

自导深弹水下弹道建模与仿真^{*}

程善政, 叶利民, 李宗吉

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要:为分析自导深弹的攻潜效果,建立了自导深弹和无自导功能的深弹在不同操舵规律下纵平面内的弹道数学模型,利用 Matlab/Simulink 软件对深弹攻击作匀速直线运动的目标潜艇的弹道进行了仿真,通过仿真结果可以看出:自导深弹比无自导功能的深弹的攻潜效果有较大的提高,采用不同操舵规律时对目标的攻击效果有明显的差别。

关键词:自导深弹;水下弹道;建模与仿真

中图分类号:TJ013;TJ65 **文献标志码:**A

The Model and Simulation of Underwater Trajectory for Homing Depth Charge

CHENG Shanzheng, YE Limin, LI Zongji

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to analyze the effectiveness of homing depth charge attacking the submarine, in the paper, the mathematical model of longitudinal trajectory was established for homing depth charge with different control orderliness and depth charge without homing function. Then the Matlab/Simulink was used to carry on simulation research for the trajectory when the target was moving with invariable speed in a beeline. The simulation result shows that the effectiveness of homing depth charge attacking the submarine is improved compared with depth charge without homing function and the difference in effectiveness is very apparent among homing depth charges which are equipped with control orderliness.

Keywords: homing depth charge; underwater trajectory; model and simulation

0 引言

深水炸弹不仅是水面舰艇和反潜飞机重要的反潜武器,也是水面舰艇未来重要的反鱼雷武器。深弹具有造价低廉、维修保养方便、可装备不同的海上武器平台等特点,国外在保留传统航空深弹廉价和使用方便特点的基础上,增加了自导捕获和跟踪目标的装置,进一步研制出带有自导功能的深弹,使其攻潜效果与传统航空深弹相比有较大的提高,因此受到各国的广泛重视。为此 20 世纪 90 年代以来,俄罗斯、意大利、瑞典、美国和德国等国家相继研制了航空自导深弹。俄罗斯的 C-3B 无动力航空自导深弹、意大利的 A200 型自导深弹,用于装备反潜直升机完成反潜任务。

针对自导深弹在不同的操舵规律下攻击不同深度的目标,文中采用 Matlab/Simulink 设计实现了自

导深弹水下纵平面内的弹道仿真,从仿真结果分析几种情况下的攻击效果,对入水参数的选择以及装备战术技术性能的选取具有较高的参考价值。

1 自导深弹的运动数学模型

1.1 基本假设

- 1) 深弹外形轴线对于铅垂平面 xoy 对称,在纵向运动中不产生侧向力、偏航力矩和横滚力矩。
- 2) 深弹的控制系统是理想的,使深弹的对称轴面保持在垂直平面内。
- 3) 深弹航行的弹道为垂直平面内平面弹道。
- 4) 深弹运动的过程中不产生附加质量。
- 5) 深弹完全浸没在流体介质,处于全沾湿状态。
- 6) 忽略入水弹道引起的弹道诸元的变化,深弹入水后自导系统立刻开始工作。

^{*} 收稿日期:2010-11-02

作者简介:程善政(1987-),男,山东邹城人,硕士研究生,研究方向:武器系统总体与核心子系统设计。

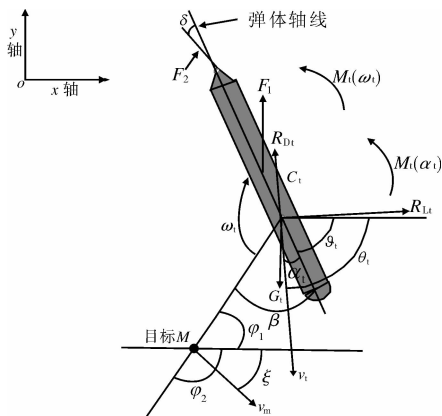


图 1 自导深弹水下受力示意图

1.2 坐标系的建立

坐标系为以自导深弹入水点 o 为原点, M 为目标, ox 为水平方向, 取使自导深弹初始速度水平分量为正的方向作为 ox 的正向, oy 垂直向上为正的坐标轴; 纵向运动是指深弹在铅垂平面 xoy 内的运动。纵向运动由深弹质心 C_t 在 xoy 平面内的运动和绕弹体质心的转动运动组成。

