

基于 ASA-LSF 的非平稳扭振信号频率估计算法

李晓飞，李宏坤

(大连理工大学机械工程学院 大连, 116024)

摘要 旋转机械在服役过程中普遍存在转速波动现象, 针对该现象导致的基于斑马纹反射激光脉冲序列测量得到的扭振信号呈现非平稳性并伴随采样频率实时变化, 以及手工粘贴斑马纹可能引发的拉伸变形、首尾衔接不良等分度角误差, 进而严重影响扭振频率估计精度等问题, 提出角域同步平均(angle-domain synchronous average, 简称 ASA)结合最小二乘拟合(least squares fit, 简称 LSF)的非平稳扭振信号频率估计算法(ASA-LSF), 实现对扭振频率的准确估计。首先, 基于 ASA 技术, 消除转速波动影响的采样频率时变问题, 将非平稳信号等效为平稳角域信号; 其次, 采用最小二乘法对 ASA 处理后的数据进行有效拟合, 消除斑马纹首尾衔接点的分度角误差; 最后, 通过设计不同电压、电流工况实验, 验证该算法的有效性。结果表明: 所提算法为工程实际中扭振频率的精准识别, 以及避免扭振频率与机组固有频率相近时产生的共振提供了新的解决方案。

关键词 扭转振动; 角域同步平均; 最小二乘法; 频率估计

中图分类号 TH113.1

引言

旋转机械广泛应用于电力、化工等工业领域。轴的扭转振动是一种重要的振动形式, 扭振引起的扭转应力变化往往会导致突发性的生产事故^[1]。因此, 对旋转轴系扭转振动的频率进行精准估计, 对保障旋转机械安全运行具有重要意义。

常用的扭振测量技术主要可分为接触式与非接触式^[2]。接触式测量方法主要为应变片测轴的扭转变形。Han 等^[3]利用电阻应变片法测量旋转轴弹性变形时电阻值的变化, 对某船舶轴系扭振进行了测试, 验证了该方法的有效性。非接触式测量方法是利用装在轴上的等分结构, 基于非接触式的测振传感器产生相应的脉冲时间序列, 进而得到与扭振相关的信息。Nazolin 等^[4]基于光电式脉冲时序法对某 300 MW 的汽轮机组进行扭振监测, 验证了该方法的有效性。此外, 基于光纤传感器的扭振测量方法不依赖于轴上的分度结果, 因此也得到广泛应用。然而, 在采用光电式脉冲时序法测量扭振时, 转速波动易导致扭振信号呈现非平稳性(采样频率时变), 严重影响扭振频率的估计精度。

目前, 时频分析用于处理非线性非平稳扭振信号, 主要分为 2 类: ① 基于傅里叶变换的各种算法; ② 基于经验模态分解的数据处理方法。基于傅里叶变换的改进方法对于线性稳定系统的数据处理效果

较好, 但不具备自适应性。Stockwell 等^[5]提出了采用高斯窗函数的 S 变换算法, 处理后的信号分辨率更高。沈微等^[6]提出了一种同步挤压小波变换方法, 通过噪声仿真信号验证了该方法的有效性。潘高元等^[7]基于同步挤压小波变换和 S 变换, 推导出同步挤压 S 变换的表达式, 并以冲击仿真信号对该方法进行了验证。

分析可知, 上述时频分析方法受限于测不准原理, 即时间分辨率和频率分辨率不可兼得, 导致上述方法处理扭振数据得到的时频分辨率普遍较低。基于时域同步平均^[8] (time-domain synchronization average, 简称 TSA) 方法可有效提取振动特征, 且能有效识别信号中的周期成分, 并降低噪声对原始信号的干扰。王思文^[9]提出了基于 TSA 技术处理扭振信号的方法, 获取近似的扭振频率, 提高了时频分辨率。但由于转速波动导致的时间周期不固定, 该方法对扭振信号进行频率估计时, 所得扭振频率的精确度较差。

针对上述问题, 本研究提出一种基于 ASA-LSF 的非稳态扭振信号频率估计算法, 实现对非稳态工况下扭振频率的精确估计。通过 ASA 算法消除转速波动的影响, 采用 LSF 算法拟合出斑马纹首尾衔接处的数值, 使用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 简称 FFT) 得到准确的扭振频率。该算

法有助于提高扭振频率的估计精度和时频分辨率,从而避免扭振频率与机组轴系固有频率接近时发生共振现象。

1 扭振信号测量与提取原理

1.1 扭振测量原理

使用光纤传感器采集脉冲序列测量扭振信号的原理如下:将斑马纹粘贴于被测轴系,获得轴系的等分结构;由于斑马纹对光的反射率不同,激光照射在斑马纹上时,会产生不同的光电信号;光纤传感器放置在轴的一侧,激光通过光纤传感器照射在斑马纹上并产生反射信号。图1为斑马纹单位分度角示意图。以脉冲时序法利用光纤传感器测量扭转振动信号,扭振测量原理图如图2所示。

