统健康状态估计问题的定量定义,构建了允许同时对机械系统健康的多个维度进行建模和估计的数字孪生框架;HE等^[38]提出用于泵站非稳态流动状态估计的数字孪生解决方案,提出结合频域分析和广义预测控制理论的非稳态流动状态估计方法;LI等^[39]通过物联网将所有与电池相关的数据传输至云端,构建电池系统数字孪生模型,并基于电池诊断算法对数

据进行评估,开发了适合云计算的充电状态和健康状态估计方法,探索了电池系统数字孪生模型中的等效电路模型的应用。

随着数据挖掘、机器学习等技术的发展和兴起,基于物理系统当前监测数据及历史数据,利用深度学习等方法对物理系统的状态进行实时评估进一步成为研究热点。齐波等^[40]基于数据分析和数据挖掘的技术构建了输变电设备数字孪生体,基于设备运行特征实现了传感评估和数据融合,并实现了设备的状态评估、诊断及预测,如图3所示;DAS等^[41]针对在线电池管理系统存在的实时容量不足和数据使用率较差的问题,提出整车队的锂离子电池组的数字孪生框架,基于迁移学习的预测技术对电池的健康状态进行评估;谢林等^[42]提出数控折弯机数字孪生模型,基于折弯机的运行状态监测数据和孪生

数据提出了监测数据与孪生数据融合的液压系统健康状况评估方法;TANG 等^[43]利用云平台的数据存储和计算能力,使用来自分散的电池储能系统的实时数据用于建模和参数识别,并提出了串联电池组的电池模型及其荷电状态(State-of-Charge, SOC)和健康度状态(State-of-Health, SOH),提出了基于机器学习算法的电池模型及其 SOC 和 SOH 的估计方法;YANG 等^[44]提出基于剩余有用循环寿命预测的锂离子电池可靠性数字孪生模型,基于贝叶斯算法提出了数字孪生体模型的自适应进化方法,实现基于数字孪生体的电池寿命预测、可靠性评估和预测性维护。高端装备的系统组件繁多,不同尺度组件之间耦合机理复杂,如何进一步融合机理模型和数据驱动模型,实现高端装备多维度、多尺度的状态实时评估仍亟待研究。

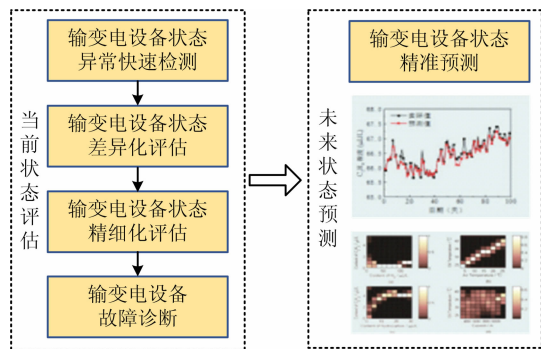


图3 输变电设备状态评估技术流程

2.3 故障诊断与预警

数字孪生凭借其数据驱动的特性与处理非线性动态和不确定性的能力,为生产、设备、制造等提供了故障诊断与预警的新范式。

在故障诊断方面,WANG 等^[45]提出了适用于旋转机械故障诊断的数字孪生参考模型,并给出了基于参数敏感度分析的模型更新策略,如图4所示;HE 等^[46]讨论了数据驱动数字孪生的容错控制策略,探讨了传感故障、过程扰动、执行器故障、多故障场景的应对方案和结果;JAIN 等^[47]建立了分布式光伏系统故障诊断的数字孪生模型,给出了设计方法、数学分析、仿真研究和实验验证;DEEBAK 等^[48]提出了基于深度迁移学习的数字孪生辅助的加工刀具状态故障诊断技术;XIA 等^[49]提出了数字孪生辅助深度迁移学习的机械智能故障诊断方法,只需使用目标域的一个采样迁移参数实现预训练 NSDAE 的精调;NGUYEN 等^[50]使用数字孪生方法提升了装备健康检测系统级故障检测和诊断方

法;JIANG 等^[51]设计了柴油机故障诊断的自适应稀疏注意力网络数字孪生辅助方法,提出一种新型的基于软阈值滤波的分布式动态时变故障注意力机制;VANDANA 等^[52]讨论了电动车储能系统多维数字孪生框架,分析了数字孪生技术在自感知、自判断、事先预警等功能上的思路;HE 等^[53]从生产指标优化角度分析了数字孪生辅助的可持续智能制造问题,构建了智能工业产品传感和控制系统实时参数驱动的虚拟远程监控模型;夏玲等^[54]针对 Buck 电路故障诊断方法存在计算量大和准确率低等问题,提出一种基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法;杨俊峰等^[55]搭建了数字孪生模型,通过 OPC-UA 协议使物理实体、虚拟仿真和服务模块之间的数据进行集成与融合,实现了对设备状态可视化监测与故障诊断。

