

# 高过载环境下弹载器件结构动态响应研究

钱立志, 李俊, 宁全利

中国人民解放军炮兵学院信息化弹药研究所, 合肥 230031

**摘要** 弹载器件的抗高过载设计是新型信息化弹药设计中的一大难点,也是制约各国信息化炮弹快速发展的主要瓶颈之一。目前,弹载器件抗高过载机制的研究主要采用将火炮发射载荷和减载结构简化为线性系统的方法,其研究结论与实弹试验结果存在较大差异。本文针对火炮实际发射载荷和减载结构材料的非线性特性,在建立强冲击条件下弹载器件一维动力学模型的基础上,通过数值拟合方法分别对外界载荷曲线和材料性能实验测得的减载结构材料力-位移曲线进行拟合,然后采用精细积分法递推出弹载器件的相对位移和相对加速度计算模型,并以某型特种弹为例,对其弹载器件的动态响应进行仿真计算,实弹试验验证了计算结果的合理性,文中有关研究方法可为各类弹载器件的抗高过载设计提供理论参考和方法依据。

**关键词** 弹载器件;动力学模型;高过载;减载结构;精细积分法

**中图分类号** TJ410

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.01.04

## Structural Dynamical Response of Projectile-based Equipment Under High Overload

QIAN Lizhi, LI Jun, NING Quanli

Research Institute of Information Ammunition, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China

**Abstract** The design of a projectile-based equipment against high overload is very difficult in the context of the new-type information based ammunition design, and is one of the primary bottlenecks in the information based development of shells. At present, methods are usually adopted to simplify the system of the launching load and the load-relieving structure into a linear system to deal with the problem of Projectile-loaded Equipments against high overload; the results are not satisfactory as compared with the test results. According to the actual launching load and the nonlinear characteristics of load-relieving structure materials, based on a one-dimensional dynamical model in the strong shock condition, the load curve and the force-displacement curve of the load-relieving structure using material's mechanical experiment are obtained by curve fitting from data obtained by numerical simulations. The computational models of relative displacement and relative acceleration of the projectile-based equipment can be calculated using a precise integration method. With a certain special type shell as an example, the dynamic response of the projectile-based equipment is calculated, experiment results have verified the calculation results, and therefore, the research methods can provide a theoretical reference for the design of projectile-based equipment against high overload.

**Keywords** projectile-based equipment; dynamical model; high overload; load-relieving structure; precise integration method

### 0 引言

信息化炮弹结构较一般常规弹药复杂得多,且弹载器件通常含有精密电子元器件和各类光电传感器,其承受过载的能力相对较弱。为确保该类器件在火炮发射中安全、可靠,必须对其进行抗高过载设计,主要是通过抗过载能力较弱的弹载器件底部加装减载结构,利用减载结构的变形吸能特性减小传递到器件上的冲击峰值<sup>[1-2]</sup>,从而达到抗火炮发射高过

载的目的。目前国内外主要集中于减载结构材料的研制、单个弹载器件的抗过载能力测试和数值仿真,采用 Hopkinson 杆测试、分析了测试电路模块<sup>[3-4]</sup>、电子芯片<sup>[5]</sup>在缓冲装置保护下的稳定性和可靠性,将 Hopkinson 压杆试验技术和波形整形技术用于火工品的抗高过载性能测试<sup>[6]</sup>,从而判断火工品在高过载环境下是否能够保持安全稳定。抗过载机制研究主要是在将火炮实际发射载荷简化为理想半正弦加速度载荷,

收稿日期:2010-05-26;修回日期:2010-12-09

作者简介:钱立志,教授,研究方向为信息化弹药,电子信箱:pbnql@sohu.com

将减载结构简化为线性弹簧和黏滞阻尼线性系统基础上进行的<sup>[7-8]</sup>,其研究结论与实弹试验结果存在较大差异,无法真正达到解决实际问题的目的。弹载器件常用的减载结构材料主要为橡胶、碟形弹簧和泡沫铝等,该类材料具有明显的非线性特性。如何针对该类材料的实际特性建立高过载环境下弹载器件的动力学模型,验证所设计减载结构的合理性,是弹载器件抗高过载研究的主要内容之一,也是弹载器件抗高过载设计的关键。

### 1 弹载器件动力学模型的建立

弹丸发射过程中,弹载器件和减载结构在膛内压力的作用下随弹体一起高速运动,这是一个典型的由基础运动引起的强迫运动。为方便研究,将弹体、弹载器件及其减载结构简化为一个质量-弹簧-阻尼系统,同时忽略弹丸的旋转、弹体的变形及弹体与身管的摩擦力等。简化模型如图1所示。

