

机场群离港航班时刻稳定性评估及优化

王兴隆^{1,*}, 许晏丰¹, 薛依晨²

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 中国民用航空华北地区空中交通管理局, 北京 100621)

摘 要: 随着中国航空运输量的不断增加, 机场群航班时刻资源日益稀缺、航班延误严重等问题也逐渐显现, 有必要深入研究机场群的航班时刻优化问题。在明确机场群离港航班时刻稳定性概念基础上, 提出离港航班延误率、平均延误时间等共 6 项机场群离港航班时刻稳定性评估指标, 并运用改进的逼近理想解排序 (TOPSIS) 法对稳定性进行质量评估。建立机场群离港航班时刻优化模型, 选择改进粒子群算法来实现对该模型的优化, 并以稳定性质量为标准对优化前后航班计划进行比较。以京津冀机场群为例进行验证, 仿真结果表明: 所提优化模型和算法能够降低北京首都国际机场离港航班平均延误时间 18.8 s, 降低平均延误率 9.9%; 繁忙航线平均延误时间降低 12.7 s, 平均延误率降低 3.0%; 有效降低了京津冀机场群整体延误水平, 提高机场群离港航班时刻稳定性。

关 键 词: 机场群; 稳定性评估; 逼近理想解排序; 离港航班时刻优化; 粒子群算法

中图分类号: V35

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)06-1331-11

近年来, 为满足逐年增加的民航需求量, 中国陆续出现了“一市多场”或“多市多场”的机场群。机场群的出现, 使中国机场密集程度不断增高, 这虽然让机场之间能够相互耦合、相互影响, 但也使得机场群内部的空域竞争更加激烈, 机场群时刻资源日益稀缺, 尤其是机场群航班时刻编排不合理更加剧了矛盾, 也使得机场群航班延误现象更加频发。以京津冀机场群 2019 年数据为例: 出港航班 44.94 万架次, 出港准点率为 70.79%, 平均延误时长为 32.28 min。因此, 建立合理的航班时刻评估方法并有效优化是十分必要的。

国内外学者通过构建模型对机场群航班时刻进行评估。Brueckner 等^[1]构建了一个简单模型, 即影响航班时刻的随机冲击不是连续的, 而是离散的, 以此来分析航班时刻表的缓冲选择问题; 闵捷等^[2]提出航班延误波及变化评估指标, 在构建航线网络模型的基础上找出了计划过站时间、航线类型和航线顺序这 3 个影响评估指标的因素, 并以此来对航

班时刻进行评估; Ren 等^[3]通过对航班延误实际情况的定量评估, 更好地制定了季节性航班时刻表, 提出一种基于历史数据的航班时刻表评估模型, 以寻找航班延误潜在关键环节; 胡明华等^[4]针对中国枢纽机场运营高峰时段时刻资源紧张、超负荷运行、放行顺序不合理等情况, 分析机场航班运行规律和航班时刻存在的问题, 能减少地面延误、提高放行正常率、增加机场容量。中国相关部门发布的关于时刻管理办法的政策文件, 比如中国民用航空局于 2018 年 4 月 1 日实施的《民航航班时刻管理办法》就涉及了资源配置、航班评估标准、航班时刻协调管理办法等^[5]。

在机场群航班时刻优化方面, 国内外学者也已开始进行相关研究。Clarke 等^[6]指出多机场群系统内各机场之间的关联和影响, 并创建了多机场群内部机场关联的分类方案, 确定时间序列和航路间隔是导致延误的最主要因素, 并基于此建立了一个实验矩阵, 以纽约终端区为例进行了验证; Geng 和 Hu^[7]

收稿日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-10-29; 网络出版时间: 2021-11-11 14:42

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211110.1057.001.html

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1600101); 天津市教育委员会自然科学基金重点项目 (2020ZD01)

*通信作者. E-mail: xinglong1979@163.com

引用格式: 王兴隆, 许晏丰, 薛依晨. 机场群离港航班时刻稳定性评估及优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (6): 1331-1341.

WANG X L, XU Y F, XUE Y C. Evaluation and optimization of departure flight schedule stability of airport group [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (6): 1331-1341 (in Chinese).

以京津冀机场群为例,构建了调整延误时间最小的机场群航班计划优化模型,提出求解算法,并通过仿真验证,确定了其优化模型和算法的可行性;Rahmalia 等^[8]将机组人员费用与航班时刻表配对,选择目标规划模型中覆盖所有飞行次数的最优配对作为多目标规划,选择蝙蝠算法对模型进行仿真优化,仿真结果证明了该算法的适用性。

国内方面,郑丽君等^[9]构建了包括环境成本在内的离港航空器滑行成本计算模型,以总滑行成本最小为目标,采用遗传算法开展算例仿真,求解不同策略下的最优滑行路径并对比分析了不同滑行策略对缓解拥堵及减少排放的有效性,以提高离港滑行效率,减缓航班延误;江灏等^[10]单独对拥挤和非拥挤场景下的离场航班动态协同排序问题进行了系统的研究,在提出航空公司延误公平性评价指标前提下,创建了基于交通状态的离场航班协同排序模型,并采用改进遗传算法寻求离场航班动态协同排序的最优解;王湛和吴艺^[11]以协同决策理念为基础,提出一种基于按时刻表分配公布顺序的离散化优化模型;杨新渥和裴一麟^[12]在降低航班延误的前提下,建立机场群运行航班时刻优化及动态排队双层规划模型,并以此方法进行仿真求解;王佳璇^[13]以北京首都国际机场为例,在航路容量模型与航班延误成本模型的基础上,建立基于航路分配的航班时刻优化模型,利用快速降阶优化算法对其模型进行求解。

综合现有研究,对于机场群航班时刻的研究仍有如下问题值得进一步深入:①机场群航班时刻研究大多在宏观层面进行分析,当前对机场群航班时刻的优化的研究未能充分利用机场容量、整体缓解航班延误现象;②虽然涉及到对航班时刻评估相关内容,却很少给出航班时刻具体评估指标。本文从缓解机场群航班延误现象出发,研究高峰时段下机场群航班时刻评估及优化,但机场群航班时刻研究可分为进港和离港 2 方面,考虑到相对于进港,离港航班更便于管控调整,所以优化机场群离港航班时刻对提升机场群容量有效利用,减少航班延误更有意义,因此,本文主要研究机场群离港航班时刻评估优化问题。

