

文章编号: 1000-8055(2009)08-1714-06

移动质量作用下膨胀波发射装置的 振动响应分析

王颖泽, 张小兵

(南京理工大学 动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究膨胀波发射装置的振动响应, 根据膨胀波发射装置的发射机理及结构特点, 将弹丸及惯性炮尾视为移动质量, 考虑两者刚性运动与发射身管弹性振动间的耦合作用, 联立膨胀波发射装置内弹道方程, 建立了计及弹丸及惯性炮尾实际运动规律的动力学方程. 通过离散求解, 给出了膨胀波发射装置发射过程中身管的振动响应及炮口位置处的运动学效应, 为提高弹丸射击精度及与机身的一体设计提供了必要的理论参考.

关 键 词: 航空武器系统; 膨胀波发射装置; 振动响应; 移动质量; 模态叠加法

中图分类号: V553; O347.1

文献标识码: A

Vibration analysis of rarefaction wave launch device in moving mass

WANG Ying ze, ZHANG Xiao bing

(College of Power Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The vibration response of the rarefaction wave launch device was studied. Based on the launch mechanism and structure characteristic of the rarefaction wave launch device, the vibration equations of launch device were established in consideration of the actual movement of the projectile and inertial breech. In these vibration equations, the projectile and inertial breech were equivalent to the moving masses, and the coupling effects between elastic vibration of the launch device and rigid movement of the moving masses were also considered. With modal superposition method, the vibration equations were dispersed to the second order time variant equations. After numerical calculation, the vibration response and muzzle dynamic effects were acquired. From these results, some theory references for fire precision and airframe integration design were provided.

Key words: aeronautical weapon system; rarefaction wave launch device; vibration response; moving mass; mode superposition method

随着航空武器系统作战威力要求不断提升, 对其火控系统、悬挂发射装置的整体性能要求日趋严格^[1-2]. 基于新发射机理而研制的膨胀波发射

装置^[3-4], 以其轻质、低后坐以及同其它武器平台整合方便的优点, 在航空武器系统中将会得到广泛应用. 由于膨胀波发射装置结构特殊, 发射过程

收稿日期: 2008-08-20; 修订日期: 2009-05-31

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET040509); 高校博士学科点基金(20060288019);

江苏省自然科学基金(BK2007531)

作者简介: 王颖泽(1981-), 男, 河北秦皇岛人, 博士生, 主要研究方向: 现代内弹道理论. E-mail: wyz371320@hotmail.com

较常规发射装置复杂, 对其发射过程中振动特性的研究分析, 将有助于膨胀波发射装置在航空武器系统中的具体应用. 考虑到在发射过程中, 由于发射装置卸载的复杂性, 特别是弹丸运动与身管弹性振动间的耦合作用, 使得描述其振动响应的动力学方程形式复杂, 求解十分困难, 当前的相关研究^[5-8]都是在一定的简化条件下进行的. 对于膨胀波发射装置而言, 由于后喷装置的引入, 发射过程中除了弹丸运动产生的惯性作用外, 还受到惯性炮尾运动产生的惯性作用, 且两者的作用效果相互影响. 在此条件下, 本文基于膨胀波发射装置的结构特点, 采用柔性梁理论建立了多个移动质量作用下发射装置的振动方程, 采用模态叠加法, 联立描述其发射过程的内弹道方程组, 在计及弹丸和惯性炮尾实际运动规律的条件对振动方程进行求解分析, 通过与常规发射装置振动特性的对比分析, 揭示了膨胀波发射装置在弹丸及惯性炮尾共同作用下的振动响应规律.

1 方程建立与数值求解

1.1 物理模型

膨胀波发射装置利用膨胀波在燃气介质中的传播特性, 通过控制膨胀波发射装置的开尾时机, 使膛内火药燃气延迟后喷, 进而在炮口动能不受影响的前提下, 显著减小发射装置的后坐冲量和热量的目的. 图 1 给出了膨胀波发射装置结构简图, 根据其发射特点, 将弹丸和惯性炮尾视为移动质量, 两者实际运动规律通过内弹道方程给出, 发射装置整体视为可自由后坐的移动质量-柔性梁系统, 采用欧拉-伯努利梁模型进行建模.

