

尾翼稳定脱壳穿甲弹卡瓣膛外非对称脱壳模型

杨富锋 芮筱亭 周晓丽

(南京理工大学动力工程学院, 南京 210094)

摘要 尾翼稳定脱壳穿甲弹(APFSDS)是杀伤地面装甲目标的利器. 尾翼稳定脱壳穿甲弹在后效期脱壳阶段卡瓣和弹芯存在相互干扰使膛外运动非常复杂, 影响脱壳穿甲弹的射击密集度. 根据质点运动和动量矩定理的多坐标系的表达形式和脱壳穿甲弹的膛外运动和卡瓣分离规律, 建立了能够更精确的描述卡瓣的膛外运动非对称性分离的动力学模型, 实例计算了卡瓣的脱壳过程. 该模型对分析卡瓣膛外运动和分离过程具有借鉴价值.

关键词 尾翼稳定脱壳穿甲弹, 非对称脱壳, 多坐标系

尾翼稳定脱壳穿甲弹由1个弹芯和3个卡瓣组成, 脱壳过程中由于膛口流场、尾翼屏蔽、机械干扰、气动干扰等对弹芯产生干扰^[1], 造成密集度降低. 如何精确描述卡瓣和弹体的运动规律, 对卡瓣和弹体的参数优化设计和提高密集度有重要意义. 通常弹箭的运动方程由推广的 poisson 公式^[2]获得, 针对膛外不同分离过程^[3], 本文利用推导的牛顿-欧拉法的多个坐标系质点运动和相对动量矩定理的一般表达式建立了卡瓣膛外运动的全过程公式, 对卡瓣在膛外的分离过程进行了数值仿真.

1 质点运动和相对动量矩定理

地面坐标系 $Oxyz$ 轴旋转3个角度到坐标系 $O_1x_1y_1z_1, O_2x_2y_2z_2$, 旋转3个角度到坐标系 $O_{i+1}x_{i+1}y_{i+1}z_{i+1}$, 旋转方式同文献^[4], 第 j 个坐标系到第 i 个坐标系的转换矩阵 $T_{i,j}$, ($j < i$),

$$[x_i \ y_i \ z_i]^T = T_{i,j} [x_j \ y_j \ z_j]^T \quad (1)$$

$O_i x_i y_i z_i$ 坐标系相对 $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ 坐标系的转动角速度 $\dot{\omega}_i$ 为

$$\dot{\omega}_i = -\dot{T}_{i,j-1} T_{i,j-1}^T = T_{i,j-1} \dot{T}_{i,j-1}^T \quad (2)$$

定义 O 到 O_1 的矢径为 r_1 , O_{i-1} 到 O_i 的矢径为 r_i , 对 $O_n x_n y_n z_n$ 内 O_n 到 C_n 矢径为 r_{n+1} , O 到 C_n 点的矢径 r_{C_n} (图1), 则 C_n 点的加速度为

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{C_n} = & \ddot{r}_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \{ \ddot{r}_{i+1} + 2(\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_i) \dot{r}_{i+1} + \\ & (\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_i + \sum_{j=1}^i (\sum_{k=1}^j \dot{\omega}_k) \omega_j) r_{i+1} + \\ & (\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_i) [(\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_i) r_{i+1}] \} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{ \ddot{r}_{n+1} + 2(\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_n) \dot{r}_{n+1} + \\ & (\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_n + \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^j \dot{\omega}_k) \omega_j) r_{n+1} + \\ & (\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_n) [(\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_n) r_{n+1}] \} \quad (3) \end{aligned}$$

