



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108801568 A

(43)申请公布日 2018. 11. 13

(21)申请号 201810395712.6

(22)申请日 2018.04.27

(71)申请人 北京建筑大学

地址 100044 北京市西城区展览馆路1号

(72)发明人 刘祥磊 李斯楠 马静

(74)专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司

11002

代理人 王莹 吴欢燕

(51)Int. Cl.

G01M 5/00(2006.01)

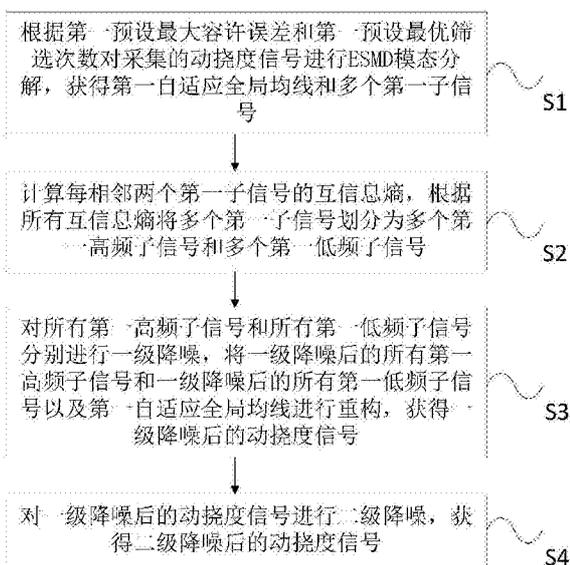
权利要求书2页 说明书12页 附图3页

(54)发明名称

一种桥梁动挠度降噪方法及系统

(57)摘要

本发明提供一种桥梁动挠度降噪方法及系统,其中方法包括:根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线 and 多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。该方法及系统通过有效降噪提高了动挠度测量结果的准确性。



1. 一种桥梁动挠度降噪方法,其特征在于,包括:

S1,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;

S2,计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;

S3,对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有所述第一高频子信号和一级降噪后的所有所述第一低频子信号以及所述第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;

S4,对所述一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,步骤S3中所述对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪进一步包括:

采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有所述第一高频子信号进行一级降噪;

采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有所述第一低频子信号进行一级降噪。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤S4进一步包括:

根据第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数对所述一级降噪后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第二自适应全局均线和多个第二子信号;

计算每相邻两个所述第二子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第二子信号划分为多个第二高频子信号和多个第二低频子信号;

采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有所述第二高频子信号进行二级降噪,采用min-max规则、软阈值和适中的分解尺度对所有所述第二低频子信号进行二级降噪;

将二级降噪后的所有所述第二高频子信号和二级降噪后的所有所述第二低频子信号以及所述第二自适应全局均线进行重构,获得二级降噪后的动挠度信号。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,步骤S2中所述计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵进一步包括:

计算每个所述第一子信号的能量熵;

根据每个所述第一子信号的能量熵计算每个所述第一子信号的固有能量熵;

根据每相邻两个所述第一子信号的固有能量熵计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤S1之前还包括:

采用波形特征匹配方法对所述采集的动挠度信号进行延拓;

相应地,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对延拓后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤S1之前还包括:

计算所述采集的动挠度信号与所述采集的动挠度信号均值的第一标准差;

根据所述第一标准差确定所述第一预设最大容许误差。

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤S1之前还包括:

预先设置多个筛选次数,根据每个所述筛选次数对所述采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得每个筛选次数对应的自适应全局均线;

计算所述采集的动挠度信号与每个所述自适应全局均线的第二标准差,根据所有所述

第二标准差确定最小第二标准差；

将所述最小第二标准差对应的筛选次数确定为所述第一预设最优筛选次数。

8. 一种桥梁动挠度降噪系统,其特征在于,包括:

信号分解模块,用于根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线 and 多个第一子信号;

信号划分模块,用于计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;

一级降噪模块,用于对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有所述第一高频子信号和一级降噪后的所有所述第一低频子信号以及所述第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;

二级降噪模块,用于对所述一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

9. 一种桥梁动挠度降噪方法的设备,其特征在于,包括:

至少一个处理器;以及

与所述处理器通信连接的至少一个存储器,其中:

所述存储器存储有可被所述处理器执行的程序指令,所述处理器调用所述程序指令能够执行如权利要求1至7任一所述的方法。

10. 一种非暂态计算机可读存储介质,其特征在于,所述非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,所述计算机指令使所述计算机执行如权利要求1至7任一所述的方法。

## 一种桥梁动挠度降噪方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及桥梁检测技术领域,更具体地,涉及一种桥梁动挠度降噪方法及系统。

### 背景技术

[0002] 随着经济的快速发展,我国铁路运营里程已达12.4万公里(高铁的运营里程为2.2万公里),其中桥梁占线路比例平均约为54%。铁路桥梁运营期间,由于受到环境恶化,气候灾变和复杂交通等因素的影响,铁路桥梁的运营安全风险不可避免的会增加。为保障铁路桥梁在运营期间的安全级别,铁路运营状态检测已成为一个亟需解决的问题,其中,火车经过铁路桥梁的动挠度是铁路运营状态的一个主要指标。

[0003] 目前,铁路桥梁动挠度测量包括接触式测量和非接触式测量,其中接触式测量主要采用的传感器是压电或压阻式加速度计,将加速度计固定在监测的铁路桥梁的关键位置;非接触式包括激光测量、全球定位系统和视觉分析系统和地面微波干涉测量等测量方式。

