

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.003

火炮新型动力后坐试验方法

靳青梅¹, 张相炎¹, 崔二巍²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 西北机电工程第二〇二研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 为提高火炮后坐仿真试验精度, 提出一种新型火炮动力后坐试验方法。描述试验基本原理, 根据系统特点, 把火炮后坐和内弹道结合起来建立动力学耦合模型, 仿真计算某具体型号火炮, 并与实弹数值仿真时结果进行对比。结果表明: 动力后坐试验数值仿真结果与实弹数值仿真结果具有良好的一致性。该方法试验精度高, 具有很好的可行性和通用性。

关键词: 数值仿真; 火炮; 动力后坐

中图分类号: TJ306 **文献标志码:** A

New Gun Power Recoil Test Methods

Jin Qingmei¹, Zhang Xiangyan¹, Cui Erwei²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. No. 202 Research Institute of Northwest Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: For improving gun recoil simulation accuracy, introduce a new test method of gun dynamic recoil. Describes the basic principles of the test, and according to the characteristics of system, combine the recoil with the interior ballistic to establish a dynamic coupling model. Simulate and calculate certain type gun, compare with the numerical simulation result of shooting. The results show that, agree well with the numerical simulation results power recoil test and live ammunition test numerical simulation results, this method has high testing precision, and has good feasibility and universality.

Keywords: numerical simulation; gun; dynamic recoil

0 引言

为了检测和考核火炮的后坐特性、炮架的受力和各机构可靠性及强度等参数, 我们已经研究了多种可行、等效的火炮后坐模拟试验系统^[1]。但是随着科技的发展, 军事装备随之更现代化更先进, 使得武器系统越来越复杂, 加大了火炮后坐模拟试验与鉴定的难度, 增加了试验样品的费用和靶场的消耗^[2]。鉴于此, 笔者提出了一种新型动力后坐试验方法。火炮新型动力后坐试验方法是在现有的火炮后坐模拟试验系统的基础上提出来的, 先设计出一套估算装填参量的方案, 通过实装火炮发射模拟弹来使后坐部分产生的动态效应与实弹射击时相同或近似相同。它具有灵活性高, 可根据靶场的面积选择装填参数; 所需科研经费少; 对仿真试验具有较强的指导意义等优势。

1 火炮新型动力后坐试验方法的基本原理

1.1 火炮发射过程后坐部分与弹丸的动量关系

实弹射击时, 把弹丸、火药气体和后坐部分作

为一个系统, 在火炮发射过程中动量守恒, 动量平衡方程^[3]为

$$W = \frac{m + 0.5\omega}{m + \omega + m_h} v_0 \quad (1)$$

式中: m_h 为火炮后坐部分的质量; W 为后坐部分的后坐速度; m 为弹丸的质量; v_0 为弹丸运动的相对运动速度; ω 为装药量。

1.2 火炮新型动力后坐仿真试验系统的工作原理

火炮新型后坐仿真实验系统的工作原理是在被测火炮上装填模拟弹进行后坐模拟试验, 以火药为动力源。动力后坐试验时, 点燃发射药, 在被试炮身管内膛产生火药燃气一方面作用于模拟弹, 推动模拟弹加速运动; 另一方面同时作用于炮身, 使得后坐部分向后运动。

1.3 动力后坐试验时弹丸的研制要求

在研制模拟弹时, 必须要保证模拟弹结构形状能够满足火炮正常装填和连发, 并能够用模具简便制造出来, 需要适当简化模拟弹的外形^[4]。

在文中，模拟弹的弹重可比实弹轻或者重。如果想要获得较小的弹丸初速和消耗较少的装药量，则将模拟弹研制得比实弹重；如果想获得较小的膛压，可将模拟弹设计得较轻。

综上所述，在装填模拟弹进行动力后坐试验时，由于弹重、弹丸结构等发生了较大改变，这就需要改变药型及装药量，来达到模拟试验要求。

1.4 动力后坐试验时弹丸初速与装药量的关系

为了使动力后坐试验达到与实弹射击时近似相同的后坐效果，则需要使得动力后坐试验时被试炮后坐部分获得的动量与实弹射击时相同，即动力后坐试验时被试炮后坐部分速度与实弹射击时保持一致，仍为 W 。

