



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113820004 B

(45) 授权公告日 2024.05.28

(21) 申请号 202111085988.2

(22) 申请日 2021.09.16

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113820004 A

(43) 申请公布日 2021.12.21

(73) 专利权人 航天智控(北京)监测技术有限公司

地址 100095 北京市海淀区紫雀路55号院9号楼六层101-37

(72) 发明人 胡勇 彭六保 曾志生 荆云砚

(74) 专利代理机构 北京巨弘知识产权代理事务所(普通合伙) 11673

专利代理师 赵洋

(51) Int. Cl.

G01H 17/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101825722 A, 2010.09.08

CN 102721462 A, 2012.10.10

CN 105068571 A, 2015.11.18

CN 105738696 A, 2016.07.06

CN 111693136 A, 2020.09.22

CN 113125179 A, 2021.07.16

KR 20100022691 A, 2010.03.03

US 2018375519 A1, 2018.12.27

WO 2020183489 A1, 2020.09.17

齐国清, 贾欣乐. 基于DFT相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法.《电子学报》.2001, (第09期), 第1164-1167页.

审查员 苏秦

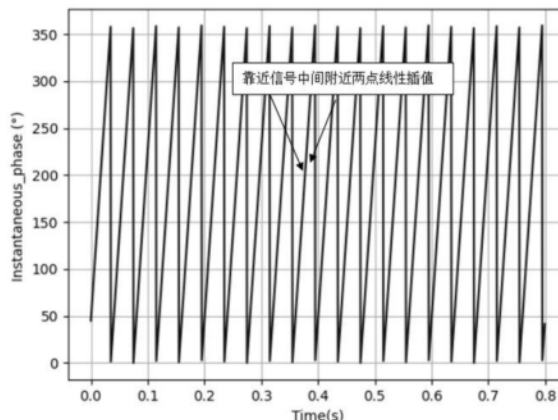
权利要求书2页 说明书9页 附图9页

(54) 发明名称

一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法

(57) 摘要

本发明提供一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 首先根据原始信号进行硬阈值带通滤波, 提取信号趋势部分, 再利用Hilbert变换提取信号瞬时相位, 利用线性插值和信号中间位置估计初始相位, 降低信号边界“吉布斯”效应对估计结果的影响。本发明全过程只有一个特征频率参数, 提高了相位估计算法鲁棒性; 涉及的FFT、IFFT、Hilbert变换等均有快速算法, 满足在线处理, 可有效应用于故障诊断、设备健康管理等实时工业监测情景; 通过滤波提高指定特征频率处信噪比, 降低其它非特征频谱对初始相位估计的干扰; 通过滤波信号长度一半附近位置估计初始相位, 避免因为“吉布斯效应”产生的信号边界震荡带来的计算误差, 提高了该方法的适用场景。



1. 一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,其特征在於:将原始信号 $f(t)$ 进行FFT后采用硬阈值带通滤波得到滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ ;

将所述滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ 进行Hilbert变换提取瞬时相位 $\varphi(t)$ ;

将所述瞬时相位 $\varphi(t)$ 利用线性插值法和信号中心位置得到初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ ;

包括以下步骤:

S1、傅里叶变换:将所述原始信号 $f(t)$ 进行FFT后得到频谱 $F(\omega)$ ;

S2:硬阈值带通滤波:将所述频谱 $F(\omega)$ 进行硬阈值带通滤波得到变换后频谱 $\tilde{F}(\omega)$ ,再将所述变换后频谱 $\tilde{F}(\omega)$ 进行IFFT得到所述滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ ;

S3、Hilbert变换:将所述滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ 进行Hilbert变换得到希尔伯特变换信号 $\hat{f}(t)$ ,将所述希尔伯特变换信号 $\hat{f}(t)$ 解析后提取所述瞬时相位 $\varphi(t)$ ;

S4、线性插值法:构造解析信号 $z(t)$ 并利用线性插值法将所述瞬时相位 $\varphi(t)$ 解析,再根据所述信号中间位置估计得到所述初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ ;

所述解析信号 $z(t)$ 为:

$$z(t) = \tilde{f}(t) + i \cdot \hat{f}(t);$$

其中所述解析信号 $z(t)$ 的极坐标为: $z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$ ,

$A(t)$ 为所述原始信号 $f(t)$ 的包络;

$A(t)$ 的表达式为:

$$A(t) = \sqrt{f(t)^2 + \hat{f}(t)^2};$$

所述瞬时相位 $\varphi(t)$ 为:

$$\varphi(t) = (\arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)}) / (2 * \pi) * 180;$$

根据所述信号中间位置估计得到所述初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ 的具体方法为:

计算信号长度一半附近的索引 $ind$ 并判断所述索引 $ind$ 是否为整数,若判断为是,则 $ind \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_L]$ ,记 $ind = t_k, k = L/2$ ,所述初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ 为: $\varphi(t_{ind}) = \varphi(t_k)$ ;

若判断为否,记索引 $ind$ 下近邻整数和上近邻整数分别为 $ind_d$ 和 $ind_u$ ,所述初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ 为:

$$\varphi(t_{ind}) = \frac{t_{ind} - ind_u}{ind_d - ind_u} \varphi(ind_d) + \frac{t_{ind} - ind_d}{ind_u - ind_d} \varphi(ind_u);$$

所述索引 $ind$ 计算公式如下:

$$ind = n_{temp} * nt,$$

其中, $n_{temp}$ 为整个信号长度一半附近的整周期个数, $nt$ 为一个周期包含采样点数;

整个信号长度一半附近的整周期个数 $n_{temp}$ 的计算公式如下：

$$n_{temp} = \frac{L}{2 * nt};$$

其中,L为采样点数;

一个周期包含采样点数 $nt$ 的计算公式如下：

$$nt = \frac{Fs}{f_0};$$

其中, $F_s$ 为采样频率, $f_0$ 为特征频率。

2. 根据权利要求1所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,其特征在于:

步骤S1中,FFT公式为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt,$$

其中, $x(t)$ 为所述原始信号 $f(t)$ 的信号点,

$f(t) = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_L]$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,其特征在于:

步骤S2中,所述硬阈值带通滤波为:将所述频谱 $F(\omega)$ 在 $[0.75*f_0, 1.25*f_0]$ 区域范围外

设定为0,得到所述变换后频谱 $\tilde{F}(\omega)$ ,其中 $f_0$ 为特征频率,即要保留的频率成分;

$$\text{IFFT为: } \tilde{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega;$$

其中, $\tilde{x}(t)$ 为所述滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ 的信号点

$$\tilde{f}(t) = \tilde{f}(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_L]$$

4. 根据权利要求1所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,其特征在于:

步骤S3中,Hilbert变换为: $\hat{f}(t) = H[\tilde{f}(t)] = \tilde{f}(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{f}(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda$ 。

## 一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及测量测试技术领域,具体涉及一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法。

### 背景技术

[0002] 传统的机械故障诊断技术以前主要依靠现场有工作的经验的人通过人耳和触摸设备仪器进行分析,这个方式需要有大量工作经验的积累,依靠专家经验的积累并不能很好的进行推广,其次存在人的主观因素和客观因素,故障诊断结论人为干扰性大。在设备诊断及预测性维护中,基于振动信号分析是应用最广泛的故障监测方法之一。其主要技术都是通过时域图和频域图来分析设备的特征频率来对应不同的故障类型。

[0003] 时域波形反应信号幅值及相位随时间变化的特征,时域波形一般可以通过对信号滤波和放大等处理方式采集到设备的信号,时域信号可以很直观的表现不同时刻下设备的运行状态及其参数量,此时收集的振动波形可以反映出设备的健康状态,通过直观的观看振动信号波形,可以得到振动信号在不同时刻的变化。一般机械设备的振动信号都是非平稳的信号,其振动的波形是由设备多个部件旋转产生的

