

破片动态飞散速度的计算*

鲁卫红, 张永顺

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 导弹攻击 TBM 等目标时, 在中低空遭遇、大脱靶量、高相对速度情况下, 战斗部爆炸后破片动态飞散弹道出现弯曲甚至存在多值问题, 以往不考虑这一情况的有关破片动态飞散速度的计算模型已不适用。为此, 建立了考虑破片弹道弯曲及多值问题, 且适用于任意遭遇情况的导弹战斗部破片动态飞散速度计算模型。模型采用了计算机数值搜索求解方法, 解决了复杂弹目交会情况下无法获得飞散速度的解析表达式的问题。利用两个算例, 对建立的模型进行了验证, 仿真计算结果与实际一致, 表明模型是合理、正确的。

关键词: 动态飞散区; 弹道; 破片速度

中图分类号: TJ760.31 文献标志码: A

The calculation of Dynamic Dispersion Speed of Fragments

LU Weihong, ZHANG Yongshun

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Shaanxi Sanyuan 713800, China)

Abstract: When a missile attacks high speed targets such as TBM, when the encounter altitude is low, miss distance is large, the relative speed between missile and target is high, the dynamic dispersion trajectory of fragments after war-head explosion is bent and sometimes the multi-value problem comes out. The old model which skips the dynamic dispersion speed of fragments is not useful anymore. So the calculating model of dynamic dispersion speed of fragments was built, which considers the problems of trajectory bend and multi-value, and fits for any encounter. The model solves the bend of ballistic trajectory of fragments and the multi-value problem and the problem that the analytic formula on calculating speed of fragments can not be obtained when encounter condition is very complex. The two simulation examples show that the model is reasonable and accurate.

Keywords: dynamic dispersion zone; ballistic trajectory; fragment velocity

0 引言

弹目交会过程中, 破片杀伤型战斗部爆炸后, 产生大量破片相对目标动态飞散。由于空气阻力作用, 破片相对目标的弹道是弯曲的^[1], 破片速度大小、方向随飞散距离的变化而变化。对中低空遭遇、大脱靶量、高速目标(如: TBM)情况, 弹道弯曲明显, 且可能出现多值问题^[2]。文中基于以上考虑提出了考虑弹道弯曲和多值问题的破片相对碰靶速度计算模型。

1 计算模型

为分析方便, 将地面观察系观察的破片相对地面的动态飞散速度称为“动态 1”, 目标观察系观察的破片相对目标的动态飞散速度称为“动态

2”。在战斗部炸点为原点的弹体坐标系中, 根据战斗部静态爆炸参数、导弹速度矢量 V_M 、目标速度矢量 V_T 、破片衰减系数 K_H 这些已知条件, 可计算空间任意点破片相对目标的动态飞散速度, 方法为: 第一步建立“静态-动态 1”对应关系, 第二步建立“动态 1-动态 2”对应关系; 第三步, 综合前两步建立的“静态-动态 1-动态 2”的对应关系, 利用计算机数值方法计算破片相对目标的动态飞散速度。

1.1 “静态-动态 1”对应关系^[3]

以原点在导弹战斗部炸点的导弹坐标系 $Ox_M Y_M Z_M$ 为参考坐标系进行分析, 如图 1 所示。

在地面观察系, 设战斗部静态爆炸产生的破片初速度关于弹轴对称分布, 在过弹轴的平面内分布为 $V_0(\varphi)$, 是静态飞散方向角 φ 的函数。考虑

* 收稿日期: 2008-11-15

作者简介: 鲁卫红(1968-), 男, 河北安平人, 副教授, 研究方向: 雷达电子对抗、导弹引战配合技术。

导弹速度 V_M , 则破片相对地面的动态飞散初速度为:

$$V_{g0} = V_0(\varphi) + V_M \quad (1)$$

由于空气阻力作用, 破片速度以指数规律衰减。通过极坐标为 (r_1, ω_1, ϕ_1) (r_1 : 斜距; ω_1 : 方位角, OY_M 轴方向为零; ϕ_1 : 方向角, 弹轴 OX_M 方向为零) 点处破片速度为:

$$V_g = V_{g0} e^{-K_H r_1} \quad (2)$$

设 V_{g0} 在 OX_M 轴投影记为 V_{g0x} , 在 $OY_M Z_M$ 平面投影为 V_p , 则:

$$\cot \phi_1 = \frac{V_{g0x}}{V_p}, (0 < \phi_1 < \pi) \quad (3)$$

$$V_{g0x} = V_{Mx} + V_0(\varphi) \cos \varphi \quad (4)$$

$$V_p = V_{My} \cos \omega_1 + V_{Mz} \sin \omega_1 + \sqrt{V_0^2(\varphi) \sin^2 \varphi - (V_{Mz} \cos \omega_1 - V_{My} \sin \omega_1)^2} \quad (5)$$

式中 V_{Mx}, V_{My}, V_{Mz} 为导弹速度 V_M 3 个正交分量。通过式(3)~式(5)用计算机数值方法求解 φ , 再利用式(4)得到 V_{g0x} 。点 (r_1, ω_1, ϕ_1) 处的破片速度:

$$V_g = V_{g0} e^{-K_H r_1} = \frac{V_{g0x}}{\cos \phi_1} e^{-K_H r_1} \quad (6)$$

由于破片相对地面(空气)做直线飞行, 所以, V_g 的单位方向矢量:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \\ \sin \phi_1 \cos \omega_1 \\ \sin \phi_1 \sin \omega_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.2 “动态 1-动态 2”对应关系^[3]

在目标观察系, 原地面观察系的点 (r_1, ω_1, ϕ_1) 沿目标速度相反方向移到 (r_2, ω_2, ϕ_2) 点处。 (r_2, ω_2, ϕ_2) 与 (r_1, ω_1, ϕ_1) 坐标关系式为:

$$\begin{aligned} r_2 &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \omega_2 &= \arctan \frac{z}{y}, \phi_2 = \arccos \frac{x}{r_2} \\ x &= r_1 \cos \phi_1 - V_{Tx} t \\ y &= r_1 \sin \phi_1 \cos \omega_1 - V_{Ty} t \\ z &= r_1 \sin \phi_1 \sin \omega_1 - V_{Tz} t \end{aligned} \quad (8)$$

式中: V_{Tx}, V_{Ty}, V_{Tz} 为目标速度 V_T 3 个正交分量; t 为破片飞行时间:

$$t = \int_0^{r_1} \frac{dr}{V_g(r, \omega_1, \phi_1)} = \int_0^{r_1} \frac{\cos \phi_1}{V_{g0x} e^{-K_H r}} dr =$$

$$\frac{\cos \phi_1 (e^{K_H r_1} - 1)}{V_{g0x} K_H} \quad (9)$$

相对目标的破片动态飞散速度:

$$V_b = V_g - V_T \quad (10)$$

V_b 的 3 个正交分量为:

$$\begin{bmatrix} V_{bx} \\ V_{by} \\ V_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_g \cos \phi_1 - V_{Tx} \\ V_g \sin \phi_1 \cos \omega_1 - V_{Ty} \\ V_g \sin \phi_1 \sin \omega_1 - V_{Tz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

V_b 的单位方向矢量为:

$$E_2 = \begin{bmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \\ E_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{bx} / \sqrt{V_{bx}^2 + V_{by}^2 + V_{bz}^2} \\ V_{by} / \sqrt{V_{bx}^2 + V_{by}^2 + V_{bz}^2} \\ V_{bz} / \sqrt{V_{bx}^2 + V_{by}^2 + V_{bz}^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

