



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116881781 B

(45) 授权公告日 2025. 11. 14

(21) 申请号 202310702769.7

G06F 18/28 (2023.01)

(22) 申请日 2023.06.13

G06F 17/16 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G01N 29/14 (2006.01)

申请公布号 CN 116881781 A

G01N 29/04 (2006.01)

(43) 申请公布日 2023.10.13

G01N 29/50 (2006.01)

G01N 29/44 (2006.01)

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

(56) 对比文件

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街

CN 111010193 A, 2020.04.14

道高新技术产业园南区粤兴一道18号

CN 115982626 A, 2023.04.18

香港理工大学产学研大楼205室

审查员 邓娇燕

(72) 发明人 周健 王友武 倪一清

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理师 温宏梅

(51) Int. Cl.

G06F 18/241 (2023.01)

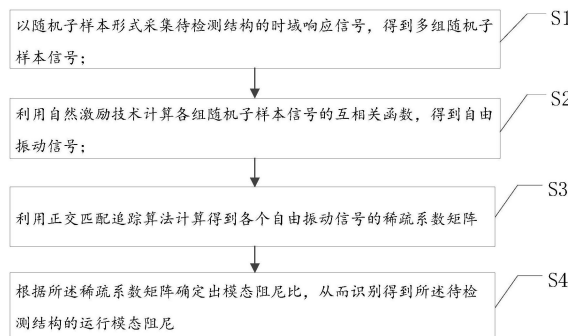
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备

(57) 摘要

本发明公开了一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备,通过以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号,利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号,利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵,根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。本实施例公开的运行模态阻尼识别方法,采用随机子样本信号采集的方法,满足了自然激励技术的要求,实现对工作激励下的模态阻尼识别,并且本实施例中采用的识别框架为频率-振型-阻尼,提高了识别精度,为结构损伤的精确识别提供了技术支持。



1. 一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,其特征在于,包括:  
以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号;  
利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号;  
利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵;  
根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。
2. 根据权利要求1所述的运行模态阻尼识别方法,其特征在于,所述以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号的步骤包括:  
利用多个传感器按照预设子样本长度和预设子样本个数,采集待检测结构的压缩振动信号;所述压缩振动信号包括:位移振动信号、速度振动信号和加速度振动信号中的一种或多种。
3. 根据权利要求1所述的运行模态阻尼识别方法,其特征在于,所述利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵的步骤包括:  
根据各个子样本的预设阻尼搜索范围,以自由振动函数作为基函数,建立阻尼字典;  
构建与所述阻尼字典的稀疏表示相对应的搜索公式;  
通过正交匹配追踪算法求解所述搜索公式的最优解,得到稀疏系数矩阵。
4. 根据权利要求3所述的运行模态阻尼识别方法,其特征在于,构建与所述阻尼字典的稀疏表示相对应的搜索公式的步骤包括:  
基于时域响应信号确定出所述待检测结构对应的模态频率和模态振型;  
以所述模态频率和模态振型作为基本信息,构建搜索公式。
5. 根据权利要求1所述的运行模态阻尼识别方法,其特征在于,所述根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比的步骤包括:  
根据不同阶模态下的阻尼设定范围,从所述稀疏系数矩阵中得到运行模态下的阻尼比。
6. 一种结构损伤的检测方法,其特征在于,其应用于如权利要求1-5任一项所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,所述方法包括:  
获取待检测结构以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号;  
根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果。
7. 根据权利要求6所述的结构损伤的检测方法,其特征在于,所述根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果的步骤包括:  
根据时域响应信号确定待检测结构对应的多组运行模态阻尼;  
根据多组运行模态阻尼与待检测结构的原始模态阻尼,判断待检测结构是否处于损伤状态;  
若所述待检测结构处于损伤状态,则根据所述运行模态阻尼确定出所述待检测结构的损伤位置。
8. 一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别系统,其特征在于,包括:  
信号获取模块,用于以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号;  
第一信号处理模块,用于利用自然激励技术计算各个随机子样本信号的互相关函数,

得到自由振动信号;

第二信号处理模块,用于利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵;

确定阻尼模块,用于根据各模态阻尼设定范围从所述稀疏系数矩阵中得到模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。

9.一种终端设备,其特征在于,所述终端设备包括有存储器和一个或者一个以上处理器;所述存储器存储有一个或者一个以上的程序;所述程序包含用于执行如权利要求1-5中任一项所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法的指令,和/或包含用于执行如权利要求6或7所述的结构损伤的检测方法的指令;所述处理器用于执行所述程序。

10.一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质存储有一个或多个程序,所述一个或多个程序可被一个或者多个处理器执行,以实现如权利要求1-5任一项所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法中的步骤,和/或如权利要求6或7所述的结构损伤的检测方法中的步骤。

## 一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备

### 技术领域

[0001] 本申请涉及结构状态监测技术领域,特别是涉及一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备。

