

3-22-2022

Effectiveness Evaluation of Surface Ship Air Defense and Antimissile Combat in Complex Electromagnetic Environment

Gaofeng Zhang

Unit 91336 of the Chinese PLA, Qinhuangdao 066326, China; zgf_051012@163.com

Liang Wu

Unit 91336 of the Chinese PLA, Qinhuangdao 066326, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Effectiveness Evaluation of Surface Ship Air Defense and Antimissile Combat in Complex Electromagnetic Environment

Abstract

Abstract: In order to effectively evaluate the effectiveness of surface ship air defense and antimissile combat in complex electromagnetic environment, *a surface ship air defense and antimissile combat effectiveness index system is established considering the influence of equipment, environment and human behavior, the evaluation process of surface ship air defense and antimissile combat effectiveness based on analytic hierarchy process(AHP) is proposed, and a hierarchical structure model of effectiveness evaluation is constructed including five levels of target layer, sub-efficiency layer, capability layer, constraint layer and plan layer.* The application shows that the evaluation process and structure model can fully reflect the influence of various factors such as complex electromagnetic environment, *effectively improve the rationality of the relative importance index of each factor of analytic hierarchy process, and ensure the confidence of effectiveness evaluation results.*

Keywords

surface ship, air defense and antimissile, combat plan, effectiveness evaluation, complex electromagnetic environment, analytic hierarchy process(AHP)

Recommended Citation

Gaofeng Zhang, Liang Wu. Effectiveness Evaluation of Surface Ship Air Defense and Antimissile Combat in Complex Electromagnetic Environment[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 640-650.

复杂电磁环境下水面舰艇防空反导作战效能评估

张高峰, 吴亮

(中国人民解放军91336部队, 河北 秦皇岛 066326)

摘要: 为有效评估复杂电磁环境下的水面舰艇防空反导作战效能, 综合考虑装备、环境和人的行为等因素的影响, 建立了水面舰艇防空反导作战效能指标体系, 提出了基于层次分析法的水面舰艇防空反导作战效能评估流程, 构建了包含目标层、子效能层、能力层、约束层和方案层共5个层次的效能评估递阶层次结构模型。应用表明, 该评估流程和结构模型能全面体现复杂电磁环境等各种因素的影响, 有效提高了层次分析法各因素相对重要性指标的合理性, 保证了效能评估结果的置信度。

关键词: 水面舰艇; 防空反导; 作战方案; 效能评估; 复杂电磁环境; 层次分析法

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)03-0640-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0844

Effectiveness Evaluation of Surface Ship Air Defense and Antimissile Combat in Complex Electromagnetic Environment

Zhang Gaofeng, Wu Liang

(Unit 91336 of the Chinese PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: In order to effectively evaluate the effectiveness of surface ship air defense and antimissile combat in complex electromagnetic environment, a surface ship air defense and antimissile combat effectiveness index system is established considering the influence of equipment, environment and human behavior; the evaluation process of surface ship air defense and antimissile combat effectiveness based on analytic hierarchy process(AHP) is proposed, and a hierarchical structure model of effectiveness evaluation is constructed including five levels of target layer, sub-efficiency layer, capability layer, constraint layer and plan layer. The application shows that the evaluation process and structure model can fully reflect the influence of various factors such as complex electromagnetic environment, effectively improve the rationality of the relative importance index of each factor of analytic hierarchy process, and ensure the confidence of effectiveness evaluation results.

Keywords: surface ship; air defense and antimissile; combat plan; effectiveness evaluation; complex electromagnetic environment; analytic hierarchy process(AHP)

引言

现代战争中, 随着新技术的不断应用, 反舰导弹突防能力大大加强。水面舰艇在反导作战过程中, 又会因为复杂电磁环境的影响, 出现战场态势掌握不完整、威胁判断不及时、火力运用不合理等问题, 导致水面舰艇防空形势严峻。电子信息靶场

在开展水面舰艇作战试验、在役考核、人员训练等工作过程中, 都需要评估复杂电磁环境对舰艇防空反导作战效能的影响, 如在外场实兵试验和作战演训前针对不同作战方案进行效能预估、水面舰艇反导作战流程和行动规范优化、能够最大限度发挥装备作战能力的作战运用模式和方法的探索等^[1]。

科研院所和部队等单位在舰艇防空反导作战

收稿日期: 2020-11-02

修回日期: 2020-12-31

第一作者: 张高峰(1980-), 男, 本科, 高工, 研究方向为舰艇作战系统建模与仿真、作战效能评估。Email: zgf_051012@163.com

效能评估方面开展了很多有益探索, 但存在指标体系构建较少考虑复杂电磁环境、效能评估缺少试训数据支撑等不足。本文从靶场试训任务保障需求出发, 在深入分析复杂电磁环境影响的基础上, 提出了较为全面的水面舰艇防空反导作战效能指标体系; 采用层次分析法, 建立了水面舰艇防空反导作战效能评估模型; 以某型舰在典型交战情节下的反导作战为例, 基于靶场试训结果数据, 分析比较了不同作战方案下的防空反导作战效能。

1 评估对象及复杂电磁环境影响

1.1 作战效能评估对象的确定

作战效能是指装备在规定条件下完成作战任务时所能发挥有效作用的程度。作战效能评估可在装备研制论证、作战试验、在役考核等不同阶段开展^[2], 不同阶段的效能评估具有不同的评估目标和侧重点。本文主要分析水面舰艇在电子信息靶场作战试验阶段涉及到的作战方案效能评估问题, 研究把水面舰艇武器系统自身作战能力和作战组织下的装备协同运用能力综合起来的作战效能, 并着重考虑复杂电磁环境对防空反导作战过程的影响。

