

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.005

基于 Simulink 的软后坐火炮反后坐装置的仿真分析

秦 凯

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究软后坐火炮后坐装置运动的可行性, 根据软后坐火炮受力情况, 建立软后坐火炮后坐装置运动微分方程, 通过 Simulink 仿真计算, 研究软后坐火炮动力学特性。结果表明: 该方法能得到整个运动循环后坐部分的运动规律, 结果符合软后坐火炮后坐装置运动规律。

关键词: 软后坐火炮; 后坐装置; 仿真计算

中图分类号: TJ303⁺.4 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Soft Recoil Gun Recoil Devices Based on Simulink

Qin Kai

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

Abstract: In order to study the feasibility of the soft recoil gun recoil device movement, according to the force of the soft recoil gun, the differential equation of the soft recoil gun recoil device was established, and the dynamic characteristics of the soft recoil gun were studied by Simulink simulation. The results show that the method can obtain the motion law of squat portion of the whole motion cycle, and the result accords with the motion law of recoil device of the soft recoil gun.

Keywords: soft recoil gun; recoil devices; simulation calculation

0 引言

火炮反后坐装置是火炮必不可少的重要部件。软后坐火炮又称为前冲式火炮。在发射前, 常规后坐火炮的后坐部分保持不动。火炮射击时, 发射载荷直接传递到后坐部分, 炮膛合力经过反后坐装置缓冲之后, 再传递到炮架上。与常规火炮后坐运动不同, 前冲火炮在射击前, 其后坐部分先向前运动, 然后击发射击, 射击时前冲能量可以抵消火炮的部分后坐能量^[1]。笔者通过对软后坐火炮动力学分析, 建立软后坐火炮后坐运动的微分方程, 通过 Simulink 仿真计算, 研究软后坐火炮动力学特性。

1 数学模型建立

1.1 炮膛合力分析

炮膛合力主要分为 2 个阶段: 1) 弹丸在膛内运动时的炮膛合力, 这一时期有火药燃气作用在膛底的力、作用在药室锥面上的轴向分力、弹丸对膛线作用的轴线分力; 2) 火药后效期的炮膛合力, 一般采用经验公式进行计算^[2-3]。

弹丸沿膛线运动时期的炮膛合力:

$$F_{pt} = F_t - F_{zm} - F_{dx} \quad (1)$$

火药燃气作用于膛底的力:

$$F_t = (\varphi_1 + \omega/2m)pA_t/\varphi \quad (2)$$

火药燃气作用于药室锥面的轴向分力:

$$F_{zm} = (A_t - A)p_t \quad (3)$$

弹丸对膛线作用的轴向分力:

$$F_{dx} = (\varphi_1 - 1)Ap/\varphi \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1), 整理得

$$F_{pt} = (1 + \omega/2m)AP/\varphi \quad (5)$$

式中, p 为内弹道计算的平均压力, 一般是离散的表格函数, 对于计算任一时间 t 点, 可用三点插值的方法求得^[4]。

后效期炮膛合力, 在没有炮口制退器时, 可表示为

$$F_{pt} = F_g e^{-t/b} \quad (6)$$

有炮口制退器时, 根据相关经验公式表示为

$$F_{pt} = \chi F_g e^{-t/b} \quad (7)$$

后效期作用时间 τ , 一般认为膛内火药燃气下降到 $p_k = 0.017\ 64$ MPa 时, 此时炮膛合力近似值 $F_{pt,k} \approx AP_k$ ^[5], 则

$$F_{pt,k} = F_g e^{-\tau/b} \approx AP_k \quad (8)$$

后效期开始时的炮膛合力为

$$F_g \approx AP_g \quad (9)$$

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-22

作者简介: 秦 凯(1993—), 男, 江苏人, 硕士, 从事火炮反后坐装置研究。E-mail: 1083460097@qq.com。

联立式(8)、式(9)可求得 τ :

$$\tau = b \ln(p_g/p_k) = 2.303 b \lg(p_g/p_k) = 2.303 b \lg(p_g/0.1764)。$$

计算后效期时间常数 b :

$$b = (\beta - 0.5)m_w v_0 / F_g。 \quad (10)$$

其中 $\beta = B/v_0$, 对于 105 mm 加农炮, $B=1250 \sim 1275$ 。通过上述分析, 采用插值方法得到最终炮膛合力曲线如图 1 所示。

