



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112414688 B

(45) 授权公告日 2022.01.04

(21) 申请号 202011267879.8

(22) 申请日 2020.11.13

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112414688 A

(43) 申请公布日 2021.02.26

(73) 专利权人 海南电网有限责任公司海南输变电检修分公司

地址 570100 海南省海口市龙华区海瑞后路23号

(72) 发明人 钟声 杨杰 苏君滨 李晓洋  
王良清 林司仲 何惠忠 王扬泓  
吴坤和 冯开业 罗言昌

(74) 专利代理机构 广州三环专利商标代理有限公司 44202

代理人 侯华民

(51) Int.Cl.

G01M 13/00 (2019.01)

G06K 9/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107702908 A, 2018.02.16

CN 111751671 A, 2020.10.09

CN 110865357 A, 2020.03.06

丁其.基于振动信号分析的断路器机械故障模式识别研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士)工程科技II辑》.2020,第10-13、18-19页.

阚玲玲等.VMD\_Wavelet联合去噪算法研究与应用.《吉林大学学报(信息科学版)》.2020,第38卷(第5期),第588-594页.

审查员 崔金

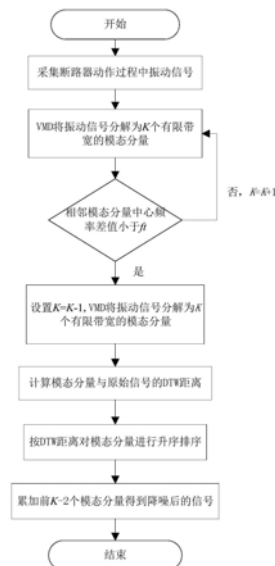
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法

(57) 摘要

本发明提供一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,包括以下步骤:S1:采集断路器动作过程中的振动信号;S2:通过VMD将振动信号分解为多个有限带宽的模态分量,所述模态分量的个数由中心频率法确定;S3:计算模态分量与原始信号的DTW距离,根据DTW距离选出相关模态分量;S4:累加所有选出的相关模态分量,然后得到降噪后的信号。通过降噪可以更好的进行信号特征的提取,有助于对断路器的运行状态进行准确监测。



1. 一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1:采集断路器动作过程中的振动信号;

S2:通过VMD将振动信号分解为多个有限带宽的模态分量;

S3:计算模态分量与原始信号的DTW距离,根据DTW距离选出相关模态分量;

S4:累加所有选出的相关模态分量,然后得到降噪后的信号。

2. 根据权利要求1所述的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,其特征在于,所述S2具体包括以下步骤:

S21:VMD的分解过程为求解以下有约束的变分问题:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t. } \sum_k u_k = x(t) \end{cases}$$

式中 $u_k$ 表示分解得到的第 $k$ 个模态分量, $k=1, 2, \dots, K$ ,  $\omega_k$ 表示 $u_k$ 的频率中心, $\delta(t)$ 表示狄拉克函数, $x(t)$ 表示断路器动作过程中的振动信号,

引入二次罚函数项和Lagrange乘子将上述有约束变分问题转化为无约束变分问题,构造表达式如下:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle$$

其中, $\alpha$ 表示惩罚因子, $\lambda(t)$ 表示Lagrange乘子;

利用乘子交替法求取以上变分问题,在这一过程中,模态分量和中心频率被不断更新,更新过程表达式为:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}$$

直到满足以下收敛条件时,更新停止:

$$\sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < \varepsilon$$

其中, $\varepsilon$ 为设置的收敛阈值,

S22:根据中心频率法确定VMD分解模态分量的个数,首先设置分解个数为 $K=2$ ,比较分解后的两个模态分量中心频率差值,若差值小于阈值 $f(t)$ ,则停止分解,最优模态分量数为 $K-1$ ;若差值大于 $f(t)$ ,则 $K=K+1$ ,重新对原始信号进行分解,继续比较相邻两个模态分量中心频率的差值,即 $u_1$ 和 $u_2$ ,  $u_2$ 和 $u_3$ 间中心频率的差值;如果出现相邻模态分量的中心频率差值小于阈值 $f(t)$ ,则最优模态分量数为 $K-1$ ;否则, $K=K+1$ ,重新分解信号,直到中心频率差值小于 $f(t)$ ,VMD分解最优模态分量个数 $K=K-1$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,其特征在于,所述计算模态分量与原始信号的DTW距离,具体包括:

S31构造VMD分解得到的模态分量 $u_k$ 与原始信号的代价矩阵D:

$$D = \begin{bmatrix} d(u_k^1, x(1)) & \cdots & d(u_k^1, x(n)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(u_k^n, x(1)) & \cdots & d(u_k^n, x(n)) \end{bmatrix}_{n \times n}$$

其中矩阵中元素 $d(u_k^i, x(j))$ 是模态分量 $u_k$ 中第i个元素与原始信号x中第j个元素间的欧式距离;

S32: 寻找最优路径DTW:

利用下式可以求解最优路径:

$$DTW(u_k, x) = \sqrt{R(i, j)}$$

其中,  $R(i, j)$  是累计距离:

$$R(i, j) = d(u_k^i, x(j)) + \min \begin{cases} R(i, j-1) \\ R(i-1, j-1) \\ R(i-1, j) \end{cases}$$

其中,  $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n, R(0, 0)=0, R(i, 0)=R(0, j)=+\infty$ 。

4. 根据权利要求3所述的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法, 其特征在于, 所述根据DTW距离选出相关模态分量, 具体为:

将模态分量与原始信号的DTW距离按升序进行排序, 重新排序的前K-2个模态分量即被选出为相关模态分量, 相加所选出的相关模态分量即降噪后的信号。

## 一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高压断路器振动信号处理技术领域,尤其涉及一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法。

### 背景技术

[0002] 断路器是电力系统中的基础元件,起到保护和控制作用。它是电力系统中唯一允许在正常和异常模式(短路、异步模式、设备过载)下改变电气拓扑结构的元件。因此,断路器的运行状态直接影响电力系统的安全和稳定运行。目前,断路器在长期运行中,因各种原因所引发的故障是无法完全避免的,因此有必要对断路器的运行状态进行监测以及早发现故障,开发有效的高压断路器状态评估系统,已成为发电企业和电网公司在电力系统管理中的一项重要任务,近年来,基于振动信号的断路器智能故障诊断系统逐渐成为主流,其从振动信号中提取状态相关特征,并输入到训练好的诊断模型中判断断路器所处的运行状态。振动信号作为一种非侵入式的信号,获取容易,蕴含了断路器动作过程中各部件的状态信息,且易于实现在线监测。然而,振动信号在采集传输过程中,容易受到断路器低频本振和电磁的干扰,所采集到的振动信号中不可避免的夹杂着噪声,这为特征提取带来了困难。

[0003] 因此,需要一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,在对振动信号特征提取前,进行降噪处理。

### 发明内容

[0004] 鉴此,本发明的目的在于提供一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,以解决现有技术出现的上述问题。

[0005] 一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,包括以下步骤:

[0006] S1:采集断路器动作过程中的振动信号;

[0007] S2:通过VMD将振动信号分解为多个有限带宽的模式分量;

[0008] S3:计算模式分量与原始信号的DTW距离,根据DTW距离选出相关模式分量;

[0009] S4:累加所有选出的相关模式分量,然后得到降噪后的信号。

[0010] 进一步的,所述S2具体包括以下步骤:

[0011] S21:VMD的分解过程为求解以下有约束的变分问题:

$$[0012] \begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = x(t) \end{cases}$$

[0013] 式中 $u_k$ 表示分解得到的第 $k$ 个模式分量, $k=1,2,\dots,K$ , $w_k$ 表示 $u_k$ 的频率中心, $\delta(t)$ 表示狄拉克函数, $x(t)$ 表示断路器动作过程中的振动信号,

[0014] 引入二次罚函数项和Lagrange乘子将上述有约束变分问题转化为无约束变分问

题,构造表达式如下:

$$[0015] \quad L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle$$

[0016] 其中,  $\alpha$  表示惩罚因子,  $\lambda(t)$  表示Lagrange乘子;

[0017] 利用乘子交替法求取以上变分问题,在这一过程中,模态分量和中心频率被不断更新,更新过程表达式为:

$$[0018] \quad \hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}$$

$$[0019] \quad \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}$$

[0020] 直到满足以下收敛条件时,更新停止:

$$[0021] \quad \sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < \varepsilon$$

