

一种对圆柱形空中目标着靶参数算法的研究

梁振刚^{1,2}, 蒋建伟¹, 陈峰²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘 要: 能否准确有效地计算毁伤元对空中目标的着靶参数是评价弹药对空中目标毁伤概率的重要环节,也是评估导弹武器系统作战效能的重要指标。在分析毁伤元运动模型和目标元模型的基础上,提出了将圆柱形目标离散成多个小矩形并根据交会点到矩形四边的距离之和与周长关系作为命中目标的判定方法,推导出了着靶速度方向和目标轴截面、横截面夹角及着靶角和着速参数计算方法,并通过实例验证了该算法的正确性与准确性,为进一步研究毁伤元对目标的毁伤计算奠定了基础。

关 键 词: 毁伤元;空中目标;动态交会;毁伤概率;着靶参数

中图分类号: TP 301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)01-0015-05

Research for Impacting Parameters Algorithm on Cylindrical Aerial Target

LIANG Zhen-gang^{1,2}, JIANG Jian-wei¹, CHEN Feng²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China. Corresponding author: LIANG Zhen-gang, E-mail: lzg596@tom.com)

Abstract: Whether to calculate the impacting parameter accurately and efficiently which is about the kill element against the air target not only plays an important role in evaluating the kill probability of ammunition for aerial targets, but also plays an important indicator to assess the operational effectiveness of the missile weapon system. Based on the analysis of kill element and target motion model, methods of discretizing cylindrical target into multiple small rectangles were proposed, and the angle calculation methods on the velocity direction of impacting and the axial section, cross section of the target, target angle and the target speed were deduced by using the judging criterion on hitting the target according to the relation between the distance of the intersection point to the four sides of the rectangle and the perimeter. And then the correctness and accuracy of the algorithm were verified by an example. The algorithm serves as basis for further studying the impacting parameter which is about the kill element against the aerial target.

Key words: kill element; aerial target; dynamic interception; kill probability; impacting parameter

毁伤元击中目标的着靶参数计算是研究对目标毁伤概率的关键技术之一,很多空中目标都有圆柱部,所以研究圆柱形空中目标具有很强的实际意义。毁伤元对圆柱形目标的着靶参数主要有:着靶点、毁伤元与目标相对速度方向和目标横截面及轴截面的夹角、着靶角及着靶速度。其中毁伤元与目标相对速度方向和目标横截面及目标轴截

面的夹角可唯一确定圆柱形目标的着靶姿态,而着靶角可用于判断着靶时是否有跳飞情况出现。

由于毁伤元击中目标的空中交会过程是动态的,所以研究着靶过程必须进行动态交会分析,因此毁伤元对空中目标命中点的计算是对目标着靶参数计算的关键环节^[1-2]。谢邦荣等^[3]将空中目标离散成四边形,通过4个三角形面积与四边形

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB832706); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2014076)。

作者简介: 梁振刚(1973-),男,辽宁沈阳人,北京理工大学博士研究生; 蒋建伟(1962-),男,江苏江阴人,北京理工大学教授,博士生导师。

面积比较的方法判断是否命中,对破片束与目标平面的夹角进行了研究;王马法等^[4]给出了破片命中点的计算模型,把目标元离散成三角形,定量讨论了弹目交会参数和速度衰减对命中点参数的影响。

本文根据圆柱形目标的特点,将目标元模型离散成 $m \times n$ 个矩形,建立了毁伤元与目标元动态交会方程,给出了对圆柱形目标动态交会点的求解方法,通过判断交会点到矩形 4 条边的距离之和等于周长一半作为命中的判定依据,并推导出了毁伤元击中目标着靶参数的计算方法,可准确计算出毁伤元对圆柱形目标的着靶参数。

1 毁伤元与目标元动态交会方程建立

1.1 毁伤元运动模型

毁伤元运动模型如图 1 所示,点 $A_{m0}(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0})$ 是弹体圆柱部外表面上的一个毁伤元坐标,设 $t_0 = 0$ 时弹体起爆,在 t_k 时刻该毁伤元到达 A_{m1} 点,飞行距离为 S ,则

$$\left. \begin{aligned} y_{m0} &= \frac{D_m}{2} \cos \theta, \\ z_{m0} &= \frac{D_m}{2} \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: D_m 是弹体的口径值; θ 是速度方向在 $OY_m Z_m$ 平面内的投影与 OY_m 轴的夹角,即位偏角。

