引文格式：何伟俊,万忠平. 基于改进Delaunay三角剖分算法的房屋面群自动综合[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3):114 –117. doi:10. 3969/j.issn. 1672–4623.2025.03.026

基于改进Delaunay三角剖分算法的房屋面群自动综合

何伟俊[1]，万忠平[2]
（1. 广州南沙新区规划设计研究院有限公司，广东 广州 511455；2. 广州城市信息研究所有限公司，广东 广州 510665）

摘　要：为实现基于算法的面状数据高效自动综合，以房屋面群为例，基于改进Delaunay三角剖分算法，通过选取房屋面代表点、构建与裁剪房屋面群最小生成树和融合房屋面群等步骤，实现了房屋面群的自动综合。结果表明，该方法能很好地体现原数据的分布和形态特征，清晰识别街道和面积较大的内部“岛屿”。该方法的制图综合效果优于传统方法，可应用于产业化生产。

关键词：Delaunay三角剖分；房屋面代表点；最小生成树；房屋面群融合；自动综合
中图分类号：P285　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672−4623（2025）03−0114−04

Automatic Synthesis of Roof Surface Groups Based on Improved Delaunay Triangulation Algorithm

HE Weijun[1], WAN Zhongping[2]
(1. Nansha Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511455, China;
2. Guangzhou Digital Cities Institute Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: In order to realize the efficient and automatic synthesis of surface data based on algorithms, taking the roof surface group for example, based on the improved Delaunay triangulation algorithm, we realized the automatic synthesis of roof surface group by selecting the representative points of roof surface, constructing and cutting the minimum spanning tree of roof surface group, and fusing the roof surface group. Experimental results show that the proposed method can well reflect the distribution and morphological characteristics of original data, and can clearly identify streets and large internal “islands”. Compared with the traditional methods, the effect of this method has been greatly improved, and it can be applied to industrial production.

Key words: Delaunay triangulation, representative point of roof surface, minimum spanning tree, roof surface group fusion, automatic synthesis

地理空间数据的多尺度表达是当今地理科学研究的前沿核心课题之一[1]。制图综合是多尺度表达的主要手段[2]，是多尺度空间数据生产、表达和处理的关键步骤[3]，也是空间数据尺度变换、集成融合和分析挖掘的基本手段之一[4−5]。制图综合的研究方法主要包括基于模型、基于算法、基于知识库和人机协同4种[6]。相较于传统方法，基于算法的制图综合能极大提高工作效率和自动化水平[7]。近年来，诸多学者对制图综合的理论、算法、性能和效果进行了大量研究[3, 8−14]。传统制图综合对要素进行取舍和简化导致数据信息丢失或失真；采用缓冲区、聚类和道路网等方式构建房屋面的邻近关系将忽略真实的空间距离和脉络关系；利用Delaunay三角桥接房屋面时缺乏合理的参数阈值对其进行筛选；目前大多数研究仍停留在理论和少量数据测试阶段，尚未实现全自动产业化生产。鉴于此，本文以房屋面数据为例，提出了基于改进Delaunay三角剖分算法的自动综合。基于算法的制图综合能大幅降低制图员的专业技术门槛，有效弥补制图员专业背景匮乏的缺陷，而其难点在于对制图综合知识理论和经验进行抽象分析，并将其转化为数学语言的描述和计算机处理步骤[15]。

1　算法概念与技术路线

1.1　算法概念

通常房屋面的形心可作为房屋面代表点，但在制图综合场景下，房屋面的形心不一定落在其内部，而房屋面间的拓扑关系以及形心与房屋面之间的拓扑关系影响了综合的过程[16]。因此，本文设计了一种通用算法，通过递归寻找一个确保落在房屋面内部的代表点。Delaunay三角剖分是一种点集三角剖分方法，满足三角形外接圆空圆特性、最大化最小角特性和唯一性[17−18]。最小生成树即基于房屋面代表点Delaunay三

