

doi: 10.7690/bgzdh.2024.11.014

## 某导气式自动武器动力学仿真及试验

欧天界, 贾陆阳, 李东昊, 景春温, 王 勇  
(重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

**摘要:** 为降低成本、缩短武器研发周期, 建立导气式自动武器的气体动力学数值模型。结合 UG 和 ADAMS 多软件平台建立导气式自动武器的虚拟样机模型, 对自动机进行运动特性仿真分析, 得到自动机的速度与位移曲线; 进行导气式自动武器性能试验, 通过高速摄影测得实弹射击时自动机的速度与位移曲线。将试验与仿真进行数据对比, 自动机速度最大误差为 1.5%, 自动机达到最大位移的时间误差为 8.2%, 试验与仿真结果比较吻合, 在误差允许范围之内。结果表明: 该试验验证了仿真结果的可信性, 可为导气式自动武器的研究提供参考。

**关键词:** 导气室压力; 数值模拟; 仿真研究; 试验验证

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Dynamic Simulation and Experiment of Gas Operated Automatic Weapon

Ou Tianjie, Jia Luyang, Li Donghao, Jing Chunwen, Wang Yong  
(Chongqing Jianshe Industry(Group)Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

**Abstract:** In order to reduce the cost and shorten the period of weapon research and development, an aerodynamic numerical model of gas-operated automatic weapon was established. The virtual prototype model of gas-operated automatic weapon was established by using UG and ADAMS software platform. The simulation analysis of the automatic mechanism was carried out, and the velocity and displacement curves of the automatic mechanism were obtained. The performance test of gas-operated automatic weapon was carried out, and the velocity and displacement curves of the automatic mechanism were measured by high-speed photography during live firing. By comparing the experimental data with the simulation data, the maximum error of the automatic machine speed is 1.5%, and the time error of the automatic machine reaching the maximum displacement is 8.2%. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which is within the allowable error range. The results show that the test verifies the credibility of the simulation results, which can provide a reference for the research of gas-operated automatic weapons.

**Keywords:** air guide chamber pressure; numerical simulation; simulation study; experimental verification

### 0 引言

导气式自动武器在现代武器中应用广泛, 可以通过改变导气孔的结构参数, 比如导气孔的直径、位置、气室容积等, 给自动机提供不同的能量。导气装置是利用从身管侧孔导出的部分膛内火药燃气, 作用在活塞上, 推动自动机原动件工作的装置。由于导气装置气室压力对导气式自动武器的性能有重要影响, 许多学者对导气装置动力学特性进行研究。吴佳男等<sup>[1]</sup>进行了某导气式自动武器导气室压力仿真, 计算枪管、弹丸、调节器、活塞杆等内流场与外流场仿真, 并对挤进阻力、活塞速度等进行了仿真分析。袁点等<sup>[2]</sup>建立了基于遗传算法的内弹道参数修正与计算, 并进行多目标优化, 取得最优有效解, 修正后的膛口压强与参量误差均小于 2%, 内弹道计算较合理。黄岚等<sup>[3]</sup>进行了某内能源转管武器导气装置气室流场的数值模拟, 得到导气装置

的压力云图、速度云图等, 分析内部流场对导气孔处的影响。韩晓明等<sup>[4]</sup>对转管武器的导气装置结构参数进行优化设计。

导气室压力是导气式自动武器动力的来源。仿真时, 为确保边界条件添加的正确性, 笔者利用气体动力学计算方法, 对某导气式自动武器系统进行气体动力学数值模拟, 计算导气室压力, 并进行试验验证。

### 1 导气式自动武器运动建模

#### 1.1 结构描述

导气式自动机采用的是活塞式, 导气装置的结构一般由导气孔、气室、活塞等组成, 工作原理如图 1 所示。射击时, 膛内的火药燃气推动弹丸沿枪管内膛向前运动, 当弹丸尾面经过枪管导气孔时, 膛内的火药气体经枪管壁上的导气孔进入到导气装

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-22

第一作者: 欧天界(1986—), 男, 重庆人。

置的气室内，形成气室压力，推动活塞运动，活塞撞击自动机，使自动机具有能够完成后坐的功能。

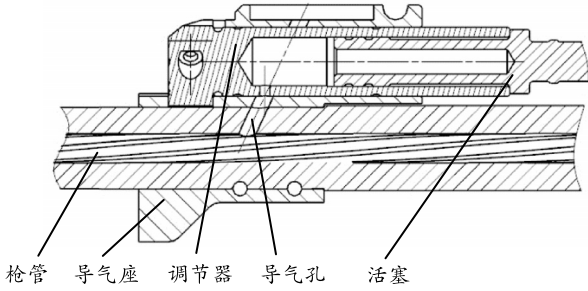


图 1 导气装置工作原理

### 1.2 基本假设

基于某导气室自动武器的工作原理，做出如下假设：

- 1) 不考虑弹丸挤进及燃气流动对枪管及导气室的烧蚀；
- 2) 各运动部件均作刚体处理；
- 3) 弹簧内耗忽略不计；
- 4) 各个零件之间的碰撞为弹性碰撞；

