

防空导弹战斗部破片飞散特性分析

何广军, 万少松, 高福利

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:以某型防空导弹的破片杀伤式战斗部为例,分析了在不同坐标系中的破片动态飞散特性,分别计算出在地面坐标系和弹体坐标系中破片的动态飞散密度函数,指出在不同的坐标系中战斗部的飞散区和飞散密度不同。

关键词:战斗部;破片飞散区;飞散密度

中图分类号:TN973 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)04-017-04

防空导弹的任务是摧毁来袭的空中目标,这一任务最终由导弹的战斗部来完成。战斗部在导弹与目标遭遇的适当时刻起爆,极为迅速地释放其内部“储存”的能量,产生很强的爆炸作用,并形成许多高速杀伤元素(金属破片等),它们的杀伤距离,远远超过导弹的半径,只要目标位于战斗部破片动态杀伤区内,就会被毁伤。

防空导弹的战斗部的类型主要有爆破式战斗部、连续杆式战斗部、聚焦式战斗部和子母式战斗部等。对爆破式战斗部破片飞散特性的分析,一般采用静态和动态两种分析方法,静态分析法是针对战斗部处于地面静止状态,研究其破片飞散特性;动态分析法是针对战斗部处于弹目交会状态破片有相对运动时,分析战斗部破片飞散特性的一种分析方法。动态飞散区可以在不同的坐标系中描述,一般常用的是在地面坐标系和弹体坐标系内描述。特别是在分析引战配合效率和单发导弹杀伤概率时要用到弹体坐标系。本文以一种防空导弹的爆破式战斗部为例,分析战斗部的静态和动态破片飞散特性,特别是分析了破片在弹体坐标系的动态飞散特性,这一点,将对分析引战配合效率和单发导弹杀伤概率是很有益处的。

1 战斗部破片静态飞散特性

1.1 静态飞散初速度分布

设战斗部为中央起爆式,静态爆炸时,中央破片飞散速度最大,两侧稍小,由于破片密度分布平缓,所以战斗部破片初速沿轴向分布可用图1中的折线近似。

静态条件下,战斗部爆炸产生的破片分布关于弹轴对称,在过轴的平面内为非均匀分布,是静态飞散角 φ 的函数。

设战斗部总长为 L_0 ,沿轴某点至战斗部中心(有正负)为 Z ,则破片初速沿轴分布用折线近似。若设对应 $Z=\pm Z_1$ 的破片在空间飞散方向角分别为 φ_1 和 φ_2 ,则 $\varphi_1\sim\varphi_2$ 区间包含了 $2Z_1/L_0\cdot 100\%$ 的破片。当 φ_1 和 φ_2 为已知时,便可确定战斗部破片静态初速关于静态飞散方向角的近似分布:

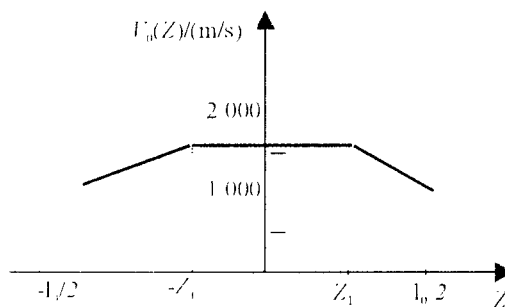


图1 静态破片初速分布

收稿日期:1999-12-17

基金项目:中国工程物理研究院院外科研预研基金资助项目(96030415)

作者简介:何广军(1965-),男,陕西宝鸡人,讲师,硕士,主要从事导弹控制与测试研究。

$$V_0(\varphi) = \begin{cases} V_{\max} & \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 \\ V_{\max} - (V_{\max} - V_{\min}) \frac{0.45L_0 - Z_1}{0.5L_0 - Z_1} \cdot \frac{|\varphi_1 - \varphi_c| - (\varphi_2 - \varphi_1)/2}{\Delta\varphi/2 - (\varphi_2 - \varphi_1)/2}, \varphi_c - \frac{\Delta\varphi}{2} \leq \varphi \leq \varphi_1 \text{ 或 } \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_c + \frac{\Delta\varphi}{2} \\ V_{\max} - (V_{\max} - V_{\min}) \frac{0.45L_0 - Z_1}{0.5L_0 - Z_1} & \text{其它(占10\%的破片)} \end{cases} \quad (1)$$

