

别地表矿物的光谱吸收特征,实现矿物成分与岩性分布的快速提取。矿物如高岭石、绿泥石和赤铁矿在特定波段存在明显吸收峰,可利用光谱匹配与特征波段比值进行识别。结合地质背景与构造信息,可生成矿化蚀变带分布图,为找矿预测提供依据。在实际应用中,通过光谱角映射与主成分变换方法对新疆、内蒙古等地区的高光谱影像进行处理,矿化信息提取精度达到85%以上。高光谱技术的引入显著缩短了地质调查周期,减少了地面取样成本,实现了从区域普查到精细勘查的无缝衔接,推动了地质遥感向量化、智能化方向发展。

6 高光谱分类结果的精度验证与优化路径

6.1 分类精度评估指标与验证方法

分类精度评估是高光谱遥感研究的重要环节,常用指标包括总体精度、用户精度、生产者精度及 Kappa 系数。通过构建混淆矩阵,可定量评估分类结果与实测数据的一致性。样本划分方式对评估结果影响显著,通常采用交叉验证与分层随机抽样策略保证样本代表性。地面实测数据、无人机影像及历史遥感影像均可作为验证依据。在模型训练阶段引入留出法可避免过拟合,提高模型泛化能力。研究显示,当训练样本量达到总样本的20%且样本分布均衡时,分类精度可提高8%至10%。系统的精度验证方法有助于评估分类算法的稳定性与可靠性,为后续模型优化提供参考,详见图1。

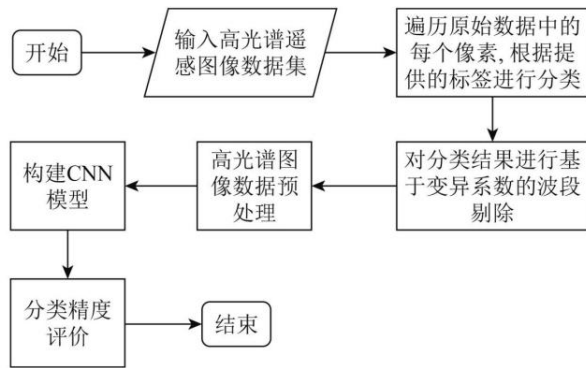


图1 高光谱分类结果的分类精度评估流程

6.2 噪声抑制与光谱混合问题的处理对策

高光谱影像在成像过程中受传感器性能、大气散射和地表复杂反射的影响,易产生噪声干扰与光谱混合现象。噪声抑制常采用维纳滤波、小波变换和主成分重建等方法,能

够有效降低随机噪声对光谱曲线形态的影响。光谱混合问题源于像元内多种地物反射的叠加,可通过线性混合模型或非线性解混算法进行分解,提取纯端元光谱信息。结合最小噪声分离与独立成分分析,可进一步提高分解精度。实验结果表明,优化后的解混模型在复杂地表环境中地物识别率提升约15%。噪声与混合处理的有效性直接影响分类结果的稳定性与可靠性,是高光谱数据预处理的重要步骤^[4]。

6.3 分类结果的后处理与可视化表达优化

高光谱分类结果在生成后需经过空间后处理与可视化优化,以提升图像表达的直观性与实用性。后处理常采用空间滤波、区域合并与边缘平滑算法,消除孤立像元和误分类区域,增强地物边界的连续性。可视化表达通过颜色映射、层级渲染与三维建模技术,将分类结果与地理空间信息系统融合,实现对地物类型的多维展示。研究表明,结合多尺度滤波与分割后的后处理流程可使分类图像的 Kappa 系数提高0.07以上。通过构建交互式可视化平台,可动态展示分类结果与光谱信息关联,方便用户进行数据解译与决策分析,为高光谱遥感成果的应用推广提供技术支撑。

