

基于区间数的终端区运行效率模糊综合评估

谢春生¹,高婉琪^{1,2},卢飞¹

(1. 中国民航大学空中交通管理学院,天津 300300; 2. 春秋航空股份有限公司客舱服务部,上海 200051)

摘要:为了更好地对终端区运行效率进行评估,本文建立了终端区运行效率评估体系,将区间数理论应用到模糊综合评价法中进行终端区运行效率评估。首先,用K-means聚类算法对评语集进行量化;然后,从区间数距离的角度确定隶属度,并结合正态分布的有序加权平均(OWA, ordered weighted averaging)算子计算权重;最后,根据所建立的评估体系对国内机场的终端区运行效率进行评估。以北京首都国际机场、北京大兴国际机场、天津滨海国际机场和石家庄正定国际机场4个京津冀地区的典型机场为例,分别评估终端区运行效率,结果为:良、良、差和差。研究结果表明:评估结果与终端区实际运行情况相符合,验证了本文方法的可行性。

关键词:空中交通运输;终端区运行效率;区间数理论;模糊综合评价;有序加权平均(OWA)算子

中图分类号:V355 文献标志码:A 文章编号:1674-5590(2026)01-0010-07

Fuzzy comprehensive evaluation of terminal area operational efficiency based on interval numbers

XIE Chunsheng¹, GAO Wanqi^{1,2}, LU Fei¹

(1. College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Cabin Service Department, Spring Airlines Co., Ltd., Shanghai 200051, China)

Abstract: In order to better evaluate the operational efficiency of terminal areas, this paper establishes an evaluation system for terminal area operational efficiency, applying interval number theory to fuzzy comprehensive evaluation methods for evaluating terminal area operational efficiency. First, the K-means clustering algorithm is used to quantify the linguistic evaluation set. Then, membership degrees are determined from the perspective of interval number distances, and weights are calculated using the ordered weighted averaging (OWA) operator combined with normal distribution. Finally, the operational efficiency of terminal areas at domestic airports is evaluated based on the established evaluation system. Taking four typical airports in the Beijing-Tianjin-Hebei region, namely Beijing Capital International Airport, Beijing Daxing International Airport, Tianjin Binhai International Airport, and Shijiazhuang Zhengding International Airport, as examples, the terminal area operational efficiency is evaluated, resulting in ratings of good, good, poor, and poor, respectively. The research results show that the evaluation outcomes align well with the actual operating conditions of the terminal areas, verifying the feasibility of the method proposed in this paper.

Key words: air transportation; terminal area operational efficiency; interval number theory; fuzzy comprehensive evaluation; ordered weighted averaging (OWA) operator

终端区作为空中交通枢纽,具有复杂的空域结构,承载着庞大的空中交通流量。在终端区空域环境较为严峻的情况下,如何更加科学准确地评估终端区运行效率,为提高终端区运行效率提供相应的理论依据,是需要研究的重要内容。

目前国外对运行效率指标的系统研究相对比较

成熟。Bolczak等^[1]对空域性能指标进行了一系列研究,包括空域容量、安全、效率等。欧洲航行安全组织从容量、安全和环境等方面对空中交通管理系统的效率进行评估^[2],并确定了评估机场运行绩效的7个关键指标,包括容量、效率、可预测性等^[3]。国际民航组织^[4]发布了《全球空中交通管理运行概念》,提出了

效率是一个关键效能区域。此外,国外对空中交通管理系统运行效率和机场航班运行效率也有比较深入的研究^[5-10],但针对终端区运行效率的研究相对较少^[11-12]。

国内研究由于起步较晚,在运行效率方面的成果较少,主要分为机场运行效率、航空公司运行效率两个方面。其中机场运行效率的研究主要包括单机场运行效率和机场群运行效率。对于单机场运行效率,王战斌^[13]以运营成本、正式员工数量、登机口数量、跑道长度等作为输入变量,以经营收入、机场相关业务量等作为输出变量,整体评估国内机场运行效率;杨新渥等^[14]采用聚类分析划分中国枢纽机场等级,并通过数据包络分析(DEA, data envelopment analysis)模型计算枢纽机场运行效率,根据各机场发展方向和功能定位提出机场协同发展策略。对于机场群运行效率,梁的达^[15]对长三角机场群的运行现状进行了系统分析,通过灰色关联度分析法对长三角机场群的运行效率进行评估,并提出了提升长三角机场群运行效率的建议;乔晓莹等^[16]对中国四大机场群枢纽机场的运行效率进行了综合评价,依据组合熵权秩和比法,从不同方面对四大机场群的运行效率进行评估,分析了四大机场群的发展规律。而对于航空公司运行效率,学者多采用 DEA 法进行研究^[17-21]。

