



基于数字孪生的综采装备技术应用研究综述

田莹 范宇鑫 张强 刘峻铭 顾颀颖 刘伟

引用本文:

田莹, 范宇鑫, 张强, 等. 基于数字孪生的综采装备技术应用研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(2): 102-125.

TIAN Ying, FAN Yuxin, ZHANG Qiang. Review on application of fully-mechanized mining equipment technologies based on digital twin[J]. Coal Science and Technology, 2026, 54(2): 102-125.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-1258>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究

Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workface monitoring technology

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 153-161 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b530b9b9-7037-4cdb-8cde-3eebc6693924>

智慧矿山工业互联网技术架构探讨

Discussion on industrial internet technology framework of smart mine

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/47ebd1cd-498a-4095-a828-56fb32cff25d>

基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究

Investigation into the monitoring and control of mechanical dynamics in inclined mining equipment utilizing digital twin technology

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 259-271 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0011>

基于数字孪生与规划放煤协同的煤矿智能开采技术

Intelligent coal mining technology based on digital twin and planned coal discharge synergy

煤炭科学技术. 2026, 54(1): 411-423 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0570>

露天矿连采装备智能化协同管控平台

Intelligent collaborative management and control platform for continuous mining equipment in open-pit mines

煤炭科学技术. 2025, 53(4): 362-372 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1525>

我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考

Application status and development thinking of intelligent mining technology and equipment in coal mines in China

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 189-198 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1054>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

田莹, 范宇鑫, 张强, 等. 基于数字孪生的综采装备技术应用研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(2): 102-125.

TIAN Ying, FAN Yuxin, ZHANG Qiang, *et al.* Review on application of fully-mechanized mining equipment technologies based on digital twin[J]. Coal Science and Technology, 2026, 54(2): 102-125.

基于数字孪生的综采装备技术应用研究综述

田莹, 范宇鑫, 张强, 刘峻铭, 顾颖颖, 刘伟

(山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 推进矿山智能化建设是提升煤炭行业安全、高效、绿色发展水平的重要途径。数字孪生技术作为新一代信息技术, 在煤矿综采装备领域的应用为智能化转型提供了重要支撑, 因此, 开展了煤矿综采装备数字孪生技术的综述研究。首先阐述了数字孪生的基本概念与核心思想, 在此基础上重点从机械行业应用现状进行切入, 具体分析了数字孪生技术在机械设计制造、故障诊断维护以及产业链协同中的具体实践, 为煤矿领域应用提供了理论和技术参照。进而, 综述了数字孪生技术在煤矿领域应用与未来发展趋势, 特别聚焦于综采装备技术环节, 详细综述了数字孪生在综采三机和智能化综采系统融合中的研究现状, 包括状态监测、故障预测、自适应控制、智能截割和协同运维等多个具体应用场景。研究表明: 数字孪生技术通过实时数据采集、虚拟建模和智能分析, 可以实现对采煤机、刮板输送机、液压支架等关键设备的全生命周期管理, 可显著提升故障预测精度和生产效率。面向未来, 需着力突破多物理场耦合建模、井下高精度感知、跨系统协同决策等关键技术瓶颈, 推动研究范式从“模型/数据驱动”向“融合驱动”, 从“单一设备优化”向“系统控制协同”根本性转变, 并通过制定行业标准与构建开源生态, 破解数据壁垒与互操作性难题, 以此促进数字孪生在智慧矿山建设和智能化无人开采中的深度应用与落地见效。

关键词: 数字孪生; 综采装备; 智能化开采; 智慧矿山; 煤矿智能化; 预测性维护; 故障诊断; 工业互联网
中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2026)02-0102-24

Review on application of fully-mechanized mining equipment technologies based on digital twin

TIAN Ying, FAN Yuxin, ZHANG Qiang, LIU Junming, GU Jieying, LIU Wei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Advancing the intelligent development of mines is a crucial pathway to enhance the safety, efficiency, and green development of the coal industry. As a new-generation information technology, digital twin technology provides important support for the intelligent transformation in the field of fully-mechanized coal mining equipment. Therefore, a review study on the digital twin technology of fully-mechanized coal mining equipment was carried out. First, the fundamental concepts and core principles of digital twins are elucidated. Building upon this foundation, the review focuses on the current application landscape within the mechanical engineering sector. It specifically analyzes the practical implementation of digital twin technology in mechanical design and manufacturing, fault diagnosis and maintenance, as well as supply chain collaboration, providing theoretical and technical references for its application in the coal mining field. Subsequently, the review examines the current applications and future development trends of digital twin technology in coal mining, with particular emphasis on the technical aspects of fully-mechanized mining equipment. It provides a detailed overview of the research status regarding the integration of digital twins with three fully-mechanized mining machines and intelligent fully-mechanized mining systems, covering specific application scenarios such as condition monitoring, fault prediction, adaptive control, intelligent cutting, and col-

收稿日期: 2025-08-28 策划编辑: 常琛 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2025-1258

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304175, 52404172); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2023QE125)

作者简介: 田莹(1980—), 女, 辽宁昌图人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: tianluolu@sohu.com

通讯作者: 顾颖颖(1991—), 女, 吉林四平人, 讲师, 博士。E-mail: 2483135213@qq.com

laborative operation and maintenance. Research indicates that digital twin technology enables full lifecycle management of critical equipment—including shearers, scraper conveyors, and hydraulic supports—through real-time data acquisition, virtual modeling, and intelligent analysis, significantly enhancing fault prediction accuracy and production efficiency. Looking ahead, breakthroughs are needed in key technical bottlenecks such as multi-physics coupling modeling, high-precision underground sensing, and cross-system collaborative decision-making. This will drive a fundamental shift in research paradigms from “model/ data-driven” to “fusion-driven”, and from “single-device optimization” to “system control coordination”. By establishing industry standards and building open-source ecosystems, we can overcome data barriers and interoperability challenges, thereby promoting the deep application and effective implementation of digital twins in smart mine construction and intelligent unmanned mining.

Key words: digital twin; fully-mechanized mining equipment; intelligent mining; smart mine; intelligent coal mining; predictive maintenance; fault diagnosis; industrial Internet

0 引 言

能源关系着国家的进步与安全,是人民生活幸福的基础保障,能源问题是人类社会所面临的一项重大问题。我国的能源现状为“富煤、贫油、少气”,这决定了我国将长期以煤作为主要能源去完成社会生产。综采过程是采煤过程的关键和核心,目前我国的煤矿综采技术向着数字化和智能化方向进行转型^[1]。2024年4月24日,国家矿山安全监察局等七部委印发的《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》指出,到2026年,建立完整的矿山智能化标准体系,推进矿山数据融合互通,实现环境智能感知、系统智能联动、重大灾害风险智能预警。到2030年,建立完备的矿山智能化技术、装备、管理体系,实现矿山数据深度融合、共享应用,推动矿山开采作业少人化、无人化,有效防控重大安全风险,矿山本质安全水平大幅提升^[2]。2025年8月21日,国务院印发的《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》指出,到2027年,实现人工智能与六大重点领域广泛深度融合,新一代智能终端、智能体等应用普及率超70%。到2030年,我国人工智能全面赋能高质量发展,新一代智能终端、智能体等应用普及率超90%,智能经济成为我国经济发展的重要增长极,推动技术普惠和成果共享。到2035年,我国将全面步入智能经济和智能社会发展新阶段,为基本实现社会主义现代化提供有力支撑。在工业领域,大力推进工业全要素智能化发展,推广人工智能驱动的生产工艺优化方法。深化人工智能与工业互联网融合应用,增强工业系统的智能感知与决策执行能力。这些指导意见对矿山这类关键工业领域实现智能化提升提出了更进一步且更加具体的要求。但就目前来看,我国智能化综采工作面的基础性关键技术仍然比较薄弱,存在远程智能监控延迟与集群设备智能化程度低等问题。在这种大背景之下,找

到一种可行的技术方法去推进“智能矿山”和“矿山无人化”显得十分迫切和重要。

数字孪生作为人类解构、描述、认识物理世界的新一代信息技术,直接面向人工智能国家战略中先进制造、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,已经成为全球信息技术发展的新焦点^[3]。作为一种新兴信息技术,数字孪生将会加速煤矿智能化进程并改变煤矿科技结构,在转变过程中实现技术革命。可以预见,在新一轮信息技术革新中,矿山开采与数字孪生、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,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^[4]。

笔者将从研究背景、工业应用启示、煤矿行业应用、综采技术应用4个方面来介绍数字孪生在相关领域的具体研究。

1 数字孪生技术研究背景

1.1 数字孪生的定义与基本概念

数字孪生(Digital Twin, DT)是一种基于实时数据和物理实体建立虚拟模型的技术,其核心思想是通过数字化手段对物理世界中的对象、过程或系统进行全面而精确的虚拟再现,从而实现对其状态、行为和性能的动态监控、分析、预测与优化^[5]。数字孪生可以被定义为物理实体、系统或过程的数字化复制体,其不仅是一个静态的虚拟模型,而且能够实时反映物理实体状态和行为的动态系统,是虚拟空间对真实空间的映射。换言之,数字孪生是物理实体的“数字镜像”,能够模拟、监控和优化其实际运行状态。它通过物理和虚拟世界之间的双向信息流动,提供了对实际系统进行深度理解和优化的手段^[6]。具体的数字孪生概念模型如图1所示,真实空间与

虚拟空间通过数据建立联系,在信息交互连接的过程中实现映射,虚拟空间可以包括多个子空间,用以更好地反映现实情况。

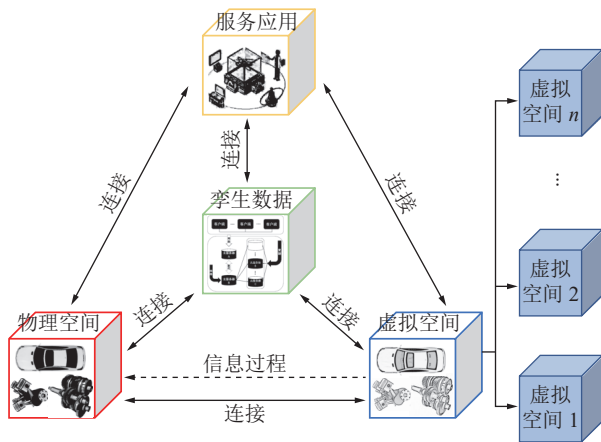


图1 数字孪生概念模型^[3]
Fig.1 Digital twin conceptual model^[3]

1.2 数字孪生技术发展历程

数字孪生作为一种先进的虚拟建模与数据集成技术,经历了从理论萌芽到实践应用的逐步发展过程。数字孪生的概念最初来源于航空航天和制造业的设备管理与优化需求,随着信息技术和计算能力的飞速发展,数字孪生技术逐渐扩展到多个行业,形成了今天广泛应用的技术体系。数字孪生技术的发展历程可概括为概念萌芽、初步应用、行业扩展和智能发展这4个关键阶段,历经了50多年,为实现覆盖设计、制造、运维至报废的全生命周期精准管理服务,这一过程中的关键时间节点与特征如图2所示。

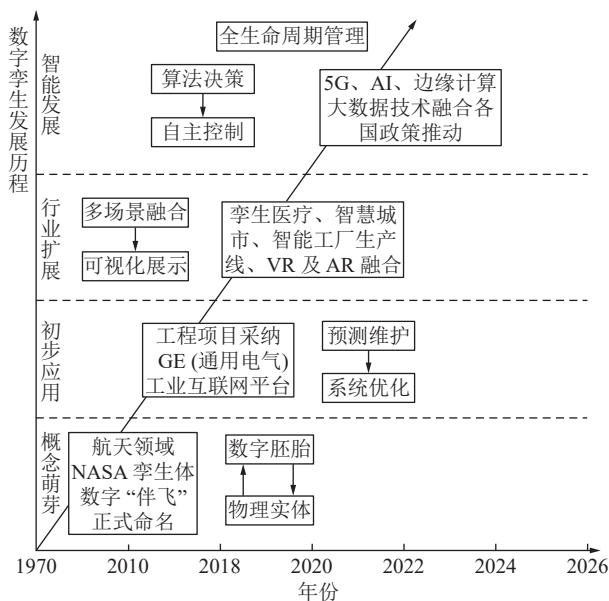


图2 数字孪生技术发展历程时间轴

Fig.2 Timeline of development of digital twin technology

下面对这4个关键时间阶段进行详细的介绍:

1) 初期概念与理论探索阶段。数字孪生概念的初步提出源于航空航天领域,早在20世纪70年代,美国阿波罗工程项目建造了一个与实际飞行飞船完全相同的地面飞船(也称为“孪生体”),在孪生体中执行实际飞行经历的“所有”操作,以镜像实际飞行飞船的实际状态,并为飞船的维护提供参考,这项技术也称为伴飞技术^[7]。阿波罗时期的孪生体可以理解一种同步动态的物理样机,与数字孪生体对应可称之为“物理孪生体”,阿波罗时期的孪生体还是一个真实存在的实物,并依靠这个实物去模拟真实环境和条件下的测试与分析,如图3所示。

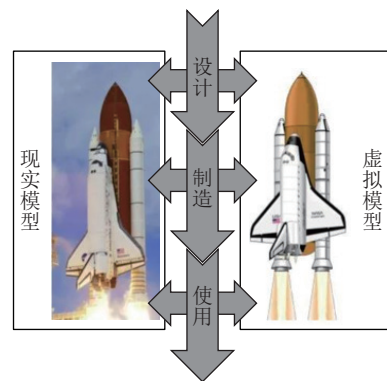


图3 NASA构想的孪生体
Fig.3 Twins conceived by NASA

时至今日,伴飞技术在航天领域已得到质的突破,在轨道修正推演的实现打破了地面试验对空间环境模拟能力有限的束缚。在2020年,嫦娥五号作为我国第一个实施无人月面取样返回的月球探测器,是“数字伴飞”在我国航空航天领域的首次应用,顺利完成了第一次轨道修正推演,如图4所示。



图4 嫦娥五号探测器轨道修正推演
Fig.4 Orbit correction deduction of chang'e-5 probe

2002年,Michael Grieves在讨论产品生命周期管理(PLM)时首次提出了信息镜像模型的基本思想^[8]。2010年,美国宇航局的约翰·维克斯(John Vickers)对数字孪生技术进行了正式命名。

2) 技术稳定与初步应用阶段。进入 2010 年, NASA 的数字孪生概念开始被更多的工程项目采纳。数字孪生技术的核心价值开始从预测维护向系统优化、全生命周期管理延伸。2014 年, 通用电气(GE) 推出了基于数字孪生的“工业互联网”平台, 标志着数字孪生技术在工业制造中逐渐应用, 但技术的广泛性和综合性仍处于发展初期^[9-11]。

