

工艺与装备

基于 AHP-熵权法的货舱码垛效果模糊综合评价

张长勇, 张倩倩

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 针对飞机货舱码垛效果影响因素较多, 现有评价方式过于单一等问题, 从行业应用的角度, 提出一种货舱码垛效果综合评价方法。**方法** 选取货舱填充率、码放效率及重心偏移量等为评价指标, 综合利用主客观权重赋值法的优点, 将 AHP 法与熵权法相结合, 计算得到各指标综合权重值, 建立货舱码垛效果分级的模糊综合评价模型。**结果** 通过对 6 组货物码放垛型进行实例计算和对比分析得出, 第 5 组码放垛型综合效果最佳, 与原始信息一致, 表明该模型对飞机货舱码垛评价效果合理可靠。**结论** 提出的评价模型有效解决了多因素情况下的码垛效果评价问题, 为飞机货舱码垛提供了理论依据。

关键词: AHP 法; 熵权法; 主客观权重综合法; 模糊数学; 码垛

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)23-0135-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.23.020

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Cargo Palletizing Effect Based on AHP-Entropy Weight Method

ZHANG Chang-yong, ZHANG Qian-qian

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a comprehensive evaluation method of cargo palletizing effect from the perspective of industrial application for the problems that there are many influencing factors of aircraft cargo palletizing effect, and the existing evaluation method is too single. Firstly, the cargo tank filling rate, stacking efficiency and center-of-gravity offset were selected as the evaluation indicators. Then, the advantages of the subjective and objective weight assignment method were utilized, and the AHP method and the entropy weight method were combined to obtain the comprehensive weight value of each indicator. Finally, the hierarchical fuzzy comprehensive evaluation model of palletizing effect was established. The example calculation and comparative analysis of 6 cargo palletizing types proved that the 5th palletizing type had the best comprehensive effect, which was consistent with the original information, indicating that the model rationally and reliably evaluated the palletizing effect of aircraft cargo. The proposed model effectively solves the problem of palletizing effect evaluation under multiple factors and provides theoretical basis for palletizing of aircraft cargo.

KEY WORDS: AHP method; entropy weight method; subjective and objective weighting; fuzzy mathematics; palletizing

随着国内民航业的快速发展和智慧机场的加快建设, 实现航空货物和行李的自动装卸与码放势在必行。确定一种对货物码放效果综合有效的评价方法,

实现对现有三维装箱算法的综合评价, 从而筛选出一种效果最好的货舱码垛方案, 对提高航空安全与经济效益具有重要意义。

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51707195); 中央高校基本科研业务费专项基金(3122016A009)

作者简介: 张长勇(1978—), 男, 博士, 中国民航大学副教授, 主要研究方向为智能电器与机场自动化。

现有的三维装箱算法的码放效果一般从箱体填充率^[1-2]、载重利用率^[3]、装箱效率^[4]、重心偏移量^[5]等方面进行评价。在码垛效果评价方面,2014年游伟等^[6]以空间利用率和载重利用率作为自己码垛方案效果的评价标准,2017年Sridhar R等^[7]以装卸成本、载重利用率以及配平指数对货运飞机的装载方法进行了评价,2018年Li H等^[8]以装箱效率与空间利用率作为效果评价,2019年张长勇等^[9]提出稳定性指标,以稳定性作为码垛效果的评价标准。还有一些学者根据自己的特定工程应用背景,对三维装箱码垛效果定义了特定的评价标准,2010年新志宏^[10]以货物总价值作为三维装箱效果的评价标准,2013年Al-varez-Valdes等^[11]以及2015年Lurkin V等^[12]对异构三维装载进行了装卸成本的评价。

综上所述,目前已有的码垛效果评价指标虽然较多,但均不适用于对货舱环境下的货物码垛效果进行综合评价,使用者难以从三维装箱算法的多种方案中进行择优选择。针对此问题,文中从多个评价指标出发,综合考虑货物码放工作的实际指标需求,实现对现有三维装箱方案的综合评价,并验证评价模型的合理性。