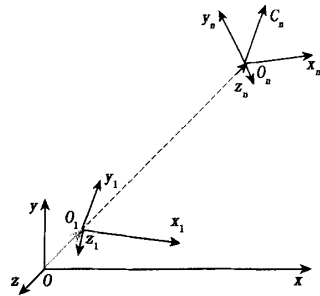


图1 多个坐标系示意图

Fig.1 Sketch Figure of systems of coordinates

C_n 相对 O_n 的绝对动量矩定理

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} G_{O_n}^{C_n} = & \frac{d^0}{dt} [J_{O_n} (\omega_1 + \dots + \omega_n)] r_{n+1} \times \\ & m_0 (r_1 + r_2 + \dots + r_n) = M_{O_n} \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{d^0}{dt} [J_{O_n} (\omega_1 + \dots + \omega_n)] = & (\omega_1 + \dots + \omega_n) \times \\ & [J_{O_n} (\omega_1 + \dots + \omega_n)] + J_{O_n} (\dot{\omega}_1 + \dots + \\ & \dot{\omega}_n + \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^j \omega_k) \omega_j) \quad (5) \end{aligned}$$

$\frac{d^0}{dt}$ 表示对矢量在地面系内求导即求绝对导, 将相应的量投影到 $O_n x_n y_n z_n$ 内

$${}_j(a_i) = \begin{cases} (T_{j,j-1} \cdots T_{i+1,i}) a_i = \\ \quad (\prod_{k=j-1}^{i+1} T_{k+1,k}) a_i, & i < j \\ a_i, & i = j \\ [(T_{j+1,j})^T \cdots (T_{i,j-1})^T] a_i = \\ \quad (\prod_{k=j+1}^i (T_{k,k-1})^T) a_i, & i > j \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} a_i &= \ddot{r}_{i+1} + 2(\omega_1 + \cdots + \omega_i) \dot{r}_{i+1} + \\ &(\dot{\omega}_1 + \cdots + \dot{\omega}_i + \sum_{j=1}^i (\sum_{k=1}^j \omega_k) \omega_j) r_{i+1} + \\ &(\omega_1 + \cdots + \omega_i) [(\omega_1 + \cdots + \omega_i) r_{i+1}] \end{aligned} \quad (7)$$

${}_j(a_i)$ 表示 a_i 在 $O_j x_j y_j z_j$ 内坐标形式. $\dot{\omega}_i$ 和 J_{O_n} 的投影转换如下

$${}_j(\dot{\omega}_i) = \begin{cases} (\prod_{k=1}^{i-1} T_{k+1,k}) \dot{\omega}_i (\prod_{k=i}^{j-1} T_{k+1,k})^T, & i < j \\ \dot{\omega}_i, & i = j \\ (\prod_{k=j+1}^{i-1} (T_{k,k-1})^T) \dot{\omega}_i (\prod_{k=j+1}^{i-1} (T_{k,k-1})), & i > j \end{cases} \quad (8)$$

$${}_j(J_{O_n}) = [(T_{j+1,j})^T \cdots (T_{n,n-1})^T] J_{O_n} \times [(T_{n,n-1}) \cdots (T_{j+1,j})] \quad (9)$$

2 卡瓣膛外运动

首先定义卡瓣膛外运动所需的运动坐标系:

地面系 $Oxyz$ 原点为炮口中心, Ox 轴为射击面与炮口水平面交线, 沿射向方向为正; Oy 轴在射击面内并与水平轴 Ox 垂直; Oz 轴垂直于射击面, 按右手法则确定其正向. 运动中各轴不变, 用于确定弹轴和速度的方位.

卡瓣随体系 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 以弹芯几何中心 O_2 为原点, $O_2 x_{1i}$ 轴为弹芯的纵轴方向, 沿弹头方向为正; $O_2 y_{1i}$ 轴在卡瓣对称面末端的 A_i 点与弹轴 $O_2 x_{1i}$ 组成的平面内且垂直于 $O_2 x_{1i}$ 轴, 指向外为正向, $O_2 z_{1i}$ 轴由右手坐标系确定其正向. 坐标系的角速度为 ω_1 . 该坐标系用于描述卡瓣末端的 A_i 点相对于弹芯的运动, 运动中该坐标系绕着弹轴转动.

