

侵彻过程弹体结构响应频率特性的分析方法*

郝慧艳^{1,2,3}, 李晓峰³, 孙运强^{1,2}, 刘明杰³

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原, 030051)

(2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原, 030051)

(3. 北京理工大学机电工程学院 北京, 100081)

摘要 为了研究侵彻过程中弹体结构响应的频率特性,通过建立弹体的有限元模型,利用弹体结构模态分析求解得到弹体的固有频率和振型,并对弹体进行谐响应分析,得到弹体在侵彻阻力作用下达到共振时的频率。针对侵彻加速度信号是非平稳时变信号,采用总体经验模态分解算法对实测的侵彻信号进行分解,找到与谐响应分析获得的共振频率相对应的分量,从而估计出弹体结构响应的对应频率。通过对实测的侵彻4层混凝土靶板的加速度信号分析,分解出的第3阶固有模态函数分量频率与谐响应分析所得弹体结构响应共振频率的相对误差为4.2%,该分量为弹体结构响应加速度信号,从而得到该实验弹在侵彻过程中弹体结构响应的频率。

关键词 弹体响应; 模态分析; 谐响应; 总体经验模态分解

中图分类号 TJ 012.4; TN 911.6

引言

在侵彻过程中弹体的壳体、内部装药、引信等均将承受较大的冲击载荷。弹体侵彻过程的弹体结构响应是研究弹体结构强度、装药安定性和引信可靠性的重要参数^[1]。当弹体冲击目标时,相当于在弹体前端施加了一个冲击力。因为加载速率很快,在弹体中将产生弹塑性应力波的传播,从而引起弹体中每一点的应力、加速度等发生突变^[1]。当弹体高速侵彻钢靶板、混凝土、岩石等硬目标时,弹体中的应力波在弹体内来回振荡形成弹体结构响应。一般来说,弹体会在其固有频率处或其二次谐波、多次谐波处发生最大振动^[2]。对于弹体结构响应加速度的研究,主要集中在揭示弹体结构响应加速度的频率特性。目前,弹体结构响应加速度的分析主要是通过对应力波在弹体内的传播特性研究和弹体模态分析有限元仿真的方法开展,分析出弹体结构响应的固有频率等特征。在对弹体建模分析时,只能近似弹体体结构和材料,忽略弹体表面的几何特征和内部较为微小的结构。

笔者采用模拟仿真和实验测试相结合的方法,以便更精确地估计弹体结构响应的频率范围。该方法主要包括3部分:a. 利用有限元模态分析求解出

弹体结构的固有频率和振型;b. 对弹体谐响应分析得到弹体在侵彻阻力作用下达到共振时的频率;c. 分析实测的侵彻加速度信号特征。由于引信动态环境非常复杂,各种振动非常丰富,侵彻加速度信号含有许多瞬变成分,是非平稳时变信号,可利用总体经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称EEMD)算法分解得出侵彻过程中的弹体结构的响应信号。该方法通过弹体结构模态分析和谐响应分析,剖析固定弹体结构的固有频率范围,并通过EEMD算法分析实测的侵彻加速度信号,证实该频率与侵彻加速度信号中某分量频率吻合,该分量即为弹体结构响应,从而可以更精确地估计弹体结构响应的频率。

1 弹体结构模态分析

弹体的振动特性包括固有频率、振型等。多自由度系统的振动方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F\sin\theta t$$

其中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; X 为位移列向量; \dot{X} 为速度列向量; \ddot{X} 为加速度列向量; F 为简谐载荷的幅值向量; θ 为激振力的频率。

该方程的广义特征值和特征向量就是弹体的固有频率和振型的解^[3]。

* 国家自然科学基金资助项目(61171177);山西省青年科技研究基金资助项目(201202013-5)

收稿日期:2012-05-17;修改稿收到日期:2012-09-01

试验弹体全长 686 mm,弹体直径为 138 mm,由壳体及内部的填充物以及引信构成。弹体 Radioss/Linear 模态分析有限元模型如图 1 所示。弹体及填充物选用的材料属性如表 1 所示。

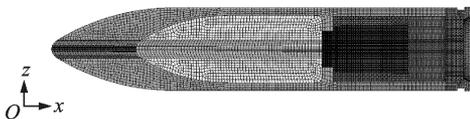


图 1 弹体有限元模型

表 1 弹体及填充物选用的材料属性

物理参数	材料	密度/ ($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量/ 10^{11} Pa	泊松比
壳体	钢	7.85	2.1	0.33
引信	钢	7.85	2.1	0.33
填充物	装药	1.68	0.3	0.40

