

飞马无人机在铁路定测阶段的应用研究

郑伦英 18610298727 罗静 李小胆

《中铁工程设计咨询集团有限公司》

摘要:

在铁路勘察设计定测阶段,大量的外业测量工作必不可少,为了减少外业勘测的工作量,提高铁路测量作业的效率及精度,结合工程实例,采用飞马无人机平台搭载不同传感器系统模块,对设计铁路沿线进行正射影像、倾斜影像、LiDAR 点云、视频航空摄影。项目应用研究表明,无人机航摄可应用于铁路 1:2000 地形图测量、线路横断面测量、特殊工点 1:500 图测绘、地质遥感判释、征拆视频制作、方案演示汇报等工作,具有数据获取灵活便捷、作业效率高、成果精度高、能减少外业工作量等优势,可广泛应用于今后的铁路勘察设计中。

关键词:

飞马无人机; 铁路定测; 航空摄影

1 引言

随着我国铁路建设的发展,在铁路勘察设计阶段,特别是定测阶段,需要使用多类型的航摄数据,以多样性的数据源成果解决外业测量的困难,优化线路设计方案,提高工作效率,节约经济成本。受航空管制、飞行条件等的影响,使用大飞机搭载不同传感器进行航空摄影,在时间和成本方面不够经济,且摄影灵活性不足,无法满足铁路勘察设计定测阶段的需要。随着无人机及传感器技术的发展,无人机低空航摄技术已经广泛应用于土地测绘工程、三维数字城市建设、规划建设、紧急抗灾、水利、电力巡检等领域,无人机航摄凭借其操作简单、使用灵活、产品种类丰富、性价比高等特点,受到铁路行业的广泛关注,其在铁路勘察设计阶段的应用优势日渐凸显。

2 项目背景

某新建铁路线路全长约 300 公里,途经城市、乡镇和山区密林等地区,地形类型包括丘陵、山地和高山地,且部分区域地势陡峭,地质情况复杂,沿线植被茂密,自然资源丰富。初测阶段 1:2000 地形图已经完成一年,现场部分地物地貌发生变化,且设计线位存在变更的情况,因此项目定测阶段需要进行 1:2000 地形图测量、地形图更新、线路横断面测量、特殊工点 1:500 图测量、地质遥感判释、征拆视频制作、方案演示汇报等工作。

采用大飞机进行航空摄影,无论从时间、效率、成本还是完成度来说,都无法满足实际生产的需要,仅靠外业实测方式,测量工作量多、难度大,工作效率低,测量精度受环境影响大,也无法满足实际生产需要,测量条件如图 1 所示。

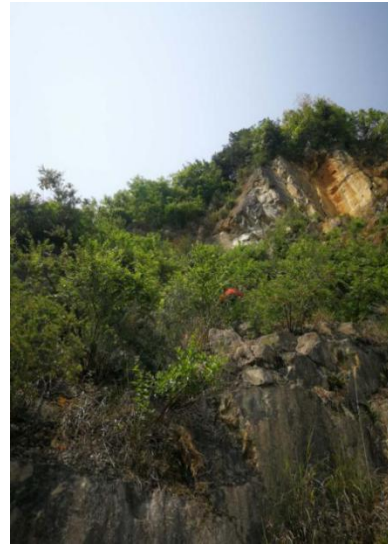
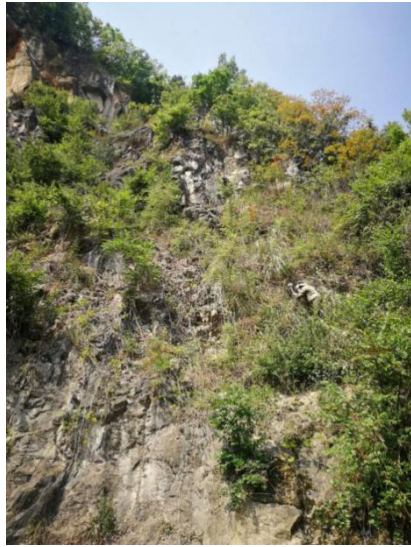


图1 铁路勘测现场

针对复杂山区铁路勘察设计需要，航遥院引进飞马 D300 和飞马 D2000 系列无人机，两者皆为多旋翼无人机，D300 传感器包括航测模块、Lidar 模块、倾斜摄影模块和视频摄影模块四种，如图 2 所示，D2000 传感器仅为 Lidar 模块，如图 3 所示。