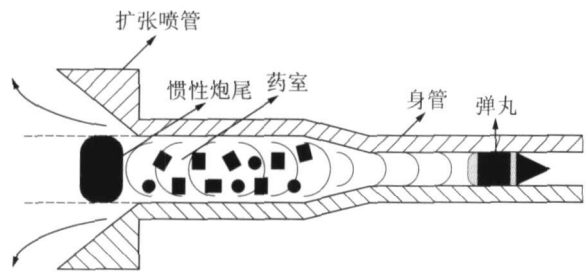


图 1 膨胀波发射装置结构简图

Fig 1 Structure image of rarefaction wave launch device

1.2 膨胀波发射装置振动方程

通过对膨胀波发射装置发射模型进行合理

分析, 得到如图 2 所示的多移动质量-柔性梁振动力学模型, 令 t 时刻身管 x 处的弹性变形为 $w(x, t)$, 作用其上的弹丸及惯性炮尾的质量分别为 m_1 和 m_2 , 速度分别为 v_1 和 v_2 , 加速度分别为 a_1 和 a_2 , 炮身在后坐阻力作用下的速度为 v_3 , 由柔性梁振动理论可得多移动质量-柔性梁振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^N m_i g \delta[x - \xi_i(t)] - \sum_{i=1}^N m_i \left[\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + 2v_i(t) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x \partial t} + v_i^2(t) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + a_i(t) \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \right] \delta[x - \xi_i(t)] \quad (1)$$

相应的边界条件

$$w(0, t) = w'(0, t) = w''(L, t) = EI w'''(L, t) = 0 \quad (2)$$

式中 EI 为发射身管的抗弯刚度; ρA 和 L 分别为发射身管的质量密度、截面积和长度; $\xi_i(t)$ 为移动质量的行程; δ 为 Dirac 函数; $m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2}$, $2mv \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x \partial t}$, $mv^2 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}$, $ma \frac{\partial w(x, t)}{\partial x}$ 分别为移动质量变速运动时产生的牵连惯性力、科氏惯性力、向心力及相对惯性力.

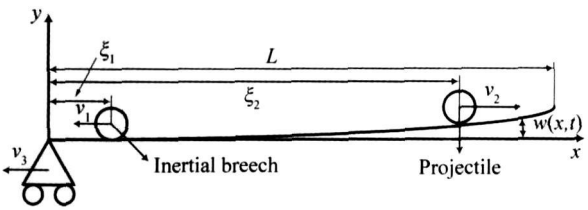


图 2 多移动质量-柔性梁振动力学模型

Fig 2 Dynamic model of multi moving mass elastic beam system

1.3 膨胀波发射装置内弹道方程

对于方程(1)右端含有的移动质量运动产生的惯性载荷项可通过膨胀波发射装置的内弹道方程确定, 根据膨胀波发射装置的发射机理可得

$$\left\{\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \begin{cases} \frac{u_1}{e^1} p^\nu & z < z_k \\ 0 & z \geq z_k \end{cases} \\ \frac{dl_1}{dt} &= v_1 \\ \frac{dv_1}{dt} &= \frac{S_1 p}{\Phi_{1m1}} \\ \frac{dl_2}{dt} &= \begin{cases} v_2 & p \geq p_e, l_1 \leq l_e \\ 0 & \end{cases} \\ \frac{dv_2}{dt} &= \begin{cases} -\frac{S_2 p}{\Phi_{2m2}} & p \geq p_e, l_1 \leq l_e \\ 0 & \end{cases} \\ \frac{d\eta}{dt} &= \begin{cases} \frac{\Phi_3 S_3 p}{\omega} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{k}{\tau}} & p \geq p_e \\ 0 & \end{cases} \\ \frac{d\tau}{dt} &= \frac{1}{\Phi_- \eta} \left[(1-\tau)(x+2x\lambda_z) \frac{dz}{dt} - \theta \tau \frac{d\eta}{dt} - \frac{\theta}{f\omega} \left(\Phi_{1m1} v_1 \frac{dv_1}{dt} + \Phi_{2m2} v_2 \frac{dv_2}{dt} \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{\begin{aligned} \phi &= \begin{cases} xz(1+\lambda_z+\mu_z^2) & z < 1 \\ x^s \frac{z}{z_k} \left(1+\lambda_z \frac{z}{z_k} \right) & 1 \leq z < z_k \\ 1 & z \geq z_k \end{cases} \\ p &= \frac{f\omega\tau(\Phi_- \eta)}{S_1(l_\phi+l_1)+S_2 l_2} \\ l_\phi &= l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\delta} (1-\phi) - \alpha \Delta (\Phi_- \eta) \right] \end{aligned} \right. \quad (4)$$

考虑到发射过程发射装置后坐运动,弹丸及惯性炮尾在身管的实际行程为

$$\begin{cases} \xi_1 = x_1 - \left[l_1 + \int_0^t v_3 dt \right] \\ \xi_2 = x_2 - \left[l_2 - \int_0^t v_3 dt \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_1, x_2 分别为惯性炮尾和弹丸在身管内的初始位置.

