



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105651537 A  
(43) 申请公布日 2016. 06. 08

(21) 申请号 201610141896. 4

(22) 申请日 2016. 03. 10

(71) 申请人 大连理工大学

地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工路  
2 号

(72) 发明人 安永辉 布莱秋斯基·巴特楼密尔  
欧进萍

(74) 专利代理机构 大连理工大学专利中心  
21200

代理人 赵连明

(51) Int. Cl.

G01M 99/00(2011. 01)

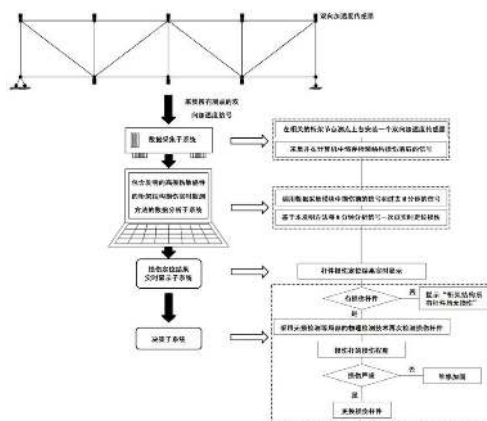
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统

(57) 摘要

一种高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统,属于结构健康监测领域。包括双向加速度传感器子系统、数据采集子系统、数据分析子系统、损伤定位结果实时显示子系统、决策子系统;数据分析子系统调用数据采集子系统的双向加速度信号基于发明的高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测方法进行损伤识别;若有损伤杆再用无损检测技术检测其损伤程度进而做出更换或维修的决策。本发明的突出优势是对桁架杆微小损伤即5%以下的刚度降低的高敏感性,有利于在损伤初期更早地发现损伤杆;本发明无需任何系统识别和矩阵运算过程,计算速度快、精确度高、当使用无线传感器时节省能耗,加上其对小损伤的超高敏感性,使其在实际工程中具有较高的应用价值。



1. 一种高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统,包括安装在桁架结构节点测点上的双向加速度传感器子系统、数据采集子系统、数据分析子系统、损伤定位结果实时显示子系统、决策子系统;其中数据采集子系统采集并存储桁架结构节点测点纵向和竖向的加速度信号;数据分析子系统调用数据采集子系统得到的双向加速度信号,利用高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统进行结构损伤识别,得到桁架结构中桁架杆的损伤情况;损伤定位结果实时显示子系统根据数据分析子系统得到的结果实时显示损伤杆件的位置;决策子系统根据结构损伤情况做出决断,若无损伤杆件,则反馈桁架结构中所有杆件均无损伤的提示;若有损伤杆件,则利用无损检测技术检测损伤杆件的损伤程度,并据损伤严重程度做出更换或维修等决策;

其特征在于高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统的结构损伤识别方法包括如下步骤:

步骤一、加速度传感器布置:将要监测的桁架结构整体或者桁架子结构中的每个桁架节点选为测点并在每个测点上各布置一个双向加速度传感器用于测试其沿着桁架结构纵向和竖向两个方向的加速度;也可以在每个测点上分别布置一个纵向加速度传感器和一个竖向加速度传感器;

步骤二、安装数据采集子系统和数据分析子系统:在桁架结构中或其附近安装数据采集仪器和一台包含数据分析子系统的电子计算机,采集桁架结构无损状态时测点的双向加速度信号存储到系统中;每隔M分钟,数据分析系统同时调用无损状态时M分钟时段及过去M分钟时段内的双向加速度信号进行桁架结构的多次损伤识别;每次识别中损伤前后的加速度响应数据点数应相同:将M分钟数据按照时间长度等分为5组数据,则损伤前后均可得到5组不同的数据,损伤前的任一组数据与损伤后的任一组数据可进行一次损伤识别,则共可执行25次损伤识别过程;选择其中的任意n次损伤识别过程的平均结果作为最终的损伤监测结果,n不小于20;具体的损伤定位步骤如下:

