

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.017



模式识别的斜拉桥损伤诊断动力 指纹与识别算法

刘杰^{1,2},王海龙^{1,3},张志国²,吴立朋²

(1.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031;2.石家庄铁道大学 土木工程学院,
石家庄 050043;3.河北建筑工程学院 土木工程学院,河北 张家口 075000)

摘要:为有效并准确诊断出斜拉桥损伤,对基于模式识别的斜拉桥损伤诊断方法进行了研究。选取易于测试出的低阶模态频率和部分关键点竖向振型数据为动力指纹,无需模态扩展或模型缩聚。研究并采用全因子设计进行动力指纹库的创建,可精确评估设定的损伤因子及其交互作用对损伤识别结果的影响。设计并增加了带随机误差的动力指纹库样本集。编制了基于 Matlab 的模式识别的多种算法,重点研究了精确度高的多层感知器识别算法及其提高该算法预测准确率的装袋集成算法。最后给出一座单塔双跨双索面斜拉桥的多种识别算法的损伤诊断过程和结果,得到一种可包容测试随机误差的高精确度斜拉桥损伤诊断评估模型。

关键词:斜拉桥;损伤诊断;模式识别;动力指纹;识别算法

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)04-0115-09

Dynamic fingerprint and identification algorithm for damage diagnosis of cable stayed bridge based on pattern recognition

Liu Jie^{1,2}, Wang Hailong^{1,3}, Zhang Zhiguo², Wu Lipeng²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China;

3. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou Hebei, 075000, P. R. China)

Abstract: In order to effectively and accurately diagnosis the damage of cable stayed bridge, the damage diagnosis method of cable stayed bridge based on pattern recognition was studied. The low order modal frequency and vertical vibrational mode of some key points were selected for dynamic fingerprints of no modal expansion or model condensation. The full factorial design was used to create the dynamic fingerprint database, which could accurately evaluate the damage factors and their interaction effects on the damage identification results. And the dynamic fingerprint database with random error was designed and added.

收稿日期:2016-03-15

基金项目:国家自然科学基金(51408379);河北省自然科学基金(E2013210104、E2013210125、E2016210087);河北省重点学科建设(桥梁与隧道工程)。

作者简介:刘杰(1977-),男,主要从事桥梁检测研究,(E-mail)liudingwen@stdu.edu.cn.

Received:2016-03-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408379); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2013210104, E2013210104, E2016210087); Construction of Key Disciplines in Hebei Province (Bridge and Tunnel Engineering).

Author brief: Liu Jie (1977-), main research interest: bridge detection, (E-mail) liudingwen@stdu.edu.cn.

The pattern recognition algorithms based on MATLAB were compiled. The high accuracy of the multilayer perceptron recognition algorithm and the algorithm to improve the prediction accuracy of the bagging ensemble algorithm were mainly studied. In the end, the damage diagnosis process and results of a single tower double span double cable planes cable stayed bridge were presented, and a high precision evaluation model covering random errors for damage diagnosis of cable stayed bridges was obtained.

Keywords: cable-stayed bridge; damage diagnosis; pattern recognition; dynamic fingerprint; identification algorithm

斜拉桥损伤诊断是斜拉桥健康监测系统的的重要组成部分和核心,其方法对健康监测系统有效性起决定性作用。按是否有反演可分为基于模型修正的损伤诊断方法和基于模式识别的损伤诊断方法两大类^[1]。基于模式识别的损伤诊断方法属无反演的正演方法,可避免病态的优化求解,在预设的模式库中通过识别算法识别与实测损伤指标最接近的模式确定结构的损伤情况。模式识别采用的损伤指标(也称指纹)有静力和动力之分,基于动力损伤指标(称为动力指纹)的损伤诊断不影响桥梁结构的正常运营,可通过环境激励工作状态模态识别^[2]进行实时监测,具有远程在线的优点。

通过综述类文献^[1, 3-6],将目前所有的动力指纹归纳为 4 类,分别为直接模态参数类(如频率、振型)、模态参数的函数类(如频率平方、模态应变能、模态保证准则、坐标模态保证准则、模态柔度、残余力向量等)、曲率类(如模态曲率、柔度曲率等)和振动信号非模态处理类(如傅里叶变换、短时傅里叶变换、Wigner-Ville 分布、小波/包分析、希黄变换(HHT)、盲源分离等)。第 2 类和第 3 类某些动力指纹虽然具有很强的损伤指示能力,但其依赖于模态参数的识别精度,且构造指标时需要较多的自由度需进行模态扩展或模型缩聚。模态扩展在扩展的振型中引入了额外误差;而模型缩聚时在有限元模型中引入了误差,破坏了原始结构的连续性。这两种方法均直接影响了结构损伤诊断的精确评估^[7],且单纯的振型扩展或模型缩聚技术对监测未测量区域处的损伤是无能为力的^[6]。因此,寻求不需要振型扩展和模型缩聚,能够直接使用低阶不完整部分振型和低阶频率作为动力指纹进行有效损伤诊断很有意义。

