

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.016

某弹丸发射安全性仿真分析研究

李庚, 白风科, 林立广, 史耀祖

(西安现代控制技术研究所第二总体部, 西安 710065)

摘要: 为评估某弹丸的发射安全性, 基于非线性有限元方法建立精确的弹丸发射系统动力学分析模型。对比分析仿真结果和试验数据, 基于上述动力学分析模型, 研究发射过程中弹丸质量偏心、推力偏心以及滑块与导轨之间间隙对弹丸横向过载的影响。仿真结果表明: 在发射过程中, 弹丸质量偏心、推力偏心越大, 弹丸横向过载越大, 发射系统安全性越差; 滑块与导轨之间的间隙越小, 弹丸在导轨内的碰撞越剧烈, 发射安全性越差。

关键词: 发射安全性; 弹丸; 发射动力学分析; 横向过载

中图分类号: TJ768.2 **文献标志码:** A

Analysis and Research on Simulation of Certain Type Projectiles Launching Safety

Li Geng, Bai Fengke, Lin Liguang, Shi Yaozu

(No. 2 General Department, Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: For evaluating the certain type projectiles launching safety, dynamic analysis model of the kinetic energy projectile was established based on the nonlinear finite element method. The simulation results were validated by comparing and analyzing with the experimental data. Then, based on the above analysis model, the influences of projectile mass eccentricity, the gap during sliding-block and rails, thrust eccentricity on the transverse acceleration were studied. The simulation results indicates that the launching safety decreasing when transverse acceleration of the projectiles increasing with the mass eccentricity and thrust eccentricity, and the launching safety decreasing when projectiles collision increasing with decreasing the gap during sliding-block and rails.

Keywords: launching safety; projectile; launch dynamic analysis; transverse acceleration

0 引言

弹药发射安全性是武器系统最基本的要求, 具体表现为弹药在发射过程中不炸膛、不解体、不早炸。弹药发射过程通常伴随着能量瞬间释放带来的超高压、超高温以及超高过载, 使得发射系统的工作环境非常恶劣, 进而产生发射安全性问题^[1-3]。

武器系统发射动力学仿真分析对于分析系统动态响应, 提高武器系统发射过程工作可靠性和安全性具有重要作用, 仿真分析结果可用于指导武器系统总体优化设计, 为提高武器系统发射安全性提供理论依据和数据支撑。常用的发射动力学分析方法主要有多体动力学方法和非线性有限元分析等^[4-6]。

针对某发射系统, 弹丸在重力的作用下与导轨之间存在一定间隙, 推进器也存在一定的推力偏心/偏移、弹丸自身也存在质量偏心^[7-8]等, 导致发射过程中弹丸与导轨发生反复碰撞, 产生较大的横向超载, 影响弹丸在导轨内的运动姿态^[9-11], 并严重威胁弹丸和整个发射系统的安全性^[12]。

笔者建立发射系统有限元模型, 基于非线性有

限元方法对弹丸发射过程进行仿真计算。通过与试验数据对比, 验证有限元模型和仿真分析计算的正确性。然后, 基于上述有限元模型, 分别研究弹丸质偏、滑块与导轨间隙以及推力偏心对弹丸运动姿态及横向过载的影响规律。

1 发射系统动力学模型

弹丸发射系统如图 1 所示。发射过程中, 推进器在外部能源的作用下, 瞬间产生极大的推力, 推动滑块和弹丸在上下导轨内高速运动, 直到推进器离开导轨。

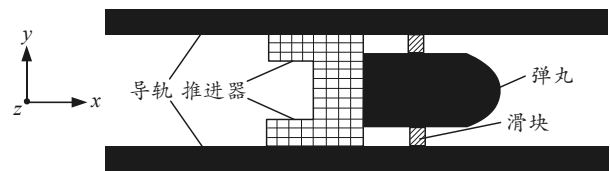


图 1 某弹丸发射系统

1.1 建模

为便于分析弹丸在轨内运动规律, 建立如图 1 所示坐标系, 以弹丸运动方向为 x 轴, 垂直于弹轴

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2020-12-25

作者简介: 李庚(1989—), 男, 河南人, 博士, 高工, 从事武器系统发射动力学仿真分析与测试研究。E-mail: ligengxidian@126.com。

