

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.014

基于空中交通运行水平的航季划分方法

谢 华¹, 王媚乙², 杨 磊², 孙 亚²

(1. 南京航空航天大学通飞学院, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

摘要: 为了优化航班时刻资源的配置, 提高民航航班正常性, 本文针对大范围空中交通运行水平下的航季划分方法进行了研究。利用动态时间规整算法分析空中交通运行效率指标的月度时间序列相似性, 建立航季划分多目标优化模型, 运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法进行划分求解, 并采用带熵值的 TOPSIS 法对帕累托解进行评价, 给出了各划分角度下最优航季划分结果, 并分析了不同空中交通运行水平下的航季划分结果及权重设定对结果的影响。结果表明, 在综合考虑空中交通运行水平评价指标影响的情况下, 随着权值的变动, 各划分角度下最优航季划分结果稳定。本文所提出方法不仅适用于大范围空域环境的航季划分, 同样适用于探索单个机场运行的航季模式, 为民航局和机场科学制定航班计划提供依据。

关键词: 交通运输规划与管理; 航班延误; 动态时间规整; 航季划分

中图分类号: V355

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)05-0878-10

Method of Flight Season Division Based on Operation Level of Air Traffic

XIE Hua¹, WANG Meiyi², YANG Lei², SUN Ya²

(1. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to optimize the allocation of flight slot resources and improve the regularity of civil aviation flights, the method of season division under the level of large-scale air traffic operation is studied in this paper. The monthly time series similarity of air traffic operation efficiency index is analyzed by the dynamic time warping algorithm, an optimized flight season division model is established, and the fast non-dominant sorting genetic algorithm with elite strategy is used to solve the problem. The TOPSIS method with entropy is used to evaluate the Pareto solution, and the final flight season division results under different division angles are given. Then and the effects of season division results and weight setting on the results under different air traffic operation levels are analyzed. The results show that, in the case of comprehensively considering the influence of the evaluation index of air traffic operation level, the result of optimal flight season division is stable with the change of weight. The method proposed in this paper is not only suitable for the flight season division of large-scale airspace environment, but also suitable for exploring the flight season mode of individual airport operation, thus providing a means for the Civil Aviation Administration and the airport to make flight schedule scientifically.

Key words: transportation planning and management; flight delay; dynamic time warping (DTW); season division

2019 年民航运输业完成总周转量 1 293.25 亿吨千米, 旅客周转量 11 705.30 亿人千米, 分别比

2018 年增长 7.2% 和 9.3%。然而, 中国民航业仍面临着资源存量不足与需求剧增的两大挑战, 虽然

基金项目: 国家自然科学基金(71971112)。

收稿日期: 2022-04-25; **修订日期:** 2022-10-11

通信作者: 王媚乙, 女, 硕士研究生, E-mail: wangmeiyi@nuaa.edu.cn。

引用格式: 谢华, 王媚乙, 杨磊, 等. 基于空中交通运行水平的航季划分方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 878-887. XIE Hua, WANG Meiyi, YANG Lei, et al. Method of flight season division based on operation level of air traffic [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 878-887.

近年来中国在空中交通管理建设方面取得了瞩目的成绩,但是民航供给侧保障能力不足与民航市场快速发展的需求不相适应的矛盾依然存在。根据中国民用航空局发布的2016—2020年民航行业发展统计公报显示^[1-5],2016—2020年航班平均正常率为79.7%,其中由天气原因导致的航班不正常比例达到了51.8%,超过了一半,由此说明以航班正常率为核心的服务质量需要继续提高。

考虑到高空风以及民航运输需求等原因,中国民用航空局颁布的《民航航班时刻管理办法》^[6]将一年划分为冬春和夏秋两个航季,在此基础上制定航班计划以实现航班时刻资源高效配置、保障航班运行有序顺畅,提高航班正点率。其中夏秋航季是指日历年3月的最后1个周日至10月最后1个周六;冬春航季是指日历年10月最后1个周日至翌年3月最后1个周六。

然而,从长期来看,一个地区的气候具有以年为周期的相似性,并且某些天气如暴风、层云和雾等经常发生在一年中的某几个月,因此某些月的天气特征较其他月更具相似性^[7]。就中国而言,龙卷风常在4~10月间出现较为频繁,台风通常出现在3~9月,冰雹以2~5月居多。天气的季节性变化使得机场航班延误与航班取消率等航班运行效率指标呈现出一定的季节规律。因此有必要对受天气季节性影响的机场航班延误等因素进行研究,在此基础上对中国航季设定进行修正,制定更加合理的航季划分,以提升航班时刻资源配置的高效性,提高民航航班正常性,进一步适应中国民航高速发展的需求。

在航班延误评估、机场容量评估等相关研究领域,已经有研究者意识到:有效探究延误等时间序列规律,有助于更准确地评估空中交通运行水平。目前,主要周期模式挖掘方法有:基于傅里叶级数的周期模式挖掘和基于聚类方法的周期模式挖掘。Abde-laty等^[8]检测了奥兰多机场的日、周以及季的机场到港延误周期模式,在此基础上又采用多项逻辑回归和二元逻辑回归模型,研究不同因素对平均日延误和单次航班延误的影响。Inniss等^[9]提出了1-参数到港容量分布模型,结合季节性聚类的方法,运用整数规划模型来划分季节周期,并以旧金山国际机场为例,将其早晨发生的恶劣天气转换为到达容量的概率分布。此模型适合于特定时间发生特定天气类型的机场容量建模,无法反映预测天气对容量的影响,且该方法计算量较大,运用起来有一定的困难。张静^[7]在Inniss的基础上设计基于遗传算法的时间序列季节划分方法,将时间序列中具有相似容量概率分布特征的月识别为1个季,

