

文章编号: 1005-0523(2023)01-0044-08



基于熵权法的平行跑道多模式进场效能分析

丁文浩, 胡明华, 江 斌

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了能准确有效地评估终端区进场航班的运行效能, 从航班进场效率和机场终端区容量提升能力两方面入手, 建立了面向不同跑道运行模式、不同类型飞行程序的效能评价指标体系, 利用基于熵权法改进的 TOPSIS 综合评价模型对终端区进场航班进行效能评价。引入基于终端区管制负荷的进场效率指标用于评估航班的进场效能, 并将其与传统效率指标做相关性分析, 验证了该指标的合理性。最后以南京禄口机场为实例, 利用 AirTop 软件分别对典型日航班做隔离运行、独立运行(传统 ILS 模式、基于 RNP AR 技术、基于 PMS 技术)仿真, 对多种模式进行对比分析。实验结果表明, PMS 技术模式下的进场效能最优, 具有良好的进场效率 and 提升容量的能力。

关键词: 机场终端区; 进场效率; 跑道运行模式; 熵权法; 仿真分析

中图分类号: V355; TP391.9

文献标志码: A

本文引用格式: 丁文浩, 胡明华, 江斌. 基于熵权法的平行跑道多模式进场效能分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 44-51.

Multi-mode Approach Effectiveness Analysis of Parallel Runways Based on Entropy Weight Method

Ding Wenhao, Hu Minghua, Jiang Bin

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

Abstract: In order to accurately and effectively evaluate the operational efficiency of arrival flights in the terminal area, based on the flight arrival efficiency and the capacity improvement capability of the airport terminal area, an efficiency evaluation index body for different runway operation modes and different types of flight procedures was established. An improved TOPSIS comprehensive evaluation model based on the entropy weight method was established to evaluate the efficiency of arriving flights in the terminal area. For the first time, the arrival efficiency index based on terminal area control load was introduced to evaluate the arrival efficiency of the flight, and the correlation analysis was carried out with the traditional efficiency index, which verified the rationality of the index. Finally, taking Nanjing Lukou Airport as an example, the AirTop software was used to simulate the isolated operation and independent operation of typical daily flights (traditional ILS mode, based on RNP AR technology and PMS technology), and compare and analyze various modes. The experimental results show that the approach efficiency under the PMS technology mode is optimal, with good approach efficiency and the ability to increase capacity. This study provides decision support for the perception of the airport's operational efficiency and planning management.

Key words: terminal airspace; approach efficiency; runway operation model; entropy weight method; simulation analysis

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(71731001); 国家自然科学基金民航联合重点课题资助项目(U2033203)

Citation format: DING W H, HU M H, JIANG B. Multi-mode approach effectiveness analysis of parallel runways based on entropy weight method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 44-51.

空中交通管理旨在避免飞行冲突,保障空中交通的畅通运行。在终端区内,进离场航线交错,且进场航班往往会加入等待程序或按管制要求进行机动,使得交通态势极为复杂。运行效能可理解为终端区内航班的运行效率和对资源利用的能力,是衡量终端区是否通畅的直观体现之一,在以往,吞吐量和延误等指标都曾被用于衡量空中交通管理的效能^[1]。

终端区航班运行效率评估的目的是对实际运行条件下航班成本和理想运行条件下的航班成本进行量化,以达到交通管理的动态感知和决策调整的目的。一般来说,终端区运行效率的评估,涉及航空器运行的特征指标选取和综合评价模型的构建。其主要研究难点在于指标和模型多样化,缺乏统一性与客观性。

