

# 无人机航空摄影测量技术在“一带一路”海外测绘任务中的应用

## —玻利维亚某钢厂选址及输水线路测绘项目

周小杰, 牟雪松, 胡振彪, 张健, 杜鹏

摘要: 综合利用多种 GNSS 测量手段, 应用无人值守连续运行站方式, 采用联测全球 IGS 站手段, 建立了项目全球基准网和玻利维亚某钢厂控制网。借助无人机航空摄影机动灵活的优势快速获取玻利维亚某钢厂及带状输水线路高分辨率影像数据, 利用差分 GPS 数据辅助空中三角测量手段在满足精度的前提下减少外业像控测量工作, 同时尝试基于点云中值滤波算法自动提取高程点及等高线等地形图要素, 提高地形图测绘工作效率, 为海外无人机地形图测绘服务提供可行的技术方案。

关键词: 无人机; 一带一路; 航空摄影测量; 地形图测绘;

### 1 项目概况

青岛勘察测绘研究院在“一带一路”建设过程中, 发挥综合技术优势先后在马尔代夫、塔吉克斯坦、津巴布韦、柬埔寨等十几个个国家开展了勘测地理信息任务, 逐渐形成了“一带一路”背景下海外测绘地理信息一体化服务的“青岛模式”, 通过多专业交互融合, 服务于海外工程项目规划、设计、建设、施工、运营全生命周期建设, 通过测绘信息化手段推动“一带一路”国际化合作。在这些项目中, 由于此类项目实施工期短、工作条件差、人员投入少、设备携带不方便, 传统测绘手段很难在有限的时间完成任务, 我院广泛采用轻小型无人机、Lidar、便携式 GNSS 设备等新兴测绘仪器开展海外勘测任务, 取得了很好的效果。

#### 1.1 项目来源

鉴于我院丰富的海外勘测服务经验和技術积累, 某大型国内外工程总承包商承建玻利维亚新建钢厂项目时, 直接委托我院开展勘测地理信息一体化服务, 涵盖厂址选址测绘、控制测量、工程初勘、详勘、输水线路测绘等一系列技术服务。在开展一期任务时, 需要开展 20 余平方千米 1:2000 地形图测绘和近 120 千米输水线路测绘任务。

#### 1.2 项目内容

1) 控制测量: 在测区采用现代大地测量技术手段, 建立全球基准网; 确定玻利维亚当地坐标系, 并建立联系, 形成与当地测绘基准相一致的高精度控制网, 为本项目勘察及各项测绘工作提供空间基准。

2) 某钢厂选址地形图测绘:

➤ 测绘 1: 2000 场地范围地形图;

3) 供水系统线路地形图测绘:

➤ 从玻利维亚某钢厂到巴拉圭河规划取水点, 沿线 124.5km, 宽度 60m, 测绘带状地形图 (以场地内现状路中线为基准, 两侧各 30m), 成图比例尺 1: 2000;

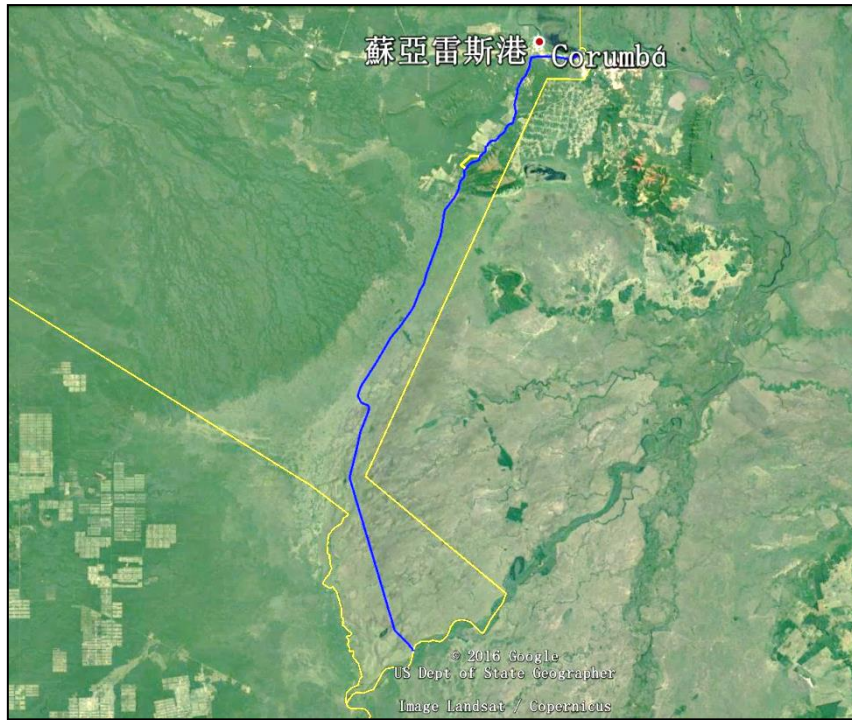


图1-1 输水线路图

### 1.3 测区自然地理概况

本项目位于玻利维亚境内，邻近巴西边界。测区境内，某钢厂植被茂盛，道路稀少，特征地物稀少，给无人机航空摄影测量带来一定的困难。输水线路，从某钢厂至巴拉圭河，全程约 120 公里，穿越沼泽地，道路崎岖，不利于航飞工作的开展；道路两侧有大量鳄鱼生存，沼泽地中有大量的蚊虫，对作业人员的安全有一定的威胁；同时，测区道路正在开展填土铺路的工作，极不利于像控测量及内业地形图测绘精度。综上所述，测区的自然地理情况不利于无人机航测法地形图的制作，对本项目的完成提出了较高考验。



