

文章编号:1006-2467(2020)03-0256-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.03.005

船舶动力系统全生命周期绿色设计的评价方法

王瑞昌, 陈志华, 明新国

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 为缓解船舶对环境的污染,实现船舶动力系统的绿色设计,通过研究船舶动力系统全生命周期绿色设计流程,确定了船舶动力系统绿色设计系统边界,构建了船舶动力系统的全生命周期绿色度评价指标体系.在考虑评价指标之间相互作用关系的基础上,综合利用 Delphi 法和网络分析法,建立评价指标超矩阵并对之求极限,确定了船舶动力系统绿色度评价体系中各指标的综合权重.参照某现役船舶动力系统,对所提出方法进行验证,并针对不同绿色设计方案进行解释说明,为船舶动力系统的绿色设计评价提供了新的方法.

关键词: 船舶动力系统; 绿色设计评价; 网络分析法; 生命周期评价

中图分类号: F 407 **文献标志码:** A

Life Cycle Assessment of Marine Power System's Green Design

WANG Ruichang, CHEN Zhihua, MING Xinguo

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to reduce the pollution of ships to the environment and realize green design of the marine power system, this paper establishes the boundary of system and presents a life cycle assessment scheme of this system. Taking into account the interaction between evaluation indicators, we utilize Delphi method and analytic network process to determine the weight for each indicator of marine power system by establishing an evaluation index super-matrix and finding its limit. The methods proposed in the paper are verified by analyzing a current marine power system and explaining different green design schemes, and they provide a new approach to green design assessment of the marine power system.

Key words: marine power system; green design evaluation; analytic network process (ANP); life cycle assessment

随着全球化进程的不断推进,船舶货运业务也在不断发展.但是,日益密集的船舶货运在推动全球经济不断增长的同时,也给环境带来了沉重负担.船舶在制造、航行和报废过程中,会排放大量污染物,严重影响生态环境的健康持续发展,而船舶动力系统的绿色性能在船舶整体绿色性能中具有决定性的

作用.船舶动力系统是一个复杂的系统产品,建立系统有效的绿色设计评价方法,对于改进船舶动力系统的绿色性能具有重要意义.全生命周期评价(LCA)是一种常见的绿色设计评价方法,Azapagic等^[1]将线性规划方法、多目标优化方法与LCA相结合,在解决环境负担分配问题的同时,保证了研发产

收稿日期:2018-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71632008)

作者简介:王瑞昌(1994-),男,河北省邢台市人,硕士生,主要研究方向为产品研发体系设计.

通信作者:明新国,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206528;E-mail: xgming@sjtu.edu.cn.

品的环境性能最优化. Woolridge 等^[2]结合 LCA 方法比较了利用回收废旧纺织品原料和未加工原材料在节约能量方面的区别. 国内关于产品全生命周期评价的研究起步较晚,黄志甲等^[3]利用全生命周期评价方法,确定了汽车燃料生命周期清单分析参数和评价边界,提出了燃料上游阶段清单的计算逻辑. 挪威船级社与 Aalesund University College 合作,利用 Eco-indicator 95 全生命周期分析工具对船舶进行 LCA 评估,指出 NO_x 和 SO_x 是船舶的首要空气污染物,且船舶营运是全生命周期中对环境影响最大的阶段. 文献[4]利用 LCA 方法,基于环境影响因素评价方法研究了拆船过程的决策;蒋春林等^[5]采用模糊层次分析法建立了船舶绿色度评价的递阶层次结构模型,定量计算出船舶的绿色度值. 针对层次分析法不能确定强关联因素间权重的问题,Asadabadi^[6]研究了利用网络分析法(ANP)和 Markov 链的以客户为导向的供应商选择方法;Bhattacharya 等^[7]利用模糊 ANP,提出了一种协作决策方法对绿色供应链进行绩效评估. 代言明等^[8]基于模糊 ANP,提出了公路隧道火灾风险综合评价模型. 赵振武等^[9]对机场旅客安检系统保障能力进行了评估.

目前,面向全生命周期的船舶绿色设计评价指标体系主要是针对整船进行评价的,收集数据较为困难,操作难度较大. 同时,现有体系多将船舶全生命周期中的各阶段视为各自独立的,但在实际设计和建造过程中,设计阶段的结构方案和原材料的种类选择直接决定了制造、营运和报废回收阶段的绿色性. 本文结合前人的研究成果,针对在船舶整体绿色度中起决定性作用的船舶动力系统,建立面向全生命周期的绿色设计评价指标体系,采用 ANP 确定各评价指标的综合权重,为船舶动力系统的绿色设计提供一种较为完整并且可行性较强的评价方法.

1 模型构建

1.1 船舶动力系统绿色设计评价方法

船舶动力系统的绿色设计主要包括概念设计和详细设计阶段. 通过概念设计阶段的环境影响识别和预评估,选出较为合理的设计方案后,进行详细设计评价. 详细设计评价主要包括船舶动力系统的研发设计、生产制造、交付使用和报废回收 4 个阶段. 利用面向全生命周期的船舶绿色设计评价指标体系,可以对不同的设计方案进行评价,从而有效指导船舶动力系统的绿色设计,船舶动力系统绿色设计的具体流程如图 1 所示.

