

引用格式: 尹锡帆, 黎鑫, 张韧, 等. UUV 攻势布雷海洋环境风险评估及方案优选 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(增刊 1): 31–39.

YIN X F, LI X, Zhang R, et al. UUV offensive mine-laying marine environmental risk assessment and scheme selection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(Supp 1): 31–39.

UUV 攻势布雷海洋环境风险评估及方案优选



尹锡帆¹, 黎鑫², 张韧², 战勇强³, 赵祥鸿¹

1 国家海洋技术中心漳州基地筹建办公室, 福建 厦门 361000
2 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 210000
3 中国人民解放军 92409 部队, 福建 福州 350000

摘 要: [目的] 构建海洋环境对无人水下航行器(UUV)攻势布雷作战性能影响的定量评估模型, 并形成量化评估结果。[方法] 首先, 研究 UUV 攻势布雷海洋环境风险评估属性, 提出基于模糊层次分析法和熵权法复合权重的理想解排序和集对分析思想的优选模型; 然后, 对 UUV 使用现状和海洋环境影响进行分析, 参考传统和无人攻势布雷作战效能的主要评估指标, 构建 UUV 攻势布雷海洋环境风险性指标; 最后, 根据海洋环境对 UUV 系统影响研究的现有成果, 构建风险性指标量化模型。通过仿真试验对想定的 UUV 攻势布雷时机次进行海洋环境风险方案优选, 验证本文方法和模型的可行性。[结果] UUV 攻势布雷按行动阶段进行海洋环境风险性指标的拆解较为有效, 构建的海洋环境风险性指标量化模型较为科学。[结论] 复合权重动态偏好系数兼顾决策权威性和数据客观性, 集对分析思想系统地考虑了统一与对立因素对方案选择的影响。

关键词: 无人水下航行器攻势布雷; 海洋环境风险评估; 复合权重; 理想解排序; 集对分析; 方案优选

中图分类号: U674.76 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01974

UUV offensive mine-laying marine environmental risk assessment and scheme selection

YIN Xifan¹, LI Xin², Zhang Ren², ZHAN Yongqiang³, ZHAO Xianghong¹

1 National Marine Environmental Support Base Preparatory Office, Xiamen 361000, China
2 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 210000, China
3 The 92409 Unit of PLA, Fuzhou 350000, China

Abstract: [Objectives] This study constructs a quantitative assessment model of the impact of the marine environment on the offensive mine-laying operational performance of unmanned underwater vehicles (UUV), and draws quantitative evaluation conclusions. [Methods] First, the attributes of offensive mine-laying marine environment assessment are researched and the optimal model of the TOPSIS and set pair analysis (SPA) method are proposed on the basis of the combined weight of the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) and entropy weight method (EWM). The current situation of UUV deployment and its impact on the marine environment are then analyzed, and the risk indexes of the marine environment on the offensive mine-laying performance of UUVs are constructed with reference to the main evaluation indexes of the operational performance of traditional and unmanned offensive mine-laying. Finally, according to the existing research results on the impact of the marine environment on UUV systems, a quantitative model of the risk indicators is completed. [Results] The feasibility of the method and model presented in this paper is verified through a simulation experiment that optimizes the marine environmental risk scheme of the determined UUV offensive mine-laying. [conclusions] It is more effective to disassemble the marine environmental risk indications in the offensive mine-laying stage, and more scientific to construct a quantitative model of marine environmental risk indications. The dynamic preference coefficient of the combined weight takes into account both the authority of decision-making and objectivity of data, and the influence of the same and opposite factors on scheme selection is considered. Finally, the feasibility of the algorithm is verified by the simulation results.

Key words: unmanned underwater vehicle (UUV) offensive mine-laying; marine environmental risk assessment; combined weight; TOPSIS; set pair analysis (SPA); scheme selection

收稿日期: 2020-05-26 修回日期: 2020-12-14 网络首发时间: 2022-01-11 09:30
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41605051); 国防科技大学科研计划重点资助项目(ZK17-02-010)
作者简介: 尹锡帆, 男, 1991 年生, 硕士, 工程师
黎鑫, 男, 1985 年生, 博士, 副教授
*通信作者: 黎鑫

0 引言

无人水下航行器又叫无人潜航器^[1],其灵活性和隐蔽性特点使它更适合在敏感和争议海区执行水下军事任务,已成为未来海战重要的应用发展方向。上世纪60年代遥控水下航行器(ROV)的研制,标志着UUV的出现。UUV既可用于军用领域,也可用于海洋观测、资源勘探和深海研究等民用领域。对于军用领域,美军是前沿引领者。2005年,美海军公布了《无人水下航行器总体发展规划》,提出了未来水下无人作战平台的开发级别,并规定了其在未来海军部队网、海上盾牌、海上基地和海上打击4大职能中的任务^[2]。2007~2013年,美国国防部先后发布了4版《无人系统(一体化路线图)》,将陆、海、空各类无人系统集成统一规划发展^[3-6]。2016年,美海军向国会提交了《2025年AUV需求》,内容包括:对新兴的水下战使命任务进行定义;对AUV(UUV)重新分级分类,并阐述各类AUV(UUV)使命任务;不同AUV(UUV)布放/回收过程和作业平台的优缺点;2025年AUV(UUV)需求量及其对潜艇兵力结构的影响^[7]。

我国在UUV领域起步较晚,近年来随着海洋战略的提出,UUV的研究应用也进入快速发展期。张宏瀚等^[8]采用遗传算法对多UUV队形优化模型进行参数优化,提高了特定海域内多UUV执行海底声信标搜索任务时的搜索性能。鞠巍等^[9]提出了UUV等新型无人平台攻势布雷作战指标评估体系,构建了基于层次分析法和集对分析法的评估模型,并通过对想定的攻势布雷方案进行优选验证了方案的可行性。在UUV攻势布雷的实际应用中,作战行动受海洋环境的影响明显。衡辉等^[10]在分析UUV布雷作战样式、流程和技术特点的基础上,从水深、潮汐、水流、风浪、海底地形地质以及温度、盐度、透明度等因素多方面探讨了海洋环境对UUV布雷作战的影响,并提出了相关行动方法。何青海等^[11]从海流、海况、内波、声场特征和密度跃层论述海洋环境对UUV的航行安全和所装载的武器、探测设备作战效能的影响,建立并分析了海流对UUV航速和航向影响的数学模型,认为海洋环境是确定UUV航线和深度等具体方案时需重点考虑的因素。目前关于海洋环境对UUV攻势布雷作战效能影响的研究较少,更多关注的是对海洋环境影响的定性分析和海洋环境单要素对UUV布雷装备性能的影响,并未形成量化的评估结果。针

