

doi: 10.7690/bgzdh.2023.10.010

反潜助飞鱼雷命中概率影响因素仿真分析

孙常存¹, 袁鹏², 闫雪¹, 史晓春¹

(1. 中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041; 2. 海军装备部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对影响反潜助飞鱼雷作战效果的主要因素, 基于反潜助飞鱼雷弹道特征分析, 建立反潜助飞鱼雷空中与水下弹道模型。结合敌潜艇典型机动规避样式, 按照反潜助飞鱼雷反潜作战流程编制仿真程序, 定量分析射程、落点偏差和主动自导作用距离对反潜助飞鱼雷命中目标概率的影响。结果表明, 该分析对反潜助飞鱼雷作战能力仿真、试验和训练方案的制定具有一定的理论指导意义。

关键词: 反潜助飞鱼雷; 作战能力; 弹道模型; 命中概率

中图分类号: TJ630 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Influence Factors on Hit Probability of Anti-submarine Assisted Torpedo

Sun Changcun¹, Yuan Peng², Yan Xue¹, Shi Xiaochun¹

(1. No. 91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China; 2. Naval Equipment Department, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the main factors affecting the operational effect of anti-submarine assisted torpedo, the air and underwater trajectory models of anti-submarine assisted torpedo are established based on the analysis of its trajectory characteristics. According to the typical maneuver evasion style of enemy submarine, the simulation program was compiled according to the anti-submarine warfare process of anti-submarine assisted torpedo, and the influence of range, impact point deviation and active homing range on the hit probability of anti-submarine assisted torpedo was quantitatively analyzed. The results show that the analysis has a certain theoretical guiding significance for the simulation, test and training scheme of the anti-submarine assisted torpedo combat capability.

Keywords: anti-submarine assisted torpedo; combat capability; trajectory model; hit probability

0 引言

反潜助飞鱼雷兼备导弹和鱼雷的优点, 具有射程远、航速高和战术使用突发性强等特点, 弥补了管装鱼雷航程小、机载鱼雷安全性低的不足, 逐步成为现代水面舰艇的重要反潜作战武器之一^[1-2], 如何发挥其作战能力以提高命中概率, 是作战部队日常训练和作战使用中关注的重点。由于反潜助飞鱼雷攻击弹道覆盖空中和水中 2 种介质, 入水时可落在目标的任意方位、任意距离上^[3], 并且入水后初始航向具有不确定性, 因而反潜助飞鱼雷攻击过程更为复杂, 影响其水下命中目标概率的参数更为多样。受训练成本、周期等因素的制约, 难以获得不同战场态势下的命中目标概率。笔者根据想定的反潜助飞鱼雷攻潜态势, 通过建立反潜助飞鱼雷弹道模型和目标规避模型, 利用蒙特卡罗法进行仿真计算, 得出不同条件下的命中目标概率, 并对仿真结果进行分析。

1 作战态势想定

反潜助飞鱼雷对潜攻击时一般可采用对目标提前位置射击法、对目标可能位置区域射击法和对目标现在点射击法。实际作战使用何种射击方法, 需要根据获取的具体目标信息情况而定^[1]。假定反潜助飞鱼雷发射前, 仅获取潜艇位置信息, 无法预测目标的航向和航速, 此时发射舰采用对目标现在点射击法。

设定鱼雷发射时刻为时间零点, 记为 t_0 , 以该时刻目标位置为坐标原点建立直角坐标系, 如图 1 所示, 取正北方向为 y 轴正方向, 正东方向为 x 轴正方向, y 轴正方向为 0° 航向, 顺时针方向为航向增大的方向, 右舷角为正值, 左舷角为负值。

图 1 中: 发射舰位于 w 点; 初始航速为 V_{w0} ; 初始航向为 C_{w0} ; 目标初始航速为 V_{m0} ; 初始航向为 C_{m0} ; 目标相对发射舰的初始距离为 D_0 ; 初始方位为 β_0 ; 则 t_0 时刻发射舰的位置坐标为:

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-05
作者简介: 孙常存(1982—), 男, 黑龙江人, 博士。

