

无人机遥感在矿业领域应用现状及发展态势

王 昆¹⁾, 杨 鹏^{2,3)}✉, 吕文生³⁾, 诸利一³⁾, 于广明⁴⁾

1) 山东科技大学能源与矿业工程学院, 青岛 266590 2) 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101 3) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 4) 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033

✉通信作者, E-mail: yangpeng@buu.edu.cn

摘 要 无人机遥感技术是融合无人机、遥感传感器、差分定位、通信等技术以实现地理环境信息快速采集处理与应用分析的新兴技术。本文介绍了无人机遥感平台构成、技术现状及工作流程, 并通过大量国内外文献调研系统梳理其在矿业领域应用场景与实际案例, 结合当前技术供给短板分析发展态势。研究表明: (1) 无人机遥感技术具备成本低廉、机动性强、数据采集灵活、时效性强、可重复、高分辨率等无可比拟的优势; (2) 当前矿业领域主要应用于露天矿生产管理、尾矿库安全监测、灾害应急救援、矿区环境监测、边坡灾害防治; (3) 规范监管、简化操控方式、提升续航时间、改善成果精度、拓展应用场景是技术应用发展趋势。无人机遥感技术在矿业领域具备广阔应用前景, 势必成为智慧矿山建设中不可缺少的重要组成部分。

关键词 无人机; 遥感; 摄影测量; 矿业; 智慧矿山

分类号 TD77.1

Current status and development trend of UAV remote sensing applications in the mining industry

WANG Kun¹⁾, YANG Peng^{2,3)}✉, LÜ Wen-sheng³⁾, ZHU Li-yi³⁾, YU Guang-ming⁴⁾

1) College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2) Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China

3) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

4) School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

✉ Corresponding author, E-mail: yangpeng@buu.edu.cn

ABSTRACT Unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing is a state-of-the-art technology that integrates UAV, remote sensing sensor, GPS differential positioning, communication, and other technologies to achieve rapid collection, processing, and analysis of geographic environmental information. UAV remote sensing is considered an important supplement of spaceborne remote sensing and is recently being widely used in the topographical surveying and mapping, precision agriculture, heritage inspection, and emergency rescue, etc. For the traditional mining industry, high-quality and real-time UAV remote sensing data can be obtained at reasonable costs and benefit the mining operations, particularly for numerous small- and medium-scale mining sites where equipments and professional expertise are expensive. However, application scenarios of UAV remote sensing in the mining industry are rarely reported and lack systematic review. Therefore, the definition, platform composition, current status, and general workflow of UAV remote sensing technology were summarized in this study. Then, through significant domestic and foreign literature surveys, the application scenarios and practical case studies of UAV remote sensing in the mining industry were systematically presented. Finally, the development trend was analyzed on the basis of the shortcomings of current technology. Results show that (1) UAV remote sensing technology has the

收稿日期: 2019–12–18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774045); “十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804600)

advantages of low costs, strong maneuverability, flexible data sampling settings, timeliness, repeatability, and high resolution. (2) The current applications of UAV remote sensing in the mining industry mainly include the operations management of open-pit mines, safety monitoring of tailing ponds, emergency rescue, environmental monitoring of mining areas, and prevention and control of slope disasters. (3) The development trend of UAV remote sensing technology application will include the standardization of UAV supervision, simplification of UAV control mode, augmentation of UAV endurance time, improvement of the quality of results, and further expansion of application scenarios. UAV remote sensing technology has broad application prospects in the mining industry and is bound to become an indispensable part of smart mines.

KEY WORDS unmanned aerial vehicle; remote sensing; photogrammetry; mining industry; smart mine

无人机是指不需要驾驶员登机驾驶的遥控或可自主驾驶的飞行载具,最早用于军事侦察机、靶机,经历 21 世纪初期商用市场开发,现已大规模应用于农林植保、地理测绘、安防救援等领域^[1],成为推动传统行业进步转型的强劲技术动力。遥感技术是当前获取地理环境及其变化信息的首要技术手段^[2]。无人机技术与遥感技术、差分定位技术、通信技术、摄影测量算法等前沿技术交叉融合催生了无人机遥感技术及其迅猛发展,该技术可实现空间遥感信息的快速获取与建模分析,相比于卫星遥感耗资巨大、重访周期过长、数据分辨率不足、获取不及时等问题,具有成本低廉、机动性强、数据采集灵活、时效性强等优势,被认为是应对欠发达国家地区遥感数据短缺的有效解决方案^[3],在较小范围或飞行困难区域高分辨率影像快速获取方面具有明显优势,是卫星遥感、航空遥感技术的重要补充。据 Roosevelt^[4]在土耳其西部地区地形测量实践研究,无人机遥感相比于传统人工测量手段效率高出一个数量级,且数据密度至少高出两个数量级。

然而,无人机遥感技术当前在矿业领域应用并不多见,且应用场景较为局限,对于该研究议题缺乏系统性调查论述。因此,本文在大量调查国内外最新文献的基础上,系统介绍无人机平台类型、技术现状及遥感工作流程,列举总结国内外学者将该技术运用到露天矿生产管理、尾矿库安全监测、灾害应急救援、矿区环境监测、边坡灾害防治等场景的成功案例与前沿进展,并进一步结合当前智慧矿山建设、矿产资源绿色开发大背景下的技术供给短板,分析展望无人机遥感技术革新发展方向及其在矿业领域应用前景,为该技术创新应用研究与大规模推广提供参考。

1 无人机遥感技术概述

1.1 无人机平台

无人机平台通常由机架机身、动力系统、飞行

控制系统、遥控系统、辅助系统五部分组成。根据动力系统特性可划分固定翼与旋翼型,固定翼型主要依靠延展的固定机翼提供升力,而旋翼型无人机则依靠机臂上若干个电机驱动桨叶协同旋转产生升力。在相同负载的情况下,固定翼无人机续航表现通常显著优于旋翼型无人机,适用于电力巡检、地图测绘等大规模航测应用场景。在起飞场地需求方面,固定翼无人机大多需要开阔场地、平整跑道或弹射器供飞机滑行起降,而旋翼型无人机则相对灵活,只需一小片空地即可实现垂直起降,能够胜任地形复杂区域测量任务。值得一提的是,瑞士 Wingtra 公司推出的 WingtraOne 无人机充分结合两者优点,通过固定机翼前端 2 组旋转桨叶驱动实现垂直起降,克服了固定翼无人机起飞场地限制,爬升到指定高度后再切换姿态至固定翼模式巡航,续航时间最高可达 55 min。此外,旋翼型无人机通常可灵活拆卸桨叶,尺寸上更加小巧、便携。当前市面上固定翼无人机主要有深圳飞马机器人公司的 F300、瑞士 SenseFly 公司的 eBee、比利时 Trimble UAS 公司的 UX5、美国 Prioria 公司的 Maveric 等,旋翼型无人机包括深圳大疆创新(DJI)公司的 Phantom 4、Inspire 2、深圳飞马机器人公司的 D1000、中国香港 Yuneec 公司的 Typhoon H Plus、法国 Parrot 公司的 Anafi 等,主要技术参数对比如表 1 所列。