[0022] 其中,  $\varepsilon$  为设置的收敛阈值,

[0023] S22:根据中心频率法确定VMD分解模态分量的个数,首先设置分解个数为 $K=2$ ,比较分解后的两个模态分量中心频率差值,若差值小于阈值 $f(t)$ ,则停止分解,最优模态分量数为 $K-1$ ;若差值大于 $f(t)$ ,则 $K=K+1$ ,重新对原始信号进行分解,继续比较相邻两个模态分量中心频率的差值,即 $u_1$ 和 $u_2$ , $u_2$ 和 $u_3$ 间中心频率的差值;如果出现相邻模态分量的中心频率差值小于阈值 $f(t)$ ,则最优模态分量数为 $K-1$ ;否则, $K=K+1$ ,重新分解信号,直到中心频率差值小于 $f(t)$ ,VMD分解最优模态分量个数 $K=K-1$ 。

[0024] 进一步的,所述计算模态分量与原始信号的DTW距离,具体包括:

[0025] S31构造VMD分解得到的模态分量 $u_k$ 与原始信号的代价矩阵D:

$$[0026] \quad D = \begin{bmatrix} d(u_k^1, x(1)) & \cdots & d(u_k^1, x(n)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(u_k^n, x(1)) & \cdots & d(u_k^n, x(n)) \end{bmatrix}_{n \times n}$$

[0027] 其中矩阵中元素  $d(u_k^i, x(j))$  是模态分量 $u_k$ 中第 $i$ 个元素与原始信号 $x$ 中第 $j$ 个元素间的欧式距离;

[0028] S32:寻找最优路径DTW:

[0029] 利用下式可以得到最优路径:

$$[0030] \quad DTW(u_k, x) = \sqrt{R(i, j)}$$

[0031] 其中,  $R(i, j)$  是累计距离:

$$[0032] \quad R(i, j) = d(u_k^i, x(j)) + \min \begin{cases} R(i, j-1) \\ R(i-1, j-1) \\ R(i-1, j) \end{cases}$$

[0033] 其中,  $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n, R(0,0)=0, R(i,0)=R(0,j)=+\infty$ 。

[0034] 进一步的,所述根据DTW距离选出相关模态分量,具体为:

[0035] 将模态分量与原始信号的DTW距离按升序进行排序,重新排序的前K-2个模态分量即被选出为相关模态分量,相加所选出的相关模态分量即降噪后的信号。

[0036] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0037] 本发明提供一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,在对断路器振动信号特征提取前,采集断路器动作过程中的振动信号,通过对VMD将断路器的振动信号分解为多个有限带宽的模态分量,所述模态分量的个数由中心频率法确定,然后计算模态分量与原始信号的DTW距离,再根据DTW距离选出相关模态分量,累加所有选出的相关模态分量,然后得到降噪后的信号。通过降噪可以更好的进行信号特征的提取,有助于对断路器的运行状态进行准确监测。

## 附图说明

[0038] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的优选实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0039] 图1是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的流程图。

[0040] 图2是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的断路器正常状态振动信号图。

[0041] 图3是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的基座螺丝松动振动信号图。

[0042] 图4是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的断路器正常状态振动信号分解后的模态分量图。

[0043] 图5是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的断路器基座螺丝松动振动信号分解后的模态分量图。

[0044] 图6是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的断路器正常状态振动信号降噪后的信号图。

[0045] 图7是本发明实施例提供的一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法的基座螺丝松动振动信号降噪后的信号图。

## 具体实施方式

[0046] 以下结合附图对本发明的原理和特征进行描述,所列举实施例只用于解释本发明,并非用于限定本发明的范围。

[0047] 实施例一

[0048] 参照图1,本发明提供一种基于VMD-DTW的断路器振动信号降噪方法,

[0049] 包括以下步骤:

[0050] S1:采集断路器动作过程中的振动信号;

[0051] S2:通过VMD将振动信号分解为多个有限带宽的模态分量;  
 [0052] S3:计算模态分量与原始信号的DTW距离,根据DTW距离选出相关模态分量;  
 [0053] S4:累加所有选出的相关模态分量,然后得到降噪后的信号。  
 [0054] 具体的,通过振动传感器采集断路器动作过程中的振动信号,采集35kV断路器合闸过程中正常状态和基座螺丝松动下的振动信号,振动传感器安装于断路器横梁处,每次采集过程中数据采集卡以10kHz速率工作300ms,根据中心频率法确定VMD分解模态分量数,在本实例中, $f(t) = 300\text{Hz}$ 。表1和表2给出了不同K值下,正常状态下和故障状态下振动信号分解得到的模态分量中心频率分布,可以看出当 $K=8$ 时,正常状态振动信号分解得到的 $u_5$ 与 $u_6$ 的差值为298.57Hz,基座螺丝松动振动信号分解得到的 $u_1$ 与 $u_2$ 的差值为270.28Hz,均小于 $f(t)$ ,因此最佳K值应设为7。

