23-32.

[2]刘珺.基于国土空间规划体系的全域土地综合整治上海实践——以崇明区三星镇为例[J].上海国土资源,2021,42(04):21-27.

[3]杨阳,冯建喜。生态保护修复下乡村分类与土地综合整治研究[C]// 中国城市规划学会。人民城市,规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集(16 乡村规划)。南京大学建筑与城市规划学院;2023:12.

[4]李昶,陈棕。湖州市全域土地综合整治实践探索[C]// 中国城市规划学会,合肥市人民政府。美丽中国,共建共治共享——2024 中国城市规划年会论文集(20 乡村规划)。湖州市空间规划编制与研究中心;2024:6.

[5]李媛.山西省土地集约利用与生态安全耦合协调发展研究[D].长安大学,2023.

[6]罗淋钟.土地综合整治驱动乡村"三生"空间重构的过程、机制与分区策略[D].西南大学,2024.

[7]汤瑜,于水.全域土地综合整治:线性轨迹、逻辑框架与实践反思[J]. 中共宁波市委党校学报,2021,43(06):109-116.

作者单位:临沂市自然资源开发服务中心

国土空间规划中地形要素重构的测绘技术方法研究

曹传刚　费国俊

摘　要:本文系统研究了国土空间规划中地形要素的获取、数字化重构与应用方法,分析了传统测绘、航空遥感、LiDAR 及多源数据融合技术的采集流程与精度控制,阐述了三维建模、地形特征提取、分级、可视化及数字地形模型优化更新方法,并探讨了其在规划分析、生态环境管理、灾害防治及城市基础设施布局中的技术支撑作用,为高精度地形数据在空间规划中的应用提供了完整技术路径。

关键词:国土空间规划;地形要素;LiDAR 测绘;三维建模;数字地形模型

一、引　言

随着我国国土空间规划向精细化、智能化发展,对地形基础数据的精度、完整性和可时效更新性提出了更高要求。传统测绘手段难以满足大范围、多地形类型和复杂地貌环境的快速、高精度获取需求,航空遥感、无人机 LiDAR 及多源数据融合技术逐渐成为关键支撑。高精度地形重构不仅可提供精细三维地形模型,还能辅助坡度稳定性、洪水淹没、土壤侵蚀及基础设施布局等分析,为空间规划决策、生态保护与灾害防治提供可靠技术依据,实现国土空间管理从二维向三维、静态向动态的转型。

二、地形要素获取的测绘技术方法

1.传统地形测绘方法

传统地形测绘主要依靠水准测量、全站仪测量及经纬仪测量等地面测量方法。实际作业中,采用高精度全站仪进行点位采集,单次测量精度能达到 ± 2 毫米,控制网布设通常用三级平面控制网分级布设方案,经平差计算后可水平控制精度 1/10,000、垂直控制精度 1/5,000。在山区和复杂地形中,通过三角高程方法和全站仪测量来构建基础地形点数据,点间距一般控制在 20 到 50m,要确保后续等高线和地形模型生成精度,测量数据经过平差、误差修正及闭合差校核后,能生成高程精度 ± 5 厘米的二维地形基础数据,且当作后续数字化重构的控制点与参考基准。

2.遥感与航空测绘技术

遥感测绘主要用高分辨卫星影像及航空摄影来得到大范围地形信息,航空摄影测量用 RGB 或多光谱相机,航高控制在 1,500–3,000m,影像分辨率能到 0.15m/ 像素,通过空三加密和立体像对匹配生出数字高程模型(DEM),它的点位高程精度能够达到 ± 30 厘米[1]。卫星遥感通过 LiDAR 搭载式或立体像对反演技术,联合影像正射校正与地物分类算法,高效获取大区域地形数

据，影像配准用地面控制点（GCP）精度控制，一般水平定位精度≤0.5米，高程精度≤0.3 米，还要针对云雾、植被遮挡等因素做辐射校正及纹理增强，为提升地形信息提取的完整度与可靠度。

3.激光雷达（LiDAR）技术

激光雷达测绘通过飞机或无人机载激光扫描器发射脉冲激光来获取点云数据，点密度能达到每平方米 100 点以上，高程测量精准度能到 ± 5 厘米，地形点和非地形点（如植被、建筑物）能通过逐点回波分析及分类算法来分离，产出数字地面模型（DTM）及数字表面模型（DSM）。激光点云经滤波、配准及重采样处理后，能够生成等高距 0.5 ~ 1 米的高精度地形模型，LiDAR 技术在复杂山地及植被覆盖区域格外有效，能够克服传统测量受通视条件限制的弊端，实现全域、快速、高精度的数据获取行为。

