数据驱动的数字孪生技术在智慧矿山中的应用进展*

祝坚[1],郭彪[2],刘庆富[3],曹鑫[3],乔旭[4],梁熙蓉[4]

(1.北京华宇工程有限公司, 北京 100011;
2.北京和利时数字技术有限公司, 北京 100176;
3.和利时卡优倍科技有限公司, 陕西 西安 710075;
4.中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:随着中国人口老龄化的加剧,依赖技术人员经验的传统矿山运营模式难以适应现代矿业可持续发展的需求,亟需引入数字孪生等先进技术,推动矿山向智能化、绿色化转型。数据驱动的数字孪生技术在矿山建设方案、矿山生产安全、矿山生产优化等场景中的应用日益广泛,数字孪生技术凭借其数据驱动特性,为矿山建设方案提供精准模拟,通过整合地质、地理等多源数据,构建出与矿山对应的虚拟模型,优化布局规划,减少实际建设中的资源浪费与风险。但受当下认知水平、技术水平以及基础设施的限制,构建的虚拟模型无法完全确保数据真实性与可靠性,致使预测结果产生偏差。通过构建完善的标准体系,增强数据融合与处理能力,优化智能算法与模型,强化跨学科合作与技术集成,推动矿山朝着无人化、智能化的方向转型。

关键词:智慧矿山;数字孪生技术;数据驱动;实时监测;智能决策

中图分类号:TD918 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0217-10

Application Progress of Data-Driven Digital Twin Technology in Smart Mines

ZHU Jian[1], *GUO Biao*[2], *LIU Qingfu*[3], *CAO Xin*[3], *QIAO Xu*[4], *LIANG Xirong*[4]

(1.Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., Beijing 100011, China;
2.Beijing Hollysys Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;
3.Hollysys Kayoubei Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China;
4.China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With the intensification of China's population aging, the traditional mine operation mode relying on the experience of technicians can no longer meet the needs of the sustainable development of modern mining. There is an urgent need to introduce advanced technologies such as digital twins to promote the transformation of mines towards intelligence and greening. With its data-driven characteristics, digital twin technology can provide accurate simulation for mine construction plans. By integrating multi-source data such as geological and geographical data, a virtual model corresponding to the real mine was constructed to optimize the layout planning and reduce resource waste and risks in actual construction. Data-driven digital twin technology has been increasingly applied in scenarios such as mine construction planning, mine production safety, and mine production optimization. However, restricted by the current cognitive level, technical capacity, and infrastructure conditions, the constructed virtual models cannot fully guarantee authenticity and reliability of data, leading to deviations in prediction results. By constructing a complete standard system, enhancing data fusion and processing capabilities, optimizing intelligent algorithms and models, and strengthening interdisciplinary cooperation and technology integration, the mining industry is driven toward unmanned and intelligent transformation.

Key words: Smart mine, Digital twin technology, Data-driven, Real-time monitoring, Intelligent decision-making

矿山勘探与开采决策主要依赖地质学家的经验判断,生产作业管理主要依托操作人员的经验与技

* **收稿日期**:2025-01-15
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3013900);中国煤炭科工集团有限公司科技创新资金专项项目(2024-2-ZD002)
作者简介:祝坚(1972—),男,北京人,高级工程师,主要研究方向为矿山固定设备选型、工业配电及控制、数字化矿山等。E-mail:zhujian@163.com
通信作者:乔旭(1986—),男,山东肥城人,博士,讲师,主要研究方向为智慧矿山、三维可视化技术。E-mail:qiaoxu@cumtb.edu.cn

能水平,设备维护与故障处理同样依靠维修人员经验,安全与环保管理则主要凭借现场监督人员的经验与直觉;而上述各环节均受具体执行人员的年龄、从业经验、受教育程度及工作态度等因素制约,易引发安全事故或造成环境破坏,相关风险难以完全规避。随着中国人口老龄化程度加剧,靠传统经验驱动的矿山运营模式已难以适应现代矿业可持续发展的需求,亟需引入数字孪生、人工智能等新一代信息技术,推动矿山向智能化、绿色化转型,逐步降低采矿业对一线作业人员的依赖,助力矿山从劳动密集型向技术密集型转化,实现资源可持续开采利用。

1 数据驱动的数字孪生技术

1.1 数字孪生技术

数字孪生技术(Digital Twin)又称为数字映射或数字镜像,通过创建虚拟模型来仿真现实世界中的实体、系统或过程,实现实时监测、预测和优化[1]。其概念最早起源于美国航天局阿波罗计划,通过构建一个与物理实体相对应的虚拟模型,以实现对物理世界的等价映射和交互融合。该模型包含物理层、数据层、模型层、功能层和应用层,实现了对物理实体的全面描述与精确分析,数字孪生逻辑架构如图 1 所示。数字孪生技术具有连续传递性,能够实时传递物理世界与数字世界之间的数据,支持模型的实时更新与优化。全面仿真性使得该技术能够模拟物理世界中的各种过程和行为,广泛应用于采矿业、制造业等领域。实时映射性为用户提供实时的决策支持。与人工智能技术的融合赋予了数字孪生技术智能驱动性,使其能够提供更智能化的决策,并自主优化其性能和行为。



