

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.006

## 基于容流匹配的进离场航班调度优化模型和算法

王莉莉 胡 畔

(中国民航大学空中交通管理学院,天津,300300)

**摘要:**综合考虑机场的空中等待航班数量、空域容量、场面容量以及机场起飞需求等约束条件,以可变的优先级为调配手段,以总延误时间最短为目标函数,建立了一个新的基于容流匹配的进离场航班调度优化模型。引入合作型协同进化遗传算法,设计了一对代表个体形成合作团体的新选择方式,有效解决了传统遗传算法种群多样性低、易早熟等问题。仿真结果表明,该模型能够在满足机场容量限制的同时,有效降低航班的总延误时间。

**关键词:**空中交通流量管理;合作型协同进化遗传算法;进离场航班序列优化;容流匹配;代表个体

**中图分类号:**V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)06-0827-06

## Arrival and Departure Scheduling Optimization Model and Algorithm Based on Matching of Traffic Flow with Capacity

Wang Lili, Hu Pan

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** Through allocated methods of variable priority, a new arrival and departure scheduling optimization model based on the matching of the traffic flow with the capacity is established with an objective of minimum total delay time subject to constraints, i. e., the number of flights waiting in the airport, the airspace capacity, the surface capacity and the departure demand of the airport. A new selection method based on the cooperative co-evolutionary genetic algorithm is established using a pair of represents to form a cooperative group, which can effectively solve the low population diversity and premature of traditional genetic algorithm. The simulation results indicate that the model can effectively reduce the total delay time of the flights and meet the capacity limit requirement of the airport.

**Key words:** air traffic flow management; cooperative co-evolutionary genetic algorithm; scheduling optimization for arrival and departure flights; matching of capacity with flow; represents

近年来,繁忙机场的拥堵现状致使航班正点率一直不高。出现拥堵问题的根源在于机场容量与流量需求之间不匹配。在对我国实际运行的流量管理系统的调研中发现,目前着重于通过限制起飞来缓解空中压力,未能很好地从空中地面容量流量协调考虑,没有最大程度利用机场和空域的资源。

如何全面考虑空中、地面的容量和流量需求,动态优化调度航班的起降,在满足各约束条件的情况下,最大化地利用空域和机场资源是本文研究的重点。

学者对于跑道容量优化以及针对跑道的进离场航班排序优化方面的问题展开了诸多研究,

**基金项目:**国家自然科学基金委与中国民用航空局联合(61179042)资助项目;中央高校基本科研经费(ZXH2012L005)资助项目。

**收稿日期:**2015-08-15;**修订日期:**2015-10-15

**作者简介:**王莉莉,女,博士,教授。主要研究方向:空域规划,空中交通优化理论。

**通信作者:**王莉莉,E-mail:llwang@cauc.edu.cn。

Dear<sup>[1]</sup>于20世纪70年代提出将位置约束法(CRS)应用于航班的优化排序问题。Balakrishnan等<sup>[2]</sup>在Dear研究基础<sup>[1]</sup>上建立了网络图。除此之外,滑动窗策略<sup>[3]</sup>、分支定界法<sup>[4]</sup>、模糊规划方法<sup>[5-6]</sup>等优化方案也被应用至解决此类问题中。随后,智能算法<sup>[7-10]</sup>被引入航班进离场优化中。王莉莉等<sup>[7]</sup>考虑尾流间隔、位置约束等限制条件给出了平行跑道进场航班优化序列以及遗传算法仿真。Ciesielski等<sup>[8-9]</sup>分别采用传统遗传算法、结合滑动时间窗策略的遗传算法优化航班进离场序列。张颢等<sup>[10]</sup>对传统的协同进化遗传算法进行改进,通过确定组合优化问题中,多约束条件所占总优化过程的影响大小而获得最优排序。在上述研究中,仅单独考虑进场、离场或是单跑道情况,未综合考虑航班延误时的机场空域容量及场面运行容量的限制。

李习凤<sup>[11]</sup>通过以时刻表为依据,以优先级为手段提出了航班的地面等待策略。陈仲恒等<sup>[12]</sup>根据航班类型和载客数量计算航班的优先级,以经济损失和人员延误损失为目标,建立了优化模型。在上述研究中,航班优先级是静态的,未从容流匹配的角度确定优先级。