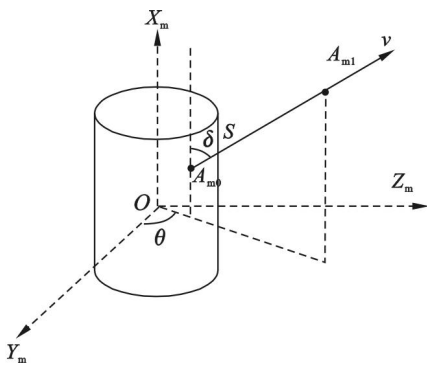


图 1 毁伤元运动模型

Fig. 1 The motion model of kill element

弹体起爆后,毁伤元在空中飞行时,主要受到空气阻力的影响,飞行速度产生衰减,可推导出衰减速度方程为^[5-7]

$$v = v_0 e^{-dS}. \quad (2)$$

式中: v_0 是毁伤元的初速度; d 是衰减系数; S 是毁伤元的飞行距离。

t_k 时刻毁伤元飞行距离可表示为

$$S = \int_0^{t_k} v dt. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)求得

$$S = [\ln(1 + dv_0 t_k)] / d. \quad (4)$$

则毁伤元的直线运动方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_m &= x_{m0} + S \cdot \cos \delta, \\ y_m &= \frac{D_m}{2} \cos \theta + S \cdot \sin \delta \cdot \cos \theta, \\ z_m &= \frac{D_m}{2} \sin \theta + S \cdot \sin \delta \cdot \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, δ 是毁伤元飞行速度方向与 OX_m 轴的夹角,即飞散方向角。

1.2 目标元模型

为了计算方便,可在目标坐标系将圆柱形目标的侧表面离散成多个矩形,将圆柱面简化成多个矩形组成的小平面,使相邻的矩形两边分别平行于轴线和底面。将轴线 $O_{t1} O_{t2}$ 等分成 m 段,周向划分为 n 份,则圆柱形目标的侧面划分成 $m \times n$ 个小矩形,设第 i 个矩形的 4 个顶点坐标为 $P_{ti1}(x_{ti1}, y_{ti1}, z_{ti1})$, $P_{ti2}(x_{ti2}, y_{ti2}, z_{ti2})$, $P_{ti3}(x_{ti3}, y_{ti3}, z_{ti3})$, $P_{ti4}(x_{ti4}, y_{ti4}, z_{ti4})$, 如图 2 所示。

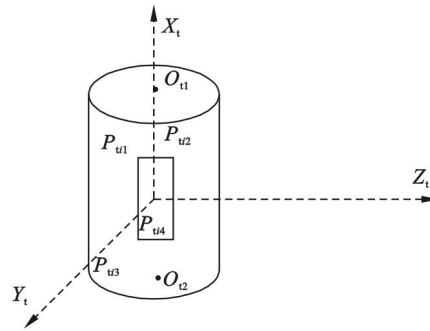


图 2 目标模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the target model

设目标的长度为 L ,则目标上下底面的圆心坐标为 $O_{t1}(\frac{L}{2}, 0, 0)$, $O_{t2}(-\frac{L}{2}, 0, 0)$,为计算着靶参数,需要将各矩形的顶点和圆柱形上下底面圆心的坐标从目标坐标系转化到弹体坐标系中,公式为^[8-10]

$$\begin{aligned} M_{tm} &= M_z[\alpha_m] M_y[\beta_m] A^T M_y[-\beta] \cdot \\ &M_z[-\alpha] M_y[-\beta_t] M_z[-\alpha_t]. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: α_m 和 β_m 是弹体的攻角和侧滑角; β_t 和 α_t 是目标的攻角和侧滑角; M_y , M_z 是分别以 Y 轴和 Z 轴为旋转轴的旋转矩阵。

$$\beta = \arcsin(\sin q \cdot \sin \varphi), \quad (7)$$

$$\alpha = \arctan(-\tan q \cdot \cos \varphi). \quad (8)$$

式中: q 为交会角; φ 为交会方位角。

$$\text{当 } q \text{ 是锐角时, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \text{当 } q \text{ 为}$$

钝角时, \mathbf{A} 为单位阵.

将第 i 个矩形的 4 个顶点坐标转化到弹体坐标系后坐标为 $P_{mi1}(x_{mi1}, y_{mi1}, z_{mi1}), P_{mi2}(x_{mi2}, y_{mi2}, z_{mi2}), P_{mi3}(x_{mi3}, y_{mi3}, z_{mi3}), P_{mi4}(x_{mi4}, y_{mi4}, z_{mi4})$. 目标上下底面的圆心 O_{t1} 和 O_{t2} 可转化为 O_{m1}, O_{m2} .

