非煤矿山安全管理中智能化技术的应用现状与展望①

李小双[1]，臧浩淳[1]，王运敏[2]，刘健鹏[1]
（1.常州大学 城市建设学院，江苏 常州 213164；2.金属矿山安全与健康国家重点实验室，安徽 马鞍山 243000）

摘　要：系统梳理了智能化技术从初期自动化监测到现代智能决策支持的演进路径，重点分析了神经网络、物联网、数字孪生、大数据等关键技术的研究成果与应用实例；探讨了以机器学习为代表的新一代智能化技术在非煤矿山安全管理中的应用进展，包括深度神经网络、支持向量机、决策树和随机森林等技术在人员安全管理与定位、矿山灾害监测与预警、矿山设备运行安全和矿山爆破作业安全等方面展现出的优势，展望了未来非煤矿山安全管理在智能化技术深度应用与融合、旧设备与现代智能技术兼容及系统化集成管理方面的发展趋势。

关键词：矿山安全；非煤矿山；智能化技术；安全管理；机器学习；发展趋势
中图分类号：TD76　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.01
文章编号：0253-6099(2025)06-0001-07

Current Status and Prospects of Application of Intelligent Technologies in Safety Management of Non-coal Mines

LI Xiaoshuang[1], ZANG Haochun[1], WANG Yunmin[2], LIU Jianpeng[1]
(1.*School of Urban Construction*, *Changzhou University*, *Changzhou* 213164, *Jiangsu*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines*, *Ma'anshan* 243000, *Anhui*, *China*)

Abstract: This paper presents the evolution path of intelligent technologies, from automated monitoring at early stage to modern AI-based decision support, and focuses on analysis of research results and application cases of key technologies, such as neural networks, the Internet of Things (IoT), digital twins and big data. It also presents discussion of the latest progress in application of a new generation of intelligent technologies represented by machine learning in safety management of non-coal mines. Specifically, technologies including deep neural networks, support vector machines, decision trees and random forests have shown advantages in aspects such as personnel safety management and positioning, monitoring and early warning of mine disasters, safe operation of mine equipment, and safety in mine blasting operation. Finally, the development trends of non-coal mine safety management are proposed, in terms of in-depth application and integration of intelligent technologies, compatibility of old equipment with modern intelligent technologies, and integrated management.

Key words: mine safety; non-coal mine; intelligent technology; safety management; machine learning; development trend

矿山安全问题始终是全球矿业发展的核心挑战，在复杂而恶劣的作业环境中，矿山面临多种多样的危险因素，威胁矿工的生命安全以及矿山的安全生产，特别是深部开采矿山，矿山安全生产面临更加严峻的挑战，事故频发且预防难度加大，这已经成为制约矿业可持续发展的重要瓶颈之一。

随着浅部资源逐渐枯竭，大多数矿山已进入深部开采阶段。深部地质环境复杂，岩体处于“三高一扰动”（高地应力、高地温、高渗透压及强烈开采扰动）的极端条件下，衍生出一系列复杂问题。高地应力诱发

① **收稿日期**：2025-05-30
基金项目：云南省中央引导地方科技发展项目(202407AC110019)；国家自然科学基金(42477142,42277154)；江苏省中青年学术带头人项目(SCZ2509200010)；山东省高等学校“青创人才引育计划”(鲁教科函〔2021〕51 号)；山东省自然科学基金(ZR2022ME188)；济南市“新高校 20 条”科研带头人工作室项目(20228108)；常州大学高层次人才引进项目(ZMF24020037)
作者简介：李小双(1983—)，男，湖北随州人，博士，教授，主要从事矿山岩土工程方面的研究工作。E-mail:xsli2011@126.com

的围岩大变形与岩爆频发加速了巷道结构与机械设备的损毁;深部高温热害、有毒气体浓度超限以及采动裂隙贯通引发的高压突水风险对矿工的生存与作业条件构成了严重威胁;开采扰动导致地质灾害发生频率增加,加剧了矿山安全生产的难度和复杂性[1-2]。传统的矿山安全管理手段的局限性凸显,尤其是在实时监控、精准预警和应急响应方面存在诸多不足,难以有效应对复杂的矿山环境,导致灾害预防与应对效率低下。因此,亟须通过先进的技术提高矿山安全管理水平。随着信息技术和智能化技术的快速发展,神经网络、物联网、数字孪生、大数据等凭借其在感知、预测、控制和决策方面的强大能力,在矿山安全管理方面得到了广泛应用[3]。

