



CSTAM 2012-B03-xxxx

基于 AHP 的船舶波浪中综合航行性能评价指标体系研究

孙树政，缪泉明，周德才，吴宝山

中国船舶科学研究中心
哈尔滨工程大学船舶工程学院

第七届全国流体力学学术会议
2012 年 11 月 12—14 日 广西·桂林

基于 AHP 的船舶波浪中综合航行性能评价指标体系研究

孙树政^{*+}, 缪泉明^{*}, 周德才^{*}, 吴宝山^{*}

^{*} (中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

⁺ (哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要 本文针对船舶在波浪中综合航行性能, 考虑船舶耐波性、波浪载荷及波浪中的快速性、稳性等性能作为波浪中的综合性能, 并从各单项性能中提取对船舶综合航行性能影响较大的特征参数, 加入波浪环境影响因子, 建立船舶在波浪中综合航行性能指标体系。进而采用层次分析法 (AHP) 对各评价指标进行分级层次分析, 确定各特征参数及各单项指标的权重, 建立船舶在波浪中综合航行性能评价指标体系。本文的研究内容对建立科学合理的船舶综合航行性能评价体系和评估方法具有重要意义, 为船舶在波浪中的综合航行性能评估提供了支撑。

关键词 船舶综合航行性能; 波浪; 评价指标体系; 层次分析法

引言

船舶在波浪中的综合航行性能一直是造船界关心的问题, 随着节能环保及绿色造船理念的不断深入, 人们对船舶的综合航行性能愈加关注。然而船舶是在海上航行的物体, 航行过程中会受到海浪的影响, 在静水中航行性能优良的船在波浪中不一定具有同样优秀的性能。船舶在波浪中的运动性能与静水中有很大不同, 由于风浪作用产生的船体运动会对船上人员作业及船上设备使用造成很大不利影响, 也使船舶的综合营运效能大幅降低。国际海事组织 (IMO) 规定自 2013 年起, 对新船实施能效设计指数 (EEDI)。在 EEDI 计算公式中直接包括波浪对航速的影响, 而我们国内很多运输船舶都达不到平均指数, 一旦执行, 对我国的船舶业是一大损失, 这对我国船舶在波浪中的综合航行性能提出了更高要求。

目前的船舶航行性能评价体系主要研究在静水环境中很少考虑波浪的影响, 且大多是以快速性、耐波性、操纵性等单项性能建立评价体系, 这与实际船舶的综合航行性能有很大差距。本文依据船舶在波浪中的各项性能参数作为特征参数, 建立船舶在波浪中综合航行性能指标体系。进而采用层次分析法 (AHP) 对各评价指标进行

分级层次分析, 确定各特征参数及各单项指标的权重, 建立船舶在波浪中综合航行性能评价指标体系。

1 评价指标的选取

通过分析各单项指标对船舶航行性能及作业任务等的影响, 根据影响程度, 基于完备性、独立性、简洁性、科学性、可操作性的原则, 选取船舶耐波性、波浪载荷及波浪中的快速性、稳性等性能, 各单项指标下又包含若干相关特征参数, 通过分析合理选取对系统性能影响较大的特征参数作为评价指标。

1.1 快速性指标

船舶快速性是指船舶在主机额定功率下, 以一定速度航行的能力。通常包括船舶阻力与船舶推进两大部分。海军系数^[3]是衡量船舶的快速性能的重要参数, 包括船舶阻力与推进性能优劣的综合信息, 是一个船舶快速性的综合评价因子。海军部系数公式如下:

$$C_{sp}(x) = \Delta^{-2/3} \cdot V_s^{-3} \cdot P_E / (\eta_o \cdot \eta_H \cdot \eta_R) \quad (1)$$

其中: Δ ——排水量;

V_s ——波浪中航速;

P_E ——有效功率;

η_o ——螺旋桨敞水效率;

η_H ——船身效率;

1) 基金资助项目

2) Email:

η_R ——相对旋转效率;

参照海军部系数,快速性的评价指标选取为波浪中航速,螺旋桨敞水效率,船身效率,相对旋转效率。

1.2 耐波性指标

船舶耐波性是由许多基本的耐波性因素所决定,目前国内外普遍认为耐波性因素通常包括六自由度的运动、线(角)速度及线(角)加速度,以及诸如甲板上浪、螺旋桨出水、船首砰击等耐波性事件和晕船率等。如前所述,船舶耐波性衡准同船舶的类型、船舶的任务、人员的素质及系统(设备)的功能有着直接联系,不同的任务要求不同的系统(设备)正常有效地工作,所以很难对每一耐波性因素做出一个绝对统一的衡准。因此可以通过相容项的合并和剔除影响较小的项,酌情减少所论的因素。根据本人查阅资料的结果和对驾驶员进行的调研以及考虑到船舶的自身性能,本文耐波性综合评估方程选取了其中的六项耐波性因素,即:横摇、纵摇、升沉、船首1站剖面处砰击、甲板上浪和船首垂向加速度。

