(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2020 年 3 月 5 日 (05.03.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/041935 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/18 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/102519

(22) 国际申请日: 2018 年 8 月 27 日 (27.08.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 大 连 理 工 大 学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中 国 辽 宁 省 大 连 市 凌 工 路 2 号 大 连 理 工 大 学 专 利 中 心, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 伊 廷 华 (YI, Tinghua); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 姚 小 俊 (YAO, Xiaojun); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 曲春绪 (QU, Chunxu); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 李 宏 男 (LI, Hongnan); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(54) **Title:** NON-PROPORTIONAL DAMPING STRUCTURE MODE IDENTIFICATION METHOD BASED ON EXTENDED SPARSE COMPONENT ANALYSIS

(54) **发明名称**: 一种基于扩展稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法

(57) **Abstract:** The present invention falls within the technical field of structural health monitoring, and provides a non-proportional damping structure mode identification method based on extended sparse component analysis. The method comprises: constructing an analytical signal of structural acceleration response data by means of Hilbert transform; converting the analytical signal to a time-frequency domain by means of short-time Fourier transform; by taking a correlation coefficient of a time-frequency coefficient at an adjacent frequency point being close to 1 as a standard, detecting a time-frequency point, i.e. a single source point, where only a first-order mode makes a contribution in a time-frequency plane; eliminating an isolated point in the single source point by means of a phase calculated at the single source point and by using a local outlier factor method; and obtaining an estimated complex mode shape amplitude by means of hierarchically clustering the amplitudes of time-frequency coefficients at the single source point, the mean value of phases within each single source point being an estimated complex mode shape phase, and finally obtaining a complex mode shape. A mode response can be estimated by means of a sparse reconstruction method. By means of the method, the application range of a sparse component analysis method is extended, and a complex mode having a non-proportional damping structure can be obtained.

(57) **摘要**: 本发明属于结构健康监测技术领域，提供了一种基于扩展稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法。采用Hilbert变换构造结构加速度响应数据的解析信号，将解析信号通过短时傅里叶变换转换到时频域，将相邻频率点处时频系数的相关系数接近于1作为标准，检测出时频平面内仅有一阶模态参与贡献的时频点即单源点；利用单源点处计算的相位，采用局部异常因子法对单源点内的孤立点进行剔除；对单源点处的时频系数幅值进行层次聚类，可得到估计的复振型幅值，各类单源点内相位的均值即为复振型相位的估计，最终得到复振型；模态响应可通过稀疏重构方法进行估计。本方法拓展了稀疏分量分析方法的应用范围，能够获得具有非比例阻尼的结构的复模态。

WO 2020/041935 A1

说 明 书

一种基于扩展稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法

技术领域

本发明属于结构健康监测数据分析技术领域，涉及具有非比例阻尼的结构模态识别方法，具体为采用扩展的稀疏分量分析方法对具有非比例阻尼的结构进行模态识别。

背景技术

结构的模态参数包括结构的频率、振型和阻尼比，这些参数代表了结构的主要动力特性。模态分析的实质是用无阻尼系统的各阶主振型将振动系统解耦，从而将物理坐标下的振动响应转换到模态坐标下。盲源分离技术的研究对象是线性混合的系统，旨在从观测信号中分离出混合矩阵和源信号。由此可见，盲源分离理论与模态识别的目的一致。从而，盲源分离技术适用于结构模态识别。

近些年，许多盲源分离方法被成功应用到模态识别。独立分量分析方法将各阶模态响应视为相互独立的信号，采用非高斯性最大化可同时获取振型和各阶模态响应；二阶盲辨识方法利用各阶模态响应之间的不相关性，通过将振动响应的互相关矩阵对角化得到振型；稀疏分量分析方法利用振动信号在时频域内的稀疏性，通过聚类和稀疏重构得到振型和模态响应。这些方法在模态识别中显现出了使用方便、计算快捷等优势，但是这些方法的使用需满足结构具有比例阻尼的前提条件。