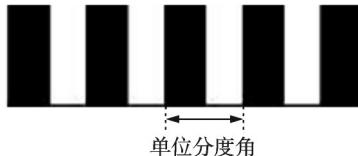


图1 斑马纹单位分度角示意图

Fig.1 Diagram of zebra tapes in unit indexing angle

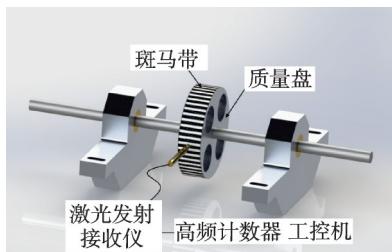


图2 扭振测量原理

Fig.2 Principle for measuring torsional vibration

1.2 扭振信号提取原理

无扭振时,轴系做匀速运动,角速度为 $\bar{\omega}$ 。由于斑马纹分度均匀,所产生电压信号的周期间隔相同。设每个脉冲信号的间隔为 T_i ,则1个旋转周期内的平均角速度^[10]为

$$\bar{\omega} = \frac{2\pi}{\sum_{i=1}^Z T_i} \quad (1)$$

假设粘贴在轴系上的斑马纹将被测轴系平均分为 Z 个分度角,则各个脉冲间隔对应的瞬时角速度为

$$\omega_i = \frac{2\pi}{ZT_i} \quad (2)$$

利用斑马纹进行扭转振动实验得到的角位移信号为动静角位移的叠加,后者是由转速随时间的变化所产生^[11]。因此,扭振角速度为瞬时角速度与平

均角速度的差值,表示为

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \bar{\omega} = \frac{2\pi}{ZT_i} - \frac{2\pi}{\sum_{i=1}^Z T_i} \quad (3)$$

扭振角位移 θ_i 可表示为

$$\theta_i = \int_0^{T_i} \Delta\omega_i dt \quad (4)$$

通过上述过程,可将采集到的脉冲时间间隔转化为包含扭振信息的角速度和角位移。

2 扭振信号分析理论基础

2.1 ASA 算法原理

TSA 可降低噪声干扰,提高信噪比。然而,扭振引发的轴系转速波动会严重影响 TSA 效果。为此,研究人员提出 ASA 新方法^[12],其原理为:假设被测轴系旋转 1 周得到 m 个脉冲间隔 $\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$,设置采样周期为 k ,故所得实验数据长度为 $m \times k$ 。ASA 的具体算法如下。

1) 将数据按周期数进行分组,并构造矩阵 C ,即

$$C = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^1 & T_1^2 & \cdots & T_1^m \\ T_2^1 & T_2^2 & \cdots & T_2^m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T_k^1 & T_k^2 & \cdots & T_k^m \end{bmatrix} \quad (5)$$

2) 对矩阵 C 按列取平均值,即

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}^1 = \frac{(T_1^1 + T_1^2 + \cdots + T_1^k)}{k} \\ \bar{T}^2 = \frac{(T_2^1 + T_2^2 + \cdots + T_2^k)}{k} \\ \vdots \\ \bar{T}^m = \frac{(T_m^1 + T_m^2 + \cdots + T_m^k)}{k} \end{array} \right. \quad (6)$$

3) 重构数据。将式(6)所得结构首尾相接构成新的数据组。将 $\bar{T}^1, \bar{T}^2, \dots, \bar{T}^m$ 依次替代原始数据中的 T_i ,即可计算各分度角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 的实际值。将计算所得分度角代入式(4),即求得扭振角位移。

设平稳随机信号 $x(t)$ 由周期信号 $f(t)$ 和白噪声 $n(t)$ 组成,即

$$x(t) = f(t) + n(t) \quad (7)$$

由式(5)、(6)可得输出信号 $y(t)$ 为

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) = f(t) + \frac{1}{\sqrt{N}} n(t) \quad (8)$$

此时输出的白噪声幅值降为原来输入信号中白噪声幅值的 $1/\sqrt{N}$ 。

2.2 LSF算法原理

假设有变量 x, y 的一组数据 $(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, m$ 。这些数据往往带有随机误差,若直接对该数据进行处理,必然将误差引入函数关系式中,LSF算法则可以有效解决此问题。设 (x_i, y_i) 为给定的一组数据,二者关系可以回归模型(也称拟合多项式)^[13]表示,即

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m = \sum_{j=0}^m a_j x^j \quad (9)$$

求函数 $s^*(x) = \sum_{k=0}^n a_k \varphi_k(x)$, 使其满足

$$E = \min_{s(x) \in S} \sum_{i=0}^m \omega_i (s^*(x_i) - y_i)^2 \quad (10)$$

以式(10)求函数 $s^*(x)$ 的方法即为数据拟合的 LSF 算法, $s^*(x)$ 为 LSF 算法的解。求 $s^*(x)$ 时, 要求函数空间 S 的基底函数 $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ 满足 Haar 条件, 即

$$\omega_i \left(\sum_{k=0}^n a_k \varphi_k(x_i) - y_i \right)^2 \quad (11)$$

显然,求解 $s^*(x)$ 等价于求式(11)的最小值点

$(a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*)$ 。令

$$\partial E / \partial a_j = 0 \quad (j = 0, 1, \dots, n) \quad (12)$$

得

$$\sum_{i=0}^m \omega_i \left(\sum_{k=0}^n a_k \varphi_k(x_i) - y_i \right) \varphi_j(x_i) = 0 \quad (13)$$

