

# 基于航班延误情况下的登机桥作业调度方法的研究

丁芳 沙常涛

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

**摘要** 航班延误导致机场事先安排好的登机桥调度方案无法满足实时需求,为了使机场在航班延误时能够更有效地运行,就需要对登机桥进行再调度。通过分析基于航班延误的登机桥调度问题的目标,基于人工蜂群算法,提出机场登机桥调度以停靠在远机位航班数,航班登机桥原有对应关系的改动数及乘客进港所用时长加权之和最小为目标的调度模型。该模型可用于机场在预先知道延误航班信息的前提下,对不同时段的延误航班实现对登机桥的高效再调度,很大程度上提高机场运行控制的效率。通过国内某大型机场的某天某时段的实际航班信息进行实验及仿真,结果表明,该模型及方法可以很好地利用到机场实际运行中。

**关键词** 贪婪算法 作业调度 Logistic 混沌序列 数据采集及分析 蜂群算法

中图分类号 TP273 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.08.014

## SCHEDULING METHOD OF BOARDING BRIDGE OPERATION BASED ON FLIGHT DELAY

Ding Fang Sha Changtao

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract** Due to flight delays, the airport's pre-arranged boarding bridge scheduling scheme cannot meet the real-time demand. In order to make the airport operate more effectively during the delay, the boarding bridge needs to be re-scheduled. By analyzing the target of the flight delay scheduling problem based on flight delay, and based on the artificial bee colony algorithm, we proposed an airport boarding bridge scheduling model with the objective of minimizing the weighted sum of the number of flights parked at far-end location, the number of changes in the original corresponding relationship between the boarding bridge and the time of passengers entry. The model could be used to efficiently re-schedule the boarding bridge for delayed flights at different times on the premise of delaying flight information in advance, and it improved the efficiency of airport operation control. The experiment and simulation were carried out through the actual flight information of a certain day at a certain domestic airport. The experimental results show that the model and method can be used well in the actual operation of the airport.

**Keywords** Greedy algorithm Job scheduling Logistic Chaotic sequence Data acquisition and analysis Bee colony algorithm

## 0 引言

登机桥调度包含航班进港和离港使用登机桥的时间段。航班延误原因一般有以下几个因素:天气、空中交通管制、航空公司自身失误、机场作业不当、以及军

事活动<sup>[1]</sup>。航班大面积延误多由天气造成的,延误发生后,旅客就会给航空公司很低的评分反馈<sup>[2]</sup>,也会降低该机场在航空公司的好感度。航班延误就必然影响到机场登机桥的预调度方案,依靠人工进行登机桥调度效率低且难度大。因此,在延误情况下,建立登机桥动态调度模型对机场运行至关重要。航班延误后需根

据延误航班的实时进离港时间及机型对登机桥进行再调度,确保延误航班的地面服务和旅客的需求。

针对登机桥多目标调度优化问题,国内外众多学者将多个目标融合进行更全面的研究。2006年,王力、刘长友使用禁忌搜索策略对模型进行调度求解<sup>[3]</sup>。2013年,文献[4]考虑到旅客满意度及舒适度提出旅客进港用时最短为目标来求解。2015年,陈骁睿提出了改进粒子群算法的调度方法,以各个停机位负载达到均衡和旅客移动距离为最短目标<sup>[5]</sup>。2016年,李亚玲等<sup>[6]</sup>提出了一种基于禁忌搜索方法的动态调度方案,此方案以利用率最大化及旅客移动距离最小为目标。同年,薛清文等<sup>[7]</sup>考虑到航空公司的利益,以航空公司成本最小化及均衡成本为目标,建立了动态分配模型。

在分析某大型机场登机桥配置信息及当天固定时间段航班信息的基础上,本文提出了一种在航班延误情况下的登机桥调度的改进ABC算法。以停靠在远机位航班数、航班与登机桥原有对应关系的改动数及旅客进港用时最短加权之和最小为优化目标的整数规划模型。

## 1 登机桥调度问题的问题描述

机场多数情况下不需要对登机桥预分配方案进行改动,通常在当航班延误发生时,才需要对登机桥进行动态调度,登机桥调度包括对近机位廊桥和远机位登机梯的调度。本文所提方法基于如下假设:

- (1) 机场为单跑道;
- (2) 登机桥数量一定,即机场根据当天监控系统,实时统计出可用登机桥,且登机桥数量满足当天航班需求;
- (3) 默认机场与航空公司没有签订登机桥强制性使用哪种廊桥;
- (4) 所有进港航班均采用先到先服务原则;
- (5) 停靠在相邻两个登机桥的航班满足安全的距离。

### 1.1 符号表

- $i$ : 航班序列号,表示第  $i$  个航班( $0 \leq i \leq M$ );  
 $k$ : 登机桥序列号,表示第  $k$  个登机桥( $0 \leq k \leq N$ );  
 $x_{ik}$ : 第  $i$  个航班停靠在第  $k$  个登机桥上,则  $x_{ik} = 1$ , 否则  $x_{ik} = 0$ ;  
 $W_{ik}$ : 航班  $i$  预调度在登机桥  $k$  的作业时间;  
 $L_{ik}$ : 航班  $i$  预调度驶离登机桥  $k$  的时间;  
 $N_{ik}$ : 登机桥  $k$  的无任务时间;  
 $C_i$ : 航班  $i$  的机型,1,2,3 分别代表小、中、大型航班;  
 $B_k$ : 登机桥  $k$  的类型,1,2,3 分别代表小、中、大型登机桥;

- $D_k$ : 登机桥  $k$  的开始可用时间;  
 $R_k$ : 登机桥  $k$  的结束可用时间;  
 $J_{ik}$ : 登机桥  $k$  服务航班  $i$  的时间;  
 $\delta$ : 登机桥安全时间间隔;  
 $d_i$ : 若航班  $i$  再分配的登机桥与预分配的登机桥不同,则  $d_i = 1$ , 否则  $d_i = 0$ ;  
 $Y_i$ : 航班  $i$  被分配至远机位,则  $Y_i = 1$ , 否则  $Y_i = 0$ ;  
 $U_{ik}$ : 航班  $i$  从着陆开始停靠到登机桥  $k$  所用的时间;  
 $H_{ik}$ : 航班  $i$  在登机桥  $k$  上的地面保障时间;  
 $z_{ijk}$ : 若航班  $i$  和航班  $j$  停靠在相同登机桥上,且航班  $j$  在航班  $i$  之后到达,则  $z_{ijk} = 1$ , 否则  $z_{ijk} = 0$ 。

### 1.2 航班延误的机场登机桥再调度模型

(1) 停靠在远机位航班数最少 当航班数量过多,近机位廊桥个数无法满足需求时,需要将航班分配至远机位使用登机梯对旅客进行服务。而多数情况下旅客是不希望在远机位登机的,所以要把调度到远机位航班数降到最小,表示为:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (1)$$

(2) 航班与登机桥原有对应关系改动数最小 航班与登机桥原有对应关系改动数应降到最小,可将其表示为:

$$F_2 = \sum_{i=1}^N d_i \quad (2)$$

(3) 旅客进港用时最小 旅客进港用时包括从航班降落至跑道滑行到登机桥及航班在登机桥上所需的地面保障时间的和,旅客进港用时最小公式为:

$$F_3 = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M x_{ik} (U_{ik} + H_{ik}) \right) \quad (3)$$

参考模型的假设条件,约束条件如下:

(1) 每个等待起降的航班必须被调度且只能被调度到一个登机桥。

$$\sum_{k=1}^M x_{ik} = 1 \quad (4)$$

(2) 登机桥在被调度给某航班的该时间段内,不能将该登机桥再调度给其他航班。即在相同登机桥上,每个航班只能有一个前序航班和一个后续航班。

$$x_{ik} \geq \sum_{i=1}^N z_{ijk} \quad (5)$$

$$x_{jk} \geq \sum_{j=1}^N z_{ijk} \quad (6)$$

(3) 根据民航局的规定,相同登机桥前序航班任务离开与后续航班任务的停靠之间必须要有一定的时间间隔,以防止航班发生碰撞等现象。

$$W_{jk} \geq L_{ik} + \delta \quad i, j \in N, k \in M, W_{jk} \geq W_{ik} \quad (7)$$

