

# 环境温度影响下基于能量曲率协整的 结构损伤识别方法

常 军,周 翔,翟慕赛

(苏州科技大学土木工程学院,江苏 苏州 215011)

**摘 要** 目的 研究能量曲率协整方法,解决环境温度影响结构损伤识别的问题。  
方法 基于时间序列小波包能量曲率协整方法,首先计算结构位移响应的小波包能量曲率,并选择第一频段的能量曲率为协整变量;然后对各节点变量序列进行协整检验,进而计算该变量估计值与实测值的残差,将其作为损伤指标;最后通过 X-bar 控制图判别结构健康状态,包括损伤时刻及损伤位置。  
结果 算例中结构各节点损伤指标呈现平稳特性,不受温度变化的影响,在损伤单元相邻节点处发生跳跃,在无损单元处始终保持围绕 0 轴波动,据此识别损伤位置。  
结论 该方法可以精确识别环境温度影响下的结构损伤状态,且具有强抗噪性。

**关键词** 能量曲率;协整;环境温度;损伤识别

中图分类号 TU312

文献标志码 A

## Damage Identification Method Based on Energy Curvature Cointegration Structure under the Influence of Environmental Temperature

CHANG Jun, ZHOU Xiang, ZHAI Musai

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, China, 215011)

**Abstract:** The paper is proposed to study the energy curvature co-integration method and solve the problem that environmental temperature affects structural damage identification. The method is based on the time series wavelet packet energy curvature cointegration. Firstly, the wavelet packet energy curvature of the structural displacement response is calculated, and the energy curvature of the first frequency band is selected as the cointegration variable. Then, the cointegration test is carried out on the variable sequence of each node, and then the residual between the estimated value of the variable and the measured value is calculated as the damage index. Finally, the X-bar control chart is used to determine the structural health status, including the damage time and damage location. The results show that the damage index of each node of the structure is stable,

收稿日期:2023-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51908395);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22-1569)

作者简介:常军(1973—),男,教授,博士,主要从事结构健康监测等方面研究。

which is not affected by temperature change, jumps at the adjacent nodes of the damaged unit, and always fluctuates around the zero axis at the lossless unit, so as to identify the damage position. This method can accurately identify the structural damage state under the influence of environmental temperature, and has strong noise resistance.

**Key words:** energy curvature; cointegration; environmental temperature; damage identification

近年来,基于振动的结构损伤识别方法得到了快速发展<sup>[1-2]</sup>,为结构健康监测的发展提供了支持。然而在实际工程中,环境温度的改变往往会影响结构损伤识别的效果<sup>[3]</sup>,导致了基于振动的结构损伤识别方法失效进而导致结构维护策略不当。因此,在环境温度影响下,如何精确地识别结构损伤状况是结构健康监测领域的热点。

目前,国内外学者针对消除环境温度影响的结构损伤识别进行了大量研究<sup>[4]</sup>,这些研究分为两类:一是建立环境温度与结构特征参数之间的关系以消除环境温度的影响,如:插值分析<sup>[5]</sup>等,这种方法的缺点是需要记录环境温度值,并且对测点位置要求严格,实际应用中较为困难;另一类是综合考虑环境温度与损伤引起的结构特征参数的变化,然后使用特定的算法消除温度的影响,例如:神经网络<sup>[6]</sup>和协整<sup>[7]</sup>等,该方法的优点是无需记录环境温度值,对测点位置要求宽松且应用简单、方便。

协整起源于计量经济学,后来被引入结构健康监测领域用来去除环境因素(温度)的影响<sup>[8]</sup>。Liu Gang等<sup>[9]</sup>以钢箱梁桥应变为协整变量,进行协整处理,去除了环境温度对结构损伤识别的影响;周翠<sup>[10]</sup>基于协整原理提出了协整对法,将相邻节点位移序列进行协整处理,消除了温度对结构损伤识别的影响;梁亚斌<sup>[11]</sup>将频率作为协整变量,通过对简支梁的一、二阶频率进行协整处理,剔除了温度对结构损伤识别的影响;刁延松等<sup>[12]</sup>将AR系数作为协整变量,分析出参与协整的变量数量不小于3个,去除温度效应的效果较好。这些研究有力地推进了该方向的发

展,但仍有一些需要研究补充。例如频率对局部损伤识别不敏感。

小波包能量曲率法具有良好的局部分析功能,有利于提高损伤识别的精度。刘习军等<sup>[13]</sup>将小波包能量曲率作为损伤指标,识别了梁式结构的损伤位置。魏玉明等<sup>[14]</sup>使用小波包能量作为损伤变量时发现,小波包能量特征向量具有较强的抗噪性。协整理论应用于结构损伤监测领域中常见的非平稳时间序列数据,建立协整关系时,对数据的平稳性、线性关系有一定要求,但通过预处理(小波包分解、曲率计算)数据能够提高协整关系的准确性。因此,综合考虑小波包能量曲率与协整法,既能使得能量曲率满足协整关系建立条件进而剔除温度影响,又能在识别损伤时具有强敏感性与抗噪性。

