

航测遥感与激光雷达融合的复杂地形工程测绘技术研究

熊梓任

中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：随着工程建设对地形测量、土地资源调查及建筑工程测量等场景提出更高的要求，传统测绘方法已难以完全适应复杂场景下的快速响应需求，航测遥感与激光雷达融合技术成为突破瓶颈的关键方向。本文梳理两类技术的基础特性，分析融合技术中的数据预处理、核心融合方法及关键算法，探讨其在电力线路勘测、变电站地形测量与选址中的应用实践。研究表明，该融合技术可以互补优势提升测绘可靠性，最后展望其未来发展趋势，为复杂地形工程测绘提供技术参考。

【关键词】：航测遥感；激光雷达；复杂地形；工程测绘技术

DOI:10.12417/3083-5526.25.04.010

在基础设施建设朝着高质量发展的大背景下，工程布局逐渐突破平原地区的局限，向地形条件越发复杂的区域推进。复杂地形因地形起伏剧烈、植被生长茂密、地质条件不稳定等特征，让测绘工作面临大量挑战，如传统测绘方法出现数据采集不全面、精度受环境影响显著、作业效率较低等问题，极大地限制了工程规划、施工及运维的科学与安全特性。航测遥感技术具备迅速大范围采集数据的能力，但在刻画地形细节上存在漏洞；激光雷达技术能够精准获取三维的空间数据，却受光谱信息不足的局限。二者融合可实现优势互补，有效应对复杂地形测绘难题。本文聚焦航测遥感与激光雷达融合的复杂地形工程测绘技术开展研究，系统梳理技术依据、融合手段、应用实例，旨在为相关工程测绘工作提供理论支撑与实践借鉴，助力融合测绘技术在复杂工程场景下的规范化施行。

1 航测遥感与激光雷达技术基础及复杂地形测绘需求

航测遥感与激光雷达是现代工程测绘的核心技术支撑，二者特性彼此互补，为复杂地形测绘给出了有效的技术路径。航测遥感依托光学、高光谱等探测手段，凭借航空平台实现大范围地形数据的迅速获取，拥有影像直观、信息多样的优势，然而其精度易受天气状况和植被遮挡的干扰，对地形细节的描绘能力欠佳。LiDAR 通过发射激光脉冲测量距离，能精准产出三维点云数据，在地形起伏建模以及隐蔽区域探测中表现突出，但存在光谱信息欠缺、平面纹理呈现不足的短处。复杂地形涉及山地、丘陵、河谷、矿区等地带，具备起伏程度高、植被繁密、地质条件复杂多样等特性，给测绘工作带来诸多挑战。工程建设场景下，测绘需满足高精度定位、高效产出数据及强环境适应性能的要求，而单一测绘技术难以兼顾这些需求，航测遥感在植被密集的区域极易出现数据缺失，LiDAR 针对大范围测绘的效率偏低，二者的技术局限成为制约复杂地形测绘质量的主要瓶颈。融合航测遥感与 LiDAR，通过优势互补实现复杂地形高精度、高效率、全天候测绘^[1]。

2 航测遥感与激光雷达融合的关键技术及方法

2.1 多源数据预处理技术

多源数据预处理是保障航测遥感和激光雷达融合精度的基础保障，主要目的是去掉数据噪声、统一数据规范，给后续融合工作搭建高质量的数据根基。就航测获取的遥感影像而言，预处理需逐个完成辐射校正和几何校正，通过改正传感器误差、大气影响以及地形起伏引发的畸变，保障影像坐标与实际地理坐标准确相符；同时采用高斯滤波、中值滤波等举措去掉影像噪声，并借助 SIFT、SURF 等特征匹配算法达成多源影像相互间配准，实现影像数据的一致性。针对激光雷达采集的点云数据，预处理重点在于噪声点的剔除与地面点的提取，借助统计分析、区域增长等算法剔除测量误差、环境干扰产生的离散噪声点，随后利用渐进式三角网滤波等方式把地面与非地面的点分离开，后续完成坐标转换，把点云数据校准到与遥感影像一致的空间参考系。此外，实现时空基准统一是预处理的关键环节，要借助 GNSS 时间同步、大地坐标系转换等技术，做到两类数据在时间与空间维度的精准契合，防止因基准差异引发的融合偏差，经过预处理的高质量数据能让后续融合精度提高 30% 以上。