图1-2 输水线路两侧鳄鱼在守候

## 2 项目技术路线

1) 控制测量：测设平面和高程控制点，建立坐标体系，为地形图测绘、勘察等工作提供空间基准。

(1) 收集已有控制点资料，获取当地坐标系统信息，实地了解点位保存情况、交通路线等情况，对建设区进行踏勘，掌握地形等地理信息，

(2) 在测区周边布设一定数量控制点，使用三台 GNSS 接收机，采用静态观测手段进行观测、平差，计算控制点坐标；高程利用 EGM08 全球似大地水准面模型，解算基线，并固定已有控制点高程值，平差得到各个点的高程。

2) 地形图测绘：利用无人机航测法，采用POS辅助稀少控制空中三角测量技术，测绘数字线划图（DLG）、数字正射影像图（DOM），为测区钢厂选址、供水线路设计及后期建设提供可靠的测绘保障。

### (1) 资料准备、航线预规划

收集测区内已有资料，进行分析，确定在本项目中的应用。

### (2) 实地踏勘、像控布设

按照技术设计的要求，对测区进行踏勘，掌握测区情况，选取合适的起飞降落场地。测区环境复杂、植被覆盖茂盛，像控点布设及测量工作困难，故空中三角测量解算时采取 F200 差分解算后的 GPS 数据辅助平差。但为确保空三解算精度及可靠性，仍布设一定数量像控点参与平差及检查。

### (3) 航空摄影

采用飞马 F200 固定翼无人机对测区实施大比例尺航空摄影，获取高分辨影像数据。航空摄影的同时架设基站，进行静态观测，静态基站的 GPS 数据与 F200 机上 GPS 数据进行差分解算，获取影像曝光点精确位置信息，减少后期空三解算的像控测量工作，提升解算精度。

#### (4) DLG、DOM 数据生产

- 利用像控测量成果、高清影像数据以及差分 GPS 数据进行空中三角测量。
- 基于空中三角测量的成果对 DLG 成图范围进行内业采集、编辑成图和建库工作。
- 利用创建好的立体像对进行影像匹配，生成数字地表模型（DSM），并结合内业采集成果中的三维特征点、线数据生成数字高程模型，利用数字高程模型对原始影像进行正射纠正，进一步进行镶嵌、色彩调整、裁切生成 DOM 数据。

### 3 实际作业流程

#### 3.1 控制测量

为了适应某钢厂项目选址需求，建立与玻利维亚当地坐标系的联系，并尽可能保持一致的需要。本坐标系椭球参数、投影方式与玻利维亚当地坐标系保持了一致，并经过与苏亚雷斯港、基哈罗港 3 个已知点联测和分析，实现了本项目测量成果与当地坐标系平面和高程坐标的一致。

##### (1) 平面坐标系统

椭球：WGS84 椭球；历元：2005.0；投影方式：UTM 投影（21SOUTH），中央子午线西经 57 度，6 度分带。

##### (2) 高程坐标系统

高程为 WGS84 椭球大地高经过 EGM2008 模型精化改正后的正常高（海拔高程）。

##### (3) 基准网布设

在驻地和厂区的空旷硬化区域布设 2 个 GNSS 基准点，点名为 HOTL 和 E001，其中 E001 与厂区控制网共用，作为本项目起算点，联测国际 IGS 站，并进行长时间观测（每天 10 小时以上，连续 5 天），观测等级高于国家 C 级 GNSS 测量要求。南美洲大陆上及周边分布有几十个国际 IGS 站，从中选取了数据能够获得且距离测区相对较近、均匀分布、控制网型较好的 7 个 IGS 跟踪站进行联测，建立基准网。联测的国际 IGS 站名为 BRAZ、UFPR、SCRZ、POVE、UNSA、IQQE、AREV，其中距离测区 1500 公里的 UFPR 站未做约束，作为检核点。



