

Application of UAV Aerial Survey Technology in Rapid Monitoring of Ground Fissures in Mining Areas

Xiang An^{1,2}

1. China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

2. Xi'an CCTEG Transparent Geology Technology Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710077, China

Abstract

The issue of ground fissures caused by coal mining not only poses a significant threat to the ecological environment of the mining area, but also requires time-consuming and labor-intensive manual monitoring of ground fissures at high frequencies. This paper takes Qipanjiang Coal Mine (East Area) as the specific research object. Based on drone aerial survey technology, it quickly acquires the Digital Orthophoto Map (DOM) of the mining area's surface. Using visual interpretation, ground fissures in the mining area are vectorized in ArcGIS software, and their specific information is compiled into a ledger. The results indicate that drone aerial surveys enable rapid monitoring of ground fissures in the mining area, significantly enhancing the efficiency and effectiveness of mine monitoring work.

Keywords

Ground Fissures Monitoring, UAV Aerial Survey, Qipanjiang Coal Mine (East Area)

无人机航测技术在矿区地裂缝快速监测中的应用

安祥^{1,2}

1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 中国·陕西 西安 710077

2. 西安煤科透明地质科技有限公司, 中国·陕西 西安 710077

摘要

【目的】煤炭开采引发的地裂缝问题, 不仅对矿区的生态环境造成巨大威胁, 同时人工高频次监测地裂缝耗时耗力, 快速监测开采塌陷区地裂缝并提取其信息为煤矿安全开采提供数据支撑。【方法】本文以棋盘井煤矿(东区)开采地表塌陷区为具体研究对象, 基于无人机航测技术快速获取塌陷区正射影像DOM, 采用目视解译在ArcGIS软件中矢量化塌陷区地裂缝, 统计其具体信息形成监测台账。【结论】结果表明, 利用无人机航测可实现开采塌陷区地裂缝快速监测, 极大提高了矿山地裂缝监测工作的效率和效果。

关键词

地裂缝监测; 无人机航测; 棋盘井煤矿(东区)

1 引言

最近一次国民经济和社会发展统计公报显示我国煤炭年消费量占能源年消费总量的 53.2%, 煤炭依旧是我国第一大传统能源^[1]。目前, 煤炭不仅在能源供给上发挥着不可替代的作用, 更在工业生产、民用取暖等众多领域起核心支撑作用。内蒙古自治区作为我国重要的煤炭生产基地, 浅埋煤层大规模开采引发的生态失衡问题日益凸显, 主要表现为地表承载能力减弱及次生地质灾害频发, 其中大范围地表裂缝现象尤为突出, 已成为制约煤炭绿色安全开采、区域生态保护的关键因素。目前针对塌陷区地裂缝的监测主要依赖人工地面勘察, 采用手持式 GPS/GNSS 设备进行现场坐标采集, 结合后

期数据处理生成裂缝分布图^[2]。然而由于矿区地裂缝具有分布密集、形态复杂的特征, 传统人工测量方式存在作业效率低、数据更新滞后等问题, 难以满足现阶段矿区灾害监测的时效性和精准性需求^[3]。

当前, 无人机技术发展已进入全新阶段, 其硬件系统与智能算法的协同创新显著增强了飞行平台的安全性能及影像采集精度^[4]。相比于传统测量以及卫星遥感, 无人机作为新型空间信息获取装备, 凭借高度灵活性、快速部署特性、运维经济性以及多场景兼容优势, 已在国土测绘、应急救援、生态保护等数十个领域实现规模化应用^[5]。特别是在矿山监测方向, 依托无人机航测构建的快速高精度数字正射影像获取体系, 为矿区地表塌陷区地裂缝的快速监测提供了全天候、高精度的技术支撑, 极大提高了矿山监测工作的效率和效果^[6]。

