

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.013

基于 isight 的某转管武器弹簧缓冲器优化设计

李世康, 李 强, 谭 庆, 马 超
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对转管武器试验过程中出现的后坐阻力和后坐位移过大的问题, 以某型转管自动机为研究对象, 提出了一种基于 isight 的缓冲器优化设计方法。基于动力学分析软件 ADAMS 建立转管武器虚拟样机模型并对其计算结果进行分析。然后基于 isight 多学科优化技术, 以最大后坐阻力作为目标函数, 在后坐位移不超过 19 mm 的约束条件下采用最优拉丁超立方设计方法对缓冲簧设计参数进行灵敏度分析。利用 isight 集成 ADAMS 运行程序, 采用多目标遗传算法 NSGA-II 对缓冲簧设计参数进行并行优化设计。实验结果表明: 优化后的设计参数与最初方案相比其后坐阻力显著减小, 同时该设计方法为转管武器缓冲器优化设计提供了参考依据。

关键词: isight 多学科优化; 转管武器; 缓冲簧; 动力学分析

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Optimization Design of Certain Type Gatling Gun Weapon Buffer Spring Device Based on Isight

Li Shikang, Li Qiang, Tan Qing, Ma Chao

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the recoil force and recoil displacement were too large during tests of the gatling gun weapon, research on certain type gatling gun, and the method of the optimization design of buffer spring device based on isight is proposed. The gatling gun weapon virtual prototype model was built based on the dynamics analysis software ADAMS, and the results were analyzed. Then, the maximum recoil force is set as the target function based on the isight multidisciplinary optimization techniques, and carry on sensitivity analysis to the design parameters of the buffer spring by using the optimal design method of Latin hypercube under no more than 19 mm in recoil displacement constraints. The ADAMS running program is integrated with isight, the design parameters of buffer spring is carried out parallel optimization by using multi-target genetic algorithm NSCG-II. The results indicate that compared with the original scheme, recoil force of optimized design parameters decrease significantly, and the design method can provide a reliable reference basis for the optimization design of buffer spring device.

Keywords: isight multidisciplinary optimization; gatling gun weapon; buffer spring; dynamics analysis

0 引言

转管武器射频较高, 比非转管武器的后坐冲量大, 使得各个机构的撞击和受力都比较大, 其射击精度也会降低, 故降低转管武器的后坐力和后坐位移十分必要。文献[1]采用动力学软件 ADAMS 对缓冲簧设计参数进行优化设计, 最终得出最优设计参数组合, 但是其优化效果不够显著, 且优化过程复杂; 文献[2]设计了一种带高效缓冲块的环形簧缓冲装置, 从结构上提出了一种新型的缓冲器; 文献[1,3]采用对链式机枪的缓冲装置进行优化设计。

多学科设计优化技术则是协调各个学科之间的冲突和矛盾, 同时利用各学科之间的协同作用, 再通过建立相关数学模型及算法来求得系统全局最优解。文献[4]通过多学科优化技术实现了柴油机

运动机构轻量化的目标; 文献[5]通过多学科优化技术实现提高车门 1 阶固有频率的目标, 从而避免车门产生共振。而笔者则将基于 isight 的多学科优化技术应用到转管武器缓冲装置优化工作, 以实现减小转管武器后坐阻力和后坐位移的目的。

1 转管武器缓冲装置动力学模型

1.1 工作原理

转管武器一般采用的是弹簧式缓冲器, 其工作原理如图 1 所示。转管武器在射击过程中会产生很大的冲量, 该冲量直接通过缓冲器作用于架体上, 从而使全炮产生一定的后坐。故该弹簧缓冲器的主要作用就是尽可能地消耗后坐冲量从而提高射击精度, 减小自动机各个部件之间的碰撞和受力。

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-03-20

基金项目: 国家基础科研项目(A0820132003)

