

doi: 10.7690/bgzdh.2013.03.010

弹丸结构参数对膛内运动的影响分析

岳永丰, 吴群彪, 沈培辉

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 基于弹性碰撞的恢复系数, 提出一种重点考虑弹丸设计参数的弹丸膛内运动模型, 分析了弹丸的主要结构参数对膛内运动的影响。模型中没有采用把恢复系数看作常数的近似方法, 而是对弹炮系统的简化模型进行有限元仿真, 得到恢复系数随前定心部径向速度变化的函数关系。以 155 mm 榴弹的特征参数为计算量, 对影响弹丸膛内运动的各因素进行了实例计算和分析。结果表明: 弹丸结构参数的变化与膛内运动特性之间存在一般规律性, 对选用合理的弹丸结构来保证膛内运动的正确性有一定的应用价值。

关键词: 弹丸; 结构参数; 膛内运动; 恢复系数

中图分类号: TJ012.1 **文献标志码:** A

Influence Analysis of Projectile Structural Parameters on Motion in Bore

Yue Yongfeng, Wu Qunbiao, Shen Peihui

(Ministerial Key Laboratory of Intelligence Ammunition Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the restitution coefficient of elastic collision, the projectile in-bore motion model was proposed with design parameters mainly considered. Analyze the influence of projectile's main structural parameters on the motion. The approximate method that the restitution coefficient was seen as constant wasn't used. Through the finite element simulation on the simplified model of gun-projectile system, the functional relation between the restitution coefficient and the radial velocity of the front bourrelet was acquired. The characteristic parameters of the 155mm shrapnel were used as the calculation parameters. Calculation and analysis about the various factors influence on the motion. The results show that there is general regularity between the projectile's structural parameters and its in-bore motion characteristics. It is useful for selecting a reasonable structure for the projectile to ensuring the regular in-bore motion.

Key words: projectile; structural parameter; in-bore motion; restitution coefficient

0 引言

弹丸在膛内的运动情况很复杂, 其运动规律取决于弹丸的外形和结构特性、火药特性、火炮的结构和运动、弹丸和火炮的相互作用以及发射环境等^[1]。保证弹丸膛内运动的良好姿态对弹丸的受力状态及出膛后的起始条件有重要意义; 因此, 笔者基于弹性碰撞的恢复系数, 提出一个主要考虑弹丸设计参数的膛内运动计算模型, 并通过一系列实例计算, 分析和总结了弹丸结构参数的变化对膛内运动规律的影响。

1 计算模型

1.1 基本坐标系

为了便于表示弹丸在膛内运动过程中所受到的力系和力矩系, 建立描述弹丸运动规律的数学模型, 结合文献[1-3]建立如下坐标系:

1) 惯性坐标系($OXYZ$ 坐标系): 弹丸装入炮膛时, 原点 O 为过弹带中心作炮膛轴线的垂面与炮膛

轴线的交点。 X 轴沿炮膛轴线, 指向炮口方向为正, 与水平方向的夹角为 α_1 。 Y 轴在铅垂面内垂直于 X 轴, 向上为正。 Z 轴由右手法则确定。该系用于确定弹丸的方位和速度。

2) 弹轴坐标系($O_1\xi\eta\zeta$ 坐标系): 原点 O_1 是弹带中心。 ξ 轴沿弹丸的几何纵轴, 指向弹头方向为正。 η 轴在铅垂面内垂直于 ξ 轴, 向上为正。 ζ 轴由右手法则确定。该系用于确定弹丸的摆动和转动。

3) 弹体坐标系($O_1x_1y_1z_1$ 坐标系): O_1 为坐标原点。 x_1 轴与 ξ 轴重合, 指向弹头方向为正。 y_1 和 z_1 轴与弹体固结, 且相对 η 轴和 ζ 轴分别转过一个自转角 γ 。该系用于表示弹丸在空间的姿态。

4) 平动坐标系(O_2xyz 坐标系): 原点 O_2 为过弹带中心作炮膛轴线的垂面与炮膛轴线的交点。 x 、 y 、 z 轴分别与 X 、 Y 、 Z 轴平行。为了简化模型, 忽略炮身的运动并将其视为刚性。在此特例下, x 轴与 X 轴重合, O_2 点在 $OXYZ$ 系中的坐标为 $(s, 0, 0)$ 。