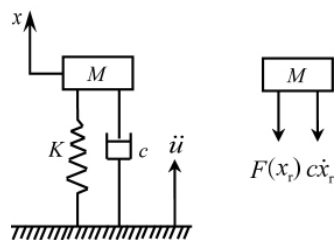


图1 质量-弹簧-阻尼系统的简化模型与受力分析  
Fig. 1 Simplified model and the mass-spring-damping system

受保护的弹载器件,即质量体  $M$  的运动是由基础(弹体)运动引起的,它首先压缩减载结构,减载结构产生一个弹力和阻尼力,质量体  $M$  正是在这两个力的作用下产生运动,考虑到实际过载环境和减载结构材料参数的非线性特性,根据质点动力学基本方程,可得强冲击条件下弹载器件一维动力学模型为

$$M\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + F(x_r) = -M\ddot{u} \quad (1)$$

其中,  $M$  为弹载器件的质量,  $c$  为阻尼系数,  $F(x_r)$  为弹簧系统产生的力,  $\ddot{u}$  为弹体加速度,  $x_r, \dot{x}_r$  和  $\ddot{x}_r$  分别为弹载器件的相对位移、相对速度和相对加速度。

为求解上述模型,需要确定弹载器件的质量  $M$ 、弹体加速度载荷  $\ddot{u}$ 、阻尼系数  $c$  及弹簧系统产生的力  $F(x_r)$ 。

### 2 弹载器件结构动态响应计算

#### 2.1 加速度载荷的确定

以装备部队的某型特种弹为例,其加速度载荷如图2所示。从图中可以看出,该特种弹在膛内阶段承受的过载最大峰值为  $13407g$ ,过载持续时间为  $10.7ms$ 。为了得到该加速度载荷随时间变化的函数,方便理论计算,采用最小二乘法将加速度随时间变化的情况拟合为7次多项式,即弹体加速度

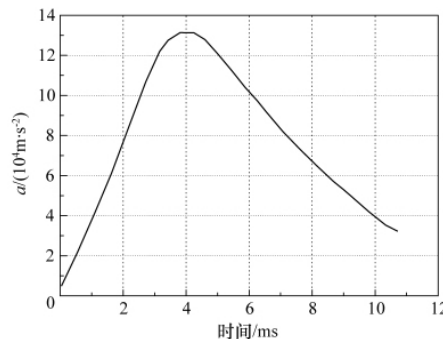


图2 某型特种弹全号装药条件下加速度载荷

Fig. 2 Acceleration load of special type shell under charge

载荷  $\ddot{u}$  随时间  $t$  的变化关系为

$$\ddot{u} = 7092 + 3102t + 17860t^2 + 1272t^3 - 2500t^4 + 511.6t^5 - 41.139t^6 + 1.193t^7 \quad (2)$$

#### 2.2 减载结构材料参数和弹性力的确定

以该特种弹为例,其弹载器件采用吸能和滞回性能良好的多层泡沫硅橡胶垫作为减载结构。将该减载结构放置在材料压缩试验机上进行材料性能测试,减载结构材料的弹力-位移曲线如图3所示。

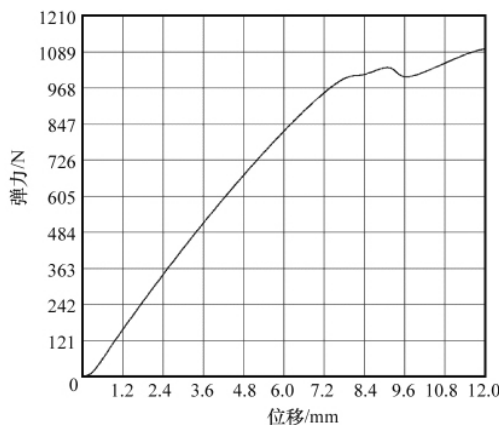


图3 减载结构的力-位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curve of load-relieving structure

同样采用最小二乘法对减载结构材料的力-位移曲线进行拟合,有

$$\begin{cases} F(x_r) = -1.91 + 138.7x_r + 3.512x_r^2 - 0.6105x_r^3 & 0 \leq x_r < 7.719 \\ F(x_r) = 2716 - 627.5x_r + 75.32x_r^2 - 2.949x_r^3 & 7.719 \leq x_r < 9.023 \\ F(x_r) = 103.5 - 2857x_r + 0.0262x_r^2 - 0.0079x_r^3 & 9.023 \leq x_r < 9.584 \\ F(x_r) = -7.869 + 33.01x_r - 0.4777x_r^2 - 0.0869x_r^3 & 9.584 \leq x_r \end{cases} \quad (3)$$

