

文章编号:1674-8190(2017)03-293-06

基于管制员负荷的西安终端区扇区优化

令璐璐, 罗军

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 若扇区的工作负荷差别较大, 会限制空域容量, 给飞行安全和空域的利用造成不利影响。为了提高空域容量, 缓解空中交通压力, 构建基于管制员负荷的西安终端区扇区优化方法。通过对西安终端区近期雷达数据进行统计分析、量化管制员负荷, 得到符合西安终端区的管制员负荷综合值; 对该终端区进行剖分得到 Voronoi 图, 依据均衡扇区管制员负荷的原则, 加入实际约束条件, 采用遗传算法对扇区进行优化。结果表明: 通过扇区优化, 提升了西安终端区的容量, 均衡了各扇区的管制员负荷, 取得了较好的优化效果。

关键词: 管制员负荷; 遗传算法; 西安终端区; Voronoi 图; 扇区优化

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.03.007

Research on Xi'an Terminal Sector Optimization Based on Controller Workload

Ling Lulu, Luo Jun

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: If the difference of the workload in a sector is too big, the airspace capacity will be limited, which will adversely affect the flight safety and airspace utilization. In order to improve the sector capacity, relieve air traffic pressure, the method of the Xi'an terminal sector capacity evaluation and optimization base on controller workload is constructed. Measuring the controller workload by the statistical analysis of the radar data, the comprehensive value of the controller workload, which accords with the Xi'an terminal workload, can be calculated. Then the Voronoi diagram is founded using computational geometry. According to the principle of balanced sector load regulation, and some actual constraints, applying genetic algorithm in terminal control airspace, the optimal design of sector structure can be achieved. Through sector optimization, the capacity of the terminal area of Xi'an is enhanced, the sectors of the control load is balanced, and good results are achieved.

Key words: controller workload; genetic algorithm; Xi'an terminal; Voronoi; sector optimization

0 引言

近年来,随着民航业的飞速发展,空中交通流量直线攀升。为了提升空域容量,获得较高的空域利用率,国内繁忙机场通常将空域划分为若干扇区,每个扇区分别设立管制席位,进行空中交通指挥和协调。由于各个扇区的工作负荷差别较大,限

制了空域容量,也给飞行安全和空域的利用造成不利影响。终端区是衔接航路和机场的枢纽空域,也是空中交通最密集、情况最复杂、冲突最多的空域。显然,终端区的容量是限制整个空域容量的关键。扇区优化对于提高终端区容量、降低管制员的工作负荷,从而保证飞行安全具有重要意义。

由于受地面导航设施的限制,交通结构形式较为固定,但随着卫星导航设施、机载导航设备、PBN程序等的发展成熟、推广应用以及航路航线的改进,更加迫切地要求优化终端区扇区,以实现空域的高效利用。

收稿日期:2017-05-24; 修回日期:2017-06-21

基金项目:中国民航飞行学院研究生创新项目(X2016-63)

通信作者:令璐璐,1356214378@qq.com

目前,国内外有关扇区优化的研究,多集中于对数学模型的选取。国外,A. Yousefi 等^[1]将空域划分为正六边形,提出一种基于管制员负荷和空中交通复杂度的扇区优化方法;G. C. Richmond^[2]采用整数规划优化方法,使空域总管制负荷最小;D. Gianazza 等^[3]同时考虑管制工作负荷和空中交通复杂度,对扇区进行配置优化;O. Babic^[4]运用模糊逻辑和动态优化方法,提出不同时间的扇区动态优化方法。国内,杨光等^[5]根据扇区管制工作负荷均衡和扇区约束条件,将扇区优化转化为非线性规划,并运用 $K-T$ 方程和 SQP 法进行求解;张明等^[6-7]采用模拟退火算法进行扇区优化,并基于变精度粗集理论,规划出不同航班数时的动态扇区数。

