网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20170512.1256.030.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：张恒，朱军. 计及风浪环境影响的水面舰船作战能力评估方法[J]. 中国舰船研究，2017，12(3)：36-42.
ZHANG H, ZHU J. Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves[J]. Chinese Journal of Ship Research，2017，12(3)：36-42.

计及风浪环境影响的水面舰船作战能力评估方法

张恒[1]，朱军[2]
1 海军装备研究院，北京 100161
2 海军工程大学 舰船工程系，湖北 武汉 430033

摘 要：[**目的**]为在水面舰船作战能力评估中计入海洋风浪环境影响，[**方法**]在分析风浪环境对水面舰船平台航行性能和武器系统使用影响的基础上，分别建立水面舰船综合作战能力评估指标体系和水面舰船风浪环境适应性评估指标体系，提出基于多属性效用理论和层次分析法(AHP)建立计及风浪环境影响的水面舰船作战能力综合评估方法，并选取国外某驱逐舰为典型算例进行验证。[**结果**]结果表明，在5级海况下计及风浪环境影响时该舰的综合作战能力约为静水中(0级海况)作战能力的81.5%，量化评估结果与专家定性评估结果趋势一致。[**结论**]该方法可以较合理地量化评估考虑风浪环境影响的水面舰船综合作战能力，为水面舰船型号论证与研制工作提供技术支持。

关键词：作战能力评估；风浪环境；水面舰船
中图分类号：U662.3 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1673-3185.2017.03.006

Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves

ZHANG Heng[1], *ZHU Jun*[2]
1 Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China
2 Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: In order to evaluate the combat capability of surface warships while considering the impact of wind and waves, the impact on seagoing performance and weapon operation is analyzed, an evaluation index system for the combat capability evaluation of surface warships is determined, and an evaluation method is presented on the basis of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and multi-attribute utility theory. Next, a typical example is used to validate the proposed method. It is found that the integrated combat capability of an evaluated destroyer in sea state 5 is approximate to 81.5% of that in calm water (sea state 0). The results show that the proposed method can quantitatively evaluate the actual combat capability of surface warships while considering the impact of wind and waves, which provides technical support for new ship demonstration and development.

Key words: combat capability evaluation; wind and waves; surface warship

0 引 言

风浪环境适应性是指水面舰船平台在远洋实际海况中航行及执行作战任务时，对遭遇的风浪等自然环境的适应能力，其优劣关系到舰船航行性能、安全性、生命力、舰载武器作战使用效能等

收稿日期：2016-04-10 **网络出版时间：**2017-5-12 12:56
基金项目：国家部委基金资助项目
作者简介：张恒(通信作者)，男，1981年生，博士，工程师。
朱军，男，1959年生，博士，教授。研究方向：船舶操纵性。E-mail：zhjun101@sina.com

指标。作战能力是对水面舰船完成给定作战任务程度的量度,是规划、研制、配置和部署的基本依据,也是评价水面舰船优劣最重要的综合性指标。水面舰船在风浪环境中的作战能力除取决于舰载武器本身的性能外,还与平台的风浪环境适应性直接相关,它是衡量水面舰船在实际海洋环境下综合作战能力的重要因素。因此,研究风浪环境适应性对水面舰船作战能力的影响因素及相关性,进而在作战能力评估中考虑其影响,可更为真实、客观地反映水面舰船的实战能力,可为方案论证设计及作战使用分析提供技术支撑,对提升水面舰船在实际海浪环境下的作战能力具有重要推动作用[1-2]。

目前,国内水面舰船风浪环境适应性研究尚处于起步阶段,作战能力评估主要有解析法、统计法、指数法和计算机作战模拟法等[3-4],但在作战能力评估中尚未开展计及风浪环境影响的深入研究。为此,本文将开展水面舰船环境适应性与实战能力的相关性研究,建立计及风浪环境的水面舰船作战能力的评估方法与评估模型,其可用于水面舰船实战能力评估,从而为水面舰船型号论证及研制工作提供技术支持。

1　海洋风浪环境对水面舰船作战使用的影响

1.1　风浪环境对舰艇平台总体性能的影响

1）快速性方面。最大航速和续航力指标通常按照在2级海况以下较为平静的风浪条件设计,而在实际海洋环境下航行时,风、浪、流的作用将导致最大航速和续航力较设计指标值降低或增加。顶风和顶流航行会增加船体阻力,降低最大航速和续航力;顺风和顺流航行将减小航行阻力,增加最大航速和续航力;同时,过大的纵摇和垂荡运动有可能出现螺旋桨出水(飞车)或吸水现象,降低螺旋桨工作效率、舰船的最大航速和续航力。

