

文章编号: 1005-0523(2006)04-0144-05

# 进化算法在终端区飞机动态排序中的应用

周伟, 白存儒, 褚芳芳

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 讨论了终端区飞机动态排序问题, 并利用进化算法建立了终端区航班排序的数学模型. 根据飞机尾流间隔要求, 利用生物进化理论, 找到更合理的航班着陆队列, 减小了航班的总延误成本. 仿真结果表明, 航班总延误成本的优化结果是令人满意的, 该算法在终端区飞机动态排序问题中的应用是可行的.

**关键词:** 空中交通管制; 终端区; 飞机排序; 进化算法

**中图分类号:** TN915.6; TN929.11

**文献标识码:** A

## 0 引言

近年来, 随着计算机硬件技术的飞速发展, 计算机的科学计算能力突飞猛进. 人们利用计算机强大的计算能力, 模仿自然界的一些现象, 创造出很多模拟算法. 其中一些算法被应用到空中交通管制的实际问题中, 极大提高了空中交通管制的效率, 加速了空中交通管制自动化的进程.

飞机排序的常用方法是先到先服务(FCFS)的方法, 根据飞机预计到达时间(ETA), 对于到达的飞机进行排序, 并给出合理的间隔, 但延误相对较大. 因此, 国内外对飞机队列优化算法做了一些其它研究, 比如时间提前量算法(Time Advanced, TA)、约束位置交换算法(Constrained Position Shift, CPS)、滑动窗优化算法、模糊模式识别算法等. 其中TA算法是通过给每一组飞机中的第一架飞机一个时间提前量来减少延误, 再利用不同类型的飞机相互尾随所需要的尾流间隔不同对飞机序列进行轻微的调整, 从而缩短队长和降低平均延误. CPS算法是建立在动态规划基础上, 对所有可能的飞机排序树进行寻优, 找到一条花费(这里指每两架飞机之间所必需

的时间间隔的总和)最小的路径, 即得到了改组飞机的最佳次序, 但这样可能会使飞机的队列有较大的变动, 增加了管制员的负担, 同时也增大了实现难度. 模糊模式识别以模糊数学理论为基础, 总和考虑了飞机排序的各个因素, 模拟管制员的决策过程做出决策, 进行科学排序, 但该算法的隶属度函数的选择较为困难, 且科学计算较为复杂.

## 1 终端区交通情况描述

空中交通管制系统的服务对象是在空域中运行的飞机, 为了保证飞机的安全距离间隔, 必须引用时基的概念. 即在交通管理中以时间作为统一标准来管理所有的飞机, 把距离间隔转化为时间间隔, 两者的转化由计算机根据实时数据计算得出. 不同类型的飞机之间的尾流间隔标准不同, 国际民航组织(ICAO)规定了在无风条件下不同类型的飞机之间最小尾流间隔距离标准, 因此也可以得到最小时间间隔标准, 见表1.

收稿日期: 2005-10-08

作者简介: 周伟(1982-), 男, 江苏南京人, 西北工业大学航空学院研究生, 专业: 交通运输规划与管理.

表 1 ICAO 规定的最小间隔标准

飞机类型	最小距离间隔/n mile			最小时间间隔/s		
	小型	大型	重型	小型	大型	重型
S	3	3	3	98	74	74
L	4	3	3	138	74	74
H	6	5	4	167	114	94

假设机场只有一条跑道,且只考虑着陆队列,规定飞机只可能从几条不同的航路进入机场终端区,概率大致相等.这样所有进入机场终端区的飞机都可以按照时间排成一个队列,图 1 给出了一个机场终端区的水平航路结构示意图.

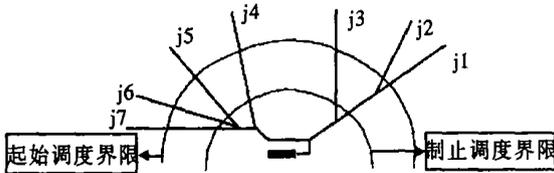


图 1 机场终端区航路结构示意图

由图 1 可知,机场终端区的空域被划分为 3 部分,由 2 个调度界限来定义.起始调度界限是一个空间界限,它是每架飞机进入管制区的边界,当飞机穿越它时,排序算法就接受它的一组参数,进行排序;终止调度界限是特定的距离着陆时间来定义的,也可以叫做冻结界限,一旦一架飞机穿越了冻结界限,它到达机场跑道的计划到达时间就保持不变,直到着陆.两个界限之间称为冻结区.