最后得到美国旧金山机场常见天气影响的航季划分。Penny等^[10]通过主成分分析对97个候选变量的筛选,提取9个与空域性能有关的指标在此基础上采用基于K-means的聚类方法,对4年的运行数据进行聚类,根据每个点到簇中心的距离定义典型日和非典型日,聚类结果显示需求和天气状况是影响空域性能的关键因素。

从已有研究可以看出,已有学者注意到合理划分航季对于优化航班时刻资源合理分配的意义,并以机场容量指标表征空中交通运行水平。然而,以上研究主要从单一指标角度考虑空中交通运行效率,甚少综合各项空中交通运行效率指标对空中交通运行水平进行评价。除此之外,现有的研究主要以国外单一机场为对象,尚无研究针对中国大范围空中交通运行水平、机场群空中交通运行水平进行探讨,因此针对合理划分中国航班时刻协调周期的研究仍比较缺乏。

本文聚焦提升航班正常性等民航核心问题,选取航班出发延误、到港延误、航班执行率为空中交通运行水平指标,计划航班量为空中交通运行计划指标,运用时间序列相似性度量方法,构建航季划分模型;设计带精英策略的快速非支配排序遗传算法从多角度求解模型,并采用带熵值的TOPSIS法对多目标优化结果进行评价。以全国35个主辅协调机场为例,探究中国空中交通运行航季模式,并分析了不同空中交通运行效率指标权值设定对结果的影响。本文研究皆在为合理划分航班时刻协调航季,优化航班时刻资源配置,提升航班正点率提供新思路。

1 基于空中交通运行水平航季划分框架

根据中国民航局发布的《民航航班时刻管理办法》^[6]规定,中国机场类型分为:主协调机场、辅协调机场和非协调机场。主协调机场采用24 h全时段航班时刻协调配置管理方式,辅协调机场在特定月份或者特定时段采用航班时刻协调配置管理方式。机场之间进港离港航班时刻匹配时,按照主协调机场、辅协调机场以及非协调机场的优先顺序原则进行。因此,为了准确、合理地评估全国空中交通运行情况,本文以北京首都(ZBAA)、广州白云(ZGGG)、上海虹桥(ZSSS)等35个主辅协调机场2017—2019年航班计划数据和航班实际执行数据为研究对象,探究全国航班运行的航季模式。航季划分流程如图1所示,具体步骤如下:

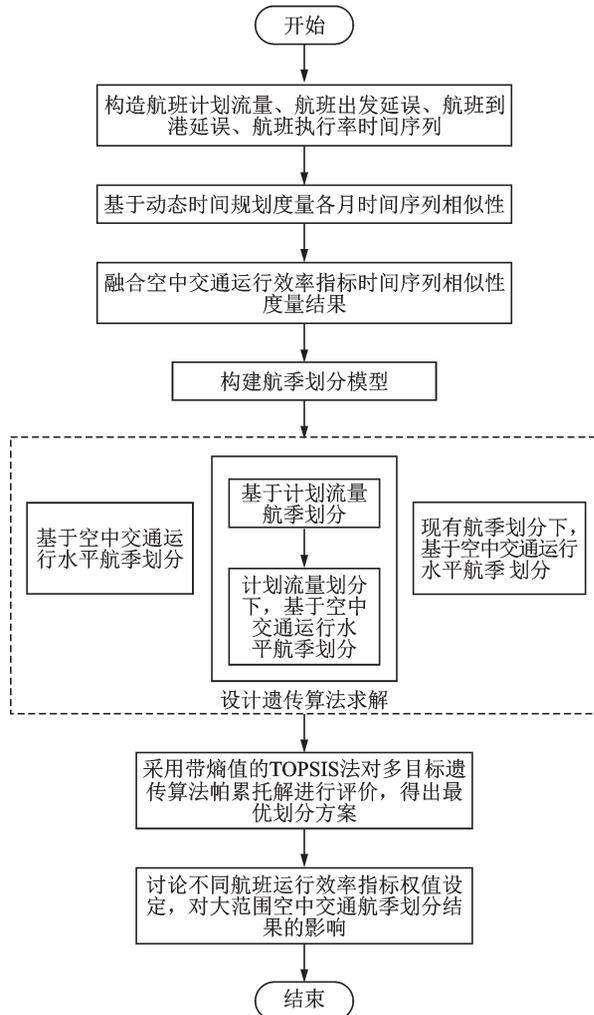


图1 航季划分流程图

Fig.1 Flow chart of season division

步骤1 统计35个主辅协调机场,2017—2019年日计划航班量、航班日平均出发延误、航班日平均到港延误以及航班日平均执行率。建立36个月月度航班日计划量、航班日平均出发延误、平均到港延误以及航班日平均执行率时间序列。

步骤2 基于动态时间规整(Dynamic time warping, DTW)算法,分析2017—2019年35个主辅协调机场月度航班日计划量、航班日平均出发延误、平均到港延误以及航班日平均执行率的时间序列相似性;

步骤3 融合航班日平均出发延误、平均到港延误和平均执行率的DTW度量结果,构建空中交通运行水平月相似性度量矩阵。

步骤4 设计遗传算法,利用空中交通运行水平月相似性度量矩阵划分基于空中交通运行水平的航季模式;利用航班日计划量相似性度量矩阵划分基于计划航班量的航季模式,并在此结果的基础上运用空中交通运行水平月相似性度量矩阵划分基于航班日计划量与空中交通运行水平的航季模

