

基于 Voronoi 图和改进 K-means 的扇区优化研究

林福根^{1,2}, 温祥西^{1,2}, 吴明功^{1,2}, 衡宇铭^{1,2}

(1.空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051; 2.国家空管防相撞技术重点实验室, 陕西 西安 710051)

摘 要:扇区划分是空中交通管制的一项重要工作,合理的扇区划分能够提高空域的使用率,保障航空器的飞行安全。鉴于平峰时段的扇区划设不能很好适用于复杂空情的现状,提出一种基于 Voronoi 图和改进 K-means 的扇区优化方法。依据空情态势构建冲突网络,结合航空器速度障碍关系和复杂网络理论提出了扇区综合管制负荷计量方式。依据负荷值采用改进 K-means 聚类方法确定了合理的聚类中心作为 Voronoi 图的生成元,从而使用 Voronoi 图的划分方法生成合理边界来优化扇区。采集厦门空域管制扇区数据作为仿真场景进行了计算分析,结果表明,在繁忙时段,优化后的扇区管制负荷平均方差相比原扇区降低了 66.04%,平峰时段降低了 13.88%,达到了均衡扇区负荷的目的,验证了扇区优化方法的有效性,为现有的扇区划设工作提供了参考依据。

关 键 词:空中交通管制;扇区优化;K-means;速度障碍法;Voronoi 图
中图分类号:V355.1;V249 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2023)01-0170-10

随着我国航空运输业的高速发展,空中交通流量持续增加,使得空中交通复杂度不断增加,导致机场区域出现交通拥堵状况,航空运输效率、飞行安全等多方面出现的问题越来越严峻,尤其是在飞行交叉汇聚点多、结构复杂、飞行量大的机场终端区。为便于管理空中交通,通常将终端区划分为多个扇区,由多个管制员协同指挥调配。然而,在同一时刻会出现不同扇区内航空器数量差异非常大的情况,这就导致有些扇区繁忙时刻,管制员的负荷激增带来安全隐患。对机场扇区科学合理划分,能够有效解决这一问题,保证飞行安全,这也使得扇区优化成为目前业界研究的一个热点。

当前,国内外学者对扇区划分研究主要采用几何方法,文献[1]提出了一种依据图分割算法的扇区划分方法;文献[2]提出了分割空域,采用动态规划算法重组单元空域块的划分方法;文献[3]在空域分割的基础上,提出了基于神经网络算法探索空域块组合的划分方法。Voronoi 图是计算几何学中一个非常重要的概念,根据点集划分的区域到点的

距离最近这一特点,Voronoi 图在物理学、生物学、机器人等很多领域得到了广泛应用^[4-6]。许多学者利用 Voronoi 图的特点,对扇区划分进行研究。韩松臣等^[7]以固定航路航线交叉点为节点生成 Voronoi 图划设管制扇区;王莉莉等^[8]以重要航路点为生成元,依据空中交通复杂度和 Voronoi 图划分扇区;Soh 等^[9]将 Voronoi 图和谐聚类算法相结合,对东南亚空域扇区进行优化。本文也选择 Voronoi 图作为扇区划设的方法。在 Voronoi 图应用于扇区划分时,关键是生成元位置的选取,现有学者大多以现实中实际的固定航路航线或航路点作为生成元,对于流量高峰、空情复杂态势下的情况鲜有研究,呈现出显著的静态特性。

此外,为了提高扇区划设的合理性,许多学者对划分的扇区进行优化:Xue^[10]提出了一种基于遗传算法的多目标模型优化方法;杨光等^[11]提出了一种基于非线性规划的扇区结构优化方法;Granberg 等^[12]结合空域复杂度,提出了一种基于混合整数规划的机场终端扇区优化框架;Serhan 等^[13]通过对机

场终端空域的动态重构来缓解天气预报对空中交通的不确定性影响;罗军等^[14]提出了一种依据蚁群算法单元搜索的扇区组合优化方法;张明等^[15]提出了一种基于模拟退火算法均衡管制员工作负荷的优化方法;张兆宁等^[16]提出了一种依据飞行流量对 Delaunay 三角形加权,采用改进的哈夫曼编码理论合并扇区的划分方法;Xu 等^[17]在交通流量管理框架内提出了一种实现空中交通需求-容量协同平衡的扇区动态划设新方法。上述研究对扇区进行合理规划分时主要是从均衡管制员负荷、空域容量等角度进行考虑的。由此,均衡管制员负荷是扇区划设的重要工作。

针对以上分析,为了均衡管制员负荷同时考虑复杂空情的影响,本文根据航空器所在空域的空情态势构建了飞行冲突网络,利用航空器间速度障碍关系和复杂网络指标构建了一种综合管制负荷指标,并将负荷值赋予空域各航空器节点(负荷点);通过引入容量裕度和加权因子改进 K-means 算法,然后对负荷点进行聚类,以聚类中心作为生成元,使用 Voronoi 图的分界思想对原扇区进行优化,达到均衡扇区负荷的目的。

1 基本概念

本文采用 Voronoi 图结合聚类算法来达到优化扇区的目的。本节主要介绍 Voronoi 图的概念,并说明 K-means 和 Voronoi 图之间的关系。

1.1 Voronoi 图

Voronoi 图是根据已知点集对平面施行的一种分割,给定平面上 n 个点的集合 $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, ($i = 1, 2, \dots, n$),由 $V(p_i) = \cap_{j \neq i} \{p \mid d(p, p_i) < d(p, p_j)\}$ 所给出对平面的分割,称为以点 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为生成元(或母点)的 Voronoi 图,其中 $d(p, p_i)$ 为点 p 和 p_i 间的 Euclid 距离,区域 $V(p_i)$ 称为点 p_i 的 Voronoi 区域。显然,该区域平面上任意位置到点 p_i 的距离都比到 S 中其他点的距离都小。

