

doi: 10.7690/bgzd.2013.02.002

舰空导弹拦截机动目标弹道仿真

刘家祺¹, 欧阳中辉¹, 孟蕾¹, 羊涛²

(1. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92768 部队, 广东 汕头 515828)

摘要: 为研究舰空导弹对蛇形机动与螺旋机动目标拦截效果的差异, 对舰空导弹拦截机动目标进行弹道仿真。首先建立反舰导弹的三维蛇形机动模型和螺旋机动模型, 然后建立舰空导弹的三维矢量拦截模型, 考虑导引头噪声和舵系统的过载限制, 最后在 Matlab 环境下进行 2 种机动的拦截弹道仿真, 采用蒙特卡洛法仿真不同机动强度和噪声强度下的脱靶量, 并对比分析拦截蛇形机动和螺旋机动的需求过载和脱靶量。仿真结果验证了反舰导弹机动模型、舰空导弹拦截模型的正确性和可行性, 可为有针对性拦截机动目标提供参考。

关键词: 舰空导弹; 反舰导弹; 蛇形机动; 螺旋机动; 弹道仿真

中图分类号: TJ760⁺.4 **文献标志码:** A

Trajectory Simulation of Ship-to-Air Missile Intercepting Maneuverable Target

Liu Jiaqi¹, Ouyang Zhonghui¹, Meng Lei¹, Yang Tao²

(1. Department of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. No. 92768 Unit of PLA, Shantou 515828, China)

Abstract: In order to investigate the differences between intercepting zigzag course and spiral course target of ship-to-air missile, the trajectory of ship-to-air missile intercepting anti-ship missile is simulated. Firstly, the zigzag course and spiral course 3D maneuver trajectory models of anti-ship missile are set up. And then, the 3D vector intercepting model of ship-to-air missile is built considering the seeker's noises and the rudder's overload limit. Finally, the intercepting trajectories of the two kinds of maneuver are simulated by using Matlab. The miss distance under different circumstances of noises and maneuver is calculated by Monte Carlo method. The overload need and miss distance of zigzag course and spiral course are analyzed comparing to each other. The simulation result shows that the anti-ship missile course model and ship-to-air missile intercepting model are correct and applicable, and it can provide reference to intercept maneuverable target.

Key words: ship-to-air missile; anti-ship missile; zigzag course; spiral course; trajectory simulation

0 引言

反舰导弹是一种可以从多种平台发射, 精确打击水面大型舰艇的制导武器, 已经成为当今海战的主要攻击武器。比较有效的突防措施是在末端进行曲线机动, 理论分析和试验验证这种措施可以极大增加对方的防御难度, 显著提高突防概率^[1-2]。与此同时, 水面舰艇如何利用舰空导弹对反舰导弹进行成功拦截, 提高自身的生存能力, 是世界各国海军普遍关注的问题^[3]。文献[4]研究了反舰导弹作蛇形机动对拦截导弹的突防规避策略, 并分析了与传统的攻击方式相比的优劣; 文献[5]分析了螺旋机动对弹道导弹再入弹头提高突防概率的有效作用; 文献[6]从反导防御能力入手, 研究末端变轨机动方式的最佳使用方法; 文献[4-6]只是建立了平面弹道模型, 忽略了水平平面和垂直平面的交叉耦合作用, 还不够贴近实际情况, 也没有比较蛇形机动和螺旋机动的孰优孰劣; 因此, 笔者在三维弹道模型的基

础上, 主要从舰空导弹拦截机动飞行反舰导弹角度出发, 详细分析了拦截蛇形机动和螺旋机动的技术难点及两者的区别。

1 反舰导弹机动模型

不考虑其他外界探测器, 目前最先进的舰载雷达对掠海飞行反舰导弹发现距离也就 30 km^[7], 当距离舰艇小于 20 km 时, 反舰导弹已经进入近程防空范围, 这个阶段被击落的概率很大, 所以机动开始时机大多在这个阶段, 目前蛇形机动技术比较成熟, 螺旋机动等非平面机动处在理论研究阶段。

