



# 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展

张俊阳 王昆 赵同彬 房平 齐宽 魏博为 李政岳

## 引用本文：

张俊阳, 王昆, 赵同彬, 等. 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 435–444.

ZHANG Junyang, WANG Kun, ZHAO Tongbin. Status and development of UAV remote sensing technology in mining surface subsidence and fracture measuring[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 435–444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0438>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究

Research on characteristics of mining-induced surface cracks based on UAV images

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/196bf575-a03b-4f18-bf95-3823bf17a3cb>

#### 基于无人机影像的西部矿区地表沉陷信息提取方法改进

Improvement of surface subsidence information extraction method based on UAV image modeling in Western Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 334–342 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1381>

#### 无人机遥感支持下的煤矸石山自然监测与预警

Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 412–421 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1901>

#### 西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望

Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 9–26 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1113>

#### 煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究

Research on extraction method of ground fissures caused by mining through UAV image in coal mine areas

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 187–196 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1204>

#### 基于无人机遥感的煤矸石山植被分类

Classification of coal gangue pile vegetation based on UAV remote sensing

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 245–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0899>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 碳中和科学与工程



张俊阳, 王昆, 赵同彬, 等. 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 435–444.

ZHANG Junyang, WANG Kun, ZHAO Tongbin, et al. Status and development of UAV remote sensing technology in mining surface subsidence and fracture measuring[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 435–444.

移动扫码阅读

# 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展

张俊阳<sup>1</sup>, 王昆<sup>1</sup>, 赵同彬<sup>1</sup>, 房平<sup>2</sup>, 齐宽<sup>3</sup>, 魏博为<sup>1</sup>, 李政岳<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东青岛 266590; 2. 北京昊华能源股份有限公司, 北京 102300;

3. 中煤地生态环境科技有限公司, 北京 100067)

**摘要:** 地下煤炭资源开发利用引发矿区地表沉陷与裂缝, 不利于矿区生态环境保护和能源矿产持续稳定供应, 对于矿区地表沉陷与裂缝的全面高效观测可提升采动地表损害认知水准、科学防治次生灾害。当前主流观测方法如地面测点人工施测、卫星遥感等存在人工作业强度高、造价昂贵、采集数据效率低等问题, 卫星 InSAR 受波长限制难以获取大尺度变形。无人机遥感技术作为一种新兴地理信息获取方法, 具备机动灵活、高效、可重复、全面覆盖等优势, 在矿区地表沉陷与裂缝观测领域备受瞩目。系统梳理该领域国内外文献, 分析前沿进展与发展态势, 以促进矿山无人机遥感的技术革新与创新应用。首先, 简要介绍无人机遥感技术要点及观测矿区地表沉陷与裂缝技术流程, 无人机搭载可见光相机、激光雷达、红外热成像相机等传感器, 生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)等遥感成果; 在地表沉陷观测方面, 分别列举文献案例分析沉陷区域地形获取、差分 DEM 沉陷模型及沉陷参数求取、水平位移观测 3 个方向的研究进展、技术难点与展望; 在地表裂缝观测方面, 介绍图像处理法、机器学习法与红外热成像观测识别裂缝的研究进展与问题; 最终, 从无人机遥感技术沉陷观测优势、裂缝背景噪声、裂缝预测及识别准确率、数据处理速度等方面展望未来发展方向。研究结果表明: ① 无人机遥感技术可胜任矿区地表地形获取与沉陷观测, 与 InSAR 等数据融合可提高沉陷参数求取精度; ② 图像处理法、机器学习法等处理无人机遥感 DOM 可实现地表裂缝智能识别, 深度学习被研究用于排除环境干扰、提高裂缝识别准确率; ③ 地表水平位移与沉陷规律研究、裂缝识别率提高及其分布预测、航测数据的快速与自动化处理、多源遥感数据融合是该领域技术应用与研究的主要发展方向。无人机遥感技术在矿区地表沉陷与裂缝观测领域具有广阔前景, 可从技术层面驱动矿山绿色、智能化发展转型。

**关键词:** 无人机; 遥感; 煤炭开采; 地表沉陷; 裂缝识别

中图分类号: TD171 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)S2-0435-10

## Status and development of UAV remote sensing technology in mining surface subsidence and fracture measuring

ZHANG Junyang<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, ZHAO Tongbin<sup>1</sup>, FANG Ping<sup>2</sup>, QI Kuan<sup>3</sup>, WEI Bowei<sup>1</sup>, LI Zhengyue<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Beijing Haohua Energy Resource Co., Ltd., Beijing 102300, China; 3. CNACG Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100067, China)

**Abstract:** The development and utilization of underground coal resources can cause the mining area surface subsidence and fractures and other hazards, which is not conducive to the protection of ecological environment and the sustainable and stable supply of energy and minerals in mining areas. Comprehensive and efficient measuring of surface subsidence and fractures in mining areas can improve the awareness level of mining damage and scientifically prevent secondary disasters. At present, the mainstream measure methods, such as manual

收稿日期: 2024-09-20 责任编辑: 常琛 DOI: 10.12438/cst.2023-0438

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2024ME144, ZR2020QE101); 国家自然科学基金资助项目(52104138)

