

# 基于效用函数的舰艇编队机动作战效能评估研究

谢芝亮, 刘富强

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001)

**摘要:** 舰艇机动能力作为编队作战能力的重要支撑之一, 以往文献很少涉及编队机动作战能力评估; 论文通过剖析舰艇编队机动作战概念, 解析机动作战任务剖面, 破解影响机动作战能力的关键因素, 构建机动能力多层评估指标体系, 采取解析聚合方式刻画编队机动作战能力; 针对指标参数差异较大, 采用效用函数转换不同指标的属性值, 比较指标实际值与期望值之间的差距, 建立效用评估模型, 准确评价舰艇编队机动作战能力, 通过实例分析验证函数模型可行性。

**关键词:** 舰艇编队; 机动作战; 效用函数; 指标体系; 效能评估

## Research on Mobile Battle Effectiveness Evaluation of Warship Formation Based on Utility Functions

XIE Zhiliang, LIU Fuqiang

(Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao 066001, China)

**Abstract:** Warship mobility is one of the important supports for formation combat ability, and previous literature rarely involves the assessment of formation mobile combat ability. Through analyzing the concept of warship formation mobile operations, this paper decomposes the profile of mobile combat missions, resolves the key factors of the mobile combat capability, constructs the multi-layer evaluation index of the mobile combat capability, and uses the analytic method to describe the ability of the formation. In view of the high difference of parameters, it adopts utility functions to transform the attributes of different indicator systems, makes a comparative difference between the actual value and the expected value, establishes the utility evaluation model, accurately evaluates the mobile combat ability of warship formation, and verifies the feasibility of the function model by an example.

**Keywords:** warship formation; mobile battle; utility functions; index system; effectiveness assessment

### 0 引言

机动能力是水面舰艇的基础能力, 代表了水面舰艇装备在不同海况下安全、快速抵达任务海域, 在一定周期内执行任务的能力, 作为舰艇总体性能中一项重要的性能, 舰艇平台作为保障舰艇作战能力的重要支撑, 最需要关注的是机动能力对作战任务的保障能力发挥程度<sup>[1]</sup>。

相关文献中多是从舰艇武器、指挥系统、信息保障等方面评估舰艇或舰艇编队作战效能, 很少涉及舰艇编队机动作战能力的评估。张恒等提出了一种基于多目标的水面舰船机动性评估方法, 通过构建综合评估指标体系, 结合层次分析法和多属性效用理论, 对舰船在复杂海洋环境下的机动性进行了评估, 并通过实例验证了评估方法的适用性和有效性, 为舰船设计和作战使用提供技术支撑<sup>[2]</sup>。杨健等在探讨舰艇编队在复杂现代海战环境下的防潜作战辅助决策问题时, 分析了决策的复杂性并针对反潜作战中影响因素提出了对舰艇机动能力的需求<sup>[3]</sup>。刘铭教授针对海上战略投送能力要求对建设战略投送力量和舰艇机动作战能力等需求等提出了意见建议<sup>[4]</sup>。

立足舰艇装备机动作战的军事需求, 根据任务剖面 and

能力分析可知, 机动能力的要求包括 3 个方面: 1) 部署到达能力, 即在规定时间内到达指定海域能力; 2) 战术机动能力, 即作战过程中对抗导弹、鱼雷、水雷等的规避, 或根据任务需要进行跟踪、追击、突进等活动的机动能力; 3) 海况适应能力, 即在不同等级海况下, 确保舰上人员及舰载电子装备、直升机平台等可正常使用的能力。

层次分析法是一种定量和定性相结合、层次化、系统化的分析方法, 常用来解决指标权重量化的问题<sup>[5]</sup>。量化处理区分定量指标和定性指标, 采取不同量化方法<sup>[6]</sup>。定量指标结果量化采取能力需求满足度函数公式计算获得, 定性指标结果的量化采用灰色理论获得<sup>[7]</sup>。舰艇编队机动作战效能评估, 涉及指标层次复杂, 是一种多层指标评估体系<sup>[8]</sup>。

在作战能力评估中通常由于装备性能各个指标的物理含义、量纲、数值范围差异较大, 因此需要对指标数据进行无量纲化处理<sup>[9]</sup>, 通过数学变换来消除指标量纲影响的方法, 一般有基于效用函数和基于隶属度函数的无量纲化方法<sup>[10]</sup>。

### 1 多层评估体系结构

#### 1.1 评估指标集

根据机动作战能力任务需求及关键因素确定评估指标

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-09-14。

基金项目: 军队科研项目(HJ2022C000105-28)。

作者简介: 谢芝亮(1991-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 谢芝亮, 刘富强. 基于效用函数的舰艇编队机动作战效能评估研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 328-333.

