

基于飞马系列无人机大比例尺航测地形图成图方法的应用研究

张懂庆

(甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院, 甘肃 天水 741020)

摘要: 随着无人机产业的飞速发展, 无人机航测作为一种新型地形图生产方式已然成为一种不可替代趋势。本文基于飞马系列无人机航测系统, 在以实际矿山生态恢复治理航测地形图生产的背景下, 利用 ARCGIS、CASS 相结合和 EPS 三维测图系统两种成图方法进行应用比较研究。结果表明: 两种方法都可以满足小区域大比例尺航测地形图的生产要求, 但前者生产成本低, 使用效率高, 易普及, 后者精度更佳, 便于数据库生产和后期数据维护。

关键词: 地形图测绘; 飞马无人机航测系统; EPS 三维测图系统; ARCGIS; CASS、ContextCapture Center (CC)

1 项目背景

1.1 背景介绍

随着无人机产业的日益成熟, 无人机航测技术也得到了空前的发展, 无论是软硬件设备、飞控系统、数据获取方式、处理模式、成果多样性, 还是产品精度、后期数据维护, 都有了质的飞跃, 智能化、灵活性日益凸显。无人机航测技术作为新型测绘产品的生产手段, 相较于传统测量模式, 有着不可替代的优势。如何利用航测技术手段和常见的测绘数据处理软件快速的生产出高精度测绘产品, 一直以来是测绘人关心的问题所在。

1.2 项目概括

为了按期完成甘肃成县厂坝大型铅锌矿生态恢复治理工程规划设计及工程实施, 需对 14.6km²区域进行快速地形图测绘, 同时提供可视化数字地表模型和约 1.3 km²区域的三维模型。测绘成果要求: 1:2000 DWG 格式地形图, 以及 20 cm 分辨率高清影像, 数字高程模型和三维模型, 此地区位于甘肃陇东南地区, 属山地地形, 坡度介于 25°至 75°之间, 交通较为便利。

2 技术路线

本文基于传统摄影测量技术, 结合成县厂坝大型铅锌矿生态恢复治理工程规划设计及工程实施实例, 利用飞马系列无人机易操作、高可靠、且具备实时差分、免像控的综合优势, 采用多机型、多架次、多维度相结合的方式对矿区进行前期数据采集, 无人机管家高精度融合解算和影像预处理, 工程创建、质检及快拼, 一键导出通用格式工程文件。采用最为常见的测绘软件 ContextCapture Center (CC)、PIX4D、ARCGIS、南方 CASS 和清华山维 EPS 分两种方案进行小区域大比例尺航测地形图生产, 具体流程如图 1 所示。

