

doi: 10.7690/bgzd.2020.02.014

基于 Matlab/Simulink 转管炮后坐缓冲运动的仿真

李 鑫¹, 王惠源¹, 王志杰²

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 西安昆仑工业(集团)有限责任公司, 西安 710000)

摘要: 为直接模拟不同的加载和卸载刚度的环形弹簧, 以某口径航空转管炮为研究对象, 在 Matlab/Simulink 软件环境下, 建立不同刚度环形弹簧后坐缓冲运动仿真模型, 并对比刚度不变的仿真结果。结果表明: 环形弹簧卸载刚度的变化不会影响到最大后坐位移、最大后坐速度结果的仿真, 但卸载刚度的变化使得最大前冲位移和最大前冲速度增大。

关键词: 环形弹簧; 刚度; 后坐

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Simulation of Recoil Buffer of Gatling Gun Based on Matlab/Simulink

Li Xin¹, Wang Huiyuan¹, Wang Zhijie²

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Xi'an Kunlun Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To directly simulate different loading and unloading annular spring, taking certain type aircraft gatling gun as the research object, in the Matlab/Simulink software environment, a simulation model for the recoil buffer of annular spring with different stiffness is established, and compare it with simulation results constant stiffness. Research results show that changes in the unloading stiffness of the annular spring will not affect the simulation of the results of the maximum recoil displacement and the maximum recoil speed, but the changes in the unloading stiffness will increase the maximum forward displacement and the maximum forward speed.

Keywords: annular spring; stiffness; recoil

0 引言

转管炮射击时, 产生的炮膛合力推动后坐部分后坐。后坐规律一直是研究转管炮动力学特性最为关注的部分。环形弹簧的缓冲减振能力高, 经常应用在转管炮后坐缓冲上, 不仅可以减小后坐部分的后坐能量, 而且可减轻复进时对架体的冲击, 提高射击精度。在 ADAMS 动力学仿真软件中, 弹簧刚度只能设置为固定值, 无法直接模拟不同的加载和卸载刚度的环形弹簧, 笔者在 Matlab/Simulink 中建立后坐仿真模型来模拟环形弹簧后坐缓冲运动^[1]。

1 膛内火药气体内弹道计算

根据内弹道方程组来计算某口径炮的内弹道, 文献[2]内弹道方程组如式(1); 内弹道时期结束后, 后效期气体运动开始, 文献[2]后效期计算的方程组如式(2)。

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \chi_y Z (1 + \lambda_y Z + \mu_y Z^2) \\ \frac{dZ}{dt} &= \frac{p_a^{n_r}}{I_k} \\ S_s p_a &= \phi m_d \frac{dv_d}{dt} \\ S_s p_a (l_\psi + l_x) &= f \omega \psi - \frac{\theta}{2} \phi m_d v_d^2 \\ l_\psi &= l_0 \left[1 - \frac{\rho_z}{\rho_p} - \rho_z \left(\alpha_p - \frac{1}{\rho_p} \right) \psi \right] \\ v_d &= \frac{dl_x}{dt} \\ \theta &= k - 1 \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} p_x &= (A - CX^2) p_b \\ v_x &= v_{k0} X \\ A &= \frac{4\gamma(n_d - 1) + 8n_d}{3\gamma(n_d - 1) + 8n_d} \\ C &= \frac{4\gamma(n_d - 1)}{3\gamma(n_d - 1) + 8n_d} \\ v_{k0} &= c_{k0} = \sqrt{\gamma p_{k0} / \rho_{k0}} \\ X &= x/L \end{aligned} \right\}。 \quad (2)$$

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2019-12-04

作者简介: 李 鑫(1993—), 男, 山西人, 硕士, 从事武器结构设计与仿真研究。E-mail: 1009214798@qq.com。

方程组中各参数的含义如表 1 所示。

表 1 方程组中各参数的含义

参数	含义	参数	含义
ψ	火药燃去百分数	ω	装药量
χ_y, λ_y, μ_y	药形系数	k	绝热系数
Z	火药已燃相对厚度	ρ_z	装填密度
I_k	压力全冲量	ρ_p	火药密度
p_a	内弹道时期膛内平均压力	α_p	火药气体余容
n_r	燃速指数	p_x	x 截面处的火药气体压力
φ	次要功计算系数	p_{k0}	后效期膛口处火药气体的压力
m_d	弹丸质量	x	截面距膛底距离
v_d	弹丸速度	L	身管总长
S_s	身管线膛内截面积	n_d	多变指数
l_w	药室自由容积的缩径长	γ	绝热指数
l_x	弹丸在线膛内的行程	p_d	后效期膛内气体平均压力
l_0	药室容积缩径长	p_k	内弹道结束的平均压力
f	火药力		