近年来,对终端区运行效能的研究主要分为基于单一指标并构建评价模型进行综合分析方法和基于跑道运行模式或飞程序,分析终端区运行效率的方法。在单一指标分析上,又可大致分为基于时间、基于管制员工作负荷和基于燃油消耗指标分析进场效率的方法。Capelleras^[2]基于机场饱和水平和拥塞水平这一指标,确定航班是否处于畅通状态,并用畅通时间和额外飞行时间来确定进场效率。王鹏鹏^[3]从时间这一维度出发,提出了终端区运行效率计算公式和终端区利用率的灰色主成分分析法评估模型。文献[4-6]基于终端区管制员的管制负荷,作为终端区进场效率指标,构建评价模型。文献[7-8]基于燃油消耗这一指标对终端区进场航班效率进行分析,并以实际运行机场为例进行验证。在基于飞程序的终端区运行效率方法方面,文献[9-10]基于点融合技术的运行模式,评估了其运行效率和飞行安全性。Galaviz等^[11]从单一跑道运行模式入手,基于天气、等待程序、航空器速度等多个因素评估了终端区的运行效率。然而,上述研究都仅从单一的运行模式或单一指标角度对终端区效能进行评估,不同运行模式下航空器的进场间隔或方式具有较大不同,终端区内的航班运行效能势必呈现出较大差异。

因此,针对平行跑道不同的运行模式,评估其

运行效能就显得十分必要。而由于终端区的运行效能主要体现在进场,故本文针对多种不同的进场模式,以南京禄口机场为实例,利用 AirTop 仿真软件,从进场效率和容量提升 2 个角度对 4 种模式进行仿真对比分析,评价平行跑道在多模式运行下的终端区运行效能,以期为机场运行效能感知与规划管理提供决策支持。

1 基于平行跑道的多运行模式

1.1 隔离运行程序

平行跑道隔离运行模式,是指同时通过两条跑道对进离场航班提供服务。一条跑道仅用于离场,另一条仅用于进近。在这种运行模式下,两条平行跑道大致可以看作是一条跑道在运行,但其运行效率要高于单跑道运行模式,原因是起飞航空器在着陆航空器未脱离跑道时便可滑跑起飞。

1.2 独立运行程序

1.2.1 基于传统 ILS 技术

传统 ILS 技术进场又称为独立平行仪表进近模式。该模式是指在两条相邻的平行跑道上进近的航空器,当它们之间不需要按规定配备雷达间隔时,可同时进行仪表进近着陆的运行模式。该模式在运行程序设计、航空器定位精度和雷达监视精度上要求严格,要求不同进近航道上的航空器进行精确的高度和横向位置的约束,以保证运行安全^[12]。

1.2.2 RNP AR 独立进近

RNP AR 独立进近 (required navigation performance authorization required) 类似于精准导航,可以实现空间上的三维导航,从而使航空器精准定位,实现其按航迹精准飞行。RNP AR 技术可有效缩小飞行保护区范围,减短五边长度,达到缓解空域矛盾,提升空域的安全性。除此之外,通过该技术可以缓解飞行员的飞行负荷,节约航空器燃料并提高经济效益,由于航迹的精确性可以取消进近高低边的配置,从而为空域受限的多跑道机场实现独立平行进近运行模式提供解决方案^[13-14]。

1.2.3 基于点融合技术进场

点融合技术是基于圆弧上任意一点到圆心的距

离相等这一原理,实施等间隔排序,管制员可引导航空器直飞进近点的运行模式。该模式可大大降低管制员工作负荷,减少管制员与飞行员之间的通话量,提升运行效率并减少等待程序的使用,但其缺点是需要较大的空域范围。点融合程序主要由汇聚点、内弧排序航段、外弧排序航段、直飞汇聚点进场程序以及等距离参考件构成^[15-16]。

2 终端区进场效能评价指标

对于终端区运行效能的评价,主要从航班运行效率和对空域、跑道等资源的利用能力两方面考虑。在 ICAO 中规定,终端区航班运行效率的常见方法是基于时间效率。同时,民用航空航行服务组织(CANSO)将效率定义为实际燃油消耗与未受阻碍或基准的燃油消耗之间差值^[17]。另也有研究指出终端区管制员的工作负荷同样会对运行效率产生影响。针对现有的终端区运行效能评价指标,结合进场航班在终端区运行全过程,提出基于时间的运行效率、基于燃油消耗的运行效率、终端区管制负荷进行量化分析。而对于资源利用能力,最直接的体现就是对空域容量提升的能力,故选取终端区空域运行时时刻容量的大小来量化评价。

