DOI: 10.11883/bzycj-2016-0282 文章编号: 1001-1455(2018)03-0677-06

侵彻弹体结构纵向振动频率特性分析*

刘 波,杨黎明,李东杰,欧阳科
(中国工程物理研究院电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 加速度传感器测试弹体加速度历程时,测试结果包含由于目标阻碍导致弹体减速的过载加速度和弹体结构振动引起的加速度。通过将弹体简化为均匀的长直圆杆,从理论上分析弹体纵向振动的频率特性。利用 ANSYS 建立了弹体有限元模型,通过模态分析得到了弹体纵向振动对应的固有频率及固有振型,并对弹体进行谐响应分析,一阶纵向振动固有频率的理论值、模态分析与谐响应分析的模拟结果都在 1 200 Hz。利用 Fourier 变换和小波分析,对加速度传感器测试数据的频率特性进行了分析,Fourier 变换得到的信号功率谱峰值在 1 114 Hz,与理论计算结果、模拟结果都能较好吻合。

关键词: 模态分析;谐响应;加速度测量;纵向振动;长直圆杆
中图分类号: O385 **国标学科代码:** 1303530 **文献标志码:** A

为了更好地使智能化武器达到最大的毁伤效果,就希望引信能达到“计层”与“计深”的功能,通常要求通过加速度传感器配合信号处理组件来测试处理弹体侵彻过程中的加速度信号[1-2]。此外,评价弹体内部的电子组件、装药等能否经受得住侵彻过程的高冲击环境,也需要对弹体穿靶过程中的加速度历程进行现场测试记录[3]。在现有的侵彻加速度现场测试技术中,较多采用弹载存储测试技术,由加速度传感器、记录电路模块和电池总共 3 部分组成。其中,加速度传感器的敏感元件将自身受到的力信号转换为电信号,再由记录电路模块将电信号记录下来,电池为加速度传感器和记录电路模块提供电源[4-5]。

加速度传感器在测试弹体穿靶过程的加速度历程,不仅测得由于目标阻碍引起的弹体过载加速度,还会测到由于应力波传播引起的弹体结构振动的加速度[6]。在高冲击加速度测试中,弹体结构振动信号甚至强于弹体过载加速度信号。而在引信的“计层”与“计深”算法设计中,需要从测试的加速度信号中提取弹体的过载加速度信号。要准确测试弹体的过载加速度,就必须对弹体的振动特性有所了解。Hao 等[7]、黄家蓉等[8]对弹体的振动特性和弹体侵彻加速度信号进行了分析,但都缺乏与简单解析解的对比,而且侵彻加速度信号也只是记录侵彻单层靶的数据。

本文中,将弹体简化为简单的均匀长直圆杆模型,对弹体的固有频率进行理论分析。此外,利用有限元软件 ANSYS,对简化的弹体有限元模型进行结构模态分析、谐响应分析,并联系加速度传感器测试数据,进一步分析侵彻过程中侵彻弹体的振动特性[9]。

1 弹体振动理论分析

研究由于弹性应力波在侵彻弹体内传播所导致的结构振动时,可以忽略头部的局部弹性变形,将弹体简化为一个圆柱形均匀长直杆[10]。一维弹性应力波在杆内的传播方程为:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}=c_0^2\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中:U 为杆横向位移,$c_0=\sqrt{E/\rho}$ 为应力波在杆内的传播速度,E 为材料弹性模量,ρ 为材料密度。考虑圆杆两端都是自由的,对应边界条件为:$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{x=0}=0$,$\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{x=L}=0$。

* **收稿日期:** 2016-09-18; **修回日期:** 2016-12-31
基金项目: 中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金项目(S20161102)
第一作者: 刘 波(1990—),男,硕士研究生,695423813@qq.com。

令 $U=X(x)T(t)$，对一维应力波波动方程分离变量，得到：

$$X_n=A\sin(\omega_n x)+B\cos(\omega_n x) \tag{2}$$

代入边界条件，得到简化模型的固有角频率为：

$$\omega_n=n\pi c_0/L \tag{3}$$

弹体简化的长圆杆模型的纵向振动固有频率为：

$$f_n=nc_0/(2L) \tag{4}$$

式中：L 为简析模型的长度。

2 弹体模态有限元模拟

利用 ANSYS 建立弹体有限元模型(见图 1)，弹体全长为 2.1 m，外径为 0.38 m。弹体由弹壳、装药及压紧环 3 部分组成。弹体 3 部分材料都采用线弹性本构模型，材料参数见表 1。

