

表 1 各剖面不同工况下的稳定性系数

计算剖面	计算方法	自重+暴雨	自重+暴雨+爆破振动力	自重+暴雨+地震力
L-L1 剖面	简化毕肖普法	3.112	2.970	2.777
	M—P 法	3.114	2.968	2.775
M-M1 剖面	简化毕肖普法	2.988	2.853	2.670
	M—P 法	2.980	2.844	2.660

7 陡帮开采效益

7.1 陡帮开采推迟剥离量

陡帮开采提高临时工作帮坡角，最主要的是要缩小最小工作平台宽度和增加开采的阶段高度。对该石灰石矿山从穿孔爆破、铲装、运输等方面来看，最小工作平台宽度控制在 40m 左右是可以实现的。如果以 12m 段高 3 个台阶一组合进行组合台阶开采，阶段高 36m，则工作帮坡角由的 22° 提高到 29° 左右，在技术上也是完全可以实现的见图二。通过 (2) ~ (4) 式计算得出单位延迟剥离量为 434.8m³。

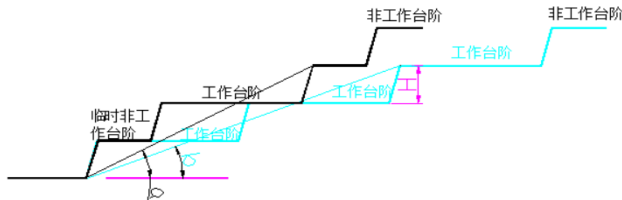


图 1 推迟剥离量示意图

$$\Delta v = n^2 H^2 (ctgb - ctga) / 2 \quad (2)$$

$$b = \arctg \frac{nH}{(n-1)w + nH / tg\alpha} \quad (3)$$

$$a = \arctg \frac{nH}{w + (n-2)l + nH / tg\alpha} \quad (4)$$

式中 Δv 为每米延迟剥离量； b 为缓帮开采帮坡脚，根据 (3) 式计算得 22°； a 为陡帮开采帮坡脚，根据 (4) 式计算得 29°； w 为最小工作平台宽度，40m； l 为临时非工作台阶宽度，15m； H 为台阶高度，12m； α 为工作台阶坡面角，75°； n 为组合台阶个数，根据 (1) 式取 3。

7.2 经济效益

整个东采区上部区域大体为长条状，从南向北推进陡帮开采的具体方法是：+660m 平台推进至优质矿位置时，+648m 平台开始从南（低质矿）向北（优质矿），工作平台超前距离 200m。从南侧靠边界位置修建矿区内运矿道路至 +624m 以上各平台。保障低质矿持续开采，并且可以根

据搭配比例随时调整低质矿的出矿量。增加东采区使用量，减缓西采区优质矿石的使用量，逐渐平衡东、西采区开采高度差距。西采区运距约 1.22km，东采区运距为 0.56km 运输成本 0.78 元/(t*km)，东矿每年出矿量约 172 万吨，减少了距离较远的西采区出矿量，节约运费 88 万元。同时将台阶与竖井降段匹配，使得后期开采整体运距得到优化，减少重车上坡距离。

东采区低质矿南北长约 350m，陡帮开采延迟出矿量约有 40.6 万吨，按挖装成本 3 元/吨。避免了集中开采此区域无法全部用于搭配生产，产生的二次堆放挖装费用约 121.8 万元。

7.3 增加作业面，保证施工安全

雁行追踪式开采可以有多个台阶同时工作，但必须保障相邻台阶超前距离符合安全要求。上一台阶爆破或排危对下面台阶都有一定影响，但现场施工组织合理可缩短影响。多个台阶同时出矿才能够保障低质矿搭配所需要的量，杜绝交叉作业，保障生产安全。陡帮开采减少人员、设备暴露在终了边坡附近作业时间，且根据边坡稳定性分析可看出在不同工况下其稳定性系数均大于三级边坡安全稳定性系数。

8 结语

该石灰石矿山采用陡帮开采方式调整了底部优质资源与中上部劣质资源出矿时间，节约了低质矿二次转运堆放成本；同时调整了东、西采区延深不平衡，匹配竖井与各平台的降段速度，使得各平台尽量以重车下坡或平路行驶为主优化矿石运距，节约运输成本。各台阶的施工组织安排是陡帮开采的关键工作，必须重视相邻台阶间钻、爆、挖、运及辅助各工序的统筹安排。

参考文献

- [1] 石磊.关于露天采矿技术及应用发展阐述[J].冶金与材料,2023,43(4):115-117.
- [2] 杨鹏,蔡嗣经.高等硬岩采矿学[M].北京:冶金工业出版社,2010,68-69.
- [3] 王寰宇,韩延清,渠爱巧,等.某露天煤矿陡帮开采技术方案比选[J].现代矿业,2017(6):57-62,75.
- [4] 林荣平,刘献华.陡帮开采技术在紫金山金矿的应用[J].有色金属(矿山部分),2002,54(3):14-15,20.