### 1.3 接触碰撞力模型

#### 1.3.1 法向接触力模型

自动武器在碰撞过程中，2 个零件之间的碰撞速度、材料参数、零件尺寸等因素，对碰撞有很大影响。笔者采用 Lankarani-Nikravesh 接触力模型<sup>[5-6]</sup>，表示为：

$$F_n = K\delta^n + C\dot{\delta} \quad (1)$$

式中： $F_n$  为 2 个零件之间的碰撞力； $K$  为 2 个零件碰撞时的刚度系数； $\delta$  为接触体的穿透深度； $n$  为碰撞指数； $C$  为接触碰撞阻尼系数； $\dot{\delta}$  为接触点处的相对碰撞速度。

阻尼系数<sup>[7]</sup>可表示为：

$$C = 3K(1 - c_e^2)\delta^n / 4\dot{\delta}_0 \quad (2)$$

式中： $n$  一般取 1.5； $c_e$  为恢复系数，取 0.9； $\dot{\delta}_0$  为撞击点的初始相对速度。

#### 1.3.2 摩擦力模型

自动武器工作过程中，2 个零件之间发生接触碰撞，应考虑 2 个零件之间相对运动时产生的摩擦力，零件之间的摩擦力对自动机速度、位移最大值的时间有很大影响。仿真过程中，考虑摩擦力的影响，一般采用修正的 Coulomb 摩擦模型<sup>[7-9]</sup>，可以将 2 个零件之间产生的摩擦力准确地描述出来。切向摩擦力可以表示为：

$$F_t = -c_f c_d F_n (v_t / \|v_t\|) \quad (3)$$

式中： $c_f$  为滑动摩擦系数； $c_d$  为动态修正系数； $v_t$  为相对切向速度。

动态修正系数  $c_d$  可以表示为：

$$c_d = \begin{cases} 0, & \|v_t\| < v_0 \\ (\|v_t\| - v_0) / (v_1 - v_0), & v_0 \leq \|v_t\| \leq v_1 \\ 1, & \|v_t\| > v_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v_0$  和  $v_1$  为计算动态校正系数而指定的速度值。

## 2 导气室气体动力学建模求解

利用内弹道及后效期方程可以求得导气孔处的气体压力变化曲线。

### 2.1 导气室压力数值建模

采用文献[10-11]经典内弹道模型，其方程如下式：

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \lambda Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \\ dZ/dt &= u_1 p_g^n / e_1 \\ S p_g &= \phi m_p dv/dt \\ v &= dl/dt \\ p_g &= (f m_p \phi - (k_0 - 1) \phi m_p v^2 / 2) / S(l_\phi + l) \\ l_\phi &= l_0(1 - \Delta(1 - \phi) / \rho_m - \alpha \Delta \phi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $\phi$  为相对已燃体积； $Z$  为火药燃烧量； $u_1$  为燃速系数； $e_1$  为药丸厚度； $p_g$  为膛内火药气体压力； $n$  为燃烧指数； $m_p$  为弹丸质量； $v$  为弹丸速度； $S$  为身管横截面积； $f$  为火药力； $k_0$  为绝热系数； $\phi$  为忽略挤进阻力的次要功系数； $l_\phi$  为药室自由容积缩径长； $l$  为弹丸行程； $l_0$  为药室容积缩径长； $\Delta$  为装药的装填密度； $\rho_m$  为混合装药密度； $\alpha$  为发射药的余容。

导气装置的结构参数：导气孔在枪管上的位置、导气孔的横断面面积、导气管道的长度、气室初始容积、活塞与气室壁之间的间隙、活塞横断面面积、活塞及自动机质量等，利用布拉文经验公式计算导气室压力，其方程如下式所示：

$$\left. \begin{aligned} p_s &= p_d e^{-t/b} (1 - e^{-\alpha t/b}) \\ b &= i_0 / p_d \\ \alpha &= 1 / (1 / \eta_s - 1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $p_s$  为气室压力； $p_d$  为弹丸经过导气孔瞬间的膛内平均压力； $t$  为从弹丸经过导气孔瞬间算起的时间，即气室压力工作时间； $b$  为与膛内压力冲量有关的时间系数； $\alpha$  为与导气装置结构有关的结构