2）操纵性方面。水面舰船操纵性技术参数都是针对静水状态而设计,实际海洋环境中的风、浪、流都将增加操船的困难。海洋环境对舰船操纵影响很大,主要体现在航向保持、操纵回转、穿越强剪切流环境效应3个方面。

3）适航性方面。适航性主要是从作战使用的角度考虑舰船应具备一定的抵抗波浪、保证舰船海上作业的能力,适航性环境效应指舰船设计输入的海况与实际海况差异所造成的技术参数的变化,适航性环境效应可能使舰船摇荡增强,也可能使摇荡减缓,平台风浪环境适应能力的优劣直接影响舰载武器装备效能的发挥和舰员的作业效率。在高海况下出现过大摇荡运动时,一般实际操作中更多的是通过降低航速或改变航向来减缓舰船的摇荡运动。

4）稳性方面。水面舰船稳性是舰船航行安全的重要指标。其环境效应有2个方面:一是抗风浪能力的环境效应,即实际航行中海洋风浪条件与设计条件存在差异,导致舰船航行时因风浪作用发生倾覆的风险增大或减小;二是由于波浪的作用导致舰船横向摇荡运动出现异常增大的现象,如参数激振横摇和横甩。因此,水面舰船稳性环境效应包括纯稳性丧失、抗风浪倾覆效应、参数激振横摇和横甩。

1.2　风浪环境对舰载武器装备使用的影响

1）对雷达系统的影响。海浪使雷达天线和目标物产生不同程度的摇摆,两者的相对运动会使目标偏离天线波束主轴,降低天线的方向性系数,从而导致雷达最大作用距离缩短。同时,海面的起伏不平会使雷达荧光屏上产生许多海水杂波。海水杂波的亮度随风浪的增大而增强,风浪较大时,杂波会成片出现,可造成一定范围内的目标回波被淹没。

2）对声呐系统的影响。海浪运动引起的海水静压力变化,会对压敏水听器产生干扰,由于由其引起的海水静压力变化的幅度随深度的增加迅速降低,故在浅海产生的噪声是压敏水听器的主要低频噪声源。海面粗糙度产生的噪声是高频段自然噪声的噪声源,自然噪声级与海况直接相关。

3）对导弹武器的影响。风影响导弹射程,造成导弹偏航。顺风时导弹空速变小,相应的空气阻力减小,使导弹的射程增大;逆风时,则使导弹射程减小。海浪的影响主要在于波高、浪向、浪级及相位对导弹出水姿态的影响。纵向海浪会影响导弹的俯仰姿态,而横向海浪则会导致导弹偏航和影响其滚动姿态。

4）对鱼雷武器的影响。鱼雷在航行中因有废气逸出水面而在海面形成明显的航迹,因此当海面较为平静时,鱼雷航迹较为明显,易被较早发现。当海面有成片白色浪花时,鱼雷的航迹会与白色浪花混杂在一起,有利于浪花掩盖鱼雷航迹,不易被敌发现。海面能见度的好坏,直接影响鱼雷的发现距离。

5）对水雷武器的影响。海流对锚雷的雷体具有一定的压力作用,使雷索顺流向呈倾斜弯曲

状态。海流可以使沉底水雷发生滚动,滚动发出的声响能使沉底雷的声引信发生动作直至爆炸。沉底雷滚动还可能改变水雷引信的作用方向,从而减小水雷的作用距离,降低使用效果。潮汐引起海面水位周期性升降,潮差越大,对水雷深度的影响越大。对于非触发沉底雷而言,由于其破坏半径是固定值,因此,潮汐所引起的潮差变化直接影响其水面破坏半径的大小。

6)对舰载直升机的影响。舰载直升机起飞时最忌顺风,横风在一般情况下没有太大的影响,但也不能超出一定的限度。若舰上空间大,直升机可以在起飞前转向顶风,或至少可以转向比较有利的方向。湍流也是影响直升机起降的经常性干扰因素,有时虽然有合适的甲板风,但由于湍流的存在,飞机也不能起降。风浪引起的舰船摇摆和升沉使得直升机的预定着舰点处于随机运动中,如果没有准确的引导,准确着舰将十分困难。