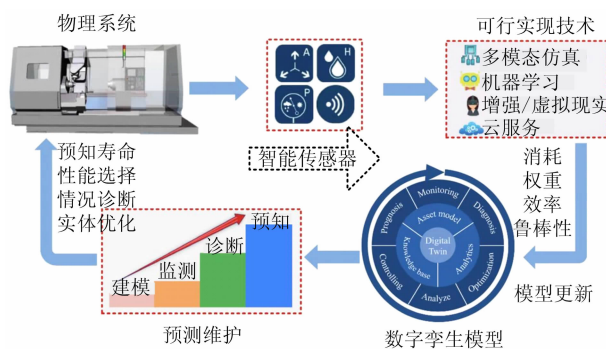


图4 基于数字孪生的故障诊断框架

在实际生产中,设备故障通常会带来严重的影响和后果,甚至威胁生产人员的安全,传统的“定期修”、“故障修”运维模式通常在人力财力等多方面考虑均不是最优运维方案,因此向“预防修”、“状态修”的新模式变换成为必然。故障预警主要通过设备对要发生的故障进行诊断,并在故障发生前提前预警,在高可信模块和历史与感知数据的支持下,数字孪生成为故障预警的有效手段。王红微等^[56]构建了包含机场物理世界、赛博空间的数字孪生模型,提出了基于数字孪生的新型航班保障预警系统架构,实现了保障车辆和航班数据的实时采集和潜在碰撞风险的预警;朱天明等^[57]针对碰撞预警系统建模和仿真结果难以真实表达物理域且现有碰撞预警系统仅限于车内预警的问题,设计了基于数字孪生五维框架,详述了面向扩展碰撞预警系统的数字孪生建模过程。大数据与专家系统驱动的数字孪生技术充分结合数据、经验和高可信建模技术,是数字孪生技术在高端装备智能运维故障诊断与预警

领域的重要研究方向与待解决的问题与难题。

2.4 寿命预测

寿命预测是制定预测性维护计划、生产计划调整和零部件管理等决策的基础,是健康管理的重要组成部分。部分学者展开了基于数字孪生的通用寿命预测架构设计^[58]。WANG等^[59]通过建立一个虚拟数字孪生模型和其所对应的物理模型之间的有效双向通信,来准确预测该物体的结构疲劳寿命。该孪生模型由高精度逼近模型、动态贝叶斯推理模型和裂纹跟踪模型组成,并通过离线训练和在线预测的方式实现寿命预测。SHAO等^[60]构建了一个数据和模型融合的剩余寿命预测框架体系,如图5所示,用卡尔曼滤波器和贝叶斯网络分别构造了物理实体模型和数字孪生体的退化模型,进一步通过将孪生数据补充到物理模型中来得到剩余寿命的最优估计。

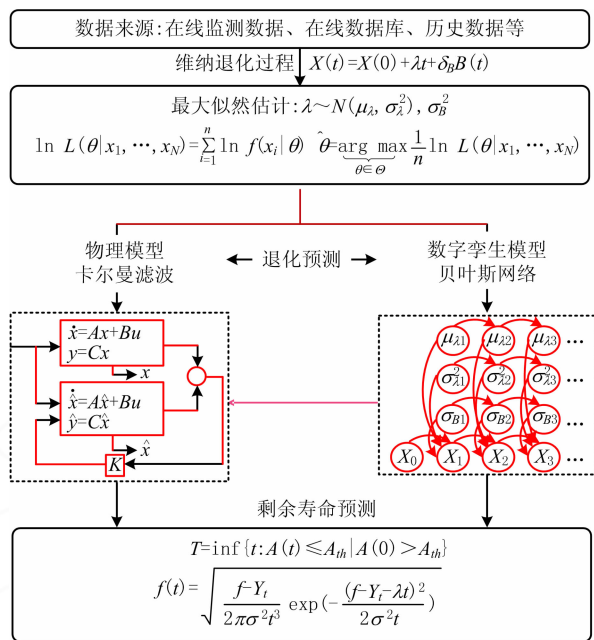


图5 数据与模型融合的寿命预测技术

在桥梁结构、飞行器、工厂、电池等领域,寿命预测是管理与运维的重要环节,也是当前国内外的研究热点之一。JIANG等^[61]设计了钢桥非确定性疲劳寿命预测数字孪生框架,并建立了一个概率多尺度模型来表征整个桥梁生命周期的疲劳演变;MERAGHNI等^[62]构建了一个包含物理层、数据层和孪生层的数据驱动的数字孪生系统,来实现质子交换膜燃料电池系统的剩余寿命预测,在孪生层基于堆叠去噪自编码器的深度迁移学习模型实现寿命的预测;TUEGEL等^[63]基于数字孪生理念,通过整