2.1 基于时间的运行效率指标

定义基于时间的航班进场效率为

$$E_t = 1 - \frac{T_{\text{act}} - T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_t 为航班的进场效率, E_t 越大,进场效率越高; T_{act} 为实际进场时间; T_{ref} 为畅通进场时间。

2.2 基于燃油消耗的运行效率指标

参考飞行时间的终端区运行效率指标,燃油效率计算式为

$$E_{\text{ff}} = 1 - \frac{F_{\text{act}} - F_{\text{ref}}}{F_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_{ff} 为航班的进场效率, E_{ff} 越大,进场效率越高; F_{act} 为实际燃油消耗; F_{ref} 为航班燃油进场消耗的基准值。此基准值是参考文献[7]中的方法,即将典型日所在的月内所有的 B738 航班的油耗排序,取第百分之二十位的燃油消耗作为基准值。

2.3 基于管制负荷的运行效率指标

为充分研究终端区管制员工作负荷与进场效率之间的关系,首先采集了南京禄口机场终端区的实际运行数据,利用 AirTop 构建终端区模型,并仿真分析禄口机场终端区管制负荷,最后对终端区管

制负荷与现有效率指标进行相关性分析,如果 Pearson 相关系数的绝对值接近于 1,可以证明两变量之间具有强相关性。

采用前文所提到的基于时间的效率计算方法来计算每架航班的进场效率。选取禄口机场 3 个典型日航班数据,通过 AirTop 仿真该 3 日的航班运行情况,得到单位小时扇区管制负荷,设置 5 min 的滑动时间窗口,使其每 5 min 统计一次管制员的小时工作负荷,扩充统计数据。最后,清洗掉凌晨无航班等情况所出现的干扰数据,共得到 417 条数据。

利用式(3)对该数据进行雅克-贝拉(JB)检验,检验其是否符合正态分布

$$JB = \frac{N}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right] \quad (3)$$

式中: JB 为 JB 统计量,根据 JB 值可进一步计算其对应的 P 值; N 为样本容量; S 为样本的偏度, S 越接近 0,样本偏度越接近正态分布的偏度; K 为样本的峰度, K 越接近 3,样本峰度越接近正态分布的峰度。

样本数据的偏度、峰度的计算公式分别如式(4)和式(5)所示

$$S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} \quad (5)$$

式中: x_i 为变量集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 中的元素; $\bar{x}$ 为数据集中所有变量的均值。对运行数据集中的进场效率和管制负荷 2 个变量进行假设检验, H_0 : 变量服从正态分布; H_1 : 变量不服从正态分布。利用 MATLAB 计算得出数据集中 2 个变量的偏度、峰度、JB 检验值以及 P 值如表 1 所示。

表 1 数据样本表

Tab.1 Data sample table

Index	Arrival efficiency	Controller workload
Skewness	0.002 8	0.104 2
Kurtosis	3.205 7	2.920 6
JB test value	0.73	0.85
P value	0.500 0	0.500 0

当 $P < 0.05$ 时,拒绝原假设,即随机变量不服从正态分布;否则,不能拒绝原假设,也就是该随机变量服从正态分布。由表 1 可知,两变量的 P 值均大于 0.05,故不能拒绝原假设,进场效率和管制负荷均呈正态分布。故可画出进场效率与管制负荷的散点图,见图 1,并计算其 Pearson 相关系数为 -0.931 04, P 值为 $8.571\ 91\text{e-}184$,两变量间具有很强的负相关性。