[0055] 表1正常状态振动信号在不同K值下分解得到的模态分量中心频率

K	中心频率 (Hz)								
	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$
1	189.93								
2	189.86	2964.26							
3	189.60	1657.18	3466.21						
[0056] 4	189.33	1394.63	2964.10	3887.87					
5	188.71	981.07	2006.25	2964.17	3877.89				
6	184.89	699.33	1657.19	2962.99	3466.93	4250.62			
7	184.59	699.11	1394.29	2007.34	2963.07	3466.95	4250.64		
8	184.58	699.09	1392.61	1842.61	2797.27	3095.84	3875.84	4254.13	
9	184.44	699.02	1384.68	1658.44	2011.73	2962.99	3465.90	3878.66	4254.81

[0057] 表2基座螺丝松动振动信号在不同K值下分解得到的模态分量中心频率

K	中心频率(Hz)								
	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$
1	624.13								
2	623.95	2568.35							
3	623.31	1707.83	3231.11						
[0058] 4	621.90	1406.84	2568.19	3632.60					
5	610.65	941.35	2133.26	3230.92	3983.91				
6	379.53	799.87	1707.17	2567.57	3231.23	4306.67			
7	378.33	799.11	1407.03	2133.25	2779.35	3632.38	4306.95		
8	363.09	633.37	1406.50	1909.26	2567.95	3229.32	3633.88	4307.01	
9	359.19	615.80	942.17	1698.88	2133.48	2775.75	3229.63	3633.93	4307.02

[0059] 图4为图2信号分解后的模态分量,图5为图3信号分解后的模态分量。

[0060] 计算分量与原始信号的DTW距离,结果如表3,其中,括号内的数字大小为排序结果。

[0061] 表3模态分量与原始信号的归一化DTW距离

[0062]	状态	DTW 距离						
		$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$
[0063]	正常	0.90 (7)	0.81 (6)	0.10 (1)	0.62 (5)	0.45 (3)	0.18 (2)	0.53 (4)
	底座螺丝 松动	0.90 (7)	0.43 (6)	0.10 (1)	0.33 (5)	0.23 (2)	0.28 (3)	0.30 (4)

[0064] 按DTW距离升序选择前5个信号进行重构,得到降噪后的信号如图6和图7,对比原始信号如图2和图3可以发现,噪声得到缓解,波峰更加明显。

[0065] 所述S2具体包括以下步骤:

[0066] S21:VMD的分解过程为求解以下有约束的变分问题:

$$[0067] \begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = x(t) \end{cases}$$

[0068] 式中 $u_k$ 表示分解得到的第k个模态分量, $k=1,2,\dots,K$ , $\omega_k$ 表示 $u_k$ 的频率中心, $\delta(t)$ 表示狄拉克函数, $x(t)$ 表示断路器动作过程中的振动信号,

[0069] 引入二次罚函数项和Lagrange乘子将上述有约束变分问题转化为无约束变分问题,构造表达式如下:

$$[0070] L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle$$

[0071] 其中, $\alpha$ 表示惩罚因子, $\lambda(t)$ 表示Lagrange乘子;

[0072] 利用乘子交替法求取以上变分问题,在这一过程中,模态分量和中心频率被不断更新,更新过程表达式为:

$$[0073] \hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}$$

$$[0074] \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}$$

[0075] 直到满足以下收敛条件时,更新停止:

$$[0076] \sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < \varepsilon$$

[0077] 其中, $\varepsilon$ 为设置的收敛阈值,

[0078] S22:根据中心频率法确定VMD分解模态分量的个数,首先设置分解个数为 $K=2$ ,比较分解后的两个模态分量中心频率差值,若差值小于阈值 $f(t)$ ,则停止分解,最优模态分量数为 $K-1$ ;若差值大于 $f(t)$ ,则 $K=K+1$ ,重新对原始信号进行分解,继续比较相邻两个模态分量中心频率的差值,即 $u_1$ 和 $u_2$ , $u_2$ 和 $u_3$ 间中心频率的差值;如果出现相邻模态分量的中心频率差值小于阈值 $f(t)$ ,则最优模态分量数为 $K-1$ ;否则, $K=K+1$ ,重新分解信号,直到中心频率差值小于 $f(t)$ ,VMD分解最优模态分量个数 $K=K-1$ 。