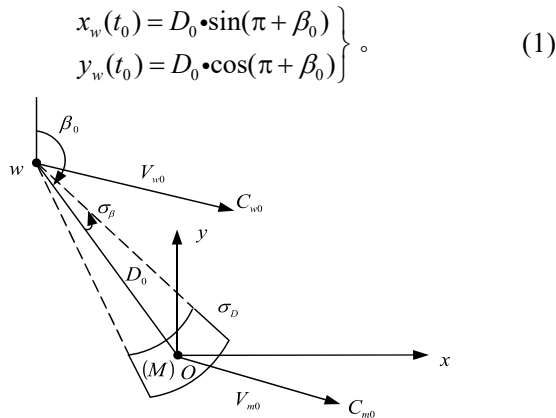


图 1 发射舰与目标初始运动态势

根据反潜助飞鱼雷可能的作战模式可知，发射舰可采用舰载声呐或直升机吊放声呐进行目标探测^[4]，无论采用何种探测方式，都应考虑声呐探测误差的影响。设我方声呐测距误差为 σ_D ，测向误差为 σ_β ，如上图。在声呐探测误差影响下，声呐探测到的目标相对发射舰的距离和方位可表示为：

$$\left. \begin{aligned} D &= D_0 + \sigma_D \\ \beta &= \beta_0 + \sigma_\beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则 t_0 时刻，声呐探测到的目标位置坐标为：

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_m(t_0) &= x_w(t_0) + D \cdot \sin(\beta) \\ \tilde{y}_m(t_0) &= y_w(t_0) + D \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2 模型建立

2.1 反潜助飞鱼雷弹道流程

反潜助飞鱼雷从发射到发现目标的整个航行过程可划分为 6 个弹道阶段，分别为空中弹道、入水初始弹道、初始搜索弹道、跟踪攻击弹道、再搜索弹道和垂直命中弹道。整个弹道阶段的组成流程如图 2 所示。

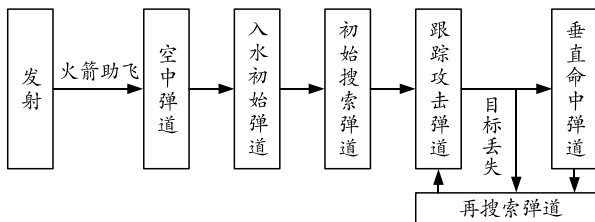


图 2 反潜助飞鱼雷全弹道流程

2.2 空中弹道模型

根据空中弹道的不同，反潜助飞鱼雷可分为弹道式和飞航式 2 种。弹道式反潜助飞鱼雷空中弹道包括助推段、滑翔段和雷伞段，如图 3 所示；飞航式反潜助飞鱼雷空中弹道包括助推段、调整段、巡航平飞段和雷伞段，如图 4 所示。

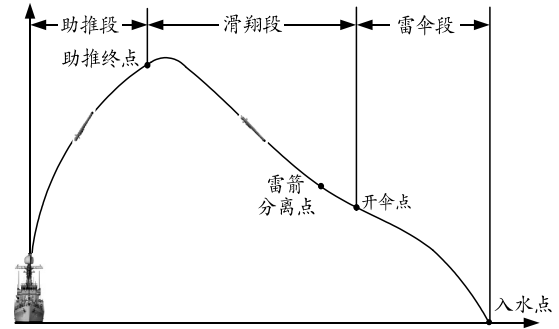


图 3 弹道式反潜助飞鱼雷空中弹道

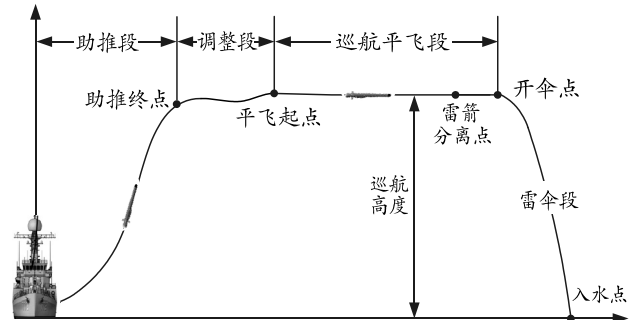


图 4 飞航式反潜助飞鱼雷空中弹道

反潜助飞鱼雷空中弹道模型主要是研究一定条件下的雷体运动微分方程组，完整的空中弹道分析应在地面、速度、雷体等几个坐标系确定的 3 维空间中进行，涉及到的方程及参数众多^[5-6]。由于反潜助飞鱼雷命中目标概率仿真需要明确鱼雷空中飞行距离与飞行时间的对应关系，为不受反潜助飞鱼雷空中弹道类型的限制，利用反潜助飞鱼雷空中飞行试验数据，通过多项式拟合得到飞行距离与飞行时间的关系式。

