

文章编号:1671-1637(2019)01-0127-09

## 场面航空器滑行时空协同优化模型

姜雨<sup>1</sup>, 王欢<sup>1</sup>, 樊卫国<sup>1,2</sup>, 陈丽丽<sup>1</sup>, 蔡梦婷<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 苏州农业职业技术学院 智慧农业学院, 江苏 苏州 215008)

**摘要:**引入双层规划方法,研究了场面航空器在滑行道系统中的滑行调度问题;考虑了成本与冲突对场面航空器运行效率和安全的影响,以航空器推出延迟时间与滑行路径作为决策变量,以航空器在滑行道系统中滑行过程无冲突与场面航空器的总滑行距离最短为目标函数,构建了场面航空器滑行时空协同优化模型;针对航空器滑行道调度问题的特点,设计了适用于航空器滑行时空协同优化模型的双层规划算法,以降低场面航空器滑行距离和等待时间;为了验证航空器滑行时空协同优化模型及算法的有效性,对比了先到先服务调度方案的计算结果,分析了滑行等待时间与滑行距离对场面航空器运行效率的影响。研究表明:场面航空器滑行时空协同优化模型与先到先服务的航空器调度方案相比,保证了航空器滑行过程无冲突,将16架次航空器的总滑行距离从40 690 m降至37 700 m,降低了8%;航空器平均运行时间为254 s,提升了滑行道系统的整体运行效率;在复制组数为100与变异概率为0.4的条件下,采用场面航空器滑行时空协同优化模型能够在412 s内获得最优解,求解效率与收敛性显著。可见,采用场面航空器时空协同优化模型在保障航空器滑行安全的前提下,能有效提高场面航空器滑行调度效率,降低航空器运行成本,能够为繁忙机场滑行道调度提供决策支持。

**关键词:**航空运输;飞机滑跑;双层规划模型;启发式算法;滑行调度;路径优化

**中图分类号:**V355.2 **文献标志码:**A

## Spatio-temporal cooperative optimization model of surface aircraft taxiing

JIANG Yu<sup>1</sup>, WANG Huan<sup>1</sup>, FAN Wei-guo<sup>1,2</sup>, CHEN Li-li<sup>1</sup>, CAI Meng-ting<sup>1</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;  
2. School of Intelligent Agriculture, Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, Jiangsu, China)

**Abstract:** The taxiing schedule problem of surface aircraft at the airport was studied by introducing a bi-level programming method. The impacts of taxiing cost and conflict on the operation efficiency and safety of surface aircraft were considered. The spatio-temporal cooperative optimization model of surface aircraft taxiing was constructed by taking the pushout delay time and aircraft taxiing path as decision variables, and the minimum total taxiing distance of surface aircraft without conflict in the taxiway system as objective functions. According to the characteristics of aircraft taxiway schedule problem, a bi-level programming algorithm suitable for the aircraft taxiing spatio-temporal collaborative optimization model was designed to reduce the taxiing distance and waiting time of aircraft. In order to verify the validity of the model and algorithm, the result of the first-come-first-served scheduling plan was compared, and the

收稿日期:2018-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(U1333117)

作者简介:姜雨(1975-),女,山东烟台人,南京航空航天大学副教授,工学博士,从事机场场面运行优化研究。

impacts of waiting time and taxiing distance on the efficiency of surface aircraft were analyzed. Analysis result shows that compared with the first-come-first-serve scheme, the spatio-temporal cooperative optimization model can ensure zero-collision during the aircraft taxiing, and the total taxiing distance of 16 aircrafts reduces from 40 690 m to 37 700 m with a reduction of 8%. The average running time of aircraft is 254 s, which shows that the overall operating efficiency of taxiway system increases. Under the condition that the replication groups number is 100 and the mutation probability is 0.4, the optimal solution of spatio-temporal cooperative optimization model can be obtained within 412 s, and the model has significant efficiency and convergence. It can be seen that on the premise of guaranteeing the safety of aircraft taxiing, the spatio-temporal collaborative optimization model of surface aircraft can effectively improve the efficiency of aircraft taxiing scheduling, reduce the aircraft operation cost, and provide the decision support for the busy airport taxiway scheduling. 3 tabs, 5 figs, 30 refs.

**Key words:** air transportation; aircraft taxiing; bi-level programming model; heuristic algorithm; taxiing scheduling; path optimization

**Author resume:** JIANG Yu(1975-), female, associate professor, PhD, jiangyu07@nuaa.edu.cn.

## 0 引 言

机场场面资源系统包括停机位系统,滑行道系统和跑道系统,其中滑行道系统连接跑道系统和停机位系统,并承担来自两者进离场航空器的滑行任务,是影响场面运行安全与效率的关键。优化航空器在滑行道系统的滑行过程能够提高场面资源运行安全与效率。通过指派滑行路径等调度手段对航空器滑行过程进行优化,可以有效降低航空器滑行成本,提升滑行效率,进而提升场面航空器运行效率,增加机场场面动态容量并降低航空器场面拥堵,保障航空器的运行安全。