各坐标系的关系如图 1 所示。

收稿日期: 2012-09-18; 修回日期: 2012-10-28

作者简介: 岳永丰(1987—), 男, 内蒙古人, 硕士, 从事弹丸膛内运动分析研究。

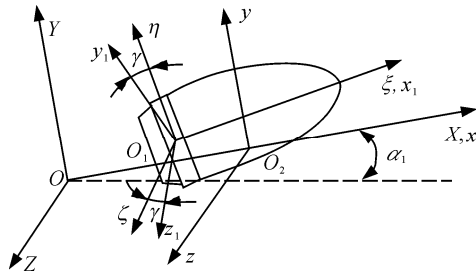


图 1 坐标系示意图

1.2 恢复系数

考虑弹丸前定心部直径小于炮膛直径的情况，假设定心部为弹性体，允许与炮膛有撞击与弹回。笔者摒弃了弹丸发射动力学中刚体碰撞模型常用的恢复系数为定值的假定，认为它是随碰撞前瞬时弹丸前定心部中心的径向速度而变化^[4]。

由于火炮的重量远大于弹重，所以可认为碰撞前后炮身的运动不变。另外，弹炮间隙实际上很小，膛壁和弹体的曲率相近，因此炮膛可用具有一定曲率的钢板近似代替，弹丸前定心部可用具有一定厚度的球壳近似代替，这是一个特殊的单球碰撞系统。

不同型号的弹丸具有不同壁厚的前定心部，其对应的恢复系数值也不同，现选取某 155 榴弹的定心部厚度为计算量。将弹丸前定心部中心的径向速度范围均匀分段，使球壳以不同的对应速度撞击钢

板^[4]。通过动力学仿真得到小球碰撞前后的速度变化，就可利用式 (1) 求出对应速度下的恢复系数值，其数据如表 1 所示。

$$E = -\frac{v_{r2}}{v_{r1}} \quad (1)$$

式中： E 为碰撞的恢复系数； v_{r1} 、 v_{r2} 分别为碰撞前和碰撞后瞬时弹丸前定心部中心的径向速度。

表 1 各速度段对应的恢复系数值

速度 $v/(m/s)$	恢复系数 E	速度 $v/(m/s)$	恢复系数 E
0.1	0.871	12.5	0.821
0.5	0.873	15.0	0.709
2.5	0.873	17.5	0.627
5.0	0.872	20.0	0.556
7.5	0.879	22.5	0.503
10.0	0.872	25.0	0.463

对数据进行拟合，得到式 (2)

$$E = 5.9e - 5v_{r1}^3 - 3e - 3v_{r1}^2 + 0.023v_{r1} + 0.85 \quad (2)$$

1.3 运动方程组

考虑弹丸的旋转、动静不平衡、弹炮间隙、弹带的弹塑性变形和前定心部与膛壁的撞击与弹回等因素，通过弹炮相互作用、内弹道学过程确定作用在弹丸上的力和力矩。利用线动量和角动量定理，建立弹丸膛内运动方程如式 (3)：

