

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.012

# 人枪系统参数对射击精度的影响

咎博勋<sup>1</sup>, 薛百文<sup>1</sup>, 杨臻<sup>1</sup>, 阮伟靖<sup>2</sup>, 薛钧<sup>2</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国兵器工业第 208 研究所, 北京 102202)

**摘要:** 为使人枪系统具有最佳的匹配效果和客观评价枪械的射击性能, 对影响人枪系统射击精度的参数进行研讨。根据单发卧姿有依托抵肩射击的特点, 以多刚体系统动力学为理论基础, 应用 UG 软件, 建立模拟人体枪架发射动力学仿真模型, 分析自动机在人体枪架发射过程中运动特性对枪口位移的影响, 得出射击精度实验结果, 对影响射击精度的导气孔直径和复进簧刚度进行分析。仿真分析结果验证了该模型的可行性和有效性。

**关键词:** 自动武器; 人枪系统; 射击精度; 发射动力学; 自动机

**中图分类号:** TJ203 **文献标志码:** A

## Effect of Human Gun System Parameters on Firing Accuracy

Zan Boxun<sup>1</sup>, Xue Baiwen<sup>1</sup>, Yang Zhen<sup>1</sup>, Ruan Weijing<sup>2</sup>, Xue Jun<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

**Abstract:** In order to make the human-gun system has the best matching effect and to objectively evaluate the firing performance of the gun, the parameters that affect the firing precision of the human-gun system are discussed. According to single prone position has the characteristic of relying on over shoulder shooting, based on the theory of multiple rigid body system dynamics, the application of UG software, the simulated human body gun launch dynamics simulation model is established, analysis the effect of the movement characteristics of the automaton on the muzzle displacement during the firing of the human body gun frame, get the results of firing accuracy experiment, gas guide hole diameter and the complex spring stiffness which influence on firing precision are analyzed. Simulation results verify the feasibility and effectiveness of the model.

**Keywords:** automatic weapon; human-gun system; firing accuracy; emission dynamics; automata

## 0 引言

自动武器是轻武器装备体系中重要的骨干武器之一, 提高其射击精度一直是世界各国的研究重点, 无论是对其射击精度、射击稳定性以及枪械动力匹配的研究, 都离不开人-枪系统的相互作用。使人-枪系统具有最佳的匹配效果和客观评价枪械的射击性能, 是自动武器研制过程中的重要突破点之一。

对于人枪相互作用的研究: 美国的 T.D.Hatching 等<sup>[1]</sup>以 M79 和 M230 榴弹发射器等单发武器为研究对象, 研究分析了人体质量、运动和射手作用力对武器的影响; 包建东、王昌明等<sup>[2-4]</sup>对人-枪模型的建立及仿真做了相应分析, 仿真结果与实验结果较吻合; 孙睿敏<sup>[5]</sup>围绕提高手枪射击精度从动力学和实验 2 个方面展开了研究; 薛均<sup>[6]</sup>通过对运动生理学及人机工程学等方面的研究, 分析了刚柔耦合系统的发射动力学。

人枪相互作用机理的研究是一个复杂而系统的

课题。现阶段的研究大多数是针对人体参数对射击精度的影响, 缺少枪械动力匹配参数在人枪系统中的影响; 因此, 笔者对其进行分析。

## 1 人枪模型建立与仿真

### 1.1 人枪模型建立

基于卧姿有依托抵肩射击人枪系统的特点, 以多刚体系统动力学为理论基础, 参考国标《中国成年人人体尺寸》和《成年人人体惯性参数》, 通过 UG 3 维建模软件建立人体模拟枪架如图 1 所示。基于此标准, 选取人体主要尺寸标准中百分位数为 90%, 计算人体各个主要环节参数, 计算结果见表 1, 人体模型质量为 76.12 kg, 身高为 1 758 mm。

根据汉纳凡人体力学模型<sup>[7]</sup>的划分方式, 结合卧姿射击的特点, 可将模拟人体枪架划分为持枪系统、上躯干系统、下躯干系统、下体以及弹簧阻尼系统, 且在不影响到仿真分析结果的情况下, 将人体的左、右足, 左、右小腿以及左、右大腿进行相