1.3 稳性指标

船舶的稳性,是指船舶受到外力矩的作用离开平衡位置而发生倾斜,当外力矩消失以后,船舶所具有的回到原来平衡位置的能力。静稳性可以使用复原力矩的大小来衡量;动稳性则需要使用复原力矩所做的功的大小来衡量。它们均是变量,受船舶排水量、稳性高度和倾斜角的影响。虽然所有建造的船只在水下之前都经过验船部门的检验,并且在确认满足稳性规范后才交付使用的,但由于船舶横稳性与复杂的海洋环境、船舶运动、操纵等因素密切相关,而现行稳性规范中的气象衡准则是以船在静水中稳性为基础,以统计资料为依据的准动力法^[20]。如此,显然存问题有待于改善,即:如何确切地描述风、浪、流对船舶的作用。本文根据第一章中对船舶稳性研究的进展参考稳性规范,选取船舶在风浪中的抗风能力作为评价指标。

1.4 波浪载荷指标

在选取波浪载荷^[5]性能指标时主要要考虑到传播的总纵强度。在船体的纵向总强度分析中,通常包括总纵弯曲时的合成正应力校核,总纵弯曲时的剪应力校核,以及极限强度校核

二个部分。前两部分讨论的是船体在正常航行状态时的强度,后一部分讨论的是船体在意外状态下所具有的强度贮备。船舶在使用过程中可能遭遇的意外情况是多种多样的、如搁浅、碰撞、水下爆炸等等。由于此时作用于船体上的外载荷不好确定,因而常常笼统地用剖面的极限弯矩来评估船体结构的承载能力。

在我国现行的船舶规范中^[21],极限弯矩 M_u 的定义为:在离横剖面中和轴最远的船体梁翼板中,当内应力达到危险应力(对于伸情况,取为材料的屈服极限 σ_s ;对于压缩情况,取为板架的临界应力 σ_{cr})时所对应的总纵弯矩。亦即:

$$\begin{cases} \text{中垂时} & M_u = \min(\sigma_{cr\text{甲板}} W_{\text{甲板船底}}, \eta_1 \sigma_s W_1) \\ \text{中拱时} & M_u = \min(\sigma_{cr\text{船底}} W_{\text{船底甲板}}, \eta_2 \sigma_s W_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_{\text{甲板}}$ 、 $W_{\text{船底}}$ ——分别是中垂时甲板和船底的剖面模数;

$W_{\text{甲板}}$ 、 $W_{\text{船底}}$ ——分别是中拱时甲板和船底的剖面模数(在计算上述剖面模数时,应计及在压应力作用下部分板格失稳的影响);

$\sigma_{cr\text{甲板}}$ 、 $\sigma_{cr\text{船底}}$ ——分别是甲板和船底的板架发生整体屈曲时的临界应力;

η_1 、 η_2 ——分别是中垂和中拱时船体梁受拉翼板至中和轴的距离与受压翼板至中和轴距离之比(其值大于1时取为1)。

极限强度条件常用极限弯矩与正常航行时最大外弯矩的无因次比值来表示。即不论中垂或中拱状态,必须满足:

$$\frac{M_u}{M_s + M_w} \geq m \quad (3)$$

式中: M_s ——静水弯矩;

M_w ——波浪弯矩;

M_u ——极限弯矩;

在本文中综合考虑强度的影响,选择极限强度条件作为波浪载荷评价指标。

2 各指标权重的确定

2.1 层次分析法

层次分析法(AHP—Analytic Hierarchy Process)^[8]是美国匹兹堡大学T.L.Satty于20世纪70年代初提出的一种分析问题的方法。AHP

法计算的结果最终是一组系数或相对排序。作为权系数，可以直接代入模型用于计算，例如“加权和”等模型中的权系数；作为方案间的相对排序，其本身就可用于决策。

AHP的特点是，思路清晰、所需定量数据不多和适用于多准则、多目标分析。使用步骤包括：明确问题、建立递阶层次结构、建立各层次判断矩阵、层次单排序和层次总排序。层次分析法要求对每一层次的各个元素的相互重要性给出判断，并将结果以数值的形式表达出来，写成矩阵的形式。通过比较指标集中两两指标的相对重要性，可以构造如下判断矩阵见表1：

