

doi: 10.7690/bgzd.2015.04.003

多弹种发射新型火炮自动机技术

闫俊超, 张相炎, 刘 宁

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为降低战争冲突中所配备武器的要求, 同时也使得其后勤管理更加方便有效, 提出一种能够实现多弹种发射的新型火炮自动机的设想。以 30 mm 口径为基础, 建立一个新型的火炮自动机模型, 并在其基础上进行相关动力学数值模拟仿真。分析结果表明: 该设计方案是可行的, 通过合理设计自动机及其各机构参数, 可以在所建自动机上实现多弹种发射的目的。

关键词: 多弹种; 火炮; 自动机; 数值仿真

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Technology of Automatic Gun with Multi-caliber Bullet

Yan Junchao, Zhang Xiangyan, Liu Ning

(Mechanical Engineering College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For reducing equipment demand in battle, and making logistic management more efficiently at the same time, puts forward a design for realizing new automatic gun with multi-caliber bullet launching. Based on 30 mm caliber, established a new automatic gun model. Based on it, carry out corresponding dynamic numerical simulation. The analysis results show that the automatic continuous firing is available for different caliber bullets by a rational design of automatic gun and parameters of its agencies.

Keywords: multi-caliber bullet; gun; automatic; simulation

0 引言

现代战争的形式多种多样, 为了不断适应新环境下的现代化战争需求, 兵器在其发展的过程中也被不断地赋予新的内容和使命。时下钓鱼岛、黄岩岛等争端问题形势严峻, 为了能够应对不同的冲突形式, 一门舰艇上往往需要配备多种发射武器。笔者以此为背景, 提出一种可以实现多弹种发射的火炮自动机技术, 使其可以实现“一炮多弹”的用途, 这样不仅能够利用它来应付不同的冲突形式, 而且还有利于后勤管理工作更加方便地进行, 可谓一举两得。

文中以不同的弹丸和装药量配重比形成的内弹道性能来模拟多弹种发射时的内弹道性能, 进而给出自动机的设计方案和受力运动数学模型, 并在此基础上进行模拟仿真^[1-2], 验证文中观点的可行性。

1 模型建立

1.1 炮膛合力模型

炮膛合力 F_{pt} 是使得自动炮后坐部分运动的主动力。自动炮在射击过程中, 其身管内膛的火药燃烧所产生的高温高压的气体压力作用于炮膛, 该作

用力则被称之为炮膛合力 F_{pt} ^[3]。

一般在研究炮膛合力 F_{pt} 时, 常将 F_{pt} 分为 3 个阶段来进行研究, 即启动期、弹丸膛内运动期以及火药气体后效期。

1) 启动期。

启动期由击发底火开始, 至弹带完全挤入膛线为止。该时期对后坐运动的影响一般忽略不计。

2) 弹丸膛内运动期。

弹丸膛内运动期由弹带完全挤入膛线开始, 至弹丸离开炮口为止。该时期炮膛合力的表达式为

$$F_{pt} = (1 + \frac{\omega}{2m}) / (\varphi_1 + \frac{\omega}{3m}) \times pA \quad (1)$$

其中: ω 、 m 分别为火药装药质量和弹丸质量; φ_1 为阻力系数(对于 $1/d > 30$ 的中等威力的火炮, 一般取值为 1.05); p 为膛内平均压力; A 为药室膛底的截面面积。

3) 火药气体后效期。

火药气体后效期由弹丸离开炮口开始, 至膛内的火药气体压力衰减为外界大气压为止。该时期的炮膛合力通常采用经验公式来计算得到, 即:

收稿日期: 2014-11-09; 修回日期: 2014-12-26

作者简介: 闫俊超(1990—), 男, 山西人, 在读硕士, 从事自动炮的建模、仿真及设计研究。

$$F_{pt} = Ap_{gt} \times e^{-\frac{t-t_0}{b}} \quad (2)$$

$$b = \frac{\omega(B - 0.5v_0)}{A(p_{gt} - p_k)} \quad (3)$$

其中： t_0 、 v_0 、 p_{gt} 分别指的是弹丸出炮口瞬间的时间、弹丸初速以及膛底压强； p_k 指的是一般认为后效期结束时的火药气体压力，取值为 0.176 4 MPa； B 为经验系数，取值为 1 250~1 300 之间，量纲为 m/s。