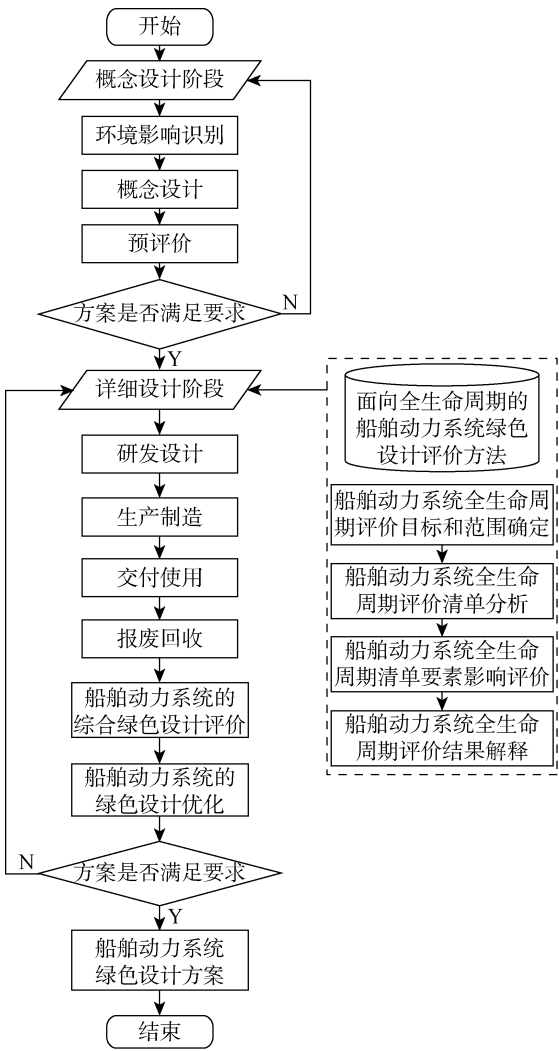


图 1 船舶动力系统绿色设计流程图
Fig. 1 A flow chart of marine power system's green design

1.2 全生命周期评价标准框架

全生命周期评价标准框架(见图 2)含有目标与范围定义、清单分析、影响评价和解释 4 部分.

(1) 目标与范围定义. 鉴定船舶动力系统的功能单元,选择能够提供选定功能单元的参考产品或参考服务,并限定船舶动力系统全生命周期系统的边界,如图 3 所示.

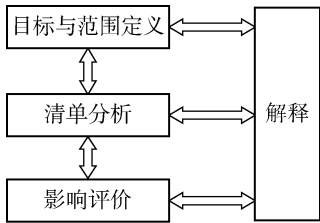


图 2 全生命周期评价框架
Fig. 2 Life cycle assessment framework

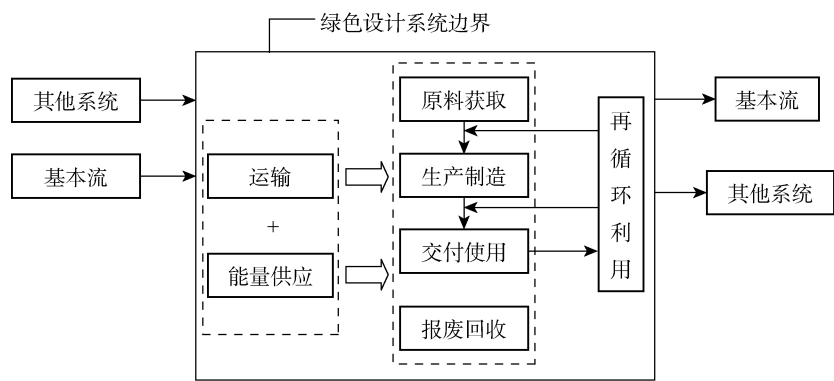


图 3 面向全生命周期的船舶动力系统边界图

Fig. 3 Marine power system's boundary map for the whole life cycle

(2) 清单分析. 搜集船舶动力系统全生命周期中与环境交换的输入输出信息, 构建船舶动力系统的全生命周期清单, 包括船舶交付情况记录、电子数据库、文献数据、未公开发表的数据以及实地的测量计算等.

(3) 影响评价. 将收集的全生命周期清单数据, 定性或定量地转化为所能造成的环境影响指标, 主

要包括分类、特征化、规范化和加权, 进而得出不同设计方案下船舶的绿色性能, 以便于调整设计方案.

(4) 解释. 根据全生命周期评价设定的目标, 通过分析模拟, 形成最终意见或者建议.