方向分别为 y 轴和 z 轴。

为提高仿真结果的准确性，发射系统建模时考虑导轨加工和装配误差，给定导轨直线度误差 δ ，假设导轨变形形式为正弦曲线，则导轨上任意一点处的误差可表示为：

$$y = \delta \sin(2\pi/Lx) \tag{1}$$

其中 L 为导轨的长度，且 $0 \leq x \leq L$ 。

发射系统中的导轨和滑块以柔性体建模，导轨材料为铜，滑块材料为铝合金，其力学参数如表 1 所示。

表 1 材料力学参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
铜	8 800	116	0.34
铝合金	2 800	71	0.33

1.2 边界条件

导轨与推进器之间紧密接触，可设置为滑动摩擦，给定摩擦系数为 0.1。弹丸与推进器之间通过橡胶垫片连接，使得弹丸可以绕推进器相对运动。建模时用铰链模拟橡胶垫片，通过计算可给出铰链弯曲刚度为 $3.5 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ，扭转刚度为 $1 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。

初始状态下，弹丸居于上下导轨之间中心位置处，滑块与上下导轨之间间隙一致，均为 d 。发射过程中，由于弹丸绕推进器来回摆动，导致滑块与导轨之间存在反复接触碰撞。该碰撞特点为时间短、强度高、频率高，给动力学仿真分析带来了较大难度。建模时，在滑块与导轨可能发生解除的表面之间建立接触对。仿真计算中，若解除对未发生碰撞，对也不会影响仿真分析结果；若发生碰撞，给定摩擦系数为 0.1，接触对采用罚函数接触算法，自动选取罚函数刚度。

2 动力学分析与验证

对于上述动力学仿真分析问题，笔者采用非线性显示动力学方法进行求解^[10-12]。如图 2 所示，上下导轨每隔 200 mm 的间距进行固定支撑，推进器所受到的推力过载可通过实测得到。

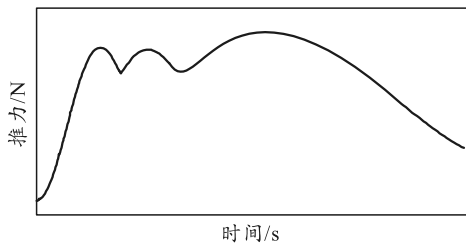


图 2 弹丸推力

某次发射试验条件^[12]：弹丸水平发射，弹丸质偏为正 y 向(标记为 e_{1y})0.566 mm，推进器推力偏心为正 y 向(标记为 e_{2y})0.4 mm，滑块与导轨之间间隙(标记为 d)实测为 0.65 mm，导轨直线度实测 δ 为 0.5 mm，实测弹丸发射过载如图 2 所示。通过仿真分析，即可得到弹丸在导轨内运动的速度、加速度及弹体姿态变化情况如图 3—6 所示。