针对上述研究中存在的问题,本文提出了一种新的基于容流匹配的进离场航班调度优化模型,容流匹配是指综合考虑机场空中降落和地面起飞需求、空域和机场场面容量限制,合理安排航班的起降,使机场效益最大化。本文所提模型综合考虑进离场多跑道体况下提出,考虑了机场空域容量及场面运行容量的限制,从容流匹配的角度设计了动态优先级。在算法上,采用合作型协同进化遗传算法(Cooperative co-evolutionary genetic algorithm, CCGA),相比传统的遗传算法,加入了竞争环境对进化的影响,设计了一对代表个体形成合作团体的优化方式,很大程度上弥补了传统遗传算法种群多样性低的缺点。

## 1 容流匹配模型

### 1.1 模型原理

实时动态提取机场上空需降落的航班数量及场面需起飞的航班数量,当二者均未超过容量限制时,按照尾流间隔、降落时间窗等对其采用遗传算法迭代优化排序;当需进场的航班数量超过其容量,且场面容量未达到饱和时,为先到达的部分需进场航班分配较大的优先级,保证进场航班更多地被分配到时隙,能够尽快降落;当场面航班数量超过其容量时,停止增加新的需起飞航班,且为最早

等待的部分需起飞航班分配较大的优先级,保证离场航班能更多地被分配到时隙,尽快起飞;当机场的总流量超过其总容量时,停止新增需进场航班和需离场航班,保证机场已运行的航班有序运行。

### 1.2 模型假设

**假设 1:**假设机场为多跑道机场,且相邻跑道间的运行模式为独立平行仪表进近。

**假设 2:**每个航班的预计起飞时间或预计降落时间已知。

**假设 3:**引入“时基”概念,整个计算过程中,统一以时间为标准,将管制规则中的距离间隔转换为时间间隔。

### 1.3 目标函数

以总延误时间最小为目标,目标函数为

$$z = \min \sum_{m=1}^N (ST_m - ET_m) \quad (1)$$

式中: $z$ 为总延误时间; $ST_m$ 为第 $m$ 个航班的计划进场/离场时间; $ET_m$ 为第 $m$ 个航班的预计进场/离场时间; $N$ 为航班的总架数。

### 1.4 决策变量

根据模型所需约束条件,设计决策变量 $x_{ir}$ ,  $y_{mn}$ ,  $z_{jr}$ ,  $P$ ,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ 。其中式(2~4)的设计为满足跑道约束和间隔约束的需要;式(5)用于比较任意两个航班的优先级,其中 $p_m$  ( $m < N$ )为第 $m$ 个需起飞或落地的航班的优先级,该式表示如果航班 $n$ 的优先级大于航班 $m$ 的优先级,则 $P$ 的值为1,否则为0;式(6,7)分别用于确定场面航班数量与场面容量的大小和空中航班数量与空域容量的大小,其中 $R(t)$ 为 $t$ 时刻场面已有航班的数量, $C_g(t)$ 为 $[t-1, t]$ 时段场面容量, $A(t)$ 为 $t$ 时刻空中航班的数量, $C_a(t)$ 为 $[t-1, t]$ 时段空域容量, $K_0$ ,  $K_1$ 为0~1变量;式(8)用于比较机场空中和场面总航班数与机场的总容量的大小,如果机场空中和场面实际总航班数小于机场的总容量, $K_2$ 的值为1,否则为0。

$$x_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{进场航班 } i \text{ 在跑道 } r \text{ 上降落} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{相邻航班 } m, n \text{ 在同一条跑道上起降} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

$$z_{jr} = \begin{cases} 1 & \text{离场航班 } j \text{ 在跑道 } r \text{ 上起飞} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

$$P = \begin{cases} 1 & p_n(t) > p_m(t) \\ 0 & p_n(t) \leq p_m(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$K_0 = \begin{cases} 1 & R(t) < C_g(t) \\ 0 & R(t) \geq C_g(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$K_1 = \begin{cases} 1 & A(t) \geq C_a(t) \\ 0 & A(t) < C_a(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$K_2 = \begin{cases} 1 & R(t-1) + A(t-1) < C_a(t) + C_g(t) \\ 0 & R(t-1) + A(t-1) \geq C_a(t) + C_g(t) \end{cases} \quad (8)$$