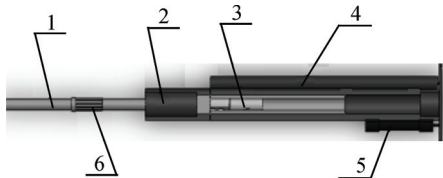
需要指出的是，当弹丸离开炮口的瞬间，膛线阻力消失，炮膛合力会发生突变。

综上所述，炮膛合力的表达式为：

$$F_{pt} = \begin{cases} (1 + \frac{\omega}{2m}) / (\varphi + \frac{\omega}{3m}) \times pA & (0 \leq t < t_g) \\ (\varphi + \frac{\omega}{2m}) / (\varphi + \frac{\omega}{3m}) \times p_g A & (t = t_g) \\ Ap_{gt} \times e^{-\frac{t-t_g}{b}} & (t_g < t \leq t_k) \\ 0 & (t > t_k) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 自动机模型

自动完成重新装填到发射下一发炮弹的全部动作由火炮自动机来完成^[4]。根据不同的分类方法，火炮自动机可分为多种结构。文中采用的自动机模型结构如图 1 所示。



1. 身管；2. 炮箱；3. 炮闩；4. 炮闩复进簧；
5. 液压缓冲簧；6. 炮管螺帽。

图 1 火炮自动机模型

文中采用身管长后坐式自动炮结构，在后坐结束后，炮闩被卡锁卡在后方而炮身继续复进，当炮身将要复进到位时，解脱卡锁，炮闩在炮闩复进簧的作用下推弹入膛并发射^[5]。

如图 1 所示，本模型的反后坐装置由大、小刚度身管复进簧、炮闩复进簧以及液压缓冲器 4 部分组成。在身管后坐的过程中，与身管固连的身管螺帽首先会压缩小刚度身管复进簧，当后坐距离达到一定值 x_1 时，炮管螺帽的花键齿开始压缩大刚度身管复进簧；当后坐距离达到另一一定值 x_2 时，身管撞击液压缓冲器的外筒而受到缓冲器的后坐阻力；当然，后坐的整个过程中，炮闩复进簧都会受到压缩

而产生后坐阻力。

由上述模型可以得到后坐过程中身管所受后坐阻力的表达式：

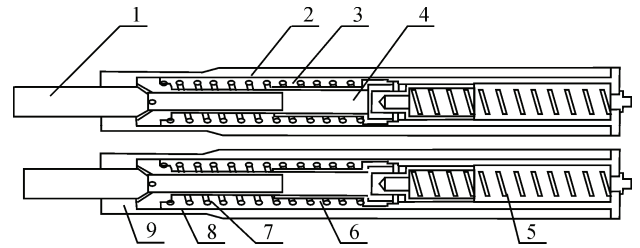
$$F_R = \begin{cases} F_{01} + F_{03} + (K_1 + K_2)x + f - m_h g \sin \varphi & (0 \leq x < x_1) \\ F_{01} + F_{02} + F_{03} + (K_1 + K_2)x + K_3(x - x_1) + f - m_h g \sin \varphi & (x_1 \leq x < x_2) \\ F_{01} + F_{02} + F_{03} + F_{04} + (K_1 + K_2)x + K_3(x - x_1) + K_4(x - x_2) + f(a_x)v^2 + f - m_h g \sin \varphi & (x \geq x_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中由动量守恒原理得

$$v' = m_h \times v / (m_h + m_y) \quad (6)$$

式中： x 、 v 分别表示后坐部分的位移和速度； m_h 、 v 分别表示后坐部分的质量和速度； m_y 表示液压缓冲筒的质量； F_{01} 、 F_{02} 、 F_{03} 、 F_{04} 分别为各弹簧的预紧力； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别表示各弹簧的刚度； a_x 表示液压缓冲器的流液孔面积，它随后坐 x 的变化而变化； f 为后坐部分所受摩擦力； g 为重量加速度； φ 为自动炮射角。

文中液压缓冲器作用过程如图 2 所示。

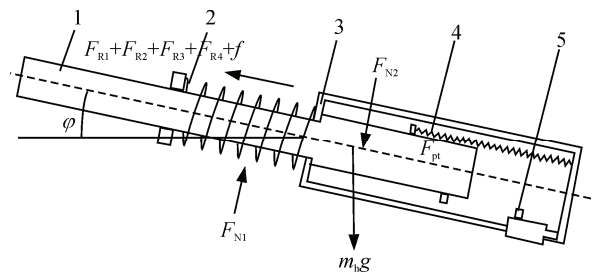


1. 活塞杆；2. 缓冲筒；3. 后腔；4. 调节器内腔；5. 调节腔弹簧；
6. 活塞复进簧；7. 斜孔；8. 沟槽；9. 前腔。

图 2 液压缓冲器结构

2 后坐运动基本方程

根据自动炮的工作原理，取自动炮的后坐部分为研究对象，进行受力分析，进而建立自动炮的后坐运动方程^[6-8]。图 3 所示为自动炮在射击时的后坐部分的受力分析示意图。