3) 深化应用与跨行业扩展阶段。随着数字孪生技术的不断进化, 其应用场景得到了极大的拓展。2018 年之后, 随着 5G 通信技术的快速发展, 数字孪生技术在大规模数据传输和反馈方面得到了迅速提升。工业互联网与数字孪生的深度融合, 使得智能工厂和智能生产线的应用成为现实。数字孪生技术实现了对工业设备的智能运维, 降低了维护成本, 智能工厂数字孪生系统如图 5 所示。此外, 虚拟现实(VR)、增强现实(AR)技术的结合, 使得数字孪生系统的可视化效果得到了进一步强化, 推动了其在各个行业中的应用^[12]。



图 5 数字孪生智能工厂
Fig.5 Digital twin smart factory

4) 智能化与自主化发展阶段。进入 2020 年, 数字孪生技术的发展进入了一个更加智能化、自动化的阶段。5G、边缘计算、AI 与大数据等技术的结合, 使得数字孪生系统具备了自主进行决策与优化的能力, 核心表现为多尺度建模、实时交互、AI 增强仿真和跨系统协同优化^[13]。

当今, 中国将数字孪生列为数字化转型的核心技术, 多项政策推动其产业化, 2020 年 12 月, 我国工业互联网专项工作组印发《工业互联网创新发展行动计划(2021—2023)》, 鼓励建设“数字孪生工厂”, 推动工业互联网与 DT 结合。2021 年, 国务院印发《“十四五”数字经济发展规划》, 明确提出推进数字孪生技术在智能制造、智慧城市中的应用。2023 年, 中共中央、国务院印发《数字中国建设整体布局规

划》, 强调构建“数字孪生城市”, 提升城市治理智能化水平。国际方面, 欧盟在 2022 年提出“Destination Earth”计划, 旨在建立全球气候数字孪生, 美国国家标准与技术研究院 NIST 在 2024 年投资 2.85 亿美元, 旨在以数字孪生技术助力芯片制造, 推动 DT 标准化。

2 数字孪生技术体系及工业应用启示

数字孪生技术起源于并成熟于高端机械制造等工业领域, 其技术体系和方法论已形成相对稳定的范式, 为煤矿这类复杂工业场景提供了方法论和技术栈的参考。理解数字孪生在理想工业环境下的成功实践, 是分析其在煤矿这一复杂、恶劣且高风险场景中应用价值与挑战的必要前提。

2.1 高保真建模与虚拟仿真

高保真建模与虚拟仿真是数字孪生技术体系的基石, 虚拟模型先建好才能更真实地反映实际情况。其核心在于构建与物理实体在几何形态、物理属性、行为规则及状态演化等方面高度一致的虚拟模型, 一个完整的高保真建模及虚拟仿真技术包含以下 4 个层次:

1) 尺寸采集层: 依赖于二维/三维图纸、三维激光扫描、摄影测量等技术获取物理实体的精确几何数据。

2) 数据采集层: 通过部署在设备上的传感器网络, 持续采集如温度、振动、位移等运行参数。数据通过无线数据采集模块汇聚, 并经无线 AP(访问点) 传输至上位机系统, 完成数据的初步整理与上传。当然, 数据传输方式可根据实际情况进行选择。

3) 数据管理层: 该层是整个框架的“中枢神经”, 负责对海量的多源数据进行融合、存储与管理。其核心是基于 MySQL 构建的关系型数据库, 并使用 DataGrip 等数据库管理工具进行高效运维。

4) 数据驱动层: 该层是数字孪生可视化与交互的最终呈现端, 它主要由数据管理层(数据库)处理好的数据和尺寸采集层建立的虚拟模型共同融合而成。具体在 Unity Hub 管理的 Unity 3D 引擎环境中, 导入由底层准备好的 FBX 格式三维模型。引擎环境平台接收来自中间数据管理层的真实数据, 通过 TCP 等网络协议和 SQL 指令, 实现与数据管理层的稳定数据交互, 并驱动虚拟模型进行同步运动、状态变化等动态仿真, 最终生成高保真度的虚拟镜像, 从而实现对物理实体运行状态的监控、回溯分析与可视化展示。在内部, 则通过 C#语言编写的驱动程序

代码,将导入整理好的数据形成一串串指令,映射到虚拟模型上,实现虚拟仿真等可视化界面展示。典型的数字孪生高保真建模的示例如图6所示。

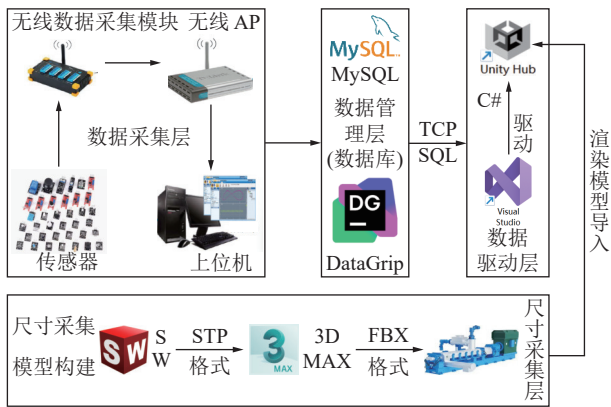


图6 典型数字孪生高保真建模示例

Fig.6 Typical digital twin high fidelity modeling example

在机械制造行业中,这种高精度建模不仅广泛应用于产品设计阶段的虚拟验证,通过有限元分析(FEA)模拟结构强度与疲劳性能^[14],利用计算流体力学(CFD)评估流体行为与热管理效能^[15],更延伸至制造全流程的数字化重构与协同优化^[16]。具体而言,高保真模型支持整条生产线的虚拟布局规划、工艺过程仿真、运动控制逻辑验证^[17]以及人机工程分

析,从而实现设备联动调试、产能瓶颈预测、能耗动态优化等深层应用^[18]。通过将物理空间中的设备、流程与数据实时映射至虚拟环境,数字孪生驱动制造系统向柔性化、智能化与可预测性方向持续演进^[19]。赵丹丹^[20]、刘轩^[21]、刘欢连^[22]、刘帅^[23]以生产线状态虚实映射监测系统为研究对象,通过构建机械加工生产线的多层次数字孪生模型(图7,图8),实现了对设备布局、物料流和信息流的动态仿真与优化,从而在虚拟空间中预演和调试生产方案,大幅降低了实体的试错成本。

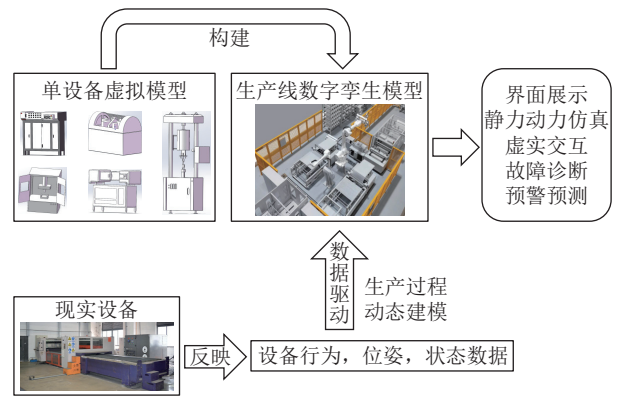


图7 机械加工生产线孪生系统^[20-22]

Fig.7 Twin system of machining production line^[20-22]

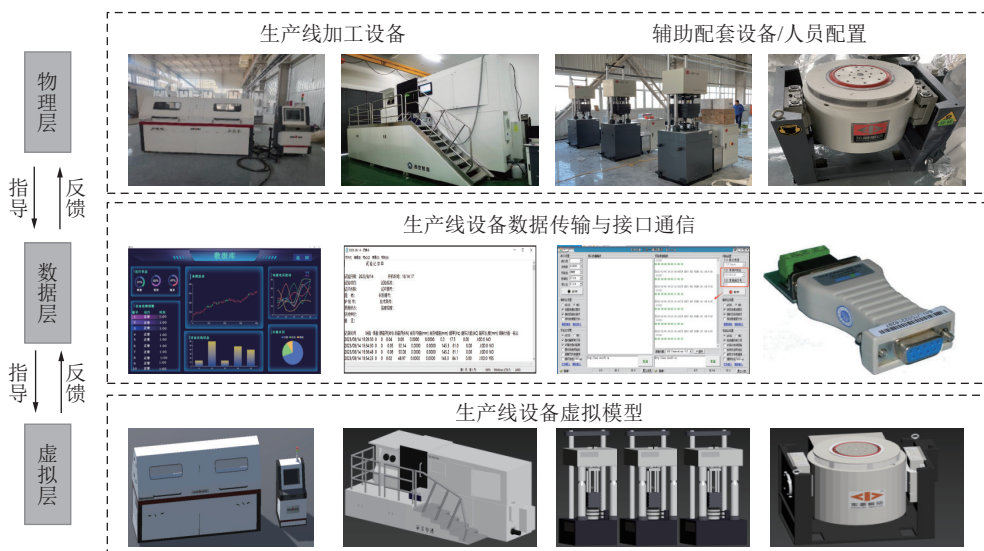


图8 多层次信息数字孪生产线模型^[23]

Fig.8 Multi level information digital twin production line model^[23]

这种高保真建模能力主要应用在煤矿设备上,并为综采工作面的虚拟构建提供了直接的技术参照。应用于综采三机(采煤机、刮板输送机、液压支架)时,重点在于突破机械-液压-负载的多物理场耦合建模。通过建立采煤机截割部与煤岩相互作用的动力学模型,或液压支架群与顶板围岩耦合的力学模型,是实

现设备精准控制和工况仿真的先决条件,为后续的预测性维护 and 自适应控制奠定初步模型基础。

2.2 预测性维护与故障诊断

数字孪生技术实现预测性维护与故障诊断,依赖于一个贯穿“物理空间-虚拟空间-服务系统”的闭环技术体系^[24]。其实现始于多源异构数据的智能

感知与高质量采集,通过在设备关键部位部署振动、温度、声发射等多种传感器,把采集到的数据进行初步滤波、降噪与特征提取,以应对井下恶劣工况带来的数据低信噪比挑战^[25]。采集的数据经 5G 或工业以太网等协议传输后,进入融合机理与数据驱动模型构建核心环节。一方面,基于物理定律(如动力学、摩擦学)构建高保真机理模型,用于模拟设备在正常与典型故障模式下的响应,提供可解释性强的分析基础并生成仿真数据以弥补真实故障样本的稀缺^[26];另一方面,应用先进的深度学习算法(CNN、LSTM、RNN 等)、迁移学习以及生成对抗网络 GAN 进行数据增强,从历史与实时数据中挖掘故障特征与退化规律^[27]。最终,通过数字线程技术将实时数据流与上述模型动态耦合,在虚拟空间中实现设备状态的同步映射、故障的早期诊断以及剩余使用寿命的精准预测^[28],并将诊断预测结果以可视化方式反馈,或直接生成维护决策指令,从而完成从“感知-认知-预警-决策”的完整技术闭环^[29]。

在机械行业,该领域的研究呈现出机理模型与数据驱动算法深度融合的趋势。例如,WANG 等^[30]、HUANG 等^[31]构建了融合物理机理的虚拟模型,并引入深度学习(双向门控循环单元 bi-GRU、卷积神经网络 CNN)处理振动、噪声等多模态数据,显著提升了复杂系统的故障诊断精度与早期预警能力。GUO 等^[32]构建了基于数字孪生技术的改进随机森林算法(IRF),通过虚拟仿真生成平衡数据集并结合迁移学习,实现了汽车后桥装配线智能故障诊断。XU 等^[33]提出了一种基于数字孪生和深度迁移学习的双阶段故障诊断方法(DFDD),通过虚拟空间高保真模型预训练和物理空间迁移学习,实现了汽车侧围生产线全生命周期的高精度故障诊断与预测性维护。WANG 等^[34]提出了一种基于参数敏感性分析的自适应数字孪生模型,通过转子系统实验数据验证了该模型在旋转机械全生命周期故障诊断中实现不平衡量精确量化与定位的有效性。孙培禄等^[35]构建了数字孪生驱动的机电设备远程运维方法,通过构建孪生机电模型实现远程实时监控,并成功应用于数控设备的故障诊断,验证了该技术在 MRO 服务中的有效性。姜海聪等^[36]基于数字孪生技术,提出一种往复压缩机故障诊断方法,通过三维建模与虚实交互技术构建可视化监控系统,提升了设备故障诊断效率和交互能力。王晓辉^[37]通过构建数字孪生映射模型,将状态监测、故障诊断与维修服务进行集成,设计完成了基于数字孪生技术的离心泵机组

状态监测和故障诊断系统,实现设备的优化运行和预测性维护。徐桂安^[38]、吴钱昊^[39]、汪健等^[40]则在轴承、齿轮箱等关键部件上,通过仿真与算法结合,解决了物理实体故障样本稀缺的难题,轴承故障诊断数字孪生系统如图 9 所示。

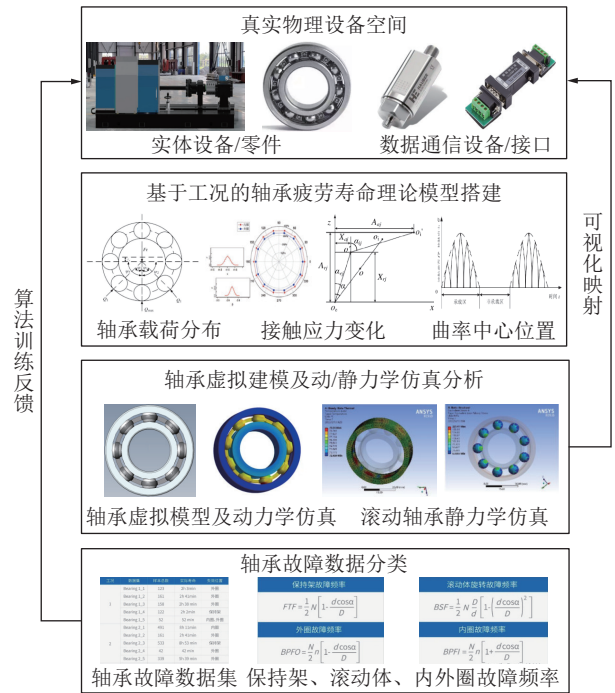


图 9 基于数字孪生的滚动轴承故障诊断框架^[38-40]

Fig.9 Rolling bearing fault diagnosis framework based on digital twins^[38-40]