“没有免费的午餐(NFL)定理”指出,不存在与应用无关的任何理由认定某种学习或分类算法比另外一种更好,每类算法仅适合特定的模式分类任务^[8]。本文对模式识别的多种算法进行了 Matlab

编程实现,通过斜拉桥早期损伤诊断进行实验,考察算法的准确度及适用性。为进一步提高算法的准确率,对识别准确率高多层感知器算法进行了装袋集成算法的研究,该装袋集成算法进一步提高了多层感知器算法识别准确度。

1 动力指纹选取及动力指纹库设计

一个理想的损伤动力指纹应该在低阶模态条件下对结构关键部件的局部损伤较为敏感,且在结构模态测试中易于获取。由于现场条件和测试仪器的限制,一般只能得到低阶不完整的模态参数^[9]。根据本文的前期工作,在此不妨选择前 5 阶频率和测点归一化振型值作为动力指纹,不需要进行模型缩聚或模态扩展。

要想获取动力指纹需要根据设定的损伤因子进行仿真试验设计^[10]。试验设计(DOE, Design of Experiments)是数理统计学的分支,是工程和科研中有着广泛应用的统计方法之一。全因子设计法(FFD, Full Factorial Design)允许任意数目的因子和水平,可对所有因子的全部组合在所有水平上进行评估。FFD 为精确评估因子和交互作用的影响提供了大量的信息,正好可精确评估设定的损伤因子及其交互作用对损伤诊断结果的影响。FFD 需要进行的仿真试验次数较大,但这些工作是在斜拉桥损伤诊断评估模型建成之前进行的,并不会影响实际应用,试验设计方法的取舍不应仅以计算代价大小作为判别的标准。全因子设计法试验分析次数为

$$Num = \prod_{i=1}^m n_i \quad (1)$$

式中: n_i 表示第 i 个因子的水平数; m 表示因子的个数。

比如按本文斜拉桥算例中采用 5 个部位的弹性模量变化率作为损伤因子,损伤程度取 0、0.01、0.02 三个水平,则对应的仿真试验次数为 243 次。

根据选择的动力指纹创建样本库,需要对设定

的单个或多个部位(可以是非测点)损伤情况根据测点的动力指纹进行精确识别,应首先建立各部位因子及其交互作用与测点动力指纹之间的精确关系。本文研究并采用全因子设计进行动力指纹库的创建。另外,考虑到基于环境激励的模态参数识别由于噪声、测试仪器设备、识别算法、人为等因素影响,测试并识别的模态参数难免存在不同程度的随机误差,且该误差一般满足正态分布,本文算例中成桥时计算与实测振型值也证明了这点。因此,本文设计并增加了带随机误差的动力指纹库样本集将包容测试的随机误差。同时,还与不加随机误差的样本库比较,文中算例证明本文所构建的样本库可极大提高各种算法的识别准确率。

设计并增加带随机误差的动力指纹库样本集,噪声水平为 0.01~0.1,共 10 个噪声水平,增加 2 430 条样本集。特别说明的是,样本集数量的增加只会增加模式识别建模的时间,利用训练好的算法模型去测试在线识别的动力指纹时间很短,通过计算测试发现在个人电脑上一般仅需 0.01 s,样本集数量多少并不影响在线损伤诊断的效率。实现过程如下:

设仿真试验提取的动力指纹向量为 x , 包含前 5 阶频率和前 5 阶 11 个测点的归一化振型值,共计 60 个指纹。采用 Matlab 正态分布随机矩阵函数 $\text{randn}(m, n)$, 该函数任意一次生成不同的满足标准正态分布的 $m \times n$ 阶矩阵。

增加的 10 个噪声水平的动力指纹向量用 y 表示,对应的 Matlab 代码为:

```
X = xlsread('e:\动力指纹库.xls','动力指纹库',
A2:BH244);
```

```
lei = xlsread('e:\动力指纹库.xls','动力指纹库',
'BI2:BI244');
```

```
for j=1:1:10
noise=j;
for i=1:1:243
wucha(i,1:60) = noise/100 * X(j,1:60). *
randn(1,60);
end
```

```
Y=X+wucha;
```

```
xlswrite('E:\增加随机误差.xls', Y, ['A',
num2str(2+j*243),':', 'BH', num2str(244+j*
243)]);
```

```
xlswrite('E:\增加随机误差.xls', lei, ['BI',
```

```
num2str(2+j*243),':', 'BI', num2str(244+j*
243)]);
```

```
end
```