1) 根据桁架杆*i*两端节点处测得的在整体坐标系下的双向加速度响应 $a_{x,down}^i$ 、 $a_{y,down}^i$ 、 $a_{x,up}^i$ 和 $a_{y,up}^i$ 获得桁架节点处在沿桁架杆方向及在该桁架杆所在的桁架平面内垂直于该桁架杆的方向组成的局部坐标系下桁架节点处沿着该桁架杆方向的加速度响应 $a_{down}^i$ 和 $a_{up}^i$ ,其中 $a_{x,down}^i$ 、 $a_{y,down}^i$ 、 $a_{x,up}^i$ 和 $a_{y,up}^i$ 分别代表整体坐标系下桁架杆*i*两端节点在不同方向的加速度:down代表下端节点或左端节点处,up代表上端节点或右端节点处,x、y分别代表整体坐标系下x和y方向的加速度; $a_{down}^i$ 和 $a_{up}^i$ 分别代表桁架杆下端或左端节点、上端或右端节点处在局部坐标系下沿着桁架杆方向的加速度响应;对任意一根桁架杆*i*,根据如下公式进行加速度响应转换:

$$a_{down}^i = \cos \alpha a_{x,down}^i + \sin \alpha a_{y,down}^i \quad (1)$$

$$a_{up}^i = \cos \alpha a_{x,up}^i + \sin \alpha a_{y,up}^i \quad (2)$$

2) 由如下公式计算桁架杆*i*沿轴向加速度变化的离散度 $ASA_i$ :

$$ASA_i = \text{var}(a_{up}^i - a_{down}^i) \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

其中m是所有被监测杆件的总数;

3)获得监测桁架杆件处轴向加速度变化离散度波形在损伤前后的相对变化率  $\Delta ASA_i$ :

$$\Delta ASA_i = \left( \frac{ASA_i^{damaged}}{\bar{\mu}^{damaged}} - \frac{ASA_i^{healthy}}{\bar{\mu}^{healthy}} \right) / \frac{ASA_i^{healthy}}{\bar{\mu}^{healthy}} \quad (4)$$

其中  $\bar{\mu}^{healthy}$  和  $\bar{\mu}^{damaged}$  分别是损伤前后所有杆件的ASA值的均值;

4)计算损伤指标DI:由式(5)得到第k次识别过程的离散度波形相对变化率  $\Delta ASA_i^k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , n为损伤识别过程总次数且不小于20;对于其中每一次损伤识别过程,将所有杆件的  $\Delta ASA_i^k$  值进行归一化处理:

$$(\Delta ASA_i^k)^* = \Delta ASA_i^k / \max_i(\Delta ASA_i^k) \quad (5)$$

损伤指标DI,即平均归一化桁架杆轴向加速度离散度波形相对变化率,通过如下公式计算:

$$DI_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta ASA_i^k)^* \quad (6)$$

5)桁架杆损伤定位:若桁架杆i的损伤指标  $DI_i$  的值大于阈值  $\varepsilon$ ,则将桁架杆i判定为损伤杆,即:

$$\text{损伤杆件} = \{DI_i > \varepsilon; i=1,2,\dots,m\} \quad (7)$$

其中阈值  $\varepsilon$  根据结构无损工况的损伤定位结果即各桁架杆的损伤指标DI的值来确定,方法如下:获得结构损伤前采集的任意两个M分钟时段的加速度信号分别作为一对损伤前后的加速度信号代入以上步骤(1)~(5)观察所有待监测杆件的  $DI_i$  值,阈值  $\varepsilon$  是一个略大于无损工况下所有杆件  $DI_i$  的值来避免将无损杆误判为损伤杆。

## 一种高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于基于振动信息的结构健康监测技术领域,涉及到桁架结构的损伤实时监测,具体地说是发明了一种用于定位微小损伤桁架杆的实时监测系统。

### 背景技术

[0002] 目前已有多种基于振动信息的桁架结构的损伤监测方法;应用较为广泛的是美国东北大学Bernal教授提出的随机损伤定位向量(SDLV)法,其适用于环境激励下的实时损伤定位,得到了美国伊利诺伊大学香槟分校Spencer教授等人的试验验证。但该方法应用到工程结构上面临两个困难:一是该方法需要进行参数识别进而构建柔度矩阵,而测试噪声对参数识别尤其是模态振型识别质量影响较大,进而影响到该法的损伤定位精确度;二是该方法对小损伤的敏感性有待继续提高,该方法对不同类型桁架杆的损伤敏感性不同其中对桁架竖向平面的斜杆损伤最为敏感,但也只能识别出刚度下降约25%的桁架斜杆,而桁架竖杆刚度下降大约70%时其损伤才能得到成功识别。这两点大大制约了该方法在实际工程中的使用。