1.3 纵向运动方程

根据以上假设, 可以得到自导深弹的运动方程:

$$\begin{cases} m_t \frac{dv_t}{dt} = (G_t - F_1) \sin \theta_t - R_{Dt} \\ m_t v_t \frac{d\theta_t}{dt} = (G_t - F_1) \cos \theta_t - R_{Lt} \\ J_t \frac{d\omega_t}{dt} = M_t + F_1 x_b \cos \theta_t \\ \frac{d\vartheta_t}{dt} = \omega_t \\ \frac{dx_{t1}}{dt} = v_t \cos \theta_t \\ \frac{dy_t}{dt} = -v_t \sin \theta_t \\ \alpha_t = \theta_t - \vartheta_t \\ \bar{\omega} = \frac{\omega_t L_t}{v_t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha_t, \vartheta_t, \theta_t, \omega_t, v_t, x_{t1}, y_t$ 这 7 个运动参数称为纵向运动参数。 v_t 为深弹在任意时刻的速度大小; θ_t 为深弹的速度方向与射向 ox 方向的夹角, 即弹道角; ϑ_t 为深弹弹体轴线与射向 ox 的夹角, 即姿态角; α_t 为深弹速度的方向与深弹弹体轴线的夹角, 即攻角; ω_t 为深弹绕其质心 C_t 的角速度, 取顺时针方向为正; x_{t1}, y_t 为任意时刻深弹的位置坐标; m_t 为深弹的质量; J_t 为深弹的转动惯量; x_b 为深弹质心和浮心之间的距离; R_{Dt} 为深弹所受阻力、 R_{Lt} 为升力; M_t 为深弹所受的俯仰力矩; G_t 为深弹自身的重力, F_1 为深弹所受浮力;

L_t 为深弹的弹体长度。自导深弹所受力和力矩的模型为:

$$\begin{cases} R_{Dt} = C_{Dt} \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t \\ R_{Lt} = C_y^\alpha \frac{1}{2} \rho v_t^2 2 S_t \alpha + C_y^\delta \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t \delta + \\ C_y^\omega \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t \bar{\omega} \\ M_t = m_t^\alpha \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t L_t \alpha - m_t^\delta \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t L_t \delta - \\ m_t^\omega \frac{1}{2} \rho v_t^2 S_t L_t \bar{\omega} \\ G_t = m_t g \\ F_1 = \rho g V \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_t 为深弹的最大横截面积; V 为深弹弹体体积; ρ 为海水的密度; g 为重力加速度; C_{Dt} 为以深弹最大横截面积 S_t 为特征面积的阻力因数; $C_y^\alpha, C_y^\delta, C_y^\omega$ 分别为深弹的升力因数对攻角 α 、舵角 δ 的位置导数和对角速度 ω_t 的旋转导数; $m_t^\alpha, m_t^\delta, m_t^\omega$ 分别为深弹的俯仰力矩因数对攻角 α 、舵角 δ 的位置导数和对角速度 ω_t 的旋转导数; δ 为某时刻舵角值。纵向的运动中只需补充一个控制方程, 就可以与纵向运动方程联立求解纵向运动参数和舵角 δ , 确定深弹的运动及其弹道。

