

智能机舱绿色等级模糊综合评价方法研究

徐 潇, 叶志坚, 李建正, 李广志, 刘可可

武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月15日; 录用日期: 2025年6月11日; 发布日期: 2025年6月19日

摘 要

本文提出了一种智能机舱绿色等级模糊综合评价方法。首先给出了机舱设备三级绿色指标体系; 基于三级指标体系, 各机舱设备根据自身设备特点建立设备自身的绿色指标体系; 利用机舱设备绿色指标等级评估方法, 分别对各机舱设备的绿色指标等级进行评估; 根据各机舱设备所占权重及指标得分隶属度, 开展全船层次的全船机舱设备绿色指标打分, 最终实现全船机舱设备绿色指标等级评估。

关键词

机舱设备, 模糊综合评价, 绿色等级, 指标体系

The Fuzzy Synthetic Evaluation Method Research of Green Grade for Intelligent Engine Devices

Xiao Xu, Zhijian Ye, Jianzheng Li, Guangzhi Li, Keke Liu

Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Apr. 15th, 2025; accepted: Jun. 11th, 2025; published: Jun. 19th, 2025

Abstract

This paper proposes the fuzzy synthetic evaluation method of green grade for intelligent engine devices. Firstly, the three level green index system of intelligent engine devices is given, based on which the green index system of respective engine devices is established. The evaluation method of green grade for engine devices is raised based on fuzzy analytic hierarchy process, and the respective engine device green grade is evaluated using this method. According to the weight of different engine devices and membership of green index score, the green grade index evaluation for whole ship engine devices is executed, ultimately the green grade level evaluation of whole ship engine devices is finished.

文章引用: 徐潇, 叶志坚, 李建正, 李广志, 刘可可. 智能机舱绿色等级模糊综合评价方法研究[J]. 仪器与设备, 2025, 13(2): 221-236. DOI: 10.12677/iae.2025.132029

Keywords

Engine Devices, Fuzzy Synthetic Evaluation, Green Grade, Index System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着人们绿色生态观念的不断加强和 IMO 对环保要求的日益严苛，“绿色船舶”和“绿色航运”已成为海工装备和船舶机舱设备的主旋律。由于绿色机舱设备类型的多样性，不同类型的机舱设备具有不同的设计要求和环境特征，至今没有统一的、公认的、权威的机舱设备绿色设计评价指标体系及评估模型。机舱设备的绿色程度涉及产品生命周期的全过程，这使得绿色评价成为一项复杂的工作。科学、客观地评价产品的绿色程度，需要建立合理的评价指标体系及评估模型。

2. 智能机舱设备绿色性能综合评估总体方案

结合智能机舱设备目前绿色度评估[1]应用需求，找到科学、合理的风险评价方法显得尤为重要，常用的机电设备绿色性能评价方法包括数据包络分析方法、人工神经网络、层次分析法[2] [3]、模糊综合评价法[4] [5]等。

由于每一种方法都有其优缺点，在复杂的机舱设备绿色等级评估过程中，通常采用综合多种分析方法来评价风险因素，达到优势互补的效果。模糊综合评价法与层次分析法的结合在各种机械领域装备的分析评价中应用广泛，也是机电设备绿色性能评估常用的方法之一，本项目将采用模糊综合评价法和层次分析法相结合的模糊层次分析法(FAHP)实现对机舱设备绿色性能评估。

2.1. 机舱设备绿色性能模糊综合评估方法

基于模糊层次分析法机舱设备绿色性能模糊综合评估方法如图 1 所示。



Figure 1. The fuzzy synthetic evaluation method of green grade for engine devices
图 1. 基于模糊层次分析法机舱设备绿色性能评估方法

假设系统的指标体系层次结构为两级，其中有四个一级指标 B_1 , B_2 , B_3 , B_4 。假定某个一级指标 B_1 含 3 个二级指标，该一级指标的因素集设为 $\mu_1 = \{\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13}\}$ ，由模糊层次分析法得到的权重集为： $W_1 = \{\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}\}$ ，其模糊关系矩阵通过具体指标数值进行三角模糊数变换后得到：

$$CR_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix}$$

此时可得到一级指标 B_1 的综合评价为

$$BR_1 = W_1 \circ CR_1 = (\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix}$$

