机载激光雷达在架空线路地形建模中的信息化数据融合研究

陈杰林
深圳新能电力开发设计院有限公司　广东 深圳　518000

摘　要　在架空线路工程建设与运行管理中，高精度地形信息是支撑线路规划、安全校核与环境分析的重要基础。机载激光雷达具备高密度、三维化和大范围同步获取地形数据的技术优势，但单一数据源在地物表达完整性与语义信息承载方面仍存在一定局限。围绕机载激光雷达点云数据，结合多源空间信息的协同特征，开展架空线路地形建模中的信息化数据融合研究，系统分析数据融合在提升地形模型精度、增强空间表达能力及支撑工程应用方面的作用机制。研究结果表明，信息化数据融合能够有效改善复杂地形条件下地形建模的真实性与稳定性，为架空线路工程的精细化设计与运行管理提供可靠的数据基础。

关键词　机载激光雷达；架空线路；地形建模；信息化数据融合；点云数据

Research on Information-Based Data Fusion of Airborne LiDAR in Terrain Modeling for Overhead Lines

Chen Jie-lin
Shenzhen Xinneng Power Development and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong Province, China

Abstract　In the construction, operation, and management of overhead line engineering projects, high-precision terrain information serves as a crucial foundation supporting line planning, safety verification, and environmental analysis. Airborne LiDAR offers technical advantages such as high-density, three-dimensional, and large-scale synchronous acquisition of terrain data. However, a single data source still has limitations in terms of the completeness of feature representation and the carrying capacity of semantic information. Focusing on airborne LiDAR point cloud data and leveraging the synergistic characteristics of multi-source spatial information, this paper conducts research on information-based data fusion in terrain modeling for overhead lines. It systematically analyzes the mechanisms by which data fusion enhances the accuracy of terrain models, strengthens spatial expression capabilities, and supports engineering applications. The research results indicate that information-based data fusion can effectively improve the authenticity and stability of terrain modeling under complex terrain conditions, providing a reliable data foundation for the refined design and operational management of overhead line engineering.

Key words　Airborne LiDAR; Overhead Lines; Terrain Modeling; Information-Based Data Fusion; Point Cloud Data

架空线路往往跨越地形起伏显著、地表覆盖类型复杂的区域，地形条件对线路路径选择、杆塔布设及安全运行产生直接影响。传统测绘手段在精度、效率与空间连续性方面已难以满足现代线路工程对三维地形信息的需求，尤其在大范围、复杂环境条件下，其适用性受到明显制约。机载激光雷达凭借主动探测与高密度点云获取能力，为地形信息采集提供了新的技术支撑，但在地物语义表达和综合信息利用层面仍需多源数据协同加以完善。在信息化建设不断深化的背景下，探索机载激光雷达与多源空间数据的融合路径，对提升架空线路地形建模质量与工程应用价值具有现实意义。

1　机载激光雷达在架空线路地形数据获取中的技术特征

1.1 机载激光雷达点云数据的空间表达优势

机载激光雷达以主动探测方式获取高密度三维点云，其空间结构清晰、连续性强的特点，使地表微地貌、林下高程差异及复杂坡折关系得以完整呈现，而在地形起伏剧烈或植被覆盖繁复的区域，其穿透能力又使地表真实形态得以较少干扰地显现，地形纹理因此更为真实、细节更为锐利[1]。点云数据在高程解析、坡向识别与空间形态推断中的表现较为稳定，而在大范围快速扫描的条件下，数据精度与均匀性仍能保持较高水平，使架空线路工程对连续三维地形的需求得到可靠支撑，空间信息的丰富程度亦明显优于传统测绘手段。

1.2 架空线路地形测绘对数据精度与完整性的要求

架空线路路径规划与杆塔布设依赖地形信息的稳定性、精细度与空间一致性，高差计算、净空分析与通道安全校核皆需在高精度地形基础上展开，而若地形数据在细节表达或边界区域存在缺失，工程判定便易产生偏差。机载激光雷达在高程采集、地表建模和空间连续性维护方面表现突出，能够在复杂地貌中保持较高精度，并以稳定的数据结构支撑后续的空间分析，使线路设计的可靠性与安全性得到强化，工程评价体系随之更具科学性与适用性。

