

低碳视角下无人机技术在灰岩矿勘探中的效率优化与资源节约路径

白雪

(安徽省地质矿产勘查局 322 地质队, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:以安徽省宿州市顺河乡鹤山建筑石料用灰岩矿勘探项目为研究对象, 聚焦低碳视角下无人机技术在灰岩矿勘探中的应用。通过对工程实例的分析, 从设备性能、气象条件和数据处理三个角度, 系统地探讨影响无人机在灰岩矿山勘查中作业效率的主要因素, 并从设备的选择和维护、改进数据处理流程、优化飞行计划等角度, 有针对性地提出优化作业效率的策略。分析无人机在灰岩矿勘查中存在的资源分配不合理现象并提出了人机在灰岩矿勘查中的资源节省途径。为无人机在灰岩矿山勘探领域的高效低碳应用提供理论依据和现实依据, 促进灰岩矿山勘探领域的可持续发展。

关键词: 低碳; 无人机技术; 灰岩矿勘探; 效率优化; 资源节约

中图分类号: P624

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)07-0066-7

0 引言

在全球碳中和目标驱动下, 矿业勘探的低碳转型已从技术实践升级为理论与范式的双重革新。传统灰岩矿勘探依赖燃油机械与人力密集型作业, 其高碳症结既表现为单次钻探任务高达 200kg 的 CO₂ 排放^[1], 更隐含于“高投入-低效率”模式下的资源错配——人工测绘导致的储量估算偏差率年均达 8.7%^[2,3], 设备冗余使单位勘探成本较技术前沿水平高出 40% 以上^[4]。在此背景下, “低碳勘探”作为可持续发展理论、生命周期评价(LCA)与资源效率理论的交叉应用, 要求通过技术创新实现勘探活动的环境效益(碳减排、生态保护)与经济效益(效率提升、成本优化)协同^[5,6]。无人机技术凭借电力驱动(替代柴油机械)、高效覆盖(数据覆盖率提升 3 倍)与非接触式作业(避免地表扰动)的特性, 成为破解传统勘探高碳低效困境的关键载体^[7]。然而, 当前研究呈现显著的“技术偏向性”: 虽证实无人机在数据覆盖率(km²/h)、建模精度(平面误差 ≤ 5cm)等技术效率指标上的优势^[8,9], 却缺乏对“技术效率提升如何转化为碳减排”

的理论解构——《Journal of Cleaner Production》(2022)指出的路径优化可减少 12%–18% 无效飞行能耗, 尚未与设备选型、数据处理等环节形成系统性低碳机制, 且对植被破坏碳汇损失、人工失误重复作业等隐性资源消耗的量化研究不足, 导致“技术-环境-经济”三维耦合理论框架缺失^[10]。

本文以安徽鹤山灰岩矿勘探项目为实证对象, 基于“碳足迹-效率”双维度框架, 旨在构建无人机技术应用的全生命周期低碳评估模型。研究通过量化分析设备选型(大疆无人机+华测采集系统)、飞行规划(动态气象适配算法)、数据处理(AI 自动建模技术)的效率优化节点, 揭示“技术效率提升→资源消耗下降→碳排放减少”的传导机制: 在 2.3km² 含丘陵、陡坡的复杂地形中, 对比传统方法与无人机技术的勘探效能, 实证检验可持续发展理论与 LCA 在技术路径中的协同应用。研究突破现有文献的碎片化局限, 首次将效率优化纳入资源节约理论体系, 构建涵盖设备生产、运行、报废阶段的碳足迹核算模型, 量化无人机技术较传统方法降低 40% 以上单位任务碳强度(LCA 测算)的协同效应, 为