基于上述分析,笔者提出环境温度影响下基于能量曲率协整结构的损伤识别方法,将能量曲率作为协整计算变量,用于结构健康监测领域,判别结构损伤状态。笔者利用节点处变量(能量曲率)的线性组合不受温度影响的特点,达到分离温度效应的目的。当节点处发生损伤时,其线性组合发生变化,并以此判别损伤位置。在理论推导后,通过在变化温度影响下的简支钢梁进行数值模拟;研究表明:该方法能够有效消除环境温度的影响,识别结构损伤位置,且该方法无需识别模态信息,无需记录环境温度值。

## 1 理论基础

### 1.1 小波包能量曲率

小波包分析可以将信号 $x(t)$ 分解在不同的频带上,然后通过数学方法计算为某一

频带上的信号能量值,如式(1)、式(2)所示。

$$x(t) = \sum_{i=1}^{2^j} x_j^i(t). \tag{1}$$

$$E_j^i = \int_{-\infty}^{+\infty} [x_j^i(t)]^2 dt. \tag{2}$$

式中: $j$ 为尺度指标,表示分解层数; $x_j^i(t)$ 为小波包分解的第 $j$ 层、 $i$ 频带的信号分量; $E_j^i$ 为第 $i$ 频带的信号能量,各频带的信号能量之和等于信号的总能量。

小波包能量曲率计算如下:

$$\varphi_{E_j,k} = \frac{E_{j,k-1}^i + E_{j,k+1}^i - 2 E_{j,k}^i}{\Delta^2}. \tag{3}$$

式中: $\Delta$ 为相邻测点之间的距离(各相邻测点距离相同); $k$ 为测点编号; $\varphi_{E_j,k}$ 为测点的能量曲率。工程上常用db(Daubechies)小波函数分析,并依据 $P$ 范数熵指标确定小波函数的阶数和分解层数。小波包能量曲率可以表示为测点处的结构自振频率、阻尼比和采样频率的函数,该能量包含了结构固有频率和阻尼比等信息<sup>[13]</sup>。

1.2 协整理论

协整理论用于处理时间序列的非平稳性。如果两个或者多个非平稳时间序列经过线性组合为平稳的时间序列,那么就认为这些序列之间具有协整关系,协整关系表现为原序列之间具有近似相同的变化趋势。

非平稳序列 $y_t$ 经 $d$ 次差分后为平稳序列,而经 $d-1$ 次差分后为非平稳序列,记为 $I(d)$ 。在 $n$ 维 $d$ 阶单整时间序列 $y_t = [y_{1t}, y_{2t}, \cdots, y_{nt}]^T$ 中, $t = 1, 2, 3$ ,如果存在一个非零向量 $\beta$ 使得序列 $y_t$ 的线性组合满足平稳性要求,就可以建立长期均衡关系。组合公式如下:

$$\beta_1 y_{1t} + \beta_2 y_{2t} + \cdots + \beta_n y_{nt} = \varepsilon_t. \tag{4}$$

此时,如果残差序列 $\varepsilon_t$ 符合白噪声序列(即 $\varepsilon \sim I(0)$ ),表现为长期平稳状态,则建立的长期均衡关系能够描述非平稳时间序列之间的联系,那么 $\{\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n\}$ 表示序列 $y_t$ 的协整向量。因此建立协整模型的目的在于得出协整向量从而计算残差序列。

协整方程中的各原序列为同阶非平稳的

时间序列。检验时间序列的平稳性,笔者采用ADF单位根检验法,当各变量时间序列检验为同阶非平稳时,利用协整方法可以计算出协整方程的系数向量。基于回归残差的检验,采用EG协整检验法。

1.3 ADF 单位根检验

ADF(Augmented Dickey-Fuller)单位根检验是检验时间序列平稳性的方法。若时间序列具有单位根,则其为非平稳时间序列,否则为平稳时间序列。例如,一阶自回归模型AR(1)检验公式如下:

$$y_t = \rho y_{t-1} + u_t. \tag{5}$$

式中: $\rho$ 为回归参数; $u_t$ 为均值为0,方差为1的高斯随机变量。

由式(5)差分可得:

$$\nabla y_t = r y_{t-1} + \varepsilon_t. \tag{6}$$

式中: $r = \rho - 1$ 。

检验的原假设为 $r = 0$ (概率上接近0),备选假设为 $r < 0$ 。 $r$ 值无法直接计算,需要构造一个 $t$ 检验统计量用于平稳性检验, $t_r = \hat{r} / \sigma_r$ , $\hat{r}$ 的普通最小二乘估计值, $\sigma_r$ 为 $r$ 的标准差估计值。将得出的 $t_r$ 值与DF表<sup>[15]</sup>中5%显著水平下的临界值作比较,如果小于对应的临界值,则拒绝原假设,该序列为平稳的时间序列,反之,该序列为非平稳的时间序列。当原序列为非平稳时,继续对原序列的一阶差分序列 $\Delta y_t$ 进行假设检验,检验结果为平稳序列时即为一阶单整序列。

1.4 EG 协整检验

EG(Engle-Granger)协整检验分为两步,用于检验变量 $x_t$ 和 $y_t$ 是否具有协整关系。如果有,则计算出协整向量并建立协整方程。

步骤1:如果变量 $x_t$ 和 $y_t$ 是一阶单整序列 $I(1)$ ,则基于变量 $x_t$ 序列,对变量 $y_t$ 序列进行最小二乘估计出 $\hat{y}_t$ ,再与原序列 $y_t$ 计算残差 $\varepsilon_t$ 序列。

