

文章编号:1674-8190(2020)03-344-09

军事活动影响下的终端区容量评估方法研究

黄海清¹,甘旭升²,丁黎颖²,孙静娟²

(1. 西京学院 理学院, 西安 710123)

(2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 准确地预测军事活动影响下的空域容量对于缓解军民航空矛盾冲突具有重要意义。通过对飞机机动动作的分析,给出飞行受限区的划设方法;利用改进的遗传算法从定量的角度对军事活动影响下的空域容量进行评估;以某机场终端区为例,对终端区容量进行仿真实验。结果表明:改进的遗传算法能够有效避免传统算法计算量指数级增长的局限性,在保证准确性的同时可以提高运算的效率。

关键词: 军事活动;飞行受限区;遗传算法;容量评估;计算机仿真

中图分类号: V351; [U8]

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Capacity Assessment Method of Terminal Area Under the Influence of Military Activities

HUANG Haiqing¹, GAN Xusheng², DING Liying², SUN Jingjuan²

(1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China)

(2. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Accurately predicting the airspace capacity under the influence of military activities is of great significance for easing the contradiction between military and civil aviation. Based on the analysis of aircraft maneuverability, the design method of flight restricted zone is given. An improved genetic algorithm is used to evaluate the airspace capacity under the influence of military activities from a quantitative perspective. The terminal zone of a certain airport is taken as an example to perform the simulation experiment of terminal zone capacity. The results show that the improved genetic algorithm can avoid the limitation of exponential increase of computation amount of traditional algorithm effectively, and improve the efficiency of calculation while ensuring accuracy.

Key words: military activities; restricted flight area; genetic algorithm; capacity assessment; computer simulation

0 引言

军事活动作为制约终端区容量评估有效性的关键因素,准确地预测终端区容量对于提高空域管

理水平具有重大意义。2010年,由于军用航空活动的限制,兰州管制区内有近320架次的航班受到军事活动的影响,其中航班盘旋最长时间达到40分钟。2014年,东南沿海的军事演习造成了大量

收稿日期:2019-07-19; 修回日期:2019-09-30

通信作者:甘旭升,gxsh15934896556@qq.com

引用格式:黄海清,甘旭升,丁黎颖,等. 军事活动影响下的终端区容量评估方法研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 344-352.

HUANG Haiqing, GAN Xusheng, DING Liying, et al. Study on capacity assessment method of terminal area under the influence of military activities[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 344-352. (in Chinese)

的航班延误甚至取消。大量的军用航空活动,对民航航班的飞行造成一定的影响。军事活动已经成为终端区容量的重要影响因素。目前国内对于军事活动影响下的终端区容量评估的研究很少,大多是定性的评估,定量的分析较少。军事活动性质比较特殊,飞行流控时间较长,且占用高度层范围大,需要在各个活动区域内不断穿越高度层,或者在不同的活动区域内相互穿越,因此对活动区域周边的航路航线影响较大;且军事受限区所需要考虑的因素更加多样化,包括天气、飞机偏航、空中风、飞行员操纵等。因此,军事受限区的划设成为一个难点。

目前,国内外对于空域容量的评估方法主要有四种:一是基于数学模型的评估方法;二是基于历史数据的评估方法;三是通过计算机仿真的评估方法;四是通过管制员工作负荷评估的方法。国外,T. R. Inniss等^[1]根据危险天气的统计数据来估算对到达容量的影响;J. Krozel等^[2]通过圆锥形空域来模拟机场终端区,并给出了短期的确定性容量预测及相应的概率分布;J. Zou等^[3]应用最大流和最小割定理来对危险天气影响下的空域容量进行评估;M. Janic^[4]利用管制员工作负荷量来评估容量,并研究了不同的空中交通管制操作程序、间隔规则和服务规则对空域容量的影响;P. Volf^[5]将扇区空域作为研究对象,通过对管制员工作负荷和管制员承受能力的研究,以管制员可承受的负荷阈值作为限制计算最大的飞行架次。国内,刘欢^[6]充分考虑了军用航空影响、天气改变等动态因素,构建了区域动态容量评估模型,并开发出了区域容量评估系统;王少朋等^[7]分别从理论和应用方面研究了管制员工作负荷评估,并以此构建了基于管制员工作负荷的区域扇区容量评估模型;杨昌其等^[8]基于BP神经网络模型,建立了管制员疲劳状态的识别方法。然而,由于军方活动的特殊性,目前还没有相应的数学模型和历史数据库。国内外对于空域容量的评估方法,大都不适用于军事活动影响下空域容量评估,需要重新构建一套适用于军方活动影响下的评估体系。