对这些问题,本文将根据UUV技术特点和使用现状,将UUV攻势布雷按行动阶段进行风险性指标拆解,构建UUV攻势布雷海洋环境风险性指标量化模型,提出基于模糊层次分析法、熵权法复合权重的理想解排序和集对分析思想的优选模型,实现海洋环境影响下UUV攻势布雷的作战时次优选。

1 方案优选分析方法

UUV开展攻势布雷如何选择合适的海洋环境使行动达到效益最大化,属于多目标多属性的方案评估和排序问题。

1.1 基于模糊层次分析法和熵权法的复合权重

对于多目标综合评价问题,权重系数至关重要,结合主观赋权法与客观分析法的综合优化评估方法更有利于揭示客观规律,完成多目标指标权重的确定^[12]。主观赋权法采用模糊层次分析法^[13],客观分析法采用熵权法^[14]。

1.1.1 模糊层次分析法

模糊层次分析法较传统层次分析法增加了人判断的模糊性,其模糊互判矩阵为 A , $A_{n \times n}$ 为有 n 个指标的模糊互判矩阵, $a_{ii} = 0.5 (i = 1, 2, \dots, n)$, $a_{ij} + a_{ji} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。矩阵权重为 w :

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, w 为模糊互判矩阵 A 的权重。

模糊互判矩阵一致性可以用相容性指标 I 检验^[15]。设 $W_{n \times n}$ 为 A 的特征矩阵, $W_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。 $I(A \times W)$ 为 A 的相容性指标, T 为决策者态度,取0.1。当 $I(A \times W) \leq T$ 时通过一致性检验。其中, $I(A \times W) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ij} - 1|$ 。

设专家给出 m 个模糊互判矩阵 $A^k (k = 1, 2, \dots, m)$,当专家给出的模糊互判矩阵相容性指标 $I(A^k \times A^k)$ 通过一致性检验后,综合权重 $\bar{w}$ 可以用 m 个权重 $w^k (k = 1, 2, \dots, m)$ 的均值代表。其中,

$$\bar{w}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m w_i^k (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

1.1.2 熵权法

熵权法利用决策矩阵的结构信息分析得出各目标的权重系数,其权重系数 ω 公式如下:

设 $B_{l \times n}$ 为 l 个由 n 个指标构成的备选方案决策

矩阵, 决策矩阵评价指标值为 $b_{ij}(i=1,2,\cdots,l; j=1,2,\cdots,n)$ 。一般数值越大越优的指标为收益型指标, 数值越小越优的指标为成本型指标, 为比较评价指标, 采用百分比变化法对决策矩阵 B 进行无量纲化处理, 处理后的决策矩阵评价指标值为 $b'_{ij}(i=1,2,\cdots,l; j=1,2,\cdots,n)$, 收益型指标和成本型指标无量纲化计算公式为

$$b'_{ij} = \begin{cases} \frac{b_{ij}}{\max_i b_{ij}} & \text{收益型指标} \\ \frac{\min_i b_{ij}}{b_{ij}} & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (3)$$

E 为决策矩阵 B 的熵:

$$E_j = -\frac{1}{\ln l} \sum_{i=1}^l e_{ij} \ln e_{ij} \quad (4)$$

式中, $e_{ij} = \frac{b'_{ij}}{\sum_{i=1}^l b'_{ij}}$, 如 $e_{ij} = 0$, 则定义 $\lim_{e_{ij} \rightarrow 0} e_{ij} \ln e_{ij} = 0$ 。

ω 为决策矩阵 B 权重系数:

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (5)$$

1.1.3 复合权重 ρ_i 计算方法

结合模糊层次分析法权重系数 w 和熵权法权重系数 ω , 并考虑主客观指标值的离散度, 动态权重偏好系数 ε_i , 以距离指标 ρ_i 为复合权重^[12]:

$$\rho_i = \sqrt{(\varepsilon_i w_i)^2 + (1 - \varepsilon_i)^2 \omega_i^2} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (6)$$

用最小二乘法模型求得 ε_i :

$$\min(\rho_i) = \sqrt{(\varepsilon_i w_i)^2 + (1 - \varepsilon_i)^2 \omega_i^2}, \quad 0 \leq \varepsilon_i \leq 1$$
$$\varepsilon_i = \frac{\omega_i}{w_i + \omega_i} \quad (7)$$

1.2 基于复合权重理想解排序和集对分析思想的优选模型

理想解排序以备选方案对正理想解和负理想解的趋近程度来进行排列, 备选方案越趋近正理想解越优^[16]。但很多决策中备选方案远离负理想解并不能同时接近正理想解, 需要同时考虑这两方面的因素。集对分析研究存在联系的两个集合属性的对立(远离负理想方案)、同一(趋近正理想解)和相异程度^[17]。作战系统常出现联系紧密的成对集合, 本文结合理想解排序和集对分析理论, 构建基于复合权重理想解排序和集对分析思想的优选模型。

假设集对 H 有 P 个对立点, S 个同一点, 余下 F 个为相异点。 u 为集对 H 的联系度:

$$u = \alpha - \beta I - \gamma J$$

式中: $\alpha + \beta + \gamma = 1$, $\alpha = \frac{S}{P+S+F}$ 为同一度, $\gamma = \frac{P}{P+S+F}$ 为对立度, $\beta = \frac{F}{P+S+F}$ 为相异度; I 和 J 是联系数, 仅作为标记, 表示 β 是相异度, γ 是对立度。设 $shi(H)$ 为在指定问题背景下的集对势, $shi(H) = \frac{\alpha}{\gamma}$, $\gamma \neq 0$ 。

在上节决策矩阵 B 无量纲化处理的基础上, 易知正理想解 B^+ 为决策矩阵 B 中行向量最大值构成的方案, 负理想解 B^- 为最小值构成的方案:

$$\begin{cases} b_j^+ = \max_i (b'_{ij}) \\ b_j^- = \min_i (b'_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

