

飞马 D2000 变高飞行在金川金属矿山工业级中的应用

武拴军 张永龙 王俊超 刘鹏山 吴志全 靳博

【金川集团股份有限公司龙首矿】

摘要：

近几年，无人机低空摄影技术逐渐成熟，该项技术已广泛应用于金川金属矿山工业级中。本文详细阐述了基于无人机摄影技术的形象直观的、高精度的实景三维数字模型，作为矿区地表塌陷监测、矿区新农村规划建设、地表建设工程数据核算、环境恢复治理工程等的真三维底图，并提高了矿山测量工作效率，使矿区地表测绘工作更高效、更安全，获得了多尺度的矿山测量成果，为矿山的安全生产提供了高精度的数据支撑。

关键字：

无人机航测技术；塌陷监测；环境恢复治理；新农村建设；工程数据核算

1 项目背景

近年来，随着金属矿山采用无底柱分段崩落法开采深度不断增大与开采面积逐渐扩张，矿山地表已呈现出明显的塌陷。经过 GPS 测量技术定期持续的地表塌陷监测发现，地表累计塌陷最大值已达 5.416 米，塌陷区形变明显，裂缝环形分布上下贯穿，如图 1，地表已经共有 52 多条裂缝，甚至地表还出现了一个最大口径约 20m、深度约 10m 的漏斗状陷落坑，经现场勘察，目前已出现 5 个落坑，局部塌陷的偶然性增大，传统接触式的监测不适用于正在崩落资源界限以上的塌陷区内开展，存在安全隐患，而矿山崩落法持续开采，崩落资源量和崩落面积、深度持续增大，故塌陷区持续性监测仍需开展，需为矿石崩落法安全开采提供地表塌陷监测数据。还有，为有效防止地质灾害，需要开展防洪防汛规划、设计；为高效适宜和综合利用矿产资源，需要开展工业场地及地表工程项目规划、设计等等，需为矿区各类规划设计、应急救援提供三维底图，为矿区各类规划设计提供直观、可视、全景的数字表面模型，当前急需解决这些问题，同时，也可以促进数字化矿山建设。



图 1 矿区现状

2 技术路线

围绕无人机低空摄影测量技术在金川金属矿山工业级中的应用问题,其技术路线分为前期准备、外业数据采集、内业空三建模、数据编辑与加工四个部分。首先是通过数字正射摄影和倾斜摄影和机载 GPS 相结合的技术获取金川矿区的航片(金川矿区建筑物采用倾斜摄影测量,其余采用正射摄影测量),内业利用无人机管家和 Context Capture 软件进行 POS 数据解算与坐标转换、自由空三处理、刺像控点,以及生产模型,其次,基于 EPS 三测图系统进行 1:500 地形图采集,最后,生产金川矿区的生产数字正射影像(DOM)、数字表面模型(DSM)、数字高程模型(DEM)和数字线划地图(DLG),项目的总体思路,如图 2。

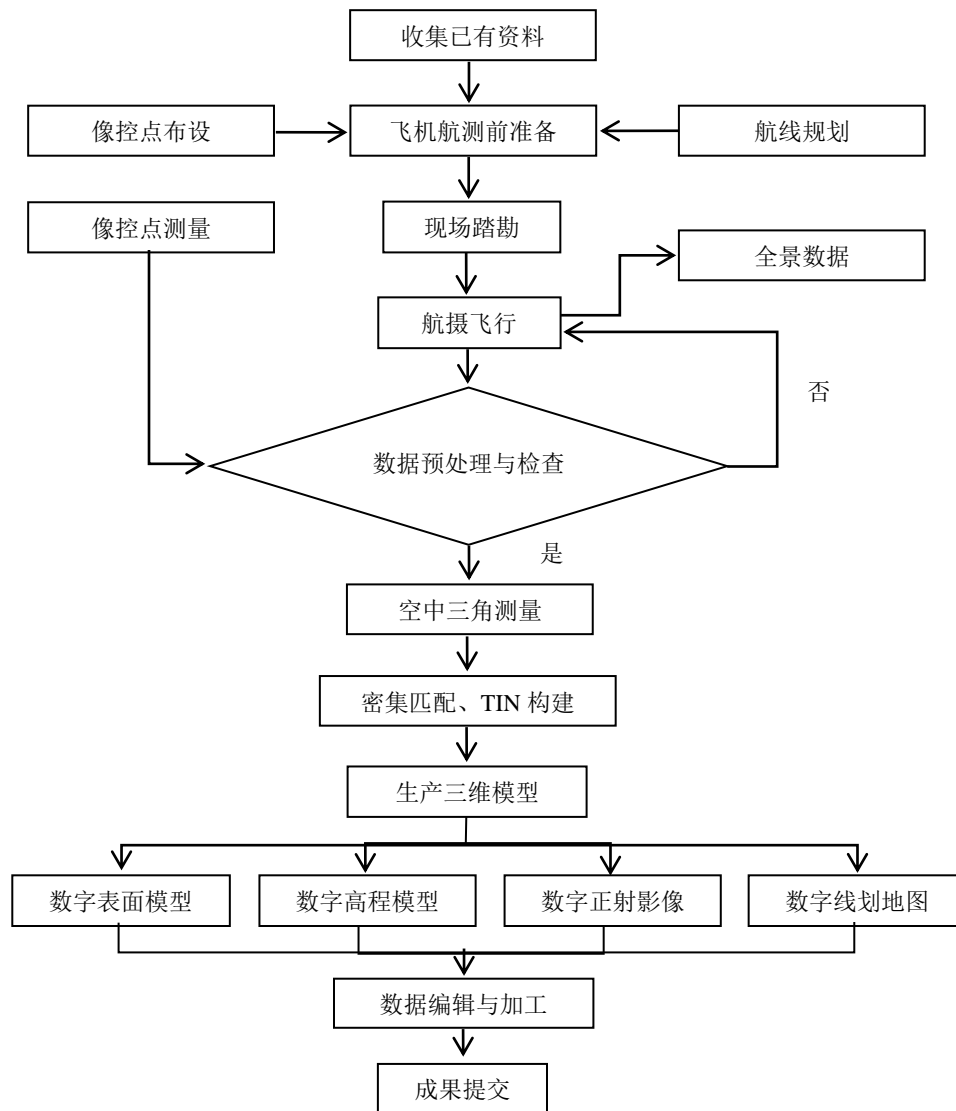


图 2 技术路线

3 测区介绍

本次项目测区位于甘肃省金昌市，以露天矿坑、山脉与戈壁滩为主，如图 3，地形高差在 500 米以内。测区为露天老坑、山脉、建筑混合，露天老坑在 0~500 米之间，山脉在 20~300 米间，大多数建筑物高度超过 50 米，局部建筑物在 110 米左右，如图 4。