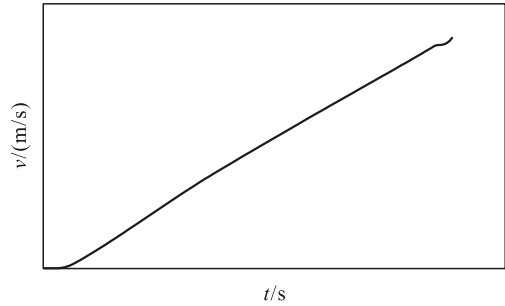


图 3 弹丸速度变化

试验过程中对弹丸发射过载进行了测试，图 4 和图 5 分别对仿真和试验得到的弹丸 y 向过载和 z 向过载进行了对比，两者一致性较好。

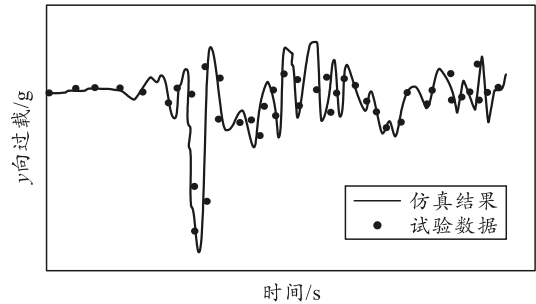


图 4 y 向过载变化

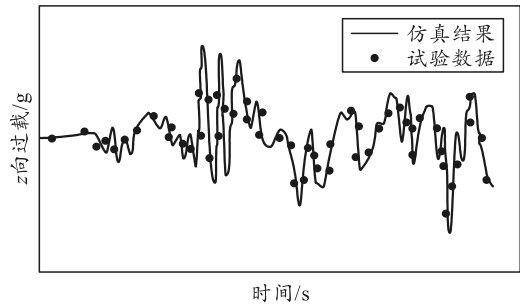


图 5 z 向过载变化

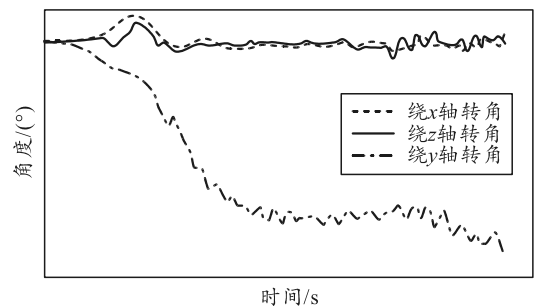


图 6 弹丸姿态角变化

3 发射安全性分析

为了降低弹丸横向过载，提高发射安全性，笔者将分别研究弹丸质量偏心、滑块与导轨之间间隙以及推力偏心对弹丸横向过载的影响规律。

初始状态下发射系统参数：弹丸水平发射，弹丸无质偏，推力无偏心，滑块与导轨之间间隙为 $d=0.65\text{ mm}$ ，导轨直线度为 $\delta=0.5\text{ mm}$ ，推力过载如图 2 所示。

3.1 质偏对横向过载的影响

分别给定弹丸垂向质偏为 $e_{1y}=0\text{ mm}$ 、 $e_{1y}=0.3\text{ mm}$ 和 $e_{1y}=0.8\text{ mm}$ ，对比这 3 种工况下弹丸所受过载情况如图 7 和图 8 所示。

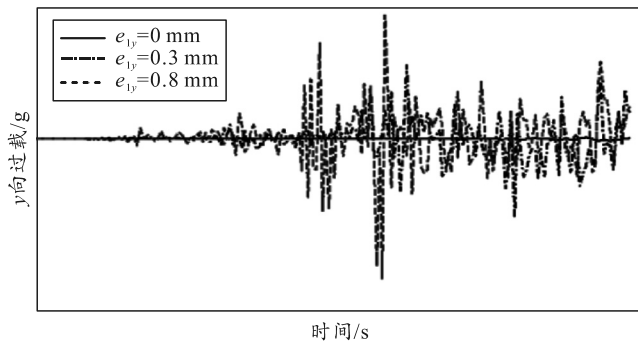


图 7 垂向质偏下弹丸 y 向过载变化

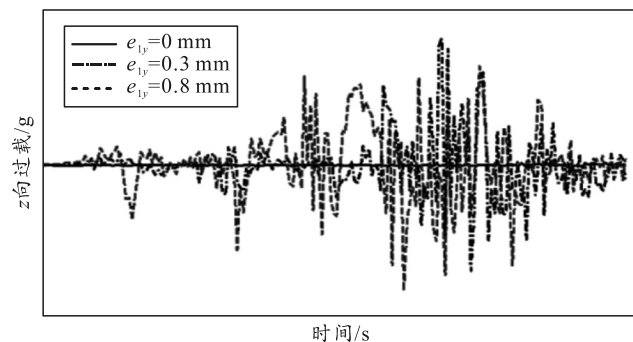


图 8 垂向质偏下弹丸 z 向过载变化

分别给定弹丸横向质偏为 $e_{1z}=0\text{ mm}$ 、 $e_{1z}=0.3\text{ mm}$ 和 $e_{1z}=0.8\text{ mm}$ ，仿真分析结果如图 9 和图 10 所示。