原序列理想方程:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t. \tag{7}$$

估计方程:

$$\hat{y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_t$$
 (8)

残差方程:

$$\epsilon_t = y_t - \hat{y}_t$$
 (9)

步骤 2: 检验残差  $\epsilon_t$  序列的平稳性。如果  $\epsilon_t$  是平稳的, 则  $x_t$  和  $y_t$  序列具有协整关系; 如果非平稳, 则  $x_t$  和  $y_t$  序列没有协整关系。

当残差  $\epsilon_t$  序列为平稳的时间序列时, 原变量  $x_t$  和  $y_t$  之间具有协整关系,  $\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$  即为变量  $x_t$  和  $y_t$  协整方程所求的协整向量。

1.5 X-bar 控制图

通过协整分析可得协整残差  $\epsilon_t$ 。假设该残差服从正态分布, 则根据残差的均值  $\overline{NI}$  和标准差  $\sigma$ , 建立置信区间, 得到残差序列的控制限值: X-bar 控制图的中心值  $CL$ 、上控制限值  $UCL$  和下控制限值。

当协整处理消除了环境温度对结构的影响时, 所得的协整残差值仅表示为结构健康或损伤。正态分布假设下协整残差的健康区间为  $[\overline{NI} - 3\sigma, \overline{NI} + 3\sigma]$ 。因此, 待测样本的残差处于控制限值之内时, 判断为没有发生损伤; 反之, 判断为发生了损伤。

2 基于能量曲率协整的损伤识别方法

笔者以各节点的能量曲率为协整变量, 进行协整处理(消除温度影响), 所得残差表现为平稳的时间序列, 说明结构健康时, 协整残差序列围绕 0 值处于平稳状态, 而当结构发生损伤时, 协整残差序列出现正向跳跃, 处

于非平稳状态。这为即时判别结构健康状态提供了可能性。具体操作步骤如下:

- 1) 采集结构的位移响应数据并计算小波包能量曲率;
- 2) 对基准状态的能量曲率序列进行 ADF 单位根检验, 确定各变量序列为同阶单整序列;
- 3) 将能量曲率作为协整变量, 进行协整估计(分离温度), 得到协整向量;
- 4) 建立协整方程, 输入待检测的能量曲率时间序列, 输出残差时间序列;
- 5) 结合 X-bar 控制图, 根据基准的残差序列设定健康阈值判别待测样本序列的健康状态。

3 数值模拟

3.1 数值模型

采用 ABAQUS 有限元程序建立了变温度场下钢梁模型<sup>[16]</sup>, 模型划分为 20 个单元, 21 个节点, 进行二维温度场下实体单元模拟, 两端为简支(见图 1)。有限元基本参数: 密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.3, 热传导率为 52.5 W/(m·K), 比热为 480 kJ/(kg·K)。分析步采用温度-位移耦合, 网格尺寸设置为 2.0 cm。横截面尺寸与温度分布如图 2 所示, 截面温度均匀分布与梯度分布, 梯度温度下有限元云图如图 3 所示。模型计算起止时间为 2019 年 1 月 1 日—2020 年 2 月 21 日, 计算间隔为 4 h, 温度变化范围为 -14 ~ 34 ℃。

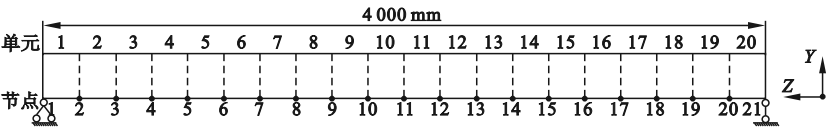


图 1 工字钢简支梁

Fig. 1 The simply supported beam with I-steel

激励为沿 y 方向竖直向下施加于各个节点的白噪声序列, 其采样频率为 200 Hz, 该频率包含了模型的前 5 阶固有频率, 利用 ABAQUS 的动力响应分析模块获取图 1 所

示的节点 1 ~ 21 的 y 向位移响应, 位移响应的采样频率为 200 Hz, 持续时间为 10 s。

笔者根据文献[14, 17]编写了结构位移响应的小波包能量曲率 Matlab 计算程序, 根

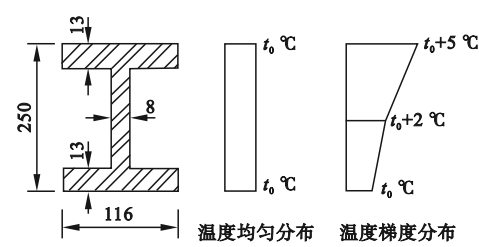


图2 简支梁横截面温度分布

Fig. 2 The temperature distribution of simply supported beam at cross section

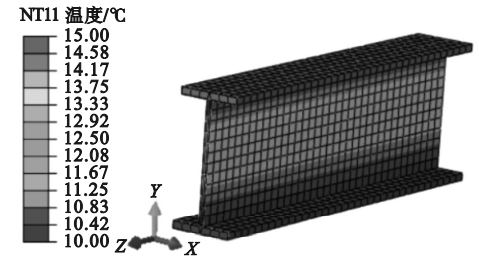


图3 钢梁在梯度温度场下的云图(部分截取)