综上,目前相关学者对运行效率的研究主要集中在机场运行效率、航空公司运行效率等方面,对终端区的运行效率研究较少,因此对终端区运行效率进行科学评估和分析是需要研究的方向。本文建立了终端区运行效率评估体系,结合区间数理论及模糊综合评价法,以中国典型终端区之一——京津冀终端区为例,对该终端区运行效率进行评估。本文首先将 K-means 聚类算法应用到评语集的确定中,量化得到终端区运行效率的评价标准,把评语集用区间数表示,以增加评价标准划分的客观性;然后,结合基于正态分布的有序加权平均(OWA, ordered weighted averaging)算子确定权重,给每个评分专家赋予权重,避免以往确定权重方法中极端打分严重影响评分结果的情况;同时,提出一种新的隶属度确定方法,使隶属度能更加准确地反映终端区运行效率和评语集之间的隶属关系;最后,通过模糊综合评价对京津冀 4 个典型机场的运行效率进行实例分析。

1 终端区运行效率指标体系建立

中国空域存在各种因素的限制,加之终端区航路、航线交错复杂,使得终端区运行效率难以被评估,为

了更加准确和客观地对终端区运行效率进行分析,需要建立一套完整、全面反映终端区运行效率的评估体系。因此,本文以目的性、全面性、简洁性和可操作性为综合评估指标建立原则,从终端区资源使用情况、航班取消情况和航班延误情况 3 个方面进行终端区运行效率指标体系的建立,如图 1 所示。

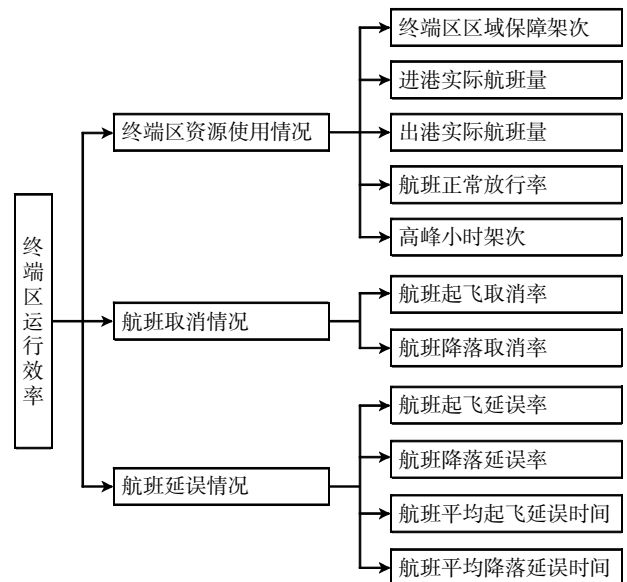


图 1 终端区运行效率指标体系

Fig.1 Indicator system for terminal area operational efficiency

2 终端区运行效率评估

2.1 基于 K-means 聚类算法确定评语集

模糊综合评价法是以隶属关系为基础,运用模糊数学原理,从不同角度对受多种因素影响、多种条件制约的事物或对象进行综合评价的方法,以期获得较为客观和全面的整体评价结果。其优势在于能够更加科学合理地量化评价对象中的各种模糊信息,从而有效地解决具有模糊性和非确定性的问题。

模糊综合评价中确定评语集是重要的一环,评语集即对每个指标的评判标准,后续需要根据确定好的评语集得出最终评价结果。若评语集划分不够科学和准确,得到的评价结果将会与预期或实际情况相差甚远。同时,由于人们对事物的认知通常是一个范围而不是一点,所以对每个指标评判标准的划分往往是一个区间,可以用区间数表示。区间数即用区间表示的数,是由闭区间上所有实数构成的集合,代表不确定性,与模糊数学的核心思想一致。

在过去对于模糊综合评价的研究中,通常根据文献总结或专家意见对评语集进行确定和分类,主观因

素过强,不能客观地对评价对象进行评价。本文采用K-means 聚类算法对每个指标的数据进行聚类分析,从而量化得到 k 个簇,将每个簇的最大值作为区间数的上界,最小值作为下界,从而得到评语集中每个指标的评价标准。用指标的真实数据聚类得到的评语集更具有科学性和客观性,可降低评估过程中的主观性。

2.2 正态分布的 OWA 算子确定权重

确定权重的方法可以分为主观和客观两种。客观赋权法的主要代表是熵权法,指标的变异程度是熵权法用来确定权重的依据,即变异程度越大,表明这个指标提供的信息量越多,则该指标的权重越大。但熵权法并不能准确地对权重进行衡量,因为变异程度是指数据的离散程度,同重要程度有着本质的区别,指标的变异程度高,其重要程度不一定高,反之亦然。主观赋权法包括层次分析法和专家打分法等,但这些方法都存在一定的缺陷,如专家对问题的认知程度不同,导致某一专家的打分在一定程度上出现偏差,从而使某一专家的打分严重影响整体得分情况。

