

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.004

## 枪托结构对射击精度影响分析

张泽栋<sup>1</sup>, 薛百文<sup>1</sup>, 杨臻<sup>1</sup>, 刘万川<sup>1</sup>, 咎博勋<sup>2</sup>, 薛钧<sup>3</sup>(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国人民解放军第5702工厂, 陕西 咸阳 7122013;  
3. 中国兵器工业第二〇八研究所, 北京 102202)

**摘要:** 为研究立姿无依托抵肩射击最优的枪托结构对射击精度的影响, 提出一种射击精度的仿真与实验对比分析方案。在人枪系统动力学模型基础上, 以枪托抵肩面倾斜角度、枪托刚度为设计优化变量, 通过协同仿真获取膛口跳角、内弹道随机散布对比曲线; 将立靶散布  $R_{50}$  的仿真计算结果与试验结果作对比, 结果基本一致, 误差小于15%。结果表明: 采取 6°软枪托时, 射弹散布有明显的优化, 该方案对优化人枪系统中枪械结构和人机工效设计具有指导作用。

**关键词:** 射击精度; 人枪系统; 动力学; 随机散布

**中图分类号:** TJ01; TP391.9 **文献标志码:** A

## Influence Analysis of Gun Stock Structure on Firing Accuracy

Zhang Zedong<sup>1</sup>, Xue Baiwen<sup>1</sup>, Yang Zhen<sup>1</sup>, Liu Wanchuan<sup>1</sup>, Zan Boxun<sup>2</sup>, Xue Jun<sup>3</sup>(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. No. 5702 Factory of PLA, Xianyang 7122013, China;  
3. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industry, Beijing 102202, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the optimal butt structure on the firing accuracy of shoulder firing without support in standing position, a comparative analysis scheme of simulation and experiment on the firing accuracy was proposed. Based on the dynamic model of the man-gun system, the muzzle jump angle and the random dispersion curve of the interior ballistics were obtained by collaborative simulation with the tilt angle of the butt shoulder surface and the stiffness of the butt as the design optimization variables. The simulation results of vertical target dispersion  $R_{50}$  are compared with the experimental results, and the results are basically consistent, the error is less than 15%. The results show that when the 6° soft butt is adopted, the projectile dispersion is obviously optimized, and the scheme has a guiding role in optimizing the gun structure and ergonomic design in the man-gun system.

**Keywords:** firing accuracy; man-gun system; dynamics; random dispersion

### 0 引言

射击精度直接影响自动武器的打击能力, 是装备试验鉴定过程中重点检验的指标之一。对于立姿无依托抵肩射击的人枪系统<sup>[1-2]</sup>来说, 除了射手在射击时生物机体的动态响应特性之外, 枪械的结构参数也起到关键作用。生物机体的动态响应如射击时肌肉的疲劳程度、神经反应系统等会改变射击姿态, 从而对枪械与人体的相互作用和射击精度产生影响<sup>[3-4]</sup>。在人枪系统中, 枪托作为连接枪械与人体的重要枢纽, 对其结构参数的研究将为优化枪械工效设计和提高射击精度提供理论参考。

对于人枪相互作用的研究, 主要分成2种方法: 通过试验方法分析枪械设计参数对射击精度的影响和建立人枪相互作用模型仿真分析<sup>[5]</sup>。包建东等<sup>[6]</sup>建立了人枪运动变化规律测试系统, 通过试验分析

了人枪系统运动对射击精度的影响规律; 宋杰等<sup>[7]</sup>通过建立人枪系统动力学仿真模型, 分析了在人枪相互作用中人体重要关节冲击载荷变化规律和影响因素; 王彦平等<sup>[8]</sup>建立了简化的多刚体力学模型, 运用模态分析方法分析了枪的振动特性, 通过枪口跳动量估算射击精度。

笔者主要分析枪托结构参数对射击精度的影响因素, 对人体模型进行简化, 削弱人体动态响应的因素。通过对枪托抵肩面倾斜角度、枪托刚度等影响因素仿真分析和综合试验, 获得步枪立姿无依托瞄准一射击过程中的人枪相互作用规律。并且, 通过膛口跳角曲线和弹着点散布, 分析了枪托不同结构参数对射击精度影响的内在机理, 提出了最优的枪托结构为6°软枪托, 对优化人枪系统中枪械结构和人机工效设计具有重要意义。

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2022-10-20

基金项目: 装备预先研究项目(0901)