### 背景技术

[0002] 模态阻尼是模态参数之一,而模态参数是结构健康监测的重要参数。模态阻尼常用于结构状态评估、损伤识别、结构控制等领域。

[0003] 传统模态识别方法需要服从奈奎斯特采样定理,即采样频率不小于大于识别的最大模态频率的两倍。对于长期监测而言,如果以奈奎斯特采样率进行采样会产生大量数据,导致计算效率过低。压缩感知(Compressive sensing,CS)是一种用于压缩采样的数学方法,基于结构振动信号具有一定的稀疏性的假设,压缩感知可以以低于奈奎斯特率采集信号并且理论上能精确恢复信号,所以压缩感知被引入到模态识别领域用于从压缩信号中提取模态参数。

[0004] 目前基于压缩感知的模态识别方法对工作激励下的模态阻尼识别还没有进行研究,导致模态识别的质量下降,无法满足对运行模态阻尼准确识别的需求。

[0005] 因此,现有技术有待改进。

### 发明内容

[0006] 鉴于上述现有技术中的不足之处,本发明的目的在于为用户提供一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备,克服现有技术中无法对待检测结构的运行模态阻尼进行准确识别的缺陷。

[0007] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0008] 第一方面,本实施例提供了一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,其中,包括:

[0009] 以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号;

[0010] 利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号;

[0011] 利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵;

[0012] 根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。

[0013] 可选的,所述以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号的步骤包括:

[0014] 利用多个传感器按照预设子样本长度和预设子样本个数,采集待检测结构的压缩振动信号;所述压缩振动信号包括:位移振动信号、速度振动信号和加速度振动信号中的一种或多种。

[0015] 可选的,所述利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵的步骤包括:

[0016] 根据各个子样本的预设阻尼搜索范围,以自由振动函数作为基函数,建立阻尼字

典；

[0017] 构建与所述阻尼字典的稀疏表示相对应的搜索公式；

[0018] 通过正交匹配追踪算法求解所述搜索公式的最优解,得到稀疏系数矩阵。

[0019] 可选的,构建与所述阻尼字典的稀疏表示相对应的搜索公式的步骤包括:

[0020] 基于时域响应信号确定出所述待检测结构对应的模态频率和模态振型;

[0021] 以所述模态频率和模态振型作为基本信息,构建搜索公式。

[0022] 可选的,所述根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比的步骤包括:

[0023] 根据不同阶模态下的阻尼设定范围,从所述稀疏系数矩阵中得到运行模态下的阻尼比。

[0024] 第二方面,本实施例公开了一种结构损伤的检测方法,其中,其应用于所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,所述方法包括:

[0025] 获取待检测结构以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号;

[0026] 根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果。

[0027] 可选的,所述根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果的步骤包括:

[0028] 根据时域响应信号确定待检测结构对应的多组运行模态阻尼;

[0029] 根据多组运行模态阻尼与待检测结构的原始模态阻尼,判断待检测结构是否处于损伤状态;

[0030] 若所述待检测结构处于损伤状态,则根据所述运行模态阻尼确定出所述待检测结构的损伤位置。

[0031] 第三方面,本实施例公开了一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别系统,其中,包括:

[0032] 信号获取模块,用于以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号;

[0033] 第一信号处理模块,用于利用自然激励技术计算各个随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号;

[0034] 第二信号处理模块,用于利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵;

[0035] 确定阻尼模块,用于根据各模态阻尼设定范围从所述稀疏系数矩阵中得到模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。

[0036] 第四方面,本实施例提供了一种终端设备,其中,所述终端设备包括有存储器和一个或者一个以上处理器;所述存储器存储有一个或者一个以上的程序;所述程序包含用于执行所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法的指令,和/或包含用于执行所述的结构损伤的检测方法的指令;所述处理器用于执行所述程序。

[0037] 第五方面,本实施例提供了一种计算机可读存储介质,其中,所述计算机可读存储介质存储有一个或多个程序,所述一个或多个程序可被一个或者多个处理器执行,以实现所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法中的步骤,和/或所述的结构损伤的检测方法中的步骤。

[0038] 本发明公开了一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备,通过以随

机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号,利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号,利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵,根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。本实施例公开的运行模态阻尼识别方法,采用随机子样本信号采集的方法,满足了自然激励技术的要求,实现对工作激励下的模态阻尼识别,并且本实施例中采用的识别框架为频率-振型-阻尼,提高了识别精度,为结构损伤的精确识别提供了技术支持。

### 附图说明

- [0039] 图1为本发明实施例中运行模态阻尼识别方法的步骤流程图;
- [0040] 图2a为原始信号的位置分布示意图;
- [0041] 图2b为现有技术中随机采样的原理示意图;
- [0042] 图2c为本发明实施例中随机子样本采样的信号原理示意图;
- [0043] 图3是本发明实施例中结构损伤的检测方法的步骤流程图;
- [0044] 图4是本发明实施例中运行模态阻尼识别系统的结构原理框图;
- [0045] 图5是本发明实施中四自由度质量-弹簧-阻尼结构示意图;
- [0046] 图6是本发明实施例中为 $\beta=0.0005$ 时基于四自由度质量-弹簧-阻尼系统测量的振动位移响应信号的压缩前原始信号的时域图;
- [0047] 图7是本发明实施例中为 $\beta=0.0005$ 时基于四自由度质量-弹簧-阻尼系统测量的振动位移响应数据的压缩前原始信号的频谱图。

