

一种 TMSST 结合相关峭度的柔性薄壁轴承故障特征提取方法

虞超峰, 赵学智

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 在 STFT 的基础上提出了一种时间重分配多同步压缩变换(TMSST)结合相关峭度的柔性薄壁轴承故障特征提取方法。该方法通过对 STFT 结果使用压缩算子提高其时频聚集性;结合相关峭度准则选择最佳频率点处的脉冲特征;对脉冲特征分析得到其冲击频率特性。将所述方法用于柔性薄壁轴承内外圈故障信号特征提取,并将其与 S 变换结合相关峭度进行对比,结果证明所提方法在成功提取故障特征的同时能更好地反映故障特征频率的时变性,为轴承故障诊断提供了一种时频分析的新视角。

关键词: 故障诊断; 柔性薄壁轴承; 特征频率; 时间重分配多同步压缩变换; 相关峭度

中图分类号: TH165⁺.3; TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)05-1259-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.05.024

引言

谐波传动是一种靠波发生器使柔性齿轮产生可控的弹性变形波,从而实现运动和动力传递的传动,其具有运动精度高、虚动量小、传动比大、体积小等优点。因此,谐波传动减速器在工业机器人和航空航天领域中被广泛应用^[1-2]。柔性薄壁轴承是谐波减速器的重要组成部分,该轴承在工作中会随柔轮的弹性变形而不断发生变化,导致其不仅承受滚动体的循环应力载荷,还承受来自椭圆长轴部位的周期性交变挤压以及外部载荷的挤压,使得柔性薄壁轴承的内圈、外圈及滚动体等元件易发生损伤,这将造成轴承振动异常,导致整体传动精度降低^[3-4]。对其故障的准确诊断,对保证谐波减速器的安全可靠运行具有十分重要的意义。

由于柔性薄壁轴承这种特殊的工作方式,决定了它与普通轴承的不同。当柔性薄壁轴承装配到椭圆形的凸轮上时,将会跟随其轮廓线产生强制变形,内外圈变成椭圆形;当其跟随椭圆轴转动时,又会受到椭圆长轴的周期性挤压而产生大尺度形变,而且在柔轮的啮入、啮出时还会承受周期性的冲击^[5],这将使它比普通轴承的振动信号更为复杂。由于柔性薄壁轴承的节径是变化的,其损伤时所产生的振动特征频率还存在时变性,完全不同于普通轴承^[6]。

目前针对柔性薄壁轴承故障特征的提取都将其等效为普通滚动轴承进行分析,通过分析其频谱特征来进行故障诊断,忽略了其振动特征频率时变性的特点^[7-8]。

短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)、连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)、S 变换等时频分析方法为有效提取非平稳信号时频特征提供了良好的途径。但這些方法生成的时频谱存在能量扩散的现象,使得瞬时频率能量分布被模糊化^[9-10]。2011 年 Daubechies 等^[11]提出了一种时频重排的同步压缩小波变换(Synchrosqueezing Transform, SST)方法,在 CWT 的基础上,对变换后的小波系数进行重排,在提高信号时频聚集性的同时很好地保持了信号重构的特性。类似的,基于 STFT 的同步压缩^[12]和基于 S 变换的同步压缩^[13]也可以提高时频聚集性并支持可逆重构。但 SST 主要是在尺度/频率方向上重新分配,适合于表征类似谐波的信号,这些信号在时频谱上与时间轴接近平行。因此, SST 常被用来对非平稳信号的转频提取。除类谐波信号外,另一类非平稳信号可以称为类脉冲信号,这些信号在时频图上与时间轴接近垂直,其中冲击信号就是类脉冲信号。针对类脉冲信号,He 等^[14]提出了时间重排的同步压缩变换(Time-Reassigned Synchrosqueezing Transform, TSST),相继 Fourer 等^[15]将这种方法扩展到 S