西安咸阳国际机场作为西北地区最大的空中综合交通枢纽,是中国重要的门户机场,其运输业务量连续多年快速增长。截至 2016 年末,西安咸阳国际机场的年运输起降架次、旅客吞吐量、货邮吞吐量分别达到 29 万架次、3 700 万人次和 23 万吨,三项指标的年均增长率分别达到 9.0%、12.2%和 10.5%^[8];终端区扇区也从两个增加至五个。实际调研发现,当前扇区负荷存在不均衡现象,有必要进行扇区优化。

本文首先通过采集管制繁忙时段的录音、雷达数据等,以管制员的指令划分,量化管制员工作负荷,并计算得到各扇区的管制负荷;然后依据扇区负荷均衡度原则,基于遗传优化算法对原有扇区进行调整和优化。

1 扇区优化

1.1 扇区的划分

设 W_g 为扇区总负荷, S 为管制员的工作时间段,根据 ICAO 空中交通服务的 DORATASK 方法^[9],扇区的个数 N_s 为^[10]

$$N_s = \begin{cases} \text{int}\left(\frac{W_g}{S \times 80\%}\right) + 1 & \left(\frac{W_g}{S \times 80\%} \neq \text{int}\left(\frac{W_g}{S \times 80\%}\right)\right) \\ \text{int}\left(\frac{W_g}{S \times 80\%}\right) & \left(\frac{W_g}{S \times 80\%} = \text{int}\left(\frac{W_g}{S \times 80\%}\right)\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: int 为取整符号。

当 $\frac{W_g}{S \times 80\%}$ 的计算结果不为整数时,对其取整数再加 1。

1.2 优化目标函数

扇区优化的目标是依据“均衡管制负荷”的原则以使各扇区之间的管制负荷之差最小。

扇区优化的目标函数为^[11]

$$L = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} |W_i - W_j| \right\} \quad (2)$$

式中: W_i 和 W_j 分别为第 i 、 j 扇区的工作负荷; N_s 为扇区个数。

扇区优化的约束条件^[12]包括:

①扇区边界约束: 航路交叉点距离扇区边界必须满足规定距离,保证管制员有足够的时间去调配解决冲突。其约束公式为

$$D_{\min} \geq (t_1 + t_2)v + l \quad (3)$$

式中: D_{\min} 为交叉点距离扇区边界的最小距离; t_1 为管制员解决冲突所耗时间; t_2 为扇区之间移交所耗时间; v 为航空器的平均速度; l 为航空器之间的管制安全间隔距离。

②扇区最短停留时间约束: 航空器在扇区中至少要停留一定的时间,该时间应足够管制员完成监视和管制等操作。其约束公式为

$$T_{\min} \geq 2T_s \quad (4)$$

式中: T_{\min} 为扇区停留最短时间; T_s 为管制移交时间。

此外,还应考虑地空通信信号的范围,管制山区等特殊空域,例如放油区、限制空域等;扇区的划分应有利于管制员集中在雷达屏幕上的注意力等。上述因素均难以量化,在确定边界时,可作为参考因素。

2 遗传算法

1975 年,美国密执安大学的 John Holland 教授首先提出了遗传算法(GA),它是一种通过模拟自然进化过程来搜索最优解的方法,是模拟达尔文生物进化论“优胜劣汰”的自然选择和遗传学机理的计算模型^[13],适用于解决传统搜索方法难以解决的复杂问题和某些非线性问题^[14]。遗传算法的实质是根据“适者生存”的原则,对群体进行选择、

交叉、变异,逐代进化,最终得到满足条件的最优解。

适应度函数是遗传算法中的一个非常重要的因素,直接影响着 GA 的搜索能力和精度。在扇区优化中,本文采用优化目标函数的倒数作为适应度函数^[15],其公式为

$$F = \frac{1}{L} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} |W_i - W_j|} \quad (5)$$

