

doi: 10.7690/bgzdh.2023.05.017

基于 ADAMS 的冲锋枪动力学仿真分析

王镒磊¹, 姚养无¹, 李树军², 罗大鹏²

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 宁波军鸽防务科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 针对某型冲锋枪射击时的动态特性, 分析相关零件运动的合理性。基于多刚体动力学理论, 利用 UG、ADAMS 等软件建立冲锋枪的虚拟样机模型, 对冲锋枪进行包括击发、推弹入膛、后坐、抽壳、抛壳等两连发射击过程的动力学仿真分析, 得到关键零部件在整个运动过程中的位移和速度随时间变化曲线。将数值仿真结果与试验数据进行对比, 结果表明: 该模型是正确可行的, 为进一步的样机校核及优化奠定了基础。

关键词: 冲锋枪; 多刚体动力学; 虚拟样机; 连发仿真

中图分类号: TJ23 **文献标志码:** A

Dynamics Simulation Analysis of Submachine Gun Based on ADAMS

Wang Yilei¹, Yao Yangwu¹, Li Shujun², Luo Dapeng²

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

2. Ningbo Military Pigeon Defense Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: According to the dynamic characteristics of a certain type of submachine gun during shooting, the rationality of the movement of related parts is analyzed. Based on the theory of multi-rigid-body dynamics, the virtual prototype model of the submachine gun is established by using UG, ADAMS and other software, and the dynamic simulation analysis of the submachine gun is carried out, including the process of firing, pushing the cartridge into the chamber, recoil, extraction and ejection. The displacement and velocity curves of the key parts in the whole process of motion are obtained. The numerical simulation results are compared with the experimental data, and the results show that the model is correct and feasible, which lays a foundation for further prototype verification and optimization.

Keywords: submachine gun; multi-rigid-body dynamics; virtual prototype; burst simulation

0 引言

冲锋枪是单兵使用的发射手枪弹的轻型全自动枪。相比于其他枪械, 冲锋枪因携带方便、火力迅猛等特点成为了各国军队在近距离作战中的主要武器, 目前仍大量装备在各军种中^[1]。在冲锋枪的设计过程中, 大多数采用自由枪机式自动方式, 使整枪的结构较为紧凑。而枪机作为冲锋枪的核心部件, 其工作特性的好坏直接影响武器整体性能的优劣。当前对于冲锋枪在整个发射过程的分析比较少, 为研究冲锋枪在射击时的动态特性, 更好地了解关键部件的运动规律, 笔者以某型冲锋枪为研究对象, 对该冲锋枪在连发射击状态下枪机的运动特性进行仿真分析。

1 冲锋枪结构及原理

该型冲锋枪主要由枪管、枪机、延迟块、机匣、机框、复进簧、枪托、握把和击锤等几十个零部件组成, 在 UG 软件中建立其 3 维模型如图 1 所示。

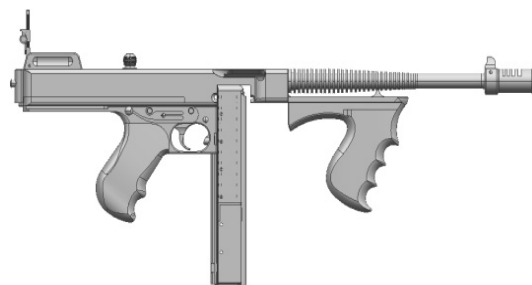


图 1 冲锋枪 3 维模型

冲锋枪在自由枪机式的基础上衍生出了多种巧妙的自动方式。笔者所研究的冲锋枪采用了一种独特的开膛待击、枪机延迟后坐的半自由枪机式自动方式。该方式与其他方式最大的不同为在机匣内部存在一个与之相配合的延迟块, 通过射击过程中不同角度的摩擦阻力来延迟枪机后坐。延迟块与机匣通过机匣上的槽与延迟块两端的凸起实现配合。此外, 枪机在相应的位置上也开有与延迟块相配合的斜槽, 使得击发后延迟块能够带动枪机一起运动。延迟块及其与机匣、枪机等部件的配合如图 2—3 所示。

