

引用格式: 房灿新, 郭兴旺. 一种面向复杂作战试验环境的水面舰艇作战效能评估方法[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 259-265.

FANG C X, GUO X W. An operational effectiveness evaluation method for surface warships in complex operational test environment[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(3): 259-265.

# 一种面向复杂作战试验环境的水面舰艇作战效能评估方法



扫码阅读全文

房灿新\*, 郭兴旺

中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001

**摘要:** [目的] 为了更合理地评估作战试验中水面舰艇的作战效能, 面向复杂的战场环境, 开展水面舰艇作战效能评估方法研究。 [方法] 首先, 以作战试验项目设计及试验想定为牵引, 分析舰艇平台作战试验项目的内容, 研究复杂战场环境下作战对抗强度和电磁环境的量化分级标准; 然后, 提出一种基于复杂战场环境影响因子的作战效能评估改进方法, 并以某型水面舰艇对空方面作战试验效能评估为例进行试验验证。 [结果] 结果显示, 所提方法是有效的。 [结论] 该方法充分考虑了复杂战场环境对不同作战单元作战能力的影响, 能解决舰艇作战效能评估方法中贴合复杂战场环境实际不足的问题, 可为舰艇装备作战试验的工程实施提供参考。

**关键词:** 水面舰艇; 作战试验; 复杂战场环境; ADC 效能评估

中图分类号: U674.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03048

## An operational effectiveness evaluation method for surface warships in complex operational test environment

FANG Canxin\*, GUO Xingwang

The Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao 066001, China

**Abstract:** [Objectives] In order to evaluate the operational effectiveness of surface warships more reasonably, this article proposes improving the existing evaluation methods to better suit complex battlefield environments. [Methods] First, according to operational test items and test scenarios planning, the content of the warship platform test items are analyzed, and classification standards for complex battlefield environments' operational intensity and electromagnetic environment are designed. An improved method for evaluating combat effectiveness based on the influence factors of complex battlefield environments is then proposed, and the operational effectiveness of a certain type of surface warship in an anti-air warfare environment is evaluated. [Results] The results show that the proposed method is effective. [Conclusions] The proposed method fully considers the influence of complex battlefield environments on the combat capability of different operational units, and solves the problem of existing operational effectiveness evaluation methods failing to fit the actual situation of complex battlefield environments. As such, this study can provide valuable references for the operational testing of naval vessels.

**Key words:** surface warship; operational test; complex battlefield environment; ADC effectiveness evaluation

## 0 引言

根据现行装备试验鉴定程序和要求, 性能试验和作战试验都是装备试验鉴定体系中不可分割的组成部分<sup>[1-2]</sup>, 前者主要对照装备的研制要求进行检测, 后者则立足于高强度的体系对抗, 主要

检验装备的作战效能。长期以来, 我国海军舰艇装备试验都侧重于性能试验, 注重对装备战术技术指标的考核。而武器装备能否在作战中发挥应有的能力, 能否完成所赋予的任务, 是否好用, 是装备研制、试验和部队使用关注的重点, 也是装备作战试验考核的重点。

收稿日期: 2022-08-19

修回日期: 2023-05-19

网络首发时间: 2023-06-02 16:07

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 房灿新, 男, 1968年生, 硕士, 研究员

郭兴旺, 男, 1987年生, 硕士, 工程师

\*通信作者: 房灿新

美国海军在2017年版《作战试验与鉴定主任手册》中指出,作战试验与鉴定是“由典型用户负责操作和维护试验系统,并尽可能在模拟的真实作战条件下实施”,试验目的是“对舰队使用或作战部署的武器系统的作战效能和适用性进行精确评估”<sup>[3]</sup>。我国在作战试验方面的研究还处于起步阶段<sup>[4-5]</sup>,并且在相关的效能评估方法研究方面也未结合作战试验的设计与想定<sup>[6-8]</sup>,因此研究和符合我国海军战场实情的作战效能评估方法,对完成舰艇定型工作,加快我军战斗力的生成具有重要作用。

