

引用格式: 邹永久, 杜太利, 姜兴家, 等. 基于 AEC 模型的船舶燃油供给系统状态评估 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 174–179.
ZOU Y J, DU T L, JIANG X J, et al. Evaluation of marine fuel supply system state based on AEC model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 174–179.

基于 AEC 模型的船舶燃油供给系统状态评估



邹永久, 杜太利, 姜兴家, 张跃文*

大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026

摘 要: [目的] 针对船舶机舱智能化的发展需求, 为了预判系统设备的潜在失效因素, 提出一种适用于船舶系统健康状态评估的新型 AEC 模型。[方法] 首先, 将改进层次分析法(AHP)与熵权法(EWM)的优势相结合, 形成组合赋权法来确定各项评估指标的综合权重; 然后, 采用云重心评判法(CGCEM)计算加权偏离度, 并对系统健康状态进行评估。[结果] 实船燃油供给系统的验证结果表明: 实测运行数据的加权偏离度计算结果为 0.181 5, 隶属于 (0, 0.33) 区间, 这与实船的健康运行状态一致。[结论] AEC 模型可以较准确地评估船舶燃油供给系统的健康状态, 可为智能船舶的状态评估和维护保养辅助决策提供参考。
关键词: 燃油供给系统; 层次分析法; 熵权法; 云重心评判法; 状态评估
中图分类号: U664.81*2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01779

Evaluation of marine fuel supply system state based on AEC model

ZOU Yongjiu, DU Taili, JIANG Xingjia, ZHANG Yuewen*

Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: [Objectives] In view of the development demand of intelligent engine room of ships, in order to uncover the potential failure factors of equipment in advance, a new AEC health state evaluation model suitable for the ship's system and equipment is proposed. [Methods] This model combines the improved analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM) to form a combined weight method to determine the comprehensive weight of each evaluation index, and then the cloud gravity center evaluation method (CGCEM) is used to evaluate the health status of the research object based on the weight of each evaluation index. [Results] The proposed model is verified by the actual operation data of the fuel supply system on the ship, and the calculation results show that the weighted deviation degree of the actual operation data is 0.181 5, which belongs to the interval (0, 0.33) and is in a healthy state, which is consistent with the facts. [Conclusions] It indicates that the AEC evaluation model can accurately evaluate the health status of the fuel supply system and has certain practical application values in the intelligent ship status evaluation and maintenance decision-making.
Key words: fuel supply system; analytic hierarchy process (AHP); entropy weight method (EWM); cloud gravity center evaluation method (CGCEM); state assessment

0 引 言

在“工业 4.0”以及“中国制造 2025”的时代背景之下, 智能船舶、无人船舶已成为造船业和船舶营运业的重点发展方向^[1-2]。实现船舶机舱智能

化的前提条件是能够对船舶动力装置关键系统的健康状态和发展趋势进行预估, 从而为系统零部件的置换、维修策略提供支持^[3-5]。以燃油供给系统为例, 其主要功能是为柴油机提供一定压力和黏度的燃油, 其一旦发生故障, 就有可能导致柴

收稿日期: 2019-09-19 修回日期: 2020-04-24 网络首发时间: 2021-01-25 10:03
基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(MC-201712-C07); 高校青年教师种子基金资助项目(3132019008)
作者简介: 邹永久, 男, 1988 年生, 硕士, 讲师。研究方向: 船舶机械故障预测与健康管理技术。Email: zouyj0421@dlmu.edu.cn
杜太利, 男, 1986 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶机械故障预测与健康管理技术。Email: dutaili@dlmu.edu.cn
张跃文, 男, 1967 年生, 硕士, 教授。研究方向: 船舶机械故障预测与健康管理技术。Email: zhangyuewen@dlmu.edu.cn

*通信作者: 张跃文

油机停车,甚至使船舶失去动力,所以对燃油供给系统进行健康状态评估意义非常重大。康兴等^[6]通过抗干扰和数据处理的方式,实现了运行状态数据的实时、准确获取,并通过诊断系统数据分析预判了故障类型继而报警,从而保证了系统及动作,防止了故障的扩大。梁树甜等^[7]提出了基于模糊神经网络的船舶电力推进系统状态评估模型,并结合船舶电力推进系统的实船运行数据开展状态评估模型仿真试验,获取了相对准确的仿真结果,但未开展实船或试验台数据的模型验证工作。吴小豪等^[8]建立了基于超球支持向量机的船舶高温淡水系统状态评估模型,并在训练样本确定以及核函数确定等方面开展了深入研究,但其确定设备自身性能方程的方法过于复杂,故工程实用性欠佳。汪益兵等^[9]针对船舶设备状态监控、综合诊断以及健康评估等综合健康管理开展了技术研究,并对设备运行和维修作业提供了辅助决策功能,但因缺少健康评估计算,未从根本上解决船舶设备的状态评估问题。