在扇区划设时往往用直线代替曲线,这样可以避免航空器在扇区间交接时造成的不必要边界纠纷。图 1 为一个 Voronoi 图的实例,其中点代表生成元,折线为 Voronoi 边,运用该方法画出的边界均由直线构成,符合扇区边界的划设要求。

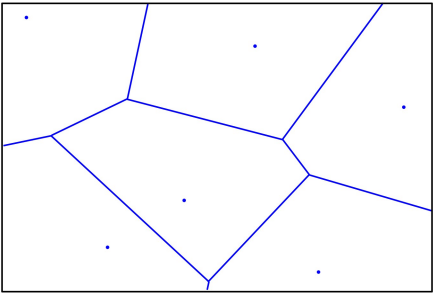


图 1 Voronoi 图

1.2 K-means 与 Voronoi 图关系

传统 K-means 是通过节点间欧式距离进行聚类的,其各所属类的节点到其所属的簇中心距离比到其他簇中心都要更近;Voronoi 图是针对每一个生成元即节点进行 Voronoi 单元划分生成边界,生成元所在的边界内任何位置到该生成元的距离比到其他生成元都要更近。结合两者定义,给定一个包含 300 个点集的数据,设置聚类个数 $K = 6$,经 K-means 聚类后如图 2a) 所示(图中 $\times$ 符号为簇中心),此时虽然能分辨每个点所属簇中心的情况,但却不能清晰地辨别类与类之间的边界范围。若考虑将簇中心作为 Voronoi 图的生成元,如图 2b) 所示将划分精确的分类边界。由此可知, K-means 的簇中心和 Voronoi 图有较好的契合点。

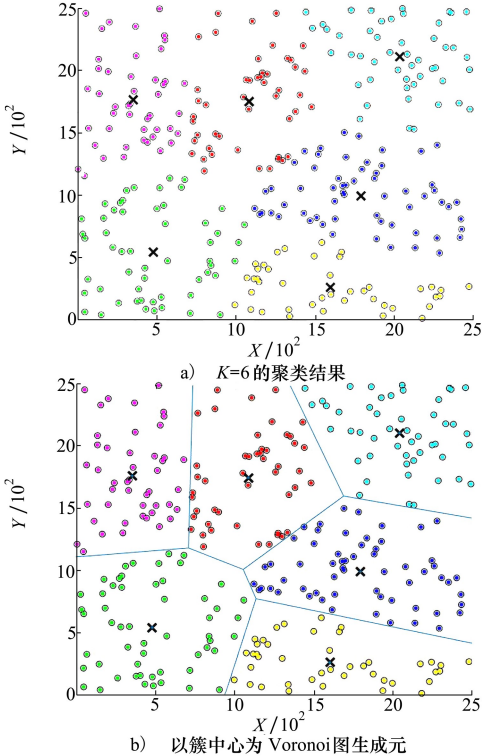


图 2 K-means 与 Voronoi 结合示意图

回到本文的研究方向,利用 Voronoi 划分扇区时,生成元位置的确定是关键点。以往学者通过固定的航路点和航迹等确定生成元的位置,并对生成元加权处理从而达到均衡扇区负荷目的^[7-9]。本文将“加权”思想前移,利用冲突网络客观描述各航空器的管制难度,进而可视各航空器节点为负荷点,如图 3 所示,1~4 航空器存在冲突连边,假设其各管制难度分别为 0.9,2.3,1.9,1.1,则可得到图 3 所示的 1~4 的负荷点。

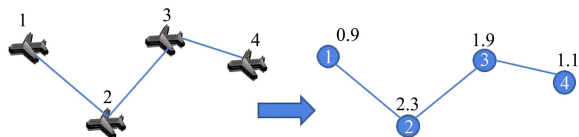


图 3 负荷点示意图

在已知原扇区个数的情况下(即已知 K),对负荷点进行 K-means 聚类,聚类的目的是使 K 个扇区内的管制难度尽可能均衡。传统的 K-means 算法只能将距离相近的点聚类,达不到均衡管制员负荷的目的,因此要通过改进 K-means 算法将各负荷点进行聚类,聚类结束后以各簇中心为 Voronoi 图生成元即可生成扇区边界。如图 4 所示,现实中的管制员都处于同一场所分别指挥不同扇区的航空器,将簇中心赋予虚拟导航点的意义,通过该点作为 Voronoi 图的生成元生成扇区边界。

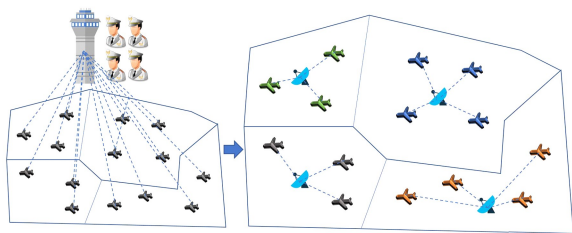


图 4 虚拟导航点示意图

2 基于冲突网络的管制负荷评估

在管制工作中,管制员负荷的主要来源包括扇区内航空器的数量和航空器之间的冲突。探究航空器节点管制难度时,考虑航空器之间的冲突关系构建冲突网络,进而利用复杂网络理论确定管制负荷。