国内学者主要利用数学分析法来求解终端区容量。但该方法随着节点的增多,计算的复杂度呈指数型上升,且由于算法本身的限制不适合用计算

机进行大规模的编程。

本文将军事活动作为影响因素加入到流量决策当中,利用最大流最小割理论^[9-11]从定量的角度求解军事活动影响下的终端区容量,在分析传统算法的特点及缺陷的基础上,用改进的遗传算法求解军事活动影响下的终端区容量,并与传统算法进行比较验证。

1 基本概念

1.1 飞行受限区

飞行受限区就是指当受到恶劣天气、军事活动或者流量控制等因素影响时,为了保障飞行安全在规定时间内而禁止飞越的空域。

在本文中,将受到军事活动影响的区域作为飞行受限区,民航航班在飞行过程中不得在该区域内通过。

1.2 终端区动态容量

终端区动态容量一般指在一定空域结构下考虑管制规则和一些相关因素(如军事活动)的影响,且一直有航空器在终端区进出的情况下,单位时间内所能容纳的最大航空器数量。

1.3 最大流最小割定理

在任一个网络 G 的所有割集中,其最小的割集流量之和就等于该网络最大流的流量。

目前,已经有人将最大流最小割理论应用在多边形中,用两条边来代表源(S)和汇(T)。而在从源(S)到汇(T)的各个通路中,其通行能力由容量来决定。而整个网络中容量最小的部分就是网络的最小割,也就是整个网络的咽喉部分或者瓶颈,是决定该网络通行能力的直接因素。多边形最小割示意图如图1所示。

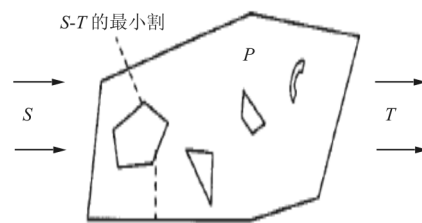


图1 多边形最小割示意图
Fig. 1 Minimum cut of polygon

2 飞行受限区的划设

2.1 飞行活动区的确定

军用航空飞行活动往往会受到飞行员动作误差、空中风向的影响,不同的动作所需要的空域范围是不同的。在确定飞行受限区时,需要确定不同科目所需要的活动范围。本文中军用航空飞机所需要的空域范围是利用数学模型,并结合飞行特点来确定的,通过蒙特卡洛法确定实际的圆心和机动半径,进而求出右侧边界的位置。

2.1.1 转弯半径的计算

通常战斗机飞行员的动作误差服从正态分布,其分布函数为

$$g(M_{\text{last}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{(M_{\text{last}} - M_{\text{should}})^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (1)$$

式中: M_{should} 为期望动作误差; M_{last} 为实际动作误差; σ_p 为标准差。

在飞机飞行训练的过程中,影响飞机机动轨迹的因素主要有机动起点、转弯的坡度、转弯的速度、风及其导航设施的精度等,飞行轨迹图如图 2 所示,其中飞机的期望机动轨迹为实线所示,然而由于受到了全向风和动作的影响,其运动轨迹如虚线所示。

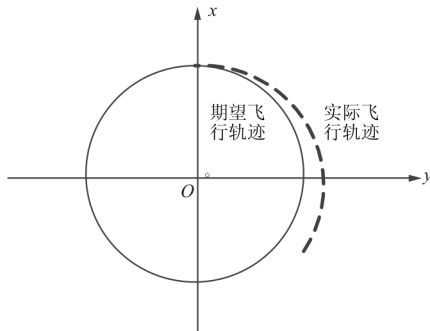


图 2 飞行轨迹图

Fig. 2 Flight path diagram

通过转弯半径的计算可知转弯半径与其飞行速度及坡度的关系为

$$R_0 = \frac{v^2}{g \tan \gamma} \quad (2)$$

假设期望的飞行速度 $v = 250 \text{ m/s}$ (900 km/h),期望转弯坡度 $\gamma = 45^\circ$,由于受到动作误差的影响,其服从式(1)的正态分布,因此在速度误差和转弯坡度误差影响下的转弯半径为

$$R'_0 = \frac{(v')^2}{g \tan \gamma} \quad (3)$$

其中实际速度和实际转弯坡度服从正态分布:

$$\begin{cases} f_\gamma(\gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma} \exp\left(-\frac{(45 - \gamma')^2}{2\sigma_\gamma^2}\right) \\ f_v(v') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(-\frac{(250 - v')^2}{2\sigma_v^2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 转弯轨迹圆心计算

将实际圆心位置定义为 $O_1(x_1, y_1)$,期望的圆心坐标为 $O(x_s, y_s)$,且在机动过程中只考虑转弯过程中的影响,则实际圆心坐标为

$$\begin{cases} x_1 = x_s + R_1 \cos \theta \\ y_1 = y_s - R_1 \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为飞机开始盘旋时的航向角。

