

doi: 10.7690/bgzd.2024.10.003

无人机载无后坐力枪内弹道性能数值模拟

刘朋展¹, 王国强¹, 苏精明², 王敏祥³, 张娜⁴

- (1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 重庆嘉陵特种装备有限公司弹药技术中心, 重庆 400032;
3. 重庆建设工业(集团)有限责任公司通用装备研究所, 重庆 400054;
4. 淮海工业集团工艺技术部, 山西 长治 046012)

摘要: 为降低枪械武器的发射后坐力, 建立基于全可燃药筒、尾喷气体式无后坐力发射系统内弹道数值计算模型。分析尾喷气体式无后坐力发射系统工作原理与发射过程, 建立发射过程中的内弹道模型, 进行弹道系统参数设计与内弹道数值仿真。设计无后坐力发射弹道系统验证方案, 进行内弹道试验, 并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析。结果表明, 该模型能正确模拟发射过程中膛压变化。

关键词: 无人机; 无后坐力; 可燃药筒; 内弹道; 数值计算

中图分类号: TJ32 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Internal Ballistics Performance of Recoilless Gun Equipped with UAV

Liu Pengzhan¹, Wang Guoqiang¹, Su Jingming², Wang Minxiang³, Zhang Na⁴

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Ammunition Technology Center, Chongqing Jialing special equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China;
3. General Equipment Research Institute, Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China;
4. Process Technology Department, Huaihai Industrial Group, Changzhi 046012, China)

Abstract: To reduce the launching recoil of firearms, a numerical calculation model of internal ballistics based on combustible cartridge and recoilless was established. The working principle and launch process of the rear jet gas recoilless launch system are analyzed, and the zero-dimensional interior ballistic model during the launch process is established, to simulate the performance of ballistic system. A recoilless launch trajectory system verification scheme was designed, and internal ballistic was conducted. The numerical simulation results were compared with the experimental results. The results indicate that the model can accurately simulate the changes in chamber pressure during the launch process.

Keywords: UAV; recoilless; combustible cartridge; interior ballistic; numerical calculation

0 引言

无人作战是未来战争发展趋势。小型无人机没有人类的自适应控制能力, 很难适应枪械发射时的后坐力^[1]。无后坐力发射原理是通过后部设置的拉瓦尔喷管向后喷射气体, 抵消弹头向前移动的不平衡冲量, 可用于改进小口径武器使其适应小型无人机的搭载。

奥伯多夫毛瑟公司已经开发出一种适用于无人作战平台的 30 mm 无后坐力炮 RMK30^[2]。肖俊波等^[3]进行了延迟式喷管减后坐原理的动力学建模与仿真。王杨等^[4]针对无后坐力炮的流场进行了数值模拟。Cheng 等^[1]对身管延时喷射减后坐枪的性能预测方法进行了研究。戴劲松等^[5]针对速射火炮的定向反射膨胀减后坐机理开展了研究。付丽华等^[6]针对无后坐力炮的内弹道参量进行了分析。庞春桥

等^[7]针对轻型无后坐力炮的动不平衡冲量特性开展了研究。张帆^[8]针对 14.5 mm 喷孔前置式膨胀波枪炮发射过程开展了数值仿真与分析。王颖泽等^[9]针对膨胀波火炮的内弹道性能分析与数值模拟开展了研究。章勇等^[10]针对平衡炮的内弹道不平衡冲量开展了研究。采用可燃药筒方案代替弹壳用于无后坐力发射可以省去抽壳、抛壳机构, 提高武器系统的轻量化与可靠性水平。苏精明等^[11]研究了可燃药筒与发射药的匹配性能。郭俊廷等^[12]对埋头弹可燃药筒的性能进行了模拟。Yang 等^[13]对不同组分的可燃药筒性能进行了研究。Zhang 等^[14]研究了用 BEMS 树脂基复合涂层改善可燃弹壳耐高温和防水性能。邹伟伟等^[15]对小口径可燃药筒及装药的燃烧性能进行了研究。

笔者采用全可燃药筒尾喷气体式无后坐力发射

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-27

基金项目: 山西省基础研究计划(202203021212161)

第一作者: 刘朋展(1988—), 男, 河北人, 博士。

方案进行了小口径身管发射武器方案设计。建立了基于全可燃药筒、无后坐力发射方案的内弹道数值计算模型，通过试验验证了所建立的数值模型。

1 无后坐力发射方案

无后坐力发射系统弹药方案如图 1 所示，主要由拉瓦尔喷管、弹膛、身管和弹药 4 部分组成，其中弹药由可燃药筒、发射药、弹头、点火头和挡板组成。点火装置接收弹膛内磁场能量形成的感应电流，点燃底火，引燃发射药，完成发射过程。

