

文章编号:1671-251X(2020)05-0015-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020040042

面向智能矿山与新工科的数字孪生技术研究

张帆^{1,2}, 李闯¹, 李昊¹, 刘毅¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;
2. 中国矿业大学(北京)智慧矿山与机器人研究院, 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:将数字孪生与人工智能(AI)技术相结合,提出了基于数字孪生+AI的智能矿山建设新思路。探索了智能矿山技术发展路径,研究了数字孪生技术的特征、应用领域及发展趋势,指出数字孪生是数字化矿山发展的必然趋势。提出了基于数字孪生+AI的智能矿山理论架构,构建了矿山数字孪生模型,模型自下而上分别为矿山全要素物理实体、矿山信息物理融合层、矿山数字孪生模型、矿山孪生数据交互层、矿山应用智能服务层,据此实现智能矿山的泛在感知、协同控制和智能决策与优化。从应用实际需求出发,探讨了智能矿山模型构建技术、智能开采数字孪生体技术、矿山智能控制技术、矿山设备故障预测、基于数字孪生的人机交互等关键技术。通过研究数字孪生在智能矿山中的应用,为 AI 技术在智能矿山应用落地提供思路,为未来智能矿山新工科建设提供理论借鉴。

关键词:智能矿山; 数字孪生; 人工智能; 矿山数字孪生模型; 智能开采数字孪生体
中图分类号:TD67 文献标志码:A

Research on digital twin technology for smart mine and new engineering discipline

ZHANG Fan^{1,2}, LI Chuang¹, LI Hao¹, LIU Yi¹

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Intelligent Mining and Robotics, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract:Combining digital twin with artificial intelligence (AI) technology, a new idea for smart mine construction based on digital twin + AI was proposed. Development path of smart mine technology was explored, and characteristics, application fields and development trends of digital twin technology were studied, and it was pointed out that digital twin is an inevitable trend of digital mine development. The theoretical framework of smart mine based on digital twin + AI was proposed, and mine digital twin model was constructed which includes mine full element physical entity, mine information physics fusion layer, mine digital twin model, mine twin data interaction layer, mine application intelligent service layer from bottom to top. Ubiquitous perception, collaborative control and intelligent decision-making and optimization of the intelligent mine can be realized based on the model. Starting from actual application requirements, key technologies such as smart mine model construction technology, smart mining digital twin technology, mine intelligent control technology, mine equipment fault prediction, and human-computer interaction based on digital twin were discussed. By studying the application of digital twin in smart mine, it provides ideas for the application of AI technology in smart mine and theoretical reference for the construction of new engineering discipline in smart mine in the future.

收稿日期:2020-04-13;**修回日期:**2020-05-06;**责任编辑:**胡娴。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800);中国矿业大学(北京)教改项目(J190516)。
作者简介:张帆(1972—),男,甘肃会宁人,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为智慧矿山、数字孪生与智能监控,E-mail:zf@cumtb.edu.cn。
引用格式:张帆,李闯,李昊,等. 面向智能矿山与新工科的数字孪生技术研究[J]. 工矿自动化,2020,46(5):15-20.
ZHANG Fan, LI Chuang, LI Hao, et al. Research on digital twin technology for smart mine and new engineering discipline[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 15-20.

Key words: smart mine; digital twin; artificial intelligence; mine digital twin model; intelligent mining digital twin

0 引言

国际矿业形势正在经历一场深刻的革命,建立绿色、安全、高效的现代化智能矿山开发与利用体系是未来发展方向。2020 年 3 月,国家八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,加快了智能化煤矿技术演进步伐。因此,矿业新工科建设要主动应对新一轮科技革命与产业变革的战略行动,加强现代化智能矿山理论基础研究,着力解决智能矿山领域具有战略性、前沿性的关键技术难题。

在矿山可视化领域,虚拟现实(Virtual Reality, VR)/增强现实(Augmented Reality, AR)技术研究取得了一些阶段性成果^[1-2],但其三维重构效果和数据驱动能力仍然较弱,尚未形成质的飞跃,无法对复杂条件下矿山综采工作面进行数据镜像、智能控制、实时反馈和交互映射,实现装备智能协同与实时监控。因此,在智能矿山领域的研究中需要探索新技术、新方法,注重学科交叉融合,以适应未来矿业开采技术革命,促进煤矿智能化技术发展。