得到的模糊评价集 $BR_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15})$ 即为因素集 $U = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5)$ 在评价集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$ 上的隶属度；同理，对其他二级评价指标进行模糊评价，得到各指标对应的一级模糊评价集 $R = (BR_1, BR_2, BR_3, BR_4)$ 。根据一级指标的权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)$ ，可得到最终的模糊评价集

$$A = W \circ R = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) \circ \begin{bmatrix} BR_1 \\ BR_2 \\ BR_3 \\ BR_4 \end{bmatrix}_{4 \times 5} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$$

计算过程如图 2 所示。

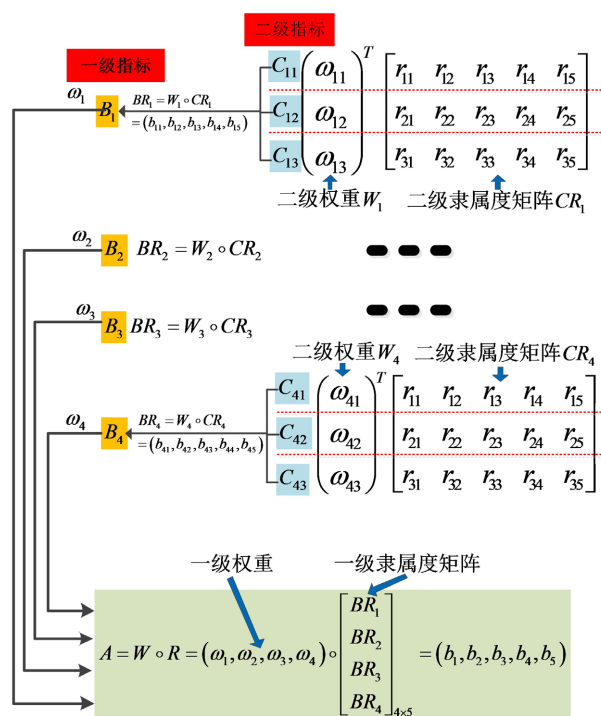


Figure 2. The fuzzy synthetic evaluation progress
图 2. 模糊评判过程

机舱设备绿色性能综合评价结果 $A = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ 为评价集

$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$ 各元素的隶属度。这里我们采用两种方法处理此结果:

1. 最大隶属度原则

这一方法并不是放之四海而皆准的, 它有自己的适用标准。定义最大隶属度原则有效性的测度指标:

$$\alpha = \frac{m\beta - 1}{2\gamma(m-1)} \quad (1)$$

其中 m 为模糊综合评判向量 $A = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ 中元素的个数, β 为 A 中的最大隶属度, γ 为 A 中的第二大隶属度, 具体测度标准如下:

当 $\alpha = +\infty$ 时, 最大隶属度原则完全有效;

当 $1 \leq \alpha \leq +\infty$ 时, 非常有效;

当 $0.5 \leq \alpha \leq 1$ 时, 比较有效;

当 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 时, 低效;

当 $\alpha = 0$ 时, 完全失效。

2. 加权平均原则

该方法适用于评价结果中排序前两位的隶属度值相差不大、最大隶属度原则失效或低效的情况。首先对 A 作归一化处理, 再利用“加权平均型(模糊向量单值化)”基本公式, 计算绩效评价的综合得分。

2.2. 模糊层次分析法权重求解

2.2.1. 模糊判断矩阵基本概念

相对于传统的方案评估方法, 基于模糊层次分析法的方案评估受主观因素影响明显降低。此种方法在不同领域的方案评估中得到了广泛应用, 基于模糊一致矩阵的方案评估方法是其中重要的一类。

模糊集合理论中对模糊一致关系和模糊一致矩阵的定义如下:

定义 1: 设模糊矩阵 $F = (f_{ij})_{m \times n}$, 若有 $f_{ij} + f_{ji} = 1$, 则称矩阵 F 为模糊互补矩阵; 若矩阵 F 对于任意的 $k \in [1, m]$, 都有

$$f_{ij} = f_{ik} - f_{jk} + 0.5 \quad (2)$$

则称其为模糊一致矩阵。

定义 2: 模糊一致矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times m}$ 中:

当 $r_{ij} = 0.5$, 表示元素 i 与元素 j 同样重要;

当 $0.5 \leq r_{ij} \leq 1$, 表示元素 i 比元素 j 重要, 且 r_{ij} 越大, 元素 i 比元素 j 重要程度越高;