设 d_i^+ 为评价方案到正理想解的距离, d_i^- 为评价方案到负理想解的距离, D 为正理想解到负理想解的距离:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \rho_j (b'_{ij} - b_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \rho_j (b'_{ij} - b_j^-)^2} \\ D = \sqrt{\sum_{j=1}^n \rho_j (b_j^+ - b_j^-)^2} \end{cases} \quad (9)$$

评价方案 B_i 在相对接近正理想解 B^+ 下的联系度为

$$u_i^+ = \frac{d_i^-}{D} + \left(\frac{D - d_i^-}{D} \right) J \quad (10)$$

集对 $\{B_i, B^+\}$ 属于一种对立同一集合, B_i 越接近正理想解 B^+ , 对立度越小, 同一度越大, 当 $B_i = B^+$ 时, $u_i^+ = 1 + 0J$, 集对完全确定。评价方案 B_i 在相对接近负理想解 B^- 下的联系度为

$$u_i^- = \frac{d_i^+}{D} + \left(\frac{D - d_i^+}{D} \right) J \quad (11)$$

综合考虑评价方案 B_i 同正理想解 B^+ 和负理想解 B^- 关系, 假设评价方案 B_i 在区间 (B^-, B^+) 中接近 B^+ , 远离 B^- 的联系度为 $u_i = \alpha_i + \beta_i I + \gamma_i J$ 。采用理想方案法求得同一度 α_i , 对立度 γ_i , 相异度 β_i :

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{d_i^-}{D} \cdot \frac{D - d_i^+}{D} \\ \gamma_i = \frac{d_i^+}{D} \cdot \frac{D - d_i^-}{D} \\ \beta_i = \frac{D^2 + 2d_i^- \cdot d_i^+ - (d_i^+ + d_i^-) D}{D^2} \end{cases} \quad (12)$$

预选方案 R_i 基于正理想解 B^+ 的联系度 u_i 和集对势 $shi(H_i)$ 为:

$$\begin{cases} u_i = \frac{d_i^-}{D} \cdot \frac{D-d_i^+}{D} + \frac{D^2+2d_i^- \cdot d_i^+ - (d_i^+ + d_i^-)D}{D^2} I + \\ \frac{d_i^+}{D} \cdot \frac{D-d_i^-}{D} J \\ shi(H_i) = \frac{d_i^-(D-d_i^+)}{d_i^+(D-d_i^-)} \end{cases} \quad (13)$$

2 UUV 攻势布雷海洋环境影响指标体系构建

2.1 UUV 攻势布雷海洋环境风险性评价指标体系

UUV 攻势布雷中 UUV 布雷系统岸基布放存在战时港口易受敌军干扰、布放条件要求较高、隐蔽性弱等问题; UUV 布雷系统舰船布放具有机动性强、隐蔽效果好等优点, 以舰船布放为例分析海洋环境评估指标。常规武器装备下的布雷作战方案评估属性指标有障碍毁伤概率、目标封锁时间、雷障有效性能、布雷可用兵力、水雷需求数量、完成任务时间、人员训练水平等^[18-19]。对于无人布雷平台, 鞠魏等^[9]根据其具备的远距离布放、自主程度高、无人员伤亡的特点, 选择平台数量、完成时间、自主程度、航路安全、布雷误差、敌船密度和我方战损等 7 个属性为布雷作战方案的评估指标。

海洋环境对无人水下航行器的研究表明, 影响 UUV 作战效能的海洋环境要素有: 风、浪、流、雨、海雾、水色、内波、跃层、潮汐、水深、地形、台风等^[10-11, 20]。参考传统和无人攻势布雷作战效能的主要评估指标, 结合海洋环境影响其作战效能的主要要素, 建立 UUV 攻势布雷海洋环境风险性评价指标体系, 如图 1 所示。UUV 攻势布雷海洋环境风险性为目标层 B_1 , 布放回收作业

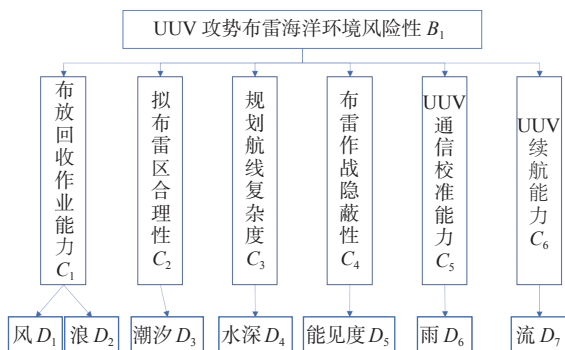


图 1 UUV 攻势布雷海洋环境风险性评价指标体系

Fig. 1 UUV offensive mine-laying marine environmental risk assessment index system

能力、拟布雷区合理性、规划航线复杂度、布雷作战隐蔽性、UUV 通信校准能力、UUV 续航能力为一级指标层, 标记为 $C_1 \sim C_6$, 风、浪、流、雨、潮汐、水深、能见度为二级指标层, 标记为 $D_1 \sim D_7$ 。

2.2 指标定义和量化

2.2.1 布放回收作业能力

评估海洋环境引起的船舶横摇、纵摇和海况对人员开展 UUV 布放/回收作业能力的影响, 不同型号船舶对海洋环境的适应性不同。横摇、纵摇和海况可以由横摇角 ϕ 、纵摇角 θ 和海况等级 H_k 表示, 参考李积德^[21]的船舶耐波性量化模型, 进行如下分析:

1) 横摇角 ϕ 分析。船舶横摇角 ϕ 服从瑞利分布, $S_\phi(\omega)$ 为船在不规则波中的横摇谱:

$$S_\phi(\omega) = \left[\frac{\omega^2 \sin\psi \cdot K_\phi}{g} \sqrt{(1-L_\phi^2)^2 + 4\mu_\phi^2 L_\phi^2} \right]^2 S_\zeta(\omega) \quad (14)$$