2 计及风浪环境影响的作战能力评估方法

2.1 基于层次分析和多属性效用理论的评估方法

计及风浪环境的作战能力评估方法有以下特点:一是下属指标多,包括航行性能适应性、武器装备使用适应性等多类属性指标;二是指标层次较多,如作战能力下属有对空、对海、对水下作战能力指标,对空、对海、对水下作战能力指标还分别包含下属指标;三是指标的不可公度性,即指标没有统一的量纲,如航速的单位是节,续航力的单位是海里,不能用统一的标准评价。

首先,对于这类多目标、多层次、多属性等复杂问题的评估,需依照层次分解构建指标体系,确保评估指标能包括综合性能的主要方面,且具备可实现性。

然后,确定综合评估方法。一是要确定底层单指标的度量方法,对于综合性能这类指标,其底层指标的优劣与作战使用直接相关,不存在固定、标准化的处理方法,因此,在作战使用中可根据不同任务需求和使用要求,按照效用函数法量化各底层指标;二是确定指标权重,对于这类多指标、多层次系统,层次分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)是确定其权重的有效方法;三是指标综合方法,如果认为各层指标间关联度较小,按照多属性效用理论,可依层次加权求得总的效用值。因此,将AHP方法与多属性效用理论结合形成综合评估方法理论成熟,评估方法和模型简单,便于操作,评估结果为总效用值,物理意义清晰。

因此,在综合性能评估中,可以先建立评估指标体系,然后采用基于AHP方法与多属性效用理论相结合的综合评估方法和评估模型进行综合评估。

计及风浪环境的作战能力评估等于不计风浪环境影响作战能力评估结果与环境适应性效应的乘积。

2.2 评估流程

在计及风浪影响的水面舰船实战能力评估中结合多属性效用理论与AHP方法的优点,建立如图1所示的综合评估流程。

第1步:按层次分解,建立作战能力评估指标体系和环境适应性效应指标体系;

第2步:建立作战能力各底层指标的价值函数,确定环境适应性效用函数;

第3步:采用两两比较法确定各层指标的权重;

第4步:分析确定作战能力各底层指标值和效用值;