(4) 由于航班靠桥后地服人员还需对航班进行安

全检查及航餐、加油的服务,因此同一航班任务驶离登机桥时刻与靠桥时刻的差应大于登机桥实际服务航班的时长。

$$L_{ik} - W_{ik} \geq J_{ik} \quad (8)$$

(5) 使用同一登机桥的相邻两个航班任务之间的空余时间,等于后面航班的预进港时间减去前面航班的预离港时间。

$$N_{ik} = W_{jk} - L_{ik} \quad i, j \in N, k \in M, W_{jk} \geq W_{ik} \quad (9)$$

(6) 由于受登机桥端口高度和航班机舱高度的约束,小型航班只能停靠小型登机桥,中型登机桥可以停靠中、小型航班,大型登机桥可以停靠大、中、小三种航班。即航班类型只能小于等于需停靠的登机桥的类型。

$$C_i \leq x_{ik} B_k \quad (10)$$

(7) 小、中、大型航班类型  $C_i$  及小、中、大型登机桥类型  $B_k$  从小到大大都分别用 1, 2, 3 表示。

$$C_i = \{1, 2, 3\} \quad B_k = \{1, 2, 3\} \quad (11)$$

目标函数表示为调度员在已知延误航班信息的基础上,以调度到远机位的航班数、航班登机桥原有对应关系的改动数及乘客进港所用时长加权之和最小。登机桥再调度模型的目标函数为:

$$\min F = \alpha F_1 + \beta F_2 + \chi F_3 \quad (12)$$

式中:  $\alpha = 0.3, \beta = 0.3, \chi = 0.4$ , 代表每个子任务的权重。不管是航空公司还是机场,最终目的都是服务乘客,所以权重应当大一些。

## 2 改进的人工蜂群算法

算法与登机桥再调度模型的映射关系如表 1 所示。

表 1 调度问题与 ABC 算法模型的映射关系

ABC 算法	调度问题
蜜源,即可行解	调度方案,即登机桥与航班的有序对应序列
可行解每个维度的可能取值	各航班的编码
目标函数	航班扰动数、分配至远机位航班、旅客进港用时最小化

### 2.1 构造食物源编码

采用二进制编码方式进行食物源编码,设现有  $N$  个航班要分配给  $M$  个登机桥,  $x$  为  $N$  行  $M$  列的矩阵。每个航班都在  $M$  个登机桥中取值,每个种群初始解都有  $N \times M$  个基因,每个基因取值只有 0 或 1。

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NM} \end{pmatrix}$$

其中  $x_{ik} = 1$  表示将第  $i$  个航班分配给第  $k$  个登机桥,否则  $x_{ik} = 0$ 。

### 2.2 种群初始解

种群初始解的质量直接决定了最终解的质量高低,种群初始解分布越均匀,范围越大,就会更容易产生最优解。

进行登机桥再调度问题时,应考虑登机桥调度的各种约束条件和降低登机桥再调度对原预调度方案的改动性,因此,采用贪婪算法产生初始可行解。由如下搜索步骤产生:

步骤 1: 读取登机桥原调度方案,删除延误航班的登机桥预调度方案。

步骤 2: 读取延误航班信息,将  $n$  个延误航班按进港时间  $W_{ik}$  升序排列,得到延误航班排序队列  $F_N = f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

步骤 3: 从  $F_n$  中选出一个延误航班  $f_i$ , 根据约束条件,计算其目标函数值,在可选登机桥集合中选取目标函数值最小的登机桥分配给该延误航班,更新该登机桥的开始可用时间  $D_k$  和结束可用时间  $R_k$ , 从  $F_N$  中删除  $f_i$ 。