本文将结合试验实践与新的鉴定定型要求,对作战试验项目进行设计与想定分析,并对复杂战场环境中的作战对抗强度及电磁环境进行量化分级,以构建作战效能评估体系,然后提出一种基于复杂战场环境影响因子的作战效能评估方法。该方法将综合考虑作战对抗强度和电磁环境因素对作战试验结果的影响,并结合信息熵和可用性、可信性、能力(availability, dependability, capability, ADC)效能评估方法对作战单元复杂混合结构下的作战试验结果进行综合评估,以为水面舰艇作战试验中的效能评估提供一种有效的方法和依据。

表1 作战对抗强度分级表

Table 1 Grading of operational intensity

作战对抗强度	战役场景含义	战术场景含义
简单	蓝盟不参与,以T, Y等为作战对象	单向单波1~2枚同型号导弹/单向1枚鱼雷威胁
一般	蓝盟仅提供情报支援,以T, Y等为作战对象	双向单波2~4枚不同型号导弹/单向1枚鱼雷威胁
较强	蓝盟提供多维信息作战,以T, Y等为作战对象	双向双波5~7枚不同型号导弹/双向2枚鱼雷威胁
强	蓝盟直接参与信息系统和火力系统一体化打击,双航母群以上打击力量介入	双向双波9~11枚不同型号导弹/双向多波3枚鱼雷威胁
复杂	蓝盟战略意志碰撞,局部战争向全面战争蔓延	多向多波大于11枚不同型号导弹/多向多波大于3枚鱼雷威胁

## 2) 电磁环境效应。

根据GJB 6520-2008《战场电磁环境分类与分级方法》<sup>[10]</sup>,以及由装备定型管理部门颁布实施的有关装备复杂环境适应性试验与边界性能考核通用要求等法规,将电磁环境按照干信比(J/S)或是保精度探测空域退化度Q指标分为了4级,即简单、轻度、中度和重度。雷达具体的电磁环境分级标准如表2所示。

普遍认为,战场的单向透明一直是以信息系统为核心的体系作战能力建设所面临的最严重挑战之一。电磁环境效应将会影响到预警探测能力中的威力、自动巡航能力和抗干扰能力,影响作战流程的流畅性、武器的信息保障能力以及打击效果等。因此,在实兵试验及仿真试验等相关项目中,均需将电磁环境复杂度和作战对抗强度作

# 1 复杂作战试验环境想定设计

试验鉴定法规明确要求需拟制作战试验想定,旨在对战场环境、参试兵力及编成、作战态势及进程、主要作战行动及装备运用等内容进行设定,也便于与部队的演训活动进行有机结合<sup>[9]</sup>。需要基于多种不同编队编成的应用形态和强敌威胁,梳理分析被试舰的核心军事能力需求,然后在此基础上筹划制定作战试验想定;明确被试舰在典型作战场景中的具体任务,并在不同作战试验想定的牵引下,设计一系列与之对应的试验项目(科目),以考核被试舰在不同作战对抗强度和电磁环境下的作战效能。

## 1) 作战对抗强度。

作为被试装备的某型舰艇在不同的作战对抗强度下,会表现出不同的作战效能;在实装试验以及基于仿真系统的作战任务完成度评估过程中,作战对抗强度会影响到预期的作战目标是否能够最终实现。本文依据蓝盟参与作战的情况、作战对象,以及导弹/鱼雷威胁的波次、数量等,将作战对抗强度分为了5级,即简单、一般、较强、强和复杂,具体如表1所示。

表2 电磁环境分级——雷达装备方法示例

Table 2 Grading of electromagnetic environment (radar equipment taken as an example)

电磁环境级别	干信比(J/S)/dB	保精度探测空域退化度Q/%
I级(简单)	$0 < J/S < 10$	$95 < Q < 100$
II级(轻度)	$10 \leq J/S < 20$	$95 \leq Q < 85$
III级(中度)	$20 \leq J/S < 30$	$85 \leq Q < 60$
IV级(重度)	$J/S \geq 30$	$60 \leq Q < 0$

为一项重要的试验条件来予以考虑。

# 2 基于复杂战场环境影响因子的作战效能评估改进方法

从综合能力解析的角度构建作战效能评估指标体系<sup>[11-12]</sup>,然后将底层指标进行归一化处理,得

到与“阿利·伯克”级舰的能力对比度。考虑到复杂战场环境(作战对抗强度、电磁环境)的影响,引入复杂战场环境影响因子Z,提出一种舰艇作战效能评估改进方法。最后,利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)聚合,并利用信息熵和ADC效能评估法,对作战效能进行综合评估。