合结构偏转和计算的温度响应飞行条件,从而产生局部损伤和材料状态演化,在孪生空间中设计压力、维度、震动预测模块以及损伤寿命预测模型,实现实时的健康监测和寿命预测;GUO等^[64]提出一种制造车间的数字孪生寿命预测模型,首先通过软硬件结合的方式获取物理空间的实时状态,构建制造车间的数字孪生模型,进一步建立基于非线性漂移布朗运动的寿命预测模型;HE等^[65]凝练了包含数据层、映射层和应用层三维数字孪生齿轮寿命预测架构,在应用层通过理查德磨损寿命模拟、齿轮表面磨损实验等技术方法实现寿命预测。付洋等^[66]建立面向涡轮盘性能退化的数字孪生框架,通过在虚拟空间构建共性表征模型、个性表征模型、动态演化模型以及退化追踪与预测模型,并基于物理实体和虚拟模型的实时数据交互实现涡轮盘的寿命在线预测。对于高端装备,其组成组件具有多尺度、耦合复杂等特点,不同尺度组件的性能退化及损伤演化机理难以刻画,如何设计高可靠的基于数字孪生的高端装备寿命预测方法,为维修策略提供技术支持仍旧是研究难点。

3 高端装备智能运维数字孪生应用

基于上述数字孪生在智能运维方法的现状分析与总结,本文梳理了数字孪生技术在轨道交通系统与装备、能源装备等高端装备的应用现状与进展。

3.1 轨道交通系统与装备

数字孪生能够有效提升复杂系统的运行、监控、优化等服务水平,对于提升轨道交通的智能化发展具有重要的作用。在轨道交通基础设施方面,KAEWUNRUEN等^[67]初步总结了数字孪生的发展历程及原理方法,分析了数字孪生技术在铁路智能运维领域的发展现状,提出了基础设施智能运维的技术框架和解决方案并展望了未来的发展方向。朱庆等^[68]对数字孪生川藏铁路实景三维空间信息平台的建设与应用进行了归纳,认为数字孪生是建设智能铁路的有效途径和复杂环境下铁路建设和管理信息化水平与品质保障的关键支撑。吕向茹等^[69]研发了基于数字孪生技术的环铁一体化协同实验平台,实现了环铁实验基地全域资产管理、实验管理、调度管理等应用功能。王小书等^[70]设计了基于数字孪生模型的铁路客运站应急响应仿真方案,并对大面积晚点、大客流、火灾与暴恐等典型应急场景进行了细化仿真功能设计;王可飞等^[71]探讨了基

于建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 的铁路数字孪生工程,梳理了智能铁路应用现状,分析了在综合、进度、质量、安全、投资、环保等信息化过程的应用;梁策等^[72]探讨了面向竣工交付的数字孪生铁路系统的建设和应用;德国铁路股份公司 (Deutsche Bahn, DB) 实时数字技术战略,基于 TecEx 计划和“数字化维护”计划积累的数据,研发了铁路系统的完整、全面数字化映射,并开展了仿真模拟识别系统中的弱点并有针对性的进行优化,如图 6 所示^[73];ZHANG 等^[74]提出了铁路转辙机的数字孪生故障诊断方法,设计了数字孪生模型的三维和五维架构。

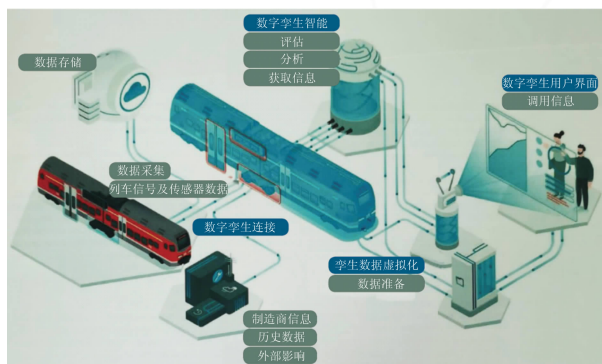


图6 DB列车数字孪生示意图^[73]