橡胶垫采用泡沫硅橡胶,其阻尼系数以厂家提供数据为准,大小为  $1200$ 。

#### 2.3 模型的求解

采用精细积分法<sup>[9]</sup>对弹载器件的动力学模型进行求解。将式(3)代入方程(1)中可得

$$\begin{cases} M\ddot{x}_r+c\dot{x}_r+F_0(x_r)=-M\ddot{u} \\ F_0(x_r)=K_0+K_1x_r+K_2x_r^2+K_3x_r^3 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $K_0, K_1, K_2, K_3$  为减载材料的基本参数。

设  $Y=(x_r, \dot{x}_r)^T$ , 于是可将方程(4)转换为状态方程(5):

$$\dot{Y}=BY+C+f \quad (5)$$

其中,

$$B=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{c}{M} \end{bmatrix} \quad C=-\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_0}{M}+\frac{K_2x_r^2}{M}+\frac{K_3x_r^3}{M} \end{bmatrix} \quad f=-\begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{u} \end{bmatrix}$$

对于非线性项  $x_r^2, x_r^3$ , 在  $\tau=t_{k+1}-t_k$  内可做如下分解:

$$\begin{cases} x_{r,k+1}^3=3x_{r,k}^2x_{r,k+1}-2x_{r,k}^3 \\ x_{r,k+1}^2=2x_{r,k}x_{r,k+1}-x_{r,k}^2 \end{cases}$$

故

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_3x_{r,k+1}^3}{M}+\frac{K_2x_{r,k+1}^2}{M}+\frac{K_0}{M} \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} x_{r,k+1} \\ \dot{x}_{r,k+1} \end{bmatrix} - B_1 = \\ & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3\frac{K_3x_{r,k}^2}{M}+2\frac{K_2x_{r,k}}{M} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{r,k+1} \\ \dot{x}_{r,k+1} \end{bmatrix} - \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ 2\frac{K_3x_{r,k}^3}{M}+\frac{K_2x_{r,k}^2}{M}-\frac{K_0}{M} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$H_0=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3\frac{K_3x_{r,k}^2}{M}+2\frac{K_2x_{r,k}}{M} & 0 \end{bmatrix} \quad B_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 2\frac{K_3x_{r,k}^3}{M}+\frac{K_2x_{r,k}^2}{M}-\frac{K_0}{M} \end{bmatrix}$$

外界加速度载荷为

$$\ddot{u}=r_0+r_1\tau+r_2\tau^2+r_3\tau^3+r_4\tau^4+r_5\tau^5+r_6\tau^6+r_7\tau^7$$

则在  $\tau$  时间内方程(5)可简化为

$$\dot{Y}=HY+r_0+r_1\tau+r_2\tau^2+r_3\tau^3+r_4\tau^4+r_5\tau^5+r_6\tau^6+r_7\tau^7 \quad (7)$$

其中,

$$H=B-H_0 \quad r_0=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{01} \end{bmatrix}+B_1 \quad r_1=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{11} \end{bmatrix} \quad r_2=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{21} \end{bmatrix}$$

$$r_3=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{31} \end{bmatrix} \quad r_4=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{41} \end{bmatrix} \quad r_5=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{51} \end{bmatrix} \quad r_6=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{61} \end{bmatrix} \quad r_7=-\begin{bmatrix} 0 \\ r_{71} \end{bmatrix}$$

可设方程(7)通解为

$$Y=e^{H(t-t_0)} \times f(t)$$

代入方程(7), 有

$$\begin{aligned} e^{H(t-t_0)} \times \dot{f}(t) &= r_0+r_1(t-t_0)+r_2(t-t_0)^2+r_3(t-t_0)^3+r_4(t-t_0)^4+ \\ & r_5(t-t_0)^5+r_6(t-t_0)^6+r_7(t-t_0)^7 \end{aligned} \quad (8)$$

