

12-30-2023

## Airport Operational Efficiency Evaluation Based on Combined Weighting-TOPSIS Model

Jie Hu

*The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;  
State Key Laboratory of Air Traffic Management System, Nanjing 210007, China, hujie5@cetc.com.cn*

Fan Bao

*The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;  
State Key Laboratory of Air Traffic Management System, Nanjing 210007, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Airport Operational Efficiency Evaluation Based on Combined Weighting-TOPSIS Model

## Abstract

**Abstract:** In order to improve the scientificity and comprehensiveness of the airport operational efficiency evaluation, a new method based on the combined weighting-TOPSIS model is proposed. From 4 dimensions of stand operational efficiency, passenger boarding efficiency, aircraft taxiing efficiency, and coordination efficiency, a new airport operational efficiency evaluation system consisting of 11 indicators, such as flight approach rate, corridor bridge turnover rate, stand change ratio, etc., are constructed. G1 method and entropy weight method are implemented respectively to calculate the subjective and objective weights of the evaluation indicators, and the combined weights are calculated by minimizing the deviation of subjective and objective attributes. TOPSIS is implemented to calculate the comprehensive evaluation index of target airport. Using the proposed evaluation model, the operational efficiency analysis of 8 domestic airports in three categories is carried out, and the corresponding comprehensive operational efficiency grades and ranking list are obtained. Research results show that the proposed airport operational efficiency evaluation model can effectively identify the main factors affecting the airport operational efficiency, and has certain reference value.

## Keywords

operational efficiency evaluation, combined weighting, G1 method, entropy weight method, technique for order performance by similarity to ideal solution(TOPSIS)

## Recommended Citation

Hu Jie, Bao Fan. Airport Operational Efficiency Evaluation Based on Combined Weighting-TOPSIS Model[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2570-2581.

# 基于组合赋权-TOPSIS模型的机场运行效率评价

胡杰<sup>1,2</sup>, 鲍帆<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210007; 2. 空中交通管理系统全国重点实验室, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为提高机场运行效率评价结果的科学性和全面性, 提出了一种基于组合赋权-TOPSIS (technique for order performance by similarity to ideal solution)模型的机场运行效率评价方法。从机位运行效率、旅客登机效率、飞机滑行效率和协同效率4个维度出发, 构建了由航班靠桥率、廊桥周转率、机位变更比例等11个指标组成的机场运行效率评价体系; 利用G1法、熵权法分别计算评价指标主观和客观权重, 以最小化主客观加权属性偏离程度为目标计算组合权重; 使用TOPSIS计算待评价机场综合评价指数。利用该模型分析国内3类共8家机场的运行效率, 可以得到各评价对象的运行效率等级和综合排名。结果表明: 该模型能够有效探明影响机场运行效率的主要因素, 具有一定的参考价值。

**关键词:** 运行效率评价; 组合赋权; G1法; 熵权法; TOPSIS(technique for order performance by similarity to ideal solution)

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2570-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0769

**引用格式:** 胡杰, 鲍帆. 基于组合赋权-TOPSIS模型的机场运行效率评价[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2570-2581.**Reference format:** Hu Jie, Bao Fan. Airport Operational Efficiency Evaluation Based on Combined Weighting-TOPSIS Model[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2570-2581.

## Airport Operational Efficiency Evaluation Based on Combined Weighting-TOPSIS Model

Hu Jie<sup>1,2</sup>, Bao Fan<sup>1,2</sup>(1. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;  
2. State Key Laboratory of Air Traffic Management System, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to improve the scientificity and comprehensiveness of the airport operational efficiency evaluation, a new method based on the combined weighting-TOPSIS model is proposed. From 4 dimensions of stand operational efficiency, passenger boarding efficiency, aircraft taxiing efficiency, and coordination efficiency, a new airport operational efficiency evaluation system consisting of 11 indicators, such as flight approach rate, corridor bridge turnover rate, stand change ratio, etc., are constructed. G1 method and entropy weight method are implemented respectively to calculate the subjective and objective weights of the evaluation indicators, and the combined weights are calculated by minimizing the deviation of subjective and objective attributes. TOPSIS is implemented to calculate the comprehensive evaluation index of target airport. Using the proposed evaluation model, the operational efficiency analysis of 8 domestic airports in three categories is carried out, and the corresponding comprehensive operational efficiency grades and ranking list are obtained. Research results show that the proposed airport operational efficiency evaluation model can effectively identify the main factors

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1600104); 江苏省科技项目(BZ2020001)

第一作者: 胡杰(1987-), 男, 高工, 博士, 研究方向为机场运行规划、控制与评估。E-mail: hujie5@cetc.com.cn

affecting the airport operational efficiency, and has certain reference value.

**Keywords:** operational efficiency evaluation; combined weighting; G1 method; entropy weight method; technique for order performance by similarity to ideal solution(TOPSIS)

## 0 引言

我国民航持续高质量发展, 民航运输总周转量、旅客周转量、货邮周转量均已位居世界第二<sup>[1]</sup>。快速增长的运输量给民航业的发展带来了巨大压力, 主要表现在大型机场运行压力日益增大, 航班延误问题日益突出。2022年1月全球出港航班量前20的机场准点率排名仅广州白云机场1家上榜<sup>[2]</sup>。为此, 国内各大机场在日常运营中采取了一系列信息化举措提高生产运行能力, 如机场协同决策系统和信息集成系统的建设、旅客自助值机、无纸化登机等。虽然这些新技术在一定程度上提高了机场运行效率, 但是从整体上看, 一方面我国机场在运行效率提升方面的信息化建设水平参差不齐, 急需一套科学、全面的标准体系进行引导; 另一方面由于缺乏一套可量化的机场运行效率评价指标体系和方法, 难以对机场的信息化建设效益准确评估, 不能为机场运行效率的持续提升提供有效依据。因此, 建立一套科学、全面的机场运行效率评价指标体系, 对机场运行效率进行定量分析评价, 发掘机场运行问题和效率短板是我国未来智慧机场建设过程中亟需解决的问题之一。

