

文章编号:1671-1637(2015)02-0070-09

## 基于 RHC-GA 的多跑道进离场航班 多目标动态优化模型

张启钱, 胡明华, 张洪海

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**以管制负荷与航班延误总成本最小为目标函数,以尾流间隔、跑道限制与最大位置约束为约束条件,结合中国民航最新运行标准,建立了基于滚动时域控制策略的多跑道进离场航班多目标动态优化模型。针对模型求解规模庞大的特点,结合滚动时域控制策略的动态特性,设计了求解模型的遗传算法,选取中国某大型繁忙机场高峰时段的48个航班数据进行实例验证。仿真结果表明:当重、中、轻3种机型的单位飞行成本分别为25、16、10元·s<sup>-1</sup>时,采用现有先到先服务的策略,总延误损失为36 098元,管制负荷为32架次;当采用5个滚动时域的控制策略时,总延误损失为28 900元,管制负荷为31架次;当采用4个滚动时域的控制策略时,总延误损失为27 375元,管制负荷为32架次;当采用3个滚动时域的控制策略时,总延误损失为27 194元,管制负荷为33架次。与现有的先到先服务策略相比,提出的模型能动态地优化多跑道进离场航班排序问题,有效减少延误损失,并均衡跑道资源利用状况。

**关键词:**航空运输;航班管理;航班计划;多跑道;滚动时域控制;遗传算法

**中图分类号:**V355

**文献标志码:**A

## Dynamic multi-objective optimization model of arrival and departure flights on multiple runways based on RHC-GA

ZHANG Qi-qian, HU Ming-hua, ZHANG Hong-hai

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** The minimum control workload and flight delay were taken as objective functions, wake turbulence separation, runway restriction and the maximum position limit were taken as constraint conditions, and the dynamic multi-objective optimization model of arrival and departure flights on multiple runways based on RHC-GA was set up by considering the latest operation standards of Civil Aviation Administration of China. For the large solution scale of the proposed model, genetic algorithm was designed to solve the proposed model with the dynamic characteristics of receding horizon control strategy, and the 48 flights data in the peak period of a large Chinese busy airport were selected to verify the model. Simulation result shows that when the unit flight costs of heavy, medium and light aircrafts are 25, 16, 10 yuan · s<sup>-1</sup> respectively, the total delay cost is 36 098 yuan and the control workload is 32 sorties by using the first come first served (FCFS) strategy. The total delay cost is 28 900 yuan and the control workload is 31 sorties by using the receding horizon control strategy with 5 receding horizons, the total delay cost is 27 375 yuan and

收稿日期:2014-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61104159);“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAH24B08)

作者简介:张启钱(1979-),男,江苏海门人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中交通运输研究。

导师简介:胡明华(1962-),男,湖南益阳人,南京航空航天大学教授,工学博士。

the control workload is 32 sorties by using the receding horizon control strategy with 4 receding horizons, and the total delay cost is 27 194 yuan and the control workload is 33 sorties by using the receding horizon control strategy with 3 receding horizons. Compared with the existing FCFS strategy, the proposed model is able to optimize the multi-runway sequencing problem of arrival and departure flights more dynamically, and the total delay cost reduces more efficiently and the runway resource could be utilized more evenly. 3 tabs, 14 figs, 25 refs.

**Key words:** air transportation; flight management; flight schedule; multiple runways; receding horizon control; genetic algorithm

**Author resumes:** ZHANG Qi-qian(1979-), male, doctoral student, +86-25-84896206, zhangqq@nuaa.edu.cn; HU Ming-hua(1962-), male, professor, PhD, +86-25-84896650, minghuahu@nuaa.edu.cn.

## 0 引 言

近年来,随着中国航空运输业务量的迅速增长,跑道资源已逐渐饱和。为提高跑道运行效率,中国民航局制定了《优化空中交通管制运行规范的暂行规定》,细分和更新了航空器尾流间隔与航空器起飞着陆最小间隔。为确保跑道的安全与高效运行,经验调度方法的低效率和高工作负荷问题在日益繁忙的大型机场运行中愈加突显,亟需安全、灵活、高效的航班优化调度辅助策略,在保证安全的前提下,灵活高效地优化进离场航班起降队列,有助于提升大型繁忙机场运行效率,缓解大面积航班延误问题。

国内外学者早在 20 世纪末已开展航班优化调度问题研究,Lambrecht 等研究发现优化调度算法能有效提升机场终端区运行容量并缓解航班延误问题<sup>[1]</sup>;Bolender 等基于先到先服务(First Come First Served, FCFS)策略,研究了进场航班的跑道动态分配问题<sup>[2-3]</sup>,但忽略了航班着陆时间间隔等非对称因素,并不能有效地降低大面积航班延误;Kari 等研究了协同机场进场航班调度的组合优化方法,以最小化进场队列调整成本为优化目标,采用整数规划到达排序模型优化进场队列,优化结果有助于为航空公司航班到达排序提供决策支持<sup>[4]</sup>;Beasley 等针对进场航班调度问题提出了混合整数 0-1 规划模型,优化结果表明该方法能大幅减少调度延误<sup>[5-7]</sup>,但求解效率较低;Hansen 等采用了遗传算法研究进场航班调度问题<sup>[8-9]</sup>,虽然求解效率较高,但优化结果稳定性差,难以得到最优解;程晓航等设计了精英自适应遗传算法求解进场航班调度问题<sup>[10]</sup>,改进后的遗传算法收敛性较好,求解效率更高;孙宏等分别应用了模拟退火算法、模糊 Petri 网与蚁群算法求解进场航班调度问题,研究结果表明 3 种智能

算法对求解航班调度问题具有一定优势<sup>[11-14]</sup>;应圣钢等探讨了基于多目标动态规划的多跑道进港排序问题,考虑了航班调度的动态性和优化目标的多样性<sup>[15]</sup>,但忽略了实际调度中进离场航班之间的相互影响;周茜等基于 CDM GDP 策略,研究了跑道混合运行下的时隙分配问题,分析了在协同决策支持下,以地面延误作约束条件的航班时隙分配问题<sup>[16]</sup>。