图 1 数字孪生逻辑架构

Fig.1 The digital twin logical architecture

数字孪生技术通过构建矿山的虚拟镜像,实现了对矿产资源的数字化管理和智能分析,优化了开采计划,提高了资源利用率。同时,该技术还能实时监测和模拟预测矿山开采过程,帮助矿山企业及时发现环境问题,采取环保措施,减少废弃物排放和环境污染,并为生态修复和绿色开采提供科学依据。此外,数字孪生技术还能对矿山设备进行实时监测和智能诊断,预警设备故障和安全隐患,优化开采方案,降低安全风险。该技术通过深度挖掘和分析矿山运营数据,揭示矿山运营的内在规律和潜在价值。随着矿山数据愈加繁冗复杂,数字孪生技术越来越需要加强对数据的有效管理和利用[2]。

1.2 数据驱动的数字孪生技术

数据驱动的数字孪生技术,作为数字孪生技术的新阶段,其核心在于强调数据在模型构建、仿真分析、优化决策等过程中的主导作用。与传统的数字孪生技术相比,数据驱动的数字孪生技术更加注重数据的实时性和准确性[3-4]。

数据驱动的数字孪生技术的原理依然基于现实物理系统向虚拟数字模型的映射和反馈。在这一过程中,数据的采集、处理和分析成为了关键环节。通过物联网、大数据、云计算等技术手段,数据驱动的数字孪生技术能够实时采集物理实体的多维度数据,包括几何形状、结构、材料、运行状态、环境参数

等。这些数据经过清洗、整合和分析后,被用于构建和更新数字孪生模型,使模型能够更准确地反映物理实体的当前状态和未来趋势。数据驱动的数字孪生技术体系如图 2 所示。



图 2 数据驱动的数字孪生技术体系

Fig.2 Data-driven digital twin technology system

数据驱动的数字孪生技术具有更高的实时性、准确性和预测性。由于强调数据的实时采集和分析,数字孪生模型能够更快速地响应物理实体的变化,提供更为及时的信息支持。通过对大量历史数据的深度挖掘和分析,该技术能够更准确地预测物理实体的未来状态和行为,为决策者提供更为可靠的决策依据。目前,数据驱动的数字孪生技术已广泛应用于智慧矿山建设,为矿山行业的智能化转型和可持续发展提供了技术支持。

2 数据驱动的数字孪生技术在智慧矿山中的应用进展

2.1 在矿山建设方案中的应用

数据驱动的数字孪生技术为矿山建设提供了数据支撑和技术赋能,有助于形成具体的矿山建设方案。杨军等[5]指出数字孪生技术是赋能平台的关键,强调了数据驱动的数字孪生技术在煤炭工业互联网中的重要地位和作用。EL BAZI 等[6]针对数字孪生在采矿业的应用现状,重点讨论了数字孪生的概念、设计、开发及多层架构框架,不仅深化了对数字孪生技术的理解,还指明了数字孪生在采矿业中的潜在应用方向。FARRELLY 等[7]则具体指出了数字孪生在采矿业中的应用建议及试点项目的实施策略,为智慧矿山的实践路径提供了理论指导。姚江等[8]介绍了基于工业互联网的露天矿数字孪生建模系统和方法,这一系统的实现为智慧矿山提供了整体解决方案,促进了矿山运营的全面智能化。付恩三等[9]也对智慧露天矿山的定义、架构及关键技术进行了深入探讨,为智慧矿山的构建提供了理论框架和技术支撑。丁恩杰等[10]回顾了矿山信息化技术的发展历程,分析了智慧矿山的核心关键技术,并强调了数字孪生知识建模的重要性。以上研究工作为智慧矿山的深入发展和技术创新提供了宝贵经验和启示。在技术实施层面,KABASHKIN[11]提出在全生命周期管理中实施数字孪生的综合框

架,强调数据驱动模型的重要性。PARK 等[12]研究了组织数字孪生(DTO)的应用,提出了一种使用面向行动的过程挖掘来实现 DTO 的方法,通过构建数字孪生接口模型引出约束和操作,由操作引擎持续监控和触发,以改进业务流程,为组织业务流程的智能化管理提供了支持。HIMMELSTOSS 等[13]分析了如何为目标导向的数据驱动产品开发利用建模数字孪生,为数字孪生在智慧矿山中的更广泛应用提供了理论支撑和方法指导。WANG 等[14]通过构建煤矿瓦斯事故的孪生安全管理模型,实现了煤矿安全智能高效的管理方式,有效弥补了传统管理模型的不足。WEN 等[15]进一步提出了矿山现场救援环境数字孪生系统(DTSMRE),提高了救援成功率,为矿山安全提供了科技支撑。MA 等[16]提出了基于数字孪生和大数据技术的解决方案,并通过案例研究证明了该策略在节能和降低成本方面的有效性。随着系统规模的增加,系统集成对其兼容性提出了更高的要求,FARRELLY 等[17]呼吁改进互操作性标准、集成平台和数字孪生的应用方式,以推动智慧矿山的深入发展。