作者简介: 张俊阳(1998—), 男, 河南禹州人, 硕士研究生。E-mail: jy়zhang@sdust.edu.cn

通讯作者: 王昆(1991—), 男, 河南获嘉人, 副教授, 博士, 硕士生导师。E-mail: kwang@sdust.edu.cn

measure of ground observation points and satellite remote sensing, have problems such as high operation intensity and expensive cost, and InSAR is difficult to obtain large-scale deformation due to wavelength limitation. As a new method of geographic information acquisition, Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing (UAVRS) technology has the advantages of flexibility, efficiency, accuracy, repeatability, and comprehensive coverage, and has become a research hotspot in mining area surface subsidence and fractures measuring. Systematic review of domestic and abroad literatures and analysis of frontier progress and development trend are conducive to technological innovation and application in this field. Firstly, the main points of UAVRS and the technical process of measuring surface subsidence and fractures in mining areas are introduced briefly. The UAV is equipped with visible light camera, LiDAR, infrared thermal imaging camera and other sensors, generate remote sensing results such as Digital Elevation Model (DEM) and Digital Orthophoto Map (DOM); Then, in terms of surface subsidence measuring, the research progress, technical difficulties and prospects of terrain acquisition, differential DEM subsidence model, subsidence parameters acquisition and horizontal displacement measuring are analyzed by citing literature cases. In the field of surface fractures measuring, the research progress and problems of image processing, machine learning and infrared thermal imaging are introduced. Finally, the future development direction is forecasted from the advantages of UAVRS technology in subsidence measuring, fractures background noise, fractures prediction and identification accuracy, and data processing speed. Research shows that: (1) UAVRS technology is competent for surface topography acquisition and subsidence measuring in mining areas, and fusion with InSAR data can improve the measuring accuracy of subsidence parameters; (2) Based on DEM acquired by UAVRS, image processing and machine learning methods can realize intelligent recognition of surface fractures, and deep learning is studied to eliminate environmental interference and improve the accuracy of fractures recognition; (3) The research of surface horizontal displacement and subsidence law, the improvement of fracture identification rate and its distribution prediction, the rapid and automatic processing of aerial survey data, and the fusion of multi-source remote sensing data are the main development directions of technology application and research in this field. UAVRS technology has broad prospects in the field of mining surface subsidence and fractures measuring, can drive the transformation of green and intelligent development of mines from the technical level.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; remote sensing; coal mining; surface subsidence; fracture detection

## 0 引言

作为煤炭生产消费大国,未来很长一段时间内煤炭仍将在我国能源结构中占据主体地位。2021年我国能源生产结构煤炭占比67%,其中一次能源消费占比56%<sup>[1]</sup>。煤炭井工开采造成采空区上层顶板断裂,原地质结构改变,引发地表沉陷。同时,地表不均匀沉陷产生地裂缝,是矿区最常见、最直观的地表破坏表现形式之一。地表沉陷与裂缝严重影响地面建筑物、土地生产能力、生产生活设施安全与社区和谐稳定,丘陵山区裂缝易因雨水冲刷作用导致坡体失稳、滑坡、泥石流等地质灾害。上述问题正在严重危害矿区生态环境保护与能源矿产持续稳定供应,难以满足经济社会高质量发展需求。矿区地表沉陷与裂缝产生影响因素复杂,对其开展全面、高效、高质量的观测是揭示致灾机理、实施合理防治措施的前提。

当前矿区地表沉陷和裂缝观测多借助人工布置测点、测线并携带专业仪器如全站仪、实时动态测量技术(Real-Time Kinematic,RTK)流动站等赴现场周期观测的方式,测点布设与采集工作量大且标志物易丢失<sup>[2]</sup>;自动化定点观测方法虽然能够达到高精度、自动化的要求,但仍是以点为单位测量,存在成本高、数据维度低等缺点,难以反映矿区地表整体沉陷情

况。国内外学者研究提出基于地面三维激光扫描和干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术的矿区地表沉陷观测方法,前者在理想情况下能获取毫米级精度数据<sup>[3]</sup>,但其设备价格昂贵且通常不能一站式测量,对于地形复杂的矿区地表适用性不强;而后者虽具有获取高精度地表微小变形、连续空间覆盖以及避免人工现场作业的优势,但也存在时空失相干、大气影响以及可观测最大变形量受其波长限制等问题<sup>[4]</sup>。21世纪以来,无人机遥感技术装备飞速革新,已成熟应用于地理测绘、电力巡检、农林植保、地灾防治等领域,成为推动传统行业进步转型的强劲技术动力。无人机遥感技术矿业领域应用亦逐步受到国内外研究者重视<sup>[5]</sup>,但同时因数据精度、技术门槛等问题饱受诟病。本文调研国内外最新文献,梳理无人机遥感技术在矿区沉陷和裂缝观测领域应用案例与研究进展,为技术推广应用与发展提供参考。

## 1 无人机遥感技术

无人机是以动力系统和导航系统为基础的无人驾驶航空器,由预编程序或在一定距离范围内使用遥控设备控制飞行<sup>[6]</sup>。无人机搭载传感器获取遥感数据即无人机遥感技术可实现空间信息快速获取,与卫星遥感技术相比具有机动灵活、高效、可重复、

全面覆盖等优势,被认为是应对乡村、矿区等偏远地区遥感数据短缺的有效解决方案<sup>[7]</sup>。LEE等<sup>[8]</sup>、王昆等<sup>[9]</sup>总结无人机遥感技术在露天矿生产管理、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,认为该技术

在矿业领域应用前景广阔。

无人机遥感技术为开采沉陷和裂缝观测提供数据支持,如图1所示,搭载传感器包括可见光相机、激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)以及红外热成像相机等。

