

采空区探测方法对比分析与应用

赵艺龙¹, 付刚毅¹, 张欣睿^{2,*}, 李勇康¹, 朱容晖¹, 聂昕晖¹

1. 嵩县山金矿业有限公司运营管理部, 河南 洛阳, 471400

2. 山东科技大学, 测绘与空间信息学院, 山东 青岛, 266590

摘要: 矿产资源开采后遗留的采空区严重威胁生产安全, 其精准探测是进行有效治理与灾害预防的前提。采空区探测中主流的物探方法—地震映像法、高密度电阻率法与瞬变电磁法等传统物探方法虽在探测隐伏采空区方面各具优势, 但普遍存在范围受限、精度不足等局限性。而新兴的三维激光扫描技术, 能够直接、快速地获取采空区内部的高精度三维空间信息, 在精细化探测采空区形态、计算空区体积及实现可视化分析方面展现出独有价值。本文重点阐述各类方法的基本原理、优缺点及适用条件, 指出相比之下, 采用联合作业模式的三维激光扫描技术更具优势, 通过应用案例, 进一步验证了该技术的实用性。结论得出, 三维激光扫描技术将为采空区的精准探测、稳定性评估及指导治理带来方便, 是传统物探方法的重要补充和提升, 具有广阔的应用前景。

关键词: 采空区探测; 高密度电阻率; 地震映像法; 瞬变电磁法; 三维激光扫描

Comparison and Analysis of Abandoned Area Detection Methods and Their Applications

Yilong Zhao¹, Gangyi Fu¹, Xinrui Zhang^{2,*}, Yongkang Li¹, Ronghui Zhu¹, Xinhui Nie¹

1. Operation and Management Department of Shan jin Mining Co., Ltd. in Song xian County, Luoyang, Henan, 471400, China

2. Shandong University of Science and Technology, College of Geodesy and Geomatics, Qingdao, Shandong, 266590, China

Abstract: The abandoned mining areas left after the exploitation of mineral resources pose a serious threat to production safety. The precise detection of these areas is a prerequisite for effective management and disaster prevention. Although the mainstream geophysical exploration methods such as seismic imaging, high-density resistivity, and transient electromagnetic methods each have their advantages in detecting concealed mining areas, they generally suffer from limitations such as restricted detection range and insufficient accuracy. In contrast, the emerging three-dimensional laser scanning technology can directly and rapidly obtain high-precision three-dimensional spatial information of the mining areas, demonstrating unique value in the detailed detection of the morphology of the mining areas, calculation of the volume of the voids, and realization of visual analysis. This paper focuses on elaborating the basic principles, advantages and disadvantages, and applicable conditions of various methods, and points out that the three-dimensional laser scanning technology with a combined operation mode has more advantages. Through application cases, the practicality of this technology is further verified. The conclusion is that the three-dimensional laser scanning technology will bring convenience to the precise detection, stability

assessment, and guidance of mining area management, and is an important supplement and improvement to traditional geophysical exploration methods, with broad application prospects.

Keywords: Abandoned area detection; High-density resistivity; Seismic imaging method; Transient electromagnetic method; Three-dimensional laser scanning

我国多数地下矿山普遍存在遗留采空区,其位置、形态与边界具有高度的隐蔽性和复杂性,对矿山安全生产与周边环境构成严重威胁^[1]。由于其空间信息的不确定性及探测过程的高风险性,使得有效治理难以推进。因此,实现对采空区的精准探测,已成为进行稳定性分析与危险防控不可或缺的前提^[2-4]。

