

推荐阅读：

智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径

煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践

智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析

异步测时矿井人员精确定位方法

煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑

大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制

工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术

采煤机惯性导航定位动态零速修正技术

采煤机概念设计生态学模型构建与实现

5G 技术在煤矿智能化中的应用展望

煤矿机器人体系及关键技术

智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术

智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨

智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法

基于残差神经网络的矿井图像重构方法

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动阅读

刘善军,吴立新,毛亚纯,等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2265-2276. doi:10.13225/j.cnki.jccs.NZ20.0362

LIU Shanjun,WU Lixin,MAO Yachun,et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2265-2276. doi:10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0362

天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用

刘善军[1],吴立新[2],毛亚纯[1],贺黎明[1],王 植[1],许志华[3],魏恋欢[1],杨泽发[2]

(1. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083; 3. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘 要:露天开采是我国矿产资源开采的主要方式之一,长期高强度、大规模开采形成了众多高陡边坡,由此带来的边坡失稳及灾害现象十分严重,对其进行有效监测和灾害预警,是边坡治理、安全保障和绿色矿山建设的关键。由于大型露天矿山地形复杂、观测条件困难、影响因素众多,传统的、单一的监测手段均难以奏效。在讨论智能监测相关概念的基础上,介绍了露天矿边坡智能监测的思想、内容和内涵;指出大型露天矿边坡智能监测的核心是天-空-地多平台多模式协同观测,包括时间协同、空间协同、参数协同和智能分析;介绍了目前大型露天矿边坡智能监测的 7 项关键技术,即导航卫星 GNSS 在线监测技术、雷达卫星 D-InSAR 监测技术、光学卫星高分影像监测技术、无人机与 TLS 联合监测技术、地基红外热像监测技术、顾及大气折光的测量机器人监测技术、基于 WiFi 的监测信息多终端显示技术。这些手段不仅要强调监测仪器的先进性、鲁棒性和精度,更要发挥多手段的时空互补性和过程协同性,而稳定可靠的通讯网络、快速自动的数据处理和智能综合的分析模块,是实现矿山滑坡智能监测和智能应急的关键。最后,以辽宁抚顺西露天煤矿特大滑坡、鞍钢鞍千铁矿大型排土场和鞍钢弓长岭铁矿滑坡的天-空-地协同观测为典型案例,介绍了适合不同矿山特点和任务需求的露天矿边坡智能监测技术方案及其取得的实效。

关键词:露天矿山边坡;智能监测;协同观测;数字矿山;智能矿山

中图分类号:TD804;TN959 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2020)06-2265-12

Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications

LIU Shanjun[1],WU Lixin[2],MAO Yachun[1],HE Liming[1],WANG Zhi[1],XU Zhihua[3],WEI Lianhuan[1],YANG Zefa[2]

(1. *School of Resource and Civil Engineering,Northeastern University,Shenyang* 110819,*China*; 2. *School Geosciences & Infor-physics,Central South University,Changsha* 410083,*China*; 3. *College of Geoscience and Surveying Engineering,China University of Mining & Technology (Beijing),Beijing* 100083,*China*)

Abstract:Surface mining is one of the major methods of mineral resource development in China. The long-term and high intensity development of surface mine has brought with a lot of slopes with high angle and great depth,which leads to serious instability issues and large landslides. To monitor the surface mine slopes effectively and to forecast the landslides are the keys of slope treatment,safe production and green mine development. However,the large surface

收稿日期:2020-04-13 **修回日期**:2020-05-20 **责任编辑**:郭晓炜

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB707102);国家杰出青年科学基金资助项目(50525414);湖南省创新人才基金资助项目(2018RS3013)

作者简介:刘善军(1965—),男,河北涿鹿人,教授,博士生导师。E-mail:liushanjun@mail.neu.edu.cn

通讯作者:吴立新(1966—),男,江西宜春人,教授,博士生导师。E-mail:wulx66@csu.edu.cn

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

mines usually have complex terrain, difficult observation conditions and multiple impacting factors, which make the traditional and single observation method to be less effective. Based on discussing some conceptions related with intelligent monitoring, this paper introduces the idea, contents and connotation of intelligent monitoring on surface mine slope. The core of intelligent monitoring on surface mine slope is spaceborne-airborne-ground collaborated observations with multiple platforms and multiple modes, which include temporal coordination, spatial coordination, parametric coordination and intelligent analysis. Seven key technologies for the intelligent monitoring on surface mine slope are introduced, which are GNSS online monitoring, D-InSAR of radar satellite, high-resolution imaging of optical satellite, joint observation of unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanner, ground-based thermal imaging, surveying robot referring to atmospheric refraction, and the WiFi-based multi-end display of monitoring information. These means not only emphasize the advancement, robustness and accuracy of monitoring instruments, but also play the complementary and process coordination of multiple means. The stable and reliable communication network, fast and automatic data processing and intelligent integrated analysis module are the keys to realize the intelligent monitoring and intelligent emergency management of mine slope landslide. Finally, three typical application cases in Liaoning Province are introduced, which are the large-scale landslide in Fushun West Surface Mine, the large waste rock pile of the Anqian Iron Mine of AnSteel Group, and the landslide of the Gongchangling Iron Mine of AnSteel Group. The particular monitoring measures referring to the mine's features and special demands. Following that, the practical effect reached are also interpreted.

Key words: open-pit slope; intelligent monitoring; collaborated observation; digital mine; intelligent mine

中国矿产资源丰富,露天开采是我国矿产资源(尤其煤矿、铁矿和有色矿产)开发的主要形式。长期高强度开采,导致开采深度、堆排高度和边坡角度不断增大。长期开采形成的众多人工高陡边坡(包括采场边坡和排土场边坡)稳定性变差,由此带来的矿山滑坡灾害问题日益突出。露天矿山边坡失稳,严重影响矿山正常生产和矿区生命财产安全,对其进行快速精准监测和及时有效预警,既是矿山防灾减灾与绿色矿山建设的关键,也是数字矿山[1-5]、智能矿山[6-10]、智能采矿[8-9,11-14]以及矿山智能化[15-16]建设的重要任务。

国内外矿山边坡监测方法不少,如地表位移及变形监测、地下钻孔测斜及应力监测、声发射及微震监测、地下水监测和气象参数监测等。其中,针对位移与变形的几何监测是最常使用的方法。传统的大地测量几何监测手段虽然精度高,但工作量大、成本高,存在布点困难和测点稀疏等缺点。大范围和复杂地形条件下,地基测量受到很大限制,难以获取大型露天矿山的大范围位移及大变形信息,无法为矿山边坡灾害防治提供全面、准确的信息保障。

随着现代测绘科学与技术的迅猛发展,各种新型监测手段不断涌现,如卫星导航定位系统(GNSS)变形监测[17]、雷达差分干涉测量(D-InSAR)[18-19]、近景及无人机(UAV)航空摄影测量[20-21]、远距离三维激光扫描(TLS)[22-23]等,均已应用于不同矿山。边坡及滑坡监测正逐渐从传统的点式监测向面式、甚至体式监测发展。但是,不同监测方法均因各自的固有缺陷而有不同的适用性和局限性。比如:GNSS 监测虽然精度高、响应快,可实现在线、连续监测,但监测点位稀疏,在深坑环境卫星信号差且易产生多路径效应而无法监测;D-InSAR 虽然测量精度高且为面式监测,可获取大范围位移场信息,但大变形时相位解缠困难或相位失相关;地基 TLS 虽然速度快、精度较高,但存在扫描死角、且其配套的软件模块对大规模点云数据的处理比较复杂。由于大型露天矿山的边坡高、坡度陡、落差大,影响因素众多,具有复杂、隐蔽、多尺度、多阶段和大变形等特性,迫切需要构建多平台、多手段联合的天-空-地协同式智能监测方法与技术体系。