本文以焦化公司蒙西棋盘井煤矿(东区)开采塌陷重点监测区域为具体研究对象, 基于无人机航测技术快速获取

【作者简介】安祥(1994-), 男, 中国陕西咸阳人, 硕士, 实习研究员, 从事煤矿透明地质研究。

塌陷区正射影像 DOM, 采用目视解译法在 ArcGIS 软件中矢量化矿区地裂缝, 统计其具体信息形成监测台账, 以期为地裂缝快速监测提供技术指导。

2 研究区概况

棋盘井煤矿东区位于桌子山煤田东南缘。区域地貌以高原侵蚀性丘陵为主, 整体呈现东北向西南渐降的地势特征, 受干旱气候影响形成典型的荒漠-半荒漠生态系统, 地表植被覆盖率较低, 走向长壁后退式综采工艺通过大采高、快速推进实现高产, 但顶板垮落形成的悬臂结构易引发覆岩大规模断裂, 其产生的“三带”发育(冒落带、裂隙带、弯曲带)直接传导至地表, 形成地裂缝群。此类裂缝具有延展性强、周期性活化的特点, 致使地表监测与修复工程防治成本较高; 同时, 井田地表内分布着多家牧民房屋, 这些地裂缝的存在不仅给煤矿安全开采带来隐患, 任其发展也会对牧区生态环境及牧民财产生命安全带来隐患。

3 无人机航测技术

3.1 技术简介

无人机摄影测量技术基于多角度影像数据采集与三维重建原理, 通过搭载高分辨率倾斜相机以垂直与倾斜(15° - 45°)多视角获取地表影像, 结合 POS 系统(GNSS/IMU)记录的定位姿态数据, 利用多视影像联合平差、空中三角测量和密集匹配算法, 提取地物特征点生成高密度三维点云, 经三角网构建与真实纹理映射形成厘米级精度的实景三维模型, 同步通过地面像控点校正和差分 GPS(RTK/PPK)技术消除系统误差, 最终实现大范围地理空间信息的高效、精准数字化重构。技术体系由飞行平台、任务设备、数据处理软件三部分组成^[7-8]。

3.2 系统组成

3.2.1 飞行平台

无人机飞行平台作为现代智能航空器的核心载体, 其体系化架构主要由五大技术模块构成: 承载平台模块、动力驱动模块、空间定位模块、飞行控制模块及数据链系统^[9]。各子系统通过精密协同构成完整的空中作业体系, 为多样化应用场景提供可靠的技术支撑。

在硬件架构层面, 飞行平台主体采用航空级复合材料构建的无人机机体, 依据空气动力学原理形成多模态构型设计: 固定翼构型凭借大展弦比机翼实现高速巡航, 适用于长距离测绘任务; 多旋翼构型通过差速矢量推进达成六自由度精准悬停, 适配精细化巡检需求; 垂直起降型融合固定翼与旋翼优势, 兼具高效航程与垂直起降能力; 单旋翼构型则继承直升机传动系统特性, 具备大载荷运输潜力。

动力驱动系统采用永磁无刷电机与定制翼型螺旋桨的组合方案, 匹配高能量密度锂聚合物电池组, 通过矢量推力分配算法实现动态功率管理。

空间定位系统采用多模卫星导航增强技术, 集成双频

RTK(实时动态定位)与 PPK(后处理动态定位)双冗余定位模块。通过接收北斗/GPS/GLONASS 多星系信号, 配合地面基准站差分校正, 在复杂电磁环境中仍可维持厘米级定位精度。

作为技术中枢的飞行控制系统, 采用异构双处理器架构, 运行自适应控制算法与故障诊断程序。通过融合多源传感器数据流(包括三轴陀螺仪、气压计、超声波/TOF 模组), 构建闭环 PID 控制体系, 实现 0.05° 的姿态角控制精度。

数据链系统构建天地一体化通信网络, 采用 2.4GHz/5.8GHz 双频段跳频技术确保控制指令可靠传输。所有通信信道均采用加密协议, 通过频域扩频技术有效抑制电磁干扰。