战斗部爆炸瞬间, 可认为 V_{Tx}, V_{Ty}, V_{Tz} 为常量, 由式(11)、式(12)可知, 破片速度方向是变化的, 破片弹道弯曲。

1.3 计算破片相对目标速度的步骤

在给定弹体坐标系中点 (r_2, ω_2, ϕ_2) 后, 利用式(11)计算破片动态 2 速度 V_b 时, 需要先求对应的动态 1 的 (r_1, ω_1, ϕ_1) 坐标值。求解方法是用计算机数值方法搜索 (r_1, ω_1, ϕ_1) 点。

考虑到动态飞散区可能存在多值问题, 文中采用的搜索方法是: 以等步长 λ 自 (r_2, ω_2, ϕ_2) 点沿 V_T 矢量方向直线搜索 (r_1, ω_1, ϕ_1) 点。搜索步骤:

① 设置破片飞行时间:

$$t(i) = i \cdot \lambda / V_T \quad (13)$$

变量 $i \in (0 \sim M)$ 由小到大取值。 $M = \frac{L}{\lambda}$, L

为观察时间段内的目标最大飞行距离。步长 λ 大小的选取根据计算精度而定。

② 计算解的可能点 $A(i)(r_1(i), \omega_1(i), \phi_1(i))$ 。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \\ z_1(i) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_2 \cos \phi_2 \\ r_2 \sin \phi_2 \cos \omega_2 \\ r_2 \sin \phi_2 \sin \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Tx} \\ V_{Ty} \\ V_{Tz} \end{bmatrix} \cdot t(i) \\ \begin{bmatrix} r_1(i) \\ \omega_1(i) \\ \phi_1(i) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sqrt{x_1^2(i) + y_1^2(i) + z_1^2(i)} \\ \arctan(z_1(i)/y_1(i)) \\ \arccos(x_1(i)/r_1(i)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

③ 计算炸点到 $A(i)$ 连线方向上破片初速度 $V_{g0}(i)$ 。

④ 时间为 $t(i)$ 时, 破片由炸点向 $A(i)$ 方向实际飞到 $B(i)$ 点, 破片相对地面的飞行距离:

$$r(i) = \frac{\ln[V_{g0}(i) K_H t(i) + 1]}{K_H} \quad (15)$$

⑤ 计算 $A(i)$ 、 $B(i)$ 两点距离

$$D(i) = r(i) - r_1(i) \quad (16)$$

⑥ 当

$$D(i)D(i-1) < 0 \quad (17)$$

时,取:

$$t = (i - \frac{D(i)}{D(i) - D(i-1)}) \frac{\lambda}{V_T} \quad (18)$$

用 t 替换式(13)中的 $t(i)$,解式(13)方程,便得到一个解(r_1, ω_1, ϕ_1)。获得一个解后,还要继续向下搜索可能存在的其它解。因为动态飞散区可能存在多值问题。若整个搜索过程中出现无解,则说明(r_2, ω_2, ϕ_2)点处于战斗部破片相对目标的动态飞散区范围以外,破片速度为零。

根据解(r_1, ω_1, ϕ_1),利用 1.1 节、1.2 节建立的模型,便可计算得到破片相对目标的动态飞散速度。

2 计算举例

例 1:假设在弹体坐标系中战斗部静态飞散角 $\varphi = 70^\circ \sim 110^\circ$, 破片初速 $V_0(\varphi) = 2000(\text{m/s})$ 。导弹速度 $V_M = [1000, 0, 0]^T (\text{m/s})$ 。目标(飞机)速度 $V_T = [-400, 0, 0]^T (\text{m/s})$ 。 $K_H = 0.02$ 。在 $\omega_2 = 0^\circ$ 平面内,取 $D = r_2 \sin(\phi_2) = 10 \sim 50\text{m}$, $H = r_2 \cos(\phi_2) = 10 \sim 50\text{m}$ 的区域进行计算。

