

飞马 D200S 无人机在铁路危岩落石调查中的应用

李嘉雨，任云，王栋，贾哲强，张敏

(中铁二院工程集团有限责任公司 地勘岩土工程设计研究院，成都 610031)

第一作者 李嘉雨 联系电话：15108411663 电子邮箱：1245962984@qq.com

地址：成都市金牛区通锦路 3 号

摘要：新建济南至枣庄铁路沿线危岩落石发育对铁路施工及运营安全构成威胁。为准确查明危岩体的分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况，本项目在地质调绘、遥感解译的基础上，通过使用携带 D-CAM310 镜头的飞马 D200S 无人机对沿线典型危岩体工点开展三维倾斜摄影测量并制作三维点云和实景模型，获取了危岩体分布范围、高度、块径、体积、节理裂隙发育情况、典型断面等的关键参数。相较于传统的危岩落石调查手段，使用无人机开展调查大幅提高了对危岩落石调查的效率和精度，降低了生产成本和人员安全风险，为防治危岩落石提供了准确的数据支撑，推动了铁路勘察技术从传统地质调绘向“空天地一体化勘察”的技术进步。

关键词：危岩落石 飞马无人机 空天地一体化勘察 铁路

1. 项目背景

新建济南至枣庄铁路北起济南枢纽，向南经泰安、济宁，止于枣庄市台儿庄区，正线全长 268.564km，正线速度目标值为 350km/h，工程总投资约 521.42 亿元。它是山东“四横六纵”高铁网、山东半岛城市群城际铁路网的重要组成部分，是引导和带动区域旅游高质量发展的重要载体，是构建沿线地区对外连接长三角、京津冀等地区快速客运通道的重要组成部分。



图 1 鲁中南低山丘陵区典型崩塌



图 2 西山隧道进口倒悬状危岩体

新建济南至枣庄铁路济南至泰安段途径鲁中南低山丘陵区，地面高程 40~650m，沿线多位于泰山山麓中低山前缘，山体陡峻，基岩多裸露，花岗岩、石英闪长岩、二长花岗岩、灰岩多形成基岩陡壁或倒悬状危岩体，危岩落石、崩塌较为发育（图 1），部分地段由于人工采石形成倒悬状岩体（图 2），对铁路的施工安全及运营安全构成威胁，据此开展危岩落石调查与风险评价专题工作。

2. 技术路线

为了判识危岩体及崩塌的对铁路施工及运营的危害程度，提出有针对性的防治措施，需查明危岩体的分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况和各种结构面特征及组合关系等信息。

为实现上述目标，本次利用飞马 D200S 无人机对沿线危岩所处的环境、规模、类型、可能的破坏形式及其影响范围进行了详细的判识及现场调查，其技术路线（图 3）如下：①首先通过遥感解译手段，对拟建铁路沿线进行危岩识别和排查；②开展地面调绘查明危岩所在斜坡地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件等情况；③使用携带 D-CAM310 镜头的飞马 D200S 无人机开展三维倾斜摄影测量；④使用飞马无人机管家和 Context Capture 软件将无人机获取的高清影像照片制作成无人机三维点云模型和三维影像模型；⑤使用 PolyWork 对三维点云模型进行断面切割，使用 Acute 3D 软件测量危岩体分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况；⑥根据测得的危岩体的典型断面、结构面产状、块径大小开展节理裂隙分析和运动轨迹模拟。