系数； $i_0$  为膛内火药燃气单位面积压力总冲量； $\eta_s$  为气室冲量效率。

在导气式压力作用下，活塞运动方程：

$$m_s \frac{d^2 x}{dt^2} = S_s p_s - F_R \quad (7)$$

式中： $p_s$  为气室内的压力； $S_s$  为活塞端面面积； $m_s$  为活塞及与活塞相连的运动件质量； $F_R$  为活塞与内壁间的阻力。

## 2.2 模型验证

为检验计算的导气室压力结果能够符合试验条件，对导气室压力进行试验验证。试验使用压力传感器(瑞士 Kistler 公司产 6215, 量程 600 MPa, 线性度误差 0.45%)安装于导气室前端, 在电荷放大器的作用下, 将压力传感器收集的信号传递给数据采集器, 由此得到导气室压力曲线, 试验仪器与试验原理如图 2 和 3 所示。

以某导气式自动武器为试验用枪, 改装与本文中结构相同的调节器装置进行导气室压力测量试验, 通过对比导气室压力变化曲线以验证导气室压力计算的正确性。



图 2 导气室压力测量仪器

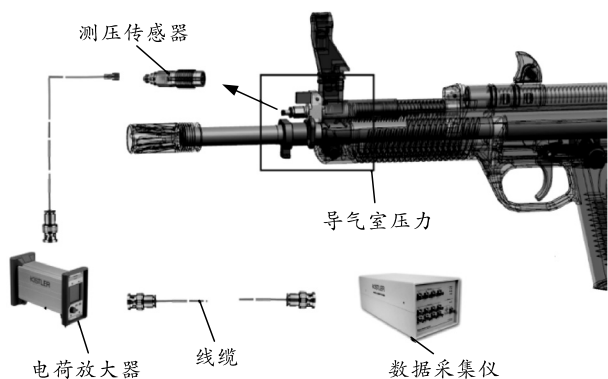


图 3 导气室压力测量试验布置

将实测导气室压力与数据计算进行对比, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 实测与计算, 导气室压力达到最大值的时间分别为 0.002 与 0.001 9 s, 误差为 5%; 实测与计算的最大导气室压力值分别为 30.57 与 32.8 MPa, 误差为 7.3%, 在误差允许范围之内, 计算结果与试验结果基本符合, 验证了导气室压力数据计算的正确性。

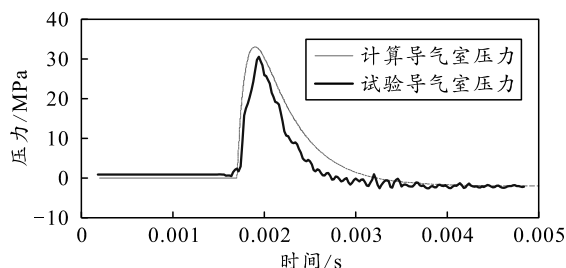


图 4 导气室压力试验值与计算值

## 3 导气式自动武器系统动力学仿真

导气室自动武器的结构构件多且复杂, 直接在 ADAMS 中建模比较困难。利用 3 维建模软件建立自动武器系统的 3 维模型, 并对模型进行简化, 删除螺钉等无关零件。将模型导入 ADAMS 中<sup>[12-14]</sup>, 设置各刚体的材料属性、边界条件、接触参数等。建立的 ADAMS 模型如图 5 所示, ADAMS 核心步骤的建立如图 6 所示。



图 5 某导气室自动武器虚拟样机模型

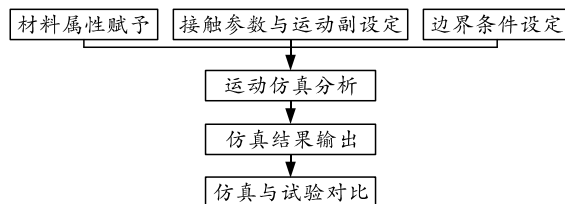


图 6 ADAMS 仿真流程

建立导气室自动武器发射动力学模型, 可以有效地分析自动机后坐与复进过程中, 自动机的速度与位移变化情况。笔者采用多体动力学建模方法, 建立某自动武器发射动力学模型<sup>[15-16]</sup>。导气室自动武器的驱动能源为推动活塞运动的气室压力, 对于自动武器气室压力加载, 由前文所述的内弹道计算与试验获得。

自动机的循环可分为后坐和复进 2 个过程, 后坐行程为: 开锁前行程-开锁-开锁后自由行程-抛壳-枪机惯性后坐-后坐到位缓冲。复进过程为: 缓冲簧加速-枪机复进-机头预转-闭锁-闭锁自由行程。边界条件: 将导气室压力转化为力加载在活塞上, 完成自动武器的后坐与复进行程。

