基于小波包分析与支持向量机的斜拉索损伤识别

李延强, 刘得运

(石家庄铁道大学 工程力学系,河北 石家庄 050043)

摘要:斜拉索作为斜拉桥的主要受力构件,其损伤将直接威胁斜拉桥的运营安全。现提出 一种基于小波包分析与支持向量机相结合的斜拉索损伤识别新方法。利用小波包理论对索梁 锚固点的加速度时程响应进行小波包分解,构造小波包能量变化率指标,以该指标作为支持向 量机的输入参数,定义斜拉索的刚度折减为损伤因子表示斜拉索损伤程度作为支持向量机的输 出,通过支持向量机损伤识别模型对斜拉索损伤进行识别定位,并以实验室独塔斜拉桥模型进 行了数值验证。结果表明:该方法能较好地识别斜拉索损伤,且受输入向量位置及个数影响较 小,随着损伤程度的增加,平均预测误差逐渐减小。本方法对噪声污染具有一定的鲁棒性。

关键词:斜拉索;损伤识别;小波包分析;支持向量机;能量变化率

中图分类号: TP391; U441.4 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373 (2020) 02 - 0118 - 07

近年来,斜拉桥因其跨越能力强、结构形式简洁美观、良好的力学性能和经济指标等优点,得到广泛 的应用。斜拉索作为斜拉桥的主要受力构件,它的损伤会对桥梁结构的安全性、整体性和静动力特性等 产生不利影响,对于桥梁的安全运营及养护具有极其重要的价值,对事故的预防和生命财产安全具有重 大的意义。因此,斜拉索的损伤问题引起了许多学者的高度重视,并进行了深入的研究^[1-4]。

小波包分析可以放大结构的振动响应,被越来越多地应用于损伤识别领域。丁幼亮等^[5]在对振动响 应小波包分析的基础上,利用小波包脉冲响应函数及小波包能量谱识别结构损伤。Law et al^[6]利用灵敏 度方法对一框架结构进行了参数识别。朱劲松等^[7]提出了一种小波包能量变换率平分和损伤识别指标, 通过简支梁模型的数值仿真,验证了该指标损伤识别的可行性。何浩祥等^[8]提出基于小波包脊的时变频 率提取办法,并对结构多维地震损伤进行了识别。刘习军等^[9]利用小波包分析计算结构能量最大的单阶 模态响应指标,并利用该指标对简支梁损伤识别进行了数值模拟。近年来基于小波分析与人工神经网络 相结合的结构损伤识别方法得到了迅速发展,Hou et al^[10]提出了一种利用小波变换和神经网络进行调制 信号的识别方法。管德清等^[11]将小波分析与神经网络结合进行框架损伤位置和程度的识别。肖书敏 等^[12]利用小波神经网络方法对桥梁结构损伤进行了定位。综上所述,基于小波包分析和支持向量机 相结合的损伤识别方法在工程领域的应用尚不多见,而应用于斜拉索损伤识别研究目前还尚未有相关 文献报道。

鉴于小波包分析具有较高的分辨率以及支持向量机优良的泛化能力,本文提出一种小波包分析与支持向量机相结合的损伤识别方法,并将其应用于斜拉索损伤识别领域,利用小波包理论对索梁锚固点的加速度时程响应进行小波包分解,构造小波包能量变化率指标,在此基础上,进行支持向量机损伤识别模型的构建,对斜拉桥拉索损伤识别进行研究。

1 损伤识别指标

定义斜拉索损伤前后刚度的折减率 α 为损伤因子, 即 $\alpha = (EA)^d/(EA)^*$,其中, $(EA)^d$ 为损伤后刚度;

收稿日期:2019-02-25 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190029

基金项目:国家自然科学基金(11602153);河北省自然科学基金(E2016210066)

作者简介:李延强(1973一),男,教授,博士,研究方向为大跨桥梁损伤识别。E-mail:yanleeq1973@163.com

李延强,刘得运.基于小波包分析与支持向量机的斜拉索损伤识别[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):118-123,129.

