

矿山数字孪生 MiDT:模型架构、关键技术及研究展望

鲍久圣¹,张可琨¹,王茂森¹,阴妍¹,杨磊²,葛世荣³

(1.中国矿业大学机电工程学院,江苏徐州 221116;2.中国矿业大学徐海学院计算机系,江苏徐州 221008;3.中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院,北京 100083)

摘要:矿山数字孪生(Mine Digital Twin, MiDT)是智慧矿山建设的重要组成部分,是一个集成模型构建、智能控制、故障预测、人机交互等先进技术于一体的安全、高效、便捷的智慧系统,是推动矿山数字化和智能化转型发展的重要技术引擎。在矿山数字化与智能化建设的背景下,阐述了矿山数字孪生的基本内涵,对我国矿山数字孪生技术研究现状进行了总结与分析,并对其未来发展趋势进行了展望。首先,介绍了数字孪生的基本概念、级别划分、典型应用及最新发展,分析了矿山数字孪生存在的应用难点,表明了矿山数字孪生开发的必要性;其次,调研了数字孪生在矿山建设、开采、监控以及运维等方面的应用及发展现状,剖析了新一代信息技术与矿山数字孪生推进过程的深度融合;再次,阐述了矿山数字孪生模型的系统架构,分析了端层、边层、网层与云层等子系统的组成及功能,基于数字孪生五维模型的主要组成部分与运行机理构建了矿山数字孪生四边形系统模型;接着,阐述了矿山数字孪生模型系统架构与矿山数字孪生关键技术的内在关系,分析总结了矿山数字孪生在模型构建、智能控制、设备故障预测和人机交互等方面亟需突破的关键技术及研究内容;最后,从实际应用、模型系统架构、关键技术等方面归纳提出了矿山数字孪生技术未来的研究重点和发展方向。

关键词:数字孪生;智慧矿山;模型架构;信息技术;运行机理

中图分类号:TD67 文献标志码:A 文章编号:2097-3357(2023)01-0166-12

Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects

BAO Jiusheng¹, ZHANG Kekun¹, WANG Maosen¹, YIN Yan¹, YANG Lei², GE Shirong³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Department of Computer Science, Xuhai College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Mine Digital Twin (MiDT) is an important part of intelligent mine construction. It is a safe, efficient and convenient intelligent system integrating advanced technologies such as model construction, intelligent control, fault prediction and human-computer interaction. It is an important technical engine to promote the digital and intelligent transformation of mine. Under the background of mine digital and intelligent construction, the basic connotation of MiDT is expounded, the research status of MiDT technology in China is summarized and analyzed, and its future development trend is prospected. Firstly, the basic concept, level division, typical application and latest development of digital twin are introduced, and the application difficulties of MiDT are analyzed, which shows the necessity of MiDT devel-

收稿日期:2023-11-10 修回日期:2023-11-27 责任编辑:王凡

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2023035);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022XSCX27);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:鲍久圣(1979—),男,安徽桐城人,教授,博士生导师,博士。E-mail:cumtjjs@cumt.edu.cn

通讯作者:张可琨(1997—),男,江苏徐州人,博士研究生。E-mail:zhangkekun20@163.com

引用格式:鲍久圣,张可琨,王茂森,等.矿山数字孪生 MiDT:模型架构、关键技术及研究展望[J].绿色矿山,2023,1(1):166-177.

BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 166-177.



移动阅读

opment. Secondly, the application and development status of digital twin in mine construction, mining, monitoring, operation and maintenance are investigated, and the deep integration of new generation information technology and MiDT promotion process is analyzed. Thirdly, the system architecture of the MiDT model is expounded, the composition and function of the subsystems such as end layer, edge layer, network layer and cloud layer are analyzed, and the quadrilateral system model of MiDT is constructed. Based on the main components and operation mechanism of the five-dimension digital twin model, the quadrilateral model of MiDT is constructed. Then, the internal relationship between the system architecture of MiDT model and the key technologies of MiDT is expounded, and the key technologies and research contents of MiDT in model construction, intelligent control, equipment fault prediction and human-computer interaction are analyzed and summarized. Finally, the research priority and development directions of MiDT technology in the future are summarized from the aspects of practical application, model system architecture and key technologies.

Key words: digital twin; intelligent mine; model architecture; information technology; operation mechanism

随着全球性能源的不断消耗,可持续发展的需求愈加迫切。在新一轮能源革命的到来之际,友好型生态环境对工业社会衍生出了新的约束性诉求,这将直接影响矿山行业的发展,绿色矿山势在必行。在人工智能的赋能下,新一代数字技术使得开采效率的可提升与开发过程的可环保并行发展,有效促进了数字矿山与绿色矿山的逐渐演化与成熟。

近年来,我国矿山领域兴起了数字化和智能化发展高潮。2016年11月,国土资源部发布《全国矿产资源规划(2016—2020年)》,聚焦矿业科技创新,加快矿山数字化建设^[1];2020年2月,国家8部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,文件指出将以数字化为方向,探索建立煤矿信息数据分析与共享交换平台,同步推进煤矿智能化发展^[2];2023年9月,国家矿山安监局研究出台《加快推进矿山数字化智能化高质量发展的指导意见》,着力解决发展不平衡、不充分等问题^[3],积极引导加快矿山智能化建设。时至今日,传统数字矿山的内涵已不足以接洽新一代数字信息技术的应用趋势,矿山领域亟需引入数据可视化^[4]与人机交互化^[5]的融合数字模型。面向矿山数字化和智能化转型发展的迫切需求^[6],矿山数字孪生应运而生。

矿山数字孪生是矿山数字化和智能化建设中的重要一环,它将交互匹配现实矿山涵盖的环境要素,完善固有性矿山监测体系,助力矿山无人驾驶技术普及应用,从而促进智慧矿山^[7]、数字矿山^[8]以及绿色矿山^[9]的高质量发展。目前,矿山数字孪生技术已取得了重要研究进展,但总体上仍有长足的提升空间。笔者调研了数字孪生在矿山领域的赋能及应用,阐述了矿山数字孪生模型的系统架构,分析了矿山数字孪生关键技术及其研究现状,在此基础上提出了矿山数字孪生技术的发展趋势。

1 数字孪生概述

数字孪生以数字化方式模拟并刻画物理实体在现实环境中的属性与规则,能够帮助解决信息物理融合等诸多难题。通过不断迭代优化,其内涵、级别与应用得到了不断的发展。

1.1 数字孪生基本概念

数字世界来源于实体世界而又服务于实体世界,实体世界则与数字世界交互作用而使自身完善发展。数字孪生以物理实体为基础,利用数字化技术对实体世界中的物体、系统以及过程进行建模与仿真,通过获取实时数据、建立数学模型以及融合应用算法等手段,在物理实体和数字孪生体之间建立忠实的映射关系,从而实现物理实体进行全方位的分析、预测与调控^[10],其概念最早在2002年由MICHAEL GRIEVES教授提出^[11]。