1.1 蛇形机动模型

实现蛇形机动飞行一般采用过载控制方案, 开始机动后, 通过舵偏指令控制导弹飞行, 主要体现为航向角和水平面法向加速度的反复变化, 机动的程度受到最大侧向过载的限制^[8-11]。为了方便计算起见, 假设其在水平面内做轴线平行于坐标轴的正

收稿日期: 2012-08-19; 修回日期: 2012-09-30

基金项目: 航空科学基金(20085584010)

作者简介: 刘家祺(1987—), 男, 江苏人, 硕士, 助理工程师, 从事海军武器系统仿真研究。

弦曲线运动, 周期为 T_s , 振幅为 A_s , 且保持不变。机动开始和结束时刻导弹速度都平行于坐标轴。

机动段开始时刻 $t=0$, 导弹在 B 点, 位移 $\mathbf{B}=(x_B, y_B, z_B)$, 假设在 B 点导弹平行于 x 轴飞行, 若导弹速度仍为 $\mathbf{V}_B=(v_{Bx}, v_{By}, v_{Bz})$, $v_{By}=0$, $v_{Bz}=0$, 机动段任意 t 时刻反舰导弹的位移和速度分别为 $\mathbf{T}=(x_T, y_T, z_T)$ 和 $\mathbf{V}_T=(v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz})$, 则有

$$\begin{aligned} x_T &= x_B + v_{Tx}t \\ y_T &= y_B \\ z_T &= z_B - A_s + A_s \sin\left(\frac{2\pi}{T_s}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ v_{Tx} &= v_{Bx} \\ v_{Ty} &= v_{By} = 0 \\ v_{Tz} &= \frac{2\pi A_s}{T_s} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s}t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{蛇形机动最大过载 } a_{s\max} = A_s \left(\frac{2\pi}{T_s}\right)^2.$$

1.2 螺旋机动模型

蛇形机动只是水平面内的机动, 而螺旋机动则是在纵向和横向 2 个方向上的机动, 是真正意义上的三维机动。螺旋机动的水平方向和垂直方向上同时存在着相同频率和振幅的舵偏指令, 只不过相位差 $\pi/2$ 。同样为了运动方程的简化, 假设其轴线平行于坐标轴, 幅度 A_1 和周期 T_1 恒定, 机动开始和结束时刻导弹速度都平行于坐标轴。

$t=0$ 时导弹在 B 点, 位移 $\mathbf{B}=(x_B, y_B, z_B)$, 假设在 B 点导弹平行于 x 轴飞行, 若导弹速度仍为 $\mathbf{V}_B=(v_{Bx}, v_{By}, v_{Bz})$, $v_{By}=0$, $v_{Bz}=0$, 机动段任意 t 时刻反舰导弹的位移和速度分别为 $\mathbf{T}=(x_T, y_T, z_T)$ 和 $\mathbf{V}_T=(v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz})$, 则有

$$\begin{aligned} x_T &= x_B + v_{Tx}t \\ y_T &= y_B + A_1 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \frac{\pi}{2}\right) \\ z_T &= z_B + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \frac{\pi}{2}\right) \\ v_{Tx} &= v_{Bx} \\ v_{Ty} &= \frac{2\pi A_1}{T_1} \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \frac{\pi}{2}\right) \\ v_{Tz} &= -\frac{2\pi A_1}{T_1} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{螺旋机动最大过载 } a_{l\max} = A_l \left(\frac{2\pi}{T_l}\right)^2.$$

2 舰空导弹拦截模型

设反舰导弹质量为 m , 动量为 $\mathbf{P}=m\mathbf{V}_r$, 相对于原点 O_r 的角动量为 \mathbf{L} , 用速度表示

$$\mathbf{L} = \mathbf{R} \times \mathbf{P} = m\mathbf{R} \times \mathbf{V}_r \quad (3)$$

其相对于原点的转动惯量为 I , 矢量 \mathbf{R} 的转动角速度为 $\boldsymbol{\Omega}$, 根据转动惯量定义 $I = mR^2$, 则角动量 \mathbf{L} 用角速度表示

$$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\Omega} = mR^2\boldsymbol{\Omega} \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 得, $m\mathbf{R} \times \mathbf{V}_r = mR^2\boldsymbol{\Omega}$, 则 $\boldsymbol{\Omega}$ 的矢量计算公式为

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{R} \times \mathbf{V}_r / R^2 \quad (5)$$