2.1.3 空域半径的计算

空中飞行的航空器不可避免地会受到风的影响,然而在进行航迹估计的过程中是无法确定风向的。因此,国际民航组织在航路划设的过程中定义了一个对航空器最不利的风向——全向风,全向风为转弯时垂直于飞机当前航向向外的风向。假设全向风的风速为 w ,则在全向风的影响下,实时转弯半径可以表示为

$$R_1 = R'_0 + \frac{w}{a} \quad (6)$$

式中: a 为飞机转过的角度数。

因而最终所需的空域范围半径 A 为

$$A = x_1 + R_1 \quad (7)$$

2.2 飞行受限区的划设

航空器在实际飞行中,往往需要进行多种科目的练习。为保证飞行安全,军方飞行活动空域及其保护区内均无法通过民用航班,本文将此区域定义为飞行受限区,通常用二维区域来表示。

划设飞行受限区主要是利用最小外接矩形法。利用面积较小的矩形不断逼近军方活动的空域,当矩形的边与军方活动空域相切时,形成的矩形为受军事活动影响的空域(如图 3 所示)。此方法首先需要确定军方活动空域在坐标轴上的极值,即在 x 轴上的最大值 x_{max} 与最小值 x_{min} ,以及 y 轴上的最大值 y_{max} 与最小值 y_{min} 。四个点形成的区域为初始面积较小的空域: $(x_{\text{min}}, y_{\text{min}})$, $(x_{\text{min}}, y_{\text{max}})$, $(x_{\text{max}}, y_{\text{min}})$, $(x_{\text{max}}, y_{\text{max}})$ 。将初始扫描线的角度设置为 0 ,之后按照一定的增量 d_A 增加,扫描线为两组相互垂直的边。将扫描线沿着目标矩形的边界移动至与活动空域相切为止。此时形成的矩形为

该扫描角度下的外接矩形。根据相关法规,军方活动空域离航路航线需要保持 10 km 的水平间隔,因此将各扫描角度下面积最小的外接矩形增加安全间隔后定义为受军方飞行活动影响的空域,即飞行受限区(如图 3 阴影区所示)。

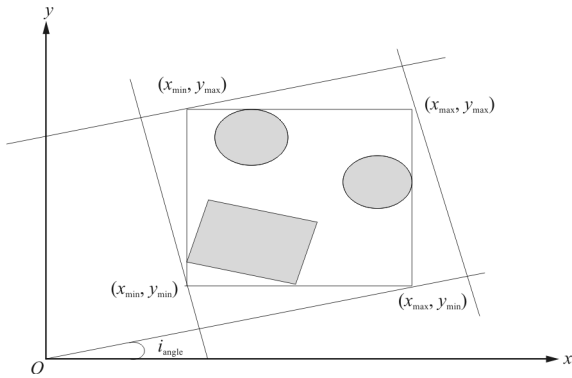


图 3 起始外接矩形及其扫描示意图
Fig. 3 Initial external rectangle and its scanning schematic diagram

利用外接矩形划设飞行受限区的流程图,如图 4 所示。

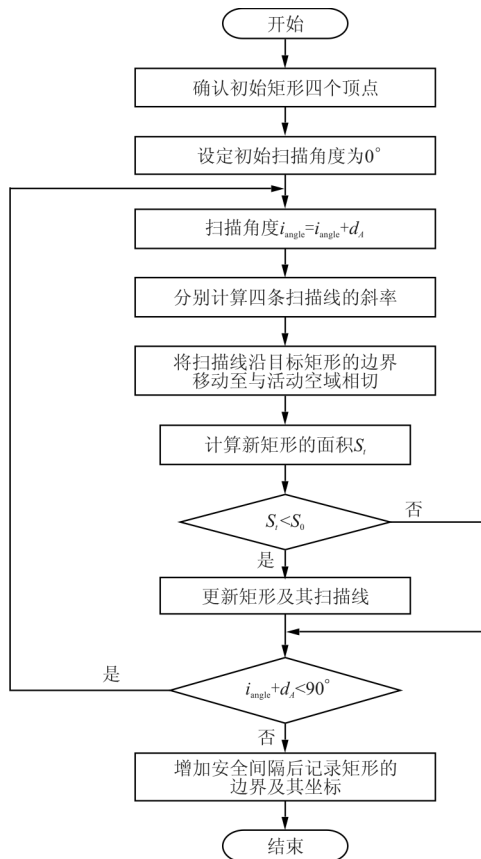


图 4 飞行受限区划设流程图
Fig. 4 Flow chart of flight restriction zoning

3 终端区容量评估方法

军事活动作为影响空域容量的因素之一,通过构建终端区容量评估模型,利用最大流最小割原理可以找出受军事活动影响下的空域容量瓶颈,并利用改进的遗传算法来对模型进行求解,以确定影响下的空域容量。

3.1 模型构建

3.1.1 假定条件

本文将终端区看作是一个网络,其中的飞行受限区看作网络中的多边形区域(不能流过的区域),则利用最大流最小割理论就可以求取该终端区内的动态容量。在此模型中,假定:

- (1) 航空器进离场均使用同一条跑道;
- (2) 进离场航线中,每条航段的距离均已给定;
- (3) 航空器在任一条航段上均以平均速度飞行;
- (4) 在每条航段上只能单向飞行,且飞行方向已经给定;
- (5) 对流天气的影响区域为中间航段;
- (6) 在终端区没有等待区,所有航空器均是即到即走。

在这些假设成立前提下,终端区的容量就是指在单位时间内经过终端区入口点的最大航班量。

3.1.2 弧容量求解

为了计算终端区的动态容量,需要计算每段弧上所能容纳航班的最大数,即该航段的容量。具体公式为

$$C_{ij}(t) = \frac{1}{(R_{ij}^n - R_{ij}^m) P_m P_n} \quad (8)$$

$$R_{ij}^m = \frac{L_{ij}}{\bar{V}_{ij}^m + W_{ij} \cos \theta} \quad (9)$$

$$R_{ij}^n = \frac{L_{ij} + \delta^{mn}}{\bar{V}_{ij}^n + W_{ij} \cos \theta} \quad (10)$$

$$\bar{V}_{ij}^n = K_{ij} \cdot v_{AIS}^n \quad (11)$$

式中: m, n 为航空器的种类,用 1~3 表示重型机、中型机以及轻型机; v_{AIS} 为该机型的进近速度; K_{ij} 为弧 A_{ij} 上的速度换算因子; θ 为该航空器纵轴的方向与航段方向的夹角; W_{ij} 为该航段上的风速,算法与程序设计中风速的算法一致; \bar{V}_{ij} 为航空器在

该航段上的平均速度; L_{ij} 为该航段的长度; δ^{mn} 为保证飞行安全而设置的安全间隔; R_{ij} 为该航空器在航段 A_{ij} 上飞行所需的时间; P 为指该机型所占的比例。

换算因子 K_{ij} 为

$$K_{ij} = \frac{1.712\ 329(273 + T_H)^{0.5}}{(288 - 0.006\ 496H)^{2.628}} \quad (12)$$

对于换算因子 K_{ij} 的计算, 本文可根据高度和温度求出, 也可以通过查询换算因数表就可以得知; 如果给定的高度或者温度没有列出, 可用内插法求其值。利用以上公式, 就可以计算出航段的容量, 即网络图中的弧容量 $C_{ij}(t)$ 。

3.1.3 评估模型构建

在计算出终端区网络示意图中每条弧的弧容量后, 将划设的飞行受限区标记在网络图中, 并以此构建在天气影响下的终端区容量的动态评估模型。

将所需要的变量用以下符号表示: $B_{ij}(t)$ 为 t 时刻下, 航段 A_{ij} 上的航班数; $I_{ij}(t)$ 为 $(t, t+1)$ 时段内, 流入该航段 A_{ij} 的航班数; $O_{ij}(t)$ 为 $(t, t+1)$ 时段内, 流出该航段 A_{ij} 的航班数; $f_{ij}(t)$ 为 $(t, t+1)$ 时段内, 该航段 A_{ij} 净流出量, 即流量。 $I_{ij}(t)$, $O_{ij}(t)$, $f_{ij}(t)$ 三者之间的关系为

$$f_{ij}(t) = O_{ij}(t) - I_{ij}(t) \quad (13)$$

本文用 S 表示该网络的源, 用 T 表示该网络的汇, 那么航段 A_{ij} 在时段 $(t, t+1)$ 内的净输出量为

$$\begin{cases} O_{ij}(t) - I_{ij}(t) = \sum_j f_{ij} & (i = S) \\ O_{ij}(t) - I_{ij}(t) = B_{ij}(t) & (i \neq S, T) \\ O_{ij}(t) - I_{ij}(t) = -\sum_k f_{ki} & (i = T) \end{cases} \quad (14)$$

而此规划模型中的约束条件如下:

(1) 航段 A_{ij} 上的容量约束: $0 \leq f_{ij}(t) \leq C_{ij}(t)$;

(2) 非负整数约束: $B_{ij}(t) \geq 0, f_{ij}(t) \geq 0$ 。

在军方活动过程中, 航班不得经过划定的飞行受限区。为了在该模型中将军事活动的影响纳入其中, 假定如果某航段在飞行受限区内, 那么该航段暂时不允许航空器通过。本文将军事活动作为一个变量因子 $\zeta_{ij}(t)$ 。

当 $\zeta_{ij}(t) = 0$ 时, 说明该航段受到了军事活动影响;

当 $\zeta_{ij}(t) = 1$ 时, 说明该航段不受军事活动

影响。

本文将计算得到的网络最大流 $\max v(f)$ 对时间 t 进行求导得到最终的进场容量:

$$C_{app} = \frac{d[\max v(f)]}{dt} \quad (15)$$

在计算出终端区的进场容量之后, 还要求出终端区的离场容量 C_{dep} 。同理, 将跑道的离场端作为起点, 终端区的出口点作为终点建立终端区离场网络示意图, 之后参考进场容量的计算方法就可以得到离场容量 C_{dep} 。