1 智能监测相关概念

20 世纪末开始,在信息化、数字化、物联网、传感网、大数据、人工智能等新技术快速发展背景下,传统矿山逐步迈向了从智能化采矿技术、到数字矿山、再到智能矿山的发展道路[8,12],矿山安全与灾害监测及分析也随之向自动化、智能化方向发展。但是,目前学术界、工业界对于智能、人工智能及智能监测等内涵还不是很清楚,不同行业专家学者及工程技术人员的理解和观点也不尽相同,甚至存在歧义、混淆或误解。笔者从语义内涵和哲学角度辨析智能监测,兼论与智能监测相关的几个重要概念。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

1.1　智能与智慧

从语义上讲,“智能”是智力和能力的总称。一般认为,智能是知识和智力的总和,前者是智能的基础,后者是获取和运用知识求解问题的能力。根据霍华德·加德纳的多元智能理论[24],人类智能涉及 8 个范畴:语言(Verbal/Linguistic)、逻辑(Logical/Mathematical)、空间(Visual/Spatial)、肢体运作(Bodily/Kinesthetic)、音乐(Musical/Rhythmic)、人际(Inter-personal/Social)、内省(Intra-personal/Introspective)和自然探索(Naturalist)。人类智能至少包括 3 个方面的能力:理解、分析和解决问题的能力,归纳和演绎推理能力,以及自我适应环境而生存发展的能力。

“智慧”通常指人们面对复杂与敏感事物时,能以善德(比如尊重、爱和可持续性)为基础来权衡处理,如亚里士多德所言的实践智慧[25]。“智慧”是大众崇尚、憧憬与神往的名词,是心灵层次升华的概念,其核心是强调人的德性、灵性、悟性与天才。显然,智慧是比智能更高层次的概念。此处,“智”指智能化、自动化、自学习、自组织、自适应化,是智商(IQ)的表征;“慧”字下方为“心”,指与人的心/脑密切相关,与人的德性、灵性、悟性相通,是情商(EQ)与变商(CQ)的有机融合[26]。我们认为,只有当技术受到德性的约束,或技术包含了德性,才合乎实践智慧。遗憾的是,目前在许多场合和文献中,大家似乎并没有对二者加以严格区分,如在城市领域,智能城市和智慧城市两种叫法都存在。回顾 IBM 公司最早提出 Smart City(国内将其翻译/演绎为智慧城市)这一概念时,其内涵主要是机敏、迅捷的意思,只是在技术层面,并没有涉及“德性”和“慧”的内涵。笔者认为:智能是智力和能力的总称,强调的是运用知识和规则而自动、快速、准确处理和解决问题的外在能力,是对物而言的,是技术层面的,如智能仪器、智能机器人、智能装备[15]等;智慧是人的德性、灵性、悟性与天才的综合体现,强调的是驾驭复杂问题并合乎伦理与德性而解决复杂问题的内在能力,是对人而言的,是社会层面的,如智慧长者、智慧先贤、智慧思想、智慧规划等。当我们把人的智能(如逻辑推理、归纳总结、判断决策等)赋予仪器设备与技术系统时,仪器设备与技术系统的能力得以增强和提升,能够按照人的思维逻辑而做判断和自动调整运行状态。此时,人工智能、智能检测等新技术也就诞生了。

1.2　人工智能

1956 年夏,麦卡锡、明斯基等科学家在美国达特茅斯学院开会,研讨“如何用机器模拟人的智能”,首次提出“人工智能(Artificial Intelligence,简称 AI)”概念,标志着人工智能学科的诞生。但受当时计算机性能限制,人工智能学科发展一直缓慢。近年来,随着网络技术、计算机技术等的飞速发展,人工智能技术重新焕发勃勃生机。随之而来的智能工业、智能农业、智能制造等概念不断涌现。目前比较认可的人工智能定义是:一种研发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统。人工智能的发展经历了逻辑推理-概率推理-因果推理 3 个阶段[26-27]。

按照人工智能的复杂程度可分为弱、强和超强 3 种人工智能[26,28]。目前,仍然处于弱人工智能阶段,如基于概率的机器学习、深度学习等均是对人类认知过程的模拟。强人工智能不仅具有感知、推理和理解能力,还具有某种信念,通常归属为人类的认知状态。21 世纪以来,弱人工智能迅猛发展;尤其是 2008 年经济危机后,美日欧希望借机器人技术实现再工业化。工业机器人带动了弱人工智能和相关产业的不断突破,很多必须用人来做的工作如今已用机器人代替。显然,弱人工智能还停留在技术层面,没有受到伦理和德性的约束;强人工智能暂时处于瓶颈阶段,还有待时日。矿山是自然环境、矿产资源、采掘工程、技术装备、矿山人员的复合体;矿山虽然有人的参与,但它的主体是物,是技术与人的载体。因此,目前称智能矿山可以,称智慧矿山则不妥。

1.3　智能监测

监测的语义为监视、检测。监视偏重于观察,而检测偏重于测量、检验。对于地灾监测,通常理解为运用某种技术和方法,测量和监视地质灾害活动以及各种诱发因素的动态变化,是预测预报地质灾害的重要手段,是减灾防灾的重要依据。智能监测的核心是通过监视与测量目标对象,在线处理和分析变化过程、识别异常行为或前兆现象,并据此智能调整监测参数、跟踪监测目标、聚焦重点对象并提前预警。智能监测主要通过设计特定的算法模块、开发相应的软件系统,通过自动控制传感器的工作方式及监测系统的总体行为,实现目标观测、数据通讯、过程分析、行为判断与反馈调控,实现类似人类智能的监测。因此,目前称智能监测可以,称智慧监测则不妥。

2　露天矿边坡智能监测思想、内容及内涵

大型露天矿山地表形态复杂、局地岩性多变、断裂缺陷众多、气象影响多样,单一监测手段难以满足大型露天矿山边坡灾害整体、连续监测的实际要求,迫切需要研发多平台集成、多手段联合的智能监测技

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

术,使得优势互补、效果增强。我们理解的地灾智能监测内涵,主要体现在多种传感器的协同工作、多源数据的智能分析等方面。在国家重点基础研究发展计划(973)项目"事件驱动的空天地多传感器协同观测方法"的支持下,结合国内外滑坡监测实践,本团队研发形成了一套具有较强普适性的天-空-地(spaceborne-airborne-ground,SAG)观测协同的露天矿边坡智能监测技术。

2.1 露天矿边坡智能监测核心思想

露天矿边坡天-空-地协同智能监测的核心思想是:① 适应过程:根据矿山滑坡孕育及发展过程不同阶段、不同位置的位移量及变形速度差异,采用多种适宜的监测仪器和技术手段进行协同观测;② 应急聚焦:常规监测模式下的平静期,部分监测仪器处于节能休眠状态;当某一传感器探测到异常信号(如加速位移、强降雨)时,监测系统立刻进入应急响应,唤醒休眠中的传感器进入应急期工作状态,并协同其他监测仪器和技术手段进入应急聚焦监测模式。