尽管上述新的求解算法效率提升显著,但这些研究工作主要基于静态环境,忽略了航班运行的动态变化特性,也未考虑离场航班对进场航班调度的相互影响。Capri 等考虑离场航班对调度问题的动态性影响,并设计了启发式算法求解<sup>[17-19]</sup>,但仍面临求解效率低与航班动态变化造成的求解规模大的问题;Lee 等以国外机场的进场航班为研究对象,研究了跑道调度成本、航班延误与吞吐量三者之间的平衡性问题<sup>[20]</sup>,但未考虑进离场航班间的相互影响;张洪海等针对进场航班排序问题建立了多目标优化模型,并假设离场航班对进场航班无影响<sup>[21]</sup>,但由于在实际调度中通常采取进场优先的管制策略,进场航班对离场航班的影响是不容忽视的。

目前,国内外研究成果主要集中在调度算法的分析与改进,且以静态优化问题为主,动态模型仍存在求解规模大的问题。尽管模型求解效率得到一定的提升,但主要以国际民航组织 ICAO 规定的尾流间隔标准为参照进行航班混合运行优化分析,基于中国民航新规则下的运行研究相对薄弱,离场航班优化研究较少。本文进一步综合考虑中国民航局关于优化管制运行规范的暂行规定与管制单位实际的离场管制规则等因素,以空中交通管制负荷与航班总延误成本最小为优化目标,以尾流间隔、跑道限制与最大位置约束为约束条件,建立了基于 RHC-GA

的多跑道进离场航班多目标动态优化模型,以期既能提高大型机场跑道资源利用率和运行效率,又符合中国民航的运行特点和实际情况。

### 1 问题描述与分析

#### 1.1 问题描述

机场跑道与进离场航线相互耦合形成一体化的终端区系统,形成机场终端区时空模型<sup>[22]</sup>,见图 1。假设机场有 2 条跑道,采用独立平行进近运行模式,进场航班从不同入口点进入终端区并按照指定航线进场,离场航班根据地面管制滑行规则到达指定跑道入口处等待离场,根据预计到达跑道入口时间次序对所有进离场航班排序并分配起降时隙。通过起始调度界限和终止调度界限将终端区划分为 3 部分,中间部分为本文研究的排序区域。

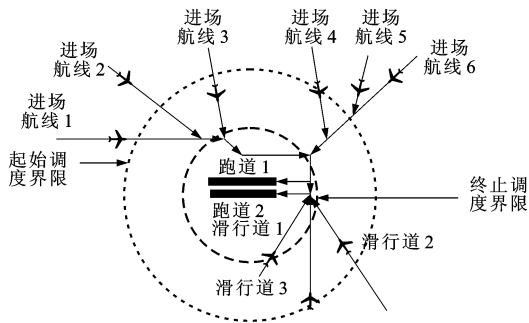


图 1 机场终端区时空模型

Fig. 1 Space-time model of airport terminal area

在空间上,进离场航班还应满足一定的安全间隔要求,中国民航最新的最小距离间隔标准见表 1。本文设  $T_1$  为进场航班跑道脱离时间;  $T_2$  为离场航

班滑跑离地时间;  $L_1$  为进场航班之间最小安全裕度;  $L_2$  为管制运行部门规定的最迟发布进场时间对应的进场航班之间的距离;  $T_0$  为尾流间隔;  $V$  为后续进场航班平均速度; 尾流距离间隔为  $T_0V$ ; 正常连续进场间隔为  $T_1V + L_1$ ; 管制规定的连续落地间隔为  $T_1V + L_2$ ; 2 个进场航班间插放离场航班的正常距离间隔为  $V(T_1 + T_2) + L_1$ , 管制规定的间隔为  $V(T_1 + T_2) + L_2$ 。

表 1 最小距离间隔

Tab. 1 Minimum distance intervals n mile

前机	后机		
	重型机	中型机	轻型机
重型机	4	5	6
中型机	4	4	5
轻型机	4	4	4

根据中国民航最新运行标准,尾流间隔的最小标准为前机脱离跑道后,后机在决断高度之前就可以发布进场指令,即前后 2 个航班之间最小距离间隔为尾流距离间隔、正常进场间隔与管制规定间隔的最大值。2 个航班之间插放离场航班的间隔为正常距离间隔与管制规定间隔的最大值。前后 2 个航班的最小时间间隔为尾流间隔与管制部门规定的最小放飞间隔的最大值。一般不同方向离场的航班之间没有特殊要求,遵照尾流准则或管制单位规定的间隔,同方向航班前后离场(中间无进场航班)的时间间隔为 3 min,研究时必须考虑不能将同向航班放在前后,否则将造成延误成本增加。最小时间间隔标准见表 2。

表 2 最小时间间隔

Tab. 2 Minimum time intervals

航班起降类型	前机	后机	时间间隔/s	航班起降类型	前机	后机	间隔要求
进场	重型机	重型机	90	离场	重型机	重型机	同向时取 120 s,不同向时取180 s
		中型机	90			中型机	
		轻型机	115			轻型机	
	中型机	重型机	90		中型机	重型机	
		中型机	90			中型机	
		轻型机	100			轻型机	
	轻型机	重型机	90		轻型机	重型机	
		中型机	90			中型机	
		轻型机	90			轻型机	

当在连续进场航班之间插入离场航班时,若离场航班为重型机,则进场航班之间的时间间隔为 140 s;若离场航班为中型机,则进场航班之间的时间间隔为 115 s;若离场航班为轻型机,则进场航班