水面舰艇的作战试验主要采用实兵实装试验与仿真评估相结合的手段, 在实兵试验开展之前,

需首先运用仿真手段对实兵作战方案进行效能评估, 以评价其合理性和可行性^[3]。作战试验还需要通过作战方案评估的方式, 为部队合理使用装备、充分发挥装备能力提供作战运用参考, 为装备交付部队后迅速形成战斗力提供支撑。

1.2 复杂电磁环境对水面舰艇防空反导作战的影响

信息化条件下的海战场充斥着大量电磁活动, 水面舰艇面临的电磁环境复杂多变^[4]。为充分评估复杂电磁环境对水面舰艇搭载的各类信息化装备作战能力的影响, 电子信息靶场在外场试验训练中利用大量的背景电磁环境模拟器、威胁环境模拟器和高功率干扰环境模拟器等电磁环境生成设备为水面舰艇营造逼真的战场电磁环境, 通过试训任务数据分析, 得出了复杂电磁环境影响水面舰艇作战效能的几个主要方面。表 1 从侦察预警、指挥控制和干扰拦截 3 个作战环节具体分析了复杂电磁环境对水面舰艇防空反导作战效能的影响。

由表 1 分析可知, 复杂电磁环境对水面舰艇防空反导作战效能的影响主要体现在以下 3 个方面: ①加大了战场态势的感知难度, 降低了战场态势感知的完整性和准确性; ②影响了指挥控制的实时性、准确性和稳定性; ③制约了软硬武器的抗击效果^[5]。

表 1 复杂电磁环境对防空反导作战效能影响分析

Table 1 Analysis of the influence of complex electromagnetic environment on air defense and antimissile combat effectiveness		
作战环节	受影响装备	影响效果
侦察预警	电子侦察设备	信号密度和强度达到一定程度, 会对接收机造成影响, 轻者虚警率、漏警率提高, 重者可能会造成侦察系统被阻塞, 甚至失效
	对空搜索雷达	易受干扰, 会影响舰载中远程搜索雷达对空中威胁目标的探测, 使我防空预警系统无法达成早期预警
	通信设备	易受干扰, 会对舰舰、舰机、舰岸通信质量造成影响, 无法正常接收来自友邻方的信息支援, 延误战机或影响抗击行动
指挥控制	指挥控制系统	不直接受影响, 但传感器批号频繁变化、航迹质量下降会导致指控系统综合态势不稳定, 影响指挥决策和目标指示下达
干扰拦截	硬武器	影响航空导弹、舰炮发射时机, 影响目标跟踪稳定性, 降低打击效果
	软武器	影响有源、无源干扰的实施时机, 影响干扰资源分配和干扰决策, 降低干扰效果

2 作战效能指标体系

2.1 指标选取原则

描述水面舰艇防空反导作战效能，必须建立效能的指标体系。指标体系的构建要考虑3个主要因素：①评估目标，就是对水面舰艇完成拦截来袭反舰导弹、保存自己作战任务的能力进行评价；②评估边界，就是期望装备完成任务时敌我双方的条件和外部环境条件，包括装备体系、作战对象、电磁环境、自然环境和人为因素等；③评估对象，主要是立足于装备自身能力属性，研究为达成作战目标而采取的作战策略和方法，即作战方案。

评估指标体系应具备以下特征^[6]：①综合宏观性，指标集合应能从不同层次和角度尽量全面地度量系统完成规定任务的程度，各指标所呈现的分项意义不应相互重复；②环境影响性，各指标的设置应充分体现复杂电磁环境和气象环境对装备效能发挥的影响，并考虑人为因素对作战流程的影响；③相对可比性，下一层次的指标对上一层次的指标

应具有支撑性，同一层次同类指标对于上一层次中某一元素的重要性具有相对可比性。

2.2 指标体系确立

依据指标选取原则，基于作战过程分析和靶场试训任务结果数据，利用系统分析方法，权衡取舍之后，找出能全面反映系统效能的评估因素，按照一定的结构层次进行排列组合，使其构成一个有机整体，形成指标体系。水面舰艇防空反导的作战效能主要取决于3个方面的分项效能，即预警探测效能、指挥协同效能和武器运用效能，各分项效能又进一步分解深化为多个子项效能，各层指标的设置均依据表1充分考虑复杂电磁环境的影响，形成水面舰艇防空反导作战效能指标体系如图1所示。

其中，预警探测效能和武器运用效能直接体现了复杂电磁环境对软硬武器性能发挥的影响；指挥协同类能力体现人与装备结合的综合效能，反映装备职手和指挥员的操作、决策和协同能力，人的操作和决策的及时性、正确性在很大程度上也会受到复杂电磁环境的影响。