依次对 E 求 a_j 的偏导, 得到 n 元线性方程组, 求解该方程组可得各项系数 $a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*$ 。由于 $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ 满足 Haar 条件, 故该方程组有唯一解。

3 基于ASA-LSF的频率估计算法

本研究提出的 ASA-LSF 算法流程图如图 3 所示。该算法的基本思想为:首先, 对等角度采样的扭振数据进行 ASA 处理, 得到序列 $\{\bar{T}^1, \bar{T}^2, \dots, \bar{T}^m\}$, 计算得出平均采样频率 \bar{f}_s , 将由转速波动导致的非平稳扭振信号等效为平稳的扭振信号;其次, 采用最小二乘法对 ASA 后的数据进行有效拟合, 拟合出斑马纹首尾衔接点的数值 \bar{T}^1 ;最后, 重构数据 $\{\bar{T}^1, \bar{T}^2, \dots, \bar{T}^m\}$, 通过 FFT 实现对扭振频率的准确估计。

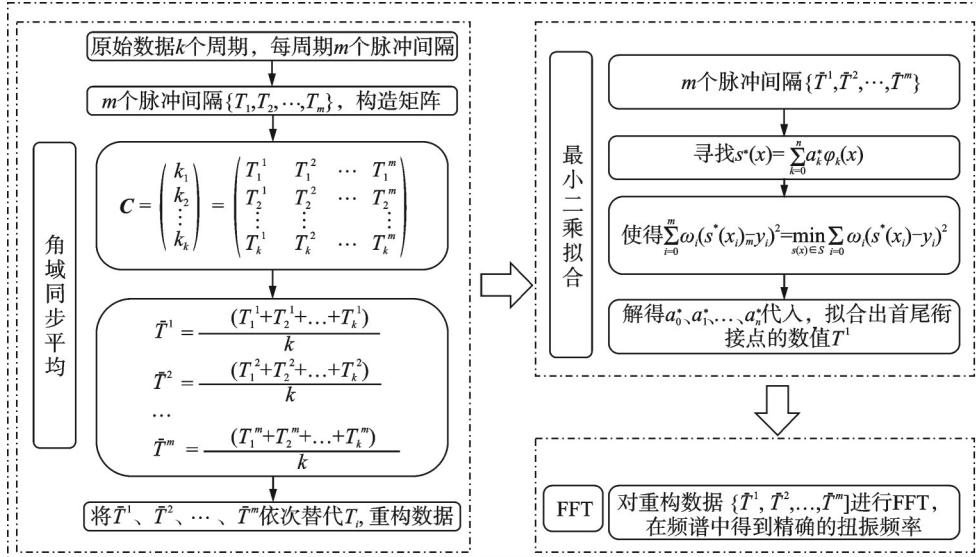


图 3 ASA-LSF 算法流程图

Fig.3 Flowchart of ASA-LSF algorithm

4 基于ASA-LSF的频率估计与验证

4.1 扭振实验设计

根据扭振的产生和测量机理, 搭建如图 4 所示的扭振测试实验台。采集系统预设 3 V 的采集触发电压。在系统控制下, 由斑马纹触发高速计数器卡采

集, 并由激光发射接收器光电转化后得到脉冲信号。当白条纹扫过光纤传感器时, 达到设置的触发电压值即触发采集, 记录当前时钟周期 T_0 的个数 N_i ; 当黑条纹扫过光纤传感器时, 产生的电压低于触发电压时, 停止采集。当下一次高电平出现时, 时钟周期的个数变为 N_{i+1} , 2 个时钟周期时间差 $t_i =$

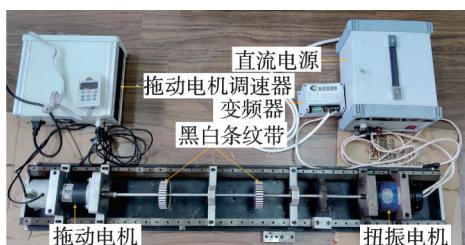


图 4 扭振测试实验台

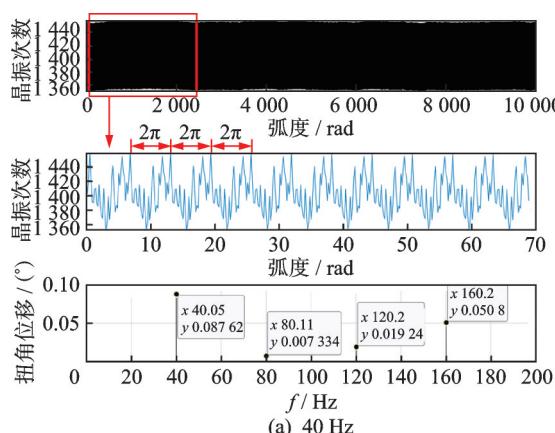
Fig.4 Measurement bench of torsional vibration

$T_0(N_{i+1} - N_i)$, 即为 2 个分度角之间的时间间隔。在被测轴系发生扭转振动时, 轴系的转速会产生波动, 时间间隔 t_i 是变化的, 导致扭振信号变为非平稳信号。通过分析时间间隔 t_i 的变化即可得到被测轴系相应的扭振信息。

