



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402804

引用格式:支博,田勇,梁满佳,等.基于改进 Agent 的空域管制扇区划设方法[J].科学技术与工程,2025,25(7):3035-3043.

Zhi Bo, Tian Yong, Liang Manjia, et al. Improved Agent-based sectorization method of air traffic management[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 3035-3043.

## 基于改进 Agent 的空域管制扇区划设方法

支博, 田勇\*, 梁满佳, 黄潇, 吕越

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

**摘要** 为解决传统基于主观经验人为划设的扇区所存在的空域资源分配不均问题,满足如今空中交通运行需求,通过改进 Agent 方法,研究终端区三维扇区划设问题。首先,在满足传统扇区划设约束条件下,以提高扇区同交通流适应性,降低并均衡管制负荷为目标;随后,通过使用遗传算法确定 Agent 初始解位置以提高计算效率,设计优化 Agent 生长规则与空域填充规则方式改进传统 Agent 方法;最后,以上海终端区内数据进行实例分析验证,结果表明:相比现行与传统 Agent 方法所得扇区划设方案,改进 Agent 方法能够分别提升 25.84%、18.54% 的扇区形状特征与空中交通流适应性;同时在降低终端区管制负荷总和基础上,可将各扇区间管制负荷标准差分别降低 53.33%、36.58%。可见基于改进 Agent 的空域管制扇区划设方法为中国本土特色化空域规划提供参考性意见。

**关键词** 空中交通管理; 扇区划设; Agent 模型; 启发式算法; 强化学习

**中图分类号** V355; **文献标志码** A

### Improved Agent-Based Sectorization Method of Air Traffic Management

ZHI Bo, TIAN Yong\*, LIANG Man-jia, HUANG Xiao, LÜ Yue

(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**[Abstract]** In order to solve the problem of uneven allocation of airspace resources in traditional artificial sectors based on subjective experience, and to meet the needs of today's air traffic operation, the problem of three-dimensional sectorization in terminal areas was studied by improving Agent method. Firstly, while adhering to traditional sectoring constraints, the objective was to enhance sector adaptability to traffic flows and achieve a reduction and balance in air traffic control workload. Subsequently, the traditional Agent method was improved by using genetic algorithm to determine the location of Agent initial solution, so that it could enhance computational efficiency, designing and optimizing Agent growth rules and spatial filling rules. Finally, using the Shanghai terminal area as a case study, the results indicated that the improved Agent method yields sector planning scheme with respective improvements of 25.84% and 18.54% in sector shape characteristics and adaptability to airborne traffic flows. Simultaneously, while reducing the overall terminal area air traffic control workload, the standard deviation of control workload among sectors was reduced by 53.33% and 36.58%, respectively, compared to the existing and traditional Agent methods. It can be seen that the Research on Improved Agent-Based Sectorization Method provides reference for the local characteristic airspace planning of our country.

**[Keywords]** air traffic management; sectorization; Agent modeling; genetic algorithm; reinforcement learning

随着中国民航运输业近年来持续高质量发展<sup>[1]</sup>,现有空域容量与交通需求间矛盾日益明显<sup>[2]</sup>。为保证空域安全,增加空域容量,将给定的空域划设为更小的区域,划设后更小的区域即为管制扇区<sup>[3]</sup>。而终端区内航空器运行情况复杂多变,扇区多为依据国际民航组织文件,结合主观经验划设,导致管制负荷不均,限制空域容量<sup>[4]</sup>。

伴随空中交通运输管理正从粗放化管理演变为智能化辅助决策下的精准管理<sup>[5]</sup>。国内外学者

致力采用图论方法与智能算法科学解决扇区划设问题。Venugopalan 等<sup>[6]</sup>使用航路空域同步优化框架,减轻管制协调负担并保留新旧扇区形状的相似性。Granberg 等<sup>[7]</sup>以斯德哥尔摩阿兰达机场为实例,为终端区动态扇区划设提供了概念验证。王毅鹏<sup>[8]</sup>对功能性栅格进行两次 Voronoi 剖分,针对远期交通流超出扇区管制能力的问题,提出了功能性空域扇区划设优化模型,并利用遗传算法和仿真软件 TAAM(total airspace and airport modeler)进行优

收稿日期:2024-04-17 修订日期:2024-06-05

基金项目:江苏省青年科学基金(BK20230892);江苏省双创博士人才项目(JSSCBS20220212)

第一作者:支博(2001—),男,汉族,上海人,硕士研究生。研究方向:空中交通管理。E-mail:zhi\_bo1@nuaa.edu.cn。

\*通信作者:田勇(1976—),男,汉族,湖北洪湖人,博士,教授。研究方向:绿色民航、空中交通管理。E-mail:tianyong@nuaa.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