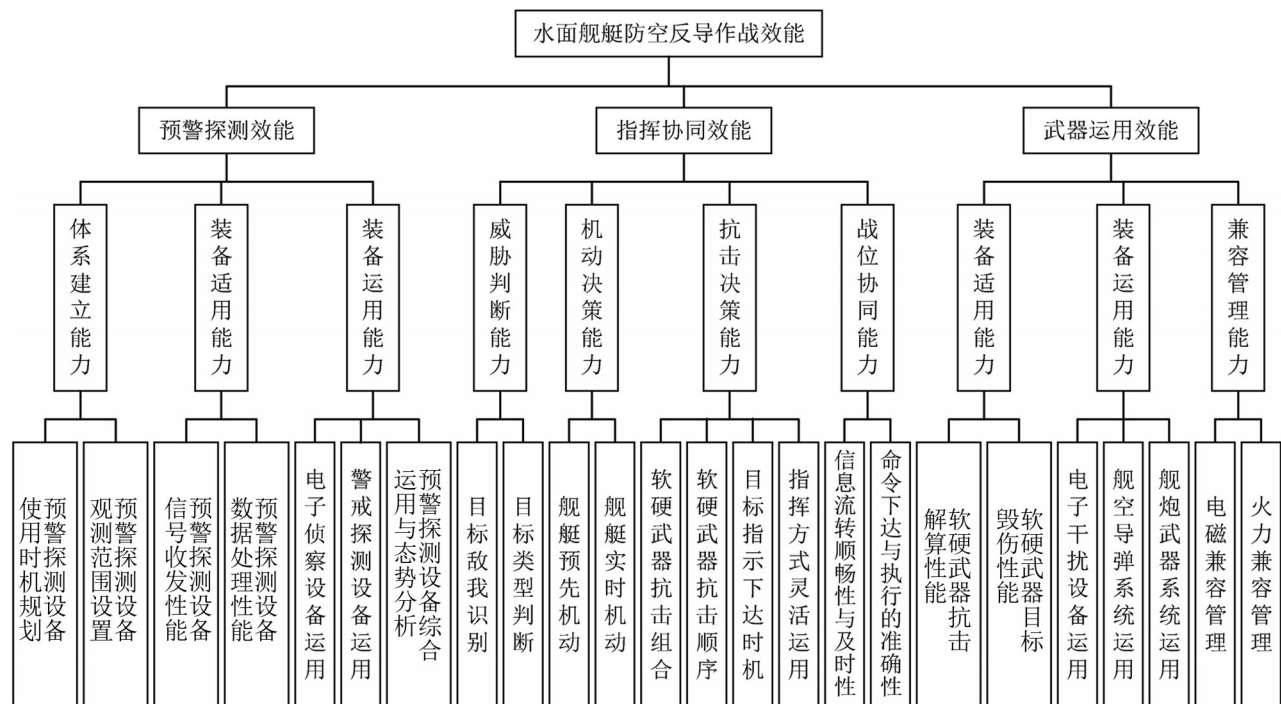


图1 水面舰艇防空反导作战效能指标体系

Fig. 1 Effectiveness index system of surface ship air defense and antimissile combat

3 基于层次分析法的作战效能评估

目前, 作战效能评估方法主要有解析法、统计法和作战模拟法3类^[7]。解析法是作战效能评估应用最主要的方法, 常用的解析法包括指数法、系统分析法、层次分析法、多目标决策法等。其中, 层次分析法是一种定性定量相结合的、系统化、层次化的分析方法, 特别适合于水面舰艇作战行动这类具有复杂层次结构的多指标决策评估问题。在此, 采用层次分析法对复杂电磁环境下水面舰艇防空反导作战效能进行评估。

3.1 层次分析法的基本原理

层次分析法, 是由美国运筹学家 Thomas L. Saaty 教授于20世纪70年代初提出的, 它是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的层次权

重决策分析方法, 比较适合于具有分层交错评价指标, 而指标值又难以定量描述的决策问题^[8]。

对于作战效能评估问题, 层次分析法将评估涉及到的各类因素按性质属性及隶属关系, 聚类组合形成具有决策目标(评估目标)、决策准则(评估指标)和决策对象(作战方案)递阶层次的分析结构模型。然后, 对结构模型中准则层各因素对于上一层次具有隶属关系因素的相对重要性, 依据作战专家的经验判断给予两两比较的定量表示, 再利用数学方法计算出准则层全部因素的相对重要性权值。最后, 通过综合计算各层因素相对重要性的权值, 获得决策对象层各因素对于决策目标层的相对重要性权值, 以此作为评价和选择决策对象的依据。