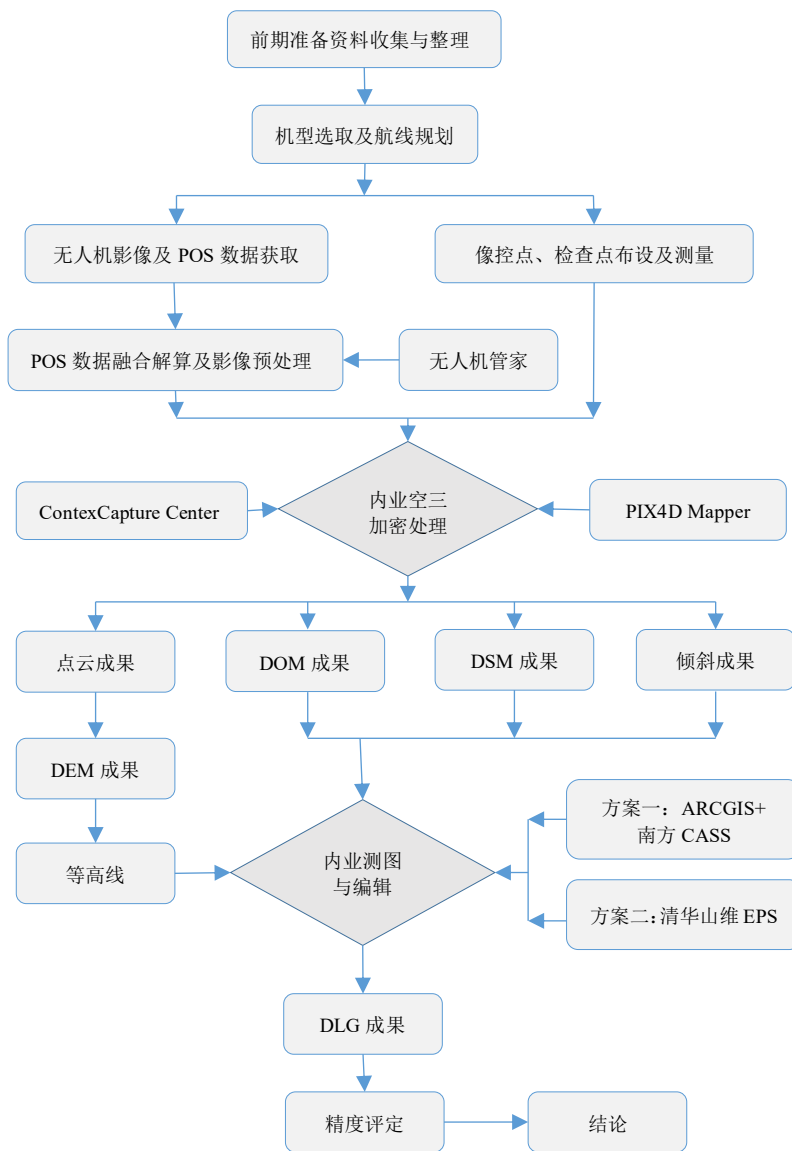


图 1 技术路线流程图

3 数据获取平台选取

根据测区实际情况及测绘产品的要求，本次无人机数据获取平台选用深圳飞马 D200 四旋翼无人机（如图 2 所示）和 V1000 垂起固定翼无人机两款无人机（如图 3 所示），其中，利用 D200 四旋翼无人机可变高、长续航、免像控等优势，搭载五镜头 D-OP300 倾斜模块，生产高精度三维倾斜成果，利用 V1000 垂起固定翼无人机长续航、简便易携带等优势，搭载单镜头 V-CAM1000 航测模块（具体参数见表 1），生产大面积正射成果。地面控制站选用飞马无人机管家，地面站可控制无人机按规划的航线进行数据采集，同时，飞马系列无人机不仅可以搭载正射、倾斜摄影模块，也可搭载激光雷达、可见光、多光谱、热红外、视频等模块进行多元化生产。



图 2 D200 四旋翼无人机



图 3 V1000 垂起固定翼无人机

表 1 D200 四旋翼无人机和 V1000 垂起固定翼无人机参数

项 目	D200 四旋翼无人机参数	V1000 垂起固定翼无人机参数
导航卫星	GPS: L1+L2 (20Hz) BeiDou: B1+B2(20HZ) GLONASS:L1+L2 (20Hz)	GPS: L1+L2 (20Hz) BeiDou: B1+B2(20HZ) GLONASS:L1+L2 (20Hz)
差分模式	PPK/RTK 及其融合作业模式	PPK/RTK 及其融合作业模式
标准起飞重量	8.5kg	4.8kg
悬停精度 RTK	水平 1cm+1ppm; 垂直 2cm+1ppm	水平 1cm+1ppm; 垂直 2cm+1ppm
巡航速度	13.5m/s	17m/s
测控半径	5KM	20KM
相机型号及参数	D-OP300 倾斜模块: 传感器尺寸 23.5×15.6mm 相机倾斜角度 45° 有效像素 2400 万 x5 镜头参数: 中间 25mm, 四周四个相机 35mm	SONYA7RIII : 有效像素: 4200 万 (7952x5304) 传感器尺寸 35.9mmx24mm 镜头焦距 35mm 定焦 分辨率 2cm@150m
抗风能力	5 级 (正常作业)	6 级 (正常作业)
任务响应时间	展开≤10min, 撤收≤15min	展开≤5min, 撤收≤10min
起降方式	无遥控器垂直起降	全自动垂直起降
续航时间	48min (单架次海平面悬停时间)	90min

4 外业数据采集

4.1 影像数据和 POS 数据获取

结合矿区地形特点, 大面积正射影像生产时, 选用 V1000 垂直起降无人机, 将测区划分为 2 个测区, 如图 4 所示, 三维倾斜生产时, 将矿区划分为四个测区, 如图 5 所示, 由于测区 1 和测区 3 高低落差较大, 采用变高飞行来确保建筑物和低海拔区域的地物精度, 测区 2 和测区 4 采用固定航高, 共飞行 4 个架次。由于飞马系列无人机具备 RTK/PPK 融合差分作业功能, 可直接通过网络 RTK 实时获取基准站和 POS 数据。同时, 为了确保成果质量, 按照相关航测规范和保证立体像对后方交会精度更佳的方式^[1-3], 采集少量像控点和若干检核点, 如 6-7 所示。