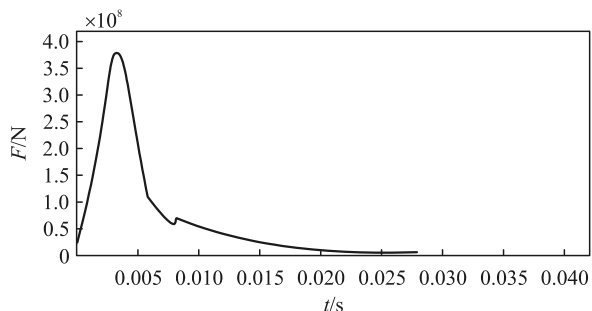


图 1 炮膛合力

1.2 软后坐运动计算

与常规后坐火炮不同, 软后坐火炮射击时, 其射击循环主要分前冲时期、后坐时期和复进时期^[6]。

液体气压式前冲机在受挤压过程中, 活塞压缩气体, 气体对活塞的力就是前冲机力, 其过程可描述为多变过程:

$$p_f V^n = p_0 V_0^n = \text{常数}; \quad (11)$$

$$F_f = A_f p_f = A_f p_0 (V_0/V)^n; \quad (12)$$

$$V = V_0 - A_f X; \quad (13)$$

$$F_f = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f X))^n。 \quad (14)$$

前冲火炮射击时全炮受力的分析方法与常规后坐火炮受力分析方法相同。利用达朗贝尔原理, 建立全炮的动平衡微分方程。整个运动循环的计算, 可利用龙格-库塔法解 1 阶微分方程组数值方法求解。由于前冲机力和炮膛合力有各自变化规律, 所以按各个时期分段进行。

1) 在前冲加速阶段。

后坐部分受 3 个力作用, 前冲机力 F_q 、制退机阻力 $F_{\phi h}$ 和摩擦力 f 。

$$m_h (d^2x/dt^2) = 2F_q - F_{\phi h} - f。 \quad (15)$$

代入各项参数:

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n - K_1 \rho / 2 [(A_0 - A_p)^3 / a_x^2 + K_2 A_{ij}^3 / K_1 A_1^2] v^2 - f。 \quad (16)$$

边界条件为: $t=t_0=0$ 时, $x=0, v=0$; $v=v_1=v_{\max}$ 时, $t=t_1, x=X_1$ 。

2) 弹丸在膛内运动时期。

在前冲减速时期, 微分方程为

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n - \frac{K_1 \rho}{2} [(A_0 - A_p)^3 / a_x^2 + K_2 A_{ij}^3 / K_1 A_1^2] v^2 - f - F_{pt}。 \quad (17)$$

边界条件为: $t=t_1$ 时, $x=X_1, v=v_1$; $t=t_2$ 时, $v=v_2=0, x=X_2=X_{q\max}$ 。

在后坐加速时期, 微分方程为

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n + K_1 \rho / 2 [(A_0 - A_p)^3 / a_x^2 + K_2 A_{ij}^3 / K_1 A_1^2] v^2 + f - F_{pt}。 \quad (18)$$

边界条件为: $t=t_2$ 时, $x=X_2, v=0$; $t=t_3$ 时, $v=v_3, x=X_3$ 。

3) 在火药气体后效期。

由于处于后坐时期, 微分方程为

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n + \frac{K_1 \rho}{2} \left[\frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2 A_{ij}^3}{K_1 A_1^2} \right] v^2 + f - F_{pt}。 \quad (19)$$

边界条件为: $t=t_3$ 时, $x=X_3, v=v_3$; $t=t_4$ 时, $v=v_4, x=X_4$ 。

4) 后坐惯性时期。

后效期结束, 没有炮膛合力, 继续后坐, 微分方程为

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n + \frac{K_1 \rho}{2} \left[\frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2 A_{ij}^3}{K_1 A_1^2} \right] v^2 + f。 \quad (20)$$

边界条件为: $t=t_4$ 时, $x=X_4, v=v_4$; $t=t_5$ 时, $v=v_5=0, x=X_5$ 。

5) 复进时期。

复进时期的运动方程与前冲时期相同, 微分方程为:

$$m_h (d^2x/dt^2) = A_f p_0 (V_0/(V_0 - A_f x))^n - \frac{K_1 \rho}{2} \left[\frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2 A_{ij}^3}{K_1 A_1^2} \right] v^2 - f。 \quad (21)$$

边界条件为: $t=t_5$ 时, $x=X_5, v=0$; $t=t_6$ 时, $v=v_5, x=X_6=0$ 。

为了简化计算, 仿真计算采用零射角工况, 摩擦力 $f = m_h g (\mu \cos \varphi + \sin \varphi)$ 取定值 800 N, 软后坐火炮采用定速击发方式, 当反后坐装置前冲速度达到 4.7 m/s 时击发。根据每个阶段的微分方程, 建立如图 2 所示的 Simulink 仿真计算模型。