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2019-12-06

基金项目: 装备预先研究项目(0901)

作者简介: 咎博勋(1994—), 男, 山西人, 硕士, 从事自动武器结构设计与仿真研究。E-mail: 1838814878@qq.com。

应的简化，减少后期仿真的工作量。

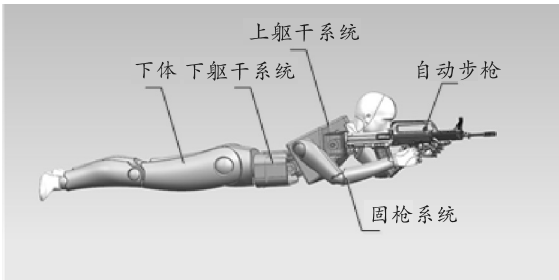


图 1 人枪实体模型

表 1 人体主要环节基本参数

环节名称	长/mm	质心位置/mm	质量/kg
头颈	246	127.62	5.796 2
前臂	253	141.58	1.538 2
上臂	33	165.86	1.982 4
上躯干	280	124.50	14.680 0
手	193	118.56	0.490 6
下躯干	260	184.45	16.708 0
大腿	495	287.65	11.401 0
小腿	397	191.20	3.180 2
足	80	42.39	0.938 8
下体	972	625.00	30.896 0
整体	1 758	780.56	76.120 0

## 1.2 人枪模型仿真分析

### 1.2.1 人枪耦合动力学方程

根据 ADAMS 采用的计算方法，选取人枪系统内的每个刚体质心在惯性参考系中的 3 个直角坐标和确定刚体方位的 3 个欧拉角作为笛卡尔广义坐标，用带乘子的拉格朗日方程处理具有多余坐标的完整约束系统或非完整约束系统，导出以笛卡尔广义坐标为变量的运动学方程，建立的人枪系统耦合动力学方程<sup>[6]</sup>为：

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n m_{ik}(q_k) & \sum_{j=1}^m \frac{\partial \phi_j}{\partial q_i} \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial \phi_j}{\partial q_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_k \\ \lambda_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_i \\ h_j \end{Bmatrix}$$

其中： $i = 1, 2, \dots, n$ ； $j = 1, 2, \dots, m$ 。

### 1.2.2 基本假设

人枪系统是一个复杂的系统。为全面准确地表达人枪系统的特性，根据前期高速摄影实验观察结果和文献<sup>[6]</sup>的研究结论，对人枪系统作假设如下：

- 1) 将枪各构件看作刚体。
- 2) 笔者对模型施加载荷时，主要考虑导气室压力、后坐到位的撞击和膛底合力对枪身的作用；不考虑子弹发射时的作用在枪管上的阻力。
- 3) 考虑枪身内部活动机件在射击过程中的碰

撞问题，根据真实情况，添加各构件之间的摩擦系数等。

4) 根据生物学的研究，人体肌肉对外界的主动响应时间在 300 ms 之后，笔者研究 300 ms 内人枪系统的响应情况，忽略这段时间内人体的主动响应，将人体看作被动生物<sup>[8]</sup>。

5) 在射击过程中，将人体下躯干视为相对地面基本不动，且上躯干简化为一个连续刚体，上、下躯干之间的联接简化成具有三自由度且带刚度阻尼的铰链联接。

6) 在射击过程中，假设枪托底部与射手肩部支撑点间无相对滑动，且忽略手掌与枪械之间的相对运动，两者之间以固定副约束。

### 1.2.3 约束确定

人枪系统射击模型通过弹簧阻尼系统模拟射击过程中人体肌肉对武器的调节作用。根据前期高速摄影实验和文献<sup>[9]</sup>的研究结果，需对各个自由度方向上添加的弹簧阻尼系统如图 2 所示。