本文重点关注智能化技术在非煤矿山安全管理方面的应用与进展,探讨深度神经网络、支持向量机、决策树、随机森林等关键技术在非煤矿山安全中的创新应用,分析智能矿山技术在实际应用中的挑战与发展趋势。针对技术融合不足、数据壁垒及应急响应滞后等现实问题,提出未来智能化发展的优化方向,旨在为非煤矿山安全管理体系的高效升级提供理论支撑与实践参考。

1 智能化技术

为深入分析智能化技术应用与发展现状,利用 VOSviewer 软件对近 20 年来矿山安全管理领域的相关文献进行了可视化分析,结果表明,人工智能、5G 技术、物联网、数字孪生和云平台等智能化技术逐渐广泛应用于矿山安全管理。因此,本文对以神经网络、物联网、数字孪生、大数据为代表的智能化技术在矿山安全管理中的应用进行了分析。

1.1 神经网络

神经网络是一种模仿人脑神经元连接和学习过程的人工智能技术,能够通过大规模数据处理和复杂模式识别实现自适应学习与非线性建模。神经网络根据结构、功能和应用场景可分为多种类型,其中的典型模型为误差反向传播(back propagation,简称 BP)神经网络和卷积神经网络(convolutional neural network,简称 CNN)。BP 神经网络是一种基础且应用广泛的前馈神经网络,在安全风险预测、矿井环境监测、设备健康管理、人员行为管理及智能化管理等方向发挥了重要作用[4-6]。CNN 具有优异的鲁棒性,尤其擅长处理具有网格拓扑结构的数据,如图像和视频,最初应用于计算机视觉领域,近年来已逐步扩展至微震数据分析、冲击地压预警、人员行为识别等矿山安全管理中[7]。神经网络在矿山应用中也存在缺陷,其高性能依赖于大规模、高质量的训练数据,矿山又常面临数据采集困难、样本稀缺或分布不均的挑战[8]。

1.2 物联网

物联网技术通过无线射频识别(radio frequency identification,简称 RFID)、传感器、定位系统等设备,将物体与互联网连接,实现智能识别、定位、跟踪和管理,构建了信息化与智能化的管理体系[9]。在矿山领域,物联网通过传感器网络的部署,实现对矿山环境、设备运行状态和人员活动的全方位实时监控与智能化管理[10-11]。物联网应用快速发展的同时,也存在一些显著不足。物联网依赖于稳定的网络环境,在复杂环境下会面临信号覆盖不足的问题,尤其在实时性要求较高的场景(如灾害监测)中,信号延迟或中断可能引发关键数据丢失,威胁系统可靠性。物联网与云计算在矿山安全管理中的动态诊断架构[13]如图 1 所示。

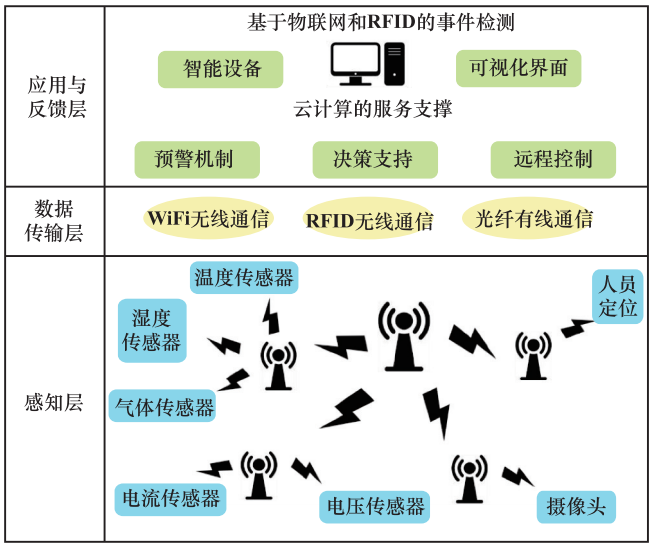


图 1 物联网与云计算在矿山安全管理中的动态诊断架构

Fig. 1 Dynamic diagnosis architecture of IoT and cloud computing in mine safety management