1.4 振动方程的解耦

由于振动方程是一个含有复杂数学函数的非线性方程,直接进行解析求解或者采用积分的方法直接进行数值求解都是极其困难的,为此采用基于伽辽金变分原理的模态迭加法对方程进行解耦,得到便于数值求解的二阶时变系数方程组.

选取身管的固有振型函数为模态坐标,对方程进行坐标变换,其变换形式为

$$w(x,t) = \sum_j \phi_j(x) q_j(t) \quad (6)$$

式中 $\phi_j(x)$ 为身管第 j 阶振型的模态函数; $q_j(t)$ 为身管第 j 阶振型的模态坐标. λ 为方程 $1+\cos(\lambda L) \coth(\lambda L) = 0$ 的正根

$$\begin{aligned} \phi_j(x) &= \\ &\coth(\lambda x) - \cos(\lambda x) \frac{\sinh(\lambda L) - \sin(\lambda L)}{\coth(\lambda L) + \cos(\lambda L)} \cdot \\ &\quad [\sinh(\lambda x) - \sin(\lambda x)] \end{aligned}$$

将式(6)代入式(1)进行模态展开

$$\begin{aligned} EI \sum_j \phi_j^{(4)}(x) q_j(t) + \rho A \sum_j \phi_j(x) \ddot{q}_j(t) &= \\ \sum_{i=1}^N m_i \left[g - \left(\sum_i \phi_j(x) \ddot{q}_j(t) + \right. \right. \\ 2v_i \sum_i \phi_j(x) \dot{q}_j(t) + v_i^2 \sum_j \phi_j''(x) q_j(t) + \\ \left. \left. a_i \sum_j \phi_j(x) q_j(t) \right) \right] \delta(x-\xi_i) \end{aligned} \quad (7)$$

上式两端分别乘以 $\phi_k(x)$ 并沿 0 到 L 积分,根据模态函数的正交性化简可得

$$\begin{aligned} \left[\rho A \sum_j M_{jk} + \sum_j \sum_{i=1}^N m_i \bar{M}_{jk,i} \right] \ddot{q}_j(t) + \\ \sum_j \sum_{i=1}^N 2m_i v_i C_{jk,i} \dot{q}_j(t) + \left[EI \sum_j K_{jk} + \right. \\ \left. \sum_j \sum_{i=1}^N (m_i v_i^2 \bar{K}_{jk,i} + m_i a_i C_{jk,i}) \right] q_j(t) = \\ \sum_{i=1}^N Q_{k,i}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $M_{jk} = \int_0^L \phi_j(x) \phi_k(x) dx,$

$$K_{jk} = \int_0^L \phi_j^{(4)}(x) \phi_k(x) dx,$$

$$C_{jk,i} = \phi_j[\xi_i(t)] \phi_k[\xi_i(t)],$$

$$\bar{M}_{jk,i} = \phi_j[\xi_i(t)] \phi_k[\xi_i(t)],$$

$$\bar{K}_{jk,i} = \phi_j''[\xi_i(t)] \phi_k[\xi_i(t)],$$

$$Q_{k,i}(t) = m_i g \phi_k[\xi_i(t)]$$

由此得到便于数值求解的二阶时变系统微分方程组

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + K q(t) = Q(t) \quad (9)$$

2 膨胀波发射装置振动响应求解分析

对于解耦获得的二阶时变微分方程组,采用降阶的方法将其转化为一阶微分方程组,选取变步长四阶 Runge-Kutta 法进行数值求解可得到 $q(t)$ 的分布规律,将其带入式(6)中即可获得 $w(x,t)$ 的分布规律. 本文选取某口径膨胀波发射

装置为计算原型, 取前四阶模态, 联立内弹道方程组对膨胀波发射系统进行数值求解.