Optimization of topographic mapping accuracy of mountainous area by UAV aerial survey

Dongpo Meng

Hubei Electric Power Planning and Design Research Institute Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430040

Abstract

To address the challenges of rugged mountainous terrain, low efficiency, and insufficient accuracy in traditional surveying, this study conducts research on optimizing topographic mapping accuracy for drone aerial surveys in mountainous areas. By identifying key error sources in processes such as ground simulation flight, image control point layout, and data processing, a comprehensive precision positioning optimization system is developed. Two practical case studies—road surveying in Gansu's 16-square-kilometer mountainous region and hydropower project mapping in Shaanxi—are employed to validate the effectiveness of the optimization strategy. Through DEM fusion-based flight path planning, adaptive image control point deployment, and multi-source data integration, the system achieves maximum planar accuracy of 1.8cm and elevation accuracy of 2.7 cm, with 40% higher efficiency and 55% lower costs compared to traditional methods. The research demonstrates that this optimization framework effectively resolves issues like uneven resolution and model voids in mountainous aerial surveys, providing reliable support for large-scale topographic mapping in mountainous regions.

Keywords

UAV aerial survey; mountain terrain; surveying and mapping accuracy optimization

无人机航测的山区地形测绘精度优化研究

孟东坡

湖北省电力规划设计研究院有限公司, 中国 · 湖北 武汉 430040

摘 要

针对山区地形起伏大、传统测绘效率低、精度不够的问题,本文进行无人机航测山区地形测绘精度优化研究。根据仿地飞行、像控点布置及数据处理等重要过程误差来源,创建全流程精确定位优化系统。利用甘肃16平方公里山区公路勘测、陕西水电工程测绘两个实战案例来检验优化策略的有效性,采用DEM融合航线规划、自适应像控点布设、多源数据融合处理后,平面精度最高可达1.8cm,高程精度可达2.7cm,比传统方案效率提高40%,成本降低55%。经研究发现,此优化体系可以很好地解决山区航测时出现的分辨率不均、模型空洞等状况,给大比例尺山区测绘提供可靠的支撑。

关键词

无人机航测; 山区地形; 测绘精度优化

1 引言

山区地形测绘对于公路建设、水电开发、地质灾害监测等都有着十分重要的基础性意义,但是由于其起伏剧烈、高差显著等特点,给传统的测绘技术带来了很大的挑战。固定高度无人机测绘容易出现高海拔区域重叠度低,低海拔区域分辨率过高的问题,造成空三失败或者成果精度不均。传统“粗测+精测”迭代模湖北省武汉市式可以提高精度,但是成本增加,效率低。近些年来,仿地飞行、倾斜摄影等技术的发展给山区测绘提供了一条新路子,已有研究证明仿地飞行可以明显提高高程精度,但是在 DEM 预处理、航线

参数优化等方面还没有系统方案。本文针对精度优化过程中的关键环节给出全方位的技术方案,有重要的现实意义,对推进山区测绘智能化升级起到了一定的推动作用。

2 无人机航测山区地形测绘的研究意义

2.1 破解山区测绘技术瓶颈的核心价值

山区地形复杂给传统测绘技术带来许多局限, GPS 全野外作业劳动强度大、周期长,陡坡、密林区难以进行。无人机航测由于机动性好、覆盖范围大,成为山区测绘的主要方式,而精度优化研究则直接针对它的主要问题展开。经由解决仿地飞行航线规划、影像匹配误差等事宜,可以有效地避开模型空洞、扭曲变形这些质量瑕疵,在陕西水电工程测绘当中,精度改良之后即便是在 800 米高差的地形上依然能取得高精度成果,冲破了原先的技术应用界限,给予复杂山

【作者简介】孟东坡(1987-),男,中国湖北武汉人,硕士,从事电力研究。

区测绘赋予可行的方案。

2.2 支撑工程建设提质增效的实践价值

山区公路、水电等工程建设对测绘精度要求很高, 1 : 500 比例尺地形图的平面和高程精度直接关系到工程设计是否合理、施工是否安全。精度优化研究能提高成果的可靠性, 在甘肃某山区公路勘测项目里, 采取优化策略之后, 模型完整度做到 99.3%, 对比传统办法周期减短 40%, 节约开支 55%。高精度测绘成果能缩减工程返工率, 减小施工风险, 在边坡稳定性评定时准确的高程数据可改善灾害预警精确度, 给工程安全赋予坚固保证^[1]。

2.3 推动测绘行业技术升级的创新价值

目前无人机航测技术正处于快速发展阶段, 山区测绘精度优化研究可以推动多技术融合创新。在研究过程中用到的 DEM 数据融合技术、航线平滑算法优化、AI 地形预测等技术可丰富无人机航测技术体系。像基于地形复杂程度的自适应像控点布置策略, 根据数学模型进行像控点数量精确计算, 摆脱了以往按经验布置的方式。这些技术创新除了可以运用到山区测绘之外, 还可以向应急抢险、文物保护等领域延伸, 推进测绘行业的智能化与精细化发展^[2]。