2.2 露天矿边坡智能监测技术内容

露天矿边坡天-空-地协同智能监测的技术内容有:① 早期使用热成像仪进行矿山边坡温度场探测,根据目标辐射亮温与发射率和温度的关系,以及温度与表层岩性、地质结构及岩土湿度的关系,识别矿山边坡中的断层、破碎带、含水带以及软岩层,从而确定滑坡隐患区和潜在危险区;② 使用卫星 D-InSAR 技术监测分析整个边坡区域的位移场,甄别出正在发生变形的区域,并与热像确定的隐患区一起作为后续监测靶区;③ 结合矿区地形及矿山边坡可达性,在靶区选择一组关键点位布设地面 GNSS、降雨量及钻孔倾斜、岩土湿度等监测点,建立多参数连续监测网,并与附近的 GNSS 连续运行参考站(CORS)进行联测,实现滑坡体多参数地基监测;④ 开发智能处理软件模块,快速处理地基监测数据,自动分析监测数据的变化特征,智能判断边坡变化趋势及异动现象;⑤ 当监测数据超出阈值(如位移加速或位移量累计达 dm 级),应急采用地面双/多目 CCD 监控影像进行位移场宏观监测,并联合 TLS 进行位移场扫描;⑥ 当边坡进入大变形阶段时(如位移量累计达米级),采用卫星高分影像监测矿坑水平位移场,并联合地基 TLS 扫描滑动边坡,实现矿坑边坡三维大变形场的精准、全面监测;⑦ 进而,根据多平台、多参数监测数据,智能分析和确定滑坡破坏位置、成灾区域和潜在滑动体,并利用 UAV 查证核实、TLS 跟踪扫描,为边坡灾害及隐患治理提供依据。

2.3 露天矿边坡智能监测科学内涵

露天矿边坡天-空-地协同智能监测的科学内涵是"三协同、一智能",即:① 时间协同:在不同阶段使用不同的监测手段,实现涵盖滑坡孕育发展全程的、技术经济有效的连续监测;包含两层意思,其一为根据滑坡孕育与发展规律,在不同阶段使用不同的监测手段;其二为根据当前监测仪器所获监测数据,对滑坡动态及其发展态势进行预判,进而自动启用其他更合适的监测手段进行跟踪、增强和聚焦监测;② 空间协同:将点式和面式监测相结合、地上和地下监测相结合、天-空-地多平台相结合,发挥不同手段、不同方法的各自优势,实现矿坑整体的全覆盖、多层次和多精度监测;③ 多参数协同:地表位移、几何变形、地表温度、岩土湿度、降雨量等(还可按需增加应力、微震等)监测协同,实现多参数、多维信息互补增强,支撑时空关联与智能分析;④ 智能分析:结合矿山边坡运移及滑坡成灾规律,设计人工智能算法、开发软件模块、形成智能监测系统,根据目标态势自动进行监测单元工作状态与模式的分期配置和节能优化,以及休眠单元唤醒和事件驱动[29],进而实现多平台、多参数协同规划[30]、应急聚焦和智能预警。

3 露天矿边坡智能监测关键技术

3.1 导航卫星 GNSS 在线监测技术

GNSS 监测具有连续、实时、三维、高精度测量,全天候全天时作业、自动化程度高,以及可提供及时预警信息等不可替代的优点。GNSS 包括美国全球定位系统(GPS)、俄罗斯格洛纳斯系统(GLONASS)和欧洲伽利略导航卫星系统(Galileo),以及我国的北斗导航卫星系统(BDS),能够提供连续的全球导航和空间定位服务[31]。国外从 20 世纪 90 年代开始用 GPS 进行变形监测[32],早期是以多期复测的方式获取数据进行形变分析,属于事后服务方式,精度仅能达到分米级或厘米级。随着 GNSS 的 CORS 概念提出,以及 4G/5G 无线通讯技术的快速发展[33],GNSS 定位的时效性(准实时或实时)和精度(毫米级甚至亚毫米级)均得到改善,GNSS 变形监测的服务方式从以前的事后、低精度、人工处理发展到实时、高精度、自动化在线监测,服务范围也从仅能对形变量较大的土质边坡对象进行监测,拓展到了微小形变的岩质边坡、混凝土大坝和地壳形变监测等众多领域。

随着我国 BDS 的建成[34],融合 GPS 和 BDS 的在线监测系统陆续在国内边坡监测领域获得了广泛应

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

用,其中包括大型露天矿山。鞍钢矿业公司鞍千矿的哑巴岭采场及其排土场、弓长岭矿何家采场以及齐大山铁矿的露天采场等多个高陡边坡,均安装了 GPS+BDS 的边坡监测运行系统,实现了数据的远程实时获取、处理和分析,并能根据监测结果进行多种方式(短信、邮件和微信等)的预警预报。自 2017 年以来,该系统已对多次滑坡及时做出预警,为矿山现场作业人员的安全撤离与避险提供了依据,避免了财产损失和人员伤亡,得到了矿山管理人员及现场作业人员的高度认可。

3.2　雷达卫星 D-InSAR 监测技术

近年来,随着卫星雷达遥感技术的快速发展,D-InSAR 在边坡及滑坡变形场监测中发挥了重要作用,克服了传统大地测量的点式变形测量的局限,且理论精度达到毫米级。但是,在 InSAR 形变监测中,有许多干扰因素和复杂情况需要考虑,否则很难获得正确的形变场信息。在诸多干扰因素中,大气延迟[35]及电离层扰动[36]影响常被忽略。尽管 SAR 卫星轨道为太阳同步轨道,电离层的周日变化相位通过干涉差分可以大部分消除,但电离层变化既有长周期波动也具短时间扰动。对于时间跨度较长的两期影像,不同太阳活动水平时电离层平均 TEC 变化可达几十 TECU;对于时间跨度较短的两期影像,电离层扰动同样可达几十 TECU,这些差异在常规 InSAR 处理中并不能消除,由此可能引入几十甚至上百米的高程误差以及高达分米的形变误差。

为此,贺黎明等[37]提出了一种融合 GNSS 反演 TEC 和 NeQuick-2 电离层模型的 InSAR 电离层影响外部改正方法。在 D-InSAR 和多孔径 InSAR(MAI)电离层影响改正基础上,顾及露天矿山滑坡不仅具有较大垂向形变、而且存在显著水平形变的特点,融合 D-InSAR 和 MAI 提出了 D-InSAR/MAI 联合监测方法,实现了露天矿边坡三维形变场监测。进而引入短基线集(SBAS)思想,将传统的单一视线向时序监测拓展为顾及电离层影响的 LOS-SBAS 和 AZI-SBAS 联合的时序监测,实现了矿山边坡形变场的 InSAR 时序监测。利用 L 波段 ALOS-PALSAR 数据,提取了 2007—2011 年抚顺西露天矿边坡的变形场,揭示了该矿北坡和南坡滑坡体的空间范围及变化特征,发现该期间北坡和南坡均存在显著的垂向形变(达 1.1 m),而且北坡和南坡滑坡区域同时存在较大的水平形变(达 1.5 m)。与 GNSS 监测结果相比,二者平均偏差仅为 9.5 mm,表明该技术达到了很高的几何精度。

3.3　光学卫星高分影像监测技术

虽然雷达卫星 D-InSAR 能够对大范围变形场进行高精度监测,但当变形量太大时,InSAR 会出现影像失相干、相位解缠困难的问题,导致 D-InSAR 失效。如何在边坡进入大变形阶段时进行有效的卫星遥感监测,是亟待解决的问题。为此,胡文敏等[38]探讨了利用 ZY-3 光学卫星立体影像检测露天矿坑地表变形的可行性;刘善军、张慧慧等[39-41]研究提出了基于高分卫星影像和计算机自动匹配算法的大型边坡形变场监测方法。其原理是:利用计算机自动匹配算法 SIFT、ASIFT 对不同时期的高分影像特征进行识别和对比之后,匹配同名点,并对同名点之间的距离及方向进行量测,从而获取滑坡位移矢量场,实现滑坡范围的有效圈定。