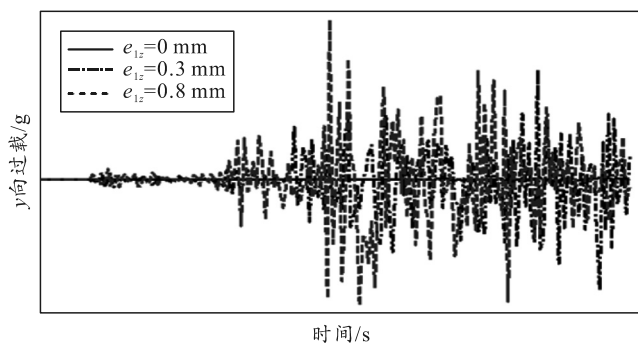


图 9 横向质偏下弹丸 y 向过载变化

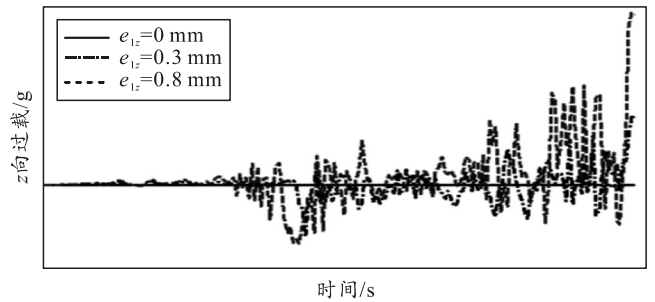


图 10 横向质偏下弹丸 z 向过载变化

根据图 7—10 可以看出：弹丸垂向质偏和横向质偏对横向过载的影响规律一致，即弹丸质偏越大，横向过载也越大。

3.2 推力偏心对横向过载的影响

给定推进器垂向推力偏心为 $e_{2y}=0\text{ mm}$ 、 $e_{2y}=0.3\text{ mm}$ 和 $e_{2y}=0.8\text{ mm}$ ，仿真分析结果如图 11 和图 12 所示。

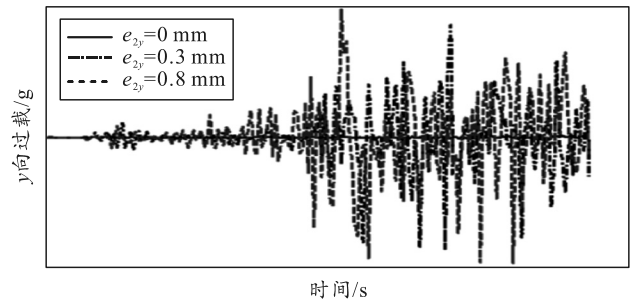


图 11 垂向推力偏心对弹丸 y 向过载的影响

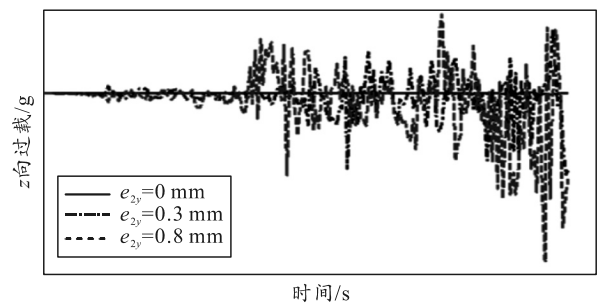


图 12 垂向推力偏心对弹丸 z 向过载的影响

分别给定推进器横向推力偏心为 $e_{2z}=0\text{ mm}$ 、 $e_{2z}=0.3\text{ mm}$ 和 $e_{2z}=0.8\text{ mm}$ ，仿真分析结果如图 13 和图 14 所示。

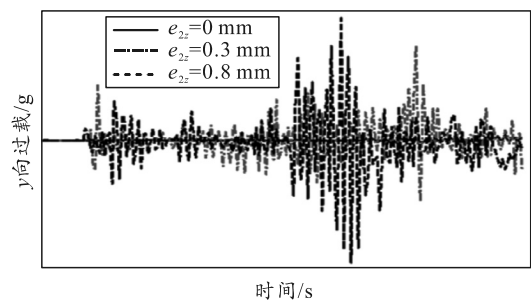


图 13 横向推力偏心对弹丸 y 向过载的影响

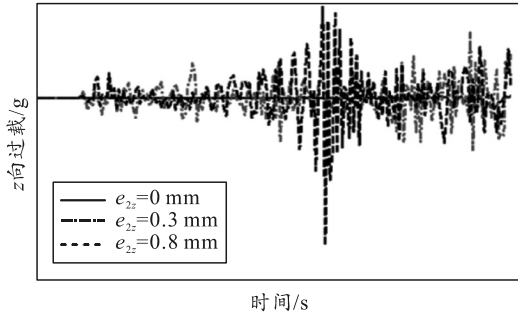


图 14 横向推力偏心对弹丸 z 向过载的影响

根据图 11—14 可以看出,发射过程中弹丸横向过载随推力偏心的增大而增大。

3.3 滑块与导轨间隙对横向过载的影响

给定弹丸质量偏心为 $e_{1y}=0.8$ mm, 推力无偏心, 滑块与导轨的间隙分别给定 $d=0.65$ mm、 $d=0.75$ mm 和 $d=0.9$ mm。这 3 种工况下弹丸所受过载情况如图 15 和图 16 所示。