在评价指标体系构建研究方面, 目前, 国内外学者在机场运行效率评价方面开展了诸多研究工作, 最早可溯源于20世纪70年代, Gillen等<sup>[3]</sup>提出了基于数据包络分析方法的机场效率评价方法, 围绕机场管理和监管策略建立了综合评价指标体系。Hasan等<sup>[4]</sup>对土耳其主要机场的运营效能进行了系统性的评估研究, 建立了包含机场跑道长度、跑道数量、旅客吞吐量、货邮吞吐量, 以及近机位数量在内的机场运营效能评估体系。王俊丹等<sup>[5]</sup>从基础设施、技术条件、人力资源、竞争

因素等指标出发, 建立了机场运行效率评价指标体系, 采用数据包络分析方法从静态和动态2个维度对我国主要机场的运行效率进行了评价分析。丛玮等<sup>[6]</sup>建立了包含机位、登机口、滑行、正常性、保障量5个维度在内的多层次机场运行效率评价指标体系, 采用可拓层次分析法与专家打分法对机场运行效率进行评价。除此之外, 部分学者围绕如何提高机场运行效率开展了相关工作, 如航班-登机口多目标优化<sup>[7]</sup>、场面航空器最优滑行策略设计<sup>[8]</sup>等。

在评价方法研究方面, 确定评价指标权重是实现科学评价的前提之一。为了实现机场运行效率科学评价, 需要对每项评价指标赋以适当的权重。常用的指标权重计算方法有主观赋权和客观赋权两大类, 其中, 主观权重计算方法有层次分析法<sup>[9]</sup>、G1法<sup>[10]</sup>、德尔菲法<sup>[11]</sup>等; 客观权重计算方法有熵权法<sup>[12]</sup>、Critic权重法<sup>[13]</sup>、变异系数法<sup>[14]</sup>等。层次分析法适用于对多个层次指标分别计算权重, 该方法根据专家对评价对象的认知构造判断矩阵, 并以此计算指标权重。因此, 指标权重结果具有较强的主观性, 且需要对判断矩阵进行一致性检验, 当同一层级指标较多时, 判断矩阵构造难度大。G1法是郭亚军等<sup>[15-16]</sup>在层次分析法的基础上提出的一种适用于解决多因素、大规模复杂评价问题的指标权重计算方法。与层次分析法相比, 该方法无需对指标的相对重要性进行两两比较, 减少了权重计算工作量, 且不需要进行判断矩阵一致性检验, 解决了大规模复杂评价问题判断矩阵难以收敛的问题。熵权法是一种根据各项评价指标历史实测数据计算指标权重的客观赋权方法, 评价指标数据波动越大, 则其对应的权重也越大, 因此, 相比主观赋权法具有较高的可信度和精准度。但是, 该方法由于缺少业务经

验指导, 指标权重可能失真, 且对样本的依赖性较大, 随着建模样本不断变化, 权重会发生一定波动<sup>[17]</sup>。相比Critic权重法和变异系数法, 熵权法的优点在于最大程度地利用了评价指标的属性值来计算各项指标的权重系数。考虑到单一赋权方法会导致评价指标权重偏向性问题, 通常组合使用多种权重计算方法以获得评价指标综合权重<sup>[18-19]</sup>。根据权重计算原理的不同, 综合权重融合方法也不尽相同, 常见有权重平均法、线性加权法等。

综上所述, 国内外学者从评价指标体系的构建、指标权重的确定, 以及综合评价方法的研究等多个层面丰富了机场运行效率评价研究内容, 提供了有价值的参考依据, 但依然存在以下不足之处: ①构建的评价指标体系无法覆盖机场航班保障全流程, 导致评价结果可参考性低; ②计算指标权重时偏向使用单一赋权法, 使得评价结果具有较强的片面性。因此, 本文在开展现场实地调研、查阅标准文献和咨询专家的基础上, 建立了机场运行效率评价指标体系; 利用G1法和熵权法分别计算评价指标主观和客观权重, 并以最小化主客观加权属性偏离程度为优化目标, 建立了指标权重组合赋权模型, 计算得到评价指标组合权重; 利用逼近理想解排序法(technique for order performance by similarity to ideal solution, TOPSIS)计算得到待评价机场相对接近度, 即为机场运行效率综合评价指数, 以期为机场运行效率评价提供一种新思路。

## 1 研究方法

### 1.1 运行效率评价方法

本文建立了机场运行效率综合评价模型, 围绕机场航班保障全流程, 选取停机位利用、旅客安检登机、进出港航班滑行等关键因素, 从机位运行效率、旅客登机效率、飞机滑行效率和协同效率4个方面, 选取和构建机场运行效率评价指标体系, 对机场运行效率进行综合评价。

图1为运行效率评价流程, 步骤如下:

- (1) 确定评价指标, 构建机场运行效率评价指标体系, 并按照旅客吞吐量选择典型机场, 获取评价指标原始数据;
- (2) 数据标准化处理, 包括数据一致化和无量纲化处理;
- (3) 利用G1法、熵权法分别计算评价指标主观权重和客观权重, 并由此计算得到评价指标综合权重;
- (4) 计算待评价机场运行效率综合指数, 并结合评价标准等级分析结果。

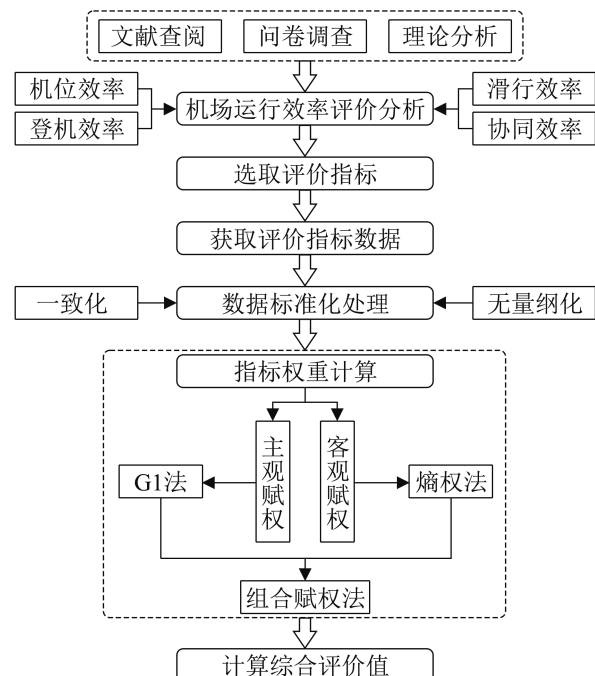


图1 机场运行效率评价流程

Fig. 1 Airport operational efficiency evaluation process

### 1.2 机场运行效率评价指标体系

建立系统、完整的评价指标体系是进行科学评价的基础, 在构建机场运行效率评价指标体系时, 应遵循科学性、系统性和全面性等原则。本文在查阅相关标准、文献和实地调研的基础上, 建立了包含4个一级指标和11个二级指标的机场运行效率评价指标体系, 如图2所示。

