

基于 EMD 的某火炮身管模态参数识别

王永刚, 尹 强

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要:现阶段火炮模态参数识别都是以快速傅里叶变换(FFT)为基础,信号必须平稳且是严格的周期信号;通常情况火炮工作状态下的信号是非平稳信号;经验模式分解(EMD)方法是一种新的非平稳的信号处理技术,EMD方法在处理非平稳信号时相对其他方法有相当大的优势;首先对某火炮身管在有限元分析软件中建模,分别在有约束和自由状态下对身管进行模态识别;然后用EMD方法对相关数据进行处理,得到身管的模态参数(频率、阻尼比、刚度矩阵、阻尼矩阵、质量矩阵),并与有限元分析方法得到的结果进行对比、分析;数值仿真证明了EMD方法在火炮领域的可行性和有效性。

关键词:火炮;身管;EMD;模态参数识别

本文引用格式:王永刚,尹强.基于EMD的某火炮身管模态参数识别[J].兵器装备工程学报,2017(1):69-74.

Citation format:WANG Yong-gang, YIN Qiang. Modal Parameters Identification of Gun Barrel Based on EMD Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(1):69-74.

中图分类号:TH113

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)01-0069-06

Modal Parameters Identification of Gun Barrel Based on EMD Method

WANG Yong-gang, YIN Qiang

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

Abstract: The modal parameters identification of artillery is mostly based on the Fast Fourier Transform (FFT). However, the FFT signals must be smooth and strictly periodic. The signal was usually non-stationary in the gun working condition. The EMD method had a great advantage than other methods in dealing with non-stationary signals. In this paper, firstly, we built the model of a gun barrel in the finite element analysis software. Secondly, we identified the gun modal parameters in the constraints and free stated. Thirdly, we dealt the data with the EMD method, and got the gun modal parameters (frequency, damping ratio, stiffness matrix, damping matrix, mass matrix). Finally, we compared the result of the EMD method with the result of the finite element analysis method. The numerical simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the EMD method for modal parameter identification of artillery.

Key words: gun; barrel; EMD; identify modal parameter

火炮作为战场上的常规武器,具有火力密集、反应迅速、抗干扰能力强等特点。多年来,我国的火炮机械设计,把功能要求和静强度作为主要准则,因此常常会出现保守设计的

情况,导致火炮的设计质量大而且成本比较高^[1]。随着火炮设计技术的不断发展,在设计时不但要考虑静态特性还要考虑动态特性。这种火炮设计的需求刺激了模态分析技术的

收稿日期:2016-08-15;修回日期:2016-09-20

作者简介:王永刚(1991—),男,硕士研究生,主要从事火炮技术研究。

迅速发展,加上近些年来计算机技术的高速发展和快速傅里叶动态分析技术的发展,使模态分析技术成功应用于火炮的结构设计和性能分析。现阶段的模态参数识别方法很多,应用于地震工程和建筑工程上的模态参数识别方法主要有分量分析法、加权最小二乘法、有理分式多项式法、正交多项式法、时域复指数法、Ibrahim 时域法 (ITD)、节约时域法 (STD)。基于 output-only 的模态参数方法有峰值法、频域分解法、PolyMAX 法、随机子空间法、随机减量技术 (RDT)、自然激励技术 (NExT)、特征系统实验算法等^[2]。

在火炮方面的应用,现阶段识别模态参数处理数据的方法有兰索斯法,子空间法,降阶法等。应用比较广泛的是传统的实验模态分析,这种方法通过测量结构中各个部位在特定激励下的振动输出响应,用模态分析理论及相应的计算机软件分析处理所记录的激励信号和响应信号,获得频响函数,完成模态参数的识别^[3]。现在大部分模态识别方法都是基于 FFT 理论来完成的。但是 FFT 分析方法并非适用于所有类型的信号分析,Fourier 分析有严格的限制条件^[4]:信号必须是平稳信号而且是严格的周期信号;被分析的系统必须是线性系统。否则 Fourier 分析将失去物理意义。工作状态下的火炮,其响应信号多数情况是非线性非稳定信号,基于 FFT 的模态分析方法将失去物理意义^[5]。