[0004] 由于时域波形在设备故障分析中,比较单一,设备部件的振动信号进行了叠加,不能直观的分析出设备此时的状态,从而需要将时域信号进行傅里叶变化,将动态复杂的信号进行分解,将不同频率的振动信号在频域图中体现出来,频域图的故障特征频率可以反映设备此时的运行状态。将信号波形进行时频转换可以将采集到的一个周期内的波形转换成多个频率分量。根据傅里叶变换,将时域信号映射到频域上,频域图中反映了信号的幅度关系和特征频率的关系,频域信号分析不需要考虑信号是否为线性关系,直接通过频率信号来反映设备的运行状态。

[0005] 通常将开机、停机过程的振动信号称为瞬态信号,它是转子系统对转速变化的响应,是转子动态特征和故障征兆的反映。仪器在启停过程中,转子经历了各种转速,其振动信号是转子系统对转速变化的响应,是转子动态特征和故障征兆的外在表现,包含了平时难以获得的丰富信息。因此,启停过程分析是转子检测的一项重要工作。通过分析设备振动信号的幅值和相位偏移,能够发现转子系统的共振频率和临界转速。根据低速下的幅值和相位,有助于了解转子的弯曲程度。通过相位的变化可以看出真个启停机过程中转子系统对于转子不平衡激荡的响应。(系统在通过临界转速时幅值响应有明显的共振峰,而相位在其前后变化近 $180^\circ$ )

[0006] 为了避开共振引起的振动异常,提高故障诊断的正确率,需要对瞬态信号(启停机情况)进行幅值和相位估计,通过改变机器结构,增大基础刚度,保证转子有良好的平衡性,使得风机运行转速避开共振区。

[0007] 振动信号的相位计算常用方法如下:

[0008] 快速傅里叶变换(FFT)频谱分析方法,在对离散信号进行频谱分析时,由于离散信号是进行了时域截断的,会产生能量泄漏、频谱幅值变小、测量精度降低等问题。为减小这

类误差,国内外学者提出了基于矩形窗、Hanning窗、Blackman窗、Blackman—Harris窗的信号加窗插值FFT分析算法,在一定程度上抑制了频谱泄漏,提高了信号参数估计的准确度。通过调整窗参数,选择旁瓣峰值电平小且旁瓣渐近衰减速率大的窗函数。对信号进行处理可以有效降低信号时域截断时相邻频谱旁瓣间的相互干扰造成的长范围泄漏。

[0009] 正弦逼近法,完全是基于现代计算机技术和数字信号处理技术的发展而产生的。以最小二乘法为核心的正弦逼近法,能够实现1Hz—10kHz宽频带范围内振动传感器相频特性的绝对测量,特别适用于采样周期数较少的低频大振幅情况下的振动传感器幅相特性的测量。

[0010] 全相位FFT谱分析方法能够一定程度地抑制频谱泄露问题。该分析方法分析两个存在延时关系的序列的频谱,再使用时移相位差法对两次相位谱分析的结果进行校正,可以根据已知的正弦信号频率得到准确的相位、幅值的校正。

[0011] 模拟法就是使用相位测量电路对输入的交变信号相位进行测量,由于该电路一般涉及到很多高性能的元器件,电路设计复杂,元件昂贵,测量精度有限且容易受到周围环境的干扰。

[0012] 过零法主要是检测信号幅度为0时两组同频信号之间的相位差,该方法的测量精度主要取决于采样时间的间隔大小,并且计算结果容易受到外部因素的干扰。相关法在进行相位差计算时,常常需要一个同频率的基准信号作为参考,先对输入信号和基准信号进行相关度计算,再求解输入信号和基准信号之间相位差。

[0013] 频谱法是先计算出两组输入信号的相频特性,然后根据待分析信号频谱图中的峰值位置,计算获得当前输入信号的相位值,当需要进行两组信号的相位差时,可计算出单个信号的相位,然后相减即可。其中后两种检测方法在实际测量实验中表现出良好的抗干扰性。频谱法不仅可用于测量两组信号之间的差异,还可独立分析每组输入信号参数,例如:幅值、相位、频率等。

[0014] 现有技术混杂了不同频率以及噪声的情况下,全相位时移相位差法提取的相位信息虽然十分精确,但是幅值的准确度下降的比较大;正弦逼近法在提取幅值信息方面更为精确,但相位的提取较差;FFT 频谱分析法的准确度相对最差。而当信号分析的频率分辨力不足以分辨信号频率时,幅值、相位估计准确度都有所下降。传统的进行FFT 频谱分析的方法,不可避免会出现能量泄漏,幅值变小,精度降低,且无法实现真正的整周期截断。在对离散信号加各种窗函数后虽然频谱幅值的测量精度有所提高,但是相位的最大误差仍然很大。正弦逼近法理论较成熟,测量范围较宽,但是正弦逼近法是采用最小二乘法乘法来拟和出正弦信号的幅值、相位,最小二乘法所确定的估计量的误差取决于测量数据的误差和方程组所给出的函数关系。

## 发明内容

[0015] 本发明是为了解决传统相位估计方法存在鲁棒性低、实时性差等问题,我们提出了一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,用于在线故障诊断。该方法首先根据原始信号进行硬阈值带通滤波,提取信号主要趋势部分,再利用Hilbert变换提取信号瞬时相位,利用信号中间位置估计(线性插值)初始相位,降低信号边界“吉布斯”效应对估计结果的影响。

[0016] 本发明提供一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,将原始信号  $f(t)$  进行FFT后采用硬阈值带通滤波得到滤波后信号  $\tilde{f}(t)$ ;

[0017] 将滤波后信号  $\tilde{f}(t)$  进行Hilbert变换提取瞬时相位  $\varphi(t)$ ;

[0018] 将瞬时相位  $\varphi(t)$  利用线性插值法和信号中心位置得到初始相位值  $\varphi(t_{ind})$ 。

[0019] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,作为优选方式,包括以下步骤:

[0020] S1、傅里叶变换:将原始信号  $f(t)$  进行FFT后得到频谱  $F(\omega)$ ;

[0021] S2:硬阈值带通滤波:将频谱  $F(\omega)$  进行硬阈值带通滤波得到变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$ ,再将变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$  进行IFFT得到滤波后信号  $\tilde{f}(t)$ ;

[0022] S3、Hilbert变换:将滤波后信号  $\tilde{f}(t)$  进行Hilbert变换得到希尔伯特变换信号  $\hat{f}(t)$ ,将希尔伯特变换信号  $\hat{f}(t)$  解析后提取瞬时相位  $\varphi(t)$ ;

[0023] S4、线性插值法:构造解析信号  $z(t)$  并利用线性插值法将瞬时相位  $\varphi(t)$  解析,再根据信号中间位置估计得到初始相位值  $\varphi(t_{ind})$ 。

[0024] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,作为优选方式,步骤S4中,

[0025] 解析信号  $z(t)$  为:

$$[0026] \quad z(t) = \tilde{f}(t) + i \cdot \hat{f}(t);$$

[0027] 其中解析信号  $z(t)$  的极坐标为:  $z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$ ,

[0028]  $A(t)$  为原始信号  $f(t)$  的包络;

[0029]  $A(t)$  的表达式为:  $A(t) = \sqrt{f(t)^2 + \hat{f}(t)^2}$ 。

[0030] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,作为优选方式,步骤S4中,瞬时相位  $\varphi(t)$  为:

$$[0031] \quad \varphi(t) = (\arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)}) / (2 * \pi) * 180。$$

[0032] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,作为优选方式,步骤S4中,根据信号中间位置估计得到初始相位值  $\varphi(t_{ind})$  的具体方法为:

[0033] 计算信号长度一半附近的索引  $ind$  并判断索引  $ind$  是否为整数,若判断为是,则  $ind \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_L]$ , 记  $ind = t_k, k = L/2$ , 初始相位值  $\varphi(t_{ind})$  为:  $\varphi(t_{ind}) = \varphi(t_k)$ ;

[0034] 若判断为否,记索引  $ind$  下近邻整数和上近邻整数分别为  $ind_d$  和  $ind_u$ , 初始相位值  $\varphi(t_{ind})$  为:

$$[0035] \quad \varphi(t_{ind}) = \frac{t_{ind} - ind_u}{ind_d - ind_u} \varphi(ind_d) + \frac{t_{ind} - ind_d}{ind_u - ind_d} \varphi(ind_u)。$$

[0036] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法,作为优选方式,索引  $ind$  计算公式如下:

$$[0037] \quad ind = n_{temp} * nt,$$

[0038] 其中,  $n_{temp}$  为整个信号长度一半附近的整周期个数,  $nt$  为一个周期包含采样点数。

[0039] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 作为优选方式, 整个信号长度一半附近的整周期个数  $n_{temp}$  的计算公式如下:

$$[0040] \quad n_{temp} = \frac{L}{2 * nt};$$

[0041] 其中,  $L$  为采样点数;

[0042] 一个周期包含采样点数  $nt$  的计算公式如下:

$$[0043] \quad nt = \frac{Fs}{f_0};$$

[0044] 其中,  $Fs$  为采样频率,  $f_0$  为特征频率。

[0045] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 作为优选方式, 步骤S1中, FFT公式为:

$$[0046] \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt,$$

[0047] 其中,  $x(t)$  为原始信号  $f(t)$  的信号点,

[0048]  $f(t) = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_L]$ 。

[0049] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 作为优选方式, 步骤S2中, 硬阈值带通滤波为: 将频谱  $F(\omega)$  在  $[0.75*f_0, 1.25*f_0]$  区域范围外设定为0, 得到变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$ , 其中  $f_0$  为特征频率, 即要保留的频率成分;

$$[0050] \quad \text{IFFT为: } \tilde{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega;$$

[0051] 其中,  $\tilde{x}(t)$  为滤波后信号  $\tilde{f}(t)$  的信号点

$$[0052] \quad \tilde{f}(t) = \tilde{f}(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_L]$$

[0053] 本发明所述的一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 作为优选方式, 步骤S3中, Hilbert变换为:

$$[0054] \quad \hat{f}(t) = H[\tilde{f}(t)] = \tilde{f}(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{f}(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda。$$

[0055] 傅里叶变换 (FFT) 及其反变换 (IFFT)

[0056] 利用Fourier分析实现振动信号时域和频域之间的相互转换, 可以将原时域信号的研究转换为频域上的Fourier系数的研究。在信号处理领域, Fourier变换发挥了重要的作用, 具有里程碑式的意义, 它被看作是信号时域与频域之间的桥梁。对于信号  $x(t)$ , 其连续 Fourier变换 (FFT) 为

$$[0057] \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

[0058] 其逆变换 (IFFT) 为:

$$[0059] \quad x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

[0060] 在实际应用时,信号在时域和频域中往往是离散的,因此常用到的是离散Fourier变换 (DFT),考虑到运算速度与系统消耗方面,快速Fourier变换 (FFT) 被广泛应用于信号的频域分析中。

[0061] 硬阈值带通滤波

[0062] 本发明中计算信号FFT频谱,对高频谱区域做硬阈值处理,利用FFT反变换IFFT去除信号噪声,提高信号信噪比,提高后续估计初始相位的准确性。

[0063] 给定信号 $f(t)$ ,其中 $t \in (-\infty, +\infty)$ ,其傅里叶变换为 $F(\omega)$ ,假设我们要保留频率成分为 $f_0$ 部分,令频谱 $F(\omega)$ 在 $[0.75*f_0, 1.25*f_0]$ 区域范围外为0 (硬阈值操作),记该变换后的频谱为 $\tilde{F}(\omega)$ ,对于 $\tilde{F}(\omega)$ 执行FFT反变换 (即IFFT) 计算滤波后的信号 $\tilde{f}(t)$ 。希尔伯特变换

[0064] 设实值信号 $f(t)$ ,其中 $t \in (-\infty, +\infty)$ ,它的希尔伯特变换 (Hilbert) 定义为:

$$[0065] \quad \hat{f}(t) = H[f(t)] = f(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda$$

$$[0066] \quad \hat{f}(t) = H[\tilde{f}(t)] = \tilde{f}(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{f}(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda$$

[0067]  $\frac{\pi}{2}$  相位偏移

[0068] 记 $\frac{1}{\pi t}$ 的傅里叶变换 $F[\frac{1}{\pi t}] = -i \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} -i, & \omega > 0 \\ i, & \omega < 0 \end{cases}$ ,其中 $\omega$ 为频率,根据定理 $F[f(t) * g(t)] = F[f(t)]F[g(t)]$ ,

$$[0069] \quad F[f(t) * \frac{1}{\pi t}] = -i \cdot F[f(t)] \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} F[f(t)] e^{-i\frac{\pi}{2}} & \omega > 0 \\ F[f(t)] e^{i\frac{\pi}{2}} & \omega < 0 \end{cases},$$

[0070] 所以对实值信号 $f(t)$ 做希尔伯特变换后,其幅值不变,但是有 $\pm \frac{\pi}{2}$ 的相位偏移,对原始信号正频率部分产生 $+\frac{\pi}{2}$ 相移,对原始信号负频率部分产生 $-\frac{\pi}{2}$ 相移,同时原始信号 $f(t)$ 与其希尔伯特变换 (Hilbert)  $\hat{f}(t)$ 是正交的。

[0071] 解析信号

[0072] 定义解析信号 $z(t) = f(t) + i \cdot \hat{f}(t)$ ,其中 $\hat{f}(t)$ 是实值信号 $f(t)$ 的希尔伯特变换,

[0073]  $z(t)$ 极坐标表示为: $z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$ , $A(t)$ 为信号 $f(t)$ 的包络, $\varphi(t)$ 为信号 $f(t)$ 的瞬

时相位(角度):

$$[0074] \quad A(t)=\sqrt{f(t)^2 + \hat{f}(t)^2}, \quad \varphi(t)=(\arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)}) / (2 * \pi) * 180$$

$$[0075] \quad \text{瞬时频率定义为相位的导数: } \omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}。$$

[0076] 线性插值

[0077] 线性插值是一种较为简单的插值方法,其插值函数为一次多项式。设函数 $y=f(x)$ 在两点 $x_0, x_1$ 上的值分别为 $y_0, y_1$ ,求多项式 $y=\varphi_1(x)=a_0+a_1*x$ ,使满足 $y_0=\varphi_1(x_0), y_1=\varphi_1(x_1)$ ,计算得

$$[0078] \quad y = \varphi_1(x) = \frac{x-x_1}{x_0-x_1}y_0 + \frac{x-x_0}{x_1-x_0}y_1, \text{ 根据两个点的值,通过线性插值可以估计这两点之间任意一点的值。}$$

[0079] 方案流程

[0080] 为了有效对振动信号进行初始相位估计,提高后续故障诊断效果,本发明首先通过硬阈值带通滤波提高信号信噪比,接下来通过 Hilbert变换构造解析信号,通过该解析信号计算原始信号的瞬时相位。为了克服“频谱泄漏”对边界部分信号的影响,利用信号中心附近位置估计信号初始触发位置,具体方案流程如下:假设该信号  $f(t)$  长度为 $L=2048$ ,采样频率为 $F_s=2.56\text{KHz}$ :  $f(t)=f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L)=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_L]$ 。