其技术流程为:① 首先,进行遥感影像预处理,包括正射校正和影像配准,对原始影像进行投影差改正后,将原始影像纠正成正射影像;② 然后,实施 SIFT,ASIFT 算法,包括确定模拟图像、特征点提取与匹配,实现不同时相图像之间的特征点提取与匹配;③ 剔除误匹配点,保留正确匹配点;④ 进行边坡位移场计算与标定,包括像方坐标系建立、同一特征点位移方向及像元数量确定,进一步计算位移矢量,绘制边坡位移场的等值线图,直观地显示边坡位移空间范围。该技术成本低、应用简便、效率高,为大变形滑坡“面”式监测提供了新手段。利用该技术,成功进行了抚顺西露天矿南帮大滑坡水平形变场的提取,取得了良好的效果。

3.4　无人机-TLS 协同的监测技术

卫星遥感监测受制于卫星重访周期,而低空 UAV 遥感平台具有成本低、机动性强的优势,可搭载光学相机定期与不定期地获取矿山高分辨率影像。通过数字摄影测量技术精确恢复场景三维点云,可为滑坡应急测量及其态势评估提供依据[42-43]。TLS 技术采用非接触式扫描测量方式,通过记录激光回波时间及角度信息,可快速、高精度地获取场景的三维形态信息。由于激光具有一定的穿透性,可透过稀疏植被到达地面而获取地表信息,从而消除植被覆盖对高陡边坡形变监测的干扰[44]。

露天边坡三维形变监测依赖于时序点云的高精度配准。然而,露天开采导致地形持续变化,传统的基于最近点匹配的点云配准方法易陷入局部最优而降低配准精度,影响监测结果。为此,许志华等[21]提出了基于形态不变区的多时相点云配准思想,并以福建紫金露天矿某堆场为例,完成了两个时相 UAV 影

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

像重建点云的高精度配准,实现了露天堆场工程量的 UAV 监测。此后,许志华等[45]通过算法优化,利用 TLS 技术开展无人工标志点的大型露天矿坑分米级 DEM 重建与采掘变化分析,突破了 ZY3 光学遥感测量的云雨约束及 DEM 产品精度限制。此外,笔者还设计了 UAV-TLS 协同的露天矿采掘态势监测方案,并以鞍山哑巴岭露天矿进行了应用示范,取得很好效果。图 1 为 2017-09-12—2018-11-12 四个时段的采场地面高程相对变化,其中暖色区为正高差即高程降低(台阶开采),冷色区为负高差即高程上升(爆破隆起)。由此,形成了一套优势互补、精度可靠的露天矿边坡及采掘态势变化的空-地协同监测技术模式。

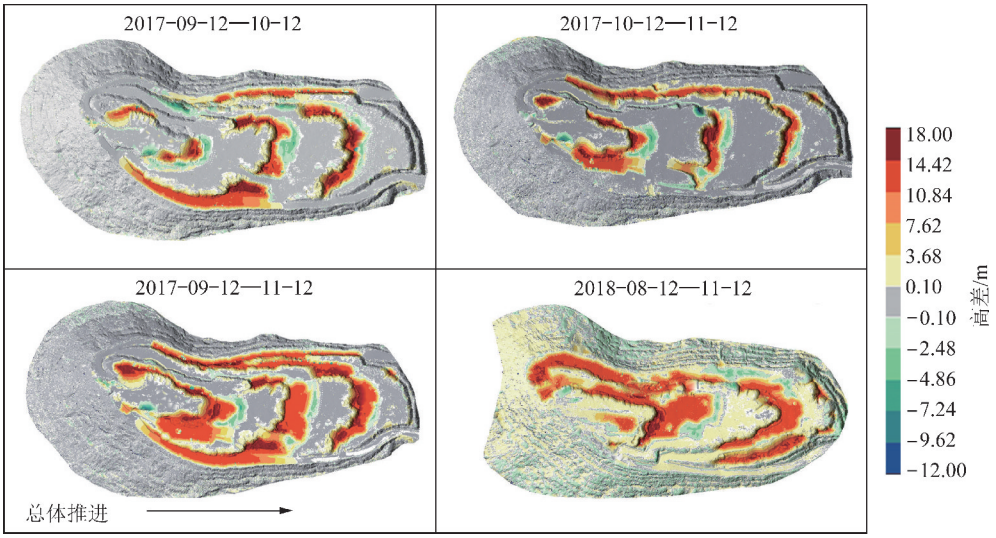


图 1 UAV 与 TLS 协同的露天矿采掘态势监测

Fig. 1 UAV-TLS collaborated observation for open-pit mining situation monitoring

3.5 地基红外热像检测技术

热成像是将不可见的红外辐射转化为可见热像的新技术。其原理是利用目标与周围环境之间因温度差异而产生的热对比度差异,把红外辐射能量密度分布显示成热图像。热成像技术具有被动式、非接触、全天候、全区域、高动态、高灵敏等独特优势。吴立新、刘善军等[46-49]在遥感-岩石力学基础实验研究过程中,大量开展了岩石受力破裂过程的热红外辐射变化特征与规律研究,为热成像技术应用于矿山灾害监测提供了依据。刘善军等[50]应用发现了滑坡隐患的热成像识别标志,形成了滑坡隐患热像检测技术。该技术的原理是:滑坡是边坡岩体沿滑动面产生滑动的现象,滑动面是滑坡产生的先决条件;因滑动面往往是地质构造面(如断层、破碎带、层理等)或者是软岩层面(如泥岩、千枚岩等),这些软弱面给滑坡形成提供了有利条件;软弱面由于岩石破碎、强度低、密度小、孔隙度高,内部富含水,导致其热力学性质与周围完整岩石明显不同;由于水的热容量和热惯量较大,加之水的蒸发作用,使得软弱面处的温度往往不同于周围岩石;因此,使用热成像就可以将边坡中的软弱面(破碎带)识别出来。

监测实践发现,滑坡体两侧的滑动面在热像中一般表现为低温特征。富水时滑动面亮温较完整岩体低 5 ~ 10 K;这种两侧亮温低、中间高的热像特征是滑坡隐患区识别的重要标志[50]。该技术在抚顺西露天矿、鞍钢齐大山铁矿、眼前山铁矿、鞍千矿、大孤山铁矿、弓长岭铁矿的边坡稳定性监测中得到有效应用,成功发现了多处潜在的滑坡隐患区,并及时通知了矿山,为矿山及时避险和处理险情提供了直观可靠的技术依据。

3.6 顾及大气折光的测量机器人监测技术

大地测量手段已从过去单纯的距离或角度测量发展为二者兼具的全站仪测量技术,以及一站自动测量多个目标点的测量机器人技术,并摆脱了对反射棱镜的依赖。由于测量机器人监测成本低、布点灵活,且具有自动化、高精度的优势,已在露天矿边坡变形监测中得到普及应用。但是,其测量精度与局地大气条件密切相关。由于露天矿坑高程变化剧烈、矿山作业干扰,导致露天矿坑大气条件与一般平地地表大不相同,大气折光影响严重。而且传统模型无法精确矫正大气折光影响,导致测量机器人监测露天矿变形时存在“三角高程测不准”的问题。为此,毛亚纯等[51]利用氢气球放飞试验,采集露天矿坑上方不同高度、不同季节的大气折光物理量数据,仔细研究了露天矿大气环境影响因素及关键物理量变化规律,并通过回归拟合,建立了温度、湿度和气压的高程梯度模型。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

据此,提出依据测距光径曲线的高差数字模型及大气折光物理量梯度模型,对电磁波在传播路径中的延迟量进行积分,建立了露天矿环境下的大气竖直折光系数模型:

$$\overline{K} = -\frac{2}{S^2}\int_0^S Rl\,\frac{79.393}{T\times 10^6}\left[\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z} - 0.142\,\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}z} - \left(\frac{P-0.142e}{T}\right)\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}\right]\sin\alpha\,\mathrm{d}l$$