图 4 V1000 垂起固定翼无人机正射航线

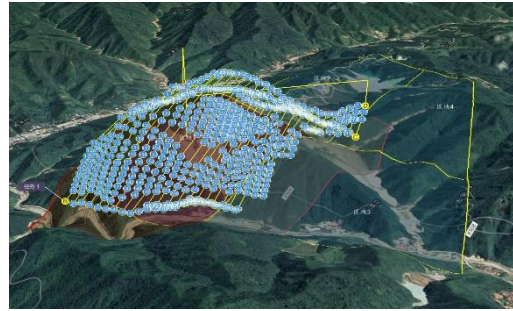


图 5 D200 四旋翼无人机变高倾斜航线



图 6 像控点检核点布设



图 7 像控点检核点测量

4.2 飞行质量检查

在外业飞行过程中，无人机飞手可通过地面站实时监测本地无人机的飞行状态，确保外场飞行安全和数据完整，在外场数据采集完成后，可现场通过无人机管家质检图功能对本次采集的影像数据和 POS 数据进行质量检查。确保像片的有效范围覆盖了整个测区。在航向上超出成图范围的基线均在一条以上，旁向上超出成图范围均在像幅的 35% 以上，全区域无摄影绝对漏洞。

5 航空摄影测量内业数据处理

5.1 无人机管家融合解算

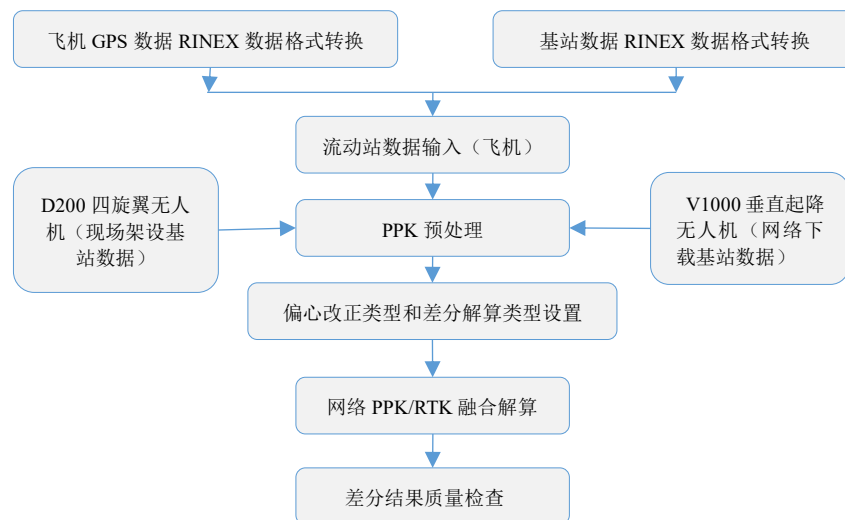


图 8 无人机管家融合解算流程图

由于目前技术原因，在飞行过程中还无法将 GPS 的相位中心直接归并到相机中心，同时，考虑到各种外在因素对成图精度的影响，飞马系列无人机可直接利用无人机管家的智理图模块中的图像批处理工具进行图像格式转换、旋转、畸变改正、金字塔构建、匀色和增强等，GPS 处理工具进行 RINEX 数据格式转换，GPS 解算、坐标转换、参数计算等，具体结算流程如图 8 所示。

5.2 空三解算

该项目正射影像采用飞马无人机管家和 PIX4D 相结合的方式快速生成测区数字地表模型 DSM 和数字正射影像图 DOM 及点云数据，倾斜摄影采用飞马无人机管家和 ContexCapture Center (CC) 相结合的方式生产。采用飞马无人机管家的主要目的是进行高精度 POS 数据融合解算和对原始相片进行畸变矫正。当然，也可直接利用 PIX4D 和 ContexCapture Center (CC) 自带的相机自检校模型进行畸变校正。需要注意的是，由于空三匹配中连接点的迭代性和线性关系，空三报告的精度并不能很好的代表成图精度，特别是空三平差较弱区域，故在立体测图模式下，首先应检核检查点精度，在精度满足测图要求和相关规范后，方可进行 DLG 生产作业^[4]。本文将以此成果作为 DLG 生产的基础数据。