体系:

$$U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$$

其中:  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 是  $U$  中的指标。  $U_{ij} = \{U_{ij1}, U_{ij2}, U_{ij3}, \dots, U_{ijn}\}$  是  $U_i$  中第  $j$  个指标的指标集,  $U_{ijk}$  是该指标集中的指标。 指标体系机构如图 1, 形成多层指标体系结构<sup>[11]</sup>。

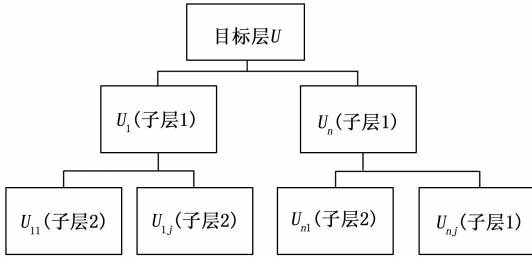


图 1 多层指标体系结构图

### 1.2 指标权重集

逐层指标进行两两相互比较, 对任意 2 个评估项, 其相对重要度由重要度差值绝对值 AHP9 标度法相邻标度距确定, 建立判断矩阵, 由判断矩阵确定各层指标所占的权重<sup>[12]</sup>。 设  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  为集合  $U$  中每一层指标相互判断的矩阵, 求出元素权重的集合  $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ , 满足  $\sum_{i=1}^m W_i = 1 (i = 1, \dots, m)$ 。

### 1.3 指标数据集

指标数据集为  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ , 其中  $V_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 表示舰艇编队机动作战能力基础指标项的数值, 由于机动能力各个指标的物理含义、量纲、数值范围差异较大, 因此需要对指标数据进行无量纲化处理<sup>[13]</sup>。 采取基于效用函数的指标无量纲化方法后的表征矩阵  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ,  $r_i \in [0, 1]$ 。

### 1.4 评估结果集

通过层次分解并进行加权求和, 根据支撑指标的权重  $W$ , 对采用加权求和的形式进行聚合, 可得到每一层的量化评估结果<sup>[14]</sup>。

$$U_i = \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad (1)$$

计算机动力中第二层指标的效能评估量化值及相对于机动能力这一级指标所占的权重, 获得能力量化评估结论<sup>[15]</sup>。

## 2 指标度量方法

采用基于效用函数的指标无量纲化方法消除量纲影响。 效用函数是将各指标实际属性值转换为目标效用测度的映射关系, 也称为属性转换函数, 不同类型和不同性质的指标可以选择不同的效用函数, 常用的效用函数有线性函数、指数函数、Sigmoid 函数等形式<sup>[16]</sup>。 效用函数分为效益型和成本型, 效益型为数值越大对结果评价越好, 成本型为数值越大对结果评价越差, 通常用膨胀系数来进行转换<sup>[17]</sup>。

### 2.1 指数型效用评估模型

适用于分阶段能力提升装备的相关性能、效能等特性的量化评估<sup>[18]</sup>。

首先建立三阶效用评估模型。 对于装备某一待评估特性  $x$ , 若其 3 阶段装备能力提升预期量化指标分别为  $x_l$  (初阶预期指标)、 $x_m$  (中阶预期指标)、 $x_h$  (高阶预期指标), 令各阶预期指标对应的评估分量分别为:  $v_1$  (初阶预期评估分量)、 $v_2$  (中阶预期评估分量)、 $v_3$  (高阶预期评估分量)<sup>[19]</sup>。