1.3 数字孪生

数字孪生利用先进的数字技术,创建物理实体的虚拟模型,经模拟和优化,增强物理实体的能力或扩展其功能[12]。数字孪生技术的核心在于构建矿山的虚拟数字模型,与实际矿山的运行状态实时映射和动态交互[13],实现对矿山地质结构、设备状态、人员分布以及作业动态精准高效的实时监测、分析与预测。在地质灾害预防方面,数字孪生利用实时传感器数据和历史运行数据,对矿山岩体变形、地下水渗流及地震波传播等关键参数进行动态仿真与趋势预测,提前识别潜在风险并制定相关应急预案,有效减少突发事故的发

生概率[14]。文献[15]基于数字孪生建立了露天金属矿事故安全管理模型,该模型集成了各种传感器和监控设备,实时收集矿山的温度、湿度、气体浓度等数据。在设备管理与维护方面,数字孪生模型可对矿山设备进行虚拟化监控,实时反馈设备运行状态及潜在故障点,文献[16]基于数字孪生建模,使用激光雷达对车辆进行高精度位置监测,与 5G SA 网络的可靠通信以及利用安全区和安全消息来实现紧急停车。

虽然数字孪生技术能够提供强大的数据支持和预警功能,但在关键操作环节仍需人工确认,并且数字孪生系统中的人工智能算法在决策时往往难以提供清晰的解释,在某些情况下,算法可能误判风险,导致不必要的停产或错误决策。

1.4　大数据

大数据是指通过多种渠道采集的规模巨大、类型多样、增长迅速的数据集合,具有“体量大、速度快、种类多、价值高”的特征。在非煤矿山安全管理领域,大数据为传统安全管理模式注入了新的活力,有效提升了风险监测、隐患预警及应急处置能力[17]。在矿区部署传感器、摄像头和无人机等设备,大数据平台能够实时采集地质条件、设备运行状态、尾矿库水位及排水情况等数据,再和历史数据综合分析,可有效识别潜在风险。在预测性维护及应急管理方面,大数据的作用尤为显著,文献[18]提出通过分析挖掘机和运输车辆的运行数据,可提前预测维护需求或部件更换时间。此外,文献[19]以云计算和大数据处理技术为核心,提出了一种结合现场检测与数值模拟的金属矿山采动灾害监测预警云平台;文献[20]构建了基于大数据平台的区域地质灾害应急管理系统,显著提高了区域事件的响应效率。通过数据挖掘和机器学习,大数据还能总结事故发生规律,使非煤矿山安全管理逐步由被动防护向主动预防转变[21]。

大数据技术虽在预测性维护、应急管理等领域发挥了重要作用,但实际应用中仍会面临一些瓶颈,例如:矿山大数据中高比例无效信息严重制约技术效能,传感器因环境干扰与设备冗余运行,产生大量低价值数据。因此,需要构建高效的数据治理体系,大数据才能在非煤矿山安全管理领域实现有效应用,释放其潜在价值。

2　新一代智能化技术的研究进展

新一代智能化技术在深度学习、强化学习、计算机视觉、自然语言处理等领域取得了突破性的发展,在强调跨领域协同和系统集成的同时,体现了高度的适应性、实时性和智能预判能力。

2.1　新一代智能化技术

2.1.1　深度神经网络

深度神经网络(deep neural network,简称 DNN)是深度学习的一个重要模型,核心理念是在多层神经元的相互作用下,模拟人脑的处理机制,自动从大量数据中学习并提取重要特征,这种自动化的特征提取和模式识别能力,使得 DNN 在处理海量数据时具备前所未有的优势。与传统机器学习方法相比,DNN 无需人工干预,从原始数据中自动进行特征抽取,如训练深度神经网络模型,能够从设备运行数据(振动、温度、电流)中学习并识别设备的健康状况,实现故障预测和预防性维护。

2.1.2　支持向量机

支持向量机(support vector machine,简称 SVM)作为监督式机器学习方法中的经典模型,在数据分类与模型分析领域具有重要应用价值,适用于样本规模有限且特征维度较高的场景。SVM 的核心原理是通过构造特征空间中的最大间隔决策边界,实现对不同类别样本的最优划分,这个最优超平面的选择是基于最大化类别间隔的原则,在保证能够正确分类的同时,尽量增加分类边界两侧数据点之间的距离。这种做法不仅能提升模式判别准确性,还能增强模型的泛化能力,有效抑制模型过适应现象,从而使其在面对新数据时表现得更加稳定[22]。在非煤矿山安全管理中,SVM 被广泛应用于灾害预测、设备健康监测和安全风险评估等方面。