在反潜助飞鱼雷实航试验中，可获取从鱼雷出箱到雷箭分离点的试验数据。取 n 个航次鱼雷空中飞行试验数据，从鱼雷出箱到雷箭分离点的飞行距离为 (L_1, L_2, \dots, L_n) ，对应的飞行时间为 (T_1, T_2, \dots, T_n) ，空中雷伞弹道时间取为 T_s 。对试验数据进行 m 阶多项式拟合，得到拟合系数为 $(a_1, a_2, \dots, a_m, a_{m+1})$ ，则反潜助飞鱼雷空中飞行距离 L 与飞行时间 T 的关系式为：

$$T = a_1 L^m + a_2 L^{m-1} + \dots + a_m L + a_{m+1} + T_s \quad (4)$$

空中飞行距离即为发射舰初始位置与鱼雷实际入水点连线的距离。假设 t_0 时刻发射舰向目标当前点（声呐探测到的目标位置）发射鱼雷，鱼雷将落入以目标当前点为中心、落点精度 σ_R 为半径的圆形区域内，其落点偏差 R 服从正态分布 $N(0, \sigma_R^2)$ ，落点方位 β_R 服从均匀分布 $U(0, 2\pi)$ ，结合式(1)得到鱼雷实际入水点坐标为：

$$\left. \begin{aligned} x_i(T) &= \tilde{x}_m(t_0) + R \cdot \sin \beta_R \\ y_i(T) &= \tilde{y}_m(t_0) + R \cdot \cos \beta_R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

因此，鱼雷空中飞行距离为：

$$L = \sqrt{[x_i(T) - x_w(t_0)]^2 + [y_i(T) - y_w(t_0)]^2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)即可得出对应的空中飞行时间。

2.3 入水初始弹道模型

反潜助飞鱼雷的战斗载荷一般为轻型声自导鱼雷，在经空中弹道入水并动力启动后，鱼雷根据航行深度与设定初始搜索深度差值大小调整下潜角度，并以较小的深度超差过渡到初始搜索深度，初始航向在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上均匀分布，到达初始搜索深度后，自导开机进入水平面初始搜索弹道。

根据鱼雷入水初始弹道特点，可将入水初始弹道简化为水平面的直航运动，鱼雷航速为 V_t ，航向为 C_{t0} ，直航运动时间为 T_0 ，设 t_i 时刻鱼雷位置坐标为 $\{x_w(t_i), y_w(t_i)\}$ ，鱼雷入水初始弹道数学模型为：

$$\left. \begin{aligned} x_i(t_{i+1}) &= x_i(t_i) + \Delta t \cdot V_t \cdot \sin(C_{t0}) \\ y_i(t_{i+1}) &= y_i(t_i) + \Delta t \cdot V_t \cdot \cos(C_{t0}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7)进行弹道计算，当满足条件 $\sum \Delta t \leq T_0$ 时，鱼雷入水初始弹道结束。

2.4 初始搜索弹道模型

鱼雷到达初始搜索深度后，开始执行初始搜索弹道，即始终以设定的角速率、半径和搜索时间做向左或向右的旋回运动。设 t_i 时刻鱼雷旋回角速率为 ω_i ，旋回半径为 R_i ，航向为 C_i ，为减小累积误差，让鱼雷按舷而不是切线进行旋回运动，旋回运动数学模型可以表示为^[7]：

$$\left. \begin{aligned} x_i(t_{i+1}) &= x_i(t_i) + L_i \cdot \sin(C_i \pm \Delta C_i / 2) \\ y_i(t_{i+1}) &= y_i(t_i) + L_i \cdot \cos(C_i \pm \Delta C_i / 2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： L_i 为两点间舷长； ΔC_i 为两点间鱼雷航向变化量，左旋时取负，右旋时取正，分别表示为：

$$L_i = \sqrt{2R_i^2(1 - \cos \Delta C_i)}; \quad (9)$$

$$\Delta C_i = \omega_i \cdot \Delta t \quad (10)$$

2.5 跟踪攻击弹道模型

设 t_i 时刻鱼雷位置坐标为 $\{x_i(t_i), y_i(t_i)\}$ ，目标位置坐标为 $\{x_m(t_i), y_m(t_i)\}$ ，则鱼雷与目标距离为：