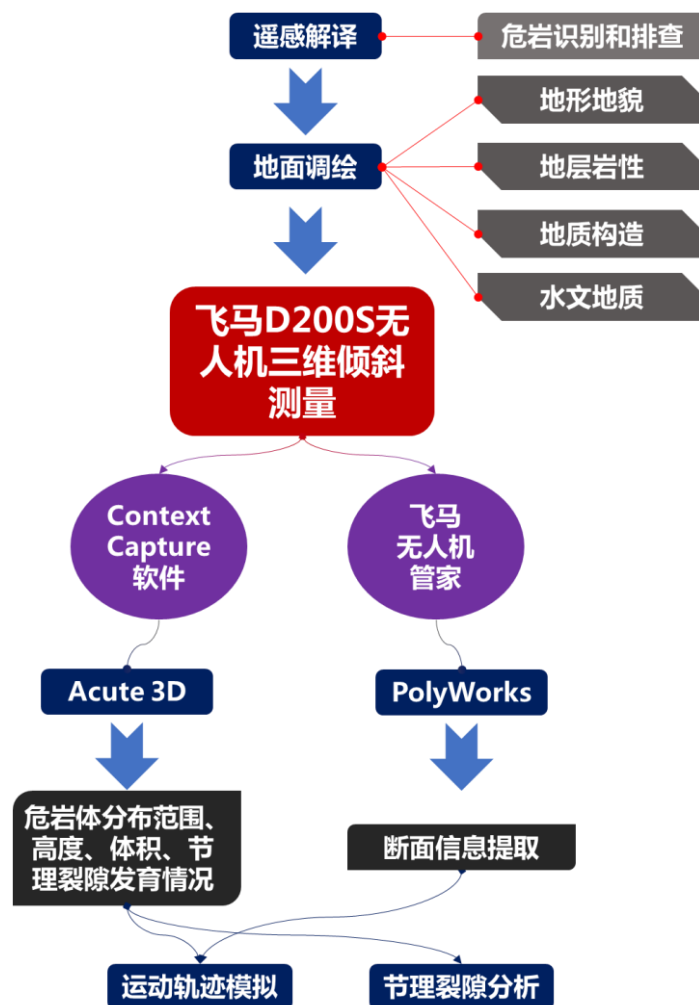


图 3 基于飞马 D200S 无人机危岩落石调查技术路线图

3. 实际作业流程

飞马 D200S (表 1) 空机重量 6.5kg, 起飞重量 8.5kg。该型无人机具有高精度航测、单兵作业成本低、起飞场地要求低、拆装方便、免相控精度、模块化任务、精准随地飞行的诸多优势。其续航时间高达 48min; 同时, 有效像素达 4200 万能够拍摄出极高清影像照。

本项目共利用外业工作 2 天时间, 完成坞东村、东岭、西山、杏花峪 4 个隧道进出口点的 1:500 比例精度的三维倾斜测量, 面积共计 3.742km², 航向重叠度 78%, 旁向重叠度 78%, 照片拍摄分辨率 4.3cm/像素。

表 1 飞马 D200S 无人机及其航测模块参数

外形尺寸	830x732x378mm
空机重量	6.5kg
起飞重量	8.5kg
巡航速度	13.5m/s
最大下降速度	8m/s
续航时间	48min (单架次海平面悬停时间)
抗风能力	5 级 (正常作业)
导航卫星	GPS: L1+L2 (20Hz) BeiDou: B1+B2 (20HZ) GLONASS:L1+L2 (20Hz)
悬停精度 RTK	水平 1cm+1ppm; 垂直 2cm+1ppm
差分模式	PPK/RTK 及其融合作业模式
测控半径	5KM
最大爬升速度	10m/s
实用升限高度	海拔 4500m
工作温度	-30~50 ° C
D-CAM310 镜头有效像素	(7952×5304)4200 万
云台	两轴增稳云台

3.1 飞行前准备工作

3.1.1 室内工作

飞行开展前, 需了解飞行地区的气象条件、限飞区域、航线走向、军事设施、高压电线走向等关键信息, 并对潜在风险源进行评估, 制定相关应急预案。

飞马 D200S 的动力电池以三块为一组, 且每组电池不能混用。飞行前一天, 除将无人机动力电池充满, 还需对相机电池和基站电池进行充电。针对需开展倾斜摄影的危岩体工点, 可打开飞马无人机管家选择智航线, 新建工程, 导入测区在卫星地图的 KML 文件, 在输入测区分辨率、重叠度和地面高程后, 飞马无人机管家将自动生成航线 (图 4)。