[0004] 然而,无论是接触式测量或非接触式测量,在测量铁路桥梁动挠度的过程中,由于受到环境因素、地面震动以及测量设备本身测量精度等影响,不可避免地会产生噪声信息,导致降低了铁路桥梁动挠度测量的精度。

[0005] 有鉴于此,亟需提供一种桥梁动挠度降噪方法及系统。

### 发明内容

[0006] 本发明为了克服现有技术中在桥梁动挠度测量过程中由于受到环境因素、地面震动以及测量设备本身测量精度等影响所产生的噪声信息,导致铁路桥梁动挠度测量的精度不高的问题,提供一种桥梁动挠度降噪方法及系统。

[0007] 一方面,本发明提供一种桥梁动挠度降噪方法,包括:

[0008] S1,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线 and 多个第一子信号;

[0009] S2,计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;

[0010] S3,对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有所述第一高频子信号和一级降噪后的所有所述第一低频子信号以及所述第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;

[0011] S4,对所述一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0012] 优选地,步骤S3中所述对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪进一步包括:

[0013] 采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有所述第一高频子信号进行一级降噪;

- [0014] 采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有所述第一低频子信号进行一级降噪。
- [0015] 优选地,所述步骤S4进一步包括:
- [0016] 根据第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数对所述一级降噪后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第二自适应全局均线和多个第二子信号;
- [0017] 计算每相邻两个所述第二子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第二子信号划分为多个第二高频子信号和多个第二低频子信号;
- [0018] 采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有所述第二高频子信号进行二级降噪,采用min-max规则、软阈值和适中的分解尺度对所有所述第二低频子信号进行二级降噪;
- [0019] 将二级降噪后的所有所述第二高频子信号和二级降噪后的所有所述第二低频子信号以及所述第二自适应全局均线进行重构,获得二级降噪后的动挠度信号。
- [0020] 优选地,步骤S2中所述计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵进一步包括:
- [0021] 计算每个所述第一子信号的能量熵;
- [0022] 根据每个所述第一子信号的能量熵计算每个所述第一子信号的固有能量熵;
- [0023] 根据每相邻两个所述第一子信号的固有能量熵计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵。
- [0024] 优选地,所述步骤S1之前还包括:
- [0025] 采用波形特征匹配方法对所述采集的动挠度信号进行延拓;
- [0026] 相应地,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对延拓后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号。
- [0027] 优选地,所述步骤S1之前还包括:
- [0028] 计算所述采集的动挠度信号与所述采集的动挠度信号均值的第一标准差;
- [0029] 根据所述第一标准差确定所述第一预设最大容许误差。
- [0030] 优选地,所述步骤S1之前还包括:
- [0031] 预先设置多个筛选次数,根据每个所述筛选次数对所述采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得每个筛选次数对应的自适应全局均线;
- [0032] 计算所述采集的动挠度信号与每个所述自适应全局均线的第二标准差,根据所有所述第二标准差确定最小第二标准差;
- [0033] 将所述最小第二标准差对应的筛选次数确定为所述第一预设最优筛选次数。
- [0034] 一方面,本发明提供一种桥梁动挠度降噪系统,包括:
- [0035] 信号分解模块,用于根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;
- [0036] 信号划分模块,用于计算每相邻两个所述第一子信号的互信息熵,根据所有所述互信息熵将所述多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;
- [0037] 一级降噪模块,用于对所有所述第一高频子信号和所有所述第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有所述第一高频子信号和一级降噪后的所有所述第一低频子信号以及所述第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;
- [0038] 二级降噪模块,用于对所述一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降

噪后的动挠度信号。

[0039] 一方面,本发明提供一种桥梁动挠度降噪方法的设备,包括:

[0040] 至少一个处理器;以及

[0041] 与所述处理器通信连接的至少一个存储器,其中:

[0042] 所述存储器存储有可被所述处理器执行的程序指令,所述处理器调用所述程序指令能够执行上述任一所述的方法。

[0043] 一方面,本发明提供一种非暂态计算机可读存储介质,所述非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,所述计算机指令使所述计算机执行上述任一所述的方法。

[0044] 本发明提供了一种桥梁动挠度降噪方法及系统,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线 and 多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。该方法及系统采用ESMD模态分解将桥梁动挠度信号分解为多个子信号,并采用互信息熵法区分多个子信号中的高频信号和低频信号,最终采用不同的降噪方法对高频信号和低频信号分别进行一级降噪,消除大部分的高频噪声,再对一级降噪后的动挠度信息进行二级降噪,进一步消除低频噪声和剩余少量的高频噪声,能够有效消除桥梁动挠度检测过程中由于受到环境因素、地面震动和测量设备本身测量精度等影响所产生的噪声信息,有效提高了动挠度测量结果的准确性。

## 附图说明

[0045] 图1为本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪方法的整体流程示意图;

[0046] 图2为本发明实施例的动挠度信号二级降噪的方法流程示意图;

[0047] 图3为根据本发明实施例的相邻两个第一子信号的互信息熵计算方法的流程示意图;

[0048] 图4为本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪系统的整体结构示意图;

[0049] 图5为本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪方法的设备的结构框架示意图。

## 具体实施方式

[0050] 下面结合附图和实施例,对本发明的具体实施方式作进一步详细描述。以下实施例用于说明本发明,但不用来限制本发明的范围。

[0051] 图1为本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪方法的整体流程示意图,如图1所示,本发明提供一种桥梁动挠度降噪方法,包括:

[0052] S1,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;

[0053] 具体地,针对桥梁动挠度检测过程中采集的动挠度信号,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,其中第一预设最大

