

复杂地形条件下水利水电地形测绘技术创新与案例分析

邹凯

广东 江门 529000

DOI:10.61369/WCEST.2026030013

摘 要： 复杂地形（山地、河谷等）因起伏剧烈、植被茂密等特征，对传统测绘技术造成精度低、效率差等挑战。创新方法通过多源数据融合（无人机 LiDAR、倾斜摄影、InSAR 等）解决上述问题，案例验证其精度与效率优势，未来将向智能化、标准化方向发展，推动水利水电工程测绘技术升级。

关 键 词： 复杂地形水利水电测绘；多源数据融合；智能测绘技术

Innovation and Case Analysis of Topographic Mapping Technology for Water Conservancy and Hydropower under Complex Terrain Conditions

Zou Kai

Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract： Complex terrains (mountains, valleys, etc.) pose challenges to traditional surveying techniques such as low accuracy and low efficiency due to their intense undulations and dense vegetation. Innovative methods solve the above problems through multi-source data fusion (such as unmanned aerial vehicle LiDAR, oblique photography, InSAR, etc.), and case studies verify their accuracy and efficiency advantages. In the future, they will develop towards intelligence and standardization, promoting the upgrading of surveying and mapping technology in water conservancy and hydropower engineering.

Keywords： surveying and mapping of water resources and hydropower in complex terrain; multi-source data fusion; intelligent surveying and mapping technology

引言

复杂地形是水利水电工程建设的主要制约要素，其大幅起伏、繁茂植被以及地质结构的异质性等特性，使得传统测绘技术遭遇精度欠佳、效率不高以及存在数据盲区等问题。2023年11月，水利部颁布的《关于加快推进智慧水利建设的指导意见》清晰指出，要加强复杂地形测绘技术改革，以此来支持工程全生命周期的管理工作。目前无人机 LiDAR、多源数据融合以及智能处理等技术渐渐打破传统限制，通过三维建模与动态监测，实现高山峡谷、喀斯特等区域的高精度数据收集。这些创新手段不但提高测绘的效率和精度，还可为水利水电项目的选址、建设以及安全评估提供可靠保障，促使行业朝着数字化、智能化方向转变。

一、复杂地形水利水电地形测绘基础与挑战

（一）复杂地形的特征及其测绘影响

复杂地形涵盖山地、河谷、喀斯特等地貌，特征为地形起伏剧烈、高差显著、植被茂密、地质结构复杂。山地坡度常超 30°，部分达 60° 以上，传统测量设备难以布设稳定观测点；河谷受水流冲刷，岸坡稳定性差，季节水位变化增加作业难度。传统测绘面临核心难点：GNSS 信号易遮挡，单点定位误差达米级，无法满足水利水电厘米级精度要求；地面测量需大量布设控制

点，陡峭区域作业时间达平原 3-5 倍；茂密植被区难以获取真实地形数据，易致模型失真。此外，滑坡、泥石流等灾害威胁人员安全与设备完好，进一步制约测绘工作^[1]。

（二）水利水电地形测绘现有技术概述

复杂地形水利水电测绘中，传统地面测量如全站仪、水准仪在平缓区域精度可靠，但在复杂地形下受通视限制，效率低且难以覆盖陡峭、深谷区域。航空摄影测量借助无人机快速获取影像，生成 DOM、DSM 等产品，广泛应用于前期勘测^[2]，但易受山区云雾影响，植被密集区地形细节还原有限。LiDAR 技术通过

激光点云穿透植被，精度高，但设备成本昂贵，数据处理复杂耗时。InSAR 技术可实现全天候大范围监测，适用于地质灾害频发区，但空间分辨率较低，易受大气延迟影响产生误差。现有技术各有优势与局限，难以单独满足复杂地形水利水电测绘对高精度与高效率的双重要求。