Fig. 3 The cloud image of steel beam under gradient temperature field (partial interception)

据范数熵指标,采用 db12 小波基并作 4 层小波分解,选择能量最大的第一频段能量进行曲率计算,使用第 3 s 至第 10 s 的位移响应序列,序列长度为 1 600。

3.2 环境因素

温度的影响是通过改变结构材料的弹性模量得以实现,钢材的弹性模量和温度的关系<sup>[3]</sup>如图 4 所示。

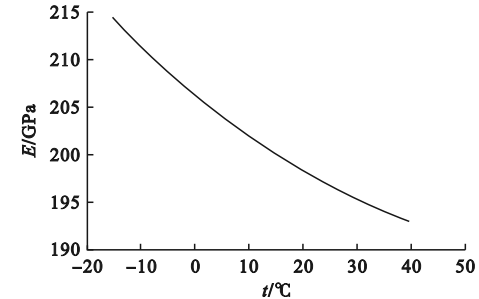


图4 钢弹性模量随温度变化关系

Fig. 4 The relationship between elastic modulus of steel and temperature

笔者选取北京 2019 年 1 月 1 日—2020 年 2 月 21 日室外温度记录作为有限元软件温度场模拟中的环境温度,该温度记录每天的 0 时、4 时、8 时、12 时、16 时和 20 时的室外

温度,共计 2 502 个记录,如图 5 所示,其中基准样本为 2019 年的 2 190 个记录,用来计算健康阈值。在 2020 年 1 月 1 日—2 月 21 日的 312 个室外温度样本中引入损伤,用于损伤检测。

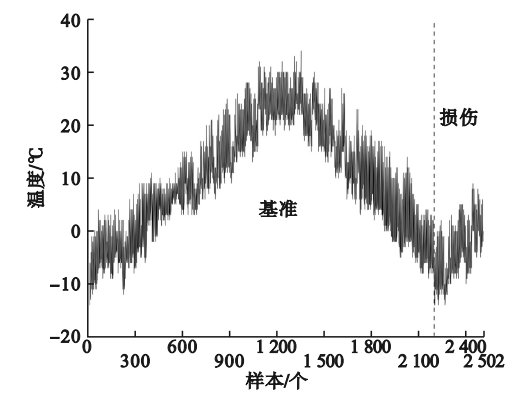


图5 北京海淀区室外温度记录

Fig. 5 The outdoor temperature records in Haidian district, Beijing

3.3 损伤工况

笔者以划分单元发生损伤作为研究对象来验证所提方法的有效性,损伤模拟是通过改变损伤假设单元的弹性模量得以实现,工况 C1 ~ C6 为北京室外温度序列加横截面温度均匀分布,工况 C7 ~ C12 为北京室外温度序列加横截面温度梯度分布。各工况损伤设定如表 1 所示。

表1 损伤工况

Table 1 The damage condition

损伤工况	横截面温度分布情况	损伤梁单元/个	弹性模量折减量/%
C1	均匀	0	0
C2	均匀	5	10
C3	均匀	5、10	10
C4	均匀	5、10、16	10
C5	均匀	5、16	20
C6	均匀	5、10、16	10、20、30
C7	梯度	0	0
C8	梯度	5	10
C9	梯度	5、10	10
C10	梯度	5、10、16	10
C11	梯度	5、16	20
C12	梯度	5、10、16	10、20、30



3.4 温度对小波包能量曲率的影响

单元5 两侧的节点5 和6 样本序列(样

本2 503 ~4 000 段)引入损伤后,节点5、节点6 处的小波包能量曲率如图6 所示。

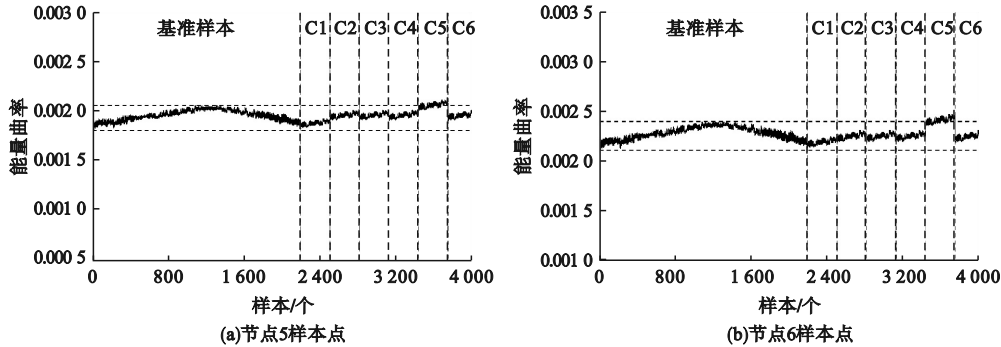


图6 温度影响下节点5、6 处小波包能量曲率样本序列

Fig. 6 The sample sequence of wavelet packet energy curvature at nodes 5,6 under the influence of temperature

图6 中纵向虚线表示不同损伤工况的分界线,样本序列的1 ~2 190 段为基准样本,2 190 ~4 000段为设定的不同损伤工况样本,横向虚线表示各个基准样本幅值变化范围。由图6 可知,各基准样本的时间序列在温度影响下是非平稳的,而对于大多数损伤工况的样本序列并未超出基准样本值的变化范围,说明温度改变引起的能量曲率变化掩盖了损伤引起的能量曲率变化,在这种情况下较难直接通过一组小波包能量曲率的变化判断结构是否发生了损伤。

