

应用科技
Applied Science and Technology
ISSN 1009-671X, CN 23-1191/U

《应用科技》网络首发论文

题目： 基于博弈论-TOPSIS 法的船型综合评价方法
作者： 张明霞，韩丹，赵桐鸣
收稿日期： 2019-11-25
网络首发日期： 2020-10-14
引用格式： 张明霞，韩丹，赵桐鸣. 基于博弈论-TOPSIS 法的船型综合评价方法. 应用科技. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20201014.0909.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于博弈论-TOPSIS 法的船型综合评价方法

张明霞, 韩丹, 赵桐鸣

大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要：船型综合评价是一个多目标决策问题。为克服采用单一方法确定权重存在的片面性，基于主观赋权的层次分析法、客观赋权的熵权法和智能赋权的 BP-神经网络法三类赋权法得到的权重，采用博弈论法来确定指标的组合同权重，将各评价指标组合同权重与逼近理想解排序法(TOPSIS)结合，建立博弈论-TOPSIS 评价模型。并以一组消防船为例进行了案例分析。评价结果表明，博弈论-TOPSIS 法与改进复合权重 TOPSIS 法的评价结果趋势一致，且博弈论-TOPSIS 法的方案区分度更大，说明采用博弈论法确定的指标组合同权重更加合理，能够为多方案船型评价工作提供更有效的评价工具。

关键词：博弈论；TOPSIS 法；层次分析法；BP-神经网络；熵权法；改进复合权重；消防船；船型综合评价

中图分类号：U692.6

文献标志码：A

Comprehensive evaluation of ship type based on game theory and TOPSIS

ZHANG Mingxia, HAN Dan, ZHAO Tongming

School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: The comprehensive evaluation of ship forms is a multi-objective decision-making issue. In order to overcome the one-sidedness of determining the weight by using a single method, we used Game Theory to determine the combined weights of pre-given indicators based on the weights obtained by three kinds of weighting methods, including analytic hierarchy process of subjective weighting, entropy weight method of objective weighting and BP-neural network method of intelligent weighting, and combined the weights of each evaluation index with TOPSIS method to establish a game theory--TOPSIS evaluation model. A case study was conducted with a group of fireboats as an example. The evaluation results show that the game theory-TOPSIS method is consistent with the evaluation result of the improved composite weight TOPSIS method, and the game theory-TOPSIS method has certain advantages in distinguishing different evaluation methods, which shows the index weight determined by the game theory is reasonable and can provide an effective evaluation tool for multi-scheme ship evaluation.

Keywords: Game Theory; TOPSIS; AHP; BP-neural network; EWM; ICW; fireboat; ship type comprehensive evaluation

船舶的建造投资大、使用周期长、风险高，设计成功与否，很大程度上取决于方案的设计。因此就要求设计者在船型方案的初步设计阶段，对各可行方案进行准确的船型综合评价。如此，赋权方法是否可以兼顾专家主观意见和指标客观性、评价方法的优劣，将直接影响决策者的判断。因此使用全面综合的赋权方法以及合理的评价模型，能够改善

船型综合评价工作的质量，更好地为决策者提供建议。

以往的船舶综合评价工作往往采用一些传统评价方法。李劲松等^[1]、汪敏等^[2]、姚雷等^[3]采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对船型方案选型提出决策建议，但此方法依赖专家意见，评价结果过于主观。刘元丰等^[4]、高丹等^[5]将模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)分别应用于船舶航行安全评价、船舶溢油事故定级方面，验证了模糊综合评价法在船舶工程领域的适用性，但模糊评价法同样对专家的经验判断依赖性较强。

收稿日期：2019-11-25.

作者简介：张明霞，女，副教授，博士；

韩丹，女，硕士研究生。

通信作者：张明霞, E-mail: mxzhang@dlut.edu.cn.