2 多层感知器算法及其装袋算法实现

基于文献[11]以及 PUDN 网(具体网址:www.pudn.com)编制并调试了书中的十几种算法,反复计算测试发现其中 7 种算法具有较高的识别精度,按识别准确率由高到低的顺序分别为多层感知器算法、随机森林算法、 k -最近邻算法、LMT 决策树算法、罗杰斯特回归算法和 RIPPER 算法,对比情况将在斜拉桥算例中介绍。

多层感知器算法由于可处理非线性关系分类问题,在非线性模式识别的很多领域都得到推广应用。首先,确定神经网络结构,如图 1 所示,由一个输入层、一个隐含层和一个输出层组成^[12-13]。然后,利用 BP 算法进行训练,不需要对数学模型有过多了解,该算法从一定程度上推动了模式识别概念的普及和技术应用。

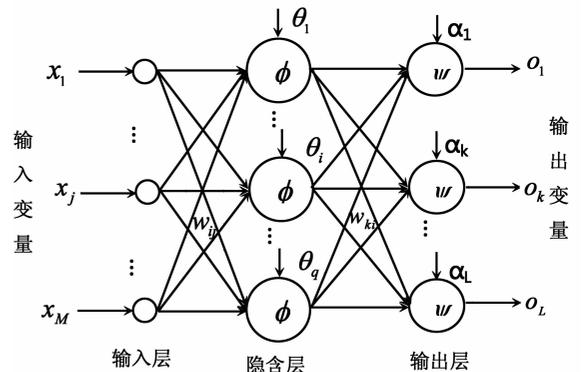


图 1 多层感知器网络

Fig. 1 Multilayer perceptron network

隐含层第 i 个节点输入和输出分别为

$$net_i = \sum_{j=1}^M w_{ij} x_j + \theta_i \quad (2a)$$

$$y_i = \varphi(net_i) = \varphi\left(\sum_{j=1}^M w_{ij} x_j + \theta_i\right) \quad (2b)$$

式中: w_{ij} 表示隐含层第 i 个节点到输入层第 j 个节点之间的权值(Weight); x_j 表示输入层第 j 个节点的输入, $j=1, \dots, M$; θ_i 表示隐含层第 i 个节点的阈值(Threshold); $\varphi(x)$ 表示隐含层的激励函数。

输出层第 k 个节点的输入和输出分别为

$$net_k = \sum_{i=1}^q w_{ki} y_i + a_k =$$

$$\sum_{i=1}^q \omega_{ki} \varphi \left(\sum_{j=1}^M \omega_{ij} x_j + \theta_i \right) + a_k \quad (3a)$$

$$o_k = \psi(\text{net}_k) = \psi \left(\sum_{i=1}^q \omega_{ki} y_i + a_k \right) =$$

$$\psi \left(\sum_{i=1}^q \omega_{ki} \varphi \left(\sum_{j=1}^M \omega_{ij} x_j + \theta_i \right) + a_k \right) \quad (3b)$$

式中: ω_{ki} 表示输出层第 k 个节点到隐含层第 i 个节点之间的权值(Weight), $i=1, \dots, q$; $\psi(x)$ 表示输出层的激励函数; a_k 表示输出层第 k 个节点的阈值(Threshold), $k=1, \dots, L$; o_k 表示输出层第 k 个节点的输出。

然后根据误差梯度下降法依次修正并调节输出层的权值 ω_{ki} 和阈值 a_k 以及隐含层的权值 ω_{ij} 和阈值 θ_i , 使修改后的网络的最终输出能接近期望值。其相应修正量计算公式为

$$\Delta \omega_{ki} = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot y_i \quad (4a)$$

$$\Delta a_{ki} = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \quad (4b)$$

$$\Delta \omega_{ij} = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot \omega_{ki} \cdot \varphi'(\text{net}_i) \cdot x_j \quad (4c)$$

$$\Delta \theta_i = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot \omega_{ki} \cdot \varphi'(\text{net}_i) \quad (4d)$$

式中: η 表示学习速率; T 表示输出目标; P 表示训练样本数目; p 表示第 p 个训练样本; L 表示输出层节点数目; 其他参数含义同前。

该算法会因为训练样本的可变性等因素出现分类误差, 有时分类准确率并不稳定。提高分类准确率可通过装袋方法。装袋技术^[14-21]能通过学习 and 组合一系列分类法来提高分类的整体准确率。为进一步提高算法的识别准确率以便将来实际推广应用, 对多层感知器算法按不同方法集成对比, 发现装袋集成能提高其识别准确率, 故主要介绍对多层感知器算法的装袋集成方法。