2.1.3　决策树

决策树(decision tree,简称 DT)作为经典的监督式学习方法,常见于预测建模中的类别划分与数值预测任务。决策树的结构由根节点、内部节点和叶节点组成,其中每个节点代表一个决策点或特征条件,而叶节点则表示最终的分类结果或预测值[23]。决策树学习的关键是对数据的属性进行最优划分,原理是通过信息熵或基尼系数等指标选择最优的分裂特征,将数据集递归地划分为更纯净的子集,直至满足终止条件。在矿山安全管理中的应用主要涉及灾害风险评估、设备故障诊断、人员行为管理和事故原因分析等领域。

2.1.4　随机森林

随机森林(random forest,简称 RF)作为并行化集成学习框架,广泛应用于分类和回归问题,利用 Bagging 方法从原始数据集中随机抽取多个不同的子集,并使用这些子集训练多棵决策树,保证每棵决策树的训练过程都有一定的随机性。RF 采用了袋外法

(out-of-bag)来评估模型性能并进行预测,训练过程中每棵树的数据经随机抽样生成,而未参与当前树训练的样本则作为“袋外”样本,用于评估该树的预测效果。在矿山安全管理的实际应用中,这意味着 RF 模型能够在训练时自动筛选出对预测结果贡献最大的特征,再对袋外数据进行检验,进一步优化模型。

2.2 应用及研究进展

2.2.1 人员安全管理与定位

在矿山事故的统计数据中,人为因素占据了主导地位。非煤矿山中 70%~80%的事故与人员操作直接相关,充分揭示了人员不安全行为在矿山安全管理中的关键影响[24]。非煤矿山作业环境复杂多变,人员安全管理与定位难度较大,当前行为识别精度不足,工人面临的高风险作业内容多样,机器操作失误、疲劳驾驶、违规作业等不安全行为更加剧了高危环境下事故发生的可能性[25]。为此,支持向量机、决策树、随机森林与深度神经网络等算法逐步应用到矿山人员安全管理中。其中,SVM 适用于小样本、高维度行为数据的分类与异常检测,可用于疲劳驾驶判别、操作行为识别等任务;DT 模型结构直观、便于规则提取,适合构建作业行为标准与风险路径判断;RF 作为集成算法,具有良好的鲁棒性和泛化能力,能够融合多源监测信息,提升复杂环境下不安全行为的预测精度;DNN 具备强大的非线性建模和多维特征自动提取能力,可实现对矿工违规操作、未佩戴防护装备等行为的精准识别。文献[26]使用深度学习方法显著增强了安全帽检测识别系统的稳定性;文献[27]利用 DNN 进行特征提取,分析驾驶员的生理数据以及行为数据,进而评估驾驶员的疲劳程度。然而,当前相关研究仍较为局限,亟待在实际应用中进行更多探索,如何利用智能化技术对矿工的行为轨迹进行实时跟踪与分析、如何通过智能系统动态划分危险区域并进行风险评估,以及如何设计高效的应急响应调度系统等问题仍需要进一步的研究和实践验证。

2.2.2 矿山灾害监测与预警

非煤地下矿山作为高危作业场所,地压异常、水文地质灾害、火灾隐患已成为行业安全防控的难点[28-30]。非煤地下矿山岩层结构复杂多变,在采矿作业过程中,围岩应力场的动态演变可能引发局部区域应力异常积累,当应力超过某一临界值时,岩体会发生变形,进而引发岩爆与矿震、顶板垮落、矿柱变形与破坏、巷道围岩大变形等多种形式的地压灾害[31]。水文地质条件是非煤地下矿山的基础,不合理的排水或导水不畅,使得矿井内部可能会面临大量地下水的渗透,不仅会抬高矿井内的水位,还可能导致矿井内部的地质压力异常增大,增加坍塌等次生灾害发生的风险。矿井火灾也是矿山灾害中危害较大的类型之一,火灾不仅会直接烧毁设备、损坏井下设施,还会产生大量有毒有害气体,危及矿工生命[32]。在露天采场中,伴随着采掘深度的扩大,坡面稳定性明显下降,坡顶落石、塌方等灾害发生概率增大,威胁采场设施和人员安全,堵塞采矿道路[33]。