随着工业 5.0 和智能技术的蓬勃发展,CHEN 等[18]率先将 ChatGPT、数字孪生和场景工程等前沿技术相融合,探索了智能矿山发展的战略要求,提出了一个涵盖矿业工业互联网平台、矿业操作系统和基础模型的综合架构,这一架构的实施显著提高了采矿效率,并有效降低了安全风险。在此基础上,DIETZ 等[19]为数字孪生引入了一个数据驱动框架,包括数据获取、模型构建、仿真验证和决策支持等关键步骤,验证了该框架的有效性和实用性。VITALE 等[20]则进一步提出了基于过程挖掘的工业网络物理系统数字孪生开发框架。这一框架连接了数据驱动和基于过程的分析方法,实现了对系统动态的准确模拟和异常检测,显著提高了异常检测的时间性能和准确性,为工业系统的实时监控和优化控制开辟了新的路径,也为智慧矿山的智能化管理提供了新的技术手段。SAVOLAINEN 等[21]研究了采矿业基于时间的维护(TBM)政策的优化问题,通过数字孪生模型模拟矿山环境,并结合离散事件模拟和系统动力学方法,实现了运维成本的最小化。谢嘉成等[22]进一步提出了基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式,这一创新为智能化无人开采提供了核心技术支撑,推动了矿山开采方式的智能化转型。陈龙等[23]融合智慧矿山理念和平行智能理论,设计了智慧矿山操作系统(IMOS),为矿山无人化与智能化提供了一体化解决方案,推动了智慧矿山技术的集成与创新。张帆等[24]则提出了基于数字孪生+5G 的智慧矿山建设新思路,构建了矿山数字孪生模型(MDTM),设计了智能开采的数字孪生一体化方案,如图 3 所示。通过将 5G 技术的高速、低延迟特性与数字孪生的精确模拟能力相结合,为智慧矿山的智能化开采提供了技术保障。

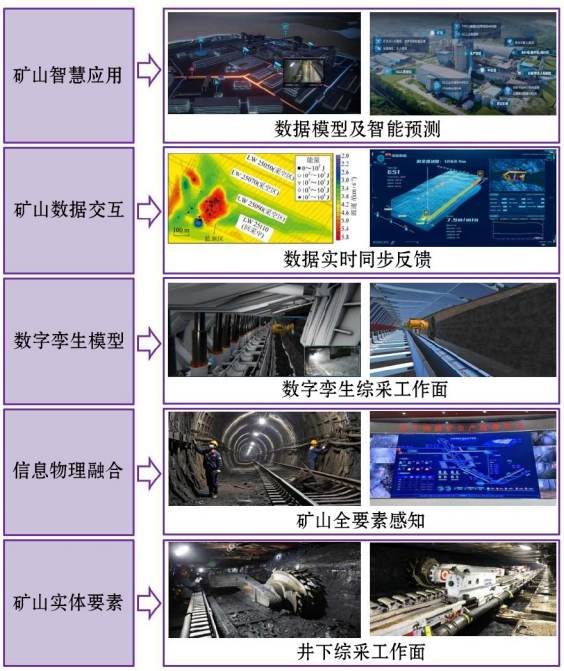


图 3 矿山数字孪生模型(MDTM)架构

Fig.3 Architecture of the Mine Digital Twin Model (MDTM)

2.2 在矿山生产安全中的应用

数据驱动的数字孪生技术为矿山生产安全提供了从设备维护到安全预警的全方位解决方案。在设备维护方面,GAO 等[25]提出了基于数字孪生和 CNN-LSTM 算法的故障预测方法,通过构建提升机制动系统的数字孪生模型,提高了故障预测的准确性。ELBAZI 等[26]还介绍了一个集成专家系统的数字孪生矿山运输卡车监测系统,通过实时跟踪和监测运输卡车,显著提高了运输卡车的安全性和可靠性。王栋淇等[27]研究了输送线场景的数字孪生系统构建问题,实现了对输送线设备状态的实时监控和故障高效诊断处理。LIANG 等[28]研究了矿山提升机电机温度的预测问题,提出了基于数字孪生和循环神经网络的温度预测与超前感知方法,实现了对电机温度变化的准确预测和主动检测。

HUANG 等[29]针对永磁同步电机(PMSM)提出了基于数字孪生和改进麻雀搜索算法优化随机森林的方法,实现了对 PMSM 故障的准确诊断。CHEN 等[30]针对永磁同步电机的匝间短路故障(ISCF)诊断问题,提出了基于数据驱动数字孪生模型的方法,实现了对 ISCF 的早期诊断。WANG 等[31]提出了一种基于数字孪生技术的煤矿设备安全投资优化方法,通过预测实施后的事故损失来验证投资优化计划的有效性,显著降低了事故损失并提高了投资的经济效益。