2 1 膨胀波发射装置受载分析

图 3 和图 4 分别给出了特定装填条件下, 弹丸和惯性炮尾速度以及二者运动产生的惯性载荷随时间的变化规律. 从图 3 中可以看到, 在发射过程中, 弹丸和惯性炮尾的运动状态呈阶段性变化: 在发射初始阶段, 惯性炮尾保持不动, 弹丸在火药燃气的推动下作加速度增大的加速运动; 随着发射的进行, 惯性炮尾启动, 并沿炮口反方向运动, 后喷装置逐渐被打开; 当后喷装置完全打开后, 惯性炮尾制止, 弹丸继续加速运动, 但加速度不断减小, 直至飞出炮口. 由于弹丸和惯性炮尾运动规律的阶段性变化导致其运动产生的惯性载荷的分布呈现阶段性波动变化, 这点从图 4 中可以明显地看到. 为此在对发射装置进行振动分析时, 必须考虑弹丸和惯性炮尾的实际运动规律.

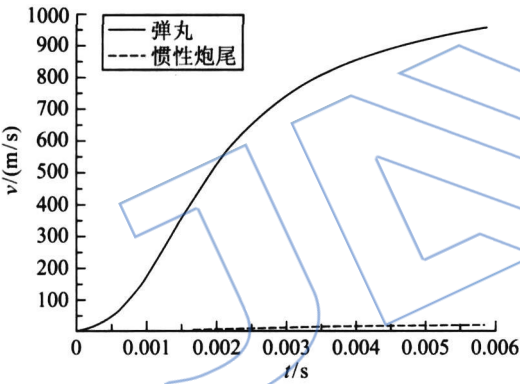


图 3 $v-t$ 分布曲线

Fig. 3 Distribution of velocity in different time

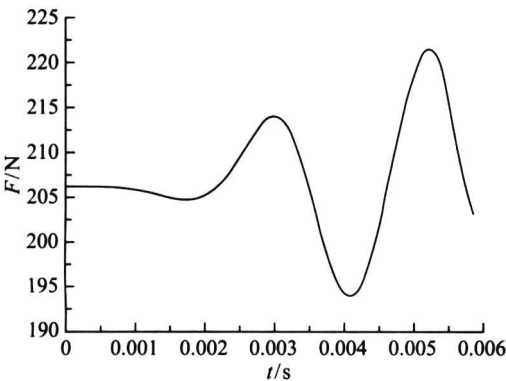


图 4 惯性移动载荷分布曲线

Fig. 4 Distribution of inertial moving loads

2 2 膨胀波发射装置振动响应分析

为了便于分析及求解的通用性, 引入以下变量对身管的横向变形参量进行无量纲化

$$\begin{aligned} \xi &= x/L, \quad \tau = t/T_0, \\ w^*(x, t) &= EIw(x, t)/\rho gAL^3, \\ \theta^*(x, t) &= EI\theta(x, t)/\rho gAL^2, \\ v^*(x, t) &= \frac{\sqrt{EI}v(x, t)}{\sqrt{\rho AgL}}, \\ a^*(x, t) &= a(x, t)/g \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $T_0 = \sqrt{\rho AL^4/EI}$; $\theta(x, t)$, $v(x, t)$, $a(x, t)$ 分别为炮口转角, 炮口速度和炮口加速度.

将式 (10) 带入式 (9) 联立内弹道方程组进行求解可得如图 5~ 图 10 所示仿真结果.

图 5 给出了弹丸和惯性炮尾共同作用下膨胀波发射身管各点横向变形随时间的分布规律. 从中可以看到, 身管的整体振动效应随着弹丸和惯性炮尾运动而不断加剧, 在发射初始阶段, 弹丸和惯性炮尾在启动压力的限制下运动比较缓慢, 身管整体的振动幅度较小, 但随着弹丸及惯性炮尾的不断加速运动, 身管整体的振动幅度不断变大, 直到弹丸出炮口, 振动幅度达到最大. 从图 6 给出的身管不同位置处横向变形随时间的分布中可以看到, 身管横向变形并不是随着轴向距离的增加而呈现线性分布, 而是出现了跳跃性变化, 这很好的说明了发射过程中身管的振动效应.

