

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.011

## 近程防空导弹拦截巡航导弹的建模与仿真

李英杰<sup>1</sup>, 贾燕军<sup>2</sup>, 李相民<sup>3</sup>(1. 海军航空工程学院 研究生 2 队, 山东 烟台, 264001; 2. 海军装备部, 北京 100084;  
3. 海军航空工程学院 兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为有效提高导弹的杀伤能力, 对近程防空导弹拦截巡航导弹进行建模与仿真。对近程防空导弹武器系统的探测和杀伤区进行分析, 计算导弹的发射区。根据防空导弹的导引规律, 建立对巡航导弹的拦截模型, 根据导弹的杀伤区、搜索跟踪雷达对目标的发现距离等计算出导弹的发射区。利用 MATLAB 进行仿真, 计算拦截次数、每次拦截时目标距离发射阵地的距离及拦截总时间, 并根据不同的杀伤区, 对导弹速度与拦截次数的关系进行仿真。该方法具有一定的通用性, 可为提高导弹战术技术性能提供参考。

**关键词:** 巡航导弹; 反导拦截; 比例导引; 建模仿真**中图分类号:** N945.12; N945.13 **文献标识码:** A

## Research on Modeling and Simulation of Short Range Anti-Aircraft Missile Interception for Cruise Missile

Li Yingjie<sup>1</sup>, Jia Yanjun<sup>2</sup>, Li Xiangmin<sup>3</sup>(1. No. 2 Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;  
2. Naval Equipment Department, Beijing 100084, China;  
3. Dept. of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to improve killing capability of anti-aircraft missile effectively, the modeling and simulation of the short-range anti-aircraft missile intercepting cruise missile is constructed. According to the analysis on detecting zone and killing zone, compute the launching zone of short-range anti-aircraft missile. The model of anti-aircraft missile interception for the cruise missile is constructed under guide rules. On the basis of the killing zone of short-range anti-aircraft missile and the detecting distance of search and track radar, the launching zone of short-range anti-aircraft missile is worked out. Then the simulation is conducted in MATLAB. Calculate the times of interception and the distance of every interception. In different killing zone, calculate the connection of missile speed and interception times. This model has universality in some extent, so it can provide reference to improve the technical performance and tactical performance of the missile.

**Keywords:** cruise missile; anti-missile interception; proportional navigation; modeling and simulation

### 0 引言

防空是国家军事战略的重要组成部分, 根据组织指挥层次和任务的不同, 通常将现代防空作战分为国土防空、野战防空和要地防空 3 种。其中, 要地防空是保卫国家重要地区, 如重要城市、军事基地、交通枢纽等地区安全的防空<sup>[1]</sup>。

自从第一次海湾战争以来, 精确制导武器在现代战争中的地位越来越重要, 而精确制导武器中最为耀眼的就是巡航导弹。自从海湾战争美国首次使用“战斧”巡航导弹取得了很好的战果之后, 在科索沃和阿富汗战争中, 巡航导弹都发挥了很大的作用<sup>[2]</sup>, 大大提高了空袭作战的效率, 对现代战争产生了重大的影响<sup>[3]</sup>。防空导弹是防御巡

航导弹的有效兵器之一, 防空导弹的战术技术性能决定了拦截巡航导弹的能力。对于巡航导弹来说, 防空导弹的拦截能力主要取决于防空导弹的单发命中概率、在杀伤空域内的拦截次数。由于巡航导弹速度快, 近程防空导弹拦截距离短, 拦截次数有限, 故通过对拦截次数的计算, 分析影响拦截次数的因素, 以提高武器系统的效能。

### 1 近程防空导弹武器系统对巡航导弹的探测模型及分析

近程防空导弹武器系统对巡航导弹的探测是通过空或对海警戒雷达来实现。巡航导弹飞行高度低, 最低巡航高度可达 7 m<sup>[4]</sup>, 对于低空目标, 雷达探测距离主要受地球曲率的影响, 雷达

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2010-08-20

基金项目: 军队预研基金资助项目 (40108040402)