[0003] 所以,发明一种对桁架杆小损伤敏感、损伤定位精确度高的损伤实时监测系统非常必要,有利于在桁架杆损伤初期及时发现和定位损伤杆件并根据其损伤程度做出维修或更换的决策,有利于桁架结构的安全服役。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于设计一种对桁架结构杆件微小损伤的实时定位系统,以使桁架杆在发生5%以下刚度降低这样水平的损伤时能被及时地监测到。本发明的关键技术在于提出的高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测方法,基于此方法发明了一种高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统。该系统包括安装在桁架结构节点测点上的双向加速度传感器子系统、数据采集子系统、数据分析子系统、损伤定位结果实时显示子系统、决策子系统;其中数据采集子系统采集并存储桁架结构节点测点纵向和竖向的加速度信号;数据分析子系统调用数据采集子系统得到的双向加速度信号,并利用基于发明的高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测方法进行结构损伤识别,得到桁架结构中桁架杆的损伤情况;损伤定位结果实时显示子系统根据数据分析子系统得到的结果实时显示损伤杆件的位置;决策子系统根据结构损伤情况做出决断,若无损伤杆件,则反馈桁架结构中所有杆件均无损伤的提示;若有损伤杆件,则利用无损检测技术检测损伤杆件的损伤程度,并据损伤严重程度做出更换或维修等决策。

[0005] 数据分析子系统每隔M分钟调用采集数据基于包含如下步骤的高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测方法进行计算分析从而实现桁架杆的损伤定位,M建议选10~60:

[0006] 步骤一、加速度传感器布置:将要监测的桁架结构整体或者桁架子结构中的每个桁架节点选为测点并在每个测点上各布置一个双向加速度传感器用于测试其沿着桁架结构纵向和竖向两个方向的加速度;也可以在每个测点上分别布置一个纵向加速度传感器和一个竖向加速度传感器;

[0007] 步骤二、安装数据采集子系统和数据分析子系统：在桁架结构中或其附近安装数据采集仪器和一台包含数据分析子系统的电子计算机，采集桁架结构无损状态时测点的双向加速度信号存储到系统中；每隔M分钟，数据分析系统同时调用无损状态时M分钟时段及过去M分钟时段内的双向加速度信号进行桁架结构的多次损伤识别。每次识别中损伤前后的加速度响应数据点数应相同；将M分钟数据按照时间长度等分为5组数据，则损伤前后均可得到5组不同的数据，损伤前的任一组数据与损伤后的任一组数据可进行一次损伤识别，则共可执行25次损伤识别过程；选择其中的任意n次损伤识别过程的平均结果作为最终的损伤监测结果，其中n不小于20；具体的损伤定位步骤如下：

[0008] 1)根据桁架杆*i*两端节点处测得的在整体坐标系下的双向加速度响应 $a_{x,down}^i$ 、 $a_{y,down}^i$ 、 $a_{x,up}^i$ 和 $a_{y,up}^i$ 获得桁架节点处在沿桁架杆方向及在该桁架杆所在的桁架平面内垂直于该桁架杆的方向组成的局部坐标系下桁架节点处沿着该桁架杆方向的加速度响应 $a_{down}^i$ 和 $a_{up}^i$ ，其中 $a_{x,down}^i$ 、 $a_{y,down}^i$ 、 $a_{x,up}^i$ 和 $a_{y,up}^i$ 分别代表整体坐标系下桁架杆*i*两端节点在不同方向的加速度：down代表下端节点或左端节点处，up代表上端节点或右端节点处，x、y分别代表整体坐标系下x和y方向的加速度； $a_{down}^i$ 和 $a_{up}^i$ 分别代表桁架杆下端或左端节点、上端或右端节点处在局部坐标系下沿着桁架杆方向的加速度响应。对任意一根桁架杆*i*，根据如下公式进行加速度响应转换：

$$[0009] \quad a_{down}^i = \cos \alpha a_{x,down} + \sin \alpha a_{y,down} \quad (1)$$

$$[0010] \quad a_{up}^i = \cos \alpha a_{x,up} + \sin \alpha a_{y,up} \quad (2)$$