熊云峰^[6]综合考虑了客观因素和主观因素, 将得到的复合权重与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)结合, 建立了复合权重 TOPSIS 船舶性能综合评价方法; 张明霞^[7]对主客观两类赋权法采用动态组合得到改进复合权重, 并将之与 TOPSIS 方法结合, 建立了改进复合权重 TOPSIS 评价模型, 完成了算例中 7 艘修井船的评价, 证明了此方法在船型综合评价中的适用性。Pelorus^[8]将 TOPSIS 与层次分析法(AHP)相结合, 确定了一种适用于船舶运营商的成本效益决策工具。张明霞^[9]对上述几种评价方法做了对比, 发现改进复合权重 TOPSIS 法区分度最高。

在船型综合评价工作中, 评价指标权重的确定是否科学合理对于评价工作结果影响很大。目前常用的船型综合评价方法, 例如层次分析法(AHP)、模糊综合评价法(FCE)及熵权法(entropy-weight method, EWM)等, 以上单一方法确定的权重存在片面性。复合权重是将主观赋权法与客观赋权法两种方法以一定方式进行组合, 一定程度上兼顾了决策者主观意愿与评价对象的客观信息。而基于博弈论的组合权重赋权原理, 是对采用多种不同赋权方法得到的权重进行博弈集结, 来协调不同赋权方法之间的不一致, 最终达到一个均衡满意的结果, 能够更科学、全面和客观地解决权重的确定问题。Hu^[10]基于博弈论对遥控装置的网络改造和验收技术优化进行了分析和探讨, 对其应用条件和技术难点进行了分析, 在实际应用中取得了良好的效果; 陈衍泰^[11]运用合作博弈的原理, 基于组合评价以及具有相同属性的单一评价方法, 提出了应用合作博弈确定组合评价权重系数的方法; 何俊^[12]将博弈论和灰色关联分析的评估方法引入到雷达抗干扰能力的综合评估上, 得到了科学的权重; 周建国^[13]采用基于博弈论的组合权重确定方法来确定评价指标的权重, 并与灰色关联度理论结合, 对我国六大区域电力市场的运营效果进行了综合评价。

本文将基于博弈论的组合权重确定方法应用于船型综合评价工作中, 通过主观赋权的层次分析法^[2]、客观赋权的熵权法^[14]和智能赋权的 BP-神经网络法^[15]分别得到 3 个权重向量, 对得到的权重进行博弈集结得到最优权重。然后, 利用 TOPSIS 评价模型对确定指标权重后的船型方案进行综合评价。

1 基于博弈论的组合权重确定方法

综合权重的集结模型可分为博弈集结模型、团队集结模型及群体集结模型 3 类^[13]。其中博弈集结模型的基本思想是, 根据不同赋权方法分别求得的权重, 假设这些权重向量是相互独立的, 在其中寻找协调一致的关系, 可以有效地减少主观赋权法计算权重的主观性和提高客观赋权法的科学性, 寻找不同赋权方法的均衡和协调。寻找组合权重和各个权重之间的最小化偏差, 最终得到反映专家意见及指标本身属性的组合权重。由此推导出本文的策略模型即博弈集结模型。

1.1 基本假设

设 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 为方案集, 其中 U_i 代表第 $i(0 < i \leq m)$ 个可行方案, x_{ij} 表示第 $i(0 < i \leq m)$ 个方案的第 $j(0 < j \leq n)$ 个指标值, 可建立初始决策矩阵 $B = \{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

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

1.2 归一化处理

在建立基本假设之后, 需要对指标进行归一化处理。

方案的评价指标通常分为两类, 一类是效益型指标, 一类是消耗型指标。而指标间具有不同的量纲与数量级, 没有可比性, 所以需要评价指标进行标准化处理。

首先需对评价指标进行无量纲处理, 公式如下。

对于效益性指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij}}$$

对于消耗性指标:

$$r_{ij} = \frac{\max_j x_{ij}}{x_{ij}}$$

无量纲处理后进行归一化处理:

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$$

式中: x_{ij} 表示第 $i(0 < i \leq m)$ 个方案的第 $j(0 < j \leq n)$ 个指标值; r_{ij} 表示 x_{ij} 的标准化指标值; r'_{ij} 表示 r_{ij} 的标准化指标值。

最终得到的标准化决策矩阵 R 为

$$R = (r'_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1n} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r'_{m1} & r'_{m2} & \cdots & r'_{mn} \end{bmatrix}$$

1.3 博弈论赋权法

经过基本假设和归一化指标后, 设使用 L 种不同的赋权方法计算得到 L 个权重向量 $w_k = [w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}]$, ($k=1, 2, \dots, L$), 构建一个基本权重向量集:

$$w = \{w_1, w_2, \dots, w_L\} \quad (1)$$

这些权重向量的任意线性组合均构成一个可能权重集:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T \quad (\alpha_k > 0) \quad (2)$$

式中: α_k 为权重系数, w 为可能的权重向量。

寻找最满意的权重向量 w^* , 就是使 w 与各 w_k 的离差极小化:

$$\min \left\| \sum_{j=1}^L \alpha_j w_j^T - w_i^T \right\|_2 \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (3)$$

根据矩阵的微分性质得到式 (8) 的优化一阶导数条件为

$$\sum_{j=1}^L \alpha_j w_i w_j^T = w_i w_i^T \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

对应的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} w_1 \bullet w_1^T & w_1 \bullet w_2^T & \cdots & w_1 \bullet w_L^T \\ w_2 \bullet w_1^T & w_2 \bullet w_2^T & \cdots & w_2 \bullet w_L^T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_L \bullet w_1^T & w_L \bullet w_2^T & \cdots & w_L \bullet w_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \bullet w_1^T \\ w_2 \bullet w_2^T \\ \vdots \\ w_L \bullet w_L^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

解出 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$, 并归一化:

$$\alpha^* = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^L \alpha_k} \quad (6)$$

最后得出组合权重 w^* :

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (7)$$

2 逼近理想解排序法 (TOPSIS)

逼近理想解排序法 (TOPSIS) 的原理是借助评

价对象与方案正负理想解的相对距离对其进行排序的。正理想解的每一个指标通常取为评价方案中的最好的值; 负理想解为待评价方案中各指标最劣的值。TOPSIS 法通过检测待评价方案与正负理想解的相对趋近度来判断方案的好坏, 显然, 越趋近正理想解方案越优。

张明霞^[7]建立了改进复合权重 TOPSIS 评价模型, 将改进复合权重 TOPSIS 法用于船型综合评价工作中, 完成了 7 艘修井船的评价, 证明了此方法在船型综合评价中的适用性。又在文献[9]将此方法与层次分析法、模糊综合评判法以及模糊层次分析法对比, 发现 TOPSIS 法的方案评价得分区分度最高, 即越好的方案得分更高, 避免出现忽略最优方案的现象。

由此本文选择 TOPSIS 法作为本文评价方法, 正 (负) 理想解公式为

$$\begin{cases} R^+ = \left\{ \max_i (r'_{ij}) \mid i \in (1, m); j \in (1, n) \right\} \\ R^- = \left\{ \min_i (r'_{ij}) \mid i \in (1, m); j \in (1, n) \right\} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R^+ 为正理想解; R^- 为负理想解。

则各评价方案与正负理想解的距离表示为

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j (r'_{ij} - r_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j (r'_{ij} - r_j^-)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_i^+ 、 d_i^- 分别表示第 i 个方案与正负理想解的距离值; r_j^+ 、 r_j^- 分别为 R^+ 与 R^- 相对应的指标值。

那么, 贴近度 c_i 的计算公式可表达为:

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i \in (1, m) \quad (10)$$

待评价方案的贴近度 c_i 取值范围为 $(0, 1)$, 越接近 1 说明该待评价方案距离正理想解越近, 方案越优。

在本文中 c_i 值的大小代表船型方案的好坏, 可作为方案评价得分。

3 算例验证

在本节中, 按照图 1 流程对算例进行计算。

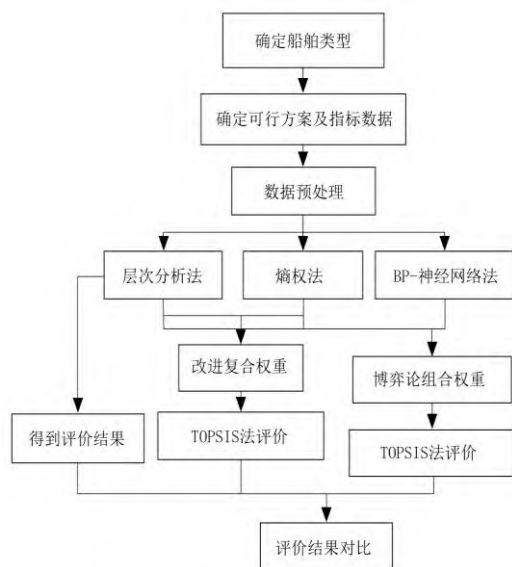


图1 算法计算流程

本文算例为 13 艘消防船, 部分数据通过查阅文献[16]得到。13 艘船分别是澳门消防船(澳消)、珠海消一号(珠消一)、KASUMI(KAS)、香港 5 号(香 5)、珠江号、MIYAGO(MIY)、KUSUNOKI(KUS)、布引号、横滨号、NAMIHAYA(NAM)、MINOO(MIN)、深消一、深消二、深消三。

表1 消防船各项指标初始数据^[16]

序号	船名	$P/\text{元}$	$S/\text{元}$	E_E	F	V_s/kn
1	澳消	54 259 000	7 988 000	2.7	570 000	16.93
2	珠消一	53 979 000	7 931 000	2.34	568 000	16.17
3	KAS	33 084 000	5 691 000	2.14	288 000	15.06
4	香 5	57 198 000	8 178 000	1.94	550 000	14.89
5	珠江号	63 546 000	8 823 000	3.03	555 600	16.84
6	MIY	33 639 000	6 035 000	2.23	264 000	14.74
7	KUS	33 849 000	6 070 000	2.89	240 000	15.52
8	布引号	30 871 000	5 289 000	2.94	192 000	15.04
9	横滨号	40 745 600	6 689 000	2.76	288 000	15.11
10	NAM	40 757 800	6 678 000	2.49	288 000	14.61
11	MIN	30 458 000	5 161 100	3.85	160 000	15.57
12	深一二	56 713 000	8 112 900	2.68	360 000	14.26
13	深消三	62 156 000	8 638 800	3.56	360 000	15.17

3.1 层次分析法(AHP)

3.1.1 构造判断矩阵

判断矩阵为层次分析法的信息基础, 其元素值能真实反映出评价对象各个指标之间的相对重要程度。为表述每一层中各要素相对其上层某要素的相对重要程度, 构造判断矩阵^[2]如下:

$$A = (a_{jk})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

式中 a_{ij} 为针对准则层 C_k 而言, 指标 A_i 相对指标 A_j 重要程度的数值, 通常采用 1~9 的相对比较标度^[2]。

因在本消防船船型综合评价中, 指标的重要度为: P (造价)不太重要; S (年营运成本)不太重

综合考虑消防船的经济性、工作性能与绿色度要求, 建立造价(P)、年营运成本(S)、灭火能力(F)、航速(V_s)、能效设计指数(energy efficiency design index, EEDI)(E_E)这 5 个评价指标, 其中 P 、EEDI 是消耗型指标, 值越小越好, 其他指标为效益型指标, 值越大越好。

航速(V_s)为消防船服务航速, 利用海军部公式来估算; 而消防船的灭火能力(F)受水炮的流量和射程的直接影响; EEDI 反映了消防船作业与航行时二氧化碳的排放情况。