[0081] 1. 计算原始信号 $f(x)$ 傅里叶变换 $F(\omega)$

[0082] 2. 根据设备转速设置硬阈值滤波频率范围:本例中假设设备转速为3000转/分,则该设备对应的1倍频(1X)为  $3000/60=50\text{Hz}$ , 2倍频(2X)为 $3000/60*2=100\text{Hz}$ , ... 8倍频(8X)为 $3000/60*8=400\text{Hz}$ ;如果我们需要估计1倍频(1X:  $f_0=50\text{Hz}$ )的初始相位,则令频谱 $F(\omega)$ 在 $[0.75*f_0, 1.25*f_0]$ 区域范围外为0(硬阈值操作),记该变换后的频谱为 $\tilde{F}(\omega)$ ,对 $\tilde{F}(\omega)$ 执行FFT反变换(即IFFT)计算滤波后的信号 $\tilde{f}(t)$ 。

[0083] 3. 计算滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ 的Hilbert变换 $\hat{f}(t) = H[\tilde{f}(t)]$

[0084] 4. 构造解析信号 $z(t) = \tilde{f}(t) + i \cdot \hat{f}(t)$ ,  $z(t)$ 极坐标表示为: $z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$ ,  $A(t)$ 为信号 $f(t)$ 的包络,  $\varphi(t)$ 为信号 $f(t)$ 的瞬时相位(角度单位)

$$[0085] \quad A(t)=\sqrt{f(t)^2 + \hat{f}(t)^2}, \varphi(t)=(\arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)}) / (2 * \pi) * 180$$

[0086] 5. 计算一个周期包含采样点数  $nt = \frac{F_s}{f_0}$ , 取整个信号长度一半附近的整周期个数

$$n_{\text{temp}} = \frac{L}{2 * nt}$$

[0087] 6. 计算信号长度一半附近的索引:  $\text{ind} = n_{\text{temp}} * nt$ , 若ind为整数, 则

[0088]  $\text{ind} \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_L]$ , 记  $\text{ind} = t_k$ , 其中  $k \in [1, 2, 3, \dots, L]$ ;  $K=L/2$  则估计的初始

相位为： $\varphi(t_{ind}) = \varphi(t_k)$ ；若ind不是整数，记ind下近邻整数和上近邻整数分别为 $ind_d$ 和 $ind_u$ ，则估计的初始相位为，

$$[0089] \quad \varphi(t_{ind}) = \frac{t_{ind} - ind_u}{ind_d - ind_u} \varphi(ind_d) + \frac{t_{ind} - ind_d}{ind_u - ind_d} \varphi(ind_u)$$

[0090] 本发明具有以下优点：

[0091] (1) 本方法全过程只有特征频率 $f_0$ 一个参数，其他中间参数都是自适应的。提高了相位估计算法鲁棒性。

[0092] (2) 本方法计算过程中涉及FFT、IFFT、Hilbert变换等均有快速算法，满足在线处理，可有效应用于故障诊断、设备健康管理等实时工业监测情景。

[0093] (3) 本方法通过滤波提高指定特征频率处的信噪比，降低其它非特征频谱对初始相位估计的干扰

[0094] (4) 本方法通过滤波信号长度一半附近位置估计初始相位，避免因为“吉布斯效应”产生的信号边界震荡带来的计算误差。

### 附图说明

[0095] 图1为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法流程图；

[0096] 图2为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A1单一频率信号图；

[0097] 图3为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A1 FFT 频谱图；

[0098] 图4为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A1瞬时相位图；

[0099] 图5为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A2单一频率信号图；

[0100] 图6为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A2FFT 频谱图；

[0101] 图7为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A2瞬时相位图；

[0102] 图8为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A3单一频率信号图；

[0103] 图9为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A3 FFT 频谱图；

[0104] 图10为一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法信号样本A3瞬时相位图。

### 具体实施方式

[0105] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。

[0106] 实施例1

[0107] 一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法，将原始信号 $f(t)$ 进行FFT后采用硬阈值带通滤波得到滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ ；

[0108] 将滤波后信号 $\tilde{f}(t)$ 进行Hilbert变换提取瞬时相位 $\varphi(t)$ ；

[0109] 将瞬时相位 $\varphi(t)$ 利用线性插值法和信号中心位置得到初始相位值 $\varphi(t_{ind})$ ；

[0110] 包括以下步骤：

[0111] S1、傅里叶变换：将原始信号 $f(t)$ 进行FFT后得到频谱 $F(\omega)$ ；

[0112] FFT公式为：

$$[0113] \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt ,$$

[0114] 其中,  $x(t)$  为原始信号  $f(t)$  的信号点,

$$[0115] \quad f(t) = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_L];$$

[0116] S2:硬阈值带通滤波:将频谱  $F(\omega)$  进行硬阈值带通滤波得到变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$ ,再将变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$  进行IFFT得到滤波后信号  $\tilde{f}(t)$ ;

[0117] 硬阈值带通滤波为:将频谱  $F(\omega)$  在  $[0.75*f_0, 1.25*f_0]$  区域范围外设定为0,得到变换后频谱  $\tilde{F}(\omega)$ ,其中  $f_0$  为特征频率,即要保留的频率成分;

$$[0118] \quad \text{IFFT为: } \tilde{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega ;$$

[0119] 其中,  $\tilde{x}(t)$  为滤波后信号  $\tilde{f}(t)$  的信号点

$$[0120] \quad \tilde{f}(t) = \tilde{f}(t_1, t_2, t_3, \dots, t_L) = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_L];$$

[0121] S3、Hilbert变换:将滤波后信号  $\tilde{f}(t)$  进行Hilbert变换得到希尔伯特变换信号  $\hat{f}(t)$ ,将希尔伯特变换信号  $\hat{f}(t)$  解析后提取瞬时相位  $\varphi(t)$ ;

$$[0122] \quad \text{Hilbert变换为: } \hat{f}(t) = H[\tilde{f}(t)] = \tilde{f}(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{f}(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda ;$$

[0123] S4、线性插值法:构造解析信号  $z(t)$  并利用线性插值法将瞬时相位  $\varphi(t)$  解析,再根据信号中间位置估计得到初始相位值  $\varphi(t_{ind})$ ;

[0124] 解析信号  $z(t)$  为:

$$[0125] \quad z(t) = \tilde{f}(t) + i \cdot \hat{f}(t) ;$$

[0126] 其中解析信号  $z(t)$  的极坐标为:  $z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$ ,

[0127]  $A(t)$  为原始信号  $f(t)$  的包络;

$$[0128] \quad A(t) \text{ 的表达式为: } A(t) = \sqrt{f(t)^2 + \hat{f}(t)^2} ;$$

[0129] 瞬时相位  $\varphi(t)$  为:

$$[0130] \quad \varphi(t) = (\arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)}) / (2 * \pi) * 180 ;$$

[0131] 根据信号中间位置估计得到初始相位值  $\varphi(t_{ind})$  的具体方法为:

[0132] 计算信号长度一半附近的索引  $ind$  并判断索引  $ind$  是否为整数,若判断为是,则  $ind \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_L]$ , 记  $ind = t_k, k = L/2$ , 初始相位值  $\varphi(t_{ind})$  为:  $\varphi(t_{ind}) = \varphi(t_k)$ ;

[0133] 若判断为否,记索引  $ind$  下近邻整数和上近邻整数分别为  $ind_d$  和  $ind_u$ , 初始相位值

$\varphi(t_{ind})$ 为:

$$[0134] \quad \varphi(t_{ind}) = \frac{t_{ind} - ind_u}{ind_d - ind_u} \varphi(ind_d) + \frac{t_{ind} - ind_d}{ind_u - ind_d} \varphi(ind_u);$$