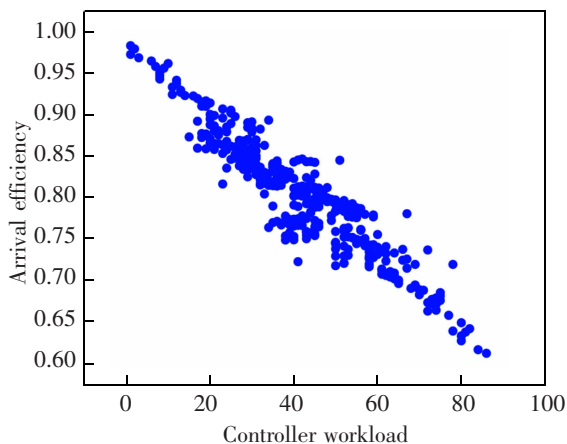


图 1 典型日进场效率与管制负荷及相关性

Fig.1 Typical daily approach efficiency and control load and the correlation

2.4 终端区空域运行时刻容量评价指标

在终端区面积相同的情况下,选取终端区空域运行时刻容量这一指标进行评估,而时刻容量是指系统或系统单元在考虑服务水平前提下单位时间内(通常为 1 h)的最大服务能力。

3 基于熵权法的 TOPSIS 评价模型

3.1 熵权法原理

熵权法是一种客观的给各个变量分配权重的方法,它依据指标变异程度的大小,间接反映其信息量的大小。若变异程度小,信息量小,其对应的权值也应该越低。根据典型日航班仿真的原始数据本身,便可以得到相对客观的指标权重^[18]。已有不少学者采用 TOPSIS 或改进的 TOPSIS 模型对终端区进场效率进行评价^[19-20]。

假设 x 表示事件 X 可能发生的某种情况, $p(x)$ 表示这种情况发生的概率。则可定义

$$I(x) = -\ln p(x) \quad (6)$$

因为 $0 \leq p(x) \leq 1$, 所以 $I(x) \geq 0$, 如果事件 X 可能发生的情况分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则可以定义事件的信息熵为

$$H(x) = \sum_{i=1}^n p(x_i) I(x_i) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \ln p(x_i) \quad (7)$$

由式(6)可以证明,当 $p(x_1) = p(x_2) = \dots = p(x_n) = \frac{1}{n}$ 时, $H(x)$ 取最大值,此时 $H(x) = \ln n$ 。

3.2 指标权重的确定

熵权法把评价中各个待评价单元的信息进行量化,并确定各因子的权重,以达到简化评估流程的目的。本文采用熵权法确定各个指标的权重。

标准化处理后的矩阵记为 Z , Z 中的每一个元素

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m}$$

计算第 j 项指标下第 i 个样本所占的比重,把该值当作相对熵中的概率。计算概率矩阵 P , 其中 P 中的每一个元素 p_{ij} 的计算公式如下

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (8)$$

容易验证 $\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1$, 即保证了每一项指标所对应的概率和为 1。

计算每个指标的信息熵,并计算信息效用值,最后归一化得到每个指标的熵权。对第 j 个指标而言,其信息熵的计算式如下

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

这里的信息效用值可定义为 $d_j = 1 - e_j$, 根据式(9)可以得到,信息效用值越大,其对应的信息就越多。将得到的信息效用值进行归一化处理,进而可以得到每个评价指标的熵权值

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (10)$$

3.3 TOPSIS 综合评价模型

优劣解距离法(TOPSIS)可以充分利用数据信息,准确反映各评价方案之间的差距,但具有局限性。评价指标间无权重区分,造成其在评价有多个

不同类型评价指标的场景时,模型的准确性不高。对于终端区复杂多变的指标特性,特别是在不同模式运行下的机场终端区内,时间效率、燃油效率等评价指标间差异明显,传统的 TOPSIS 评价模型显然不能有效适用。面对未知的权重分配比例,熵权法能够给各个评价指标赋予客观的权重值,不仅真实地保留了多模式运行下机场效能评价指标间的差异,同时还避免了根据经验赋权所带来的主观性。故本文采用改进的 TOPSIS 综合评价模型来对不同运行模式下的机场终端区运行效能进行评价。