作者简介: 张泽栋(1998—), 男, 河北人, 硕士, 从事武器系统结构设计与仿真技术研究。E-mail: 572173105@qq.com。

## 1 人枪系统实体模型的建立

### 1.1 人枪系统基本假设

为全面表达立姿射击人枪系统的特性，根据对射击试验现象的观察和测试分析，对人枪系统简化模型作如下假设：

1) 人体模型基本姿势：枪托抵住肩部，左手握住下护木，右手握住握把；

2) 根据生物学的研究，人体肌肉对外界的主动响应时间要在 300 ms 之后，因此着重分析 300 ms 内人枪系统的响应情况，将人体作为被动生物考虑，忽略这段时间内人体的主动响应<sup>[9]</sup>；

3) 由于人体的刚性远小于枪械的刚性，故将人体在基本姿势时的上躯干看成一个柔性体，其下躯干、下肢和上肢看作刚性体；

4) 在人体的肩部与枪连接的部位创建一个质量很小的抵肩刚体，使枪械在抵肩部位的连接运动符合实际情况；

5) 人体的肩部、腰部及上肢腕关节部位用不同刚度的弹簧和不同阻尼系数的阻尼器来描述；

6) 在射击过程中，人体臀部及下肢视为相对于地面基本不动。

### 1.2 人枪系统虚拟样机的建立

基于立姿抵肩无依托人枪射击的基本假设原则，参照 GB/T10000—1988 中国成年人人体尺寸标准数据<sup>[10]</sup>和某型自动步枪结构参数，利用 UG 建立了人枪系统模型。通过模型确立人枪系统各部分的装配关系，然后导入 ADAMS 中，通过添加约束副、弹簧阻尼系统、火药气体作用力确定各部分之间的约束关系，得到该人枪系统模型的虚拟样机如图 1 所示。



图 1 人枪系统模型的虚拟样机

## 2 对射击精度影响的仿真分析

### 2.1 干扰因素的设置

笔者重点分析枪托结构因素对射击精度的影

响，需要消除仿真中其他干扰因素。为消除材料之间参数设置对仿真结果的影响，可以假设射手使用武器时身着作训服，那么枪托与人体的接触参数可以设为橡胶与尼龙的接触参数，接触参数如图 2 所示。针对射击精度的好坏不易直观观察这一因素，在 ADAMS 中建立了“膛口圆心—抵肩中心—膛口圆心(固定在地面)”的膛口跳角测量，通过随机散布曲线对比反映射击精度优劣。

Force Display	Red
Normal Force	Impact
Stiffness	2855.0
Force Exponent	1.1
Damping	0.57
Penetration Depth	0.1
Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.7
Dynamic Coefficient	0.55
Stiction Transition Vel.	0.1
Friction Transition Vel.	10.0

图 2 尼龙与橡胶的接触参数

### 2.2 枪托倾斜角度分析

针对某步枪枪托进行了以下多倾斜角度分析，如图 3 所示建立了枪托抵肩斜面角度  $0^{\circ} \sim 14^{\circ}$  的模型进行仿真计算，得到不同斜度下的前 3 发膛口跳角值如图 4 所示。

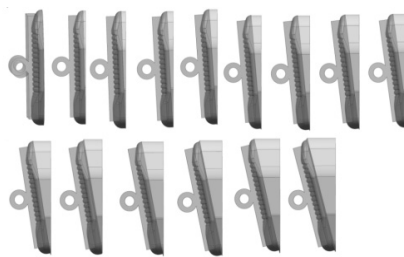


图 3 各个倾斜角度的枪托

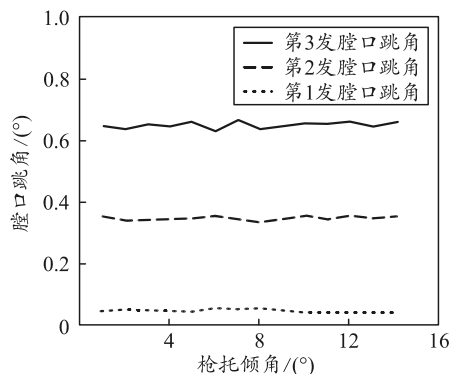


图 4 不同斜度下的膛口跳角值

由上图可看出，在不同倾斜度下，膛口跳角曲

线变化呈现一致性高、规律性强等特点，说明散布精度的变化来源于细小的结构差异。在枪托斜度为 6° 时，第 3 发弹的跳角值为最小，相邻跳角差值也较小；枪托斜度为 8° 时，第 2 发弹的跳角值为最小，第 2 发与第 1 发弹的跳角差值为最小；相邻偏差值较小说明相邻两发弹的散布更为集中，精度更好。因此，选择 6°、8° 等 2 种枪托斜度进行后续的定量分析。

在 Matlab 中对内弹道参数进行改动，主要改动 5.8 mm 子弹弹丸质量与装药量，计算得到不同的后坐力曲线，将其导入 ADAMS 中两两组合进行仿真，并测量膛口的跳动角度，3 种随机散布对应的参数情况如表 1 所示。在装药量与弹丸质量有微小变化时，6°、8° 枪托的不同随机散布下的跳角曲线如图 5—6 所示。