第5步:应用多属性效用理论计算计及风浪环境影响的作战能力总效用值。

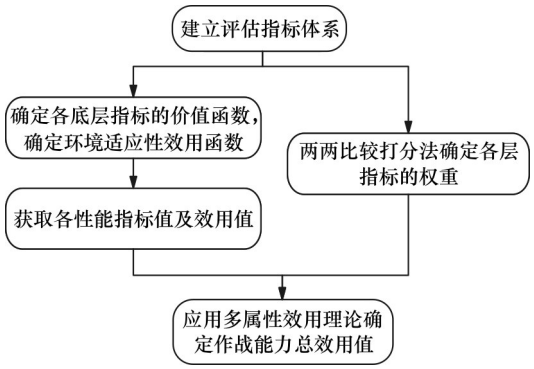

图1 舰船综合作战能力评估流程

Fig.1 The evaluation process of integrated combat capability of warships

2.3 计及风浪环境的综合作战能力评估指标体系

计及风浪环境的综合作战能力评估指标体系包括水面舰船综合作战能力评估指标体系(图2)和水面舰船风浪环境适应性指标体系(图3)2部分。

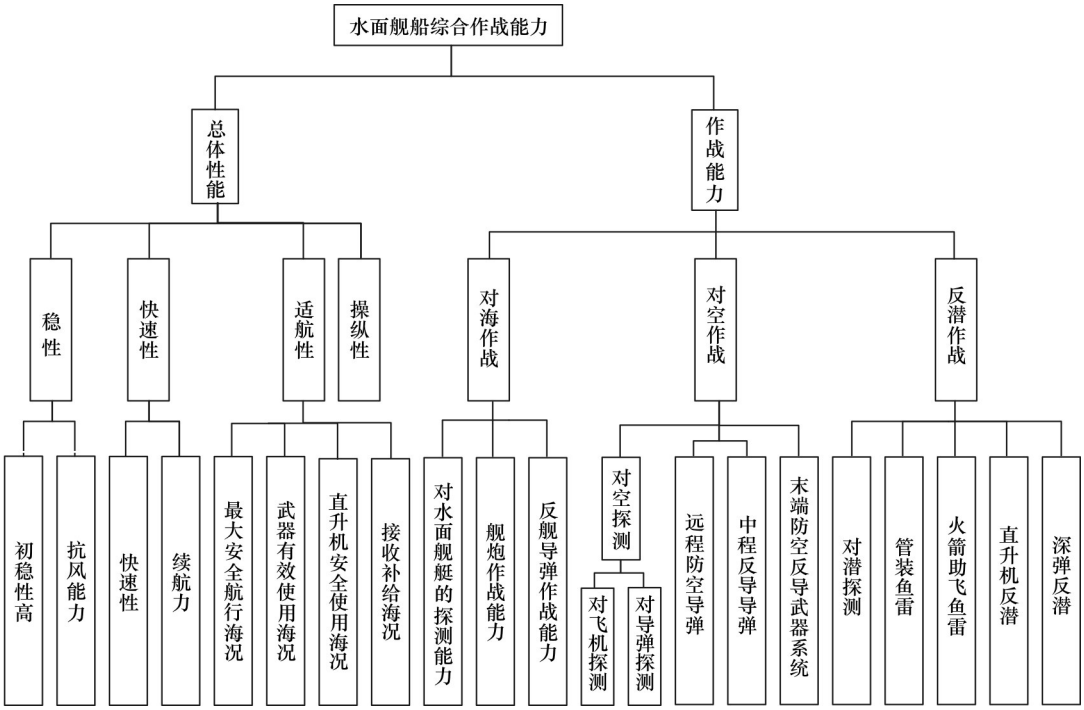

图2　综合作战能力评估指标体系

Fig.2　The index system of integrated combat capability evaluation

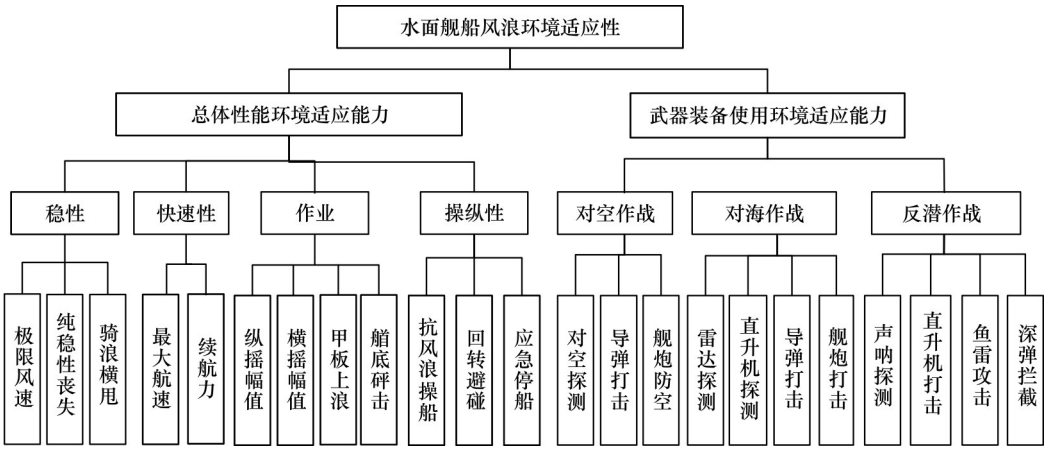

图3　风浪环境适应性指标体系

Fig.3　The index system for evaluating impact of wind and waves on integrated combat capability

2.3.1　综合作战能力评估指标体系

水面舰船综合作战能力指标体系包括总体性能和作战能力2部分:前者包括稳性、快速性、适航性和操纵性等;后者包括对海作战能力、对空作战能力、反潜作战能力等。

2.3.2　风浪环境适应性指标体系

舰船风浪环境适应性指标体系由总体性能环境适应能力和武器装备使用环境适应能力2个环境适应能力构成。总体性能环境适应性按照稳性、快速性、作业、操纵性展开;武器装备使用环境适应能力指在实际海洋环境与测试(设计)条件下战术指标的差异,按照对空、对海和反潜作战的环境适应性展开。

