引文格式：周新鼎,袁立罡,曹毅敏,等. 基于渔网分割的城市低空空域建模[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 18-20. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.004

基于渔网分割的城市低空空域建模

——以南京市江宁区为例

周新鼎，袁立罡，曹毅敏，陈海燕
（南京航空航天大学，江苏 南京 211000）

摘　要：针对城市低空空域的精细化建模问题，提出了一种基于渔网分割的场景建模方法。首先通过ArcScene对二维建筑物数据进行预处理和三维实体转换，生成建筑物的三维模型，并构建建筑物缓冲区以确保周边空域的安全性；然后利用渔网分割技术对研究区进行网格化处理，将渔网点按设定高度进行三维扩展，形成多层高度的三维空域数据；最后通过筛选算法剔除被建筑物和缓冲区覆盖的网格点，生成可用空域。以南京市江宁区为例进行了实例研究与对比分析。结果表明，该方法能精确划分城市复杂环境中的可用空域，为城市低空空域管理和无人机路径规划提供了有效支持。

关键词：低空空域；三维建模；渔网分割；ArcScene
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0018-03

Urban Low-altitude Airspace Modeling Based on Grid Division: A Case Study of Jiangning District, Nanjing City

ZHOU Xinding, YUAN Ligang, CAO Yimin, CHEN Haiyan
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211000, China)

Abstract: Aiming at the fine-grained modeling problem of urban low-altitude airspace, we proposed a scenario modeling method based on grid division. Firstly, we preprocessed the 2D building data and converted it into 3D models using ArcScene, while created building buffer zones to ensure the safety of surrounding airspace. Then, we applied the grid division technique to divide the study area into grids, followed by 3D expansion of the grid points at specified heights, forming multi-layered 3D airspace data. Finally, we used a filtering algorithm to remove the grid points overlapped by buildings and buffer zones, resulting in the usable airspace. An example study and comparative analysis in Jiangning District, Nanjing City, demonstrated that this method could effectively divide usable airspace in complex urban environment, providing strong support for urban low-altitude airspace management and UAV path planning.

Key words: low-altitude airspace, 3D modeling, grid division, ArcScene

随着智慧城市建设的推进，城市低空空域的管理与规划成为关键问题。无人机的广泛应用使得城市复杂环境下的低空空域建模逐渐成为研究热点。国际上，FAA的无人机交通管理系统[1]和欧洲的U-Space计划[2]为低空空域管理提供了标准和规范。Bauranov等[3]分析了设计城市空域的参考因素并提出了建议；谢华等[4-5]研究了面向低空空域的栅格表征度量与最优标定方法，同时针对复杂低空系统构建了无人机飞行冲突网络模型，刘月宁等[6]研究了ArcGIS在无人机领域的应用与发展。作为GIS平台的三维可视化工具，ArcScene能对建筑物进行精确的三维建模[7-8]；但对大范围城市区域的低空空域建模，尤其涉及到建筑物与空域之间的关系时，其基本功能仍存在一定的约束。传统三维栅格化方法虽广泛应用于低空空域的分析与建模中[9-10]；但在复杂的城市环境，尤其是城市低空航线规划中，存在因栅格内部区域受限造成整个栅格不可用，从而导致可用空域空间下降的情况[11]。鉴于此，本文提出了一种基于渔网分割的城市低空空域建模方法。以南京市江宁区为例，本文对该方法进行了实证研究与对比分析。结果表明，该方法不仅能精确表达建筑物的三维形态，还通过筛选出传统三维栅格化方法中被整体标记为不可用但实际可部分利用的差集点，更有效地划分了城市复杂环境中的可用空域，显著提升了可用空域的精度与利用率，为无人机低空路径规划和城市空域规划提供了科学依据。

1　基于渔网分割的场景建模方法

1.1　建模技术路线

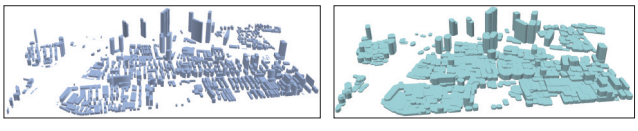
本文提出的城市低空空域场景建模方法从城市三

项目来源：国家重点研发计划资助项目（2022YFB4300905）。
第一作者简介：周新鼎（2000—），硕士，研究方向为空域数字化量化表征与无人机路径规划，E-mail：SZ2307092@nuaa.edu.cn。

