

旋转自稳定末敏子弹运动特性分析*

杨永亮¹, 刘荣忠¹, 郭锐¹, 陈亮¹, 赵博博^{1,2}, 邢柏阳¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 中国人民解放军73917部队, 江苏南京 210000)

摘要:为研究某型旋转自稳定末敏子弹运动特性,充分考虑末敏子弹的结构强非对称特点和其初始抛撒条件,引入动不平衡弹体模型,推导超大攻角条件下子弹的空间6自由度弹道方程,计算分析子弹的稳态扫描运动特性。结果表明:子弹体的质量分布非对称和初始抛撒角速度是子弹药实现稳态扫描运动的必要条件;子弹扫描频率只由抛撒角速度 $\omega_{\sigma 0}$ 决定,且和 $\omega_{\sigma 0}$ 正相关;初始俯仰角 $\varphi_{a0} \geq 0^\circ$ 时,扫描角整体呈增大趋势,初始俯仰角 $\varphi_{a0} < 0^\circ$ 时,扫描角整体变化趋势为先减小后增大;扫描面积与配重-全弹质量比、初始俯仰角、初始偏航角和初始角速度呈正相关,与均质圆柱体转动惯量比呈负相关。

关键词:末敏子弹;结构强非对称;大攻角;扫描特性;弹道学

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)01-145-06

Motion characteristic analysis of rotary self-stabilizing terminal sensitive submunition

YANG Yongliang¹, LIU Rongzhong¹, GUO Rui¹, CHEN Liang¹, ZHAO Bobo^{1,2}, XING Boyang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. The PLA Unit 73917, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to study the motion characteristics of a certain type of rotary self-stabilizing terminal sensitive submunition, the submunition's asymmetric structure characteristics and its initial projection condition were fully considered. The dynamic unbalance missile model was introduced to derive the 6 degrees of freedom trajectory equation of the submunition and analyze the characteristics of steady state scanning motion of submunition. Results show that the submunition's asymmetric mass distribution and the initial angular velocity are the necessary condition for the realization of the steady state scanning. The scanning frequency of the submunition is only determined by the projection angular velocity $\omega_{\sigma 0}$, and is positively correlated with the $\omega_{\sigma 0}$. When the initial pitch angle $\varphi_{a0} \geq 0^\circ$, the overall trend of scanning angle is increased, and when $\varphi_{a0} < 0^\circ$, the scanning angle decreases and then increases. The scanning area is positively correlated with the mass ratio of weight and projectile, the φ_{a0} , the initial yaw angle and the $\omega_{\sigma 0}$, and is negatively correlated with the ratio moment of inertia of the center cylinder.

Key words: terminal sensitive submunition; strongly asymmetric; large attack angle; scanning characteristic; ballistics

旋转自稳定末敏子弹由圆柱体战斗部和外置探测器组成,形成了强非对称弹体结构。大攻角下抛射时,母弹赋予子弹高速旋转,末敏子弹便会在地面上形成“橄榄球”形的扫描螺旋曲线^[1]。旋转自稳定末敏子弹不依赖非对称空气动力实现稳态扫描运动,与伞降和翼片型末敏弹相比,其体积小、受风的影响小、扫描频率和落速高,故不易受敌方反制,成为未来末敏弹的主要发展方向。

目前,美军已经装备类似二级航空子母弹 BLU-108^[2],一枚 BLU-108 内装 40 个末敏反装甲子弹 skeet。空中投射一枚 BLU-108,可以覆盖两倍足球场的宽度、四倍足球场长度的面积,

具有大面积杀伤和封锁特点^[3]。由于涉密,国外相关文献尚未公布对 skeet 末敏子弹扫描运动形成机理及影响规律理论方面的研究成果,文献[4-5]是关于非对称翼末敏弹的实验研究,没有对弹丸的扫描运动进行理论分析。国内学者的研究工作主要集中在伞降和翼片型末敏弹的稳态扫描运动形成机理上。马晓冬、郭锐等^[6-7]分析了有伞末敏弹涡环旋转伞的流固耦合特性,并进行了高塔投放实验验证。舒敬荣、顾建平^[8-9]研究了单翼末敏弹在非对称空气动力作用下的稳态扫描运动机理,分析了稳态扫描段的影响因素。吕胜涛、刘荣忠等^[10-11]分析了 S-S 型和 S-C 型双