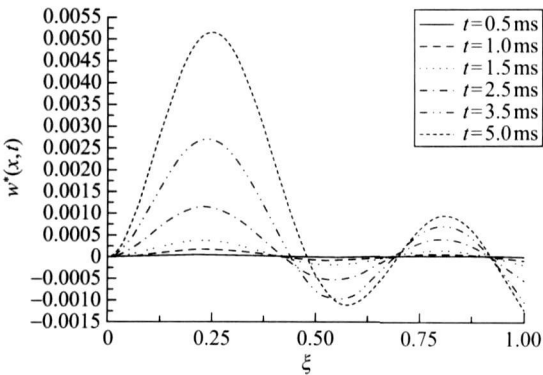


图 5 身管横向变形轴向分布曲线

Fig. 5 Axial distribution of barrel deflection

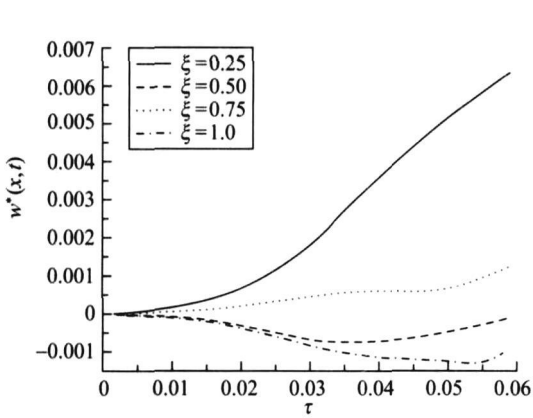


图 6 不同位置身管横向变形分布曲线
Fig. 6 Distribution of barrel deflection in different location

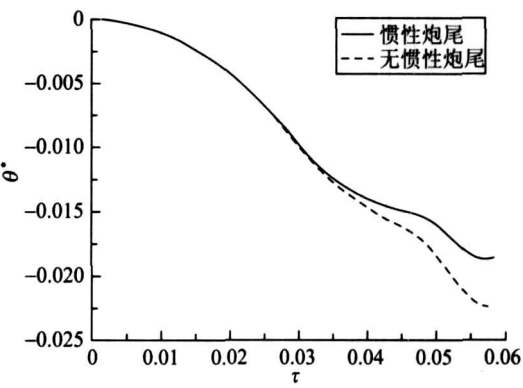


图 8 炮口转角分布曲线
Fig. 8 Distribution of muzzle rotative angle

图 7~ 图 10 依次给出了在弹丸和惯性炮尾共同作用下炮口横向变形、炮口转角、炮口横向速度及炮口横向加速度的分布规律. 从中可以看到, 炮口处的振动响应及动力学效应随着弹丸的运动不断加剧, 但受到炮口位置附近振型函数及模态坐标的突跃变化, 导致炮口的横向变形及横向加速度的幅值在弹丸运动到炮口附近时有所回落, 而炮口转角和横向速度则一直增大, 成为引起弹丸初始扰动的主要原因. 通过与同类型常规发射装置(无惯性炮尾后喷装置)的计算结果进行对比分析可知, 尽管惯性炮尾的引入增加了产生惯性载荷的移动质量的个数, 但是身管的振动效果并没有增大而是有所减小. 究其原因是由于惯性炮尾的引入使得发射过程中部分火药燃气外流, 导致弹丸速度受到一定的影响进而减弱了其运动产生的惯性效应, 同时弹丸和惯性炮尾的相互运动也影响了各自对身管的作用效果.

