

doi: 10.7690/bgzd.2020.04.018

某航炮缓冲器优化设计

李大勇¹, 王妍²

(1. 航空工业庆安集团有限公司, 西安 710077; 2. 陆军边海防学院, 西安 710108)

摘要: 为解决航炮因口径增大导致炮架承受过高冲击力的问题, 对航炮缓冲器进行优化设计。将航炮缓冲器的环簧结构改为环簧-液压结构, 对缓冲器的结构及工作原理进行说明, 构建后坐前冲阶段动力学模型, 对后坐阻力的变化规律进行分析, 对改进后的结构进行参数优化, 并对其进行仿真分析。结果表明: 使用改进后的缓冲器可以有效地降低航炮射击过程中的后坐、前冲力及后坐、前冲位移, 并且能达到浮动射击的效果。

关键词: 缓冲器; 后坐力; 浮动射击

中图分类号: TJ392 **文献标志码:** A

Optimal Design of Certain Type Aircraft Gun Recoil Damper

Li Dayong¹, Wang Yan²

(1. AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Army Academy of Border Coastal Defense, Xi'an 710108, China)

Abstract: To solve the problem that increasing caliber results in high recoil force, a certain type aircraft gun recoil damper will be optimal designed. Change the ring spring construction of the buffer to ring spring-hydraulic construction, introduce its construction and working principle, establish mechanical model of recoiling or priming process, analyze the change rule of recoil resistance, optimize the parametric of the improved construction and carry out simulation and analysis. The results of analysis indicate that can reduce the recoil or primer ignition force and recoil or primer ignition displacement effectively and achieve the result of floating shooting though the use of improved recoil damper.

Keywords: recoil damper; recoil; float shooting

0 引言

随着作战飞机性能的提高, 对航炮的射速、射程和威力提出了更高的要求。转管武器的一个主要特点就是射速高, 增大其口径就可以达到射程远、威力大的要求, 备受作战飞机的欢迎, 但是也会带来后坐力剧增的问题。如何减小航炮后坐力是航炮火力系统研究中的关键问题, 也是解决火炮威力与机动性这对矛盾的关键技术^[1]。

为了提高航炮作战指标, 要求将原单管炮改为4管转管炮, 同时要满足最大前冲、后坐力不超过25 kN, 最大前冲、后坐行程之和不超过20 mm。在这种情况下, 缓冲器装置参数变量与转管自动机的参数变量匹配尤为重要, 如果匹配不好, 会使自动机的后坐阻力叠加增大, 严重影响射击精度。尤其对高射速转管自动机, 会出现后坐位移叠加严重的现象, 使减小高射速转管自动机的后坐力变得尤为困难^[2-4]。针对这一问题, 笔者将原缓冲器的环簧摩擦块式结构改为环簧液压式, 并根据射速特点调整环簧刚度、预紧力和液压节流孔面积, 使其与自动

机频率匹配, 达到浮动射击效果, 进而实现减小后坐、前冲力和后坐、前冲行程的目的。

1 缓冲器结构设计

1.1 缓冲器的结构

为了提高缓冲器的性能, 将缓冲器结构由原来的环簧摩擦块结构改为环簧液压结构。改进后的缓冲器结构如图1所示。

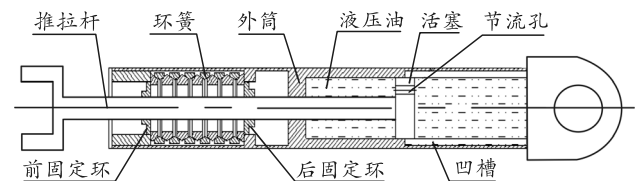


图1 缓冲器结构

缓冲器工作过程中受到环簧作用力和液压阻力。环簧压紧和恢复过程的刚度系数是不同的, 预紧力也相应地发生改变。根据环簧特性, 恢复阶段的预紧力、刚度系数是压缩阶段的0.4倍。缓冲器不工作时推杆的位置如图1所示, 此时活塞处于平衡位置, 节流孔面积为 a , 节流孔的形状、个数

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-01-10

作者简介: 李大勇(1987—), 男, 黑龙江人, 满族, 硕士, 工程师, 从事航空武器研究。E-mail: 2234240375@qq.com。

根据实际结构来定, 液压油可以通过节流孔流向活塞另一侧; 位于活塞左侧的腔室直径(即活塞直径)为 D , 右侧腔室带有凹槽(结构类似于身管膛线)相当于增加了节流孔面积, 所以右侧腔室等效节流孔面积为节流孔面积与凹槽面积之和。为了保证密封性, 在缓冲器的活塞外圆周增加密封结构。