容许误差和第一预设最优筛选次数是预先设定的,具体过程如下:

[0054] 针对采集的动挠度信号 $s(t)$ ,提取 $s(t)$ 中极大值和极小值所组成的极值序列 $N_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),计算 $N_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )中相邻极值点(包括极大值点和极小值点)的中点序列 $M_i$  ( $i=1,2,\dots,n-1$ ),采用3次B样条曲线插值拟合相邻极值点的中点,根据拟合数据的残差标准差确定中点曲线插值模型,并根据曲线插值参加计算的中点个数,建立加权中点曲线的计算模型,获取中点序列 $M_i$  ( $i=1,2,\dots,n-1$ )的拟合曲线 $\bar{L}$ ,即均值曲线 $\bar{L}$ ;

[0055] 将上述获得均值曲线 $\bar{L}$ 的方法步骤作为一次筛选,在此基础上,计算采集的动挠度信号与均值曲线的差值 $s(t)-\bar{L}$ ,针对 $s(t)-\bar{L}$ 重复上述步骤,获得新的均值曲线 $\bar{L}$ ,直至 $\bar{L}$ 的标准差不大于第一预设最大容许误差或筛选次数达到了第一预设最优筛选次数,此时分解出一个第一子信号 $IMF_1$ ;

[0056] 在上述基础上,针对 $s(t)-IMF_1$ 重复上述步骤,依次获得 $IMF_2$ 、 $IMF_3$ ... $IMF_i$ ,即获得多个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),直至最后剩余模态函数剩一定数量的极值点,一般情况最后剩余模态函数中剩余的极值点的个数为十个以内,可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。采用二乘法优化最后剩余模态函数,即可获得第一自适应全局均线 $R$ 。

[0057] 通过上述步骤,即可将采集的动挠度信号分解为第一自适应全局均线 $R$ 和多个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )。

[0058] 需要说明的是,上述采集的动挠度信号包括利用接触式测量方法和非接触式测量方法采集的动挠度信号,即动挠度信号的采集方式可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0059] S2,计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;

[0060] 具体地,针对上述获得的多个第一子信号,计算每相邻两个第一子信号的互信息熵。互信息熵法反映随机变量相互包含的信息量或相互间的统计依赖性,两个随机变量之间越关联,互信息熵越大;反之,则互信息熵越小。

[0061] 基于上述原理,根据所有互信息熵获得的互信息熵的变化规律,即互信息熵从大到小、再到大的变化过程,该变化过程中必将对应出现一个转折点,该转折点的互信息熵最小,即此时相邻两个第一子信号相关性最小,因此可确定该相邻两个第一子信号中包括高频信号和低频信号,由此,即可将多个第一子信号中的高频信号和低频信号进行区分,并最终可将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号。

[0062] S3,对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;

[0063] 具体地,针对上述获得的多个第一高频子信号和多个第一低频子信号,对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,消除所有第一高频子信号和所有第一低频子信号中的大部分高频噪声。在一级降噪过程中,可以采用不同的降噪方法对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号进行降噪,即采用不同的降噪方法对高频信号和低频信号进行降噪,获得一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号。其中采用的降噪方法可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。最终,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及上述获得的第

一自适应全局均线进行重构,即对动挠度信号进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号。

[0064] S4,对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0065] 具体地,一级降噪后的动挠度信号中大部分高频噪声已经消除,但还存在较多的低频噪声未被消除,同时ESMD模态分解过程存在模态混叠效应的影响,故而一级降噪后的动挠度信号仍存在着少量的高频噪声和较多的低频噪声。有鉴于此,针对一级降噪后的动挠度信号,可以采用预设的降噪方法对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,其中可以通过上述步骤S1-S3中的方法步骤对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,也可以采用其他降噪方法对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪。二级降噪所采用的降噪方法可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0066] 本发明提供了一种桥梁动挠度降噪方法,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。该方法采用ESMD模态分解将桥梁动挠度信号分解为多个子信号,并采用互信息熵法区分多个子信号中的高频信号和低频信号,最终采用不同的降噪方法对高频信号和低频信号分别进行一级降噪,消除大部分的高频噪声,再对一级降噪后的动挠度信息进行二级降噪,进一步消除低频噪声和剩余少量的高频噪声,能够有效消除桥梁动挠度检测过程中由于受到环境因素、地面震动和测量设备本身测量精度等影响所产生的噪声信息,有效提高了动挠度测量结果的准确性。

[0067] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,步骤S3中对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪进一步包括:采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有所述第一高频子信号进行一级降噪;采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有所述第一低频子信号进行一级降噪。

[0068] 具体地,本实施例中,针对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号,采用小波阈值去噪法对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号进行一级降噪。

[0069] 在小波阈值去噪法中,阈值判定准则的选取是非常关键的问题。如果阈值选取过大,则会使图像严重失去细节信息,图像变得模糊;如果阈值选取过小,则图像中还包含大量噪声,不能达到去噪的效果。目前常用的阈值判定准则包括stein无偏似然估计阈值(rigrsure准则)、固定阈值(sqtwolog准则)、启发式估计阈值(heursure规则)和最小最大估计阈值(min-max规则)。利用阈值判定准则选取阈值函数,传统的阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数两种。此外,分解尺度是影响信号去噪效果的一个重要因素。分解尺度取得越大,则噪声和信号表现的不同特性越明显,越有利于二者的分离。但另一方面,分解尺度越大,重构到的信号失真也会越大,在一定程度上又会影响最终去噪的效果。因此合理的确定分解尺度很关键。