通过式(15), 就可以计算出该终端区的动态容量 C :

$$C = C_{app} + C_{dep} \quad (16)$$

3.2 模型求解方法

求出终端区容量的关键是确定该网络的最大流。根据最大流最小割定理, 可以利用改进的遗传算法进行求解。

3.2.1 传统算法的分析比较

求解网络最大流最小割问题其实是一类组合优化问题。目前比较常见的方法有 Ford-Fulkerson 标号算法^[11]、预流推进类算法^[12]等。Ford-Fulkerson 是利用标号的方式来找寻增广链路。通过不断增加增值链上的流量到无增广链为止。其算法的复杂度为 $O(nm^2)$, 由于受算法的限制, 此算法不适用于大规模的编程。而预流推进算法则是在标号法的基础上提出的改进算法, 其复杂度为 $O(n^2m)$ 。可以看出, 传统方法随着节点数目的增加, 计算的复杂度会呈指数上升。为避免该问题, 本文根据最大流最小割定理, 结合遗传原理, 设计了求解最大流最小割问题的遗传算法。

3.2.2 改进遗传算法的设计求解

3.2.2.1 编码与解码方式

假设网络中共有 n 个顶点, 其中进入点 m 个, 终点 p 个。用 (s, \bar{s}) 表示网络中的一个割集; s, \bar{s} 分别是不同的顶点集。使用 n 个二进制字符来表示可行解, 如 (a_1, a_2, \dots, a_n) , 其中 a_i 为 0 或者 1, 当 a_i 为 0 时, 该顶点位于顶点集 s 内, 否则位于 \bar{s} 内。如可行解(110010)表示对应的割集 (s, \bar{s}) , 其中 $s = (a_1, a_2, a_5)$, $\bar{s} = (a_3, a_4, a_6)$ 。每个可行解均对应一个割集。

初始群体: 随机生成 N 个可行解作为初始群体。对于每个个体, 进入点必须为 1, 终点必须为

0,其余点为随机生成的二进制代码 0 或者 1。

3.2.2.2 适应度函数

由于在求解终端区动态容量的过程中,需要找出网络是最小割集容量。因此,将每个割集的容量作为适应度,即:

$$D(s, \bar{s}) = C(s, \bar{s}) = \sum_{(v_i, v_j) \in C(s, \bar{s})} c_{ij} \quad (17)$$

对于 (s, \bar{s}) 中顶点形成的边为 (v_i, v_j) , 其中 $v_i \in s, v_j \in \bar{s}$ 。若 $c_{ij} > 0$, 则 $(v_i, v_j) \in (s, \bar{s})$, 然后代入式(16)中求出该割集容量, 从而作为该个体的容量。

3.2.2.3 选择算子

在群体中,每个个体都按照一定的概率进行交叉与变异,个体越接近最优解越容易被选择。在动态容量求解的过程中,适应度值越小,越接近最优解。而遗传算法求解中则是适应度值越大越容易被选择,因此,在计算适应度以后需要对其进行归一化处理。

将群体中适应度的最大值记为 c_{max} , 最小值为 c_{min} 。为结合实际情况,将个体的适应度函数更改为

$$F(s, \bar{s}) = 1 - \frac{D(s, \bar{s}) - c_{min}}{c_{max} - c_{min} + 0.0001} \quad (18)$$

$F(s, \bar{s})$ 在 0~1 之间变动,割集容量越小、越接近 1,越容易被选中。在计算出每个个体的适应度后,生成随机数 r , 若 $r < F(s, \bar{s})$, 则该个体可以被选中。

3.2.2.4 交叉算子

对于选择出来的个体,需要按照相应的概率来进行交叉操作以产生新个体。假定交叉概率为 P_c , 对于选择出的两个个体,生成 0~1 之间的随机数 r , 若 $r < P_c$, 则进行交叉操作。具体为:将父本和母本中属于 s 的个体合并,其余作为 \bar{s} 中的个体。即:

$$(s, \bar{s}) = (s_1, \bar{s}_1) \otimes (s_2, \bar{s}_2) = (s_1 \cup s_2, \bar{s}_1 \cup \bar{s}_2) \quad (19)$$

如: $(101001) \otimes (110001) = (111001)$ 。

3.2.2.5 变异操作

假定变异概率为 P_m , 对于每个新个体中的顶点(非进入点或者终点),随机生成一个 0~1 之间的数字 r , 若 $r < P_m$, 则更改该位置上的二进制数字。若原位置上数字为 1 则变异为 0, 反之则变异为 1。

