

【引用格式】陆泽平, 吴茂林, 周浩, 等. 利用极限作用距离多层次拒止自航器的方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (1): 95-99.

利用极限作用距离多层次拒止自航器的方法

陆泽平, 吴茂林*, 周浩, 王鹏

(海军工程大学, 湖北 武汉 430030)

摘要 水下无人自航器是水面舰船自身安全的主要威胁之一。为解决悬浮式拦截装备对水下无人自航器拦截率较低的问题, 在原有装备作用距离、射界和威力不变的基础上, 提出了利用其最大和最小射程以及最小入水准备时间, 进行远场/近场 2 批次拦截的拒止策略。建立了多层次拦截水下无人自航器的数学模型, 采用蒙特卡洛法进行计算机仿真, 仿真表明: 利用这种拦截策略并配合舰船的规避机动, 在 2 次发射间隔内, 可进行装填实现多次拦截, 对后舷而来的自航器拦截概率提高到 70%~81%。

关键词 悬浮式设备; 水下防御; 仿真试验系统; 拦截策略

中图分类号 TJ65

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2025)01-0095-005

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.013

A Method of Multilevel Interception of Unmanned Underwater Vehicles Using Limit Acting Distances

LU Zeping, WU Maolin*, ZHOU Hao, WANG Peng

(Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China)

Abstract Unmanned underwater vehicles (UUVs) pose a significant threat to the safety of surface ships. To address the issue of low interception rates of suspended interception equipment against UUVs, a denial strategy of conducting two batches of interception in the far field and near field is proposed based on the unchanged action range, field of fire, and power of the original equipment, by utilizing its maximum and minimum ranges and minimum water entry preparation time. A mathematical model for multilevel interception of UUVs is established, and computer simulation is conducted using the Monte Carlo method. The simulation results show that by employing this interception strategy in conjunction with the ship's evasive maneuvers, multiple interceptions can be achieved within the interval between two launches, and the interception probability of UUVs approaching from the stern can be increased to 70%~81%.

Key words suspended equipment; underwater defense; simulation test system; interception strategy

0 引言

有效防御水中自航器(现以鱼雷武器为主)的攻击, 是水面舰船的主要作战任务^[1], 也是世界各

国研究的热点。现各国水下防御的主要对抗手段是以噪声干扰器、自航式声诱饵等软对抗手段为主。然而随着先进水下自航器的自导系统抗干扰能力的提高, 特别是声/尾流自导方式的广泛使用, 配

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 陆泽平(1993-)男, 硕士, 讲师, 主要从事水下航行器研究。

*通信作者: 吴茂林(1971-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事水下航行器研究。

合远距离线导模式,软对抗手段已经难以实现对水下自航器的防御。

在此背景下,我国学者开展了悬浮式装备对抗水下自航器的作战理论研究^[2-7]。因其在水下较为隐蔽而难以探测,并且船只对于小目标方位、距离测定拥有较大误差^[8]。姚奉亮^[9]等通过建立悬浮式装备拦截线导-声自导水下自航器作战模型,利用计算机仿真得到船只采取规避机动和悬浮式装备进行拒止水下自航器的概率只有 32%~60%。为了解决现防御手段拦截概率较低的问题,利用悬浮式装备极限作用距离和最短布设时间,结合船只机动规避,仿真计算组织 2 次投放悬浮式装备可能性。

1 水下自航器航路估计

在现代的海战中,潜射无人自航器是潜艇远距离攻击水面舰船的主要武器之一,其攻击的成败完全取决于艇上系统能否有效地对航行器实施导引^[10-11]。导引航路是指其投放或搜索到目标后,通过遥控或者直航+自导的方式接近目标而形成的运动航线。对于直航+尾流自导航行器,现常用的导引方法有:尾追导引法、固定提前角导引法、平行接近法、比例导引法、现代导引法。

目前国内外水中航行器战法中,尾追法和固体提前角法得到了广泛的应用,一个原因是可实现性好,另一个原因是可以较好保证不跟丢,且导引时间短^[12]。

如图 1 所示,假定某一时刻水下自航器和水面船只坐标为点 T 和 S ,且始终在同一水平面内。水下自航器和船只直接相对运动方程通过平面内极坐标参量 R, q 的相对变化率来表示。