针对航空器的滑行道调度问题,国内外学者主要从建模方法和求解手段进行大量研究,并取得了较多的研究成果。在建模方面,Cheng 在不考虑滑行冲突的情况下,建立了基于航空器最短滑行路径算法的航空器动态规划模型<sup>[1]</sup>;Marin 将航空器场面滑行调度问题抽象成多商品流问题,通过整数规划计算航空器最优滑行路径<sup>[2]</sup>;Deau 等提出了航空器滑行规划的两阶段算法分别为跑道排序和滑行路径规划模型<sup>[3]</sup>;Jiang 等提出了在协同决策机制下的航空器场面协同优化调度,并考虑航空器优先级问题<sup>[4]</sup>;李睿馨等提出一种基于最小费用流的多因素约束滑行优化模型,可在短期内缓解滑行冲突,减小滑行成本<sup>[5]</sup>;王艳军等在时间依赖最短路径算法的基础上,提出了基于冲突回避的动态滑行路径分配模型,动态提升运行效率<sup>[6]</sup>;Tancredi 等以滑行时间最短、油耗最少、成本最低、效率最高以及安全为目

标,建立了航空器滑行调度的多目标模型<sup>[7]</sup>;Zang 等提出了利用粒子群算法来解决滑行调度问题<sup>[8]</sup>;张亚平等基于机位等待惩罚策略计了一种基于连续时间马尔科夫链的迭代优化模型<sup>[9]</sup>;潘卫军等建立了全局着色 Petri 网,更加精细地对滑行道进行建模<sup>[10]</sup>。

在算法求解方面,Rosa 等提出用遗传算法解决滑行道优化问题<sup>[11]</sup>;Nogueira 等采用蚁群算法对航空器滑行路径优化,使其满足安全约束,算法计算效率较高<sup>[12]</sup>;丁建立等采用改进蚁群协同算法与滑动窗口控制相结合的方法,对滑行道进行优化调度<sup>[13]</sup>;Luo 等建立了有色 Petri 模型求解,实现了航空器的无冲突滑行<sup>[14]</sup>;汤新民等采用时间窗调整再规划策略更新路径,实现航空器滑行路径的动态规划<sup>[15]</sup>;Liu 等采用粒子群算法来求解航空器滑行调度问题,在计算精度上具有显著优势<sup>[16]</sup>;Samà 等提出了一种基于滚动时域的航空器滑行实时调度方法<sup>[17]</sup>;Zhou 等根据冲突检测规划滑行路径,利用改进的 A\* 算法搜索静态滑行道网络的最短安全路径<sup>[18]</sup>;黄政等针对航空器排序与调度问题,提出了基于格里芬斯塔特编码和滚动时域优化策略的遗传算法求解<sup>[19]</sup>;Cheng 等利用精英自适应遗传算法对地面等待问题进行求解<sup>[20]</sup>;Fu 等提出利用粒子群算法来解决滑行调度问题<sup>[21]</sup>;Weiszer 等采用主动路由选择策略,对机场场面运行集成优化<sup>[22]</sup>;Alonso-Ayuso 等针对航空器的冲突检测和解决问题提出了变邻域搜索算法<sup>[23]</sup>;闫春望等利用随机时变神经网络对时变网络中最短路径问题求解,能够满足网络动态性的要求<sup>[24]</sup>;付宇晓利用耦合神经网络

结合人工势场法对航空器滑行问题进行求解<sup>[25]</sup>;李睿馨利用 Dijkstra 算法构建基于最小费用流多因素约束的滑行路径优化模型对航空器滑行路径决策进行优化<sup>[26]</sup>。

纵观国内外的研究成果,大部分建模单从航空器最优的滑行路径优化入手,而缺少对航空器开始滑行时间的优化调度。单纯利用改变航空器滑行路径的优化方式容易受制于滑行道网络空间构型以及容量,而通过改变航空器滑行开始时间可以从时间上错开拥堵区域与冲突,从而提升滑行效率。现有求解手段对单目标优化问题的研究已经很深入,但是难以体现航空器滑行路径与开始滑行时间的相互作用,如何将两者联系起来协同优化亟待研究。

本文从场面航空器运行安全和效率角度出发,协同优化航空器的滑行路径与滑行开始时间,提出一种在满足航空器滑行过程中安全无冲突的前提下,减小所有进离场航空器的等待时间与滑行时间的调度模型,从而提高航空器场面运行效率与动态容量,为大型机场场面资源调度提供决策依据。

## 1 场面航空器滑行时空协同优化模型

### 1.1 问题描述

在场面航空器滑行调度过程中,进场航空器是从跑道出口按照一定的路径滑行到目标停机位。离场航空器是从停机位按照指定的滑行路径滑行到相应跑道入口。在航空器滑行过程中,要避免任意 2 架航空器发生滑行冲突,确保滑行安全。同时尽可能的降低航空器滑行距离和滑行时间,从而提升机场场面运行效率。

### 1.2 模型假设

(1)航空器实际滑行过程中,同一段滑行道只允许 1 架航空器滑行。

(2)每架航空器的滑行路径均可从可行滑行路径集中任意选取。

(3)所有的航空器以相同的速度滑行,且不允许停止等待。

(4)将相邻的部分停机位整合为一个停机区,只将进场航空器指派到预先指派的停机区即可。

(5)航空器滑行过程中不能穿越跑道。

### 1.3 场面航空器滑行时空协同优化双层规划模型

本文建立的基于双层规划<sup>[27-30]</sup>的场面航空器滑行时空协同优化模型中,上层规划优化的对象是航空器的开始滑行时间,从时间上错开航空器在滑行过程中的冲突;下层规划研究对象是航空器的滑行路径,