式;在现行航季划分的基础上,运用空中交通运行水平月相似性度量矩阵划分基于现有航季与空中交通运行水平的航季模式。

步骤5 采用带熵值的TOPSIS法对多目标遗传算法帕累托最优解进行评价,得出各划分角度下的最优划分方案。

步骤6 探究不同航班运行效率指标权值设定对航季划分结果影响。

2 空中交通运行水平指标时间序列

航班正常性是影响民航服务质量、评估民航运行效率的重要指标。中国民航局发布的《民航航班正常统计办法(2013)》^[11]将符合以下条件之一的航班判定为正常航班:(1)在计划离港时间前后5分钟之内撤轮挡,且按航班运行正向进程起飞,不发生滑回、中断起飞、返航和备降等特殊情况;(2)不晚于计划到港时间挡轮挡。可见航班起飞时间、航班到港时间以及航班执行率是影响航班正常性的重要指标,因此本文主要采用航班出发延误、航班到港延误以及航班执行率表征空中交通运行水平。

本文使用的航班数据包含航班号、机型、出发机场、到达机场、计划离港时间(Estimated departure time, ETD)、实际离港时间(Actual departure time, ATD)、计划到港时间(Estimated arrival time, ETA)以及实际到港时间(Actual arrival time, ATA)。其中,计划离港时间可以直接从航班计划数据中读取,实际离港时间只有实际执行的航班有记录,因此认为实际离港时间为空的航班并未执行,记为取消航班。

2.1 航班平均出发延误时间序列构造

出发延误时间以日为粒度,计算方法为航班实际离港时间与航班计划离港时间之差,差值小于0的按0计算,表达式为

$$\text{Depdelay} = \begin{cases} \text{ATD} - \text{ETD} & \text{ATD} > \text{ETD} \\ 0 & \text{ATD} < \text{ETD} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 航班平均到港延误时间序列构造

到港延误时间以日为粒度,计算方法为航班实际到港时间与航班计划到港时间之差,差值小于0的按0计算,表达式为

$$\text{Arrdelay} = \begin{cases} \text{ATA} - \text{ETA} & \text{ATA} > \text{ETA} \\ 0 & \text{ATA} < \text{ETA} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 航班平均执行率时间序列

航班执行率以日为粒度,计算方法为当日实际执行航班数量与计划执行航班数量之比有

$$\text{执行率} = \frac{\text{实际航班数}}{\text{计划航班数}} \times 100\% \quad (3)$$

3 基于 DTW 算法的时间序列相似性分析

一个地区的气候具有以年为周期的相似性,在此对中国 2017—2019 年航班月均出发延误、航班月均到港延误以及航班月均执行率数据按年归一化后进行统计,统计结果如图 2 所示。

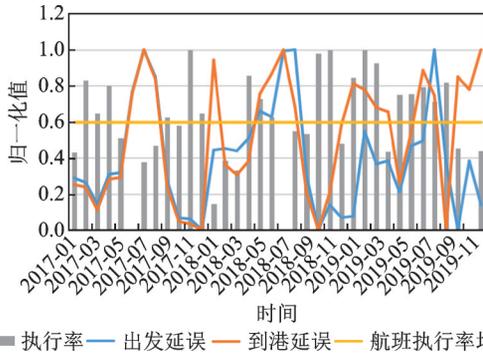


图 2 2017—2019 年航班出发延误、到港延误和执行率统计图

Fig.2 Statistical chart of departure delay, arrival delay and implementation rate of flight in 2017—2019

从图 2 中可以看出,航班出发延误、到港延误在 3 年间呈现出较为明显的重复波动,在每年 7 月左右达到延误峰值。航班执行率除 2 月执行率均在平均值以上外,并未呈现出明显规律。此情况考虑是由于 2017 年春节为 1 月 27 日,2018 年春节为 2 月 15 日,2019 年春节为 2 月 4 日。3 年中,2 月均处于春运高峰,因增加了补班航班数,使得航班执行率在 2 月较高。基于月度航班运行情况相似性进行航季划分对于指导航班时刻资源配置,提升航班正点率有实际意义。

时间序列相似性的定义是由 Agrawal 等^[12]提出的,其度量结果是基于时间序列无监督聚类、时间序列分类等时间序列分析活动的基础。

DTW 算法由日本学者 Itakura 提出^[13],最初应用于语音识别领域,是典型的时间序列相似性弹性度量方法。DTW 算法可通过调整时间序列中的点,使对应的数据点进行匹配,得出任意长度时间序列最佳匹配路径,从而计算两时间序列之间的距离,有效解决时间序列不等长等问题。以 2017 年 1 月与 2 月主辅协调机场日平均出发延误时间序列为例,DTW 算法的原理如图 3 所示。图 3(a)中两实线分别表示 2017 年 1 月、2017 年 2 月全国主辅协调机场日平均出发延误时间序列。对于两长度分别为 m, n 的时间序列 X, Y , DTW 算法需构造一个 $m \times n$ 的矩阵 A , 矩阵中各元素 a_{ij} 表示两时间

