

doi: 10.7690/bgzdh.2022.04.001

## 某高射速航炮供弹系统数值仿真分析

马文鑫<sup>1</sup>, 周 栋<sup>2</sup>, 石树平<sup>3</sup>, 戴劲松<sup>1</sup>, 王茂森<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110000; 3. 西安昆仑工业(集团)有限责任公司, 西安 710043)

**摘要:** 针对一种高射速航炮供弹系统工作时因卡弹造成航炮停射的现象, 研究其故障原因。分析工作时局部弹带运动特性, 基于复杂铰链连接的多刚体弹带模型编程建立数值仿真模型, 仿真得到弹带尾部炮弹运动规律, 与真实实验数据基本吻合。仿真分析结果表明: 弹带尾部炮弹运动过程中垂直于运动方向的加速度过大, 尾部炮弹存在摆尾现象导致供弹阻力增大, 从而造成系统卡弹故障。

**关键词:** 供弹系统; 卡弹; 故障分析; 数值模拟; 多刚体动力学

**中图分类号:** TJ392 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation Analysis of Certain Type High Firing Rate Aircraft Gun Shell Feeding System

Ma Wenxin<sup>1</sup>, Zhou Dong<sup>2</sup>, Shi Shuping<sup>3</sup>, Dai Jinsong<sup>1</sup>, Wang Maosen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110000, China;

3. Xi'an Kunlun Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Aiming at the phenomenon that the feeding system of a high firing rate aircraft gun stops firing due to the shell jamming, the causes of the failure are researched. Based on the multi-rigid-body belt model with complex hinge connection, the numerical simulation model was established by programming, and the movement law of the projectile at the tail of the belt was obtained by simulation, which was basically consistent with the real experimental data. Further simulation results show that the acceleration perpendicular to the movement direction is too large in the movement process of the tail shell of the belt, and the tail shell has the phenomenon of tail swing, which increases the feeding resistance and causes the system jamming failure.

**Keywords:** shell feeding system; shell jamming; failure analysis; numerical simulation; multi-rigid-body dynamics

### 0 引言

某高射速航炮供弹系统在工作时出现卡弹等异常现象, 严重时甚至会造成航炮停射; 因此, 分析该系统供弹过程中局部弹带在弹箱中的运动特性具有重要意义。

航炮射击时弹带的运动十分复杂。弹带各链节间有间隙, 弹带层在相对平移运动时会出现卡滞和脱节现象<sup>[1]</sup>。目前计算弹带运动主要有等截面弹性带、变截面弹性带、弹性铰连接的多刚体、复杂铰连接的多刚体 4 种模型<sup>[2-5]</sup>。前 3 种为弹性带模型, 不考虑链节之间的间隙和碰撞的能量损失, 不能模拟第 2 发炮弹及以后各发的弹带运动; 第 4 种多刚体模型考虑链节间隙和碰撞能量损失, 可以模拟连续射击时弹带的运动特性。利用上述第 4 种多刚体模型, 文献[3]首次建立了 4 自由度弹链动力学模型

描述弹带运动规律及供弹阻力; 文献[4]运用波动理论研究了不同弹带长度与拨弹速度下弹带阻力。

笔者以某高射速航炮供弹系统为研究对象, 分析其工作原理, 建立数值模拟并通过实验验证模型, 从而进一步分析影响供弹异常的原因, 为该系统优化设计提供参考。

### 1 工作原理分析

如图 1 所示, 航炮供弹系统为一种新型的航炮供弹机构, 主要由连接装置、弹箱、限位器、推弹装置等部分组成。

下图:  $X$  轴正向为炮弹运动方向;  $Z$  轴为炮弹轴向; 弹带只受到弹箱的约束力, 且相比  $X$  轴与  $Y$  轴受力该方向受力可忽略, 故假设弹带在  $Z$  轴方向不运动, 重点考虑弹带在  $X$  轴与  $Y$  轴方向运动特性。