### 2.1 作战效能综合评估指标体系构建

首先,通过树状分析方法构建舰艇综合作战

效能评估指标体系。将舰艇作战效能分解为编队作战指挥能力、对空作战能力、对海作战能力、对潜作战能力、对陆指挥能力、机动能力、综合攻防能力、生命力能力及备战备航能力等9个考核评估点。然后,以对潜作战能力为例,将其继续分解为预警探测性能、指挥控制性能、软硬打击性能等作战要素,随后进一步分解至局部作战单元及具体的武器装备效能,如图1所示<sup>[8]</sup>。

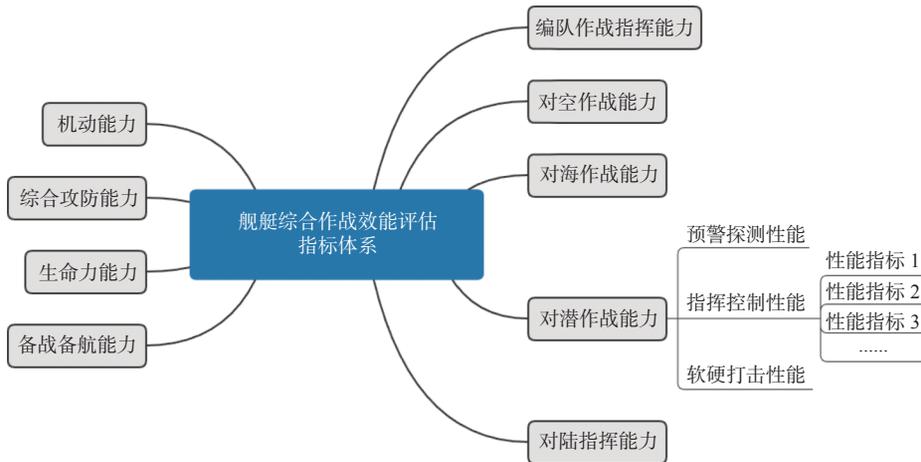


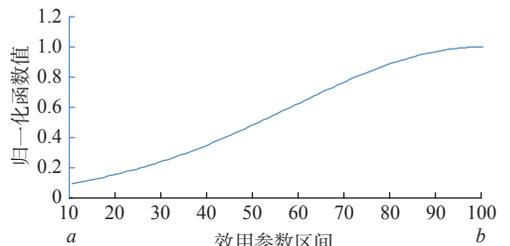
图1 舰艇综合作战效能评估指标体系

Fig. 1 Integrated combat effectiveness evaluation index system of naval vessels

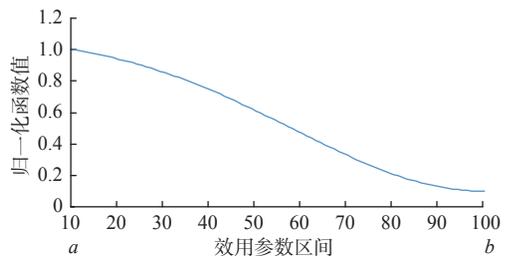
### 2.2 指标归一化处理

以“阿利·伯克”级舰为参照系,对底层指标需进行归一化处理<sup>[13]</sup>。例如,对于红方导弹打击距离相对于蓝方导弹的打击距离,给出一个相对的归一化比值(0~1之间)。采用如图2所示的高斯改进的归一化函数方法对指标进行处理,其中图的横轴量纲由具体的被评参数的量纲确定,归一化后的纵轴为无量纲。图2(a)和图2(b)分别反映了效益型和成本型参数区间与归一化后函数值的关系,相对于常见的线性归一化函数,其能更好地描述事物的自然属性。其中,属性值越大越好的指标称作效益型指标,如打击范围、命中概率等;属性值越小越好的指标称作成本型指标,如反应时间等。针对这2种指标,其效益型和成本型归一化函数分别如式(1)和式(2)所示。