消防船本身的应用场景导致消防船都有比较相似的技术特点: 良好的快速性以及持续的灭火能力。消防船需要较高航速来保证在火灾尚未造成严重损失的时候到达火灾现场; 而很多火灾的燃烧时间都会持续几天几夜, 因此, 持续的灭火能力也是一个消防船所必须的^[16]。

在本消防船船型综合评价中, 默认的各个衡量指标的重要度为: P (造价)不太重要; S (年营运成本)不太重要; EEDI 值得重视; F (消防能力)很重要; V_s (航速)重要。

为使图表更加清晰直观, 对部分船名及指标进行简化。消防船各项指标初始数据如表 1 所示。

要; EEDI 值得重视; F (消防能力) 很重要; V_s (航速) 重要。

以上述指标重要度为例: 两指标同等重要, 标度为 1; 某指标比另一指标略微重要, 标度为 3; 某指标比另一指标明显重要, 标度为 5; 某指标比另一指标强烈重要, 标度为 7; 各标度倒数反映反比较意义。

故建立相应的判断矩阵 A 如表 2 所示。

表 2 判断矩阵 A

A	P	S	E_E	F	V_s
P	1	1	0.333 3	0.142 9	0.2
S	1	1	0.333 3	0.142 9	0.2
EEDI	3	3	1	0.2	0.333 3
F	7	7	5	1	0.333 3
V_s	5	5	3	3	1

为检验判断矩阵中各元素的协调性, 需要进行一致性检验, 通常一致性检验公式为

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)R_I}$$

式中: n 为评价指标的个数; C_R 为一致性检验指标; R_I 为平均随机一致性指标, 取值与比较因子的数量有关, 当 $n=5$ 时, $R_I=1.12$ 。通常认为, 当 $C_R < 0.1$ 时, 认为层次分析法判断矩阵有满意的一致性, 否则必须重新调整判断矩阵直至符合一致性标准为止^[2]。

经计算, 矩阵 A 的 $\lambda_{\max}=5.364 5$, $R_I=1.12$, $C_R=0.081$, $C_R < 0.1$, 矩阵 A 通过一致性检验。

3.1.2 指标权重向量

权重向量为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n]$, 确定各评价因素的权重, 计算公式如下:

表 3 层次分析法评价得分

船名	澳消	珠消一	KAS	香 5	珠江号	MIY	KUS	布引号	横滨号	NAM	MIN	深一二	深消三
评价得分	0.104 0	0.101 0	0.094 1	0.114 2	0.098 1	0.075 6	0.071 4	0.067 2	0.074 2	0.074 6	0.062 8	0.077 6	0.075 7

3.2 熵权法 (EWM)

熵权法的基本思想是根据待评价方案指标本身属性及特点来确定客观权重。信息熵 E_j 用来度量信息量的大小, 建立在原始数据的基础上, 客观性比较强^[14]。本文采用了以信息熵 E_j 确定属性权重的方法, 具体定义如下。

根据得到的标准化决策矩阵 R 计算信息熵 E_j :

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}}{e_{ij}} \ln \frac{x_{ij}}{e_{ij}} \quad (12)$$

$$e_{ij} = \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$, (m, n 定义见 1.1 节);

$$\omega_{jk}' = \frac{a_{jk}}{\sum_{k=1}^n a_{jk}}$$

计算得到层次分析法的一组指标 (P, S, E_E, A, V_s) 权重向量 w_1 为

$$w_1 = [0.056 5, 0.056 5, 0.159 2, 0.429 6, 0.359 2]$$

3.1.3 评价结果

由式 (1) ~ (5) 得到标准化决策矩阵:

$$R = (r_{ij}')_{m \times n} =$$

0.059 9	0.065 4	0.075 2	0.121 7	0.084 7
0.060 2	0.065 9	0.086 8	0.121 3	0.080 9
0.098 2	0.091 8	0.094 9	0.061 5	0.075 3
0.056 8	0.063 9	0.107 4	0.117 4	0.074 5
0.051 1	0.059 2	0.067 0	0.118 6	0.084 2
0.096 6	0.086 6	0.091 1	0.056 4	0.073 7
0.096 0	0.086 1	0.070 3	0.051 2	0.077 6
0.105 3	0.098 8	0.069 1	0.041 0	0.075 2
0.079 8	0.078 1	0.073 6	0.061 5	0.075 6
0.079 7	0.078 2	0.081 6	0.061 5	0.073 1
0.106 7	0.101 2	0.052 8	0.034 2	0.077 9
0.057 3	0.064 4	0.075 8	0.076 9	0.071 3
0.052 3	0.060 5	0.057 1	0.076 9	0.075 9

将 R 与权重向量 w_1 带入式 (11) 得到层次分析法

最终评价得分:

$$B = R w_1 \quad (11)$$

如表 3 所示。

$K > 0$, $K = \frac{1}{\ln(n)}$, 为常系数; x_{ij} 见 1.2 节定义。

因此, 第 j 个评价指标标准化的熵权法权重系数值为

$$\theta_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (14)$$

由式 (12) ~ (14), 计算得到一组熵权法确定的指标 (P, S, E_E, F, V_s) 权重向量 $w_2 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 为

$$w_2 = [0.198 6, 0.202 5, 0.203 0, 0.190 3, 0.205 5]$$

3.3 BP-神经网络法

神经网络可通过学习和训练获取网络的权值和结构。本文以层次分析法得到的评价结果作为目标

值, 依靠 Matlab 所携带的神经网络工具箱 nntool 对样本进行训练, 得到权值。

当输入的标准化方案指标值训练结束并达到要求的网络精度后, 基于调整后得到的最终输入层到隐含层之间的连接权矩阵 V , 计算各输入层节点到所有隐含层节点之间连接权的绝对值之和, 并归一化, 得到 m 个指标的权重^[15]:

$$w_3 = \frac{\sum_{l=1}^k |v_{jl}|}{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^k |v_{il}|} \quad j=1, 2, \dots, m$$

式中 v_{jl} 为各输入层节点到所有隐含层节点间的连接权值。

得到 BP-神经网络法确定的指标 (P, S, E_E, F, V_s) 权重向量 w_3 为

$$w_3 = [0.216 \ 3, 0.161 \ 4, 0.208 \ 2, 0.153 \ 6, 0.260 \ 5]$$

3.4 博弈论法

分别通过层次分析法、熵权法和 BP-神经网络法得到 3 组权重向量 w_1, w_2, w_3 , 由式(1)~(5)可得到相应线性方程组的矩阵表示形式:

$$\begin{bmatrix} 0.345 \ 3 & 0.210 \ 6 & 0.214 \ 1 \\ 0.210 \ 6 & 0.214 \ 1 & 0.200 \ 7 \\ 0.214 \ 1 & 0.200 \ 7 & 0.207 \ 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.345 \ 3 \\ 0.214 \ 1 \\ 0.207 \ 6 \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 求解线性方程组的最优解为

表 4 改进复合权重 TOPSIS 法评价得分 (c_i)

船名	澳消	珠消一	KAS	香 5	珠江号	MIY	KUS	布引号	横滨号	NAM	MIN	深一二	深消三
评价得分	0.687	0.719	0.472	0.721	0.631	0.421	0.326	0.319	0.354	0.381	0.287	0.428	0.375

3.5.2 博弈论-TOPSIS 法贴适度 c_i 计算

根据 3.4 节得到的博弈论组合权重, 由式(8)~

$$\alpha_1 = 1.039 \ 1, \quad \alpha_2 = 0.474 \ 3, \quad \alpha_3 = -0.529 \ 7。$$