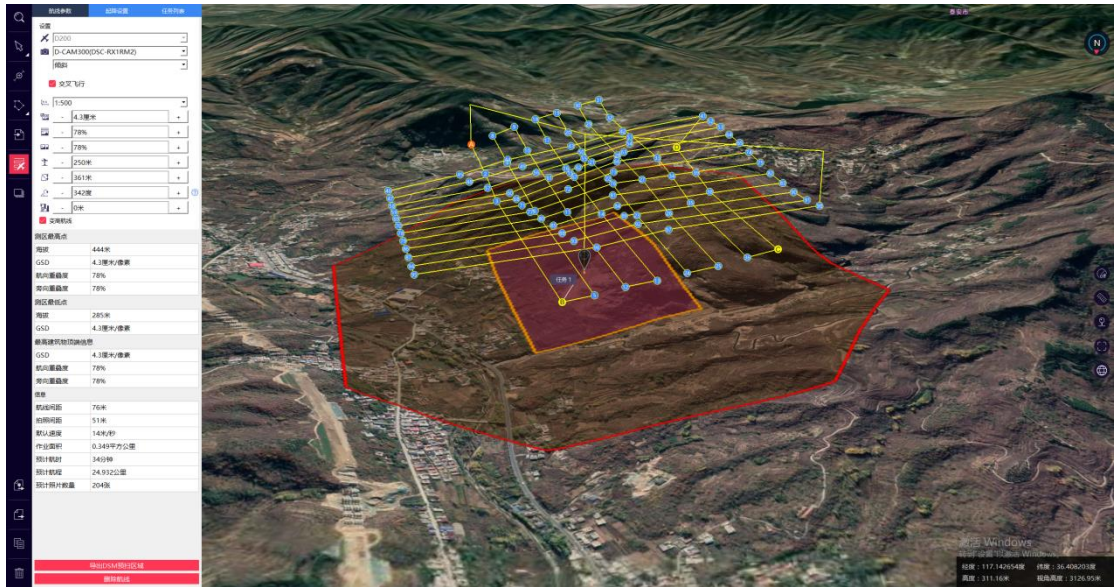


图 4 利用智航线提前规划西山隧道进口无人机飞行航线

3.1.2 室外工作

本次配置机长 1 人，驾驶员 1 人，观察员 1 人（图 5）。D200S 无人机起降点选择四周无遮挡的 20m×20m 宽的空旷光滑地面，并保证飞机爬升时净空无障碍物。确认起降点后对无人机进行组装，并检查机体完整性、确认螺旋桨无裂痕缺口。待检查完毕后，在地面站 10m 范围内架设无人机 RTK 基站，并选择单基站+PPK 模式为基站连接模式。最后，飞行前还需对飞马无人机 D200S 进行固件升级，保证其飞控固件处于最新版状态。



图 5 东岭隧道出口航测现场工作照片

3.2 无人机飞行及降落回收

上述准备工作完成后，起降飞行器时需绕无人机旋转一圈拍摄视频，以便出现飞行事故后，查清事故原因。无人机起飞后，无人机将进入自主飞行状态，地面站将自动报送飞机飞行状态，通过地面站可以监控飞机姿态、位置、高度、空速、剩余电量等参数。当飞机完成航测后将自动降落。飞机降落后会自动加锁，使用 type-c 线下载机载 POS 数据。飞机断电后取出相机内存卡，下载照片数据。