步骤 4: 判断  $F_N$  集合是否再无取值可能,如果无取值结果,则输出相应的延误航班的登机桥再调度方案,否则跳转至步骤 3 继续往下执行。

初始可行解的搜索流程如图 1 所示。

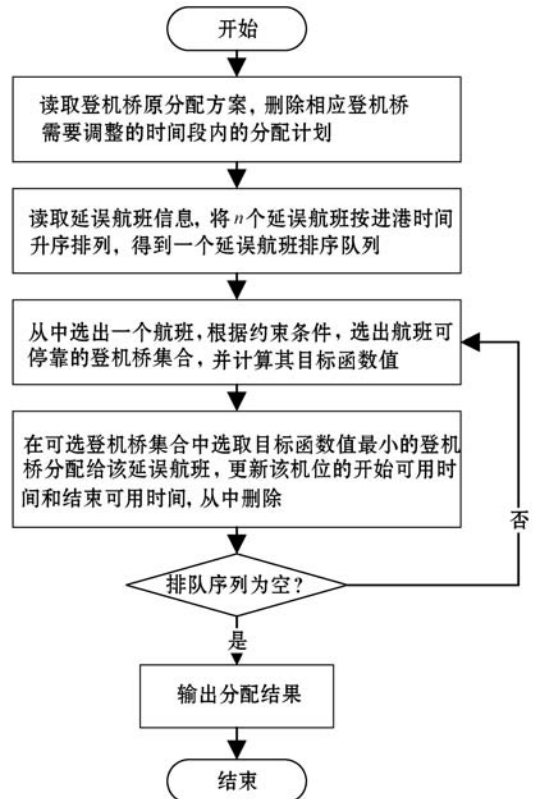


图 1 初始可行解搜索流程图

## 2.3 适应度评价函数

本文中,采用文献[8]的对数适应度评估方式,将各种群间的差异区分开来,改进后的适应度评价方式为<sup>[8]</sup>:

$$fit_i = \frac{0.1}{0.1 + \frac{1}{|lgf_i|}} \quad (13)$$

## 2.4 改进局部搜索机制

原始 ABC 算法中,全局搜索较好,但后期局部搜索的随机性太强,易陷入局部最优,导致对种群初始解没有充分地搜索。对于文献[12]中只是将每一代中的最优解提取出来加入到跟随蜂及侦察蜂的搜索策略当中,容易导致更优解的丢失。所以本文提出一种基于 Logistic 混沌搜索的更优解改进策略,在每一代中最优解的基础上,再进行  $k$  次的混沌迭代搜索,并且将更优解策略加入到跟随蜂及侦察蜂的搜索策略当中,这样更容易找出更优解。

原始 logistic 混沌映射为:

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (14)$$

式中: $k$  为迭代次数, $k = (1, 2, \dots, K)$ ,  $K$  为最大迭代次数。当  $\mu = 4$  时,  $y_1 \in (0, 1)$ , 且  $y_1 \neq (0.25, 0.5, 0.75)$ , 此时,式(14)是一个混沌系统。

本文采用文献[9]的映射模型:

$$x_{k+1} = \omega x_k - 2 \tanh(\xi x_k) \exp(-3x_k^2) \quad (15)$$

当  $\mu = 4$ ,  $y_1 = 0.65$ ,  $\omega = 0.5$ ,  $\xi = 2.7$  时,式(14)及式(15)对应的混沌系统如图 2 和图 3 所示。由图可知,式(14)混沌系统产生的解分布在  $(0, 1)$  之间,式(15)混沌系统产生的解分布在  $(-1, 1)$  之间。在产生最优解的过程中,由于引进了当前代最优解的概念,所以选择式(15)产生的随机序列有更大的范围及更好的遍历性,能产生较高质量的个体。