3.5 消除温度影响

3.5.1 协整参考点选取

笔者提出协整参考点设置:将相邻节点变量序列按对分组,随机抽取一对变量进行协整检验,所检工况为无损时设定为协整无损参考点,有损伤时则抽取下一对变量进行检验。参考点的选取是为了减少文献[10,18]损伤观察数量,进而提高健康检测效率。笔者研究发现,当协整参考点为损伤时,检验后的无损测点残差序列也会出现异常,仅当协整参考点为无损时,其他测点协整检验结果正常。

经检验可知,第一对(节点2、节点3)、第二对等变量序列为健康时间序列,后续将以节点7 作为协整参考点进行协整检验。

3.5.2 消除温度对结构损伤识别的影响

经EG 协整初步检验节点5、节点7 序列存在协整关系,则假设存在理想的协整公式,如式(10)所示,但真实状态下,序列间的系数 $\beta_0, \beta_1$ 无法直接计算。因此,通过最小二乘法估计协整系数,输出节点5 的“估计”序列,如式(11)所示。最后计算节点5 真实序列与“估计”序列的残差值以达到消除温度影响的目的。

$$J_5 = \beta_0 + \beta_1 J_7 + \varepsilon = J_{\text{actual}} \tag{10}$$

$$\hat{J}_{\text{Fitted}} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 J_7 \approx \beta_0 + \beta_1 J_7 \tag{11}$$

$$\varepsilon = J_{\text{actual}} - \hat{J}_{\text{Fitted}} = J_5 - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 J_7 \tag{12}$$

式中: $J$  为节点变量时间序列。笔者通过“估计”温度对结构的影响变化量,进而计算结构实测量与温度估计量的残差以消除温度的影响,结构实测值与温度估计值如图7 所示,残差值将在后文3.6 小节展示。

3.6 结构异常检测

3.6.1 截面温度均匀分布下结构异常检测

根据笔者所提方法,协整处理后,算例中结构各节点损伤指标呈现平稳特性,不受温度变化的影响,在损伤单元相邻节点处发生跳跃,在无损单元处始终保持围绕0 轴波动。无噪声下,工况C1 ~C6 识别结果如图8 所示。由图可知,各单元相邻节点的残差序列呈现平稳特性,说明该方法有效分离了温度

