

DOI: 10.7652/xjtuxb201307019

磁流变阻尼器滞回模型参数的 敏感性分析及其简化模型

薛晓敏¹, 孙清¹, 伍晓红², 张陵²

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决 Bouc-Wen 模型参数多、数学表达式复杂、参数识别困难的问题, 根据 Bouc-Wen 模型中参数的物理意义及其对结果输出贡献的大小进行了参数敏感性分析, 滤除敏感性差的参数, 令敏感性强的参数参与拟合滞回曲线, 从而获得了简化的 Bouc-Wen 模型。在参数敏感性分析中, 提出并采用了修正的 one-at-a-time(OAAT)法。修正 OAAT 法是在 OAAT 法的基础上, 令待测参数之外的其他参数自由变化, 充分考虑了参数之间的耦合关系, 具有全局敏感性分析的意义, 可使结果更为准确和全面。为了验证 Bouc-Wen 简化模型的有效性, 采用遗传算法对 Bouc-Wen 模型和 Bouc-Wen 简化模型的参数进行了识别, 并对磁流变阻尼器力学特性试验数据进行了数值模拟, 结果表明: Bouc-Wen 简化模型能够更精确、更高效地模拟滞回曲线, 拟合精度平均提高了 4%, 计算效率平均提高了 47%。

关键词: Bouc-Wen 模型; 振动控制; 参数识别; 敏感性分析

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0102-06

Simplified Hysteretic Model for Magneto-rheological Damper with Parameter Sensitivity Analysis

XUE Xiaomin¹, SUN Qing¹, WU Xiaohong², ZHANG Ling²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Too many parameters in the Bouc-Wen model impede its further application due to the capability limitation of computer and algorithm available currently. Thus a simplified Bouc-Wen model is suggested, which is derived from sensitivity analysis according to the physical significance of comprehending parameters and their contributions to the model output. A modified one-at-a-time method(OAAT)is adopted in the sensitivity analysis, where the rest parameters are set free except the test parameter, and the interactions among the model parameters are sufficiently considered. Test data of magneto-rheological damper responses are utilized to verify that the proposed simplified Bouc-Wen model with genetic algorithm is capable to simulate the hysteretic curves accurately. Compared with the original model, the proposed model improves the fitting precision for the hysteresis curve and the computational efficiency by 4% and 47%, respectively.

Keywords: Bouc-Wen model; vibration control; parameter identification; sensitivity analysis

收稿日期: 2012-11-06。 作者简介: 薛晓敏(1977—),女,讲师;孙清(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172226)。

网络出版时间: 2013-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130513.1746.001.html>

许多工程结构或系统在荷载作用下都会进入非线性状态而呈现出滞回特性^[1-3]。以磁流变阻尼器为例,力学性能试验表明其为一种具有高度非线性滞回特性的作动装置。为了描述滞回系统这一复杂的非线性特性,许多学者提出了理论模型,比较有代表性的是 Binham 黏塑性模型^[4]、双线性模型^[5]、分段线性模型^[6-7]、微分模型和双非线性模型^[8]、Bouc-Wen 微分模型^[9]等,其中 Bouc-Wen 微分模型是一种应用广泛的模型,它的滞回恢复力-位移(速度)曲线比较符合工程实际,不同的滞回系统可以通过改变其模型参数得以实现,具有非常好的适应性。

但是,Bouc-Wen 模型也有明显的缺陷,即未知参数过多,给参数识别工作增加了很大的难度。此外,由于模型参数过多且方程复杂等原因,导致控制量(电流或电压)隐含在方程组内,要实现控制量的求逆异常困难。因此,简化 Bouc-Wen 模型并保证滞回系统特性的模拟精度,具有非常重要的实际意义。