之间的时间间隔为 110 s。

#### 1.2 符号说明

本文假设优化时域内航班初始起降跑道、起降序列与预计起降时间已知,且机场的运行容量始终

满足进场与离场需求。 $T_{qh}$  为前机机型为  $q$ 、后机机型为  $h$  时的最小尾流间隔( $q, h$  取 1、2、3 分别代表重、中、轻 3 种机型);  $T$  为单个滚动时域的时间;  $W$  为管制工作量,以航班架次作为计量单位;  $M_p$  为最大位置约束,通常取 3~5;  $E_{ikr}$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上的最早起降时间;  $L_{ikr}$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上的最晚起降时间;  $T_{ikr}$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上的目标起降时间;  $t_{ikr}$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上的实际起降时间;  $x_{ikr}$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上延误状态的 0-1 变量,当  $t_{ikr} \neq T_{ikr}$  时,  $x_{ikr}$  取 1,否则  $x_{ikr}$  取 0;  $y_{ir}$  为航班  $i$  在跑道  $r$  上起降的 0-1 变量,当航班  $i$  起降在跑道  $r$  上时,  $y_{ir}$  取 1,否则  $y_{ir}$  取 0;  $q_{ik0}$  为航班  $i$  在初始队列中的序号;  $q_{ik}$  为经过滚动时域  $k$  优化后的航班  $i$  在队列中的序号;  $C_k$  为滚动时域  $k$  内所有航班的延误成本;  $C$  为总延误成本;  $C(t_{ikr})$  为滚动时域  $k$  内航班  $i$  在跑道  $r$  上  $t_{ikr}$  时刻起降的延误成本。

### 1.3 目标与约束

在满足基本约束的条件下,对管制负荷与航班总延误成本实施航班优化调度,同时设定最大位置约束。大负荷的工作容易造成管制员的疲劳,降低管制工作的安全性<sup>[19,23]</sup>。通过最小化航班调整的架次实现管制负荷优化目标,航班在队列中位置和速度的调整将直接增加管制员的工作量。以管制工作量  $W$  最小为目标函数建立优化模型为

$$\min W = \sum_i x_{ikr} \quad (1)$$

航班总延误成本为所有进离场航班的延误成本的总和。在目标时间起降时,航班成本最低,早于或晚于目标时间都意味成本增加(非目标时间起降均称为延误)。总延误成本实际上是时间的分段式超线性缓慢增长的幂函数<sup>[21]</sup>,  $C(t_{ikr})$  可表示为

$$C(t_{ikr}) = \begin{cases} c_{ei} (T_{ikr} - t_{ikr})^{1+\epsilon_e} & E_{ikr} \leq t_{ikr} \leq T_{ikr} \\ c_{li} (t_{ikr} - T_{ikr})^{1+\epsilon_l} & T_{ikr} < t_{ikr} < L_{ikr} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $c_{ei}$  为航班  $i$  早于目标起降时间起降时的单位时间成本;  $c_{li}$  为航班  $i$  晚于目标起降时间起降时的单位时间成本;  $\epsilon_e, \epsilon_l$  分别为早于与晚于目标起降时间的单位时间成本系数,通常由单位时间飞行成本(滑行成本)和旅客单位时间延误经济损失确定。

为了防止出现的较大延误全部施加给部分航班,一般要求  $0 < \epsilon_e = \epsilon_l < 1$ 。以总延误成本  $C$  最小为优化目标建立优化模型为

$$\min C = \sum_i \sum_r C(t_{ikr}) \quad (3)$$

最大位置约束是指为优化后的航班序列中某个航班与 FCFS 策略的序列中位置的最大变化区间,为了确保优化结果的真实有效,通常对不满足最大位置约束值  $M_p$  的航班优化序列进行延迟惩罚,有

$$|q_{ik} - q_{ik0}| \leq M_p \quad (4)$$

## 2 基于 RHC 策略的航班动态排序模型

航班动态排序模型是一个离散事件模型,航班队列随着时间推移离散性变化。已有模型一般以新航班加入排序队列为触发事件进行建模,但进离场航班加入排序队列的时间是一定范围内的随机值,因此,队列的更新并无较好的规律性。本文引入新的动态排序策略,即滚动时域控制 (Receding Horizon Control, RHC) 策略<sup>[24]</sup>,将排序时间固定在某一时域内,并不断更新时域以实现航班调度的动态性。

在静态优化策略下,根据预测信息对所有进离场航班流进行调度优化,得到静态的优化方案,见图 2。在图 2 的基础上,再引入滚动时域控制策略,滚动时域控制策略是一种向前看若干步的动态优化策略,即优化当前滚动时域内的进离场航班,并以该时域最后调度时间作为下一时域的起始调度时间,在下一个时域重复相同的优化,见图 3。

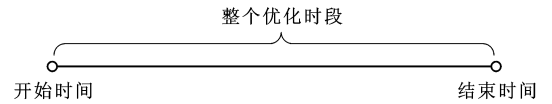


图 2 静态策略

Fig. 2 Static strategy

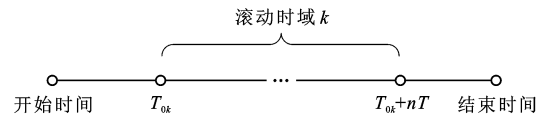


图 3 RHC 策略

Fig. 3 RHC strategy

从图 3 可以看出,目标优化时段被划分为由  $n$  个时间长度  $T$  组成的滚动时域,滚动时域  $k$  的起止点分别为  $T_{0k}$  与  $T_{0k} + nT$ ,第  $\lambda$  个时间间隔起止点分别为  $T_{0k} + \lambda T$  与  $T_{0k} + (\lambda + 1)T$ 。搜索滚动时域  $k$  第  $\lambda$  个时间间隔上的航班信息,对当前滚动时域的航班制定优化措施,并仅实施第  $\lambda$  个时间间隔的方案结果并冻结,然后使  $\lambda = \lambda + 1$ ,重复优化过程直至时域终点。可见,通过滚动时域推进优化过程 RHC 策略可满足调度动态性要求,更加实用。

假设航班  $i$  的前机为  $j$ ,以所有航班的总延误成本最小为目标,在 RHC 策略下,式(3)可更新为

$$\min C = \min \sum_k C_k = \min \sum_k \sum_r \sum_i C(t_{ikr}) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } kT < t_{ikr} \leq (k+1)T \quad (6)$$

$$t_{jkr} - t_{ikr} \geq T_{qh} \quad (7)$$

$$y_{ir} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$\sum_r y_{ir} = 1 \quad (9)$$

