

基于 ADAMS 的某型冲锋枪自动机 动力学仿真和分析

张红勇¹, 王智伟²

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010011)

摘要: 为研究某型冲锋枪自动机运动规律和动力学特性, 进而探究导气孔大小对自动机运动循环的影响, 首先使用 UG 软件建立该枪自动机的三维实体模型, 其次在 ADAMS 软件中建立虚拟样机, 利用 Matlab 软件对内弹道和导气室压力曲线进行拟合, 对该枪的单发射击进行仿真, 得到了枪机和枪机框的位移速度曲线、复进簧压力曲线等动力学特性, 对比仿真结果与试验数据, 说明虚拟样机模型具有较高的可行性, 最后仿真分析导气孔大小对自动机运动循环的影响, 仿真结果表明, 随着导气孔直径增大, 后坐速度和后坐撞击变大, 复进到位速度明显提高, 复进时间显著降低, 自动循环时间相对缩减, 为产品优化设计提供理论参考。

关键词: 冲锋枪; 自动机; 动力学; 虚拟样机; ADAMS

Dynamic Simulation and Analysis of a Certain Type of Submachine Gun Automaton Based on ADAMS

ZHANG Hongyong¹, WANG Zhiwei²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Inner-Mongolia Power Machinery Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: In order to study the motion law and dynamic characteristics of a certain type of submachine gun automaton, and further explore the influence of the size of air guide hole on the motion cycle of the automaton, firstly, the three-dimensional solid model of the submachine gun automaton is established using UG software, then the virtual prototype is built in ADAMS software, and the internal trajectory and air guide chamber pressure curve are fitted using Matlab software. The single shot of the gun is simulated to obtain the dynamic characteristics of the gun and the gun frame, such as the displacement-velocity and compound spring pressure curves. Compared with the test data, the simulation results show that the virtual prototype model has a high feasibility. Finally, the influence of the pilot hole size on the automaton motion cycle is analyzed. With the diameter increase of air guide hole, the recoil speed and recoil impact are expanded, the recoil speed is significantly increased, the recoil time is significantly reduced, and so does the automatic cycle time, which provides a theoretical reference for the optimization design of product.

Keywords: submachine gun; automaton; dynamics; virtual prototype; ADAMS

0 引言

冲锋枪是单兵两手握持或抵肩、发射手枪弹、近距离连发射击的全自动枪械的总称^[1]。具有体积小、重量轻、携弹量大、火力强等优点, 适用于近距离作战和冲锋, 在 200 米内可造成有效杀伤, 因此大量装备于军队中^[2-3]。大多数冲锋枪采用自由枪机式的自动方式^[4], 自动机作为冲锋枪的核心部件, 其工作环境较为复杂, 往往承受高温高压作用和各机构之间剧烈的碰撞, 因此其可靠性对冲锋枪的性能有直接影响^[5]。以往使用实弹射击的试验方法探究自动机的可靠性, 不仅试验成本高、弹药消耗大、研发周期长, 而且实弹射击具有较大的危险性, 在这样的背景下, 虚拟样机技术应运而生^[6-7]。虚拟样机技术是使用软件建立机械

系统的三维实体模型和力学模型, 对系统的性能进行分析和评估^[8]。利用虚拟样机技术, 可在武器设计、研究工作中反复修改设计方案和运动学模型, 缩短研制周期和研制成本, 完成物理样机难以实现的试验, 把握机械系统各部件的特性^[9]。文献 [10] 通过在冲锋枪机匣内壁刻螺旋凹槽来降低射频, 并在 ADAMS 软件中建立虚拟样机, 通过仿真验证了这一方法的可行性。文献 [11] 设计了一种回转体半自由枪机式结构以提高质量转换效率, 基于虚拟样机技术, 利用 ADAMS 软件对机构进行了动力学仿真, 验证了设计的合理性。文献 [12] 设计了一种能量可控的半自由枪机结构, 使用 ADAMS 软件仿真验证了这一结构可实现对枪机后能量大小的控制。文献 [13] 通过增加缓冲装置改善冲锋枪的射击精度, 建立虚拟样机进行仿真, 验

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-08-21。

作者简介: 张红勇(1998-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 张红勇, 王智伟. 基于 ADAMS 的某型冲锋枪自动机动力学仿真和分析[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 234-243.

证了方案的有效性。综上所述, 通过构建虚拟样机对武器系统这类多体碰撞的问题即研究自动机各部件间的运动规律具有较高的适用性, 对于武器研发周期的缩减和成本具有积极作用。本文以某型冲锋枪为研究对象, 以该自动武器的自动机为例利用 ADAMS 建立虚拟样机模型, 对导气式武器进行动力学仿真分析, 探究其核心部件运动特性及自动机各部件之间的冲击载荷, 通过对自动机中各部件之间的冲击载荷来分析自动机部件碰撞对射击精度的影响, 并通过改变导气孔大小对自动机循环动作的影响规律进行分析, 用于指导实际的设计过程, 同时原型模型也可以为其改进提供依据, 其分析研究为枪械中击发机构的结构优化和工程设计提供了坚实的理论基础。

1 自动机结构与工作原理

1.1 自动机结构

自动机是自动武器的主要部件, 其主要功能是自动完成自动武器从发射到抛壳再到进弹, 以及发射后一发弹的一系列过程^[14]。自动机的种类有很多种, 本文研究的是导气式自动机, 其导气方式为活塞长行程。自动机主要由身管及导气装置、复进装置、闭锁机构和发射机构等结构组成。

1.1.1 身管及导气装置

身管由弹膛、线膛和坡膛组成, 线膛由 4 条右旋矩形等齐膛线组成, 导程长度为 240 mm。导气装置为活塞长行程冲击式, 其组成部分如图 1 所示。球形凹面在活塞前端, 两条环形沟位于活塞的两侧, 其主要作用是减少火药燃气的泄露。导气孔位置靠近枪口, 距身管尾端 305.6 mm, 导气孔直径为 4.2 mm。

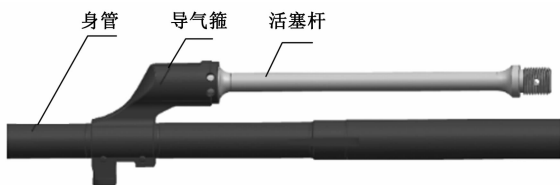


图 1 导气装置

1.1.2 复进装置

复进装置主要作用是: 自动机部件后坐时将能量积攒起来为其复进提供一定的动力, 其结构如图 2 所示。导管和导杆具有导向作用, 以防止复进簧扭曲或卡死, 挡圈为复进簧提供一定的预压。

