



西南交通大学学报
Journal of Southwest Jiaotong University
ISSN 0258-2724, CN 51-1277/U

《西南交通大学学报》网络首发论文

题目: 数字孪生在高速列车生命周期中的应用与挑战
作者: 丁国富, 何旭, 张海柱, 黎荣, 王帅虎
网络首发日期: 2022-04-11
引用格式: 丁国富, 何旭, 张海柱, 黎荣, 王帅虎. 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.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220409.2258.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

数字孪生在高速列车生命周期中的应用与挑战

丁国富, 何旭, 张海柱, 黎荣, 王帅虎

(西南交通大学机械工程学院, 四川成都, 610031)

摘要: 数字孪生 (Digital Twin, DT) 是推动轨道交通装备领域数字化、智能化的关键技术之一, 其相关研究仍处于起步阶段。首先, 在分析高速列车研发现状及发展趋势的基础上, 阐述数字孪生高速列车基本内涵并从高速列车全生命周期数字孪生模型构建和功能服务两个方面分别描述数字孪生高速列车的技术框架, 然后, 提出数字孪生高速列车所面临的关键技术问题与挑战, 主要分析了模型驱动高速列车数字样机构建、多学科、多粒度、多状态高速列车数字孪生模型构建、全生命周期海量异构数据分析与融合、多维信息模型轻量化与可视化等领域的技术挑战; 最后, 展示了前期在轨道车辆关键部件服役能力劣化仿真中已开展的数字孪生相关实践工作, 以期对未来高速列车全生命周期数字化的深入研究和实践提供参考。

关键词: 数字孪生; 高速列车; 全生命周期; 关键技术; MBSE

中图分类号: U238

文献标志码: A

Application and Challenges of Digital Twin in the Life Cycle of High-speed Trains

DING Guofu, HE Xu, ZHANG Haizhu, LI Rong, WANG Shuaihu

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Digital Twin (DT) is one of the key technologies to promote digitalization and intelligence in the field of rail transit equipment, and its related research is still in its infancy. Firstly, based on the analysis of the research and development status and development trend of high-speed trains, the basic connotation of digital twin high-speed trains is expounded, and the technical framework of digital twin high-speed trains is described from two aspects of the whole life cycle digital twin model construction and functional service of high-speed trains. Then, the key technical problems and challenges faced by digital twin high-speed trains are put forward. The technical challenges in the fields of model-driven digital prototype construction of high-speed trains, multidisciplinary, multi-granularity and multi-state digital twin model construction of high-speed trains, full life cycle massive heterogeneous data analysis and fusion, and multidimensional information model lightweight and visualization are mainly analyzed. Finally, the digital twin related practical work carried out in the service capacity degradation simulation of key components of rail vehicles in the early stage is demonstrated, in order to provide reference for the further research and practice of the whole life cycle digitization of high-speed trains in the future.

Key words: digital twin; high-speed trains; life-cycle; key technologies; model-based system engineering

轨道交通装备制造业是我国高端装备制造业自主创新典范, 高速列车已经成为国家外交金名片, 是践行“一带一路”、“中国制造 2025”

等国家战略的重要载体。随着新一代科学、信息技术的发展, 以物联网、大数据、云计算、人工智能为代表的颠覆性新兴使能技术与轨道

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1708000)

作者简介: 丁国富(1972—),男,教授,博士,研究方向为数字化设计与制造,E-mail: dingguofu@swjtu.edu.cn

通信作者: 丁国富(1972—),男,教授,博士,研究方向为数字化设计与制造,E-mail: dingguofu@swjtu.edu.cn

交通产品加速深度融合,智能化、数字化、网络化和信息化技术的集成创新将成为高速列车未来发展方向^[1]。目前,高速列车生命周期相关研究主要集中在整车动力学^[2-4]、系统及关键零部件可靠性^[5-7]、振动噪声^[8-9]、空气动力学^[10]、弓网-列车-轨道耦合系统仿真等^[11-12]性能优化设计,自动化装配^[13]、车间物流过程实时仿真等制造效率优化^[14],服役安全监控、故障预测与诊断等运维服务^[15],并取得了重要进展。但目前高速列车全生命周期研发要素考虑不全面,较少从设计、制造和运维三环节协同优化角度考虑,导致其全生命周期设计不闭环、模型不统一,造成高速列车整机设计难度不断加大、加工制造复杂、运营维护困难等问题^[16]。

数字孪生是未来十大战略技术之一,为当前制造业的创新和发展提供了新的理念和工具,为复杂动态系统的全生命周期信息物理融合提供了实施途径,将复杂产品创新设计、制造效率和运维水平提升至一个新的高度^[17]。数字孪生是一个集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程^[18],旨在通过充分发挥海量数据资源所带来的优势,在数字空间设计虚拟模型并建立数字虚体与物理实体映射关系进而“镜像”实体。数字孪生在产品全生命周期中各个阶段均有涵盖^[19-21],涉及到卫星^[22]、电力^[23]、智慧城市^[24]、船舶^[25]、石油^[26]等多个领域。

目前,围绕高速列车及其基础设施的数字孪生研究已逐渐开展并多集中在列车智能运维与性能评估、系统运行决策优化和制造运维融合等方面。在智能运维方面,樊孟杰等^[27]地铁列车性能评估中存在的评估时效性不足、准确性不高和评估模式单一等问题,提出基于数字孪生的地铁列车性能评估架构,通过模型、行为和状态三个层次的映射构建性能评估系统,全面表达了列车的性能。在系统运行决策优化方面,王运达^[28]等基于数字孪生技术提出了一种模型与数据混合驱动的城轨供电系统建模方法,并建立其数字孪生体系架构,采用负荷数据实测输入及模型参数主动校正的方法,对牵

引供电系统运行状态精准分析具有重要意义。在制造运维融合方面,Wang等^[29]提出了基于数字孪生的复杂产品制造、运维一体化框架和虚实融合的系统集成模式,以某型车转向架故障预测案例验证了方法的可行性和有效性,实现了复杂产品制造与运维流程的深度融合,消除了制造与运维环节产生的信息孤岛。

数字孪生可以为高速列车设计、制造和运维三个环节的有效融合和协同优化提供数据、模型和功能等方面的支持,然而并未有研究人员针对高速列车全生命周期设计不闭环、模型不统一等问题开展相关研究工作。在高速列车生命周期中引入数字孪生技术理念,建立产品数字孪生模型,实现其设计、制造和运维多阶段有机融合和闭环迭代优化设计,成为一种新的设计途径和未来发展趋势。本文在前期我国高速列车数字化研发现状及发展趋势研究^[16]的基础上,基于数字孪生技术,系统分析高速列车生命周期研发技术与存在的问题,建立数字孪生高速列车模型构建框架和功能服务框架,提出基于模型的系统工程(Model-based Systems Engineering, MBSE)和数字样机技术构建产品数字孪生模型,并针对未来数字孪生高速列车关键技术及其挑战进行了探讨,最后对已开展相关工作进行介绍,以期对未来高速列车研发提供参考。

1 高速列车生命周期研发技术分析

高速列车作为一种典型的复杂机电一体化产品,具有结构复杂、零部件数多、多系统耦合等特点,其研发流程涵盖总体设计、技术设计、生产制造、整车验证、运营维护(包括状态监测、故障预测、维护检修等)多个阶段,如图1所示。可以看出现有研发流程主要是以串行为主、局部并行为辅,在该模式下,高速列车产品迭代优化周期长、研发成本高。下面主要从设计、制造和运维三个阶段来分析当前的研发技术现状和趋势。