1 评价指标权重优化

在货舱码垛效果模糊综合评价中,权重值的确定对评价结果会有很大的影响,不同的权重值会得到不同的结果。权重的确定方法目前主要分为2种:主观权重赋值法^[13]与客观权重赋值法^[14]。主观权重赋值法是由决策者通过主观意识结合专业知识进行评判,但存在对权重的主观影响性较大,对复杂问题的客观性差的缺点;客观权重赋值法有较强的数学理论依据,确定的权重精确度较高,但是解释性较差,对所得到的结果不能给出明确的解释。

文中选取主客观权重赋值法相结合策略,分别选取主观权重赋值法中的AHP法与客观权重赋值法中的熵权法结合,该方法结合二者的优点实现权重的综合确定。

1.1 AHP法确定主观权重

AHP法的基本思想是把复杂的问题分解成若干层次和若干因素,在各个因素之间进行比较与计算,便可得到不同方案重要性程度的权重,实现了决策者将复杂的问题的决策思维过程模型化与数量化。

通过已经确定的3个垛型评价指标,根据专家打分值分析对比各个指标的重要程度,采用1~9及其倒数的标度方法得到判断矩阵 A ,其中1~9代表量度表有9个刻度,表示2个对比的指标元素比较下的重要性程度。然后计算出该判断矩阵 A 的特征向量 ω 与最大特征值 λ_{\max} ,若判断矩阵 A 为相容矩阵,则特征向量 ω 归一化处理后可作为指标的权向量 w_j ;若判断矩阵 A 为不相容矩阵时,则用式(1)不相容度指

标式进行验证。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

当随机一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$ 时,可以认为判断矩阵 A 的相容性良好,则选取特征向量 w 作为权向量;若随机一致性比率 $CR \geq 0.1$,则需要根据不同专家分别得出判断矩阵并计算 CI 值,去除 $CI < 0.1$ 的专家打分。

1.2 熵权法确定客观权重

熵权法的主要思想是根据每个评价指标变异程度的大小来计算出各指标的 s 熵权值,然后再通过熵权值对每个指标的权重进行修正,最后得到比较客观的权重值。

根据文中选取的6个待测垛型样本,每个样本中包含3个评价指标,得到 6×3 样本矩阵 A ,见式(2)。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于各项垛型评价指标的计量单位不统一,需要先进行数据标准化处理,然后构建样本矩阵 $X = [x_{ij}]_{6 \times 3}$,其中 $i=1,2,3; j=1,2,\dots,6; x_{ij}$ 为第 i 个待测垛型样本的第 j 项指标的实际值。数值越大越优型以及数值越小越优型分别选取式(3)与式(4)进行计算。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4)$$

计算第 j 项码垛效果评价指标下第 i 个码垛方案样本值占该指标的比重见式(5)。

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (5)$$

通过式(6)计算第 j 项垛型评价指标的熵值,其中 n 为待测垛型样本数量。

$$e_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (6)$$

通过式(7)计算3项评价指标的权重。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^3 (1 - e_j)} \quad (7)$$

1.3 主观权重与客观权重的组合优化

考虑到主观赋权法与客观赋权法二者的优缺点,

文中综合二者的赋权结果，从而实现了二者优点的结合，克服了它们的局限性，可使结果更具有科学性。

目前常用的组合权重确定方法是，设定折中系数 ε ^[15]，再将 2 种方法求得的权值进行分配，见式 (8)，但是该方法对于折中系数 ε 的设定仍有强烈的主观性。其中 γ_j 为 AHP 法计算得出的权重值， w_j 为熵权法计算得出的权重值。

$$\omega_j = \gamma_j \varepsilon + w_j (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

在参考目前常用计算组合权重方法的基础上，针对货舱码放效果评价问题提出一种新的综合权重确定法。当码垛效果的各个评价指标值之间相差较大时，则说明码垛效果评价指标显示出了较大的信息量，其对应的权重也应该较大。