变换。但是 TSST 在处理强频率变换信号中具有局限性, Yu 等^[16]在此基础上提出了时间重分配多同步压缩变换 (Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform, TMSST) 用于分析具有快速变化特性的复杂信号。TMSST 可使时频图上冲击特征能量更加集中, 但如果要准确提取故障冲击特征还要进一步选取时频图上特定频率点进行分析。考虑到轴承故障冲击的周期特性, McDonald 等^[17]提出了相关峭度的概念, 并以其为目标函数解卷积出被噪声掩盖的连续性冲击信号。

综上所述, 为准确提取柔性薄壁轴承故障冲击信号的时频特征, 本文在 STFT 的基础上提出了基于相关峭度和时间重分配多同步压缩变换的柔性薄壁轴承故障特征提取方法。该方法对 TMSST 结果进行分析, 选择相关峭度最大的频率点处切片, 根据切片上的脉冲频率获取故障冲击特征。最后, 将该方法应用于柔性薄壁轴承的内外圈故障信号分析, 成功提取其故障冲击时频特征。

1 理论分析

1.1 时间重分配多同步压缩变换理论

频率变化的单分量信号可以描述为:

$$\hat{s}(\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \quad (1)$$

式中 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 表示频域中的信号幅度和相位, $-\varphi'(\omega)$ 是 $\varphi(\omega)$ 系数的负数, 表示群延迟 (Group Delay, GD)。此信号的理想时频 (Time-Frequency, TF) 谱可表示为^[18]:

$$ITFR(t, \omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \delta(t + \varphi'(\omega)) \quad (2)$$

式中 $\delta(t)$ 为狄拉克函数。根据式(2), 在理想情况下, 信号的 TF 特征应该只出现在 GD 轨迹上。信号 $s(t)$ 的短时傅里叶变换的时域表达式为:

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) g(u-t) e^{-i\omega u} du \quad (3)$$

式中 $g(t)$ 为窗函数。根据 Parseval 定理, 在频域中, 使用移动窗函数 $\hat{g}(\xi)$, 信号的 STFT 可以写成:

$$G(t, \omega) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\xi) \hat{g}(\xi - \omega) e^{i(\xi - \omega)t} d\xi \quad (4)$$

为了进一步探讨式(1)所示信号的 STFT 结果, 假设所分析的信号是一个强变频信号, 即 $\exists \epsilon$ 足够小, 对于 $\forall \omega$ 有 $|A'(\omega)| \leq \epsilon$ 和 $|\varphi'''(\omega)| \leq \epsilon_0$ 。因此, 可在形式上对信号进行二阶泰勒展开:

$$\hat{s}(\xi) = A(\omega) e^{i[\varphi(\omega) + \varphi'(\omega)(\xi - \omega) + 0.5\varphi''(\omega)(\xi - \omega)^2]} \quad (5)$$

下式为在 STFT 中使用的高斯窗函数:

$$g(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

下式为 STFT 的频域表达式:

$$\hat{g}(\omega) = \sqrt{2\pi} \sigma e^{-0.5\sigma^2\omega^2} \quad (7)$$

式中 σ 为控制窗宽的常数。

将式(5)和(7)代入式(4)得:

$$G(t, \omega) = \sqrt{2\pi} \sigma A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} (2\pi)^{-1} \times \int_{-\infty}^{+\infty} e^{0.5[i\varphi''(\omega) - \sigma^2](\xi - \omega)^2} e^{i[t + \varphi'(\omega)](\xi - \omega)} d\xi = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma^2 - i\varphi''(\omega)}} e^{-\frac{[t + \varphi'(\omega)]^2}{2\sigma^2 - 2i\varphi''(\omega)}} \quad (8)$$