当结构具有非比例阻尼时，振动系统的振型和模态响应均为复数，此时结构产生的模态为复模态。由于实际结构的阻尼并不严格服从比例阻尼，考虑结构的复模态更符合实际要求。针对复模态问题，目前研究者们已提出了多种方法。例如，采用 Hilbert 变换构造振动信号的解析信号，运用二阶盲辨识方法分离出复模态振型和模态响应；另外，同时使用位移和速度数据避免了 Hilbert 变

说 明 书

换引起的误差，使得识别结果更具有鲁棒性；振动系统的复模态叠加可表达为欠定盲源分离的问题，从而采用欠定二阶盲源辨识方法可直接从位移数据中获取复模态。然而这些方法均要求传感器个数多于或者等于待识别的模态阶数，对于大型土木工程结构现场测试，安装的传感器个数有时会少于待识别的模态阶数。稀疏分量分析方法是针对欠定盲源分离问题提出的，在传感器个数较少时具有很大的优越性，然而该方法仅限于具有比例阻尼的结构使用。因此，将稀疏分量分析方法扩展到非比例阻尼结构的模态识别具有十分重要的意义。

发明内容

本发明的目的是提供一种扩展的稀疏分量分析方法，将稀疏分量分析方法的应用范围扩展到具有非比例阻尼的结构模态识别中。

本发明的技术方案：

一种基于扩展稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法，采用 Hilbert 变换构造振动信号的解析信号，对解析信号进行短时傅里叶变换转换到时频域，采用单源点检测技术从时频域中挑选出仅有一阶模态参与贡献的点，即单源点；计算单源点处的相位，并依据相位数据采用局部异常因子对单源点中的孤立点进行剔除；采用层次聚类方法对时频点的幅值进行聚类，得到复振型的幅值，同时将聚类结果中各类别单源点下的相位进行平均，得到复振型的相位，最终得到复振型；依据复振型和振动响应，对模态响应进行重构，提取各阶频率和阻尼比；

具体步骤如下：

第一步，构造加速度信号的解析信号

采样得 t 时刻的加速度响应：$\mathbf{x}(t)=\left[x_1(t),x_2(t),\ldots,x_m(t)\right]^{\mathrm{T}}$，其中 m 为传感器个数，$[\cdot]^{\mathrm{T}}$ 表示对向量取转置；对加速度响应 $\mathbf{x}(t)$ 进行 Hilbert 变换得到 $\hat{\mathbf{x}}(t)$，

说 明 书

其表达式为：$\hat{\mathbf{x}}(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\mathbf{x}(\tau)}{t-\tau}d\tau$，构造加速度响应的解析信号：$\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{x}(t)+j\hat{\mathbf{x}}(t)$，其中$j$为虚数单位；

第二步，获取解析信号在时频域的表达

采用短时傅里叶变换将加速度响应的解析信号$\tilde{\mathbf{x}}(t)$变换到时频域，其表达式变为：$\tilde{\mathbf{x}}(t,f)=\left[\tilde{x}_1(t,f),\tilde{x}_2(t,f),\ldots,\tilde{x}_m(t,f)\right]^{\mathrm{T}}$，其中$f$表示频率；

第三步，采用平均相关系数进行单源点检测

将时频平面t_k时段对应的一段频率范围作为分析域F，计算两传感器位置a和b处时频系数的相关系数：$R_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\frac{r_{ab}(t_k,\mathrm{F})}{\sqrt{r_{aa}(t_k,\mathrm{F})r_{aa}(t_k,\mathrm{F})}}$，其中$r_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\sum_{f\in\mathrm{F}}\left|\tilde{x}_a(t_k,f)\cdot\tilde{x}_b(t_k,f)\right|$，$\forall a,b\in\{1,2,\ldots,m\}$；将所有传感器位置计算得到的相关系数取均值，得到平均相关系数$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})=\frac{1}{M}\sum_{\mathrm{a}=1}^{m}\sum_{b=1,b\neq a}^{m}R_{ab}(t_k,\mathrm{F})$，其中$M=\mathrm{C}_m^2$，$\mathrm{C}_m^2$表示从$m$个样本选取两个不同的无序样本产生的所有组合形式的数量；单源点检测标准为$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})\geq 1-\varepsilon$，其中$\varepsilon$为阈值，满足检测标准的区域$(t_k,\mathrm{F})$内的所有点均标记为单源点，检测出的单源点标记为$(\bar{t},\bar{f})$；