1.3 评价指标体系的构建

船舶动力系统的全生命周期绿色评价指标体系主要分为如表 1 所示的 4 个层级. 第 1 层为总目标

表 1 船舶动力系统的全生命周期绿色评价指标体系

Tab. 1 A life cycle green evaluation index system of marine power system

G_s	m	i	k	G_m	$A_{m,i}$	$A_{m,ik}$
总目标	1	1	1	研发设计	资源属性	材料利用率
			2			先进设备利用率
			3			废旧材料回收率
		2	1		环境属性	噪声污染
			2			空气污染
			3			水体污染
			4			固体污染
		3	1		能源属性	能源利用率
			2			清洁能源比例
		4	1		技术属性	设计制造的技术先进性
			2			功能性能的技术先进性
			3			拆卸处理的技术先进性
		5	1		经济属性	设计制造成本
			2			使用维护成本
			3			报废回收成本
	2	1	1	生产制造	资源属性	材料利用率
		⋮	⋮			
		⋮	⋮			
	3	1	1	交付使用	资源属性	材料利用率
		⋮	⋮			
		⋮	⋮			
	4	1	1	报废回收	资源属性	材料利用率
		⋮	⋮			
		⋮	⋮			

层,即船舶动力系统全生命周期综合绿色度(G_s);第 2 层为子目标层,包括研发设计、生产制造、交付使用、报废回收 4 个阶段在内的各阶段绿色度(G_m , $m=1,2,3,4$);第 3 层为一级指标,主要包括资源属性、环境属性、能源属性、技术属性和经济属性 5 个因素集($A_{m,i}$, $i=1,2,3,4,5$);第 4 层为二级指标,主要包括材料利用率、废旧材料回收率等($A_{m,ik}$, $k=1,2,\dots,g_i$, g_i 为第 i 个因素集中因素的个数).各个层级之间的指标相互独立,且上一层级指标可支配下一层级指标.确定目标和范围,可以明晰船舶动力

系统全生命周期绿色设计评价的系统边界.根据该边界,查找相关建造资料,完成船舶动力系统全生命周期清单的构建.但是,船舶动力系统绿色评价指标之间并非完全独立,而是相互影响、相互依存的,如先进设备的利用率会显著影响材料利用率,材料利用率则会直接影响固体污染程度,各个指标的权重不能简单依据传统的层次分析法获得.因此,可以通过建立基于 ANP 的船舶动力系统绿色设计评价模型,得到更加合理的指标权重.以研发设计阶段的绿色度评价为例,建立网络分析模型,如图 4 所示.

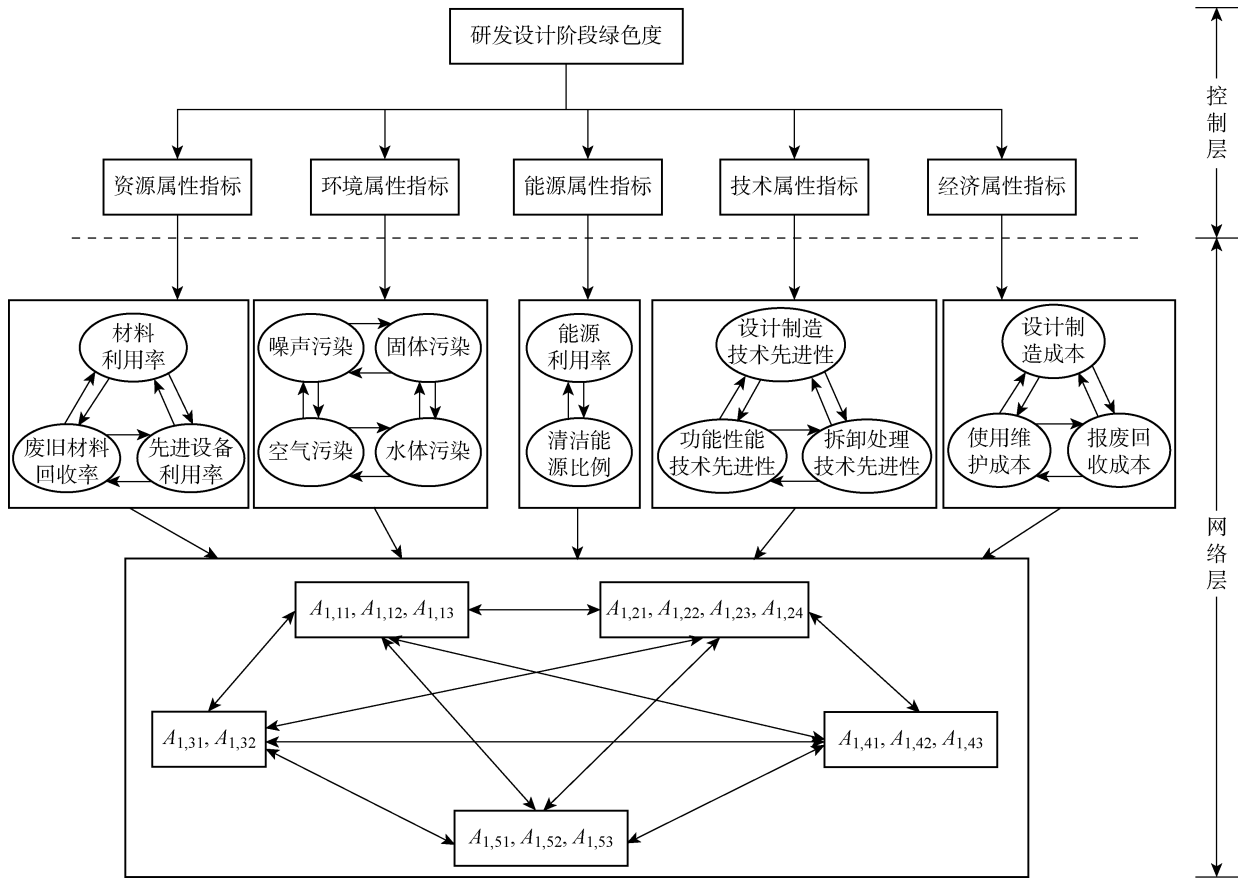


图 4 船舶动力系统研发设计阶段绿色度评价网络分析模型
Fig. 4 A network analysis model of green degree of marine power system