$$\begin{cases} m a_p = -m g \sin \alpha_1 - 2\pi r_b h_b \mu K r_d \cos \alpha + S(P_b - P_a) \\ m \ddot{y} = -m g \cos \alpha_1 + \pi r_b h_b K (-y + z \mu \sin \alpha) + S(P_b - P_a) \psi - m (l_b \ddot{\psi} - \dot{\gamma} L_2 - \dot{\gamma}^2 L_1) \\ m \ddot{z} = -\pi r_b h_b K (z + y \mu \sin \alpha) - S(P_b - P_a) \theta + m (l_b \ddot{\theta} - \dot{\gamma} L_1 + \dot{\gamma}^2 L_2) \\ C \dot{\gamma} = m g \cos \alpha_1 L_2 + M_x^c + M_y^c \psi - M_z^c \theta - \dot{\psi} [(C-A) \beta_1 - m l_b L_2] - \dot{\theta} [(C-A) \beta_2 - m l_b L_1] \\ (A + m l_b^2) \ddot{\psi} = C \dot{\gamma} \dot{\theta} - (C-A) (\ddot{\gamma} \beta_1 + \dot{\gamma}^2 \beta_2) + m l_b (\dot{\gamma} L_2 + \dot{\gamma}^2 L_1) + m g \sin \alpha_1 \cdot L_1 + \\ m g l_b (\psi \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1) + M_x^c \theta + M_z^c - P_a S (y + l_a \psi) + P_b S (y - l_c \psi) \\ (A + m l_b^2) \ddot{\theta} = -C \dot{\gamma} \dot{\psi} - (C-A) (\dot{\gamma} \beta_2 - \dot{\gamma}^2 \beta_1) - m l_b (-\dot{\gamma} L_1 + \dot{\gamma}^2 L_2) - m g \sin \alpha_1 \cdot L_2 + \\ m g l_b \theta \sin \alpha_1 - M_x^c \psi + M_y^c + P_a S (z - l_a \theta) - P_b S (z + l_c \theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中， $L_1 = L_{m1} \cos \gamma - L_{m2} \sin \gamma$ ， $L_2 = L_{m1} \sin \gamma + L_{m2} \cos \gamma$ ， $\beta_1 = \beta_{D1} \sin \gamma - \beta_{D2} \cos \gamma$ ， $\beta_2 = \beta_{D1} \cos \gamma + \beta_{D2} \sin \gamma$ ， $S = \pi r_b^2$ ， $M_x^c = \pi r_b h_b [2r_b T - \mu K \sin \alpha (2r_b r_d - y^2 - z^2)]$ ， $M_y^c = \pi r_b h_b \mu K \cos \alpha \cdot z (2r_d - r_b) + 1/12 \pi r_b h_b^3 K (\mu \psi \sin \alpha - \theta)$ ， $M_z^c = \pi r_b h_b \mu K \cos \alpha \cdot y (r_b - 2r_d) - 1/12 \pi r_b h_b^3 K (\psi + \mu \theta \sin \alpha)$ 。其中： m 为弹丸质量； a_p 为 O_2 点相对于惯性系的纵向加速度； y 、 z 为弹带中心在平动系的 y 轴和 z 轴上的投影； P_a 为弹前空气压力； P_b 为计算膛压； r_b 为炮膛半径； h_b 、 r_d 和 K 为弹带的宽度、初始变形量和弹性刚度； α 、 α_1 、 μ 分别为膛线缠角、火炮射角、弹带与膛壁的摩擦系数； T 为弹带单位面积上

的膛线扭力； A 和 C 为弹丸的赤道转动惯量和极转动惯量； L_{m1} 、 L_{m2} 和 β_{D1} 、 β_{D2} 为弹丸的质量偏心和动不平衡角在弹体系的 y_1 轴和 z_1 轴上的投影； ψ 和 θ 为弹丸的几何纵轴相对于炮膛轴线的俯仰角和偏航角； l_a 为弹带中心到前定心部前端面的距离； l_b 为弹丸几何中心到弹带中心的距离， l_c 为弹带中心到弹带后端面的距离； M_x^c 、 M_y^c 、 M_z^c 为弹带和炮膛相互接触产生的力矩对平动系的分量。

采用 1.2 中所述弹性碰撞模型处理弹丸前定心部与膛壁的接触问题，恢复系数的值可由式 (2) 计算得到。由线动量和角动量定理的积分形式，并借助膛线约束和恢复系数关系，得到如下标量方程组