因为在评价一组数据的离散程度时，一般选取方差为评价标准，所以对于各评价价值，方差的大小也可以代表指标的无序程度。与此同时代表了该指标有着较大的信息量，因此引入方差变量 σ^2 实现主客观权重的结合，得到的最终综合权重值见式 (9)。

$$\omega_j = \gamma_j \sigma_j^2 + w_j (1 - \sigma_j^2) \quad (9)$$

式中： γ_j 为 AHP 法计算得出的权重值； w_j 为熵权法计算得出的权重值； σ_j^2 为归一化后各个评价指标值的方差。

2 模糊综合评价模型

结合现有的码垛方式及模糊数学理论基础^[16]，通过采用 AHP-熵权法构建的货舱码垛效果模糊综合评价模型的具体步骤如下所述。

1) 确定因素集。通过对机场工作人员与专家的调查，目前对飞机货舱的码垛效果主要需求是垛型重心偏移量、码垛效率及货舱填充率。评价因素集表示见式 (10)。

$$U = \{\text{填充率 } u_1, \text{装箱效率 } u_2, \text{重心偏移量 } u_3\} \quad (10)$$

2) 确定评价集。不同的码垛规则会码放出来不同的垛型指标值，为了对多每个不同码垛规则的性能进行综合评价，评价集通过分析当前码垛方案及相关专家意见设定为 3 个等级。评价集见式 (11)，其中等级越高表示综合码垛效果越好。

$$V = \{\text{一级 } v_1, \text{二级 } v_2, \text{三级 } v_3\} \quad (11)$$

3) 确定权重向量。首先构造待测样本矩阵，然后通过 AHP 法与熵权法结合计算得出各个评价指标的综合权重值，假若指标因素 u_i 对应的指标权重为 w_i ，则 3 个指标因素对应的权重向量见式 (12)。

$$W = [w_1, w_2, w_3] \quad (12)$$

4) 确定模糊关系矩阵。采用不同的隶属函数进行计算，其隶属度矩阵存在差异，但各隶属函数的评价结果是等效的，因此选取较为普遍的梯形分布函数。评价因子为偏大型函数以及当评价因子为偏小型

函数分别用式 (13) 与式 (14) 确定隶属函数。

$$A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (13)$$

$$A(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (14)$$

以垛型样本 X_1 为例，将评价指标数值带入上述相关函数，可得到 3×3 模糊关系矩阵 R ，见式 (15)。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

5) 模糊综合评价。根据步骤 3 计算得到的指标权重向量 W 与步骤 4 中得到的模糊关系矩阵 R ，通过模糊运算，见式 (16)，得到码垛方案 X_1 的综合隶属度，然后根据最大隶属度原则， X_1 方案对某个等级的隶属度最高，可以得出该码垛方案属于该等级。利用步骤 1—5 分别对各个待测垛型进行计算，可以得出任何一组码垛方案数据的模糊综合评价结果。

$$B = W \circ R \quad (16)$$

式中： \circ 为模糊算子符号。

3 实例分析

3.1 数据预处理

文中以 A319 机型为例，该机型货舱前舱内部尺寸为 324 cm×143 cm×124 cm，分别选取课题组前期提出的 6 种码垛方案进行仿真码放，货物信息及仿真货舱装载情况见表 1，坐标位置为货物左后下角点信息。限于篇幅，表 1 仅列出部分货物数据及其布局位置。获得 6 组码垛方案后，码垛效果的各个评价指标的计算方法各不相同，每组指标数据都是通过如下所述步骤 1—3 计算方式获得。

1) 采用式 (17) 作为箱体填充率的计算式。

$$F = \frac{V_s}{V_t} \times 100\% \quad (17)$$

式中： V_s 为装入货舱货物总体积； $V_t = \max(X) \times \max(Y) \times \max(Z)$ ， X, Y, Z 分别为垛型中货物坐标。