化。Oktal 等<sup>[9]</sup>提出了应用于空域划分的多目标混合整数数学模型,利用地理信息系统(geography information system, GIS)对所构建模型标量化处理。Wong 等<sup>[10]</sup>提出基于动态空域划分的滚动时域优化方法,规划和处理动态变化的扇区,并对所提出的方法进行了性能评估。Mohammed 等<sup>[11]</sup>以动态多目标优化形式对模糊空域扇区划设问题进行建模,并使用元启发式算法求解,通过发放问卷收集管制员主观数据,基于数据模拟数值算例对所提出模型进行说明。叶志坚等<sup>[12]</sup>采用自顶而下的 Voronoi 图切割方法,一次性切割成形,并对蚁群算法进行改进,提高了计算过程的收敛速度。陈姝含<sup>[13]</sup>通过已知空域结构,提出基于最小长度描述原则的航迹分段数学模型进行数据分析,将扇区内交通流的运行趋势尽量相同作为优化目标,以北京终端管制区为例进行了扇区划设。Ruano<sup>[14]</sup>优化了名为 SECTORIA 的扇区优化器,该工具对空域可能配置进行等级排序从而以时空角度选择最佳的扇区配置,改进后的工具增加了对扇区容量约束,更好处理不可避免的流量过载。徐灿等<sup>[15]</sup>结合垂直高度的层次聚类与水平方向的 Voronoi 图划分,根据飞行性质赋予终端区各空域单元功能属性。Zhou 等<sup>[16]</sup>提出了名为 AirFusion 的机器学习框架,旨在通过动态空域扇区化(dynamic airspace sectorization, DAS)来平衡空域需求和容量,创新使用时间融合变压器进行空域需求和容量预测,实例证明模型具有高准确度。Zhang 等<sup>[17]</sup>提出一种三维空域扇区多目标优化框架,包括飞行聚类、扇区生成、工作负载评估和扇区优化四个核心模块,通过对新加坡空域实际运行数据的优化结果进行分析,获得多样化的最优扇区化方案。

当前研究已取得了丰富成果,鉴于此,研究旨在进一步解决以下问题:①过去扇区划设问题中许多强化学习方面算法面对更新换代迅速的扇区划设问题模型难以兼顾求解性能、扇区形状、计算复杂度等关键要素,亟须在传统扇区划设方法基础上实施改进。②传统 Agent 方法具有扇区划设精细度高的特点,但在直棱柱、凸性约束等扇区强约束条件方面存在不合理情况<sup>[18]</sup>。③多数扇区划设研究主要针对航路区域进行实例分析,对终端区进行研究的文献较少,而少数终端区扇区划设研究中考虑的也仅为单机场终端区,实例未选择多机场终端区。研究通过搭建改进 Agent 方法的扇区划设框架以解决上述不足的同时,期望在多机场终端区环境下使得扇区形状适应主要交通流,增加终端区容量;并实现管制员工作负荷的均衡,提升飞行安全

性。为提升空管部门实际运行高效性具有重要指导意义。

## 1 航迹数据处理

使用华东空管局空中交通管制中心流量管理室提供的 2022 年 6 月 15—17 日内高峰时段上海终端区内北向运行雷达记录的航迹数据,数据内容包括航班号、航迹点时间、航迹点三维坐标(经度、纬度、高度)、航向角、速度。作为多机场运行终端区,航空器在运行过程中,速度不断变化。存在进场航班速度逐渐降低,而离场航班速度逐渐增大的特点,而雷达更新时间是保持不变的,导致了航迹数据会出现外疏内密的情况,对于该特点,研究针对性对原始数据进行清洗、分类与重采样。

实际终端区中所记录的雷达数据由于信号覆盖等问题存在航班号字段缺失的情况,需删去缺失航班号字段的雷达航迹。其次,筛除异常数据,主要包括:①水平范围或垂直范围不在终端区内的雷达航迹数据;②飞机落地速度减为 0 后,在同一位置仍不断记录航迹;③一个架次的航班在相同记录时间内有多条位置高度等完全不同的记录;④航迹任意两点间出现不规则变化,该航迹明显异于相邻时段的正常航迹。

清洗完异常雷达航迹数据;根据航迹平均上升率将航迹数据划分为三个类别飞行性质:进场、离场和飞越航班。

最后,针对记录的雷达数据点时间间隔过短,以及在短时间内航空器位置不会出现大幅度变化所导致的航迹数据冗余,有必要对每一条航迹进行重新采样。在维持其有效飞行特性的前提下,统一每条航迹的时间参照,以便在相同的时间参照下统一处理航迹数据。数据重采样使用等间隔采样法,利用线性插值法在原始航迹数据的基础上补全飞行航迹,采样间隔为 5 s。研究共计选取 2 150 架次航班的 519 675 个航迹坐标点。

## 2 问题描述

### 2.1 空域栅格化建模

终端区空域分割为三维空域栅格,各空域栅格内包含部分雷达航迹,设某时间段内整个终端区运行航班架次为  $N$  架,航迹数据集  $T$  表示为

$$T = \{P_1, P_2, \dots, P_N\} \quad (1)$$

式(1)中:第  $i_{\text{air}}$  架航班的航迹数据  $P_{i_{\text{air}}}$  表示为

$$P_{i_{\text{air}}} = \{p_{i_{\text{air}},1}, p_{i_{\text{air}},2}, \dots, p_{i_{\text{air}},M}\} \quad (2)$$

式(2)中:  $p_{i_{\text{air}},j_{\text{tra}}}$  为按时间先后排序的第  $i_{\text{air}}$  架航班

航迹的第  $j_{tra}$  个航迹点,并假设该航空器共有  $M$  个航迹点,定义每个航迹点为六维向量  $p_{i_{air}j_{tra}}$ ,即

$$p_{i_{air}j_{tra}} = \{x, y, h, d, v, t\} \quad (3)$$

式(3)中:  $x$  为经度;  $y$  为纬度;  $h$  为高度;  $d$  为航向;  $v$  为速度;  $t$  为航迹被雷达捕捉的时间。

即终端区空域表示为

$$B = \cup_{u,v,z} L(P')_{uwz} \\ P' = \{p_{i_{air}j_{tra}^1}, p_{i_{air}j_{tra}^2}, \dots, p_{i_{air}j_{tra}^M}\}, \\ 1 \leq i_{air} \leq N, 1 \leq j_{tra} \leq M \quad (4)$$

