

文章编号:1671-1637(2021)01-0115-17

## 工业4.0下智能铁路前沿技术问题综述

缪炳荣,张卫华,刘建新,周 宁,梅桂明,张 盈

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**以铁路基础设施和车辆为主要研究对象,结合智能制造涉及的前沿技术和方法,阐述了合理利用工业4.0的内涵要素进行中国下一代智能铁路数字化建设、改造与升级的重要性和必要性;按照工业4.0的基本概念、技术内涵、系统模型和技术框架的影响效果,对比分析了智能基础设施、智慧列车、智能运维及相关技术的实施过程和存在问题,并在此基础上分析了以智慧列车为核心的智能铁路数字化平台建设关键技术;概括了铁路传统制造向智能制造数字化建设的具体技术要求,整理了利用工业4.0六维模型解决人工智能、大数据、云计算和数字孪生等前沿技术与铁路传统制造业的融合问题,包括数据传输与共享、信息通信与安全技术的潜力挖掘、智能管理、技术应用、信息安全、状态智能感知等各个方面。研究表明:中国铁路数字信息技术和智能技术与传统制造过程存在融合不足的问题;智能制造的核心技术储备不足,状态智能感知、数据在线分析、工业控制系统等软硬件技术自主性不强;铁路系统大数据建设的数据传输和标准体系也不够完善;未来智能铁路应该加强工业4.0下铁路传统制造的标准化管理系统与数据信息安全系统的数字化设计、升级与改造;需要深刻思考和分析人工智能和大数据驱动等前沿技术与铁路的融合与实施,通过工业4.0涵盖的各项关键技术的实施和准确评估真正有效推动中国智能铁路先进数字化平台的建设和发展。

**关键词:**智能铁路;智慧列车;工业4.0;人工智能;物联网;大数据

**中图分类号:**U270.12 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.005

### Review on frontier technical issues of intelligent railways under Industry 4.0

MIAO Bing-rong, ZHANG Wei-hua, LIU Jian-xin, ZHOU Ning, MEI Gui-ming, ZHANG Ying

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** The importance and necessity of the rational use of the connotative elements of Industry 4.0 for the digital construction, transformation, and upgrading of the next generation intelligent railways of China were explained. To this end, railway infrastructures and vehicles were considered as research objects, and frontier technologies and methods pertaining to intelligent manufacturing were combined. Based on the impacts of basic concept, technical connotation, system model, and technical framework of Industry 4.0, the implementation processes and existing problems of intelligent infrastructure, smart train, intelligent operation and maintenance, and related technologies were compared and analyzed. In addition, the key technologies for the digital platform construction of intelligent railways focusing on smart trains were analyzed. The specific technical requirements for the digital construction corresponding to

收稿日期:2020-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51775456);牵引动力国家重点实验室自主课题(2019TPL\_T03)

作者简介:缪炳荣(1970-),男,江苏泰县人,西南交通大学副研究员,工学博士,从事多学科设计优化与智能制造、车辆动力学及寿命预测、结构健康监测研究。

引用格式: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.

Citation: MIAO Bing-rong, ZHANG Wei-hua, LIU Jian-xin, 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.

traditional manufacturing to intelligent manufacturing were summarized. Problems pertaining to the integration of frontier technologies, such as artificial intelligence, big data, cloud computing, and digital twins, with the traditional railway manufacturing, were compiled and solved using a six-dimensional model of Industry 4.0. These problems included the data transmission and sharing, exploration of the potential of information communication and security technology, and intelligent management, technology application, information security, and intelligent state awareness. Research result demonstrates that the integration of digital information technology and intelligent technology with the traditional manufacturing process is insufficient. The core know-how of intelligent manufacturing is inadequate. A lack of autonomy of software and hardware technologies, such as intelligent state awareness, online data analysis, and industrial control systems, is observed. The data transmission and standard system for the construction of big data for the railway system is not perfect. The digital design, upgrade, and transformation of the standardized management system and data information security system of railway traditional manufacturing in Industry 4.0 should be strengthened in future intelligent railways. Deep thinking and analysis of the integration and implementation of frontier technologies including artificial intelligence and big data drive in railways are required. Various key technologies covered in Industry 4.0 should be implemented and accurately evaluated to truly and effectively promote the construction and development of an advanced digital platform for intelligent railways of China. 1 tab, 13 figs, 69 refs.

**Key words:** intelligent railway; smart train; Industry 4.0; artificial intelligence; internet of things; big data

**Author resume:** MIAO Bing-rong (1970-), male, associate professor, PhD, brmiao@home.swjtu.edu.cn.

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51775456); Autonomous Research Project of State Key Laboratory of Traction Power (2019TPL\_T03)

## 0 引 言

近年来,智能制造涵盖的技术已经在航空、公路、铁路等制造领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。智能制造是在1989年日本较早提出的技术概念,其基本定义是利用先进制造和工业控制技术等智能化解决制造系统中可能出现的各种不确定性问题,以达到更高的产品质量和生产效率<sup>[3]</sup>。智能制造技术的核心是工业数据互联互通。早期阶段由于缺少物联网、大数据和人工智能等技术的支持,制造业实际上并没有取得期待的工业大革命的效果。2011年,德国政府部门开始提出工业4.0(Industry 4.0, I4.0)的概念,且在2013年正式实施智能制造的战略规划,其根本目的是实现德国本土制造业技术的不断创新,增强制造实力与产品竞争力<sup>[4]</sup>。经过近10年的发展,各个国家纷纷提出本国制造业的强化战略,工业4.0已经对全球的智能制造产业产生极大的技术影响和冲击。这不仅直接导致了全球制造业出现数字

化的第4次工业革命,也促进了新一代智能制造技术涵盖的数字化模型、系统方法和技术特征的成熟<sup>[5]</sup>。工业4.0技术的核心基础是信息物理系统(Cyber Physical System, CPS)和工业物联网(Industrial Internet of Thing, IIoT)等。全新的智能制造技术也表现出比人工操作的传统制造技术具有更加快速、高效和自主的执行能力,创建更合理与更灵活的生产管理流程,能够更加快速地解决企业在生产、运输与运营维护过程中可能出现的任何技术问题<sup>[6]</sup>。

显然,工业4.0也可以定义为基于CPS和IIoT等数字化技术的现代智能制造,是一种不断提高生产效率和价值链的技术术语。它融合了CPS、IIoT、云计算(Cloud Computing)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)、大数据(Big Data)和智慧传感器(Smart Sensor)等技术内涵。工业4.0已经重新定义了工业概念和业务流程,加速了与物联网和人工智能等新技术的融合与发展<sup>[7-10]</sup>。换句话说,工业4.0概念的最终目标是不断提升制造业的数字化水

平,真正实现智能制造<sup>[11]</sup>。工业 4.0 的实施主要是通过高适应性、高效率、高度智能的数字化工厂,在产业流程、智能产品及价值链流程中不断利用物联网等技术融合新信息,提高产品质量和竞争力<sup>[12]</sup>。在未来人们将会更多地利用智能传感器技术收集大数据,实现信息交换和数据驱动。无论对象是人还是机器,在人与人(Person-to-Person, P2P)、人与机器(Person-to-Machine, P2M),和机器与机器(Machine-to-Machine, M2M)之间均可通过自动控制和通信技术提高生产效率,创造更加智能的工作环境和智能产品。

如今,工业 4.0 涵盖的大量技术已经被广泛应用于传统制造业。在航空工业中,人们可以利用智

能传感器技术监控飞机在飞行过程中的不同飞行姿态和安全状态;在城市交通中,人们利用云平台 and 大数据驱动技术实现智能汽车在无人驾驶状态下的数据采集、分析和处理;在铁路领域中,运营部门可以实现动车组的智能运营和维护管理等<sup>[13]</sup>。当然,按照智能制造技术的发展趋势,未来人们会发展脑机接口(Brain Machine Interface, BMI)等技术,促使工业 5.0 的技术革命,即人-机协同的个性化时代<sup>[14]</sup>。

工业 4.0 涵盖的广义技术概念正在不断打破现代智能制造技术与传统制造业的生产、运营、物流与管理模式,模糊了物理、数字和人类互动的界限,也加快了彼此的融合与发展。工业大革命的主要发展历程可以简单如图 1 所示<sup>[15]</sup>。

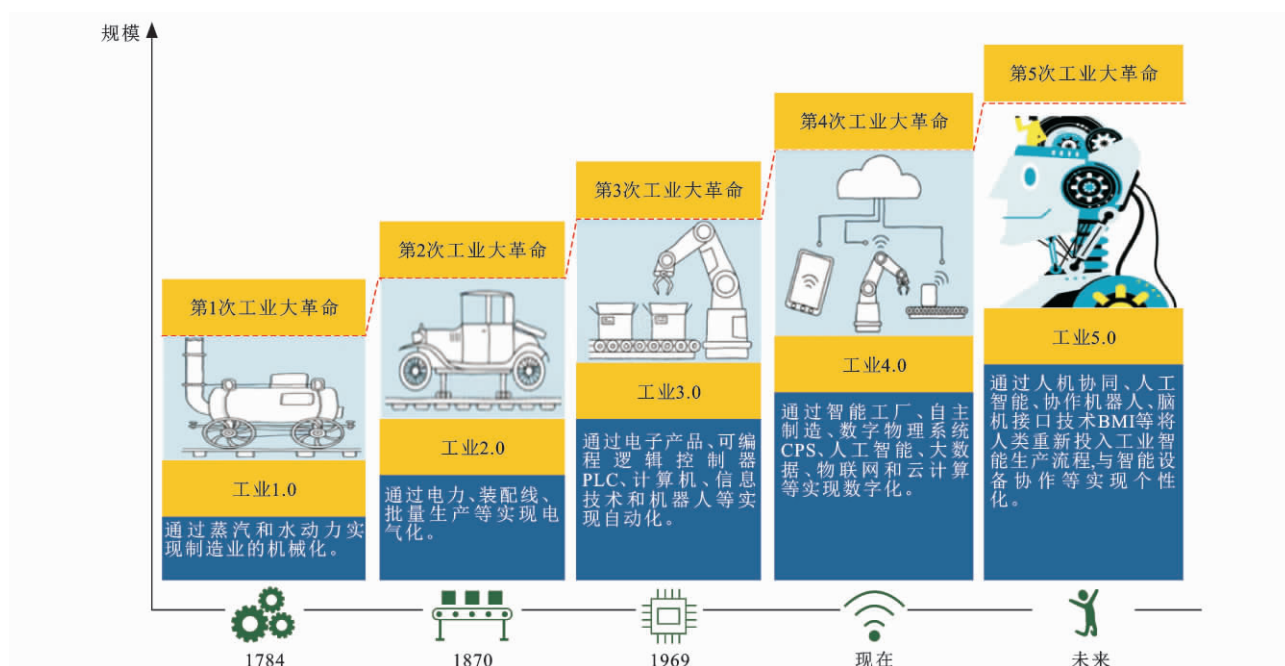


图 1 工业 4.0 的发展历程

Fig. 1 Development history of Industry 4.0

传统制造业正在面临着产业化时代向数字生态时代的转变,其中包含的一些技术特征和概念的区别如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