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-01-28

作者简介: 马文鑫(1996—), 男, 山西人, 硕士, 从事有链供弹研究。E-mail: 1774396690@qq.com。

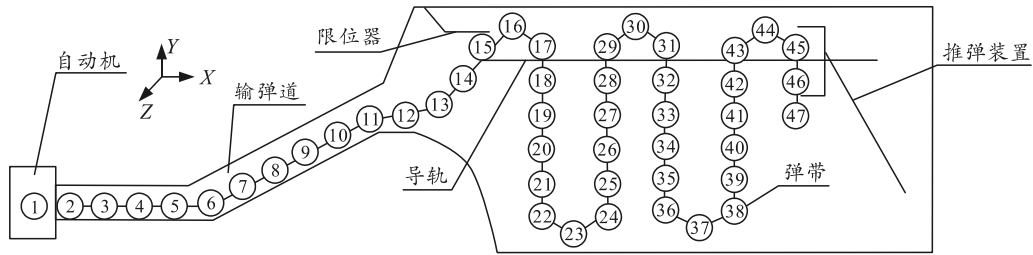


图 1 工作原理

该系统工作原理为：炮弹 1 击发后带动弹带朝 X 轴正向运动，随着炮弹逐渐进膛，炮弹 15—17 依次经过导轨与限位器，带动炮弹 18—22 在重力作用下掉到弹箱左下部，同时推弹装置推动炮弹 45 和 46 往 X 轴正向运动，直到炮弹 29 靠近限位器位置，随后推弹装置复位。随着炮弹不断击发，弹箱左下部炮弹依次进入输弹道，然后炮弹 29—31 经过限位器带动炮弹 32—36 掉到弹箱左下部，重复上一串弹带运动直至所有炮弹被击发。为减小供弹阻力，推弹装置推动弹带朝着自动机方向运动。弹箱左下部的曲线形设计主要作用是减小弹带扭曲角度从而减小供弹阻力，推弹装置的主要作用是推动尾部炮弹往 X 轴正向运动，进而推动每串弹带运动到靠近限位器位置。

## 2 建立数值仿真模型

考虑链节间隙，假设炮弹是刚体，内力的作用线与炮弹和弹链的质心的连线重合，链节间有间隙，链节的弹性用一根无质量的弹簧代表，炮弹间有结构阻尼及碰撞引起的能量损失，得到如图 2 所示的由复杂铰连接的多刚体模型<sup>[6-8]</sup>。

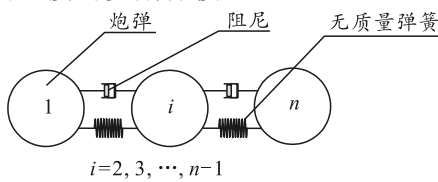


图 2 复杂铰连接多刚体弹带模型

取弹带中间第  $i$  发炮弹，其受力如图 3 所示。

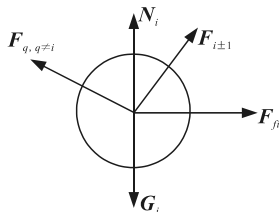


图 3 第  $i$  发炮弹受力

由上图可知，除第 1 发与第  $n$  发外的第  $i$  发炮弹动力学方程为：

$$M_i a_i = F_{i\pm 1} + G_i + F_{f_i} + F_{q, q \neq i} + N_i \quad (1)$$

式中： $M_i$  为第  $i$  发炮弹与弹链的总质量； $a_i$  为第  $i$  发炮弹加速度矩阵； $F_{i\pm 1}$  为第  $i-1$  个弹链与第  $i+1$  个弹链对第  $i$  发炮弹的作用力矩阵； $G_i$  为第  $i$  发炮弹的重力矩阵； $F_{f_i}$  为弹箱作用于第  $i$  发炮弹的摩擦力矩阵； $F_{q, q \neq i}$  为第  $q$  发炮弹对第  $i$  发炮弹的作用力矩阵； $N_i$  为作用于第  $i$  发炮弹的支撑力矩阵。各矩阵具体表达式为：

$$a_i = \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $\ddot{x}_i$  为第  $i$  发炮弹 X 轴加速度； $\ddot{y}_i$  为第  $i$  发炮弹 Y 轴加速度。