第一作者简介：何伟俊（1991—），硕士研究生，高级工程师，主要从事地理信息基础平台和国土资源信息化开发工作，E-mail：nheweijun@sina.com。

角剖分的最小权重生成树，连接线的权重为代表点表示的两个房屋面之间的最短距离，体现房屋面的邻近关系。Prim算法是图论中的一种算法，采用贪心算法的思想，可在加权连通图（Delaunay三角网）里搜索最小生成树[19-20]。颗粒度阈值是指裁剪房屋面代表点的最小生成树、筛选三角形时采用的距离阈值，可根据需要展现交通路径宽度。

1.2　技术路线

基于改进Delaunay三角剖分算法的制图综合技术主要利用GDAL库的拓扑运算函数，设定颗粒度阈值，以实现房屋面群的自动综合。其技术路线为：

1）计算各房屋面的代表点，实现空间数据降维。

2）通过房屋面群的代表点集合生成无约束的Delaunay三角网数学模型，以三角边连接的房屋面间的最短距离为权重，利用Prim算法生成基于Delaunay三角网的最小生成树。道路网可作为区分房屋面群的约束条件[13]，但若道路网不完善或邻近且本应融合的房屋被一条小路相隔，则可能影响房屋面群的划分。本文在最小生成树中采用颗粒度阈值，裁剪权重超过阈值的三角边，形成多棵在视觉上邻近的房屋面群聚合树，每棵聚合树连接的房屋面即为待融合的房屋面群，利用不同的颗粒度阈值可实现不同尺度的聚合。

3）基于房屋面群进行自动判断融合，利用房屋面群所有顶点生成无约束的Delaunay三角网；再利用房屋面集群的边作为其约束边，生成与边不相交三角网；最后通过颗粒度阈值删除距离房屋面群较远的三角形，融合剩下的三角形得到房屋面群。

2　关键技术

2.1　房屋面代表点的确定

计算房屋面的形心，若形心落在房屋面内部，则将其作为房屋面代表点；否则以形心为旋转点，将长度为 d （房屋面外接矩形的对角线长度）的线段旋转一定角度（线段在正北方位为0°方向，顺时针为正方向），当线段将房屋面裁切为两个面积相当的多边形后停止旋转。具体算法步骤为：①判断旋转方向的正逆，若以0°和30°（根据实操经验发现30°是一个合适且实用的搜索步长）分割房屋面时右侧面积比左侧面积多，且30°相对于0°时差值变少，则旋转方向为正，否则为逆；②以30°的步长旋转分割线，若当前分割与前一次分割的左右两侧面积大小关系发生变化，停止旋转；③采用二分法继续寻找，当左右两侧面积差少于面积阈值（取该房屋面面积的1/10）停止旋转；④取分割线与房屋面相交线的中点作为房屋面代表点，若中点不落在房屋面内，则选取相交线上距离形心最近点向外延伸颗粒度阈值相等长度的点，递减该长度，直至点落在房屋面内部。其中需要注意是，若形心落在房屋面的岛内，则分割线长度为 $2d$，且形心是其中点。

2.2　最小生成树的构建与裁剪

1）最小生成树的构建。首先利用GDAL的Delaunay Triangulation方法构建房屋面代表点群的关联三角网，以其所连接的两个房屋面之间的最短距离为三角网边的权重；然后采用Prim算法生成最小生成树，结果见图1a。具体逻辑算法为：①初始化房屋面代表点集合 S_{point}；②遍历所有三角边，选取权重最小的边作为初始边，从 S_{point} 中剔除该边的两个顶点；③遍历与最小生成树中所有代表点相连且与最小生成树不形成闭环的边，将其中权重最小的边加入最小生成树中，并从 S_{point} 中剔除该边的两个顶点；④重复步骤②，直至 S_{point} 为空。