1. 炮身；2. 身管复进簧；3. 炮箱；
4. 炮闩复进簧；5. 液压缓冲器。

图 3 射击时后坐部分受力分析

从上图中可以看出，射击时后坐部分所受的主动力包括：后坐部分的重力 $m_h g$ ；炮膛合力 F_{pt} 。

后坐部分所受的阻力包括：炮身复进簧作用于炮身的阻力 F_{R1} 、 F_{R1} ；炮闩复进簧作用于后坐部分的阻力 F_{R3} ；液压缓冲器作用于后坐部分的阻力 F_{R4} ；后坐部分所受摩擦阻力 f 。

后坐部分所受的约束反力包括炮箱作用于炮身的法向约束反力 F_{N1} 、 F_{N2} 。

以沿炮膛轴线为 x 轴，根据牛顿第二定律，可以得到后坐部分的运动微分方程

$$m_h \frac{d^2x}{dt^2} = F_{pt} + m_h g \sin \varphi - (F_{R1} + F_{R2} + F_{R3} + F_{R4}) - f \quad (7)$$

式中 x 表示后坐部分沿炮膛轴线的运动行程。

为了方便起见，将式 (7) 表示为

$$m_h \frac{d^2x}{dt^2} = F_{pt} - F_R \quad (8)$$

3 数值仿真及结果分析

参考国内某 30 mm 口径自动炮技术指标，设定该自动机的主要技术参数如下：

口径： $d=30$ mm；

最大膛压：不大于 350 MPa；

后坐力：不大于 42 kN；

后坐行程：280~340 mm。

在满足以上条件的前提下，通过调整装药量和弹重配比来模拟多弹种发射时的内弹道性能。合理调节各弹簧的预紧力和刚度以及液压孔 a_x 的变化规律，从而验证是否可以得到适合的后坐运动。

通过调整各参数，得到以下合理参数，如表 1。

表 1 各参数数值

参数	数值	参数	数值
F_{01}/kN	1.5	$K_1/(\text{N}/\text{mm})$	5.0
F_{02}/kN	1.5	$K_2/(\text{N}/\text{mm})$	5.0
F_{03}/kN	8.0	$K_3/(\text{N}/\text{mm})$	50.0
F_{04}/kN	1.0	$K_4/(\text{N}/\text{mm})$	1.5
x_1/mm	260	x_2/mm	270

输入以上已知条件，便可以计算得到文中所建自动机在不同装填条件下的后坐运动规律。

需要注意的是，射角的大小会影响后坐的运动规律，显而易见，射角为负时会减小后坐位移，而射角为正时会增大后坐位移。表 2 是表示后坐位移 $x=280\sim 340$ mm 时的火药装药量 ω 和弹丸质量 m 的关系，其中，后坐位移 x 的最小值和最大值分别对应射角为 -20° 和 75° 时。

从上表中可以看出：通过合理布置装药量 ω 和弹丸质量 m ，便可以实现自动炮的多弹种发射。

图 4、图 5 是射角为 -20° 、装药质量 ω 为 0.045 kg、弹丸质量为 0.475 kg 时和射角为 75° 、装药质量 ω 为

0.100 kg、弹丸质量为 0.386 kg 时的后坐运动曲线，从图中可以更加直观地看出不同装填条件下的后坐运动规律。

表 2 ω 、 m 对后坐位移 x 的影响

ω/kg	m/kg	x/m	$F_{R\max}/\text{kN}$
0.045	0.470~0.500	0.280~0.293	19.2
0.060	0.340~0.500	0.280~0.321	26.9
0.070	0.270~0.500	0.280~0.329	30.8
0.080	0.235~0.475	0.280~0.340	38.3
0.090	0.205~0.430	0.280~0.340	40.9
0.100	0.175~0.386	0.280~0.340	40.2