表1 判断矩阵的形式

R	A₁	A₂	...	...	A_n
A₁	<i>a₁₁</i>	<i>a₁₂</i>	...	...	<i>a_{1n}</i>
A₂	<i>a₂₁</i>	<i>a₂₂</i>	...	...	<i>a_{2n}</i>
...
...
A_n	<i>a_{n1}</i>	<i>a_{n2}</i>	...	...	<i>a_{nn}</i>

其中 a_{ij} 表示对R而言， a_i 对 a_j 的重要性。在层次分析法中 a_{ij} 的取值采用1, 3, 5, 7, 9标度法，使两个元素的比较得以量化。建立判断矩阵后还需对其进行归一化处理 and 一致性检验。设 $a_{ij} = f(u_i, u_j)$ 则：判断矩阵应具有一下特征：

$$a_{ii} = 1 \quad (4)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}} \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

为了使所得的分析结果合理化，构造判断矩阵后，还需检验判断矩阵的一致性，以保证不发生太大的偏差，即对于判断矩阵，计算满足下式：

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (7)$$

其中A为判断矩阵， λ_{\max} 为矩阵A的最大特征根，W为对应于 λ_{\max} 的规范化特征向量。经归一化处理后，即为该层相应影响因素对于上一层次因素的相对重要性的层次单排序值(权重)，对层次单排序的一致性检验是计算偏差一致性指标：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

其中：CI为一致性指标，n为判断矩阵的阶数。当随机一致性比例：

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.10 \quad (9)$$

则认为层次单排序结果具有满意的一致性即判断矩阵A符合一致性要求，否则需要调整判断矩阵，使其具有满意的一致性。其中RI为随机一致性指标，其值可查表得出。

当判断矩阵具有了满意的一致性后， λ_{\max} 所对应的归一化后的特征向量便可以作为归一化的权重值。

2.2 指标权重判断矩阵的建立

采用层次分析法建立两层指标体系，将快速性、耐波性、稳性、波浪载荷等四项性能作为一级指标，见表2所示；各单项性能中的不同评价指标作为二级指标，根据各项指标的相对重要程度分别建立判断矩阵，见表3、4所示：

表2 航行性能权重判断矩阵

A	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	1/3	1/5	1
A ₂	3	1	1/2	3
A ₃	5	2	1	5
A ₄	1	1/3	1/5	1

表中：A₁—稳性，A₂—快速性，A₃—耐波性，A₄—波浪载荷。经计算得归一化后的特征向量 $W=(0.0994, 0.28397, 0.51794, 0.0994)^T$ 随机一致性比例 $CR=0.00156 < 0.10$ 符合一致性要求。

表3 快速性指标权重判断矩阵

A ₂	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄
w ₁	1	5	5	5
w ₂	1/5	1	1	1
w ₃	1/5	1	1	1
w ₄	1/5	1	1	1

表中：w₁—波浪中航速，w₂—螺旋桨敞水效率，w₃—船身效率，w₄—相对旋转效率。经计算得归一化后的特征向量 $W_2=(0.625, 0.125, 0.125, 0.125)^T$ 随机一致性比例 $CR=0 < 0.10$ 符合一致性要求。

表4 耐波性指标权重判断矩阵

A ₃	u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	u ₅	u ₆
u ₁	1	1/3	1	2	3	5
u ₂	3	1	3	2	5	6
u ₃	1	1/3	1	2	3	5
u ₄	1/2	1/2	1/2	1	3	5

u_5	1/3	1/5	1/3	1/3	1	2
-------	-----	-----	-----	-----	---	---

表中： u_1 —纵摇， u_2 —横摇， u_3 —升沉， u_4 —船首垂向加速度， u_5 —船首一站处剖面抨击， u_6 —甲板上浪。经计算得归一化后的特征向量 $W_3=(0.18841, 0.37121, 0.18841, 0.14962, 0.06359, 0.03876)^T$ 随机一致性比例 $CR=0.03322 < 0.10$ 符合一致性要求。

3 各指标衡准值

3.1 快速性衡准

由于波浪增阻的存在使得船舶在风浪中航行时产生一定的速度损失，以静水航速为衡准，将同样主机功率下在波浪中的实际航速与衡准值进行比较。

3.2 耐波性衡准值

不同的组织、不同的学者对耐波性衡准有不同的建议^[1]，本文采用中国船舶科学研究中心为此提出一套耐波性衡准如表 5 所示：

表 5 中国船舶科学研究中心耐波性衡准

编号	耐波性因素	衡准值
1	单幅有义纵摇 $\psi_{a/3}$	4.8 ⁰
2	单幅有义横摇 $\theta_{a/3}$	16 ⁰
3	晕船率（2 小时内）%	30
4	有义垂向加速度 g	0.4
5	100 次振荡中出现抨击次数	3
6	每分钟甲板上浪次数	0.5
7	每分钟螺旋桨出水次数 （25% 桨叶）	0.5