基于矩阵 Z 定义最大值 $Z^+=(Z_1^+,Z_2^+, \cdots ,Z_m^+)= (\max \{Z_{11},Z_{12}, \cdots ,Z_{n1}\}, \cdots ,\max \{Z_{1m},Z_{2m}, \cdots ,Z_{nm}\})$,最小值 Z^- 则可定义为 $Z^-= (Z_1^-,Z_2^-, \cdots ,Z_m^-)= (\max \{Z_{11},Z_{12}, \cdots ,Z_{n1}\}, \cdots ,\max \{Z_{1m},Z_{2m}, \cdots ,Z_{nm}\})$,定义第 $i(i=1,2,\cdots ,n)$ 个评价对象与最大值的距离

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^++Z_{ij})^2}$$

(11)

定义第 $i(i=1,2,\cdots ,n)$ 个评价对象与最小值的距离

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^-+Z_{ij})^2}$$

(12)

则可以计算得出第 $i(i=1,2,\cdots ,n)$ 个评价对象未归一化的得分

$$S_i=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-}$$

(13)

4 多模式运行进场效能实例分析

采用计算机仿真模拟的方法,构建南京机场多场景计算机仿真模型,通过不同规模航班流与仿真延误的演化关系,分析不同运行模式下,南京机场的容量以及相关运行效率指标。

根据南京禄口机场的终端区资料,建立了禄口机场终端区空域运行评估数据库以及空域容量评估模型中的空域结构模型、冲突探测与解脱模型、航班流排序模型和仿真模型。

4.1 终端区进场效率分析

通过 AirTop 软件^[21-23]中的 flight report 功能项,可以完整地得到典型日内每架航班的过点时间信息、实际接地时间信息、在进近航段的燃油消耗信息等信息。表 2 是通过仿真得到的航班运行数据。

鉴于从不同走廊口进入终端区到落地过程中的飞行距离不同,其在进场时产生的时间和油耗势必不同,故根据南京禄口机场实际情况,把从 OF,ESBAG,TAPEN,HFE 4 个走廊口进场的航班进行分类,根据表 2 得到的仿真结果分别统计并计算各效率指标值。得到的结果如表 3 所示。

表 2 通过 AirTop 仿真的航班运行数据
Tab.2 Flight operation data simulated by AirTop

Callsign	IAF	Time at IAF	Actual arrival time	Controller workload	Fuel burned in approach/(1×10 ² kg)
CSZ9596	OF	23:50:59	00:06:36	35	88.32
CSN6511	OF	23:52:06	00:08:54	44	156.72
CES2882	TAPEN	23:57:02	00:11:57	32	95.22
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
CES2720	ESBAG	23:32:27	23:51:02	48	95.77

表 3 各运行模式下效率仿真结果
Tab.3 Efficiency simulation results in each operation mode

Operation mode	Time efficiency	Fuel efficiency	Controller workload
Isolation	73.62	71.39	54.40
ILS	75.14	73.38	54.66
RNP AR	78.57	78.30	53.75
PMS	79.00	76.30	53.60

根据第 3 节介绍的计算方法,分别计算典型日内每架航班在不同运行模式下基于时间的进场效率、基于燃油消耗的进场效率,最终取全天的平均值作为该模式下的时间效率和燃油效率。表 4 中的管制负荷是根据 AIP 资料对在计算机软件内设置扇区的水平信息和垂直信息,以小时为步长,根据流量分布取高峰时段的 5 h 的管制负荷平均值。

4.2 终端区容量利用分析

前文提到用终端区空域运行时刻容量来代表容量利用的程度,经研究,通常情况下选取的可接受延误水平为平均离场延误 6 min。其中不包括地面运行的延误,即航空器推出、滑行延误等。若按照仿真平均延误,全天的高峰小时延误低于 15 min,平均延误小于 8 min^[24-25]。综合考虑具有代

表性的跑道航班时隙分布情况、机场空域的交通流分布和管制规则,通过加压测试,得出全天平均延误约 8 min 下的终端区空域运行时刻容量,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在容量利用方面,经仿真评估,实施基于 ILS 的双跑道独立运行飞行程序后,终端区空域运行时刻容量为 55 架次/h,较隔离运行增长了 16.7%;实施基于 RNP AR 的双跑道独立运行飞行程序后,终端区空域运行时刻容量为 57 架次/h,增长 20.8%;实施 PMS 进场程序后,终端区空域运行时刻容量为 62 架次/h,增长了 29%。不同运行模式下的流量及延误分布如图 2 所示。