[0011] 2)由如下公式计算桁架杆*i*沿轴向加速度变化的离散度 $ASA_i$ ：

$$[0012] \quad ASA_i = \text{var}(a_{up}^i - a_{down}^i) \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

[0013] 其中m是所有被监测杆件的总数；

[0014] 3)获得监测桁架杆件处轴向加速度变化离散度波形在损伤前后的相对变化率 $\Delta ASA_i$ ：

$$[0015] \quad \Delta ASA_i = \left( \frac{ASA_i^{damaged}}{\bar{\mu}^{damaged}} - \frac{ASA_i^{healthy}}{\bar{\mu}^{healthy}} \right) / \frac{ASA_i^{healthy}}{\bar{\mu}^{healthy}} \quad (4)$$

[0016] 其中 $\bar{\mu}^{healthy}$ 和 $\bar{\mu}^{damaged}$ 分别是损伤前后所有杆件的ASA值的均值；

[0017] 4)计算损伤指标DI：由式(5)得到第k次识别过程的离散度波形相对变化率 $\Delta ASA_i^k$ ， $k=1,2,\dots,n$ ，n为损伤识别过程总次数且不小于20；对于其中每一次损伤识别过程，将所有杆件的 $\Delta ASA_i^k$ 值进行归一化处理：

$$[0018] \quad (\Delta ASA_i^k)^* = \Delta ASA_i^k / \max_i(\Delta ASA_i^k) \quad (5)$$

[0019] 损伤指标DI，即平均归一化桁架杆轴向加速度离散度波形相对变化率，通过如下公式计算：

$$[0020] \quad DI_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta ASA_i^k)^* \quad (6)$$

[0021] 5) 桁架杆损伤定位:若桁架杆*i*的损伤指标 $DI_i$ 的值大于阈值 $\varepsilon$ ,则将桁架杆*i*判定为损伤杆,即:

$$[0022] \quad \text{损伤杆件} = \{DI_i > \varepsilon; i = 1, 2, \dots, m\} \quad (7)$$

[0023] 其中阈值 $\varepsilon$ 根据结构无损工况的损伤定位结果即各桁架杆的损伤指标 $DI$ 的值来确定,方法如下:获得结构损伤前采集的任意两个*M*分钟时段的加速度信号分别作为一对损伤前后的加速度信号代入以上步骤(1)~(5)观察所有待监测杆件的 $DI_i$ 值,阈值 $\varepsilon$ 应为一个略大于无损工况下所有杆件 $DI_i$ 的值来避免将无损杆误判为损伤杆。

[0024] 本发明的关键技术即高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测方法可以实时监测桁架结构各待测杆件的损伤状况并进行反馈,突出优势是其对桁架杆微小损伤即5%以下的刚度降低的高敏感性,有利于在损伤初期更早地发现损伤杆件并及时对其进行维修或更换。

[0025] 本发明的有益效果在于,相比传统的桁架结构健康监测方法,本发明提出的方法直接使用加速度信号在时域里构件损伤指标,不需要任何系统识别过程,无需复杂的矩阵运算;因此,其还具有计算速度快、精确度高、当使用无线传感器时节省能耗等优点,加上其对小损伤超高的敏感性,使其在实际工程中具有较高的应用价值。

## 附图说明

[0026] 图1本发明的流程示意图

[0027] 图2立体桁架结构示意图

[0028] 图3桁架结构竖向平面内的杆件编号及其待测子结构研究对象

[0029] 图4 5%噪声水平下桁架节点2的竖向加速度信号

[0030] 图5 5%噪声水平下基于本发明方法的无损工况损伤定位结果

[0031] 图6 5%噪声水平下基于本发明方法的损伤工况1~8损伤定位结果

## 具体实施方式

[0032] 以一个简支桁架结构的数值模型为例验证本发明中的损伤实时监测方法的有效性。下面结合附图具体说明本发明提出的高损伤敏感性的桁架结构实时监测方法:

[0033] 1) 建立桁架结构数值模型

[0034] 如图2,该桁架结构模型的跨度为5.6m,共14间每间长度为0.4m;该桁架结构共有56个桁架节点、160根桁架杆;桁架结构的两端边界条件设置为一端铰支、一端滑动。