此外,随着我国军民融合战略深入执行,航天空气动力技术研究院自主研发的大中型彩虹系列无人机在应急测绘、航空物探等民用领域得以成功应用^[5],该无人机采用活塞式发动机驱动,具备长航时、大载重等优势。

1.2 搭载传感器类型

根据无人机平台的尺寸大小、载重能力及遥感任务需求,搭载不同类型传感器。其中最为常见的是光学数码相机,采集影像序列经特征选取、影像匹配、点云生成等一系列处理生成遥感数据成果,被称为无人机摄影测量。因使用门槛低、设备

表 1 常见消费级无人机参数

Table 1 Specifications of common consumer-grade UAV drones

Type	Product	Mass/ kg	Wingspan/diagonal size/cm	Battery capacity/ (mA·h)	Surveying sensor	Maximum flight endurance/min	Maximum speed/ (km·h ⁻¹)	Maximum transmission distance/km
Fixed-wing UAV	Feima F300	3.75	180	—	42-MP Sony RX1RII camera/oblique module/thermal infrared module	90	—	10
	SenseFly eBee Classic	0.69	96	2150	20-MP S.O.D.A. camera/Sequoia + multispectral sensor/thermal sensor	50	90.0	3.0
	TrimbleUX5	2.50	100	6000	24-MP Sony a5100 camera	50	80.0	5.0
	PrioriMaveric	1.16	74.9	—	Digital camera/thermal infrared camera	45–60	101.0	15.0
	WingtraWingtraOne	3.70	125	6800	42-MP Sony RX1RII camera/multispectral sensor/thermal infrared sensor	55	57.6	8.0
Multi-rotor UAV	DJI Phantom 4 Pro/Feima D1000	1.39	35	5870	20-MP 1"CMOS	28	72.0	7.0
	DJIInspire 2	3.44	60.5	4280	24-MP Zenmuse X7	23	94.0	7.0
	YuneecTyphoon H Plus	1.70	52	5400	20-MP 1"CMOS	25	72.0	1.6
	ParrotANAFI	0.32	—	2700	21-MP 1/2.4" CMOS	25	55.0	4.0

成本低、商用软件多样,搭载光学数码相机的无人机摄影测量是当前应用最为广泛的无人机遥感形式,也是本文讨论的重点。另一方面,随着无人机遥感应应用场景越来越丰富,无人机平台可搭载的热红外、多光谱、激光雷达、航磁等传感器正朝着微型化、定制化、模块化的趋势演变,在农林植保、海域环境调查、工业排污监测、矿产资源勘查等领域得以应用,同样受到研究者与从业人员的高度重视^[6]。

1.3 作业流程

基于光学相机的无人机摄影测量是应用最广泛的一种无人机遥感形式。得益于无人机遥感行业技术进步与市场扩张,市面上摄影测量后处理商用软件种类繁多、特色功能各异,主要有俄罗斯 Agisoft 公司的 Metashape(原名 Photoscan)、瑞士 Pix4D 公司的 Pix4Dmapper、法国 Acute3D 公司的 Smart 3D 软件(被 Bentley 公司收购后更名为 ContextCapture)、斯洛伐克 Capturing Reality 公司的 RealityCapture、意大利 3DFLOW 公司的 3DF Zephyr、加拿大 SimActive 公司的 Correlator 3D、武汉天际航公司的 DP-Modeler、适普软件与武汉大学团队研发的 VirtuoZo、北京航天宏图公司的 PIE-UAV、香港科技大学团队研发的 Altizure、深圳飞马机器人公司推出的一站式无人机管家等。各类软件在任务配置、运算效率、运行环境、参数

设置、输出格式、成果分析及配套软件支持等方面存在差异,而基本原理与操作流程大致相同。

本节将以无人机摄影测量为例,介绍无人机遥感数据获取与处理的常规作业流程,如图 1 所示。在制定工作计划时,需综合考虑测量区域任务目标与硬件配置,以确立合适航测参数。重建地面分辨率(Ground sampling distance, GSD)是地面上两个连续像素中心点之间的距离,由相机镜头焦距、相机传感器尺寸、拍摄图像宽度和飞行高度四项参数共同决定,反映最终成果的精度和质量,也代表着最终拼接图像的精细化程度,是无人机摄影测量中最引人关注的关键指标。其值越大,代表重建成果空间分辨率越低、细节越不明显。通常情况下,飞行高度越低、相机像素值与焦距值越大,可获得的 GSD 值越小。常用的机载传感器多为数码相机,也可根据应用场景搭载热红外相机、多光谱相机等^[6-7]。部分专业级无人机还可搭载高精度实时动态差分(Real-time kinematic, RTK)辅助设备,降低全球定位(Global positioning system, GPS)坐标定位误差。与此同时,外业测量通常还需使用易识别标志物标记地面控制点(Ground control point, GCP),均匀布设在测区易抵达地点,使用高精度全球定位系统(Global navigation satellite system, GNSS)量测记录 GCP 坐标点,以进一步保障摄影测量后处理结果的全局精度,确保

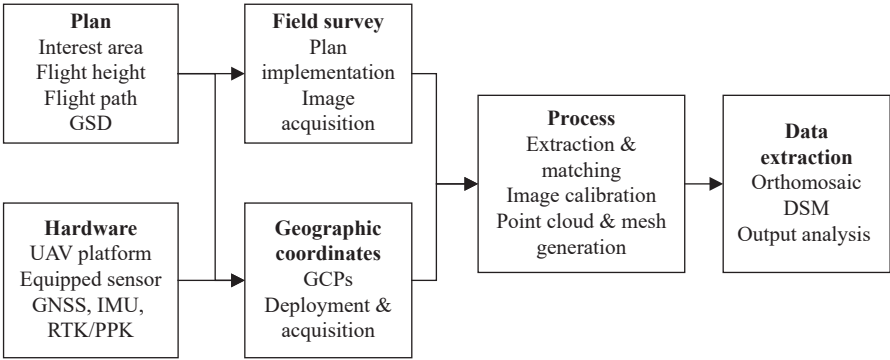


图 1 无人机摄影测量作业常规作业流程

Fig.1 General workflow of UAV photogrammetry

生成结果的经纬度与实际 GPS 坐标准确对应。经特征提取、影像匹配、点云生成、结果输出获得测区正射影像/数字表面模型 (Digital surface model, DSM) 等遥感成果, 再借助后处理程序或导入第三方软件提取关键信息、开展进一步数据应用与处理分析。

