

## 基于RHC的航班着落调度多目标优化算法

张启钱 胡明华 施赛锋

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**研究了基于滚动时域控制(RHC)策略的终端区进场航班动态排序问题,目的是在终端区空中交通繁忙的情况下,有效地为到达航班安排合理的着陆次序,在满足安全间隔兼顾管制员负荷的情况下,给出航班经过多目标优化的着陆时间,提高航班进场率,降低飞行延误成本。建立了基于RHC的航班动态排序模型,并利用精英保留策略的遗传算法对一个算例进行验证计算。算例仿真结果表明,进场率得到了提高,延误时间和成本明显减少,验证了方法的有效性。

**关键词:**终端区排序;RHC策略;多目标优化;遗传算法

**中图分类号:**V355.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1005-2615(2012)03-0393-06

## Multi-object Optimization Algorithm for Aircraft Landing Based on Receding Horizon Control Strategy

Zhang Qiqian, Hu Minghua, Shi Saifeng

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** To make the scheduling of arrival flight more efficient in the busy terminal area, receding horizon control (RHC) strategy is studied for the sequencing and scheduling of arrival flight in the terminal area. Considering the safety interval and the controller workload, a strategy is given to improve the aircraft arrival-rate, and reduce the cost of aircraft delay. A mathematic model based on the RHC strategy is established, and an elite conservation genetic algorithm is designed to verify the proposed model. The experimental result shows that arrival-rate is improved, and the cost and time of delay is reduced obviously.

**Key words:** sequencing in terminal area; RHC strategy; multi-object optimization; genetic algorithm

伴随着航空运输快速增长,我国航班延误的绝对数量急剧攀升,2000年共14.27万延误架次,2008年增加至26万架次。每年约1/5旅客遭遇航班延误,按2008年1.9亿客流量计算,延误旅客人数近4000万人次,我国民航业每年由此带来的经济损失都以亿元为统计单位<sup>[1]</sup>。

流量分布不均衡、流量与容量不匹配引发的区域终端区拥挤是造成航班延误的重要原因之一。终端区排序问题是研究空中交通流繁忙的机场,在不违反航班尾流间隔的安全标准下,高效合理地到

达航班提供优化的着落次序,实现航班提前着落,降低航班的大面积延误状况。近年来国内外一直重视对终端区空中交通流进行优化调度的研究,研究结果表明终端区优化调度算法最高可使系统容量提高15%<sup>[2]</sup>,从而有效地缓解航班延误,降低航班延误损失。国外,1997年,Ronbinson提出了基于模糊推理的终端区进场航班排序算法<sup>[3]</sup>。2008年, Lee对跑道排序过程中的航班油耗成本、时间延误和运行吞吐量的权衡进行了研究<sup>[4]</sup>。国内,徐肖豪和程晓航先后于2004年及2006年分别运用自适应

**基金项目:**国家科技支撑计划(2011BAH24B09)资助项目。

**收稿日期:**2011-09-28; **修订日期:**2011-12-29

**通讯作者:**胡明华,男,教授,博士生导师,1962年出生,E-mail:minghuahu@263.net。

遗传算法求解航班排序问题,但两者在算子设计与染色体编码方式等方面有所不同<sup>[5-6]</sup>。2009年,张洪海建立了包括延误损失、延误公平性和管制员负荷的着陆航班排序多目标优化模型,并运用多目标遗传算法求解了该模型<sup>[7]</sup>。终端区航班排序属于组合优化问题,难以采用线性规划模型求解。本文提出了旨在减小航班延误成本及航班延误时间的多目标优化算法,建立了基于滚动时域控制(Receding horizon control, RHC)的动态航班多目标优化排序模型,并采用精英保留策略多目标遗传算法求解该模型。

## 1 问题提出

假设排序只考虑终端区内的着落航班流,航班按照机场不同的标准仪表进场程序从各个方向进入终端区着落,按照着陆时间先后顺序,在进场航线交叉点处以先后到达时间排成队列。图1描述了机场终端区航路平面结构图。