## 1.5 约束条件

### 1.5.1 跑道约束

在为进离场航班分配跑道时,只能为进场或者离场的航班分配某一条固定跑道。令  $r$  为机场跑道数,  $N_a$  为进场航班数,  $i$  代表该航班为进场航班,  $j$  代表该航班为离场航班。则式(9,10)分别表示了对于所有进场和离场的航班都被分配了一条跑道,且只能分配一条跑道。

$$\sum_{r=1}^R x_{ir} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N_a; r = 1, 2, \dots, R \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{jr} = 1 \quad j = N_a, N_a + 1, \dots, N; r = 1, 2, \dots, R \quad (10)$$

### 1.5.2 航班数量的确定及优先级调配

机场航班数量随着时间变化,令  $L(t)$  为  $[t-1, t]$  时段机场上空需要降落的航班数量,  $\Delta E(t)$  为  $[t-1, t]$  时段机场上空新增的需要降落的航班数量。则  $t$  时刻,机场上空的实际航班数量可通过式(11)获取,当机场空中和场面实际总航班数大于机场的总容量时,停止增加空中需要接受服务的航班。

$$A(t) = A(t-1) - L(t) + K_2 \Delta E(t) \quad (11)$$

令  $T(t)$  为  $[t-1, t]$  时段需要从跑道起飞的航班数量,  $\Delta G(t)$  为  $[t-1, t]$  时段机场场面新增的需要起飞的航班数量。则  $t$  时刻,机场场面的实际航班数量可通过式(12)获取,当机场空中和场面实际总航班数大于机场的总容量时,停止增加地面需要接受服务的航班。

$$R(t) = R(t-1) - T(t) + L(t) + K_2 \Delta G(t) \quad (12)$$

此时已得到  $A(t)$  和  $R(t)$  在  $t$  时刻的值,通过式(6,7)可获得相应的  $K_0$  和  $K_1$  的值。

令  $p_i(t)$  ( $i < N_a$ ) 为  $t$  时刻空中需降落航班  $i$  的优先级,  $p_j(t)$  ( $j < N - N_a$ ) 为  $t$  时刻场面需起飞的航班  $j$  的优先级。当机场场面容量未达到饱和,同时机场上空实际航班数超过机场空域容量时,通过式(13)可实现为空中最早到达的前  $A(t) - C_a(t)$  架航班赋予较大的优先级,确保其尽快降落。当机场场面实际航班数大于等于其容量值时,通过式(14)可实现,为场面最早撤轮档的前  $R(t) -$

$C_g(t)$  架航班增加更大的优先级,确保其尽快起飞。

$$p_i(t) = K_0 K_1 p_i(t-1)(1 + \beta_1) \quad i = 1, 2, \dots, A(t) - C_a(t) \quad (13)$$

$$p_j(t) = \overline{K_0} p_j(t-1)(1 + \beta_2) \quad j = 1, 2, \dots, R(t) - C_g(t) \quad (14)$$

令  $STA_m$  为进场航班  $m$  计划跑道降落时间,  $STD_m$  为离场航班  $m$  计划跑道起飞时间,并且  $STA_m \cap STD_m = \phi$ ,  $STA_m \cup STD_m = ST_m$ 。则式(15)可保证优先级相对较高的航班有优先降落或起飞的权利。

$$\begin{aligned} STA_m > P * STA_n & \quad STA_m > P * STD_n \\ m \neq n, & \quad STD_m > P * STA_n, \\ STD_m > P * STD_n, & \quad m, n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (15)$$

### 1.5.3 间隔约束和位置约束

两架降落(起飞)航班之间要满足尾流间隔,令  $S_{mn}$  为相邻两架航班  $m, n$  在同一条跑道起降安全间隔,  $D_{mn}$  为相邻两架航班  $m, n$  不在同一条跑道上起降的安全间隔,则通过式(16)可实现任意两架航班之间的间隔大于其尾流间隔。

$$\begin{aligned} ST_n - ST_m & \geq S_{mn} y_{mn} + D_{mn}(1 - y_{mn}) \\ m, n & = 1, 2, \dots, N; n > m \end{aligned} \quad (16)$$