6 ARCGIS 和 CASS 相结合地形图生产方案

传统的航空摄影数字线划图的生产都是在立体模型（立体像对）上通过专业的采集软件进行，比如最常见的 VirTuo-Zo(适普软件)，但利用此方法存在专业性强，对作业人员的综合能力要求高，且单模型数据采集速度慢，市场普及率低等缺点。下面就用最常见 ARCGIS 和 CASS 相结合的方式获取满足精度的地形图成果。

6.1 地形数据矢量化

以最新的南方 CASS10.1 为平台，利用数据工具栏中的加载大影像功能，将空三获取的 DOM 高清影像直接加载到工作界面中（CASS10.1 以前版本不支持超大影像数据加载，可通过裁剪方式缩小数据量和加载插件相结合的方式加载），按照地形图规范要求对各类地物地貌矢量化，获取地物矢量化图层。如图 9 所示局部矢量化地形数据。



图 9 局部矢量化地形数据

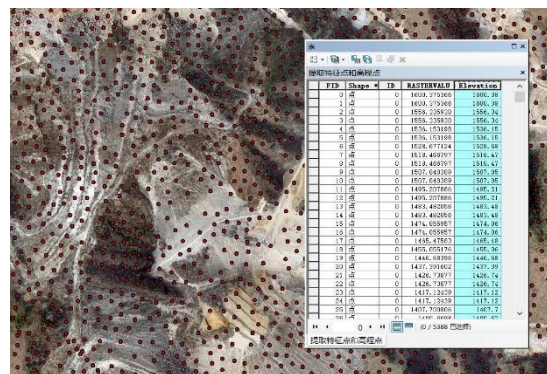


图 10 地貌特征点及高程点

6.2 高程数据获取

高程数据的获取重点利用 ARCGIS 平台，新建一个点图层，依据地形图规范对地形要素和高程点注记密度、分布、位数等要求，利用空三获取的 DOM 高清影像提取地貌特征点及高程点。如图 10 所示地貌特征点及高程点。具体步骤为：首先利用系统工具箱中的 Spatial Analysts Tools——提取分析——值提取至点，在输入点要素时选择点图层，输入栅格要素时选择数字地表模型 DSM 数据，提取地形要素特征点和高程点信息，高程字段默认为 RASTERVALU。由于 CASS 软件中，对高程值的定义为 Elevation，故追加 Elevation 字段，并进行赋值运算，最后导出 DWG 格式并含有高程信息的点文件数据。

6.3 地形图成图编辑

利用要素转 CAD，将 ARCGIS 中的点文件数据输出为 DXF 格式（或 DWG 格式）。然后在 CASS 软件中，首先将获取的高程数据和矢量化数据进行合并，然后利用高程数据生成等高线，最后，对整个地形图进行综合、整饰等处理，得到满足要求的 DWG 格式的地形图成果。如图 11 所示，ARCGIS+CASS 局部地形图成果。

7 EPS 地形图生产方案

清华山维 EPS 进行地形图生产在很大程度上可以理解为 ARCGIS 和 CASS 的结合体，不仅具有 ARCGIS 庞大的数据库功能，还具有南方 CASS 软件超强的图形编辑功能。其主要优势是可以直接加载超大影像数据、倾斜数据、点云数据等，同时，也可利用上述基础性数据进行地形图生产和后期数据库维护。

7.1 地形数据矢量化

以清华山维 EPS 三维测图系统为平台，利用三维测图工具栏中生成垂直投影模型工具，将空三获取的 DOM 和 DSM 数据转化为 EPS 可识别的数据格式，加载此垂直投影数据，同时打开二三维同步功能，采取二维和三维联动模式，采集地形数据。此方法进行地形图数字线划的最大优势是可以利用三维窗口，实时获取真实的地形地貌特征，成图精度更高。如图 12 所示，EPS 二三维联动矢量化。