3.2 作战效能评估流程

层次分析法应用于水面舰艇防空反导作战效能评估的流程如图2所示。

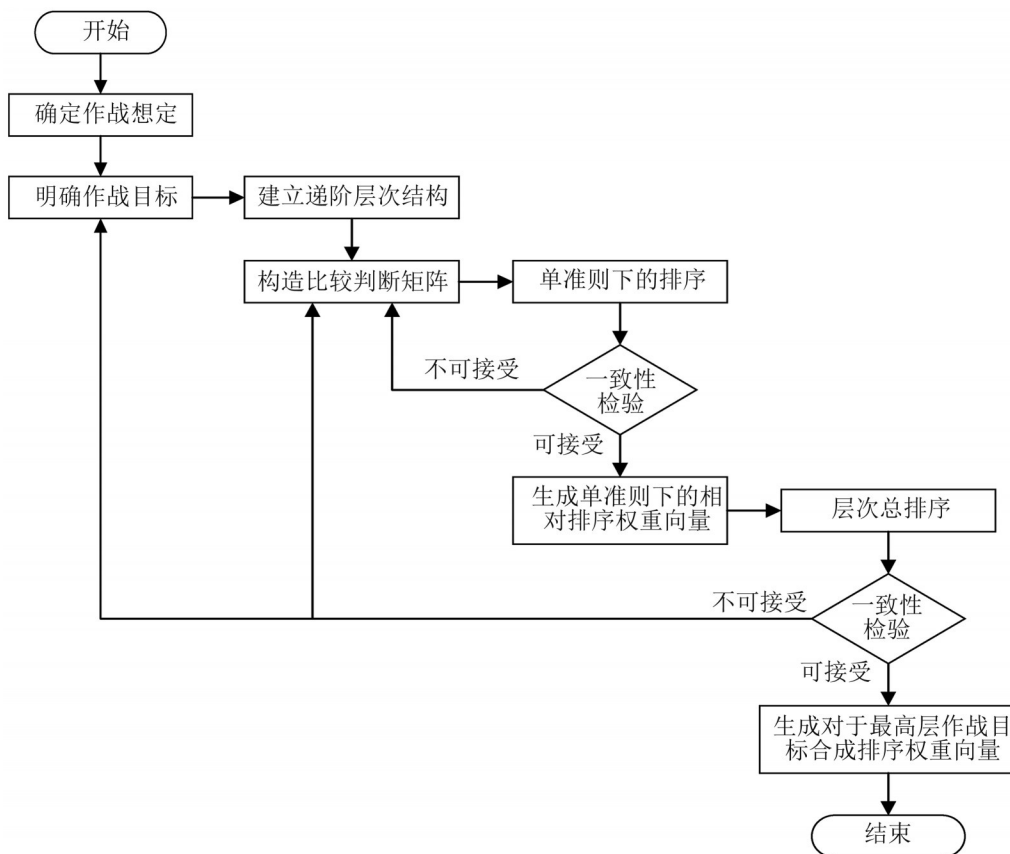


图2 基于层次分析法的作战效能评估流程

Fig. 2 Combat effectiveness evaluation process based on analytic hierarchy process

第1步,明确作战目标。首先要确定作战想定,作战想定为作战效能评估提供任务背景和敌我对抗条件;然后要明确在作战想定约束下想要达成的作战目标。每一次作战效能评估都是针对具体的作战目标而开展的。

第2步,建立递阶层次结构。根据典型作战想定下的作战目标,将影响完成作战任务的各因素按性质属性(同层分组)及隶属关系(上下分层)进行分组分层,形成一个由目标层、若干准则层、方案层所组成的不相交的递阶层次结构^[9],其中作战目标是最高层,称为总目标层。

第3步,构造比较判断矩阵。以递阶层次结构中上一层次某个因素作为比较准则,构造比较判断矩阵(正互反矩阵)来表达下一层次各因素(隶属于同一上层因素)的相对重要性。比较判断矩阵是层次分析法的信息基础,对于每一个准则及它所支配的因素都可以得到一个比较判断矩阵。

第4步,进行单准则下的排序。依据比较判断矩阵,计算同一层次因素对于上一层次中具有隶属关系的准则因素的相对排序权重,这一过程称为单准则下的排序。每一层次作单准则排序时,均需要进行比较判断矩阵的一致性检验,如果一致性不可

接受,则需要对比较判断矩阵作适当的修正。

第5步,进行层次总排序。计算同一层次中所有因素对于最高层(作战目标)的相对重要性标度(又称合成排序权重向量),这一过程称为层次总排序。最终需得出最底层(方案层)对于总目标层的合成排序权重向量。合成排序权重向量生成后,需要进行一致性检验,如果一致性不可接受,则需要对比较判断矩阵作适当的修正,甚至需要对作战目标的合理性进行调整。

3.3 作战效能评估模型

3.3.1 递阶层次结构模型

根据层次分析法原理和指标体系,建立水面舰艇防空反导作战效能评估的递阶层次结构如图3所示。

该递阶层次结构由目标层、准则层和方案层组成。其中,目标层规定了总的作战目标;准则层又包括子效能层、能力层和约束层3个层次,体现了水面舰艇防空反导作战效能指标体系,各指标综合约束着作战效能的发挥;方案层包括若干个作战方案,各作战方案都应瞄准总的作战目标,综合考虑指标因素,力求最大限度地发挥舰载武器的综合作战效能。

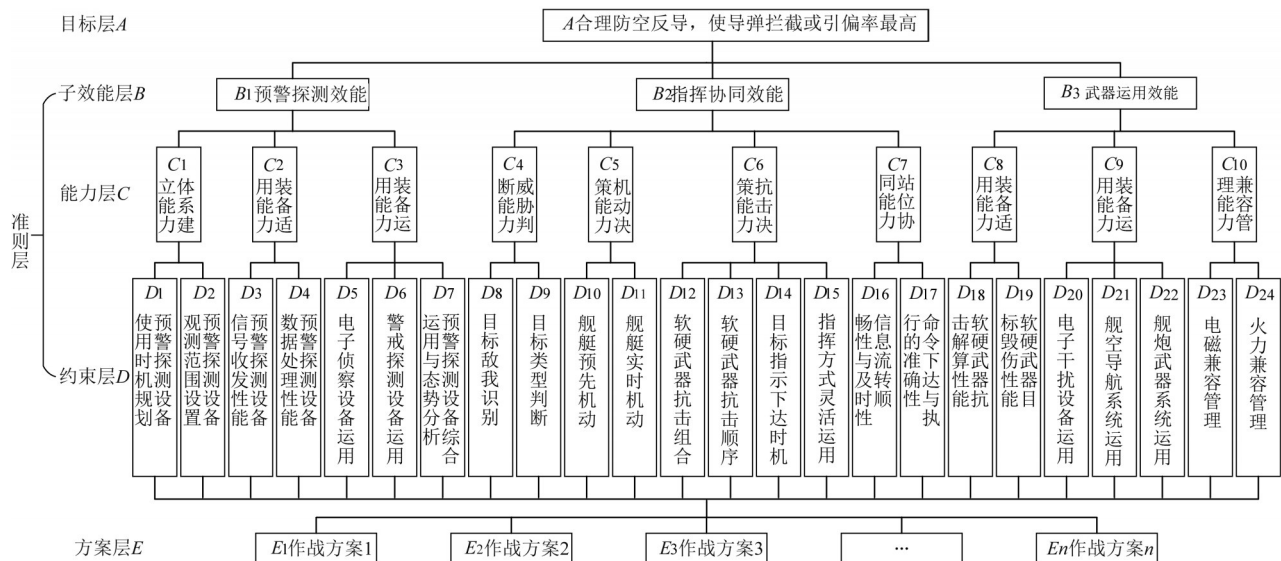


图3 水面舰艇防空反导作战效能评估的递阶层次结构

Fig. 3 Hierarchical structure of the effectiveness evaluation of surface ship air defense and antimissile combat