2) 装箱效率记为 t ，为装完该组货物所用总时间。

3) 垛型重心横向偏移量，其中垛型的重心计算见式 (18)。

$$r_{CM} = \sum_{i \in I} r_{CM_i} m_i / m \quad (18)$$

重心横向偏移量 $C = (r'_{CM} - r_{CM})$ ，半径向量 r_{CM} 表示任意装载货物 i 的重心， m 为箱内所装物品总的质量， m_i 为第 i 个物品质量。

表1 货物信息及布局位置
Tab.1 Cargo information and layout location

货号	货物尺寸/cm			货物质量/kg	方案1坐标	方案2坐标	方案3坐标	方案4坐标	方案5坐标	方案6坐标
	长	宽	高							
1	48	31	23	15.42	(56,35,25)	(78,0,50)	(0,0,0)	(49,107,25)	(106,32,0)	(0,42,50)
2	73	50	30	30.44	(119,114,50)	(53,96,0)	(0,31,0)	(102,33,45)	(53,72,48)	(174,64,25)
3	53	34	23	13.28	(52,37,43)	(102,33,25)	(0,81,0)	(53,0,50)	(0,42,50)	(116,80,48)

59	53	38	25	20.12	(0,63,43)	(79,35,48)	(179,76,60)	(116,38,50)	(56,107,25)	(53,34,0)
60	52	34	25	13.77	(56,0,25)	(122,75,80)	(179,113,69)	(0,90,25)	(119,38,43)	(106,63,0)

通过步骤1—3所示计算方法对6种码垛方案计算得到6组指标数据见表2。

表2 6组指标计算值
Tab.2 Calculated values of 6 groups of indicators

方案编号	填充率 $u_1/\%$	装箱效率 $u_2/(s \cdot 组^{-1})$	重心偏移量 u_3/cm
1	82.52	17.34	10.52
2	84.22	14.89	7.83
3	91.26	20.87	12.20
4	89.09	15.28	10.46
5	92.05	15.63	6.39
6	87.43	19.77	11.86

表3 专家评分
Tab.3 Expert score

编号	专家评价分值		
	填充率	装箱效率	重心偏移量
1	55	65	85
2	65	80	90
3	60	75	95
4	75	55	85
5	70	70	70
6	65	60	80
7	80	50	75
8	45	90	80

3.2 计算组合权重

组合权重的计算采用了主观赋权法中的AHP法与客观权重赋值法中的熵权法相结合的方式，二者的结合即避免了权重与属性实际重要程度相悖的情况的发生又避免了评价结果过于主观性的问题。

1) 根据AHP法求得指标权重值，第1步通过分析各个指标的重要程度，通过咨询8位机场工作人员及专家对评价因素的重要程度进行赋值打分，分值按照百分制进行，分值越高说明该效果指标越重要，评分结果见表3。根据AHP法计算步骤，结合文献[17]中计算公式及专家的综合评判结果构造得出判断矩阵见式(19)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/7 \\ 1/2 & 1 & 1/6 \\ 7 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

第2步根据方根法得到判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{max}=3.0841$ ，该特征值对应的最大特征向量归一化后为[0.1436 0.0964 0.7600]，评价指标对应的权重集见式(20)。

$$\gamma = (0.1436 \quad 0.0964 \quad 0.7600) \quad (20)$$

最后计算得到一致性指标 $CI=0.0421$ ，计算得到随机一致性比率 $CR=0.0809 < 0.1$ ，所以可以认为层次分析排序的结果有满意的一致性， $\gamma = (0.1436 \quad 0.0964 \quad 0.7600)$ 可作为权重集。