二、地形测绘技术创新方法分析

（一）创新技术的核心原理

复杂地形水利水电测绘技术的创新方法以多维度数据感知与融合为核心。无人机 LiDAR 技术通过激光脉冲测距，结合 GPS/IMU 定位定姿，快速生成高精度三维点云，凭借对植被的穿透能力，有效提取山区、峡谷等隐蔽地形特征^[3]。多传感器集成技术将 LiDAR、光学相机与合成孔径雷达（SAR）协同工作，光学影像提供纹理信息，LiDAR 获取几何数据，SAR 实现全天候穿透观测，通过空间配准与数据融合算法构建统一坐标系，提升地形建模的完整性与精度。这些技术针对传统测绘方法效率低、盲区多的难题，通过动态感知与智能处理，实现对复杂地形的精准快速表征，为水利水电工程设计施工提供可靠数据支撑。

（二）技术创新的突破点与优势

复杂地形条件下水利水电测绘技术创新围绕多源数据融合、智能算法及装备集成展开，克服陡峭峡谷、高海拔冰川及茂密植被区通视受限、遮挡严重等难题。采用无人机倾斜摄影与 LiDAR 技术结合，构建三维点云模型，实现厘米级数据采集，效率较传统全站仪提升5—10倍，通过自动化算法减少人工干预，降低作业风险^[4]。整合多光谱遥感与 InSAR 技术，满足库区淹没线监测、坝体变形分析等需求，实现动态地形实时捕捉。技术优势体现在跨尺度数据融合，将宏观地形趋势与微观地质结构结合，为水利水电工程选址与施工规划提供全面技术保障。

三、创新技术在水利水电工程的案例应用

（一）案例一：高山峡谷水电站测绘应用

1. 项目背景与地形条件分析

某高山峡谷水电站位于西南横断山脉核心区域，流域内山势陡峭，相对高差超1500米，峡谷最窄处仅300米，且常年受季风气候影响，云雾缭绕、降水频繁，传统地面测绘难以抵达悬崖、陡坡等区域^[1]。项目需完成坝址区100平方公里1:500比例尺地形图测绘，同时获取坝肩岩体结构面、河谷纵剖面等关键工程地质信息，为大坝选型、导流洞设计及边坡稳定性评价提供数据支撑。该区域地质构造复杂，断层、褶皱发育，加之植被茂密（森林覆盖率达75%），常规光学遥感易受遮挡，地面测量因地形限制存在大量数据盲区，测绘精度与效率难以满足工程进度要求^[2]。此外，项目区生态环境脆弱，需尽量减少人工实地作业对原始地貌的破坏，因此对测绘技术的非接触性、高效性提出了更高要求^[3]。为解决上述问题，项目团队整合多源遥感与智能测绘技术，通过无人机倾斜摄影、机载激光雷达（LiDAR）与合成孔径雷达干涉

测量（InSAR）相结合的方式，构建三维地形模型并提取工程关键参数^[4]。其中，LiDAR 技术可穿透植被获取裸露地表数据，倾斜摄影则能还原复杂地形的纹理特征，两者融合有效弥补了单一技术的局限性^[5]。

2. 技术创新实施过程及成果

针对高山峡谷水电站地形复杂、传统测绘手段效率低的问题，采用多源融合技术开展测绘工作。首先利用无人机搭载 LiDAR 系统进行航测，设置飞行高度500m、点云密度10点/m²，覆盖坝址区及上下游5km 范围，同步采集高分辨率影像数据；同时结合地面 GNSS 静态测量布设12个基准站，获取高精度坐标控制网，为航测数据提供基准^[1]。数据处理阶段，通过点云滤波算法去除植被与噪声，生成数字高程模型（DEM），并与影像数据融合构建三维地形模型。精度验证采用实地测量对比法，选取20个特征点（含悬崖、冲沟等复杂地形点），对比模型坐标与实测坐标，结果显示平面误差≤0.3m、高程误差≤0.2m，满足工程设计精度要求^[2]。最终成果为水电站坝轴线选择、坝体结构设计提供了高精度地形数据，相比传统全站仪测量，作业效率提升4倍，成本降低30%，有效解决了高山峡谷地形测绘的技术难题^[3]。