煤矿井下设备(如采煤机摇臂、输送机减速箱、泵站)的故障停机代价高昂且极具危险性。机械领域的预测性维护技术体系为综采关键设备的全生命周期健康管理提供了可迁移的技术支持。由机械生产线延伸到煤矿设备,虽然使用环境改变,但是孪生的技术和内核方法没有变。无论是机械生产线上的数控机床、机器人,还是煤矿井下的采煤机、输送机,其核心都是旋转机械或机电液一体化系统,均面临着由磨损、疲劳、过载等导致的性能退化与突发故障问题,二者在故障物理机理、振动、温度等信号表征上具有高度共性。但本着具体问题具体分析的原则,煤矿相对于机械生产线,其极端恶劣的工况对数据质量提出了远比地面工厂更苛刻的要求,这反过来推动了感知技术与边缘计算在抗干扰、高可靠性方面的进步。此外,煤矿设备“故障样本稀缺”这一难题被急剧放大,促使研究人员将机械领域已开始探索的迁移学习、生成对抗网络(GAN)数据增强和小样本学习等前沿算法,置于煤矿应用场景下进行更具挑战性的验证与优化,从而将这些技术推向新的

成熟高度。通过构建煤矿设备机理模型与井下多源监测数据(振动、温度、压力、电流)驱动的融合诊断预测模型,并针对井下恶劣工况(强振动、高粉尘、电磁干扰)优化数据采集质量,开发适用于小样本、零样本故障的智能诊断算法,可以构建一套适用于煤矿的预测性维护与故障诊断的具体框架。近年来,该技术路径在煤矿恶劣工况下的可行性已得到初步验证。

2.3 全生命周期协同优化管理

数字孪生实现全生命周期协同优化,核心在于构建一个贯通各环节的“数据枢纽”与“决策沙箱”,重点解决跨主体、跨时段的多目标协同问题。在协同优化方面,其技术实现依赖于多智能体协同决策框架,将产业链中的设计方、制造单元、运维团队等视为具有自主决策能力的智能体,通过数字孪生平台进行实时数据交换与策略协调。基于统一的数据模型与交互协议,利用联合仿真技术在虚拟空间中并行推演不同部门的决策方案,并采用多目标优化算法或强化学习,以实现成本最低、交付最快、能效最优的全局目标下的资源动态调配与任务协同。这一协同优化技术框架可贯穿于产品的设计(早期)、制造运维(中期)和报废回收(后期)整个生命周期。

在机械产业链协同中,数字孪生作为“数据枢纽”,打通了企业内外的信息孤岛,从产品的设计、测试和可行性,再到定价、售卖和供应链,实现了跨部门、跨企业的资源优化配置与协同决策^[41-43]。例如,李清蕾^[44]提出的基于数字孪生的协同设计闭环(图10),通过集成产品生命周期管理(PLM)系统与企业资源计划(ERP)系统,使得设计方案可以快速迭代并优化,提升了整体产业链的响应速度与价值。同时,数字孪生平台涵盖了设计参数、生产成本、市场数据与竞争情报的多源异构数据融合,实现了从工程设计到商业决策的全周期跨阶段协同优化。

数字孪生技术从机械的全生命周期协同优化可

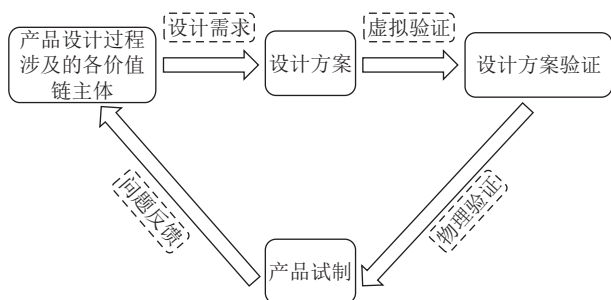


图10 基于数字孪生的智能制造产品协同设计闭环^[44]

Fig.10 Closed loop collaborative design of intelligent manufacturing products based on digital twin^[44]

以引申到智能化综采系统的全过程协同控制,具有重要的指导意义。综采工作面是一个由“三机”紧密配合的复杂系统,绝非单台设备的简单叠加。数字孪生技术应致力于构建一个覆盖“煤流-设备-人员”的综采系统级孪生体。借鉴机械产业链协同的理念,可实现:采煤机截割速度与刮板输送机运力的动态匹配、液压支架跟随采煤机行程的自动跟机联动,以及基于全局生产效率优化的协同调度。这将系统级智能从单点的设备监控提升至整个生产线的优化决策,是实现无人化综采工作面的关键。

3 数字孪生煤矿行业应用现状

3.1 煤矿安全管理中的数字孪生应用

煤矿行业因其特殊的工作环境和高风险性,一直以来都是安全管理的重点领域。数字孪生技术能够实时收集矿井内的各种安全数据,如瓦斯浓度、空气流量、温湿度等,结合矿井地质结构、设备运行状态等信息,通过虚拟模型进行综合分析,实时监控矿井的安全风险^[45]。当前研究主要围绕瓦斯、通风、冲击地压等重大风险源展开。WANG等^[46]基于数字孪生五维模型构建了瓦斯事故孪生安全管理模型,实现了煤矿瓦斯事故的智能预防与精准管控。李伟^[47]针对钻孔卸压设备状态监测不足问题,基于数字孪生技术构建了钻孔卸压平台智能监测系统,实现了设备运行状态的实时监控与故障预警。丁茹瑶^[48]基于数字孪生技术构建虚拟通风监测系统,通过C4D建模与CFD数值模拟实现瓦斯浓度精准预测与预警,提升了煤矿安全通风管理水平。张凯^[49]为解决传统数值模拟方法研究冲击地压计算结果与监测数据不匹配的问题,提出一种基于数字孪生技术的冲击地压监测预警方法,研究并设计了一种数字孪生驱动的煤场智能管控系统。王佳奇等^[50]为了弥补传统煤矿安全管理的不足,将数字孪生技术引入煤矿安全管理当中来。基于五维模型,研究构建了煤矿瓦斯事故数字孪生模型,如图11所示。

此外,井下通信能力的提高和稳定对煤矿安全也具有十分重要的作用,目前主流的方法是利用先进通信技术与数字孪生融合,搭建一个适用于井下的安全管理平台。张拴民等^[51]针对煤矿井下通信延迟和信息孤岛问题,将5G通信和数字孪生技术融合,构建了智能化安全管控平台,实现了煤矿安全生产的高效远程控制和智能化管理。赵文等^[52]则通过GIS建模与多源数据融合,利用数字孪生技术实现了矿山全流程数字化映射与智能决策。郭向阳等^[53]提

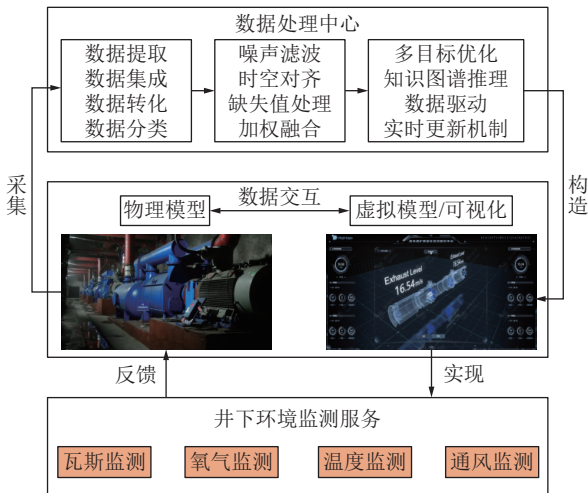


图 11 瓦斯事故数字孪生模型^[50]

Fig.11 Digital twin model of gas accident^[50]

出了基于数字孪生的智慧煤矿安全管控平台理念，设计了数据感知层、平台组件层和应用服务层的系统架构，分析了平台构建所需的关键技术，并构建了风险管控子系统。

尽管研究广泛，但多数系统仍处于“可视化监控”阶段，离真正的“智能预警”尚有距离。其局限性体现在：

1) 模型依赖性：瓦斯涌出、冲击地压等的预测高度依赖地质力学模型的准确性，而井下地质条件的不确定性极大，导致模型预测可靠性存疑。

2) 数据融合度低：现有系统多是对单一风险源的监测，缺乏对“瓦斯-应力-裂隙-微震”等多源异构数据的深度融合与关联分析，难以揭示灾害链生的机理。

3) 实时性不足：高保真度的 CFD 或力学仿真计算量大，难以实现分钟级甚至秒级的实时预警，制约了其在应急决策中的应用。

3.2 煤矿生产流程优化中的数字孪生应用

煤矿生产是一个复杂的系统工程，涉及矿区资源开采、设备调度、人员管理等多个环节。对煤矿生产的每一个环节进行细致化的流程优化是一个非常艰巨的任务，通过数字孪生技术能够构建煤矿的虚拟生产流程模型，对矿山的各个生产环节进行精确模拟。数字孪生技术通过对开采路径、设备使用、运输系统等环节的虚拟建模，可以有效减少能源消耗、提高采掘效率，并在矿山作业过程中及时调整方案，确保生产过程顺畅。在此背景下，诸多学者与工程实践者围绕数字孪生在煤矿生产流程优化中的关键问题展开了深入研究，致力于解决生产系统多环节耦合复杂、实时调控能力不足、决策依赖经验等痛点，

推动了该技术从概念框架逐渐走向系统化、集成化的工程应用。相关研究覆盖了生产控制、设备投资优化、安全管理及全局协同调度等多个层面，逐步构建起“数据驱动、虚实映射、智能决策”的煤矿生产数字孪生技术体系。这些成果不仅涵盖了对开采、运输、通风等关键流程的动态模拟与策略预演，也在一定程度上提升了煤矿生产系统的透明度、可预测性与整体智能化水平，为构建新一代智慧矿山提供了关键理论支撑与实现路径。具体的相关研究如下：

ZHANG 等^[54] 针对煤矿生产安全管控难题，基于数字孪生技术构建煤矿生产控制模型 (CMPCM)，通过人-信息-物理系统智能交互模式，实现了煤矿生产流程的健康管理。WANG 等^[55] 针对煤矿设备安全投资决策主观性强的问题，基于数字孪生技术提出数据与模型双驱动的优化方法，为煤矿生产提供了科学决策依据。刁怀斌^[56] 探究了数字孪生技术在煤矿生产中的应用路径，并搭建了一款基于数字孪生的煤矿生产智能化管理系统，实现了对煤矿生产全过程的数字化管控。肖黎俊等^[57] 为推进煤矿智能化转型，设计了基于数字孪生的智能管控平台，并在山西霍尔辛赫煤矿、贵州百卡煤矿应用。丁序海等^[58] 为提高煤矿智能化水平，实现对综采工作面的实时监测，在三道沟煤矿综采工作面上融合数字孪生、5G 技术，搭建了综采工作面数字孪生智能生产协同管控架构，如图 12 所示，这是实现系统级应用的有益实践。

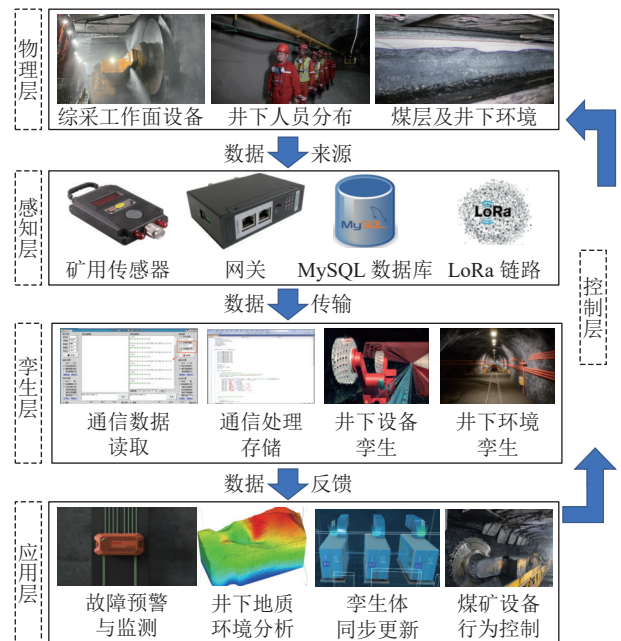


图 12 综采工作面数字孪生智能生产协同管控架构^[58]

Fig.12 Digital twin intelligent production collaborative control architecture for fully-mechanized mining face^[58]

该领域的研究呈现出从“设备级优化”向“系统级协同”演进的特点,目前绝大多数研究存在以下问题:

1) 优化算法与实际脱节:许多研究提出的优化算法(遗传算法、强化学习等)在仿真环境中效果显著,但未充分考虑井下生产组织的复杂性(如设备突发故障、人员调度、地质变化),导致算法失效。

2) “数据-模型-决策”闭环未贯通:目前的应用多以监测和可视化为主,虚拟模型产生的优化指令(如采掘方案调整、运输系统调速)如何安全、可靠、自动地反馈给物理实体并执行,仍是技术瓶颈。决策仍需人工介入,未能形成完整闭环。

3) 经济效益评价缺失:缺乏对部署数字孪生系统所带来的投资回报率(ROI)的量化研究,使得企业决策缺乏依据,阻碍了数字孪生系统的大规模推广。

3.3 煤矿设备监测与维护中的数字孪生应用

煤矿设备的健康与运转效率直接影响矿井的生产安全与经济效益,目前煤矿设备监测运维管理技术的发展历程可划分为3个阶段,分别为煤矿装备管理标准体系建设,设备台账流程管理和智能运维管理及系统平台建设,目前主要在智能运维阶段进行拓展和延伸^[59]。煤矿设备智能运维的实现主要依托于以下3个层面的技术融合与应用:

1) 基于物联网的设备状态智能感知与精准识别技术。为实现对设备状态的全面实时感知,当前研究与实践普遍采用部署多源本安型传感器(振动、温度、压力、电流传感器)与无线射频识别(RFID)技术相结合的方式,构建覆盖关键设备的立体感知网络。有研究提出了多层级RFID运维管理模型,通过为设备部署电子标签,实现对设备身份、位置信息与关键运行参数的非接触式自动采集与识别,降低了故障识别响应时间^[60]。此外,通过引入工业互联网标识解析体系,为每一台矿用设备赋予唯一的标识编码,实现“一物一码”,为设备从采购、安装、运行、维护到报废的全生命周期数据追踪与信息互通提供了标准化基础,可有效解决设备管理中的信息孤岛难题^[61]。

2) 基于云边协同的系统架构与大数据分析技术。面对井下设备产生的海量、异构数据,构建集数据采集、传输、存储、计算与分析于一体的云边协同平台成为主流技术方向^[62]。通过设计基于云平台的智能运维服务系统,利用工业以太网和轻量级通信协议将井下数据安全传输至云端,在平台层集成数据清洗、存储与各类故障诊断算法模型,以软件服务