在安全预警领域,数字孪生技术在地质条件评估监测、瓦斯预警方面具有较大的应用潜力。SHI 等[32]提出 IC-XGBoost3D 方法,用于从有限数据中构建地下地层的 3D 地质模型,提高了地质条件评估的准确性。AKBULUT 等[33]开发了一种基于传感器的岩土工程监测框架,利用三维数字孪生技术实现了地质条件的连续监测,显著提高了地质灾害预警的准确性和及时性。在煤与瓦斯突出强度的风险预测方面,WANG[34]结合数字孪生和深度学习技术,构建了基于优化量子门节点的神经网络预测模型,实现了对煤与瓦斯突出强度的精确预警。针对采矿业中不可预见的火灾事故,HAZRATHOSSEINI 等[35]关注露天采矿的模拟局限性,提出了一个用于露天矿山的数字孪生六层架构,为露天矿山的数字化转型提供了明确的路径和目标。YU 等[36]提出了一种基于深度学习的密集连接轻量级网络,并将其纳入基于数字孪生的框架中,实现了裂隙的实时检测。GATTULLI 等[37]提出了一种利用数字孪生模型改进结构健康监测和早期预警解决方案的方法,并通过案例研究验证了其有效性。

2.3 在矿山生产优化中的应用

在智慧矿山生产优化领域,数字孪生技术的研究涉及网络优化、软件优化、控制优化、通风优化和运输优化等内容,见表 1。

表 1 矿山生产优化不同应用领域的技术特点与关键问题

Table 1 Technical characteristics and key issues in different application areas of mine production optimization

应用领域	应用方向	技术特点	关键问题
网络优化	节点监测、任务调度	具备实时处理能力,通过机器学习等进行预测。	数据同步,模型复杂度与计算资源的合理分配,安全与隐私保护等。
软件优化	数据结构、计算框架、建模方式	数字孪生数据结构、ACP 计算框架,通过随机有限集和贝叶斯推理等算法建模。	软件兼容性和互操作性问题,算法效率与稳定性问题,软件持续更新与维护。
控制优化	控制架构、控制算法	信息物理系统控制架构,混合建模和五维架构。	模型精度与实时性,传感器与执行器可靠性,控制策略适应性。
通风优化	通风规划、数值模拟	通风系统的实时监控和优化控制,识别通风系统中的高风险区域,通过通风阻力系数估计模型。	系统复杂性,数据获取与处理,实时性与响应速度。
运输优化	车辆调度、车辆控制、运输轨迹、物料优化	优化铲运设备调度,实时分析支持最优挖掘轨迹,实现精确预测和控制。	系统集成与兼容性,实时调度与优化,安全与可靠性。

在网络优化方面,FEDRIZZI 等[38]开发了一个数字孪生模型,用于捕捉 MEC 节点的行为,并通过机器学习模型实现了对关键性能指标的准确预测。GOSAVI 等[39]设计了一种基于仿真的数字孪生(S-DT),用于工作站级别的维护调度在线决策,并通过强化学习算法确定了接近最优的维护计划。KAMALAKANNAN 等[40]提出了一种新的模拟处理环境 DTFL-DF,通过调整数字孪生的原始设计,在边缘-雾层实现了实时数据处理和关键任务操作的处理,为采矿业的安全生产提供了有力保障。

在软件优化方面,ORUKELE 等[41]提出了一种数字孪生数据结构,使用分布式系统和面向对象编程的概念,实现系统数字孪生实例的开发,并保持与物理系统的高度一致性。张俊等[42]为平行系统及 ACP 方法建立了数据驱动的数学形式和计算框架,并讨论了其在数字孪生系统中的应用。王鹏等[43]提出了面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法,通过随机有限集和贝叶斯推理提高了仿真结果的准确性和可信性。ZHOU 等[44]讨论了数字孪生在仿真优化中面临的挑战,开展了在分布建模场景中解决这些挑战的研究。

在控制优化方面,XIA[45]提出了一种支持 CPS 的控制架构,并通过深度强化学习实现了生产操作的智能控制。ELBAZI 等[46]则通过比较研究不同应用中开发的数字孪生,提出了一个概念架构,旨在提高采矿机器的性能,并通过案例研究展示了数字孪生在模拟关键场景和优化机器使用方面的有效性。针对天井钻进施工项目的高异质性和复杂性,HU 等[47]提出了一种基于数字孪生的天井钻进过程规划系统框架,通过混合建模和五维架构的构建,

解决质量预测问题。YOU 等[48]则研究了采煤机的自适应速度控制问题,通过构建采煤机的数字孪生模型并设计自适应模糊滑模控制器,实现了采煤机的精确自适应高度调节。QI 等[49]开发了使用数字孪生方法进行磨削力预测的系统,通过整合传感器数据、物理模型和系统操作信息,实现了对磨削力的准确预测。LUO 等[50]提出了一种数据驱动的数字孪生方法,用于快速且高效地实时估计感应电机的转子温度,为感应电机的过热保护提供了参考。SINAGRA 等[51]提出了一种基于数字孪生的压力调节系统管理新方法,并通过实际应用验证了其稳健性和有效性。王青山等[52]针对受动载荷作用的结构,提出了一种基于降阶模型库和机器学习数据驱动的数字孪生构建方法,并通过试验验证了其有效性。