式中,$\overline{K}$ 为测距光径上的竖直大气折光系数平均值;T,P,e 分别为测距光径曲线上点的温度、气压和水汽压;α 为天顶距;S 为监测基站到监测点的斜距;l 为测距光径上的点到监测点的距离;R = 6 371.393 km;$\mathrm{d}P/\mathrm{d}z$ 为气压梯度;$\mathrm{d}T/\mathrm{d}z$ 为温度梯度;$\mathrm{d}e/\mathrm{d}z$ 为水汽压梯度;z 为采场底部到测距光径曲线上点的高程。

由此,解决了大型露天矿矿坑测量机器人测量的大气折光影响问题,提升了边坡监测精度[52]。采用该技术,实现了测量机器人在齐大山铁矿、鞍千铁矿边坡监测中的成功应用。经过大气折光改正后的高差与国家一等水准施测的高差对比,最大相差仅 2.05 mm,表明经过大气折光模型改正后的测量机器人监测精度可以满足边坡监测需要。

3.7　基于 WiFi 的监测信息多终端显示技术

在矿山无线通信网络的基础上采用多源信息融合技术,将多源监测信息进行汇聚和融合处理,开发了多源监测动态信息的多终端协同显示系统。设计了系统功能架构、逻辑架构、技术架构和部署架构等,开发了基于安卓、Ios,Windows 等系统的多终端协同显示平台,实现了监测信息、失稳预警信息等在电脑、手机、平板、车载、调度中心等多终端动态显示(图 2)。2018 年,在鞍钢矿业公司鞍千矿安装了运行系统。该系统由现场自动监测报警和分析发布两大部分构成,具备露天矿边坡安全监测分析、露天矿边坡安全自动报警和数据查询功能。

4　3 个典型应用案例

4.1　案例 1:抚顺西露天煤矿特大滑坡天-空-地协同观测及过程分析

抚顺西露天煤矿是亚洲第一大露天矿,已有百余年开采历史,2013 年已形成长 6.6 km、宽 2.2 km、深达 500 m 的露天大坑。该矿历史上曾发生过多次滑坡,但规模都不大。2007 年,南帮开始出现移动变形,之后持续发展;2014 年初,南帮坡顶出现了一条长 3 100 m、宽 40 m、落差达 18 m 的巨大裂缝,形成了国内外罕见的矿山特大滑坡,引起了国家有关部门

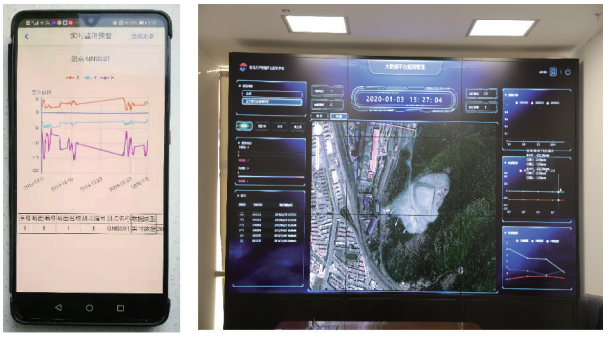


图 2　监测结果在手机和调度监视屏显示

Fig. 2　Monitoring results displayed on the mobile phone and dispatching screen

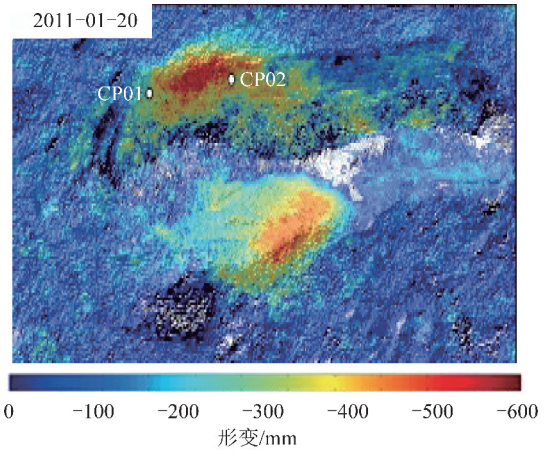
的高度重视。如何回顾分析和跟踪监测该滑坡的全程变化,对于矿区滑坡治理和防灾减灾至关重要。本团队结合实际情况,依托国家重点基础研究发展计划(973)课题的研究成果,提出了天-空-地多源协同观测方案,集成了多种监测技术,包括天基(卫星 InSAR、卫星高分遥感)、空基(无人机高分影像)、地基(GNSS 站点、TLS、红外热像、测量机器人、IoT)等技术,系统开展了西露天矿特大滑坡的天-空-地协同观测与分析(图 3)。

监测及分析表明:2007 年至 2013 年 7 月,南帮滑坡体为低速滑动阶段(<20 mm/d);2013 年 8 月至 2014 年 12 月,为快速滑动阶段,最大滑动速率达到 180 mm/d;2014 年 12 月以后,滑坡位移速率减缓,至 2015 年 7 月 1 日,滑动位移量下降到 4 ~ 6 mm/d。2013 年 4 月至 2015 年 7 月,该滑坡体的北向滑动位移量最大达到 54.0 m。在空间范围上,整个滑坡体被围限在矿区 2 号断层、5 号断层和南缘地裂缝之间。通过天-空-地协同观测与回顾分析,有效掌握了该滑坡形成与时空发育规律,为滑坡治理提供了关键信息和技术依据。

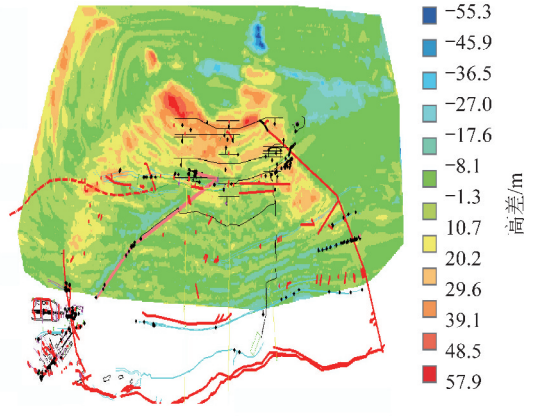
4.2　案例 2:鞍钢鞍千铁矿大型排土场天-空-地协同观测及隐患区分

鞍千铁矿排土场是一个已于 2012 年停止排放的大型排土场,高 120 m、长 1 500 m、坡角 30° ~ 40°,其下方有居民。为保障居民安全,2015 年开始进行稳定性监测。由于排土场规模大,若单独使用 GNSS 进行在线监测,不仅需要布置许多点位,而且还可能漏掉关键部位。如何降低成本,做到有效监测,成为难题。基于多源协同观测理念,通过 4 个结合,即地基点式监测(GNSS、测量机器人、裂缝位移计)和天基星面式监测(InSAR)相结合,在线监测(GNSS)和离线监测(测量机器人、裂缝位移计)相结合,变形监测(GNSS、测量机器人、裂缝位移计、InSAR)和温度场监测(热成像技术)相结合,

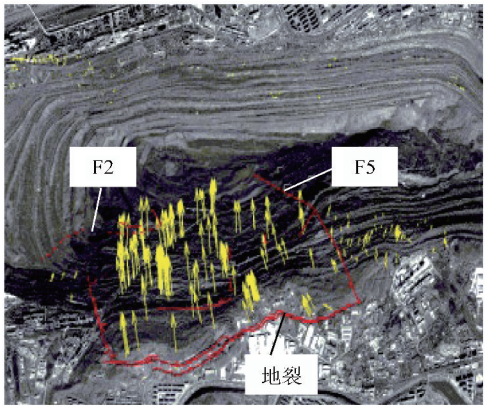
中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net