通过 Matlab 进行编程求解得到该弹内弹道及后效期的膛内压力曲线如图 1 所示。

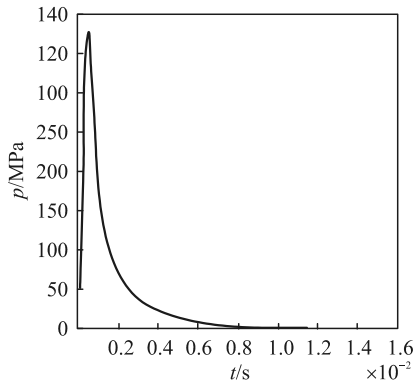


图 1 内弹道及后效期膛内压力

炮膛合力估算公式为

$$F_t = Sp_t \quad (3)$$

式中： S 为炮膛截面面积； p_t 为内弹道及后效膛内压力。炮膛合力与时间的关系如图 2 所示。

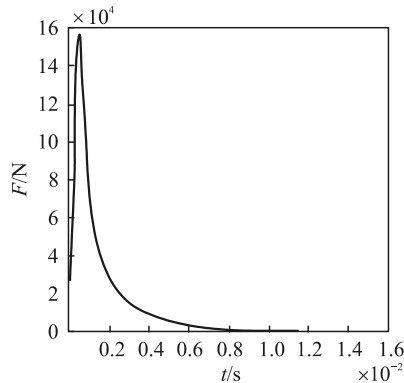


图 2 炮膛合力-时间

2 验证内弹道计算

弹丸在膛内运动时期存在着弹丸、火药与火药燃气和后坐部分的运动。利用动量守恒原理可得出自由后坐运动与弹丸在膛内运动诸元(参数)的关系。参考文献[3]，后效期结束点自由后坐速度为

$$W_{\max} = (m + \beta\omega)/m_h v_0 \quad (4)$$

式中： m 为弹丸质量； β 为火药气体作用系数； ω 为装药量； m_h 为后坐部分质量。

自由后坐过程中，利用后坐部分动量的增量等于炮膛合力的全冲量，来验证前面计算得到的炮膛合力是否正确。由已知弹的参数和后坐部分质量，利用式(4)计算得到的自由后坐最大速度为 1.586 9 m/s。自由后坐的特点是当火药气体后效期结束后，自由后坐运动成为了匀速直线运动。单发自由后坐仿真速度结果如图 3 所示。

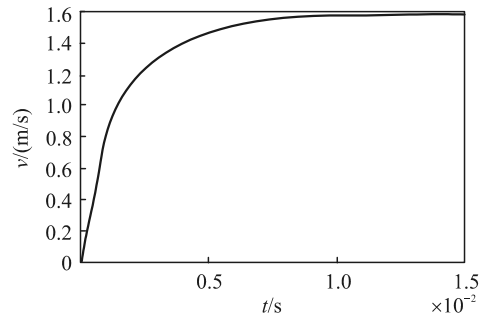


图 3 自由后坐速度-时间

由图可知：仿真得到的最大自由后坐速度为 1.583 m/s，接近理论计算结果，说明前面计算的炮膛合力载荷正确。

3 环形弹簧的特性

环形弹簧是由多个带有内锥面的外圆环和外锥面的内圆环配合组成，由于外圆环和内圆环沿配合圆锥相对滑动时，接触表面具有很大的摩擦力，即加载时增大了弹簧刚度，卸载时，摩擦力阻滞了弹簧弹性变形的恢复，减小了弹簧作用力。环形弹簧在加载和卸载循环中，由摩擦力转化为热能所消耗的功，大小可以达到加载过程所作功的 60%~70%；因此，环形弹簧的缓冲减振能力很高。环形弹簧力学性能曲线如图 4 所示。