数学模型可用来近似模拟高度复杂的工程、物理、环境、社会及经济现象^[10]。模型的开发包括若干步骤,其中一个重要步骤是考察每个参数对模型结果的影响程度。对于复杂的数学模型,可以通过滤除那些对模型结果影响不大或没有影响的参数,保留对结果比较敏感的参数,来达到在不影响计算精度的条件下简化数学模型的目的。基于这个思路,本文主要探讨 Bouc-Wen 模型的参数敏感性问题,并在此基础上获得简化的 Bouc-Wen 模型,以期为该模型在振动控制领域的进一步应用提供理论支持。

1 Bouc-Wen 模型

Bouc-Wen 模型^[9]由于数值计算较为容易,而且能够灵活描述多种滞回动力系统的力学行为,因此得到了广泛的应用。图 1 给出了这种模型的基本构架,其中滞回装置输出力 F 由 3 部分构成,分别是由系统滞回系数、刚度系数和黏性系数产生的。

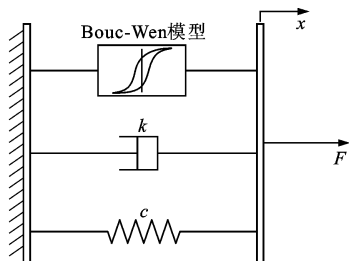


图 1 Bouc-Wen 模型示意图

假设滞回系统为一阻尼器装置,那么由该装置所产生的阻尼力可由下式表示

$$F = c \dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (1a)$$

$$\dot{z} = A \dot{x} - \beta \dot{x} |z|^n - \gamma z |\dot{x}| |z|^{n-1} \quad (1b)$$

式中: z 为与滞回形状相关的无量纲中间变量; x 、 $\dot{x}$ 分别是阻尼器的位移和速度; c 、 k 、 f_0 、 α 、 A 、 β 、 γ 、 n 为模型未知参数。

2 模型参数描述

在 Bouc-Wen 模型中:黏性系数 c 、刚度系数 k 和滞回系数 α 是最主要的描述磁流变阻尼器力学性能的参数,具有明确的物理含义;平衡力 f_0 是由于补偿器的存在而产生的力;滞回环形状控制系数 A 、 β 、 γ 和屈服斜率系数 n 主要控制滞回环的形状,功能是能够更好地控制各种不同频率激励下滞回曲线的形态,但是它们没有明确的物理含义^[11]。各参数描述如下。

(1) c 一般与速度有关,其值取决于阻尼力-速度曲线的平均斜率

$$c \approx \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\dot{x}_{\max} - \dot{x}_{\min}} \quad (2)$$

(2) k 一般与位移相关,其值取决于阻尼力-位移曲线的平均斜率

$$k \approx \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

(3) 在 Bouc-Wen 模型中,速度为 0 附近的阻尼力与速度的关系以线性为主,随着速度的增加此相关关系则转变为一定程度的非线性变化趋势。参数 α 主要反映阻尼力-速度曲线由线性到非线性的变化率(即曲线斜率的变化率)的大小。由于 Bouc-Wen 模型中滞回系数 α 主要与滞回变量 z 相关,而 z 又要通过求解微分方程而获得,中间因素较为复杂,因此很难给出 α 的具体数值,根据经验,一般将其规定为与位移幅值有关的量^[12]