式中: ψ 为船舶航行方向与波浪传播方向的夹角; K_ϕ 为波面角修正系数, $K_\phi < 1$, 表示船宽和吃水有限性对横摇波浪主扰动力矩的影响, 引用李积德提出的近似公式 $K_\phi = k_1 k_2$, 其中, $k_1 = e^{-\pi C_b/\lambda}$ 是有限吃水修正系数, C_b 为船吃水深度, λ 为海浪波长, $k_2 = 1 - C_w \left(\frac{C_b}{\lambda} \right)^2$ 是有限船宽修正系数, C_w 为船水线面积系数, C_b 为船宽; L_ϕ 为调谐因数, $L_\phi = \frac{w}{n_\phi}$, n_ϕ 为横摇近似固有频率; u_ϕ 为横摇无因次衰减系数, $u_\phi = \frac{v_\phi}{n_\phi}$, v_ϕ 为横摇衰减系数。

2) 纵摇角 θ 分析。在船舶质量 m 、航速 v 情况下, $S_\theta(\omega_e)$ 为船在不规则波中遭遇频率 ω_e 的波能谱:

$$S_\theta(\omega) = \left[K_\theta / \sqrt{(1-L_\theta^2)^2 + 4\mu_\theta^2 L_\theta^2} \right]^2 S_\zeta(\omega_e) \quad (15)$$

式中: K_θ 为动水压力及船长影响修正系数; L_θ 为调谐因数, $L_\theta = \frac{w}{n_\theta}$, n_θ 为纵摇近似固有频率; μ_θ 为纵摇无因次阻尼系数, $\mu_\theta = \frac{v_\theta}{n_\theta}$, $2v_\theta$ 为纵摇阻尼系数; $S_\zeta(\omega_e)$ 为遭遇频率 ω_e 的波能谱, 实测发现, 船在海上多向不规则波中纵摇运动比单向规则波迎浪纵摇小, 修正后的 $S_\zeta(\omega_e)$ 公式为

$$S_\zeta(\omega_e) = 0.869 S_\zeta(\omega) / \left(1 + \frac{2mv}{g} \right) \quad (16)$$

3) 海况等级 H_k 分析。国际上海况和风、浪之间对应关系还未统一, 大致分为 2 类标准: 第 1 类

是建立海况和波浪尺度(主要指有义波高 $\tilde{h}_{1/3}$)的关系;第 2 类建立海况和波浪尺度、风速的关系。中国国家海洋局发布的是第 1 类标准,我们选用中国国家海洋局发布的海况标准更适合,即利用海况等级 H_k 和有效波高 $\tilde{h}_{1/3}$ 的关系进行分析。

海洋环境因素影响下的横摇角、纵摇角和海况等级对作业能力属于强制约束,当超过安全指标时不能作业。根据指标合成原理,该 3 个指标很少互相影响,我们利用乘法原则进行指标合成,据此,定义基于风速 U (当知道有义波高或波平均频率时,可以用本节给出的公式换算成风速)的布放回收作业能力数学公式 $Z_n(U)$:

$$Z_n(U)=\begin{cases} Z(U)=\left(\frac{\phi(U)}{\phi'}\right)^a\cdot\left(\frac{\theta(U)}{\theta'}\right)^b\cdot\left(\frac{H_k(U)}{H'_k}\right)^c \\ \phi(U)<\phi'\cap\theta(U)<\theta'\cap H_k(U)<H'_k \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

(17)

式中: $Z(U)$ 为横摇角、纵摇角和海况等级未超过安全作业临界值时的指标合成公式; $a+b+c=1$, $a\sim c$ 为不同船舶对于横摇角、纵摇角和海况等级适用的权重系数; ϕ' , θ' , H'_k 为横摇角、纵摇角和海况等级安全作业临界值。横摇、纵摇和海况越大,越不利于布雷作战,布放回收作业能力属于成本型指标。

2.2.2 拟布雷区合理性

评估海洋环境潮汐水深对拟布雷区水雷有效触发实现作战效能的影响,高潮水深比水雷战技值水深越小,则拟布雷区越具有合理性。这是由于水雷的有效触发水深不能大于战技值,有效触发水深小于该值才能发挥作战效能,不同季节下目标港口附近的水深变化严重影响水雷的有效触发,需要利用不同季节的潮汐变化规律,合理选择布雷区域。据此,定义基于不同季节下高潮水深 G_h 的拟布雷区合理性公式 $L_q(t)$:

$$L_q(t)=\begin{cases} e^{k[G_h(t)-G'_h]}, & G_h(t)\leq G'_h \\ 1, & G_h(t)>G'_h \end{cases}$$

(18)

式中: G'_h 为水雷的有效触发水深战技值; k 为不同水雷水深适用的加权系数。高潮水深越大,越不利于布雷作战,拟布雷区合理性属于成本型指标。

2.2.3 规划航线复杂度

评估海洋环境海水深度对 UUV 布雷规划航线的影响,海水深度越深,规划航线越简单,越有利于 UUV 安全航行。海水深度同潮汐高潮水深一样属于强制性约束因素,最大值小于 UUV 安全航行的最小水深时,则拟定航线不适合布雷行

动,大于 UUV 安全航行的最小水深时,则拟定航线适合布雷行动。据此我们定义基于海水深度 S_h 的规划航线复杂度公式 $H_x(S_h)$:

$$H_x(S_h)=\begin{cases} 0, & S_H(S_h)\geq mS_{LH} \\ \frac{m}{m-1}\cdot\frac{S_{LH}}{S_H(S_h)}-\frac{1}{m-1}, & S_H(S_h)<mS_{LH} \end{cases}$$

(19)

式中: S_H 为作战决策基于现有海水深度 S_h 明确的无人水下航行器航路; S_{LH} 为无海洋环境影响下的理想航路,即布雷点到拟布雷区直线距离; m 为理想航路最大增加距, $m=\frac{R_z}{S_{LH}}$, R_z 为 UUV 最大作战半径。海水深度越大,越有利于布雷作战,规划航线复杂度属于收益型指标。

2.2.4 布雷作战隐蔽性

评估海洋环境能见度对 UUV 攻势布雷安全隐蔽行动的影响,能见度越小越有利于布雷作战的安全隐蔽。能见度是反映大气透明程度的物理量,通常以人的正常视力能将一定大小的黑色目标从天空背景中识别出来的最大距离表示,能见度一般按距离划分为 6 个等级,结合常用的能见度影响定性总结经验^[22],将布雷作战隐蔽性影响定性描述同定量分级进行模糊匹配,具体对照情况如表 1 所示。