式(4)中:  $B$  为整个空域;  $L(P')_{uwz}$  为存有航迹信息的空域栅格;  $P'$  为该单个栅格包含的航迹点集合,  $i_{air}$  与  $j_{tra}$  分别表示该栅格内某航班对应的某航迹点;  $u, v, z$  分别为栅格中心的经度、纬度和高度索引,表达式为

$$\begin{cases} u = \frac{R_x - R_{\min(x)}}{R_{xSize}} + 1 \\ v = \frac{R_y - R_{\min(y)}}{R_{ySize}} + 1 \\ z = \frac{R_h - R_{\min(h)}}{R_{hSize}} + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:  $R_x, R_y, R_h$  分别为栅格底面中心点经纬度和高度;  $R_{\min(x)}, R_{\min(y)}, R_{\min(h)}$  分别为包围终端区  $B$  的各最小直棱柱栅格中经纬度和高度最小值;  $R_{xSize}, R_{ySize}, R_{hSize}$  为预先定义的直棱柱参数。

## 2.2 模型优化目标

模型以最大化扇区形状与主要交通流适应性;降低并均衡管制负荷为优化目标。

合理终端区扇区划设应使扇区形状特征与主要交通流走向保持对齐,通过计算第  $i_{sector}$  个扇区  $S_{i_{sector}}$  的累积交通共性  $C_S$  来量化这种适应性,即

$$C_S = \sum_{\substack{i_{grid}j_{grid} \in S \\ j_{grid} \in Adj_{i_{grid}}}} G_{i_{grid}j_{grid}} \\ G_{i_{grid}j_{grid} | j_{grid} \in Adj_{i_{grid}} j_{grid} \neq i} = tr_{i_{grid}j_{grid}} \quad (6)$$

式(6)中:栅格  $i_{grid}$  和  $j_{grid}$  为扇区  $S_{i_{sector}}$  中的相邻栅格;  $G_{i_{grid}j_{grid}}$  为栅格  $i_{grid}$  与  $j_{grid}$  的共性;  $Adj_{i_{grid}}$  为栅格  $i_{grid}$  的相邻栅格的集合;  $tr_{i_{grid}j_{grid}}$  定义为在给定时间间隔内航班的航迹位置从栅格  $i_{grid}$  转移到相邻栅格  $j_{grid}$  的总次数。

空中交通管制员的工作负荷是空域运行安全的关键因素。基于式(4),定义空域栅格  $L_{i_{grid}}(P')_{uwz}$  都有相关交通流量负载  $w_{i_{grid}}$ ,表示空域内经过该栅格的航班数,栅格交通负载值之和决定空域总交通负载  $W_B$  并通过期望整个空域  $B$  内的扇区总数  $S_B$  (输入参数),得平均交通量  $\mu$ ,表达式为

$$W = \sum_{i_{grid}=1}^{N_{grid}} w_{i_{grid}} \\ \mu = \frac{W}{S_B} = \frac{\sum_{i_{grid}=1}^{N_{grid}} w_{i_{grid}}}{S_B} \quad (7)$$

基于式(4),分配给扇区  $S_{i_{sector}}$  的工作负载  $W_S$  计算公式为

$$W_S = \sum_{i_{grid} \in g_S} w_{i_{grid}} \quad (8)$$

式(8)中:  $g_S$  为扇区  $S_{i_{sector}}$  的空域栅格集合。

扇区  $S$  工作负载处在允许上下限之间时,认为该扇区的管制负荷是合理均衡的,可表示为

$$(1 - \varepsilon)\mu \leq W_S \leq (1 + \varepsilon)\mu \quad (9)$$

式(9)中:  $\varepsilon$  为可行扇区工作负荷与平均值之间差异系数,在  $0 \sim 1.0$  (通常为  $0.05 \sim 0.20$ )<sup>[19]</sup> 取值。

扇区的工作负荷标准差  $F(W_S)$  可定义为

$$F(W_S) = \sqrt{\frac{1}{S_B S_{i_{sector}=1}} \sum_{i_{grid}=1}^{S_B} (W_S - \mu)^2} \quad (10)$$

## 2.3 评估指标

为评估划设方法求得的扇区划设结果,根据各优化目标选择相应的评估指标。

平均飞越扇区时间侧面体现空中交通流走向是否同扇区形状特征一致,计算公式为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i_{air}} (t_{i_{air}}^{ex} - t_{i_{air}}^{en}) \quad (11)$$

式(11)中:  $n$  为扇区内航空器总架次;  $t_{i_{air}}^{en}, t_{i_{air}}^{ex}$  分别为航空器进入与离开扇区的时刻。

量化管制员监视负荷,加权多种交通复杂性因素,整合成扇区动态密度。动态密度能较好地反映划设方案是否减轻管制员的工作负载<sup>[20]</sup>。对扇区  $S_{i_{sector}}$  的动态密度  $\rho$  及其标准差  $SD(\rho)$  定义为

$$\rho = \frac{\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3 + \lambda_4 N_4 + \lambda_5 N_5}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} \quad (12)$$

式(12)中:  $N_1$  为给定时间内单个扇区航空器架次;  $N_2$  为航向变化大于  $15^\circ$  的航空器架次;  $N_3$  为速度变化大于  $18 \text{ km/h}$  的航空器架次;  $N_4$  为高度变化大于  $250 \text{ m}$  的航空器架次;  $N_5$  为存在冲突可能的航空器数量,本研究认为航空器间横向距离小于  $10 \text{ km}$ ,垂直距离小于  $300 \text{ m}$  存在冲突可能;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  为主观权重。

## 2.4 约束条件

研究约束条件采用传统扇区划设问题的强约束,具体如下:①扇区连续性,一个扇区的管制工作必须在连续空间内完成;②扇区完整唯一性,划设空域的管制责任应当具有唯一性,具体到研究中体现为空域中任意栅格有且只能属于唯一的扇区;