卡瓣体坐标系 $A_i x_{3i} y_{3i} z_{3i}$ 卡瓣对称面末端与弹体接触点 A_i 为原点, $A_i x_{3i}$ 位于卡瓣对称面内沿卡瓣体纵轴向前为正向, $A_i y_{3i}$ 在卡瓣对称面内轴垂直于 $A_i x_{3i}$ 轴, 由内向外为正向, $A_i z_{3i}$ 轴由右手坐标系确定其正向. 坐标系的角速度为 ω_2 . 该坐标系用于描述卡瓣绕 A_i 点的转动.

实际运动过程中, 卡瓣体系绕着绕 A_i 点 3 自

由度转动, 而卡瓣随体系跟着 A_i 点绕弹轴转动, 弹轴相对于地面坐标系摆动. 3 坐标系关系如图 2.

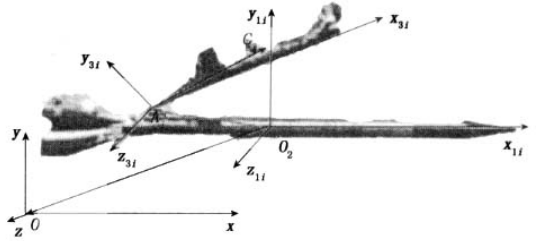


图 2 单个卡瓣与弹芯的坐标系

Fig.2 The sabot and long rod system of coordinates

左下标 0 说明矢量在坐标系 $Oxyz$ 内, 左下标 1 说明矢量在坐标系 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 内, 左下标 2 说明矢量在坐标系 $A_i x_{3i} y_{3i} z_{3i}$ 内. C_i 为卡瓣体质心.

$$[i_{1i} \ j_{1i} \ k_{1i}]^T = L_2 [i \ j \ k]^T \quad (10)$$

$$[i_{3i} \ j_{3i} \ k_{3i}]^T = L_3 [i_{1i} \ j_{1i} \ k_{1i}]^T$$

O 到 O_2 的矢量 r_1 , A_i 到 C_i 的矢量式 r_3 在卡瓣体系内坐标阵 $A_i C_i = [l_{ci} \ lm_{1i} \ lm_{2i}]^T$ 是常量, 在 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 内 O_2 到 A_i 的矢量式 r_2 坐标阵

$$O_2 A_i = [-lm + x \ d/2 + y \ 0]^T \quad (11)$$

式中 x, y 是 A_i 在 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 内运动坐标, 由式(3)得 C_i 点在 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 的运动方程

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{C_i} &= L_2 \ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 + L_3^T \ddot{r}_3 + 2\dot{\omega}_{21} (L_3^T \dot{r}_3) + \\ &(\dot{\omega}_{21} + \dot{\omega}_{21} \dot{\omega}_{21}) (L_3^T r_3) + 2\dot{\omega}_1 \dot{r}_2 + \\ &2\dot{\omega}_1 (L_3^T \dot{r}_3) + 2\dot{\omega}_1 \dot{\omega}_{21} (L_3^T r_3) + \\ &\dot{\omega}_1 \dot{\omega}_1 (r_2 + L_3^T r_3) + \dot{\omega}_1 (r_2 + L_3^T r_3) \end{aligned} \quad (12)$$

由 $m_i \ddot{r}_{C_i} = {}_1 F_{C_i}$ 得

$$\begin{aligned} \ddot{r}_2 &= {}_1 F_{C_i} / m_i - \{ L_2 r_1 + (\dot{\omega}_{21} + \\ &\dot{\omega}_{21} \dot{\omega}_{21}) (L_3^T r_3) + 2\dot{\omega}_1 \dot{r}_2 + \\ &2\dot{\omega}_1 \dot{\omega}_{21} (L_3^T r_3) + \dot{\omega}_1 \dot{\omega}_1 (r_2 + \\ &L_3^T r_3) + \dot{\omega}_1 (r_2 + L_3^T r_3) \} \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)的第 3 行推得卡瓣随体系 $O_2 x_{1i} y_{1i} z_{1i}$ 绕弹芯的纵轴旋转的角度 γ_{2i} 的方程