SVM 算法适用于岩爆等级评估、水害敏感区域划分等,在特征维度较高、样本数量有限的非煤矿山环境中优势显著。DT 模型适用于构建灾害因果路径与风险等级判定规则。RF 模型通过集成多棵决策树提高模型稳定性和容错能力,能在处理多源监测数据时有效规避单模型过拟合问题。未来应持续推进智能化监测技术与地质、物探、遥感、物联网等多源数据的融合,提升数据的时空连续性与可靠性。

2.2.3 矿山设备运行安全

在非煤矿山作业中,采矿生产通常依赖大量大型机械设备,且矿山设备通常处于高强度、连续运转的状态,工作环境恶劣,设备容易出现故障,对作业人员安全和生产效率构成隐患,因此设备的安全监测与故障管理是确保生产顺利和预防事故发生的重要环节。在地下采场,设备需要承受高湿度和大量粉尘的侵袭,导致电气系统绝缘性能降低,可能引发漏电、短路等故障,造成操作人员触电事故的风险。因此,智能化技术在设备故障诊断方面的应用需求逐渐增大,成为矿山安全管理中的一项重要任务[34]。

传统的矿山设备故障诊断主要基于规则的专家系统或经验法则,这些方法虽然在一定程度上有效,但对设备类型、工作环境和操作条件具有较高的依赖性,且精度和泛化能力存在局限性,难以适应复杂多变的矿山作业环境。随着智能技术的迅速发展,机器学习与深度学习等新兴技术逐渐被引入矿山设备故障诊断领域,与传统依赖人工经验的诊断模式相比,这些新型方法,尤其是深度学习,自动学习和分析海量数据,显著提升了故障诊断的准确性、实时性和自动化水平[35]。文献[36]提出了一种基于 DNN 的矿山机电设备智能故障预测方法。SVM 在早期故障识别与模糊边界分类中表现优越,文献[37]提出了一种基于 SVM 的矿山机电设备故障智能化检测方法,经自适应修正策略进一步优化了模型性能。DT 具有良好的可解释性,能够构建直观的设备故障逻辑路径,便于工程人员理解与干预,文献[38]针对矿井通风系统的安全性,提出了一种基于 DT 的智能故障诊断系统,优化风速传感

器的布置和剪枝决策树。由上述研究可知,机器学习等智能技术的广泛应用,正在不断提升矿山设备故障诊断的精度、效率和智能化水平,未来应加强设备数据标准化建设与多源数据融合技术的研究,推动矿山设备运维系统的集成化、平台化发展,全面提升非煤矿山设备运行的安全性与可靠性。

2.2.4　*矿山爆破作业安全*

爆破设计不合理、操作不规范等会导致安全隐患,具体表现为爆破后冲、上翻、根底现象以及大块岩石的形成[39]。此外,爆破人员未严格按照规程施工,爆破器材运输与储存管理不规范或起爆方法错误,均会增加作业风险。安全距离和范围设计不合理也会加剧爆破的危险性:飞石、有毒气体以及冲击波会对人员、设备及周边建筑物造成威胁,甚至引发粉尘扩散和岩体滑坡等次生灾害,破坏周边环境。

目前,新一代智能化技术在非煤矿山爆破安全领域的研究尚未广泛开展,现有的研究主要集中在 BP 神经网络、CNN 和 SVM 等技术的应用上。DNN 具备强大的非线性建模与特征抽象能力,可在多源复杂数据下实现对爆破冲击范围、飞石轨迹及环境响应的高精度预测,文献[40]提出了一种基于单阶段的 DNN 的 PG-YOLOv3 模型,该模型在处理爆破现场中的微小目标检测时表现出很高的准确率。SVM 在小样本爆破数据分类与边界识别方面具有显著优势,能够有效实现对爆破参数异常值的快速识别与报警。智能算法虽在爆破作业风险识别中展现出良好前景,但仍存在若干问题亟待解决,在爆破风险评估中,尚未形成系统化的多源数据融合框架,难以实现对飞石轨迹、冲击波传播路径及其危害范围的精准模拟与预测。面对日益严格的环保与绿色矿山建设要求,爆破作业中低振动、低粉尘、高效率的协同控制策略亟待建立与推广。