③扇区直棱柱约束,雷达管制工作中,雷达屏幕显示扇区平面投影,为防止管制员视线混淆,扇区划设过程中需将三维扇区设为直棱柱形状,要求扇区上下表面全等,且侧棱与上下表面垂直。对约束条件③的举例如图 1 所示。

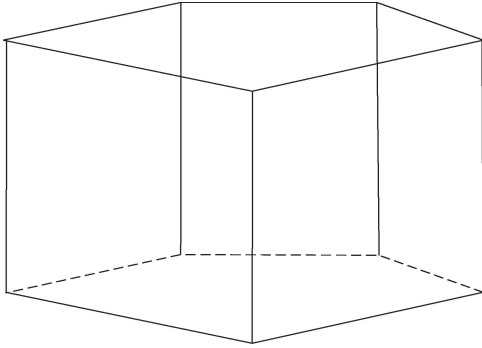


图 1 扇区直棱柱约束示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sector straight prism constraint

### 3 改进方法

本研究 Agent 属于慎思型 Agent。慎思型 Agent 能够对当前感知做出反应的同时,保留有关于过去的信息<sup>[20]</sup>。

本研究 Agent 的基本结构为设立感知器,执行器和决策模块。其中感知器根据上文模型的优化目标,在栅格化后空域中感知当前最优栅格组;执行器则为执行归纳分配栅格组给各自所属的空域扇区的操作;而决策模块则为 Agent 的核心,包括设定 Agent 的动作规则,以聚类形式将栅格分配给扇区。改进 Agent 方法体现在相较传统方法,改进了决策模块,使用元启发式算法优化初始解位置、设计更为合理的动作规则,包括生长规则与空域填充规则。

Agent 间的通信方式选用间接通信,已得到分配的栅格在空域填充规则启用前,将不再参与分配。而未得到分配的空域栅格认为是共享资源,而每次迭代过程中未分配栅格的累积交通共性值等属性认为是当前状态,各 Agent 能同时收到环境中共享资源或状态的修改以完成信息传递。

#### 3.1 遗传算法优化初始解

研究表明,Agent 所在初始栅格位置对于时间计算成本的影响巨大<sup>[21]</sup>。合理的 Agent 初始位置将大大提高后续空域扇区生长的速度,降低计算的时间成本。

设置初始 Agent 数量,基于 Agent 数量和空域内栅格总数量得遗传算法种群中染色体个体数量  $N_s$  为

$$N_s = \frac{M}{N_A} \quad (13)$$

式(13)中: $M$  为空域内栅格总数量; $N_A$  为 Agent 解数量。 $N_A$  个栅格组成一个染色体,其中基因表达为栅格中心点经纬度、高度。

对于初始解位置选择,考虑两方面因素。一是染色体中栅格交通负载,初始解栅格的交通负载越大表明在该栅格处航班的交通流密度越大。相比交通负载小的栅格,Agent 在交通负载大的栅格生长速度更快。优化目标公式为

$$W_{i_\alpha} = \sum_{q=1}^M P'_q, \quad q \in i_\alpha, \alpha \in N_s \quad (14)$$

式(14)中: $W_{i_\alpha}$  为染色体  $i_\alpha$  中栅格交通流量负载总和; $\alpha$  为染色体编号; $P'_q$  为栅格  $q$  的交通流量负载。

二是栅格中心点坐标间的欧式几何距离,由于模型中交通流是连续的,如果只注重栅格交通负载将可能会造成选择初始栅格位置时,在交通流密度最大的小范围区域内选择了多个初始解位置,导致 Agent 在生长过程中过早相遇而减缓生长速度。同时,由于栅格体积相对终端区足够小,本身可看成一个点。其坐标分别对应经度、纬度与高度,需要进行单位转换,研究借鉴了半正矢公式,即

$$d = 2r \arcsin \left[ \sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式(15)中: $d$  为两栅格间米制距离; $r$  为地球半径; $\lambda$  为经度; $\varphi$  为纬度。因此对栅格间几何距离求和的计算公式为

$$D = \sum_{i_{grid}, j_{grid} \in N_B} \sqrt{d_{i_{grid}, j_{grid}}^2 + h_{i_{grid}, j_{grid}}^2} \quad (16)$$

式(16)中: $h_{i_{grid}, j_{grid}}$  为第  $i_{grid}$  个与第  $j_{grid}$  个栅格间高度差绝对值。该部分最后对目标  $z$ -score 标准化得适应度函数,即

$$F(A) = \lambda_1 Z A_{W_{i_\alpha}} + \lambda_2 Z A_D + k \quad (17)$$

式(17)中: $A$  为种群个体; $Z A_{W_{i_\alpha}}$  为优化目标  $W_{i_\alpha}$  的标准化结果; $Z A_D$  为优化目标  $D$  的标准化; $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  代表权重。对个体中栅格距离过近情况,  $F(A)$  引入惩罚函数  $k$ , 当满足约束条件时  $k = 0$ , 不满足时为  $-\infty$ 。染色体进行多次迭代的交叉变异,其适应度函数最大值作为 Agent 初始解位置。

#### 3.2 改进后 Agent 的生长规则

设置生长规则将每步确定最优的栅格组添加入扇区,该操作将会赋予每个 Agent 一次奖励值,最优栅格组代表对 Agent 的奖励值当前最大。

由式(8)得 Agent 当前工作负载不超过工作负载上限,执行生长规则。生长规则首先根据Agent初始位置生长直棱柱。

**步骤一** 在初始栅格位置选定相邻栅格中所有累积交通共性值  $C_{i,j}$  不为零的栅格。

**步骤二** 获得结果在经纬度面投影并依照投影与高度层数构建直棱柱,将栅格交通负载值添加到 Agent 当前的工作负载当中。

通过移动比率均衡增长各 Agent 工作负载。移动比率指迭代中确定低工作负载的 Agent 个数以执行生长规则,取值范围为 0.0 ~ 1.0,该部分根据之前传统 Agent 方法的研究取值为 0.18<sup>[18]</sup>。产生的初始直棱柱形状如图 2 所示。