通过为研究时段内每架次航空器指派适当滑行路径,避免滑行冲突,同时缩短航空器场面滑行距离。

#### 1.3.1 上层规划模型

上层优化以解决滑行过程中的冲突为主要目标,尽可能减少航空器等待时间,降低场面资源运行成本,其目标函数是研究时段内所有进离场航空器总等待时间和冲突数量最小,决策变量是航空器  $i$  的开始滑行时间  $T_{1,i}$ 。上层规划模型的目标函数和约束条件分别为

$$\min Z_1 = \sum_{i \in F_1} c_1 (T_{1,i} - E_{1,i}) + \sum_{i \in F_2} c_2 (T_{1,i} - E_{2,i}) + M\delta \quad (1)$$

$$\text{s. t. } N_{1,i} = N_{2,i} \quad (2)$$

$$T_{1,i} \geq E_{1,i} \quad (3)$$

$$T_{1,i} \geq E_{2,i} \quad (4)$$

$$T_{2,i} \leq E_{3,i} \quad (5)$$

式中: $F_1$ 、 $F_2$  分别为离、进场航空器集合; $c_1$ 、 $c_2$  分别为离、进场航空器的等待成本; $E_{1,i}$ 、 $E_{3,i}$  分别为离场航空器  $i$  的预计推出与起飞时间; $E_{2,i}$  为降落时间; $M$  为一个足够大的惩罚系数; $\delta$  为滑行冲突点数量; $N_{1,i}$ 、 $N_{2,i}$  分别为上、下层规划航空器  $i$  的滑行路径; $T_{2,i}$  为进离场航空器滑行结束时间。

式(1)表示上层规划的目标函数;式(2)表示下层规划计算得到的进离场航空器的滑行路径传递至上层规划,作为上层规划航进离场空器的滑行路径的约束;式(3)表示离场航空器在预计推出时间之后才能推出;式(4)表示进场航空器滑行开始时间在预计降落时间之后;式(5)表示离场航空器滑行结束时间在预计起飞时间之前。

#### 1.3.2 下层规划模型

下层规划目标是通过合理指派航空器滑行路径,实现所有进离场航空器总滑行时间最小,决策变量是航空器  $i$  的可行滑行路径  $N_i$ ,按照上层规划传递的航空器开始滑行时间进行滑行。下层规划模型的目标函数和约束条件分别为

$$\min Z_2 = \sum_{i \in F} (T_{2,i} - T_i) + M\delta \quad (6)$$

$$\text{s. t. } T_i = T_{1,i} \quad (7)$$

$$\frac{L_{pq} R_{ipq}}{V_i} - M(1 - R_{ipq}) \leq T_{iq} - T_{ip} \quad (8)$$

$$Z_{ijp} (T_{ip} + \tau_{ijp}) \leq T_{jp} \quad (9)$$

$$Z_{ijp} - Z_{ijq} \leq 2 - (R_{ipq} + R_{jpq}) \quad (10)$$

$$Z_{ijp} - Z_{ijq} \geq -2 + (R_{ipq} + R_{jpq}) \quad (11)$$

$$Z_{ijp} - Z_{ijq} \leq 2 - (R_{ipq} + R_{jpq}) \quad (12)$$



$$Z_{ijp} - Z_{ijq} \geq -2 + (R_{ipq} + R_{jqp}) \quad (13)$$

$$\tau_{ijp} = (T_{iq} - T_{jp}) / L_{pq} D \quad (14)$$

式中:  $F$  为进离场航空器集合;  $T_i$  为下层规划航空器  $i$  滑行开始时间;  $L_{pq}$  为节点  $p$  和  $q$  之间的距离;  $V_i$  为航空器  $i$  的滑行速度;  $R_{ipq}$  为判断航空器  $i$  是否从节点  $p$  滑行至节点  $q$  的布尔变量;  $T_{ip}$  为进离场航空器  $i$  到达节点  $p$  的时间;  $Z_{ijp}$  为判断航空器  $i$  和  $j$  到达节点  $p$  的先后的布尔变量;  $\tau_{ijp}$  为安全时间间隔;  $D$  为等效安全距离间隔。

式(6)表示下层规划的目标函数,场面航空器滑行时空协同优化模型中假设航空器滑行速度恒定且不允许等待,故滑行时间长短可以衡量滑行路径长度;式(7)将上层规划得到的进离场航空器开始滑行时间传递至下层规划,作为下层规划开始滑行时间的约束条件;式(8)表示进离场航空器在路径上任意两节点之间的滑行时间小于等于到达两节点的时间之差,即航空器滑行路径的连续性约束;式(9)用于检测任意两架进离场航空器间的交叉冲突;式(10)、(11)用于检测航空器超越冲突;式(12)、(13)用于检测航空器对头冲突;当式(9)~(13)任意一个不等式不满足且安全时间间隔不满足时,冲突点  $\delta$  数量增加;式(14)表示航空器安全时间间隔。

## 2 算法设计

基于双层规划的场面航空器滑行时空协同优化模型求解过程中,首先初始化上层决策变量,给予各个航空器一个合理范围内随机的初始解,即作为进离场航空器的预计开始滑行时间;下层规划则在参数约束范围内选择合适的滑行路径,优化目标函数,并将调度方案反馈给上层规划作为最优解;上层规划依据下层规划反馈的最优解,再次进行优化,比较前后两组解,选出新的最优解记录并传递给下层作调整。重复这一过程直到最大迭代次数。

本文借鉴遗传算法的迭代思路,将决策变量复制若干组,形成种群进行操作,提升算法效率。同时对种群施加交叉和变异操作,提升算法局部范围内搜索最优解的能力,避免陷入局部最优。设计出的基于双层规划的场面航空器滑行时空协同优化模型的求解算法具体过程如下。