计算出第 i 个矩形在弹体坐标系中的平面方程:

$$A_{mi}x_{mi} + B_{mi}y_{mi} + C_{mi}z_{mi} + D_{mi} = 0. \quad (9)$$

平面法向量 \mathbf{f}_{pm} 为

$$\mathbf{f}_{pm} = (A_{mi}, B_{mi}, C_{mi}) = P_{mi1}P_{mi2} \times P_{mi1}P_{mi3}, \quad (10)$$

$$D_{mi} = -A_{mi}x_{mi1} - B_{mi}y_{mi1} - C_{mi}z_{mi1}. \quad (11)$$

设目标在弹体坐标系作匀速直线运动, 其相对弹体的运动速度为 $\mathbf{v}_m(v_{mx}, v_{my}, v_{mz})$, 则 t 时刻的目标第 i 个矩形平面方程为

$$A_{mi}(x - v_{mx}t) + B_{mi}(y - v_{my}t) + C_{mi}(z - v_{mz}t) + D_{mi} = 0. \quad (12)$$

1.3 动态交会点的求解

假设在 t_h 时刻, 毁伤元击中圆柱形侧面的第 i 个矩形, 则将式(5)代入式(12), 得到

$$A_{mi}x_{m0} + B_{mi}y_{m0} + C_{mi}z_{m0} + (A_{mi}\cos\varphi + B_{mi}\sin\varphi \cdot \cos\theta + C_{mi}\sin\theta \cdot \sin\varphi) \frac{1}{d} \ln(1 + dv_{m0}t_h) - t_h(A_{mi}v_x + B_{mi}v_y + C_{mi}v_z) + D_{mi} = 0. \quad (13)$$

通过迭代法^[11-12]可求出 t_h 值, 然后代入式(4)和式(5)即可求出毁伤元的飞行距离和命中点坐标.

1.4 毁伤元击中目标模型

因为构成目标是矩形微元, 所以当交会点 h 在矩形内部时(见图 3), 可推出

$$|P_{mi1}P_{mi2}| + |P_{mi1}P_{mi3}| = |he_1| + |hd_1| + |hd_2| + |he_2|. \quad (14)$$

说明毁伤元击中目标平面时, 交会点到矩形四条边的距离之和正好等于周长一半.

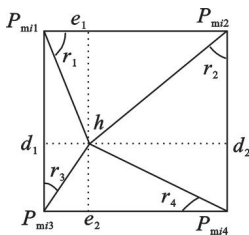


图 3 目标判定原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the target determination principle

2 着靶参数计算

2.1 毁伤元击中目标时的速度

如果毁伤元命中目标, 则将求得的时间 t_h 代入式(3)求出 t_h 时刻毁伤元飞行距离, 代入式(2)求出毁伤元命中目标时的速度 v :

$$v = v_0 e^{-\ln(1 + av_0 t_h)}. \quad (15)$$

2.2 着靶速度方向和目标轴截面夹角 α

毁伤元在 t_h 时刻命中目标, 如图 4 所示. 由目标上下底面的圆心及着靶点可求出着靶点所在目标轴截面的法向量 \mathbf{f}_z . 毁伤元命中目标时, 毁伤元在弹体坐标系中的速度矢量为

$$\mathbf{v}_e = (v \cdot \cos\delta, \frac{D_m}{2} \cos\theta + v \cdot \sin\delta \cdot \cos\theta, \frac{D_m}{2} \sin\theta + v \cdot \sin\theta \cdot \sin\delta). \quad (16)$$

毁伤元命中目标时, 毁伤元与目标的相对速度矢量为

$$\mathbf{v}_{er} = \mathbf{v}_e - \mathbf{v}_{mr}. \quad (17)$$

式中, \mathbf{v}_{mr} 为在弹体坐标系中目标与弹体的相对速度矢量.

毁伤元着靶速度方向和目标轴截面夹角 α 为

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{\mathbf{v}_{er} \cdot \mathbf{f}_z}{|\mathbf{v}_{er}| \cdot |\mathbf{f}_z|} \right|. \quad (18)$$

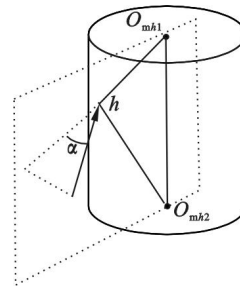


图 4 着靶速度方向和目标轴截面夹角

Fig. 4 The angle between the velocity direction of impacting and the axial section of target