相关文献已经表明,描述工业 4.0 概念的典型数学模型之一就是六维模型。该模型涵盖了工业 4.0 涉及的所有智能制造的关键技术,即利用 CPS 和 IoT 技术帮助传统制造企业从组织架构的战略与管理(智能管理)、智能工厂、智能操作(智能运行)、智能产品、数据驱动和职员等 6 个方面实现数字化升级和改造,进行制造业信息数据流的标准化、互通化和共享化<sup>[16]</sup>。六维模型正在利用每个环节的数据信息连通,实现符合数据通信安全协议和相关标准的数据驱动服务。同时,通过物联网技术,智

能制造可以实现价值链中各个环节和流程(智能工厂、智能产品、人员、智能生产、智能服务等)的信息通信、数据传输、数据驱动和信息共享,这不仅极大改善了产品质量,也提高了制造企业的综合竞争力<sup>[16]</sup>。工业 4.0 的六维模型示意如图 3 所示。

如今,利用工业 4.0 新技术解决全球制造业发展中面临的技术难题和瓶颈,已经成为许多国家对未来制造业的一种必然选择和共识。近些年来,中国、美国、日本、英国、印度等主要制造业国家也纷纷提出对应工业 4.0 概念的制造业发展战略和规划,均希望在未来几十年内能够大幅提高本国制造业的数字化制造水平。提出类似于德国工业 4.0 发展战略的主要制造国家已经在实施本国智能制造的

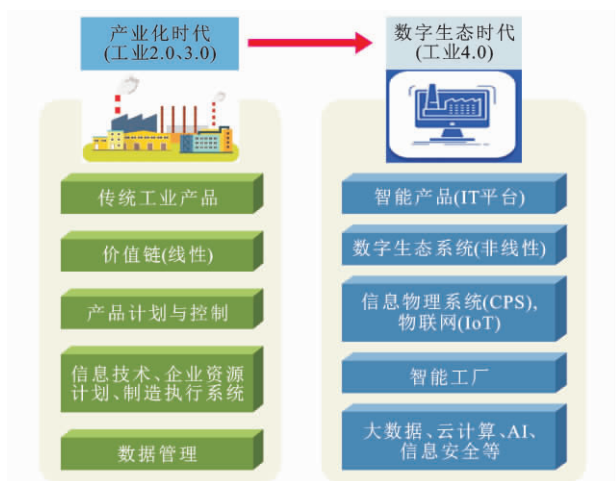


图 2 产业化时代和数字生态时代的特征

Fig. 2 Characteristics of production and digital ecosystem eras

战略规划,如图 4 所示<sup>[17-20]</sup>。

在工业 4.0 的背景下,物联网技术作为核心技术已经让大量的工业数据通过互联网进行信息通信,符合标准规范的智能设备正在通过数据通信技术,实现从智能工厂的组织管理到生产制造部门每个环节的数据驱动。工业 4.0 涉及的关键技术正在被直接应用于机械化、电气化和自动化控制等领域。

同时,它与人工智能、大数据等融合,实现了信息传播和数据识别等,极大提高了产品的生产质量和效率。其主要包括的技术内容如下<sup>[21-22]</sup>。

(1) 网络物理系统,也称为信息物理系统(CPS)、数字物理系统或虚拟实体系统等。其主要功能是将产品制造过程中的供应、制造、销售等海量信息数据化、智能化和信息化,实现快速、高效、高品质产品定制的技术服务。该系统不仅通过新技术与传统制造业相互作用,创建一个全新系统功能世界,打破了实体产业与虚拟产品的界限,而且改变了现有业务和市场模型的形式,使得产品制造、操作、服务供应商组成完整的价值链。

(2) 物联网(Internet of Thing, IoT)或工业物联网(Industrial Internet of Thing, IIoT),主要是为各个部门真正提供工业数据信息的互连和共享。由于具有强大的数据化控制力,物联网能够实现数据共享,保证工作协调性、统一性和管理的高效性。它主要是由具有唯一标识符的计算机、工厂、数字化设备、产品和人员等相互连接组成一个复杂大系统,通过网络传输数据实现人机交互,这不仅有助于企业内部的高效运营管理,还可以利用存储数据的云