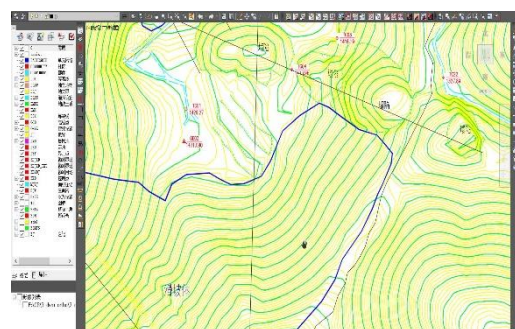


图 11 ARCGIS+CASS 局部地形图成果

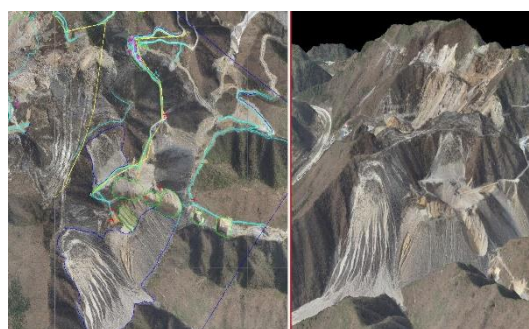


图 12 EPS 二三维联动矢量化

7.2 高程数据获取

由于利用 DOM 和 DSM 生成的垂直投影数据覆盖于地表，无法更好的将植被、建筑物等高程进行过滤，故还是应该采取人工提取地形地物高程的方式，获取准确高程数据。具体

步骤为：利用三维测图工具栏——等高线高程点——提取高程点功能，依据地形图规范对地形要素和高程点注记密度、分布、位数等要求，采用人工加点方式提取高程点。当然，针对地形地貌较为简单，且无地物覆盖、高程准确的区域，也可采用面选方式批量提取高程点。如图 13 所示，EPS 提取高程点



图 13 EPS 提取高程点



图 14 EPS 中局部地形图成果

7.3 地形图成图编辑

在矢量化和提取高程点的基础上，利用地膜处理工具栏中的生成三角网，构建不规则三角网 TIN，进一步生成等高线。然后对整个地形图成果进行综合、整饰、数据质检等后续处理，获取最终的地形图成果。由于 EPS 生成的地形图为 EDB 格式，故导出最终成果时需选择工具栏中的数据转换功能输出 DWG 格式。如图 14 所示，EPS 中局部地形图成果

8 两种成图方法精度分析

为了比较两种成图方案的成图精度，选择矿区 10 个检核点分别进行统计分析，ARCGIS+CASS 成图方案的成图精度统计情况如表 2 所示，EPS 成图方案的成图精度统计情况如表 3 所示，两种成图方案成图精度中误差如表 4 所示。

表 2 ARCGIS+CASS 成图方案的成图精度统计表

检查点	航测值			实测值			差值		
	x/m	y/m	z/m	x/m	y/m	z/m	Dx	Dy	Dz
1	564257.894	56199.541	1260.107	564257.792	56199.500	1260.020	0.102	0.041	0.087
2	563314.776	57915.132	1379.284	563314.785	57915.186	1379.199	-0.009	-0.054	0.085
3	562801.574	58399.325	1442.089	562801.525	58399.410	1442.043	0.048	-0.084	0.046
4	563333.652	58419.490	1628.012	563333.684	58419.442	1628.030	-0.032	0.047	-0.018
5	564562.199	58096.654	1523.714	564562.178	58096.661	1523.709	0.021	-0.007	0.005
6	563650.895	57543.193	1412.521	563650.985	57543.133	1412.440	-0.090	0.059	0.081
7	563692.741	56074.294	1120.671	563692.788	56074.360	1120.602	-0.047	-0.066	0.069
8	564363.846	57406.953	1443.314	564363.860	57406.843	1443.249	-0.014	0.110	0.065
9	563826.739	58329.574	1623.786	563826.708	58329.556	1623.960	0.031	0.018	-0.174
10	564109.815	56682.184	1268.133	564109.861	56682.130	1268.130	-0.045	0.055	0.003

