

文章编号:1005-0523(1999)04-0001-05

非线性迟滞阻尼减振器动力学模型参数识别

王 轲, 李 伟, 朱德懋

(南京航空航天大学 振动工程研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 在非线形迟滞阻尼减振器的建模中可以把减振器恢复力分为几部分:非线性弹性力,非线性阻尼力,以及由于摩擦引起的迟滞力。恢复力与位移变形之间般存在非对称关系,本文采用实验建模方法,根据系统达到最大变形位置前后恢复力与变形的本构关系不同,利用最小二乘法识别出滑移极限等模型参数。考虑实际噪声污染的影响,用小波变换进行信号预处理,既去除噪声又较好地保留了时域信号的形状和相位,从而使识别具有实际可行性。

关键词: 参数识别; 非对称迟滞环; 非线性动力学; 小波降噪

中图分类号: O322; TP301 **文献标识码:** A

0 引言

以钢丝绳、钢丝网垫减振器为代表的非线性迟滞阻尼减振器具有大阻尼及软、硬化刚度的理想动力学特性,但是这类减振器系统的动力学模型建立一直是颇为困难的^[1]。它的恢复力是运动状态的非线性函数,含在非线形刚度和阻尼引起的弹性力和阻尼力,尤其后者含有的因摩擦、滑移而产生的迟滞阻尼使系统具有记忆特性^[2]。这样,整个系统的本构关系是一个多值函数^[3]。在周期外激励作用下,减振器系统的恢复力随变形位移构成迟滞环,而且这个迟滞环一般是非对称的^[4]。这类系统建模的困难严重地影响了它们的设计、制造与应用^[5]。

许多学者对非线性迟滞阻尼减振器进行了建模与(非)参数识别的工作^[6]。提出了不同的动力学模型,但一般都是对称迟滞阻尼模型^[7]。而且模型参数的识别方法比较复杂,计算量大,不能满足工程需要^[8]。笔者试图基于减振器运动的最大变形点确定,建立系统不同运动阶段的不同参数识别方程,用最小二乘法直接计算非线性非对称迟滞阻尼模型的有关参数^[9]。

1 非线性非对称迟滞阻尼减振器的动力学模型

减振器加配重形成了单自由度的振动系统^[10]。钢丝绳、钢丝网垫减振器一方面在受拉伸与受压缩时钢丝间的摩擦力有所不同^[11]。另一方面,减振器中不同受力方向上布置的钢丝减振元件的体积、密度也不相同^[12]。这样,整个系统在周期激励下的迟滞环是非对称的^[13]。在外激励下的力学模型可简化成如图1所示^[14]。其中非线性弹簧和阻尼器提供的恢复力可以认为仅分别与位移和速度有关,无耦合项存在,分别记为 $h(y)$ 和 $g(\dot{y})$,但2个函数是分段函数,在拉伸和压缩具有

收稿日期:1999-03-23; 修订日期:1999-06-08

作者简介:王 轲(1967-),男,浙江杭州人,南京航空航天大学在读博士研究生,工程师^[15]

不同的关系式^[13]由摩擦滑移产生的滞后恢复力 $Z(t)$ 与变形历史有关,可采用如图2所示的非对称双折线关系描述^[13]减振器在质量 m 的重力作用下的初始位移为 x_0 ,以系统静平衡位置为坐标原点^[13]

该单自由度系统动力学方程为

$$m\ddot{x} + F_n(y, \dot{y}, t) = f(t) + mg \quad (1)$$

总恢复力

$$\left. \begin{aligned} F_n(y, \dot{y}, t) &= h(y) + g(y) + Z(t) \\ y &= x(t) + x_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:非线性弹簧提供的恢复力由位移奇数幂次项线性组合而成

$$h(y) = \begin{cases} \sum_{i_1=1}^{n_1} a_{i_1} (y)^{2i_1-1}, & y \geq 0 \\ \sum_{i_2=1}^{n_2} b_{i_2} (y)^{2i_2-1}; & y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