船舶动力系统的全生命周期绿色度评价步骤如下.

步骤 1 权重确定.先利用层次分析法,对每组指标因素集中的因素,构造两两比较的判断矩阵,从而获得权重矩阵 W' ,将矩阵 W' 合并,构造未加权的超矩阵 W .通过构造因素集的两两判断矩阵,可以得到因素集的权重矩阵 Y ,由此可以得到加权超矩阵 \bar{W} .对超矩阵进行极限运算,最终即可得到每个指标的权重.

步骤 2 根据步骤 1 中确定的各指标的权重,

对船舶动力系统的研发设计、生产制造、交付使用和报废回收各阶段的绿色度进行综合评价.

2 权重的确定

本节以研发设计阶段(即 $m=1$ 时)的权重确定为例,并省略各指标符号中的下标 m .

(1) 利用层次分析法中的权重确定方法构造单一因素集的权重矩阵.利用 Delphi 法,以第 j 个因素集中任一因素 z 为基准,比较第 i 个因素集中各个因素相对重要程度,判断矩阵标度含义如表 2 所示.构

表 2 判断矩阵标度
Tab.2 The scale of judgment matrix

得分	含义
1	相对某一因素而言,因素 z_1 与因素 z_2 同等重要
3	相对某一因素而言,因素 z_1 比因素 z_2 略重要
5	相对某一因素而言,因素 z_1 比因素 z_2 明显重要
7	相对某一因素而言,因素 z_1 比因素 z_2 明显重要得多
9	相对某一因素而言,因素 z_1 比因素 z_2 绝对重要
2,4,6,8	介于以上相邻两个判断之间的情况
倒数	若因素 z_1 与 z_2 的重要性之比为 a_{pq} ,那么因素 z_2 与 z_1 的重要性之比为 $1/a_{pq}$

造判断矩阵

$$\boldsymbol{W}_{ij,z}=[a_{pq}]_{g_i\times g_j}=\begin{bmatrix}a_{11}&\cdots&a_{1g_i}\\\vdots&&\vdots\\a_{g_i1}&\cdots&a_{g_ig_i}\end{bmatrix}$$

对矩阵 $\boldsymbol{W}_{ij,z}$ 的每一列进行归一化处理,即

$$b_{pq}=\frac{a_{pq}}{\sum_{p=1}^{g_i}a_{pq}}$$

得到

$$\boldsymbol{B}_{i,z}=[b_{pq}]_{g_i\times g_j}=\begin{bmatrix}b_{11}&\cdots&b_{1g_i}\\\vdots&&\vdots\\b_{g_i1}&\cdots&b_{g_ig_i}\end{bmatrix}$$

再对 $\boldsymbol{B}_{i,z}$ 按行求和,得到

$$\boldsymbol{C}_{i,z}=[c_1\ c_2\ \cdots\ c_{g_i}]^T$$

将 $\boldsymbol{C}_{i,z}$ 归一化处理后,可得权重向量

$$\boldsymbol{D}_{i,z}=[d_1\ d_2\ \cdots\ d_{g_i}]^T$$

此时对应的最大特征值的近似值为

$$\lambda_{iz,\max}\approx\sum_{l=1}^{g_i}\frac{(\boldsymbol{W}_{ij,z}\boldsymbol{D})_l}{g(\boldsymbol{D})_l}$$

分别以第 j 个因素集中其他因素为基准,构造判断矩阵,通过求得每个判断矩阵的最大特征值对应的特征向量,最终得到第 i 个因素集相对第 j 个因素集的权重矩阵:

$$\boldsymbol{W}_{ij}=\begin{bmatrix}w_{11}&\cdots&w_{1g_j}\\\vdots&&\vdots\\w_{g_i1}&\cdots&w_{g_ig_j}\end{bmatrix}$$

(2) 对判断矩阵 \boldsymbol{W}_{ij} 进行一致性检验:

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

其中:

$$CI=\frac{\lambda_{iz,\max}-g_i}{g_i-1}$$

RI 为平均随机一致性指标,是根据足够多个随机发生的判断矩阵计算而得的一致性指标的平均

值,矩阵的维数越大,RI 值也会越大. RI 的取值如表 3 所示.