## 4 试验验证与仿真结果分析

导气室自动武器的速度和位移随时间变化与导

气室压力相关，通过对比相同气室压力作用下自动机速度、位移曲线仿真、试验值符合程度，3 者来反映仿真模型建立的正确。

为验证仿真模型的正确性，对自动武器进行试验验证。试验采用某导气式自动武器为试验用枪，试验工装如图 7 所示。试验中对自动机进行标记，并记录自动机复进与后坐过程的速度与位移随时间变化。



图 7 试验用枪

将试验与仿真数据进行对比，图 8 和 9 分别为仿真与试验的速度与位移对比。由数据可知，仿真中自动机速度达到最大值为 6.15 m/s，实测自动机达到最大速度为 6.24 m/s，仿真与实测自动机速度最大值误差为 1.5%，仿真中与实测中，自动机后坐达到最大位移 119 mm 的时间分别为 0.045 s 与 0.014 3 s，时间误差为 8.2%，在允许范围内。

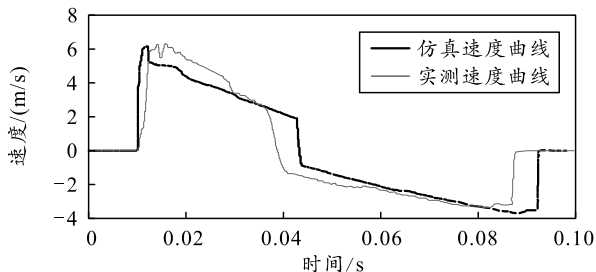


图 8 仿真与试验的速度对比

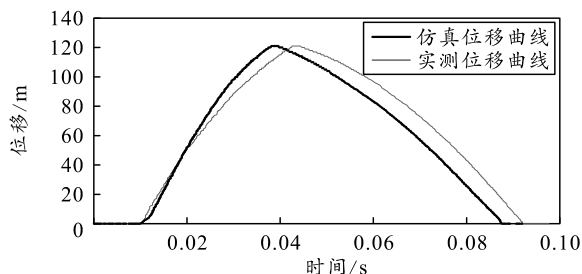


图 9 仿真与试验的位移对比

## 5 结束语

为验证某导气式自动武器模型建立的正确性，笔者通过理论分析、动力学仿真与试验研究的方法，对某导气式自动武器进行研究。具体结论如下：

1) 通过导气式自动武器的工作原理可知，导气室压力为仿真计算的关键因素。

2) 导气室压力的数值计算与试验数据进行对比，实测与数值计算的最大导气室压力值误差为 7.3%，在误差允许范围之内，验证了仿真方案的可靠性。

3) 通过试验得到的自动机位移和速度变化曲线与仿真数据进行对比，自动机速度最大值误差为 1.5%，自动机达到最大位移的时间误差为 8.2%，在误差允许范围之内，验证了仿真结果的可信性。

4) 仿真计算与实际试验结果高度吻合，为导气式自动武器的动力学仿真提供参考，避免大量试验研究引起的成本过高等问题，对缩短武器研发周期具有重要的作用。

## 参考文献：

- [1] 吴佳男, 王文杰, 谭继宇. 某导气式自动武器导气室压力仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9): 51-54.
- [2] 袁点, 张朋, 张克. 某模块化枪族导气装置动力特性仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 50-53.
- [3] 黄岚, 韩晓明, 李强, 等. 某内能源转管武器导气装置气室流场的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 21-24.
- [4] 韩晓明, 薄玉成, 王惠源, 等. 内能源转管武器导气装置结构参数优化设计[J]. 火炮发射与控制, 2008(2): 50-53.
- [5] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems[J]. Journal of Mechanical Design, 1990, 112(3): 369-376.
- [6] 侯雨雷, 井国宁, 邓云蛟, 等. 含转动副间隙的两转动并联机构动力学建模与动态特性分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(2): 158-165.
- [7] 白争锋. 考虑铰间间隙的机构动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 刘太素, 钱林方, 陈光宋, 等. 某输弹机开放式链传动建模及动力学特性分析[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2109-2117.
- [9] 赵彦玲, 夏成涛, 王弘博, 等. 钢球展开过程运动学及动力学分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 185-192.
- [10] 李佳圣, 邱明, 廖振强, 等. 带膛口助旋制退器的转管机枪动力学建模与仿真[J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1344-1349.
- [11] 宋健, 宋向华, 蔡蓓, 等. 火箭弹自力弹射内弹道特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(5): 944-954.