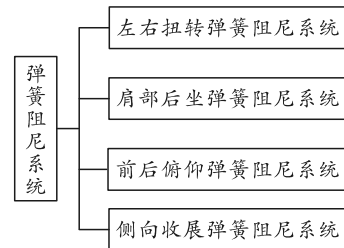


图 2 弹簧阻尼系统

### 1.2.4 载荷加载

笔者着重考虑载荷有导气室压力和膛底合力，是人枪系统动力学模型中重要的参数，对自动机的动力学特性有着重要的作用。在进行动力学仿真分析时，导气室压力无法直接作为载荷添加到人枪模型的虚拟样机上，根据导气室自动步枪的运动特点，将导气室压力转换成施加在导气活塞杆上的力，气室压力乘以活塞杆底面积，即可求出活塞杆的受力曲线如图 3 所示。人体枪架动力学模型如图 4 所示。

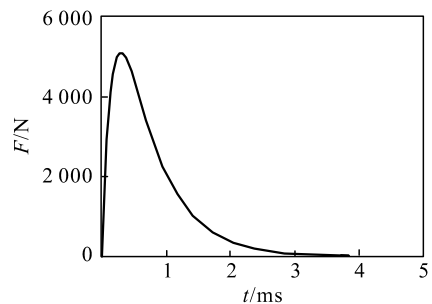


图 3 导气活塞杆的受力

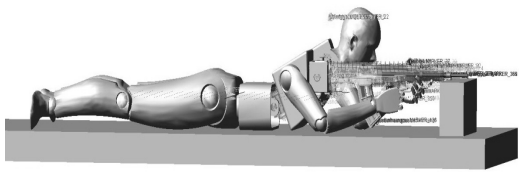


图 4 人体枪架动力学模型

### 1.2.5 仿真分析

仿真结束后，经过后处理，选取枪机框开始后坐位移经过 0.1 s 时间段作为横坐标的取值范围，此范围得到的枪机框位移曲线与自动步枪的枪口垂直角位移、水平角位移曲线如图 5 所示。

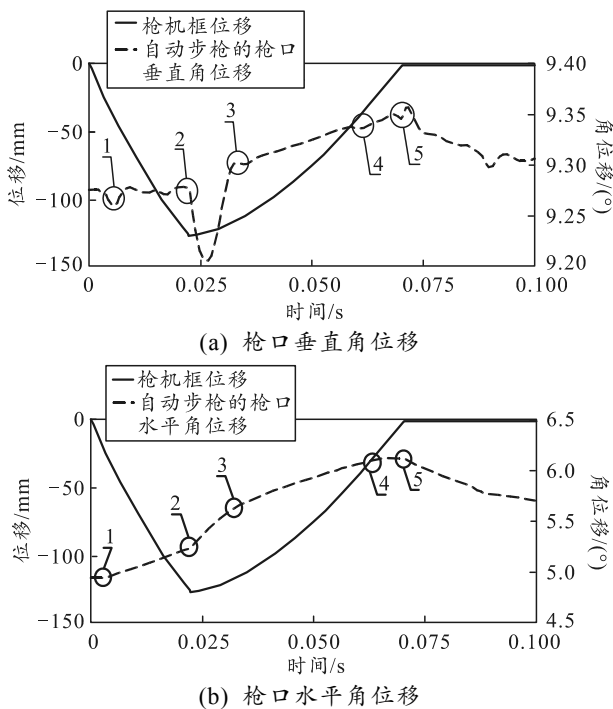


图 5 枪口角位移

从图中可以看出：在气室压力的作用下，自动机开始后坐，且在拉壳钩的作用下，弹壳与自动机一起后坐，在标记 1 处，弹壳与抛壳挺发生碰撞，引起枪身振动，故而枪口在垂直和水平方向发生跳动与偏转。在标记 2 处，自动机后坐到位撞击枪托体，使其对人体抵肩处产生较大冲击力，使抵肩处受力发生偏转，引起枪口垂直跳动和水平偏转继续增大。随后，自动机开始复进，枪口的垂直角位移在此过程的某一瞬间时达到最大值，其在偏转角度约为 0.075s 后开始回落。在标记 3 处，自动机在进行复进过程中，与供弹到位的下一发弹丸底部接触并产生碰撞，且由于枪身自身质心的偏转，枪口继续向下偏转，但对枪口水平角位移影响不大。在标