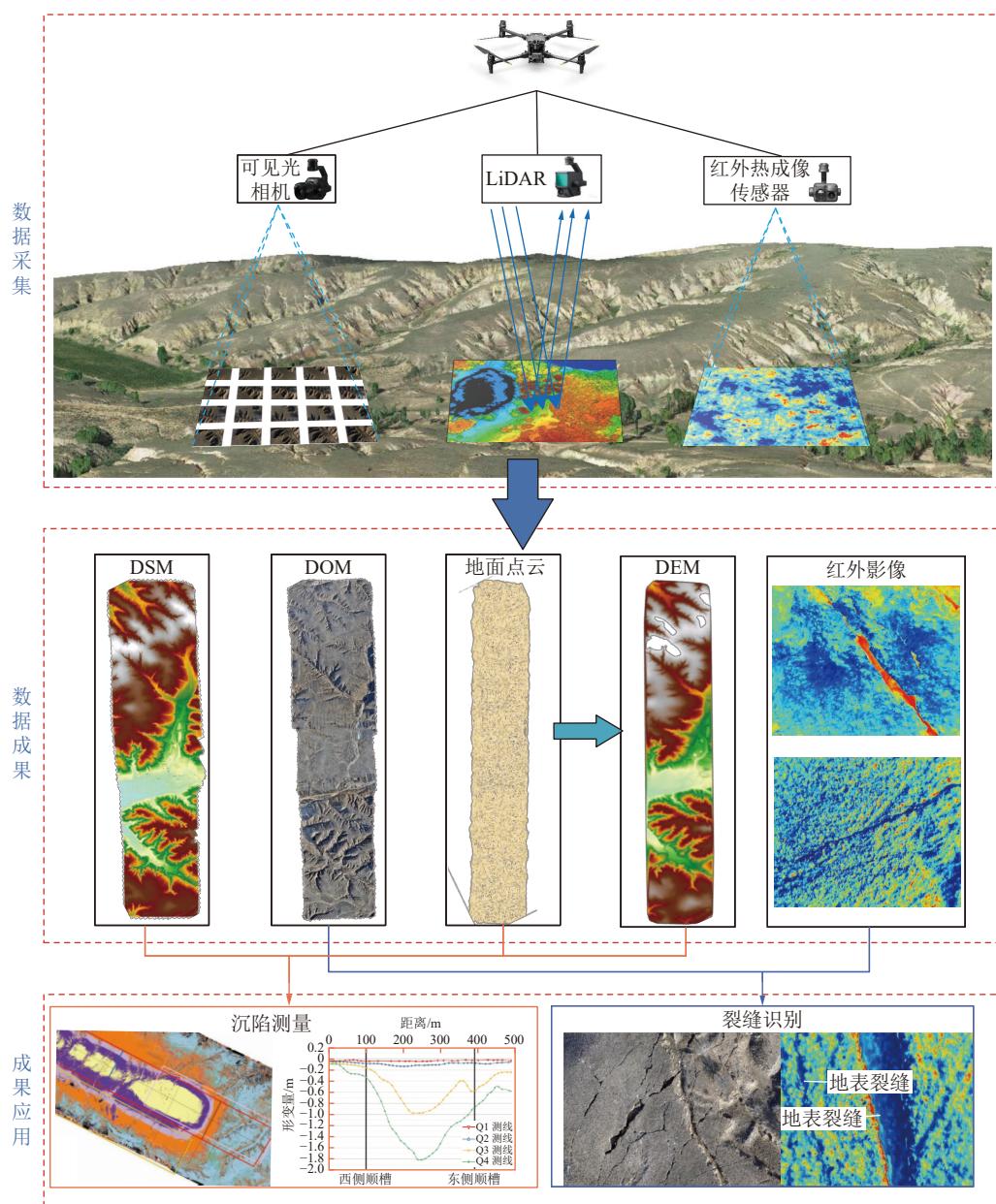


图1 无人机遥感技术矿区地表沉陷与裂缝观测技术流程

Fig.1 Technical flow of surface subsidence and fracture measurement in mining area using UAV remote sensing technology

无人机搭载可见光相机通过设置合适的飞行高度、重叠率等参数后在待测区域上空按照规定航线飞行并采集照片,同时记录拍照瞬间相机的空间位置及姿态,借助摄影测量软件后处理生成数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)和数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)等成果。DSM是包含地表附着物高程及平面坐标的模型,可用于观测

无建筑物且植被稀疏区域地表沉陷;DOM为数字化遥感影像,兼具地物平面坐标和影像特征,可用于裂缝识别。

无人机搭载LiDAR通过向地表发射波束并接收其回波,采集高密度点云数据。在沉陷观测中,利用机载LiDAR传感器获取区域点云,通过点云滤波算法获取地面点云,可用于生成数字高程模型(Digit-

al Elevation Model, DEM), 其包含地面平面坐标及高程, 描述地貌形态的空间分布, 在植被茂密区域, 机载 LiDAR 获取 DEM 数据成果可提升地表沉陷观测精度。

红外波段的波长大于可见光, 其穿透性也较强, 其中  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的热红外波段常用于探测地物的发射率及温度。由于裂缝内部温度受地层温度影响, 与地表周围环境温度存在明显差异, 故可被红外热成像相机探测, 与无人机结合可以克服地形等限制, 灵活观测裂缝。如 BAROÑ 等<sup>[10]</sup> 利用机载红外热成像探测边坡和悬崖裂隙, 证明该方法可快速获取裂隙分布。

## 2 矿区地表沉陷无人机遥感观测

### 2.1 沉陷区域地形获取

获取精度满足要求的沉陷区域地形数据是沉陷研究的前提。SUH 等<sup>[11]</sup> 使用无人机遥感技术观测开采沉陷坑, 得到精度  $14 \text{ cm}$  的地形模型, 证明该技术可初步满足沉陷区域地形测量需求; 随着无人机遥感硬件以及数据处理算法的改进, 其观测精度也有提高, IGNJATOVIĆ STUPAR 等<sup>[12]</sup>、TAN 等<sup>[13]</sup> 分别将开采沉陷区无人机遥感观测结果与全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)及水准观测结果对比, 指出该技术在沉陷区域地形采集精度达到厘米级; 若沉陷区域存在茂密植被, 会对无人机数据采集造成干扰, 田帅帅等<sup>[14]</sup> 为解决该问题, 从地形特征出发, 提出基于断面式点云滤波和 DEM 模型修正的沉陷区 DEM 构建方法, 实现高精度 DEM 快速获取。

### 2.2 地表沉陷观测及参数求取

利用无人机遥感技术观测开采沉陷的常规思路

是对多期地形数据做差处理得到沉陷盆地, 该方法被称为差分数字高程模型(DEM of Difference, DoD)<sup>[15]</sup>, 如图 2 所示。高精度 DEM 是 DoD 方法的关键, LI-AN 等<sup>[16]</sup> 通过对比分析发现自适应不规则三角网滤波算法获取地面点效果最好, 并利用该算法得到某采空区地面点云, 生成 DEM, 通过 DoD 方法得到精度为  $16 \text{ cm}$  的下沉盆地; 张永庭等<sup>[17]</sup> 利用无人机机载 LiDAR 生成采空区地表 DEM, 通过 DoD 方法得到精度为  $4.3 \text{ cm}$  的下沉盆地。当地表无高大建筑物和植被时, DEM 也可以用 DSM 替代<sup>[18]</sup>, 汤伏全等<sup>[19]</sup> 直接对两期 DSM 叠加得到沉陷模型, 并利用可见光植被指数获取植被覆盖区域来消除植被影响, 使沉陷模型精度从  $15.3 \text{ cm}$  提高到  $7.1 \text{ cm}$ , 又通过统计非沉陷区误差分布特征减小沉陷模型系统误差, 使沉陷模型精度达到  $4.1 \text{ cm}$ , 该研究思路为构建高精度沉陷模型提供参考。

