



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108875706 A

(43)申请公布日 2018. 11. 23

(21)申请号 201810788147.X

(22)申请日 2018.07.18

(71)申请人 中国海洋大学

地址 266000 山东省青岛市崂山区松岭路
238号

(72)发明人 刘鹏 刘福顺 高树健 卢洪超
田哲 王许洁 崔高杰 齐聪山
王睿敏 汪沐阳 来庆昊

(74)专利代理机构 青岛中天汇智知识产权代理
有限公司 37241

代理人 王丹丹

(51)Int. Cl.

G06K 9/00(2006.01)

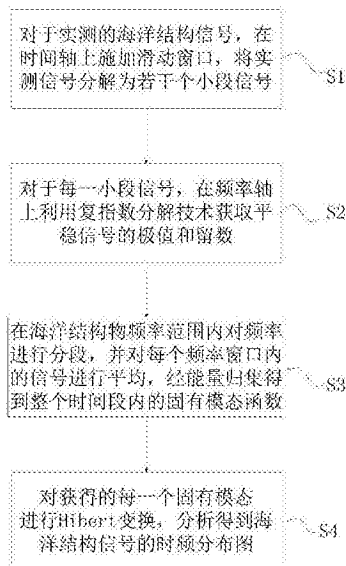
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法

(57)摘要

本发明公开一种基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,在时间轴上施加滑动窗口以考虑信号的非平稳、非线性特征;频率轴上应用复指数分解技术获取平稳信号的极值、留数,通过能量归集技术得到整个时间段内的固有模态函数,进而以Hilbert变换为桥梁,得到时频分布图。本发明既解决了传统复指数分解成分为单一模态的不足,又克服了经验模态分解的模式混叠的问题,显著提升了时频分析精度;在工程上,为包括浮式平台以及浮式风电在内的浮式海洋结构物的时频分析提供了一种新的分析方法,能够为相关结构的设计、检测等工作提供新的技术手段,具有较广的工程应用前景。



1. 基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

A、对于实测的海洋结构信号 $y(t)$, 在时间轴上施加滑动窗口, 滑动步长设置为1, 从而将实测信号 $y(t)$ 分解为若干个小段信号;

B、对于每一小段内的信号, 在频率轴上利用复指数分解技术获取平稳信号的极值和留数;

C、在海洋结构物频率范围内对频率进行分段, 并对每个频率窗口内的信号进行平均, 经能量归集得到整个时间段内的固有模态函数;

D、对获得的每一个固有模态函数进行Hibert变换, 分析得到海洋结构信号的时频分布图。

2. 根据权利要求1所述的基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法, 其特征在于: 所述步骤A中, 在时间轴上施加的滑动窗口的步长设置为1, 则当滑动窗口滑动第 m 次时的小段信号表示为:

$$y_{m,n} = y_{m+n-1} \quad (1)$$

式中, $m=0, 1, 2, \dots, N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0, 1, \dots, L-1$, L 为每小段信号包含的点数。

3. 根据权利要求2所述的基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法, 其特征在于: 所述步骤A还包括以下步骤:

将获得的海洋结构信号中的每小段信号 $y_{m,n}$ 分解为实数或复数的指数形式, 即为复指数序列:

$$y_{m,n} = \sum_{l=1}^{p_m} y_{m,l} z_{m,l}^n \quad (2)$$

式中, p_m 为对应于 $y_{m,n}$ 的级数个数, $z_{m,l} = e^{\lambda_{m,l} n \Delta t}$, 指数 $\lambda_{m,l}$ 为实数或共轭复数, $l=1, 2, 3, \dots$, Δt 为采样时间间隔; 记 $\lambda_{m,l} = -\alpha_{m,l} + j2\pi f_{m,l}$ 为极值, 其中, $\alpha_{m,l}$ 为衰减因子, $\omega_{m,l}$ 为圆频率, j 为虚数单位; 记 $y_{m,l} = A_{m,l} e^{j\theta_{m,l}}$ 为对应的留数, 其中 $A_{m,l}$ 和 $\theta_{m,l}$ 分别代表初始幅度和相位角。

4. 根据权利要求1或3所述的基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法, 其特征在于: 所述步骤C中, 通过以下步骤得到整个时间段内的固有模态函数:

(1) 在海洋结构物频率范围内对频率进行分段, 设频率窗宽度为 Δf , 通过一个矩形窗将整个频率范围分为若干段; 根据步骤B中通过极值、留数分解获得的频率 $f_{m,l}$, 得到相对应的频率窗口;

然后通过对应的留数 $y_{m,l}$ 和极值 $\lambda_{m,l}$ 在频率窗口内重构信号 $\hat{y}_{m,l}$: $\hat{y}_{m,l} = y_{m,l} e^{\lambda_{m,l} n \Delta t}$, 式中, $m=0, 1, 2, \dots, N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0, 1, \dots, L-1$, L 为每小段信号包含的点数, $l=1, 2, 3, \dots$, Δt 为采样间隔;

(2) 获得滑动窗口滑动第 m 次时各频率窗口内的重构信号, 然后滑动窗口依次滑动, 重复上述步骤获得下一个时刻各频率窗口内的重构信号, 滑动窗口滑动完成后, 在每个时刻的每个频率窗口内, 则有 q ($q=0, 1, \dots, Q$) 个重构的成份, 在每个频率窗口内, 对其内的 k 个成份进行加权平均, 即:

$$y_{m,l} = \frac{\sum_{k=1}^N y_{m,l}^2}{Q}$$

当频率窗足够小时,则认为每个频率窗口内的信号只具有一个频率成份,即单频率成份分量;

(3) 将得到的所有单频率成份分量在整个时间段内进行拼接,即能量归集,获得整个时间段内的单频率成份分量 s_r ($r=1,2,\dots,n$),即:

$$s_r = \sum_{m=1}^{N-1} y_{m,l}$$

即为固有模态函数。

5. 根据权利要求4所述的基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,其特征在于:所述步骤D中,通过以下方式得到Hilbert谱:

(1) 对每一个固有模态函数 $s_r(t)$ ($r=1,2,\dots,n$) 进行Hilbert变换:

$$\bar{s}_r(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_r(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (15)$$

将解析信号表示为:

$$z_r(t) = s_r(t) + j\bar{s}_r(t) \quad (16)$$

得到相位的表达式如下:

$$\varphi_r(t) = \arctan \frac{\bar{s}_r(t)}{s_r(t)} \quad (17)$$

从而可以得到瞬时频率:

$$f_r(t) = \frac{d\varphi_r(t)}{dt} \quad (18)$$

(2) 进而得到海洋结构物实测信号的希尔伯特谱:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{r=1}^n a_r(t) e^{j\int \omega_r(t) dt} \quad (19)$$

式中, $a_r(t)$ 为第 r 个固有模态函数的振幅, $\omega_r(t)$ 为第 r 个固有模态函数的频率。

6. 根据权利要求5所述的基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,其特征在于:所述步骤B中,极值和留数分解具体采用以下方式:

(1) 对于等间隔离散信号,将式(2)转换为 p 阶差分方程:

$$\sum_{l=0}^{p_m} a_{m,l} y_{m,n+l} = 0, \quad n = 0, 1, \dots, L - p_m - 1 \quad (3)$$

式中, p_m 为对应于 $y_{m,n}$ 的级数个数, $m=0,1,2,\dots,N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0,1,\dots,L-1$, L 为每小段信号包含的点数, $l=1,2,3,\dots$,系数 $a_{m,l}$ 为实常数;

对应于式(3)的特征多项式为:

$$\sum_{l=0}^{p_m} a_{m,l} z^l = 0 \quad (4)$$

(2) 引入中间变量

$$x_{1m,n} = y_{m,n}, \quad x_{2m,n} = y_{m,n+1}, \quad \dots, \quad x_{p_m m,n} = y_{m,n+p_m-1} \quad (5)$$

将 p 阶矩阵差分方程(3)转变为一阶矩阵差分方程

$$x_{1m,n} = G_m x_{m,n} \quad (6)$$

式中

$$G_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_{m,0} & -a_{m,1} & -a_{m,2} & \dots & -a_{m,p-2} & -a_{m,p-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times p} \quad (7)$$

$$x_{m,n} = [x_{1m,n}, x_{2m,n}, \dots, x_{pm,n}]^T \in \mathbb{R}^{p \times m} \quad (8)$$

其中,矩阵 G_m 的 p_m 个特征根与特征多项式(4)的 p_m 个根相等;

(3) 构建Hankel矩阵计算矩阵 G_m 的特征根,其中,Hankel矩阵为:

$$H_m(k) = \begin{bmatrix} y_{m,k} & y_{m,k+1} & \dots & y_{m,k+\eta-1} \\ y_{m,k+1} & y_{m,k+2} & \dots & y_{m,k+\eta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m,k+\xi-1} & y_{m,k+\xi} & \dots & y_{m,k+\xi+\eta-2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, ξ 和 η 分别为Hankel矩阵的行数和列,利用奇异值分解技术获得系统状态矩阵的一个实现为:

$$A_m = S_{m,1}^{-1/2} U_{m,1}^T H_m(1) V_{m,1} S_{m,1}^{-1/2} \quad (12)$$

对矩阵 A_m 进行特征值分析,其特征根为 $\lambda_{m,i} (i=1,2,\dots,p_m)$,由公式 $\lambda_{m,i} = \ln z_{m,i} / \Delta t$ 即可得到 $\lambda_{m,i}$,进而由 $\lambda_{m,i} = -\hat{a}_{m,i} + i2\pi f_{m,i}$ 得出频率 $f_{m,i}$ 和衰减因子 $\hat{a}_{m,i}$,从而通过最小二乘法求解 $\hat{f}_{m,i}$ 。

基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法。

背景技术

[0002] 目前针对海洋结构的时频分析方法主要分为线性时频分析方法和非线性时频分析方法,通过对信号进行时频分析,可以构造一个合适的时间和频率的分布,既可以表示信号的能量或强度,也可以用以估计信号的特征参量。传统线性时频分析方法包括短时傅里叶变换,小波变换等,是由傅里叶频谱分析转换得到的,但它们均以傅里叶变换为其最终理论依据,因而用它们分析非线性信号容易产生虚假信号和假频等矛盾现象。

[0003] 针对非线性信号的时频分析,目前最重要的方法是希尔伯特黄变换(HHT变换),它赋予了瞬时频率合理的定义、物理意义和求法,这一方法创造性地提出了固有模态函数的概念以及将任意信号分解为固有模态函数的方法——经验模态分解方法,初步建立了以瞬时频率为表征信号交变的基本量,以固有模态函数为基函数的新时频分析方法体系。但是,经验模态分解是一种经验性的分解方法,缺乏严格的数学推理,难以得到固有模态函数的表达式,同时,当信号中各成份频率相近时,极易发生模态混叠的现象。

发明内容

[0004] 本发明提出一种对海洋结构进行时频分析的新方法,即基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,利用基于滑动平均的复指数分解技术得到固有模态函数的极值和留数表达式,从而通过Hilbert变换得到时频图,既解决了传统复指数分解成分为单一模态的不足,又克服了经验模态分解的模态混叠的问题,显著提高了时频分析精度。

[0005] 本发明是采用以下的技术方案实现的:一种基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤A、对于实测的海洋结构信号 $y(t)$,在时间轴上施加滑动窗口,将实测信号 $y(t)$ 分解为若干个小段信号,施加滑动窗口是基于信号的非平稳、非线性特征的考虑,将每小段内信号近似为时不变信号,保留了信号的时变信息;