对多层感知器进行装袋的算法是根据均匀概率分布从样本库中有放回重复抽样得到多个样本集, 然后使用多层感知器算法为每个样本集构件一个分类器, 训练多个分类器后, 分类器对单个预测值进行多数表决, 得票最高的类别指派给测试样本, 这种方法通过降低多层感知器算法训练数据的随机波动方差进而改善了泛化误差。基于多层感知器算法的装

袋的过程如下:

- 1) 设抽样次数为 k , 根据均匀概率分布从样本库中循环抽取 k 个自助样本集 D_i ;
- 2) 在 D_i 上训练多层感知器 C_i ;
- 3) 训练好的多个 C_i 对单个预测值进行多数表决, 用得票最高的预测值作为测试样本的结果。

Matlab 部分代码如下:

```
for i=1:1:k
incremental=ceil(rand*100);
for randpos=1:incremental
[result, samples]=bootstrp(1,'copy',
numbers);
end
.....
net=newp(PR,S,TF,LF);
[net,tr]=train(net,PBags,testBags);
end
```

3 斜拉桥算例分析

主桥为单塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 结构布置如图 2 所示。斜拉索采用扇形布置, 梁上索距 6 m, 桥跨为 (130+130) m, 两跨对称布置 18 对斜拉索; 主梁采用预应力混凝土倒梯型的单箱四室截面, 主梁中间设三道直腹板, 两侧设斜腹板, 端部为风嘴形状; 主梁顶面全宽 37.5 m, 直线上标准段顶面设双向 2% 横坡; 标准断面梁高 3 m, 塔梁固结区加高到 3.5 m; 主梁标准断面底板宽 21.9 m, 底板厚 28 cm, 顶板厚 28 cm, 斜边腹板厚 28 cm, 中间直腹板厚 40 cm; 箱梁外侧悬臂宽 1.55 m, 厚 100 cm; 顺桥向根据拉索间距设置横梁, 横梁腹板厚 40 cm^[22]。

采用 Ansys 进行建模, 主梁和桥塔采用 BEAM188 单元, 采用 CAD 定义截面的方式定义截面创建, 斜拉索采用 link10 单元, 主梁和桥塔横梁预应力采用等效荷载法施加, 采用影响矩阵法和优化方法^[22]建立基准有限元模型, 如图 3 所示。主梁振动测点布置如图 4 所示。动力分析时, 为与振型实测情况吻合, 采用主梁测点最大元素归一化方法提取竖向位移振型, 提取前 5 阶模态, 基准有限元模型与采用环境激励测得的成桥频率及测点归一化竖向振型对比分别如表 1 和表 2 所示。

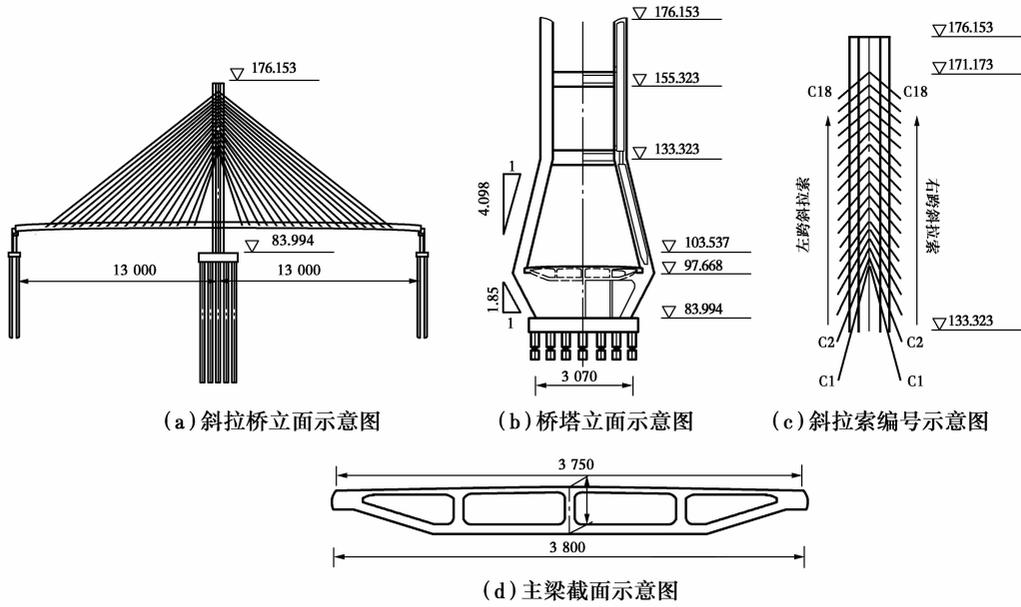


图 2 斜拉桥结构布置图(单位:cm)

Fig. 2 Structural diagram of cable-stayed bridge(unit: cm)

