

基于误差分析的火箭上浮水雷打击概率试验评定

李 飞, 叶浩亮

(中国人民解放军 91388 部队 92 分队, 广东 湛江 524022)

摘要: 针对火箭上浮攻击水雷打击概率试验实施困难、安全风险和耗费高、无科学合理评定模型的现状, 在分析火箭上浮水雷打击毁伤目标工作原理和动作过程的基础上, 结合水下非接触爆炸毁伤原理, 综合利用误差分析、数理统计和概率论方法, 建立了一套科学合理可行的水雷打击概率计算模型; 然后通过解决试验评定工程化实施过程中的测量误差修正和样本量分配问题, 形成了一套可实际工程化应用的水雷打击概率试验评定方案; 三型目标舰船的典型计算案例表明, 该方案解决了可在封锁区域内任意点攻击的火箭上浮水雷打击概率考核问题, 在保证试验评定质量的同时可大幅提高试验实施质效, 不仅可推广应用至其他类型水雷的打击概率试验评定中, 还可在一定程度上指导火箭上浮水雷的研制和设计。

关键词: 火箭上浮水雷; 打击概率; 命中概率; 水下爆炸毁伤; 误差分析; 试验评定

Test Evaluation of Rocket Floating Mine's Strike Probability Based on Error Analysis Method

LI Fei, YE Haoliang

(Unit 92, PLA91388, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: Test evaluation of the rocket floating mine's strike probability is difficult, high safety risk and cost, lack of scientific and reasonable evaluation model. the work principle and action process of the rocket floating mine's strike damage target is analyzed, the principle of Underwater Non-Contact Explosion damage is combined. By using the error analysis, mathematical statistics method and probability theory, a scientific and feasible strike probability calculation method is proposed. Then by solving the problems of measurement error correction and sample allocation in the process of engineering implementation of test evaluation, a reasonable test and evaluation scheme of strike probability that can be applied in practical engineering in the field of the mine test evaluation is generated. The typical calculation cases for three ship targets show that, The scheme solves the problem of strike probability assessment of rocket floating mine, which can attack at any point in the blocked area. This scheme can greatly improve the quality and efficiency of test implementation, which ensures the quality of test evaluation at the same time. It can not only be applied to the test evaluation of strike probability of other types of mines, but also can guide the development and design of rocket floating mines to a certain extent.

Keywords: rocket floating mine; strike probability; hit probability; underwater explosion damage; error analysis; test evaluation

0 引言

火箭上浮水雷具有水深适用范围广、上浮打击速度快、作战半径大等特点, 其军事经济效应好, 预期的作战效能较高。打击概率是衡量火箭上浮水雷单雷作战效能的重要作战指标, 其涵盖了水雷探测、识别、定位、攻击决策、上浮攻击并毁伤进入水面封锁半径内目标舰船的全过程。

打击概率作为含毁伤效果的全系统、综合性指标, 其试验评定中遇到两个难题: 一是无法实际使用水雷装备进行目标舰船真实打击毁伤试验; 二是概率类指标考核需要大样本以提高置信度。水雷作为一次性使用武器, 完全通过几十条的大样本实航试验消耗来评定从军事经济性和试验实施风险上均不可接受。因此, 建立打击概率数学计算模型并利用多源实航试验数据来综合评定, 是一条科学合

理可行的工程化思路。

文献 [1-2] 建立了一种含毁伤的武器装备对目标的打击概率数学模型, 综合考虑了瞄准误差和正横距离估计误差, 并将舰船目标毁伤平面等效为矩形, 但其存在几个问题: 1) 未考虑水雷对目标舰船的动作概率, 即给出攻击指令的概率; 2) 未考虑火箭上浮弹道的系统误差, 并将火箭上浮弹道二维两向散布误差等同; 3) 将水雷的预测打击点误差简单的用正横误差来代替; 4) 未考虑火箭上浮水雷主动攻击时舰船等效毁伤面积的计算。文献 [3-6] 建立了区域攻击火箭上浮水雷的命中概率计算模型, 但其均是从水雷固定区域攻击的角度来计算命中概率, 与在封锁半径内任意点打击目标的火箭上浮水雷作战方式不符; 另外其也未考虑水雷对目标舰船的动作概率、综合打击概率、毁伤效果以及试验评定工程化实施过程中的样本量分配和

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-03-15。

作者简介: 李 飞(1983-), 男, 河南三门峡人, 硕士, 工程师, 主要从事水中兵器试验鉴定技术方向的研究。

引用格式: 李 飞, 叶浩亮. 基于误差分析的火箭上浮水雷打击概率试验评定[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 292-297.