当 $0 \leq r_{ij} \leq 0.5$, r_{ij} 越小, 元素 j 比元素 i 重要程度越高。

定义 3: 定义优先关系矩阵如下: 对于模糊互补矩阵 $F = (f_{ij})_{m \times m}$, 若元素 i 比元素 j 重要, 则 $f_{ij} = 1$, 反之取 $f_{ij} = 0$; 若元素 i 与元素 j 同样重要, 则取 $f_{ij} = 0.5$ 。

2.2.2. 构建模糊互补矩阵

机舱设备绿色性能评估在企业的生产经营管理活动中具有非常重要的作用, 是企业制定决策、改进生产工艺、确保持续发展的基础性工作。绿色性能评价的准确性和科学性关键在于指标权重的确定。指标权重的大小直接决定了该指标在指标体系中的地位和作用。因此, 正确选择指标权重的计算方法及其重要。结合前期研究, 本项目采用模糊数学和层次分析法相结合的方法来确定指标的权重。

通常情况下, 模糊层次分析法构建模糊互补矩阵大致有以下几个步骤:

1. 专家选择

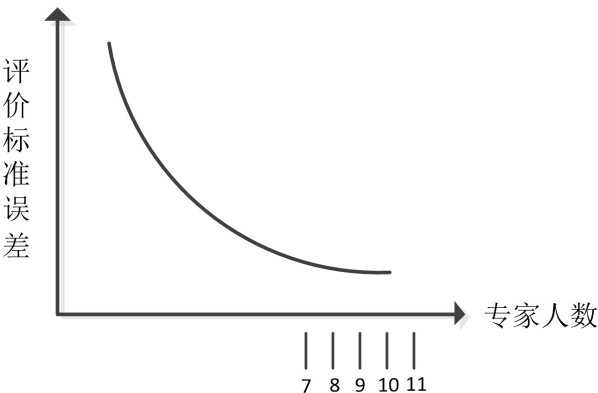


Figure 3. The relation between the number of expert and the evaluation deviation
图 3. 专家人数与评价误差之间的关系

在采用模糊层次分析法和专家调查法确定指标的相对权重时，专家的选择对评价结果的准确性影响很大。本文在专家的选择上坚持三个原则：一是所选专家应是绿色船舶机舱设备研究领域的权威，具有一定的声望和广泛的代表性；二是所选专家应熟悉制造业的特点、地位作用和发展现状以及发展前景；三是所选专家应熟悉武汉船机公司的战略目标和运营状况。

再就是关于专家人数的确定。考虑到调查成本和调查结果处理的复杂程度两方面的因素，专家人数不能太多；但是专家人数也不能太少，样本太小就会缺乏权威性。相关的调查显示，评价标准误差与专家人数呈现反相关关系，但当专家人数超过 7 人时，进一步增加专家对评价结果的准确性影响不大。从图 3 我们不难看出，专家在 7 人左右较宜。

2. 构造模糊判断矩阵

运用专家调查法对船机舱设备绿色性能指标体系中处于同一等级下的不同因素，按照 0.1~0.9 数量标度表进行两两比较构造模糊判断矩阵，如表 1 所示。

Table 1. Fuzzy judgment matrix scale standard
表 1. 模糊判断矩阵标度准则

0.1~0.9 数量标度表	
指标因素 i 与 j 的定性比较结果	标度值
具有同等重要性	0.5
指标因 i 比 j 稍微重要	0.6
指标因 i 比 j 明显重要	0.7
指标因 i 比 j 重要得多	0.8
指标因 i 比 j 极端重要	0.9
反比较(若指标因 i 比 j 相比较得到判断 r_{ij} ，则因 i 与 j 相比较得到的判断为 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

根据标度准则表，可以构造模糊判断矩阵 F ，判断矩阵的基本形式如表 2 所示。

Table 2. Fuzzy judgment matrix
表 2. 模糊判断矩阵

U	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	r_{11}	r_{12}	$\cdots$	r_{1n}
C_2	r_{21}	r_{22}	$\cdots$	r_{2n}
C_3	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
C_4	r_{n1}	r_{n2}	$\cdots$	r_{nn}

其中:

$0 < r_{ij} < 1$ 且只能为 $0.1, 0.2, \dots, 0.9$;

$r_{ii} = 0.5 (i = 1, 2, \dots, n)$;

$r_{ij} = 1 - r_{ji} (i = 1, 2, \dots, n)$;