3　非煤矿山安全管理发展趋势

1)非煤矿山智能化安全管理转型。智能化技术在非煤矿山安全管理中的深度应用与融合成为该行业发展的重要方向,但非煤矿山的安全管理从传统的经验性管理向科技驱动、智能化管理转型过程中面临诸多挑战。一些中小型矿山由于成本较高、人员技术水平有限,智能化管理系统的普及程度仍然较低,致使安全管理效能未能充分发挥。为了解决此问题,矿山行业亟须加大智能化技术的研发和推广力度,整合人工智能、物联网和大数据分析等技术,实现生产环境、设备状态和人员行为的实时监控,增强安全风险的预测与预警能力。

2)非煤矿山设备的智能改造与融合。非煤矿山现有设备的老化问题严重,导致其与现代智能化技术的兼容性较差,设备的智能化改造和系统整合在短期内难以大规模实现。因此,设备更新、智能化改造以及新一代智能化技术与非煤矿山设备深度融合应用将成为非煤矿山建设的重要任务,未来矿山安全管理也将朝着更加系统化、智能化和自动化的方向发展。

3)非煤矿山智能应急决策与响应体系优化。利用新一代智能技术进行系统集成管理,结合智能算法优化应急管理系统。矿山作业通常涉及多个独立运行的系统,如设备监控系统、环境监测系统和人员管理系统等,基于实时数据和历史经验,系统能够自动分析并调整安全管理策略,以应对复杂多变的矿山作业环境,这种智能化的决策能力将显著提升矿山安全管理的反应速度和预判能力。

4　结语

1)神经网络、物联网、数字孪生与大数据等智能技术的广泛应用,极大提升了非煤矿山安全管理的实时感知、风险识别与预警响应能力,使矿山安全由传统的经验管理向数据驱动、智能决策转变。同时,深度神经网络、支持向量机、决策树和随机森林等机器学习技术在人员定位、灾害监测、设备运维和矿山爆破等安全领域取得显著成效,也为矿山安全管理模式的革新提供了坚实基础。

2)智能化技术虽具备广阔应用前景,但实际推广过程中仍存在系统集成难度大、老旧设备兼容性差、中小矿山投入能力不足等问题。不同技术间的融合度不高、数据壁垒等因素也制约了技术效能的全面发挥。未来,应持续加强新一代智能化技术的跨界融合,推动构建集数据感知、智能分析与应急响应于一体的全流程闭环安全管理系统,加快行业整体智能化的升级步伐,助力矿业安全、高效与可持续发展。

参考文献(References):

[1] 顾清华,李学现,卢才武,等. “双碳”背景下露天矿智能化建设新模式的技术路径[J]. 金属矿山, 2023(5):1-13.
GU Qinghua, LI Xuexian, LU Caiwu, et al. Technical path of new intelligent mode of open-pit mine under the background of “dual carbon”[J]. Metal Mine, 2023(5):1-13.

[2] 杨天鸿,王赫,董鑫,等. 露天矿边坡稳定性智能评价研究现状、存在问题及对策[J]. 煤炭学报, 2020,45(6):2277-2295.
YANG Tianhong, WANG He, DONG Xin, et al. Current situation, problems and countermeasures of intelligent evaluation of slope stability in open pit[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(6):2277-2295.

[3] 魏文艳. 我国煤矿智能化发展及技术创新[J]. 煤炭经济研究, 2024,44(8):102-108.
WEI Wenyan. Intelligent development and technical innovation of coal mine in our country[J]. Coal Economic Research, 2024,44(8):102-108.

[4] 张津鹏,李林,刘光伟,等. 基于IGWO-BPNN的露天矿卡车故障预测方法[J]. 煤炭工程, 2023,55(12):114-120.
ZHANG Jinpeng, LI Lin, LIU Guangwei, et al. An IGWO-BPNN-based method for open-pit mine truck failure prediction[J]. Coal Engineering, 2023,55(12):114-120.

[5] 卢栋,富国凯,孙正军,等. 震后危岩体边坡力学参数反演及余震动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):34-40.
LU Dong, FU Guokai, SUN Zhengjun, et al. Inversion of mechanical parameters and dynamic response analysis of dangerous rock mass slopes after earthquakes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):34-40.