Step 1: 初始化。上层规划的开始滑行时间在合理范围内随机赋值。计算总等待延误  $T_d$ , 将  $n$  架航空器开始滑行时间的解  $\{T_{1,1}, T_{1,2}, \dots, T_{1,n}\}$  和总等待延误  $T_d$  传递给下层规划; 下层规划在上层规划

传递的开始滑行时间下,为航空器  $i$  随机选择滑行路径  $N_i$ , 形成路径解决方案  $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ , 计算总滑行路径长度  $L$ 。

Step 2: 计算航空器经过路径上各节点的时间,以约束(9)~(13)检验滑行冲突点数量  $\delta$ ; 将路径解决方案  $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  和开始滑行时间方案  $\{T_{1,1}, T_{1,2}, \dots, T_{1,n}\}$  作为最优路径和最优开始滑行时间,同总滑行路径长度  $L$ , 冲突点数目  $\delta$  等传递给上层规划。

Step 3: 上层规划将最优开始滑行时间方案复制  $\omega$  组,通过施加一个随机数  $\tau$  对每组时间施加变化,每组中航空器的滑行开始时间  $T_{1,i}$  以一定概率  $\sigma$  发生变异。

Step 4: 在计算所有复制组中,第  $k$  组开始滑行时间方案的总等待延误为  $T_{dk}$ , 其中  $k \in \{1, 2, \dots, \omega\}$ , 以各组开始滑行时间方案为基础,结合最优路径解决方案,计算航空器经过路径上各节点的时间,检验每一组中滑行冲突点数量  $\delta_k$ 。

Step 5: 在总延误小于当前最优总等待延误  $T_{dk} \leq T_d$ , 且冲突数量更低  $\delta_k \leq \delta$  的组中,选择最优组作为新的最优开始滑行时间方案,并将该方案的总等待延误  $T_{dk}$  和冲突点数目  $\delta_k$  赋值给总等待延误  $T_d$  和冲突点数目  $\delta$ , 并传递给下层规划; 记录当前最优的路径方案与开始滑行时间方案作为最优解。

Step 6: 下层规划复制  $\omega$  组当前最优路径方案,以一定的变异概率  $\sigma$  对每组中的滑行路径施加变异操作; 结合上层规划传递的最优开始滑行时间方案,计算各组路径解决方案的总滑行路径长度  $L_k$ ; 计算航空器经过路径上各节点的时间,检验各组中滑行冲突点数量  $\delta_k$ 。

Step 7: 在所有总滑行路径长度小于当前最优解  $L_k \leq L$ , 且冲突数量  $\delta_k \leq \delta$  的组中,选择最优组作为下层规划的新的最优路径方案,并将该方案的总滑行路径长度  $L_k$  和冲突点数目  $\delta_k$  赋值给总滑行路径长度  $L$  和冲突点数目  $\delta$ , 传递给上层规划; 记录当前最优的路径方案与开始滑行时间方案作为最优解。

Step 8: 当前迭代次数增加  $g = g + 1$ , 若此时迭代次数  $g$  不小于最大迭代次数  $g'$  时,则循环结束,否则返回步骤 Step 3。

Step 9: 从上层和下层规划的解中,选取目标函数数值最小的解作为问题的最优解,若此时冲突点数目  $\delta = 0$  则求解成功; 若求解失败,令当前迭代次数  $g = 0$ , 最大迭代次数赋值为  $2g'$ , 返回步骤 Step 1 重新计算。

3 仿真实验

以中国某大型机场滑行道系统结构作为仿真对象,选取该机场西半区域,将多个相邻的停机位抽象成 3 个集中停机区  $G_1$ 、 $G_2$  和  $G_3$ 。去掉一些无关的

滑行道和节点,形成包含 37 个节点、48 条边、2 条跑道和 3 个集中停机区的网络结构,见图 1。

航班数据选取该机场某日 8:00~8:15 高峰小时航班数据,见表 1,其中:A 为进场航空器,D 为离场航空器。设置变异概率  $\sigma=0.4$ ,复制组数 $\omega=100$ 。