为减少个别专家打分对评分结果的极端影响,本文采用基于正态分布的 OWA 算子确定权重。OWA 算子的本质是将数据从大到小排序,通过数据所在位置进行加权计算,从而达到消除不合理情况的目的。基于正态分布的 OWA 算子^[2]既考虑了数据的位置信息,又考虑了数据之间的比例关系,将所有专家打分的均值作为衡量标准,离均值较远的专家给予较低的权重,反之给予较高的权重。这样就给每位专家的打分结果也赋予了权重,避免了专家打分产生的极端值带来的影响。

设 n 位专家对第 i 个指标 $\tau_i(i = 1, 2, \dots, p)$ 的初始打分数据为 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, α_j 是其中排名第 j 位的数据 ($j = 1, 2, \dots, n$), μ 和 σ 分别为数据组的均值和标准差,则 $\boldsymbol{\theta} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是与 OWA 算子相关联的权重向量,即每个专家打分的权重为

$$w_j = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\alpha_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\alpha_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}} = \frac{e^{-\frac{(\alpha_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=1}^n e^{-\frac{(\alpha_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}} \quad (1)$$

可计算出所有指标的绝对权值向量 $\boldsymbol{\rho} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p)^T$, 其中

$$\eta_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \alpha_j \quad (2)$$

每个指标 τ_i 的相对权重为

$$\delta_i = \frac{\eta_i}{\sum_{i=1}^p \eta_i} \quad (3)$$

2.3 区间数距离确定隶属度

模糊综合评价的核心是确定因素集中的每个指标 τ_i 对评语集中每个评语的隶属度。假设 Y 为论域 G 的一个模糊子集,任意元素属于集合 Y 的程度用 $[0, 1]$ 闭区间上的一个实数 $u_Y(x)$ 表示。对于一个给定的 x_0 , $u_Y(x_0)$ 称为元素 x_0 的隶属度。

通常确定隶属度的方法主要有模糊统计和指派方法两种。这两种方法主观性过强,不能完全体现特定元素和集合的隶属关系,很难准确判断隶属度。隶属度的本质即为一个元素属于一个集合的程度,可看作该元素和集合的相似程度,即这个元素和该集合越相似,则认为该元素对于集合的隶属度越高。由于研究对象属于模糊概念,也可以用区间数表示,因此可将区间数距离转化为度量相似性的准则来表示隶属度。假定 $[A] = [a^-, a^+]$ 为某评语集 V 的某个元素, $[B] = [b^-, b^+]$ 为某因素集 Q 的某个元素,区间数 $[A]$ 与 $[B]$ 的距离越小,认为 $[B]$ 和 $[A]$ 的相似程度越高,即 $[A]$ 属于 $[B]$ 的程度越高,则隶属度越高。基于此,可将区间数之间的距离转化为隶属度,区间数 $[A]$ 与 $[B]$ 的距离可表示为

$$d = \sqrt{(c_a - c_b)^2 + \frac{1}{3}(\lambda_a - \lambda_b)^2} \quad (4)$$

式中: $c_a = \frac{1}{2}(a^+ + a^-)$ 为区间数 $[A]$ 的中点; $\lambda_a = \frac{1}{2}(a^+ - a^-)$ 为区间数 $[A]$ 的半径; $c_b = \frac{1}{2}(b^+ + b^-)$ 为区间数 $[B]$ 的中点; $\lambda_b = \frac{1}{2}(b^+ - b^-)$ 为区间数 $[B]$ 的半径。

2.4 模糊综合评价过程

(1) 划分第一因素集 Q 和第二因素集 Q_l 为

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k\} = \bigcup_{l=1}^k Q_l$$

$$Q_l = \{q_1^{(l)}, q_2^{(l)}, \dots, q_o^{(l)}\} \quad (5)$$

式中: l 为第二因素集编号; k 为第一因素集 Q 中元素个数; o 为第二因素集 Q_l 中元素个数。

(2) 确定评语集为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (6)$$

式中, m 为评语的个数。

(3) 根据评语集 V 对第二因素集 Q_l 确定综合评判矩阵,即

$$\mathbf{R}_l = \begin{bmatrix} r_{11}^{(l)} & \cdots & r_{1m}^{(l)} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{o1}^{(l)} & \cdots & r_{om}^{(l)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $r_{st}^{(l)}$ 为 Q_l 中第 s 个指标对 V 中第 t 个评语的隶属度, 表示为

$$r_{st}^{(l)} = \frac{1}{d_{st}^{(l)}} \quad s = 1, 2, \dots, o; t = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^m \frac{1}{d_{st}^{(l)}}$$