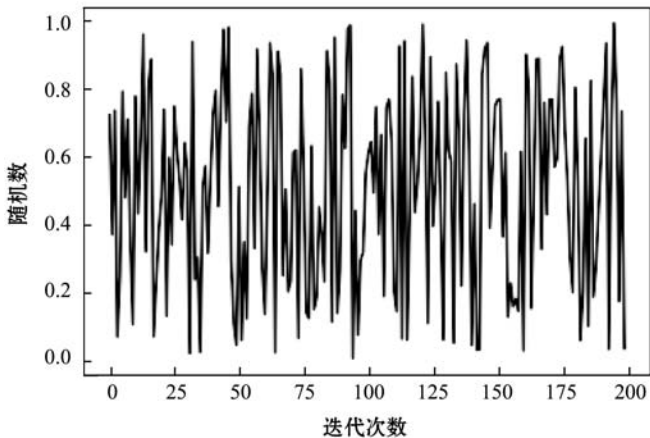


图 2 式(14)混沌系统

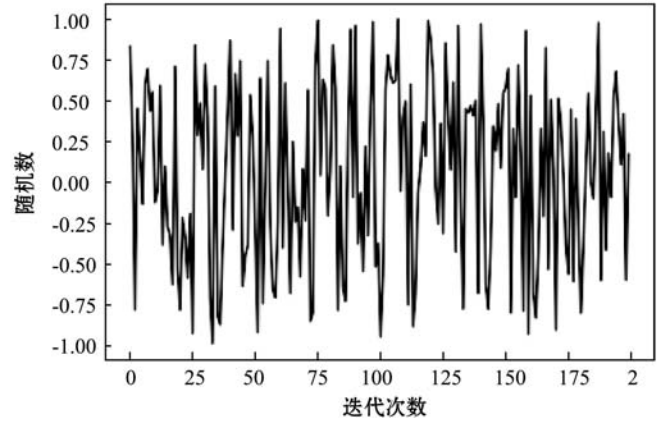


图 3 式(15)混沌系统

## 2.5 改进跟随蜂局部搜索策略

跟随蜂在雇佣蜂搜索完成产生的最好个体  $x_{gbest}$  基础上再次搜索更好个体<sup>[10-11]</sup>,然后在  $x_{gbest}$  附近根据式(16)再进行  $k$  次混沌搜索,得到  $k$  个个体,比较  $k$  个个体中质量最高的个体作为  $x_{kbest}$ ,比较  $x_{gbest}$  与  $x_{kbest}$  的适应度值,选择大的成为最优个体  $x_{best}$ 。本文中观察蜂搜索就是将某个航班在其可停靠的登机桥集合里重新选择一个登机桥进行替换。

在  $x_{gbest}$  附近进行混沌搜索的公式为:

$$y_k = x_{gbest} + x_k \quad (16)$$

产生新食物源的更新公式为  $V_{ik}$ :

$$V_{ik} = x_{best} + \tau(x_{ik} - x_{best}) + \varphi(x_{r_1,k} - x_{r_2,k}) \quad (17)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, SN$ ;  $k = 1, 2, \dots, D$ ;  $gbest$  表示当前代最优个体,  $r_1, r_2$  表示邻域内随机解,  $D$  表示解的维数,  $SN$  表示种群数量,  $\varphi$  在  $[-1, 1]$  随机取值。  $\tau$  为比例系数,大小为<sup>[12]</sup>:

$$\tau = \exp\left(\frac{-iter}{MCN}\right) \quad (18)$$

式中: $iter$  是当前迭代次数,  $MCN$  为总迭代次数。

## 2.6 改进的侦察蜂局部侦察策略

在进行局部搜索时,原始 ABC 算法侦察蜂没有很好地找出更优食物源的能力,易陷于局部最优。在本文中,侦察蜂搜索即航班随机的变换登机桥,形成新的候选解,每次搜索产生的候选解数量与种群规模保持一致。搜索时,在依靠跟随蜂最优解基础上加入比例系数策略,如下式所示:

$$V_{ik} = x_{best} + rand(0, 1) \times \tau \times x_{best} \quad (19)$$

## 2.7 改进后的人工蜂群算法的流程

改进后 ABC 算法工作流程图如图 4 所示。

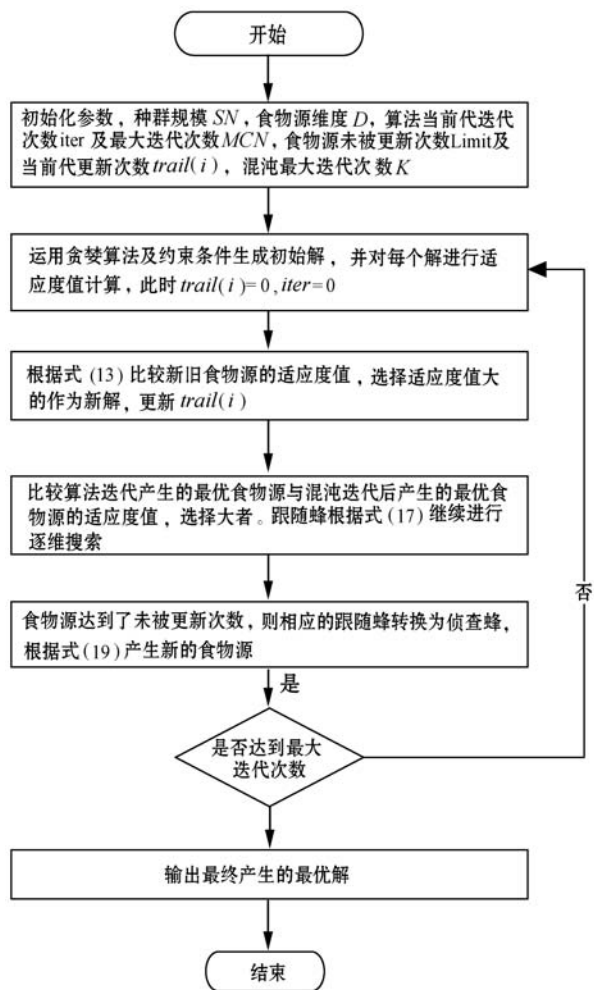


图 4 改进 ABC 算法的流程图

### 3 仿真实验及分析

基于国内某大型机场某时间段的航班信息进行仿真实验, 航班信息如表 2 所示。

表 2 航班信息表

序列号	航班号	机型	计划到港时间	计划离港时间
1	9C8813	中	0655	0810
2	FM9147	中	0700	0810
3	MU9147	中	0710	0820
4	CA1656	小	0740	0845
5	G54092	小	0800	0900
6	MU9131	小	0800	0855
7	GS7882	大	0800	0900
8	CA1534	小	0800	0905
9	CZ9304	小	0830	0930
10	CA1524	小	0845	0950
11	CZ5554	小	0855	0955
12	MF8552	中	0920	1005
13	CA1528	中	0940	1025

续表 2

序列号	航班号	机型	计划到港时间	计划离港时间
14	KN1228	中	0945	1045
15	MU9069	大	0955	1045
16	CA5014	小	0955	1040
17	OZ327	中	1000	1050
18	KE805	中	1005	1045
19	GS7994	小	1020	1110
20	HU8132	小	1025	1110
21	CA172	中	1030	1120
22	CZ9224	中	1035	1130
23	MF1068	小	1040	1130
24	ZH1351	小	1055	1130
25	HA3802	小	1100	1140
26	HU7805	大	1045	1130
27	MF1010	小	1050	1135
28	CZ3108	中	1115	1205
29	MF1014	小	1100	1150
30	ZH1315	小	1100	1200
31	MU3019	中	1105	1150
32	CZ9576	中	1115	1155

根据机场实际距离及民航运输标准<sup>[13]</sup> 计算出的各个阶段的用时如表 3 所示。数字序号 1 - 8 代表远机位登机梯, 航班到达时所需的靠桥用时为 3.5 min, 101 - 108 代表近机位廊桥, 所需的靠桥用时为 5 min。只有远机位需用摆渡车。

表 3 登机桥类型及停靠用时 min

编号	类型	摆渡车	保障用时	停靠用时	旅客进港用时
1	中	6.48	9.98	5.40	15.38
2	中	5.60	9.10	5.50	14.60
3	小	5.73	9.23	5.70	14.93
4	小	6.53	10.03	6.20	16.23
5	中	6.45	9.95	6.31	16.26
6	中	6.78	10.28	6.18	16.46
7	小	6.56	10.02	6.14	16.16
8	中	6.67	10.17	5.34	15.51
101	大	0	5	5.42	10.42
102	中	0	5	5.33	10.33
103	中	0	5	5.36	10.36
104	小	0	5	5.40	10.40
105	小	0	5	5.42	10.42
106	中	0	5	5.73	10.73
107	大	0	5	6.50	11.50
108	大	0	5	6.12	11.12

登机桥预调度方案如表4所示。

表4 登机桥预调度方案

编号	航班号		编号	航班号			
1	32		101	5	16	26	
2	7	28	102	2	13	23	
3	21		103	1	11	19	
4			104	3	10	18	27
5	30		105	4	12	20	
6	31		106	6	15	25	
7			107	8	14	24	
8	22		108	9	17	29	

在进行模拟登机桥再调度时,在这32个航班中选择任意8个航班作为延误航班,航班延误信息如表5所示。

表5 航班延误信息表

序号	航班号	机型	计划使用时间	计划离开时间
3	MU9147	中	0739	0850
6	MU9131	小	0845	0938
11	CZ5554	小	0928	1047
15	MU9069	小	1015	1103
19	GS7994	小	1050	1200
21	CA172	小	1055	1145
24	ZH1351	小	1120	1155
29	MF1014	小	1140	1230

