



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111024398 A  
(43)申请公布日 2020.04.17

(21)申请号 201911352882.7

(22)申请日 2019.12.25

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 赵明 苗永浩 李博闻 孔子豪 苟超

(74)专利代理机构 西安智大知识产权代理事务所 61215

代理人 贺建斌

(51)Int.Cl.

G01M 13/045(2019.01)

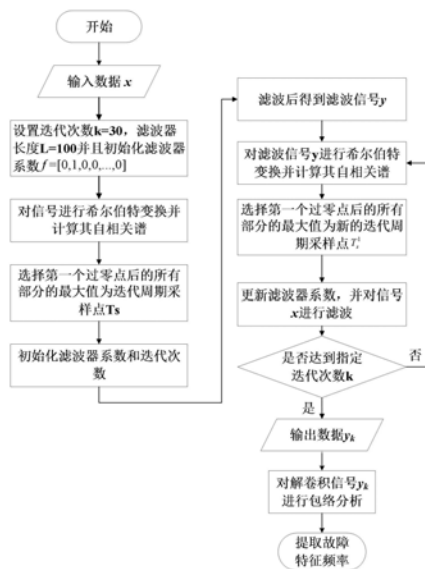
权利要求书2页 说明书4页 附图5页

(54)发明名称

一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法

(57)摘要

无需周期的最大相关峭度解卷积方法,首先对采集的振动信号进行截断和去均值处理;然后对振动信号进行希尔伯特变换得到其解析信号,并且通过选择其自相关谱中第一个过零点后部分的最大值点作为迭代周期进行解卷积操作,然后利用每次迭代滤波后的信号继续计算其自相关谱中第一个过零点后部分的最大值点作为迭代周期来更新滤波器,以此得到最优滤波器系数;最后对滤波后的信号进行包络分析,从包络谱中能提取故障特征频率,本发明在特征频率的提取过程中不需要人为参与,有利于实现故障特征提取和诊断监测的自动化,节约时间,效率更高。



1. 一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:将振动加速度传感器吸附于对被测试滚动轴承的轴承座上,并对振动信号进行高频采样、截断和去均值处理,将处理后的振动信号记为 $x(n)$ ;

步骤二:对振动信号 $x(n)$ 进行希尔伯特变换得到其解析信号 $\tilde{x}(n)$ ;

步骤三:预先设定解卷积的迭代次数 $k$ ,滤波器长度 $L$ 并且初始化滤波器系数 $f=[0, 1, 0, 0, \dots, 0]$ ;然后计算得到解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的自相关谱,利用式(1)-(2)的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为迭代周期采样点数 $T_s$ ,并将该信息代入以下迭代步骤用于最优滤波器系数的选择;

$$T_s = \arg \max_{\tau} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\bar{\tau}), N] \quad (1)$$

$$a(\bar{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\bar{\tau}) dn \equiv 0 \quad (2)$$

其中, $N$ 为解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的长度, $\tau$ 为偏移量, $\bar{\tau}$ 为自相关函数的零点位置;

步骤四:对振动信号 $x(n)$ 进行最大相关峭度解卷积迭代滤波,其中,滤波器系数按照公式(3)实施,

$$f = \frac{\|y\|^2}{(M+1)\|\beta\|^2} (X_0 X_0^T)^{-1} \sum_{m=0}^M X_{mT} \alpha_m \quad (3)$$

其中, $M$ 为相关峭度的移位阶数,移位阶数设置为1, $y$ 为对振动信号 $x(n)$ 进行最大相关峭度解卷积滤波后的滤波信号, $T$ 为转置符号, $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数操作,

$$X_r = \begin{bmatrix} x_{1-r} & x_{2-r} & x_{3-r} & \dots & x_{N-r} \\ 0 & x_{1-r} & x_{2-r} & \dots & x_{N-1-r} \\ 0 & 0 & x_{1-r} & \dots & x_{N-2-r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x_{N-L-r+1} \end{bmatrix}_{L \times N} \quad r = mT_s, m = 1, 2, \dots, M$$

$$\alpha_m = \begin{bmatrix} y_{1-mT_s}^{-1} (y_1^2 y_{1-T_s}^2 \dots y_{1-MT_s}^2) \\ y_{2-mT_s}^{-1} (y_2^2 y_{2-T_s}^2 \dots y_{2-MT_s}^2) \\ \dots \\ y_{N-mT_s}^{-1} (y_N^2 y_{N-T_s}^2 \dots y_{N-MT_s}^2) \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} y_1 y_{1-T_s} \dots y_{1-MT_s} \\ y_2 y_{2-T_s} \dots y_{2-MT_s} \\ \dots \\ y_N y_{N-T_s} \dots y_{N-MT_s} \end{bmatrix}$$