1 离港航班时刻稳定性评估

航班时刻,即民航机场为使航空器在某一特定日期起飞、降落、飞行等航空活动得以实现而获得的航空器到港、离港的预定时间。机场航班时刻的制订是空中交通活动开展运行的基础和前提,机场之间以及机场群之间航班时刻的协调优化是提高

整体运行效率前提和保障。

本文将机场群离港航班时刻稳定性定义为机场群离港航班时刻受外部因素扰动后,能通过对航线容量和离港航班计划调配,恢复原航班计划的能力;如果机场因自身容量不足,无法保障航班按计划运行,且无法自行恢复到原计划状态,该失稳情况经过航线传递后,导致航线容量和机场群其他机场容量不足,最终导致大量航班延误、旅客滞留、运输资源调配失衡等问题发生,此时机场群离港航班时刻失稳。其中,航班延误是航班时刻失稳最常见的表现形式。

1.1 离港航班时刻稳定性评估指标

根据机场群离港航班时刻稳定性的定义,本文通过对机场群离港航班时刻质量进行评估,来有效反映其稳定性,以航班延误为抓手,选取离港航班延误率、离港航班平均延误时间、航线延误率、航线平均延误时间、机场延误率和机场平均延误时间这 6 个指标来确定离港航班时刻稳定性的质量。高质量的离港航班时刻安排可以使稳定性提高,而低质量的离港航班时刻安排可能使系统失稳,从而导致航班延误的发生。

1) 离港航班延误率:单位时间内机场离港发生延误的航班占全部航班数的比例,能够反映机场离港运行延误情况。其计算式为

$$d_{\text{Delay}} = \frac{D_{\text{Delay}}}{D} \tag{1}$$

式中: D_{Delay} 为单位时间内发生延误的离场航班架次; D 为单位时间内离场航班总架次。

2) 离港航班平均延误时间:单位时间内离港航班延误总时长与离港航班总架次的比值,能够反映机场离港运行稳定情况。其计算式为

$$\text{Delay}_{\text{ad}} = \frac{1}{D} \sum_{i=0}^D (T_{\text{iact}} - T_{\text{iest}}) \tag{2}$$

式中: T_{iact} 为第*i*架离港延误航班实际从机场起飞的时刻; T_{iest} 为第*i*架进港延误航班计划从机场起飞的时刻。

3) 航线延误率:单位时间内机场某一航线进离场发生延误的航班占全部航班数的比例,能够反映机场该航线航班运行延误情况。其计算公式为

$$r_{\text{Delay}} = \frac{R_{\text{Delay}}}{R} \tag{3}$$

式中: R_{Delay} 为单位时间内航线发生延误的航班架次; R 为单位时间内航线航班总架次。

4) 航线平均延误时间:单位时间内某一航线航班延误总时长与航班总架次的比值,能够反映该航线运行稳定情况。其计算式为

$$\text{Delay}_{\text{ar}} = \frac{1}{R} \sum_{i=0}^R (T_{\text{iact}} - T_{\text{iest}})$$

(4)

5) 机场延误率: 单位时间内机场发生延误的航班占全部航班数的比例, 能够全面反映机场所有航线运行延误情况。其计算式为

$$u_{\text{Delay}} = \frac{N_{\text{Delay}}}{N}$$

(5)

式中: N_{Delay} 为单位时间内发生延误的航班架次; N 为单位时间内总航班架次。

6) 机场平均延误时间: 单位时间内进港航班延误时长和离场航班延误时长之和, 与总航班架次的比值, 能够反映机场所有航线总体运行稳定情况。其计算式为

$$\text{Delay}_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^R (T_{\text{iact}} - T_{\text{iest}})$$

(6)

采用空域和机场仿真建模软件 TAAM 建立机场群航班运行仿真模型, 在 TAAM 软件中设置流量管理和过点间隔 2 种方式, 解决仿真过程中的飞机冲突问题。建立的仿真模型数据包括基础数据和航班计划数据。基础数据用于搭建静态模型; 航班计划数据用于搭建动态模型。完成静态和动态模型构建后, 根据历史数据和统计结果, 对比扇区流量、延误等运行指标验证仿真输出结果, 以此得到离港航班时刻稳定性评估指标的具体评估数值。

1.2 稳定性质量评估方法

选取逼近理想解排序 (a technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 法对离港航班时刻质量进行综合评估。但传统 TOPSIS 法在机场群航班时刻质量评估问题的应用上存在很大不足, 评估得到的航班时刻质量相对贴进度数值较为极端, 因此, 借鉴灰色关联分析法思想^[14-15], 将灰色关联系数处理方法引入到 TOPSIS 法中, 对传统 TOPSIS 法的无量纲决策矩阵元素进行灰色关联系数处理, 从而得到新的改进的无量纲灰色关联系数决策矩阵, 形成改进的 TOPSIS 法。具体评估步骤如下:

步骤 1 建立初始决策矩阵。

根据由 TAAM 仿真输出的各方案指标评估结果, 得到对应的航班时刻质量评估指标, 建立初始决策矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

(7)

式中: m 为方案 (机场) 数量; n 为航班时刻质量评估指标个数; x_{ij} ($i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$) 为第 i 个方

案对应的第 j 个航班时刻质量评估指标值。

步骤 2 无量纲化决策矩阵。

对初始决策矩阵标准化处理, 消除指标量纲不同影响, 建立标准化矩阵 $V = [v_{ij}]_{m \times n}$ 。

越大越优型指标为

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

(8)

越小越优型指标计算公式为

$$v_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

(9)

式中: v_{ij} 为 x_{ij} 标准化后的值; x_j 为第 j 个航班时刻所有方案的质量评估指标值; $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 分别为 x_j 的最大和最小值。

步骤 3 加权决策矩阵计算。

各指标权重 W 与无量纲矩阵 V 相乘, 得到加权决策矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, $r_{ij} = w_j v_{ij}$ ($i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$), w_j 为各指标的权重值。该权重采用层次分析法确定。

步骤 4 正负理想解计算:

$$S_j^+ = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\}, j = 1, 2, \cdots, n & v_{ij} \text{ 为越大越优型指标} \\ \min_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\}, j = 1, 2, \cdots, n & v_{ij} \text{ 为越小越优型指标} \end{cases}$$

(10)

$$S_j^- = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\}, j = 1, 2, \cdots, n & v_{ij} \text{ 为越大越优型指标} \\ \max_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\}, j = 1, 2, \cdots, n & v_{ij} \text{ 为越小越优型指标} \end{cases}$$

(11)