作者简介: 李英杰 (1977-), 男, 山东人, 硕士, 从事火力控制系统研究。

对巡航导弹的发现距离可由以下公式确定:

$$D_f = 4.12 \times (\sqrt{H_0} + \sqrt{H_t}) \quad (1)$$

其中:  $H_0$  为雷达天线高度(m);  $H_t$  为目标飞行高度(m)。

假设巡航导弹飞行高度 20 m, 雷达天线高度 20 m, 可得  $D_f = 37$  km, 对巡航导弹的发现距离较近, 相应的对巡航导弹的抗击和拦截次数受到限制。可见, 当对低空飞行的巡航导弹探测距离较近时, 近程防空导弹系统对巡航导弹的早期预警具有一定难度。因此在拦截巡航导弹时, 必须在近程防空导弹作战空域最远距离上, 尽早尽远地发射导弹, 以获得充分抗击时间, 增加对目标的抗击次数。

## 2 防空导弹武器系统的杀伤区和发射区

导弹的杀伤区和发射区是导弹武器系统的主要战术性能指标。导弹的杀伤区是指导弹以不低于某一概率杀伤目标的空间区域。导弹与目标在该区域外遭遇, 其杀伤概率必然会显著降低。导弹的发射区是指当导弹发射时刻, 空中目标位于该空域中, 以保证防空导弹和目标在杀伤区中相遇。

射击水平飞行的目标时, 将杀伤区的边界向空中目标来袭相反方向推移一段距离  $L_t$ , 即为发射区的边界。

$$L_t = V_m \cdot t_{zy} \quad (2)$$

其中:  $V_m$  为空中目标的飞行速度;  $t_{zy}$  为导弹从发射到与目标在杀伤区边界遭遇所用的时间。

导弹的发射区除受杀伤区限制外, 还受雷达的探测距离、跟踪距离、导弹系统反应时间  $T_f$ 、导弹的飞行速度  $V_i$ 、目标的来袭速度  $V_m$  等的制约。通常情况下, 可通过以下方法确定防空导弹的发射区<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} D_{F\max} = D_{\max} + V_m \cdot D_{\max} / V_i \\ D_{F\min} = D_{\min} + V_m \cdot D_{\min} / V_i \end{cases} \quad (3)$$

考虑到雷达的发现距离  $D_f$  和导弹系统反应时间  $T_f$ , 在确定防空导弹的发射区时, 常采用下式:

$$\begin{cases} D_{F\max} = \min(D_{F\max}, D_f - T_f \cdot V_i) \\ D_{F\min} = D_{F\min} \end{cases} \quad (4)$$

导弹在按下发射按钮到主发动机点火, 导弹起飞出筒的时间  $T_s$ , 则  $D_{F\min}$  应采用以下公式:

$$D_{F\min} = D_{F\min} + V_m \cdot (D_{F\min} / V + T_s) \quad (5)$$

## 3 防空导弹武器系统对目标的拦截模型

以发射点为坐标原点, 建立地面直角坐标系,  $Ox$  轴与地面相切, 指向来袭巡航导弹,  $Oy$  轴垂直于地面, 向上为正,  $Oz$  轴垂直于  $xOy$  平面, 组成右手直角坐标系, 显然  $xOy$  平面为发射平面<sup>[6]</sup>。敌巡航导弹在飞行末端, 接近目标时通常以匀速直线运动, 我近程导弹可以  $360^\circ$  旋转发射, 故可假定来袭巡航导弹与我防空导弹在  $xOy$  平面内。假设某型近程防空导弹导引规律采用比例导引, 比例导引规律是导弹速度矢量的转动角速度  $\dot{\theta}$  和视线角速度  $\dot{q}$  成比例。即:

$$\dot{\theta} = K \times \dot{q} \quad (6)$$

其中,  $\dot{\theta}$  为导弹转向角速度;  $\dot{q}$  为视线角速度;  $K$  为比例系数。

对上式两边积分, 得:

$$(\theta - \theta_0) = K \times (q - q_0) \quad (7)$$

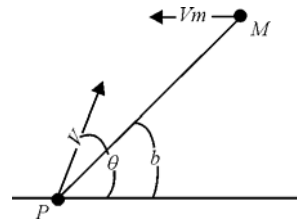


图 1 导弹和目标相对运动关系图

图 1 中,  $P$  点和  $M$  点及其连线的变化可以用方程 (8)、(9) 表示<sup>[7]</sup>:

$$\dot{R} = -V_m \times \cos q - V_i \times \cos(\theta - q) \quad (8)$$

$$R \times \dot{q} = V_m \times \sin q - V_i \times \sin(\theta - q) \quad (9)$$

将式 (7) 代入式 (8)、式 (9), 得:

$$\dot{R} = -V_m \times \cos q - V_i \times \cos((k-1)q + \theta_0 - kq_0) \quad (10)$$

$$R \times \dot{q} = V_m \times \sin q - V_i \times \sin((k-1)q + \theta_0 - kq_0) \quad (11)$$

令  $\tau_0 = \theta_0 - q_0$ , 即为制导开始时刻的前置角。

假设  $\tau_0 = 30^\circ$ , 可得:

$$\dot{R} = -V_m \times \cos q - V_i \times \cos((k-1)q - (k-1)q_0 + \tau_0) \quad (12)$$

$$\dot{q} = (V_m \times \sin q - V_i \times \sin((k-1)q - (k-1)q_0 + \tau_0)) / R \quad (13)$$

假设弹目距离  $R = 8$  m 时, 防空导弹战斗部启爆<sup>[8]</sup>, 一次拦截结束。

根据导弹拦截过程, 进行仿真, 如图 2。

由此得到防空导弹比例导引的理想弹道及弹目相遇的时间  $T$ , 相遇时巡航导弹的水平距离  $X$ 。

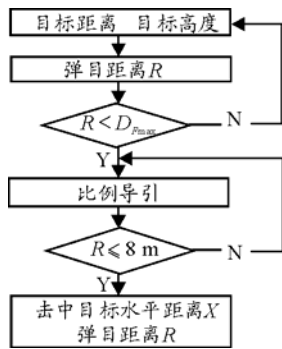


图 2 导弹拦截过程

当巡航导弹飞抵防空导弹发射区远界，防空导弹第一次发射，巡航导弹距发射点的斜距  $R_1 = D_{Fmax}$ ，水平距离  $X_1$ ，飞行高度  $H$ ，且  $R_1 = \sqrt{X_1^2 + H^2}$ 。第一次射击拦截点距发射点的斜距为  $R'_1 = D_{max}$ ，即杀伤区远界。第一次射击结束后，可得到第一次射击所用时间  $T_1$ ，拦截点距离发射点的水平距离  $X'_1$ 。考虑防空导弹的射击效果，如果拦截成功，须马上进行火力转移；如果拦截失败，巡航导弹突防，须对目标进行第二次拦截。假设目标在作战空域内突防成功，第二次拦截的时机主要与目标速度  $V_m$ 、对第一次射击效果的评估时间  $T_p$ 、导弹发射出筒时间  $T_s$  有关。

第二次对巡航导弹拦截时，巡航导弹距发射点的水平距离为  $X_2 = X'_1 - V_m \times T_p$ 。第二次拦截时，防空导弹飞行时间  $T_2$ ，拦截点距发射点的水平距离为  $X'_2 = X_2 - V_m \times (T_s + T_2)$ 。

由此可以推出一般式，第  $N$  次对巡航导弹拦截时，巡航导弹距发射点的水平距离为  $X_N = X'_{N-1} - V_m \times T_p$ 。第  $N$  次拦截时距发射点的水平距离为  $X'_N = X_N - V_m \times (T_s + T_N)$ 。

防空导弹的发射区近界为  $D_{Fmin}$ ，只有  $R_N = \sqrt{X_N^2 + H^2} \geq D_{Fmin}$  时射击，以保证发射阵地的安全及杀伤效果。根据防空导弹的具体战术技术性能，可以计算出对同一目标在杀伤区内的拦截次数  $N$ 。