在通风优化方面,KYCHKIN 等[53]的研究工作为地下矿山通风系统的动态优化提供了新思路,通过结合数字孪生技术,实现了通风系统的实时监控和优化控制。类似地,JACOBS 等[54]利用数字孪生技术识别了深井矿山通风系统中的高风险区域,并提出了相应的改进措施,为采矿业提供了主动规划和管理通风系统的有效方法。CAO 等[55]聚焦于矿山通风系统数字孪生模型(DTMVS)的构建,关注了通风阻力系数的不确定性问题,通过拉丁超立方抽样和通风阻力系数估计模型,提高了模拟的准确性。IKEDA 等[56]提出了将废弃矿山重新利用为数据中心的创新思路,并通过通风模拟评估了这一转型的可行性,研究验证了数字孪生在模拟和优化复杂系统方面的潜力,为废弃矿山的再利用提供了可能。

在运输优化方面,周辰奥等[57]构建了露天金属矿山数字孪生系统架构,并通过仿真试验流程对铲运设备流调度进行了优化,为大规模连续生产系统仿真的创新应用提供了依据。ZOU 等[58]为跨域车辆(CDV)开发了一个数据驱动的数字孪生系统,实现了对 CDV 运动状态的精确预测和控制,显著提高了运动控制性能。FU 等[59]的研究将数字孪生技术应用于无人驾驶电缆铲斗,通过实时分析铲斗的结构性能并支持最优挖掘轨迹的生成,有效防止了结构失效,提高了挖掘作业的安全性和效率。XIE 等[60]针对地下采矿系统的挑战,开发了闭环协同人机 CPS 作业系统(MHCPS),利用 VR/AR 技术实现人与智能系统的集成,优化了物理系统。针对颗粒介质运输与处理系统的复杂性,SERVIN 等[61]探索了一种以材料为导向的数字孪生方法,该方法使用颗粒表示颗粒介质,能够在数字形式中跟踪材料,并通过组合控制系统、传感器和模拟模型的数据,更好地学习材料属性并预测对下游过程的影响。这一创新为颗粒介质系统的优化提供了新途径。

3 存在问题与展望

3.1 主要问题

数据驱动的数字孪生技术作为一种新兴的数字化工具,逐渐在智慧矿山建设中展现出巨大潜力。通过创建生产环境数字孪生模型,可以实时监测生产过程中的各种参数和状态,及时发现并处理安全隐患。同时,数字孪生技术还可以优化生产流程和设备配置,提高生产效率和资源利用率。数字孪生技术的发展也面临着一些挑战。由于目前的认知水平、技术水平以及基础设施的限制,数字孪生中所建立的虚拟模型并不能完全保证数据真实可信,导致预测结果出现偏差。此外,数字孪生技术尚未建立一套完善的标准体系,导致在应用实践中出现一系列问题。

3.1.1 增加安全隐患

矿山生产环境复杂且危险,存在诸如瓦斯泄漏、顶板压力变化、设备故障等多种潜在安全隐患。数据驱动的数字孪生技术本应作为提升矿山安全保障的重要手段,通过实时监测、预警和应急处理来有效防范这些隐患。然而,技术落地实施过程中的种种问题却给安全生产带来了更大的风险。首先,设备质量缺陷是数字孪生系统的一大问题。低质量的传感器、监控设备等可能无法准确感知和传输现场数据,导致系统无法及时捕捉到安全隐患。例如,瓦斯监测设备若出现故障,就可能错过最佳的预警时机,从而引发瓦斯突出事故。其次,数据采集不准确也是一大隐患。在数字孪生系统中,数据是决策的基础。如果采集到的数据存在误差或偏差,那么基于这些数据的分析和预警也将失去意义。例如,若顶板压力监测数据出现偏差,可能导致对顶板稳定性的误判,进而引发顶板冒落事故。此外,系统不稳定导致的故障、停机或数据丢失都可能影响系统的正常运行,安全隐患无法被及时发现和处理。例如,在紧急情况下,若系统无法稳定运行,就可能无法及时启动应急预案,从而给矿工的生命安全带来威胁。

3.1.2 降低生产效率

数字孪生技术旨在通过优化生产流程、精准控制设备等方式提高生产效率,从而提升企业的经济效益和市场竞争力。然而,技术落地实施过程中的

种种问题反而可能降低采矿效率。首先,技术不成熟的系统可能无法稳定运行或实现预期的功能,导致生产流程无法得到有效优化。例如,智能调度系统若无法准确判断设备状态或生产需求,就无法做出合理的调度决策,从而影响生产效率。其次,系统集成不合理也是导致生产效率降低的原因之一。在矿山数字孪生系统中,各个子系统需要紧密协作才能实现整体优化。如果系统集成不合理,就可能形成信息孤岛、数据冗余或流程冲突等问题,影响生产效率。例如,若监控系统与调度系统无法有效对接,就可能导致调度决策无法及时响应监控数据的变化。此外,项目还可能由于操作复杂、培训不足等原因导致技术人员无法充分发挥数字孪生系统的优势。