步骤 5 各方案与正负理想解间的欧氏距离计算:

$$Sd_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^+ - r_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \cdots, m$$

(12)

$$Sd_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^- - r_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \cdots, m$$

(13)

步骤 6 各方案与正理想解的相对贴进度计算。

各评估方案与正理想解的相对贴进度 η_i 为

$$\eta_i = \frac{Sd_i^-}{Sd_i^+ + Sd_i^-} \quad i = 1, 2, \cdots, m$$

(14)

最终结果相对贴进度越大, 航班时刻越接近正理想解, 航班时刻越稳定。因此, 通过比较航班时刻的相对贴进度就可以评估离港航班时刻稳定性, 从而判断该优化结果是否有效。

在步骤 3 加权决策矩阵计算中, 本文通过层次分析法对 6 个评估指标进行赋权, 层次分析法的航班时刻稳定性评估层次递进结构如图 1 所示。

通过层次分析法标准过程, 建立准则层和指标层的判断矩阵, 对机场群离港航班时刻质量评估层

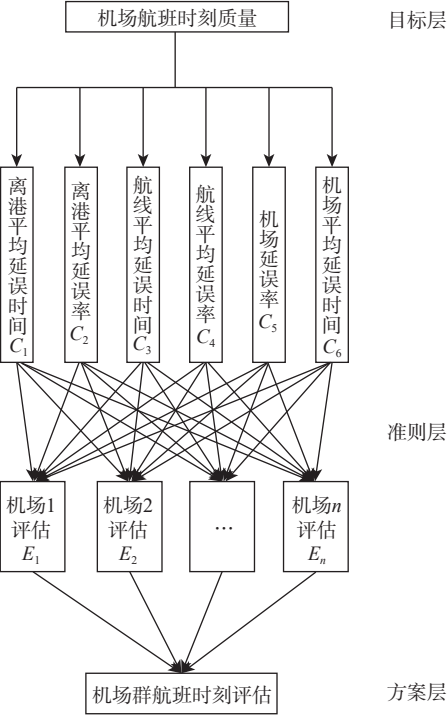


图1 机场航班时刻稳定性评估层次递进结构

Fig. 1 Hierarchical structure of airport flight schedule stability evaluation

次结构中各层次的判断矩阵进行计算检验,并计算权重,最终得到机场离港航班时刻质量评估的准则层要素(离港平均延误时间 C_1 、离港平均延误率 C_2 、航线平均延误时间 C_3 、航线平均延误率 C_4 、机场延误率 C_5 和机场平均延误时间 C_6)的权重向量为

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6] = [0.283 \ 0.237 \ 0.097 \ 0.080 \ 0.167 \ 0.136]$$

2 机场群离港航班时刻优化模型

本文对航班时刻优化不是集中在对某一个机场时刻的优化配置,而是考虑多个机场的综合协调和平衡:机场群内包含多个机场,每个机场有1条或多条跑道,离港航班需要在机场群内确定的跑道上起降,同时又要共享相关的航线资源。机场群内多机场间宏观离港运行示意图,如图2所示, p_i 为机场群离港航线所需经过的各移交点。

针对该优化模型,通过对其分析,做出如下假设:

- 1) 机场群内各机场都采用进离场航线分离模式运行,进离场航班之间互不影响,则可单独考虑机场离港航线移交点的离港航班流量限制。
- 2) 机场群内各机场的每一个航班对应的离港航线移交点是确定的。
- 3) 点的飞行时间是确定的,进而根据初始离港航班时刻表到达移交点的预订时刻也是已知确定的。
- 4) 机场群内各机场所有离港航班时刻调整量

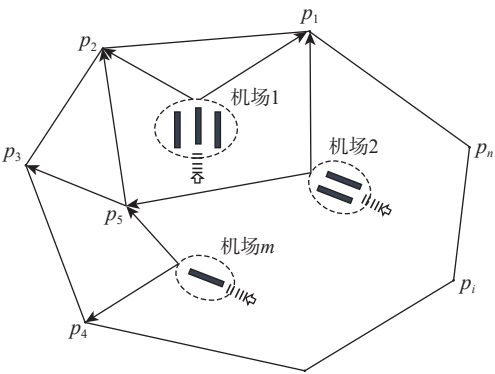


图2 机场群内多机场间宏观离港运行示意图

Fig. 2 Macro departure operation diagram of multiple airports in airport group

均有一个可允许的最大调整量,而且该调整量是相同的。

5) 机场群内各机场预定的离港航班时刻信息是已知的。

6) 相对各航班预定的离港航班时刻,优化后的航班离场时刻不得早于航班时刻表中预定的时刻。

7) 机场群内各机场容量以及各航线移交点的容量是已知的。

2.1 集合及变量说明

在离港航班时刻优化建模过程中,为了使问题描述简洁,需要用到的模型参数说明如表1所示。

2.2 优化模型建立

为了直观形象地辅助说明机场群离港航班时刻优化问题数学模型的建立过程,机场群内各航班向各个特定时段或时刻(一般为5 min)的指派示意图,如图3所示。

图3中左侧一列代表机场群内所有航班形成的航班序列,中间一列表示时间范围内所有的离港航班时刻(段)序列,最右侧一列表示针对每个航班时刻的机场、航线移交点或交叉点对应的时刻容量集合。这样,机场群离港航班时刻优化问题实际上就是将每个航班指派到容量受限的各个时刻中,使得总延误“成本”达到最小,保证航线稳定性的实现和优化。

2.2.1 决策变量

根据所考虑的问题及有关假设,可设定离港航班时刻优化问题的决策变量为

$$x'_{mf} = \begin{cases} 1 & \text{机场}m\text{的航班}f\text{在时刻}t\text{离场} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

2.2.2 目标函数

问题的目标函数可以选取机场群内各机场所有航班延误的总延误“成本”,每个航班的延误成本与其延误时段相关,一般情况下如果延误时段越

表 1 模型参数说明

Table 1 Model parameter description

参数	说明
M	机场群内所有机场集合
P	机场群内所有机场离港航线移交点集合
T	所考虑时间范围内离港航班时刻集合, 其中每个时刻并不是一个具体的时刻, 而是指定机场为所有航班预留的一个特定时段, 一般以 5 min 为最小时间单元
$F = \{f_m m \in M\}$	机场群内所有机场起飞离港航班集合, f_m 为机场 m 的起飞离港航班集合
$\tau_{\max}$	可接受的航班延误最大时刻调整量
$C_{mf}(\ast)$	预先设定的机场 m 离场航班 f 关于延误时段数的不减函数
$D_m(t)(\forall m \in M, \forall t \in T)$	给定的机场 m 在时刻 t 的离场容量
$D_p(t)(\forall p \in P, \forall t \in T)$	给定的航线移交点 p 在时刻 t 的离场容量
$x_{mf}^t(\forall m \in M, \forall f \in F_m, \forall t \in T)$	航班时刻优化问题的决策变量
$\alpha_{mf}^p(\forall m \in M, \forall f \in F_m, \forall p \in P)$	根据已知航班信息确定的、过移交点 p 的 0-1 型判断系数