4.综合多源数据获取方法

满足国土空间规划高精度、全覆盖地形数据需求，一般用多源数据融合方法，综合 GPS RTK 测量、全站仪控制点、无人机 LiDAR 点云、航空摄影和卫星影像，经空间配准、精度权重融合及点云密度调控来生成统一坐标系下数字地形数据集。点云数据融合用最近邻插值和张量平滑算法，让点间距维持在 0.2 ~ 1 米，提高模型连贯度和精准度，多源融合要做数据一致性检查，包含高程偏差统计、三维坐标差别分析及点云完整性评定，保证生成数据契合规划分析及仿真应用需求。

三、地形要素数字化重构技术

1.三维地形建模方法

三维地形建模首先依靠高精度 DEM（数字高程模型）及 DTM（数字地面模型）数据，挑选合适的建模方法生成地形表面，在 TIN（三角网不规则网络）建模中，把地形采样点当作顶点，搭建三角网，确保边长处在 2 ~ 5 米范围。对于地形坡度变化大的山地或断裂地貌，能通过局部细分三角形实现坡度及坡向精度≤1 度，采用基于边界约束的 Delaunay 算法防止出现退化三角形。在栅格化建模方法中，把地形空间分成 1 × 1 米到 5 × 5 米的网格，每个网格记平均高程数值，采用双线性或三次卷积插值算法给高程做平滑处理，结合高程滤波消除测量噪声，确保建模点之间高程保持连续，精度达到均衡状态。

建模时要结合坡度优化和边界平滑算法消除 DEM/DTM 中因采样间距不均或异常点造成的局部突变，具体操作包含每个网格运用局部坡度调整，把坡度变化率超过 15° 的点做曲面拟合修正，对山脊、沟谷及陡坡区域同时采用加密网格策略，把网格间距从标准 5 米缩到 1 ~ 2 米确保地形表达完全[2]。最后生成三维地形模型能在 GIS 或 BIM 平台中导入，作为国土空间规划中土地利用、建设限度、基础设施布局及生态保护等分析的基础数据，支持全域多分辨率表现和高精度地形重建操作。

2.地形特征提取与分级

地形特征提取先给 DEM 数据做预处理，包含高程滤波、异常值去除和空洞填补，接着依据数值计算提取坡度、坡向及起伏度，坡度和坡向计算能用 Sobel 算子或 Horn 算子，窗口大小一般选择 3 × 3 到 5 × 5 像素，保证局部特征抓取精准度。起伏度通过局部高程极差计算实现，依照坡度分类标准（平缓坡 0 ~ 5° 、缓坡 5 ~ 15° 、中坡 15 ~ 25° 、陡坡 > 25° ）做完坡度分级，山脊和沟谷线提取用流向分析、TIN 最大曲率及水系拓扑分析办法，对每条线段做起止点坐标及坡度校核工作，确保山脊、沟谷线等空间位置绝对精度处于 ± 0.1m/km 范畴。

地形分级将坡度、起伏度及土壤侵蚀易损性等指标结合起来，把区域划分为平原、丘陵、山地及高山等类别，如表 1。操作步骤包括在 GIS 中为 DEM 生成坡度栅格图，对起伏度和曲率栅格图进行叠加分析，并通过加权分级法计算出综合地形分级指数。同时，通过矢量化提取各类地形的边界线，并与现有土地利用数据进行空间配准，保证各地形等级在规划坐标系中精准对应，为国土空间规划中建设用地选择、生态保护区划及灾害防控提供量化基础。

3.高精度地形可视化与仿真

地形可视化和仿真依靠三维地形模型进行，首先将 TIN 或栅格化模型导入虚拟地球引擎或 GIS 三维模块，通过光照、材质、纹理和阴影渲染生成逼真的三维地形，LOD（细节层次）多分辨率技术能实现从 1:5,000 到 1:50,000 不同缩放级别渲染，局部高精度区域呈现 1 × 1m 网格的坡度纹理。操作中为每个网格应用基于高程梯度的纹理映射，将坡度超过 15° 的区域渲染成陡坡

表 1 地形等级分类

地形等级	坡度范围	起伏度	土壤侵蚀易损性
平原	0 - 5°	0 - 2 m	低
丘陵	5 - 15°	2 - 10 m	中
山地	15 - 25°	10 - 50 m	高
高山	>25°	>50 m	极高

