

文章编号: 1005—0523(2007)04—0039—04

基于BP神经网络算法的土木结构损伤检测研究

郭琳^{1,2}, 孙伟¹, 魏建军²

(1. 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008; 2. 徐州建筑职业技术学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 结构损伤会导致其振动频率发生变化, 基于频率测量的结构损伤识别方法简单方便, 在结构健康监测领域应用广泛. 本文在分析结构固有频率的基础上, 把结构损伤识别问题分解为损伤状态辨别、损伤定位、损伤程度识别三个过程, 对每个过程用模态参数构造标识量, 并作为特征参数输入到神经网络中实现损伤识别. 结合实验室一箱形钢梁的损伤检测试验进行了应用, 收到满意的效果.

关键词: 固有频率; 振动模态; 神经网络; 损伤识别

中图分类号: U448.21 **文献标识码:** B

土木结构在使用过程中不断发生局部损伤, 当局部损伤累积到一定程度, 就会对结构的安全性、可靠性构成威胁. 结构损伤识别问题为高度非线性的复杂系统, 传统方法进行损伤识别难度很大. 神经网络在知识获取、适应性学习、纠错能力等方面具有很好的优越性, 成为研究损伤识别问题提供了新的手段. 神经网络在解决问题时的关键是网络输入参数的合理选择^[1]. 模态性质是结构物理参数的函数, 一旦结构出现损伤, 模态性质就会发生变化, 若以这些特征信息作为输入参数, 则需要大量的样本数据, 造成网络的输入节点数过多. 本文转换了模态参数, 以损伤位置的频率变化平方比 ζ_1 和损伤程度的频率变化比 ζ_2 为神经网络的输入参数, 简化了模型, 在实验应用中得到很好的效果.

1 BP神经网络算法^[2]

BP网络是人工神经网络的一种, 通过对若干样本的自学习, 建立网络输入变量与输出变量之间的非线性映射关系. 基本的BP网络构成包括输入层、隐含层和输出层, 同层单元之间不相连.

输入层和输出层有与网络输入变量 $I_l (l=1, 2, \dots, L)$ 及输出变量 $O_n (n=1, 2, \dots, N)$ 相应的 L 和 N 个

神经元, 而隐层取 $M (M=2L+1)$ 个神经元. 输入变量 I_l 将按下式分配到隐层的第 m 个神经元, 作为其输入 d_m :

$$d_m = \sum_{l=0}^L w_{lm}^1 I_l$$
 式中, w_{lm}^1 是第1层 l 单元到第2层 m 单元之间的权系数. m 单元的输出 C_m 是其输入 d_m 的函数, 即: $C_m = F(d_m)$, 神经元的传递函数 F 通常选用 sigmoid 函数, 即 $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$. 同理可定义第3层(输出层)的 n 单元的输入 g_n 和输出 O_n 分别为: $g_n = \sum_{m=0}^M w_{mn}^2 C_m$, $O_n = F(g_n)$. 有 sigmoid 函数知输出 O_n 的值域为 $(0, 1)$, 需对样本的期望输出进行归一化处理. 通过一定数量样本的网络训练, 确定出最优的权系数, 使得网络输出值与期望值之间的二次残差最小, 这一过程有BP算法来完成.

BP网络的逼近能力和训练方法是其应用的关键, 其算法实现的过程可参考相关的文献.

2 输入参数的确定

结构振动的方程为:
$$([K] - \omega^2 [M]) \{ \varphi \} = 0 \tag{1}$$
 式中 $[K]$ 、 $[M]$ 分别为结构刚度和质量矩阵,

$\{\varphi\}$ 为振型矩阵, ω 为特征值. 结构损伤后, 刚度和质量等会发生小的变化, 则随之 $\{\varphi\}$ 和 ω 产生了一个小的改变量, 损伤后结构运动方程变为:

$$[[K + \Delta K] - (\omega + \Delta\omega)^2 [M + \Delta M]] \{ \varphi + \Delta\varphi \} = 0 \quad (2)$$

式中: ΔK 、 ΔM 和 $\Delta\varphi$ 分别是整体刚度矩阵、质量矩阵和振型的改变量.