表 3 EPS 成图方案的成图精度统计表

检查点	航测值			实测值			差值		
	x/m	y/m	z/m	x/m	y/m	z/m	Dx	Dy	Dz
1	564257.781	56199.512	1260.101	564257.792	56199.500	1260.020	-0.010	0.012	0.081
2	563314.745	57915.196	1379.132	563314.785	57915.186	1379.199	-0.040	0.010	-0.067
3	562801.543	58399.402	1442.105	562801.525	58399.410	1442.043	0.018	-0.008	0.062
4	563333.549	58419.391	1628.109	563333.684	58419.442	1628.030	-0.135	-0.051	0.079
5	564562.129	58096.592	1523.682	564562.178	58096.661	1523.709	-0.049	-0.069	-0.027
6	563650.937	57543.209	1412.494	563650.985	57543.133	1412.440	-0.048	0.076	0.054
7	563692.721	56074.314	1120.583	563692.788	56074.360	1120.602	-0.067	-0.046	-0.019
8	564363.894	57406.896	1443.214	564363.860	57406.843	1443.249	0.034	0.052	-0.035
9	563826.762	58329.517	1623.918	563826.708	58329.556	1623.960	0.055	-0.039	-0.042
10	564109.885	56682.189	1268.179	564109.861	56682.130	1268.130	0.024	0.059	0.049

表 4 两种成图方案的成图精度中误差统计表

ARCGIS+CASS 成图方案			EPS 成图方案		
平面中误差	高程中误差	点位中误差	平面中误差	高程中误差	点位中误差
0.057m	0.056m	0.08m	0.056m	0.039m	0.066m

依据低空数字航空摄影测量内业规范^[6]和 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量内业规范^[7], 数字线划图 (B 类) 1:500 地物点对附近野外控制点的平面位置中误差为 0.6m (平地、丘陵地), 高程中误差为不超过 0.7m (平地、丘陵地); 基础地理信息数字成果 1:500 1:1000 1:2000 数字线划图^[9], 1:500 平面位置精度为 0.3m (平地、丘陵地), 1:2000 平面位置精度为 1.2m (平地、丘陵地), 1:500 高程注记点高程中误差为 0.4m (丘陵地), 1:2000 高程注记点高程中误差为 0.5m (丘陵地)。从表 1 和表 2 可以看出, 上述两种成图方案都能满足大比例尺地形图测图规范和精度要求。

从表 3 的两种成图方案的成图精度结果可知, 在平面精度方面, 采用 ARCGIS+CASS 成图方案和 EPS 成图方案基本一致, 而在高程精度方面, EPS 成图方案明显优于 ARCGIS+CASS 成图方案, 其主要原因为三维可视化, 可以大大提高地物辨识度, 从而提高成图整体精度。

9 总结

本文通过实践对比分析表明, 利用飞马系列无人机的两种成图方案都能满足小区域大比例尺航测地形图成图要求, 且方案一中采用的 ARCGIS 和 CASS 为最常见的成图软件, 大大降低生产成本投入, 加快成图效率, 易普及。方案二中采用 EPS 成图, 其成图精度明显优于方案一, 特别是高程精度方面, 且 EPS 具有庞大的空间逻辑和图属一致性功能, 便于后期数据库维护。当然, 针对如何提高整个航测地形图的精度, 还有诸多因素要考虑, 比如:

POS 值的精度, 像机的内方位元素和畸变参数的确定, 空三平差的过程控制, 迭代算法的优化等。

参考文献:

- [1] 张懂庆, 汪志忠. 航空摄影单像空间后方交会在智慧矿山中的精度控制 [J]. 世界有色金属, 2019(21): 180-183.
- [2] 朱进, 丁亚洲, 陈攀杰等. 控制点布设对无人机影像空三精度的影响 [J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 116-120.
- [3] 杨荣帮, 毕洪基. 低空无人机航摄控制点布设及影像精度分析[J]. 北京测绘, 2018, 32(4): 399-404.
- [4] 贾智乐. 飞马 F200 无人机在大型水利工程及 BIM 建设中的应用 [J]. 测绘通报, 2019(9):159-162.
- [5] CH/Z 3003 - 2010. 低空数字航空摄影测量内业规范 [S].
- [6] GB/T 7930 - 2008. 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图航空摄影测量内业规范 [S].
- [7] CH/T 9008.1 - 2010. 基础地理信息数字成果 1: 500 1: 1000 1: 2000 数字线划图 [S].

[作者简介] 张懂庆 (1989~), 男, 甘肃天水人, 毕业于中国矿业大学, 注册测绘师/测绘工程师, 现主要从事测绘、地理信息、无人机航测等方面的工作。
甘肃省天水市麦积区马跑泉路 54 号, 甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院, 741000, 电话: 18393334705, E-mail: zhangdongqing024@163.com