$$\alpha \leq 1.5(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

(4) f_0 代表了补偿器输出力的大小

$$f_0 \approx \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (5)$$

参数 A 、 β 、 γ 和 n 控制滞回曲线的形状,并没有特殊的物理含义,这些参数一般可以根据经验进行调整。

3 参数敏感性分析

数学模型中其中一个输入参数变化对模型输出

结果的影响程度,说明了这个参数对模型输出大小的贡献程度。一般可通过敏感性分析找出对模型输出结果影响较大的参数;相反地,也可以筛选出敏感性弱的参数。

3.1 OAAT 法和 MOAAT 法

参数敏感性分析是研究在不同输入参数变化的条件下,模型输出变化被分配或定量程度的度量。关于敏感性分析,Hamby 等人提出过很多有效的方法^[10],其中最简便的方法是令待测参数在一定范围内变化,与此同时,令其他参数保持不变,然后观察由于这一参数的改变所导致的模型输出结果变化的规律,这种方法被称为 OAAT(one-at-a-time)法,是一种典型的局部敏感性分析方法。局部敏感性分析主要针对参数个体对系统的影响进行考量。但是,参数的敏感性并非只依赖于某个参数的变化对模型输出产生影响,同时还会受参数间的相互影响而导致系统模型的输出结果发生变化。基于这一点,本文对 OAAT 法进行了修正,称为 MOAAT 法,即在 OAAT 法的基础上,令待测参数之外的其他参数自由变化,然后观察由于待测参数数值改变引起的模型输出的变化规律。MOAAT 法充分考虑了参数之间的耦合关系,因此具有全局敏感性分析的意义,得出的结果应该更为准确和全面。

- MOAAT 法的分析步骤:
- (1)在参数可变化的范围内,选取其中大小适中的一组参数组合作为参照基点;
 - (2)确定待测参数作为 MOAAT 法的分析对象,以其基点值为中心点增大或减小数值(最大变化量取基点值的 50%),与此同时,引入遗传算法设计除待测参数之外的 7 个参数为优化变量,令其他参数自由变化;

(3)记录下每一次数值变化对模型输出的影响程度,采用式(6)计算参数敏感度,然后将参数敏感度按照数值大小进行排序,以此衡量各个参数对模型输出的贡献。

模型参数敏感度的计算公式为

$$S = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (F_i - F'_i)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

式中: F_i 代表原模型参数代入 Bouc-Wen 模型获得的第 i 个数据点的阻尼力; F'_i 为变化后的参数代入 Bouc-Wen 模型获得的相应阻尼力; N 为数据点总数; S 为参数的敏感度,值越大说明该参数的敏感性越高。

3.2 算例

设计 2 个算例,分别采用 MOAAT 法和 OAAT 法对 8 个参数进行敏感性分析,各参数选取不同的基点数值。

算例 1 选择参数基点: $c=0.1\text{ kN}\cdot\text{s/mm}$, $k=0.1\text{ kN/mm}$, $\alpha=50\text{ kN/mm}$, $f_0=2\text{ kN}$, $A=0.1$, $\beta=5\text{ mm}^{-2}$, $\gamma=5\text{ mm}^{-2}$, $n=2$ 。模型输入:频率为 0.5 Hz、幅值为 10 mm 的简谐外激励信号。

算例 2 选择参数基点: $c=0.1\text{ kN}\cdot\text{s/mm}$, $k=0.1\text{ kN/mm}$, $\alpha=20\text{ kN/mm}$, $f_0=0.1\text{ kN}$, $A=0.1$, $\beta=3\text{ mm}^{-1.5}$, $\gamma=3\text{ mm}^{-1.5}$, $n=1.5$ 。模型输入:频率为 0.5 Hz、幅值为 10 mm 的简谐外激励信号。

分别采用 2 种方法对算例 1 进行参数敏感性分析,得出的结果大致相同,即在 8 个参数中, f_0 、 n 、 A 这 3 个参数是最为敏感的(敏感度百分比均大于 12%),而参数 β 、 γ 、 k 和 α 的敏感性较低(敏感度百分比均小于 10%),具体结果见表 1。对算例 2 的敏感性分析也获得了相似的结论: n 、 c 、和 α 这 3 个参数的敏感性最高(敏感度百分比均大于 10%),而参数 f_0 、 γ 和 β 的敏感性最低(敏感度百分比均小于 8%),结果见表 2。

表 1 算例 1 的 MOAAT 法敏感性分析结果			
参数	敏感度 S/kN	排序	敏感度百分比/%
f_0	1.013 5	1	24.808 5
n	0.914 7	2	22.390 0
A	0.601 0	3	14.711 3
c	0.455 0	4	11.137 5
β	0.401 0	5	9.815 7
α	0.320 0	6	7.833 0
k	0.236 5	7	5.789 0
γ	0.143 6	8	3.515 0