[0070] 基于上述原理,本实施例中,为了消除第一高频子信号和第一低频子信号中的大部分高频噪声,采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有第一高频子信号进行一级

降噪;同时采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有第一低频子信号进行一级降噪。最终,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号。在其他实施例中,也可以采用其他降噪方法对第一高频子信号和第一低频子信号进行一级降噪,可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0071] 本发明提供的一种桥梁动挠度降噪方法,采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有第一高频子信号进行一级降噪;同时采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有第一低频子信号进行一级降噪,有利于消除第一高频子信号和第一低频子信号中的大部分高频噪声,进而有利于提高动挠度测量结果的准确性。

[0072] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,如图2所示,步骤S4进一步包括:

[0073] S41,根据第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数对一级降噪后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第二自适应全局均线和多个第二子信号;

[0074] 具体地,针对一级降噪后的动挠度信号,根据第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数对一级降噪后的动挠度信号进行ESMD模态分解,其中第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数是预先设定的,可以结合实际情况设置合适的第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数,此处不做具体限定。经过ESMD模态分解后即可获得第二自适应全局均线和多个第二子信号。其中ESMD模态分解的具体步骤可以参见上述对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解的具体过程,此处不再赘述。

[0075] S42,计算每相邻两个第二子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第二子信号划分为多个第二高频子信号和多个第二低频子信号;

[0076] 具体地,针对上述获得的多个第二子信号,计算每相邻两个第二子信号的互信息熵,根据所有互信息熵获得互信息熵的变化规律,即互信息熵从大到小、再到大的变化过程,该变化过程中必将对应出现一个转折点,该转折点的互信息熵最小,即此时相邻两个第二子信号相关性最小,因此可确定该相邻两个第二子信号中包括高频信号和低频信号,由此,即可将多个第二子信号中的高频信号和低频信号进行区分,并最终可将多个第二子信号划分为多个第二高频子信号和多个第二低频子信号。

[0077] S43,采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有第二高频子信号进行二级降噪,采用min-max规则、软阈值和适中的分解尺度对所有第二低频子信号进行二级降噪;

[0078] 为了消除一级降噪后的动挠度信号中存在的少量高频噪声和较多的低频噪声,采用heursure规则、硬阈值和高分解尺度对所有第二高频子信号进行二级降噪;同时采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有第二低频子信号进行二级降噪。在其他实施例中,也可以采用其他降噪方法对第二高频子信号和第二低频子信号进行二级降噪,可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0079] S44,将二级降噪后的所有第二高频子信号和二级降噪后的所有第二低频子信号以及第二自适应全局均线进行重构,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0080] 最终,将二级降噪后的所有第二高频子信号和二级降噪后的所有第二低频子信号以及第二自适应全局均线进行重构,获得二级降噪后的动挠度信号。由此,二级降噪后的动挠度信号中的高频噪声和低频噪声均已基本消除,进一步提高了动挠度测量结果的准确

性。

[0081] 本发明提供了一种桥梁动挠度降噪方法,根据第二预设最大容许误差和第二预设最优筛选次数对一级降噪后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第二自适应全局均线和多个第二子信号;计算每相邻两个第二子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第二子信号划分为多个第二高频子信号和多个第二低频子信号;采用heursure规则、硬阈值和低分解尺度对所有第二高频子信号进行二级降噪,采用min-max规则、软阈值和适中的分解尺度对所有第二低频子信号进行二级降噪;将二级降噪后的所有第二高频子信号和二级降噪后的所有第二低频子信号以及第二自适应全局均线进行重构,获得二级降噪后的动挠度信号。该方法在一级降噪的基础上进一步消除了一级降噪后的动挠度信号中存在的少量高频噪声和较多的低频噪声,进一步提高了动挠度测量结果的准确性。

[0082] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,如图3所示,步骤S2中计算每相邻两个第一子信号的互信息熵进一步包括:

[0083] S21,计算每个第一子信号的能量熵;

[0084] 在将采集的动挠度信号分解为多个第一子信号的基础上,计算每个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )的能量熵,具体计算公式如下:

[0085]  $E(IMF_i) = -1b(P(IMF_i)/P)$ ;

[0086] 其中 $P(IMF_i)$ 是每个子信号的能量, $P$ 是采集的动挠度信号的总能量, $n$ 是第一子信号的数量。

[0087] S22,根据每个第一子信号的能量熵计算每个第一子信号的固有能量熵;

[0088] 具体地,根据每个第一子信号的能量熵计算每个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )的固有能量熵,具体计算公式如下:

[0089]  $H(IMF_i) = -p(IMF_i) \lg(IMF_i)$ ;

[0090] 其中 $p(IMF_i) = E(IMF_i)/E$ , $E(IMF_i)$ 为第 $i$ 个第一子信号 $IMF_i$ 的能量熵, $E$ 为所有第一子信号的总能量熵。

[0091] S23,根据每相邻两个第一子信号的固有能量熵计算每相邻两个第一子信号的互信息熵。

[0092] 具体地,根据每相邻两个第一子信号的固有能量熵计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,具体计算公式如下:

[0093]  $I(IMF_i, IMF_{i+1}) = H(IMF_i) + H(IMF_{i+1}) - H(IMF_i, IMF_{i+1})$ ;

[0094] 其中 $H(IMF_i)$ 和 $H(IMF_{i+1})$ 分别为第 $i$ 个第一子信号的固有能量熵和第 $i+1$ 个第一子信号的固有能量熵。