$$D_i = \sqrt{(x_m(t_i) - x_i(t_i))^2 + (y_m(t_i) - y_i(t_i))^2} \quad (11)$$

鱼雷追踪航向角为^[8]：

$$\theta_m = \begin{cases} \arctan \frac{x_m(t_i) - x_i(t_i)}{y_m(t_i) - y_i(t_i)} & (x_m(t_i) \geq x_i(t_i), y_m(t_i) < y_i(t_i)) \\ \pi - \arctan \frac{x_m(t_i) - x_i(t_i)}{y_m(t_i) - y_i(t_i)} & (x_m(t_i) > x_i(t_i), y_m(t_i) < y_i(t_i)) \\ \pi + \arctan \frac{x_m(t_i) - x_i(t_i)}{y_m(t_i) - y_i(t_i)} & (x_m(t_i) \leq x_i(t_i), y_m(t_i) < y_i(t_i)) \\ 2\pi - \arctan \frac{x_m(t_i) - x_i(t_i)}{y_m(t_i) - y_i(t_i)} & (x_m(t_i) < x_i(t_i), y_m(t_i) > y_i(t_i)) \\ \pi/2 & (x_m(t_i) \geq x_i(t_i), y_m(t_i) > y_i(t_i)) \\ 3\pi/2 & (x_m(t_i) \leq x_i(t_i), y_m(t_i) > y_i(t_i)) \end{cases} \quad (12)$$

在鱼雷搜索目标阶段，若使鱼雷自导系统发现目标，必须使目标进入自导系统有效作用范围之内，即目标要落入到鱼雷自导扇面中，因而目标相对鱼雷的距离 D_i 和方位 θ_m 需满足以下约束条件：

$$\left. \begin{aligned} D_i &< r \\ C_i - \lambda &< \theta_m < C_i + \lambda \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： C_i 为 t_i 时刻鱼雷航向； r 为自导作用距离； λ 为自导扇面半角。

鱼雷自导检测为发现目标，则鱼雷停止旋回，转向目标进行主动搜索捕获目标，主动捕获目标成功则转入主动跟踪。假定鱼雷在 t_i 时刻发现目标，鱼雷运动位置为 $\{x_i(t_i), y_i(t_i)\}$ ，目标运动位置为 $\{x_m(t_i), y_m(t_i)\}$ ，则鱼雷与目标距离 D_i 按式(11)计算，鱼雷追踪航向 C_i 按式(12)计算。鱼雷跟踪攻击弹道数学模型表示为：

$$\left. \begin{aligned} x_i(t_{i+1}) &= x_i(t_i) + \Delta t \cdot V_t \cdot \sin C_i \\ y_i(t_{i+1}) &= y_i(t_i) + \Delta t \cdot V_t \cdot \cos C_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

当鱼雷与目标距离未达到命中条件时，按式(14)进行弹道计算，直至鱼雷丢失目标转入再搜索弹道或命中目标。

2.6 再搜索弹道模型

鱼雷追踪攻击目标过程中，如果丢失目标，根据丢失目标时鱼雷与目标距离的不同，执行不同的再搜索弹道，由旋回再搜索和直航再搜索等弹道形式构成，直航搜索弹道模型同式(7)，旋回搜索弹道模型同式(8)。

2.7 潜艇目标规避模型

有关文献表明，潜艇声纳对鱼雷的报警距离在 $5 \sim 6$ km 量级^[9]，由于反潜助飞鱼雷一般落在距目标仅 1 km 的位置处，因而鱼雷入水时被敌潜艇探

测的概率必然很大，同时考虑到鱼雷小舷角攻击时加速会缩短与鱼雷的距离，敌潜艇一般采用“旋回+加速”的机动样式^[10]。

现假定鱼雷入水时敌潜艇收到鱼雷报警信号，经过艇长做出决策的反应时间和潜艇操纵的延迟时间后，敌潜艇采用背雷转旋回机动，当敌潜艇旋回到鱼雷处于其舷角大于 Q'_m 时止，改为加速直航。敌潜艇机动规避鱼雷如图 5 所示。