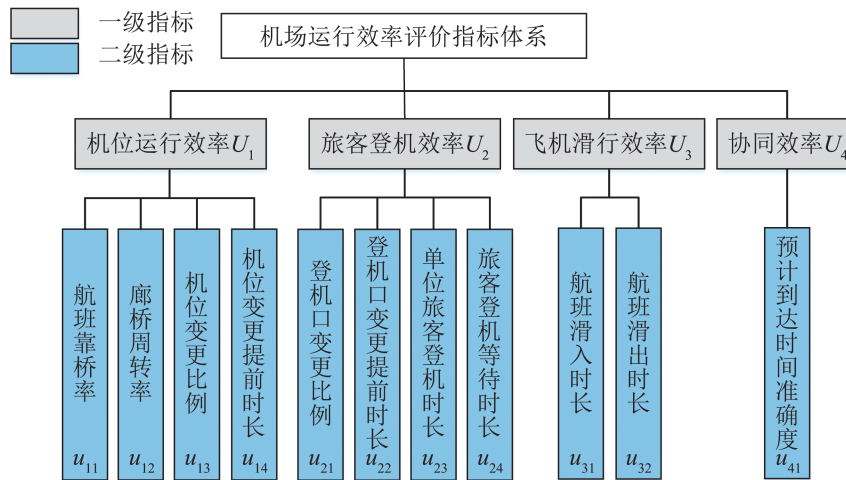


图2 机场运行效率评价体系

Fig. 2 Airport operational efficiency evaluation system

### 1.2.1 机位运行效率

机位运行效率进一步细分为4个指标: 航班靠桥率  $u_{11}$ 、廊桥周转率  $u_{12}$ 、机位变更比例  $u_{13}$ 、机位变更提前时长  $u_{14}$ 。

#### (1) 航班靠桥率

航班靠桥率指的是一段时期内停靠航站楼廊桥机位的航班架次与所有可靠桥的航班架次之比。其数值越大, 对应的靠桥率等级越优, 是机场和旅客尤为在意的一个重要指标。航班靠桥率为

$$u_{11} = N_1/N_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $N_1$ 为一段时期内停靠航站楼廊桥机位的航班架次;  $N_2$ 为机场在该时间段内的总保障航班架次。

#### (2) 廊桥周转率

廊桥周转率指的是单位时间内(取值为1 h)停靠廊桥机位的航班架次与机场廊桥机位总数之比。对于特定机场而言, 单位时间内廊桥保障的航班架次越多, 则廊桥周转率越高, 对应的廊桥周转率等级也越优。

#### (3) 机位变更比例

机位变更比例指的是一段时期内已经分配停机的航班因当前机位不可用而被临时更改机位的比例, 反映了机场关键资源分配的准确性。机位变更比例越小, 对应的机位变更比例等级越优。

机位变更比例为

$$u_{13} = N_3/N_4 \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $N_3$ 为一段时期内临时变更机位的航班架次;  $N_4$ 为机场在该时间段内的总保障航班架次。

#### (4) 机位变更提前时长

机位变更提前时长指的是临时更改航班停靠机位的时刻距离旅客登机时刻的时间差。机位变更提前时长越大, 对应的机位变更提前时长等级越优。机位变更提前时长为

$$u_{14} = T_1 - T_2 \quad (3)$$

式中:  $T_1$ 为旅客登机时刻;  $T_2$ 为航班机位变更时刻。

### 1.2.2 旅客登机效率

旅客登机效率进一步细分为4个指标: 登机口变更比例  $u_{21}$ 、登机口变更提前时长  $u_{22}$ 、单位旅客登机时长  $u_{23}$ 、旅客登机等待时长  $u_{24}$ 。

#### (1) 登机口变更比例

登机口变更比例指的是一段时期内由于登机口对应停机位被延误航班占用、登机口突发情况不可使用等原因, 临时更改飞机机位而导致的旅客登机口变更的比例。登机口变更比例越小, 对应的登机口变更比例等级越优。登机口变更比例为

$$u_{21} = N_5/N_6 \times 100\% \quad (4)$$

式中： $N_5$ 为一段时间内临时变更登机口的航班架次； $N_6$ 为机场在该时间段内的总保障航班架次。

### (2) 登机口变更提前时长

登机口变更提前时长指的是旅客登机口更改时刻距离旅客计划登机时刻的时间差。登机口变更提前时长越大，对应的登机口变更提前时长等级越优。登机口变更提前时长为

$$u_{22} = T_3 - T_4 \quad (5)$$

式中： $T_3$ 为旅客登机时刻； $T_4$ 为航班登机口变更时刻。

### (3) 单位旅客登机时长

单位旅客登机时长指的是机场一段时间内平均每位旅客从开始登机到登机结束所消耗的时间，该项指标体现了机场登机口的服务效率。单位旅客登机时长越小，对应的单位旅客登机时长等级越优，表明机场登机口效率越高。