[0007] 步骤B、对于每一小段内的信号,在频率轴上利用复指数分解技术获取平稳信号的极值和留数;

[0008] 步骤C、在海洋结构物频率范围内对频率进行分段,并对每个频率窗口内的信号进行平均,经能量归集得到整个时间段内的固有模态函数,通过基于滑动平均的复指数分解技术而非经验模态分解方法得到固有模态函数,克服传统希尔伯特黄变换易发生模态混叠的不足,并给予了固有模态函数表达式;

[0009] 步骤D、对获得的每一个固有模态函数进行Hilbert变换,分析得到海洋结构信号的时频分布图,既解决了传统复指数分解成分为单一模态的不足,又克服了经验模态分解的模态混叠的问题,显著提升了时频分析精度。

[0010] 进一步的,所述步骤A中,在时间轴上施加的滑动窗口的步长设置为1,以保证分析

海洋结构物时信号的连续性,则当滑动窗口滑动第 m 次时的小段信号就可以表示为:

$$[0011] \quad y_{m,n} = y_{m+n-1} \quad (1)$$

[0012] 式中, $m=0,1,2,\dots,N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0,1,\dots,L-1$, L 为每小段信号包含的点数。

[0013] 进一步的,所述步骤A还包括以下步骤:

[0014] 将获得的海洋结构信号中的每小段信号 $y_{m,n}$ 分解为实数或复数的指数形式,即为复指数序列:

$$[0015] \quad x_{m,l} = \sum_{l=1}^{p_m} y_{m,n} z_{m,l} \quad (2)$$

[0016] 式中, p_m 为对应于 $y_{m,n}$ 的级数个数, $z_{m,l} = e^{\lambda_{m,l} n \Delta t}$,指数 $\lambda_{m,l}$ 为实数或共轭复数, $l=1,2,3,\dots$, Δt 为采样时间间隔;记 $\lambda_{m,l} = -\alpha_{m,l} + j2\pi f_{m,l}$ 为极值,其中, $\alpha_{m,l}$ 为衰减因子, $\omega_{m,l}$ 为圆频率, j 为虚数单位;记 $y_{m,l} = A_{m,l} e^{j\theta_{m,l}}$ 为对应的留数,其中 $A_{m,l}$ 和 $\theta_{m,l}$ 分别代表初始幅度和相位角,步骤A通过滑动平均,克服传统的极值、留数分解方法只能处理时不变信号的缺陷,通过将每小段内信号近似为时不变信号,保留了信号的时变信息,并且通过将步长设置为1,保证了信号的连续性,从而可以用来处理时变系统,实现对海洋结构物的信号分析。

[0017] 进一步的,所述步骤C中,通过以下步骤得到整个时间段内的固有模态函数:

[0018] (1) 在海洋结构物频率范围内对频率进行分段,设频率窗宽度为 Δf ,通过一个矩形频率窗将整个频率范围分为若干段;同时,为提高精度可以减小频率窗宽度 Δf ,根据步骤B中通过极值、留数分解获得的频率 $f_{m,l}$,得到相对应的频率窗口;

[0019] 并通过对应的留数 $y_{m,l}$ 和极值 $\lambda_{m,l}$ 在频率窗口内重构信号 $\varphi_{m,l}$: $\varphi_{m,l} = y_{m,l} e^{\lambda_{m,l} n \Delta t}$,式中, $m=0,1,2,\dots,N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0,1,\dots,L-1$, L 为每小段信号包含的点数, $l=1,2,3,\dots$, Δt 为采样间隔;

[0020] (2) 获得时间轴上的滑动窗口滑动第 m 次时各频率窗口内的重构信号,然后依次滑动窗口,重复上述步骤即可得到下一个时刻各频率窗口内的重构信号,时间轴上的滑动窗口滑动完成后,在每个时刻的每个频率窗口内,会有 q ($q=0,1,\dots,Q$) 个重构的成份,在每个频率窗口内,对其内的 k 个成份就行加权平均,即:

$$[0021] \quad y_{m,t} = \frac{\sum_{l=1}^q \varphi_{m,l}}{q}$$

[0022] 当频率窗足够小时,则认为每个频率窗口内的信号只具有一个频率成份,即单频率成份分量, $\varphi_{m,l}$ 为每个频率窗口内的 q 个重构成分;

[0023] (3) 将得到的所有单频率成份分量在整个时间段内进行拼接,可以得到整个时间段内的单频率成份分量 s_r ($r=1,2,\dots,n$),即:

$$[0024] \quad s_r = \sum_{m=1}^{N-1} y_{m,t}$$

[0025] 即为固有模态函数;

[0026] 则在得到固有模态函数之后,将信号表示为和的形式,即:

$$[0027] \quad y(t) = \sum_{r=1}^n s_r \quad (14)$$

[0028] 其中,在求解海洋结构物实测信号固有模态函数时,代替了传统的经验模态分解方法,通过对频率分段,并对每个频率窗口内的信号进行平均,来得到传统意义上的固有模态函数,通过一种性的固有模态函数求解思路,克服传统经验模态分解会发生严重模态混叠的问题,从而解决了由于海洋结构物噪声频率相近而产生严重模态混叠现象的问题。

[0029] 进一步的,所述步骤D中,通过以下方式得到Hilbert谱:

[0030] (1)对每一个固有模态函数 $s_r(t)$ ($r=1,2,\dots,n$)进行Hilbert变换:

$$[0031] \quad \bar{s}_r(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_r(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (15)$$