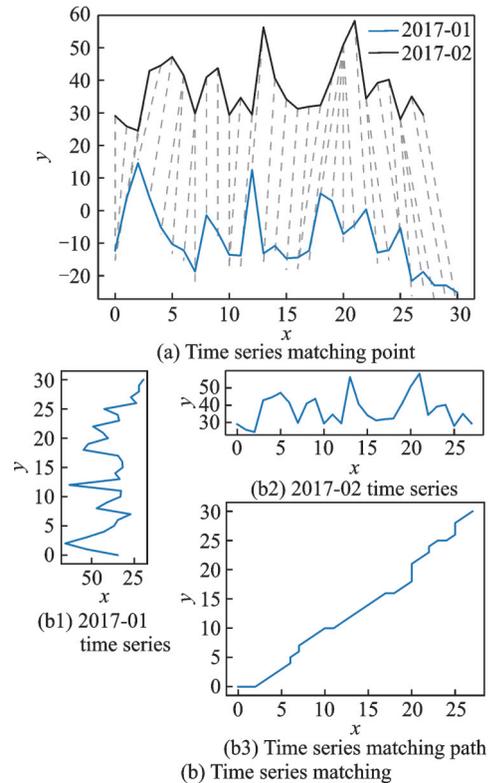


图 3 DTW 规整算法原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of DTW algorithm

序列 x_i 和 y_j 之间的距离 $\text{Dist}(x_i, y_j)$, 在此矩阵 DTW 采用寻找最优度量路径的方法,寻找一条通过此矩阵中若干元素的路径,路径通过的元素即为两时间序列进行计算对齐的点,如图 3 所示,虚线连接的即为序列之间相似的点,DTW 距离计算公式为

$$D_{\text{dtw}}(i, j) = \begin{cases} 0 & i = 0 \text{ and } j = 0 \\ \infty & i = 0 \text{ or } j = 0 \\ \text{Dist}(x_i, y_j) + \min \begin{cases} D_{\text{dtw}}(i-1, j) \\ D_{\text{dtw}}(i, j-1) \\ D_{\text{dtw}}(i-1, j-1) \end{cases} & i \neq 0 \text{ and } j \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

4 基于遗传算法的全国航班运行情况航季划分方法

4.1 模型建立

在对全国航班运行情况进行航季划分时,希望同时考虑到航季内部航班运行情况的相似性和航季间航班运行情况的差异性。因此,考虑构建多目标优化模型针对全国航班运行情况进行航季划分。模型中所用符号说明如表 1 所示。

表1 模型符号说明

Table 1 Model symbol description

符号名称	符号说明
m	划分航季数量
n_s	第 s 季中包含的月数
H	空中交通运行水平评价指标数
α_h	指标 h 对空中交通运行水平的影响权重
x_{sab}^h	指标 h 第 s 季中第 a 个月和第 b 个月的DTW距离
x_{ijkl}^h	指标 h 第 i 季中第 j 月与第 k 季中第 l 月的DTW距离

4.1.1 目标函数

综合考虑季内航班运行情况相似性及季间航班运行情况差异性,本文设置目标函数如下。

目标函数1:最小化平均季内距离。平均季内距离反应被划分为同一航季间各月运行情况的相似性,某划分下,平均季内距离最小,即

$$\min \sum_{s=1}^m \sum_{a=1}^{n_s} \sum_{b=1}^{n_s} \sum_{h=1}^H \frac{\alpha_h x_{sab}^h}{mC_{n_s}^2} \quad (5)$$

目标函数2:最大化平均季间距离。平均季间距离反应被划分为不同航季之间各月运行情况的差异性,某划分下,平均季间距离最大,即

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{h=1}^H \frac{\alpha_h x_{ijkl}^h}{mn_j n_k} \quad (6)$$

4.1.2 约束条件

中国现行民航航班时刻管理办法将全国航班运行分为冬春、夏秋两航季,按航季分配航班时隙、制定航班计划,两航季共包含12个月。因此本文在基于航班运行情况划分航季时,依然考虑以12个月为单位进行划分,分别设置以下约束条件。

约束条件1:至少划分为两季,即

$$m \geq 2 \quad (7)$$

约束条件2:每季至少包含两个月,即

$$n_s \geq 2 \quad (8)$$

约束条件3:每次划分必须是对12个月的完整划分,且各季内月份是连续的。例如:(10,11,12,1,2)、(3,4,5)、(6,7,8,9)这样的划分是有效的,而(3,5,8)这样的划分是无效的,即

$$\sum_{s=1}^m n_s = 12 \quad (9)$$

4.2 算法设计

遗传算法(Genetic algorithm, GA)是由 John Holland 提出的仿生物进化算法^[14]。该算法通过编码、选择、交叉及变异等方法模拟生物在自然环境中“适者生存,优胜劣汰”的进化过程,从而形成一种全局优化概率搜索算法。

对于以12个月为单位的航季划分问题,可视在表盘上寻找 n 个点,将表盘划分为 n 个部分,是一个典型的组合优化问题。如图4所示,若选取3、



图4 航季划分遗传算法设计思想示意图

Fig.4 Schematic diagram of design idea of genetic algorithm for season division

6、10三个点,则表盘被划分为3-5、6-9、10-2三个部分。

本文采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)对该问题进行求解,具体步骤如下:

步骤1 算法参数设置。确定种群规模,最大进化代数、种群染色体长度、交叉变异概率。

步骤2 解码得到各个体航季划分结果。本问题中将染色体个体长度设置为12,染色体编码采用0-1编码,0表示加入前一季,1表示新季起始月。如 $X=(0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,1)$ 表示的航季划分结果为:3-6、7-8、9-11、12-2。

步骤3 判断是否满足约束条件。本问题中将染色体长度设置为12,因此自然满足约束条件3。对于约束条件1需先对染色体各个元素求和,求和结果大于1则满足约束条件1,否则不满足。对于约束条件2需先对染色体各个元素进行判断,对于前11个元素,需满足第 i 个元素与第 $i+1$ 个元素不同时为1,第12个元素需满足第12个元素与第1个元素不同时为1。将不满足任意一个约束条件的种群个体目标函数值设置为 $(M, 0)$ 。