* 收稿日期:2016-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372136)

作者简介:杨永亮(1991-),男,内蒙古五原人,博士研究生,E-mail:443624640@qq.com;

刘荣忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:liurongz116@163.com

翼末敏弹的翼片弯折面积和弯折角两因素对气动参数的影响规律,以此进行了翼型优化设计和高塔实验验证。赵博博、陈亮等^[12-13]分析和优化了新型扭曲尾翼掠飞末敏弹的气动特性,并进行了风洞实验验证。陈超等^[14]建立了用于智能雷系统的子弹药模型,并推导了子弹运动方程。

本文根据旋转自稳定末敏子弹抛射条件和结构非对称特点,引入非对称弹体模型。基于此模型推导了超大攻角下空间 6 自由度弹道方程,对运动方程进行数值求解,得出了弹体结构和抛撒条件对扫描运动特性的影响规律。

1 建立坐标系和弹丸模型

1.1 坐标系建立

坐标系间变换关系^[1]及子弹工作过程示意图如图 1 和图 2 所示。本文主要研究图 1 中的工作过程 3 和 4。 $O-XYZ$ 为地面惯性坐标系,基准坐标系为 $C-X_N Y_N Z_N$,弹轴坐标系为 $C-\xi\eta\sigma$,弹体坐标系为 $C-X_1 Y_1 Z_1$,其中 O 点为子弹抛撒点在地面的铅垂投影, C 为弹体质心, φ_a 称为俯仰角, φ_2 称为偏航角, γ 称为滚转角。

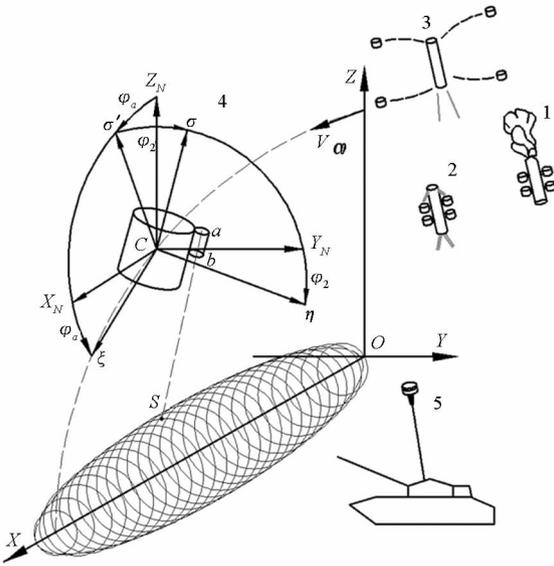


图 1 坐标系间关系及工作过程示意图
Fig. 1 Relationships between coordinate systems and working process

故弹轴坐标系到基准坐标系的变换矩阵 L_{NA} 为:

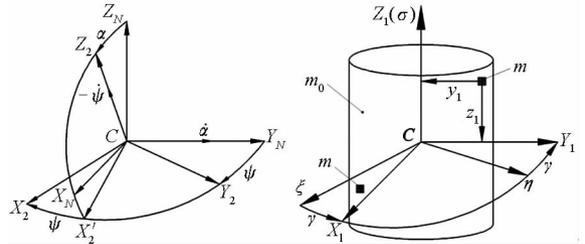
$$L_{NA} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_a & -\sin\varphi_2\sin\varphi_a & \cos\varphi_2\sin\varphi_a \\ 0 & \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 \\ -\sin\varphi_a & -\sin\varphi_2\cos\varphi_a & \cos\varphi_2\cos\varphi_a \end{pmatrix} \quad (1)$$

图 2(a) 为弹道坐标系 $C-X_2 Y_2 Z_2$ 与基准坐标系的关系。取弹体质心为弹道坐标系原点, $C-X_2 Y_2 Z_2$ 可以由基准坐标系经两次转换而成:第一次是 $C-X_N Y_N Z_N$ 绕 CY_N 轴正向右旋 α 角到 $C-X_2 Y_N Z_2$ 位置,第二次是 $C-X_2 Y_N Z_2$ 系绕 CZ_2 轴负向右旋 ψ 角到弹道坐标系 $C-X_2 Y_2 Z_2$ 。故弹道坐标系到基准坐标系的变换矩阵 L_{NV} 为:

$$L_{NV} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\alpha & \sin\psi\cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ -\cos\psi\sin\alpha & -\sin\psi\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