式中: $x$ 为指标值; $a, b$ 为公式参数,分别由效用区间最小值和最大值确定; $m = (b - a) / \sqrt{-2 \times \ln 0.2}$ ,为中间变量。



(a) 效益型归一化函数图



(b) 成本型归一化函数图

图2 高斯改进的归一化函数方法

Fig. 2 Improved Gaussian function of normalization method

$$f_a(x) = \begin{cases} 0.1, & x < a \\ \text{Exp}\left(-\frac{(x-b)^2}{2m^2}\right), & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$f_b(x) = \begin{cases} 1, & x < a \\ 1 + 0.1 + \text{Exp}\left(-\frac{(x-b)^2}{2m^2}\right), & a \leq x < b \\ 0.1, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 复杂战场环境影响因子定义

为了更好地量化海战场的复杂环境对作战效能评估的影响,结合第1章对作战对抗强度和电

电磁环境的分级,定义复杂战场环境影响因子 $Z$ 为量化指标。该指标表示了考虑复杂环境因素与未考虑复杂环境因素这2种情况下作战效能之间的差异(一般比值在 $0\sim 1$ 之间)。具体地,根据作战单元及其效能评估指标的不同,以及作战对抗强度和电磁环境分级的不同,复杂战场环境影响因子 $Z$ 又可以分解为 $Z_{ij}^{\text{combat}_p}$ 和 $Z_{ij}^{\text{elect}_q}$ ,以此定量地表示不同作战对抗强度 $p$ 及电磁环境分级 $q$ 对作战单元 $i$ 第 $j$ 个指标的影响。由于作战对抗强度与电磁环境这2种环境影响因素之间不具有相关性,因此,复杂战场环境影响因子 $Z$ 的取值可以采用线性合成的方式进行,即

$$Z_{ij} = \sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^4 \omega^{\text{combat}_p} \omega^{\text{elect}_q} Z_{ij}^{\text{combat}_p} Z_{ij}^{\text{elect}_q} \quad (3)$$

式中: $Z_{ij}$ 为第 $i$ 个作战单元第 $j$ 个指标的复杂战场环境影响因子; $\omega^{\text{combat}_p}$ 为对抗作战强度为 $p$ 时影响因子的权重; $\omega^{\text{elect}_q}$ 为电磁环境分级为 $q$ 时影响因子的权重; $Z_{ij}^{\text{combat}_p}$ 为对抗作战强度为 $p$ 时对第 $i$ 个作战单元第 $j$ 个性能指标的影响因子; $Z_{ij}^{\text{elect}_q}$

为电磁环境分级为 $q$ 时对第 $i$ 个作战单元第 $j$ 个性能指标的影响因子。具体的数值将由研究海战场复杂环境方面的专家结合试验情况综合确定。其中,

$$\sum_{p=1}^5 \omega^{\text{combat}_p} = 1, \quad \sum_{q=1}^4 \omega^{\text{elect}_q} = 1$$

## 2.4 基于复杂战场环境因子的作战单元作战能力评估

在获取了某一作战单元的一组归一化性能指标之后,可以采用层次分析法<sup>[13]</sup>加权计算得到某一作战单元某一方面的作战能力,即ADC效能评估方法中的能力 $C$ 。根据层次分析法的步骤,首先基于专家评价对该项能力的具体性能指标的重要程度进行对比,如表3所示,构造判断矩阵 $B$ 。然后,用本征向量法求解最大本征值 $\lambda_{\max}$ 和各个性能指标的权重 $\omega$ ,若最大本征值 $\lambda_{\max}$ 大于同阶矩阵相应的 $\lambda'_{\max}$ ,则不能通过一致性检验,需重新估计矩阵 $B$ ,直至 $\lambda_{\max} < \lambda'_{\max}$ 通过一致性检验,求得的 $\omega$ 才有效。

表3 指标重要性判断矩阵 $B$ 中元素的取值

Table 3 Index importance value selection of elements in judgment matrix  $B$

相对重要程度	定义	说明
1	同等重要	2个指标同样重要
3	略微重要	由经验或判断,认为一个指标比另一个指标略微重要
5	相当重要	由经验或判断,认为一个指标比另一个指标重要
7	明显重要	深感一个指标比另一个指标重要,且这种重要性已有实践证明
9	绝对重要	强烈地感到一个指标比另一个指标重要得多
2, 4, 6, 8	2个相邻判断的中间值	需要折中时采用
倒数		2个指标相互比较时互为倒数