$$\begin{aligned} \ddot{\gamma}_{2i} &= \{ {}_1 F_{C_i}(3) / m_i - W_{2c}(3) - (-\dot{\omega}_1(2) + \\ &\omega_1(1)\omega_1(3)) r_{AO}(1)\omega_1(2)\omega_1(3) r_{AO}(2) - \\ &r_{AO}(3) (-\omega_1(1)^2 - \omega_1(2)^2) - \\ &2\omega_1(1) r_{BO}(2) + 2\omega_1(2) r_{BO}(1) \} / r_{AO}(2) - \\ &\dot{\phi}_1 \sin(\phi_2) - \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \cos(\phi_2) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 ϕ_1, ϕ_2 是弹芯绕地面系摆动的角度.

$$r_{AO} = (L_3^T r_3) + r_2 \quad (15)$$

$$r_{BO} = (\dot{\omega}_{21}(L_{3i}^T r_3) + r_2 \quad (16)$$

$$W_{2c} = (L_2 \ddot{r}_1 + (\dot{\omega}_{21} + \dot{\omega}_{21} \dot{\omega}_{21})(L_{3i}^T r_3) \quad (17)$$

$\dot{\omega}_{21}$ 为 $A_i x_3 y_3 z_3$ 在 $O_2 x_1 y_1 z_1$ 内的投影矩阵. 由式(4)和式(5)得在卡瓣体系内卡瓣绕 A_i 转动的方程

$$\begin{aligned} {}_2 J_{A_i} \dot{\omega}_2 = & {}_2 (M_{A_i}) - \bar{r}_3 m (\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2) - \\ & \{ {}_2 J_{A_i} (L_{3i} \dot{\omega}_1 + (L_{3i} \dot{\omega}_1 L_{3i}^T) \omega_2) + \\ & (L_{3i} \dot{\omega}_1 L_{3i}^T + \dot{\omega}_2) \times \\ & [{}_2 J_{A_i} (L_{3i} \omega_1 + \omega_2)] \} \quad (18) \end{aligned}$$

整理得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_{3i} \\ \ddot{\psi}_{3i} \\ \ddot{\theta}_{3i} \end{bmatrix} = & ({}_2 J_{A_i} \cdot \mathbf{X} \mathbf{S})^{-1} \{ {}_2 (M_{A_i}) - \\ & r_3 m_2 (\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2) - [{}_2 J_{A_i} (L_{3i} \dot{\omega}_1 + \\ & (L_{3i} \dot{\omega}_1 L_{3i}^T) \omega_2) + (L_{3i} \dot{\omega}_1 L_{3i}^T + \\ & \dot{\omega}_2) [{}_2 J_{A_i} (L_{3i} \omega_1 + \omega_2)]] - \\ & {}_2 J_{A_i} \cdot \mathbf{X} \mathbf{b} \} \quad (19) \end{aligned}$$

其中 $\phi_{3i}, \psi_{3i}, \theta_{3i}$ 是卡瓣体系随卡瓣随体系 $O_2 x_1 y_1 z_1$ 转过的 3 个角度

$$\mathbf{X} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin \phi_{3i} \\ 0 & -\cos \phi_{3i} & \sin \phi_{3i} \cos \psi_{3i} \\ 0 & \sin \phi_{3i} & \cos \phi_{3i} \cos \psi_{3i} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{X} \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{3i} \cos \phi_{3i} \dot{\psi}_{3i} \\ \dot{\theta}_{3i} \dot{\phi}_{3i} \cos \phi_{3i} \cos \psi_{3i} - \dot{\theta}_{3i} \dot{\psi}_{3i} \sin \phi_{3i} \sin \psi_{3i} + \\ \dot{\psi}_{3i} \dot{\phi}_{3i} \sin \phi_{3i} \\ -\dot{\theta}_{3i} \dot{\phi}_{3i} \sin \phi_{3i} \cos \psi_{3i} - \dot{\theta}_{3i} \dot{\psi}_{3i} \cos \phi_{3i} \sin \psi_{3i} + \\ \dot{\psi}_{3i} \dot{\phi}_{3i} \cos \phi_{3i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