#### 4 算例分析

假设巡航导弹飞行速度  $V_m = 300 \text{ m/s}$  [9]，飞行高度  $H_i = 20 \text{ m}$ ；近程防空武器系统导弹系统反应时间  $T_f = 11 \text{ s}$ ， $T_p = 1 \text{ s}$ ， $T_s = 1 \text{ s}$  [10]。对目标的发现距离  $D_f$ ，导弹的飞行速度  $V_i$ 。

对于某近程防空导弹， $D_f = 40 \text{ km}$ ， $D_{max} = 15 \text{ km}$ ， $D_{min} = 2 \text{ km}$ ， $V_i = 3 \text{ Ma}$  [11]。

根据导弹多次拦截过程，进行仿真，如图 3。

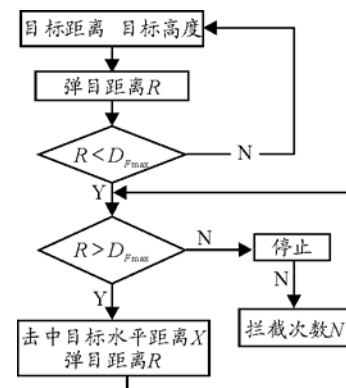


图 3 导弹多次拦截过程

可得  $D_{Fmax} = 19.41 \text{ km}$ ， $D_{Fmin} = 3.19 \text{ km}$ ，对目标可以拦截 6 次，第 1 次拦截目标斜距 4.98 km，第 2 次拦截目标斜距 10.975 km，第 3 次拦截目标斜距 7.882 km，第 4 次拦截目标斜距 5.491 km，第 5 次拦截目标斜距 3.643 1 km，第 6 次拦截目标斜距 2.215 1 km，拦截总时间 46.24 s。仿真如图 4。

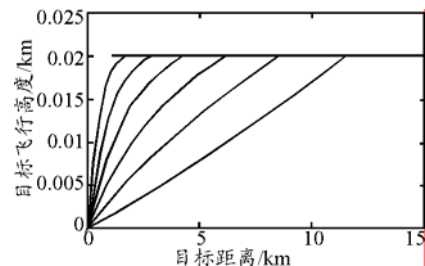


图 4 拦截仿真

对各型的近程防空导弹系统，发现距离、杀伤区及导弹的飞行速度不同，拦截次数也不相同。假设表 1 为各型导弹的发现距离、飞行速度及杀伤区 [11]。对巡航导弹的拦截仿真数据如表 2。

表 1 导弹的参数

序号	$D_f/\text{km}$	$D_{max}/\text{km}$	$D_{min}/\text{km}$	$V_i/\text{Ma}$	$D_{Fmax}/\text{km}$	$D_{Fmin}/\text{km}$
1	20	10	2	1.3	15.8	3.957 5
2	20	10	2	2	14.411 8	3.482 4
3	40	10	2	2	14.411 8	3.482 4
4	40	15	2	2.5	20.294 1	3.305 9
5	40	20	2	2	28.823 5	3.482 4
6	40	25	2	1.5	35.8	3.776 5

表 2 拦截次数

	第一次/km	第二次/km	第三次/km	第四次/km	第五次/km	拦截次数	拦截总时间/s
1	9.97	5.341	2.584 1			3	30.11
2	9.97	6.319	3.787 1	2.029 1		4	30.55
3	9.97	6.319	3.787 1	2.029 1		4	30.55
4	14.98	10.474	7.141	4.678	2.857 1	4	44.9
5	19.99	13.273	8.611	5.377	3.133 1	5	61.39
6	24.9	15.124	8.923	5.02	2.563 1	5	79.86

近程防空导弹对既定的巡航导弹目标的发射区远界主要与杀伤区远界和导弹的飞行速度有关, 其次与武器系统对目标的发现距离有关; 发射区近界与杀伤区近界和导弹飞行速度有关。发射区远界随杀伤区远界、导弹飞行速度增大而增大; 发射区近界随导弹速度增大而减小。

