

文章编号: 0258-2724(2010)03-0464-06 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.03.025

基于航班时刻优化的多机场地面等待问题 ——模型和算法

叶博嘉, 胡明华, 田勇

(南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 210016)

摘要: 为了优化航班的多机场地面等待问题,根据航班时刻信息,考虑空域容量和飞机周转限制,建立了以总延误时间最少、总延误成本最低、总调整航班架次最少、总延误航班架次最少的多目标、多机场地面等待问题模型.用非支配分类遗传算法 II (NSGA-II) 求出了该模型的优化多目标解集.以 2008 年秋季北京、上海和广州三大枢纽机场为例对该模型进行了验证,与先到先服务情况相比,平均总延误成本减少了约 24%,平均总航班调整数减少了约 62%.

关键词: 空中交通;空中交通流量管理;航班时刻优化;多目标优化;多机场地面等待;NSGA-II 算法
中图分类号: V355.1 **文献标识码:** A

Multi-airport Ground Holding Problem Based on Airline Schedule Optimization: Models and Algorithm

YE Bojia, HU Minghua, TIAN Yong

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

Abstract: To solve the multi-airport ground holding problem, a multi-objective and multi-airport optimization model was built based on airline schedule. This model consists of objective functions of the minimum total delay time, the minimum total delay cost, the minimum total number of adjusted flights, and the minimum total number of delayed flights, subjected to the constraints of airspace capacity, aircrafts turnover, etc. Then, the multi-objective optimization solution set of the model was obtained using the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). Finally, the proposed method was applied to schedule optimization for three main hub airports in Beijing, Shanghai, and Guangzhou, China, in autumn 2008. Compared with the results by the first-come-first-service (FCFS) policy, the average delay cost and the number of adjusted flights, after optimized by the proposed method, was reduced by 24% and 62%, respectively.

Key words: air traffic; air traffic flow management; airline schedule optimization; multi-objective optimization; multi-airport ground holding; NSGA-II

近年来,多机场地面等待问题(multi-airport ground holding problem, MAGHP)一直是国内外学术界研究的热点,其核心策略是通过调整多个相关机场航班的起、降时刻,合理分配无法避免的总延误时间.通过优化多机场航班时刻表、提前减轻机

场繁忙时段的运输压力,解决基于航班时刻优化的多机场地面等待问题,有效地提高机场运营效率和安全性.因此,研究基于航班时刻优化的多机场地面等待问题的理论和方法、合理地制定航班时刻表,是科学管理空中交通流量的基础.

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA12A105)

作者简介: 叶博嘉(1983-),男,博士研究生,研究方向为空中交通运输规划与管理, E-mail: yebojia2005@hotmail.com

通讯作者: 胡明华(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为空中交通运输规划与管理, E-mail: minghuahu@263.net

文献[1-2]根据地面等待策略(ground holding problem, GHP),结合各种优化模型和算法,解决多机场地面等待问题.文献[3]提出了基于整数规划的多机场地面等待问题优化模型.文献[4]对文献[3]的模型进行了进一步研究,提出在多机场模型中加入航路容量限制,建立了多元受限的网络流模型,并采用启发式算法求解该模型.文献[5]提出了基于序列约束的多机场地面等待问题模型.文献[6]提出了用分解式(disaggregate)整数规划模型求解航班的离场时间和飞行路线.文献[7]将航空公司优先权引入文献[6]的模型中.文献[8]提出了动态、随机的多机场地面等待问题整数规划模型.文献[9]建立了多元受限的地面等待问题模型,并将启发式算法和专家系统相结合,对模型求解.文献[10]建立了空中交通短期流量管理的动态网络流量模型.文献[11]研究了管制区短期空中交通流量管理问题,并提出了时隙-航线分配模型和算法.

综上所述,在多机场地面等待问题的研究中,建立的模型都是以系统的总延误成本最小为单目标,因此,经常造成个别航班超长时间延误,无法满

足实际运行需要.随着模型中机场数量的增加,机场之间的耦合又会使航班优化的求解空间迅速变得复杂起来,采用普通的整数规划方法难以对其进行有效处理,形成NP(non-deterministic polynomial)型难题的组合优化问题^[12-13].因此,本文以航班时刻表为基础,考虑空域容量、飞机周转等运行限制,建立了一种多目标、多机场的地面等待问题整数规划模型,并采用NSGA-II算法(non-dominated sorting genetic algorithm II)进行求解,用实例进行了验证分析,表明了本文模型的正确性和有效性.