作者简介: 李世康(1992—), 男, 山西人, 硕士, 从事高射速武器理论与技术研究。

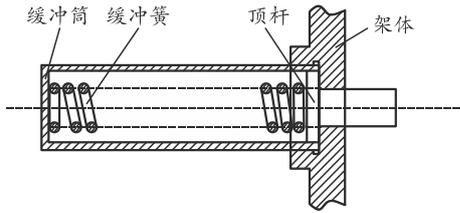


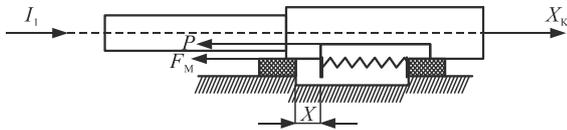
图 1 缓冲装置工作原理

1.2 转管武器后坐阻力计算数学模型

转管武器在弹簧缓冲器上的受力如图 2 所示。弹簧力为

$$P = KX_0 + KX = P_0 + KX \quad (1)$$

式中： X_0 为弹簧的预压量； P_0 为弹簧的预压力， $P_0=KX_0$ ； K 为弹簧的刚度。



I_1 : 火药气体作用炮身向后的冲量； X : 武器本体后坐位移； P : 弹簧力； F_M : 摩擦力。

图 2 转管武器在缓冲器上的受力简图

以炮架为受力对象，规定力的方向向后为正，向前为负，则在已知武器运动规律的情况下，各阶段后坐力计算公式如下。

武器后坐阶段的后坐力为

$$F = KX_0 + KX + F_M \quad (2)$$

武器复进阶段的后坐力为

$$F = KX_0 + KX - F_M \quad (3)$$

由此可知：转管武器后坐阻力大小与缓冲簧的刚度、预压力有关，故通过对缓冲簧参数进行优化设计可以达到减小后坐阻力的目的。此外，后坐阻力还与摇架导轨、缓冲簧及其他关重件之间的摩擦阻尼力有关，将该摩擦力简化为与缓冲簧并联的阻尼器，则可将阻尼设定为另外一个设计参量来对缓冲簧进行优化设计^[6]。

1.3 坐性能分析

笔者基于多刚体动力学理论和动力学仿真软件 ADAMS 建立了某型转管自动机虚拟样机模型如图 3 所示。为了得出后坐性能曲线，在尽量保证与实际模型保持一致的基础上对原转管自动机 3 维模型做了如下修改：

1) 在不影响计算结果的基础上，对没有相对运动关系的部件进行固定处理；

2) 为了真实模拟转管武器后坐运动过程，将试验测得的炮膛合力数据以 SPLINE 函数的形式施加与炮门上，其曲线如图 4 所示；

3) 考虑计算成本，所建立的虚拟样机模型为全刚体模型，不考虑柔性体对部件的影响。



图 3 转管武器虚拟样机模型

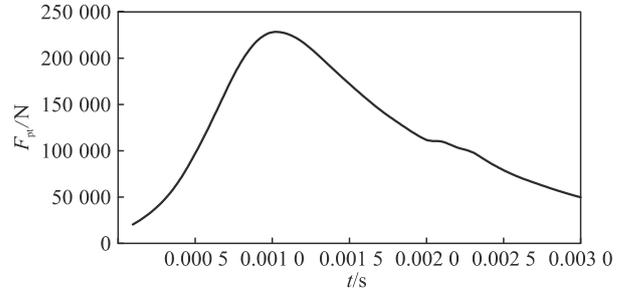


图 4 炮膛合力曲线

自动机后坐复进过程中缓冲簧一方面要保证自动机各个组件运动平稳，同时还要保证连续射击时后坐阻力不会发生叠加。通过仿真计算得出转管武器在射速为 3 600 发/min 时期后坐特性曲线如图 5 所示，其后坐阻力及后坐位移变化平稳，并且没有出现叠加的现象，其最大后坐阻力为 86 212.2 N，最大后坐位移为 16.7 mm。在自动机高速运转过程中会对射击精度及各关重件的使用性能产生很大的影响。