### 具体实施方式

[0048] 为了使本申请的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本申请进行进一步详细说明。应当理解,此处描述的具体实施例仅仅用以解释本申请,并不用于限定本申请。

[0049] 压缩感知被称为压缩采样或稀疏采样,是一种寻找欠定线性系统的稀疏解的技术。压缩感知被应用于信号处理中获取和重构稀疏或可压缩的信号。压缩感知在具体应用中更关注的是如何利用信号本身所具有的稀疏性,从部分观测样本中恢复原始信号,通常认为压缩感知分为压缩测量和重构恢复两个阶段,压缩测量关注的是如何对原始信号进行处理以获得稀疏样本表示,重构恢复关注的是如何基于稀疏性从少量的观测中复原信号。

[0050] 目前基于压缩感知进行模式识别的技术中,已经实现以压缩振动信号作为输入数据,实现运行模态频率和模态振型的识别,但是现有技术还无法识别运行模态阻尼,导致在实际应用中有一定的局限性,降低了模态识别的质量。

[0051] 为了解决上述问题,本实施例公开了一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备,基于压缩感知实现对运行模态阻尼的识别,具体的,本方法先以随机子样本形式采集压缩的时域响应信号,利用自然激励技术计算各个采集随机子样本对应的时域响应信号的互相关函数,基于信号之间的互相关函数获取自由振动信号,再通过正交匹配追踪算法获取时域响应信号的稀疏表示,找到信号对应的稀疏系数矩阵,根据稀疏系数矩阵得到待检测结构的运行模态阻尼。本实施例中提供的方法,能够实现工作激励下模态阻尼的

识别,提高结构检测时模态参数识别的精度,以及实现结构损伤位置定位的准确度。

[0052] 下面结合附图对本发明所公开的实施例做更为详细的说明。

[0053] 本实施例公开了一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,如图1所示,包括:

[0054] 步骤S1、以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号。

[0055] 待检测结构为阻尼结构,也即是待检测结构中含有阻尼,比如:四自由度质量-弹簧-阻尼结构。利用传感器可以对待检测结构的时域响应信号进行采集,具体的,本步骤中以随机子样本形式进行待检测结构的时域响应信号的采集。该随机子样本是通过在原有样本的前提下,先构建出子样本,再基于构建出的子样本进行信号采集。

[0056] 具体的,结合图2a至图2b所示,图2a为原始信号样本,以该原始信号样本的占有率为全部的样本为例,原始的采样为依次采样,信号之间可设置为均匀分布或固定以预设间隔进行采样。图2b为随机采样的原理示意图,在进行随机采样时,可以在原全部信号的基础上,根据设置的采集信号个数,随机获取其中的多个信号,采集信号位置为随机的,可以间隔1个信号,或多个信号进行信号采集。

[0057] 如图2c所示,本发明实施例公开的采集信号的方式为随机子样本采集。根据待检测结构的大小先设置子样本的长度和数量,在一种实施方式中,子样本的数量可以设置为压缩信号长度除以子样本的长度,也即是,若压缩信号的长度为9,子样本的长度为3,则可以设置子样本的数量为3。如图2c中子样本的长度设置为3,在具体实施时,子样本内的各个样本之间的时间间隔是相等的,但是相邻子样本之间的时间间隔是随机的,因此将该采样方法称为随机子样本采样形式。为了避免子样本之间的时间间隔过大,可以为每个子样本划分出相同大小的区域,每个区域划分的大小相等,并且每个区域的大小等于原始样本长度除以子样本数量。如图2c所示,两个相邻边界中间为一个区域,在各个区域内含有一个子样本,各个子样本包括多个样本,图2c中一个子样本中含有3个样本。

[0058] 在具体应用时,本步骤包括:利用多个传感器按照预设子样本长度和预设子样本个数,采集待检测结构的压缩振动信号;所述压缩振动信号包括:位移振动信号、速度振动信号和加速度振动信号中的一种或多种。也即是,先根据待检测结构的大小或所需要识别的精度,设置子样本长度和子样本个数,按照设置好的子样本长度、个数及各个子样本所布局的位置利用传感器进行待检测结构压缩振动信号的采集。

[0059] 可以想到的是,压缩振动信号不仅仅为位移振动信号,还可以是速度振动信号,或加速度振动信号。本步骤中以位移振动信号为例,对采集到的压缩信号进行表示。

[0060] 在结构动力学理论中,对于自由度为N的线性时不变系统,振动方程为:

$$[0061] \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t)$$

[0062] 其中 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是质量矩阵, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是阻尼矩阵, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是刚度矩阵, $\mathbf{F}(t)$ 是环境激励, $\mathbf{x}$ 是 $t$ 时刻系统的位移响应;通过随机采集子样本的形式来采集压缩信号,压缩振动位移响应 $\mathbf{Y}$ 可表示为:

$$[0063] \quad \mathbf{Y}_{N \times L} = \mathbf{X}_{N \times M} \Phi_{M \times L};$$

