

文章编号: 1673-3193(2024)02-0170-08

车体刚强度结构优化对连发武器射击精度的影响

白文杰¹, 韩晓明¹, 任广武², 于君然²

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 内蒙古第一机械集团有限公司, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 为减小射击时车体振动对车载连发武器射击精度的影响, 建立了某轮式车辆车体有限元模型, 对火炮典型射击工况下车体的受力进行了分析, 以提高车体结构刚强度为优化目标, 在车体后方横向增加变截面梁来改进相应的薄弱结构。车体改进前后的模态测试与射击试验结果表明, 经过车体结构优化可有效改善整车环境下对射击精度影响较大的身管一阶模态频率, 5连发射击时的射击精度得到有效提高。

关键词: 车体结构优化; 连发武器; 模态测试; 射击精度

中图分类号: TJ81+0.3; TJ811+.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.02.006

引用格式: 白文杰, 韩晓明, 任广武, 等. 车体刚强度结构优化对连发武器射击精度的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 170-177.

BAI Wenjie, HAN Xiaoming, REN Guangwu, et al. Influence of optimization of rigid strength structure of vehicle body on firing accuracy of automatic weapon[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 170-177.

Influence of Optimization of Rigid Strength Structure of Vehicle Body on Firing Accuracy of Automatic Weapon

BAI Wenjie¹, HAN Xiaoming¹, REN Guangwu², YU Junran²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: In order to mitigate the impact of vehicle body vibration on the firing accuracy of vehicle-mounted automatic weapon during firing, a finite element model of a wheeled vehicle body was developed to analyze the stress distribution on the vehicle body under typical firing conditions of artillery. With the optimization objective of improving the stiffness of the vehicle body structure, a variable cross-section beam was added transversely at the rear of the vehicle body to improve the corresponding weak structure. By comparing the modal test and shooting test results before and after implementing improvements to the vehicle body, the body structure optimization can effectively improve the first-order modal frequency of the body tube, which has a greater impact on the shooting accuracy under the whole vehicle environment, thereby effectively improving shooting accuracy during 5-round firings.

Key words: optimization of car body structure; automatic weapon; modal testing; firing accuracy

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 装备预研领域基金资助项目

作者简介: 白文杰(1998—), 男, 硕士生, 主要从事武器系统设计理论与技术的研究。

通信作者: 韩晓明(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事高射速发射理论与技术、结构可靠性的研究。E-mail: hongqi5912@126.com。

0 引言

车载连发武器的射击精度直接影响着轮式车辆的火力和突击力。火炮身管振动是影响射击精度的重要因素之一,因为身管的振动影响着弹丸出炮口时的姿态,所以如何减少身管振动成为提高射击精度的关键^[1]。轮式车辆射击时,冲击载荷通过身管传递给座圈,再经车体、悬架传递给地面^[2],这一过程中车体要承载较多的后坐载荷,此时车体的刚强度不仅影响着瞬时射击时的车体变形及应力分布,也影响着整车下的身管一阶振动频率^[3-4],因此,通过提高车体刚强度来减小武器系统振动,提高射击精度具有重要意义。

针对火炮身管的振动特性,宋永彬^[5]分析了两种不同形状身管结构的振动特性对射击精度的影响;赵宏达等^[6]通过将武器站后坐部分及摇架等效为缓冲弹簧,分析了不同缓冲弹簧刚度下的扰动量特性;华洪良等^[7]为了抑制机枪系统结构振动并提高射击精度,通过仿真分析了机枪系统不同支撑结构对散布精度的影响。针对车体优化设计,Cavaliere 等^[8]提出了一种降阶模型来对车体结构进行优化设计,研究了车身刚度在设计空间中的变化;王亮宽等^[9]通过建立轮式自行高炮车体的有限元模型来对典型工况进行分析计算,找出了底盘车体在火炮不同射击工况下的薄弱环节和变形特征。

综上所述,如何通过改进车体结构的刚强度来提高车载连发武器系统的射击精度仍是亟待解决的问题。本文主要通过实车模态测试与分析,建立车体结构有限元模型,优化车体结构薄弱环节以提高车体结构刚强度,并最终实现轮式车辆车载武器射击精度的提升。

1 身管模态分析

1.1 身管模态测试方法

火炮身管是一个连续弹性体,理论上具有无数个自由度,具有无数阶模态,在进行模态分析时,需要考虑提取多少阶模态才是足够的。对于第 i 阶模态,其模态有效质量^[10]定义为

$$m_{f,i} = \frac{(\varphi^T M \bar{r})_i^2}{\hat{m}_{ii}}, \quad (1)$$

式中: \hat{m}_{ii} 为系统广义质量矩阵; \bar{r} 为影响向量;