(SaaS)的形式为多方用户提供设备状态监测、远程诊断、运维工单管理等应用,最终实现“线上诊断、线下运维”的新型服务模式^[63]。在故障诊断的核心算法层面,呈现出机理模型、数据驱动与专家知识深度融合的技术趋势。王铁军^[64]提出了“机理模型+AI建模+专家诊断”的综合诊断方法,一方面通过规则引擎等可视化工具将设备物理机理与专家经验固化为可执行的诊断规则;另一方面,利用历史运行数据训练人工智能算法,实现基于数据驱动的早期预警;同时,通过构建可不断丰富的故障案例库与知识库,实现诊断经验的积累与复用,形成持续优化的智能诊断能力。在具体设备应用中,刘晓峰^[65]针对掘进机开发了集成案例推理(CBR)与规则推理(RBR)的智能诊断系统,通过传感器实时采集机、电、液系统参数,与历史故障案例进行匹配推理,实现了对潜在故障的快速识别与精准定位,有效提升了故障发现率与诊断效率。

3) 智能运维体系全生命周期管理技术。智能运维的内涵已从传统的故障后维修和定期检修,扩展到覆盖设备从选型、采购、安装、运行、维护至报废回收的全过程。针对井下特殊环境,目前已形成体系化的设备全生命周期管理理念,其核心在于构建设备与人、设备与环境以及其他设备之间的动态关联模型。通过这一体系,不仅能实现设备状态的实时感知与自我诊断,更能基于全局数据对设备健康趋势进行超前预测,并最终通过智能工单系统驱动运维活动,形成一个贯穿设备一生的、持续优化的管理闭环,从战略层面保障设备资产综合效率最优化^[66]。

这些技术方法的应用,为实现设备状态的透明化、运维决策的智能化奠定了坚实基础,同时也为数字孪生技术在煤矿运维中实现多源数据融合、故障预警策略优化与智能闭环管控,提供了相应的技术准备与落地场景。

数字孪生技术能够提供煤矿设备的全生命周期管理和智能化维护,基于历史运行数据与机器学习算法建立的预测性维护模型,可准确预判比如轴承磨损、齿轮失效等潜在故障,使维护周期从传统的定期检修转变为按需维护。目前主流的研究方法是针对煤矿井下具体设备,将数字孪生技术与先进的AI算法进行深度融合,用以提升诊断精度与系统响应能力。对于这种模式,数字孪生在这里大多数起到一个可视化界面与状态呈现的作用,通过构建直观、动态的三维虚拟界面,有效辅助工程人员实时掌握设备运行状况、历史数据及诊断结果,方便人员查看。

但是系统的核心分析与决策能力仍高度依赖于所采用的 AI 算法,所以主体核心部分还是在算法方面,这些算法需要完成信号处理、特征提取到状态识别与预测的关键任务,构成了数字孪生监测维护系统的核心驱动力。

GUO 等^[67]针对智能采煤工作面知识链挖掘不足的问题,构建了五维数字孪生框架,通过建立“环境-机器-物料”多能流耦合的动态知识演化模型,为煤矿设备监测与智能开采提供了知识驱动的决策支持新范式。GAO 等^[68]基于数字孪生技术提出 CNN-LSTM 融合算法,通过 AMESim-MATLAB 联合仿真构建故障诊断平台,解决了矿井提升机制动系统故障预测难题。李丁卯等^[69]针对矿用机电设备智能化故障诊断需求,基于数字孪生技术提出混合建模方法,结合小波变换特征提取,提升了煤矿设备监测的故障识别准确率和实时性。姜占东等^[70]构建了一套涵盖基础支撑层至智能化应用层的完整数字孪生技

术架构,通过物联网与边缘计算实时监测电气设备,结合 5G 技术实现了高效数据交互与可视化。许升起等^[71]针对煤矿机电设备状态监控与维护需求,提出数字孪生煤矿机电设备数字映射与智能诊断架构。采用基于卷积神经网络(CNN)的故障诊断方法,提升了诊断精度与效率。张磊等^[72]针对鄂尔多斯万利一矿 31311 工作面缺乏实时监测和预测能力、视频信号视角有限且有粉尘干扰的问题,搭建了数字孪生监测维护平台,系统架构(图 13)。该流程始于传感器数据采集,经 PLC/OPC 服务器汇聚后,通过 MQTT 与 MySQL 协议分别处理实时与历史数据,并驱动 Unity 三维可视化平台实现设备状态的监测。系统对异常数据自动预警,并依据故障预测模型生成维护决策,指导现场人员进行维护操作,最终将结果反馈至系统,形成一个持续优化的“监测-预警-维护”数据闭环,有效提升了设备故障预测准确性与维护效率。

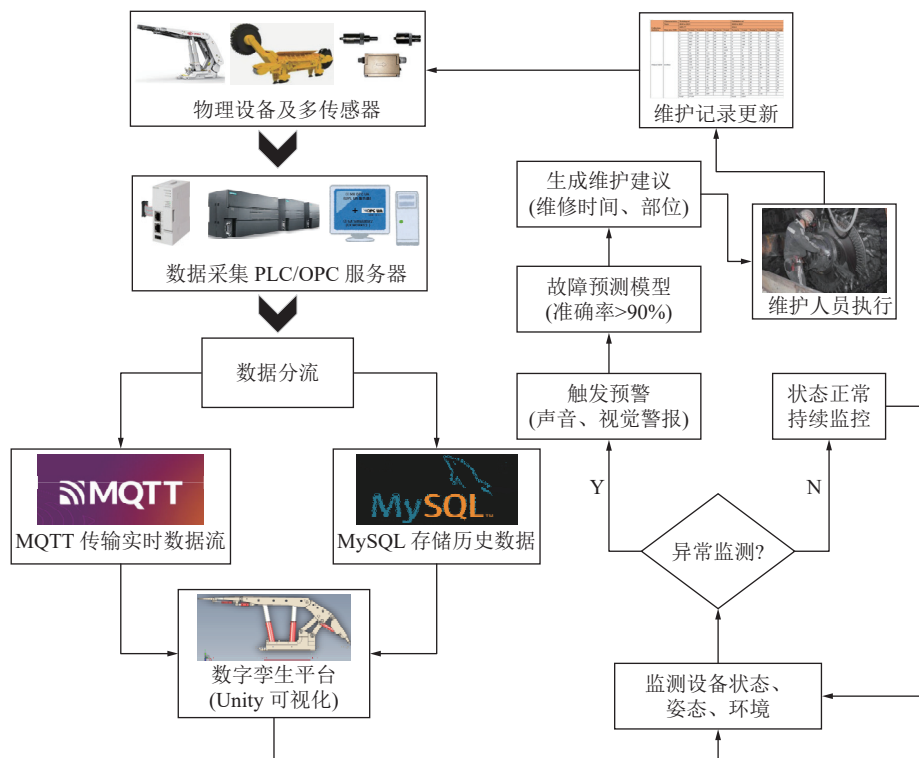


图 13 煤矿采煤工作面数字孪生监测维护系统架构^[72]

Fig. 13 Architecture of digital twin monitoring and maintenance system for coal mining face^[72]

虽然井下设备数字孪生+监测维护这一研究非常广泛,但普遍存在“算法过剩而数据匮乏”的矛盾。大量研究扎堆于采用 CNN、LSTM 等流行算法进行故障分类,但在特征工程、模型轻量化(以适应井下边缘计算设备)方面创新不足,许多模型为“黑箱”。其次,诊断模型依赖大量高质量、带标签的训练数

据,煤矿设备的核心部件故障数据极为稀少,大型关键设备,例如采煤机摇臂、主泵站的严重故障数据极为稀少,企业出于安全和管理考量,往往难以获取此类数据并用于研究。另外,井下强振动、高粉尘、潮湿、电磁干扰等恶劣环境导致传感器数据信噪比低,原始振动信号中掺杂大量背景噪声。许

多研究在预处理阶段简单采用滤波或小波变换,对于非平稳、非线性的强噪声处理效果有限,导致模型在实际应用中泛化能力骤降,这形成了算法先进性与数据低质性的矛盾。由于缺乏有效的迁移学习和小样本学习机制,模型在现场的泛化能力不足。此外,大部分研究仍以数据驱动为主,未能与设备固有的物理机理模型(如传动系统动力学模型、液压系统模型)深度耦合。纯数据驱动模型存在2个缺点:第一是可解释性差,这种模型只能给出“可能发生故障”的预警,但无法解释“为何发生”及“何种故障模式在演化”,井下工程师难以据此制定精准的维修策略,从而降低了信任度和可用性。第二是外推能力弱,纯数据模型在训练数据覆盖的工

况内表现良好,一旦遇到未见过的新工况或复合故障,其预测结果可能完全失效,甚至给出错误预警,带来巨大风险。为了解决上述问题,应将机理模型与数据驱动模型进行深度耦合。比如,构建一个齿轮箱动力学仿真模型,生成大量涵盖不同故障类型和程度的仿真数据,再利用迁移学习技术,用仿真数据预训练模型,最后用少量真实的井下数据进行微调,从而解决数据稀缺问题,增强其可靠性和外推能力。

但总体而言,数字孪生技术在煤矿领域的应用仍具有比较大的进步性,包括井下一些关键设备的状态监测、故障预测、维修指导等多个维度,具体的评估指标及数据对比见表1。

表1 数字孪生技术应用于煤矿关键设备运维的量化效能对比^[67-72]

Table 1 Quantitative efficiency comparison of digital twin technology applied in coal mine key equipment operation and maintenance^[67-72]

评估维度	具体指标	传统运维模式 (基准)	引入数字孪生后 (典型值)	提升幅度/变化趋势	关键支撑技术与依据
状态监测数据基础	数据采集频率	分钟级,关键参数为主	毫秒级至秒级 多参数同步	可提升1~2个数量级	5G、工业以太网等保障高频数据传输
	数据采集点覆盖	单机、孤岛式采集,点位有限	系统性、全生命周期数据采集,点位可达数千至上万个	覆盖率可提高3~5倍	构建包含设备、环境、人员的全面感知模型
	模型精度与规模	简单的二维图纸或低精度模型	1:1高保真三维模型,三角面数可达百万级	从示意性到毫米级精准映射	采用3D Max、BIM等精细建模渲染技术
故障预测健康管理	故障预测准确率	依赖经验,突发故障预测率<30%	对核心部件故障估计预测准确率>92%	准确率可提高2倍以上	基于数字孪生与深度学习融合预测
	平均无故障时间(MTBF)/h	500~800	可延长至1000~1500h	提升60%~90%	预测性维护避免突发故障,延长稳定运行周期
	非计划停机率	占生产时间的7%~10%	可降低至3%~4%	下降>50%	实时监控与精准定位故障点,有案例显示设备事故率降低了31%
维修执行与效率	维修响应时间	发现异常到现场诊断平均需4~8h	系统自动预警、定位,响应缩短至1~2h	可缩短60%~75%	数字孪生系统结合MR技术指导维修
	部件更换时间	故障后更换	可实现提前更换	保障生产连续	全生命周期预测部件寿命

注:数据为综合当前学术文献与行业领先应用案例报告值的典型范围。其中,故障预测准确率、非计划停机率等指标参考了李丁卯等^[69]、姜占东等^[70]、张磊等^[72]的研究成果;设备综合效率(OEE)、平均无故障时间(MTBF)等指标依据《智能化矿山验收标准(征求意见稿)》及相关行业分析报告进行估算。数据旨在展示技术应用的积极趋势和潜在潜力,具体数值因矿井地质条件、技术方案和实施水平而异。

4 数字孪生综采装备技术发展现状

4.1 数字孪生技术在综采装备中的应用场景

数字孪生技术在综采装备技术中的应用场景涵盖采煤、运输、支护等全作业链条,并通过构建虚拟矿山,实现对综采作业过程的全面感知、动态预测与智能决策^[73]。通过数字孪生技术,可以监控综采工作面的地质条件、煤层厚度、岩石结构等因素,优化采煤路径与设备运行模式。同时,在运输环节中,数字孪生技术通过实时监控刮板输送机、皮带输送机等设备的状态与煤流量数据,优化运输路径与设备运行模式,避免运输过程中的堵塞、过载等问题,提

高运输效率^[74-76]。其应用可根据集成度和智能化水平划分为3个渐进的层级:

1) 设备级(Equipment Level): 聚焦采煤机、刮板输送机、液压支架等单设备的机理建模、状态监测与本机优化,是当前研究最密集、技术相对最成熟的层级,但是孤立性明显。

2) 系统级(System Level): 主要研究综采三机之间乃至与配套系统(如供电、通风)的协同联动。其核心是打破信息孤岛,通过DT实现数据互通与动作同步,追求“1+1>2”的整体效率与安全提升。

3) 决策级(Decision Level): 面向整个工作面的生产管理与战略决策。基于DT对“地质-装备-工

艺”的全景映射和模拟推演,进行生产计划优化、能耗管理、风险预警与投资决策,是实现矿井级智能化的最高形态。

4.2 数字孪生技术在综采三机设备中的应用

综采三机设备(采煤机、刮板输送机、液压支架)是综采装备技术的核心组成部分,其高效协同运行是综采作业的基础。数字孪生技术根据三机设备的具体应用场景和动作特征进行建模与实时监控,提升了设备运行效率和协同管理能力。其研究根据综采三机不同的特点和适用场景,展开了广泛研究,但大多是用数字孪生技术做控制方向,突破了可视化的局限,可以实现初步的“以虚控实”。

4.2.1 采煤机数字孪生技术应用

采煤机作为综采工作面的主要作业设备,其运行状态对整个采煤过程至关重要。数字孪生技术在采煤机领域的应用已从理论探索走向实践落地,目前形成了以“感知-建模-分析-决策”为核心的技术体系。根据功能定位和技术成熟度的不同,当前数字孪生在采煤机上的应用主要体现在实时状态监控、预测性维护、自适应控制3个方面。

现代数字孪生系统通过安装在采煤机上的多源传感器网络(包括振动传感器、电流传感器、温度传感器、位移传感器等),可以采集滚筒转速、牵引速度、电机功率、轴承温度、齿轮箱振动等关键参数,采样频率最高可达10 kHz,并可以实现对采煤机工作状态的毫秒级监测。2023年陕煤曹家滩矿业与梅安森科技联合开发的“煤矿数据治理系统”采用了边缘节点预处理与中央平台深度融合的分层架构,提升了数据处理的效率和准确性。小保当煤矿在2025年应用天玛智控两巷数字孪生系统,实现了两巷设备状态的动态监测。王春燕^[77]构建的采煤机数字孪生监测系统通过传感器数据融合和FMU协议实现了虚实数据的高效交互,系统集成SCADA、PLC等工业控制系统,形成了完整的设备状态监控体系。实时状态监控是数字孪生技术在采煤机上最基础也是目前最成熟的应用方向。

预测性维护是实时状态监测技术的进阶,通过所监测的设备参数,反过来对采煤机设备健康运行提供保障^[78]。DING等^[79]提出的基于数字孪生的预测性维护方法通过高保真建模与AE bi-GRU预测模型,实现了采煤机关键部件剩余寿命的精准预测,调整后的确定系数 R^2 达到0.9916,显著高于传统机器学习方法的预测精度。丁华等^[80]的研究进一步将数字孪生与深度学习融合,构建了采煤机多物理参数