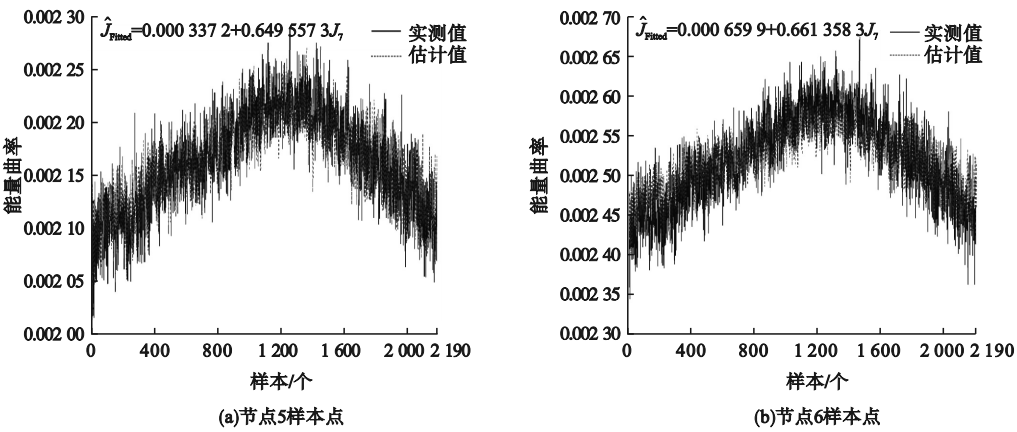


图7 节点能量曲率实测值与估计值

Fig. 7 The measured and estimated values of node energy curvature

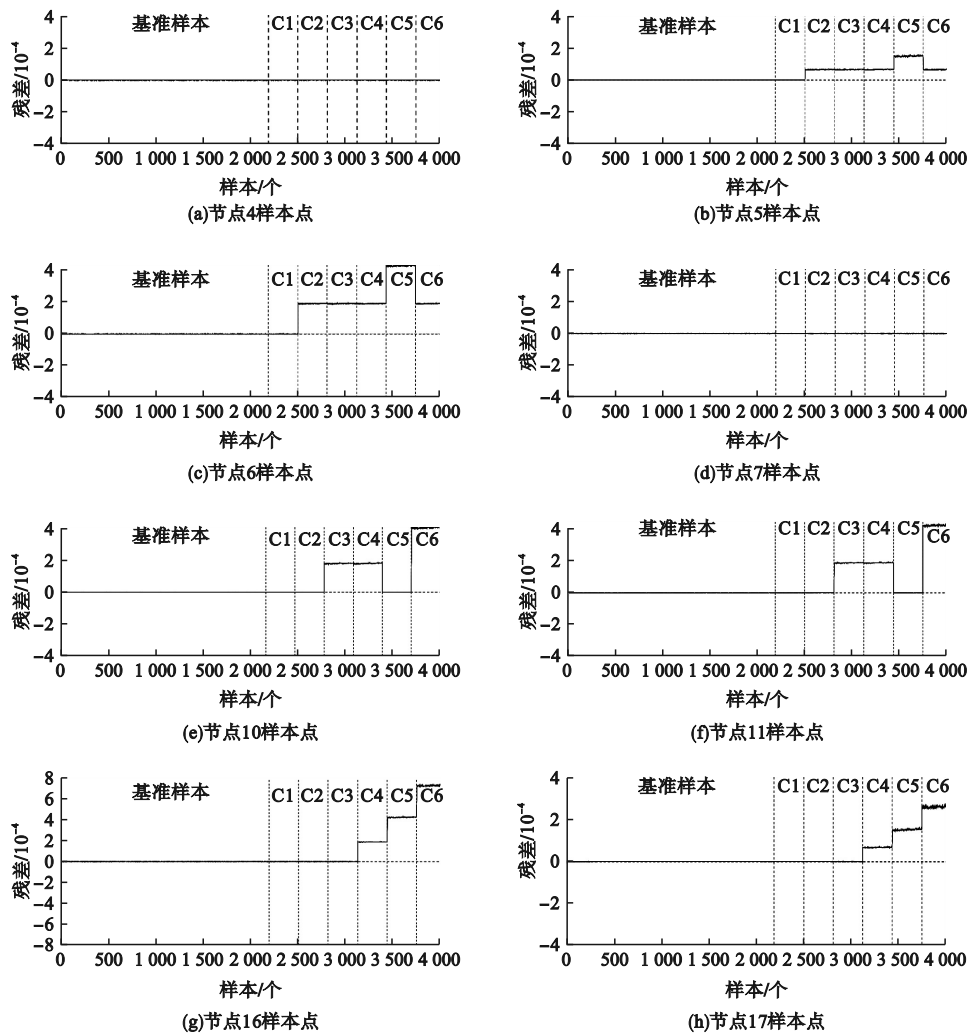


图8 无噪声下工况 C1 ~ C6 识别结果

Fig. 8 The identification results of working condition C1 ~ C6 without noise

影响,在此基础上,根据残差是否发生跳跃进行识别单元损伤状态。由损伤工况 C2 ~ C6 的残差可知,节点 5、6、10、11、16 和 17 均出现了向上跳跃(0 轴上方),说明单元损伤得到有效识别,而无损工况 C1 的残差始终围绕 0 轴微小波动,说明没有发生损伤,识别结果正确。由工况 C2 ~ C4 可知,单损、两损和三处损伤都能有效识别。由工况 C2 和 C5 可知,单元 5 相邻节点的残差值随着损伤程度增大发生增加,说明笔者所选的协整变量对损伤较为敏感,可以作为评估结构损伤程度的指标。由工况 C3 或 C5 可知,当结构对称位置损伤时,依然能够有效识别损伤时刻与位置。由工况 C6 可知,节点 6、11 和 16 的残差值随着梁单元损伤程度的增加而随之增加。因此,

当结构发生多处损伤且损伤程度不同时,依然可以有效识别,检测样本残差值的相对大小反映了梁单元损伤程度的相对大小。

为了检验笔者所提方法在噪声环境下的鲁棒性。对结构的位移响应添加 20% 高斯白噪声,噪声模型采用文献[10]中公式,结果如图 9 所示。噪声影响下,损伤指标依然有效分离了温度的影响,单元 5、10 和 16 相邻节点的残差序列在引入损伤后均发生了正向跳跃,此时根据残差突变的节点编号即可准确地定位出损伤位置。与无噪声影响的结构真实反映相比,有噪声影响使得残差序列波动变大,但整体依然保持平稳,损伤识别结果依然正确,说明所提方法具有较强的抗噪性。