以上矩阵 F 是模糊互补矩阵。

2.2.3. 构建模糊优先矩阵

在实际的应用中, 往往容易确定两元素之间的相对重要关系, 却难以对两元素之间相对重要性的程度进行准确的量化处理, 即难以从样本集中直接构造模糊一致矩阵。故采用对模糊优先矩阵构造模糊一致矩阵的办法进行评判。

对模糊互补矩阵 $F = (f_{ij})_{m \times m}$ 中的元素按照如下规则进行调整, 得到模糊优先矩阵, 如表 3 所示。

Table 3. Fuzzy precedence matrix
表 3. 模糊优先矩阵

标度	定义
0	元素 i 没有元素 j 重要
0.5	元 i 和元 j 重要同等重要
1	元 i 比元 j 重要

$$r_{ij} = \begin{cases} 0.5 & C_i = C_j \\ 1.0 & C_i > C_j \\ 0 & C_i < C_j \end{cases} \quad (3)$$

C_i 与 C_j 分别表示指标 r_i 与指标 r_j 的相对重要程度。

2.2.4. 构建模糊一致矩阵及权重求解

利用模糊一致矩阵进行绿色性能等级评估, 往往遵循以下步骤:

1. 在绿色性能等级评估过程中, 往往可以根据不同影响因素的隶属关系, 对其进行层次划分。对于面向效能的参数方案评估, 则首先需要对系统效能的构成进行分析。
2. 针对得到的层次模型, 可以建立优先关系矩阵, 用来表明每一个层次中的因素针对上层因素的相对重要性关系。矩阵中元素的取值可以由定义 3 确定。
3. 根据如下步骤, 利用公式(4), (5), 可将模糊互补矩阵(模糊优先矩阵也属于模糊互补矩阵)转化为

模糊一致矩阵。

对模糊互补矩阵按行求和

$$r_i = \sum_{j=1}^m f_{ij} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

并进行如下数学变换

$$r_i = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5 \quad (5)$$

则由此建立的矩阵是模糊一致矩阵，理由如下：

对应任意 k 即 $\forall k=1, 2, \dots, n$

$$r_{ik} - r_{jk} + 0.5 = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5 - \left(\frac{r_j - r_k}{2m} + 0.5 \right) + 0.5 = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5 = r_{ij}, \quad \text{固通过公式(5)变换后的矩阵满足模}$$

糊一致矩阵的定义，所以变换后的矩阵必为模糊一致矩阵。

4. 对模糊一致矩阵按公式(6)进行层次单排序，可得各因素对上一层因素的重要性权值。详细步骤如下：

① 计算模糊一致矩阵 R 每一行所有元素的乘积 $M_i = \prod_{j=1}^m r_{ij}^k$ ，其中 $i=1, 2, \dots, m$

② 计算每一行的 m (其中 m 为矩阵阶数)次方根 $\bar{S}_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m r_{ij}^k}$

③ 将所有行的 m 次方根 $\bar{S}_i$ 求和得到 $\sum_{i=1}^m \bar{S}_i$

④ 归一化处理得到该指标的权重 $S_i^k = \frac{\bar{S}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{S}_i}$

$$S_i^k = \frac{\bar{S}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{S}_i}, \quad \text{其中 } \bar{S}_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m r_{ij}^k} \quad (6)$$

5. 在层次单排序的基础上，综合各层权重矩阵，得出各绿色指标的综合权重。

2.3. 定量指标隶属度的确定

基于前面对三角模糊数和标杆管理的分析研究，我们采用基于标杆管理法的三角模糊函数法来确定定量指标的隶属度。定量指标隶属度函数的确定又可分为正向指标、逆向指标两大类。

2.3.1. 正向指标隶属度函数的确定

对于正向指标，指标数值约大，则机舱设备绿色性能等级越高。根据相关行业标准、国家规定和专家调查法确定指标的最低值 a 和标杆值 b 后 ($a < b$)，在区间 $[a, b]$ 内插入三个等距离的点 d_2, d_3, d_4 ，令：

$$d_1 = a, d_5 = b, d_2 = \frac{(d_5 - d_1)}{4} + d_4 \dots$$

即可得到评价集：

设评价集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$ 对应指标的标准值为 $(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ ，得出以下隶属度函数：

$$\mu_{v_1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq d_1 \\ \frac{d_2 - x}{d_2 - d_1} & x \in [d_1, d_2] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_1}{d_2 - d_1} & x \in [d_1, d_2] \\ \frac{d_3 - x}{d_3 - d_2} & x \in [d_2, d_3] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_2}{d_3 - d_2} & x \in [d_2, d_3] \\ \frac{d_4 - x}{d_4 - d_3} & x \in [d_3, d_4] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_3}{d_4 - d_3} & x \in [d_3, d_4] \\ \frac{d_5 - x}{d_5 - d_4} & x \in [d_4, d_5] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_{v_5}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_4}{d_5 - d_4} & x \in [d_4, d_5] \\ 1, & x \geq d_5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

