

# 改进的基因表达算法对航班优化排序问题研究

梁文快<sup>1,2</sup>, 李毅<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 国家空管自动化系统技术重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:**文中主要针对航班排序问题,以减少航班延误为目的,提出了改进型基因表达式算法。通过研究基因表达式编程在航班排序中的应用,在此基础上设计了改进型基因表达算法(IGEA),并给出了算法的详细描述和步骤。通过仿真实验,与传统 FCFS 算法相比,该算法可有效减少总的航班延误时间,并且改进型基因表达式算法的效率要高于 FCFS,且能搜索到全局最优解。通过仿真对比,基因表达式算法能很好地提高航班排序效率,减少航班延时。

**关键词:**空中交通管理;航班排序;基因表达式编程;全局最优

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2014)07-0005-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.002

## Research on Optimization of Flight Scheduling Problem Based on Improved Gene Expression Algorithm

LIANG Wen-kuai<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. National Key Laboratory of Air Traffic Control Automation System Technology,  
Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Mainly aiming at the flight scheduling problem, in order to reduce flight delays, the improved gene expression algorithm is proposed. By studying the application of the GEP in the flights scheduling, the improved gene expression algorithm is designed based on it in this paper, and give a detailed description of the algorithm and steps. The simulation experiments show that compared with the traditional FCFS algorithm, this algorithm can effectively reduce the total time of flight delays, and the efficiency of gene expression algorithm is better than FCFS, and can gain the global optimal solution. By comparing the simulation, the gene expression algorithm can improve flight sorting efficiency, reduce flight delays.

**Key words:** air traffic management; flight schedule; gene expression programming; global optimal

## 0 引言

近年来,随着航空器数量的不断增长,机场已由传统的单跑道多滑行模式变成了现在的多跑道多滑行模式。空中交通流量也迅猛增加,这就造成了很多机场的交通出现拥挤现象,使得航班延误时常发生。航班延误不仅与气候等自然因素有关,在很多情况下,还与航班的调度有关。合理有效的航班排序,能有效地缩减航班延误时间,因此航班调度问题已被许多学者关注<sup>[1-4]</sup>。对于终端区,合理的航班调度是减少航班延误的一个重要方面。传统的航班调度方法主要

有:先来先服务(FCFS),这种方法的优点是简单,缺陷是航班延时严重。目前,针对航班延时问题,一些专家学者提出了相应的调度方法:遗传算法,模拟退火算法,还有改进的遗传算法等。但是,这些算法不能高度并行、随机、自适应搜索,也不能保证最优航班序列的存在。

基因表达式编程是在遗传算法和遗传编程的基础上发展而来的,它具有遗传算法和遗传编程的优点。在表达形式上,它继承了GA的定长线性编码简单快捷的特点;在基因表达(语义表达)上,它继承了GP的

收稿日期:2013-09-29

修回日期:2014-01-06

网络出版时间:2014-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60736046&60572175);国家“863”高技术发展计划项目(2006AA12A10)

作者简介:梁文快(1988-),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为空管自动化系统;李毅,副教授,硕士生导师,通信作者,研究方向为空管自动化系统。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140424.0830.075.html>

树形结构灵活多变的特点,用简单编码解决复杂问题,因此具有较强的解决问题的能力<sup>[5-6]</sup>。文中通过研究基因表达式编程在航班排序优化问题上的应用,结合具体仿真环境对基因表达式编程进行了改进,具体改进方面主要有:

(1) 算法流程上舍弃了原始 GEP 算法的转座和重组;

(2) 编码方式上采用“1”和“2”分别表示滑行道 1 和滑行道 2 上的所有航班,编码简单;

(3) 文中的变异算子是将某对基因对(航班)“1”和“2”进行对调,得到变异后的染色体;

(4) 文中采用保留除了最优个体的所有染色体方法,放弃使用赌盘轮采样策略;

(5) 在适应度函数选择方面,文中选择了适合仿真实验的适应度函数  $F(t)$ 。

同时,文中对 FCFS 算法和改进后的基因表达式算法在航班排序问题上的仿真结果进行了对比,通过仿真实验表明,改进型基因表达式编程在航班排序优化问题上要优于 FCFS 算法。

## 1 航班排序问题描述

航班排序一般有进场和离场两部分,文中重点讨论离场排序部分。离场指的是航班飞离终端区之前,未进入航线的过程,主要有准备起飞、飞离机场和飞离终端区三个阶段。一般飞离机场又包含地面和空中两个方面,文中主要以地面操作部分为讨论的重点,并且以多滑行道、单跑道模式为研究对象,多个离场航班队列,每个队列占一个滑行道,如图 1 所示。