通过上文提出的改进人工蜂群算法与所建立的航班延误的登机桥再调度模型进行求解,需对参数初始化,  $SN = 32$ ,  $D = 16$ ,  $MCN = 3\ 000$ ,  $Limit = 50$ ,  $K = 200$ 。登机桥使用最小时间间隔  $\delta = 5$  min。实验采用 MATLAB R2014a 进行仿真,选择第100,200, ..., 3 000代的目标函数值仿真出的收敛曲线对比图如图5所示。

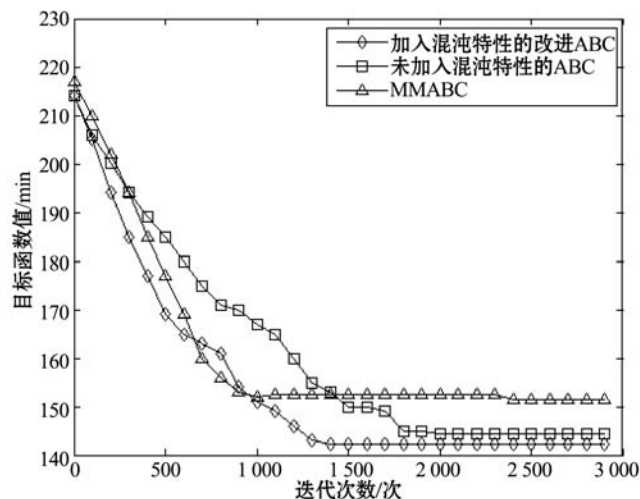


图5 目标函数收敛曲线

由图5可知,文献[12]提出的MMABC在1 000代前算法的收敛速度快,但是之后的收敛速度接近于0,且没有达到收敛的条件,也没有产生可行的解。未加混沌特性且改进了适应度评价方式后的ABC算法在1 000代前期收敛速度较快,且1 000代以后的收敛相较于MMABC效果更好,只能产生可行解,目标函数值为148.3 min。加入混沌搜索后的改进ABC算法的图像收敛速度更快,产生更优解的时间明显缩短,这不仅与所需要的进化次数和群体规模有关,而且还与当前迭代的初代个体有关,初代个体的质量越高,就更容易达到更优解,目标函数值为142.6 min。

登机桥再分配方案如表6所示。

表6 登机桥再调度方案

编号	航班号		编号	航班号				
1	32			101	5	16	26	
2	7	15	28	102	2	13	23	
3	3			103	1	11		
4	19			104	10	18	27	
5	30			105	4	12	20	24
6	31			106	6	25		
7	29			107	8	14		
8	22			108	9	17	21	

分析实验结果表明:

(1) 航班登机桥原有对应关系的改动数变小 在选择的8个延误航班中,有4个航班被指派到与预调度方案相同的登机桥,4个航班被分配到别的登机桥。对登机桥再调度后,有6架航班登机桥进行了调整,分别为第3、15、19、21、24、29。

(2) 航班可能停靠在近机位廊桥的概率增大 在延误航班中,第6、11、21、24号航班进行了靠桥,当将延误航班全部安排到远机位登机梯时,靠桥率为0%,根据以上方法靠桥率达到了50%。

(3) 减少了旅客进港用时总和 若将延误航班全部安排到远机位,则按照预调度的远机位登机梯安排方案如表7所示。

表7 预调度的远机位登机梯安排方案

登机桥编号	航班号		
1	6	32	
2	7	11	28
3	3	21	
4	19		
5	30		
6	31		
7	15	24	
8	22	29	

按照此方案,延误航班进港用时总和为 123.9 min,按照本文的优化方案,延误航班的进港用时总和为 104.55 min,减少了旅客的进港用时。

## 4 结 语

本文研究了在航班发生大面积性延误时,机场对登机桥的再调度问题。考虑了顾客满意度、登机桥类型、航班类型及航班的进离港时间等因素,以减少使用远机位登机梯的航班数、减少对原调度方案的改动性及减少旅客进港用时为目标。根据机场实际标准建立约束条件,建立了航班延误时登机桥再调度的多目标模型,以国内某机场航班延误情况为实验样本,验证了所提方法的可行性。本文所研究的登机桥再调度问题属于再调度的 NP-hard 问题,目前还没有找到可以高效解决该问题的方法,本文根据改进的 ABC 算法仿真结果来看算法的收敛性较好。结合模型、算法和实验数据进行仿真研究,证明了实验得出的登机桥再调度方案在三个目标上都得到较优的效果。后续工作还要去深入分析机场登机桥在多跑道条件下的多目标综合调度问题,并设计出更合理有效的调度求解方法,以此来获得更优的调度方案是未来工作的关键和难点。