图2 飞马 D300 航测系统



图3 飞马 D-LiDAR2000 航测系统

3 项目应用

3.1 基本比例尺地形图测绘及更新

该项目定测阶段涉及到改线，需进行 1:2000 地形图测量及更新，在隧道进出口、桥梁、车站等特殊工点位置需要测绘 1:500 大比例尺地形图。本次使用飞马 D300 无人机搭载 D-CAM300 航测模块进行航飞，利用获取的影像完成基本比例尺地形图采集及更新工作。

3.1.1 方案设计

根据航测规范要求及测图需要，针对 1:2000 地形图测图，航摄地面分辨率设定为 8~10cm，针对 1:500 地形图测绘，航摄地面分辨率 $\leq 5\text{cm}$ ，影像重叠度航向重叠度应在 60%~85%，最小不小于 53%；旁向重叠度应在 15%~60%，最小不小于 8%，航带设计如图 4 所示。

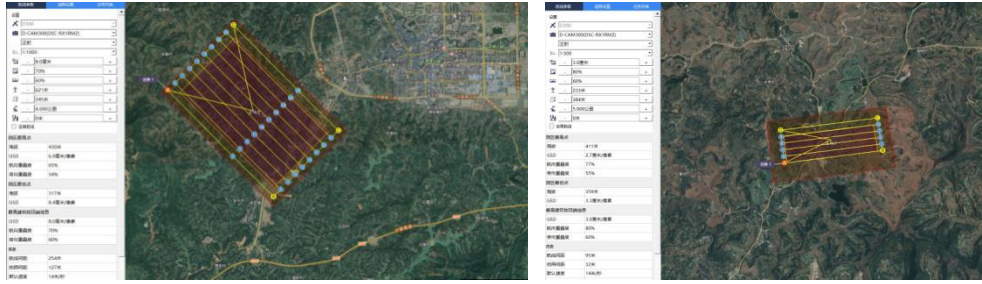


图 4 航带设计

3.1.2 数据处理

以某区域 1:2000 地形图成图为例，根据地面基站和无人机的 PPK 模块解算厘米级的 POS 数据，依据测区的地形特征布设地面控制点，外控点布设及测量现场如图 5 所示。

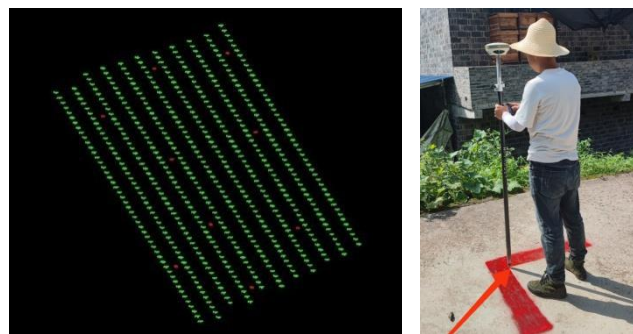


图 5 像控点布设测量图

使用无人机管家进行空中三角测量，该区域定向点平面误差最大值 0.208m，高程误差最大值 0.154m，检查点平面误差最大值 0.254m，高程误差最大值 0.185m，满足规范要求^[1]，输出加密成果及去畸变影像，使用立体测图软件进行地形图测绘，测量成果如图 6 所示。

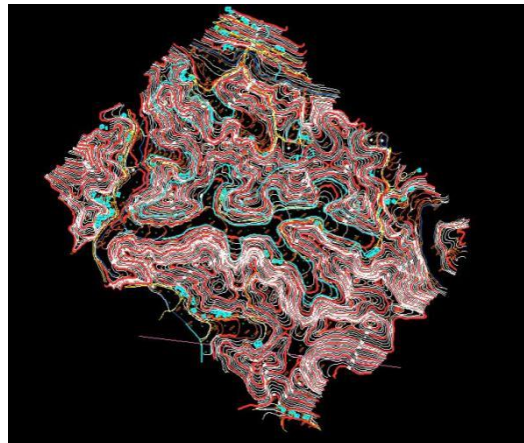


图 6 1:2000 地形图成果

3.1.3 精度分析

采用 RTK 测量方法在成图区域测量地物地貌检查点，检查地形图精度，全区共测量平面检查点 25 个，其误差统计情况如下：

地形图平面误差最大值 0.32m，中误差 0.19m，测量高程检查点 22 个，高程误差最大值 0.28m，中误差 0.13m，满足规范要求，由此可知，使用飞马无人机进行 1:2000 地形图