纹理，用动态光照模拟坡面朝向，提高规划阶段空间阅读性和精准度。

仿真操作中结合视域分析、阴影分析及水流路径模拟，为每个区域设计网格为 1×1m 到 2×2m，捕捉细小地形变动，水流路径模拟靠流向算法和累积流量计算，生成雨水径流方向和积水区域，为排水和地形改造规划提供空间数据支持[3]。三维模型加载和渲染运用 GPU 并行计算及多线程处理，能实时处理百万级别的点云，确保模型交互操作效率，为国土空间规划中不同地形区域的方案分析提供高精度可视化基础。

4.数字地形模型优化与更新

数字地形模型优化首先对点云或 DEM 数据进行噪声滤波、异常点剔除及空洞填充，滤波操作采用多尺度高斯核平滑和逐点 Z 值校正，修正高程异常点（偏差 0.5～1 米），对于空洞区域通过周边网格插值和曲面拟合进行填充，确保地形连贯和空间统一。分辨率提升方面，在关键区域将原始 1×1m 网格通过双线性或三次卷积插值细化为 0.5×0.5m，实现微地形表达，结合坡度和曲率阈值对加密网格做局部优化。

更新方法基于定期无人机航测、卫星影像及地面观测数据，通过自动增量更新机制，对高程变化超过 ±10 厘米的区域进行重采样和模型替换，操作流程含差异检测、版本管理、数据融合和模型替换，确保历史模型和新测数据相符。更新后的数字地形模型精度可达水平 ±0.2m、垂直 ±0.1m，还能输出多种格式（如 GeoTIFF、LAS、OBJ）导入 GIS 或 BIM 平台，为国土空间规划中土地利用分析、基础设施设计及生态防控提供持续、动态、精细的地形基础数据[4]。

四、地形要素重构在国土空间规划中的应用

1.规划分析与决策支持

在国土空间规划中，地形重构给出精细的基础数据，支撑土地利用、建设限制和空间格局分析，依据高精度 DEM，能做坡度稳定性分析、洪水淹没模拟、土壤侵蚀预测等技术研究，形成可量化的规划指标。结合 GIS 叠加分析方法，整合地形、土地利用、交通、管线等多类数据，实现空间适宜性评估、开发强度控制及用地划分决策，规划过程中，全部空间分析都基于 0.5～1 米网格分辨率的数字地形模型，保证地形约束和开发潜力量化结果清晰准确，为规划方案优化提供数据支持。

2.生态环境与灾害防治应用

数字地形模型助力生态环境保护与灾害防治技术运用，通过坡向与坡度分析，合并流域剖析与水文模型，找出洪水容易发生的区域及水土流失重点区域；通过高精度三维模型，结合坡地植被覆盖比率数据，实现生态敏感区精细划定。山体滑坡、泥石流等灾害风险分析依靠 DEM 高程变化率计算及地形曲率分析，精度控制在 ±0.2 米，地形重构数据能和遥感植被指数（如 NDVI）和降雨资料融合起来，建立多因素灾害风险指数，为生态管控与灾害防治提供技术量化依据。

3.城市与基础设施规划应用

城市和基础设施规划中，三维地形数据能用来进行道路、桥梁、地下管网及建筑布局设计，通过 TIN 模型和坡度分析开展道路纵横断面设计，保证坡度≤6%符合交通设计规范要求；地下管线铺设联合 DTM 生成管线冲突检测模型，空间精度控制在 ±0.2 米[5]。建筑规划能依靠高程等值线做地块分级及建筑高度控制，同时和风环境仿真、雨水径流模拟相结合，给城市防洪排涝、绿色空间布局及基础设施施工提供数据根基，数字地形模型能导入 BIM 或 CIM 平台，实现设计、施工和运维全流程空间协同。

五、结　语

本文系统梳理了国土空间规划中地形要素获取、数字化重构及应用方法，形成了基于多源测绘技术、高精度三维建模及数字地形优化更新的完整技术体系。通过综合 LiDAR、航空遥感及地面测量数据，实现点密度≥50 点 /m2、高程精度 ±5 cm 的数字地形模型，为规划分析、生态防治及城市基础设施布局提供了可靠技术支撑，明确了地形要素在精细化空间管理中的操作路径与应用方法。□

参考文献：

[1]戴骏睿.测绘工程中特殊地形的测绘技术研究 [J]. 工程技术研究,2024,9(24):212-214.

[2]莫红川.乡村振兴视角下丘陵地区乡村生活空间重构[D].西华师范大学,2023.

[3]彭莉,田罗.无人机测绘技术在国土空间规划中的运用研究[J].中国设备工程,2025,(14):245-247.

[4]张仕军.城市国土空间规划中测绘地理信息技术的实际应用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):160-162.

[5]李艳,孔辉,王晓峰.现代测绘技术在国土空间规划中的应用研究[J].房地产世界,2025,(20):146-148.

作者单位：安徽省第四测绘院