3.1.3 引起资源浪费

数字孪生技术落地实施过程中的种种问题不仅无法提升安全保障和生产效率,还可能引起资源浪费。首先,购买低质量的智能化设备和软件本身就是一种资金浪费。这些设备和软件可能无法稳定运行或实现预期的功能,导致企业投入的资金无法得到有效回报。例如,若购买的传感器质量不过关,就需要频繁更换或维修,增加了企业的运营成本。其次,由于项目无法达到预期效果,企业需要不断地进行维修、改造甚至重新建设。这些额外的投入不仅消耗了企业的人力、物力和财力,还可能影响企业的正常生产运营。此外,因生产效率低下导致资源未能得到充分合理的开采也是一种浪费。

3.2 发展方向

针对智慧矿山建设中数字孪生技术的问题,下面分别从健全评价标准、提升智能水平和助力无人开采三个方面提出数字孪生技术未来的发展方向,通过构建完善的标准体系、强化数据融合与处理能力、优化智能算法与模型、加强跨学科合作与技术集成,推动矿山向无人化、智能化转型。

3.2.1 健全评价标准

为确保数字孪生技术在智慧矿山建设中的有效性和可靠性,需制定和完善相应的评价标准。首先,建立一套涵盖数字孪生技术全生命周期的评价体系,包括模型构建、数据采集、处理、分析以及应用效果等多个环节。参考《系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价(SQuaRE)第10部分:系统与软件质量模型》(GB/T 25000.10—2016),分别从功能性、性能效率、兼容性、易用性、可靠性、信息安全性、维护性、可移植性等方面建立数字孪生技术评价标准,如图4所示。明确了数字孪生系统各项技术指标的评价方法和标准,如性能效率方面的并发性、可靠性方面的模拟准确性等。



图4 数字孪生技术评价标准

Fig.4 Evaluation criteria for digital twin technology

3.2.2 提升智能水平

强化数据融合与处理能力,是提升数字孪生技术智能水平的关键。首先,改进现有数据采集技术,如云边协同的物联网、智能传感器网络等,实现矿山生产全过程的数据高效采集。同时,利用大数据技术和云计算平台,对海量数据进行存储和处理。其次,研发有效的数据融合算法,将不同来源、不同格式的数据融合成统一、准确的数据集。消除数据冗余和冲突,提高数据的可用性和可靠性。在数据处理的基础上,优化智能算法与模型。通过引入机器学习、深度学习及大模型等技术,对数字孪生模型进行训练和优化,提高其预测和决策的准确性。目前,尽管相关研究已取得阶段性进展,且初步实现矿井智能规划、智能采掘和设备的智能维护等功能,但距离生产全流程高度智能化的目标仍有较大差距。

3.2.3 助力无人开采

实现矿山无人化开采,是数字孪生技术的终极目标之一。无人开采不仅能够提高生产效率、降低安全风险,还能够帮助人类开拓新的矿藏,实现深地、深海和深空等领域的开采。为此,需要加强跨学科合作与技术集成,融合机械工程、自动化控制、计算机科学等领域的创新技术,实现对开采设备的远程监控和智能控制。以人工智能技术为核心,以数据驱动为手段,研发高度智能的数字孪生系统,实现探测、采掘、运输、洗选全流程智能化,为矿山无人化开采铺平道路。

随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展,数字孪生技术将与这些前沿技术进一步融合,实现更高效的数据采集、传输、处理和分析。这将使得数字孪生技术能够更准确地反映物理世界的真实状态,通过推动构建完善的标准体系、强化数据融合与处理能力、优化智能算法与模型、加强跨学科合作与技术集成,引领数据驱动的数字孪生技术向着安全、高效、可持续的方向发展。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 杨林瑶,陈思远,王晓,等.数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J].自动化学报,2019,45(11):2001-2031.
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica,2019,45(11):2001-2031.

[3] 魏一雄,郭磊,陈亮希,等.基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J].计算机集成制造系统,2021,27(2):352-363.
WEI Yixiong, GUO Lei, CHEN Liangxi, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data driven[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2021,27(2):352-363.

[4] 李浩,王昊琪,程颖,等.数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J].中国机械工程,2020,31(7):757-772.
LI Hao, WANG Haoqi, CHENG Ying, et al. Technology and application of data-driven intelligent services for complex products[J]. China Mechanical Engineering,2020,31(7):757-772.

[5] 杨军,张超,杨恢凡,等.煤炭工业互联网技术研究综述[J].工矿自动化,2023,49(4):23-32.
YANG Jun, ZHANG Chao, YANG Huifan, et al. Research summary on coal industry internet technology[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(4):23-32.

[6] EL BAZI N, MABROUKI M, LAAYATI O, et al. Generic multi-layered digital-twin-framework-enabled asset lifecycle management for the sustainable mining industry[J]. Sustainability,2023,15(4):3470.

[7] FARRELLY C T, DAVIES J C. Interoperability, integration, and digital twins for mining-part 2:pathways to the network-centric mine[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2021,15(3):22-31.