在轨道交通机车车辆及动车组方面, DIMITROVA 等^[75]探讨了数字孪生技术在铁路维修转型以及机车车辆、铁路基础设施、信号系统等方面的实现。DING 等^[76]描述了基于数字孪生的高速列车全生命周期模型框架,分析了模型驱动数字孪生体构建、孪生数据分析融合等技术挑战,并初步探索了数字孪生在车辆关键部件服役能力的应用实践。CHEN 等^[77]提出了基于数字孪生的动车组运维管理系统架构,设计了动车组、运用所和高级修车间 3 个典型应用。ZHANG 等^[78]基于数字孪生设计了机车车辆车轮故障预测及健康管理,为保障机车车辆车轮的服役可靠性提供了有力支撑。孙扶瑶^[79]提出了基于大数据平台和数字孪生模型的动车组运维解决方案,阐述了基于大数据平台的动车组数字孪生模型总体框架,并利用最小二乘支持向量机实现了数字孪生模型中数据处理模式的自调整。陈彦等^[80]为了解决动车组运维信息化的数据分散、数据挖掘不够深入和缺乏融合展示的问题,设计了包含数字孪生动车组、数字孪生运用所和数字孪生高级修车间的动车组运维管理系统。

随着大数据、AI 等新技术在轨道交通系统与装备上的应用,数字孪生技术成为了轨道交通系统与装备智能运维的有效手段,并得到了国内外学者的初步关注与探讨。轨道交通系统与装备运行于复杂环境下的智能大系统,其“预防修”、“状态修”的实现依赖于智能运维的高可信建模、状态评估、故障诊断与预警、寿命预测等关键技术,是数字孪生技术在轨道交通系统与装备智能运维方向待解决的重要问题与难题。

3.2 能源装备

随着数字孪生技术的发展和能源装备等对智能化发展的需求,许多学者尝试结合数字孪生的虚实交互特点,并将其运用于能源装备的运行管理、运行维护及性能优化等领域。在核电能源领域, PATTERSON 等^[81]提出了集成运行、存储和处理核废料的核电数字环境框架;针对不确定环境下的优化问题, KOCHUNAS 等^[82]给出了基于数字孪生的核电站最大化信息增益和性能的形式化分析方法。MOHANTY 等^[83]分析了核反应堆数字孪生的 SQL 和 NOSQL 数据库,给出了基于 MongoDB 的 NOSQL 数据库为例加压水反应堆蒸汽发生器的数字孪生模型。GONG 等^[84]研究了数据支持的物理信息机器学习降阶数字孪生建模,给出了应用于核反应堆物理的实例。

在电力装备领域, LIU 等^[85]结合电力装备制造和管理组织方式,总结了电力装备领域数字孪生技术应用所涉及的关键技术,提出了以物理层、通信层、虚拟层和应用层为核心的电力装备数字孪生技术架构,并分析了电力装备数字孪生在设计、制造、动态管理及运维等全生命周期的典型应用场景。为了更好地实现电网运行状态预测和故障诊断等功能, HUANG 等^[86]提出了基于北斗与数字孪生技术的电网运维平台架构,并初步开发了电网运维平台。针对能源互联网面临的规划、运行和控制等难题, SHEN 等^[87]中探讨了数字孪生能源互联网构建和规划方面的典型应用,并介绍了能源互联网规划数字孪生平台。YANG 等^[88]分析了数字孪生技术在电力装备全生命周期中的研究进展,提出了电力装备数字孪生框架并构建了基于 Twin Builder 的变压器数字孪生模型。

随着系统仿真、智能管控等新技术在能源装备领域的应用,数字孪生技术成为了能源装备智能运维的新手段,国内外学者能源装备关键技术与问题

探讨了数字孪生的应用方向,其系统性“预防修”、“状态修”等新特征下的智能运维是尚待解决的问题与重要的研究方向。

4 结论与展望

本文分析了当前高端装备运维关键技术及应用的发展历程,阐述了高端装备运维新需求下当前运维关键技术的不足。数字孪生技术实现了信息物理空间的有机融合,在虚拟空间先知先觉,在物理空间实时优化,从而与装备实体实现共生共智。数字孪生技术的不断成熟应用,必将颠覆传统的高端装备运行维护模式,带来一场装备智能运维模式的革新,进而大幅降低高端装备的运维成本、提高装备的使用寿命。目前,数字孪生技术尚处于高速发展阶段,真正实现基于数字孪生的高端装备智能运维还面临如下挑战:

(1)复杂环境智能感知技术的挑战 装备自身以及外部的工作环境复杂,需要开发多类型、多参数、宽量程、高精度、低能耗、自校准、抗干扰的智能传感器,为数字孪生物理对象的各种参数感知提供支撑。

(2)数字孪生建模技术带来的挑战 构建能够实时演化的高可信的复杂装备的数字模型是一个亟待解决的难题。对于黑盒模型来说,如何设计开发高效的不平衡样本处理学习算法是一个挑战;对于灰盒、白盒模型来说,如何设计参数、结构可在线更新的机理模型同样面临挑战。

(3)安全可信数据传输的挑战 数字孪生平台的实现需要建立安全可信的数据传输环境,如何保证数据双向高速传输的安全可信也是需要深入研究的重要方向。

(4)算力存储等高性能要求挑战 考虑到数字孪生平台对于算力、存储等的高性能要求以及高端装备的远程部署,基于数字孪生的高端装备智能运维未来应该朝着云边协同的架构模式发展,这对云端平台的总体架构以及边缘侧的能力资源分配提出了更高的要求。