3.3.2 比较判断矩阵模型

根据水面舰艇防空反导作战效能评估的递阶层次结构, 对每一层次各因素针对上一层次某一个存在隶属关系因素的相对重要性进行两两比较, 形成比较判断矩阵。

假定目标层因素 A 与下一层次因素 B_1, B_2, \dots, B_n 有隶属关系, 则构造的比较判断矩阵 A_B 为

$$A_B = \begin{bmatrix} 1 & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ \frac{1}{b_{12}} & 1 & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{b_{1n}} & \frac{1}{b_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $b_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$ 是对于比较准则因素 A 而言, 下一层次中第 i 个因素与第 j 个因素相比的相对重要性, 取值为正整数 1~9(称为标度)及其倒数, b_{ij} 取值规则见表 2。

表 2 比较判断矩阵元素取值规则

Table 2 Value rules of elements in comparative judgment matrix

元素	标度	取值规则
b_{ij}	1	以上一层次某因素为准则, 本层次因素 i 与因素 j 相比, i 与 j 同样重要
	3	以上一层次某因素为准则, 本层次因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 稍微重要
	5	以上一层次某因素为准则, 本层次因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 明显重要
	7	以上一层次某因素为准则, 本层次因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 强烈重要
	9	以上一层次某因素为准则, 本层次因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 极端重要
	2,4,6,8	2 个相邻标度的中间值

3.3.3 相对排序权重模型

通过计算比较判断矩阵的特征向量 W 来获得同一层次因素对于上一层次某准则因素的相对排序权重, 并利用特征向量 W 对应的最大特征根 λ_{max} 进行比较判断矩阵的一致性检验^[8]。

由于比较判断矩阵元素取值是定性比较量化的结果, 因此计算比较判断矩阵的特征向量并不

需要很高的精度, 这里采用求根法计算特征向量的近似值。首先计算比较判断矩阵 A_B 每行元素乘积的 n 次方根:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

然后, 将 \bar{W}_i 归一化, 得到 W_i :

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

比较判断矩阵 A_B 的特征向量 W 即为

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (4)$$

W 的分量 w_i 即为相应因素单准则排序下的相对权重值。

特征向量 W 对应的最大特征根 λ_{max} 为

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (5)$$

比较判断矩阵的一致性指标 CI 为

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

当 $CI=0$ 时, 比较判断矩阵具有完全一致性, λ_{max} 比 n 大得越多, 矩阵的不一致程度就越严重。为了量化 λ_{max} 与 n 接近到什么程度时可认为矩阵的一致性可以接受, 将 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较, 记为一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

式中: RI 的常用取值见表 3。

当 $CR < 0.1$ 时, 认为比较判断矩阵的一致性可以接受, 否则应对矩阵作适当的修正。

表 3 平均随机一致性指标 RI 取值

Table 3 Value of average random consistency index RI

阶数	RI	阶数	RI
3	0.58	7	1.36
4	0.89	8	1.41
5	1.12	9	1.46
6	1.26	10	1.49

3.3.4 合成排序权重模型

获得每一层次各因素对于上一层次各准则因素的相对排序权重后, 就可以自上而下地计算各

层次因素对于总目标层的合成排序权重，直至得出方案层对目标层的合成排序权重^[10]。

设第2层次B的m个因素对于目标层的相对排序权重向量为 W_B ：

$$W_B = (w_{b1}, w_{b2}, \dots, w_{bm})^T \quad (8)$$

设B层的下一个层次C共有n个因素，它们对于B层的第i个因素 b_i 的相对排序权重向量为 W_{Ci} ：

$$W_{Ci} = (w_{Ci1}, w_{Ci2}, \dots, w_{Cin})^T \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

C层全部n个因素对于B层全部m个因素的相对排序权重构成 $n \times m$ 矩阵 P_C ：

$$P_C = \begin{bmatrix} w_{C11} & w_{C21} & \dots & w_{Cm1} \\ w_{C12} & w_{C22} & \dots & w_{Cm2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{C1n} & w_{C2n} & \dots & w_{Cmn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中：对于C层第j($j = 1, 2, \dots, n$)个因素与B层第i($i = 1, 2, \dots, m$)个因素无隶属关系的，对应 w_{Cij} 取值为0。