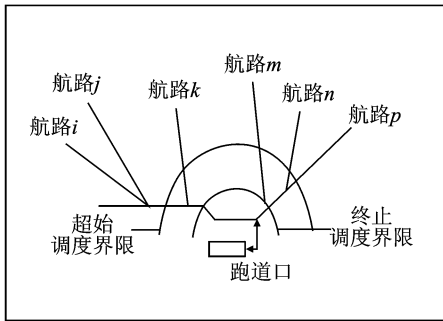


图1 机场终端区的水平航路结构示意图

由图1可知,终端区空域按定义的两个调度界限划分为3个部分。排序算法在着落航班穿越设定的起始调度界限时,按照其一组参数(航班号、预计着陆时间、机型等)将其参与排序。当航班穿越终止调度界限后,由算法分配给航班落地的到达时间保持不变。两个界限间的时域成为航班动态排序区。本文计算的航班处于动态着落过程,考虑每次排序策略对管制员的影响,在启动算法前设定合理的起始调度界限与终止调度界限的时间间隔。目前的终端区流量管理主要是管制员根据雷达屏幕上的航班间相对位置,通过冲突连线来控制距离间隔,从而实现飞行安全。考虑流量管理的精确性,必须引入时基的概念。将管制中使用的前后机距离间隔转化为排序系统的时间间隔,以时间为统一标准来实现对所有航班的排序管理。航班间的尾流间隔标准根据机型差异而定,ICAO规定了无风条件下不同类型飞机之间的最小尾流间隔标准<sup>[8]</sup>,见表1。

表1 ICAO规定的最小间隔标准

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

基于航班尾流间隔标准和各类机型航班延误成本<sup>[9]</sup>的不同,本文建立了旨在同时减少进场延误时间和降低延误成本的数学模型。根据航班的预计到达时间,对动态进场航班采用基于RHC策略的多目标遗传算法进行优化。

## 2 RHC航班动态排序模型

### 2.1 RHC策略

RHC策略<sup>[10]</sup>是一种向前看 $N$ 步的动态优化策略,在当前时间间隔,收集目前有效的信息,对滚动时域上的问题进行优化。但只执行当前时间间隔内的算法结果,忽略滚动时域内其他 $n-1$ 个时间间隔上的方案,然后转移到下一个时间,重新根据更新的信息进行重复优化。

RHC航班进场排序策略:通过某种算法优化滚动时域内的着落航班流,但仅执行当前时域内第一个时间片上的结果,在下一个时域重复执行相同的优化。如图2所示,开始时间 $t(k)$ 至结束时间 $t(k)+nT$ 这一时间段就是一个滚动时域的长度,该滚动时域由 $n$ 个时间间隔 $T$ 组成,称为第 $k$ 个滚动时域。第 $k$ 个滚动时域上的第一个时间间隔 $t(k)$ 至 $t(k)+T$ 为第 $k$ 个时间间隔,在优化第 $k$ 个滚动时域内的航班信息时,算法获取终端区当前航班状态,即搜集当前滚动时域上第 $k$ 个时间间隔到第 $k+n-1$ 个时间间隔之间的信息,得到当前滚动时域内的问题解决策略,但仅实施第 $k$ 个时间间隔的优化结果,忽略当前滚动时域内其他时间间隔上的算法结果,并让 $k$ 自加1后重复上述优化过程,直至满足设定条件而终止优化。航班进场多目标优化的RHC策略流程见图3。

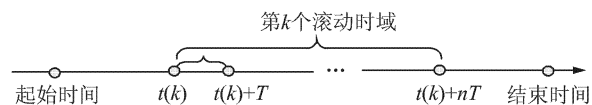


图2 RHC优化策略示意图

### 2.2 RHC多目标优化模型

根据优化目标,结合RHC策略引入以下变量建立多目标优化模型:

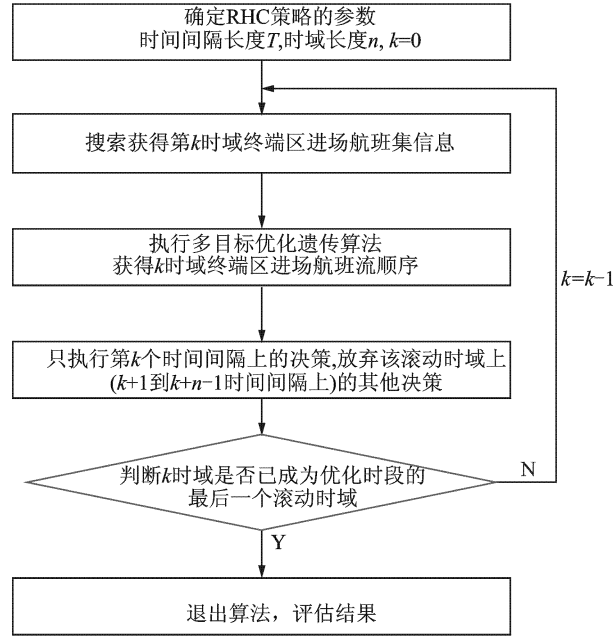


图3 航班进场多目标优化的RHC策略流程

(1)  $k$ , 表示当前滚动时域内正在优化的时间间隔;