### (4) 旅客登机等待时长

旅客登机等待时长指的是旅客结束安检进入登机等待区域到实际开始登机所需要的等待时间。旅客登机等待时长越小，对应的旅客登机等待时长等级越优，表明机场登机口效率越高。

## 1.2.3 飞机滑行效率

飞机滑行效率进一步细分为2个指标：航班

滑入时长 $u_{31}$ 和航班滑出时长 $u_{32}$ 。

### (1) 航班滑入时长

航班滑入时长指的是航空器从落地跑道滑行至到港航班停机位挡上第一个轮档所花费的时间。航班滑入时长越小，对应的滑入时长等级越优，表明机场滑行效率越高。

### (2) 航班滑出时长

航班滑出时长指的是航空器从离港航班停机位撤去最后一个轮档后滑行至起飞跑道所花费的时间。航班滑出时长越小，对应的滑出时长等级越优，表明机场滑行效率越高。

## 1.2.4 协同效率

协同效率主要体现在预计到达时间准确度，其中，预计到达时间准确度指航班实际落地时间减去预计落地时间差值的绝对值。根据预计到达时间准确度3 min内占比衡量机场运行协同效率，预计到达时间准确度越大，对应的预计到达时间准确度等级越优，表明机场协同效率越高。

综上所述，本文建立的运行效率评价体系包括11个具体二级指标，根据机场日常运行将二级指标细分为5个等级，分别为优I、良II、一般III、较差IV和差V，对于可量化的评价指标，采用查阅标准、实地调研等方法确定评价等级，如表1所示。

表1 机场运行效率评价指标标准  
Table 1 Airport operational efficiency evaluation index standard

指标等级	优	良	一般	较差	差
航班靠桥率/%	$80 \leq u_{11} \leq 100$	$70 \leq u_{11} < 80$	$60 \leq u_{11} < 70$	$50 \leq u_{11} < 60$	$u_{11} < 50$
廊桥周转率/架次	$u_{12} \geq 7$	$6 \leq u_{12} < 7$	$5 \leq u_{12} < 6$	$4 \leq u_{12} < 5$	$u_{12} < 4$
机位变更比例/%	$u_{13} \leq 15$	$15 < u_{13} \leq 20$	$20 < u_{13} \leq 25$	$25 < u_{13} \leq 30$	$u_{13} > 30$
机位变更提前时长/min	$u_{14} \geq 240$	$180 \leq u_{14} < 240$	$150 \leq u_{14} < 180$	$90 \leq u_{14} < 150$	$u_{14} < 90$
登机口变更比例/%	$u_{21} \leq 15$	$15 < u_{21} \leq 25$	$25 < u_{21} \leq 35$	$35 < u_{21} \leq 45$	$u_{21} > 45$
登机口变更提前时长/min	$u_{22} \geq 240$	$180 \leq u_{22} < 240$	$150 \leq u_{22} < 180$	$90 \leq u_{22} < 150$	$u_{22} < 90$
单位旅客登机时长/s	$u_{23} \leq 15$	$15 < u_{23} \leq 20$	$20 < u_{23} \leq 25$	$25 < u_{23} \leq 30$	$u_{23} > 30$
旅客登机等待时长/min	$u_{24} \leq 10$	$10 < u_{24} \leq 15$	$15 < u_{24} \leq 20$	$20 < u_{24} \leq 25$	$u_{24} > 25$
航班滑入时长/min	$u_{31} \leq 6$	$6 < u_{31} \leq 12$	$12 < u_{31} \leq 18$	$18 < u_{31} \leq 24$	$u_{31} > 24$
航班滑出时长/min	$u_{32} \leq 12$	$12 < u_{32} \leq 18$	$18 < u_{32} \leq 24$	$24 < u_{32} \leq 30$	$u_{32} > 30$
预计到达时间准确度/%	$90 \leq u_{41} \leq 100$	$85 \leq u_{41} < 90$	$80 \leq u_{41} < 85$	$75 \leq u_{41} < 80$	$u_{41} < 75$

## 2 综合评价模型

常用的指标权重计算方法有主观赋权和客观赋权两大类, 其中, 主观赋权法过分依赖于专家经验; 客观赋权法对样本依赖性大, 缺少业务经验指导, 权重可能失真, 最终导致结果无效。由此可见, 单一赋权法具有较强的主观或客观性。本文通过计算评价指标组合权重, 提高评价结果的可靠性, 并采用TOPSIS法实现机场运行效率综合评价, 如图3所示, 具体步骤如下:

- (1) 采用极差法对评价指标原始数据进行标准化处理;
- (2) 利用G1法和熵权法分别计算评价指标主观权重;
- (3) 计算评价指标组合权重;
- (4) 构建加权判断矩阵并利用TOPSIS法对评价对象进行综合总评价。

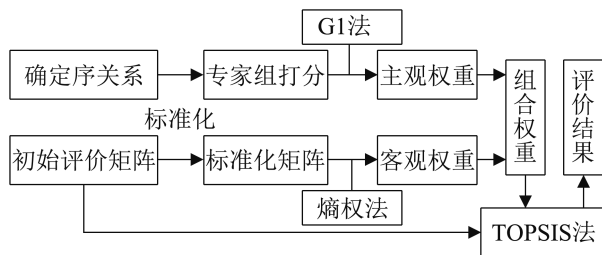


图3 机场运行效率评价模型步骤框图

Fig. 3 Step diagram of airport operational efficiency evaluation model

### 2.1 主观赋权法-G1法

G1法是一种简洁、有效的 subjective 赋权方法, 无需进行一致性检验。G1法是在层次分析法的基础上建立的一种更加完善的权重计算方法, 避免了层次分析法由于评价指标过多导致的判断矩阵无法通过一致性检验的弊端, 其计算步骤如下。

#### (1) 确定序关系

假设评价指标集  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  为指标体系中同一级的  $n$  个指标, 且  $n \geq 2$ , 结合专家意见按照以下步骤确定指标序关系:

1) 专家在评价指标集  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  中选择最重要的一个评价指标, 记作  $c_1^*$ ;

2) 在评价指标集剩余的  $n-1$  个评价指标中选择次重要的一个评价指标, 记作  $c_2^*$ , 经过  $n-1$  次选择后, 最后一个评价指标记为  $c_n^*$ ;

3) 从而可以确定得到评价指标集  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  的序关系为

$$c_1^* \geq c_2^* \geq \dots \geq c_{n-1}^* \geq c_n^* \quad (6)$$

将重新组成的集合  $\{c_1^*, c_2^*, \dots, c_{n-1}^*, c_n^*\}$  称为确定序关系后的评价指标集, 进而可以得到相邻指标间的重要程度排序。