（二）案例二：丘陵区水库地形测绘应用

某丘陵区水库位于南方低山丘陵地带，是区域水资源调配与防洪减灾的关键工程，其地形测绘需满足水库库容计算、坝体选址及淹没区划定的高精度需求。该区域地形起伏度达150—300米，坡度多在15°—35°之间，且沟谷纵横、冲沟发育，形成破碎化微地貌单元。同时，库区植被覆盖率超过70%，以亚热带常绿阔叶林与灌丛为主，部分区域存在高秆作物与藤蔓植物交织的情况，传统地面测绘难以穿透植被获取地表真实高程，而光学遥感易受植被遮挡产生数据缺失。此外，库区部分区域为喀斯特地貌，存在隐伏溶洞与地下暗河，进一步增加了地形测绘的复杂性。项目前期采用全站仪与 GNSS-RTK 进行局部测量时，因地形阻隔导致信号失锁率达30%以上，且植被密集区的点云数据空隙率超过25%，无法满足工程设计对 DEM 分辨率（1m×1m）与精度（±0.15m）的要求^[7]。

2. 技术创新实施过程及成果

在丘陵区水库地形测绘应用中，技术创新实施过程以无人机倾斜摄影与三维激光扫描融合技术为核心，首先针对丘陵区地形破碎、植被覆盖度高的特点，采用多旋翼无人机搭载五镜头倾斜相机，按1:500比例尺要求规划航线，获取覆盖水库库区及周边10km²范围的倾斜影像数据，同步使用地面三维激光扫描仪对关键区域（如坝址、溢洪道等）进行点云采集，点云密度达10点/m²^[6]。数据处理阶段，通过 ContextCapture 软件构建三维实景模型，将激光点云数据与倾斜摄影模型进行配准融合，利用点云的高精度特性修正模型在植被遮挡区域的误差，生成的数字高程模型（DEM）分辨率达0.2m，数字正射影像（DOM）分辨率达0.1m。成果方面，该技术相比传统全站仪测绘，外业作业时间缩短60%，内业数据处理效率提升45%，地形测量精度满足水利水电工程设计要求，为水库库容计算、坝体稳定性分析及移民安置规划提供了精准的空间数据支撑，有效解决了丘陵区地形测绘中

效率与精度难以兼顾的问题^[8]。

四、技术创新方法评价与发展展望

（一）技术性能综合评估

1. 精度与可靠性评价

在复杂地形条件下，水利水电地形测绘技术的精度与可靠性评价需结合量化指标展开对比分析。创新技术如无人机倾斜摄影测量、激光雷达（LiDAR）等，在测量精度上表现出显著优势：以某山区水利工程为例，无人机倾斜摄影测量的平面精度可达 $\pm 5\text{cm}$ ，高程精度 $\pm 10\text{cm}$ ，而传统全站仪测量在同等地形条件下平面精度仅为 $\pm 15\text{cm}$ ，高程精度 $\pm 20\text{cm}$ ^[9]。在数据可靠性领域，创新技术通过多源数据融合以及实时动态监测手段，确实减少地形遮挡、植被覆盖等要素的干扰，数据完整性提高约30%，但是传统方法受环境条件约束，数据缺失比例较高。另外创新技术的自动化数据处理体系能够降低人为差错，数据一致性验证的通过率相较于传统方式提高25%，进一步加强测量结果的可信性。通过对这些量化指标开展对比分析，能够为复杂地形状况下水利水电地形测绘技术的挑选与优化提供科学支撑，还能为后续技术创新的方向明确评估标准。