测量误差修正等因素。

本文通过分析火箭上浮水雷的工作原理以及攻击毁伤目标的全过程, 结合误差分析和武器系统单发命中理论, 综合考虑火箭上浮水雷的动作概率、预测打击点误差、火箭上浮弹道散布误差、水雷水下爆炸毁伤半径和目标舰船等效毁伤区域、试验评定工程化实施中的测量误差修正、试验样本量分配等因素, 建立了一套可实际工程应用的打击概率试验评定模型, 其不仅可用于评定火箭上浮水雷的打击概率, 同时可扩展到其他水雷如沉底雷等装备的打击概率评定中。

1 火箭上浮水雷打击成功判别标准

1.1 水雷的水下毁伤半径计算

火箭上浮水雷的打击概率定义为: 目标舰船从封锁半径内通过时, 水雷上浮攻击并按规定的毁伤效果毁伤目标舰船的概率。一次有效的打击毁伤目标过程火箭上浮水雷要完成以下动作:

- 1) 水雷正确探测到目标, 并完成识别、定位; 之后依据水深、火箭上浮速度和弹道等计算出上浮打击时间, 结合目标运动要素, 给出打击目标的提前点, 即预测攻击点;
- 2) 水雷向预测攻击点上浮攻击, 并在预定起爆深度起爆毁伤目标。

图 1 是火箭水雷上浮攻击、毁伤目标过程的示意图。

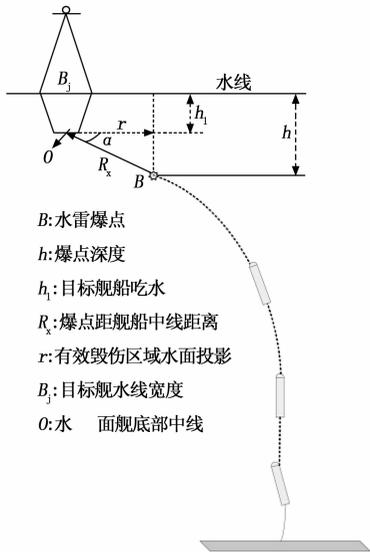


图 1 火箭上浮水雷攻击毁伤目标示意图

水雷的毁伤效果一般采用冲击因子体系描述^[7-9], 其是英国、意大利以及北约许多国家共同采用的舰船破坏标准, 用以评定水中兵器毁伤水面舰艇的能力。冲击因子破坏标准有计算简单的特点, 而且可以根据对舰船毁伤程度的要求方便地将其换算为概率值, 较适合于水雷类中远距离非接触爆炸的水中兵器; 不足之处是没有考虑舰船结构特征影响。

使用冲击因子描述水雷毁伤效果时, 可用水下毁伤半径来表征水雷按规定毁伤效果毁伤舰船时的空间范围, 即:

$$R = 0.4526 \frac{\sqrt{k_1 k_2 G}}{SF} \frac{1 + \sin \alpha}{2} \quad (1)$$

式 (1) 中, k_1 为炸药的 TNT 当量系数; k_2 为海底反射系数; G 为炸药的质量; R 为水下毁伤半径; SF 为冲击因子; α 为爆心距水面舰船龙骨中心连线与水平方向的夹角 (具体见图 1)。火箭上浮水雷起爆时均远离海底, 因此海底反射系数 k_2 取 1; 在水雷装药 G 、炸药的 TNT 当量系数 k_1 、冲击因子 SF 已知的情况下, 式 (1) 可等价于:

$$R = C_0 \left(1 + \frac{h - h_1}{R_x} \right) \quad (2)$$

式中, $C_0 = \frac{0.4526 \sqrt{k_1 G}}{SF}$ 为一常数。

试验中, 获取水雷爆点 B 的位置以及起爆时刻舰船的真实位置, 并据此计算出爆点距舰船底部中线段最近距离 R_x , 将舰船吃水深度 h 、起爆点深度 h_1 代入式 (2), 计算出水下毁伤半径 R , 若 $R_x \leq R$, 则水雷打击毁伤成功; 反之, 水雷打击毁伤失败。

1.2 水雷有效毁伤区域的水面投影半径

火箭上浮水雷的爆点深度 h 一般是固定值, 因此爆点只能在深度 h 的平面内散布。如图 2 所示, 爆点在 B_0 、 B_1 和 B_2 连线上散布, 每处爆点皆有一个对应的水下毁伤半径。