步骤五:得到第一次滤波后的信号 $y_1$ ,并进行希尔伯特变换得到其解析信号 $\tilde{y}_1(n)$ ,按照式(4)-(5)的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为新的迭代周期采样点数 $T_s^1$ ;

$$T_s^1 = \arg \max_{\tau} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\bar{\tau}), N] \quad (4)$$

$$a(\vec{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n + \tau) dn \equiv 0 \quad (5)$$

步骤六:按照式(3)利用新的迭代周期采样点数 $T_s^1$ 更新滤波器系数进行下一步滤波,直到迭代数量达到指定的迭代数量 $k$ 次后终止,选择最后的滤波信号 $y_k$ 为最佳滤波信号;

步骤七:对滤波信号 $y_k$ 进行包络分析并得到包络谱,对包络谱进行分析,进而提取故障特征频率,最终识别出滚动轴承故障。

## 一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机械设备故障诊断技术领域,特别涉及一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法。

### 背景技术

[0002] 振动分析为现阶段机械设备故障诊断最为有效的途径之一,机械设备的状态劣化往往表现为振动信息的变化或异常。目前基于振动信息的信号处理方法,例如时域法、频域法还有时频域法,这些都已成功应用于轴承故障诊断中,并产生了很好的效果。然而,在滚动轴承故障诊断领域仍然面临着很多挑战,轴承故障的提取仍然具有很多困难。1、测试传感器与故障源之间冗长而复杂的传递路径能严重影响传递函数,进而使冲击信号的幅值降低、时间拉长,从而导致故障引起的脉冲很容易被噪声覆盖。2、轴承中滚子的随机波动会导致原本呈准周期的故障冲击的频谱包络谱进一步模糊。3、来自机械系统中的非周期性噪声及周期性干扰的影响,为提取轴承故障冲击增加了更多挑战。

[0003] 目前,解卷积方法被认为是能消除传递路径影响最有效的方法之一,而且解卷积方法能够自适应地设计滤波器的特性对于精确完整地过滤故障信息十分关键。在机械故障诊断领域,最常用的两种解卷积方法有两种,分别是最小熵解卷积方法和最大相关峭度解卷积方法,但是最小熵解卷积方法容易被信号中的随机冲击干扰影响,而最大相关峭度解卷积方法虽然能够克服随机冲击干扰的缺陷,但是该方法也需要精确的周期作为先验知识。而在滚动轴承的故障诊断中,预先精确确定故障轴承十分困难。首先,机械设备的旋转很难以完全保持恒定,因此由速度波动带来的故障周期计算不准确难以避免;其次,设备中的零部件繁多,滚动轴承数量通常也很多,很难预先确定故障源,因此,预先计算故障轴承的周期也不太现实。

### 发明内容

[0004] 为了克服上述现有的缺点,本发明的目的在于提供一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法,无需先验知识,就能实现精确的故障诊断。

[0005] 为实现上述目的,本发明方案采取的技术方案为:

[0006] 一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一:将振动加速度传感器吸附于对被测试滚动轴承的轴承座上,并对振动信号进行高频采样、截断和去均值处理,将处理后的振动信号记为 $x(n)$ ;

[0008] 步骤二:对振动信号 $x(n)$ 进行希尔伯特变换得到其解析信号 $\tilde{x}(n)$ ;