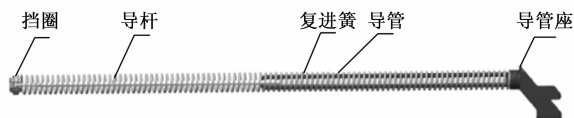


图 2 复进装置

1.1.3 闭锁机构

该枪的闭锁方式为枪机回转式。闭锁机构组成部分如

图 3 所示。其中闭锁凸笋位于枪机前方两侧, 它以旋转运动的形式进入机匣的闭锁槽, 后方为闭锁支撑面, 在前方上部的定型凸笋配合于机匣的定型槽, 在圆弧面、开锁螺旋面、闭锁螺旋面、复进平面与限制面的作用下, 可以很好完成开锁、后坐、复进及闭锁等一系列动作。

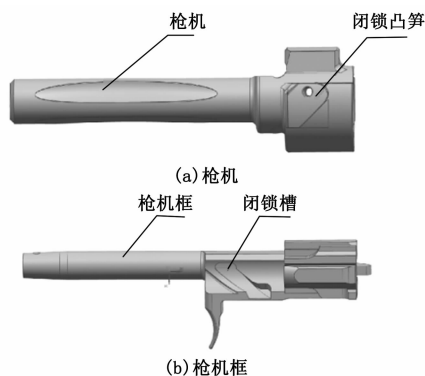


图 3 闭锁机构

1.1.4 发射机构

该枪为单连发发射机构, 其状态有: 单发、连发、三连发, 由发射转换器进行控制, 它的主要零部件如图 4 所示。

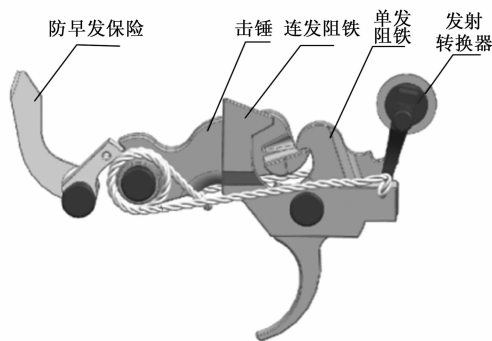


图 4 发射机构

1.2 自动动作及自动动作循环图表

1.2.1 导气式自动方式和自动动作

导气式是膛内部分高压火药燃气通过身管上的导气孔进入气室, 推动枪机后坐的自动方式^[15]。根据导气装置的不同结构, 可分为活塞式和导气管式两类。该型冲锋枪为活塞长行程, 即把火药燃气的作用力通过活塞传递给枪机框, 活塞与枪机框联接成一体运动^[16]。并通过增大机框质量提高其抗干扰能力。

该枪的自动动作为: 扣动扳机, 击锤撞击击针后, 枪弹底火在击针的撞击下燃烧, 火药气体迅速膨胀, 弹头在其作用下向前运动。当弹头经过导气孔时, 火药燃气从导气孔进入气室, 活塞与枪机框在气室火药燃气的作用下一同后坐, 枪机框在螺旋槽的作用下沿着枪机定型凸笋滑动, 然后开锁前自由行程完成, 枪机定型凸笋在枪机框螺

旋面的撞击下，完成开锁，枪机在枪机框的带动下一起后坐运动，枪机框后坐直至碰到枪尾完成后坐运动。后坐到位会压缩复进簧，复进簧力的作用下开始推动枪机和枪机框开锁复进，在机框推动下，枪机定型凸笋进入螺旋槽，然后枪机右旋闭锁，在枪机凸笋限制面的作用下枪机框走完闭锁自由行程，枪机框撞击机匣前端停止并完成复进动作。

1.2.2 自动循环图

自动循环图是描述自动机部件的运动顺序以及部件之间的协调运动的图表或曲线图。它显示自动机的运动特征，描述自动机工作循环中的主要部件和基础部件之间的运动规律。

在自动机的工作周期中，每个部件都有一定的运动规律，并且在循环过程中主导部件带动其余部件完成自动循环过程，这个起主导作用的部件称为基础构件，其他由基础构件带动的构件称为工作构件。本文研究的冲锋枪以活塞杆和枪机框作为基础构件，带动其他工作构件一起完成自动循环。图 5 为该枪自动机的工作循环图，图中数据单位为 mm。循环图以身管轴线后坐方向为正方向，原点为闭锁状态静平衡位置。

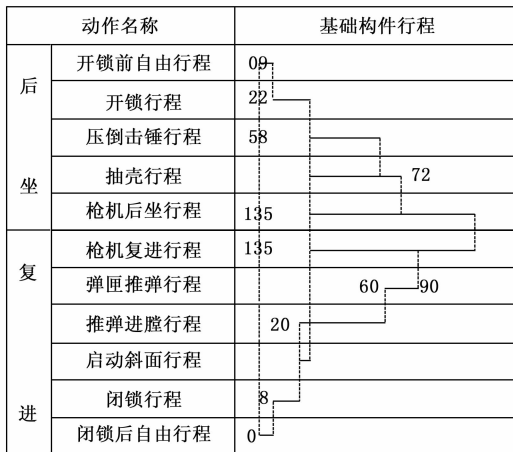


图 5 该冲锋枪自动机工作循环图

2 虚拟样机模型的建立

2.1 模型简化及导入

三维模型是由 UG 导入 ADAMS 中的。首先将 UG 绘制的三维模型转化为 x_t 格式的文件，其次将生成的文件导入到 ADAMS，最后对模型进行一定的简化处理。这样不仅可以减小计算量，提高仿真效率，而且也能尽可能地减少误差，但是导入的模型也应该既简单又清晰，能够很好地反映实际的变化过程^[17]。导入模型如图 6 所示。对于外加载荷，将气室压力直接作用于活塞杆上，抽壳阻力以外力形式给出。

2.2 材料施加

对导入的模型零部件进行重新命名，便于零部件约束



图 6 自动机模型

及载荷的添加，该型冲锋枪的绝大多数零件采用合金钢材料，机匣采用锻制不锈钢材料。表 1 为各部件的材料属性。在 ADAMS 中将表中各部件的材料属性赋予。

表 1 刚体名称及材料

名称	材料	是否运动件
活塞杆	合金钢	是
枪机框	合金钢	是
枪机	合金钢	是
身管	合金钢	否
活动导杆	合金钢	是
复进簧导杆	合金钢	否
拉壳钩	合金钢	是
扳机	合金钢	是
阻铁	合金钢	是
击锤	合金钢	是
防早发保险	合金钢	是
机匣	锻制不锈钢	否
导气箍	合金钢	否
节套	合金钢	否