#### (2) 相邻指标间的重要程度定量分析

根据表2对相邻评价指标  $c_{k-1}^*$  和  $c_k^*$  之间的重要程度进行量化:

$$r_k = \alpha_{k-1}^* / \alpha_k^* \quad (7)$$

式中:  $r_k$  为相邻评价指标  $c_{k-1}^*$  和  $c_k^*$  之间的相对重要程度比值,  $k$  取值范围为  $[2, n]$ ;  $\alpha_{k-1}^*$  和  $\alpha_k^*$  为相邻评价指标  $c_{k-1}^*$  和  $c_k^*$  的权重, 根据常用文化用语, 建立基于9级语气算子的  $r_k$  赋值表<sup>[15]</sup>, 如表2所示。

表2  $r_k$  赋值参考  
Table 2  $r_k$  assignment reference

$r_k$	$r_k$ 赋值说明
1.0	$c_{k-1}^*$ 与 $c_k^*$ 同等重要
1.2	$c_{k-1}^*$ 比 $c_k^*$ 稍微重要
1.4	$c_{k-1}^*$ 比 $c_k^*$ 明显重要
1.6	$c_{k-1}^*$ 比 $c_k^*$ 强烈重要
1.8	$c_{k-1}^*$ 比 $c_k^*$ 极端重要
1.1、1.3、1.5、1.7	上述两相邻判断的中值

#### (3) 指标权重计算

根据给定的  $r_k$  赋值, 评价指标  $c_n^*$  的权重计算式为

$$\alpha_n^* = \left( 1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\alpha_{k-1}^* = r_k \alpha_k^*, \quad k=2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中:  $\alpha_n^*$  为评价指标  $c_n^*$  的权重。式(8)为基于专家决策得到指标的主观权重值, 由式(9)可以计算得到各指标的主观权重。



进而可以得到机场运行效率评价指标集的主观权重向量为

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (10)$$

式中： $\alpha$ 为对应原始评价指标集的权重向量。

## 2.2 客观赋权法-熵权法

熵最初是一个热力学概念，Shannon首先将其引入信息论，用来度量系统的不确定性，信息熵定量地描述了一条信息包含信息量的多少。熵权法根据评价指标的信息熵确定权重<sup>[20]</sup>。一般来说，评价指标的信息熵越小，表明指标值的变异程度越大，提供的信息量越多，在综合评价中其权重也就越大；反之若某个指标的信息熵越大，表明指标值的变异程度越小，提供的信息量越少，在综合评价中其权重也就越小。由此可知，熵权法是基于评价指标实际数据的客观评价方法，其评价结果更加具有客观性，计算步骤如下。

### (1) 原始数据预处理

根据评价指标以及获得的评价对象原始数据，建立初始评价矩阵：

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： $X$ 为初始评价矩阵； $x_{ij}$ 为第*i*个评价对象的第*j*个指标的原始数据，其数值由机场一段时间内的运行统计获得； $m$ 为评价对象个数； $n$ 为评价指标数。

对于正向指标，也称“效益型”指标，其标准化处理式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (12)$$

对于负向指标，也称“费用型”指标，其标准化处理式为

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (13)$$

进而可以得到机场运行效率标准化矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

对标准化矩阵元素进行归一化处理，计算过程为

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (15)$$

(2) 计算评价指标信息熵  
评价指标信息熵计算式为

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (16)$$

(3) 计算评价指标熵权  
评价指标熵权计算式为

$$\beta_j = (1 - e_j) / \left( n - \sum_{j=1}^n e_j \right), 0 \leq \beta_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \beta_j = 1 \quad (17)$$

进而可以得到机场运行效率评价指标集的客观权重向量为

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \quad (18)$$

## 2.3 组合赋权

由2.1和2.2节可知，假设由G1法计算得到的主观权重值为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ ，由熵权法计算得到的客观权重值为 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ ，则组合权重为

$$w_j = t\alpha_j + \tau\beta_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中： $t$ 和 $\tau$ 为主观权重系数和客观权重系数，其中， $t \times \tau \geq 0, t + \tau = 1$ 。

根据式(11)以及计算得到的主客权重可以得到任一评价对象的主观和客观加权属性值。因此，对于第*i*个评价对象的第*j*个指标的主观加权属性为 $t\alpha_j y_{ij}$ ，客观加权属性为 $\tau\beta_j y_{ij}$ ，则其主客观加权属性的偏离程度为

$$Z_i = \sum_{j=1}^n (t\alpha_j y_{ij} - \tau\beta_j y_{ij})^2, i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$Z_i$ 越小，评价对象*i*的主客观加权属性越趋于一致，本文以最小化主客观加权属性偏离程度为目标函数建立权重组合优化模型：

$$\min Z = \sum_{i=1}^m Z_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha_j y_{ij} - \tau \beta_j y_{ij})^2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} t + \tau = 1, t\tau \geq 0 \\ 0 \leq t \leq 1 \\ 0 \leq \tau \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

优化模型求解过程如下。

建立 Lagrange 函数:

$$L(t, \tau, \lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha_j y_{ij} - \tau \beta_j y_{ij})^2 + \lambda(t + \tau - 1) \quad (22)$$

式中:  $\lambda$  为 Lagrange 乘子。

$$\frac{\partial L(t, \tau, \lambda)}{\partial t} = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha_j^2 y_{ij}^2) - 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha_j \beta_j y_{ij}^2) + \lambda \quad (23)$$

$$\frac{\partial L(t, \tau, \lambda)}{\partial \tau} = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\tau \beta_j^2 y_{ij}^2) - 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha_j \beta_j y_{ij}^2) + \lambda \quad (24)$$

$$\frac{\partial L(t, \tau, \lambda)}{\partial \lambda} = t + \tau - 1 \quad (25)$$

令式(23)~(25)为0, 并联立方程可求解得到权重系数分别为

$$t = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \beta_j (\alpha_j + \beta_j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 (\alpha_j + \beta_j)^2} \quad (26)$$

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \alpha_j (\alpha_j + \beta_j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 (\alpha_j + \beta_j)^2} \quad (27)$$

求解式(26)和式(27)得到评价指标组合权重加权重系数  $t$  和  $\tau$ , 将  $t$  和  $\tau$  带入式(19)可得到评价指标权重值。本文提出的主客观加权重属性值一致化的组合赋权方法, 解决了常用组合赋权法平均分配主客观权重导致的评价指标权重不合理问题。