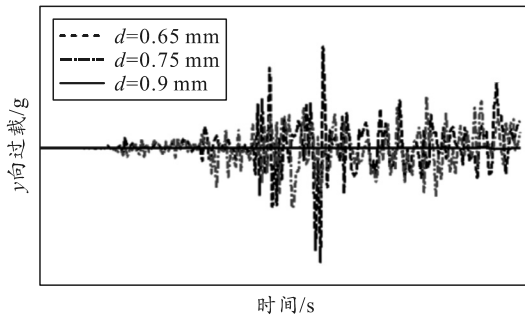


图 15 间隙对弹丸 y 向过载的影响

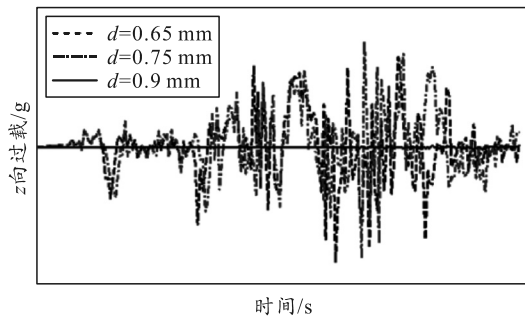


图 16 间隙对弹丸 z 向过载的影响

根据图 15 和图 16 可以看出: 随着滑块与导轨之间间隙的减小, 弹丸在导轨内的碰撞有加剧的趋势, 所受到的横向过载反而增大。

3.4 结果分析

统计各个工况下弹丸横向和垂向的最大过载, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 弹丸最大过载发生在垂向推力偏心为 0.8 mm 处, 为垂向 5 491 g; 综合对比可以发现, 推力偏心对弹丸横向和垂向过载的影响显著大于弹丸质偏的影响。

表 2 各工况下弹丸最大过载

影响因素/mm	y 向/g	z 向/g
$e_{1y}=0$	178	142
$e_{1y}=0.3$	839	2 209
$e_{1y}=0.8$	1 027	4 449
$e_{1z}=0.3$	1 786	623
$e_{1z}=0.8$	3 734	887
$e_{2y}=0.3$	118	3 663
$e_{2y}=0.8$	1 142	5 491
$e_{2z}=0.3$	2 326	1 623
$e_{2z}=0.8$	4 209	2 187
$d=0.65$	2 139	3 644
$d=0.75$	1 173	3 167
$d=0.90$	1 028	2 240

4 结论

笔者建立了某弹丸发射系统有限元模型, 通过仿真分析得到了发射过程中弹丸的运动和姿态情况, 通过仿真分析结果和试验数据的对比, 验证了有限元模型有效性和仿真分析正确性, 表明该有限元模型和仿真分析方法可用于分析该发射系统的发射安全性;

研究了弹丸质偏对横向和垂向过载的影响规律, 结果表明: 弹丸质偏对弹丸的横向和垂向过载有较大影响, 其值越小, 弹丸横向和垂向过载越小, 弹丸与导轨的碰撞越平缓, 发射系统安全性越高;

研究了推力偏心对横向和垂向过载的影响, 结果表明: 推进器推力偏心越大, 弹丸的横向和垂向过载也越大, 发射系统安全性越差, 因此, 推进器推力偏心应越小越好;

研究了滑块与导轨之间间隙对弹丸横向过载的影响, 结果表明: 间隙越小, 弹丸在导轨内的碰撞也越剧烈, 横向过载越大; 因此, 合理选取滑块与导轨的间隙, 可以显著降低弹丸横向过载, 优化弹丸轨内发射环境, 提高发射系统发射安全性。

参考文献:

- [1] 芮筱亭, 贡来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 2-6.
- [2] 芮筱亭, 冯宾宾, 王燕, 等. 发射装药发射安全性评定方法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 1-11.
- [3] 芮筱亭, 王燕, 王国平. 弹药发射安全性试验方法进展 [J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 81-92.
- [4] 王国平, 芮筱亭. 远程多管火箭发射动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1097-1100.
- [5] 刘馨心, 褚福磊, 徐宏斌. 考虑接触的某弹发射动力学建模与分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 55-62.
- [6] 陈世业. 自行火炮弹炮多体发射系统动力学仿真研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 2-5.