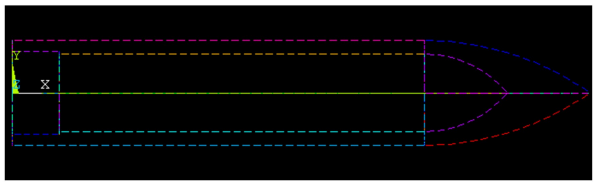


图 1 弹体有限元模型

Fig. 1 Finite element model of projectile

表 1 材料模型参数

Table 1 Material parameter in simulation

材料	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	ν
弹壳	7 800	210	0.28
装药	1 800	30	0.30
压紧环	7 800	210	0.28

将弹体简化为均匀长直圆杆(杆材料采用弹壳的材料模型，杆长为弹长)，计算圆杆纵向振动的固有频率，并对比有限元模型模拟结果，见表 2。然后提取有限元模型对应的弹体纵向的前四阶振型，如图 2 所示。由表 2 可以看出，有限元模型的前两阶固有频率模拟结果与简化的圆杆模型的近似值偏差都在 5%以内，但是高阶固有频率的简析近似值与模拟结果还是有 10%左右的差距。说明利用圆杆纵向振动波动方程求解纵向振动固有频率是较准确的。

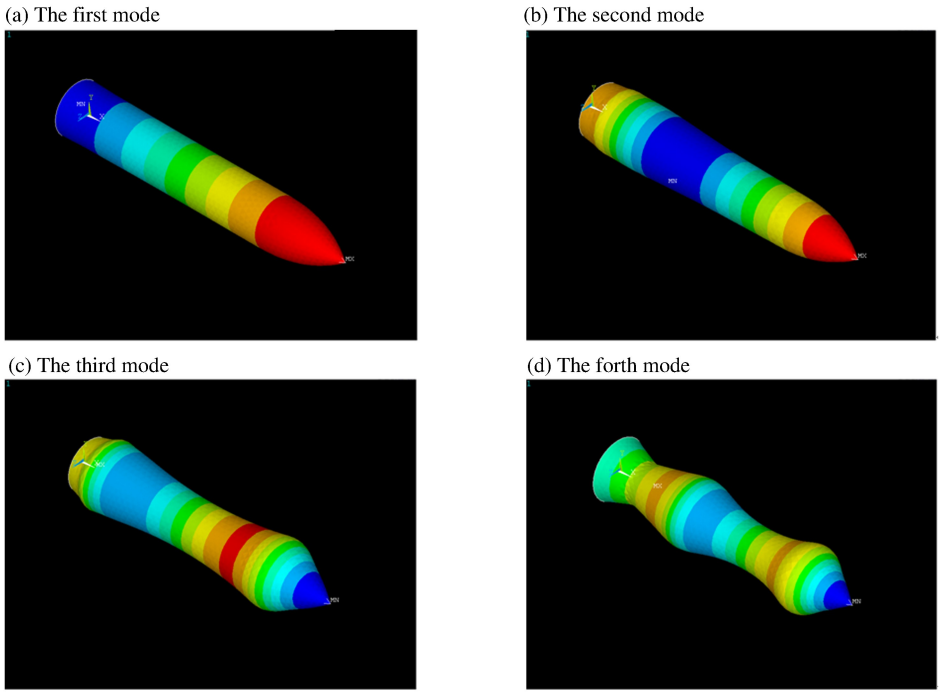


图 2 弹体纵向振动前 4 阶振型

Fig. 2 First four modes of axial vibration of projectile

表 2 模态分析与谐响应分析结果与理论值的比较

Table 2 Comparison of simulation results with theoretical values

阶数	f/Hz			δ_f/%	
	简化模型	模态分析	谐响应分析	模态分析	谐响应分析
1	1 235.4	1 198.4	1 200	3.0	2.9
2	2 470.8	2 363.4	2 360	4.3	4.5
3	3 706.2	3 451.0	3 460	6.9	6.6
4	4 941.6	4 386.6	4 380	11.2	11.4

3　弹体结构谐响应模拟分析

利用 ANSYS 建立有限元模型，结构与材料参数同上。对有限元模型进行瞬态分析，约束弹尖节点 Y、Z 方向的位移，在弹体头部施加冲击加速度载荷。设定谐响应频率范围为 0～5 000 Hz，分为 250 个子步进行加载。