2.3 约束副施加

本文所建立的模型从击发、后坐、退壳、复进、进弹等在内的整个射击过程进行了仿真，模型共包含 16 个零件、7 个固定副、2 个移动副、4 个转动副、1 个圆柱副，其总自由度为 24。在 ADAMS 中用约束副对各部件连接，表 2 为各部件的连接关系^[18]。

表 2 各刚体间约束连接

部件 1	部件 2	约束副	约束自由度
机匣	地面	固定副	6
活塞杆	枪机框	固定副	6
身管	节套	固定副	6
复进簧导杆	机匣	固定副	6
节套	机匣	固定副	6
导杆座	复进簧导杆	固定副	6
枪机	拉壳钩	固定副	6
机匣	枪机框	平移副	5
枪机框	枪机	圆柱副	4
机匣	防早发保险	旋转副	4
拉壳钩	弹壳	平移副	5
机匣	阻铁	旋转副	4
击锤	机匣	旋转副	4
机匣	扳机	旋转副	4

在实际中, 自动武器各部件之间的碰撞广泛存在, 因此在虚拟样机模型的建立中对应的设置部件间的接触副, 其工作的全过程实质上是火药燃气作用下的自动机运动, 弹簧作用下的零部件运动, 机构传动和碰撞四类运动形态的不同组合, 而机构的传动也是靠碰撞来实现的。因此对 ADAMS 中碰撞问题的解决机理的研究是尤为重要, 其碰撞是武器系统动力学仿真过程中的关键问题之一。表 3 为各部件之间的接触副。

表 3 各部件的接触副

部件 1	部件 2
枪机	枪机框
枪机框	节套
枪机	枪管
枪机框	机匣
防早发保险	枪机框
防早发保险	击锤
阻铁	击锤
击锤	扳机
枪机	击锤
击锤	枪机框
导杆座	枪机框

2.4 弹簧及扭簧的确定

该自动机虚拟样机涉及到的弹簧有复进簧和阻铁簧, 涉及到的扭簧为击锤和机匣、防早发保险和机匣之间的扭簧。

1) 复进簧参数: 复进簧装配高度为 296 mm; 复进簧预压力为 25 N; 复进簧工作压力为 65 N; 复进簧刚度为 290 N/m。

2) 阻铁簧参数: 阻铁簧预压力为 10 N; 阻铁簧刚度为 200 N/m。

3) 击锤扭簧参数: 击锤扭簧刚度为 10 N/(mm/deg); 击锤扭簧预压力为 -30 N。

2.5 驱动载荷的添加

在枪械自动机的动力学研究中, 一般要对火药燃气压力、弹壳的抽壳阻力和推弹阻力等因素进行考虑。而这些力只能以外力的形式施加, 为了简化模型, 在此处主要考虑火药燃气作用力。

2.5.1 内弹道计算

内弹道是对弹丸在膛内运动规律和伴随射击现象进行研究^[19-20]。自动机运动的原动力是火药燃气压力, 也是自动武器工作的动力源, 因此首先要进行内弹道方程的建立, 利用 Matlab 绘制出 $p-l$ 、 $v-l$ 、 $p-t$ 及 $l-t$ 的弹道曲线, 进而确定模拟样机所受载荷, 导入仿真软件进行动力学分析。

因此构建内弹道方程组为:

1) 形状函数:

$$\varphi = \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \quad (1)$$

2) 燃速方程:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{u_1}{e_1} p^n \quad (2)$$

3) 弹丸运动方程: 用平均压力和次要功系数 φ 表示的运动方程

$$\varphi m \frac{dv}{dt} = Sp \quad (3)$$

4) 弹丸速度与行程关系:

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (4)$$

5) 内弹道基本方程:

$$\begin{cases} Sp(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \\ l_\psi = l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\rho_p} - \alpha - \frac{1}{\rho_p} \Delta\psi \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中, ψ 为火药已燃百分数, χ 、 μ 、 λ 为火药形状特征量, Z 为火药已燃相对厚度, u_1 为燃速系数, e_1 为火药弧厚, p 为平均压力, n 为燃速指数, φ 为次要功计算系数, m 为弹丸质量, v 为弹丸速度, t 为弹丸运动时间, S 为枪膛横断面积, l 为弹丸行程长, l_ψ 为药室自由容积缩径长, f 为火药力, ω 为装药质量, θ 为火药热力参数, Δ 为火药装填密度, ρ_p 为火药密度。

在给定的初始条件下, 基于四阶龙格-库塔法对内弹道方程组进行求解, 计算步骤如下:

1) 输入已知数据:

① 火炮构造及弹丸诸元: S 、 V_0 、 l_g 、 m ;

② 装药条件: f 、 α 、 ω 、 ρ_p 、 θ 、 u_1 、 n 、 e_1 、 χ 、 λ 、 μ 、 ρ ;

③ 初始条件: p_0 ;

④ 计算次要功计算系数的参数: K 、 b ;

⑤ 计算步长: h 。

2) 常量计算:

起始计算需要确定的常量有:

$$\begin{cases} \varphi = K + b \frac{\omega}{m} \\ \Delta = \frac{\omega}{V_0} \\ l_0 = \frac{V_0}{S} \\ \bar{l}_g = \frac{l_g}{l_0} \\ v_j = \sqrt{\frac{2f\omega}{\theta\varphi m}} \\ B = \frac{S^2 e_1^2}{f\omega\varphi m u_1^2} (f\Delta)^{2(1-n)} \end{cases} \quad (6)$$

3) 初值计算:

$$\begin{cases} \bar{l}_0 = 0 \\ \bar{l}_0 = 0 \\ \bar{v}_0 = 0 \\ \bar{p}_0 = \frac{p_0}{f\Delta} \\ \psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\rho_p}} \\ \sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda}{\chi} \psi_0} \\ Z_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda} \end{cases} \quad (7)$$

通过查阅资料,得到该型冲锋枪弹药参数如表 4 所示^[21]。

通过 Matlab 计算并绘制出如图 7 所示的 $p-t$ 、 $v-t$ 、 $p-l$ 及 $l-t$ 的弹道曲线。

该枪的身管长度为 413 mm, 导气孔到身管尾端的距离为 0.74 倍身管长, 约 306 mm, 导气孔直径为 4.2 mm^[22]。由上图曲线可得, 弹丸经过导气孔时间为 $t_d = 0.798 0$ ms, 此时膛压为 53.271 0 MPa, 弹丸飞出膛口时间为 0.952 5 ms,