[0009] 步骤三:预先设定解卷积的迭代次数 $k$ ,滤波器长度 $L$ 并且初始化滤波器系数 $f = [0, 1, 0, 0, \dots, 0]$ ;然后计算得到解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的自相关谱,利用式(1)-(2)的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为迭代周期采样点数 $T_s$ ,并将该信息代入以下迭代步骤用于最优滤波器系数的选择;

$$[0010] \quad T_s = \arg \max_{\tau} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\bar{\tau}), N] \quad (1)$$

$$[0011] \quad a(\bar{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\bar{\tau}) dn \equiv 0 \quad (2)$$

[0012] 其中,N为解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的长度, $\tau$ 为偏移量, $\bar{\tau}$ 为自相关函数的零点位置;

[0013] 步骤四:对振动信号 $x(n)$ 进行最大相关峭度解卷积迭代滤波,其中,滤波器系数按照公式(3)实施,

$$[0014] \quad f = \frac{\|y\|^2}{(M+1)\|\beta\|^2} (X_0 X_0^T)^{-1} \sum_{m=0}^M X_{mT} \alpha_m \quad (3)$$

[0015] 其中,M为相关峭度的移位阶数,移位阶数设置为1,y为对振动信号 $x(n)$ 进行最大相关峭度解卷积滤波后的滤波信号,T为转置符号, $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数操作,

$$[0016] \quad X_r = \begin{bmatrix} x_{1-r} & x_{2-r} & x_{3-r} & \dots & x_{N-r} \\ 0 & x_{1-r} & x_{2-r} & \dots & x_{N-1-r} \\ 0 & 0 & x_{1-r} & \dots & x_{N-2-r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x_{N-L-r+1} \end{bmatrix}_{L \times N} \quad r = mT_s, m = 1, 2, \dots, M$$

$$[0017] \quad \alpha_m = \begin{bmatrix} y_{1-mT_s}^{-1} (y_1^2 y_{1-T_s}^2 \dots y_{1-MT_s}^2) \\ y_{2-mT_s}^{-1} (y_2^2 y_{2-T_s}^2 \dots y_{2-MT_s}^2) \\ \dots \\ y_{N-mT_s}^{-1} (y_N^2 y_{N-T_s}^2 \dots y_{N-MT_s}^2) \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} y_1 y_{1-T_s} \dots y_{1-MT_s} \\ y_2 y_{2-T_s} \dots y_{2-MT_s} \\ \dots \\ y_N y_{N-T_s} \dots y_{N-MT_s} \end{bmatrix}$$

[0018] 步骤五:得到第一次滤波后的信号 $y_1$ ,并进行希尔伯特变换得到其解析信号 $\tilde{y}_1(n)$ ,按照式(4)-(5)的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为新的迭代周期采样点数 $T_s^1$ ;

$$[0019] \quad T_s^1 = \arg \max_{\tau} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\bar{\tau}), N] \quad (4)$$

$$[0020] \quad a(\bar{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n+\bar{\tau}) dn \equiv 0 \quad (5)$$

[0021] 步骤六:按照式(3)利用新的迭代周期采样点数 $T_s^1$ 更新滤波器系数进行下一步滤波,直到迭代数量达到指定的迭代数量k次后终止,选择最后的滤波信号 $y_k$ 为最佳滤波信号;

[0022] 步骤七:对滤波信号 $y_k$ 进行包络分析并得到包络谱,对包络谱进行分析,进而提取故障特征频率,最终识别出滚动轴承故障。

[0023] 本发明相比于现有技术,具有以下有益效果:

[0024] a) 本发明相比于传统的最大相关峭度解卷积方法,不需要任何先验知识,也无需

对系统故障特征频率进行预估,方法具有鲁棒性。

[0025] b) 本发明比传统的最大相关峭度解卷积方法,操作简单,无需重采样操作,输入参数少。

[0026] c) 本发明克服了传统解卷积方法的诸多缺陷,例如对随机冲击成分敏感。

### 附图说明

[0027] 图1为本发明实施例的轴承实验台示意图。

[0028] 图2为本发明方法的流程图。

[0029] 图3为实施例的振动信号 $x(n)$ 。

[0030] 图4为实施例振动信号的解析信号 $\tilde{x}(n)$ 。

[0031] 图5为经最大相关峭度解卷积方法处理后的信号。

[0032] 图6为经最大相关峭度解卷积方法处理后信号的包络谱。

[0033] 图7为经无需周期的最大相关峭度解卷积方法处理后的信号。

[0034] 图8为经无需周期的最大相关峭度解卷积方法处理后信号的包络谱。

### 具体实施方式

[0035] 下面结合附图和实施例对本发明做详细描述。

[0036] 实施例采用某机车轴承试验台,如图1所示,该试验台由液压马达、驱动轮、轴承和机车轮对等组成,液压马达带动驱动轮运动进而驱动轴承外圈运动,轴承内圈固定在机车轮对的车轴上,加速度传感器固定在轴承一端,测量轴承的振动信号。