由图 2(b) 可知,弹体坐标系到弹轴坐标系的变换矩阵 L_{AB} 为:

$$L_{AB} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$



(a) $C-X_2 Y_2 Z_2$ 系与基准系
(b) $C-X_1 Y_1 Z_1$ 系与 $C-\xi\eta\sigma$ 系
(a) Coordinate of $C-X_2 Y_2 Z_2$ and $C-X_N Y_N Z_N$
(b) Coordinate of $C-X_1 Y_1 Z_1$ and $C-\xi\eta\sigma$

图 2 坐标系间的关系

Fig. 2 Relationships between coordinate systems

1.2 非对称弹体模型

为了便于探究非对称弹体结构对扫描运动的影响规律,建立图 2(b) 中弹体坐标系下的弹体模型。子弹药由均质圆柱体 m_0 和两个配重块 m 组成,两个配重块 m 在弹体坐标系下的坐标为 $(0, \pm y_1, \pm z_1)$,在扫描运动方程中将其视为质点耦合到均质圆柱体上。均质圆柱体的惯量矩阵为:

$$J_0 = \begin{pmatrix} A_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_0 & 0 \\ 0 & 0 & C_0 \end{pmatrix}$$

其中, A_0 为赤道转动惯量, C_0 为极转动惯量。子弹药整体的惯量矩阵为:

$$J_B = \begin{pmatrix} A_0 + 2(y_1^2 + z_1^2)m & 0 & 0 \\ 0 & A_0 + 2z_1^2m & -2y_1z_1m \\ 0 & -2y_1z_1m & C_0 + 2y_1^2m \end{pmatrix} \quad (4)$$

令 $A_1 = I_{xx}, A = I_{yy}, B = I_{yz} = I_{zy}, C = I_{zz}$, 故:

$$J_B = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A & -B \\ 0 & -B & C \end{pmatrix}$$

再经坐标变换可得到弹轴坐标系下弹体的惯量矩阵 $J_A = L_{AB} J_B L_{AB}^T$ 。

2 运动方程

2.1 末敏子弹受力分析

相比常规旋转稳定炮弹, 结构非对称末敏子弹的飞行速度和自转速度都很低, 分析受力时, 主要考虑重力 G 、空气动力 F 、赤道阻尼力矩和极阻尼力矩对扫描运动的影响。不计气象条件变化和风的影响^[14]。

1) 重力 G :

$$G = (m_0 + 2m)[g_x, g_y, g_z]^T = (m_0 + 2m)[0, 0, -g]^T \quad (5)$$

式中: m_0 为均质圆柱体质量; m 为配重的质量; g_x, g_y 和 g_z 为重力加速度 g 在地面坐标系三个方向的分量。

2) 空气动力 F : 将空气动力 F 在 $C - X_2 Y_2 Z_2$ 系中分解为阻力 F_x 、侧向力 F_y 和升力 F_z 。阻力 F_x 和侧向力 F_y 的方向分别为 CX_2 和 CY_2 的负向。升力 F_z 的方向为 CZ_2 的正向。故 F 的表达式为:

$$F = \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_x \\ -F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -qSc_x \\ -qSc_y \\ qSc_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $q = \rho v^2 / 2$; S 为弹丸特征面积; c_x 为阻力系数, c_y 为侧向力系数, c_z 为升力系数。根据坐标系间的变换关系, 空气动力在地面坐标系下的投影为:

$$F = \begin{bmatrix} F_{xE} \\ F_{yE} \\ F_{zE} \end{bmatrix} = L_{NV} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} = L_{NV} \begin{bmatrix} -qSc_x \\ -qSc_y \\ qSc_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 空气动力阻尼力矩 M : 将空气动力阻尼力矩 M 在弹轴系 $C - \xi\eta\sigma$ 中分解为赤道阻尼力矩 M_ξ 、 M_η 和极阻尼力矩 M_σ 。

$$M = \begin{bmatrix} M_\xi \\ M_\eta \\ M_\sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -qSldm'_x \omega_\xi v^{-1} \\ -qSldm'_y \omega_\eta v^{-1} \\ -qSldm'_z \dot{\gamma} v^{-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: l 为弹体特征长度; d 为弹径; m'_x, m'_y, m'_z 分别为 $C\xi$ 轴、 $C\eta$ 轴、 $C\sigma$ 轴的阻尼力矩系数导数。