当  $x$  为效益型指标时, 有:  $x_l < x_m < x_h, 0 \leq v_1 < v_2 < v_3 < 1$ 。

当  $x$  为成本型指标时, 有:

$$x_z = \frac{\text{enhance\_index\_a}}{x} \quad (2)$$

式中,  $x_z$  为成本型指标转换后的数值,  $\text{enhance\_index\_a}$  为膨胀系数<sup>[20]</sup>。

令  $f_s(x)$  为对  $x$  的效益型三阶效用评估函数, 则应满足以下特性:

$$f_s(x) \text{ 为单调递增的, 且 } 0 \leq f_s(x) \leq 1 \quad (2)$$

$$f_s(x_l) = v_1 \quad (3)$$

$$f_s(x_m) = v_2 \quad (4)$$

$$f_s(x_h) = v_3 \quad (5)$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f_s(x) = 1 \quad (6)$$

对于满足上述条件的评估模型, 定义:

$f_s(x), 0 \leq x \leq x_l$  初阶效用评估区;  $f_s(x), x_l < x \leq x_m$  为中阶效用评估区;  $f_s(x), x_m < x < +\infty$  为高阶效用评估区。

对装备特性  $x$ , 指数效益型三阶效用评估模型实现如下所述<sup>[21]</sup>:

$$f_s(x) = \begin{cases} \ln\left[1 + \frac{x \times (e^{v_1} - 1)}{x_l}\right], & (0 \leq x \leq x_l) \\ (v_1 - 1) + e^{\frac{(x-x_l)/(x_m-x_l) \times \ln(1-v_1+v_2)}{v_2-v_1}}, & (x_l < x \leq x_m) \\ 1 - e^{-\frac{(x-x_m)/(x_h-x_m) \times \ln(1-v_2)}{v_3-v_2} / ((\ln(1-v_1) - \ln(1-v_2)) \times (\ln(1-v_1) - \ln(1-v_2)) / (x_l - x_m))}, & (x_m < x < +\infty) \end{cases} \quad (7)$$

对应三阶效用评估函数如图 2 所示。

### 2.2 Sigmoid 效用评估模型

Sigmoid 效用评估模型适用于对量化指标的非线性效能评估。 根据被评估对象的性质, Sigmoid 效用评估模型分为效益型、成本型两大类<sup>[22]</sup>。

#### 2.2.1 效益型 Sigmoid 评估模型

令被评估对象某一效益型指标  $x$ , 确定其效用区间为  $[x_l, x_r]$ , 则指标  $x$  对应的效益型 Sigmoid 评估函数  $f_s(x)$  为单调递增函数<sup>[23]</sup>, 且有:

$$\begin{cases} 0.1 \leq f_s(x) \leq 0.9, x \in [x_l, x_r] \\ f_s(x_l) = 0.1 \\ f_s(x_r) = 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

效益型 Sigmoid 评估通用模型为:

$$f_s(x) = \frac{1}{1 + e^{-(a(x-b))}} \quad (9)$$

式中, 参数  $a, b$  根据被评估对象的效用区间确定:

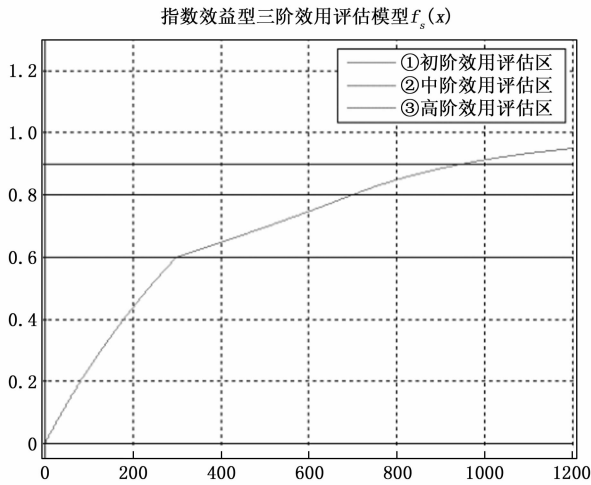


图 2 指数效益型三阶效用评估函数

$$\begin{cases} a = \frac{2\ln 9}{x_r - x_l} \\ b = \frac{1}{2}(x_l + x_r) \end{cases} \quad (10)$$

2.2.2 成本型 Sigmoid 评估模型

成本型 Sigmoid 评估模型对应于成本性指标的效能评估, 为单调递减函数<sup>[24]</sup>, 且有:

$$\begin{cases} 0.9 \geq f_s(x) \geq 0.1, x \in [x_l, x_r] \\ f_s(x_l) = 0.9 \\ f_s(x_r) = 0.1 \end{cases} \quad (11)$$