7 结语

基于卫星遥感的高光谱图像分类技术以其高光谱分辨率和强信息获取能力,已成为地表信息识别与环境监测的重要手段。通过多维特征提取、空间信息融合与模型优化,分类精度与稳定性显著提升。不同算法在地物识别、农情监测和地质勘查中展现出广泛适应性与实际应用价值。随着遥感卫星平台的更新与数据处理技术的进步,高光谱分类将更加智能化、精细化与多源化。未来研究应注重算法轻量化与实时分析能力建设,实现从数据获取到决策支持的全链条优化,为自然资源管理、生态保护及农业监测提供更加精准的技术支撑。

参考文献

- [1] 张威.基于元学习的小样本高光谱图像分类[D].导师:程玉虎.中国矿业大学,2024.
- [2] 王新鹏.基于四元数判别分析和稀疏张量判别回归的高光谱图像特征提取和分类技术研究[D].导师:凌永权(Wing-Kuen LING).广东工业大学,2024.
- [3] 赵烜赫.基于机器学习的草地牧草高光谱图像识别算法研究[D].导师:潘新.内蒙古农业大学,2021.
- [4] 刘梦滢.基于多分类器的高光谱图像半监督方法研究[D].导师:谢福鼎.辽宁师范大学,2021.

Application and development trend of new surveying and mapping technology in highway survey and design

Xuqi Chen Guoqin Chen

Hainan Kaiqi Survey, Design and Consulting Co., Ltd., Haikou, Hainan, 570100, China

Abstract

The “air-ground-water-underground” multi-dimensional data collection system developed through new surveying technologies has become a core approach to enhance quality and efficiency in highway survey and design. Aerial drones equipped with radar simulate ground-level flight to capture 3D terrain point clouds, while vehicle-mounted systems utilize Beidou positioning to collect dynamic corridor data. Underwater unmanned vehicles overcome blind spots in water surveys, and handheld scanners address modeling challenges in confined spaces like bridge underpasses. This multi-technology collaboration optimizes survey workflows, providing foundational support for route optimization and BIM design. It demonstrates the significant value of technological integration in improving overall project efficiency, injecting new momentum into the development of highway survey and design.

Keywords

highway survey and design; multi-dimensional mapping technology; point cloud acquisition; BIM collaboration; data fusion

测绘新技术在公路勘测设计中的应用与发展趋势

陈旭齐 陈国秦

海南凯琦勘测设计咨询有限公司，中国·海南 海口 570100

摘 要

测绘新技术搭建的“空-地-水-地下”多维采集体系，已成公路勘测设计提质增效核心路径，空中无人机雷达仿地飞行，捕获地形三维点云；车载系统依托北斗定位，收集道路廊道动态数据；水下无人船突破水域勘察盲区，手持扫描仪解决桥底涵洞等密闭空间建模难点。多技术协同推进勘测工作流程优化，为路线优化与 BIM 设计筑牢底层支撑，展现技术融合提升工程整体效能的重要价值，为公路勘测设计领域发展注入新动力。

关键词

公路勘测设计；多维测绘技术；点云采集；BIM协同；数据融合

1 引言

公路勘测设计是影响工程投资与运维质量的关键环节，传统人工勘测在复杂地形中效率低、数据完整性差，难满足智慧交通发展需要，G98 高速改扩建工程中需把运营 35 年的四车道高速扩为双向八车道，对勘测精度与效率要求极高。无人机雷达、车载移动测量、水下无人船与手持扫描等技术构建起空天地水一体化勘测体系，实现全要素采集，突破传统作业瓶颈，为工程设计提供统一可靠的数据基础。

2 多维测绘技术应用框架构建

2.1 空中无人机雷达勘测系统搭建

空中无人机雷达勘测系统集成激光雷达、高清影像与北斗定位模块，形成“规划-采集-回传”一体化作业链路（见图 1），系统沿公路廊道预设仿地飞行航线，在复杂

地形中穿透植被覆盖并同步获取高清影像，单次续航满足带状区域勘测需求^[1]。采集数据经预处理后直接输出点云为地形建模提供基础数据源，G98 高速 SJ02 标段项目采用 CW-30 LiDAR 系统，设定航高 400 米，航向与旁向重叠率分别达 70% 和 55%，激光频率 400Hz，点云密度 40 点/平方米，仿地飞行有效获取沿线植被区与丘陵地带的高精度三维点云，为 1:2000 地形图与 DEM 制作提供可靠保障。