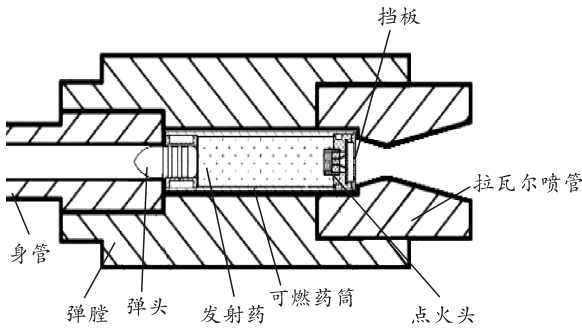


图 1 全可燃药筒无后坐力发射系统方案

无后坐力发射过程分为 4 个阶段：1) 定容燃烧阶段，点火后弹膛内火药迅速燃烧；2) 在膛内达到一定压力时，尾部的挡板与底火部件在火药气体的作用下破碎，从后部喷出，处于开膛燃烧阶段；3) 火药的迅速燃烧阶段，此阶段弹头向前运动冲量与尾喷气体的冲量达到平衡；4) 当弹丸出枪口后，进入第 4 阶段，直至火药燃烧完全。

2 内弹道过程建模

考虑无后坐力发射过程到将膛内压力分布规律应用到燃速方程、运动方程和状态方程的研究中是十分困难的，因此，采用平均压力的概念建立内弹道方程组如式 1 所示。

$$\left. \begin{aligned} dZ_i/dt &= u_i p^n \\ \psi_i &= \chi_i Z_i (1 + \lambda_i Z_i + \mu_i Z_i^2) \\ dl/dt &= v \\ dv/dt &= Sp/\phi m \\ d\eta/dt &= \frac{C_A v_j S_j}{f \omega} \frac{p}{\sqrt{\tau}} \\ d\tau/dt &= \left(\frac{d\psi(1-\tau)}{dt} - \frac{\theta \phi m v dv}{f \omega dt} - \frac{\theta \tau d\eta}{dt} \right) / (\psi - \eta) \\ p &= f \omega \tau (\psi - \eta) / S(l + l_w) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

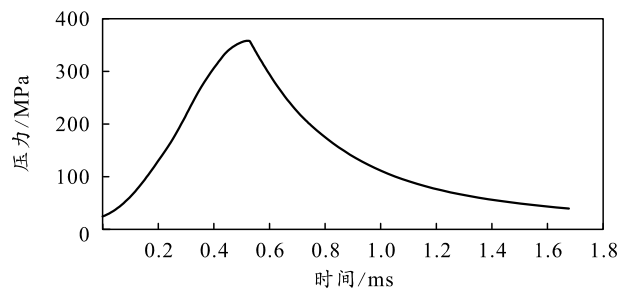
3 模型验证

设计了 14.5 mm 口径无后坐力发射方案，基本

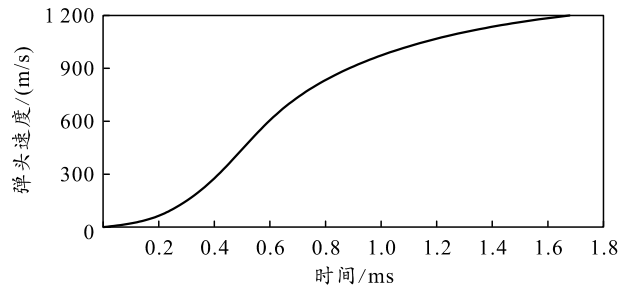
参数如表 1 所示。将设计参数带入内弹道方程组中进行数值模拟，使用四阶龙格-库塔方法计算内弹道，得到了发射过程中膛压、弹头速度、后坐力随时间变化的规律，如图 2 所示。最大膛压达到了 360 MPa，内弹道时间为 1.7 ms。如图 2(b)所示，弹丸初速为 1 200 m/s。

表 1 无后坐力发射系统初始参数

名称	数值	名称	数值
口径/mm	14.5	可燃药筒长度/mm	118
弹头质量/g	20	燃速常数/(m/(MPa·s))	6.15E-8
发射药燃速常数/(m/(MPa·s))	5.5E-8	可燃药筒质量/g	21.7
发射药质量/g	21	药室容积	3.391 2E-4
发射药火药力	7E5	可燃药筒火药力	10.5E5