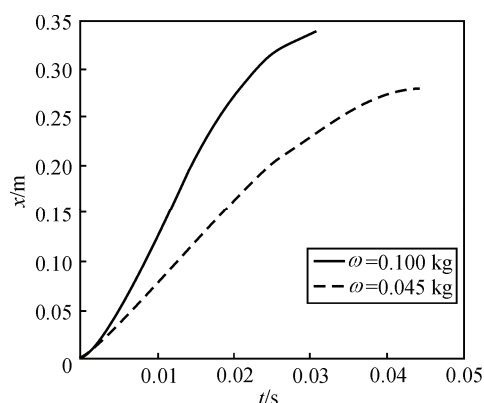


图 4 不同装填条件下的后坐时间-位移曲线

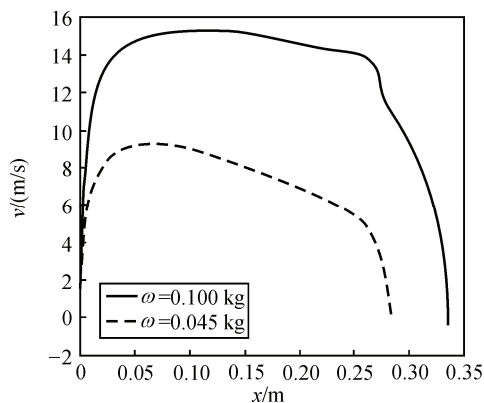


图 5 不同装填条件下的后坐速度-位移曲线

文中对所建自动炮要求最大膛压不超过 350 MPa，表 3 是装药量 ω 变化时为满足这一要求的弹丸可以配备的最大质量 m_{\max} 。

表 3 满足最大膛压要求的 ω 、 m 值 kg

ω	m_{\max}	ω	m_{\max}
0.045	0.975	0.085	0.500
0.050	0.875	0.090	0.465
0.065	0.665	0.095	0.440
0.070	0.615	0.100	0.415

通过以上分析，可以得到满足文中所建自动炮实现多弹种发射要求的 ω 、 m 关系图，具体如图 6 所示。

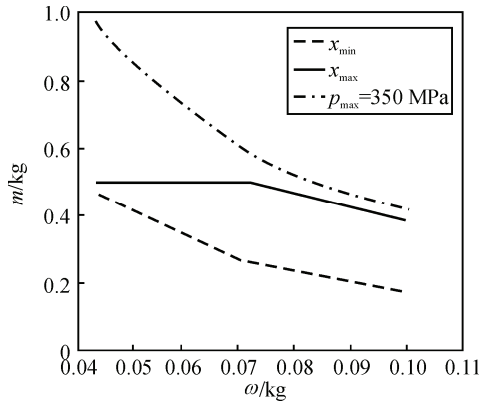


图 6 ω-m 关系曲线

从图中可以看出：只要装药量 ω 和弹丸质量 m 的组合落于图中 x_{\min} 和 x_{\max} 2 条线段之间的范围，那么在该装填条件下就可以实现文中所建自动炮的自动连射，即证明文中所建自动炮可以实现多弹种发射。

4 结束语

笔者建立了多弹种发射火炮自动机方案模型，并对其进行了动力学模拟仿真^[9]，从仿真算例结果可以得到以下结论：

1) 对于文中涉及到的自动炮而言，在弹丸质量一定且其他装填条件不变的前提下，后坐位移 x 和装药量 ω 呈正相关的关系。

(上接第 4 页)

在此基础上，可以准确地预测出目标的未来位置，提高炮兵对运动目标射击的准确性。因此，利用卡尔曼滤波算法，有效地提高了火控系统的火力反应时间和射击精度。

5 结束语

卡尔曼滤波算法采用预测—更新的递推算法，适合计算机进行快速计算。随着对系统状态的不断测量，可以快速收敛，从而对系统状态进行准确估计。在火控系统中使用该算法，可以快速准确估计运动目标，有效地提高了武器系统的火力反应时间

2) 对于文中涉及到的自动炮而言，在后坐位移一定且装填条件不变的前提下，弹丸质量 m 和装药量 ω 呈负相关的关系。

3) 文中所建自动机可实现多弹种发射，且仿真结果给出了模拟内弹道时装药量 ω 为 0.045~0.100 kg 时对应的需要配备的弹重，进而验证了笔者的设想。

参考文献：

- [1] 郑鹏, 张相炎. 基于虚拟样机技术的某舰炮自动机动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(2): 56-70.
- [2] 徐凤军, 高跃飞. 某高炮自动机动力学仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 14-17.
- [3] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 111-224.
- [4] 张相炎. 火炮自动机设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 16-139.
- [5] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 10-133.
- [6] 曾晋春, 杨国来. 某火炮自动机虚拟样机建模与仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 42-45.
- [7] 蔡文勇, 陈运生. 车载火炮动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2006(4): 12-15.
- [8] 武俊明, 姚养无. 某型榴弹发射器自动机动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(2): 66-68.
- [9] 赵澎, 龚友平, 胡杭民. 面向离合器大批量定制的虚拟设计仿真平台研究[J]. 机电工程, 2013, 30(4): 417.

和射击精度，满足了现代战争的需要。

参考文献：

- [1] 周启煌, 单东升. 坦克火力控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 28-29.
- [2] 高靖廷, 黄宪义, 许梅生. 炮兵射击学[M]. 合肥: 合肥炮兵学院, 1994: 98-102.
- [3] 郭治. 现代火控理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 47-48.
- [4] 宋国合, 陈同军. 某远程火箭炮火控系统仿真训练平台[J]. 兵工自动化, 2013, 32(3): 21-23.
- [5] 李相民, 孙瑾, 谢晓方, 等. 火力控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 45-46.