式中, d_{st} 为 Q_l 中第 s 个指标的区间数与 V 中第 t 个评语的区间数距离。

(4) 确定 Q_l 的综合评判为

$$D_l = Z_l \cdot R_l \quad (9)$$

式中, Z_l 为 Q_l 中各元素的权重

$$Z_l = [z_1^{(l)} \quad z_2^{(l)} \quad \dots \quad z_o^{(l)}] \quad (10)$$

(5) 对 Q 进行综合评判, 即

$$D = Z \cdot R \quad (11)$$

式中

$$R = [D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_k]^T \quad (12)$$

Z 为 Q 中各元素的权重, 即

$$Z = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_k] \quad (13)$$

(6) 根据最大隶属度原则判断终端区空域利用率的高低。

3 算例分析

3.1 实例计算

从中国民用航空局、航空公司及第三方平台收集整理了北京首都国际机场(ZBAA)、北京大兴国际机场(ZBAD)、天津滨海国际机场(ZBTJ)和石家庄正定国际机场(ZBSJ)(分别简称为首都机场、大兴机场、滨海机场和正定机场)等华北地区各机场两年的原始数据, 由于数据量庞大和篇幅限制, 本节不作具体数据展示。将数据进行处理和计算后得到各指标数据, 如表 1 所示, $q_1^{(1)}$ 为终端区区域保障架次; $q_2^{(1)}$ 为进港实际航班量; $q_3^{(1)}$ 为出港实际航班量; $q_4^{(1)}$ 为航班正常放行率; $q_5^{(1)}$ 为高峰小时架次; $q_1^{(2)}$ 为航班起飞取消率; $q_2^{(2)}$ 为航班降落取消率; $q_1^{(3)}$ 为航班起飞延误率; $q_2^{(3)}$ 为航班降落延误率; $q_3^{(3)}$ 为航班平均起飞延误时间; $q_4^{(3)}$ 为航班平均降落延误时间。

表 1 各机场指标数据

Tab.1 Indicator data for each airport

机场	$q_1^{(1)}$ /架	$q_2^{(1)}$ /架	$q_3^{(1)}$ /架	$q_4^{(1)}$	$q_5^{(1)}$ /架	$q_1^{(2)}$	$q_2^{(2)}$	$q_1^{(3)}$	$q_2^{(3)}$	$q_3^{(3)}$ /min	$q_4^{(3)}$ /min
首都机场	[1 036, 1 455]	[304, 495]	[317, 496]	[0.584 2, 0.898 5]	[30, 50]	[0.098 4, 0.429 6]	[0.104 7, 0.401 9]	[0.096 2, 0.631 6]	[0.093 3, 0.615 4]	[4.03, 121.70]	[13.71, 94.09]
大兴机场	[537, 1 043]	[132, 279]	[138, 279]	[0.506 6, 0.913 3]	[21, 40]	[0.082 2, 0.511 1]	[0.078 2, 0.475 3]	[0.023 8, 0.515 2]	[0.025 8, 0.500 0]	[1.18, 71.28]	[6.95, 73.16]
滨海机场	[491, 648]	[170, 203]	[170, 200]	[0.716 7, 0.883 7]	[10, 20]	[0.120 5, 0.284 0]	[0.103 3, 0.282 7]	[0.105 8, 0.580 5]	[0.056 1, 0.573 0]	[3.61, 78.99]	[10.80, 115.42]
正定机场	[263, 352]	[97, 113]	[97, 115]	[0.720 4, 0.845 6]	[13, 26]	[0.146 2, 0.264 7]	[0.158 7, 0.293 7]	[0.072 2, 0.636 4]	[0.072 2, 0.600 0]	[1.81, 69.44]	[8.65, 79.47]

结合模糊综合评价的步骤可以确定第一因素集 $Q = \{Q_1, Q_2, Q_3\}$, 其中, Q_1, Q_2, Q_3 分别代表终端区资源使用情况、航班取消情况、航班延误情况。第二因素集 $Q_1 = \{q_1^{(1)}, q_2^{(1)}, q_3^{(1)}, q_4^{(1)}, q_5^{(1)}\}$; $Q_2 = \{q_1^{(2)}, q_2^{(2)}\}$; $Q_3 = \{q_1^{(3)}, q_2^{(3)}, q_3^{(3)}, q_4^{(3)}\}$ 。评语集 $V = \{\text{优, 良, 中, 差, 极差}\}$ 。进行