也可得卡瓣质心在地面坐标系内的运动

$$r_{C_i} = r_1 + L_{2i}^T (r_2 + L_{3i}^T r_3) \quad (22)$$

$$\dot{r}_{C_i} = \dot{r}_1 + L_{2i}^T (\dot{r}_2 + \dot{\omega}_{21} (L_{3i}^T r_3)) \quad (23)$$

$$\ddot{r}_{C_i} = \ddot{r}_1 + L_{2i}^T (\ddot{r}_2 + (L_{3i}^T \dot{\omega}_2 L_{3i} + L_{3i}^T \dot{\omega}_2 \dot{\omega}_2 L_{3i})(L_{3i}^T r_3)) \quad (24)$$

3 判断分离的条件

卡瓣尾部 B_i 和 D_i 点在卡瓣体系内(图 3)的坐标为 $[0, -d/4, -\sqrt{3}d/4]$ 和 $[0, -d/4, -\sqrt{3}d/4]$

则卡瓣尾部 B_i 和 D_i 点在卡瓣随体系 $O_2 x_1 y_1 z_1$ 内的矢量为

$${}^1 r_{O_2 B_i} = r_2 + L_{3i}^T r_{A_i B_i} \quad (25)$$

$${}^1 r_{O_2 D_i} = r_2 + L_{3i}^T r_{A_i D_i} \quad (26)$$

判断卡瓣与弹芯分离的条件

$$\begin{aligned} \sqrt{{}^1 r_{O_2 B_i} (2)^2 + {}^1 r_{O_2 B_i} (3)^2} & > d/2 \\ \sqrt{{}^1 r_{O_2 D_i} (2)^2 + {}^1 r_{O_2 D_i} (3)^2} & > d/2 \quad (27) \end{aligned}$$

判断与尾翼碰撞的条件

$$\begin{cases} l_{w2} > |x| > l_{w1}, y > d_w - d/2, \text{不碰撞} \\ l_{w2} > |x| > l_{w1}, y < d_w - d/2, \text{碰撞} \end{cases} \quad (28)$$

式中 l_{w1} 是尾翼前缘距卡瓣未分离前末端距离, l_{w2} 是尾翼后缘距卡瓣未分离前末端距离, d_w 为尾翼侧缘距弹芯轴线距离, d 为弹芯直径.

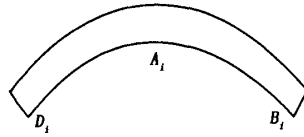


图 3 卡瓣末端面

Fig. 3 The end terminal surface of sabot

4 碰撞识别分析

描述碰撞识别需要物体的几何信息, 确定一些重要的几何变量和物体的边界^[5]. 针对在脱壳过程中, 卡瓣之间和卡瓣与弹芯之间可能发生碰撞, 下面分别对卡瓣之间和卡瓣与弹芯之间的碰撞进行识别.

在卡瓣体系 $C_i x_3 y_3 z_3$ 内, 在每个卡瓣上取 8 个特征点, $s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, s_{i4}$, 分布如图 4, $s_{i5}, s_{i6}, s_{i7}, s_{i8}$, 在卡瓣右侧. 3 个卡瓣顺时针标号为 1, 2, 3.

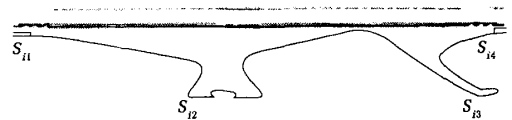


图 4 卡瓣左侧的特征点

Fig. 4 Characteristic dots in left side of sabot

确定了碰撞点后, 采用两体碰撞动力学方法对碰撞点进行分析^[6], 假设碰撞过程中没有摩擦发生, 碰撞前后质量和转动惯量不发生变化, 采用文^[6]中的碰撞分析方法, 可得到碰撞后的速度和角速度.