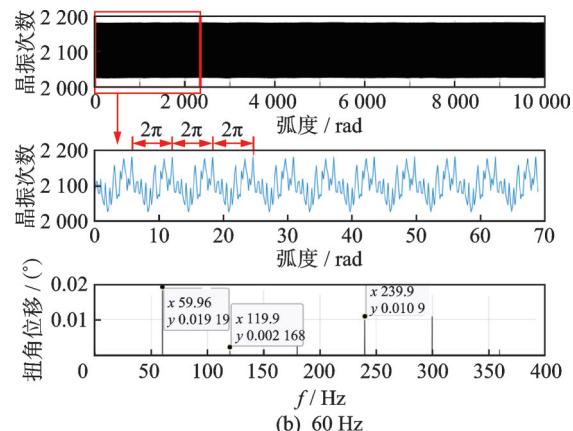
4.2 扭振数据处理问题分析

基于上述扭转振动采集系统进行多次实验, 通过 FK-308S 型变频器调节输出电压频率来控制扭转振动频率。对实验数据进行处理后得到的不同转频下原始数据频谱如图 5 所示。首先, 当转速设置为 2 400 r/min(即转频为 40 Hz)、变频器设置扭转振动频率为 30 Hz 时, 对采集的扭转振动数据进行 FFT 变换, 得到的频谱如图 5(a)所示; 当转速设置为 3 600 r/min(即转频为 60 Hz)、变频器设置扭转振动频率为 270 Hz 时, 对采集的扭转振动数据进行 FFT 变换, 得到的频谱如图 5(b)所示。可以看出, 主要频率为转动频率及其倍频, 扭转振动频率幅值较小, 难以观察到相关特征。

对整个扭转振动产生过程以及对采集系统的分析可知, 扭转振动原始数据存在较强的噪声干扰和转速波动。同时, 斑马纹的手动粘贴过程存在拉伸变形、首尾衔接不精准等问题, 导致被测轴系存在分度误差。直接对原始数据进行分析, 从频谱上仅可得被测轴系的转动频率, 难以观察到扭转振动频率。



(a) 40 Hz

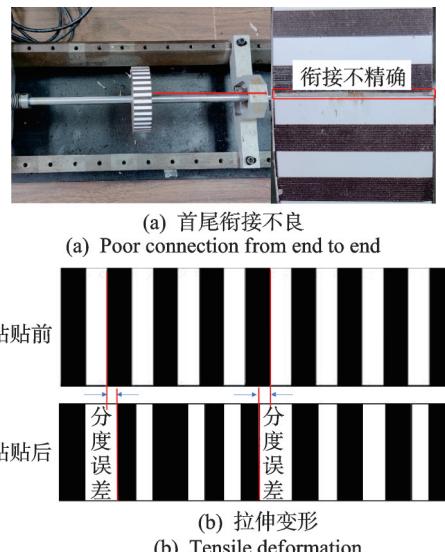


(b) 60 Hz

图 5 不同转频下原始数据频谱

Fig.5 Raw data spectrum under different conversion frequencies

斑马纹分度误差如图 6 所示, 展示了手工粘贴斑马纹导致的拉伸变形与首尾衔接不精确情况。此外, 扭振信号较微弱, 信噪比较低, 且旋转轴转速波动导致扭转振动产生的信号呈现非平稳特性, 导致无法通过普通 FFT 算法获得该信号^[14]。因此, 需要提出新的扭转振动频率估计算法, 对非平稳的扭振信号进行分析, 从而获得精确的扭转振动频率。



(b) 拉伸变形

(b) Tensile deformation

图 6 斑马纹分度误差

Fig.6 Zebra tapes with indexing error

4.3 基于 ASA-LSF 的扭振频率估计

基于上述方法将原始数据按照周期数目构造矩阵, 并进行 ASA 算法处理, 得到处理后的多周期数据。随后, 拟合出相应函数关系, 得到斑马纹首尾衔接处的数据值, 以此值作为 ASA 算法处理后每个周期的数据起始值, 重构数据, 并将重构后的数据进行 FFT 处理。

为验证 ASA-LSF 算法的有效性,将未应用算法所得频谱与本研究所提算法所得频谱进行对比。设置轴系转速为 2 400 r/min(即转频为 40 Hz),变频器将扭振频率设置分别设置为 30、270 Hz,采集信号后进行数据处理,得到扭振频率为 30、270 Hz 时的处理结果对比,分别如图 7、8 所示。