随着煤炭智能开采与 VR 技术进入深度融合阶段,无人化精准开采、透明开采和流态化开采^[3],以及全方位、全时空、智能化监控研究已逐渐迈向前台^[4-5]。数字孪生作为新一代信息技术和国家新基建重点发展方向,直接面向人工智能(Artificial Intelligence, AI)国家战略中解决先进制造、能源工业等任务需求,是当今计算机仿真和图像处理领域中一个非常活跃的研究方向,在智能制造、能源开发和利用领域得到了广泛关注。德国西门子公司基于数字孪生思想构建了生产过程流程的系统模型,通过模拟仿真分析生产过程的所有环节,实现了产品设计、制造过程的虚拟化和数字化^[6]。美国通用公司基于数字孪生体,采用工业物联网和大数据等技术实现发动机实时监控、故障诊断和性能预测^[7-8]。葛世荣等^[9]基于数据主线提出了数字孪生智能采煤工作面技术系统及其构建。陶飞等^[10-11]提出了数字孪生车间的实现模式,为智能制造领域信息物理系统的实现提供了理论参考。庄存波等^[12]基于数字孪生思想,提出多系统耦合优化控制思想及优化方法。张帆等^[13-14]针对数字开采在智能化无人开采中的应用需求,提出了基于数字孪生的综采工作面智能孪生数字体衍生及模型演化机理。可以预见,在新一轮信息技术革新中,矿山开采与数字孪生、AI、工业互联网、5G、云计算和大数据等技术创

新融合,将为煤矿智能化发展提供关键技术支撑,真正实现煤炭安全、绿色、高效和智能化开采^[15-16],同时也将为探索可持续发展的智能矿山建设和新工科专业方向提供新的思路。

1 数字孪生技术

1.1 概述

2003 年,美国密歇根大学 Michael Grieves 教授提出了物理实体一致性虚拟数字化映射的概念^[6],被认为是数字孪生的雏形。数字孪生体作为一个集成多物理、多尺度的概率仿真模型,基于当前物理模型、实时数据和历史数据等来表征物理实体的状态^[7]。该概念在制造领域的使用最早可追溯到美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的阿波罗研究项目^[11-12]。数字孪生技术的主要特征:① 虚拟数字化,建立一个与物理实体的结构和性质相同的虚拟数字孪生体。② 虚实交互,建立信息空间和物理空间的关联,实现数据和信息交互。③ 虚实融合,直观地反映虚实融合和以虚控实的特征。从实现功能角度看,数字孪生是数字孪生体建模的技术、过程和方法,而数字孪生体则是实现数字孪生的对象、模型和数据。数字孪生通过数字化手段来构建一个数字孪生体,通过对物理系统的精准描述与虚实联动,实现对物理实体的仿真、分析与优化。

1.2 应用领域

近年来,数字孪生成为智能制造和智能控制领域的研究热点,在理论研究和实际应用方面快速发展,其主要原因如下:

(1) 计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacture, CAM)等技术和基于物理建模的数字化表达技术得到广泛应用,使得在产品全生命周期各阶段采用数字化方式精确描述物理产品成为可能,在虚拟空间为数字孪生产品仿真设计及应用提供了关键技术支撑。

(2) 云计算、边缘计算和高性能计算等先进计算技术的快速发展,以及机器学习、深度学习等 AI 算法不断涌现,使动态数据实时采集、存储和预测成为可能,为虚拟空间和物理空间的实时关联与互动提供了重要技术支撑。

《工业互联网体系架构 2.0》白皮书的发布,体

现了数字孪生等新型信息技术对传统行业的创新引领与变革作用^[17]。在工业互联网的功能实现中,数字孪生已经成为关键支撑,通过数据采集、集成、分析和优化来满足业务需求,形成物理世界生产对象与数字空间业务应用的虚实映射,最终支撑各类智能化应用服务。目前,数字孪生技术已广泛应用于智能制造与生产系统,在数字孪生车间、产品数字孪生体和数字孪生健康预测等领域取得了一系列研究成果^[18-19]。随着工业互联网、大数据、5G 和 AI 等新型技术的兴起与广泛应用,数字孪生技术在未来能源工业和矿山开发与利用、矿山智能开采、无人化智能监控、设备远程故障诊断与健康预测等方面具有应用潜力。