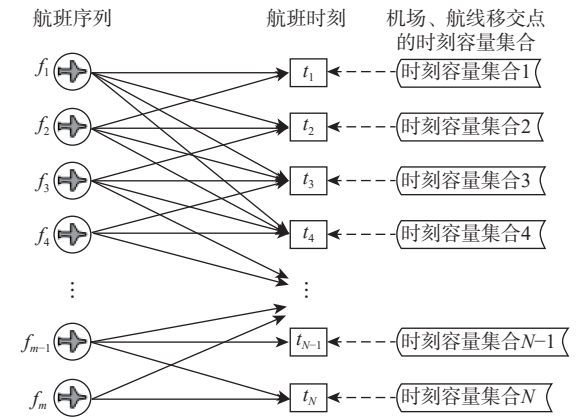


图 3 机场群内各航班向各个时刻的指派示意图

Fig. 3 Schematic diagram of assignment of flights within airport group to various moments

多其延误“成本”将越大, 由此可设定每个航班的延误“成本”函数是其延误时段的不减函数。

如果机场 m 的航班 f 从预订时刻 t_e 延误到时刻 t 起飞, 则其延误时段为 $t - t_e$, 设定的延误“成本”函数 $C_{mf}(t - t_e)$ 为关于延误时段的一个不减函数, 当该函数为比例系数为 1 的线性函数时, 该航班的成本即为其延误时段, 总延误成本就是所有机场所有航班的总延误时段。

问题的目标函数可表示为

$$\text{Min } z = \sum_{m \in M} \sum_{f_m \in F_m} \sum_{t \in T} C_{mf}(t - t_e) x_{mf}^t \quad (16)$$

该目标函数为机场群内各机场所有航班的总延误“成本”, 与各航班延误时段直接相关, 因而该目标函数可以反映机场群内航班的质量情况。

2.2.3 约束条件

问题的主要约束条件及公式表达和约束含义如下:

1) 唯一性约束: 表示每个航班在所考虑时间范围内只能执行唯一一次起飞离场任务。其表达

式为

$$\sum_{t \in T} x_{mf}^t = 1 \quad \forall m \in M, \forall f \in F \quad (17)$$

2) 时段最大调整幅度约束: 表示每个航班不能提前起飞离场而只能延误, 且延误时段数有最大的延误时段数限制。其表达式为

$$0 \leq t - t_e \leq \tau_{\max} \quad (18)$$

3) 起飞离场容量约束: 表示在任意时段给定机场的起飞离场航班数不能超过其预先设定的离场容量。其表达式为

$$\sum_{f \in F_m} x_{mf}^t \leq D_m(t) \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (19)$$

4) 航线移交点的离场容量约束: 表示在任意时段机场群内所有机场起飞的、通过航线移交点 p 的所有离场航班数不能超过其预先设定的离场容量。其表达式为

$$\sum_{m \in M} \sum_{f_m \in F_m} \alpha_{mf}^p x_{mf}^t \leq D_p(t) \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (20)$$

式中: 航线移交点的离场容量约束中的 α_{mf}^p 为根据所有航班信息确定的一个已知参数, 可表示为

$$\alpha_{mf}^p = \begin{cases} 1 & \text{机场 } m \text{ 的航班 } f \text{ 经航线移交点 } p \text{ 离场} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

3 算法设计

针对机场群离港航班时刻实际优化问题的规模, 不仅需要涉及多个机场的成百上千个航班, 而且还要考虑多个机场及其共享的空域离港航线的容量限制, 同时需要考虑长时间周期范围内的航班时刻安排, 机场群离港航班时刻优化模型的规模将非常可观, 因此, 本文采用粒子群 (particle swarm

optimization, PSO)算法对建立的航班时刻优化模型进行求解。PSO 算法操作简单、收敛速度快,适用于大规模数据优化;但 PSO 算法存在早熟收敛、维数灾难、易于陷入局部极值等问题,所以对标准 PSO 算法进行改进,提出了惯性权重线性递减的粒子群 (linear decareasing-particle swarm optimization, LD-PSO)算法对所建模型进行求解,平衡了全局和局部搜索能力,更好地提高了算法寻优性能^[16]。

3.1 算法流程

- LD-PSO 算法的流程如图 4 所示。
- 步骤 1** 以离港航班起飞时刻作为粒子,设置迭代次数,初始惯性权重 ω ,初始化粒子群 q ,初始化粒子位置 $x_{i,j}$ 和速度 $V_{i,j}$ 。
- 步骤 2** 更新速度和位置,并根据离港容量约束 $D_m(t)$ 和时刻最大偏移约束 $\tau_{\max}$,生成新的航班离

- 港时刻,得到新的离港航班时刻表。
- 步骤 3** 根据延误时段数目的线性函数,确定航班延误成本函数 $C_{mf}(\ast)$,利用新的航班时刻表,计算总延误成本,计算每个粒子适应度值。
- 步骤 4** 对每个粒子,比较其适应度值和其经历过的最好位置的适应度值 $qbest$,如果更好,更新 $qbest$;储存个体极值 $qbest$ 和群体极值 $gbest$ 。对每个粒子,比较其适应度值和群体所经历最好位置的适应度值 $gbest$,如果更好,更新 $gbest$ 。
- 步骤 5** 达到迭代次数停止,输出最小总延误成本,单位时间段起飞架次以及新的航班时刻表,否则返回步骤 2。

3.2 算法实现

算法中,不同粒子在解空间中的位置表示离港航班优化问题的一个可行解。由于求解是对离港时刻的选择,所以采用二进制编码表示其 0-1 抉择,1 表示选择,0 表示不被选择。

搜索过程中,粒子的位置首先要满足支配限制,即粒子对应的节点集 F_m 是属于总集 F 的。在此基础上迭代搜索,使适应度函数值更优。根据优化目标,将总延误成本最小作为 PSO 算法的适应度函数,如式 (10) 所示。