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2023-02-28

作者简介: 王镒磊(1996—), 男, 山西人, 硕士, 从事轻武器设计、仿真、优化研究。E-mail: 1003579509@qq.com。

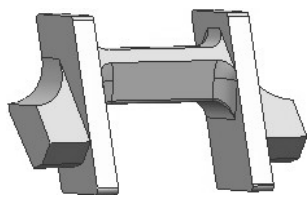


图 2 H 形延迟块模型

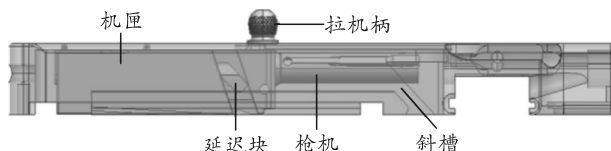


图 3 H 形延迟块与其他零件配合模型

由于采用的是开膛待击的自动方式，其运作原理为：扣动扳机，压缩的复进簧被释放并推动拉机柄向前运动，拉机柄推动延迟块进而带动枪机一起运动，当枪机经过弹匣上方时将子弹经斜面推入弹膛。枪机复进到位后，拉机柄继续复进并将延迟块压下使其两侧的凸起进入机匣的斜槽内，然后拉机柄继续复进，撞击击锤，击锤撞击击针完成击发。击发后，在枪膛合力的作用下，由于延迟块两侧的凸起与机匣斜槽的摩擦作用，枪机只能缓慢后退从而延缓了枪机后坐，其最大优势在于能够在枪机质量较小时发射威力更大的枪弹，但比采用自由枪机式的冲锋枪结构更为复杂^[2-3]。

2 虚拟样机模型的建立

随着计算机技术的发展，计算机辅助设计已经成为工程设计人员不可或缺的工具。ADAMS 能够通过简单的操作较为准确地模拟复杂机构的运动，在机械、航天、兵器等领域得到了广泛应用。笔者拟采用 ADAMS 软件建立该冲锋枪的虚拟样机模型，仿真分析过程须在以下假设的基础上进行^[4]：

- 1) 模型中除了弹簧外其余构件均为刚体；
- 2) 忽略弹壳与弹膛摩擦力及运动件之间的摩擦力。

ADAMS 的仿真流程如图 4 所示。

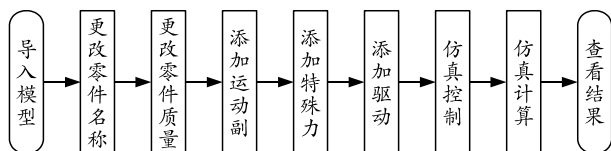


图 4 仿真流程

对于多刚体动力学仿真分析，运动副、特殊力以及驱动的添加是整个仿真建模的关键。

2.1 导入几何模型

UG 中的 3 维模型 CAD 软件可通过 Parasolid

格式导入 ADAMS 中^[5]。在不影响运动分析的前提下，为提高仿真效率，需对几何模型进行一定的简化。最终得到的导入模型如图 5 所示。



图 5 ADAMS 模型导入

2.2 零件名称及质量属性修改

对导入的模型零部件进行重新命名，为提高仿真效率，便于零部件约束及载荷的添加，需对导入的模型零部件进行重新命名。

该型冲锋枪的绝大多数零件采用钢材料，延迟块采用黄铜材料。

2.3 运动副的添加

笔者建立的仿真模型从扣动扳机开始对包括击发、复进、后坐、退壳、进弹等在内的整个射击过程进行了仿真，模型共包含 27 个零件、11 个固定副、4 个移动副、5 个转动副。各零件间的约束关系如表 1 所示^[6]。

表 1 零件间的约束关系

约束副类型	部件 1	部件 2
固定副	发射机座	大地
固定副	机匣	发射机座
固定副	复进簧导杆	机匣
固定副	复进簧导杆座	机匣
固定副	T 形突起	发射机座
固定副	弹匣体	T 形突起
固定副	托弹簧座	弹匣体
固定副	抛壳挺	机匣
固定副	抽壳钩	枪机
固定副	扳机卡榫	发射机座
固定副	枪管	机匣
移动副	拉机柄	机匣
移动副	枪机	机匣
移动副	托弹板	弹匣体
移动副	击针	枪机
转动副	扳机	发射机座
转动副	扳机脱离钩	扳机
转动副	阻铁	发射机座
转动副	击发杠杆	发射机座
转动副	击锤	枪机

2.4 特殊力的添加

2.4.1 接触力的添加

机构间的接触碰撞是枪械系统在整个工作过程的关键，击发、抽壳、抛壳等动作均因机构间的碰撞才能有条不紊地完成。为得到更加真实的仿真结

果, 将接触均定义为实体接触^[7]。本模型所定义的部件间的接触副如表 2 所示。

表 2 零件间的接触关系

部件 1	部件 2	部件 1	部件 2
击锤	枪机	H 形延迟块	机匣
H 形延迟块	拉机柄	H 形延迟块	发射机座
H 形延迟块	复进簧导杆座	H 形延迟块	枪机
H 形延迟块	击锤	弹壳 1	枪机
弹壳 1	托弹板	弹壳 1	弹匣体
弹壳 1	弹头 1	弹壳 1	机匣
弹壳 1	抽壳钩	弹壳 1	抛壳挺
弹壳 1	枪管	弹壳 1	击针
弹头 1	机匣	弹头 1	枪管
弹头 1	弹匣体	弹壳 2	枪机
弹壳 2	机匣	弹壳 2	枪管
弹壳 2	托弹板	弹壳 2	弹匣体
弹壳 2	弹头 2	弹壳 2	弹壳 1
弹头 2	弹匣体	弹头 2	机匣
弹头 2	枪管	托弹板	弹匣体
扳机	发射机座	扳机脱离钩	击发杠杆
击发杠杆	发射机座	击发杠杆	阻铁
阻铁	发射机座	阻铁	枪机
扳机	扳机脱离钩	枪机	枪管
击针	枪机	击锤	拉机柄
击锤	击针	抽壳钩	枪管
拉机柄	枪机		