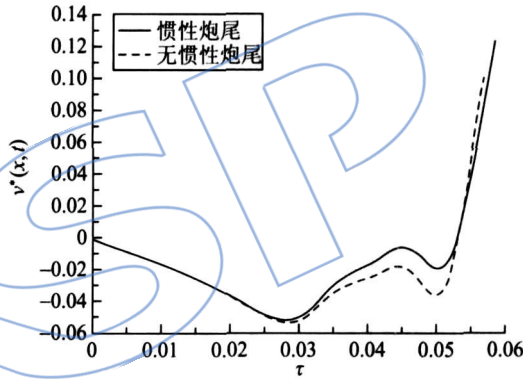


图 9 炮口横向速度分布曲线
Fig. 9 Distribution of muzzle transverse velocity

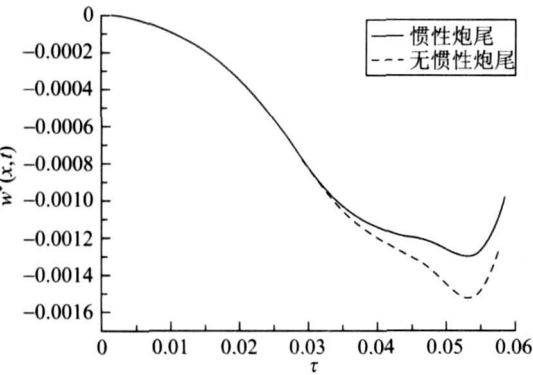


图 7 炮口横向变形分布曲线
Fig. 7 Distribution of muzzle deflection

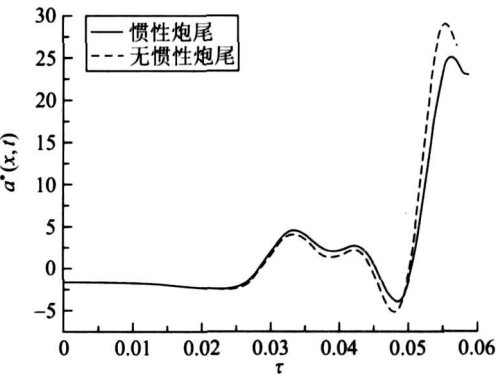


图 10 炮口横向加速度分布曲线
Fig. 10 Distribution of muzzle transverse acceleration

3 结 论

通过对膨胀波发射身管在复杂运动载荷作用下振动响应的计算分析可得到如下结论:

1) 由于膨胀波发射装置发射过程较常规发射系统复杂, 弹丸和惯性炮尾运动产生的惯性载荷效应呈现阶段性变化, 对其引起的身管振动分析必须考虑两者实际的运动规律. 同时两者运动产生的惯性载荷效应并不是简单的线性叠加, 而是由两者的运动规律及相互间的运动决定的.

2) 膨胀波发射装置在减小自身重量的同时, 并没有加剧发射过程中自身的振动效应, 相反通过控制惯性炮尾的运动规律和启动时机可以削弱由于弹丸运动而产生的炮口扰动, 从而保证发射稳定性的同时也提高了系统的射击精度.

3) 模态叠加法在处理惯性载荷作用下弹性支撑的振动响应问题时, 能够克服间断函数和脉冲函数引入所带来的困难, 同时通过选取不同的振型函数和惯性载荷的运动规律方程可以处理任意多个惯性载荷作用下各种弹性支承的振动响应问题.

参考文献:

- [1] 王祖典. 航空武器系统的一体化综合设计技术[J]. 电光与控制, 2002, 80(4): 11-15.
WANG Zudian. The integration design technology of aeronautical weapon system [J]. Electron Isotopes and Control, 2008, 80(4): 11-15. (in Chinese)
- [2] 戴龙成, 宣益民, 尹健. 悬挂发射装置的总体设计方法研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 50-57.
DAI Longcheng, XU AN Yimin, YIN Jian Investigation on system design method of ejecting devices of missiles [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(2): 50-57. (in Chinese)
- [3] Kathe E, Dillon R. Sonic rarefaction wave low recoil gun [R]. AIAA-01-0743, 2001.
- [4] Kathe E. Rarefaction wave recoilless gun system: U. S. , 6460446B1 [P]. 2002 10 8.
- [5] 康新中, 王宝元. 炮管振动的有限元分析[J]. 兵工学报, 1990, (2): 16-22.
KANG Xinzhong, WANG Baoyuan. Finite element analysis of barrel vibrations [J]. Acta Armamentarii, 1990, (2): 16-22. (in Chinese)
- [6] 周叮, 谢玉树. 弹丸膛内运动引起炮管振动的小参数解法[J]. 振动与冲击, 1999, 18(1): 76-81.
ZHOU Ding, XIE Yushu. Solution of barrel vibration caused by motion of bullets in bore by use of small parameter method [J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(1): 76-81. (in Chinese)
- [7] 姜沐, 郭锡福. 弹丸加速运动在身管中激发的振动[J]. 弹道学报, 2002, 14(3): 57-63.
JIANG Mu, GUO Xifu. On the vibration of tube due to acceleratory moving projectile [J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(3): 57-63. (in Chinese)
- [8] 胡红生. 移动质量激励梁振动主动控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
HU Hongsheng. Research on active vibration control of beam under moving mass [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)