\mathbf{V}_c 方向与 \mathbf{R} 平行, 方向相反, 所以有

$$\mathbf{V}_c = -|\mathbf{V}_c| \mathbf{e}_r = -\frac{|\mathbf{V}_c|}{|\mathbf{R}|} \mathbf{R} \quad (6)$$

由相对速度平行方向分解公式 $|\mathbf{V}_c| = |\mathbf{V}_r| |\cos\theta|$ 和点积定义式, 得

$$|\mathbf{V}_c| = |\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}_r| / |\mathbf{R}| \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6), 得

$$\mathbf{V}_c = -\frac{|\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}_r|}{|\mathbf{R}|^2} \mathbf{R} \quad (8)$$

真比例导引律 (TPN) 的指令加速度 \mathbf{a}_M 施加在垂直于视线的方向, 其大小正比于接近速度 \mathbf{V}_c 大小和视线角速率 $|\boldsymbol{\Omega}|$ 的乘积, 即

$$|\mathbf{a}_M| = N |\mathbf{V}_c| |\boldsymbol{\Omega}| \quad (9)$$

由右手螺旋定则知 $\boldsymbol{\Omega}$ 垂直于视线转移平面内的矢量 \mathbf{a}_M 和 \mathbf{V}_c , TPN 中 \mathbf{a}_M 垂直 \mathbf{V}_c , 所以导引律矢量形式为

$$\mathbf{a}_M = N \mathbf{V}_c \times \boldsymbol{\Omega} \quad (10)$$

将式 (5)、式 (8) 代入导引方程 (10), 得

$$\mathbf{a}_M = -\frac{N |\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}_r|}{|\mathbf{R}|^4} \mathbf{R} \times (\mathbf{R} \times \mathbf{V}_r) \quad (11)$$

弹目相向运动时 $\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}_r$ 的符号一直都是负的, 去掉绝对值符号后, 方程为

$$\mathbf{a}_M = \frac{N (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}_r)}{|\mathbf{R}|^4} \mathbf{R} \times (\mathbf{R} \times \mathbf{V}_r) \quad (12)$$

理想情况下, 视线角速度只是由相对运动产生

的,事实上它还受进入导引头闪烁噪声、接收机噪声和角噪声等大量干扰因素的影响^[12],由中心极限定理知,满足一定条件下大量随机变量和的极限是高斯分布的,所以可以合理假设导引头输出量视线角速率上存在一个符合 $N(\xi, \sigma^2)$ 高斯噪声 x ,视线角速度的方向仍然不变。则有

$$\Omega' = (|\Omega| + x) \Omega / |\Omega| \quad (13)$$

加速度受弹体操作力矩的限制,不一定能满足上述指令加速度的要求,实际作用于弹体的加速度

$$a_M' = \begin{cases} a_M, & |a_M| < a_{max} \\ a_{max} (a_M / |a_M|), & |a_M| \geq a_{max} \end{cases}$$

其中 a_{max} 为弹体最大可用过载。

加速度和速度,速度和位移的关系为:

$$dV_M/dt = a_M \quad (14)$$

$$dR_M/dt = V_M \quad (15)$$

若已知舰空导弹的初始位移和速度和目标的运动方程,可以通过数值积分的方法计算出任意时刻舰空导弹的运动状态。

3 仿真分析

在地面坐标系中,机动前反舰导弹沿 x 轴负方向作匀速直线运动,被攻击的舰艇沿着 z 轴正方向作匀速直线运动,反舰导弹机动开始时刻 $t=0$,反舰导弹和舰艇分别在 B 点和 F 点,假设舰空导弹在反舰导弹机动段的开始时刻发射,所以 F 点也是反舰导弹的发射点,仿真步长 0.001 s,有效导航比 $N=4$ 。反舰导弹 T 在 B 点的初始位移和速度: $R_B = (20\ 000, 10, 800)$ m, $V_{TB} = (-750, 0, 0)$ m/s。舰艇 J 和舰空导弹 M 在 F 的初始位移 $R_F = (0, 0, 200)$ m,速度为 $V_{JF} = (0, 0, 15)$ m/s, $V_{MF} = (750, 40, 100)$ m/s。通过 Matlab 仿真得到了反舰导弹做蛇形机动和螺旋机动的弹道,以及舰空导弹拦截这 2 种机动目标时的弹道,如图 1 所示。