1.3 发展趋势

(1) 拟实化。数字孪生体是物理实体在虚拟空间的真实反映,通过 VR 的拟合化程度表征所仿真物理实体的数字孪生体逼真程度。基于多物理集成模型的仿真结果能精确地反映和镜像物理场景的真实状态和行为,在虚拟场景通过智能监测和监控实现系统的高仿真功能和性能,从而解决传统 VR 技术在时序和几何尺度等方面的技术瓶颈问题。

(2) 融合化。数字孪生与 AI、工业互联网、5G、云计算、大数据、VR、AR 和混合现实(Mix Reality, MR)等技术融合是未来的发展趋势。数字孪生作为数字孪生体的使能技术,将通过多源数据与神经网络和机器学习等 AI 技术融合,实现数字孪生体模型和关键数据的忠实映射、交互反馈与协同控制。数字孪生与 VR、AR、MR 等融合将是智能矿山建模与 VR 技术未来发展的重要方向。

(3) 智能化。数字孪生作为仿真建模新模式,通过生产对象孪生与特征融合,实现模型的集成和决策支持,并利用机器学习、数据挖掘、边缘计算和 AI 提升模型重构能力。数字孪生通过物理实体的历史数据与当前传感数据的多源融合、训练学习和迭代优化,实现数字体的学习孪生,并利用多源数据融合与 AI 决策,最终实现自主孪生和智能化。

2 数字孪生在智能矿山中的应用

2.1 数字矿山建设方面

数字孪生技术的应用可推进数字化矿山建设、管理数字化与智能化内涵式发展。通过研究煤矿精准探测与数字矿山精确建模技术,构建矿山可视化物理模型、可验证的仿真模型、可表示的逻辑模型、可计算的数据模型,实现物理矿山实体与数字矿山孪生体之间的虚实映射、实时交互。建立基于数字孪生与工业互联网技术融合的数字孪生矿山信息平

台,充分利用 5G 通信网关技术、边缘计算、高带宽和低延时等优势,为矿山数字孪生智能开采工作面提供分布式计算和高速传输^[15-16],为数字化矿山建设提供新思路和新途径。

2.2 智能矿山开采方面

现代矿山开采技术与物联网、云计算、大数据和 AI 等信息技术融合是实现智能矿山的必然发展趋势。未来将形成具有感知分析、交互反馈、智能控制、智能决策等功能的智能系统,实现物理矿山实体与数字矿山孪生体之间的虚实映射、实时交互,以及矿山无人化开采全息感知、全过程智能化运行、拟人化作业与虚拟场景展现。数字孪生技术可为矿山智能开采提供新方法。通过构建矿山开采工作面物理实体的数字孪生模型,精确表征数字孪生模型的时空演化特性与映射重构性能,实现矿山开采工作面生产过程远程智能监测、设备性能实时监控和生产场景三维可视化,提升煤炭安全、绿色、高效和智能化开采水平。

2.3 智能矿山安全监控方面

矿山安全监控由信息化、网络化逐渐向智能化方向转变和发展。建立基于工业互联网平台的数字孪生智能监控系统,通过数字孪生对生产场景实时监控和虚拟映射,利用三维可视化平台获取井下综采工作面实时运行数据和精确信息,解决矿山安全监控系统存在的视频数据分离、可视化效果较差等问题,对瓦斯超限、突水、顶板来压等事故提前预警。通过数字孪生、数据融合、深度学习与迭代优化,实现矿山综采工作面的远程可视化实时监控,为智能监控提供新的技术手段,从而提升智能监控系统的监控精度。