为了简化计算,也可近似地把初速用常量来表示

$$V_0(\varphi) = V_0 \quad \varphi \in (\varphi_c - \Delta\varphi/2, \varphi_c + \Delta\varphi/2)$$

1.2 静态飞散密度分布

设通过静态飞散角 φ 处张角 $d\varphi$ 的一个环域破片数为 dN ,则战斗部破片的静态飞散密度分布百分比函数为

$$F_0(\varphi) = \frac{1}{N} \frac{dN}{d\varphi} \quad (2)$$

N 表示战斗部破片飞散产生的破片总数。设破片总质量为 m_t ,则 $N \approx m_s/m_t$ 战斗部的破片飞散密度可以用平缓的正态分布近似:

$$F_0(\varphi) = \begin{cases} \frac{K}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} e^{-\frac{(\varphi-\varphi_c)^2}{2\sigma_\varphi^2}} & \varphi_c - \frac{\Delta\varphi}{2} \leq \varphi \leq \varphi_c + \frac{\Delta\varphi}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中: σ_φ 由下式计算

$$e^{-\frac{(\Delta\varphi/2)^2}{2\sigma_\varphi^2}} = 85\% \sim 90\%$$

K 由下式计算

$$K = \int_{\varphi_c - \frac{\Delta\varphi}{2}}^{\varphi_c + \frac{\Delta\varphi}{2}} \frac{e^{-\frac{(\varphi-\varphi_c)^2}{2\sigma_\varphi^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} d\varphi$$

代入典型值: $\varphi_c = 90^\circ, \Delta\varphi = 30^\circ$,解得 φ 的分布为

$$F_0(\varphi) = \begin{cases} 1.79e^{-\frac{(\varphi-\pi/2)^2}{0.53}} & 1.31\text{rad} \leq \varphi \leq 1.83\text{rad} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

计算举例: 设 $m_t = 30\text{g}, m_s = 52.8\text{kg}$,由(4)式求得对应飞散边沿、中心的破片分布密度为 48.4片/°、54.6片/°,可见飞散角边沿与中心密度比为 88% ∈ (85%, 90%)。在对应距离 $R = 10\text{m}$ 处的分布密度为 4.4片/m² 和 5.5片/m²。

2 战斗部破片动态飞散特性

在确定对目标的坐标毁伤概率时,要求知道破片碰靶位置及破片碰靶密度,这就需要建立破片的动态飞散模型。可分两步建立动态飞散模型,第一步,建立战斗部破片相对于地面(或空气)的飞散模型,我们称之为“动态飞散模型 I”;第二步,建立战斗部破片对于目标的飞散模型,我们称之为“动态飞散模型 II”。

2.1 动态飞散模型 I

在地面坐标系中,讨论破片的飞散特性同静态情况一样,需讨论破片密度分布和速度分布,为了问题的简化,我们只讨论密度分布导弹战斗部爆炸产生的破片初速为 $\vec{V}_0(\varphi)$ 与导弹速度 \vec{V}_M 的矢量和,即

$$\vec{V}_{01} = \vec{V}_0(\varphi) + \vec{V}_M \quad (5)$$

用导弹坐标系表示的矢量合成图见图 2 所示。

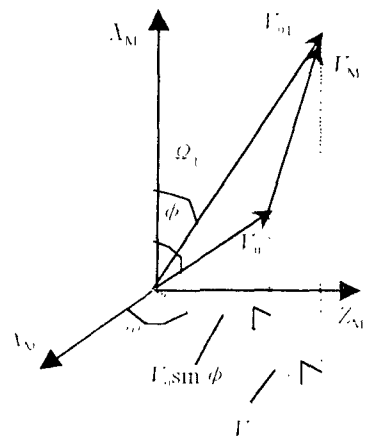


图 2 导弹坐标系中的 $\vec{V}_0(\varphi), \vec{V}_M$ 及 \vec{V}_{01} 关系

设通过飞散区 I 中某点 $(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 处垂直于破片速度 \vec{V}_1 的截面 dS_1 的破片数为 dN_1 , 则动态飞散区 I 的破片密度分布为

$$F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1) = \frac{1}{N} \frac{dN_1}{dS_1} \quad (6)$$