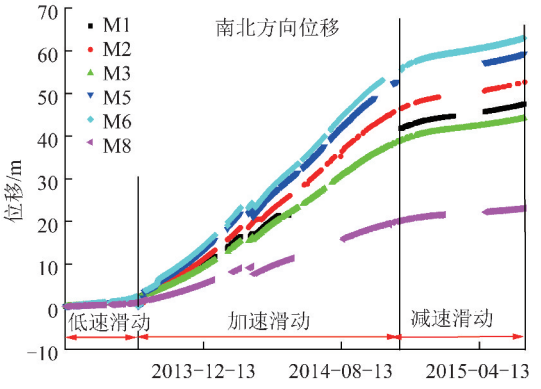
(a) InSAR获得的滑坡初期垂直变形场



(b) TLS获得的滑坡中期垂直形变场



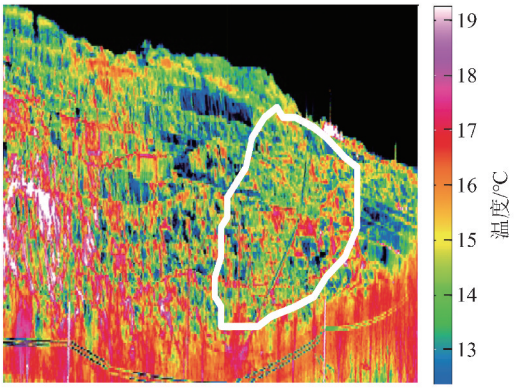
(c) 高分遥感获得的滑坡后期位移场



(d) GNSS实时监测的南北方向位移



(e) UAV监测的传送带破坏情况



(f) 热成像探测的滑坡危险区

图 3 抚顺西露天煤矿特大型滑坡天-空-地协同的监测结果

Fig. 3 Results of SAG collaborated monitoring on the great slope in the Fushun West Open-pit Mine

现场监测与力学数值模拟相结合,实现了鞍千铁矿排土场稳定性的全面监测[53-54]。总体监测方案包括:① 利用 RIGEL VZ4000 型 TLS 对排土场进行扫描,获取点云数据,建立排土场的三维模型;② 利用 Flac3D 软件并基于 TLS 三维模型数据,对排土场的稳定性进行数值分析,所需关键参数如容重、内摩擦角、黏聚力等根据现场取样和室内岩石力学实验获得;③ 使用热成像进行排土场监测,通过温度场分析,确定异常区,进而确定软弱工程地质体;④ 利用 COSMO-SkyMed 卫星数据,对排土场进行 D-InSAR 形变场分析,确定最大形变区,为 GNSS 重点监测提供靶区;⑤ 在靶区内布置 GNSS 点,远程在线、实时、连续监测排土场变形情况,掌握排土场时序变形特征;⑥ 使用测量机器人对靶区进行加密监测,一般为每周进行一次现场监测,雨天必要时增加监测频次;⑦ 在监测后期,即雨季到来后,在排土

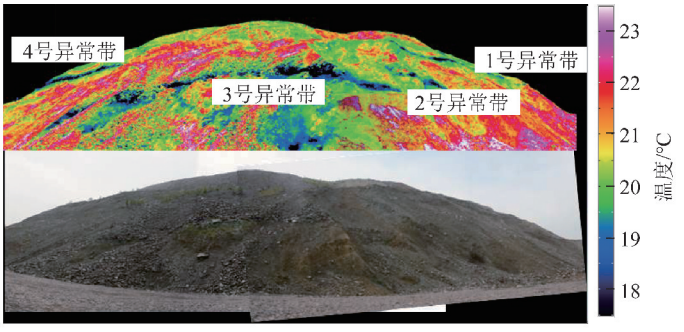
中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

场发现了地面发育宏观裂缝,于是使用裂缝位移计进行裂缝直接观测,获取裂缝宽度变化数据,掌握裂缝发展情况。

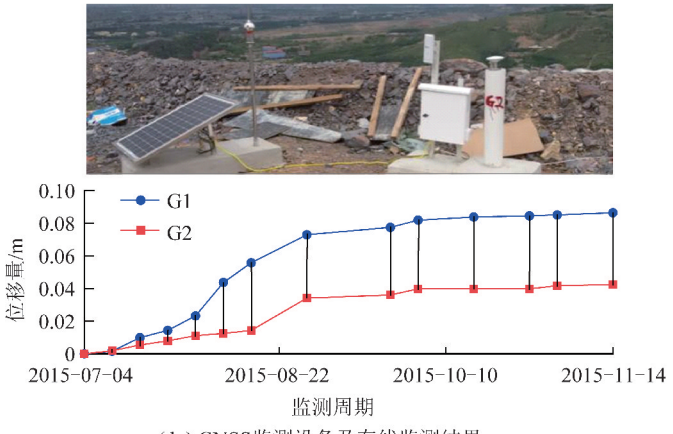
综合监测表明(图 4):热成像发现在排土场的东部边坡存在 4 处含水黏土层,增加了边坡的滑动性,影响了排土场的稳定性。D-InSAR、GNSS、测量机器人以及裂缝位移计的协同观测发现,在排土场东部存在较大位移变化区域。经综合研判,对排土场的稳定性进行了危险性评估和隐患区划分,为矿山进一步采取防治措施提供了依据。

4.3　案例 3:鞍钢弓长岭铁矿边坡天-空-地协同观测及红色预警

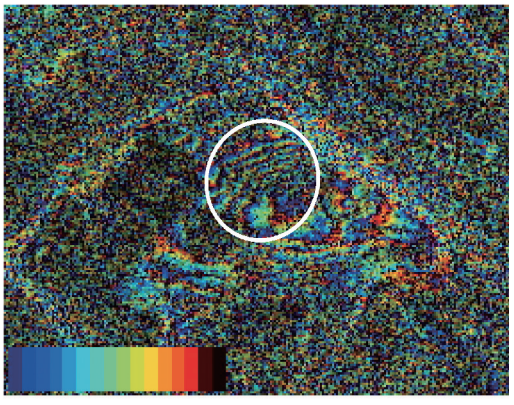
弓长岭铁矿是鞍钢的另一重要铁矿,具有百年开采历史,边坡高度超过 400 m,形成了许多高陡边坡,局部坡度达 40°以上。采用天-空-地协同观测技术,对弓长岭铁矿的 3 个采区边坡进行了监测,成功实现了滑坡预警。具体包括:① 利用红外热像技术对弓长岭铁矿 3 个采区(何家、独木和大砬子)采场边坡进行热成像检测,获取了 3 个采场在不同时期的温度场数据;分析温度场异常特征,识别出 3 个潜在滑坡危险区;② 采用 Sentine-1 雷达卫星的影像数据,利用 SBAS-InSAR 技术分析获得了弓长岭矿区从 2017-11-08—2018-10-22 之间的形变序列,发现了多个较大变形区,为 GNSS 监测点的选位布设提供了依据;③ 基于热成像检测和 InSAR 监测结果,联合确定了 3 个发育中的滑坡危险区,进而在危险区布设了 5 个 GNSS 在线监测点;④ GNSS 在线监测发现,2019-05-20—05-29,何家采场边坡出现了位移加速,由 3 mm/d 增加到 18 mm/d,5 月 30 日达到 293.5 mm/d,监测系统立即发出红色预警,并及时通知矿山有关部门。矿山据此采取应急处置措施,确保了滑坡期间的生命及财产安全。



(a) 热成像发现的含水黏土层



(b) GNSS监测设备及在线监测结果



(c) D-InSAR圈定的最大变形区

图 4　鞍千铁矿大型排土场天-地协同的监测结果

Fig. 4　Results of spaceborne-ground collaborated monitoring on the large stack pile in Anqian Iron Mine

