

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.003

爆破式 ARM 对典型雷达目标的毁伤效果研究

马登武¹, 沈静², 张真²

(1. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 为分析爆破式反辐射导弹(anti-radiation missile, ARM)对典型相控阵雷达目标的毁伤效果, 对 ARM 爆破战斗部的引战配合进行研究。在分析空地反辐射导弹末段弹道特性及爆破式战斗部毁伤机理的基础上, 建立了爆破式 ARM 对典型目标触发起爆和近炸起爆时的毁伤模型, 并采用 Monte-Carlo 仿真方法确定了近炸起爆的最佳起爆高度及不同起爆方式的导弹单发毁伤概率。仿真结果表明: 对于天线高度较高的目标适宜采用近炸起爆, 对于天线高度较低的目标适宜采用触发起爆。

关键词: 空地反辐射导弹; 爆破式战斗部; 最佳起爆高度; 单发导弹毁伤概率
中图分类号: TJ762.1 **文献标志码:** A

Study on Damage Effects of Explosive ARM to Typical Radar Target

Ma Dengwu¹, Shen Jing², Zhang Zhen²

(1. Dept. of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to analyze ARM (anti-radiation missile) to typical phased array radar target destructive effects, the coordination between fuze and warhead is studied. Based on analyzing the characteristics of ARM terminal trajectory and demolition warhead destruction mechanics, destruction model is set up to describe ARM attacking typical target in proximity and contact explosion. Monte-Carlo simulation method is applied to calculate the destructive probability at the optimal detonation height and different mode. The result indicates that proximity mode is fit to target with high antenna, and contact explosion mode is fit to target with low antenna.

Keywords: air-to-ground ARM; demolition warhead; optimal detonation height; single missile destructive probability

0 引言

反辐射导弹(anti-radiation missile, ARM)是利用敌方辐射源辐射的能量进行被动寻的、攻击敌方雷达及其载体的导弹。ARM 通过打击各类地空导弹、制导雷达、高炮炮瞄雷达、预警雷达和气象雷达, 实现压制敌防空武器系统和预警指挥系统, 是重要的电子战硬杀伤武器。

目前 ARM 战斗部多采用预制破片或爆破式战斗部。破片式战斗部对传统机械扫描雷达能够获得较好的毁伤效果。但对于相控阵雷达而言, 由于整个雷达天线阵面由许多相互独立的阵元组成, 即使部分阵元损坏, 雷达的整体性能也不会显著下降。破片式战斗部主要以单位面积上有限的破片为杀伤元素, 能对目标造成离散的局部点毁坏。而爆破式战斗部主要靠爆炸冲击波对毁伤半径内的目标造成面毁伤。因此以相控阵雷达为典型目标的 ARM 多采用爆破式战斗部。笔者以爆破式 ARM 为研究对象, 分析其对典型相控阵雷达目标的毁伤效果。

1 雷达目标描述

典型的雷达目标由雷达舱体和天线 2 个部分组成, 如图 1, 舱体可用一立方体加以描述, 长×宽×高为 $A \times B \times C$, 各平面所围成的区域为:

$$\begin{cases} -0.5A \leq X \leq 0.5A \\ -0.5B \leq Y \leq 0.5B \\ 0 \leq Z \leq C \end{cases}$$

天线所在平面区域为:

$$X_1^2 + Y_1^2 = R^2$$

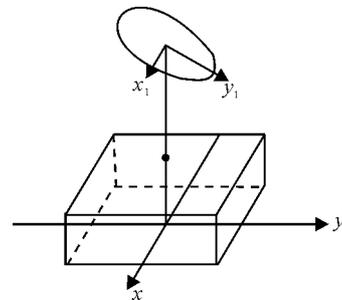


图 1 典型雷达目标示意图

收稿日期: 2011-07-14; 修回日期: 2011-08-17

作者简介: 马登武(1964—), 男, 山东人, 博士, 教授, 从事航空武器系统与运用工程研究。

2 弹道末段方程

ARM 的末段弹道方程由攻击方位角 λ , 高低角 ω 和制导误差决定。方位角 λ 为 $[0, 2\pi]$ 间的均匀分布。根据文献[1]可知, 一般 ARM 的高低角为 $20^\circ \sim 60^\circ$, 不妨假定 $\omega \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中 $\mu = 40^\circ$, $\Phi(\frac{60-\mu}{\sigma}) - \Phi(\frac{20-\mu}{\sigma}) = 0.9$, 解得 $\Phi(\frac{20}{\sigma}) = 0.95$, $\frac{20}{\sigma} = 1.645$, $\sigma = 12.16$, 故 $\omega \sim N(40, 12.16^2)$ 。

制导误差由制导平面内 x_1 轴和 y_1 轴上的偏差 X_1, Y_1 决定, X_1, Y_1 分别服从正态分布^[2], 即 $X_1 \sim N(0, \sigma_x^2), Y_1 \sim N(0, \sigma_y^2)$, 通常两者相互独立且 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma = CEP/1.774$ 。