(2)  $T$ , 表示滚动时域上一个标准时间间隔的长度;

(3)  $N_k$ , 表示一个滚动域包含的时间间隔总数;

(4)  $|k$ , 表示当前计算的滚动时域;

(5)  $N_{AC}(\cdot, |k)$ , 表示航班预计着陆时间(Estimated time of arrival, ETA)在  $k$  滚动时域上的总数;

(6)  $(k+j|k)$ , 表示在  $k$  时间区域内的第  $j$  个时间间隔;

(7)  $D_i(\cdot, |k)$ , 表示  $k$  滚动域内航班  $i$  的时间滞后量;

(8)  $C_i(\cdot, |k)$ , 表示  $k$  滚动域内航班  $i$  的延误成本量;

(9)  $E_i(\cdot, |k)$ , 表示  $k$  滚动域内航班  $i$  的ETA;

(10)  $S_i(\cdot, |k)$ , 表示  $k$  滚动域内航班  $i$  的分配到的实际到达时间(Scheduled time of arrival, STA);

(11)  $q(n, \cdot, |k)$ , 表示当前时域内处于优化后的航班队列中的第  $n$  个位置的航班。

模型目标函数为

$$\min_{q(1, \cdot, |k), q(2, \cdot, |k), \dots, q(N_{AC}(\cdot, |k), \cdot, |k)} D(\cdot, |k) = \min_{i=1}^{N_{AC}(\cdot, |k)} D_i(\cdot, |k) \quad (1)$$

$$\min_{q(1, \cdot, |k), q(2, \cdot, |k), \dots, q(N_{AC}(\cdot, |k), \cdot, |k)} C(\cdot, |k) = \min_{i=1}^{N_{AC}(\cdot, |k)} C_i(\cdot, |k) \quad (2)$$

$$D_i(\cdot, |k) = S_i(\cdot, |k) - E_i(\cdot, |k) \quad (3)$$

$$C_i(\cdot, |k) = K_i * D_i(\cdot, |k) \quad (4)$$

式中:  $K_i$  表示各种机型对应的成本常数。

最大位置约束(Maximum position shift, MPS)条件为

$$\begin{aligned} |n - i| &\leq \text{MPS} & q(n) &= i \\ i &= 1, \dots, N; n &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

### 3 基于RHC的多目标遗传算法

#### 3.1 基于航班号的染色体随机编码<sup>[11]</sup>

染色体编码长度为算法处理的航班总数, 假定参与的排序队列中有10个依次降落的航班, 航班编号分别为0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 每个编号都与特定航班对应, 产生的随机个体0542713869表示航班按照0—5—4—2—7—1—3—8—6—9顺序依次进行降落。

#### 3.2 适应度函数

适应度是用来衡量种群中各个个体在算法优化计算中能达到或有助于找到最优解的优良程度。本文求解函数是延误时间和延误成本最小化的多目标优化, 因此本文算法采用Hajela和Lin提出的“可变目标权重聚合法”<sup>[12]</sup>。

这种方案是在适应度赋值时使用加权和法, 对每个目标赋相应权重。为了并行搜索多个解, 权重本身并不固定, 问题解和权重同时实施进化操作。为了保证收敛速度和遗传搜索的稳定性, 该方法需要使用配对约束来保证正常可靠的进化操作。适应度函数公式如下所示

$$\text{Fit}f(x) = \frac{1}{f(x)} = \left( \frac{1}{\sum_{i \neq j} d_{i,j} x_{i,j}} \right)^p \quad (6)$$

式中:  $d_{i,j}$  表示目标对应的权值;  $x_{i,j}$  表示染色体对应的适应度;  $p$  为常数, 表示对适应度函数做幂运算。

#### 3.3 选择运算

本文采用传统的轮盘赌法对每一代种群进行选择操作, 适应度值大的个体将以大概率被选中, 适应度值较小的个体将因概率较小很难被选中或者被淘汰。若某个染色体的适应度为  $f_i$ , 则个体被选取中的概率  $P_i$  表示为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (7)$$