2.4 智能矿山运维方面

数字矿山全息感知、业务协同控制、智慧化运维服务体系是未来智能矿山的必经之路。将数字孪生、物联网、云计算、大数据和 AI 等技术融合应用于智能矿山服务模式,将实现矿山智能开采、智能选矿、智能煤流、智能安监和智能运维。通过矿山物联网和大数据平台,利用数字孪生技术实现矿山物理实体在虚拟场景的对象孪生、过程孪生和性能孪生,实现三维可视化智能运维新模式。利用矿山运维数据的多源融合、深度学习、迭代优化和自主决策,可实现矿山运维服务全生命周期的智能化,以及矿山安全、应急处置、绿色开采的智慧化管控^[9]。

3 矿山数字孪生模型架构

矿山数字孪生模型架构如图 1 所示,自下而上分别为矿山全要素物理实体层、矿山信息物理融合

层、矿山数字孪生模型层、矿山孪生数据交互层、矿山智能应用服务层,据此实现智能矿山的泛在感知、协同控制和智能决策与优化。

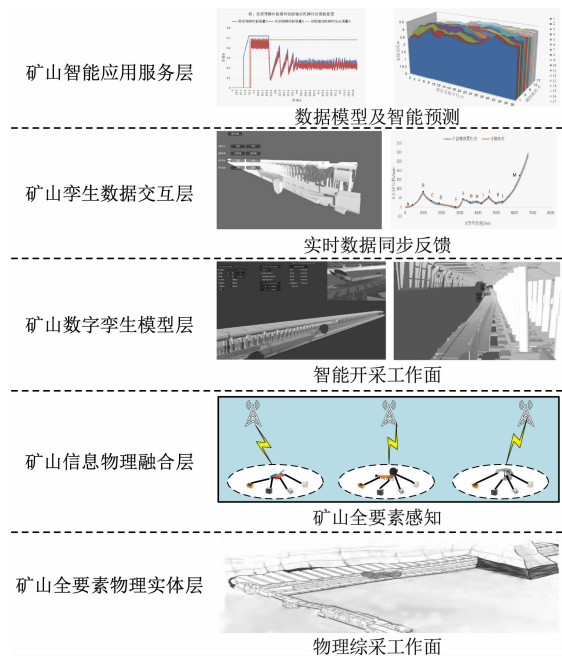


图 1 矿山数字孪生模型架构

Fig.1 Architecture of mine digital twin model

(1) 矿山全要素物理实体层是矿山数字孪生模型体系结构的最基础层,为矿山数字孪生模型中的各层提供系统资源和物理支撑。不论是全要素信息物理系统(Cyber-Physical Systems,CPS)资源的交互融合,还是多维虚拟模型的仿真模拟、逻辑模型的验证和数据模型的计算,均建立在矿山全要素物理实体基础之上。

(2) 矿山信息物理融合层是矿山数字孪生模型的载体,CPS在矿山数字孪生模型体系中起桥梁纽带作用,实现虚拟孪生体与物理实体之间的交互映射和同步反馈。CPS贯穿于智能矿山全生命周期各阶段,为矿山物理要素的智能感知与互联、数字孪生模型构建、孪生数据融合交互与智能服务提供信息基础和数据支撑。

(3) 矿山数字孪生模型层是实现智能矿山规划设计、生产管理、运行维护和故障预测等各种功能最核心的组件,由物理模型、仿真模型、逻辑模型和数据模型相互耦合和演化集成,在矿山数据驱动下实现物理综采工作面的对象孪生、过程孪生和性能孪生^[4,8]。

(4) 矿山孪生数据交互层通过数据驱动实现矿山数字孪生模型信息交互与同步反馈。矿山孪生数据源于物理实体、虚拟模型和虚拟孪生体应用服务,矿山孪生数据交互层将物理实体、数字孪生模型和数字孪生体连接为一个有机的整体,使得信息与数

据在各部分间相互耦合与交互反馈,实现双向通信与服务交互。

(5) 矿山智能应用服务层通过人机接口提取矿山数字孪生模型实时传感数据,经多源异构数据融合后通过 OPC 统一架构(Unified Architecture,UA)、可扩展消息处理现场协议(Extensible Messaging and Presence Protocol,XMPP)、消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)协议等,利用机器学习和深度学习等 AI 算法实现物理综采工作面与虚拟数字孪生工作面的实时交互与同步反馈^[8];通过应用云端协同技术、VR/AR/MR 人机交互技术和工业应用程序开发技术,实现对数字孪生虚拟工作面的操作与智能远程监控^[15-16]。