2 无人机遥感在矿业领域应用现状

在矿业领域围绕传统运营生产模式技术瓶颈, 充分发挥无人机与遥感技术优势, 国内外学者尝试将无人机遥感在矿山运行周期各个环节中推广应用。

2.1 露天矿山生产管理

无人机遥感技术可为露天矿提供低成本、高质量的空间数据支撑, 推进生产管理方式向智能化、信息化转变。国内外学者对此开展了大量研究, 李迁^[8]在江西龙南稀土矿区开展无人机遥感测试, 指出该技术在掌控矿山运行状态、储量变化、尾矿堆存能力、复垦复绿情况、非法开采搜证等场景具备应用潜质; Xiang 等^[9]使用固定翼无人机获取 2014—2016 年北京密云铁矿地表地貌遥感数据, 并通过数字表面模型差异算法求得体积变化, 结合经验模型提取分析露天采场范围及其变化特征; Chen 等^[10]利用该技术获取北京周边两处铁矿的高分辨率 DSM 地形数据, 研究分析露天矿边坡位移特征、周边地貌变化及其与环境污染关联特征, 指出该方法能够以较低成本实现大规模地形调查, 有利于矿山绿色可持续开采规划与环境保护实践; 张玉侠等^[11]为减小外业劳动强度、提升工作效率, 引入无人机摄影测量技术成功实现露天矿山开采范围、开采面积、开挖土方量、开采过程、排水疏干、土地复垦的动态监测。在成果精度验证方面, 许志华等^[12]将无人机遥感测得采剥量、堆排量与矿车运输台账对比验证, 显示其精度接近地面激光雷达扫描结果, 可满足工程应

用需求; Esposito 等^[13]借助该技术测得 2013—2015 年间意大利一处露天矿点云数据与体积变化量, 与实际开采、排土、复垦数据对比验证显示成果精度满足工程需求, 适用于露天矿这类地形地貌动态变化的监测场景。在与传统测量方法的对比研究方面, 杨青山等^[14]分别借助无人机遥感与传统人工 GPS RTK 测量手段评估新疆地区两座矿山动用储量, 对比显示其相对误差优于 10%、精度满足工程要求, 并且无人机遥感外业测量耗时缩短 2/3、工作效率更高、数据不易篡改可信度更好, 能够实现矿山储量变化全局掌控, 从技术层面遏制违法采矿活动, 保障新疆地区资源开发有序开展; Raeva 等^[15]以保加利亚一处采石场为例对比研究无人机遥感与传统人工测量手段在储量动态监测的应用效果, 结果显示无人机遥感成果误差在 1.1% 左右, 而数据采集耗时缩减 90% 以上, 更适合大范围区域的数据快速获取; Tong 等^[16]提出无人机遥感与地面激光扫描技术结合的露天矿三维成图与监测工作方法, 现场测试表明成图精度达到 dm 级别。此外, 在矿产勘察方面, 崔志强^[17]利用无人机平台高精度航磁/伽马能谱综合测量系统开展了湘东南地区岩性构造填图及找矿远景预测研究, 认为无人机航空物探技术正趋于成熟具备良好应用前景; 李飞等^[18]介绍了无人机航磁测量系统在新疆克拉玛依和喀什地区应用情况, 表明在地质填图、地质构造、矿产资源勘察应用中效果良好。

综上所述, 在露天矿山生产管理辅助中, 无人机遥感精度可媲美人工测量、地面激光扫描等传统测量手段, 并且具有机动性强、人工作业强度低、数据可靠度高、覆盖面大、工作效率高等优势。此外在地质调查、矿产勘察中也有应用。

2.2 尾矿库安全监测

尾矿库是具有高势能的泥石流重大危险源,

溃坝事故往往造成惨重人员伤亡、巨额经济损失与难以修复的环境污染^[19]。Rico 等^[20]统计分析全球尾矿库溃坝事故案例,指出最常见灾害诱因是极端天气,其次是人为安全管理疏漏。由于尾矿库溃坝灾害诱发因素多、成因复杂、后果严重,其运行情况的实时监测对于安全管理实践至关重要。地表布设传感器的传统监测方式在实践中暴露出视角单一、造价与维护成本高、长期稳定性差等问题^[19]。例如,2019年1月巴西 Brumadinho 尾矿坝溃决事故酿成 249 人丧生、21 人失踪的严重后果,经调查尾矿库安装多达 94 个孔隙水压计和 41 个水位监测传感器,而在事故发生前未监测到任何数据异常^[21]。运用无人机遥感技术作为尾矿库传统地表监测系统的有力补充,突破地表的点位监测局限实现尾矿库及其周边区域的整体全局监测,是当前尾矿库防灾减灾领域的研究热点之一^[22-23]。Rauhala 等^[22]尝试利用该技术对芬兰极地区域一处已暂停使用的金矿尾矿库开展年沉降量监测,验证结果表明测量成果分辨率可达到 dm 级别,能够快速为尾矿库生产运营管理与位移监测提供连续、低成本的支撑数据;巴西 Samarco 铁矿自 2013 年开始实施以月度为周期的无人机影像巡查及地形监测工作,积累影像资料与遥感数据成为 2015 年溃坝事故调查的重要证据^[24];贾虎军等^[25]提取无人机遥感航测三维结果实时掌控尾矿库基础参数、堆排量与下游情况等,从而评估分析尾矿库安全状态与灾害风险;马国超等^[26]以四川省某尾矿库为研究对象,探索研究无人机摄影测量技术在尾矿库建设规划中的适用性与应用场景,得到水平和高程误差分别为 0.311 与 0.304 m,可用于辅助尾矿库建设规划与安全风险评价,克服矿区复杂地形限制与劳动作业强度高等难题;王昆^[23]将无人机摄影测量成果与数值模拟方法结合,超前预测正常运行尾矿库发生溃坝事故情形下泄露泥浆在真实地形上的演进过程,提取出泥浆流速、淹没深度、波及范围等关键数据,为尾矿库应急管理提供参考。如何进一步提高监测精度、简化工作流程、提高工作效率、拓展成果应用场景是该技术进一步推广需要着重改进的方向。

2.3 灾害应急救援

先进配套装备是矿山灾害应急救援工作的制胜法宝。充分发挥作业机动性强、不受地形限制等优势,国内外学者探索无人机遥感技术在滑坡、地震等灾害应急救援中的应用场景,积累了大量成功案例,对于该技术服务支持矿山应急救援工