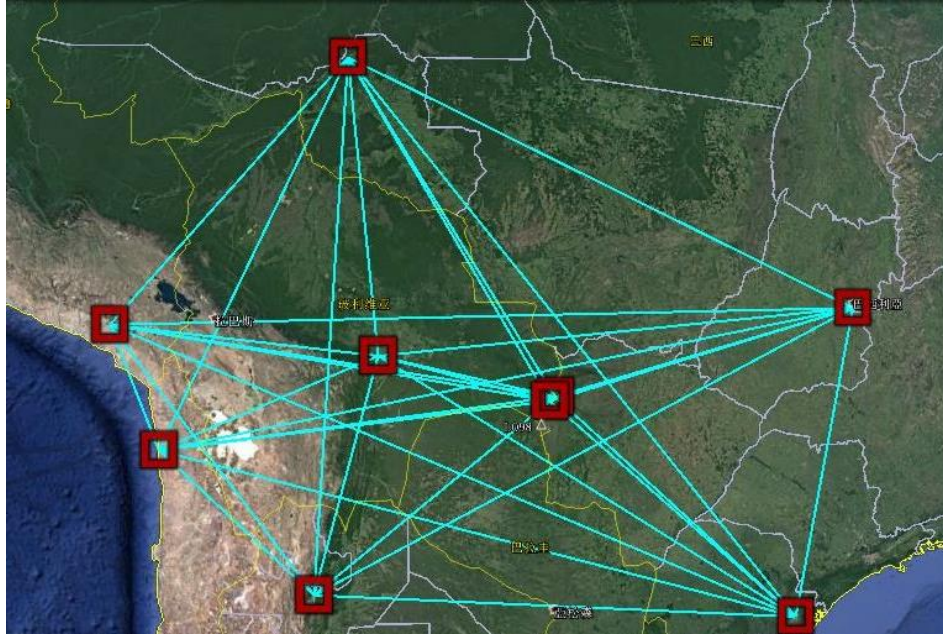


图 3-1 联测 IGS 跟踪站位置示意图

### (3) 控制网的布设

在钢厂布设 4 个控制点，点位排列为大地四边形，形成厂区控制网，点名为 E001、E002、E003、E004。采用钢钉打入地层或者混凝土浇筑，并用红油漆在现场标注，现场采用 IPAD 采集概略坐标，精度取至 0.1 秒，点位布设过程中采用数码照相机拍照进行过程记录。选点埋石结束后，现场绘制点之记（备注：玻利维亚开展工作涉及到土地权属问题，测绘工作只允许在自己的土地范围内开展）。

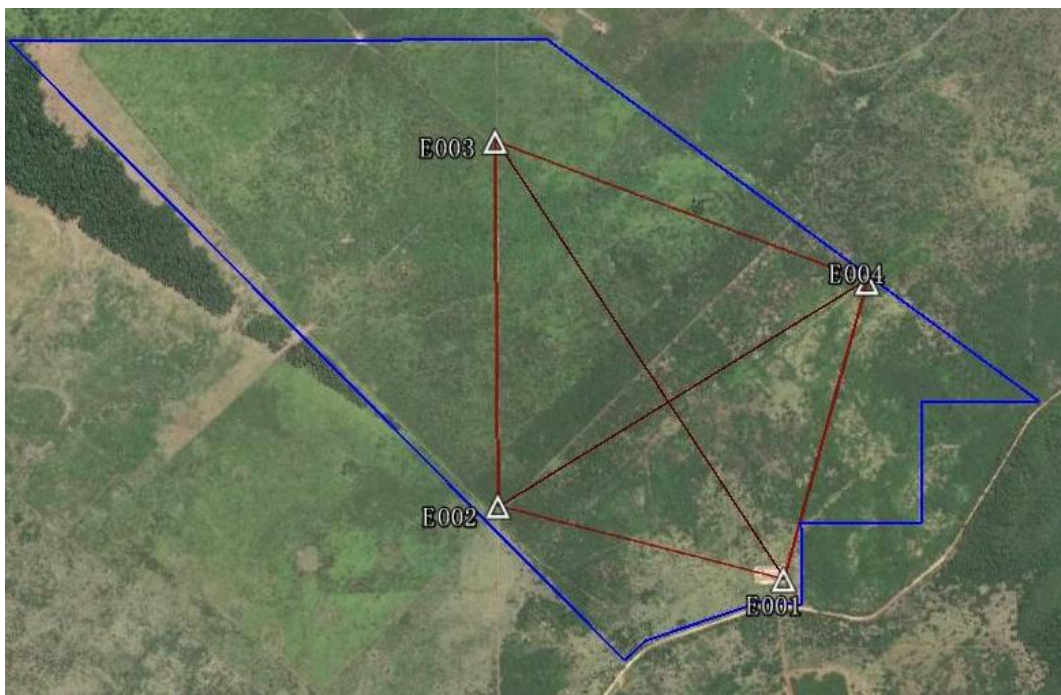


图 3-2 某钢厂控制网布设

#### (4) 外业观测

全球基准网外业观测采用 C 级 GNSS 卫星定位静态作业模式,采用 2 台天宝 R8 双频接收机进行观测,该接收机静态水平定位的标称精度为  $3\text{mm}+0.1\text{ppm}$ ,每天同步观测时间不少于 10 小时。控制网外业观测采用 E 级 GNSS 卫星定位静态作业模式,采用 3 台天宝 R8 双频接收机和 1 台天宝 R6 双频接收机进行观测,同步观测时间不少于 1 小时。



图 3-3 GNSS 卫星定位静态观测

#### (5) 数据处理

全球基准网基线为 20km 到 1500km,属于大型网,采用 GAMIT/GLOBK 软件进行数据处理,数据处理时下载同步 IGS 跟踪站数据以及 IGS 精密星历,进行高精度数据解算;