随着数字孪生技术自身的不断完善发展,上述研究工作必将对高端装备在运行过程中的状态评估、寿命预测、故障预警与预警等方面提供更有力的技术支持,从而有效提升高端装备安全可靠性和智能运维水平。

参考文献:

- [1] The Central People's Government of the People's Republic of China. The fourteenth five year plan for national economic and social development of the people's Republic of China and the outline of long-term objectives for 2035[EB/OL]. [2021-03-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm(in Chinese). [中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-03-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.]
- [2] GELERNTER D. Mirror worlds or the day software puts the universe in a shoebox: How will it happen and what it will mean[M]. U K: Oxford University Press, 1993.
- [3] GRIEVES M W. Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins[M]. Reston, Va., USA: AIAA, 2019.
- [4] PIASCIK R, VICKERS J, LOWRY D, et al. Technology area 12: Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map[EB/OL]. [2022-06-12]. https://www.nasa.gov/pdf/501625main_TA12-MSMSM-DRAFT-Nov2010-A.pdf.
- [5] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA, 2012.
- [6] ZHANG Lin, LU Han. Discussing digital twin from of modeling and simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007(in Chinese). [张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.]
- [7] ZHANG Lin. Cold thinking about digital twin and its modeling and simulation technology[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 1-10(in Chinese). [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.]
- [8] WANG Feiyue. Computational experiment method and behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 893-897(in Chinese). [王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893-897.]
- [9] NING B, TANG T, DONG H R, et al. An introduction to parallel control and management for high-speed railway systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1473-1483.
- [10] LIU X, ZHOU M, SONG H F, et al. Parallel intelligence method for timetable rescheduling of high-speed railways under disturbances[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DT-PID). Washington, D. C., USA: IEEE, 2021: 414-417.
- [11] DONG H R, ZHU H N, LI Y D, et al. Parallel intelligent systems for integrated high-speed railway operation control and dynamic scheduling[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(12): 3381-3389.

- [12] DONG H R, NING B, CHEN Y, et al. Emergency management of urban rail transportation based on parallel systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 14(2): 627-636.
- [13] ZHUANG C, LIU J, XIONG H, et al. Connotation, architecture and development trend of product digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 753-768(in Chinese). [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.]
- [14] IEEE Computer Society. Standard for digital twin maturity model and assessment methodology in Industry[EB/OL]. [2022-05-14]. <https://standards.ieee.org/ieee/3144/10837/>.
- [15] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2018, 15(4): 2405-2415.
- [16] KENETT R S, BORTMAN J. The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2022, 38(3): 1357-1366.
- [17] AIVALIOTIS P, GEORGOULIAS K, CHRYSSOLOURIS G. The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(11): 1067-1080.
- [18] KHAN S, FARNSWORTH M, MCWILLIAM R, et al. On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance[J]. *Annual Reviews in Control*, 2020, 50: 13-28.
- [19] LIU Z, MEYENDORF N, MRAD N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1949(1): 1-6.
- [20] ERRANDONEA I, BELTRÁN S, ARRIZABALAGA S. Digital twin for maintenance: A literature review[J]. *Computers in Industry*, 2020, 123: 103316.
- [21] XIONG M L, WANG H W, FU Q, et al. Digital twin-driven aero-engine intelligent predictive maintenance[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(11): 3751-3761.
- [22] SAVOLAINEN J, URBANI M. Maintenance optimization for a multi-unit system with digital twin simulation[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, 32: 1953-1973.
- [23] MI S H, FENG Y X, ZHENG H, et al. Prediction maintenance integrated decision-making approach supported by digital twin-driven cooperative awareness and interconnection framework[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 329-345.
- [24] ZHANG L, ZHOU L F, HORN B K P. Building a right digital twin with model engineering[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 59: 151-164.
- [25] DING Kai, ZHANG Xudong, ZHOU Guanghui, 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(in Chinese). [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.]
- [26] WU C L, ZHOU Y C, PESSÔA M V P, et al. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 79-93.
- [27] TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(1): 1-15(in Chinese). [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.]
- [28] JIANG H F, QIN S F, FU J L, et al. How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 36-51.
- [29] WANG H Q, LI H, WEN X Y, et al. Unified modeling for digital twin of a knowledge-based system design[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 68: 102074.
- [30] SCHROEDER G N, STEINMETZ C, PEREIRA C E, et al. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(30): 12-17.
- [31] XIAO Jinghua, XIE Kang, CHI Jiayu. Intelligent manufacturing, digital twin and strategic scenario modeling[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University: Social Sciences Edition*, 2019, 18(2): 69-77(in Chinese). [肖静华, 谢康, 迟嘉昱. 智能制造、数字孪生与战略场景建模[J]. *北京交通大学学报: 社会科学版*, 2019, 18(2): 69-77.]
- [32] LIU S M, BAO J S, LU Y Q, et al. Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 180-195.
- [33] ZHANG C Y, XU W J, LIU J Y, et al. Digital twin-enabled reconfigurable modeling for smart manufacturing systems[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, 34(7-8): 709-733.
- [34] GLATT M, SINNWEILL C, Yi L, et al. Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 231-245.
- [35] SCHROEDER G N, STEINMETZ C, RODRIGUES R N, et al. A methodology for digital twin modeling and deployment for industry 4.0[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 109(4): 556-567.
- [36] ZHANG H, QI Q L, TAO F. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 417-428.
- [37] TOOTHMAN M, BRAUN B, BURY S J, et al. A digital twin framework for mechanical system health state estimation[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54(20): 1-7.