## 2 进化算法

早在 60 年代初期,柏林工业大学的 I. Rechenberg 和 H. P. Schwefel 等在进行风洞实验时,利用生物变异思想来随机改变物体形状参数,并取得了较好的结果.随后他们对这种方法进行了深入的研究,形成进化计算的一个分支进化策略(Evolutionary Strategy, ES)<sup>[1]</sup>.现今进化计算基本划为 4 个分支,除了 ES 以外,还有遗传算法(GA),进化规划(EP)和遗传程序设计(GP).在进化计算中大多数系统采用基于种群的设计方案,加入自然选择、交叉和变异等操作,来完成种群的进化过程,模式定理可以解释这种进化过程的数学基础<sup>[2]</sup>.

进化算法采用双性繁殖的思想,算法中有交叉操作.在飞机排序问题中,交叉和变异等基本操作会产生许多无效解,因此在飞机排序问题中,应采用改进的交叉和变异操作.

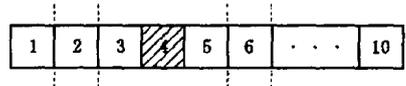
本文采用的进化算法可以看作作为一种单性遗

传,并不采用交叉操作的方式,避免产生无效解,仅用改进的变异操作产生新的个体,以符合飞机排序最优解的搜索问题<sup>[3]</sup>.

变异算子 1:基因座选择算子.在小于排序航班数  $n$  中随机生成一个正整数,以这个整数来表示要变换位置的基因座.若随机选中的整数为 4,被选中的基因为



变异算子 2:飞机序列变化算子.在小于最大位置改变量(Max Position Shift, MPS)的情况下,随机生成一个整数,(整数的绝对值小于 MPS),代表要变换的基因座前移或者后移的改变量.若 MPS 的值为 2,染色体中被选中的基因可变化的位置有



飞机排序问题中,对算法还有实时性的要求,计算应该能够在合理的时间内完成,并收敛到合适的解,因此给定算法的两个停滞条件,其中任何一个条件满足,算法停止.

1) 最大进化代数:算法在没有任何异常中止的情况下所规定运行的代数.

2) 停滞代数:算法运行中,适应度值没有改进的代数大于规定的停滞代数时,算法被中止运行,此时种群中适应度最高的解为最优解.

算法利用种群的进化寻找最优解.在进化过程中,采用选择策略,寻找到比现今种群中平均适应度高的个体时,复制优良个体替换适应度较低的个体.在进化过程中不断进行选择,最终收敛到一个优良种群,其中适应度最高的个体即为最优解.

## 3 建立数学模型

### 3.1 算法的数学模型

终端区在起始排序界限和终止排序界限之间有一个排序区,排序区中有多条航路通向排序冻结区,每条航路上都有飞向冻结区的飞机队列.我们以其中一条航路为例,设该航路上有  $N$  架飞机,各个参量定义为:第  $i$  架飞机的类型为  $p(i)$ ,当  $i, j$  分别为此航路上前后两架飞机时,定义的时间间隔为  $d[p(i), p(j)]$ ,延误成本指数为  $r[p(i)]$ ,延误成本为  $R(i)$ ,预计到达时间为  $t_i'$ ,实际到达时间为  $t_i$ ,飞机的延误定义为  $D(i)$ ,平均延误成本为  $aver-$

$aged$ .

在没有发生任何交通管制原因而引起的延误,飞机的到达时间为预计到达时间  $t_i'$ . 飞机因为受到各种干扰(交通管制或天气因素影响等等)而实际到达的时间称为实际到达时间  $t_i$ . 设  $H$  为  $N$  维向量,  $H(i) \neq H(j), \forall i, j \in [1, N]$  且  $i \neq j$ . 设  $H$  代表问题的一个可行解, 表示一个可能的着陆序列,  $H(i)$  代表飞机在这个序列中的位置为  $i$ , 前一位置的飞机为  $H(i-1)$ ,  $H(i)$  的到达时间为:

$$t[H(i)] = \max \{ t'[H(i)], t[H(i-1)] + d(p[H(i)], p[H(i-1)]) \} \quad (1)$$

由上式可以看出队列  $H$  中, 第  $i$  架飞机的到达时间为  $\max$  函数中两个量的最大值, 第一个量为飞机的预计到达时间, 第二个量为上一架飞机的实际到达时间与两架飞机之间的间隔时间之和, 在此把延误定义为:

$$D(i) = t(i) - t'(i) \quad (2)$$

因为飞机队列中的飞机类型不同, 相同的延误时间对每一类型飞机的延误成本是不相同的, 机型越大的飞机可认为延误成本越高, 飞机的延误成本可以定义为:

$$R(i) = \gamma[p(i)]D(i) = \gamma[p(i)]t(i) - t'(i) \quad (3)$$

整个队列的平均延误成本为:

$$average_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma[p(i)][t(i) - t'(i)] \quad (4)$$