图 3 测区全貌

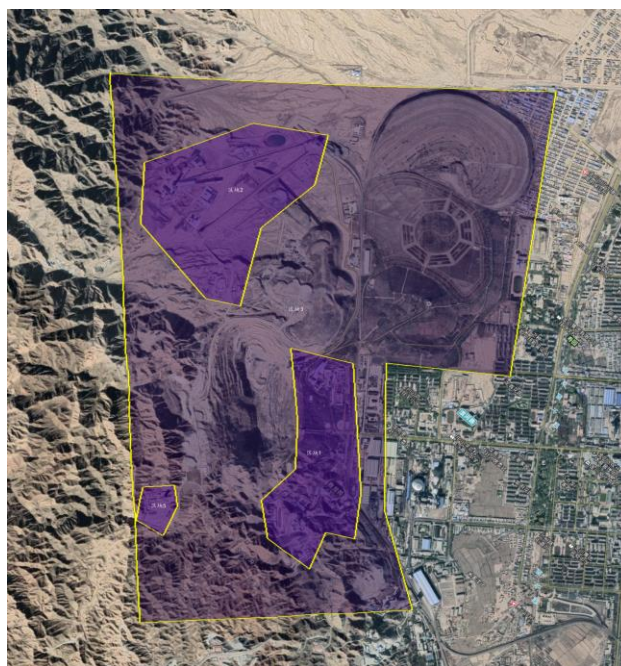


图 4 测区范围

无人机作业时间为上午 9 点~下午 15 点，在该时间段内，测区内天气晴朗，光线适中，偶有薄云，1~2 级微风，适合飞行。测区内平均分布像控点 6~8 个/平方千米，地面与建筑物检查点共布设 35 个，如图 5，用于项目生产需求。

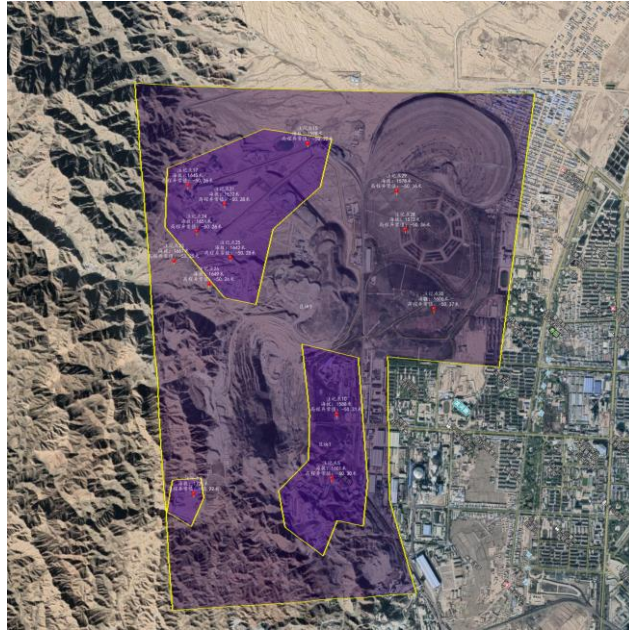


图 5 测区图上的控制点或者检查点分布图

4 实验设备选用

随着金川金属矿山采用无底柱分段崩落法开采深度不断增大与开采面积逐渐扩张，塌陷区形变明显，裂缝环形分布上下贯穿，经过 GPS 测量技术定期持续的地表塌陷监测发现，地表累计塌陷最大值已达 5.416 米，塌陷区形变明显，裂缝环形分布上下贯穿，地表已经共有 52 多条裂缝，甚至地表还出现了一个最大口径约 20m、深度约 10m 的漏斗状陷落坑，经现场勘察，目前已出现 5 个落坑，局部塌陷的偶然性增大，传统接触式的地表塌陷监测不适用于正在以崩落法开采的采区上覆地表塌陷区内开展，存在安全隐患，所以一致沿用的 GPS 监测测量技术已无法开展监测范围大、要求监测周期短的塌陷区监测。还有，利用传统的全站仪、GPS 等测量仪器是无法建立矿区数字孪生式的地表模型，无法为矿山建立直观的、全面的、数字化的地表模型，不能为矿区各类规划设计、环境整治、应急救援等提供精确直观的三维底图。

为了解决上述种种困难，我们慎重选择设备。优先选择基于无人机的航空摄影测量系统，开展倾斜摄影及 1:500 精度的地形测绘，建立金川矿区的数字表面模型。为了保证精度，要求航摄地面分辨率达到 1.5cm。在多方考察后，我们选择飞马 D2000 (SN:D2000GLS21051069)无人机搭载 D-CAM2000(SN:D-CAM200021030438)或 D-OP3000 (SN:D-OP300020190154)镜头所做的测试能满足项目要求。如图 6，因为相机的焦距比普通市面上的倾斜相机都长，这点可以保证我们的无人机飞行在一个足够安全的高度，还能保证地面物体的分辨率达到 1.5cm 以内。同时，全画幅的镜头能够帮助我们在高密度的矿区中飞行时，能够拍到矿区建筑物更多的角度，从而尽可能提升模型拼接质量。



图6 飞马 D2000 搭载 D-CAM2000 或 D-OP3000

5 航线设计参数

根据金川矿区属于多山、多建筑物与露天老坑等复杂地形，再参照 GBT 27920.1-2011 数字航空摄影规范要求，航线的设计参数，如表 1。

表 1 航线设计参数

| 项目 | 摄影要求 |
|-----------|--|
| 影像分辨率 | 1.5 厘米 |
| 航高设计 | 相对航高 96 米 |
| 航向重叠度 | 80% |
| 旁向重叠度 | 70% |
| 影像倾斜角度 | 正射 90°，前后左右视 45° |
| 影像倾斜角度改变量 | 不大于 5°，最大不超过 12% |
| 摄影分区 | 根据项目作业范围及测区情况划定 |
| 测区边界覆盖 | 航向超出边界不少于两条基线，旁向覆盖超出测区边界线不少于 5 条航线，保证影像全覆盖 |
| 拍摄时间 | 选择测区最有利气象条件，保证影像质量 |
| 补摄与重摄 | 出现相对漏洞和绝对漏洞应补摄 |
| 影像质量 | 影像清晰、层次丰富、反差适中、色调柔和 |

6 实际作业流程

6.1 测区踏勘

通过对测区原始影像进行判断分析，详细了解测区内现有露天老坑、新 1#主井、新 2#副井、西二主井、西二副井与混合井井塔，西一、西二与东部制浆站，1#与 2#办公楼及西二皮带走廊，西一斜坡道硐口，矿区农村土房等建筑物的最大高度，以及测区内的山峰的最

大高度，以便我们规划无人机航测航线，制定飞行方案，保证飞行作业的安全。

6.2 航线设计与航摄

本次项目设计相对航高为 96 米，地面分辨率（GSD）为 1.5cm，航向/旁向重叠度为 80%/70%，按照变高飞行进行航测。

测区有效面积约 12.4km²，实际航飞面积约 15km²，露天老坑与建筑物采用倾斜航测，其余的采用正射航测，如图 7，累计飞行 16 个架次。考虑到戈壁滩风与山谷风影响，航飞速度为 8m/s，单架次飞行时间约 40min，共获取 305055 张影像，航片影像清晰、色彩均匀，满足本次项目的使用要求。