φ 为固有振型; M 为第 i 阶模态质量。

所有模态的有效质量之和等于结构的总质量,通过模态有效质量可以判断各阶模态的重要性。火炮的悬臂梁模型设定为长度为 L , 单位长度质量为 ρ 的身管, 计算得到一阶模态的有效质量为 $0.6131\rho L$, 二阶模态的有效质量为 $0.1883\rho L$, 前两阶模态有效质量的占比为 80.14% , 说明这两阶模态对身管的弯曲振动贡献量最大, 因此, 试验采用前三阶模态对身管进行测试分析。

模态试验时, 首先由激励设备产生激励, 引起系统振动, 再将力传感器和加速度传感器测得的信号放大, 输入到分析与监测系统, 通过软件对信号作 FFT 变换, 输出频响函数和相干函数, 利用模态分析软件对所有的频响函数进行整体曲线拟合和模态识别, 并测得结构的试验模态参数^[11]。试验流程如图 1 所示。

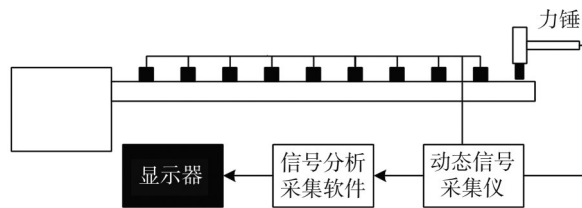


图 1 身管模态试验流程

Fig. 1 Tube modal test procedure

本次试验测点布置如下: 点 1~9 均匀分布在身管上, 其中点 1 在炮口位置, 逐点至身管根部, 点 10 布置在车体内座圈前端位置, 点 11 在支撑点后端。锤击点位于炮口附近, 锤击方向为竖直方向。

1.2 模态测试结果分析

根据加速度传感器测得的响应信号, 使用模态分析测试软件来进行模态识别, 测得身管结构的固有频率及阻尼比。由于高阶的固有频率对身管结构的动力学特性没有太大的影响, 因此, 本实验只比较身管的前三阶模态。表 1 为锤击测试频率分布表, 图 2 为身管上点 1 的锤击测试结果。

对比表 1 和表 2 的测试结果可知, 该武器系统身管各点的一阶模态频率位于 $7.66\sim 8.44$ Hz 的频段内, 其射击频率为 5 Hz (射速 300 发/分), 即身管各点的一阶模态频率与射击频率相差较小, 会影响车载武器的射击精度。

表1 锤击测试频率分布表

Tab. 1 Hammer test frequency distribution table

测点位置	车体改进前身管模态响应/Hz			
	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
	频率	频率	频率	频率
身管点1	8.44	12.97	15	15.78
身管点2	8.28	12.97	15	15.78
身管点3	8.28	12.97	15	15.78
身管点4	8.28	12.97	15	15.78
身管点5	8.44	12.97	15	15.78
身管点6	8.28	12.97	15	15.63
身管点7	8.28	12.97	15.16	15.78
身管点8	8.28	12.97	15.16	15.78
身管点9	7.66	8.28	12.97	15.16
座圈位置	7.66	8.28	12.97	—
支撑位置后端	3.75	7.66	8.44	12.97

表2 模态试验分析得到的前3阶模态参数

Tab. 2 The first 3 order modal parameters obtained by modal test analysis

模态阶数	频率/Hz	阻尼比/%
1	8.25	3.368
2	12.75	3.674
3	15.5	4.309

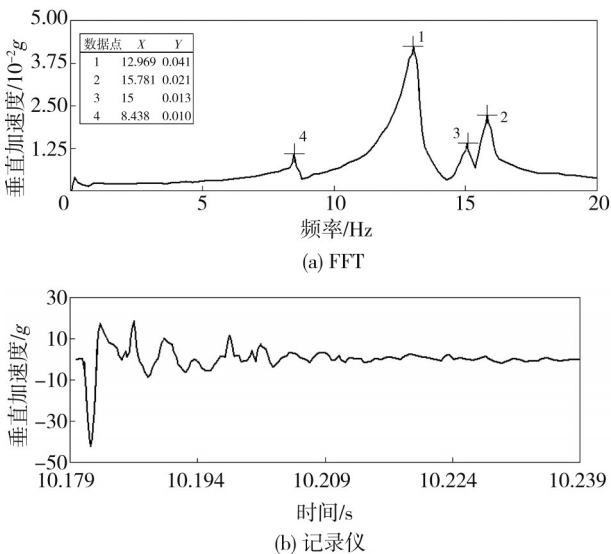


图2 身管1点锤击测试结果

Fig. 2 Tube 1 point hammer test results

2 车体有限元模型

2.1 改进前车体的建模及分析

为分析车体结构刚强度,建立了车体有限元分析模型(如图3所示),应用基于外部有限元逼近法的Simsolid软件对车体进行建模分析^[12]。将车体与内部的梁结构分别赋予不同的材料属性^[13](如表3所示),采用无网格法对其进行网格划分,并将车和梁以绑定接触进行固定。