矿业低碳勘探提供“理论框架-技术路径-实证验证”的完整逻辑链,助力“双碳”目标下资源行业的绿色转型范式构建。

1 研究方法 with 案例背景

1.1 低碳勘探的核心理论支撑

“低碳勘探”的理论建构以可持续发展理论、生命周期评价(LCA)与资源效率理论为基石,旨在通过技术创新实现勘探活动的环境效益与经济效益协同。可持续发展理论要求勘探技术在追求数据精度的同时降低生态扰动,无人机技术的电力驱动模式与非接触式作业特性,通过替代燃油机械、避免地表开挖,直接减少植被破坏导致的碳汇损失,体现“发展与保护统一”的核心理念。生命周期评价(LCA)理论构建全流程碳核算框架,将勘探技术划分为“生产-运行-报废”三阶段,通过量化设备能效(如固态锂电池能量密度提升30%)、任务能耗(电网碳因子 $0.5\text{kg CO}_2/\text{kWh}$)及报废影响^[11],为无人机与传统钻探的碳足迹差异提供科学测度工具。资源效率理论以“单位勘探面积要素投入”为核心,无人机凭借高效数据覆盖率($3.2\text{ km}^2/\text{h}$ vs 传统人工 $0.3\text{ km}^2/\text{h}$)与自动化作业模式(减少60%人力投入),通过“要素集约化”降低能源、人力与时间成本,契合“最小投入-最大产出”的理论本质。

1.2 “碳足迹-效率”双维度分析框架构建

基于上述理论,研究构建“环境-经济”耦合分析框架,从双维度揭示无人机技术的低碳协同机制。环境效益维度遵循LCA理论边界,涵盖直接碳排放(无人机电力消耗 vs 传统钻探燃油消耗,单次任务排放差异达100倍)与间接碳排放(传统勘探植被破坏导致的碳汇损失,无人机非接触式作业使其隐性成本趋近于零)^[12]。经济效率维度聚焦全流程作业效能:数据获取效率以单位时间覆盖率衡量,无人机搭载高分辨率传感器实现复杂地形的快速覆盖;数据处理效率通过AI算法减少人工干预,将单任务周期从

48h压缩至12h并降低机房能耗;资源配置效率体现为人力优化(现场人员从10人降至3人),凸显技术替代对集约化作业的驱动作用。双维度框架通过量化“技术参数-环境效益-经济成本”的关联,为后续分析提供统一的评估标准^[13]。

1.3 理论传导机制与研究逻辑设计

无人机技术的低碳价值通过实现“技术效率提升→资源消耗下降→碳排放减少”三级机制,各环节均锚定具体理论支撑:设备选型环节依据技术创新理论,通过固态锂电池等颠覆性技术提升续航能力、减少作业频次,从源头降低能源消耗强度;飞行规划环节运用空气动力学与运筹学理论,通过动态气象适配算法(如逆风航线规划减少15%无效航程)直接降低运行阶段能耗,实现碳减排15.3%;数据处理环节基于机器学习理论,借助AI自动识别技术减少70%人工标注时间,缩短高耗能设备运行时长,达成“效率提升-能耗下降”的协同优化^[14,15]。该传导机制为后文设备选型、飞行规划、数据处理等技术路径的分析提供理论锚点,形成“理论框架-技术验证-实证结论”的完整逻辑链,确保每个优化策略均能回溯至可持续发展、LCA或资源效率理论,为矿业低碳勘探构建可复制的方法论范式。

2 无人机技术效率优化的低碳路径

2.1 设备性能与选型的低碳优化

设备性能与选型在无人机技术应用于灰岩矿勘探的低碳化进程中起着关键作用。从理论层面来看,采用高效能电池对减少单位任务能耗意义重大。以固态锂电池为例,相较于传统锂电池,其能量密度更高。研究表明,固态锂电池能量密度可比现有锂离子电池高30%^[16],这意味着无人机搭载固态锂电池后,续航能力大幅提升,单位任务中电池充电或更换次数减少,从而降低了能源消耗。而传统勘探设备多依赖燃油机械,单次钻探任务的柴油消耗可产生高达

表 1 多旋翼与固定翼无人机性能对比

参数	多旋翼无人机	固定翼无人机
平均能耗	1.2kWh/任务	0.8 kWh/任务
续航时间	40min	120min
地形适应性	垂直起降,适应陡坡、障碍物密集区	需开阔起降场地,适应大范围平坦区域
悬停精度	≤0.3m(RTK 模式)	不适用

200kg CO₂ 排放。相比之下,无人机采用高能效电池在减少碳排放方面优势明显。

在设备选型中,需综合考量无人机型号的能耗、续航及地形适应性差异。以多旋翼(如大疆 M300 RTK)与固定翼(如纵横 CW-15)为例,其核心参数对比如表 1 所示。