聚类计算后得到所有指标的评语集聚类结果, 如表 2 所示。

本文邀请了 50 位专家对每个指标的重要程度进行打分。采用 0~100 分的评分标准, 0 分表示该指标的重要性最低, 100 分则表示该指标的重要性最高。根据

表 2 评语集聚类结果

Tab.2 Clustering results of the linguistic evaluation set

评语	$q_1^{(1)}$ /架	$q_2^{(1)}$ /架	$q_3^{(1)}$ /架	$q_4^{(1)}$	$q_5^{(1)}$ /架	$q_1^{(2)}$	$q_2^{(2)}$	$q_1^{(3)}$	$q_2^{(3)}$	$q_3^{(3)}$ /min	$q_4^{(3)}$ /min
优	[1 086, 1 579]	[409, 517]	[381, 516]	[0.805 7, 0.979 9]	[39, 50]	[0.018 0, 0.190 8]	[0.017 2, 0.190 7]	[0, 0.070 8]	[0, 0.076 9]	[0, 11.36]	[0, 13.57]
良	[740, 1 083]	[313, 408]	[259, 378]	[0.638 1, 0.805 2]	[28, 38]	[0.191 2, 0.357 8]	[0.191 3, 0.356 2]	[0.071 4, 0.162 4]	[0.077 3, 0.184 2]	[11.39, 30.19]	[13.58, 28.39]
中	[435, 739]	[222, 312]	[158, 257]	[0.431 7, 0.637 9]	[18, 27]	[0.358 5, 0.566 7]	[0.356 6, 0.561 8]	[0.162 8, 0.283 8]	[0.184 8, 0.326 1]	[30.56, 64.02]	[28.48, 51.77]
差	[201, 433]	[127, 221]	[76, 157]	[0.204 9, 0.430 3]	[8, 17]	[0.568 6, 0.798 9]	[0.356 6, 0.561 8]	[0.284 2, 0.438 6]	[0.327 0, 0.500 0]	[64.73, 125.97]	[52.04, 97.00]
极差	[1, 199]	[0, 126]	[0, 75]	[0, 0.203 6]	[0, 7]	[0.801 7, 1.000 0]	[0.791 5, 1.000 0]	[0.442 3, 1.000 0]	[0.505 8, 1.000 0]	[173.79, 329.07]	[101.61, 243.04]

正态分布的 OWA 算子可以得到第一因素集和第二因素集的权重,如表 3 所示。

表 3 指标权重
Tab.3 Indicator weights

指标	权重	指标	权重
Q_1	0.353 6	$q_1^{(2)}$	0.502 0
$q_1^{(1)}$	0.211 5	$q_2^{(2)}$	0.498 0
$q_2^{(1)}$	0.196 8	Q_3	0.350 5
$q_3^{(1)}$	0.198 4	$q_1^{(3)}$	0.252 3
$q_4^{(1)}$	0.195 2	$q_2^{(3)}$	0.253 6
$q_5^{(1)}$	0.198 1	$q_3^{(3)}$	0.249 3
Q_2	0.296 0	$q_4^{(3)}$	0.244 8

对于首都机场,可以计算出评语集 V 对第二因素集的综合评判矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.450 3 & 0.300 1 & 0.139 0 & 0.063 7 & 0.046 9 \\ 0.250 2 & 0.197 7 & 0.162 4 & 0.158 0 & 0.231 7 \\ 0.465 5 & 0.243 9 & 0.129 2 & 0.086 8 & 0.074 5 \\ 0.106 2 & 0.752 0 & 0.078 2 & 0.038 3 & 0.025 4 \\ 0.211 2 & 0.217 9 & 0.204 0 & 0.183 1 & 0.183 7 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.066 4 & 0.837 7 & 0.053 7 & 0.025 5 & 0.016 8 \\ 0.109 1 & 0.747 0 & 0.079 5 & 0.038 8 & 0.025 6 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.034 2 & 0.045 0 & 0.076 4 & 0.811 3 & 0.033 8 \\ 0.090 8 & 0.126 8 & 0.271 9 & 0.434 8 & 0.075 7 \\ 0.095 9 & 0.111 8 & 0.158 0 & 0.321 7 & 0.312 6 \\ 0.127 1 & 0.136 2 & 0.186 7 & 0.425 7 & 0.124 2 \end{bmatrix}$$

从而可以得到第二因素集的综合评判

$$D_1 = Z_1 \cdot R_1 = [0.299 4 \quad 0.340 7 \quad 0.142 7 \quad 0.105 5 \quad 0.111 6]$$

$$D_2 = Z_2 \cdot R_2 = [0.087 7 \quad 0.792 5 \quad 0.066 5 \quad 0.032 1 \quad 0.021 2]$$

$$D_3 = Z_3 \cdot R_3 = [0.086 7 \quad 0.104 7 \quad 0.173 3 \quad 0.499 4 \quad 0.135 9]$$

继而得到

$$R = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 4 & 0.340 7 & 0.142 7 & 0.105 5 & 0.111 6 \\ 0.087 7 & 0.792 5 & 0.066 5 & 0.032 1 & 0.021 2 \\ 0.086 7 & 0.104 7 & 0.173 3 & 0.499 4 & 0.135 9 \end{bmatrix}$$

由此计算出第一因素集的综合评判

$$D_{ZBAA} = Z \cdot R = [0.162 2 \quad 0.391 7 \quad 0.130 9 \quad 0.221 8 \quad 0.093 4]$$