根据计算得到的粒子在当前位置的适应度函数值,与该粒子历史最优的适应度进行比较,得到个体当前的最优位置 $qbest$;待个体最优位置更新完成后,根据所有粒子的适应度值计算粒子种群当代整体的最优位置 $gbest$ 。

- 粒子群的速度为
- $$V_{i,j} = \omega V_{i,j} + c_1 r_1 (qbest_{i,j} - x_{i,j}) + c_2 r_2 (gbest_{i,j} - x_{i,j}) \tag{22}$$
- 式中: $V_{i,j}$ 为粒子速度; ω 为初始惯性权重,为一个定值; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数; $x_{i,j}$ 为粒子当前位置; $qbest_{i,j}$ 为粒子 i 目前的个体最优位置; $gbest_{i,j}$ 为当代种群全局的最优位置。基于粒子的速度,其位置和惯性权重更新为
- $$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j} + V_{i,j}(k+1) \tag{23}$$
- $$\omega = 1.2 - \frac{k}{k_{\max}} \tag{24}$$
- 式中: k 为迭代次数。

4 实例分析

本文以京津冀机场群为例,选择 2019 年 6 月 9 日的飞行计划作为实例数据,从中筛选出当日 8 时至 21 时繁忙时段 702 个离场航班时刻为研究对象,其中北京首都国际机场共 529 个航班,天津滨海国际机场共 120 个航班,石家庄正定国际机

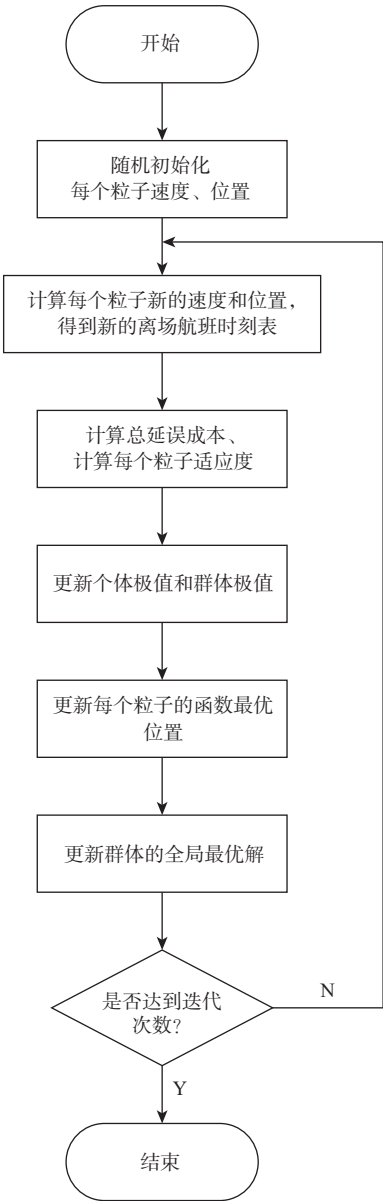


图 4 LD-PSO 算法流程

Fig. 4 Flow chart of LD-PSO algorithm

共 53 个航班。以每 5 min 为一个时间间隔, 其原始离港航班时刻数据(局部)如表 2 所示。

表 2 京津冀机场群各时刻原始安排航班数(局部)
Table 2 Original scheduled flights of Beijing-Tianjin-Hebei airport group at each time (partial)

序号	航班号	起飞机场	起飞时刻	到达时刻	到达机场
001	3U8896	ZBAA	08:00	11:10	ZUUU
002	CA1431	ZBAA	08:00	10:55	ZUCK
003	MU5636	ZBAA	08:00	10:55	ZSSS
004	3U8838	ZBAA	08:00	11:00	ZGSZ
005	CZ6161	ZBAA	08:00	11:10	ZUUU
006	HU7382	ZBAA	08:00	11:50	ZJHK
007	MU5102	ZBAA	08:00	10:15	ZSSS
008	MU2467	ZBAA	08:00	10:00	ZSSH
009	MU2104	ZBAA	08:00	10:00	ZPPP
010	CA1371	ZBTJ	08:00	11:20	ZGSZ
011	GS7859	ZBTJ	08:00	10:10	ZHHH
012	GS7881	ZBTJ	08:00	10:05	ZSPD
013	NS3219	ZBSJ	08:00	10:00	ZSSS
014	NS3221	ZBSJ	08:00	10:30	ZUCK
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
699	CA1329	ZBAA	21:00	00:20	ZGGG
700	CA4118	ZBAA	21:00	00:10	ZUUU
701	CF9031	ZBAA	21:00	23:25	ZSPD
702	GS6509	ZBTJ	21:00	00:50	ZJSY

4.1 机场群离港航班时刻优化

根据数据选择的时间段, 划设 13×12=156 个航班时刻, 同时考虑到每个航班最大可接受延误时段数是 6 个时段(最多延误 30 min), 并假设虚增一个时段以接纳前 162 个时段未能被安排的所有航班, 总航班时刻数共有 156+6+1=163 个时段。航班时刻序号和具体航班时刻的对应关系如表 3 所示。

数学模型中涉及的变量和约束有: 当日的 702 个离港航班, 及每个航班可安排在包括预定时

表 3 时刻序号和航班时刻的对应关系
Table 3 Correspondence between time serial numbers and flight schedule

时刻序号	航班时刻
时刻1	08:00
时刻2	08:05
⋮	⋮
时刻 <i>j</i>	XX:XX
⋮	⋮
时刻157	21:00
时刻158	21:05
⋮	⋮
时刻163	21:30

段在内的其后 7 个时段, 所以决策变量为 702×7=4 914 个; 702 个离港航班形成了 702 个唯一性约束; 起飞离场容量约束设定为北京首都国际机场容量值 5, 天津滨海国际机场、石家庄正定国际机场均为 2, 共有 163 个容量约束条件。

航班延误“成本”参数为延误时段数目的不减函数, 为简单起见设定为延误时段数的线性函数, 比例系数为 5, 这样航班优化配置到时刻离场的延误“成本”系数设置为

$$c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{航班}i\text{延误}0\text{个时段} \\ 5 & \text{航班}i\text{延误}1\text{个时段} \\ 10 & \text{航班}i\text{延误}2\text{个时段} \\ 15 & \text{航班}i\text{延误}3\text{个时段} \\ 20 & \text{航班}i\text{延误}4\text{个时段} \\ 25 & \text{航班}i\text{延误}5\text{个时段} \\ 30 & \text{航班}i\text{延误}6\text{个时段} \\ M & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中: M 为一个极大正数, 可以在求解过程中迫使对应的决策变量取值为 0, 即满足了最大可接受延误时段的要求, 也排除了不符合实际的情况。至此, 数学模型建立完毕。