2）最小生成树的裁剪。根据Delaunay三角边加入最小生成树的先后顺序，形成最小生成树的三角边序列（$List_{tri-edge}$）。定义一个树节点数据结构，节点记录房屋面代表点与其连接的子节点集合以及该树关联的三角边。裁剪结果见图1b。具体逻辑算法为：①初始化房屋面代表点与树节点的映射集 KV 和树集合 S_{tree}（街区房屋面群集合）；②选取 $List_{tri-edge}$ 中第一条三角边的一个顶点构建树节点 A，在 A 中记录该三角边，并将 A 加入 S_{tree} 中，同时将顶点和树节点加入 KV 中，同理利用另一个顶点构建树节点 B，将顶点和树节点加入 KV 中，若该三角边长度小于颗粒度阈值，则将 B 加入 A 中，成为 A 的子节点，反之则将 B 加入到 S_{tree} 中；③遍历 $List_{tri-edge}$ 剩余的三角边，每一条边的一个顶点皆可在 KV 中找到与之相关的树节点 C，再利用另一个顶点构建树节点 D 并将该顶点和 D 加入 KV 中，若该三角边的长度小于颗粒度阈值，则



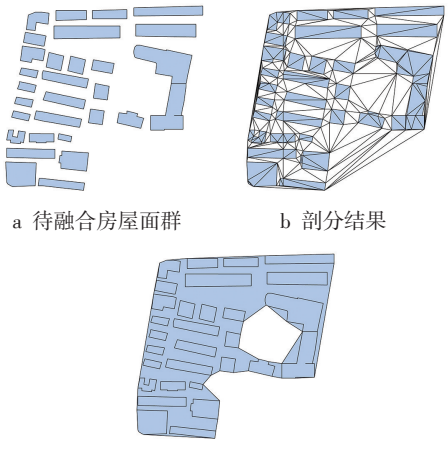
a 构建　　b 裁剪

图1　最小生成树的构建与裁剪

将 D 加入 C 中，反之则将 D 加入到 S_{tree} 中；④ S_{tree} 中的要素即为裁剪后的树集合，代表街区单元的房屋面群。

2.3 房屋面群的融合

常用的多边形融合算法包括凸包、凹包和基于Delaunay三角网的融合算法[21-22]等。受益于对复杂多边形三角剖分的研究[23-25]，本文提出了针对房屋面群的基于约束边的Delaunay三角剖分算法，具体步骤为：①采用房屋面群所有顶点构建无约束Delaunay三角网，并对其创建R树索引 $Index_{rtree}$，提升空间查询效率，再创建三角网集合 $S_{triangle}$，将所有三角形加入其中；②遍历房屋面群中所有房屋面的边，从 $Index_{rtree}$ 中查询与边相交的三角形，从 $S_{triangle}$ 中移除这些三角形，将相交的三角形融合成一个简单多边形 H，并利用该房屋面的边将 H 分隔成两侧多边形；③对受影响的每侧多边形进行三角剖分，采用格林公式获得多边形逆时针序列，将序列中的所有点创建点集合 S_p，若 S_p 的点数为4，则直接将该多边形加入 $S_{triangle}$ 中，否则遍历点序列，计算点的凹凸性，如果是凸点，则利用该点与前置点和后置点构成三角形，三角形不包含其他点，则将生成的三角形加入 $S_{triangle}$ 中，并从 S_p 中删除该点，直至 S_p 的点数等于4；④遍历完所有房屋面的边，$S_{triangle}$ 中三角形即为多边形集群剖分结果（图2b），若三角形3条边上的点与房屋面群的最远距离大于阈值（采用与裁剪最小生成树同样的颗粒度阈值），则剔除该三角形，再融合 $S_{triangle}$ 中所有三角形，得到融合后房屋面群；⑤去除融合后房屋面群中面积小于阈值（根据实验经验，取颗粒度阈值平方的5倍）的岛，得到最终结果（图2c）。