约束条件(6)保证被优化航班的进离场时间在当前优化时间间隔内;约束条件(7)保证航班  $j$  和  $i$  起降时满足最小尾流间隔;约束条件(8)、(9)保证每个航班只能降落在一条跑道上。

结合式(1)~(9),基于 RHC 策略的多跑道进离场航班多目标动态优化模型的目标为式(1)和(5),约束条件为式(2)、(4)、(6)~(9)。

### 3 基于 RHC 策略的遗传算法

#### 3.1 遗传算子

##### 3.1.1 轮盘赌选择

本文选取轮盘赌选择的方法对种群进行选择操作,具有较高适应度的个体将以较大的概率被选择,反之将以较大的概率被淘汰。本文在选择操作时保留精英个体,有利于加快进化过程的收敛性。令  $\eta$  为任意一个染色体,染色体  $z$  的适应度为  $g_z$ ,  $z$  被选择的概率为

$$P_z = \frac{g_z}{\sum_{\eta} g_{\eta}} \quad (10)$$

##### 3.1.2 基于同跑道排序启发式交叉

在启发式交叉操作时,针对同跑道的染色体个体进行序列交叉。在个体具有相同跑道基因的基因位中随机产生 1 个交叉点,将交叉点后面的具有相同跑道基因的基因交叉、复制与删除相同基因位而得到新的个体,将所有个体中适应度最高的 2 个个体作为交叉得到的后代。

##### 3.1.3 跑道启发式变异

本文针对跑道采用启发式变异方法,选择染色体具有相同目标起降时间的航班进行跑道变异操作,通过判断不同跑道的具有相同航班架次、延误与进离场性质,确定跑道变异的航班和队列次序,其他保持不变,选择其中最好的一个作为变异产生的后代。

#### 3.2 适应度函数

适应度函数的设计主要基于目标函数,因此,适应度的大小能直接反映目标函数的优化程度,本文采用基于目标优劣表现的排序方法确定个体适应度<sup>[25]</sup>。将种群个体按所有目标函数的优劣排序,计

算综合适应度,综合适应度高的个体的优化结果更加优良。个体的适应度计算规则为

$$G_a(X_b) = \begin{cases} [S - R_a(X_b)]^2 & R_a(X_b) > 1 \\ \alpha S^2 & R_a(X_b) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$G(X_b) = \sum_b G_a(X_b)$$

式中: $S$  为种群中个体总数量; $X_b$  为种群的第  $b$  个个体; $R_a(X_b)$  为按目标  $a$  优劣排序后个体  $X_b$  的序号; $G_a(X_b)$  为个体  $X_b$  在目标  $a$  下的适应度; $G(X_b)$  为个体  $X_b$  对所有目标的综合适应度; $\alpha$  为(1,2)区间的某个常数,使较优较高的个体获得更高的适应度。

由以上分析可知,总体表现较优的个体适应度较大,参与进化的概率也较大,算法步骤如下。

Step 1:读取滚动时域  $k$  内的航班信息。

Step 2:判断  $k$  是否为 1,当  $k=1$  时,转 Step 4。

Step 3:读取滚动时域  $k-1$  内所有未冻结的航班信息。

Step 4:种群初始化,分别生成滚动时域  $k$ 、 $k-1$  内未冻结航班的初始种群。

Step 5:轮盘赌选择,计算初始综合适应度。

Step 6:启发式交叉,选择相同跑道的个体进行概率交叉。

Step 7:启发式变异,针对具有相同目标起降时间的个体进行变异操作。

Step 8:适应度计算,对操作后的新一代进行综合适应度计算。

Step 9:寻找新的最优个体并保存。

Step 10:输出种群信息。

Step 11:若达到最大迭代次数  $m'$ ,转 Step 12;若未达到最大迭代次数,令迭代次数  $m=m+1$ ,转 Step 5。

Step 12:若优化时域结束( $k>n$ ),转 Step 13;若优化时域未结束,令  $k=k+1$ ,转 Step 1。

Step 13:输出所有时域优化后的最优航班信息,结束。

基于 RHC 策略的遗传算法流程图 4。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 仿真计算

为验证模型的可行性和求解算法的高效性,选取中国某大型繁忙机场高峰时段 9:00~10:00(起始时间换算为 0,计算时间为 0~3 600 s)的 48 个航班进行调度,设置种群规模为 20,选择、交叉、变异的概率