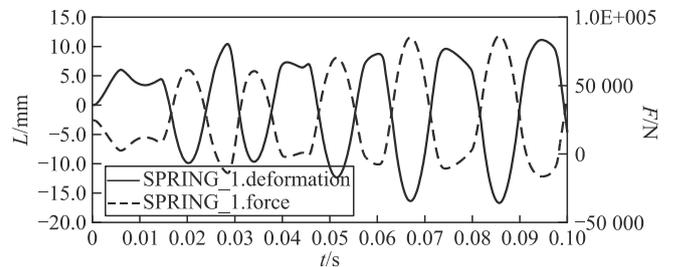


图 5 后坐阻力、后坐位移曲线

2 缓冲簧优化设计

2.1 缓冲簧设计参数灵敏度分析

分析前面的计算结果可知：要提高射击精度和自动机各关重件的使用性能，必须减小后坐阻力和后坐位移，而缓冲簧作为缓冲装置的关键部件，对其设计参数进行优化设计可以实现降低后坐阻力的目标。故选取转管武器的最大阻力为目标函数，在其后坐位移变化不大的基础上，对缓冲簧影响比较大的设计参数进行优化设计，可达到降低后坐阻力的目的。其设计参数主要有弹簧刚度 $dv_stiffness$ ，阻尼 $dv_damping$ 和预压力 $dv_preload$ 。

最优拉丁超立方设计可以使实验点尽量均匀地分布在设计空间中，从而使变量和响应拟合得更

加精确^[7]；因此，笔者采用最优拉丁超立方设计方法对缓冲簧设计参数进行灵敏度分析。本次实验设计一共建立了 200 个设计点，共进行了 201 次计算，通过计算得出 Pareto 图如图 6。该图显示了所有项对每个响应的贡献程度百分比。图 7 为各个设计变量对目标函数的主效应图，灵敏度越高说明变量对目标函数的影响越大。由图得知：预压力对最大后坐阻力的影响最大，且目标函数随其增大而减小；其次是阻尼，而弹簧刚度的影响最小，但目标函数随其增大而增大。