测量是可行的。

1:500 地形图测量可以使用航摄模块获取影像进行立体测图，也可以使用无人机搭载激光雷达传感器获取地面点云数据，结合数字正射影像生产，精度及生产效率都优于立体采集，因此被广泛应用于实际生产中。

3.2 线路 LiDAR 点云横断面测量

横断面测量是指测量垂直于线路中线方向的地面线，其测量目的是要反应线路垂直方向的地形起伏情况，以绘制横断面图进行隧道、路基、桥梁、站场等工程设计^[2]。在铁路定测阶段，各专业需要大量的横断面数据，如果仅仅靠外业的测量方式，无法满足项目的实际需要，采用航测的方法，在植被茂密的地区，精度无法满足距离限差 $\pm 0.3\text{m}$ ，高差限差 $\pm 0.35\text{m}$ 的精度要求^[3]，因此采用飞马无人机搭载 LiDAR 模块，应用 GNSS 差分技术、IMU 数据处理技术、激光扫描技术等，快速、高精度地获取所测对象的空间三维坐标，通过点云数据滤波分类提取，获得线路横断面成果。

3.2.1 方案设计

本次航飞选用飞马 D-LiDAR2000 航测系统，回波数三回波，测距精度优于 2cm，水平定位精度优于 0.02m，高差定位精度优于 0.03m。D2000 具有仿地飞行功能，系统内置了地面高程模型，可以根据地面高程实时调整飞行高度，保证相对航高一致，使得整个测区点云密度相同。针对地面植被密度的不同一般分三个档次进行航线规划，如表 1 所示。

表 1 不同植被密度航线参数

地面植被情况	航飞高度	航带重叠度	航飞速度	平均点密度
密林区	100m	35%	8m/s	190 点/平方米
一般林区	130m	30%	10 m/s	115 点/平方米
植被稀疏地区	150m	25%	13.5 m/s	75 点/平方米