作具有示范指导意义。

在应急测绘与灾区调查方面,Chiabrand 等^[27]先后借助固定翼无人机 eBee、四旋翼无人机 Phantom 4、地面近距离摄影测量及 Zeb1 手持激光雷达对 2016 年 6 月意大利中部一处地震受灾村庄开展了遥感勘测工作,固定翼与旋翼型无人机所获取成果地面分辨率分别达到每像素 5 和 2.18 cm,可基本满足灾情调查及情势研判需求;Mavroulis 等^[28]基于 WebGIS 应用与无人机遥感提出地震灾害损失的快速评估技术框架,并在 2017 年 6 月希腊莱斯沃斯岛地震早期应急响应中发挥重要作用;Yamazaki 等^[29]采用运动恢复结构算法处理地表与无人机采集影像资料,分别获取日本、尼泊尔两处地震灾区建筑物模型,以快速评估灾区整体概况与建筑物受损情况;杨燕等^[30]使用 4 架无人机对 2016 年浙江丽水 9·28 滑坡事故开展了无人机摄影测量应急测绘,快速获取的正射影像图、三维模型及视频图像数据为现场救灾提供了地理信息数据支持;臧克等^[31]在 2008 年汶川地震救援工作中使用无人机勘察北川县南部受灾地区,快速评估受灾区域整体状况,用以指导制定次生灾害预防措施与抢险救灾方案;黄瑞金等^[32]提出以异构无人机集群灾情地理信息为核心的灾害监测数据协同采集及处理方法,在 8·8 九寨沟地震与 6·24 茂县山体垮塌的应急处置和灾情掌控中发挥出关键作用。在应急救援搜寻方面,李明龙等^[33]针对地震灾害救援场景提出无人机集群空地协同搜救框架,搭载红外、声呐、雷达等生命探测装置,探获受灾人群位置密度分布信息,为应急救援工作开展提供参考。然而,当前无人机遥感作为新兴技术在应急救援领域应用仍处于探索阶段,存在诸多难题限制该技术大规模推广应用,Boccardo 等^[34]分析总结出以下 3 项技术应用难点:1) 配套装备需预先部署在高风险区域,以保障应急救援响应效率;2) 低能见度、暴雨、大风等极端天气条件将制约无人机作业;3) 灾害应急工作分秒必争,采集影像处理时长与成果质量难以平衡。

2.4 矿区环境监测

随着生态文明建设、矿山可持续发展战略全面推进,矿山环境保护、复垦复绿工作受到监管部门与矿山企业的高度重视。而无人机遥感技术可大大降低环境监测人力劳动强度,杨海军等^[35]举例阐述了无人机遥感技术在矿山环境风险评估、突发环境事件、污染调查等领域的应用价值,如张家口 520 座尾矿库环境风险调查、2012 年贵州万

泰锰业尾矿库泄露应急监测、2010 年吉林永吉县山洪灾害导致化学原料泄露遥感监测等, 该技术可弥补传统地面环境监测手段周期长、范围小、连续性差等局限。在矿区地表塌陷变形监测方面, 高冠杰等^[36]将无人机遥感技术引入到采煤地表沉陷量变形监测中, 测得羊场湾煤矿某工作面最大沉陷量为 6.5 cm, 与地面实测结果较为吻合; 侯恩科等^[37]以宁东煤炭基地金凤煤矿地表塌陷灾害监测为案例, 研究高分辨率无人机遥感信息在矿区地表裂隙解译、地面沉降量计算、塌陷移动规律的处理与分析方法, 结果显示: 1) 地形平坦区域 143 m 航高可识别约 2 cm 宽度的地表裂缝; 2) 基于光谱、延长线和紧密阈值规则的计算机自动提取分类方法可实现采煤地面塌陷裂缝的快速有效识别; 3) 采煤工作面地表下沉量和下沉系数精度经验证满足现场技术需求。无人机搭载多光谱传感器监测矿区植被同样受到研究者青睐, 肖武等^[38]基于无人机多光谱影像遥感数据构建了采煤沉陷区农作物生物量反演模型, 评估高潜水位矿区开采沉陷而引发的农作物渍害影响程度, 并分析了该方法在矿山土地破坏监测、土地复垦与生态修复评价等领域的应用潜力。此外, 在矿区土地侵蚀方面, 魏长婧等^[39]通过提取山西省马脊梁矿区无人机遥感影像与多波段扫描影像的纹理特征、线性特征、分形维数、归一化植被指数及光谱特征, 绘制出矿区地裂缝分布信息图, 为矿区灾害综合治理提供参考; 杨超等^[40]利用该技术研究矿山排土场边坡土壤侵蚀速率, 获取的数字高程模型精度达到 0.26 m, 推算得出土壤流失面积、侵蚀沟体积、侵蚀速率等重要参数; 赵星涛等^[41]应用无人机遥感技术排查地面塌陷、地裂缝等矿山地质灾害, 认为其具备精度高、耗时短、机动性强等优点, 在土地利用变化、矿山地质灾害规模及分布探测等场景中有良好应用前景; D'Oleire-Oltmanns 等^[42]制定年度/季度的无人机摄影测量采集计划, 以获取摩洛哥南部沟壑区的多尺度数字地形模型, 结合 GIS 工具量化该区域沟谷面积与体积, 揭示其随时间的变化规律, 实现了优于卫星遥感与传统野外调查的土壤侵蚀高分辨率监测。在矿区生态修复方面, 何原荣等^[43]基于无人机重建影像数据与三维激光扫描点云数据评估紫金矿区生态修复工程, 指出该项技术具备分辨率高、非接触性、效率高的优势, 可用于矿区修复质检、复垦工程管理中; Hassan-Esfahani 等^[44]通过无人机搭载多光谱传感器采集视觉光谱数据、近红外和红外/热遥感数

据, 引入一系列植被指数作为输入变量, 并结合人工神经网络构建模型评估土壤表层湿度, 与地面实测记录比对显示该方法能够胜任土壤表层湿度的低成本、高效率监测。综上可见, 国内外学者应用该技术在矿区环境风险评估、塌陷区变形监测、土地侵蚀、植被保护、生态修复等方面积累了大量研究经验, 在我国生态矿山建设的浪潮下, 该技术在矿山环境监测领域拥有良好推广前景。