数字孪生技术的实现主要包含数字模型、空间关联、实时监测3大要素^[12],其一般性特点在于:①虚实同构,虚拟孪生体与其本源物理实体需在形貌、内容及属性等方面保持一致,并在物理实体空间与虚拟数字空间之间进行同构分析,不断实时动态更新以确保其对物理实体对象映射的准确性;②虚实融合,数字孪生进行物理实体对象的虚拟映射,包括所有相关的可用信息集合^[13],同步反映物理实体的运行情况并实现以虚控实的功能^[14];③虚实交互,虚拟数字空间与物理实体空间协同关联,实现信息数据交互。

1.2 数字孪生级别划分

根据技术特征及实现功能的不同,数字孪生可划分为4个级别,见表1。级别L1~L4分别对应预数字孪生、数字孪生、自适应数字孪生以及智能数字孪生^[15-16]。数字孪生L1级别对应传统虚拟原型,该虚拟原型支持虚拟仿真功能,能够预先进行系统的模拟与测试,在发现潜在问题的同时降低开发风险,传统

综采工作面的监控中心大多属于 L1 级别的数字孪生;数字孪生 L2 级别可以有效地将物理实体系统的实时数据与具体模型相结合,支持技术规范与概念设计^[17],提供准确的状态分析^[18];数字孪生 L3 级别能够根据孪生系统实时反馈的数据不断更新,具备偏好与优先级的学习能力,葛世荣院士提出的数字孪生智采工作面系统^[19]已达到此级别;数字孪生 L4 级别在包含前三级别所有功能之外,还具备无监督学习能力,在不确定环境中进行自我状态调整,体现了高度的智能性与自主性。

表 1 数字孪生的级别
Table 1 Level of digital twin

功能	级别			
	L1	L2	L3	L4
虚拟仿真	√	√	√	√
信息采集		√	√	√
信息反馈			√	√
监督学习			√	√
非监督学习				√

1.3 数字孪生应用及发展

随着工业互联网、云计算以及大数据等智能技术的兴起,近年来数字孪生已在智能制造、航空航天、交通物流、建筑设计等多个领域逐渐得到认可与深入应用,为各行业的持续发展提供了新颖的思路与丰富的方法,如图 1 所示。



图 1 数字孪生的功能及应用

Fig.1 Function and application of digital twin

数字孪生最先在工业制造领域进行成熟化应用,主要集中在工业设施设备的智能管控方面,可在提升生产效率的同时降低运营成本^[20]。RIOS 等^[21]率先将数字孪生理念应用于智能制造行业,我国也将数字孪生纳入“十四五”发展规划中的智能制造模块。在航空航天领域,NASA 通过构造孪生体空间飞行器以在飞行准备期间进行太空环境下的仿真实验,从而提升飞行任务决策的正确性^[22];达索航空公司基于数字孪生理念构建虚拟平台,改进战斗机的设计过程,

提升质量超过 15%^[23]。面对智能交通的发展,一些学者利用数字孪生进行交通拥堵预测,如曲传声等^[24]构建了交通拥堵预测的数字孪生系统。在智能建造领域,丁超等^[25]研发建筑数字孪生全生命周期管理平台,促进了项目智能化管理;杜明芳等^[26]构建数字孪生智慧协同建造模型,为绿色建造系统开发提供了技术方案。

目前,智能制造、航空航天、交通物流、建筑设计等领域的数字孪生级别大都处于 L2~L3 级别,诸多应用难点尚需攻克。智能制造数字孪生需要优化整个生产线,包括生产计划、物料流、设备状态等;航空航天数字孪生需要考虑飞机的结构、动力系统、航电系统等复杂的组成部分,提升模拟的精度与实时性;交通物流数字孪生涉及陆、海、空等多种运输模式,需要提升多环节的实时监控与调度能力;建筑设计数字孪生需要考虑从设计、建造、运营到维护的整个生命周期,同时要优化能源效率与室内舒适度等指标。

数字孪生既是第 4 次工业革命的通用目的的技术之一,也是未来十大战略技术之一,凭借在多个领域的杰出性示范应用效果,其正在潜移默化地吸引着其他行业领域进行数字化转型,而矿山领域是其正在进行拓展应用的重要领域之一。与智能制造、航空航天、交通物流、建筑设计等领域的数字孪生不同,矿山数字孪生面临着一些差异性挑战,例如:矿山数字孪生需要考虑地质条件、气象气候等因素,这增加了模型的复杂性;矿山数字孪生需要模拟包含露天及井下在内的复杂工作流程以优化生产效率;矿山数字孪生需重点处理安全调度与管理,以降低事故风险。

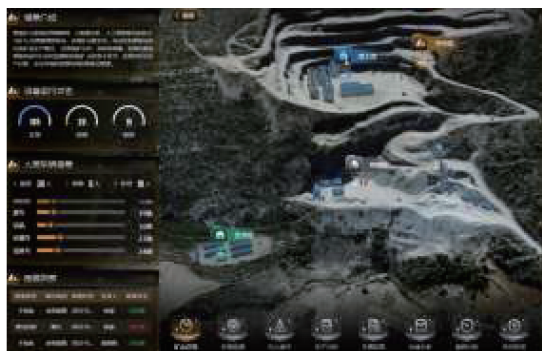
现代矿山领域逐渐迈入一个全新的发展阶段,智能化与数字化技术是提升矿山效率的必经途径。数字孪生技术以其独特的优势,正成为数字化智慧矿山发展的重要方向,而矿山数字孪生面临的挑战正预示着矿山数字化转型的聚焦点,基于这些挑战进一步开发矿山数字孪生对矿山安全、高效、智慧运营有着重要意义。

2 数字孪生在智慧矿山中的典型应用

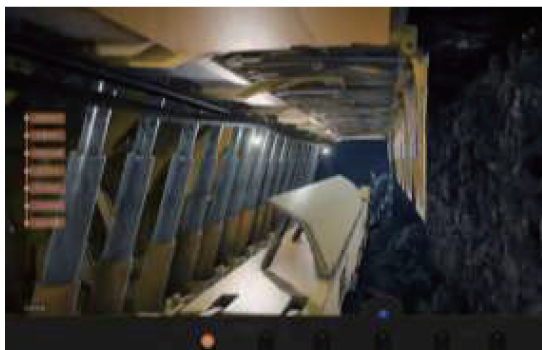
数字孪生是实体物理世界与虚拟信息世界之间的纽带,能够在矿山建设、开采、监控以及运维等方面提供更加安全、高效、智能的服务。此外,数字孪生也是数字矿山发展的必由之路,它将赋能智慧矿山,从而为智慧矿山的可持续发展提供理论引导与技术支持。全球范围内知名的数字矿山解决方案提供商已将引入和布局数字孪生技术作为共识,其中达索系统^[27]与海克斯康^[28]等企业的发展势头较为迅猛。