4.3 不同运行模式进场效能的综合评价

对 4 种跑道运行模式进行综合评价。通过

表 4 不同运行模式下终端区空域运行时刻容量仿真结果
Tab.4 Capacity simulation results in different operation modes

Operation mode	Departure/ h:min:s	Delay arrival/ h:min:s	Average/ h:min:s	Peak hour flights
Isolation	00:04:50	00:11:17	00:08:04	48
ILS	00:05:10	00:11:07	00:08:05	55
RNP AR	00:06:10	00:09:06	00:08:06	57
PMS	00:06:52	00:08:10	00:08:03	62

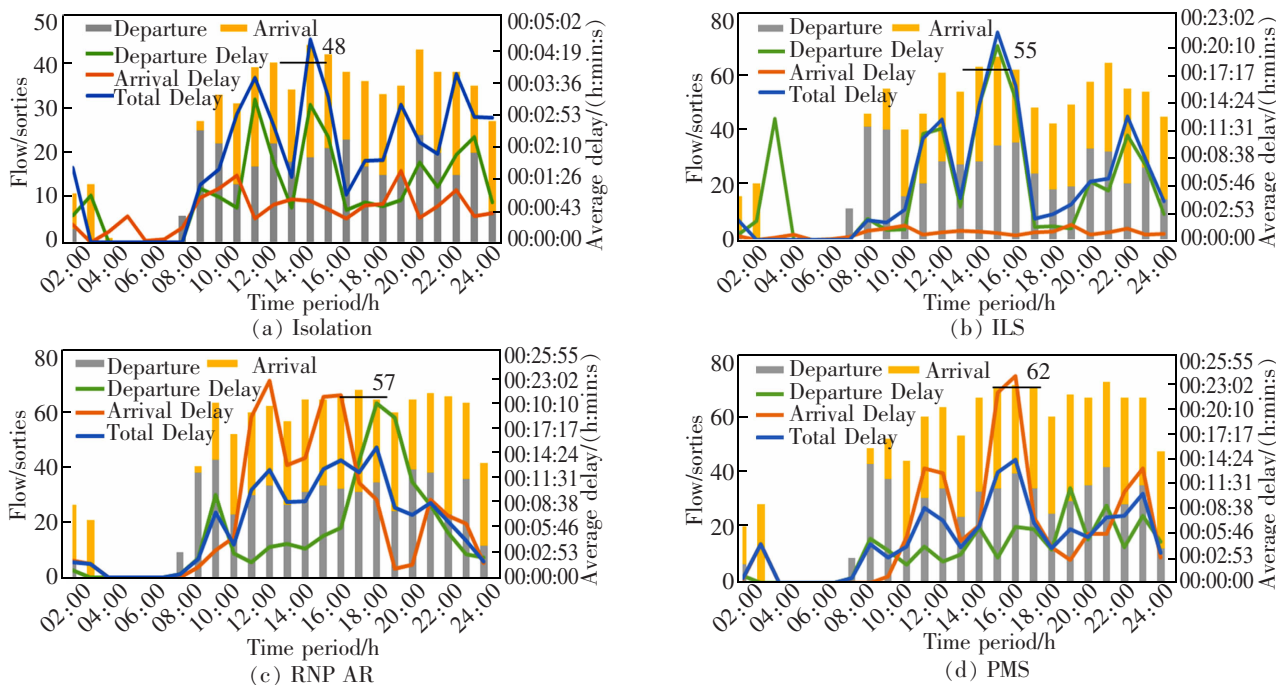


图 2 不同运行模式下的流量及延误分布图

Fig.2 Flow and delay distribution map under different operating modes

MATLAB 实现对基于熵权法改进的 TOPSIS 评价模型的编程,最终得到的评价因子权重值如表 5 所示。

表 5 评价因子的权重
Tab.5 The weight of the evaluation factor

Evaluation factor	Weight
Time-based efficiency	0.084 0
Fuel-based efficiency	0.119 7
Controller workload	0.006 3
Capacity utilization	0.790 0