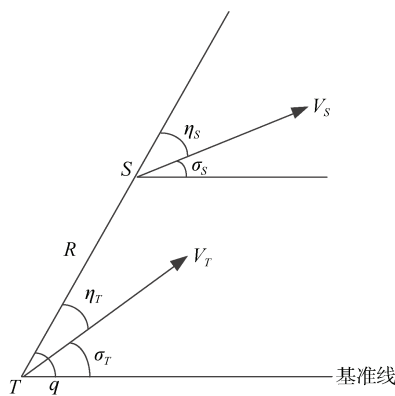


图 1 水下自航器导引示意图
Fig. 1 UUV guidance diagram

R 为水下自航器距离水面船只的距离。当 $R=0$ 时,水下自航器击中目标, TS 为水下自航器瞄准线。

q 为水下自航器瞄准线与某一基准线之间的夹角,也称为目标方位角。

σ_S, σ_T 分别为水面船只、水下自航器与基准线之间的夹角,称为船只航向角和水下自航器接近角。

η_S, η_T 分别为水面船只、水下自航器的速度矢量与瞄准线 TS 之间的夹角, η_T 又称为提前角,从瞄准线顺时针转向速度为正。

得到在极坐标中水面船只和水下自航器的运动方程:

$$\frac{dR}{dt} = V_S \cos \eta_S - V_T \cos \eta_T \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{R} (V_T \sin \eta_T - V_S \sin \eta_S) \quad (2)$$

$$q = \sigma_T + \eta_T \quad (3)$$

$$q = \sigma_S + \eta_S \quad (4)$$

尾追法与固定提前角法在方程上的体现为提前角的大小。尾追法: $\eta_T=0$; 固定提前角法: $\eta_T=\text{常数} \neq 0$ 。

2 悬浮式装备有效拦截域

水下自航器报警后,经系统反应时间后立即投放悬浮式装备,可对水下自航器进行有效拒止的布设点的集合称为有效拦截域。水下自航器的报警舷角 Q_m 通过报警水听器给出,水下自航器的距离 D 利用火控装备通过船只水听器性能、水文情况进行估算。

2.1 水面船只直航时的有效拒止域

如图 2 所示,以水面船只确定水下自航器目标的 t_0 时刻水下自航器位置 T 为坐标原点,以正北线为纵轴建立直角坐标系。由于对水下小目标的探测能力较近,这里假设目标已经进入声自导弹道。 S 点为 t_0 时刻水面船只所在位置点。水面船只以 V_1 的速度沿 X 轴正向运动,水下自航器以 V_2 的速度按照不同导引方法追击水面船只。其中,尾追法、自动调整提前角法 ($0 < \eta_T < \text{平行接近提前角}$)、平行接近法的航路如图中所示。如果水下自航器选择

比例导引法, 其航路将介于固定提前角法和平行接近法两者之间。

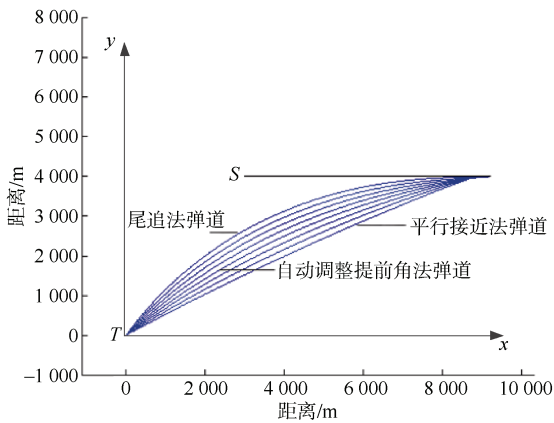


图 2 自航器采用多种导引方法的态势图
Fig. 2 UUV state diagram using multiple guidance methods

悬浮式装备的有效拦截区域即图 2 中航路曲线组成的区域。当确定水下自航器和本舰的相对位置, 只要使用现有导引方法, 水下自航器就会出现在该有效拦截域内。深弹的最佳布放位置应该是一条横跨水下自航器航路的线段, 横拦水下自航器航路方向。

2.2 水面船只规避时的有效拦截域

如果水面船只探测到水下自航器接近威胁, 判断了水下自航器位置并进行背向转弯加速机动的规避战术^[13-14], 那尾追接近法和自动调整提前角法的水下自航器航路将发生变化。图 3 中, 水面船只只在判断遭受水下自航器接近后采取了加速左转远规避方案。