基于此,本文拟针对船舶燃油供给系统,提出一种适用于系统健康状态评估的 AEC 模型,通过选取数个表征系统运行状态的参数作为评估指标,采用改进层次分析法和熵权法相结合的组合赋权法进行综合权重计算,并将基于云重心评判法进行健康状态评估,用以预测潜在的故障信息,从而合理安排系统设备的维护保养工作。

1 船舶燃油供给系统

燃油系统作为船舶动力装置的“心脏”,对船舶的正常运行而言至关重要。船舶燃油系统主要包含 5 大功能系统:注入、贮存、驳运,净化和供给,其中燃油供给系统可以为柴油机提供一定压力和黏度的燃油,该系统主要由供给泵、自清滤器、混油桶、循环泵和雾化加热器组成,如图 1 所示。首先,燃油从日用柜流经三通转换阀进入双联粗滤器进行初级过滤;然后,进入燃油供给泵进行首次加压,加压后的燃油随即进入燃油自清

滤器进行二次过滤,而后直接进入流量计(FT),以记录柴油机消耗的燃油数量;最后,燃油流经混油桶并进入燃油循环泵进行再次加压,经雾化加热器处理,获得理想的黏度和压力后进入主机。

2 船舶系统设备的状态评估模型

2.1 组合赋权法的建模过程

2.1.1 传统层次分析法

层次分析法是将一个复杂的问题划分为若干层次,然后从定性与定量相结合的角度计算各层次的单排序及综合总排序的方法,其适用于解决多目标、多因素、存在不确定性且缺少定量信息的复杂决策问题。层次分析法是一种系统性的分析方法,其首先将人的主观意见转换为数量,然后基于完善的知识体系理论开展实际运用分析。针对系统的健康状态评估问题,层次分析法是待评估系统分解为相互联系各个层次,并基于一定的实际标准来衡量各个指标对待评估系统的相对重要程度,进而计算各个评估指标的权重值,其具体建模过程如下:

1) 确定判断矩阵 B 。

假设有 n 项评估指标,基于 1~9 标度法对各个层次之间评估指标的重要性进行量化,如表 1 所示。表 1 中: b_i 为第 i 项评估指标; b_j 为第 j 项评估指标; $b_{ij} = b_i/b_j$, 为 b_i 比 b_j 重要的程度,其中 $i=1, 2, \cdots, n, j=1, 2, \cdots, n$, 且 $i \neq j$ 。

表 1 1~9 标度法的标度取值及含义	
Table 1 The value and meaning of 1-9 scale method	
标度值 b_{ij}	含义
1	b_i 与 b_j 同等重要
3	b_i 比 b_j 略微重要
5	b_i 比 b_j 明显重要
7	b_i 比 b_j 强烈重要
9	b_i 比 b_j 极度重要
2, 4, 6, 8	b_i 比 b_j 的重要性在1, 3, 5, 7, 9标度之间
2-9的倒数	b_j 比 b_i 重要, 具体含义参见上文

n 项评估指标的评估矩阵 B (组成元素为 b_{ij})为

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} b_1/b_1 & b_1/b_2 & \cdots & b_1/b_n \\ b_2/b_1 & b_2/b_2 & \cdots & b_2/b_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_n/b_1 & b_n/b_2 & \cdots & b_n/b_n \end{bmatrix}$$

(1)

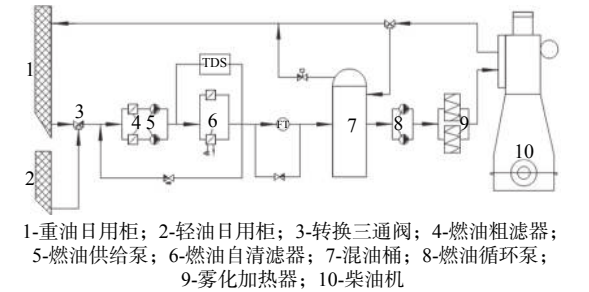


图 1 船舶燃油供给系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ship fuel supply system