模态参数的识别对火炮结构设计和性能分析有着重要的意义。根据火炮的机构设计,要求到工厂加工规定性能指标的零部件,由于受到加工工序和仪器设备误差等影响,在加工完成后,得到的零部件往往有一定偏差,这就需要对火炮进行模态参数识别,测定加工后的零部件的实际模态参数,如果没有达到设计要求,则需要寻找原因,找出哪一环节影响了加工结果。火炮的模态参数识别不仅可以加快火炮的设计进程而且可以减小结构设计成本。火炮的结构参数还会影响到火炮的战术技术指标,如射击准确度,射击密集度等。所以火炮的模态参数识别对火炮的结构设计和技术分析至关重要。

1 经验模式分解方法 (EMD)

1998 年美籍华人 N. E. Huang 等^[6]提出一种信号处理方法经验模式分解法 (Empirical Mode Decomposition),简称 EMD 方法。该方法是将信号进行平稳化处理,将信号分解成具有不同尺度波动,不同特征的数据序列。每个序列成为一个固有模态函数 (Intrinsic Mode Function),简称 IMF。对每个 IMF 进行 Hilbert 变换,可以得到信号的瞬时振幅和瞬时频率。与 FFT 相比,希尔伯特变换 (HHT) 可以处理非平稳和瞬态问题。HHT 得到的每阶 IMF 的振幅和频率是随时间变化的,消除了为反映信号的非平稳性引入的多余且无物理意义的简谐波,使信号分析更加灵活方便^[7]。

EMD 方法具体过程:

(1) 对任意给定信号 $x(t)$, 首先确定出 $x(t)$ 上的所有极值点,用三次样条曲线连接所有极大值点形成上包络线和下

包络线。数据 $x(t)$ 与上下包络线的均值 m_1 的差记为 h_1 , 则 $h_1 = x(t) - m_1$ 。将 h_1 视为新的 $x(t)$, 重复上述步骤,直到 h_1 满足 IMF 的两个条件(整个事件历程内,穿越零点的次数与极值点数相等或最多相差 1;信号上任意一点,有局部极大值定义的上包络线和由局部极小值定义的下包络线的均值为 0,即信号关于时间轴局部对称)时,则其成为原始信号筛选出的第一阶 IMF,记为 C_1 。

(2) 将 C_1 从 $x(t)$ 中分离出来得到一个去掉高频分量的差值信号 r_1 , 把 r_1 作为新信号,重复 (1) 的筛选步骤,直到第 n 阶的残余信号成为单调函数不能再分 IMF 为止^[8]。

2 希尔伯特变换

EMD 方法基于信号的局部特征时间尺度,将信号自适应地分解为若干个 IMF 分量之和,对 EMD 得到的每个特征模态函数作希尔伯特变换 (HHT)^[9]。 $x(t)$ 为测量信号,则

$$\tilde{v}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{v(\tau)}{v(t-\tau)} d\tau \quad (1)$$

$v(t)$ 的解析信号 $Y(t)$ 表示为

$$Y(t) = v(t) + i\tilde{v}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (2)$$

如式 (2) 中 $A(t)$ 为瞬态幅值, $\theta(t)$ 为瞬态相位角, $i = (-1)^{1/2}$ 。信号的瞬态频率可由下式得出

$$\omega(t) = d\theta(t)/dt \quad (3)$$

对于式 (2) 中幅值 $A(t)$ 及相位角 $\theta(t)$ 可进一步表示为

$$A(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_0 t} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \omega_d t + \phi_0$$

对幅值 $A(t)$ 及相位角 $\theta(t)$ 引入对数及微分算子,则

$$\begin{aligned} \ln A(t) &= \ln A_0 - \zeta\omega_0 t \\ \omega(t) &= \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_d \end{aligned} \quad (5)$$

3 模态参数的识别

对 $\theta(t) - t$ 图,用线性最小均方拟合过程进行直线拟合,直线斜率即为 ω_d 。对 $\ln A(t) - t$ 图,同样用线性最小均方拟合过程进行直线拟合,直线斜率即为 $-\zeta_j\omega_0$ 。对于 ζ 比较小时,即使 $\ln A(t)$ 在拟合直线附近波动,也不会影响识别结果^[10]。