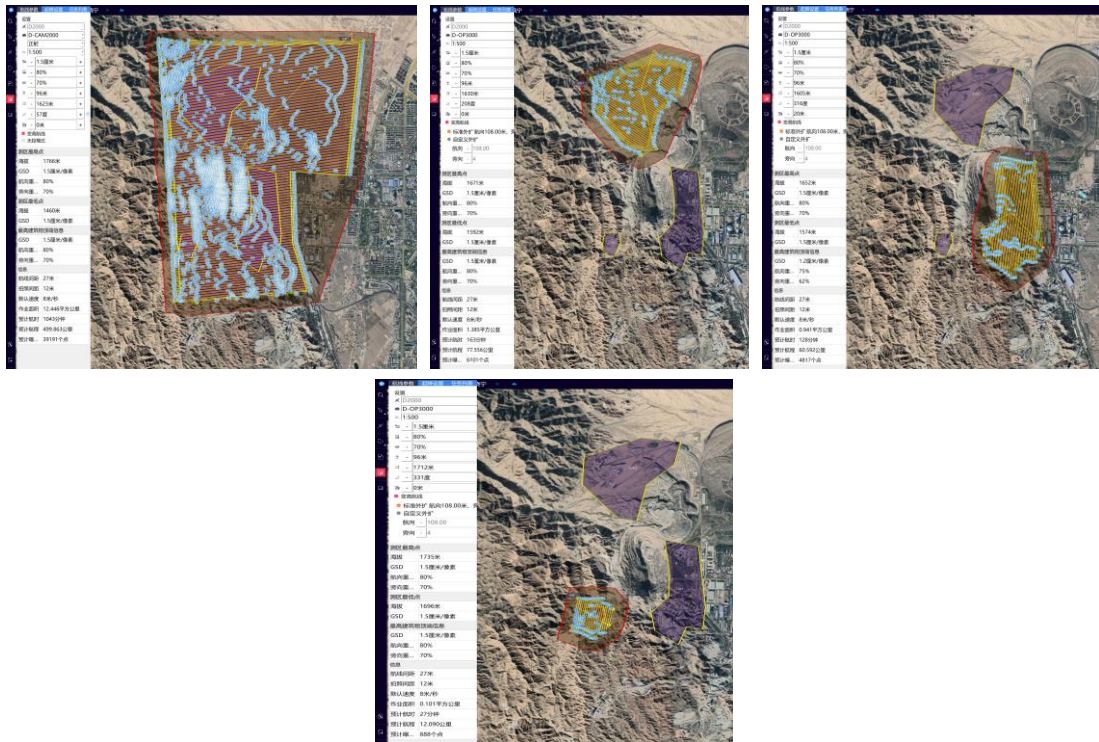


图 7 测区航线规划

6.3 像控点布设与观测

根据像控点布设原则，为了保证金川矿区的无人机摄影测量成果精度，在金川矿区的测区内视野开阔、无遮挡的区域内布设像控点，严格做到布设像控点：测区外围 4 个+内部 1 个，每个作业区域均匀布设 5 个点，像控点编号为：XJ1、XJ2、XJ3 等，共布设像控点 35 个点。利用 GPS 静态观测技术对像控点进行观测，观测时间为 1 小时，其中使用三脚架架设 GPS 仪器，量取仪器高三次，三次读数不大于 5mm，天线高的量测、确认和输入要认真仔细，取中数输入 GPS 接收机，如图 8，获得高精度的像控点坐标数据。



图 8 像控点观测

6.4 内业数据处理

本次项目空三解算采用 ContextCapture Center Master 软件配备 6 个节点进行影像数据处理。图形工作站配置为 CPU: Intel 酷睿 i9-10940X 盒装、128G 内存、RIX5000 显卡、2T 固态硬盘与 8T 机械硬盘。

数据处理：将导入 305055 张影像数据—影像相关设置—POS 设置—相机参数设置—平均高程设置，最后，运行空三解算，如图 9。

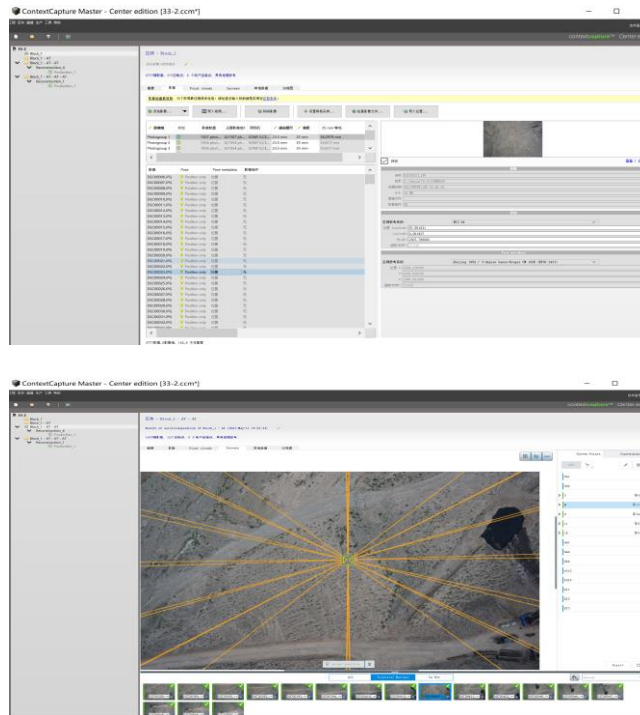


图 9 影像数据空三解算

6.5 精度检查

本次项目验证中，项目的精度验证点有 35 个，使用飞马 D2000 无人机搭载 D2-PSDK 采集的数据成果能满足 1:500 地籍精度要求，精度验证结果如下表 2。最终产生的矿区的数字表面模型（DSM）精度验证结果为平面中误差为 $\pm 8\text{mm}$ ，高程误差为 $\pm 23\text{mm}$ ，完全满足《矿山测量技术标准（金川集团股份有限公司 2020 年）》规定的 1:500 比例尺精度要求。