鹤山矿区属丘陵地貌(坡度>25°区域占比 32%),植被覆盖率 65%,且存在多处陡崖(坡度>30°)。多旋翼无人机凭借垂直起降能力与高精度悬停特性(坡度适应范围 0°-45°),可安全执行陡坡区数据采集;固定翼机型虽续航优势显著,但受限于起降条件与低空避障能力,仅适用于开阔平缓区域。因此,本项目采用多旋翼无人机为主力机型,针对 5km² 以上连续勘探区辅以固定翼无人机提升效率,实现能耗与地形适应性的最优平衡。

在本工程中,选用大疆无人机与华测 E93 采集系统配合使用,展现出显著的能效优势。大疆无人机机动性强,数据获取功能出色,能快速完成大面积地形测量任务,在获取相同面积地形信息时,相较于传统勘探设备,可大大缩短作业时间,减少能源消耗。华测 E93 采集系统精度高,在图根控制和地质资料采集过程中,能精准获取数据,避免因数据不准确导致的重复作业,进一步降低能耗。相关研究指出,合理的设备选型能够有效减少无人机在勘探过程中的能源消耗,进而实现碳减排。例如,在类似的灰岩矿勘探项目中,通过优化设备选型,使得单位勘探面积的碳排放量降低了约 30%。根据工程的具体需要全面运用测绘 3S 技术进行 1:2000 数字化地形图制作的技术路线,利用新航摄资料及空三加密成功,采用航空摄影测量方法完成项目需求的 1:

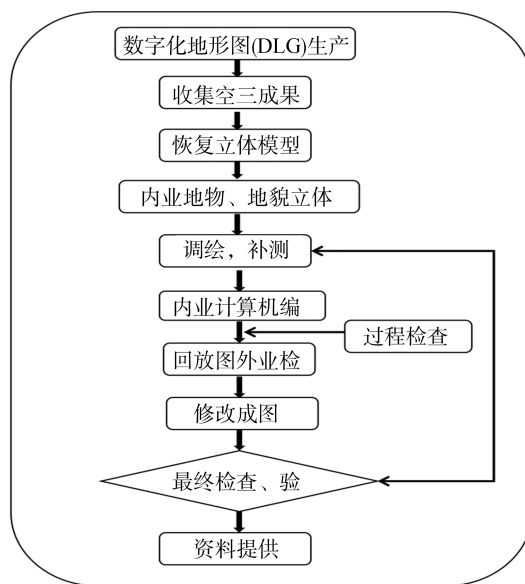


图 1 航空测量工作流程图

2000 数字线化图(DLG)测绘任务(图 1)。

此外,设备稳定性同样影响着勘探过程中的碳排放。灰岩矿勘查作业场地地形复杂、环境严酷以及不稳定的气流、强风等气象条件容易导致无人机失去控制甚至坠毁。一旦设备损坏,不仅在修理和替换设备方面会耗费大量时间,还会造成已收集数据的损失,导致勘探工作被迫中断,后续重新开展相关工作将增加能源消耗和碳排放。因此,选择稳定性高的设备,如经过特殊设计、适应复杂环境的无人机,能有效减少因设备故障带来的额外碳排放。

2.2 飞行计划优化的碳减排机制

飞行计划优化是实现无人机在灰岩矿勘探中碳减排的重要环节。从理论上分析,通过路径优化减少无效飞行里程,能够直接降低无人机的能耗与碳排放。例如,逆风飞行时合理规划航线,可以利用逆风产生的阻力来降低无人机的飞

行速度,从而减少动力消耗。在宿州矿区,冬季西北风较强,对矿区南北方向的勘查作业采用逆风起飞、顺风返回的航线,这种规划不仅能降低能耗,还能提高飞行安全性。

为了更直观地展示飞行计划优化的碳减排效果,结合本工程案例数据进行分析。在优化飞行计划前,无人机在该矿区执行一次勘探任务,平均飞行距离为 50km,电池消耗量为 80%,根据相关碳排放计算模型,此次飞行产生的碳排放量约为 15kg。优化飞行计划后,充分考虑当地的风向、风速、光照等因素,对航线进行了合理调整,平均飞行距离缩短至 42.5km,减少了 15%的航程,电池消耗量降低至 68%。经计算,优化后每次飞行的碳排放量减少至 12.7kg,相比优化前减少了 2.3kg,减排比例约为 15.3%。