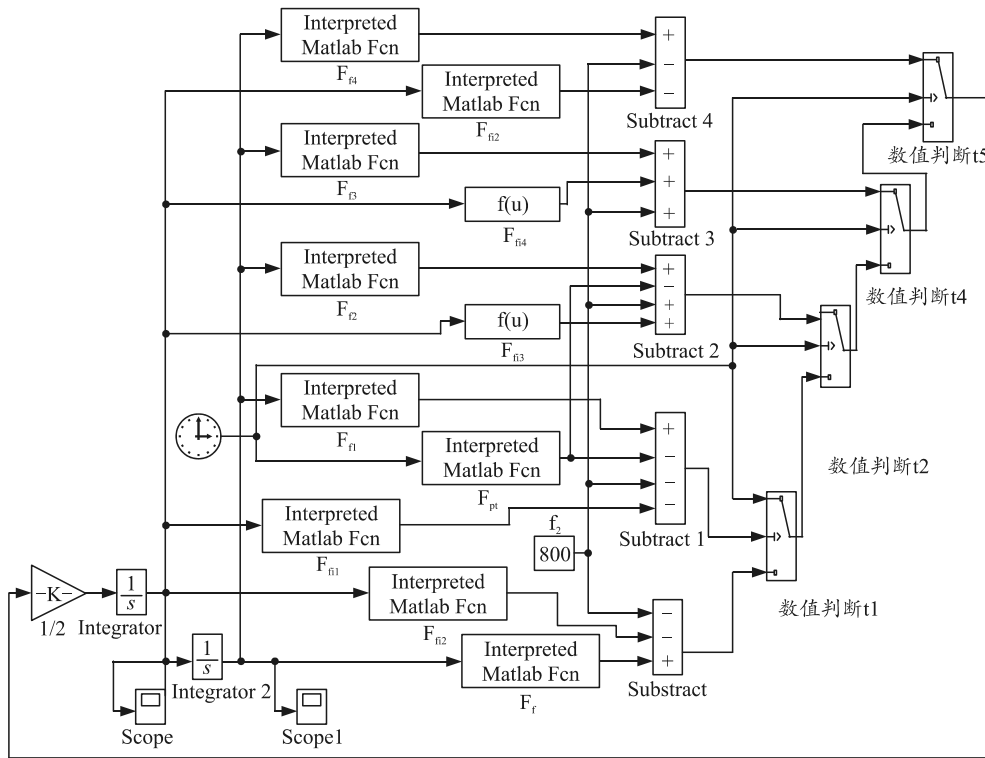
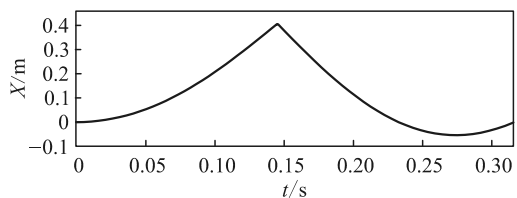


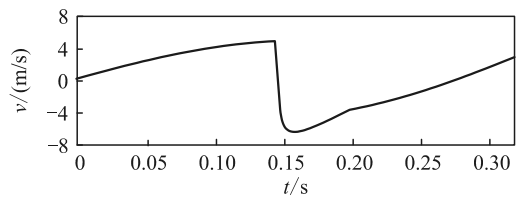
图 2 软后坐仿真模型

2 仿真及分析

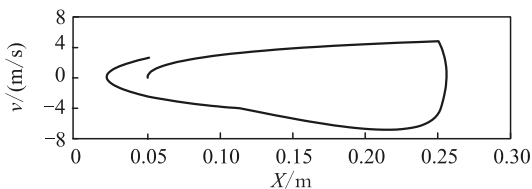
通过仿真计算，得到反后坐装置运动的时间位移曲线、时间速度曲线和位移速度曲线如图 3 所示。



(a) 时间位移



(b) 时间速度



(c) 速度位移

图 3 仿真结果

软后坐火炮采用定速击发方式，当前冲速度达到 4.7 m/s 时，击发装置点火，点火后，炮膛合力产生并迅速上升，后坐装置速度迅速下降。当前冲运

动停止后，后坐部分加速向后缓冲，后效期结束后，由于惯性力，继续向后运动，当前冲力大于惯性力时，后坐位移达到最大，反后坐装置在前冲机作用下，向前运动到挂卡位置，从而整个运动循环结束，等待下一次的发射。

3 结束语

仿真计算结果表明，整个运动循环后坐部分的运动规律与软后坐火炮运动过程基本相符。通过仿真发现：最后复进到位时，速度为 2.5 m/s，需要设计复位制动器，以保证后坐部分较低复进速度到达挂卡位置。

参考文献：

- [1] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 258-259.
- [2] 吴俊岐. 长行程大阻力磁流变阻尼器设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 62-63.
- [3] 王卉, 李英顺. 基于多源信息融合的火炮装填状态监测与故障诊断系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 31-34.
- [4] 张志坚. 前冲式反后坐装置设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 44-46.
- [5] 何卫国, 谈乐斌, 潘孝斌. 基于 Simulink 的火炮反后坐装置仿真分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 41-43, 55.
- [6] 罗正. 迫击炮软后坐技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 25-26.