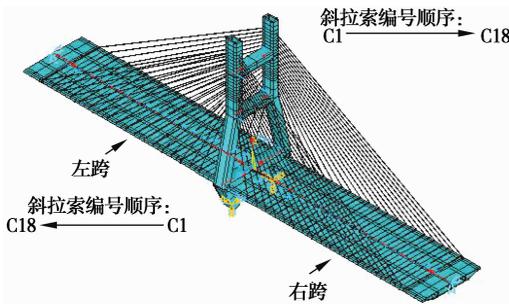


图 3 斜拉桥结构模型

Fig. 3 The Structure Model of cable-stayed bridge

表 1 基准有限元模型与实测频率对比

Table 1 The comparison between FE calculated and measured frequencies

阶数	实测频率	基准有限元模型频率	误差/%
1 阶	0.469 951	0.464 782	1.1
2 阶	0.781 907	0.791 290	-1.2
3 阶	0.903 752	0.891 099	1.4
4 阶	1.114 995	1.100 500	1.3
5 阶	1.136 485	1.147 850	-1.0

由表 1 可知,基准有限元模型与实测频率较为吻合,最大误差仅为 1.4%。

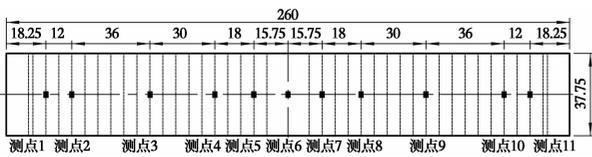


图 4 环境激励工作状态振动测点布置图(单位:m)

Fig. 4 arrangement of vibration measuring points in environmental excitation (unit: m)

表 2 基准有限元模型与实测测点归一化竖向振型值对比

Table 2 Comparison of the normalized difference between the finite element model and measurement

测点	第 1 阶振型值			第 2 阶振型值			第 3 阶振型值			第 4 阶振型值			第 5 阶振型值		
	计算	实测	误差/%	计算	实测	误差/%									
1	0.402	0.405	-0.8	0.376	0.379	-0.9	0.432	0.425	1.5	0.330	0.335	-1.5	-0.195	-0.194	0.5
2	0.778	0.785	-0.9	0.738	0.738	0.0	0.835	0.841	-0.8	0.580	0.584	-0.7	-0.481	-0.482	-0.2
3	1.000	0.986	1.4	1.000	1.002	-0.2	1.000	0.996	0.4	1.000	1.011	-1.1	-1.000	-1.002	-0.2
4	0.662	0.660	0.3	0.657	0.653	0.6	0.491	0.492	-0.2	0.738	0.728	1.4	-0.798	-0.787	1.4
5	0.305	0.307	-0.8	0.314	0.311	1.1	0.164	0.162	1.1	0.095	0.096	-0.6	-0.338	-0.337	0.3
6	0.000	0.000	1.4	0.038	0.038	1.1	0.068	0.069	-1.1	0.000	0.000	0.7	0.000	0.000	0.2

续表 2

测点	第 1 阶振型值			第 2 阶振型值			第 3 阶振型值			第 4 阶振型值			第 5 阶振型值		
	计算	实测	误差/%	计算	实测	误差/%	计算	实测	误差/%	计算	实测	误差/%	计算	实测	误差/%
7	-0.305	-0.310	-1.7	0.314	0.317	-0.9	0.165	0.165	0.0	-0.095	-0.095	-0.2	0.338	0.333	1.6
8	-0.662	-0.663	-0.1	0.657	0.656	0.1	0.492	0.489	0.6	-0.738	-0.731	0.9	0.798	0.804	-0.8
9	-1.000	-1.002	-0.2	1.000	1.012	-1.2	1.000	0.989	1.1	-1.000	-1.008	-0.8	1.000	0.993	0.7
10	-0.778	-0.776	0.3	0.738	0.746	-1.1	0.835	0.822	1.5	-0.581	-0.589	-1.4	0.481	0.477	0.8
11	-0.402	-0.401	0.3	0.376	0.376	0.0	0.432	0.432	0.1	-0.330	-0.335	-1.4	0.195	0.195	-0.2

由表 2 可知,基准有限元模型与实测测点归一化竖向振型值比较吻合,最大误差仅为 -1.71%,表明本文创建的基准有限元模型是可行的,基于基准有限元模型的后续动力分析及损伤诊断是有效的,误差分布规律如图 5 所示。

本文选择前 5 阶频率和 11 个测点的前五阶归一化振型值作为动力指纹。选择塔梁联接部位梁段、跨中和 1/4 跨梁段等易损部位的单元弹性模量等五个损伤因子,用以识别其他方法较难识别的早期损伤,损伤因子水平如表 3 所示。需要说明,损伤时采用降低单元弹性模量的方法简单并易于实现,若采用其他方法(比如降低截面几何特性等)设定损伤,进行损伤识别的方法和过程与本文所述方法相同。因此,损伤设定方法的选取并不影响损伤识别方法在实际工程中的使用。