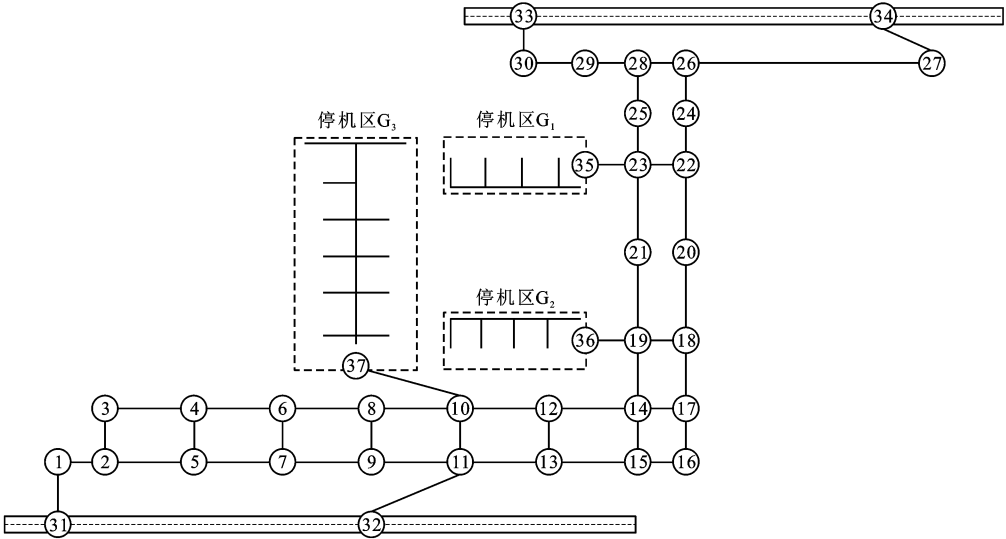


图 1 某大型机场滑行道系统构型  
Fig. 1 Structure of a large airport taxiway system

表 1 航空器滑行时刻表

Tab. 1 Aircraft taxiing timetable

航空器编号	开始滑行时间	滑行起点	滑行终点	分类
1	08:00	32	37	A
2	08:00	35	33	D
3	08:02	36	31	D
4	08:02	37	31	D
5	08:04	36	33	D
6	08:05	34	35	A
7	08:06	32	36	A
8	08:06	34	36	A
9	08:08	32	37	A
10	08:08	35	33	D
11	08:10	32	35	A
12	08:11	34	35	A
13	08:12	36	31	A
14	08:14	34	37	A
15	08:15	35	33	D
16	08:15	32	36	A

3.1 仿真结果分析

本文运用 MATLAB 编程求解该双层规划问题,获得上层规划最优解  $Z_1=294\text{ s}$ ,下层规划最优解  $Z_2=37\text{ 700 m}$ 。在求解过程中,上下层规划最优

解的迭代进化过程见图 2。

由图 2(a)上层规划最优解进化过程可以看出:随着迭代次数的增加,总等待时间从较大的初始值开始逐渐降低;第 1~10 次迭代中,最优解下降程度剧烈,将模型的等待时间优化到了一个正常的范围,这是由于算法中给初始解随机赋予了一个较大的值,导致滑行冲突点数量较多,从而导致函数值过大;随着迭代次数的进一步增加,总等待时间下降,上层规划的可行解与最优解的曲线基本重合,这表明上层规划的进化效率较高,每次迭代几乎都能找到最优解;从第 90 次迭代开始,等待时间开始出现平缓,接近最大迭代次数内的最优解。

从图 2(b)下层规划最优解进化过程可以看出:随着迭代次数的增加,最优的总滑行距离呈阶梯状下降;第 1~30 次迭代的下降速度较快,下层规划可行解的曲线在前 30 次迭代与最优解曲线重合度较高,这一阶段进化效率高,总滑行距离快速下降;从第 30 次迭代开始,下层规划算法寻找更优解的难度增加,算法效率开始降低;第 30~100 次迭代中只出现过 3 次下降,仅有 5 次找到了最优解,这是由于下层规划问题的复杂度较高,进一步优化当前最优解难度较大导致。

为保证算法有效性,当下层规划无法找到无冲突的最优解,而上层规划能够找到无冲突的最优解时,

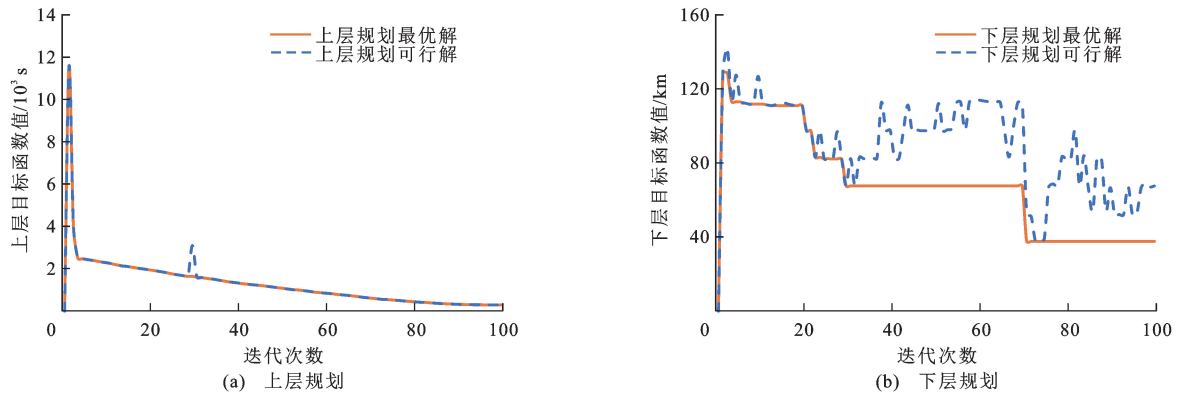


图 2 模型最优解进化过程

Fig. 2 Optimal solution evolution process of model

上层最优解则为模型的最优解,模型算法依然有效。

在仿真过程中,下层规划冲突点数量的迭代进化过程见图 3,可以看出:初始条件下共有 7 个滑行冲突点,随着迭代次数的增加,冲突点逐渐减少,在第 70 次迭代后冲突点数量为 0,这与下层规划最优解的进化趋势基本相符;由于本文所建立的场面航空器滑行时空协同优化模型中不允许出现冲突,无冲突的滑行方案才是可行解,故只有在第 70 次迭代后出现的解才是可行的,最优可行解一定是在迭代 70 次后产生。