[6] 陈莎莎,何理,李腾飞,等. 基于ACO-BP模型的岩石爆破破碎块度预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):12-16.
CHEN Shasha, HE Li, LI Tengfei, et al. Prediction of blast-induced rock fragmentation based on ACO-BP model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):12-16.

[7] 张云鹤. 基于卷积神经网络的矿井人员安全帽佩戴检测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
ZHANG Yunhe. Research on mine personnel helmet wearing detection method based on convolutional neural network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[8] 王鑫瑀,曹鹏飞,肖一清,等. 基于HGS-ANN混合模型的爆破振动预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):159-163.
WANG Xinyu, CAO Pengfei, XIAO Yiqing, et al. Blasting vibration prediction based on novel HGS-ANN model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):159-163.

[9] 杨超凡. 物联网技术在矿山安全管控体系的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2022,6(2):12-13.
YANG Chaofan. Application of Internet of Things technology in mine safety management and control system[J]. Electronic Components and Information Technology, 2022,6(2):12-13.

[10] WANG W Q, ZHANG Y M, SUN S Y, et al. Design of mine safety dynamic diagnosis system based on cloud computing and Internet of Things technology[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021,40(4):5837-5844.

[11] 唐匡仁. 基于物联网的露天矿安全生产监测平台设计[J]. 西部资源, 2022(6):180-182.
TANG Kuangren. Design of open-pit mine safety monitoring platform based on Internet of Things[J]. Western Resources, 2022(6):180-182.

[12] 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.

[13] GAO L, LI S G, GUO H M. Visualization and analysis of research areas and hot topics in the field of digital twins[J]. IEEE Access, 2024,12:26897-26904.

[14] LAGAP U, GHAFFARIAN S. Digital post-disaster risk management twinning: A review and improved conceptual framework[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024,110:104629.

[15] 贺仁华,黄林兰. 基于数字孪生的露天金属矿安全管理研究[J]. 价值工程, 2024,43(7):10-12.
HE Renhua, HUANG Linlan. Research on safety management of open-pit metal mine based on digital twin[J]. Value Engineering, 2024,43(7):10-12.

[16] PÄÄKKÖNEN P, HORSMANHEIMO S, PAKKALA D, et al. Reference architecture design and evaluation for digitalization of underground mining[J]. Internet of Things, 2024,26:101238.

[17] HU J, XU X B. Research on real-time network data mining technology for big data[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019,2019(1):139.

[18] 黄夏德. 非煤矿山资源综合利用新技术应用[J]. 世界有色金属, 2024(1):97-99.
HUANG Xiade. Application of new technologies for comprehensive utilization of non coal mining resources[J]. World Nonferrous Metals, 2024(1):97-99.

[19] 徐晓冬,朱万成,张鹏海,等. 金属矿山采动灾害监测预警云平台搭建与初步应用[J]. 金属矿山, 2021(4):160-171.
XU Xiaodong, ZHU Wancheng, ZHANG Penghai, et al. Construction and preliminary application of cloud platform for monitoring and early warning of mining disasters in metal mines[J]. Metal Mine, 2021(4):160-171.

[20] QIAN X P. Regional geological disasters emergency management system monitored by big data platform[J]. Processes, 2022,10(12):2741.

[21] WANG B, WANG Y. Big data in safety management: An overview[J]. Safety Science, 2021,143:105414.

[22] 熊朝林,陈俊智. INRBO-SVM模型在边坡安全系数预测中的应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):20-25.
XIONG Chaolin, CHEN Junzhi. Application of INRBO-SVM model in predicting slope safety factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):20-25.

[23] 齐冲冲,杨星雨,李桂臣,等. 新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J]. 煤炭学报, 2021,46(2):688-700.
QI Chongchong, YANG Xingyu, LI Guichen, et al. Research status and perspectives of the application of artificial intelligence in mine backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(2):688-700.

[24] ZHU Y N, LI C, LI L R, et al. Dynamic assessment and system dynamics simulation of safety risk in whole life cycle of coal mine[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(23): 64154-64167.

[25] 泰柳伊. 疲劳监测技术在智慧矿山安全管理中的应用[J]. 工程建设与设计, 2024(10):104-106.
TAI Liuyi. Application of fatigue monitoring technology in smart mine safety management[J]. Construction & Design for Engineering, 2024(10):104-106.