[0032] 将解析信号表示为:

$$[0033] \quad z_r(t) = s_r(t) + j\bar{s}_r(t) \quad (16)$$

[0034] 得到相位的表达式如下:

$$[0035] \quad \varphi_r(t) = \arctan \frac{\bar{s}_r(t)}{s_r(t)} \quad (17)$$

[0036] 从而可以得到瞬时频率:

$$[0037] \quad f_r(t) = \frac{d\varphi_r(t)}{dt} \quad (18)$$

[0038] (2)进而得到海洋结构物实测信号的希尔伯特谱:

$$[0039] \quad H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{r=1}^n a_r(t) e^{j \int \omega_r(t) dt} \quad (19)$$

[0040] 式中, $a_r(t)$ 为第 r 个固有模态函数的振幅, $\omega_r(t)$ 为第 r 个固有模态函数的频率。

[0041] 进一步的,所述步骤B中,极值和留数分解具体采用以下方式:

[0042] (1)对于等间隔离散信号,将式(2)转换为 p 阶差分方程:

$$[0043] \quad \sum_{l=0}^{p_m} a_{m,l} y_{m,n+l} = 0, \quad n = 0, 1, \dots, L - p_m - 1 \quad (3)$$

[0044] 式中, p_m 为对应于 $y_{m,n}$ 的级数个数, $m=0,1,2,\dots,N-1$, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0,1,\dots,L-1$, L 为每小段信号包含的点数, $l=1,2,3,\dots$,系数 $a_{m,l}$ 为实常数;

[0045] 对应于式(3)的特征多项式为:

$$[0046] \quad \sum_{l=0}^{p_m} a_{m,l} z^l = 0 \quad (4)$$

[0047] (2)引入中间变量

$$[0048] \quad x_{1m,n} = y_{m,n}, \quad x_{2m,n} = y_{m,n+1}, \quad \dots, \quad x_{p_m m,n} = y_{m,n+p_m-1} \quad (5)$$

[0049] 将 p 阶矩阵差分方程(3)转变为一阶矩阵差分方程

$$[0050] \quad x_{1m,n} = G_m x_{m,n} \quad (6)$$

[0051] 式中

$$[0052] \quad G_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_{m,0} & -a_{m,1} & -a_{m,2} & \dots & -a_{m,p-2} & -a_{m,p-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p_m \times p_m} \quad (7)$$

$$[0053] \quad x_{m,n} = [x_{1m,n}, x_{2m,n}, \dots, x_{p_m m,n}]^T \in \mathbb{R}^{p_m \times n} \quad (8)$$

[0054] 其中,矩阵 G_m 的 p_m 个特征根与特征多项式(4)的 p_m 个根相等;

[0055] (3) 构建Hankel矩阵计算矩阵 G_m 的特征根,其中,Hankel矩阵为:

$$[0056] \quad H_m(k) = \begin{bmatrix} y_{m,k} & y_{m,k+1} & \dots & y_{m,k+\xi-1} \\ y_{m,k+1} & y_{m,k+2} & \dots & y_{m,k+\eta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m,k+\xi-1} & y_{m,k+\xi} & \dots & y_{m,k+\xi+\eta-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0057] 式中, ξ 和 η 分别为Hankel矩阵的行数和列,利用奇异值分解技术获得系统状态矩阵的一个实现为:

$$[0058] \quad A_m = S_m^{-1/2} U_m^T H_m(1) V_m S_m^{-1/2} \quad (12)$$

[0059] 对矩阵 A_m 进行特征值分析,其特征根为 $z_{m,i} (i = 1, 2, \dots, p_m)$,由公式 $\lambda_{m,i} = \ln z_{m,i} / \Delta t$ 即可得到 $\lambda_{m,i}$,进而由 $\lambda_{m,i} = -\alpha_{m,i} + i2\pi f_{m,i}$ 得出频率 $f_{m,i}$ 和衰减因子 $\alpha_{m,i}$,从而通过最小二乘法求解 $f_{m,i}$,在使用极值、留数方法对每段信号进行分解时,由于条件数大于未知数的个数,将高阶差分方程转化为一阶差分方程,以避免求解时可能出现的病态问题,使得求得的结果更加精确和稳定。

[0060] 与现有技术相比,本发明的优点和积极效果在于:

[0061] 1) 本发明方案通过严格的模型分析得到了传统经验模态分解方法所无法得到的固有模态函数的表达式,并利用Hilbert变换得到了固有模态函数的瞬时频率,并将其变化规律表现在时频图上,提供一种新的海洋结构时频分析的分析方法,为后期的模态参数识别的研究做了重要的技术支持及铺垫;

[0062] 2) 传统的复指数分解技术只能针对时不变信号,本发明通过滑动平均的方法将信号分解为若干小段,并认为每个小段内的信号为时不变信号,再对其利用复指数分解,从而可以用来分析时变信号;同时,由于步长设置为1,保证了信号的连续性,使得该方法能够处理工程实际中所出现的一些非周期信号,实际应用价值高;

[0063] 3) 本发明中固有模态函数不再通过经验模态分解得到,而是通过在频率轴上应用复指数分解技术获取平稳信号的极值、留数,通过能量归集技术得到整个时间段内的固有模态函数,进而可以以Hilbert变换为桥梁,得到时频分布图,避免了模态混叠现象的发生,也为固有模态函数提供了数学依据;同时,也保证了分析方法计算精度高的特点,尤其在应用到大型复杂海上结构时,具有较广阔的工程应用前景。

附图说明

[0064] 图1为本发明实施例中选用的海上风机测试数据及其频谱图;

[0065] 图2为传统希尔伯特黄变换时频分析结果示意图;

[0066] 图3为本发明实施例所述方法得到的时频分析结果示意图;

[0067] 图4为本发明实施例所述方法原理示意图。

具体实施方式

[0068] 为了能够更加清楚地理解本发明的上述目的、特征和优点,下面结合附图及实施例对本发明做进一步说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0069] 本实施例提出一种基于滑动平均与能量归集的海洋结构时频分析方法,如图4所示,本发明的核实思想是通过分析信号的固有模态函数表达式进而得到其时频图;对于固有模态函数,通过基于滑动平均的复指数分解技术而非经验模态分解方法得到,克服了传统希尔伯特黄变换易发生模态混叠的不足,并给予了固有模态函数数学表达式;最后以Hilbert变换为桥梁,求解得到海洋结构信号的时频分布图,具体如下:

[0070] 步骤S1、对于实测的海洋结构信号 $y(t)$,在时间轴上加窗并进行滑动,将信号 $y(t)$ 分解为若干个小段:

[0071] 采样间隔表示为 Δt 、 $t_k = k \Delta t$,离散的信号 $y_k (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 通过矩形窗口分割为小段信号;为保证使用分析海洋结构物时信号的连续性,滑动窗口步长设置为1。这样,当窗口滑动第 $m (m=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 次时的小段信号就可以表示为:

$$[0072] \quad y_{m,n} = y_{m+n-1} \quad (1)$$

[0073] 式中, n 表示第 m 段信号的第 n 个点, $n=0, 1, \dots, L-1$, L 为每小段信号包含的点数。

[0074] 从而,通过式(1),就可以将实测的海洋结构信号中的每一小段信号 $y_{m,n}$ 分解为实数或复数的指数形式,即为复指数序列:

$$[0075] \quad y_{m,n} = \sum_{p=1}^{p_m} y_{m,j} z_{m,j}^n \quad (2)$$

[0076] 式中, p_m 为对应于 $y_{m,n}$ 的级数个数, $z_{m,j} = e^{\lambda_{m,j} n}$;由于 $y_{m,n}$ 常为实信号,指数 $\lambda_{m,1}$ 可以是实数,也可以是共轭复数;记 $\lambda_{m,1} = -\alpha_{m,1} + j2\pi f_{m,1}$,其中 $\alpha_{m,1}$ 为衰减因子, $\omega_{m,1}$ 为圆频率, j 为虚数单位;记 $y_{m,j} = A_{m,j} e^{j\theta_{m,j}}$,其中 $A_{m,1}$ 和 $\theta_{m,1}$ 分别代表初始幅度和相位角。

[0077] 通过加窗处理,克服了传统的极值、留数分解方法只能处理时不变信号的缺陷,该方法通过滑动平均,将每段内信号近似为时不变信号,保留了信号的时变信息,通过将步长设置为1,保证了信号的连续性,从而可以用其来处理时变系统,实现了对海洋结构物的信号分析。

[0078] 步骤S2、在每一小段的海洋结构物实测信号内,对其进行极值、留数分解:

[0079] (1)、对于等间隔离散信号,将式(2)转换为 p 阶差分方程:

$$[0080] \quad \sum_{i=0}^{p_m} a_{m,i} y_{m,n+i} = 0, \quad n = 0, 1, \dots, L - p_m - 1 \quad (3)$$

[0081] 式中,系数 a_1 为实常数,不失一般性可令 $a_{p_m} = 1$ 。

[0082] 对应于式(3)的特征多项式为:

$$[0083] \quad \sum_{i=0}^{p_m} a_{m,i} z^i = 0 \quad (4)$$

[0084] (2) 引入

$$[0085] \quad x_{1m,n} = y_{m,n}, \quad x_{2m,n} = y_{m,n+1}, \quad \dots, \quad x_{p_m m,n} = y_{m,n+p_m-1} \quad (5)$$

[0086] 可以得到式(3)具有相同的特征根的一阶矩阵微分方程

$$[0087] \quad x_{1m,n} = G_{mxm,n} \quad (6)$$

[0088] 式中

[0089]
$$G_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_{m,p} & -a_{m,p-1} & -a_{m,p-2} & \dots & -a_{m,p-2} & -a_{m,p-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times p} \quad (7)$$

[0090]
$$x_{m,0} = [x_{1m,0}, x_{2m,0}, \dots, x_{p_m,0}]^T \in \mathbb{R}^{p_m} \quad (8)$$

[0091] 理论上,矩阵 G_m 的 p_m 个特征根与特征多项式(4)的 p_m 个根相等。

[0092] (3) 通过Hankel矩阵分析矩阵 G_m 的特征根:

[0093]
$$H_m(k) = \begin{bmatrix} y_{m,k} & y_{m,k+1} & \dots & y_{m,k+\eta-1} \\ y_{m,k+1} & y_{m,k+2} & \dots & y_{m,k+\eta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m,k+\xi-1} & y_{m,k+\xi} & \dots & y_{m,k+\xi+\eta-2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0094] 式中, ξ 和 η 分别为Hankel矩阵的行数和列数。

[0095] 在式(9)中,令 $k=0$ 并对 $H_m(0)$ 进行奇异值分解,有

[0096]
$$H_m(0) = [U_{m,1} \quad U_{m,2}] \begin{bmatrix} S_{m,1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m,1}^T \\ V_{m,2}^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0097] 理论上讲,式(10)中非零奇异值的个数等于状态空间模型的模型阶数 p_m ,即 $U_{m,1} \in \mathbb{R}^{p_m \times p_m}$,

[0098] $S_{m,1} \in \mathbb{R}^{p_m \times p_m}, V_{m,1} \in \mathbb{R}^{p_m \times p_m}$ 。

[0099] 令 $k=1$ 可得 $H_m(1)$

[0100]
$$H_m(1) = U_{m,1} S_{m,1}^{1/2} A_m S_{m,1}^{1/2} V_{m,1}^T \quad (11)$$

[0101] 得系统状态矩阵的一个实现为

[0102]
$$A_m = S_{m,1}^{-1/2} U_{m,1}^T H_m(1) V_{m,1} S_{m,1}^{-1/2} \quad (12)$$