2.4　计及风浪环境的综合作战能力评估方法

2.4.1　综合作战能力评估方法

1)指标权重确定方法。

按照AHP方法,通过两两比较确定评价指标的权重,按照9点标度法两两比较确定各层指标之间的相对重要程度,如表1所示。

表1 9点标度法及其含义

Table 1 Definitions of the nine interval scale

标 度	含 义
1	表示行因素与列因素同等重要
3	表示行因素比列因素稍微重要
5	表示行因素比列因素重要
7	表示行因素比列因素重要很多
9	表示行因素比列因素绝对重要
2,4,6,8	表示上述两相邻判断的中值
以上标度的倒数	因素 i 与 j 比较的判断值为 b_{ij}，则因素 j 与 i 比较判断值为 $1/b_{ij}$

比较 n 个元素 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 对准则的影响，以确定它们在准则中所占的比重。每次取2个元素 x_i 和 x_j，用 a_{ij} 表示 x_i 与 x_j 关于准则的相对重要程度之比，其全部比较结果可用矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表示。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

该矩阵即为判断矩阵。判断矩阵中的赋值 a_{ij} 表示元素 x_i 关于元素 x_j 的重要程度的赋值。对判断矩阵求出其各特征值，其中最大的实特征值对应的特征向量即为相对权重，一般将其归一化得到最终的权重。

2）价值函数建立方法。

对底层各定量指标，采用价值函数法来确定其评估分值。具体方法是：依据舰艇的主要作战使用性能要求和相关舰船规范，确定各定量指标的价值函数，首先确定各指标的门限值，即满足使用要求的最小可接受值；然后确定目标值，即理想值或技术极限值。之后，按作战使用要求确定价值函数形式（可以分为线性、S型、上凸型、下凹型），对于曲线形函数，在确定门限值、目标值及中间某些点的分值后，采用样条曲线拟合形成效用函数[5-7]。例如：

最大航速门限值选取主要作战使用性能要求的基本值，取值29 kn，对应的效用值为60；考虑作战使用需求及当前技术水平，中间值取30 kn，对应的效用值为90；目标值考虑目前船型、动力水平所能达到的技术极限或同级舰最大值，取值32 kn，对应的效用值为100。价值函数取上凸形曲线，通过确定的典型航速下的效用值拟合得出价值函数曲线，如图4所示。

2.4.2 环境适应性效应评估方法

环境适应性评估体系中，底层指标有各自的量纲，为使不同量纲转换成统一可以评估的能力，

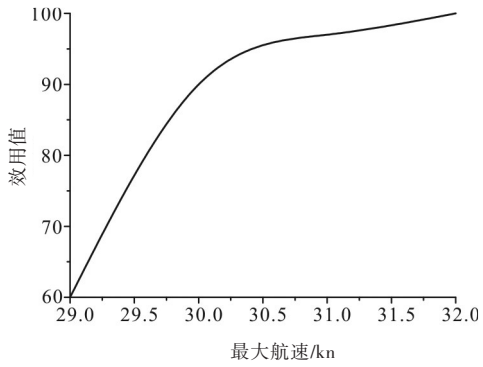

图4 最大航速价值函数

Fig.4 The value function of the maximum speed

应用多属性效用理论（Multi-Attribute Utility Theory，MAUT）将目标属性按照转换函数变换成0～1的能力值。参照GJB 4000-2000，将海况划分等级（0～9级海况）作为海洋环境输入条件，各个适应性属性值采用Sigmoid型函数确定。S 型函数（图5）的具体形式为

$$S=1-\frac{1}{1+\mathrm{e}^{(A-B\times ST)}} \tag{1}$$

式中：ST 为海况级别，取值范围为0～9；A，B 为常数，取值如表2所示；S 为评估属性值。

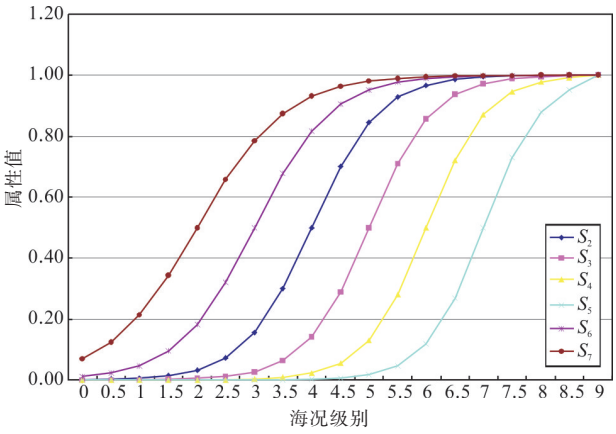

图5 S 型函数

Fig.5 The S function

表2 S 型函数对应的常系数 A，B 值

Table 2 The values of constant coefficient A and B in the S function

	海况级别					
	2	3	4	5	6	7
系数 A	2.6	4.5	6.8	9	11.4	14
系数 B	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2
函数	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7