[26] 仝泽友,冯仕民,侯晓晴,等. 基于安全帽佩戴检测的矿山人员违规行为研究[J]. 电子科技, 2019,32(9):26-31.
TONG Zeyou, FENG Shimin, HOU Xiaoqing, et al. Recognition of

underground miners' rule-violated behavior based on safety helmet detection[J]. Electronic Science and Technology, 2019,32(9):26-31.

[27] 刘旭,战凯,于骞翔,等. 基于人脸特征的疲劳检测在矿山远程驾驶中的应用[J]. 有色金属工程, 2022,12(4):124-130.
LIU Xu, ZHAN Kai, YU Qianxiang, et al. Application of fatigue detection based on face feature classification in mine remote driving[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022,12(4):124-130.

[28] 崔建超. 非煤地下矿山危险因素及安全管理对策[J]. 中国金属通报, 2023(12):222-224.
CUI Jianchao. Risk factors and safety management countermeasures of non-coal underground mines[J]. China Metal Bulletin, 2023(12):222-224.

[29] ZHOU Z L, HUANG Y H, ZHAO C C. Microseismic monitoring and disaster warning via mining and filling processes of residual hazardous ore bodies[J]. Minerals, 2024,14(9):948.

[30] ZHOU Z L, HUANG Y H, ZHAO C C. Distribution law of mine ground pressure via a microseismic sensor system[J]. Minerals, 2023,13(5):649.

[31] CHENG L, WU Q Z, LI H T, et al. Safety and protection measures of underground non-coal mines with mining depth over 800 m: A case study in Shandong, China[J]. Sustainability, 2022,14(20):13345.

[32] SHI D P, LIU X, HE L W. A review on mine fire prevention technology and theory based on bibliometric analysis[J]. Sustainability, 2023,15(24):16639.

[33] 李小双,罗浪,王运敏,等. 露天转地下开采覆岩采动响应的坡角影响效应研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):33-37.
LI Xiaoshuang, LUO Lang, WANG Yunmin, et al. Slope angle effect on overburden strata response during transition from open pit to underground mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):33-37.

[34] 张秀宇,付智博,吴季洪. 矿山机电设备故障诊断技术发展现状[J]. 能源与节能, 2024(10):151-153.
ZHANG Xiuyu, FU Zhibo, WU Jihong. Development status of fault diagnosis technology of mine electromechanical equipment[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(10):151-153.

[35] 陈公领. 物联网的矿山装备数字化运维研究与应用分析[J]. 世界有色金属, 2023(19):1-3.
CHEN Gongling. Research and application analysis on digital operation and maintenance of mining equipment based on the Internet of Things[J]. World Nonferrous Metals, 2023(19):1-3.

[36] 幸伟鹏. 基于深度学习的矿山机电设备智能故障预测[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊 1):238-242.
XING Weipeng. Intelligent fault prediction of mine electromechanical equipment based on deep learning[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):238-242.

[37] 赵海瑞. 基于支持向量机的矿山机电设备故障智能化检测方法[J]. 自动化应用, 2024(10):107-109.
ZHAO Hairui. Intelligent fault detection method of mine electromechanical equipment based on support vector machine[J]. Automation Application, 2024(10):107-109.

[38] 倪景峰,乐晓瑞,常立峰,等. 基于决策树的矿井通风阻变型故障诊断及传感器优化布置[J]. 中国安全生产科学技术, 2021,17(2):34-39.
NI Jingfeng, LE Xiaorui, CHANG Lifeng, et al. Resistance variant fault diagnosis and optimized layout of sensors for mine ventilation based on decision tree[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021,17(2):34-39.

[39] 付俊,周罕,徐继刘,等. 露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):32-34.
FU Jun, ZHOU Han, XU Jiliu, et al. Study on characteristics and law of blasting vibration for open-pit slopes in limestone mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):32-34.

[40] 杨航远. 基于改进 YOLOv3 的露天矿爆破现场智能实时危险预警方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2021.
YANG Hangyuan. Research on intelligent real-time risk early warning of open pit blasting site based on improved YOLOv3[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.

引用本文:李小双,臧浩淳,王运敏,等. 非煤矿山安全管理中智能化技术的应用现状与展望[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):1-7.
LI Xiaoshuang, ZANG Haochun, WANG Yunmin, et al. Current status and prospects of application of intelligent technologies in safety management of non-coal mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):1-7.