通常情况下, ARM 随机弹道与天线平面垂直, 在以雷达天线中心 (X_0, Y_0, Z_0) 为瞄准点的制导平面内, 制导系统误差为零^[3]。将瞄准点 (X_0, Y_0, Z_0) 旋转变换, 其旋转方位角为 λ , 则

$$\begin{cases} X'_0 = X_0 \cos \lambda - Y_0 \sin \lambda = 0 \\ Y'_0 = X_0 \sin \lambda + Y_0 \cos \lambda = 0 \\ Z'_0 = Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

在地面坐标系中 ARM 拦截点坐标为:

$$\begin{cases} X''_0 = X'_0 + x_0 \sigma_x \sin \omega = x_0 \sigma_x \sin \omega \\ Y''_0 = Y'_0 + y_0 \sigma_y = y_0 \sigma_y \\ Z''_0 = Z'_0 + x_0 \sigma_x \cos \omega = Z_0 + x_0 \sigma_x \cos \omega \end{cases} \quad (2)$$

因此, ARM 的末段弹道方程可以表示为:

$$\frac{X - X''_0}{\cos \omega \cos \lambda} = \frac{Y - Y''_0}{\cos \omega \sin \lambda} = \frac{Z - Z''_0}{\sin \omega} \quad (3)$$

ARM 采用触发起爆方式时, 炸点的坐标为:

$$\begin{cases} X = X''_0 - Z''_0 \cot \omega \cos \lambda = \\ \quad x_0 \sigma_x \sin \omega - (Z_0 + x_0 \sigma_x \cos \omega) \cot \omega \\ Y = Y''_0 + Z''_0 \cot \omega \sin \lambda = \\ \quad y_0 \sigma_y - (Z_0 + x_0 \sigma_x \cos \omega) \cot \omega \\ Z = 0 \end{cases} \quad (4)$$

ARM 采用定炸高起爆方式时, 炸点的坐标为:

$$\begin{cases} X = X''_0 + (H - Z''_0) \cot \omega \cos \lambda = \\ \quad x_0 \sigma_x \sin \omega + (H - Z_0 - x_0 \sigma_x \cos \omega) \cot \omega \\ Y = Y''_0 + (H - Z''_0) \cot \omega \sin \lambda = \\ \quad y_0 \sigma_y + (H - Z_0 - x_0 \sigma_x \cos \omega) \cot \omega \\ Z = H \end{cases} \quad (5)$$

3 爆破式战斗部毁伤能力模型

典型目标的杀伤规律可用空气冲击波超压值

ΔP (MPa) 和受压时比冲量 I ($N \cdot s/m^2$) 来描述:

$$(\Delta P - P^*) \times (I - I^*) = K$$

其中: ΔP 为空气冲击波波阵面的超压值; I 为空气冲击波的比冲量; P^*, I^*, K 是由目标易损特点决定的常数。

如图 2, 当 $(\Delta P - P^*) \times (I - I^*) \geq K$ 时, 能够实现目标的有效毁伤; 当 $(\Delta P - P^*) \times (I - I^*) < K$ 时, 不能有效毁伤目标。

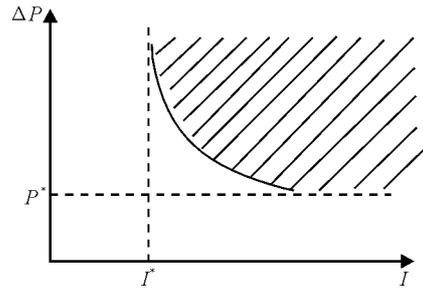


图 2 目标易损性曲线

当采用近炸方式时, 战斗部在空中起爆, 战斗部爆炸的冲击波超压 ΔP 和比冲 I 可由下面公式计算^[4-5]:

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{0.082}{\bar{r}} + \frac{0.265}{\bar{r}^2} + \frac{0.686}{\bar{r}^3} \\ I = \frac{220}{\bar{r}} \sqrt{w} \\ \bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{w}} \end{cases} \quad (6)$$

其中: w 是等效 TNT 装药质量, kg; r 是距爆心的距离, m。

当采用触发起爆方式时, 由于地面对爆炸冲击波的反射作用, 应将等效 TNT 装药质量修正为 $w_e = 1.8w$ 。

4 ARM 对典型目标的单发毁伤概率

4.1 触发起爆的情况

炸点 (X, Y, Z) 到雷达舱体几何中心在地面垂直投影点 $(0, 0, 0)$ 的距离为:

$$l_1 = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (7)$$

炸点到天线几何中心 (X_0, Y_0, Z_0) , 即 $h(0, 0, Z_0)$ 的距离为:

$$l_2 = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - Z_0)^2} \quad (8)$$