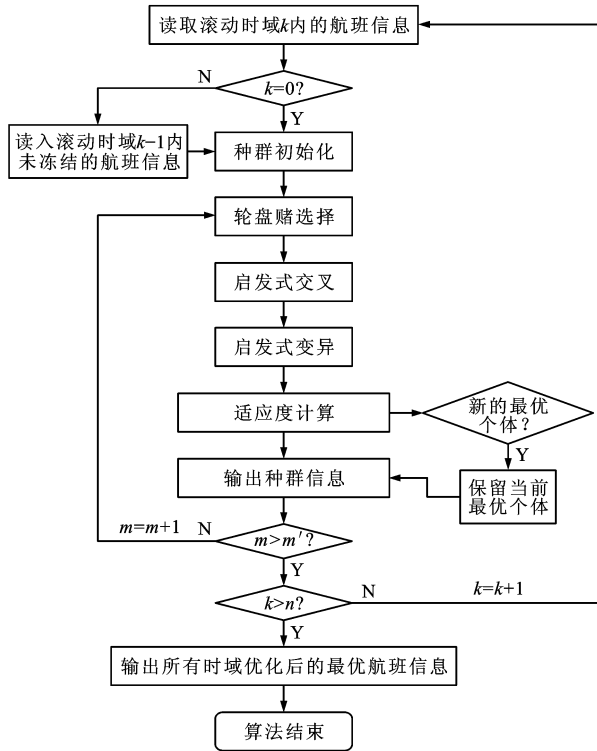


图4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

依次为 0.10、0.05、0.01, 最大迭代次数 200 次; 最大位置约束  $M_p$  取 3, 参数  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_c$  均为 0.5; 参考文献[21] 设置重、中、轻 3 种机型的单位飞行成本分别为 25、16、10 元  $\cdot s^{-1}$ , 可使用 2 条跑道。本文基于 JAVA 仿真平台, 分别计算了 FCFS 策略和本文模型的调度结果。由于在实际管制中主要以 FCFS 策略为主, 航班调度次序完全由实际到达时间决定, 故通过比较航班计划数据与实际运行结果数据即可得到基于 FCFS 策略的延误损失和管制负荷(基于 FCFS 策略的方法为方法 1)。针对选取的算例, 本文还设计了 3 种 RHC-GA 算法: 在方法 2 中, 将优化时段划分为 5 个滚动时域( $n$  取 5), 其他参数不变; 在方法 3 中, 将优化时段划分为 4 个滚动时域( $n$  取 4), 其他参数不变; 在方法 4 中, 将优化时段划分为 3 个滚动时域( $n$  取 3), 其他参数不变。

#### 4.2 结果分析

分别在 FCFS 与 RHC 策略下, 采用方法 1, 总延误损失为 36 098 元, 管制负荷为 32 架次; 采用方法 2, 总延误损失为 28 900 元, 管制负荷为 31 架次; 采用方法 3, 总延误损失为 27 375 元, 管制负荷为 32 架次; 采用方法 4, 总延误损失为 27 194 元, 管制负荷为 33 架次, 优化结果分别见图 5、6。

以方法 1 的延误损失为基准, 3 种 RHC-GA 算

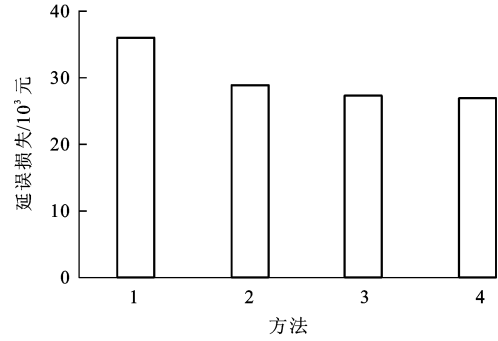


图5 延误损失比较

Fig. 5 Comparison of delay costs

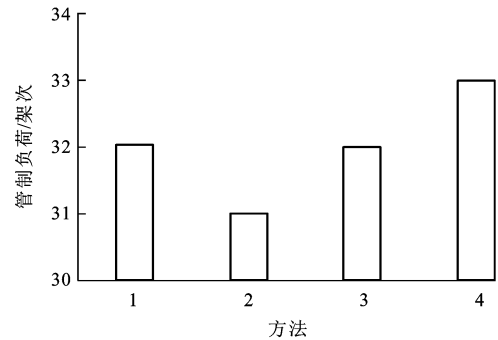


图6 管制负荷比较

Fig. 6 Comparison of control workloads

法的延误损失依次减少 20%、24%、25%; 以满负荷 48 架次为基准, 3 种方法管制负荷依次减少 35.4%、33.3%、31.3%。滚动时域划分越少, 延误损失减少越大, 但管制负荷存在增加的趋势。选取优化结果较优的方法 4 与方法 1 对比, 求解结果见表 3, A 表示进场, D 表示离场, L 表示中型机, H 表示重型机。图 7 为方法 1、4 的航班延误损失曲线, 采用 FCFS 策略的方法 1 的航班延误损失较小, 随着航班不断到达, 其延误损失增大较快, 其中航班 44 的延误损失达到 4 000 元, 航班 47 的延误损失达到 4 981 元, 延误损失较大。采用 RHC 策略的方法 4 的航班延误损失较小, 后续到达航班延误