在不同季节和气象条件下,飞行计划优化的策略也有所不同。在暴雨季节(6-8月份),提前规划后备降落场,选择地势高、排水条件好的地方,避免地面积水影响飞机降落,同时根据天气预报动态调整飞行时刻,在雨停后或短时间内完成任务,减少设备因潮湿受损的风险,避免因设备故障导致的额外飞行和能源消耗。在冬季和夏季,针对不同的风向和风速特点制订不同的航路规划。如夏季有强烈的东南风,在东南方向的工作区降低飞行高度,避免高空大风影响,减少因抵抗强风而增加的能源消耗和碳排放。在 5 级风以上的情况下,减少每次飞行的距离,提高重叠率,保证测量准确性的同时,避免因强风导致的飞行姿态不稳定而增加能耗。在 9-11 级大风时停止运行,防止飞机失事,避免因事故造成的设备损坏和后续勘探工作的能源浪费。

针对复杂地形的作业稳定性进行验证,在 > 30° 陡坡区(占勘探区 22%),通过 RTK 差分定位(基站+移动站模式)与倾角传感器校准(精度 0.1°),无人机悬停误差控制在 ≤ 0.5m(实测均值 0.32m);在植被茂密区(NDVI > 0.6),采用多光谱传感器(波段数 5)与 80% 航向重叠率设计,图像有效识别率达 96.7%。

另外,飞行规划考虑光照的季节变化也有助

于碳减排。在黎明和黄昏期间,通过调节飞行高度和飞行角度减小背光摄影导致的图像劣化,避免因图像质量问题而重复飞行获取数据。在高湿度和易形成雾的气候条件下,选择在早上 10 点到下午 3 点之间的高照明时间操作,减少图像后续处理工作量,进而降低因数据处理时间,延长导致的能源消耗。

2.3 数据处理流程的低碳附加值

数据处理流程在无人机技术应用于灰岩矿勘探的低碳路径中也具有重要意义。从理论角度分析,采用高效算法能够降低人工干预,减少机房高耗能设备的运行时间。以 AI 自动识别技术为例,利用机器学习方法对无人机拍摄的图像数据进行快速分析和处理,可自动识别图像中的地质特征,如通过深度学习算法自动辨识灰岩矿脉的走向,大大减少手工标注和处理图像的工作量。这不仅提高了数据处理效率,还减少了人工操作所需的时间和精力,降低了机房内计算机等设备的长时间运行能耗。

灰岩矿勘探资料处理效率存在瓶颈,需要建立一套系统的优化计划,以解决工程中的具体问题。针对安徽省宿州市顺河乡鹤山建筑用灰岩矿工程实例,由于不同的资源评价方法(普查时采用地质块段法,而此次为平行断面法)和地貌调查的变化,造成 1.26% 的误差。因此,对资料处理流程的改进主要集中在方法的适应性和规范化两个方面。在软、硬件的协作水平上,优选使用与纵剖面方法具有较高匹配度的数据处理工具,例如能够对由 UAV 拍摄到的高解析度图像和点云进行自动解析的专用地质模型化软件,从而能够以较低的人为干涉量,以较快的速度生成满足纵剖面方法的运算要求的 3D 模型(图 2)。同时,采用高性能的计算集群来解决数据量大的问题,保证地形数据校正和断面生成等复杂操作的高效率,不会因为硬件资源的限制而导致数据处理时间过长。在流程的优化上,建立数据处理的各个环节的标准化作业规程。在图像前处理过程中,对图像的校正和坐标变换建立统