根据式(6)、(7)可得到博弈论组合权重向量 w^* 为 $w^* = (0.039 \ 0, 0.070 \ 5, 0.153 \ 9, 0.462 \ 9, 0.338 \ 3)$

3.5 TOPSIS 法船型方案评价

下面分别采用改进复合权重法和基于博弈论的组合权重确定方法确定指标权重, 将各评价指标权重与 TOPSIS 方法结合, 建立改进复合权重 TOPSIS 评价模型与博弈论-TOPSIS 评价模型。将上述 2 种方法应用到消防船船型的优选中, 对 13 艘消防船进行船型综合评价。

3.5.1 改进复合权重 TOPSIS 法贴适度 c_i 计算

由文献^[7]可知: 已经由 3.1 与 3.2 节求出层次分析法权重向量 w_1 与熵权法权重向量 w_2 , 于是复合权重 ρ 可表示为

$$\rho = \sqrt{(\varepsilon_j w_{1i})^2 + [(1 - \varepsilon_j) w_{2i}]^2}$$

动态权重偏好系数 ε_j 为

$$\varepsilon_j = \frac{w_{2i}^2}{w_{1i}^2 + w_{2i}^2}$$

w_i 为求得的组合权重值。

再由公式(8)~(10), 计算各方案的贴适度即评价得分 c_i 如表 4 所示。

表 5 博弈论-TOPSIS 法评价得分 (c_i)

船名	澳消	珠消一	KAS	香 5	珠江号	MIY	KUS	布引号	横滨号	NAM	MIN	深一二	深消三
评价得分	0.631	0.796	0.403	0.802	0.729	0.348	0.264	0.231	0.332	0.348	0.203	0.457	0.427

3.5.3 3 种方法结果比较

由于层次分析法、改进复合权重 TOPSIS 法、博弈论-TOPSIS 法的 5 组指标重要程度一致, 因此将表

(10), 计算各方案的贴适度即评价得分 c_i 如表 5 所示。

3~5 的评价结果绘图, 对 3 种不同方法得到的 13 艘消防船的评价结果进行对比分析, 如图 2 所示。

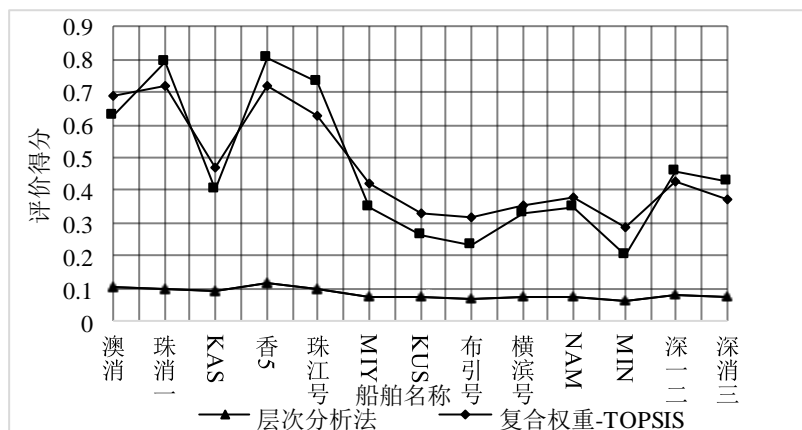


图 2 3 种方法的评价得分比较

1) 从图 2 可以看出, 3 种方法得分最高的均为 香港 5 号(香 5)消防船, 得分最低为 MINOO(MIN)

号消防船。即当各个衡量指标的重要度为： P （造价）不太重要、 S （年营运成本）不太重要、 $EEDI$ 值得重视、 F （消防能力）很重要、 V_s （航速）重要时，香港 5 号（香 5）消防船船型最优，MINOO（MIN）号消防船最劣；

2) 从图 2 可以看出，3 种方法的评价得分曲线趋势一致，其中博弈论-TOPSIS 法与改进复合权重 TOPSIS 法这 2 种方法的评价得分曲线起伏较大，即区分度较大；层次分析法的方案评价得分曲线趋于平稳，即区分度较小；