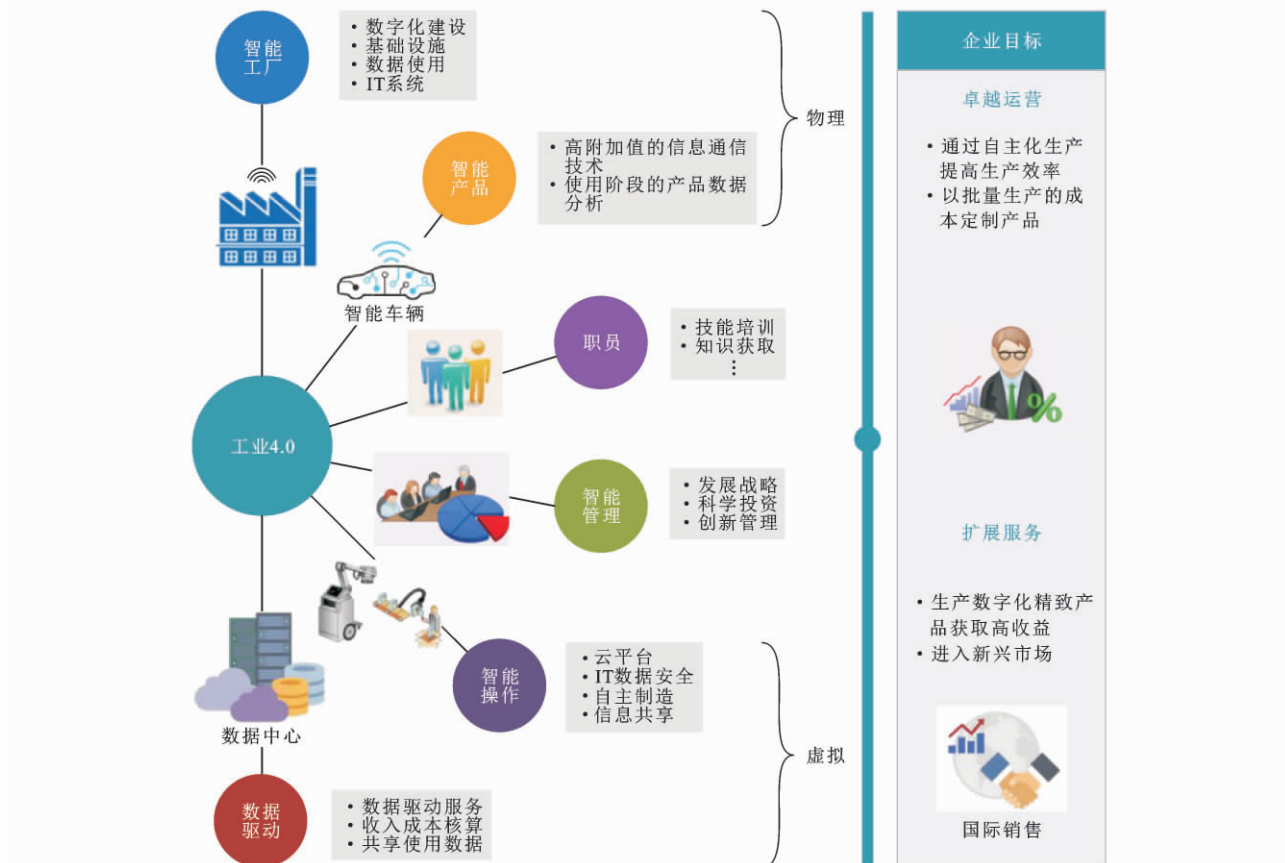


图 3 工业 4.0 的六维模型

Fig. 3 Six-dimensional model of Industry 4.0

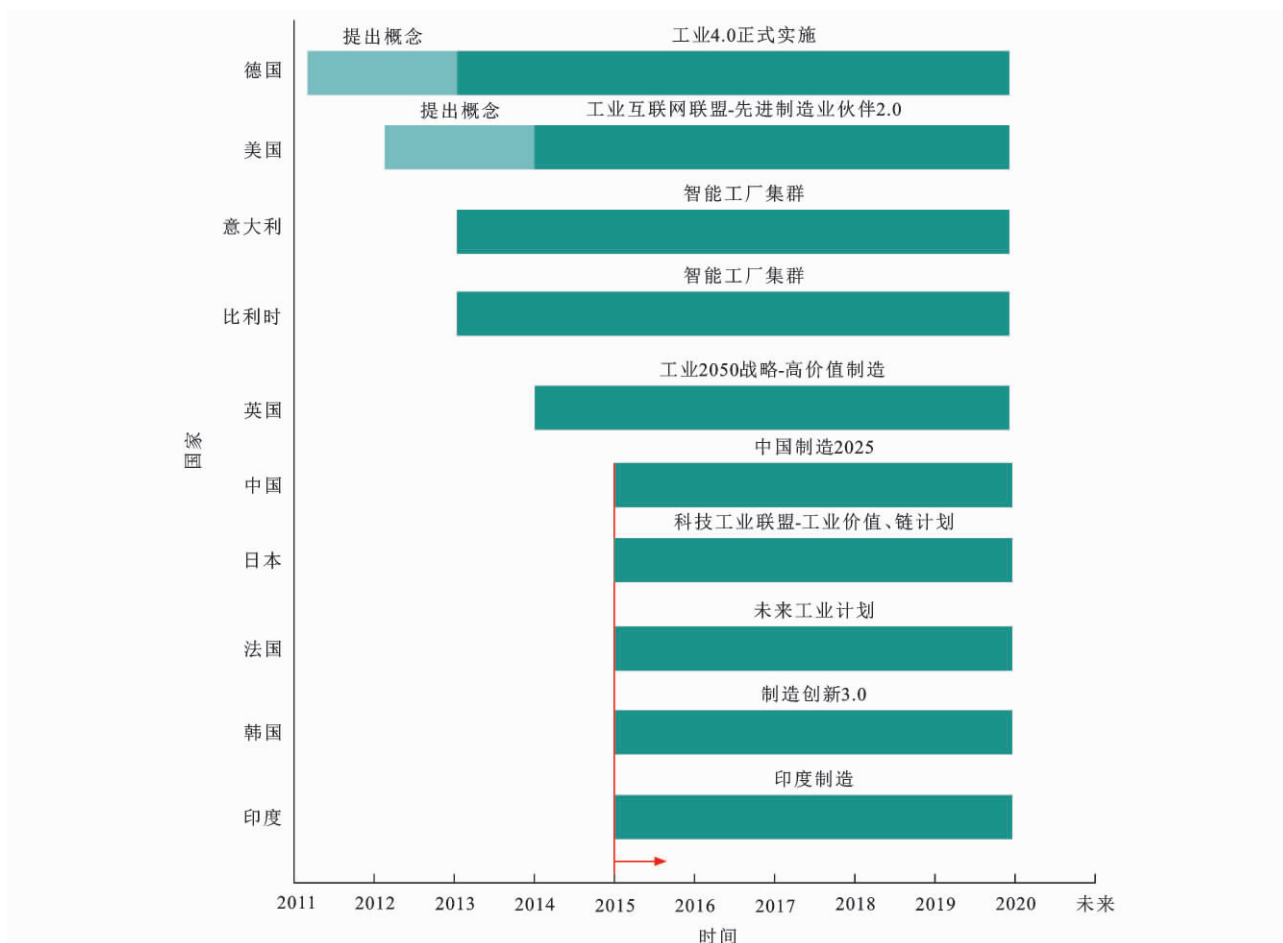


图 4 工业 4.0 的主要制造国家

Fig. 4 Major manufacturing countries of Industry 4.0

平台来优化设备、生产、运营维护等环节。物联网在所有颠覆性数字化技术中具有最大影响,其作用领先于移动互联网、云计算等技术。

(3)云计算,利用云平台进行远程工业服务、管理和性能基准测试等应用程序计算。随着数字化与通信技术的不断进步,海量机器数据和计算分析功能将向云平台和云计算的解决方案转移。与独立计算机系统相比,云计算可以更快地推出各种软硬件、性能模型和交付选项的更新。其主要功能是提供或获取模型数据信息,以实现网络通信服务技术,随时可用并进行实时数据处理和分析。其内容包括超算、工业软件、操作系统、存储和应用程序等。客户可以根据需求为其使用服务付费,避免对自身 IT 基础架构进行大量重复投资,降低计算成本。

(4)大数据,由于数据处理的主要挑战之一是其数量和规模,多源海量数据使得制造业难以精确识别某个可能导致正确分析与决策的细小信息和趋势。大数据可以有效识别单个组件的性能及其操作限制,避免未来生产、运营和维护中发生故障,并采

取积极的预防措施。由于各种数据来源(设备、传感器、卫星和 GPS 信号)产生大量数据,几乎涵盖了智能制造领域的各个环节,通过提高大数据分析和处理能力,企业能够持续创新智能产品和服务,并提高生产力和效率。

(5)人工智能,开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新技术科学。通过该技术,机器能够自主学习,而不需要依赖人类来建立知识,形成对过去知识积累的经验 and 专家数据库。

(6)产品全寿命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM),负责管理产品整个生命周期的过程,包括产品的概念设计、工程设计和生产制造以及产品的销售、市场营销、服务和支持等。它允许公司参与客户在生产过程中的定制要求,更紧密地应对市场需求,做出更快的反应,进行自我控制或故障处理,并自主采取适当措施。由于 CPS、物联网、人工智能、大数据等元素的融入,工业 4.0 概念下的制造业正以指数级的速度快速发展。未来智能制造



会变得更加可靠、高效、灵活和安全。

工业 4.0 的主要应用领域为智能产品开发,其中包括具有增强现实、虚拟现实或混合现实功能的智能可穿戴设备,允许产品定制和虚拟产品设计。3D 打印技术作为重要环节将促进制造业按客户需求定制产品和智能化生产;智能工厂中相互连接的生产设备可以收集和共享数据,促进更大程度的制造和测试合作。其他应用还包括:大数据分析和人工智能技术可以减少意外停机成本,减少生产线中断;自主机器人、无人机和智能车辆等技术可提高生产效率,改善工作条件;智能采购、仓储和定制服务可保证产品订单的顺利履行;通过无线智能传感器技术可进行实时资产跟踪,实现客户与供应商之间的动态生产计划和动态产能扩展,也就是实现智能物流与管理。

主要工程应用场景简述如下<sup>[17]</sup>。

(1)识别机会,由于物联网技术的应用,计算机可以收集大量数据并分析该数据,实时处理生产、运营、维护等环节中产品出现的性能故障,以识别不同运营状态和提供监测能力。制造商通过识别技术可以快速优化产品的质量和运营,利用安装的各种智能传感器获取的数据对产品制造、运营与维护的各个环节进行信息识别并提供科学决策依据。

(2)自主设备,不需要人员亲自操作或远程控制其操作的设备。通过编制的程序进行设备或产品的操作或控制,只需要极少数人来监督生产运营和操作。

(3)产品定制,在产品设计和生产过程中直接考虑客户或供应商的需求,定制生产小批量、单个零件或个性化产品,不断改进和完善产品设计质量,满足客户体验,提高产品性能和成本效益。

(4)智能车辆,智能车辆是一个集成环境感知(传感器、雷达等)、规划决策、多等级辅助、自动驾驶等功能于一体的综合车辆系统,它集成运用了计算机、传感器、信息融合、数据通讯、人工智能及自动控制等技术。

(5)智能物流和供应链优化,通过物联网相连的产品供应链可以自动调整和适应新产品需求和物流信息。

(6)自主机器人,机器人通过物联网技术的支持,利用计算机连接且相互通信,实现自主操作和生产等。

(7)增材制造(Additive Manufacturing, AM),也称 3D 打印,在计算机控制下成型连续的材料层以创建物体,主要应用于合成三维物体的制造过程。

一般以数字模型文件为基础,运用液体、粉末或片状金属或塑料等可粘合性材料,通过逐层打印方式构造新物体的技术。

(8)仿真模拟,实现系统与结构部件的仿真与模拟,有效评估产品在各种复杂环境中的服役情况。利用虚拟样机的仿真模拟技术可以更快地开发、测试和研制新产品,确定最优解决方案。

(9)增强现实(Augmented Reality, AR),增强现实技术是虚拟现实的增强版本,允许用户使用实时叠加的数字信息来增强其视野。它的功能是通过在用户的真实世界视图上叠加计算机生成的图像,增强现实世界的直接或间接视图的实时性。

(10)网络安全,由于系统通过物联网和云平台连接,网络信息必须要安全和可靠才能实现数字化的智能制造流程。

(11)系统集成,满足大量设备系统实现数据共享、数据应用和数据交换的集成与通信技术,使得大多数设备不仅在自身的操作中实现高度自动化,而且可以与其他设备或系统实现自动化。这种标准化的开放体系结构可以更好地将产品需求与定制的数据信息传输到企业和客户。

(12)数字孪生(Digital Twin, DT),也称数字双胞胎技术,充分利用物理模型、系统、运行等数据,集成多学科、多物理、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映对应于现实中实体装备全生命周期的一种动态数字技术。

中国新时代的智能交通和轨道先行的发展战略和纲要已经正式颁布,更加有必要利用工业 4.0 概念涵盖的技术分析未来铁路智能制造前沿性问题。为此,本文结合国内外工业 4.0 的相关文献,针对未来智能铁路(Intelligent Railway)数字化建设中可能出现的前沿技术问题进行深刻思考,从技术对比分析的角度提出中国未来智能铁路可能需要的解决方案和一些建议。

## 1 存在的一些问题

全球发达国家的制造业正在从工业 3.0 向工业 4.0 阶段发展,实现从生产自动化向网络信息化方向转变<sup>[18-19]</sup>。中国制造业依然主要处于工业 2.0 和工业 3.0 的发展与实施阶段,需要重新评估自动化与智能化水平<sup>[20]</sup>。尽管中国轨道交通领域的制造业在近 10 余年来取得了全球瞩目的成就,但依然面临数字化技术升级、改造和换代的迫切需求与竞争压力。工业 4.0 的概念和内涵技术正在将铁路的传

统制造提升到智能制造水平。新的铁路智能制造内容应包括:传统制造业的数字化建设、升级和改造;更加自主和灵活的铁路一体化信息网络协作;提供以用户为中心的可快速扩展的智能解决方案和按需协作的智能服务;更加开放的互联网铁路产品智能管理和利用智能化替换所有传统制造业的一体化解决方案。