3.2.2.6 算法步骤

Step 1: 初始化种群,随机生成 N 个可行解。

Step 2: 分别计算每个可行解的适应度值,并作归一化处理,选择其中适应度值最佳的个体遗传到下一代个体中。

Step 3: 选择相应的父本和母本,根据概率 P_c 的大小进行交叉操作,产生对应的个体。

Step 4: 对产生的新个体进行变异操作,并作为下一代种群。

Step 5: 重复 Step 3~Step 4, 直至下一代种群个体为 N 。

Step 6: 判断是否达到要求,若是则输出最优个体和最优适应度值对应的 $D(s_1, \bar{s}_1)$, 否则转入 Step 2。

4 算例仿真

本文以某机场终端区为例,计算该机场某一时段的离场容量。假设军方当天的训练科目为盘旋机动和 8 字机动。采用蒙特卡罗法选取符合速度、坡度的概率密度函数分布的随机数,进行 $n = 1\,000\,000$ 次的军用航空飞行仿真,仿真计算的参数如表 1 所示。最终位置偏差结果如图 5~图 6 所示,为方便显示截取了前 10 000 次的仿真数据。

表 1 仿真相关参数

Table 1 Simulation related parameters

参 数	数 值	参 数	数 值
$v/(m \cdot s^{-1})$	250	σ_r	2
$\gamma/(^\circ)$	45	$W/(m \cdot s^{-1})$	0.58
σ_v	15		

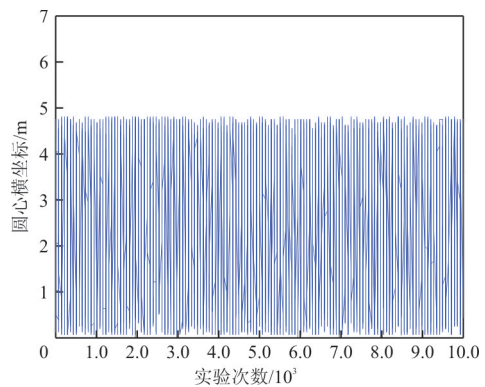


图 5 实际圆心横坐标位置图

Fig. 5 Actual center abscissa location

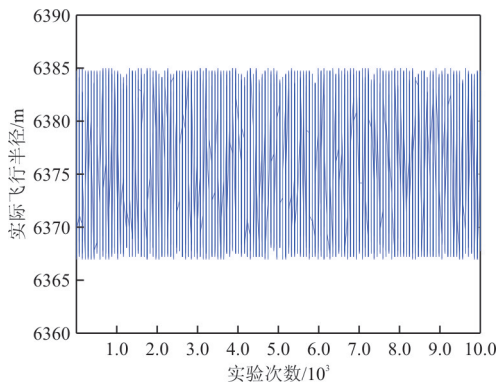


图 6 实际半径图

Fig. 6 Actual radius diagram

通过实例仿真发现,军用航空飞机在作盘旋机动时,圆心最大的偏离距离在横坐标上的投影为 4.732 m,实际飞行过程中半径最大为 6 384.36 m,因此当飞行在作盘旋机动时,可以将其活动范围划定为半径为 7 km 的圆形区域。

对于 8 字机动,本文假设飞机在做完转弯机动后,平飞时间为 8 min,在考虑全向风的情况下,通过对其动作的 1 000 000 次仿真,寻求其右边界距离坐标原点的最大距离,结合飞行半径的变化情况确定最终的空域范围。通过对 1 000 000 次的数据分析,其边界最远距离为 15.832 km,最大半径为 6.432 km,因此空域范围为 13 km×23 km 的矩形区域。飞行动作示意图如图 7 所示,前 10 000 次最右侧的边界偏差示意图如图 8 所示。