[0103] 矩阵 A_m 的特征根为 $\lambda_{m,i} (i=1,2,\dots,p_m)$,由公式 $\lambda_{m,i} = \ln z_{m,i} / \Delta t$ 可计算复指数序列中的复指数 $\lambda_{m,i}$,进而由 $\lambda_{m,i} = -\theta_{m,i} + j2\pi f_{m,i}$ 得出频率 $f_{m,i}$ 和衰减因子 $\theta_{m,i}$ 。

[0104] (4) 已知 $\lambda_{m,i}$,可得到如下矩阵形式:

[0105]
$$\begin{bmatrix} \lambda_{m,1}^0 & \lambda_{m,2}^0 & \dots & \lambda_{m,p_m}^0 \\ \lambda_{m,1}^1 & \lambda_{m,2}^1 & \dots & \lambda_{m,p_m}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{m,1}^{K-1} & \lambda_{m,2}^{K-1} & \dots & \lambda_{m,p_m}^{K-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{f}_{m,1} \\ \hat{f}_{m,2} \\ \vdots \\ \hat{f}_{m,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{m,0} \\ y_{m,1} \\ \vdots \\ y_{m,K-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

[0106] 并通过最小二乘法求解 $\hat{f}_{m,i}$ 。

[0107] 该步骤在使用极值、留数方法对每段信号进行分解时,由于条件数大于未知数的个数,将高阶差分方程转化为一阶差分方程,可以避免求解时可能出现的病态问题,使求得的结果更加精确和稳定。

[0108] 步骤S3、分析得到整个时间段内的固有模态函数:

[0109] (1) 在海洋结构频率范围内对频率进行分段,设频率窗宽度为 Δf ,通过一个矩形

窗口将整个频率范围分为若干段,同时,为提高精度,减小频率窗宽度 Δf 。通过求得的频率 $f_{m,i}$,找到相对应的频率窗口,并通过对应的 $f_{m,i}$ 和 $\lambda_{m,i}$ 在频率窗口内重构信号 $y_{m,i}$:

$$[0110] \quad y_{m,i} = f_{m,i} e^{j\lambda_{m,i} n \Delta t}$$

[0111] (2) 则得到窗口滑动第 m 次时,各频率窗口内的重构信号,然后滑动窗口,滑动步长为 1。重复上述步骤即可得到下一个时刻各频率窗口内的重构信号;窗口滑动完成后,在每个时刻的每个频率窗口内,会有 q ($q=0,1,\dots,Q$) 个重构的成份,在每个频率窗口内,对其内的 k 个成份就行加权平均即

$$[0112] \quad y_{m,i} = \frac{\sum_{q=1}^Q y_{m,i}^q}{Q}$$

[0113] 当频率窗足够小时,则认为每个频率窗口内的信号只具有一个频率成份,即单频率成份分量。

[0114] (3) 将得到的所有单频率成份分量在整个时间段内进行拼接,获得整个时间段内的单频率成份分量 s_r ($r=1,2,\dots,n$),即

$$[0115] \quad s_r = \sum_{i=1}^{N-1} y_{m,i}$$

[0116] 等价于经验模态分解中的固有模态函数,得到固有模态函数之后,我们可以将信号表示成和的形式

$$[0117] \quad y(t) = \sum_{r=1}^n s_r \quad (14)$$

[0118] 在求解海洋结构物实测信号固有模态函数时,代替了传统的经验模态分解方法,本方法有着严格的数学推导,通过对频率分段,并对每个频率窗口内的信号进行平均,来得到传统意义上的固有模态函数,因此本方法相当于提供了一种新的固有模态函数求解的思路;同时,本方法也克服了传统经验模态分解会发生严重模态混叠的问题,从而解决了由于海洋结构物噪声频率相近而产生严重模态混叠现象的问题。

[0119] 步骤 S4、对每一个固有模态函数进行 Hilbert 变换,求得瞬时频率,并表示到 Hilbert 谱中:

[0120] (1) 对每一个固有模态函数 $s_r(t)$ ($r=1,2,\dots,n$) 进行 Hilbert 变换

$$[0121] \quad \tilde{s}_r(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_r(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (15)$$

[0122] 将解析信号表示为如下形式

$$[0123] \quad z_r(t) = s_r(t) + j\tilde{s}_r(t) \quad (16)$$

[0124] 得到相位的表达式如下

$$[0125] \quad \varphi_r(t) = \arctan \frac{\tilde{s}_r(t)}{s_r(t)} \quad (17)$$

[0126] 从而可以得到瞬时频率

$$[0127] \quad f_r(t) = \frac{d\varphi_r(t)}{dt} \quad (18)$$

[0128] (2) 因此可以得到海洋结构物实测信号的希尔伯特谱

$$[0129] \quad H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^N a_n(t) e^{j(\omega t + \phi_n(t))} \quad (19)$$

[0130] 从频谱中,我们可以得到海洋结构物实测信号的时频分布,它提供了频域和时域的联合信息,并且清楚的描述了频率变化与时间的关系。

[0131] 下面以位于江苏省的某海上实测风力发电机数据为例对该方法的有效性进行分析,将三向加速度传感器间隔安装在测试风机的基础上,海上风点机组的基础采用单桩结构形式。设定采样频率为200Hz,记录相应的加速度响应60分钟。

[0132] 本实施例以最下部的传感器得到的y方向的数据进行分析,图1分别给出了选取的信号的时域图和频域图,在图中我们可以看到该风机的基频为0.3Hz,二阶频率为1.7Hz,三阶频率为2.6Hz。图2为传统的希尔伯特黄变换分析得到的时频分析结果,从图中我们可以看到基频在0.3Hz附近。但是由于大量噪声的干扰,发生了严重的模态混叠现象,只能看出在1.5Hz和2Hz间有较大的能量成份存在,同时也无法识别处2.6Hz处的频率成份。图3即为本发明方法所得到的时频分析结果,从图3中可以看出其结果与频域结果吻合良好,同时,也可以清晰的看到频率随时间的变化情况,计算精度较高,同时也说明了本发明方法的正确性及有效性。