[0135] 索引ind计算公式如下:

$$[0136] \quad ind = n_{temp} * nt,$$

[0137] 其中,  $n_{temp}$  为整个信号长度一半附近的整周期个数,  $nt$  为一个周期包含采样点数;

[0138] 整个信号长度一半附近的整周期个数  $n_{temp}$  的计算公式如下:

$$[0139] \quad n_{temp} = \frac{L}{2 * nt};$$

[0140] 其中,  $L$  为采样点数;

[0141] 一个周期包含采样点数  $nt$  的计算公式如下:

$$[0142] \quad nt = \frac{Fs}{f_0};$$

[0143] 其中,  $Fs$  为采样频率,  $f_0$  为特征频率。

[0144] 实施例2

[0145] 一种鲁棒的振动信号初始相位估计方法, 本实例采用航天智控(北京)监测技术有限公司“智能运维大数据云平台”采集实时数据, 分别对单一频率信号A1(图2: 25Hz, 采样频率  $Fs = 2560\text{Hz}$ , 采样点数  $L = 2048$ , 初始相位  $45^\circ$ ); 单一频率信号加随机噪声A2(图5: 25Hz, 采样频率  $Fs = 2560\text{Hz}$ , 采样点数  $L = 2048$ , 初始相位  $45^\circ$ , 加入随机噪声); 多个频率信号混合加随机噪声A3(图8:  $f_1 = 25\text{Hz}$ , 初始相位  $45^\circ$ ;  $f_2 = 50\text{Hz}$ , 初始相位  $60^\circ$ ;  $f_3 = 100\text{Hz}$ , 初始相位  $30^\circ$ ; 采样频率  $Fs = 2560\text{Hz}$ , 采样点数  $L = 2048$ , 加入随机噪声)

[0146] 1. 对信号样本A1在线分析如图2所示, 计算其FFT频谱如图3所示。本信号没有加入噪声, 忽略方案中硬阈值带通滤波步骤。通过Hilbert变换估计其瞬时相位如图4所示, 根据A1长度一半附近位置线性插值估计初始相位为  $44.99^\circ$  (误差  $0.01^\circ$ )。

[0147] 2. 对信号样本A2在线分析如图5所示, 计算其FFT频谱如图6所示, A2受噪声干扰比较大, 通过硬阈值带通滤波, 保持  $f = [18.75, 31.25]$  部分频率。通过Hilbert变换估计其瞬时相位如图7所示, 根据A2长度一半附近位置估计初始相位为  $44.67^\circ$  (误差  $0.33^\circ$ )。

[0148] 3. 对信号样本A3在线分析如图8所示, 计算其FFT频谱如图9所示, A3受噪声干扰比较大, 指定计算  $f_2 = 50\text{Hz}$  频率成分的初始相位, 通过硬阈值带通滤波, 保持  $f = [43.75, 56.25]$  部分频率。通过Hilbert变换估计其瞬时相位如图10所示, 根据A3长度一半附近位置估计初始相位为  $60.8^\circ$  (误差  $0.8^\circ$ )。