在进化计算中, 处理的问题大部分是寻找最大值的问题, 而我们在讨论飞机排序问题时的目标函数是寻找最小值的问题, 为了适应进化计算的要求, 我们将目标函数的倒数作为适应度选择函数. 计算中为了避免平均延误为 0 造成适应度函数分母无意义的情况, 给分母加上一个无穷小的数  $\epsilon^{[4]}$ . 此时适应度选择函数为:

$$f(S) = \frac{1}{average_D + \epsilon} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma[p(i)][t(i) - t'(i)] + \epsilon} \quad (5)$$

### 3.2 动态算法的流程

在终端区中, 从起始调度界限到终止调度界限的整个排序区中, 有若干条航路, 我们对每条航路运用进化算法进行排序. 由于在实际情况中, 越靠近终止排序界限的飞机由于位置已十分接近排序冻结区, 可供管制员进行排序飞行的裕度越小, 所以在排序的过程中还应给靠近终止排序界限的飞

机有较高的优先级, 这样以避免它们在队列中的位置发生较大的改动, 在算法中采用整个排序区中所有飞机的预计到达时间小于某一特定的时间量来限制.

飞机队列在进行变动的时候, 若后面的飞机要插入到前面连续飞行的两架飞机之间, 首先需要判断它们之间是否有足够的间隔使得它们与新插入的飞机不产生冲突. 若有, 直接插入, 否则, 解决冲突. 通常采用的管制手段为被超越的飞机减速, 使后面的飞机能够顺利的超越. 但这样必然会增加被超越飞机的延时. 为了减少延时, 可让被超越飞机减速的同时, 使超越的飞机进行加速. 如果这种队列次序变化过大, 必然增加管制员的负担, 因此我们限制飞机的次序的变化, 引进最大位置交换  $MPS=2$ , 这样可以减小飞机队列变化给管制员造成过大的负担, 并寻找出延误成本相对较小的飞机队列.

完成排序区中所有航路上飞机的排序之后, 再根据排序好的飞机的预计到达时间, 将最接近排序冻结区的飞机移出, 即从进化算法对象中移出, 移出飞机的数量根据实际情况设定. 从进化算法中移出的飞机, 再根据 FCFS 算法给出合理的时间间隔, 进入排序冻结区, 加入最终着陆队列. 没有移出进化算法的飞机与继续进入的排序区的飞机参与下一次进化算法的排序, 继续上面所述的过程, 最终完成着陆队列的排序.

整个算法的流程如下:

a) 在排序区中, 根据进化算法和约束条件完成每条航路上飞机队列的排序, 得到延误成本较低的飞机队列;

b) 每条航路上排序完成之后, 根据整个排序区中飞机的预计到达时间, 将最接近排序冻结区的飞机移出进化算法的对象;

c) 移出进化算法对象的飞机, 再根据 FCFS 算法给出合理的时间间隔, 进入排序冻结区, 加入着陆队列;

d) 未移出进化算法对象的飞机和继续进入排序区的飞机作为下一次进化算法排序的对象, 重复上面所述的步骤;

a-d 步往复循环, 完成整个终端区的飞机着陆队列的动态排序过程.

### 4 仿真结果

本文采用 MATLAB 编写了算法仿真程序. 用某机场的班机时刻表对算法进行检验. 模型仿真的时候借鉴了英国设菲尔德(Sheffield)大学的 MATLAB 遗传算法工具箱中的源代码<sup>[5]</sup>, 对种群的生成和选择等的代码进行了修改, 加入进化过程的两个算子. 在仿真时使用的进化算法的参数: 种群大小为

20, 染色体的长度为 10, 变异概率 60%, 最大移动量  $MPS=2$ , 最大进化代数 为 200, 停滞代数为 50. 类型为 S、L、H 的航班延误成本指数分别为 20、30、40. 仿真结果显示整个终端区航班队列的总延误时间有所减小, 但变化不大. 而进化算法的目标——航班总的延误成本得到降低. 仿真结果中静态航班延误成本减小了, 动态航班队列排序延误成本减小了. 因此可以看出在解决航班总延误成本优化的动态排序问题中, 进化算法比 FCFS 算法更为令人满意.