则第3层次C的n个因素对于目标层的合成排序权重向量 W_C 为

$$W_C = P_C W_B = (w_{C1}, w_{C2}, \dots, w_{Cn})^T \quad (11)$$

下面介绍层次总排序的一致性检验算法，层次总排序的一致性体现每一层次对目标层一致性程度(称为层次单排序一致性指标)的累积效应。

以第2层次B的第i($i = 1, 2, \dots, m$)个因素 b_i 为比较准则，由式(6)可得比较判断矩阵 Bi_C (隶属于 Bi 的C层因素对于比较准则 Bi 进行两两比较的判断矩阵)的一致性指标 CI_{Bi_C} (属于单准则排序一致性指标)，C层全部因素对于B层全部m个因素的一致性指标向量 CI_{B_C} 为

$$CI_{B_C} = (CI_{B1_C}, CI_{B2_C}, \dots, CI_{Bm_C})^T \quad (12)$$

则C层全部因素对于目标层的层次单排序一致性指标 CI_C 为

$$CI_C = CI_{B_C} W_B \quad (13)$$

同理，可得平均随机一致性指标 RI_C 为

$$RI_C = RI_{B_C} W_B \quad (14)$$

则截止第3层次C，C层次总排序的一致性比率 CR_C 为

$$CR_C = CR_B + \frac{CI_C}{RI_C} \quad (15)$$

式中： CR_B 可由式(7)计算得到。

当 $CR_C < 0.1$ 时，认为评估模型在C层水平上达到一致性要求。依此算法，直至得出评估模型在方案层E层水平上的一致性比率 CR_E ，当 $CR_E < 0.1$ 时，认为层次总排序的一致性可以接受。

4 防空反导作战效能评估实例

4.1 作战任务与作战方案

假设我方某型水面舰艇在某海域执行巡逻警戒任务，接上级敌情通报，敌攻击机编队可能对我舰实施多波次导弹打击，我舰的作战任务为综合运用本舰对空防御软硬武器，拦截敌两波次导弹齐射共计4枚导弹的攻击。根据作战任务，制定备选作战方案见表4。

表4 某型水面舰艇防空反导备选作战方案
Table 4 Alternative combat plans for air defense and antimissile of a certain type of surface ship

方案序号	使用武器类型	考虑复杂电磁环境	软硬武器综合运用	应急处置预案
1	电子对抗舰空导弹	全面考虑	部分合理	完善
2	舰空导弹舰炮	未考虑	合理	完善
3	电子对抗舰炮	全面考虑	合理	不完善
4	电子对抗舰空导弹舰炮	全面考虑	部分合理	完善
5	电子对抗舰空导弹舰炮	部分考虑	合理	不完善

为了简要说明问题，表4仅示例性、概括性地列举了几个主要的方案要素。效能评估的目标是从5个备选作战方案中选出最优的作战方案，用于指导防空反导作战行动。

4.2 构造比较判断矩阵

根据水面舰艇防空反导作战效能评估的递阶层次结构，以某型水面舰艇为研究对象，采用作战专家评判打分的方法构造各层次比较判断矩阵。在比较判断矩阵元素赋值时，应加大更易受复杂电磁环境影响的因素重要性比重。在实际操作过

程中, 专家依据各准则对最底层的作战方案进行比较时, 除考虑作战方案本身对应方面的因素外, 还可将具体舰艇所属人员的操作指挥水平考虑进去, 这样可以更加全面客观地反映该舰的实际作战水平^[11], 评估结果将更有针对性。

对于总目标 A , 子效能层 B 各因素成对比较构造比较判断矩阵 A_B 为

$$A_B = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 6 \\ 1/2 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

对于子效能层各因素 $B1, B2, B3$, 能力层 C 各因素的比较判断矩阵以表格形式进行描述, 见表5。

对于能力层各因素 $C1, C2, \dots, C10$, 约束层 D 各因素的比较判断矩阵见表6。

表6中, 对于能力层因素 $C2$, 约束层因素 $D3$ 和 $D4$ 进行比较时, 考虑“预警探测设备信号收发

性能”更易受复杂电磁环境(干扰信号)的影响, 因此将因素 $D3$ 的重要性设置为大于 $D4$ 。

对于约束层因素 $D1, D2, \dots, D24$ 中的部分因素, 方案层 E 各方案的比较判断矩阵见表7。

在靶场实际效能评估应用中, 以上各层次各因素比较判断矩阵表将基于历年复杂电磁环境下试验训练结果数据赋值, 可充分体现复杂电磁环境的影响, 且具有较高的置信度。

4.3 单准则下的排序

依据相对排序权重模型, 采用 Matlab 2020a 软件分别求各比较判断矩阵的特征向量 W 及其对应的最大特征根 λ_{\max} , 并计算一致性比率 CR , 结果见表8。

可见, 所有比较判断矩阵的 CR 值均小于0.1, 符合一致性要求。

表5 能力层 C 各因素比较判断矩阵表

Table 5 Comparative judgment matrix table of each factor in capability layer C

$B1$	$C1$	$C2$	$C3$	$B2$	$C4$	$C5$	$C6$	$C7$	$B3$	$C8$	$C9$	$C10$
$C1$	1	1/4	1/6	$C4$	1	1/2	1/3	3	$C8$	1	1	3
$C2$	4	1	1/2	$C5$	2	1	1/2	5	$C9$	1	1	3
$C3$	6	2	1	$C6$	3	2	1	7	$C10$	1/3	1/3	1
				$C7$	1/3	1/5	1/7	1				

表6 约束层 D 各因素比较判断矩阵表

Table 6 Comparative judgment matrix table of each factor in constraint layer D

$C1$	$D1$	$D2$	$C2$	$D3$	$D4$	$C3$	$D5$	$D6$	$D7$	$C4$	$D8$	$D9$
$D1$	1	1	$D3$	1	3	$D5$	1	1/3	1/5	$D8$	1	5
$D2$	1	1	$D4$	1/3	1	$D6$	3	1	1/2	$D9$	1/5	1
						$D7$	5	2	1			
$C5$	$D10$	$D11$	$C6$	$D12$	$D13$	$D14$	$D15$	$C7$	$D16$	$D17$		
$D10$	1	3	$D12$	1	3	5	7	$D16$	1	1/2		
$D11$	1/3	1	$D13$	1/3	1	2	3	$D17$	2	1		
			$D14$	1/5	1/2	1	2					
			$D15$	1/7	1/3	1/2	1					
$C8$	$D18$	$D19$	$C9$	$D20$	$D21$	$D22$	$C10$	$D23$	$D24$			
$D18$	1	3	$D20$	1	1/5	1/3	$D23$	1	3			
$D19$	1/3	1	$D21$	5	1	2	$D24$	1/3	1			
			$D22$	3	1/2	1						