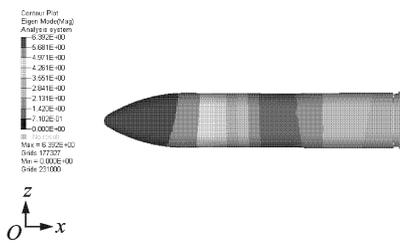
采用通用有限元软件平台 Altair HyperWorks 10.0 下的前/后处理模块及求解器模块,完成模态分析的各个环节^[3]。在软件平台上对弹体结构进行模态分析后,得到了全弹体在自由状态下的固有频率分析比较结果。弹体前 3 阶的振型主要为刚体振动,即沿 x, y, z 三坐标轴方向的振动,之后主要是拉伸、折皱和弯曲振型及少数其他类型的振型。大部分振型是成对出现的,它们的形状完全相同,对应的本征频率几乎相等,只是空间方向不同,弯曲、折皱振型的波节随着阶数增大而增多。几个主要固有频率的分析结果如表 2 所示,图 2 为轴向拉伸-压缩模态最大的第 10 阶和第 14 阶振型图。

表 2 弹体模态分析结果

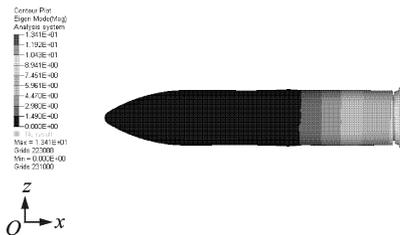
模态阶数	固有频率/Hz	振型
7	1 380.66	1 阶弯曲振型($x-z$ 平面内)
8	1 381.16	1 阶弯曲振型($x-y$ 平面内)
9	2 178.61	1 阶扭转振型(弹轴)
10	2 937.18	1 阶拉伸-压缩振型(弹轴)
11	2 907.46	2 阶弯曲振型($x-z$ 平面内)
12	2 909.62	2 阶弯曲振型($x-y$ 平面内)
13	3 068.74	2 阶扭转振型(弹轴)
14	3 994.88	2 阶拉伸-压缩振型(弹轴)

2 弹体结构谐响应分析

为了得到弹体在侵彻阻力作用下达到共振时的频率数值,还需对弹体进行谐响应分析。谐响应分析主要用于分析持续的周期载荷在结构系统中产生持续的周期响应,确定线性结构承受随时间按正弦规律变化的体载荷的模态响应。在周期性外力作用



(a) 第10阶振型图(2937.18 Hz)



(b) 第14阶振型图(3994.88 Hz)

图 2 两种模态振型图

下,结构将以载荷频率做周期振动。周期载荷作用下的运动方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F\sin\theta t$$

其中: C 为阻尼矩阵; F 为简谐载荷的幅值向量; θ 为激振力的频率。

位移响应为

$$X = A\cos(\theta t + \varphi)$$

其中: A 为位移幅值向量,与结构的固有频率 ω 、载荷频率 θ 以及阻尼矩阵 C 有关; φ 为位移响应滞后激励载荷的相位角^[4]。

本试验中弹体的引信安装在弹底部位,定义弹底节点组的谐波响应文件输出并研究该节点频率-位移响应输出。利用HyperMesh 软件的Analysis 面板选择Radioss 进行求解^[3]。使用完全法进行弹体谐波响应分析,要求弹体满足静定条件,对弹体尖端节点进行约束,耦合其在 x, y, z 3 个方向上的平动自由度及其绕 x, y 和 z 轴的转动自由度。选择模态叠加法进行谐波响应求解,设定谐波响应频率范围为 $0 \sim 5\,000$ Hz,子步数目为 $1\,000$ 步,选择恒定载荷施加。图 3 为引信位置轴向谐振过载-频率曲线,其过载峰值的大小与弹体输入激励载荷的频率呈高度相关的关系。其谐振频率分别在 $2\,937$ Hz 和 $3\,905.604$ Hz,特别在 $2\,937$ Hz 左右,弹体沿轴向 1 阶拉伸-压缩模态位置达到最大。通过对弹体进行结构模态分析和谐响应分析,可知在弹体振动幅度最大时所对应的频率分别为 $2\,937$ Hz。