$$F_{i\pm 1} = \begin{bmatrix} k(x_{i-1} - x_i) \cos \alpha_{i,i-1} + k(x_{i+1} - x_i) \cos \alpha_{i,i+1} + \\ c(\Delta \dot{x}_{i,i-1} + \Delta \dot{x}_{i,i+1}) \\ k(y_{i-1} - y_i) \sin \alpha_{i,i-1} + k(y_{i+1} - y_i) \sin \alpha_{i,i+1} + \\ c(\Delta \dot{y}_{i,i-1} + \Delta \dot{y}_{i,i+1}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $k$  为弹链刚度； $c$  为等效阻尼系数； $x_i$  为第  $i$  发炮弹 X 轴方向位移； $\Delta \dot{x}_{i,i-1}$  为第  $i-1$  发炮弹与第  $i$  发炮弹 X 轴方向速度的差值； $y_i$  为第  $i$  发炮弹 Y 轴方向位移； $\Delta \dot{y}_{i,i-1}$  为第  $i-1$  发炮弹与第  $i$  发炮弹 Y 轴方向速度的差值； $\alpha_{i, i-1}$  为第  $i-1$  发炮弹与第  $i$  发炮弹质心连线与 X 轴方向夹角； $\alpha_{i, i+1}$  为第  $i+1$  发炮弹与第  $i$  发炮弹质心连线与 X 轴方向夹角。弹链在拉伸和压缩时刚度不同：

$$k = \begin{cases} k_l & x_{i-1} - x_i \geq \delta \\ 0 & 0 < x_{i-1} - x_i < \delta \\ k_y & x_{i-1} - x_i \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $k_l$  为弹链拉伸刚度； $k_y$  为弹链压缩刚度； $\delta$  为弹链间间隙。

$$G_i = \begin{bmatrix} 0 \\ mg \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$F_{f_i} = \begin{bmatrix} F_{f_{ix}} \\ F_{f_{iy}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $F_{f_{ix}}$  为第  $i$  发炮弹 X 轴方向摩擦力； $F_{f_{iy}}$  为第  $i$  发炮弹 Y 轴方向摩擦力。

$$F_{q,q \neq i} = \begin{bmatrix} \sum_{q=1, q \neq i}^n F_{q,q \neq i} \cos \beta_{q,i} \\ \sum_{q=1, q \neq i}^n F_{q,q \neq i} \sin \beta_{q,i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $F_{q,q \neq i}$  为第  $q$  发炮弹对第  $i$  发炮弹作用力； $\beta_{q,i}$  为第  $q$  发炮弹与第  $i$  发炮弹质心连线与  $X$  轴方向的夹角。

$$N_i = \begin{bmatrix} N_{ix} \\ N_{iy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $N_{ix}$  为作用于第  $i$  发炮弹的支撑力在  $X$  轴方向的分力； $N_{iy}$  为作用于第  $i$  发炮弹的支撑力在  $Y$  轴方向的分力。

首发炮弹没有上一个弹链对其作用力，但有一个外力  $P$  作用于它，当  $i$  取 1 时，可得到第 1 发炮弹动力学方程为：

$$M_1 a_1 = F_2 + G_2 + F_{f2} + F_{q,q \neq 1} + N_1 \quad (9)$$

第  $n$  发炮弹没有下一个弹链对其作用力，当  $i$  取  $n$  时，可得到第  $n$  发炮弹动力学方程为：

$$M_n a_n = F_n + G_n + F_{fn} + F_{q,q \neq n} + N_n \quad (10)$$

根据建立的弹带动力学模型，通过某软件编程建立该系统数值仿真模型，根据实际工作时参数设置首发弹击发外力  $P$  即拨弹力大小，同时设置拨弹频率即射速。通过计算可以得到每一发炮弹从初始位置到被击发任意时刻加速度等参数。