弹丸飞出膛口速度为 712.95 m/s。

表 4 冲锋枪弹药参数

参数	数值
枪膛横断面/mm ²	47.9
装药质量/g	1.6
药室容积/mm ³	1 860
火药密度/(kg/m ³)	1 600
弹丸行程全长/mm	413
火药热力学参数	0.252 64
弹丸质量/g	7.9
燃速指数	1
挤进压力/MPa	30
燃速系数/(mm ³ /(g·s))	$7.589 8 \times 10^{-4}$
次要功系数	1.025 8
火药厚度/mm	0.2
火药力/(kg·m/kg)	939 65
火药长度/mm	0.865 32
火药余容/(m ³ /kg)	$0.928 27 \times 10^{-4}$

2.5.2 气室压力分析

气室内火药气体压力与膛内火药气体压力的变化规律具有较大的联系, 并且与其装置自身的结构参数有关。根

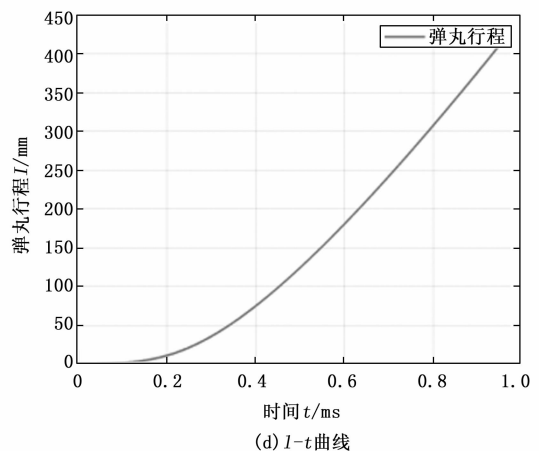
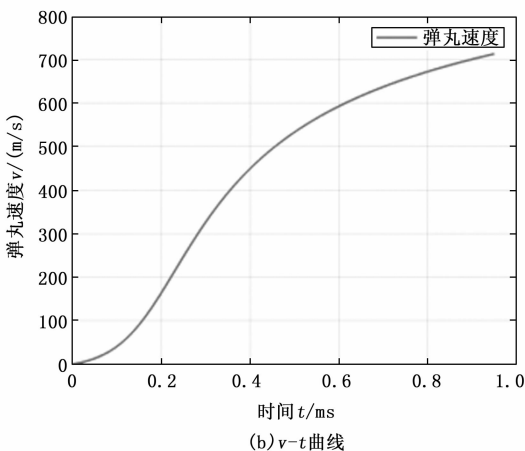
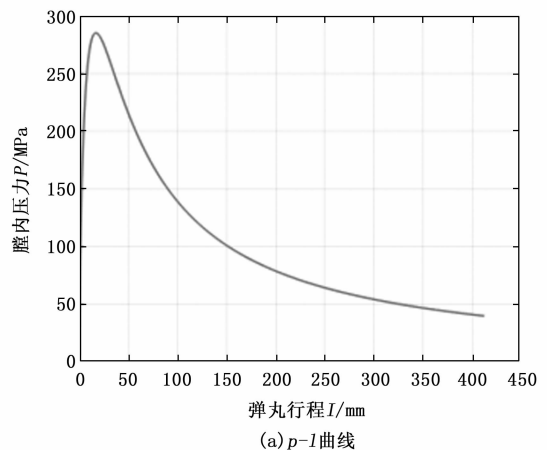
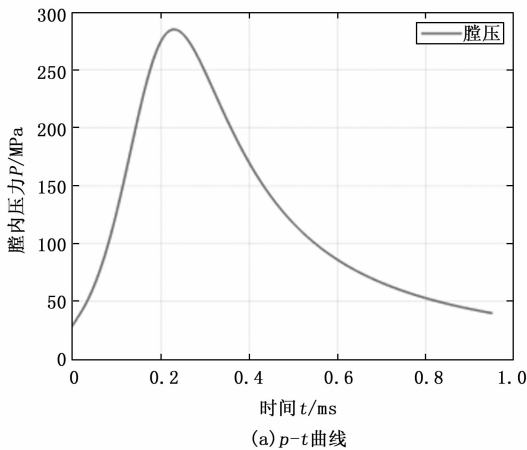


图 7 $p-t$ 、 $v-t$ 、 $p-l$ 及 $l-t$ 弹道曲线

据布拉文经验公式计算气室压力的变化, 导气室压力^[23]为:

$$P_s = P_d e^{-t/b} [1 - e^{-\alpha(t/b)}] \quad (8)$$

其中: P_s 为气室压力, P_d 为弹头经过导气孔瞬时的膛内平均压力, b 为与膛内压力冲量有关的时间系数, α 为与导气装置结构有关的参数, t 为弹头经过导气孔瞬间开始时计算气室压力工作时间, e 为自然对数的底。

时间系数 b 公式如下:

$$\begin{cases} b = \frac{i_0}{p_d} \\ i_0 = \frac{p_d + p_k}{2} t_{dk} + \frac{(\beta - 0.5)m_y v_0}{S} \end{cases} \quad (9)$$

其中: p_d 为弹头经过导气孔瞬时的膛内平均压力, 此处为 53.27 MPa; i_0 为膛内压力的单位全冲量; p_k 为弹头飞出膛口瞬间的膛内平均压力, 此处为 39.87 MPa; S 为枪膛横截面积, 此处为 47.90 mm²; m_y 为装药质量, 此处为 1.6 g; v_0 为弹头初速, 此处为 712.95 m/s; β 为火药燃烧后系数, $\beta = \frac{v_{mm}}{v_0}$, 此处 $v_{mm} = 1\ 103$ mm/s, 故 $\beta = 1.547$ 。

结构系数 α 公式如下:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\eta_s} - 1} \quad (10)$$

其中: η_s 为气室冲量效率。

由马蒙托夫研究理论可知, 导气装置的结构参数是导气装置的气室压力主要影响因素, 其参数如下:

- 1) 导气孔的有效横断面积 $S_d = \frac{\pi}{4} d_d^2$, 其中 d_d 为导气孔直径, 值为 4.2 mm;
- 2) 活塞横断面积 $S_s = \frac{\pi}{4} d_s^2$, 其中 d_s 为活塞口直径, 值为 15 mm;
- 3) 活塞与腔室壁之间间隙横截面积 $\Delta S_s = \frac{\pi}{2} d_s \Delta d_s$, 其中 Δd_s 为气室内壁与活塞口间隙, 值为 0.3 mm;
- 4) 气室初始容积 V_0 为 1.78 cm³;
- 5) 活塞及其连接的自动机部件的质量 m_s 为 0.485 kg。

为方便计算, 其计算方法采用 4 个相对参数, 分别为: 活塞相对面积 σ_s 、间隙相对面积 σ_Δ 、活塞相对质量 σ_m 和气室换算长度 σ_0 :