3 实测侵彻加速度信号分析

对实测的侵彻加速度信号进行分析。图 4 为侵

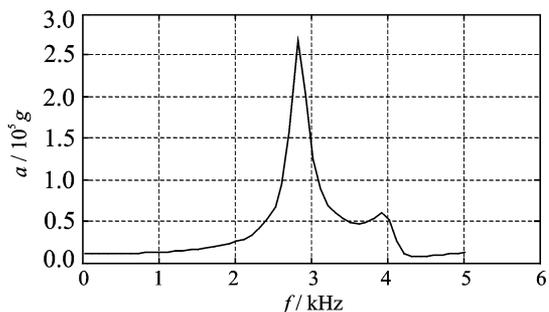
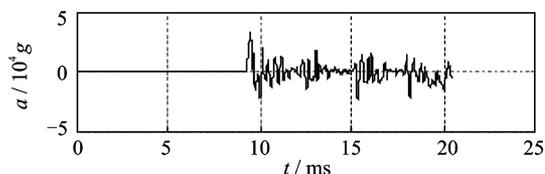
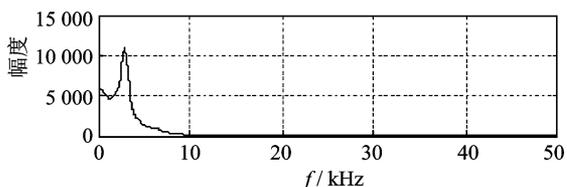


图3 引信位置谐振过载-频率曲线



(a) 侵彻试验数据



(b) Burg功率谱

图4 侵彻4层靶的加速度曲线及Burg功率谱

彻4层混凝土靶的加速度曲线及Burg功率谱,侵彻着速为823 m/s,第1层靶板的厚度均为180 mm,第2,3,4层靶厚度为100 mm,靶间距均为2 m。

实测侵彻过载信号主要包含两种信号成分:一是弹体在侵彻目标介质过程中遇到的侵彻阻力所形成的加速度信号,以应力波的方式在弹体内传播;二是弹体在侵彻过程中所产生的振动信号,包括弹丸横向和纵向的振动信号^[2,5]。笔者主要考虑纵向侵彻过载,该加速度曲线的Burg功率谱分析如图4所示。在2 825 Hz附近能量达到最大,和谐响应分析所得弹体结构响应固有频率2 937 Hz非常接近,相对误差为3.9%。

EEMD是在经验模态分解(empirical mode decomposition,简称EMD)方法基础上加了噪声辅助的分解方法,解决了含有异常噪声信号的EMD分解会产生模态混叠的问题^[6-7]。EEMD算法可以根据信号自身特征自适应地分解各种非平稳信号,从频域上将信号分离为若干个固有模态函数(intrinsic mode functions,简称IMF)之和,各分量是中心频率由高到低变化的窄带分量^[8-9]。

应用EEMD算法对该加速度信号进行分解^[10],分解的各IMF分量如图5所示。分解后的IMF₃分量以及Burg功率谱分析如图6所示,得出其能量集中

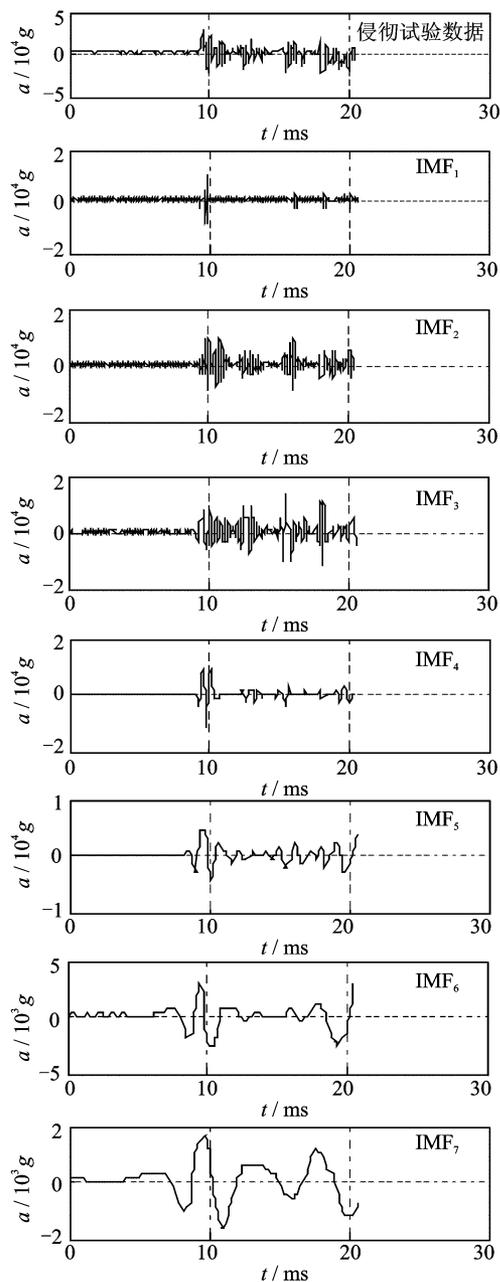
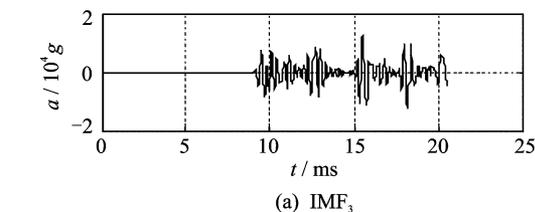
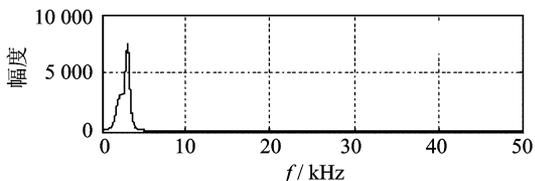