当然,要真正实现智能铁路的数字化建设,还存在着很多需要克服的技术难题,包括线路、车站、桥梁和隧道等基础设施,智慧列车、运营维护等与人工智能、物联网和大数据等技术的彻底融合。智能铁路问题的解决实际与 CPS 和 IoT 等工业 4.0 概念密切相关<sup>[21]</sup>。为了更清楚地了解中国智能铁路未来前沿技术的发展方向,有必要利用工业 4.0 的技术模型和框架系统分析智能铁路可能存在的一些技术问题<sup>[22]</sup>。铁路传统制造业正在向铁路智能制造业的数字化建设转变,未来可能存在的技术问题如下。

(1)铁路智能产品、智能管理、智能运维、智能车间、人才储备等方面存在的诸多不确定因素,容易导致智能铁路建设目标与现实情况存在较大差距。

(2)不断探索和寻求利用人工智能、大数据、物联网等新兴技术与铁路传统制造数字化升级和改造的最优解决方案。

(3)加深智能铁路涵盖的基础设施、智慧列车和智能运维及相关技术的理解,提出以智慧列车为核心的智能铁路数字化平台建设。

## 2 智能铁路基本概念和模型

工业 4.0 的基本概念、技术内涵、系统模型和技术框架等涉及的范围和内容都比较广泛,也说明铁路传统制造业有必要思考如何结合工业 4.0 的六维模型进行智能制造的技术升级,并针对系统安全性和数据容量等具体问题开展科学决策和合理建设。很多学者已经提出铁路 4.0<sup>[21-24]</sup>、智能铁路<sup>[25-26]</sup>、智慧车站(Smart Station)<sup>[27-28]</sup>和智慧列车<sup>[29]</sup>。简而言之,智能铁路是指智慧城市中智能交通系统的铁路运输子系统,且将铁路基础设施、列车、车辆的运营调度管理和运输规划等完全整合成一个铁路智能制造的工业生态系统。其主要内容包括智能基础设施、智慧列车和车辆的智能运维等子系统在内的智能制造大系统,且在 CPS 和 IoT 等技术基础上通过系统集成技术实现未来安全和高效的铁路运输<sup>[30]</sup>。

### 2.1 智能铁路的框架系统

工业 4.0 的概念,或中国制造 2025 的规划,正在影响着中国未来铁路的发展历程。Lin<sup>[25,30-37]</sup>等结合智能铁路的特征,针对性地提出智能铁路的技术系统架构。由于涵盖内容比较广泛,还需要考虑铁路不同子系统之间的网络通信、数据传输和数据交互技术等<sup>[38]</sup>,这就存在基础设施、智慧列车、智能运维等子系统之间的信息共享及信息安全的问题<sup>[39]</sup>。这些系统不仅需要实现海量大数据的高速率、无线数据的准确传输,还需要提供高效的大数据传输标准及各种不同源文件格式的安全解决方案<sup>[40]</sup>。当然,智能铁路建设不仅需要考虑数字化技术升级,也需要考虑以智慧列车为核心的智能设计与制造和线路环境及车辆运维过程中的数据信息安全与网络监控。本文在众多文献的基础上提出一种以智慧列车为核心的智能铁路构想,如图 5 所示。

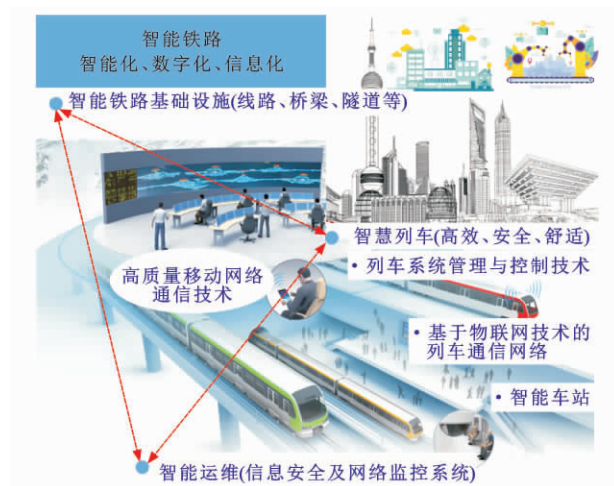


图 5 未来的智能铁路构想

Fig. 5 Concept of future intelligent railway

本文将智能铁路的技术框架分为状态感知层、数据传输层、技术应用层和智能管理层等 4 个层次和若干子系统,且在智能铁路大系统框架中强调了标准规范管理系统和数据信息安全系统的重要性<sup>[25,30-37]</sup>。其技术框架如图 6 所示。

### 2.2 智能基础设施

智能基础设施(Intelligent Infrastructure)是线路、桥梁、隧道、车站、供电系统、通信信号等基础设施的智能化,主要应用于铁路基础设施的智能建模和系统的智能管理。它通过物联网的嵌入式设备对系统互连性和典型事件定义的深入理解,集成传感器、通信、计算和控制等技术解决铁路系统基础设施的智能化问题。利用智能基础设施进行主动维护、



图6 智能铁路的主要技术框架

Fig. 6 Main technical framework of intelligent railway

智能计划和调度、能源管理等<sup>[22,25,38]</sup>,这不仅提高了基础设施的运行可靠性和安全性,也加强了资产利用率,降低了排放量等,还能够更准确、可靠地支持列车的自动识别、防灾安全、交通安全、应急指挥救援、交通资源管理等。主要包括:通过分析大数据确定对象的发展趋势,进行基础设施状态预测性的智能维护;使用先进的测量或建模方法消除影响基础设施智能维护的不利因素;应用智能监控技术和数据传输技术识别基础设施的初期恶化情况,开展基于状态的预防性维护策略,而不是仅仅在紧急情况下进行维护。

智能车站作为基础设施的主要内容,需要使用大量智能传感器技术收集各方面的大数据,不断提高旅客运输管理的运行效率、安全性和持续性发展,实现车站系统的智能化管理和维护。其主要内容包括车站的智能管理、智能设施、智能移动性、智能安全监控等<sup>[27-28]</sup>。

实际上,传统铁路基础设施的管理模式正在逐渐被铁路智能管理系统所取代。比如,在云平台 and 大数据等技术的帮助下,人们可以更有效地监测与管理基础设施的设备、线路和车站,同时极大降低其运行和维护风险。线路、桥梁、隧道等的智能监测、状态监控和数据传输等也能通过配备大量智能传感器技术,利用物联网和数据分析之间的数据互换实现更多的智能应用<sup>[38-39]</sup>。

### 2.3 智慧列车

智慧列车是指通过数据传输、通信技术平台和车载传感器实现车与基础设施之间大数据信息的实时可靠传输,实现列车智能化<sup>[40-44]</sup>。智慧列车是智能铁路的核心内容,实际上面对的挑战主要体现在5个方面<sup>[45-48]</sup>:模块化系统的集成、设备或资产的互操作、资源的高效利用、新型多功能材料的应用和利用信息通信和电子技术实现智能化处理。通过实时动态数字平台和操作环境数字平台进行列车状态信息感知和监控是下一代高速列车主要发展的趋势之一。

智慧列车将工业4.0技术不断融入车辆产品的概念设计、工程设计、生产、销售、运行和维护等环节,开展全寿命周期管理。产品智能设计还需要考虑个性化产品及定制化需求、不同子系统之间的数字一体化协同和创新、采用灵活柔性的制造方式与考虑智能运行模式和智能管理等。比如智能物流和运维阶段需要充分考虑消费者需求,提供科学决策,降低运维成本。通过数字孪生技术实现不同子系统之间的数据传输、信息共享和信息安全等,将不同环节的信息实时反馈到产品全寿命周期的各个阶段。

### 2.4 智能运维

智能运维是智慧列车在线路上安全运行、高效运营的重要保障,这不仅保证了列车的稳定运行,而且可以监测列车的运营状态,提高列车编组和车辆



的检修效率,降低运行和维护成本,延长产品全寿命周期等<sup>[21]</sup>。基础设施和智慧列车等的智能运维可能会导致更多子系统之间的技术融合,如列车的预测性维护、智能基础设施和铁路设备资产的高级监控、视频监视系统、铁路运营、旅客和货运信息系统、列车控制系统、安全保证、信号系统、网络安全和能源效率等<sup>[22-25]</sup>。

以日本东铁集团(JR East)提出智慧维护计划(Smart Maintenance Initiative, SMI)为例简单说明智能铁路运营与维修的关键技术<sup>[46]</sup>。基础设施的运维过程已经由基于时间的维护(Time Based Maintenance,

TBM)(有时也称为计划维修和定期维修)向基于状态的维护(Condition Based Maintenance, CBM)(有时也称为状态维修和视情维修)策略转变。

虽然 TBM 和 CBM 对传统铁路基础设施及装备的运维方式进行了显著改进,但是随着人工智能、大数据等工业 4.0 技术的融合,铁路故障预测与健康管 理 (Prognostic and Health Management, PHM)正在成为智能铁路智能运维模式的主要发展方向。日本的智能维护计划中实现了铁路的集成评估管理、专家数据库和人工智能铁路智能维护技术,具体如图 7 所示<sup>[46]</sup>。

