

文章编号:1671-1637(2012)06-0063-06

多跑道航班起降调度优化算法

张启钱¹, 胡明华¹, 施赛锋², 杨晶妹³

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国民用航空青岛空中交通管理站, 山东 青岛 266108;
3. 天津航空有限责任公司, 天津 300300)

摘要:为了提升大型繁忙机场的运行效率,考虑了多跑道的运行条件和安全要求等因素,以最小航班总延误为目标函数,以最大位置偏移为约束条件,引入滚动时域控制策略,建立了航班动态排序模型。针对多跑道航班调度问题的特点,分别采用基于滚动时域控制策略的遗传算法和现有的先到先服务算法求解模型。计算结果表明:当航班正常时,采用现有的先到先服务算法,航班总延误为1 712 s,采用基于滚动时域控制策略的遗传算法,航班总延误为1 080 s,与先到先服务算法相比,延误时间减小37.0%;当航班不正常时,采用现有的先到先服务算法,航班总延误为1 658 s,采用基于滚动时域控制策略的遗传算法,航班总延误为969 s,与先到先服务算法相比,延误减小41.5%。可见,基于滚动时域控制策略的遗传算法有效。

关键词:航空运输;交通流量管理;航班排序;RHC策略;遗传算法;染色体编码

中图分类号:V355.1 **文献标志码:**A

Optimization algorithm of flight takeoff and landing on multi-runways

ZHANG Qi-qian¹, HU Ming-hua¹, SHI Sai-feng², YANG Jing-mei³

(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Qingdao Air Management Station of CAAC, Qingdao 266108, Shandong, China; 3. Tianjin Airlines Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to improve the operation performance of large busy airport, some factors of multi-runways such as operation condition and safety requirement were considered. The minimum total flight delay was taken as objective function, the maximum position shift was taken as constraint condition, receding horizon control(RHC) strategy was introduced, and the dynamic flight sequencing model was established. Aiming at the characteristics of flight scheduling problem for multi-runways, the model was solved by using the genetic algorithm based on RHC strategy(RHC-GA) and the existing first come first serve(FCFS) algorithm respectively. Calculation result shows that when flights are normal, the total flight delay is 1 712 s by using FCFS algorithm. The total flight delay is 1 080 s by using RHC-GA, and reduces by 37.0% compared with the result of FCFS algorithm. When flights are not normal, the total flight delay is 1 658 s by using FCFS algorithm. The total flight delay is 969 s by using RHC-GA, and reduces by 41.5% compared with the result of FCFS algorithm. So RHC-GA is effective. 3 tabs, 2 figs, 16 refs.

Key words: air transportation; traffic flow management; flight sequencing; RHC strategy; genetic algorithm; chromosome coding

收稿日期:2012-07-23

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2011BAH24B08);国家自然科学基金项目(61104159)

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,从事空中交通智能化研究。

导师简介:胡明华(1962-),男,湖南益阳人,南京航空航天大学教授。

Author resumes: ZHANG Qi-qian(1979-), male, doctoral student, +86-25-84895266, zhangqq@nuaa.edu.cn; HU Ming-hua(1962-), male, professor, +86-25-84896650, minghuahu@263.net.

0 引言

近年来,随着中国航空运输业务量的迅速增长,许多机场通过增加跑道等方法提高容量,缓解航班延误。虽然多跑道运行在一定程度上提升了机场可用容量,但同时使得机场运行态势更为复杂,对航班调度提出了更高要求。为了满足多跑道机场运行的安全性、高效性,依靠传统方式人工手动或经验调度已不能满足其高负荷的运转要求,亟需提供更加灵活、高效的航班调度策略,实现机场终端区精细化的流量管理过程。在保证安全的前提下,高效、合理地优化航班起降次序是重要手段之一,可以为提升中国典型繁忙机场运行效能及缓解航班延误提供方法支持。