2.2 运动微分方程

将力的表达式代入动量定理中, 向地面坐标系下分解; 力矩的表达式代入动量矩定理中, 向弹

轴坐标系下分解, 并与运动学方程联立可得:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_{xE} \\ \dot{y} = v_{yE} \\ \dot{z} = v_{zE} \\ \dot{v}_{xE} = F_{xE} / (m_0 + 2m) \\ \dot{v}_{yE} = F_{yE} / (m_0 + 2m) \\ \dot{v}_{zE} = F_{zE} / (m_0 + 2m) - g \\ \dot{\varphi}_2 = -\omega_\xi \\ \dot{\varphi}_a = \omega_\eta / \cos\varphi_2 \\ \dot{\gamma} = \omega_\sigma - \omega_\eta \tan\varphi_2 \\ \dot{\omega}_\xi = D_1 / D \\ \dot{\omega}_\eta = D_2 / D \\ \dot{\omega}_\sigma = D_3 / D \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中: } D = |J_A|, D_1 = \begin{vmatrix} Q_1 & -Asin\gamma & Bsin\gamma \\ Q_2 & A\cos\gamma & -B\cos\gamma \\ Q_3 & -B & C \end{vmatrix},$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} A_1 \cos\gamma & Q_1 & Bsin\gamma \\ A_1 \sin\gamma & Q_2 & -B\cos\gamma \\ 0 & Q_3 & C \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} A_1 \cos\gamma & -Asin\gamma & Q_1 \\ A_1 \sin\gamma & A\cos\gamma & Q_2 \\ 0 & -B & Q_3 \end{vmatrix},$$

$$\begin{cases} Q_1 = M_\xi + \omega_\eta \tan\varphi_2 (A_1 \sin\gamma \omega_\xi + A \cos\gamma \omega_\eta - B \cos\gamma \omega_\sigma) - \\ \omega_\eta (-B \omega_\eta + C \omega_\sigma) - \dot{\gamma} (B \cos\gamma \omega_\sigma - A_1 \sin\gamma \omega_\xi - A \cos\gamma \omega_\eta) \\ Q_2 = M_\eta - \omega_\eta \tan\varphi_2 (A_1 \cos\gamma \omega_\xi - A \sin\gamma \omega_\eta + B \sin\gamma \omega_\sigma) + \\ \omega_\xi (-B \omega_\eta + C \omega_\sigma) - \dot{\gamma} (B \sin\gamma \omega_\sigma + A_1 \cos\gamma \omega_\xi - A \sin\gamma \omega_\eta) \\ Q_3 = M_\sigma + \omega_\eta (A_1 \cos\gamma \omega_\xi - A \sin\gamma \omega_\eta + B \sin\gamma \omega_\sigma) - \\ \omega_\xi (A_1 \sin\gamma \omega_\xi + A \cos\gamma \omega_\eta - B \cos\gamma \omega_\sigma) \end{cases}$$

其中: $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\sigma$ 是弹丸绕质心转动的总角速度 ω 在弹轴坐标系下的分量。

2.3 扫描特性方程

图3为弹体坐标系下弹丸结构示意图。弹丸探测器斜外置, 探测器上 a, b 两点的连线为探测扫描线。探测器上 a, b 两点在弹体坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} a_B = (0, R_1 + R_2, h_1/2) \\ b_B = (0, R_1 + R_2, (h_1 - h_2)/2) \end{cases}, \text{ 将其投影}$$

到地面坐标系为:

$$a_E = \begin{bmatrix} x_{Ea} \\ y_{Ea} \\ z_{Ea} \end{bmatrix} = L_{NA} \cdot L_{AB} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 + R_2 \\ h_1/2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$b_E = \begin{bmatrix} x_{Eb} \\ y_{Eb} \\ z_{Eb} \end{bmatrix} = L_{NA} \cdot L_{AB} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 + R_2 \\ (h_1 + h_2)/2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