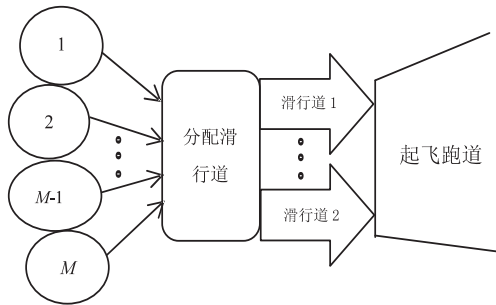


图 1 航班离场图

离场航班调度就是对航班进行排序,并使得排序模型最优化,跑道利用率最大且航班的总延时最小。由于在实际应用中,每个离场航班都对应一个起飞跑道,一条滑行道和一个离场时段,那么这就需要确定两个问题,一个是滑行道的分配,另一个是航班离场排序。离场航班分多个队列进入滑行道,那么在跑道起飞端,如何选择第一架起飞航班,使得总的航班离场时间最小。这个问题是一个排序优化问题,可以建立排序模型,设计排序算法来解决。

## 2 航班离场排序模型

合理安排航班排序,使得航班在安全的保障前提下,产生的总延时最小。为了使得航班离场的总时延最小,文中建立如下表达式及变量:

$$\min DT = \sum_{i=1}^M (dt_i - dt_{i-1}) = dt_M - dt_0 \quad (1)$$

其中,  $M$  为正在等待起飞的航班总数;  $dt_i$  为航班  $i$  的分配离场时间;  $dt_0$  为正在跑道上的航班离场时刻;  $dt_M$  为最后一架航班的分配离场时刻。

$$\Delta dt_{(i-1,0)} = dt_i - dt_{i-1} \geq \max(m_{(i,i-1)} - w_{(i,i-1)}), i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

其中,  $m_{(i,i-1)}$  代表航班的纵向间隔;  $w_{(i,i-1)}$  代表航班的尾流间隔。

为了达到所有航班的总离场时间消耗最低这一目标,所有的航班只有尽可能的连续离场才能达到这一期望,所以在(2)式中取等号。假设  $\Delta dt_{(i+1,i)}$  表示第  $i$  架航班与第  $i+1$  架航班之间的最小安全间隔时间,则目标表达式(1)可化为:

$$\min DT = \sum_{i=1}^{M-1} \Delta dt_{(i+1,i)} \quad (3)$$

由 FCFS(先到先服务)原则可知,每个滑行道上的航班队列都应该满足

$$dlt_j^k - dlt_{j-1}^k \geq 0, j = 1, 2, \dots, M_k; k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

其中,  $dlt_j^k - dlt_{j-1}^k$  分别表示第  $k$  条滑行道上第  $j$  和第  $j+1$  航班(前后机)的分配起飞时刻,  $M_k$  表示第  $k$  条滑行道(队列)的航班数,显然  $\sum_{k=1}^K M_k = M$  成立。并且条件(4)也保证了在 FCFS 的原则下航班离场要遵从的一个性质:各队等待起飞航班的相对顺序不变。

## 3 算法设计

基因表达式编程(Gene Expression Programming, GEP)是由葡萄牙裔英国籍学者 Candida Ferreira 于 2001 年提出的一种新的遗传算法,这种算法综合了传统遗传算法(GA)和遗传编程(GP)的优点,使用线性、简单、固定长度的个体表达不同形状和大小的树状结构,这一特点能使其拥有强大的遗传算子,从而使程序能够高效地进化,并能有效地搜索解空间。

### 3.1 编码方法

由于编码方式要保证航班在各队列的相对顺序不变,又要保证交叉和变异形成的总队列满足该条件并且具有实际的意义,一些普通的编码方式,如符合编码或者是序号编码已在一些算法中提到或使用,但是这些编码方式不具有这样的功能。从此问题的特点出发,文中设计另一种编码方式。为简单起见,文中研究

两个滑行道(队列)的情形。将滑行道1的所有航班标记为“1”,将滑行道2上的所有航班标记为“2”,则MF个“1”和NF个“2”,共有MF+NF个航班(标号),其中,第一个“1”至第MF个“1”对应于 $A_1, A_2, \dots, A_{MF}$ ,第一个“2”至NF个“2”对应于 $B_1, B_2, \dots, B_{NF}$ 。

3.2 变异算子设计

变异是所有具有修饰能力的算子中最高效的算子,即使在变异概率很小的情况下,经历变异的系统能很容易地调整使种群在峰顶保持平衡(虽然这种平衡并不稳定)<sup>[7-10]</sup>。

因为个体中的基因型只包含“1”和“2”两种符号,并且个数保持不变,所以,最简单最直观的变异方法就是将个体编码中的某对基因(航班)“1”和“2”进行位置对换操作,从而得到变异后的染色体。