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{S_s}{S_d} \\ \sigma_\Delta = \frac{\Delta S_s}{S_d} \\ \sigma_m = \frac{m_s}{m_y} \\ \sigma_0 = \frac{v_{0s}}{S_d} \end{cases} \quad (11)$$

η_s 与这 4 个参数的函数关系为:

$$\begin{cases} \eta_s = f_1(\sigma_s, \sigma_\Delta) \\ \gamma_0 = f_2(\sigma_s, \sigma_0) \\ \gamma_m = f_3(\sigma_s, \sigma_m) \\ \gamma_{m,0} = f_3(\sigma_s, \sigma_m) \end{cases} \quad (12)$$

则气室冲量效率为:

$$\eta_s = \eta_{s0} \gamma_0 \gamma_m \gamma_{m,0} \quad (13)$$

通过插值计算得:

$$\begin{cases} \eta_s = 0.6841 \\ \alpha = 2.1656 \end{cases} \quad (14)$$

活塞所受导气室作用力为:

$$F_{ps} = p_s \times S_s \quad (15)$$

通过 Matlab 拟合并绘制曲线 p_s-t 和 F_s-t 。

图 8 为 Matlab 绘制拟合出来的气室压力曲线。在 ADAMS 软件中, 不能直接将气室压力曲线导入进去, 通过 Akima 拟合方式导入数据, 此方法不需要进行繁琐的计算, 根据对图 8 中的气室压力曲线图中的点进行拾取, 拟合的单位是按照国际单位制中的基本单位规定, 因此设置横坐标 X 的单位为时间 (s), 纵坐标 Y 的单位为牛顿 (N), 然后加载拟合完成的载荷。图 9 为载荷拟合示意图。

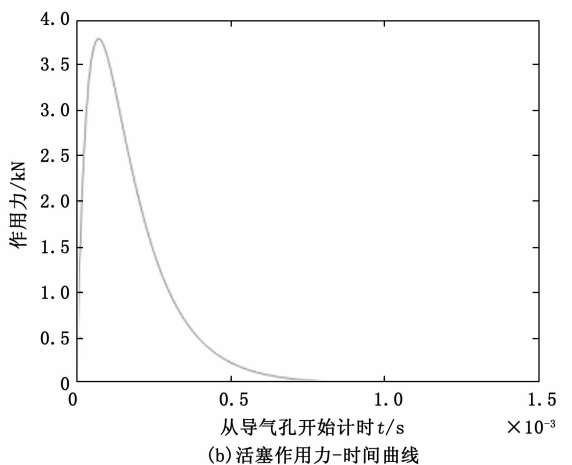
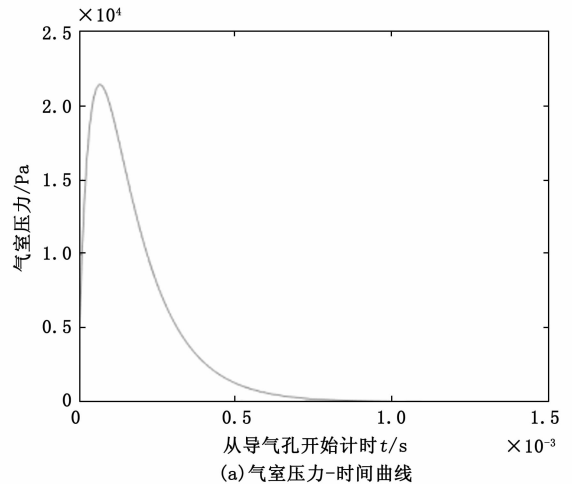


图 8 气室压力曲线

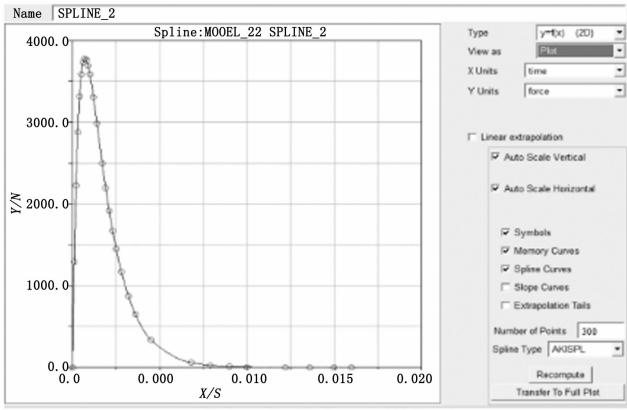


图 9 气室压力载荷拟合示意图

2.6 虚拟样机的建立

在将上述的材料赋予、部件命名、运动副添加、接触副以及弹簧、扭簧和外力的添加之后，得到该型冲锋枪的虚拟样机。

3 虚拟样机仿真分析及可信度验证

在仿真软件 ADAMS 中建立了该型冲锋枪自动机的虚拟样机，并且在虚拟样机中添加气室压力载荷以及弹簧、扭簧等参数，对样机的运动进行仿真，从而了解机构的动

力学特性。并且通过仿真，获得自动机中关键部件的运动规律。

3.1 运动特性仿真实验

此次仿真主要对自动机单发进行分析，从击发开始计时，对枪机框和枪机进行分析。

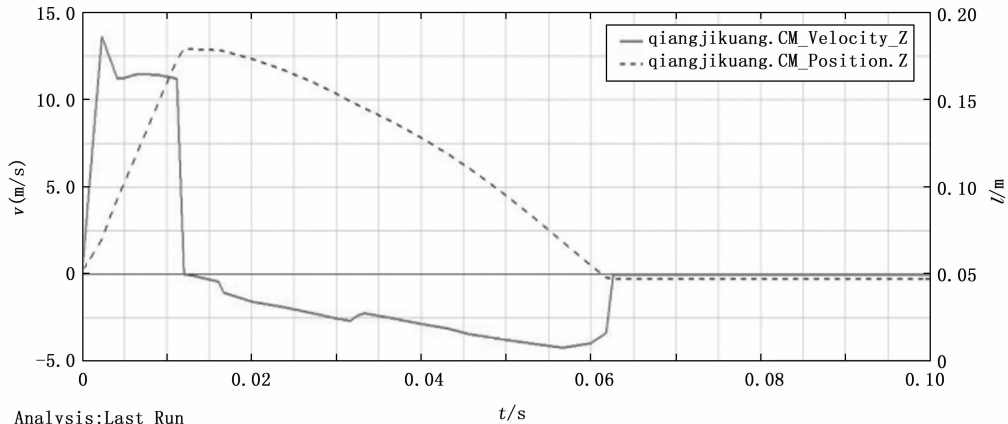
自动机在击发之后，火药燃气快速膨胀，弹丸通过导气孔时，活塞杆开始受到火药燃气压力向后运动，并带动枪机框快速后坐，并且压缩复进簧，速度降低，直到枪机框碰到导杆座，速度降到零，在复进簧的作用力下，枪机框复进，直至到位，仿真结果如图 10 所示，图 10 (a) 为其速度位移曲线，图 10 (b) 为枪机框和枪机速度曲线。