[0095] 本发明提供了一种桥梁动挠度降噪方法,通过计算每个第一子信号的能量熵;根据每个第一子信号的能量熵计算每个第一子信号的固有能量熵;根据每相邻两个第一子信号的固有能量熵计算每相邻两个第一子信号的互信息熵。有利于根据互信息熵将多个第一子信号中的高频信号和低频信号进行区分,进而有利于对高频信号和低频信号分别进行降噪处理。

[0096] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,步骤S1之前还包括:采用波形特征匹配方法对采集的动挠度信号进行延拓;相应地,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对延拓后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线

和多个第一子信号。

[0097] 具体地,本实施例中,在对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解之前,考虑动挠度信号两端不可能同时存在极值点,采用波形特征匹配方法对采集的动挠度信号进行延拓,以使得动挠度信号的两端均为极大值点或极小值点,从而有效抑制端点效应。

[0098] 在上述基础上,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对延拓后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号。

[0099] 本发明提供的一种桥梁动挠度降噪方法,采用波形特征匹配方法对采集的动挠度信号进行延拓,从而根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对延拓后的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号,能够有效抑制端点效应。

[0100] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,步骤S1之前还包括:计算采集的动挠度信号与采集的动挠度信号均值的第一标准差;根据第一标准差确定第一预设最大容许误差。

[0101] 具体地,在对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解时,通过设置第一预设最大容许误差,以防止模态分解次数过少或过多导致降低分解的第一子信号的质量。本实施例中,针对采集的动挠度信号 $s(t)$ ,计算动挠度信号 $s(t)$ 的均值,具体计算公式如下:

$$[0102] \quad \bar{s}(t) = \left( \sum_{i=1}^n s_i \right) / n;$$

[0103] 在上述基础上,再计算采集的动挠度信号 $s(t)$ 与均值的第一标准差,具体计算公式如下:

$$[0104] \quad \sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s}(t))^2}$$

[0105] 在上述基础上,根据第一标准差确定第一预设最大容许误差,第一预设最大容许误差 $\varepsilon = k\sigma_0$ ,其中 $k$ 为比例系数。

[0106] 本发明提供的一种桥梁动挠度降噪方法,计算采集的动挠度信号与采集的动挠度信号均值的第一标准差;根据第一标准差确定第一预设最大容许误差,通过设置合适的第一预设最大容许误差,有利于根据第一预设最大容许误差对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解。

[0107] 基于上述任一实施例,提供一种桥梁动挠度降噪方法,步骤S1之前还包括:

[0108] 预先设置多个筛选次数,根据每个筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得每个筛选次数对应的自适应全局均线;

[0109] 具体地,预先设置多个筛选次数,例如可以设置筛选次数的取值区间 $[1, K_{\max}]$ ,根据取值区间中的每个筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得每个筛选次数对应的自适应全局均线。其中根据每个筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解的具体实现步骤可以参见上述实施例中的ESMD模态分解的具体过程,此处不再赘述。

[0110] 计算采集的动挠度信号与每个自适应全局均线的第二标准差,根据所有第二标准差确定最小第二标准差;

[0111] 具体地,针对上述获得的每个筛选次数对应的自适应全局均线,计算采集的动扰

度信号与每个自适应全局均线的第二标准差,并在所有第二标准差中确定数值最小的第二标准差。

[0112] 将最小第二标准差对应的筛选次数确定为第一预设最优筛选次数。

[0113] 具体地,根据最小第二标准差反推对应的自适应全局均线,根据对应的自适应全局均线确定对应的筛选次数,最终将该筛选次数确定为第一预设最优筛选次数。

[0114] 本发明提供一种桥梁动挠度降噪方法,预先设置多个筛选次数,根据每个筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得每个筛选次数对应的自适应全局均线;计算采集的动挠度信号与每个自适应全局均线的第二标准差,根据所有第二标准差确定最小第二标准差;将最小第二标准差对应的筛选次数确定为第一预设最优筛选次数。通过设置合适的第一预设最优筛选次数,有利于根据第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解。

[0115] 图4为本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪系统的整体结构示意图,如图4所示,本发明提供一种桥梁动挠度降噪系统,包括:

[0116] 信号分解模块1,用于根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;

[0117] 具体地,针对桥梁动挠度检测过程中采集的动挠度信号,利用信号分解模块1根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,其中第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数是预先设定的,具体过程如下:

[0118] 针对采集的动挠度信号 $s(t)$ ,提取 $s(t)$ 中极大值和极小值所组成的极值序列 $N_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),计算 $N_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )中相邻极值点(包括极大值点和极小值点)的中点序列 $M_i$  ( $i=1,2,\dots,n-1$ ),采用3次B样条曲线插值拟合相邻极值点的中点,根据拟合数据的残差标准差确定中点曲线插值模型,并根据曲线插值参加计算的中点个数,建立加权中点曲线的计算模型,获取中点序列 $M_i$  ( $i=1,2,\dots,n-1$ )的拟合曲线 $\bar{L}$ ,即均值曲线 $\bar{L}$ ;

[0119] 将上述获得均值曲线 $\bar{L}$ 的方法步骤作为一次筛选,在此基础上,计算采集的动挠度信号与均值曲线的差值 $s(t)-\bar{L}$ ,针对 $s(t)-\bar{L}$ 重复上述步骤,获得新的均值曲线 $\bar{L}$ ,直至 $\bar{L}$ 的标准差不大于第一预设最大容许误差或筛选次数达到了第一预设最优筛选次数,此时分解出一个第一子信号 $IMF_1$ ;