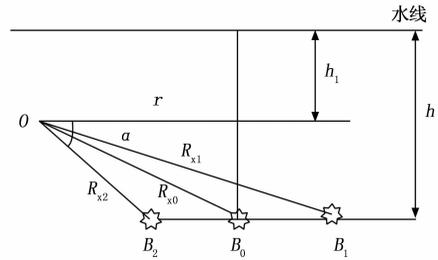


图 2 有效毁伤区域的水面投影半径

假设在 B_0 处爆点距舰船底部中线的距离等于水下毁伤半径, 代入式 (2), 可解一元二次方程得一个固定水下毁伤半径 $R_0 = R_{x0}$ 。此时, 依据式 (2) 的计算关系, 在 B_2 处爆点距舰船中线的距离 R_{x2} 将小于此处的水下毁伤半径, 水雷攻击成功; 反之, 爆点在 B_1 处将攻击失败。

可见, 对于爆点深度固定的火箭上浮水雷, 其存在一个固定的水下位置, 为水雷打击毁伤成功的判别线。反映到图 2 中, 爆点只有落在平面投影半径 r 的范围内才能有效毁伤目标, r 为有效毁伤区域的水面投影半径, 其起点为舰船底部中线段。

$$r = \sqrt{R_{x0}^2 - (h - h_1)^2} \quad (3)$$

2 火箭上浮水雷打击概率建模计算

2.1 打击概率总体计算模型

将火箭上浮水雷对目标的探测、识别、定位、攻击决策、下发目标参数和攻击指令这一过程效果用动作概率 P_{atk} 来表征, 将水雷上浮攻击、起爆及毁伤目标效果用命中概率来 P_{hit} 表征, 则火箭上浮水雷的打击概率 P_{STK} 可表示为:

$$P_{STK} = P_{atk} P_{hit} \quad (4)$$

动作概率 P_{atk} 可通过水雷目标探测系统动作区域性试验获得大量的样本, 试验实施相对简单; 命中概率的 P_{hit} 则需要综合考虑预测攻击点误差、火箭上浮弹道误差、爆点深度、水雷装药量和爆炸威力、目标舰船吃水深度和水线下轮廓形状等一系列因素, 需要建模计算。

图 2 中, 爆点位置在水平面上的二维位置只要在有效毁伤区域水面投影半径 r 之内, 就可保证爆点距舰船距离小于于毁伤半径。建立爆点水平位置散布的概率分布模型, 并在有效毁伤区域 A_T 内积分, 即可计算出命中概率 P_{hit} 。

$$P_{hit} = \iint_{A_T} \psi(x, \varphi) dx d\varphi \quad (5)$$

式 (5) 中, $\psi(x, \varphi)$ 为爆点在水平面上的误差散布概率密度函数。

2.2 目标舰船等效毁伤区域 A_T 的确定

由于水下毁伤半径的存在, 水雷水下爆炸毁伤舰船时, 会存在一个明显的等效毁伤区域, 如图 2 中所示。由于毁伤半径计算起点为舰船中线, 而不同的舰船类型水线处宽度不一致, 因此存在与水面毁伤半径对比的关系。主要有以下两类。

1) r 大于等于舰船水线半宽的情况:

图 3 (a) 为舰船水线处形状, 图 3 (b) 为 r 大于等于舰船水线半宽时, 目标舰船命中概率积分计算时的等效毁伤区域 A_T 。

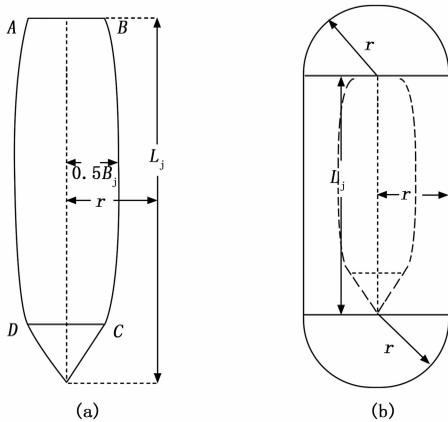


图 3 r 大于等于舰船水线半宽时的等效毁伤区域

2) r 小于舰船水线半宽的情况:

当舰船水线半宽大于有效毁伤区域的水面投影半径时, 有效毁伤区域在舰船宽向是舰船的实际水线宽。如图 4 (a) 所示。一般这种情况出现在船体宽度很大的大型货轮上, 可将其水线处甲板面近似看成椭圆面, 则其面积可等效为长 $0.8L_j$ 、宽 B_j 的矩形^[13], 如图 4 (a) 所示, 水线甲板等效面积 A 如下:

$$A = \frac{\pi L_j B_j}{4} \approx 0.8 L_j B_j \quad (6)$$

其有效毁伤区域 A_T 如图 4 (b) 所示。

2.3 爆点误差散布分析及建模计算

严格来说, 火箭上浮攻击水雷的爆点散布是一个与爆点

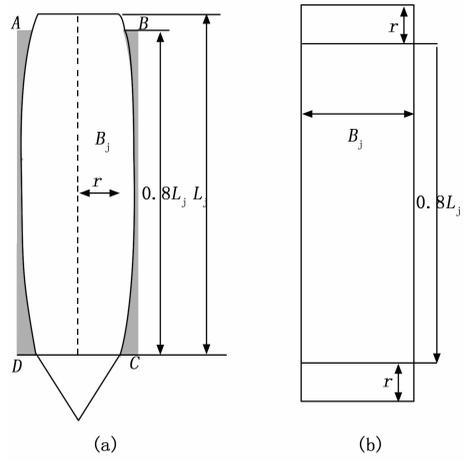


图 4 r 小于舰船水线半宽时的等效毁伤区域

深度控制误差、预测攻击点误差和上浮弹道散布误差相关的三维函数。建立爆点误差散布函数需考虑起爆深度 h 的控制误差。目前传感器及控制技术的发展水平可将起爆深度 h 的误差范围控制在 5 m 以内, 假设起爆点深度控制误差为一随机误差且服从 $N(0, \sigma)$ 的正态分布, 按照 3σ 原则, 爆点深度误差的标准差在 2 m 以内, 相对于预测攻击点和上浮弹道散布误差, 工程应用上可将此误差可忽略不计。

依据随机误差传递和合成理论, 假设水雷的预测攻击点误差、上浮弹道散布误差传递合成为最终的攻击命中误差, 该误差在舰船航行向和正横距离向服从二维正态分布, 则有:

$$\psi(x, \varphi) = \frac{1}{2\pi \sqrt{|\mathbf{K}|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{d} - \mathbf{M})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{M})\right] \quad (7)$$

式 (7) 中, \mathbf{K} 为协方差矩阵, \mathbf{M} 为均值矩阵。

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_\varphi \\ \sigma_x \sigma_\varphi & \sigma_\varphi^2 \end{pmatrix}, \mathbf{d} = [x \quad \varphi]^T, \mathbf{M} = [\mu_x \quad \mu_\varphi]^T \quad (8)$$

建立起爆时刻目标舰船坐标系, 坐标原点为舰船中心点, 舰船航行向为 E 轴, 正横距离向为 N 轴, 则攻击命中误差分解合成关系见图 5, 图 6 为爆点散布误差水面二维投影示意图。

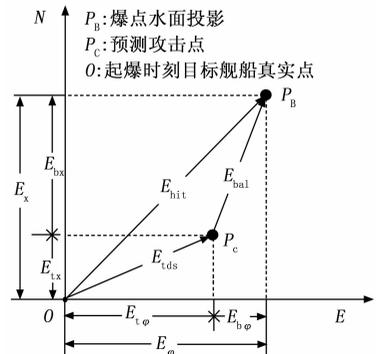


图 5 爆点散布误差分解图

图 5 中, 攻击命中的爆点误差 E_{hit} 由两部分误差合成:

- 1) 预测攻击点的误差 E_{tds} , 其由水雷的目标探测系统产生, 其在正横距离向和舰船航行向的分量为 E_{tx} 和 E_{ty} ;
- 2) 上浮弹道散布误差 E_{bal} , 其在正横距离向和舰船航行向的投影为 E_{bx} 和 E_{by} 。

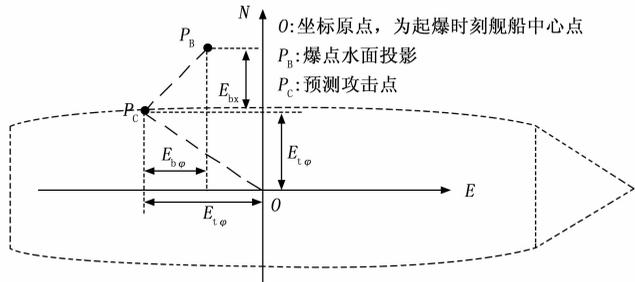


图 6 爆点散布误差水面二维投影示意图

上述所有的误差均为随机概率误差, 可用其标准差代替。

根据误差传递和合成理论^[14-15], 若随机变量 x, y, z 有如下关系:

$$y = f(x, z) \quad (9)$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 x, y, z 的随机误差, 且 Δx 和 Δz 为独立观测的量, 则有:

$$\Delta_y^2 = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Delta_x^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Delta_z^2 \quad (10)$$