而与运动速度有关的恢复力为

$$g(y) = \begin{cases} \sum_{i_3=0}^{n_3} c_{i_3} |y|^{k_3} \text{sgn}(\dot{y}), & y \geq 0 \\ \sum_{i_4=0}^{n_4} d_{i_4} |y|^{k_4} \text{sgn}(\dot{y}); & y < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$Z(t)$ 用增量形式给出

$$dZ(t) = \begin{cases} \frac{k_{s_1}}{2} [1 + \text{sgn}(z_{s_1} - z(t))] dy, & y \geq 0 \\ \frac{k_{s_2}}{2} [1 + \text{sgn}(z_{s_2} - z(t))] dy; & y < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$k_{s_1} = z_{s_1} \setminus y_{s_1}, \quad k_{s_2} = z_{s_2} \setminus y_{s_2} \quad (6)$$

式中: y_{s_1} 、 y_{s_2} 为钢丝网垫减振器产生宏观滑移的极限值; z_{s_1} 、 z_{s_2} 为最大滑移力^[13]

2 模型参数识别

对上面给出的各物理参数 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 z_{s_1} 、 z_{s_2} 、 k_{s_1} 、 k_{s_2} 可采用实验数据进行近似拟合^[13]

通过实验得到非线性迟滞阻尼减振器的静变形 x_0 ,系统质量 m ,及正弦激励力与响应的采样时间序列: $t_k, f_k, x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, (k = 1, 2, \dots, M_d)$ ^[13]由方程(1),(2)可形成下面的时域参数识别问题

$$F_N^{(k)}(x_k + x_0, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, t_k, \eta) = f_k + m(g - \ddot{x}_k) \quad (7)$$

式中: η 是待识别的减振器物理参数向量

$$\eta = \{a_1, \dots, a_{n_1}, b_1, \dots, b_{n_2}, c_0, c_1, \dots, c_{n_3}, d_0, d_1, \dots, d_{n_4}, z_{s_1}, k_{s_1}, z_{s_2}, k_{s_2}\}^T$$

尽管表达式(5)中含有用增量形式表示的恢复力部分,但对如图2所示的双折线模型,只要确定不同速度方向时的最大滑移力和斜直线斜率,就可确定 $Z(t)$ ^[13]和 $h(y)$ 、 $g(y)$ 的参数 a_i ,

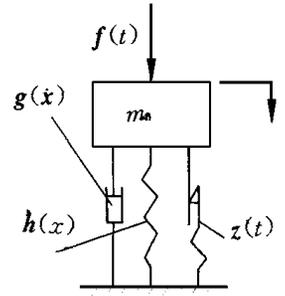


图1 力学模型

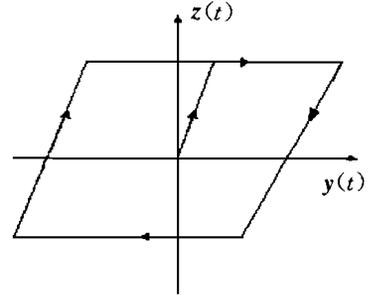


图2 双折线模型

b_i, c_i, d_i 理论上讲只需给出 $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + 2$ 组采样数据就可唯一确定⁽¹³⁾

设采样时间范围内系统 N 次达到位移峰值⁽¹³⁾根据运动学位移与速度的关系,当阻尼减振器达到位移峰值时,其速度等于零⁽¹³⁾尽管采样点不可能恰好处于位移峰值点上,但可以知道位移峰值时间区间 $(t_{k-1}, t_k]$ 内的充要条件是

$$\mathbf{x}_{k-1}\mathbf{x}_k \leq 0; \quad \mathbf{x}_{k-2}\mathbf{x}_{k-1} > 0 \quad (8)$$

通过在第 k 点附近取 m_1 个时间点对应的位移值 $\mathbf{x}_{k-m_1} + \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_{k-m_1+1} + \mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{x}_0$, 用样条插值可以得到受压缩和拉伸的不同位移峰值 \mathbf{y}_{NS} 和 \mathbf{y}_{NX} ⁽¹³⁾