成本型 Sigmoid 评估通用模型为:

$$f_s(x) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(-a(x-b))}} \quad (12)$$

3 机动作战指标体系建立

根据舰艇编队机动作战任务剖面和能力需求分析可知,

表 1 舰艇编队机动作战指标含义表

指标名称	含义	量纲
1. 机动作战效能		—
1.1 快速性	是指舰艇以较小的功率消耗而获得较高航速的能力;	—
1.1.1 最大航速	指舰艇在执行任务时,可以达到的最大速度;	Kn
1.1.2 巡航航速	指舰艇在执行任务时,为保持编队、巡逻、巡航等所使用的航速;	Kn
1.2 适航性	指舰艇在风浪条件下安全航行并有效作业的能力;	—
1.2.1 正常使用武器海况	指能正常使用武器系统时的最大海况;	级
1.2.2 安全航行海况	指舰艇能正常航行时的最大海况;	级
1.3 续航力	指舰艇在一次装载燃油、滑油和机械用水达到满载排水量时的装载状态后以规定航速航行时,所能达到的最大续航距离的能力;	—
1.3.1 最大航程	指舰艇在一次装载燃油、滑油和机械用水达到满载排水量时的装载状态后以规定航速航行时,所能达到的最大航行距离;	Nmile
1.3.2 自给天数	舰艇依托自身携带食物、油水等能够持续作战的天数;	天
1.4 操纵性	指舰艇借助其操纵装置保持或改变航向、航速和位置的性能,是保证安全航行和机动所必须具备的一种航海性能;	—
1.4.1 回转直径	舰艇以满舵作回转运动,其航向回转待与原航向成 180°时,原航向与新航向线之间的垂直距离与舰艇水线长的比值。	m
1.5 补给力	舰艇编队依靠编队内部补给舰进行补给后持续作战的能力;	—
1.5.1 补给舰物资装载量	舰艇编队内补给舰能够装载补给物资的数量;	t
1.5.2 舰用燃料油补给速度	补给舰与舰艇补给的舰用燃料油的速度。	m <sup>3</sup> /s

机动能力的要求包括 3 个方面: 1) 部署到达能力, 即在规定时间内到指定海域能力; 2) 战术机动能力, 即作战过程中对抗导弹、鱼雷、水雷等的规避, 或根据任务需要进行跟踪、追击、突进等活动的机动能力; 3) 海况适应能力, 即在不同等级海况下, 确保舰上人员及舰载电子装备、直升机平台等可正常使用的能力。根据舰艇总体性能技术的专业领域, 上述三方面能力主要与水面舰艇编队的快速性、适航性、续航力和操纵性、补给力等对应<sup>[25]</sup>。其中:

快速性, 是指舰艇以较小的功率消耗而获得较高航速的能力, 主要与舰艇的阻力和推进器的效率有关。考虑水面舰艇任务使用要求, 一般与机动部署能力相关的主要指标是持续最大航速和巡航速度, 分别代表快速到达任务海域的能力和长距离巡逻或部署的覆盖能力。

适航性, 是指舰艇在风浪条件下安全航行并有效作业的能力, 耐波性是适航性的重要组成部分。适航性通常用海况等级表示, 包括正常使用武器的海况和安全航行的海况, 其中武器使用海况需要测量的指标是舰艇使用武器平台运动响应(纵横摇、加速度)。

续航力是指舰艇在一次装载燃油、滑油和机械用水达到满载排水量时的装载状态后以规定航速航行时, 所能达到的最大续航距离的能力。续航力体现了长期远距离执行任务的机动保障能力。

操纵性, 是指舰艇借助其操纵装置保持或改变航向、航速和位置的性能, 是保证安全航行和机动所必须具备的一种航海性能, 主要包括航向稳定性、回转性和转首性。可选取上述要求中最具代表性的指标, 以大角度转向机动时间(回转直径)为考核指标。