[0037] 利用无需周期的最大相关峭度解卷积方法对该试验台中车轮轴承进行诊断,应用对实验数据进行分析并和传统最大相关峭度解卷积方法进行对比。

[0038] 如图2所示,一种无需周期的最大相关峭度解卷积方法,包括以下步骤:

[0039] 步骤一:将振动加速度传感器吸附于对被测试滚动轴承的轴承座上,并对振动信号进行高频采样、截断和去均值处理,其中采样频率为76.8k Hz,时长为1s,处理后的振动信号 $x(n)$ 如图3所示;

[0040] 步骤二:对振动信号 $x(n)$ 进行希尔伯特变换得到其解析信号 $\tilde{x}(n)$ ,如图4所示;

[0041] 步骤三:预先设定解卷积的迭代次数 $k=30$ ,滤波器长度 $L=100$ 并且初始化滤波器系数 $f=[0,1,0,0,\dots,0]$ ;然后计算得到解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的自相关谱,利用式(1)-(2)的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为迭代周期采样点数 $T_s$ ,并将该信息代入以下迭代步骤用于最优滤波器系数的选择;

$$[0042] \quad T_s = \arg \max_{\tau} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\vec{\tau}), N] \quad (1)$$

$$[0043] \quad a(\vec{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}(n+\tau) dn \equiv 0 \quad (2)$$

[0044] 其中, $N$ 为解析信号 $\tilde{x}(n)$ 的长度, $\tau$ 为偏移量, $\vec{\tau}$ 为自相关函数的零点位置;

[0045] 步骤四:对振动信号 $x(n)$ 进行最大相关峭度解卷积迭代滤波,其中,滤波器系数按照公式(3)实施,

$$[0046] \quad f = \frac{\|y\|^2}{(M+1)\|\beta\|^2} (X_0 X_0^T)^{-1} \sum_{m=0}^M X_{mT} \alpha_m \quad (3)$$

[0047] 其中,  $M$ 为相关峭度的移位阶数, 移位阶数设置为1,  $y$ 为对振动信号  $x(n)$  进行最大相关峭度解卷积滤波后的滤波信号,  $T$ 为转置符号,  $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数操作,

$$[0048] \quad X_r = \begin{bmatrix} x_{1-r} & x_{2-r} & x_{3-r} & \cdots & x_{N-r} \\ 0 & x_{1-r} & x_{2-r} & \cdots & x_{N-1-r} \\ 0 & 0 & x_{1-r} & \cdots & x_{N-2-r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x_{N-L-r+1} \end{bmatrix}_{L \times N} \quad r = mT_s, m = 1, 2, \dots, M$$

$$[0049] \quad \alpha_m = \begin{bmatrix} y_{1-mT_s}^{-1} (y_1^2 y_{1-T_s}^2 \cdots y_{1-MT_s}^2) \\ y_{2-mT_s}^{-1} (y_2^2 y_{2-T_s}^2 \cdots y_{2-MT_s}^2) \\ \cdots \\ y_{N-mT_s}^{-1} (y_N^2 y_{N-T_s}^2 \cdots y_{N-MT_s}^2) \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} y_1 y_{1-T_s} \cdots y_{1-MT_s} \\ y_2 y_{2-T_s} \cdots y_{2-MT_s} \\ \cdots \\ y_N y_{N-T_s} \cdots y_{N-MT_s} \end{bmatrix}$$