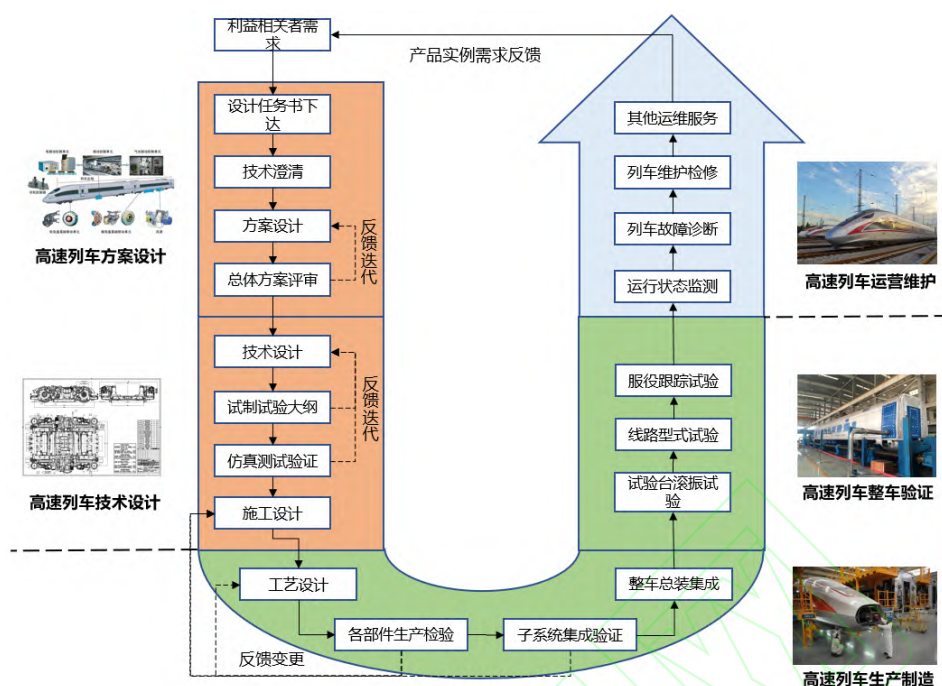


图 1 高速列车现有研发流程

Fig.1 The existing development process of high-speed train

(1) 设计阶段

在系统工程理论应用方面，高速列车作为典型复杂装备，其设计研发是一个反复迭代与论证的复杂系统工程^[30]。当前研发过程中多采用工程文本、设计图纸、邮件、图表等来实现不同研发部门及学科间的数据交换，即基于文档的系统工程（Text-based Systems Engineering, TBSE），这容易使设计人员对同一需求产生二义性，随着设计过程的推进，各种文档不断迭代会产生学科间关系不清晰、研发管理效率低下、设计周期长等问题，亟需一种新的系统工程设计方法指导和优化当下研发流程。

在系统设计仿真验证方面，转向架的结构参数对其动力学性能有着极大影响，一般多采用降低簧下质量方式即采用轻量化技术措施提升动力学性能，但轻量化也势必意味结构强度的下降，多学科优化仿真作为最常用的手段被广泛应用于车体、转向架等系统设计。。而仿真试验的效果主要取决于仿真环境模型同现实的差异程度，环境模型同现实越相近，则仿真结果更为准确可信。然而列车实时运行状态多变，不同线路条件、运行载荷、运行里程和速度工况下的载荷谱都不同，且设计和运维环节脱离，设计人员无法及时有效地对在线运维数据进行挖掘从而更新环境模型最终反馈优化设

计。虽然已有研究基于实测路谱及牵引制动工况建立动力学试验台^[31]，然而实际环境并不是一成不变，充分利用各代列车履历数据、在线运维数据建立列车实体所对应的数字模型（产品设计模型和环境模型）并建立仿真模型数据库，将全生命周期数据虚实融合，建立高精度、高保真度、可自更新的虚拟仿真模型，来全面提高设计质量和效率^[32]显得尤为重要，同时使用数字线程进行数据管理，保证全生命周期不同阶段和不同设计部门数据的统一管理，使工作可以并行开展加速设计进程^[33]。

(2) 制造阶段

高速列车制造阶段一般包含机械加工、零部件装配等活动。已有主机厂开发了车间监测面板来实时对装配工序、作业进度和装配误差进行监控，但无法实时展现产品自底向上的动态装配过程，也无法对装配误差进行动态捕捉展示。此外零部件加工过程中用于记录产品设计缺陷的工艺文件与质量文件也无法实时地传输和利用，并反馈回设计阶段助力下一代产品的迭代优化设计。

车间是制造活动的执行基础，随着计算机技术和信息网络的支持，在虚拟信息空间开展车间生产要素管理、生产活动计划、生产活动控制等功能越来越成熟^[34]。然而在传统的制造

模式中,信息流、物料流、控制流在生产执行各阶段仍然相互孤立,由于缺乏物料流和信息流数据融合机制,无法形成完整的实时/历史数据集来复现生产过程,实现产品质量追溯和潜在价值信息挖掘以优化系统决策,形成精准可靠、行之有效的控制流^[35]。因此,车间生产要素间信息、物理数据的实时交互和融合显得尤为重要,是提升生产效率、增强车间智能化的必经途径,是智能车间、智能制造的必然要求。

(3) 运维阶段

近些年来,得益于智能化、信息化技术发展,高速列车及其基础设施运维过程已经开始由基于时间的维护(Time Based Maintenance, TBM)向基于状态的维护(Condition Based Maintenance, TBM)策略改变,智能诊断、故障预测等技术得到了快速发展^[36]。但在大数据、人工智能等工业 4.0 技术的推动下,铁路故障预测与健康管 理(Prognostics Health Management, PHM)正在成为智能铁路智能运维模式的主要发展方向^[37]。如王军^[38]开发了面向 PHM 的高速列车谱系化产品技术平台实时评估预测高速列车的健康状态,并基于列车状态制定相应维修策略。随着高速列车速度的提升、运营环境的复杂多变,列车运营维护产生的海量异构数据使得当前智能运维系统的数据传输速度和评估效率面临严峻挑战。在车地间数据传输处理机制方面,特别是海量数据的无线传输和异构数据处理,构建基础设施、移动装备、运营指挥、检修和旅客服务一体的统一数据中心^[31],制定数据标准并实现各子系统数据共享和同步,实现数据的高效监测、分析与管 理势在必行。在运维诊断分析模型构建方面,对各关键零部件的结构、材料的正常和故障样本进行采集,借助大数据分析技术研究其失效准则、故障发展规律,并建立相应数据库,提高列车状态监测和寿命预测的准确性十分重要。在异构数据分析处理、模型构建训练效率方面,通过 5G、物联网(Internet of Things, IoT)、边缘计算等技术打通运行维修环节中现场总线、无线网络和有线网络的通信互联,实现“云边”协同列车性能评估模式成为新的发展方向。在“云端”利用云计算负责处理长周期的模型训练、离线数据挖掘等,在“边端”车载端负责短周期、时效敏感的数据处理和性能评估需

求。

总结上述发展现状,高速列车在全生命周期内主要特点表现为:设计方面,在设计理论方面多采用传统基于文档的系统工程方法,设计要素、指标繁多,设计闭环难;在基础理论研究方面高速列车设计-仿真一体化流程复杂,多以物理样机验证为主,缺乏高保真度、高精度仿真试验模型。制造方面,迫切需要借助信息物理融合手段解决车间生产要素和物理数据交互融合难的问题,高速列车产品生产装配协同作业复杂。运维方面车、地协同管控难,运维系统数据传输速度和评估效率有待提升。

结合高速列车全生命周期特点和发展趋势,对高速列车产业提出了以下新需求:

(1) 数字化、智能化升级需求

数字化方面,对高速列车全生命周期内全业务、全流程、全系统进行数字化升级,实现数据与模型驱动的管理、控制、决策与验证。智能化方面,通过大数据、人工智能等技术对数据和知识等进行挖掘,提高列车车间生产调度、运行故障诊断等环节自适应和学习能力。服务化方面,提升高速列车全生命周期内各阶段应用场景平台系统的服务化水平和应用系统的使用管理效率,提升不同对象层级间应用服务协作效率和质量。