对于身管的自然频率和阻尼比只需任意位置的响应信号即可求出,然而要识别模态质量、刚度、阻尼必须得到所有自由度的测量值。

$$|\phi_{pj}| / |\phi_{qj}| = \exp[A'_{pj}(t_0) - A'_{qj}(t_0)] \quad (6)$$

其中, $A'_{pj}(t_0)$ 和 $A'_{qj}(t_0)$ 分别代表对于衰减幅 $\ln A_{pj}(t)$ 和 $\ln A_{qj}(t)$ 进行线性最小均方拟合在 $t = t_0$ 时刻的值。模态元素 ϕ_{pj} 和 ϕ_{qj} 的相位差为

$$\phi_{pj,q} = \theta'_{pj}(t_0) - \theta'_{qj}(t_0) \quad (7)$$

其中, $\theta'_{pj}(t_0)$ 和 $\theta'_{qj}(t_0)$ 分别代表对于相位角 $\theta_{pj}(t)$ 和 $\theta_{qj}(t)$ 进行线性最小均方拟合以后在 $t = t_0$ 时刻的值。

由式(6),式(7)可以确定 ϕ_{pj} 相对于 ϕ_{qj} 的符号。这样,在 j 阶复模态向量 Φ_j 中的所有元素相对于某一特定元素的绝对值和相位角都可以确定。复数值 a_j 可以导出:

$$|a_j| = \frac{2F_0 |\phi_{pj}| |\phi_{qj}| |\lambda_j^2|}{\exp[A'_{pj}(0)]}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

$$b_j = -\lambda_j a_j \quad (9)$$

然后利用复模态的正交特性可以得到质量矩阵,刚度矩阵:

$$\Psi^T \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \Psi = \text{diag}[b_j], j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$\Psi^T \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \Psi = \text{diag}[a_j]$$

则

$$\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} = \Psi^{-T} \text{diag}[b_j] \Psi^{-1} \quad (11)$$

尽管由式(11)可以确定阻尼矩阵 C ,但由于估算误差可能不能满足运动方程,要从运动方程来估算 C 。可以得到:

$$M[\Phi \quad \Phi^*] \begin{bmatrix} \Lambda^2 \\ \Lambda^{*2} \end{bmatrix} + C[\Phi \quad \Phi^*] \begin{bmatrix} \Lambda \\ \Lambda^* \end{bmatrix} + K[\Phi \quad \Phi^*] = 0 \quad (12)$$

其中, Λ 和 Λ^2 为 $n \times n$ 的对角阵,对角元素分别为 λ_j 和 λ_j^2 。

$$M\Phi\Lambda^2 + C\Phi\Lambda + K\Phi = 0 \quad (13)$$

则

$$C = -\{M\Phi\Lambda^2 + K\Phi\}\Lambda^{-1}\Phi^{-1} \quad (14)$$

由于对复模态振型和 λ_j 的估算误差,由等式(11)和(14)估算的刚度和阻尼矩阵可能不是对称阵。因此,用平均过程处理使得 K 和 C 对称:

$$K = \frac{K + K^T}{2}, C = \frac{C + C^T}{2} \quad (15)$$

由此便可计算出火炮身管的质量矩阵,刚度矩阵和阻尼矩阵。

4 固定约束下身管模态参数识别

实例1:对某火炮身管用有限元软件 abaqus 进行建模,然后对身管进行模态参数识别。身管模型如图1所示。

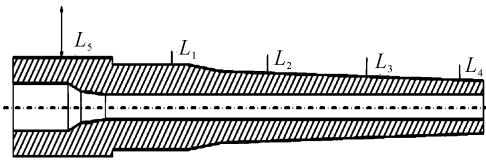


图1 火炮身管模型

身管的末端加固定约束。身管的长度为 8.060 6 m 弹性模量为 210 kPa,泊松比为 0.3,密度为 $7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ 。在 L_5 处沿 Z 方向施加 54 N 的力,作用时间为 0.002 s,分别在 L_1, L_2, L_3, L_4 位置处输出加速度信号,信号输出位置之间