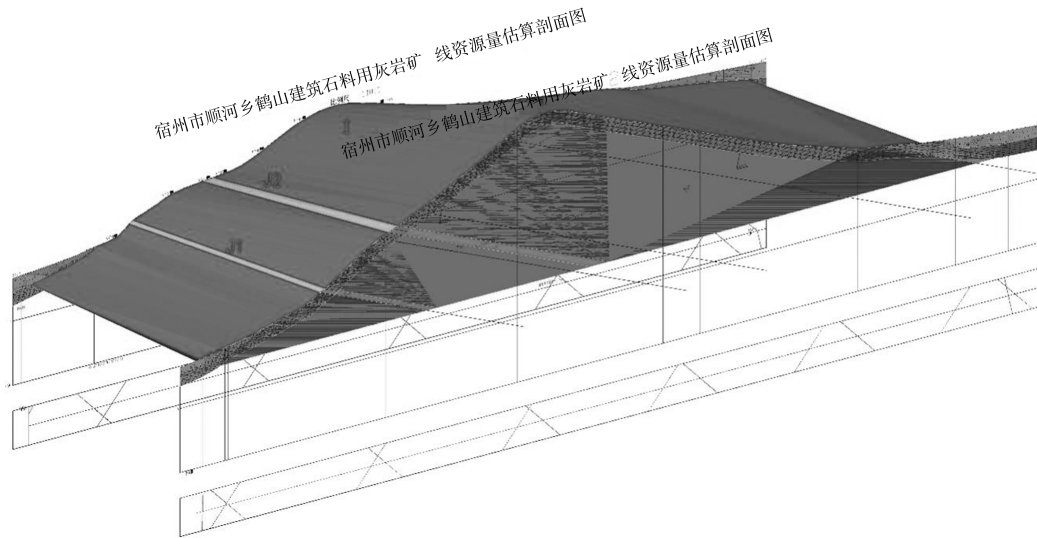


图 2 三维模型估算体积

一的标准,防止由于图像的格式和参数不一致而造成的重复工作;在模型的分析过程中,采用一些自动化的方法来代替传统的手工方法,如采用人工智能的方法来自动判别地层的界限,从而降低人工判定的误差。同时,借鉴该工程前 2 个储量估计错误的经验,在采用纵剖面法计算之后,采用地质区块法对其结果进行校核,从而提高储量估计的精度和可信度,提高勘探成果的产出效率和质量。

3 资源节约的碳排放量化与机制分析

3.1 能源节约的碳减排效应

无人机技术的电力驱动特性使其在能源消耗与碳排放上显著优于传统勘探方法。基于生命周期评价(LCA)理论,本研究构建能源碳排放对比模型:

(1) 无人机能耗模型:

单次任务电池能耗(E_{UAV})由飞行时间(t)与功率(p)计算:

$$E_{UAV} = p \times t (\text{kWh}) \quad (1)$$

按中国电网(华东区域电网 2020 年基准线排放因子为 $0.5201 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$,数据来源:《中国区域电网基准线排放因子(2020)》)平均碳排放因子($0.5 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$)换算,碳排放量为:

$$C_{UAV} = E_{UAV} \times 0.5 (\text{kgCO}_2) \quad (2)$$

(2) 传统钻探能耗模型:

钻探车辆燃油消耗量($C_{传统}$ 、 $V_{传统}$)与碳排放关系为:

$$C_{传统} = V_{传统} \times 2.68 (\text{kg CO}_2) \quad (3)$$

鹤山灰岩矿项目中,无人机单次任务平均能耗为 0.8 kWh (对应碳排放 0.4 kg CO_2),而传统钻探单次任务消耗柴油 15 L (对应碳排放 40.2 kg CO_2)。碳排放差异大,凸显无人机技术的低碳优势。

3.2 人力资源集约化的低碳价值

传统灰岩矿勘探需大量现场人员(地质员、钻工、测绘员),其通勤、住宿等活动产生间接碳排放。无人机技术通过自动化作业减少人力需求,实现碳减排的“隐形收益”。

人力需求的减少降低了人员通勤和住宿所产生的间接碳排放。以本项目为例,传统勘探方式需 10 名工作人员在现场工作一周,假设每人每周通勤往返路程为 100 km (车辆百 km 油耗 8 L ,柴油碳排放系数 $2.68 \text{ kg CO}_2/\text{L}$),住宿产生的能源消耗相当于每人每天排放 0.8 kg CO_2 ,则一周内人员通勤和住宿产生的间接碳排放量为 270.4 kg CO_2 。而采用无人机技术后,现场人员减少至 3 人,相应的间接碳排放量大幅降低,这充分体现了人力资源集约化带来的低碳价值。

3.3 环境扰动减少的生态效益

传统勘探中,重型机械进场、钻孔施工等操作易破坏植被与地表结构,造成水土流失与碳汇损失。研究表明,每公顷植被破坏导致的碳汇损失约为 50~100t CO₂ 当量。无人机技术通过非接触式测绘,将环境扰动降至最低。鹤山项目勘探区域面积 2km²,传统方法需开辟 3 条临时道路(总长 5km),破坏植被面积 0.2km²,对应碳汇损失约 10,000t CO₂ 当量。而无人机勘探无需地面作业,隐性碳成本趋近于零。此外,减少的土壤扰动还可降低后期生态修复费用(约 200 万元/km²),进一步体现其可持续性价值。