[0149] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。

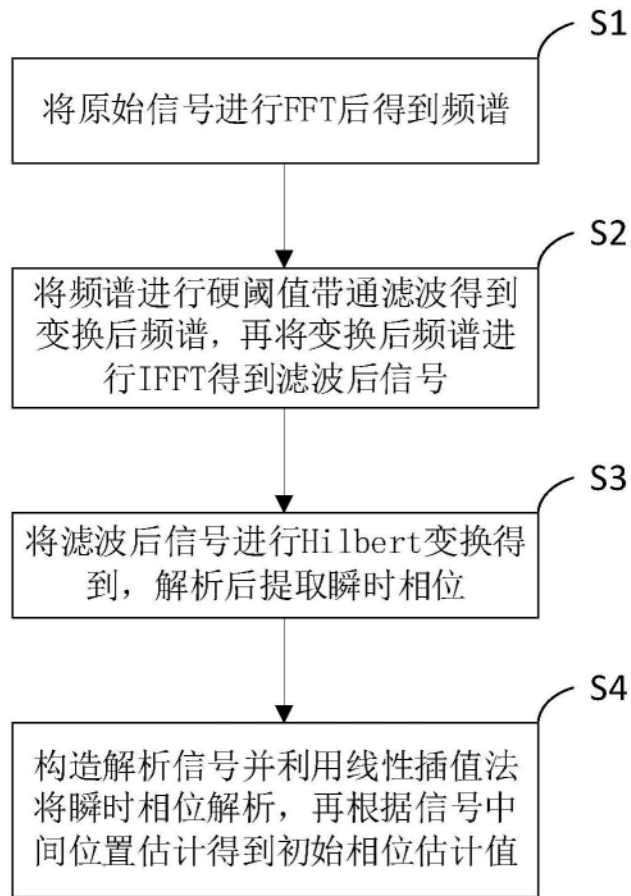


图1

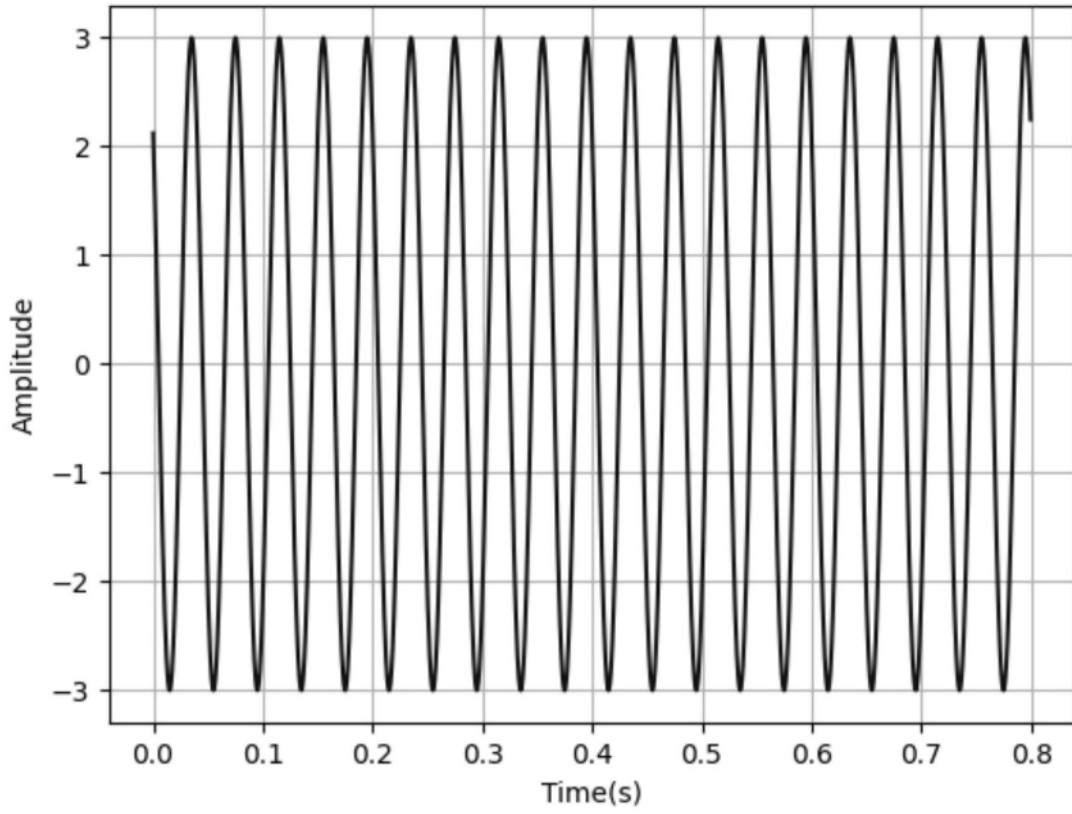


图2