(2) 高保真度、高精度模型需求

高速列车全生命周期不同阶段存在多种模型,如在总体设计阶段有对列车、轨道、公网等进行概念设计形成的相应概念设计模型,在数据驱动下进行方案验证形成的总体验证模型;在详细设计阶段基于模型对列车不同层级机械结构、电气管路、通信传感等模块进行设计仿真验证,形成详细设计模型;在生产制造阶段,基于车间总装模型和总成工艺模型实现列车详细设计模型到列车产品模型的转化;在运维阶段,不同型号列车在不同线路运营,列车模型和环境模型共同形成列车运维网络模型,并可以为列车设计模型提供数据、模型支持。不同阶段的模型在物联网、工业互联网等技术的支持下,数据量倍增,不同阶段相应的模型也需要进一步提升其精度和保真度,从而满足各阶段模型应用需求。

(3) 新技术融合服务升级需求

随着云计算、物联网、大数据、人工智能

等新技术的飞速发展,势必使高速列车产业服务进一步升级转变,如基于边缘计算的高速列车数据存储和模型计算服务、基于物联网的列车总成车间要素关联融合、基于大数据的高速列车运维平台数据分析与决策、基于人工智能的高速列车在轨运行智能管控、基于 VR 和 AR 的高速列车装配工艺可视化及培训等方面的探索与应用。

针对以上需求,亟需借助信息化手段提升高速列车及相关系统智能应用与服务的能力。

2 数字孪生高速列车技术架构

2.1 数字孪生高速列车基本概念

数字孪生概念最早由美国密歇根大学的迈克尔·格里弗斯教授于 2003 年提出^[39],如图 2 所示。2011 年美国国防部将数字孪生概念应用于飞行器并构建其数字孪生体^[40],同时定义数字孪生是一个利用物理模型、传感器采集、产品运行履历等数据,且集成了多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程^[41]。近些年随着数字孪生受到广泛关注,工业界和学术界开始广泛致力于数字孪生的研究与应用^[42],Gartner 已经将 DT 列为 2019 年十大战略技术之一^[43]。数字孪生提供了一种可以深度融合新 IT 技术的强力工具^[44],是一种在信息世界刻画物理世界、仿真物理世界、优化物理世界、增强物理世界的重要技术^[45],是一种实现物理世界与信息世界交互与共融的有效方法^[46],更是一种推进全球工业和社会发展向数字化、网络化、智能化、服务化转型的有效途径^[47]。

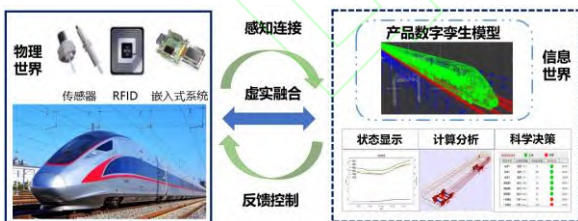


图 2 数字孪生概念

Fig.2 Concept of digital twin

高速列车设计、制造、运维各环节信息物

理数据分离,导致设计模型难以有效传至制造和运维阶段,而制造和运维阶段的虚实数据又无法对设计形成有效反馈,严重制约了复杂产品的创新研发。数字孪生通过建立物理实体与虚拟模型的感知连接,实现多源异构信息物理数据融合下的反馈控制和闭环迭代优化,为高速列车全周期、多要素信息物理融合开辟了新途径,与企业长期发展战略不谋而合,通过对高速列车现状以及发展需求分析,结合数字孪生概念及相关理论,本文探讨提出数字孪生高速列车的概念。

数字孪生高速列车是将数字孪生技术贯穿高速列车全生命周期各个阶段,在数据层满足高速列车全生命周期内的多源异构物理信息数据虚实同步,在模型层构建贯穿高速列车全周期、全要素、融合 CAD、CAE 和 CAM 的数字孪生模型,在应用层实现以推进高速列车全生命周期内三环节协同运作为目的,以数据为基础,全周期、全要素数字孪生模型为纽带实现对三环节的综合仿真评价,对列车性能、状态和故障等进行分析以及预测,构建闭环优化迭代孪生模型,最终驱动企业产品创新。要实现上述目标,构建全周期、全要素、融合多源异构数据的高速列车数字孪生模型(Digital Twin Model of High-Speed Train, DTMHST)是核心。

2.2 高速列车数字孪生模型构建框架

数字孪生驱动的高速列车模型通过构建全周期、全要素高速列车数字孪生模型,实现虚拟空间仿真模型同现实空间的物理实体间映射反馈,采集并重构制造和运维过程的工艺数据、质量数据、物流数据、服役数据、维修数据等,实现从概念设计、数字样机研制、仿真试验、工艺设计、制造与装配到运行维护的全流程、全周期多源异构数据的有机集成与整合。本文提出的全周期、全要素高速列车数字孪生模型构建框架分为三层,如图 3 所示,分别是高速列车数字样机构建、高速列车数字孪生模型构建以及高速列车数字孪生模型映射与融合。

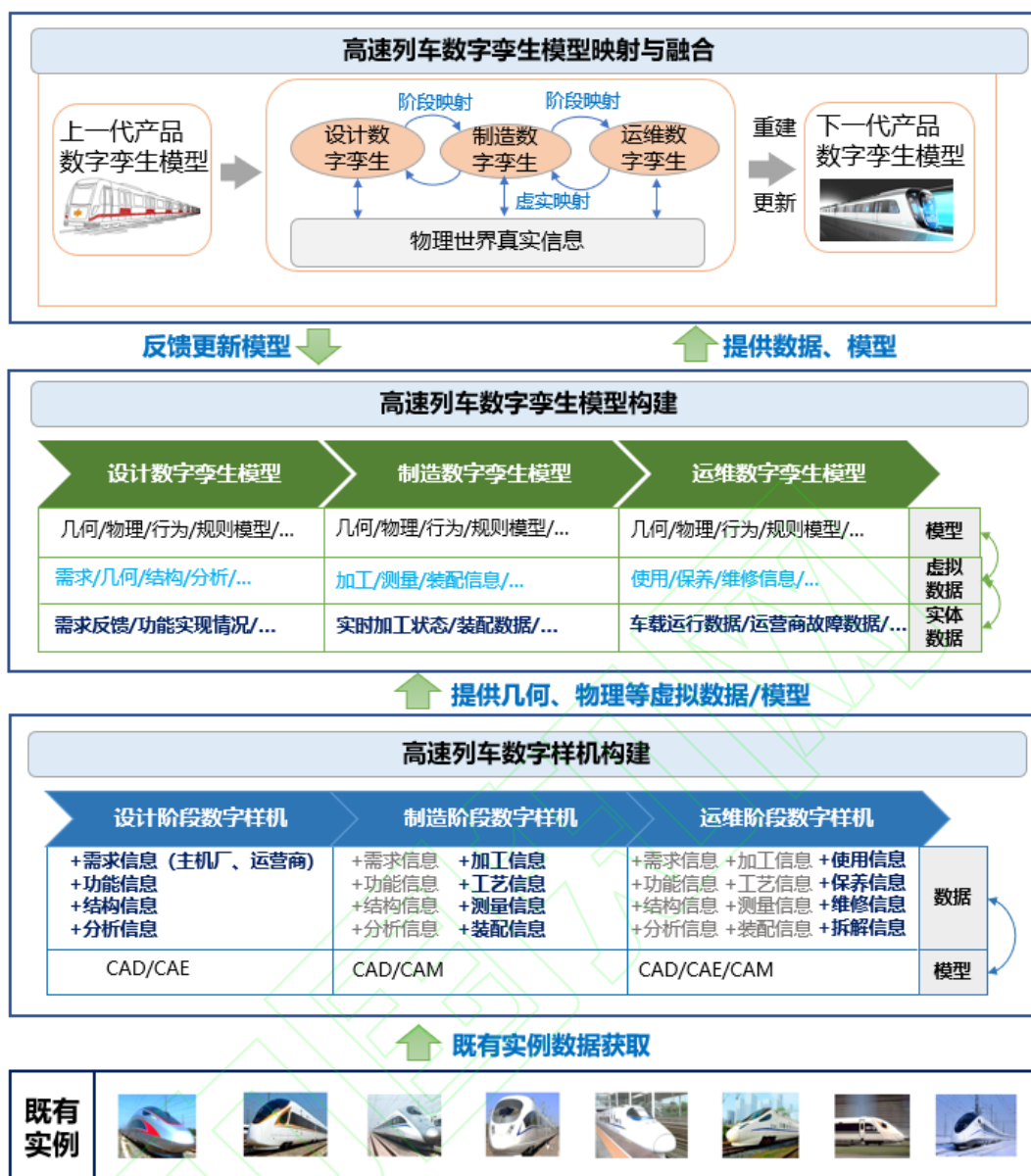


图 3 高速列车数字孪生模型构建框架

Fig.3 A framework for constructing digital twin model of high-speed train

在高速列车研发过程中所经历的需求分析、概念设计、总体设计、详细设计、物理样机试制和性能验证环节中，数字样机扮演着重要角色，样机模型贯穿了列车研发的全生命周期，是各种分析验证、服务管控的基础。