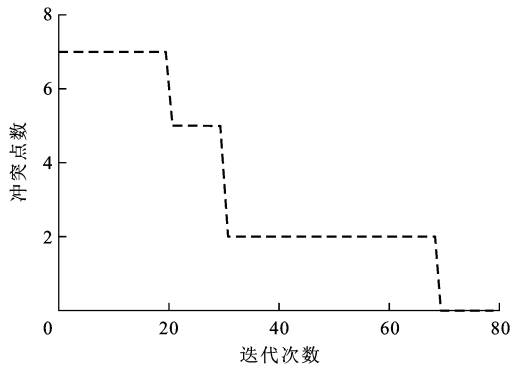


图 3 航空器滑行冲突点数进化过程

Fig. 3 Evolution process of aircraft taxiing conflict point number

将场面航空器滑行时空协同优化模型仿真结果与采用相同的数据、选择最短路径优先的先到先服务(First-Come-First-Served, FCFS)的调度结果相比较,见表 2。

从表 2 中可以看出:在基于 FCFS 的调度结果中,16 架次航空器总滑行距离为 40 690 m,平均每架次航空器的滑行距离为 2 543 m;由于 FCFS 调度中直接按计划排班运行,所以航空器的平均等待时间为 0;场面航空器滑行时空协同优化模型调度结果中,16 架次航空器总滑行距离为 37 700 m,平均每架次航空器的滑行距离为 2 356 m,比 FCFS 中航空

表 2 优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimization results

方法	FCFS	航空器滑行时空协同优化模型
总滑行距离/m	40 690	37 700
平均滑行距离/m	2 543	2 356
总等待时间/s	0	294
平均等待时间/s	0	18.4
冲突点数	9	0

器平均滑行距离降低了 8%;航空器总等待时间为 294 s,平均每架次等待 18.4 s,属于可接受范围。在场面航空器滑行时空协同优化模型中,航空器为了避免滑行道内的滑行冲突,提高滑行系统的运行效率和安全,必须保证冲突点数量为 0,因此,航空器需要在推出时进行一定时间的等待;而基于 FCFS 的滑行调度结果虽然不需要在推出时等待,但是在滑行道运行时因为需要通过等待以避免冲突,所以浪费的时间远大于前者,且影响滑行道系统的运行效率。

假设场面航空器滑行时空协同优化模型中所有航空器的滑行速度相等且恒定不变,可以用滑行时间的长短衡量滑行距离;航空器的运行时间是指该航空器的滑行时间和等待时间之和。对场面航空器滑行时空协同优化模型优化结果中每架航次空器的滑行时间与等待时间进行分析,见图 4,可以看出:航空器平均运行时间为 254 s,滑行时间较为均衡,每一架次航空器的等待时间较短,属于可接受范围;需要等待的航空器数量较少,只有 5 架次,占总航空器数量的 31%;只有第 13 架次的航空器等待时间较长,其排班顺序发生了变化,航班时刻表整体扰动较低。增加少量的航空器等待时间可以减少一定的滑行时间,从而降低航空器的滑行成本。

通过以上对比可以看出:基于场面航空器滑行

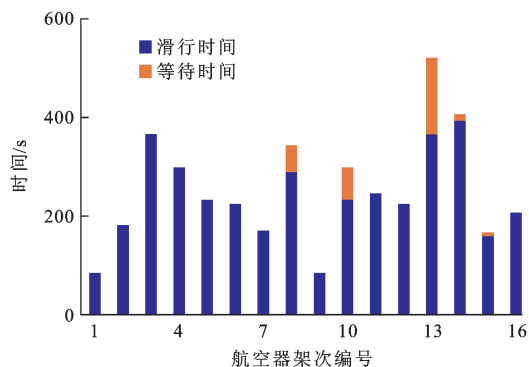


图 4 航空器的运行时间

Fig. 4 Operation times of aircrafts

时空协同优化模型调度的结果从航空器的总滑行距离、航空器运行时间、冲突点数量 3 个方面均优于基于 FCFS 的航空器滑行调度结果;场面航空器滑行时空协同优化模型不断优化航空器的等待时间和路径选择结果,从时间和空间上减少航空器滑行冲突发生的同时优化滑行路径,进而提高航空器滑行效率。例如,在航空器滑行时空协同优化模型中,航空器在空间上选取较长的滑行路径,避开冲突区域到达滑行终点,或者在时间上选择进行较短的等待,避开冲突后再开始滑行;而基于 FCFS 的滑行调度方法无法选择较短路径,避免冲突的方法只有在滑行道中等待。

### 3.2 算法参数分析

在航空器滑行时空协同优化模型求解过程中,算法的变异概率  $\sigma$  和复制组数  $\omega$  会对模型的计算结果产生重要影响。本文采用控制变量法分别分析  $\sigma$  和  $\omega$  两个参数的取值对运行结果的影响。

复制比例  $\omega=100$  不变,变异概率  $\sigma$  取值分别为 0.1、0.2、...、0.8,在其他所有条件相同的情况下进行多次仿真试验,取各次试验平均值,选择几组具有代表性的实验结果,见表 3,可以看出:变异概率为