表3 材料属性

Tab. 3 Material attribute

	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
车体材料	7850	2.06×10 ⁵	0.3
梁材料	7800	2×10 ⁵	0.3

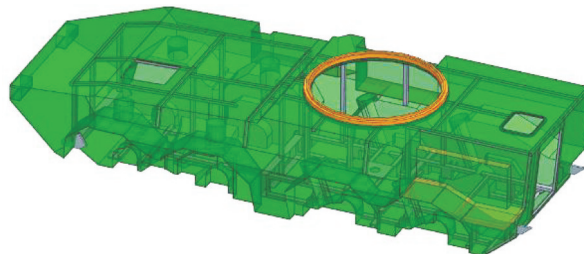


图3 车体模型

Fig. 3 Vehicle body model

设置接触关系与模型边界条件:对车体桥孔进行固定约束;设置全局地球重力,重力加速度为9.8 m/s²;载荷设置为武器后坐力35 000 N,炮塔自重2 674 kg。

以方向角0°、不同高低射角为典型工况,进行仿真分析,计算得到车体的变形及等效应力如图4、图5所示。

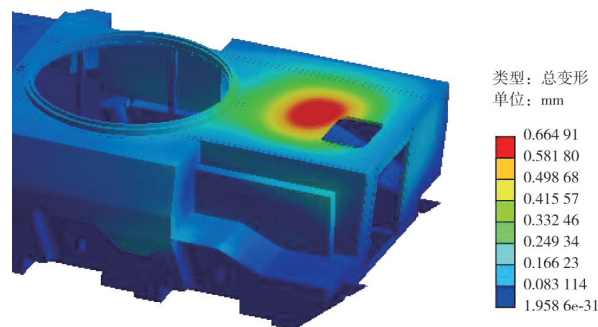


图4 高低角0°车体变形云图

Fig. 4 Cloud image of deformation of car body with elevation angle 0°

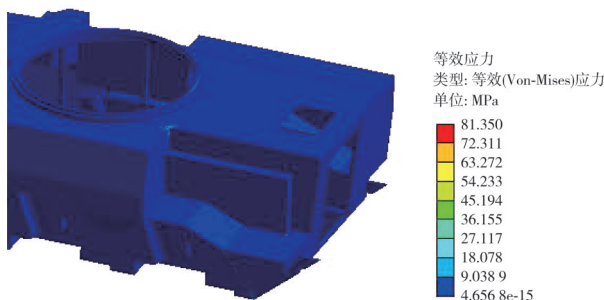


图5 高低角0°车体应力云图

Fig. 5 Cloud image of stress of car body with elevation angle 0°

对比表4的计算结果可知,车体的最大变形量均位于炮塔座圈后部,三种典型工况下高低角0°时的变形及应力最大,最大变形量为0.664 9 mm;最大应力为81.35 MPa,最大应力

点为炮塔座圈后方支撑拐角处。

表 4 车体改进前刚强度计算结果汇总表

Tab. 4 Summary of calculation results of stiffness strength before car body improvement