步骤4 进行快速非支配排序,计算拥挤度。基于结果进行选择、交叉和变异等遗传算子操作,得到子代种群。将子代种群与父代种群合并,再次进行快速非支配排序,计算拥挤度,将临界层之前的个体加入下一代,临界层个体按拥挤度从大到小进行排序,选择若干个加入下一代,直到新种群规模等于初始种群规模^[15]。

步骤5 判断是否达到最大迭代次数。若达到最大迭代次数则输出算法运行结果:当前种群 Pareto 最优解中各航季划分下平均季内距离与平均季间距离。否则,迭代次数加1转入步骤2。

4.3 多目标优化结果综合评价

带精英策略的快速非支配排序遗传算法会求解出多个帕累托最优解,在此采用带熵值的 TOP-SIS 法对各解进行综合评价。

熵值法是一种客观赋权法,熵值越小表明该指标信息量越大、不确定性越小,是一种根据指标的相对变化程度对系统的总体影响来确定权重的客观赋权法。本文中,最优航季划分模型优化目标分为:季间平均差异最大和季内平均相似性最大,在此采用熵值法确定两目标对系统总体的影响。熵值计算方法为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_i^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (10)$$

式中: m 为帕累托最优解个数; j 为目标函数个数; p_{ij} 为各帕累托目标函数值正向归一化处理后的值。

TOPSIS 法^[16]通过对有限评价对象与理想目标之间的接近程度进行排序,对对象进行相对优劣评价,其评价指标计算方法为

$$C = \frac{D^-}{D^- + D^+} \quad (11)$$

式中: D^+ 为解到最优解的距离; D^- 为解到最劣解的距离。

5 实例分析

本文以全国 35 个主辅协调机场(北京大兴、成都天府除外)2017—2019 年航班数据为例展开实例分析。

采用 DTW 分别度量 3 年月度计划航班量时间序列相似性、延误时间序列相似性以及航班执行率时间序列相似性。由于 DTW 度量的是时间序列之间的距离,因此 DTW 度量值越小,时间序列更为相似。考虑到各指标对于空中交通运行水平影响权重不同,本文参考《华东空管局组织质量评价研究》^[17]的研究结果,设置航班出发延误和航班到港延误指标权值为 0.324,设置航班执行率权值为 0.352,对各航班运行效率指标进行相似性度量的结果进行加权平均,分别从基于空中交通运行水平、计划流量下空中交通运行水平以及对标现有航季下空中交通运行水平 3 个角度进行航季划分。

5.1 基于空中交通运行水平的航季划分

图 5 为基于空中交通运行效率指标相似性综合度量求解航季划分的结果,在种群进化完成时,共得到 9 个帕累托最优解。算法采用超体积指标(Hypervolume, HV)^[18]评价算法收敛性和多样性。HV 表示算法获得的非支配解集与参考点围成的区域面积,其值越大说明算法性能越好。图 5(b)中,横坐标表示每重复一次步骤 2~步骤 5 的次数,

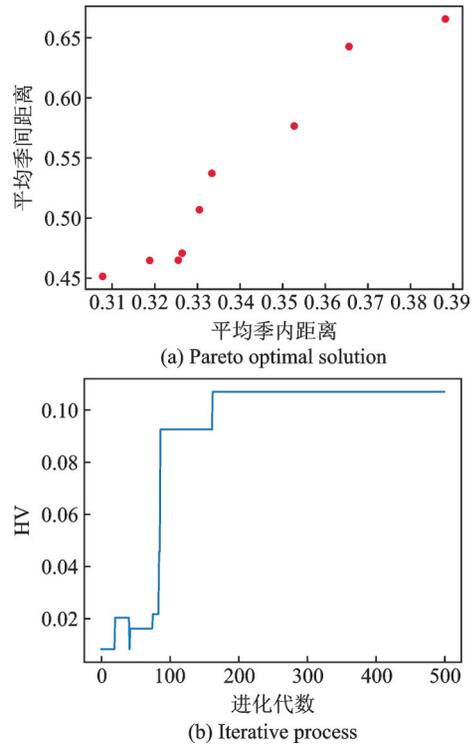


图 5 基于空中交通运行水平的 Pareto 最优解

Fig.5 Pareto optimal solution based on air traffic operation level

纵坐标表示超体积指标值,可见 HV 值在接近 200 代时趋于稳定。

基于空中交通运行水平航季划分各帕累托解及各解对应目标函数结果如表 2 所示,共 9 个帕累托最优解,可供管理者基于对目标函数偏好进行选择。由表 2 可看出结果 1 为各帕累托解中季内相似性最高的划分方法,结果 9 为各帕累托解中季间差异性最大的划分方法。其中 7 种划分方法将 6~8 月单独划分为 1 季,其余两种划分方法将 7~8 月划分为 1 季,此结果表明现有夏秋航季将 6、7、8 月纳入夏秋航季与 9 月~次年 3 月一同制定航班计划,缺乏科学性,且 7、8 月交通运行水平更具相似性。

表 2 基于空中交通运行水平航季划分 Pareto 最优解
Table 2 Division of Pareto optimal solution based on air traffic operation level

结果	最小化平均季内距离	最大化平均季间距离	航季划分结果	航季数
1	0.307 8	0.451 6	2-3、4-5、6-8、9-1	4
2	0.318 8	0.464 8	1-3、4-5、6-8、9-12	4
3	0.325 5	0.465 0	4-5、6-8、9-10、11-3	4
4	0.326 4	0.470 9	1-2、3-5、6-8、9-12	4
5	0.330 5	0.507 0	4-5、6-8、9-3	3
6	0.333 4	0.537 3	1-5、6-8、9-12	3
7	0.352 7	0.576 6	1-6、7-8、9-12	3
8	0.365 6	0.642 7	6-8、9-5	2
9	0.388 2	0.665 6	7-8、9-6	2