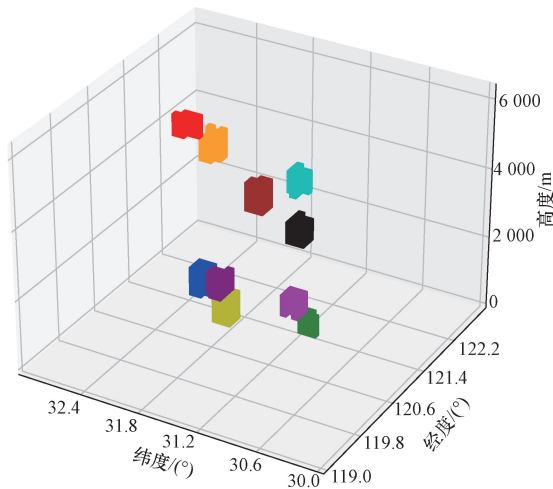


图2 基于 Agent 初始位置生长的直棱柱结构  
Fig. 2 Straight prismatic structure based on the initial position of the Agent

构建初始位置直棱柱后,进行栅格聚类,分为以下步骤。

**步骤一** 通过移动比率得低工作负载的Agent,基于当前栅格组,寻找与栅格组相邻且未被Agent占据的栅格,并选择其中累积交通共性值最高栅格。

**步骤二** 确定目标栅格后,以目标相对当前 Agent 栅格组的高度位置,产生水平或垂直几何平面的栅格组生长方式。新加入的栅格标记为已分配栅格,不再被其余 Agent 分配,使得条件②得到满足;栅格组交通负载属性累加至 Agent 的工作负载。

**步骤三** 计算并排序 Agent 的工作负载大小,重复步骤一、二。

若某个 Agent 执行生长规则时无法再寻找到目标栅格或在添加栅格组交通负载过程中,Agent 工作负载大于设定工作负载上限时,则停止工作。

生长规则始终保证 Agent 增长的栅格组为平面级别,所得扇区结果满足约束条件③,解决了传统方法中易违反直棱柱约束与计算成本高的不足。最终,整个生长规则的具体流程如图 3 所示。

改进规则的亮点在于改进后 Agent 的生长规则先构造了投影为凸多边形的初始直棱柱扇区,并在后续栅格增长过程中基于这些直棱柱添加栅格组,不破坏其直棱柱的属性,同时自始至终规则保证了 Agent 所属空域栅格的生长是满足空域内各扇区交通负载均衡增长。

### 3.3 空域填充规则

生长规则可能导致某些栅格归属冲突无法分配

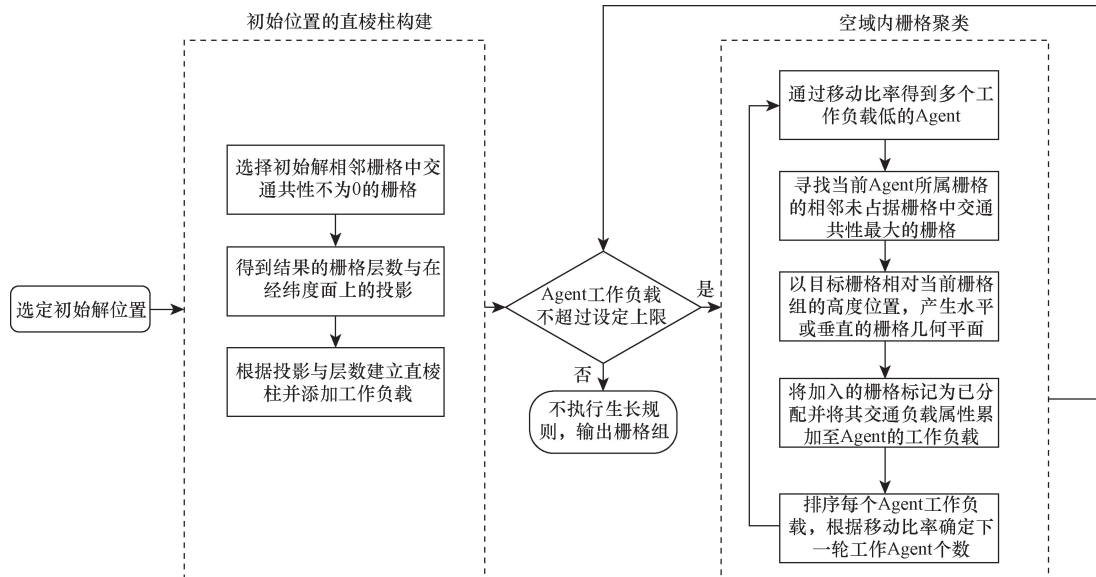


图3 改进后 Agent 生长规则流程图  
Fig. 3 Flow chart of improved agent growth rules

给任何 Agent, 需要空域填充规则重新组织这些栅格。空域填充规则作为改进生长规则的补充, 确保了空域栅格的归属同时不破坏模型约束条件, 保证扇区划设结果的合理性。只有在所有 Agent 完成生长规则后空域仍存在未分配栅格时, 才会执行此规则, 步骤如下。