实际的侵彻测试实验中，一般由引信里的加速度测试记录装置现场测试侵彻过程中的加速度历程。而引信一般装于弹体尾部的压紧环内，提取模拟分析得到压紧环中心处对应节点的频率曲线，如图 3 所示。理论计算得到的、模态分析得到的和谐响应分析得到的弹体纵向振动固有频率，见表 2。从表 2 可以看出，加速度测试装置在频率为 1 200、2 360、3 460、4 380 Hz 的简谐载荷下，位移响应最大。谐响应分析得到的前 3 阶固有频率与简析近似解偏差均不超过 7%，再次证实了利用波动方程求解弹体振动固有频率的准确性。

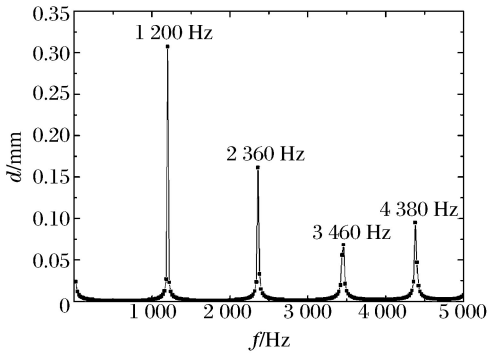


图 3 弹体谐响应频率

Fig. 3 Frequency of projectile's harmonic response

4　实测加速度信号分析

图 4 为侵彻 5 层钢筋混凝土靶板的加速度传感器实测得到的穿靶过程中的加速度信号，利用 MATLAB 对加速度信号进行 Fourier 变换，得到加速度信号的功率谱，如图 5 所示。从图 5 可以看出，加速度信号功率谱在 1 114 Hz 能量达到最大值，与前面模态分析的 1 198 Hz 比较接近，实际的测试数据也说明了利用波动方程求解弹体振动固有频率的有效性。在实际工况中，压紧环与弹体之间采用螺纹连接，而不是建模中直接接触的方式，实际的螺纹连接的刚度相对建模理偏小，导致实测的加速度信号的频率谐振点偏小。

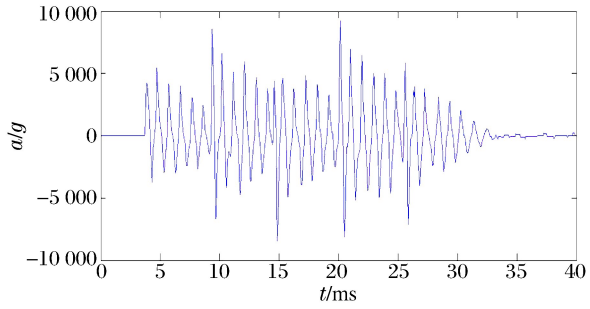


图 4 实测加速度信号

Fig. 4 Actually measured acceleration signal

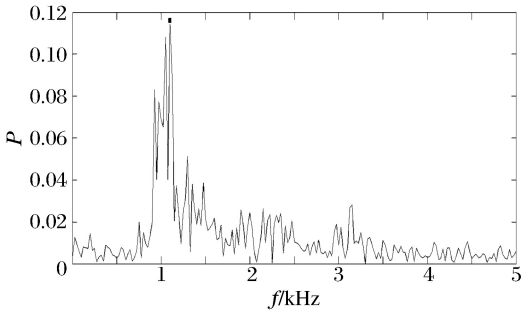


图 5 测试信号功率谱

Fig. 5 Power spectrum of measured signal

但是测试值与模态分析、谐响应分析结果还是有 8%左右的误差。这可能是:在实际的侵彻加速度历程测试中,测试装置一般螺纹连接装于压紧环内;而在有限元建模中,进行了简化处理,直接将测试装置与压紧环建模为一个整体,增加了测试装置与压紧环之间的连接刚度,导致有限元模型的结果偏高。

为了进一步了解实测加速度信号的频率特性,对图 4 中传感器曲线进行滤波分析。利用 MATLAB 中的小波分析工具对过载曲线进行简单的滤波分析,分析它在不同频段内的信号成分。对信号进行 5 级分解,图 6 为低通滤波结果,表示信号接近程度,而图 7 为带通滤波结果,表示信号细节部分。