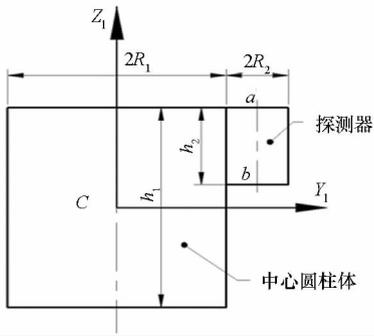


图 3 弹体坐标系下弹丸模型

Fig. 3 Projectile model in $C-X_1Y_1Z_1$

探测线 ab 在地面坐标系下的直线方程为:

$$\frac{x - x_{Ea}}{x_{Ea} - x_{Eb}} = \frac{y - y_{Ea}}{y_{Ea} - y_{Eb}} = \frac{z - z_{Ea}}{z_{Ea} - z_{Eb}} \quad (12)$$

设探测线 ab 与地面 $O-XY$ 的交点为 S 点, S 点的轨迹便为末敏子弹的扫描轨迹, 令式 (12) 中 $z=0$ 可得扫描轨迹的表达式:

$$\begin{cases} x_s = x_{Ea} - z_{Ea}(x_{Ea} - x_{Eb}) / (z_{Ea} - z_{Eb}) \\ y_s = y_{Ea} - z_{Ea}(y_{Ea} - y_{Eb}) / (z_{Ea} - z_{Eb}) \end{cases} \quad (13)$$

设地面坐标系 $O-XYZ$ 的基本单位向量依次记为 i, j, k , 则探测线 ab 的方向向量可表示为: $ab = (x_{Ea} - x_{Eb})i + (y_{Ea} - y_{Eb})j + (z_{Ea} - z_{Eb})k$, 故扫描角为:

$$\theta = (ab, k) = \arccos\left(\frac{z_{Ea} - z_{Eb}}{\sqrt{(x_{Ea} - x_{Eb})^2 + (y_{Ea} - y_{Eb})^2 + (z_{Ea} - z_{Eb})^2}}\right) \quad (14)$$

3 工程算例及运动特性分析

3.1 工程算例

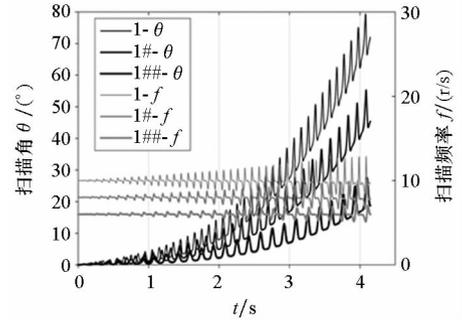
由于子弹药特殊的抛撒方式, 在运动初始时刻, 攻角为 90° , 即弹体周围只存在横向绕流, 其流场特性近似圆柱绕流, 根据何颖等^[15]对旋转圆柱绕流的研究结果, 当圆柱表面线速度与来流速度的比为 0.15, $Re = 1.4 \times 10^5$ 时, $c_x = 1.26, c_y = 0.27, c_z = 0$, 分别对应 $C-X_2Y_2Z_2$ 系下阻力系数、侧向力系数和升力系数。

采用某型子弹结构为例, 算例方案见表 1。其均质圆柱体长径比: $h_1/d = 0.71$ 。配重与圆柱体质量比: $2m/m_0 = 0.56$ 。圆柱体转动惯量比: $A_0/C_0 = 0.84$ 。配重块在 $C-X_1Y_1Z_1$ 系下坐标为 $(0, \pm 0.075 \text{ m}, \pm 0.01 \text{ m})$ 。初速 $v_{xEO} = 22 \text{ m/s}$, $z_0 = 100 \text{ m}, x_0 = y_0 = 0 \text{ m}$ 。求解算例, 结果如图 4 所示。

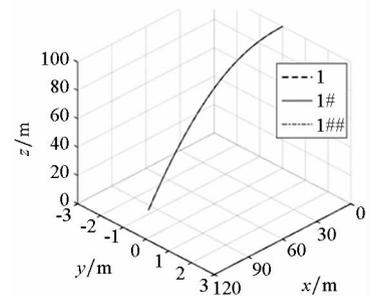
表 1 算例方案表

Tab. 1 Case scheme table

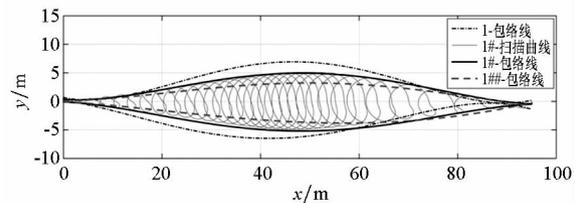
变量	算例编号						
	1	1#	1##	2#	3#	4#	5#
$\omega_{\sigma 0}/(\text{r/s})$	6	8	10	8	8	8	8
$\varphi_{a0}/(^{\circ})$	0	0	0	-16	+16	0	0
$\varphi_{20}/(^{\circ})$	0	0	0	0	0	-4	+4