从20世纪末开始,国内外学者已展开航班优化调度问题研究。Lambrecht等研究发现使用终端区优化调度算法可大幅提升系统容量,有效缓解航班延误^[1];Bolender等基于先到先服务原则采用离散事件仿真技术初步解决了到达航班的跑道动态分配问题^[2];Andersson等对美国国家航空航天局协同进场规划决策支持工具性能进行了优化分析^[3];Saraf等为拥挤机场进场航班提供了较为有效的组合优化方法^[4];Lee等研究了跑道排序过程中成本、延迟和吞吐量的平衡性问题^[5]。虽然上述研究取得了一定成果,但均是以国外机场为研究对象,并不完全适用中国典型繁忙机场的多跑道运行情况。周茜等研究了单跑道混合使用下的跑道时隙问题^[6];程晓航等运用自适应遗传算法求解了航班排序问题^[7];孙宏等分别运用模拟退火算法、模糊Petri网算法和蚁群算法模拟了航班的调度问题^[8-10];张洪海等针对着陆航班排序问题建立了多目标优化模型和求解算法^[11]。国内外研究均对调度算法进行了分析与改进,提高了效率,但已有研究成果主要以单跑道运行为研究对象,大多研究针对进场调度,对多跑道航班起降调度问题研究较少。

本文在已有研究成果基础上,综合考虑多跑道运行、混合起降和策略动态性等因素,以减少航班总延误为目标函数,建立了基于滚动时域控制的航班动态排序模型,针对多跑道航班起降混合调度排序这一组合优化问题,设计了基于滚动时域控制策略的遗传算法,并进行求解验证。

1 问题描述

多跑道运行容量与机场终端区容量相互耦合,是密不可分的一体化系统,为了切合国内机场运行现状,建立了简化的机场终端区时空模型,见图1。假设机场有2条跑道,进场航班沿进场航线从不同的进口点进入,离场航班准时到达跑道口离场,所有进入终端区的起降航班都可按照到达跑道的先后排队;采用独立平行仪表进近方式,不同跑道间的航班相互不影响。根据机场终端区运行的时间特点,建立时间模型,运行时间轴被起始调度界限和终止调度界限分为3部分。其中,起始调度界限是指航班进入管制计划的时刻,一旦航班运行时间穿越该界限,排序算法就接收其相关参数进行排序;终止调度界限是指特定的起降时刻,一旦航班运行时间进入该界限,其起降时间就保持不变;两界限之间即为排序区。

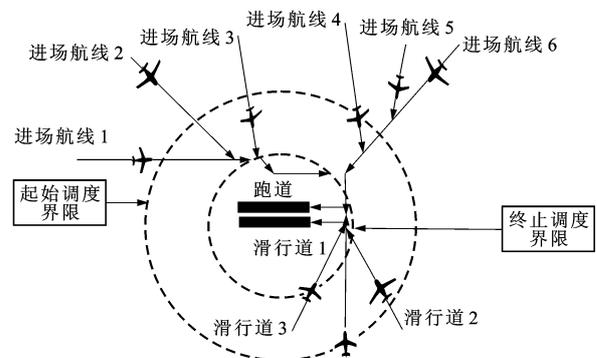


图1 机场终端区时空模型

Fig. 1 Spatiotemporal model of airport terminal area

基于图1的时空模型,多跑道运行需满足尾流间隔安全要求。假设2条跑道独立运行,因此,只对同跑道起降航班采用最小安全时间间隔标准^[12],见表1, T_q 为最小安全时间间隔, q 为前机机型, h 为后机机型; q, h 为1、2、3分别代表进场降落的重、中、轻型机; q, h 为4、5、6分别代表离场起飞的重、中、轻型机。

本文假定航班初始起降序列和预计起降时间已知,在满足一定约束限制下,对航班起降跑道分配、航班起降顺序和航班起降时间进行优化调度,同时设定最大位置约束。最大位置约束是优化后航班序列中某架航班与先到先服务序列中航班位置的最大变化范围,为确保优化的可行性,一般对超出最大位

表 1 最小时间间隔
Tab. 1 Minimum time intervals

最小安全时间 间隔 T_{qh}	后飞机型 h						
	1	2	3	4	5	6	
前机 机型 q	1	60	90	120	90	90	90
	2	60	90	90	90	90	90
	3	60	60	60	90	90	90
	4	90	90	90	60	90	120
	5	90	90	90	60	90	90
	6	90	90	90	60	60	60