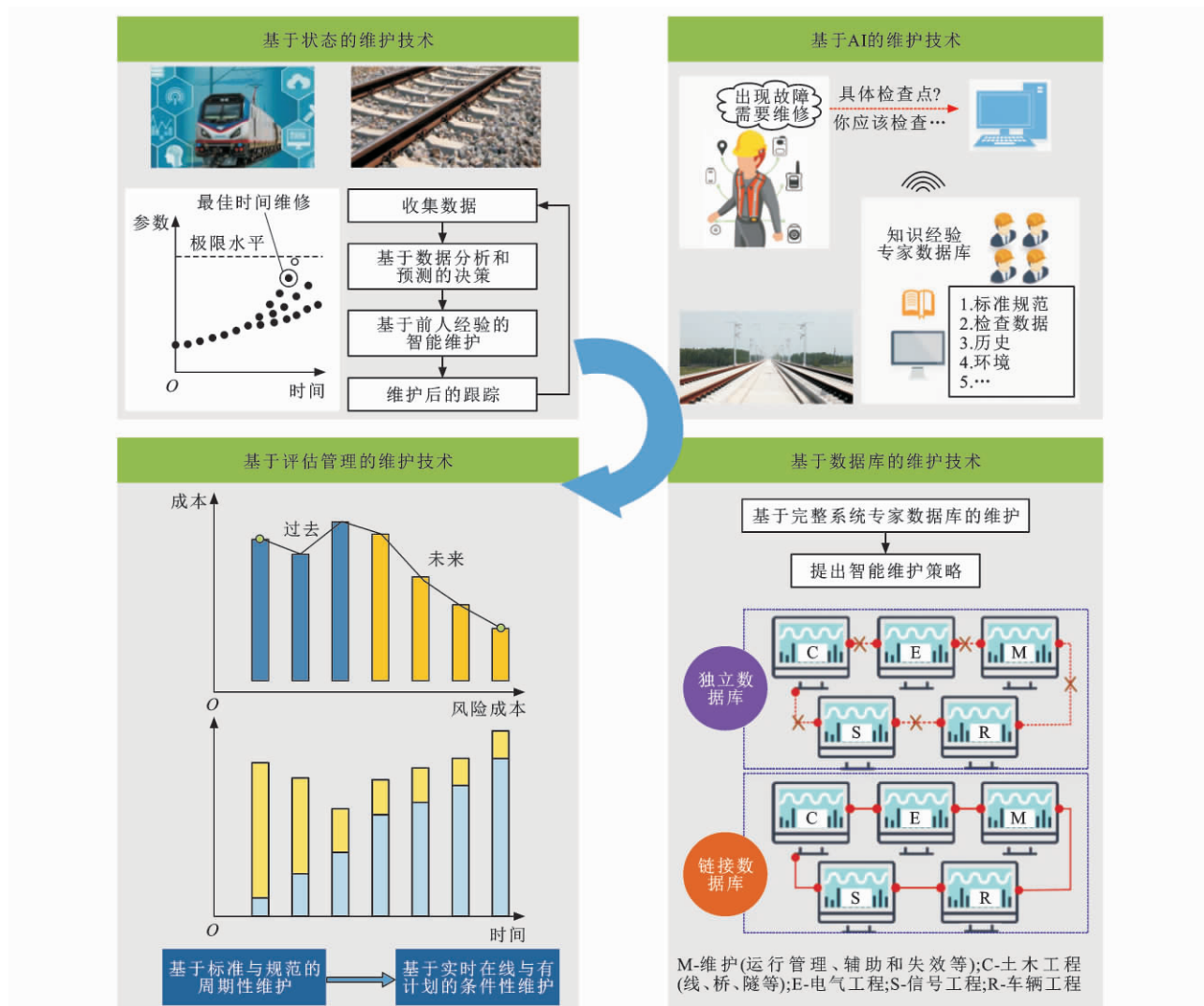


图 7 日本未来铁路的智能维护策略

Fig. 7 Intelligent maintenance strategy of future railways of Japan

为了列车和线路的智能运营维护,需要人们利用物联网和大数据等技术精确分析和智能诊断基础设施和车辆等各个子系统的异常状态。比如:需要对各个子系统之间的状态特征相互关联,进行故障精准预测和定位;对列车的实时状态数据进行特征提取和预

处理,深入挖掘列车运行积累的历史数据,建立系统故障预测数学模型;对部件、系统和列车不同层次的特征数据及关联关系进行监测和逻辑推导等。

目前,高速列车智能诊断与故障预测系统主要由车载 PHM 系统、车地数据传输系统、地面感知系

统、地面 PHM 系统等 4 个要素组成<sup>[43]</sup>。在车辆智能运维方面,人们可以根据各个子系统的历史故障数据进行人工智能训练和深度学习,形成专家经验知识库,且最终通过大数据挖掘和分析构建更有能力的智能运维技术。

梁建英<sup>[43]</sup>综合运用高速列车运维产生的实时数据和历史数据,提取车辆关键部件(如轴承等)的智能诊断模型,监控和预测车载设备运行状态,且提出较为详细的高速列车智能诊断和故障预测系统的思路和方法,其系统架构如图 8 所示<sup>[47]</sup>。

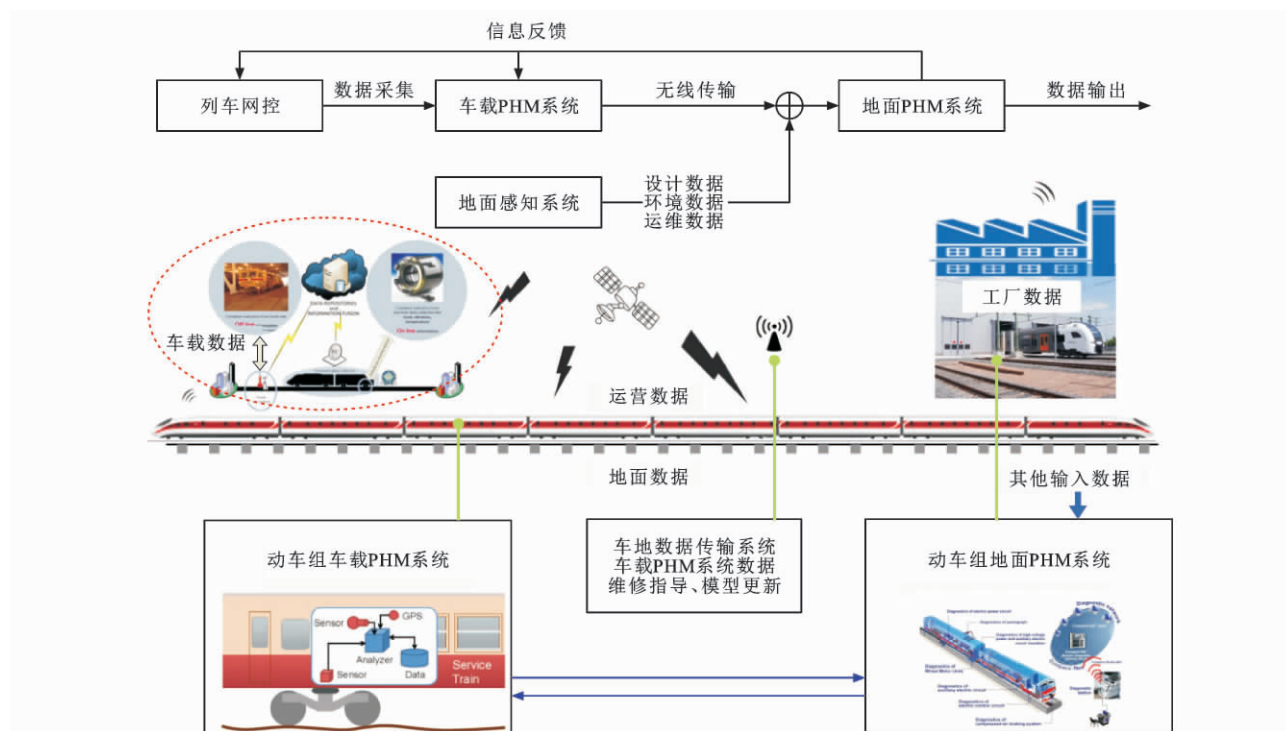


图 8 高速列车智能诊断与故障预测系统

Fig. 8 High-speed train intelligent diagnosis and fault prediction system

## 2.5 其他技术的应用

在智能铁路的建设过程中,一些国际企业已经在制造过程中考虑以工业 4.0 为基础的智能生态系统建设。比如瑞典 SKF 公司提出的智慧生态系统(Smart Eco-System)模型<sup>[39]</sup>。其核心是通过可靠、安全、低延迟、高带宽和可以互操作的网络通信进行轴承制造的数据连接和信息共享,实现制造业的数字化。随着智能传感器数量和类型的增加,设备管理及所收集的运维数据也需要建立智能、多客户访问的安全管理平台 and 系统,满足智能操作每个环节的数据传递和管理。产品的智能生态系统模型如图 9 所示<sup>[39]</sup>。

### 2.5.1 大数据技术的应用

大数据技术的应用过程正在通过网络总线实现不同系统的数据互连,利用通信技术访问各个相关部门和子系统传感器获得的大数据为智能铁路大系统的全局优化提供可能。大数据的应用解决了传统铁路数据本地化带来的局限性,不仅可以实现智能管理,也缩小了铁路运维的范围。大数据分析的主



图 9 SKF 公司提出的智慧生态系统

Fig. 9 Smart eco-system proposed by SKF Company

要目标是实现异构数据源、可扩展数据结构、实时通信和可视化技术的预测算法优化。具体包括:实现铁路各个系统数据的自动化、可互操作、互连和高级流量管理;利用标准化产品和接口的可扩展数据和升级系统可以满足旧系统的改造和升级;根据大量资产和流量状态的数据和信息提高信息管理系统临近预报和预测状态的功能;能够准确预测资产状态,实现智能运维管理。大数据技术应