2.2 核心融合技术与方法体系

航测遥感与激光雷达融合技术促成了以数据级、特征级、决策级为核心的三级融合体系，各层级的融合目标与应用场景各有侧重。数据级融合作为最基础的融合层级，直接针对预处理后的遥感影像像素与激光雷达点云开展融合工作，常用方式涵盖素点云投影匹配、影像纹理与点云高程叠加等，通过把点云现有的三维空间信息赋予影像像素，弥补遥感影像高程信息缺失的弱项，提高数据的空间呈现能力，这种层级的融合适合对地形细节要求较高的精细建模场景。特征级融合主要聚焦两类数据的特征提取及匹配，先从遥感影像提取边缘、纹理、地物轮廓等特征，从点云中提取平面、曲面、角点等三维特征，之后采用特征相似度计算、迭代匹配等办法实现特征关联，形成统一的特征聚合，与数据级融合相比，其抵御干扰的能力更强，适合复杂地形下开展地物识别与分类^[2]。决策级融合属于

最高层级的融合，凭借前两级融合得到的结果，结合各类测绘任务的需求，运用贝叶斯推理、DS证据理论等策略对多源数据的测绘结论进行综合判定，采用交叉验证和权重分配对测绘结果进行优化，切实降低单一数据决策的不确定性，保证复杂地形测绘结果具备可靠性与稳定性。

2.3 融合技术的关键算法与模型

关键算法以及模型是助力航测遥感与激光雷达高效融合的核心要点，应按照复杂地形特征开展适应性优化。ICP（迭代最近点）算法是针对点云与影像特征匹配的经典算法，通过迭代算出两点集之间的最优变换矩阵来达成精准对齐，为强化其在复杂地形中的可靠性，优化版本引入随机采样一致性（RANSAC）算法，高效剔除异常值干扰，缓和地形起伏对匹配精度造成的效应。就特征提取与融合而言，深度学习模型具有明显优势，如基于卷积神经网络（CNN）而形成的多源数据融合模型，可自主学习遥感影像的纹理特征以及激光雷达的空间特征，依靠特征融合层完成深层次特征融合，相比传统算法，其地物分类精度提升15%—20%，尤其适合植被生长密集、地形破碎的复杂区域。针对海量多源数据高效融合的需求，并行计算算法和分块融合模型被普遍采用，通过将大规模数据分块后做并行计算，大幅增进融合效率，突破了传统算法在海量数据处理方面的效率瓶颈。这些算法与模型的协同开展，实现了复杂地形下多源数据的精准、高效聚合^[3]。

3 融合技术在复杂地形工程测绘中的应用实践

3.1 电力线路勘测应用

输电线路是我国实现跨地区能量输送的重要途径，往往需要穿越山区、河谷、森林等地形，且地形起伏大、植被遮挡严重、通视条件差、地质构造不稳等特点，常规测量方式容易出现数据缺失、精度不足、工作效率不高等缺陷，严重影响了线路规划的科学性和建设运行的安全性。航测遥感与激光雷达融合技术凭借优势互补特性，为输电线路勘察的全流程、高精度处理提供了解决方案。在路线选择过程中，激光雷达可以穿透密集的植被覆盖，精确获取高精度的3D点云资料，将地形沟谷、山体斜坡、滑坡、泥石流等地质隐患点的时空分布情况清楚呈现出来。航测遥感充分利用高分辨率的高光谱图像，对森林、水体、居民点、生态敏感区域等进行精确识别。两者结合建立的3D精细化地貌模式，帮助设计者进行多个方案的比较，实现最大程度的规避高危地区和高密度社区，降低拆除和生态环境的损害。与常规方法相比，该方法的选线速度可提高40%，后续施工费用可减少30%，并已在我国西电东送、青藏互联等大型工程中，成功应用于青藏高原高海拔冻土区、森林密集区域的选线工作。在建设过程中，采用基于多源信息的融合方法，对塔体周围地貌和斜坡的变形进行实时监控，精确捕捉滑坡、塌方等地质灾害的前期前兆，并给出相应的预警。在此基础上，对塔基开挖土石方量、基础施工高程、施工地貌自适应调整方

案等进行精准分析，为施工进度控制和资源配置提供科学的参考，减少施工人员返工造成的经济损失。运维阶段，利用时序信息对沿线地表沉降、塔基位移和植物长势等进行长时间的实时监控，实现对电网安全风险的早期检测，实现对电网的高精度探测，提高电网的检测能力和对地质灾害的早期预警能力。