一般而言,如果由计算得到的 CR 值越小,则判断矩阵的一致性越好,通常认为当 $CR<0.1$ 时,判断矩阵就会具有满意的一致性. 如果由计算得到的 CR 值较大,则判断矩阵不满足一致性,即属性因素集中不同因素之间的重要度存在矛盾,此时则需要细化专家打分的准则或有聘请更多的专家参与重要度评价打分并且求取其平均值,直至判断矩阵满足一致性检验要求.

表 3 平均随机一致性指标的值
Tab.3 The value of mean random consistency index

g_i	RI	g_i	RI
1	0	9	1.45
2	0	10	1.49
3	0.58	11	1.51
4	0.90	12	1.54
5	1.12	13	1.56
6	1.24	14	1.58
7	1.32	15	1.59
8	1.41		

(3) 构造未加权的超矩阵. 计算出各项判断矩阵 \boldsymbol{W}_{ij} 后,得到未加权的超矩阵

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}_{11}&\cdots&\boldsymbol{W}_{15}\\\vdots&&\vdots\\\boldsymbol{W}_{51}&\cdots&\boldsymbol{W}_{55}\end{bmatrix}$$

(4) 构造加权超矩阵. 考虑到不同因素集间的相互影响,以第 i 个因素集为基准,构建因素集间的判断矩阵

$$\boldsymbol{S}^{(i)}=\begin{bmatrix}s_{11,i}&\cdots&s_{15,i}\\\vdots&&\vdots\\s_{51,i}&\cdots&s_{55,i}\end{bmatrix}$$

进而求得因素集的权重矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{51} & \cdots & s_{55} \end{bmatrix}$$

加权超矩阵由未加权矩阵 \mathbf{W} 与影响权重矩阵 \mathbf{S} 相乘得到,即

$$\bar{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} s_{11}\mathbf{W}_{11} & \cdots & s_{15}\mathbf{W}_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{51}\mathbf{W}_{51} & \cdots & s_{55}\mathbf{W}_{55} \end{bmatrix}$$

(5) 计算加权超矩阵的极限. 计算加权超矩阵 $\bar{\mathbf{W}}$ 特征根为 1 时的特征向量 $\bar{\mathbf{W}}^\infty$, 归一化处理后可得各个二级指标的权重向量.

(6) 根据各个二级指标的实际评价值以及权重,通过线性计算即可得到船舶全生命周期各阶段的绿色度.

(7) 利用判断矩阵得到船舶动力系统设计全生命周期各阶段的重要度,采用线性计算得到船舶动力系统全生命周期总体绿色度,从而为船舶的绿色设计提供参考.

3 示例验证

基于上文船舶动力系统绿色设计评价体系,参照现有的某功率级船舶动力系统,对相同功率级的某新型船舶动力系统的全生命周期绿色度进行分析

评价.
3.1 指标权重的确定

(1) 通过专家打分的形式,确定指标体系中的各个判断矩阵,以资源属性指标因素集为例,构建判断矩阵

$$\mathbf{W}_{1,11} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

经一致性检验,可知该资源属性指标的判断矩阵成立. 同理,分别构建环境属性指标、能源属性指标、技术属性指标和经济属性指标的判断矩阵,以及单一指标集相对于其他指标集的判断矩阵. 经一致性检验后,可得研发设计阶段未加权的超矩阵,如表 4 所示($w_{1,i,k}$ 表示 G_1 中因素 $A_{1,i,k}$ 未加权时的权重). 通过对一级指标的重要程度进行两两比较分析,求得一级指标权重矩阵

$$\mathbf{W}_{1,A} = \begin{bmatrix} 0.149 & 0.136 & 0.202 & 0.192 & 0.155 \\ 0.597 & 0.544 & 0.504 & 0.462 & 0.559 \\ 0.075 & 0.109 & 0.101 & 0.115 & 0.099 \\ 0.060 & 0.090 & 0.067 & 0.077 & 0.062 \\ 0.119 & 0.121 & 0.126 & 0.154 & 0.125 \end{bmatrix}$$