矿区地表沉陷观测中, 沉陷参数的求取也备受关注, 其准确性直接影响沉陷预测结果, 对煤矿生产建设规划具有重要意义。常用的沉陷参数有下沉系数和主要影响角正切。下沉系数指充分采动情况下, 地表最大下沉值与煤层采厚的比值; 主要影响角正切指沉陷主要影响半径与开采深度的比值。因此求取精确的最大下沉值和影响半径是参数求取的关键。

受限于测点密度, 传统点位沉陷观测方法不利于捕获最大下沉值点, 而无人机遥感观测沉陷是以面为单位观测, 能够得到整个区域的下沉值, 有利于最大下沉值的获取, 进而计算精确的下沉系数。高银贵等<sup>[20]</sup> 用 DoD 法得到沉陷盆地, 通过概率积分法求沉陷预计参数并与水准测量求参结果比较, 得出下沉系数的相对误差仅为  $1.4\%$ , 但主要影响角正切的相对误差较大, 为  $20\%$ , 这是由于无人机遥感精度

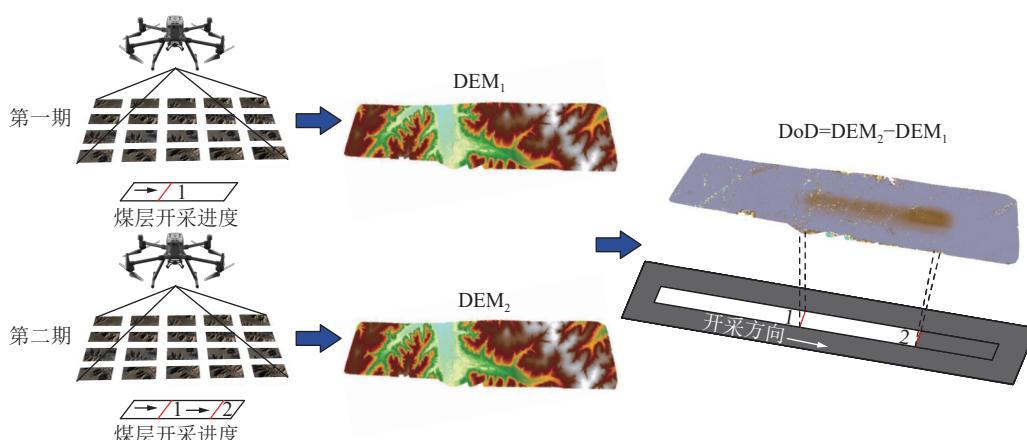


图 2 无人机遥感沉陷观测 DoD 方法

Fig.2 The DoD mining subsidence surveying method using UAV remote sensing

还不满足沉陷盆地边缘获取需求，不利于主要影响角等关键参数的求取。

为研究观测精度对沉陷预计参数反演的影响，ZHOU 等<sup>[21]</sup>通过 DoD 法得到地表沉陷模型，拟合动态反演得到沉陷预计参数，并通过模拟分析发现当误差小于最大沉陷值的 7% 时，反演的沉陷预计参数可靠。为提升沉陷区域边缘获取精度，ZHOU 等<sup>[22]</sup>融合无人机遥感与 InSAR 技术，用 InSAR 观测沉陷盆地边缘小变形区域，用无人机遥感观测大变形区域，得到沉陷盆地并动态反演沉陷预计参数，求取主要影响角正切相对误差仅为 5%<sup>[23]</sup>。WANG 等<sup>[24]</sup>、胡东升等<sup>[25]</sup>、ZHANG 等<sup>[26]</sup>同样将无人机遥感数据与 InSAR 数据融合，实现高精度沉陷观测。

无人机遥感技术结合 DoD 方法能够实现地表沉陷观测，可通过消除植被影响提高精度；作为沉陷观测的重要方面，沉陷参数也能够通过无人机遥感技术求取，但对于沉陷盆地边缘等小变形区域，该技术精度还达不到观测要求，故主要影响角正切等参数求取精度不高，但与 InSAR 等数据融合能提高精度，弥补短板。

### 2.3 地表水平位移观测

地下开采造成的地表变形是三维的，包括垂直沉陷和水平位移，且水平位移不容忽视，相比于垂直沉陷，其对地表建筑物的威胁更大<sup>[27]</sup>，易造成地表裂缝引发滑坡等地质灾害。当前观测矿区水平位移主要通过地表测点完成，本文借鉴冰川运动、滑坡、泥石流等领域无人机遥感技术应用案例，为该技术在矿区地表水平位移观测应用提供参考。

符茵等<sup>[28]</sup>提取两期冰川表面无人机 DOM 成果中的特征点，并追踪特征点获得三维位移；BENOIT 等<sup>[29]</sup>基于特征识别算法对两期 DOM 匹配得到配准图，进而得到冰川位移；DALL'ASTA 等<sup>[30]</sup>利用最小二乘匹配和全局匹配方法对两期 DOM 和 DSM 配准，获取冰川位移。TURNER 等<sup>[31]</sup>基于集成在 ENVI 软件中、具备遥感图像正射校正、配准和互相关功能的 COSI-Corr(Co-registration of Optically Sensed Imaged and Correlation)模块，利用图像关联算法分析某滑坡区域多期 DSM，得到厘米级精度地表移动矢量。与上述研究方法不同，何柯璐等<sup>[32]</sup>利用机载 LiDAR 点云数据，针对矿区地形特征，改进二进制形状上下文特征描述算子提取主断面水平位移，其结果符合开采沉陷特征，为沉陷区域地表水平位移研究提供新思路。

因矿区地表分布有植被且水平位移量较小，故

其水平移动研究相较于冰川和滑坡领域更具挑战性。研究重点应包括如何从多期无人机遥感成果中找到更多更精确的图像配准点和减少植被影响；另外，利用点云数据能够降低植被和光照影响，但点云密度、地形因素及观测精度的平衡也需进一步研究。