本次航飞属于一般林区，按照上表在无人机管家智航线中进行航线设计，如图 7 所示。

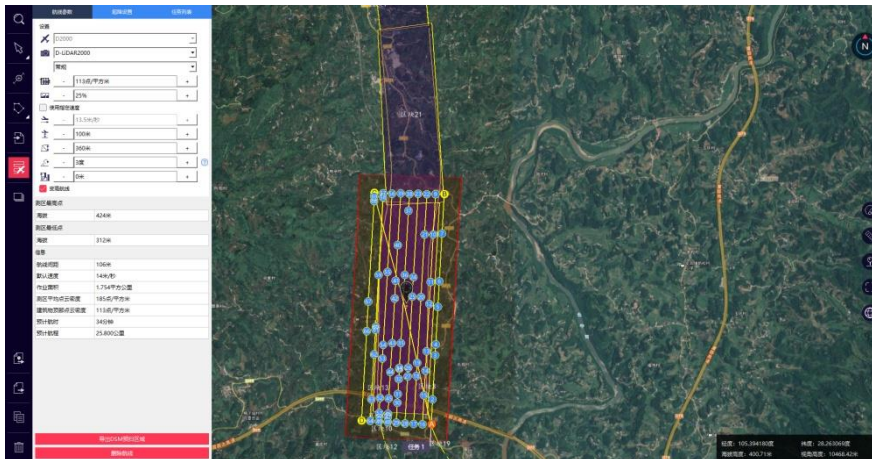


图 7 LiDAR 航摄航线设计

3.2.2 数据处理

机载 LiDAR 数据处理主要包括 IMU/GNSS 联合解算、点云平差处理、点云滤波等步骤^[4]，具体作业流程如图 8 所示。

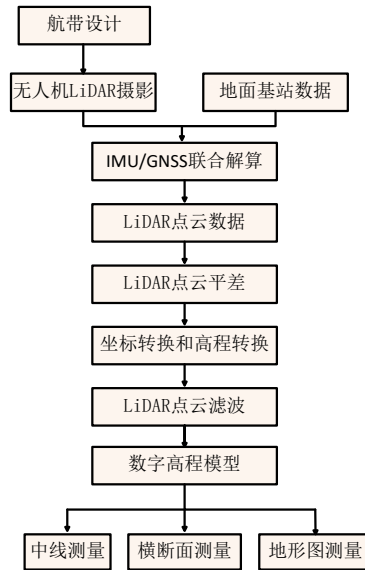


图 8 机载 LiDAR 作业流程图

LiDAR 点云数据处理包括数据预处理及数据处理，预处理是指 IMU/GNSS 联合解算，解算出航迹文件。无人机管家根据航迹文件和激光测距文件，自动进行航带数据的匹配平差，经过坐标转换，输出满足要求的点云数据，如图 9 所示。线路 LiDAR 点云的横断面测量是基于地面点数据提取，使用基于 Microsoft V8 平台的 Terrasolid 软件进行点云的自动滤波与人工分类，获得地面点，如图 10 所示。

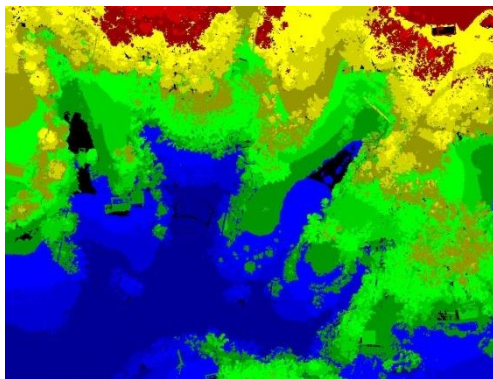


图 9 LiDAR 点云数据

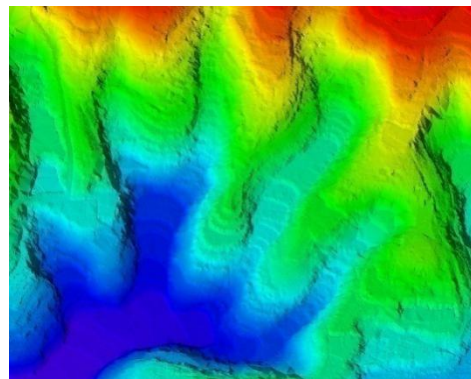


图 10 点云地面模型

使用 Terrasolid 软件进行横断面自动采集时，为了尽可能的获得所有地形变化处的高程，数据采集会造成冗余，使得设计软件在后续使用中无法承载，因此需要对自动提取的断面数据进行抽稀处理，抽稀结果如图 11 所示。

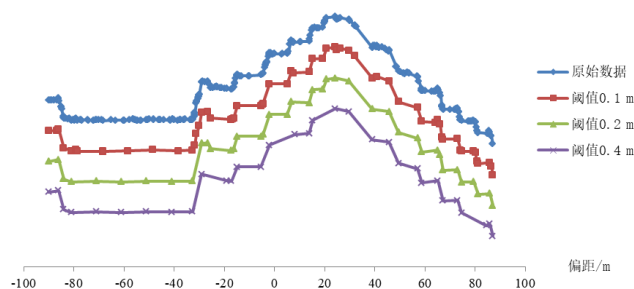


图 11 LiDAR 点云横断面数据处理成果对比

3.2.3 精度分析

LiDAR 点云横断面测量精度分析分为两部分：一是点云精度分析，即点云绝对精度，二是断面成果精度分析，即点云相对精度。为了检测 LiDAR 点云绝对精度，采用 RTK 测量方法在测区范围内测量检查点，导入 LiDAR 点云工程，内插得出高程差值。该区域外业共实测了 209 个检查点，检测点云高程偏差最大值 0.266m，检测点高程中误差 0.091m，高程偏差具体分布如图 12 所示。