表 2 验证点精度

| 序号 | 点名 | 实测检查点坐标(m) | | | 模型检查点坐标(m) | | | 点位误差(mm) | | |
|----|-------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|------------|------------|
| | | X | Y | Z | X | Y | Z | ΔX | ΔY | ΔZ |
| 1 | hh1 | 8563.248 | 4518.238 | 1761.353 | 8563.245 | 4518.243 | 1761.352 | -3 | 5 | -11 |
| 2 | hh4 | 8568.315 | 4325.616 | 1766.628 | 8568.307 | 4325.622 | 1766.622 | -8 | 6 | -16 |
| 3 | HH-1 | 8145.256 | 4437.286 | 1767.475 | 8145.261 | 4437.283 | 1767.482 | 5 | -3 | 17 |
| 4 | HH-2 | 8152.125 | 4346.095 | 1768.192 | 8152.131 | 4346.097 | 1768.200 | 6 | 2 | 8 |
| 5 | HH-3 | 8156.236 | 4305.619 | 1766.512 | 8156.232 | 4305.623 | 1766.510 | -4 | 4 | -12 |
| 6 | HH-4 | 8158.348 | 4265.143 | 1765.929 | 8158.356 | 4265.138 | 1765.939 | 8 | -5 | 10 |
| 7 | HH-5 | 8169.359 | 4224.667 | 1761.057 | 8169.364 | 4224.662 | 1761.064 | 5 | -5 | 17 |
| 8 | HH-6 | 8178.589 | 4184.191 | 1764.869 | 8178.585 | 4184.195 | 1764.860 | -4 | 4 | -19 |
| 9 | XJ-1 | 8389.546 | 4143.715 | 1763.048 | 8389.538 | 4143.721 | 1763.042 | -8 | 6 | -16 |
| 10 | XJ-2 | 8345.159 | 4103.239 | 1769.553 | 8345.166 | 4103.235 | 1769.542 | 7 | -4 | -11 |
| 11 | XJ-3 | 8300.772 | 4062.763 | 1767.611 | 8300.778 | 4062.765 | 1767.619 | 6 | 2 | 10 |
| 12 | XJ-4 | 8256.385 | 4022.287 | 1769.953 | 8256.390 | 4022.280 | 1769.960 | 5 | -7 | 12 |
| 13 | XJ-5 | 8211.998 | 3981.811 | 1773.371 | 8212.006 | 3981.809 | 1773.383 | 8 | -2 | 22 |
| 14 | XJ-6 | 8167.611 | 3941.335 | 1772.396 | 8167.612 | 3941.340 | 1772.399 | 1 | 5 | 13 |
| 15 | XJ-7 | 8123.224 | 3900.859 | 1769.734 | 8123.220 | 3900.853 | 1769.732 | -4 | -6 | -12 |
| 16 | XJ-8 | 8078.837 | 3860.383 | 1768.501 | 8078.842 | 3860.387 | 1768.505 | 5 | 4 | 9 |
| 17 | XJ-9 | 8034.450 | 3819.907 | 1758.068 | 8034.443 | 3819.913 | 1758.063 | -7 | 6 | -5 |
| 18 | XJ-10 | 7990.063 | 3779.431 | 1758.329 | 7990.065 | 3779.424 | 1758.342 | 2 | -7 | 23 |
| 19 | XJ-11 | 7945.676 | 3738.955 | 1758.693 | 7945.670 | 3738.961 | 1758.689 | -6 | 6 | -14 |
| 20 | XJ-12 | 7901.289 | 3698.479 | 1759.650 | 7901.297 | 3698.472 | 1759.660 | 8 | -7 | 10 |
| 21 | XJ-13 | 7856.902 | 3658.003 | 1757.955 | 7856.906 | 3658.008 | 1757.961 | 4 | 5 | 13 |
| 22 | XJ-14 | 7812.515 | 3617.527 | 1759.796 | 7812.518 | 3617.519 | 1759.788 | 3 | -8 | -8 |
| 23 | BG-1 | 8425.138 | 3577.051 | 1760.813 | 8425.131 | 3577.044 | 1760.819 | -7 | -7 | 16 |
| 24 | BG-2 | 8647.847 | 3536.575 | 1761.596 | 8647.839 | 3536.580 | 1761.590 | -8 | 5 | -16 |
| 25 | BG-3 | 8870.556 | 3496.099 | 1755.604 | 8870.561 | 3496.096 | 1755.615 | 5 | -3 | 11 |
| 26 | BG-4 | 9093.265 | 3455.623 | 1758.584 | 9093.271 | 3455.616 | 1758.592 | 6 | -7 | 18 |
| 27 | 3-1 | 9315.974 | 3415.147 | 1757.910 | 9315.966 | 3415.153 | 1757.904 | -8 | 6 | -16 |
| 28 | 3-2 | 9538.683 | 3374.671 | 1758.342 | 9538.676 | 3374.678 | 1758.337 | -7 | 7 | -10 |
| 29 | 5-1 | 9761.392 | 3334.195 | 1762.889 | 9761.395 | 3334.187 | 1762.893 | 3 | -8 | 14 |
| 30 | 5-3 | 9984.101 | 3293.719 | 1765.455 | 9984.096 | 3293.723 | 1765.448 | -5 | 4 | -23 |
| 31 | 7-5 | 10206.810 | 3253.243 | 1767.047 | 10206.817 | 3253.240 | 1767.058 | 7 | -3 | 11 |
| 32 | 7-8 | 10429.519 | 3212.767 | 1766.950 | 10429.512 | 3212.775 | 1766.945 | -7 | 8 | -15 |
| 33 | 9-1 | 10652.228 | 3172.291 | 1769.967 | 10652.234 | 3172.288 | 1769.975 | 6 | -3 | 18 |
| 34 | 11-2 | 10874.937 | 3131.815 | 1770.856 | 10874.929 | 3131.819 | 1770.850 | -8 | 4 | -11 |
| 35 | 11-3 | 11097.646 | 3091.339 | 1767.517 | 11097.652 | 3091.331 | 1767.505 | 6 | -8 | -12 |

6.6 DLG 生产

项目基于影像数据的空三与模型成果，在 EPS 软件中进行 1:500 矿区地形图测图，如图 10，并运用 ContextCapture Center Master 软件生产了正射影像，经与检核点进行校对，该矿区地形测图满足《矿山测量技术标准（金川集团股份有限公司 2020 年）》精度要求。

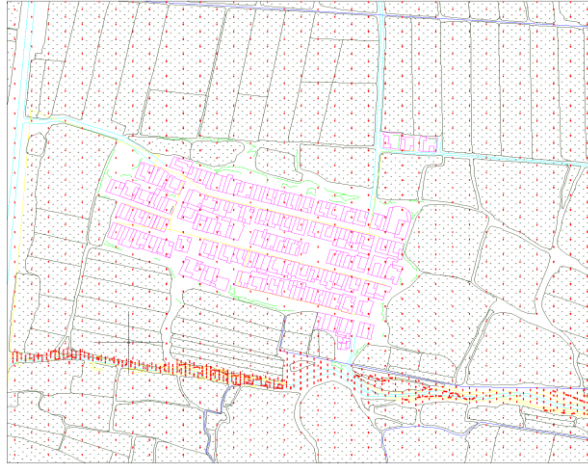


图 10 矿区农村 DLG

6.7 矿区数字沙盘建立

项目基于矿区正射与倾斜影像数据的空三与模型成果，在无人机管家软件中进行 POS 数据解算、坐标转换，满足矿区影像数据的 WGS-84 坐标系转换为地矿坐标系，并运用 ContextCapture Center Master 软件建立了矿区的数字表面模型（DSM），如图 11，经与检核点进行校对，该矿区数字表面模型（DSM）满足《矿山测量技术标准（金川集团股份有限公司 2020 年）》精度要求。