3.3 稳性衡准

根据稳性规范^[17]中对船舶稳性的要求，水面舰船的抗风能力按舰船所能抗御的风级分为六级，见表 6

表 6 水面舰船稳性级别

稳性级别	风级	额定风速（距水面 10 米高度处）m/s
1	12	52
2	11	46
3	10	40
4	9	35
5	8	31
6	6	21

水面舰艇在正常排水量时的抗风级别应符合表 7 的规定。

u_6	1/5	1/6	1/5	1/5	1/2	1
-------	-----	-----	-----	-----	-----	---

表 7 正常排水量下舰船抗风级别要求

正常排水量 Δ/t	$2500 \leq \Delta$	$1000 \leq \Delta < 2500$	$200 \leq \Delta < 1000$
风级	12	11	10

水面舰船的抗风能力应符合公式：

$$U_1 \geq U_0 \quad (10)$$

式中： U_1 ——舰船所能承受的极限风速，m/s

U_0 ——舰船应能承受的额定阵风风速，m/s

水面舰船所能承受的极限风速 U_1 （距水面 10 米高度处），可按以下公式计算：

$$U_1 = C \cdot C_h \sqrt{\frac{I_C \cdot \Delta}{A_v \cdot Z}} \quad (11)$$

式中： C ——系数，取 $C=115.5$ ；

C_h ——风速沿高度分布的修正系数

$$Z_v > 3.5m, C_h = (10/Z_v)^{1/8}$$

$$Z_v \leq 3.5m \text{ 时}, C_h = 1.140;$$

I_C ——舰船的最小倾覆力臂，m；

Δ ——核算装载状态时的排水量，t；

A_v ——受风面积，m²

Z ——计算风力作用臂，m；战斗舰艇取

$$Z = Z_v;$$

Z_v ——受风面积形心至水线的距离，m。

当针对某一特定船舶进行风浪环境适应性评价时应根据其排水量选定其抗风级别。

3.4 波浪载荷衡准

根据舰船通用规范^[9]里给出的船舶极限强度条件应满足：

$$\frac{M_u}{M_s + M_w} \geq 2.6 \quad (12)$$

4 结 论

本文以船舶耐波性、波浪载荷、波浪中的快速性、稳性等及各项性能下包含的单项特征参数作为船舶在波浪中综合航行性能评价指标，采用层次分析法建立了两级指标判断矩阵，得到了各指标的权重，并确定了各指标的衡准，为下一步建立船舶在波浪中的综合航行性能评价方程奠定了基础。

参考文献

- 1 杨松林, 朱仁庆, 王志东, 张火明. 大型中速船舶快速性和操纵性综合优化研究[J].船舶, 2003.10(5): 18-23
- 2 熊文海, 毛筱菲, 李毓江. 船舶耐波性衡准及其评价方法浅析[J].船舶工程, 2007.8(36): 42-45
- 3 杨宝璋, 石爱国. 大风浪中多因素优化航向航速选择[J].中国航海.1991.1(28): 30-40
- 4 GJB4000-2000, 舰船通用规范 0 组舰船总体与管理、1 组船体结构[S].北京, 2000.
- 5 徐昌文.模糊数学在船舶工程中的应用[M].北京: 国防工业出版社, 1994.
- 6 熊文海.船舶耐波性评价及其在航海安全中的应用[D].武汉: 武汉理工大学, 2004.
- 7 李积德.船舶耐波性[M].北京: 国防工业出版社, 1992.

RESEARCH ON EVALUATION SYSTEM FOR SHIP'S INTEGRATED SAILING PERFORMANCE

SUN Shuzheng^{1,2} MIAO Quanming¹ ZHOU Decai¹ WU Baoshan¹

(1 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

(2 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 15001, China)

Abstract In this paper the integrated sailing performance of ship's including seakeeping performance, wave loads, speed and stability performance in waves. The main characters were picked out and considering the influence of wave environment to build the evaluation system. AHP method was used to get the weight factors, and then the evaluation system could be built. The research of this paper is important to the integrated sailing performance evaluation system and evaluating method.

Key words integrated sailing performance of ship's, wave, evaluation system, AHP method