3.2 变电站地形测量与选址应用

变电站是电网的重要节点，其位置和建造对地形环境有严格的限制，需要满足地形平坦开阔、地质稳定、交通便利，且远离地质灾害危险区域等条件。在复杂地形区，变电站站址存在着地貌信息获取困难、地质隐患隐蔽、周边环境制约等难题，而常规地貌测绘手段很难实现对其进行全方位、高精度定位，容易造成站址选择不当，为后续施工和运营带来隐患。航测遥感与激光雷达相结合的方法，通过高精度的资料获取和综合分析，使整个变电站的成图工作更加科学化。在场地调查中，利用雷达点云数据对候选点进行精细重建，利用高精度点云进行地形坡度、高程差、平整度等关键参量的准确计算，迅速选取满足施工要求的平面地段；同时结合点云建模能力，识别岩溶塌陷、地下采空区和软弱地基等潜在风险，为安全评价奠定基础。航测遥感利用大面积高光谱图像，实现对待选地块及周边土地资源利用状况的精准研判，并将其与生态保护红线、土地利用规划等相关资料相融合，进行用地布局的合理性和与生态保护和城乡规划的兼容性研究。将两种方法相结合，使得场地调查时间减少50%，大大提高了场地定位的准确性。在建设过程中，以多源信息为基础建立的3D建模方法，实现对场地填筑和开挖工程量的精确估算，优化施工组织方案；对基坑开挖过程进行实时监控，以保证基坑工程的整体稳定，为基坑工程的排水设计和防护工程施工提供数据依据，防止因强降雨引发的积水、滑坡等灾害。运维阶段，通过对基础沉降和周围地貌环境的长期监控，在云贵高原、秦巴山区等复杂地形的变电站项目中，该融合技术达到厘米级观测精度，将地表沉降的监控误差控制在3毫米以下，显著提升了变电站建设与运维的安全性^[5]。

3.3 应用效果对比与典型案例分析

航测遥感与激光雷达融合技术在复杂地形测绘中的优势，可通过与单一测绘技术的核心指标对比直观体现，典型工程案例进一步验证了其实际应用价值。下表选取测绘精度、作业效率、环境适应性、综合成本四项关键指标，对比融合技术与单一航测遥感、单一激光雷达技术的应用效果。以西电东送特高压输电线路某山地段测绘为典型案例，此地带植被茂密，地形起伏剧烈。采用融合技术后，顺利实现厘米级地形建模，测绘精度较单一技术提升60%以上，作业周期缩短65%，有效规避了传统技术引发的数据缺失问题，为线路选线以及施工安全预警提供精准的数据支撑，证实了融合技术在极端复杂地形中的可行性与优越性^[6]。（如表一。）该案例中，融合技术既延续

激光雷达的高精度优势，又兼具航测遥感的广覆盖特性，在极端环境下稳定输出精准数据，为同类电力工程测绘提供了可复用的优质范本。

表一：测绘技术类型分析表

测绘技术类型	测绘精度(平面/高程)	作业效率(km ² /天)	复杂环境适应性(植被密集/地形破碎区)	综合成本(相对值)
单一航测遥感	1m/1.5m	30-50	较差, 易受植被遮挡	0.8
单一激光雷达	0.3m/0.15m	10-20	较好, 可穿透部分植被	1.5
融合技术	0.2m/0.1m	25-40	优秀, 兼顾范围与细节	1.0

参考文献:

[1] 李冲.复杂地形区 RTK 测绘技术实施难点及解决方案[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(06):97-99.
 [2] 李因国.无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用[J].信息记录材料,2025,26(06):198-200.
 [3] 张静红.工程测绘中 GPS-RTK 测量技术的应用分析[J].工程技术研究,2025,10(02):217-219.
 [4] 吴磊.测绘工程中的特殊地形测绘技术应用研究——以某城市的复杂区域为例[J].房地产世界,2024,(09):155-157.
 [5] 袁国强.无人机遥感技术在测绘工程中的应用研究[J].江西测绘,2023,(04):1-2+20.
 [6] 赵丽.工程测绘中无人机遥感测绘技术的应用探讨[J].青海国土经略,2023,(04):57-59.

4 结语

综上所述，航测遥感与激光雷达的融合技术为复杂地形的工程测绘给出了高效、精准的解决途径。该技术借助互补两类技术的优势，有效突破了单一测绘方式在复杂场景中的局限性，在电力线路勘测领域体现出明显应用价值。当前融合技术取得了一定成果，但在极端环境适应性、实时动态测绘等方面依旧存在提升的空间，未来需进一步优化融合算法、促进数据标准化落实，加强智能化技术与融合测绘的相互结合。相信随着技术逐步迭代，融合测绘技术将更有效地服务复杂地形工程建设，推动基础设施建设高质量迈进。