2) 确定各评估指标的权重。

计算评估矩阵 B 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及相对应的特征向量 ω , 使其满足

$$B\omega = \lambda_{\max}\omega \tag{2}$$

对特征向量 ω 进行归一化处理, 即可得到各项评估指标的权重。

2.1.2 改进层次分析法

虽然传统层次分析法通过 1~9 标度法来确立判断矩阵的赋权过程较为简单, 但其很强的人为主观性和模糊性将直接影响评估结果的准确性。为此, 本文采用改进层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP), 通过三标度法对评估指标的相对重要性进行定量表示, 同时引入最优传递矩阵来确立判断矩阵, 以减少计算量并进一步提高权重精度。

1) 采用三标度法构造判断矩阵。

假设有 n 项评估指标, 采用三标度法对各个层次之间评估指标的重要性进行量化, 所得的比较矩阵 A (组成元素为 a_{ij}) 为

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_1/a_1 & a_1/a_2 & \dots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & a_2/a_2 & \dots & a_2/a_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \dots & a_n/a_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

三标度法的标度取值及含义如表 2 所示。表中: a_i 为第 i 项评估指标; a_j 为第 j 项评估指标; a_{ij} 为 a_i 比 a_j 重要的程度, 为人为主观判断的结果。

表 2 三标度法的标度取值及含义
Table 2 The value and meaning of three scale method

标度取值 a_{ij}	含义
0	a_i 比 a_j 重要
1	a_i 与 a_j 同等重要
2	a_i 没有 a_j 重要

比较矩阵 A 的排序指数 r_i 为

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \tag{4}$$

根据排序指数 r_i 和 r_j , 即可构造判断矩阵 B , 其中元素 b_{ij} 为

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1, & r_j \leq r_i \\ \left(\frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1 \right)^{-1}, & r_i \leq r_j \end{cases} \tag{5}$$

式中: $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 分别为排序指数的最大值和最小值; $k_m = r_{\max}/r_{\min}$, 为重要程度系数。

2) 引入最优传递矩阵 B' 。

通过引入最优传递矩阵, 即可满足一致性校

验要求, 从而进一步求得各项评估指标的权重, 其中 B' 的元素 b'_{ij} 为

$$b'_{ij} = 10^{\frac{\sum_{k=1}^n c_{ik} - c_{jk}}{n}} \tag{6}$$

式中, c_{ik} 和 c_{jk} 均为 c_{ij} 的中间计算变量, 其中 $c_{ij} = \lg b_{ij}$, 且 $k=1, 2, \dots, n$ 。

3) 确定权重。

对最优传递矩阵 B' 进行归一化处理, 即可得到矩阵 T , 其元素 t_{ij} 为

$$t_{ij} = \frac{b'_{ij}}{\sum_{k=1}^n b'_{kj}} \tag{7}$$

式中, b'_{kj} 为 b'_{ij} 的中间计算变量。

n 项评估指标的权重值 ω'_j 为

$$\omega'_j = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ij}}{n} \tag{8}$$

2.1.3 熵权法

“熵”最初是一个热力学概念, 当引入信息领域后, 首次被称为信息熵。信息熵是一个不同于热力学熵的概念, 但其具备基本的热力学熵特性。熵权法 (entropy weight method, EWM) 是表征信息源无序程度的一种方法, 可用于度量系统的不确定程度, 从而为系统健康状态评估的各项指标权重提供理论基础。假设有 m 个评估样本, 每个评估样本中包含 n 项指标, 这样就构成了原始的数据矩阵 X :

$$X = (x_{lj})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中, x_{lj} 为数据矩阵 X 的元素, 其中 $l=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

1) 预处理原始数据。

为了保证熵的变量取值在 $[0, 1]$ 区间内, 需按照式 (10) 对所监测的系统数据进行归一化处理, 得到预处理矩阵 P 为

$$P = (p_{lj})_{m \times n} = \frac{x_{lj} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \tag{10}$$

式中: $x_j^{\max}$ 和 $x_j^{\min}$ 分别为 $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ 中的最大值和最小值; p_{lj} 为矩阵 P 的组成元素。

2) 计算信息熵 E_j 。

根据 p_{lj} , 即可计算第 j 项评估指标的信息熵 E_j

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \cdot \sum_{l=1}^m (P_{lj} \ln P_{lj})$$