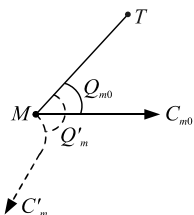


图 5 敌潜艇机动规避鱼雷

图中： M 为鱼雷报警时敌潜艇位置； T 为鱼雷入水位置； C_{m0} 为敌潜艇初始航向； C'_m 为敌潜艇完成旋回机动后的航向。

设 t_i 时刻鱼雷相对敌潜艇方位角为 θ_m ，按式(12)计算，敌潜艇航向角为 C_m ，则鱼雷处于敌潜艇的舷角为：

$$Q_m = \theta_m - C_m \quad (15)$$

根据 Q_m 可判断出鱼雷处于敌潜艇的舷别，从而确定敌潜艇旋回方向，再将 Q_m 与 Q'_m 作比较，从而确定何时停止旋回机动，改为加速直航。敌潜艇稳速直航弹道模型同式(7)，旋回机动弹道模型同式(8)，加速直航弹道模型为：

$$\left. \begin{aligned} x_m(t_{i+1}) &= x_m(t_i) + \Delta t \cdot V_m \cdot \sin C_m \\ y_m(t_{i+1}) &= y_m(t_i) + \Delta t \cdot V_m \cdot \cos C_m \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 V_m 为 t_i 时刻敌潜艇航速。若敌潜艇加速度为 α ，则 t_{i+1} 时刻潜艇航速按下式计算：

$$V_m(t_{i+1}) = V_m + \alpha \cdot \Delta t \quad (17)$$

3 仿真计算与结果分析

3.1 仿真程序流程

按照反潜助飞鱼雷作战流程，结合有关数学模型，基于蒙特卡罗法编制反潜助飞鱼雷发现目标概率仿真计算程序，单次仿真计算程序流程如图 6 所示。

3.2 仿真条件设置

反潜助飞鱼雷主要战术技术参数依据美国垂直发射的 VL-ASROC 进行选取，声呐探测参数和目标参数的选取分别如表 1 和 2 所示。

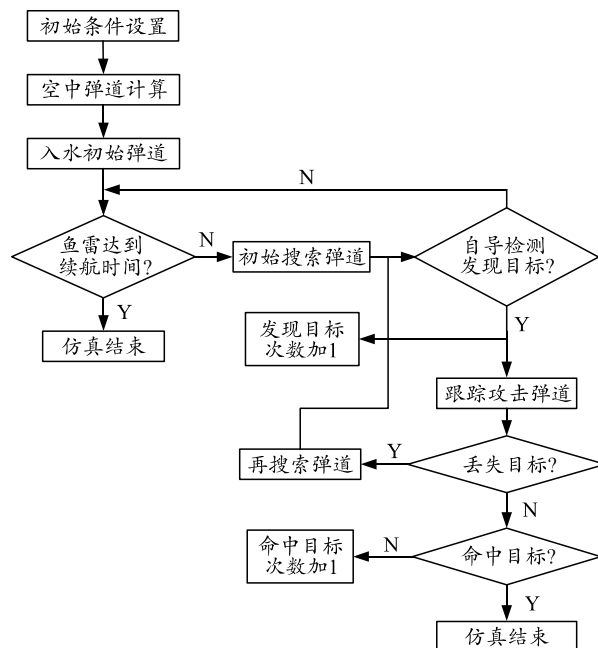


图 6 单次仿真计算流程

表 1 声呐探测参数

参数名称	仿真数值
测距误差	均值为 0、方差为 $0.02D_0$ 的正态分布
测向误差	均值为 0、方差为 2° 的正态分布

表 2 目标参数

参数名称	仿真数值
目标初始距离 D_0/km	0~60
目标初始方位 $\beta_0/(^\circ)$	120
初始位置坐标	(0, 0)
初始航速 V_{m0}/km	10
最大航速/km	25
初始航向 $C_{m0}/(^\circ)$	60
旋回角速度 $I/(^\circ/s)$	1
敌舷角临界值 $Q'_m/(^\circ)$	155
加速度 $\alpha/(m^2/s)$	2

3.3 仿真分析

3.3.1 命中目标概率随射程的变化

对不同落点偏差下命中目标概率随射程的变化进行仿真计算，结果如图 7 所示。

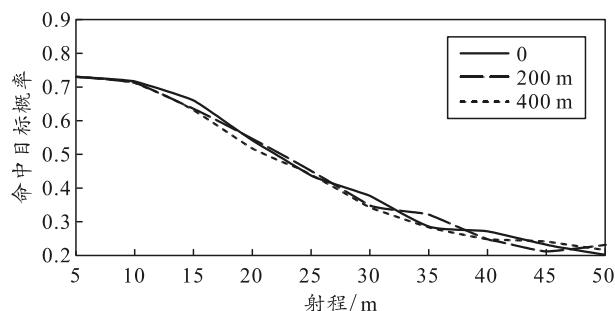


图 7 不同落点偏差下命中目标概率随射程变化

(下转第 77 页)