(2)

(EA)" 为损伤前刚度。(a_1 , a_2 ,…, a_n)是 n 个斜拉索单元的损伤因子,当第 k 根斜拉索发生损伤时,索梁锚 固区锚固点的加速度时程响应 f(t)必然发生改变,则损伤后的加速度时程响应为 $f(t)_k$,是 n 个斜拉索单 元损伤因子的函数,定义小波包组分能量: $E_{f_i} = \int_{-\infty}^{\infty} f_i^j(t)^2 dt$,则损伤后的小波包组分能量($E_{f_i,k}$)同样是 n 个斜拉索单元损伤因子的函数,用字母 e 表示,即

$$(E_{f_i})_k = e(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)$$
⁽¹⁾

采用多元泰勒级数对其进行展开,假设斜拉索单元的损伤因子初始值为($\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_n^0$),则可以得到 ($E_{f_j^i}$)_k = $e(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_n^0) + \sum_{l=0}^n \frac{\partial e(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_n^0)}{\partial \alpha_l} (\alpha_l - \alpha_l^0) + \frac{1}{2!} \sum_{l,m=0}^n \frac{\partial e(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_n^0)}{\partial \alpha_l \partial \alpha_m} (\alpha_l - \alpha_l^0) (\alpha_m - \alpha_m^0) + O^n$

略去展开式中的高阶项,只取前两项,则(E_{fi}),可以近似表示为

$$(E_{f_{j}^{i}})_{k} = (E_{f_{j}^{i}})_{k}^{0} + \sum_{l=0}^{n} \frac{\partial (E_{f_{j}^{i}})_{k}^{0}}{\partial \alpha_{l}} (\alpha_{l} - \alpha_{l}^{0})$$
(3)

式中, $(E_{f_1^i})_k^0 = e(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \cdots, \alpha_n^0)$ 。

整理之后写成增量的形式为

$$\Delta(E_{f_j})_k = \sum_{l=0}^n \frac{\partial(E_{f_j})_k^0}{\partial \alpha_l} \Delta \alpha_l = \frac{\partial(E_{f_j})_k^0}{\partial \alpha_1} \Delta \alpha_1 + \frac{\partial(E_{f_j})_k^0}{\partial \alpha_2} \Delta \alpha_2 + \cdots \frac{\partial(E_{f_j})_k^0}{\partial \alpha_n} \Delta \alpha_n$$
(4)

式中, $\Delta(E_{f_i})_k = (E_{f_i})_k - (E_{f_i})_k^0$; $\Delta \alpha_l = \alpha_l - \alpha_l^0$ 。

由式(4)可以看出:各组分能量变化量是以损伤因子为自变量的函数值,分能量变化量与损伤存在内 在联系,因此可以以各组分能量变化量为基础构造损伤指标。

当第 k 根斜拉索发生损伤时,索梁锚固点的加速度时程响应信号经过 j 水平的小波包分解,计算所得 的第 i 个组分能量为 $(E_{f_i})_i^x$,斜拉索无损伤时,索梁锚固点的加速度时程响应信号经过 j 水平的小波包分 解,计算所得的第 i 个组分能量为 $(E_{f_i})_i^x$,第 i 个组分能量变化率为 $|(E_{f_i})_i^x - (E_{f_i})_i^x|/(E_{f_i})_i^x$,定义 j 水 平下索梁锚固点加速度时程响应的小波包能量变化率损伤指标 $\Delta(E_{f_i})_i^x$ 为

$$\Delta(E_{f_j})_k = \sum_{i=1}^{2j} \frac{\left| (E_{f_j'})_k^d - (E_{f_j'})_k^u \right|}{(E_{f_j'})_k^u}$$
(5)

2 支持向量机基本原理

2.1 分类原理

设样本集为

$$(x_i, y_i), i = 1, 2, \cdots, n, x_i \in \mathbb{R}^n, y_i \in (1, 36)$$
 (6)

式中,x;为第i个位置损伤时的小波包能量变化率向量;y;为x;对应的期望输出。

支持向量机的主要思想是找出最优分类超平面,所谓最优分类,就是要求不但能正确分开,而且使分 类间隔最大,分类间隔等于 2/ ||ω||,使分类间隔最大等价于使 1/2 ||ω||² 最小,满足此条件的就是最优 分类线,推广到高维空间,分类线就是分类面。分类超平面的标准形式会受到约束条件的限制,在约束条 件下,通过求解优化问题最终可以得到最优分类函数

$$f(x) = \operatorname{sgn}\left\{\sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} y_{i}(x_{i} \cdot x) + b\right\}$$
(7)

2.2 回归原理

损伤程度识别就是利用支持向量机进行回归分析,其核心思想就是通过训练样本得到回归估计函数,然后利用回归估计函数进行损伤程度的预测。假设所有样本集都在精度 ε 下无误差地进行线性函数 拟合,寻找最小的 ω 可以表示为最优化问题

$$\min \frac{1}{2} \| \boldsymbol{\omega} \|^2 \tag{8}$$

约束条件

$$\begin{cases} y_i - \omega \cdot x_i - b \leqslant \varepsilon \\ \omega \cdot x_i + b - y_i \leqslant \varepsilon \end{cases}, \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(9)