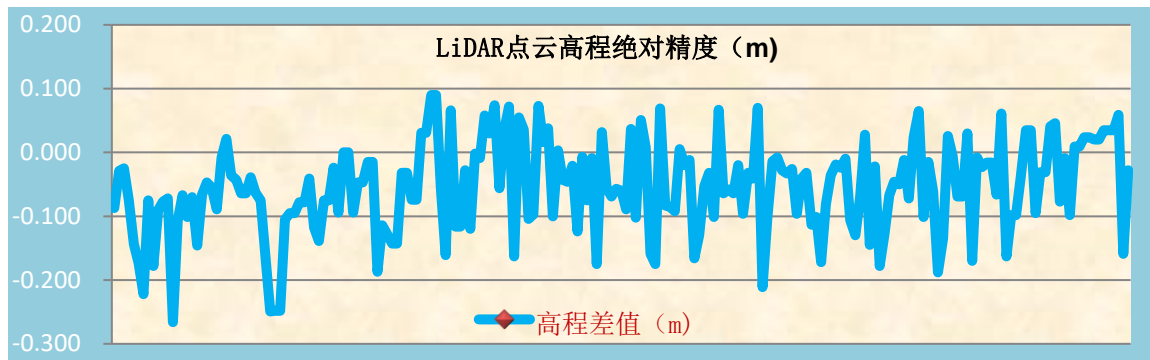


图 12 检测点高程偏差分布图

LiDAR 点云横断面成果与外业实测断面高差对比，对比结果如表 2 所示。

表 2 LiDAR 点云横断面与外业实测断面高差对比表

区间	点数 (个)	百分比	中误差 (m)
[0.0,0.35]	2546	90.48%	0.204
(0.35-0.5]	256	9.10%	
(0.5-1.0]	12	0.43%	
>1.0	0	0.00%	

由上表可知，LiDAR 点云横断面测量精度基本满足规范要求，可用于测量，但也存在高差差值大于 0.35m 的情况，根据现场实际勘察可知，误差较大的区域为：1、植被茂密的密林区，LiDAR 点云无法穿透植被到达地面，使得地面点缺少；2、在陡峭的沟坎区域，由于遮挡或者分类的错误，导致地面高程模型精度降低。针对第一种情况，我们可以使用雷达功率较强的传感器设备，增强点云穿透率，获得更多的地面点数据，针对第二种情况，需要加强人工分类及检核工作，尽可能地提高横断面测量精度。

由图 3.9 可知，LiDAR 点云精度满足 1: 500 地形图测量要求，具体作业可以单独使用点云测图，也可以进行正射航飞，制作 DOM，辅助成图作业。

3.3 三维实景模型生产

铁路勘察设计项目中，线路方案演示碰撞，重要工点设计、地质专业分析等对线路两侧地形及建筑物、构筑物三维数据的需求越来越大，常规的 DEM+DOM 模式已无法满足生产需求。随着倾斜摄影及实景三维建模技术的发展，无人机倾斜摄影以其自动化程度高、真实还原度高、空间精确度高的优势^[5]，被越来越多的使用在铁路勘察设计中。

3.3.1 方案设计

航飞采用飞马 D300 无人机搭载 D-OP300 倾斜模块，依据项目的需求设定地面分辨率，工点展示时地面分辨率设定为 5~10cm，地质专业分析时地面分辨率设定为 2~5cm。一般情况下按照垂直影像航向重叠度 70%，旁向重叠度 60%来设置影像重叠度。

3.3.2 数据处理

铁路三维实景模型制作采用无人机倾斜摄影测量技术来实现，其作业方法和流程如下图 13 所示，主要包括倾斜影像数据获取、数据准备、空三加密、实景三维建模、成果输出等内容。空三加密采用飞马无人机管家及 ContextCapture Center 软件联合完成，飞马无人机管家可快速整理航摄影像，建立加密工程，结合 ContextCapture Center 软件，可提高生产效率。

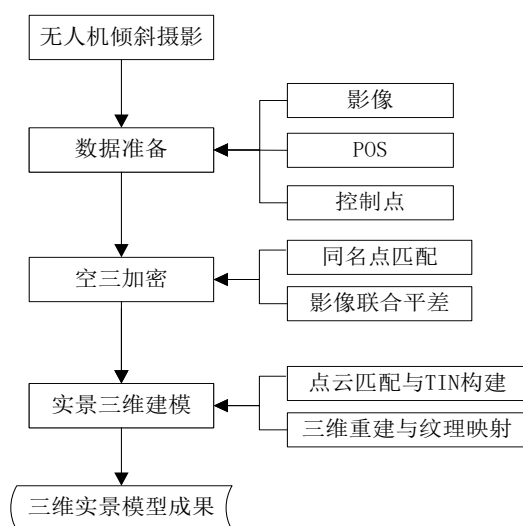


图 13 无人机倾斜影像三维实景模型制作流程

3.3.3 项目应用

在铁路项目工点设计时，采用无人机倾斜影像制作工点三维实景模型数据，能够直观、真实、生动形象地展示工点地物、地形地貌特征，作为铁路 BIM 模型的载体，能够直观地反应其与周边交通、建筑、环境间的空间位置分布关系和互通关系^[6]，以验证设计的可行性及优势性，如图 14 所示。