对该模型使用 LD-PSO 算法求解, 多次实验后可得到相应的参数设置:

1) 种群大小: 在粒子群算法中, 种群规模太小, 计算结果易陷入局部最优解; 种群规模过大, 收敛速度过慢, 计算时间大幅提高。本文设定种群大小 swarmsize=100。

2) 惯性权重因子: 由于没有区分航班优先级, 每一架次航班的权重都是相同的, 统一取值 0.5。

3) 迭代次数: PSO 算法收敛情况如图 5 所示, 在 300 多次迭代时粒子群已收敛。迭代次数自 400 次开始, 每增加 100 次对应的计算时间和结果如表 4 所示, 迭代次数过大对优化结果提高极有限, 而次数太小优化结果不够精准, 故最终迭代次数定为 500 次。

针对所要考虑的 114 426 个变量、865 个约束的离港航班时刻优化算例问题。基于离港航班时刻优化结果, 每个时刻在航班时刻优化前、后安排的航班数局部比较如表 5 所示, 该结果求得目标函数最小总延误成本为 1 689。

优化前后每个离港航班时刻安排的航班数对比可直观地从图 6(a)和 6(b)的比较中看出来, 由于优化数据较多, 因此选取了部分数据来制表, 即便如此也可看出明显的优化效果。

从图 6 的对比图可直观看出, 优化前的航班时刻安排的离港航班数十分不均衡, 经常有局部时刻离场航班数超过时刻容量限制的现象。而且 3 个

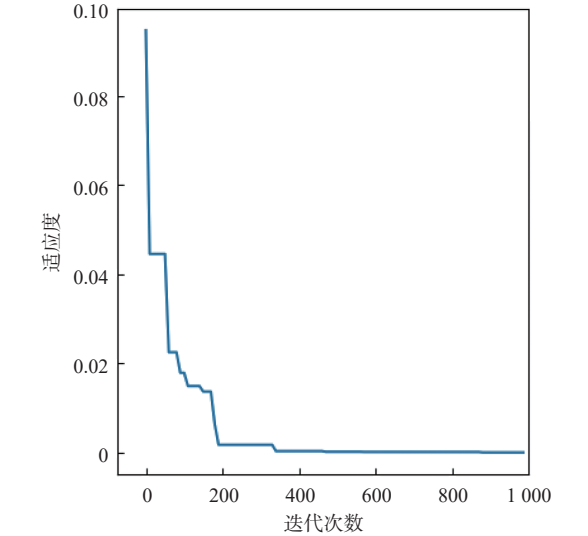


图 5 PSO 算法收敛情况
Fig. 5 Convergence of PSO algorithm

表 4 迭代次数及其运行时间 Table 4 Number of iterations and their running time		
迭代次数	计算时间/s	总延误成本
400	297	1 707
500	363	1 689
600	425	1 754
700	484	1 718
800	562	1 724
900	625	1 723
1 000	737	1 690

机场的离港航班高峰期大致相同,均为 8 时左右,14 时左右和 20 时左右。3 个机场的航班时刻安排了相同时段的离港高峰,这极易导致航班延误及飞行冲突现象的发生,还降低了机场群空域的使用效率。而且同样可以看出,离港高峰后通常都是一段离港低谷期,原因同样是高峰时段的航班冲突直接导致后续航班计划量的骤减。航班时刻安排波动较大,航班时刻的稳定性明显不高,在时间上分布不均,3 个机场的航班时刻安排同样缺乏系统性和整体性。

4.2 优化结果评估

将优化前后的机场群离港航班时刻用 TAAM 模型进行仿真运行,并导出繁忙时段(08:00—21:00)航班延误数据,计算航班时刻稳定性指标数据。将优化前后的离港航班时刻稳定性指标数据相比较,分析航班时刻优化后稳定性指标的提高程度。优化前后机场群航班时刻稳定性指标数据如表 6 所示。

由表 6 可知,北京首都国际机场优化后的离港航班平均延误时间降低较为明显,降低了 18.8 s,平均延误率降低了 9.9%;繁忙航线平均延误时间降低

表 5 每个航班优化前后时刻对比 Table 5 Comparison before and after each flight optimization						
机场	航班序号	航班号	起飞时刻		延误时段数/个	延误时长/min
			优化前	优化后		
ZBAA	001	3U8896	08:00	08:05	1	5
	002	CA1431	08:00	08:00	0	0
	003	MU5636	08:00	08:00	0	0
	004	3U8838	08:00	08:00	0	0
	005	CZ6161	08:00	08:10	2	10
	006	HU7382	08:00	08:05	1	5
	007	MU5102	08:00	08:00	0	0
	008	MU2467	08:00	08:10	2	10
	009	MU2104	08:00	08:00	0	0
ZBTJ	010	CA1371	08:00	08:00	0	0
	011	GS7859	08:00	08:00	0	0
	012	GS7881	08:00	08:05	1	5
ZBSJ	013	NS3219	08:00	08:00	0	0
	014	NS3221	08:00	08:00	0	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
ZBAA	699	CA1329	21:00	21:00	0	0
	700	CA4118	21:00	21:05	1	5
	701	CF9031	21:00	21:00	0	0
ZBTJ	702	GS6509	21:00	21:00	0	0

了 12.7 s,平均延误率降低了 3.0%。因此,对京津冀机场群离港航班时刻的优化,在一定程度上降低了北京首都国际机场离港航班和连接的繁忙航线的延误时间和延误率;机场总体延误率和平均延误时间也有明显降低。所以北京首都国际机场离港航班时刻稳定性得到明显增加和提高。

观察石家庄正定国际机场和天津滨海国际机场优化前后的离港航班平均延误时间和延误率,繁忙航线平均延误时间和延误率,以及机场延误率和平均延误时间,京津冀机场群离港航班时刻的优化,在一定程度上降低了石家庄正定国际机场和天津滨海国际机场离港航班,连接的繁忙航线的延误时间和延误率,以及机场延误率和平均延误时间,也增加和提高了这 2 个机场离港航班时刻稳定性,3 个机场之间通过航线的影响存在延误耦合情况。石家庄正定国际机场离港航班平均延误时间和延误率,以及繁忙航线平均延误时间和延误率改善程度,均好于天津滨海国际机场。