第四步，采用局部异常因子LOF方法剔除单源点中的局部异常点

选定第一个传感器位置为参考，计算各传感器位置与参考位置在单源点处的相位差$\boldsymbol{\theta}(\bar{t},\bar{f})=\left[\boldsymbol{\theta}_1(\bar{t},\bar{f}),\ldots,\boldsymbol{\theta}_m(\bar{t},\bar{f})\right]$，其中$\boldsymbol{\theta}_k(\bar{t},\bar{f})=\boldsymbol{\theta}_{\tilde{x}_1(\bar{t},\bar{f})}-\boldsymbol{\theta}_{\tilde{x}_k(\bar{t},\bar{f})}$，$\forall k\in\{1,2,\ldots,m\}$；采用局部异常因子LOF方法计算$(\bar{t},\bar{f})$对应的各相位差向量的局部异常因子，剔除掉局部异常因子大于 1 的单源点，更新后的单源点记为$(\hat{t},\hat{f})$；

第五步，对更新后的单源点进行聚类获取复振型的幅值

利用层次聚类方法对$(\hat{t},\hat{f})$处时频系数的幅值进行聚类，得到的聚类中心为

说 明 书

各阶复振型的幅值：$|\boldsymbol{\Phi}|=\left[|\boldsymbol{\varphi}_1|,|\boldsymbol{\varphi}_2|,\ldots,|\boldsymbol{\varphi}_n|\right]$，其中$\boldsymbol{\Phi}$为振型矩阵，$\boldsymbol{\varphi}_i, i=1,\ldots,n$为各阶振型向量，$n$为模态阶数；将单源点聚类后的各类单源点标记为：$\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right)$，…，$\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$；

第六步，对各类单源点对应的相位求均值

获取各类单源点对应的相位差值：$\boldsymbol{\theta}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right),\ldots,\boldsymbol{\theta}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$，计算各类单源点内相位差值的均值：$\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right),\ldots,\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$

第七步，将估计的振型幅值和相位组装为复振型

复振型幅值矩阵的每一行的元素除以第一行的元素得到归一化的矩阵：$|\overline{\boldsymbol{\Phi}}|=\left[|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_1|,|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_2|,\ldots,|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_n|\right]$；最终估计的复振型结果为：$\boldsymbol{\Phi}=\left[|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_1|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right)},|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_2|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_2,\hat{f}_2\right)},\ldots,|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_n|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)}\right]$；

第八步，频率和阻尼比识别

传感器个数m多于或等于模态阶数n时，对复振型求逆计算模态响应，即模态响应为$\mathbf{q}(t)=\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{x}}(t)$，其中$\boldsymbol{\Phi}^{-1}$表示对$\boldsymbol{\Phi}$求逆；传感器个数$m$少于模态阶数$n$时，在约束$\tilde{\mathbf{x}}=\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q}$下，将$\mathrm{H}_\sigma(q)=L-\sum_{i=1}^{L}\exp\left(\frac{-|q_i|^2}{2\sigma^2}\right)$作为代价函数并采用渐进的非凸优化方法将代价函数最小化得到模态响应的估计，其中q_i为$\mathbf{q}$中第i个元素，L为$\mathbf{q}$中元素的总个数，σ为下降因子，是一个从大到小的等差序列。得到重构的模态响应后，采用傅里叶变换提取各模态响应的频率，即为结构的各阶频率，采用对数函数拟合法提取各模态响应的阻尼比，即为结构的各阶阻尼比。