[0064] 其中 $\Phi$ 是压缩矩阵( $M \times L$ );

[0065] 步骤S2、利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号。

[0066] 自然激励技术证明对应 $n$ 自由度线性不变阻尼系统,在激励近似满足高斯白噪声的条件下,结构中两点响应之间互相关函数与脉冲响应函数具有相似的表达。由于环境振动信号为宽带信号,可以假定白噪声为环境振动下的待检测结构的激励源,则本步骤中可以用自然激励技术NE<sub>x</sub>T来计算随机信号 $Y$ 中每个子样本的互相关函数 $R$ ,从而获取自由振动信号。

[0067] 互相关函数 $R$ 可表示为:

$$[0068] \quad R_{kl}(T) = \sum_{j=1}^N \frac{\psi_{kj} A_j}{m_j \omega_{d,j}} \exp(-\xi_j \omega_{n,j} T) \sin(\omega_{d,j} T + \theta_j);$$

[0069] 其中, $\psi$ 是模态振型, $A$ 是系数, $T$ 是时间间隔, $\omega_{n,j}$ 、 $\omega_{d,j}$ 、 $\xi_j$ 、 $\theta_j$ 分别是第 $j$ 阶模态的无阻尼固有频率、有阻尼固有频率、模态阻尼比和相位。根据自然激励技术理论,互相关函数 $R$ 可以被认为是系统的自由振动响应, $R$ 也可以表示为:

$$[0070] \quad R_{N \times T} = \Psi_{N \times N} \Gamma_{N \times 2N} S_{2N \times T_{\text{Max}}};$$

[0071] 其中, $\Gamma = [\Gamma' \Gamma'']$ 是系数矩阵, $\Gamma'$ 和 $\Gamma''$ 是具有元素 $A_j$ 的对角系数矩阵, $S$ 是具有元素 $s'_j(T) = \exp(-\xi_j \omega_{n,j} T) \sin(\omega_{d,j} T)$ 和 $s''_j(T) = \exp(-\xi_j \omega_{n,j} T) \cos(\omega_{d,j} T)$ 的模态坐标矩阵

[0072] 步骤S3、利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵。

[0073] 本步骤中由于互相关函数 $R$ 的形式和压缩感知公式一致,所以本实施例中以互相关函数 $R$ 形式表示压缩感知:

$$[0074] \quad R = YD;$$

[0075] 其中, $Y$ 表示稀疏系数矩阵, $D$ 表示与阻尼搜索范围相对应的阻尼字典。

[0076] 具体的,本步骤包括:

[0077] 步骤S31、为每个子样本设定阻尼搜索范围,以自由振动函数作为基函数,建立阻尼字典。

[0078] 所述阻尼字典 $D$ 用于包括 $S$ ,阻尼字典的元素可表示为:

$$[0079] \quad d' = \exp\left(-\frac{\xi_m \omega_{d,l} T}{\sqrt{1-\xi_m^2}}\right) \sin(\omega_{d,j} T) \text{ 和 } d'' = \exp\left(-\frac{\xi_m \omega_{d,l} T}{\sqrt{1-\xi_m^2}}\right) \cos(\omega_{d,j} T)$$

[0080] 将所述阻尼字典代入搜索公式,构建自由振动信号对应的稀疏模型。

[0081] 互相关函数 $R$ 的稀疏表示的表达式为:

$$[0082] \quad R = \hat{Y} \hat{D} \Phi;$$

[0083] 其中, $Y$ 用于包括 $\Psi \Gamma$ 。

[0084] 也即是,自由振动信号对应的稀疏模型为互相关函数 $R$ 的稀疏表示。

[0085] 步骤S32、构建搜索公式用于获得所述阻尼字典的稀疏表示。

[0086] 具体的,构建搜索公式的步骤包括:

[0087] 步骤S311、基于时域响应信号确定出所述待检测结构对应的模态频率和模态振型。

[0088] 通过已有方法基于先验信息的稀疏分解(sparse decomposition with prior information,SDPI)来从压缩振动信号中获取模态频率和模态振型,并将获取的模态频率和模态振型作为DISD(DISD指本实施例所提供的运行模态阻尼识别方法)中搜索公式的基

本信息。已有方法中以压缩振动信号作为输入数据,以上一次采集的压缩振动响应信号计算的模态频率和模态阻尼比作为先验信息,设置频率搜索范围并建立相应的频率字典,利用正交匹配追踪算法识别模态参数,实现运行模态频率和模态振型的识别。

[0089] 步骤S312、以所述模态频率和模态振型作为基本信息,构建搜索公式。

[0090] 搜索公式为:

[0091]  $\text{Arg max}(\| [R(\psi d' \Phi)^T, R(\psi d'' \Phi)^T] \|_2) \text{ s.t. } d' \in D'_{\xi=\{1, \dots, q\}}, d'' \in D''_{\xi=\{1, \dots, q\}};$

[0092] 其中, $\xi$ 为误差限,例如: $\xi=0.001$ 。

[0093] 步骤S33、通过优化算法求解所述搜索公式的最优解,得到稀疏系数矩阵。

[0094] 在自由振动信号和阻尼字典为已知的情况下,通过正交匹配追踪算法对构建出的搜索公式求取最优解,得到稀疏系数矩阵。

[0095] 根据压缩感知(Compressive sensing,CS)理论可知,如果稀疏系数矩阵Y和阻尼字典D满足约束等距性条件,且稀疏系数矩阵Y在阻尼字典D域中是稀疏的,则通过优化算法求解上述稀疏模型便可以求得稀疏系数矩阵Y。

[0096] 具体实施时,稀疏表示求解算法包括:松弛算法和贪婪算法两大类,本实施例中采用贪婪算法中的正交匹配追踪算法对构建出的稀疏模型进行迭代计算,对局部的最优结果进行追踪,最终得到最优的稀疏表示结果,也即是稀疏系数矩阵。

[0097] 步骤S4、根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。

[0098] 由于根据稀疏系数矩阵可直接计算出阻尼比的大小,因此当上述步骤S3中计算得到稀疏系数矩阵Y后,便可以得到模态阻尼比。

[0099] 具体的,所述根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比的步骤包括:

[0100] 根据不同阶模态下的阻尼设定范围,从所述稀疏系数矩阵中得到运行模态下的阻尼比。在具体实施时,在确定出模态阻尼比时,可以采用不同阶模态下的阻尼参考值使用相对误差 $\Delta_{\xi_j}$ 评估识别的模态阻尼比的精度:

$$[0101] \quad \Delta_{\xi_j} = \frac{|\xi_j - \xi'_j|}{\xi_j};$$

[0102] 其中, $\xi_j$ 表示理论第j阶模态阻尼比, $\xi'_j$ 表示识别的第j阶固有频率, $\Delta_{\xi_j}$ 越接近0识别的模态阻尼比精度越高。

[0103] 压缩感知理论提出突破了奈奎斯特采样定律规定的采样频率必须大于两倍识别的最大模态频率,该理论指出信号可通过远低于奈奎斯特率的方式进行压缩采样,并且可以精确地恢复原始信号,于是压缩感知可以应用于压缩采样系统中。针对已有的方法无法识别运行模态阻尼的问题,本发明实现了基于压缩感知的运行模态阻尼识别。

[0104] 本实施例公开的运行模态阻尼识别方法,提出了一种新的压缩采样方案,子样本压缩采样方式,并且提出了一种新的识别框架:频率-振型-阻尼,另外,还提供了一种新的搜索公式,实现了对待检测结构工作激励下模态阻尼的识别。

[0105] 在公开了基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法的基础上,本实施例公开了一种结构损伤的检测方法,如图3所示,其应用于所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法,所述方法包括:

[0106] 步骤H1、获取待检测结构以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号。

[0107] 利用传感器以随机子样本形式设置在待检测结构上,用于采集待检测结构上的时域响应信号。本步骤中采用的随机子样本形式即为上述步骤S1中所公开的信号采样形式。

[0108] 步骤H2、根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果。

[0109] 根据上述步骤H1中采集到的时域响应信号分析确定出待检测结构的损伤检测结构。

[0110] 具体的,所述根据所述时域响应信号确定所述待检测结构的损伤检测结果的步骤包括:

[0111] 根据时域响应信号确定待检测结构对应的多组运行模态阻尼;

[0112] 根据多组运行模态阻尼与待检测结构的原始模态阻尼,判断待检测结构是否处于损伤状态;

[0113] 若所述待检测结构处于损伤状态,则根据所述运行模态阻尼确定出所述待检测结构的损伤位置。

[0114] 对采集得到的时域响应信号进行分析,得到与时域响应信号对应的模态阻尼,将分析得到的模态阻尼与待检测结构故障前的模态阻尼进行比较,确定待检测结构是否发生故障,以及根据单个传感器与其他传感器计算的阻尼比数值的区别来确定故障所在位置,例如,某个传感器计算的阻尼比数值与其他传感器计算的数值相差大于5%,即认为该传感器所采集信号处发生故障。

[0115] 进一步的,在公开了运行模态阻尼识别方法的基础上,本实施例公开了一种基于压缩感知的运行模态阻尼识别系统,如图4所示,所述识别系统包括:

[0116] 信号获取模块100,用于以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号;其功能如步骤S1所述。

[0117] 第一信号处理模块200,用于利用自然激励技术计算各个随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号;其功能如步骤S2所述。

[0118] 第二信号处理模块300,用于利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵;其功能如步骤S3所述。