补给力, 是指舰艇编队依靠编队内部补给舰进行补给后持续作战的能力, 主要包括补给舰物资装载量以及补给速度。指标结构及含义如表 1 及图 3。

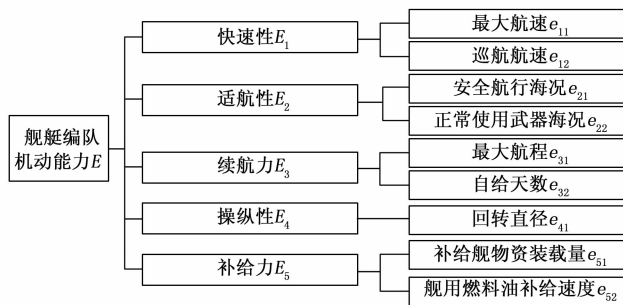


图 3 舰艇编队机动作战能力指标解析

### 4 实例分析

以外军航母编队为例, 对其机动作战能力表征特性进行分析, 通过对各项数据汇聚分析, 获取航母编队机动能力表征特性如表 2 所述。

表 2 航母编队机动能力表征特性

序号	表征指标	航空母舰	驱逐舰 1 (巡洋舰)	驱逐舰 2	护卫舰	补给舰
1	最大航速	$n_1$ kn	$n_2$ kn	$n_3$ kn	$n_4$ kn	$n_5$ kn
2	巡航航速	$x_1$ kn	$x_2$ kn	$x_3$ kn	$x_4$ kn	$x_5$ kn
3	安全航行海况	$a_1$ 级	$a_2$ 级	$a_3$ 级	$a_4$ 级	$a_5$ 级
4	正常使用武器海况	$z_1$ 级	$z_2$ 级	$z_3$ 级	$z_4$ 级	——
5	最大航程	$h_1$ nmile	$h_2$ nmile	$h_3$ nmile	$h_4$ nmile	$h_5$ nmile
6	自给天数	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
7	回转直径	$d_1$ m	$d_2$ m	$d_3$ m	$d_4$ m	$d_5$ m
8	补给舰物资装载量	——	——	——	——	bt
9	舰用燃料油补给速度	——	——	——	——	$\text{vm}^3/\text{h}$

#### 4.1 航母编队机动能力预期指标设定

对最大航速、巡航航速、安全航行海况、正常使用武器海况、最大航程、自给天数、补给舰物资装载量、舰用燃料油补给速度等表征指标选用指数型效益效用评估模型为基础, 构建表征指标能力评估效用函数, 确定各表征特征  $x_i$  (初阶预期指标)、 $x_m$  (中阶预期指标)、 $x_h$  (高阶预期指标)。

对于回转直径表征指标属于成本型评估要素, 将其进行效益型转化并引入膨胀系数进行修正。

$$x = \frac{\text{enhance\_index\_a}}{p_{\text{回转直径}}} \quad (3)$$

式中,  $p_{\text{回转直径}}$  为航母编队各舰回转直径,  $\text{enhance\_index\_a}$  为膨胀系数, 且令  $\text{enhance\_index\_a} = 10\ 000$ 。

设定各表征指标预期评估分量设定为:

$$v_1 = 0.4, v_2 = 0.6, v_3 = 0.9$$

表 3 航母编队机动能力预期指标设定

序号	表征指标	预期指标	航空母舰	驱逐舰	综合补给舰
1	最大航速	初阶预期指标	$x_{1ha}$ kn	$x_{1qn}$ kn	$x_{1zn}$ kn
		中阶预期指标	$x_{mhn}$ kn	$x_{mqn}$ kn	$x_{mzn}$ kn
		高阶预期指标	$x_{hhn}$ kn	$x_{hqn}$ kn	$x_{hzn}$ kn
2	巡航航速	初阶预期指标	$x_{1hs}$ kn	$x_{1qs}$ kn	$x_{1zs}$ kn
		中阶预期指标	$x_{mhs}$ kn	$x_{mqx}$ kn	$x_{mzs}$ kn
		高阶预期指标	$x_{hhs}$ kn	$x_{hqx}$ kn	$x_{hzs}$ kn
3	安全航行海况	初阶预期指标	$x_{1hs}$ 级	$x_{1qs}$ 级	$x_{1zs}$ 级
		中阶预期指标	$x_{mhs}$ 级	$x_{mqx}$ 级	$x_{mzs}$ 级
		高阶预期指标	$x_{hhs}$ 级	$x_{hqx}$ 级	$x_{hzs}$ 级
4	正常使用武器海况	初阶预期指标	$x_{1hs}$ 级	$x_{1qs}$ 级	——
		中阶预期指标	$x_{mhs}$ 级	$x_{mqz}$ 级	——
		高阶预期指标	$x_{hhs}$ 级	$x_{hqz}$ 级	——
5	最大航程	初阶预期指标	$x_{1hh}$ nmile	$x_{1qh}$ nmile	$x_{1zh}$ nmile
		中阶预期指标	$x_{mhh}$ nmile	$x_{mqh}$ nmile	$x_{mzh}$ nmile
		高阶预期指标	$x_{hhh}$ nmile	$x_{qh}$ nmile	$x_{hzh}$ nmile
6	自给天数	初阶预期指标	$x_{1ht}$ 昼夜	$x_{1qt}$ 昼夜	$x_{1zt}$ 昼夜
		中阶预期指标	$x_{mht}$ 昼夜	$x_{mqt}$ 昼夜	$x_{mzt}$ 昼夜
		高阶预期指标	$x_{hht}$ 昼夜	$x_{hqt}$ 昼夜	$x_{hzt}$ 昼夜
7	回转直径	初阶预期指标	$x_{1hd}$ m	$x_{1qd}$ m	$x_{1zd}$ m
		中阶预期指标	$x_{mhd}$ m	$x_{mqd}$ m	$x_{mzd}$ m
		高阶预期指标	$x_{hhd}$ m	$x_{hqd}$ m	$x_{hzd}$ m
8	补给舰物资装载量	初阶预期指标	——	——	$x_{1zb}$ t
		中阶预期指标	——	——	$x_{mzb}$ t
		高阶预期指标	——	——	$x_{hzb}$ t
9	舰用燃料油补给速度	初阶预期指标	——	——	$x_{1zv}$ $\text{m}^3/\text{h}$
		中阶预期指标	——	——	$x_{mzv}$ $\text{m}^3/\text{h}$
		高阶预期指标	——	——	$x_{hzv}$ $\text{m}^3/\text{h}$

构建指数型效用评估函数:

$$f_i(x) = \begin{cases} \ln\left[1 + \frac{x \times (e^{v_i} - 1)}{x_i}\right], & (0 \leq x \leq x_i) \\ (v_i - 1) + e^{\frac{(x-x_i)}{(x_m-x_i)} \times \ln(1-v_i+v_i)}, & (x_i < x \leq x_m) \\ 1 - e^{-\frac{(x-x_m+(x_m-x_i) \times \ln(1-v_i)) / (\ln(1-v_i) - \ln(1-v_2)) \times (\ln(1-v_2) - \ln(1-v_1)) / (x_i-x_m)}{x_m-x_i}}, & (x_m < x < +\infty) \end{cases} \quad (14)$$

#### 4.2 航母编队机动能力无量纲化表征矩阵

以预期评估指标为基准, 依次对航母编队机动能力表征指标各项能力进行无量纲化转换分析, 如表 4 所示。

#### 4.3 构建航母编队机动能力二级指标判断矩阵

综合作战需求并辅以作战分析, 构建航母编队各舰快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力两两判断矩阵。

对任意 2 个评估项  $a, b$ , 其相对重要度由  $a, b$  重要度差值绝对值至 AHP9 标度法相邻标度距确定, 如果重要度介于二者之间则取 2、4、6、8。

按照上述步骤, 逐一分析航母编队机动能力特性间相对重要度, 通过分析比较得到航母编队机动能力两两判断矩阵:

表 4 航母编队机动能力无量纲化表征矩阵

序号	表征指标	航空母舰	驱逐舰 1 (巡洋舰)	驱逐舰 2	护卫舰	型综合补给舰
1	最大航速	0.6	0.730 8	0.637 7	0.529 2	0.6
2	巡航航速	0.6	0.6	0.446 6	0.446 6	0.6
3	安全航行海况	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
4	正常使用武器海况	0.6	0.6	0.6	0.6	—
5	最大航程	0.583 7	0.837 5	0.6	0.6	0.9
6	自给天数	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6
7	回转直径	0.692 6	0.604	0.704 5	0.698 3	0.539 3
8	补给舰物资装载量	—	—	—	—	0.565 4
9	舰用燃油补给速度	—	—	—	—	0.648 5