在进行选择操作时,为了保证种群沿着优化的方向前进,引入精英保留操作,保证全局收敛性。

### 3.4 交叉运算

为避免运用基本交叉操作产生不可行解,本文采用 Goldberg 等提出的部分匹配交叉 (Partially matched crossover, PMX) 操作方法<sup>[13]</sup>。该方法通过随机选择两个交叉点,实现确定一个匹配段,然后根据父个体中参与交叉的两个中间段给出的映射关系,推算得出两个子个体。例如针对下述两个父个体,随机选出两个交叉点,交叉点位置用竖线表示:

$$P_1:(2\ 3\ |6\ 9\ 7\ 4\ |1\ 5\ 8)$$

$$P_2:(5\ 4\ |6\ 8\ 3\ 2\ |7\ 1\ 9)$$

首先将两个交叉点之间的中间段交换,得到子代两个个体:

$$C_1:(X\ X\ |6\ 8\ 3\ 2\ |X\ X\ X)$$

$$C_2:(X\ X\ |6\ 9\ 7\ 4\ |X\ X\ X)$$

上述  $X$  表示在部分交换后暂未赋值的基因,中间段映射关系有  $6\sim 6, 8\sim 9, 3\sim 7, 2\sim 4$ , 接着以为例,先保留从其父个体中继承的未被选中(没有映射关系)的航班序号 1, 5, 得到:

$$C_1:(X\ X\ |6\ 8\ 3\ 2\ |1\ 5\ 9)$$

再根据编码对应原则,父个体  $P_1$  中第一个  $X$  的源码为 2, 查映射表知 2 对应 4, 因染色体中未出现过该值,则确定位置基因为 2, 因此类推第二个  $X$  的源码为 3, 3 对应 7, 确定基因值为 7, 第三个  $X$  的源码为 8, 8 对应 9, 确定基因值为 9。最终确定  $C_1$  为 (4 7 6 8 3 2 1 5 9), 对应的  $C_2$  为 (5 2 6 9 7 4 3 1 8)。如编码对应时出现对应码与确定位置的基因值相等,则根据编码对应表继续进行搜索匹配。

### 3.5 变异运算

变异的目的是实现群体的多样性,防止局部收敛。针对航班队列的染色体的变异操作是随机选择两个变异点,并交换这两点的基因。如航班队列为 (0 2 1 3 4 5 6 8 9 7), 随机选中的基因位置为第四位的 3 和第九位的 9, 则变异后的染色体即为 (0 2 1 9 4 5 6 8 3 7)。

### 3.6 算法流程

**步骤 1** 读取  $k$  滚动时域上参与优化排序的航班。若为首次计算即  $k=0$ , 算法获取航班集合中 ETA 在该时域内的航班; 若  $k>0$ , 算法则获取前一时域内未冻结的航班和航班 ETA 在  $k$  时域最后一个时间间隔之前的所有航班。

**步骤 2** 初始化种群。

**步骤 3** 计算染色体对应航班队列的多目标优化函数: 根据染色体上航班的 ETA 和确定序列之间的间隔要求计算航班的 STA。排在当前滚动时域内第一个位置的航班, 与上一时域内被冻结的最后一个航班之间要满足尾流间隔, 航班序列中不满足 MPS 约束的航班, 要增加惩罚时间 600 s。考虑航班进场成本情况, 如航班延误超过 900 s, 则延误成本乘以 10。