图5 EEMD分解加速度信号的各阶IMF



(a) IMF₃



(b) Burg功率谱

图6 IMF₃及BURG功率谱

频率在 3 065 Hz 附近,与侵彻加速度的能量集中频率 2 825 Hz 相对应。谐响应分析所得弹体结构响应固有频率与 IMF₃ 的集中频率相比,其相对误差为 4.2%,由此认为 IMF₃ 为侵彻加速度信号的弹体响应加速度信号。

4 结束语

通过对实验弹进行弹体结构的模态分析和谐响应分析,得知压缩模态在弹体振动幅度最大时所对应的频率为 2 937 Hz。对测试获得的侵彻加速度信号进行分析,并利用 EEMD 算法分解,得到第 3 阶的 IMF 的能量集中频率为 3 065 Hz,与模态分析和谐响应分析所得的频率吻合,认为 IMF₃ 为弹体结构响应。谐响应分析所得弹体结构响应固有频率与之相对误差分别为 4.2%,可以认为该弹体结构的固有频率在 3 065 Hz 附近。本研究采用弹体结构的模态分析、谐响应分析和实测侵彻加速度信号分析相结合的方法,更精确地估计了弹体结构响应的频率范围。

参 考 文 献

- [1] 张旭,曹仁义,谭多望.超音速侵彻混凝土过程中装药安定性结构设计的动摩擦理论分析[J].高压物理学报,2012,26(1):63-68.
Zhang Xu,Cao Renyi,Tan Duowang. A dynamic friction analysis method of charge survivability during supersonic penetration of concrete target [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(1):63-68. (in Chinese)
- [2] 冯琳娜.硬目标侵彻引信仿真测试系统信号重构方法研究[D].南京:南京理工大学,2008.
- [3] 贺李平. ANSYS 13.0 与 HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析[M].北京:机械工业出版社,2012:31-46.
- [4] 赵旭东,杜娟,王春燕.基于模态分析的高速铣削主轴转速选择[J].组合机床与自动化加工技术,2012,2:29-36.
Zhao Xudong,Du Juan,Wang Chunyan. The selection of main shaft speed of high speed milling based on modal analysis[J]. Modular Machine Tool & Auto-

matic Manufacturing Technique, 2012, 2:29-36. (in Chinese)

- [5] Bai Li, Liu Mingjie, Li Xiaofeng, et al. Research on composition and formation mechanism of penetration acceleration signal[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010: 1118-1121.
- [6] 陈隽,李想.运用总体经验模态分解的疲劳信号降噪方法[J].振动、测试与诊断,2011,31(1):15-19.
Chen Jun,Li Xiang. Application of ensemble empirical mode decomposition to noise reduction of fatigue signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(1):15-19. (in Chinese)
- [7] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [8] De Ridder S, Neyt X. Comparison between EEMD, wavelet and FIR denoising: influence on event detection in impedance cardiography[C]//33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. Boston, Massachusetts, USA:[s.n.],2011:806-809.
- [9] 许舵,沈国勤,钱祖平.基于EEMD方法的混合信号分离识别[J].军事通信技术,2011,32(2):23-31.
Xu Duo, Sen Guoqin, Qian Zuping. Research on separation for mixed signals based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Military Communications Technology, 2011, 32 (2): 23-31. (in Chinese)
- [10] 李明.引信动态特性时频分析及测试研究[D].北京:北京理工大学,2010.



第一作者简介:郝慧艳,女,1980年12月生,讲师、博士。主要研究方向为信号测试分析。曾发表《Penetration acceleration signal overload rigid separation base on local mean decomposition》(《Applied Mechanics and Materials》2012, Vol. 128-129)等论文。
E-mail:haohuiyan@163.com