μ_x, μ_y, μ_z 分别为 x, y, z 的系统误差, 则有:

$$\mu_y = \frac{\partial f}{\partial x} \mu_x + \frac{\partial f}{\partial z} \mu_z \quad (11)$$

对于火箭上浮水雷, 一般由目标探测系统和战斗载荷系统分别负责目标探测识别定位和上浮攻击起爆, 两个系统之间一般是相互独立的, 因此 E_{tds} 和 E_{bal} 相互独立, 其随机误差传递为代数和关系, 综合以上有:

$$\sigma_x^2 = \sigma_{tx}^2 + \sigma_{bx}^2 \quad \mu_x = \mu_{tx} + \mu_{bx} \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ty}^2 + \sigma_{by}^2 \quad \mu_y = \mu_{ty} + \mu_{by} \quad (13)$$

由此, 计算命中概率所需的所有变量均已明确, 可综合式 (7)、式 (5), 在试验中通过大样本获取预测攻击点误差的均值和标准差、上浮弹道散布误差的均值和标准差后, 计算打击概率。

3 打击概率试验评定方案

3.1 试验方案设计约束分析

武器装备试验方案设计是一个需要在多种、多重约束限制条件下将理论方案工程化、可实施化的过程^[16]。章节 2 虽建立了打击概率的计算模型, 但在其工程化过程中, 仍需要考虑诸多影响和限制因素。结合实际情况, 主要考虑以下问题。

1) 试验数据的正态分布检验:

火箭上浮水雷打击概率建模计算的核心为误差分析和正态分布假设。在中心极限定理框架下, 大量试验样本可保证正态分布假设的合理性; 但实际试验中考虑到样机消耗, 火箭上浮弹道散布误差样本一般不超过 20 个。此时, 在应用打击概率计算模型前, 必须对相关数据进行一次正

态分布检验, 如 Shapiro-Wilk 检验等, 以保证建模计算前提的符合性。

2) 数据测量误差的分析处理:

实际试验中, 预测攻击点误差、上浮弹道散布误差的获取均依赖水雷水下雷位、目标舰船航迹数据。目标舰船的航迹由 GPS 获取, 水雷水下雷位一般由超短基线等水声定位方式获取。两种测量方式均存在测量误差, 尤其水雷雷位的水声定位误差, 基本在 10~15 m 左右, 对于精准攻击的火箭上浮水雷, 该误差在数量级上显然已与预测攻击点误差相近, 不进行分析处理将严重影响计算结果。

3) 不同目标舰船和正横距离的样本分配:

不同类型舰船的外形特征及噪声水平不同, 通过雷区时正横距离不同, 导致水雷打击时对其的探测识别和定位水平不同、等效毁伤区域不同、上浮弹道攻击时间也不同。也即是: 不同打击目标态势下, 预测攻击点和上浮弹道散布误差虽均服从同一分布, 但其均值和标准差可能完全不一致, 章节 3 的打击概率模型单次只能算一种特定攻击态势下的打击概率。

作为综合性、系统性指标, 打击概率是表征水雷打击在封锁半径范围内目标整体的平均水平, 因此设计试验方案时, 必须考虑多型目标和多种正横距离的样本分配, 在兼顾计算打击概率样本最小需求前提下, 涵盖尽量多的目标舰船类型和正横距离。

3.2 具体试验评定方案

1) 动作概率 P_{atk} 的试验方案:

在水雷目标探测系统动作区域性试验中, 充分进行多型目标舰船的动作概率 P_{atk} 摸底; 同时为保证封锁区域的覆盖性, 尽量在正横距离的边界处获得试验样本, 以边界试验样本代替不同正横距离内的普通样本。

2) 命中概率 P_{hit} 的试验方案:

水下火箭上浮弹道散布误差只与弹道行程也即攻击正横距离相关, 与目标舰船类型、航速航向等均无关, 因此只需在边界正横距离处获取上浮弹道散布误差样本即可, 以边界试验样本代替不同正横距离内的普通样本。

3) 打击概率 P_{STK} 的综合计算:

假设试验中共进行了 n 型不同的目标舰船打击概率试验, 每型目标舰船的打击概率为 P_{stki} , 依据事前侦查情报或者单独的界定, 在未来战场上每型目标舰船通过水雷封锁区域的概率权重为 w_i , 则该型水雷的打击概率可表述为:

$$P_{STK} = \sum_{i=1}^n w_i P_{stki} \quad (14)$$

4) 测量误差的修正方案:

由 GPS 和水声定位带来的测量误差主要影响水雷预测攻击点误差的计算。火箭上浮弹道散布误差一般通过内置的高精度惯组测量位移量实现, 与外界的定位测量无关。GPS 和水声定位测量误差为随机误差, 一般可将其视作服从均值为 0 的二维正态分布。以 E_{gps} 和 E_{spa} 分别代表 GPS 和水声定位误差, 其标准差分别为 σ_{gps} 和 σ_{spa} ; 以 M_0 表示水雷

雷位真值, s_0 表示预测攻击时刻舰船位置真值, E_{PR} 表示水雷计算出的预测攻击点相对雷位的位置, 则由含误差的试验数据获取的预测攻击点位置 P_c 为:

$$P_c = (M_0 + E_{apn}) + E_{PR} \quad (15)$$

由含误差的试验数据获取的预测攻击时刻舰船位置 s_c 为:

$$s_c = s_0 + E_{GPS} \quad (16)$$

由试验数据获取的预测攻击点误差为:

$$E_{tdsc} = p_c - s_c = (M_0 + E_{PR} - s_0) + (E_{apn} - E_{GPS}) = E_{tds} + (E_{apn} - E_{GPS}) \quad (17)$$

可见, 测量误差在数据处理过程中, 是以简单的代数运算叠加在处理结果中的。作为均值为 0 的随机误差, 可通过误差传递定理来进行修正。

令由含误差的试验数据计算出的预测攻击点标准差为 σ_{tc} , 标准差的真值为 σ_{tds} , 则有:

$$\sigma_{tds} = \sqrt{\sigma_{tc}^2 - \sigma_{GPS}^2 - \sigma_{apn}^2} \quad (18)$$

σ_{GPS} 和 σ_{apn} 可由具体测量设备的性能指标得到。

4 典型算例及分析

假设某型火箭上浮水雷装药量为 400 kg (TNT 当量); 起爆深度设计值为 20 ± 5 m; 打击目标舰船主要分为三大类: 典型驱护舰、典型军辅船以及大型目标舰船, 三型舰船典型吃水深度及尺寸、有效毁伤区域水面投影半径如表 1 所示。

表 2 中, 假设了一组水雷对不同目标舰船的动作概率、预测攻击点和上浮弹道散布误差数据, 并依据表 1 中目标舰船的尺寸信息及有效毁伤区域水面投影半径, 计算出了对应的打击概率。

表 1 典型目标舰船尺寸信息及对应的毁伤半径

目标舰船类型	吃水深度/m	水线长/m	水线宽/m	有效毁伤区域水面投影半径/m
驱护舰	6	160	20	29.22
军辅船	4	130	18	29.38
大型舰船	8	180	25	28.9

由表 1 可看出, 按照冲击因子体系描述舰船毁伤效果时, 一般水面舰船的水线半宽均小于其对应的有效毁伤区域水面投影半径; 此时, 等效毁伤区域主要参照图 3。

表 2 打击概率计算案例

目标舰船类型	E_{tds} 均值/m		E_{tds} 标准差/m		E_{bal} 均值/m		E_{bal} 标准差/m		动作概率 P_{atk}	打击概率 P_{STK}
	μ_{tx}	μ_{ty}	σ_{tx}	σ_{ty}	μ_{bx}	μ_{by}	σ_{bx}	σ_{by}		
驱护舰	0.1	21	12	21	0.1	0.2	5	6	0.8	0.768
军辅船	0.2	20.5	15	21	0.5	0.3	7	7	0.8	0.714
大型舰船	0.05	19	11	19	1	2	6	4	0.85	0.820

一般水面舰船的水线长远大于水线宽。综合表 1 和表 2 可看出, 计算命中概率时, 等效毁伤区域的二维面积分中, 水线长向积分很容易达到高概率。反映到实际打击场景中, 目标舰船的水线长基本相当于水雷的封锁半径, 此时水雷

攻击在水线长向很容易上靶; 目标舰船的水线宽向相对较小, 攻击时上靶较水线长向难度大。因此, 影响火箭上浮水雷打击概率的主要因素是水线宽向的预测攻击点精度, 在水雷研制设计时应重点关注该方面的性能指标实现。

水雷在研制设计时, 受限于空间尺寸, 一般装药质量很难大范围变动, 而起爆深度则可在控制系统中较容易调整。假设水雷装药量为 400 kg (TNT 当量), 其起爆深度可在 12~30 m 内变动, 在目标舰船吃水深度固定 (表 1 中典型驱护舰吃水深度 6 m) 的情况下, 计算不同起爆深度下的有效毁伤区域水面投影半径, 结果如图 7 所示。