通过熵值法度量各目标函数所包含的信息量及不确定性大小,对目标函数分别设定权值为:0.263,0.737。表3是采用带熵值的TOPSIS法对各帕累托解进行综合评价的结果。根据TOPSIS法评分认为基于空中交通运行水平的最优航季划分结果为:将一年划分为两季,第一季包含6、7、8月,第二季包含9、10、11、12、1、2、3、4、5月。

表3 TOPSIS评价结果

Table 3 TOPSIS evaluation results

结果	TOPSIS得分
8	0.764
9	0.737
7	0.568
6	0.434
5	0.327
1	0.263
2	0.250
4	0.240
3	0.233

5.2 基于计划流量与空中交通运行水平的航季划分

航班延误、执行率指标受到航班计划、天气、机场以及航空公司等多方面的影响,在此本文探究相似计划下,空中交通运行水平的相似性,即先采用计划流量指标进行航季划分,在计划流量航季划分的基础上,再基于空中交通运行水平进行航季划分。

基于计划流量进行航季划分时,模型中 H 为计划流量, α_i 为1。基于计划流量进行季节划分共得到6个帕累托最优解,采用带熵值的TOPSIS法对各解进行综合评价,得出第一季包含7、8月,第二季包含9、10、11、12、1、2、3、4、5、6月为基于计划流量的航季划分最优结果。在基于计划流量航季划分的结果上,进行基于空中交通运行水平的航季划分,由于第一季已无法再划分,基于空中交通运行水平的航季划分在第二季的基础上进行,此时算法染色体长度变为10。划分结果如图6所示,算法在200代左右收敛,共得到10个帕累托最优解。在此基础上采用带熵值的TOPSIS法对各解进行评价,得到基于计划流量与空中交通运行水平的最优划分共划为3季,结果如表4所示。

5.3 对标现有航季基于空中交通运行水平的航季划分

中国现行航季划分主要考虑需求与高空风等因素。本部分立足于现行航季设置,在冬春和夏秋航季内部进行基于空中交通运行水平的航季划

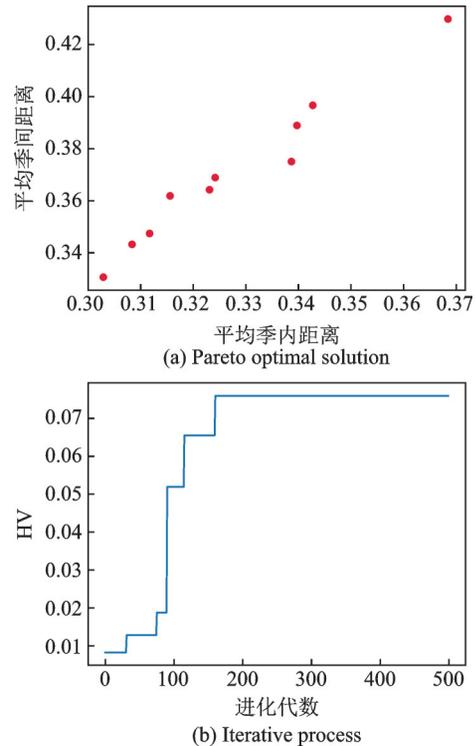


图6 基于计划流量与空中交通运行水平的 Pareto 最优解
Fig.6 Pareto optimal solution based on scheduled flow and air traffic operation level

表4 基于计划流量与空中交通运行水平的航季划分最优结果

Table 4 Optimal result based on scheduled flow and air traffic operation level

序号	月份
1	5、6
2	7、8
3	9、10、11、12、1、2、3

分。需要说明的是,这里将现有航季划分看作为夏秋航季为4~10月,冬春航季看作11月~次年3月。因此,算法对冬春航季进行划分时,染色体长度为5,对夏秋航季划分时染色体长度为7。划分结果如图7所示。

对标现有航季,基于空中交通运行水平的最优航季划分共划为5季,结果如表5所示。

中国春节一般出现在1月至2月,因而使得春运高峰主要出现在1月至3月,在此期间航班量增加使得航班执行率较高、延误较大,此情况在4月与5月出现缓解;而6月至8月为对流性天气高发时期,在此期间航班延误增大,执行率降低,此情况进入9、10月后开始缓解;11、12月进入冬季,使得北方机场新增除冰等工作,此期间航班延误又会增大。对标现有航季的划分结果与中国现行空中交通运行情况相符。