2.5 边坡灾害防治

滑坡灾害识别与防治是当前无人机遥感技术的热点应用领域。Tofani 等^[45]调查了来自意大利、西班牙、挪威等欧洲 17 个国家的 49 家地灾防治研究机构与终端用户, 受访者认定遥感信息可靠度为中等, 主要顾虑在于数据质量低与重访周期过长, 而无人机遥感技术是化解上述难题的可行方案之一。文献 [46] 列举案例剖析了卫星高分遥感、合成孔径雷达、无人机遥感、地面红外扫描等技术在滑坡领域的应用进展, 指出无人机遥感具有低成本、高效率、可重复、高分辨率等无可比拟的优势。国内外学者在滑坡灾害领域开展了大量研究: Rossi 等^[47]、Balek 等^[48]、Mateos 等^[49]深入介绍了搭载光学传感器无人机与摄影测量技术在滑坡体识别与监测中的应用前沿进展; Turner 等^[50]利用无人机遥感获取某滑坡区域 4 年的高分辨率 DSM 数据, 结合 COSI-Corr 算法量化分析得出滑坡体运移方向与轨迹; Peternel 等^[51]通过固定周期无人机摄影测量建模分析斯洛文尼亚境内某山体 2 年期间表面高程、体积变化规律及滑坡运动模式, 结果表明坡脚是该滑坡运动最活跃部分, 滑坡运动稳定伴有局部剧动与浅层滑移; Niethammer 等^[52]使用四旋翼无人机对法国南部一处活跃滑坡山体开展位移监测研究, 获取的高分辨率摄影测量重建成果与航空遥感数据对比揭示出滑坡体水平位移与裂缝发展特征; Giordan 等^[53]列举了无人机遥感在意大利西北部地区城市环境小型滑坡体调查与监测的应用案例, 指出低成本无人机遥感获取的高分辨率成果可在灾害快速识别、滑坡位移动态监测、滑坡演化模式分析、数值模拟建模中发挥重要作用; 唐尧等^[54]以 2018 年金沙江两次滑坡灾害为研究对象, 融合卫星高分遥感、无人机遥感与三维激光扫描等数据, 开展了滑坡孕灾机制与蠕动特征分析、受灾区域灾情研判与隐患排查研究, 并展望了遥感技术在地质灾害监测与应急救援中的应用前景; 叶伟林等^[55]借助无人机摄影测量技术研究分析了 2017 年甘肃罗家坡滑坡事

故滑坡体厚度、体积、距离等关键参数特征;李维炼等^[56]构建了基于无人机遥感与VR虚拟现实技术的滑坡灾害场景动态分析方法,并结合金沙江滑坡案例展示了滑坡灾情信息分析与用户沉浸式交互功能。

另一方面,高陡边坡因人工难以抵达、环境危险性高、工作强度大,传统测量手段往往受到限制。贾曙光等^[57]为解决高陡边坡地质调查中人工难以抵达区域数据获取难题,结合低空无人机遥感技术提出地形模型、岩体结构面参数等关键数据测量工作方法,并通过赤平极射投影分析判别节理组对边坡稳定性的影响;McLeod等^[58]将该技术应用到露天矿爆破岩石量监测、岩石节理面走向调查中,指出其可避免人工野外作业风险,并可实现矿山三维空间信息数据库建立及实时更新;王栋等^[59]应用无人机遥感建模勘察识别高陡边坡危险源,对危岩结构面、几何空间和地质特征测算,指出该方法相比于传统危岩勘察技术,在精度、效率、安全性、数据类型、可回溯性等方面具备优势;梁鑫等^[60]从边坡岩性组合特征、岩体结构特征、高程、坡型、坡度与采矿活动六个方面总结秦岭钒矿开采地区地质灾害发育规律,并结合无人机遥感技术提出隐蔽性边坡灾害早期识别方法。

矿区高陡边坡、尾矿坝、排土场等危险源众多,边坡失稳、滑坡等灾害隐患时刻威胁矿山安全生产。无人机遥感能够化解卫星重访周期长、数据粗糙的难题,近年来在滑坡灾害研究中受到国内外学者的大力追捧。尽管现阶段该技术仅能达到cm级精度,但可以预见遥感数据序列与传统地面测量数据结合互补,在矿区边坡灾害调查、评估及监测中具有广阔应用前景。

3 发展态势分析

当前全球矿产品需求量仍处于高位,矿产资源开发逐渐向集约化、规模化、智能化、协同化的趋势发展,颠覆传统的生产技术与管理模式不断革新。如前文所述,国内外学者聚焦矿山企业传统生产管理方式的薄弱环节,充分挖掘无人机遥感技术的优势,开展了大量探索性实践研究,积累了诸多成功案例,对于该技术在矿业领域推广应用有积极影响。Lee与Choi^[61]总结梳理了无人机遥感技术在矿业领域的应用场景,强调对于缺少精密设备与专业技术支持的中小型矿企,低成本无人机遥感技术将在地形测量、矿山生产规划、安全管理等环节扮演重要角色。

而与此同时,该技术在矿业领域的应用当前仍处于探索阶段,由于矿区地形条件复杂、周边地形更迭速度快、矿山危险源监测精度要求苛刻,无人机遥感续航、操控、后处理、数据质量、测量精度与恶劣气候条件适应性等方面技术短板饱受业界质疑,在矿业领域大规模推广应用仍然面临诸多挑战。参照Coops等^[62]的论述,结合我国当前矿业生产实践面临的难题,本文梳理出该技术应用在监管政策、操控方式、续航时间、处理算法、应用场景五个方面的发展态势:

(1)规范监管。

不同国家和地区对于民用无人机监管措施千差万别,中国、日本、加拿大、美国以及欧盟等200个国家和地区^[63]先后颁布无人机管制法律法规,严格限定无人机使用地域、方式、时间、用途等,并施行装备注册、执飞培训、飞行许可等监管措施。例如,我国深圳大疆创新(DJI)公司通过地理围栏、硬件锁定等技术手段控制无人机远离禁飞区域活动;美国法规禁止无人机在飞手视线范围之外飞行,还限制在国家公园、大型城市等敏感区域放飞无人机。上述措施保障了无人机管理规范性,但也在一定程度上延缓和限制了无人机产业扩张与行业应用,研究者常常被迫需要通过第三方专业机构开展外业测量,在研究投入、灵活性与时间成本上阻碍了技术创新。另一方面,无人机的不当使用也是无人机技术发展的一大威胁。全世界范围内,机场周边违规起飞造成民航客机迫降事件屡见不鲜,迫使各国政府纷纷收紧无人机限制。负面报道加剧公众、监管部门与利益相关方对于无人机技术的不信任,并可能招致更严苛的监管措施。统一和简化各个国家和地区的无人机监管,将会有力促进技术交流与协同进步。2018年11月,ISO国际标准化组织颁布了全球首个无人机标准草案并广泛征求意见,内容涵盖无人机分类、设计、制造、操作、维护、飞行记录、安全管理等多方面的标准化,将为全球无人机统一监管提供参考。此外,研究者还应积极参与无人机监管制度的制定与完善,力争将其对于科学研究及行业推广应用的负面影响最小化。

(2)简化操控方式。

无人机操控方式对于飞手综合素质要求高,需经过大量培训并考取飞行执照,部分专业级无人机操控还需多人协同配合,使用门槛高、自动化程度低、工作流程繁琐。随着无人机制造工艺、板载定位、视觉算法等技术创新,无人机操控方式与

配套软件也正向智能化、自动化的趋势发展。一方面基于视觉、激光、声呐、超声等传感器无人机可实现障碍物智能感知、碰撞预警、自主避障,避免因撞击发生坠落意外,有效降低了操作难度;另一方面,无人机航测软件可实现在手机、平板电脑等移动端规划同步航线,实时维护航测区域、航线、航高、重叠率等飞行参数,使其自主完成飞行任务。