2.1 冲突网络构建

为描述空情态势,本文依据航空器之间的冲突关系构建了飞行冲突网络。给定 $G = (V, E, B)$,其

中 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 是网络中节点即航空器集合, $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ 是网络中连边集合, $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ 为网络边权集合,边权反映的是冲突严重程度。

判断飞行冲突是确定飞行冲突网络连边的关键。在自由飞行状态下,依据飞行器保护区的定义,任意 2 架相同飞行高度的航空器水平距离不应小于 10 km,垂直高度不应小于 300 m。依据此标准可以设置飞机的保护区,如圆柱体、椭球体或球状保护区^[18]。如图 5 所示,本文选取椭球体作为保护区,其长轴焦距为 $d_v = 10$ km,短轴焦距 $d_l = 300$ m,当一个飞机保护区被其他飞机入侵时,就会发生冲突。

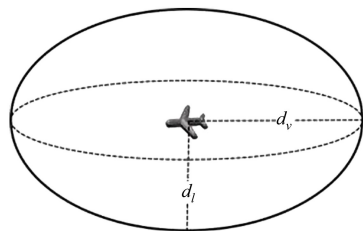


图 5 椭球保护区

依据保护区模型,构建冲突域判断式

$$C = \left\{ \frac{(x - x_c)^2}{d_v^2} + \frac{(y - y_c)^2}{d_v^2} + \frac{(z - z_c)^2}{d_l^2} \leq 1 \right\} \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为主机坐标; (x_c, y_c, z_c) 为潜在冲突机坐标。

如图 6 所示,若两机在 ACAS 通讯范围内,已知 2 架航空器飞行方向 v_A, v_B ,以 B 为参照点, A 作相对运动,其相对速度 $v_r = v_A - v_B$, v_r 与 AB 连线的夹角为 γ , AB 连线与椭圆切线夹角为 α 。 $\alpha > \gamma$ 时,若两机继续保持当前运动状态不加以调配,则会出现入侵保护区的情况,从而构成冲突,因此这种情况认为它们存在潜在冲突; $\alpha \leq \gamma$ 时则不存在潜在冲突。

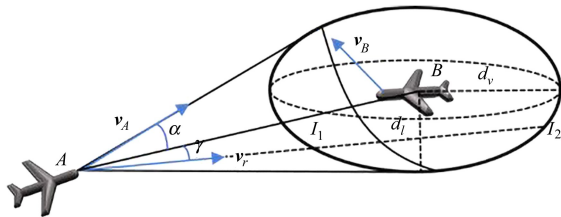


图 6 速度障碍冲突探测模型

在数学上具体求解步骤如下:在速度任意的情下,建立航空器速度、坐标与椭球之间的关系式

$$\begin{cases} \frac{x^2}{d_v^2} + \frac{y^2}{d_v^2} + \frac{z^2}{d_l^2} = 1 \\ \frac{x - x_0}{v_1} = \frac{y - y_0}{v_2} = \frac{z - z_0}{v_3} = t \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_1, v_2, v_3 分别为 x, y, z 方向上的速度分量。由上述关系解得

$$\begin{aligned} & (d_l^2 v_1^2 + d_l^2 v_2^2 + d_v^2 v_3^2) t^2 + \\ & 2(d_l^2 v_1 x_0 + d_l^2 v_2 y_0 + d_v^2 v_3 z_0) t + \\ & (d_l^2 x_0^2 + d_l^2 y_0^2 + d_v^2 z_0^2 - d_l^2 d_v^2) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

记冲突域 C 中交点个数为 n , 根的判别式为 $\Delta = b^2 - 4ac$ (其中 a, b, c 分别为多项式方程(3)中 $t^2, t, 1$ 的系数), $\Delta > 0$ 时, 判定两节点构成连边。

确定网络连边后, 边权的设置也是构成网络的关键步骤。在设置飞行冲突网络的边权时, 主要考虑两机之间冲突的紧迫程度。通过航空器的航速、航向、位置等信息计算得出冲突飞机之间的解脱时间 T , 以此来描述冲突的紧迫程度。图 6 中相对速度 v_r 与椭圆在三维空间内会有 2 个交点 I_1, I_2 , 记相交线段为 $|AI_1|, |AI_2|$ 则有可解脱时间 T

$$T = \frac{\min\{|AI_1|, |AI_2|\}}{|v_r|} \quad (4)$$

由(4)式可知, 可解脱时间 T 与合速度 v_r 呈反比, 与交点距离 $|AI_1|, |AI_2|$ 呈正比。即合速度越大, 距离越近, 可解脱时间越少, 冲突越紧迫。由于可解脱时间 T 与边权要求相反, 结合负指数函数的性质, 与 T 共同组成复合函数如(5)式所示

$$b_{ij} = e^{-T} \quad (5)$$

边权 b_{ij} 与距离 $|AI_1|, |AI_2|$ 呈反比, 与速度 v_r 呈正比, 且随着可解脱时间的减少, b_{ij} 的变化速率越大, 能够真实反映冲突紧迫程度。由于可解脱时间 T 为正数, 因此 b_{ij} 在 $[0, 1]$ 范围内变化, 起到单位化作用。

2.2 管制负荷评估

为了有效地评估飞行冲突的管制难度, 需要建立与飞行冲突特性相匹配的综合管制负荷度量。其中, 点强、介数、加权聚集系数和节点重要度是最常用的网络拓扑度量指标^[19-20], 对于飞行冲突网络, 这些指标可以定义为:

定义 1 点强 P_i

$$P_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_{ij} \quad (6)$$

式中, a_{ij} 表示节点 i, j 的连接关系, 若相连 $a_{ij} = 1$, 否

则 $a_{ij} = 0$; b_{ij} 为节点 i, j 之间的边权。点强 P_i 是网络节点度经过加权后的表达, 该值能够反映飞机冲突态势的紧迫程度, 间接表示了管制调配的压力。

定义 2 介数 J_i

$$J_i = \sum_{\substack{1 \leq j < l \leq N \\ j \neq i \neq l}} [n_{jl}(i) / n_{jl}] \quad (7)$$

式中: n_{jl} 为节点 j 和 l 的最短路径; $n_{jl}(i)$ 为节点 j, l 之间的最短路径经过节点 i 的条数。在冲突网络中, 有些节点的度虽然很小, 但它可能连接了 2 个较大冲突团, 去掉这类节点能够快速打散冲突网络, 降低管制难度。因此节点的介数在冲突网络中起到极其重要的作用, 反映了管制指挥的关键程度。

定义 3 加权聚集系数 C_i

$$C_i = \frac{1}{(k_i - 1)P_i} \sum_{m,n} \frac{\omega_{im} + \omega_{in}}{2} \Delta_{abc} \quad (8)$$

式中: k_i 为节点 i 的度; P_i 为节点 i 的点强; Δ_{abc} 为连通三元组的个数; m, n 为节点 i 的邻居节点。加权聚集系数是普通聚集系数的加权表达, 单个数值表示某节点所处位置的聚集程度。

定义 4 节点重要度 I_i

$$I_i = k_i / \sum_{j=1}^N k_j \quad (9)$$

式中: k_i 为节点 i 的度, 即冲突连边数量; I_i 随着 k_i 的增加而增加。对于冲突网络, 航空器节点的连边数量关系, 即节点重要度 I_i 最直观地体现管制难度。

不同的飞行冲突网络结构, 每个指标度量值的变化是不同的。为了准确、客观地定义冲突网络的综合管制负荷评价指标, 通过对所设定的 4 个指标进行灵敏度分析, 确定各网络指标的权重。通常情况下, 如果一个度量值随着网络的变化而发生较大的变化, 会给它一个较大的权重, 因为它很好地反映了网络的特征变化。灵敏度分析方法如下所述:

对于由 N 个节点组成的冲突网络, 依次去除网络节点, 计算网络特征度量值 $s_k (k = 1, 2, \dots, p)$ 。然后, 依据 s_k 可以得到一组网络特征变化值 $\Delta s_{ki} (i = 1, 2, \dots, n)$ 和网络特征变化平均值 $\overline{\Delta s_{ki}}$ 。网络特征变化值的方差可以由下式计算

$$S_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta s_{ki} - \overline{\Delta s_{ki}})^2}{n} \quad (10)$$

重复上述过程 n 次, 得到网络特征变化值方差的均值, 可以表示为

$$\overline{S_k^2} = \frac{1}{N} S_k^2 \quad (11)$$

依据 $\overline{S_k^2}$ 的值,能够得到各指标在综合鲁棒性指标中的权重 ω_k ,计算方法如下

$$\omega_k = \frac{\overline{S_k^2}}{\sum_{k=1}^p \overline{S_k^2}} \quad (12)$$

最后,利用归一化方法得到飞行冲突网络节点的综合管制负荷度量指标 q_i

$$q_i = \sum_{k=1}^p \omega_k \frac{s_k - \min(s_k)}{\max(s_k) - \min(s_k)} \quad (13)$$

式中, q_i 表示网络中节点 i 的综合管制负荷,其取值范围是 $[0, 1]$ 。数字越大,说明管制负荷越大。

3 扇区优化方法

扇区优化主要围绕均衡管制员负荷展开,为使各扇区管制难度聚类均衡,引入容量裕度和加权因子对传统 K-means 算法进行改进,生成对应聚类中心后利用 Voronoi 图生成扇区边界,达到优化扇区的目的。

3.1 改进 K-means 算法

为保障扇区划分的可靠性和科学性,首要的是减小扇区间的负荷差值,使各扇区负荷更加平均。此外,根据一线管制员的要求,对原有扇区进行优化时,扇区形状及边界范围不应改变过大,否则管制员在适应新扇区时需要花费更大精力。因此,要在传统的 K-means 算法的基础上考虑初始簇中心的选取,并且引入容量裕度和加权因子的概念。

传统 K-means 算法是随机选取初始聚类中心,易使聚类结果差异较大,为了保证优化后的扇区与原扇区变化尽可能减小,选择扇区几何形状的重心作为各扇区的初始聚类中心;此外,若要求各扇区负荷差值减小,即该扇区允许的最大负荷量与当前累计总负荷值的差值相似,则需要使各扇区的容量裕度相似,容量裕度^[21]用公式表示为

$$S_{YK} = s_K \phi_K - q_i \sum_K \quad (14)$$

式中: S_{YK} 为容量裕度; s_K 为第 K 个聚类扇区允许的最大最大负荷量; ϕ_K 为第 K 个扇区的负荷因数,本文取 1 ± 0.05 ; $q_i \sum_K$ 为上一次聚类时第 K 个扇区累计的总负荷。