3.2 结果分析

根据本文建立的模糊综合评估模型,可分别计算出首都机场、大兴机场、滨海机场和正定机场在整个华北地区范围内 2020 年 8 月终端区总体的运行效率综合评判结果,如图 2 所示。

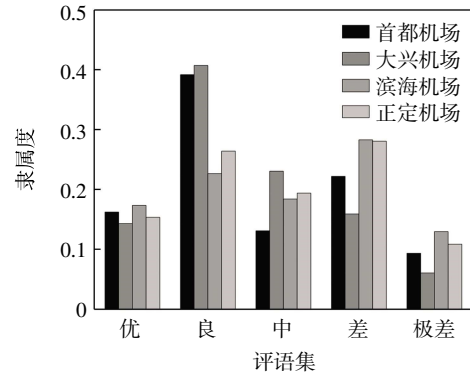


图 2 综合评判结果

Fig.2 Comprehensive evaluation results

依据最大隶属度原则,可以得出首都机场、大兴机场、滨海机场和正定机场的日均终端区运行效率的评语集综合评判结果为 $\text{Max}(D_{ZBAA}) = 0.301 6$ 、 $\text{Max}(D_{ZBAD}) = 0.318 6$ 、 $\text{Max}(D_{ZBTJ}) = 0.367 6$ 、 $\text{Max}(D_{ZBSJ}) = 0.352 1$,分别对应了评语标准中的良、良、差、差。从综合评判结果可以看出,京津冀 4 个子系统的终端区运行效率存在两极差异较大的情况。

4 个机场在终端区资源使用情况和航班延误情况两个准则层的隶属度如表 4—表 7 所示。

表 4 首都机场终端区资源使用情况和航班延误情况的隶属度

Tab.4 Membership degrees of resource utilization and flight delay conditions in the terminal area of Beijing Capital International Airport

指标	优	良	中	差	极差
$q_1^{(1)}$	0.450 3	0.300 1	0.139 0	0.063 7	0.046 9
$q_2^{(1)}$	0.250 2	0.197 7	0.162 4	0.158 0	0.231 7
$q_3^{(1)}$	0.465 5	0.243 9	0.129 2	0.086 8	0.074 5
$q_4^{(1)}$	0.106 2	0.752 0	0.078 2	0.038 3	0.025 4
$q_5^{(1)}$	0.211 2	0.217 9	0.204 0	0.183 1	0.183 7
$q_1^{(3)}$	0.034 2	0.045 0	0.076 4	0.811 3	0.033 2
$q_2^{(3)}$	0.090 8	0.126 8	0.271 9	0.434 8	0.075 7
$q_3^{(3)}$	0.095 9	0.111 8	0.158 0	0.321 7	0.312 6
$q_4^{(3)}$	0.127 1	0.136 2	0.186 7	0.425 7	0.124 2

由表 4—表 7 可知,各机场对于终端区资源使用情况的隶属度为 $\text{Max}(D_{1,ZBAA}) = 0.340 7$ 、 $\text{Max}(D_{1,ZBAD}) = 0.403 5$ 、 $\text{Max}(D_{1,ZBTJ}) = 0.324 5$ 、 $\text{Max}(D_{1,ZBSJ}) = 0.261 0$,分别对应评语标准中的良、良、差、差。可以看出,4 个机

表 5 大兴机场终端区资源使用情况和航班延误情况的隶属度

Tab.5 Membership degrees of resource utilization and flight delay conditions in the terminal area of Beijing Daxing International Airport

指标	优	良	中	差	极差
$q_1^{(1)}$	0.649 3	0.154 7	0.100 3	0.053 7	0.042 0
$q_2^{(1)}$	0.148 0	0.149 5	0.171 2	0.214 1	0.317 2
$q_3^{(1)}$	0.187 5	0.303 1	0.307 9	0.116 2	0.085 3
$q_4^{(1)}$	0.070 1	0.801 5	0.073 6	0.033 3	0.021 5
$q_5^{(1)}$	0.181 7	0.379 8	0.215 1	0.133 4	0.090 1
$q_1^{(3)}$	0.101 8	0.152 6	0.439 8	0.249 8	0.056 0
$q_2^{(3)}$	0.052 8	0.087 4	0.755 0	0.079 2	0.025 6
$q_3^{(3)}$	0.098 3	0.133 2	0.254 3	0.476 1	0.038 1
$q_4^{(3)}$	0.126 2	0.139 3	0.217 0	0.462 3	0.055 2

表 6 滨海机场终端区资源使用情况和航班延误情况的隶属度

Tab.6 Membership degrees of resource utilization and flight delay conditions in the terminal area of Tianjin Binhai International Airport