图 11 矿区数字沙盘

7 解决的生产问题

7.1 露天矿坑、山脉与戈壁滩等复杂地形无人机航摄作业

在测区有露天矿坑、山脉与戈壁滩等复杂地形条件下，利用无人机摄影测量技术首次建立了金川矿区全景式的数字沙盘，沙盘地面数据精度高达 1.5cm，沙盘面积达 14km²，拥有高精度的地矿坐标系统数据，充分生动地展示了龙首矿的地物、地貌等信息，龙首矿数字沙盘具有立体感强、形象直观，可实现任意游走、缩放查阅、视觉动态，从整体到局部再从局部到整体，详细了解龙首矿地表的地形结构和工业场地布局，为矿山工业场地布局、矿山地质环境恢复治理项目、防洪防汛工程等各类工程的规划设计、应急演练、避灾救灾等提供了真三维、高精度的三维底图，省去了规划设计人员的现场踏勘，缩短了规划与设计周期，使规划设计更趋合理准确。

7.2 实现无人机航测技术金属矿崩落法采矿引起的地表塌陷监测

首次采用无人机航测技术进行了无接触式塌陷监测，针对金属矿山采用无底柱分段崩落法开采深度不断增大与开采面积逐渐扩张，矿山地表已呈现出明显的塌陷，且经过 GPS 测量技术定期持续的地表塌陷监测发现，地表累计塌陷最大值已达 5.416 米，塌陷区形变明显，裂缝环形分布上下贯穿，地表已经共有 52 多条裂缝，甚至地表还出现了一个最大口径约 20m、深度约 10m 的漏斗状陷落坑，经现场勘察，目前已出现 5 个落坑，局部塌陷的偶然性增大，满足了塌陷区因其监测范围较广、监测周期较频繁、塌陷区测量人员无法进入等监测需求或问题，完全适应于塌陷区形变明显、裂缝环形发育上下贯穿、局部塌陷的偶然性增大、崩落法开采试验范围持续扩张的塌陷区监测，避免了地表出现偶然性沉陷等安全风险，体现出持续性塌陷监测数据采集的大批量和高效率，以及无人机航测技术地表塌陷监测数据处理的高度程序化、自动化和数字化，为崩落法采矿的安全开采提供了高精度、多样性、直观性、持续性与及时性的地表塌陷监测数据。

7.3 较短时间在金川矿区成功应用无人机航测技术

龙首矿于 2020 年 9 月引进飞马 D2000，突破了倾斜航测技术获取海量影像信息导致工作站无法进行数据处理、无人机航测系统频繁出现固件升级、倾斜航测影像信息无共同像控点导致无法进行模型拼接、航测区域内多山体与信号盲区导致无人机易失联等瓶颈，较短时间内在金川矿区成功应用无人机航测技术，实现了矿区数字表面模型的建立、数字地形图的补测、地表塌陷监测、地表湿喷站工程施工场地的工程量计算、废水综合利用项目工程量计算、废石堆场及工业场地整治暨矿区环境修复治理项目的工程量计算等，提高了测量精度，降低了测量成本，提高了测量效率，避免了测量作业过程存在的安全风险，使矿区地表测绘工作更精确、更全面、更高效、更智能，测量团队技术优势更明显。

8 创新性应用介绍

8.1 无人机航测技术用于金属矿崩落法开采地表塌陷监测

本项目成果的应用目的主要是在于以金属矿区崩落法采矿引起的地表塌陷区的数字表面模型为基础底图，如图 12，完成设计基于无人机摄影测量技术的金属矿区地表塌陷监测方案，以每 7 天为一个监测周期，共航测 48 期，对大范围的地表塌陷进行全面了解和掌握，为金属矿区地表塌陷进行预测、预报。

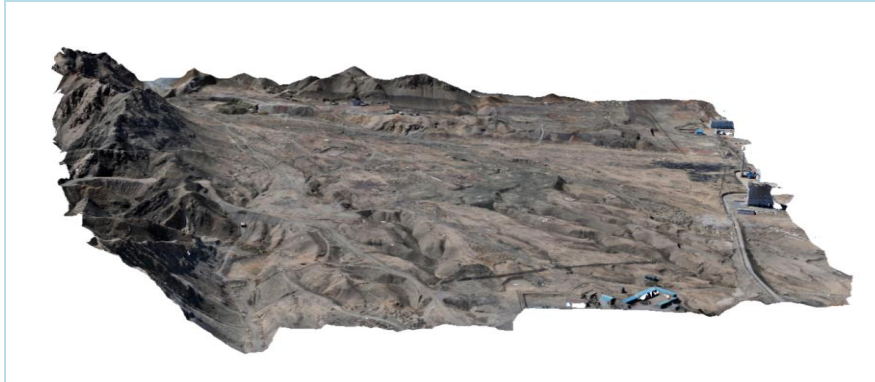


图 12 矿区基础底图

基于金属矿区地表塌陷监测区域地表数字表面模型（DSM）上，确定出矿区地表塌陷监测范围，经过多次提取塌陷监测点、监测点数量的比对、沉降 3D 模型建立试验后，制定按 10 米×10 米的网格间距进行提取监测高程点（2051 个监测点），如图 13，该监测范围完全满足覆盖矿区开采范围，规定每监测周期的矿区地表塌陷监测范围保存一致，每监测周期提取出金属矿区地表塌陷监测点，共获取了 48 期金属矿区地表塌陷监测数据，如图 14。