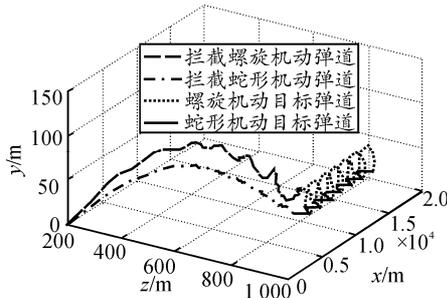


图 1 2 种机动的拦截弹道

图 2 和图 3 分别为拦截蛇形机动和螺旋机动时,

舰空导弹的需用过载曲线。图 1(a)为需用加速度矢量在 3 个坐标轴分量图,图 1(b)为其标量值变化曲线。反舰导弹蛇形机动和螺旋机动段的机动幅度 $A_s = A_l = 20$ m,周期为 $T_s = T_l = 2$ s,最大机动过载 $a_{smax} = a_{lmax} = 20g$ 。

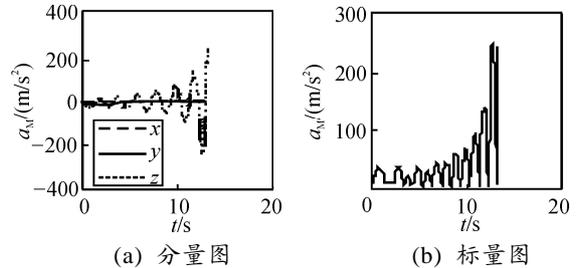


图 2 舰空导弹拦截蛇形机动目标需用加速度

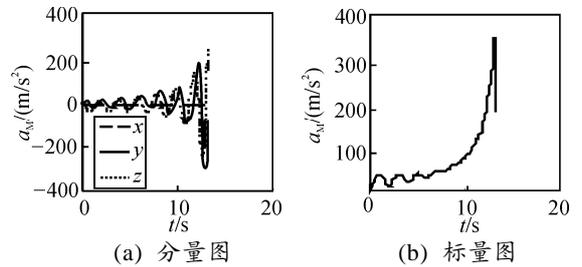


图 3 舰空导弹拦截螺旋机动目标需用加速度

从弹道弯曲程度上看,相同过载的螺旋机动要比蛇形机动引起拦截弹道弯曲程度大;从拦截弹需用过载上看,前者引起 2 个方向过载的变化,而后者只引起一个方向过载变化,螺旋机动引起的过载最大值大于蛇形机动,蛇形机动引起的过载大小反复变化的震荡频率却远高于螺旋机动。

表 1、表 2 为拦截蛇形机动、螺旋机动脱靶量 500 次蒙特卡罗仿真结果,用变步长法精确仿真实际脱靶量,制导盲区距离设为 150 m,为了方便比较,表中目标机动和视线角速率噪声选取 11 种不同的组合。

通过分析各因素对脱靶量的影响数据,可得到以下结论:

1) 比较表 1 和表 2,在同样噪声条件下,相同幅度、周期和最大机动过载的螺旋机动比蛇形机动造成的脱靶量平均值大,脱靶量标准差基本相同。

2) 如果舰空导弹过载限制 $30g$,反舰导弹最大机动过载 $20g$,经仿真知,对于蛇形机动需要噪声均值和标准差都超过 9×10^{-3} rad/s,对于螺旋机动要超过 8×10^{-3} rad/s,即可造成反舰导弹的脱靶量均值大于 4 m,如果其杀伤距离为 4 m,这样大小的噪声干扰会大大减小反舰导弹的命中概率。