- [38] HE L, WEN K, GONG J, et al. A multi-model ensemble digital twin solution for real-time unsteady flow state estimation of a pumping station[J]. *ISA Transactions*, 2022, 126: 242-253.
- [39] LI W H, RENTEMEISTER M, BADEDA J, et al. Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101557.
- [40] QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1522-1538(in Chinese). [齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1522-1538.]
- [41] DAS A P, THOMAS K, MOHAN A, et al. A battery digital twin framework for predictive maintenance and state of health estimation of electric vehicles[J]. *VDI-Berichte*, 2021, 2384: 579-592.
- [42] XIE Lin. Research and implementation of health status evaluation method for bending machine based on digital twin[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021(in Chinese). [谢林. 基于数字孪生的折弯机健康状态评估方法研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.]
- [43] TANG X S, SUN Y S, ZHAO Y X, et al. Digital twin based BESS state estimation and operating optimization[C]//Proceedings of the 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Washington, D. C., USA: IEEE, 2021.
- [44] YANG D Z, CUI Y D, XIA Q, et al. A digital twin-driven life prediction method of lithium-Ion batteries based on adaptive model evolution[J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3331.
- [45] WANG J, YE L, GAO R X, et al. Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3920-3934.
- [46] HE R, CHEN G M, DONG C, et al. Data-driven digital twin technology for optimized control in process systems[J]. *ISA Transactions*, 2019, 95: 221-234.
- [47] JAIN P, POON J, SINGH J P, et al. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(1): 940-956.
- [48] DEEBAK B D, AL-TURJMAN F. Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition[M]//International Journal of Intelligent Systems. Hoboken, N. J., USA: Wiley, 2021.
- [49] XIA M, SHAO H D, WILLIAMS D, et al. Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer learning[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: 107938.
- [50] NGUYEN T N, PONCIROLI R, BRUCK P, et al. A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 170: 109002.
- [51] JIANG J J, LI H, MAO Z W, et al. A digital twin auxiliary approach based on adaptive sparse attention network for diesel engine fault diagnosis[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 675.
- [52] GARG A, PANIGRAHI B K. Multi-dimensional digital twin of energy storage system for electric vehicles: A brief review[J]. *Energy Storage*, 2021, 3(6): e242. DOI: 10. 1002/est2.242.
- [53] HE B, BAI K J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review[J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(1): 1-21.
- [54] XIA Ling, JIANG Yuanyuan, ZHANG Jie, et al. Buck circuit Fault diagnosis method of buck circuit based on digital twin[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(2): 88-92(in Chinese). [夏玲, 姜媛媛, 张杰, 等. 基于数字孪生的Buck电路故障诊断方法[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(2): 88-92.]
- [55] YANG Junfeng, WANG Hongjun, FENG Haotian, et al. Equipment fault diagnosis technology based on digital twin model[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2021(9): 128-130(in Chinese). [杨俊峰, 王红军, 冯昊天, 等. 基于数字孪生模型的设备故障诊断技术[J]. *设备管理与维修*, 2021(9): 128-130.]
- [56] WANG Hongwei, YANG Peng, JIN Huibin, et al. Flight support early warning system architecture based on digital twins[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(24): 9954-9962(in Chinese). [王红微, 杨鹏, 靳慧斌, 等. 基于数字孪生的航班保障预警系统[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(24): 9954-9962.]
- [57] ZHU Tianming, WU Chunlong, ZHOU Youcheng, et al. Construction of extended collision warning system digital twin conceptual scheme based on TRIZ functional modeling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 337-351(in Chinese). [朱天明, 武春龙, 周有城, 等. 基于TRIZ功能建模的扩展碰撞预警系统数字孪生概念方案构建[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 337-351.]
- [58] ZHAO Liang, GAO Long, TAO Jian. Application of digital twin technology in aviation produce life prediction[J]. *National Defense Technology Industry*, 2019, 5: 42-44(in Chinese). [赵亮, 高龙, 陶剑. 数字孪生技术在航空产品寿命预测中的应用[J]. *国防科技工业*, 2019, 5: 42-44.]
- [59] WANG M M, FENG S Z, INCECIK A, et al. Structural fatigue life prediction considering model uncertainties through a novel digital twin-driven approach[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 391: 114512.
- [60] SHAO X Y, CAI B P, FAN H Y, et al. A data-driven remaining useful life prediction methodology: Optimization based on digital twin[C]//Proceedings of the Global Reliability and