选择算子是在父代群体中选择一些个体,遗传给下一代。主要采用轮盘赌的方法,即适应度比例法。选择概率为

$$P = \frac{f_i}{\sum_{j=0}^N f_j} \quad (6)$$

式中: f_j 、 f_i 分别为群体中第 j 和第 i 个个体的适应度。

交叉算子是 GA 产生新个体的主要方法,也是 GA 中具有搜索能力的主要算法。

变异算子是将等位基因换位,保证其不会永久不变,增强了 GA 的局部搜索能力。

遗传算法的流程如图 1 所示。

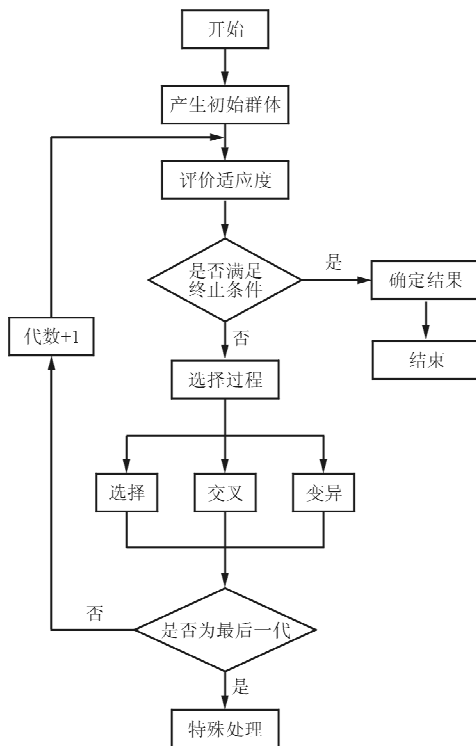


图 1 遗传算法流程图

Fig. 1 Flow chart of genetic algorithm

3 西安终端区扇区优化

目前,西安终端区共有五个扇区,其中 02 扇区和 03 扇区为外扇,外扇修正海压 3 000 m 至标准气压 6 000 m。水平边界在跑道中心延长线以北的空域为 02 扇区,以南为 03 扇区。01 扇区、05 扇区和 04 扇区为内扇,其中 01 扇区和 05 扇区负责进场,二者水平边界一致,01 扇区地面至修正海压 1 800 m,05 扇区修正海压 1 800 m 至修正海压 3 000 m;04 扇区负责离场,修正海压 1 800 m 至修正海压 3 000 m,西安终端区扇区平面图如图 2 所示。

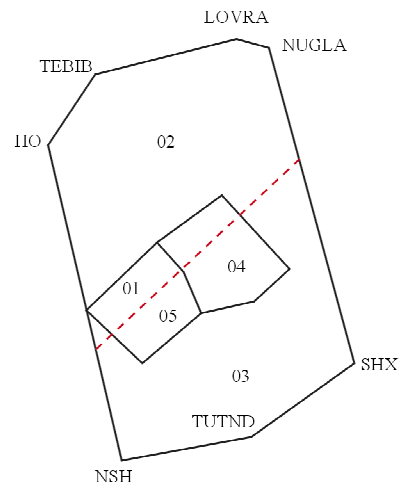


图 2 西安终端区扇区平面图

Fig. 2 Plane graph of Xi'an terminal sector

3.1 管制负荷的量化与统计

通过对西安终端区近期的雷达数据进行实际调研及统计分析,参考管制一线成熟管制员给出的各指令权值,整合得到西安终端区管制员负荷的综合值,如表 1 所示。

表 1 管制员负荷综合值

Table 1 Integrated value of controller workload

管制指令	综合值	管制指令	综合值
进场联系指令/s	17.5	盲降和塔台移交/s	16.8
高度指令/s	15.1	起飞许可指令/s	17.3
速度指令/s	9.4	离场初试联系/s	18.1
航向指令/s	8.2	离场移交指令/s	17.7
等待指令/s	17.8	其他(活动通报)/s	8.2
最后进近指令/s	14.4		

统计得到的西安终端区高峰小时段(14:00~14:59)进离港航空器数目和各指令次数,如表 2~表 3 所示。

表 2 14:00~14:59 进港指令统计
Table 2 14:00~14:59 arrival order statistics

单位:次									
进港方向	扇区	架次	初始联系	调航向	调高	调速	盲降许可	活动通报	移交
SHX	03(外扇)	11	11	25	60	33	0	8	11
NSH	03(外扇)	8	8	20	40	24	0	3	8
IIO	02(外扇)	8	8	24	48	24	0	15	8
LOVRA	02(外扇)	5	5	10	30	15	0	9	5
北(HO,LOVRA)	05(内扇)	13	13	13	15	26	0	8	13
南(SHX,NSH)	05(内扇)	19	19	19	38	38	0	10	19
北(IIO,LOVRA)	05(内扇)	13	13	26	30	13	13	5	13
南(SIIX,NSID)	05(内扇)	19	19	38	40	19	19	8	19