表 5 重要度比对因子

重要度取值	绝对重要	十分重要	比较重要	稍微重要	同样重要
$i_{jk}^*$	9	7	5	3	1

表 6 航母编队机动能力两两判断矩阵

序号	表征指标	快速性		适航性		续航力		操纵性	补给力		
		最大航速	巡航航速	安全航行海况	正常使用武器海况	最大航程	自给天数	回转直径	补给舰物资装载量	舰用燃油补给速度	
1	快速性	最大航速	1	3	—	—	—	—	—	—	
2		巡航航速	1/3	1	—	—	—	—	—	—	
3	适航性	安全航行海况	—	—	1	3	—	—	—	—	
4		正常使用武器海况	—	—	1/3	1	—	—	—	—	
5	续航力	最大航程	—	—	—	—	1	1/3	—	—	
6		自给天数	—	—	—	—	3	1	—	—	
7	操纵性	回转直径	—	—	—	—	—	—	1	—	
8	补给力	补给舰物资装载量	—	—	—	—	—	—	—	1	3
9		舰用燃油补给速度	—	—	—	—	—	—	—	1/3	1

由上表两两判断矩阵获取航母编队各舰三级指标权重，并经归一化处理得权重向量：

$$\omega_1 = (0.75 \quad 0.25 \quad 0.75 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.75 \quad 1 \quad 0.75 \quad 0.25)$$

基于单指标无量纲化结果，计算出航母编队各舰二级指标快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力能力矩阵。

表 7 航母编队机动能力各舰快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力能力值

序号	二级指标	航空母舰	驱逐舰 1 (巡洋舰)	驱逐舰 2	护卫舰	综合补给舰
1	快速性	0.6	0.698 1	0.589 9	0.508 6	0.6
2	适航性	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
3	续航力	0.595 9	0.659 4	0.45	0.45	0.675
4	操纵性	0.692 6	0.604	0.704 5	0.698 3	0.539 3
5	补给力	—	—	—	—	0.586 2

#### 4.4 构建航母编队各舰机动能力判断矩阵

基于编队内各舰对于编队机动能力的重要程度通过对比分析，构建航母编队航母本舰、驱逐舰/巡洋舰、护卫舰、综合补给舰两两判断矩阵。

$$A_{A_1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 2 \\ 1/3 & 1 & 4/3 & 2/3 \\ 1/4 & 3/4 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 3/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

由上式判断矩阵获取舰艇编队舰艇本舰、驱逐舰/巡洋舰、护卫舰、综合补给舰 4 项能力特性权重排序，并经归一化处理得排序权重向量  $\omega_2 = (0.48 \quad 0.16 \quad 0.12 \quad 0.24)^T$ 。

基于单指标无量纲化比对结果，得到航母编队机动能力二级指标能力值。

表 8 航母编队机动能力快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力能力值

能力指标	舰艇编队	航母编队
快速性		0.596 072
适航性		0.6
续航力		0.590 784
操纵性		0.650 356
补给力		0.586 2

#### 4.5 航母编队机动作战能力聚合

航母编队机动作战能力评估基于编队二级指标快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力对于编队机动作战能力的相互重要程度通过对比分析，构建航母编队机动作战能

力二级指标快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力的两两判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 3 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 3 & 1 & 3 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

由上式判断矩阵获取航母编队机动作战能力二级指标快速性、适航性、续航力、操纵性、补给力 5 项能力特性权重排序, 并经归一化处理得排序权重向量  $\omega_3 = (0.27 \ 0.09 \ 0.27 \ 0.09 \ 0.27)^T$ 。

计算得到航母编队机动作战能力为: 0.591 257 16, 数据越大舰艇编队机动作战能力越强。

## 5 结束语

通过分析舰艇编队机动作战能力需求, 建立了机动作战评估指标体系, 采用效用函数的方法对指标数据进行无量纲化统一处理, 保证了评估结果的准确性, 摒弃了评价指标物理属性不同的干扰; 对于多层指标体系, 采取逐层破解分析, 分类聚合评估的方法, 定量的对舰艇编队机动作战能力进行了评估, 从编队机动角度出发评价舰艇编队在执行远海任务中的机动作战效能。下一步将采取面向任务和仿真的方法, 重点评估舰艇编队在机动作战任务过程中物资燃料装备等消耗情况下的作战效能。