5　结语及展望

在航空航天遥感与传感网技术[55]高速发展背景下,点面结合、时空互补、参数增强的天-空-地协同观测,是大型露天矿山边坡安全及排土场稳定性智能监测的实用新技术,是矿山滑坡智能监测预警及综合防灾减灾的有效途径,已在多个大型露天矿山成功应用。该项技术具有较强的普适性,具有大规模推广应用价值。但同时,露天矿边坡智能监测在天-空-地协同观测数据智能分析、监测单元智能协同、应急任务智能驱动等方面,尚有许多研究余地和性能提升空间。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

多年矿山边坡监测工程实践表明:① 矿山边坡智能监测不仅要强调监测仪器的先进性、鲁棒性和精度,更要发挥多手段的时空互补性和过程协同性,并以隐患识别和滑坡预警为重点;② 稳定可靠的通讯网络、快速自动的数据处理和智能综合的分析模块,是实现矿山滑坡监测感知和智能应急的关键;③ 目前的智能监测技术离矿山滑坡精准预报尚有距离,原因是关于矿山滑坡孕灾环境、成灾条件、影响因素、触发方式等认识还不充分,智能监测的时空连续性与精度尚需提高。

由于雷达卫星影像的时空分辨率越来越高、多种卫星影像的可获性越来越强,SAR 数据处理软件也日益成熟,基于高分 SAR 影像的地表三维位移及形变提取技术已取得突破,卫星高分 SAR 将在露天矿山边坡高精度监测及滑坡智能预测中发挥重要作用。目前,已经可以利用高分 SAR 获得井工矿区地表的三维大位移及其时间序列信息[56-57],借助先验知识对井工开采引起的地表沉陷进行预测[58]。若加强卫星高分 SAR 与 UAV 低空摄影测量、UAV 激光扫描、地基 TLS、地基 SAR、地基 GNSS 等多平台几何监测手段的协同,将进一步提升露天矿山边坡智能监测能力。笔者团队即将开展此项研究和工程实践,可望在不久的将来取得更好的监测效果。

参考文献(References):

[1] 吴立新. 数字地球、数字中国与数字矿区[J]. 矿山测量,2000(1):6-9.
WU Lixin. The digital earth, digital China and digital mine [J]. Mine Surveying,2000(1):6-9.

[2] 吴立新,殷作如,邓智毅,等. 论 21 世纪的矿山——数字矿山[J]. 煤炭学报,2000,25(4):337-342.
WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, et al. Research to the mine in the 21st century:Digital mine[J]. Journal of China Coal Society, 2000,25(4):337-342.

[3] 吴立新,殷作如,钟亚平. 再论数字矿山——特征、框架与关键技术[J]. 煤炭学报,2003,28(1):1-7.
WU Lixin, YIN Zuoru, ZHONG Yaping. Restudy on digital mine: Characteristics,framework and key technologies[J]. Journal of China Coal Society,2003,28(1):1-7.

[4] 吴立新,朱旺喜,张瑞新. 数字矿山与我国矿山未来发展[J]. 科技导报,2004(7):29-31.
WU Lixin,ZHU Wangxi,ZHANG Ruixin. Digital mine and the future development of mines in China[J]. Science & Technology Review,2004(7):29-31.

[5] 孙豁然,徐帅. 论数字矿山[J]. 金属矿山,2007(2):1-5.
SUN Huoran,XU Shuai. On digital mine[J]. Metal Mine,2007(2): 1-5.

[6] SEPPANEN P. Intellimine research and development[J]. World Mining Equipment,1993(11):15-16.

[7] 于润沧. 中国矿业现代化的战略思考[J]. 中国工程科学,2012,14(3):27-36.
YU Runcang. Strategic consideration on China's mining modernization[J]. China Engineering Science,2012,14(3):27-36.

[8] 吴立新,汪云甲,朱旺喜,等. 三论数字矿山:借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报,2012,37(3):357-365.
WU Lixin,WANG Yunjia,ZHU Wangxi,et al. Thirdly study on digital mine:serve for mine safety and intellimine with support from IoT [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(3):357-365.

[9] 吴立新,余接情,胡青松,等. 数字矿山与智能感控的统一空间框架与精确时间同步问题[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1584-1592.
WU Lixin, YU Jieqing, HU Qingsong, et al. Unified spatial framework and precise time synchronization for digital mine and mine intelligent perception-control[J]. Journal of China Coal Society,2014, 39(8):1584-1592.

[10] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. 煤炭学报,2016,41(12):3181-3189.
HAN Jianguo. Key technology research and demonstration of intelligent mines in Shenhua Group[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(12):3181-3189.

[11] 冯夏庭,王泳嘉. 采矿科学发展的新方向——智能采矿学[J]. 科技导报,1995(8):20-22.
FENG Xiating, WANG Yongjia. Intelligent Mining Science——A new direction of mining science development[J]. Science and Technology Review,1995(8):20-22.

[12] 古德生. 智能采矿——触摸矿业的未来[J]. 矿业装备,2014(1):24-26.
GU Desheng. Intelligent mining——touching future mining industry[J]. Mining Equipment,2014(1):24-26.

[13] LI Jianguo,ZHAN Kai. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering,2018(4):381-391.

[14] WANG Jinhua, HUANG Zenghua. The recent technological development of intelligent mining in China[J]. Engineering,2017(3): 439-444.

[15] 葛世荣. 智能化采煤装备的关键技术[J]. 煤炭科学技术,2014,42(9):7-11.
GE Shirong. Key technology of intelligent coal mining equipment [J]. Coal Science and Technology,2014,42(9):7-11.

[16] 王国法,刘峰,庞义辉,等. 煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa,LIU Feng,PANG Yihui,et al. Coal mine intellectualization:The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):349-357.

[17] 刘超,高井祥,王坚,等. GPS/伪卫星技术在露天矿边坡监测中的应用[J]. 煤炭学报,2010,35(5):755-759.
LIU Chao, GAO Jingxiang, WANG Jian, et al. GPS/pseudolites technology for the slope deformation monitoring in open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(5):755-759.

[18] 吴立新,高均海,葛大庆,等. 工矿区地表沉陷 D-InSAR 监测试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2005,26(8):778-

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

782.
WU Lixin, GAO Junhai, GE Daqing, et al. D-InSAR monitoring test research on surface subsidence in industrial and mining areas[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(8):778-782.

[19] 廖明生,唐婧,王腾,等. 高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(2):217-229.
LIAO Mingsheng, TANG Jing, WANG Teng, et al. Application of high-resolution SAR data in landslide monitoring in the three gorges reservoir area[J]. Science in China: Earth Science, 2012,42(2):217-229.

[20] 盛业华,闫志刚,宋金玲. 矿山地表塌陷区的数字近景摄影测量监测技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):411-415.
SHENG Yehua, YAN Zhigang, SONG Jinling. Digital close-range photogrammetry monitoring technology of mine ground subsidence area[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003,32(4):411-415.

[21] 许志华,吴立新,陈绍杰,等. 基于无人机影像的露天矿工程量监测分析方法[J]. 东北大学学报,2016,37(1):84-88.
XU Zhihua, WU Lixin, CHEN Shaojie, et al. Method of engineering volume monitoring and calculation for open-pit mine from UAV images[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016,37(1):84-88.

[22] ABELLÁN A, VILAPLANA J M, MARTÍNEZ J. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)[J]. Engineering Geology, 2006,88(3):136-148.

[23] HU Wenmin, WU Lixin. Ground deformation extraction using visible images and Lidar data in mining area[A]. The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences[C]. XXIII ISPRS Congress, 2016: XLI-B7, 505-512.

[24] HOWARD GARDNER. Frames of mind: The theory of multiple intelligences[M]. London: Hachette UK, 2011.