动力后坐试验时，运用相似理论，膛内时期仍遵循动量守恒定律，即

$$W = \frac{m_1 + 0.5\omega_1}{m_h + m_1 + \omega_1} v_{01} \quad (2)$$

式中： m_1 为模拟弹重； ω_1 为动力后坐试验时所需装药量； v_{01} 为动力后坐试验时模拟弹初速。

在同一门被试炮上进行试验时，可以认为动力后坐试验时弹重、装药量等参量是由实弹射击时弹重、装药量等参量变化而来。即令

$$m_1 = m + \Delta m \quad (3)$$

$$\omega_1 = \omega + \Delta \omega \quad (4)$$

$$e_1 = e + \Delta e_1 \quad (5)$$

$$v_{01} = v_0 + \Delta v_0 \quad (6)$$

联立式 (1)~(6) 可得

$$\Delta v_0 = \frac{\Delta \omega + \Delta m W - \Delta m v_0 - 0.5 \Delta \omega v_0}{m + \Delta m + 0.5 \omega + 0.5 \Delta \omega} \quad (7)$$

1.5 装填参数变化量之间的关系

在本课题研究中，只修正了装药量、火药厚度及弹重的变化，被试火炮的药室容积保持不变，综合修正公式^[5]可近似为：

$$\frac{\Delta p_m}{p_m} = 2 \frac{\Delta \omega}{\omega} - \frac{4}{3} \frac{\Delta e_1}{e_1} + \frac{3}{4} \frac{\Delta m}{m} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = \frac{3}{4} \frac{\Delta \omega}{\omega} - \frac{1}{3} \frac{\Delta e_1}{e_1} - \frac{2}{5} \frac{\Delta m}{m} \quad (9)$$

式 (7)、(8) 和 (9) 组成的方程组中有 3 个等式方程，但有 5 个变量，即 Δp_m 、 $\Delta \omega$ 、 Δe_1 、 Δm 和 Δv_0 。可选取这 5 个变量中的一个为自变量，再选取剩余 4 个量中的一个量为其取不同的定值，可得到剩余 3

个变量随着自变量变化的曲线图。比如选取 Δv_0 为自变量，取 $\Delta e_1=2 \text{ mm}$ 、 $\Delta e_1=2.5 \text{ mm}$ 、 $\Delta e_1=3 \text{ mm}$ 、 $\Delta e_1=3.5 \text{ mm}$ 、 $\Delta e_1=4 \text{ mm}$ ，则可得 Δp_m 、 $\Delta \omega$ 、 Δm 随 Δv_0 变化的曲线图，再根据动力后坐试验需要，从这些图中选取合适的装填参量。

2 动态仿真试验系统的动力学仿真模型

2.1 系统的受力分析

在动态仿真试验系统的工作过程中，作用于被试火炮后坐部分的主动动力为炮膛合力 F_{pt} 和后坐部分重力 $m_h g$ ，被试火炮后坐部分所受阻力有制退机力 $F_{\phi h}$ 、复进机阻力 F_f 、常数阻力 F_c 。

2.2 系统运动微分方程的建立

运动方程的建立按照火炮的后坐特点分为弹丸在膛内运动时期、火药气体后效时期、和惯性后坐时期^[6]3 个阶段。

膛内时期是一个比较特殊的时期，在该时期内，弹丸在火药燃气的作用下加速向前运动，同时后坐部分加速向后运动。既涉及到内弹道又涉及到后坐部分运动。传统的求实弹射击后坐运动微分方程时，求出平均压力曲线 $p-t$ 表格函数，再对膛内时期的炮膛合力 F_{pt} 进行插值计算，便于后坐微分方程求解。在膛内时期，笔者把内弹道和火炮后坐运动结合起来建立数学模型。

动力后坐试验时，膛内时间 t_g 是未知的。需要先根据弹丸行程 l_g 来求出膛内时间 t_g 。

2.2.1 膛内时期 ($0 \leq t \leq t_g$) 运动微分方程的建立

被试炮膛内时期后坐部分的运动微分方程。

1) 以被试火炮后坐部分为研究对象，根据牛顿第二定律有：

$$m_h \frac{dV}{dt} = F_{pt} - F_{\phi h} - F_f - F_c \quad (10)$$

其中

$$F_{pt} = \frac{1}{\phi} \left(1 + 0.5 \frac{\omega}{m} \right) A p \quad (11)$$