采用触发起爆时, ARM 对雷达舱体的毁伤概率为:

$$P_{cl} = P\{l_1 \leq R_{cl} + r_c\} \quad (9)$$

其中: R_{c1} 为战斗部在地面起爆时, 对雷达舱体的杀伤半径; r_c 为雷达舱体形心到四壁距离的平均值。

采用触发起爆时, ARM 对雷达天线的毁伤概率为:

$$P_{c2} = P\{l_2 \leq R_{c2}\} \quad (10)$$

其中, R_{c2} 为战斗部在地面起爆时对雷达天线的有效毁伤半径。

因此, 采用触发起爆时, ARM 对目标的毁伤概率为:

$$P_c = 1 - (1 - P_{c1})(1 - P_{c2}) \quad (11)$$

4.2 定炸高起爆的情况

当起爆高度 $Z = H$, 雷达舱体高度 c 已知时, 炸点到雷达舱体几何中心的距离为^[6]:

$$l_1 = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - \frac{c}{2})^2} \quad (12)$$

炸点到雷达天线几何中心 $(0, 0, Z_0)$ 的距离为:

$$l_2 = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - Z_0)^2} \quad (13)$$

采用定炸高起爆时, ARM 对雷达舱体的毁伤概率为:

$$P_{j1} = P\{l_1 \leq R_{j1} + r_j\} \quad (14)$$

其中: R_{j1} 为战斗部在空中起爆时, 对雷达舱体的毁伤半径; r_j 为雷达舱体到舱壁距离的平均值。

采用定炸高起爆时, ARM 对雷达天线的毁伤概率为:

$$P_{j2} = P\{l_2 \leq R_{j2}\} \quad (15)$$

其中, R_{j2} 为战斗部在空中起爆时, 对雷达天线的毁伤半径。

因此, 采用定炸高起爆时, ARM 对目标的毁伤概率为:

$$P_j = 1 - (1 - P_{j1})(1 - P_{j2}) \quad (16)$$

4.3 最佳炸高的确定

当 R_{j1} , R_{j2} , Z_0 , r_j , CEP , ω 分布情况已知时, ARM 的近炸起爆高度必定存在一个最佳值 H^* 。最佳起爆高度很难以解析解的形式给出, 但可以采用 Monte-Carlo 数值模拟的方法求得。因为由 Monte-Carlo 方法求得 \hat{P}^* 的误差 $\Delta\hat{P}^* = \frac{1}{\sqrt{N}}$, 所以仿真次数 N 必须足够大才能保证 \hat{H}^* 的精度。具体的实现过程如图 3。

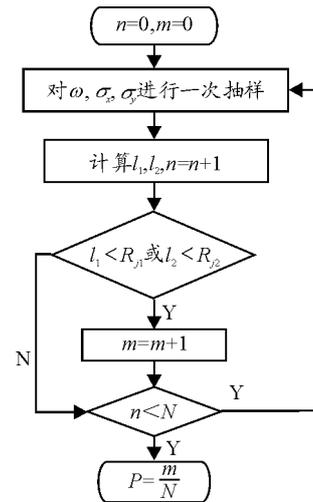


图 3 Monte-Carlo 仿真流程图

5 单发导弹毁伤概率仿真与分析

已知 $CEP=5$ m, $R_{c1}=10$ m, $R_{c2}=12$ m, $R_{j1}=8$ m, $R_{j2}=9$ m, $r_c=2.5$ m, $r_j=2$ m, 采用 Monte-Carlo 方法求得最佳起爆高度及与之对应的单发导弹毁伤概率, 如图 4。

由图 4(a)~(d)可见:

1) 随着天线高度的增加, ARM 触发起爆方式的毁伤概率不断降低, 这主要是因为 ARM 在地面炸点的散布中心不断远离目标, 炸点与目标之间的系统误差增大。

2) 随着天线高度的增加, ARM 近炸起爆方式的毁伤概率也逐渐降低, 但在最佳炸点的毁伤概率要大于触发起爆的毁伤概率。这是因为近炸起爆相对于触发起爆而言, 将炸点提前减小了炸点与目标之间的系统误差。

3) 对于天线高度较低的目标而言, 触发起爆的毁伤概率要大于近炸方式。这是因为此种情况下, 触发起爆在地面的炸点散布中心离目标较近, 系统误差小。同时, 由于地面对爆炸冲击波的反射作用, 爆破式战斗部触发起爆时的毁伤半径要大于在空中爆炸的毁伤半径。

综合上述分析可知, 为获得较高的毁伤概率, 对于天线高度较低的目标而言, 适宜采用触发起爆方式; 对于天线高度较高的目标而言适宜采用近炸方式。这对于 ARM 是比较容易实现的, 在事先已知不同类型目标辐射信号特征的情况下, 导引头根据接收信号的特性可以判别所攻击目标的类型, 进而确定采用触发或近炸的起爆方式。