在时间间隔  $(t_k, t_{k+1})$  内  $e^{H(t_k-t_k)}=T$ , 积分可得

$$\begin{aligned} V_{k+1} &= T\{[V_k+H^{-1}\{r_0-H^{-1}(r_1+2H^{-1}(r_2+3H^{-1}(r_3+4H^{-1}(r_4+ \\ & 5H^{-1}(r_5+6H^{-1}(r_6+7H^{-1}r_7))))))\}]-H^{-1}\{r_0+r_1\tau+r_2\tau^2+ \\ & r_3\tau^3+r_4\tau^4+r_5\tau^5+r_6\tau^6+r_7\tau^7-H^{-1}[r_1-2r_2\tau-3r_3\tau^2-4r_4\tau^3- \\ & 5r_5\tau^4-6r_6\tau^5-6r_7\tau^6+2H^{-1}(r_2-3r_3\tau-6r_4\tau^2-10r_5\tau^3- \\ & 15r_6\tau^4-21r_7\tau^5+3H^{-1}(r_3-4r_4\tau-10r_5\tau^2-20r_6\tau^3-35r_7\tau^4+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 4H^{-1}(r_4-5r_5\tau-15r_6\tau^2-35r_7\tau^3+5H^{-1}(r_5-6r_6\tau-21r_7\tau^2- \\ & 6H^{-1}(r_6-7r_7\tau+7H^{-1}r_7))))\} \end{aligned} \quad (9)$$

对于该减载体系, 当外激励为已知, 且初始时刻  $T_0$  时  $Y$  为已知, 则用上述递推公式可求出任意时刻的  $Y$  值, 即可得到弹载器件的相对位移  $x_r$  和相对速度  $\dot{x}_r$ 。于是, 可得弹载器件相对运动加速度为

$$\ddot{x}_r=-\frac{c\dot{x}_r+K_0+K_1x_r+K_2x_r^2+K_3x_r^3}{M} \quad (10)$$

根据叠加原理, 弹载器件绝对加速度  $\ddot{x}$  是其相对加速度  $\ddot{x}_r$  和弹体加速度  $\ddot{u}$  之和, 则

$$\ddot{x}=-\ddot{u}-\frac{c\dot{x}_r+K_0+K_1x_r+K_2x_r^2+K_3x_r^3}{M} \quad (11)$$

### 3 计算结果分析和实弹试验

#### 3.1 计算结果分析

假设某型特种弹携带的弹载器件质量  $M$  为 0.025kg, 其可承受的过载最大峰值为 7000g, 受弹载空间的限制, 其相对位移不能超过 15mm。根据上述计算过程, 输入外界载荷情况和减载材料的基本参数等, 经过 Matlab 7.1 仿真计算可得弹载器件的加速度响应和减载结构的相对位移随时间变化曲线, 如图 4、图 5 所示。

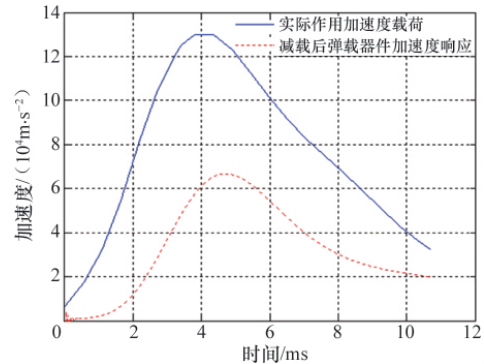


图 4 弹载器件的加速度随时间变化曲线

Fig. 4 Acceleration vs time curves of projectile-based equipment

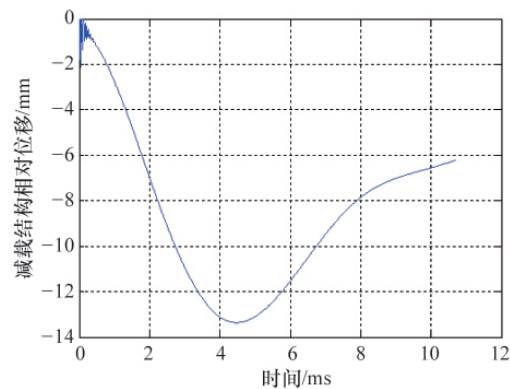


图 5 减载结构的相对位移随时间变化曲线

Fig. 5 Relative displacement vs time curve of load-relieving structure

由图 4 可知,加速度响应的最大值为  $6910g$ ,在弹载器件许可范围内,符合系统的减载要求;峰值在  $4.67ms$  时出现,说明减载结构能有效储存和耗散冲击能量,减小并延缓结构受到的冲击,达到保护器件的目的。由图 5 可知,减载结构在冲击载荷作用下形变量变化很快, $4.73ms$  左右达到最大值,为  $13.4mm$ ,之后形变量有一定恢复,整个过程符合实际情况。

### 3.2 实弹试验

对某型特种炮弹进行了装配,采用微型化设计,对电路板进行封装固化,光学系统与支撑本体之间增加了复合减载装置。经实弹试验证明,光学系统结构稳固,电子元件电讯功能正常,减载效果良好,系统稳定工作并能按设计要求完成后续任务。