[0120] 在上述基础上,针对 $s(t)-IMF_1$ 重复上述步骤,依次获得 $IMF_2$ 、 $IMF_3$ ... $IMF_i$ ,即获得多个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),直至最后剩余模态函数剩一定数量的极值点,一般情况最后剩余模态函数中剩余的极值点的个数为十个以内,可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。采用二乘法优化最后剩余模态函数,即可获得第一自适应全局均线 $R$ 。

[0121] 通过上述步骤,即可将采集的动挠度信号分解为第一自适应全局均线 $R$ 和多个第一子信号 $IMF_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )。

[0122] 需要说明的是,上述采集的动挠度信号包括利用接触式测量方法和非接触式测量方法采集的动挠度信号,即动挠度信号的采集方式可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0123] 信号划分模块2,用于计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;

[0124] 具体地,针对上述获得的多个第一子信号,利用信号划分模块2计算每相邻两个第

一子信号的互信息熵。互信息熵法反映随机变量相互包含的信息量或相互间的统计依赖性,两个随机变量之间越关联,互信息熵越大;反之,则互信息熵越小。

[0125] 基于上述原理,利用信号划分模块2根据所有互信息熵获得的互信息熵的变化规律,即互信息熵从大到小、再到大的变化过程,该变化过程中必将对应出现一个转折点,该转折点的互信息熵最小,即此时相邻两个第一子信号相关性最小,因此可确定该相邻两个第一子信号中包括高频信号和低频信号,由此,即可将多个第一子信号中的高频信号和低频信号进行区分,并最终可将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号。

[0126] 一级降噪模块3,用于对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;

[0127] 具体地,针对上述获得的多个第一高频子信号和多个第一低频子信号,利用一级降噪模块3对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,消除所有第一高频子信号和所有第一低频子信号中的大部分高频噪声。在一级降噪过程中,可以采用不同的降噪方法对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号进行降噪,即采用不同的降噪方法对高频信号和低频信号进行降噪,获得一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号。其中采用的降噪方法可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。最终,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及上述获得的第一自适应全局均线进行重构,即对动挠度信号进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号。

[0128] 二级降噪模块4,用于对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0129] 具体地,一级降噪后的动挠度信号中大部分高频噪声已经消除,但还存在较多的低频噪声未被消除,同时ESMD模态分解过程存在模态混叠效应的影响,故而一级降噪后的动挠度信号仍存在着少量的高频噪声和较多的低频噪声。有鉴于此,针对一级降噪后的动挠度信号,利用二级降噪模块4采用预设的降噪方法对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,其中可以通过上述步骤S1-S3中的方法步骤对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,也可以采用其他降噪方法对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪。二级降噪所采用的降噪方法可以根据实际需求进行设置,此处不做具体限定。

[0130] 本发明提供了一种桥梁动挠度降噪系统,根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。该系统采用ESMD模态分解将桥梁动挠度信号分解为多个子信号,并采用互信息熵法区分多个子信号中的高频信号和低频信号,最终采用不同的降噪方法对高频信号和低频信号分别进行一级降噪,消除大部分的高频噪声,再对一级降噪后的动挠度信息进行二级降噪,进一步消除低频噪声和

剩余少量的高频噪声,能够有效消除桥梁动挠度检测过程中由于受到环境因素、地面震动和测量设备本身测量精度等影响所产生的噪声信息,有效提高了动挠度测量结果的准确性。

[0131] 图5示出本发明实施例的一种桥梁动挠度降噪方法的设备的结构框图。参照图5,所述桥梁动挠度降噪方法的设备,包括:处理器(processor)51、存储器(memory)52和总线53;其中,所述处理器51和存储器52通过所述总线53完成相互间的通信;所述处理器51用于调用所述存储器52中的程序指令,以执行上述各方法实施例所提供的方法,例如包括:根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线 and 多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0132] 本实施例公开一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算机程序,所述计算机程序包括程序指令,当所述程序指令被计算机执行时,计算机能够执行上述各方法实施例所提供的方法,例如包括:根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0133] 本实施例提供一种非暂态计算机可读存储介质,所述非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,所述计算机指令使所述计算机执行上述各方法实施例所提供的方法,例如包括:根据第一预设最大容许误差和第一预设最优筛选次数对采集的动挠度信号进行ESMD模态分解,获得第一自适应全局均线和多个第一子信号;计算每相邻两个第一子信号的互信息熵,根据所有互信息熵将多个第一子信号划分为多个第一高频子信号和多个第一低频子信号;对所有第一高频子信号和所有第一低频子信号分别进行一级降噪,将一级降噪后的所有第一高频子信号和一级降噪后的所有第一低频子信号以及第一自适应全局均线进行重构,获得一级降噪后的动挠度信号;对一级降噪后的动挠度信号进行二级降噪,获得二级降噪后的动挠度信号。

[0134] 本领域普通技术人员可以理解:实现上述方法实施例的全部或部分步骤可以通过程序指令相关的硬件来完成,前述的程序可以存储于一计算机可读取存储介质中,该程序在执行时,执行包括上述方法实施例的步骤;而前述的存储介质包括:ROM、RAM、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0135] 以上所描述的桥梁动挠度降噪方法的设备等实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以

根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0136] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0137] 最后,本申请的方法仅为较佳的实施方案,并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