图 6 流动站基准站数据差分解算

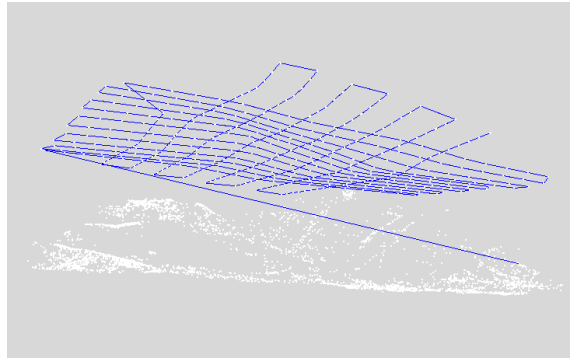


图 7 西山隧道进口空三计算成果

3.3 数据处理

无人机飞行数据主要包含照片、机载数据和基站 GNS 数据。通过将机载数据（流动站数据）与基站 GNS 数据（基准站）数据进行 GPS 和 BeiDou 综合差分解算获得无人机 POS 数据（图 6）。在对 POS 数据检查合格后，在飞马无人机管家智拼图中新建工程，导入影响信息和 POS 数据，并设置高程分辨率等信息，进行特征点提取匹配及空三计算（图 7），最终获得无人机数据的点云文件（图 8）。将飞马无人机预处理后的空三文件导入 Context Capture 软件进行三维实景建模，并用 Acute 3D 软件进行查看（图 9）。