针对矿山采空区的探测,现有方法主要包括高密度电阻率法、瞬变电磁法与地震映像法等综合物探技术和以三维激光扫描技术为代表的测绘技术。高密度电阻率法^[5]基于直流电阻率原理,通过布设电极阵列构建地下稳定电流场,实现数据自动采集。该方法具有测点密度高、信息丰富、效率高等优点,在探测采空区、岩溶洞穴等方面技术成熟,应用广泛。地震映像法^[6]源于反射波技术中的最佳偏移距原理,可选用多种或单一地震波进行探测。其特点是采集快速、显示直观、受场地限制小,且数据处理过程中无需额外校正,但该方法也存在抗干扰能力较弱、勘探深度有限的不足。瞬变电磁技术^[7]是一种基于电磁感应原理的时间域物探方法。通过发射线圈向地下发送一次脉冲磁场,在电流关断的间歇期,利用接收线圈测量由地下导体产生的二次涡流场。优点在于对低电阻体反应极为灵敏,且探测深度大、工作效率高。但其解释结果存在多解性,且易受地表金属设施等人文干扰。而三维激光扫描技术^[8-10]作为一种新兴的测绘技术,以其效率高、精度高与范围广的特点,逐渐成为采空区探测的重要技术手段,通过三维激光扫描技术手段获取的点云数据,能够准确地展现采空区轮廓、围岩表面的形态以及采空区的空间分布等关键特征,从而弥补传统物探方法的不足,并为空区的稳定性分析与工程治理提供直观、可靠的信息支撑。

本文讨论了综合物探技术和三维激光扫描的原理与在采空区探测中的应用。研究表明,综合物探技术在该领域取得了较为理想的成果,能够有效提供地下空区的信息。三维激光扫描技术则通过直接探测采空区的三维形态、边界条件以及空区的形态等,提供了直观、快速且精确的数据,成为采空区探测的重要手段。

1 采空区探测技术

1.1 综合物探技术

在采空区探测的需求增加下,综合物探技术应运而生并得到广泛应用。该类技术基于地质体在密度、电性、弹性等多种物理性质上的差异,通过多种物理探测手段的应用,显著提高异常识别的准确性与可靠性,为复杂地质条件下的采空区探测提供了有效技术途径。

1.1.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是一种以地下目标体与围岩间的电性差异为物理基础的物探方法。其工作原理是通过人工向地下建立稳定直流电场,并利用预先布设的电极阵列系统地观测地表电位分布。通过对采集到的大量空间电阻率数据进行处理与分析,从而推断地下地质结构的分布特征。

高密度电阻率法在现场作业时,首先将数十至上百根电极按预设点位布设于测线。通过程控式电极转换系统与微机化电测设备配合,即可完成数据的自动化采集。测量数据传入计算机后,可进

一步处理并生成多种地电断面分布成果图。该方法通过一次性布设电极阵列与自动化采集系统，实现了高效、低故障率的数据采集，并支持多模式扫描以获取丰富地电信息。该方法在数据获取效率、信息完整性及成本效益方面均显著优于常规电阻率法，同时具备数据预处理与成果可视化功能。但其易受复杂地形及浅部电性不均匀体干扰，其探测深度与垂向分辨率相对有限，且对低阻目标体的反应不够灵敏，反演解释存在多解性。其探测原理如图 1 所示。

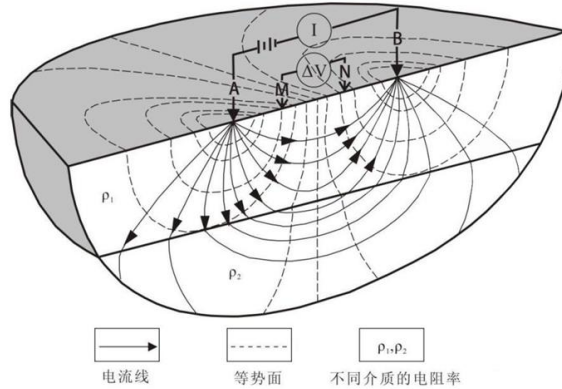


图 1 高密度电阻率法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of high-density resistivity method

