

无人机在青海玛多地震灾害调查中的应用

作者：李鑫沅 陈博 张成龙 韩炳权 杜建涛 杜晨辉

联系人：李鑫沅 15583308860

投稿单位：《长安大学》

摘要：

北京时间 2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分，青海省果洛藏族自治州玛多县（34.59°N,98.34°E）发生 M7.4 级地震（简称“玛多地震”）。采用无人机摄影测量技术获取高精度数字正射影像和数字表面模型，对地表裂缝进行精细化测绘，并根据统计的地表裂缝位移量评估地震所导致的偏移量。面对大范围区域的精细测绘任务，无人机以空中对地视角获取调查区域内的地形数据，对地表破裂进行快速高效且详细的普查，解决了传统震后地质调查效率低、人力物力耗费巨大、调查不全等问题。

关键词：

无人机；摄影测量；地震调查；灾害测绘

1 项目背景

据中国地震台网测定，北京时间 2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分，青海省果洛藏族自治州玛多县（34.59°N,98.34°E）发生 M7.4 级地震（简称“玛多地震”），震源深度 17 千米，震中距黄河乡驻地 7 公里、距玛多县城 38 公里。地震造成 G0613 西丽高速野马滩二号大桥双向坍塌、野马滩一号大桥坍塌，国道、省道多处受损严重，严重影响当地人民群众生命和财产安全（如图 1 所示）。

玛多地震发生后，对震后进行地质调查与评估工作亟需展开。考虑到本次地震断裂带可能长达百余公里，测区范围较大，且测区位于平均海拔约 4200m 的高原地区，又以泥淖沼泽地形为主，传统的地面调查手段难以进行全面的勘察且效率低下，无人机摄影测量技术以高机动性的无人机平台搭载高分辨率相机对地摄影，能够快速高效地获取目标区域的高精度地形数据。本项目旨在调查玛多地震造成的地表破裂，判断具体的断层走向，进一步研究地震活动。

综合测区情况和任务要求，决定采用无人机摄影测量技术获取高精度数字正射影像 (Digital Orthophoto Map, DOM) 和数字表面模型 (Digital Surface Map, DSM)，对地表裂缝进行精细化测绘，并根据统计的地表裂缝位移量评估地震所导致的偏移量。



图1 坍塌后的野马滩二号大桥

2 项目技术路线

本项目基于飞马无人机 E2000 平台，对震中 100 公里范围内的断层进行了数据采集。技术路线如图 2。

首先利用飞马起司行业知识库提供的 DEM 数据在无人机管家智航线模块中规划航线。然后使用智飞行模块配合地面站设备智能遥控 E2000 多旋翼无人机自主进行航飞数据采集。

测区位于青藏高原中部，地形以泥淖沼泽为主，导致地面控制点难以布设。所以使用飞马 E2000 的网络 RTK 解算服务获取相机坐标数据，对成果进行地理参考定位。在相邻区块间设置重叠度，便于后续区块配准，以提高整体地形数据的绝对定位精度，从而实现免像控测图。

经过数据处理，得到具有地理参考的高分辨率 DOM、DSM。对 DOM 进行人工解译，提取地表裂缝位置与形态，推断主断层的走向。利用 DOM、DSM 获取地表裂缝的垂向和水平向位移量，量化分析野马滩一、二号大桥道路损毁情况。