**步骤一** 寻找终端区内所有未分配的栅格。

**步骤二** 确定未分配栅格上方或下方 Agent。如果在未分配栅格上方的 Agent 数量小于栅格下方 Agent 的个数, 则由栅格上方的 Agent 参与执行空域填充规则; 否则由栅格下方的 Agent 执行规则。

**步骤三** 对各激活空域填充规则的 Agent 执行以下流程。

(1) 确定水平层, 要求与 Agent 所属扇区里横向水平栅格配置是一致, 并包含未分配的栅格。

(2) 取所有 Agent 的已分配栅格与该水平层中栅格的交集。

(3) 识别交集中栅格各属于哪些 Agent。

(4) Agent 释放这些水平层中的栅格。

(5) Agent 更新各自栅格组水平层与工作负载。

## 4 实例分析

第三部分叙述了使用改进 Agent 方法完整得到一次扇区划设方案的流程, 随后研究根据设定的训练迭代次数, 最终得到基于改进 Agent 的上海终端区扇区划设方案。

### 4.1 参数设定

基于上海终端区现实边界确立高度范围为 0 ~ 6 300 m 的空域。进行空域栅格化处理, 由于终端区的 300 m 间隔规定, 取因数设置栅格高度间隔为 100 m; 栅格选择以 6.66 km 为底面边长参数。

设置模型输入扇区个数取值为当前上海市终端区北向运行过程中实际使用的扇区个数, 即扇区个数  $S = 11$  个; 扇区工作负荷与均值差异系数  $\varepsilon_w = 0.10$ ; Agent 的工作负载上限为 13 427.09 架次。约束条件中任意栅格间距离  $d < 6.66$  km 时触发适应度函数中的惩罚函数  $k$ 。由于在迭代次数普遍达到 140 次左右时, 得到的扇区划设方案大体结构已经十分类似, 故设定使用改进 Agent 方法的迭代次数为 150。

### 4.2 改进 Agent 方法生成的扇区划设方案

根据 4.1 节各项参数, 使用改进 Agent 方法实现上海终端区空域扇区划设并可视化, 如图 4 所示。

由于研究使用遗传算法优化初始解位置以及执行生长规则的缘故, 结果出现了相同经纬度范围

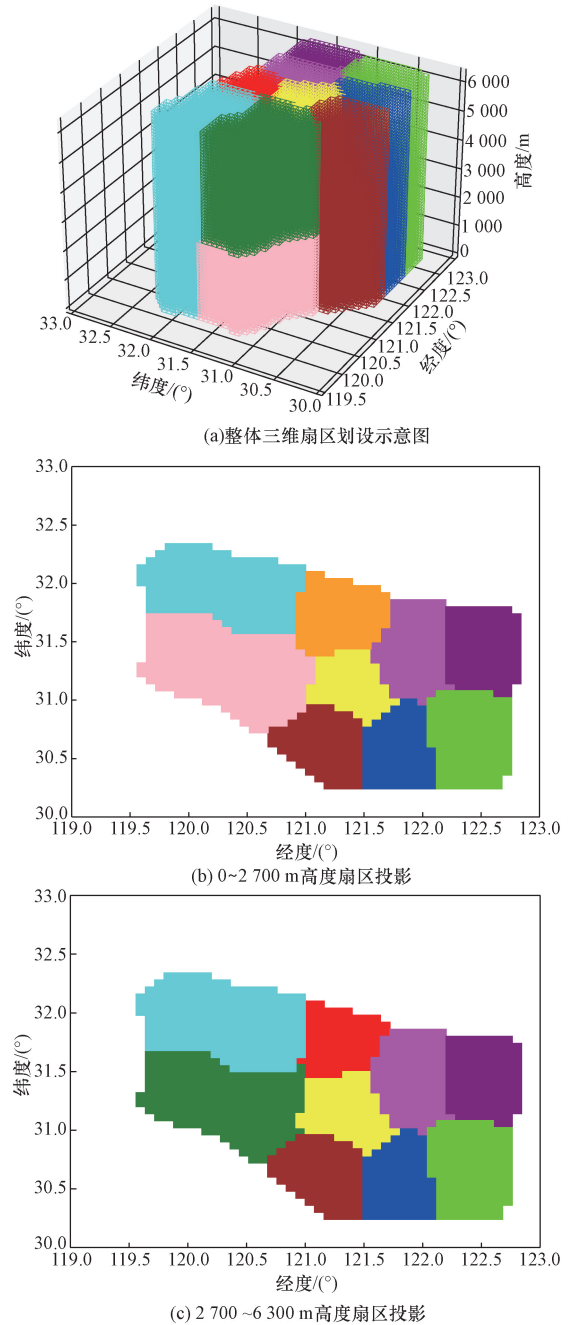


图4 改进 Agent 方法生成的上海终端区扇区划设方案

Fig. 4 Sectorization scheme of the Shanghai terminal area generated by the agent method is improved

内存在多个不同高度范围的扇区情况。图 4(b) 所示为 0 ~ 2 700 m 高度上的扇区经纬度投影; 图 4(c) 所示为 2 700 ~ 6 300 m 高度范围内扇区经纬度投影。

而事实上, 目前上海终端区高低扇区分界正是 2 700 m。所谓高低扇区指基于高度处理不同飞行阶段航班的扇区, 其中高扇区用于服务初始进场、最终离场和较高高度飞越航班, 而低扇区处理五边进近、初始爬升离场航班。因此研究部分结果与实

际运行设计存在不谋而合之处,侧面体现改进 Agent 方法能够完成上海终端区管制扇区划设工作。

同时可以发现,改进后 Agent 方法所得结果解决了传统方法所得扇区划设方案易出现的嵌入式扇区与违反直棱柱约束问题,划设扇区均为投影底面为凸多边形的直棱柱,符合现实中实际扇区运行情况。