表 1 布雷作战隐蔽性影响定性描述与能见度定量分级模糊匹配表

Table 1 Fuzzy matching table of qualitative description and quantitative classification of visibility of mine-laying operations

定性描述	定量分级	可视距离/km
基本无影响	1	≤1
影响较弱	2	2
明显影响	3	4
较大影响	4	6
严重影响	5	8
极度影响	6	≥10

能见度越大,越不利于布雷作战,布雷作战隐蔽性属于成本型指标。

2.2.5 UUV 通信校准能力

评估海洋环境降雨对 UUV 进行卫星定位通信信号强度的影响,降雨越大,卫星定位通信信号强度越差。北斗定位通信的上传频段使用 L 频段(约 1.6 GHz),下传频段使用 S 频段(约 2.5 GHz),这 2 种频段信号强度受降雨影响显著,主要有 3 个方面:一是引起信号衰减;二是增加系统噪声温度;三是去极化效应。其中,降雨引起的信号衰减对信号传输的影响最大。UUV 所在

地倾斜传输路径上降雨衰减的长时间统计值的计算方法^[23]如下。

首先明确主航行器的工作频率 f (GHz)、纬度 $\varphi(^{\circ})$ 、工作仰角 $\theta(^{\circ})$ 和平均海拔高度 h_s (km), 电磁波传播的倾斜路径长度 L_s (km)的计算公式为

$$L_s = \begin{cases} \frac{h_R - h_s}{\sin\theta}, & \theta \geq 5^{\circ} \\ \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_\theta}\right)^{1/2} + \sin\theta}, & \theta < 5^{\circ} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $h_R = 3 + 0.028\varphi$ 为UUV在所在地的实际降雨高度; R_θ 为有效地球半径, 一般取8 500 km。

年0.01%时间超过的降雨强度为 $Q_{0.01}$ (mm/h), 如未能收集到所在地降雨强度, 可以取95 mm/h。当 $Q_{0.01} \leq 100$, 年0.01%时间的信号减少因子 $q_{0.01}$ 的公式为

$$q_{0.01} = 1/(1 + L_G/35e^{-0.015Q_{0.01}}) \quad (21)$$

式中, $L_G = L_s \cos\theta$ 为倾斜路径的水平投影, 当 $Q_{0.01} > 100$ 时, 按 $Q_{0.01} = 100$ 计算。 γ_Q 为特定衰减系数, dB/km:

$$\gamma_Q = k(Q_{0.01})^\alpha \quad (22)$$

式中: k, α 为频率相关系数; τ 为线极化电场矢量与水平方向之间的极化倾角, 计算方法见ITU-R建议791附录1^[24], 当使用圆极化时, $\tau = 45^{\circ}$ 。

卫星信号平均1年的0.01%时间超过的降雨衰减 $A_{0.01}$ 的公式为

$$A_{0.01} = \gamma_Q \cdot L_s \cdot q_{0.01} \quad (23)$$

卫星信号通过雨衰损耗, 常用0.001% $\leq p\%$ $\leq 1\%$ 时间超过的降雨衰减 A_p 为参考^[25], 其公式为

$$A_p = 0.12p^{-(0.546+0.043\lg p)} A_{0.01} \quad (24)$$

对于信号衰减超定值导致通信中断的情况, 定义基于降雨衰减 A_p 的UUV通信校准能力公式 $T_z(A_p)$ 为

$$T_z(A_p) = \begin{cases} \frac{T_p - T_w}{T_p - A_p}, & A_p < (T_p - T_w) \\ 1, & A_p \geq (T_p - T_w) \end{cases} \quad (25)$$

式中: T_p 为UUV在所在地天气晴朗时的通信信号强度; T_w 为UUV战技指标中通信无效时通信强度。降雨越大, 越不利于布雷作战, UUV通信校准能力属于成本型指标。

2.2.6 UUV续航能力

评估海洋环境海流对UUV随时间变化的航速 V 、航向 φ (同纬度东经方向夹角)和位置 Z 的影

响。设UUV布放点为航路起点 O , 此时船舶停止运动, 驱动速度为 u , 预设航向为 φ_u , 海峡流速为 V_L , 流向为 φ_L , 由于航行时间内海流存在随时间变化不显著、随径向空间明显变化的特征, 海流 V_L 应是随径向空间变化的函数。根据矢量合成原理, 推算UUV随时间 t 变化的航速 V 、航向 φ 和位置 Z 公式为

$$V(t) = \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t)} \quad (26)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{V_y(t)}{V_x(t)} \quad (27)$$

$$Z_x(t) = \sqrt{Z_x^2(t) + Z_y^2(t)} \quad (28)$$

$$Z_x(t) = \int_0^t V_x(t) dt, \quad Z_y(t) = \int_0^t V_y(t) dt \quad (29)$$

$$V_x(t) = u(t) \cos(\varphi_u(t)) + V_L(x) \cos(\varphi_L(x)) \quad (30)$$

$$V_y(t) = u(t) \sin(\varphi_u(t)) + V_L(x) \sin(\varphi_L(x)) \quad (31)$$

式中: V_x 为UUV的径向航速; V_y 为UUV的纬向航速; Z_x 为UUV距起点 O 的径向距离; Z_y 为UUV距起点 O 的纬向距离。

当作战决策明确UUV校准时航程为 J_H , 校准时 T_H 一定, 航速 V 是海流 V_L 和驱动速度 u 的函数。据此, 定义基于海流 V_L 的UUV续航能力指数 $X_h(V_L, T_H)$ 的公式为

$$X_h(V_L, T_H) = \begin{cases} 0, & \int_0^{T_H} u(t) dt < J_H \\ \frac{\int_0^{T_H} u(t) dt - J_H}{(p-1)J_H}, & J_H \leq \int_0^{T_H} u(t) dt \leq pJ_H \\ 1, & \int_0^{T_H} u(t) dt > pJ_H \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\int_0^{T_H} u(t) dt$ 为UUV以驱动速度 u 航行 T_H 的距离, 其中, 当 $\int_0^{T_H} u(t) dt < J_H$ 时, 海流有助于UUV完成任务, 设 $X_h(V_L, T_H) = 0$; 由于UUV存在安全航行临界海流, 安全航行时海流流速不能超过一定值, p 为海流阻抗系数, 为 $\int_0^{T_H} u(t) dt$ 与 J_H 在逆向临界海流时的比值。 $X_h(V_L, T_H)$ 越大, 越不利于布雷作战, UUV续航能力为成本型指标。