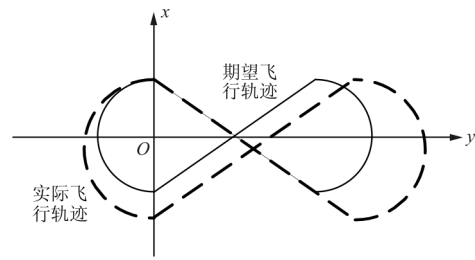


图 7 动作示意图

Fig. 7 Action diagram

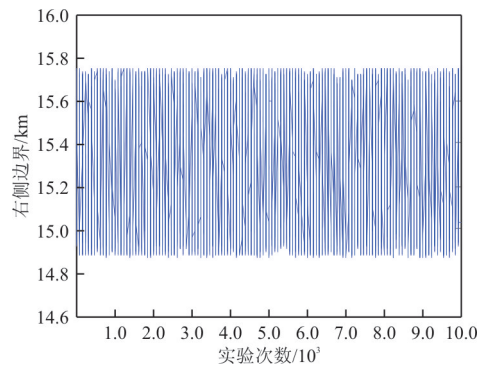
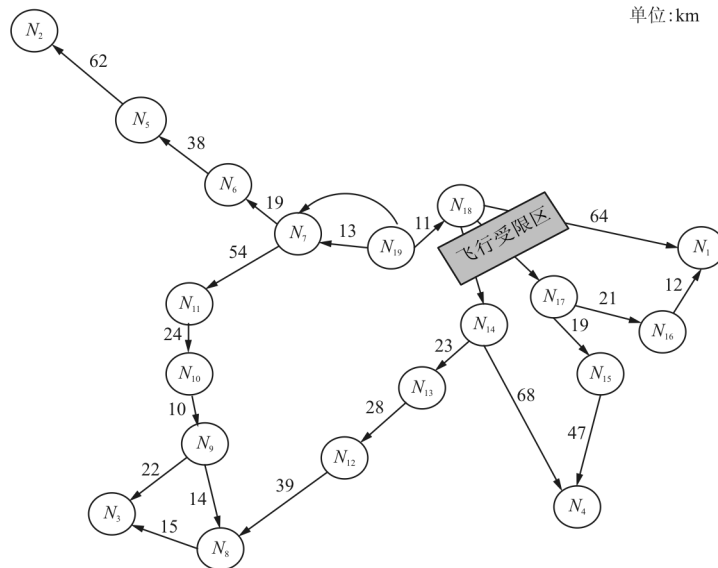


图 8 右侧边界距离图

Fig. 8 Right boundary distance diagram

利用最小外接距形法,将军事活动的影响区域标记为飞行受限区,并将其影响范围标记在离场图上,该机场的离场的结束点为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 ;离场的开始点为 N_{19} ;其余航路点均作为中间节点,建立受军事活动影响的离场网络示意图,如图 9 所示。



单位:km

图 9 军事活动影响下的网络图

Fig. 9 Network diagram under the influence of military activities

假设该终端区上的机型比例大致为:重型机 22.89%(其进近速度 280 km/h);中型机 76.89%(其进近速度为 250 km/h);轻型机 0.22%(其进近速度为 215 km/h)。

根据示意图本文可看到航段集合为

$$A = \{A_{197}, A_{711}, A_{1110}, A_{109}, A_{98}, A_{93}, A_{83}, A_{1918}, A_{1814}, A_{1413}, A_{1312}, A_{128}, A_{181}, A_{1817}, A_{1716}, A_{1715}, A_{154}, A_{144}, A_{76}, A_{65}, A_{52}\}$$

而各航段的长度(km)依次为

$$L = \{13, 54, 24, 10, 22, 17, 15, 11, 14, 28, 23, 39, 64, 20, 31, 7, 47, 68, 19, 38, 62\}$$

相应的限制飞行高度(km)为

$$H = \{1.3, 1.5, 1.2, 1.2, 0.9, 0.8, 1.1, 1.3, 0.7, 2.7, 1.7, 1.4, 1.5, 1.8, 1.6, 1.2, 4.5, 3.5, 1.3, 1.7, 2.1\}$$

根据温度以及各航段的高度查询换算因数表或利用内插法计算,本文可以得到速度的换算因子 $K = \{1.0876, 1.1046, 1.0723, 1.0816, 1.0417, 1.0326, 1.0512, 1.0329, 1.1036, 0.9876, 1.1724, 1.0832, 1.0952, 1.1146, 1.0912, 1.0716, 1.2917, 1.2245, 1.0718, 1.0972, 1.1325\}$

将上述各参数代入式(8)~式(12)中,求出每个航段的静态容量。之后,利用改进的遗传算法来求解网络的最大流最小割容量。假定初始种群个体数为 $N=10$,迭代代数 40,进行 100 次重复试验,实验结果如图 10 所示。

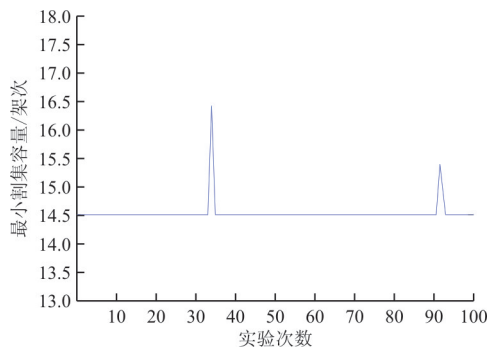


图 10 实验结果图

Fig. 10 Experiment results

利用改进遗传算法可以求得在有军事活动影响的情况下,该网络的最大流最小割容量 $C_{dep} = 14.5$ 架次。利用文献[12]中的最大流最小割算法

对问题进行求解,得出的结果仍为 $C_{dep} = 14.5$ 架次。从图 10 可以看出:在 100 次实验中仅有 2 次实验结果出现误差,其他情况下均能够得出正确结论。