4 结论

无人机在灰岩矿山勘探中的应用,是当今世界低碳经济发展的必然趋势。本文详细探讨影响无人机探测灰岩矿的各种因素,并有针对性的提出优化方案。同时,分析无人机在灰岩矿山勘查中的作用。实践证明,利用无人机技术采用高效、节能的方法,可以大大提升灰岩矿山地质勘查工作的质量和效率,降低地质勘查费用,减少地质勘查过程中的资源消耗,减轻地质勘查工作对环境的影响,从而实现“低碳”发展。未来随着技术的不断进步和行业的发展,无人机技术在灰岩矿勘探领域将发挥更大的作用,为矿业资源的可持续开发利用提供更有力的支持。

参考文献(References):

[1] 吴刚,曾思宏,张立杰,等.某灰岩矿开拓运输系统的优化探究[J].新世纪水泥导报,2024,30(01):68-70.

[2] 何惠霞.浅析无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023,12(08):98-100.

[3] 李海棠.无人机测绘在矿山测绘中的应用对策分析[J].世界有色金属,2023,37(03):16-18.

[4] 王金荣.无人机航测技术在国土资源勘测中的应用[J].中国住宅设施,2023,22(01):70-72.

[5] 高海龙.探讨无人机遥感技术在金属矿山测绘工程测量中的应用[J].世界有色金属,2023,37(01):13-15.

[6] 朱正华.无人机倾斜摄影测量在矿山监测中的应用——以龙山建筑石料用灰岩矿为例[J].安徽建筑,2021,28(03):170-171.

[7] 陈国旭.传统资源储量估算信息化研究现状及发展方向[J].金属矿山,2013,42(05):105-109.

[8] 栗雪彬.基于三维软件资源储量估算对比研究[J].矿产勘查,2020,11(04):726-731.

[8] 杨再兴,曾凌云.全国砂石土矿山开采管理现状研究[J].中国国土资源经济,2020,33(05):44-50.

[10] 张璐,周新鹏,林伟,等.3DMine 软件在基础地质勘查工作中的应用[J].工程地球物理学报,2020,17(04):508-515.

[11] 任超,冉丽,朱喜久,等.地质统计学在境外某铜矿资源量估算中的应用[J].矿产与地质,2017,31(04):826-832.

[12] 谭钢,印建平,丁钟,等.蒙古国图木尔廷-敖包锌矿三维地质建模与资源量估算对比研究[J].矿产与地质,2018,32(06):1127-1135.

[13] 毛志芳,刘开红.“三角网法”和“方格网法”在土方量计算中的应用[J].江西煤炭科技,2014,35(03):50-53.

[14] 史国伟.基于 VBA 开发的矿体自动圈定及资源储量估算智能化[J].矿产与地质,2019,33(05):933-936.

[15] 张琪,刘兴龙,孟冬青,等.3D Mine 软件在非法开采矿产资源量计算中的应用[J].城市地质,2023,18(01):117-121.

[16] Zhao Q, Zhang L, Solid-state batteries for UAV applications: Energy density and safety prospects [J], Nature Energy, 2024, 9(02): 112-120.

作者简介:

第一作者/通讯作者:白雪,1990年生,女,济南人,安徽省地质矿产勘查局322地质队,工程师,主要研究方向为地质测绘工程。Email:282166321@qq.com

Efficiency Optimization and Resource Conservation Path of UAV Technology In Limestone Mine Exploration under Low Carbon

BAI Xue

(Anhui Geological and Mineral Exploration Bureau 322 Geological Team, Ma'anshan 24300, China)

Abstract: This article takes the exploration project of the Heshan building limestone mine in Shunhe Township, Suzhou City, Anhui as the research object, focusing on the application of UAV technology in limestone mine exploration under the perspective of low carbon. Through the analysis of engineering examples, the main factors affecting the efficiency of UAV in limestone mine exploration are systematically discussed from three perspectives: equipment performance, meteorological conditions and data processing. And from the perspective of equipment selection and maintenance, data processing procedure is improved and the flight plan is optimized, and targeted strategies for optimizing work efficiency are put forward. The phenomenon of unreasonable resource allocation of UAV in limestone mine exploration is analyzed, and the way of resource saving of man-machine in limestone mine exploration is proposed. It provides theoretical basis and practical basis for the efficient and low-carbon application of in limestone mine exploration, and promotes the sustainable development of limestone mine exploration.

Key words: low-carbon; UAV technology; limestone mine exploration; efficiency optimization