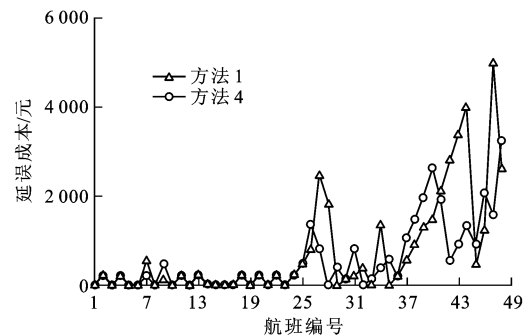


图7 方法1、4的延误成本

Fig. 7 Delay costs of methods 1 and 4

表 3 方法 1、4 的优化结果

Tab. 3 Optimization results of methods 1 and 4

航班信息					方法 1				方法 4			
航班 编号	计划时间/ s	计划 跑道	起降 类型	机型	调度时间/ s	调度 跑道	延误损失/ 元	管制负荷/ 架次	调度时间/ s	调度 跑道	延误损失/ 元	管制负荷/ 架次
1	0	1	D	L	0	1	0	0	0	1	0	0
2	0	1	D	L	120	1	210	1	120	1	210	1
3	0	2	D	H	0	2	0	0	0	2	0	0
4	0	2	A	L	115	2	197	1	115	2	197	1
5	300	1	A	L	300	1	0	0	300	1	0	0
6	300	2	A	L	300	2	0	0	300	2	0	0
7	600	1	D	L	830	2	558	1	715	1	197	1
8	600	1	A	L	600	1	0	0	600	1	0	0
9	600	1	A	L	690	1	136	1	805	2	469	1
10	600	2	D	H	600	2	0	0	600	2	0	0
11	600	2	A	L	715	2	197	1	715	2	197	1
12	900	1	D	L	900	1	0	0	900	1	0	0
13	900	1	D	L	1 020	1	210	1	1 020	1	210	1
14	900	2	D	L	950	2	56	1	920	2	14	1
15	1 800	1	A	L	1 800	1	0	0	1 800	1	0	0
16	1 800	2	A	L	1 800	2	0	0	1 800	2	0	0
17	2 100	1	D	L	2 100	1	0	0	2 100	1	0	0
18	2 100	1	A	L	2 215	1	197	1	2 215	1	197	1
19	2 100	2	D	L	2 100	2	0	0	2 100	2	0	0
20	2 100	2	D	L	2 220	2	210	1	2 220	2	210	1
21	2 400	1	D	L	2 400	1	0	0	2 400	1	0	0
22	2 400	1	A	L	2 515	1	197	1	2 515	1	197	1
23	2 400	2	D	L	2 400	2	0	0	2 400	2	0	0
24	2 400	2	D	L	2 520	2	210	1	2 520	2	210	1
25	2 400	2	A	L	2 605	1	469	1	2 605	1	469	1
26	2 700	1	D	L	2 995	1	810	1	3 115	2	1 352	1
27	2 700	1	D	L	3 320	2	2 470	1	2 995	2	810	1
28	2 700	1	A	L	3 205	1	1 815	1	2 700	1	0	0
29	2 700	1	A	L	2 700	1	0	0	2 880	2	386	1
30	2 700	1	A	L	2 790	1	136	1	2 790	1	136	1
31	2 700	2	D	L	2 815	2	197	1	2 995	1	810	1
32	2 700	2	A	L	2 880	1	386	1	2 700	2	0	0
33	2 700	2	A	L	2 700	2	0	0	2 790	2	136	1
34	2 700	2	A	L	3 115	2	1 352	1	2 880	2	386	1
35	3 000	1	D	L	3 000	2	0	0	3 235	1	576	1
36	3 000	1	D	L	3 115	1	197	1	3 115	1	197	1
37	3 000	1	A	L	3 230	1	558	1	3 350	1	1 047	1
38	3 000	1	A	L	3 320	1	916	1	3 440	1	1 476	1
39	3 000	1	A	L	3 410	1	1 328	1	3 530	1	1 952	1
40	3 000	2	D	L	3 440	2	1 477	1	3 645	2	2 621	1
41	3 000	2	D	L	3 560	2	2 120	1	3 525	2	1 924	1
42	3 000	2	A	L	3 675	2	2 806	1	3 230	2	558	1
43	3 000	2	A	L	3 765	2	3 385	1	3 320	2	916	1
44	3 000	2	A	L	3 855	2	4 000	1	3 410	2	1 328	1
45	3 300	1	A	L	3 500	1	452	1	3 620	1	916	1
46	3 300	1	A	H	3 590	1	1 235	1	3 710	1	2 076	1
47	3 300	2	A	L	3 945	2	4 981	1	3 760	2	1 579	1
48	3 300	2	A	H	4 035	2	2 621	1	3 850	2	3 225	1

波动较FCFS策略小,且最大延误损失仅为3 225元,较方法1的减少了35.2%,优化效果明显。

图8为不同策略下平均调度时间分布,纵坐标为各时间段内航班调度时间的平均值。方法4的平均调度时间曲线基本处于计划调度时间曲线和方法1调度时间曲线之间,表明RHC策略能较好保证优化后的调度时间与计划时间相符。从3条曲线发散分布的趋势可以看出,随着时间的推移,实际调度时间与计划调度时间之差增大,延误增大。由于航班计划排班密度较大,前续航班的延误会不断传播给后续航班,高密度航班计划几乎无法吸收其中的延误。

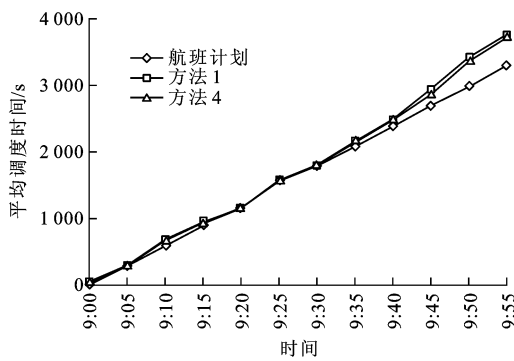


图8 平均调度时间

Fig. 8 Average scheduling times

图9~12分别为跑道1、2的延误损失与管制负荷。与方法1相比,采用方法4时,跑道1的延误成本比方法1增加1 400元,但跑道2的延误成本减小10 300元。2条跑道延误成本降低显著,且更加平衡,跑道1、2的延误成本比由3:10变为3:5,达到了降低延误成本,均衡资源利用的目标。与方法1相比,采用方法4时,每当跑道1的管制负荷减少1架次,跑道2的管制负荷就增加2架次,2条跑道的管制负荷变化均较小。