维建模和低空可用空域构建两方面入手。首先基于GIS平台，结合建筑物的二维矢量数据及其属性信息，通过ArcScene进行三维转换和建模，生成建筑物的三维结构模型，并构建建筑物缓冲区以确保周边空域的安全性；再采用渔网分割工具对目标区域进行网格划分，并根据所需的高度间隔将网格点延伸至设定高度，形成覆盖整个目标区域的三维网格结构；然后利用ArcGIS的ArcPy模块对与建筑物及其缓冲区重叠的网格点进行编程处理；最后通过筛选算法自动剔除这些点，从而构建仅包含可用空域的三维点图层，实现对城市低空可用空域的精确建模。

1.2　建筑物三维实体转换与缓冲区构造

在ArcScene中通过导入包含城市建筑物的矢量数据创建新的场景。由于原始数据通常采用地理坐标系，并不适用于城市低空空域的精细化建模，因此需通过投影和变换操作将原始数据转换为投影坐标系以提高数据的空间精度，从而确保后续三维模型构建的精度和一致性。对于建筑物范围较大的图层，通过绘制多边形限定区域，对建筑物图层进行剪裁以缩小范围，获取目标区域的切片；再通过设置拉伸因子实现三维展示，并进一步转换成三维实体，形成符合需求的基础数据。对区域进行场景切片可以精确限定建模范围，同时减少数据处理的复杂性，提高建模效率，三维实体效果见图1a。缓冲区的构造用于明确建筑物与低空可用空域之间的保护范围，从而避免建筑物与可用空域之间的干扰。首先通过ArcGIS的几何计算功能计算建筑物占地面积；然后在ArcScene中为三维实体切片图层中的建筑物设定缓冲区的线性单位，构造缓冲区（图1b）。



a 建筑物三维实体　　b 建筑物缓冲区

图1　建筑物三维实体及其缓冲区

针对缓冲区范围的设置，本文在参考低空管理相关要求的基础上，借鉴了无人机测绘和电力巡检领域的相关规范与应用实例，以对缓冲区安全距离进行更准确的赋值。根据国内外多个城市的无人机操作指南以及2020年7月发布的《民用轻小型无人机系统安全性通用要求》[12]，无人机在靠近建筑物时需保持一定的安全距离，以降低对建筑物和人群可能造成的潜在风险。此外，国务院、中央军事委员会于2023年6月28日发布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》[13]中规定，微型无人驾驶航空器和轻型无人驾驶航空器的最大平飞速度分别为40、100 km/h。因此，预留20 m的缓冲距离可有效应对无人机在飞行过程中因导航误差、风力影响等不确定因素引发的偏离情况，提供充足的安全缓冲。在无人机电力巡检领域，为确保安全操作，无人机通常飞至距离拍摄部位13~20 m处悬停进行作业，且单个悬停点停留时间一般不超过5 min，且需与作业人员保持至少5 m的距离[14]。在测绘技术领域，通过地面分辨率公式可推导得到无人机的最佳作业高度，而在贴近测量场景中，一般要求测量距离不大于20 m[15-16]。基于上述规范与实例，并综合考虑无人机飞行安全性，本文将缓冲区距离设定为20 m。

1.3　低空空域场景建模

1）渔网的生成。基于研究区的特定地理范围，利用ArcGIS提供的渔网工具设定合适的像元宽度和高度，将区域分割为规则的网格单元，并在每个网格的中心点生成标注点（即渔网点），为后续空域数据的处理和分析提供了基础框架。

2）渔网点的三维扩展和高度划分。在ArcScene上完成渔网点从二维平面到三维空间的转换，首先读取输入的点要素集坐标；然后通过设定高度范围和步长，在不同高度层插入新要素集；最后生成一个包含不同高度的三维点图层。根据《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》的规定，真高120 m以上空域为管制空域，120 m以下为非管制适飞空域。城市民用无人机的飞行活动大多在非管制空域内进行，因此本文将研究空域选定为非管制低空空域，将建模高度上限设置为120 m。

3）可用空域的表达。通过图层管理函数，逐高度层分析渔网点与建筑物及其缓冲区的重合情况，将被覆盖的渔网点标记为障碍物点。在每个高度层中，创建临时图层并通过空间查询函数定位与缓冲区面重叠的点，并统计重叠点的数量。通过创建一个点ID集合对数据进行去重，再将筛选出的不可用渔网点保存在单独的图层中，形成最终的不可用点数据集。遍历三维渔网点时，将不在不可用点集合中的渔网点标记为可用点，并插入到新的要素类中，这样可确保保留的渔网点完全位于可用范围内，形成最终的可用空域数据集。