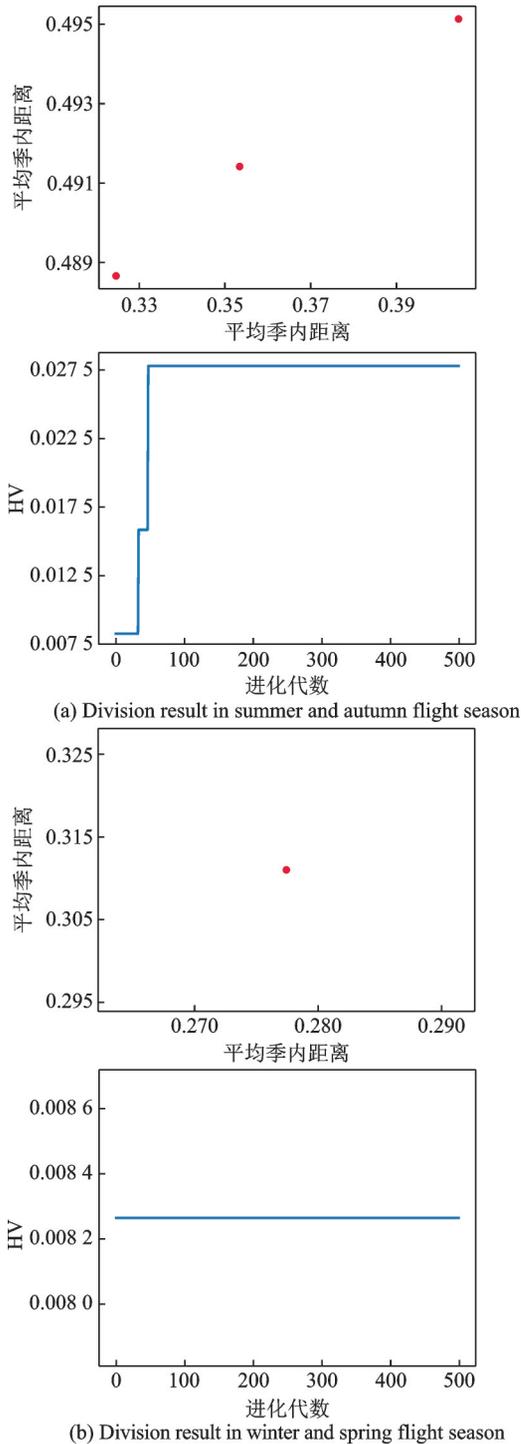


图 7 航季内基于空中交通运行水平的 Pareto 最优

Fig.7 Pareto optimal based on air traffic operation level in the flight season

5.4 敏感性分析

本文参考文献[17],通过层次分析法将各指标之间权值影响权值设置为:0.324,0.324,0.352。然而,不同的权重对模型求解结果存在一定影响。因此,本文对不同航班运行效率评价指标权值设定对航季划分结果的影响进行了分析。将指标划分为航班延误、航班执行率2类,认为同类指标对空中交通运行水平存在相似影响,即认为航班出发延

表 5 对标现有基于空中交通运行水平的航季划分最优结果

Table 5 Optimal result based on air traffic operation level during the flight season

序号	月份
1	1、2、3
2	4、5
3	6、7、8
4	9、10
5	11、12

误、航班到港延误以及航班执行率的影响权值分别为: α 、 α 、 $1-2\alpha$ 。以0.1为粒度,探究不同 α 对航季划分结果影响。各角度敏感性分析结果如表6所示。

基于空中交通运行水平角度进行航季划分时,当只考虑航班执行率对空中交通运行水平影响时,最优航季划分结果为第一季包含2、3月,第二季包含4、5、6、7、8、9、10、11、12、1月;当航班出发延误、航班到港延误与航班执行率占比较为均衡时,最优航季划分结果为第一季包含6、7、8月,第二季包含9、10、11、12、1、2、3、4、5月。当各指标权值设定较为均衡时与实际情况最为相符,因此,此类权值设定下与参考相关文献设置权值的航季划分结果一致;当只考虑航班出发延误与航班到港延误时,最优航季划分结果为第一季包含1、2、3、4、5、6月,第二季包含7、8月,第三季包含9、10月,第四季包含11、12月。

本文所选取的空中交通运行水平评价指标间存在相互影响。当航班取消时,航班执行率指标会降低,而航班延误也会减少。因此只考虑其中一类指标进行航季划分欠缺科学性。当 α 为0或0.5时,均忽略了一类指标对空中交通运行水平的影响,该权值下的最优航季划分结果欠缺科学性;其余 α 设定中,3种指标影响较为均衡的 α 设定下最优航季划分结果都为:第一季包含6、7、8月,第二季包含9、10、11、12、1、2、3、4、5月,该结果具有稳定性。另外在航班出发延误、航班到港延误以及航班执行率对空中交通运行水平影响权值设定为0.1、0.1、0.8时,模型最优结果为第一季包含2、3月,第二季包含4、5、6、7、8、9、10、11、12、1月。考虑此划分结果出现的原因:权重设置加重了航班执行率的影响,而2、3月因受到春运影响使得航班执行率普遍较高。

基于计划流量与空中交通运行水平进行航季划分时,当 $\alpha=0.1$,最优航季划分结果为分4季,第一季包含2、3月,第二季包含4、5、6月,第三季包含7、8月,第四季包含9、10、11、12、1月。其余 α 设

表6 敏感性分析结果

Table 6 Sensitivity analysis results

α	出发延误 误权值	到港延误 误权值	航班执 行率	基于空中交通运行 水平最优航季划分	基于计划流量与 空中交通运行水平 最优航季划分	对标现有航季下,基于空中交通运行水平 最优航季划分
0.0	0.0	0.0	1.0	2-3,4-1	5-6,7-8,9-4	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12或2-3,4-5,6-8,9-10,11-1
0.1	0.1	0.1	0.8	2-3,4-1	2-3,4-6,7-8,9-1	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12或2-3,4-5,6-8,9-10,11-1
0.2	0.2	0.2	0.6	6-8,9-5	5-6,7-8,9-4	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12或2-3,4-5,6-8,9-10,11-1
0.3	0.3	0.3	0.4	6-8,9-5	5-6,7-8,9-4	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12
0.4	0.4	0.4	0.2	6-8,9-5	5-6,7-8,9-4	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12
0.5	0.5	0.5	0	1-6,7-8,9-10,11-12	5-6,7-8,9-4	1-3,4-5,6-8,9-10,11-12

定下,最后航季划分结果均为分为3季,第一季包含5、6月,第二季包含7、8月,第三季包含9、10、11、12、1、2、3、4月。本文参考权值下的航季划分结果具有稳定性。