引入了最大移动位置数(Maximum position shifting, MPS),即考虑到管制员压力、飞机性能等条件,需满足公平性为原则,令  $E_q(m)$  为航班  $m$  经 FCFS 算法处理后在整个队列中的位置,  $L_q(m)$  为航班  $m$  经过 CCGA 优化后在整个队列中的位置,航班前后移动的最大位置数为 MPS,通过式(17)可实现优化前和优化后航班移动位置数不超过 MPS。

$$|L_q(m) - E_q(m)| \leq \text{MPS} \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

### 1.5.4 降落时间窗约束

由于飞行性能与进离场程序对进场航班产生的制约,每个航班都只能在其相对应的时间窗降落,因此需要限制进场航班的进场时间。

$$STA_i \in [T_e(i), T_l(i)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

式中:  $T_e(i)$ ,  $T_l(i)$  为根据航空器的飞行性能以及进场路线计算出的第  $i$  个航班的最早降落时间和最晚降落时间。

## 2 合作型协同进化遗传算法

### 2.1 种群划分

将原始种群划分为两个子种群  $A, B$ 。种群  $A$  主要以跑道约束、位置约束、间隔约束以及降落时

间窗约束为主,以式(9,10,16~18)为主要约束条件;种群B以实现容流动态调配为主要目的,以式(9~15)为主要约束条件。

## 2.2 代表个体

协同进化遗传算法中,一般以当前种群的最优个体为代表个体,但是此种代表个体的选择方法可能导致种群多样性的损失,本文采用选择两个代表个体的方法,一个为最优个体,另一个采用随机选择的方法,两个个体分别与待优化种群的某个个体结合,构成合作团体,取适应值较大者为该待优化种群个体最终的适应度值。

## 2.3 编码

采用双重编码,其中上行码表示进离场航班次序,下行码表示跑道号。如表1所示,以1为起始编号的航班代表进场航班,以61为起始编号的航班代表离场航班,0,1,2分别代表需要分配的3条跑道。

表1 编码示例

Tab.1 An example of coding

序列编号	1	2	67	3	62	4	6	5
跑道号	0	1	2	0	2	2	0	1

## 2.4 适应度函数

种群A,B均使用相同的适应度函数,取目标函数的倒数,即

$$\text{fitness} = \frac{1}{\sum_{m=1}^N (ST_m - ET_m)} \quad (19)$$

## 2.5 算法步骤

本文中CCGA算法流程见图1。

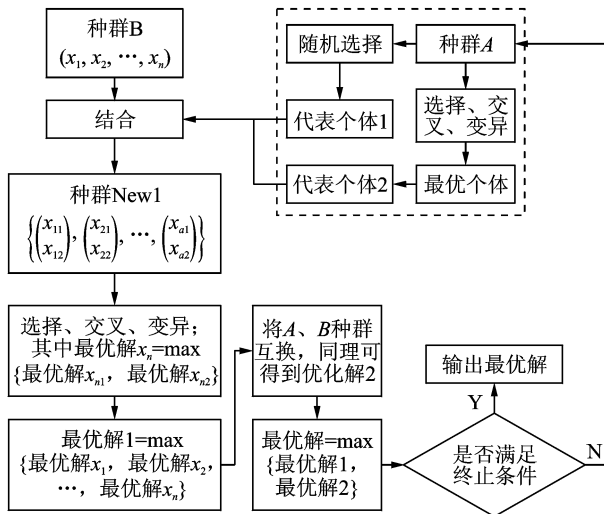


图1 CCGA算法流程

Fig.1 Process of CCGA

## 3 算法仿真

先到先服务(First come first service, FCFS)是当前管制过程中普遍采用的算法,其思想是仅以时间为标准,在满足航班安全间隔的前提下,按照航班预计到达时间( $ET_m$ )的先后次序来决定航班进场和离场次序,当航班的预计到达时间无法被满足时,对后续航班进行空中等待或地面等待处理。

本文采用Matlab软件进行仿真,在总延误时间、空中等待航班架次、地面等待航班架次3个方面将本文所提出的CCGA算法同FCFS算法所得结果进行对比,仿真结果及分析如下。