## 4 结论

基于实际的火炮发射载荷和减载材料的非线性特性,在建立强冲击条件下弹载器件一维动力学模型的基础上,以某型特种弹为例,用最小二乘法分别对加速度随时间变化曲线和材料性能实验测得的减载材料力-位移曲线进行了拟合,然后采用精细积分法递推出弹载器件的相对加速度和相对位移计算公式,再根据线性系统的叠加原理,得出弹载器件的加速度响应。最后,利用该方法分析了某型特种弹减载结构的减载性能,计算结果显示,减载结构能有效减缓弹载器件受到的冲击,变形值在其许可范围内,该减载结构也得到了实弹试验验证,说明本文对减载结构减载性能的分析方法是合理的,该分析方法也可为其他类弹载器件的减载设计提供有价值的理论参考和方法依据。

### 参考文献(References)

[1] 钱立志. 弹载任务设备抗高过载方法研究 [J]. 兵工学报, 2007, 28(8):

1017-1020.

Qian Lizhi. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(8): 1017-1020.

[2] 刘俊, 石云波, 马迎春. 高过载测试中缓冲材料的试验分析[J]. 中北大学学报, 2005, 26(5): 381-384.

Liu Jun, Shi Yunbo, Ma Youchun. *Journal of North University of China*, 2005, 26(5): 381-384.

[3] 徐鹏, 范锦彪, 祖静. 高  $g$  值冲击下存储测试电路模块缓冲保护研究 [J]. 实验力学, 2005, 20(4): 610-613.

Xu Peng, Fan Jinbiao, Zu Jing. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(4): 610-613.

[4] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 118-122.

Xu Peng, Zu Jing, Fan Jinbiao. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 118-122.

[5] 徐鹏, 祖静, 李乐. CPLD 芯片抗高  $g$  值冲击性能分析 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(1): 148-150.

Xu Peng, Zu Jing, Li Le. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(1): 148-150.

[6] 邓琼, 李玉龙, 索涛, 等. 火工品高过载动态力学性能测试方法研究[J]. 火工品, 2007(1): 28-31.

Deng Qiong, Li Yulong, Suo Tao, et al. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(1): 28-31.

[7] 李世永, 钱立志, 王志刚. 弹载侦察系统抗过载技术研究[J]. 弹道学报, 2005, 17(3): 31-35.

Li Shiyong, Qian Lizhi, Wang Zhigang. *Journal of Ballistics*, 2005, 17(3): 31-35.

[8] 王正平. 冲击载荷下减振系统的优化设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2003.

Wang Zhengping. The Optimization design of vibration isolation system under impact load[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.

[9] 文明. 具有三次非线性隔振控制系统性能研究及数值计算方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.

Wen Ming. Performance study and numerical algorithm of third nonlinear vibration isolation system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.

(责任编辑 代丽)

## ·科学共同体介绍·

### 两江学者计划

2009年12月,重庆市高层次人才队伍建设工程重大专项——两江学者计划正式启动。作为目前重庆市最高层次的人才引进计划,两江学者计划旨在对接“两院”院士、“千人计划”等国家级人才项目,延揽一批海内外学术技术精英,造就一批高水平创新团队,培育一批高层次学术技术领军人才,提升重庆核心竞争力,为打造内陆开放高地和西部人才中心提供人才保证和智力支持。

两江学者计划在汽车摩托车、电子信息、石油天然气化工、装备制造、材料工业、综合能源、现代农业等重点产业领域,机械工程、电气

工程、生物医学工程等重点学科领域,及宜居、畅通、森林、平安、健康“五个重庆”建设等相关领域中设立100个特聘岗位,用8年时间引进100名学术造诣深、发展潜力大、具有领导本学科保持或赶超国内外先进水平的特聘教授和特聘专家。特聘岗位设置期为4年。中组部“千人计划”人选、重庆市“百人计划”人选、在聘“长江学者”、“巴渝学者”被聘为两江学者计划特聘教授、特聘专家后,按照“就高不就低”的原则,享受相关待遇。

两江学者计划首期评审出的25个特聘岗位分布于19家单位,覆盖了电子信息、汽车摩

托车等重点产业领域,机械工程、电气工程等重点学科领域及“五个重庆”建设相关领域。这些岗位均具有国家级或市级重点科研平台,综合实力在同学科、行业、专业中具有明显优势。其中,国家级重点学科9个、国家重点实验室5个、国家级工程技术研究中心3个、国家级人文社科基地1个、国家认定企业技术中心9个、“973计划”首席科学家所在岗位5个。目前,已评选出16位特聘教授(专家),分别来自11个单位,年龄最大的57岁,最小的32岁,还有一位外籍博士。

(责任编辑 朱崇开(实习生),陈广仁)