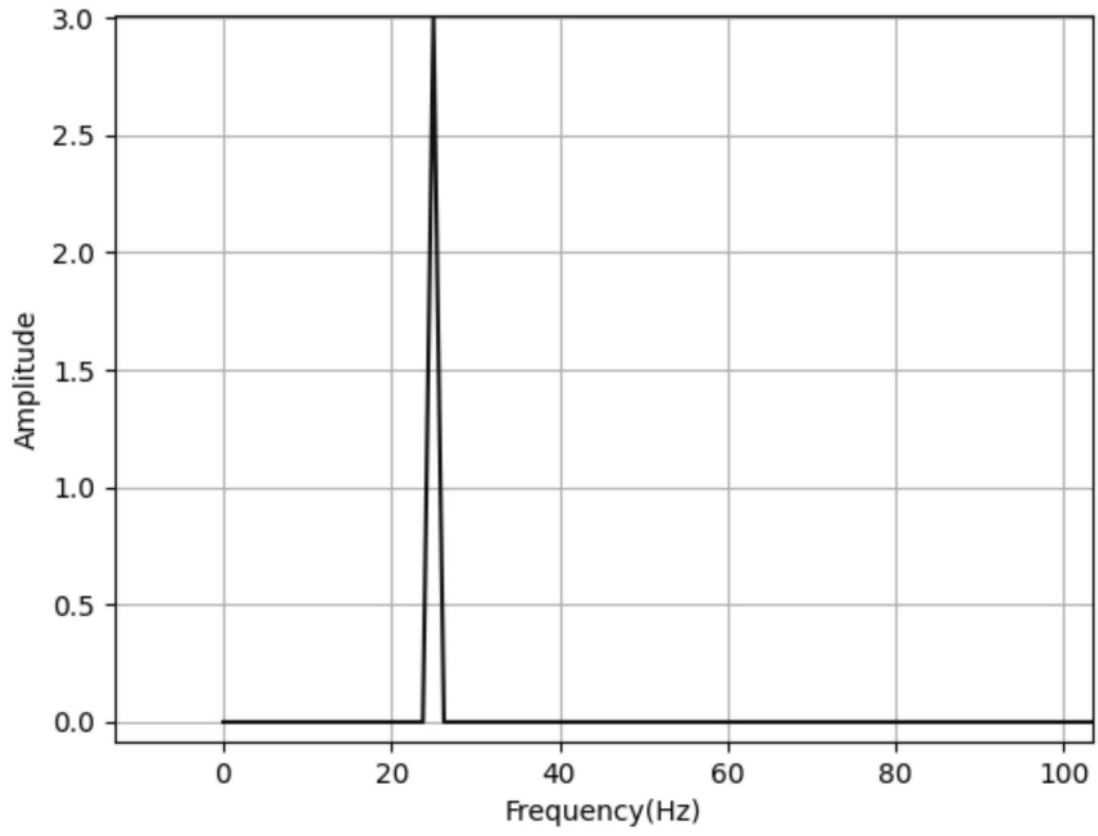


图3

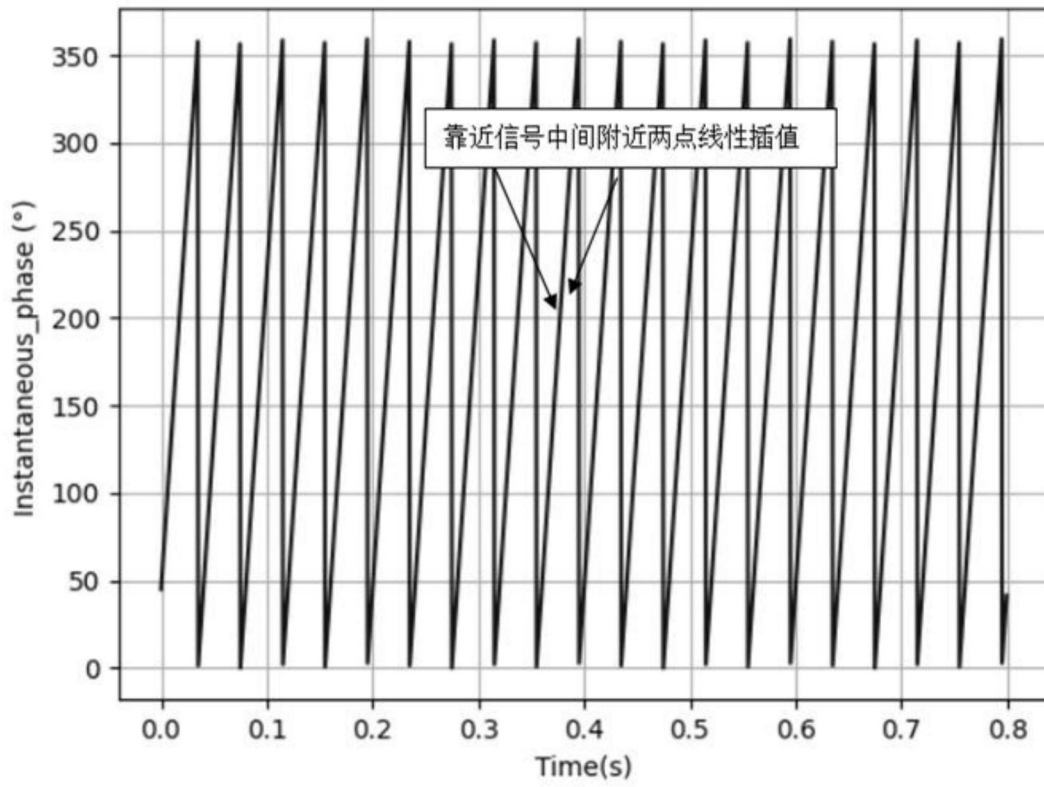


图4

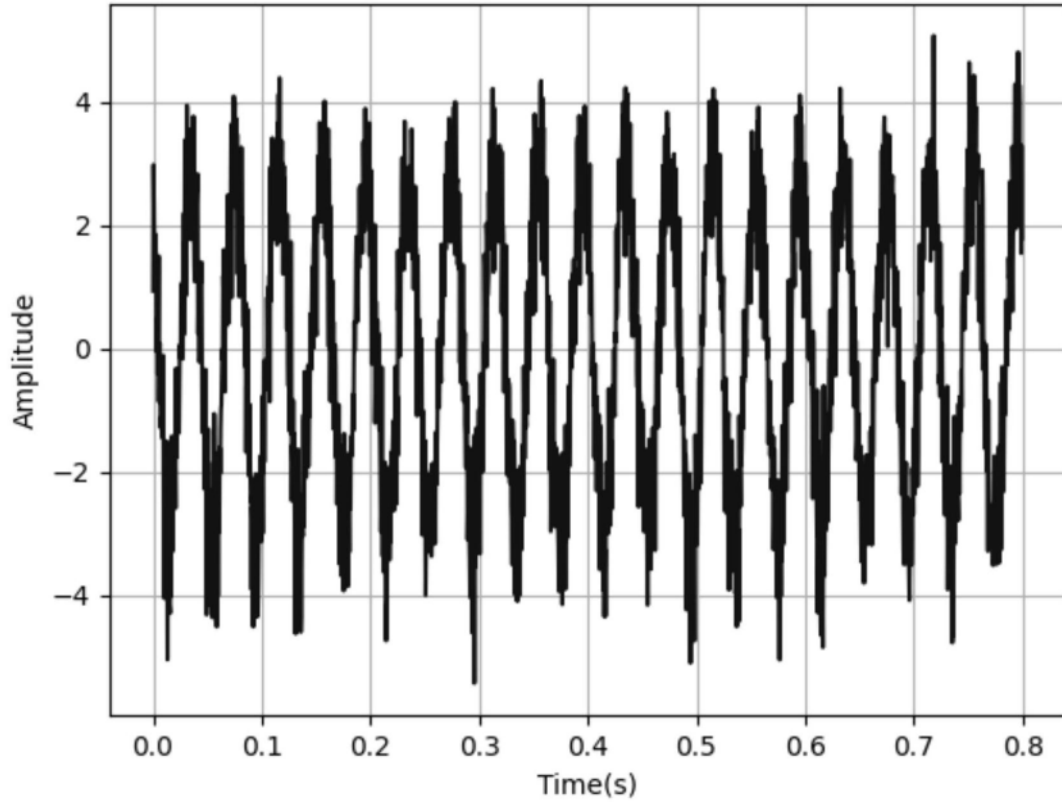


图5

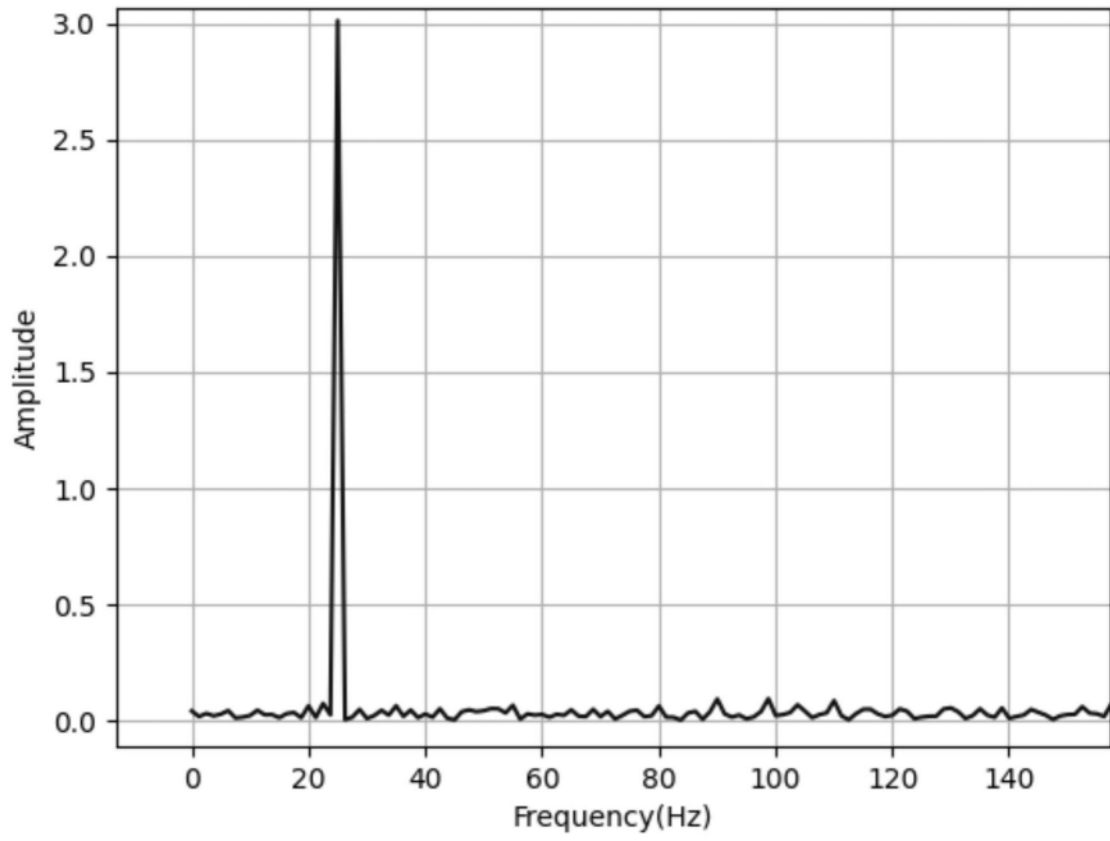


图6