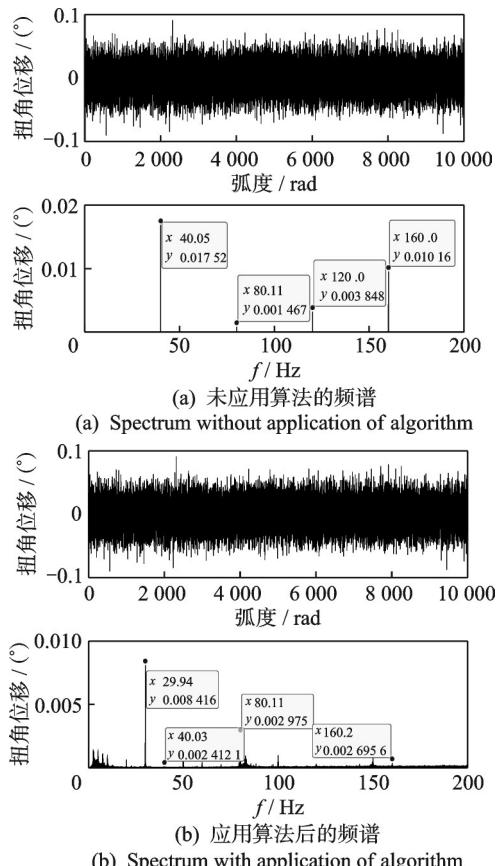


图 7 扭振频率为 30 Hz 时的处理结果对比

Fig.7 Comparison of processing results at a torsional vibration frequency of 30 Hz

图 7(a)、图 8(a) 为未应用 ASA-LSF 算法、仅对原始数据进行 FFT 处理后得到的频谱,从图中仅能观察到转频及其倍频,而未观察到微弱的扭转振动频率幅值;图 7(b)、图 8(b) 为应用基于 ASA-LSF 算

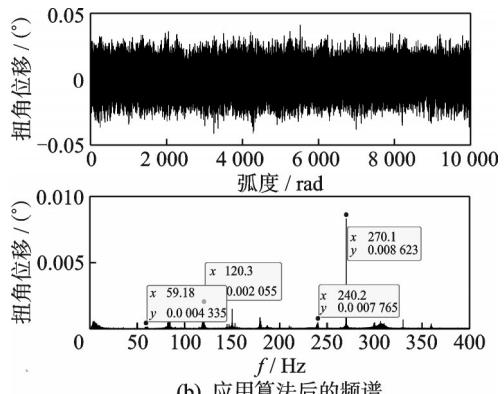
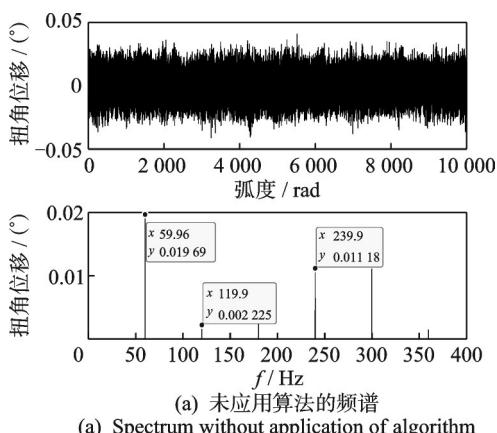


图 8 扭振频率为 270 Hz 时的处理结果对比
Fig.8 Comparison of processing results at a torsional vibration frequency of 270 Hz

法进行数据处理后得到的频谱,从图中能够明显观察到扭振频率为 29.94、270.1 Hz,且扭角位移最大,转频及其倍频的幅值明显降低。通过分析可知,基于 ASA-LSF 的非平稳信号频率估计算法在进行扭振信号处理时可得到精确的扭振频率。

4.4 不同频率估计算法结果对比

本研究对比了基于 TSA 算法和基于 ASA-LSF 的算法处理原始数据后所得的频谱精度,TSA 处理后的频谱如图 9 所示。TSA 算法处理扭振频率为

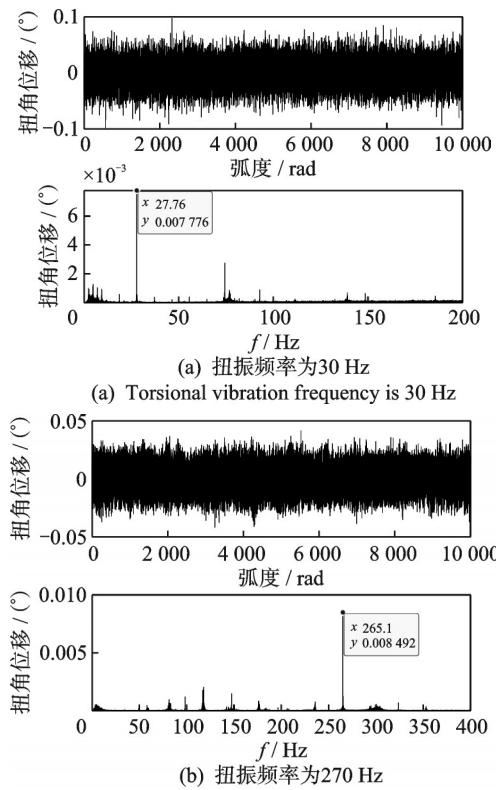


Fig.9 Spectrum after processing by TSA

30 Hz 的数据后所得频谱如图 9(a)所示,可以看到频率成分为 27.76 Hz 时的幅值最高。当扭振频率设置为 30 Hz 时,本研究所提 ASA-LSF 算法所得的频谱如图 7(b)所示,可以看到频率成分为 29.94 Hz 时的幅值最高。