置约束的航班优化序列进行延迟惩罚。

航班优化排序一般从航班最小总延误、最大机场吞吐量和航班延误总成本最小出发,建立优化模型。在多数情况下,前两种优化目标所产生效果是一致的,考虑到目前管制单位的运行方式,本文研究最小化航班总延误的航班优化排序方法。

2 航班动态排序模型

2.1 滚动时域控制策略

滚动时域控制(RHC)策略是一种向前看若干步的动态优化策略^[13],即优化滚动时域上的进离场航班流,实施当前时域上的第一个时间间隔的策略,在下一个时域重复相同的优化。RHC策略将整个优化时段划分了若干个滚动时域,从时域起点 $T_{0,k}$ 至时域终点 $T_{0,k} + nT$ 之间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。在优化当前第 k 个滚动时域时,测量当前系统的状态,搜集第 k 个时间间隔到第 $k+n-1$ 个时间间隔之间即滚动时域上的信息,基于所得信息,对当前滚动时域上的问题制定方案,仅实施第 k 个时间间隔方案结果,放弃余下的 $k+1$ 到 $k+n-1$ 时间间隔上的优化结果。

2.2 航班动态排序

关于进离场航班排序的动态模型有很多研究,动态情况下,未进入终端区和尚未加入起飞排序队列的航班起降时间是不确定的。航班动态排序模型作为一个离散事件模型,一旦有新的航班进入终端区加入排序队列,系统的状态即航班队列就发生变化。现有的模型一般采取以下步骤进行动态排序^[14]:首先,将新的航班加入排序队列;然后,将已降落或起飞的航班从排序队列删除;最后,将更新后的队列采用所用算法重新排序。从上述步骤可以看出,排序模型是以新航班加入排序队列为触发事件的模型。由于进离场航班进入排序队列并不具有规律性,排序的执行频度也无规律可循。本文基于滚

动时域控制策略的排序算法。在该策略下,排序以固定的时间频度来实现航班优化调度的动态性。

2.3 数学模型

将 RHC 策略应用到航班动态排序问题中,本文建立基于 RHC 策略的航班动态排序模型。令 N 为参与排序的总航班数量; R 为机场跑道数量; N_k 为第 k 个滚动时域包含的时间间隔数量; $N_{n,k}$ 为预计起降时间在第 k 个滚动时域内的航班数量; $d_{i,k}$ 为第 k 个滚动时域内航班 i 的时间滞后量; E_{ir} 为航班 i 在跑道 r 的预计起降时间; $E_{ir,k}$ 为第 k 个滚动时域内航班 i 在跑道 r 的预计起降时间; S_{ir} 、 S_{ij} 分别为航班 i 、 j 在跑道 r 上的实际起降时间; $S_{ir,k}$ 为第 k 个滚动时域内航班 i 在跑道 r 上的实际起降时间; $q_{n,k}$ 为第 k 个滚动时域内优化后的航班队列中的第 n 个航班; D_k 为第 k 个滚动时域所有航班的总延误。

由以上分析,可得

$$\min D_k = \min \sum_{i=1}^{N_{n,k}} d_{i,k} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } kT < S_{ir,k} \leq (k+1)T \quad (2)$$

$$S_{jr} - S_{ir} \geq T_{qh} \quad (3)$$

$$|n-i| \leq M \quad (4)$$

$$y_{ir} \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^R y_{ir} = 1 \quad (6)$$

式中: M 为最大位置约束; y_{ir} 为 0-1 决策变量;当航班 i 在跑道 r 上降落, y_{ir} 为 1,否则为 0;式(2)保证只有起降时间在当前优化时间间隔内的航班才允许起降;式(3)保证航班起降时间满足最小安全时间间隔;式(4)保证排序航班满足最大位置约束;式(5)、(6)保证航班只能起降在一条跑道上。

3 基于滚动时域控制策略的遗传算法

3.1 染色体编码方案

本文采用基于航班编号的随机数二重结构编码方案^[15-16],这种编号方案在实际中可体现为航班的 FCFS 编号、航班号和呼号。在任何可行解队列中,航班编号是唯一的,不同排列具有不同的适值函数,编码长度为调度处理的航班数量。假设排序队列中有 9 个航班,航班序号为 1~9,每个序号代表一个特定的航班号,产生一串(0,1)间的随机数,如个体(0.23, 0.11, 0.34, 0.56, 0.54, 0.87, 0.66, 0.69, 0.74)。个体中的位置代表航班序号,随机数表示航班起降的顺序,这些随机数按升序排列,得到按照航班号 2、1、3、5、4、7、8、9、6 顺序进行起降。为了满足