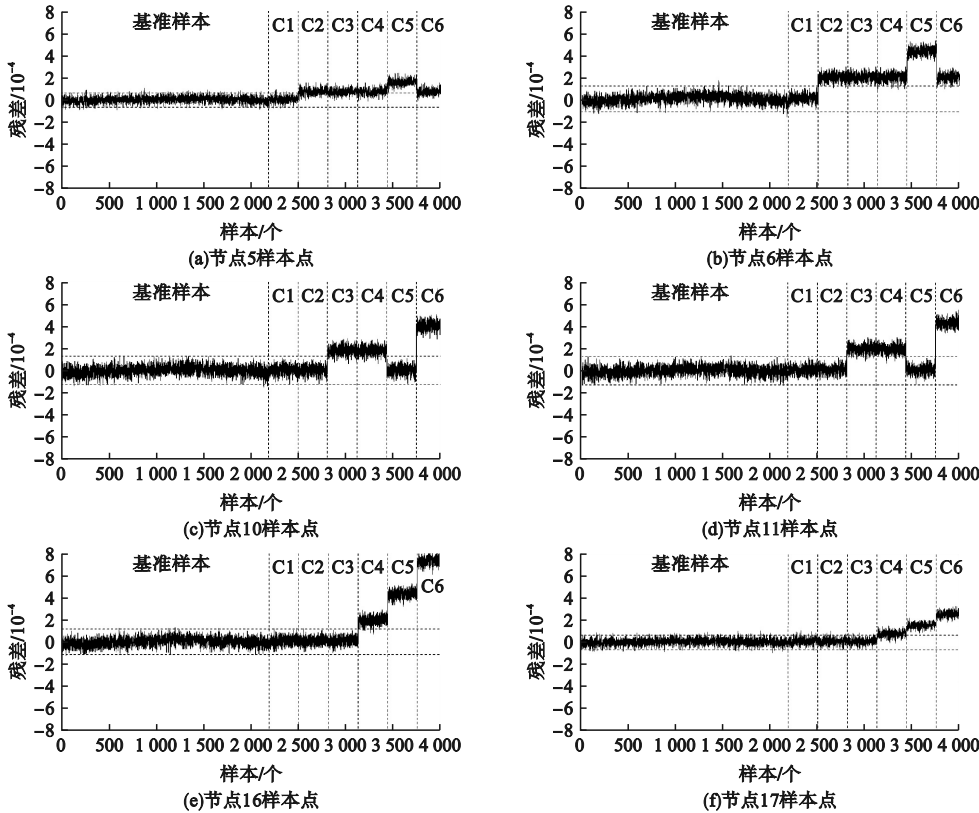


图 9 20% 噪声水平下工况 C1 ~ C6 识别结果

Fig. 9 The identification results of C1 ~ C6 with 20 % noise level

3. 6. 2 截面温度梯度分布下结构异常检测  
为了使结构温度分布更接近现实情况,根据文献引入横截面温度梯度分布<sup>[11]</sup>,上截

面温度通常高于下截面。20% 噪声水平下,协整处理后的识别结果如图 10 所示。图中残差序列呈现平稳特性,说明笔者所提方法



有效消除了环境温度的影响,单元 5、10 和 16 两侧节点的残差序列在引入损伤后均发生正向跳跃,此时可以判别损伤位置。

相对于横截面温度均匀分布的情况,残差序列表现出弱非稳态现象,但对损伤识别结果影响较小,不会造成对结果的误判。由

于能量曲率指标对损伤较为敏感,在剔除温度影响后,损伤指标的异常幅值远大于弱非稳态现象造成的波动幅值,例如图 10(b)中基准样本的弱非稳态特征相对于 C8 ~ C12 工况异常表现可忽略不计,且该特征并不影响整体的稳定性。