本文提出的渔网分割方法和传统三维栅格化方法均属于低空空域表征体系，但它们在分工和特性上有所不同。三维栅格化方法主要面向较粗密度的低空空

域表征，适用于一般空域分析；渔网分割方法则聚焦于高精度的无人机航线规划，通过灵活调整网格大小和渔网点位置，更有效地适应复杂地形和建筑物分布，直接以点的形式明确指示飞行路径，释放更多可用空域。此外，渔网点可通过增加属性，使其携带的信息更丰富，不局限于坐标信息。这种可扩展性大大增加了后续分析的深度和应用的广度，便于进行更复杂的数据处理和决策支持。

2 实例研究

2.1 区域数据获取

本文采用的建筑物矢量数据通过百度API采集，接口地址为https://lbsyun.baidu.com/；卫星地图数据来源于百度地图，采集精度达到15 m，完全符合2023年自然资源部发布的《公开地图内容表示规范》[17]中关于公开地图精度的各项要求。本文选取南京市江宁区百家湖一带作为低空域场景建模示例区域。该区域的切片长度（东西向）为3 683.698 m，宽度（南北向）为3 486.437 m，切片区域面积约为12.840 km^2。原始矢量数据坐标系为GCS_WGS_1984，为便于后续精确空间分析，将其转换为投影坐标系WGS_1984_UTM_ZONE_50N。该投影坐标系适用于南京市所在的纬度区域，能有效减少在大范围内进行几何运算的变形误差。

2.2 建模结果

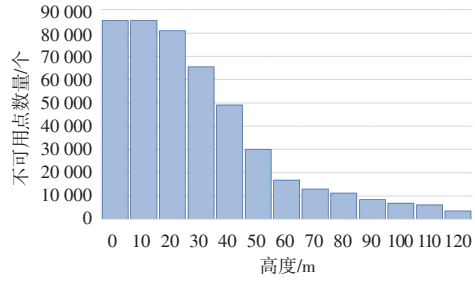
本文在对研究区进行渔网分割建模的基础上，同时筛选出传统三维栅格化方法中可能被排除的潜在可用位置，通过对比分析以验证渔网分割方法在建模精度和空间利用上的优越性。按照上述方法将建筑物从二维矢量数据转换为三维实体，并设置缓冲区距离为20 m。示例区域建筑物及其缓冲区场景见图2。



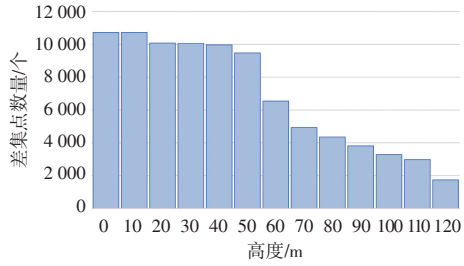
a 卫星地图 b 建筑物三维实体 c 建筑及其缓冲区

图2 建筑物及其缓冲区场景图

本文设置渔网的网格大小为10 m×10 m，低空空域的高度上限为120 m。将渔网点逐层以10 m间隔从地面拉伸至120 m的高度，在示例区域内共生成1 674 153个三维渔网点；分析每个高度层中被建筑物及其20 m缓冲区覆盖的网格点，即不可用点。每个高度层上包含的不可用点数量见图3。对于10 m×10 m×10 m的方格区域与缓冲区产生重叠的渔网点，三维栅格化方法往往将这些区域标记为不可用空域，但在本文方法中这些渔网点所表征的空域将得以利用。本文将这些点命名为差集点，差集点逐高度层的分布情况见图3b。



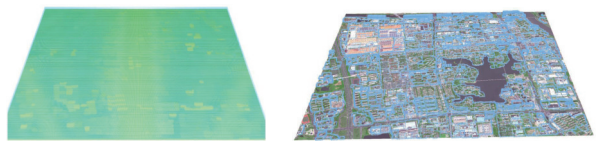
a 逐高度层不可用点



b 逐高度层差集点

图3 逐高度层不可用点和差集点统计

随着高度层的上升，不可用点和差集点的数量均逐渐降低。在120 m的低空范围内，计算得到459 142个不可用点、88 779个差集点，再通过筛选算法构建可用低空空域的渔网点集（图4）。



a 可用渔网点分布 b 差集点分布

图4 可用低空空域渔网点和差集点分布图

通过筛选所有不可用点，共获得1 211 412个可用渔网点，成功实现了对南京市江宁区百家湖一带120 m内低空可用空域的表征。相较于三维栅格化方法，该方法额外释放出的可用空域（差集点表征的空域部分）占整体可用空域的7.3%，优化效果明显。结合卫星地图和建筑物的三维实体图层，最终示例区城市低空空域效果见图5。



图5 江宁区低空空域景建模效果图

（下转第65页）