1 数学模型

为建立多目标、多机场地面等待问题模型,构建一个以目标机场集合 Q 为核心的开放型网络.对于从目标机场集合 Q 中起飞的航班,采用地面等待策略对航班进行调配;对于不在目标机场集合 Q 中起飞、而在 Q 中降落的航班,采用空中等待策略对航班进行调配.

在进行航班时刻优化调整时,根据实际需要,提出以下4个目标函数:

(1) 总延误时间最少,即:

$$\min \sum_{q \in Q} \sum_{f \in F} \sum_{t \in \Gamma} [(t - T_{d,f})(X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1}) + (t - T_{a,f})(Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1})],$$

(2) 总延误成本最小,即:

$$\min \sum_{q \in Q} \sum_{f \in F} \sum_{t \in \Gamma} [(t - T_{d,f})(X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1})C_g + (t - T_{a,f})(Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1})C_a],$$

(3) 总调整航班架次最少,即:

$$\min \sum_{q \in Q} \sum_{f \in F} \sum_{t \in \Gamma} [A_{g,f}(X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1}) + A_{a,f}(Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1})],$$

(4) 总延误航班(延误时间超过15 min)架次最少,即:

$$\min \sum_{q \in Q} \sum_{f \in F} \sum_{t \in \Gamma} [D_{g,f}(X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1}) + D_{a,f}(Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1})],$$

约束条件如下:

$$X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1} \geq 0, \quad \forall f \in F, q \in Q, t \in \{T_{d,f}, T_{d,f} + 1, \dots, T + 1\}, \quad (1)$$

$$Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1} \geq 0, \quad \forall f \in F, q \in Q, t \in \{T_{a,f}, T_{a,f} + 1, \dots, T + 1\}, \quad (2)$$

$$\sum_{f \in K} t(X_{q,f,t} - X_{q,f,t-1}) - T_{a,f} - S_f \leq 0, \quad \forall f \in K, q \in Q, t \in \{T_{a,f}, T_{a,f} + 1, \dots, T + 1\}, \quad (3)$$

$$\sum_{f \in K} t(Y_{q,f,t} - Y_{q,f,t-1}) - T_{d,f} - S_f \leq 0, \quad \forall f \in F, q \in Q, t \in \{T_{d,f}, T_{d,f} + 1, \dots, T + 1\}, \quad (4)$$

$$\sum_{f \in F} X_{q,f,t} + \sum_{f \in F} Y_{q,f,t} \leq M_{t,q}, \quad \forall f \in F, q \in Q, t \in \{T_1, 2, \dots, T + 1\}, \quad (5)$$

$$X_{q,f,T+1} = 1, \quad Y_{q,f,T+1} = 1, \quad (6)$$

数量;

式中: F 为在目标机场起飞、降落的航班集合;

K 为连程航班集合, $K \subset F$;

$\Gamma = \{1, 2, \dots, T\}$ 为时间片集合, T 为时间片

$M_{t,q}$ 为 q 机场在时间片 t 内的动态容量,其中
 $t \in \Gamma, q \in Q$;

$T_{a,f}$ 为航班 f 预计到达目标机场时间所属的时间片,其中 $f \in F, T_{a,f} \in \Gamma$;

$T_{d,f}$ 为航班 f 预计从目标机场起飞时间所属的时间片,其中 $f \in F, T_{d,f} \in \Gamma$;

S_f 为航班 f 的最小周转时间,其中 $f \in K$;

$A_{g,f}$ 为航班地面等待调整参数,

$$A_{g,f} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 执行地面等待,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$A_{a,f}$ 为航班空中等待调整参数,

$$A_{a,f} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 执行空中等待,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$D_{g,f}$ 为航班地面延误参数,

$$D_{g,f} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 地面等待时间} > 15 \text{ min,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$D_{a,f}$ 为航班空中延误参数,

$$D_{a,f} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 空中等待时间} > 15 \text{ min,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

C_g 为地面等待单位成本;

C_a 为空中等待单位成本;