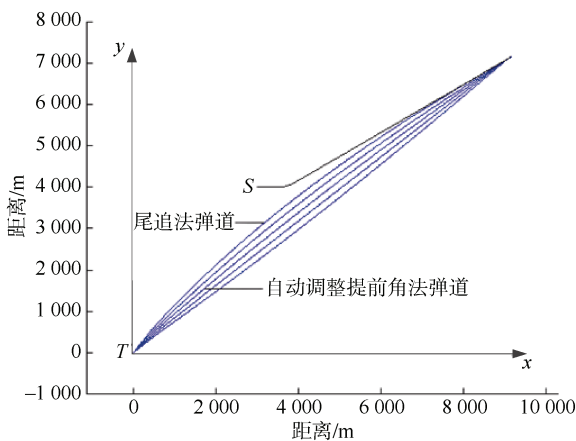


图 3 船只规避之后航器运动图
Fig. 3 UUV motion diagram after ship evasion

对比图 3 与图 2 中水下自航器航路形成的有效拦截区域。可以发现采取规避方法之后的有效拦截区域更细长, 即所需布阵宽度变窄, 有利于提高拦截装备拦截能力。除此之外, 对于尾追法的水下自航器, 规避后的水下自航器追赶时间将延长约 17%, 也有利于消耗水下自航器航程。这为水面船只进行重新装填, 组织第 2 次拦截提供了可能。

3 悬浮式装备布阵方案

悬浮式深弹通常按照“双侧基准点”方法实施布放^[15]。由射距近界、射距远界、射击边界组成了杀伤区, 如果形成的拦截弹杀伤区可以对目标进行拦截, 则表明可以使用拦截弹对来袭目标进行对抗。为了实现远界拦截和近界拦截多层次作用, 验证投放间隔能否满足系统再次装填时间, 本文令第 1 次拦截距离 $D_{\text{近}1}$ = 火箭助推深弹最大作用距离 D_{max} , 第 2 次拦截距离 $D_{\text{近}2}$ = 火箭助推深弹最小作用距离 D_{min} , 并利用水面船只的机动规避, 增加 2 次发射的间隔时间。

3.1 基于最大作用距离的远场布阵

如果编队内水下报警声呐可以对水下目标保持稳定跟踪, 被攻击船只在时间 t_1 时投放悬浮式装备、拦截装备飞行时间为 t_f , 拦截装备从入水到开始工作时间为 t_z , 不考虑拦截装备水中悬浮时间 t_g 。投放时水面舰艇坐标为 $(x_{1(t_1)}, y_{1(t_1)})$, 此时水下自航器位置坐标为 $(x_{2(t_1)}, y_{2(t_1)})$, 那么拦截点位置坐标为水下自航器运动 t_f+t_z 时间后的推算坐标 $(x_{2(t_1+t_f+t_z)}, y_{2(t_1+t_f+t_z)})$, 并且满足:

$$\left(x_{1(t_1)} - x_{2(t_1+t_f+t_z)}\right)^2 + \left(y_{1(t_1)} - y_{2(t_1+t_f+t_z)}\right)^2 = D_{\text{max}}^2 \quad (5)$$

拦截点的位置坐标可以通过递推法或计算机仿真求出, 针对不同水下自航器导引方法都可以解算出一个理想拦截点位置坐标。由于不能判断其具体导引方法, 所以深弹布阵方案选择覆盖所有的理想拦截点。

在这里, 定义远场理想拦截点为距离水下航行器距离满足拦截条件, 且与船只坐标的瞬时距离刚好等于最大射程的拦截点。深弹在此

处进行拦截，将获得更多先机。图 4 中“■”点分别为水下自航器导引提前角为 0°~15°递增时拦截装备远场理想拦截点。为了解算方便，实际拦截点取图中“*”点进行等距离布放。布放数量为 1 个基数的拦截装备，这里假设拦截装备射击密集度为 a ，图中圆形区域表示拦截装备落点的概率圆。