表 3 14:00~14:59 离港指令统计
Table 3 14:00~14:59 departure order statistics

单位:次						
离港方向	扇区	初始联系	调航向	调高	活动通报	移交
北(TEBIB,NUGLA)	04扇	8	8	16	8	8
南(TUTND)	04扇	14	0	28	14	14
北(TEBIB,NUGLA)	02扇	8	16	16	4	8
南(TUTND)	03扇	14	7	30	7	14

从表 2~表 3 可以看出:扇区总工作负荷为 15 484.8 s,01 扇~05 扇的管制负荷依次为 3 624.4、3 157.9、4 101.8、1 812.8 和 2 787.9 s,表明扇区之间的负荷差距较大;03 扇的流量约占总流量的 70%,因此需要进行扇区优化以均衡管制负荷。

3.2 容量评估

根据 DORATASK 方法,利用最小二乘原理的回归分析法,取管制员的平均工作负荷为峰值 80%时的航空器架次作为扇区的容量,得到扇区容量为 45 架次比较适合。而目前扇区容量为 54 架次,因此需要进行扇区优化以减轻管制员负荷、缓解空中交通压力。

3.3 遗传算法模型对扇区的优化

首先根据式(1)得到扇区的数目为六个;然后利用 MATLAB 编程,以扇区内重要航路点坐标为

关键点,生成有边界的 Voronoi 图,如图 3 所示;最后以均衡扇区管制负荷为目标,运用遗传算法进行扇区优化,得到优化图之后再加以修正,最终得到优化后的扇区,如图 4 所示。

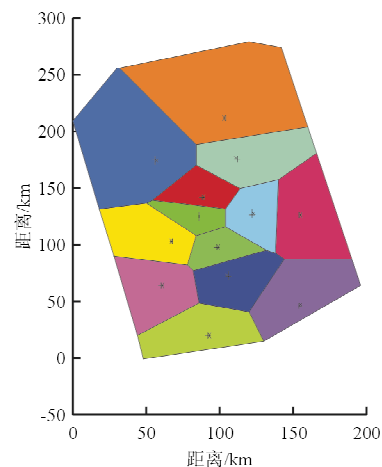


图 3 西安终端区 Voronoi 图

Fig. 3 Xi'an terminal area Voronoi diagram

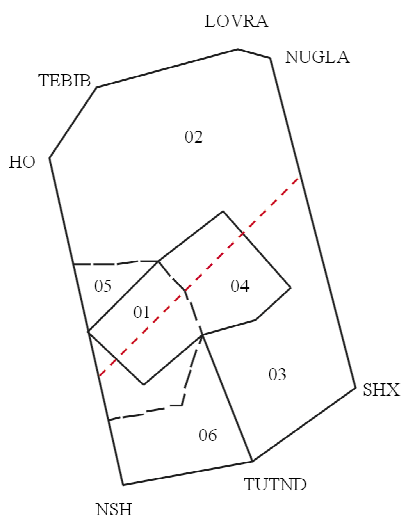


图4 优化后的西安终端区

Fig. 4 Xi'an terminal sector after optimization

从图3~图4可以看出:优化主要使05扇区扩大,同时,管制负荷最大的03扇区被划分为03和06两个扇区,这与实际情况相符;扇区总负荷由15 484.8 s降为13 926.6 s,优化后01扇区~06扇区的负荷分别为2 663.2、2 712.4、2 308.5、1 803.8、2 421.4和2 017.3 s,均小于统计时间的80%;经评估,扇区容量从45架次提升到58架次,各扇区的管制负荷得到均衡,取得了良好结果。