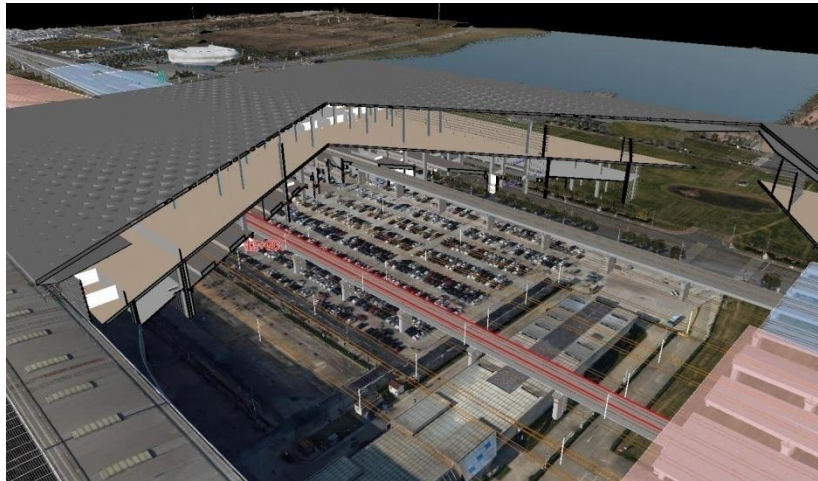


图 14 实景三维模型与铁路 BIM 模型融合展示

地质专业在进行专业调查时,也可以利用具有精确空间位置和逼真丰富纹理的三维实景模型数据,开展隧道口危岩落石调查、危岩带(体)稳定性定量分析、落石路径模拟计算、防护建议与措施等危岩落石专题分析研究工作,如图 15 所示。

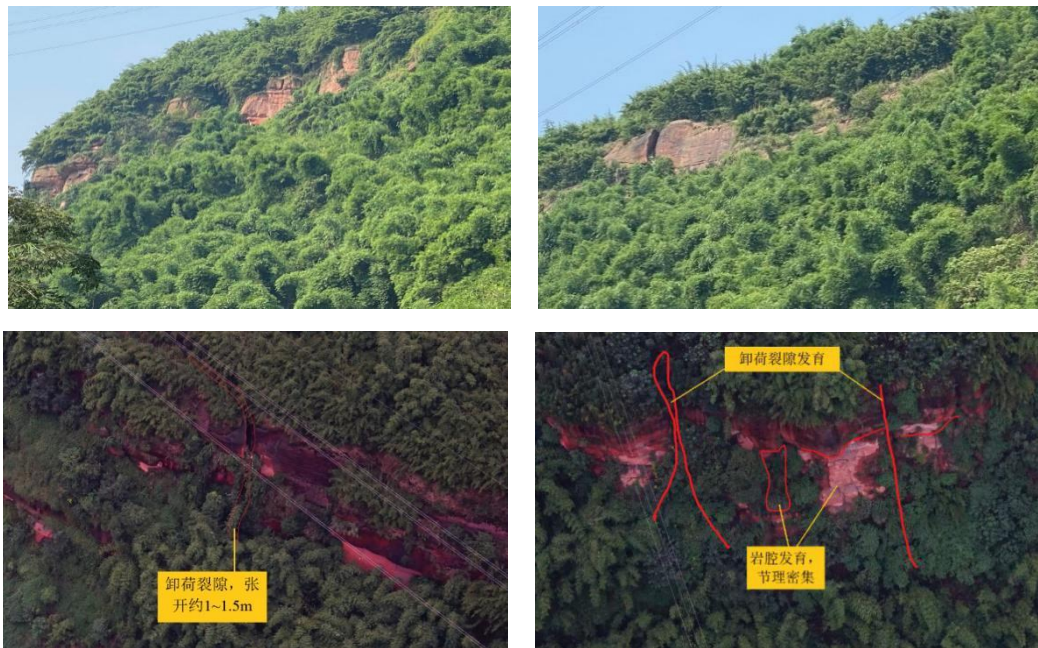


图 15 危岩带顶部发育特征现场照片(上图)及倾斜模型(下图)