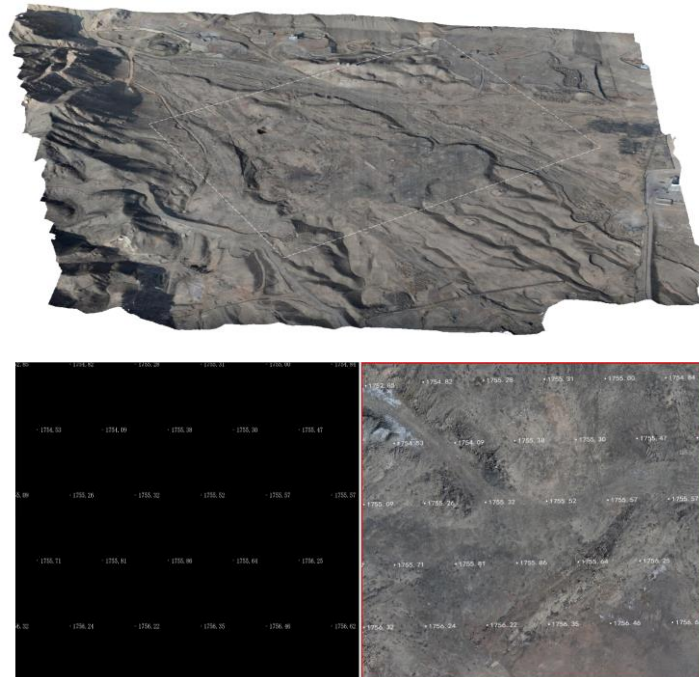


图 13 金属矿区地表塌陷监测高程点图

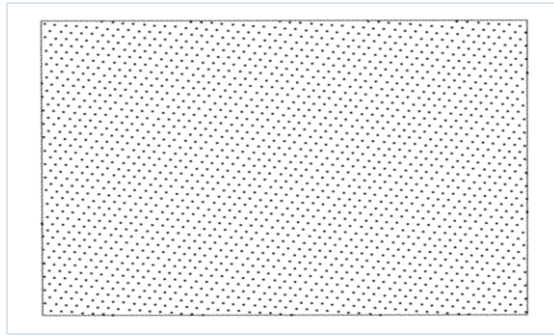


图 14 金属矿区地表监测点数据

将每监测周期的金属矿区地表塌陷监测区域地表数字表面模型 (DSM) 导入 EPS 三维测图软件, 确定出金属矿区地表塌陷监测范围, 经过多次提取塌陷监测点、监测点数量的比对、沉降 3D 模型建立试验后, 制定按 10 米×10 米的网格间距进行提取监测高程点 (2051 个监测点), 该监测范围完全满足覆盖金属矿区 3-11 行, 规定每监测周期的金属矿区地表塌陷监测范围保存一致, 每监测周期提取出金属矿区地表塌陷监测点 (DWG 格式), 再利用 CASS 软件导出金属矿区地表塌陷监测数据, 导出格式为.DAT。

另外, 对于每监测周期的矿区地表塌陷监测点坐标数据进行检验, 得出每期的崩落法采矿引起的地表塌陷明显区域内监测点的影像图平面位置中误差不得大于 1.5cm, 如表 3, 航测精度完全满足金川金属矿区崩落法采矿地表塌陷监测要求。

表 3 监测点影像平面位置中误差

| 监测点号 | 平面位置中误差 (m) | |
|------|-------------|-------|
| | X | Y |
| 1 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 0.000 | 0.000 |
| ... | ... | ... |
| 2050 | 0.000 | 0.000 |
| 2051 | 0.000 | 0.000 |

为了准备模拟出金属矿区崩落法采矿地表塌陷趋势, 依据每期的金属矿区地表塌陷监测点的三维坐标数据, 假定 DEM_0 表示崩落法采矿上一监测周期的地表 DEM, DEM_n (n 表示每监测周期数) 表示崩落法采矿本监测周期的地表 DEM, 通过下式可以求得地形塌陷高程变化:

$$\Delta DEM = DEM_n - DEM_0$$

计算出以第 1 监测周期为监测起点至每一监测周期的金属矿区地表塌陷监测点的垂直沉降位移量, 利用 Surfer 软件模拟出每监测周期的金属矿区地表塌陷监测点的沉降等值线图 (单位: m), 如图 15, 共模拟出了 47 期矿区地表塌陷监测点的沉降等值线图。

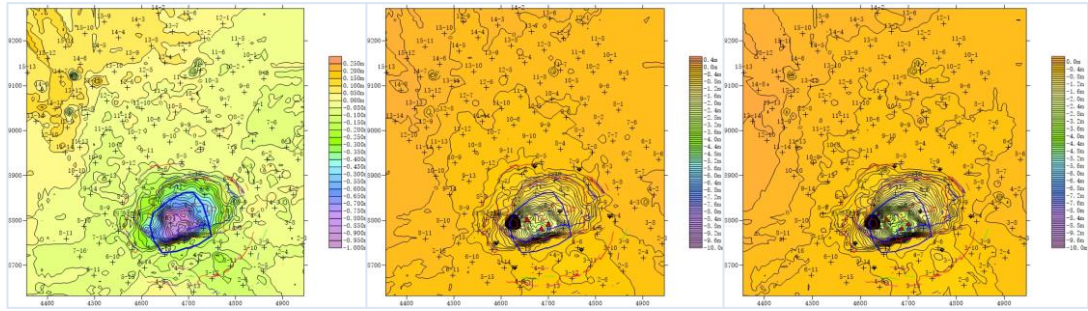


图 15 监测点沉降等值线图

按每监测周期的金属矿区地表塌陷监测点的三维坐标数据，计算出以第 1 监测周期为监测起点至每一监测周期的金属矿区地表塌陷监测点的垂直沉降位移量，模拟出每监测周期的金属矿区地表塌陷监测点的沉降 3D 模型（单位：m），如图 16，共模拟出了 47 期矿区地表塌陷监测点的沉降 3D 模型。

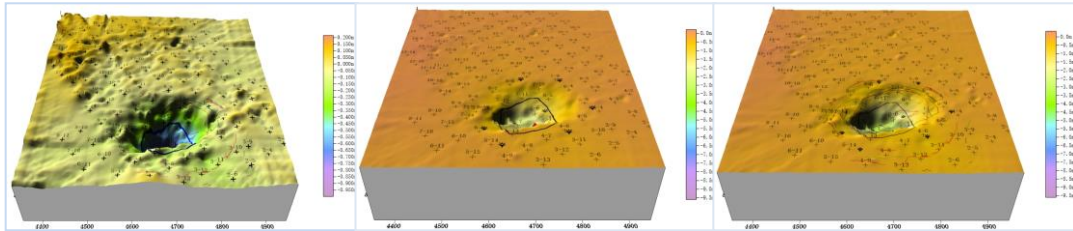


图 16 监测点沉降 3D 模型

在金属矿区地表塌陷监测区域的地表数字表面模型（DSM）上，能够直接进行监测金属矿区地表裂隙，利用 EPS 软件获取每监测周期金属矿区地表裂隙的坐标、长度、宽度，计算金属矿区地表裂隙分布区域面积，如图 17，以及利用 CASS 软件计算出金川矿区跟踪区域的沉降空间量，如图 18。



图 17 矿区地表裂隙监测

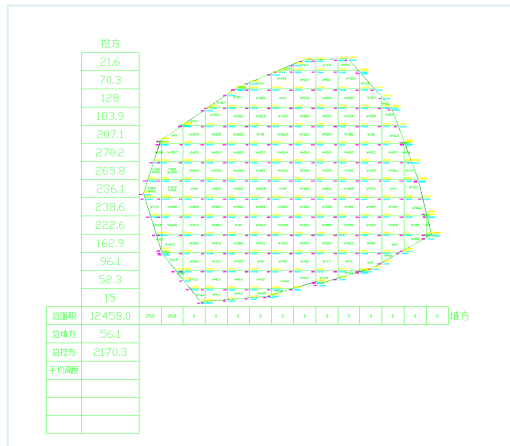


图 18 沉降空间量

8.2 无人机航测技术用于矿区周围新农村建设

本项目成果的应用目的主要是基于矿区周围农村影像数据的空三与模型成果，在 EPS 软件中进行 1:500 矿区地形图测图，如图 19，该图作为新农村建设规划设计的真三维、高精度的三维底图，充分生动地展示了矿区周围农村的地物、地貌等信息，省去了新农村建设规划设计人员的现场踏勘，缩短了规划与设计周期，使规划设计更趋合理准确。