由图 10 (a) 得到表 5 结果。

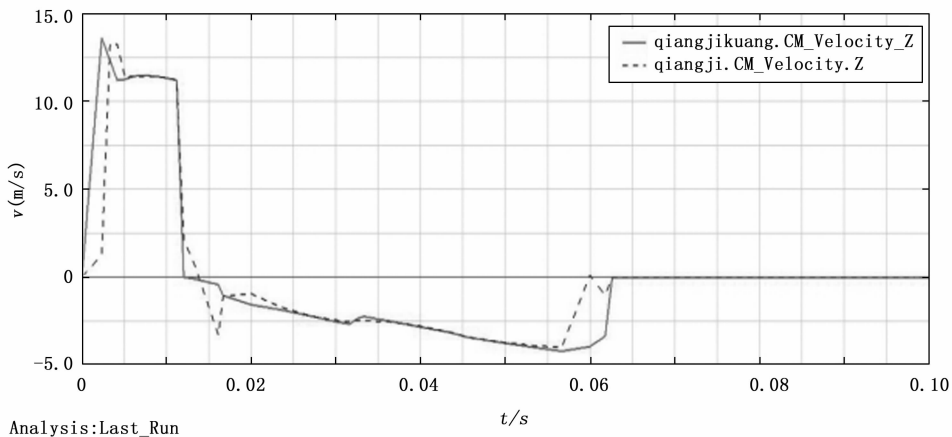
表 5 枪机速度数值仿真结果与试验结果对照

速度	仿真数据 $v/(m/s)$	试验数据 $v/(m/s)$	相对误差/%
后坐最大	13.623 2	12.887 3	5.71
后坐到位	11.216 5	10.731 4	4.52
复进开始	0.426 6	0.412 3	3.46
复进到位	3.358 1	3.206 1	4.74

由图 10 (a) 可以看出，导气压力作用后，枪机开始后



(a) 自动机枪机框速度-时间、位移-时间曲线



(b) 自动机枪机与枪机速度-时间曲线

图 10 仿真结果图

坐时, 速度持续上升, 直至与击锤碰撞并压倒击锤, 损失部分能量。途中压缩复进簧的储存能量, 直至后坐到位时枪机框与导杆座碰撞吸收了多余的能量, 从而完成后坐。复进时, 在压缩的复进簧的作用下, 枪机框和枪机开始复进, 复进到位时其中多余的能量由枪机框与节套的碰撞吸收, 从而完成复进过程。同时可以得到: 在 0.016 1 s 时枪机框的位移达到最大, 为 132.6 mm, 从后坐到复进的全过程用时 0.061 8 s, 再由上文内弹道计算得到, 弹丸从击发到飞过导气孔用时 0.798 ms, 因此完成单发射击总用时 0.062 5 s。

由图 10 (b) 可知, 枪机与枪机框在起始处的后坐时的开锁过程和复进时的闭锁过程时的速度发生变化, 此时, 枪机做回转运动, 而枪机框在做平动运动, 其余运动过程速度基本重合。

3.2 缓冲装置运动特性分析

当枪机框后坐到位时, 与导杆座发生碰撞, 此时剩余的能量被缓冲装置吸收, 从而使枪机框的后坐速度下降, 通过缓解部件之间的碰撞提高枪械的射击稳定性和可靠性。

因此, 采用一根长度为 296 mm 的复进簧, 其刚度为 290 N/m, 缓冲簧的受力变化曲线如图 11 所示。其中由曲线可以得出, 复进簧在 0.016 1 s 时所受最大的力为 62.07 N, 而此时枪机和枪机框正好后坐到位。

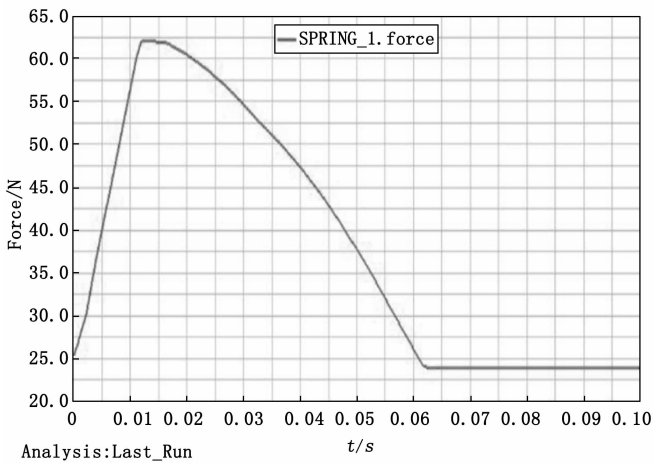


图 11 缓冲簧受力曲线

综上所述, 由单发射击仿真结果来看, 自动机的各部分运动规律基本符合实际要求, 与实际设计的各项参数在允许误差范围内, 因此该虚拟样机的建立及仿真基本可以验证自动机的性能。

4 不同导气孔直径对自动机循环动作的影响

由第 3 节的仿真结果可知, 该虚拟样机的模型构建合理。但当自动机中的一些参数发生变化时, 自动机的动作也会有相应的变化, 因此本节主要研究导气孔直径的变化对自动机动作产生的影响。

4.1 不同导气孔直径下气室压力和活塞受力

在 2.5 节中对标准导气孔直径时的导气压力进行了计算, 并且拟合出压力—时间曲线和活塞作用力—时间曲线。在此将导气孔的直径改变成 3.5 mm 和 4.9 mm, 并拟合压力曲线。

由布拉文经验公式可得, 在改变导气孔直径时, 只会改变气室结构系数 α , 由马蒙托夫研究理论和插值法进行计算, 结果如表 6 所示。

表 6 不同直径导气孔下气室冲量效率和结构系数

导气孔直径/mm	气室冲量效率	结构系数 α
3.5	0.693 3	1.626 95
4.2	0.684 1	2.165 56
4.7	0.736 6	2.797 18