通过在约束条件下求解最优化问题即可得到回归估计函数。如果存在 ε 精度下不能估计的数据,通 过引入松弛变量、拉格朗日函数和对偶变量,再根据最优解条件(KKT条件)求得参数,最终得到回归估 计函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^{l} (a_i - a_i^*)(x_i - x) + b$$
(10)

3 基于小波包分析与支持向量机的斜拉索损伤识别

通过车桥耦合振动分析得到斜拉索损伤前后索梁锚 固点的加速度时程响应,对其进行小波包分解得到能量变 化率指标,建立面向斜拉索损伤识别的支持向量机损伤识 别模型,以小波包能量变化率损伤指标作为支持向量机的 输入参数,斜拉索的损伤因子作为支持向量机的输出表示 斜拉索损伤程度,损伤识别流程如图 1 所示。

4 数值验证

4.1 有限元模型

以缩尺为 50 的实验室独塔斜拉桥模型桥为研究对 象,实验模型的构造见文献[13]。采用大型通用有限元分 析软件 ANSYS 建立该模型桥的有限元模型如图 2 所示, 主梁和桥塔采用 SHELL63 壳单元模拟,斜拉索采用 LINK10 单元模拟,全桥共 10 312 个节点,7 619 个单元。 斜拉索的编号如图 3 所示,将每根斜拉索看成一个区域, 共有 36 个区域。



图 1 斜拉索损伤识别流程



图 2 斜拉桥有限元模型

图 3 斜拉索区域编号布置图

建立汽车的全车模型,如图 4 所示。将车体简化为 4 个只有竖向自由度的质量块,用 m₁ 表示,相互 之间通过刚臂进行连接;悬架和轮胎简化为弹簧阻尼系统,其质量分别简化为只有竖向自由度的质量块, 用 m₂、m₃ 表示;分别用 k₁、c₁ 表示车体与悬架之间弹簧阻尼系统中的弹簧刚度和阻尼系数;k₂、c₂ 表示悬 架与车轮之间弹簧阻尼系统中的弹簧刚度和阻尼系数。该模型能综合考虑车的竖向、俯仰及侧仰自由 度,与真实汽车受力情况相似。根据相似理论,按照 1 : 50 的缩尺比对汽车缩尺,车辆具体参数如表 1 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

衣 I 牛 捫 梦 致 衣											
构件	质量/kg	弹簧刚度/(N・m-')	阻尼系数/(N・s・m⁻')								
车体	20	0	0								
悬架	20	2. 5e6	2. 5e6								
车轮	10	8.85e6	8, 85e6								

以4*斜拉索损伤前后为例,给出索梁锚固点的加速



4.2 斜拉索小波包能量变化率指标

图4 车辆模型图

度时程响应曲线,如图 5 所示,5 种损伤程度的能量变化率指标如图 6 所示。







对比图 4、图 5,很难识别出斜拉索的损伤位置及损伤程度。由图 6 可知,斜拉索发生不同损伤程度 时索梁锚固点的能量变化率逐渐增加,且大致呈线性关系,据此可以进行斜拉索损伤程度的识别。

4.3 斜拉索损伤识别

将 36 根斜拉索分别按 5 种损伤程度(5%、10%、15%、20%、25%)进行损伤模拟,共 180 种损伤工况。 分别提取在各个工况下索梁锚固点的加速度时程响应,并进行小波包分解,进而构造得到小波包能量变 化率损伤指标,再利用支持向量机进行损伤识别。其中以损伤程度 15%、20%和 25%时 36 个斜拉索损伤 样本作为测试集,其余斜拉索损伤样本作为训练集进行训练。损伤程度的预测结果及误差如表 2 所示。

由表2可知,当预测损伤程度为15%时,所有位置的损伤程度预测误差均在5%范围内,平均损伤预测误差仅为1.5%;当预测损伤程度为20%时,所有位置的损伤程度预测误差均在5%范围内,平均损伤预测误差仅为0.9%;当预测损伤程度为25%时,平均损伤预测误差仅为0.8%。说明本方法对斜拉索损伤程度的预测精度较高,且随着损伤程度的增加,平均预测误差逐渐减小。