记 4 处，自动机推弹入膛，弹丸头部与枪管发生轻微碰撞，引起枪口轻微振动，对其垂直和水平角位移影响不大。在标记 5 处，自动机闭锁并复进到位，枪机框撞击机匣，引起枪口振动，且其碰撞点与步枪质心并没有完全重合，故枪口在水平方向的偏转和垂直向下的偏转均达到最大值，此时枪口水平偏转角约为 1.3°，并开始反向偏转，垂直向下的偏转角约为 0.07°。

## 2 步枪射击实验

为了验证该模型是否与真人射手具有一致的射击效果，需要进行枪械射击实验。

### 2.1 实验方案

验证的主要方式是：通过将真人射手进行卧姿射击实验获得的射击精度与仿真分析计算得到的射击精度进行对比，若两者误差在 20% 以内，说明建立的人枪模型基本符合设计目标。

实验条件：实验温度为环境温度，且地面纵风、横风速度不超过 4 m/s，天气无雨、无雪、无雾，能见度良好；靶场应符合相应技术规定，靶面与水平面及射向垂直。图 6 为在靶场进行实验及高速摄影设备。

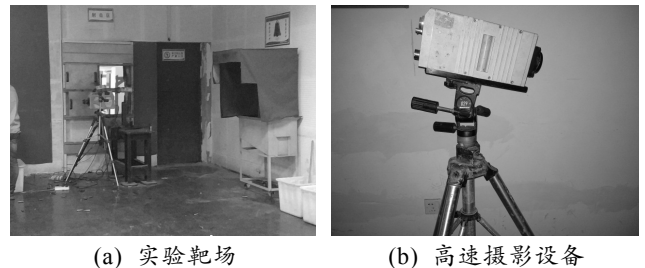


图 6 步枪射击实验

### 2.2 实验结果

为了比较射击密集度的大小，实验测量的指标主要是概率圆误差和概率圆半径。做 6 次射弹散布实验，得到的实验数据如表 2 所示。

表 2 某自动步枪的射击密集度实验统计

序号	$R_{50}$	散布中心坐标
1	4.1	(-4.4, -5)
2	3.9	(1.1, -2.4)
3	3.1	(1.3, 4.2)
4	3.7	(-3.1, 2.7)
5	3.7	(6.5, -4.3)
6	3.6	(3.1, 4.0)

由表可得平均射击密集度  $R_{50}$  为 3.68。

### 2.3 仿真与实验结果对比

为了统一计算射击密集度的方式，仿真结果采

用概率圆半径和概率误差 2 种方式。

根据枪膛横断面积、药室容积、弹丸质量、挤进压力以及次要功系数等内弹道参数，利用内弹道计算软件计算，得到内弹道膛压数据和弹丸初速，且将计算得到的膛压数据加载到动力学仿真模型上，经仿真分析得到弹丸出膛口射角；再根据弹丸出膛口瞬间弹头初速、射角，利用外弹道计算软件，求得射弹散布坐标。图 7、图 8 和图 9 分别为外弹道计算结果、射弹散布计算流程和射弹散布。

计算结果						
编号	横风速度 (m/s)	弹形系数	发射角(度)	初速 (m/s)	横向偏差 (m)	垂直向偏差 (m)
0	0.02	1.13	1.28997	945.28	0.03584	1.76531
1	0.12	1.19	1.28845	932.31	0.18690	-0.67313
2	0.04	1.13	1.27935	922.61	0.05066	0.27237
3	-0.30	1.11	1.28376	956.27	-0.41262	2.87167
4	0.23	1.15	1.27719	907.78	0.34752	-1.27486
5	-0.19	1.21	1.28317	935.83	-0.29231	-1.24209
6	0.37	1.20	1.28218	965.19	0.57478	-1.42331
7	-0.43	1.16	1.28797	920.39	-0.64660	-0.62641
8	-0.07	1.13	1.28039	919.05	-0.11003	-0.06176
9	-0.26	1.14	1.28081	940.85	-0.37647	0.83721
10	0.21	1.10	1.28567	946.67	0.28961	2.45840
11	-0.06	1.18	1.28318	918.02	-0.11759	-1.20935
12	-0.20	1.15	1.28669	933.63	-0.28639	0.48176
13	-0.19	1.13	1.28559	908.82	-0.27525	-0.95496