2.3 着靶速度方向与目标横截面夹角 ψ

毁伤元在 t_h 时刻命中目标时毁伤元与目标相对速度方向和目标横截面夹角见图 5. 由目标上下底面的圆心可得出着靶点所在目标横截面的法向量 $\mathbf{O}_{mh1}O_{mh2}$, 毁伤元着靶速度方向和目标横截面夹角 ψ 为

$$\psi = \arcsin \left| \frac{\mathbf{v}_{er} \cdot \mathbf{O}_{mh1}O_{mh2}}{|\mathbf{v}_{er}| \cdot |\mathbf{O}_{mh1}O_{mh2}|} \right|. \quad (19)$$

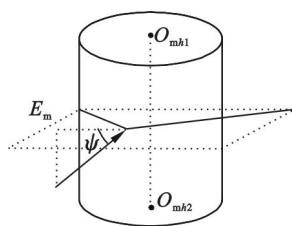


图 5 着靶速度方向和目标横截面夹角

Fig. 5 The angle between the velocity direction of impacting and the cross section of the target

2.4 着靶角 \$\beta\$

着靶角是毁伤元碰靶时其速度方向与靶面法向角间的夹角. 毁伤元命中的矩形平面与命中点所在的轴截面和横截面相互垂直, 根据勾股定理可推出

$$\sin^2 \beta = \sin^2 \alpha + \sin^2 \psi, \quad (20)$$

则

$$\beta = \arcsin \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \psi}. \quad (21)$$

2.5 着靶参数计算流程图

毁伤元对圆柱形空中目标着靶参数计算流程图见图 6.

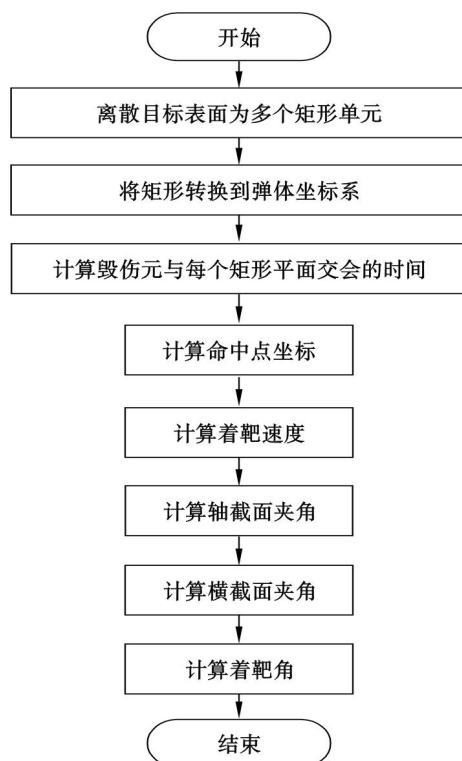


图 6 着靶参数计算流程图

Fig. 6 Flow chart of the impacting parameter calculation

3 实 例

为了验证着靶参数的计算方法的正确性, 通过实例进行运算, 输入的参数有弹目交会条件、弹

体和目标参数等, 具体的参数值见图 7.



图 7 参数输入界面

Fig. 7 Parameter input interface

通过计算得到的着靶参数包括: 着靶速度、着靶点坐标、毁伤元与目标相对速度方向和目标横截面、轴截面夹角及毁伤元击中目标的着靶角, 输出结果如图 8 所示, 通过实例说明本文提出的对圆柱形空中目标着靶参数的计算方法正确.

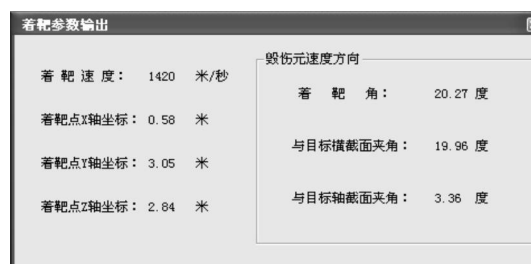


图 8 着靶参数输出界面

Fig. 8 The impacting parameter output interface

4 结 论

1) 本文将圆柱形目标离散成多个矩形进行研究, 并推导出命中目标的判定方法, 即交会点到矩形四条边的距离之和等于周长一半.

2) 给出了毁伤元对圆柱形空中目标着靶参数的求解方法, 可计算出命中目标时毁伤元着靶速度方向和目标轴截面、横截面夹角及毁伤元击中目标的着靶角、着靶点和着靶速度. 通过实例验证了该算法的正确性, 为进一步深入研究弹药对空中目标毁伤概率提供参考.

参考文献:

- [1] 张志鸿, 周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
(Zhang Zhi-hong, Zhou Shen-sheng. The coordination efficiency between the air defense missile fuze and warhead, the design of warhead [M]. Beijing: Aerospace Publishing Ltd, 1994.)

(下转第 43 页)