因此,京津冀机场群离港航班时刻优化,能够在一定程度上降低机场群整体延误水平,增加机场群的离港航班时刻稳定性。

接着评估京津冀机场群离港航班时刻质量,分析离港航班时刻优化后机场群航班时刻质量相对贴近度的提高程度。通过改进的 TOPSIS 评估法求

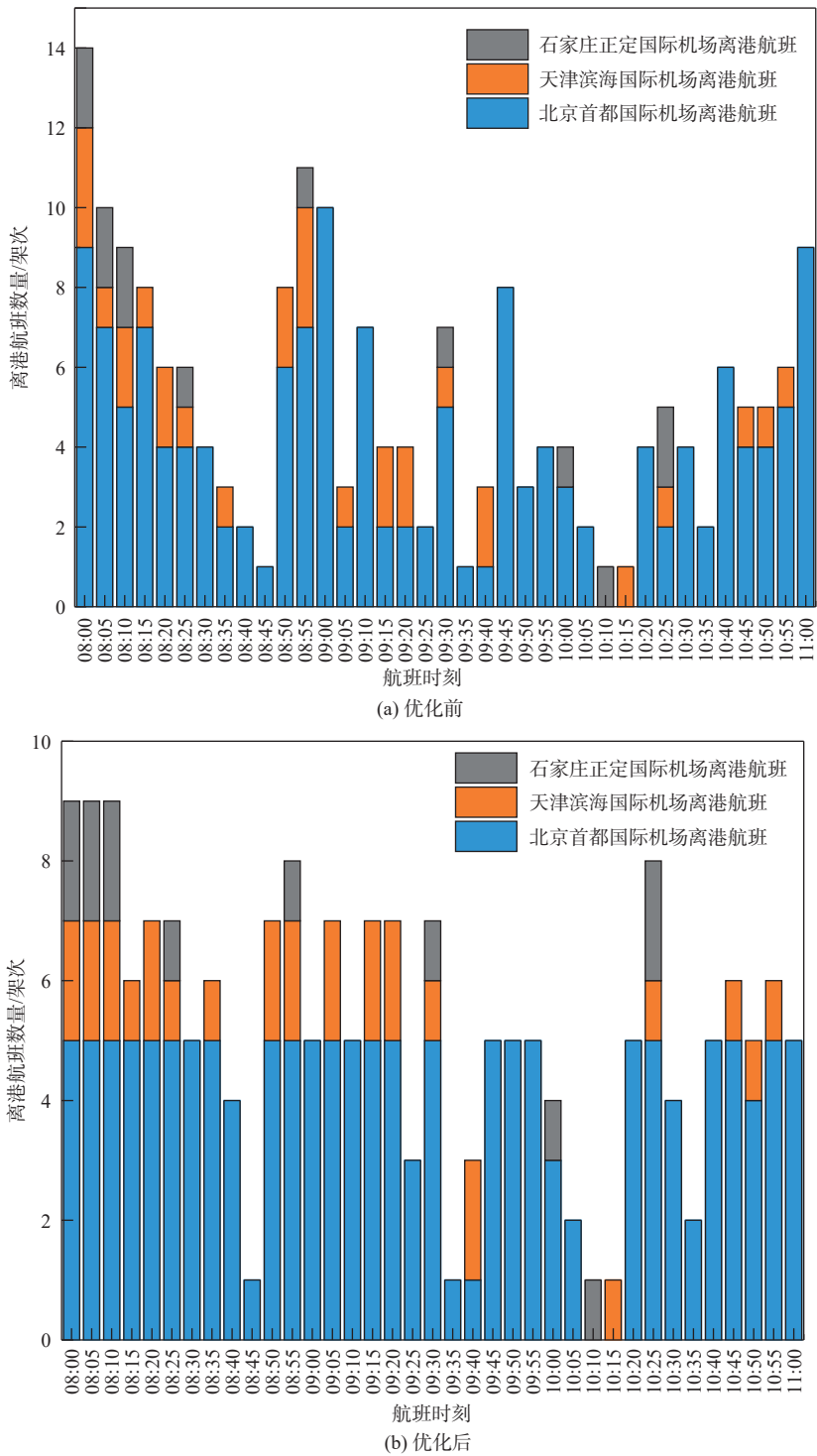


图 6 优化前后每个航班时刻安排的航班数对比

Fig. 6 Comparison of number of flights scheduled for each flight before and after optimization

出优化前后航班时刻质量相对贴近度数据如表 7 所示。

从表 7 可以发现,京津冀机场群离港航班时刻优化后,相较于优化前,北京首都国际机场航班时刻质量相对贴近度由 0.334 提高到 0.363,在一定程度上提高了北京首都国际机场航班时刻质量相对贴近度;石家庄正定国际机场航班时刻质量相对贴近度略有提高,对石家庄正定国际机场影响不大,

其相对贴近度仍然是最高的;天津滨海国际机场航班时刻质量相对贴近度同样略有提高,对天津滨海国际机场影响较小,仍然是位居第 2。

因此,京津冀机场群离港航班时刻优化,能够在一定程度上提高北京首都国际机场航班时刻质量相对贴近度;对石家庄正定国际机场、天津滨海国际机场航班时刻质量相对贴近度影响较小。总体上,对于京津冀机场群是有较明显的优化效果。

表 6 优化前后机场群航班时刻稳定性指标数据

Table 6 Flight schedule stability index data of airport group before and after optimization							
机场		离港航班平均 延误时间/s	离港航班平均 延误率/%	航线平均 延误时间/s	航线平均 延误率/%	机场平均 延误时间/s	机场 延误率/%
ZBAA	优化前	201.0	35.0	87.0	19.8	174.0	20.2
	优化后	182.2	25.1	81.4	17.6	161.3	17.2
	偏差	18.8	9.9	5.6	2.2	12.7	3.0
ZBSJ	优化前	56.0	8.2	35.0	4.0	84.0	9.8
	优化后	53.1	7.9	32.9	3.9	81.2	9.2
	偏差	2.9	0.3	2.1	0.1	2.8	0.6
ZBTJ	优化前	73.0	16.9	50.0	8.3	99.0	11.5
	优化后	66.2	15.1	45.3	7.1	93.1	10.1
	偏差	6.8	1.8	4.7	1.2	5.9	1.4

表 7 优化前后航班时刻质量相对贴近度

Table 7 Relative closeness of departure flight schedule quality before and after optimization		
机场	优化前	优化后
ZBAA	0.334	0.363
ZBSJ	0.923	0.928
ZBTJ	0.775	0.801