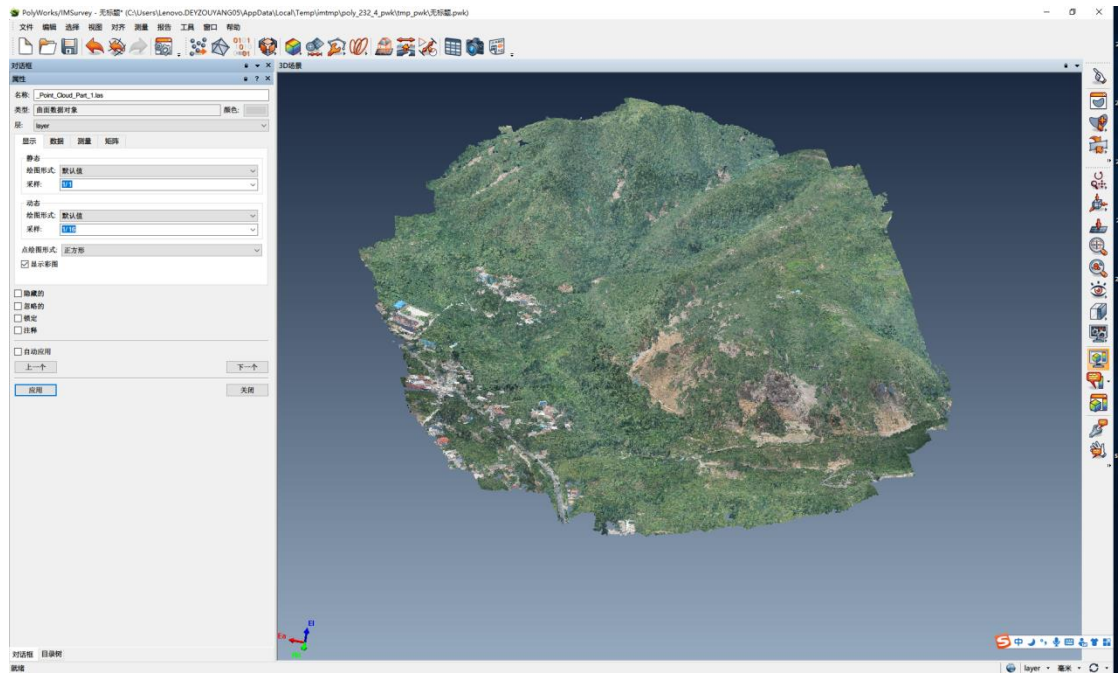


图 8 西山隧道进口三维点云纹理

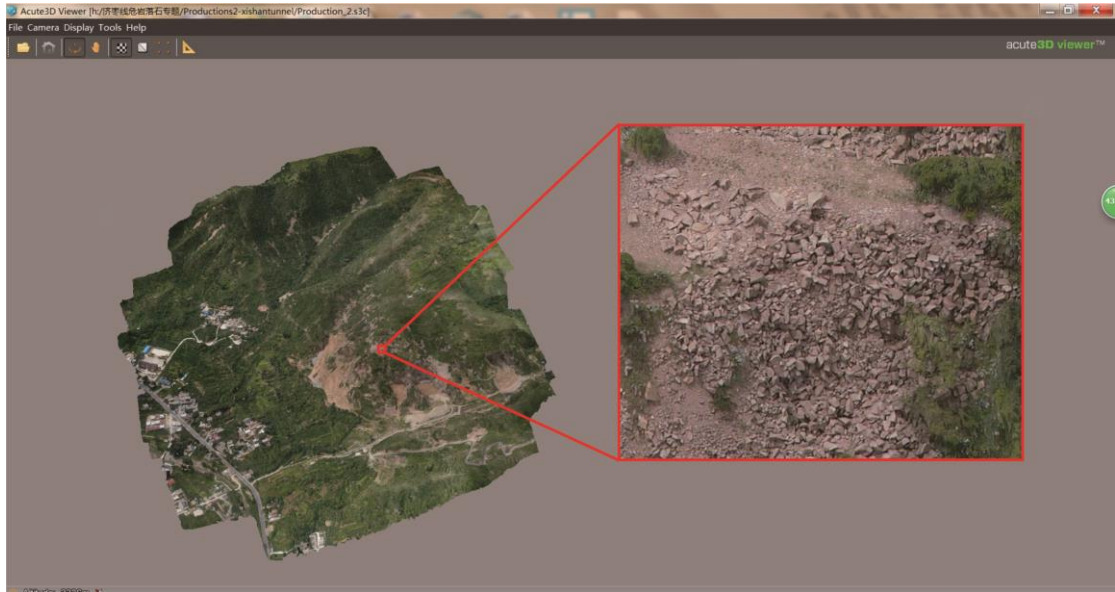


图9 西山隧道进口三维影像模型

4. 解决生产问题与创新应用

传统工程地质调查是通过地质人员沿一定路线在线路两侧一定范围内进行普查,详细调查危岩体的位置、规模、地质条件,但危岩体往往高陡隐蔽、植被十分发育,人员难以到达,并且消耗大量人力物力的同时伴随极高的勘察风险,因此对调查危岩落石的分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况造成极大困难。此外,由于卫星遥感影像分辨率通常为分米级,只能初步判断危岩体的分布范围和高度,不能实现精准测量。

因此,为解决精确测量危岩体分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况的难题,提高对危岩落石调查的效率,降低生产成本和人员安全风险。通过在新建济南至枣庄铁路的使用飞马 D200S 无人机开展三维影像航测摄影,实现了对危岩体的分布范围、高度、体积、节理裂隙发育情况的精确测量,测量精度达毫米级。

4.1 危岩体规模参数的获取

通过 Acute 3D Viewer Measurement 按钮中 Distance 功能(图 10)可以精准测量危岩体与设计标高的相对距离与高度、节理裂隙间距与张开度、孤石块径等信息,Volume 功能(图 11)可以圈定岩体面积、体积、挖方高度、填方高度等信息。通过获得孤石的块径和相对高差,可以计算获得落石方量、弹跳高度、坠落能量等参数。