得出以上各因子的权重值,将其带入综合评价模型中,得到综合评价结果如表 6 所示。

表 6 不同运行模式的最终评价得分
Tab.6 Final evaluation scores for different operating modes

Operation mode	Evaluation score
Isolation	0.038 8
ILS	0.231 3
RNP AR	0.304 3
PMS	0.425 6

可见,平行跑道的隔离运行模式不管是在进场效率还是容量利用方面,都处于较低水平;而独立运行的优势明显,进场效率明显提升的同时,结构容量也有大幅提升,其中的 RNP AR 独立运行模式在节约油耗方面具有突出优势,而点融合进场技术的运行模式有着更好的进场效能,不仅可以最大限度地提升航空器进场效率,还可在有限的空域资源内提升空域运行时刻容量,起到缓解机场航班延误的作用。

5 结论

本文研究了平行跑道不同运行模式下的进场效能,主要采用了基于熵权法改进的 TOPSIS 综合评价模型以及利用 AirTop 进行计算机仿真实验的方法,得出以下结论。

- 1) 提出了管制负荷对进场效率的影响指标,并与时间效率指标做相关性分析,相关指数为-0.93,证明其作为评价指标的科学性。
- 2) 选取南京禄口机场的历史航班运行数据作为研究对象进行仿真,并对结果进行分析,发现点融合

技术进场这一运行模式的评价分数为 0.425 6,为 4 种进场模式得分之最,证明了它的优越性。

参考文献:

[1] DEEPAK KULKARNI. Models of terminal arrival efficiency rate, NASA/TM-2019-220199 [R]. United States:NASA Ames Research Center Moffett Field, 2019.

[2] CAPPELLERAS L. Additional ASMA time performance indicator document[R]. Brussels:EUROCONTROL Performance Review Unit, 2015.

[3] 王鹏鹏. 终端区运行效率评估方法及模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.

WANG P P. Research on the evaluation method and model of operational efficiency in terminal area[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[4] 温瑞英,王红勇. 基于空中交通复杂性的管制员通话负荷回归分析[J]. 航空计算技术, 2015, 45(1): 14-16.

WEN R Y, WANG H Y. Regression analysis of communication workload based on air traffic complexity[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(1): 14-16.

[5] 张兆宁,林硕. 终端管制运行质量的投影寻踪评价模型[J]. 中国科技论文, 2018, 13(7): 803-808.

ZHANG Z N, LIN S. Comprehensive evaluation of terminal control operation quality based on projection pursuit[J]. China Science Paper, 2018, 13(7): 803-808.

[6] 王梦丽. 基于过程方法的空中交通管制系统运行效率评估[D]. 天津:中国民航大学, 2016.

WANG M L. Evaluation of operational efficiency of air traffic control system based on process approach[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.

[7] 赵焱飞,齐雁程. 基于燃油消耗的终端区进场效率评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14319-14325.

ZHAO Y F, QI Y C. Approaching efficiency evaluation of terminal airspace based on fuel consumption[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 14319-14325.

[8] ECKHARD A, TIM L, ROLF H. A comparative analysis of operations towards fuel efficiency in civil aviation[C]//Raes Aerodynamics Conference, 2010.

[9] HONG Y K, CHOI B, LEE K, et al. Dynamic robust sequencing and scheduling under uncertainty for the point merge system in terminal airspace[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19(9): 2933-2943.

[10] MAN L, DAINEL D. Conflict free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point merge system[J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 207-227.