本发明的有益效果：本发明提供了一种基于扩展的稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法，通过复振型的幅值和相位的分别估计，将稀疏分量分析方法成功应用到复模态估计中。

具体实施方式

说 明 书

以下结合技术方案，进一步阐明本发明的实施方式。

取一个三自由度弹簧质量块系统，质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵分别为：

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}3&&\\&2&\\&&1\end{bmatrix},\mathbf{K}=\begin{bmatrix}4&-2&\\-2&4&-2\\&-2&10\end{bmatrix},\mathbf{C}=\begin{bmatrix}0.1856&0.2290&-0.9702\\0.2290&0.0308&-0.0297\\-0.9702&-0.0297&0.1241\end{bmatrix}$$

给出初始条件：$\mathbf{x}(0)=[1,0,0]^{\mathrm{T}}$，获得系统在三个节点处的自由振动响应，采样频率为100Hz，对三个节点位置进行加速度时程采样。

第一步，构造采样信号的解析信号

采样得t时刻的加速度响应：$\mathbf{x}(t)=\left[x_1(t),x_2(t),x_3(t)\right]^{\mathrm{T}}$，其中$[\cdot]^{\mathrm{T}}$表示对向量取转置，对加速度响应进行Hilbert变换得到$\hat{\mathbf{x}}(t)$，其表达式为：$\hat{\mathbf{x}}(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\mathbf{x}(\tau)}{t-\tau}d\tau$，构造加速度响应的解析信号：$\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{x}(t)+j\hat{\mathbf{x}}(t)$，其中$j$为虚数单位；

第二步，获取解析信号在时频域的表达

采用短时傅里叶变换将加速度响应的解析信号$\tilde{\mathbf{x}}(t)$变换到时频域，其表达式变为：$\tilde{\mathbf{x}}(t,f)=\left[\tilde{x}_1(t,f),\tilde{x}_2(t,f),\tilde{x}_3(t,f)\right]^{\mathrm{T}}$，其中$f$表示频率；

第三步，采用平均相关系数进行单源点检测

将时频平面t_k时刻对应的一段频率范围作为分析域F，计算两传感器位置a和b处时频系数的交叉相关：$r_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\sum_{f\in\mathrm{F}}\left|\tilde{x}_a(t_k,f)\cdot\tilde{x}_b(t_k,f)\right|,\forall a,b\in\{1,2,3\}$；计算$r_{ab}(t_k,\mathrm{F})$的相关系数：$R_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\frac{r_{ab}(t_k,\mathrm{F})}{\sqrt{r_{aa}(t_k,\mathrm{F})r_{aa}(t_k,\mathrm{F})}}$；将所有传感器位置进行两两组合，并计算响应位置的相关系数，将所有组合形式的相关系数进行平均，得到平均相关系数$\overline{R}(t_k,\mathrm{F})$；单源点检测标准为$\overline{R}(t_k,\mathrm{F})\geq 1-\varepsilon$，取$\varepsilon=10^{-4}$，满足检测标准的区域$(t_k,\mathrm{F})$内的所有点标记为单源点，检测出的单源点标记为$(\overline{t},\overline{f})$；

说 明 书

将时频平面t_k时段对应的一段频率范围作为分析域F，计算两传感器位置a和b处时频系数的相关系数：$R_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\dfrac{r_{ab}(t_k,\mathrm{F})}{\sqrt{r_{aa}(t_k,\mathrm{F})r_{aa}(t_k,\mathrm{F})}}$，其中$r_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\sum_{f\in\mathrm{F}}\left|\tilde{x}_a(t_k,f)\cdot\tilde{x}_b(t_k,f)\right|$，$\forall a,b\in\{1,2,3\}$；将所有传感器位置计算得到的相关系数取均值，得到平均相关系数$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})=\frac{1}{3}\sum_{\mathrm{a}=1}^{3}\sum_{b=1,b\neq a}^{3}R_{ab}(t_k,\mathrm{F})$；单源点检测标准为$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})\geq 1-\varepsilon$，取$\varepsilon=10^{-4}$，满足检测标准的区域$(t_k,\mathrm{F})$内的所有点均标记为单源点，检测出的单源点标记为$(\bar{t},\bar{f})$；