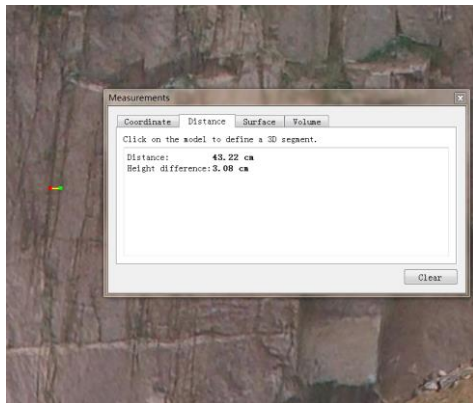


图 10 节理裂隙间距测量

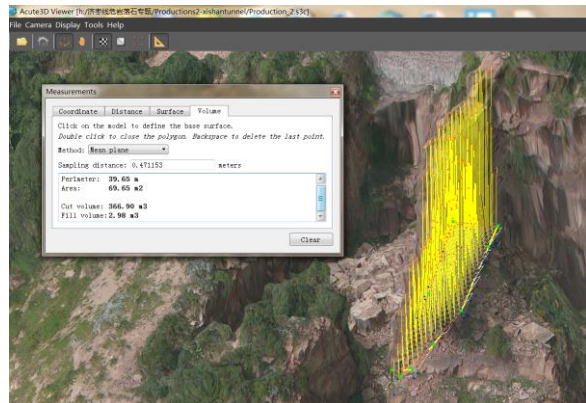


图 11 测量危岩体体积及面积

本项目共对 21 处危岩体进行了面积、体积、节理裂隙间距的测量,获得了准确的设计

参数，为隧道、桥梁防灾减灾设计提供了有力支撑。

4.2 危岩体节理裂隙发育情况

通过 Acute 3D Viewer Measurement 按钮中 coordinate 功能（图 11）可以获得危岩体的坐标和高程，当选择 WGS84 通用墨卡尔投影坐标时可以获得危岩体的 X、Y、Z 三维坐标。通过在同一结构面上不在一条直线上的三个点的数据可以拟合一个面，采用 MATLAB 编制批量处理程序（图 12），批量拟合结构面三维平面，通过获得的拟合平面的法相向量计算结构面产状信息。