设计阶段参考已有列车实例数据、实际需求等构建概念设计模型，并在整机性能参数指标约束下完成指标分解和任务分解形成方案设计模型，方案确定后进行各组份、模块的细化设计，构建各类详细设计样机模型如 CAD 模型、CAE 仿真模型等；制造阶段则需要在详细设计样机模型基础上考虑零部件加工工艺、列车总成工艺、车间生产资源调度等，构建各类

行为样机模型如加工过程仿真模型、车间管控模型，实现对列车生产及总装的管控；运维阶段则需要结合大量列车运营维护数据构建整车、系统、零部件等各层级的数值模型，如关键部件寿命预测模型、故障诊断模型等，实现对列车状态监测、故障诊断等服务。

在构建高速列车三阶段数字样机模型基础上，结合现有产品实际数据（需求反馈、加工状态、装配数据、车载运行数据等）重点实现各类样机模型同实际数据地交互和融合，进而形成三阶段孪生模型。设计阶段构建的各类概念、方案设计模型需要及时地根据客户需求、列车产品反馈等信息更新模型，形成高速列车

设计孪生模型；制造阶段工艺和车间仿真模型等也需要基于实际生产和总装过程实现对样机模型的修正与更新，不断迭代演化形成高速列车制造数字孪生模型；运维阶段不仅需要借助各类实体数据实现对产品模型和分析模型的迭代和交互，环境模型的更新尤为重要，只有结合列车运行环境模型才能真正意义上实现对运营列车的实时映射，列车模型、环境模型、轨道模型和弓网模型等共同构成高速列车运维数字孪生模型。

高速列车全生命周期内三阶段的孪生模型并不是互相独立、毫无关联，设计孪生模型是制造、运维孪生模型的基础，制造和运维孪生

模型又会给设计孪生模型提供反馈支持，为了实现高速列车各阶段孪生模型的快速生成、利用、更新和维护管控，需要对三阶段孪生模型映射、融合、关联、归纳、转换、交互，最终实现高速列车代际产品间孪生模型的演化。

2.3 数字孪生高速列车功能服务架构

数字孪生技术是实现轨道交通装备研发转型的重要手段，基于高速列车数字孪生平台可以实现高速列车全生命周期数字化管理，并对全生命周期内各阶段提供服务，如图 4 所示。高速列车数字孪生模型会随着高速列车全生命周期不断演化迭代,对实现高速列车的数字化、智能化服务具有巨大的推动作用。



图 4 数字孪生高速列车功能服务架构

Fig.4 The architecture of high-speed train digital twin function service

总体设计阶段通过统一数据线程可以实现对客户需求的统一管理 with 追溯，虚实数据和各类模型的交互融合消除不同学科、系统间的模型独立性，实现各学科、系统间协同设计，研发过程中每个阶段虚实模型的反馈数据都可以作为迭代要素反馈回设计阶段，助力高速列车闭环优化设计使得借助数字孪生开展的设计验

证相关服务更为可靠和准确。

生产制造阶段车间和产品的数字孪生重点突出了产品同车间产线的数据交互和融合，孪生模型指导着实际车间生产、调度和装配等过程，而实际的车间活动又在不断反馈数据和信息并修正、优化孪生模型，二者不断交互演化共同支持产品质量管控追溯、车间调度优化、

实时装配仿真、车间要素管控等服务。

运营维护阶段涉及到运行轨道、弓网系统等多个环境因素，因此要针对性地构建不同层级、不同粒度、不同用途的运维孪生模型，借助涵盖列车-轨道-弓网耦合大系统的孪生模型，对不同阶段、层级、来源的孪生数据进行分析、关联和利用，提供全覆盖的智能 PHM 服务，实现列车运行状态监测、列车故障诊断、在线分析决策等，实时地显示列车及其相关系统性能状态，为各专业、各地点设计维护人员提供帮助。

3 数字孪生高速列车关键技术与挑战

根据上述数字孪生高速列车技术架构，实现数字孪生在高速列车全生命周期内的贯穿与应用需要突破以下几项关键技术。

(1) 基于模型驱动高速列车数字样机构建技术

高速列车研发是一个典型的复杂系统工程，近些年来基于模型的系统工程开始逐渐替代基于文本的传统模式^[48]。MBSE 能够以数字化、图形化、标准化的语言完成对系统的表达，减少系统研发过程中需求传递错误、设计变更，提升设计效率。图 5 是 MBSE 典型“V”开发模式，“V”模型左半部分是自顶向下的正向设计过程，右半部分是自底向上的设计综合、确认验证的过程。高速列车传统开发模式一般采用手动设计、试制和试验相结合的技术手段，通过大量的破坏性试验进行产品性能的分析验证^[49]，随着计算机技术的飞速发展，数字样机技术得到普遍应用，通过数字模型代替物理样机进行产品性能的分析验证能够很大程度地减少物理样机的试制。综合前文，构建高速列车数字孪生模型首要突破技术是基于模型驱动的方式数字样机构建技术。

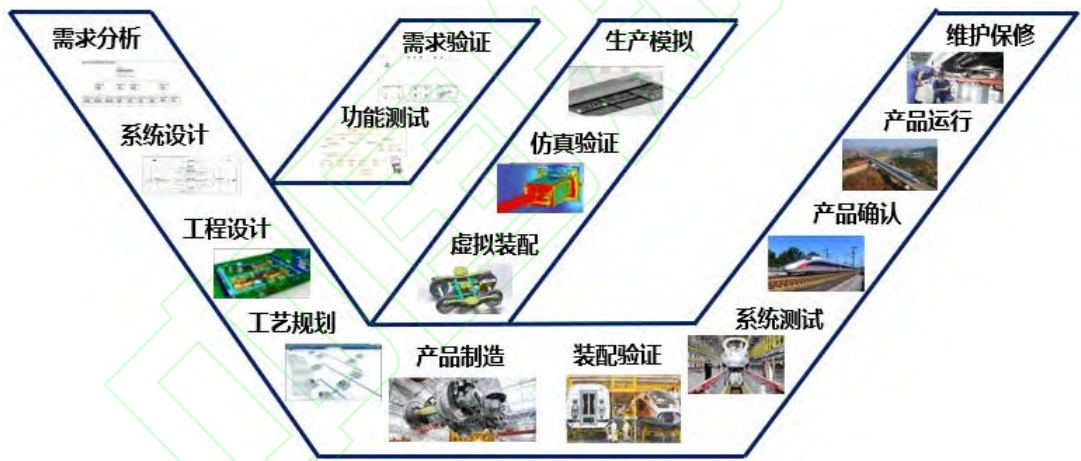


图 5 高速列车研发流程“V”模型

Fig.5 The V-model of High-speed train development process

通过 MBSE 建模语言 SysML 建立高速列车系统模型，利用 SysML 提供的行为、结构和参数图可以对列车系统层级从需求到物理架构进行描述，结合系统建模工具和其他专业领域软件如 ANSYS、SIMPACK 等，对“V”模型左半部分设计分解过程中的每一个环节进行验证，实现需求到功能结构的可追溯链。以 MBSE 系统模型为主线，结合不同阶段所涉及模型共