3.2.2 任务设备

现代飞行平台作为多任务遥感监测的重要载体, 其模块化设计可灵活适配多种专业级传感器系统。根据不同的作业需求, 平台可搭载正射测绘镜头获取厘米级精度的二维正射影像, 满足大比例尺地形图测绘需求; 配置五镜头倾斜摄影系统构建具有真实纹理的三维实景模型^[10]; 集成多光谱传感器可捕捉可见光与近红外波段数据, 为农业估产、植被长势分析提供定量化依据^[11]; 搭载激光雷达(LiDAR)设备通过发射脉冲激光获取高密度点云数据, 实现森林资源普查、电力线巡检等地物三维重建^[12]; 红外热成像设备则可突破可见光限制实现夜间监控、设备热源检测及建筑节能评估^[13]。这种灵活适配性为智慧城市、自然资源管理等领域提供全要素、全天候的地理信息数据支撑。

针对矿区地表塌陷区裂缝快速监测任务的核心需求, 结合作业效率与覆盖可快速生成满足裂缝识别要求的正射影像图, 避免倾斜摄影三维建模所需的复杂数据处理流程。该方案兼顾了航摄效率与成果精度, 符合矿区快速响应监测的时效性需求。

3.2.3 数据处理软件

无人机航测数据处理平台是针对航拍遥感影像、激光雷达(LiDAR)等多源传感器信息进行智能化解析的行业级解决方案。其功能覆盖从数据预处理、空中三角测量计算到高精度点云构建、正射影像图(DOM)生成、数字地表模型(DSM)重建及全要素三维实景建模全流程。

4 矿区塌陷区地裂缝快速监测技术流程

4.1 前期准备

外业航飞前期准备包括测区资料收集、踏勘、像控点布设及航线规划。首先开展测区资料收集, 包括井田开采边界坐标、历史地裂缝分布图; 其次实施现场踏勘评估, 在选定硬化场地(道路/广场类)作为起降点时, 需确保半径 50 米净空区无遮挡, 像控点布设主要是利用已有标志或自行制作的标志作为已知点, 而现代高精度航测可依托 PPK/RTK 技术实现影像 POS 数据厘米级定位, 除大比例尺测绘或变形监测等特殊场景外, 常规任务可省略物理像控点

布设;航线规划是利用已有软件规划作业航线,依据GSD公式($H=f \times \text{GSD}/a$)设定航高,配置航向60%-80%、旁向20%-30%的重叠率以满足监测任务需求,同时结合飞行速度与快门响应周期优化曝光时序,最终生成兼容主流无人机的.kml/.shp三维航线文件。

4.2 外业航飞

根据航拍作业规范,在天气状况良好且符合空域管理要求时,优先选取正午前后(11:30-13:30)实施拍摄。此时太阳高度角较大,可有效抑制建筑物和植被产生的投影,确保影像图面清晰度和测绘精度达标。

4.3 正射影像生成

本次数据处理选用无人机厂商配套的数据处理软件,具体流程是导入照片、导入坐标文件、空中三角测量、生成密集点云、正射影像生成。空中三角测量是航空摄影测量的核心,通过航摄仪器连续获取的具有60%-80%航向重叠度和20%-30%旁向重叠度的立体像对,结合像片间的几何约束关系,构建起可量测的三维空间模型。其技术本质在于运用共线方程、相对定向、绝对定向等摄影测量原理,将离散的二维影像坐标转化为具有地理参考的三维空间坐标系统。随着数字摄影测量的发展,现代空中三角测量已实现全自动化处理。最终结果如图1所示。

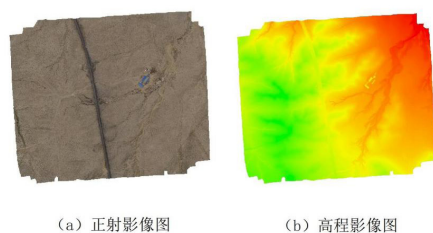


图1 塌陷区正射影像图及高程影像图

4.4 目视解译提取

目视解译提取是矿区塌陷区地裂缝快速监测的最后一步,基于ArcGIS平台导入高精度正射影像数据,新建线状矢量图层,对地裂缝进行人工矢量化勾绘,最终完成矿区塌陷区地裂缝的快速监测与信息统计分析。本次快速监测共计发现地裂缝28条,裂缝呈环形密集发育,裂缝宽度10mm至100mm,长度12m至60m,提取结果如图2所示。