(a) 扫描频率 f 、扫描角 θ
(a) Scanning frequency f and angle θ



(b) 飞行轨迹
(b) Flight path



(c) 地面扫描曲线
(c) Scanning curve

图 4 算例 1、1#和 1##的结果

Fig. 4 Numerical results of the example 1, 1# and 1##

从图 4 扫描角和扫描频率历时曲线可知, 算例 1#的扫描频率围绕直线 $f = \omega_{\sigma 0} = 8 \text{ r/s}$ 小幅波动。改变抛撒条件和弹体结构, 发现扫描频率只随抛撒角速度 $\omega_{\sigma 0}$ 而改变, 且和 $\omega_{\sigma 0}$ 正相关, 故可知末敏子弹的扫描频率由 $\omega_{\sigma 0}$ 决定。运动过程中, 扫描角 θ 逐渐增大, 且 $\omega_{\sigma 0}$ 越大, 扫描角增大的速率越大。对扫描频率曲线和扫描角曲线进行频谱分析可知, 曲线波动的频率等于弹丸绕弹轴自转的频率, 且和自转频率正相关, 说明子弹扫描

过程中同时存在进动与章动,且章动与进动频率相等。改变 $\omega_{\sigma 0}$ 不影响飞行轨迹。

3.2 扫描角和扫描区域形状

研究末敏子弹运动特性时,以得出末敏子弹初始参数对扫描角和扫描区域的影响规律为研究目标。对地面扫描曲线中的极值点进行拟合可得到扫描区域包络线,对包络线求积分可得到扫描区域面积。经大量计算试验发现,抛撒条件中的初始俯仰角 φ_{a0} 、初始偏航角 φ_{20} 、初始自转角速度 $\omega_{\sigma 0}$ 以及子弹体结构中均质圆柱体赤道与极转动惯量之比 A_0/C_0 和配重与全弹质量之比 $2m/m_0$ 这五个变量对末敏子弹运动特性有明显影响。由于影响扫描特性的变量较多,采用控制变量法来研究单一变量对扫描运动特性的影响规律,结果如图 5~6 所示。

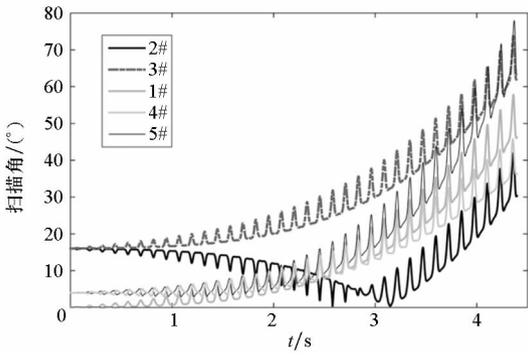


图5 扫描角的变化趋势

Fig. 5 Change trend of scanning angle

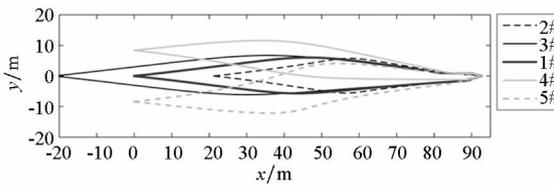


图6 初始姿态对扫描区域包络线形状影响

Fig. 6 Influence of initial pose on shape of scanning region

图 5 和图 6 分别为抛撒条件对扫描角和扫描区域形状的影响规律。由图 5 可知,初始俯仰角为负值时,扫描角总体变化趋势先减小后增大; φ_{a0} 为非负数时,扫描角总体变化趋势为逐渐增大。初始偏航角 $\varphi_{20} = \pm 4^\circ$ 和 0° 时,扫描角总体变化趋势都是增大的; φ_{20} 值越大,扫描角增大的速率越快。由图 6 可知,改变初始俯仰角会使扫描区域起点沿 x 轴移动,改变初始偏航角会使扫描区域起点沿 y 轴移动。与图 4(c) 对比可知,改变 $\omega_{\sigma 0}$ 对扫描区域起点没影响。