利用文中所建立的计算模型编程,计算得到战斗部破片相对目标的动态飞散速度,结果如图 2 所示。

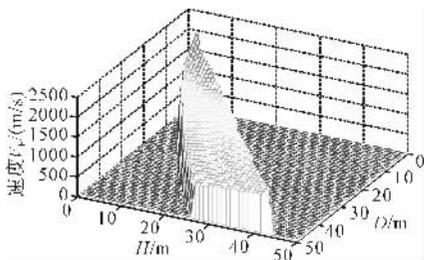


图 2 例 1 计算结果

结果表明:1) 动态飞散速度随飞散距离增加而递减;2) 动态飞散区边缘弯曲。

例 2:设破片静态飞散角 $\varphi = 60^\circ \sim 120^\circ$,破片初速 $V_0(\varphi) = 2000\cos(\varphi - 90^\circ)(\text{m/s})$ 。导弹速度 $V_M = [1000, 0, 0]^T (\text{m/s})$ 。目标(TBM)速度 $V_T = [-1200, 0, 0]^T (\text{m/s})$ 。系数 $K_H = 0.01$ 。在方位角为 $\omega_2 = 0^\circ$ 的平面内,取 $D = r_2 \sin(\phi_2) = 5 \sim 30\text{m}$, $H = r_2 \cos(\phi_2) = 5 \sim 50\text{m}$ 的区域进行

计算。战斗部破片相对目标的速度计算结果如图 3 所示。该算例存在多值问题,速度分布有两个解。图 3(b) 所示为动态飞散速度第 1 个解的分布;图 3(c) 为动态飞散速度第 2 个解的分布;为了便于观察多值区域,用图 3(a) 显示动态飞散速度第 1 个解和第 2 个解的和。

结果表明:1) 破片动态飞散速度随飞散距离增加而递减;2) 破片动态飞散区后沿附近速度出现多值;3) 例 2 与

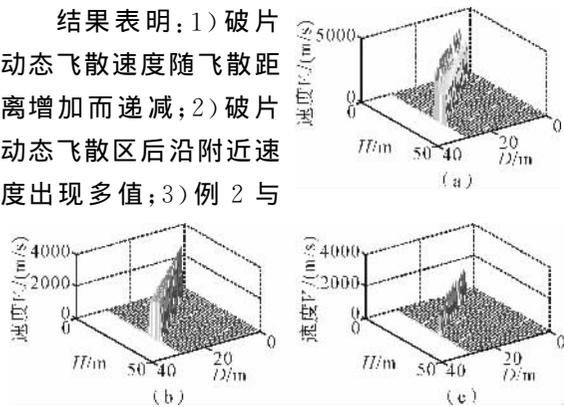


图 3 例 2 计算结果

例 1 比较,衰减系数变小后,计算的动态飞散区边缘弯曲程度下降;目标速度增大、静态飞散角范围增大、战斗部两端静态破片初速度比中央小后,计算的飞散区较前倾、飞散区出现多值。

3 结论

建立了适用于任意遭遇高度、脱靶量、目标速度的破片动态碰靶速度的计算模型。该模型除考虑弹道弯曲外,还考虑了对于 TBM 等高速目标可能出现的多值问题。通过两个算例,对建立的模型进行了验证,仿真计算结果与实际一致。

由仿真计算结果可知:1) 低空遭遇时,动态飞散区边沿是弯曲的,脱靶量较大情况下,对于引战配合有影响;由于破片速度方向的改变,对于碰靶着角也有影响。2) 对于高速目标,导弹破片静态飞散范围较大情况,动态飞散区后沿可能出现多值。计算目标毁伤概率时,需要考虑到以上两点。

参考文献:

[1] 鲁卫红. 考虑空气阻力影响的动态杀伤区[J]. 制导与引信,1994(2):55-59.
 [2] 鲁卫红,童宁宁. 战斗部破片动态飞散区的多值问题[J]. 弹箭与制导学报,1999(2):44-47.
 [3] 鲁卫红,李彦彬. 战斗部破片动态飞散区的变换[J]. 空军工程大学学报,2001(5):68-72.