$$\begin{cases}
 m \Delta v_p = -\mu_1 \cos \alpha \cdot \hat{R} \\
 m (\Delta \dot{y} + l_b \Delta \dot{\psi} - \Delta \dot{\gamma} L_2) = (-\cos \varphi + \mu_1 \sin \alpha \sin \varphi) \hat{R} \\
 m (\Delta \dot{z} - l_b \Delta \dot{\theta} + \Delta \dot{\gamma} L_1) = -(\sin \varphi + \mu_1 \sin \alpha \cos \varphi) \hat{R} \\
 C \Delta \dot{\gamma} + (A + m l_b^2) (-\psi \Delta \dot{\theta} + \theta \Delta \dot{\psi}) + (C - A) (\beta_2 \Delta \dot{\theta} + \beta_1 \Delta \dot{\psi}) - m l_b (L_1 \Delta \dot{\theta} + L_2 \Delta \dot{\psi}) = \\
 \hat{R} [y (\sin \varphi + \mu_1 \sin \alpha \cos \varphi) - z (\cos \varphi - \mu_1 \sin \alpha \sin \varphi) - r_b \mu_1 \sin \alpha] - \hat{T} \\
 C \psi \Delta \dot{\gamma} + (A + m l_b^2) \Delta \dot{\theta} + \Delta \dot{\gamma} [(C - A) \beta_2 - m l_b L_1] = \hat{R} [-(r_b \sin \varphi - z) \mu_1 \cos \alpha + l_a (\sin \varphi + \mu_1 \sin \alpha \cos \varphi)] - \\
 C \theta \Delta \dot{\gamma} + (A + m l_b^2) \Delta \dot{\psi} + \Delta \dot{\gamma} [(C - A) \beta_1 - m l_b L_2] = \hat{R} [(r_b \cos \varphi - y) \mu_1 \cos \alpha - l_a (\cos \varphi - \mu_1 \sin \alpha \sin \varphi)] \\
 \Delta \dot{\gamma} = (\tan \alpha / r_b) \Delta v_p \\
 [\Delta \dot{y} + l_a (-\dot{\theta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma)] \cos \varphi + [\Delta \dot{z} - l_a (\dot{\theta} \cos \gamma + \dot{\psi} \sin \gamma)] \sin \varphi = \\
 -(1 + E) \{ [\dot{y} + l_a (-\dot{\theta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma)] \cos \varphi + [\dot{z} - l_a (\dot{\theta} \cos \gamma + \dot{\psi} \sin \gamma)] \sin \varphi \}
 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta \times \times \times$ 为碰撞引起的参数跳动; v_p 为 O_2 点相对于惯性系的纵向速度; μ_1 为前定心部与膛壁的摩擦系数; \hat{R} 为作用在前定心部与炮膛接触面上的径向碰撞冲量; \hat{T} 为作用在弹带与炮膛接触面上的周向碰撞冲量矩; φ 为碰撞点在平动系中的方位角。

通过解上述 8 个方程可得碰撞前后弹丸运动参数的变化量 Δv_p 、 $\Delta \dot{y}$ 、 $\Delta \dot{z}$ 、 $\Delta \dot{\gamma}$ 、 $\Delta \dot{\psi}$ 、 $\Delta \dot{\theta}$ 以及 \hat{R} 和 \hat{T} , 从而由弹膛碰撞前的运动参量, 求得同一瞬时碰撞后的运动参量。然后对方程组 (3) 继续进行求解, 直到发生下一次弹膛碰撞为止。如此反复, 直到弹带离开炮膛。

2 实例分析

2.1 计算方法

笔者通过 Matlab 软件编程对模型进行求解。显然, 方程组 (3) 是二阶非线性常微分方程组。由于 Runge-Kutta 法模拟常微分方程解的高精度及相对计算量小等特点, 因此采用指令 ode 45 对式 (3) 进行求解, 它使用的是 4/5 阶 Runge-Kutta 公式。对于代数方程组 (4), 可先将其看成符号形式, 采用针对符号表达式的工具指令 solve 解得 8 个未知数的解析解。然后把各已知参数的值代入, 就可得到未知数的数值解。

2.2 计算模型

现以 155 mm 全膛榴弹为例, 利用上述模型和求解方法, 计算其在刚性不动炮膛内约束期和半约束期的弹轴围绕炮膛轴线的俯仰角及其角速度和偏航角及其角速度随时间的变化规律, 以其大小和变化趋势来判断弹丸膛内运动的性能, 并分析弹丸各结构参数对膛内运动的影响^[5]。