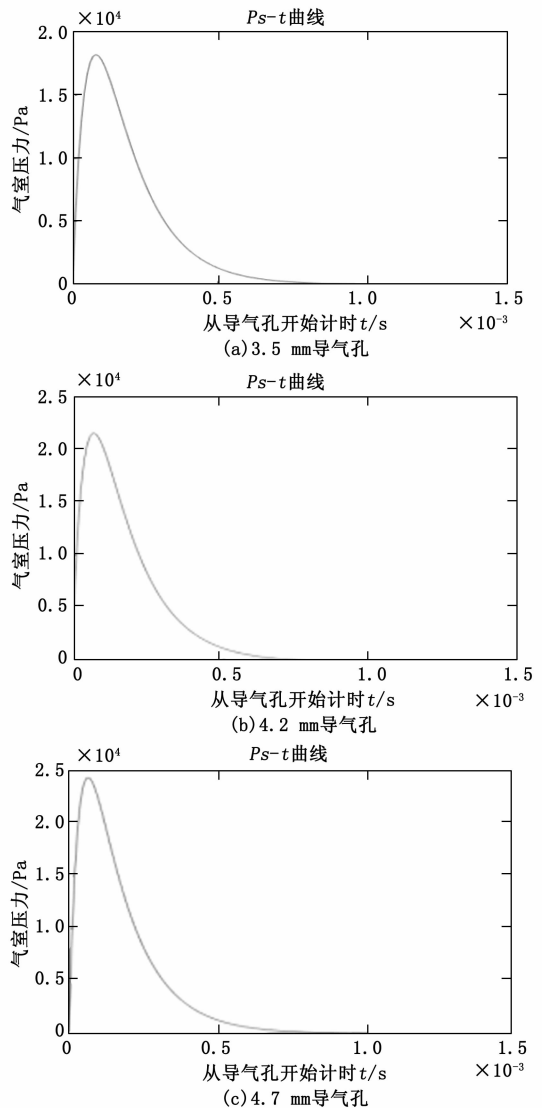


图 12 3 种导气孔气室压力—时间曲线

利用 Matlab 进行拟合得到如下结果:

图 12 为 3 种导气孔对应气室压力曲线, 图 13 为活塞杆受力曲线。

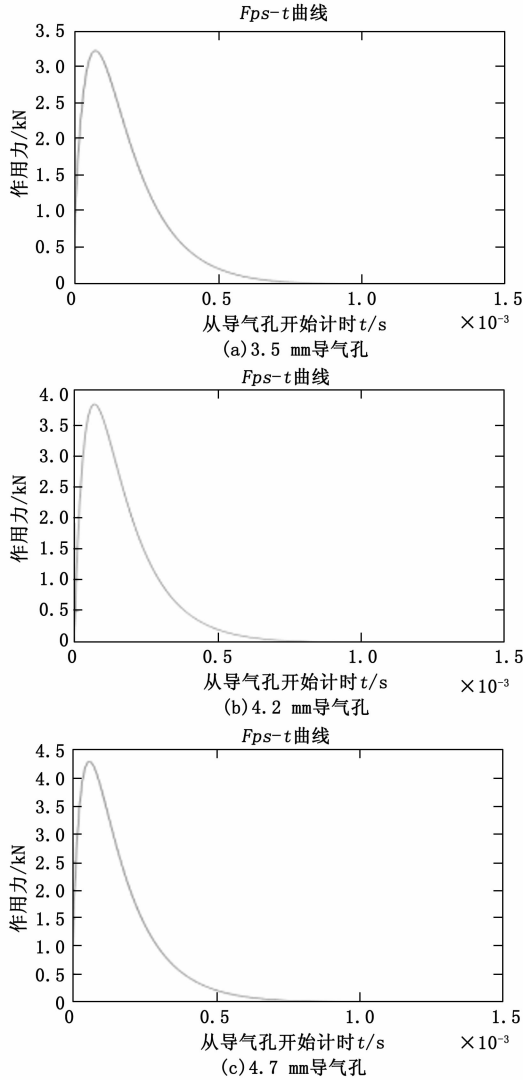


图 13 3 种导气孔活塞作用力时间曲线

由图 13 可得, 随着导气孔的增大, 气室压力随之增大, 活塞杆所受的作用力也随之增大。

4.2 改变导气孔大小的仿真结果及分析

将上节拟合的曲线分别通过 Akima 拟合方式, 并进行拟合完成载荷的加载。仿真分析结果如下: 图 14 和图 15 分别为不同导气孔大小下枪机框速度随时间变化的曲线对比和不同导气孔大小下枪机框位移随时间变化的曲线对比。

由图 15 得到的数据如表 7 所示。

由图 14、图 15 以及表 7 中的数据可以看出, 随着导气孔的直径增大枪机框的后座速度会随之增大, 与原始直径相比, 3.5 mm 直径的后坐速度为 13.632 m/s, 降低了 1.07%, 4.9 mm 直径下后坐速度为 14.140 4 m/s, 速度提高了 2.62%, 这是由于导气孔增大导致燃气压力对活塞作用力增大。图中后坐到位碰撞时损失的能量随着导气孔直

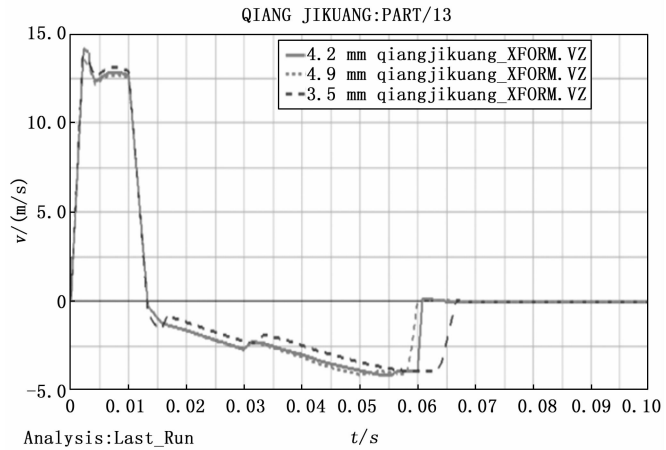


图 14 不同导气孔大小下枪机框速度曲线

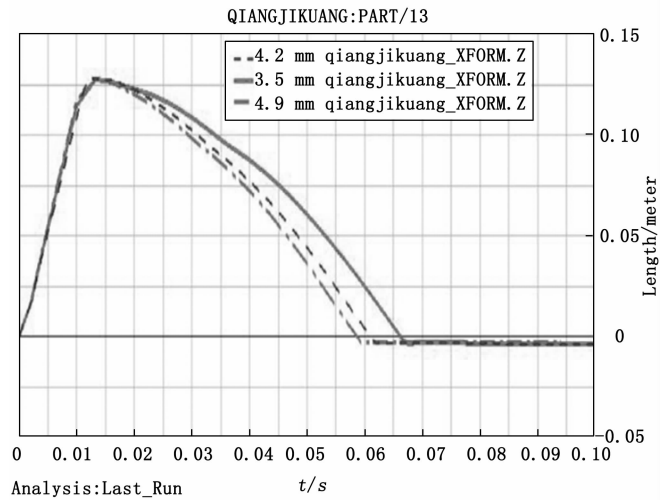


图 15 不同导气孔大小下枪机框位移曲线

径增大而变大, 但其储存在复进簧的能量也变大, 且复进时的初速随之增大的, 其变化范围在 -29.87%~13.23% 之间, 复进到位速度增大, 其变化范围在 -0.47%~3.60%, 当然复进的时间也随着导气孔直径的增大而降低, 使得击发过程中自动循环时间相对缩减, 射频增大。