高低角/(°)	仿真分析位移/mm	仿真分析应力/MPa
0	0.664 9	81.35
30	0.602 4	77.61
-5	0.652 3	80.62

2.2 车体结构优化设计

2.2.1 车体结构改进方案

通过对轮式车辆车体原结构的仿真计算,发现车体座圈后方顶甲板变形量较大,针对发现的问题,结合车体内部整体结构布局要求,对车体进行优化设计,具体方案如表 5 所示。

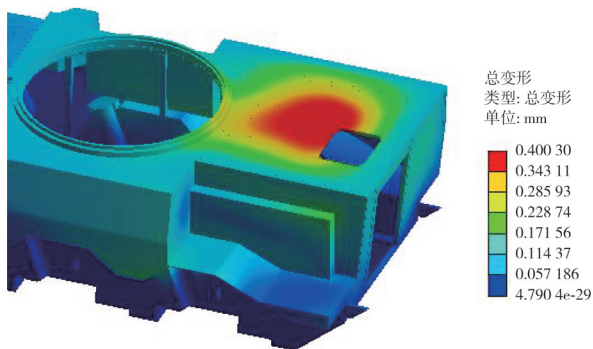
表 5 车体结构改进方案

Tab. 5 Car body structure improvement scheme

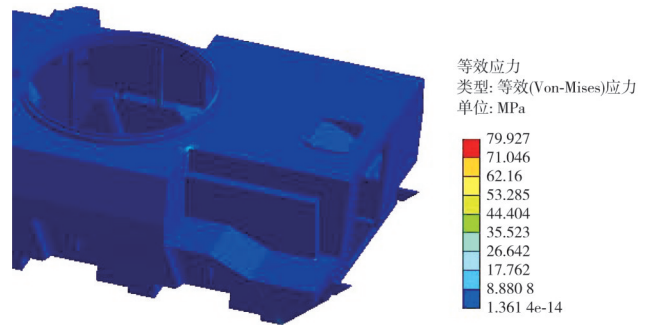
序号	方案	改进结构图
1	增加立柱方案,在座圈正后方,从架体内增加立柱,从底甲板连接至顶板。通过立柱直接将受力传递到底甲板。	
2	车体内增加薄横纵梁。通过横纵梁将受力传递到车体两侧。	
3	车体内横向增加变截面梁。通过变截面梁可减小横梁变形,并将受力传递到车体两侧。	

2.2.2 车体结构改进刚强度分析

依据原设置条件,对车体改进后的结构进行了仿真计算。方案 1 的计算结果如图 6 所示。



(a) 变形云图



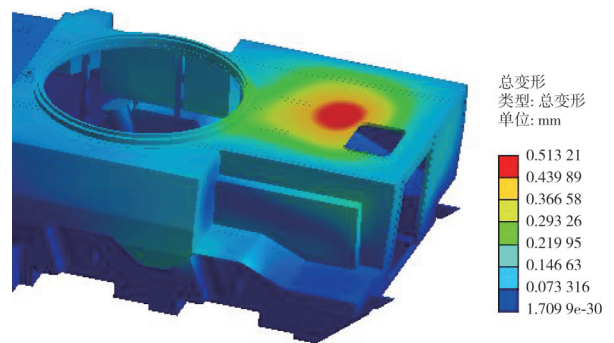
(b) 应力云图

图 6 方案 1 车体的变形及应力云图

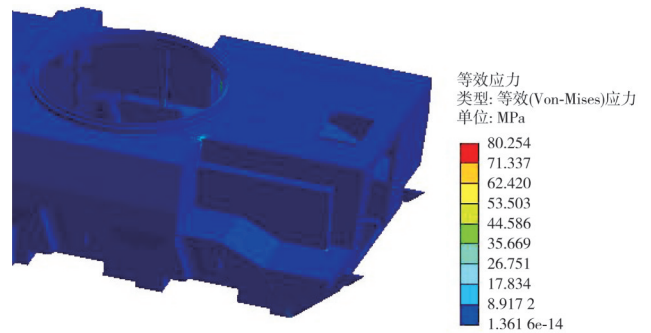
Fig. 6 Cloud image of deformation and stress of vehicle body in scheme 1

由图 6 可以看出,在典型射击工况下,方案 1 车体的最大变形量位于炮塔座圈后部,最大变形量为 0.400 3 mm,相较车体原结构有明显改善;最大应力为 79.93 MPa,最大应力点为炮塔座圈后方支撑拐角处。

方案 2 的计算结果如图 7 所示。



(a) 变形云图



(b) 应力云图

图 7 方案 2 车体的变形及应力云图

Fig. 7 Cloud image of deformation and stress of vehicle body in scheme 2

由图 7 可以看出,典型射击工况下,加装薄横纵梁后,车体后方变形区域开始减小,这是由于改善后的炮塔后方顶甲板支撑梁布置密度增大所引起

的。方案2的车体炮塔座圈后部的最大变形量为0.5132 mm,改善成效较小;最大应力为80.25 MPa,最大应力点为炮塔座圈后方支撑拐角处。

方案3的计算结果如图8所示。由图8可以看出,在射击工况下,加装变截面梁后,方案3的变形量开始向车体右侧偏移,这是由于炮塔后方车体不对称而变截面梁对称布置所引起的,车体最大变形量位于炮塔座圈后部,最大变形量为0.4094 mm,较原始车体有明显改善;最大应力为77.92 MPa,最大应力点为炮塔座圈后方支撑拐角处。