2.1 矿山数字孪生建设

数字孪生能够在矿山建设的过程中对矿山系统进行模拟和优化设计,依托矿山的地质、地形与资源分布等进行精确建模,并帮助研究人员在设计阶段明晰潜在问题。图 2 为远眺捷码建设的露天矿数字孪生以及零一数创建设的井下数字孪生可视化平台。



(a) 露天矿数字孪生可视化平台



(b) 煤矿井下数字孪生可视化平台

图 2 矿山数字孪生可视化平台

Fig.2 Visualization platform of MiDT

此外,数字孪生技术可以帮助工程师进行虚拟建模和仿真,通过模拟仿真不同的建设方案,可以预测其对环境污染、资源利用和工程成本等方面的影响^[29],从而选择最优方案,提高矿山的建设效率和可持续性。在推进矿山建设的具体过程中,围绕数字孪生技术进行精准化探测以及准确化建模是必要的前提条件,这将确保矿山物理实体与矿山数字孪生体之间形成高精度的动态虚实交互,为矿山智能化建设提供新途径。例如,付国军等^[30]根据煤矿环境特点与建设需求,提出“6+1+1”煤矿建设模型,推进了煤矿综合智能化;王佳奇等^[31]在煤矿安全建设中构建五维数字孪生瓦斯事故模型,实现了事故预防与快速响应;张维国等^[32]通过数据融合与迭代优化构建矿山数字孪生信息感知模型,提升了全量的信息探测能力。

2.2 矿山数字孪生开采

矿山开采历经了爆破化开采^[33]、机械化开采^[34]以及智能化开采^[35],进程变化如图 3 所示。爆破化

开采主要依靠劳动力与火药,开采过程效率低,事故风险大;机械化开采主要利用采煤机、刮板输送机和液压支架等机器取代人力实现资源开采,此过程以机械为主、人力为辅;随着人工智能技术的进步,矿山开采过程中越来越多的环节实现了自动化和智能化,智能化开采主要通过智能系统进行远程控制,从而保证少人化、无人化开采。当前,我国已建成多个不同规模的智能化开采工作面,煤炭产能约为 5 亿 t,形成了多煤层的智能化开采模式。

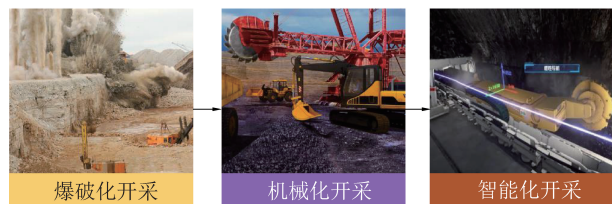


图 3 矿山开采进程变化

Fig.3 Change of mining process

数字孪生技术赋能智慧矿山开采,可为实现矿山智能化开采提供了强有力的支撑。未来,将会基于数字孪生形成实时感知、动态交互与远程决策等功能的协同系统,开创“即视即控”的智能开采模式,实现矿山物理实体与矿山数字孪生体之间的虚实交互^[36]。此外,矿山数字孪生也将精准表征矿山物理实体的三维运行场景以及时空演化特性,从而提升绿色高效的资源开采水平。

2.3 矿山数字孪生监控

随着矿山数字化建设的不断推进,现有监控系统的不足也随之体现出来:① 自动化监控存在相对独立的系统软件,数据之间关联性欠佳,未能很好地实现数据融合及共享^[37];② 矿山监控系统承载力受到一定的限制,多维度可视化效果还存在提升的空间。针对以上数字化监控系统的不足,数字孪生技术可为矿山安全监控提供新思路。一方面,矿山数字孪生可以实时监测矿山温度与气体浓度等指标,通过多传感器融合和物联网技术将信息数据实时传输到矿山数字孪生平台,及时发现火灾与塌方等异常状态,实现快速预警;另一方面,矿山物理实体模型与矿山数字孪生体之间可以形成可视化的虚实映射,能够直观准确地实现全过程综合安全监控^[38],依托三维可视化平台获取动态运行数据和精确信息,实现矿山要素实时监测定位,提升远程监控系统的可视化效果^[39-40]。矿山数字孪生监控流程如图 4 所示。

现阶段,数字孪生在矿山监控方面已取得了一些进展。借助传感器与监测设备实时采集的场景信息数据,可以辅助构建矿山数字孪生模型,模拟并预测多个设备的运行状态,提前发现并解决潜在故障。

未来,数字孪生技术在矿山监控方面的发展将更加深入。基于物联网技术的发展与普及,矿山要素的数据采集与传输将更加便捷高效,矿山数字孪生模型也将变得更加精准可靠。此外,数字孪生技术还可以与增强现实(AR)技术进行融合,为管理人员提供更加直观智能的操作界面,提高工作沉浸感与安全性。

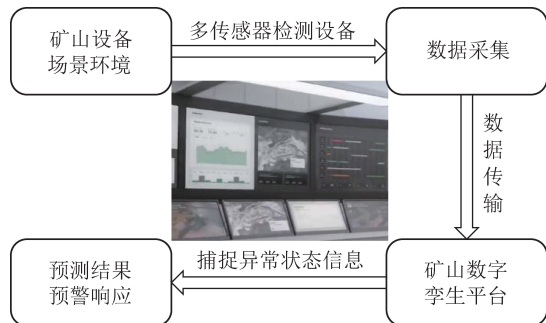


图4 矿山数字孪生监控流程

Fig.4 Flow chart of MiDT monitoring

2.4 矿山数字孪生运维

在智慧矿山中,运行维护技术扮演着至关重要的角色,它涉及矿山设施设备的维护、修理和管理,并直接影响着矿山的生产效率和运营成本。数字孪生在矿山运维中的主要作用有:① 将设备的实时运行参数与数字孪生模型相结合,实时监测设备的运行状态和环境状态,实施预测性维护;② 提供多源数据进行融合与迭代优化,对设备进行性能评估与故障预警,提高设备的可靠性和工作寿命;③ 对环境的空天地进行多源监测,预警并修复矿山生态质量,促进矿山的绿色低碳发展。