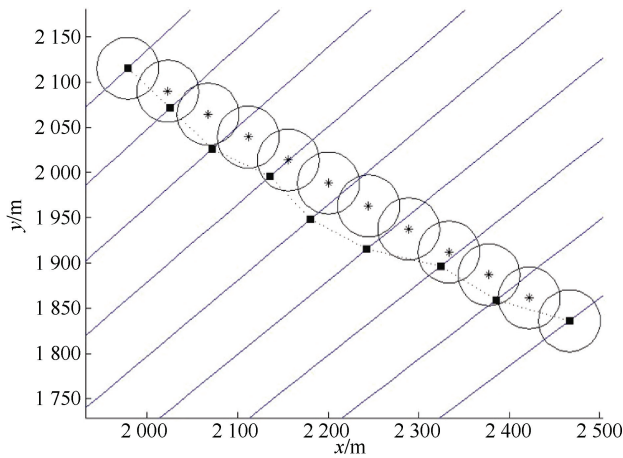


图 4 远场拦截装备布阵位置图
Fig. 4 Positioning map of far field interception equipment

3.2 基于最小作用距离的近场布阵

当水下自航器进入到水面船只的近场区域，没有更新水下自航器目标指示的条件下，可依据水下自航器初始位置信息进行再次布阵拦截。此时船只经过时间 t_2 后投放悬浮式装备、拦截装备飞行时间为 t_2 ，拦截装备从入水到开始工作时间为 t_z 。投放时水面船只坐标为 $(x_1(t_2), y_1(t_2))$ ，此时水下自航器位置坐标为 $(x_2(t_2), y_2(t_2))$ ，那么拦截点位置坐标为水下自航器运动 t_f+t_z 时间后的推算坐标 $(x_2(t_2+t_f+t_z), y_2(t_2+t_f+t_z))$ ，并且满足：

$$\left(x_{1(t_2)} - x_{2(t_2+t_f+t_z)}\right)^2 + \left(y_{1(t_2)} - y_{2(t_2+t_f+t_z)}\right)^2 = D_{\min}^2 \quad (6)$$

再次拦截位置可以通过递推计算或者计算机仿真求得。图 5 中“□”点为水下自航器不同导引方式的近场理想拦截点，“*”点为简化后等距离布放拦截点。为保证投放系统装填时间，近场布放数量为半个基数。图中圆形区域表示拦截装备近场落点的概率圆。

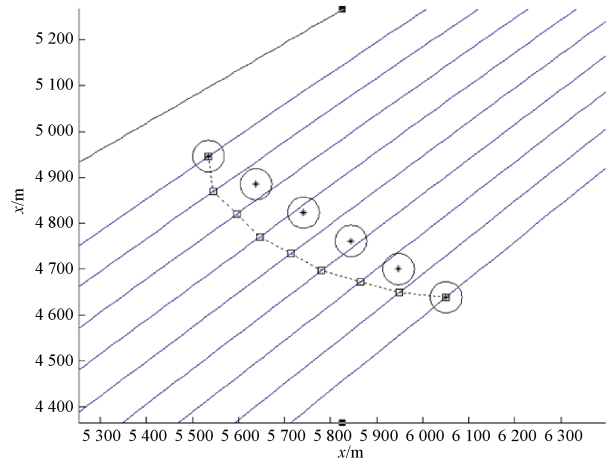


图 5 近场拦截装备布阵位置图
Fig. 5 Positioning map of near field interception equipment

如果水面船只更新了水下自航器目标的位置信息，那么就重新推算水下自航器可能的追击航路，从而获得更准确的拦截域。

3.3 悬浮式装备 2 次投放间隔计算

假设水下自航器从水面船只后半球任意方位接近本舰，即水下自航器报警舷角 Q_m 分布在 $[90^\circ, 270^\circ]$ 区间内。设报警距离为 m km，船只机动航速为 30 kn，规避最大角速度 $1.5^\circ/s$ ，鱼雷航速为 50 kn，航程 18 km。经过多次仿真计算，水下自航器报警舷角与 2 次投放间隔的大小见表 1。

表 1 不同报警舷角的 2 次投放间隔
Table 1 Intervals between 2 launches with different warning relative bearings

报警舷角 / (°)	投放间隔/s
90	168
110	181
130	184
150	181
170	173

4 拦截概率的计算

悬浮式装备拦截概率需要考虑射击的精度和毁伤能力：

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \quad (7)$$

式中： P_1 为水下自航器进入任一枚拦截装备影响范围内的概率； P_2 为水下自航器经过拦截装备阵被探测概率，这里假设 $P_2=1$ ，即水下自航器经过拦截装备阵就会被探测到； P_3 为悬浮拦截装备阵爆炸能够毁伤水下

自航器的概率, 本文认为当水下自航器航行至拦截装备有效毁伤半径 r 内, 即被拦截装备爆炸毁伤^[15]。远场与近场 2 次拦截看作 2 次独立事件, 总拦截概率^[16]

$$P=1-(1-P_y)(1-P_j) \quad (8)$$

文中假设拦截装备实际落点在概率圆内正态分布, 根据已有研究^[17], 设定来袭鱼雷总航程 $L_1=20\ 000\text{ m}$, 鱼雷速度均方差 $\sigma_v=0.5\text{ kn}$, 鱼雷报警舷角均方差 $\sigma_a=1^\circ$, 鱼雷报警距离均方差 $\sigma_d=50\text{ m}$ 。利用 MATLAB 数学工具采用蒙特卡洛法, 进行了 40 000 次仿真, 计算每一枚拦截装备落点与水下自航器航路的距离, 只要任意一枚拦截装备距离航路小于有效摧毁半径 r , 则判定为拦截成功^[18-19], 拦截概率=拦截成功数/40 000。