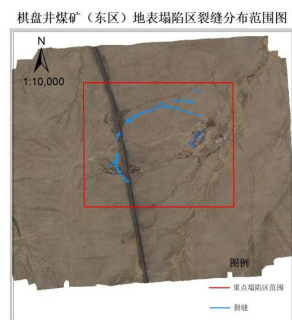


图2 地裂缝提取结果

5 结语

随着矿产资源开发规模不断扩大,矿区地表塌陷区裂缝监测已成为保障矿山安全生产和生态修复的重要技术环节。传统人工实地调查方式存在作业周期长、数据连续性差、高危区域难以覆盖等固有缺陷,尤其在复杂地形和采空区密集区域,测量人员面临较大安全隐患。无人机航测技术通过搭载正射镜头等设备,可快速获取厘米级分辨率正射影像数据,配合Pix4D、ContextCapture等建模软件,能精准构建矿区数字地表模型(DSM)和数字高程模型(DEM),目视解译技术结合ArcGIS、ENVI等地理信息系统平台,通过人机交互方式完成裂缝矢量化提取,较传统方法效率提升较多,且能生成包含裂缝走向、密度、延伸长度的结构化数据库,实现地表裂缝空间形态的定量化表达。与此同时,图像识别与AI大模型技术日渐成熟,提取算法多种多样,后续可将人工智能算法应用到地裂缝识别提取中,进一步提高生产力。

参考文献

- [1] 国家统计局.中华人民共和国2024年国民经济和社会发展统计公报sup[1]/sup[N].人民日报,2025-03-01(005).DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2025.002534.
- [2] 杨坤.利用无人机摄影测量监测西部煤矿区地表移动与地裂缝[D].中国矿业大学(北京),2022.DOI:10.27624/d.cnki.gzkb.2022.000226.
- [3] 侯恩科,慕佳欣,谢晓深,等.浅埋煤层开采地表裂缝发育规律及形成演化机理[J].煤田地质与勘探,2025,53(02):107-117.
- [4] 杨国东,王民水.倾斜摄影测量技术应用及展望[J].测绘与空间地理信息,2016,39(01):13-15+18.
- [5] 周勇兵.无人机倾斜摄影测量技术在矿山监测中的应用[J].河南科技,2022,41(23):18-22.DOI:10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2022.23.003.
- [6] 张艳秋,李艳芳.无人机倾斜摄影测量技术在光伏电站勘察中的应用[J].河南科技,2021,40(23):36-39.
- [7] 张继贤,刘飞,王坚.轻小型无人机测绘遥感系统研究进展[J].遥感学报,2021,25(03):708-724.
- [8] 洪宇,龚建华,胡社荣,等.无人机遥感影像获取及后续处理探讨[J].遥感技术与应用,2008,(04):462-466+361.
- [9] 杨瑞奇,孙健,张勇.基于无人机数字航摄系统的快速测绘[J].遥感信息,2010,(03):108-111.
- [10] 王柯,付怡然,彭向阳,等.无人机低空遥感技术进展及典型行业应用综述[J].测绘通报,2017,(S1):79-83.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0621.
- [11] 孙刚,黄文江,陈鹏飞,等.轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J].农业机械学报,2018,49(03):1-17.
- [12] 刘清旺,李世明,李增元,等.无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展[J].林业科学,2017,53(07):134-148.
- [13] 何诚,刘柯珍,舒立福,等.基于红外热成像的林地余火死灰复燃点诊断方法研究(英文)[J].光谱学与光谱分析,2018,38(01):326-332.