仿真系统,通过有限元分析模拟不同工况下关键部件的应力分布、温度场变化等物理特性,结合实际传感器数据对模型进行实时校正,提高了采煤机状态预测的准确性。

在当前,预测性维护系统面临的主要挑战是数据稀缺性问题。采煤机关键部件的全寿命周期数据难以获取,特别是故障数据更为稀少,导致深度学习模型训练不足^[81]。针对这一问题,有研究开始采用生成对抗网络(GAN)合成故障数据,或通过迁移学习利用类似设备的故障数据来提升模型泛化能力^[82]。陕煤曹家滩矿业的数据治理系统就采用了生成对抗网络来增强数据样本,提高了异常检测的准确性。

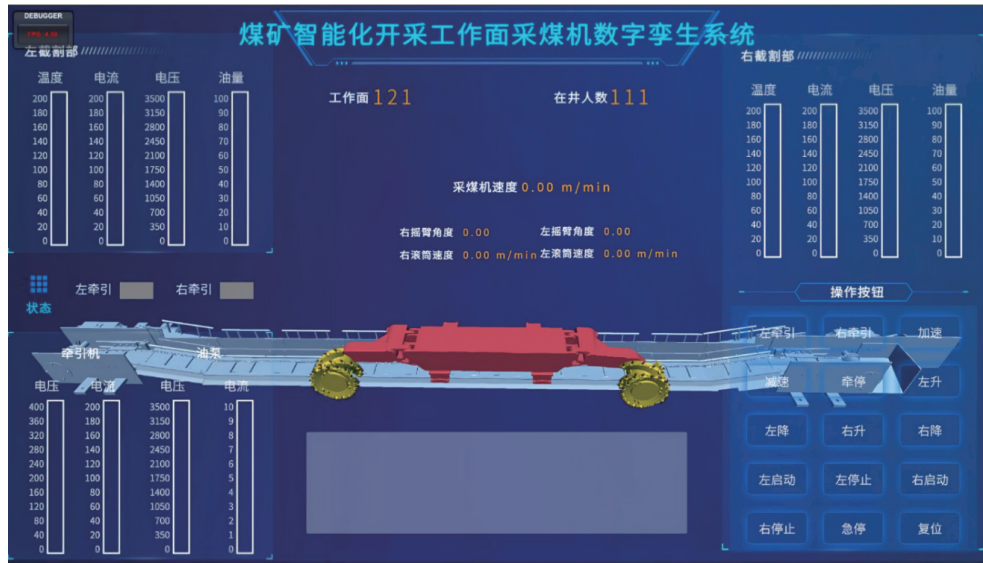
自主导航控制与智能截割代表了采煤机数字孪生技术的最高应用水平,也是实现“无人工作面”的关键环节。采煤机在工作过程中需要根据煤层厚度、硬度等地质条件变化自动调整滚筒高度和牵引速度,传统PID控制难以应对复杂多变的井下工况。数字孪生通过构建虚拟控制环境,实现了采煤机截割过程的智能调节和自主决策;通过构建虚拟工作面和强化学习环境,为采煤机智能决策提供了训练平台。

YOU等^[83]设计的基于数字孪生的自适应模糊滑模控制器(AFSMC)通过位移估计和模糊逻辑补偿,有效解决了采煤机调高系统中的非线性和不确定性扰动问题。相比传统PID控制,AFSMC在煤层厚度突变工况下的调节时间缩短了约40%,表现出更强的鲁棒性。尹宇航^[84]开发的采煤机数字孪生动态联控系统则从系统集成角度推进了自适应控制的实用化,实现了对采煤机的状态监测与控制操作。该系统通过TIA Portal实现PLC程序控制,利用SOLIDWORKS进行三维建模,最后在UNITY 3D平台上实现虚实联动,构建了完整的采煤机数字孪生动态联控系统,如图14所示。

MIAO等^[85]提出的采煤机导航切割运动规划系统采用多层级架构,包括物理感知层、综合数据层和数模融合分析层。该系统通过深度强化学习算法比较验证,实现了采煤机自主导航切割的智能化优化控制。

苗丙等^[86]的研究进一步细化了采煤机自主导航的数字孪生框架,将数字孪生服务层也融入了系统之中。该研究特别强调了“强化学习环境的数字化建模”,通过数字孪生虚拟环境训练自主决策算法,再将优化后的策略迁移到物理采煤机上,解决了直接在真实设备上训练带来的安全风险和成本问题。

采煤机数字孪生自主导航技术面临的主要瓶颈

图14 采煤机数字孪生动态联控系统^[84]Fig.14 Implicit digital twin model of shearer automatic height adjustment^[84]

是复杂地质适应性问题。如果采煤机不能自适应调整,强行截割极易引发冒顶、片帮,甚至瓦斯突出等事故。数字孪生虚拟环境与真实井下工况仍存在一定差距,特别是在断层、褶曲等复杂地质条件下,自主决策算法的可靠性仍需提升。为了提高复杂地质条件下数字孪生系统的可靠性,最新研究开始将地质雷达数据融入数字孪生模型,增强对隐蔽地质异常的感知能力。赵石畔煤矿正在探索的“5G+AI+透明地质”技术有望进一步缩小虚实差距,释放矿山智能化潜能。

4.2.2 刮板输送机数字孪生技术应用

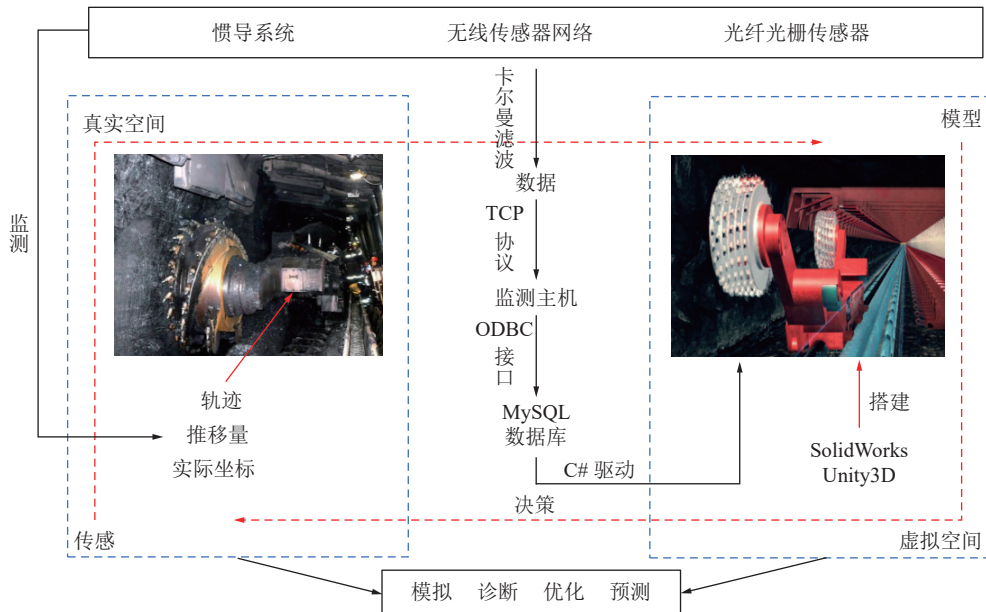
刮板输送机负责煤炭的运输,其运行效率和稳定性直接影响采煤效率。数字孪生技术可以对输送机的电机功率、链条张力等参数进行实时监测,模拟煤炭运输的动态过程,优化输送速度与能耗,避免因过载或空载引发的设备问题^[87]。当前,国家能源集团、陕煤集团等已率先应用刮板输送机数字孪生技术。中国煤炭科工集团太原研究院开发的“刮板输送机智能健康管理系统”实现了对链条张力、电机电流、减速机振动等关键参数的实时监测与趋势预测;天地科技股份有限公司的“工作面三机协同控制系统”则通过数字孪生技术优化了刮板输送机与采煤机、液压支架的配合关系,提高了整套系统的运行效率。与此同时,学术界在刮板输送机数字孪生领域也取得了丰硕成果,从高精度建模、数据融合到智能算法等多个层面推动了技术进步。

FENG等^[88]基于数字孪生技术提出刮板输送机减速机多源异构数据融合故障诊断方法,通过

VMD降噪和GAF图像转换构建数据集,结合CBAM-CNN模型提高了故障分类准确率,可以达到99.4%。LI等^[89]基于数字孪生技术构建了“煤层+设备”联合虚拟校直系统,通过分析刮板输送机浮动连接机构的运动规律,提出了新型校直方法(平均校直误差2~8mm),并在Unity3D平台验证了该方法在复杂煤层底板条件下的校直精度。张帆^[90]则采用光纤光栅传感器,利用卡尔曼滤波算法对刮板输送机直线度进行反演,形成了模拟、诊断、优化、预测一体化流程,所搭建的刮板输送机直线度监测数字孪生模型如图15所示。

ZHANG等^[91]针对刮板输送机中部槽结构力学响应实时同步难题,提出一种基于层次聚类和深度神经网络(DNN)的数字孪生建模方法,通过有限元分析获取不同载荷工况下的节点响应数据,采用DNN预测节点聚类结果,并在Unity平台开发可视化界面。WANG等^[92]基于数字孪生技术提出刮板输送机S形弯曲的虚实映射方法,通过建立机理模型并采用IQR等异常数据处理算法,在乌兰木伦煤矿验证了该技术对刮板输送机运行状态实时监测的有效性。吴爱民等^[93]提出了基于数字孪生技术的刮板输送机智能控制方法,通过数字孪生可实现对刮板输送机的远程监控和故障诊断,实现对链条的自动张紧控制。

目前,数字孪生技术在刮板输送机领域的应用主要通过多源传感器网络和三维可视化技术,实现高精度数据采集和动态展示,部分应用已能监测直线度、链条张力等关键参数,并实现虚拟与现实之间

图 15 刮板输送机直线度监测数字孪生模型^[90]Fig.15 Digital twin model for monitoring straightness of scraper conveyor^[90]

的映射。在智能控制方面,数字孪生技术已经可以支持刮板输送机的自动校直、速度优化和协同控制,部分系统可实现与采煤机、液压支架的智能联动。此外,数字孪生技术在刮板输送机链轮磨损、链条张力监测、断链预警方面应用还较少,这3个方面作为刮板输送机发生故障停机的重要指标,应该作为今后刮板输送机数字孪生技术研究的主要方向之一。

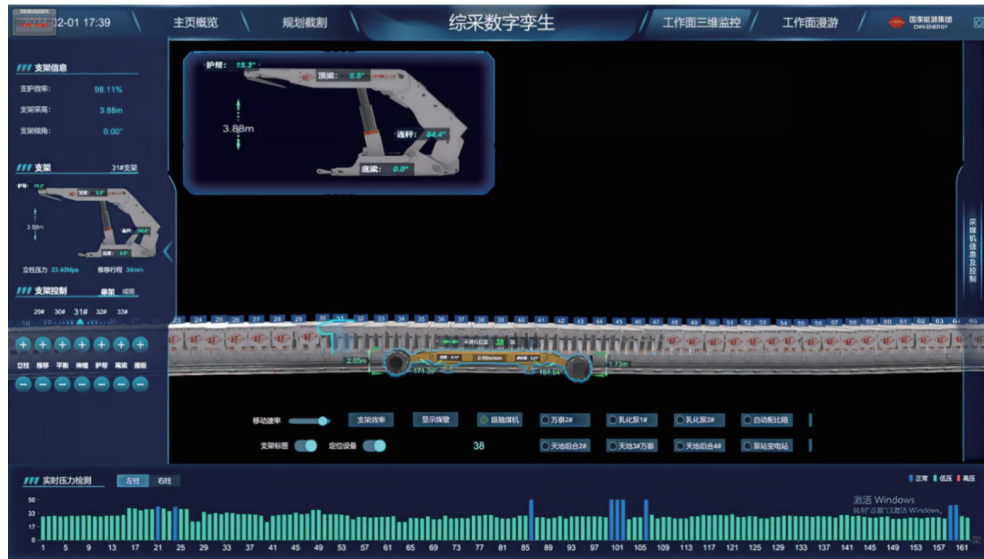
4.2.3 液压支架数字孪生技术应用

液压支架用于支撑综采工作面的顶板,其安全性对矿工生命和工作面稳定性至关重要。液压支架传统控制方式及运维管理模式主要依赖于人工操作,存在安全性差、生产效率低、运维成本较大等问题^[94]。通过数字孪生技术,可以监控支架的载荷、倾斜角度、液压压力等数据,模拟顶板压力的动态变化,预测潜在的安全隐患,并通过反馈调整支架位置和压力分布,保障工作面安全。YOU等^[95]利用液压支架数字孪生位移控制方法,通过构建岭回归预测模型和液压缸数学模型,实现了支架群协同作业的精确位移控制。JIAO等^[96]基于数字孪生系统提出液压支架群位姿自主调整智能决策方法,通过构建全位姿参数矩阵和三维工作空间,在虚拟空间完成决策优化后反向控制实体支架。XIE等^[97]将数字孪生技术融入液压支架监测之中,通过信息融合算法与虚拟数字模型的实时同步,实现了液压支架全生命周期姿态的精准监控。HAO等^[98]为了采集液压支架群位姿信息,提出基于点云与数字孪生的位姿重建方法,通过虚实点云融合技术实现了采煤机与液压支

架群的位姿重构及风险等级评估,为煤矿设备监测提供了精准位姿数据支持。XIE等^[99]基于数字孪生技术构建大型采煤工作面物理模拟系统,通过液压支架姿态感知与仿真系统实现虚实精准映射。王金辉^[100]则针对液压支架井下姿态感知盲区的问题,基于数字孪生技术构建了液压支架仿真测试平台,如图16所示。通过建立等比例缩小模型和数字孪生环境,集成CAN通信系统实现数据采集与三维可视化。

焦秀波^[101]针对液压支架群协同控制复杂、智能化程度低的难题,提出数字孪生驱动的智能调控方法。通过构建全位姿参数矩阵和分布式协同控制模型,实现支架群虚拟协同决策。张帆^[102]提出了基于数字孪生和SSA-RF算法的预测方法。通过构建两柱式支架数字孪生体模型,实现支护系统与围岩相互作用的精准映射,解决了传统液压支架载荷预测忽略动载荷影响的问题。同时,针对深部开采中液压支架自感知能力差、抗冲自适应能力弱的情况,提出一种基于数字孪生和深度强化学习的自适应抗冲支护方法^[103],构建了液压支架多维度数字孪生模型(物理、控制、机理、数据及仿真模型),利用DQN算法优化PID控制参数,动态调节支护压力,实现了虚实交互与智能决策。刘萌等^[104]针对液压支架数字孪生系统存在的精度-时延矛盾问题,构建了液压支架姿态数字孪生系统,通过构建轻量化孪生模型和优化数据传输机制,在保证姿态映射精度的同时降低了时延30%。