## 2.4 TOPSIS 评价方法

TOPSIS 法也称为“优劣解距离法”, 是一种基于原始数据的综合评价方法, 适用于对多个评价对象进行比较分析。算法实现基本过程为基于标准化处理后的原始数据矩阵构建加权判断矩阵,

分别计算评价指标中的“正理想解”和“负理想解”, 即“最优方案”和“最劣方案”, 然后计算各评价对象与“正理想解”和“负理想解”之间的欧式空间距离, 以此作为评价优劣的依据。然而, 传统的 TOPSIS 法对于“正负理想解”中垂线上的样本点无法区分其优劣, 文献[21-22]对 TOPSIS 进行了改进, 通过引入“虚拟负理想解”代替“负理想解”使评价结果更加合理科学, 算法步骤如下。

(1) 构建加权判断矩阵

$$S = YW = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中:  $W$  为评价指标权重矩阵;  $w_j$  为各指标的组合权重;  $s_{ij}$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  个指标加权值。

(2) 确定“正理想解  $S^+$ ”“负理想解  $S^-$ ”“虚拟负理想解  $S^{*}$ ”

$$S^+ = \max_{1 \leq i \leq m} s_{ij} = s_1^+, s_2^+, \dots, s_n^+, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

$$S^- = \min_{1 \leq i \leq m} s_{ij} = s_1^-, s_2^-, \dots, s_n^-, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

$$S^* = 2S^- - S^+ = 2s_1^- - s_1^+, 2s_2^- - s_2^+, \dots, 2s_n^- - s_n^+ = s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

(3) 计算待评价对象与“正理想解”和“虚拟负理想解”的欧式空间距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_j^+ - s_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (32)$$

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_j^* - s_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (33)$$

(4) 计算相对接近度

$$C_i = D_i^* / (D_i^+ + D_i^*) \quad (34)$$

式中:  $0 \leq C_i \leq 1$ , 且  $C_i$  越大, 表明  $D_i^+$  越小, 评价对象越优。

### 3 实例分析

以一组公开的2017年机场运行效率分析数据为例,对本文方法进行算例验证。算例验证中选择我国8家典型机场为研究对象<sup>[23]</sup>,包括昆明长水国际机场(KMG)、南京禄口国际机场(NKG)、贵阳龙洞堡国际机场(KWE)、宁波栎社国际机场(NGB)、合肥新桥国际机场(HFE)、泉州晋江国际机场(JJN)、德宏芒市国际机场(LUM)、大理国际机场(DLU),图4为8家机场2017年旅客吞吐量统计。

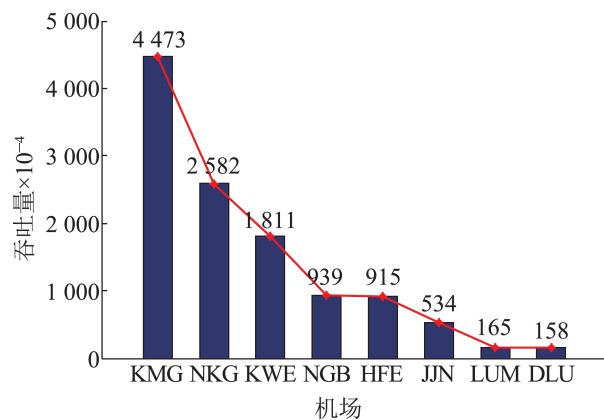


图4 8家机场2017年旅客吞吐量统计

Fig. 4 Passenger throughput statistics of 8 airports in 2017

按照旅客吞吐量将8家机场分为3类:年吞吐量超过1000万的视为第1类,包括昆明长水、南京禄口、贵阳龙洞堡3家机场;年吞吐量在200万~1000万之间的视为第2类,包括宁波栎社、合肥新

桥、泉州晋江3家机场;年吞吐量在200万以下的视为第3类,包括德宏芒市、大理2家机场。按照本文建立的机场运行效率评价指标体系进行实地调研,并查阅相关资料,获取机场实际运行数据。基于2017年6月的机场实际运行数据,8家机场运行效率指标原始数据和评价指标正负性如表3所示。

#### 3.1 指标权重计算

组织机场运行领域内专家,根据式(6)~(10)计算评价指标主观权重,根据式(11)~(18)计算评价指标客观权重,利用式(19)~(21)计算组合权重系数 $t$ 和 $\tau$ ,可以得到 $t=0.3948$ , $\tau=0.6052$ ,进一步可以计算得到评价指标组合权重,表4分别给出了评价指标主观权重、客观权重和组合权重。

图5为主观权重、客观权重和组合权重对比曲线。由图5可见,根据G1法和熵权法计算得到的主观权重和客观权重对于某些指标存在较大差异,比如,对于单位旅客登机时长指标,其主观和客观权重分别为0.019和0.132,在机场日常运行中,该项指标的重要性理应低于航班靠桥率、廊桥周转率等。因此,熵权法在计算指标权重时缺少实际运行经验的衡量,将2种方法得到的权重进行融合,不仅能够体现专家对不同指标的经验,也充分利用了数据本身提供的信息量特征,得到更加符合实际运行的指标权重值。

表3 原始数据、评价指标的正负性

Table 3 Original data, positivity and negativity of evaluation indicators

指标	正负性	原始数据							
		KMG	NKG	KWE	NGB	HFE	JJN	LUM	DLU
$u_{11}$	+	86.7	77.9	72.9	37.1	94.9	96.1	100.0	81.9
$u_{12}$	+	6	7	5	5	5	6	4	7
$u_{13}$	-	14.9	37.9	19.2	42.9	33.9	2.1	25.5	19.1
$u_{14}$	+	198.98	128.17	96.75	141.98	187.99	106.85	160.35	70.89
$u_{21}$	-	15.7	49.7	7.5	39.9	25.4	3.6	23.0	26.9
$u_{22}$	+	369.89	264.81	122.01	149.99	179.56	82.59	143.59	185.99
$u_{23}$	-	9.2	8.8	6.8	8.8	8.6	7.6	8.3	8.6
$u_{24}$	-	20.01	20.51	13.79	19.19	10.29	15.01	12.99	14.51
$u_{31}$	-	8.89	7.99	7.49	12.59	7.01	26.59	22.19	7.49
$u_{32}$	-	17.99	16.88	19.84	10.41	12.89	38.13	11.63	14.15
$u_{41}$	+	94.6	95.4	72.7	91.6	93.9	96.1	79.1	43.3