综合离港航班时刻稳定性评估指标和离港航班时刻质量的比较,可以看出,该离港航班时刻优化模型和优化算法,能够较好地 对离港航班时刻进行优化,从而促使机场群的运行效率更高效,总体效益更好。

5 结 论

1) 本文用 6 个评估指标描述航班时刻稳定性,并给出了用 TOPSIS 法对航班时刻稳定性给出质量评价的计算过程。京津冀机场群的仿真实验说明对机场群航班时刻稳定性评估具有一定的参考价值。

2) 本文构建的机场群离港航班时刻优化模型考虑多个机场的综合协调和平衡,提出的 4 组约束条件基本上能满足机场群离港航班实际优化时所需考虑情况,优化目标为总延误成本最小可减少离港航班总消耗成本,具有缓解场面拥堵和降低运行成本的优势。

3) 本文选用了优化粒子群算法,在简化计算的同时,提高了计算精度。京津冀机场群仿真实验结果表明,本文模型和算法能够用以提高航班时刻表的效率,减少航班的调整,且效果较为明显。

参考文献 (References)

[1] BRUECKNER J K, CZERNY A I, GAGGERO A A. Airline schedule buffers and flight delays: A discrete model[J]. Economics of Transportation, 2021, 26-27: 100218.

[2] 闵捷, 高强, 朱劭辉. 航班计划对延误波及变化的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(5): 81-88.
MIN J, GAO Q, ZHU M H. Influence analysis of flight schedule on delay propagation variation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(5): 81-88(in Chinese).

[3] REN Y M, ZENG W L, LI J, et al. A single airport time slot allocation method considering scheduling delay and operational delay[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Modeling, Simulation and Analysis.[S.l.]: [s.n.], 2018: 270-275.

[4] 胡明华, 裔田园, 任禹蒙. 基于改进匈牙利算法的机场航班时刻优化研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7): 2040-2043.
HU M H, YI T Y, REN Y M. Optimization of airport slot based on improved Hungarian algorithm[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(7): 2040-2043(in Chinese).

[5] 中国民用航空局. 民航航班时刻管理办法 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2018: 18-19.
Civil Aviation Administration of China. Measures for the administration of civil aviation flight schedules[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China , 2018: 18-19(in Chinese).

[6] CLARKE J P B, REN L L, MCCLAIN E, et al. Evaluating concepts for operations in metroplex terminal area airspace[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(3): 758-773.

[7] GENG X, HU M H. Collaboration optimization of flight schedule in Beijing-Tianjin-Hebei airport group[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(6): 928-935.

[8] RAHMALIA D, CHANDRA N E, ROHMANIAH S A, et al. Goal programming on optimal pairings selection from flight schedule using Bat algorithm[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020, 1490(1): 012036.

[9] 郑丽君, 胡荣, 张军峰, 等. 高峰时段下离港航空器绿色滑行策略设计与评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2320-2326.
ZHENG L J, HU R, ZHANG J F, et al. Design and evaluation of green taxiing strategy for departure aircraft during peak hours[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(11): 2320-2326(in Chinese).

[10] 江灏, 刘继新, 董欣欣. 基于交通状态的离场航班动态协同排序方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(10): 2048-2060.
JIANG H, LIU J X, DONG X F. Dynamic collaborative sequencing for departure flights based on traffic state[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(10): 2048-

2060(in Chinese).

[11] 王湛, 吴艺. 基于FS-MOPSO的多机场终端区协同航班调度策略[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 179-185.
WANG Z, WU Y. Collaborative aircrafts scheduling strategy in metroplex terminal area based on FS-MOPSO[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 179-185(in Chinese).

[12] 杨新涅, 裴一麟. 基于双层规划的航空公司航线航班优化研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(3): 1-7.
YANG X S, PEI Y L. Study on route network and flight schedule based on Bi-level planning model[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(3): 1-7(in Chinese).

[13] 王佳璇. 航路航线调整下的京津机场航班时刻设计研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018: 16-18.
WANG J X. Study on the design of flight route adjustment on the flight time of Beijing Capital Airport and Tianjin Binhai Airport[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018: 16-18(in Chinese).

[14] 杨建辉, 黄涛. 基于灰色关联分析的犹豫模糊多属性决策研究[J]. 河南科学, 2015, 33(9): 1493-1499.
YANG J H, HUANG T. Method for hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on grey correlation analysis[J]. Henan Science, 2015, 33(9): 1493-1499(in Chinese).

[15] 王新华, 李堂军, 丁黎黎. 复杂大系统评价理论与技术[M]. 济南: 山东大学出版社, 2010: 163-168.
WANG X H, LI T J, DING L L. Theory and technology of complex large-scale system evaluation[M]. Jinan: Shandong University Press, 2010: 163-168 (in Chinese).

[16] 纪君柔. 新增机场下终端区协同放行策略研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020: 12-14.
JI J R. Research on cooperative release strategy of terminal area under new airport[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020: 12-14 (in Chinese).

Evaluation and optimization of departure flight schedule stability of airport group

WANG Xinglong^{1,*}, XU Yanfeng¹, XUE Yichen²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Civil Aviation Administration of China North China Regional Administration, Beijing 100621, China)

Abstract: As China’s aviation traffic keeps growing, issues including dwindling flight schedule resources and major flight delays in airport clusters are rapidly becoming more and more prevalent. It is necessary to thoroughly study flight schedule optimization in airport groups. On the basis of defining the concept of departure flight schedule stability of airport groups, this paper puts forward six evaluation indexes of departure flight schedule stability of airport groups, such as departure flight delay rate and average delay time, and evaluates the stability quality by using improved TOPSIS (a technique for order preference by similarity to ideal solution). Following the establishment of the airport group’s departure flight schedule optimization model and the selection of an improved particle swarm optimization algorithm to optimise the model, the flight plans before and after optimization are contrasted using the stability quality as the benchmark. Finally, taking Beijing-Tianjin-Hebei airport group as an example, the simulation results show that the proposed optimization model and algorithm can reduce the average delay time of departure flights at Beijing airport by 18.8 s and the average delay rate by 9.9%; The average delay time of busy routes is reduced by 12.7 s, and the average delay rate is reduced by 3.0%, which effectively reduces the overall delay level of Beijing-Tianjin-Hebei airport group and improves the stability of departure flight schedule of the airport group.

Keywords: airport group; stability assessment; TOPSIS; departure flight schedule optimization; particle swarm optimization algorithm