综上,数字孪生技术在液压支架的应用主要包

图16 液压支架数字孪生仿真测试平台^[100]Fig.16 Digital twin simulation testing platform for hydraulic supports^[100]

括以下3个方面:

1) 数据监测与感知: 通过安装倾角、压力及位移传感器, 采集液压支架的载荷、倾斜角度(姿态)、液压缸压力、位移等物理数据, 实现工作状态透明化。

2) 力学特性分析与诊断: 在构建的虚拟液压支架模型中, 基于外界传输数据和内置的力学机理模型, 进行静力学和动力学仿真, 分析支架的受力状态, 用于预测潜在故障(如压架、倒架)和评估结构健康。

3) 智能决策与协同动作响应: 基于虚拟空间中的仿真、预测和优化结果, 利用AI算法进行决策, 生成控制指令并反向发送给液压支架物理实体, 实现设备的自主、精准调整。

尽管综采三机的功能迥异, 但其数字孪生应用面临着许多共性瓶颈:

1) 保真度与实时性的矛盾: 对于这种在复杂工况下的设备, 高精度的力学、液压学仿真模型是精准映射的基础, 但计算耗时, 难以满足井下控制对实时性的要求(通常需毫秒至秒级)。这导致许多研究中“虚”与“实”存在数秒甚至分钟级的延迟, “数字孪生”退化为“数字延时镜像”, 严重制约了其在实时控制中的应用价值。

2) 感知层能力欠缺: 数字孪生的效能严重依赖高质量输入数据。然而, 井下恶劣环境导致传感器部署受限、精度下降、寿命缩短。目前对液压支架群姿态的精确、连续测量, 或对刮板输送机链条预紧力的实时监测, 仍是工程难题。

3) 算法对复杂地质的适应性不足: 现有控制算法多在预设的典型工况下验证。然而, 煤矿地质条

件复杂多变, 遇断层、褶曲等隐蔽地质异常时, 算法因无法感知其背后的地质力学变化而极易失效, 引发安全风险。孪生系统亟需融入地质雷达、随钻测量等地质感知技术, 构建“透明工作面”, 以便缩小虚实差距。

4.3 数字孪生与智能化综采系统融合

将综采三机的数字孪生单体集成为一个完整的智能化综采系统, 是综采技术研究的最终目标之一。数字孪生技术在智能化综采系统中依托虚拟工作面模型实现采掘、运输、支护全流程的动态仿真与协同优化。该系统通过整合大数据与人工智能算法, 实时分析不同工况下的作业效率与风险因素, 为复杂地质条件下的采掘路径选择提供最优决策支持。该技术与物联网深度融合, 使地面控制中心能够通过虚拟模型对采煤机、刮板输送机和液压支架等关键设备实施远程精准调控, 降低井下作业风险。这种全流程智能化管控体系可以实现开采方案的精准模拟与优化决策, 更通过远程监控和自适应调节推动煤矿开采向高效安全智能化的新阶段发展。

苗丙等^[105]为解决煤矿井下采煤工作面多设备协同控制难题, 构建了数字孪生智采工作面系统框架。通过建立采煤机、液压支架、运输系统等关键设备的感知模型, 解决了复杂工况下数据融合与协同控制的瓶颈问题。张旭辉等^[106]针对煤矿采掘工作面远程控制存在的感知延迟、协同困难等难题, 基于数字孪生技术构建了包含智能感知、无损传输、位姿测量等六大技术体系的应用框架。通过虚实交互技术实现设备状态实时监测、MR辅助维修和远程智

能控制,为智能矿山建设提供了“感知-决策-控制”一体化解决方案。尤秀松等^[107]为了进一步提高煤矿综采设备智能控制水平,提出数字孪生驱动的智能控制方法。通过构建“物理-虚拟-交互”三体协同架构,实现了采煤机、液压支架和刮板输送机的精准映射与协同控制,显著降低了人工干预强度,为复杂工况下的设备自适应控制提供了有效解决方案。谢嘉成等^[108]提出基于数字孪生的综采工作面生产系统框架,通过物理工作面、虚拟工作面和监控服务系统的协同运行,实现生产要素优化配置与开采过程实时监控。葛世荣^[109]为解决煤矿无人化开采的感知交互和工艺优化难题,提出了数字孪生智采工作面系统(DTSMW)。通过融合 5G 和仿生技术,采煤装备的智能性得到了提高,其智能仿生特性如图 17 所示。该系统的创新之处在于,它并非简单地实现设备的自动化,而是模仿生物体的智能行为模式,形成了一个类似“感官-大脑-肢体”的协同响应闭环。具体而言,系统通过遍布工作面的传感网络(感官)实时采集地质、装备姿态、压力等多源数据;依托数字孪生虚拟模型与人工智能算法(大脑)进行数据融合、仿真推演与智能决策,如同大脑处理信息一般;最终通过精准控制的采煤机、液压支架等执行

机构(肢体)自适应地完成截割、支护等动作。该系统为实现安全、高效、自适应的煤矿无人化开采提供了全新的技术路径。数字孪生与智能化综采系统的深度融合,其价值最终体现在生产系统整体性能的量化提升上,其主要指标的变化对比归纳见表 2。



图 17 数字孪生智采工作面的智能仿生特性^[109]
Fig.17 Intelligent bionic characteristics of digital twin intelligent mining face^[109]

表 2 数字孪生智能化综采系统关键指标变化与技术对比^[105-109]

Table 2 Key index changes and technology comparison of digital twin intelligent fully-mechanized mining system^[105-109]

评估维度	具体指标	智能化建设初期(传统模式(基准))	数字孪生深度应用阶段(先进水平)	提升幅度(变化趋势)	关键支撑技术与依据
系统协同与自动化	工作面自动化率	30% ~ 40% (单机自动化为主)	85% ~ 95% (系统协同自动化)	向近乎全流程无人化演进	基于统一数字孪生平台实现“三机”智能协同控制 5G网络、实时数据引擎确保虚实同步 虚实交互与实时修正技术
	数据实时性与交互	核心控制数据延迟在秒级(2 ~ 5 s)	核心控制数据可达毫秒级(<200 ms)	延迟降低一个数量级	
	协同控制决策	依赖人工经验, 协调性差	基于多智能体协同决策框架, 自动优化配合作业	从人主决策到数据与模型驱动决策	
生产效率与资源利用	生产工效/(t·工 ⁻¹)	80 ~ 120	150 ~ 220	提升约1倍	系统级协同优化煤流与设备配合 智能调速、负载匹配, 实现节能运行 融合GIS、BIM与实时扫描数据构建高精度地质模型
	吨煤生产能耗	基准值 100%	优化至 85% ~ 90%	持续下降趋势	
安全管控与人力配置	工作面资源回收率	受地质变化影响大, 波动范围宽	通过透明地质模型与精准控制, 提升 3% ~ 5%	向精细开采发展	远程智能监控与协同控制能力增强 状态监测与超前预警 数字孪生与通风、灾害预警系统融合
	井下作业人员密度	一个工作面 15 ~ 20人	可减少至 5 ~ 8人(巡检与应急岗位), 先进案例可达3 ~ 4人	向“少人化、无人化”迈进	
	重大安全事故风险	突发事故概率约 0.5%	预计可降至 0.1% 以下	降低约80%	
经济效益与成本	灾害预警与应急响应	依赖定期检查, 响应慢	实时模拟与推演, 实现分钟级预警与预案生成	从被动防御到主动预警	减少停机、优化调度, 全面提升设备利用率 预测性维护减少非计划维修和备件浪费 集成化平台降低后期运维与扩展成本
	设备综合效率(OEE)	55% ~ 65%	78% ~ 85%	提升13% ~ 20%	
	维修成本	基准值 100%	预计可降低 20% ~ 30%	显著下降	
	系统投入与ROI	初期投入较高	预计投资回收期 2 ~ 3 a, 长期效益显著	通过增效降本实现正向回报	

注: 数据基于国家能源集团、陕煤集团等示范矿井的公开报道、行业白皮书及部分参考文献(苗丙等^[105]、尤秀松等^[107]、葛世荣等^[109])的综合分析。智能化综采工作面数字孪生系统级指标的提升是一个渐进过程, 所示范围为当前技术可达的先进水平。工作面自动化率、减人效果等指标与《煤矿智能化建设指南(2021版)》的发展目标相吻合。

数字孪生技术在智能化综采系统中的初步应用是实现工作面的全面可视化。目前,多个煤矿已经建立了高精度三维模型,能够对矿山地表厂区、井下巷道、采掘工作面以及设备设施进行真实形态还原。陕煤蒲白建新煤化公司和国能集团陕西德源府谷能源有限公司已经进行了实际应用,提高了安全生产水平。智采系统进一步应用则是实现多设备协同控制和智能决策优化,比如小保当矿业公司通过数字孪生技术实时映射井下作业场景,系统呈现出煤层赋存状态与设备运行轨迹,使采煤机能够自动调整截割参数。这其中的重点难点与可发展方向是高精度三维地质建模和透明工作面技术。目前的技术已经能够通过地质钻孔、地震全波形反演、采掘工程等实测数据,采用GIS建立粗略三维地质模型,并依托激光点云扫描设备获取工作面地质信息。多个煤矿的应用实践表明,数字孪生技术不仅在提高生产效率方面发挥作用,也在推动绿色矿山建设方面做出了重要贡献。随着技术的不断研发,数字孪生与智能化综采系统的深度融合将继续推动煤矿智能化建设向更高水平发展,但是目前,仍存在以下挑战:

1) “三重”模型融合难题:综采数字孪生系统需要融合地质模型(非均质、不确定性)、设备机理模型(多体动力学、液压)和生产流程模型(离散事件、排队论)。这3类模型的时间尺度、建模范式迥异,将它们无缝集成在一个仿真平台上,并保持与物理实体的同步,是一个巨大的技术难题,需进一步研究探索。

2) “信息-物理-控制”闭环断裂:目前的系统集成多数实现了“信息可视化”和“单向控制”,但“以虚优实”和“以虚预实”的能力还需进一步提高。虚拟空间的优化决策和预测结果,有时难以自动、安全、可靠地反馈控制物理实体。核心障碍在于算法的可靠性验证和安全冗余机制的缺失,使得最终决策权大多数时间仍掌握在人工手中。

3) 标准化与互操作性的缺失:各设备厂商的私有数据协议和接口不开放,导致来自不同供应商的三机设备其DT模型难以实现深度数据互通和协同互操作。因此,许多宣称的“系统融合”只是表层的数据看板集成,而非底层的控制逻辑融合。

5 结 论

1) 数字孪生技术从通用机械工业向煤矿井下的迁移路径与体系构建已得到充分论证,形成了相对明确的技术范式。研究表明,源于高端机械制造业的数字孪生技术范式,以高保真建模、预测性维护和

全生命周期协同为核心的技术体系,为解决煤矿综采装备的“黑箱”作业、故障频发和系统失调等问题提供了完整的技术工具箱。该技术能否在井下复杂环境中成功落地,其核心挑战与决定性因素在于面向特殊工况的深度适应性改造。这其中包括开发精度更高的矿用本安型传感器网络,研究适用于低信噪比数据的滤波与特征提取算法,以及构建能够兼容地质不确定性的设备机理模型,等等。当前的研究与实践已证明,经过“本地化”处理的数字孪生系统,能够为综采装备实现从几何形态到物理行为、从实时状态到未来演进的精准映射奠定坚实基础。

2) 装备级数字孪生应用正跨越“可视化”门槛,向“诊断”与“控制”纵深发展,并在特定场景展现出显著效益。数字孪生技术在采煤机、刮板输送机、液压支架等单体设备上的应用,已超越了初期以三维可视化和状态监测为主的阶段,目前进入了以预测性维护和自适应控制为标志的应用期。具体而言,在采煤机上,融合了物理机理与深度学习的寿命预测模型,将某些关键部件故障预测的准确率从不足30%提升至90%以上;在刮板输送机上,基于数字孪生的虚拟校直与链条张力监测技术,有效解决了直线度控制难题;在液压支架上,数字孪生驱动的群组协同位姿控制,实现了对顶板压力的智能自适应支护。定量分析表明,这些技术应用可以延长平均无故障时间,并大幅降低非计划停机率。

3) 系统级协同是实现智能化开采的必由之路,目前技术架构已初步形成并进入工程验证阶段。尽管单体设备的数字化成效显著,但煤矿高效生产的本质在于采、支、运设备系统的协同作业。所以,将孤立的设备级数字孪生体集成为工作面系统级孪生体,是实现全局优化和无人化开采的终极方向,目前已涌现出如“物理-虚拟-交互”综采三机协同理论和数字孪生智采工作面系统(DTSMW)等创新架构。这些系统级解决方案的核心进展体现在:第一,理论架构基本明晰,形成了涵盖智能感知、数据传输、虚实映射、协同控制与智能决策的完整技术体系;第二,关键使能技术取得突破,基于统一数字孪生平台的“三机”协同控制、基于5G网络的毫秒级数据交互以及多智能体协同决策框架等,已从概念探讨走向工程试应用;第三,系统级解决方案的可行性已得到初步验证。在若干示范矿井中,针对工作面“三机”的系统级协同控制已从理论架构走向工业性试验。实践表明,该技术路径在提升整体生产连贯性、优化资源配置及减少高危岗位人工依赖方面展现出明确潜力,

为其规模化应用揭示了潜在价值。

4) 目前煤矿综采装备数字孪生技术的发展仍面临以下3个瓶颈:

第一,模型融合困难,具体表现在描述地质条件(具非均质与不确定性)、装备机理(涉及多体动力学与液压)及生产流程(属离散事件系统)的异构模型,在时空尺度与建模范式上存在固有差异,导致其难以在统一平台实现集成与协同仿真;第二,数据贯通障碍,井下感知数据受恶劣环境影响,存在质量低、维度缺失问题,且煤岩界面、应力场等关键状态参数需依赖反演间接获取,引入了巨大不确定性;第三,决策闭环缺失,虚拟空间的优化决策因缺乏可靠的在线验证与安全容错机制,难以自动、安全地反馈控制物理实体,致使“感知-认知-行动”的智能闭环难以贯通,系统多数仍停留于“人工决策、系统辅助”的初级阶段。此外,产业层面标准不一与互操作性缺失,进一步加剧了数据壁垒,使得系统融合多流于表层的可视化集成。

6 挑战与展望

本综述表明,数字孪生(DT)技术为煤矿综采的智能化升级提供了前所未有的使能手段。然而,当前研究整体仍处于“强监测、弱分析、可控制、难协同”的初级阶段,基于此,本文提炼出一个面向未来综采数字孪生的“三层双轮驱动”技术框架:

三层架构:

1) 智能感知执行层(行动层):由井下部署的智能传感器、控制器和执行机构构成,是DT与物理世界交互的触手。其核心任务是高精度数据采集和精准执行控制指令。

2) 数字孪生模型层(认知层):是整个框架的大脑。由几何模型、物理模型、行为模型和规则模型融合而成的多维模型综合体,负责对物理实体进行高保真映射、状态认知、仿真推演与决策优化。

3) 智能应用服务层(应用层):面向不同用户(如矿工、工程师、管理者)提供设备诊断、生产优化、安全预警、远程协同等具体应用服务,是DT价值的最终体现。

双轮驱动:

1) 数据驱动轮:基于5G/F5G/6G、物联网、边缘计算等技术,实现感知层与模型层之间的海量数据实时、可靠、双向流动。

2) 模型/知识驱动轮:基于云计算、AI算法、行业知识图谱等技术,实现模型层对数据的深度加工与

知识提炼,产生智能决策指令,并驱动执行层动作。

当前成果大多集中于在“数据驱动轮”上完善智能感知执行层,并在“模型/知识驱动轮”上初步构建了数字孪生模型层。然而,2个驱动轮的“转速”并不匹配:“数据驱动轮”转得快,但数据质量不高、维度不全;“模型/知识驱动轮”转得慢,模型精度不足、实时性差,且与数据的融合耦合深度不够,导致难以产出高置信度的决策指令,最终使得智能应用服务层的效能大打折扣。

基于数字孪生在煤矿综采面的当前研究现状,提出以下发展建议:

1) 数字孪生赋能综采技术的发展,正处在从“单设备”向“系统协同”艰难跨越的瓶颈期。其未来突破不在于提出更复杂的算法或更宏大的框架,而在于攻克那些基础性、共性的“硬骨头”,这可以概括为3个统一:①建模统一:需研究多范式、多尺度模型的统一建模与协同仿真实论。②数据统一:突破井下高精度、高可靠性感知技术;开发轻量化、可解释、强泛化的AI算法;构建覆盖“端-边-云”的高效计算架构。③标准统一:推动建立矿山装备数字孪生模型的接口、数据、精度等行业标准,打破数据壁垒。

2) 要想实现综采技术与数字孪生的深度融合,需要保证模型可靠性、数据有效性和系统智能性。当前模型可靠性存在多物理场耦合与实时计算的矛盾。现有模型多为“离线”高保真或“在线”低精度,这两者难以同时兼顾。采煤机“截割-煤岩”相互作用、液压支架“液-机-围岩”耦合、输送机“链-煤-槽”摩擦磨损等多物理场耦合模型的计算复杂度极高,如何对其进行模型降阶和轻量化处理,使其能在边缘计算单元上满足控制回路(毫秒级)的实时性要求,是当前数字孪生综采技术的首要技术瓶颈。数据有效性则是多源异构数据的感知与融合瓶颈。井下环境导致传感数据存在低信噪比、时空不同步、大量缺失等问题。当前研究缺乏针对性的处理机制。更深层的问题在于,用于驱动模型的地质、应力等关键状态数据(如煤岩界面识别、应力场分布)无法直接测量,需依赖反演算法间接获取,引入了巨大不确定性。如何通过多模态融合感知与联合反演算法,构建高质量、全维度的数据集,是驱动DT运转的燃料问题。系统智能性则存在“感知-认知-行动”闭环的贯通难题,绝大多数系统仍未实现真正闭环。虚拟空间产生的优化决策(如调整采煤机牵引速度、改变支架支撑力)因缺乏安全验证与容错机制而不

敢直接下发至物理实体执行。应设计安全约束下的在线学习与控制算法,并建立数字孪生沙箱,让控制策略在虚拟世界中充分验证后再安全部署到实体。

3) 未来研究需实现以下4个转变,并沿着具体技术路径推进:

从“模型驱动”或“数据驱动”向“融合驱动”转变。具体路径:大力发展物理信息神经网络(PINN)。将采煤机动力学方程、液压支架力学方程等物理规律作为约束条件嵌入神经网络训练中,打造既遵循物理原理又能从数据中学习未知特性的下一代融合模型,旨在解决数据稀缺性和模型泛化能力不足的问题。

从“单一设备”向“系统协同”转变。具体路径:引入多智能体强化学习(MARL)框架。将采煤机、刮板机、液压支架视为多个智能体,其目标不仅是自身最优,更是系统整体(如生产效率最高、能耗最低)最优。通过智能体间的竞争与协作,自发涌现出卓越的协同控制策略,破解当前集中式控制算法难以处理的复杂协同难题。

从“可视化展示”向“决策量化和可解释性”转变。具体路径:在应用层,不仅输出诊断或优化结果,更需提供置信度评估和决策依据。故障诊断模型应能指出是哪些振动频率特征导致了故障判断,优化算法应能量化不同策略的预期收益与风险。这需要通过可解释性AI技术(如SHAP、LIME)对复杂AI模型进行解构,从而增强现场工程师对DT系统的信任度。

从“技术集成”向“标准与开源生态”转变。具体路径:推动制定矿山数字孪生模型接口、数据通信、精度分级等行业标准。同时,鼓励高校、研究机构与企业联合构建开源煤矿数字孪生基准数据集与算法库。此举旨在降低研究门槛,避免重复造轮子,使研究人员可以在同一基准上验证算法性能,加速技术创新。

参考文献(References):

- [1] 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 summary on digital twin technology for smart mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 168-176.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 赵建文,孟旭辉.数字孪生在煤矿电网中的应用研究[J].工矿自动化,2023,49(2):38-46.
ZHAO Jianwen, MENG Xuhui. Research on the application of digital twin in coal mine power grid[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 38-46.
- [5] 黄海松,陈启鹏,李宜汀,等.数字孪生技术在智能制造中的发展与应用研究综述[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(5):1-8.
HUANG Haisong, CHEN Qipeng, LI Yiting, et al. Review on the development and application of digital twin technology in intelligent manufacturing[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2020, 37(5): 1-8.
- [6] 杨一帆,邹军,石明明,等.数字孪生技术的研究现状分析[J].应用技术学报,2022,22(2):176-184,188.
YANG Yifan, ZOU Jun, SHI Mingming, et al. Analysis of research status of digital twin technology[J]. Journal of Technology, 2022, 22(2): 176-184, 188.
- [7] 孙刚,赵君怡,黄宇峰,等.民用航空发动机数字孪生技术研究现状与展望[J].中国科学(物理学力学天文学),2025,55(5):198-210.
SUN Gang, ZHAO Junyi, HUANG Yufeng, et al. Research status and prospect of digital twin technology for civil aero-engines[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(5): 198-210.
- [8] GRIEVES M W. Digital twins: Past, present, and future[M]. The digital twin. Cham: Springer International Publishing, 2023: 97-121.
- [9] 程昊,王红军,杨俊峰,等.面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用[J].电子测量与仪器学报,2023,37(4):115-121.
CHENG Hao, WANG Hongjun, YANG Junfeng, et al. Application of digital twin model for the whole life cycle of production line[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 115-121.
- [10] ZHANG C W, DONG L L, WANG Y R, et al. Design-manufacturing-operation & maintenance (O&M) integration of complex product based on digital twin[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1052.
- [11] 王达,孙滔,孙晓文,等.数字孪生在网络全生命周期管理中的研究[J].电信科学,2022,38(4):138-145.
WANG Da, SUN Tao, SUN Xiaowen, et al. Study on digital twins in network lifecycle management[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 138-145.
- [12] 郭夏臣,王甫银,张可心.数字孪生技术在智慧城市建设中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2024(5):30-32.
GUO Xiachen, WANG Fuyin, ZHANG Kexin. The application of digital twinning technology in the construction of smart city[J]. Intelligent Building & Smart City, 2024(5): 30-32.
- [13] HASSANI H, HUANG X, MACFEELY S. Enabling digital

- twins to support the UN SDGs[J]. *Big Data and Cognitive Computing*, 2022, 6(4): 115.
- [14] GUO D Q, ZHONG R Y, LIN P, et al. Digital twin-enabled Graduation Intelligent Manufacturing System for fixed-position assembly islands[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63: 101917.
- [15] ZHU Q Z, HUANG S H, WANG G X, et al. Dynamic reconfiguration optimization of intelligent manufacturing system with human-robot collaboration based on digital twin[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 65: 330–338.
- [16] STAN L, NICOLESCU A F, PUPĂZĂ C, et al. Digital Twin and web services for robotic deburring in intelligent manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, 34(6): 2765–2781.
- [17] SHENG J Z, ZHANG Q Y, LI H, et al. Digital twin driven intelligent manufacturing for FPCB etching production line[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 186: 109763.
- [18] FAN Y, YANG J, CHEN J, et al. A digital-twin visualized architecture for Flexible Manufacturing System[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60: 176–201.
- [19] 窦耀, 徐萌, 田梦婕, 等. 基于数字孪生技术的人机协作物料加工产线设计[J]. *电子元器件与信息技术*, 2024, 8(9): 30–32.
- DOU Yao, XU Meng, TIAN Mengjie, et al. Design of human-computer collaborative material processing line based on digital twin technology[J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2024, 8(9): 30–32.
- [20] 赵丹丹. 基于数字孪生的机械加工智能生产线研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2021.
- ZHAO Dandan. Research on intelligent machining production line based on digital twin[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2021.
- [21] 刘轩. 基于数字孪生的智能制造生产线平台构建及仿真研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- LIU Xuan. Research on construction and simulation of intelligent manufacturing production line platform based on digital twins[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [22] 刘欢连. 数字孪生驱动的柔性生产线虚拟仿真系统研发[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- LIU Huanlian. Digital for flexible manufacturing line research and development of virtual simulation system for flexible manufacturing line [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [23] 刘帅. 基于数字孪生的产线状态虚实映射监测系统研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- LIU Shuai. The research and implementation of production line state virtual and real mapping monitoring system based on digital twinning[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [24] 宋则隆. 基于数字孪生的滚动轴承故障诊断与退化预测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- SONG Zelong. Research on fault diagnosis and degradation prediction method of rolling bearing based on digital twin. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2024.
- [25] 陆剑峰, 夏路遥, 白欧, 等. 智能制造下产品数字孪生体全生命周期研究[J]. *自动化仪表*, 2021, 42(3): 1–7.
- LU Jianfeng, XIA Luyao, BAI Ou, et al. Research on product digital twin lifecycle in smart manufacturing[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 42(3): 1–7.
- [26] 干浩翔. 基于数字孪生技术的磁流变液延时机构性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- GAN Haoxiang. Research on the performance of magnetorheological fluid delay mechanism based on digital twin technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [27] QIN Y, WU X G, LUO J. Data-model combined driven digital twin of life-cycle rolling bearing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(3): 1530–1540.
- [28] 马晓红, 李名家, 屈鑫, 等. 基于系统工程的燃气轮机全生命周期数字孪生体研究[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(S1): 83–90, 101.
- MA Xiaohong, LI Mingjia, QU Xin, et al. Study on turbine full lifecycle digital twins based on systems engineering[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(S1): 83–90, 101.
- [29] 刘献礼, 李雪冰, 丁明娜, 等. 面向智能制造的刀具全生命周期智能管控技术[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 196–219.
- LIU Xianli, LI Xuebing, DING Mingna, et al. Intelligent management and control technology of cutting tool life-cycle for intelligent manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 196–219.
- [30] WANG L T, LIU Y C, YIN H, et al. Fault diagnosis and predictive maintenance for hydraulic system based on digital twin model[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(6): 065213.
- [31] HUANG Y F, TAO J, SUN G, et al. A novel digital twin approach based on deep multimodal information fusion for aero-engine fault diagnosis[J]. *Energy*, 2023, 270: 126894.
- [32] GUO K, WAN X, LIU L L, et al. Fault diagnosis of intelligent production line based on digital twin and improved random forest[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7733.
- [33] XU Y, SUN Y M, LIU X L, et al. A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 19990–19999.
- [34] WANG J J, YE L K, GAO R X, et al. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3920–3934.
- [35] 孙培禄, 刘馨, 张耿, 等. 数字孪生驱动的机电设备远程运维方法[J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(8): 20–31.
- SUN Peilu, LIU Xin, ZHANG Geng, et al. Digital twin-driven remote operation and maintenance method for electromechanical equipment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(8): 20–31.
- [36] 姜海聪, 张秀珩, 隋子昂, 等. 数字孪生驱动的往复压缩机故障诊断研究[J]. *一重技术*, 2025(2): 67–69.
- JIANG Haicong, ZHANG Xiuheng, SUI Ziang, et al. Research on fault diagnosis of digital twin reciprocating compressor[J]. *CFHI Technology*, 2025(2): 67–69.