可推知

$$F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1) = \frac{1}{N} \frac{1}{2\pi r_1^2 \sin \Omega_1} \left| \frac{dN_1}{dS_1} \right| \quad (7)$$

式中 dN 是对应 Ω_1 张角 $d\Omega_1$ 的环域(见图 3)内按 $F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 计算的破片数。所以

$$F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1) = \frac{1}{N} \frac{1}{2\pi r_1^2 \sin \Omega_1} F_0(\varphi) \left| \frac{d\varphi}{d\Omega_1} \right| \quad (8)$$

式(8)中的 $\frac{d\varphi}{d\Omega_1}$ 为 ω_1 的函数, 绕弹轴不对称。

由图 2 可求出

$$V_{01XM} = V_{MXM} + V_0(\varphi) \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

$$V_\rho = V_{MYM} \cos \omega_1 + V_{MZM} \sin \omega_1 + \sqrt{V_0^2(\varphi) \sin^2 \varphi - (V_{MZM} \cos \omega_1 - V_{MYM} \sin \omega_1)^2} \quad (10)$$

其中

$$\begin{bmatrix} V_{MXM} \\ V_{MYM} \\ V_{MZM} \end{bmatrix} = M_{MV \rightarrow M} \cdot \begin{bmatrix} V_M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

V_{MXM} 、 V_{MYM} 、 V_{MZM} 分别为导弹速度在弹体坐标系的三个分量, $M_{MV \rightarrow M}$ 为导弹速度坐标系到弹体坐标系的转换矩阵, 所以

$$\text{ctg} \Omega_1 = V_{01XM} / V_\rho \quad (11)$$

对式(11)两边微分可以看出

$$\frac{d\Omega_1}{d\varphi} = \frac{\sin^2 \Omega_1}{V_\rho^2} [V_\rho V_0'(\varphi) \sin \varphi - V_\rho V_0(\varphi) + \frac{dV_\rho}{d\varphi} V_{01XM}] \quad (12)$$

由(9)和(10)式可得

$$\frac{dV_\rho}{d\varphi} = \frac{V_0^2(\varphi) \sin \varphi \cos \varphi + \sin^2 \varphi V_0'(\varphi) V_0(\varphi)}{\sqrt{V_0^2(\varphi) \sin^2 \varphi - (V_{MZM} \cos \omega_1 - V_{MYM} \sin \omega_1)^2}} \quad (13)$$

由(9)~(11)式可得

$$\cos(\varphi) = \frac{\sin \Omega_1}{V_0^2(\varphi)} (-A_v \sin \Omega_1 \pm \sqrt{A_v^2 \sin^2 \Omega_1 - B_v}) \quad (14)$$

式(14)中

$$\begin{aligned} A_v &= V_{MXM} - V_{yw} \text{ctg} \Omega_1 \\ B_v &= A_v^2 - |V_0^2(\varphi) - V_{zw}^2| \text{ctg}^2 \Omega_1 \end{aligned}$$

$$V_{yw} = V_{MYM} \cos \omega_1 + V_{MZM} \sin \omega_1$$

$$V_{zw} = V_{MZM} \cos \omega_1 - V_{MYM} \sin \omega_1$$

联合(3)~(14)式便可求得式(8)中的 $F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 。

2.2 动态飞散模型 II

设通过动态飞散区 II 中某点 $(r_2, \Omega_2, \omega_2)$ 处垂直于破片相对速度 \vec{V}_2 的截面面积元 dS_2 的破片数为 dN_2 , 则动态飞散区 II 破片飞散密度百分比函数为

$$F_1(r_2, \Omega_2, \omega_2) = \frac{1}{N} \frac{dN_2}{dS_2} \quad (15)$$

如图 4 所示, 设 $\vec{N}_1(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 的单位矢量为 N , $\vec{N}_2(r_2,$