当系统受压缩即运动速度大于零,且尚未进入滑移状态时的识别方程是

$$\sum_{i=0}^{m_1} a_i (\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0)^{2i-1} + \sum_{i=0}^{n_3} c_i \|\mathbf{x}_k\| \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_k + \mathbf{z}_{s_2} + k_{s_1}(\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0 - \mathbf{y}_{NX})) = f_k + m(\mathbf{g} - \mathbf{x}_k) \quad (9)$$

它每次进入滑移直至达到位移峰值前的识别方程为

$$\sum_{i=0}^{n_1} a_i (\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0)^{2i-1} + \sum_{i=0}^{n_3} c_i \|\mathbf{x}_k\| \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{z}_{s_1} = f_k + m(\mathbf{g} - \mathbf{x}_k) \quad (10)$$

而系统退出该次滑移直到达到下一次反方向进入滑移的识别为

$$\sum_{i=0}^{n_2} b_i (\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0)^{2i-1} + \sum_{i=0}^{n_4} d_i \|\mathbf{x}_k\| \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_k + \mathbf{z}_{s_1} + k_{s_2}(\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0 - \mathbf{y}_{NS})) = f_k + m(\mathbf{g} - \mathbf{x}_k) \quad (11)$$

当系统运动速度小于零且已经进入滑移直至达到位移峰值前的识别方程为

$$\sum_{i=1}^{n_2} b_i (\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_0)^{2i-1} + \sum_{i=0}^{n_4} d_i \|\mathbf{x}_k\| \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{z}_{s_2} = f_k + m(\mathbf{g} - \mathbf{x}_k) \quad (12)$$

当外激励足够大,使系统产生滑移时,只要分别取位移极值后的 $n_1 + n_3 + 3$ 和 $n_2 + n_4 + 3$ 组采样点,就可计算出系统受压缩和拉伸的有关模型参数⁽¹³⁾但考虑到噪声、误差等原因,需选取更多的点,用最小二乘法对线性方程 (9) ~ (12) 进行计算来求得所需识别的物理参数向量 $\boldsymbol{\eta}$ 的估计,滑移极限可用式(8) 得到⁽¹³⁾

3 小波降噪

实际测试中的信号常常受到噪声污染,特别是位移信号不容易测准,针对这种情况,过去通过多点平滑加带通滤波进行预处理,但在反付氏变换后会引引起时域信号的相位改变,笔者利用小波变换进行降噪,效果很好⁽¹³⁾

假设测试信号序列为 s , 含噪声为 n ⁽¹³⁾选定小波基 Ψ 进行小波变换,得到各个小波系数

$$C_{i,j} = (W \Psi(s)) \left[\frac{j}{2^i}, \frac{1}{2^i} \right] = \langle S, \Psi_{i,j} \rangle \quad (13)$$

式中: Ψ 为小波基 Ψ 的对偶基⁽¹³⁾

噪声信号的能量散布各个频段,每个小波系数都有相应的分量,且幅值较小,有用信号的频率集中,只有少数小波系数含有其相应的分量,但幅值较大⁽¹³⁾只保留模值较大的小波系统,其余分量赋零,进行逆小波变换,就可得到去除了噪声的重构信号序列

$$s = \sum_{i,j} C_{i,j} \Psi_{i,j}$$

4 仿真实验及结论

根据以上方法,编制了能数识别程序,为验证上述方法的可靠性,进行如下的仿真实验^[13]取模拟减振器的本构关系如下:

当 $y > 0$ 时

$$\begin{cases} F_N(y(t), y(t), t) = a_1 y(t) + a_3 y^3(t) + c_1 y^3(t) + Z(t) \\ dZ(t) = \frac{k_{s1}}{2} [1 + \operatorname{sgn}(z_{s1} - |Z(t)|)] dy(t) \end{cases}$$

式中:物理参数取为 $a_1 = 1.0$, $a_3 = 0.1$, $c_1 = 0.1$, $c_3 = 0.1$, $k_{s1} = 0.5$, $z_{s1} = 0.1$ ^[13]