[0133] 本发明方案创造性的提出一种新的海洋结构时频分析方法,通过分析信号的固有模态函数表达式进而得到其时频图;考虑到采集信号的非平稳、非线性等特征,在时间轴上施加滑动窗口,频率轴上应用复指数分解技术获取平稳信号的极值、留数,通过能量归集技术得到整个时间段内的固有模态函数,进而以Hilbert变换为桥梁,得到时频分布图;既解决了传统复指数分解成分为单一模态的不足,又克服了经验模态分解的模态混叠的问题,显著提升了时频分析精度,在工程上,为包括浮式平台以及浮式风电在内的浮式海洋结构物的时频分析提供了一种新的分析方法,能够为相关结构的设计、检测等工作提供新的技术支持,具有较广的工程应用前景。

[0134] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非是对本发明作其它形式的限制,任何熟悉本专业的技术人员可能利用上述揭示的技术内容加以变更或改型为等同变化的等效实施例应用于其它领域,但是凡是未脱离本发明技术方案内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与改型,仍属于本发明技术方案的保护范围。

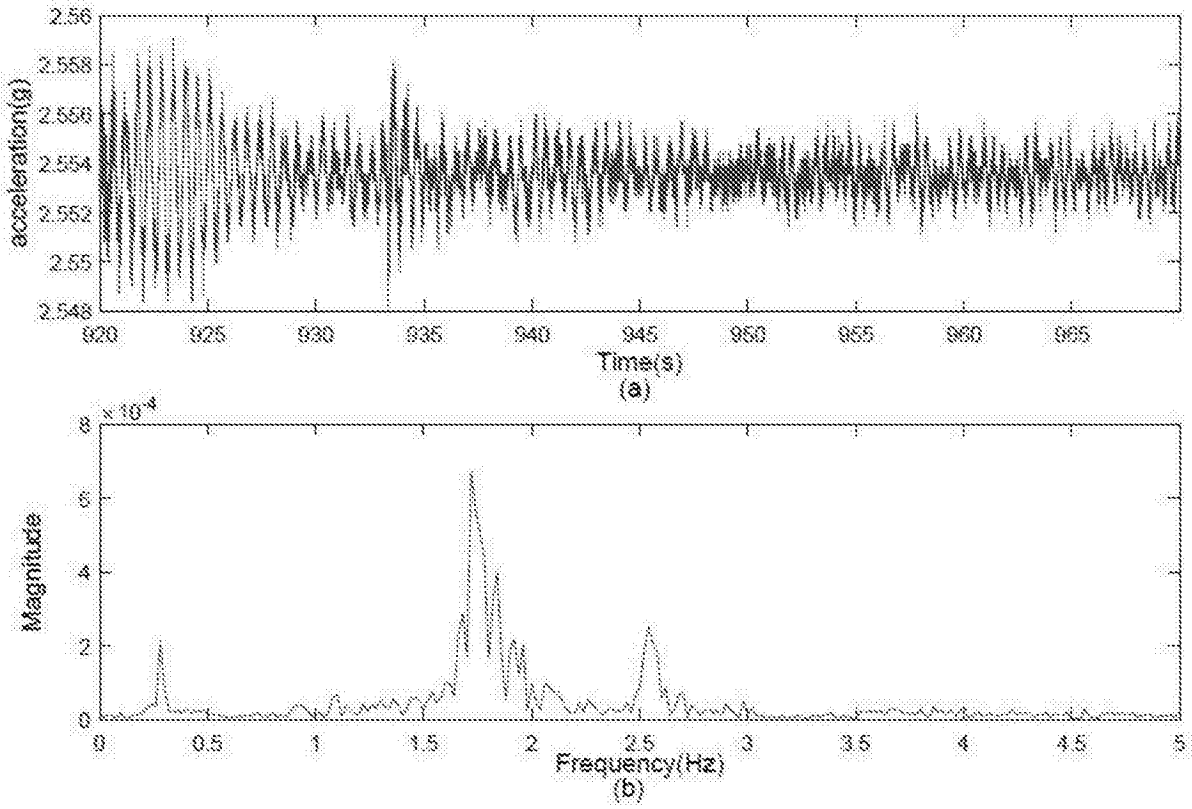


图1

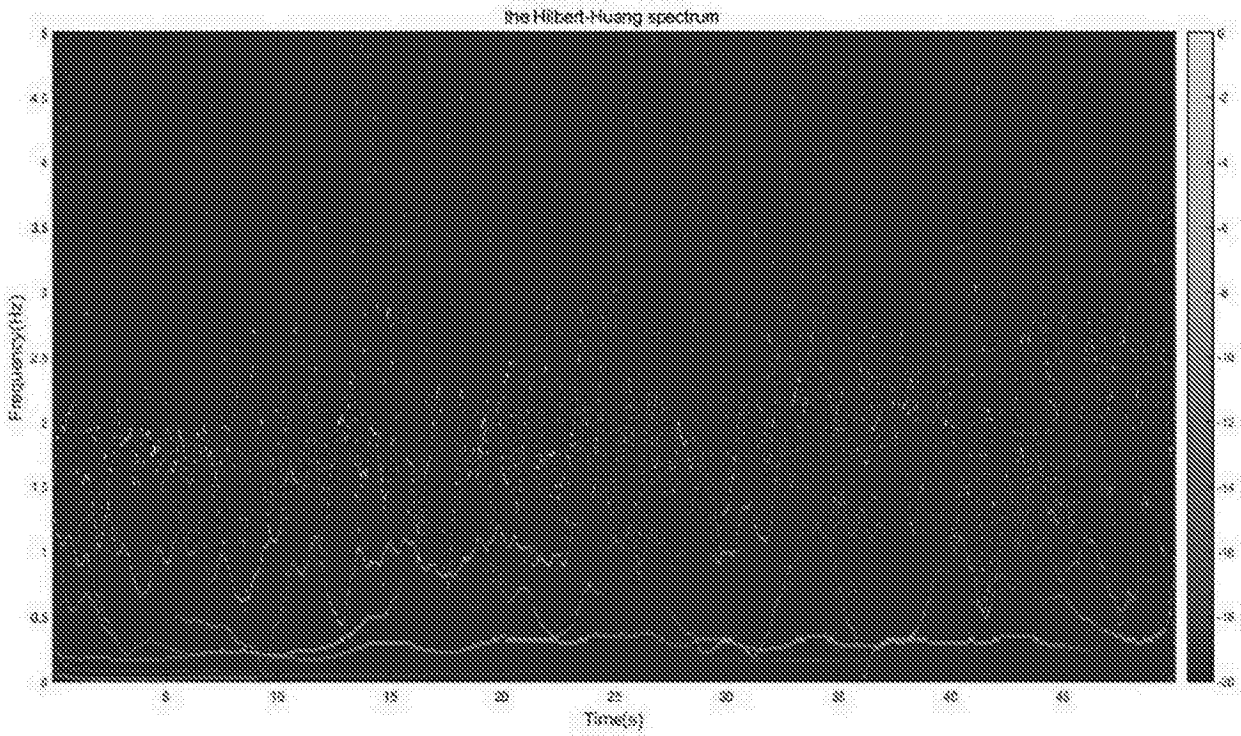


图2

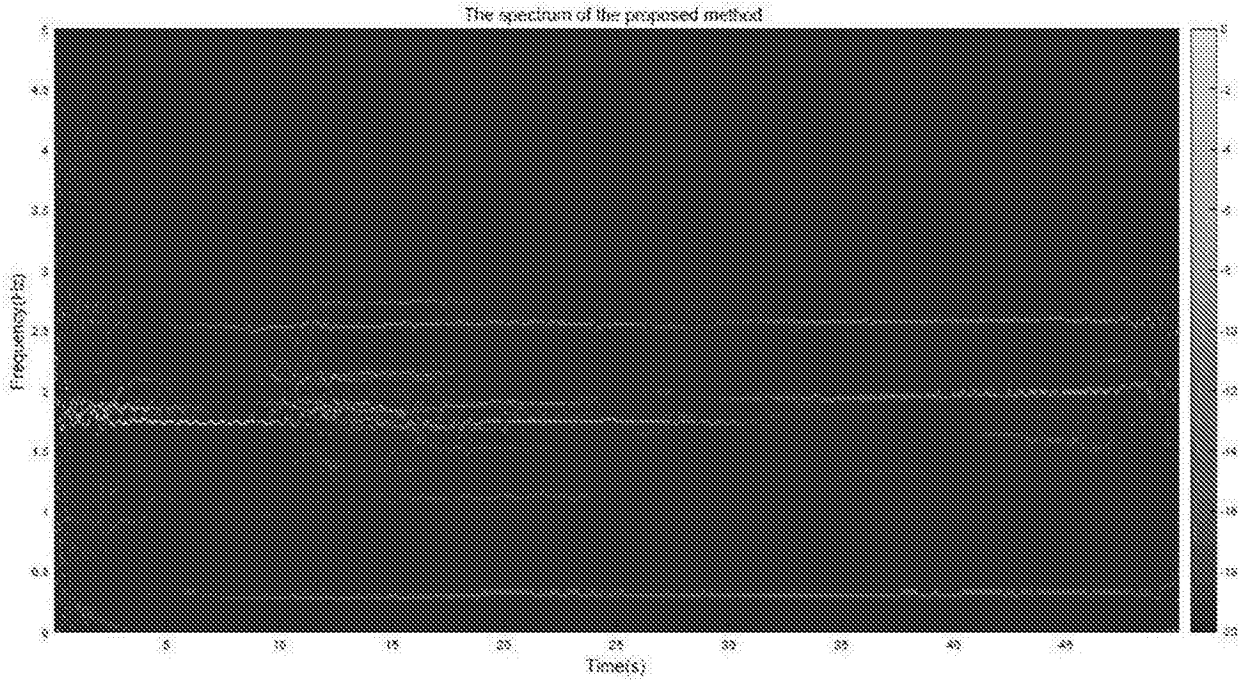


图3

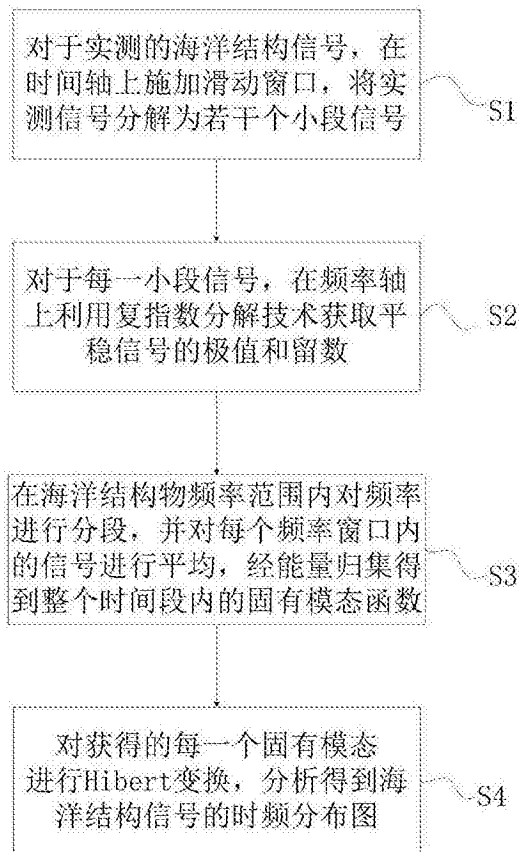


图4