(11)

3) 计算指标熵的权重 ω_j^* 。

$$\omega_j^* = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}$$

(12)

式中, $\omega_j^* \in [0, 1]$, 为第 j 项评估指标在评估过程中所占的熵权, 且 $\omega_1^* + \omega_2^* + \cdots + \omega_n^* = 1$ 。

2.1.4 组合赋权法

在实际工程应用中, 单一的主客观赋权法存在一定的片面性: 改进层次分析法存在一定的主观性, 并没有完全尊重监测数据本身的信息规律, 会对权重精度造成影响; 熵权法则过度依赖监测参数, 所以评估指标的权重会随监测数据的变化而变化。基于此, 本文将采用改进层次分析法与熵权法相结合的评估方法, 通过彼此修正来提高各项评估指标赋权结果的准确性, 既最大程度上尊重监测数据内在的信息规律, 又充分体现在权重确定过程中的主观看法, 从而得到兼具主、客观意义的权重, 即组合赋权法, 其计算方法如下:

$$\omega_j = \theta \omega_j' + (1 - \theta) \omega_j^*$$

(13)

式中: ω_j 为组合权重; θ 为改进层次分析法确定权重所占的比例。

2.2 云重心评判法的建模过程

云重心评判法 (cloud gravity center evaluation method, CGCEM) 起源于云模型理论, 基于知识表示与数据挖掘发展而来, 目前在军事、医疗、教育等领域的应用较为广泛, 且在复杂系统装备状态评估方面表现尤为出色。云重心即表征待评估系统的“重心值 T ”, 其由位置 A 和高度 B 共同决定:

$$T = A \times B$$

(14)

式中: A 为云重心的位置, 可采用评估指标的期望值表示; B 为某一个评估指标相对于待评估系统的权重, 其权重值的变化将直接影响云重心的重心值 T 。

当 n 项评估指标的参数均为理想值时, 即可构成一个 n 维的理想综合云重心向量 G^0 :

$$\begin{cases} G^0 = (G_1^0, G_2^0, G_3^0, \cdots, G_n^0) \\ G_j = A_j \times B_j \end{cases}$$

(15)

式中: G_n^0 为第 n 项评估指标为理想值时的重心值; G_j 为第 j 项评估指标的重心值; A_j 为第 j 项评估指标的云重心位置; B_j 为第 j 项评估指标的权重。

当 n 项评估指标参数来自于实船实时采集数

据时, 即可构成 n 维的实际云重心向量 G' :

$$G' = (G'_1, G'_2, G'_3, \cdots, G'_n)$$

(16)

对 G' 进行归一化处理, 即可得到一组新的向量 G'' , 其组成元素 G_j'' 为

$$G_j'' = \begin{cases} G'_j - G_j^0 / G'_{\min} - G_j^0, & G'_j < G_j^0 \\ G'_j - G_j^0 / G'_{\max} - G_j^0, & G'_j \leq G_j^0 \end{cases}$$

(17)

式中: G'_j , G_j^0 分别为 G' , G^0 的组成元素; $G'_{\min}$ 和 $G'_{\max}$ 分别为 $G'_1, G'_2, \cdots, G'_n$ 中的最小值和最大值。

根据下式计算加权偏离度 σ , 用以衡量实际云重心与理想云重心之间的距离远近。

$$\sigma = \sum_{j=1}^n G_j'' \omega_j$$

(18)

根据加权偏离度 σ 的大小, 即可确定待评估对象的健康状态。本文将评语集划分为 4 个等级: 健康 (0, 0.33)、亚健康 (0.33, 0.66)、可用 (0.66, 1)、故障 (1, ∞)。当评估对象处于最优状态时, 即与理想状态基本一致, 那么 $\sigma=0$; 当评估对象与理想状态偏差较大时, 说明已经发生故障, 此时 σ 为 (1, ∞)。