1.2 缓冲器的工作原理

缓冲系统的一个工作周期分为后坐、后坐回程、前冲和前冲回程 4 个阶段。各阶段的工作原理为:

1) 后坐阶段, 推拉杆向筒内方向运动, 推拉杆前固定环压缩环簧、活塞运动到筒壁带节流槽的一侧。此时环簧弹力和液压阻力共同阻碍推拉杆的运动。环簧弹力随着压缩量的增加而增大; 液压阻力随着活塞相对筒壁运动速度的增大而增大。

2) 后坐回程阶段, 推拉杆向筒外方向运动, 环簧形变量逐渐恢复, 但是刚度变小, 活塞运动到筒壁带节流槽的一侧方向运动。此时环簧弹力推动推拉杆运动, 液压阻力阻碍推拉杆的运动。

3) 前冲阶段, 推拉杆向筒外方向运动, 推拉杆后固定环压缩环簧、活塞运动到筒壁不带节流槽的一侧。此时环簧弹力和液压阻力共同阻碍推拉杆的运动。

4) 前冲回程阶段, 推拉杆向筒内方向运动, 环簧形变量逐渐恢复但是刚度变小, 活塞运动到筒壁不带节流槽的一侧方向运动。此时环簧弹力推动推拉杆运动, 液压阻力阻碍推拉杆的运动。

2 后坐前冲阶段动力学模型的建立

2.1 基本假设

为了便于优化设计, 笔者对某转管武器作假设和简化等效处理^[5-8]:

- 1) 后坐部分为绝对刚体, 架座为刚性炮架^[9];
- 2) 航炮射击过程中射角始终保持零度;
- 3) 炮身后坐前冲过程中与炮架之间的滑动摩擦系数为 0.1, 并且保持恒定;
- 4) 忽略了自动机内部的摩擦、撞击等对能量的消耗;
- 5) 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;
- 6) 射击时炮膛合力作用在身管轴线上, 炮身只沿炮膛合力方向后坐和复进, 不左右摆动。

对缓冲器中液体流动作如下假设^[10]:

- 1) 液体是不可压缩的, 即在任何压力作用下液

体的密度都保持不变;

- 2) 流动为 1 维定常流动;
- 3) 流体在缓冲器中的流动以地球作为惯性参考系。

2.2 动力学模型的建立

由缓冲器的工作原理可知, 航炮系统一个发射周期可分为 4 个阶段。在这 4 个阶段中分别对缓冲器的刚度系数 k 、缓冲器的预紧力 F_y 进行分析, 研究后坐阻力的变化规律。

后坐阶段推拉杆压缩环簧, 环簧的刚度系数 k , 环簧预紧力为 F_y ; 活塞进入右侧腔室, 等效节流孔面积变为 a_h 。

后坐回程阶段环簧形变量减少, 环簧的刚度系数变为 k_x , 环簧预紧力为 F_{yx} ; 活塞向左运动, 等效节流孔面积为 a_h 。

前冲阶段推拉杆压缩环簧, 环簧的刚度系数为 k , 环簧预紧力为 F_y ; 活塞进入左侧腔室, 等效节流孔面积为 a_q 。

前冲回程阶段环簧形变量减少, 环簧的刚度系数变为 k_x 、环簧预紧力为 F_{yx} ; 活塞向右运动, 等效节流孔面积为 a_q 。

环簧对推拉杆的弹力与后坐前冲位移的关系如图 2 所示。

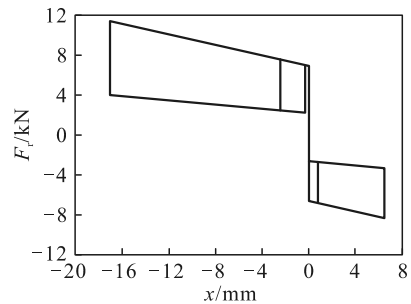


图 2 环簧弹力随炮身位移变化曲线

炮身的动力学方程为

$$m_p \ddot{x} = f - F_{pt} + 2F_r \quad (1)$$

式中: f 为炮身后坐前冲过程中与炮架之间的滑动摩擦力, 大小为 54.9 N, 方向与炮身速度方向相反; m_p 为炮身后坐部分质量, 其值为 56 kg; x 表示炮身位移; F_{pt} 为炮膛合力; $2F_r$ 为 2 个环簧缓冲器作用在炮身的反力之和。