2.4.2 弹簧力的添加

导入到 ADAMS 中的虚拟样机模型需重新定义弹簧, 该虚拟样机中涉及的弹簧有复进簧托弹板簧、击针簧、扳机簧、阻铁簧、击发杠杆簧和扳机脱离钩簧等多个弹簧。基于 ADAMS 提供的标准弹簧 Spring, 建立各弹簧的虚拟替代簧。

2.5 驱动载荷的添加

本文中涉及的力包括作用在扳机上的扳机力、膛底火药燃气压力以及抽壳阻力。

2.5.1 扳机力

扳机力垂直作用在扳机上, 扳机力大小一般为 30~40 N, 本文中取扳机力为 30 N。

2.5.2 膛底火药燃气压力

在对武器进行动力学分析时, 需加载火药气体压力, 基于经典内弹道理论建立该冲锋枪内弹道计算模型为^[8]:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \\ dZ/dt &= (u_1/e_1)p^n \\ \phi m(dv/dt) &= Sp \\ Sp(l_\psi + l) &= f\omega\psi - \theta\phi mv^2/2 \\ dl/dt &= v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:

$$l_\psi = l_0 \left[1 - \Delta/\rho_p - \Delta(\alpha - 1/\rho_p)\psi \right] \quad (2)$$

式中: χ 、 μ 、 λ 为火药形状特征量; Z 为火药已燃相对厚度; ψ 为火药已燃百分数; u_1 为燃速系数; e_1 为火药弧厚的一半; 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 为弹丸运动速度; 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。其具体参数如表 3 所示。

表 3 内弹道原始数据

参数	数值
枪膛横断面积/dm ²	0.006 642
药室容积/dm ³	0.001 247 6
弹丸行程/dm	1.05
弹丸质量/kg	0.025
火药力/(J/kg)	950 000
装药量/kg	0.000 44
火药密度/(kg/dm ³)	1.6
火药热力参数	0.25
燃速系数/(dm ³ /(s*kg))	5.002 4e-5
燃速指数	0.82

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, 得到内弹道时期膛内压力的变化规律如图 6 所示。

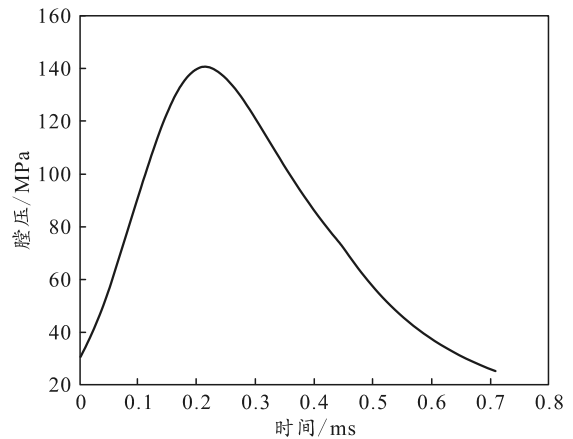


图 6 内弹道 p-t 曲线

在得到内弹道 p-t 曲线后, 通过经验公式将平均压力转化为膛底压力^[9], 其相关公式为:

$$p_T \approx (1 + \omega/(6\phi_1 m))p; \quad (3)$$

$$F_T \approx Sp_T. \quad (4)$$

式中: ϕ_1 为考虑弹丸在膛内运动的旋转功和摩擦功的弹丸质量虚拟系数; ω 为装药量; m 为弹丸质量; F_T 为膛底合力; S 为枪膛横截面积。

将膛底火药燃气压力作用于枪机上, 将力的函数设置为 AKISPL(time, 0, SPLINE_1, 0), 从而实现膛底合力的添加^[10]。

2.5.3 抽壳阻力

抽壳阻力是指拉壳钩从身管中把弹壳拉出来时所遇到的阻力，其计算公式为^[11]：

$$F_{\varphi} = \pi \{ f_0 l_k [p d_1 + 2 E_1 \delta (\Delta - 2 x \alpha / d_{pj})] - d_1^2 p / 4 \} \quad (5)$$