### 3 实验验证

实验时在弹带尾部增加一发模拟弹，测试射击过程中其受到的运动方向和垂直于运动方向的加速度。图 4 为实验原理。

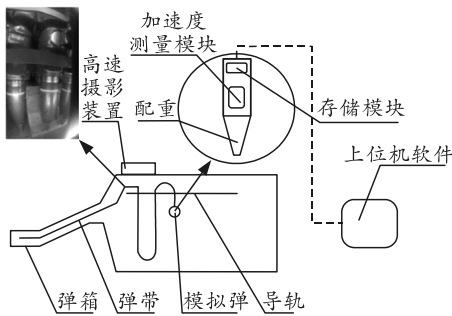


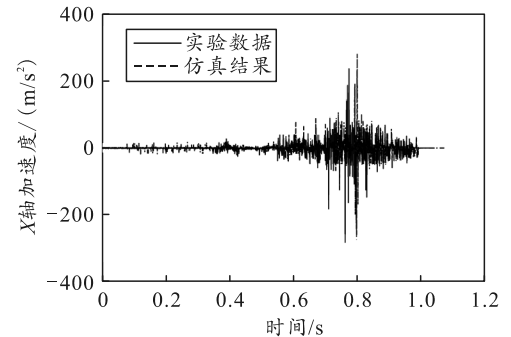
图 4 实验原理

根据前期多次射击训练结果，弹箱内剩余 30~35 发弹时出现卡弹现象概率最高，故取载弹量 33 发弹进行实验。

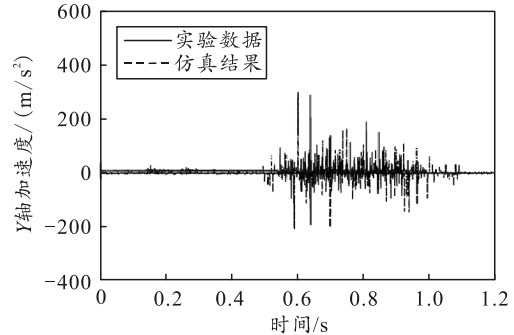
实验原理：将弹带尾部第 33 发炮弹换为模拟弹<sup>[9-10]</sup>。模拟弹内部装有加速度测量模块和数据存

储模块，可以测量弹带第 33 发弹从初始时刻到第 32 发弹被击发这段时间内加速度。为了保证测试数据可靠性，模拟弹外形与真实炮弹一致，同时在模拟弹弹头增加配重，使模拟弹质量、重心与真实炮弹一致。为了验证测量数据真实性与准确性，在弹箱上限位器部分安装高速摄影装置，通过后图像处理技术计算弹带运动速度从而验证模拟弹测得的数据。射击结束后取下模拟弹，将数据从存储模块传输到上位机软件，经数据处理可得到第 33 发弹加速度数据。

如图 5 所示，为验证模型正确性，仿真时设置载弹量为 33 发，取第 33 发弹仿真结果与实验数据进行对比。



(a) X轴加速度仿真与实验对比



(b) Y轴加速度仿真与实验对比

图 5 加速度仿真与实验对比

图 5(a)为最后一发弹  $X$  轴方向即运动方向加速度变化曲线仿真结果与实验数据对比；图 5(b)为最后一发弹  $Y$  轴方向即垂直于运动方向加速度变化曲线仿真结果与实验数据对比。由图可知，仿真结果与实验数据所得加速度曲线基本吻合。2 幅图的对比结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果与实验数据加速度极值对比

轴向	最大加速度/(m/s <sup>2</sup> )		误差/%
	仿真	实验	
X轴正向	279.3	284.8	1.93
X轴负向	280.9	290.7	3.37
Y轴正向	453.9	439.4	3.30
Y轴负向	315.9	296.4	6.58

通过仿真测得，最后一发弹在运动过程中运动方向最大加速度为  $280.9 \text{ m/s}^2$ ，垂直运动方向最大加速度为  $453 \text{ m/s}^2$ 。从实验数据可以看出：仿真结果与实验数据误差较小，建立的虚拟样机模型具有良好的精确度与可信度，可利用该虚拟样机模型进一步分析该系统出现卡弹故障的原因。

### 4 结果与分析

根据该供弹系统实际工作情况，卡弹故障常发生在最后一串弹带的最后一发弹。为分析炮弹在该位置与上一串弹带相同位置运动特性，进一步仿真第 33 发和第 19 发弹 2 个方向加速度，结果如图 6 所示。