图 2 和图 3 分别描绘了弹轴的俯仰角、偏航角和俯仰角速度、偏航角速度随时间的变化曲线, 显示了弹丸运动参数的基本变化规律。

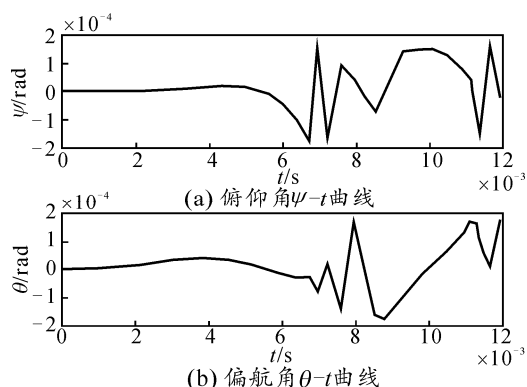


图 2 弹丸摆动角两分量的变化

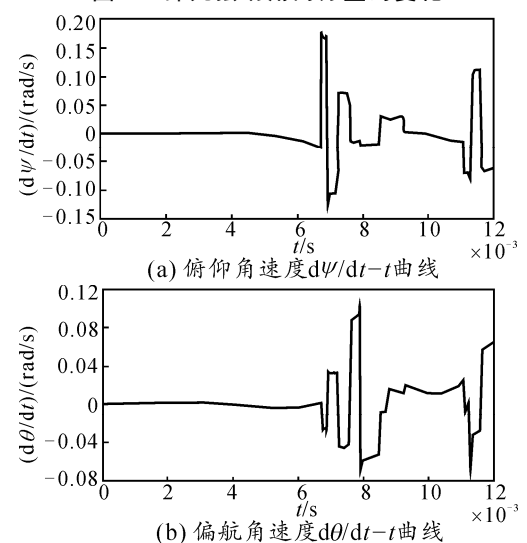


图 3 弹丸摆动角速度两分量的变化

由图 2、3 可知, 半约束期结束时, 弹轴相对于炮膛轴线的俯仰角及其角速度和偏航角及其角速度会产生突变, 而其值越大弹道散布就越大。

2.3 结构参数

将弹轴相对于炮膛轴线的俯仰角和偏航角经矢量合成得到弹轴相对于炮膛轴线的夹角, 即摆动角。同理, 将相应的角速度合成得到摆动角速度。并以最大摆动角和最大摆动角速度来衡量弹丸膛内运动状态的优劣。