环簧缓冲器作用在炮身的反力

$$F_r = F_y - kx + F_{ry} \quad (2)$$

式中: F_y 为缓冲器的预紧力 (F_y 或 F_{yx}); F_{ry} 为缓冲器的液压阻力; k 为缓冲器的刚度系数 (k 或 k_x);

x 为炮身位移(指向炮口方向为正方向)。

缓冲器的液压阻力^[11]：

$$F_{vy} = 0.5K\rho A_0 (A_0/a - 1)^2 v^2. \quad (3)$$

式中： K 为液压阻力系数； ρ 为液压油密度； v 为炮身速度； A_0 为活塞工作面积； D 为活塞外径； d 为活塞杆外径； a 为等效节流孔面积(a_h 或 a_q)。其中，后坐、前冲回程阶段 $A_0 = 0.25\pi D^2$ ；后坐回程、前冲阶段 $A_0 = 0.25\pi(D^2 - d^2)$ 。

联立式(1)、(2)、(3)并求解，就可以得到航炮后坐前冲力、后坐前冲位移随时间的变化关系。

2.3 航炮技术要求

2.3.1 航炮膛压曲线和射击频率

航炮发射最大膛压约为 383 MPa，弹丸炮口初速约为 1 000 m/s，弹丸质量 140 g，弹丸膛内行程 1.364 m。膛压曲线如图 3 所示。

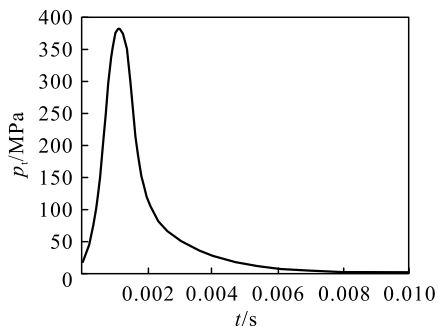


图 3 发射单发炮弹时膛压与时间关系

航炮稳定射速 3 000 发/min，转管炮驱动电机启动过程中加速旋转时间为 0.2 s。在某次靶场试验中，航炮连续射击 0.5s，测试得出的膛压曲线如图 4 所示。

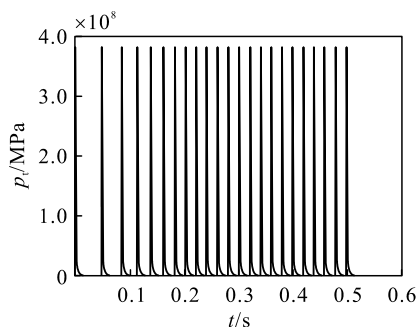


图 4 连续射击时膛压与时间关系

2.3.2 航炮结构参数

航炮身管口径 $d=23$ mm，后坐部分质量 $m_p=56$ kg。如图 5 所示，根据航炮身管口径和膛压曲线可以计算出炮膛合力曲线，最大值为 159.2 kN。炮膛合力曲线是缓冲器设计的依据。

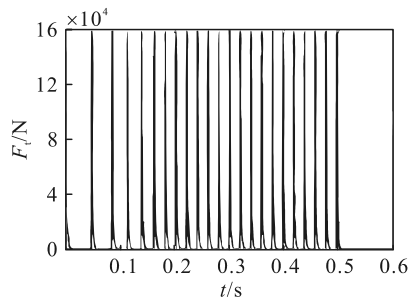


图 5 连续射击时炮膛合力与时间关系

3 模型的求解及结果分析

3.1 参数优化

经过参数优化和对环簧的计算及活塞组件的强度校核结果，得出一组最优值如表 1 所示。

表 1 缓冲器主要参数汇总

参数	数值
压紧阶段环簧刚度系数 $k/(N/m)$	260 000
恢复阶段环簧刚度系数 $k_x/(N/m)$	104 000
压紧阶段环簧预紧力 F_{y0}/N	635 0
恢复阶段环簧预紧力 F_{yx}/N	254 0
后坐、后坐回程阶段等效节流口面积 a_h/mm^2	50
前冲、前冲回程阶段等效节流口面积 a_q/mm^2	28
活塞直径 D/mm	40
活塞杆直径 d/mm	6
液压油密度 $\rho/(kg/m^3)$	870
液压阻力系数 K	1.4