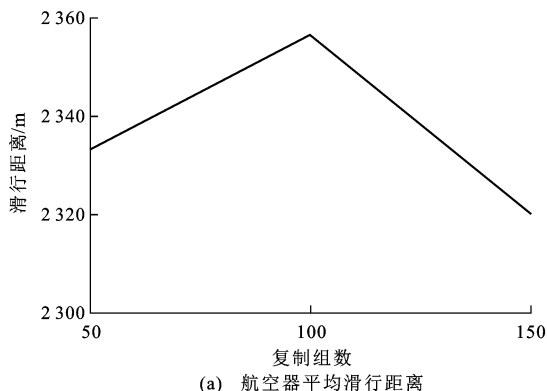
0.2 的条件下,航空器平均滑行距离为 2 368 m,航空器平均等待时间为 14.8 s;变异概率为 0.4 的条件下,航空器平均滑行距离为 2 356 m,与变异概率为 0.2 的情况接近,但是航空器平均等待时间却比前者高 23.6%;当变异概率为 0.6 时,航空器的平均滑行距离和平均等待时间高于变异概率为 0.2 和 0.4 的情况。在 3 组试验中,算法的运行时间基本接近,皆在可接受范围内,变异概率对算法最大的影响是收敛性。当变异概率取 0.2 时,算法收敛缓慢,直到第 90 次迭代左右才出现最优解,有时甚至不出现无冲突的最优解;当变异概率取 0.6 时,算法在第 10 次迭代就已经找出了最优解,收敛过快,往往容易陷入局部最优,稳定性差;当变异概率取 0.4 时算法收敛性介于二者之间,收敛性较好,且能在规定的迭代次数内找到令人满意的最优解,因此,本文算法选择性能较好的 0.4 作为变异概率。

表 3 变异概率对调度结果的影响

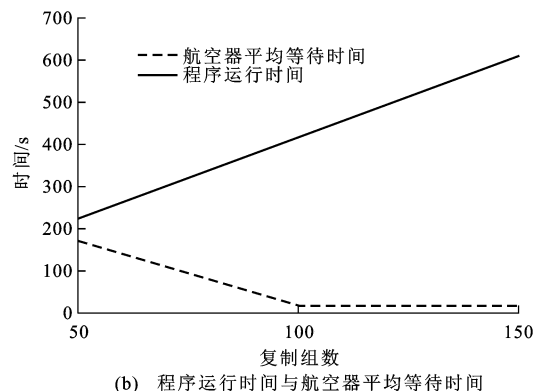
Tab. 3 Influence of mutation probability on scheduling result

变异概率	0.2	0.4	0.6
航空器平均滑行距离/m	2 368	2 356	2 418
航空器平均等待时间/s	14.8	18.3	19.3
程序运行时间/s	419	412	406
最优解出现的迭代次数	90	70	10

同理,取  $\sigma=0.4$  保持不变, $\omega$  分别设为 50、100、150,在其他所有条件相同的情况下进行多次仿真试验,并取各次试验的平均值,见图 5,可以看出:在图 5(a)中,随着复制组数的增大,航空器的平均滑行距离先增大后减小,不同复制组数之间的优化结果较为接近;在图 5(b)中,航空器平均等待时间随复制组数的增加而不断降低,程序运行时间与复制组数成正相关,随着复制组数的增大而线性增加。所以在实际运用过程中,要通过多次试验比较,选择



(a) 航空器平均滑行距离



(b) 程序运行时间与航空器平均等待时间

图 5 复制组数对调度结果的影响

Fig. 5 Influence of number of replication groups on scheduling result



一个在能接受的运行时范围间内,算法结果最优的利弊折中点。

## 4 结 语

(1)在构建航空器在场面滑行的各项约束的基础上,设计了优化航空器滑行距离与等待时间的目标函数,并完整建立了场面航空器滑行时空协同优化模型;所建立的模型变量与约束较多,为提升模型的求解效率,设计了启发式算法进行快速求解。

(2)以国内某大型机场场面构型进行实例仿真验证,结果表明场面航空器滑行时空协同优化模型能够在保证航空器滑行过程安全无冲突的前提下,降低航空器滑行距离与等待时间,且能快速提出场面航空器滑行调度方案。

(3)模型算法的求解速度和效率以及收敛性受复制组数和变异概率影响较大。一般而言,复制组数越大,求解成功的概率也就越大,但是过高的复制组数会大大增加计算时间;变异概率对算法的收敛性影响很大,需要针对问题选择合适的变异概率。

(4)双层规划在机场场面航空器滑行优化方面的研究目前非常少,下一步的研究工作将是将该方法推广到航空器场面运行的联合调度领域,探讨不同智能算法求解的优劣性。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] CHENG V H L. Airport surface operation collaborative automation concept[C]//AIAA. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 2003. Reston: AIAA, 2009: 1-14.
- [2] MARIN A G. Airport management: taxi planning[J]. Operations Research, 2006, 143: 191-202.
- [3] DEAU R, GOTTELAND J B, DURAND N. Airport surface management and runways scheduling[C]//ATM. 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Toronto: Eurocontrol, 2009: 1-9.
- [4] JIANG Yu, LIAO Zhi-hua, ZHANG Hong-hai. A collaborative optimization model for ground taxi based on aircraft priority[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-9.
- [5] 李睿馨,徐国标.一种航空器地面滑行路径决策优化算法[J].高师理科学刊,2017,37(9):14-19.  
LI Rui-xin, XU Guo-biao. A calculation method on the optimization of aircraft taxi route decision[J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2017, 37(9): 14-19. (in Chinese)
- [6] 王艳军,胡明华,苏 炜.基于冲突回避的动态滑行路径算法[J].西南交通大学学报,2009,44(6):933-939.  
WANG Yan-jun, HU Ming-hua, SU Wei. Dynamic taxiway