进一步地,为了考虑待聚类负荷点(经 q_i 加权

后的航空器节点)的实际负荷大小,应将容量裕度与负荷节点建立关系

$$\lambda_i = \frac{q_i}{S_{YK}} \quad (15)$$

式中, λ_i 为加权因子。

最后,利用 λ_i 对负荷点到聚类中心的欧式距离 D 进行修正

$$D_{iK} = \lambda_i \sqrt{(x_{0K} - x_i)^2 + (y_{0K} - y_i)^2} \quad (16)$$

式中: D_{iK} 为修正距离; (x_{0K}, y_{0K}) 为第 K 个扇区的聚类中心坐标; (x_i, y_i) 为第 i 个负荷节点的位置坐标。 λ_i 初始值为 1。

由 (16) 式可知, D_{iK} 与 λ_i 呈正比关系,若当前某一扇区所累积的总负荷较大时,待聚类的负荷点在该扇区的加权因子及修正距离也将增大。依据 K-means 算法的最小距离划分原则,可以避免将过多的负荷点划分到总负荷量大的扇区,从而减小各扇区间的负荷差值,达到均衡负荷的目的。

利用示例说明该算法的聚类方法。如图 7 所示,存在一个负荷值 $q_i = 2$ 的节点和 2 个聚类中心(以下简称中心)1,2,中心与节点的欧式距离分别为 0.1, 0.15, 若中心 1 容量裕度为 $S_{Y1} = 6$, 中心 2 容量裕度为 $S_{Y2} = 10$ (容量裕度越大说明中心所处的总负荷越小,越希望得到更多负荷点来均衡负荷),按传统 K-means 聚类方法,会将该节点归类到距离近的中心 1; 而依据本文方法,计算加权因子 λ_1, λ_2 , 并与原欧式距离相乘后得到修正距离 $D_{i1} = 0.033$, $D_{i2} = 0.030$, 进而最终结果是将该点归类到中心 2, 达到了均衡负荷的目的。

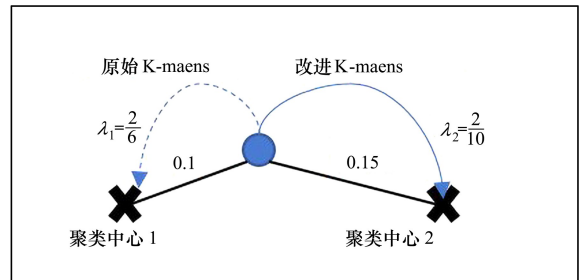


图 7 算法示例

3.2 扇区优化算法流程

基于 Voronoi 图和改进 K-means 的扇区优化过程如图 8 所示,主要步骤如下:

步骤 1 依据原扇区及航空器运行特点,构建冲突网络模型,由飞机之间的速度障碍关系确定冲

突连边和连边权重。

步骤 2 由冲突连边权重和 4 个网络特征指标,构建综合管制负荷度量指标,将负荷赋予航空器节点,称其为负荷点。

步骤 3 利用改进 K-means 算法对负荷点进行聚类,以得到导航点(聚类中心)。

步骤 4 以各扇区聚类中心为 Voronoi 图的生成元,划分扇区边界,达到优化扇区的目的。

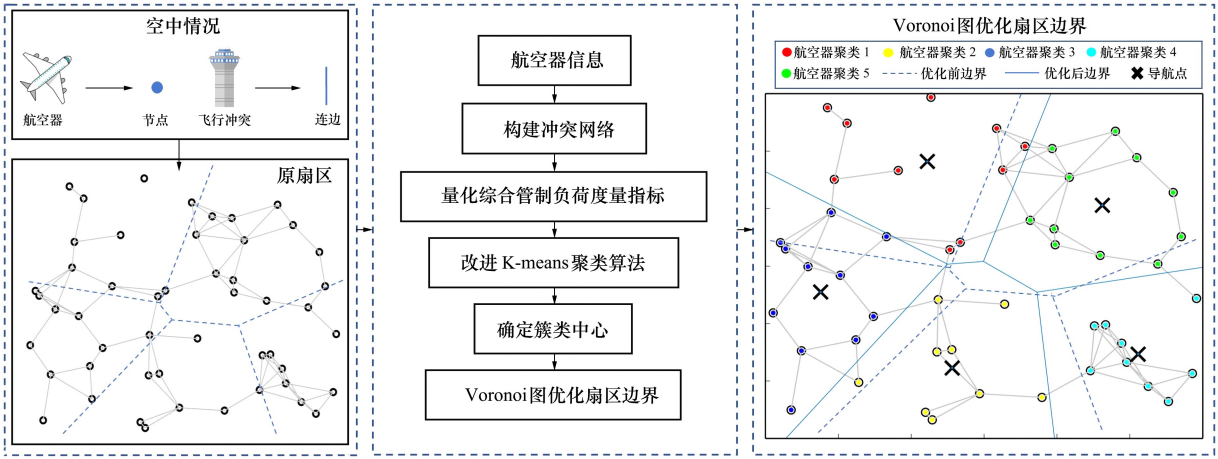


图 8 扇区优化流程

4 算例分析

4.1 仿真场景设置

为验证模型的有效性和扇区划分方法的合理性,本文选取厦门区域管制扇区数据进行建模分析。通过民航空管局空中交通运行管理系统(ATOM)和厦门空管站管制模拟机获取空情态势及雷达数据。为便于仿真,通过对 ATOM 系统中厦门扇区的边界分析,厦门空管管制区域东西长约 350 km、南北长约 400 km,共划设 4 个扇区,记录扇区边界的经度及维度,将其利用 Matlab 画出模拟扇区,如图 9 所示。