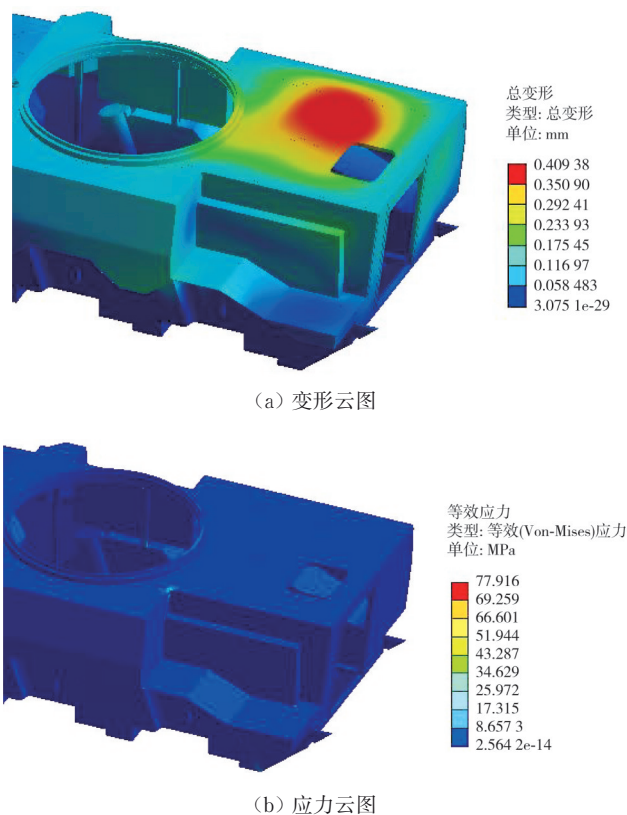


图8 方案3车体的变形及应力云图

Fig. 8 Cloud image of deformation and stress of vehicle body in scheme 3

表6 车体改进前后刚强度计算结果对比

Tab. 6 Comparison of calculation results of stiffness strength before and after car body improvement

方案	仿真分析 位移/mm	仿真分析 应力/MPa	变形量 比较值/%
原始设计	0.6649	81.35	
增加立柱	0.4003	79.93	39.79
车内增加横纵梁	0.5132	80.25	22.82
车内增加变截面横梁	0.4094	77.92	38.43

由表6车体改进前后刚强度计算结果的对比分析可知,其局部最大应力均小于车体零部件许

用应力,满足使用条件。同时,方案3炮塔后增加变截面梁方案的刚度基本等同于方案1增加立柱的方案,由于增加立柱方案会影响整车人机环境,因此,车体结构改进选用方案3方式。

在车体结构方案改进后,再次对实车进行了整车系统下身管的各阶模态频率测试^[14]。

3 系统模态与射击试验

3.1 车体改进后的系统模态与测试分析

车体结构改进前后锤击模态测试的三阶测试结果如表7所示。由表7可以看出,在车体后方横向增加变截面梁来改进相应薄弱结构后,系统身管的一阶模态频率提升至9.25 Hz,整车系统的模态得到明显提高。

表7 改进前后前三阶模态试验结果对比

Tab. 7 Comparison of the first 3 modal test results before and after the improvement

模态阶数	改进前		改进后	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	8.25	3.368	9.25	2.772
2	12.75	3.674	13.0	3.660
3	15.5	4.309	15.75	3.347

3.2 五连发射击时炮口的俯仰角

对车体结构改进前后的某轮式战车进行五连发射击试验,对比两辆车在同样射击工况下的炮口俯仰角来验证车体结构改进方案的有效性。

取身管的炮口处、距离炮口0.25 m处和距离炮口1.52 m处(身管外露部分的根部)的位置,依次记为点P1、点P2和点P7,采用高速摄影法识别上述3点的垂向位移,则炮口的局部俯仰角计算方法为

$$\theta_{\text{local}} = \frac{z_{P1} - z_{P2}}{L_{P1-P2}}, \quad (2)$$

式中: θ_{local} 为炮口局部俯仰角; z_{P1} 、 z_{P2} 为身管上点P1和点P2垂向位移; L_{P1-P2} 为点P1和点P2之间的距离。

