

完善城郊低空空域数字化区划适配技术体系研究

王 晔

向塘机场飞行管制室 江西 南昌 330201

摘要：城郊低空空域数字化区划适配技术系统服务于混合运行环境下的空域管理工作，提供了从场景感知到规则调整的一整套技术手段，它以对整个空间范围的数字化描述为起点，经过功能区的划分和区域边界的确定，最后获得针对实时变化的响应能力。城郊地区的建筑物高低不平、飞行设备繁多、气象环境多变等特点对区划方案的实时性和准确性提出了很高的要求。文章针对空域的特征提取、边界的生成和偏差驱动的规则修正三个方面进行了研究，提出一套适用于城郊复杂情况的区划适配技术方案。该技术体系能够有效地实现城郊低空空域由静止的区域管理模式转变为动态的精细化管理模式。

关键词：城郊低空；数字化空域；区划适配；网格化；动态规则

引言：城郊地带跨越城市建设边界与农业生产区域的交叠地带，低空空域内物流配送、应急救援与农林作业等各类飞行器并行运转，运行环境的复杂程度远高于城市核心区或偏远空旷地带。此类空域面临障碍物分布零散、通信导航覆盖强弱交替以及飞行密度时段性集中等多重现实制约，传统的固定扇区划分方式难以应对上述动态变化。数字化区划适配技术的核心任务是将物理空域转化为可计算的数字单元集合，并依据实时运行数据驱动区划边界与使用规则的动态调整。既有区划方法多承袭运输航空的静态设计范式，对城郊特有的时空异质性缺乏有效的数学描述与响应机制。本研究从城郊空域特征数字化表达入手，依次讨论区划生成方法与动态适配策略，力求构建一套具备工程应用价值的技术框架。

1 城郊低空空域环境的多维感知与数字化表征

1.1 城郊低空运行环境的数据获取与融合处理

城郊低空空域的数据获取无法依赖单一感知手段，雷达覆盖在城郊边缘地带存在显著衰减，光学传感器在夜间或恶劣气象条件下效能大幅降低，通信链路受建筑物遮挡后丢包率急剧上升。针对上述约束条件，数据获取架构采用分布式多节点部署方案，沿城郊主要飞行走廊布设轻型探测雷达与光电摄像机构成的主被动复合感知阵列，各节点探测数据经回传后于中心处理单元完成时空对齐操作。气象数据采集方面，微型气象站按照与飞行通道垂直的剖面线布放，重点捕捉穿越不同下垫面类型时的风速切变与湍流强度变化，这部分观测结果直接决定低空飞行活动的可执行性判定^[1]。地形与人工构筑物信息的获取通过机载激光雷达周期性采集点云数据加以实现，其处理精度必须达到区分输电塔、通信杆与临时施工支架的工程水准。各类感知数据的时间基准与空

间坐标系存在固有差异，融合处理前须完成时间戳统一校正与空间坐标转换，由此形成的综合环境数据集才能支撑后续特征提取环节的可靠运算。

1.2 面向区划划分的空域特征参数量化提取

融合后的多维环境数据须转化为能够直接服务于区划决策的量化特征参数，转化过程依据每个网格单元独立执行。空域复杂度参数由网格内障碍物占据比例、地面粗糙度系数与电磁干扰强度三项因子加权合成，城郊区域内该参数的空间变异程度显著，邻近网格之间的数值落差可能达到数倍之巨。可用容量参数反映单位空域内能够容纳的飞行器数量上限，该数值不仅受物理空间尺寸制约，与通信带宽占用率、导航信号场强覆盖度以及冲突解脱路径数量之间存在耦合关系。运行效率因子涵盖航线曲折程度、高度层变更频率以及待机等待区可用性等维度，上述因子共同影响着飞行任务实施时的时间成本与能量消耗水平^[2]。风险暴露指数纳入人口时变分布、重要目标位置及应急力量响应可达时间三项信息，该指数在城郊学校、医院与交通枢纽辐射区域内须执行更严格的赋值准则。各参数的提取运算依托滑动窗口扫描机制逐网格推进，运算完成后为每个参数附加置信度标记。

1.3 城郊空域变分辨率网格化数字模型构建

量化特征参数必须组织为具备空间索引能力与快速查询响应的网格化数字模型，该模型充当区划适配全流程的统一数据底座。网格化方案采用变分辨率架构，城郊飞行密度最高的核心通道内部署边长数十米级的高精度网格，通道外围及高空层区域采用宽松分辨率，以此在关键区域刻画精度与全局数据规模之间取得平衡。每个网格单元存储静态环境参数、准静态构筑物信息以