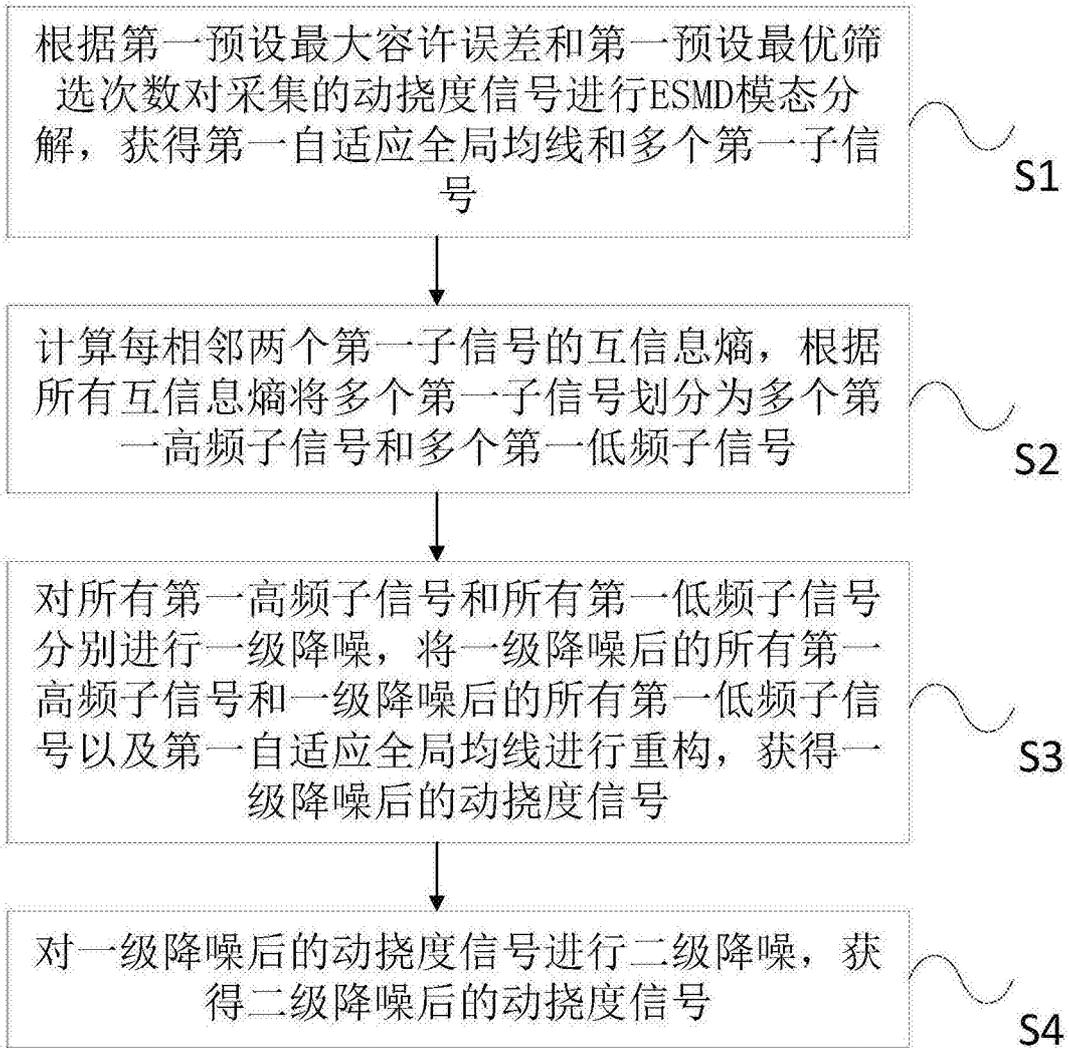


图1

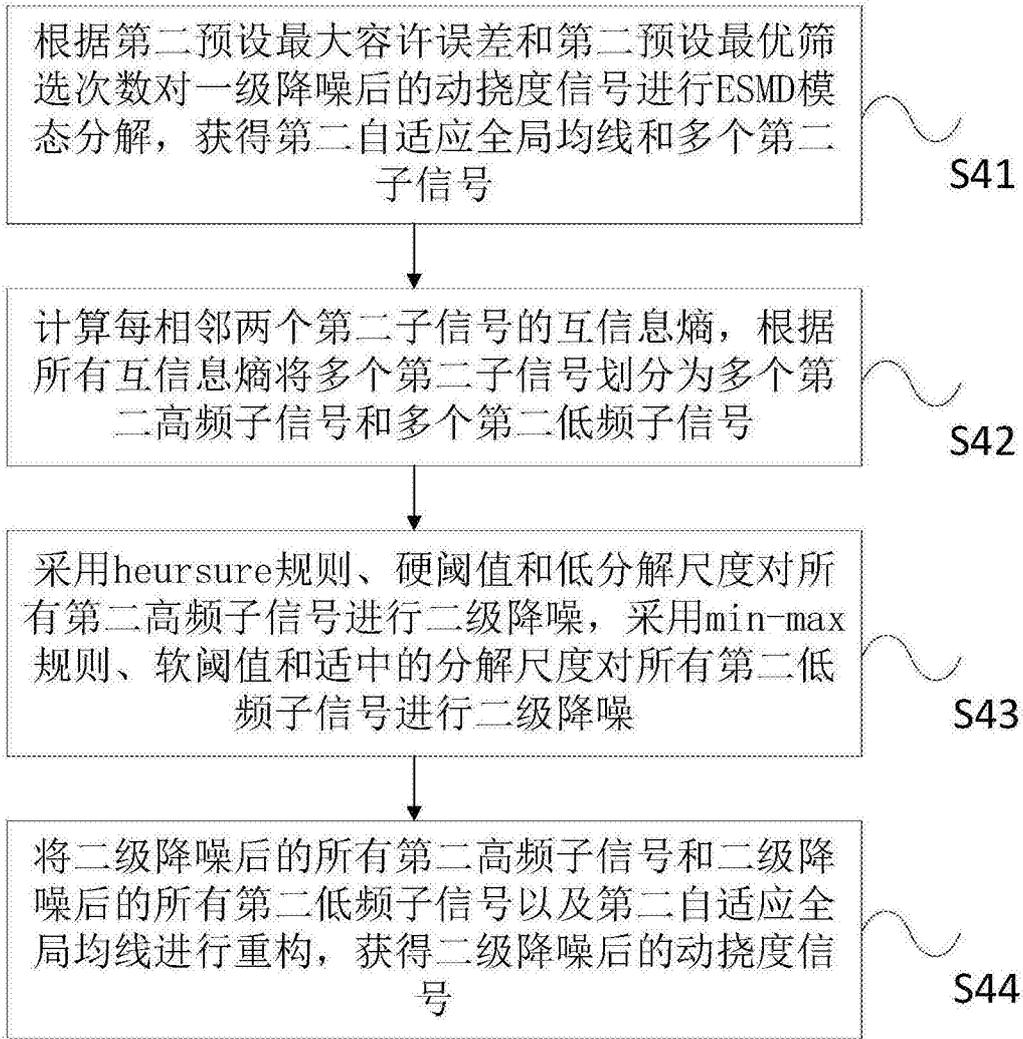


图2

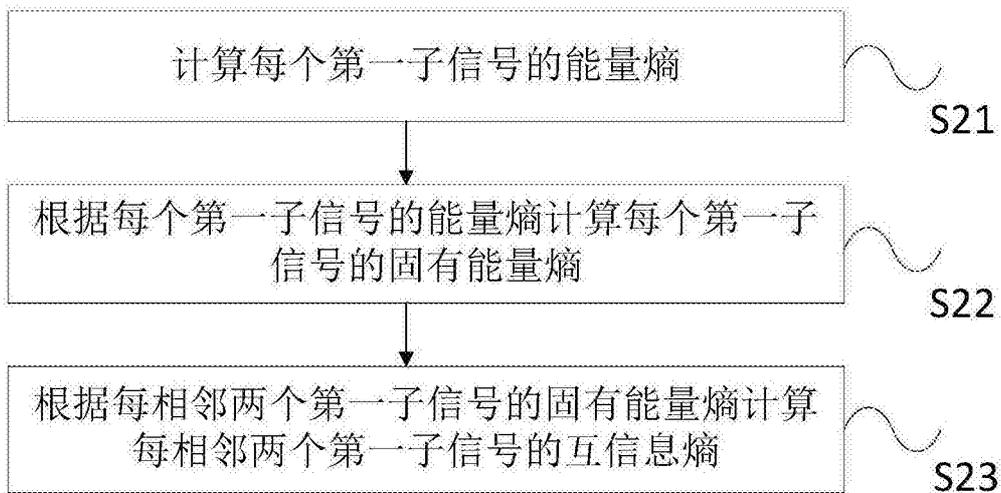