[0035] 2) 测点布置及损伤工况

[0036] 如图3所示,虚线框中的桁架子结构被选为研究对象进行桁架杆损伤定位。如表1所示,设置8个损伤工况来识别相应的损伤杆件,其中包括3个单损伤工况、4个双损伤工况、1个三损伤工况,包括三种不同类型的桁架杆即纵向杆、竖杆、斜杆。虚线框中的所有桁架节点均选作测点,在该桁架结构的有限元模型中输入白噪声激励来模拟环境激励,然后获得损伤前后所有测点处的纵向和竖向加速度响应;采样频率为500Hz;5%噪声水平下桁架节点2的竖向加速度响应如图4所示。

[0037] 表1杆件损伤工况

[0038]

	工况号	损伤工况描述
单损伤 工况	1	5号斜杆刚度降低2%
	2	8号纵杆刚度降低2%
	3	15号竖杆刚度降低5%

[0039]

多损伤 工况	4	6号纵杆及13号斜杆均降低刚度2%
	5	9号斜杆及21号斜杆均降低刚度2%
	6	10号纵杆及16号纵杆均降低刚度2%
	7	11号竖杆及19号竖杆均降低刚度5%
	8	4号纵杆、7号竖杆、17号斜杆刚度分别降低2%、5%、2%

[0040] 3)确定阈值

[0041] 阈值 $\varepsilon$ 根据几个无损工况的损伤定位结果进行确定： $\varepsilon$ 要大于无损工况中所有桁架杆的平均归一化轴向加速度离散度波形相对变化率的值。图5是5%噪声水平下对3个无损工况分别识别20次的损伤定位结果，由此确定阈值为0.20以避免无损工况结果中出现损伤杆。

[0042] 4)损伤定位结果

[0043] 对损伤工况1~8按照本发明提出的方法分别识别20次并对结果作平均，最终的损伤定位结果如图6所示；若某桁架杆的平均归一化轴向加速度离散度波形相对变化率大于阈值0.20，则将其判定为损伤杆；根据此规则，可以看出所有损伤工况的损伤定位结果均成功定位出了损伤桁架杆。

[0044] 5)结论

[0045] 由以上实例可以看出，本发明提出的高损伤敏感性的桁架结构损伤实时监测系统可以很好地定位桁架结构中不同类型的损伤杆，并且所有损伤杆的刚度降低均小于5%，表明该发明可以有效应用于桁架结构小损伤杆的实时监测。