2.2 车载动态数据采集设备部署

车载动态采集系统集成激光扫描、惯导与北斗 RTK 定位模块，依托车顶刚性支架在行驶中持续采集道路中线、坡度及地物信息，系统有高精度定位与快速更新能力，支持高速改扩建地形复测，数据实时回传云端自动比对历史数据生成变化报告。作业前完成惯导校准与信号测试，信号薄弱区依靠惯性导航保持定位连续，G98 项目沿 83 公里主线布设 329 个标靶点，采用双向扫描、车速 80km/h，点云平均间距 2-3 厘米，平差后平面与高程中误差分别为 1.79 厘米和 1.09 厘米，完全满足改扩建精度要求。

【作者简介】陈旭齐（1976-），男，中国海南海人，本科，工程师，从事测绘工程研究。

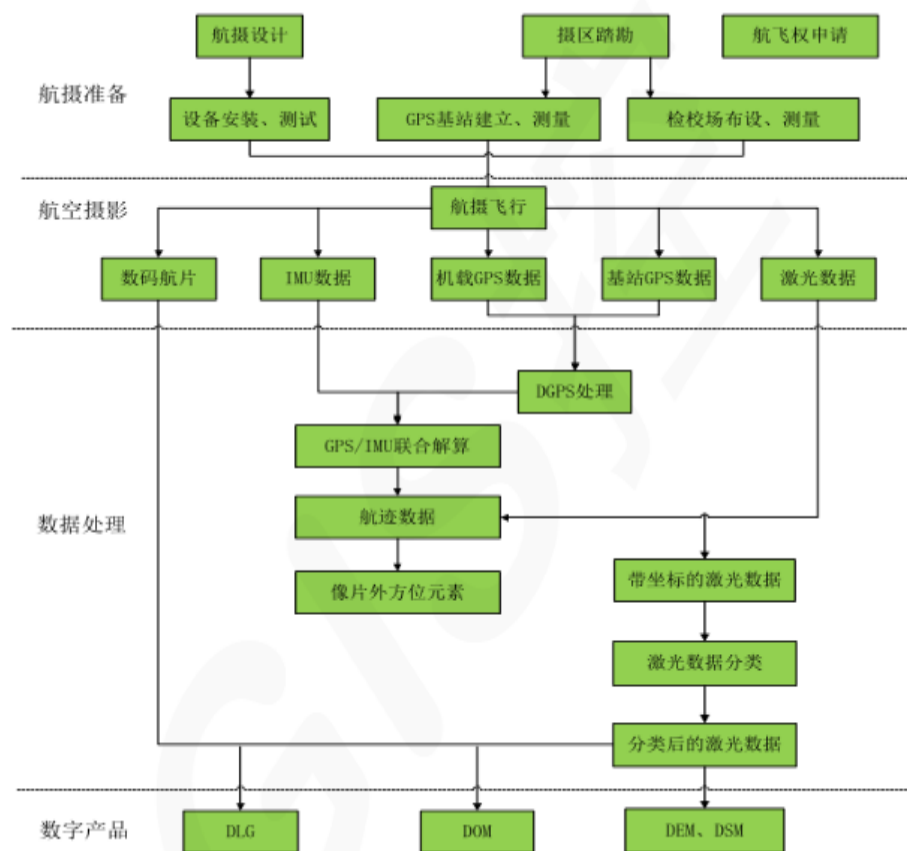


图1 激光雷达航测作业流程图

2.3 水下无人船与手持扫描配置

水下无人船搭载多波束测深仪与侧扫声呐,可用于跨河桥段河床地形勘测,能生成高精度水下三维模型;手持扫描仪融合 SLAM 与 RTK 技术,有大视场角与密闭空间作业能力,可快速获取结构完整断面,二者依托统一坐标系实现数据融合,共同构建水陆一体化模型。G98 项目南渡江特大桥及沿线大型池塘的水下地形测量中,采用智能测量无人船 W100,经精度评价,水下测量高程中误差 0.046 米、平面中误差 0.018 米,满足 1:2000 地形图精度要求。