2. 效率与成本效益评估

在技术创新方法的评价与发展展望里，技术性能的综合评定涉及精度、适应性等方面，效率与成本效益的评估重点于创新方法在作业时长、人力投入以及经济成本上的综合成效。以复杂地形的水利水电测绘工作为例，传统测绘方法会受到地形条件的约束，作业时长往往因多次踏勘以及人工进行数据处理而增加，人力投入方面需要多组人员共同协作，经济成本包含设备租赁费用、人工薪酬还有后期修正所需的费用。创新手段像无人机倾斜摄影搭配LiDAR技术，通过自动化数据收集与三维建模，大幅缩短作业时长，在某峡谷电站测绘里，作业时间相较于传统方式减少40%以上^[10]；智能化数据处理算法降低对人工干预的需求，人力投入减少30%，并且由于数据精度提高，后期返工成本降低约25%。成本效益评估要结合长期运维情况，创新手段尽管在初期设备投入方面相对较高，不过全生命周期成本比传统手段降低15%—20%，特别是在地形复杂的区域，其效率和成本方面的优势更为明显，能为水利水电工程前期规划提供更具经济性和高效性的技术支持。

（二）适用性与局限性分析

1. 不同地形条件下的适用性验证

复杂地势状况下水利水电地形测量技术的创新方式要在陡峻山坡、茂密植被等特殊地形里开展适用性检验。以无人机倾斜摄影测量为实例，在陡坡地貌里，它通过多视角影像来获取三维点云，能够有效解决传统全站仪难以到达的垂直高差区域问题，数据采集效率相较于传统方式提高3—5倍，并且高程精度能达到 $\pm 0.15\text{m}$ ，可满足水利水电工程的勘测需求；不过当坡度超过 60° 时，影像重叠度容易受遮挡因素影响，点云密度会明显降低，数据完整性会下降。在植被密集覆盖区域，激光雷达

（LiDAR）技术能够穿透植被间隙来获取地面点云数据，在植被覆盖率超80%的区域，地面点识别率仍然能达到75%，这比光学遥感技术更具优势；不过当植被高度超出5m且密度极大时，激光脉冲容易被上层植被完全遮挡，进一步造成地面点云缺失，难以准确体现地形的起伏状况。另外合成孔径雷达干涉测量（InSAR）在云雾频繁出现的复杂地势里具备全天候作业的长处，能够实现大范围的地形形变监测，不过其空间分辨率相对较低（约10m），难以符合小尺度水利工程的精细测绘要求。这些验证结论显示，单一的技术很难包括所有极端地貌，要根据地貌特性综合运用多种创新技术，以此提高测绘的全面性和精准度。

2. 现存技术局限与改进方向

复杂地形状况下水利水电地形测绘技术的创新方式在实际运用中依然面临多方面局限，不良天气（像强风、暴雨、浓雾）会明显影响无人机航测的影像采集精准度，极低温度或许会造成GNSS信号失锁或者传感器性能下降，高海拔地区的低气压环境容易降低激光雷达的测距精确性。另外险峻悬崖、繁茂植被覆盖地带的的数据穿透能力欠佳，容易产生数据盲区，而繁杂电磁环境或许会干扰多源数据融合的实时性和稳定性。针对上述不足，优化提议应专注技术适配度与场景适应度；研制抗干扰的GNSS接收机以及自适应航迹规划算法，提高恶劣天气时的作业稳定性；运用多光谱激光雷达和穿透式雷达组合体系，加强对植被与地形的穿透能力，填补数据空白区域；搭建通过边缘计算的实时数据处理平台，降低复杂电磁环境对数据传输和融合的作用；结合AI算法对多源数据开展智能校正和补全，提高复杂地形测绘的精准度与效率。