厂区控制网基线在 1km 到 20km 不等,属于小型网,直接采用广播星历、双星系统解算,采用 TBC 处理基线和平差。

#### 3.2 无人机航空摄影

本次航飞采用飞马 F200 无人机进行作业,搭载 SONYDSC-RX1R2 作为航摄仪,并且搭载 PPK 模块,航空摄影的同时架设地面基站,获取静态观测 GPS 数据。





图 3-4 某钢厂航线及航空影像示意图

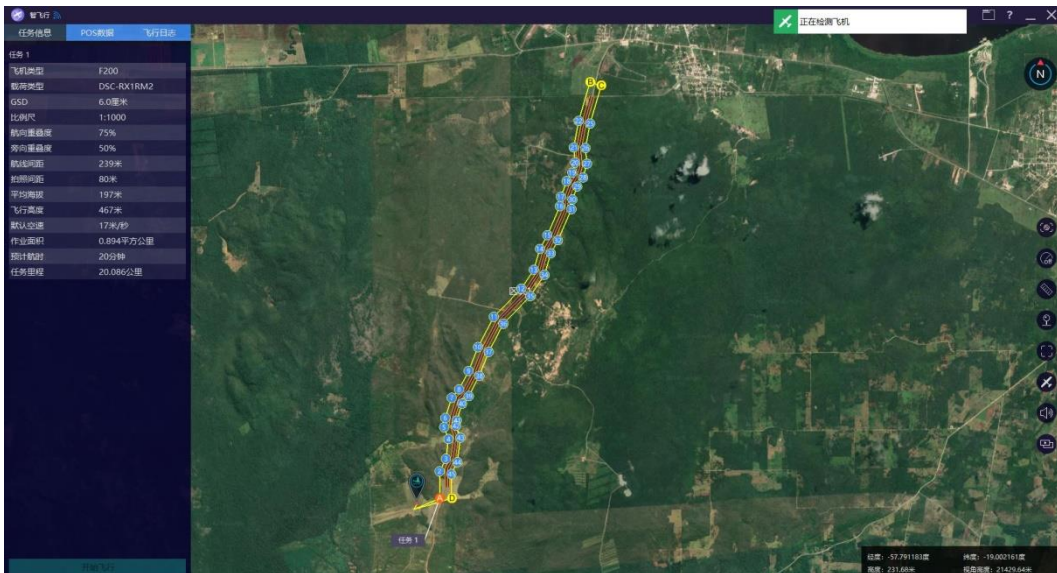


图 3-5 输水线路部分航线及航空影像示意图

本项目航飞由于测区大量植被覆盖，以及供水线路曲折狭长，无人机起降场很难确定，加之测区内有大量铁矿石，对无人机的信号干扰严重，航飞工作实施艰难。项目投入 3 架无人机，2 架 F200 固定翼无人机和 1 架精灵 4Pro 旋翼无人机，最终历时 7 天，完成测区航飞工作，有效航飞架次 13 个，3700 多张影像，影像空间分辨率 6cm。





图 3-6 某钢厂组装飞马 F200



图 3-7 飞马 F200 手抛起飞

### 3.3 像控测量及空中三角测量

通过实际踏勘，项目现场地物单调，无明显地物可作为地面控制像控标志，故根据航线



设计及地形情况，利用人工制作的靶标作为地面标志，预先布设作为地面像控点。像控点测量采用卫星定位静态作业模式（PPK）进行测量。



图 3-8 人工靶标

F200 搭载差分 GPS 模块，可获取影像点位高精度 GPS 数据，采用 GPS 辅助空中三角测量模式进行平差，大大减少像控点的布设个数。为保证地形图成图精度，本项目某钢厂区域采用区域网的方式布设像控点，总共布设 9 个像控点；供水系统线路路宽约 8m，道路两侧大多沼泽地，并有鳄鱼分布，故对供水线路沿道路边缘每 3 公里布设一个人工靶标作为像控点，并均与布设 9 个像控检查点。

空中三角测量加密分区情况：某钢厂一个加密分区，采用 GPS 辅助空中三角测量进行平差；尾矿库一个加密分区，由于人员无法进入，采用免像控 GPS 辅助空中三角测量进行平差；供水线路里程较长，并且周围植被覆盖茂盛，道路崎岖，为保证地形图精度，分为 3 个加密分区，每个加密分区约 40km。空中三角测量成果精度符合相关规范技术要求，同时通过后期地形图质量检查结果间接验证空中三角测量成果的可靠性。