在完成对实测电位与电流数据的坐标变换、畸变点剔除和滤波预处理后，通过反演计算可获得各测线视电阻率断面图。依据矿区地质电性特征，断面图中基岩呈高阻异常为红色；塌陷后充填采空区表现为中阻特征绿色；而未充填完整的富水区则显示低阻为蓝色，其断面形态呈现横向连续展布特征，构成典型采空区异常标志。根据上述电性—地质对应关系，对反演剖面进行地质解释，最终圈定勘探中的采空区异常范围。

1.1.2 地震映像法

地震映像法，是基于反射波法最佳偏移距技术的一种浅层勘探手段。该方法综合利用反射波、折射波及面波等多种地震波动信号，有效识别地下介质结构的分布与变化^[11]，其前提是地下介质密度、速度、泊松比具有差异，不同波形传播路径如图 2 所示。该方法的核心在于选择最佳偏移距，从而在避免面波等干扰的同时，有效接收来自地下目标体的反射波信号。其技术特点在于波场利用的灵活性：既可选择单一的反射纵波、横波或面波作为有效波进行探测，也可综合利用多种波场信息，从而获取更为丰富的地质响应。

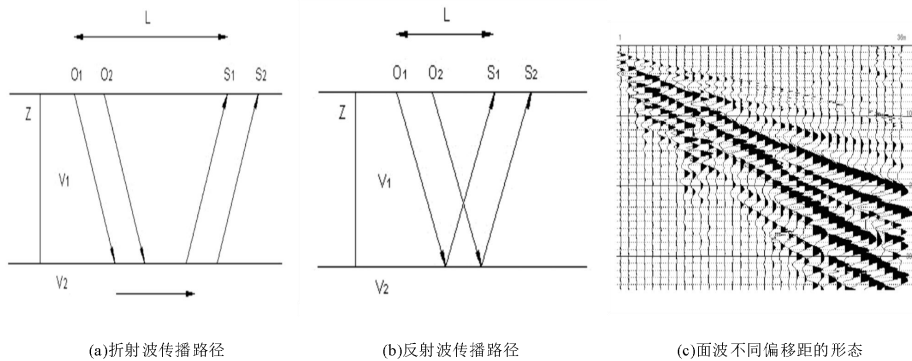


图 2 波形传播路径图

Fig. 2 Waveform Propagation Path Diagram

在实际应用中,该方法具有数据采集效率高、剖面显示直观、受场地条件制约小等突出优点。由于采用固定偏移距观测,其在数据处理时无需进行复杂的动校正,显著提升了工作效率。因此,地震映像法被广泛应用于岩土工程勘察、活断层探测、地下空洞及埋藏物定位等浅部地质问题调查中,适用于探测采空区、岩溶等与围岩存在波阻抗差异的异常地质体。地震映像法在探测单一浅部目标时效果良好,但在面对多层复杂构造时,会因最佳偏移距难以统一确定而导致探测精度下降。

1.1.3 瞬变电磁法

瞬变电磁法是一种时间域电磁探测技术,其原理是利用不接地回线向地下发射脉冲磁场。当发射电流突然关断时,该瞬变磁场会在地下介质中感应出涡流,其强度与地质体的导电性密切相关。在一次场消失后,地下感应涡流随之衰减并产生二次磁场,由地表接收装置记录该信号的瞬态响应。通过分析二次场随时间的变化特征,可推断地下介质的电性分布结构。最终,基于电动势衰减数据经反演计算获得电阻率拟断面图,从而实现了对地下地质构造的有效识别与解释。原理示意图如图3所示。