[0050] 步骤五: 得到第一次滤波后的信号  $y_1$ , 并进行希尔伯特变换得到其解析信号  $\tilde{y}_1(n)$ , 按照式 (4) - (5) 的方式选择自相关谱中第一个过零点之后的所有成分的最大值点作为新的迭代周期采样点数  $T_s^1$ ;

$$[0051] \quad T_s^1 = \underset{\tau}{arg \max} \left[ \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n+\tau) dn \right], \tau \in (\min(\bar{\tau}), N] \quad (4)$$

$$[0052] \quad a(\bar{\tau}) = \int_{n=1}^N \tilde{y}_1(n) \tilde{y}_1(n+\tau) dn \equiv 0 \quad (5)$$

[0053] 步骤六: 按照式 (3) 利用新的迭代周期采样点数  $T_s^1$  更新滤波器系数进行下一步滤波, 直到迭代数量达到指定的迭代数量30次后终止, 选择最后的滤波信号  $y_{30}$  为最佳滤波信号;

[0054] 步骤七: 对滤波信号  $y_{30}$  进行包络分析并得到包络谱, 对包络谱进行分析, 进而提取故障特征频率, 最终识别出滚动轴承故障。

[0055] 如图5所示, 图5为利用最大相关峭度解卷积方法滤波后的信号, 可以看到滤波信号中基本是大的干扰冲击信号, 没有发现明显的周期性的轴承故障冲击信号; 如图6所示, 图6为图5对应的包络谱信号, 从中也难以发现轴承故障的特征频率。如图7所示, 图7为使用本发明方法应用于相同信号后的滤波信号, 从中可以看到明显的周期性冲击成分; 如图8所示, 图8为图7对应的包络谱信号, 其中的内圈故障特征频率以及他们的谐频成分十分明显。因此可以看出, 本发明方法相比于传统的最大相关峭度解卷积方法优势明显。