## 参 考 文 献

- [1] 董念清. 中国航班延误的现状、原因及治理路径[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2013, 26(6): 25-32.
- [2] 顾兆军, 安一然, 潘杰, 等. 不正常航班旅客流恢复方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(6): 79-83.
- [3] 王力, 刘长有, 涂奉生. 民用机场停机位优化配置[J]. 南京航空航天大学学报, 2006(4): 433-437.
- [4] Jiang Y, Zeng L, Luo Y. Multiobjective Gate Assignment Based on Passenger Walking Distance and Fairness[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 361031.
- [5] 陈晓睿. 基于改进粒子群算法的机位分配问题研究[J]. 软件, 2015, 36(1): 72-76.
- [6] 李亚玲, 李毅. 基于可变禁忌长度的优化停机位分配[J]. 计算机应用, 2016, 36(10): 2940-2944.
- [7] 薛清文, 姜雨, 刘照明, 等. 基于航空公司运行成本和公平性的停机位指派[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 64-69.
- [8] 陈杰, 沈艳霞, 陆欣. 基于信息反馈和改进适应度评价的人工蜂群算法[J]. 智能系统学报, 2016, 11(2): 172-179.
- [9] Van Gorp P, Stenten H, Mens T, et al. Towards Automating Source-Consistent UML Refactorings[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2863: 144-158.
- [10] 周长喜, 毛力, 吴滨. 基于细菌趋药性和当前最优解策略的人工蜂群算法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(1): 268-272, 285.
- [11] 火久元, 张政, 孟凡明. 一种劣解突变策略引导的混合人工蜂群算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(2): 267-272, 293.
- [12] 魏锋涛, 岳明娟, 郑建明. 基于改进邻域搜索策略的人工蜂群算法[J]. 控制与决策, 2019(5): 72-79.
- [13] 彭巍, 赖怀南. 浅析基于顾客需要的民航运输服务[J]. 空运商务, 2018(7): 14-17.

## (上接第 68 页)

比传统句子相似度方法,该方法能有效提高问句相似度准确率。本文所提出的方法可以适用于所有句子语法情况,后续研究中,将进一步简化该方法的计算复杂度和提高 FAQ 回答效率。

## 参 考 文 献

- [1] 朱新华, 郭小华, 邓涵, 等. 基于抽象概念的知网词语相似度计算[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(3): 664-670.
- [2] 赵臻, 吴宁, 宋盼盼. 基于多特征融合的句子语义相似度计算[J]. 计算机工程, 2012, 38(1): 171-173.
- [3] Metzler D, Bernstein Y, Croft B, et al. Similarity measures for tracking information flow[C]//Proceedings of the 14th ACM international conference on Information and knowledge management. ACM, 2005: 517-524.
- [4] Dagan I, Lee L, Pereira F C N. Similarity-Based Models of Word Cooccurrence Probabilities[J]. Machine Learning, 1999, 34(1/3): 43-69.
- [5] 张俊飞. 改进 TF-IDF 结合余弦定理计算中文语句相似度[J]. 现代计算机, 2017(32): 20-23.
- [6] Pang X L, Jia K L. Chinese question similarity calculation based on word sense disambiguation[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, 2009: 2217-2220.
- [7] 黄洪, 陈德锐. 基于语义依存的汉语句子相似度改进算法[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(1): 6-9.
- [8] 李玲, 何聚厚. 基于语义依存分析的句子相似性度量算法及应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(7): 244-248, 313.
- [9] 王品, 黄广君. 信息检索中的句子相似度计算[J]. 计算机工程, 2011, 37(12): 38-40.
- [10] 田久乐, 赵蔚. 基于同义词词林的词语相似度计算方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2010, 28(6): 602-608.
- [11] 高航. 认知语法与汉语转类问题[M]. 上海交通大学出版社, 2009.
- [12] 董刊生, 方金云. 基于向量距离的词序相似度算法[J]. 中文信息学报, 2009, 23(3): 45-51.
- [13] Liao W H, Nie X. Spatial Association Analysis for Urban Service Based on Big Data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1310-1317.