4 结束语

基于西安终端区扇区空中交通管理的现状,量化其管制员负荷,采用遗传算法,对扇区进行优化。通过新增扇区并调整扇区边界,使各扇区的管制负荷得到均衡,且管制员负荷均小于峰值的80%,降低了管制员负荷,优化效果明显,为西安终端区扇区的合理规划提供了科学依据和参考。但在本文的研究过程中,只考虑了静态的扇区优化,未涉及扇区的动态划分和优化,这将是下一步研究的重点内容。

参考文献

[1] Yousefi A, Donohue G L. Temporal and spatial distribution of airspace complexity for air traffic controller workload-based sectorization[C]. AIAA-2004-6455, 2004.
[2] Richmond G C. An interim description of the doratask methodology the assessment of sector capacity[M]. Lon-

don: Civil Aviation Authority, 1998.

- [3] Gianazza D, Alliot J M. Optimization of air traffic control sector configurations using tree search methods and genetic algorithms [C]. Digital Avionics Systems Conference, 2002: 1-8.
[4] Babic O, Krstic T. Airspace daily operational sectorization by fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 49-64.
[5] 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. Airspace sector structure optimization design based on nonlinear programming[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2008, 6(4): 82-86. (in Chinese)
[6] 韩松臣, 张明. 依据管制工作负荷的扇区优化新方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(1): 91-96.
Han Songchen, Zhang Ming. Optimization method for sector partition based on control workload[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(1): 91-96. (in Chinese)
[7] 张明. 管制扇区的最优化划分方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 308-312.
Zhang Ming. Method for sector optimum partition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(3): 308-312. (in Chinese)
[8] 中国民用航空局. 2016年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2017-05-08)[2017-05-24]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>.
Civil Aviation Administration of China. Statistics bulletin on civil aviation industry development in 2016[EB/OL]. (2017-05-08)[2017-05-24]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>. (in Chinese)
[9] 张功. 基于管制员工作负荷的扇区容量评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Zhang Gong. Research on evaluation of sector capacity technology base on controller workload[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
[10] 国际民用航空组织. 空中交通服务计划手册[S]. 蒙特利尔: 国际民用航空组织, 1999.
ICAO. Air traffic service manual[S]. Montreal: ICAO, 1999. (in Chinese)
[11] 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, 5(4): 86-89.
Zhang Ming, Han Songchen. Method of sector optimum partition based on controller workload[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 86-89. (in Chinese)
[12] 谢鹏. 机场终端区扇区优化技术研究[D]. 南京: 南京航空

- 航天大学, 2012.
- Xie Peng. Research on sector optimization of airport terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [13] Goldberg D E. Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning[M]. Boston, USA: Addison Wesley, 1989.
- [14] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 1-4.
Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm theory application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2002: 1-4. (in Chinese)
- [15] 孔德福. 终端区扇区优化技术研究[D]. 南京: 南京航空航
- 天大学, 2011.
- Kong Defu. Research on terminal area sector optimization [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- 作者简介:**
令璐璐(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:空中交通管理。
罗 军(1970—),男,教授。主要研究方向:空中交通管理、空域规划。
- (编辑:马文静)**

~~~~~

**(上接第 255 页)**

- Li Ming. Character research on dual throat fluidic vectoring thrust nozzle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [36] 李明, 徐惊雷. 旁路式双喉道无源矢量喷管: 中国, 102434315[P]. 2012-05-02.  
Li Ming, Xu Jinglei. Bypass dual throat no-source vectoring nozzle: China,102434315[P]. 2012-05-02. (in Chinese)
- [37] Gu Rui, Xu Jinglei, Guo Shuai. Experimental and numerical investigations of a bypass dual throat nozzle[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(8): 63-69.
- [38] Gu Rui, Xu Jinglei. Dynamic experimental investigations of a bypass dual throat nozzle[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(8): 72-79.
- 作者简介:**  
夏雪峰(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:宇航推进理论。  
高 峰(1965—),男,教授,博导。主要研究方向:航空宇航推进理论与技术。  
黄桂彬(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计与论证。  
杨文佳(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:宇航推进理论。
- (编辑:马文静)**