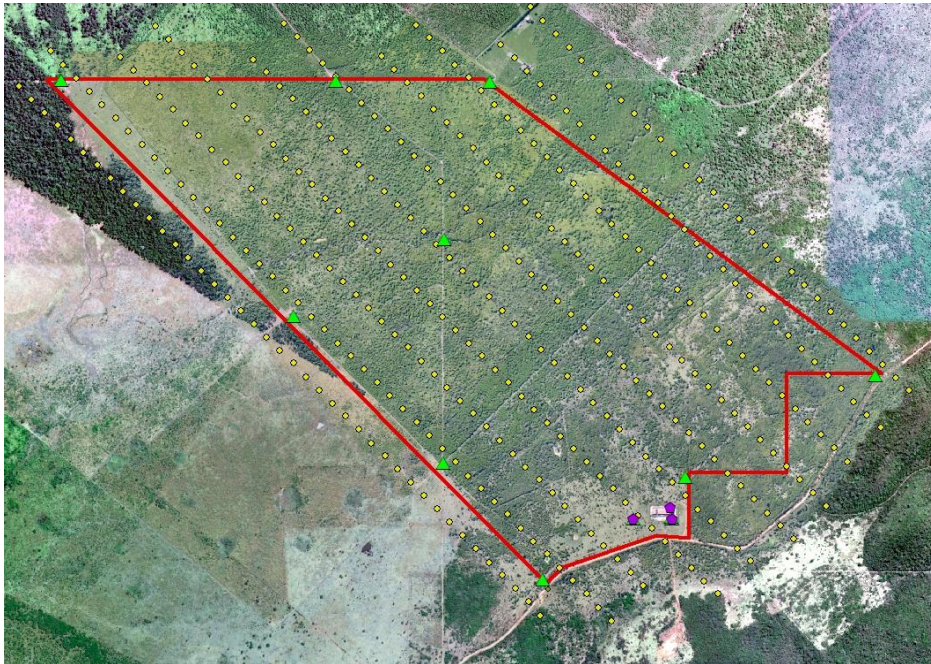


图 3-9 某钢厂像控点示意图（绿色为像控点）

### 3.4DLG、DOM 数据生产

在空中三角测量的基础上，借助摄影测量工作站自动提起数字表面模型，通过自动滤波

技术制作数字高程模型，进一步进行单片纠正、镶嵌匀色、分幅裁切等作业流程制作数字正射影像图（DOM）。



图 3-10 某钢厂 DOM 成果示意图

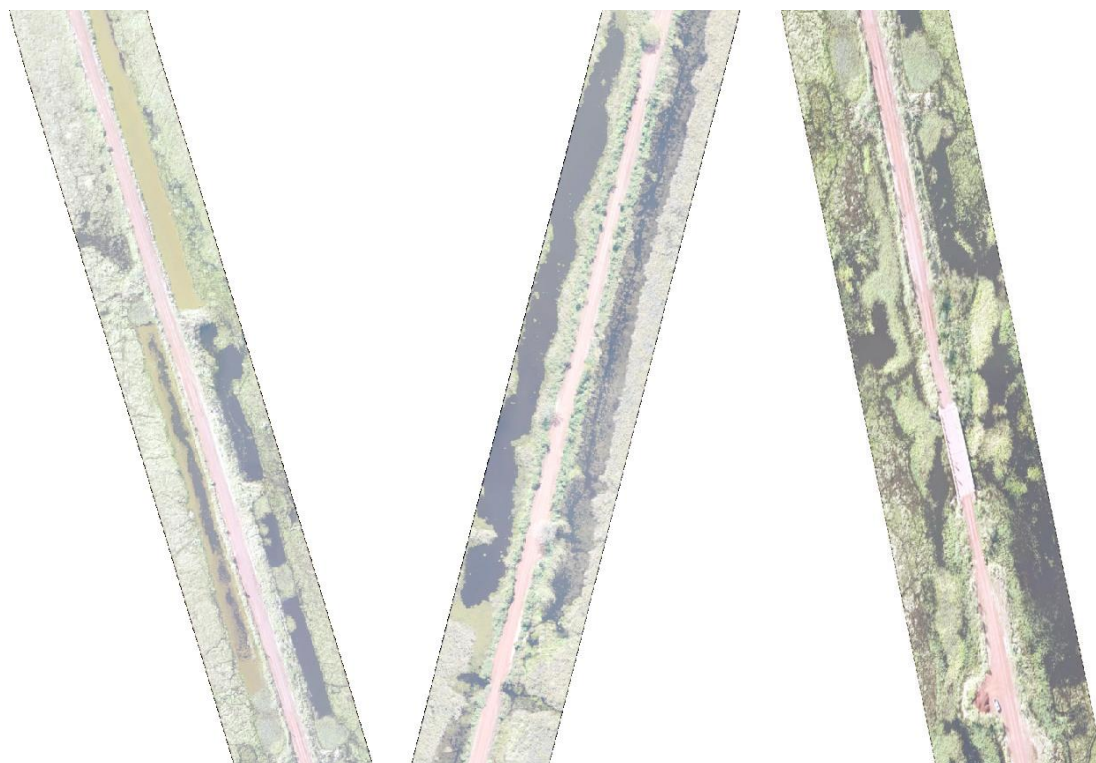


图 3-11 输水线路部分 DOM 成果示意图

针对数字线划图（DLG）成果，分析测区地形起伏较小、地物大多为植被、水域和少量房屋建筑，类别单一，测绘地形图大量工作在采集高程点及等高线方面，故本项目利用摄影测量工作立体采集工作只针对房屋、水域及陡坎等要素开展，高程点及等高线制作通过算法自动实现。高程点及等高线自动制作的思路如下，利用提取的数字表面模型自动滤波剔除