3.3 选择

选择指的是从群体中以一定的概率选择若干个体,并且这些个体是下一代的父代。文中放弃采用赌盘轮采样策略,而是直接保留除了最优个体的所有个体,这也达到了保持群体大小不变的目的。

3.4 适应度函数

文中选择的适应度函数如下:

$$F(t) = \frac{MF + NF}{\sum_{i=1}^{MF+NF-1} \Delta dt_{(i,i+1)}}$$

(5)

其中,  $\sum_{i=1}^{MF+NF-1} \Delta dt_{(i,i+1)}$  表示所有航班总离场的最小耗时。

3.5 最优航班的保留策略

文中采用最优航班的保留策略,即保留最优个体和最优可行个体。开始保留第0代的最优个体和最优可行个体,然后从第1代开始,依次将后一代的最优个体和最优可行个体同前一代的保留的个体进行比较,如果当前代的最优个体和最优可行个体优于前一代保留的个体的话,那么就将当前代个体保留,否则前一代保留个体成为当前代保留个体。

4 IGEA 算法流程

文中提出的 IGEA 算法的流程图如图 2 所示。

5 实验仿真与结果分析

仿真实验采用 C++ 作为开发工具,并使用多组测试数据进行了验证。实验中,航班的尾流间隔采用国际民航组织的规定标准,航空器分成三类,即:重型(H),中型(M)和轻型(L)。表 1 中给出了航空器类型以及不同类型航空器之间的尾流间隔,行表示前者航空器类型;列表示后者航空器类型<sup>[11-12]</sup>。

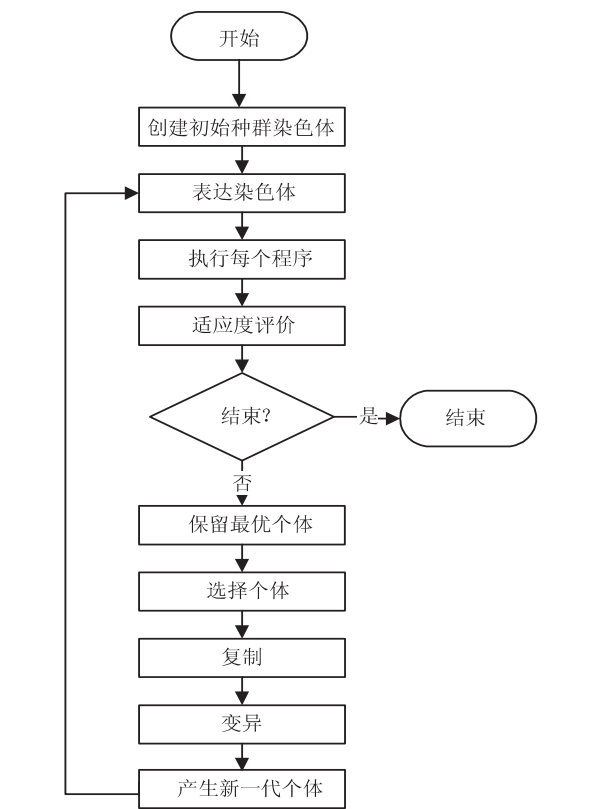


图 2 IGEA 算法流程图

表 1 航班尾流间隔 s

	H	M	L
H	54	96	132
M	54	96	96
L	54	54	54

文中 IGEA 算法在仿真实验中所使用的参数如表 2 所示。

表 2 IGEA 算法参数

参数名称	参数值
种群大小	100
进化代数	1 000
变异概率	0.044
染色体长度	20
基因数	20

在仿真实验中,随机产生两个队列 $q_1, q_2$ ,每对分别包含 10 个不同的航班, $q_1$  在前 $q_2$  在后,得到初始航班序列 $Q_0$ 。算法假设 $Q_0$ 即为 FCFS 算法航班序列,并使用 IGEA 对 $Q_0$ 进行了优化,最后得到了优化后的航班序列 $Q_n$ 。仿真的结果表明,航班序 $Q_n$ 的总耗时较 $Q_0$ 有明显的减小,如表 3 所示。

从优化前后航班离场耗时与序列散点图可以得到,优化后的离场航班要比优化前的航班分布均匀,而且从第三个航班开始,IGEA 算法航班的耗时都要小于对应 FCFS 算法的航班耗时,从而使得 IGEA 算法总航