目前,围绕智慧矿山已经陆续开展了数字孪生运维研究。例如,丁华等^[41]采用数字孪生与深度融合驱动方式对采煤机进行健康状态预测与维护;经海翔等^[42]建立矿用通风机数字孪生模型,对通风机进行预测性故障诊断;张旭辉等^[43]将预测性维护模型导入数字孪生三维可视化状态监测平台,对采煤机进行试验验证;李全生等^[44]通过生态演变模拟、生态变化过程预测以及智能分级分区生态修复等过程对矿山进行全方位生态数字孪生运维。太原煤科院基于unity引擎建立数字孪生模型,融合无人驾驶定位模块,建立了无人驾驶车辆定位数字孪生系统,如图5所示。当无人驾驶车辆出现偏离规划路径等故障时,操作人员可远程操控无人驾驶车辆,使其回到既定规划路径继续合理化运行。总体来说,数字孪生在矿山运维中的发展是以实时监测、预测和优化为趋势,通过数据驱动的决策和智能化的技术手段,提高矿山设备的可靠性、安全性以及生产效率。



图5 基于unity引擎的数字孪生运维系统

Fig.5 Digital twin operation and maintenance system based on unity engine

数字孪生的内涵机理为矿山数字孪生的应用落地提供了理论指导,新一代信息技术与矿山建设、开采、监控以及运维等过程的深度融合为矿山数字孪生的发展提供了关键支撑,这将促进矿山工业创新、协调、绿色、安全、高效式发展。

3 矿山数字孪生模型系统架构

数字孪生模型一般为三维模型,包含物理实体、虚拟孪生体以及虚实连接关系^[45]。随着相关研究的深入,目前已经形成了由物理实体、虚拟孪生体、孪生数据、连接关系以及服务组成的数字孪生五维模型^[46],如图6所示。

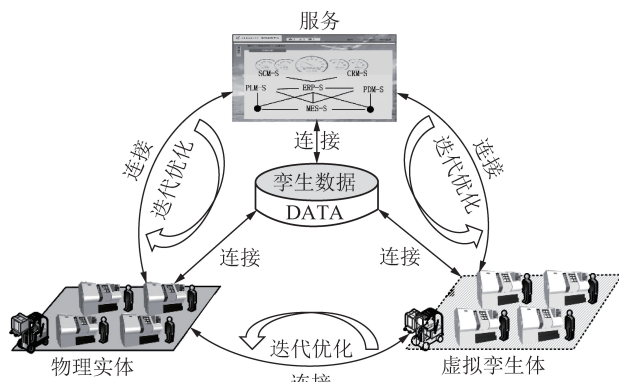


图6 数字孪生五维模型

Fig.6 Five-dimension digital twin model

传统的矿山物联网管控模型系统主要涉及物理感知层、信息融合层与应用决策层等3层架构,实现数据流自下而上的模式^[47]。为进一步促进数字孪生技术推进智慧矿山建设进程,统筹提升矿山工作的时效性、精确性与全面性,基于数字孪生五维模型的主要组成部分与运行机理,构建了如图7所示的矿山数字孪生四边形系统模型,该系统模型架构主要由4层

子系统组成,分别为端层子系统、边层子系统、网层子系统以及云层子系统,这 4 层子系统之间实时闭环交互,实现了虚实结合、相融共生。

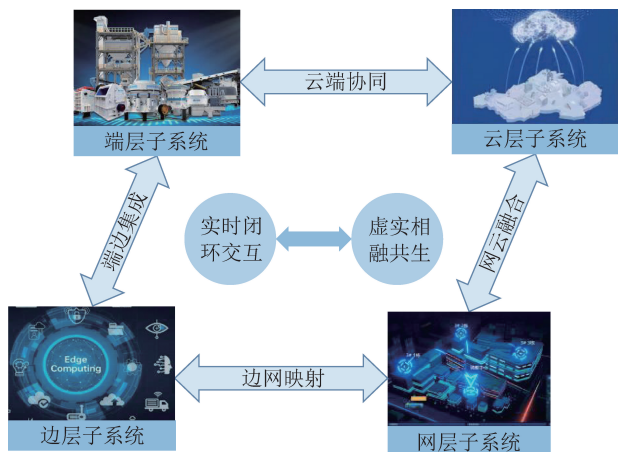


图 7 矿山数字孪生四边形模型

Fig.7 Quadrilateral model of MiDT

3.1 端层子系统

端层子系统是矿山数字孪生模型的基础层,对应

着数字孪生五维模型中的“物理实体”,主要由矿山设施、移动设备、传感设备、定位装置等矿山实体设备端的物理要素组成,其系统结构如图 8 所示。端层子系统通过在矿山中布局传感器而获取多维矿山物理信息,并将采集到的数据传输给边层子系统,保障数据实时通信。考虑到矿山的工业数据量庞大、数据维度复杂性高且易受外部环境干扰等特点,端层子系统特采用数据获取与感知技术以及数据交互与传输技术来保证矿山数字孪生的时效性和精确性。在数据获取与感知方面,通过数字化标识技术对矿山实体设施设备进行规范化数字标识^[48],利用物联网技术实现对大规模复杂矿山数据的智能感知,并对传感器及通信设备进行保护^[49],最终融合物联网末端的边缘计算技术实现更进一步的信息数据感知优化^[50]。在数据交互与传输方面,以 5G 通信技术为基础实现矿山数字孪生中数据传输交互的需求,采用不同的通信协议来处理矿山数字孪生数据传输在不同场景下的差异性问题的。

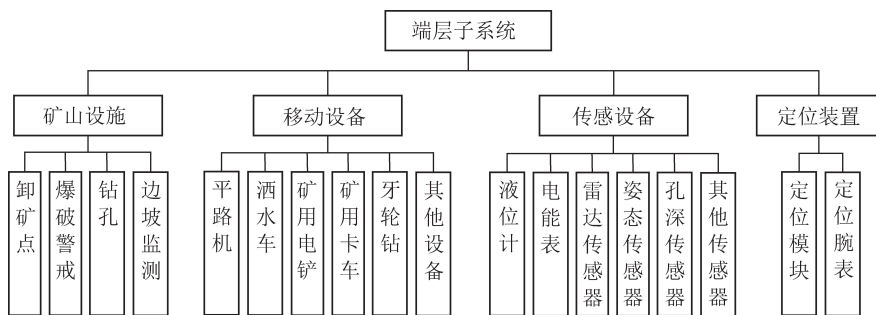


图 8 端层子系统结构

Fig.8 End-layer subsystem structure

3.2 边层子系统

边层子系统是端层子系统向网层子系统传输数据的通道,对应着数字孪生五维模型中的“服务”,其系统构成如图 9 所示。边层子系统能够就近获取端层中实体设备的运行数据,为网层子系统建立可靠的数据集基础,主要从存储、处理、融合设备状态数据以及设备运维数据等方面入手。边层子系统对端层子系统采集的数据进行汇集处理与深度融合分析,从而实现虚拟数字孪生矿山与物理实体矿山之间的虚实交互映射以及同步反馈^[51]。由于矿山环境复杂多样,在数据采集时会浮现错误数据,且数据传输的过程中可能会出现数据丢失,故从端层子系统汇集的数据大概率是多源异构数据,与真实数据存在一定的偏差。因此,将云计算与边缘计算相结合,缩短数据处理时间^[52],在对数据进行处理、清洗后,将大量多源异构数据进行深度融合,增强数据的鲁棒性,从而减少系统误差。由于边缘计算能将存储和计算任务放