满足如下技术要求<sup>[48]</sup>。

(1)满足长期需求和经济增长。研发一种通用的大数据方法和技术来提高铁路基础设施与车辆等各个系统之间的数据传输和交互能力,充分考虑环境数据的影响。

(2)更智能的铁路产品服务。通过智能化和数字化等技术实现资产与设备的科学配置。利用大数据实现自我维护和自我修复,满足铁路大系统智能运维的技术要求。

(3)铁路大系统(包括智慧列车等)数字化平台的集成,实现铁路和车辆等系统的数据传输、数据共享、数据安全性和互操作性。

(4)基于大数据的新运营维护策略将协调铁路 RAMS 系统的分析、计算和管理。

大数据分析的应用构成智能运营或维护服务的重要基础<sup>[48-54]</sup>。图 10 为大数据在智能铁路中的应用。

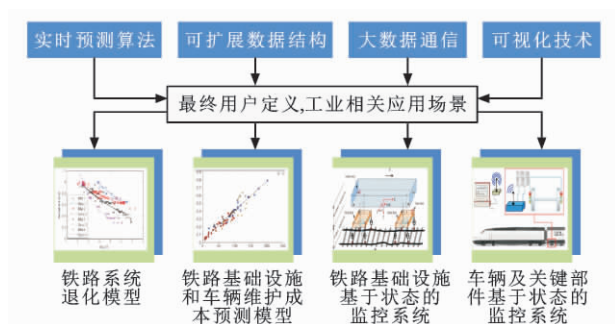


图 10 大数据在智能铁路中的应用

Fig. 10 Application of big data in intelligent railways

## 2.5.2 增强现实技术的应用

增强现实技术主要是通过计算机生成的感官输入图形、视频、声音和位置数据等形式弥补现实世界的视角,从而将虚拟现实与现实融合在一起,增强人们的感知能力<sup>[55]</sup>。它提供的新工具确保从多源数据中实现大数据传输和转移效率改善。人们根据实时信息能够更好地实现人机系统的集成和交互作用,实时传输有关零部件的故障维修信息等。它还可以与 3D 技术结合进行铁路运维的技术培训等。增强现实技术将直接影响铁路智能产品的性能、效率和质量。其主要解决方案包括预防性维护、操作员组装和服务检查等,具体类型及应用如表 1 所示<sup>[56]</sup>。

为了实时访问车辆的运行数据,铁路运营维护部门需要对基础设施、车辆等进行实时状态监控,包括运行控制、中断和状态分析等。尽管目前铁路全面实现增强现实应用还存在各种困难,但增强现实

表 1 增强现实的类型及应用

Tab. 1 Types and applications of augmented realities

类型	描述	应用场景
投影	利用虚拟图像增强用户看到的内容,允许用户与显示的虚拟图像之间交互作用。	虚拟标牌或海报;在物体表面叠加虚拟信息;协作;允许多个用户查看虚拟图像并与之人机交互。
识别	识别现实世界中的对象、图案或标记,向用户提供可补充的实时虚拟信息。	3D 可视化;3D 信息相对环境特定对象叠加;虚拟演示;在产品制造完成之前显示产品 3D 表示;原位;可视化对象、标记或图案,放置在环境中的虚拟对象。
定位	基于位置的增强现实技术,利用三角测量技术的详细输入数据为用户提供相关的方向指示,通过将实时虚拟信息精确覆盖在由设备相机呈现给用户的现实世界的视图上,从而获得信息。	位置层:将虚拟信息叠加到相对于用户位置的真实世界,提供有关对象或新地点的数据;兴趣点:提供虚拟标记,指示用户感兴趣的点,传输诸如方向、距离和高度等信息;原位:可视化相对的坐标、标记信息、放置在环境中的虚拟对象。
轮廓	将人的身体或物体的轮廓与虚拟信息融合在一起,从而使用户可以拾取和操纵现实世界中不存在的物体。	培训和教育;提供有关复杂设备或工作场景的动手经验;理解系统;将增强现实用于复杂对象的内部或分解视图。

技术的应用最终可以解决很多现实问题,比如:利用红外热成像技术可以检查铁路资产的电气系统、机械设备等的运行状态<sup>[57-59]</sup>;利用可穿戴的智能头盔可以对铁路产品进行安全检查和技术培训等。增强现实技术部分应用如图 11 所示<sup>[59]</sup>。



图 11 增强现实技术在电机维护中的应用

Fig. 11 Application of augment reality technology in motor maintenance

## 2.5.3 数字孪生技术的应用

数字孪生技术主要包括实际物理模型和虚拟空间的数字双胞胎模型,通过交换实时数据将两者联系在一起,解决数据孤岛问题<sup>[60-63]</sup>。数据孤岛问题是指许多产品或资产设备等在设计、生产和运营过程中产生大量多源应用数据不能共享,造成额外成本,导致效率低下的问题。该技术能利用物联网将



铁路基础设施、车辆、人员、运营维护等数据孤岛集合在一起,分析和认知产品各子系统组件,可以协助管理和设计部门在运营阶段访问和分析数据,更好地使用产品全寿命周期管理产品方案开发、物理属

性测试等。智能铁路可以使用数字孪生技术解决不同时间和不同来源产生数据存在的数据孤岛和不确定性问题,通过子系统建模实现虚实数据的交互操作<sup>[63]</sup>。智能列车数字孪生模型如图 12 所示。

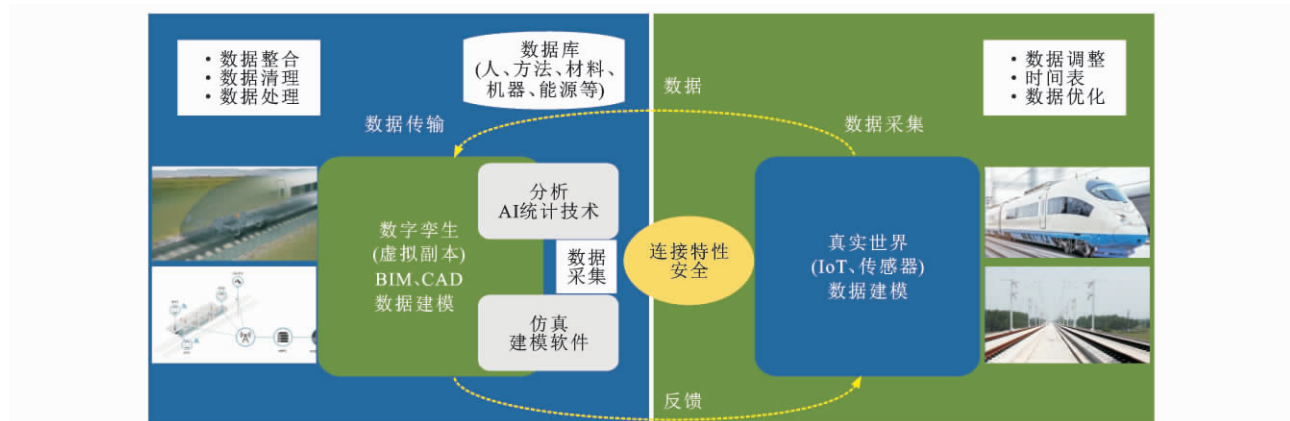


图 12 智慧列车的数字孪生模型

Fig. 12 Digital twin model of smart train

### 3 前沿技术问题的思考与展望

中国铁路传统制造业迫切需要采用工业 4.0 涵盖的技术、模型和框架内容实现铁路智能制造的数字化升级和建设。国内铁路基础设施和车辆制造企业、运营部门等也已经开始大量采用智能检测、机器替代、柔性生产、智慧物流等先进技术,但是距离真正的智能铁路依然存在很多前沿技术问题。为此,本文结合工业 4.0 概念与国内外文献,提出一些深层次的思考与展望。

#### 3.1 智能铁路一体化数字平台建设

智能铁路解决方案的首要问题应该是如何构建高效的智能铁路一体化数字平台。其建设内容需要重点考虑工业 4.0 概念和六维模型涵盖的技术内容,通过对比分析确定每个子系统需要完善的技术方面。针对智能基础设施、智慧列车和智能运维及相关技术开展建设和升级,这样不仅实现基础设施、车辆和运维状态等技术的智能化,而且可以对车辆及运行线路的地质环境、自然灾害(洪水、地震、滑坡、泥石流等)、气象条件(台风、暴雨、暴雪等)、电力能源供应等数据信息的大数据传输、信息共享和交互、通信安全等方面真正实现智能管理,提高铁路产品全寿命周期,其存在的技术挑战如下。

(1)解决不同制造商的列车数据通信标准和源文件格式的统一、开放和兼容问题。各个系统与环节均应采用统一的数据格式文件进行数据传输,真正实现多源大数据传输、数据交互、信息共享和安

全。避免大量重复工作,缩短产品制造周期,以提高工作效率和产品质量。

(2)应用高质量、海量大数据的无线网络连接和数据传输的实时性技术,利用大数据传输的以太网和云平台技术保证基础设施、列车与环境数据等物联网数据的高质量和安全通信。同时,根据先进的智能传感器技术收集、传输、处理基础设施(包括环境气候等影响)、列车编组、车辆总体及各个子系统部件在设计、制造、运营维护等不同阶段的大数据。

(3)融合传统历史经验数据和实时监测数据,根据人工智能等新技术建设数字平台的专家数据库,为铁路真正实现智能化和数字化打下坚实基础。

(4)实现未来铁路的智能感知、智能传输、智能决策和智能应用,并在此基础上加强铁路数字孪生技术的实际应用研究,实现虚拟和现实世界的数据交互,解决数字孪生技术应用的数据特征和数据提取的瓶颈。

在众多文献研究基础上,本文也提出一种智能铁路数字一体化平台的建设框架,如图 13 所示<sup>[48-69]</sup>。

#### 3.2 大数据与云平台等新技术的融合

Zhu 等<sup>[50]</sup>讨论了大数据技术在智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)中的应用,详细总结了在 ITS 中进行大数据分析的方法,包括数据源和收集方法、数据分析方法和平台以及大数据分析应用类别。未来智能铁路系统是中国 ITS 的重要组成部分。人们需要重点考虑利用 CPS、物联网等技术形成智能铁路系统的科学评价





图13 智能铁路的数字一体化平台框架

Fig. 13 Digital integrated platform framework of intelligent railways

指标体系,实现安全指标的量化评估。当然,利用基础设施、车辆和运维的智能化、数字化和信息化建设,实现列车状态的实时在线监控、智能决策和远程数据协同管理依然面临着巨大的技术挑战。