综上, 基于改进层次分析法、熵权法与云重心评判法 AEC 模型的健康状态评估过程如图 2 所示。

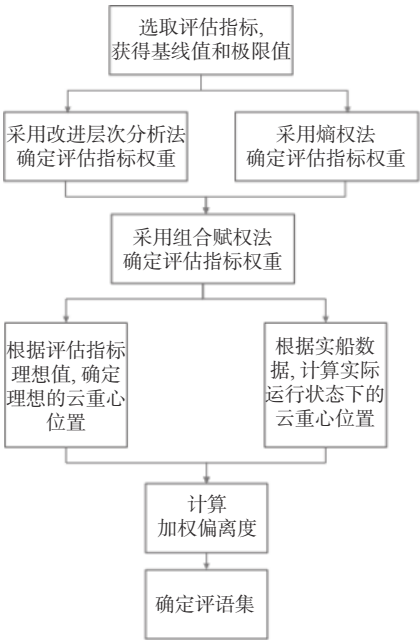


图 2 评估流程图
Fig. 2 Evaluation flow chart

3 基于 AEC 模型的船舶燃油供给系统状态评估

3.1 评估指标的选取

本文以 MAN B&W 公司 2006 年生产的 6S35MC

型柴油机作为目标船燃油供给系统的主机,其额定转速为 173 r/min,额定功率为 4 440 kW,长宽高约为 5 235 mm×2 200 mm×6 473 mm,重量约为 40 t。船舶燃油供给系统的主要设备包括燃油供给泵、燃油循环泵、雾化加热器、自清滤器和双联滤器等,涉及温度、压力等数十个常规参数。假设目标船的燃油供给系统处于健康状态,且系统运行过程中的输入参数较为稳定,故难以基于设备输入参数来评估运行状态。综合考虑多项参数的融合度和冗余度之后,本文选取了主要设备的出口参数及进/出口压差作为评估指标,具体为供给泵出口压力、雾化加热器出口燃油黏度、循环泵出口压力、自清滤器进/出口压差、双联滤器进/出口压差这 5 项参数。

3.2 评估指标基线值的获取

根据实船运行数据、设备说明书和设计手册^[10],即可确定船舶燃油供给系统 5 项评估指标的基线值,如表 3 所示。其中,主机燃料牌号为 180 cst 重油。

表 3 评估指标的基线值	
Table 3 Baseline values for evaluation indicators	
参数名称	基线值
供给泵出口压力/bar	4.0
雾化加热器出口燃油黏度/cst	13.0
循环泵出口压力/bar	8.0
自清滤器进/出口压差/bar	0.3
双联滤器进/出口压差/bar	0.2

3.3 评估指标综合权重的计算

1) 采用改进层次分析法确定指标权重。
首先,根据实船调研结果得到 5 项指标的相对重要程度,并结合表 2 得到比较矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

然后,根据式(4)~式(8)确定 5 项评估指标的权重,即

$$\omega'_j = (0.213\ 5, 0.030\ 6, 0.072\ 3, 0.470\ 2, 0.213\ 4)$$

2) 采用熵权法确定指标权重。
首先,选取 5 个评估样本,构成指标权重的原始矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} 4.00 & 13.0 & 8.10 & 0.31 & 0.20 \\ 4.10 & 14.0 & 7.90 & 0.32 & 0.19 \\ 4.00 & 14.0 & 8.00 & 0.33 & 0.19 \\ 4.00 & 13.0 & 8.00 & 0.30 & 0.21 \\ 3.90 & 12.0 & 8.10 & 0.30 & 0.21 \end{bmatrix} \quad (20)$$

然后,根据式(10)~式(12)确定 5 项评估指标的权重,即

$$\omega_j^* = (0.122\ 8, 0.197\ 6, 0.197\ 6, 0.209\ 7, 0.272\ 3)$$

3) 采用组合赋权法确定指标权重。
根据式(13)并结合专家经验^[11-12], θ 取值为 0.35,用以在最大程度上尊重主客观赋权的权重,得

$$\omega_j = (0.154\ 545, 0.139\ 150, 0.153\ 745, 0.300\ 875, 0.251\ 685)$$

3.4 基于云重心法的燃油供给系统健康状态评估

1) 计算燃油供给系统在理想状态下的加权云重心向量。根据表 3 中评估指标的基线值和 3.3 节的综合权重 ω_j ,即可计算理想状态下的加权云重心向量:

$$G^0 = (0.618\ 18, 1.808\ 95, 1.229\ 96, 0.090\ 262\ 5, 0.050\ 337)$$

2) 针对实船燃油供给系统任意一组测试样本 $x = \{3.8, 14, 7.7, 0.33, 0.24\}$,结合指标权重,根据式(16)计算综合云重心向量,得到

$$G' = (0.633\ 6, 1.948\ 1, 1.276\ 1, 0.120\ 4, 0.075\ 5)$$

3) 计算加权偏离度,确定评语集。首先,根据式(17)将实船某工作状态下的综合云向量进行归一化处理,得到

$$G'' = (0.099\ 7, 0.142\ 9, 0.150\ 0, 0.200\ 1, 0.250\ 2)$$

然后,根据式(18)计算加权偏离度,得 $\sigma=0.181\ 5$,即加权偏离度属于(0, 0.33)区间。这说明目标船的燃油供给系统处于正常运行状态,该结果与实船状态一致。由此可见,AEC 评估模型可以较准确地评估船舶燃油供给系统的健康情况。