- Prognostics and Health Management(PHM-Nanjing). Washington, D. C., USA: IEEE, 2021.
- [61] JIANG F, DING Y L, SONG Y S, 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: 112461.
- [62] MERAGHNI S, TERRISSA L S, Yue M, et al. A data-driven digital-twin prognostics method for proton exchange membrane fuel cell remaining useful life prediction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2): 2555-2564.
- [63] TUEGEL E J, INGRAFEEA A R, Eason T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin[EB/OL]. [2022-05-16]. <https://downloads.hindawi.com/journals/ijae/2011/154798.pdf>.
- [64] GUO J, YANG Z, CHEN C, et al. Real-time prediction of remaining useful life and preventive maintenance strategy based on digital twin[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2021, 21(3): 031003.
- [65] HE B, LIU L, ZHANG D. Digital twin-driven remaining useful life prediction for gear performance degradation: A review[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2021, 21(3): 030801.
- [66] FU Yang, CAO Hongrui, GAO Weiqiang, et al. Digital twin driven remaining useful life prediction for aero-engine turbine discs[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 57(22): 106-113 (in Chinese). [付洋, 曹宏瑞, 郭伟强, 等. 数字孪生驱动的航空发动机涡轮盘剩余寿命预测[J]. *机械工程学报*, 2022, 57(22): 106-113.]
- [67] KAEWUNRUEN S, LIAN Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 1537-1551.
- [68] ZHU Qing, ZHU Jun, HUANG Huaping, et al. Real 3D spatial information platform and digital twin Sichuan-Tibet railway[J]. *High Speed Railway Technology*, 2020, 11(2): 46-53 (in Chinese). [朱庆, 朱军, 黄华平, 等. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路[J]. *高速铁路技术*, 2020, 11(2): 46-53.]
- [69] LYU Xiangru, FAN Wenna, LU Wenlong, et al. Research on integrated circular railway collaborative test platform based on digital twin[J]. *Railway Computer Application*, 2021, 30(12): 29-34 (in Chinese). [吕向茹, 范文娜, 卢文龙, 等. 基于数字孪生技术的环铁一体化协同试验平台研究[J]. *铁路计算机应用*, 2021, 30(12): 29-34.]
- [70] WANG Xiaoshu, YANG Guoyuan. Research on simulation scheme of railway passenger station emergency response based on digital twins model[J]. *Railway Computer Application*, 2021, 30(7): 44-49, 60 (in Chinese). [王小书, 杨国元. 基于数字孪生模型的铁路客运站应急响应仿真方案研究[J]. *铁路计算机应用*, 2021, 30(7): 44-49, 60.]
- [71] WANG Kefei, HAO Rui, LU Wenlong, et al. Research status and perspective of BIM-based digital twin railway engineering[J]. *Railway Technical Innovation*, 2021(4): 45-51 (in Chinese). [王可飞, 郝蕊, 卢文龙, 等. 基于 BIM 的铁路数字孪生工程研究现状及展望[J]. *铁路技术创新*, 2021(4): 45-51.]
- [72] LIANG Ce, LIU Hongliang, WANG Yan, et al. Construction and application of digital twin railway system for completion and delivery[C]//*Proceedings of the 16th China Intelligent Transportation Annual Conference*. Beijing, China: Machine Press, 2021 (in Chinese). [梁策, 刘红良, 王燕, 等. 面向竣工交付的数字孪生铁路系统建设和应用[J]. 第十六届中国智能交通年会科技论文集. 北京: 机械工业出版社, 2021.]
- [73] International Focus. Digital twin strategy of DB AG[J]. *Modern Urban Transit*, 2021(12): 102-104 (in Chinese). [国际聚焦. 德国铁路数字孪生战略[J]. *现代城市轨道交通*, 2021(12): 102-104.]
- [74] ZHANG S Y, DONG H R, MASCHKE U, et al. A digital-twin-assisted fault diagnosis of railway point machine[C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence(DTPDI)*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2021.
- [75] DIMITROVA E, TOMOV S. Digital twins: An advanced technology for railways maintenance transformation[C]//*Proceedings of the 13th Electrical Engineering Faculty Conference(BulEF)*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2021.
- [76] DING Guofu, HE Xu, ZHANG Haizhu, et al. Application and challenges of digital twin in the life cycle of high-speed trains[J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 1-18 [2022-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220409.2258.006.html> (in Chinese). [丁国富, 何旭, 张海柱, 等. 数字孪生在高速列车生命周期中的应用与挑战[J/OL]. *西南交通大学学报*, 2022, 1-18 [2022-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220409.2258.006.html>.]
- [77] CHEN Yan, JIA Zhikai, SUN Peng, et al. EMU operation and maintenance management system architecture based on digital twin technology[J]. *Railway Computer Application*, 2021, 30(2): 40-44 (in Chinese). [陈彦, 贾志凯, 孙鹏, 等. 基于数字孪生技术的动车组运维管理系统架构研究[J]. *铁路计算机应用*, 2021, 30(2): 40-44.]
- [78] ZHANG Bin, NING Youbo, YANG Yanfeng, et al. Research and application of railway rolling stock wheel fault prediction and health management technology[J]. *Rolling Stock*, 2021, 59(6): 45-48 (in Chinese). [张斌, 宁友波, 杨延峰, 等. 铁路机车车辆车轮故障预测及健康管理技术研究及应用[J]. *铁道车辆*, 2021, 59(6): 45-48.]
- [79] SUN Fuyao. Research and implementation of key technologies for data preprocessing of EMU based on digital twin model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020 (in Chinese).