2 架空线路地形建模中的信息化数据融合方法

2.1 基于特征互补性的数据协同整合法

在架空线路地形建模中，多源数据往往呈现各具优势的结构差异，而特征互补的关系使协同整合成为提升建模质量的重要方向。机载激光雷达点云以三维几何信息见长，细微起伏、坡折变化与地表形态均能较为准确地呈现；影像数据的纹理与光谱特征又为地物边界、地貌分区和环境要素的识别提供可靠支撑；地形属性数据进一步补足坡度、坡向与高差结构，使地貌逻辑更加清晰。多源信息在空间维度、几何维度与语义维度上彼此照应，使地形的结构框架与地物的表面特征同时得以强化，而在复杂地貌下的线路通道识别、地物干扰分析和跨越段落判断等工程环节中，协同整合的意义愈加突出[2]。数据之间形成的互证关系，使整体模型获得更高稳定性，地形表达更加全面，空间语义更具深度，工程应用的可靠性因而不断增强。

2.2 以误差校正与权重重构为核心的融合精度增强法

融合过程中的精度提升依赖误差校正的系统性与权重分配的合理性，而在多源数据结构不尽一致的背景下，精度增强更显关键。

点云在绝对高程方面较为稳定，影像在平面细节表达上具有优势，但两者在采集时间、几何畸变与噪声水平上的差异，使匹配偏移不易完全避免，因此需以跨源特征比对与误差迭代校正方式构建几何一致性基础[3]。影像可为点云提供边界约束，点云又为影像补齐真实地表形态，两类信息相互修正，使偏差逐渐收敛。地形属性数据进一步强化融合的逻辑性，使坡度、地貌单元与空间分布关系得以统一，而权重重构机制的加入，使多源数据在不同区域的贡献度能够灵活调整，高差敏感区更侧重点云，地物变化剧烈区更依赖影像，结构平缓区则由属性信息控制整体趋势。融合精度因此呈现稳定上升态势，地形模型在形态表达和结构辨识中更显清晰，而在架空线路对净空精度、安全校核与地表干扰识别要求不断提升的背景下，这一方法展现出愈发突出的工程价值。

2.3 面向三维语义表达的多层地形结构重建法

地形建模不仅需要几何精度，更需具备对真实地貌的语义表达能力，而多层结构的重建正是提升语义深度的重要手段[4]。

点云构成的三维骨架，支撑着整体框架，使地形宏观形态得以稳定呈现；影像纹理强化表层地物的识别，其地物类型、边界轮廓与植被疏密亦因之更为清晰；而地形属性信息所形成的地貌结构逻辑，则使模型在几何描述之外延伸至语义层面，三类信息交织后自下而上构成结构体系，骨架稳其形，纹理显其貌，语义统其理，从而使模型由表及里呈现更深层的解释力[5]。在线路跨越山脊线、峡谷与粗糙复杂地表的场景下，坡向突变、沟槽展布与潜在遮挡点得以显露，使对通道形态的研判更为稳妥；而在运维阶段，风险识别、环境演变监测与空间对比亦因三维语义模型的介入而愈加可靠。多层结构的重建，使地形模型由单维向多维推进，架空线路工程因而具备更高层次的空间理解能力。

3 信息化数据融合支撑下的架空线路地形建模应用

3.1 基于特征互补的数据协同整合法在线路规划优化中的应用

在复杂地貌下，线路规划高度依赖地形细节、地表覆盖与地貌趋势的精准把握。特征互补的数据协同整合法，将三维形态、纹理特征与地貌逻辑融合于统一模型，使线路走向判断突破局部坡差限制，在连续通道中识别最优路径[6]。点云揭示微细地貌结构，影像强化地物差异，属性数据补足地貌趋势，多维信息相互支撑、彼此印证，显著提升路径比选的科学性，使规划在安全性、经济性与施工可行性之间实现更稳妥的平衡。

在某山区新建线路的比选阶段，地形起伏剧烈、植被密集，规划人员难以把握稳定的跨越点位。经整合后的模型以更清晰的坡折结构、植被密度变化呈现地貌单元，使原本模糊的区域重新具备辨识度。点云提供稳定可靠的坡面信息，影像标明地物边界的细微差异，属性信息指示适宜跨越的高程带。三者交织成一幅逻辑连贯的地貌图景，使规划团队得以锁定土石方量更低、生态干扰更小的路径方案，线路布局更趋安全，工程可实施性显著增强。

为进一步验证数据协同对规划质量的提升作用，可构建表1作为阶段成果的对比说明，从地形细节表达、地物识别、通道判断、综合适用性等维度，直观呈现整合模型相较于传统方法的综合优势，为类似复杂地形下的线路规划提供可量化的技术支撑与经验参考。