$X_{f,t,q}$ 和 $Y_{f,t,q}$ 为决策变量采用二进制的阶跃函数,

$$X_{f,t,q} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 在时间片} t \text{ 内从机场} q \text{ 起飞,} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases}$$

$$Y_{f,t,q} = \begin{cases} 1, & \text{航班} f \text{ 在时间片} t \text{ 内到达机场} q, \\ 0, & \text{否则,} \end{cases}$$

$$t \in \Gamma, q \in Q, f \in F.$$

假设在第 $T+1$ 个时间片机场容量为无限大.约束条件(1)保证了决策变量 $X_{q,f,t}$ 的非递减性,即如果航班预计在时间片 τ 从机场 q 起飞,则所有 $X_{q,f,t}$ 在 $t > \tau$ 时都为1.约束条件(2)保证了决策变量 $Y_{q,f,t+1}$ 的非递减性,即如果航班预计在时间片 τ 在机场 q 降落,则 $Y_{q,f,t}$ 在 $t > \tau$ 时都为1.约束条件(3)保证航班 f 的空中等待时间不会影响它的后续航班.约束条件(4)保证航班 f 的地面等待时间不会影响它的后续航班.约束条件(5)是相关机场的起飞、降落容量限制.约束条件(6)保证了所有执行空中等待和地面等待的航班在最终时间片 $T+1$ 前都能到达目的机场.

2 基于NSGA-II的航班时刻优化算法

NSGA-II算法^[14-15]是一种基于Pareto最优解的多目标进化算法,它在解决多目标优化时,无需对各种目标进行归一化处理,具有快速、均匀、多样性的优点.针对本文建立的数学模型,多种目标很

难进行归一化处理,且计算量庞大,因此,本文采用NSGA-II算法对模型进行求解.

根据NSGA-II算法,利用奖、罚函数技术制约算法的适应度函数,基于NSGA-II的航班时刻优化算法流程^[16-17]如图1所示.

(1) 读取航班相关数据.从数据库中读取模型所需的基本信息,包括多机场系统中的航班号、起飞机场名称、降落机场名称、航班预计起飞时间、航班预计降落时间、航班周转时间、连程航班信息、机场动态容量等.

(2) 预处理航班信息,生成初始个体.对航班相关数据进行预处理,按要求转变成所需数据类型,处理后的数据存入航班信息数据库中作为初始个体.航班信息包括:航班号、起飞机场名称、降落机场名称、预计起飞时间、预计降落时间、实际起飞时间、实际降落时间、航班调整时间片、最小周转时间、调整标志位、延误标志位、连程航班标志位.

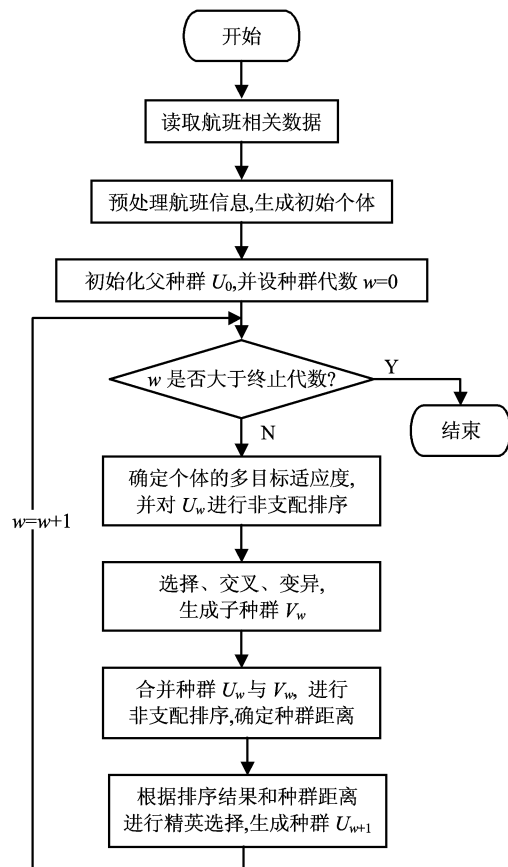


图1 航班时刻优化算法流程

Fig. 1 Flowchart of schedule optimization algorithm

(3) 设初始化父种群为 U_0 ,种群代数 $w=0$,从每个初始个体中抽取航班的实际起、降时间组成基因,通过对航班的实际起、降时间及相关信息进

行修改,生成初始化父种群.父种群的大小设置为400.