图 7 外弹道计算结果

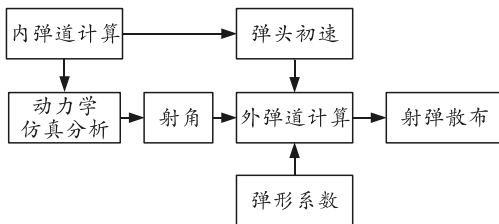


图 8 射弹散布计算流程

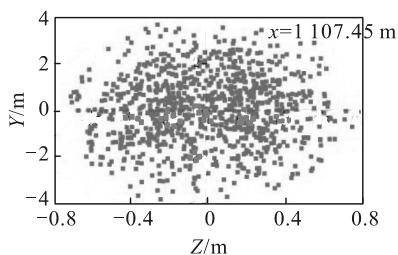


图 9 射弹散布

由图 9 可知：仿真分析的射击密集度概率圆半径  $R_{50}$  约为 3.1 cm，小于实验测得的平均射击密集度，且误差为 15.12%，小于既定目标 20%，笔者建立的卧姿有依托抵肩人枪射击模型的射击效果与真人射手的射击效果基本一致。

### 3 不同参数对射击精度影响分析

#### 3.1 导气孔直径对射击精度影响分析

笔者将导气孔直径为 0.18、0.20、0.25 和 0.28 cm

4 种情况下的导气活塞受力曲线加载到人枪模型虚拟样机上，经过仿真计算得到的枪口垂直角位移和水平角位移曲线如图 10、图 11 所示。

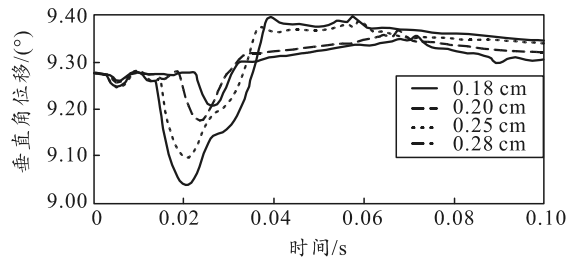


图 10 不同导气孔直径下的枪口垂直角位移

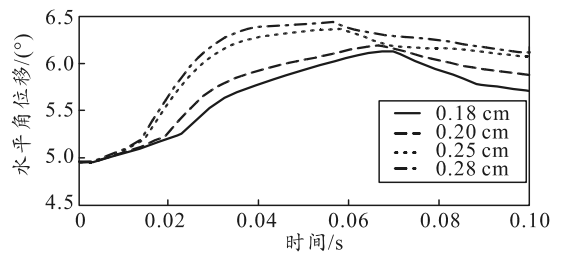


图 11 不同导气孔直径下的枪口水平角位移

由图 10 可知：在自动机后坐到位的过程中，随着导气孔直径由 0.18 cm 逐渐增大到 0.28 cm，枪口垂直角位移逐渐增大。在自动机复进过程中，因射击姿态和自动机的运动影响，使步枪质心偏转，造成枪口有一定的回弹现象。自动机复进到位时，与机匣发生碰撞，产生前冲的翻转力矩，使枪口有微小的角位移跳动，随后因射击姿态的影响而被抑制。

由图 11 可知：随着导气孔直径从 0.18 cm 增大到 0.28 cm，枪口的水平角位移最大值也随之增大，分别为 1.175°、1.258°、1.425°、1.487 5°在自动机复进到位与机匣碰撞时，因枪身的质心并不与碰撞点重合，且碰撞时产生了力矩，使水平角位移反向回转。

#### 3.2 复进簧刚度对射击精度影响分析

笔者将复进簧刚度为 160、210、250 和 290 N/m 4 种情况的变量加载到人枪模型的虚拟样机上，经仿真计算得到枪口的水平角位移和垂直角位移曲线如图 12、图 13 所示。