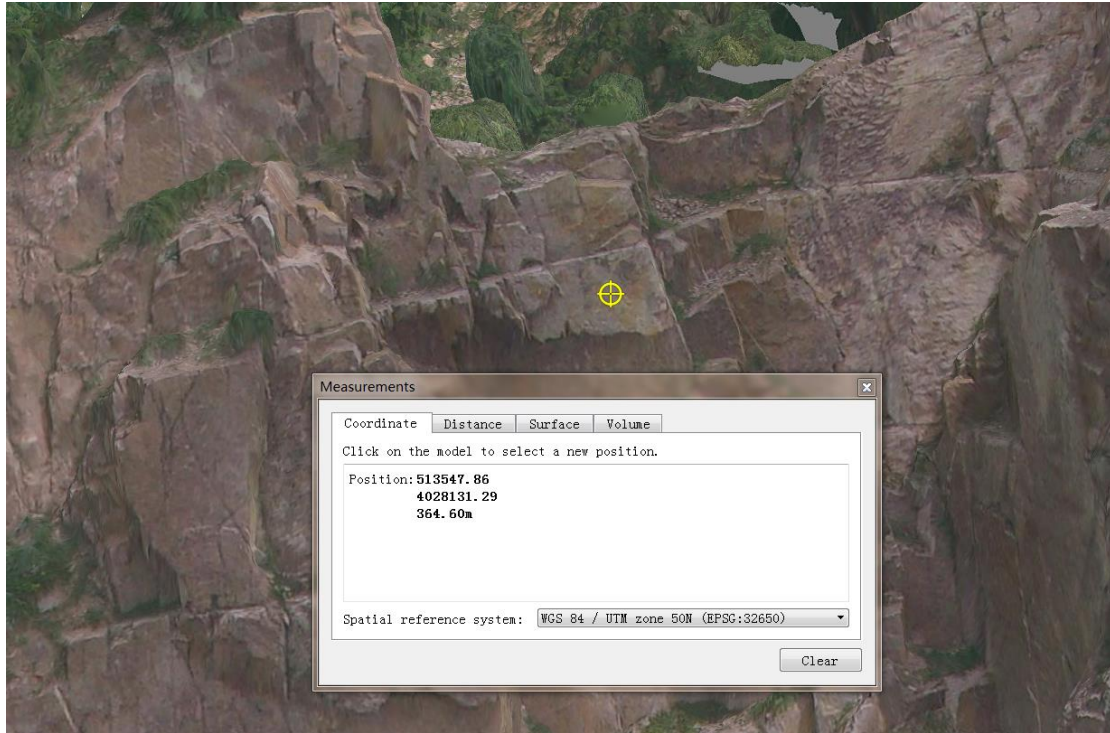


图 11 获取结构面空间三维点

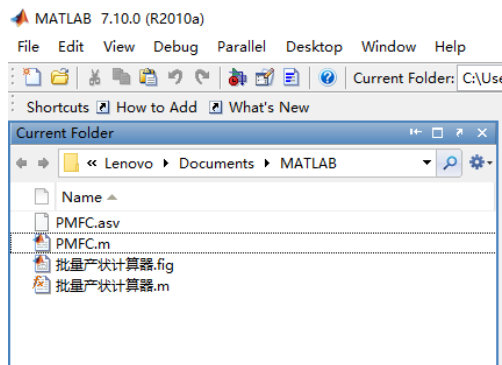


图 12 MATLAB 批量处理程序

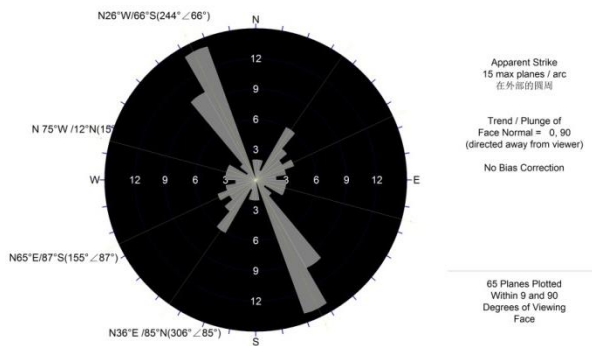


图 13 无人机测量西山隧道危岩体优势结构面图

本项目共通过此方法获得 300 组产状，其中坞东村隧道出口测得 42 组、东岭隧道出口测得 98 组，西山隧道进口测得 67 组（图 13）、杏花峪隧道进口测得 93 组，通过节理裂隙统计获取优势节理面发育情况。而相对于传统的调绘手段，这四处隧道洞口仅测得 45 组产状信息。

4.3 危岩体典型断面的量测

在编写工程工点资料时，由于工点图（1:2000）的测绘精度往往不高，不能完全体现陡崖、倒倾状岩体的微地貌。通过 Polywork 打开飞马无人机管家生成的点云文件，通过选取点云文件中的三个坐标点，创建一个平面。选取断面工具选择切割危岩体的平面，输出该断

面，即可获得该平面切割典型断面。

本项目分别对西山隧道进口危岩体（图 14）采用切割平面图等高线（图 15）和点云数据（图 16）两种方式进行剖面，通过对比可以看出使用 Polywork 切割点云数据得到典型剖面更为真实可靠，该断面（图 16）能够体现该处危岩体的倒悬状地貌。此外，通过测量岩体的节理发育情况和坠落块石的块径大小，确定西山隧道进口端危岩体落石块径为 0.1~2.85m；将 Polywork 截取的断面导入 rocfall 陡峭边坡落石统计分析软件后，输入危岩体关键参数获得危岩体失稳后能够获得落石运动路径（图 17）、弹跳高度、动能等基础数据，为防护工程布置的位置、设计参数提供了依据。