班离场耗时小于 FCFS 算法的总离场耗时,如图 3 所示。

表 3 优化前后离场航班总耗时对比表

航班序号	FCFS 算法		IGEA 算法	
	随机序列	耗时/s	优化序列	耗时/s
1	H(1)	0	M(2)	0
2	H(1)	54	H(1)	54
3	M(1)	150	H(2)	108
4	M(1)	246	H(2)	162
5	H(1)	300	H(1)	216
6	M(2)	396	L(1)	348
7	H(1)	450	L(2)	402
8	L(1)	582	M(2)	456
9	M(1)	636	M(1)	552
10	L(1)	732	L(2)	648
11	H(2)	786	M(2)	702
12	H(2)	840	H(1)	756
13	M(2)	936	M(2)	852
14	M(2)	1 032	L(1)	948
15	H(2)	1 086	M(1)	1 002
16	M(2)	1 182	H(1)	1 056
17	H(2)	1 236	M(1)	1 152
18	L(2)	1 368	M(1)	1 248
19	M(2)	1 422	H(2)	1 302
20	L(2)	1 518	H(2)	1 356

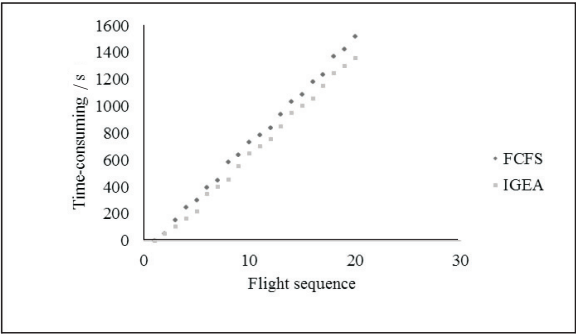


图 3 优化前后航班离场耗时与序列散点图

通过改进型基因表达式编程算法在航班离场排序问题上的仿真实验可以得出,与先到先服务(FCFS)算法比较,在总延时和每架航班的平均延时方面,都有明显的缩小,从而减少航班在空中的平均等待时间,提高了机场的实际利用率,在一定程度上也缓减了航班延误,提高了航班的安全性<sup>[13-14]</sup>。

6 结束语

文中主要研究了改进型基因表达式编程算法在航班离场排序问题上的优化,并且建立了优化排序的数学模型,通过仿真实验对模型进行了求解,实验结果表明,文中改进的算法能有效地缩小总的航班延时,并能

得到离场航班排序的最优解。今后的进一步研究可考虑对多跑道多滑行道航班离场排序优化问题以及航班排序优化的实际应用。

参考文献:

[1] 王来军,史忠科.航班离场排序问题的遗传算法设计[J].系统工程理论与实践,2005,25(9):119-125.

[2] 牟丽莎,王冬磊,彭丽娟.基于基因表达式编程的终端区飞机优化排序模型设计[J].西南科技大学学报,2011,26(3):72-77.

[3] 杨秋辉,游志胜,冯子亮,等.一种改进的基于遗传算法的多跑道到达飞机调度[J].四川大学学报(工程科学版),2006,38(2):141-145.

[4] Pan Weijun,Zhang Lin,Chen Tong. Notice of retraction optimization of flight sequencing on airport based on gene expression algorithm[C]//Proc of 2010 3rd IEEE international conference on computer science and information technology. Chengdu:IEEE,2010:278-281.

[5] 元昌安,彭昱忠,覃晓,等.基因表达式编程算法原理与应用[M].北京:科学出版社,2010.

[6] 费红霞.改进的基因表达式编程算法的研究及其应用[D].武汉:武汉科技大学,2009.

[7] Ferreira C. Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence [M]. [s. l.]: Springer, 2006.

[8] 王艳春.基因表达式编程算法及其应用综述[J].计算机应用与软件,2010,27(6):23-26.

[9] 李川,唐常杰,陈瑜,等.无表达式树的基因表达[J].计算机应用,2008,28(5):1319-1321.

[10] 张梅凤,邵诚,甘勇,等.基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法[J].电子学报,2006,34(8):1381-1385.

[11] Capri S, Ignaccolo M. Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model[J]. Journal of Air Transport Management, 2004,10(5):345-351.

[12] Liu Tung-Kuan,Chen Chiu-Hung,Chou Jyh-Horng. Optimization of short-haul aircraft schedule recovery problems using a hybrid multiobjective genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(3):2307-2315.

[13] Wang Fei,Xu Xiaohao,Zhang Jing. Strategy for aircraft sequencing based on artificial fish school algorithm[C]//Proc of Chinese control and decision conference. Yantai: IEEE, 2008:861-864.

[14] Dong Bing,Du Wen. Scheduling arrival aircrafts on multi-runway based on an improved artificial fish swarm algorithm [C]//Proc of international conference on computational and information sciences. Chengdu:IEEE,2010:499-502.

# 改进的基因表达算法对航班优化排序问题研究

作者:

梁文快, 李毅, [LIANG Wen-kuai](#), [LI Yi](#)

作者单位:

[四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065; 四川大学 国家空管自动化系统技术重点实验室, 四川 成都 610065](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(7)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201407002.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201407002.aspx)