TSA 算法处理扭振频率为 270 Hz 的数据所得频谱如图 9(b)所示,可以看到频率成分为 265.1 Hz 时的幅值最高。当扭振频率设置为 270 Hz 时,由本研究所提 ASA-LSF 算法所得的频谱如图 8(b)所示,可以看到频率成分为 270.1 Hz 时的幅值最高。

上述对比结果表明,基于 ASA-LSF 的算法处理非平稳扭振信号得到的频谱结果比 TSA 算法更为精确。此外,使用基于 ASA-LSF 算法处理非平稳的扭振信号可得到更为精确的扭振频率,降低了由于斑马纹首尾衔接不精确、拉伸变形所产生的分度误差和转速波动对扭振频率的干扰。所提算法为工程实际中精确识别扭振频率与预防机组共振提供了一种有效的解决方案。

4.5 多工况算法稳定性验证

为验证不同工况下 ASA-LSF 算法分析非平稳扭振信号的稳定性,笔者进一步开展实验,以验证所提算法所得扭振频率的准确性。第 1 组实验探究不同电流下获取扭振频率的精度和扭角位移幅值的变化。设定转子转速为 2 400 r/min,扭振频率设置为 30 Hz,在相同的电压下,分别设置扭振电机内电流的大小。扭振实验组别设置如表 1 所示。