3 各技术模块勘测原理与流程

3.1 无人机雷达点云捕获机制

无人机雷达依托激光测距原理获取点云数据,结合 IMU 姿态数据与北斗定位信息生成目标三维坐标,作业时沿线路带状扫描,激光脉冲经地物反射后,凭时间差计算距离,融合位姿参数形成三维点云,流程涵盖航线规划、航带重叠设置、实时点云监测与飞行参数调整,飞行结束后开展数据去噪、拼接与坐标转换,输出标准点云模型。G98 项目中布设 2 个地面 GPS 固定基准站与机载 POS 系统开展差分测量,解算后先做三维自由网平差,再做二维约束平差,最终输出海南海口平面坐标系成果,确保点云的地理空间精度。

3.2 车载系统数据实时传输路径

车载系统采用“端-边-云”三级传输架构,终端采集的激光点云与影像数据,于边缘节点完成压缩、滤波与格式转换,经 4G/5G 网络上传云端,云端平台具备分布式存储与数据校验能力,凭坐标比对确保质量,传输加密且支持断点续传。G98 项目实践中外业采集结束后,开展 POS 数据、激光点云数据及全景影像数据的完整性检核,借助 CoPre 软件完成 POS 数据与基站数据的联合解算,以及点云解算和全景拼接,生成具有统一三维地理空间坐标的激光点云和全景影像,为后续处理奠定基础。

3.3 密闭空间手持扫描操作规范

手持扫描在密闭空间作业遵循“标定优先、整体到局部”原则,作业前用标准靶球标定,建立局部与工程坐标系转换关系;扫描时采用环绕式路径,保持设备与结构面适宜距离避免数据失真,隧道等场景采用断面式扫描,按间距设置断面并保证扫描时长,确保拱顶、边墙等关键部位全覆盖。数据导出后即时检查完整性对缺失区域补扫,G98 项目中针对沿线 125 处涵洞及南渡江特大桥等结构,采用手持扫描与 RTK 联动方式,共采集特征点 15199 个,点位平面中误差 3.44 厘米,高程中误差 2.39 厘米,有效支撑结构物建模与改扩建设计。

4 复杂场景勘测痛点破解实践

4.1 山区地形无人机勘测方案

山区地形勘测存在植被茂密、地形陡峻、信号遮挡等麻烦，无人机勘测方案借助“分层扫描+多传感器融合”突破难题，在具体区域勘测期间，设备借助低空飞行开展近地表植被扫描，随后升高高度开展地形骨架采集工作，通过算法分离两层数据生成无植被干扰的地形模型^[2]。针对信号面临遮挡的情形，于山顶部署中继站增强卫星信号强度，联合惯性导航达成无 GNSS 区域的定位接续，于隧道勘测期间，依靠无人机雷达明晰地下暗河走向，联合大地电磁系统核查地质构造，为隧道线路优化给予数据支撑进而缩短隧道长度，飞行时借助避障传感器实时监测障碍物，自动变更航线躲避山体滑坡风险地带。

4.2 水域路段水下地质探测技术

水域路段勘测面临的核心痛点为水下地形不可见与地质取样困难，水下无人船探测技术借多设备协同达成精准勘察，针对跨河桥梁选址进行勘测期间，无人船按设定航速沿测线前行，多波束测深仪持续发出声波且覆盖宽度较大，同步获取河床地形以及地质分层数据，侧扫声呐对河床表面孤石、管线等障碍物进行成像，且成像分辨率较高，设备配备的沉积物取样器可自行采集河床表层土样，依照水质传感器数据判断水下环境对桥梁基础的腐蚀关联，在具体大桥勘测期间，此技术探测到水下溶洞，为基础设计类型的调整给予支撑，切实规避后期施工时可能出现的风险。