[11] GALAVIZ-SCHOMISCH R, GULDING J, ZOU Z H. Measuring terminal arrival efficiency rates for individual run-

- ways[C]//16 th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Washington, D C; American Institute of Aeronautics and Astronautics(AIAA), 2016.
- [12] 王超. 飞行程序运行评估的理论方法及仿真应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- WANG C. Research on theoretical method and simulation application of flight procedure operation evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [13] 王勇. 浅析 RNP AR 技术的发展与应用[J]. 科教文汇, 2021(10): 75-77.
- WANG Y. Analysis on the development and application of RNP AR technology[J]. Science and Education Collection, 2021(10): 75-77.
- [14] 陈红英, 林兰之. RNP AR 离场程序设计及实例分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2022, 33(1): 17-22.
- CHEN H Y, LIN L Z. RNP AR departure procedure design and case analysis[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2022, 33(1): 17-22.
- [15] 夏正洪, 黄龙杨, 王剑辉. 基于点融合技术的机场终端区运行效率[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 1176-1181.
- XIA Z H, HUANG L Y, WANG J H. Operation efficiency of airport terminal area based on point fusion technology[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 1176-1181.
- [16] 刘博文, 胡荣, 张军峰, 等. 点汇聚系统的设计概要与应用展望[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(3): 92-101.
- LIU B W, HU R, ZHANG J F, et al. Design outline and application prospect of point merge system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(3): 92-101.
- [17] Civil Air Navigation Services Organization. Methodologies for calculating delays/improvement opportunity pools by phase of flight AS-BU180D-15 [R]. Amsterdam: CANSO, 2013.
- [18] 瞿勤亮, 高强, 任广建. 基于熵权法改进的航班延误影响因素评估研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(1): 56-58.
- QU Q L, GAO Q, REN G J. Evaluation of influencing factors of flight delay based on improved entropy weight method[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(1): 56-58.
- [19] 孙佳琦, 闫少华, 张兆宁. 博弈论赋权的终端区管制运行效率 GRA-TOPSIS 评价模型[J]. 航空计算技术, 2019, 49(2): 54-58.
- SUN J Q, YAN S H, ZHANG Z N. Evaluation model of terminal area control operation efficiency based on game theory and GRA-TOPSIS[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(2): 54-58.
- [20] 闫少华, 于琦, 张兆宁. 集成综合评价法的终端区管制运行效率评估[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3393-3398.
- YAN S H, YU Q, ZHANG Z N. Operational efficiency of terminal area control based on integrated comprehensive evaluation method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 3393-3398.
- [21] 王博, 王剑辉, 苏刚, 等. 基于 AIRTOP 仿真的管制空域运行品质综合评价[J]. 航空计算技术, 2020, 50(4): 61-65.
- WANG B, WANG J H, SU G, et al. Comprehensive evaluation of controlled airspace operational quality based on AIRTOP simulation[J]. Aeronautical Computing Technology, 2020, 50(4): 61-65.
- [22] VERMEERSCH W, ROLING P C, MIJATOVIC D. Runway pressure research: the effect of en-route delay absorption on the runway throughput[C]//SESAR Innovation Days, 2016.
- [23] 李丘, 尚锋. 基于 AirTop 的区域点融合程序运行效益评估[J]. 飞机设计, 2021, 41(2): 77-80.
- LI Q, SHANG F. Operational benefit evaluation of regional point fusion program based on AirTop[J]. Aircraft Design, 2021, 41(2): 77-80.
- [24] 柯雨辰, 胡明华, 杨磊, 等. 面向实际运行的战略航班时刻优化技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4260-4265.
- KE Y C, HU M H, YANG L, et al. Strategic flight schedule optimization technology for actual operation[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4260-4265.
- [25] 汪梦蝶, 胡明华, 赵征. 基于可接受调整量水平的航班时刻优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(4): 671-675.
- WANG M D, HU M H, ZHAO Z. Research on flight schedule optimization based on acceptable adjustment level[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2019, 43(4): 671-675.



第一作者: 丁文浩(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: WenhaoDing@nuaa.edu.cn。



通信作者: 胡明华(1962—), 男, 教授, 硕士, 博士研究生导师, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: minghuahu@nuaa.edu.cn。

(责任编辑: 刘棉玲)