表 2 静态队列航班排序结果

航班序号	航班类型	FCFS 算法			静态进化算法			
		预计到达时间/s	实际到达时间/s	航班延误成本 $R(i)$	航班队列	航班类型	实际到达时间/s	航班延误成本 $R(i)$
1	L	30	30	0	1	L	30	0
2	L	84	104	600	2	L	104	600
3	L	112	178	1980	3	L	178	1980
4	H	175	252	3080	4	H	252	3080
5	L	203	366	4890	7	H	346	5720
6	L	265	440	5250	5	L	460	5850
7	H	301	514	8520	6	L	534	6990
8	L	354	628	8220	8	L	618	7920
9	L	399	702	9090	9	L	692	8790
10	L	448	776	9840	10	L	766	9540
11	L	502	850	10440	11	L	840	10140
12	H	543	944	16040	12	H	934	15640
13	L	595	1058	13890	13	L	1048	13590
14	S	633	1196	11260	15	L	1122	14670
15	L	672	1270	17940	14	S	1260	11760
航班延误成本之和 $\Sigma R(i)$				121040	116270			

表 3 动态队列航班排序结果(一架已着陆)

航班序号	航班类型	FCFS 算法			静态进化算法			
		预计到达时间/s	实际到达时间/s	航班延误成本 $R(i)$	航班队列	航班类型	实际到达时间/s	航班延误成本 $R(i)$
2	L	84	104	600	2	L	104	600
3	L	112	178	1980	3	L	178	1980
4	H	175	252	3080	4	H	252	3080
5	L	203	366	4890	7	H	346	5720
6	L	265	440	5250	5	L	460	5850
7	H	301	514	8520	6	L	534	6990
8	L	354	628	8220	8	L	618	7920
9	L	399	702	9090	9	L	692	8790
10	L	448	776	9840	10	L	766	9540
11	L	502	850	10440	11	L	840	10140
12	H	543	944	16040	12	H	934	15640
13	L	595	1058	13890	13	L	1048	13590

14	S	633	1196	11260	15	L	1122	14670
15	L	672	1270	17940	16	L	1196	15720
16	L	706	1344	19140	14	S	1334	12560
航班延误成本之和 $\Sigma R(i)$				140180	132790			

在动态排序算法中,有一架飞机(类型L)在第一架飞机着陆之后进入排序区,进化算法很好的解决了这一问题,在航班队列变化不大的情况下,减少了延误成本.因此本文的动态排序算法的结果是能够令人满意的.

## 5 结论

本文主要研究了进化算法在终端区飞机动态排序问题中的应用,利用生物进化理论,利用两个变异操作算子来完成种群的进化.合理选择适应度函数和进化算法的运行参数,使算法可以满足空中交通管制实时性的要求.仿真结果表明:在动态航班排序中,进化算法和FCFS算法相比,航班总的延误时间和最大延误时间没有发生太大变化,但减少了总的航班延误成本.算法采用了MPS作为约束条件,对航班队列的变化进行限制,防止航班队列变

化过大,减小了管制员工作的压力,在合理的范围内解决了航班总延误成本的优化问题,最终得到的结果是令人满意的.

## 参考文献:

- [1] 王小平,曹立明.遗传算法[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [2] 杨海军,李敏强.进化算法中基于排序选择下的准确模式理论[J].系统工程学报,2004,79-84
- [3] V. H. L. Cheng, L. S. Crawford, and P. K. Menon. Air Traffic Control Using Genetic Search Techniques[C]. Optimal Synthesis Inc. Palo Alto, California, 1999, 22-27
- [4] Delahaye Daniel, Sofiane Oussedik, Puechmorel Stephane. Airspace Congestion Smoothing by Multi-objective Genetic Algorithm [C]. ACM Symposium on Applied Computing, 2005, 907-912
- [5] 雷英杰,张善文,李续武,周创明. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005.

# Application of Evolution Algorithm to Aircraft Sequencing in Terminal Area

ZHOU Wei, BAI Cun-ru, CHU Fang-fang

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The dynamic aircraft sequencing problem in the terminal area was discussed and a mathematical model of aircraft sequencing in the terminal area was established. According to the aircraft wake separation, the algorithm use biological evolution theory to find a more reasonable sequence to decrease the cost of total aircraft delay. Simulation results indicate that the result of total aircraft delay cost optimization is satisfactory and application of the algorithm to the aircraft sequencing in terminal area is feasible.

**Key words:** air traffic control; terminal area; aircraft sequencing; evolution algorithm