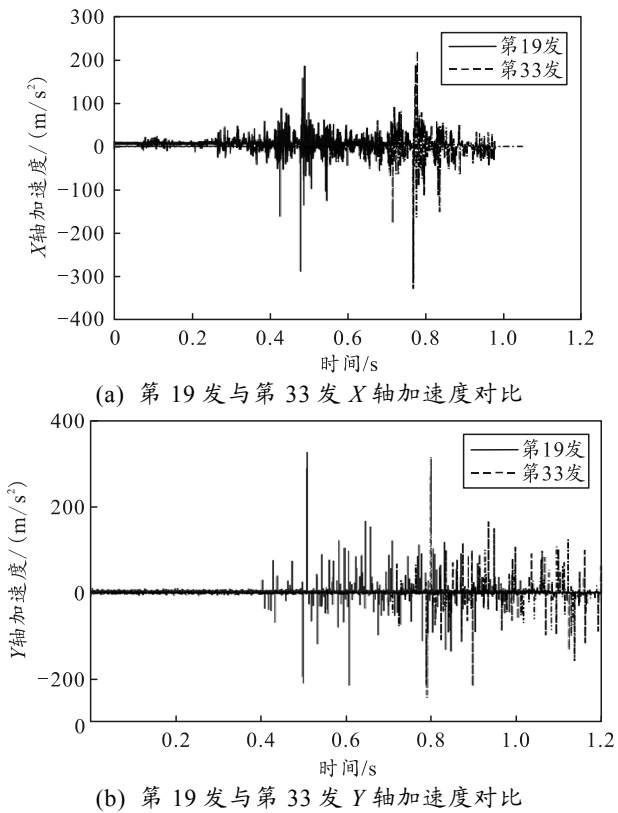


图 6 弹带尾部炮弹加速度

由上图可知，第 33 发弹 X 轴与 Y 轴加速度均大于同位置第 19 发炮弹。进一步仿真得到弹带尾部 5 发炮弹加速。

表 2 最后 5 发炮弹加速度极值对比  $\text{m/s}^2$

编号	X 轴正向	X 轴负向	Y 轴正向	Y 轴负向
第 29 发	162.7	158.4	324.6	319.8
第 30 发	178.9	185.2	344.1	338.6
第 31 发	230.2	225.4	361.1	358.2
第 32 发	244.3	251.3	378.2	380.6
第 33 发	280.9	276.1	405.8	410.3

通过 2 次仿真结果可以看出：1) 弹带最后一发弹在 2 个方向加速度极值均大于前面弹带相同位置炮弹 2 个方向加速度极值；2) 弹带尾部几发炮弹 2 个方向加速度极值均较大，越靠近弹带尾部，炮弹加速度极值越大；3) 垂直于运动方向加速极值远大于运动方向加速度极值。由以上结论可得：尾部几发炮弹在运动过程中出现摆尾现象，但弹带上相同位置炮弹因受到后面一发炮弹上弹链作用力未出现该现象。摆尾现象导致射击过程中尾部炮弹供弹阻力增大，这是造成该系统工作时供弹异常的主要原因。

### 5 结束语

1) 通过对某航炮供输系统工作原理分析，建立了基于复杂铰连接的多刚体动力学数值仿真模型，与实验数据对比基本吻合，可以利用该模型进一步模拟该系统工作时弹带运动特性。

2) 通过仿真分析得到弹带尾部炮弹加速度曲线可知，弹带尾部炮弹垂直于运动方向远大于运动方向加速度，导致弹带尾部存在摆尾现象。这是造成该系统工作时供弹异常的主要原因。

### 参考文献：

- [1] 杨军荣. 弹链供弹阻力研究[J]. 南京理工大学学报, 1997(4): 68-71, 81.
- [2] 李洪强, 廖振强, 李佳圣, 等. 转管机枪弹链拨弹阻力的研究[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(4): 561-566.
- [3] 葛胜利. 舰炮供弹系统动力学仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(9): 82-85.
- [4] 邹衍, 徐诚, 张克. 5.8 mm/7.62 mm 模块化步枪运动特性匹配分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1356-1362.
- [5] 陆继山, 冯广斌. 基于 RccueDyn 的自动供弹机故障仿真研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(4): 220-225.
- [6] 杨丽, 孙志礼, 柴小冬, 等. 供弹机虚拟样机刚柔耦合动力学特性[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(5): 377-383.
- [7] 王茂森, 廖瑞珍, 戴劲松. 某供输弹系统螺旋导引设计与仿真[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 9-12.
- [8] 谢云峰, 吴光宁. 双仓结构弹箱设计及可靠性分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 21-24.
- [9] 陆卫东, 黄强, 王茂森, 等. 模拟弹运动参数采集存储系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 89-91, 96.
- [10] 杨海川, 张建峰. 一种新式的闭合弹带机构[J]. 兵工自动化, 2011, 30(9): 16-17, 27.