从图 6 可以看出,信号在第 4 层(见图 6(e))最理想,对实测加速度信号进行 625 Hz 低通滤波处理后,加速度信号明显显露出 5 个尖峰,对应弹体侵彻 5 层混凝土靶的加速度冲击;而在第 5 层(见图 6(f)),对实测加速度信号进行 312.5 Hz 低通滤波处理后,加速度信号不能显示出明显的 5 层。从图 7 可以看出:在第 1、2 级高频噪声频段,幅值比较小,且信号比较集中,贯穿整个侵彻过程,在进行信号分析中可以忽略不计;在第 3、4 级频段内的信号幅值比第 1、2 级频段内的信号大,且其信号充满整个侵彻过程,符合弹丸振动信号特征。因此,可认为在第 3、4 级频段内的信号即为弹丸振动信号。图 6 中第 4 层与图 7 中第 3、4 级幅度的比较,验证了受应力波影响严重的信号中弹丸的刚体过载淹没在高频振荡信号中。

对信号进行滤波处理就是提取不同频段内的信号,则各层分解就是对信号进行低通或带通滤波的过程。根据上面的分析结果,可以确定图 7 中信号高频振荡信号的频率范围在 625～2 500 Hz,也可以确定信号低通滤波处理的最佳截止频率,与理论计算得到 1 235 Hz 比较接近。