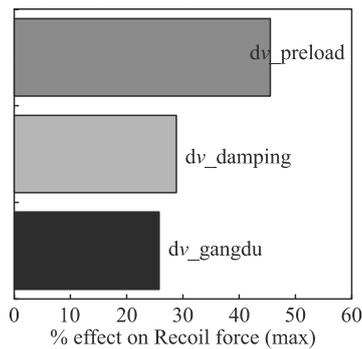


图 6 Pareto 图

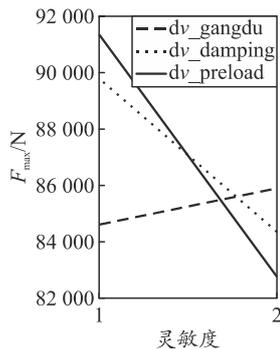


图 7 主效应图

2.2 并行优化设计

缓冲装置设计参数优化中，以后坐位移不大于 19 mm 为约束条件进行并行优化，优化目标是将后坐阻力尽可能降低。则并行优化单级方程式为：

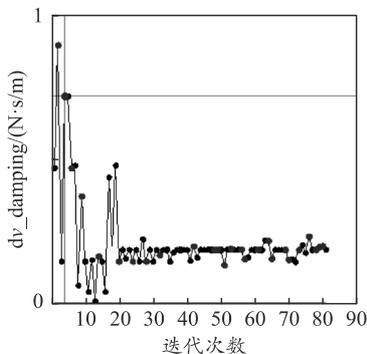


图 8 阻尼迭代过程

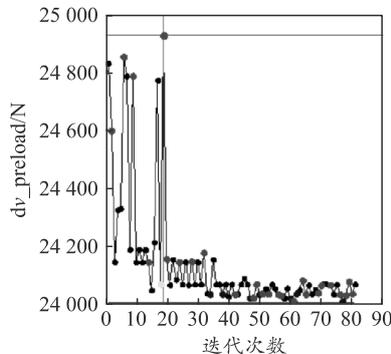


图 9 预压力迭代过程

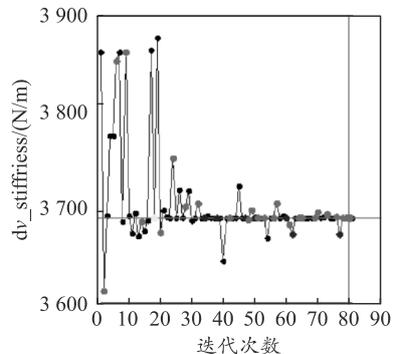


图 10 弹簧刚度迭代过程

表 1 缓冲器优化前后对比

阶段	优化前	优化后	阶段	优化前	优化后
阻尼	0.12	0.15	后坐位移	16.7	13.9
弹簧刚度	3 700	3 689	后坐力	86 212.2	79 931.3
预压力	24 500	24 066			

3 结束语

笔者通过建立转管自动机虚拟样机模型，得出后坐性能参数。然后在灵敏度分析的基础上，通过 isight 软件集成 ADAMS 运行程序，构建缓冲簧优化设计数学模型，运用多目标遗传算法

$$\begin{aligned} \min f = & \{ \min \text{recoilforce}(dv_damping, \\ & dv_stiffness, dv_preload), \\ & \max \text{recoildisplacement}(dv_damping, dv_ \\ & stiffness, dv_preload) \leq 19 \text{ mm} ; \\ & 0.0(\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}) \leq dv_damping \leq 1.0(\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}), \\ & 24\ 000(\text{N}) \leq dv_preload \leq 25\ 000(\text{N}), \\ & 3\ 600(\text{N} / \text{m}) \leq dv_stiffness \leq 3\ 900(\text{N} / \text{m}). \end{aligned} \quad (4)$$

本次并行优化采用的设计方法为多目标遗传算法 NSGA-II，对于多目标优化问题 isight 提供了 3 种遗传算法：NCGA、NSGA-II、AMGA。而 NSGA-II 算法作为 NSGA 算法的改良版，主要按照 Pareto 最优关系将群体中个体两两按目标函数向量进行比较，将所有个体分成多个依次控制的前沿层；而对于不同的 Pareto 层，则利用评价 Pareto 优越性来比较个体的优劣。该算法探索性能良好，在非支配遗传排序中因为接近 Pareto 前沿的个体被选中，故 Pareto 前进能力增强，具有更好的计算收敛能力^[7]。笔者利用 isight 软件对缓冲簧进行优化设计，各个设计变量的迭代过程如图 8—图 10 所示。对比优化前后的结果如表 1 所示，采用优化后缓冲器转管炮的后坐位移为 13.9 mm，比最初方案的 16.7 mm 减小了 16.2%；后坐阻力为 79 931.3 N，比最初方案的 86 212.2 N 降低了 7.3%。

NSGA-II 对缓冲簧设计参量进行并行优化设计。与最初方案相比，优化后降低了后坐阻力，有利于提高武器的射击精度和关重件的使用性能。同时，该设计方法可为转管武器其他部件的结构优化提供一定的参考。

参考文献：

[1] 苏高峰, 薄玉成, 王惠源, 等. 某转管武器弹簧缓冲装置的优化设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2012 (3): 44-47.