1.4 控制规律

拟采用几种不同的操舵方法, 因此可根据如下制导方程确定深弹下潜过程的攻潜弹道, 并以此来确定操舵机构的操纵控制程序。

1.4.1 不打舵

舵值始终保持在 0° , 这种情况下自导深弹与传统的无自导功能的深弹相同, 不能自动导引向目标位置。即 $\delta = 0^\circ$ 。

1.4.2 极限舵

这种操舵规律比较简单, 对目标与深弹相对位置的判定较为容易。

$$\delta = \begin{cases} +\delta_{\max} & x_m \geq x_t \\ -\delta_{\max} & x_m < x_t \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_m 为任意时刻目标的横轴坐标, δ_{\max} 为深弹所能输出的最大舵角值。

1.4.3 比例舵

$$\delta = \begin{cases} +\delta_{\max} & \varphi_1 \geq \varphi_e \\ k\varphi_1 & -\varphi_e < \varphi_1 < \varphi_e \\ -\delta_{\max} & \varphi_1 \leq -\varphi_e \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ_e 为设定的门限值, k 为操舵系数。依据深弹与目标之间的方位角 φ_1 的大小来确定舵应输出的舵角

值。

$$\text{当 } x_t \neq x_m \text{ 时, } \varphi_1 = -\arctan \frac{y_m - y_t}{x_m - x_t};$$

$$\text{当 } x_t = x_m \text{ 时, } \varphi_1 = \frac{\pi}{2}.$$

1.4.4 追踪导引舵

$$\delta = \begin{cases} +\delta_{\max} & \delta \geq \delta_e \\ k_1 \dot{\theta}_t + k_2 (\varphi_2 - \theta_t + \alpha_t) & -\delta_e < \delta < \delta_e \\ -\delta_{\max} & \delta \leq -\delta_e \end{cases} \quad (5)$$

式中： δ_e 为设定的舵角输出门限， k_1 、 k_2 为操舵系数。深弹与目标之间的方位角 φ_2 的计算方法如下：

$$\text{当 } x_t \neq x_m \text{ 时, } \varphi_2 = \arctan \frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} + \pi;$$

$$\text{当 } x_t = x_m \text{ 时, } \varphi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

在没有目标的情况下，要保持深弹的舵角 δ 为 0° ，可以使深弹尽快的达到极限下潜速度，以最快的速度下潜。

2 目标捕获判据

在仿真中采用以下简化模型：深弹与目标的相对距离： $r = \sqrt{(x_m - x_t)^2 + (y_m - y_t)^2}$ ；偏离自导深弹轴线的角度差值： $\beta = \varphi_2 - \vartheta_t$ ；约束条件为：1) $r \leq r_0$ (r_0 表示深弹自导作用距离)；2) $-\lambda \leq \beta \leq \lambda$ (λ 为深弹有效搜索扇面的 $1/2$)。若同时满足两个约束条件，即认为有效捕获。

3 目标运动模型

目标未发现遭受深弹攻击时，通常作匀速定深直线运动。为简化计算，文中只考虑潜艇作匀速定深直线运动的情况，不做规避动作。

无论目标作匀速直线运动，还是作变速变深机动，均可根据目标距离及方位推算出目标的初始坐标 (x_{m0}, y_{m0}) ，再依据所解算的目标速度 v_m 和航向 ξ ，即可推算目标的瞬时坐标 (x_m, y_m) ，目标作匀速直线运动时的具体模型如下：

$$\begin{cases} x_m = x_{m0} + \int_0^t v_m \cdot \cos \xi dt \\ y_m = y_{m0} + \int_0^t v_m \cdot \sin \xi dt \end{cases} \quad (6)$$

4 仿真计算

4.1 仿真初始条件

4.1.1 自导深弹计算参数

自导深弹是传统深弹基础上增加了自导捕获和跟踪目标的装置，其主要性能参数略。

深弹的入水速度为 $v_{10} = 20\text{m/s}$ ，入水弹道角 $\theta_{10} = \pi/3$ ，其它的初始参数均为 0，深弹入水点是在目标速度方向上的后置点，与目标的水平距离为 30m，采用不同的操舵规律，但所有操舵规律下所能输出的最大舵角均相同。