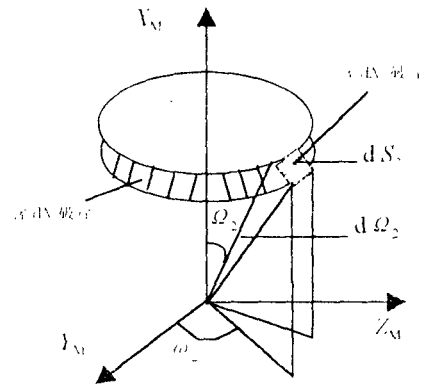


图 3 dN 与 dN_2 的关系

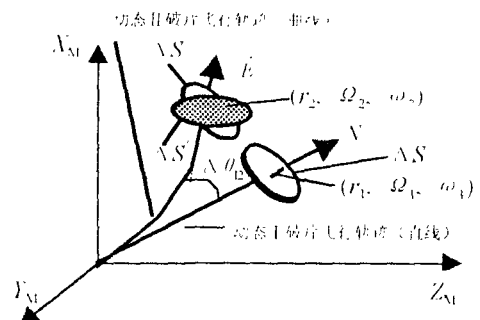


图 4 动态飞散区 I 和 II 密度分布关系图

Ω_2, ω_2) 的单位矢量为 \vec{E} 。在地面坐标系中观察,通过 $(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 处与 \vec{N} 垂直的面积元 ΔS 的破片数为 ΔN , 这些破片,在目标坐标系的观察的情形是:通过 $(r_2, \Omega_2, \omega_2)$ 处与 \vec{N} 相垂直的面积元 ΔS 的破片数也为 ΔN , 但破片速度方向改变为 \vec{E} 。 ΔS 在垂直于 \vec{E} 的平面上的投影面积为

$$\Delta S' = \Delta S \cdot \cos\theta_{12}$$

其中 θ_{12} 为 \vec{N} 和 \vec{E} 的夹角。

$$\cos\theta_{12} = \vec{N} \cdot \vec{E} = \frac{V_1 \cdot V_2}{|\vec{V}_1| \cdot |\vec{V}_2|} \quad (16)$$

因此,按照 $F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 和 $F_2(r_2, \Omega_2, \omega_2)$ 各自的定义可知

$$F_2(r_2, \Omega_2, \omega_2) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta S'} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta S \cos\theta_{12}} = \frac{F_1(r_1, \omega_1, \Omega_1)}{\cos\theta_{12}} \quad (17)$$

$F_1(r_1, \Omega_1, \omega_1)$ 和 $\cos\theta_{12}$ 由前面介绍的模型确定,这样 $F_2(r_2, \Omega_2, \omega_2)$ 便可求出了。

3 结论

通过以上分析可知:

(1) 战斗部破片的静态飞散特性和破片有相对运动时的动态飞散特性是不相同的,动态情况下比相应的静态时要大。

(2) 由式(13)和式(14)可得出在地面坐标系和弹体坐标系分别观察时密度的分布不同,在弹体坐标系中的密度比地面坐标系的密度要大。

(3) 由于在不同坐标系的密度分布不同,因此其飞散区的形状也不同。

参考文献:

- [1] 何广军. 防空导弹定向战斗部与毁伤研究报告[R]. 96030415-1, 西安:空军导弹学院, 1998.
- [2] 张志鸿. 防空导弹引信与战斗部引战配合效率[M]. 北京:宇航出版社, 1994, 32-42.
- [3] 周中生. 防空导弹引信设计及仿真[M]. 北京:宇航出版社, 1994, 152-156.
- [4] 秦承森, 李维新, 袁国兴, 等. 破片分束聚焦战斗部设计及原理实验[J]. 爆炸与冲击(增刊), 1995, 1(4): 12-14.

The Analysis on Dispersion Characteristic of Aerial Defence Missile Warhead

HE Guang-jun, WAN Shao-song, GAO Fu-li
(The Missile Institute, AFEU., Sanyuan 713800, China)

Abstract: According to the fragment warhead of the missile, we propose dynamic characteristic of fragment dispersion in different reference frames, calculate dynamic distributing density function in earth reference frame and missile reference frame, and point out the dispersion section of the warhead is different from the dynamic distributing density in earth reference frame and missile reference frame.

Key words: warhead; dispersion section of fragment; dispersion density