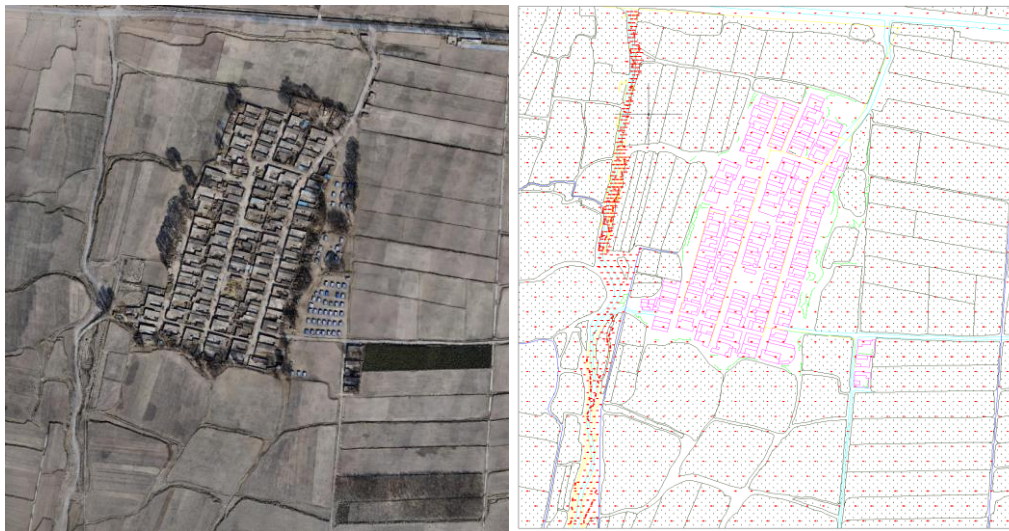


图 19 矿区农村 DLG

8.3 无人机航测技术用于矿区地表建设工程数据核算

本项目成果的应用目的主要是应用无人机摄影测量技术获取地表建设工程施工场地影像信息，建立地表建设工程施工场地的数字表面模型（DSM），如图 20—图 21，确定出地表建设工程施工场地范围，按 1 米×1 米网格间距提取地表工程建设施工场地高程点，如图 22—图 23。



图 20 西二湿喷站建设施工场地数字表面模型



图 22 西二湿喷站建设施工场地高程点云



图 21 沉淀池建设施工场地数字表面模型



图 23 沉淀池建设施工场地高程点云

根据龙首矿地表工程建设施工场地高程点，高效地、准确地计算出龙首矿地表工程建设施工场地的工程数据，计算结果如下，如图 24—图 25。

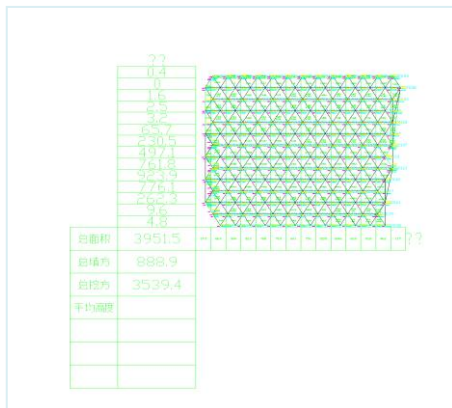


图 24 西二湿喷站建设施工场地工程数据

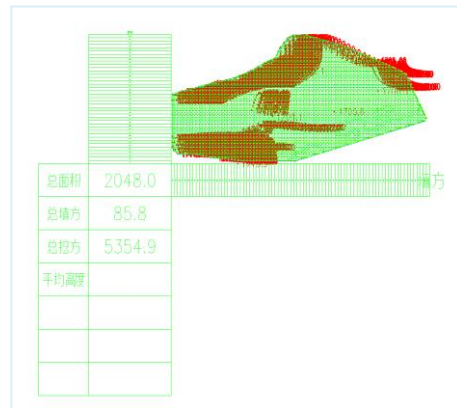
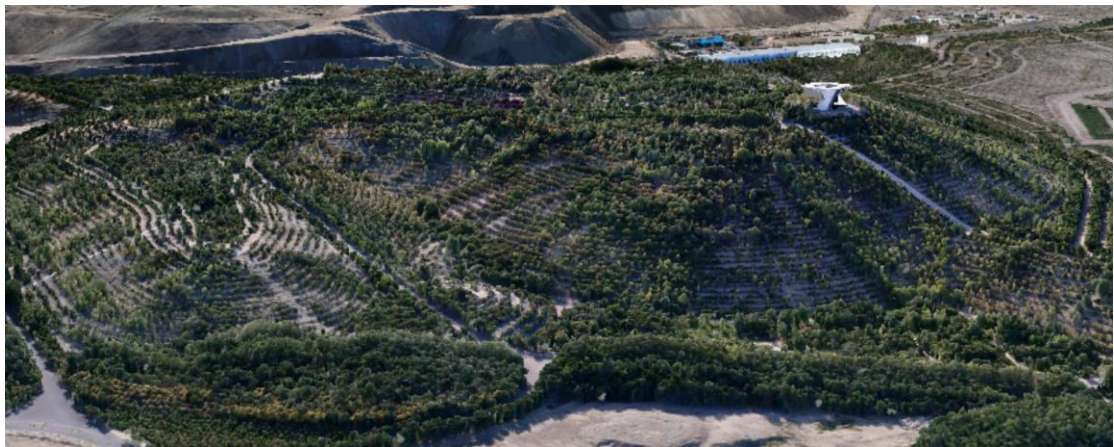
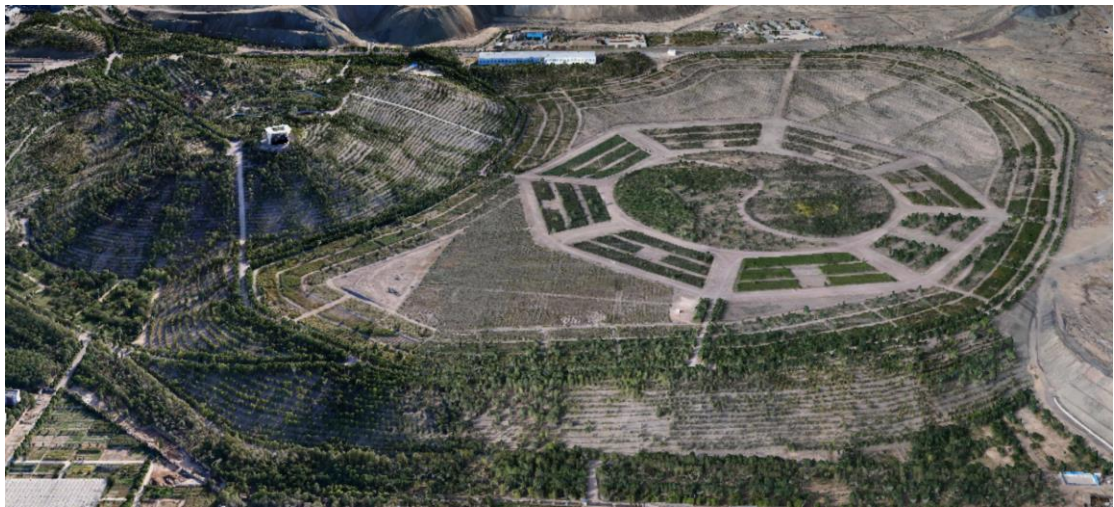