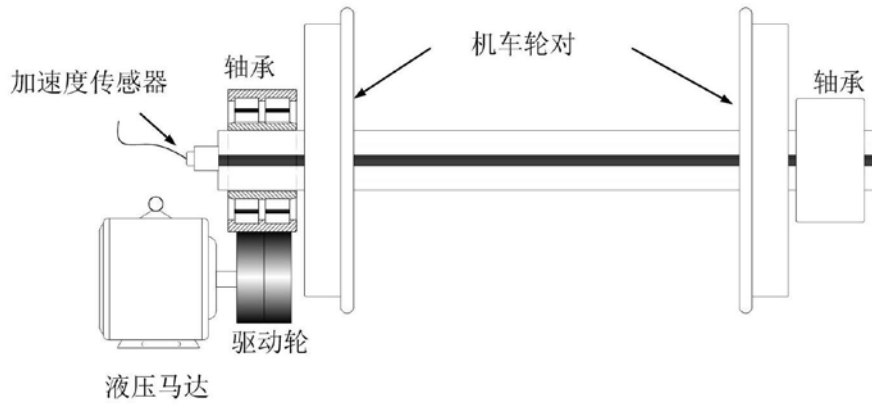


图1



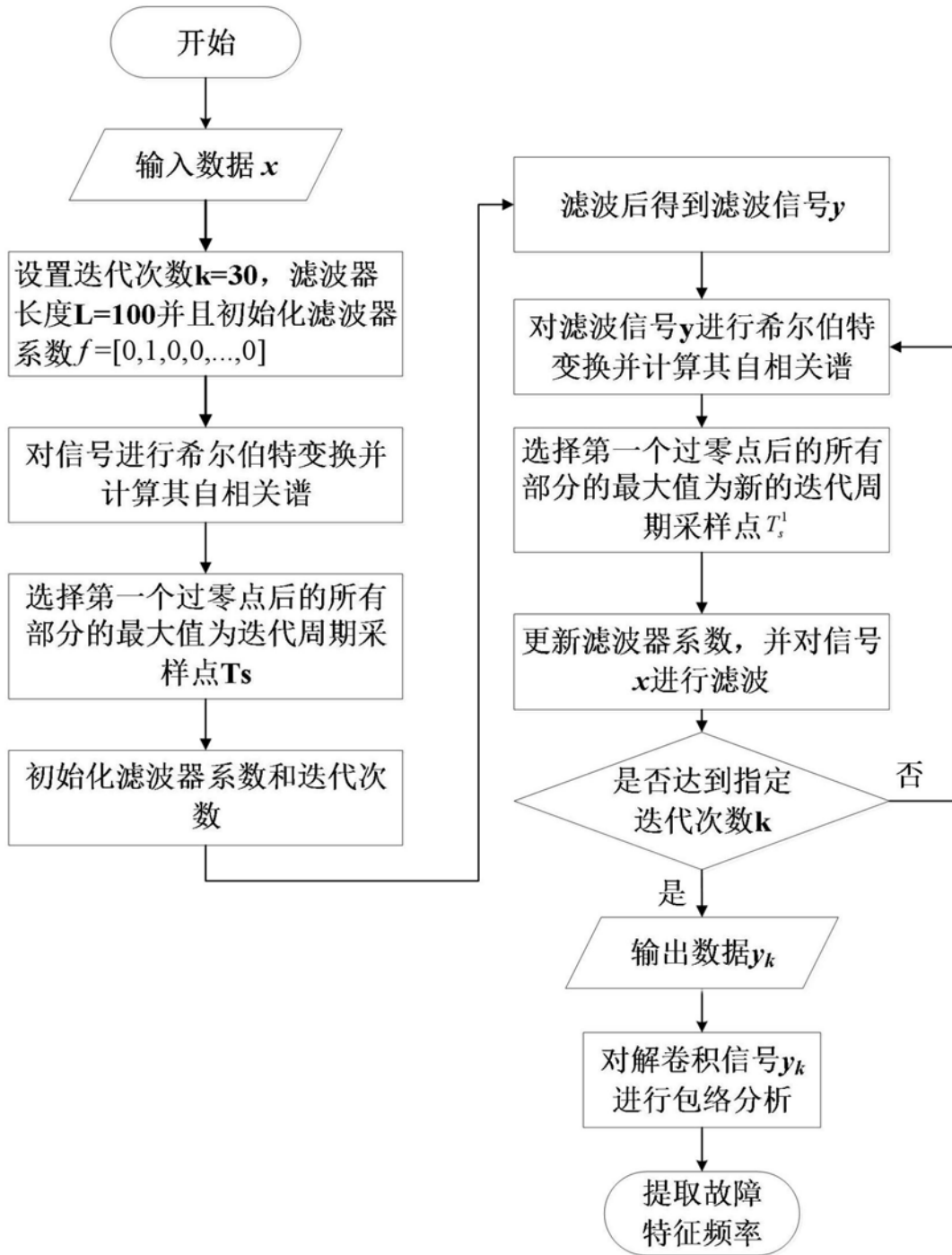


图2

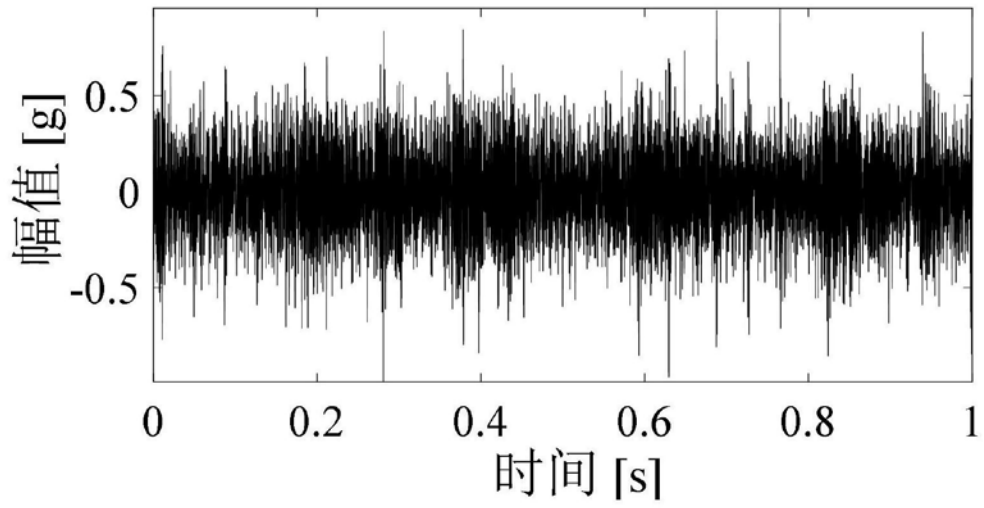