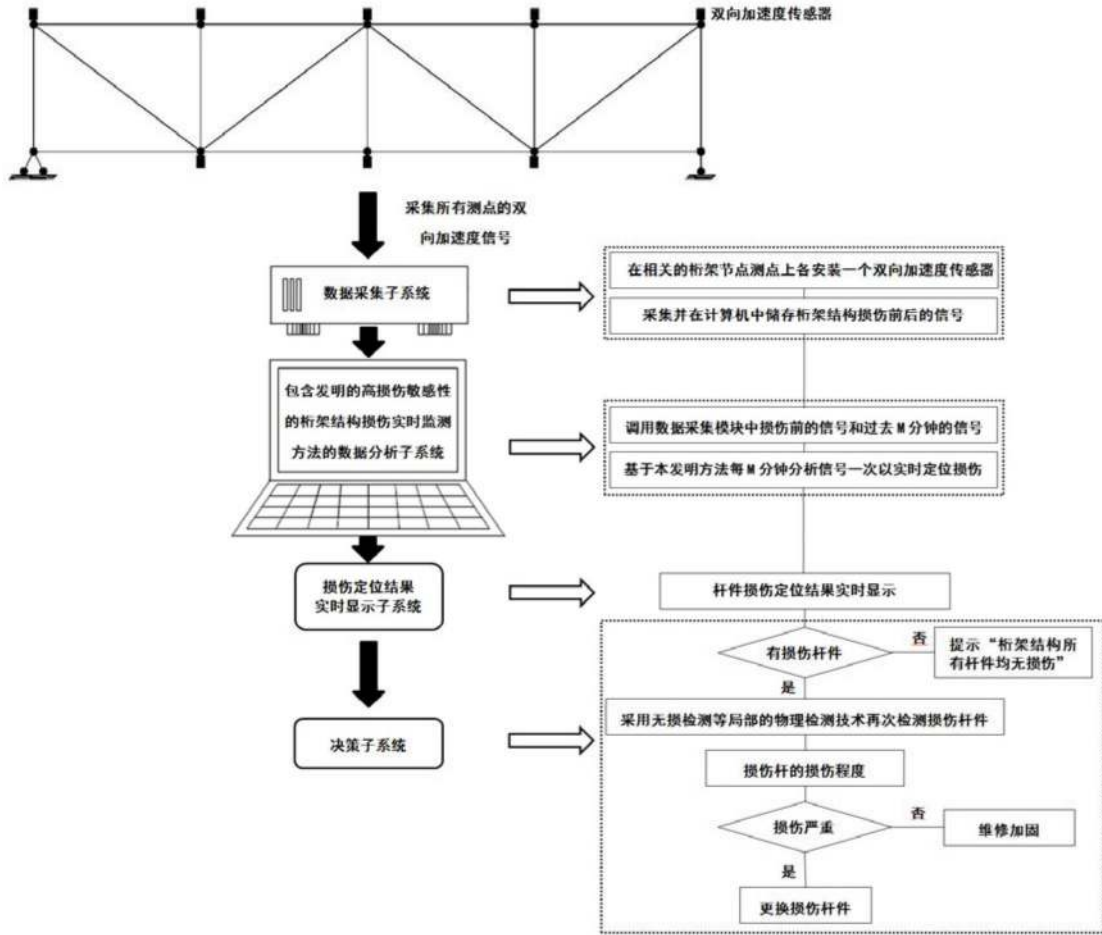


图1

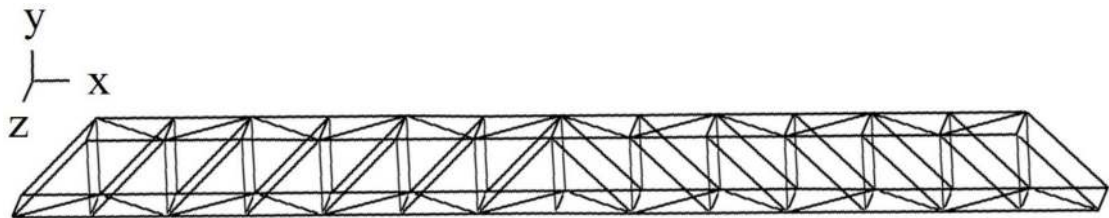


图2

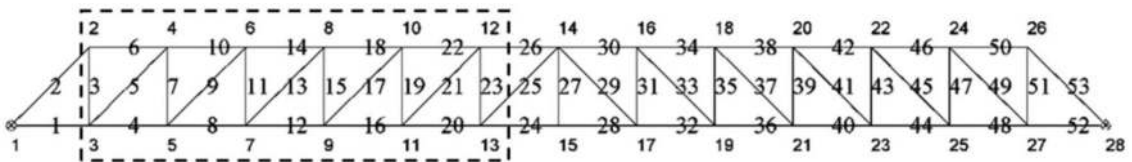


图3