其中的主要挑战之一就是智能铁路系统需要智能处理多源大数据。智能卡、GPS、传感器、视频、雷达、射频等检测器及社交媒体等数据量正在从万亿B级发展到PB级。如此大量的数据,传统的数据处理系统和技术方法效率低,已经不能够满足有效的数据分析要求。大数据正在影响轨道车辆智能且有极大帮助的海量知识数据库。简而言之,大数据技术的应用需要面对铁路基础设施和车辆运维带来的技术瓶颈,主要包括如下。

(1)根据多源异构数据源创建实时在线的数据库,开发高效的大数据处理算法,以应对核心数据的特征选取、数据挖掘、数据压缩和数据分析等问题。

(2)考虑创建专家系统,将异构数据源精确集成到基于云平台的高性能应用系统的问题。

(3)对监控系统开放式接口网关实现大数据通信时,研究不同子系统在不同时间节点和位置的信息同步、异构通信支持(包括移动性和聚合性)以及实时信息传输的优先级协议等问题。

(4)保证不同层次的系统之间在应用数字孪生、增强现实等技术时,实现安全、准确和高效的大数据传输与信息通信的相关问题。

为了保证评估结果的合理和有效,列车与线路运维的海量数据特征模型的建立、分析和计算的准确性极大依赖于云平台技术解决方案。云平台技术解决方案在铁路领域中的作用在继续扩大。比如解决基础设施及车辆状态的数据信息及时决策管理问题时和考虑与其他信息源(如地质灾害、电力能源、恶劣天气等环境数据)的集成与分析时均需要依赖云计算技术。列车通过实时在线故障诊断与监测系统,对智能传感器获得的海量数据进行数据采集、挖掘、处理和数据库交互,实现智能管理和智能决策等。

大数据分析能帮助智能铁路更快、更准确地发现运维过程中出现的各种问题,且能够最大程度地降低成本,但在使用大数据驱动技术进行铁路资产维护决策的典型框架系统的构建过程中,要考虑智能铁路云平台分布式架构和智能决策框架体系的创新,主要挑战如下。

(1)对铁路基础设施和车辆系统安全状态模型的深度学习与跨系统模型的融合,实现离线、在线相结合的车辆系统安全隐患数据挖掘技术。

(2)基于模型、信号和知识等车辆故障诊断模型的深度结合,实现不同系统、不同层次、不同环节的风险预测与事故致因推理方法等。

(3)利用云平台逐步形成铁路及列车大数据一体化数字平台下的智能运维评估决策系统,满足未

来铁路大系统更丰富的状态感知、故障诊断、评估预警和维修决策的先进性、科学性、高效性和安全可靠要求。

### 3.3 智能铁路数字化建设展望

IIoT 技术是工业 4.0 的重要基础之一,为智能铁路各子系统不同环节的数据传输、数据共享与信息安全提供极大的技术保障,有不可替代的重要作用。

(1)智能铁路一体化数字平台的难点在于如何真正解决铁路与六维模型的大数据与云平台建设。通过物联网和云平台等技术进行大数据驱动,实现基础设施、车辆等各子系统大数据传输、共享和通信安全等技术应用。

(2)基础设施、智慧列车和运维及相关技术的智能化与智能制造技术深度集成的问题,其核心还是要将 CPS 和 IoT 融入智能产品设计、智能生产、运营维护等环节的大数据信息集成到智能工厂,真正实现智能管理。

(3)智能铁路的主要挑战在于如何将智能管理层、应用技术层、数据传输层、状态感知层等与信息管理和标准系统的集成化问题,以支持智能铁路一体化大数据系统。

## 4 结 语

本文详细分析了工业 4.0 的技术内涵、框架系统和六维模型的含义,而且重点讨论了铁路智能制造业的现状以及存在的一些关键问题。通过分析工业 4.0 概念下智能铁路技术的具体实施过程,提出了中国智能铁路建设的一些具体设想。

(1)目前中国铁路制造业距离真正的智能制造还有较大差距。多数企业依然还是处于工业 2.0 到工业 3.0 的阶段,即从电气化到自动化的发展阶段。部分车辆制造企业虽然开始进行数字化和信息化建设,但依然缺少一些智能制造关键软硬件系统技术的支撑,这也说明中国的铁路制造企业需要加快建设步伐,迅速将近年来先进的智能制造技术在不同的系统级别加快自主研制和基础研究创新,从上到下,从局部到全面,逐步实现智能铁路全方位的工业生态系统建设。

(2)中国铁路为了更好适应智能制造技术在铁路领域的发展要求,应与人工智能、云平台计算等技术融合,加快数字平台与数字孪生、大数据技术体系完善。铁路制造业应该积极采用新兴技术改善工业生态系统,实现具有远程、智能、离线的智能管理模式。同时,以 CPS 和 IIoT 等技术为基础,通过数字

平台的建设实现多源环境的大数据驱动,保证数据通信传输的准确性、高效性和信息安全。

(3)智能铁路的建设应该能够根据不同的系统级别和层次,实现智能管理层、应用技术层、数据传输层和状态感知层的大数据融合,结合专家数据库的标准管理和数据传输安全系统,建设一个科学合理的智能铁路发展框架大系统,加快智能制造涉及的六维模型涵盖技术的升级和相关人才的培养。

(4)近年来国内外关于智能制造六维模型的研究成果正在呈现积极发展的态势,对精细化物理模型和虚拟模型的数字孪生技术的逐渐重视,也提高了铁路智能维修和管理的效率,但也可以发现铁路智能制造领域依然存在许多不足,比如多源数据不同标准之间的融合和数据共享应用方面存在着极大的局限性。

(5)通过跨学科、跨领域的大数据技术的集成,加快铁路传统制造与智能制造新技术的融合,才能不断提高铁路制造业数字化建设的质量。为了发挥工业 4.0 带来的技术影响力,铁路制造业应该不断强化 CPS 和 IoT 技术的基础建设,加快各个子系统的数字平台建设,通过自主研制具有知识产权的智能制造装备,解决中国智能铁路不同子系统之间物理对象和数字模型之间数字通信技术的瓶颈问题,利用大数据的准确分析和预测功能,更好地提升企业的智能制造水平。

### 参 考 文 献 :

### References :

- [1] GAO Liang, SHEN Wei-ming, LI Xin-yu. New trends in intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2019, 5(4): 619-620.
- [2] QU Y J, MING X G, LIU Z W, et al. Smart manufacturing systems: state of the art and future trends[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9/10/11/12): 3751-3768.
- [3] 李培根. 浅说智能制造[J]. 科技导报, 2019, 37(08): 1. LI Pei-gen. Talking about intelligent manufacturing [J]. Science and Technology Review, 2019, 37(8): 1. (in Chinese).
- [4] ROBLEK V, MESKO M, KRAPEZ A. A complex view of Industry 4.0[J]. SAGE Open, 2016, 6(2): 2158244016653987.
- [5] ZHONG R Y, XU Xun, KLOTZ E, et al. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review[J]. Engineering, 2017, 3(5): 616-630.
- [6] QI Qing-lin, TAO Fei. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison [J]. IEEE Access, 2018, 6: 3585-3593.
- [7] XU Li-da, XUE L, Li Ling. Industry 4.0: state of the art

- and future trends[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(8): 2941-2962.
- [8] ROJKO A. Industry 4.0 concept: background and overview[J]. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2017, 11(5): 77-90.
- [9] DELGADO TELLO E G. Industry 4.0 application of advanced services in logistics[R]. Barcelona: Polytechnic University of Catalonia, 2018.
- [10] SCHUMACHER A, EROL S, SIHN W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises[J]. Procedia Cirp, 2016, 52(1): 161-166.
- [11] FARSI M A, ZIO E. Industry 4.0: some challenges and opportunities for reliability engineering[J]. International Journal of Reliability Risk Safety: Theory and Application, 2019, 2(1): 23-34.
- [12] TAKAKUWA S, VEZA I, CELAR S. "Industry 4.0" in Europe and East Asia[C]//KATALINIC B. Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium. Vienna: DAAAM International, 2018: 61-69.
- [13] HOZDIC E. Smart factory for Industry 4.0: a review[J]. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 2015, 7(1): 28-35.
- [14] PRAUSE M. Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs: the case of Japan[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5807.
- [15] 德勤洞察. 数字孪生: 连接现实与数字世界[J]. 软件和集成电路, 2020, 5: 78-85.  
DELOITTE Insight. Digital twin: linking reality and the digital world[J]. Software and Integrated Circuit, 2020, 5: 78-85. (in Chinese)
- [16] THOBEN K D, WIESNER S, WUEST T. "Industrie 4.0" and smart manufacturing—a review of research issues and application examples[J]. International Journal of Automation Technology, 2017, 11(1): 4-16.
- [17] WAGIRE A A, JOSHI R, RATHORE A P S, et al. Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice[J]. Production Planning and Control, 2020: 1-20.
- [18] 《铁道技术监督》编辑部. 新时代交通强国铁路先行规划纲要[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(9): 1-6, 24.  
Editorial Office of *Railway Quality Control*. Outline of powerful nation railway advance planning in the new era[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(9): 1-6, 24. (in Chinese)
- [19] 胡鞍钢. 中国进入后工业化时代[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2017, 16(1): 1-16.  
HU An-gang. China entering post-industrial era[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2017, 16(1): 1-16. (in Chinese)
- [20] 苗圩. 中国制造2025与德国工业4.0异曲同工[J]. 装备制造, 2015(6): 22.  
MIAO Wei. Made in China 2025 is similar to German Industry 4.0[J]. Equipment Manufacturing, 2015(6): 22. (in Chinese).
- [21] PICCAROZZI M, AQUILANI B, GATTI C. Industry 4.0 in management studies: a systematic literature review[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3821.
- [22] JOSEY J. Intelligent infrastructure for next-generation rail system[J]. Cognizant 2020 insights, 2013: 1-8.
- [23] FRAGA-LAMAS P, FERNANDEZ-CARAMES T M, CASTEDO L. Towards the internet of smart trains: a review on industrial IoT connected railways[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1457.
- [24] 王同军. 智能铁路总体架构与发展展望[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(7): 1-8.  
WANG Tong-jun. Overall framework and development prospect of intelligent railway[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7): 1-8. (in Chinese)
- [25] LIN Shao-fu, JIA Ya-fang, XIA Si-bin. Research and analysis on the top design of smart railway[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1187(5): 052053.
- [26] GRGUREVIC I, ROZIC T. Next generation transport industry innovations[R]. Opatija: Transport and Traffic Sciences University of Zagreb, 2019.
- [27] BIN Sheng, SUN Geng-xin. Optimal energy resources allocation method of wireless sensor networks for intelligent railway systems[J]. Sensors, 2020, 20(2): 482.
- [28] ALAWAD H, KAEWUNRUEN S. Wireless sensor networks: toward smarter railway stations[J]. Infrastructures, 2018, 3(3): 24.
- [29] 张卫华, 缪炳荣, 王婷婷, 等. 下一代高速列车发展战略研究[R]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
ZHANG Wei-hua, MIAO Bing-rong, WANG Ting-ting, et al. Research on development strategy of next generation high speed train[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [30] 张锦, 徐君翔, 郭静妮, 等. 智能川藏铁路系统总体架构设计与研究[J]. 综合运输, 2020, 42(1): 100-107.  
ZHANG Jin, XU Jun-xiang, GUO Jing-ni, et al. Design and research on overall architecture of intelligent Sichuan-Tibet Railway System[J]. China Transportation Review, 2020, 42(1): 100-107. (in Chinese)
- [31] LU Chun-fang, CAI Chao-xun. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet Railway Project[J]. Engineering, 2019, 5(5): 833-838.
- [32] 王峰. 我国高速铁路智能建造技术发展实践与展望[J]. 中国铁路, 2019(4): 1-8.  
WANG Feng. Development of China's intelligent HSR building technology and its future[J]. China Railway, 2019(4): 1-8. (in Chinese)
- [33] 康学东. 我国铁路智能建设与运营管理初探[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 84-89.  
KANG Xue-dong. Preliminary exploration on the intelligent construction and operation of china's high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 84-89.

