

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.09.008

## 舰空导弹与蛇行机动反舰导弹对抗仿真

刘博

(海军装备部航技部, 北京 100071)

**摘要:** 针对舰空导弹与蛇行机动反舰导弹对抗的模拟问题, 对舰空导弹与蛇行机动反舰导弹对抗进行仿真。分析了模拟舰空导弹拦截蛇行机动反舰导弹的重要性, 将舰空导弹与反舰导弹的三维运动轨迹分解为纵平面和水平面上的二维运动, 分别建立模型, 进行轨迹合成, 分析反舰导弹蛇行机动时偏航角的变化规律并给出对抗的仿真流程。仿真结果表明: 该模型符合实际情况, 可为舰空导弹对蛇行机动反舰导弹的拦截适宜性判断提供依据。

**关键词:** 舰空导弹; 蛇行机动; 反舰导弹; 三维弹道

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## Simulation on Antagonism Between Ship-to-Air Missile and Snake Maneuvering Anti-Ship Missile

Liu Bo

(Aviation Technology Support Branch of Navy, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Aiming at the simulation problem that antagonism between ship-to-air missile and snake maneuvering anti-ship missile, simulate the antagonism. The importance of simulation of antagonism between ship-to-air missile and snake maneuvering anti-ship missile is analyzed, three-dimensional movement is decomposed two-dimensional in the plumb and level plane, then composing the movement contrail, three-dimensional proportional guidance trajectory is achieved. It analyzes the order of crab angle when anti-ship missile carries on snake maneuver and describes the simulation flow chart. The simulation result indicates that the model possesses applicability.

**Key words:** ship-to-air missile; snake maneuver; anti-ship missile; three-dimensional trajectory

### 0 引言

现代海战中, 反舰导弹是攻击大中型水面舰艇的主要武器, 命中一枚反舰导弹就可以使一艘舰艇丧失战斗力。末端机动是提高反舰导弹突防效能的一个有效手段, 如俄罗斯马斯基特超光速反舰导弹在末制导段就采用了水平侧向蛇行机动和垂直平面内跃升—俯冲机动, 大大提高了突防能力, 使其成为目前世界上最先进的反舰导弹之一<sup>[1]</sup>。反舰导弹与舰空导弹这对矛与盾的较量日趋激烈, 使得研究舰空导弹拦截蛇行机动反舰导弹的模型显得尤为重要。文献[2]和[3]以不同的角度在水平面内研究了舰空导弹与反舰导弹的对抗过程。笔者假设舰空导弹采用比例导引制导律, 模拟了舰空导弹与侧向蛇行机动反舰导弹的三维遭遇过程。

### 1 三维比例导引模型

#### 1.1 速度矢量分解

假设采用杀伤空域坐标系  $OXYZ$ 。舰空导弹的速度矢量  $V_m$  与水平面间的夹角  $\theta_m$  称为弹道倾角, 速

度矢量指向水平面上方, 弹道倾角为正, 反之为负;  $V_m$  在水平面内投影与  $OX$  轴的夹角  $\psi_m$  称为弹道偏角, 由  $OY$  轴俯视时, 逆时针旋转为正<sup>[4]</sup>。则舰空导弹速度在坐标系上的分量为

$$\begin{cases} v_{mx} = v_m \cos(\theta_m) \cos(\psi_m) \\ v_{my} = v_m \sin(\theta_m) \\ v_{mz} = -v_m \cos(\theta_m) \sin(\psi_m) \end{cases} \quad (1)$$

假设反舰导弹的速度是  $V_t$ , 弹道倾角为  $\theta_t$ , 弹道偏角为  $\psi_t$ 。按照式 (1) 即可写出反舰导弹速度矢量在坐标系上的分量。

#### 1.2 纵平面相对运动方程

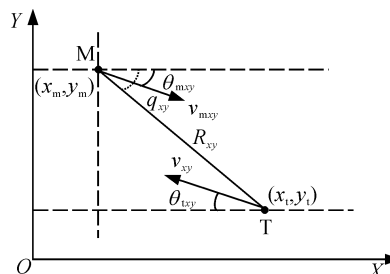


图1 纵平面的相对运动模型

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-04-23

基金项目: 某国防预研基金资助项目(40108040402)