4.1.2 目标计算参数

为便于计算，对目标潜艇作如下假设：目标在 100m、200m、300m 三个不同的深度上均作定深匀速直线运动，航行的速度均为 10m/s。

4.2 仿真计算结果与分析

从图 2 中可以看出，攻击 100m 深度的目标时，深弹入水既能立刻发现目标并操舵导引向目标，攻击 200m 深度的目标时，入水后很短的时间后就能发现目标并操舵导引，但是攻击较深的 300m 目标时，在入水后的 10s 内无法探测到目标，所以前 10s 无自导功能的深弹的弹道与另外三种操纵方式下相同。若深弹没有自导功能时，深弹达到极限下潜速度时在水平方向上最终偏离入水点约 30~40m。在不同的操舵控制规律下，各自的弹道在 X 方向偏离入水点的差别较大，当攻击 100m 深度的目标，自导深弹下潜到 100m 深度时，在极限舵操舵方式下偏离原入水点比较大，约 250m，在比例舵控制下偏离原入水点约 160m，在追踪导引舵控制下偏离原入水点较小，只有 60m 左右；当

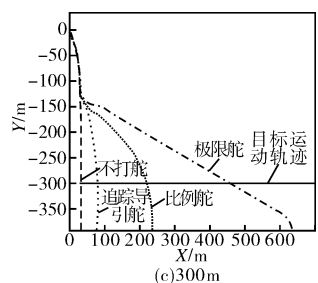
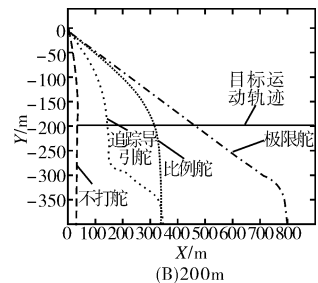
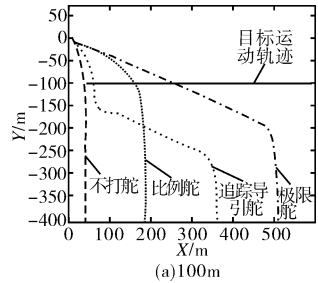


图 2 不同打舵方式下对不同深度上目标攻击时的弹道

攻击 200m 深度的目标，自导深弹下潜到 200m 深

度时,在极限舵操舵方式下偏离原入水点仍然比较大,约 460m,在比例舵控制下偏离原入水点约 310m,在追踪导引舵控制下偏离原入水点 150m 左右;当攻击 300m 深度的目标,自导深弹下潜到 300m 深度时,在极限舵工作方式下偏离原入水点约 460m,在比例舵控制下偏离原入水点约 210m,在追踪导引舵控制下偏离原入水点只有 80m 左右;由于在采用的控制规律下自导深弹所能输出的实际最大舵角较小,当自导深弹下潜到目标所在深度以下时,虽能探测到目标,但无法控制深弹使其爬升,所以均将继续下潜;当最终无法探测到目标后,深弹都将以弹道角 $\theta_t = \pi/2$, $v_t = 14.7\text{m/s}$ 的极限下潜速度垂直下潜。

从图 3 可以看出,由于增加了自导导引功能,无论采用何种操舵控制规律,自导深弹总能比无自导功能的深弹更接近目标,若在多枚自导深弹投放攻击的情况下时,从而使自导深弹命中毁伤目标的概率提高。攻击同一目标时,在比例舵操纵规律下的自导深弹能更接近目标,追踪导引舵操纵效果次之,极限舵操纵方式下较一般,而且在各种操纵规律下,最接近目标的时刻不同,与传统的无自导功能的深弹相比较,在追踪导引舵操纵方式下能最快的导引向目标。