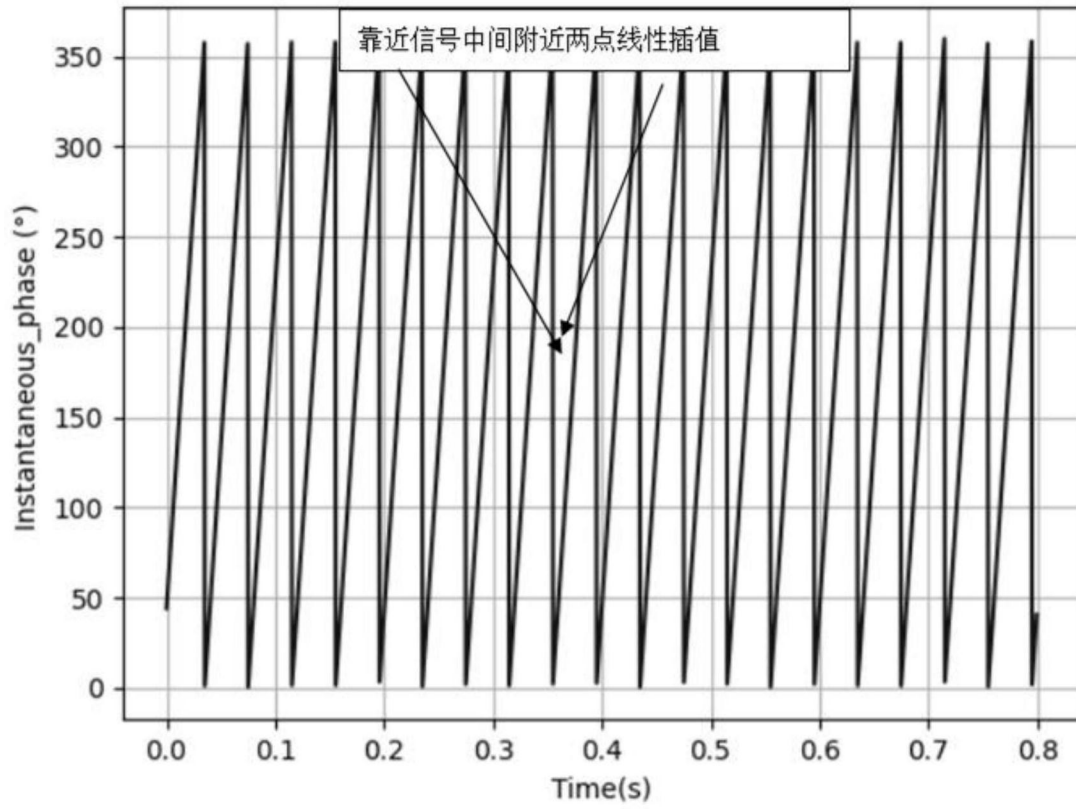


图7

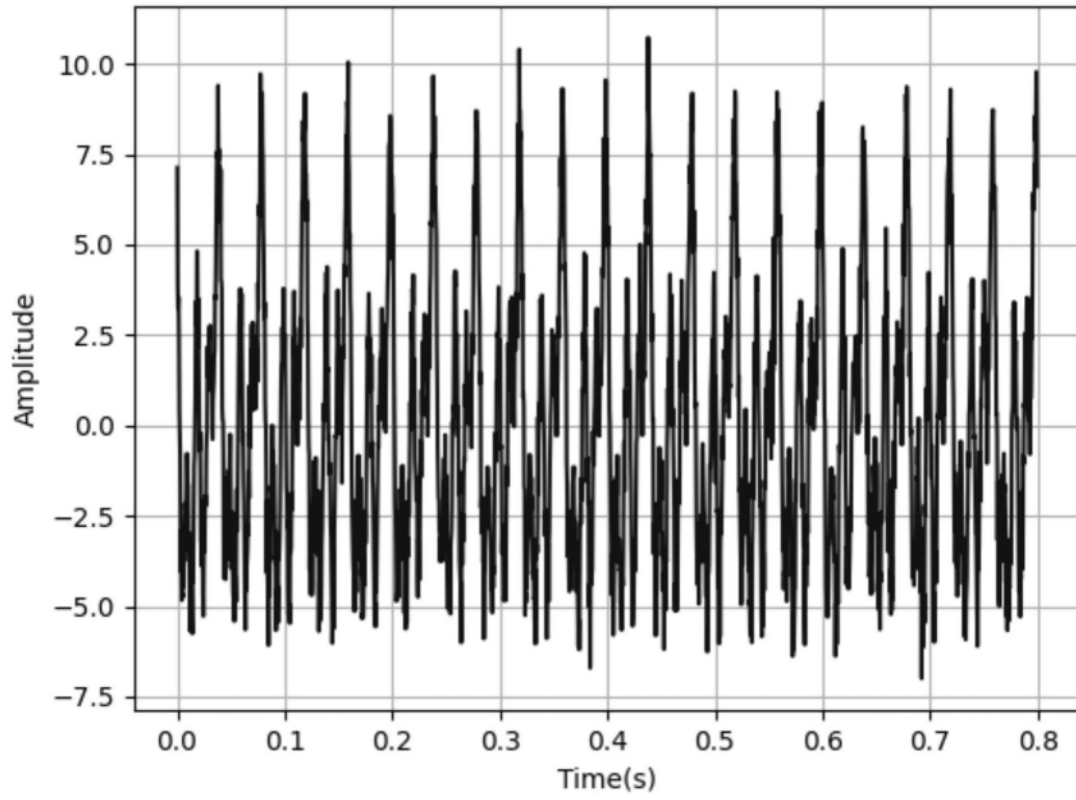


图8

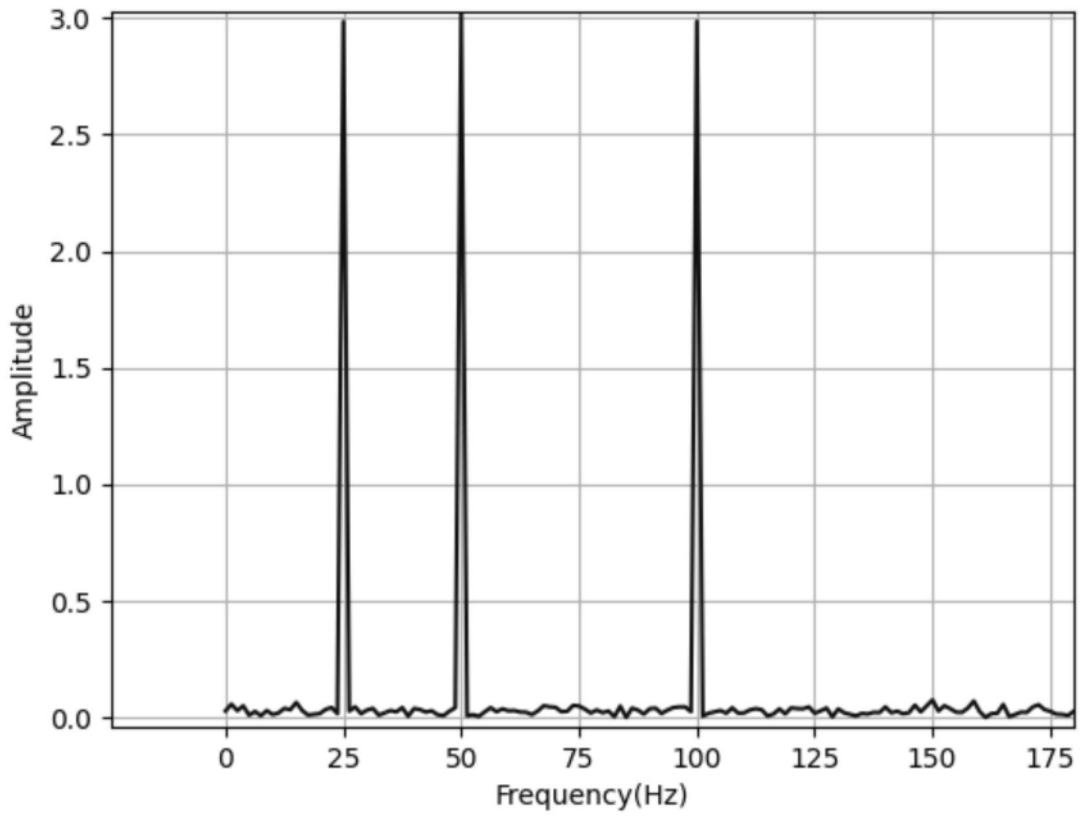


图9

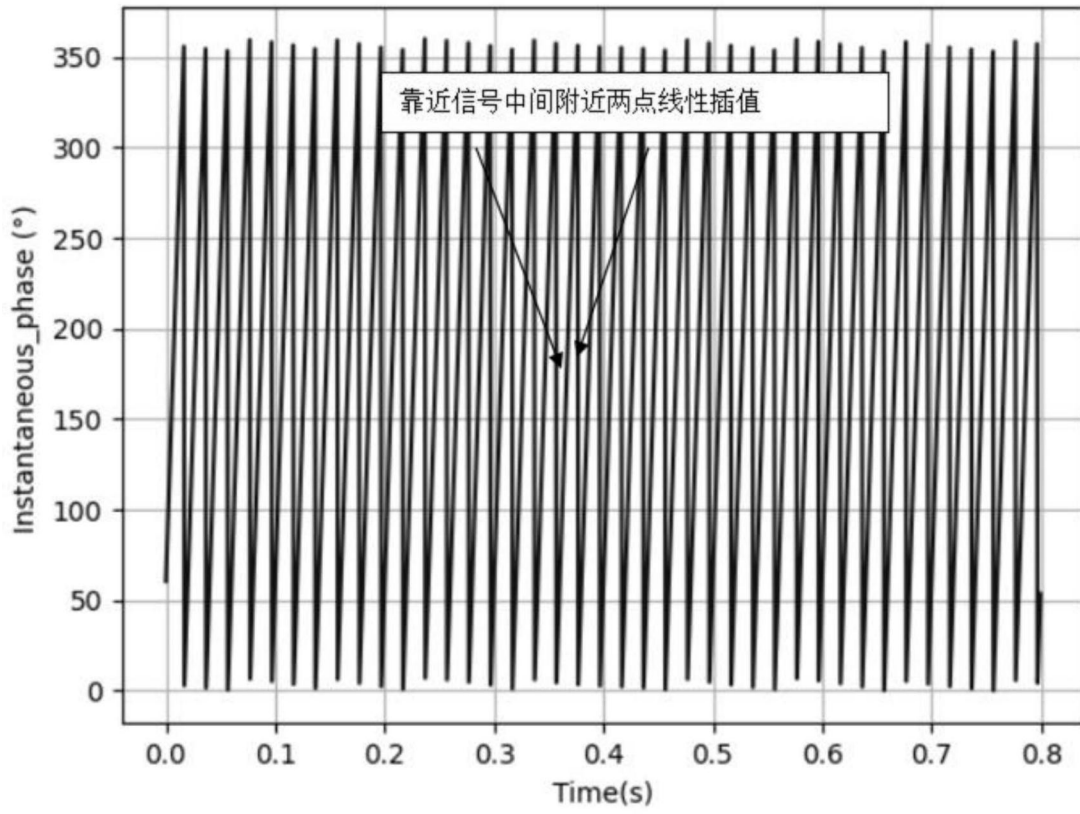


图10