多跑道运行方案,本文采用二重结构编码。

3.2 适应度函数

本文对模型设计的目标函数为最小化求解问题,因此,需要针对性地进行转换,对模型中的目标函数取倒数,作为适应度选择函数。同时,为避免优化过程中目标函数取值出现 0 的状态,而造成变量值溢出。每次计算时,对目标函数加一个相对很小的数 ϵ 。适应度选择函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = \frac{1}{D_k + \epsilon} \quad (7)$$

3.3 遗传算子

3.3.1 启发式交叉法

根据染色体编码原则,本文设计了一种启发式交叉算子:对个体 P_1 、 P_2 进行交叉,将 P_1 中第 m 位到第 L 位基因复制到 P_2 后面,然后删除 P_2 中与复制基因相同的基因位生成 C_2 ,同理将 P_2 中第 m 位到第 L 位基因复制到 P_1 后面,然后删除 P_1 中与复制基因相同的基因位生成 C_1 ,在交叉过程中基因位对应的变量码不变。最后对比 P_1 、 P_2 、 C_1 、 C_2 的适应度,选择适应度高的 2 个个体作为交叉的后代。

3.3.2 启发式变异

本文采用启发式变异方法,利用邻域技术获得后代的改进。对于每一个染色体按它的邻域交换不多于 x 位基因,基因位对应的变量码保持不变,可获得一族染色体,选择其中最好的一个作为变异产生的后代。

3.4 算法步骤

算法流程见图 2,具体算法步骤如下。

Step 1:读取第 k 个滚动时域上需要排序的航班相关信息,若 $k=0$,则读取该时域上的 E_{ir} ;若 $k>0$,读取上一时域未冻结的航班相关信息与第 k 个滚动时域最后一个时间间隔上的 E_{ir} 。

Step 2:种群初始化。

Step 3:计算染色体对应航班队列的目标函数,根据染色体确定的序列按最小安全间隔要求和 E_{ir} 计算 S_{ir} 。首次优化时,根据航班分配跑道分别得出航班在各自跑道上的策略实施时间,并记录在冻结区内每条跑道上最后一个航班的起降时间。次轮优化时,根据前次的记录与本轮随机产生的序列进行跑道匹配,找到对应的上轮最后一个航班后加上安全间隔,与 E_{ir} 比较后得出 S_{ir} 。给不满足最大位置约束的航班的延误加惩罚时间 10 000 s,计算目标函数值。