近程防空导弹对巡航导弹的拦截次数与导弹

的飞行速度和杀伤区远界有关。现代防空导弹均为超音速飞行, 最快飞行速度可达到 8 马赫<sup>[12]</sup>。对于飞行器而言,  $Ma > 1.2$  为超音速<sup>[6]</sup>。警戒雷达对巡航导弹的发现距离约为 40 km, 假设导弹的杀伤区远界  $D_{\max}$  分别为 10 km、15 km、20 km、25 km<sup>[11]</sup>, 导弹速度与拦截次数的关系仿真如图 5。

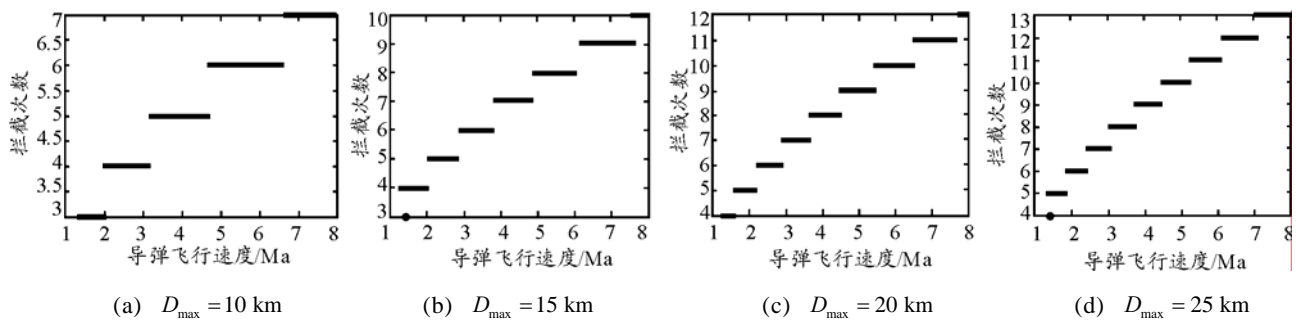


图 5 导弹速度与拦截次数的关系

可见, 对近程防空导弹, 应采用性能更好的固体火箭发动机和高比冲推进剂, 大幅度提高导弹速度, 增大射程, 可以有效提高拦截次数。

## 5 结论

仿真结果证明, 该模型可以应用于计算对不同发射区、导弹飞行速度与拦截次数的关系, 并具有一定的通用性, 可为提高导弹战术技术性能提供参考。

## 参考文献:

- [1] 蔡朝林. 现代城市防空[J]. 地面防空武器, 2002(2): 15-19.
- [2] 张湘南, 黄建英. 巡航导弹—现代战争中的骄子[J]. 现代防御技术, 2004, 32(4): 10-13.
- [3] 闫肃, 刘新学. 防空导弹体系拦截巡航导弹的探讨[J]. 航天电子对抗, 2000(4): 1-3.
- [4] 曹亚杰, 胡晓磊. 论巡航导弹的防御[J]. 地面防空武器,

2006(1): 38-41.

- [5] 彭建平. 反舰导弹对舰艇硬防御反导系统突防仿真研究[D]. 海军大连舰艇学院, 2000(5): 13-17.
- [6] 杨建军. 地空导弹武器系统概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 79-80.
- [7] 李相民, 等. 火力控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 146-147.
- [8] 郑平泰, 杨涛, 王宝敏. 导弹破片战斗部对空中目标的杀伤概率计算[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 45-47.
- [9] 付伟. 巡航导弹的弱点及对抗[J]. 兵工自动化, 2000(6): 36.
- [10] 赵晨光, 李为民, 陈永革, 等. 低空防空导弹射击巡航导弹作战能力研究[J]. 弹箭与制导学报, 2000, 21(4): 31-33.
- [11] 袁华, 等. 第四代防空导弹关键技术初探[J]. 现代防御技术, 2007, 35(5): 51-54.
- [12] 钱晋. 舰空导弹与反导拦截技术[J]. 现代舰船, 2004(2): 33-36.