置在更接近数据源的节点上,因此它能简化数据传输过程,提高传输效力,确保实时处理、减少延迟,为矿区带来更优质的智能服务。

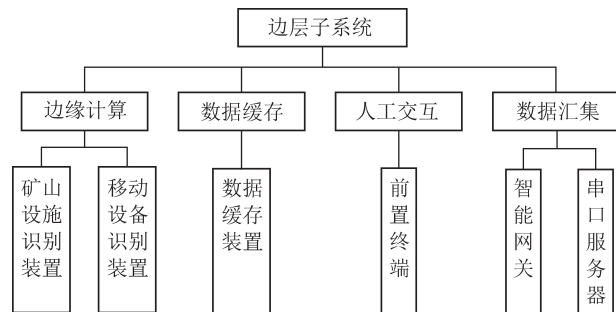


图 9 边层子系统结构

Fig.9 Edge-layer subsystem structure

3.3 网层子系统

网层子系统是融合矿山工控与生产的网络体系,对应数字孪生五维模型中的“连接”,能够实现各层子系统之间的数据传输,主要包含工控网、公网、办

公网以及数传电台^[53],其系统构成如图10所示。网层子系统基于边层子系统的融合数据集建立矿山数字模型,该子系统为实现矿山数字孪生应用而建立的模型主要由物理模型、行为逻辑模型、仿真模型、设备故障模型等耦合而成^[54-55]。网层子系统将矿山物理空间进行精准映射并实时更新矿山数字模型,可以实现智慧矿山规划建设、开采管理、运行维护以及故障预测等功能^[56]。

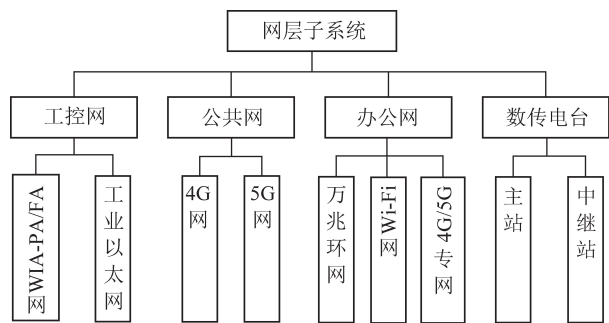


图10 网层子系统结构

Fig.10 Network-layer subsystem structure

3.4 云层子系统

云层子系统是矿山数字孪生模型系统的最顶层,也是人机交互的窗口,用于构建矿山数字孪生模型,对应数字孪生五维模型中的“服务”,主要包含基础设施层、平台服务层与管理应用层,系统构成如图11所示。

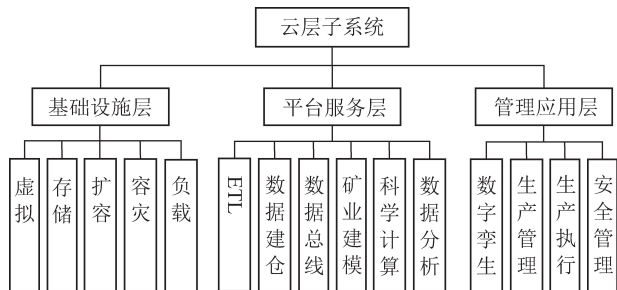


图11 云层子系统结构

Fig.11 Cloud-layer subsystem structure

与边层子系统不同的是,云层子系统更适合全局性、非实时、长周期的大数据处理与分析服务,云层子系统的服务包括功能型服务和业务型服务,该子系统在网层子系统构建的模型基础上,通过人机交互接口全方位地向矿山设备监测、矿山人员管理与矿山运营决策等物理实体矿山的各类场景提供应用。为实现物理实体矿山与虚拟数字孪生矿山的实时交互与同步反馈,云层子系统需要采用 OPC UA、Web Service 等通信接口^[39];为便于数字孪生矿山系统工作面的操作控制与智能远程监测,该子系统需采用云端协同、VR/AR/MR 人机交互以及工业应用程序开发等技术^[57-58]。

4 矿山数字孪生关键技术

矿山数字孪生模型系统架构是一张“网”,体现了矿山数字孪生的理论功能与运行机理,是矿山数字孪生的宏观指南。而矿山数字孪生关键技术则是“网”上的重要节点,体现了矿山智能化发展的实际应用需求。在矿山数字孪生模型系统架构下,矿山数字孪生关键技术发挥功能性支撑作用。对模型构建、智能控制、故障预测以及人机交互等关键技术进行研究是促进矿山更加安全、高效与可持续运营的重要基础。

4.1 矿山数字孪生模型构建技术

矿山数字孪生模型构建技术旨在利用云计算、大数据与人工智能技术,融合信息物理内涵,通过虚拟空间的矿山数字孪生体展现矿山物理实体的关联属性,建立多尺度多维度矿山数字模型,实现矿山智能化模型构建与优化。矿山数字孪生模型构建需要综合考虑物理实体的工作原理、运行环境以及演变规律,形成的构建方法如图12所示。

构建多源融合、全息感知和数据交互的矿山数字孪生模型是推进智慧矿山建设的核心,而如何基于数字孪生理念构建智慧矿山模型又是痛点与难点,目前相关研究大多围绕以下内容展开:① 矿山生产工艺模型构建与仿真,涵盖物理量与几何量;② 高精度模型表现方法,特征精确提取、数据挖掘以及自主优化与决策。例如,杨诚等^[59]研究矿山运维阶段的需求,以信息模型为载体,构建选矿厂数字孪生运维管理模型,实现了工程网格化集成管理;苗丙等^[60]将智采工作面划分层次,构建智采工作面数字孪生模型,实现全场景虚拟三维展现,提升了采煤工作面智能化水平;李鸳等^[61]研究矿山装备复杂零件的多维度加工过程,构建矿山机械装备零件数字孪生动态模型,包括几何与工艺子模型,客观展现了零件加工过程的变化状态。

4.2 矿山数字孪生智能控制技术

矿山数字孪生智能控制技术融合了数字孪生技术与智能控制技术,是智慧矿山的核心,该技术通过数字孪生模型对矿山进行实时监测,帮助工程管理者及时了解矿山运营状况,及时发现问题并采取相应措施。同时,矿山数字孪生智能控制技术将智能控制算法应用于矿山生产过程中,促使人工智能、机器学习和自动化技术融入矿山运营与控制优化,通过实时数据分析和反馈控制,提升矿山的生产效率与安全性。基于数字孪生的矿山智能控制系统如图13所示。