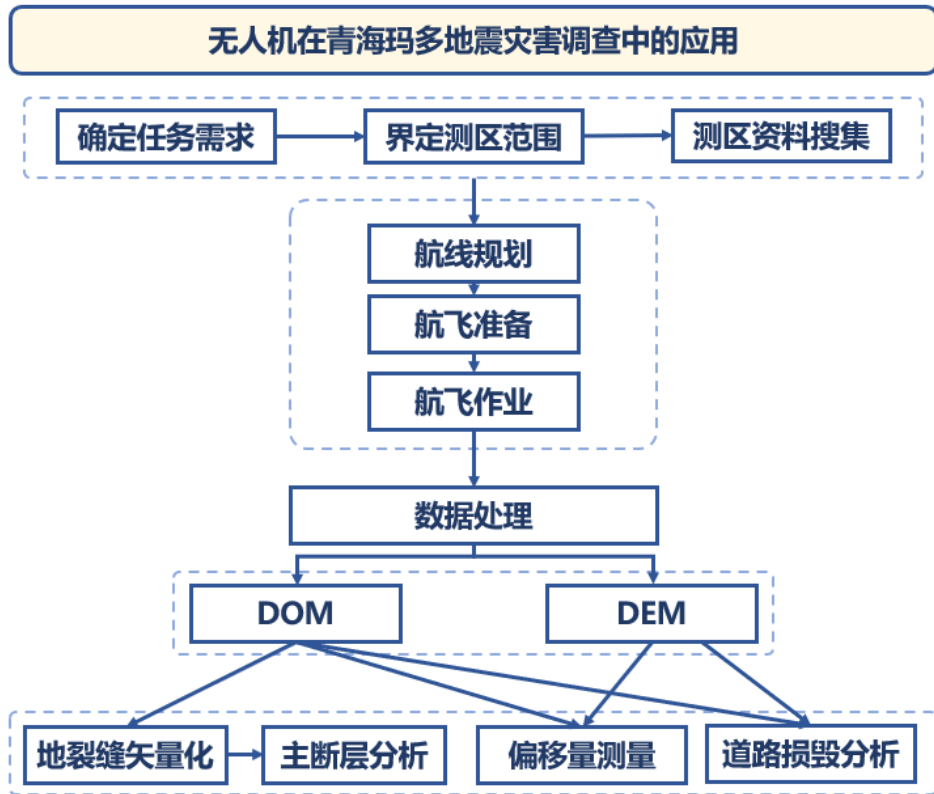


图 2 技术路线图

3 作业流程

3.1 作业设备

3.1.1 飞马 E2000 智能航测/遥感系统

本项目使用飞马 E2000 智能航测系统进行航飞数据采集。如图 3，飞马 E2000 是一款面向专业行业用户的满足高易用、高效率、高精度航测应用的智能航测系统，标配 2430 万像素的 E-CAM2000 航测模块，能够获取高分辨率影像；标配高精度差分 GNSS 板卡，能够实现基于 RTK/PPK 融合解算的 1:500 大比例尺免像控成图，同时支持精准的三维仿地飞行，适应各类地形变化，以提高数据质量；具备自动垂直起降功能和自动避障功能，实现高度自动化智能化飞行，简化学习成本，提高作业效率。E2000 标准起飞重量 2.8kg，标准载荷 200g，续航时间高达 60min，测控半径 10 公里；即便位于平均海拔约 4000m 的高原地区，经实测，在使用高原专用桨叶的情况下，最大续航时间仍可达 40min。所以无论在效率方面还是精度方面，飞马 E2000 智能航测系统能够完全满足本次项目的任务需求。



图3 E2000 飞马智能航测/遥感系统

3.1.2 软件平台

无人机管家是飞马 E2000 智能航测系统的软件平台，能够进行数据获取、处理、显示管理及无人机维护的一站式智能 GIS 系统，满足各种应用的航线模式，支持各类飞行平台、真三维地形数据的精准三维航线规划、三维实时飞行监控、快速飞行质检、数据管理与导出、飞行日志回放等功能。

3.2 航线规划

将 InSAR 技术获得的断层线向两侧各扩展 1km 得到的带状区域作为项目的测区范围。考虑电池续航与工作效率，将断层线分段。采用带状规划航线，航线规划如图 4。

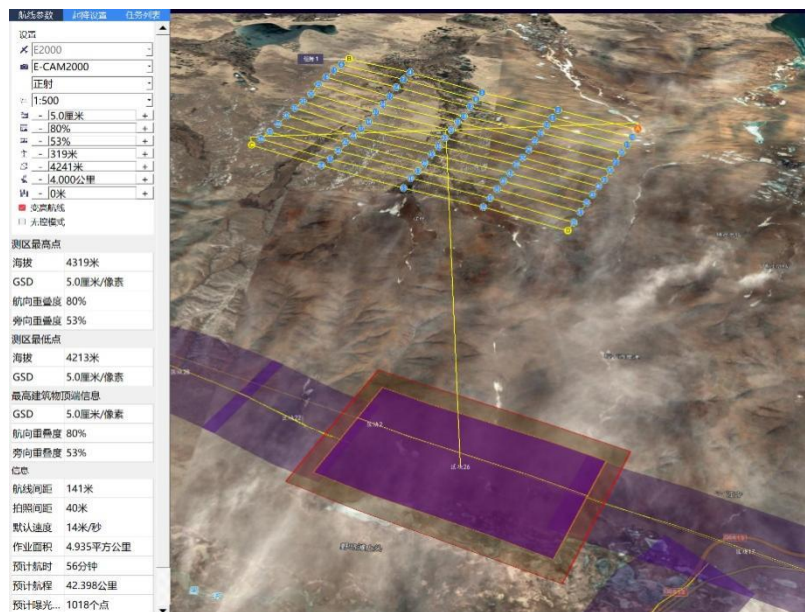


图4 航线规划图

在平原地区，每块电池支持 50min 飞行，但本测区位于高原，每块电池仅能支持约 40min 飞行，为提高作业效率，按照每两块电池一个区块布设航线。地面分辨率过高也会影响作业