2.4.3 计及风浪环境的综合作战能力评估方法

计及风浪环境的综合作战能力计算公式如式（2）所示。

$$U(K)=\sum_{i=1}^{n}K_iU(x_i)\cdot R(x_i) \tag{2}$$

式中：K_i 为第 i 个指标 x_i 的权重；$U(x_i)$ 为第 i 个指标 x_i 的效用值；$R(x_i)$ 为第 i 个指标 x_i 的环境适应性效应值。

3　典型案例

以国外某型驱逐舰为例，开展计及风浪环境适应性的作战能力评估。

3.1　指标权重计算

首先，采用AHP方法确定如图2和图3所示的综合作战能力评估指标体系和环境适应性评估指标体系的指标权重。

3.2　综合作战能力效用值计算

根据价值函数建立方法，建立综合作战能力评估指标体系中各指标的价值函数。例如，首先确定初稳性高和直升机安全使用价值函数的形式，再分别确定门限值、目标值和中间值及对应的效用值，拟合得出价值函数曲线如图6和图7所示。

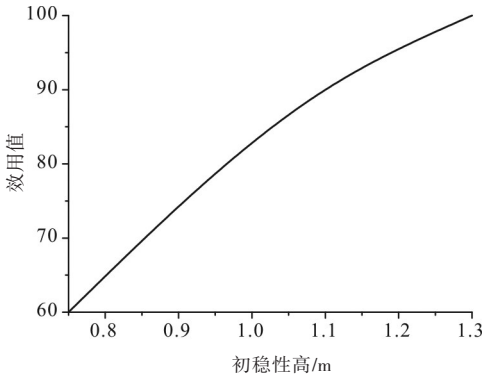

图6　初稳性高价值函数

Fig.6　The value function of initial metacentric height

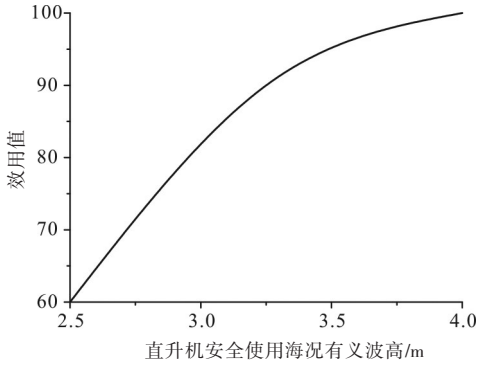

图7　直升机安全使用海况价值函数

Fig.7　The value function of sea states for safe operation of helicopters

根据综合作战能力底层各指标值，按照建立的价值函数，可计算出各指标的效用值，如表3所示。

表3　指标效用值

Table 3　The utility values of indexes

指标项目	效用值	指标项目	效用值
初稳性高（标准排水量）	80	对导弹探测能力	60
抗风能力（正常排水量）	100	导弹打击能力	80
最大航速（满载排水量下）	90	末端反导武器系统能力	100
续航力	47	雷达对海探测能力	62
最大安全航行海况（有义波高）	60	导弹对海打击能力	90
武器有效使用海况（有义波高）	90	舰炮对海打击能力	66.7
直升机安全使用海况（有义波高）	60	声呐探测能力	60.6
接受补给海况（有义波高）	80	直升机打击能力	100
定常回转直径（正常排水量、最大航速）	60	管装鱼雷能力	85
对飞机探测能力	60	助飞鱼雷能力	45

3.3　环境适应性效应

1）总体性能环境适应性效应。根据式（1）得出0～9级海况下总体性能环境适应性属性值计算结果，如表4所示。

2）武器装备使用环境适应性效应。根据式（1）得出0～9级海况下武器装备使用环境适应性属性值计算结果，如表5所示。

3）计及风浪环境的典型驱护舰作战能力评估。根据式（2）得出0~5级海况下计及风浪环境影响的作战能力计算结果，如表6所示。

由表6可知，在5级海况下计及风浪环境影响时该舰的综合作战能力约为静水中（0级海况）作战能力的81.5%，量化评估结果与专家定性评估结果趋势一致。

4　结　语

在以往开展的水面舰船作战能力评估中，主要根据武器系统本身的性能指标开展作战能力的综合评估，而水面舰船平台和武器系统很多性能指标主要针对静水和较小海况条件下使用提出，因此，水面舰船在实际海洋环境中，特别是在远海海域中航行和使用武器系统，综合作战能力将受到影响，基于平台和武器系统本身性能指标的综合作战能力评估结果不能完全反映实际作战能力。本文分析了风浪环境对平台航行性能和武器系统使用的影响，建立了综合作战能力、风浪环境适应性评估指标体系，提出了基于AHP方法和多