表 2 算例 2 的 MOAAT 法敏感性分析结果			
参数	敏感度 S/kN	排序	敏感度百分比/%
n	0.501 1	1	25.947 6
c	0.397 4	2	20.577 9
α	0.236 2	3	12.230 7
k	0.210 0	4	10.874 1
A	0.183 6	5	9.507 0
β	0.150 0	6	7.767 2
f_0	0.132 9	7	6.881 7
γ	0.120 0	8	6.213 8

图 2 直观地显示出 MOAAT 法分析的各个参

数的敏感度分布情况。由图 2a 可见,算例 1 中 f_0 的敏感度值最大,是 MOAAT 法分析中最为敏感的参数, n 次之;由图 2b 可以看出,算例 2 中 n 是 MOAAT 法分析中最为敏感的参数,而 c 次之。在参数敏感性分析过程中,虽然 OAAT 法和 MOAAT 法的分析会得出稍有不同结果,但大致结论相同,在分析参数敏感性时可以相互参考,这样才可以得到最全面的结论。

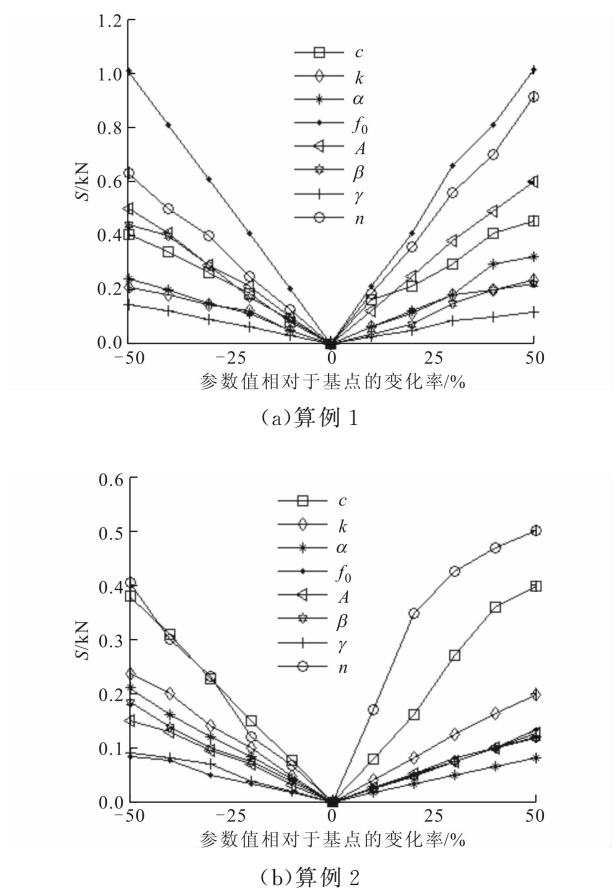


图 2 MOAAT 法的参数敏感性分析蛛网图

通过对 2 个算例的参数敏感性分析,可以得出以下结论:针对不同的基点值,各个参数的敏感度排序会有所不同。这说明,对于不同规格的滞回系统或装置,其模型参数的敏感性各有不同。假设某阻尼器工作于算例 1 的基点范围,则可将敏感性差的参数 β 、 γ 、 k 和 α 固定在基点,从而可获得简化的 Bouc-Wen 模型如下

$$F = c\dot{z} + 0.1x + 50z + f_0$$
$$\dot{z} = A\dot{x} - 5|\dot{x}| |z|^n - 5z |\dot{x}| |z|^{n-1}$$

式中未知参数剩下了 c 、 f_0 、 A 和 n 4 个。

与原 Bouc-Wen 模型相比,该简化模型的参数大大减少,可使后续的参数识别和控制算法执行均相应得以简化。

4 试验验证

磁流变阻尼器是一种理想的半主动控制装置,阻尼器内的磁流变液体为非牛顿流体,力学结构关系复杂,具有明显的非线性滞回特性,如何精确描述磁流变阻尼器的力学特性,是实现其半主动控制算法的前提。本文设计并制作了一种双出杆磁流变阻尼器,最大输出电流为 3.0 A,试验中采用材料试验机系统(MTS)进行正弦循环加载(如图 3 所示),测量其出力、位移等。