效率，但地面分辨率过低意味着较高的飞行高度，所以这又会制约电池续航时间。综合考虑认为 5cm 的地面分辨率较为合适。

输出模型的质量直接受到重叠率的影响。一般情况下，设置 80%的航线重叠率和 60%的旁向重叠率可以获得较高精度的模型。精度要求不高时，53%的旁向重叠率也可满足。

3.3 航飞准备

选择满足 10m × 10m 的空旷平坦区域，远离电线塔。架设地面站，安装桨叶、电池及 SD 卡，检查无人机安装情况，保证安全飞行。



图 5 起降场地与飞马 E2000

3.4 航飞作业

软件发出起飞指令，无人机开始飞行，并按预定航线进入航飞作业。在此过程中，地面人员可查看实时飞行参数，主要包括：飞行姿态、飞行位置、飞行速度、风速、GPS 卫星数、RTK 状态及剩余电量，确保无人机安全作业。无人机返回后，注意数据导出。

高原地区风速大、变化快，有时风速高达 11m/s，但飞马 E2000 仍能准确、稳定地保持航线飞行。整个项目共 45 架次，经过检查无照片漏拍发生，而且获取的数据完整且清晰。在一次飞行作业中，突遇阵雨，此时无人机在距降落点 1km 远的高空。得益于该无人机的多工况可靠性，在人工降落指令发出后，E2000 缓缓降落。经过检查，其各系统正常运行。

3.5 数据处理

项目选用 WGS84 坐标系（EPSG:4326）作为坐标参考框架，相应的 DOM、DSM 坐标系为 WGS84 UTM Zone 47N（EPSG:32647）。

本次项目选用 Metashape 软件进行数据处理，处理流程包括数据导入、参数设置、对齐像片、密集匹配、生成 DSM、匀光匀色、生成 DOM，结果如图 6(a)(b)。



图 6(a) 野马滩二号大桥的数字正射影像图

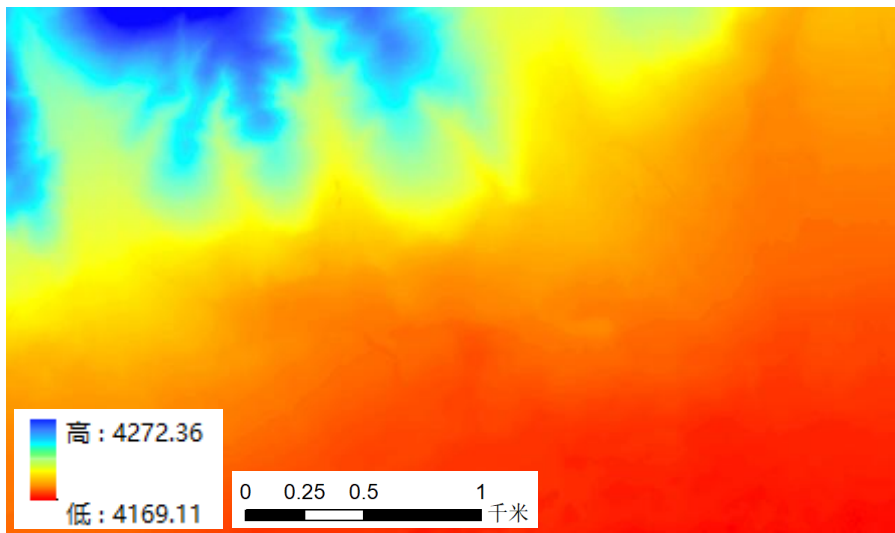


图 6(b) 主断层周边局部区域的数字表面模型

4 精度分析

地裂缝测量需要相对精度达到厘米级，对绝对定位精度要求不高，只需保持分米级定位精度即可。由于区块范围足够大（通常达到千米级），利用 GNSS-RTK 解算得到的相机位置作为地理参考定位，能够使解算的模型在旋转和尺度上保持精确，主要的绝对偏移体现在平移误差上，另外利用区块的重叠部分进行配准，能够进一步提高整体测区地形数据的绝对平面定位精度。