最后,考虑复杂战场环境对作战效能的影响,计算第 $i$ 个作战单元某一方面的作战能力,具体计算公式如下:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} C_{ij} Z_{ij} \quad (4)$$

式中: $C_i$ 为考虑复杂战场环境影响时第 $i$ 个作战单元的作战能力; $\omega_{ij}$ 为第 $i$ 个作战单元第 $j$ 个指标的权重; $C_{ij}$ 为第 $i$ 个作战单元第 $j$ 个指标的技战能力。

## 2.5 基于信息熵的ADC作战效能评估

某舰艇平台由多个复杂的串、并联作战单元构成,某一个作战单元的故障、战损失效等都会对作战能力产生影响。考虑到舰艇平台各作战单

元实际串、并联的关系,本文基于信息熵<sup>[14-15]</sup>方法对某一方面作战能力的ADC效能进行了评估计算。

根据上述计算,得到考虑复杂战场环境影响的第 $i$ 个作战单元某一方面的作战能力 $C_i$ ,然后以信息熵进行转化表征,可得到考虑复杂战场环境影响的第 $i$ 个作战单元某一方面作战能力的信息熵如下:

$$I_i^C = -\ln(C_i) \quad (5)$$

式中, $I_i^C$ 为第 $i$ 个作战单元的能力信息熵。

对于串联系统,信息熵为作战单元信息熵的加权和,如式(6)所示。

$$I_A = \sum_{i=1}^m \omega_i \times I_i \quad (6)$$

式中:  $I_A$  为串联系统的总信息熵;  $\omega_i$  为第  $i$  个作战单元的权重;  $I_i$  为串联系统中第  $i$  个作战单元的能力信息熵。

对于并联系统, 其信息熵的计算公式如下:

$$1/I_B = 1/I_1 + 1/I_2 + \dots + 1/I_m \quad (7)$$

式中:  $I_B$  为并联系统的总信息熵;  $I_m$  为并联系统中第  $m$  个作战单元的信息熵。

根据串、并联系统的信息熵计算公式(式(6)和式(7)), 可计算得到任一作战系统结构下(混合串、并联系统)某一方面作战能力总的的能力信息熵, 以及作战系统总的作战能力值。

$$I^C = I_A + I_B \quad (8)$$

$$C = -\exp(I^C) \quad (9)$$

式中:  $I^C$  为某一方面作战系统总的的能力信息熵;  $C$  为考虑复杂战场环境影响的某一方面总的作战能力。

最后, 结合 ADC 效能评估方法<sup>[8]</sup>, 即可得到考虑复杂战场环境影响的平台某一方面作战能力总的的作战效能评估值。

$$E = A \times D \times C \quad (10)$$

式中:  $E$  为平台某一方面作战能力总的的作战效能值;  $A$  为平台总的可用度;  $D$  为平台总的可信度。

### 3 应用实例

本文将从效能解析聚合的角度出发, 考虑复杂战场环境(作战对抗强度、电磁环境)的影响, 采用基于信息熵的 ADC 效能评估方法, 对某型水面舰艇的对空作战效能进行评估。首先, 将本系统简化为一个串、并联的混合系统, 如图 3 所示, 并假设在对空作战试验中各作战单元全部正常工作, 各作战单元的能力指标层级关系如图 4 所示。

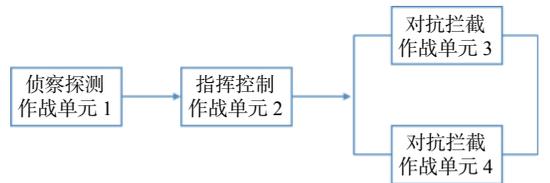


图 3 对空系统作战单元组成关系

Fig. 3 Composition relationship of combat units for air defense system



图 4 对空方面作战效能分解图

Fig. 4 Decomposition diagram of operational effectiveness in air defense operation