[0119] 确定阻尼模块400,用于根据各模态阻尼设定范围从所述稀疏系数矩阵中得到模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼,其功能如步骤S4所述。

[0120] 此外,本实施例还提供了一种终端设备,其中,所述终端设备包括有存储器和一个或者一个以上处理器;所述存储器存储有一个或者一个以上的程序;所述程序包含用于执行所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法的指令;所述处理器用于执行所述程序。

[0121] 以及,本实施例还提供了一种计算机可读存储介质,其中,所述计算机可读存储介质存储有一个或多个程序,所述一个或多个程序可被一个或者多个处理器执行,以实现所述的基于压缩感知的运行模态阻尼识别方法中的步骤,和/或所述的结构损伤的检测方法中的步骤。

[0122] 本领域内的技术人员应明白,本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本发明可采用完全硬件实施例、完全软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0123] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备(系统)、计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0124] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0125] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0126] 为了进一步说明本实施例所提供的方法、系统及设备,如图5、图6和图7所示,以四自由度质量-弹簧-阻尼系统作为待检测结构为例,对本发明所提供的方法、系统及设备所取得识别效果验证。

[0127] 首先,将四自由度质量-弹簧-阻尼系统的质量矩阵设置为 $M = \text{diag}([1111])$ ,并且刚度矩阵被设置为:

$$[0128] \quad K = \begin{bmatrix} 20 & -10 & 0 & 0 \\ -10 & 22 & -12 & 0 \\ 0 & -12 & 20 & -8 \\ 0 & 0 & -8 & 16 \end{bmatrix} * 100 \text{ N/m}$$

[0129] 阻尼矩阵设置为 $C = 0.1M + \beta K$ ,考虑 $\beta = 0.0005$ 和 $0.001$ ,激励 $F$ 是零均值、单位方差的高斯白噪声,基于数值软件进行仿真,采样频率为30Hz的振动响应数据,采样100000次,压缩比为3.33和5,压缩后的信号用本发明所提供的运行模态阻尼识别方法进行性能的验证。如图6所示是本发明实施例中为 $\beta = 0.0005$ 时基于四自由度质量-弹簧-阻尼系统测量的振动位移响应信号的压缩前原始信号的时域图;如图7所示是本发明实施例中为 $\beta = 0.0005$ 时基于四自由度质量-弹簧-阻尼系统测量的振动位移响应数据的压缩前原始信号的频谱图。

[0130] 实例中,设置子样本长度为5000,自然激励技术(NExT)的参考通道为 $\ddot{x}_1$ 。初始阻尼搜索范围为[0-10%],搜索间隔为0.02%。对于 $\beta = 0.0005$ ,模态频率为 $\omega_{d,1} = 2.95\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,2} = 5.87\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,3} = 7.70\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,4} = 9.75\text{Hz}$ ;对于 $\beta = 0.001$ ,模态频率为 $\omega_{d,1} = 2.95\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,2} = 5.86\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,3} = 7.70\text{Hz}$ ,  $\omega_{d,4} = 9.75\text{Hz}$ 。通过本实施例公开的运行模态阻尼识别方法进行运行模态阻尼识别,识别的模态参数如表1所示,由表1中结果可知,本实施例提供的运行模态阻尼识别方法(简称DISD方法)有较好的识别精度。

[0131] 表1

$\beta$	压缩比	模态阶数	模态阻尼比(%)		
			理论	DISD	
[0132]	0.0005	3.33	1	0.73	0.71
			2	1.06	1.09
			3	1.31	1.29
			4	1.61	1.63
	0.001	5	1		0.73
			2		0.99
			3		1.32
			4		1.58
[0133]	0.001	3.33	1	1.20	1.14
			2	1.98	1.94
			3	2.52	2.52
			4	3.15	3.14
	0.005	5	1		1.22
			2		1.99
			3		2.53
			4		3.04

[0133] 本发明公开了一种运行模态阻尼识别方法、损伤检测方法、系统及设备,通过以随机子样本形式采集待检测结构的时域响应信号,得到多组随机子样本信号,利用自然激励技术计算各组随机子样本信号的互相关函数,得到自由振动信号,利用正交匹配追踪算法计算得到各个自由振动信号的稀疏系数矩阵,根据所述稀疏系数矩阵确定出模态阻尼比,从而识别得到所述待检测结构的运行模态阻尼。本实施例公开的运行模态阻尼识别方法,采用随机子样本信号采集的方法,满足了自然激励技术的要求,实现对工作激励下的模态阻尼识别,并且本实施例中采用的识别框架为频率-振型-阻尼,提高了识别精度,为结构损伤的精确识别提供了技术支持。

[0134] 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但不能因此而理解为对发明专利范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。

