

# 高空远程滑翔鱼雷弹道建模与仿真\*

张 磻, 宋保维, 王司令

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

**摘要:**为建立高空远程滑翔鱼雷弹道仿真系统,首先对总体方案进行研究,建立了纵平面无动力滑翔段、低空突防段、减速段弹道模型。设计了俯仰通道和滚转通道的控制律,并对减速段弹道影响因素进行分析。最后基于 Matlab Simulink 建立高空远程滑翔鱼雷仿真工具箱,对空中弹道进行仿真。仿真结果表明,该弹道模型准确可靠,控制系统设计合理,具有一定的实用性。

**关键词:**滑翔;鱼雷;数学模型;弹道;仿真

**中图分类号:**TJ630.1 **文献标志码:**A

## Modeling and Trajectory Simulation for High Altitude Long-range Gliding Torpedo

ZHANG Bo, SONG Baowei, WANG Siling

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:**To establish a high altitude long-range gliding torpedo trajectory simulation system, the overall scheme was researched at first. The models of unpowered gliding trajectory, low altitude penetration trajectory and decelerating trajectory were given. The control laws of pitch channel and roll channel were designed. The influential factors of decelerating trajectory were analyzed. The Matlab Simulation tools box was carried out, and the aerial trajectory was simulated. The simulation results show that the trajectory model is accurate, reliable and has practical value.

**Keywords:**gliding; torpedo; mathematic model; trajectory; simulation

### 0 引言

长期以来,由于多方面原因,中国海军对近海海域水下目标的搜索、监视能力一直相对薄弱,尤其是能够进行大区域、大面积水域快速巡逻和快速反应的空中反潜装备相对欠缺,已经严重滞后于中国海洋安全形势的发展变化<sup>[1]</sup>。航空反潜在空潜对战中一直处于优势地位,但随着潜射防空导弹技术的发展,这一优势被逐渐打破。为了提高作战飞机的生存能力,军事专家们提出了“防区外攻击”的概念。即通过增加武器系统的航程,实现飞机在防区外攻击的目的。高空远程滑翔鱼雷,就是在这一概念上形成的一种高空反潜武器。文中针对这一新型反潜武器进行弹道仿真,为进一步的研究奠定基础。

### 1 总体方案

文中所涉及的高空远程滑翔鱼雷整个工作过程

可以分为以下几个阶段,如图1所示。

1)反潜巡逻机在空中进行搜索,发现目标后,通过通讯系统将敌方的坐标位置等信息传送给作战指挥中心,作战指挥中心下达作战任务。

2)根据给定的算法(原则上采用投放距离最大为最优指标,从而可以保证载机的安全性)计算在不同投放初始条件下投放点的经纬度和高度以及预定弹道方案<sup>[2]</sup>,在反潜飞机起飞前,将这些数据装入任务加载机,反潜飞机携带高空远程滑翔鱼雷飞往预定的作战区域。

3)反潜飞机到达作战区域后,将目标水域位置、弹道方案等任务数据传输到制导控制部件的任务计算机中,调整速度和姿态,然后启动连接分离机构,实施对鱼雷的投放并启动滑翔组件控制延时器。

4)当延时器到达预设的延迟时间后,启动滑翔组件工作,滑翔翼面和立尾翼自动弹开,GPS接收机快速截获卫星信号,随后进入预定自主攻击目标阶段。在滑翔鱼雷飞行的过程中,GPS/SINS/北斗组合导航

\* 收稿日期:2011-08-29

基金项目:西北工业大学重点创新项目(2008KJ01001)资助

作者简介:张磻(1971-),男,北京人,博士研究生,研究方向:系统工程。

仪不断测出滑翔鱼雷的实时位置坐标、飞行速度和姿态信息,任务计算机不断将这些信息与方案弹道各点进行比较,形成误差信号,给出舵偏指令,通过舵机系统控制滑翔鱼雷按方案弹道飞行。

5) 由于现代海战中经常出现水面舰艇与潜艇进行协同作战的情况,因此当高空远程滑翔鱼雷到达预定的攻击区附近后,通过装在鱼雷腹部的火箭助推器使得鱼雷变轨并进行低空突防,以避免敌方协同作战的舰载雷达的搜索。

6) 当高空远程滑翔鱼雷进入水区域后,由于低空突防高度一般小于50m甚至更低,降落伞对滑翔鱼雷姿态和速度调整较难达到要求,并且降落伞目标过大,因此考虑采用装在头部的火箭反推器进行减速,并调整入水姿态,鱼雷的控制系统通过感应加速度变化并启动滑翔组件脱离装置,实现变体过程。