作者简介: 刘博(1972—), 男, 河南人, 工程师, 从事航空军械保障研究。

纵平面内舰空导弹与反舰导弹的相对运动模型如图 1 所示。

图 1 中, M 表示舰空导弹, 位置参数用  $(x_m, y_m)$  表示; T 表示反舰导弹, 位置参数用  $(x_t, y_t)$  表示。在 XOY 平面上,  $R_{xy}$  为相对距离;  $q_{xy}$  为相对视角角;  $\theta_{mxy}$  和  $\theta_{txy}$  分别为两者的速度在纵平面的投影与 OX 轴正向的夹角;  $v_{mxy}$  与  $v_{txy}$  分别为舰空导弹和反舰导弹的速度。角度以 OX 轴为基准, 逆时针为正。相对运动方程如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} \dot{R}_{xy} = -v_{mxy} \cos(q_{xy} - \theta_{mxy}) + v_{txy} \cos(q_{xy} - \theta_{txy}) \\ R_{xy} \dot{q}_{xy} = v_{mxy} \sin(q_{xy} - \theta_{mxy}) - v_{txy} \sin(q_{xy} - \theta_{txy}) \\ \dot{\theta}_{mxy} = k \dot{q}_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$R_{xy} = \sqrt{(x_t - x_m)^2 + (y_t - y_m)^2} \quad (3)$$

$$q_{xy} = \arctan \frac{y_t - y_m}{x_t - x_m} \quad (4)$$

$$v_{mxy} = \sqrt{v_{mx}^2 + v_{my}^2} \quad (5)$$

$$v_{txy} = \sqrt{v_{tx}^2 + v_{ty}^2} \quad (6)$$

$$\theta_{mxy} = \arctan \frac{v_{my}}{v_{mx}} \quad (7)$$

$$\theta_{txy} = \begin{cases} \arctan(v_{ty} / v_{tx}) & v_{tx} \geq 0 \\ \arctan(v_{ty} / v_{tx}) + \pi & v_{tx} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

### 1.3 水平面相对运动方程

水平面内舰空导弹与反舰导弹的相对运动模型如图 2 所示。

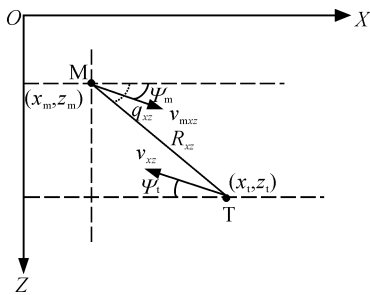


图 2 水平面的相对运动模型

在 XOZ 平面中, 相对运动方程如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} \dot{R}_{xz} = -v_{mxz} \cos(q_{xz} - \psi_m) + v_{txz} \cos(q_{xz} - \psi_t) \\ R_{xz} \dot{q}_{xz} = v_{mxz} \sin(q_{xz} - \psi_m) - v_{txz} \sin(q_{xz} - \psi_t) \\ \dot{\psi}_m = k \dot{q}_{xz} \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$\psi_m = -\arctan(z_t / x_t) \quad (10)$$

$$q_{xz} = -\arctan \frac{z_t - z_m}{x_t - x_m} \quad (11)$$

其他参量可以仿照 1.2 节写出。

## 2 反舰导弹蛇行机动模型

反舰导弹攻击目标的基本过程<sup>[3]</sup>是:

- 1) 准备攻击段: 反舰导弹末制导雷达跟踪目标后, 实施直接导引控制, 尽快瞄准目标(航向对准);
- 2) 机动段: 在满足机动开始条件下, 由攻击转入机动规避, 即按设计的机动周期、机动次数, 通过等幅等频的航向舵偏指令控制反舰导弹作蛇形机动飞行;
- 3) 攻击段: 在满足机动结束条件下, 由机动飞行转入导引控制状态, 直至击中目标。