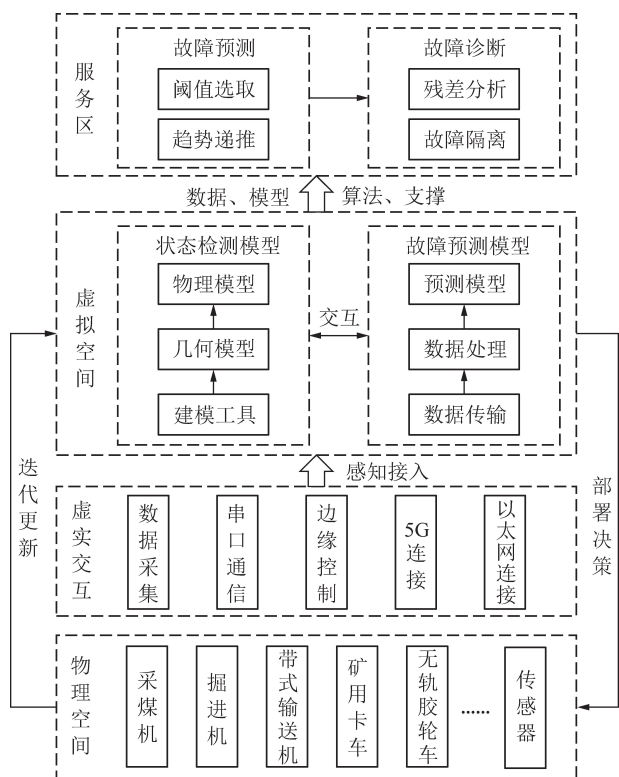


图 14 矿山数字孪生设备故障预测技术的实现过程

Fig.14 Realization process of fault prediction technology for MiDT equipment

息,进行实时监控、精确定位以及远程控制。矿山数字孪生人机交互技术强调用户友好性、体验沉浸性以及过程可操作性,通过指令更新操作进程,以实现人机协调与有机融合为目标导向。例如,笔者所在课题组与石家庄煤矿机械有限公司联合研制井下无人驾驶单轨吊^[65],利用数字孪生技术将作业现场进行远程界面可视化,管理人员可与实体单轨吊形成远程交互性联系,并成功实现了运输过程中障碍物实时检测、精准定位、智能控制和远程操控等功能,如图 15 所示。



图 15 无人驾驶单轨吊数字孪生交互平台

Fig.15 Unmanned monorail crane platform of digital twin

智慧矿山视域下数字孪生人机交互的实现需要研

究以下内容:①通过数字孪生与 AI 构建多源数据,融合全息投影技术创建高分辨率、高精度的三维图像模型,模拟实际矿山环境中的动态变化,包括地质变化、设备状态和生产流程;②进行多源数据有效处理,包括传感器数据、地质数据、气象数据等,开发先进的图像处理和模式识别算法,进行矿山状态自动识别与监测;③通过语音识别、面部识别、手势识别与脑机接口等多种交互方式,完成多场景下的远程操作控制。

5 研究展望

(1)在实际应用方面,改善矿山环境监测网,优化影像缺失、图像逼真度欠佳、参数协调性不足以及信息传输存在壁垒等问题;在矿山数字孪生操作系统内核基础上,建立应用程序编程接口,以便提升多种应用场景的适配性,同时构建标准应用场景模块以实现快速适配。

(2)在模型系统架构方面,依托多源矿区样本数据研究矿山物理实体的参数反演,持续性分析并修正矿山数字孪生模型,提升算法模型的先进性与有效性;以生态环境为目标导向,探索基于天空地多源监测的矿山生态环境数字孪生系统架构,推动实现矿山全过程安全、高效、绿色运行。

(3)在关键技术方面,研究矿山物理实体与数字孪生体之间的双向交互机制,分析系统的不完备性缺陷,提升数字孪生演化的同步性;聚焦矿山数字孪生无人驾驶融合技术,结合大数据平台,融合 VR/AR 技术,实现无人驾驶车辆精准调控与纠偏,促进数字矿山无人化运行。

参考文献 (References):

- [1] 《全国矿产资源规划(2016~2020)年》正式发布实施[J]. 地质装备,2017,18(1):3.
“The national mineral resources plan(2016-2020)” is officially released and implemented[J]. Equipment for Geotechnical Engineering,2017,18(1):3.
- [2] 鲍久圣,刘琴,葛世荣,等. 矿山运输装备智能化技术研究现状及发展趋势[J]. 智能矿山,2020,1(1):78-88.
BAO Jiusheng,LIU Qin,GE Shirong,et al. Research status and development trend of intelligent technologies for mine transportation equipment[J]. Journal of Intelligent Mine,2020,1(1):78-88.
- [3] 汪学彬,孙呈鹏,杨沛,等. 中国矿山绿色转型与区域发展不平衡性问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):135-140.
WANG Xuebin,SUN Chengpeng,YANG Pei,et al. Analysis on the imbalance between green transformation and regional development of mines in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021,32(1):135-140.
- [4] 贺雁鹏,黄庆享,曹健. 可视化矿山的发展现状及关键技术[J].