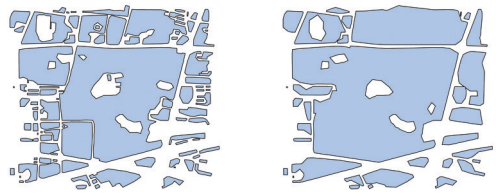
a 待融合房屋面群　　b 剖分结果

c 融合结果

图2 房屋面群融合过程

3 实验结果

以某城市内1 420个房屋面为例，对原始房屋群数据进行地图投影，设定颗粒度阈值为视觉1 mm，在1∶10 000比例尺下代表现实世界的10 m距离，综合得到101个房屋面，缩编率为7.11%，综合后房屋面群的内部空白区“岛屿”和外轮廓凹陷表现丰富（图3a）。在1∶20 000比例尺下，设定颗粒度阈值为20 m，综合得到33个房屋面，缩编率为2.32%，相距20 m以内的街区已融合成一个房屋面，且外轮廓细节减少，内部“岛屿”数量和面积比1∶10 000比例尺的综合结果少，但主干街道表现更明显（图3b）。综上所述，在无额外人工干预下，通过设定不同颗粒度阈值可得到不同比例尺的缩编地图，不同房屋面群切割合理，综合后的房屋面群能很好地体现原数据的分布特性和形态特征，并能清晰识别出比距离阈值大的街道和面积较大的内部“岛屿”。



a 1∶10 000比例尺　　b 1∶20 000比例尺

图3 多尺度融合结果

4 结 语

本文通过抽象与分析房屋面群的制图综合过程，梳理得到房屋面代表点确定、最小生成树构建与裁剪和房屋面群融合3个步骤，并利用制图综合知识理论和经验将其转化为可量化的数学语言描述和计算机处理步骤，实现了房屋面群的自动化综合，技术优势明显，现已应用于产业化生产。针对当前矢量大数据动态渲染技术现状，基于改进Delaunay三角剖分算法的房屋面群自动化综合制图具备以下优势：①相较于基于模型或知识库的制图综合，其允许制图员在缺乏专业知识背景的情况下生成缩编地图；②通过设定不同的颗粒度阈值，可快速生产多尺度综合结果，并能反映数据在不同尺度下的分布特性和形态特征；③通过减少要素量，提升了矢量引擎的渲染性能；④基于约束边的Delaunay三角剖分算法，可识别出房屋面群中主次街道和内部空白区“岛屿”，效果优良。本文虽然实现了房屋面群的自动化综合，但仍存在一些不足：①算法越复杂，融合效果越好，但性能却会下

降；②尚未实现三角边上计算距离房屋面群最远点的算法，本文采用三角边每条边上的20个中分点，共60个点中最远点作为替代；③由于三角剖分结构的特点，房屋面之间桥接部分的直角化特征不明显。

参考文献

[1] 孙庆先,李茂堂,路京选,等. 地理空间数据的尺度问题及其研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2007,23(4):53-56

[2] 王迪,钱海忠,赵钰哲. 综述与展望:地理空间数据的管理、多尺度变换与表达[J]. 地球信息科学学报,2022,24(12):2 265-2 281

[3] 马京振,孙群,李少梅,等. 多尺度矢量空间数据融合的基本问题研究[J]. 测绘科学,2022,47(9):208-216

[4] 武芳,巩现勇,杜佳威. 地图制图综合回顾与前望[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 645-1 664

[5] 翟彦放,谢艾伶,赵礼剑. 一种面向多图层的制图数据综合方法[J]. 地理空间信息,2019,17(10):73-74

[6] 汪秋菱,姜宝兴. 地图自动制图综合研究综述[J]. 科学技术创新,2020(21):63-64

[7] 王家耀,钱海忠. 制图综合知识及其应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(5):382-386

[8] 赵炜,袁嘉铭. 基于缓冲区代数运算的多边形地图综合算法设计[J]. 北京测绘,2023,37(2):272-279

[9] 郭庆胜,黎佳宜,曹元晖,等. 建筑物白模多边形的自动合并[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(1):12-18

[10] 程绵绵,孙群,陈焕新,等. 空间相似性约束的自动制图综合基本问题研究[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(11):14-18