正向指标隶属度函数及评价等级集合逻辑图如图 4 所示。

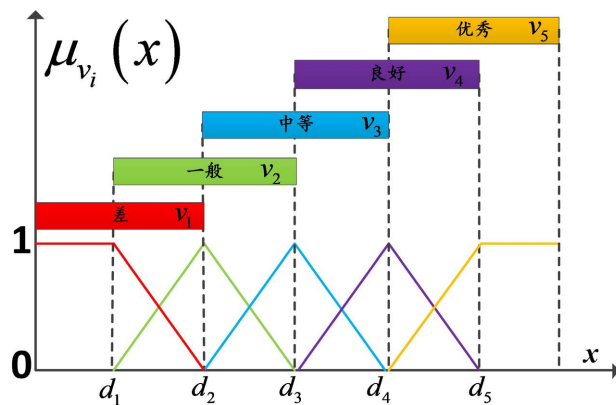


Figure 4. The positive indicator membership function and the evaluation grand collection logic diagram
图 4. 正向指标隶属度函数及评价等级集合逻辑图

对于任意一个指标, 其对于评价集的隶属度满足条件: $\sum_{i=1}^5 \mu_{vi}(x)$

假如绿色供应链中资本保值增值率这个指标的实际值为: 0.11, 标准值为(0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15), 实际值在 0.1 和 0.125 之间, 根据上述隶属度函数, 我们可以得出该指标对评价集的隶属度为: (0, 0, 0.6, 0.4, 0)。

2.3.2. 逆向指标隶属度函数的确定

对于逆向指标, 指标数值越大, 则机舱设备绿色性能等级越低。根据相关行业标准、国家规定和专家调查法确定指标的最低值 a 和标杆值 b ($a \geq b$), 在区间 $[b, a]$ 内插入三个等距离的点 d_2, d_3, d_4 , 令:

$$d_1 = b, d_5 = a, d_2 = \frac{(a_5 - a_1)}{4} + d_1 \dots$$

即可得到评价集:

$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$ 对应指标的标准值为 $(a_5, a_4, a_3, a_2, a_1)$, 同理得出以下隶属度函数:

$$\mu_{v5}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq d_1 \\ \frac{d_2 - x}{d_2 - d_1} & x \in [d_1, d_2] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu_{v4}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_1}{d_2 - d_1} & x \in [d_1, d_2] \\ \frac{d_3 - x}{d_3 - d_2} & x \in [d_2, d_3] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu_{v3}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_2}{d_3 - d_2} & x \in [d_2, d_3] \\ \frac{d_4 - x}{d_4 - d_3} & x \in [d_3, d_4] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu_{v2}(x) = \begin{cases} \frac{x - d_3}{d_4 - d_3} & x \in [d_3, d_4] \\ \frac{d_5 - x}{d_5 - d_4} & x \in [d_4, d_5] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu_{v_1}(x)=\begin{cases} \frac{x-d_4}{d_5-d_4} & x\in[d_4,d_5] \\ 1 & x\geq d_5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