**步骤 4** 根据多目标优化函数计算适应度函数值。

**步骤 5** 保留精英个体。

**步骤 6** 判断进化代数是否为最大代数。若不是, 进化代数加 1 并顺序执行, 否则转至 10。

**步骤 7** 进行选择、交叉、变异操作。

**步骤 8** 执行步骤 3~5。

**步骤 9** 评估遗传效果, 若此时的最优个体优于当前最优个体, 将其赋值当前最优个体。否则用当前最优个体代替最差个体。

**步骤 10** 判断  $(+k) * T$  与  $(+T)$  值的大小, 如果  $(+k) * T > (+T)$  则优化结束, 按顺序执行, 否则  $k=k+1$  转到步骤 1, 表示设定的结束时间。

**步骤 11** 输出排序结果。

## 4 仿真结果及分析

本文算法采用 C++ 编写仿真程序, 对文献 [14] 中的某机场 40 架连续进场航班进行仿真验证。分别用先到先服务 (First come first served, FCFS) 算法、延误时间最小的 RHC 策略、延误成本最小的 RHC 策略以及延误成本和延误时间混合优化的 RHC 策略进行计算。实际计算时, 模型中采用的参数如下: 种群大小为每次进入  $k$  时域参与计算航班架次的 4 倍, 交叉概率为 60%, 变异概率为 1%, 执行次数为每次进入  $k$  时域参与计算航班架次的 20 倍。尾流间隔采用表 1 中的时间尾流间隔, 决策偏好  $d_i=0.5, d_j=0.5$ , 适应度幂函数  $p=0.4$ , MPS=3,  $T=360$  s,  $N_k=2$ 。根据文献 [9] 提出的各类机型航班延误成本计算, 设定重中轻 3 种机型单位时间延误成本比为 5:3:1。计算时不考虑航班提前降落, 延误成本为延误时间乘以单位时间延误成本。表 2 和表 3 分别为 FCFS 算法、延误时间最小的 RHC 策略、延误成本最小的 RHC 策略以及延误成本和延误时间混合优化的 RHC 策略下的降落时间表和延误结果分析表。

表2 FCFS和RHC策略下的降落时间

s

航班序号	机型	预计到达时间	降落时间			航班序号	机型	预计到达时间	降落时间			
			FCFS	RHC策略 时间最小	RHC策略 成本最小				RHC策略 多目标优化	FCFS	RHC策略 时间最小	RHC策略 成本最小
1	L	54	54	54	54	21	H	1 578	1 831	1 584	1 590	1 590
2	L	108	128	128	128	22	S	1 657	1 998	1 751	1 940	1 940
3	L	136	202	202	202	23	L	1 784	2 072	1 997	2 162	2 088
4	H	199	276	518	276	24	L	1 912	2 146	2 219	2 014	2 162
5	L	227	390	276	484	25	L	1 950	2 220	2 071	2 088	2 014
6	L	289	464	350	558	26	H	2 046	2 294	2 441	2 236	2 236
7	H	325	538	424	370	27	L	2 095	2 408	2 145	2 444	2 592
8	L	473	652	632	632	28	L	2 154	2 482	2 293	2 666	2 444
9	L	496	726	780	820	29	H	2 293	2 556	2 535	2 330	2 330
10	L	525	800	706	968	30	L	2336	2 670	2 367	2 518	2 814
11	L	587	874	928	1 042	31	L	2 412	2 744	2 797	2 740	2 518
12	H	630	948	1 002	706	32	L	2 560	2 818	2 723	2 592	2 666
13	L	854	1 062	854	894	33	L	2 618	2 892	2 649	2 814	2 740
14	S	976	1 200	1 169	1 254	34	H	2 770	2 966	3 102	3 036	3 036
15	L	1 080	1 274	1 243	1 116	35	L	2 834	3 080	2 871	2 888	2 888
16	L	1 243	1 348	1 317	1 328	36	S	2 875	3 218	3 363	3 382	3 382
17	H	1 270	1 422	1 391	1 402	37	L	2 946	3 292	2 946	2 962	2 962
18	S	1 388	1 589	1 849	1 842	38	L	3 028	3 366	3 028	3 244	3 244
19	L	1 416	1 663	1 923	1 704	39	H	3 125	3 440	3 196	3 130	3 130
20	H	1 490	1 737	1 490	1 496	40	S	3 160	3 607	3 461	3 480	3 480

表3 FCFS和RHC策略下的延误结果分析

s

航班序号	延误时间			航班序号	延误时间			
	FCFS	RHC策略 时间最小	RHC策略 成本最小		RHC策略 多目标优化	FCFS	RHC策略 时间最小	RHC策略 成本最小
1	0	0	0	23	213	378	230	304
2	20	20	20	24	307	102	176	250
3	66	66	66	25	121	138	212	64
4	77	319	77	26	395	190	190	190
5	163	49	257	27	50	349	349	497
6	175	61	269	28	139	512	364	290
7	213	99	45	29	242	37	37	37
8	179	159	159	30	31	182	330	478
9	230	284	324	31	385	328	328	106
10	275	181	443	32	163	32	32	106
11	287	341	455	33	31	196	196	122
12	318	372	76	34	332	266	266	266
13	208	0	40	35	37	54	54	54
14	224	193	278	36	488	507	507	507
15	194	163	36	37	0	16	16	16
16	105	74	85	38	0	216	216	216
17	152	121	132	39	71	5	5	5
18	201	461	454	40	301	320	320	320
19	247	507	288	延误				
20	247	0	6	总时间	9 548	6 876	7 633	7 473
21	253	6	12	延误				
22	341	94	283	总成本	30 096	21 468	20 907	21 019