对于精度的评定，我们可以利用区块间的重叠部分来检验区块的定位偏移，在重叠区域选取同名点，测量同名点间的偏移量，按照下面的公式计算区块的绝对平面定位精度。

最终结果表明，区块的平面绝对定位精度为 23.37cm，考虑到本次项目共获取了 21 个区块，经过配准后，整体 DOM 的绝对定位精度可能达到 10cm。此外，我们在地面勘察时使用的手持 GPS 所提供的点位直接导入叠加到 DOM 上，能够保持足够的一致性。

5 地震灾害调查

5.1 地裂缝精细调查与断层反演

利用获取的 DOM 进行人工解译,对地表裂缝进行精细的矢量化提取,获得地表裂缝的位置与形态,从而推断主断层的走向;同时,基于 DOM 提取的地裂缝矢量(如图 7),提取水平位移量,然后结合 DSM 获取单个裂缝的剖面图(如图 8),从而提取垂向位移量。最终我们获得了玛多地震所致的地裂缝的分布、位移量,推断主断层走向。

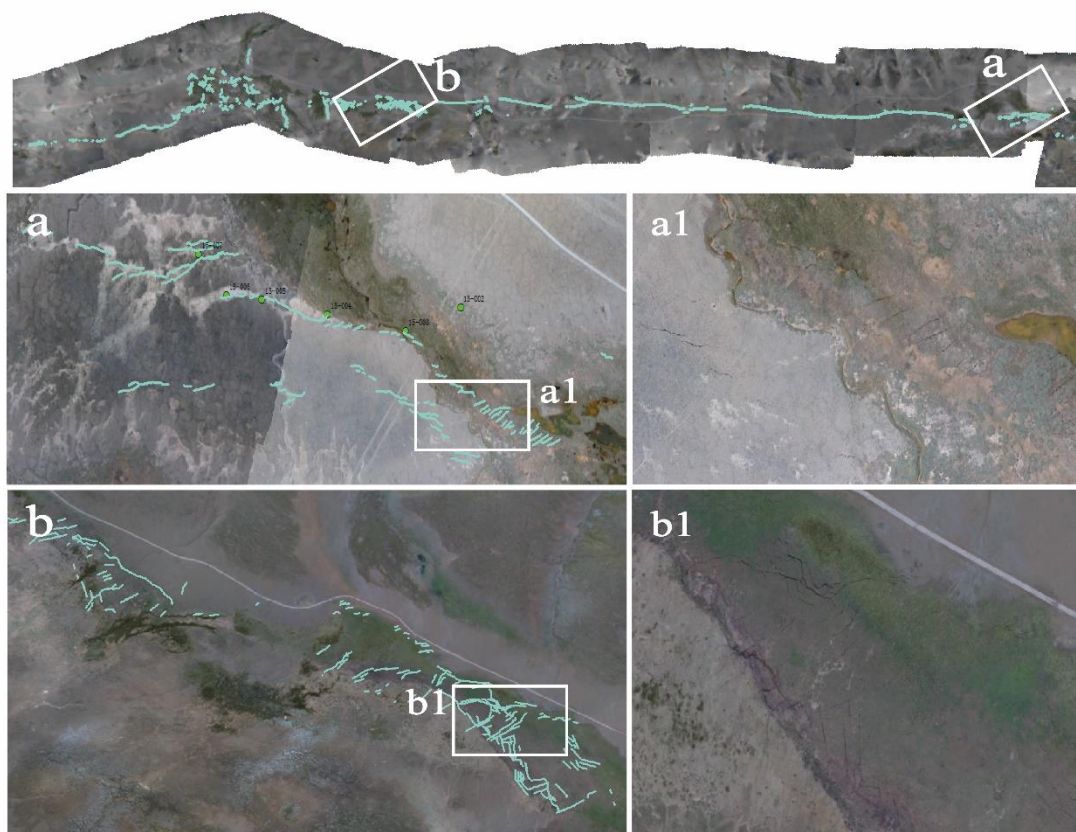


图 7 研究区域断层分布

5.2 道路损毁情况分析

针对野马滩一、二号大桥,我们基于高分辨率 DOM 和 DSM 精细量测了损毁信息。野马滩一号大桥受损严重,总共坍塌 35 块,受损总长度为 406.851 米,据 DSM 获得的剖面图计算,野马滩一号大桥坍塌的平均倾角为 11.59° ,平均坍塌间隔约 22 米。野马滩二号大桥共 8 段坍塌,受损总长度为 166.104 米,平均倾角为 7.93° 。