损伤使结构刚度明显降低, 而质量分布几乎不改变, 所以方程可进一步简化为:

$$[[K + \Delta K] - (\omega^2 + 2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2) [M + \Delta M]] \{ \varphi + \Delta\varphi \} = 0 \quad (3)$$

将(3)式展开, 且忽略二阶项:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\{\varphi\}^T [\Delta K] \{\varphi\}}{\{\varphi\}^T [M] \{\varphi\}} \quad (4)$$

$$\text{对第 } i \text{ 阶振型, 有: } \Delta\omega_i^2 = \frac{\{\varphi_i\}^T [\Delta K] \{\varphi_i\}}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (5)$$

单元变形由结构的振型计算求出, 即:

$$[\epsilon_m(\varphi)] = [f(\varphi)] \quad (6)$$

式中: $[f(\varphi)]$ 为振型相对位移对单元变形求值函数, ϵ_m 为单元弹性变形(m 为单元号).

则有:

$$\{\varphi_i\}^T [K] \{\varphi_i\} = \sum_{m=1}^M [\epsilon_m(\varphi_i)]^T [K_m] [\epsilon_m(\varphi_i)] \quad (7)$$

式中为结构单元总数, 而

$$\{\varphi_i\}^T [\Delta K] \{\varphi_i\} = \sum_{m=1}^M [\epsilon_m(\varphi_i)]^T [\Delta K_m] [\epsilon_m(\varphi_i)] \quad (8)$$

则式(5)改写为:

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\sum_{m=1}^M [\epsilon_m(\varphi_i)]^T [\Delta K_m] [\epsilon_m(\varphi_i)]}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (9)$$

对结构的单个单元(损伤单元点), 上式可简化

$$\text{为: } \Delta\omega_i^2 = \frac{[\epsilon_N(\varphi_i)]^T [\Delta K_N] [\epsilon_N(\varphi_i)]}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (10)$$

式(10)用单元的变化直接表达出了结构频率的变化, 固有频率变化表征损伤程度. 单元变形由振型表达, 当损伤在某阶振型具有较高能量时, 会对该阶频率产生较大的影响^[2].

$$\text{定义单元损伤系数: } \alpha_{ij} = \frac{\Delta K_{Nij}}{K_{Nij}} \quad (11)$$

式中: ΔK_{Nij} 为损伤产生后的单元刚度的变化量; K_{Nij} 为单元设计刚度, 刚度损伤系数矩阵为:

$$[\alpha_N] = [\alpha_{ij}] \quad (12)$$

即单元刚度变化量可用该单元刚度矩阵乘以该单元损伤系数矩阵:

$$[\Delta K_N] = [\alpha_N] [K_N] \quad (13)$$

把上式代入式(9), 得:

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{[\epsilon_N(\varphi_i)]^T [\alpha_N] [K_N] [\epsilon_N(\varphi_i)]}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (14)$$

结构的任意阶频率变化均包含了相同的单元 N 损伤程度信息, 式(14)能够用于识别结构损伤程度^[3].

结构发生损伤时, 其刚度降低而结构质量不变化, 损伤引起的第 i 阶固有频率变化 $\delta\omega_i$ 可以看作是刚度降低量 δK 及其损伤位置矢量 ζ 的函数^{[5][6]}

$$\delta\omega_i = f(\delta K, \zeta) \quad (15)$$

将上式在未损伤($\delta K=0$)领域内进行一阶泰勒级数展开

$$\delta\omega_i = f(0, \zeta) + \left. \frac{\partial f(0, \zeta)}{\partial(\delta K)} \right|_{\delta K=0} \delta K \quad (16)$$

未损伤时, $\delta K=0$, $\delta\omega_i=0$, 故由(16)式可确定 $f(0, \zeta)=0$, 于是有:

$$\delta\omega_i = f(0, \zeta) + \left. \frac{\partial f(0, \zeta)}{\partial(\delta K)} \right|_{\delta K=0} \delta K = g_i(\zeta) \delta K \quad (17)$$

式中: $g_i(\zeta)$ 仅是位置矢量 ζ 的函数. 同理, 可得第 j 阶模态变化量

$$\delta\omega_j = g_j(\zeta) \delta K \quad (18)$$

(17)(18)两式相比, 得:

$$\frac{\delta\omega_i}{\delta\omega_j} = \frac{\delta\omega_i(\zeta)}{\delta\omega_j(\zeta)} = h(\zeta) \quad (19)$$

损伤后结构任意两阶频率改变量之比仅是损伤位置的函数, 而与损伤大小无关^[7], 由该式可进行结构损伤的位置的判断.