植被、水系、房屋等数据，获取地面点数据制作数字高程模型，并自动提取等高线数据，为满足地形图图示的可读性及美观性可进一步进行平滑处理。在地面点数据的基础上进一步采用中值滤波算法，按照地形图高程点密度要求逐空间格网方式提取高程点，提高地形图制作的工作效率。

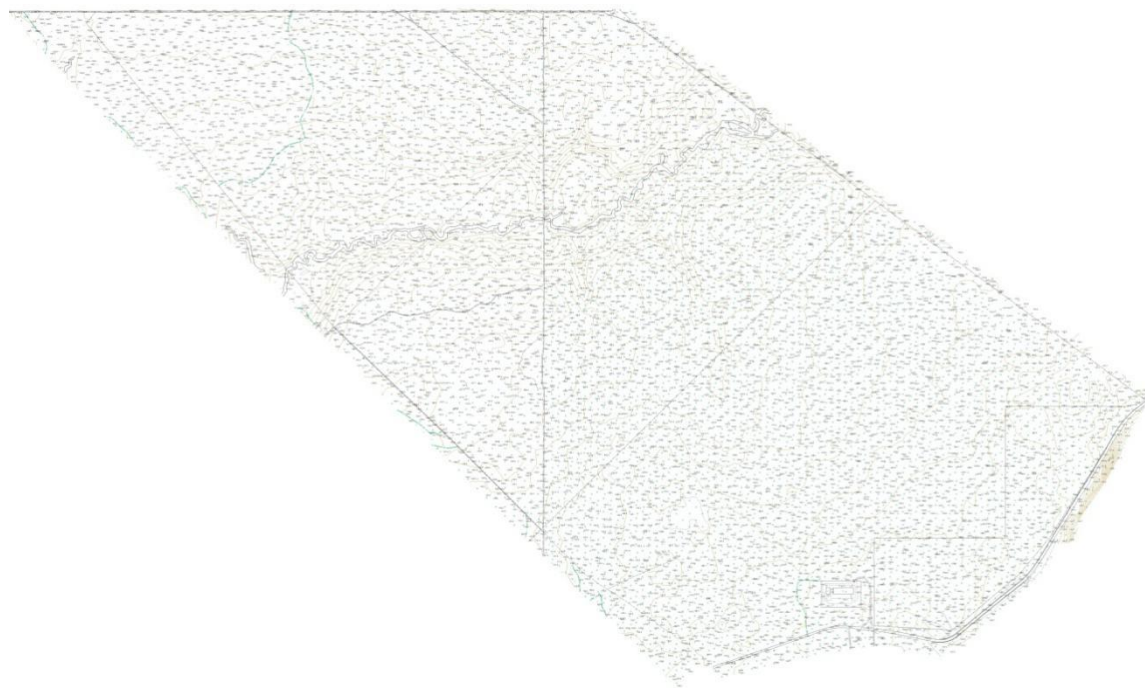


图 3-12 某钢厂 DLG 成果示意图



图 3-13 输水线路部分 DLG 成果

4 成果精度情况

4.1 控制精度

1) 基准网精度统计

GAMIT 基线解算的精度评价最直观的方法为通过单天标准化均方差 NRMS 衡量，他表示单时段解算出的基线值偏离其加权平均值的程度。NRMS 越小表明基线解算精度越高，小于 0.3 即为合格。

表 4.1 基准网基线解算单天标准化均方差

序号	日期	年积日	NRMS
1	6-26	177	0.202
2	6-27	178	0.201
3	6-28	179	0.200
4	6-29	180	0.204
5	6-30	181	0.207

表 4.2 基准网检核点坐标较差 (单位: m)

检核点	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
UFPR	0.0248	-0.0024	0.0158

2) 厂区控制网精度统计

本次测量布设了厂区控制网，平差后边长及精度统计如下表，精度接近国标 C 级网精度水平。

表 4.3 厂区控制网平差精度统计表

No.	FROM	TO	S(m)	MS(cm)	MS:S	ppm
B7	E001	E004	1332.086	0.138	1/962247	1.039
B5	E001	E003	2168.651	0.099	1/2194300	0.456
B1	E001	E002	1226.607	0.103	1/1190872	0.840
B6	E003	E004	1683.416	0.129	1/1303693	0.767
B4	E003	E002	1502.068	0.120	1/1249744	0.800
B11	HOTL	E001	22348.529	0.113	1/19741126	0.051
B8	HOTL	E004	21247.841	0.210	1/10112319	0.099



B9	HOTL	E003	22234.699	0.130	1/17162389	0.058
B10	HOTL	E002	23094.972	0.186	1/12404735	0.081
最弱边 theworstbaseline						
No.	FROM	TO	S(m)	MS(cm)	MS:S	ppm
B7	E001	E004	1332.086	0.138	1/962247	1.039

#### 4.2 地形图精度

由于测区自然湿地及林地环境，同时项目工期紧张，平面精度检查采用立体采集特征点线和数字正射影像同名特征点检查，高程精度利用现场实测高程点和地形图上的高程注记点进行内插检查。经检查平面和高程精度均满足相关规范及合同约定要求，具体统计信息如下表所示。