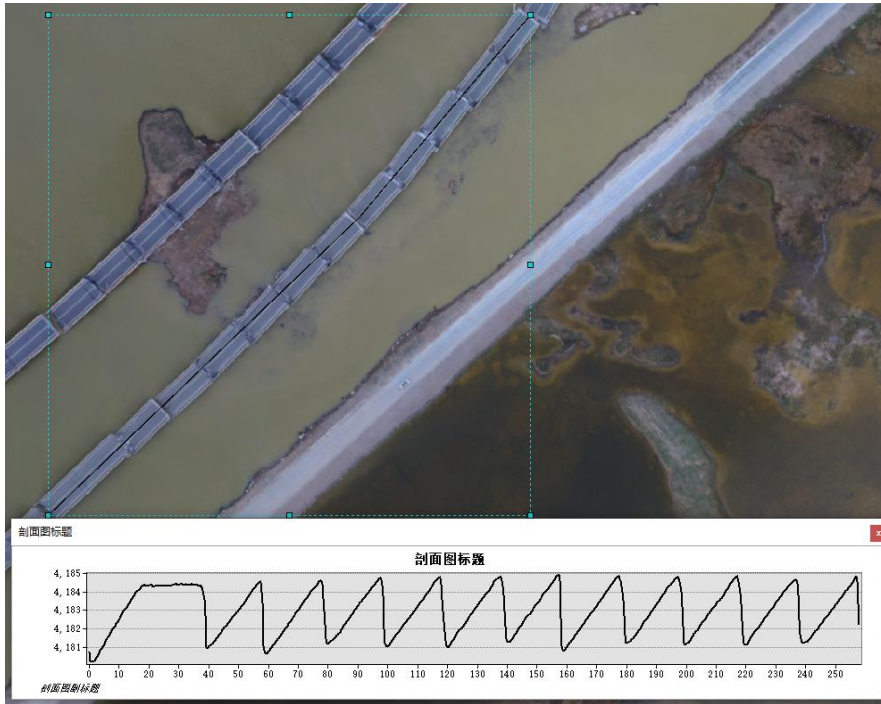


图 8 野马滩一号大桥部分剖面图



图 9 野马滩一号大桥地面实拍图

6 项目特点及优势总结

本项目采用无人机摄影测量技术，完成了对震后地表破裂及道路交通损毁的测绘，展示了无人机在地震灾害调查及道路损毁调查中的应用，项目利用飞马 E2000 智能航测系统，获取了青海省玛多县地震主断裂带周边区域及野马滩一号大桥与野马滩二号大桥区域的高分辨率正射摄影数据，借助 E2000 配备的高精度差分 GNSS 板卡结合 RTK 网络差分服务提供的分米级相机定位精度，生成具有满足绝对定位需求的高精度地形数据。不仅如此，E2000

优秀的抗风能力及续航能力，使得在复杂环境下仍能够保持高效、安全、智能的数据采集。展现了无人机在气象变化剧烈的高海拔地区的良好适应性。项目为相关应用场景的工作提供了样例，拓展了无人机摄影测量的应用领域。

本项目所涉及的地表破裂调查与道路交通损毁调查充分发挥了无人机摄影测量不可替代的优势：

1. 面对大范围区域的精细测绘任务，无人机以空中对地视角获取调查区域内的地形数据，对地表破裂进行快速高效且详细的普查，解决了传统震后地质调查效率低、人力物力耗费巨大、调查不全等问题。

2. 面对坍塌的大桥，传统测量手段难以保证安全，通过无人机非接触式测量方式不仅避免了危险作业，还能获取精细、全面得受损信息。

3. 面对高海拔复杂环境，传统地面调查受限且危险，无人机以其高灵活性、高适应性，应对极端复杂环境，同时还能保证数据质量的稳定。

无人机摄影测量技术正随着无人机的迅速发展而获得越来越广泛的应用。无人机提供的高灵活、长续航、高精度、高分辨率、高适应性等能力，使其在灾害调查中发挥着越来越重要的作用。希望未来的无人机能够进一步发展，特别是无人机定位精度的提高、相机分辨率的提升及续航的提升，我们相信无人机摄影测量技术能够在灾害调查及防治领域中发挥更加重要的作用。