第四步，采用局部异常因子LOF方法剔除单源点中的局部异常点

选定第一个传感器位置为参考，计算各传感器位置与参考位置在单源点处的相位差$\boldsymbol{\theta}(\bar{t},\bar{f})=\left[\boldsymbol{\theta}_1(\bar{t},\bar{f}),\ldots,\boldsymbol{\theta}_3(\bar{t},\bar{f})\right]$，其中$\boldsymbol{\theta}_k(\bar{t},\bar{f})=\boldsymbol{\theta}_{x_1(\bar{t},\bar{f})}-\boldsymbol{\theta}_{x_k(\bar{t},\bar{f})}$，$\forall k\in\{1,2,3\}$；采用局部异常因子LOF方法计算$(\bar{t},\bar{f})$对应的各相位差向量的局部异常因子，剔除掉局部异常因子大于1的单源点，更新后的单源点记为$(\hat{t},\hat{f})$；

第五步，对更新后的单源点进行聚类获取复振型的幅值

利用层次聚类方法对$(\hat{t},\hat{f})$处时频系数的幅值进行聚类，得到的聚类中心为各阶复振型的幅值：$|\boldsymbol{\Phi}|=\left[|\boldsymbol{\varphi}_1|,|\boldsymbol{\varphi}_2|,|\boldsymbol{\varphi}_3|\right]$，其中$\boldsymbol{\Phi}$为振型矩阵，$\boldsymbol{\varphi}_i,i=1,\ldots,3$为各阶振型向量；将单源点聚类后的各类单源点标记为：$(\hat{t}_1,\hat{f}_1)$，…，$(\hat{t}_n,\hat{f}_n)$；

第六步，对各类单源点对应的相位求均值

获取各类单源点对应的相位差值：$\boldsymbol{\theta}(\hat{t}_1,\hat{f}_1),\ldots,\boldsymbol{\theta}(\hat{t}_3,\hat{f}_3)$，计算各类单源点内相位差值的均值：$\bar{\boldsymbol{\theta}}(\hat{t}_1,\hat{f}_1),\ldots,\bar{\boldsymbol{\theta}}(\hat{t}_3,\hat{f}_3)$；

第七步，将估计的振型幅值和相位组装为复振型

复振型幅值矩阵的每一行的元素除以第一行的元素得到归一化的矩阵：

说 明 书

$$\left|\bar{\boldsymbol{\Phi}}\right|=\left[\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_1\right|,\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_2\right|,\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_3\right|\right]=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 0.9904 & 1.4734 & 0.9442\\ 8.0556 & 0.4437 & 0.2228\end{bmatrix}$$；最终估计的复振型结果为：

$$\boldsymbol{\Phi}=\left[\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_1\right|e^{j\bar{\theta}\left(\hat{f}_1\right)},\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_2\right|e^{j\bar{\theta}\left(\hat{f}_2\right)},\left|\bar{\boldsymbol{\varphi}}_n\right|e^{j\bar{\theta}\left(\hat{f}_3\right)}\right]$$

$$=\begin{bmatrix}1.0000 & 1.0000 & 1.0000\\ -0.1915-0.9717j & -1.4713+0.0789j & 0.9440+0.0197j\\ 0.6035+8.0329j & -0.3872+0.2165j & 0.2014+0.0954j\end{bmatrix};$$