炮口的全局俯仰角名义值计算方法为

$$\theta_{\text{global}} = \frac{z_{P1} - z_{P7}}{L_{P1-P7}}, \quad (3)$$

式中: θ_{global} 为炮口全局俯仰角; z_{P7} 为身管外露部分根部点P7的垂向位移; L_{P1-P7} 为点P1和点P7之间的距离。

由图9可以看出,改进前轮式战车在五连发射击过程中身管各点的振动位移在-40~60 mm之间,改进后其在五连发射击过程中身管各点振

动位移在 -25~25 mm 之间,身管各点的振动位移均大幅减小。改进前后步兵战车在五连发射击

过程中,身管上各点的垂向振幅有明显差异,与身管结构模态测试结果基本相同。

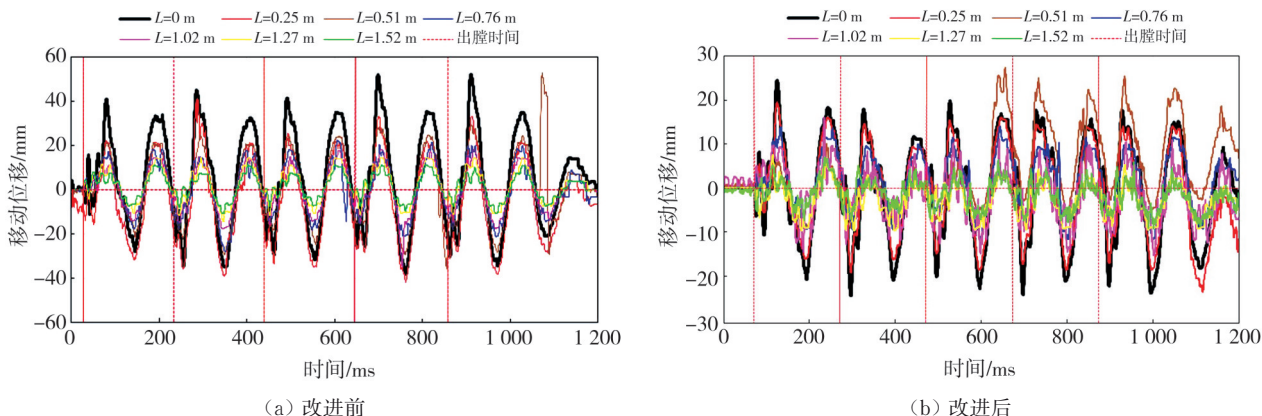


图 9 改进前后火炮身管上各点的振动位移

Fig. 9 Vibration displacement at each point on the gun barrel before and after improvements

图 10 为五连发射击过程中俯仰角度变化情况,其中五发弹的出膛时间分别为 80, 280, 480, 680 和 880 ms。

规律,且振幅得到明显改善。

由图 11 可以看出,在弹丸出膛口时刻,改进后的炮口局部俯仰角集中在 -10 mrad 附近,而改进前的炮口局部俯仰角集中在 40 mrad;改进后的炮口全局俯仰角集中在 2 mrad,改进前的炮口全局俯仰角无明显变化规律。因此,改进后的测试结果要明显优于改进前的测试结果,优化效果显著,改进车体结构后,系统模态的提高使连发时炮口的初始扰动得到了有效减小。