建立反舰导弹蛇形机动模型时, 只考虑水平面内的侧向机动, 纵向保持平飞。结合三维比例导引模型中所描述的参数, 取仿真步长为  $\Delta t$ , 主要考虑反舰导弹的偏航角  $\psi_t$  的变化规律:

$$\begin{cases} \psi_t(t + \Delta t) = \psi_t(t) + (v_{xz} / r) \Delta t & z_t < z_{t0} \\ \psi_t(t + \Delta t) = \psi_t(t) - (v_{xz} / r) \Delta t & z_t \geq z_{t0} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $r$  为蛇形机动半径;  $z_{t0}$  为反舰导弹的机动前的航路捷径。

反舰导弹的法向加速度为:

$$a_{\perp} = v_{tx}^2 / r \quad (13)$$

考虑法向加速度  $a_{\max}$  的限制, 则法向加速度指令为:

$$a_{\perp} = \begin{cases} a_{\perp} & |a_{\perp}| \leq a_{\max} \\ a_{\max} & |a_{\perp}| > a_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

## 3 参数更新与循环结束标志<sup>[5-6]</sup>

### 3.1 参数更新

舰空导弹参数更新公式为:

$$\begin{cases} x_m(t + \Delta t) = x_m(t) + v_{mx} \Delta t \\ y_m(t + \Delta t) = y_m(t) + v_{my} \Delta t \\ z_m(t + \Delta t) = z_m(t) + v_{mz} \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \theta_{mxy}(t + \Delta t) = \theta_{mxy}(t) + \dot{\theta}_{mxy} \Delta t \\ \psi_m(t + \Delta t) = \psi_m(t) + \dot{\psi}_m \Delta t \end{cases} \quad (16)$$

仿照上式, 可以写出反舰导弹参数的更新公式。

舰空导弹与反舰导弹的距离为:

$$R = \sqrt{(x_t - x_m)^2 + (y_t - y_m)^2 + (z_t - z_m)^2} \quad (17)$$

由于在二维平面上采用制导律, 只能更新  $\theta_{mxy}$  和  $\theta_{txy}$ , 而舰空导弹与反舰导弹的运动轨迹需要更

新弹道倾角  $\theta_m$  和  $\theta_l$ ，所以需要更新公式：

$$\theta_m = a \tan \frac{\tan \theta_{mxy}}{\sqrt{1 + \tan^2 \psi_m}} \quad (18)$$

同样，可写出  $\theta_l$  的表达式。

### 3.2 循环结束标志

舰空导弹的需用法向过载为：

$$\begin{cases} n_{xy} = v_{mxy} \dot{\theta}_{mxy} / g \\ n_{xz} = v_{mxz} \dot{\theta}_{mxz} / g \end{cases} \quad (19)$$

假设舰空导弹的可用法向过载为  $n$ ，如果  $n_{xy}$  或者  $n_{xz}$  小于  $n$ ，则表示弹道受过载限制，跳出循环；如果  $\dot{R}_{xy} > 0$  或者  $\dot{R}_{xz} > 0$ ，则表明目标脱靶，跳出循环；如果弹目距离  $R$  小于设定距离  $\Delta r$ ，则表明命中目标，跳出循环；如果舰空导弹达到了有效射程，则跳出循环。