表4 评价指标主客观权重和组合权重  
Table 4 Subjective weights, objective weights and combined weights

指标	主观权重 $\alpha_j$	客观权重 $\beta_j$	组合权重 $w_j$
$u_{11}$	0.272	0.057	0.142
$u_{12}$	0.140	0.088	0.109
$u_{13}$	0.087	0.106	0.098
$u_{14}$	0.057	0.095	0.080
$u_{21}$	0.127	0.081	0.099
$u_{22}$	0.042	0.125	0.092
$u_{23}$	0.019	0.132	0.087
$u_{24}$	0.059	0.131	0.104
$u_{31}$	0.029	0.074	0.056
$u_{32}$	0.087	0.054	0.067
$u_{41}$	0.081	0.057	0.066

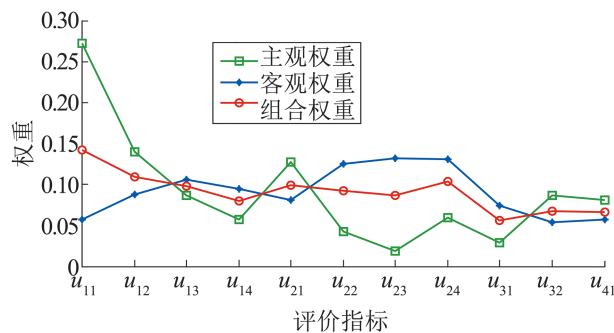


图5 评价指标权重对比

Fig. 5 Comparison of evaluation index weights

机场日常运行中, 靠桥机位通过廊桥, 旅客可以直接登机, 远机位旅客则需坐摆渡车登机, 因此, 航班靠桥率是各机场运行保障中关注的核心指标之一。由图5可以看出, 本文构建的机场运行效率评价指标体系中航班靠桥率权重占比最大, 与目前机场实际运行需求相符合, 也进一步说明了本文提出的组合权重模型的有效性。

### 3.2 机场运行效率评价等级标准计算

根据表1中的机场运行效率评价指标分级值以及表4中的组合权重构建加权判断矩阵, 并根据式(22)~(27)计算分级值到“正理想解”和“虚拟负理想解”的欧式空间距离和相对接近度, 相对接近度越接近1, 表明越接近最优等级, 机场运行效率评价级别越高, 因此, 根据相对接近度来

划分机场运行效率评价的级别, 机场运行效率等级标准如下。

I级:  $0.8517 \leq C_i \leq 1$

II级:  $0.8152 \leq C_i < 0.8517$

III级:  $0.784 \leq C_i < 0.8152$

IV级:  $0.7456 \leq C_i < 0.784$

V级:  $0.5 \leq C_i < 0.7456$

### 3.3 机场运行效率综合评价

根据表3中的各评价对象原始数据以及表4中的评价指标组合权重, 利用式(21)~(26)计算各评价对象与“正理想解”和“虚拟负理想解”的欧式空间距离和相对接近度, 进一步根据3.2节中计算得到的评价等级标准可以确定待评价机场的运行效率等级及其运行效率综合排序, 结果如表5所示。

表5 各评价机场相对接近度计算结果

Table 5 Calculation results of relative closeness of each evaluated airport

评价对象	$D_i^+$	$D_i^-$	$C_i$	效率等级	排序
KMG	0.093 1	0.550 7	0.855 4	I	1
NKG	0.119 4	0.521 9	0.813 9	III	4
KWE	0.129 7	0.526 6	0.802 3	III	7
NGB	0.156 9	0.488 7	0.757 0	IV	8
HFE	0.115 4	0.540 6	0.824 1	II	2
JJN	0.123 9	0.547 8	0.815 5	II	3
LUM	0.124 2	0.538 8	0.812 7	III	5
DLU	0.122 3	0.527 6	0.811 9	III	6

### 3.4 结果分析

本文基于组合赋权-TOPSIS模型对我国3类共8家机场的运行效率进行了综合评价, 通过建立机场运行效率评价指标体系, 并利用组合赋权-TOPSIS模型实现各机场运行效率综合评价, 主要结论如下:

(1) 一类机场中昆明长水国际机场的运行效率最高, 南京禄口国际机场与贵阳龙洞堡国际机场运行效率整体相当, 其中, 昆明长水机场的综合评价指数为0.8554, 对照3.2节中的效率评价等级

为I级，即优；南京禄口国际机场和贵阳龙洞堡国际机场的综合评价指数分别为0.813 9和0.802 3，即一般。分析这2家机场的运行效率原始数据可知，在机位效率和登机效率方面存在较大提升空间。

(2) 二类机场中宁波栎社国际机场的运行效率最低，合肥新桥国际机场的运行效率最高。分析机场运行效率原始数据可知，宁波栎社国际机场的机位效率和登机效率较低，而泉州晋江国际机场的滑行效率较低，因此，这2家机场可以针对性地采取措施提高运行效率。对照机场运行效率等级标准可知，宁波栎社国际机场运行等级为IV，即较差；其余2家机场运行效率等级为II，即良。

(3) 三类机场中德宏芒市国际机场运行效率比大理国际机场略高，综合评价指数分别为0.812 7和0.811 9。对照机场运行效率等级标准可知，德宏芒市国际机场和大理国际机场的运行等级皆为III级，即一般。

## 4 结论

本文考虑机场航班保障重要阶段，构建了机场运行效率评价指标体系，建立了G1-熵权法与TOPSIS综合评价模型，并选择我国3类共8家机场进行了算例分析，得到以下结论：

(1) 基于组合赋权-TOPSIS的机场运行效率评价模型是一种新的机场运行效率评价方法。该方法分别利用G1法和熵权法计算评价指标主观和客观权重，并以最小化主客观加权属性偏离程度确定组合权重，两者结合使用不仅减小了G1法赋权的主观性，也减小了数据变化导致权重值的波动。