计算结果表明基于RHC策略的多目标遗传排序算法结果与FCFS算法结果比较延误成本约减少30%，延误总时间约减少了30%，计算结果符合实际情况。因此本文基于RHC策略的遗传动态排序算法比FCFS算法更为有效。本文给出的决策偏好为0.5:0.5的均衡偏好，决策者可根据偏好，设置偏好参数，获得满意的优化方案。

## 5 结束语

本文讨论了基于RHC策略的终端区机场动态排序问题。采用的遗传算法计算结果表明，本文的建模方法及算法的选择在解决单跑道终端区排序问题时是快速有效的，能够满足实时操作的要求；同时可以减少平均延误成本、总延误时间。算法采用的RHC策略可满足决策者对于动态航班的灵活管理要求，排序队列生成时间对决策者而言具有良好的操作性，决策者可根据自身偏好选择最终调度方案，优化效率高。但由于动态航班多目标优化的复杂性，算法需进一步改进。算法应考虑减少对管制员负荷的增量，增强管制员接受度，从而更加满足实际系统的运行需求。鉴于目前国内的大终端区多采用双跑道运行，在今后的工作中将结合双跑道机场实际情况进行研究，以期实现更好的经济效益。

### 参考文献：

- [1] 刘光才. 全面解析航班延误[EB/OL]. <http://news.carnoc.com/list/162/162197.html>. 2010-06/2011-01.
- [2] Lambrecht M, Slater G L. Departure trajectory modeling for air traffic control automation tools [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Portland; AIAA, 1999: 1507-1520.
- [3] Ronbinson J E, Davis T J, Isaacson D R. Fuzzy reasoning-based sequencing of arrival aircraft in the terminal area [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. New Orleans, LA; [s. n.]. 1997:422-432.
- [4] Lee Hangbong, Hamsa B. Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling[C]//proceeding of American Control Conference. Seattle, Washington; IEEE, 2008; 2449-2454.
- [5] 徐肖豪,姚源. 遗传算法在终端区飞机排序中的应用[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):121-126.  
Xu Xiaohao, Yao Yuan. Application of genetic algorithm to aircraft sequencing in terminal area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(3):121-126.
- [6] 程晓航,薛惠锋,洪鼎松. 进港飞机调度的精华自适应遗传算法设计[J]. 交通与计算机,2006,24(6):91-94.  
Cheng Xiaohang, Xue Huifeng, Hong Dingsong, et al. Design of elitist adaptive genetic algorithm in arrival aircrafts scheduling [J]. Computer and Communications. 2006,24(6):91-94.
- [7] 张洪海,胡明华. 多跑道着陆飞机协同调度多目标优化[J]. 西南交通大学学报. 2009,44(3):402-409.  
Zhang Honghai, Hu Minghua. Multi-objection optimization for collaborative scheduling aircraft landing on multi-runways [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009,44(3):402-409.
- [8] International Civil Aviation Organization. Rules of the air and air traffic services (DOC4444) [S]. Montréal; International Civil Aviation Organization, 1996.
- [9] 徐肖豪,李雄. 航班地面等待模型中的延误成本分析与仿真[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(1):115-120.  
Xu Xiaohao, Li Xiong. Cost analysis of flight delays and simulation in ground-holding model [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006,38(1):115-120.
- [10] Hu Xiaobing Chen Wenhua. Receding horizon control for aircraft arrival sequencing and scheduling [J]. IEEE Trans Intell Transp Syst, 2005,6(2):189-197.
- [11] 施赛锋. 广州终端区进离场航班排序系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [12] Hajeala P, Lin C Y. Genetic search strategies in multi-criterion optional design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization [J], 1992,4(2):99-107.
- [13] 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.
- [14] 杨晶妹. 终端区进场航班排序方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.