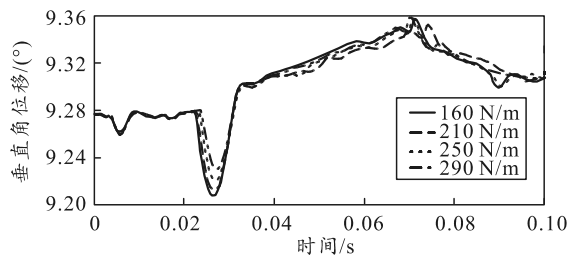


图 12 不同复进簧刚度下的枪口垂直角位移

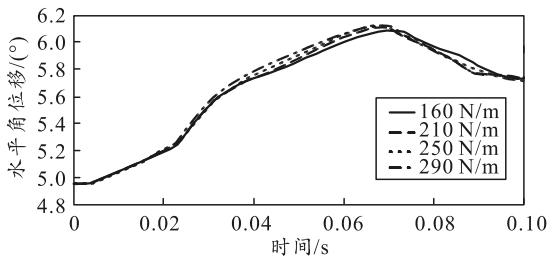


图 13 不同复进簧刚度下的枪口水平角位移

由图 12 可知,不同复进簧刚度对后坐运动过程中枪口的垂直角位移影响不大。自动机后坐位时,复进簧刚度越大,对枪托体的冲击载荷越小,此时引起的枪口垂直角位移幅值也越小。自动机复进过程中,复进簧的刚度越大,给予自动机加速度就越大,使其对机框的撞击力就越大,导致枪身的翻转力矩也就越大。

从图 13 可知:随着复进簧刚度的逐渐增大,自动机在复进运动时的速度就越快,枪身内部活动机件因碰撞产生的碰撞力越大,使得枪口的水平角位移越大,但总体影响不是很明显。

### 4 结论

笔者通过建立卧姿有依托抵肩射击的人枪系统动力学模型,仿真分析了自动机在人体枪架发射过程中的运动特性对枪口位移的影响,实验验证了所建模型的可行性。通过仿真、理论分析得出以下结论:

1) 导气孔直径越大,自动机获得的初速越大,使其在后坐过程中枪身内部活动机件受到的碰撞力越大,引起的枪身振动较剧烈,对射击精度影响较大;导气孔直径过小,会使自动机获得的初速不够,

枪身后坐时间过长,导致整个自动循环时间过长,直接影响枪械射击精度。

2) 随着复进簧刚度的增大,可有效减小自动机后坐过程中枪身内部活动机件的碰撞,但在复进到到位时,会产生较大的冲击载荷,使枪口振动剧烈;复进簧刚度过大,会导致后坐不到位,刚度过小,影响自动机循环时间,使复进时间过长。

### 参考文献:

[1] HUTEHING T D, RAHE A E. Study of Man-Weapon Reaction Forces Applicable to the Fabrication of a Standard Rifle Firing Fixture[R]. ADA034523, 1975.

[2] 包建东,王昌明,孔德仁,等.连发射击人枪系统机械导纳测量与分析[J].南京理工大学学报,2006(4): 521-524.

[3] 包建东,王昌明,孔德仁,等.人枪运动对射击精度影响的实验研究[J].仪器仪表学报,2006(6): 1273-1276.

[4] 包建东.人-枪相互作用试验研究[D].南京:南京理工大学,2006.

[5] 孙睿敏.手枪击发前动力学特性研究[D].太原:中北大学,2015.

[6] 薛钧.刚柔耦合系统发射动力学特性的仿真分析[D].南京:南京理工大学,2008.

[7] HANAVAN E P. A mathematical of the human body[M]. Aerospace Medical Research Laboratories, Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command, 1964: 446-448.

[8] 唐刘建,温垚珂,徐诚,等.手枪弹侵彻软防护人体胸部靶标的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2018(1): 106-110, 117.

[9] 郑召辉.模拟人体枪架结构与动力学仿真[D].南京:南京理工大学,2008.

[10] FENG J. A Study on Multi-scale/Multi-theme map information model and nearest neighbor search method[D]. PhD in Information Engineering, University of Nagoya, Japan, 2004: 56-59.

(上接第 44 页)

[8] IBRAHIM O A, MOHSEN K J. Design and Implementation an Online Location Based Services Using Google Maps for Android Mobile[J]. International Journal of Computer Networks and Communications Security (CNCS), 2014(2): 113-118.

[9] SINGHAL M, SHUKLA A. Implementation of location