从航班进离场角度分析,图13为部分进场航班

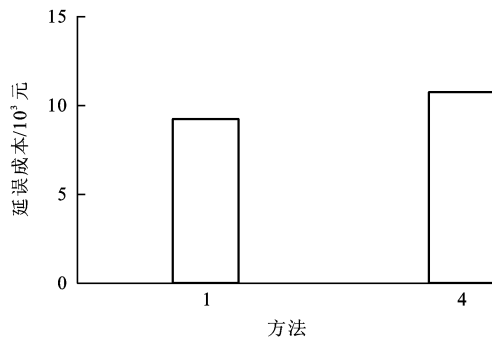


图9 跑道1延误成本

Fig. 9 Delay costs of runway 1

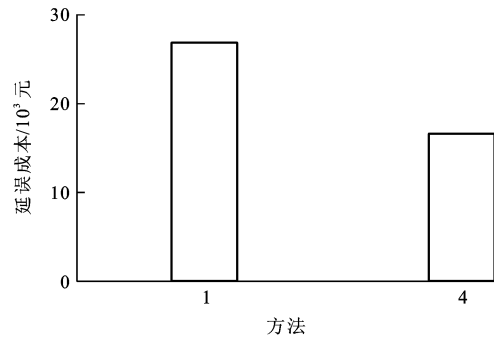


图10 跑道2延误成本

Fig. 10 Delay costs of runway 2

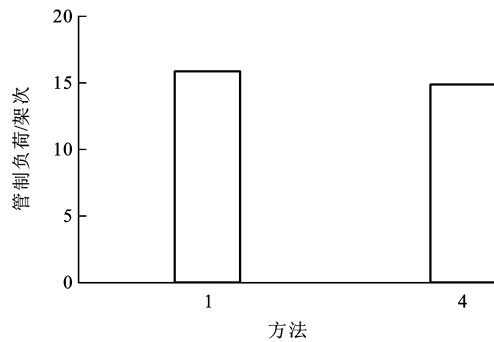


图11 跑道1管制负荷

Fig. 11 Control workloads of runway 1

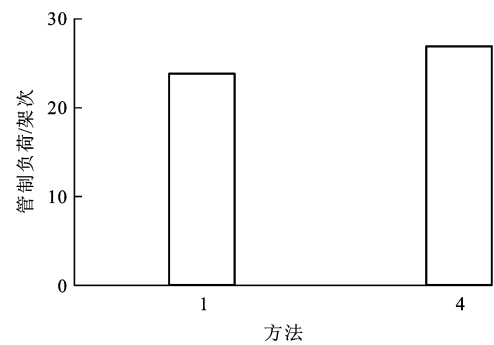


图12 跑道2管制负荷

Fig. 12 Control workloads of runway 2

延误分布,进场航班共27架次,图14为部分离场航班延误分布,离场航班共21架次,优化后的进场航班延误时间比较均衡,避免了部分航班较长的延误,方法4较方法1的减少23%。离场航班的延误存在波动,主要是进场航班与离场航班时隙交换导致延误传播到离场航班,采用方法4时,离场总延误比方法1的只增加8%,但所有航班的延误为8 570 s,较方法1减少了24%,进场与离场航班延误比由12:5变为17:10。

以上分析表明,RHC策略能在一定程度上均衡跑道、进场与离场延误、部分航班的延误成本和管制负荷,从而使航班调度达到最优。



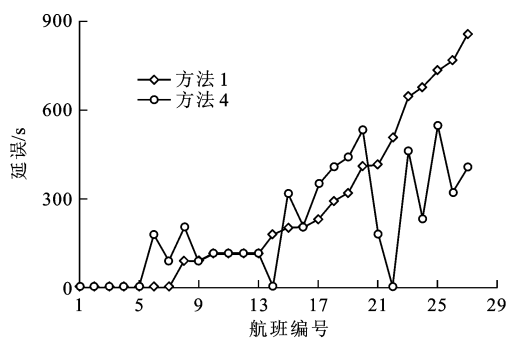


图 13 进场航班延误分布

Fig. 13 Delay distributions of arrival flights

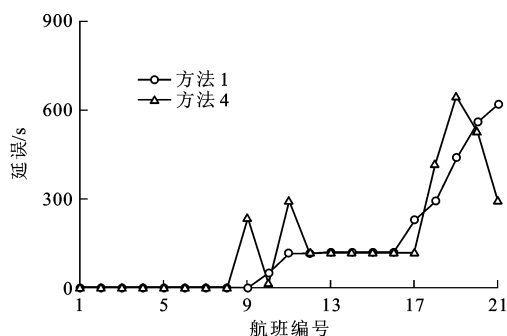


图 14 离场航班延误分布

Fig. 14 Delay distributions of departure flights

## 5 结 语

本文建立了基于 RHC 策略的多跑道进离场航班多目标动态优化问题,仿真结果表明,提出的模型能有效减少延误损失与管制负荷,跑道使用更加均衡,进离场航班延误得到较好平衡,可以为典型繁忙机场多跑道运行条件下的航班实施多目标策略动态排序。通过时域控制有助于管制员根据扇区和场面工作量协同配合完成航班的动态优化排序,同时可满足管制单位根据自身运行规范设置的起降间隔,可适用于不同地区的决策者对航班动态、灵活管理的要求,从而有利于提升机场终端区系统运行能力。本文主要研究正常航班的动态优化调度问题,在突发扰动导致机场运行容量下降时,如何合理、动态地调度非正常航班将是下一步需要研究的问题。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] LAMBRECHT M, SLATER G L. Departure trajectory modeling for air traffic control automation tools[C]// AIAA. Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1999: 1507-1520.
- [2] BOLENDER M A, SLATER G L. Cost analysis of the departure-en route merge problem[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(1): 23-29.

- [3] TRIVIZAS D A. Optimal scheduling with maximum position shift (MPS) constraints: a runway scheduling application[J]. Journal of Navigation, 1998, 51(2): 250-266.
- [4] KARI A, HALL W, ATKINS S, et al. Optimization-based analysis of collaborative airport arrival planning[J]. Transportation Science, 2003, 37(4): 422-433.
- [5] BEASLEY J E, KRISHNAMOORTHY M, SHARAIHA Y M, et al. Scheduling aircraft landings—the static case[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 180-197.
- [6] SOOMER M J, FRANX G J. Scheduling aircraft landings using airlines' preferences[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(1): 277-291.
- [7] BEASLEY J E, KRISHNAMOORTHY M, SHARAIHA Y M, et al. Displacement problem and dynamically scheduling aircraft landings[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(1): 54-64.
- [8] HANSEN J V. Genetic search methods in air traffic control[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(3): 445-459.
- [9] HU Xiao-bing, PAOLO E D. An efficient genetic algorithm with uniform crossover for air traffic control[J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(1): 245-259.
- [10] 程晓航,薛惠锋,洪鼎松,等.进港飞机调度的精英自适应遗传算法设计[J].交通与计算机,2006,24(6):91-94.  
CHENG Xiao-hang, XUE Hui-feng, HONG Ding-song, et al. Design of elitist adaptive genetic algorithm in arrival aircrafts scheduling [J]. Computer and Communications, 2006, 24(6): 91-94. (in Chinese)
- [11] 孙 宏,张 翔,徐 杰.应用模拟退火算法求解飞机调度问题[J].飞行力学,2006,24(4):84-87.  
SUN Hong, ZHANG Xiang, XU Jie. Applying the simulated annealing algorithm to solve airliner aircraft dispatching problem[J]. Flight Dynamics, 2006, 24(4): 84-87. (in Chinese)
- [12] 王海东,孙淑光,华克强.模糊 Petri 网在飞机进近排序中的应用[J].系统仿真学报,2007,19(18):4298-4301.  
WANG Hai-dong, SUN Shu-guang, HUA Ke-qiang. Applications of fuzzy Petri net method in aircraft approach sequencing[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(18): 4298-4301. (in Chinese)
- [13] 李志荣,张兆宁.基于蚁群算法的航班着陆排序[J].交通运输工程与信息学报,2006,4(2):66-69.  
LI Zhi-rong, ZHANG Zhao-ning. Prioritizing landing flights based on ACS[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(2): 66-69. (in Chinese)
- [14] ERNST A T, KRISHNAMOORTHY M, STORER R H. Heuristic and exact algorithms for scheduling aircraft landings[J]. Networks, 1999, 34(3): 229-241.
- [15] 应圣钢,孙富春,胡来红,等.基于多目标动态规划的多跑道进港排序[J].控制理论与应用,2010,27(7):827-835.  
YING Sheng-gang, SUN Fu-chun, HU Lai-hong, et al. Multi-objective dynamic programming algorithm for aircraft arrival sequencing and runway scheduling[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(7): 827-835. (in Chinese)