- routing algorithm based on conflict avoidance[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 933-939. (in Chinese)
- [7] TANCREDI U, ACCARDO D, FASANO G, et al. An algorithm for managing aircraft movement on an airport surface[J]. Algorithms, 2013, 6(3): 494-511.
- [8] ZANG Jing-nan, LIU Qing. Airport taxi scheduling strategy based on particle swarm optimization algorithm[C]//MCE. International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Paris: Atlantis Press, 2014: 118-121.
- [9] 张亚平,廉 冠,邢志伟,等.飞机推出控制停机位等待惩罚策略[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):39-45.  
ZHANG Ya-ping, LIAN Guan, XING Zhi-wei, et al. Aircraft departure pushback control strategy based on gate-hold penalty[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 39-45. (in Chinese)
- [10] 潘卫军,杨 磊,朱新平,等.繁忙机场机坪运行过程着色 Petri 网建模[J].计算机仿真,2018,35(1):52-56,97.  
PAN Wei-jun, YANG Lei, ZHU Xin-ping, et al. Modeling of busy airport apron running processes based on color Petri net[J]. Computer Simulation, 2018, 35(1): 52-56, 97. (in Chinese)
- [11] ROSA L P, FERREIRA D M, CRUCIOL L L B V, et al. Genetic algorithms for management of taxi scheduling[C]//IEEE. 2013 International Conference on Artificial Intelligence. New York: IEEE, 2013: 594-598.
- [12] NOGUEIRA K B, AGUIAR P H C, LI Wei-gang. Using ant algorithm to arrange taxiway sequencing in airport [J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2014, 6(4): 357-361.
- [13] 丁建立,李晓丽,李全福.基于改进蚁群协同算法的枢纽机场场面滑行道优化调度模型[J].计算机应用,2010,30(4): 1000-1003,1007.  
DING Jian-li, LI Xiao-li, LI Quan-fu. Optimal scheduling model for hub airport taxi based on improved ant colony collaborative algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 1000-1003, 1007. (in Chinese)
- [14] LUO Xiao, TANG Yong, WU Hong-gang. Real-time adjustment strategy for conflict-free taxiing route of A-SMGCS aircraft on airport surface[C]//IEEE. 12th IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2015: 929-934.
- [15] 汤新民,王玉婷,韩松臣.基于 DEDS 的 A-SMGCS 航空器动态滑行路径规划[J].系统工程与电子技术,2010,32(12): 2669-2675.  
TANG Xin-min, WANG Yu-ting, HAN Song-chen. Aircraft dynamic taxiway routes planning for A-SMGCS based on DEDS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2669-2675. (in Chinese)
- [16] LIU Qing, LI Chun-ling, LUO Xiao-fei. Airport taxi scheduling strategy based on cooperate particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2011, 3(9): 165-172.



- [17] SAMÀ M, D'ARIANO A, D'ARIANO P, et al. Optimal aircraft scheduling and routing at a terminal control area during disturbances[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 47(P1): 61-85.
- [18] ZHOU Hang, JIANG Xin-xin. Research on taxiway path optimization based on conflict detection[J]. *Plos One*, 2015, 10(7): 1-17.
- [19] 黄政, 白存儒, 张伟. 到达航班排序与调度优化的遗传算法研究[J]. *航空工程进展*, 2011, 2(2): 236-240.  
HUANG Zheng, BAI Cun-ru, ZHANG Wei. Genetic algorithm for arrival sequencing and scheduling optimization[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2011, 2(2): 236-240. (in Chinese)
- [20] CHENG Xiao-hang, XUE Hui-feng, HONG Ding-song, et al. Design of adaptive genetic algorithm on single airport ground-holding policy[C]//ASCE. *International Conference on Transportation Engineering 2007*. Reston: ASCE, 2007: 253-258.
- [21] FU A-li, LEI Xiu-juan, XIAO Xiao. The aircraft departure scheduling based on particle swarm optimization combined with simulated annealing algorithm[C]//IEEE. *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 2008: 1393-1398.
- [22] WEISZER M, CHEN Jun, LOCATELLI G. An integrated optimisation approach to airport ground operations to foster sustainability in the aviation sector[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 567-582.
- [23] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J, et al. A VNS metaheuristic for solving the aircraft conflict detection and resolution problem by performing turn changes[J]. *Journal of Global Optimization*, 2015, 63(3): 583-596.
- [24] 闫春望, 黄玮, 王劲松. 一种随机时变神经网络最短路径算法[J]. *天津理工大学学报*, 2016, 32(2): 40-44.  
YAN Chun-wang, HUANG Wei, WANG Jin-song. A stochastic time-varying neural network shortest path algorithm[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2016, 32(2): 40-44. (in Chinese)
- [25] 付宇晓. 面向机坪管制移交的场面运行优化问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
FU Yu-xiao. Research on the airport surface operation optimization problem of the transfer of the aprons control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [26] 李睿馨. 大型繁忙机场机坪管制工作中的滑行路径决策优化算法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.  
LI Rui-xin. Research on the optimization algorithm of taxiing path decision of the ramp control work in the busy airport[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018. (in Chinese)
- [27] BRACKEN J, MCGILL J T. Mathematical programs with optimization problems in the constraints[J]. *Operations Research*, 1973, 21(1): 37-44.
- [28] BRACKEN J, FALK J E, MCGILL J T. Technical note—the equivalence of two mathematical programs with optimization problems in the constraints[J]. *Operations Research*, 1974, 22(5): 1102-1104.
- [29] WEN U P, HSU S T. Linear bi-level programming problems—a review[J]. *The Journal of the Operational Research Society*, 1991, 42(2): 125-133.
- [30] WHITE D J, ANANDALINGAM G. A penalty function approach for solving bi-level linear programs[J]. *Journal of Global Optimization*, 1993, 3: 397-419.