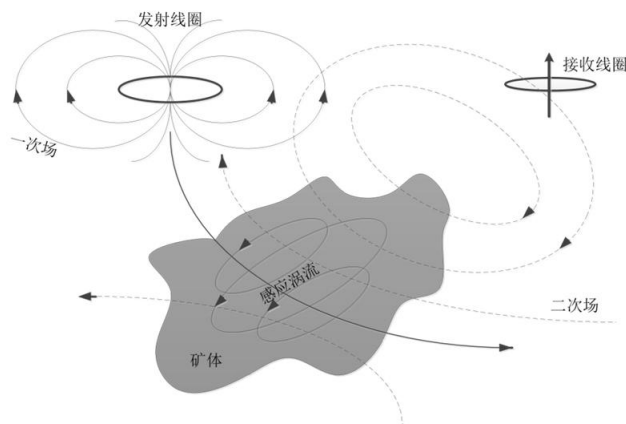


图3 瞬变电磁法原理示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the Principle of Transient Electromagnetic Method

瞬变电磁法具备体积效应小、异常形态清晰的特点,其分层辨识能力突出,且能有效穿透高阻屏蔽层。该方法在一次观测中可同步获取剖面与测深数据,为地质解释提供丰富的依据。其对低阻体反应极为灵敏,能够有效识别微弱电性异常,常用于划定含水或富水区分布。在探测埋深超过100米的深层采空区时优势显著,具备发现多层空区结构的能力。但该方法对地下岩溶、金属矿采空区等空区的测量精度较低。

1.2 三维激光扫描技术

随着社会经济发展与科技进步,矿山测绘技术取得了显著进步。其中,三维激光扫描技术的引入,革新了传统的空区探测模式,在探测精度与工作效率上实现了提升。该技术基于激光测距原理,融合了相位式与脉冲式两种测量模式,能够依据空区的实际条件与探测需求,实施灵活、高效且全面的三维空间数据采集。

1.2.1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术是基于激光测距原理,通过采集物体表面高密度点云数据,获取目标的空间坐标与反射特征,实现三维模型的快速重构。该技术实现了从传统单点测量到面状扫描的技术革新,

显著提升了空间数据采集的精度与效率。近年来随着无人机的普及和各种轻小型机载 LiDAR (Light Detection And Ranging) 系统的飞速发展, 三维空间信息获取越来越便捷, 应用更是遍及各个行业领域, 点云数据的获取手段越来越丰富。三维激光扫描系统主要由发射器、接收器、时间计数器、滤光镜、控制电路板、主控计算机及相关软件等七部分构成。该系统基于激光测距原理, 通过精确计算激光信号从发射至返回的时间差, 可确定扫描仪与目标点之间的直线距离; 同时, 系统同步获取激光束的横向扫描角与纵向扫描角 (如图 4 所示), 从而实现对目标点三维坐标的精确解算。该技术能够高效、精准地重建采空区的三维空间结构, 为准确评估其形态特征与稳定性提供可靠的数据支撑^[12]。

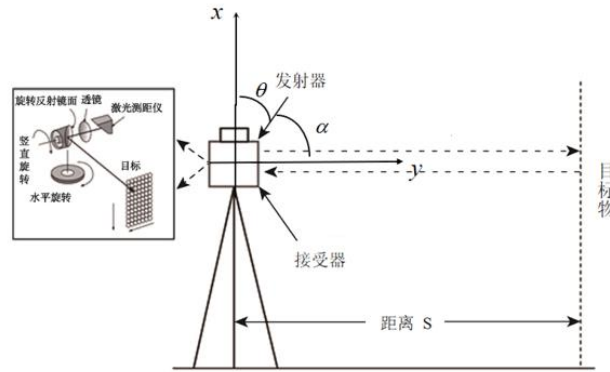


图 4 三维激光扫描原理示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of 3D Laser Scanning Principle

1.2.2 手持三维激光扫描仪

SLAM (即时定位与地图构建) 是扫描仪在未知环境中同时实现自我定位与环境建图的技术。定位旨在确定仪器在世界坐标系中的六自由度位姿 (位置与姿态), 建图则通过传感器数据构建环境模型。地图通常由点云构成, 可分为稀疏点云与稠密点云等类型, 其中稀疏点云主要用于定位, 而稠密点云、栅格地图等经处理后还可支持路径规划与导航控制。