表 4 未加权的二级指标超矩阵
Tab. 4 A super matrix of unweighted secondary indicators

指标	权重														
	$w_{1,11}$	$w_{1,12}$	$w_{1,13}$	$w_{1,21}$	$w_{1,22}$	$w_{1,23}$	$w_{1,24}$	$w_{1,31}$	$w_{1,32}$	$w_{1,41}$	$w_{1,42}$	$w_{1,43}$	$w_{1,51}$	$w_{1,52}$	$w_{1,53}$
$A_{1,11}$	0.633	0.158	0.209	0	0	0.623	0.377	0.569	0.431	0.131	0.783	0.086	0.556	0	0.444
$A_{1,12}$	0.571	0.143	0.286	0.284	0.216	0.216	0.284	0.444	0.556	0.409	0.546	0.045	0.623	0	0.377
$A_{1,13}$	0.667	0.111	0.222	0	0	0.623	0.377	0.500	0.500	0.375	0	0.625	0.600	0	0.400
$A_{1,21}$	0	1.000	0	0.077	0.231	0.384	0.308	0.500	0.500	0.500	0.500	0	0.333	0.333	0.334
$A_{1,22}$	0	1.000	0	0.090	0.273	0.547	0.090	0.398	0.602	0.400	0.600	0	0	1.000	0
$A_{1,23}$	0.300	0.400	0.300	0.091	0.227	0.455	0.227	0.431	0.569	0.256	0.423	0.321	0.423	0.256	0.321
$A_{1,24}$	0.384	0.231	0.385	0.040	0.480	0.320	0.160	0.398	0.602	0.231	0.463	0.306	0.463	0.231	0.306
$A_{1,31}$	0.375	0.625	0	0	0.300	0.400	0.300	0.333	0.667	0.116	0.707	0.177	0.500	0.333	0.167
$A_{1,32}$	0.500	0.500	0	0	0.286	0.428	0.286	0.333	0.667	0.158	0.633	0.209	0.601	0.300	0.099
$A_{1,41}$	0.752	0.124	0.124	0.050	0.050	0.500	0.400	0.429	0.571	0.286	0.571	0.143	1.000	0	0
$A_{1,42}$	0.569	0.431	0	0.086	0.057	0.514	0.343	0.333	0.667	0.286	0.571	0.143	0.306	0.463	0.231
$A_{1,43}$	0.484	0.484	0.032	0	0	0.571	0.429	0.400	0.600	0.286	0.571	0.143	0	0	1.000
$A_{1,51}$	0.546	0.409	0.045	0	0	0.600	0.400	0.398	0.602	0.099	0.901	0	0.653	0.216	0.131
$A_{1,52}$	0.333	0.333	0.334	0	0.053	0.526	0.421	0.333	0.667	0	1.000	0	0.706	0.235	0.059
$A_{1,53}$	0.476	0.476	0.048	0	0	0.571	0.429	0.250	0.750	0	0.924	0.076	0.500	0.400	0.100

进而计算得到二级指标的加权超矩阵,如表 5 所示
($w'_{1,i}$ 表示 G_1 中因素 $A_{1,i}$ 加权后的权重),对得到的
的加权超矩阵求极限可得二级指标加权超矩阵的收敛矩阵,如表 6 所示($w''_{1,i}$ 表示 G_1 中因素 $A_{1,i}$ 加权
归一化后的权重).

因此,可以计算得到各个二级指标在研发设计
阶段、制造阶段、交付使用阶段、报废回收阶段的权
重,如表 7 所示.

表 5 二级指标加权超矩阵

Tab. 5 A super matrix of weighted secondary indicators

指标	权重														
	$w'_{1,11}$	$w'_{1,12}$	$w'_{1,13}$	$w'_{1,21}$	$w'_{1,22}$	$w'_{1,23}$	$w'_{1,24}$	$w'_{1,31}$	$w'_{1,32}$	$w'_{1,41}$	$w'_{1,42}$	$w'_{1,43}$	$w'_{1,51}$	$w'_{1,52}$	$w'_{1,53}$
$A_{1,11}$	0.094	0.024	0.031	0	0	0.372	0.225	0.043	0.032	0.008	0.047	0.005	0.066	0	0.053
$A_{1,12}$	0.085	0.021	0.042	0.170	0.129	0.129	0.170	0.033	0.041	0.025	0.033	0.003	0.074	0	0.045
$A_{1,13}$	0.099	0.016	0.033	0	0	0.372	0.225	0.038	0.038	0.023	0	0.037	0.071	0	0.048
$A_{1,21}$	0	0.136	0	0.042	0.125	0.209	0.168	0.055	0.055	0.045	0.045	0	0.040	0.040	0.040
$A_{1,22}$	0	0.136	0	0.049	0.148	0.298	0.049	0.043	0.066	0.036	0.054	0	0	0.121	0
$A_{1,23}$	0.041	0.054	0.041	0.050	0.123	0.248	0.123	0.047	0.062	0.023	0.038	0.029	0.051	0.031	0.039
$A_{1,24}$	0.052	0.031	0.052	0.022	0.261	0.174	0.087	0.043	0.066	0.021	0.042	0.028	0.056	0.028	0.037
$A_{1,31}$	0.076	0.126	0	0	0.151	0.202	0.151	0.034	0.067	0.008	0.047	0.012	0.063	0.042	0.021
$A_{1,32}$	0.101	0.101	0	0	0.144	0.216	0.144	0.034	0.067	0.011	0.042	0.014	0.076	0.038	0.012
$A_{1,41}$	0.144	0.024	0.024	0.023	0.023	0.231	0.185	0.049	0.066	0.022	0.044	0.011	0.154	0	0
$A_{1,42}$	0.109	0.083	0	0.040	0.026	0.237	0.158	0.039	0.077	0.022	0.044	0.011	0.047	0.071	0.036
$A_{1,43}$	0.093	0.093	0.006	0	0	0.264	0.198	0.046	0.069	0.022	0.044	0.011	0	0	0.154
$A_{1,51}$	0.085	0.063	0.007	0	0	0.335	0.224	0.039	0.060	0.006	0.056	0	0.082	0.027	0.016
$A_{1,52}$	0.052	0.052	0.052	0	0.030	0.294	0.235	0.033	0.066	0	0.062	0	0.088	0.029	0.007
$A_{1,53}$	0.074	0.074	0.007	0	0	0.319	0.239	0.025	0.074	0	0.057	0.005	0.063	0.050	0.013