3 仿真评估与分析

想定某岛屿封锁战中, 要求红军在任务期间对该岛重要港口进行隐蔽性UUV攻势布雷。红军指挥所综合分析敌我军情, 从规定时间内遴选出5个可布雷时间 $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$, 要求气象海洋专家对该5个时间进行UUV攻势布雷作战

效能风险性评估,并遴选首要布雷时间。想定的 5 个可布雷时间海洋环境风险性评价指标值,按收益型指标和成本型指标无量纲化公式处理后的数值如表 2 所示。据此,海洋环境风险性指标中,布放回收作业能力、拟布雷区合理性、布雷作战隐蔽性、UUV 通信校准能力和 UUV 续航能力属于成本型指标,无量纲化数值越大,海洋环境对作战效能负面影响越小;规划航线复杂度属于收益型指标,无量纲化数值越大,海洋环境对作战效能负面影响越大。

3.1 复合权重动态偏好系数计算

首先,由模糊层次分析法计算主观权重 w ,

$$B = \begin{bmatrix} (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.7,0.6) & (0.9,0.9,0.9) & (0.6,0.6,0.7) & (0.7,0.7,0.8) & (0.8,0.8,0.7) \\ (0.4,0.3,0.4) & (0.5,0.5,0.5) & (0.7,0.7,0.7) & (0.5,0.4,0.6) & (0.6,0.5,0.6) & (0.6,0.6,0.7) \\ (0.1,0.1,0.1) & (0.3,0.3,0.3) & (0.5,0.5,0.5) & (0.2,0.2,0.3) & (0.3,0.3,0.4) & (0.4,0.4,0.4) \\ (0.3,0.4,0.4) & (0.4,0.6,0.5) & (0.7,0.8,0.8) & (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.6,0.5) & (0.6,0.5,0.6) \\ (0.2,0.3,0.3) & (0.4,0.5,0.4) & (0.6,0.7,0.7) & (0.5,0.4,0.4) & (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.5,0.5) \\ (0.3,0.2,0.2) & (0.3,0.4,0.4) & (0.6,0.6,0.6) & (0.4,0.5,0.4) & (0.4,0.5,0.5) & (0.5,0.5,0.5) \end{bmatrix}$$

首先,算得模糊综合权重 $w=(0.2055,0.1756,0.1289,0.1756,0.1611,0.1533)$ 。判断矩阵和矩阵权重间的相容性指标 $I=(0.0926,0.0936,0.0916,0.0278,0.0667,0.0500)$,都小于 0.1,通过一致性检验。

然后,由熵权法求客观权重 ω (计算步骤略),算得熵权法权重 $\omega=(0.1576,0.1779,0.1744,0.1496,0.1690,0.1715)$ 。由 w 和 ω 指标值可以看出,主客观分析权重值不一,主观分析法更看中人的行动不确定性,重视海洋环境对指战员布放回收作业能力、拟布雷区合理性和布雷作战隐蔽性的影响;客观分析法对评价对象自身信息进行归纳分析,认为布雷海区海洋环境中最大潮高、海水深度和海流流速是制约攻势布雷作战效能发挥的主要因素。这显示决策者主观意愿同评价对象客观信息之间存在差异,反映出不同视角下决策分析结果不同。

最后,由复合权重计算得动态偏好系数 $\varepsilon=(0.4340,0.5033,0.5751,0.4601,0.5120,0.5279)$,归一化复合权重 $\rho=(0.1799,0.1782,0.1495,0.1629,0.1664,0.1632)$ 。由复合权重 ρ 指标值可知,综合考虑主客观分析结果,更便于揭示实际规律,完成 UUV 攻势布雷海洋环境风险性指标权重的确定。

3.2 布雷时间 T 的优选

将上节复合权重动态偏好系数 ε 代入上文提出的基于复合权重理想解排序法和集对分析法的优选模型中,得出相对理想方案的优选排序(计算过程略),如图 2 所示。

表 2 无量纲化后的 UUV 攻势布雷海洋环境风险性指标值
Table 2 UUV offensive mine-laying marine environmental risk dimensionless index

布雷时间 T	布放回收作业能力 C_1	拟布雷区合理性 C_2	规划航线复杂度 C_3	布雷作战隐蔽性 C_4	UUV通信校准能力 C_5	UUV续航能力 C_6
T_1	2/9	2/3	3/4	1	1/3	3/7
T_2	1/2	1	1/2	1/5	2/3	1
T_3	1/3	2/3	1	1/2	2/5	3/5
T_4	1	2/3	1/2	1/4	1	1
T_5	2/5	1/2	1/2	1/3	3/10	1/2

3 名专家对指标层 6 个指标的模糊评判矩阵 B 如下:

$$B = \begin{bmatrix} (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.7,0.6) & (0.9,0.9,0.9) & (0.6,0.6,0.7) & (0.7,0.7,0.8) & (0.8,0.8,0.7) \\ (0.4,0.3,0.4) & (0.5,0.5,0.5) & (0.7,0.7,0.7) & (0.5,0.4,0.6) & (0.6,0.5,0.6) & (0.6,0.6,0.7) \\ (0.1,0.1,0.1) & (0.3,0.3,0.3) & (0.5,0.5,0.5) & (0.2,0.2,0.3) & (0.3,0.3,0.4) & (0.4,0.4,0.4) \\ (0.3,0.4,0.4) & (0.4,0.6,0.5) & (0.7,0.8,0.8) & (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.6,0.5) & (0.6,0.5,0.6) \\ (0.2,0.3,0.3) & (0.4,0.5,0.4) & (0.6,0.7,0.7) & (0.5,0.4,0.4) & (0.5,0.5,0.5) & (0.6,0.5,0.5) \\ (0.3,0.2,0.2) & (0.3,0.4,0.4) & (0.6,0.6,0.6) & (0.4,0.5,0.4) & (0.4,0.5,0.5) & (0.5,0.5,0.5) \end{bmatrix}$$