同构成数字样机模型，实现对高速列车不同阶段的统一描述。基于 MBSE 系统模型构建的数字样机模型可以对高速列车全生命周期信息进行统一描述，是贯穿高速列车全生命周期的统一数据源，为高速列车数字孪生模型构建框架各层提供系统资源和物理支撑，是高速列车数字孪生构建的基础，如图 6 所示。

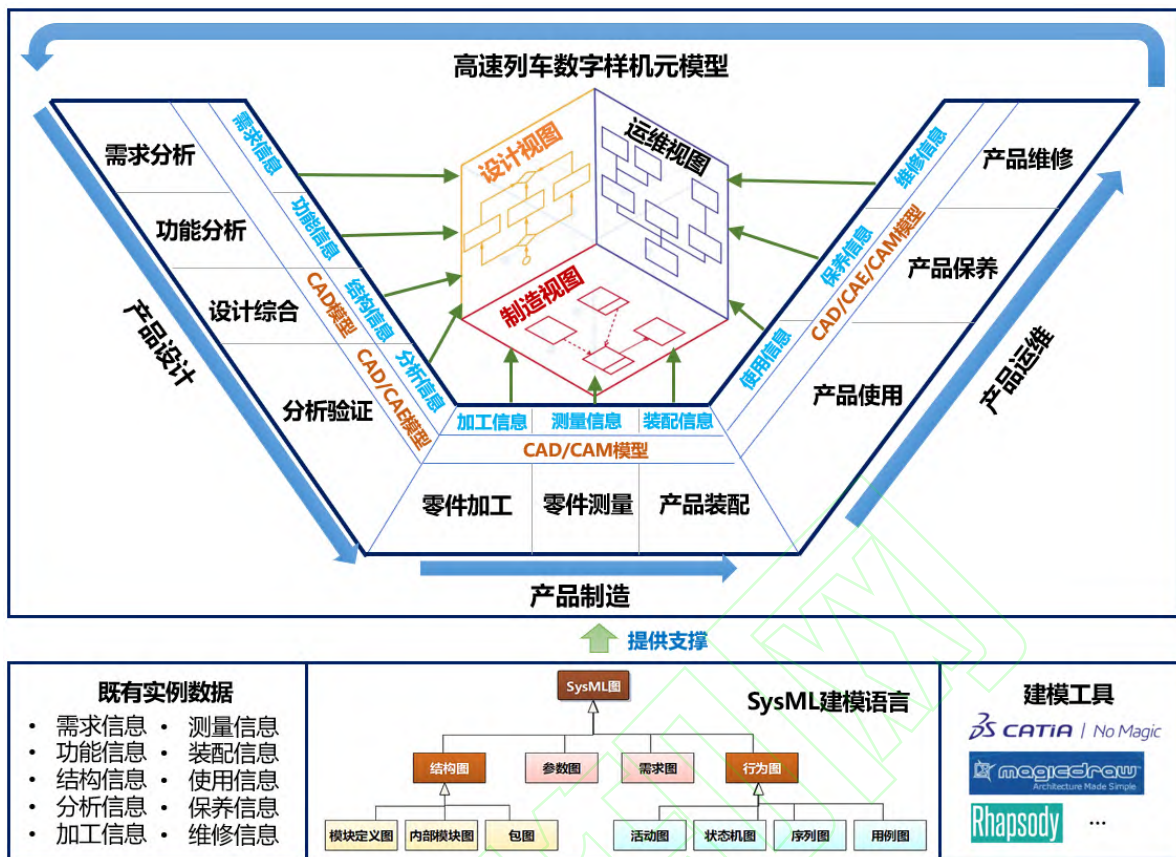


图 6 高速列车数字样机构建

Fig.6 The construction of high-speed train digital prototype

基于所构建的 SysML 架构模型和行为模型（包括状态模型、活动模型、信息交互模型等）结合高速列车关键零部件逻辑控制流程，可以搭建不同层级的仿真样机模型，有助于早期验证系统设计方案的可行性、减少系统中存在的潜在风险。

（2）多学科、多粒度、多状态高速列车数字孪生模型构建技术

实现高速列车数字孪生的核心在于数字孪生模型的构建，然而构建全面详尽的孪生模型极其昂贵且复杂。孪生模型不单单只是一个或

一类模型，高速列车各系统所涉及模型有几何模型、物理模型、行为模型及规则模型等，各类模型共同提供数据信息对产品进行详细地描述。以高速列车设计、制造与运维三阶段数字样机所提供的需求、几何、物理、行为等信息和 CAD、CAE、CAM 模型为基础，获取高速列车三阶段实时数据，通过虚实数据交互融合来支持构建和更新几何、物理、行为、规则虚拟模型，继而构建三阶段数字孪生模型，为相关应用服务提供基础，如图 7 所示。

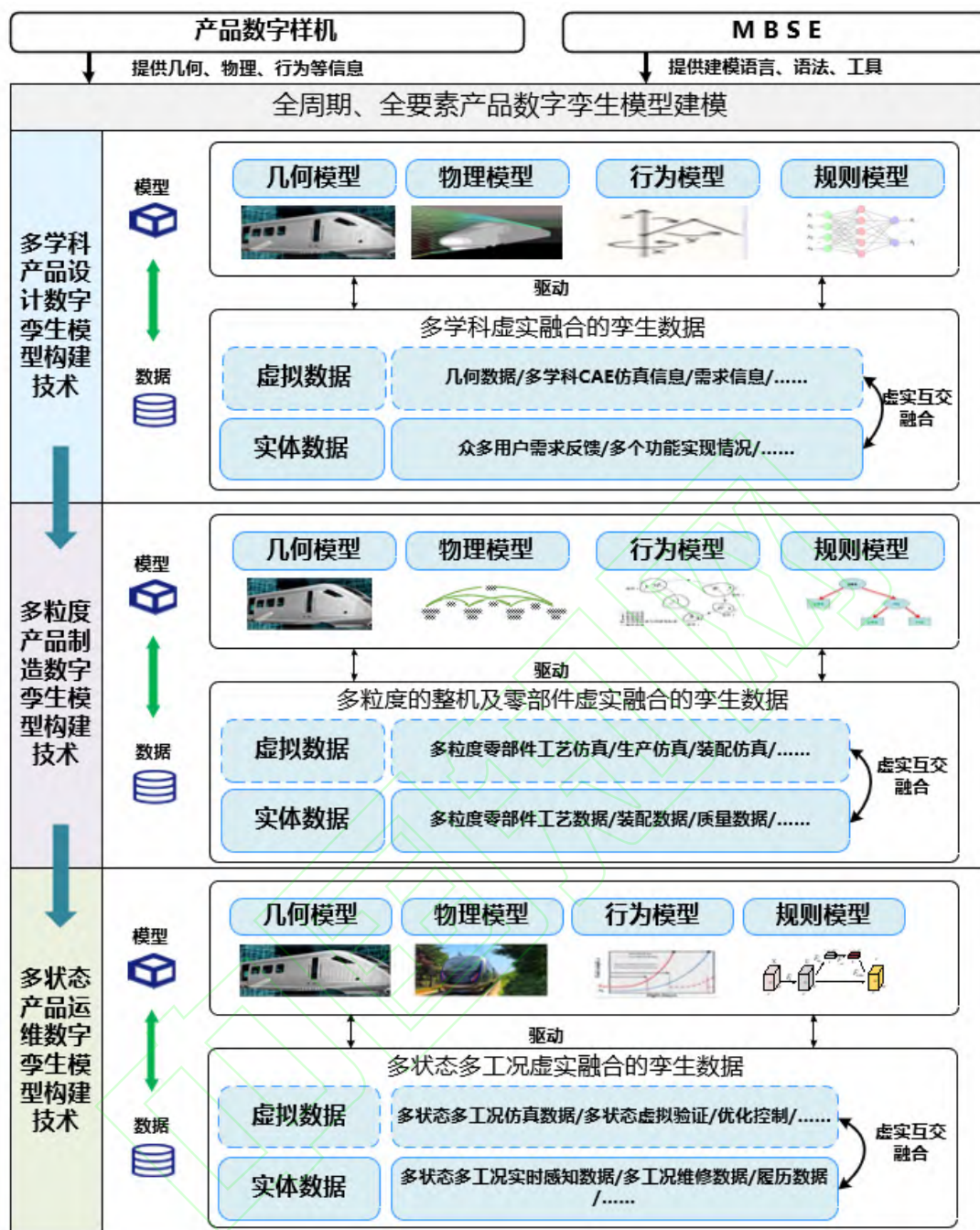


图 7 高速列车数字孪生模型构建

Fig.7 The construction of high-speed train digital twin model

高速列车设计过程中由于用户需求变更、功能实现冲突、结构接口不统一等问题而导致的设计变更常有发生，已经落成固化的数字样机模型已不能满足设计要求。

对于多学科场景耦合设计模型的构建需要从机理出发，明确各类设计模型特征，建立动态的数字孪生模型，通过获取该阶段实体数据（历代产品的设计缺陷数据、用户变更需求数据、仿真测试反馈数据等），更新设计阶段数