当 $y < 0$ 时

$$\begin{cases} F_N(y(t), y(t), t) = b_1 y(t) + b_3 y^3(t) + y(t) + d_3 y^3(t) + Z(t) \\ dZ(t) = \frac{k_{s2}}{2} [1 + \operatorname{sgn}(z_{s2} - |Z(t)|)] dy(t) \end{cases}$$

式中:物理参数取为 $b = 1.1$, $b_3 = 0.15$, $d_1 = 0.11$, $d_3 = 0.1$, $k_{s2} = 0.48$, $z_{s2} = 0.11$ ^[13]

为使识别过程可行,需配置适当的质量和激励,配置参数如表 1 所示,分别在无噪声和位移混入幅值为 $[-0.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}]$ 的随机噪声这两种情况求识别方程的数值解,识别结果如表 2、表 3 所示^[13]其中,含噪声时,对位移信号进行了小波降噪处理^[13]

表 1 识别过程的配置参数

参数	m_1	m_2	m/kg	采样间隔 /s	激励力 /N
设置	4	4	0.005	0.001	$20\sin(15t)$

表 2 参数识别结果(无噪声)

参数	a_1	a_3	c_1	c_3	z_{s1}	k_{s1}
实际值	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
仿真值	1.000 0	0.099 8	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.499 8

参数	b_1	b_3	d_1	d_3	z_{s2}	k_{s2}
实际值	1.1	0.15	0.11	0.1	0.11	0.48
仿真值	1.100	0.150	0.110	0.100	0.110	0.480

表 3 参数识别结果(含噪声)

参数	a_1	a_3	c_1	c_3	z_{s1}	k_{s1}
实际值	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
仿真值	1.000 2	0.098 6	0.100 0	0.100 0	0.103 1	0.502 5

参数	b_1	b_3	d_1	d_3	z_{s2}	k_{s2}
实际值	1.1	0.15	0.11	0.1	0.11	0.48
仿真值	1.102 1	0.148 9	0.109 6	0.099 3	0.110 6	0.478 9

由表 2、表 3 可知,仿真结果和理论结果有很好的 consistency,本文的识别方法是可靠的且具有一定的抗噪能力^[13]同是可以看到位移的测量噪声主要对与位移有关的参数 a_1 、 b_1 等的识别带来误差^[13]

[参 考 文 献]

- [1] J M Ko, Y O Ni. Hysteretic behavior and Xmpirical modeling of a wire-cable vibration isolator[J]. **The International Journal of Analytical and Experimental Model Analysis**, 1992, 7(2) 19.
- [2] 胡海岩, 李岳峰¹⁹. 具有记忆特性的非线性减振器参数识别[J]¹⁹. **振动工程学报**, 1989, 12(2) : 17~26 19.
- [3] 崔锦泰著, 程正兴译. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995 19.

The Parameter Identification of Dynamic Models of Nonlinear Hysteretic Damping Isolators

WANG Ke, LI Wei, ZHU De-mao

(Inst. of Vibration Research, Nanjing Aeronautics and Astronautics Univ., Nanjing 210016, China)

Abstract: In the process of modeling an nonlinear hysteretic damping isolator, the restoring force can be analyzed into several components, which include the nonlinear elastic force, the nonlinear damping force and the hysteretic restoring force originated from dry friction. of the three forces, the relationship between the restoring force and deformation can be unsymmetrical. In the course of modeling through experiments as introduced by the present paper, the maximum deformation is firstly determined. Then according to different constitutive equations between deformation and the restoring force before and after reaching maximum deformation, the model parameters concerning the gliding limit and so on are identified directly by employing the least squares. Considering the influence of actual noise pollution, signals are subjected to the pretreatment of wavelet transformation which not only enables denoising, but also retains the shape and phase of time domain signals. Hence, the whole process of identification becomes feasible.

Key words: parameter identification; unsymmetrical hysteretic ring; nonlinear dynamics; wavelet denoise