- 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 32-37.
- HE Yanpeng, HUANG Qingxiang, CAO Jian. Development status and key technologies of visual mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 32-37.
- [5] 刘勇, 马鹏飞, 薛国庆, 等. 人机交互技术在智能矿山设备中的应用[J]. 工矿自动化, 2021, 47(S1): 45-47.
- LIU Yong, MA Pengfei, XUE Guoqing, et al. Application of human-computer interaction technology in intelligent mining equipment[J]. Journal of Mine Automation, 2021, 47(S1): 45-47.
- [6] 谈明强. 5G 助力智慧矿山数字化转型[J]. 世界有色金属, 2022(18): 134-136.
- TAN Mingqiang. 5G helps digital transformation of smart mines[J]. World Nonferrous Metals, 2022(18): 134-136.
- [7] 陈龙, 王晓, 杨健健, 等. 平行矿山: 从数字孪生到矿山智能[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1633-1645.
- CHEN Long, WANG Xiao, YANG Jianjian, et al. Parallel mines: From digital twins to mine intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1633-1645.
- [8] 裴景垚, 张文理, 秦玉鑫. 数字化时代下矿山的智能化开采与工程安全问题研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(5): 157.
- PEI Jingyao, ZHANG Wenli, QIN Yuxin. Research on intelligent mining and engineering safety of mines in the digital age[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 157.
- [9] 马莉. 我国绿色矿山发展水平评价及发展模式与长效机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- MA Li. Research on the development level evaluation, development mode and long-term mechanism of green mines in China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [10] 胡荣华, 安冬, 史梦圆, 等. 智能矿用机器人研究现状及发展趋势[J]. 黄金, 2023, 44(9): 59-68.
- HU Ronghua, AN Dong, SHI Mengyuan, et al. Research status and development trend of intelligent mining robot[J]. Gold, 2023, 44(9): 59-68.
- [11] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 2017: 85-113.
- [12] 孟丹, 刘建业, 杨博, 等. 数字孪生在矿业数字化转型中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(6): 9-18, 31.
- MENG Dan, LIU Jianye, YANG Bo, et al. Application of digital twin in digital transformation of mining industry[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(6): 9-18, 31.
- [13] 易雪琴. 国内外数字孪生城市建设的经验及启示[J]. 信息技术与政策, 2023, 49(8): 25-30.
- YI Xueqin. The experience and enlightenment of digital twin city construction at home and abroad[J]. Information and Communications Technology, 2023, 49(8): 25-30.
- [14] 刘劲松. 高档数控机床数字孪生关键技术研究与应用[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2023.
- LIU Jinsong. Research and application of digital twin key technology for high-end CNC machine tools[D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [15] 江海凡. 面向数字孪生的离散制造车间建模与仿真方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- JIANG Haifan. Research on modeling and simulation method of discrete manufacturing workshop for digital twin[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [16] 蔡健. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用研究[J]. 长江技术经济, 2022, 6(S1): 245-247.
- CAI Jian. Application of digital twin technology in operation and management of water conservancy projects[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2022, 6(S1): 245-247.
- [17] 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 intelligent mine and new engineering[J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(5): 15-20.
- [18] 于晓峰. 面向电动机装配线的数字孪生模型的构建与应用[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- YU Xiaofeng. Construction and application of digital twin model for motor assembly line[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.
- [19] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925-1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Research on technical architecture of digital twin intelligent mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [20] THOBEN K, WIESNER S, WUEST T. "Industrie 4.0" and smart manufacturing review of research issues and application examples[J]. International Journal of Automation Technology, 2017, 11(1): 4-16.
- [21] RIOS J, HERNANDEZ C, OLIVA M. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft[J]. Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems, 2015: 657-666.
- [22] 张科利, 王建华, 曹豪. 互联网+煤矿开采大数据技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 123-128.
- ZHANG Keli, WANG Jianwen, CAO Hao. Research and practice of Internet + coal mining big data technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 123-128.
- [23] 本刊编辑部. 美欧军工领域发力数字孪生技术应用[J]. 国防科技工业, 2019(2): 36-37.
- Editorial Department of this Journal. The application of digital twin technology in the military industry of the United States and Europe[J]. Defence Science & Technology Industry, 2019(2): 36-37.
- [24] 曲传声. 基于数字孪生技术的交通拥堵预测与控制研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- QU Chuansheng. Research on traffic congestion prediction and control based on digital twintechology[D]. Shenyang: Shenyang University, 2022.
- [25] 丁超, 苏政, 许城瑜. 基于数字孪生的建筑全生命周期管理平台构建[J]. 建筑经济, 2023, 44(8): 73-79.
- DING Chao, SU Zheng, XU Chengyu. Construction of building life cycle management platform based on digital twin[J]. Construction Economy, 2023, 44(8): 73-79.

- [26] 杜明芳,孙玥. 基于学习控制的绿色数字孪生建造系统研究[J]. 智能建筑与智慧城市,2023(6):124-129.
DU Mingfang, SUN Yue. Research on green digital twin construction system based on learning control [J]. Intelligent Building & Smart City,2023(6):124-129.
- [27] 崔耀,李天越,叶壮,等. 综采跟机工艺数字孪生系统架构与关键技术[J]. 工矿自动化,2023,49(2):56-62,76.
CUI Yao, LI Tianyue, YE Zhuang, et al. Digital twin system architecture and key technologies of fully mechanized mining machine following process[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(2):56-62,76.
- [28] 李国清,王浩,侯杰,等. 地下金属矿山智能化技术进展[J]. 金属矿山,2021(11):1-12.
LI Guoqing, WANG Hao, HOU Jie, et al. Advances in intelligent technology of underground metal mines [J]. Metal Mine, 2021(11):1-12.
- [29] 刘峰,郭林峰,赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Coal safety interval and green low-carbon technology path under the background of double carbon[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):1-15.
- [30] 付国军,赵阳升,牛乃平. 煤矿智能化建设顶层设计方案研究[J]. 中国煤炭,2020,46(12):6-14.
FU Guojun, ZHAO Yangsheng, NIU Naiping. Research on top-level design scheme of coal mine intelligent construction [J]. China Coal,2020,46(12):6-14.
- [31] 王佳奇,卢明银. 基于数字孪生的煤矿瓦斯事故安全管理[J]. 煤矿安全,2020,51(8):251-255.
WANG Jiaqi, LU Mingyin. Safety management of coal mine gas accidents based on digital twin [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(8):251-255.
- [32] 张维国,葛启发,赵奕,等. 基于数据感知的数字孪生矿山建设研究[J]. 有色设备,2021,35(2):13-18.
ZHANG Weiguo, GE Qifa, ZHAO Yi, et al. Research on digital twin mine construction based on data perception [J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment,2021,35(2):13-18.
- [33] 余永强,杨小林,王伟. 矿山爆破开采对周围建筑物的影响[J]. 金属矿山,2004,33(10):69-72.
YU Yongqiang, YANG Xiaolin, WANG Wei. The influence of mine blasting mining on surrounding buildings [J]. Metal Mine, 2004, 33(10):69-72.
- [34] 宁宇. 我国煤矿综合机械化开采技术现状与思考[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2013,18(1):1-4.
NING Yu. Present situation and thinking of comprehensive mechanized mining technology in coal mines in China [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2013,18(1):1-4.
- [35] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice of intelligent coal mine(primary stage) [J]. Coal Science and Technology,2019,47(8):1-36.
- [36] 王国法,任怀伟,庞义辉,等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of coal mine intelligent (primary stage) technology system [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7):1-27.
- [37] 贺耀宜,高文,杨耀,等. 智能矿山多元监控信息融合与联动研究[J]. 工矿自动化,2022,48(11):11-19.
HE Yaoyi, GAO Wen, YANG Yao, et al. Research on multi-monitoring information fusion and linkage of intelligent mine [J]. Journal of Mine Automation,2022,48(11):11-19.
- [38] 胡青松. 运煤带式输送机网络视频监控系统设计[J]. 矿山机械,2016,10(9):82-84.
HU Qingsong. Design of network video monitoring system for coal belt conveyor [J]. Mining & Processing Equipment,2016,10(9):82-84.
- [39] 屈挺,张凯,闫勉,等. 物联网环境下面向高动态性生产系统动态运行的联动决策与控制方法[J]. 机械工程学报,2018,54(16):24-33.
QU Ting, ZHANG Kai, YAN Mian, et al. Linkage decision-making and control method for optimal operation of high dynamic production system in Internet of things environment [J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(16):24-33.
- [40] 谢嘉成,杨兆建,王学文,等. 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, YANG Zhaojian, WANG Xuewen, et al. Production system design and operation mode of fully mechanized mining face based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2019,25(6):1381-1391.
- [41] 丁华,杨光亮,杨兆建,等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. 中国机械工程,2020,31(7):815-823.
DING Hua, YANG Liangliang, YANG Zhaojian, et al. Health state prediction of shearer driven by fusion of digital twin and deep learning [J]. China Mechanical Engineering,2020,31(7):815-823.
- [42] 经海翔,黄友锐,徐善永,等. 基于数字孪生和概率神经网络的矿用通风机预测性故障诊断研究[J]. 工矿自动化,2021,47(11):53-60.
JING Haixiang, HUANG Yourui, XU Shanyong, et al. Research on predictive fault diagnosis of mine ventilator based on digital twin and probabilistic neural network [J]. Journal of Mine Automation, 2021, 47(11):53-60.
- [43] 张旭辉,鞠佳杉,杨文娟,等. 基于数字孪生的复杂矿用设备预测性维护系统[J]. 工程设计学报,2022,29(5):643-650,664.
ZHANG Xuhui, JU Jiashan, YANG Wenjuan, et al. Predictive maintenance system of complex mining equipment based on digital twin [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(5):643-650,664.
- [44] 李全生,刘举庆,李军,等. 矿山生态环境数字孪生:内涵、架构与关键技术[J]. 煤炭学报,2023,48(10):3859-3873.
LI Quansheng, LIU Juqing, LI Jun, et al. Digital twin of mine ecological environment: connotation, architecture and key technologies [J]. Journal of China Coal Society,2023,48(10):3859-3873.
- [45] BARYKIN S, KAPUSTINA I, SERGEEV S, et al. Developing the