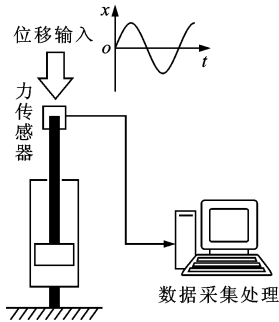


图 3 磁流变阻尼器特性试验示意图

采用 Matlab 语言和 Origin 数值分析软件对试验数据进行处理,并用磁流变阻尼器特性试验数据进行模拟,利用遗传算法对原模型和简化模型的参数进行识别,继而通过对比 2 种模型结果的精确性和计算效率,验证本文提出的简化 Bouc-Wen 模型的有效性和优越性。

4.1 基于遗传算法的参数识别

参数识别的流程如图 4 所示。

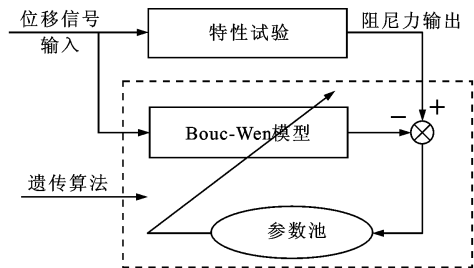


图 4 基于遗传算法的参数识别流程

(1)收集试验数据,包括位移 x 、速度 $\dot{x}$ 和阻尼力 F 的数据。

(2)将 x 、 $\dot{x}$ 代入 Bouc-Wen 模型中,然后对比试验和仿真所得到的阻尼力(F)数据的差值,将数据序列的均方差(E_{RMS})作为遗传算法的适应度函数,用以衡量遗传个体的优劣并进行遗传淘汰。

(3)经过数代遗传操作,最终获得优化解(参数数值)。

遗传算法中的参数设计见表 3。

表 3 遗传算法参数设置

基因模式	个体数	染色体数	基因数
二进制	60	20×6	20
选择方法	交叉率	变异率	迭代终止条件
轮盘赌	0.8	0.01	$E_{\text{RMS}} < 0.1$

4.2 参数敏感性分析

对磁流变阻尼器的 Bouc-Wen 模型进行参数敏感性分析,首先需要确定各个参数的基点数值。参数 c 、 k 、 α 、 f_0 的基点可依据式(2)~式(5)进行选取, A 、 β 、 γ 和 n 由于没有明确的物理含义,其基点数值可采用遗传算法进行参数识别来获得。依据该磁流变阻尼器的 Bouc-Wen 模型的参数敏感性分析结果,OAAT 法分析的参数 c 、 A 和 n 的敏感性都很强,敏感度百分比基本都大于 10%,而其他参数都属于比较不敏感的参数,其敏感度百分比均小于 10%;MOAAT 法的分析结果与 OAAT 法的分析结果类似,参数 c 、 A 和 n 的敏感性都很高,敏感度百分比基本上都大于 10%,而其他参数的敏感度百分比均小于 5%。

根据以上结果,可得出针对该磁流变阻尼器的力学性能数据,其 Bouc-Wen 模型参数中的 c 、 A 和 n 对模型输出影响较大,而其他参数则对模型输出影响较小。因此,假设将不敏感参数的数值固定在基点值($k=0.005 \text{ kN/mm}$, $f_0=0.1 \text{ kN}$, $\alpha=22 \text{ kN/mm}$, $\beta=3 \text{ mm}^{-2}$, $\gamma=3 \text{ mm}^{-2}$),则原 Bouc-Wen 模型可以简化成以下形式