式中： f_0 为弹壳与弹膛之间的摩擦系数； l_k 为弹壳在弹膛内的总长； d_1 为弹壳内径； E_1 为弹壳材料的弹性模量； δ 为弹壳壁厚； Δ 为弹壳外表面与弹膛壁间的相对紧缩量； d_{pj} 为弹壳的平均直径； α 为弹壳锥型部的半锥度角； x 为弹壳后退行程。

通过对各个零件的约束处理及各类弹簧的虚拟弹簧替代，最后建立的某型冲锋枪动力学仿真模型如图 7 所示。



图 7 冲锋枪虚拟样机

3 动力学特性分析

通过仿真分析，连发射击时枪机由从扣动扳机开始包括击发、后坐、退壳、进弹等在内的整个射击过程中的速度与位移曲线如图 8—9 所示。

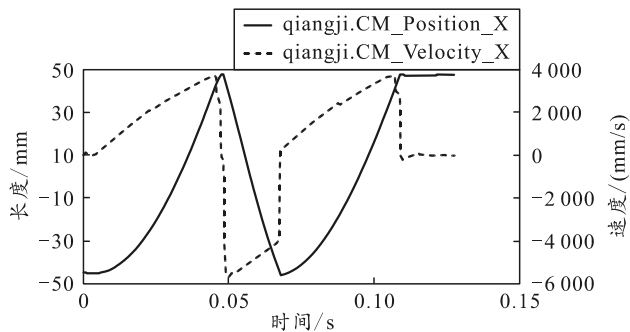


图 8 两连发时枪机的速度、位移曲线

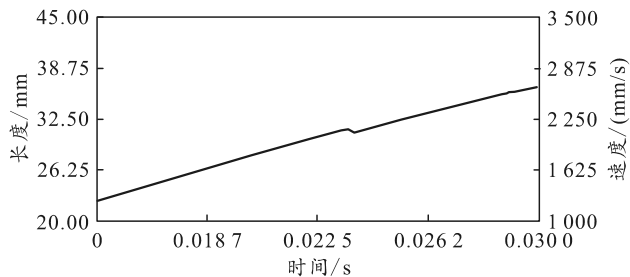


图 9 两连发时枪机的速度曲线放大图

该仿真分析由从扣动扳机开始包括推弹入膛、击发、后坐、退壳、进弹的整个过程。由仿真分析可知在 0 时刻开始扣动扳机，在 0.003 9 s 枪机解脱

阻铁的扣合，在弹簧预压力的作用下枪机开始向前运动，速度不断增大，在 0.023 7 s 时枪机的速度有所变化，此时枪机接触弹壳底部开始推弹入膛。在 0.048 3 s 时刻完成弹丸的击发并开始后退，后坐的最大速度为 5.628 m/s，在 0.067 7 s 完成后坐，相当于一次完整射击。后坐到位的速度为 4 m/s，枪机的后坐行程约为 93 mm，之后枪机开始复进、进弹直到复进到位，复进到位的速度为 3 m/s。

为验证模型的可信度，将数值仿真结果与试验结果进行比较，得到枪机各关键位置的速度仿真结果与试验结果对比如表 4 所示。

表 4 枪机速度数值仿真结果与试验结果对照

条件	仿真数据 v/(m/s)	试验数据 v/(m/s)	相对误差/%
后坐最大	5.628	5.250	6.7
后坐到位	4.000	3.822	4.5
复进到位	3.000	2.860	4.7

枪机位移仿真结果与试验结果对比如表 5 所示。

表 5 后坐位移数值仿真结果与试验结果对照

仿真数据 L/m	试验数据 L/m	相对误差/%
93.0	88.4	4.9

将冲锋枪在连发射击过程中的枪机运动速度与位移的数值仿真结果同试验结果进行对比，由于仿真过程是在一定的假设前提下进行，必然与实际的射击过程存在误差，在一定误差范围内，所建立的虚拟样机模型具有一定的可信度。

4 结束语

笔者主要介绍了某型冲锋枪虚拟样机模型建立的具体实现方法和步骤，通过仿真对枪机在一个完整射击过程中的运动特性进行分析，得到连发射击时枪机由开始运动到推弹入膛、后坐、退壳、复进过程中的枪机速度和位移曲线；并通过与试验数据进行对比验证了所建立模型的正确性，对枪机的运动规律有了更深刻的认识，为该类武器的设计校核及进一步优化设计奠定了基础。

参考文献：

- [1] 王裕安，徐万和，薄玉成. 自动武器构造[M]. 北京：北京理工大学出版社，1994：22-35.
- [2] 曾振宇，黄俊. “画”说汤姆逊 M1928A1 0.45 英寸冲锋枪 M1 0.45 英寸冲锋枪之异同[J]. 轻兵器，2007(18)：28-31.
- [3] 三土，明光. 汤姆逊冲锋枪全传[J]. 现代兵器，2006(11)：20-26.