图3

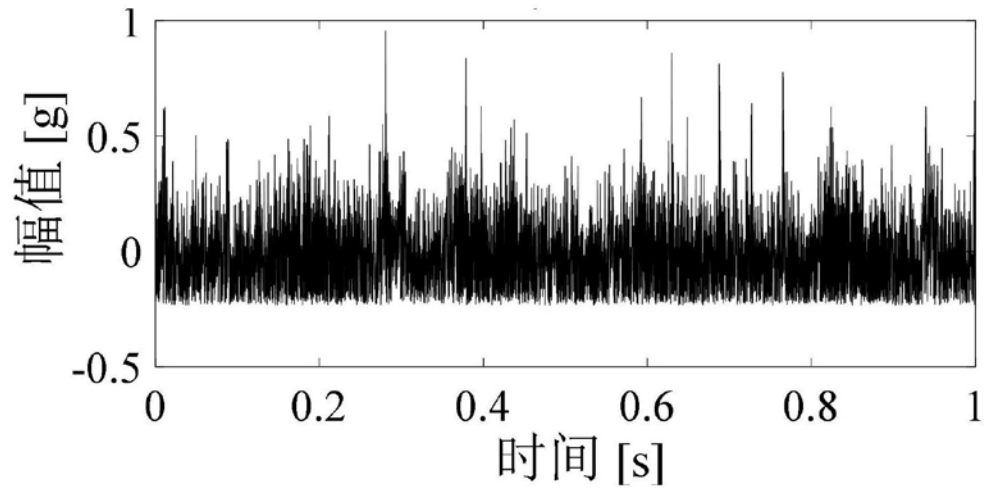


图4

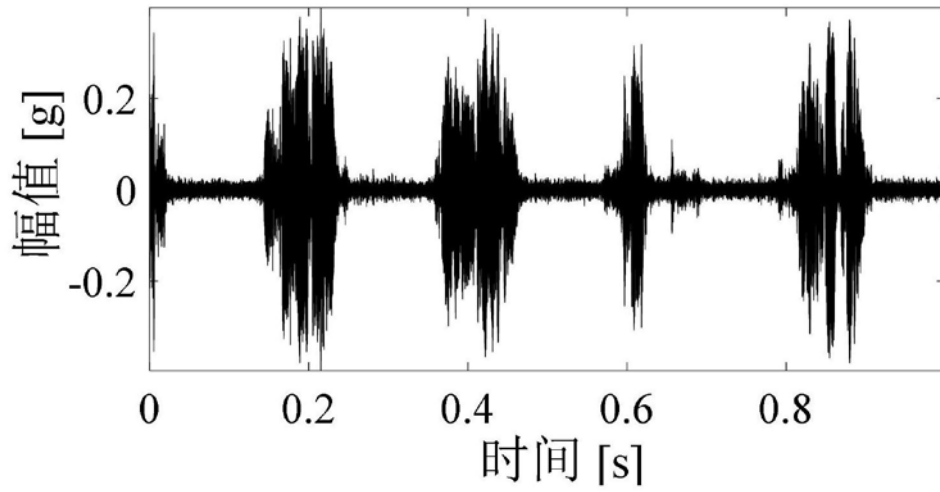


图5