表 7 方案层 E 各方案对于约束层 D 部分因素的比较判断矩阵表

Table 7 Comparative judgment matrix table of each plan in plan layer E to some factors in constraint layer D

D3	E1	E2	E3	E4	E5	D5	E1	E2	E3	E4	E5	D10	E1	E2	E3	E4	E5	D12	E1	E2	E3	E4	E5
E1	1	9	1	1	4	E1	1	9	1/3	2	4	E1	1	1	5	1	5	E1	1	3	1	1/2	1
E2	1/9	1	1/9	1/9	1/4	E2	1/9	1	1/9	1/5	1/2	E2	1	1	5	1	5	E2	1/3	1	1/2	1/6	1/4
E3	1	9	1	1	4	E3	3	9	1	6	4	E3	1/5	1/5	1	1/5	1	E3	1	2	1	1/2	1
E4	1	9	1	1	4	E4	1/2	5	1/6	1	2	E4	1	1	5	1	5	E4	2	6	2	1	2
E5	1/4	4	1/4	1/4	1	E5	1/4	2	1/4	1/2	1	E5	1/5	1/5	1	1/5	1	E5	1	4	1	1/2	1
D16	E1	E2	E3	E4	E5	D18	E1	E2	E3	E4	E5	D21	E1	E2	E3	E4	E5	D23	E1	E2	E3	E4	E5
E1	1	2	3	1/5	1/4	E1	1	9	1	1	4	E1	1	1/3	2	1/5	1/5	E1	1	7	1	1	4
E2	1/2	1	2	1/6	1/5	E2	1/9	1	1/9	1/9	1/4	E2	3	1	4	1	1	E2	1/7	1	1/7	1/7	1/4
E3	1/3	1/2	1	1/9	1/7	E3	1	9	1	1	4	E3	1/2	1/4	1	1/6	1/6	E3	1	7	1	1	4
E4	5	6	9	1	2	E4	1	9	1	1	4	E4	5	1	6	1	1	E4	1	7	1	1	4
E5	4	5	7	1/2	1	E5	1/4	4	1/4	1/4	1	E5	5	1	6	1	1	E5	1/4	4	1/4	1/4	1

表 8 单准则排序计算结果

Table 8 Calculation results of single criterion ranking

矩阵	特征向量 W	λ_{max}	CR
A_B	(0.222 2, 0.666 7, 0.111 1) ^T	3.000 0	0
B1_C	(0.089 0, 0.323 4, 0.587 6) ^T	3.009 2	0.007 9
B2_C	(0.161 9, 0.287 9, 0.490 1, 0.060 1) ^T	4.019 2	0.007 2
B3_C	(0.428 6, 0.428 6, 0.142 9) ^T	3.000 0	0
C1_D	(0.500 0, 0.500 0) ^T	2.000 0	0
C2_D	(0.750 0, 0.250 0) ^T	2.000 0	0
C3_D	(0.109 5, 0.309 0, 0.581 6) ^T	3.003 7	0.003 2
⋮	⋮	⋮	⋮
C10_D	(0.750 0, 0.250 0) ^T	2.000 0	0
D3_E	(0.295 9, 0.029 3, 0.295 9, 0.295 9, 0.083 0) ^T	5.040 0	0.008 9
D5_E	(0.153 8, 0.153 8, 0.076 9, 0.307 7, 0.307 7) ^T	5.000 0	0
⋮	⋮	⋮	⋮
D23_E	(0.292 7, 0.035 4, 0.292 7, 0.292 7, 0.086 3) ^T	5.083 1	0.018 5

4.4 层次总排序

依据合成排序权重模型，求得层次 C 所有 10 个因素对于目标层的合成排序权重向量 W_C 为

$$W_C = \begin{bmatrix} 0.0198 & 0.0719 & 0.1306 & 0.1079 & 0.1919 \\ 0.3267 & 0.0401 & 0.0476 & 0.0476 & 0.0159 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

C 层次总排序的一致性指标 $CI_C = 0.0053$ 、平均随机一致性指标 $RI_C = 0.7867$ 、一致性比率 $CR_C = 0.0067 < 0.1$ ，判定 C 层次总排序符合一致性要求。

层次 D 所有 24 个因素对于目标层的合成排序权重向量 W_D 为

$$W_D = \begin{bmatrix} 0.0099 & 0.0099 & 0.0539 & 0.0180 \\ 0.0143 & 0.0404 & 0.0759 & 0.0899 \\ 0.0180 & 0.1439 & 0.0480 & 0.1918 \\ 0.0713 & 0.0401 & 0.0235 & 0.0134 \\ 0.0267 & 0.0357 & 0.0119 & 0.0052 \\ 0.0277 & 0.0147 & 0.0119 & 0.0040 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

D 层次总排序的一致性指标 $CI_D = 0.0024$ ，平均随机一致性指标 $RI_D = 0.1390$ ，一致性比率 $CR_D = 0.0241 < 0.1$ ，判定 D 层次总排序符合一致性要求。