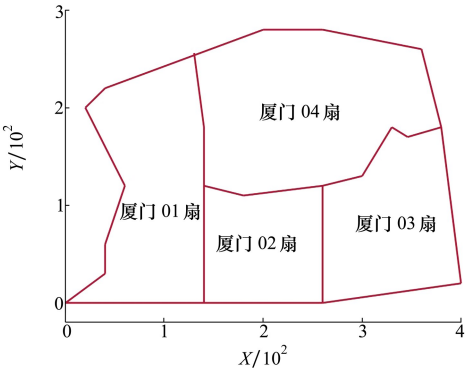


图 9 模拟扇区

4.2 管制负荷分析

通过对厦门区域扇区 2021 年 12 月 13 日至 2021 年 12 月 19 日的雷达数据进行调研及统计分析,得知区域扇区的日高峰时段通常处于 11 : 00 ~ 16 : 00,日高峰小时段通常处于 12 : 00 ~ 12 : 59。因此,本文选取 2021 年 12 月 18 日高峰小时段管制员认为最繁忙时刻的空情态势作为仿真数据进行 Matlab 仿真分析。该时刻共 46 架次航空器,其坐标、航速、航向信息如表 1 所示。图 10 为 Matlab 仿真场景,节点代表航空器(赋值后为负荷点),节点间的连边表示航空器间存在冲突。

表 1 航空器信息指标(部分)

节点	扇区	坐标	航速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	航向
1	4	(314.0, 214.9)	605.6	34
2	1	(19.6, 14.8)	674.7	09
3	2	(157.5, 100.9)	713.3	21
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
45	1	(109.3, 56.3)	764.2	16
46	3	(320.5, 121.1)	638.5	30

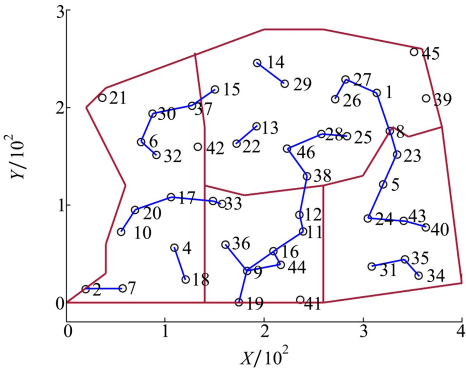


图 10 空情场景

依据构建的冲突网络和 2.2 节所描述的方法,选取了点强 P_i 、介数 J_i 、加权聚集系数 C_i 和节点重要度 I_i 构成了综合管制负荷评价指标。由 4.1 节所设定的仿真场景,进行了 30 次灵敏度分析并取平均值,测得各参数的权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为 $[0.375\ 2, 0.262\ 4, 0.167\ 8, 0.194\ 6]$,得到通用综合管制负荷指标 q_i 如(17) 式所示,以此得到各扇区的管制负荷如表 2 所示。

$$q_i = \omega_1 \frac{P_i - \min(P_i)}{\max(P_i) - \min(P_i)} + \omega_2 \frac{J_i - \min(J_i)}{\max(J_i) - \min(J_i)} + \omega_3 \frac{C_i - \min(C_i)}{\max(C_i) - \min(C_i)} + \omega_4 \frac{I_i - \min(I_i)}{\max(I_i) - \min(I_i)}$$

(17)

表 2 扇区信息情况

扇区编号	管制负荷	扇区面积
1	3.424 9	23 800
2	4.257 2	13 800
3	2.963 8	19 000
4	4.018 2	32 580

由图 10 及表 2 可知,1~4 扇区的航空器数量分别为:13,10,9,14。其中,4 扇区航空器最多,1 扇区次之,而其工作强度却都弱于 2 扇区。经验证,2 扇

区中,左上位置的 3 与 33 号及中心位置的 16 与 44 号航空器相对距离分别为 9.753 8,15.90 km,且连边权重较大,冲突较紧迫,此外,2 扇区的冲突网络几乎为连通状态。相比而言,1 与 4 扇区的扇区面积大、航空器间相对距离较远、航空器分布较分散、冲突紧迫程度较低,因此,其工作强度较低。

4.3 扇区优化结果与分析

将所构建的仿真场景、空情数据及管制负荷导入 3.1 节的改进 K-means 算法中,设定 K 值为 4,得到的聚类结果如图 11 所示。图中 4 种颜色的节点聚类得到的最终簇中心坐标为: $\{(85.8, 118.8), (193.5, 47.4), (336.4, 101.3), (242.9, 197.8)\}$ 。以簇中心坐标作为 Voronoi 图的生成元,从而得到新的扇区划分,如图 11 中的红色实线所示。

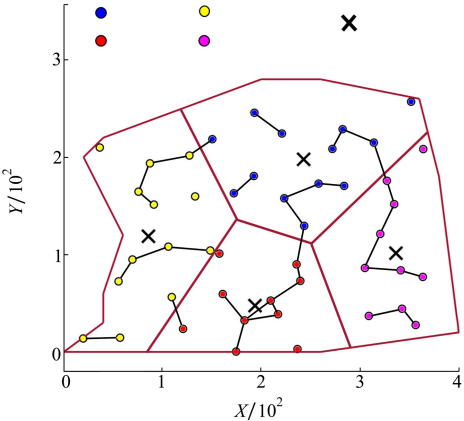


图 11 Voronoi 图优化后的扇区

宏观上看,经 Voronoi 优化后的扇区与原扇区划分相比变化不大,能够减少因管制员适应新扇区所付出的精力;为了证明所划分扇区的合理性,选取了优化前后的扇区管制负荷、扇区面积、扇区负荷标准差、方差、最大负荷差、平均偏差进行比较。得到的结果如图 12 所示。