7) 鱼雷入水后,海水电池进水,发动机启动工作,鱼雷逐渐过渡到有动力有控制航行阶段,并调整姿态,按照预先设定的运动程序进行搜索,当鱼雷发现目标后,启动导引系统,发出的导引指令控制鱼雷运动,鱼雷自动跟踪并不断接近目标,直至最后命中目标<sup>[3]</sup>。

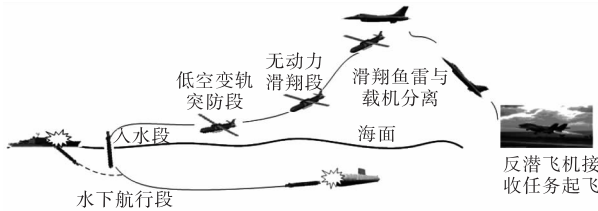


图1 高空远程滑翔鱼雷作战流程示意图

## 2 数学模型

在弹道设计的初始阶段,认为高空远程滑翔鱼雷仅在纵平面内运动,没有出现弹道偏离的现象,也不考虑随机干扰产生的误差。在研究高空远程滑翔鱼雷运动模型之前,先作如下几点基本假设:①高空远程滑翔鱼雷为刚体,其外形关于纵平面对称;②流体动力位置力及阻尼力满足线性假设;③忽略因加工及安装造成的误差;④不考虑地球的自转和地球的曲率,近似认为地面坐标系为惯性坐标系;⑤忽略因火箭燃料消耗引起的质量和质心位置的变化。由此给出纵平面内弹道的数学模型。

运动模型建立在地面坐标系  $Axyz$ 、体坐标系  $Ox_1y_1z_1$ 、弹道坐标系  $Ox_2y_2z_2$  和速度坐标系  $Ox_3y_3z_3$  下<sup>[4]</sup>。

### 1) 无动力滑翔段纵向方程组

无动力滑翔段纵向方程组由动力学模型,运动学

模型和角度关系及控制方程组成。

$$m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin \theta \quad (1)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = Y - mg \cos \theta \quad (2)$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x + J_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) = M_z \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \theta \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin \theta \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \quad (6)$$

$$\alpha = \vartheta - \theta \quad (7)$$

$$\delta_z = f(\varepsilon_x) \quad (8)$$

### 2) 低空突防段

考虑到助推火箭推力的作用,低空突防段纵向运动方程组与无动力滑翔段相比式(1)、式(2)变为:

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - X - mg \sin \theta \quad (9)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + Y - mg \cos \theta \quad (10)$$

### 3) 减速段

考虑到反推火箭作用力,减速段纵向运动方程组与无动力滑翔段相比式(1)~式(3)变为:

$$m \frac{dV}{dt} = -P_1 \cos \alpha - X - mg \sin \theta \quad (11)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = -P_1 \sin \alpha + Y - mg \cos \theta \quad (12)$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x + J_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) = M_z + P_1 d \quad (13)$$

其中: $P$ 为助推火箭推力大小; $P_1$ 为反推火箭推力大小; $d$ 为反推火箭距质心距离。其它参数定义见参考文献[4]。

## 3 控制系统设计<sup>[5]</sup>

### 3.1 无动力滑翔段和低空突防段控制律设计

无动力滑翔段和低空突防段控制系统的设计目标是使其以足够的准确度保持在弹道轨迹上。由于鱼雷本身的搜索距离较大,与制导炸弹相比不需要极小的投弹命中率和圆概率误差,控制任务主要为保证增程距离和安全入水,对入水点精度误差要求不高。

为使俯仰通道、偏航通道、滚转通道之间耦合尽可能小,滚转角必须稳定在一定范围之内。给出俯仰通道和滚转通道控制律如下:

### 1) 俯仰通道

俯仰通道采用法向加速度控制,控制律为:

$$\Delta\delta_z = 57.3 * (K_0\Delta\vartheta + K_1q + K_2\Delta a_2 + K_3\Delta H + K_4\dot{H} + K_5\Delta H/s) \quad (14)$$

式中: $\Delta\delta_z$  为升降舵增量; $q$  为俯仰角速率; $\Delta a_2$  为法向加速度; $\Delta H$  为高度增量。在无动力滑翔段,仅对  $K_0$ 、 $K_1$  进行整定,其它参数均为零,在低空突防段需对所有参数进行整定。

### 2) 滚转通道

如果高空远程滑翔鱼雷在飞行过程中由于各种原因发生滚转,控制指令与鱼雷上执行坐标系之间的相对关系将会受到破坏。增加滚转角速度信息作为反馈量,可以增大系统阻尼,使动态过程的超调下降,调节时间缩短。增加积分信号提高系统的跟踪精度和鲁棒性。设计的控制律如下:

$$\Delta\delta_x = 57.3 * (K_\gamma\Delta\gamma + K_{\dot{\gamma}}\Delta\dot{\gamma} + K_{\int\gamma} \int \Delta\gamma dt) \quad (15)$$