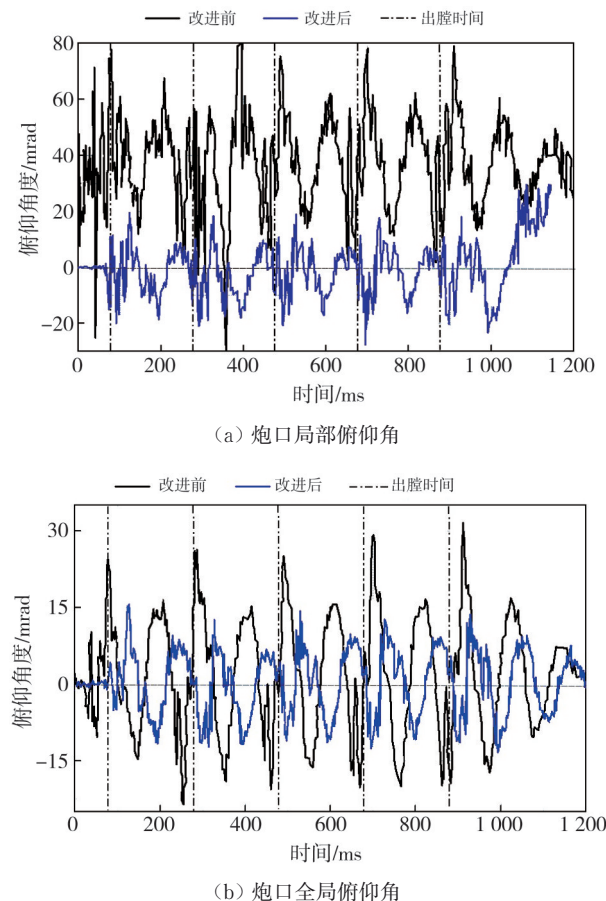


图 10 改进前后炮口俯仰角

Fig. 10 The muzzle pitch angle before and after improvements

由图 10 可以看出,俯仰角度随着连发过程呈现周期性振荡,优化后的俯仰角度变化仍符合该

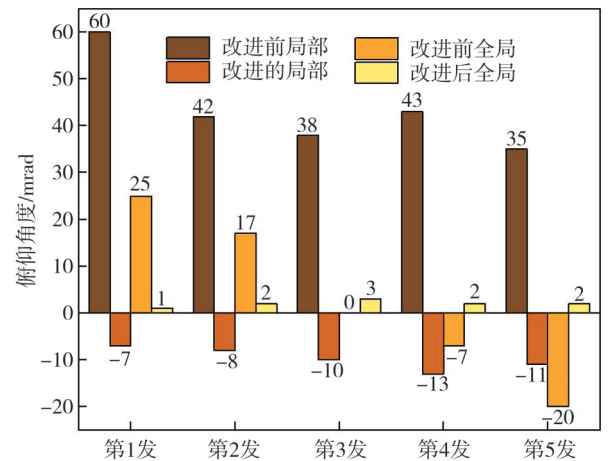


图 11 出膛时刻的炮口俯仰角

Fig. 11 Muzzle pitch angles at the muzzle moment

4 射击精度对比分析

4.1 射击准确度分析

图 12 和图 13 分别为车体结构改进前后 200 m 立靶的连发射击着靶位置示意图,瞄准点均为坐标点(0, 0),并且在同一坐标范围内显示两

组数据。

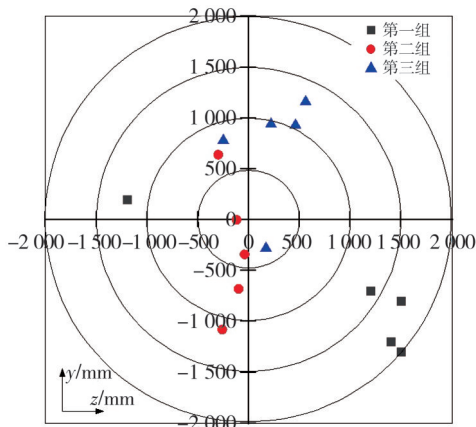


图12 车体结构改进前的着靶位置

Fig. 12 The target position before the improvement of the body structure

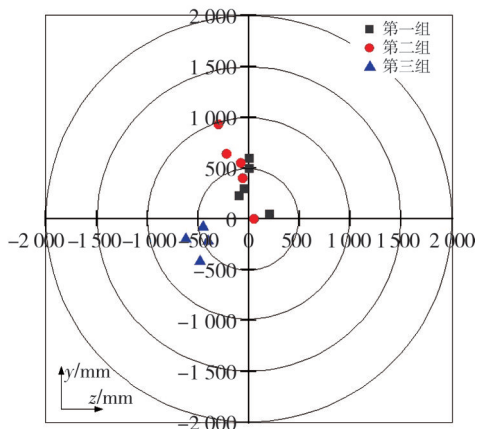


图13 车体结构优化后的着靶位置

Fig. 13 The target position after the improvement of the body structure

射击准确度是武器散布中心偏差,指散布中心对瞄准点的偏离程度。由图12可以看出,车体结构改进前的3组试验弹着点分别在1 000~2 000 mm、100~1 100 mm、250~1 300 mm范围内随机分布;由图13可以看出,车体结构优化后的3组试验弹着点分别在200~600 mm、0~1 000 mm、250~750 mm,主要集中在偏差800 mm内。对比可以看出,连发过程中车体结构优化后的散布中心偏差均比改进前的小,各组偏差范围也较小且更为稳定。经过车体结构优化改进,散布中心偏差得到有效减小,射击准确度性能得到进一步提升。

4.2 立靶密集度分析

对于小样本量,立靶射弹散布坐标的概率误差^[15]为

$$E_y = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

$$E_z = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

高低散布密集度为

$$\frac{E_y}{X} \times \frac{360}{2\pi}, \quad (6)$$

方向散布密集度为

$$\frac{E_z}{X} \times \frac{360}{2\pi}. \quad (7)$$

表8为车体结构改进前与改进后的立靶密集度。改进前连发射击过程中立靶密集度的平均值为 $0.1026^\circ \times 0.1074^\circ$,而改进后连发射击过程中立靶密集度的平均值为 $0.0228^\circ \times 0.0438^\circ$,经过车体结构优化后立靶密集度明显更加集中,立靶密集度性能得到进一步提升。

表8 改进前后的立靶密集度

Tab. 8 The vertical target density before and after improvements

组别	改进前结果 (方向×高低)/(°·°)	改进后结果 (方向×高低)/(°·°)
第一组	0.2256×0.0864	0.0222×0.0420
第二组	0.0216×0.1266	0.0270×0.0660
第三组	0.0606×0.1098	0.0192×0.0240
平均值	0.1026×0.1074	0.0228×0.0438