字样机即 SysML 系统模型和 CAD、CAE、CAM 模型并基于此构建几何、物理、行为、规则等虚拟模型，结合相关机器学习算法，来开展需求预测、设计优化等相关应用服务。

对于多粒度场景关联制造模型的构建需要分为两部分：制造数字孪生模型和制造过程数字孪生模型。高速列车复杂装备包括若干系统、子系统和零部件，为建立高速列车制造阶段数字孪生模型，采用 BOM 对其进行层次化表达。

通过输入设计阶段的产品 CAD 模型、设计 BOM 和技术指标等数据,融合制造过程的加工/装配工艺数据、质量数据仿真数据等虚实数据,依次构建不同粒度(整机、系统、子系统、零部件)的制造阶段数字孪生模型。制造过程数字孪生的本质是建立物理制造系统(生产线、车间)和虚拟制造系统的双向交互。从系统论出发,对物理制造系统关键组成要素和关系进行识别与表征,建立虚拟制造系统是实现数字孪生的第一步。在此基础上,从几何、逻辑、数据三个维度,依次建立机加/装配生产线的虚实连接关系,实现虚拟生产线与物理生产线从几何高度相似、到内部运行逻辑一致、到运行数据契合。基于上述虚实连接方案,依次建立数字孪生设备、数字孪生单元/工位和数字孪生生产线/车间。最后,通过数据库、数据通信协议和消息中间件技术实现物理生产线和虚拟生产线的数据交互。以产品数字孪生模型为输入,通过产品数字孪生模型与制造过程数字孪生模型(包括仿真应用和管控应用)的数据交互、互动,实现物理产品(毛坯、外购件、标准件等)向设计阶段的数字孪生模型(理想产品)无限逼近,最终实现设计模型的物化。

对于多状态场景混合运维模型的构建需要以物理实体和虚拟模型为基础,根据模型构建数据需求,采集高速列车物理设备的状态数据、履历数据及检修数据等,并整理形成数据集,通过清洗、融合、补全等操作进行数据建模。在前文所建立的数字样机基础上通过三维渲染图形引擎重构高速列车三维模型,同时基于三维建模和数据采集重构复杂装备虚拟模型,梳理数据模型及逻辑结构,为信息模型构建提供基础。根据采集的数据和建立的虚拟模型,构建高速列车的运动仿真、诊断模型、预测模型等模型,构建形成复杂装备的数字孪生运维模型,并基于构建的数字孪生模型,开展数字孪生应用服务如:状态监测、故障预测、能力评估、维修决策等。

(3)全生命周期海量异构数据分析与融合技术

要实现高速列车数字孪生,数据是关键驱动力。高速列车全生命周期各类数据的采集、传输和存储是数字孪生模型的基础,数据的分析与融合是重点。数据融合不单单旨在多学科、

多领域数据融合,也是全生命周期内多阶段数据的融合,通过历史数据和实时传感数据地不断融合,能够实现数据驱动模型的不断迭代优化从而提升模型的准确性。在机理不明确、模型不完善的情况下,采用深度学习、支持向量机、统计方法、相关性分析、聚类分析、时间序列分析等技术是实现高速列车状态监测、故障诊断等各类服务的重要数据分析手段。一般地,数据源既包括车载数据、地面数据中心的数据,也包括虚拟模型仿真产生的数据,需要对各类数据、特征、决策等进一步融合,将基于物理的建模和数据驱动的建模与大数据相结合,借助存于海量数据中的特征信息辅助构建模型,可以提升模型鲁棒性和准确性。随着各类新兴技术产生数据的体量和异构性不断增加,传统的关系型数据库技术压力倍增,非关系型数据库正成为一种新的选择^[50]。

(4)多维信息模型轻量化与可视化技术

高速列车数字孪生平台是将数字孪生技术在轨道交通领域落地应用的重要保证。构建融合高速列车全机、全生命周期孪生模型后,需要在时间和空间维度上对不同类型的多维融合数据和模型(三维模型、分析模型、数值模型等)进行可视化展示,不同利益相关者可以对高速列车全生命周期内数据和模型进行监管。利用三维图像、立体声响、人机交互界面等工具使多方利益相关者有更加直观的逼真体验,快速地学习和了解目标系统的各种信息,有利于人们实时监控和指导高速列车制造与运维。由于列车 CAD 模型数据量大,为了使设计师、运维人员能够在移动设备上不受时间和地点的限制快速查看列车三维模型,了解列车相关信息,模型轻量化设计势在必行,当前模型轻量化研究多是应用隐藏或删除模型特征算法来减小模型体积或通过三维模型进行压缩从而减小模型存储空间等手段。

4 数字孪生高速列车应用实践

基于数字孪生高速列车理论,在高速列车全生命周期运维阶段开始了探索,为实现城市轨道交通装备关键部件服役性能仿真分析并对整车性能进行评价,在关键部件全生命周期能力劣化仿真模型构建、关键部件服役评估模型构建、可视化仿真平台开发方面开展了相关研

究与开发工作。

在关键部件全生命周期能力劣化仿真模型构建方面，主要研究了地铁关键部件服役能力劣化仿真模型的构建和车辆运行状态感知系统设计，前者是仿真模拟的关键基础，后者则给仿真过程提供重要数据来源。关键部件服役能力劣化仿真模型构建方面，针对不同部件特点和仿真需求搭建运维场景下多状态数据的数字孪生模型。如将损伤计算与疲劳寿命预测算法同真实传感器长期采集的应力时间历程相结合共同构建构架数字孪生模型，能够更加准确计算损伤和预测疲劳寿命；对受电弓利用大数据技术分析融合技术分析弓网接触副磨耗数据，建立受电弓碳滑板磨耗预测模型，并嵌入考虑接触网形貌特征的弓网横向动力学模型，各维度模型关联、作用共同形成其数字孪生模型实现全寿命周期内弓网动力学性能仿真研究。车辆运行状态感知系统设计方面，依据车辆安全性及服役性能劣化理论模型，研制车辆及环境状态感知系统工程样机，实时采集车辆运行过程中的速度、运行模式等工况信号、车体振动及应力和转向架振动及应力，包括 20 个转向架振动感知传感器、4 个转向架应力感知传感器、2 个车体振动感知传感器、8 个车体应力感知传感器，10 个数据前置采集器，及一个车辆 MVB