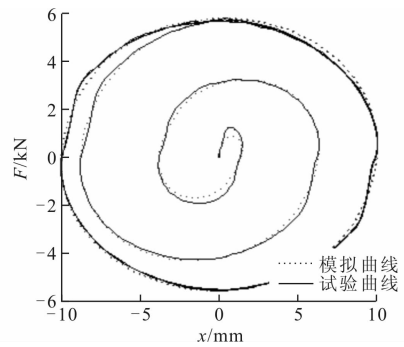
$$F = c \dot{x} + 0.005x + 22z + 0.1$$

$$\dot{z} = A \dot{x} - 3 \dot{x} |z|^n - 3z |\dot{x}| |z|^{n-1}$$

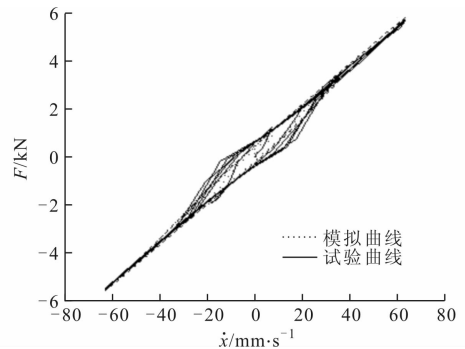
这个简化的 Bouc-Wen 模型仅剩余了 3 个未知参数,分别是 c 、 A 和 n 。由于简化的 Bouc-Wen 模型是将不敏感参数采用基点数值进行固定,因此参数识别的工作就主要围绕 c 、 A 和 n 这 3 个参数展开。

图 5 为简化的 Bouc-Wen 模型对磁流变阻尼器的模拟结果与部分试验曲线的对比,工况如下:外激励信号输入的振幅为 10 mm,简谐波频率为 1.0 Hz,电流强度分别为 0 A 和 2 A。从图 5 中可见,简化 Bouc-Wen 模型的模拟结果与试验结果吻合良好,能够精确地描述该磁流变阻尼器的力学特性,验证了模型简化方法的可行性。

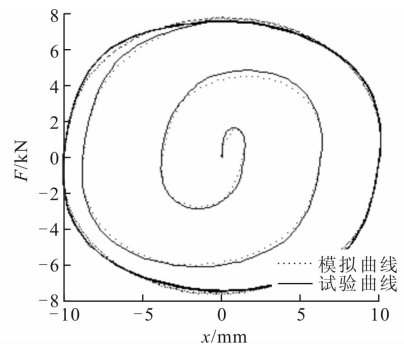
为了进一步验证简化的 Bouc-Wen 模型能够精确高效地描述磁流变阻尼器的力学特性,将以上参数识别的计算精度和效率与原 Bouc-Wen 模型进行对比,结果见表 4。由表 4 可以看到,原 Bouc-Wen



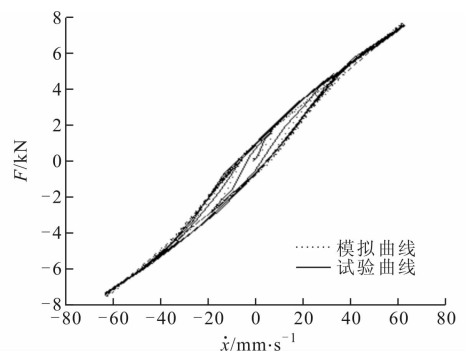
(a) 电流为 0 A 时的阻尼力-位移曲线



(b) 电流为 0 A 时的阻尼力-速度曲线



(c) 电流为 2 A 时的阻尼力-位移曲线



(d) 电流为 2 A 时的阻尼力-速度曲线

频率为 1.0 Hz, 振幅为 10 mm

图 5 磁流变阻尼器的试验曲线和拟合曲线

模型的平均计算精度(E_{RMS})为 0.103 4,总共耗费的迭代次数平均为 53,而简化 Bouc-Wen 模型的平均

计算精度为 0.099 0,平均迭代次数为 28,即简化 Bouc-Wen 模型的计算精度提高了 4%,计算效率提高了 47%。很显然,简化的 Bouc-Wen 模型无论在计算精度方面还是计算效率方面均得到了不同程度的提高。这是由于简化的 Bouc-Wen 模型在优化过程中只针对敏感的 c 、 A 和 n 3 个参数进行参数识别,工作量较原 Bouc-Wen 模型的 8 个参数减少了很多,计算效率自然就得到了很明显的提高;另一方面,简化的 Bouc-Wen 模型是在去掉不敏感参数的基础上进行简化的,对比结果验证了它与原 Bouc-Wen 模型具有相当的计算精度,甚至还有一定程度的提高。因此,本文提出的简化模型的方案具有一定的优越性。