(4) 当 w 小于终止代数时,跳转至(5);否则,算法结束.

(5) 确定个体的多目标适应度,并对 U_w 进行非支配排序.首先,根据4个目标函数,结合各机场的容量约束条件,应用奖、罚函数,确定多目标函数的适应度.对于满足容量约束条件的个体,目标函数的适应度较高;对于不满足约束条件的个体,根据超出容量约束的时间片个数使用罚函数;对于调整波动小,流量、容量匹配较好的个体,将根据匹配较好的个体数使用奖函数.确定多目标适应度后,依据个体适应值,对种群 U_w 进行非支配排序.

(6) 进行选择、交叉和变异,生成子种群 V_w .通过选择操作,优化解集将朝 Pareto 最优解集方向移动,并均匀分布.本文采用锦标赛选择方式,根据非支配关系和种群距离进行排序.根据实际需求,个体之间的交叉采用多点、多次交叉方式,交叉次数及交叉点个数都取3,交叉点采用随机选取方式,交叉系数取0.6.个体间的变异采用定点变异和随机变异相结合的方式,以加快收敛速度,本算法中变异系数取0.1.

(7) 合并种群 U_w 与 V_w ,并进行非支配排序,确定种群距离.取种群 U_w 与新生成种群 V_w 的并集,合并后种群大小变为800,种群内的支配关系及种群距离被破坏,需采用(5)中的非支配算法重新排序,排序完毕后,用种群距离算法重新计算个体之间距离.

(8) 根据排序结果和种群距离进行精英选择,生成新种群 U_{w+1} .初始新种群 U_{w+1} 取空集,根据(7)中的非支配排序结果,逐层对新种群 U_{w+1} 进行补充,直到达到种群规模400为止.如果加入某层个体后,种群大小大于400,则根据该层个体的种群距离,按降序重新选择(优先选择种群距离大的个体),直至达到种群规模400.

(9) 种群代数加1,跳转至(4).

3 实例分析

本节将根据多目标航班时刻优化模型,以我国北京、上海、广州三大枢纽机场为研究对象,利用基于 NSGA-II 的算法对航班时刻进行优化求解.

算法使用整数编码方式,以与三大机场相关的起、降时间片为基因,即如果航班从三大机场起飞,则基因为起飞时间,调整后的航班执行地面等待;

否则,为降落时间,调整后的航班执行空中等待.因此,染色体的长度由三大机场在相关时间片内的航班起降架次决定.

利用 VC 设计出多目标航班时刻优化系统.取2008年5月12日8:00~12:00在三大枢纽机场起降的航班作为算例,目标机场集合 Q 包括首都机场、上海虹桥机场和广州白云机场.假设首都机场的容量为60架次/h、广州白云机场的容量为48架次/h、上海虹桥机场的容量为36架次/h.

通过数据分析发现,在8:00~12:00时段中,共有459架次航班在三大机场起降,造成35个时间片57架次航班超出机场的容量限制,按照先到先服务(first come first serve, FCFS)原则,总计需要调整约176架次航班,造成总延误时间约为890 min,见表1.

用延误时间表示总的延误成本,地面等待时间与延误成本的比值为1: C_g ,空中等待时间与延误成本的比值为1: $1.5C_g$.因为采用先到先服务策略,设5 min为一个起降时间片,不考虑机场之间彼此的起降限制,总延误航班为0.

表1 遵守先到先服务原则的结果
Tab.1 Delay cost based on the first come first service

总延误成本/min	总延误时间/min	总调整航班数/架次	总延误航班数/架次	超出容量时间片/个
2 260	890	178	0	35

本算例中,种群大小取400,算法终止代数取800,变异系数取0.1,交叉系数取0.7.利用 NSGA-II 算法对航班进行优化,第500代的 Pareto 前端解(即最优解集合)见表2.

表2 第500代 Pareto 前端解
Tab.2 Pareto fronts of generation 500

方案	总延误成本/min	总延误时间/min	总延误航班数/架次	总调整航班数/架次
1	1 735	845	3	71
2	1 705	840	5	66
3	1 650	835	4	67
4	1 790	845	3	70
5	1 680	830	4	68
平均值	1 712	839	3.8	68.4

注:计算时间为130 s.