[25] 邵华. 亚里士多德论实践智慧的内涵[J]. 武汉科技大学学报(社会科学版),2011,13(1):1-8.
SHAO Hua. Connotations of Aristotle's phronesis[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Social Science Edition),2011,13(1):1-8.

[26] 陈如明. 超级人工智能的务实发展策略[J]. 世界电信,2017(2):25-29.
CHEN Ruming. Practical development strategy of hybid artificial intelligence[J]. World Communication, 2017(2):25-29.

[27] PAN Yunhe. Heading toward artificial intelligence 2.0[J]. Engineering, 2016,2(4):409-413.

[28] 梅剑华. 理解与理论:人工智能基础问题的悲观与乐观[J]. 自然辩证法通讯,2018,40(4):1-8.
MEI Jianhua. Understanding and theory: The optimistic attitude and pessimistic attitude in the discussion of artificial intelligence[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2018,40(4):1-8.

[29] 胡青松,吴立新,张申,等. 事件驱动的灾害监测传感网中的节能数据传输[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(5):1404-1409.
HU Qingsong, WU Lixin, ZHANG Shen, et al. Energy-saving data transmission scheme for event-driven disaster monitoring sensor networks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014,44(5):1404-1409.

[30] 胡文敏,胡青松,张炜,等. 事件驱动的对地观测任务协同规划模型[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(1):204-212.
HU Wenmin, HU Qingsong, ZHANG Wei, et al. A cooperative planning model on earth observing task using event-driven method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(1):204-212.

[31] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报,2013,1(1):3-8.
NING Jinsheng, YAO Yibin, ZHANG Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013,1(1):3-8.

[32] 王利,张勤,管建安,等. 基于 GPS 技术的滑坡动态变形监测试验结果与分析[J]. 武汉大学学报信息科学版,2011,36(4):422-426.
WANG Li, ZHANG Qin, GUAN Jian'an, et al. Experiment results and analysis of the dynamic deformation monitoring of a kind of landslide based on GPS technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,36(4):422-426.

[33] 姜卫平. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报,2017,46(10):1379-1388.
JIANG Weiping. Challenges and opportunities of GNSS reference station network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1379-1388.

[34] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Navigation, 2019,66(1):7-18.

[35] LI Zhiwei, CAO Yunmeng, WEI Jianchao, et al. Time-series InSAR ground deformation monitoring atmospheric delay modeling and estimating[J]. Earth Science Review, 2019,192:258-284.

[36] 贺黎明. 滑坡与地震监测中电离层扰动分析及其影响改正算法[D]. 沈阳:东北大学,2014.
HE Liming. Ionospheric disturbance analysis and delay correction algorithms for landslide and earthquake monitoring[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.

[37] HE Liming, WU Lixin, LIU Shanjun, et al. Mapping two-dimensional deformation field Time-Series of large slope by coupling DInSAR-SBAS with MAI-SBAS[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9):12440-12458.

[38] HU Wenmin, WU Lixin, ZHANG Wei, et al. Ground deformation detection using China's ZY-3 stereo imagery in an opencast mining Area[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017,6,361.

[39] LIU Shanjun, WANG Han, HUANG Jianwei, et al. High-resolution remote sensing image-based extensive deformation-induced landslide displacement field monitoring method[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015,2(3):170-177.

[40] 张慧慧,刘善军,王茹. 基于高分影像和 ASIFT 算法的滑坡位移场监测方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(10):1468-1472,1476.

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

ZHANG Huihui, LIU Shanjun, WANG Ru. Monitoring method of landslide displacement field based on high-resolution images and ASIFT algorithm[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(10): 1468-1472, 1476.

[41] 张慧慧,刘善军.露天矿滑坡位移监测的 ASIFT 算法[J].金属矿山,2017,46(5):165-170.
ZHANG Huihui, LIU Shanjun. Landslide displacement monitoring of open-pit mine based on ASIFT algorithm[J]. Metal Mine, 2017, 46(5): 165-170.

[42] 许志华,吴立新,刘军,等.顾及影像拓扑的 SfM 算法改进及其在灾场三维重建中的应用[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(5):599-606.
XU Zhihua, WU Lixin, LIU Jun, et al. Modification of SfM algorithm referring to image topology and its application in 3-dimension reconstruction of disaster area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 599-606.

[43] XU Zhihua, WU Lixin, MARKUS GERKE, et al. Skeletal camera network embedded structure-from-motion for 3D scene reconstruction from UAV images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 121: 113-127.

[44] 吴立新,许志华,范松滔,等.植被稀疏地区沟蚀变化的 TLS 监测与沟蚀量估算[J].武汉大学学报信息科学版,2017,42(10):1-8.
WU Lixin, XU Zhihua, FAN Songtao, et al. Gully erosion TLS monitoring and estimation in area of sparse vegetation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(10): 1-8.

[45] XU Zhihua, XU Ershuai, WU Lixin, et al. Registration of terrestrial laser scanning surveys using terrain-invariant regions for measuring exploitative volumes over open-pit mines[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 606.

[46] WU Lixin, LIU Shanjun, WU Yuhua, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part I: IRR image abnormalities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(3): 473-482.

[47] WU Lixin, LIU Shanjun, WU Yuhua, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part II: IRR T-Curve abnormalities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(3): 483-493.

[48] 吴立新,刘善军,吴育华.遥感-岩石力学引论:岩石受力灾变的红外遥感[M].北京:科学出版社,2006.

[49] 刘善军,吴立新,王川婴,等.遥感-岩石力学(Ⅷ)——论岩石破裂的热红外前兆[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1621-1627.
LIU Shanjun, WU Lixin, WANG Chuanying, et al. Remote sensing-rock mechanics (VIII)-TIR omens of rock fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1621-1627.

[50] 刘善军,徐忠印,吴立新,等.遥感-岩石力学在矿山应用的试验研究[J].金属矿山,2011(7):61-65.
LIU Shanjun, XU Zhongyin, WU Lixin, et al. Application test of remote sensing rock mechanics in mine[J]. Metal Mine, 2011(7): 61-65.

[51] 鞍钢集团矿业有限公司.基于测量机器人露天边坡监测高程数据的处理方法[P].中国专利:ZL201611167804.6,2019-05-28.

[52] GAO Yandong, XU Maolin, MAO Yachun. Method to improve the accuracy of slope monitoring data based on a measuring Robot[J]. International Journal of Online Engineering. 2015, 11(1): 46-51.

[53] WEI Lianhuan, ZHANG Yun, ZHAO Zhanguo, et al. Analysis of mining waste dump site stability based on multiple remote sensing technologies[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 2025.

[54] 孙厚广,熊宏启,邵猛,等.红外热成像在排土场稳定性监测中的应用[J].金属矿山,2017(2):109-112.
SUN Houguang, XIONG Hongqi, SHAO Meng, et al. Application of infrared thermal imaging in monitoring stability of the dump[J]. Metal Mine, 2017(2): 109-112.

[55] ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng, CHEN Zeqiang, et al. Geospatial sensor web: A cyber-physical infrastructure for geoscience research and application[J]. Earth-Science Reviews, 2018(185): 684-703.

[56] YANG Zefa, LI Zhiwei, ZHU Jianjun, et al. Retrieving 3-D large displacements of mining areas from a single amplitude pair of SAR using offset tracking[J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 338.

[57] YANG Zefa, LI Zhiwei, ZHU Jianjun, et al. Retrieving time-series three-dimensional displacements of mining area with a single geometry InSAR dataset[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92: 529-544.

[58] YANG Zefa, LI Zhiwei, ZHU Jianjun, et al. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter inversion, and forward prediction: A Review[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(1): 71-90.