表 4 Bouc-Wen 模型与简化模型的
参数识别精度和效率对比

电流 /A	E_{RMS} (迭代次数)	
	Bouc-Wen 模型	简化 Bouc-Wen 模型
0.0	0.093 8(50)	0.086 6(29)
1.2	0.102 5(59)	0.100 0(30)
3.0	0.092 7(52)	0.088 3(27)
均值	0.103 4(53)	0.099 0(28)

5 结 论

本文提出了一种简化的 Bouc-Wen 模型,只需要少量参数(一般为 3 个)就能够准确模拟滞回系统或装置的力学性能。该简化思路是采用全局敏感性分析和局部敏感性分析方法对原 Bouc-Wen 模型的多个参数进行敏感性分析,然后根据分析结果,将那些敏感度差的参数滤除(将其固定在基点数值上,即为已知数值),令剩余少量的敏感性参数参与拟合各类智能装置的滞回曲线。

为了验证简化 Bouc-Wen 模型的可行性和优越性,采用遗传算法对 Bouc-Wen 模型及其简化模型的参数进行了识别。数值计算结果显示,简化 Bouc-Wen 模型的计算效率相对于原模型平均提高了 47%,曲线拟合精度平均提高了 4%,由此证明本文提出的简化模型以及参数识别方案是切实可行的,具有一定的实用价值和工程应用前景。

参考文献:

[1] 赵大海,李宏男. 压电摩擦阻尼器的试验研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(1): 60-62.
ZHAO Dahai, LI Hongnan. Experimental investigation of piezoelectric friction damper[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2009, 31(1): 60-62.

[2] 彭凌云,周锡元. 拟线性摩擦阻尼器性能试验与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 188-194.
PENG Lingyun, ZHOU Xiyuan. Experiment and FEA on performance of pseudo-linear friction damper[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 188-194.

[3] HONG S R, CHOI S B, CHOI Y T, et al. A hydro-mechanical model for hysteretic damping force prediction of ER damper; experimental verification[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 285 (4/5): 1180-1188.

[4] SHAMES I H, COZZARELLI F A. Elastic and inelastic stress analysis[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1992: 120-122.

[5] DICLELI M, KARALAR M. Optimum characteristic properties of isolators with bilinear force-displacement hysteresis for seismic protection of bridges built on various site soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 982-995.

[6] AOKI S, WATANABE T. Practical response analysis of a mass-spring impact system with hysteresis damping[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 234 (1/2/3): 1-9.

[7] ZHANG Yunfei, IWAN W D. Some observations on two piecewise-linear dynamic systems with induced hysteretic damping[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(5): 753-765.

[8] JIN Jinduo, ZHANG Yunfei, WEI Wei. Steady-state response of a binon-linear hysteretic system[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2006, 41 (8): 926-935.

[9] KWOK N M, HA Q P, NGUYEN M T, et al. Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA[J]. ISA Transactions, 2007, 46(2): 167-179.

[10] HAMBY D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental-models[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 32(2): 135-154.

[11] CHARALAMPAKIS A E, KOUMOUSIS V K. Identification of Bouc-Wen hysteretic systems by a hybrid evolutionary algorithm[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(3/4/5): 571-585.

[12] XUE Xiaomin, SUN Qing, ZHANG Ling, et al. Semi-active control strategy using genetic algorithm for seismically excited structure combined with MR damper[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(3): 291-302.

(编辑 葛赵青)