浅部老空区巷道环境复杂, 存在通视条件差、无卫星信号等挑战, 导致传统测绘方法难以准确获取其三维空间信息。为解决此问题, 可采用手持式 SLAM 移动三维激光扫描技术 (如图 5 所示)。该技术无需卫星信号与设站, 通过高速激光扫描直接获取高精度点云数据, 快速构建真实还原的老空区三维模型, 精确掌握其空间形态与分布, 从而为后续的稳定评价与工程治理提供关键数据基础。



图 5 手持式三维激光扫描仪

Fig. 5 Handheld 3D Laser Scanner

1.2.3 防撞无人机三维激光扫描系统

当前矿山实现三维数字化表达的关键在于获取准确、完整的基础测绘数据。然而，地下矿山采空区地质条件复杂，部分空区存在不明范围的积水与有害气体，严重威胁测量人员安全，致使手持激光扫描设备等难以直接开展点云采集工作。为解决上述问题，可采用防撞无人机激光扫描系统（如图6所示），在无GNSS信号的井下环境中执行采空区探测任务。该技术使操作人员无需进入危险区域即可完成对采空区的初步扫描，获取其基本空间信息，进而评估人员进入的可行性，并为后续分段精细扫描方案的制定提供依据。

防撞无人机三维激光扫描系统基于SLAM引擎与控制系统协同工作，实现了点云数据的实时获取与多源传感器融合，且具备精准感知与动态补偿能力，显著提升了飞行稳定性。其在弱光环境下仍能保持高分辨率成像，通过多传感器集成保障了数据采集的精确性与完整性，有效克服高危环境的探测限制，为复杂空间探测提供安全可靠的解决方案。



图6 防撞无人机扫描系统

Fig. 6 Anti-collision Unmanned Aerial Vehicle Scanning System

2 工程应用实例

采用三维激光扫描技术对某矿及采空区进行多平台激光雷达联合模式探测。首先，使用SLAM手持扫描仪对连接巷道、开采面等可到达区域进行同步扫描，并精确采集四个井下控制点，为后续数据建立了准确的井下坐标基准。随后，针对人员无法进入的危险区域，使用防撞无人机三维激光扫描系统进行探测，深入采空区与溜井采集点云数据并同步录制实景视频，确保了危险区域数据的完整性与准确性，如图7所示。



图7 数据采集过程

Fig. 7 Data Acquisition Process

对两台不同型号的 SLAM 手持扫描仪所获取的点云分别进行拼接与去噪处理, 经对比验证, 两者数据吻合良好。随后, 将实测控制点的已知坐标导入, 完成点云数据的绝对坐标校正。最后, 将防撞无人机三维激光扫描系统采集的采空区点云与已校正的巷道点云进行配准与坐标统一, 成功构建出完整的井下采空区点云数据模型, 如图 8 所示。随后通过内业处理软件, 可测算扫描巷道总长度, 采空区最大长度、宽度、高度, 采空区体积等可量化数据。经测算, 本次扫描巷道总长度约 747 m, 采空区最大长度、宽度、高度分别约为 32.4 m、10.9 m、30.3 m; 采空区体积约 3449 m³; 斜溜井最大长度约 52 m。