(下转第 99 页)

- exchange[J]. China Industrial Economy, 2006(2): 77-83. (in Chinese)
- [17] 齐殿伟, 诺敏, 王玉姣. 我国企业社会责任对财务绩效影响研究[J]. 经济纵横, 2013(11): 82-84.
- QI Dian-wei, NUO Min, WANG Yu-jiao. Study on the influence of corporate social responsibility in China on financial performance[J]. Economic Review, 2013(11): 82-84. (in Chinese)
- [18] 曾明, 刘佳依, 钟周. 企业社会责任与财务绩效关系实证研究[J]. 财会通讯, 2013(9): 19-21.
- ZENG Ming, LIU Jia-yi, ZHONG Zhou. An empirical research on relationship between CSR and financial performance[J]. Communication of Finance and Accounting, 2013(9): 19-21. (in Chinese)
- [19] 王茂祥. 企业社会责任管理及其与和谐社会建设的关系[J]. 改革与战略, 2012, 28(12): 117-120.
- WANG Mao-xiang. Management of corporation social responsibility and its relationship with the construction of the harmonious society[J]. Reformation and Strategy, 2012, 28(12): 117-120. (in Chinese)
- [20] CILIBERTI F, PONTRANDOLFO P, SCOZZI B. Logistics social responsibility: standard adoption and practices in Italian companies[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 113(1): 88-106.
- [21] RIYANTO Y E, TOOLSEMA L A. Corporate social responsibility in a corporate governance framework[R]. Singapore: National University of Singapore, 2007.
- [22] 龙继林. 对我国航空运输企业社会责任的思考[J]. 管理世界, 2011(1): 60-61.
- LONG Ji-lin. Thinking on the social responsibility of Chinese air transport enterprise[J]. Management World, 2011(1): 60-61. (in Chinese)
- [23] 辛磊, 贾妍. 基于博弈论的供应链战略合作伙伴选择[J]. 系统工程, 2011, 29(4): 123-126.
- XIN Lei, JIA Yan. The choice of supply chain partners based on game theory[J]. Systems Engineering, 2011, 29(4): 123-126. (in Chinese)
- [24] 汪忠, 吴琳, 张乾梅, 等. 基于模糊综合评价法的社会企业合作伙伴选择研究[J]. 财经理论与实践, 2013, 34(4): 104-108.
- WANG Zhong, WU Lin, ZHANG Qian-mei, et al. The partner selection of social enterprise based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2013, 34(4): 104-108. (in Chinese)
- [25] 买生, 匡海波, 张笑楠. 基于科学发展观的企业社会责任评价模型及实证[J]. 科研管理, 2012(3): 148-154.
- MAI Sheng, KUANG Hai-bo, ZHANG Xiao-nan. The corporate social responsibility evaluation model based on the concept of scientific development[J]. Science Research Management, 2012(3): 148-154. (in Chinese)

(上接第78页)

- [16] 周茜, 张学军, 柳重堪. CDM GDP 程序中混合使用跑道时隙分配问题研究[J]. 空中交通管理, 2005(5): 23-26.
- ZHOU Qian, ZHANG Xue-jun, LIU Zhong-kan. Study on time slot allocation for mixed runway application in CDM GDP program[J]. Air Traffic Management, 2005(5): 23-26. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] EUN Y, HWANG I, BANG H. Optimal arrival flight sequencing and scheduling using discrete airborne delays[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(2): 359-373.
- [19] MALAEK S M B, NADERI E. A new scheduling strategy for aircraft landings under dynamic position shifting[C]//IEEE. 2008 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2008: 1-8.
- [20] LEE H, BALAKRISHNAN H. Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling[C]//IEEE. Proceedings of American Control Conference. New York: IEEE, 2008: 2449-2454.
- [21] 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 Hong-hai, HU Ming-hua. Multi-objective optimization for collaborative scheduling aircraft landing on multi-runways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 402-409. (in Chinese)
- [22] 张启钱, 胡明华, 施赛锋, 等. 多跑道航班起降调度优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 63-68.
- ZHANG Qi-qian, HU Ming-hua, SHI Sai-feng, et al. Optimization algorithm of flight takeoff and landing on multirunways[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 63-68. (in Chinese)
- [23] 陈炜炜, 耿睿, 崔德光. 进近区域到达航班排序和调度的优化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(1): 157-160.
- CHEN Wei-wei, GENG Rui, CUI De-guang. Optimization of sequencing and scheduling for arrival aircrafts in approach area[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(1): 157-160. (in Chinese)
- [24] 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.
- YANG Jing-mei. Research on algorithms for scheduling arrival aircrafts in terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [25] 游进军, 纪昌明, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水利学报, 2003, 7(7): 64-69.
- YOU Jin-jun, JI Chang-ming, FU Xiang. New method for solving multi-objective problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 7(7): 64-69. (in Chinese)