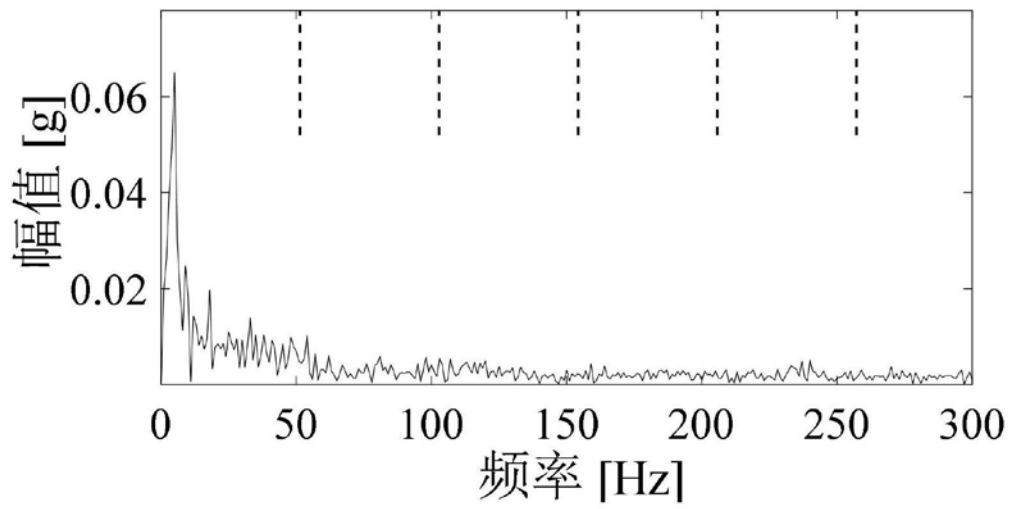


图6

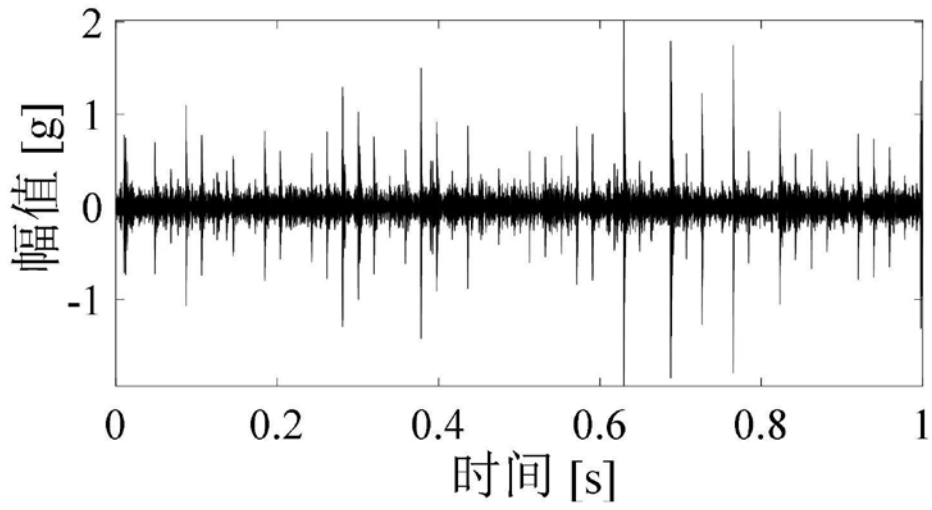


图7

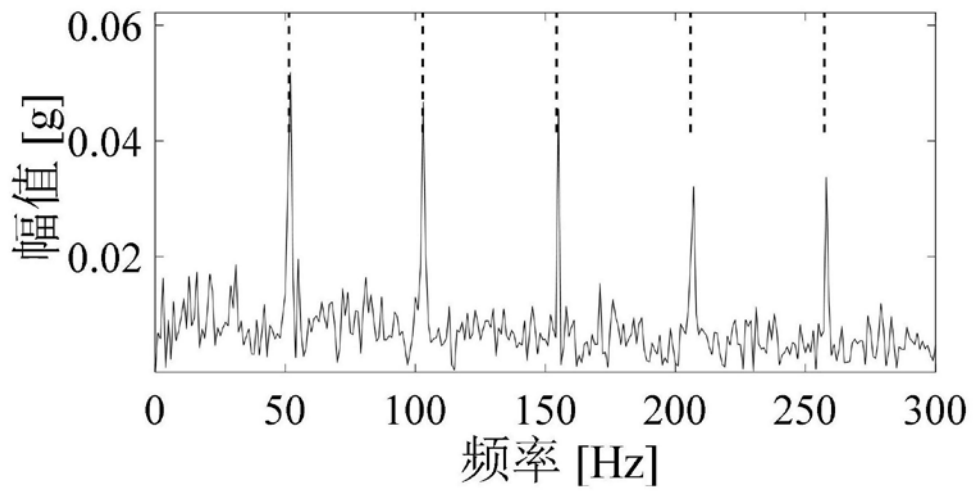


图8