指标	优	良	中	差	极差
$q_1^{(1)}$	0.024 7	0.077 8	0.138 0	0.347 9	0.411 6
$q_2^{(1)}$	0.127 8	0.192 7	0.271 2	0.295 3	0.112 8
$q_3^{(1)}$	0.075 8	0.112 9	0.213 7	0.314 2	0.283 4
$q_4^{(1)}$	0.350 7	0.413 2	0.122 3	0.067 3	0.046 5
$q_5^{(1)}$	0.049 0	0.080 5	0.191 1	0.561 0	0.118 3
$q_1^{(3)}$	0.056 6	0.076 3	0.139 8	0.679 2	0.048 1
$q_2^{(3)}$	0.100 4	0.148 4	0.414 5	0.269 7	0.066 9
$q_3^{(3)}$	0.094 1	0.123 5	0.232 8	0.501 8	0.047 8
$q_4^{(3)}$	0.109 4	0.114 5	0.142 4	0.265 5	0.368 1

表 7 正定机场终端区资源使用情况和航班延误情况的隶属度

Tab.7 Membership degrees of resource utilization and flight delay conditions in the terminal area of Shijiazhuang Zhengding International Airport

指标	优	良	中	差	极差
$q_1^{(1)}$	0.036 1	0.088 2	0.127 6	0.307 8	0.440 4
$q_2^{(1)}$	0.143 9	0.197 3	0.247 5	0.265 7	0.145 7
$q_3^{(1)}$	0.074 6	0.104 2	0.170 7	0.324 3	0.326 2
$q_4^{(1)}$	0.275 4	0.493 4	0.121 8	0.065 0	0.044 4
$q_5^{(1)}$	0.076 9	0.136 8	0.449 8	0.233 9	0.102 6
$q_1^{(3)}$	0.046 1	0.061 1	0.106 0	0.744 2	0.042 6
$q_2^{(3)}$	0.098 5	0.140 8	0.333 3	0.353 0	0.074 4
$q_3^{(3)}$	0.099 3	0.136 6	0.267 8	0.462 2	0.034 1
$q_4^{(3)}$	0.126 9	0.138 5	0.205 0	0.457 1	0.072 5

场对于终端区资源使用情况的较大差异是造成综合评判结果差距的主要原因。首都机场对指标 $q_1^{(1)}$ 、 $q_2^{(1)}$ 、 $q_3^{(1)}$ 的隶属度最高皆为优,对指标 $q_4^{(1)}$ 、 $q_5^{(1)}$ 的隶属度最高为良;大兴机场对指标 $q_1^{(1)}$ 的隶属度最高为优, $q_2^{(1)}$ 为极差, $q_3^{(1)}$ 为中, $q_4^{(1)}$ 、 $q_5^{(1)}$ 为良;而滨海和正定两机场隶属度最高主要分布在中到极差。终端区资源使用情况中各指标的隶属度结果呈现了两极差异性,原因是北京作为首都,拥有更好的基础设施和健全的公共服务,对城市各方面的发展具有巨大的吸引力,由此产生了“虹吸效应”,即大城市将周边小城市的资源吸引到自己身边的一种现象,导致京津冀终端区时刻资源配置不平衡。在大兴机场落地实施运行之前,首都机场一直处于超负荷运行状态,航班时刻资源无法满足用户的需求,由于这种“虹吸效应”的影响,滨海机场和正定机场无法与之竞争;大兴机场建成运行后,北京可供使用的航班时刻资源增加,之前首都机场无法分配的航班则无须调度到附近的津冀两场或直接取消,使得京津冀发展不均衡的趋势愈发严重。

由表 4—表 7 可知,各机场对于航班延误情况的隶属度为 $\text{Max}(D_{3,ZBAA}) = 0.499 4$ 、 $\text{Max}(D_{3,ZBAD}) = 0.420 6$ 、 $\text{Max}(D_{3,ZBTJ}) = 0.448 0$ 、 $\text{Max}(D_{3,ZBSJ}) = 0.522 2$,分别对应评语标准中的差、中、差、差。从各机场对航班延误情况这一因素集的隶属度结果来看,4 个机场的航班流终端区的延误率和延误时间基本处于中到差的水平,表明京津冀终端区整体的航班延误情况较为严重。本文所涉及的延误时间包括空中等待调度的延误时间和起飞落地时航班在跑道上滑行所造成的延误时间。因此,分别对终端区关键航路点处的延误及跑道起降延误时间进行了统计,发现北京两机场航班在终端区关键航路点处的延误占总延误的比重分别为 61.9% 和 58.4%,说明由空域资源限制导致的交通拥堵情况较为严重;而津冀两场跑道起降延误所占比重分别为 56.3% 和 72.8%,说明跑道系统的运行情况较差,无法准时对飞机进行放行。该情况符合京津冀地区整体空域和航班资源分配不均衡、航班延误时间较长且延误率较高的实际情况。