$$F_{\phi h} = f(a_x) V^2 \quad (12)$$

$$F_f = F_{f0} \left(\frac{V_0}{V_0 - A_f x} \right)^n \quad (\text{气压式复进机}) \quad (13)$$

$$F_f = F_{f0} + kx \quad (\text{弹簧式复进机}) \quad (14)$$

$$F_c = v m_h g + m_h g (f \cos \theta - \sin \theta) \quad (15)$$

式中： θ 为火炮发射时的射角； f 为摩擦系数； ϕ 为次要功系数； ν 为密封装置的等效摩擦系数。

2) 弹丸的运动微分方程。

以弹丸为研究对象，根据牛顿第二定律有：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Ap}{\phi m} \quad (16)$$

3) 速度与位移之间的关系。

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (17)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (18)$$

式中 l 和 x 分别为弹丸行程和后坐位移。

4) 内弹道方程。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{e_1} p^n \quad (19)$$

$$p = \frac{f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\phi m v^2}{A(l+l_\psi)} \quad (20)$$

由式 (10)、(16)、(17)、(18) 和 (19) 5 个方程所组成的微分方程组中，总共含有 5 个未知量， p 是关于 v 、 l 、 Z 的函数，可以求解。求解时，用龙格库塔数值解法编程计算。在膛内时期这一阶段可以求出 p_g 、 v_0 、 v_g 、 x_g 以用于后效期计算。

2.2.2 后效时期 ($t_g \leq t \leq t_k$) 运动微分方程的建立

后效期时弹丸已经离开炮口，火药燃气对火炮的后坐部分继续产生作用，只需建立后坐运动微分方程。

$$m_h \frac{dv}{dt} = F_{pt} - F_{\phi h} - F_f - F_c \quad (21)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (22)$$

$$F_{ptg} = \frac{1}{\phi} \left(\phi_1 + 0.5 \frac{\omega}{m} \right) A p_g \quad (23)$$

$$F_{pt} = \chi F_{ptg} e^{-\frac{t-t_g}{b}} \quad (\text{有炮口制退器}) \quad (24)$$

$$F_{pt} = F_{ptg} e^{-\frac{t-t_g}{b}} \quad (\text{无炮口制退器}) \quad (25)$$

式 (21) 中， F_c 、 F_f 、 $F_{\phi h}$ 的公式同膛内时期一样。

2.2.3 惯性时期 ($t_k \leq t \leq t_\lambda$) 运动微分方程的建立

惯性期炮膛合力为 0，后坐部分只受后坐阻力。

$$m_h \frac{dv}{dt} = F_{pt} - F_{\phi h} - F_f - F_c \quad (26)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (27)$$

$$F_{pt} = 0 \quad (28)$$

式 (26) 中 F_c 、 F_f 、 $F_{\phi h}$ 的公式同膛内时期一样。

3 实弹数值仿真与动力后坐试验数值仿真结果的对比

3.1 某 130 mm 加农炮的结果对比

装填参数如表 1 所示。

表 1 装填参数

参数	实弹数值仿真	动力后坐试验数值仿真
弹重 m/kg	33.4	68.4
装药量 ω/kg	12.9	19.6
后坐重量 m_h/kg	2 600	2 600
炮膛截面积 S/dm^2	1.394	1.394
火药厚度 e_1/mm	1.15	3.15
药室容积 W_0/dm^3	18.58	18.58