逆向指标隶属度函数及评价等级集合逻辑图，如图 5 所示。

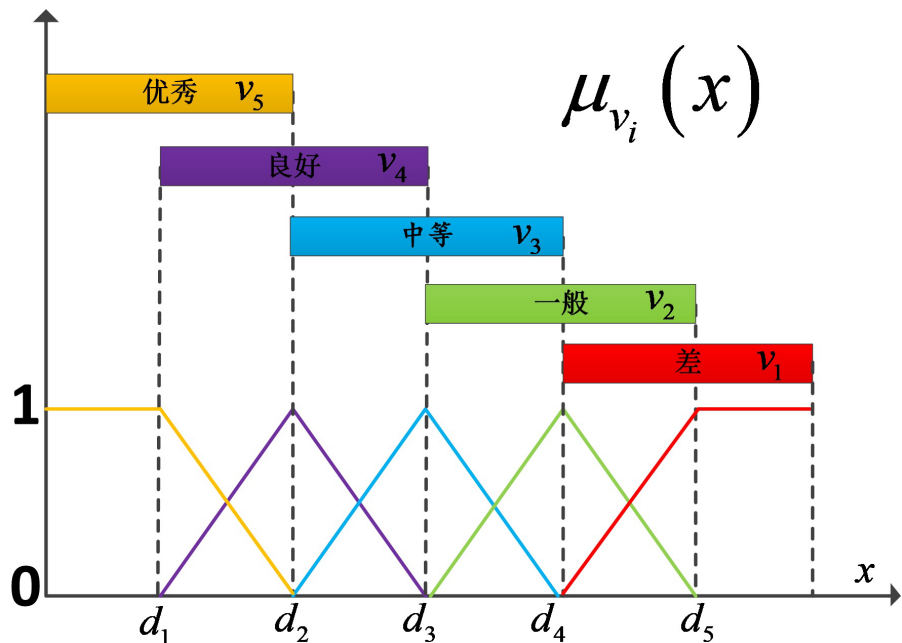


Figure 5. The invert indicator membership function and the evaluation grand collection logic diagram
图 5. 逆向指标隶属度函数及评价等级集合逻辑图

2.4. 定性指标隶属度的确定

对于智能化率、产品新颖性等定性指标我们采用专家调查法来确定其隶属度。具体操作过程如下：聘请专家(6 位)，各位专家根据公司的实际情况，按事先规定的评价集，对公司的各个评价指标进行等级的划分，最后统计数据。假设参与评价的专家人数为 X ，对于指标 μ_{ij} 而言，有 Y 个专家对其的评价等级为 V_m ，则该指标对 V_m 的隶属度为 X/Y ，依次可得出该指标的隶属度行矩阵，进而得出整个指标体系的隶属度向量矩阵 R 。

3. 智能机舱绿色等级模糊综合评价方法模拟验证

3.1. 机舱设备绿色指标体系架构

以全回转舵桨、舵机、调距桨等机舱设备为例，开展全船机舱设备绿色性能等级评估。
如表 4 所示为机舱设备绿色指标体系架构。通过广泛对船东等机舱设备用户的调研，结合船机舱设备特色，广泛听取各方专家意见，并查漏补缺，分析指标内容是否有重复和漏项，是否反映了评价的目的和导向，是否有针对性和均衡性，是否能全面反映机舱设备绿色性能影响因素，初步设计了整合了 4 个一级指标、11 个二级指标、23 个三级指标，形成机舱设备绿色性能综合评价指标体系，来评价船机舱设备的综合绿色性能等级；

Table 4. The green indicator architecture of engine devices
表 4. 机舱设备绿色指标体系架构

一级指标	二级指标	三级指标
经济性 B1	产品能耗 C1	耗电量 D1
		耗油量 D2
		耗汽量 D3
	全生命周期成本 C2	设计成本 D4
		制造成本 D5
		采购成本 D6
		使用成本 D7
		维修保养成本 D8
		回收处理成本 D9
环境协调性 B2	产品能效 C3	能效比 D10
	环境属性 C4	大气污染 D11
		废固污染 D12
		水体污染 D14
	振动噪声 C5	噪声 D14
可靠性 B3	持久性 C6	平均无故障工作时间 D16
	可维修性 C7	平均维修时间 D17
	设计可靠性 C8	失效率 D18
技术先进性 B4	智能化 C9	智能化率 D19
	创新性 C10	产品新颖性 D20
	可持续发展 C11	标准化 D21
		系列化 D22
		模块化 D23

基于表 4 机舱设备绿色性能指标体系，结合典型机舱设备全回转舵桨产品现状，构建全回转舵桨绿色指标体系，如表 5 所示；

Table 5. The green performance index architecture of typical engine devices for Full-rotation rudder propeller
表 5. 典型机舱设备全回转舵桨绿色性能指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
经济性 B1	全生命周期成本 C2	设计成本 D4
环境协调性 B2	振动噪声 C5	噪声 D14
		振动 D15