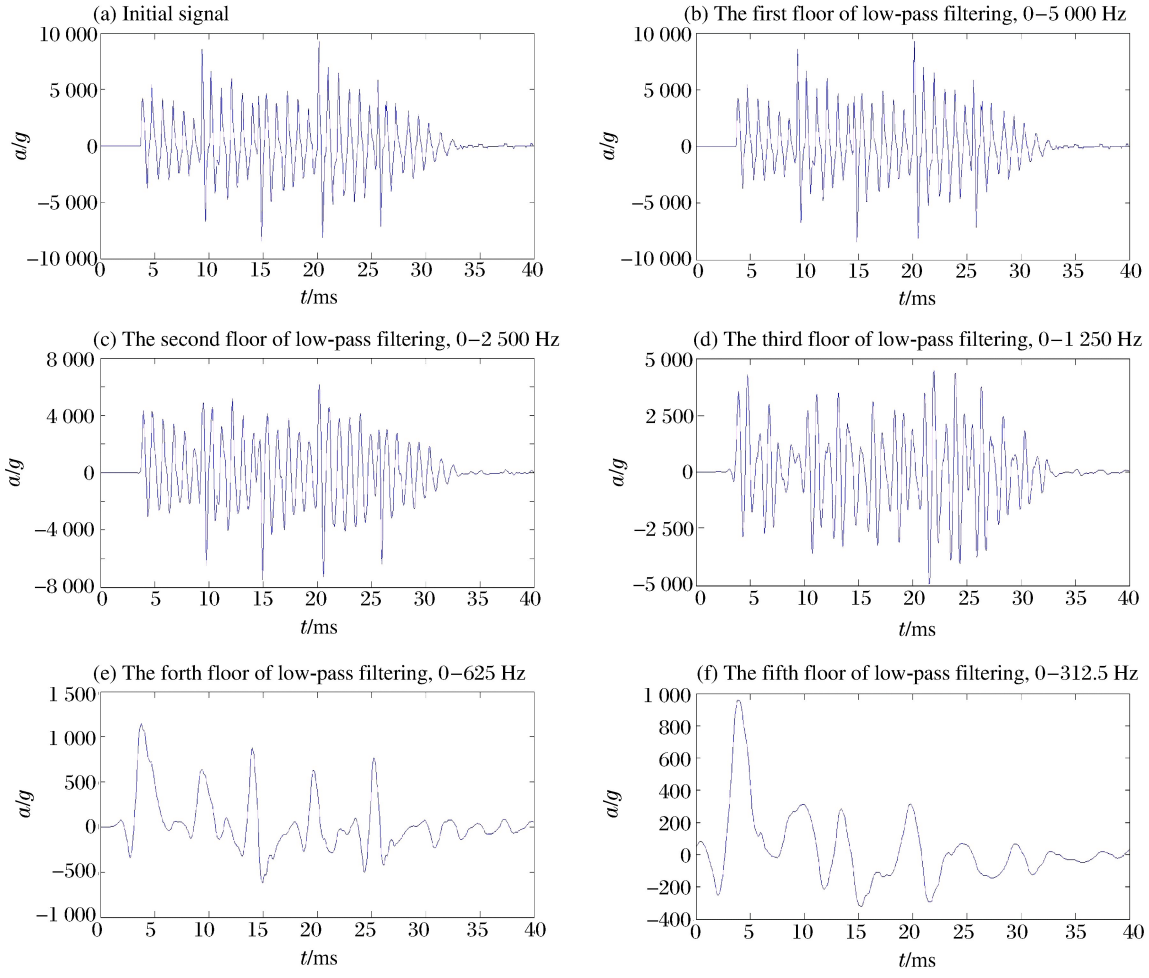


图 6 低通滤波结果

Fig. 6 Low-pass filtered results

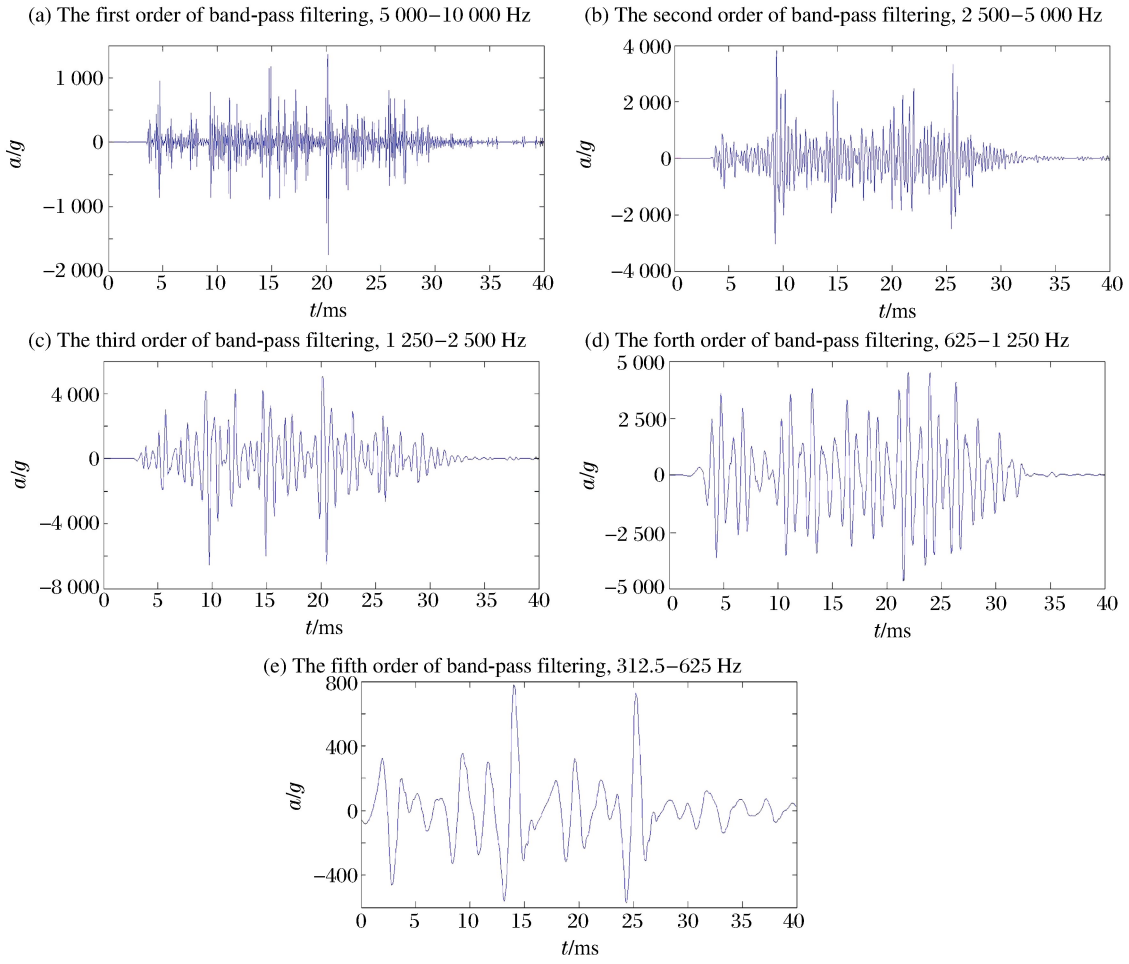


图 7　带通滤波结果

Fig. 7　Band-pass filtered results

5　结　论

通过将弹体简化为圆柱形长直杆，理论分析了弹体振动的频率特性。建立有限元模型，对弹体进行了模态分析与谐响应分析，弹体振动在 1 2 00Hz 出现峰值，与简化模型的理论值吻合较好，前两阶固有频率的误差都在 5%以内。并对实际测试的加速度传感器信号进行 Fourier 变换和小波分析，信号功率谱在 1 114 Hz 能量最大，与模拟分析得到的固有频率有 8%左右的差距。模拟分析中将压紧环建模为一个整体，增加了测试装置与压紧环之间的连接刚度，导致有限元模型的模拟结果偏高。加速度信号低通滤波结果也和理论计算值很好吻合。这些说明，利用波动方程求解侵彻弹体纵向振动固有频率具有有效性。