数据采集装置，两套数据处理主机，为车辆安全性及服役性能评估提供数据支撑。

在关键部件服役评估模型构建方面，主要研究了仿真评估体系的构建和基于云边协同的评估模式的构建。仿真评估体系构建方面，依据 GB 5599、EN 13749、UIC 518 等标准对车辆安全性及疲劳损伤理论模型进行了引用及建立，车辆安全性从平稳性、横向稳定性、轮轨振动进行评估，车辆服役性能劣化从疲劳损伤维度进行评估，为仿真劣化模型评估提供理论支撑。云边协同评估模式构建方面，相较于传统列车故障诊断模式，数字孪生驱动下的列车性能评估对列车全方位、多角度的评价提出了更高的要求，不仅面临海量异构多源数据带来的存储计算压力，由于各类评估模型算法所需计算时间不同带来的评估时效性也不高。通过构建云边协同评估模式，在边缘端处理耗时端、时延敏感的评估需求，车载端搭建边缘分布式评估系统，车载数据中心将评估所需数据发送至评估系统，并将评估结果返回数据中心；建立在地面的云端则主要针对路网利用大数据平台，完成模型训练、预测性评估等。云端与边缘端通过车地通信单元实现交互，二者相互协同可以有效提升仿真模型评估效率。上述工作如图 8 所示。

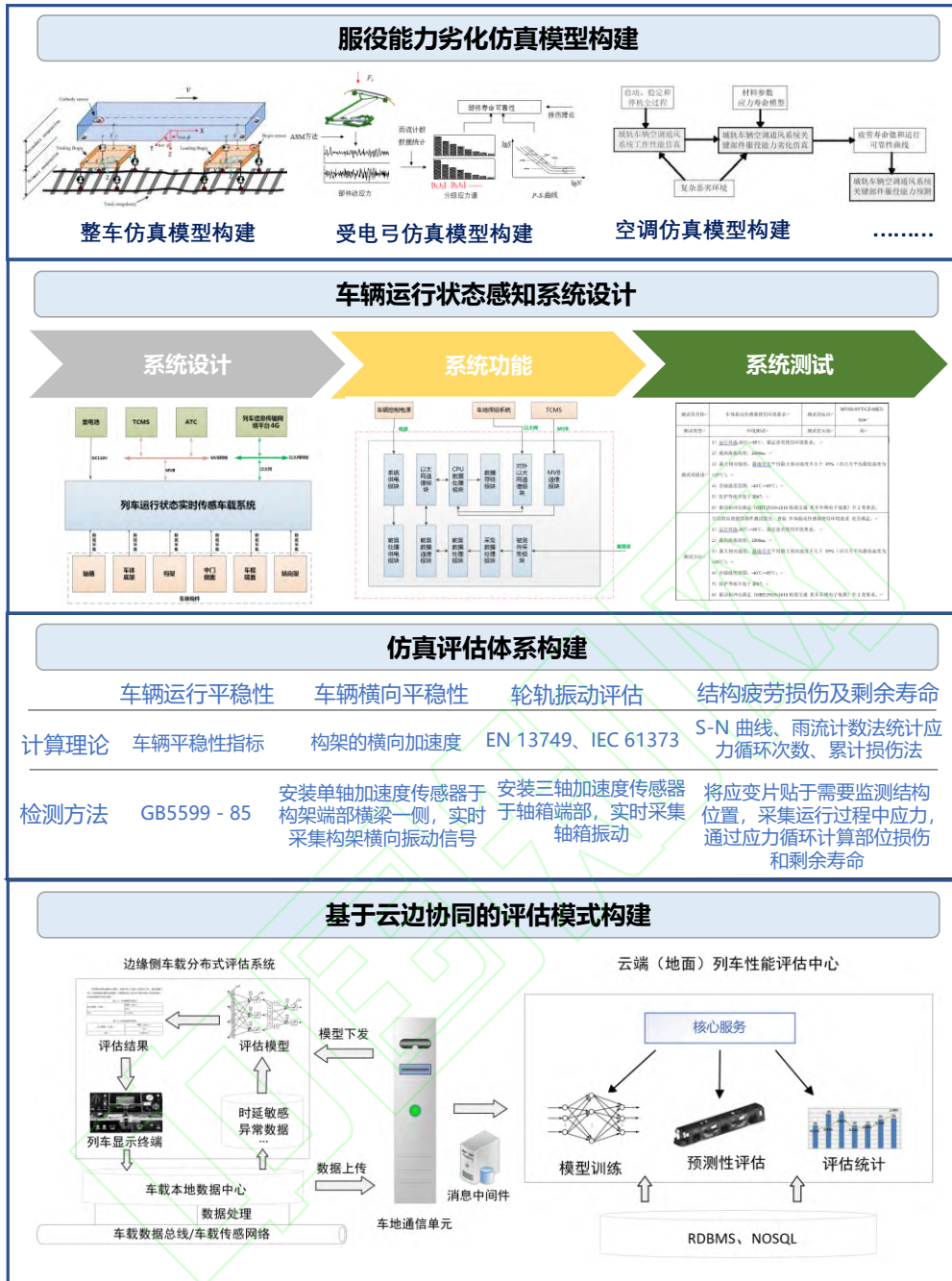


图 8 数字孪生城轨车辆关键部件全生命周期能力劣化仿真模型及服役评估模型构建

Fig.8 Construction of a simulation model and service evaluation model for the degradation of the capability of the key components of the digital twin urban rail vehicle life cycle

在可视化仿真平台开发方面，集成上述模型和方法，开发城轨车辆关键部件服役能力三维数字可视化系统。该平台系统实现对地铁运行场景、三维模型、仿真模型、数据接口等集成，通过传感器对车辆实体的振动、速度、温度等进行实时监测，基于实时监测数据和已有历史数据，在虚拟空间对车辆组关键部件（如车体、受电弓等）从几何、物理、行为、规则

等维度进行描述，并集成为城轨车辆的高逼真度虚拟模型；实体及其虚拟模型同步运行，产生的孪生数据不仅包括振动、温度等实时感知数据；还包括虚拟模型产生的疲劳磨损、振动、热应力等仿真数据，通过多维数据处理与融合技术得到的融合数据，在孪生数据及虚拟模型的驱动下，实现对城轨车辆的智能健康管理应用服务，相关研究与开发工作已经顺利完成项

目验证验收,为开展数字孪生高速列车的设计、仿真、分析功能奠定一定基础,如图 9 所示。



图 9 基于数字孪生的城轨车辆关键部件服役能力三维数字可视化系统

Fig.9 3D digital visualization system based on the service capability of key components of digital twin urban rail vehicles

5 结论

近些年来,新一代科学、信息技术蓬勃发展,智能化、信息化、数字化逐渐成为高速列车未来发展方向,但目前高速列车全生命周期研发要素考虑不全面、全生命周期设计不闭环、模型不统一,而数字孪生作为近期学术界和工业界最为火热且最有前景的技术之一,已经在多个领域茁壮发展,数字孪生能够实现虚拟空间和实体空间的相互连接、交互和融合,实现信息物理数据融合下的反馈控制和闭环迭代优化,为解决上述问题开辟了新途径。作者在分析了当前高速列车全生命周期研发现状和发展趋势之后,提出了数字孪生高速列车概念,从高速列车数字孪生模型构建和数字孪生高速列车功能服务两个角度介绍了数字孪生高速列车技术架构,着重介绍了高速列车孪生模型构建中涉及到的关键技术与挑战。数字孪生技术是实现轨道交通领域装备转型的重要手段,基于数字孪生高速列车技术框架可以实现高速列车全生命周期数字化管理,最后对团队已开展的相关前期实践工作进行了介绍,旨在为未来高速列车数字化发展及建设提供参考,希望未来将进一步完善和优化数字孪生高速列车框架,深入研究关键技术,并在不同方面开展更加深

入的应用研究,高速列车领域庞大复杂,数字孪生在高速列车全生命周期中的全应用还需要国内外专家和学者们的不懈努力与实践。

参考文献:

- [1] 缪炳荣,张卫华,池茂儒,等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J]. 铁道学报,2019,41(03): 58-70.
MIAO Bingrong, ZHANG Weihua, CHI Maoru, et al. Analysis and prospects of key technical features of next generation high-speed trains. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(03): 58-70.
- [2] 朱海燕,曾庆涛,王宇豪,等. 高速列车动力学性能研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3): 57-92.
ZHU Haiyan, ZENG Qingtao, WANG Yuhao, et al. Research progress in dynamics performance of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 57-92.
- [3] 石怀龙,郭金莹,王勇. 变轨距高速列车的动力学