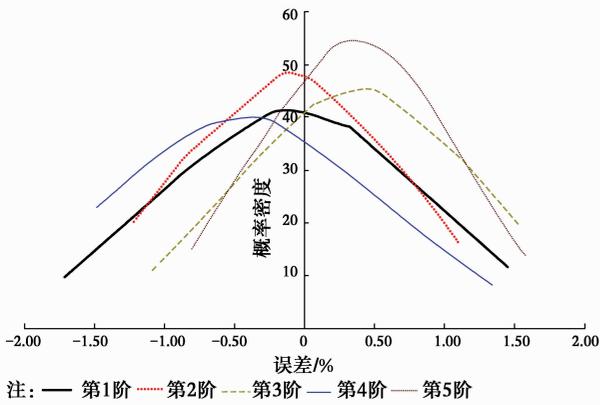


图 5 计算与实测归一化振型值误差分布规律

Fig. 5 Comparison of the error distribution of the normalized mode value calculated and measured

由图 5 可见,有限元计算的振型值与实测振型值误差满足正态分布规律。说明测试并识别的模式参数存在满足正态分布的随机误差,本文设计并增加了带随机误差的动力指纹库样本集正是为包容模式参数识别的随机误差。

表 3 损伤因子及因子水平

Table 3 Damage factor and factor level

损伤因子	因子水平
主梁右 1/4 跨单元弹性模量损失率 E_1 (距测点较远)	0, 0.01, 0.02
主梁右跨中单元弹性模量损失率 E_2	0, 0.01, 0.02
塔梁联接处主梁单元弹性模量损失率 E_3	0, 0.01, 0.02
主梁左 1/4 跨单元弹性模量损失率 E_4 (距测点较远)	0, 0.01, 0.02
主梁左跨中单元弹性模量损失率 E_5	0, 0.01, 0.02

采用全因子设计进行动力指纹库的计算,设计矩阵如表 4 所示,共有 243 次仿真试验,限于篇幅,只提供前 20 次和最后 10 次仿真试验设计矩阵数据。

表 4 全因子设计试验设计矩阵部分数据

Table 4 Some data of design matrix of full factorial design

编号	$E_1/\%$	$E_2/\%$	$E_3/\%$	$E_4/\%$	$E_5/\%$	编号	$E_1/\%$	$E_2/\%$	$E_3/\%$	$E_4/\%$	$E_5/\%$	编号	$E_1/\%$	$E_2/\%$	$E_3/\%$	$E_4/\%$	$E_5/\%$
1	0	0	0	0	0	11	0	0	1	0	1	234	2	2	1	2	2
2	0	0	0	0	1	12	0	0	1	0	2	235	2	2	2	0	0
3	0	0	0	0	2	13	0	0	1	1	0	236	2	2	2	0	1
4	0	0	0	1	0	14	0	0	1	1	1	237	2	2	2	0	2
5	0	0	0	1	1	15	0	0	1	1	2	238	2	2	2	1	0
6	0	0	0	1	2	16	0	0	1	2	0	239	2	2	2	1	1
7	0	0	0	2	0	17	0	0	1	2	1	240	2	2	2	1	2
8	0	0	0	2	1	18	0	0	1	2	2	241	2	2	2	2	0
9	0	0	0	2	2	19	0	0	2	0	0	242	2	2	2	2	1
10	0	0	1	0	0	20	0	0	2	0	1	243	2	2	2	2	2

根据如表 4 所示的设计矩阵进行 Ansys 仿真试验,提取每次试验的动力指纹,形成动力指纹库,共有 243 条样本集。

建好样本库后,利用 Matlab 编制好的算法进行训练,训练好后对测试样本集进行识别。

测试样本任意设定而不是从样本库中提取的 10 种损伤工况,如表 5 所示,包括无损伤及单和多部位的不同程度的早期低损伤。并对这 10 种工况各自单独增加有随机误差的训练样本集,按噪声水平 0.01~0.1,10 种包含各自单独随机误差的训练样本集,共计 11 个训练样本集。

表 5 10 种损伤工况对应的损伤类别及因子值

Table 5 Damage category and factor value corresponding to ten kinds of damage conditions

类别 编号	$E_1/$ %	$E_2/$ %	$E_3/$ %	$E_4/$ %	$E_5/$ %	说明
1	0	0	0	0	0	无损伤
39	0	1	1	0	2	2 部位损伤,单对称损伤且程度不同
72	0	2	1	2	2	4 部位损伤,双对称且分为同损伤和不同损伤
97	1	0	1	2	0	3 部位损伤,单对称损伤且程度不同
159	1	2	2	1	2	5 部位损伤,双对称同损伤程度
226	2	2	1	0	0	3 部位损伤,不对称损伤
234	2	2	1	2	2	5 部位损伤,双对称同损伤程度
3	0	0	0	0	2	单部位损伤
139	1	2	0	1	0	3 部位损伤,单对称且损伤程度相同
146	1	2	1	0	1	4 部位损伤,双对称且分为同损伤和不同损伤