及动态气象场快照三类属性数据,存储结构须按时间轴线保留历史状态记录以供区划调整时追溯特定时刻的环境条件。数字模型的刷新机制按照参数类型区分驱动周期,气象类参数以分钟级间隔自动更新,建筑物类信息由卫星影像变化检测触发非定期修正,飞行密度统计数据依据实时航迹报告实施滚动窗口计算。

2 基于运行效能与风险约束的数字化区划划分方法

2.1 城郊运行场景分类指引下的区划粒度确定

区划划分的第一步不是去画边界线,而是根据城郊空域飞行任务的种类组成来确定每个区域应该有的划分粒度。城郊空域中的飞行任务可以分为以下三种基本形式:可预测航线类、应急响应类、移动作业类。可预测航线类包括有固定频次的物流运输、管线巡查等活动,其时空轨迹有很强的重复性,在这种情况下可以适当放松对分区的要求,把计算资源放在对航道容量保障上。应急响应类有医疗转运、灾害侦查等,起降点和飞行路线都不固定,这种情况下的划分粒度应该足够的细以便于能够及时的生成任意起点到终点之间的飞行路线可行性判断。移动作业类包括农林喷洒、建筑测绘等,作业空间随着地面工作区域的移动而不断的移动,分区的粒度要随着作业位置的变化而不断的进行动态分配。高度方向上的粒度差异也不容忽视,在离地面100米以内的低空空域内由于有建筑和植被遮挡较多,适宜用较小的粒度来刻画其中的空隙分布情况;100至300米的低空层障碍物明显减少,可以采用中等的粒度,重点注意不同属性的功能区域之间的衔接过渡;300米以上高空层的粒度可以适当的放大但是要注意标注出和通航的空层之间的垂直隔离带。

2.2 功能区边界生成的空间约束条件与优化

确定各区域的划分粒度之后,须在网格化数字模型上生成满足运行约束的功能区边界集合,这些边界涵盖禁飞区、限高区、高度层通道区与机动等待区等类别。禁飞区边界以风险暴露指数为首要划定依据,凡指数超出安全阈值的网格单元被合并为连续区域并赋予绝对禁入属性,边界生成过程中须评估禁飞区对周边飞行通道的挤压效应,避免因边界设定不当导致邻近通道容量骤降。限高区的边界高度值由网格内障碍物顶部高程与通信覆盖下限联合确定,当障碍物因施工发生高度变化或通信信号强度产生波动时,限高区边界须具备自动抬升或下降的响应能力。高度层通道区的边界设计需平衡飞行效率与冲突消解需求,直线通道有利于提升飞行速度,但城郊地面障碍物的不规则分布迫使通道必须实施适度弯曲以规避高风险网格,弯曲幅度由路径搜索算法

在给定起止点与高度层后自动求解。

2.3 矢量区划向可查询数字地图产品的转换

功能区边界以矢量几何形式存在,尚不能直接支撑飞行器的在线避障计算与航线选择操作,须将其转换为具备查询与计算能力的数字化空域地图产品。转换流程首先将矢量边界栅格化至与数字模型坐标系完全一致的网格阵列中,每个网格依据所属功能区获得一个基础属性编码,编码体系须预留扩展字段以便后续容纳新增的区域类型或规则变更。栅格化处理后的地图须生成两类辅助数据层,距离场层记录每个网格到最近禁飞区边界的最短距离数值,该层服务于飞行器安全裕度的保持策略制定;高度约束层给出每个网格在不同方位方向上的允许穿越最大高度,该层直接关联飞行器爬升与下降剖面的规划运算^[3]。地图产品还需嵌入区域间的连通性信息,即任意两个功能区网格之间是否存在不穿越禁飞区的高度层连续路径,连通性矩阵通过形态学骨架提取技术预先计算并固化存储。转换完成的数字地图须附带版本标识与有效时间窗口声明,同一物理空域在不同时段可对应多份并行存储的地图版本。