2) 根据熵权法确定指标权重值，首先需要将本数据表1中的数据标准化处理，利用式(3—4)将表格中各个指标标准化，其中填充率为数值越大越优型，装箱效率与重心偏移量为越小越优型，然后根据式(5—6)计算得出各项垛型评价指标的熵值，最后计算得出3项评价指标的熵权值见式(21)。

$$w_j = [0.3054, 0.2829, 0.4326] \quad (21)$$

3) 根据评价指标的综合权重确定法，即式(9)求得3个评价指标最终的综合权重值见式(22)。

$$\omega_j = [0.2189, 0.1324, 0.6491] \quad (22)$$

3.3 模糊综合评价

以码垛方案1为例，根据各个指标的性质不同， u_1 指标为偏大型， u_2, u_3 为偏小型指标，将其按其属

性分别带入对应的隶属函数，便可得到式(23)所示的 3×3 矩阵，该矩阵则可作为方案1的模糊关系矩阵。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 & 0 \\ 0 & 0.83 & 1 \\ 0 & 0.42 & 0.74 \end{bmatrix} \quad (23)$$

然后将模糊关系矩阵 R_1 与综合权重 ω_j 按式(16)进行模糊运算得到结果见式(24)。

$$B = [0.0018 \quad 0.3854 \quad 0.6127] \quad (24)$$

最后按照最大隶属度原则，垛型1的最大隶属度值为0.627，最接近于第3等级，所以判定垛型1为3级。

根据以上所述方法进行类似的计算，便可以计算出方案2—6的模糊综合评价结果，6个垛型数据的模糊综合评价结果见表4。

表4 样本码垛效果模糊综合评价结果
Tab.4 Fuzzy comprehensive evaluation results of sample palletizing effect

编号	1级	2级	3级	评价结果	排序
方案1	0.0018	0.3854	0.6127	3级	4
方案2	0.6422	0.3026	0.0642	1级	2
方案3	0.0461	0.2134	0.7465	3级	6
方案4	0.1327	0.6271	0.3562	2级	3
方案5	0.9276	0.0793	0.0012	1级	1
方案6	0.0673	0.2543	0.6862	3级	5

从表4综合评价结果可以看出，在6组方案中，方案5有0.9276的概率为货舱一级码垛方式，是所有方案中可作为最佳飞机货舱的码垛方法。由初始数据分析，鉴于重心偏移量与箱体填充率2个评价指标权重较大，6组方案中最优的码垛方案为第5种，虽然码垛效率稍低，但其影响权重较低，对整体码垛效果影响较小，评价的结果与原始信息一致，可见评价方法的合理性。同时，通过此综合评价模型的计算可以更清晰地得出多组码放方案的综合效果对比结果，使评价结果更加准确可靠。

4 结语

由于影响码垛效果因素的多样性以及量值的模糊性，文中针对货舱码垛效果评价引入模糊综合评价，根据机场环境下码垛效果的指标需求，综合考虑了影响码垛效果的各项因素，利用AHP-熵权法确定各项指标的权值，通过隶属函数，建立了评价样本与码垛效果等级之间的隶属关系。通过对6组码垛方式进行模糊运算与分析，结果表明提出的基于AHP-熵权法的码垛效果模糊综合评价方法可行有效，能够有效避免决策信息的丢失。

文中提出的码垛效果综合评价模型，不仅适用于飞机货舱码垛效果评价，也可为其他行业的货物码垛效果评价提供参考，在应用于不同场景时，需要根据实际情况选取相应的评价指标。