### 2.4 沉陷观测技术展望

学者研究证实无人机遥感技术获取沉陷区域地形以及观测沉陷的可行性，且具备机动灵活、高效、可重复、全面覆盖等优势。在实际应用中，该技术最大不足是其精度难以满足沉陷盆地边缘获取要求，所以观测关键区域沉陷规律仍依赖其他技术方法。但无人机可迅速获取沉陷区域地形，观测整体沉陷，从宏观角度分析沉陷规律。在后续发展应用中，如何发挥其长处，在大范围观测和提取整体沉陷规律是发展的重点。数据精度和采集效率的平衡也需着重考虑。在水平位移观测中，借鉴相关领域研究方法，从无人机成果影像中更精确地提取配准点是未来研究重点。

## 3 矿区地表裂缝无人机遥感观测

矿区地表裂缝的及时准确观测对环境治理具有重要意义。传统裂缝观测方法是人工巡检，工作量大且效率低下；利用卫星遥感观测裂缝受分辨率、时效性及作业门槛限制。侯恩科等<sup>[33]</sup>用 50 cm 分辨率卫星遥感影像和 4 cm 分辨率无人机遥感影像解译同一区域地裂缝，发现无人机遥感影像能更充分反映裂缝特征，且裂缝形态清晰，最小裂缝宽度为 5 cm，验证了无人机遥感技术相比于卫星遥感技术识别地裂缝的优越性。由于矿区地表覆盖范围大且环境复杂，通过 DOM 人工观测裂缝费时费力且易出现遗漏，往往需借助图像处理法、机器学习法<sup>[34]</sup>等技术方法实现地表裂缝快速准确识别。

### 3.1 图像处理法识别地表裂缝

图像处理法指利用图像处理技术，结合裂缝自身形态特征使其在图像上得以凸显。STUMPF 等<sup>[35]</sup>综合利用高斯滤波、形态滤波以及面向对象等方法提取裂缝，结果表明该方法虽能够识别裂缝，但对图像中的阴影敏感。针对该问题，韦博文等<sup>[36]</sup>提出一种适用于复杂地物条件下无人机影像裂缝识别提取的改进一阶高斯差分匹配滤波算法，可实现地裂缝的动态快速识别提取。杨娜等<sup>[37]</sup>利用无人机影像通过对图像预处理后利用优化的自适应阈值分割方法实现木结构裂缝识别和尺度测量。矿区地表环境复杂、地形起伏大，造成无人机影像中纹理杂乱且通常

伴有阴影,图像处理法识别矿区地表裂缝应用范围较为局限。

### 3.2 机器学习法识别地表裂缝

常用的机器学习算法如朴素贝叶斯(Naive Bayes, NB)、支持向量机(Support Vector Machines, SVM)、随机森林(Random Forests, RF)等,裂缝识别中,多应用于道路<sup>[38-40]</sup>、桥梁<sup>[41-42]</sup>、墙体<sup>[43-46]</sup>等背景较为单一的场景。

为探究矿区地表裂缝最佳识别算法,杨奇让等<sup>[47]</sup>构建面向对象监督分类模型方法,对比分析SVM、K最近邻、RF和NB等算法的裂缝分类效果,结果显示SVM算法效果最优,但存在细小裂缝漏提取和植被误提取问题;汤伏全等<sup>[48]</sup>对比分析Canny、SVM以及最大似然法(Maximum Likelihood Method, MLM)的裂缝识别效果,结果表明MLM提取效果最好,但受植被等噪声影响较大,可用RF算法消除植被影响,再采用MLM获取更完整的裂缝信息。

综上,无论是SVM还是MLM算法,其识别裂缝效果均受地表植被影响。深度学习作为机器学习的特定形式,可以解决复杂的非线性关系,在医疗、金融、无人驾驶等领域应用广泛。无人机遥感技术能够为深度学习提供大量训练数据,深度学习能够解决地裂缝形态和背景复杂的问题,两者结合可提高裂缝识别准确度。ZHANG等<sup>[49]</sup>将深度学习应用到裂缝识别中,训练监督深度卷积神经网络来分类照片,效果显著优于SVM和Boosting方法。邓雅心等<sup>[50]</sup>结合无人机遥感和改进的全卷积神经网络识别大坝裂缝,其召回率为85.84%,表明该方法准确有效;余加勇等<sup>[51]</sup>提出集成深度学习YOLOv5和U-Net3+算法的一体化桥梁裂缝识别方法,其裂缝分割召回率达92.22%,定位召回率达95.15%,实现桥梁裂缝高效高精度识别定位。程健等<sup>[52]</sup>为解决地表裂缝复杂背景噪声问题,提出一种基于混合域注意力变形卷积网络的方法来强化特征图中特定通道和空间位置对地裂缝识别的贡献程度,研究表明该方法能够显著提高裂缝识别精度。地裂缝曲折形态及背景噪声导致人工标注不够准确,影响裂缝识别准确率,为此王臻等<sup>[53]</sup>提出一种弱监督分类的深度学习地裂缝识别模型,优化裂缝标注不准确问题,结果表明优化标注能够将裂缝识别召回率从81.3%提升到91.4%,效果显著。

深度学习与无人机遥感技术结合在裂缝识别方面具有优势,无人机遥感虽能够为深度学习提供大量数据,但裂缝复杂的背景噪声会影响数据标注的

准确性,影响识别准确性。

### 3.3 机载红外热成像相机识别裂缝

除搭载可见光镜头获取相片和DOM来识别裂缝外,无人机还能搭载红外热成像相机根据裂缝与周围环境的温度差异识别裂缝,因不同时间段的温差不同,为找到红外热成像相机地裂缝识别最佳时间窗口,赵毅鑫等<sup>[54]</sup>对地表裂缝发育区域全天候监测,得出其地裂缝识别最优时间窗口,并通过分析红外图片中裂缝尺寸,得到测量裂缝尺寸精度最高的时间段<sup>[55]</sup>;对于隐蔽裂缝,该团队选取不同时间对不同埋深隐蔽地裂缝进行不同高度的红外测量,得出隐蔽裂缝观测最佳时间窗口<sup>[56]</sup>。

### 3.4 地表裂缝识别方法展望

无人机遥感可为裂缝识别提供如可见光影像和红外图片等数据支持。对于背景单一的裂缝提取,采用图像处理法或机器学习法均能得到理想结果。对于沉陷区域地裂缝,其周围环境复杂,识别效果影响因素多,可采用机器学习法尤其是深度学习法,但如何降低植被和阴影的影响需作为后续研究的重点。同时由于裂缝发育与工作面开采过程中的开采速度、开采条件以及地质环境等因素关联性复杂,可建立裂缝与开采因素间的特征关系,提高识别准确率。另外,利用DOM或航拍相片提取地裂缝尺寸参数会受到成像变形影响,在后续研究中可利用三维模型建立完整的成像模型和三维场景提高裂缝尺寸参数提取精度<sup>[57]</sup>。