表 1 扭振实验组别设置

Tab.1 Group settings for torsional vibration experiments

组别	电压/V	电流 I /A	电流 II /A
1	24.6	1.0	2.0
2	29.7	1.0	2.0
3	32.3	1.0	2.0

使用 ASA-LSF 算法数据处理后得到不同电压下的扭振幅值,并对其中的频谱信息进行分析。

24.6 V 电压下的扭振幅值如图 10 所示。可以看到,当电流设置为 1.0 A 时,扭角位移为 0.008 026°;当电流设置为 2.0 A 时,扭角位移为 0.011 400°。随着电流的增大,扭转角的幅值与扭角位移均逐渐增大。

29.7 V 电压下的扭振幅值如图 11 所示。可以看到,当电流设置为 1.0 A 时,扭角位移为 0.012 39°;当电流设置为 2.0 A 时,扭角位移为 0.017 61°。

32.3 V 电压下的扭振幅值如图 12 所示。可以看到,当电流设置为 1.0 A 时,扭角位移为 0.013 18°;当电流设置为 2.0 A 时,扭角位移为 0.018 77°。

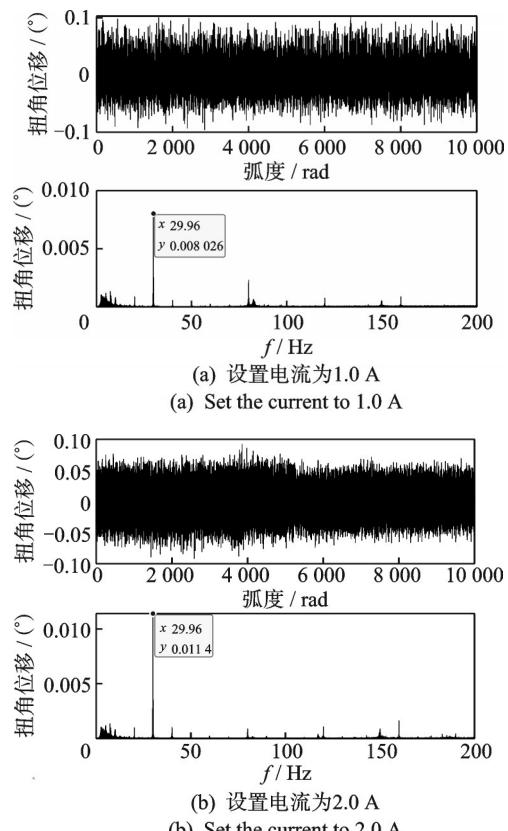


Fig.10 Torsional amplitude values at 24.6 V

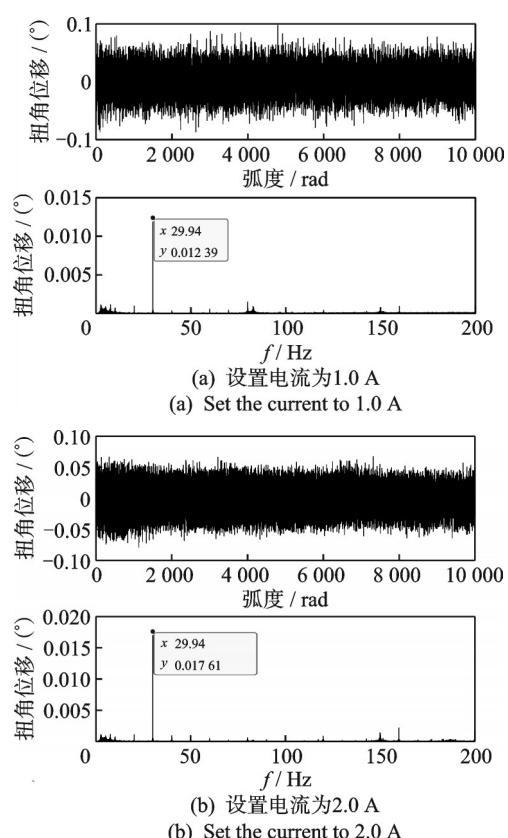


Fig.11 Torsional amplitude values at 29.7 V

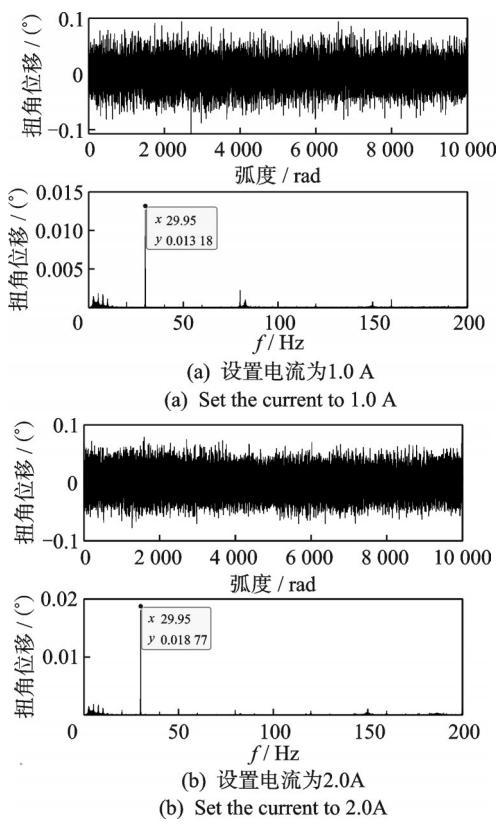


图12 32.3 V电压下的扭振幅值

Fig.12 Torsional amplitude values at 32.3 V

分析图10~12可得出,在转速电压相同的情况下,随着电流的增大,扭振角位移的幅值随之增大,但扭转角幅值的增大并未呈现明确的线性关系。同时,与实验设置的30 Hz扭振频率相比,各组实验得到的扭振频率估计精度均超过99.8%。

开展第2组实验以探究不同电压下获取扭振频率的精度和扭角位移幅值的变化。设定转子转速为2 400 r/min,扭振频率为30 Hz。扭转振动电机的电流恒为1.5 A,电压分别为7.4、11.1、14.5、21.1 V,并进行多组实验。采用ASA-LSF算法数据处理得到频谱信息,不同电压下的扭振幅值如图13所示。由图可知,在转子转速和扭振电机电流固定时,随着扭振电机的电压逐渐增大,扭角位移的幅值随之增

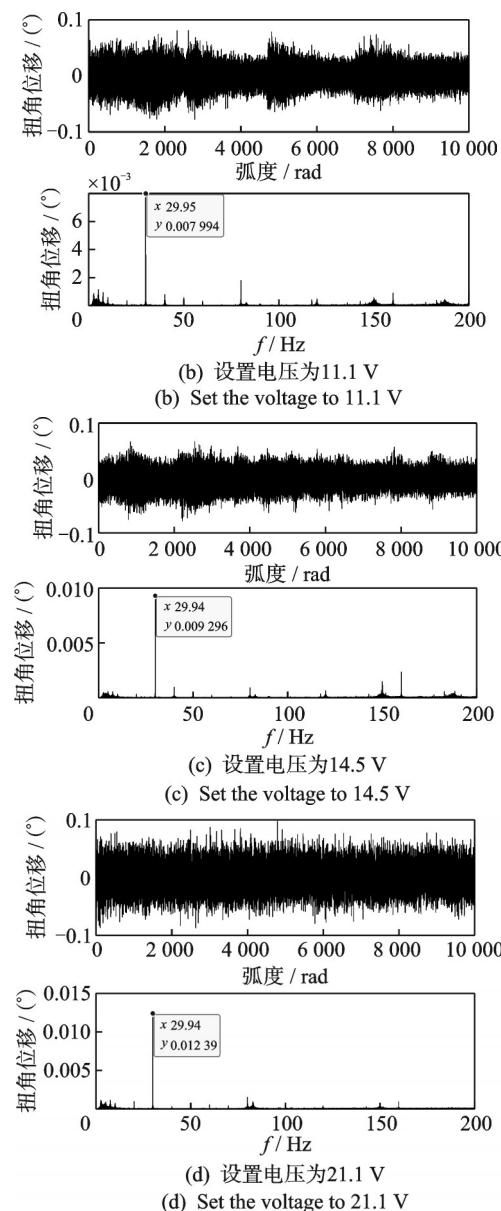
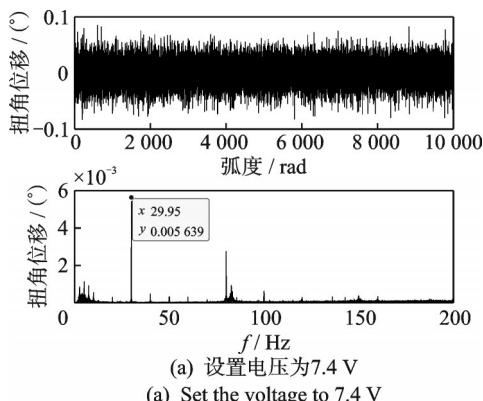