参考文献：

- [1] 李孙寸, 施心陵, 张松海, 等. 基于多元优化算法的三维装箱问题的研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 106—115.
LI Sun-cun, SHI Xin-ling, ZHANG Song-hai, et al. Research on 3D Packing Problem Based on Multivariate Optimization Algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 106—115.
- [2] GRIFFITHS V, SCANLAN J P, ERES M H, et al. Cost-driven Build Orientation and Bin Packing of Parts in Selective Laser Melting (SLM)[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 273(1): 334—352.
- [3] 朱向, 雷定猷. 带平衡约束三维装箱问题的双层混合遗传算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 203—209.
ZHU Xiang, LEI Ding-you. Double Layer Hybrid Genetic Algorithm for 3D Packing Problem with Equilibrium Constraints[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2015, 15(2): 203—209.
- [4] TRIIVELLA A, PISINGER D. The Load-balanced Multi-dimensional Bin-packing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2016, 74: 152—164.
- [5] RAMOS A G, SILVA E, OLIVEIRA J F. A New Load Balance Methodology for Container Loading Problem in Road Transportation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 266(3): 1140—1152.
- [6] 游伟, 雷定猷, 朱向. 三维装箱问题的偏随机密钥混合遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(22): 265—270.
YOU Wei, LEI Ding-you, ZHU Xiang. Biased Random Key Hybrid Genetic Algorithm for Three Dimensional Loading Problem[J]. Computer Engineering & Applications, 2014, 50(22): 265—270.
- [7] SRIDHAR R, CHANDRASEKARAN M, PAGE T. Multi Objective Optimization of Heterogeneous Bin Packing Using Adaptive Genetic Approach[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2017, 9(48): 12—26.
- [8] LI H, WANG Y, MA D P, et al. Quasi-Monte-Carlo Tree Search for 3D Bin Packing[C]// Switzerland: Springer Cham, 2018: 384—396.
- [9] 张长勇, 王艳芳, 吴智博. 强异构货物垛型稳定性分析及评估方法[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 164—169.
ZHANG Chang-yong, WANG Yan-fang, WU Zhi-bo. Stability Analysis and Evaluation Method of Strong Heterogeneous Cargo Stack Type[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 164—169.

- [10] 靳志宏, 兰辉, 郭贝贝. 基于现实约束的集装箱配载优化及可视化[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(9): 1722—1728.
JIN Zhi-hong, LAN Hui, GUO Bei-bei. Optimization and Visualization of Container Stowage Based on Realistic Constraints[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2010, 30(9): 1722—1728.
- [11] ALVAREZ V R, PARREN O F, TAMARIT J M. A GRASP/Path Relinking Algorithm for Two- and Three-Dimensional Multiple Bin-size Bin Packing Problems[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(12): 3081—3090.
- [12] LURKIN V, SCHYNS M. The Airline Container Loading Problem with Pickup and Delivery[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(3): 955—965.
- [13] 李若哲, 唐文勇, 李晓冬. 船舶风险控制方案的层次分析-模糊综合评价[J]. 中国航海, 2019, 42(1): 71—75.
LI Ruo-xi, TANG Wen-yong, LI Xiao-dong. Hierarchical Analysis Fuzzy Comprehensive Evaluation of Ship Risk Control Schemes[J]. China Navigation, 2019, 42(1): 71—75.
- [14] 赵萌, 任嵘嵘, 李刚. 基于模糊熵-熵权法的混合多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2013(6): 78—83.
ZHAO Meng, REN Rong-rong, LI Gang. Hybrid Multi-attribute Decision-making Method Based on Fuzzy Entropy Entropy Weight Method[J]. Operations Research and Management, 2013(6): 78—83.
- [15] 胡宗顺, 黄之杰, 朱倩, 等. 基于熵权法-AHP法航空制氧制氮站安全评价指标体系权重确定方法研究[J]. 装备环境工程, 2017(4): 77—81.
HU Zong-shun, HUANG Zhi-jie, ZHU Qian, et al. Research on Weight Determination Method of Safety Evaluation Index System for Aviation Oxygen and Nitrogen Production Station Based on Entropy Weight Method-AHP Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017(4): 77—81.
- [16] 范新宇, 贾志献, 白雪亮, 等. 熵权模糊综合评价模型在极软岩隧洞围岩分级中的应用[J]. 工程地质学报, 2019(6): 1236—1243.
FAN Xin-yu, JIA Zhi-xian, BAI Xue-liang, et al. Application of Iso-Entropy Fuzzy Comprehensive Evaluation Model to Surrounding Rock Classification of Extremely Soft Rock Tunnels[J]. Journal of Engineering Geology, 2019(6): 1236—1243.
- [17] 刘大海, 宫伟, 邢文秀. 基于AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 462—467.
LIU Da-hai, GONG Wei, XING Wen-xiu. A Comprehensive Method for Determining the Weight of the Vulnerability Index of Islands and Coastal Zones Based on AHP-entropy Weight Method[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 462—467.