[8] 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. Open-pit mine digital twin modeling system and method based on industrial internet[J]. Metal Mine,2023(1):161-171.

[9] 付恩三,刘光伟,赵浩,等.智慧露天矿山总体框架及关键技术研究[J].工矿自动化,2021,47(8):27-32.
FU Ensan, LIU Guangwei, ZHAO Hao, et al. Research on the overall framework and key technologies of intelligent open-pit mines[J]. Journal of Mine Automation,2021,47(8):27-32.

[10] 丁恩杰,俞啸,夏冰,等.矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J].煤炭学报,2022,47(1):564-578.
DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):564-578.

[11] KABASHKIN I. Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models[J]. Mathematics,2024,12(19):2979.

[12] PARK G, VAN DER AALST W M P. Realizing a digital twin of an organization using action-oriented[C]//Process Mining: Proceedings of the 3rd International Conference on Process Mining (ICPM). Eindhoven:[s.n.], 2021.

[13] HIMMELSTOSS H, BAUERNHANSL T. Modelling the digital twin for data-driven product development a literature review[C]//Proceedings of the 5th Conference on Production Systems and Logistics (CPSL). Stellenbosch:[s.n.],2023.

[14] 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.

[15] WEN H, LIU S K, ZHENG X Z, et al. The digital twins for mine site rescue environment:application framework and key technologies[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186:176-188.

[16] MA S Y, DING W, LIU Y, et al. Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries[J]. Applied Energy, 2022, 326:119986.

[17] FARRELLY C T, DAVIES J C. Interoperability, integration, and digital twins for mining-part 1:pathways to the network-centric mine[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2021,15(3):13-21.

[18] CHEN L, LI Y C, SILAMU W, et al. Smart mining with autonomous driving in industry 5.0: architectures, platforms, operating systems, foundation models, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024,9(3):4383-4393.

[19] DIETZ M, REICHVILSER T, PERNUL G. A data-driven framework for digital twin creation in industrial environments[J].IEEE Access,2024,12:93294-93304.

[20] VITALE F, GUARINO S, FLAMMINI F, et al. Process mining for digital twin development of industrial cyber-physical systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2024,21(1):866-875.

[21] SAVOLAINEN J, URBANI M. Maintenance optimization for a multi-unit system with digital twin simulation example from the mining industry [J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2021,32(7):1953-1973.

[22] 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.

[23] 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 mining operating systems: from digital twins to mining intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1633-1645.

[24] 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.

[25] 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.

[26] ELBAZI N, TIGAMI A, LAAYATI O, et al. Digital twin-enabled monitoring of mining haul trucks with expert system integration:a case study in an experimental open-pit mine [C]//Proceedings of the 5th IEEE Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). Nevsehir:[s.n.],2023.

[27] 王标淇,范维,陈传军,等.基于实时数据驱动的车间输送线数字孪生系统研究与实现[J].制造业自动化,2023,45(8):171-177.
WANG Yueqi, FAN Wei, CHEN Chuanjun, et al. Research and implementation of digital twin system of workshop conveyor line based on real-time data[J]. Manufacturing Automation,2023,45(8):171-177.

[28] LIANG J, MA L, LIANG S, et al. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines[J]. Computers & Electrical Engineering,2023,110:108833.

[29] HUANG Y K, 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.

[30] CHEN Z C, LIANG D L, JIA S F, et al. Incipient interturn short-circuit fault diagnosis of permanent magnet synchronous motors based on the data-driven digital twin model[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2023,11(3):3514-3524.

[31] 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-Basel,2024,14(23):11101.

[32] SHI C, WANG Y. Data-driven construction of three-dimensional subsurface geological models from limited Site-specific boreholes and prior geological knowledge for underground digital twin[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2022,126:104493.

[33] AKBULUT N K B, ANANI A, BROWN L D, et al. Building a 3D digital twin for geotechnical monitoring at san xavier mine[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024:1-18.

[34] WANG Z Q. Prediction method of coal and gas outburst intensity based on digital twin and deep learning[J]. Frontiers in Energy Research,2022,10:891184.

[35] HAZRATHOSSEINI A, AFRAPOLI A M. The advent of digital twins in surface mining:its time has finally arrived [J]. Resources Policy,2023,80:103155.

[36] YU R, YANG X Y, CHENG K. Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines[J]. Frontiers in Energy Research,2023,11:1265111.

[37] GATTULLI V, FRANCHI F, GRAZIOSI F, et al. Design and evaluation of 5G-based architecture supporting data-driven digital twins updating and matching in seismic monitoring[J]. Bulletin of Earthquake Engineering,2022,20(9):4345-4365.

[38] FEDRIZZI R, BELLIN A, COSTA C E, et al. Building the digital twin of a mec node:a data driven approach[C]// Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Network Softwarization (IEEE NetSoft)- Boosting Future Networks through Advanced Softwarization. Madrid:[s.n.],2023.

[39] GOSAVI Abhijit, GOSAVI Aparna. A simulation-based digital twin for data-driven maintenance scheduling of risk-prone production lines via actor critics[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal,2024,11:09579-1.