由此可见,优化改进武器系统车体结构的刚强度,可提高整车系统模态,减小武器射击过程中车体振动对炮口初始扰动的影响,进而提高连发时的射击准确度和立靶密集度。

5 结论

本文通过对某型轮式战车进行车体结构改进,得到最优结构,从而提升了整体系统模态与射击精度。

1) 通过对车体改进前身管的模态分析,发现其一阶模态频率与射击频率差距过小,这是影响火炮连续射击精度的主要原因;

2) 通过建立车体Simsolid有限元模型,对改进前后的车体刚强度分析后得出,在座圈后端增加变截面横梁能够在保证人机环境的前提下,减小车体变形,提高车体刚度;

3) 车体结构改进前后的五连发射击实验结果表明,改变轮式车辆车体结构的刚强度可以有效提升系统的模态及武器系统的射击精度。

参考文献:

- [1] 杨国来, 葛建立, 孙全兆, 等. 火炮振动与控制的发展现状及应用前景[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1043-1051.
YANG Guolai, GE Jianli, SUN Quanzhao, et al. Development and application prospects of gun vibration and control [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1043-1051. (in Chinese)
- [2] 芮筱亭, 刘怡昕, 于海龙. 坦克自行火炮发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] 郭海峰. 某自动机射击过程中支撑刚度的影响特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [4] 林辉, 陈吉清, 谢然. 汽车车身结构刚度与模态分析及结构改进方法研究[J]. 现代制造工程, 2011(6): 58-63.
LIN Hui, CHEN Jiqing, XIE Ran. Auto body structural stiffness and modal analysis method and structure improvement research [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(6): 58-63. (in Chinese)
- [5] 宋永彬. 模态分析在身管设计中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2023(2): 41-42.
SONG Yongbin. Application of modal analysis in tube design [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2023(2): 41-42. (in Chinese)
- [6] 赵宏达, 欧卫林. 某型武器站动力学建模及后坐力对射击精度影响[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(11): 116-125.
ZHAO Hongda, OU Weilin. Dynamic modeling of certain weapon station and the influence of recoil force on firing accuracy [J]. Fire Control and Command Control, 2022, 47(11): 116-125. (in Chinese)
- [7] 华洪良, 廖振强, 郭魂, 等. 机枪系统支撑发射动力学特性及散布精度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(1): 42-47.
HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, GUO Hun, et al. Study on launch dynamics and dispersion accuracy of a machine gun system with supporting structures [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(1): 42-47. (in Chinese)
- [8] CAVALIERE F, ZLOTNIK S, SEVILLA R, et al. Nonintrusive parametric NVH study of a vehicle body structure [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023, 51(11): 6557-6582.
- [9] 王亮宽, 周加永, 薛庆阳, 等. 轮式自行高炮车体刚强度分析与结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(3): 44-48.
WANG Liangkuan, ZHOU Jiayong, XUE Qingyang, et al. Stiffness analysis and structure optimization of a wheeled self-propelled anti-aircraft artillery vehicle [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(3): 44-48. (in Chinese)
- [10] 谢欢, 王红岩, 郝丙飞, 等. 坦克火炮身管模态分析及振动特性研究[J]. 车辆与动力技术, 2018(4): 22-27.
XIE Huan, WANG Hongyan, HAO Bingfei, et al. Study on modal analysis and vibration characteristics of tank gun barrel [J]. Vehicle & Power Technology, 2018(4): 22-27. (in Chinese)
- [11] 赫雷, 王进, 管红根, 等. 某身管的实验模态分析[J]. 物理实验, 2010, 30(10): 36-39.
HE Lei, WANG Jin, GUAN Honggen, et al. Experimental modal analysis of a barrel [J]. Physics Experimentation, 2010, 30(10): 36-39. (in Chinese)
- [12] 聂新宇, 汪小芳, 刘勇, 等. 基于无网格法的风力发电机主轴强度仿真研究[J]. 机电工程, 2023, 40(11): 1760-1767.
NIE Xinyu, WANG Xiaofang, LIU Yong, et al. Simulation of wind turbine main shaft strength based on meshless method [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(11): 1760-1767. (in Chinese)
- [13] 张岱南, 晁刚, 贾国栋, 等. 某型装甲保障车车体结构强度有限元仿真研究[J]. 车辆与动力技术, 2023(1): 36-39.
ZHANG Dainan, CHAO Gang, JIA Guodong, et al. Finite element simulation study on the structural strength of an armored support vehicle body [J]. Vehicle & Power Technology, 2023(1): 36-39. (in Chinese)
- [14] 谭祥军, 钱小猛. 模态试验实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [15] 李魁武, 王宝元. 火炮射击密集度研究方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.