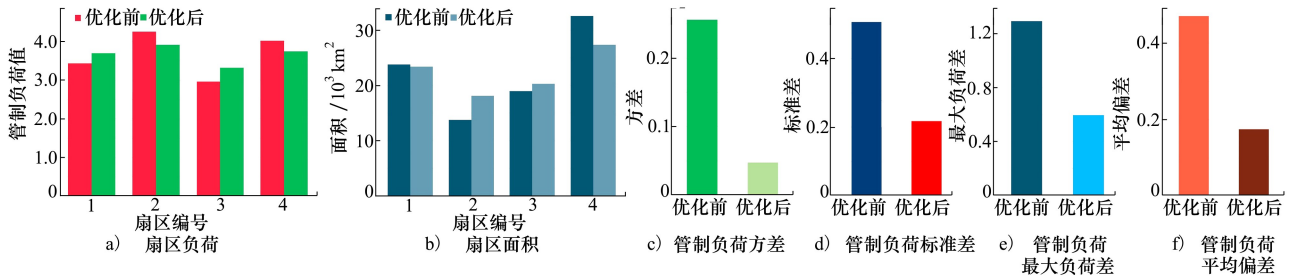


图 12 优化前后数据比较

由图 12 可知,优化后的各扇区管制负荷相对均衡,编号 1~4 各扇区的面积变化不大,且管制负荷由原来的 {3.429 4,4.257 2,2.963 8,4.018 2} 分别变化为现在的 {3.697 5,3.912 6,3.316 6,3.741 9}。扇区优化后,各扇区管制负荷方差为 0.047 4,相比于原扇区降低了 81.46%,说明其管制负荷波动很小,拥有更好的稳定性;负荷标准差为 0.217 7,相比于原扇区降低了 56.94%,反映其扇区负荷离散程度低,较为均衡;最大负荷差为 0.596 0,相比于原扇区降低了 53.92%,说明扇区优化后,扇区间不存在过高或过低的负荷;平均偏差为 0.175 3,相比于原扇区降低了 62.75%,该值体现了各扇区的负荷与平均负荷相比差别不大,较为合理。

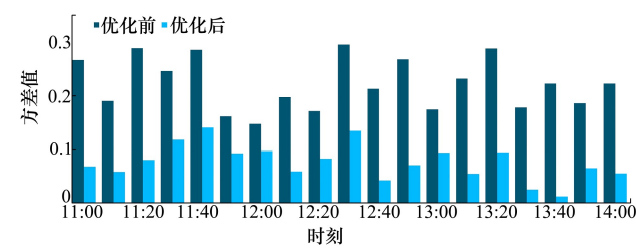


图 13 高峰时段扇区负荷方差

由以上分析可知,利用本文所提方法优化扇区,能够达到均衡负荷的目的,为现行的扇区划设工作提供决策参考。

5 结 论

扇区优化对于保证空中交通的安全,提高空域的利用率具有重要意义。本文对管制扇区的划分进行了优化,主要成果在以下几方面:

1) 依据航空器间速度障碍关系构建的冲突网络,将冲突检测拓展到三维,能够客观、准确反映航空器之间飞行态势。

依据以上分析方法,为了进一步验证该扇区划设方法的普适性,选取繁忙时段 11:00~14:00、平峰时段 19:00~22:00,每间隔 10 min 进行雷达采样,共计 38 组数据进行扇区负荷方差分析。高峰时段结果如图 13 所示,经优化后的扇区负荷方差明显低于原始扇区,方差平均值分别为 0.222 9,0.075 7,降低了 66.04%,说明新的扇区划设起到了明显均衡扇区负荷的作用。

平峰时段如图 14 所示,优化前后的扇区负荷方差没有明显改变,其平均方差为 0.121 2(优化前)、0.104 4(优化后),降低了 13.88%,说明相比于原扇区,调整过后的扇区在平峰时刻也较为适用。

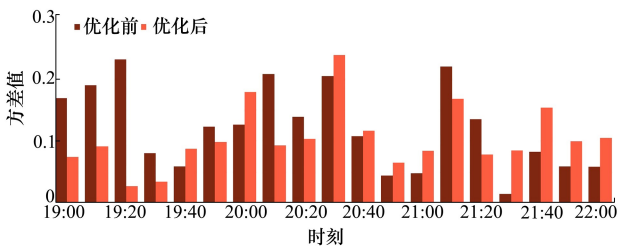


图 14 平峰时段扇区负荷方差

2) 通过分析实际的空情态势定量管制员负荷来优化扇区,能够减少一定的主观因素,具有客观性,为现有的扇区划设工作提供一定的借鉴参考。

3) 依据飞行冲突关系,构建综合管制负荷指标,采用改进 K-means 的 Voronoi 图算法,将平均聚类后的簇中心作为 Voronoi 图扇区生成元,得到新的扇区划分,实现了扇区的优化。

在高密度、复杂空情的情况下,对扇区划分的优化调整,能够均衡管制工作负荷,减少管制员压力过大带来的飞行隐患,提高航空器飞行的安全性,对适应流量不断增加的空中交通发展趋势具有较高的现实意义。

参考文献:

[1] LI J H, WANG T, SAVAI M, et al. Graph-based algorithm for dynamic airspace configuration[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(4): 1082-1094

[2] KULKARNI S, GANESAN R, SHERRY L. Static sectorization approach to dynamic airspace configuration using approximate dynamic programming[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2011(2266): 1-9