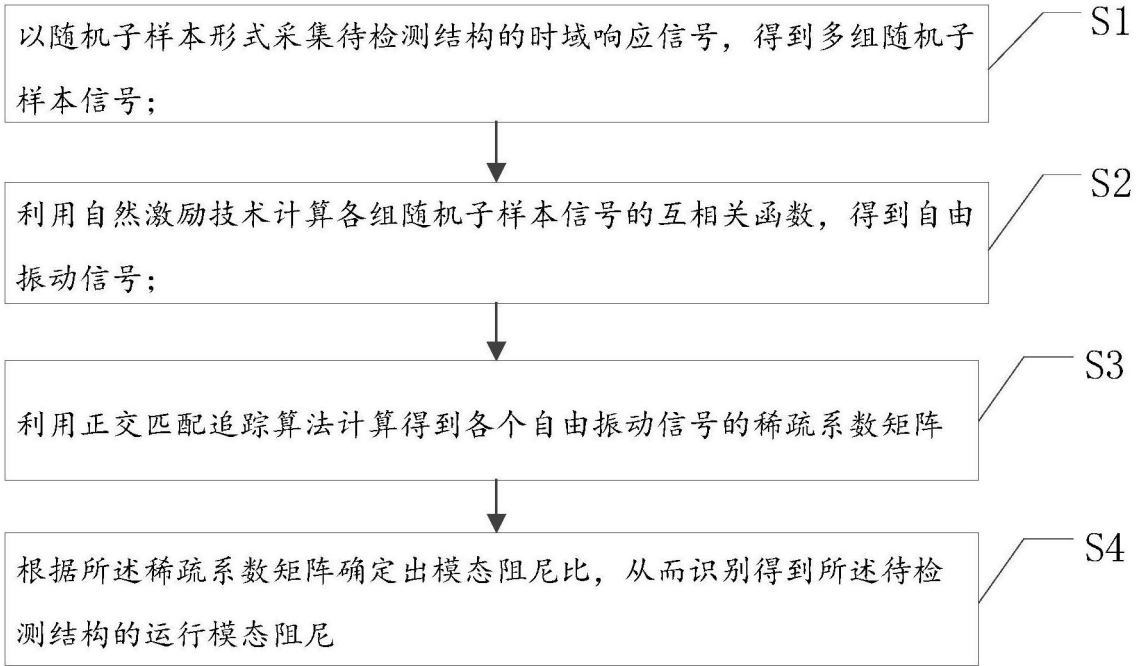


图1

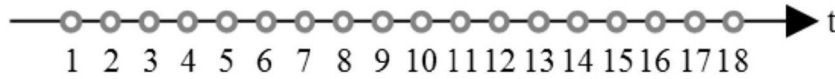


图2a

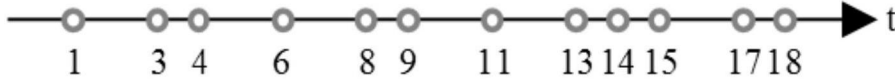


图2b

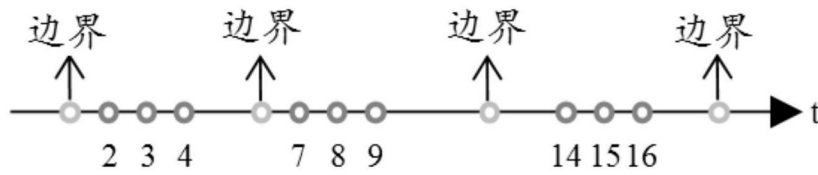


图2c