距离为 1.652 0 m。

然后用有限元法对火炮的模态参数进行识别,得到模态参数数据,然后对模型产生的加速度信号用 EMD 方法进行参数识别。如图2所示为 L_1 位置处加速度响应信号。

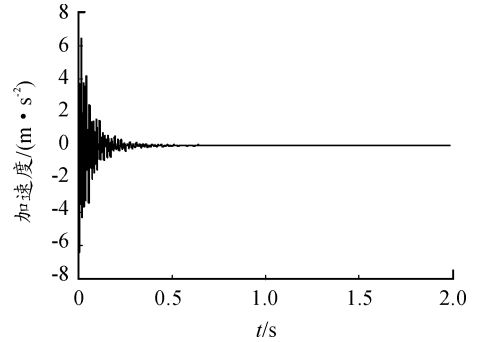


图2 有约束身管 L_1 位置处加速度响应信号

对实验得到的位置 L_1 加速度信号进行 EMD 分解,首先对信号进行 FFT 变换。如图3所示。

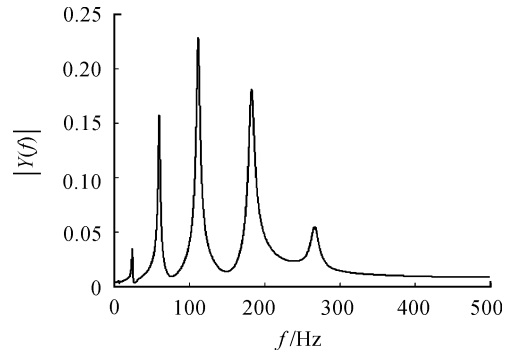


图3 L_1 位置处信号 FFT 变换

如图4所示身管一阶频率大概为 20 Hz,对加速度信号进行 15 ~ 30 Hz 的带通滤波,得到滤波后的响应信号 $x_1(t)$ 。

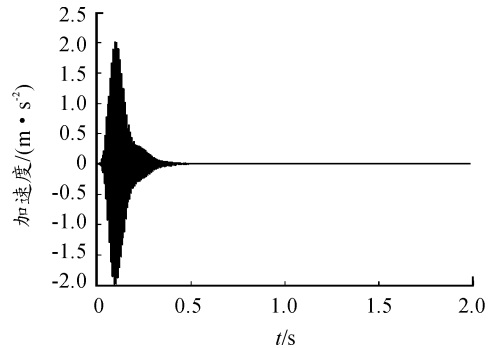


图4 L_1 位置处信号滤波后信号 $x_1(t)$

然后对 $x_1(t)$ 进行 EMD 分解。分解得到 IMF 如图5所示。 IMF_1 近似于一阶模态响应信号,然后对 IMF_1 进行 HHT 变换得到相位角图和幅值对数图。

身管的前四阶固有频率和阻尼比如表 1。

表 1 理论值与 EMD 识别值

模态	f/Hz			阻尼比		
	理论值 (有限元方法)	识别值 (EMD方法)	误差/ %	理论值 (有限元方法)	识别值 (EMD方法)	误差/ %
一阶	24.66	25.09	1.70	0.12	0.11	8.3
二阶	60.41	60.52	0.18	0.17	0.17	0
三阶	112.07	112.81	0.66	0.23	0.21	8.7
四阶	182.73	183.17	0.24	0.28	0.27	3.6

身管的质量,刚度和阻尼矩阵如表 2。从数据上来看,在固定约束条件下,EMD 方法对身管的模态参数识别与理论值偏差不大,可用百分比给出各参数的误差数值的最大值。

5 自由状态下身管的模态参数识别

算例 2:对身管在自由状态下进行模态参数识别。方法步骤同固定约束状态情况的识别方法。

自由状态下身管的 L_1 位置处响应如图 8 所示。

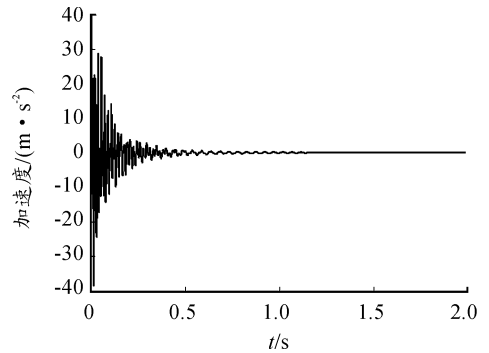


图 8 自由状态下 L_1 位置处响应信号

然后对自由状态下身管的 L_1 位置处响应信号进行 FFT 变换,估算身管固有频率值。变换结果如下:

如图 9 可知,身管的一阶固有频率大概在 20 Hz 左右,然后对身管进行 15 ~ 25 Hz 的带通滤波。滤波之后的响应信号 $x_2(t)$ 如图 10 所示。

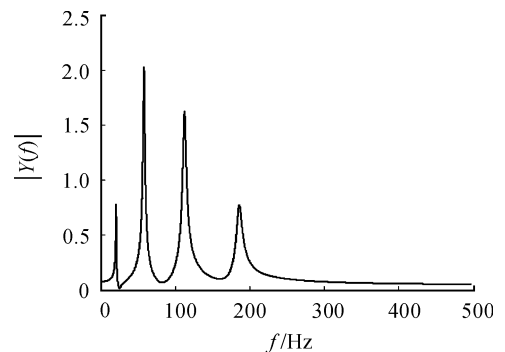


图 9 自由状态下 L_1 位置信号响应 FFT 结果

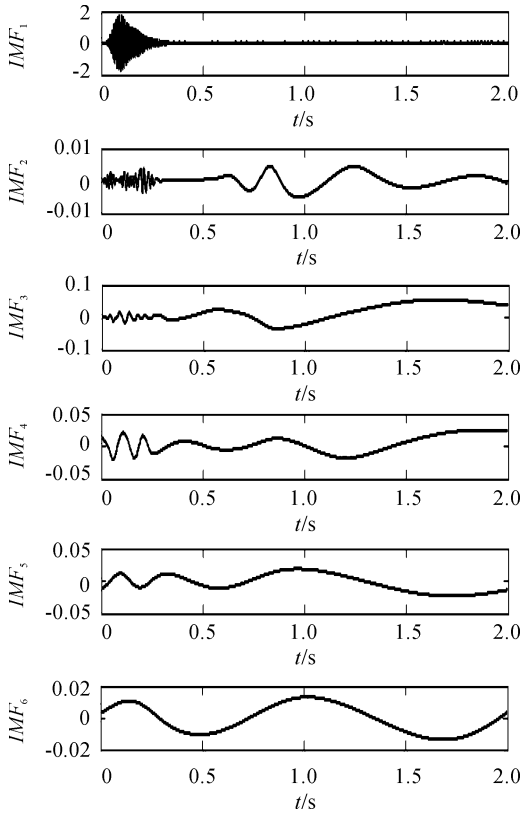


图 5 $x_1(t)$ 进行 EMD 分解得到的 IMF 曲线

如图 6、图 7 所示,可以算得 $\omega_d = 153.18$, $-\zeta\omega_0 = -2.76$ 。求得 $f = 24.38 \text{ Hz}$, $\zeta = 0.11$ 。由此身管的第一阶固有频率 $\omega_0 = 157.65$, $f_0 = 25.09$ 。