(3) 提升续航时间。

市面上多数中小型无人机采用高容量电池驱动,续航时间难以得到保证,尤其是旋翼型无人机功耗巨大飞行时间常限制在 20 ~ 40 min,难以胜任矿山大规模应用场景。除研制高效锂离子电池、电力与燃料混动系统、低功耗微型电子器件、减轻无人机重量等方法外,固定翼与旋翼混合飞行模式、太阳能电池、无人机集群化协同作业、以及无人船或无人车一体化联合作业,亦正成为化解无人机续航难题的解决方案。

(4) 改善成果精度。

无人机遥感成果精度是行业应用中最引人关注的指标,也是当前该技术饱受质疑的痛点。成果精度取决于任务规划、相机分辨率、相机校准、重建算法与地面参照等,Sanz-Ablanedo 等^[64]研究了地面参照因素中地面控制点数量和位置对于成果精度的影响规律,分别对比 4000 个、400 个、65 个控制点下的重建成果检验均方根误差,结论表明高密度地面控制点(每 100 张照片中至少 3 个控制点)才可达到高精度测量需求,且地面控制点应尽量均匀分布在测量区域内;Balek 与 Blahůt^[48]以捷克境内一处滑坡体为研究对象,对比分析无人机摄影测量、全站仪、地面激光扫描 3 种方法监测体积年变化量的效果,指出无人机遥感精度虽逊于其他方法,但其仍可满足监测需求且具备较大应用潜力,着重强调了相机校准参数以及摄影测量基础理论知识对于重建成果精度的重要性;Beretta 等^[65]指出相比于激光雷达、RTK 基站等传统测量手段,无人机遥感可减少地表植被、移动机械、水体反射等带来的测量误差。无人机遥感数据采集与处理是决定成果质量的最直接环节,当前仍然面临诸多挑战:如高速飞行时电子快门易产生图像畸变、飞行姿态滚转时成像连续性差、成果精度受地表植被影响、地面控制点布设采集工作量大等。硬件方面,可搭载的各类高分辨率数码相机、雷达、多光谱、热红外传感器技术革新飞速^[1],将进一步拓展了无人机应用场景;机载 RTK

技术大幅提升无人机飞行定位定姿系统数据测量精度,预期将在无地面控制点(GCPs)的情况下可获得 cm 级精度成果,进一步简化工作流程;此外有研究者^[16]指出在人工难以获取地面控制点的高危环境下,地面光扫描点云数据可替代作为地面控制点。在处理算法方面,商用软件在重叠率、飞行速度、仰角等最优参数选取上缺乏通用依据,算法调校及验证难度高,研究者与软件厂商应开放对话合作,研发适用特定应用场景的无人机遥感建模算法。同时,由于摄影测量重建计算量巨大,后处理软件往往对系统硬件配置需求严苛,高性能并行计算、云计算、全工作流程自动化处理等技术框架研发迫在眉睫。

(5) 拓展应用场景。

无人机遥感在矿业领域应用仍处于探索阶段。随着产业转型、技术革新与应用场景拓展,无人机遥感势必在智慧矿山建设中扮演重要角色。在矿区水文地质勘查、航磁异常调查方面的应用,趋向于工作自动化、平台集成化、成果多元化、数据精准化的趋势发展;矿山生产管理方面,在采场爆破设计、设备健康度巡查、运输调度、采空区探测、巷道质量检测等场景的创新应用研究备受瞩目;矿区环境监测方面,搭载多光谱、热红外等传感器模块的无人机遥感在废弃物管理、污染物监测、复垦复绿、塌陷区调查中的应用仍较少见,技术应用关键难题亟需解决;在矿山应急管理方面,融合图像智能识别、增强现实/虚拟现实(AR/VR)、数值仿真技术,无人机遥感在隐患排查、紧急疏散、安全培训、应急救援决策支持中的应用仍需深入系统研究。此外,降雨、强风、严寒、低能见度等恶劣气候条件作业限制,同样是制约无人机遥感技术应用场景扩展的关键因素,而随着防水、抗风等特种无人机飞行平台制造工艺成熟与传感器技术日益革新,全天候作业的无人机遥感技术应用场景将进一步丰富。

总之,更加智能化、集群化的工作方式、更强的环境适应能力、更长的续航时间、更精准的机载测量设备是当前无人机技术革新的主要方向。无人机制造产业正发生着日新月异的变化,碳纤维轻质材料的使用、电子器件微型化与低功耗化、电池技术成熟化、机载定位组件精准化、操控方式智能化、搭载传感器多样化、处理算法高效化、计算设备云端化,以及与 5G 通信技术、虚拟现实、大数据、人工智能等前沿技术的交叉融合,将为解决数据传输带宽、协同时延、位置校验、复

杂场景建模等注入新的活力, 进一步丰富无人机遥感技术在矿业领域的应用场景。

4 结论

全球范围内, 无人机遥感技术正展示出强大的应用潜力与蓬勃的市场前景, 在矿业领域中的创新应用层出不穷。本文在大量文献调研的基础上, 梳理总结了无人机遥感技术特征与工作流程、应用场景、实际案例以及发展态势, 主要结论包括: (1) 无人机遥感具备成本低廉、机动性强、数据采集灵活、时效性强、可重复、高分辨率等优势, 针对特定应用场景, 多旋翼、固定翼无人机平台可搭载光学、红外、多光谱等传感器; (2) 当前该技术在矿业领域主要应用于露天矿生产管理、尾矿库安全监测、灾害应急救援、矿区环境监测、边坡灾害防治, 国内外学者积累了大量研究案例; (3) 规范监管、简化操控方式、提升续航时间、改善成果精度、拓展应用场景是该技术应用未来发展趋势。随着技术革新、装备升级以及前沿技术交叉融合, 无人机遥感技术在矿业领域更加深入的创新应用, 将颠覆传统矿业生产管理模式, 势必成为智慧矿山体系建设中不可缺少的重要组成部分。