表 6 二级指标加权超矩阵的收敛矩阵

Tab. 6 A convergence super matrix of weighted secondary indicators

指标	权重														
	$w''_{1,11}$	$w''_{1,12}$	$w''_{1,13}$	$w''_{1,21}$	$w''_{1,22}$	$w''_{1,23}$	$w''_{1,24}$	$w''_{1,31}$	$w''_{1,32}$	$w''_{1,41}$	$w''_{1,42}$	$w''_{1,43}$	$w''_{1,51}$	$w''_{1,52}$	$w''_{1,53}$
$A_{1,11}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,12}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,13}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,21}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,22}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,23}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,24}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,31}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,32}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,41}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,42}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,43}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,51}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,52}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031
$A_{1,53}$	0.058	0.066	0.026	0.036	0.116	0.249	0.143	0.042	0.061	0.020	0.044	0.015	0.055	0.038	0.031

表 7 船舶动力系统绿色度评价指标权重

Tab. 7 The assessment index weight of marine power system's greenness

指标	权重			
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
$A_{m,11}$	0.058	0.061	0.028	0.048
$A_{m,12}$	0.066	0.071	0.036	0.057
$A_{m,13}$	0.026	0.019	0.020	0.067
$A_{m,21}$	0.036	0.040	0.042	0.038
$A_{m,22}$	0.116	0.134	0.153	0.128
$A_{m,23}$	0.249	0.263	0.273	0.251
$A_{m,24}$	0.143	0.157	0.165	0.174
$A_{m,31}$	0.042	0.048	0.049	0.030
$A_{m,32}$	0.061	0.049	0.061	0.032
$A_{m,41}$	0.020	0.018	0.013	0.011
$A_{m,42}$	0.044	0.036	0.043	0.028
$A_{m,43}$	0.015	0.010	0.013	0.053
$A_{m,51}$	0.055	0.062	0.039	0.020
$A_{m,52}$	0.038	0.014	0.044	0.021
$A_{m,53}$	0.031	0.018	0.021	0.042

3.2 全生命周期绿色度分析

参照现役某型号船舶动力系统,聘请 10 位中船重工某研究所船舶动力系统设计与制造方面的专家,对标国际和国家船舶动力系统绿色设计标准,对以下 3 种不同的新型船舶动力系统设计方案进行绿色设计评价.例如,现役某型号船舶动力系统的材料利用率为 45%,则新型船舶动力系统绿色设计评价中的“材料利用率”一项的得分可由下式计算:

$$M_{t,11} = \frac{O_{t,11} - 0.45}{1 - 0.45} \times (100 - 60) + 60$$

其中: $M_{t,11}$ 表示第 t 种方案船舶动力系统绿色设计评价中“材料利用率”的得分; $O_{t,11}$ 表示第 t 种方案船舶动力系统的材料利用率.

通过求取专家打分的平均值,得到评价结果如表 8 所示.方案 1 改进现有制造工艺,采用模块化设计和精益制造理念的船舶动力系统绿色设计方案;方案 2 对标军用船舶动力系统要求,采用先进制造技术保障功能及性能先进性;方案 3 对标国际绿色船舶设计要求,采用先进加工设备和工艺技术降低环境污染.

考虑到船舶动力系统绿色设计过程中全生命周期各个阶段间会相互影响,故对全生命周期的各个阶段进行重要度分析,通过建立判断矩阵,最终得到全生命周期各个阶段的权重为

$$P=[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]=$$
$$[0.360 \ 1 \ 0.205 \ 4 \ 0.262 \ 8 \ 0.171 \ 7]$$

3 种不同设计方案绿色度的计算结果,如表 9 所示.

表 8 不同船舶动力系统绿色评价结果

Tab. 8 Green evaluation indices of different marine power systems

二级指标	评价得分			
	方案 1	方案 2	方案 3	现役某型号船舶动力系统
材料利用率	69	78	82	60
先进设备利用率	67	75	84	60
废旧材料回收率	65	68	89	60
噪声污染	68	74	85	60
空气污染	71	72	87	60
水体污染	62	68	92	60
固体污染	60	64	90	60
能源利用率	69	73	84	60
清洁能源比例	64	69	86	60
设计制造技术先进性	67	76	84	60
功能性能技术先进性	79	85	87	60
拆卸处理技术先进性	73	76	88	60
设计制造成本	84	64	48	60
使用维护成本	82	62	52	60
报废回收成本	62	67	69	60

表 9 3 种设计方案的绿色度

Tab. 9 Greenness of three design schemes

方案	G_1	G_2	G_3	G_4	G_s
1	67.187	66.861	66.877	66.102	66.852
2	69.970	70.030	69.540	69.845	69.848
3	83.901	84.757	84.895	86.051	84.708

3.3 解释与评价

通过比较表 9 中 3 种不同设计方案的全生命周期绿色度,可以发现方案 3 的绿色度最高,优于其他两种设计方案,且 3 种方案的绿色度均优于作为参考的现役某型号船舶动力系统.但是,不同的经济发展水平和工作性能要求,对船舶动力系统的整体绿色度有不同的要求.