3.3 扫描面积

图 7 和图 8 分别为抛撒条件和子弹体结构对扫描面积的影响规律。

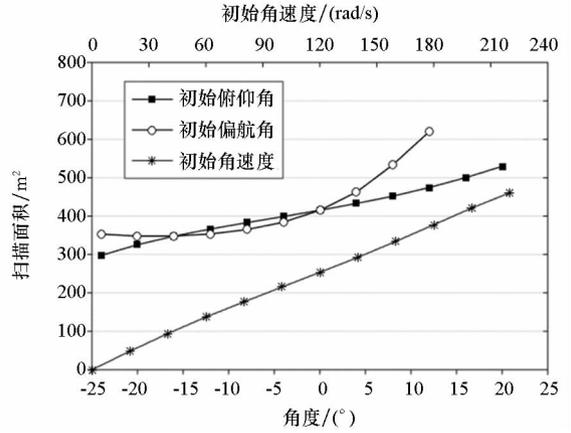


图7 抛撒条件对扫描面积的影响

Fig. 7 Influence of throwing condition on scanning area

随着 φ_{a0} , φ_{20} , $\omega_{\sigma 0}$ 的增大,扫描面积递增;随着配重与全弹质量之比的增大,扫描面积单调递增;随着均质圆柱体转动惯量比值的增大,扫描面积单调递减。图 8 中转动惯量比小于 0.66 后,弹丸在落地前发生翻转,扫描面积急剧增大,不具有可信度。图中虚线为拟合得到的走势曲线。

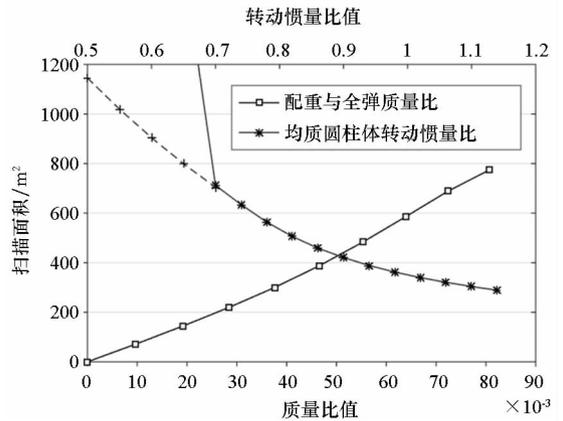


图8 弹体结构对扫描面积的影响

Fig. 8 Influence of projectile structure on scanning area

4 结论

根据旋转自稳定末敏子弹药的结构特点,引入动不平衡弹体模型,根据高等动力学理论推导了大攻角条件下末敏子弹的 6 自由度运动微分方程组。对运动微分方程进行数值求解得到了弹体结构以及抛撒初始条件对扫描运动特性的影响规律,得到如下结论:

1) 建立的弹体模型可以准确地模拟该型旋转自稳定末敏子弹药的结构特点;将探测器安装

于圆柱体战斗部外侧形成的弹体质量非对称分布是使该旋转末敏子弹药实现稳态扫描运动的直接原因。

2) 末敏子弹扫描频率只由抛撒角速度 $\omega_{\sigma 0}$ 决定, 且和 $\omega_{\sigma 0}$ 正相关; 扫描过程中同时存在章动与进动, 且章动与进动频率相同。

3) 初始俯仰角 $\varphi_{a0} \geq 0^\circ$, 扫描角总体变化趋势为增大, $\varphi_{a0} < 0^\circ$, 扫描角总体趋势为先减小后增大; 初始偏航角 φ_{20} 由负值变化到正值, 扫描角总体变化趋势都是增大的, φ_{20} 值越大, 扫描角增大的速率越快; 扫描面积与配重 - 全弹质量比、 φ_{a0} 、 φ_{20} 和 $\omega_{\sigma 0}$ 呈正相关, 与均质圆柱体转动惯量比呈负相关。

参考文献 (References)