参 考 文 献

- [1] Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogramm Eng Remote Sens*, 2015, 81(4): 281
- [2] Li D R. Development prospect of photogrammetry and remote sensing. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2008, 33(12): 1211
(李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(12): 1211)
- [3] Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2014, 39(5): 505
(李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(5): 505)
- [4] Roosevelt C H. Mapping site-level microtopography with real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK GNSS) and unmanned aerial vehicle photogrammetry (UAVP). *Open Archaeol*, 2014, 1: 29
- [5] Yan D, Zhou N E. The applications and prospects of CH UAV systems. *Comput Eng Software*, 2018, 39(9): 117
(闫东, 周乃恩. 彩虹无人机系列应用及展望. 软件, 2018, 39(9): 117)
- [6] Giordan D, Hayakawa Y, Nex F, et al. The use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2018, 18(4): 1079
- [7] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2014, 92: 79
- [8] Li Q. *Application of Low-Altitude UAV Remote Sensing in Mine Monitoring* [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013
(李迁. 低空无人机遥感在矿山监测中的应用研究——以赣州稀土矿区为例[学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013)
- [9] Xiang J, Chen J P, Sofia G, et al. Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environ Earth Sci*, 2018, 77(6): 220
- [10] Chen J P, Li K, Chang K J, et al. Open-pit mining geomorphic feature characterisation. *Int J Appl Earth Observ Geoinform*, 2015, 42: 76
- [11] Zhang Y X, Lan P T, Jin Y C, et al. Practice and exploration of unmanned aerial vehicle three-dimensional oblique photogrammetry technology in the monitoring of open pit mines. *Bull Surv Mapp*, 2017(Suppl): 114
(张玉侠, 兰鹏涛, 金元春, 等. 无人机三维倾斜摄影技术在露天矿山监测中的实践与探索. 测绘通报, 2017(增刊): 114)
- [12] Xu Z H, Wu L X, Chen S J, et al. Method of engineering volume monitoring and calculation for open-pit mine from UAV images. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2016, 37(1): 84
(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. 东北大学学报: 自然科学版, 2016, 37(1): 84)
- [13] Esposito G, Mastroiocco G, Salvini R, et al. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environ Earth Sci*, 2017, 76(3): 103
- [14] Yang Q S, Fan B B, Wei X L, et al. Research on the application of unmanned aerial vehicle technology in Xinjiang mineral monitoring. *Bull Surv Mapp*, 2015(5): 91
(杨青山, 范彬彬, 魏显龙, 等. 无人机摄影测量技术在新疆矿山储量动态监测中的应用. 测绘通报, 2015(5): 91)
- [15] Raeva P L, Filipova S L, Filipov D G. Volume computation of a stockpile—A study case comparing GPS and UAV measurements in an open pit quarry. *Int Arch Photogram Remote Sens Spatial Inform Sci*, 2016, XLI-B1: 999
- [16] Tong X H, Liu X F, Chen P, et al. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of Open-Pit Mine Areas. *Remote Sens*, 2015, 7(6): 6635
- [17] Cui Z Q. The application of the high precision airborne geophysical survey to the investigation of important metallogenic belts. *Geophys Geochem Explor*, 2018, 42(1): 38
(崔志强. 高精度航空物探在重要成矿带资源调查中的应用. 物探与化探, 2018, 42(1): 38)
- [18] Li F, Ding Z Q, Cui Z Q, et al. Application demonstration of the CH-3 UAV-borne magnetic survey system in different terrain areas of Xinjiang. *Geol Explor*, 2018, 54(4): 735
(李飞, 丁志强, 崔志强, 等. CH-3无人机航磁测量系统在我国新

- 疆不同地形区的应用示范. 地质与勘探, 2018, 54(4): 735)
- [19] Wang K, Yang P, Hudson-Edwards K, et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents. *Chin J Eng*, 2018, 40(5): 526
(王昆, 杨鹏, Hudson-Edwards Karen, 等. 尾矿库溃坝灾害防控现状及发展. 工程科学学报, 2018, 40(5): 526)
- [20] Rico M, Benito G, Salgueiro A R, et al. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *J Hazard Mater*, 2008, 152(2): 846
- [21] WISE Uranium Project. Chronology of major tailings dam failures (from 1960) [EB/OL]. (2019-10-02) [2019-11-20]. <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
- [22] Rauhala A, Tuomela A, Davids C, et al. UAV remote sensing surveillance of a mine tailings impoundment in sub-arctic conditions. *Remote Sens*, 2017, 9(12): 1318
- [23] Wang K. *Research on Slurry Routing SPH Simulation and Hazards Prevention of Tailings Dam Failure* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019
(王昆. 尾矿库溃坝演进SPH模拟与灾害防控研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019)
- [24] Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam [EB/OL]. (2016-08-25) [2017-10-01]. <http://fundaoinvestigation.com/the-panel-report/>
- [25] Jia H J, Wang L J, Jin X, et al. Three-dimensional spatial data acquisition and risk analysis of tailings pond based on UAV aerial survey. *J Saf Sci Technol*, 2018, 14(7): 115
(贾虎军, 王立娟, 靳晓, 等. 基于无人机航测的尾矿库三维空间数据获取与风险分析. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7): 115)
- [26] Ma G C, Wang L J, Ma S, et al. Application of UAV photogrammetry in construction planning of mine tailings reservoir. *Sci Surv Mapp*, 2018, 43(1): 84
(马国超, 王立娟, 马松, 等. 无人机摄影测量在矿山尾矿库建设规划的应用. 测绘科学, 2018, 43(1): 84)
- [27] Chiabrando F, Sammartano G, Spanò A. A comparison among different optimization levels in 3D multi-sensor models. A test case in emergency context: 2016 Italian earthquake. *Int Arch Photogram Remote Sens Spatial Inform Sci*, 2017, 42-2(W3): 155
- [28] Mavroulis S, Andreadakis E, Spyrou N I, et al. UAV and GIS based rapid earthquake-induced building damage assessment and methodology for EMS-98 isoseismal map drawing: The June 12, 2017 Mw 6.3 Lesvos (Northeastern Aegean, Greece) earthquake. *Int J Disast Risk Reduct*, 2019, 37: 101169
- [29] Yamazaki F, Matsuda T, Denda S, et al. Construction of 3D models of buildings damaged by earthquakes using UAV aerial images // *Proceedings of the Tenth Pacific Conference Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific*. Sydney, 2015: 204
- [30] Yang Y, Du G L, Cao Q T, Application of UAV aerial surveying technology in geological disaster emergency mapping. *Bull Surv Mapp*, 2017(Suppl): 119
(杨燕, 杜甘霖, 曹起铜. 无人机航测技术在地质灾害应急测绘中的应用——以9.28丽水山体滑坡应急测绘为例. 测绘通报, 2017(增刊): 119)
- [31] Zang K, Sun Y H, Li J, et al. Application of miniature unmanned aerial vehicle remote sensing system to Wenchuan earthquake. *J Nat Disast*, 2010, 19(3): 162
(臧克, 孙永华, 李京, 等. 微型无人机遥感系统在汶川地震中的应用. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 162)
- [32] Huang R J, Shen F Q, Zhou X X, et al. The key technology of disaster geographic information acquisition in UAV cluster and major applications. *Bull Surv Mapp*, 2019(6): 96
(黄瑞金, 沈富强, 周兴霞, 等. 无人机集群灾情地理信息获取关键技术及重大应用. 测绘通报, 2019(6): 96)
- [33] Li M L, Yang W J, Yi X D, et al. Swarm robot task planning based on air and ground coordination for disaster search and rescue. *J Mech Eng*, 2019, 55(11): 1
(李明龙, 杨文婧, 易晓东, 等. 面向灾难搜索救援场景的空地协同无人群体任务规划研究. 机械工程学报, 2019, 55(11): 1)
- [34] Boccardo P, Chiabrando F, Dutto F, et al. UAV deployment exercise for mapping purposes: evaluation of emergency response applications. *Sensors*, 2015, 15(7): 15717
- [35] Yang H J, Li Y, Zhu H T, et al. UAV remote sensing's application in the environmental protection field. *Chin High Technol Lett*, 2015, 25(6): 607
(杨海军, 李莹, 朱海涛, 等. 无人机遥感技术在环境保护领域的应用. 高技术通讯, 2015, 25(6): 607)
- [36] Gao G J, Hou E K, Xie X S, et al. The monitoring of ground surface subsidence related to coal seams mining in Yangchangwan coal mine by means of unmanned aerial vehicle with quad-rotors. *Geol Bull China*, 2018, 37(12): 2264
(高冠杰, 侯恩科, 谢晓深, 等. 基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测. 地质通报, 2018, 37(12): 2264)
- [37] Hou E K, Shou Z G, Xu Y N, et al. Application of UAV remote sensing technology in monitoring of coal mining-induced subsidence. *Coal Geol Explor*, 2017, 45(6): 102
(侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 等. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 102)
- [38] Xiao W, Chen J L, Da H Z, et al. Inversion and analysis of maize biomass in coal mining subsidence area based on UAV images. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2018, 49(8): 169
(肖武, 陈佳乐, 笪宏志, 等. 基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析. 农业机械学报, 2018, 49(8): 169)
- [39] Wei C J, Wang Y J, Wang J, et al. The technical research of extracting ground fissure information in mining area with the UAV image. *Met Mine*, 2012(10): 90
(魏长婧, 汪云甲, 王坚, 等. 无人机影像提取矿区地裂缝信息技术研究. 金属矿山, 2012(10): 90)
- [40] Yang C, Su Z A, Ma J, et al. Method of soil erosion rate estimation on mineland dump slope based on unmanned aerial vehicle image. *Bull Soil Water Conserv*, 2016, 36(6): 126
(杨超, 苏正安, 马菁, 等. 基于无人机影像快速估算矿山排土场