经济成本对整体绿色度的贡献在整体绿色度中的占比为

$$CP = \frac{1}{G_s} \sum_{e=1}^3 \sum_{m=1}^4 w''_{m,5e} Q_{m,5e} P_m$$

其中: $w''_{m,5e}$ 为第 m 阶段的二级指标 $A_{m,5e}$ 的权重,如 $w''_{1,51}$ 表示第 1 阶段,即研发设计阶段设计制造成本

的权重; $Q_{m,5e}$ 为第 m 阶段的二级指标 $A_{m,5e}$ 的评分,如 $Q_{1,51}$ 表示第 1 阶段,即研发设计阶段设计制造成本的评分; P_m 为第 m 阶段的权重,如 P_1 表示第 1 阶段,即研发设计阶段的权重。

功能性能对整体绿色度的贡献在整体绿色度中的占比为

$$FP = \frac{1}{G_s} \sum_{m=1}^4 w''_{m,42} Q_{m,42} P_m$$

通过计算可以得到 3 种不同设计方案各自的 G_s 、CP 和 FP 值,如表 9 和 10 所示。

比较 3 种不同设计方案的 G_s 、CP 和 FP 值可以发现,方案 1 经济成本对整体绿色度的贡献即其在整体绿色度中的占比明显高于其他两种方案,适用于需特别注重经济效益的造船厂;方案 2 功能性能对整体绿色度的贡献要高于其他两种方案,适用于对船舶动力系统功能性能要求较高的船型;方案 3 绿色度最高,对环境的污染程度最低。

表 10 不同设计方案的 CP 和 FP 值

Tab. 10 Values of CP and FP of different schemes

方案	CP	FP
1	0.123	0.046
2	0.097	0.048
3	0.068	0.040

4 结 语

本文通过梳理绿色船舶全生命周期绿色设计流程,确定了系统边界,并构建了船舶动力系统的全生命周期绿色度评价指标体系。通过分析各个二级评价指标的相互作用关系,采用网络分析法求解各指标的综合权重,比传统的层次分析法求解得到的综合权重更具客观性和合理性。本文参照某现役型号的船舶动力系统,利用 Delphi 法对 3 种不同的绿色设计方案进行打分,对网络分析法在船舶动力系统绿色设计评价中的应用进行示例验证,并对不同绿色设计方案进行解释说明,并为船舶动力系统的绿色设计评价提供了新的研究方法,船厂可以根据自身的发展阶段选择合适的设计方案。

参考文献:

[1] AZAPAGIC A, CLIFT R. Life cycle assessment and multiobjective optimisation [J]. **Journal of Cleaner Production**, 1999, 7(2): 135-143.

[2] WOOLRIDGE A C, WARD G D, PHILLIPS P S, *et al.* Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective [J]. **Resources, Conservation and Recycling**, 2006, 46(1): 94-103.

[3] 黄志甲, 张旭. 汽车燃料的生命周期评价模型[J]. **同济大学学报**, 2003, 31(12): 1472-1476.

HUANG Zhijia, ZHANG Xu. Model of life cycle assessment of vehicle fuel[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(12): 1472-1476.

[4] JOHN J, SRIVASTAVA R K. Decision insights for shipbreaking using environmental impact assessment: Review and perspectives[J]. **International Journal of Strategic Decision Sciences**, 2018, 9(1): 45-62.

[5] 蒋春林, 刘家新. 基于模糊层次分析方法的船舶绿色度评估体系研究[J]. **船海工程**, 2007, 36(2): 73-76.

JIANG Chunlin, LIU Jiaxin. Assessment system of the ship's green degree based on fuzzy-AHP[J]. **Ship & Ocean Engineering**, 2007, 36(2): 73-76.

[6] ASADABADI M R. A customer based supplier selection process that combines quality function deployment, the analytic network process and a Markov chain[J]. **European Journal of Operational Research**, 2017, 263(3): 1049-1062.

[7] BHATTACHARYA A, MOHAPATRA P, KUMAR V, *et al.* Green supply chain performance measurement using fuzzy ANP-based balanced scorecard: A collaborative decision-making approach[J]. **Production Planning & Control**, 2014, 25(8): 698-714.

[8] 代言明, 胡彦杰, 邓敏, 等. 基于模糊网络分析法的公路隧道火灾风险综合评价模型[J]. **安全与环境学报**, 2016, 16(4): 57-61.

DAI Yanming, HU Yanjie, DENG Min, *et al.* Comprehensive road tunnel fire risk assessment model based on the FAND[J]. **Journal of Safety and Environment**, 2016, 16(4): 57-61.

[9] 赵振武, 刘福鳌. 基于模糊网络分析法的机场旅客安检系统保障能力评估[J]. **安全与环境学报**, 2015, 15(2): 20-24.

ZHAO Zhenwu, LIU Fua. Evaluation method of the supporting functions of the airport passenger security inspection system based on the fuzzy analytic network process [J]. **Journal of Safety and Environment**, 2015, 15(2): 20-24.

(本文编辑:蒋霞)