参考文献：

[1]　赵海峰，张亚，李世忠，等. 侵彻弹体频率特性分析及过载信号处理[J]. 中国机械工程，2015，26(22)：3034-3039.
ZHAO Haifeng，ZHANG Ya，LI Shizhong，et al. Frequency characteristics analysis and overload signal process of penetration projectile[J]. China Mechanical Engineering，2015，26(22)：3034-3039.

[2]　宋萍，李科杰. 硬目标侵彻武器高冲击试验和高过载传感器技术国外发展概况[J]. 测控技术，2002，21(增刊 1)：30-32.

SONG Ping, LI Kejie. Development of the technique of high shock test on hard-target penetration weapons and high-g accelerometer at broad[J]. Measurement & Control Technology, 2002,21(suppl 1):30-32.

[3] RASHKOVSKA A, TROBEC R, DEPOLLI M, et al. Time and frequency analysis of non-uniform sampling[C]// MIPRO, Proceedings of the 33rd International Convention. 2010:236-240.

[4] 徐鹏,祖静,范锦彪.高 g 值侵彻加速度测试及其相关技术研究进展[J].兵工学报,2011,32(6):739-745.
XU Peng, ZU Jing, FAN Jinbiao. Research development of high g penetration acceleration test and its correlative technology[J]. Acta Armamentarii, 2011,32(6):739-745.

[5] ZHANG Wendong, CHEN Lujiang, XIONG Jijun. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(3):436-447.

[6] 赵小龙,马铁华,徐鹏,等.弹丸侵彻混凝土加速度信号测试及分析[J].爆炸与冲击,2014,34(3):347-353.
ZHAO Xiaolong, MA Tiehua, XU Peng, et al. Acceleration signal test and analysis for projectile penetrating into concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(3):347-353.

[7] HAO H, LI X, SUN Y. Projectile structural response frequency characteristics analysis method in penetration process[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2013,1997(16):7-11.

[8] 黄家蓉,刘瑞朝,何翔,等.侵彻过载测试信号的数据处理方法[J].爆炸与冲击,2009,29(5):555-560.
HUANG Jiarong, LIU Ruichao, HE Xiang, et al. A new data processing technique for measured penentration overloads[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):555-560.

[9] ZHANG Q. Applications of FEM and lanczos algorithm in modal analysis of slender missile[J]. Journal of Projectile Rocket & Guidance, 2007,27(4):61-63.

[10] 王秋萍,张虎,吴迎春.金属杆中纵固有频率的研究[J].声学与电子工程,2005,24(8):144-147.
WANG Qiuping, ZHANG Hu, WU Yingchun. Study of longitudinal vibrating natural frequency of metallic rod [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2005,24(8):144-147.

Analysis of axial vibration frequency for projectile structure in penetration

LIU Bo, YANG Liming, LI Dongjie, OUYANG Ke

(*Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the measurement of a projectile's acceleration history using an acceleration transducer, the results achieved contain the acceleration resulting from the hindrance of a target that decelerates the projectile and the acceleration resulting from the structural vibration of the missile. In this study, a simple model was established simplifying the projectile as a long straight round bar and analyses the frequency characteristics of the axial vibration of a projectile. A finite element model of the projectile was built using ANSYS to solve the natural frequency and mode of the projectile via modal analysis, then the harmonic response analysis about the projectile was conducted. The theoretical results and simulated results were quite consistent, both about 1 200 Hz. The frequency characteristics of the actual acceleration signal obtained from the target experiment were analyzed via the Fourier transform and wavelet analysis. The peak value of the signal power density spectrum was at 1 114 Hz, consistent with both the theoretical value and the simulated result.

Keywords: modal analysis; harmonic response; acceleration measurement; axial vibration; long straight round bar

(责任编辑 丁 峰)