(2) 昆明长水国际机场运行效率最高，宁波栎社国际机场运行效率最低，3类机场在运行各个方面仍存在的问题，特别是宁波栎社国际机场总体运行效率偏低。为提升机场运行效率，各家机场需要进一步采用新技术优化航班运行保障流

程，如利用大数据技术预测场面可变滑行时间、基于AI算法实现机场停机位智能分配等。

(3) 以一种新的角度对机场运行效率评价方法进行初步探索。由于机场运行是一个较为复杂的系统，指标的选取还有进一步完善的空间，权重计算及评价等级标准制定还需进一步研究。

## 参考文献：

- [1] 邱超奕. 我国民航运输总周转量、旅客周转量均位居世界第二: 航线密布通全球[N]. 人民日报, 2021-10-03(002).
- [2] 飞常准. 2022年1月全球最繁忙机场TOP20 广州白云机场全球最准点[EB/OL]. (2022-02-25)[2022-08-09]. <http://mhfw.cn/plus/view.php?aid=42932>.
- [3] Gillen D, Lall A. Developing Measures of Airport Productivity and Performance: An Application of Data Envelopment Analysis[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 1997, 33(4): 261-273.
- [4] Hasan Örkücü, Cemal Balıkcı, Mustafa Isa Dogan, et al. An Evaluation of the Operational Efficiency of Turkish Airports Using Data Envelopment Analysis and the Malmquist Productivity Index: 2009–2014 Case[J]. *Transport Policy*, 2016, 48: 92-104.
- [5] 王俊丹, 曾小舟, 冯琳. 基于DEA方法的我国机场运行效率评价[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(6): 82-89. Wang Jundan, Zeng Xiaozhou, Feng Lin. Evaluation of Airport Operation Efficiency Based on DEA Method[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2017, 34(6): 82-89.
- [6] 丛玮, 谢道仪, 朱睿, 等. 基于可拓多层次状态分类的机场运行效率评价研究[J]. *航空计算技术*, 2022, 52(2): 49-52, 57. Cong Wei, Xie Daoyi, Zhu Rui, et al. Research on Airport Operation Efficiency Evaluation Based on Extension Multi-level State Classification[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2022, 52(2): 49-52, 57.
- [7] Tan Caimao, He Junliang. Robust Airport Gate Assignment Based on the Analysis of Flight Arrival Time[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 6693127.
- [8] Jiang Yu, Hu Zhitao, Liu Zhenyu, et al. A Bilevel Programming Approach for Optimization of Airport Ground Movement[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 38(5): 829-839.
- [9] Zha Shanshan, Guo Yu, Huang Shaohua, et al. A Hybrid MCDM Approach Based on ANP and TOPSIS for

- Facility Layout Selection[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 35(6): 1027-1037.
- [10] Gu Yili, Xie Jinjie, Liu Hongji, et al. Evaluation and Analysis of Comprehensive Performance of a Brake Pedal Based on an Improved Analytic Hierarchy Process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(9): 2636-2648.
- [11] Dawood K A, Sharif K Y, Ghani A A, et al. Towards a Unified Criteria Model for Usability Evaluation in the Context of Open Source Software Based on a Fuzzy Delphi Method[J]. Information and Software Technology, 2021, 130: 106453.
- [12] Qin Yuan, Guan Ke, Kou Jialiang, et al. Durability Evaluation and Life Prediction of Fiber Concrete with Fly Ash Based on Entropy Weight Method and Grey Theory[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126918.
- [13] 杨爱武, 李战武, 徐安, 等. 基于RS-CRITIC的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2357-2365.  
Yang Aiwu, Li Zhanwu, Xu An, et al. Threat Assessment of Air Combat Target Based on RS-CRITIC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2357-2365.
- [14] 白丽丽, 白尚旺, 党伟超, 等. 基于离差最大化组合赋权的煤矿安全评价研究[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(4): 82-87.  
Bai Lili, Bai Shangwang, Dang Weichao, et al. Coal Mine Safety Assessment Based on Maximum Deviation Combination Empowerment[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(4): 82-87.
- [15] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 梁蕊, 赵亮. 基于G1权重法和物元分析法LNG储备站后评价[J]. 煤气与热力, 2019, 39(7): B35-B40, B46.  
Liang Rui, Zhao Liang. Post-evaluation of LNG Reserve Station Based on G1 Weighting Determination Method and Matter-element Analysis Method[J]. Gas & Heat, 2019, 39(7): B35-B40, B46.
- [17] Zhao Junru, Tian Jundong, Meng Fanxiang, et al. Safety Assessment Method for Storage Tank Farm Based on the Combination of Structure Entropy Weight Method and Cloud Model[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 75: 104709.
- [18] Liu Chang, Yang Shiwu, Cui Yong, et al. An Improved Risk Assessment Method Based on a Comprehensive Weighting Algorithm in Railway Signaling Safety Analysis[J]. Safety Science, 2020, 128: 104768.
- [19] 罗樟圳, 江海凡, 付建林, 等. 基于组合赋权的离散车间生产计划综合评价[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1856-1865.  
Luo Zhangzhen, Jiang Haifan, Fu Jianlin, et al. Combination Weighting-based Comprehensive Evaluation for Discrete Workshop Production Plan[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1856-1865.
- [20] Cui Wenhua, Ye Jun. Improved Symmetry Measures of Simplified Neutrosophic Sets and Their Decision-making Method Based on a Sine Entropy Weight Model[J]. Symmetry, 2018, 10(6): 225.
- [21] 胡永宏. 对TOPSIS法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识, 2002, 32(4): 572-575.  
Hu Yonghong. The Improved Method for TOPSIS in Comprehensive Evaluation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2002, 32(4): 572-575.
- [22] Niu Dongxiao, Wu Gengqi, Ji Zhengsen, et al. Evaluation of Provincial Carbon Neutrality Capacity of China Based on Combined Weight and Improved TOPSIS Model[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2777.
- [23] 百度文库. 机场运行效率分析报告[EB/OL]. [2022-08-29]. <https://wenku.baidu.com/view/f6d842742d3f5727a5e9856a561252d381eb2077.html>.