3) 比较表 1、表 2 中的第 6 行和 10 行,第 9

行和第11行, 相同最大过载条件下, 蛇形机动和螺旋机动的机动幅度增大比机动周期减小造成的脱靶

量大, 即机动幅度大比机动次数多的反舰导弹更难拦截。

表1 舰空导弹拦截蛇形机动目标脱靶量

序号	A_s/m	T_s/s	N_s	$a_{smax}/(m/s^2)$	$\xi/(mrad/s)$	$\sigma/(mrad/s)$	d_{sml}/m	σ_d/m
1	20.0	2.00	7	20.0	0	0	0.50	0
2	20.0	2.00	7	20.0	4	4	1.63	0.17
3	20.0	2.00	7	20.0	4	8	1.87	0.31
4	20.0	2.00	7	20.0	8	4	2.90	0.24
5	20.0	2.00	7	20.0	8	8	3.27	0.46
6	26.7	2.00	7	26.7	4	4	8.09	0.25
7	26.7	2.00	7	26.7	4	8	8.34	0.51
8	26.7	2.00	7	26.7	8	4	11.37	0.31
9	26.7	2.00	7	26.7	8	8	11.83	0.59
10	20.0	1.73	8	26.7	4	4	6.68	0.28
11	20.0	1.73	8	26.7	8	8	9.46	0.62

表2 舰空导弹拦截螺旋机动目标脱靶量

序号	A_l/m	T_l/s	N_l	$a_{lmax}/(m/s^2)$	$\xi/(mrad/s)$	$\sigma/(mrad/s)$	d_{sml}/m	σ_d/m
1	20.0	2.00	7	20.0	0	0	1.20	0
2	20.0	2.00	7	20.0	4	4	2.29	0.17
3	20.0	2.00	7	20.0	4	8	2.75	0.35
4	20.0	2.00	7	20.0	8	4	3.74	0.24
5	20.0	2.00	7	20.0	8	8	4.16	0.46
6	26.7	2.00	7	26.7	4	4	11.79	0.32
7	26.7	2.00	7	26.7	4	8	12.41	0.69
8	26.7	2.00	7	26.7	8	4	13.54	0.31
9	26.7	2.00	7	26.7	8	8	14.04	0.69
10	20.0	1.73	8	26.7	4	4	9.52	0.27
11	20.0	1.73	8	26.7	8	8	11.96	0.58

4 结束语

仿真结果说明了反舰导弹机动模型、舰空导弹拦截模型的正确性和可行性。反舰导弹三维的螺旋机动比平面内的蛇形机动给拦截带来更大的难度。为了保证拦截概率, 需要对末端防御的舰空导弹制导精度和可用过载提出更高的要求。模型提供了一种分析目标机动, 干扰噪声和过载限制等因素对脱靶量影响的方法, 同时也为评估舰空导弹的作战效果提供了定量分析的依据。

参考文献:

- [1] 顾文锦, 赵红超. 超音速反舰导弹末端非平面机动研究[J]. 飞行力学, 2003, 21(3): 36-40.
- [2] 孙明玮. 反舰导弹机动与导引配合的弹道设计研究[J]. 现代防御技术, 2007: 35(1): 23-26.
- [3] 张玉龙. 海军舰空导弹武器系统发展及对策研究[J]. 中国航天, 1998, 6(6): 32-37.
- [4] 马良, 姜青山. 反舰导弹对舰空导弹的机动突防模型研

- 究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 185-188.
- [5] 陈万春, 聂蓉梅, 刘佳琪, 等. PAC-3 爱国者拦截弹末制导精度仿真研究[J]. 飞航导弹, 1999, 19(7): 57-62.
- [6] 武志东, 顾文锦, 毕兰金, 等. 反舰导弹最优末端变轨机动策略[J]. 兵工自动化, 2010, 29(10): 1-5.
- [7] 张玉龙, 吴威娜. 美国航母反导弹作战初步分析[J]. 飞航导弹, 2000, 2(2): 7-10.
- [8] 彭汉国, 王永洁, 赵阳杨. 超声速反舰导弹蛇形机动突防舰空导弹建模仿真[J]. 战术导弹技术, 2008, 9(5): 78-83.
- [9] 李新国, 方群. 有翼导弹飞行动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 80-92.
- [10] Imado F, Miwa S. Missile Guidance Algorithm Against High-g Barrel Roll Maneuvers[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17(1): 123-128.
- [11] 顾文锦, 王士星, 张翼飞. 实现大空域的过载控制[J]. 战术导弹控制技术, 2001, 32(1): 8-13.
- [12] 李红亮, 曹延杰, 宋贵宝, 等. 基于兰彻斯特方程的反舰导弹突防模型[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 16-18.