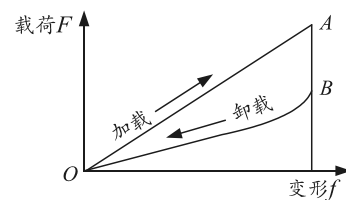


图 4 环形弹簧特性

4 建立仿真模型

4.1 简化模型

为了便于仿真分析，模型假设如下：

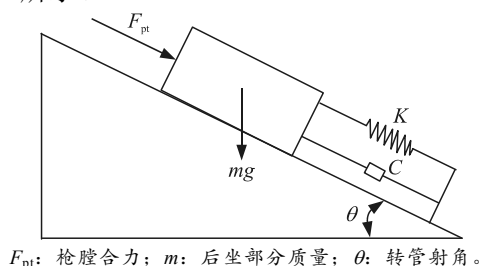
1) 后坐部分为绝对刚体，忽略自动机内部摩擦、撞击等对能量的消耗；

2) 假设弹丸作用于膛线导转侧的力矩只在弹丸沿膛线运动时期起作用，对后坐方向上影响很小；

3) 射击时只沿炮膛合力 F_{pt} 的方向后坐和复进，不左右摆动；

4) 环形弹簧加载与卸载的刚度(阻尼)均假定是一常数。

取转管炮后坐部分作为研究对象分析其后坐运动，把缓冲簧自身内耗简化为一个与缓冲弹簧并联的阻尼器，构造一个弹簧阻尼器。令弹簧的刚度为 K ，阻尼器的等效阻尼系数为 C 。简化后的模型如图 5^[4-5]所示。



F_{pt} : 膛膛合力; m : 后坐部分质量; θ : 转管射角。

图 5 简化后的动力学模型

4.2 建立运动方程

设后坐部分质量为 m ，弹簧加载刚度为 k ，卸载刚度与加载刚度的比例系数为 μ 。

后坐部分后坐运动微分方程为：

$$ma = F_{pt} - F_R; \quad (5)$$

$$F_R = kx \pm F_0 \pm C\dot{x} - mg \sin \theta \pm f. \quad (6)$$

式中： a 为后坐部分运动加速度； F_{pt} 为膛膛合力； F_R 为后坐力； F_0 为弹簧预压力； C 后坐系统阻尼系数； f 为摇架导轨与后坐部分摩擦力； x 为位移； \dot{x} 为速度； θ 为射角。

后坐部分在缓冲器上的一个循环运动可以分为后坐、复进、前冲和返回 4 个阶段。

当 $x > 0, v > 0$ 时，后坐阶段可以表示为：

$$ma = F_{pt} - F_0 - kx - C\dot{x} + mg \sin \theta - f. \quad (7)$$

当 $x > 0, v < 0$ 时，复进阶段可以表示为：

$$ma = F_{pt} - F_0 - \mu kx + \mu C\dot{x} + mg \sin \theta + f. \quad (8)$$

当 $x < 0, v < 0$ 时，前冲阶段可以表示为：

$$ma = F_{pt} + F_0 - kx + C\dot{x} + mg \sin \theta + f. \quad (9)$$

当 $x < 0, v > 0$ 时，返回阶段可以表示为：

$$ma = F_{pt} - F_0 - \mu kx - \mu C\dot{x} + mg \sin \theta - f. \quad (10)$$

5 仿真及结果分析

按环形弹簧在加载和卸载循环中，由摩擦力转化为热能所消耗的功达到加载过程所作功的 60%，笔者确定了卸载刚度与加载刚度的比例系数 μ 为 0.4。环形弹簧加载刚度为 $K=2\ 444\ \text{N/mm}$ ，缓冲簧预压力为 $F_p=8\ 000\ \text{N}$ 。仿真结果如下。

1) 卸载刚度变化的仿真结果如图 6、7 所示。

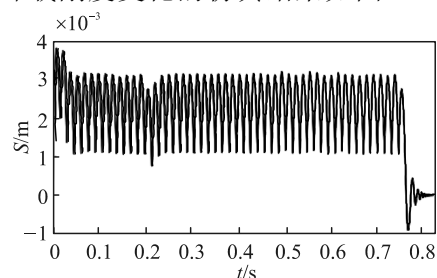


图 6 位移-时间

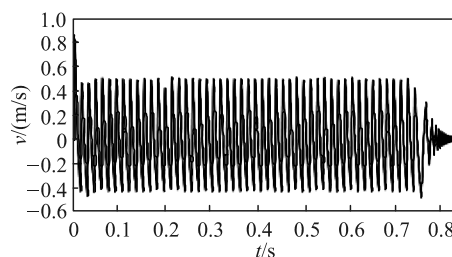


图 7 速度-时间

由图 6 可知：最大后坐位移为 3.773 mm，最大前冲位移为 0.926 mm。由图 7 可知：最大后坐速度为 0.823 m/s，最大前冲速度为 0.487 m/s。