裂缝准确识别后,探究裂缝随时间的变化关系是裂缝治理的重点工作;另外,根据研究结果准确预测裂缝分布也是管理部门和矿山企业共同关注的方向,可为地面规划和环境治理提供参考。

## 4 不足与展望

### 4.1 不 足

1)地表植被影响。矿区地表沉陷区域多位于偏远地区,地表常覆有植被,对于构建高精度沉陷盆地和水平位移测量不利。基于图像处理与深度学习方法的裂缝识别技术均难以消除植被影响。

2)无人机遥感成果精度。限制无人机遥感技术在矿区地表沉陷观测应用推广的重要因素之一是其成果精度不足,除植被对精度的影响外,无人机系统硬件、飞行参数、光照条件以及重建算法等都会影响成果精度。

3)数据处理速度。受当前数据传输速度、摄影测量重建算法以及计算机配置限制,无人机数据的

处理往往要花费数小时甚至数十小时，影响数据的实时性与应用效率。

4)多源数据融合界点的确定。虽已有学者将 InSAR 数据与无人机遥感数据融合用于提升沉陷盆地观测精度,但多种类型遥感数据融合的界点确定方法还没有统一标准。

## 4.2 展望

1)无人机遥感技术在矿区地表沉陷观测应用中,减少植被影响提升精度的同时应进一步研究如何发挥其长处,在大范围内观测获取矿区整体沉陷规律,为沉陷治理、预测及井下生产提供参考。同时应加大地表水平位移研究力度。

2)结合更加先进的深度学习算法识别地表裂缝是未来发展方向,但需考虑降低裂缝复杂背景噪声的影响。在深度学习算法中进一步植入煤层开采速度、开采条件等影响因素可以提升裂缝识别准确率,利用三维模型建立完整的成像模型和三维场景提高地裂缝尺寸提取精度。在矿区地表裂缝准确识别基础上,裂缝演化规律及预测裂缝分布是将今后研究热点。

3)随着无人机遥感系统硬件、重建算法等不断发展,数据传输以及云处理技术有助于提高作业效率、改变作业模式,有望实现数据的“边采集边处理”、“无人值守”式观测。

4)加强多源遥感数据融合以充分发挥无人机遥感技术的优势。多源遥感数据融合可实现技术短板互补、获取更加精准的矿区地表沉陷范围,如何综合 InSAR 波长和无人机遥感精度以确定沉陷数据融合界点,是提高数据融合精确性的研究方向。

## 5 结论

1)无人机遥感技术可采集沉陷区域地形数据并观测沉陷,与 InSAR 等数据融合可实现沉陷边缘高精度观测。借鉴改进冰川和滑坡等领域研究案例可以填补当前地表水平位移空缺。

2)无人机遥感技术获取 DOM 可为地表裂缝识别提供高质量影像数据。借助图像处理和机器学习方法可实现裂缝智能识别。采用深度学习方法可以提高裂缝识别准确率。如何降低植被和阴影影响,总结裂缝规律以及分布预测是未来研究重点。

3)随着技术改进,无人机遥感技术在矿区沉陷与裂缝观测应用中精度、数据处理速度等限制会逐渐改善。

4)无人机遥感技术对矿区生态科学治理、矿山

智能化转型具有重要意义,势必成为未来智能化矿山建设中不可缺少的重要组成部分。

## 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 [M]. 北京: 地质出版社, 2022: 14–14.
- [2] ZHENG Junliang, YAO Wanqiang, LIN Xiaohu, et al. An accurate digital subsidence model for deformation detection of coal mining areas using a UAV-Based LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 421.
- [3] 张舒, 吴侃, 王响雷, 等. 三维激光扫描技术在沉陷监测中应用问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(11): 92–95.  
ZHANG Shu, WU Kan, WANG Xianglei, et al. Discussion on application of 3D laser scanning technology to ground subsidence monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(11): 92–95.
- [4] 刘一霖, 张勤, 黄海军, 等. 矿区地表大量级沉陷形变短基线集 InSAR 监测分析[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 144–151.  
LIU Yilin, ZHANG Qin, HUANG Haijun, et al. Monitoring and analyzing large scale land subsidence over the mining area using small baseline subset InSAR[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(2): 144–151.
- [5] 罗伟, 王飞. 基于无人机遥感技术的煤矿地表监测与分析 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S2): 268–273.  
LUO Wei, WANG Fei. Coal mine surface monitoring and analysis is based on UAV remote sensing technology [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 268–273.
- [6] WATTS A C, AMBROSIA V G, HINKLEY E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1671–1692.
- [7] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505–513, 540.  
LI Deren, LI Ming. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505–513, 540.
- [8] LEE S, CHOI Y. Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry[J]. *Geosystem Engineering*, 2016, 19(4): 197–204.
- [9] 王昆, 杨鹏, 吕文生, 等. 无人机遥感在矿业领域应用现状及发展态势[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1085–1095.  
WANG Kun, YANG Peng, LYU Wensheng, et al. Current status and development trend of UAV remote sensing applications in the mining industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1085–1095.
- [10] BAROŇ I, BEČKOVSKÝ D, MiČA L. Application of infrared thermography for mapping open fractures in deep-seated rock-slides and unstable cliffs[J]. *Landslides*, 2012, 11(1): 15–27.
- [11] SUH J, CHOI Y. Mapping hazardous mining-induced sinkhole subsidence using unmanned aerial vehicle (drone) photogrammetry[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(4): 144.