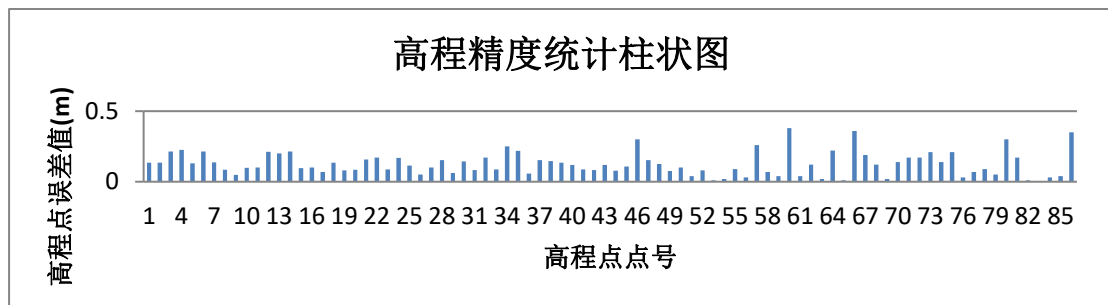


图 4-1 高程精度统计图表

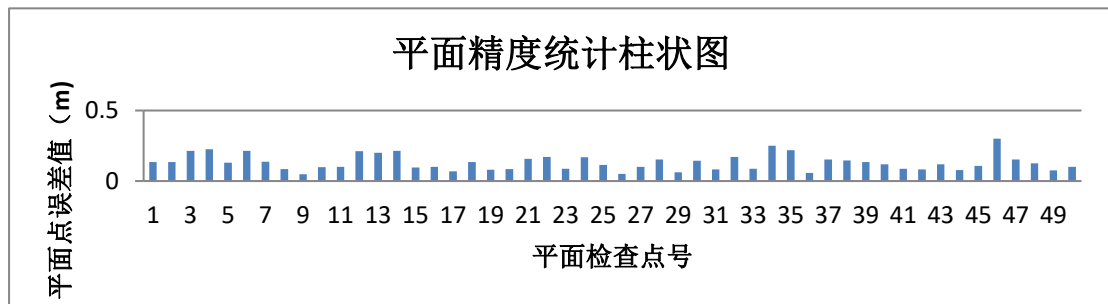


图 4-2 平面精度统计图表

#### 5 解决生产中的问题

无人机航空摄影测量技术应用于大比例尺地形图测绘，技术路线已经相当很成熟，项目实施起来也比较简单，但针对海外项目工期紧张、设备资源缺少、地理环境复杂等特点影响下，项目实施过程中往往遇到一系列问题。在此分享下飞马 F200 应用于玻利维亚海外地形图测绘遇到的一些问题及解决办法。

##### 5.1 无人机出关、入关申报

无人机设备在很多国家属于敏感设备，如果没有走正常报关手续，出关和入关时设备会

被海关暂扣、罚款甚至没收。建议出关前了解对方国家海关相关法律法规和政策，提前进行无人机出关申报。

## 5.2 无人机管家带状区域规划提高航飞效率

玻利维亚钢厂到巴拉圭河规划取水点，沿线约 120km，宽度 60m，成图比例尺 1: 2000，线路崎岖，以传统面状航线规划要增加几倍甚至十几倍的航飞面积，增加航飞工作量，不利于项目开展。采用无人机管家的带状区域规划，每 10-15 公里作为一个分区进行航线规划，对于线路弯曲较大区域可以增加拐弯航点，确保航飞区域无航摄漏洞，提高带状区域影像采集工作效率。

## 5.3 差分 GPS 辅助空中三角测量减少外业像控测量

项目采用飞马 F200 无人机，配有 PPK 模块，航飞作业的同时架设地面 GPS 基站同步进行静态 GPS 观测。航飞完成后利用机载 GPS 数据和地面基站 GPS 数据进行差分解算，获取无人机航飞摄影瞬间曝光点的精确点位信息，即影像差分 GPS 数据。采用差分 GPS 辅助空中三角测量平差，降低钢厂像控点密度要求，弥补巴拉圭河供水线路像控点布设不合理造成平差边缘区域误差较大的不足。

## 5 项目总结

项目综合利用多种 GNSS 测量手段，应用无人值守连续运行站方式，采用联测全球 IGS 站手段，建立了项目全球基准网和玻利维亚某钢厂控制网。

借助飞马无人机航空摄影机动灵活和无人机管家人性化的航线设计的优势快速获取玻利维亚某钢厂及带状输水线路高分辨率影像数据，利用差分 GPS 数据辅助空中三角测量手段在满足精度的前提下减少外业像控测量工作。同时尝试基于点云中值滤波算法自动提取高程点及等高线等地形图要素，提高地形图测绘工作效率。

本项目包括控制测量、无人机航空摄影、地形图测绘等技术流程，属于无人机航空摄影测量一体化综合生产测绘项目，技术路线科学合理，为海外无人机地形图测绘服务提供值的借鉴的技术方案。