图 25 沉淀池建设施工场地工程数据

9 成果照片

本次项目建立了高精度的、直观的与可视化的矿区的露天老坑、国家级矿山公园与矿区附近的居民房屋的三维景图，如图 26。



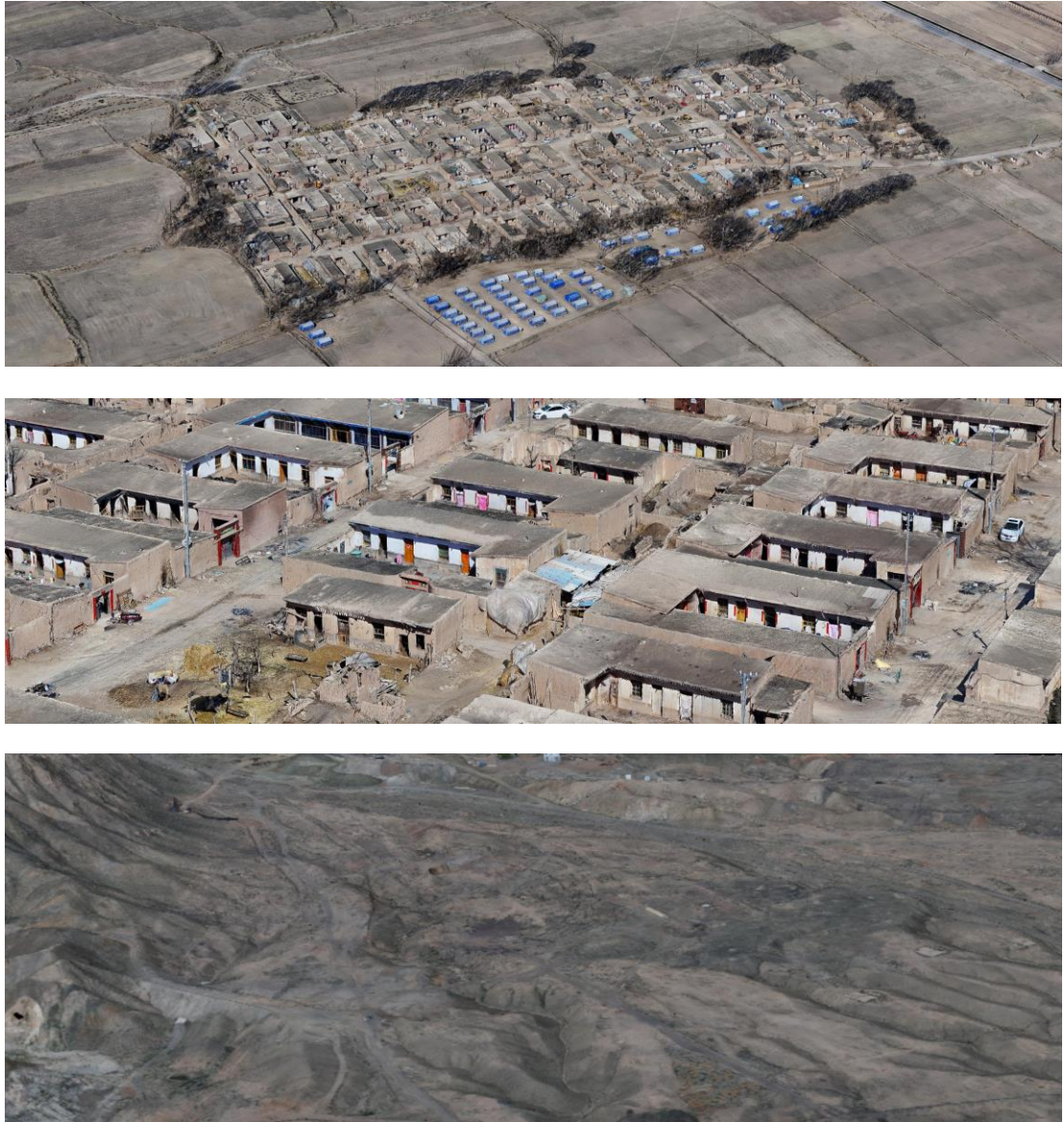


图 26 矿区三维景图

10 项目特点及总结

通过项目实施后，成功应用了无人机摄影测量技术，充分突出了无接触式测量技术的高效性与安全性，建立了高精度的金属矿区的数字表面模型、数字线划图、数字高程模型与数字正射影像图，建立了真三维、可视化的矿区数字沙盘，以及高精度的金属矿崩落法开采对地表塌陷的无人机摄影测量监测的沉降 3D 模型，为金属矿崩落法安全开采提供了高精度、及时的基础资料和矿区地表工程建设施工的工程数据；使新技术成功地在金川金属矿进行应用，加强了测量人才培养，提高测量工作效率；使地表测绘工作更高效、更安全，获得了多尺度的测量成果。

对于金属矿区的露天老坑、建筑物与塌陷区的三维重建，由于无人机飞行高度低，通常采用倾斜多镜头采集数据，其影像的数据量往往十分庞大，对于图形工作站的配置要求极高，

会给影像数据的空三平差过程带来一定的困扰，由因无人机电池的续航电量有限，尤其在海量金属矿区影像分区、架次间高程落差大的时候，就会导致无人机每架次获取的影像数据较少与航测架次增多，引起获取的影像数据的 POS 数据较多，给 POS 数据解算带来不便。

但飞马 D2000 搭载 D-CAM2000 或 D-OP3000 镜头的调校的测绘级高分镜头拍摄稳定、影像质量高，可使航摄地面分辨率达到 1.5cm，使 305055 张影像的大分区在分架次区域网平差时仍能保持良好的通过率，未发现分架次分层与大量丢片现象，并且平差速度和测图精度也很好，既缩短了内业工期，又满足不同项目需求。

索尼镜头具备的稳定性、飞行质量要求高、影像质量高等特点，使矿山倾斜摄影测量项目的生产时间具备确定性与可靠性，在保障项目工期，提升矿山测量作业效率方面具有重要的意义。金川矿山摄影测量项目的成果及经验可进一步应用于厂房调查、矿区地形图测量、矿区变形监测、基础测绘数据更新等项目中。

作者简介：刘鹏山，(1987-)，男，甘肃武威人，毕业于兰州大学，工程硕士，中级工程师，从事测绘相关工作。