图3

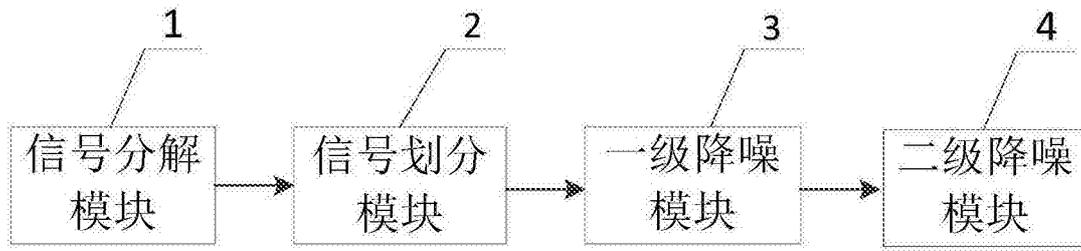


图4

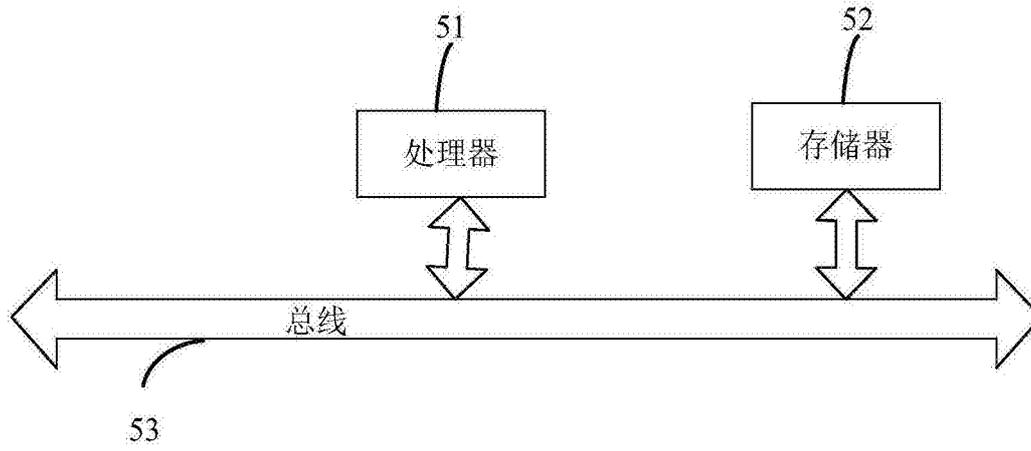


图5