层次 E 所有5个待评估作战方案对于最高层作战目标的合成排序权重向量 W_E 为

$$W_E=(0.213\ 6, 0.147\ 5, 0.121\ 2, 0.335\ 1, 0.182\ 6)^T \quad (19)$$

E 层次总排序的一致性指标 $CI_E=0.006\ 0$, 平均随机一致性指标 $RI_E=1.120\ 0$, 一致性比率 $CR_E=0.029\ 5<0.1$, 判定 E 层次总排序符合一致性要求。

效能评估结果表明, 某型水面舰艇在完成“拦截两波次齐射共4枚导弹攻击”的防空反导作战任务时, 选择作战方案4的效能最高。

5 结论

本文紧贴靶场任务需求, 提出了考虑复杂电磁环境影响的水面舰艇防空反导作战效能指标体系, 充分利用靶场历年任务积累的试训实施经验和数据资源, 有效提高了层次分析法各因素相对重要性指标的合理性, 工程指导意义较强。本文基于层次分析法的水面舰艇防空反导作战效能评估具有定性和定量相结合、评估模型灵活简洁、计算过程严谨、结论清晰明确等优势, 且能够体现环境条件、对抗条件和人为因素的影响, 在评估要素的全面性和评估结论的合理性方面优于传统的静态评估方法, 但是对装备实际性能、复杂电磁环境影响、反应时间等的体现仍不够精确和充分, 在指标权重衡量方面主要依靠专家经验, 主观性较强, 且只能进行方案选优, 不能优化得出更好的新方案。相比层次分析法, 作战模拟法能实现对抗条件下的动态推演评估, 能较全面地考虑作战过程影响因素^[12], 可计算出对抗背景下对敌导弹的拦截范围与概率, 可同时拦截敌导弹数量等指标数据, 适合于武器系统或作战方案作战效能指标的预测评估, 但是作战模拟系统构建过程复杂, 且需要解决模拟精度和模型置信度问题。

后续, 将加强装备模型和作战行为模型建立, 开展基于舰载作战指挥系统实装软件和武器装备

模型的作战模拟评估方法研究, 并积极探索层次分析法与作战模拟法相结合的效能评估方法。通过综合对比分析不同评估方法下的评估结论, 得出对水面舰艇防空反导作战效能的更合理评价, 同时将开展效能评估方法研究成果的推广应用工作。

参考文献:

- [1] 刘宗福. 基地化训练中水面舰艇防空作战能力评估方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(6): 17-20, 85.
Liu Zongfu. Evaluation Method of Air-Defense Capability of Surface Ship in Base-Training[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(6): 17-20, 85.
- [2] 吴溪, 王铁虎, 高振辉. 武器装备作战试验评估指标体系构建及优化方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(3): 75-80, 85.
Wu Xi, Wang Tichu, Gao Zhenhui. Research on Establishment and Optimization Method of Evaluation Index System for Weapons Equipment Operational Test [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(3): 75-80, 85.
- [3] 孙旭涛, 曹泽宇, 孙向前. 基于内外场联合试验的作战试验构想[J]. 系统仿真技术, 2018, 14(3): 191-196.
Sun Xutao, Cao Zeyu, Sun Xiangqian. Operational Test Conception Based on Infield and Outfield Joint Test[J]. System Simulation Technology, 2018, 14(3): 191-196.
- [4] 秦绪凯. 新型舰艇作战系统复杂电磁试验环境构建技术[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 130-133.
Qin Xukai. Constructing Technology of Complex Electromagnetic Environment for New Type Campaign System Test[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(7): 130-133.
- [5] 刘大成, 蚩建峰, 刘宗福. 复杂电磁环境下反辐射武器系统毁伤效能评估方法[J]. 系统仿真技术, 2020, 16(2): 103-106, 122.
Liu Dacheng, Chi Jianfeng, Liu Zongfu. Damage Effectiveness Evaluation Method of Anti-Radiation Weapon System in Complex Electromagnetic Environment[J]. System Simulation Technology, 2020, 16(2): 103-106, 122.
- [6] 宋敬华, 林清享, 李亮. 指控装备作战效能评估指标体系构建[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(5): 47-50.
Song Jinghua, Lin Qingxiang, Li Liang. Research on the Construction of Evaluation Index System of Combat Effectiveness of Command and Control Equipment[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(5): 47-50.
- [7] 刘翔宇, 赵洪利, 杨海涛. 作战方案评估方法综述[J]. 兵

- 器装备工程学报, 2018, 39(8): 79-84.
- Liu Xiangyu, Zhao Hongli, Yang Haitao. Overview of Operational Plan Evaluation Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 79-84.
- [8] 郑锦, 王宇. 基于层次分析法的水面舰艇作战效能评估[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(6): 23-27.
- Zheng Jin, Wang Yu. Combat Effectiveness Evaluate of Surface Ship Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Automation & Instrumentation, 2017, 32(6): 23-27.
- [9] 王雅君. C⁴ISR系统效能评估指标体系及计算模型[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(3): 24-27, 35.
- Wang Yajun. Efficiency Evaluation Index System and Calculation Model of C⁴ISR System[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(3): 24-27, 35.
- [10] 陈璇. 武器装备作战效能评估和分析方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- Chen Xuan. Research on Evaluation Analysis Method of Weapon Equipment Operational Effectiveness[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [11] 杨娟, 朱延雷, 何榕. 面向装备体系作战效能评估的SEM建模与评估方法[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 33-36.
- Yang Juan, Zhu Yanlei, He Rong. SEM Model and Evaluation Method for Operational Effectiveness Assessment of Equipment System[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(2): 33-36.
- [12] 张珂彬, 董志明. 基于仿真即服务的作战试验仿真系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 72-74.
- Zhang Yubin, Dong Zhiming. Design of Operational Test Simulation System Based on SaaS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 72-74.