## 4 实例仿真

舰空导弹拦截蛇行机动反舰导弹仿真流程如图3所示。

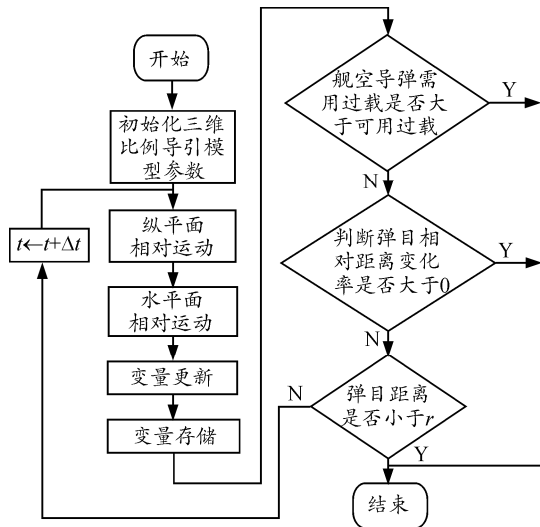


图3 仿真流程图

参数设定：假设舰空导弹制导开始时刻，舰空导弹初始位置为  $(0,0,0)$ ， $V_m = 800 \text{ m/s}$ ， $\theta_m = 30^\circ$ ， $k = 4$ ， $\Delta r = 30 \text{ m}$ ，最大可用过载  $n = 20g$ ，反舰导弹飞行高度  $y_l = 25 \text{ m}$ ， $V_l = 300 \text{ m/s}$ ， $\theta_l = 0^\circ$ ，蛇行机动开始时刻反舰导弹位置为  $(20\ 000, 25, 2\ 000)$ ， $\psi_l = 90^\circ$ ，蛇行机动半径  $r = 500 \text{ m}$ ，弹道仿真步长  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 。

仿真结果如图4、5所示。图4显示了反舰导弹的蛇行机动过程，此时，反舰导弹的侧向机动过载

为  $18g$ 。如图5所示，由于反舰导弹采用侧向机动，舰空导弹的侧向需用过载肯定大于纵向需用过载；因此，仅描绘了舰空导弹水平面上法向过载变化曲线。由图5可以看出，舰空导弹水平需用法向过载最大达到了  $35g$ ，而舰空导弹的可用法向过载为  $20g$ 。因此，在这种条件下，舰空导弹无法拦截该蛇行机动反舰导弹。

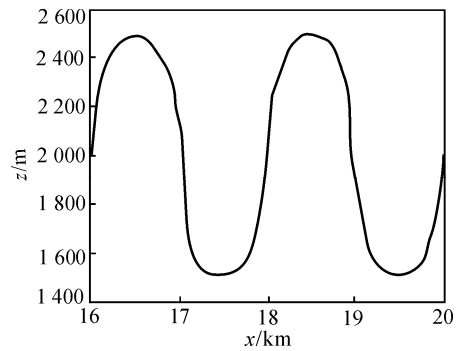


图4 反舰导弹蛇行机动示意图

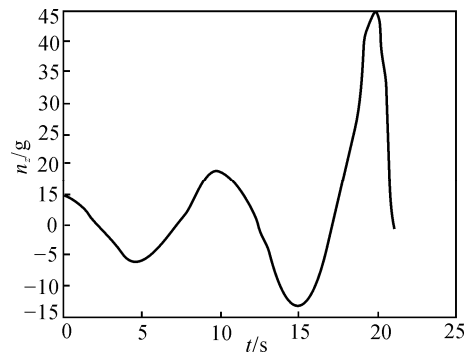


图5 舰空导弹水平面上法向过载变化曲线

反舰导弹速度不变，改变反舰导弹蛇行机动的半径，令  $r = 1\ 000 \text{ m}$ ，仿真结果如图6、7所示。此时，反舰导弹的侧向机动过载为  $9g$ ，由图7可以看出，舰空导弹水平面上需用法向过载小于  $20g$ 。因此，舰空导弹可以拦截该蛇行机动反舰导弹，拦截过程如图6所示。

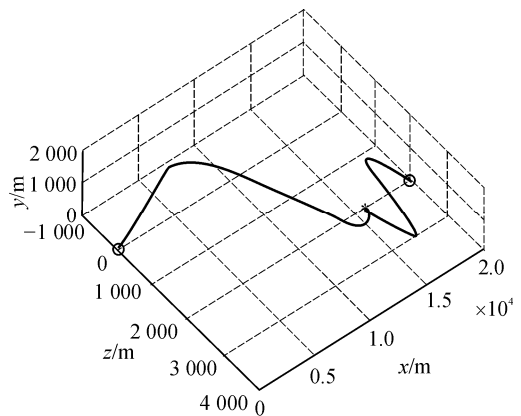


图6 舰空导弹拦截蛇行机动反舰导弹过程