在此真诚感谢深圳机器人厂家对本项目大力支持。

## 6 项目创新点

### (1) 综合利用多种 GNSS 测量手段建立控制框架基准

项目综合利用多种 GNSS 测量手段，解决了项目地点在南美洲处于南半球和西半球需要探讨全球基准建立，玻利维亚当地坐标系尚不确定等问题。同时应用了无人值守连续运行站方式，采用联测全球 IGS 站手段，建立了全球基准网、厂区控制网，基线长度跨越 1km



到 2500km，数据处理方法更加综合，为海外项目控制基准问题提供解决方案。

### (2) 基于点云中值滤波算法自动提取地形图高程点

基于点云中值滤波算法自动提取地形图高程点技术，在传统航测空中三角测量的基础上，生成空间数字表面模型，预设空间网格作为统计单元，同时约束地形图高程点密度，利用中值滤波算法逐格网自动提取满足标准比例尺地形图高程点信息。此技术路线同样适应倾斜摄影测量、机载 Lidar 数据处理，在基于地形图测绘的项目中可以进一步提升高程点采集精度，提高工作效率。

项目中某钢厂测区虽有大量林木覆盖，但林木之间间距较大同时无浓密杂草，利用航测法提取的数字表面模型（DSM）中有大量地面点数据。同时地势平坦，统计格网小区域内高程变化较小，用统计单元内中值信息作为地形图高程注记点，能够避免最大值和最小值的极端情况，也避免均值引入的近似误差，能够更贴切的表达地形信息。

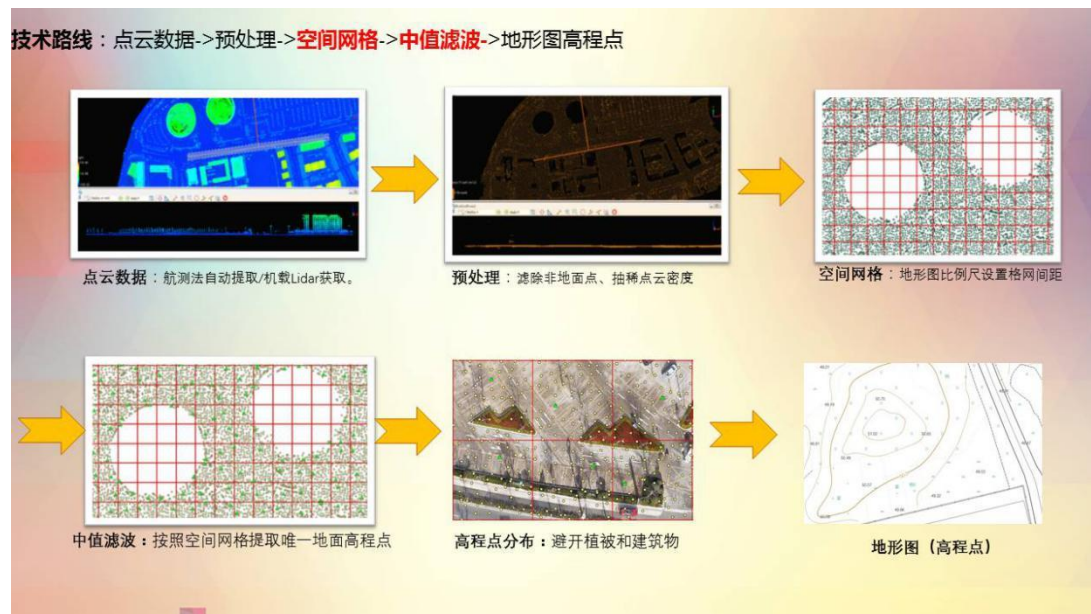


图 6-1 基于点云中值滤波算法自动提取地形图高程点技术路线

此方法高程点从原始点云数据提取，避免传统高程内插算法或人工立体采集引起高程精度的损失，利用中值滤波很好的抑制点云中低点、飞点、异常点等噪点对地面高程点提取的影响；同时利用空间网格技术，按照不同比例尺地形图对高程点密度要求设置合理的格网尺寸，对特殊地形区域设置不规则格网，满足地形图高程点密度要求。

### (3) 基于差分 GPS 辅助空三测量技术提高地形图测绘精度

输水线路测绘全长 120 公里，内有道路宽约 10m，道路两侧属于自然湿地保护区，藏有大量鳄鱼、毒蛇等危险动物，作业人员无法进入湿地布设像控点及测量工作，故只能沿道路内部布设，无法保证道路两侧区域地形图成果精度。

本项目采用静态基站 GPS 数据和飞马 F200 机载 GPS 数据利用飞马无人机管家进行差分解算，可获取无人机拍摄影像数据的精确空间位置。空中三角测量平差引入差分 GPS 参与解算，通过调整差分 GPS 权值约束，提高空中三角测量解算精度。通过大量生产实验表明，在像控测量无法实施的项目中可以采用免像控差分 GPS 空中三角测量平差，平面精度可以满足 1:500 地形图要求，高程精度满足 1:2000 地形图精度要求；如果可以布设一定数量控制点，可以采取稀疏控制点的差分 GPS 辅助空中三角测量方案，对平面和高程精度有一定提升作用，同时像控点也可以验证空三解算的精度及可靠程度。