3.2 仿真结果

求解式(1)一(3)构成的方程组，假设连续 0.6 s 后停止，得到航炮后坐前冲力、后坐前冲位移随时间的变化关系如图 6 所示。

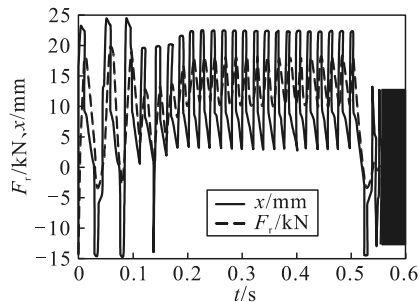


图 6 后坐、前冲力/位移随时间变化

从图可以看出：连续射击过程中，除启动和停止阶段振动较大外，达到稳定射速后坐力和后坐位移都较小。稳定射击时最大后坐力约为 22 kN，最大后坐位移约为 18 mm，无前冲运动，达到浮动射击效果。

经计算得出：炮身最大后坐位移为 20.3 mm，最大前冲位移为 3.8 mm，炮身极限运动行程为 24.1 mm；缓冲器传递给炮架的最大后坐力为 24.5 kN，缓冲器传递给炮架的最大前冲力为 14.7 kN。

4 结论

根据仿真结果可以看出：经过优化后的缓冲器有效地降低了航炮后坐、前冲力和后坐前冲位移，使最大后坐、前冲行程之和小于 25 mm，最大后坐阻力小于 25 kN，达到了技术要求。连续射击 0.15 s 后，航炮的前冲运动被抵消掉，达到了浮动射击的效果。环簧—液压式缓冲器比环簧式缓冲器的缓冲效率高，能够更多地吸收后坐动能，缓冲效果更好。

在实际设计工作中，可以根据实际需要调整各部分结构尺寸。该思路可以为航炮缓冲器的设计提供一种新方法。

参考文献：

[1] 王永存, 周霖, 袁稳新, 等. 一种降低后坐力的火炮发射方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2007(4): 10-12.
 [2] 蒲玉成, 王惠源, 解志坚. 转管武器总体技术的若干问题[J]. 火炮发射与控制学报, 2005(1): 9-16.

(上接第 49 页)

[2] 吴俊, 黄晓明, 林晨, 等. 基于业务流程管理的智能变电站配置文件全寿命周期管控工程化应用[J]. 电工技术, 2016(5): 81-82.
 [3] 李翌辉, 史亚斌, 胡进寿, 等. 基于改进型遗传算法的复杂产品生产车间布局优化方法[J]. 兵工自动化, 2018,

(上接第 65 页)

参考文献：

[1] 史逸民, 史达伟, 郝玲, 等. 基于数据挖掘 CART 算法的区域夏季降水日数分类与预测模型研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(6): 760-765.
 [2] 马海荣, 程新文. 一种处理非平衡数据集的优化随机森林分类方法[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(11): 28-32.
 [3] 赵丽娜. Fisher 判别法的研究及应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 30-32.
 [4] 陈春玲, 吴凡, 余瀚. 基于逻辑斯蒂回归的恶意请求分类识别模型[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(2):

[3] 郝秀萍, 蒲玉成, 王惠源. 超高射速自动机缓冲装置参数优化设计方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(4): 32-33.
 [4] 齐晓林. 航空自动武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 63-75, 205-216.
 [5] 余驰, 张钢峰, 杨超. 航炮射击炮振响应抑制特性分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 20-23.
 [6] 蒲玉成, 王惠源, 李强. 自动机结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 312-329.
 [7] 王月梅. 理论力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996: 44-48.
 [8] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 305-320.
 [9] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 98-101.
 [10] 姚养无. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 71-77, 131-136.
 [11] 郭竞尧, 刘彦, 李勇, 等. 某液压弹簧式浮动机仿真及优化[J]. 液压与气动, 2014(2): 85-87.

[4] 郑世华, 张艳丽. 工作流程管理系统-BPM 的特点与应用分析[J]. 科技视界, 2015(1): 254-262.
 [5] 王履华, 高权忠, 陈海华. GIS-BPM 引擎的设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(1): 137-140.
 [6] 陈立云, 罗均丽. 跟我们学建流程体系[M]. 北京: 中华工商联合出版社, 2014: 193-207.

124-128.
 [5] 周苏, 胡哲, 文泽军. 基于 K 均值和支持向量机的燃料电池在线自适应故障诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 255-260.
 [6] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10.
 [7] FORTE R M. 预测分析: R 语言实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 122-123.
 [8] 郝知远. 基于改进的支持向量机的股票预测方法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 339-343.
 [9] 郭轶斌, 郭威, 秦宇辰, 等. 基于 Kappa 系数的异质性检验及其软件实现[J]. 中国卫生统计, 2016, 33(1): 169-171.