[40] KAMALAKANNAN U, SRIRAMULU R, RAMAMURTHI P. DTFL-DF:digital twin architecture powered by federated learning decision forest to mitigate fire accidents in mining industry[J]. Systems Engineering,2024,27(5):869-885.

[41] ORUKELE O, POLETTE A, LORENZO A G, et al. A data structure for developing data-driven digital twins[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Product Lifecycle Management: Leveraging Digital Twins, Circular Economy, and Knowledge Management for Sustainable Innovation (PLM). Montreal:[s.n.],2023.

[42] 张俊,许沛东,王飞跃.平行系统和数字孪生的一种数据驱动形式表示及计算框架[J].自动化学报,2020,46(7):1346-1356.
ZHANG Jun, XU Peidong, WANG Feiyue. Parallel systems and digital twins: a data-driven mathematical representation and computational framework [J]. Acta Automatica Sinica,2020,46(7):1346-1356.

[43] 王鹏,杨妹,祝建成,等.面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J].系统工程与电子技术,2020,42(12):2779-2786.
WANG Peng, YANG Mei, ZHU Jiancheng, et al. Dynamic data driven modeling and simulation method for digital twin [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2779-2786.

[44] ZHOU E L, ASSOC COMPUTING M. Data-driven simulation optimization in the age of digital twins[C]// Proceedings of the 38th ACM SIGSIM International Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (ACM SIGSIM PADS). Atlanta:[s.n.],2024.

[45] XIA K S. Simulation-based and data-driven approaches to industrial digital twinning towards autonomous smart manufacturing systems[M]. South Carolina: University of South Carolina,2021.

[46] ELBAZI N, MABROUKI M, CHEBAK A, et al. Digital twin architecture for mining industry:case study of a stacker machine in an experimental open-pit mine[C]//Proceedings of the 4th IEEE Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM). Cappadocia:IEEE,2022.

[47] HU F W, QIU X J, JING G Y, et al. Digital twin-based decision making paradigm of raise boring method [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2023, 34 (5): 2387-2405.

[48] YOU X S, GUO Y A, MIAO B, et al. A digital twin-based adaptive height control for a shearer[J]. Machines,2024,12 (7):460.

[49] QI B, PARK H S, PUBLISHING I O P. Data-driven digital twin model for predicting grinding force[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Modern Technologies in Industrial Engineering Ⅷ (ModTech).[s.l.]:Network,2020.

[50] LUO Y, WANG L G, SIDOROV D, et al. An approach to estimate the temperature of an induction motor under nonlinear parameter perturbations using a data-driven digital twin technique[J]. Energies,2024,17(19):4996.

[51] SINAGRA M, CREACO E, MORREALE G, et al. Energy recovery optimization by means of a turbine in a pressure regulation node of a real water network through a data-driven digital twin[J]. Water Resources Management,2023, 37(12):4733-4749.

[52] 王青山,严波,陈岩,等.基于降阶模型和数据驱动的动态结构数字孪生方法[J].应用数学和力学,2023,44(7):757-768.
WANG Qingshan, YAN Bo, CHEN Yan, et al. A digital twin method for dynamic structures based on reduced order models and data driving [J]. Applied Mathematics and Mechanics,2023,44(7):757-768.

[53] KYCHKIN A, NIKOLAEV A, IEEE. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin [C]//Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).[s.l.]:Electr Network,2020.

[54] JACOBS D R, VAN LAAR J H, SCHUTTE C S L. Strategy to identify and mitigate hazards in deep-level mine ventilation systems using a calibrated digital twin[J]. South African Journal of Industrial Engineering,2022,33(3):204-217.

[55] CAO P, LIU J, WANG H L, et al. Uncertainty analysis of digital twin model of mine ventilation system[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):26558.

[56] IKEDA H, MOKHTAR N E B, SINAICE B B, et al. Digital twin technology in data center simulations:evaluating the feasibility of a former mine site[J]. Sustainability,2023, 15(23):16176.

[57] 周辰奥,周科平,张孝平,等.面向数字孪生的大型露天金属矿生产调度仿真分析[J].金属矿山,2024(3):190-199.
ZHOU Chen'ao, ZHOU Keping, ZHANG Xiaoping, et al. Simulation analysis of large-scale open-pit mine production scheduling oriented to digital twin[J]. Metal Mine,2024(3):190-199.

[58] ZOU Y, LIU Y Z, CHEN Z B, et al. Data driven digital twin system for the cross-domain vehicle [J]. Ocean Engineering,2024,311:118846.

[59] FU T, ZHANG T, LYU Y L, et al. Digital twin-based excavation trajectory generation of uncrewed excavators for autonomous mining[J]. Automation in Construction,2023,151:104855.

[60] XIE J C, LIU S G, WANG X W. Framework for a closed-loop cooperative human Cyber-Physical System for the mining industry driven by VR and AR: MHCPS [J]. Computers & Industrial Engineering,2022,168:108050.

[61] SERVIN M, VESTERLUND F, WALLIN E. Digital twins with distributed particle simulation for mine-to-mill material tracking[J]. Minerals,2021,11(5):524.