图 1 为某 130 mm 加农炮后坐阻力曲线。从图 1 中可以看出，动力后坐试验数值仿真得到的后坐阻力曲线与实弹数值仿真时规律相同，一致性较好。

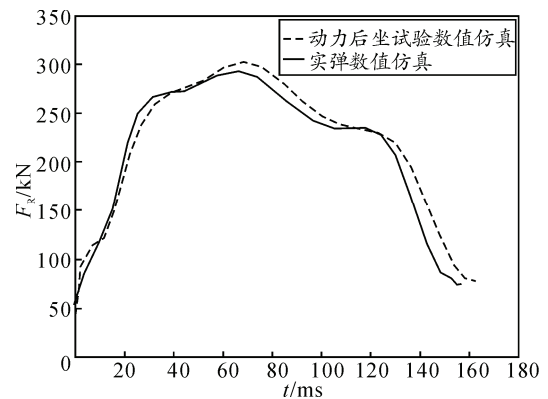


图 1 某 130 mm 加农炮 F_R-t 曲线

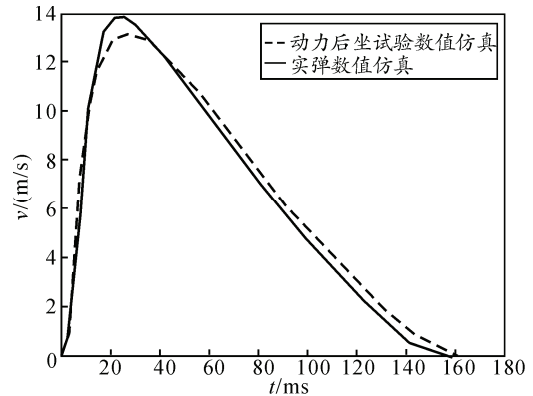


图 2 某 130 mm 加农炮 $v-t$ 曲线

图 2 为某 130 mm 加农炮后坐速度曲线。从图

2 可看出：动力后坐试验数值仿真得到的后坐速度曲线与实弹数值仿真时规律近似相同，一致性较好。

表 2 几项主要参数指标对比

数据类型	F_{Rm}/kN	x_{rm}/mm	$v_m/m \cdot s^{-1}$	x_{vm}/mm
实弹数值仿真	292	606	13.83	193
动力后坐数值仿真	301	604	13.2	202
相对误差/%	3	0.3	4.5	4.6

表 2 中， F_{Rm} 和 x_{rm} 为最大后坐阻力及其对应的位移， v_m 和 x_{vm} 为最大后坐速度及其对应的位移。可以看出，这几项主要参数指标对比的误差不超过 5%。

4 结束语

笔者通过 Matlab 软件模拟了新型动力后坐试验方法，采用新型动力后坐试验方法对某具体型号火炮进行了数值仿真计算，并与实弹数值仿真结果进行了对比，结果表明：

1) 新型动力后坐试验方法在理论上是可行的，

(上接第 6 页)

统计分析发射方位角一次差，其均值和标准差如表 1 所示。

表 1 发射方位角一次差均值与标准差 (°)

参数	均值	标准差
发射方位角一次差	0.002	0.006

分析图 5 和表 1 中的数据，文中方法与文献[6]中的公式法计算结果吻合比较好，精度高，易于编程实现，具有较大的工程应用价值。

3 结束语

通过算例数据分析，基于高斯投影的发射方位角计算方法精度高，易于实现，可在相关领域应用。但是由于是采用高斯投影的方法，当射程较大时，

灵活性较高；

2) 在膛内时期把内弹道和火炮后坐结合起来建立的耦合模型是正确的；

3) 数值仿真对动力后坐试验具有较强的指导意义。

参考文献：

[1] 张金忠, 童皖, 徐航. 关于在火炮后坐动态模拟试验中的后坐阻力失真分析[J]. 测试技术学报, 2004, 18: 81-84.

[2] 郑锦, 丛树学, 武翰文. 一种新的火炮武器系统射击精度试验方法[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(1): 98-102.

[3] 姚养无. 火炮后坐仿真试验系统及其动力学数值仿真[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 152-155.

[4] 杨兆华, 王耀民. 五七高炮小型试验用塑料模拟弹[J]. 中国塑料应用, 1978(1): 25-29.

[5] 钱林方, 侯保林, 徐亚栋. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 111-183.

[6] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 160-170.

发射点和落点可能不在一个度带里，需要把发射点和落点统一到同一度带进行计算。

参考文献：

[1] 周立锋, 姜大治, 韩先平. 高精度发射方位角计算方法研究[J]. 战术导弹技术, 2008(6): 13-16.

[2] 罗海银, 刘利生, 李安, 等. 导弹航天测控通信技术词典[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 6-7.

[3] 朱华统, 郑育富. 大地测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1987: 414-421.

[4] 邬熙娟, 江国焰, 高俊强. 子午线收敛角计算公式及计算精度分析[J]. 现代测绘, 2005, 28(6): 22-25.

[5] 朱紫阳, 施一民. 测地坐标系中子午线收敛角的直接解式[J]. 同济大学学报, 2003, 31(8): 968-971.

[6] 李厚朴, 边少锋. 高斯投影的复变函数表示[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 5-9.