2) 卸载刚度不变化的仿真结果如图 8、9 所示。

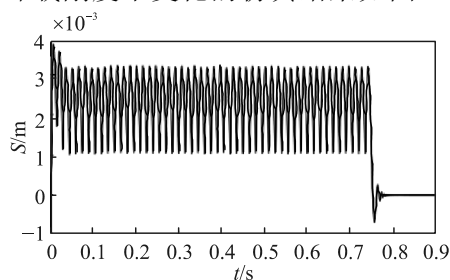


图 8 位移-时间

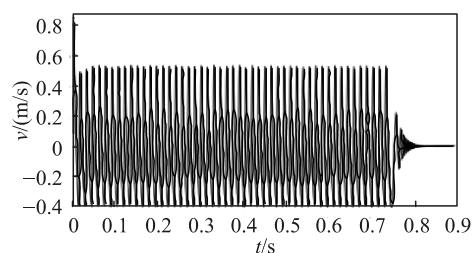


图 9 速度-时间

由图 8 可知：最大后坐位移为 3.775 mm，最大前冲位移为 0.676 mm。由图 9 可知：最大后坐速度为 0.823 m/s，最大前冲速度为 0.431 m/s。

通过对 2 组仿真结果的对比可知：2 组最大后坐位移和最大后坐速度非常接近，但在最大前冲位移和最大前冲速度上有差异。

6 结论

笔者对验证所加炮膛合力载荷是否准确提供了方法，在 Matlab/Simulink 软件下实现了环形弹簧变刚度的后坐缓冲运动仿真。通过对卸载刚度变化和不变化仿真结果进行分析，得出环形弹簧卸载刚度的变化不会影响到最大后坐位移、最大后坐速度结果的仿真，但卸载刚度的变化使得最大前冲位移

(上接第 49 页)

参考文献：

[1] 宋太亮. 装备保障性系统工程[M]. 北京：国防工业出版社, 2008: 47.

[2] 王凯, 孙万国. 武器装备军事需求论证[M]. 北京：国防工业出版社, 2008: 22.

[3] 宋怀常. 中国人的思维危机[M]. 天津：天津人民出版社, 2010: 29.

(上接第 58 页)

[3] BEVILACQUA M, CIARAPICA F E, GIACCHETTA G. Critical chain and risk analysis applied to high-risk industry maintenance: A case study[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27: 419-432.

[4] 何旭洪, 童节娟, 薛大知. 应用 PSA 方法进行核电站维修风险管理[J]. 清华大学学报, 2006, 46(3): 441-443.

和最大前冲速度增大。该研究对仿真环形弹簧后坐缓冲运动具有一定的指导意义，在工程实践中具有良好的参考价值。

参考文献：

[1] 朵英贤, 马春茂. 中国自动武器[M]. 北京：国防工业出版社, 2014: 262-305.

[2] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京：北京理工大学出版社, 2009: 19-127.

[3] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京：国防工业出版社, 2010: 10-56.

[4] 薄玉成, 王惠源, 李强. 自动机结构设计[M]. 北京：兵器工业出版社, 2009: 317-329.

[5] 牛碧凯. 航空转管机枪发射动力学研究[D]. 太原：中北大学, 2015: 15-18.

[4] Jonathan Baron. 思维与决策[M]. 北京：中国轻工业出版社, 2009: 5-14.

[5] 郝玉涛, 王超伟, 赵洪义, 等. 基于组合评价法的装备保障方案评价[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 62-65.

[6] 马绍民. 综合保障性工程[M]. 北京：国防工业出版社, 1995: 93-94.

[7] 王健, 古平, 卜昭锋, 等. 装备保障数据需求分析方法与建模[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 136-140.

[5] VINNEM J E, BYE R, GRAN B A. Risk modelling of maintenance work on major process equipment on offshore petroleum installations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25: 274-292.

[6] 吴同晗, 张仕新, 陈春良, 等. 基于能力需求的维修保障人员专业种类确定方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 73-77.