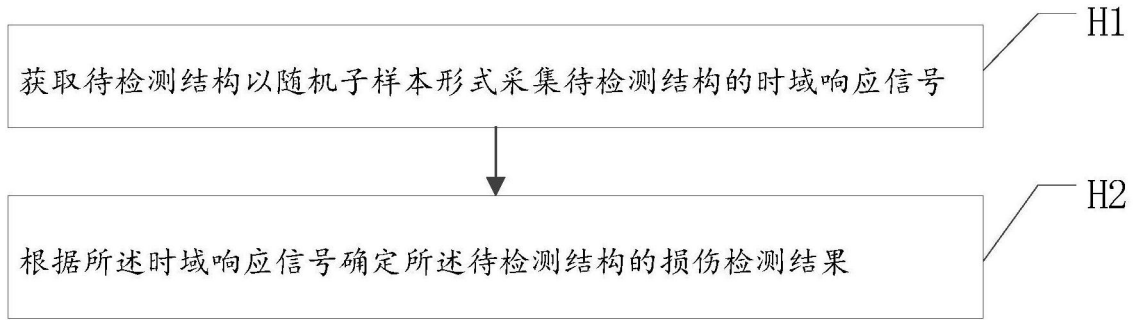


图3

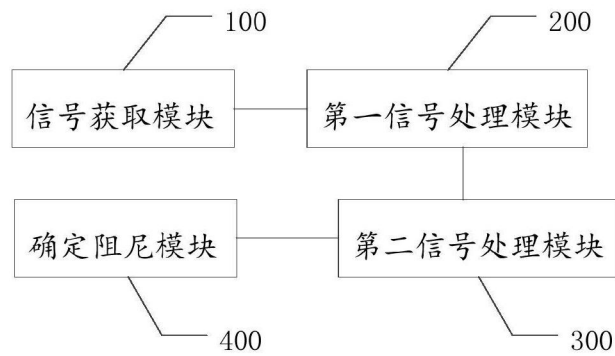


图4

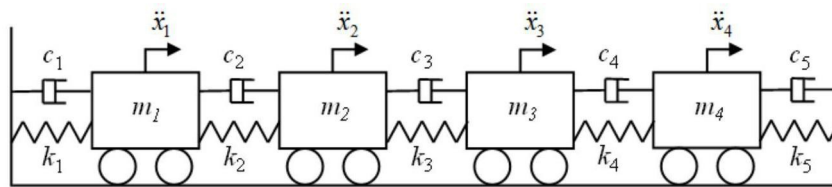


图5

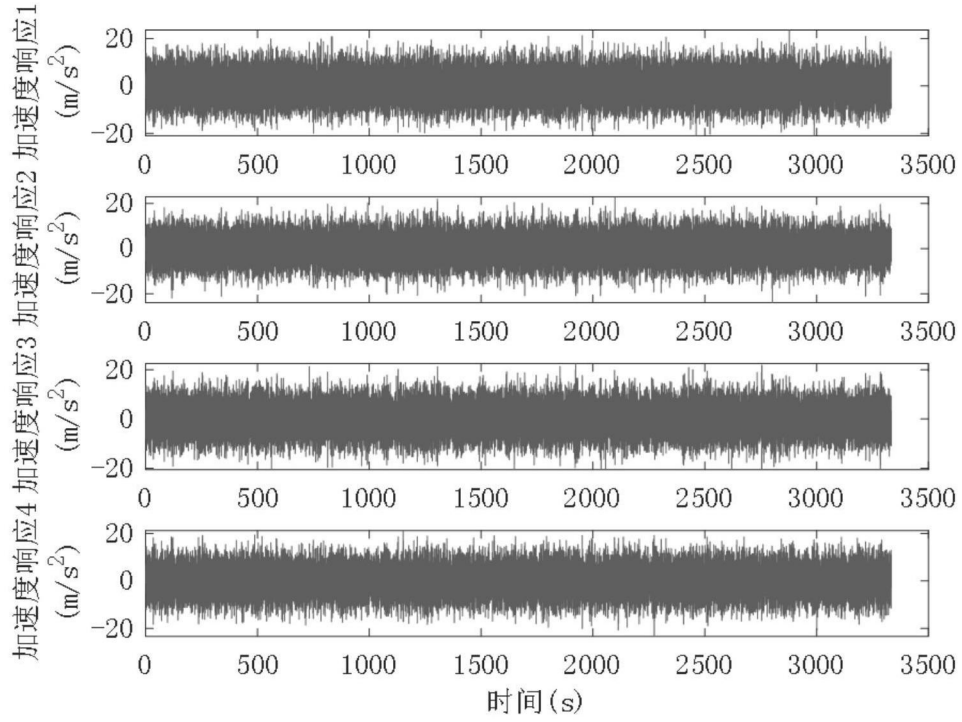


图6

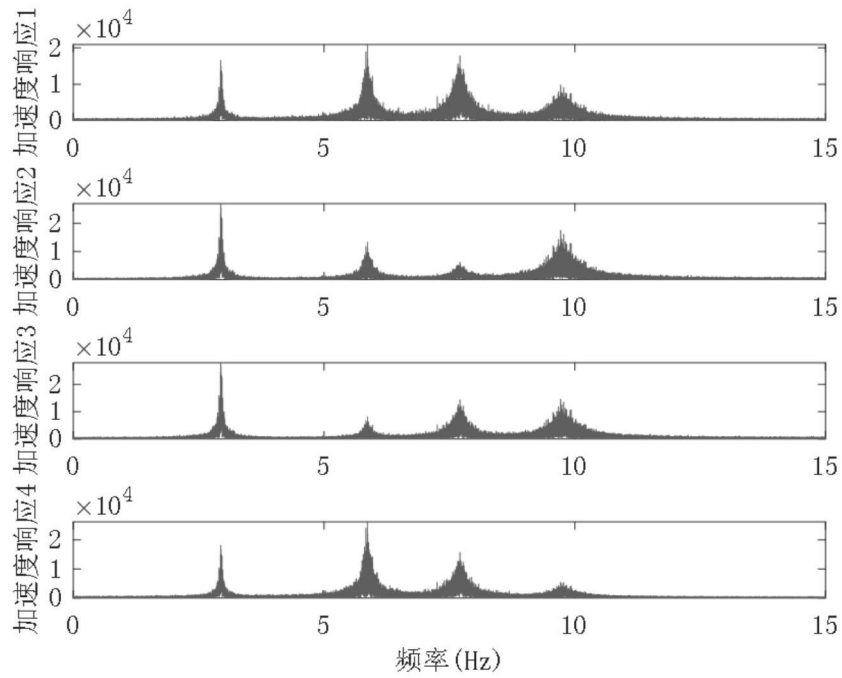


图7