仿真结果如表 2 所示。

表 2 拦截装备对不同报警舷角水下自航器的拦截概率
Table 2 Intercept probability of intercepting equipment to UUVs with different warning relative bearings

报警舷角/ $(^\circ)$	投放间隔/s	拦截率/%
90	168	0.71
110	181	0.77
130	184	0.75
150	181	0.81
170	173	0.80

从仿真结果可以看出:

1) 针对后半球方向来袭水下自航器, 水面船采用拦截装备的 2 个极限作用距离进行 2 次拦截布阵, 其拦截概率可达 70%~81%。

2) 悬浮式装备 2 次拦截的投放间隔在 168~184 s 之间, 可以完成半基数以上的弹药填充。

5 结束语

为提高悬浮式装备拦截水下自航器的概率, 本文针对水下自航器的典型导引方式计算出悬浮式装备的有效拦截域, 并通过水面船只的规避使得该区域更狭长。提出了利用 2 个极限作用距离的拦截方法, 将拦截阵靠近梭形拦截域的窄端, 使拦截阵的长度更短。经过仿真计算, 2 次拦截可大大提高拦截成功率, 并且所需投放间隔足够半个基数悬浮式装备的装填。

当然, 作为初步研究, 文中提出的制止方法还需要进一步实验验证。水下自航器的位置误差、运动航路对于拦截概率的影响有待进一步探讨。

参考文献

- [1] 陈龙, 马亚平. 基于 GD-MOEA/D 算法的航母编队反潜火力优化[J]. 计算机仿真, 2018, 35(10): 33-38, 131.
- [2] 田恒斗, 侯宝娥, 翟东民, 等. 悬浮式深弹反鱼雷武器系统的有效拦截域分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(3): 13-16.
- [3] 田恒斗, 侯宝娥, 赵红光, 等. 悬浮式深弹反鱼雷武器系统作战效能试验评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(9): 122-125.
- [4] 梁庆卫, 杨成, 林胜, 等. 舰载深弹反潜作战效能分析模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 773-777.
- [5] 罗会彬, 方石. 鱼雷近程防御方法探讨[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(2): 32-35.
- [6] 赵端陆, 熊自明, 马云飞, 等. 基于 ANSYS 的新型拦截射网仿真分析与试验验证[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(9): 261-268, 331.
- [7] 邱涛, 陈韶华. 深弹自导过程的波束相关处理仿真[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(2): 128-132.
- [8] 郑文强, 韩雪滨, 寇祝. 水面舰艇反潜手段防御无人艇攻击方法研究[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(8): 86-88.
- [9] 邵宗战, 熊勇, 胡伟凡. 某拦截弹高海况下目标探测及装载性能适应性评估[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(1): 144-148, 208.
- [10] 姚奉亮, 贾跃, 丁贝. 悬浮式深弹拦截线导+声自导鱼雷作战模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(5): 24-27, 30.
- [11] 王改娣, 翁璐, 吕艳慧, 等. 鱼雷攻击体目标命中效果仿真方法[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(1): 78-82.
- [12] 曲丰, 张仪, 吴磊. 基于提升线导鱼雷捕获概率的导引方法优化研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(10): 41-44.
- [13] 陈颜辉, 孙振新. 水面舰艇纯机动规避尾流自导鱼雷方法[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(1): 68-71.
- [14] 徐海珠, 袁延艺, 余赟, 等. 水面舰艇对抗尾流自导鱼雷方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(8): 13-16.
- [15] 任磊, 贾跃, 施帆. 基于相对运动考虑海流影响的拦截弹布放方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(2): 66-70.
- [16] 赵向涛, 寇祝, 王佳婧, 等. 水面舰艇规避尾流自导鱼雷方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(9): 100-104.
- [17] 孙慧玲, 胡伟文, 宋业新, 等. 悬浮式深水炸弹综合防御鱼雷作战仿真系统确认方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2523-2529.
- [18] 张磊潇, 胡伟文, 孙慧玲. 基于效能仿真的舰艇综合防御鱼雷作战决策优化[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(12): 2789-2795.
- [19] 吴玲, 王丕琨, 卢发兴. 基于预定毁伤概率的悬浮式深弹使用方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 1217-1224.

(责任编辑: 曹晓霖)