TF 能量在 GD 轨迹周围扩散, 为了提高能量浓度, TSST 首先推导出二维 GD 估计, 结果如下^[14]:

$$\hat{i}(t, \omega) = \operatorname{Re} \left(iG(t, \omega)^{-1} \frac{\partial G(t, \omega)}{\partial \omega} \right) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得:

$$\hat{i}(t, \omega) = -\varphi'(\omega) + \frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^4 + \varphi''(\omega)^2} \cdot [t + \varphi'(\omega)] \quad (10)$$

分析式(10)可以发现当 $t = -\varphi'(\omega)$ 时:

$$\hat{i}(-\varphi'(\omega), \omega) = -\varphi'(\omega) \quad (11)$$

通过式(11)可知, 当 $t = -\varphi'(\omega)$ 时其在函数 $\hat{i}(t, \omega)$ 的映射是其本身, 故 $t = -\varphi'(\omega)$ 是函数 $\hat{i}(t, \omega)$ 的不动点。这意味着可以使用不动点迭代算法来减少 $-\varphi'(\omega)$ 和 $\hat{i}(t, \omega)$ 之间的误差, 将 $t = \hat{i}(t, \omega)$ 作为迭代初值代入式(10)可得第一次迭代结果为:

$$\hat{i}(\hat{i}(t, \omega), \omega) = -\varphi'(\omega) + \left[\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^4 + \varphi''(\omega)^2} \right]^2 [t + \varphi'(\omega)] \quad (12)$$

显然:

$$\hat{i}(\hat{i}(t, \omega), \omega) + \varphi'(\omega) < \hat{i}(t, \omega) + \varphi'(\omega) \quad (13)$$

式(12)和(13)意味着通过一次迭代, 新的二维 GD 估计 $\hat{i}(\hat{i}(t, \omega), \omega)$ 已经比 $\hat{i}(t, \omega)$ 更接近 $-\varphi'(\omega)$ 。通过不断将前一次迭代结果代入式(10)作为后一次迭代的参数, 可得第 N 次迭代后的二维 GD 估计为:

$$\hat{i}^{[N]}(t, \omega) = -\varphi'(\omega) + \left[\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^4 + \varphi''(\omega)^2} \right]^N \cdot [t + \varphi'(\omega)] \quad (14)$$

当迭代次数 N 足够大时, $\hat{i}^{[N]}(t, \omega)$ 将无限接近 $-\varphi'(\omega)$, 即:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \hat{i}^{[N]}(t, \omega) = -\varphi'(\omega) \quad (15)$$

结合式(2)和(15), 将 STFT 结果沿时间方向进行积分, 并把扩散的 TF 能量压缩到 GD 轨迹中:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} Ts^{[N]}(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t, \omega) \cdot \delta(u - \hat{i}^{[N]}(t, \omega)) dt \quad (16)$$

式中 $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(u - \hat{t}^{[N]}(t, \omega)) dt$ 为同步压缩算子, u 为将相同GD值对应的时间分量进行压缩后得到的新时间轴。由式(16)可以看出, TMSST是利用压缩算子将STFT的时频系数统一压缩到群延迟位置, 在新的时频平面 (u, ω) 中, 得到能量分布高度集中的时频谱 $Ts^{[N]}(u, \omega)$ 。

1.2 时间重分配多同步压缩变换离散形式实现

为了使TMSST可以便于有效的数值计算和编程实现, 在本节中, 进行离散形式的TMSST分析。TMSST最重要的步骤是根据等式(9)计算信号的GD估计量, 并利用不动点迭代法使获得的GD更加精确。接下来就式(9)进行分析, 先求解STFT结果对 ω 的偏导:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(t, \omega)}{\partial \omega} &= \frac{\partial \int_{-\infty}^{+\infty} g(v-t)s(v)e^{-i\omega v} dv}{\partial \omega} = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} g(v-t)s(v) \frac{\partial e^{-i\omega v}}{\partial \omega} dv = \\ & -i \int_{-\infty}^{+\infty} v \cdot g(v-t)s(v)e^{-i\omega v} dv \quad (17) \end{aligned}$$