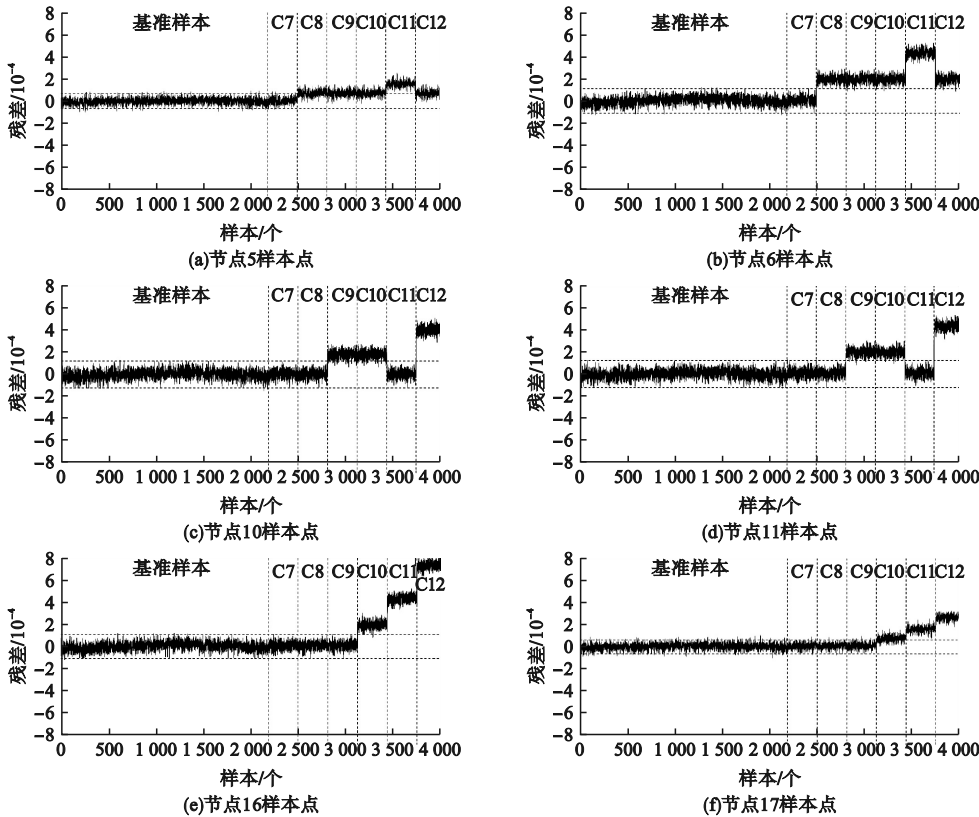


图 10 20% 噪声水平下工况 C7 ~ C12 识别结果

Fig. 10 The identification results of C7 ~ C12 with 20 % noise level

4 结 论

(1)环境温度影响下基于能量曲率协整的损伤识别方法能够有效地消除环境温度的影响且精确判别结构健康状态;能够有效地识别结构的损伤发生时刻、损伤位置和损伤相对大小。

(2)各节点区域能够独立地进行损伤识别,且无需监测温度数据,具有较强的抗噪性。

参考文献

[ 1 ] 李慧民,董美美,熊雄,等. 基于振动的结构损

伤识别研究综述 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (4): 45 - 50.  
(LI Huimin, DONG Meimei, XIONG Xiong, et al. Review of vibration-based structural damage identification [J]. Building structures, 2021, 51 (4): 45 - 50. )  
[ 2 ] MANOACH E, WARMINSKI J, KLODA L, et al. Vibration based methods for damage detection in structures [C]. MATEC web of conferences, 2016.  
[ 3 ] YAN A M, KERSCHEN G, BOE D P, et al. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part I: a linear analysis [J]. Mechanical systems and signal processing, 2005, 19(4): 847 - 864.  
[ 4 ] 张涛,李腾腾,李阳光. 温度影响下结构损伤识别研究现状及展望 [J]. 公路工程, 2014, 39 (1): 44 - 49.  
(ZHANG Tao, LI Tengting, LI Yangguang.

- Research status and prospect of structural damage identification under the influence of temperature [J]. Highway engineering, 2014, 39 (1): 44 - 49. )
- [5] PEETERS B, ROECK G D. One-year monitoring of the Z24 bridge; environmental effects versus damage events [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2001, 30(2): 149 - 171.
- [6] ZHOU H F, ASCE Y Q N M, ASCE A J M K F. Eliminating temperature effect in vibration-based structural damage detection [J]. Journal of engineering mechanics, 2011, 137 (12): 785 - 796.
- [7] SHI H, WORDEN K, CROSS E J. A regime-switching cointegration approach for removing environmental and operational variations in structural health monitoring [J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 103: 381 - 397.
- [8] 吴文开, 徐明强, 王树青, 等. 考虑环境因素影响的海洋平台结构损伤检测研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 294 - 302.  
(WU Wenkai, XU Mingqiang, WANG Shuqing, et al. Damage detection of offshore platform structures considering environmental factors [J]. Vibration and impact, 2021, 40 (16): 294 - 302. )
- [9] LIU Gang, ZHANG Jianxin, YAO Xuan, et al. Damage detection from continuous long-term static response using cointegration and mewma control chart [C]. Shanghai: International Conference on Sustainable Development of Critical Infrastructure, 2014: 421 - 429.
- [10] 周翠. 考虑环境因素影响的结构健康监测损伤识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
(ZHOU Cui. Damage identification of structural health monitoring considering environmental factors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. )
- [11] 梁亚斌, 李东升, 李宏男. 环境温度影响下基于频率协整的在线损伤识别[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(3): 307 - 314.  
(LIANG Yabin, LI Dongsheng, LI Hongnan. Online damage identification based on frequency cointegration under the influence of ambient temperature [J]. Journal of Dalian university of technology, 2014, 54 (3): 307 - 314. )
- [12] 刁延松, 曹亚东, 孙玉婷. 环境变化下基于AR模型系数和协整的海洋平台结构损伤识别[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 179 - 188.  
(DIAO Yansong, CAO Yadong, SUN Yuting. Damage identification of offshore platform structures based on AR model coefficients and cointegration under environmental changes [J]. Engineering mechanics, 2017, 34 (2): 179 - 188. )
- [13] 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.  
(LIU Xijun, SHANG Kairan, ZHANG Suxia, et al. Damage identification of beam structures based on improved wavelet packet energy [J]. Vibration and shock, 2016, 35 (13): 179 - 185. )
- [14] 魏玉明, 张永志, 王涛, 等. 基于小波包能量特征向量的结构动力响应损伤识别[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1156 - 1160.  
(WEI Yuming, ZHANG Yongzhi, WANG Tao, et al. Structural dynamic response damage identification based on wavelet packet energy eigenvector [J]. Earthquake engineering, 2017, 39(6): 1156 - 1160. )
- [15] 张世英, 樊智, 郭明媛. 协整理论与波动模型-金融时间序列分析及应用[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2014.  
(ZHANG Shiying, FAN Zhi, GUO Mingyuan. Cointegration theory and volatility model-financial time series analysis and application [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. )
- [16] 杨文瑞, 冯中敏, 黎惠莹, 等. 变温度场下CFRP布加固工字钢梁疲劳性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 93 - 96.  
(YANG Wenrui, FENG Zhongmin, LI Huiying, et al. Study on fatigue performance of I-beam strengthened with CFRP sheets under variable temperature field [J]. Building structure, 2021, 51(16): 93 - 96. )
- [17] LI J, HAO H. Health monitoring of joint conditions in steel truss bridges with relative displacement sensors [J]. Measurement, 2016, 88: 360 - 371.
- [18] 梁亚斌, 李东升, 李宏男. 环境温度影响下基于结构连续位移曲率组合的损伤识别方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(3): 399 - 407.  
(LIANG Yabin, LI Dongsheng, LI Hongnan. Damage detection method based on the combination of successive displacement curvature under the influence of environmental temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(3): 399 - 407. )
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)