表1 不同数据组合在线路规划阶段的应用对比

数据组合方式	地形细节表达	地物识别	通道判断	综合适用性
单一影像数据	较弱	较强	一般	中
单一点云数据	较强	较弱	较强	中
点云+影像融合	强	强	强	较高
协同整合（点云+影像+属性）	最强	最强	最强	高

表1所展示的优势，正体现协同整合法在线路规划中的关键价值，使复杂地貌下的路径选择更具依据与可靠性。

3.2 以误差校正与权重重构为核心的融合精度增强法在线路安全校核中的应用

在安全校核中，高程精度的细微差异往往决定净空是否满足规范、跨越段是否具备足够冗余，因而误差校正与权重重构构成提升模型可靠性的核心。点云与影像几何差异明显、噪声分布不一，使匹配环节易生偏移，而融合中的迭代校正机制使误差逐步收敛；权重的动态重构又令不同数据在各类地形区段发挥增益，使模型在坡折突变、高差敏感或地物复杂区域仍能保持稳定，整体精度亦随之提高。

在某地级地区的线路安全复核中，原有 DEM 因地物变化频繁而难以支撑精细化净空分析，局部甚至出现净空偏低的误判。采用融合精度增强法后，影像强化地物边界，使点云三维结构的表达获得关键补充；属性数据补足坡度逻辑，使局部噪声迅速收敛，高差突变区的纹理亦逐渐明晰。结果显示，跨越段净空分析值显著趋稳，原本判断困难的干扰区边界重新清晰，安全评估可信度同步提升，为线路调整提供了坚实依据。

实践效果表明，精度增强不仅显著提高地形模型的可信度，也令关键校核参数保持稳定，在高风险区段尤具价值，相关结论因而更具参考意义。

3.3 面向三维语义表达的多层地形结构重建法在线路运维管理中的应用

线路运行期的隐患往往源于环境的长期累积变化，而多层地形结构重建法整合几何、纹理与语义，使地表演变特征更立体、更持续地呈现，点云所呈现的是地表形态的框架，影像补充的是地物纹理的细致层次，属性信息构筑地貌逻辑，三者叠加后，三维语义模型因而具备“结构—表面—演化”并存的特征，使运维人员在识别植被生长、侵蚀深化、滑移趋势与人为扰动时的敏感度提升，判断更具前瞻性，变化线索也由此呈现出更紧凑、更清晰的连续轨迹。

在某企业的运维示范工程中，部分线路穿越沿河缓坡，受季节性水蚀与植被快速生长影响明显，传统巡检虽能发现显著隐患，却难以及时识别细微的累积风险。引入语义结构模型后，点云揭示坡脚侵蚀的深度变化，影像识别植被扩张的路径，属性信息分析坡向与风致偏移之间的耦合机制，使运维团队能够提前锁定潜在高风险位置。基于模型的分析，他们调整了清理周期，重新规划了巡检线路，并对局部区段实施加固，使风险在未形成实际故障前便得到有效处置。

这一案例不仅说明语义重建法能够提升运维效率，也显示出其在长期环境监测中的战略价值，使线路运行更加安全、管理体系更具前瞻性。

4 结束语

在机载激光雷达与信息化融合不断深化的背景下，地形建模的精准刻画与环境理解正展现更高价值，架空线路工程因数据体系的强化而具备更稳健的规划基础、更可靠的安全边界与更敏锐的运维感知，而多源信息交织形成的三维认知框架又推动着线路建设向精细化、智能化迈进，使工程决策更具前瞻性，管理体系亦因数据的深度贯通而焕发新的活力。

参考文献

[1]高鹏,高洋.基于机载激光雷达数据处理技术的岸线测绘[J].中国海事,2025(4):50-52.

[2]王伟翰,高铭泽,施小龙,等.机载线阵激光雷达动态成像建模与验证[J].兵工学报,2025,46(6):336-345.

[3]韩新哲.基于激光雷达测绘技术在矿山地形测量中的精度分析[J].世界有色金属,2024(17):121-123.

[4]王明伟.无人机机载激光雷达技术在矿山三维测绘中的应用研究[J].世界有色金属,2023(21):7-9.

[5]连毅峰.倾斜摄影测量与机载LiDAR在复杂地形测绘中的应用[J].能源与环境,2025(6):141-145.

[6]王和平,夏少波,谭弘武,等.电力巡线中机载激光点云数据处理的关键技术[J].地理空间信息,2015,13(5):59-62,68.

（本文编辑 曹 阳）