式中 $s(v)$ 为待分析信号, $g(v)$ 为窗函数。 $G(t, \omega)$ 反映了信号 $s(v)$ 在时刻 t 的频谱, 设:

$$G_v(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} v \cdot g(v-t)s(v)e^{-i\omega v} dv \quad (18)$$

$G(t, \omega)$ 和 $G_v(t, \omega)$ 的离散形式分别写为 $G[n, k]$ 和 $G_v[n, k]$, 其中 $n=0, 1, \dots, L-1$ 为时间参数; L 为总采样点数; $k=0, 1, \dots, L-1$ 为频率参数。设原始信号的采样频率为 f_s , 则 k 对应的频率为 $k \cdot f_s / L$, 由此可得:

$$G[n, k] = \sum_{j=0}^{L-1} s[j] \cdot g[j-n] e^{-i2\pi jk/L} \quad (19)$$

$$G_v[n, k] = \sum_{j=0}^{L-1} v[j] \cdot s[j] \cdot g[j-n] e^{-i2\pi jk/L} \quad (20)$$

由式(17), (19)和(20)可以求得式(9)的离散形式:

$$\hat{t}[n, k] = \text{Re} \left(\frac{G_v[n, k]}{G[n, k]} \right) \quad (21)$$

将式(21)得到的 $\hat{t}[n, k]$ 记为 $\hat{t}^{[1]}[n, k]$, 作为不动点迭代的初始值, 将 $\hat{t}^{[1]}[n, k] \rightarrow n^{[1]}$, 则:

$$\hat{t}^{[2]}[n, k] = \hat{t}^{[1]}[n^{[1]}, k] \quad (22)$$

再将 $\hat{t}^{[2]}[n, k] \rightarrow n^{[2]}$, 以此类推, 通过不断迭代得到 $\hat{t}^{[N]}[n^{[N-1]}, k]$ 。一般迭代10次, 两次迭代间的差值已经非常微小, 故本文迭代次数全定为10。

最后根据式(16)可以得到离散化压缩结果:

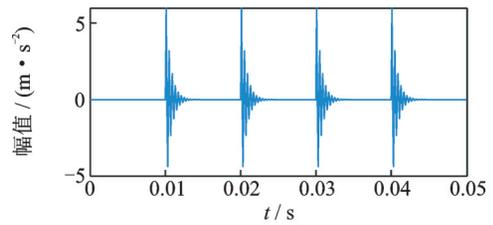
$$\begin{aligned} Ts^{[N]}[m, k] &= \sum_{n=0}^{L-1} G[n, k] \cdot \\ & \delta(m - \hat{t}^{[N]}[n^{[N-1]}, k]) \quad (23) \end{aligned}$$

式中 m 为新时频平面的时间参数, k 为频率参数。

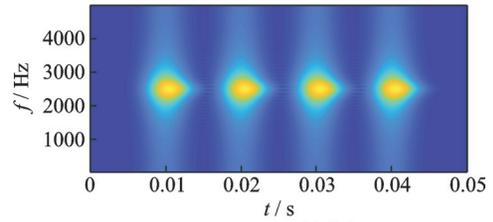
下面通过对周期性冲击响应仿真信号进行TMSST, 可以更直观地描述算法实现流程和具体效果:

$$a(t) = 7e^{-g \times 2\pi f_n t} \sin(2\pi f_n t \sqrt{1-g^2}) \quad (24)$$

式中 阻尼系数 $g=0.1$, 共振频率 $f_n=2.5$ kHz, 采样频率为10 kHz。 $a(t)$ 为周期性冲击响应信号的基本函数, 构造周期性冲击响应频率为 $f_r=100$ Hz 的仿真信号, 图1(a)为其时域波形图, 图1(b)为STFT后的时频图。