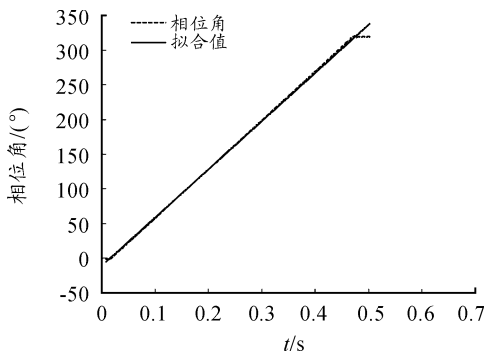


图 6 相位角曲线

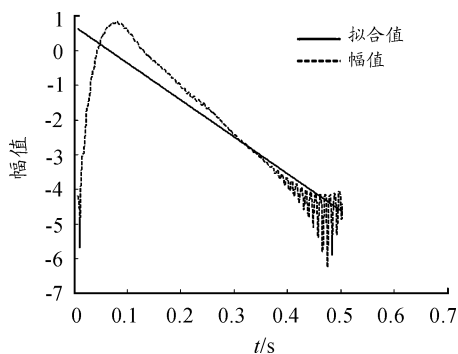


图 7 幅值对数曲线

表2 约束存在时有限元法和EMD法的模态参数

	理论值(有限元方法)					识别值(EMD方法)			
	915.67	0	0	0	0	901.23	1	7	5
质量矩阵/kg	0	470.25	0	0	0	4	498.45	10	13
	0	0	411.55	0	0	8	5	399.98	6
	0	0	0	392.14	0	3	8	6	375.98
	2 907 290.66	-1 116 645.52	0	0	0	2 907 123.54	-1 116 625.47	250	-34
刚度矩阵/ kN	-1 116 645.52	20 831 186.55	-966 541.03	0	0	-1 116 625.47	20 832 122.65	-1 011 254.03	74
	0	-966 541.03	1 856 083.03	-889 542	0	25	-969 987.73	1 856 978.25	-889 114.21
	0	0	-889 542	889 542	0	-105	-14	-889 114.21	889 114.21
	5 400	17 810	-157 500	94 920	0	4 320	14 250	-126 000	75 940
阻尼矩阵/ (N·s·m ⁻¹)	17 810	4 770	53 430	-389 870	0	14 250	3 820	42 750	-311 900
	-157 500	53 430	2 310	-121 340	0	126 000	42 750	1 850	97 070
	94	920	-389 870	-121 340	0	75 940	31 900	97 070	5 550
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

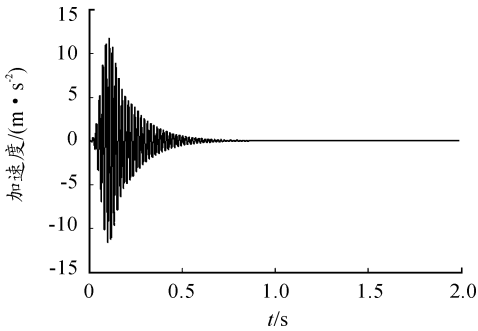


图10 自由状态身管L₁位置滤波后响应信号x₂(t)

然后对滤波后的响应信号x₂(t)进行EMD分解,得到固有模式函数IMFS,如图11所示。

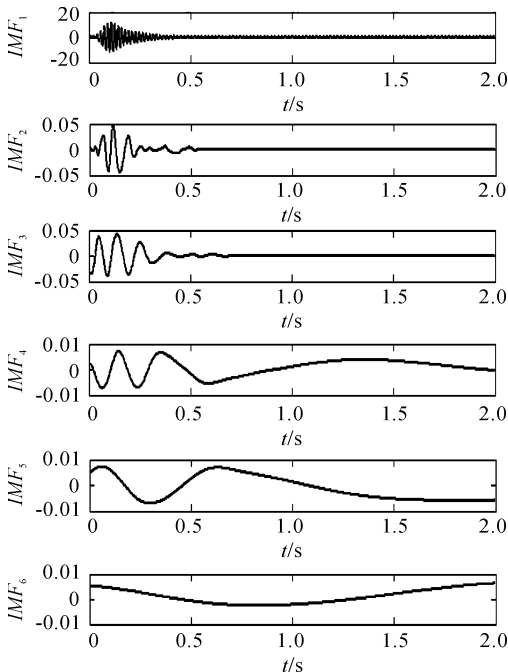


图11 固有模式函数IMFS

对第一个IMF进行HHT变换,求身管的阻尼频率 ω_d 和 $-\zeta\omega_0$ 的值。

如图12、图13所示,可以算得到 $\omega_d = 131.19$, $-\zeta\omega_0 = -2.52$, $f = 20.88$ Hz, $\zeta = 0.12$ 。同理计算自由状态下身管的其他阶次固有频率和阻尼比如表3。自由状态下身管的质量矩阵、刚度矩阵阻尼矩阵如表4所示。