经过多次计算发现,计算到500代后,优化结果不再有明显改进.因此,第500代的 Pareto 前端解可近似作为最优解集合,即表2中的最优方案集

合为种群中的5个最优方案,它们各有所长.通过分析可知,优化后的方案中,总延误成本明显减少(平均减少了约24%),总延误时间减少,总延误航班数有所增加,总调整航班数明显减少(平均减少了约62%),受影响的航班数量大大减少,实际运行效率更高.

根据决策人员的调整目的,可任选其中一个方案作为优化后的解.本文选择总延误成本最小的解作为本次优化方案,如图2所示.方案1可以满足

本文的需求.

下面将进一步分析 NSGA-II 算法的结果,考虑到四维图形的表达效果不佳,本文选择总延误时间、总调整航班架次和总延误航班架次3个目标函数生成三维图形进行研究,利用 Origin8.0 进行仿真,结果如图3所示.

通过分析可以发现,最优解集合在图3中构成了凸面,不断地向3个最小坐标值的交点方向逼近,形成了3个目标函数的 Pareto 前端解.

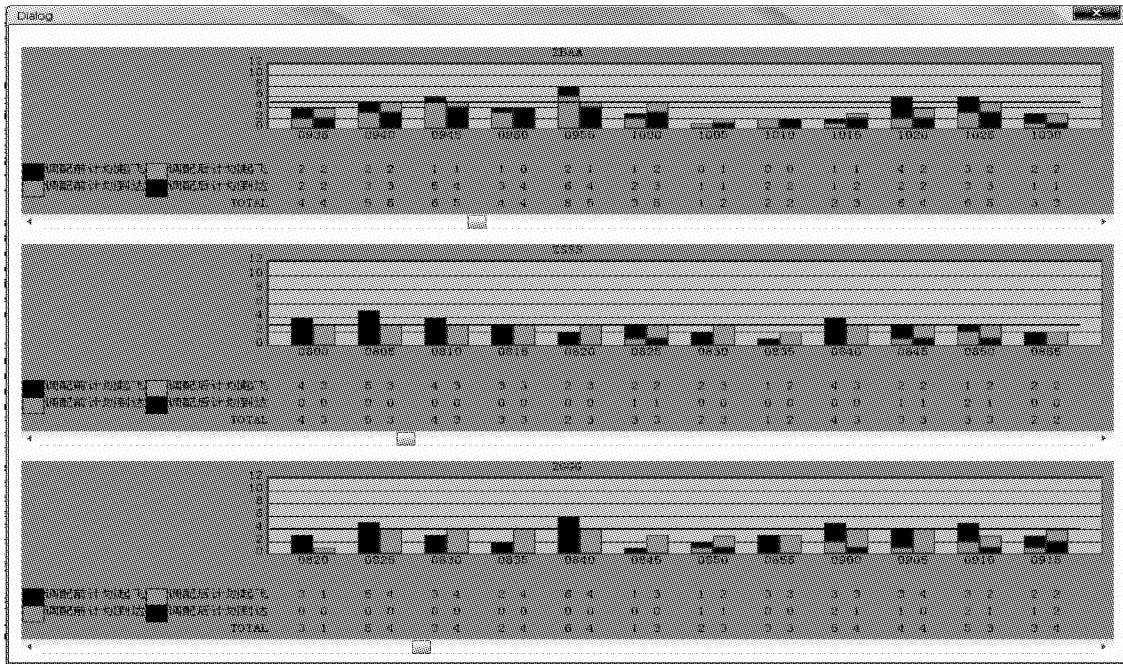


图2 方案1的优化结果
Fig. 2 Optimization results of solution 1

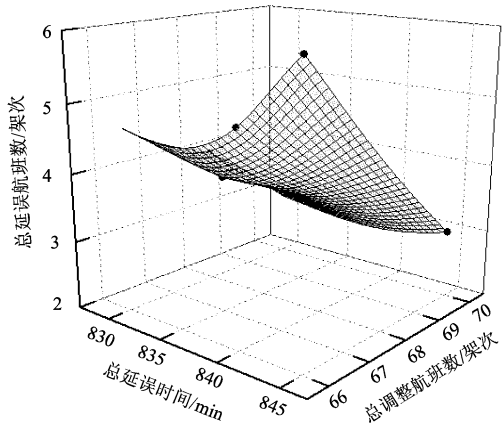


图3 三目标仿真结果
Fig. 3 Simulation result with three objectives

4 结论

(1) 在已有多机场地面等待问题模型的基础上,提出了一种新的基于航班时刻优化的多目标、

多机场地面等待问题模型,并给出了模型的多目标函数和约束关系式.