2.4 服务生态保护与灾害监测的社会价值

山区属于生态保护的重点区域, 同时也是地质灾害易发区, 高精度测绘成果对于生态监测以及灾害防控具有重要意义。精度提升之后的无人机航测可以实现对植被覆盖区地形的精确还原, 从而给生物栖息地守护以及退耕还林状况监测赋予数据依靠。地质灾害监测利用前后期高精度测绘数据对比, 可以准确找到滑坡、泥石流等地质灾害发生时变形的特点, 提高地质灾害预警的时效性。山区洪水淹没范围监测用厘米级精度的正射影像, 可以为救灾方案的制定提供准确的依据, 最大程度上减少人员和财产的损失。

3 无人机航测山区地形测绘的发展现状

3.1 核心技术应用日趋成熟

无人机航测技术在山区测绘中已经形成基本体系, 仿地飞行作为核心技术, 已经发展出 DSM 仿地和实时仿地两种主流模式。DSM 仿地通过导入地形数据生成变高航线, 其中预扫模式虽然增加了作业时间但是安全性更高, 基础模式使用公开 DEM 数据成本低但是需要人工干预修正; 实时仿地通过传感器实时感知地形实现“贴地”飞行。倾斜摄影技术和仿地飞行的结合越来越广泛, 多镜头同步拍摄可以提高模型的立体感, 高山测区用该组合技术制作的 1 : 500 地形图, 其平面中误差为 0.291m, 符合规范要求^[3]。

3.2 精度影响因素研究较为深入

学界已经明确无人机航测山区精度主要影响因素为前期 DEM 数据精度、飞行参数设置、像控点布置和后期数据处理方法。DEM 数据误差会直接叠加到飞行高度上, 造成总高度误差变大; 飞行参数中航向重叠率 80%-85%、旁向

重叠率 70%-80% 是最佳范围, 过低容易产生航摄漏洞, 过高会加重数据冗余; 像控点布设上地形特征点优先布设能提高解算精度, 60% 控制点 +40% 检查点的分级使用模式已成共识; 数据处理软件 ContextCapture、Pix4D 等空三解算效率较高。

3.3 实践中应用中仍存突出瓶颈

尽管技术已有了一定的发展, 但在实践中还有很多问题。复杂地形的适应性差, 高差大于 800m 且气象条件差的地方, 航线会剧烈震荡, 影像质量受影响; 数据处理速度慢, 大量的倾斜影像匀色、空三解算要耗费很长时间, 模型拉花、空洞等问题还需要人工修正; 成本控制难, 高精度 DEM 数据获取、专业设备投入、技术人员培训等费用高, 中小测绘单位难以承受; 四是标准化程度低, 不同测区的技术方案没有统一的标准, 造成成果的精度稳定性不好。

3.4 技术发展呈现新趋势

无人机航测山区精度优化正在向智能化、多平台协同方向发展。加入 AI 技术以后, 地形特征可以自动识别和预估, 根据有限的对航线进行规划, 激光雷达与视觉 SLAM 技术融合之后, 使得实时仿地飞行不再需要事先的 DEM 数据, 提高了在复杂地形中的适应能力。无人机集群作业模式通过多机协同完成大面积测区的快速覆盖, 空天地一体化监测体系把卫星遥感、地面监测数据结合起来, 形成全方位的测绘网络。新的趋势给精度优化提供了一条新路径, 给行业发展注入了新的活力。

4 无人机航测山区地形测绘精度优化策略

4.1 前期规划阶段, DEM 数据融合与航线优化

前期规划是精度保障的基础, 核心就是创建高质量的基础数据并规划科学航线。使用多源数据融合和安全余量干预的 DEM 预处理方案, 将 AW3D30、ALOS 等公开 DEM 与已有地形图融合, 在 ArcGIS 软件中进行叠加校正, 剔除高程异常点, 对断层、陡崖等特殊地形区域用实地踏勘数据补充修正。安全余量设置根据地形坡度来调整, 坡度 $\leq 30^\circ$ 时取 20 米, $30^\circ < \text{坡度} \leq 60^\circ$ 时取 35 米, 坡度 $> 60^\circ$ 时取 50 米, 有效避免无人机撞山。航线规划用 WayPointMaster 软件, 根据 DSM 数据生成平滑航线, 用加权函数算法平滑航线拐点, 减少飞行高度突变。针对不同的地形设置不同的参数, 高山区域为 85% 的航向重叠率和 75% 的旁向重叠率, 平缓区域为 80% 的航向重叠率和 70% 的旁向重叠率, 保证全域分辨率一致。例如测区设置相对航高 359.40m, 影像地面分辨率达到 0.05m, 完全满足 1, 500 地形图精度要求, 航线总长度比传统方案缩短了 12%, 提高了作业效率^[4]。

4.2 数据采集阶段: 设备选型与像控点优化布设

设备选型要符合测区的要求, 建立“地形复杂度”和“设备性能”之间的匹配模型。高差超 500 米的高山区首选大疆 M300 RTK 无人机, 最大飞行海拔 7000 米, 载重 1.7kg,