[11] 钟英铭. 基于深度学习的面向制图综合的建筑物群组模式识别研究[D]. 武汉:华中师范大学,2021

[12] 高晓蓉. 顾及几何和语义相似的居民地自动综合方法[D]. 兰州:兰州交通大学,2022

[13] 黄玉兰,郭庆胜,王慧慧,等. 基于顶点线性插值的建筑物群聚合的简易方法[J]. 地理空间信息,2022,20(2):15-21

[14] 李安平,翟仁健,殷吉崇,等. 顾及空间结构关系的居民地自动合并方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1 723-1 733

[15] 毛炜青. 交互式基础地理数据制图综合方法的研究[J]. 测绘科学,2009,34(4):101-102

[16] 樊红,Tran Q A. 大比例尺居民地面状要素的自动无级综合[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(2):271-275

[17] 高莉. 改进的Delaunay三角剖分算法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015

[18] 周佳文,薛之昕,万施. 三角剖分综述[J]. 计算机与现代化,2010(7):75-78

[19] 马磊,李永树. 基于Prim算法的GIS连通性研究[J]. 测绘科学,2011,36(6):204-206

[20] 江波,张黎. 基于Prim算法的最小生成树优化研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(13):3 244-3 247

[21] 艾廷华,郭仁忠,陈晓东. Delaunay三角网支持下的多边形化简与合并[J]. 中国图象图形学报,2001,6(7):93-99

[22] 艾廷华,刘耀林. 土地利用数据综合中的聚合与融合[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2002,27(5):486-492

[23] 刘少华,吴东胜,罗小龙,等. Delaunay三角网内插多边形算法研究[J]. 测绘科学技术学报,2007,23(2):136-138

[24] 马洪滨,郭甲腾,何群,等. 带岛屿多边形Delaunay三角剖分算法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009,30(5):733-736

[25] 王中辉,闫浩文. 复杂多边形的Delaunay三角剖分研究[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷,2009,6(4):109-111

(上接第108页)

换及实时服务[J]. 测绘科学,2023,48(3):111-119

[8] 王明,李祖锋,李贯亮. EIGEN-6C4重力场模型在大高差抽水蓄能电站高程测量中的应用[J]. 西北水电,2023(4):54-57

[9] 李建成,陈俊勇,宁津生,等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003

[10] 李明飞,吴军超,秦川. 基于移去—恢复法的局部似大地水准面精化模型对比研究[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(9):952-956

[11] 陈良,游为. 剩余地形模型的适用性分析[J]. 测绘科学,2023,48(8):51-56

[12] 罗陶荣,王中元,梁宁,等. 利用EGM2008模型与加权组合模型进行高程异常拟合[J]. 测绘通报,2018(1):28-32

[13] 张杰,孙文,梅宇庭,等. 重力场模型研究进展及最新重力位模型精度比较分析[J]. 现代测绘,2018,41(2):40-43

[14] 周隽,罗旭. 顾及剩余地形模型的山区残余高程异常确定方法[J]. 测绘科学,2022,47(10):74-81

[15] 王之豪,曾怀恩,张群,等. GNSS高程转换拟合方法对比研究 [EB/OL]. (2023-12-20) [2024-01-25]. https://kns. cnki.net/kcms2/article/abstract?v=e9e-pYHXmfes9gs3LFhBf7DqwM-qWsNx3bZ6RxdhCrhl9VtVMo7E5mbMRQk7o5OUcGC13Mq3969RS39Jgn812hM7lWNK2KAp6ULK6HA5gMHv9n6NOvgckJ8TwESteLjTvNFrQzh6ezVYC3ZS-vjIdQOdu1p0mHA9keJBcwOz1Rin4mnLUXM_7j4N832-O_pqd&uniplatform=NZKPT&language=CHS

[16] 刘政纲,梁迎春. EGM2008模型GNSS高程转换在山区地形图测量的研究[J]. 地理空间信息,2022,20(8):89-92