4.3 桥涵结构手持扫描应用案例

桥底与涵洞勘测面临着空间狭隘、光线黯淡、人工难以抵达等痛点，手持扫描技术借助灵活作业及高精度采集达成突破，在具体大桥桥底实施勘测之际，借助胸托式手持扫描仪沿桥墩周边行走，短时间内便可实现单个桥墩扫描，所获点云数据可清晰展现混凝土裂缝宽度及钢筋外露状况。进行特定直径涵洞的勘测期间，操作人员背负设备顺着涵洞轴线移动，设备自动组合多视角点云，生成三维模型可精准算出涵洞断面变形量，于针对某高速公路涵洞的检测项目，该技术大幅缩减检测时间且精度颇高，成功辨认出多处结构裂缝隐患，扫描时借助内置光源补充光线，维持阴暗区域数据采集的质量水准。

5 多源数据融合处理关键技术

5.1 点云与影像数据配准方法

点云同影像数据配准采用“特征点匹配+迭代最近点”组合算法，先由影像提取角点、边缘等特征点，利用 SIFT 算法同点云中的特征点达成初步匹配，算出初始转换矩阵，再借助迭代最近点算法优化匹配结果，求取点云与影像特征点的欧式距离，依靠最小二乘法迭代调整变换参数，直至平均误差限定于合理范围^[3]，针对具体高速项目，该方法实现无人机雷达点云与高清影像的配准，让地形模型保有三维空

间信息，还存有真实纹理细节，配准期间引入地面控制点实施精度校验，按密度进行控制点布设，保证配准结果契合勘测规范要求。

5.2 跨设备数据格式兼容技术

跨设备数据兼容凭借统一交换标准与格式转换达成，以 XML 定义点云、影像等数据的元数据规范，规定坐标系与精度参数内容；构建专用转换插件，把无人机、车载、手持设备等多源数据转变为通用格式，转换时借助特征点坐标比对开展精度校验，杜绝数据失真。该技术于多设备协同勘测里达成了数据无缝融合，为 BIM 建模构建完整、一致的数据支撑，G98 项目而言机载以及车载激光雷达点云通过靶标控制点完成七参数拟合，达成两种源数据平面及高程的精度统一，消除了多源点云在道路廊道内的融合阻碍，为 BIM 建模以及横断面提取提供了无缝贴合的三维底图。

5.3 BIM 模型数据集成路径

BIM 模型数据集成借助“分层导入+关约束”路径，把地形点云数据输入 Civil3D 进而生成数字地面模型，作为路线设计的基础凭借；把道路中线、横断面等设计数据导入自 CAD，构建与地面模型的拓扑关系，把手持扫描生成的桥梁、涵洞等结构物数据模型导入 Revit，与路线模型完成空间对齐工作，实现结构跟地形的精准匹配。针对特定大桥项目，集成后的 BIM 模型能清晰呈现桥梁基础与河床地形的衔接关系，借助碰撞检测找出设计冲突，集成进程以采用 IFC 标准作为数据交换格式开展，维持不同软件平台间数据的一致性，与此同时构建数据版本管理机制，记录每次集成时的修改内容与时间点。

6 技术应用效能提升与优化

6.1 勘测周期缩短技术保障

借助“并行作业+智能处理”，勘测周期缩短，无人机、车载设备和水下无人船同步实施空、地、水数据采集作业，自动化处理凭借 AI 算法达成数据智能预处理，像点云去噪、影像拼接这类传统上需人工耗时去做的工作，如今能够借助自动化手段迅速达成^[4]。在 G98-SJ02 标段内，利用机载与车载激光雷达协同实施作业，自 2023 年 5 月 11 日进场直至 6 月 15 日提交最终成果，仅用 35 天就完成了主线 32.346 公里的控制测量、51 平方公里：囊括 2000 地形图测绘和 83 公里车载激光测量等全部勘测事宜，跟传统人工勘测比，工期缩短约 40%。

6.2 数据精度控制实践策略

数据精度控制借助“设备校准—过程校验—成果核验”三级策略，作业开始前，对无人机、车载与手持设备逐个开展测距、惯导及扫描精度标定工作；过程中按时比对控制点坐标，实时调整采集参数；成果阶段凭借多源数据交叉验证，及时开展超限数据补测工作。有关 G98 项目，依靠该三级控制策略，四等 GNSS 控制网里，最弱点点位误差是 1.42