第八步，模态响应重构

对复振型Φ求逆，模态响应$\mathbf{q}(t)=\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{x}}(t)$，其中$\Phi^{-1}$表示对$\Phi$求逆；若采用节点 1 和节点 2 处共两个加速度响应，此时传感器个数少于模态阶数，在约束条件$\tilde{\mathbf{x}}=\Phi\mathbf{q}$下，给出代价函数$\mathrm{H}_\sigma(q)=L-\sum_{i=1}^{L}\exp\left(\frac{-\left|q_i\right|^2}{2\sigma^2}\right)$，采用渐进的非凸优化方法将代价函数最小化得到模态响应的估计，其中q_i为$\mathbf{q}$中第i个元素，L为$\mathbf{q}$中元素的总个数，σ为下降因子，取为$\sigma=[0.5,0.4,0.3,0.2,0.1]$。最终识别到的各阶模态频率为：0.1360Hz、0.2472Hz 和 0.5001Hz，各阶阻尼比为：3.1898%、1.6403%和 1.7333%。

权利要求书

1.一种基于扩展稀疏分量分析的非比例阻尼结构模态识别方法，其特征在于：

第一步，构造加速度信号的解析信号

采样得t时刻的加速度响应：$\mathbf{x}(t)=\left[x_1(t),x_2(t),\ldots,x_m(t)\right]^{\mathrm{T}}$，其中$m$为传感器个数，$[\cdot]^{\mathrm{T}}$表示对向量取转置；对加速度响应$\mathbf{x}(t)$进行 Hilbert 变换得到$\hat{\mathbf{x}}(t)$，其表达式为：$\hat{\mathbf{x}}(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\mathbf{x}(\tau)}{t-\tau}d\tau$，构造加速度响应的解析信号：$\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{x}(t)+j\hat{\mathbf{x}}(t)$，其中$j$为虚数单位；

第二步，获取解析信号在时频域的表达

采用短时傅里叶变换将加速度响应的解析信号$\tilde{\mathbf{x}}(t)$变换到时频域，其表达式变为：$\tilde{\mathbf{x}}(t,f)=\left[\tilde{x}_1(t,f),\tilde{x}_2(t,f),\ldots,\tilde{x}_m(t,f)\right]^{\mathrm{T}}$，其中$f$表示频率；

第三步，采用平均相关系数进行单源点检测

将时频平面t_k时段对应的一段频率范围作为分析域F，计算两传感器位置a和b处时频系数的相关系数：$R_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\frac{r_{ab}(t_k,\mathrm{F})}{\sqrt{r_{aa}(t_k,\mathrm{F})r_{aa}(t_k,\mathrm{F})}}$，其中$r_{ab}(t_k,\mathrm{F})=\sum_{f\in\mathrm{F}}\left|\tilde{x}_a(t_k,f)\cdot\tilde{x}_b(t_k,f)\right|$，$\forall a,b\in\{1,2,\ldots,m\}$；将所有传感器位置计算得到的相关系数取均值，得到平均相关系数$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})=\frac{1}{M}\sum_{\mathrm{a}=1}^{m}\sum_{b=1,b\neq a}^{m}R_{ab}(t_k,\mathrm{F})$，其中$M=\mathrm{C}_m^2$，$\mathrm{C}_m^2$表示从$m$个样本选取两个不同的无序样本产生的所有组合形式的数量；单源点检测标准为$\bar{R}(t_k,\mathrm{F})\geq 1-\varepsilon$，其中$\varepsilon$为阈值，满足检测标准的区域$(t_k,\mathrm{F})$内的所有点均标记为单源点，检测出的单源点标记为$(\bar{t},\bar{f})$；