对标现有航季基于空中交通运行水平进行航季划分时,当 α 为0,0.1,0.2时,对于冬春航季的划分有两个帕累托解,综合评价结果均为0.5。因此,此权值下共有两种等价航季划分,其中将一年划分为五季,第一季包含1、2、3月,第二季包含4、5月,第三季包含6、7、8月,第四季包含9、10月,第五季包含11、12月。该结果在所有权值水平下适用,符合中国空中交通运行情况。

6 结 论

本文主要工作包括:从航班计划量、航班出发延误、航班到港延误以及航班执行率多角度建立时间序列,综合评价空中交通运行水平;利用动态时间规整算法分析各时间序列间的相似性,有效解决月度时间序列不等长问题;考虑平均季内距离、平均季间距离建立多目标空中交通运行水平航季划分模型;本文设计算法求解基于空中交通运行水平航季划分结果,计划流量与空中交通运行水平的航季划分结果,对标现有航季下,基于空中交通运行水平的航季划分结果。3种航季划分为基于不同角度的航季划分,没有优劣之分,可供航季管理部门基于不同需求选择。其中对标现有航季下,基于空中交通运行水平的航季划分将1年划分为5季:第一季包含1、2、3月,第二季包含4、5月,第三季包含6、7、8月,第四季包含9、10月,第五季包含11、12月,比较符合我国目前空中交通运行情况。本文提出的基于空中交通运行水平航季划分方法,不仅适用于大范围空域环境下的航季划分更可运用于机场群、单一机场,探究机场空中交通运行水平的航季模式,为今后机场运行、航班计划制定提供指导。

本文研究中仍存在以下不足:(1)在各指标权

值设定时,本文将航班出发延误与航班到港延误对空中交通运行水平影响视为同等重要。然而,实际中,两指标尚有一定差别,在此可细化航班出发延误与航班延误指标对空中交通运行水平的影响程度,使得航季划分结果更加科学。(2)除航班出发延误、到港延误、航班执行率外还可增加其他航班运行效率指标表征空中交通运行水平,使得基于空中交通运行水平的航季划分结果更为科学合理。

参考文献:

- [1] 中国民航局.2016年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2016 [EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>.
- [2] 中国民航局.2017年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201805/P020180521622831951125.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2017 [EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201805/P020180521622831951125.pdf>.
- [3] 中国民航局.2018年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201905/P020190508519529727887.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical Bulletin on the development of civil aviation industry in 2018 [EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201905/P020190508519529727887.pdf>.
- [4] 中国民航局.2019年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/P020200605630677965649.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical Bul-

- letin on the development of civil aviation industry in 2019 [EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/P020200605630677965649.pdf>
- [5] 中国民航局. 2020年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://211.65.106.2/cache/6/03/www.caac.gov.cn/a35e9d625e6c2da1d1eb7b6e012abb58/P020210610582600192012.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2020 [EB/OL]. [2022-03-25]. <http://211.65.106.2/cache/6/03/www.caac.gov.cn/a35e9d625e6c2da1d1eb7b6e012abb58/P020210610582600192012.pdf>.
- [6] 中国民航局. 民航航班时刻管理办法[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201802/P020180224337160787361.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Measures for the administration of civil aviation flight time[EB/OL]. [2022-03-25]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201802/P020180224337160787361.pdf>.
- [7] 张静. 天气影响的机场容量与延误评估研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012. ZHANG Jing. Study on evaluation of airport capacity and delay affected by weather[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [8] ABDEL-ATY M, LEE C, BA I Y, et al. Detecting periodic patterns of arrival delay[J]. Journal of Air Transport Management, 2007, 13(6): 355-361.
- [9] INNIS T R, BALL M O. Estimating one-parameter airport arrival capacity distributions for air traffic flow management[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2004, 12(3): 223-251.
- [10] PENNY S, HOFFMAN R, KZOZZL J, et al. Classification of days in the national airspace system using cluster analysis[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2005, 13(1): 29-54.
- [11] 中国民航局. 民航航班正常统计办法(2013)[EB/OL]. [2022-03-25]. <https://wenku.baidu.com/view/d2ef42f249fe04a1b0717fd5360cba1aa8118c93.html>. Civil Aviation Administration of China. Measures for normal statistics of civil aviation fights (2013) [EB/OL]. [2022-03-25]. <https://wenku.baidu.com/view/d2ef42f249fe04a1b0717fd5360cba1aa8118c93.html>.
- [12] AGRAWAL R K, ADHIKARI R. A combination of artificial neural network and random walk models for financial time series forecasting[J]. Neural Computing & Applications, 2014(6): 1-9.
- [13] BERNDT D J, CLIFFORD J. Using dynamic time warping to find patterns in time series[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. [S. l.]: [s. n.], 1994: 359-370.
- [14] 徐英. 遗传算法的改进及应用实现[D]. 北京:北京理工大学, 2003. XU Ying. Improvement and application of genetic algorithm[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] 张优凯, 许艺红, 甘丽珍. 基于熵值-TOPSIS模型的区域物流发展能力研究[J]. 闽江学院学报, 2021, 42(5): 16-24. ZHANG Youkai, XU Yihong, GAN Lizhen. Research on regional logistics development capability based on entropy-TOPSIS model[J]. Journal of Minjiang University, 2021, 42(5): 16-24.
- [17] 徐苏. 华东空管局组织质量评价研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020. XU Su. Study on organizational quality evaluation of East China Air Administration [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [18] YU X, LU Y Q, YU X. Evaluating multi-objective evolutionary algorithms using MCDM methods[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1-14.

(编辑:刘彦东)