- [1] 杨永亮, 刘荣忠, 郭锐, 等. 一种旋转自稳定灵巧子弹药稳态扫描运动研究[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 36(6): 49 - 52.
YANG Yongliang, LIU Rongzhong, GUO Rui, et al. Study on the steady scanning motion of a smart submunition with rotary self-stabilization[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 36(6): 49 - 52. (in Chinese)
- [2] 崔瀚, 焦志刚. 国外末敏弹发展概述[J]. 飞航导弹, 2015(2): 24 - 31.
CUI Han, JIAO Zhigang. An overview of the development of the terminal sensitive projectile in foreign countries[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(2): 24 - 31. (in Chinese)
- [3] 郑荣跃, 秦子增. 子母弹研究进展[J]. 国防科技大学学报, 1996(1): 60 - 64.
ZHENG Rongyue, QIN Zizeng. Recent development in submunition[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1996(1): 60 - 64. (in Chinese)
- [4] Mora V N, Piechocki J, Sanz-Andrés Á. Experimental research on a vertically falling rotating wing decelerator model[C]// Proceedings of 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2007.
- [5] Mora V N, Sanz-Andrés Á, Cuerva A. Experimental investigation of an autorotating-wing aerodynamic decelerator system [C]// Proceedings of 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [6] 马晓冬, 郭锐, 刘荣忠, 等. 涡环旋转伞流固耦合特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2015, 35(1): 84 - 89.
MA Xiaodong, GUO Rui, LIU Rongzhong, et al. Fluid-structure interaction characteristics analysis of vortex ring parachute[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 35(1): 84 - 89. (in Chinese)
- [7] 郭锐, 刘荣忠, 王本河, 等. 一种非对称双翼结构弹丸减速导旋特性试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5): 249 - 250, 254.
GUO Rui, LIU Rongzhong, WANG Benhe, et al. Experimental study on decelerating and spinning characteristics of an asymmetric two-wing projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5): 249 - 250, 254. (in Chinese)
- [8] 舒敬荣, 张邦楚, 韩子鹏, 等. 单翼末敏弹扫描运动研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 415 - 420.
SHU Jingrong, ZHANG Bangchu, HAN Zipeng, et al. A study on the scanning motion of single-fin target-sensitivity-projectile[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 415 - 420. (in Chinese)
- [9] 顾建平, 韩子鹏. 单翼末敏弹稳态扫描段影响因素分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 70 - 72, 76.
GU Jianping, Han Zipeng. Influence factor analysis about single-fin TSA's stable scanning phase[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 70 - 72, 76. (in Chinese)
- [10] 吕胜涛, 刘荣忠, 郭锐, 等. S-S 双翼末敏弹气动外形优化设计[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1150 - 1154.
LYU Shengtao, LIU Rongzhong, GUO Rui, et al. Optimum design on aerodynamic shape of the S-S style non-parachute terminal sensitive projectile[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(9): 1150 - 1154. (in Chinese)
- [11] 吕胜涛, 刘荣忠, 郭锐, 等. 弹性翼 S-C 型末敏弹气动特性研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 785 - 790.
LYU Shengtao, LIU Rongzhong, GUO Rui, et al. Research on aerodynamic characteristics of terminal sensitive projectile with S-C shaped elastic wings[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(5): 785 - 790. (in Chinese)
- [12] 赵博博, 刘荣忠, 郭锐, 等. 扭曲尾翼飞行器的气动特性[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 19 - 24.
ZHAO Bobo, LIU Rongzhong, GUO Rui, et al. Aerodynamic characteristics of the twist fin vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 19 - 24. (in Chinese)
- [13] 陈亮, 刘荣忠, 郭锐, 等. 扭曲尾翼弹箭气动外形多目标优化[J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1187 - 1193.
CHEN Liang, LIU Rongzhong, GUO Rui, et al. Multi-objective optimization on aerodynamic shape of projectile with twisted empennages[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1187 - 1193. (in Chinese)
- [14] 陈超, 王志军. 智能雷攻击坦克顶甲时的刚体扫描运动方程[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(3): 173 - 175.
CHEN Chao, WANG Zhijun. Rigid body scanning movement equation on intelligent mine attacking to tank top armor[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2001, 22(3): 173 - 175. (in Chinese)
- [15] 何颖, 杨新民, 陈志华, 等. 旋转圆柱绕流的流场特性[J]. 船舶力学, 2015, 19(5): 501 - 508.
HE Ying, YANG Xinmin, CHEN Zhihua, et al. Flow field characteristics of flow past a rotating cylinder[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(5): 501 - 508. (in Chinese)