第四步，采用局部异常因子 LOF 方法剔除单源点中的局部异常点

选定第一个传感器位置为参考，计算各传感器位置与参考位置在单源点处的相位差$\boldsymbol{\theta}(\bar{t},\bar{f})=\left[\boldsymbol{\theta}_1(\bar{t},\bar{f}),\ldots,\boldsymbol{\theta}_m(\bar{t},\bar{f})\right]$，其中$\boldsymbol{\theta}_k(\bar{t},\bar{f})=\boldsymbol{\theta}_{\tilde{x}_1(\bar{t},\bar{f})}-\boldsymbol{\theta}_{\tilde{x}_k(\bar{t},\bar{f})}$，$\forall k\in\{1,2,\ldots,m\}$；采用局部异常因子 LOF 方法计算$(\bar{t},\bar{f})$对应的各相位差向量的

权利要求书

局部异常因子，剔除掉局部异常因子大于 1 的单源点，更新后的单源点记为$\left(\hat{t},\hat{f}\right)$；

第五步，对更新后的单源点进行聚类获取复振型的幅值

利用层次聚类方法对$\left(\hat{t},\hat{f}\right)$处时频系数的幅值进行聚类，得到的聚类中心为各阶复振型的幅值：$\left|\boldsymbol{\Phi}\right|=\left[\left|\boldsymbol{\varphi}_1\right|,\left|\boldsymbol{\varphi}_2\right|,\ldots,\left|\boldsymbol{\varphi}_n\right|\right]$，其中$\boldsymbol{\Phi}$为振型矩阵，$\boldsymbol{\varphi}_i,i=1,\ldots,n$为各阶振型向量，$n$为模态阶数；将单源点聚类后的各类单源点标记为：$\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right)$，...，$\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$；

第六步，对各类单源点对应的相位求均值

获取各类单源点对应的相位差值：$\boldsymbol{\theta}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right),\ldots,\boldsymbol{\theta}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$，计算各类单源点内相位差值的均值：$\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right),\ldots,\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)$

第七步，将估计的振型幅值和相位组装为复振型

复振型幅值矩阵的每一行的元素除以第一行的元素得到归一化的矩阵：$\left|\overline{\boldsymbol{\Phi}}\right|=\left[\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_1\right|,\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_2\right|,\ldots,\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_n\right|\right]$；最终估计的复振型结果为：$\boldsymbol{\Phi}=\left[\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_1\right|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_1,\hat{f}_1\right)},\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_2\right|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_2,\hat{f}_2\right)},\ldots,\left|\overline{\boldsymbol{\varphi}}_n\right|e^{j\overline{\boldsymbol{\theta}}\left(\hat{t}_n,\hat{f}_n\right)}\right]$。

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/102519

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/18(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F17

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI; EPODOC; CNKI; IEEE; CNPAT: 稀疏分量分析, 模态识别, SPARSE COMPONENT ANALYSIS, MODE IDENTIFICATION

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107943757 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 20 April 2018 (2018-04-20) entire document	1
A	黄宴委等 (JIANG, Yanwei et al.). "基于DSP+FPGA的结构健康监测数据采集系统设计 (Design for Structure Health Data Acquisition System Based on DSP+FPGA)" *福州大学学报(自然科学版) (Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition))*, Vol. 38, No. 1, 28 February 2010 (2010-02-28), entire document	1

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
16 November 2018	**22 November 2018**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
State Intellectual Property Office of the P. R. China (ISA/CN) **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088** **China**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/102519

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 107943757 A	20 April 2018	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2018/102519

A. 主题的分类

G06F 17/18(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F17

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

WPI;EPODOC;CNKI;IEEE;CNPAT:稀疏分量分析，模态识别，SPARSE COMPONENT ANALYSIS,MODE IDENTIFICATION

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 107943757 A (大连理工大学) 2018年 4月 20日 (2018-04-20) 全文	1
A	黄宴委等. "基于DSP+FPGA的结构健康监测数据采集系统设计" 福州大学学报(自然科学版)，第38卷，第1期，2010年 2月 28日 (2010-02-28)， 全文	1

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2018年 11月 16日	2018年 11月 22日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	林亮亮
传真号 (86-10)62019451	电话号码 86-(010)-62411890

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2018/102519

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 107943757 A	2018年 4月 20日	无	