结合各专家评价结果、研究院的调研结果以及部队交流情况等, 对各性能指标进行综合评价, 并通过指标的归一化处理, 获得 4 个作战单元的二级性能指标值  $C_{ij}$ 。考虑到复杂战场环境对作战试验情况的影响, 由相关专家确定不同作战对抗强度及电磁环境分级下不同作战单元各性能指标的影响程度, 也即确定复杂战场环境影响因子  $Z_{ij}^{combat-p}$  和  $Z_{ij}^{elect-q}$ , 如表 4 所示。同时, 根据专家对作战试验中不同作战对抗强度及电磁环境影响程度的综合评判, 确定复杂战场环境影响因子的

权重  $\omega^{combat-p}$  和  $\omega^{elect-q}$ , 如表 5 所示。

随后, 通过层次分析法构建判断矩阵  $B$ , 如表 6 所示, 以作为作战单元 3 的能力指标判断矩阵。其余 3 个作战单元的能力指标判断矩阵在此不再赘述。

经过层次分析法, 得到一致性检验结果  $4.1622 < 4.27$ , 作战单元 3 各指标的权重计算结果为  $(0.1645, 0.2785, 0.2785, 0.2785)$ 。据此, 由式(5)即可计算得到考虑复杂战场环境影响的各作战单元的作战能力值及能力信息熵。假设串联系统的权重

表4 复杂战场环境影响因子取值表

Table 4 The value selection of influence factors in complex battlefield environment

评估指标	作战对抗强度					电磁环境				
	简单	一般	较强	强	复杂	简单	轻度	中度	重度	
警戒探测跟踪能力	对飞机目标探测距离	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7
	对导弹目标探测距离	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7
	对飞机目标跟踪精度	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7
	对导弹目标跟踪精度	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7
	空中目标探测批数	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
	空中目标跟踪批数	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
指挥控制能力	对空方案生成时间	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
	对空决策区范围	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	对空方案目标数量	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
武器打击能力	对空武器反应时间	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
	对空武器打击范围	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7
	对空武器目标批数	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
	对空武器命中概率	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5

表5 复杂战场环境影响因子权重取值表

Table 5 The weight selection of influence factors in complex battlefield environment

作战对抗强度					电磁环境			
简单	一般	较强	强	复杂	简单	轻度	中度	重度
0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2

表6 武器打击能力指标判断矩阵

Table 6 The judgment matrix of counter interception capability index

能力特征	反应时间	打击范围	目标批数	命中概率
反应时间	1	1/2	1/2	1/2
打击范围	2	1	1	1
目标批数	2	1	1	1
命中概率	2	1	1	1

$(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (0.3, 0.3, 0.4)$ , 则在对空作战方面总的作战能力信息熵为  $I_K^C = \omega_1 \times I_1 + \omega_2 \times I_2 + \omega_3 \times \frac{I_3 I_4}{I_3 + I_4}$ , 对空方面的作战能力为  $C_K = -\exp(I_K^C)$ 。再结合各作战单元的可用度与可信度, 即可得到系统考虑复杂战场环境影响时对空方面的作战效能值  $E_K = A_K \times D_K \times C_K$ 。

通过上述计算, 得到考虑复杂战场环境影响时对空方面作战试验的效能评估值为 0.677, 经相关专家证实, 确认该数值符合实际情况, 这也进一步说明基于复杂战场环境影响因子的作战效能评估改进方法是贴合作战实际情况的。

## 4 结 语

本文在作战试验想定的牵引下, 对影响作战效能的复杂战场环境因素予以了具体的分析与定性描述, 通过结合作战对抗强度及电磁环境分级, 提出了一种基于复杂战场环境影响因子的作战效能评估改进方法, 并以水面舰艇对空方面作战试验的效能评估为例, 对该方法进行了验证, 显示所提方法有效。该方法可为开展复杂战场环境条件下的作战效能评估及水面舰艇装备作战试验实施提供新的参考。