### 4.3 对比与分析

将改进 Agent 方法所得扇区划设方案同现行与传统 Agent 方法的扇区划设方案对比,得到结果如下。

(1)计算各方案中扇区的平均飞越时长四分位数。 $Q_1$  代表第一四分位数; $Q_2$  表示第二四分位数,即中位数; $Q_3$  代表第三四分位数,且  $Q_1 < Q_3$ ,具体数值如表 1 所示。

对比三种方案下各自 11 个扇区的平均飞越扇区时间得到方案四分位数,可得改进 Agent 方法的第

表 1 平均飞越扇区时长四分位数

Table 1 Average crossover sector duration quartile

扇区划设方案	飞越时长/s		
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
现行扇区划设方案	183.63	263.39	341.20
传统 Agent 方法	193.13	279.60	345.00
改进后的 Agent 方法	307.18	331.44	367.41

一与第三四分位数最大,为 307.18 s 与 367.41 s;对比中位数得改进方案平均飞越扇区时长分别提升了 25.84%、18.54%。表明在大部分情况下,改进 Agent 方法得到的扇区划设方案平均飞行区域时间更长,改进 Agent 方法所得扇区形状特征能更好对齐主要交通流,使得终端区容量最大。

(2)据式(12)的交通复杂因素,对三种划设方案中 11 个扇区的相关航空器架次数据进行了处理。得扇区管制监视负荷大小与分布情况,结果如图 5 所示。

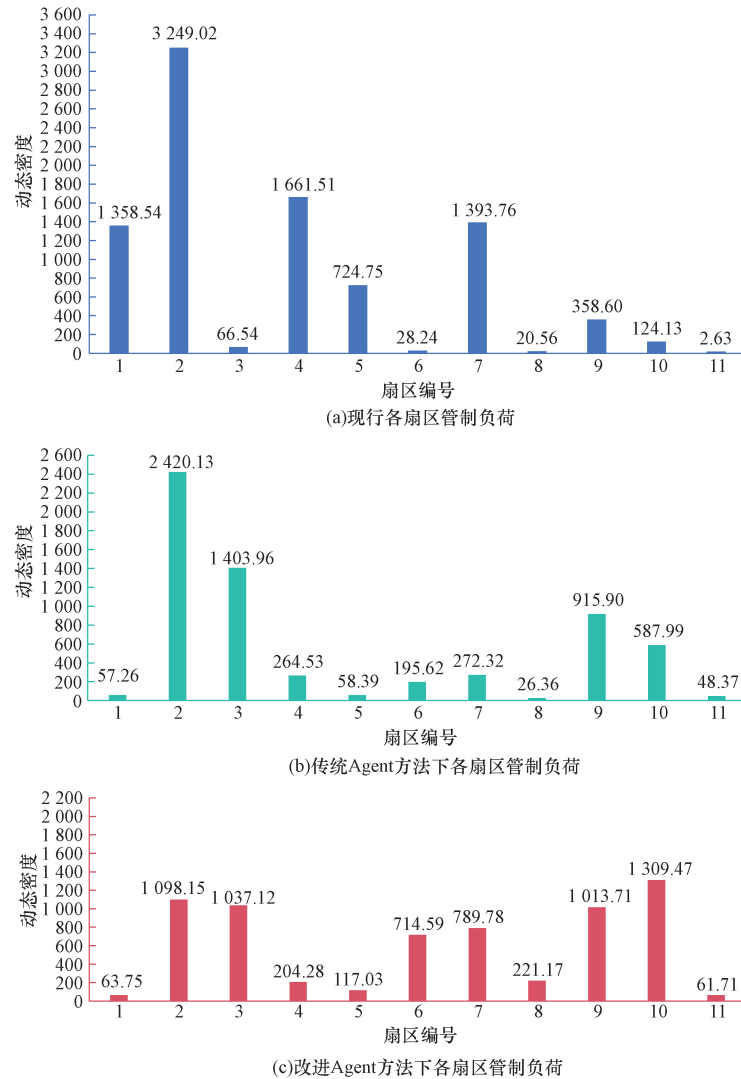


图 5 三种扇区划设方案的动态密度柱状图

Fig. 5 Dynamic density histogram of the three sectorization schemes

研究根据得到的各扇区动态密度数值,进一步对不同方案下各扇区动态密度求和,计算终端区管制负荷,对比各方法所得的扇区划设方案的管制监视负荷总和,并计算管制负荷标准差,结果如表 2 所示。

表 2 不同扇区划设方案管制监视负荷总和与标准差  
Table 2 The sum and standard deviation of the monitoring load in different sectorization schemes

项目	现行扇区划设方案	传统 Agent 方法	改进 Agent 方法
管制负荷之和/架次	8 987.28	6 250.83	6 629.71
管制负荷之和相比现行方案改进/%	—	30.45	26.23
管制负荷标准差/架次	1 021.61	751.85	476.81
管制负荷标准差相比现行方案改进/%	—	26.41	53.33

经计算,改进 Agent 方法划设的扇区相较现行方案,可将管制负荷之和降低 26.23%,管制负荷标准差降低 53.33%,而对比改进前后的 Agent 方法,改进 Agent 方法显著降低了终端区内管制负荷标准差,证明改进 Agent 方法所得的扇区划设方案能够在降低终端区管制负荷总和的同时,显著实现各扇区间管制负荷的均衡。