Fig.13 Torsional amplitude values at different voltages

大。同时,可从频谱中得到精确的扭振频率。

上述实验结果表明,在不同电压与不同电流的工况下,本研究所提ASA-LSF算法对于非平稳扭振信号的分析均表现出良好的稳定性。与设置的30 Hz扭振频率相比,各组实验得到的扭振频率估计值精度均高于99.8%。

5 结 论

- 提出了基于ASA的扭振信号转速波动消除算法,通过ASA算法计算得出采样数据的平均采样频率,解决了非平稳扭振信号由采样频率实时变化导致FFT后扭振频率不精确的问题。

- 提出了一种基于LSF的扭振信号拟合算法,

有效抑制了因手工粘贴斑马纹造成的拉伸变形与首尾衔接不良所引入的分度误差。

3) 设计了2组实验对所提算法的有效性和准确性进行验证。第1组实验分别设置扭振频率30 Hz、转频40 Hz和扭振频率270 Hz、转频60 Hz, 验证了所提算法可在上述转频下精确识别扭振频率, 降低转频干扰; 第2组设计了不同电压、不同电流工况的实验, 频谱所得扭振频率精确度均超过99.8%。通过实验验证了所提算法在多工况下进行扭振频率估计的稳定性与可靠性。

参 考 文 献

- [1] 王伟, 余震, 邱云明, 等. 船艇轴系扭振状态测试与分析[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(6): 51-54.
WANG Wei, YU Zhen, QIU Yunming, et al. The measurement and analysis on ship shaft's torsional vibration status[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(6): 51-54.(in Chinese)
- [2] 郭艳玲, 邱枫, 李志鹏. 旋转机械扭振检测方法的研究现状及展望[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(6): 47-54.
GUO Yanling, QIU Feng, LI Zhipeng. Research status and prospect of torsional vibration detection methods for rotating machinery[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(6): 47-54.(in Chinese)
- [3] HAN H S, LEE K H, PARK S H. Estimate of the fatigue life of the propulsion shaft from torsional vibration measurement and the linear damage summation law in ships[J]. Ocean Engineering, 2015, 107: 212-221.
- [4] NAZOLIN A L, POLYAKOV V I, GNEZDILOV S G. Diagnostics of shaft trains of large turbine sets for integrity using torsional vibration measurements[J]. Thermal Engineering, 2020, 67(1): 25-35.
- [5] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [6] 沈薇, 陶新民, 高珊, 等. 基于同步挤压小波变换的振动信号自适应降噪方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 239.
SHEN Wei, TAO Xinmin, GAO Shan, et al. Self-adaptive denoising algorithm for vibration signals based on synchrosqueezed wavelet transforms[J]. Journal of Vibrations and Shock, 2018, 37(14): 239.(in Chinese)
- [7] 潘高元, 李舜酩, 安增辉, 等. 滚动轴承冲击特征提取的同步挤压S变换方法[J]. 振动工程学报, 2020, 33(2): 433-440.
PAN Gaoyuan, LI Shunming, AN Zhengui, et al. Im-
- pact feature extraction from rolling bearing fault signal by synchrosqueezed S-transform [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2): 433-440.(in Chinese)
- [8] BRAUN S. The synchronous (time domain) average revisited[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(4): 1087-1102.
- [9] 王思文. 基于光电式脉冲时序法的扭振测量技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 范君浩, 雷俊松, 周瑞平, 等. 轴系扭振在线监测系统开发研究[J]. 内燃机, 2020(2): 6-9, 13.
FAN Junhao, LEI Junsong, ZHOU Ruiping, et al. Research on development of a shaft torsional vibration monitoring system[J]. Internal Combustion Engines, 2020(2): 6-9, 13.(in Chinese)
- [11] CHEN M L, ZHENG N, ZHENG J, et al. Phase demodulation of rotor torsional vibration measurement under time-varying speed[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022(1): 9222022.
- [12] 王志乐, 俞龙桥, 张茂强. 基于角域同步平均的齿轮箱故障诊断[J]. 蚌埠学院学报, 2020, 9(2): 35-38.
WANG Zhile, YU Longqiao, ZHANG Maoqiang. Gearbox fault diagnosis based on synchronous avarage in angle domain[J]. Journal of Bengbu University, 2020, 9(2): 35-38.(in Chinese)
- [13] 孔英会, 苑津莎, 李新叶, 等. 基于时序特征和参数估计的变压器故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 48-54.
KONG Yinghui, YUAN Jinsha, LI Xinye, et al. A fault diagnosis method for power transformer based on temporal characteristics and parameter estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 48-54.(in Chinese)
- [14] ZHANG Q J, LU G X, ZHANG C Y, et al. Time-frequency analysis of torsional vibration signals based on the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, robust independent component analysis, and prony's methods [J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(23/24): 3728-3739.



第一作者简介:李晓飞,男,1997年1月生,硕士生。主要研究方向为扭转振动机理、扭振信号数据分析与轴系扭振动力学仿真。

E-mail:lx970108@163.com

通信作者简介:李宏坤,男,1974年9月生,博士,教授、博士生导师。主要研究方向为微弱特征信号提取方法、故障诊断与运行可靠性评估。机械系统振动与噪声控制。

E-mail:lihk@dlut.edu.cn