- nese). [孙扶瑶. 面向数字孪生模型的动车组数据预处理关键技术研究[实现][D]. 北京:北京交通大学, 2020.]
- [80] CHEN Yan, JIA Zhikai, SUN Peng, et al. EMU operation and maintenance management system architecture based on digital twin technology[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(2): 40-44 (in Chinese). [陈彦, 贾志凯, 孙鹏, 等. 基于数字孪生技术的动车组运维管理系统架构研究[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(2): 40-44.]
- [81] PATTERSON E A, TAYLOR R J, BANKHEAD M. A framework for an integrated nuclear digital environment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 87: 97-103.
- [82] KOCHUNAS B, HUAN X. Digital twin concepts with uncertainty for nuclear power applications[J]. Energies, 2021, 14(14): 4235.
- [83] MOHANTY S, ELMER T W, BAKHTIARI S, et al. A Review of SQL vs NoSQL database for nuclear reactor digital twin applications: With example MongoDB based NoSQL database for digital twin model of a pressurized-water-reactor steam-generator [C]//Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, N. Y., USA: ASME, 2021.
- [84] GONG H L, CHENG S B, CHEN Z, et al. Data-enabled physics-informed machine learning for reduced-order modeling digital twin: application to nuclear reactor physics[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 196(6): 668-693.
- [85] LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554 (in Chinese). [刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1539-1554.]
- [86] HUANG Wende, ZHANG Xiaofei, PANG Xiangping, et al. Smart grid operation and maintenance platform based on Beidou and digital twin technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(21): 31-35 (in Chinese). [黄文德, 张晓飞, 庞湘萍, 等. 基于北斗与数字孪生技术的智能电网运维平台研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 31-35.]
- [87] SHEN C, JIA M S, CHEN Y, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.
- [88] YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521 (in Chinese). [杨帆, 吴涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1505-1521.]
- [89] HUANG Xin, TANG Lei, ZHU Tao, et al. Application of digital twin in operation and maintenance for substation equipment[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 102-108 (in Chinese). [黄鑫, 汤蕾, 朱涛, 等. 数字孪生在变电设备运行维护中的应用探索[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 102-108.]

作者简介:

高士根(1986—),男,天津人,副教授,博士生导师,研究方向:列车数字孪生理论, E-mail: gaoshigen@bjtu.edu.cn;

周敏(1988—),男,湖南益阳人,副教授,硕士生导师,研究方向:智能优化与调度,通讯作者, E-mail: minzhou@bjtu.edu.cn;

郑伟(1975—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向:铁路数字孪生技术;

张林鎰(1966—),男,湖北随州人,副教授,硕士生导师,研究方向:智能制造;

张斌(1967—),男,北京人,研究员,硕士生导师,研究方向:铁路车辆轮轴技术;

宋海锋(1988—),男,河南安阳人,副教授,硕士生导师,研究方向:智能感知;

吴兴堂(1993—),男,陕西安康人,博士后,研究方向:状态预测;

李妮(1980—),女,湖南衡阳人,教授,博士生导师,研究方向:数字孪生建模仿真;

王昆玉(1995—),男,山东淄博人,博士研究生,研究方向:建模仿真可信评估。