5 数值仿真

实例仿真得到了某脱壳穿甲弹卡瓣末端 A_i 点在卡瓣随体系中的运动轨迹(图 5), 可以判断出卡

瓣末端与尾翼未发生接触(卡瓣末端距弹底 147 mm, 单片尾翼宽 35 mm), 即卡瓣正常脱壳。

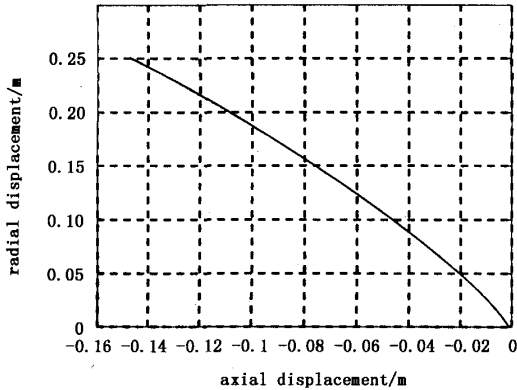


图5 卡瓣末端 A_i 点在卡瓣随体系内轨迹

Fig.5 The movement orbit of sabot end A_i in the system of sabot follow

6 结论

卡瓣对弹芯干扰大大降低了脱壳弹的射击精度, 提高脱壳穿甲弹的射击密集度关键在于研究卡瓣脱落过程对弹芯的影响。本文建立的非对称性脱壳过程卡瓣的运动方程能更好的描述卡瓣的运动规律, 对分析脱壳过程中卡瓣对弹芯的干扰提供了更准确的模型, 是提高射击密集度的理论基础。

参 考 文 献

- 1 惠东. 长杆式尾翼稳定脱壳穿甲弹脱壳分析与计算. 兵工学报(弹箭分册), 1984(3):81~90(Hui Dong. Discarding sabot analysis and calculation of APFSDS of long rod. *Projectile Fascicule of Acta Armamentarii*, 1984(3): 81~90(in Chinese))
- 2 徐明友, 丁松滨. 飞行动力学. 北京: 科学出版社, 2003. 7~10(Xu Mingyou, Ding Songbing. *Flight Dynamic*. Beijing: Science Press, 2003. 7~10(in Chinese))
- 3 Cayzac1 Dr R, Carettel Mr E, Alziary Pr T. Intermediate ballistics unsteady sabot separation: first computations and validations. 19th International Symposium on Ballistics. Switzerland; Printed by Vetter Druck AG, 2001
- 4 杨启仁, 徐直军. 脱壳动力学. 北京: 国防工业出版社, 1996. 34~35(Yang Qiren, Xu Zhijun. *Dynamic of Sabot Discard*. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 1996. 34~35(in Chinese))
- 5 彼得·艾伯哈特, 胡斌. 现代接触动力学. 南京: 东南大学出版社, 2003. 178~199(Eberhard Peter, Hu Bing. *Advanced Contact Dynamics*. Nanjing: Southeast University Press, 2003. 178~199(in Chinese))
- 6 李东旭. 逃逸飞行器分离动力学与仿真. 北京: 科学出版社, 2003. 305~313(Li Dongxu. *Escape Aircraft Separation Dynamics and Simulation*. Beijing: Science Press, 2003. 305~313(in Chinese))

THE ASYMMETRIC DISCARDING SABOT MODULE OF APFSDS

Yang Fufeng Rui Xiaoting Zhou Xiaoli

(Power Engineering College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract APFSDS is the main weapon that can kill the armor target on the ground. During the discarding sabot, the interference between the sabot and the long rod is complicated and affects the dispersion of APFSDS. Based on the expression form of particle movement, the theorem of momentum moment in systems of coordinates, and the law of APFSDS movement and separation process out of bore, this paper proposed an asymmetric dynamical model of separation to describe the sabot motion out of bore, and the process of discarding sabot was calculated. This module of movement and separation of APFSDS is useful for analyzing the discarding process and the movement out of bore.

Key words Armor Piercing Fin-stabilized Discarding Sabot(APFSDS), asymmetric discarding, coordinate systems