(a) 膛内压力-时间曲线



(b) 膛内弹头速度-时间曲线

图 2 内弹道仿真曲线

后坐力冲量仿真结果如图 3 所示，后坐冲量先向前(身管指向方向)，再向后，最终稳定到 1 N·s。

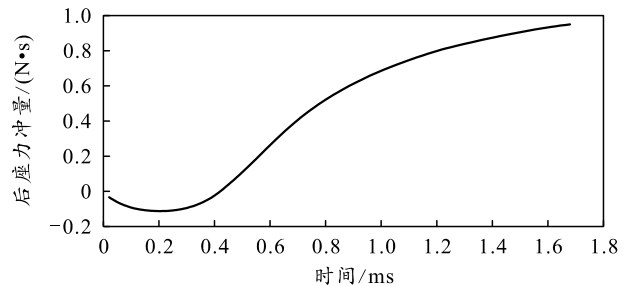


图 3 后坐力冲量仿真曲线

4 试验结果

加工的弹道枪、弹药如图 4 所示，进行了弹道射击试验，测试了膛压与初速。



(a) 试验弹道枪



(b) 试验样弹

图 4 试验器材与试验过程

测量了弹膛中部膛压，结果如图 5 所示，发射过程中的最大压力达到了 375 MPa，内弹道持续了 2 ms。测试了弹道枪的位移为 23 mm，取滑轨的摩擦系数为 0.05，计算得到后坐力为 2.27 N·s。测试了枪口 5 m 处弹头速度，为 1 100 m/s。

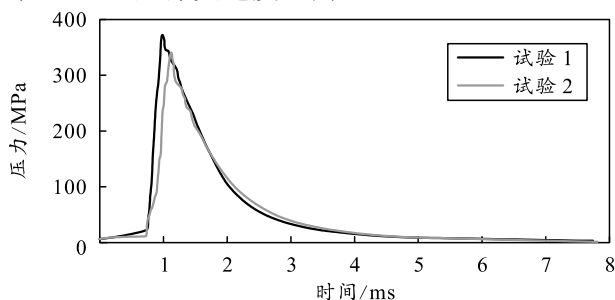


图 5 试验测试膛内压力曲线

5 结论

笔者以适合无人机搭载的小口径无后坐力发射武器为研究对象，对其内弹道性能进行了数值分析，并进行了弹道试验，验证了数值分析结果。

1) 针对 14.5 mm 口径无后坐力发射系统进行了数值模拟，模拟结果与试验结果基本符合一致。

2) 采用全可燃药筒方案的小口径无后坐力发射武器，可以将发射过程后坐力降低到 2.27 N·s。

3) 方案可行，初速可达到 1 100 m/s。

参考文献：

- [1] CHENG C, WANG C, ZHANG X. A prediction method for the performance of a low-recoil gun with front nozzle[J]. Defence Technology, 2019, 15(5): 703-712.
- [2] FOSS C F. Mauser pushes 30mm RMK for wider roles[J]. Jane's Defence Weekly, 2003, 39(5): 28-29.
- [3] 肖俊波, 杨国来, 李洪强, 等. 身管武器时延式喷管减后坐动力学建模仿真[J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 9.
- [4] 王杨, 姜孝海, 郭则庆, 等. 某无后坐炮的流场数值模拟[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(1): 5.
- [5] 戴劲松, 何福, 苏晓鹏, 等. 速射火炮定向反射膨胀减后坐力机理研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 9.
- [6] 付丽华, 阮文俊. 无后坐炮一维两相流内弹道参量分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019(7): 5.
- [7] 庞春桥, 陶钢, 李召, 等. 轻型无后坐力炮的动不平衡冲量特性[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2424-2431.
- [8] 张帆. 膨胀波火炮发射原理及其在常规结构枪炮中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [9] 王颖泽, 张小兵. 膨胀波火炮两相流内弹道性能分析与数值模拟[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 154-159.
- [10] 章勇, 杨臻, 吴臣. 平衡炮内弹道不平衡冲量技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(2): 6.
- [11] 苏精明, 王满林, 霍永清, 等. 小口径可燃药筒与发射药匹配性研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 4.
- [12] 郭俊廷, 余永刚. 半可燃药筒埋头弹内弹道性能数值模拟[J]. 弹道学报, 2021, 33(3): 52-56.
- [13] YANG W T, YANG J X, ZHANG Y C, et al. A comparative study of combustible cartridge case materials[J]. Defence Technology, 2017, 13(3): 127-130.
- [14] ZHANG B, FU E, SHI H, et al. Improvement in High Temperature-Resistant Performance and Waterproof Property of Combustible Cartridge Case with BEMS Resin Based Composite Coating[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022(3): 47.
- [15] 邹伟伟, 郝晓琴, 张志勇, 等. 小口径可燃药筒及装药的燃烧性能研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1423-1429.