由图 7 可看出, 装药量和目标舰船吃水深度固定的情况下, 存在一个最佳的起爆深度, 使有效毁伤区域水面投影半径最大, 此时命中概率最大。因此, 水雷在研制设计时, 应根据打击目标舰船的实际尺寸、装药质量来合理选择最佳起爆深度, 以达到最佳的打击概率。

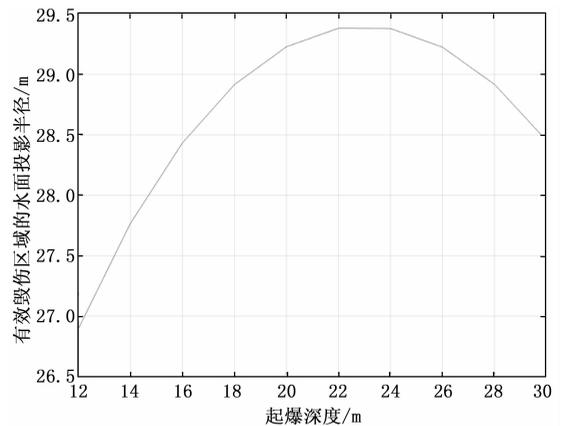


图 7 装药量和目标舰船吃水深度固定情况下不同起爆深度的有效毁伤区域水面投影半径

5 结束语

本文在分析火箭上浮水雷探测、识别、定位、上浮打击目标的全过程的基础上, 结合水下非接触爆炸毁伤原理, 综合利用误差分析和数理统计方法建立了一套火箭上浮水雷打击概率计算模型; 之后在解决试验评定工程化实施过程中的测量误差修正和样本量分配等问题的基础上, 提出了一套可实际工程化应用的火箭上浮水雷打击概率试验评定方案。该方案解决了封锁区域内任意点攻击的火箭上浮水雷打击概率考核问题, 且已成功应用至某型火箭上浮水雷的性能鉴定试验和作战效能评估中。典型计算案例表明, 该方案在保证试验评定质量的同时可大幅提高试验实施质效, 不仅可推广应用至其他类型水雷 (如沉底雷) 的打击概率试验评定中, 还可在一定程度上指导火箭上浮水雷的设计和研制。

参考文献:

[1] 皮汉文, 周遂华. 对目标打击概率的数学模型及分析 [J]. 海军工程大学学报, 2003, 15 (6): 78-82.
 [2] 滕兆新, 张旭. 水雷对舰船的毁伤概率计算模型及仿真