### 参考文献:

- [1] 刘 畅, 孟 梅, 张 恒, 等. 面向任务的驱逐舰作战效能评估方法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34 (12): 1479-1489.
- [2] 张 恒, 宋久振, 安中昌. 基于多目标的水面舰船机动性评估方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (6): 4.
- [3] 杨 健, 姜 伟, 王步云. 基于战例的舰艇编队防潜作战辅助决策研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1106-1109.
- [4] 刘 铭. 我军海上战略投送需求与力量建设 [J]. 军事交通学院学报, 2019, 21 (4): 1-4.
- [5] GREEN J M. Establishing system measures of effectiveness [J]. Establishing System Measures of Effectiveness, 2001.
- [6] RAINS D A. Fleet mix mission effectiveness analysis [J]. Naval Engineers Journal, 1999.
- [7] 赵敏来, 罗 翔, 马玉林. 基于 FAHP 的航母编队作战效能评估 [J]. 舰船电子工程, 2007 (4): 37-38.
- [8] SAATY T L. The analytic hierarchy process [Z]. 2001.
- [9] 吴 柱, 王俐莉, 侯向阳. 联合机动编队作战体系网络化描述 [J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34 (4): 12-17.
- [10] 纪彦星. 联合机动编队合同战术模型建模研究 [J]. 计算机与数字工程, 2016, 44 (2): 214-217.
- [11] HWANG C L, YOON K P. Multiple attribute decision making. Methods and applications. A state-of-the-art survey [Z]. 1981.
- [12] 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.
- [13] 邓海飞, 刘晨涛, 李 胜. 基于模糊层次分析法的无人机系统效能评估方法 [J]. 航空兵器, 2005 (4): 40-42.
- [14] 龚虹瑞, 陈 露, 高 越, 等. 基于效能评估的卫星资源调度方法 [J/OL]. 计算机测量与控制, 1-8 [2024-08-09]. <http://106.52.93.171:8085/kcms/detail/11.4762.TP.20240614.1400.033.html>.
- [15] 王新语, 崔浩林. 基于卡尔曼滤波和 AHP 的航空管制航空器应急指挥效能评估 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 227-230.
- [16] 宋艳波, 许 腾, 孙钧正. 基于任务的联合机动编队反舰作战效能模型 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (6): 48-52.
- [17] 宋 强, 赵建忠, 许宜贺, 等. 航母编队远海作战弹药补给装备发展分析 [J]. 中国修船, 2022, 35 (2): 70-73.
- [18] 王运栋, 周海燕. 海上联合机动编队信息对抗能力分析与评估 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40 (3): 60-63.
- [19] 胡 磊, 李 昊, 闫世强, 等. 武器装备作战效能评估方法研究与探讨 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40; 242 (5): 65-68.
- [20] 曹志敏, 周玉芳. 智能化作战效能评估指标体系构建方法 [J/OL]. 指挥控制与仿真, 1-7 [2024-08-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1759.TJ.20240221.1659.002.html>.
- [21] YANG H D, ZHOU M, SUN H W. 舰艇平台机动航线与导弹攻击航路一体化设计方法 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (s2): 7-12.
- [22] 王 鹏, 郝 婷. 水面舰艇曲折机动算法研究 [C] //2013 年 (第三届) 海军指挥信息系统技术交流会, 2013.
- [23] BROWN A J, SALCEDO, J. Multiple-objective optimization in naval ship design [J]. Naval Engineers Journal, 2003, 115 (4): 49-61.
- [24] DEMKO D. Tools for multi-objective and multi-disciplinary optimization in naval ship design [J]. Phytochemical Analysis, 2005, 11 (1): 21-28.
- [25] 潘国民, 邓 晋. 水面舰艇机动仿真模型的仿真度研究 [C] //中国自动化学会系统仿真专业委员会, 中国系统仿真学会仿真技术应用专业委员会, 中国系统仿真学会离散系统仿真专业委员会. Proceedings of 14th Chinese Conference on System Simulation Technology & Application (CCSSTA' 2012), 海军兵种指挥学院, 2012.