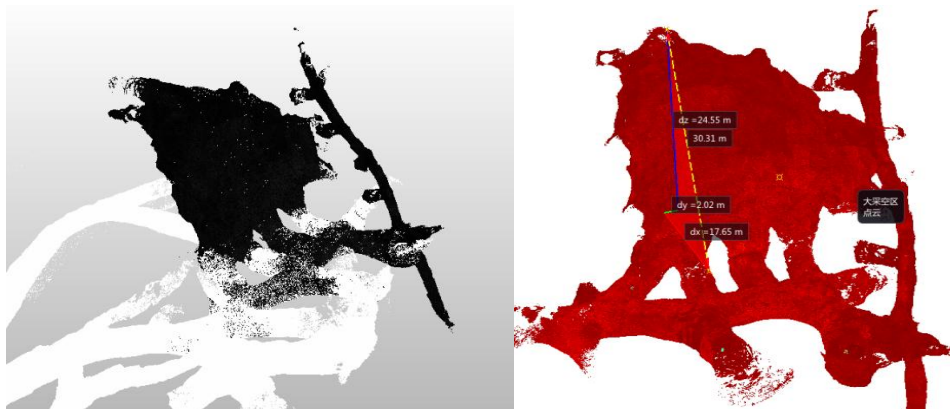


图 8 采空区点云数据

Fig. 8 Point cloud data of the mined-out area

3 结论

本文系统对比分析了高密度电阻率法、地震映像法、瞬变电磁法等综合物探技术与三维激光扫描技术在采空区探测中的应用, 得出以下主要结论:

(1) 传统物探方法在初步圈定地下异常体方面各有优势, 但也普遍存在多解性、探测精度有限等固有限制。

(2) 相比之下, 三维激光扫描技术凭借其非接触、高效率、高精度的技术特点, 能够直接获取采空区的真实三维空间形态与海量点云数据, 实现了采空区高精度探测。

(3) 工程应用实例表明, 该探测方案能够安全、高效地完成从可进入巷道到危险采空区的全覆盖数据采集, 为采空区体积计算、稳定性分析及后续治理工程提供了直观可靠的数据支撑。

综上所述, 采空区探测在不同的要求下有不同的探测技术, 三维激光扫描技术作为该体系中的关键一环, 将随着硬件性能的提升与算法的优化, 在矿山数字化与智能化进程中发挥更为核心的作用。

参考文献

- [1] 周逸文, 张涛, 段隆臣, 等. 我国矿山采空区综合治理研究综述[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(04): 220-230.
- [2] 章林, 孙国权, 李同鹏, 等. 地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用[J]. 金属矿山, 2013, (11): 1-4+138.
- [3] 杨建桥, 刘陈明, 杨德敏. 地下矿山采空区群治理方案优化研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(04): 132-136.
- [4] 王平尤. 金属非金属矿山采空区现状与治理对策分析[J]. 世界有色金属, 2023, (02): 190-192.
- [5] 周水祥, 李文辉. 高密度电阻率法在某锑矿盲采空区勘查中的应用[J]. 湖南有色金属, 2024, 40(01): 8-12.
- [6] 宗传志. 综合物探技术在潍烟线金矿采空区勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2021, 47(02): 76-81.

- [7] 李海洋, 付巨德, 王庆胜, 等. 瞬变电磁法探测技术在采空区探测中的应用[J]. 资源信息与工程, 2023, 38(02): 33-36.
- [8] 齐智宇, 王健, 赵艺龙, 等. 基于改进空间密度聚类的电力线自动提取[J]. 应用激光, 2025, 45(02): 141-147.
- [9] 杜祜玮, 任富强, 常来山. 三维激光扫描技术在国内矿山领域的应用[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 154-160.
- [10] 乔俊峰, 周沅楨, 王永, 等. 三维激光扫描测体积技术及其应用进展[J]. 激光与红外, 2021, 51(09): 1115-1122.
- [11] 郭苗苗. 瞬变电磁法和地震映像法在地下管线探测中的应用[J]. 能源技术与管理, 2023, 48(06): 148-149+152.
- [12] 韩瑞亮, 董建春, 李瑞环. 综合三维激光扫描技术在某铁矿复杂空区探测的应用[J]. 现代矿业, 2022, 38(03): 219-222.

基金项目: 山东省自然科学基金, 基于 LiDAR 技术的城市地下空间安全监测关键技术研究 (ZR2023MD027)。

¹ **第1作者简介:** 赵艺龙 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地质测绘。 E-mail: zyl16315450@163.com。

* **通讯作者简介:** 张欣睿 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 点云数据处理。 E-mail: w1250101309@163.com。