- physical distribution digital twin model within the trade network[J]. *Academy of Strategic Management Journal*, 2021, 20(1): 1-24.
- [46] 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. Digital twin five-dimensional model and its application in ten fields[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [47] 董培林, 寇向宇, 吴均文, 等. 数字孪生技术在矿山物联网管控系统的应用[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(10): 163-168.
DONG Peilin, KOU Xiangyu, WU Diwen, et al. Application of digital twin technology in mine Internet of things management and control system[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(10): 163-168.
- [48] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1564-1575.
XIANG Chenmeng, ZENG Siming, YAN Peng, et al. The typical application and prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [49] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 70-82.
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development ideas of key technologies for intelligent sensing of ubiquitous power Internet of things[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 70-82.
- [50] 蔡月明, 封士永, 杜红卫, 等. 面向泛在电力物联网的边缘节点感知自适应数据处理方法[J]. *高电压技术*, 2019, 45(6): 1715-1722.
CAI Yueming, FENG Shiyong, DU Hongwei, et al. Edge node sensing adaptive data processing method for ubiquitous power Internet of things [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6): 1715-1722.
- [51] 张帆, 葛世荣, 李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 168-176.
ZHANG Fan, GE Shirong, LI Chuang. Research on digital twin technology of intelligent mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 168-176.
- [52] 王鑫, 王霖, 余芸, 等. 数字孪生电网的特性、架构及应用综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(11): 3721-3733.
WANG Xin, WANG Lin, YU Yun, et al. Summary of characteristics, architecture and application of digital twin power grid[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(11): 3721-3733.
- [53] 姚江, 王智强, 侯卫钢, 等. 基于工业互联网的露天矿数字孪生建模系统和方法[J]. *金属矿山*, 2023(1): 161-171.
YAO Jiang, WANG Zhiqiang, HOU Weigang, et al. Digital twin modeling system and method for open-pit mine based on industrial internet[J]. *Metal Mine*, 2023(1): 161-171.
- [54] GRIEVES M, VICKERS J. *Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [55] 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: 中国, 201911388529.4[P]. 2019-12-30.
GE Shirong, ZHANG Fan, GUAN Zengjun. Digital twin intelligent monitoring system for fully mechanized mining face: China, 201911388529.4[P]. 2019-12-30.
- [56] 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 intelligent mine and new engineering [J]. *Journal of Mine Automation*, 2020, 46(5): 15-20.
- [57] 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 and 5G and WiFi6[J]. *Journal of Mine Automation*, 2019, 45(10): 1-4.
- [58] 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. Smart coal mine 2025 scenario objectives and development path [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 295-305.
- [59] 杨诚, 李亮, 裴嘉, 等. BIM 技术在数字化矿山运维管理阶段的应用[J]. *工程技术研究*, 2023, 8(7): 133-135.
YANG Cheng, LI Liang, PEI Jia, et al. Application of BIM technology in operation and maintenance management stage of digital mine [J]. *Engineering and Technological Research*, 2023, 8(7): 133-135.
- [60] 苗丙, 葛世荣, 郭一楠, 等. 煤矿数字孪生智采工作面系统构建[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2): 143-153.
MIAO Bing, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Construction of digital twin intelligent mining face system in coal mine [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2): 143-153.
- [61] 李鸳. 基于数字孪生的矿山机械装备复杂零件动态建模[J]. *机床与液压*, 2021, 49(18): 160-165, 192.
LI Yuan. Dynamic modeling of complex parts of mining machinery and equipment based on digital twin[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(18): 160-165, 192.
- [62] 程乔, 王映华, 李冉, 等. 移动边缘计算技术与应用的探讨[J]. *广西通信技术*, 2020(3): 1-6.
CHENG Qiao, WANG Yinghua, LI Ran, et al. Discussion on mobile edge computing technology and application[J]. *Guangxi Communication Technology*, 2020(3): 1-6.
- [63] 张超, 张旭辉, 毛清华, 等. 煤矿智能掘进机器人数字孪生系统研究及应用[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(5): 813-822.
ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, MAO Qinghua, et al. Research and application of digital twin system for coal mine intelligent tunneling robot[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(5): 813-822.
- [64] NIKOLAKIS N, MARATOS V, MAKRIS S. A cyber physical system(CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 1(1): 56.
- [65] 鲍久圣, 章全利, 葛世荣, 等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 1085-1098.
BAO Jiusheng, ZHANG Quanli, GE Shirong, et al. Key basic research and application practice of unmanned auxiliary transportation system in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 1085-1098.