- [37] 王晓辉. 离心泵机组状态监测及故障诊断系统设计研究[J]. *设备管理与维修*, 2025(4): 19–21.
WANG Xiaohui. Design and Research on condition monitoring and fault diagnosis system of centrifugal pump unit[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2025(4): 19–21.
- [38] 徐桂安. 基于数字孪生的齿轮箱仿真与故障诊断研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2024.
XU Guian. Research on simulation and fault diagnosis of gearbox Based on digital twins[D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2024.
- [39] 吴钱昊. 基于数字孪生车间的生产车间设备监控和设备故障预警方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
WU Qianhao. Research on methods for equipment monitoring and equipment fault early warning of production workshop based on digital twin workshop [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [40] 汪健, 王华, 戴天赐, 等. 基于数字孪生的滚动轴承故障诊断方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2025, 44(3): 17–20.
WANG Jian, WANG Hua, DAI Tianci, et al. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on digital twin[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2025, 44(3): 17–20.
- [41] WANG W X, LIU Y Q, CHAI X D, et al. Digital twin system framework and information model for industry chain based on industrial Internet[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2024, 25(7): 951–967.
- [42] IVANOV D. Intelligent digital twin (iDT) for supply chain stress-testing, resilience, and viability[J]. *International Journal of Production Economics*, 2023, 263: 108938.
- [43] 王超. 数字孪生赋能智能网联汽车供应链: 复杂性解析与韧性构建[J]. *物流技术*, 2025, 44(4): 13–24.
WANG Chao. Digital twin empowered intelligent connected vehicle supply chains: Complexity analysis and resilience construction[J]. *Logistics Technology*, 2025, 44(4): 13–24.
- [44] 李清蕾. 基于数字孪生的智能制造产品设计与定价决策[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
LI Qinglei. Design and pricing decision of smart manufacturing products based on digital twin[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [45] HUANG Y R, YUAN B, XU S Y, et al. Fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor of coal mine belt conveyor based on digital twin and ISSA-RF[J]. *Processes*, 2022, 10(9): 1679.
- [46] WANG J Q, HUANG Y L, ZHAI W R, et al. Research on coal mine safety management based on digital twin[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e13608.
- [47] 李伟. 基于数字孪生的钻孔卸压感知系统研制[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
LI Wei. Development of a digital twin-based borehole unloading sensing system[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024.
- [48] 丁茹瑶. 晓明矿综采工作面数字孪生虚拟通风监测系统研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.
DING Ruyao. Research on digital twin virtual ventilation monitoring system for fully mechanized mining face in Xiaoming mine[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2024.
- [49] 张凯. 基于数字孪生技术的冲击地压监测与预警研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
ZHANG Kai. Research on rock burst monitoring and early warning based on digital twin technology[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2022.
- [50] 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. Mine gas accident safety management based on digital twin[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(8): 251–255.
- [51] 张拴民, 史洪恺. 基于5G技术的智能化煤矿安全管控平台设计[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(S1): 140–147.
ZHANG Shuanmin, SHI Hongkai. Design of an intelligent coal mine safety control platform based on 5G technology[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(S1): 140–147.
- [52] 赵文, 王超, 何利辉, 等. 基于数字孪生的煤矿安全智能监控平台设计[J]. *矿山机械*, 2025, 53(5): 54–59.
ZHAO Wen, WANG Chao, HE Lihui, et al. Design of intelligent monitoring platform for coal mine safety based on digital twin[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2025, 53(5): 54–59.
- [53] 郭向阳, 于亮亮, 吴卫兵, 等. 基于数字孪生的智慧煤矿安全管控平台研究[J]. *能源技术与管理*, 2022, 47(4): 134–136.
GUO Xiangyang, YU Liangliang, WU Weibing, et al. Research on smart coal mine safety control platform based on digital twins[J]. *Energy Technology and Management*, 2022, 47(4): 134–136.
- [54] ZHANG X, LV X, WANG Y, et al. Production process management for intelligent coal mining based on digital twin[M]. *Digital Twin Driven Service*: Academic Press, 2022: 251–277.
- [55] WANG Y R, WANG L, WANG H N, et al. Data-driven and model-driven integration approach for optimizing equipment safety investment in digital twin coal mining enterprises[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 11101.
- [56] 刁怀斌. 基于数字孪生的煤矿生产智能化管理系统研究[J]. *自动化应用*, 2023(15): 201–203.
DIAO Huaibin. Research on intelligent management system for coal mine production based on digital twins[J]. *Automation Application*, 2023(15): 201–203.
- [57] 肖桀俊, 刘红梅, 石发强, 等. 基于数字孪生的煤矿智能管控平台架构研究与实现[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(5): 43–49.
XIAO Canjun, LIU Hongmei, SHI Faqiang, et al. Research and implementation of intelligent control platform architecture for coal mine based on digital twin[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(5): 43–49.
- [58] 丁序海, 张侯, 胡伟. 三道沟煤矿综采工作面数字孪生智能生产协同管控关键技术研究及应用[J]. *智能矿山*, 2024, 5(5): 67–72.
- [59] 庞义辉, 毕经龙, 袁鹏喆, 等. 煤机装备全生命周期管理系统架构与关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(2): 339–350.
PANG Yihui, BI Jinglong, YUAN Pengzhe, et al. Coal mining

- equipment lifecycle management system architecture and key technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(2): 339–350.
- [60] 王宽. 基于RFID技术的煤矿机电设备智能运维管理方法[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(8): 218–220.
WANG Kuan. Intelligent operation and maintenance management method of coal mine electromechanical equipment based on RFID technology[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2024, 14(8): 218–220.
- [61] 金树军. 基于标识解析体系的矿用设备关键运维系统[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(12): 159–161, 173.
JIN Shujun. Key operation and maintenance system of mining equipment based on identification analysis system[J]. *Digital Technology & Application*, 2022, 40(12): 159–161, 173.
- [62] 汪杰, 李晓华, 郑功勋, 等. 基于云平台的煤矿智能运维服务系统研究[J]. 煤矿机械, 2023, 44(8): 191–194.
WANG Jie, LI Xiaohua, ZHENG Gongxun, et al. Research on intelligent operation and maintenance service system of coal mine based on cloud platform[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(8): 191–194.
- [63] 雷雨, 殷鹏, 姚磊, 等. 煤矿机电设备智能化运维管理关键技术研究[J]. 价值工程, 2025, 44(25): 149–152.
LEI Yu, YIN Peng, YAO Lei, et al. Research on key technologies for intelligent operation and maintenance management of coal mine electromechanical equipment[J]. *Value Engineering*, 2025, 44(25): 149–152.
- [64] 王铁军. 煤矿设备全生命周期健康诊断系统[J]. 工矿自动化, 2022, 48(S1): 101–104.
WANG Tiejun. Life cycle health diagnosis system for coal mine equipment[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(S1): 101–104.
- [65] 刘晓峰. 煤矿掘进机电设备故障诊断与维护[J]. 煤矿现代化, 2025, 34(1): 47–51.
LIU Xiaofeng. Fault diagnosis and maintenance of electromechanical equipment of coal mine roadheader[J]. *Coal Mine Modernization*, 2025, 34(1): 47–51.
- [66] 陈永光, 王学强. 智能化煤矿设备全生命周期管理体系建设与应用[J]. 智能矿山, 2023, 4(11): 84–90.
- [67] GUO Y, YANG F, GE S, et al. Novel knowledge driven active management and control scheme of smart coal mining face with digital twin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S1): 334–344.
- [68] GAO P B, ZHAO S H, ZHENG Y. Failure prediction of coal mine equipment braking system based on digital twin models[J]. *Processes*, 2024, 12(4): 837.
- [69] 李丁卯, 罗珍平. 面向矿用机电设备数字孪生模型的故障特征提取与识别技术[J]. 现代电子技术, 2025, 48(8): 173–178.
LI Dingmao, LUO Zhenping. Fault feature extraction and identification technology for digital twin model of mine electromechanical equipment[J]. *Modern Electronics Technique*, 2025, 48(8): 173–178.
- [70] 姜占东, 杨阳, 何军, 等. 煤矿供电设备数字孪生技术及应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(12): 234–240.
JIANG Zhandong, YANG Yang, HE Jun, et al. Digital twin technology and application of coal mine power supply equipment[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2024, 46(12): 234–240.
- [71] 许升起, 陈录平, 段武德. 数字孪生驱动的煤矿机电设备状态监控和诊断[J]. 煤矿机械, 2024, 45(12): 168–171.
XU Shengqi, CHEN Luping, DUAN Wude. Condition monitoring and diagnosis of coal mine electromechanical equipment driven by digital twin[J]. *Coal Mine Machinery*, 2024, 45(12): 168–171.
- [72] 张磊, 李绍良, 曲越. 煤矿采煤工作面数字孪生系统研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(12): 173–176, 182.
ZHANG Lei, LI Shaoliang, QU Yue. Research and application of digital twin system in coal mining working face of coal mine[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2024, 42(12): 173–176, 182.
- [73] 葛世荣, 王世博, 管增伦, 等. 数字孪生: 应对智能化综采工作面技术挑战[J]. 工矿自动化, 2022, 48(7): 1–12.
GE Shirong, WANG Shibo, GUAN Zenglun, et al. Digital twin: Meeting the technical challenges of intelligent fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(7): 1–12.
- [74] 宋述阳, 王世博, 王赞, 等. 融合综采装备姿态约束的采煤机截割路径规划方法研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(7): 3668–3678.
SONG Shuyang, WANG Shibo, WANG Yun, et al. Multi-dimensional constraint-based coal mining machine cutting path planning technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(7): 3668–3678.
- [75] 王皓宇. 煤矿综采工作面两巷数字孪生系统的研发与应用[J]. 智能矿山, 2025, 6(6): 60–65.
- [76] 刘清, 张龙, 李天越, 等. 综采工作面三机数字孪生及协同建模方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 47–55.
LIU Qing, ZHANG Long, LI Tianyue, et al. A three machine digital twin and collaborative modeling method for fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(2): 47–55.
- [77] 王春燕. 基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
WANG Chunyan. Coal mining machine operating condition monitoring and health assessment based on digital twin technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [78] 张强, 刘文革, 田莹, 等. 滚筒采煤机发展历程及关键技术探讨[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 48–63.
ZHANG Qiang, LIU Wenzhuo, TIAN Ying, et al. Development and key technologies of drum shearer[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(10): 48–63.
- [79] DING H, YANG L L, YANG Z J. A predictive maintenance method for shearer key parts based on qualitative and quantitative analysis of monitoring data[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 108684–108702.
- [80] 丁华, 杨亮亮, 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

- prediction of shearers driven by digital twin and deep learning[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(7): 815–823.
- [81] 郭三宝. 智能化技术在采煤机故障诊断与维护中的应用研究[J]. *机械管理开发*, 2025, 40(3): 257–260.
GUO Sanbao. Application of intelligent technology in fault diagnosis and maintenance of coal mining machine[J]. *Mechanical Management and Development*, 2025, 40(3): 257–260.
- [82] 郭军. 基于GAN与CNN的煤机设备故障智能诊断方法研究[J]. *煤矿机械*, 2023, 44(12): 182–185.
GUO Jun. Research on intelligent fault diagnosis method of coal machine equipment based on GAN and CNN[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(12): 182–185.
- [83] YOU X S, GUO Y N, MIAO B, et al. A digital twin-based adaptive height control for a shearer[J]. *Machines*, 2024, 12(7): 460.
- [84] 尹宇航. 基于数字孪生的煤矿智能化开采工作面采煤机动态联控技术研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2025.
YIN Yuhang. Research on dynamic joint control technology of coal mining machines based on digital twin-driven coal mines[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2025.
- [85] MIAO B, GE S R, LI Y W, et al. Method of motion planning for digital twin navigation and cutting of shearer[J]. *Sensors*, 2024, 24(18): 5878.
- [86] 苗丙, 葛世荣. 采煤机数字孪生导航截割运动规划理论与方法[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(8): 1–13.
MIAO Bing, GE Shirong. Theory and method of shearer digital twin navigation cutting motion planning[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(8): 1–13.
- [87] 刘庆华, 马柯峰. 刮板输送机智能控制技术现状与展望[J]. *智能矿山*, 2022, 3(3): 10–16.
- [88] FENG L, DING Z Y, YIN Y B, et al. Scraper conveyor gearbox fault diagnosis based on multi-source heterogeneous data fusion[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116797.
- [89] LI S H, XIE J C, REN F, et al. Virtual straightening of scraper conveyor based on the position and attitude solution of industrial robot model[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(5): 1149–1170.
- [90] 张帆, 李闯, 李昊. 智能综采工作面刮板输送机直线度监测方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 246–255.
ZHANG Fan, LI Chuang, LI Hao. Study on straightness monitoring method of scraper conveyor in intelligent fully-mechanized mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 246–255.
- [91] ZHANG Q, LIU W, WANG Y, et al. Research on postural behavior and structural response prediction of scraper conveyor based on digital twin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(6): 3210–3223.
- [92] WANG H, WANG F, LI H, et al. Virtual-real mapping for the scraper conveyor S-shaped bending in a fully mechanized mining face production system based on digital twin[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2025: 1–21.
- [93] 吴爱民, 冯景浦, 沈丰, 等. 刮板输送机链条自动张紧控制策略研究[J]. *煤矿机械*, 2024, 45(12): 52–54.
WU Aimin, FENG Jingpu, SHEN Feng, et al. Research on automatic tensioning control strategy of scraper conveyor chain[J]. *Coal Mine Machinery*, 2024, 45(12): 52–54.
- [94] 赵飞宇. 煤矿综采工作面液压支架协同控制安全运维研究[J]. *自动化应用*, 2024(10): 145–147.
ZHAO Feiyu. Research on collaborative control and safe operation and maintenance of hydraulic support in coal mine fully mechanized mining face[J]. *Automation Application*, 2024(10): 145–147.
- [95] YOU X S, GE S R. Research on decision-making and control technology for hydraulic supports based on digital twins[J]. *Symmetry*, 2024, 16(10): 1316.
- [96] JIAO X, XIE J, WANG X, et al. Intelligent decision method for the position and attitude self-adjustment of hydraulic support groups driven by a digital twin system[J]. *Measurement*, 2022, 202: 111722.
- [97] XIE J C, WANG X W, YANG Z J, et al. Virtual monitoring method for hydraulic supports based on digital twin theory[J]. *Mining Technology*, 2019, 128(2): 77–87.
- [98] HAO Z X, XIE J C, WANG X W, et al. A method for reconstructing the pose of hydraulic support group based on point cloud and digital twin[J]. *Measurement*, 2024, 225: 113977.
- [99] XIE P, YANG H, WU Y, et al. Investigation into the monitoring and control of mechanical dynamics in inclined mining equipment utilizing digital twin technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(12): 259–271.
- [100] 王金辉. 基于数字孪生的液压支架仿真测试平台研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
WANG Jinhui. Research on simulation testing platform of hydraulic supports based on digital twin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [101] 焦秀波. 数字孪生驱动的液压支架群位姿智能调控方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
JIAO Xiubo. Research on intelligent control method for position and attitude of hydraulic support groups driven by digital twin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [102] 张帆, 李玉雪, 李昱翰, 等. 基于数字孪生的煤矿两柱式支架载荷预测方法[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(1): 312–325.
ZHANG Fan, LI Yuxue, LI Yuhan, et al. SSA-RF: A novel prediction method for two-column supports in coal mines based on digital twins[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(1): 312–325.
- [103] 张帆, 邵光耀, 李昱翰, 等. 基于数字孪生和深度强化学习的矿井超前液压支架自适应抗冲支护方法[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(6): 23–29, 45.
ZHANG Fan, SHAO Guangyao, LI Yuhan, et al. Adaptive impact resistance support method for advanced hydraulic supports in mines based on digital twins and deep reinforcement learning[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(6): 23–29, 45.
- [104] 刘萌, 付翔, 姜玉龙, 等. 液压支架姿态数字孪生精准快速映射

- 方法[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(6): 136–141, 158.
- LIU Meng, FU Xiang, JIANG Yulong, et al. Precise and fast digital twin mapping method for hydraulic support attitude[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(6): 136–141, 158.
- [105] 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 system for intelligent mining in coal mines[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2): 143–153.
- [106] 张旭辉, 张超, 杨文娟, 等. 数字孪生驱动采掘工作面远程控制技术分析与发展趋势[J]. *智能矿山*, 2020, 1(1): 112–124.
- [107] 尤秀松, 葛世荣, 郭一楠, 等. 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(7): 3265–3275.
- YOU Xiusong, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 3265–3275.
- [108] 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及运行模式[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.
- [109] 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. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925–1936.