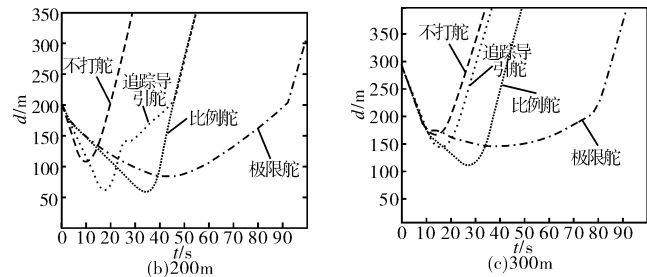


图 3 不同打舵方式下的深弹与不同深度上目标的相对距离随时间的变化

图 4 是不同的操纵方式下深弹攻击不同深度目标时速度随时间的变化情况。深弹的极限下潜速度只与深弹自身的技术参数有关,与何种操纵方式无关,所以当深弹无法探测到目标后,深弹最终均将达到极限下潜速度 $v_t = 14.7\text{m/s}$;由于在追踪导引舵操纵方式下自导深弹所输出的舵角与较多的参数有关,所以当能探测到目标时,其速度的变化震荡较多,而比例舵操纵方式下其舵角的获得只与深弹和目标的方位角有关,所以不会发生震动,极限舵操纵方式下则由于能更长时间的使得目标在自导深弹的探测范围内,所以其达到极限下潜速度需要更长的时间。

5 结论

通过对比不同操纵方式下的自导深弹以及无自导功能的深弹对目标的攻击弹道等仿真结果,可以看出:

- 1) 带有自导功能的自导深弹其攻潜效果比传统深弹有较大改进,能达到更接近目标的效果。
- 2) 不同的操纵方式下攻击相同深度的目标以及同种操纵方式时攻击不同深度目标的效果有所区别。攻击相同深度的目标潜艇时,深弹在追踪导引舵控制规律下到达目标深度时在横向上偏离入水点的距离最小,其达到目标所在深度所需要的时间最短;自导深弹在相同入水条件下打击同一目标时,比例舵控制规律下比其它几种控制规律下的自导深弹能达到更接近目标的目的;极限舵操舵规律下的自导深弹攻击目标时在横向上偏离入水点的距离最大,到达目标所在深度需要的时间最长。
- 3) 弹体极限下潜速度的大小只与弹体本身的参数有关,但是达到极限下潜速度的时间与所采用的操纵方式有较大关系。

参考文献:

[1] 张志涌. MATLAB 教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
 [2] 魏凤昕. 火箭深弹外弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
 [3] 孙明太. 航空反潜概论[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
 [4] 范辉,张宇文,李文哲. 自导深弹导引弹道设计与仿真[J]. 火力与指挥控制,2009(8):75-79.
 [5] 彭荆明,舒旭先. 深弹控制仿真系统研究[J]. 水雷战与舰船防护,2009(1):35-38.
 [6] 何国宝,王敏毅. 无动力导向航空深弹及其攻潜作战的计算机仿真[J]. 水雷战与舰船防护,2000(1):55-58.

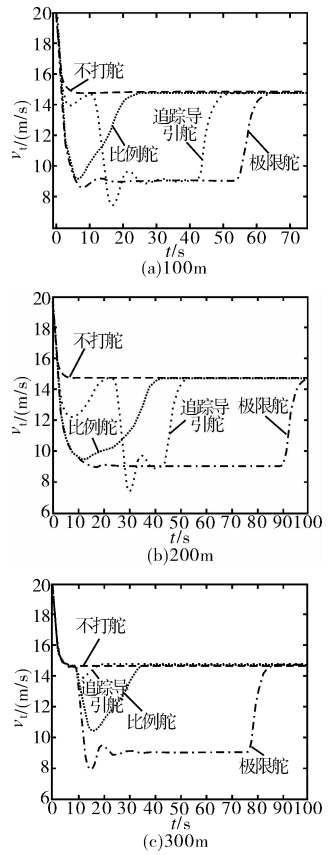


图 4 不同打舵方式下深弹攻击不同深度上目标时的速度随时间的变化