- (in Chinese).
- [34] 史天运. 中国高速铁路信息化现状及智能化发展[J]. 科技导报, 2019, 37(6): 53-59.
- SHI Tian-yun. Present situation of wide applications of information and intelligence in the field of high-speed railway in China[J]. Science and Technology Review, 2019, 37(6): 53-59. (in Chinese)
- [35] 王可飞, 郝蕊, 卢文龙, 等. 智能建造技术在铁路工程建设中的研究与应用[J]. 中国铁路, 2019(11): 45-50.
- WANG Ke-fei, HAO Rui, LU Wen-long, et al. Intelligent construction technology and its application in railway engineering construction[J]. China Railway, 2019(11): 45-50. (in Chinese)
- [36] 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.
- ZHU Qing, ZHU Jun, HUANG Hua-ping, et al. Real 3D spatial information platform and digital twin Sichuan-Tibet Railway[J]. High speed Railway Technology, 2020, 11(2): 46-53.
- [37] 王洪雨. 智能京张高速铁路总体创新设计[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 7-11.
- WANG Hong-yu. The overall innovative design of the intelligent high-speed railway from Beijing to Zhangjiakou[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 7-11. (in Chinese)
- [38] STAJANO F, HOULT N, WASSELL I, et al. Smart bridges, smart tunnels: transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(8): 872-888.
- [39] HALLDORSDDOTTIR K, NIELSEN O A, PRATO C G. Home-end and activity-end preferences for access to and egress from train stations in the Copenhagen Region[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2017, 11(10): 776-786.
- [40] 缪炳荣, 张卫华, 邓永权, 等. 新一代中国高速铁路动车组面临的技术挑战与策略研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 98-112.
- MIAO Bing-rong, ZHANG Wei-hua, DENG Yong-quan, et al. Technology challenges and strategies of the new generation Chinese high-speed railway EMU[J]. Engineering Science, 2015, 17(4): 98-112. (in Chinese).
- [41] 张卫华, 缪炳荣. 下一代高速列车关键技术的发展趋势与展望[J]. 机车电传动, 2018(1): 1-5, 12.
- ZHANG Wei-hua, MIAO Bing-rong. Development trend and prospect of key technologies for next generation high speed trains[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(1): 1-5, 12. (in Chinese)
- [42] 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(3): 58-70.
- MIAO Bing-rong, ZHANG Wei-hua, CHI Mao-ru, et al. Analysis and prospects key technical features of next generation high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 58-70. (in Chinese)
- [43] 梁建英. 开启智能化轨道交通装备新时代[J]. 科学, 2020, 73(2): 17-22.
- LIANG Jian-ying. Start a new era of intelligent rail transit equipment[J]. Science, 2020, 73(2): 17-22. (in Chinese)
- [44] ZHAO Hong-wei, LIANG Jian-ying, LIU Chang-qing. High-speed EMUs: characteristics of technological development and trend[J]. Engineering, 2020, 6(3): 234-244.
- [45] HODGE V J, O'KEEFE S, WEEKS M, et al. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1088-1106.
- [46] TAKIKAWA M. Innovation in railway maintenance utilizing information and communication technology (smart maintenance initiative)[J]. Japan Railway and Transport Review, 2016(67): 22-35.
- [47] 梁建英. 高速列车智能诊断与故障预测技术研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 63-70.
- LIANG Jian-ying. Research on intelligent diagnosis and fault prediction technology for high speed trains[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 63-70. (in Chinese)
- [48] GHOFrani F, HE Q, GOVERDE R M P, et al. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: a survey[J]. Transportation Research Part C—Emerging Technologies, 2018, 90: 226-246.
- [49] GALAR D, KARIM R, KUMAR U. Big data in railway operations and maintenance[EB/OL]. (2020-07-07) [2020-09-07]. <https://www.globalrailwayreview.com/article/61515/big-data-railway-operations-maintenance-2/>.
- [50] ZHU Li, YU F R, WANG Yi-ge, et al. Big data analytics in intelligent transportation systems: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(1): 383-398.
- [51] HSU H H, CHANG Chuan-yu, HSU C H. Big Data Analytics for Sensor-network Collected Intelligence[M]. London: Academic Press, 2017.
- [52] GUYON I, AMINE R, TAMAYO S, et al. Analysis of the opportunities of industry 4.0 in the aeronautical sector[C]// IMCIC. 10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics. Orlando: IMCIC 2019: 02063948.
- [53] JANUSOVA L, CICMANCOVA S. Improving safety of transportation by using intelligent transport systems[J]. Procedia Engineering, 2016, 134: 14-22.
- [54] FUMEO E, ONETO L, ANGUITA D. Condition based maintenance in railway transportation systems based on big data streaming analysis[J]. Procedia Computer Science, 2015, 53: 437-446.
- [55] AZPIAZU J, SILTANEN S, MULTANEN P, et al. Remote support for maintenance tasks by the use of augmented Reality: the ManuVAR project[C]// VTT. CARVI 2011: IX Congress on Virtual Reality Applications. Alava: VTT, 2011: 1-6.
- [56] HALL N, LOWE C, HIRSCH R. Human factors considerations



- for the application of augmented reality in an operational railway environment[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 799-806.
- [57] POTTER K. Augmented reality becoming a focus in maintenance technology[EB/OL]. (2020-08-08)[2020-09-07]. <https://www.geospatialworld.net/blogs/augmented-reality-becoming-a-focus-in-maintenance-technology/>.
- [58] DIDIER J Y, ROUSSEL D, MALLEM M, et al. AMRA: augmented reality assistance for train maintenance tasks[C]// ISMAR. 4th ACM/IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Vienna: ISMAR, 2005: 00339457
- [59] MARR B. 5 important augmented and virtual reality trends for 2019 everyone should read[DB/OL]. (2020-08-08)[2020-09-07]. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/01/14/5-important-augmented-and-virtual-reality-trends-for-2019-everyone-should-read/#682a027222e7>.
- [60] GHOBAKHLOO M. Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(8): 2384-2405.
- [61] NIKOLAKIS N, ALEXOPOULOS K, XANTHAKIS E, et al. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(1): 1-12.
- [62] NICHOLSON G. Digital twins and the railway: one framework many implementations[EB/OL]. (2020-08-11)[2020-09-07]. <https://www.rssb.co.uk/Insights-and-News/Blogs/Digital-twin-and-the-railway-one-framework-many-implementations>.
- [63] MIKELL M. Immersive analytics: the reality of IoT and digital twin[EB/OL]. (2020-08-11)[2020-09-07]. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/immersive-analytics-digital-twin/>.
- [64] THADURI A, GALAR D, KUMAR U. Railway assets: a potential domain for big data analytics[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 53: 457-467.
- [65] ZHANG Da-lin. High-speed train control system big data analysis based on the fuzzy RDF model and uncertain reasoning[J]. *International Journal of Computers Communications and Control*, 2017, 12(4): 577-591.
- [66] JAMSHIDI A, HAJIZADEH S, SU Z, et al. A decision support approach for condition-based maintenance of rails based on big data analysis[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 185-206.
- [67] FINK O, WANG Q, SVENSÉN M, et al. Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 92: 103678.
- [68] JAMSHIDI A, FAGHIH-ROOHI S, HAJIZADEH S, et al. A big data analysis approach for rail failure risk assessment[J]. *Risk Analysis*, 2017, 37(8): 1495-1507.
- [69] NUNEZ A, HENDRIKS J, LI Z, et al. Facilitating maintenance decisions on the Dutch railways using big data: the ABA case study[C]// IEEE. 2014 IEEE International Conference on Big Data. New York: IEEE, 2014: 48-53.