3.4 视频摄影

无人机视频摄影的目的在于将地形图线路方案直观形象地展示在视频中,为专业调查困难地段提供素材;将线位、特殊工点、桥隧分布等情况展示在视频中,便于方案比较、汇报;记录线路周边地形地貌,减少后期因加盖房屋、耕地变化引起地经济纠纷^[7]。

3.4.1 方案设计

本次航飞采用飞马无人机 D300 搭载视频模块,线路东西走向,根据航飞经验及电池、信号的承载能力,每个架次航摄飞行 6-8KM,为了视频后续拼接和剪辑的过渡性和完整性,每个航线和上一个航线航向重叠 0.1km。根据地形情况,提前进行航线规划,具体规划如表

3 所示。

表 3 视频摄影航线规划

航线	里程范围 (m)	航飞高度	航飞速度	俯仰角	备注
1	DK158+000~DK164+500	300m	14m/s	30°~45°	
2	DK164+400~DK170+800	300m	14m/s	30°~45°	
3	DK170+700~DK177+500	300m	14m/s	30°~45°	

相机俯仰角设置根据地形情况或视频需要设定,如地形以山区植被为主,航飞俯仰角设置为 30°~45°,如需要显示天际线,则减少俯仰角度。

根据线路专业设计线位,导入无人机管家智飞行,进行航飞参数设置,如图 16 所示。



图 16 航飞参数设置

3.4.2 视频编辑

后期视频编辑采用 Adobe Premiere Pro 和 Adobe After Effects 软件,结合 SuperMap 超图和 MicroStation CONNECT Edition 软件。Adobe Premiere Pro 软件主要进行视频剪辑拼接,将不同架次的视频按照里程顺序拼接起来; Adobe After Effects 软件主要进行视频编辑,主要是添加线路中线、里程、用地界、特殊工点、重点地物标注等,标注内容包括点、线、面及文本; SuperMap 超图和 MicroStation CONNECT Edition 软件主要是对注记信息进行处理,辅助视频编辑。

3.4.3 视频成果

剪辑编辑后的视频成果,如图 17 所示。



图 17 视频成果

4 结论

在铁路勘察定测阶段投入使用飞马无人机能较大程度上提高作业效率，减少作业成本，便捷作业方式，丰富数据成果内容，创新铁路工程汇报展示手段，对工程实例成果数据的精度分析结果及其在三维实景模型与铁路 BIM 融合构建大场景等方面的创新应用表明，飞马无人机能够以高灵活性、高精度、高效率、低成本的方式满足铁路勘察设计定测阶段的需要，可作为测量的主要手段参与到设计项目工作中。

参考文献：

- [1] GB/T 23236-2009. 数字航空摄影测量 空中三角测量规范[S].
- [2] 铁道部第二勘测设计院. 铁路测量手册[M]. 中国铁道出版社. 2001.
- [3] GBT_10101-2018. 铁路工程测量规范[S]. 中国铁道出版社.
- [4] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路工程卫星的位与遥感测量技术规程[S]. 中国铁道出版社. 2020.
- [5] 黄骞, 代成, 张金等. 倾斜摄影技术在公路勘察设计中的应用初探[J]. 公路. 2018.
- [6] 高文峰. 信息化模型技术在铁路车站改造中的应用研究[J]. 铁道勘察, 2019(2): 5-9
- [7] 范宇东. 多旋翼无人机航摄影像视频技术在铁路中的应用[J]. 价值工程, 2021:210-211.
- [8] 张东旭. 飞马无人机在 1:500 比例尺地形图测绘中的应用[J]. 城市勘测, 2020(3): 150-152.
- [9] 赵小阳, 孙松梅. 无人机倾斜摄影支持下的 1:500 高精度三维测图方案及应用[J]. 测绘通报, 2019(7):87-91.
- [10] 甘俊“无人机+”测绘技术在铁路工程汇报展示中的应用[J]. 铁道勘察, 2020(5): 18-21