本次实例分析中的指标数据均可以从实时航班数据网站和国家公布的文件中获取,得到的指标可以合理地反映终端区的实际运行现状。本文得出的综合评估结果仅针对于整个华北地区,若需对其他地区进行评估只需对数据源进行更换即可,因此本研究对评

估中国所有机场的终端区运行效率可提供一定的参考价值。

4 结语

本文综合考虑了终端区运行效率的影响因素及指标的可行性,构建了终端区运行效率指标体系。将区间数的概念和模糊综合评价法相结合,采用 K-means 聚类算法确定了终端区运行效率的评价标准,并提出了通过区间数距离确定隶属度的方法,对京津冀地区的终端区运行效率进行评估,得出北京两个机场的运行效率皆为良,而天津和石家庄两个机场的运行效率皆为差的结果。综合评估结果揭示了京津冀对于终端区资源不能得到有效且平衡的配置现状,且在终端区运行过程中共用的空域资源存在大量的航班冲突情况,整个终端区航班延误情况严重。综合评估结果与 4 个机场实际情况相符合,验证了模型的有效性,且可适用于中国所有机场终端区运行效率的计算。

基于本文的研究,后续可以继续补充和完善终端区运行效率评估体系,对于影响因素、评估指标与运行效率之间的因果关系可以进行进一步的研究和分析,得出更具有普遍性的结论,并根据评估结果分析讨论如何提高终端区的运行效率。

参考文献:

- [1] BOLCZAK C N, HOFFMAN J H, JENSEN A J, et al. National airspace system performance measurement: overview[R]. McLean: Center for Advanced Aviation System Development, 1997.
- [2] PELS E, NIJKAMP P, RIETVELD P. Inefficiencies and scale economies of European airport operations[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2003, 39(5): 341-361.
- [3] EUROCONTROL PERFORMANCE REVIEW UNIT. ATM airport performance (ATMAP) framework: measuring airport airside and nearby airspace performance (version 1)[R]. Brussels: EUROCONTROL, 2009.
- [4] ICAO. Global air traffic management operational concept: DOC 9854[S]. Montreal: ICAO, 2005.
- [5] MARTÍN J C, ROMÁN C. A benchmarking analysis of Spanish commercial airports. A comparison between SMOP and DEA ranking methods[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2006, 6(2): 111-134.
- [6] REYNOLDS T. Analysis of lateral flight inefficiency in global air traffic management[C]//The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO, Anchorage, Alaska. AIAA, 2008: AIAA2008-8865.
- [7] KNORR D, CHEN X, ROSE M, et al. Estimating ATM efficiency pools in the descent phase of flight[R]. Cambridge, MA: Volpe National Transportation Systems Center, 2011.
- [8] DEARMON J, MAHASHABDE A, HOGAN B. Departure flow efficiency and the identification of causes for inefficiencies[C]//2014 IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC), October 5-9, 2014, Colorado Springs, CO, USA. IEEE, 2014: 1-25.
- [9] LOZANO S, GUTIÉRREZ E. Slacks-based measure of efficiency of airports with airplanes delays as undesirable outputs[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 131-139.
- [10] LI Y, WANG Y Z, CUI Q. Evaluating airline efficiency: an application of virtual frontier network SBM[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 81: 1-17.
- [11] DEARMON J S, COOPER W, MASEK T, et al. Measuring flight efficiency in the national airspace system[C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, June 13-17, 2016, Washington, D C. Reston, Virginia: AIAA, 2016: 4359.
- [12] RUAN L Y, GARDI A, SABATINI R. Operational efficiency analysis of Beijing multi-airport terminal airspace[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 92: 102013.
- [13] 王战斌. 基于 DEA 方法的中国机场运营效率实证研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(6): 186-191.
- [14] 杨新渥, 王倩. 基于聚类分析和 DEA 的枢纽机场评价研究[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(3): 5-8.
- [15] 梁的达. 长三角机场群运行效率评价方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [16] 乔晓莹, 贺瑞瑞. 基于组合熵权秩和比法的机场群运行效率综合分析[J]. *综合运输*, 2021, 43(4): 15-21, 60.
- [17] 张蔚. 基于 DEA 的我国低成本航空公司经营效率评价研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [18] 张伟娜, 徐月芳. 基于 DEA 拥塞模型的我国航空公司效率分析[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2014, 25(6): 9-14.
- [19] 范二强. 基于 SFA 法的航空公司运营效率分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2016.
- [20] 李焯, 王延章, 崔强. 考虑非期望产出的航空公司网络 RAM 效率评价[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2648-2660.
- [21] 王子娇. 基于网络非精确 DEA 和灰平面算法的航空公司效率预测研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [22] 吴坚. 基于 OWA 算子理论的混合型多属性群决策研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.

(责任编辑: 明月)