Step 4:根据目标函数计算适应度函数。

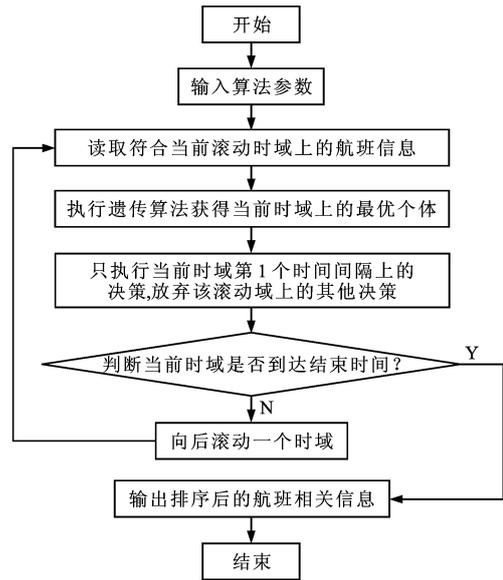


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

Step 5:找到种群中最优个体赋值给目前最优个体。

Step 6:判断进化代数是否满足小于最大代数的条件,若满足,代数加 1 并按顺序执行,否则转到 Step 13。

Step 7:轮盘赌选择。

Step 8:按交叉概率进行染色体交叉操作。

Step 9:按变异概率进行染色体变异操作。

Step 10:执行 Steps 3~5。

Step 11:评估遗传效果,若当代最优个体优于目前最优个体,将其赋给目前最优个体。

Step 12:输出该种群的平均函数值、最优函数值。

Step 13:按目前最优个体重新计算航班排序后队列、 S_{ir} 与延误等信息。

Step 14:当滚动时域到达设定的优化结束时间时算法结束,执行 Step 15,否则 k 自动加 1 并转到 Step 1。

Step 15:输出整个时段排序后的航班队列与相应的 S_{ir} 。

4 计算结果分析

基于广州白云机场某时段 30 架连续航班数据,采用现有的先到先服务 (FCFS) 算法和基于滚动时域控制策略的遗传算法 (RHC-GA),通过 C++ 语言编程实现仿真验证。种群大小为每次进入第 k 个滚动时域参与计算架次的 20 倍;交叉率为 0.6;变异率为 0.06;执行次数为每次进入第 k 个滚动时域参

与计算架次的 30 倍;最大位置约束为 3;跑道数量为 2,跑道编号分别为 1 和 2。考虑到此方法排序主要解决拥挤时段的排序问题,根据起降最小安全时间间隔标准,取 N_k 为 2, T 为 300 s 以保证参与航班的排序量,同时降低算法复杂度。

仿真试验以航班最小总延误为优化目标,分别给出了航班在正常运行条件下的优化调度方案(表 2)和除了航班 8、11 因航空公司自身原因不能正常离场外的其余航班(简称航班不正常时)的优化调度方

表 2 航班正常时的计算结果

Tab. 2 Calculation result when flights are normal

航班序号	航班类型	E_0/s	E_1/s	FCFS 算法			RHC-GA		
				S/s	R_1	T_0/s	S/s	R_1	T_0/s
1	1	54	64	54	0	0	54	0	0
2	4	108	98	98	1	0	98	1	0
3	2	126	106	144	0	18	144	0	18
4	3	148	168	188	1	20	254	1	86
5	4	185	164	234	0	49	164	1	0
6	1	223	206	248	1	42	223	0	0
7	3	260	282	324	0	64	314	1	32
8	5	312	334	338	1	4	313	0	1
9	1	352	335	384	0	32	374	1	39
10	2	410	432	432	1	0	410	0	0
11	5	458	488	474	0	16	488	1	0
12	3	510	520	522	1	2	510	0	0
13	2	590	580	590	0	0	590	0	0
14	1	618	630	630	1	0	650	0	32
15	6	640	635	680	0	40	635	1	0
16	2	688	700	720	1	20	740	0	52
17	3	712	720	770	0	58	725	1	5
18	1	734	754	780	1	26	845	1	91
19	2	765	780	830	0	65	785	1	5
20	6	812	800	870	1	70	830	0	18
21	3	842	828	920	0	78	920	0	78
22	1	882	870	960	1	90	905	1	35
23	4	912	902	1 010	0	98	995	1	93
24	2	965	930	1 050	1	120	980	0	15
25	2	1 000	990	1 100	0	100	1 070	0	70
26	3	1 013	1 025	1 140	1	115	1 145	1	120
27	4	1 035	1 045	1 190	0	155	1 055	1	10
28	2	1 078	1 092	1 200	1	108	1 265	1	173
29	3	1 123	1 105	1 280	0	157	1 205	1	100
30	2	1 153	1 125	1 290	1	165	1 160	0	7

案(表 3)。在表 2、3 中, E_0 为航班在 1 号跑道的预计起降时间; E_1 为航班在 2 号跑道的预计起降时间; S 为航班最后实际起降时间; T_0 为单个航班的延误值; R_1 为跑道编号, R_1 取 0 对应 1 号跑道, R_1 取 1 对应 2 号跑道。