表4 总体性能环境适应性属性值

Table 4 The environmental adaptability values of seagoing performance

指标	海况级别									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
极限风速	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.982	0.881	0.500	0.119	0.000
纯稳性丧失	1.000	0.994	0.968	0.846	0.500	0.154	0.032	0.006	0.001	0.000
骑浪横甩	1.000	0.994	0.968	0.846	0.500	0.154	0.032	0.006	0.001	0.000
纵摇幅值	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
横摇幅值	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
甲板上浪	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
艏底砰击	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
抗风浪操船	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
回转避碰	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
应急停船	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
最大航速	1.000	0.994	0.968	0.846	0.500	0.154	0.032	0.006	0.001	0.000
续航力	1.000	0.994	0.968	0.846	0.500	0.154	0.032	0.006	0.001	0.000

表5 武器装备使用环境适应性属性值

Table 5 The environmental adaptability values of weapons

指标	海况级别									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
对空探测	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.982	0.881	0.500	0.119	0.000
对空导弹打击	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
舰炮防空	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
雷达探测	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.982	0.881	0.500	0.119	0.000
对海导弹打击	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
舰炮打击	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
声呐探测	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
直升机打击	1.000	0.999	0.996	0.973	0.858	0.500	0.142	0.027	0.004	0.000
鱼雷攻击	1.000	1.000	0.999	0.997	0.978	0.870	0.500	0.130	0.022	0.000
深弹拦截	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.982	0.881	0.500	0.119	0.000

表6 综合作战能力评估结果

Table 6 The computational results of integrated combat capability of the evaluated destroyer

	海况级别					
	0	1	2	3	4	5
综合作战能力	74.29	74.23	73.95	72.78	68.80	60.57

属性效用理论的综合评估方法，针对国外某驱逐舰的应用结果表明，所建立的量化评估方法具有较好的科学性。鉴于风浪环境对水面舰船平台航行性能和武器系统影响的复杂性，今后还应在风浪环境适应性影响函数方面开展更深入的研究。

参考文献：

[1] 林武强，徐定海. 舰艇装备环境及其影响和存在问题分析[J]. 装备环境工程，2005，2(2)：48-52.
LIN W Q，XU D H. The influence and existing problems of the environment for and on carrier based materiel[J]. Equipment Environmental Engineering，2005，2(2)：48-52 (in Chinese).

[2] 蒋颉，傅江妍，韩正君. 水面舰艇在高海况航行时的安全性分析[J]. 舰船科学技术，2015，37(1)：6-10.
JIANG J，FU J Y，HAN Z J. Research on the security of naval ships in severe sea conditions[J]. Ship Science and Technology，2015，37(1)：6-10 (in Chinese).

[3] 牛作成，吴德伟，雷磊. 军事装备效能评估方法探究[J]. 电光与控制，2006，13(5)：98-101.
NIU Z C，WU D W，LEI L. Study on effectiveness evaluation for military equipment[J]. Electronics Optics & Control，2006，13(5)：98-101 (in Chinese).

[4] 吴岿华，任耀峰，周胜. 海战场环境下舰艇作战能力评估[J]. 舰船电子工程，2015，33(5)：4-5，26.
WU K H，REN Y F，ZHOU S. Combat capability evaluation of ship in sea battlefield environment[J]. Ship Electronic Engineering，2015，33(5)：4-5，26 (in Chinese).

[5] BROWN A J，TOMAS M. Reengineering the naval ship concept design process [C]//Research to Reality in Ship Systems Engineering Symposium. [S.l.]：NSWC Carderock，1998：1-12.

[6] BROWN A，SALCEDO J. Multiple-objective optimization in naval ship design[J]. Naval Engineers Journal，2003，115(4)：49-62.

[7] DEMKO D. Tools for multi-objective and multi-disciplinary optimization in naval ship design[D]. Blacksburg，Virginia：Virginia Polytechnic Institute and State University，2005.