由以上证明, 可设计神经网络的输入参数为

$$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_1 = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta\omega_j} \quad \zeta_2 = \omega_w - \omega_{dr} \quad (20)$$

其中, ω_w 为结构损伤前的 ζ 阶固有频率, ω_{dr} 为结构损伤后的 ζ 阶固有频率. ζ_1 是一个仅与损伤的位置有关而与损伤程度无关的量, 而结构的损伤程度可以由损伤前后频率的变化 ζ_2 来反映.

3 算例

以一简支矩形钢梁模型进行模拟试验. 梁长 L 为 1 000 mm, 宽 B 为 80 mm, 高 h 为 100 mm, 弹性模量 E 为 2.1×10^{11} Pa, 泊松比 μ 为 0.28, 密度 ρ 为 7.8×10^3 kg/m³. 分别在矩形截面梁的 100、200、300、400、500 mm 的地方, 锯开深度为 10、30、50、80 的缺

口.用矩形梁上损伤深度为 10、30、50 mm 的前八阶作为参数计算标本,用来训练网络,用小的损伤来检测损伤位置和程度是否准确.限于篇幅,本文只给出矩形梁在 100、200、300 mm 损伤位置处不同损伤程度时的前五阶固有频率,如表 1 所示.

表 1 矩形梁在不同损伤位置、不同损伤程度时的各阶固有频率

损伤程度/mm	1 阶/Hz	2 阶/Hz	3 阶/Hz	4 阶/Hz	5 阶/Hz
未损	0	219.94	224.28	708.44	729.71
100	10	219.92	224.06	702.86	729.46
100	30	219.71	221.55	643.35	726.5
100	50	213.49	219.22	518.19	718.72
200	10	219.91	223.69	703.63	728.77
200	30	217.26	219.66	655.14	720.32
200	50	199.65	219.1	560.6	703.54
300	10	219.8	223.27	705.73	728.5
300	30	212.8	218.55	677.4	718.26
300	50	187.65	216.08	618.49	699.37

3.1 梁的损伤识别

梁在受损前后模态频率发生变化,梁在 100、300 mm 受损处的模态变化情况如下图.

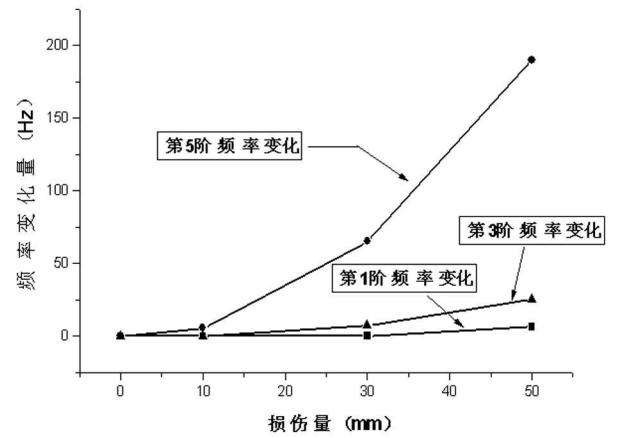


图 1 梁在 100 mm 处的模态频率变化

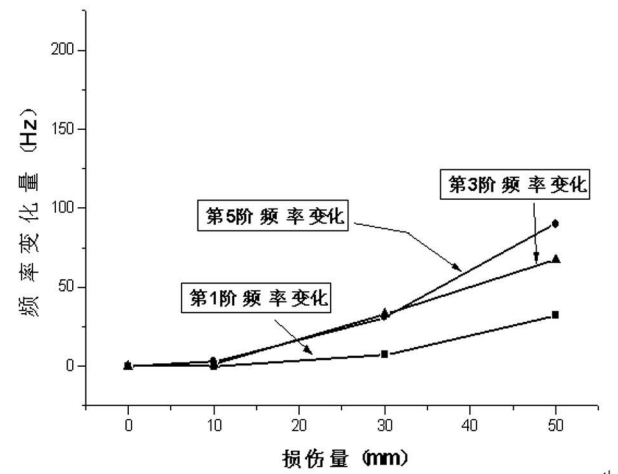


图 2 梁在 300 mm 处的模态频率变化

从图中很清楚看到:(1)结构受损后模态频率向低频漂移;(2)模态频率对损伤的敏感度并不是各阶均等;损伤引起的频率飘移随损伤量呈非线性增大,即频率对大损伤更敏感.这样通过结构模态的改变很容易识别出了损伤的产生^[9].