表 3 航班不正常时的计算结果

Tab. 3 Calculation result when flights are not normal

航班序号	航班类型	E_0/s	E_1/s	FCFS 算法			RHC-GA		
				S/s	R_1	T_0/s	S/s	R_1	T_0/s
1	1	54	64	54	0	0	54	0	0
2	4	108	98	98	1	0	98	1	0
3	2	126	106	144	0	18	144	0	18
4	3	148	168	188	1	20	254	1	86
5	4	185	164	234	0	49	164	1	0
6	1	223	206	248	1	42	223	0	0
7	3	260	282	324	0	64	314	1	32
9	1	352	335	335	1	0	352	0	0
10	2	410	432	410	0	0	432	1	0
12	3	510	520	520	1	0	510	0	0
13	2	590	580	590	0	0	590	0	0
14	1	618	630	630	1	0	650	0	32
15	6	640	635	680	0	40	635	1	0
16	2	688	700	720	1	20	740	0	52
17	3	712	720	770	0	58	725	1	5
18	1	734	754	780	1	26	845	1	91
19	2	765	780	830	0	65	785	1	5
20	6	812	800	870	1	70	830	0	18
21	3	842	828	920	0	78	920	0	78
22	1	882	870	960	1	90	905	1	35
23	4	912	902	1 010	0	98	995	1	93
24	2	965	930	1 050	1	120	980	0	15
25	2	1 000	990	1 100	0	100	1 145	1	155
26	3	1 013	1 025	1 140	1	115	1 070	0	57
27	4	1 035	1 045	1 190	0	155	1 055	1	10
28	2	1 078	1 092	1 200	1	108	1 235	1	143
29	3	1 123	1 105	1 280	0	157	1 130	0	7
30	2	1 153	1 125	1 290	1	165	1 190	0	37

从表 2、3 中可以看出,当航班正常时,采用现有的 FCFS 算法,航班总延误为 1 712 s,采用本文提出的 RHC-GA,航班总延误为 1 080 s,与 FCFS 算法相比,延误减小 37.0%。当航班不正常时,采用现有的 FCFS 算法,航班总延误为 1 658 s,采用本文提出的 RHC-GA,航班总延误为 969 s,与 FCFS 算

法相比,延误减小 41.5%。由此,可以看出 RHC-GA 能根据航班动态信息生成更有效的排序策略,更高效地使用跑道,提高机场进离场率,对航班的延误优化有明显效果。

5 结 语

本文讨论了基于 RHC 策略的多跑道航班起降优化调度问题,引入 RHC 策略通过选择时间频度有助于协助管制员根据扇区工作量来控制参与航班排序的航班量,符合管制员进行指令调配的时间需求,满足决策者对于航班动态、灵活的管理要求,提升机场终端区服务能力。由于多跑道航班起降优化调度问题会随着跑道数量的增大而更为复杂,且人为因素的影响也会随之加深,因此,今后将结合优化策略对管制员工作负荷的增量因素,进一步改进算法,提出更完善的优化方案以更贴近实际管制运行需求。

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. Portland: 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] ANDERSSON K, HALL W, ATKINS S, et al. Optimization-based analysis of collaborative airport arrival planning[J]. Transportation Science, 2003, 37(4): 422-433.
- [4] SARAF A P, SLATER G L. An efficient combinatorial optimization algorithm for optimal scheduling of aircraft arrivals at congested airports[C]//IEEE. Proceedings of Aerospace Conference. Helena: IEEE, 2006: 11-22.
- [5] LEE H, BALAKRISHNAN H. Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling[C]//IEEE. Proceedings of American Control Conference. Washington DC: IEEE, 2008: 2449-2454.
- [6] 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(1): 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(1): 23-26. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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-objection optimization for collaborative scheduling aircraft landing on multi-runways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 402-409. (in Chinese)
- [12] 曹 力,邓雪云,王旭辉,等. 基于机型间隔的机场终端区流量优化[J]. 系统工程学报, 2009, 24(3): 360-364.
CAO Li, DENG Xue-yun, WANG Xu-hui, et al. Airport terminal area flow optimization based on aircraft traffic gaps[J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24(3): 360-364. (in Chinese)
- [13] HU Xiao-bing, CHEN Wen-hua. Receding horizon control for aircraft arrival sequencing and scheduling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2005, 6(2): 189-197.
- [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.
YANG Jing-mei. Research on algorithms for scheduling arrival aircrafts in terminal area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [15] 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.
SHI Sai-feng. The research on terminal aircraft sorting system in Guangzhou[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [16] 韩云祥,汤新民,韩松臣. 固定航路最优飞行冲突解脱模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 115-120.
HAN Yun-xiang, TANG Xin-min, HAN Song-chen. Conflict resolution model of optimal flight for fixation airway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 115-120. (in Chinese)