4 数字孪生智能矿山关键技术

4.1 智能矿山模型构建技术

矿山模型设计是实现智能矿山建设的理论基础和技术“硬核”。采用信息物理融合思想,通过建立数字孪生矿山场景、设备和作业流程等虚拟仿真模型,实现物理空间实际场景与所对应的虚拟空间仿真场景虚实交互、数据同步,真正实现智能矿山模型构建与设计优化。

实现基于数字孪生的智能矿山模型构建需要研究以下内容:① 数字孪生工艺模型构建,研究基于矿山多物理量与几何量融合的物理实体数字孪生模型构建理论与方法、矿山数据高精度实时获取技术、矿山生产过程建模与仿真技术^[18-19]。② 数字孪生模型的高精度表达及优化方法,研究基于矿山大数据挖掘的知识建模、精确描述与图像特征精确提取和优化方法,以及基于神经网络、深度学习的自主优化和决策方法^[20-21]。

4.2 智能开采数字孪生体技术

智能开采数字孪生体是建立在虚拟空间的反映物理实体真实性的数字模型,通过智能综采装备的对象孪生、过程孪生和性能孪生,实现对综采装备数字孪生体的性能评估。通过虚拟综采工作面数字孪生体,综合描述矿山综采工作面的机械、电气和液压等设备和系统,实现矿山综采工作面物理设备全生命周期的映射,从而为综采设备的性能仿真和健康预测提供决策支持。

实现智能开采数字孪生体需要研究以下内容:① 矿山设备部件及系统集成描述,包括矿山机械、电气、液压等技术领域的综采装备、子系统与零部件的耦合仿真、精确描述方法。② 矿山虚实交互的动态数据实时更新与可视化呈现,包括基于矿山综采

装备物理模型、状态参数、运行数据的实时更新与交互迭代。

4.3 矿山智能控制技术

矿山控制系统是智能矿山的大脑。利用先进传感器技术,实时采集设备状态参数及煤岩识别、矿压监测、煤流监测、过程定位等开采过程数据;通过矿山数字孪生控制系统设计、数字孪生控制系统调优、数字孪生控制系统决策,实现矿山控制系统功能的完整性校验和控制算法迭代优化、智能开采装备控制系统的性能评估,以及对物理实体实时状态和历史状态真实反馈与自主学习的自主决策控制。

实现基于数字孪生的矿山智能控制需要研究以下内容:① 矿山数字孪生模型多源异构数据、实时和历史数据,数字孪生模型与控制系统之间的数据驱动交互与状态同步反馈。② 基于物理属性和动力学特性的控制仿真,实现数字孪生模型在控制数据驱动下的行为过程仿真,提高矿山控制系统的自主决策性和准确性。

4.4 矿山设备故障预测

矿山设备故障与健康预测(Mine Equipments Fault and Health Prediction, MEFHP)是利用深度学习实现对矿山设备的质量缺陷、运行故障识别及健康预测,并对矿山设备故障诊断及健康预测进行表征。数字孪生驱动的 MEFHP 是在孪生数据驱动下,基于矿山物理设备与虚拟设备的同步映射、实时交互及精准服务,形成矿山设备健康管理新模式。

实现基于数字孪生的矿山设备故障预测需要研究以下内容:① 基于数字孪生的矿山设备故障特征提取、故障过程建模及扰动因素分析等。② 基于 MEFHP 自学习、自优化机制和虚拟验证的 MEFHP 自主精准服务等。

4.5 基于数字孪生的人机交互

人机交互协同是矿山智能开采中的典型应用场景,通过人机交互可以实现远程控制、实时监控、精确定位与健康预测,提高矿山全息感知、可视化运维水平和智能生产效率。基于数字孪生的人机交互,构建与矿山物理空间忠实映射的虚拟空间数字孪生体,通过基于 AI 的模式识别、手势感知或语义理解等指令,实时更新虚拟场景的操作进程,实现人-机-环-控的智能协调与有机融合。