以某机场3条跑道独立运行情况为例,对某时段50架连续航班流的运行状况进行仿真,跑道数 $r=3$ ,其中进场航班24架,离场航班26架,种群规模为100。机场空域容量是指通过管制员的指挥能力以及机场的空域范围等因素确定的空中可容纳航班的最大数量;场面容量是指通过机场的停机坪数量以及机场场面运行压力等因素确定的场面可接受航班的最大数量。本文根据该机场的实际运行情况,令该时段机场空域容量为15架,即 $C_a(t_0)=15$ ,场面容量为25架,即 $C_g(t_0)=25$ 。CCGA算法的交叉操作采用单点交叉方式,航班交叉率与跑道交叉率均为0.9,变异率为0.04, MPS=3。

引入“时基”概念后,将距离间隔转化为时间间隔。根据机场的进离场最小安全间隔规定,不同机型之间的最小尾流间隔如表2所示。

表2 不同机型间的尾流最小安全间隔

Tab.2 The minimum wake intervals between different

aircraft models			s
航班类型	H	L	S
H	113	135	170
L	89	89	110
S	83	83	94

注:H、L、S分别代表重型机、中型机、轻型机。

根据机场的实际运行状况,分别得到仿真结果如图2~5所示。

图2为CCGA算法的收敛过程,算法进化至37代趋于收敛。

图3为传统FCFS算法与本文所采用的CCGA算法在总延误时间上的对比情况,从图中可知,CCGA算法在总延误时间上要小于FCFS算法,FCFS算法最终的总延误时间为146 364 s,CCGA算法为125 436 s。

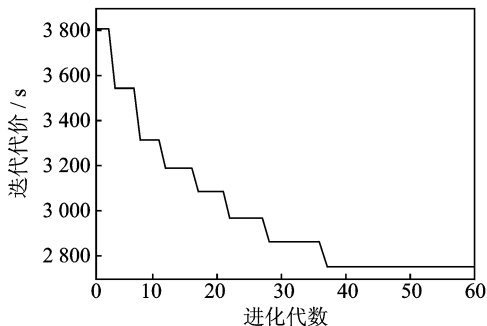


图 2 合作型协同进化遗传算法收敛过程  
Fig. 2 Convergence process of CCGA

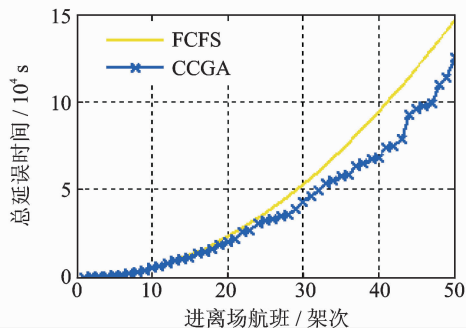


图 3 FCFS 与 CCGA 总延误时间对比  
Fig. 3 Comparison of total delay time between FCFS and CCGA

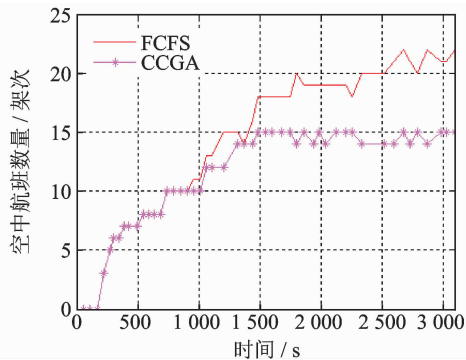


图 4 FCFS 与 CCGA 空中航班架次对比  
Fig. 4 Comparison of air flight number between FCFS and CCGA

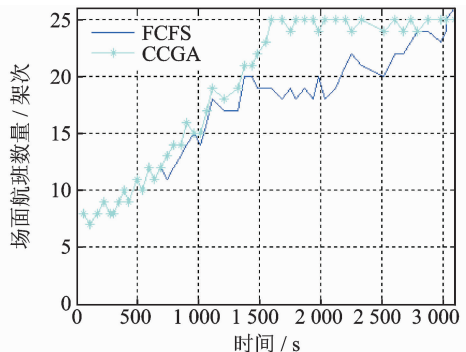


图 5 FCFS 与 CCGA 场面航班架次对比  
Fig. 5 Comparison of ground flight number between FCFS and CCGA