[0079] 所述计算模态分量与原始信号的DTW距离,具体包括:

[0080] S31构造VMD分解得到的模态分量 $u_k$ 与原始信号的代价矩阵D:

$$[0081] \quad D = \begin{bmatrix} d(u_k^1, x(1)) & \cdots & d(u_k^1, x(n)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(u_k^n, x(1)) & \cdots & d(u_k^n, x(n)) \end{bmatrix}_{n \times n}$$

[0082] 其中矩阵中元素 $d(u_k^i, x(j))$ 是模态分量 $u_k$ 中第i个元素与原始信号x中第j个元素间的欧式距离;

[0083] S32:寻找最优路径DTW:

[0084] DTW距离是在两信号最佳匹配下获得的,最佳匹配的求取可以转化为寻找最优路径,即从代价矩阵D中找到一条路径,使得两个信号中元素沿路径的累积距离最小,DTW距离越小,两个时间序列之间的相似度越高,基于动态翘曲的思想,利用下式可以得到最优路径:

$$[0085] \quad DTW(u_k, x) = \sqrt{R(i, j)}$$

[0086] 其中, $R(i, j)$ 是累计距离:

$$[0087] \quad R(i, j) = d(u_k^i, x(j)) + \min \begin{cases} R(i, j-1) \\ R(i-1, j-1) \\ R(i-1, j) \end{cases}$$

[0088] 其中, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n, R(0, 0) = 0, R(i, 0) = R(0, j) = +\infty$ 。

[0089] 所述根据DTW距离选出相关模态分量,具体为:

[0090] 将模态分量与原始信号的DTW距离按升序进行排序,重新排序的前K-2个模态分量即被选出为相关模态分量,相加所选出的相关模态分量即降噪后的信号。以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,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。