表 1 随机散布对应的参数情况

随机散布	弹丸质量	装药量
1	4.6	1.8
2	4.7	1.8
3	4.7	1.7

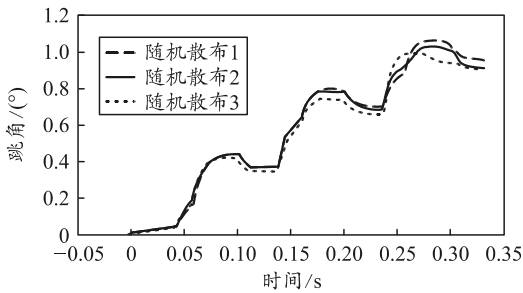


图 5 6°枪托不同随机散布下的跳角曲线

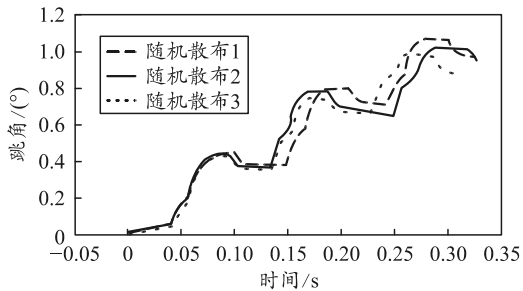


图 6 8°枪托不同随机散布下的跳角曲线

由上图可知：6°枪托在不同随机散布下，跳角随时间的波动较为稳定；8°枪托在不同随机散布下，跳角随时间的变化较为明显。这说明 6°枪托在不同弹道情况下能够保持较好的一致性。并且，随着弹丸质量增加、装药量减小，跳角随时间的波动趋势平缓，2 种枪托的精度逐渐增加。

### 2.3 枪托刚柔耦合分析

将 UG 中斜度分别为 6°、8° 的 2 种枪托模型导

入 ANSYS 中，建立有限元模型，之后导出有限元模型到 ADAMS 中建立柔性体并进行仿真。

通过查阅相关资料和数值计算取得枪托采用的橡胶的密度为  $\rho=1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ，杨氏模量为  $E_s=6.1\times 10^6\ \text{Pa}$ ，泊松比为  $\mu=0.49$ 。将刚性体与柔性体导入 ADAMS 中，运行仿真如图 7—8 所示，仿真结果如图 9—10 所示。

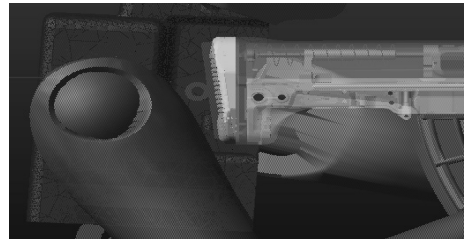


图 7 柔性体枪托

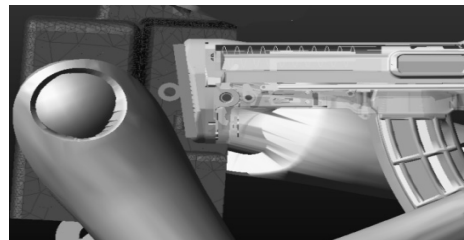


图 8 刚体枪托

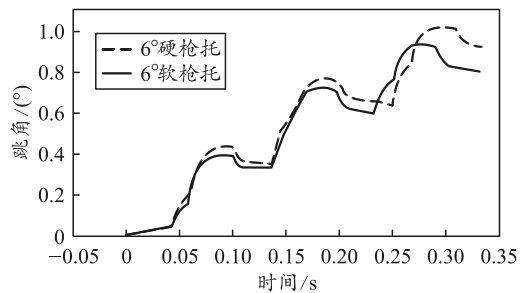


图 9 6°软硬枪托对比

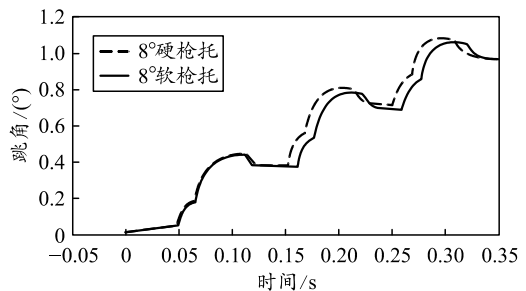


图 10 8°软硬枪托对比

如图 9—10 分别对比了相同斜度下软、硬枪托的跳角随时间的波动情况。可以发现：不同角度下，软枪托的膛口跳角基本都小于硬枪托的膛口跳角。表明软枪托有助于提高射击精度。