- [12] IGNJATOVIĆ STUPAR D, ROŠER J, VULIĆ M. Investigation of Unmanned Aerial Vehicles-Based photogrammetry for large mine subsidence monitoring[J]. *Minerals*, 2020, 10(2): 196.
- [13] TAN Hao, YU Xuexiang, ZHU Mingfei, et al. Deformation monitoring and spatiotemporal evolution of mining area with Unmanned Aerial Vehicle and D-InSAR technology [J]. *Mobile Information Systems*, 2022(1): 8075611; 1–12.
- [14] 田帅帅, 赵艳玲, 李亚龙, 等. 高潜水位矿区采煤沉陷地 DEM 的无人机建法[J]. 测绘通报, 2018, 64(3): 98–101.
- TIAN Shuaishuai, ZHAO Yanling, LI Yalong, et al. DEM establishing method of mining subsidence in high underground water mining area with UAV[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018, 64(3): 98–101.
- [15] WHEATON J M, BRASINGTON J, DARBY S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 35: 136–156.
- [16] LIAN Xuguang, LIU Xiaoyu, GE Linlin, et al. Time-series unmanned aerial vehicle photogrammetry monitoring method without ground control points to measure mining subsidence[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 15(2): 024505.
- [17] 张永庭, 徐友宁, 梁伟, 等. 基于无人机载 LiDAR 的采煤沉陷监测技术方法——以宁东煤矿基地马连台煤矿为例[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2270–2277.
- ZHANG Yongting, XU Youning, LIANG Wei, et al. Technical methods for colliery subsidence disaster monitoring using UAV LiDAR: A case study of the Maliantai colliery, Ningdong coal base, Ningxia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2270–2277.
- [18] WANG Shuqing, BAI Zechao, LV Yuepeng, et al. Monitoring extractive activity-induced surface subsidence in highland and alpine opencast coal mining areas with Multi-Source data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 1–12.
- [19] 汤伏全, 孙伟, 樊志刚, 等. 基于无人机影像的西部矿区地表沉陷信息提取方法改进[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S1): 334–342.
- TANG Fuquan, SUN Wei, FAN Zhigang, et al. Improvement of surface subsidence information extraction method based on UAV image modeling in Western Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S1): 334–342.
- [20] 高银贵, 周大伟, 安士凯, 等. 煤矿开采地表沉陷 UAV-摄影测量监测技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(5): 57–65.
- GAO Yingui, ZHOU Dawei, AN Shikai, et al. Study on surface subsidence in coal mining by UAV-photogrammetry monitoring technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 57–65.
- [21] ZHOU Dawei, QI Lizhuang, ZHANG Demin, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry technology for dynamic mining subsidence monitoring and parameter inversion: a case study in China[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 16372–16386.
- [22] ZHOU Dawei, WANG Ling, AN Shikai, et al. Integration of unmanned aerial vehicle (UAV)-based photogrammetry and InSAR for mining subsidence and parameters inversion: a case study of the Wangjiata Mine, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8): 343.
- [23] 周大伟, 安士凯, 吴侃, 等. 矿山开采损害 InSAR /UAV 融合监测关键技术及应用研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(10): 121–134.
- ZHOU Dawei, AN Shikai, WU Kan, et al. Research on the key issues and application of InSAR /UAV fusion monitoring for coal mining damages[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 121–134.
- [24] WANG Rui, WU Kan, HE Qimin, et al. A novel method of monitoring surface subsidence law based on probability integral model combined with active and passive remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 299.
- [25] 胡东升, 程小凯, 张雅飞, 等. 空天地一体化监测联合反演开采沉陷概率积分预计参数研究 [J]. *煤炭工程*, 2023, 55(1): 81–86.
- HU Dongsheng, CHENG Xiaokai, ZHANG Yafei, et al. Parameter inversion of mining subsidence probability integration prediction method based on space-air-ground integrated monitoring[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(1): 81–86.
- [26] ZHANG Yafei, LIAN Xugang, GE Linlin, et al. Surface subsidence monitoring induced by underground coal mining by combining DInSAR and UAV photogrammetry[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4711.
- [27] 郭增长, 柴华彬. 煤矿开采沉陷学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013: 127–128.
- [28] 符茵, 刘巧, 刘国祥, 等. 基于无人机影像的冰面流速与高程变化提取方法[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1245–1256.
- FU Yin, LIU Qiao, LIU Guoxiang, et al. Monitoring glacier surface velocity and ablation using high-resolution UAV imagery[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1245–1256.
- [29] BENOIT L, GOURDON A, VALLAT R, et al. A high-resolution image time series of the Gorner Glacier – Swiss Alps – derived from repeated unmanned aerial vehicle surveys[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(2): 579–588.
- [30] DALL'ASTA E, FORLANI G, RONCELLA R, et al. Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 127: 102–114.
- [31] TURNER D, LUCIEER A, DE JONG S. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1736–1757.
- [32] 何柯璐, 汤伏全, 李振洪. 基于地形特征的采煤沉陷盆地构建与水平移动信息智能提取方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(5): 717–729.
- HE Kelu, TANG Fuquan, LI Zhenhong. Coal mining subsidence basin construction and horizontal movement intelligent extraction based on topographic features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(5): 717–729.
- [33] 侯恩科, 张杰, 谢晓深, 等. 无人机遥感与卫星遥感在采煤地表裂缝识别中的对比[J]. *地质通报*, 2019, 38(S1): 443–448.
- HOU Enke, ZHANG Jie, XIE Xiaoshen, et al. Contrast application of unmanned aerial vehicle remote sensing and satellite re-