## 5 结论

本研究为解决空中交通管制负荷不均、航班延误严重等问题,在当前倡导民航安全高效发展的大背景下,聚焦空域管制扇区,展开基于改进 Agent 的扇区划设方法的研究,选择以终端区扇区划设问题为切入点,归纳优化目标与约束条件,并提出实例分析的评估指标。实例采用上海终端区空域进行扇区划设,相比传统 Agent 方法与现有方案,提出的改进 Agent 方法有效提高了扇区形状与空域交通流向符合度,同时降低了终端区管制负荷总和与标准差,显示了该方法在实际空管扇区运行过程中的巨大潜力,得到如下结论。

(1) 针对传统 Agent 方法计算成本高,扇区生长速度慢的缺点,创新提出遗传算法优化 Agent 初始解位置的选择,以求达到初始 Agent 解的位置能够使得后续扇区快速生长的目的,优化过程引入多目标进行量化并加权,同时考虑初始解过近所导致的前提假设出现矛盾,在适应度函数中设置强约束,提高研究严谨性。

(2) 研究创新性针对 Agent 生长规则与空域填充规则进行改进,在保留传统强化学习方法在划设精细度方面优点的同时,解决了传统 Agent 方法所

得扇区划设方案易违反多种扇区划设约束的情况,结果表明,相比现行与传统 Agent 划设方法得到扇区划设方案,改进后方案扇区形状与空中交通流向符合度分别提升 25.84%、18.54%,同时各扇区间管制负荷标准差降低了 53.33%、36.58%。

(3) 研究存在的不足在于:未考虑空域实际运行过程中的强动态因素;只存在同种扇区划设方法的改进前后的纵向对比,缺少不同类别方法的横向对比。未来可以进一步研究如何降低终端区的管制负荷并考虑在终端区扇区划设过程中,军方活动或恶劣天气等动态因素对扇区正常运行的影响。同时结合其他研究成果进行比较得到不同扇区划设方法的特点。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2022 年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2023.  
Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2022 [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2023.
- [2] 邢大伟, 田勇, 万莉莉, 等. 降低噪声影响的进场航线路径优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 287-294.  
Xing Dawei, Tian Yong, Wan Lili, et al. Path optimization of approach route with noise reduction[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(13): 287-294.
- [3] Yin C W S, Venugopalan T K, Suresh S. A multi-objective approach for 3D airspace sectorization: a study on Singapore regional airspace[C]. //2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). New York: IEEE, 2016: 1-8.
- [4] Zou X, Song J Y, Cheng P, et al. Sectorization and configuration transition in airspace design[J]. Mathematical Problems in Engineering: Theory, Methods, and Applications, 2016, 6: 6048326.
- [5] 袁立罡. 终端区动态交通特征与运行态势研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
Yuan Ligang. Research on dynamic traffic characteristics and operation situation of terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [6] Venugopalan T K, Yin W, Suresh S, et al. Simultaneous optimization of airway and sector design for air traffic management[J]. Journal of Air Transportation, 2018, 26(1): 8-22.
- [7] Granberg T A, Polishchuk T, Polishchuk V, et al. Integer programming: based airspace sectorization for terminal maneuvering areas with convex sectors[J]. Journal of Air Transportation, 2019, 27(4): 169-180.
- [8] 王毅鹏. 空域扇区动态规划与优化研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
Wang Yipeng. Research on airspace sector dynamic planning and optimization [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [9] Oktal H, Yaman K, Kasimbeyli R. A mathematical programming approach to optimum airspace sectorisation problem[J]. The Journal of Navigation, 2020, 73(3): 599-612.
- [10] Wong C S Y, Suresh S, Sundararajan N. A rolling horizon optimi-

- sation approach for dynamic airspace sectorization[J]. IFAC Journal of Systems and Control, 2020, 11: 100076.
- [11] Mohammed G, El Bekkaye M. Fuzzy dynamic airspace sectorization problem [M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 229-250.
- [12] 叶志坚, 王建忠, 张召悦, 等. 图切割快速生成扇区的蚁群算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 297-307.  
Ye Zhijian, Wang Jianzhong, Zhang Zhaoyue, et al. Ant colony algorithm for fast sector generation based on diagram cutting[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 297-307.
- [13] 陈姝含. 基于航迹数据的终端区功能扇区划分[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.  
Chen Shuhan. Functional sector division of terminal area based on track data [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [14] Ruano F S. Improvements in sectorization optimizer within the dynamic airspace configuration concept[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [15] 徐灿, 田勇, 牛科新, 等. 考虑空域功能性的终端区内三维扇区划设方法研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12674-12682.  
Xu Can, Tian Yong, Niu Kexin, et al. Three-dimensional sectorization in terminal area considering airspace function[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12674-12682.
- [16] Zhou W, Pham D T, Alam S. AirFusion: A machine learning framework for balancing air traffic demand and airspace capacity through dynamic airspace sectorization[C]// 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Bilbao: IEEE, 2023: 5324-5331.
- [17] Zhang W, Hu M, Yin J, et al. Multi-objective 3D airspace sectorization problem using NSGA-II with prior knowledge and external archive[J]. Aerospace, 2023, 10(3): 216.
- [18] Tang J J, Alam S, Lokan C, et al. A multi-objective approach for dynamic airspace sectorization using agent based and geometric models[J]. Transportation Research Part C, 2011, 21(1): 89-121.
- [19] Zelinski S. A comparison of algorithm generated sectorizations [J]. Air Traffic Control Quarterly, 2010, 18(3): 279-301.
- [20] Genders W, Razavi S. An open-source framework for adaptive traffic signal control [J]. arxiv preprint arxiv, 2019, 1909.00395.
- [21] Kicingner R, Yousefi A. heuristic method for 3d airspace partitioning: genetic algorithm and agent-based approach [C]// 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS). Hilton Head: AIAA, 2019: 7058.