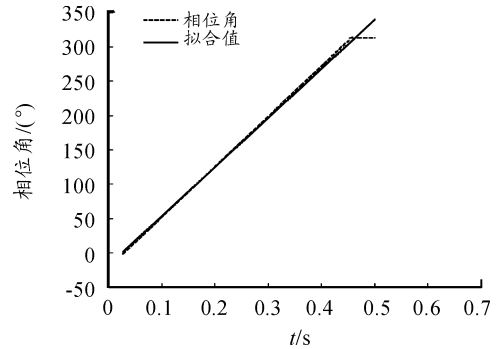


图12 相位角曲线

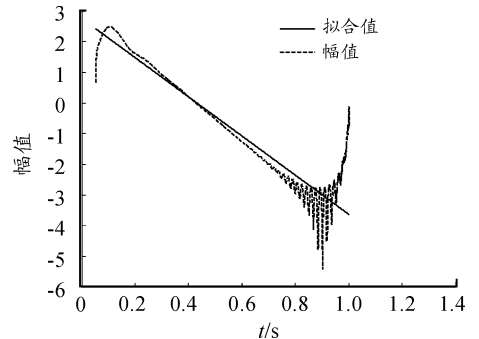


图13 幅值对数曲线

表3 自由状态下理论值与 EMD 识别结果对比数据

模态	频率/Hz			阻尼比		
	理论值(有限元方法)	识别值(EMD方法)	误差/%	理论值(有限元方法)	识别值(EMD方法)	误差/%
一阶	20.90	20.01	4.4	0.12	0.13	8.3
二阶	58.34	58.38	0.06	0.18	0.17	5.6
三阶	112.65	113.51	0.76	0.23	0.22	4.3
四阶	186.01	185.77	0.13	0.27	0.28	3.7

表4 自由状态下身管的有限元法和 EMD 法的结果数据

	理论值(有限元方法)				识别值(EMD方法)			
质量矩阵/kg	915.67	0	0	0	900.11	0	0	0
	0	470.25	0	0	0	478.56	0	0
	0	0	411.55	0	0	0	423.14	
	0		0	0	0	0	0	
刚度矩阵/ kN	2 901 289.59	-1 114 762.31	0	0	2 883 990.09	-1 114 613.98	96	51
	-114 762.31	2 074 385.63	-959 623.34	0	-1 114 613.98	2 072 626.89	-958 012.91	-28
	0	-959 623.34	959 417.61	-863 794.27	-15	-958 012.91	1 826 767.09	-868 754.18
	0	0	-863 794.27	863 794.27	79	-21		-868 754.18
阻尼矩阵/ (N·s·m ⁻¹)	2 700	8 900	-78 750	47 460	3 240	10 680	-94 500	56 950
	8 900	2 390	26 720	-194 940	10 680	2 860	32 060	-233 920
	-78 750	26 720	1160	-60 670	-94 500	32 060	1 390	-72 800
	47 460	-194 940	-60 670	3 470	56 950	-233 920	-72 800	4 170

6 结论

本文通过在有限元软件中建立火炮身管模型,算出了在一端固定约束和自由状态两种情况下火炮身管的模态参数,用 EMD 的方法对这两种情况下的火炮身管进行模态参数识别,并分别与有限元法的结果进行对比。说明 EMD 识别结果可靠,EMD 相对于传统的模态实验方法数据处理方便,结果可靠,而且适用于工作状态下火炮产生的非线性信号。对火炮模态参数识别,对火炮的结构设计,性能指标的分析有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 余成宝. 火炮系统模态测试与分析[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [2] 郭川睿. 地震激励下结构模态参数识别及振动台试验验证[D]. 长沙:中南大学,2014.
- [3] 任春,张继承,罗奇峰. HHT 方法在结构模态参数时域识别中的应用[J]. 长江大学学报,2008,5(4):115-118.
- [4] 莫平杰. 基于 HHT 方法的机械系统模态参数识别[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [5] 王慧. HHT 方法及其若干应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
- [6] 孙兆伟. 基于现代信号处理的结构模态参数识别与损伤识别研究[D]. 北京:北京邮电大学,2012.
- [7] 任宜春. 基于小波分析的结构参数识别方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- [8] 杨永锋,吴亚锋. 经验模态分解在振动分析中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [9] YANG J N, LEI Y, LIN S, et al. Hilbert-Huang Transform Based Approach For Structural Damage Detection, ASCE Journal of Engineering Mechanics[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics,2004,130(1):85-95.
- [10] YANG J N, LEI Y, PAN S W, et al. Identification of Linear Structures Based on Hilbert-Huang Spectral Analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2003,32(10):1443-1467.
- [11] 王邦力,伍鹏宇,罗斌. 某型火箭炮身管改进设计[J]. 兵工自动化,2016(1):93-96.

(责任编辑 周江川)