+= //- / BA	预测结果		相对误差/%		相佐住民	预测结果			相对误差/%				
坝切似直	15%	20%	25%	15%	20%	25%	1	15%	20%	25%	15%	20%	25%
1	0.148	0.200	0.248	1.3	0.0	0,8	19	0.148	0.199	0.248	1.3	0.5	0.8
2	0.144	0.194	0.248	4.0	3.0	0.8	20	0.148	0.199	0.248	1.3	0.5	0.8
3	0.145	0.194	0.248	3.3	3.0	0.8	21	0.147	0.199	0.248	2.0	0.5	0.8
4	0.149	0.197	0.248	0.7	1.5	0.8	22	0.148	0.200	0.248	1.3	0.0	0.8
5	0.149	0.200	0.248	0.7	0.0	0.8	23	0.148	0.198	0.248	1.3	1.0	0.8
6	0.147	0. 199	0.248	2.0	0.5	0.8	24	0.147	0. 199	0.248	2.0	0.5	0.8
7	0.147	0.198	0.248	2.0	1.0	0.8	25	0.147	0.199	0.248	2.0	0.5	0.8
8	0.147	0,200	0.248	2.0	0.0	0,8	26	0.149	0, 199	0.248	0.7	0.5	0.8
9	0.150	0.203	0.248	0.0	1.5	0.8	27	0.149	0.199	0.248	0.7	0.5	0.8
10	0. 147	0,200	0.248	2.0	0.0	0.8	28	0.148	0.199	0.248	1.3	0.5	0.8
11	0.147	0.200	0.248	2.0	0.0	0.8	29	0.147	0, 198	0.248	2.0	1.0	0.8
12	0. 149	0.201	0.248	0.7	0.5	0.8	30	0.149	0.200	0.248	0.7	0.0	0.8
13	0.150	0, 198	0.248	0.0	1.0	0.8	31	0.149	0.200	0.248	0.7	0.0	0.8
14	0, 149	0, 199	0.248	0.7	0.5	0.8	32	0.149	0.199	0.248	0.7	0.5	0.8
15	0.150	0,201	0,248	0.0	0.5	0.8	33	0.148	0.198	0.248	1.3	1.0	0.8
16	0.146	0, 201	0.248	2.7	0.5	0.8	34	0.147	0.198	0.248	2.0	1.0	0.8
17	0.147	0.199	0.248	2.0	0.5	0.8	35	0.143	0.191	0.248	4.7	4.5	0.8
18	0.152	0.197	0,246	1.3	1.5	1.6	36	0.144	0.192	0.248	4.0	4.0	0.8

表 2 损伤程度预测结果及误差

4.3.1 输入向量个数对识别结果的影响

以损伤程度 15%为例,分别考虑输入向量的个数为 4、12 和 20 3 种情况,采用交叉验证法进行 SVM 参数优化,识别结果如图 7~图 9 所示。



图 7 4 个输入向量时识别结果

由图 7~图 9 可知,当输入向量个数为 4 时,识别正确率 均为 94.44%;当输入向量个数为 12 时,识别正确率已经达到 了 100%,输入向量个数为 20 时同样是 100%。这表明该方 法对输入向量个数要求不高,少量的输入向量即可达到较高 的识别正确率。

4.3.2 噪声影响分析

由于实际工程中,测试信号不可避免地会受到噪声干扰。 为了研究噪声对本方法识别结果的影响,通过对模拟得到的 加速度时程响应加入不同程度噪声来模拟现场测试时被噪声 污染过的实际加速度时程响应。即



图 8 12 个输入向量时识别结果



 $F_m = F_c + E_{\rho} \operatorname{rand}(N) \times \sigma(F_c)$

(11)

123

式中, F_c 为模拟得到的加速度时程响应; F_m 为噪声影响后的加速度时程响应; E_p 为噪声等级,用百分数 表示;rand(N)为零均值、单位标准差满足标准正态分布,且与原始数据等长(长度为N)的随机数列向量; $\sigma(F_c)$ 为加速度时程响应的标准差。

主要讨论了噪声等级为1%、2%、5%的3种情况,损伤程度预测结果如图10所示。



图 10 损伤程度识别误差

由图 10 可知,本方法在噪声污染情况下仍可以进行斜拉索的损伤识别,且保持有较高的识别率,说 明本方法对噪声污染具有一定的鲁棒性。但同时可以看到:随着噪音等级的增加,位置识别正确率逐渐 降低,损伤程度平均预测误差逐渐增大。

5 结论

基于小波包分析与支持向量机相结合的损伤识别方法,理论上可以实现对斜拉索损伤程度的较高精 度预测;随着损伤程度的增加,平均预测误差逐渐减小,且只需少数输入向量即可得到较高的斜拉索损伤 识别正确率。该方法对噪声污染具有一定的鲁棒性,但随着噪声水平的增大,平均预测误差呈增加趋势。 本方法的实用性尚需试验验证。