3) 13 艘消防船的博弈论-TOPSIS 法与改进复合权重 TOPSIS 法相比，评价得分区分度更大，且具有较优方案得分更高，较差方案得分更低的特点。

4 结论

1) 针对主、客观赋权法的不足，构建了结合层次分析法-熵权法-BP-神经网络法的博弈论组合权重赋权模型，得到了基于博弈论确定的组合权重。

2) 采用博弈论-TOPSIS 法对方案进行评价，结果表明，与层次分析法和改进复合权重 TOPSIS 法得到的评价结果趋势一致，证明了博弈论法在船型综合评价中，指标权重确定方面是合理可行的。

3) 改进复合权重 TOPSIS 法、博弈论-TOPSIS 法这 2 种方法的方案评价得分区分度较大，层次分析法的方案评价得分区分度较小。其中，结合层次分析法-熵权法-BP-神经网络法的博弈论赋权法结合了多种赋权法得到组合权重，更具合理性。

4) 改进复合权重 TOPSIS 法评价得分与博弈论-TOPSIS 法评价得分相比，博弈论-TOPSIS 法的方案区分度更大。并且由于博弈论-TOPSIS 法与复合权重 TOPSIS 法相比，具有较优方案得分更高，较差方案得分更低的特点。故应用博弈论-TOPSIS 法进行船型选优，可以使最优方案更加突出。所以当实际应用中船型数量过多时，应用博弈论-TOPSIS 法进行船型选优时会有更大优势。

参考文献:

- [1] 李劲松, 冯恩德. 船型方案的多目标决策: 层次分析法[J]. 武汉水运工程学院学报, 1993, 17(3): 295-305.
- [2] 汪敏, 王丽铮. 层次分析法在船型方案选优中的应用[J].

船海工程, 2005(4): 42-44.

- [3] 姚雷, 李国安, 段宏. 层次分析法在大型水面舰船船型多方案优选中的应用[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3): 12-14.
- [4] 刘元丰, 唐兴莉. 基于模糊综合评判方法的船舶航行安全评价[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(3): 123-126.
- [5] 高丹, 寿建敏. 模糊综合评价法在船舶溢油事故定级中的应用[J]. 船舶, 2007(4): 18-21.
- [6] 熊云峰, 陈章兰, 袁红莉. 基于复合权重 TOPSIS 的船舶性能综合评价法[J]. 船舶工程, 2012, 34(3): 28-31.
- [7] 张明霞, 姜哲伦, 徐晓丽. 改进复合权重 TOPSIS 法在船型综合评价中的应用[J]. 船舶与海洋工程, 2019, 35(5): 34-42, 68.
- [8] KARAHALIOS H. The application of the Ahp-topsis for evaluating ballast water treatment systems by ship operators[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2017, 52: 172-184.
- [9] 张明霞, 姜哲伦, 徐晓丽. 船型技术经济评价方法比较研究[J]. 船舶, 2017, 28(6): 84-96.
- [10] HU Y R, LIU Q X. Network reform and acceptance technology optimization of telecontrol device based on game theory[C]//Proceedings of the 2019 7th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. Chongqing: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2019: 5.
- [11] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 应用合作博弈确定组合评价权重系数的方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(3): 89-94.
- [12] 何俊. 基于博弈论的雷达抗干扰评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- [13] 周建国, 王满炜. 基于博弈论和灰色关联度的区域电力市场运营效果评价指标体系[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 69-73, 88.
- [14] 桂云苗, 朱金福. 一种用信息熵确定聚类权重的方法[J]. 统计与决策, 2005(16): 29-30.
- [15] 张天云, 陈奎, 魏伟, 等. BP 神经网络法确定工程材料评价指标的权重[J]. 材料导报, 2012, 26(2): 159-163.
- [16] 迟殿力. 大型消防船技术经济论证[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.