[3] GIANAZZA D. Forecasting workload and airspace configuration with neural networks and tree search methods[J]. Artificial Intelligence, 2010, 174(7/8): 530-549

- [4] HUANG X, LI H N, RAO Z W, et al. Fracture behavior and self-sharpening mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride in grinding based on cohesive element method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(12): 2727-2742
- [5] LEGLAND D, GUILLON F, DEVAUX M F. Parametric mapping of cellular morphology in plant tissue sections by gray level granulometry[J]. Plant Methods, 2020, 16(3): 5872-5881
- [6] TIEN M, PARK Y Y, JUNG K H, et al. Performance evaluation on the accuracy of the semantic map of an autonomous robot equipped with P2P communication module[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2020, 13(3): 704-716
- [7] 韩松臣, 张明, 黄卫芳. 管制扇区优化划分的方法及计算机实现技术[J]. 交通运输工程学报, 2003(1): 101-104
HAN Songchen, ZHANG Ming, HUANG Weifang. The method of optimal division of control sectors and computer realization technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003(1): 101-104 (in Chinese)
- [8] 王莉莉, 贾铎. 基于复杂度分析的空域扇区划分[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 140-146
WANG Lili, JIA Huafei. Sector division of airspace based on complexity analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(1): 140-146 (in Chinese)
- [9] SOH S W, ZHONG Z W. Sectorisation of airspace based on balanced workloads[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2020, 92(2): 213-221
- [10] XUE M. Airspace sector redesign based on Voronoi diagrams[J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2009, 6(12): 624-634
- [11] 杨光, 胡明华, 王艳军. 基于非线性规划的空域扇区结构优化设计[J]. 交通运输工程与信息学报, 2008, 6(4): 82-86
YANG Guang, HU Minghua, WANG Yanjun. Optimization design of airspace sector structure based on nonlinear programming [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2008, 6(4): 82-86 (in Chinese)
- [12] 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
- [13] SERHAN D, YOON S W, CHUNG S H. Dynamic reconfiguration of terminal airspace during convective weather: robust optimization and conditional value-at-risk approaches[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 132: 333-347
- [14] 罗军, 王珏. 北京终端区扇区容量评估及优化[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(33): 8967-8970
LUO Jun, WANG Jue. Assessment and optimization of sector capacity in Beijing terminal area[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(33): 8967-8970 (in Chinese)
- [15] 张明, 韩松臣. 依据管制员工作负荷的扇区优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2005(4): 86-89
ZHANG Ming, HAN Songchen. Sector optimization method based on controller workload [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005(4): 86-89 (in Chinese)
- [16] 张兆宁, 张东满. 基于 Delaunay 三角形的分时段区域管制扇区划分[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(29): 100-105
ZHANG Zhaoning, ZHANG Dongman. Division of regional control sectors based on delaunay triangle[J]. Science, Technology and Engineering, 2014, 14(29): 100-105 (in Chinese)
- [17] XU Y, PRATS X, DELAHAYE D. Synchronised demand-capacity balancing in collaborative air traffic flow management[J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2020, 114: 359-376
- [18] SALAU E N, GARIEL M, VELA A E, et al. Aircraft proximity maps based on data-driven flow modeling[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(2): 563-577
- [19] JIANG X R, WEN X X, WU M G, et al. A complex network analysis approach for identifying air traffic congestion based on independent component analysis[J]. Physica, 2019, 523: 364-381
- [20] 郭世泽, 陆泽明. 复杂网络理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2012
GUO Shize, LU Zeming. Foundations of complex network theory[M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese)
- [21] 姚佳奇, 唐波, 刘子怡. 基于改进 K-means 聚类算法的海外欠发达城市配电网规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 54-60
YAO Jiaqi, TANG Bo, LIU Ziyi. Distribution network planning for overseas underdeveloped cities based on improved K-means clustering algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(23): 54-60 (in Chinese)

Research on airspace sector optimization based on Voronoi diagram and improved K-means algorithm

LIN Fugen^{1,2}, WEN Xiangxi^{1,2}, WU Minggong^{1,2}, HENG Yuming^{1,2}
(1.Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2.National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Xi'an 710051, China)

Abstract: Sector partition is an important task of air traffic control, and a reasonable sector partition can improve the utilization rate of airspace and protect the flight safety of aircrafts. Since the sector partition during flat hours is not well suited to the complex air situation, this paper proposes a sector optimization method based on Voronoi diagram and improved K-means. Firstly, a conflict network is constructed based on the air situation, and a comprehensive sector control workload measurement method is proposed by combining aircraft velocity obstacle relationship and complex network theory. Based on the workload value, a cluster center is determined as the generating element of Voronoi diagram by using the improved K-means method, and then the sector is optimized by using the division method of Voronoi diagram. In this paper, the data of Xiamen airspace control sectors are collected as a simulation scenario for calculation and analysis. The simulation results show that the average variance of the optimized sector control workload is reduced by 66.04% during the peak hours and 13.88% during the flat hours compared with the original sector. The method achieves the purpose of balancing the sector workload, verifies the effectiveness of the sector optimization method, and provides a reference basis for the existing sector partition work.

Keywords: air traffic control; sector optimization; K-means algorithm; velocity obstacle; Voronoi diagram

引用格式:林福根, 温祥西, 吴明功, 等. 基于 Voronoi 图和改进 K-means 的扇区优化研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(1): 170-179

LIN Fugen, WEN Xiangxi, WU Minggong, et al. Research on airspace sector optimization based on Voronoi diagram and improved K-means algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(1): 170-179 (in Chinese)