(2) 通过算例,利用 NSGA-II 算法对模型进行了优化求解.

(3) 采用 NSGA-II 算法求解多目标、多机场模型,克服了传统的多目标遗传算法需要进行归一化处理 and 搜索效率低且容易陷入局部最优的缺陷.

(4) 实例分析表明,本文提出的基于航班时刻优化的多目标、多机场地面等待问题模型能够求解出多种可行的流量管理方案,缓解了空中交通拥挤,减少了冲突.

此外,本模型是基于航班时刻的多目标、多机场、静态地面等待问题模型.下一步的研究工作是引入气象信息,建立一种随机、动态的多目标、多机场地面等待问题模型.同时,需要进一步对 NSGA-II 算法的参数进行修改和完善.

参考文献:

- [1] LI Weigang, SOUZA B B, CRESPO A M F, et al. Decision support system in tactical air traffic flow management for air traffic flow controllers[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14(6): 329-336.
- [2] MUKHERJEE A, HANSEN M. A dynamic rerouting model for air traffic flow management[J]. *Transportation Research Part B*, 2009, 43(1): 159-171.
- [3] VRANAS P B. The multi-airport ground-holding problem in air traffic control[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [4] BERTSIMAS D, PATTERSON S. The air traffic flow management with en-route capacities [J]. *Operations Research*, 1998, 46(3): 406-422.
- [5] NAVAZIO L, ROMAIN-JACUR G. The multiple connections multi-airport ground holding problem: models and algorithms [J]. *Transportation Science*, 1998, 32(3): 268-276.
- [6] LINDSAY K S, BOYD E A, BURLINGAME R. Traffic flow management modeling with the time assignment model[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 1993, 1(2): 125-138.
- [7] GOODHART J. Increasing airline operational control in a constrained air traffic system[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2000.
- [8] MUKHERJEE A. Dynamic stochastic optimization models for air traffic flow management[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2004.
- [9] 胡明华,徐肖豪,陈爱民,等. 空中交通流量管理中的多元受限地面等待策略问题研究[J]. *航空学报*, 1998,19(1): 78-82.
HU Minghua, XU Xiaohao, CHEN Aimin, et al. Multiple unit ground holding strategy problem research in air traffic flow management[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1998, 19(1): 78-82.
- [10] 程朋,崔德光,吴澄. 空中交通短期流量管理的动态网络流模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2000,40(11): 114-118.
CHENG Peng, CUI Deguang, WU Cheng. Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition*, 2000, 40(11): 114-118.
- [11] 赵焱飞. 管制区短期空中交通流量管理的时隙-航线分配模型及算法[J]. *航空学报*, 2009, 30(1): 121-126.
ZHAO Yifei. Time-route assignment model and algorithm for short-term area traffic flow management [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(1): 121-126.
- [12] 韩松臣,徐肖豪,贺利强. 航班在机场终端区时延解析计算的新方法[J]. *航空学报*, 2000, 21(6): 528-531.
HAN Songchen, XU Xiaohao, HE Liqiang. New analytic computation method of flight delay in the airport terminal area[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(1): 121-126.
- [13] 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 Mminghua. Multi-objection optimization for collaborative scheduling aircraft landing on multi-runways [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(3): 402-409.
- [14] 蔡自兴,徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 136-168.
- [15] 郑金华. 多目标进化计算及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2007: 122-206.
- [16] JADAAN A, RAJAMANI L, RAO C R. Non-dominated ranked genetic algorithm for solving multi-objective optimization problems: NRCGA[J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2008, 4(1): 60-67.
- [17] KALYANMOY D E B. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, 6(2): 182-193.

(中文编辑:秦萍玲 英文编辑:兰俊思)