4 结 语

针对船舶机舱智能化的发展需求,本文提出了一种适用于船舶系统健康状态评估的 AEC 模型,并基于实船燃油供给系统的实际运行数据开展了可行性验证。通过结合层次分析法和熵权法的优势,AEC 模型可以更准确地计算各项评估指标的综合权重,进而利用云重心评判法即可完成船舶系统设备健康状态的有效评估。

参考文献:

[1] 赵军. 船舶技术状态评估方法研究状况概述 [J]. 船电技

术, 2018, 38(8): 6–8.

ZHAO J. Summary of research on ship technical condition evaluation methods[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2018, 38(8): 6–8 (in Chinese).

[2] 黄一, 王鸿东, 程锋瑞, 等. 基于时序数据库的无人船信息管理系统设计与性能测试 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 161–166.

HUANG Y, WANG H D, CHENG F R, et al. Design and performance test of USV information management system based on time-series database[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(4): 161–166 (in Chinese).

[3] 杨春波, 陶青, 张健, 等. 基于综合健康指数的设备状态评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 104–109.

YANG C B, TAO Q, ZHANG J, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 104–109 (in Chinese).

[4] 邹永久. 基于 RKGM-AR 模型的船舶柴油机热力参数趋势预测研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.

ZOU Y J. Prediction of ship main engine thermodynamic parameters using RKGM-AR model[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014 (in Chinese).

[5] 张跃文, 孙晓磊, 丁亚委, 等. 船舶动力装置智能诊断系统设计 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 140–146.

ZHANG Y W, SUN X L, DING Y W, et al. Design of intelligent diagnosis system for ship power equipment[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(6): 140–146 (in Chinese).

[6] 康兴, 李维波, 余万祥, 等. 某舰用变压器在线监测与故障诊断系统研究 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 147–154.

KANG X, LI W B, YU W X, et al. Study of on-line monitoring and fault diagnosis system for a naval transformer[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(4): 147–154 (in Chinese).

[7] 梁树甜, 郝春学, 王孟莲. 模糊神经网络在船舶电力推进系统状态评估中的应用 [J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(5): 99–104.

LIANG S T, HAO C X, WANG M L. The application of fuzzy neural network in the marine electric propulsion system condition assessment[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(5): 99–104 (in Chinese).

[8] 吴小豪, 张跃文, 孙培廷, 等. 基于超球支持向量机的船舶高温淡水系统状态评估 [J]. 船舶工程, 2017, 39(2): 49–52, 93.

WU X H, ZHANG Y W, SUN P T, et al. State evaluation of marine high temperature freshwater system based on hyper sphere support vector machine[J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(2): 49–52, 93 (in Chinese).

[9] 汪益兵, 杨燕斌. 基于 CBM 的船舶设备健康管理系统 [J]. 船舶工程, 2017, 39(10): 70–74.

WANG Y B, YANG Y B. Ship equipment health management system based on CBM[J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(10): 70–74 (in Chinese).

[10] 陈绍纲, 朱国伟, 李渤仲, 等. 轮机工程手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1992: 1172–1247.

CEHN S G, ZHU G W, LI B Z, et al. Marine engineering manual[M]. Beijing: China Communications Press, 1992: 1172–1247 (in Chinese).

[11] 周依希, 李晓明, 瞿合祚. 基于反熵-AHP 二次规划组合赋权法的电网节点综合脆弱性评估 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 133–140.

ZHOU Y X, LI X M, QU H Z. Node comprehensive vulnerability assessment of power grid based on anti-entropy-AHP quadratic programming combination weighting method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(7): 133–140 (in Chinese).

[12] 张发明, 刘志平. 组合评价方法研究综述 [J]. 系统工程学报, 2017, 32(4): 557–569.

ZHANG F M, LIU Z P. Combined evaluation methods: a literature review[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(4): 557–569 (in Chinese).