式中: $\Delta\delta_x$  为副翼偏转角增量; $K_\gamma$  (无量纲) 为倾斜角偏差传递系数; $K_{\dot{\gamma}}$  (s) 为倾斜角速率偏差传递系数; $K_{\int\gamma}$  为倾斜角积分传递系数。

## 3.2 减速段弹道的影响因素分析

影响减速段弹道的主要因素有:反推力的大小,反推作用时间和反推火箭的安装位置。反推力的大小对鱼雷的散布、速度及姿态有很大影响,不合适的反推力会使得鱼雷入水达不到要求。反推力作用时间对鱼雷的散布影响相对较小,但是对速度及姿态影响很大。反推力时间过大,会使得鱼雷入水姿态过小,而反推力时间不足,姿态入水则过大。反推火箭安装位置对鱼雷入水的速度影响相对较小,但是对散布及姿态影响较大。因此,在实际设计当中反推火箭应当采用合理的安装位置。

## 4 仿真结果

参考文献[6]中表 1 给出的滑翔翼、水平尾翼、垂直尾翼参数,设定投放速度 300m/s,高度 6000m。无动力滑翔段俯仰角为 12°,近海面突防高度为 50m。助推火箭推力 3000N,推力作用时间 100s。减速段反推力 -14000N,反推火箭点火时间 2.9s。

使用 Matlab Simulink 建立仿真工具箱,对空中全弹道进行仿真,得到仿真曲线如图 2 ~ 图 5 所

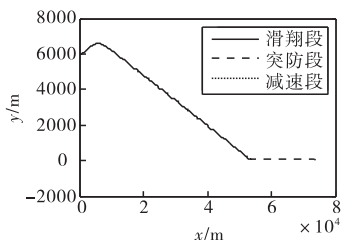


图 2 弹道曲线

示。由图 2 可以看出,当投放高度为 6000m 时,高空远程滑翔鱼雷的增程距离达到 73km,增程效果十分明显。由图 3 可以看出在突防段进行高度切换时响应较为迅速。图 4 显示在反推火箭作用下,鱼雷达到安全入水条件。图 5 显示在变轨段俯仰角变化在控制范围之内,保证弹道顺利切换。图 6 显示当滚转角产生 7° 偏差时,控制系统能够迅速消除偏差。

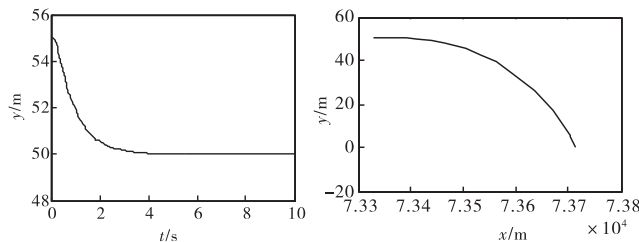


图 3 低空突防段高度响应曲线 图 4 减速段弹道曲线

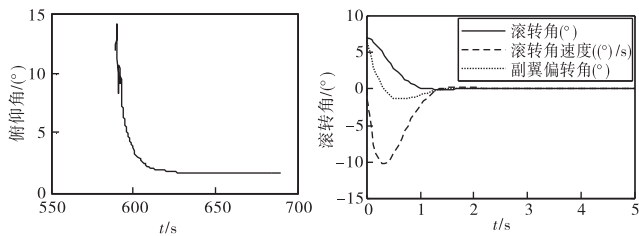


图 5 低空突防段俯仰角响应曲线 图 6 滚转角响应曲线

## 5 结束语

文中针对高空远程滑翔鱼雷这一新概念武器系统,由总体方案出发,对工作流程加以分析,给出纵向弹道各个阶段的数学模型,并进行控制律的设计,仿真结果表明所设计的控制律能够很好的实现预计的弹道。

### 参考文献:

[1] 葛晖,徐德民,项庆睿. 自主式水下航行器控制技术新发展[J]. 鱼雷技术,2007,15(3):1-7.

[2] 李蜜,沈春林. 一种基于 GPS/SINS 的精确制导炸弹控制系统的设计研究[J]. 控制理论与应用,2005,24(5):5-8.

[3] 潘光,吴文辉,毛昭勇,等. 高空远程滑翔鱼雷全弹道仿真关键技术[J]. 鱼雷技术,2009,4(10):10-15.

[4] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

[5] 孟秀云. 导弹制导与控制系统原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2003.

[6] 朱信尧,宋保维,毛昭勇,等. 高空滑翔 UUV 气动参数估算与启动特性分析[J]. 计算机仿真,2011,5(28):179-183.