续表

可靠性 B3	耐久性 C6	平均无故障工作时间 D16
技术先进性 B4	智能化 C9	智能化率 D19

基于表 4 机舱设备绿色性能指标体系，结合典型机舱设备舵机产品现状，构建全回转舵桨绿色指标体系，如表 6 所示；

Table 6. The green performance index architecture of typical engine devices for steering engine
表 6. 典型机舱设备舵机绿色性能指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
经济性 B1	产品能耗 C1	耗电量 D1
	全生命周期成本 C2	设计成本 D4
环境协调性 B2	振动噪声 C5	噪声 D14
		振动 D15
可靠性 B3	耐久性 C6	平均无故障工作时间 D16
技术先进性 B4	智能化 C9	智能化率 D19

基于表 4 机舱设备绿色性能指标体系，结合典型机舱设备调距桨产品现状，构建全回转舵桨绿色指标体系，如表 7 所示。

Table 7. The green performance index architecture of typical engine devices for controllable-pitch propeller
表 7. 典型机舱设备调距桨绿色性能指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
经济性 B1	全生命周期成本 C2	设计成本 D4
环境协调性 B2	振动噪声 C5	噪声 D14
		振动 D15
可靠性 B3	耐久性 C6	平均无故障工作时间 D16
技术先进性 B4	智能化 C9	智能化率 D19

3.2. 全回转舵桨绿色等级评估

基于以上三级权重及隶属度计算，可得到全回转舵桨一级指标权重 $DJW1$ 及隶属度矩阵 RMB ：

$$DJW1 = (0.3530 \ 0.1450 \ 0.2850 \ 0.2170)$$
$$RMB = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.856 & 0.144 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{pmatrix}$$

则可得到全回转舵桨绿色性能的综合评价：

$$RMA = DJW1 \times RMB = (0 \ 0 \ 0.043 \ 0.759 \ 0.197)$$

优化后的全回转舵桨绿色性能得分为：

$$Score_{\text{优化后}} (0 \ 0 \ 0.043 \ 0.759 \ 0.197) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 83.0796$$

同时基于以上方法，计算得到全回转舵桨优化前绿色指标得分：

$$Score_{\text{优化前}} (0 \ 0.087 \ 0.497 \ 0.416 \ 0) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 66.5886$$

可以看到，通过绿色优化后，全回转舵桨的绿色指标得分提高了将近 17 分，提高了全回转舵桨的绿色等级。

3.3. 舵机绿色等级评估

基于以上三级权重及隶属度计算，可得到舵机一级指标权重 $DJW1$ 及隶属度矩阵 RMB ：

$$JW1 = (0.3530 \ 0.1450 \ 0.2850 \ 0.2170)$$

$$RMB = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.645 & 0.355 \\ 0 & 0 & 0 & 0.821 & 0.179 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{pmatrix}$$

则可得到舵机绿色性能的综合评价：

$$RMA = DJW1 \times RMB = (0 \ 0 \ 0.043 \ 0.805 \ 0.151)$$

优化后的舵机绿色性能得分为：

$$Score_{\text{优化后}} (0 \ 0 \ 0.043 \ 0.805 \ 0.151) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 82.1579$$

同时基于以上方法，计算得到舵机优化前绿色指标得分：

$$Score_{\text{优化前}} (0 \ 0.087 \ 0.514 \ 0.381 \ 0.018) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 66.6146$$

可以看到，通过绿色优化后，舵机的绿色指标得分提高了将近 16 分，提高了舵机的绿色等级。

3.4. 调距桨绿色等级评估

基于以上三级权重及隶属度计算，可得到调距桨一级指标权重 $DJW1$ 及隶属度矩阵 RMB ：

$$JW1 = (0.3530 \ 0.1450 \ 0.2850 \ 0.2170)$$
$$RMB = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.846 & 0.154 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.722 & 0.279 \\ 0 & 0 & 0 & 0.923 & 0.077 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0.2 \end{pmatrix}$$

则可得到调距桨绿色性能的综合评价：

$$RMA = DJW1 \times RMB = (0 \ 0 \ 0.299 \ 0.596 \ 0.106)$$

优化后的调距桨绿色性能得分为：

$$Score_{\text{优化后}} = (0 \ 0 \ 0.299 \ 0.596 \ 0.106) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 76.1418$$

同时基于以上方法，计算得到调距桨优化前绿色指标得分：

$$Score_{\text{优化前}} = (0 \ 0.217 \ 0.457 \ 0.326 \ 0) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 62.1822$$