- [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (16): 4241 - 4243.
- [3] 洪 星, 洪志平, 马爱民. 定向攻击水雷打击概率模型研究 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, 26 (5): 50 - 52.
- [4] 王 涛, 孙明太, 韩 强. 模拟法在火箭上浮水雷命中概率计算中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 21 (2): 48 - 51.
- [5] 叶浩亮, 陈 涛, 张召奎. 区域攻击水雷命中概率的试验统计模型 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 3 (38): 77 - 80.
- [6] 叶浩亮, 李 飞, 张召奎. 主动攻击水雷攻击成功率试验考核方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 225 - 227.
- [7] 刘 军, 王树宗. 两种水雷破坏半径计算方法比较与实例分析 [J]. 舰船科学技术, 2005, 27 (4): 59 - 61.
- [8] 王树乐, 张义帅, 胡迺成, 等. 不同当量水雷战斗部水下爆炸对目标损伤特性分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (9): 17 - 20.
- [9] 姚熊亮, 曹 宇, 郭 君, 等. 一种用于水面舰船的水下爆炸冲击因子 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28 (5): 501 - 509.
- [10] 尚 奇, 李 兵, 胡 敏. 水雷小子样弹点散布方差估计 [J]. 水雷战与舰船防护, 2005, 1 (1): 30 - 32.
- [11] 廉 斌, 赵加鹏. 火箭上浮水雷弹道散布扰动分析研究 [J]. (上接第 279 页)
- 粒子滤波不断重复迭代更新, 改进布谷鸟算法使粒子的分布更为集中在最优点且分布合理, 可以稳定控制粒子集规模在较小的范围内, 提高粒子滤波的计算精度和效率. ICS-PF 算法可实现粒子间的信息交换可以有效地压缩粒子的规模, 与人工智能进一步结合跟踪领域将得到更好的发展和应用.
- 参考文献:**
- [1] 张 琪, 胡昌华, 乔玉坤. 基于权值选择的粒子滤波算法研究 [J]. 控制与决策, 2008, 23 (1): 117 - 120.
- [2] MISHRA S, CHAUHAN A, MISHRA K B. Role of binary and ternary blends of WCO biodiesel on emission reduction in diesel engine [J]. Fuel, 2020, 262 - 264.
- [3] 陈志敏, 田梦楚, 吴盘龙, 等. 基于蝙蝠算法的粒子滤波法研究 [J]. 物理学报, 2017, 66 (5): 41 - 50.
- [4] 郭春明, 宫皓泉, 王艳娇, 等. 基于改进粒子滤波的无线传感器网络目标跟踪算法 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2017 (5): 1 - 6.
- [5] 邱雪娜, 刘士荣, 吕 强. 基于信息共享机制的粒子滤波算法及其在视觉跟踪中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (12): 1724 - 1730.
- [6] CHEN Z M, BO Y M, WU P L, et al. Novel particle filter algorithm based on adaptive particle swarm optimization and its application to radar target tracking [J]. Control and Decision, 2013, 28 (2): 193 - 200. (in Chinese)
- [7] YANG X S. A new bat-inspired algorithm [A]. Studies Computational Intelligence: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO) [C] // Berlin Heidelberg: Springer, 2010, Vol284, 65 - 74.
- [8] HAN W, XU J, ZHOU M, et al. Cuckoo search and particle filter-based inverting approach to estimating defects via magnetic flux leakage signals [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 水雷战与舰船防护, 2013, 21 (2): 39 - 42.
- [12] 闫伟杰. 基于命中概率的舰炮武器系统杀伤区研究 [J]. 舰船电子工程, 2014, 37 (7): 138 - 140.
- [13] 邢昌风, 李敏勇, 吴 玲. 舰载武器系统效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [14] 姜玉生. 误差传递公式在系统误差分析中的应用 [J]. 丹东纺专学报, 2001, 8 (1): 47 - 48.
- [15] 孙 栋. 误差传递公式及其应用 [J]. 邵阳高专学报 [J]. 1994, 7 (2): 116 - 119.
- [16] 武小悦. 装备试验与评价 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [17] 刘保根, 程景平, 郭东旭. 水雷打击概率计算方法研究 [J]. 水雷战与舰船防护, 2010, 18 (2): 30 - 33.
- [18] 祁文哲, 吴庆立, 吴秋轩, 等. 直瞄武器射击综合条件命中概率的研究 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33 (9): 68 - 70.
- [19] 胡 江, 胡 浩, 李进军. 舰载火箭炮命中概率计算模型 [J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32 (6): 34 - 36.
- [20] 张运龙, 张 旭, 罗一丁. 主动攻击水雷可攻区域研究 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40 (10): 80 - 82.
- [9] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum inspired genetic algorithm [A]. Pro Of IEEE International Conference on Evolutionary Computation [C] // Piscataway: IEEE Press, 1996: 61 - 66.
- [10] 黄 辰, 费继友, 王丽颖. 基于多策略差分分布鸟算法的粒子滤波方法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (4): 265 - 272.
- [11] 徐 壮, 彭 力. 基于 KLD 采样的自适应粒子滤波目标跟踪算法 [J]. 计算机工程, 2019 (12): 182 - 188.
- [12] 董崇杰, 刘 毅, 彭 勇. 改进布谷鸟算法在人群疏散多目标优化中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28 (5): 1063 - 1069.
- [13] OZA N C. Online bagging and boosting [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C] // Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015, 2340 - 2345.
- [14] AVIDANS. Support vector tracking [J]. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 26 (8): 1064 - 1072.
- [15] 董崇杰, 刘 毅, 彭 勇. 改进布谷鸟算法在人群疏散多目标优化中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28 (5): 1063 - 1069.
- [16] 王晓华, 聂腾腾. 改进的布谷鸟算法优化粒子滤波研究 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (12): 60 - 65.
- [17] 李 欣, 徐 亮. 利用传感器距离和能耗约束的无线传感器网络路由优化 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2589 - 2591, 2599.
- [18] 桑成伟, 徐 毓, 张 楠, 等. 一种机动目标的跟踪算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1398 - 1400.
- [19] 关旭宁, 魏瑞轩, 吴 楠, 等. 无人机跟踪地面目标制导控制方法 [J]. 电光与控制, 2013 (10): 51 - 55.
- [20] 胡 啸, 林剑峰, 刘立林. 卫星侦察舰船目标分布预测及效能分析 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (6): 1580 - 1582, 1586.