- [J]. 机械工程学报,2020,56(20): 98-105.
- SHI Huailong, GUO Jinying, WANG Yong. Dynamic performance of High-speed gauge-changeable railway vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 98-105.
- [4] ZHANG Weihua, SHEN Zhiyun, ZENG Jing. Study on dynamics of coupled systems in high-speed trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(7): 966-1016
- [5] 王曦,侯宇,孙守光,等. 高速列车轴承可靠性评估关键力学参量研究进展[J]. 力学学报,2021,53(1): 19-34.
- WANG Xi, HOU Yu, SUN Shouguang, et al. Advances in key mechanical parameters for reliability assessment of High-speed train bearings[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 19-34.
- [6] CHI Zhexiang, CHEN Ruoran, HUANG Simin, et al. Multi-state system modeling and reliability assessment for groups of High-speed train wheels[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 107026.
- [7] LU Yaohui, ZHENG Heyan, ZENG Jing, et al. Fatigue life reliability evaluation in a High-speed train bogie frame using accelerated life and numerical test[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188: 221-232.
- [8] 孙强,张捷,肖新标,等. 低温环境下高速列车车内噪声问题及控制方案[J]. 振动.测试与诊断,2018,38(6): 1217-1222+1296.
- SUN Qiang, ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, et al. Interior noise issue noise control measures of High-speed train in low temperature[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1217-1222+1296.
- [9] TAN Xiaoming, WANG Tiantian, QIAN Bosen, et al. Aerodynamic noise simulation and quadrupole noise problem of 600km/h High-speed train[J]. IEEE Access, 2019, 7(124866-124875).
- [10] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J].中国工程科学,2015,17(4): 30-41.
- TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of High-speed rails in China[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 30-41.
- [11] 蔡成标. 高速铁路列车—线路—桥梁耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学,2004.
- [12] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学研究[J]. 中国工程科学,2015,17(4): 42-52.
- ZHANG Weihua. Study on dynamics of coupled system in High-speed trains[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 42-52.
- [13] 高加. 高速列车智能化生产工艺技术研究[J]. 轨道交通装备与技术,2020(6): 14-17.
- GAO Jia. Research on intelligent production technology of high-speed train[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(6): 14-17.
- [14] 涂天慧. 高速列车转向架自动化装配线仿真与优化研究[D]. 成都: 西南交通大学,2019.
- [15] 杨国伟. 高速列车设计和服役关键力学问题专题序[J]. 力学学报,2021,53(1): 17-18.
- YANG Guowei. Investigation on key mechanics problems of High-Speed Train design and service safety[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 17-18.
- [16] 丁国富,姜杰,张海柱,等. 我国高速列车数字化研发的进展及挑战[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2): 251-263.
- DING Guofu, JIANG Jie, ZHANG Haizhu, et al. Development and challenge of digital design of high-speed trains in China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 251-263.
- [17] LU Yuqian, LIU Chao, WANG Kevin I-Kai, et al. Digital twin-driven smart manufacturing:

- connotation, reference model, applications and research issues[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [18] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin-the simulation aspect[M]. Mechatronic Futures. Springer, Cham, 2016: 59-74.
- [19] TAO Fei, SUI Fangyuan, LIU Ang, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019,57(12).
- [20] 庄存波,刘检华,熊辉. 分布式自主协同制造——一种智能车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8): 1865-1874.
- ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui. Distributed initiative and collaborative manufacturing: new paradigm for intelligent shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 1865-1874.
- [21] TAO Fei, ZHANG Meng. Digital Twin Shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017(5): 20418-20427.
- [22] 刘蔚然,陶飞,程江峰,等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(3): 565-588.
- LIU Weiran, TAO Fei, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 王成山,董博,于浩,等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5): 1597-1608.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.
- [25] 李福兴,李璐曦,彭友. 基于数字孪生的船舶预测性维护[J]. 船舶工程,2020,42(S1): 117-120,396.
- LI Fuxing, LI Luxi, PENG You. Ship predictive maintenance based on digital twins[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 117-120, 396.
- [26] 陈岳飞,肖珍芳,方向. 数字孪生技术及其在石油化工行业的应用[J]. 天然气化工(C1 化学与化工),2021,46(2): 25-30.
- CHEN Yuefei, XIAO Fangzhen, FANG xiang. Digital twin technology and its application in petrochemical industry[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2021, 46(2): 25-30.
- [27] 樊孟杰,江海凡,丁国富,等. 基于数字孪生的地铁列车性能评估系统[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-18[2022-01-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210716.1002.002.html>.
- FAN Mengjie, JIANG Haifan, DING Guofu, et al. Digital twin-based performance evaluation for subway twin[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-18[2022-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210716.1002.002.html>.
- [28] 王运达,张钢,于泓,等. 基于数字孪生的城轨供电系统高保真建模方法[J]. 高电压技术, 2021 ,47(5): 1576-1583.
- WNAG Yunda, ZHANG Gang, YU Hong, et al. High fidelity modeling method of urban rail power supply system based on digital twin[J]. High Voltage Engineering, 2021 ,47(5): 1576-1583.
- [29] WANG Yunrui, REN Wenzhe, LI Yan, et al. Complex product manufacturing and operation and maintenance integration based on digital twin[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117: 361-381.
- [30] 曾庆臻. 地铁转向架配置模型构建及求解[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [31] 丁叁叁,陈大伟,刘加利. 中国高速列车研发与展望[J]. 力学学报,2021,53(1):35-50.
- DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China High-Speed Train[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35-50.
- [32] 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 Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [33] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报,2020,41(9): 6-17.
- MENG Hesong, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 6-17.
- [34] 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 Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [35] 江海凡,丁国富,张剑. 数字孪生车间演化机理及运行机制[J]. 中国机械工程,2020,31(7): 824-832+841.
- JIANG Haifan, DING Guofu, ZHANG Jian. Evolution and operating mechanism of digital twin shopfloors[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 824-832+841.
- [36] 贾利民,秦勇,李平. 新一代轨道智能运输系统总体框架与关键技术[J]. 中国铁路,2015(4): 14-19+60.
- JIA Limin, QIN Yong, LI Ping. The overall framework and key technologies of the new-generation rail intelligent transportation system[J]. Chinese Railways, 2015(4): 14-19+60.
- [37] 缪炳荣,张卫华,刘建新,等. 工业4.0下智能铁路前沿技术问题综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 115-131.
- MIAO Bingrong, ZHANG Weihua, LIU Jianxin, et al. Review on frontier technical issues of intelligent railways under industry 4.0[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 115-131.
- [38] 王军. 面向 PHM 的高速列车谱系化产品技术平台开发和实践[J]. 中国铁道科学,2021,42(1): 80-86.
- WANG Jun. Development and practice of PHM oriented High-Speed Train pedigree product technology platform[J]. China Railway Science, 2021, 42(1): 80-86.
- [39] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//KAHLEM F J, FLUMERFELT S, ALVES A. Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, Cham, 2017: 85-113.
- [40] 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: 1687-5966.
- [41] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//Proceedings of the 53rd Structures Dynamics and Materials Conference. Special Session on the Digital Twin. Reston, Va. USA: AIAA, 2012: 1-14.
- [42] 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 twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [43] GARFINKEL J. Top 10 strategic tech trends for 2019. Gartner Newsroom. 2019, p. 1-5.
- [44] QI Qinglin, TAO Fei, HU Tianliang, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019.
- [45] 陶飞,马昕,胡天亮,等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(10): 2405-2418.
- TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [46] 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 Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [47] TAO Fei, CHENG Jiangfeng, QI Qinglin, et al.

Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.

[48] Technical Operations International Council on Systems Engineering (INCOSE). Systems Engineering Vision 2020[R]. [S. I.]: INCOSE, 2007.

[49] 许红静. 复杂产品数字样机集成分析建模方法研究[D]. 天津: 天津大学,2007.

[50] 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.

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.