- mote sensing technology relating to ground surface cracks recognition in coal mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(S1): 443–448.
- [34] CAO Wenming, LIU Qifan, HE Zhequan. Review of pavement defect detection methods[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 14531–14544.
- [35] STUMPF A, MALET J-P, KERLE N, et al. Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics[J]. *Geomorphology*, 2013, 186: 12–27.
- [36] 韦博文, 刘国祥, 汪致恒. 基于改进的MF-FDOG算法和无人机影像提取黄土地区地裂缝[J]. *测绘*, 2018, 41(2): 51–56, 61.
- WEI Bowen, LIU Guoxiang, WANG Zhiheng. Extracting ground fissures in loess landform area using Modified F-FDOG algorithm and UAV images[J]. *Surveying and Mapping*, 2018, 41(2): 51–56, 61.
- [37] 杨娜, 张翀, 李天昊. 基于无人机与计算机视觉的中国古建筑木结构裂缝监测系统设计[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 27–39.
- YANG Na, ZHANG Chong, LI Tianhao. design of crack monitoring system for Chinese ancient wooden buildings based on UAV and CV[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 27–39.
- [38] 彭瑶瑶, 王思远, 傅兴玉, 等. 无人机影像辅助下的路桥病害智能检测[J]. *测绘通报*, 2017, 63(8): 67–70, 105.
- PENG Yaoya, WANG Siyuan, FU Xingyu, et al. Intelligent road and bridge disease detection method based on UAV images[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017, 63(8): 67–70, 105.
- [39] 袁依文, 雷斌. 无人机视觉技术在道路裂缝分类中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2022, 60(5): 235–239.
- YUAN Yiwen, LEI Bin. The application of UAV vision technology in the classification of road cracks[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022, 60(5): 235–239.
- [40] 郝巨鸣, 杨景玉, 韩淑梅, 等. 引入 Ghost 模块和 ECA 的 YOLOv4 公路路面裂缝检测方法[J]. *计算机应用*, 2023, 43(4): 1284–1290.
- HAO Juming, YANG Jingyu, HAN Shumei, et al. YOLOv4 highway pavement crack detection method using Ghost module and ECA[J]. *Journal of Computer Applications*, 2023, 43(4): 1284–1290.
- [41] 马学志, 范剑雄, 柴雪松, 等. 无人机巡检系统在铁路混凝土桥梁检测中的应用[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(12): 76–80.
- MA Xuezhi, FAN Jianxiong, CHAI Xuesong, et al. Application of UAV inspection system in railway concrete bridge inspection[J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(12): 76–80.
- [42] 袁磊, 苏永华, 张斌, 等. 无人机摄影测量技术在铁路桥梁巡检中的应用[J]. *铁道建筑*, 2022, 62(3): 83–87.
- YUAN Lei, SU Yonghua, ZHANG Bin, et al. Application of UAV photogrammetry technology in railway bridge inspection[J]. *Railway Engineering*, 2022, 62(3): 83–87.
- [43] 刘春, 艾克然木·艾克拜尔, 蔡天池. 面向建筑健康监测的无人机自主巡检与裂缝识别[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 921–932, 918.
- LIU Chun, AKBAR Akram, CAI Tianchi. UAV autonomous inspection and crack detection towards building health monitoring[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2022, 50(7): 921–932, 918.
- [44] 丁威, 俞珂, 舒江鹏. 基于深度学习和无人机的混凝土结构裂缝检测方法[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(S1): 1–12.
- DING Wei, YU Ke, SHU Jiangpeng. Method for detecting cracks in concrete structures based on deep learning and UAV[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(S1): 1–12.
- [45] 文青. 基于深度学习的建筑物表面裂缝检测技术研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- WEN Qing. Research and implementation of building surface crack detection technology based on Deep Learning [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [46] 李怡静, 程浩东, 李火坤, 等. 基于改进 U<sup>2</sup>-Net 与迁移学习的无人机影像堤防裂缝检测[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(6): 52–59.
- LI Yijing, CHENG Haodong, LI Huokun, et al. Crack detection of embankment in UAV images based on improved U<sup>2</sup>Net and transfer learning[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(6): 52–59.
- [47] 杨奇让, 胡振琪, 韩佳政, 等. 煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(6): 187–196.
- YANG Qirang, HU Zhenqi, HAN Jiazheng, et al. Research on extraction method of ground fissures from UAV image mining in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(6): 187–196.
- [48] 汤伏全, 李林宽, 李小涛, 等. 基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(10): 130–136.
- TANG Fuquan, LI Linkuan, LI Xiaotao, et al. Research on characteristics of mining-induced surface cracks based on UAV images[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(10): 130–136.
- [49] ZHANG Lei, YANG Fan, ZHANG Y D, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing* [C]. Phoenix, AZ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016: 3708–3712.
- [50] 邓雅心, 骆旭佳, 李红林, 等. 基于无人机倾斜摄影测量技术的水电站坝面裂缝检测研究[J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(5): 158–161, 166.
- DENG Yaxin, LUO Xujia, LI Honglin, et al. Research on water power station dam surface crack detection based on UAV oblique photogrammetry [J]. *Technological Innovation and Application*, 2021, 11(5): 158–161, 166.
- [51] 余加勇, 刘宝麟, 尹东, 等. 基于 YOLOv5 和 U-Net3+的桥梁裂缝智能识别与测量 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(5): 65–73.
- YU Jiayong, LIU Baolin, YIN Dong, et al. Intelligent identification and measurement of bridge cracks based on YOLOv5 and U-Net3+[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2023, 50(5): 65–73.
- [52] 程健, 叶亮, 郭一楠, 等. 采空区地裂缝混合域注意力变形卷积网络检测方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 993–1002.
- CHENG Jian, YE Liang, GUO Yinan, et al. An aerial image detection method of ground crack in goaf based on deformable convolutional network with hybrid domain attention[J]. *Journal of*

- China Coal Society, 2020, 45(S2): 993–1002.
- [ 53 ] 王臻, 王辉, 李国锋. 弱监督的无人机影像地裂缝自动提取[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(3): 51–56.  
WANG Zhen, WANG Hui, LI Guofeng. Automatic extraction of ground fissures from UAV images by weakly supervised learning[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(3): 51–56.
- [ 54 ] 赵毅鑫, 许多, 孙波, 等. 基于无人机红外遥感和边缘检测技术的采动地裂缝辨识[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 624–637.  
ZHAO Yixin, XU Duo, SUN Bo, et al. Investigation on ground fissure identification using UAV infrared remote sensing and edge detection technology[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 624–637.
- [ 55 ] ZHAO Yixin, SUN Bo, LIU Shimin, et al. Identification of mining induced ground fissures using UAV and infrared thermal imager: Temperature variation and fissure evolution[J]. [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](#), 2021, 180: 45–64.
- [ 56 ] 赵毅鑫, 许多, 张康宁, 等. 采动地表浅层隐蔽裂缝的无人机红外识别现场试验[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1921–1932.  
ZHAO Yixin, XU Duo, ZHANG Kangning, et al. In-situ experiment on the identification of shallow hidden mining induced ground fissure using UAV infrared technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1921–1932.
- [ 57 ] LIU Yufei, CHO Soojin, SPENCER B F, et al. Concrete crack assessment using digital image processing and 3D scene reconstruction[J]. [Journal of Computing in Civil Engineering](#), 2016, 30(1): 04014124.