### 2.4 两因素结合分析

通过以上分析可知，在倾斜角度影响下，6°枪

托的一致性显著优于 8°枪托的一致性；刚柔特性对照下，柔性较好。结合上述分析结果进行组合仿真，对随机散布纵横方向偏离值进行测量，并将 2 个方向的偏离值转换为靶纸上的坐标如图 11—12 所示。

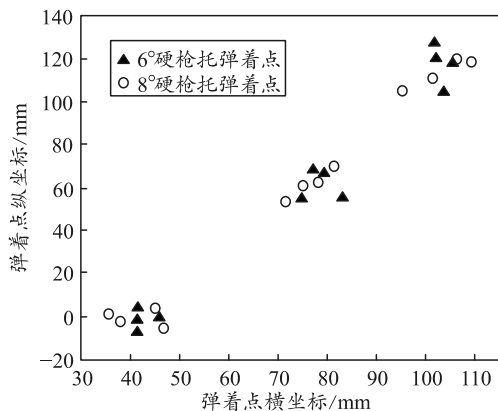


图 11 6°、8°硬枪托弹着点散布

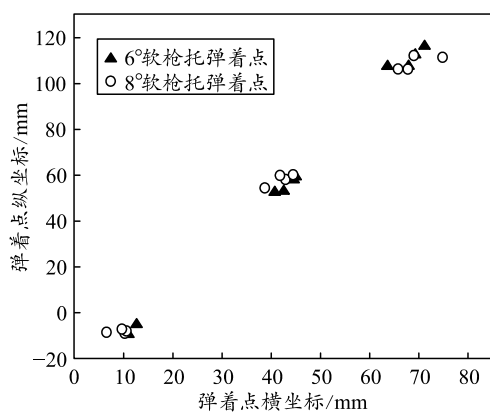


图 12 6°、8°软枪托弹着点散布

如上图所示，通过对弹着点散布数据计算，得到射击散布圆  $R_{50}$  (半数弹着点圆半径) 的值：8°硬枪托的  $R_{50}$  为 6.3 cm，6°硬枪托的  $R_{50}$  为 5.9 cm；8°软枪托的  $R_{50}$  为 5.8 cm，6°软枪托的  $R_{50}$  为 5.7 cm。4 种结果比较来看，6°软枪托仿真结构更优，表现出更好的散布效果。

### 3 试验验证

为检验仿真结果，分析最优人机工效下的枪托结构，对枪托抵肩面倾斜角度、刚度两因素综合加工样机如图 13 所示，并进行试验验证。



图 13 人机工效样机测试试验

### 3.1 试验方案

笔者根据 GJB4104.3—2000 轻武器测试规程<sup>[11]</sup> 中的第 14 部分：立靶密集度测试，进行实验测试分析。验证的主要方式是通过对立姿抵肩无依托射击试验获得的射击精度与仿真计算得到的射击密集度散布  $R_{50}$  进行对照，若改进后的枪托结构的射击散布有明显优化，且仿真与实验误差在 15% 以内，说明建立的人枪系统虚拟样机符合设计目标；在人枪系统中，枪托结构参数的差异对射击精度有较大的影响。

试验条件为：射手惯用手为右手，使用某步枪进行立姿无依托抵肩射击，室内靶道，10 m 处有上半身立靶。正式试验开始前，安排射手进行 20 发射击，使射手熟悉射击过程。正式试验开始后，连续射击 3 组，每组 20 发。在枪托抵肩面倾斜角度影响试验中，分别采用 6°硬枪托和 8°硬枪托对照；在枪托刚柔影响试验中，分别采用 6°硬枪托和 6°软枪托对照。靶场射击试验如图 14 所示。



图 14 人枪系统射击试验

### 3.2 试验结果对比

8°硬枪托测得 3 组射击密集界  $R_{50}$  平均值为 6.6 cm，6°硬枪托测得 3 组射击密集界  $R_{50}$  平均值为 6.1 cm，6°软枪托平均值为 5.5 cm。试验测试的指标主要是概率圆误差和概率半径，对比样机实测数据与仿真精度分析， $R_{50}$  结果如表 2 所示。

表 2 人机工效样机实测及仿真精度对比

影响因素	仿真结果/cm	实验结果/cm	相对误差/%
原枪托	6.6	6.9	4.5
8°硬枪托	6.3	6.6	4.7
6°硬枪托	5.9	6.1	3.3
6°软枪托	5.7	5.5	3.5

## 4 结论

笔者以枪托不同倾斜角度和刚柔特性为研究对象，建立刚柔耦合人枪系统模型并进行动力学仿真分析，通过仿真计算和试验验证得到以下结论：

(下转第 46 页)