6 种识别算法在无随机误差的样本库与有随机误差的样本库训练好后,对表 5 所示 10 种损伤及不同噪声水平下的带单独随机误差的训练样本集进行识别,识别准确率结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 比较可知,用带随机误差的样本库进行识别准确率明显高于不带随机误差的样本库

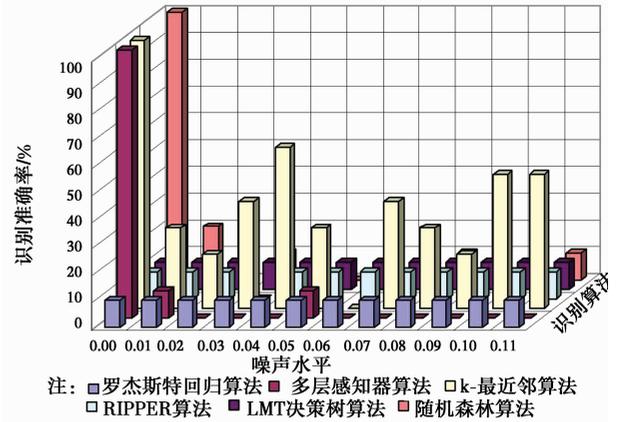


图 6 用无随机误差样本库时各算法识别准确率
Fig. 6 Identification accuracy of each algorithm without random error samples

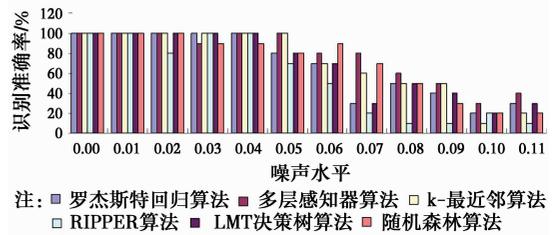


图 7 用有随机误差样本库时各算法识别准确率
Fig. 7 Recognition accuracy of each algorithm with random error samples

的识别准确率。

由图 6 可知,利用不带随机误差的样本库,k-最近邻法识别准确率最高,但波动较大,其识别效果不足以满足实际健康监测要求。

利用带随机误差的样本库,6 种识别算法的识别准确率均极大提高,其中,多层感知器算法无论是无噪声、有噪声还是单或多部位有无损伤、各种早期损伤都可以精确识别。仅在噪声水平为 2% 及 5% 时,准确率没有随机森林算法高,但随机森林算法在 2%、3%、4% 噪声水平时准确率相比多层感知器算法低。综合比较,多层感知器算法的识别准确率最高,但仍有待提高识别精度。因此,为提高多层感知器的识别准确率,对多层感知器算法进行了装袋处理,其识别准确率如图 8 所示。

由图 8 可知,装袋处理后的识别精度,在噪声水平 2% 时达到 100%,噪声水平 5% 以上时也提高了,最大提高 30%。同时,由图 8 可见,即使在环境激励下模态参数识别误差达到 10% 时,识别准确率高达 70%,适应性极强。

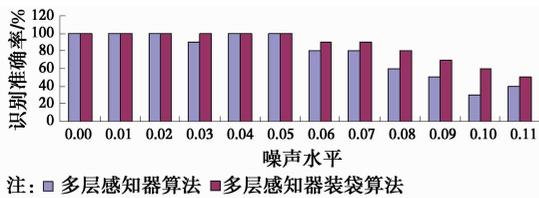


图 8 多层感知器装袋算法前后识别准确率

Fig. 8 Recognition accuracy of multilayer perceptron algorithm before and after bagging accuracy

4 结 论

1) 提出用全因子设计方法进行动力指纹库的创建。对于基于模式识别的结构的损伤识别, 试验设计方法的取舍不应仅以计算代价大小作为判别标准。

2) 提出并设计实现了动力指纹库样本集中增加带不同噪声水平的随机误差的样本集。

3) 通过对多层感知器算法进行装袋集成, 得到了一种可包容测试随机误差的高精确度斜拉桥损伤诊断评估模型, 该模型对于早期低损伤(1, 2%)的识别精度, 无论是测量点附近还是较远处, 无论是对称损伤还是非对称损伤均能较精确识别。

参考文献:

- [1] 吴向男, 徐岳, 梁鹏, 等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 49-58.
WU X N, XU Y, LIANG P, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(6): 49-58. (in Chinese)
- [2] 刘宇飞, 辛克贵, 樊健生, 等. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 46-53.
LIU Y F, XIN K G, FAN J S, et al. An overview of modal identification from ambient responses [J]. Electronic Test, 2014, 31(4): 46-53. (in Chinese)
- [3] 高维成, 刘伟, 邹经湘. 基于结构振动参数变化的损伤探测方法综述[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 3-9.
GAO W C, LIU W, ZOU J X. Dynamic modeling and analysis of natural vibration of the three_ dimensions shaking table for vibration strengthening and polishing technology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(4): 3-9. (in Chinese)
- [4] 黄方林, 王学敏, 陈政清, 等. 大型桥梁健康监测研究进展[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 4-10.