而利用改进遗传算法与传统算法在运行时间上的对比情况如图 11 所示。

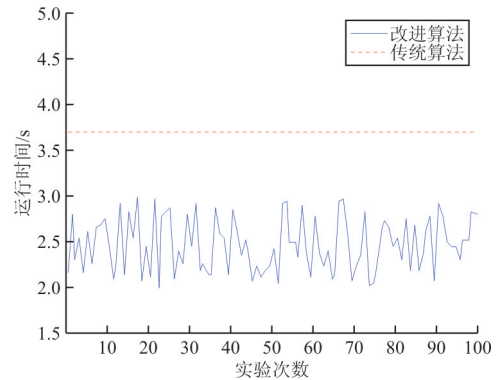


图 11 运行时间对比图

Fig. 11 Run time comparison diagram

从图 11 可以看出:相较于传统最大流最小割算法,利用改进的遗传算法不仅能较为准确地预测终端区容量,而且所需要的计算时间少于传统算法,效率更高。利用传统的数学分析法,主要利用固定方法求解数值,算法的复杂度会随着节点的增多呈指数型增加;改进算法主要利用智能算法搜索寻优的能力,算法的运算效率主要和种群规模有关,而与节点数量关系不大,因此利用改进的遗传算法求解终端区容量可以有效避免由于节点增多而引起的复杂度增长的局限性。终端区容量会由于军事活动的影响而变化,及时地计算出终端区动态容量能够使终端区运行更加高效合理。

5 结 论

(1) 本文提供了一种飞行受限区的划设方法。通过构建相应的运动模型,利用蒙特卡罗法从量化的角度确定飞机的运动范围,进而利用外接矩形法来确定最终的飞行受限区,为之后对军事活动的研究提供了一种思路。

(2) 借鉴传统算法中最大流最小割原理,利用改进遗传算法进行求解,避免了传统算法随着节点增多计算复杂度呈指数上升的局限性,在保证准确性的同时,提高运算的效率。

(3) 在下一步的研究中,需要在保证有效性的同时,尽可能改进运算方法来进一步提高运算的效率。

参考文献

- [1] INNISS T R, BALL M O. Estimating one-parameter airport arrival capacity distributions for air traffic flow management[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2004, 12(3): 223-251.
- [2] KROZEL J, MITCHELL J S B. Capacity estimation for super-dense operations[C]// 2008 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Honolulu: AIAA, 2008: 1-6.
- [3] ZOU J, KROZEL J W, KROZEL J, et al. Two methods for computing directional capacity given convective weather constraints[C]// 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago: AIAA, 2009: 1-15.
- [4] JANIC M. Modeling effects of different air traffic control operational procedures, separation rules, and service disciplines on runway landing capacity[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2014, 48(6): 556-574.
- [5] VOLF P. NAS-wide simulation of air traffic with ATC behavior model[C]// 2015 Integrated Communication Navigation and Surveillance Conference. Herndon, VA: AIAA, 2015: 1-6.
- [6] 刘欢. 区域动态容量评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
LIU Huan. Regional dynamic capacity evaluation technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [7] 王少朋, 周雄飞. 基于管制员工作负荷的区域扇区容量评估[J]. *航空计算技术*, 2015, 7(4): 118-123.
WANG Shaopeng, ZHOU Xiongfei. Area sector capacity assessment based on controller workload[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2015, 7(4): 118-123. (in Chinese)
- [8] 杨昌其, 谭娟, 仇争平. 基于 BP 神经网络的管制员疲劳状态识别研究[J]. *航空计算技术*, 2018, 48(1): 17-20.
YANG Changqi, TAN Juan, QIU Zhengping. Controller's fatigue recognition based on BP neural network[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2018, 48(1): 17-20. (in Chinese)
- [9] 田勇. 扇区动态容量评估方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(8): 2163-2169.
TIAN Yong. Research on the method of sector dynamic capacity evaluation[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2014, 34(8): 2163-2169. (in Chinese)
- [10] 张兆宁. 危险天气下的终端区动态容量评估[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(21): 53-59.
ZHANG Zhaoning. Assessment of terminal airspace dynamic capacity considering dangerous weather[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(21): 53-59. (in Chinese)
- [11] FORD L R, FULKERSON D R. Maximal flow through a network[M]. Birkhauser Boston: *Classic Papers in Combinatorics*, 2009: 243-248.
- [12] 吴海燕, 高进博, 冷传才. 路网容量最大流的一种改进算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2006, 6(2): 51-56.
WU Haiyan, GAO Jinbo, LENG Chuancai. A new maximum-flow method of Urban road network capacity[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2006, 6(2): 51-56. (in Chinese)

作者简介:

黄海清(1959—),女,学士,副教授。主要研究方向:非线性建模、计算物理。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:非线性系统建模、空域管理。

丁黎颖(1979—),女,硕士,讲师。主要研究方向:空中管制、空管法规。

孙静娟(1981—),女,博士,讲师。主要研究方向:空中管制、空管法规。

(编辑:丛艳娟)