实现基于数字孪生的人机交互需要研究以下内容:① 基于数字孪生与 AI 的三维图像精确重构和映射、智能孪生数字体的衍生与构建、全息投影技术。② 基于 5G 边缘计算与 VR 技术融合的多维度数据精确表征、高清图像与精准模式识别技术,以及边缘计算和高速通信技术。

5 结论

(1) 从智能矿山应用及新工科建设需求出发,分析了当前智能矿山研究和发展现状,指出了数字孪生是未来智能矿山技术演进的必然趋势。

(2) 提出了基于数字孪生+AI 的智能矿山理论架构,构建了矿山数字孪生模型。

(3) 从应用实际需求出发,探讨了智能矿山模型构建技术、智能开采数字孪生体技术、矿山智能控制技术、矿山设备故障预测、基于数字孪生的人机交互等关键技术,以期为推动智能矿山理论和技术的研究与发展及矿业新工科建设提供参考。

参考文献(References):

[1] 谢嘉成,王学文,杨兆建.基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(6):1381-1391.
XIE Jiacheng, WANG Xuewen, YANG Zhaojian. Design and operation mode of production system of fully mechanized coal mining face based on digital twin theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(6):1381-1391.

[2] 李梅,孙振明,吕平洋,等.煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1):156-161.
LI Mei, SUN Zhenming, LYU Pingyang, et al. Study on key technology of multiplayer virtual reality training platform for fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 156-161.

[3] 谢和平,鞠杨,高明忠,等.煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210-1219.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(5):1210-1219.

[4] 葛世荣,张帆,管增伦.面向综采工作面的数字孪生智能监控系统:201911388529.4[P]. 2020-02-26.
GE Shirong, ZHANG Fan, GUAN Zenglun. Digital twin intelligent monitoring system for fully mechanized mining face: 201911388529. 4 [P]. 2020-02-26.

[5] 张帆,闫秀秀,李亚杰.基于稀疏度自适应的矿井智能监控图像重构方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1346-1354.
ZHANG Fan, YAN Xiuxiu, LI Yajie. A novel image reconstruction method of mine intelligent surveillance based on adaptive sparse representation[J]. Journal of

- China Coal Society, 2017, 42(5):1346-1354.
- [6] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises [J]. International Journal Product Development, 2005, 2(1/2):71-84.
- [7] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management [M]. Florida: Space Coast Press, 2011.
- [8] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [9] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智能采煤工作面技术架构研究[J/OL]. 煤炭学报: 1-15 [2020-05-03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0327>.
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-15 [2020-05-03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0327>.
- [10] 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, 94(9-12): 3563-3576.
- [11] 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.
- [12] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [13] 张帆, 徐志超. 基于残差神经网络的矿井图像重构方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3614-3624.
ZHANG Fan, XU Zhichao. A mine image reconstruction method based on residual neural network[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3614-3624.
- [14] 张帆. 面向智能矿山场景的数字孪生模型演化机理及方法: 201911388541. 5[P]. 2020-01-22.
ZHANG Fan. The evolution mechanism and method of the digital twin model for smart mine scene: 201911388541. 5[P]. 2020-01-22.
- [15] 孙继平, 陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 1-4.
- [16] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [17] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构(版本 2.0) [EB/OL]. [2020-04-23]. <http://www.aii-alliance.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=23&id=1489>.
Industrial Internet Industry Alliance. Industrial Internet system architecture (Version 2.0) [EB/OL]. [2020-04-23]. <http://www.aii-alliance.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=23&id=1489>.
- [18] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.
LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.
- [19] QIU Shiguang, FAN Xiumin, WU Dianliang, et al. Virtual human modeling for interactive assembly and disassembly operation in virtual reality environment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9-12): 2355-2372.
- [20] 鲍劲松, 李志强, 项前, 等. 半实物虚拟装配的建模、演化与应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 61-69.
BAO Jinsong, LI Zhiqiang, XIANG Qian, et al. The modeling, evolutionary and application of quasi-physical virtual assembly [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 61-69.
- [21] 窦亚冬, 王青, 李江雄, 等. 飞机数字化装配系统数据集成技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(5): 858-865.
DOU Yadong, WANG Qing, LI Jiangxiong, et al. Data integration for aircraft digital assembly system [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(5): 858-865.