3.2 梁的损伤定位

损伤定位采用前面讨论参数 ζ_1 ,当 BP 网络训练完成后,用检测样本进行检测.

3.3 矩形梁的损伤程度标定

参数 ζ_2 作为神经网络的特征参数来识别梁的损伤程度.

4 结语

基于频率变化参数的结构损伤识别,只需测出结构的频率及其变化,不需要测量振型等其它模态

表 2 神经网络对损伤程度标定的识别结果

损伤位置	第一阶 $\omega_0-\omega_1$	第二阶 $\omega_0-\omega_2$	第三阶 $\omega_0-\omega_3$	实际损伤 大小 d_0 /mm	网络识别 大小 d_1 /mm	识别绝对误差 (d_0-d_1)	识别相对误差 $\frac{ d_0-d_1 }{d_0} \times 100\%$
100	0.02	0.22	5.58	10	10.236 4	0.236 4	2.364
	0.23	2.73	65.09	30	32.174 2	2.174 2	7.247
	6.45	5.06	190.25	50	52.122 9	2.122 9	4.246
300	0.14	1.01	2.71	10	9.814 0	-0.18 6	1.86
	7.14	5.73	31.04	30	29.583 1	-0.416 9	1.390
	32.29	8.2	89.95	50	49.897 3	-0.102 7	0.205

参数就可对结构的损伤做出判断,简单易行.在识别过程中划分为损伤识别、定位、损伤程度识别 3 个子过程,利用较少的参数,将振动模态分析技术和神经

网络技术相结合实现了结构损伤检测,获得了较好的效果,该方法还具有很强的鲁棒性,不仅受模型误差的影响较小,而且不会因测量信息的不完整影响

损伤检测精度.

参考文献:

[1] 王志坚, 韩 西, 钟 厉. 基于结构动力参数的土木工程结构损伤识别方法[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 128—132.

[2] 姜绍飞. 基于神经网络的结构优化与损伤检测[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[3] 郑 猛, 陈恩利, 闫明明. 基于模态参数和神经网络的结构损伤检测[J]. 国防交通工程与技术, 2004, (2): 15—19.

[4] 郭杏林, 陈建林. 基于神经网络技术的结构损伤探测[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(3): 269—273.

[5] 万小朋, 王军强, 赵美英. 基于模态频率和神经网络的结构损伤检测[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(2): 156—159.

[6] Kaminski P C. The Approximate Location of Damage through the Analysis of Neural Frequencies with Artificial Neural Networks [J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 1995, 209: 117—123.

[7] Masri SF, Nakamura M, Chassiakos AG, et al. Neural network approach to detection of changes in structural parameters [J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 1996, 122: 350—360.

[8] Yun C—B, Bahng EY. Substrual identification using neural networks[J]. Computers and Structures, 2000, 77: 41—52.

The Study of Structural Damage Detection Based on BP Neural Network Technique

GUO Lin^{1,2}, XUN Wei¹, WEI Jian-jun²

(1. School of Information & Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008;
2. Xuzhou Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The method based on frequency measurement to localize structure damage is widely applied to structure health monitor. In this paper, the structural damage detection is divided into three courses, which are structural damage identification, structural damage localization and structural damage severity determination course. Damage detection courses are named by modal parameters and inputted to neural network as parameters for structural health monitoring. Damages of different locations and severity on a box beam are simulated with BP neural network.

Key words: natural frequency; vibration modal; neural network; damage detection

简讯二

华东交通大学获批教育部工程研究中心一项

接国家教育部来文, 我校铁路环境振动与噪声工程中心获批为教育部工程研究中心, 结束了我校无教育部工程中心的历史.