3 区划规则与运行态势联动的动态适配技术

3.1 运行态势连续感知与区划状态偏差检测

区划地图一经发布投入运行即面临飞行态势持续变化的客观现实,实际运行轨迹与地图预设状态之间的偏差逐步累积至一定程度时,必须触发区划适配流程以防止运行效率劣化或安全裕度降低。偏差检测的首要环节是建立区划运行状态的特征描述向量,该向量包含各功能区的实时占用比例、穿越申请驳回率与飞行平均延误时长三个观测维度,观测数值由空域管理系统自动采集飞行器上报的位置报文与地面监视设备的探测数据联合计算获得。将实时观测向量与地图设计时预期的基准向量实施多变量比对,应用统计过程控制方法判定偏差是否超越随机波动所允许的区间范围,若超越则进一步定位偏差源自某个功能区的局部过载还是跨区域的流量分布结构改变。检测机制必须区分两类偏差性质,偶发性偏差由单次应急任务或短暂气象扰动诱发,该类偏差在干扰因素消除后可自行恢复常态;趋势性偏差表现为连续多个检测周期内同一指标持续偏离基准且偏离量逐次递增,该类偏差揭示运行需求模式已经发生实质性迁移,须即刻启动区划调整流程。

3.2 区划规则参数在线调整与边界形态修正

检测到趋势性偏差之后,适配机制首先执行规则参数层面的微调操作,仅当参数调整无法使偏差收敛时才触发边界结构的实质性修正进程。规则参数调整的对象

涵盖各功能区的通行优先级权重、高度层使用许可的时间窗口以及容量上限数值,调整过程采用闭环反馈控制策略,将偏差量作为反馈输入信号经由比例-积分环节计算参数修正步长并逐次施加至数字地图的规则属性表中。每次调整结束后预留一个运行观测窗口用以评估修正效果,若偏差指标进入可接受区间则锁定当前参数组合并递增地图版本编号,若偏差方向发生反转或出现新型偏差形态则回退至调整前的参数配置并转换至边界修正分支^[4]。边界修正涉及功能区轮廓的缩放或平移操作,禁飞区边界仅在安全风险等级发生实质性变化时才允许修正,容量类功能区的边界则可根据交通流分布数据的统计特征进行适度扩张或紧缩调整。修正过程中须维持不同属性功能区之间边界的连续性与最小间距约束。

3.3 适配后区划方案的生效验证与切换流程

每一次参数调整或边界修正完成后,更新后的区划方案必须通过严格的生效验证程序方可投入实际运行,验证环节旨在发现并排除新方案中潜藏的功能冲突与运行安全隐患。验证的首个阶段为自治性检查,重新执行区划生成阶段的一致性校验规程,确认所有网格的属性赋值仍然满足无冲突归属与无歧义编码的基本要求,同时核算新方案中各类功能区的面积占比与设计预期之间的偏差是否处于容许公差范围以内。自治性审查通过后进入模拟推演阶段,利用累积的历史轨迹数据作为激励输入,在数字模型中仿真新区划方案控制下的飞行器运行过程,重点观测通道交汇节点的流量压力变化趋势与应急飞行任务的绕航代价增量,推演结果若显示任一关键节点的冲突概率超过可接受水平则返还边界修正环节重新运算^[5]。模拟推演合格的新方案进入子区域试行阶段,选取运行密度较低且风险等级偏小的部分子区域先

行启用,试行期间收集的各项反馈信息经确认无异常后再将新方案逐步扩大至全部适用空域范围。最终版本地图须与旧版本并行留存一段过渡时期,直至新版本的累计运行记录达到统计可信标准后旧版本方予注销。

结语

城郊低空空域数字化区划适配技术体系是由环境表征、区划生成、动态适配三个主要模块组成的一个整体流程,它将实体空间映射到一个可以计算的管理对象上,在网格化数字模型中使用可变的粒度达到精确度与计算效率之间的取舍,功能区边界生成方法同时把运行效率和风险控制结合在一起考虑进去,动态调整机制经过偏差检测、规则更改、方案测试循环进行不断地赋予区划体系对形势变化的适应性发展能力。技术方案已在理论上通过整个过程的串联测试,各部分的算法设计和链接逻辑具有明显的工程可行性。

参考文献

- [1]张值瑜.低空经济数字化监管的域外镜鉴与反身法规制[J].河南师范大学学报(哲学社会科学版),2026,53(2):65-72.
- [2]夏仕达,王琦,杜加懂,等.面向低空经济的数字化网络架构及标准化研究[J].移动通信,2026,50(4):24-33.
- [3]陈娉婷,吴守荣,陈梓琪,等.数字化时代低空经济和数字传媒融合发展策略探究[J].中国商论,2026,35(3):23-26.
- [4]于磊,张亚红,雷倩芳,等.低空遥感赋能高标准农田建设:测绘地理信息驱动的数字化管理新模式[J].测绘通报,2026(4):28-34,64.
- [5]张陈平,李麒阳,陈玉洁,等.低空飞行器高性能结构件轻量化低成本大规模制造关键技术[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2026,58(2):249-265.