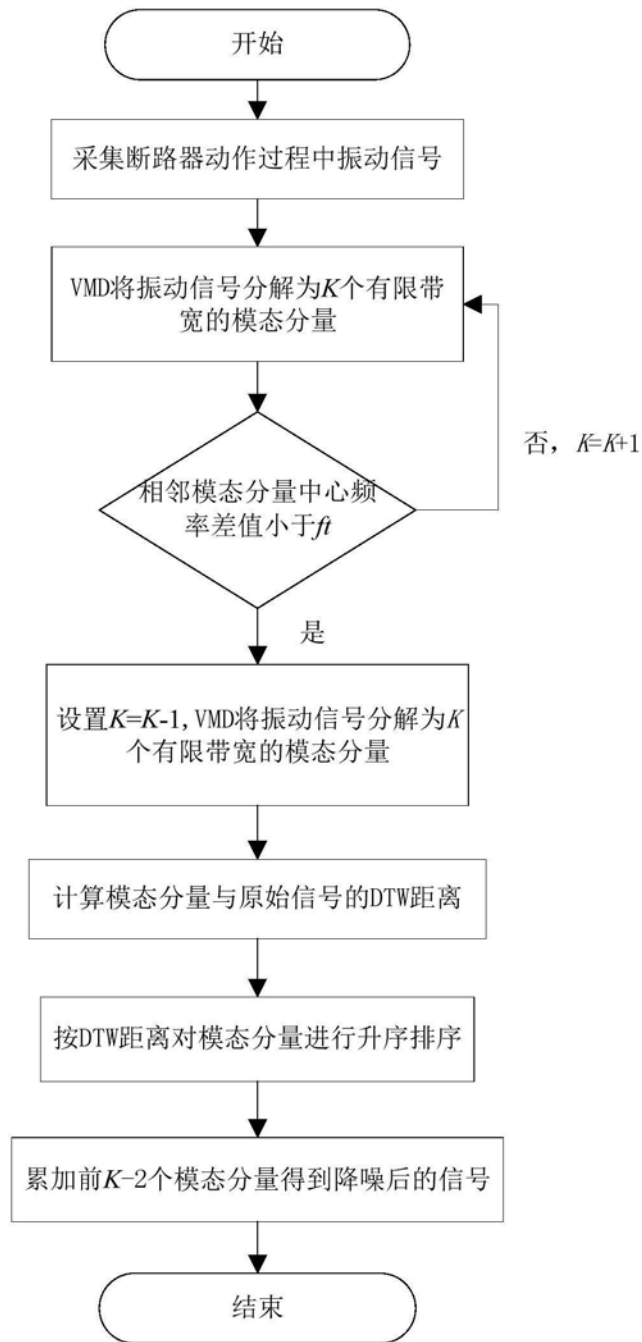


图1

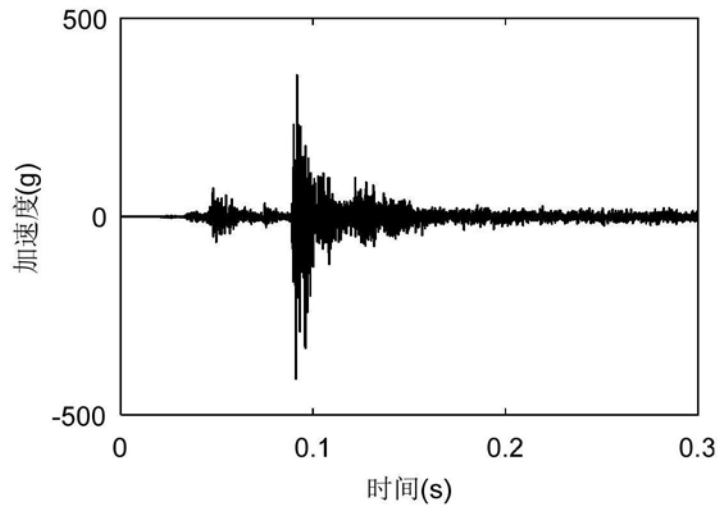


图2

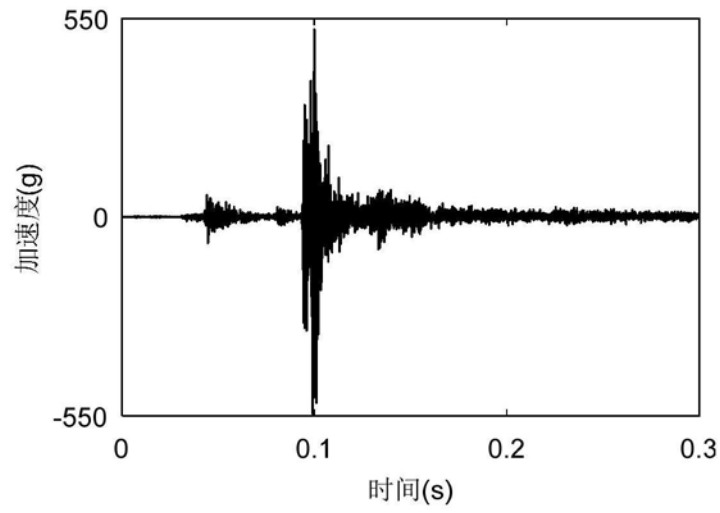


图3

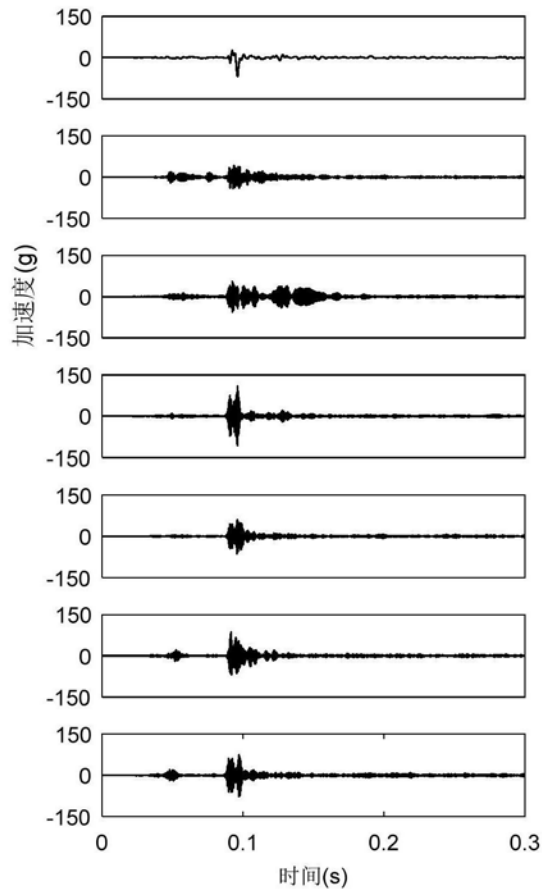