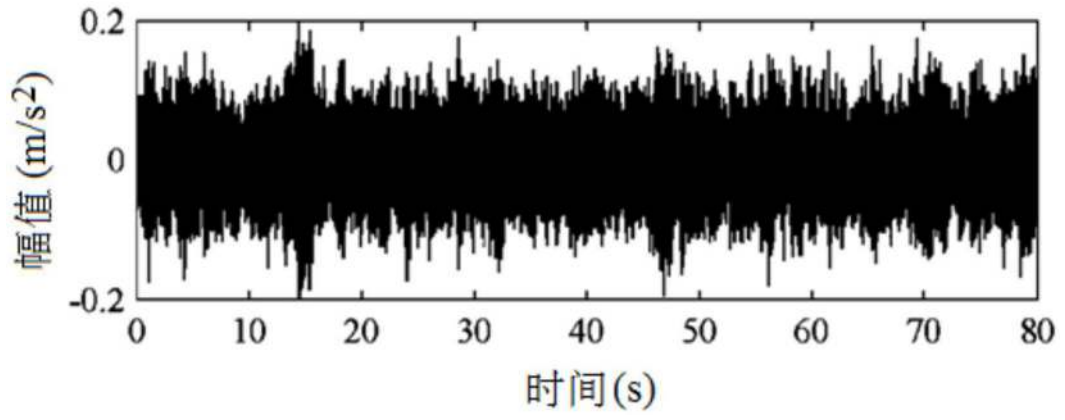


图4

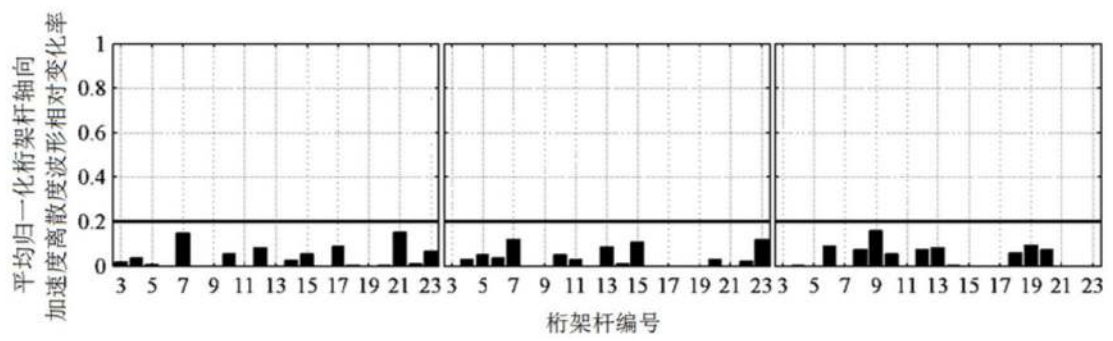


图5

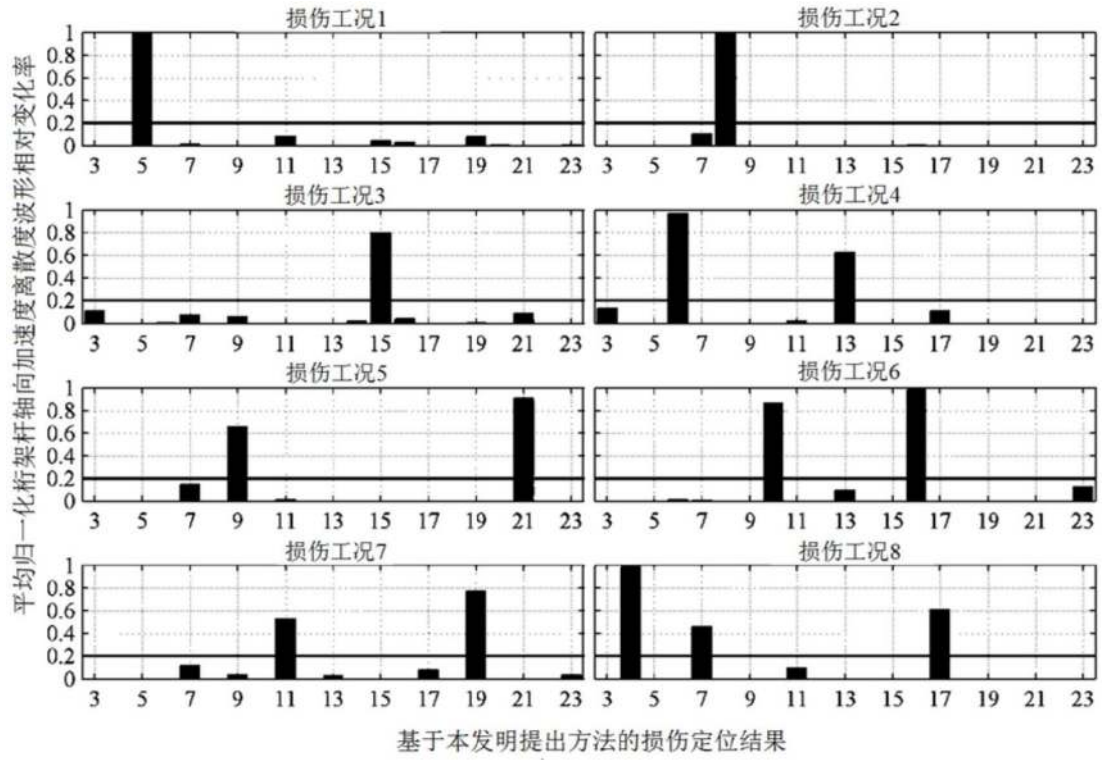


图6