参考文献

- [1]杨杰,李爱群,缪长青. BP 神经网络在大跨斜拉桥的斜拉索损伤识别中的应用[J]. 土木工程学报,2006,39(5):72-77,95.
- [2]张清华,李乔,唐亮.基于损伤敏感指标的斜拉桥结构损伤定位研究[J].工程力学,2008,25(5):163-169.
- [3]李延强,彭沉彬.基于车激索力响应的斜拉桥主架损伤识别研究[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(2);307-319.
- [4]郭健,徐洪东,江定宇,等.基于小波分析的跨海大桥斜拉索风致损伤识别[J].浙江工业大学学报,2017,45(6);671-676.
- [5]丁幼亮,李爱群.基于振动测试与小波包分析的结构损伤预警[J].力学学报,2006,38(5):639-644.
- [6] Law S S, Li X Y, Lu Z R. Structural damage detection from wavelet coefficient sensitivity with model errors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(10): 1077-1087.
- [7] 朱劲松, 孙雅丹. 基于小波包能量的桥梁损伤识别指标[J]. 振动. 测试与诊断, 2015, 35(4): 715-721, 800.
- [8]何浩祥,陈奎,闫维明.基于小波包变换和时变频率的结构地震损伤评估[J].振动与冲击,2016,35(7):23-30.
- [9]刘习军,商开然,张素侠,等. 基于改进小波包能量的梁式结构损伤识别[J].振动与冲击,2016,35(13):179-185,200.
- [10] Hou Y, Feng H. Study of modulation recognition algorithm based on wavelet transform and neural network[J]. Journal of Computers, 2011, 6(7);1511-1518.
- [11] 管德清, 廖俊文, 吴兆. 基于应变模态小波神经网络的结构损伤识别方法[J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2015, 36(3): 45-51.
- [12]肖书敏,闫云聚,姜波澜.基于小波神经网络方法的桥梁结构损伤识别研究[J].应用数学和力学,2016,37(2):1-11.
- [13]李延强,赵世英,杜彦良.基于最敏感斜拉索张力指标的斜拉桥主梁损伤识别方法[J].中国铁道科学,2014,35(2): 20-25.

(下转第129页)

Analysis of Cross Section Mechanical Properties of Steel-concrete Composite Beam Under Negative Bending Moment

Liang Xian¹, Duan Shujin^{1,2}, Meng Lijun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to compare the static behaviors of different type of composite beams under negative bending moment, the whole process analysis of stress on cross section for steel-concrete composite beam, double composite beam and composite-laminated beam were carried out to get the moment-curvature curves of the beam section. Combined with an engineering example, the moment-curvature curves of the three types-four species composite beam sections and the corresponding stiffness at each stage were obtained. The maximum crack width of the three types of beams under service load were calculated and compared each other. The analysis results show that: after the top concrete slab cracking, the stiffness of the double composite beam, the common composite beam (with 30 mm thick bottom steel plate) and the composite-laminated beam are almost equivalent; the ultimate bearing capacity of the double composite beam is the highest one in the three type beams. The cracking moment of composite-laminated beam is about $2\sim3$ times that of other two type beams; and its cracking width is only 3% of other types of beams under service load. Therefore, the composite-laminated beam section is more suitable to the negative bending moment region of the continuous composite beam.

Key words: double composite beam; composite-laminated beam; common composite beam; negative bending moment region; bending stiffness; whole process analysis; crack width

(上接第123页)

Damage Identification of Stay Cables Based on Wavelet Packet Analysis and Support Vector Machine

Li Yanqiang, Liu Deyun

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Stay cables are the main force component of cable-stayed bridge. The damage of cables directly threatens the operation safety of cable-stayed bridge. A new damage detection method based on wavelet packet analysis and support vector machine (SVM) was proposed to detect the damage of stay cables in this paper. The acceleration response of the anchorage point of the cable and the girder was decomposed according to the wavelet packet theory, and the energy change rate index of the wavelet packet was constructed. The index was used as the input parameter of SVM, the stiffness reduction of cables was defined as damage factor and used as the output of SVM and the damage of stayed cable as the output of SVM were identified and located. The numerical verification of the single tower cable-stayed bridge in the laboratory was carried out. The results show that the damage identification method based on wavelet packet analysis and SVM can detect the damage of stay cables accurately, and the influence on results by input vector position and the number of input vectors is very little. With the increasing of the damage degree, the average forecast error is gradually reduced. It is shown that this method is robust to noises.

Key words: stay cable; damage identification; wavelet packet analysis; SVM; energy change rate