HUANG F L, WANG X M, CHEN Z Q, et al. Research progress made on the health monitoring for large-type bridges[J]. China Railway Science, 2005, 26(2): 4-10. (in Chinese)

- [5] 王志坚, 韩西, 钟厉, 等. 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.
WANG Z J, HAN X, ZHONG L, et al. Review of damage identification of civil engineering structures based on dynamic parameters[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(4): 128-132. (in Chinese)
- [6] 杨秋伟. 基于振动的结构损伤识别方法研究进展[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10): 86-91.
YANG Q W. A review of vibration-based structural damage identification methods [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10): 86-91. (in Chinese)
- [7] 袁旭东, 高潮, 高少霞. 量测模态数量对结构损伤识别影响数值模拟研究[J]. 工程力学, 2007, 24(Sup1): 75-78.
YUAN X D, GAO C, GAO S X. A numerical simulation for influence of measurement mode quantity on structural damage identification [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(Sup1): 75-78. (in Chinese)
- [8] 孙志军, 薛磊, 许阳明. 基于深度学习的边际 Fisher 分析特征提取算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 805-811.
SUN Z J, XUE L, XU Y M. Marginal fisher feature extraction algorithm based on deep learning [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 805-811. (in Chinese)
- [9] 冯新, 李国强, 范颖芳. 几种常用损伤动力指纹的适用性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(4): 23-26.
FENG X, LI G Q, FAN Y F. Application of phase power spectrum based on complex wavelet transform to fault diagnosis of gears [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(4): 23-26. (in Chinese)
- [10] 朱劲松, 肖汝诚. 大跨度 PC 斜拉桥结构快速分析神经网络模型[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 33-39.
ZHU J S, XIAO R C. Neural network model to structural simulation of large-span pc cable-stayed bridges [J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 33-39. (in Chinese)
- [11] 张学工. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 13-144.
- [12] DONG X M, WANG Z H. Damage severity assessment using modified BP neural network [C] // Materials

- Science and Engineering, 2010 International Conference on Materials Science and Engineering Science, Shenzhen, China; Trans Tech Publications, 2011; 1016-1020. (in Chinese)
- [13] DIAO Y S, YU F, MENG D M. Structural damage localization based on AR model and BP neural network [C]//Advances in Structural Engineering, 2011 International Conference on Civil Engineering and Transportation, Jinan, China; Trans Tech Publications, 2011; 1211-1215.
- [14] 饶文碧, 谈怀江, Bostrom Henrik. 基于归纳学习的结构损伤识别方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(2):142-145.
- RAO W B, TAN H J. Detection of structural damage by inductive learning methods[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(2):142-145. (in Chinese)
- [15] ADHVARYU P, PANCHAL M. A review on diverse ensemble methods for classification [J]. Journal of Computer Engineering, 2012, 1(4):27-32.
- [16] MORDELET F, VERT J P. A bagging SVM to learn from positive and unlabeled examples [J]. Pattern Recognition Letters, 2014, 37: 201-209.
- [17] ADLER W, BRENNING A. Ensemble classification of paired data [J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2011, 55:1933-1941.
- [18] BI K, WANG X D, YAO X, et al. Adaptively selective ensemble algorithm based on bagging and confusion matrix[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 711-716.
- [19] KER A, BAS P, BOHME R, et al. Moving steganography and steganalysis from the laboratory into the real world [C]// Proc. of ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security, 2013: 45-58.
- [20] TIAN J, LI M Q, CHEN F Z, et al. Coevolutionary learning of neural network ensemble for complex classification tasks [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(4):1373-1385.
- [21] DENEMARK T, FRIDRICH J, HOLUB V. Further study on the security of S-UNIWARD [C]// Proc. of SPIE, 2014, 9028:45-55.
- [22] 王海龙, 刘杰, 王新敏, 等. 建立斜拉桥基准有限元模型的新方法与实现[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3):458-462.
- WANG H L, LIU J, WANG X M, ZHANG Z G. et al. A new method and its implementation of building baseline FE model of cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 458-462. (in Chinese)

(编辑 胡玲)