可以看到，通过绿色优化后，调距桨的绿色指标得分提高了将近 14 分，提高了调距桨的绿色等级。

3.5. 全船机舱设备绿色性能评估

根据专家打分，分析全回转舵桨、舵机、调距桨相互之间重要程度，构建全回转舵桨、舵机、调距桨的模糊优先矩阵，如表 8 所示；基于典型机舱设备模糊优先矩阵，构建典型机舱设备模糊一致矩阵表 9 所示；基于权重计算公式，可得到权重表 10 所示。

Table 8. Typical engine devices fuzzy priority matrix
表 8. 典型机舱设备模糊优先矩阵

	全回转舵桨	舵机	调距桨
全回转舵桨	0.5	0	0.5
舵机	1	0.5	1
调距桨	0.5	0	0.5

Table 9. Typical engine devices fuzzy consistent matrix
表 9. 典型机舱设备模糊一致矩阵

	全回转舵桨	舵机	调距桨
全回转舵桨	0.5	0.25	0.5
舵机	0.75	0.5	0.75
调距桨	0.5	0.25	0.5

Table 10. Typical engine devices weight
表 10. 典型机舱设备权重

设备	权重
全回转舵桨	0.274
舵机	0.452
调距桨	0.274

Table 11. The degree of membership for green performance of the typical engine devices before optimization
表 11. 典型机舱设备优化前绿色性能隶属度

设备	差	一般	中等	良好	优秀
全回转舵桨	0	0.087	0.497	0.416	0
舵机	0	0.087	0.514	0.381	0.018
调距桨	0	0	0.299	0.596	0.106

Table 12. The degree of membership for green performance of the typical engine devices after optimization
表 12. 典型机舱设备优化后绿色性能隶属度

设备	差	一般	中等	良好	优秀
全回转舵桨	0	0	0.043	0.759	0.197
舵机	0	0	0.043	0.805	0.151
调距桨	0	0.217	0.457	0.326	0

Table 13. The degree of membership for green performance of the whole ship engine devices
表 13. 全船机舱绿色性能隶属度

	差	一般	中等	良好	优秀
绿色优化前	0	0.063	0.45	0.45	0.037
绿色优化后	0	0.059	0.156	0.661	0.122

根据上述章节计算结果，可分别得到全回转舵桨、舵机及调距桨等典型机舱设备优化前后的绿色性能隶属度，如表 11、表 12 所示。

基于各机舱设备权重及绿色性能隶属度，计算可以得到全船机舱设备的隶属度，如表 13 所示：

$$\text{全船辅机隶属度}_{\text{优化前}} = \text{各辅机权重矩阵} \times \text{各辅机隶属度矩阵}_{\text{优化前}}$$

$$\text{全船辅机隶属度}_{\text{优化后}} = \text{各辅机权重矩阵} \times \text{各辅机隶属度矩阵}_{\text{优化后}}$$

基于以上可以得到全船机舱设备优化前后综合得分为：

$$\text{Score}_{\text{优化前}} = (0 \quad 0.063 \quad 0.45 \quad 0.45 \quad 0.037) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 69.2307$$

$$\text{Score}_{\text{优化后}} = (0 \quad 0.059 \quad 0.156 \quad 0.661 \quad 0.122) \times \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} = 76.8795$$

可以看到，通过绿色优化后，全船机舱设备的绿色指标得分提高了将近 7 分，提高了机舱设备的绿色等级。

4. 结论

本文建立了机舱设备绿色性能指标体系，该体系包括 4 个一级指标、11 个二级指标、23 个三级指标。给出了基于模糊层次分析法机舱设备绿色性能模糊综合评估方法。

通过建立机舱设备绿色性能评价集、因素集及评价尺度集；并基于船舶机舱设备三级绿色指标体系建立阶梯结构模型；利用层次分析法计算各级指标的相对权重；根据机舱设备各绿色指标实际得分，计算得到机舱设备各级指标隶属度矩阵；同时基于各级指标权重及隶属度矩阵，计算机舱设备绿色指标综合得分；最后根据绿色指标最终得分结构，最终进行机舱设备的绿色等级划分。

参考文献

- [1] 张乃明, 张丽, 卢维宏, 等. 区域绿色发展评价指标体系研究与应用[J]. 生态经济, 2019(12):185-189.
- [2] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.
- [3] 刘姝驿, 杨庆媛, 何春燕, 等. 基于层次分析法(AHP)和模糊综合评价法的土地整治效益评价[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 54-60.
- [4] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16.
- [5] 刘文彬. 模糊综合评价系统研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2003.