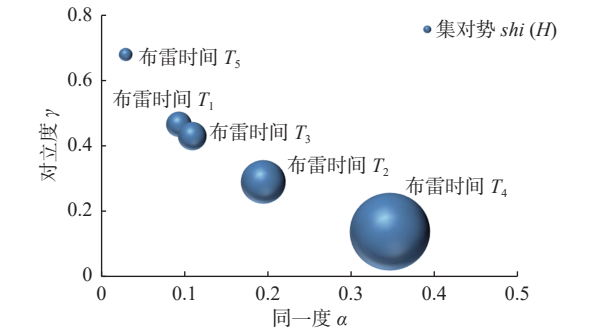


图 2 相对理想方案的优选排序 (图中蓝色球面积大小表示集对势 $shi(H)$ 大小)
Fig. 2 Optimal arrangement of relative ideal schemes (The size of blue sphere area in the figure represents the size of set pair potential)

如图 2 所示,如果仅考虑同一度 α ,方案排序结果为: $T_4>T_2>T_3>T_1>T_5$ 。如果仅考虑对立度 γ ,方案排序结果为: $T_4>T_2>T_3>T_1>T_5$ 。同时考虑同一度 α 和对立度 γ ,根据集对势 $shi(H)$,方案排序结果为: $T_4>T_2>T_3>T_1>T_5$ 。综合考虑同一度 α 和对立度 γ ,选用 T_4 时次作为 UUV 攻势布雷作战首选时间, T_2 时次作为 UUV 攻势布雷作战备选时间。

3.3 UUV 攻势布雷优选时次海洋环境场分析和决策建议

选择布雷作战首选时间 T_4 时次进行 UUV 攻势布雷海洋环境场分析,从表 2 可知,无量纲化后海洋环境风险指标值分别为:布放回收作业能力为 1,拟布雷区合理性为 2/3,规划航线复杂度为 1/2,布雷作战隐蔽性为 1/4,UUV 通信校准能力为 1,UUV 续航能力为 1。具体表现为:首选时间

T_4 时次布放回收作业能力、UUV 通信校准能力、UUV 续航能力受海洋环境影响最小,最有利于布雷行动;拟布雷区合理性受海洋环境影响较小,对水雷作战效能影响较小;布雷作战隐蔽性和规划航路复杂度受海洋环境影响相对较大,但其复合权重占比较小,对攻势布雷行动总体影响也较小。备选时间 T_2 时次拟布雷区合理性、UUV 续航能力受海洋环境影响最小,最有利于布雷行动;UUV 通信校准能力受海洋环境影响较小,对布雷作战效能影响较小;布放回收作业能力、规划航路复杂度受海洋环境影响较大,其中,布放回收作业能力复合权重占比较大,对攻势布雷行动总体影响也较大;布雷作战隐蔽性受海洋环境影响最大,但其复合权重占比较小,对攻势布雷行动总体影响较小。此外, T_3 、 T_1 和 T_5 时次布放回收作业能力、UUV 通信校准能力等风险指标受海洋环境影响显著,对攻势布雷行动总体影响较大。

决策建议:一是 UUV 攻势布雷作战首选时间预定为 T_4 时次,备选时间预定为 T_2 时次;二是选择 T_4 时次开展 UUV 攻势布雷,作战隐蔽性较低,需要做好惑敌准备,可以通过采取伪装措施、设置假目标和民船混合行动等增强作战隐蔽性,规划航路复杂度较高,可以增加定位校准次数,减少 UUV 航行偏差;三是选择 T_2 时次开展 UUV 攻势布雷,需要在按 T_4 时次准备的基础上,加强布放回收作业时船舶横摇、纵摇角较大时和高海况下的安全训练;四是选择其余时次开展 UUV 攻势布雷,应在加强布放回收安全作业能力训练的基础上,加强其余风险指标能力的保障或训练。

4 结 论

针对 UUV 攻势布雷海洋环境影响的多目标多属性方案评估和排序问题,对想定的 5 个拟布雷时次进行海洋环境风险性相对理想方案的优选排序,得到以下结论:

1) 采用基于模糊层次分析法和熵权法确定的复合权重构建结合理想解排序法和集对分析法的优选模型,复合权重的使用兼顾了决策权威性和数据客观性,使用集对分析思想同一度、对立度和集对势综合分析排序,系统考虑了同一与对立因素对方案选择的影响,仿真结果表明了该算法的可行性。

2) 将 UUV 攻势布雷按布放、航行、校准、布雷和回收 5 个行动阶段进行作战风险性准则指标拆解,构建了 UUV 攻势布雷海洋环境风险性指标较为科学的量化模型,将海洋环境的风、浪、海

况、海流、降雨、潮汐、能见度、海水深度等要素与 UUV 攻势布雷影响主要准则指标一一对应。

3) 攻势布雷海洋环境风险性指标复合权重 $\rho=(0.1799, 0.1782, 0.1495, 0.1629, 0.1664, 0.1632)$,布放回收作业能力和拟布雷区合理性权重最大,说明人的不确定性最易影响 UUV 攻势布雷作战效能的实现。拟布雷时次方案优选排序结果为: $T_4>T_2>T_3>T_1>T_5$,通过采取一定措施增强作战隐蔽性后,首选时间 T_4 时次将更好地实现 UUV 攻势布雷。

海洋环境对 UUV 攻势布雷的影响复杂多变,布雷作战主要准则指标常受多种海洋环境要素的影响,由于研究资料有限,本文仅对影响 UUV 攻势布雷的主要准则指标,选择重要的海洋环境要素进行分析,量化模型有待进一步论证,以提高评估的有效性。

参考文献:

- [1] 钱东,赵江,杨芸.军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J].水下无人系统学报,2017,25(1):1-30.
QIAN D, ZHAO J, YANG Y. Development direction and trend of military UUV (I): a review of U. S. military unmanned system development plan[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(1): 1-30 (in Chinese).
- [2] 胡必文,程彬彬.浅析水下无人作战平台现状及未来作战使命[J].水雷战与舰船防护,2013,21(4):67-71.
HU B W, CHENG B B. Status quo and future combat mission of underwater unmanned combat platform[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2013, 21(4): 67-71 (in Chinese).
- [3] United States Department of Defense. Unmanned systems roadmap 2007-2032[R]. U. S. : United States Department of Defense, 2007.
- [4] United States Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap FY2009-2034[R]. U. S. : United States Department of Defense, 2009.
- [5] United States Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap FY2011-2036[R]. U. S. : United States Department of Defense, 2011.
- [6] United States Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap FY2013-2038[R]. U. S. : United States Department of Defense, 2013.
- [7] United States Navy. Autonomous undersea vehicle requirement for 2025[R]. U. S. : United States Department of Defense, 2016.
- [8] 张宏瀚,郭焱阳,许亚杰,等.多 UUV 搜索海底声信标任务规划方法[J].中国舰船研究,2020,15(1):13-20.
ZHANG H H, GUO Y Y, XU Y J, et al. Mission planning method of multi-UUV search submarine acoustic beacon[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020,

15(1): 13–20 (in Chinese).