表 7 不同直径的导气孔下后坐和复进数值仿真对比

导气孔直径/mm	3.5	4.2	4.9
后坐最大速度/(m/s)	13.632	13.779 8	14.140 4
复进时初速/(m/s)	0.815 5	1.162 9	1.316 8
复进到位速度/(m/s)	3.921 6	3.939 9	4.081 6
复进到位时间/s	0.063	0.060	0.058

因此由以上规律可知, 在枪械的设计改进中, 通过导气孔的改变对枪械的性能产生较大的影响, 导气孔直径的增大, 能较大地提高枪械的射频, 增大枪械的火力强度, 但其较大的碰撞能量导致枪械中的关键部件即枪机和枪机框的磨损增大, 对枪械的可靠性和使用寿命产生负面的影

响。通过虚拟样机模型的构建, 可以计算导气孔直径的最优值来提高枪械的综合性能, 或者针对性地提高单方面的作战性能, 为枪械的改进提供参考依据。

5 结束语

本文以某冲锋枪为例首先介绍了该枪自动机的结构及工作原理, 并且构建该枪自动机的虚拟样机模型, 通过仿真对导气式的射击过程进行仿真分析, 得到从击发、后坐、退壳、复进、进弹等在内的整个射击过程中枪机、枪机框的速度位移曲线以及缓冲装置的受力情况, 通过对比试验数据验证模型的可靠性。最后从导气孔直径角度分析了不同大小的导气孔对后坐和复进状态的影响规律, 对该类枪械的设计和优化具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 兵器工业部《枪械手册》编写组. 枪械手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[2] 靳 通. 某迁移式自动机的设计与仿真研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[3] 陈华荣. 某型冲锋枪设计与分析研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[4] 姚养无, 王 刚, 师 翼. 弹簧液压力延迟后坐枪机的动力学仿真 [J]. 兵工学报, 2008, 134 (5): 518-520.

[5] 李 鹏. 导气式自动武器模拟试验系统被试自动机动力学仿真与分析 [D]. 太原: 中北大学, 2011.

[6] 朱明武, 李永新. 开发常规兵器模拟试验系统的意义和任务 [J]. 测试技术学报, 1995 (1): 1-7.

[7] 姚养无. 火炮动态仿真射击试验技术 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008.

[8] 王瑞林, 李永健, 张军挪. 基于虚拟样机的轻武器建模技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[9] 罗庆生, 刘 杨, 李凯林. 基于 ADAMS 的便携式自动割胶机

器人的仿真分析 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 198-202.

[10] 焦 健, 郝秀平, 苏 瑞. 冲锋枪降射频结构设计与动力学分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48 (12): 25-28.

[11] 郭浩然, 袁志华, 尹 鑫. 回转体半自由枪机机构设计与动力学仿真研究 [J]. 井冈山大学学报 (自然科学版), 2020, 41 (1): 59-64.

[12] 袁志华, 韩 铁, 彭 璐, 等. 可控后坐能量的杠杆式半自由枪机动力学仿真 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (4): 385-389.

[13] 苏 瑞, 郝秀平. 基于 ADAMS 的冲锋枪缓冲装置设计 [J]. 机械管理开发, 2016, 31 (1): 24-26.

[14] 王裕安, 薄玉成. 自动武器构造 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991.

[15] 董少峰. 电动式自动机动态模拟试验技术 [D]. 太原: 中北大学, 2007.

[16] 辛学敏, 毛保全. 某型机枪遥控武器站静态特性仿真分析 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (11): 127-131.

[17] 庞海涛, 姚养无, 车 悦, 等. 枪用计数器的加速度感应开关仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 241-246.

[18] 齐 清. 步枪自动机缓冲技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.

[19] 侯保林, 高旭东. 弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[20] 王镒磊, 姚养无, 李树军. 基于过程集成的迫击炮内弹道参量优化 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 193-200.

[21] 樊向武. 弹丸内弹道运行时间计算方法 [J]. 装备制造技术, 2010 (7): 66-67.

[22] 张相炎. 自动机结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[23] 王 刚, 杨 莺, 刘少军. 虚拟样机技术在工程机械领域的应用 [J]. 工程机械, 2003 (8): 11-13.

(上接第 233 页)

[13] YIN X, TAN H. Low-complexity fine frequency synchronization for MB-OFDM based UWB systems [J]. Journal of Communications, 2016, 11 (2): 164-170.

[14] 王小龙, 井 冰, 黄佳森, 等. 宽带系统中载波频偏与采样频偏的联合估计 [J]. 计算机工程与应用, 2014 (9): 93-97.

[15] 王 丹, 杨 恒, 石贝贝. UFMC-MIMO 系统中一种干扰消除算法 [J]. 雷达科学与技术, 2021, 19 (1): 69-73.

[16] SEDLACEK P, SLANINA M, MASEK P. An overview of the IEEE 802.15.4z standard its comparison and to the existing UWB standards [C] // 2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). IEEE, 2019: 1-6.

[17] 徐广辉, 蔚保国, 赵 军, 等. 超宽带信号高灵敏度接收技术研究 [J]. 全球定位系统, 2023, 48 (4): 30-36.

[18] 鲍亚川, 杨梦焕, 李建佳, 等. 遮蔽空间定位导航技术特征分析与发展综述 [J]. 全球定位系统, 2023, 48 (4): 24-29.

[19] 杨港顺. 基于 UWB 信号的地下遮蔽空间信道建模和定位研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.

[20] 李 康, 刘国峰, 廖 焯, 等. 一种基于匹配滤波插值的频偏估计方法 [J]. 光通信研究, 2020 (2): 20-24.

[21] SANJEEV. S, VIMAL B, KUNTAL D, et al. Sparsity-based monobit UWB receiver under impulse noise environments [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8 (3): 849-852.