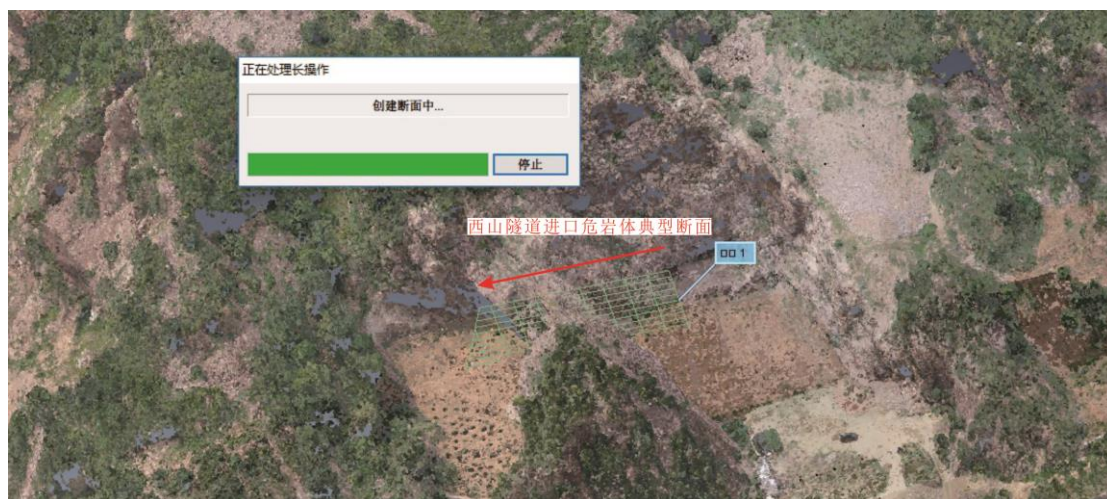


图 14 西山隧道进口典型危岩体断面

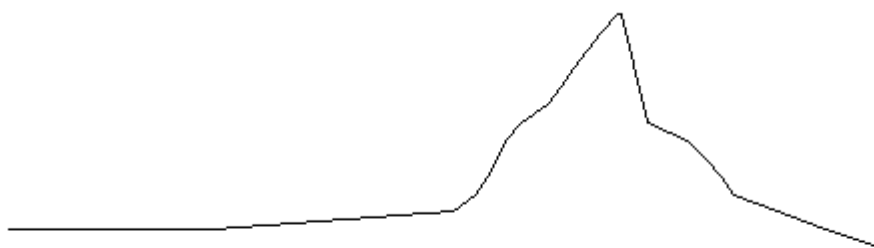


图 15 切割平面图等高线得到的西山隧道进口危岩体典型剖面

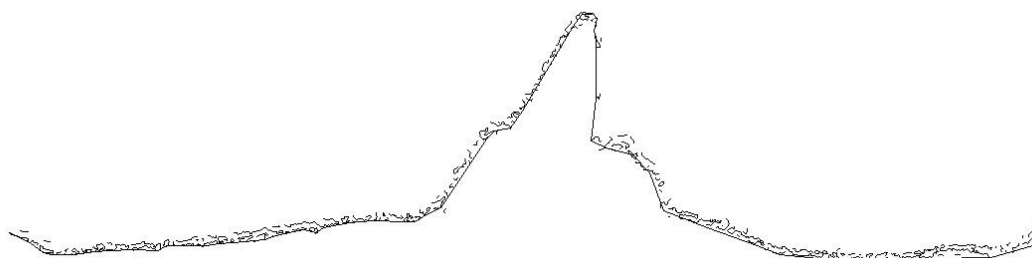


图 16 使用 Polywork 切割点云数据得到的西山隧道进口危岩体典型剖面

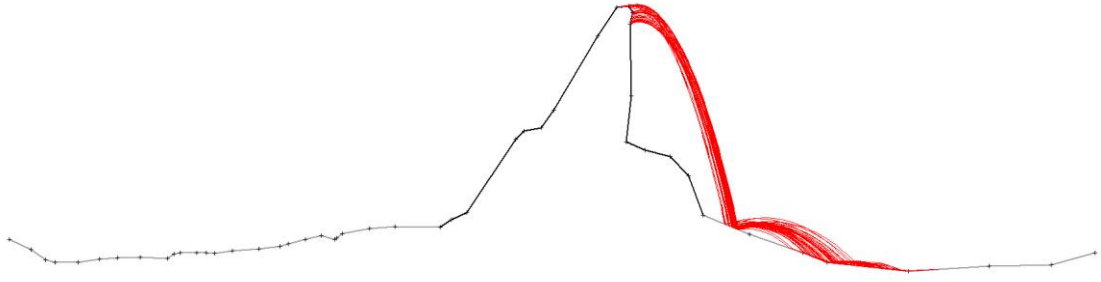


图 17 西山隧道进口危岩体落石运动轨迹

6. 项目特点及优势总结

本项目具有时间紧、调查难度大、调查要求精度高、人员调查风险大等特点。通过在新建济南至枣庄铁路危岩落石调查与风险评价专题项目中应用飞马 D200S 无人机,解决了传统地质勘察手段获取危岩落石关键形态参数困难、准确度差、测量效率低、人员风险高的行业痛点及难点,实现了危岩体规模参数、节理裂隙发育情况、典型断面的精确测量,为防治危岩落石提供了准确的数据支撑,大幅提高对危岩落石调查的效率和精确度,降低生产成本和人员安全风险,推动了铁路勘察技术从传统地质调绘向“空天地一体化勘察”的技术进步。