[9] 鞠巍, 周银龙, 严宗睿. 基于 SPA+AHP 的空潜无人攻
势布雷方案优选 [J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 5–7, 16.
JU W, ZHOU Y L, YAN Z R. Preferable selection of
offensive mine-laying plans for unmanned aerial/under-
water vehicles based on SPA and AHP[J]. Ordnance In-
dustry Automation, 2017, 36(9): 5–7, 16 (in Chinese).

[10] 衡辉, 王新华, 杨迎化, 等. 海洋环境对 UUV 布雷作战
影响分析 [J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25(1): 38–40,
86.
HENG H, WANG X H, YANG Y H, et al. Influence of
ocean environment on UUV minelaying operation[J].
Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2017, 25(1): 38–40,
86 (in Chinese).

[11] 何青海, 丁文强, 吴文龙. 海洋环境对 UUV 作战使用影
响研究 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(7): 99–102.
HE Q H, DING W Q, WU W L. Research on opera-
tional influence of ocean environment on UUV[J]. Ship
Science and Technology, 2016, 38(7): 99–102 (in
Chinese).

[12] 熊云峰, 陈章兰, 袁红莉. 基于复合权重的船舶性能灰
色综合评价法 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34(8):
119–122.
XIONG Y F, CHEN Z L, YUAN H L. Grey compre-
hensive evaluation of ship performance based on syn-
thesized weight[J]. Ship Science and Technology, 2012,
34(8): 119–122 (in Chinese).

[13] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 基于模糊层次分析法的决策
方法及其应用 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(11):
38–41.
JI D C, SONG B F, YU T X. The method of decision-
making based on FAHP and its application[J]. Fire Con-
trol & Command Control, 2007, 32(11): 38–41 (in
Chinese).

[14] SEN Y, TAI W J. Research on risk evaluation of large-
scale shopping mall based on improved AHP derived
from EWM and TOPSIS[C]//Proceedings of 2018 2nd
International Conference on Innovations in Economic
Management and Social Science. Shanyang: CSP, 2018:
14–18.

[15] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究 [J].
解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 94–96.
XU Z S. Research on compatibility and consistency of
fuzzy complementary judgement matrices[J]. Journal of
PLA University of science and Technology (Natural Sci-
ence Edition), 2002, 3(2): 94–96 (in Chinese).

[16] 余梦珩, 张韧, 葛珊珊, 等. 北极西北航道自然环境危险
性评估及航线优选 [J]. 海洋科学进展, 2018, 36(4):
614–628.
YU M J, ZHANG R, GE S S, et al. Evaluation of arc-
tic northwest passage's natural environment risk and
route selection[J]. Advances in Marine Science, 2018,
36(4): 614–628 (in Chinese).

[17] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. 基于集对分析的不确定多
属性决策方法 [J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1423–
1426.
YANG J J, ZHOU J Z, FANG J C, et al. Uncertain
multi-attribute decision making methods based on set
pair analysis[J]. Control and Decision, 2008, 23(12):
1423–1426 (in Chinese).

[18] 张韧. 海洋环境特征诊断与海上军事活动风险评估
[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.
ZHANG R. Characteristic diagnosis of marine environ-
mental factors and risk assessment of oceanic military
activity[M]. Beijing: Beijing Normal University Press,
2012 (in Chinese).

[19] 万树平. 布雷方案评估的灰关联度方法 [J]. 计算机工程
与应用, 2009, 45(32): 206–208.
WANS P. Method of grey relation degree for evalu-
ation of minelaying plans[J]. Computer Engineering and
Applications, 2009, 45(32): 206–208 (in Chinese).

[20] 滕兆新, 张旭, 钱江. 基于理想方案的布雷方案评估 [J].
兵工学报, 2007, 28(11): 1405–1408.
TENG Z X, ZHANG X, QIAN J. Evaluation of
minelaying plans based on ideal plans[J]. Acta Arma-
mentarii, 2007, 28(11): 1405–1408 (in Chinese).

[21] 李积德. 船舶耐波性 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出
版社, 2007.
LI J D. Ship seakeeping[M]. Harbin: Harbin University
of Engineering Press, 2007 (in Chinese).

[22] 于海泳, 倪小清, 杨鹏, 等. 海洋水文气象对驱护舰兵力
作战效能影响研究 [J]. 舰船电子工程, 2014, 34(10):
114–118.
YU H Y, NI X Q, YANG P, et al. The influence of
marine hydrometeorological for destroyer & frigate
troops combat effectiveness[J]. Ship Electronic Engineer-
ing, 2014, 34(10): 114–118 (in Chinese).

[23] 中华人民共和国信息产业部. 卫星通信链路大气和降雨
衰减计算方法: YD/T 984-1998[S]. 北京: 人民邮电出版
社, 1995.
Ministry of Industry and Information Technology of
China. Methods for calculating attenuations by atmo-
spheric gases and rain in the satellite communication
link: YD/T 984-1998[S]. Beijing: Posts & Telecom
Press, 1995 (in Chinese).

[24] Choice of polarization for the broadcasting-satellite ser-
vice: ITU-R BO. 791[S]. 1992.

[25] 王宇飞, 康健, 王保印. Ka 波段多波束卫星通信降雨衰
减功率优化法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2006,
24(4): 385–389.
WANG Y F, KANG J, WANG B Y. Rain attenuation
compensation of Ka band multi-beam satellite commu-
nication through optimized power control[J]. Journal of
Jilin University (Information Science Edition), 2006,
24(4): 385–389 (in Chinese).