图4

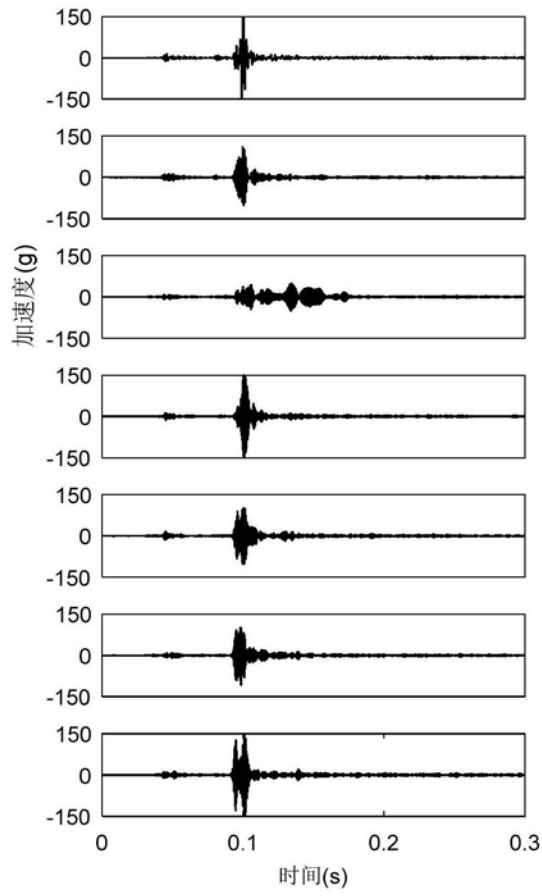


图5

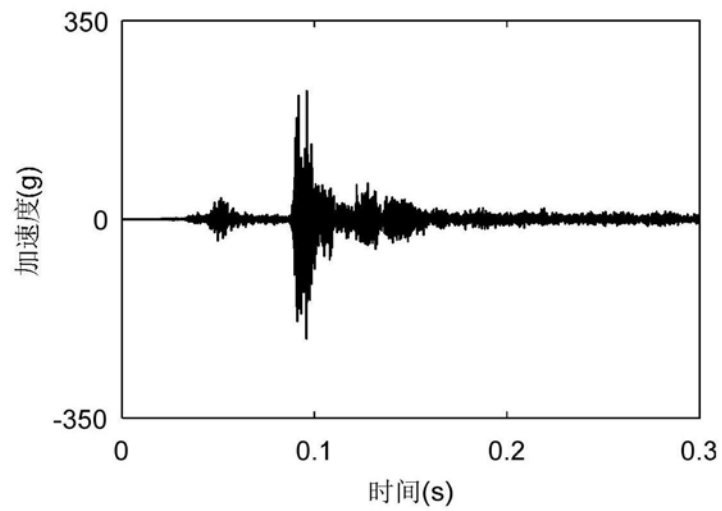


图6

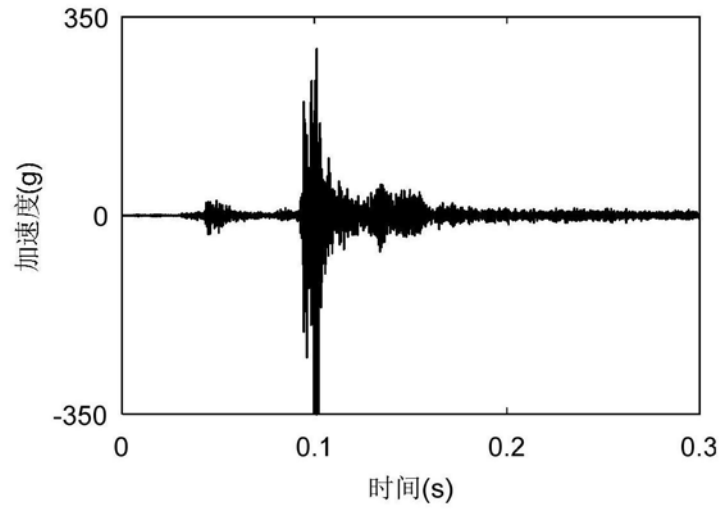


图7