- [4] 卞立新, 罗兴柏, 李金明, 等. 导弹武器系统研制费用估算方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 6(6): 136-139.
- [5] 张丽叶, 郑绍钰. 基于 LS-SVM 的装备研制费用模型与分析[J]. 兵工自动化, 2009, 2(2): 16-21.
- [6] 张丽叶, 谢文秀. 基于 PSO_LS-SVM 的装备研制费用预测研究[J]. 海军航空工程学报, 2010(6): 690-694.
- [7] 焦鹏, 王新政. 基于 SVM 的模拟电路故障诊断及参数优化方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(8): 2039-2043.
- [8] CORTES, VAPNIK V. Support Vector Network[J]. Machine Learning, 1995(20): 273-297.
- [9] CHAPELLE O, VAPNIK V. Choosing multiple parameters for support vector machines[R]. New York: AT&T Research Labs, 2001.
- [10] 郑连清, 吴萍, 刘小龙. 基于遗传算法的 LS-SVM 在谐波源建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 1674-3415.
- [11] 熊南, 刘百芬. 基于自适应粒子群优化 LSSVM 的网络流量在线预测[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(9): 21-24.
- [12] SHI B, LI Y X, YU X h, et al. A modified particle swarm optimization and radial basis function neural network hybrid algorithm model and its application[J]. WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2009, 1: 134-138.
- [13] 黄国权, 尤新华. 改进粒子群算法优化最小二乘支持向量机的网络流量混沌预测[J]. 激光杂志, 2015, 36(3): 96-99.
- [14] 王贺, 胡志坚. 基于 IPSO-LSSVM 的风电功率短期预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 107-112.
- [15] 柴远斌. 改进粒子群算法和最小二乘支持向量机的电力负荷预测[J]. 交通电气, 2015, 34(12): 46-49.
- [16] 汪洋, 龚仁喜. 基于改进粒子群优化 LS-SVM 的谐波源特性研究[J]. 计算机仿真, 2015(9): 58-62.
- [17] 程思嘉, 张昌宏. 基于粒子群算法优化最小二乘支持向量机的电路故障诊断方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(3): 98-101.
- [18] 王营, 王蔚. 基于改进粒子群优化 LSSVM 的光伏功率预测[J]. 科技经济导刊, 2016(28): 114-115.

(上接第 51 页)

- [2] 赵少华. 转管机枪缓冲器优化设计[D]. 太原: 中北大学, 2010: 1-3.
- [3] 杜敏. 12.7 mm 链式机枪缓冲装置的优化与设计[D]. 太原: 中北大学, 2014: 1-3.
- [4] 李磊, 张建润, 陈琳. 柴油机运动机构多学科协同优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 33-37.
- [5] 刘豪, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 多学科优化在后背门改进设计中的应用[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(5): 766-770.
- [6] 朱家莹, 潘玉田, 孙明颜. 某型火炮摇架结构拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 17-20.
- [7] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 94-95, 193-195.
- [8] 李海军, 王殿宇, 陈玉良. 基于 EHA 的机载导弹弹簧蓄能弹射可行性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016(4): 5-7.

(上接第 54 页)

参考文献:

- [1] 魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
- [2] 叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏感器工作模式设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1244-1247.
- [3] HYUNJAE L, HYOCHOONG B. Star pattern identification technique by modified grid algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1112-1116.
- [4] 陆敬辉, 王宏力, 孙渊, 等. 三角形内切圆的星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 752-756.
- [5] PRAKASH A, WU A, LIU J Y, et al. Performance based evaluation of star catalog generation methods[C]. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California: AIAA, 2002: 5-8.
- [6] 田宏, 林玲, 郝永杰, 等. 星敏感器导航星表建立[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(3): 43-46.
- [7] 朱长征, 居永忠, 杜晓辉. 导航星库制定方法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1327-1330.
- [8] JEFFERY W B. On-orbit star processing using multi-star star trackers[J]. SPIE, 1994, 2221: 6-14.
- [9] 陈元枝, 郝志航, 王国辉, 等. 适用于星敏感器的导航星星库制定[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 331-334.
- [10] JU G, KIM H, POLLOCK T, et al. DIGSTAR: a low-cost micro star tracker[C]. Space Technology Conference & Exposition, Albuquerque, NM: AIAA, 1999: 99-4603.
- [11] 张广军, 魏新国, 江洁. 一种改进的三角形星图识别方法[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1150-1154.
- [12] 赵学胜, 孙文彬, 陈军. 基于 QTM 的全球离散格网变形分布及收敛分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 438-442.
- [13] 孙文彬, 赵学胜, 高彦丽, 等. 球面似均匀格网的剖分方法及特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 53-56.
- [14] SUN W B, ZHAO X S, GAO Y L, et al. Partition methods and character analysis of near-equal grids on spherical facet[J]. Geography and geo-information science, 2009, 25(1): 53-56.