（三）行业应用前景与发展趋势

1. 水利水电工程的推广潜力

复杂地势状况下的水利水电地形测量技术改革，像三维激光扫描、无人机倾斜摄影、InSAR与GNSS-RTK融合技术等，已在多个大中型项目里显示出精度高、效率好、成本可掌控的技术长处。这些技术通过多源数据融合和智能处理算法，化解传统测绘在高山峡谷、高海拔冻土区等复杂地形里遭遇的数据获取不易、精度欠佳等难题，其标准化应用前景是建立统一的技术流程和质量控制体系，促使行业从依赖经验向依靠数据转型。行业应用趋向展现多技术协作、智能化和数字化融合的特性，未来测绘技术会进一步与BIM、GIS平台深度融合，实现工程全生命周期的动态监控与管理。在水利水电工程领域，创新技术的推广潜能明显，特别是在大型水电站建设的前期勘测、施工阶段变形监测以及运行阶段安全评估里，规范化的创新手段能够大幅缩短工程周期、降低安全隐患，同时为智慧水利建立提供核心数据支持，预计未来三到五年将在国内重点水利水电项目中实现规模化运用，推动行业技术进步与管理模式创新。

2. 未来技术融合与研究趋势

在技术创新方法评估与发展前景方面，复杂地貌水利水电地形测量技术的改革要综合考虑精度、效率以及环境适应能力，当前技术在极端地貌下的数据收集与处理仍然存在难题，未来应重点攻克多源数据融合的精度校验方法，建立标准化的技术评估体

系，以此加强技术的可靠性和可推广程度。在行业应用前景和发展趋向方面，随着水利水电工程朝着高海拔、深峡谷这类复杂区域延伸，对高精度、实时性测绘的需求会持续增加，智能化测绘技术会逐渐取代传统人工操作，促使行业向数字化、自动化转变，减少工程成本和安全隐患。未来科技融合与研究走向重点于 AI、大数据和测绘科技的深度结合，AI 算法能够实现地形数据的智能辨别与异常探查，大数据技术可整合多源时空数据开展趋势预判，二者联合将搭建感知、分析、决策一体化的智能测绘体系，这种融合不但能明显提高复杂地形测绘的效能与精准度，还会催生出新型工程设计与管理方式，对水利水电领域的规划、建设和运维产生变革性作用，推动该行业朝着智慧化方向迈进。

五、总结

复杂地形水利水电测绘技术的创新成效展现在多源数据整合、动态监控与智能处置的进展。多源数据融合整合倾斜摄影、LiDAR 以及 GNSS，实现高精度三维建模，攻克陡峭峡谷、深水库区的数据采集难题；动态监测依靠实时传输与分析，确保施工安全；智能处理利用 AI 提高解译效率，缩减测绘周期。案例实践证明，某高海拔水电站工程通过技术融合实现 1:500 比例尺的测绘工作，效率提高 40%；某岩溶水库运用 GNSS 持续监测，实时察觉库岸滑坡的潜在危险。推广工作要协同政策与技术推进：拟定复杂地形的测绘规程，清楚数据采集和验收的准则；搭建跨平台的共享机制，开发专用的装备软件，强化人才培育，促使创新技术得到广泛运用，提高工程建设的科学性与安全性。

参考文献

- [1] 刘瑀. 基于现场调查与地形核定的水库沉积计算及分析 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [2] 柴小龙. 复杂地形条件下四足机器人控制方法研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [3] 王怀计. 基于局部地形复杂度指标与全局地形特征的海图水深综合方法 [D]. 山东科技大学, 2022.
- [4] 付豪. 复杂地形射击机器人研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 李响. 复杂地形环境自动驾驶车辆路径规划方法研究 [D]. 吉林大学, 2024.
- [6] 徐耀文, 胡文学, 李斐洋. 多源数据融合技术在地形测绘中的应用 [J]. 模型世界, 2023(24): 44-46.
- [7] 甘涛, 廖银. 测绘工程中特殊地形测绘技术分析 [J]. 信息系统工程, 2022(1): 69-72.
- [8] 王福莲. 基于多源数据融合的矿山大比例尺地形图测绘方法研究 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(1): 10-11.
- [9] 孙金波. 测绘工程中特殊地形的测绘技术分析 [J]. 四川建材, 2022, 48(4): 71-72.
- [10] 田露. 基于多源数据融合的矿山大比例尺地形图测绘方法研究 [J]. 世界有色金属, 2022(7): 31-33.