### 参考文献:

- [1] KASS R A, ALBERTS D S, HAYES R E. 作战试验及其逻辑 [M]. 马增军, 孟凡松, 车福德, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2010: 115-173.  
KASS R A, ALBERTS D S, HAYES R E. Logic of warfighting experiments[M]. MA Z J, MENG F S, CHE D F, et al, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 115-173 (in Chinese).
- [2] 房灿新, 郑锦, 赵立志. 舰艇性能试验与作战试验一体化设计 [J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(5): 135-138.  
FANG C X, ZHENG J, ZHAO L Z. Integrated design of warship performance test and operation test[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(5): 135-138 (in Chinese).
- [3] 徐强, 金振中, 杨继坤. 美军水面舰艇作战试验研究及启示 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(2): 176-179, 185.  
XU Q, JIN Z Z, YANG J K. Research and enlighten-

- ment on the operational test of US army surface ships[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(2): 176–179, 185 (in Chinese).
- [4] 王金良, 郭齐胜, 李玉山, 等. 陆军开展装备作战试验的总体思考 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2016, 30(3): 1–6.  
WANG J L, GUO Q S, LI Y S, et al. General reflection on the army equipment operational test[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2016, 30(3): 1–6 (in Chinese).
- [5] 柯宏发, 杜红梅, 祝冀鲁. 电子装备作战试验模式问题研究 [J]. *国防科技*, 2015, 36(4): 34–41.  
KE H F, DU H M, ZHU J L. Study on operational test pattern of electronic equipment[J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, 36(4): 34–41 (in Chinese).
- [6] 杨星, 潘谊春, 杜克新. 基于 ADC 模型的某雷达干扰系统效能分析 [J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(2): 72–75.  
YANG X, PAN Y C, DU K X. Radar jamming system effectiveness analysis based on ADC model[J]. *Fire Control & Command Control*, 2009, 34(2): 72–75 (in Chinese).
- [7] 燕雪峰, 张德平, 黄晓冬, 等. 面向任务的体系效能评估 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020: 93–107.  
YAN X F, ZHANG D P, HUANG X D, et al. Mission oriented effectiveness evaluation and optimization of system of systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020: 93–107 (in Chinese).
- [8] 孙永林, 阮永贵, 肖虎, 等. 基于模糊评判的 ESM 系统作战效能评估 [J]. *舰船电子工程*, 2020, 40(8): 134–136, 140.  
SUN Y L, RUAN Y G, XIAO H, et al. Operational efficiency evaluation of ESM system based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(8): 134–136, 140 (in Chinese).
- [9] 曹裕华, 王元钦. 装备作战试验理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 1–52.  
CAO Y H, WANG Y Q. Theory and method of equipment operational test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 1–52 (in Chinese).
- [10] 中国人民解放军总装备部. 战场电磁环境分类与分级方法: GJB 6520–2008[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008.  
General Armament Department of PLA. Classification and gradation methods for battlefield electromagnetic environment: GJB 6520–2008[S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of General Armament Department of PLA, 2008 (in Chinese).
- [11] 王凯, 赵定海, 闫耀东, 等. 武器装备作战试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 194–218.  
WANG K, ZHAO D H, YAN Y D, et al. Weapon equipment operational test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 194–218 (in Chinese).
- [12] 雷永林, 朱智, 甘斌, 等. 基于仿真的复杂武器系统作战效能评估框架研究 [J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(9): 1654–1663.  
LEI Y L, ZHU Z, GAN B, et al. Combat effectiveness simulation evaluation framework of complex weapon system[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1654–1663 (in Chinese).
- [13] 岳超源. 决策理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 206–208.  
YUE C Y. Decision theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2003: 206–208 (in Chinese).
- [14] 王剑飞, 武文军, 李红星, 等. 基于信息熵的美军 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估 [J]. *电光与控制*, 2006, 13(2): 24–28, 32.  
WANG J F, WU W J, LI H X, et al. Evaluation of US army C<sup>4</sup>ISR system effectiveness based on Shannon information entropy[J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(2): 24–28, 32 (in Chinese).
- [15] 徐敬, 张生. 基于信息熵的反导系统综合作战效能评估研究 [J]. *指挥控制与仿真*, 2010, 32(5): 63–66.  
XU J, ZHANG S. Research on integrative operation effectiveness evaluation of anti-missile systems based on information entropy[J]. *Command Control & Simulation*, 2010, 32(5): 63–66 (in Chinese).