图 4,5 分别为两种算法在运行过程中,随着时间推移空中航班数量和场面航班数量的变化情况。从图中可以看出,在进场航班上,优化开始约 1 500 s后,传统 FCFS 算法进场航班架次节节攀升,远超过实际机场空域容量;在实际计算机仿真中,为了防止累计延误航班过多产生累计效应,在空中航班数量增至 12 架,场面航班数量增至 22 架时,就已采取部分限流措施,确保航班数量始终稳定在容量限制范围内。同 FCFS 相比,CCGA 充分利用场面容量,减少了空中等待航班数量,降低了总延误时间,提高了安全性。

### 4 结束语

本文提出了一种基于容流匹配的多跑道进离场航班调度优化模型,模型根据进离场航班的需求和容量现状,为处于不同状态航班设计了动态可变的优先级;除了尾流间隔、降落时间窗等约束条件外,增加了机场空域容量以及场面运行容量的限制;对传统遗传算法进行改进,引入合作型协同进化遗传算法,设计了一对代表个体形成合作团体的新的选择方式,有效解决了传统遗传算法过早陷入局部最优解等问题。仿真结果证明该模型虽然限制机场空中和场面的航班流量,但是仍能够合理的利用机场空域及场面运行资源,降低总延误时间。

然而随着航班架次的增大,计算时间也随之增大,计算的时效性还有待提高;另外本文中空地等待航班的容量限制还是通过经验获得,今后应加强对获取该数值有直接影响的因素的研究,使模型更加符合机场的实际运行。

### 参考文献:

[1] Dear R G. The dynamic scheduling of aircraft in the near terminal area[R]. Cambridge, Mass.: Flight Transportation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1976.

[2] Balakrishnan H, Chandran B. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone, Colorado, USA: [s. n.], 2006:21-24.

[3] 王莉莉, 史忠科, 张兆宁. 机场着陆排序的一种滑动窗优化算法[J]. 中国民航学院学报, 2005, 22(6):

- 18-21.
- Wang Lili, Shi Zhongke, Zhang Zhaoning. Optimizing slip window algorithm for sequencing of scheduled arriving aircrafts[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2005, 22(6): 18-21.
- [4] Stiverson P, Rathinam S. Heuristics for a runway-queue management problem[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 225(5):481-499.
- [5] Reza T, Mojtaba Y, Farzad R. Scheduling the sequence of aircraft landings for a single runway using a fuzzy programming approach [J]. Journal of Air Transport Management, 2012, 25(8): 15-18.
- [6] 徐肖豪, 黄宝军. 终端区飞机排序的模糊综合评判方法研究[J]. 航空学报, 2001, 22(3): 259-261.
- Xu Xiaohao, Huang Baojun. Study of fuzzy integrated judge method applied to the aircraft sequencing in the terminal area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(3): 259-261.
- [7] 王莉莉, 顾秋丽. 平行跑道到达航班排序问题研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(6): 566-569.
- Wang Lili, Gu Qiuli. Parallel runway arrival aircraft-sequencing optimization [J]. Flight Dynamics, 2013, 31(6): 566-569.
- [8] Ciesielski V, Scerri P. An anytime algorithm for scheduling aircraft landing times using genetic algorithms [J]. Australian Journal of Intelligent Information Processing System, 1997, 4(3): 206-213.
- [9] Ciesielski V, Scerri P. Real time genetic scheduling of aircraft landing times [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, USA: [s. n.], 1998:360-364.
- [10] 张颢, 赵焱飞, 刘宏志. 基于协同进化遗传算法的航班进港优化调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 14(2): 94-101.
- Zhang Xie, Zhao Yifei, Liu Hongzhi. Optimal scheduling of aircraft arrivals based on co-evolutionary genetic algorithm [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 14(2): 94-101.
- [11] 李习凤. 机场地面等待策略及优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- Li Xifeng. Study of the airport ground-holding strategy and optimizing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [12] 陈仲恒, 谢则辉, 王建. 基于固定优先级和贪心法的航班时隙分配算法[J]. 现代计算机, 2014(3):11-15.
- Chen Zongheng, Xie Zehui, Wang Jian. Flight slot assignment algorithm based on fixed priority and greedy algorithms [J]. Modern Computer, 2014(3): 11-15.