按照文献[6]给出的弹丸各结构参数的范围, 通

过只改变其中一个参量而其他参量不变的方式来考虑单一参数的变化对弹丸膛内运动的影响, 结果见图 4~图 8。

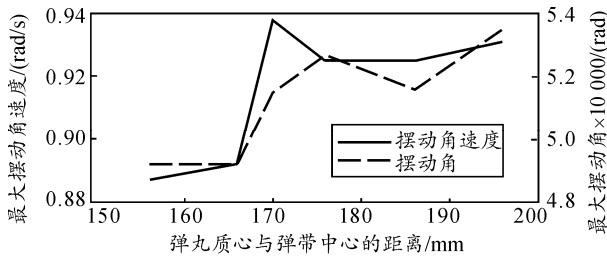


图 4 质心与弹带的距离对运动参数的影响

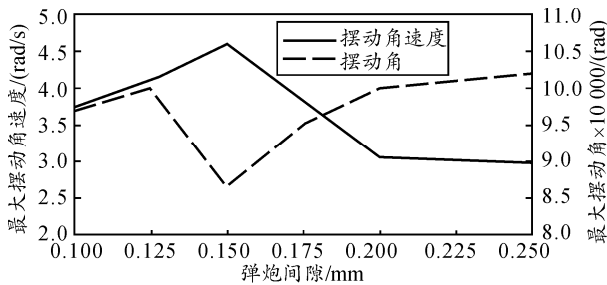


图 5 弹炮间隙对运动参数的影响

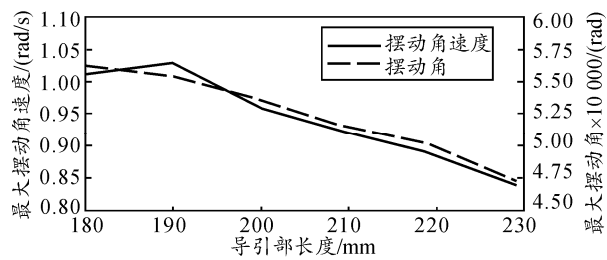


图 6 导引部长度对运动参数的影响

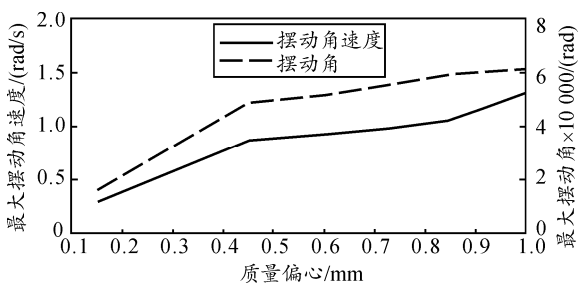


图 7 质量偏心对弹丸运动参数的影响

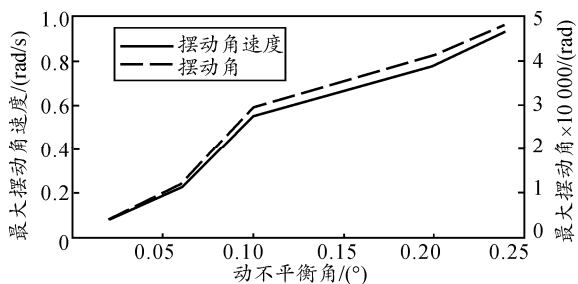


图 8 动不平衡角对弹丸运动参数的影响

由图 4 可知, 除了 175 mm 附近的小部分区域外, 随着弹丸质心与弹带距离的增大, 弹丸的摆动角和角速度均呈上升趋势。说明弹丸的质心越靠近

弹带, 其气动偏心力臂越小, 弹丸的膛内运动性能越好。此外, 部分区域出现同整体变化趋势不一致的现象, 可能是由于相应的距离会造成弹丸前定心部与火炮膛壁的碰撞频率接近弹体或身管材料的固有频率, 引起共振。

由图 5 可知, 弹炮间隙 b 的取值为 0.10~0.125 mm 时, 弹轴的最大摆动角和最大摆动角速度都逐渐增大。 b 取较小值时, 不仅增加制造工艺的难度, 而且在 $b=0.125$ mm 左右造成较大的弹轴摆动角和摆动角速度。之后, 摆动角速度出现极大值后随之下降, 所以在设计弹炮间隙时, 应避免摆动角速度的极大值所对应的弹炮间隙。

由图 6 可知, 弹丸的导引部越长, 弹轴的最大摆动角和最大摆动角速度越小。而导引部过长会使相应的弹头部过短, 弹丸飞行中阻力增大, 造成弹丸空气动力性能不佳。所以在弹丸设计时, 需按实际情况折中选取导引部的长度。

由图 7 和图 8 可知, 弹丸的动静不平衡性也是影响弹丸膛内运动状态的 2 个主要因素。由于动静不平衡量的增大, 使弹轴的摆动角和摆动角速度都有所提高, 所以减小弹丸的动静不平衡也是弹丸设计的一个主要任务。

3 结论

根据理论分析与计算比较结果, 得出如下结论:

1) 弹丸质心与弹带的距离、导引部长度和弹丸的动静不平衡性等结构参数对弹丸的膛内运动影响很大, 这些干扰量越大, 弹丸在膛内的横向运动就越剧烈。

2) 弹丸在膛内运动时, 弹轴的摆动角和摆动角速度随时间变化的曲线呈波状。这表明: 如果能够合理调整弹丸的结构及其膛内运动时间等参量, 就可以得到尽可能小的弹丸炮口摆动角速度。

参考文献:

- [1] 芮筱亭, 杨启仁. 弹丸发射过程理论[M]. 南京: 东南大学出版社, 1992: 1-63.
- [2] 郭锡福, 中国太. 弹丸发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 135-217.
- [3] Martin. T. Soifer, Robert. S. Becker. Equations of projectile motion in a flexible gun tube[R]. AD-A127064, 1983: 2-32.
- [4] 岳永丰, 沈培辉. 恢复系数对弹丸膛内运动参数的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 60-64.
- [5] 黎春林, 翁佩英. 弹丸膛内运动分析[J]. 弹道学报, 1994, 6(1): 45-52.
- [6] 魏惠之, 朱鹤松, 汪东晖. 弹丸设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 20-46.