- 边坡土壤侵蚀速率的方法. 水土保持通报, 2016, 36(6): 126)
- [41] Zhao X T, Hu K, Lu X P, et al. Precise detection method for mine geological disasters using low-altitude photogrammetry based on unmanned aerial vehicle. *Sci Surv Mapp*, 2014, 39(6): 49
(赵星涛, 胡奎, 卢晓攀, 等. 无人机低空航拍的矿山地质灾害精细探测方法. 测绘科学, 2014, 39(6): 49)
- [42] D'Oleire-Oltmanns S, Marzolf I, Peter K D, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in morocco. *Remote Sens*, 2012, 4(11): 3390
- [43] He Y R, Chen J Z, Lin Q, et al. Applications in the mining ecological restoration based on aerial imaging and point cloud data. *J Cent South Univ Forest Technol*, 2017, 37(4): 79
(何原荣, 陈鉴知, 林泉, 等. 航拍影像与点云数据在矿区生态修复中的应用. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 79)
- [44] Hassan-Esfahani L, Torres-Rua A, Jensen A, et al. Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks. *Remote Sens*, 2015, 7(3): 2627
- [45] Tofani V, Segoni S, Agostini A, et al. Use of remote sensing for landslide studies in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2013, 13(2): 299
- [46] Casagli N, Frodella W, Morelli S, et al. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenviron Disast*, 2017, 4(1): 9
- [47] Rossi G, Tanteri L, Tofani V, et al. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*, 2018, 15(5): 1045
- [48] Balek J, Blahůt J. A critical evaluation of the use of an inexpensive camera mounted on a recreational unmanned aerial vehicle as a tool for landslide research. *Landslides*, 2017, 14(3): 1217
- [49] Mateos R M, Azanon J M, Roldan F J, et al. The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, 2017, 14(2): 743
- [50] Turner D, Lucieer A, De Jong S M. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sens*, 2015, 7(2): 1736
- [51] Peternel T, Kumelj Š, Oštir K, et al. Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides*, 2017, 14(1): 395
- [52] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Eng Geol*, 2012, 128: 2
- [53] Giordan D, Manconi A, Tannant D D, et al. UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides // 2015 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Milan, 2015: 5344
- [54] Tang Y, Wang L J, Ma G C, et al. Disaster monitoring and application prospect analysis of the Jinsha River landslide based on “Gaofen+”. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2019, 44(7): 1082
(唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 基于“高分+”的金沙江滑坡灾情监测与应用前景分析. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(7): 1082)
- [55] Ye W L, Su X, Wei W H, et al. Application of UAV aerial photograph system in emergency rescue and relief for landslide. *Bull Surv Mapp*, 2017(9): 70
(叶伟林, 宿星, 魏万鸿, 等. 无人机航测系统在滑坡应急中的应用. 测绘通报, 2017(9): 70)
- [56] Li W L, Zhu J, Zhu X L, et al. An exploratory analysis method of VR scene in landslide based on UAV remote sensing data. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2019, 44(7): 1065
(李维炼, 朱军, 朱秀丽, 等. 无人机遥感数据支持下滑坡VR场景探索分析方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(7): 1065)
- [57] Jia S G, Jin A B, Zhao Y Q. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope. *Rock Soil Mech*, 2018, 39(3): 1130
(贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用. 岩土力学, 2018, 39(3): 1130)
- [58] McLeod T, Samson C, Labrie M, et al. Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine. *Geomatica*, 2013, 67(3): 173
- [59] Wang D, Zou Y, Zhang G Z, et al. Application of photographic technique by unmanned aerial vehicle to dangerous rock exploration. *J Chengdu Univ Technol Sci Technol Ed*, 2018, 45(6): 754
(王栋, 邹杨, 张广泽, 等. 无人机技术在超高位危岩勘查中的应用. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2018, 45(6): 754)
- [60] Liang X, Fan W, Su Y J, et al. Study on early identification technology of concealed geological hazards in vanadium mining area of Qinling. *J Catastrophol*, 2019, 34(1): 208
(梁鑫, 范文, 苏艳军, 等. 秦岭钒矿集中开采区隐蔽性地质灾害早期识别研究. 灾害学, 2019, 34(1): 208)
- [61] Lee S, Choi Y. Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosyst Eng*, 2016, 19(4): 197
- [62] Coops N C, Goodbody T R H, Cao L. Four steps to extend drone use in research. *Nature*, 2019, 572(7770): 433
- [63] UAV Coach. Master list of drone laws (organized by state & country) [EB/OL]. (2019-08-21) [2019-09-04]. <https://uavcoach.com/drone-laws/>
- [64] Sanz-Ablanedo E, Chandler J H, Rodríguez-Pérez J R, et al. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sens*, 2018, 10(10): 1606
- [65] Beretta F, Shibata H, Cordova R, et al. Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining. *REM-Int Eng J*, 2018, 71: 463