(a) 时域图
(a) Time domain diagram



(b) STFT时频图
(b) Time-frequency diagram by STFT

图1 仿真信号及其STFT结果

Fig. 1 Simulation signal and its STFT result

STFT由于使用固定的窗函数造成了变换过程中能量扩散, 导致时频图模糊。图2为在图1(b)的基础上进行TMSST的结果, 可以看出TMSST通过时频重排很好地提高了时频聚集性, 大大减少了STFT结果在时频空间中的能量扩散。

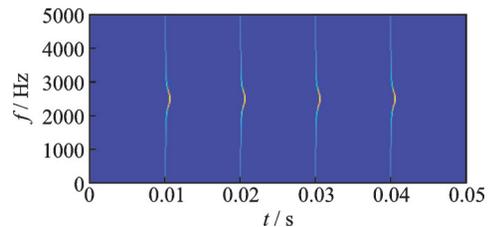


图2 TMSST结果

Fig. 2 TMSST result

1.3 相关峭度理论

峭度最初由Dwyer在1991年提出^[19], 是反映随机变量分布特性的数值统计量。由于峭度与轴承尺寸、转速、载荷等因素无关, 仅对信号中的冲击成分敏感, 特别适用于轴承表面损伤或凹坑类故障。但峭度对信号中单个冲击的敏感程度要远远大于信号中的周期性冲击成分, 因此, 可能导致频带选取错

误,进而误导滚动轴承故障诊断结果。相关峭度(Correlated Kurtosis, CK)是近年在峭度基础上提出的^[17],相关峭度表达式如下:

$$CK(y_n, T, M) = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\prod_{m=0}^{M-1} y_{n-mT} \right)^2}{\left(\sum_{n=1}^N y_n^2 \right)^{M+1}} \quad (25)$$

式中 y_n 为去均值化的输入信号; T 为冲击敏感周期; N 为输入信号的采样点数; M 为移位周期数。当 $T=0$ 且 $M=1$ 时,相关峭度退化为峭度。

1.4 TMSST 结合相关峭度的柔性薄壁轴承冲击提取方法

当柔性薄壁轴承发生故障时,由于轴承的运动部件反复通过缺陷位置,将周期性地产生一系列脉冲。两个连续脉冲之间的时间间隔就是故障周期,由故障类型来决定。考虑到脉冲通常具有宽频带性质,而且噪声等干扰因素的存在使得故障脉冲本身在时频图上不是一条直线。利用 TMSST 方法对轴承振动信号进行处理,从得到的时频图中选择恰当的频率切片可以有效提取故障脉冲特征。

考虑到轴承故障冲击本身具有峭度大的特点,且故障冲击本身为周期性冲击,作者提出以相关峭度为评价指标,并以相关峭度最大的频率点切片描述轴承故障特征。首先计算 TMSST 表示的每个频率点切片对应的相关峭度值为:

$$TFCK(\omega) = CK \left(\left| T_S^{[N]}(t, \omega) \right| - \phi(\omega), T, M \right) \quad (26)$$

式中 $\phi(\omega)$ 表示 TMSST 结果在频率点 ω 处的平均值。

冲击敏感周期 T 是由轴承振动信号中故障特征频率和采样频率决定的。可通过下式计算冲击敏感周期取值^[20]:

$$T = \left\lceil \frac{f_s}{f_{\text{fault}}} \right\rceil \quad (27)$$

式中 f_s 为振动信号的采样频率, f_{fault} 为理论计算的故障特征频率, $\lceil \cdot \rceil$ 为对 x 向上取整。因为实际转速相比于所调节转速常偏低,而造成实测故障频率也会比理论故障频率偏低,故对结果进行向上取整。

对于移位周期数 M ,考虑到当 M 取值过大时,不仅会增大计算复杂度,同时容易导致漂移问题的出现,造成丧失原信号内在本质特征的结果^[21-22]。故本文将 M 取值最大定为 5,求取原始信号的相关峭度,根据相关峭度的最大值确定 M 。整体算法流程如图 3 所示。

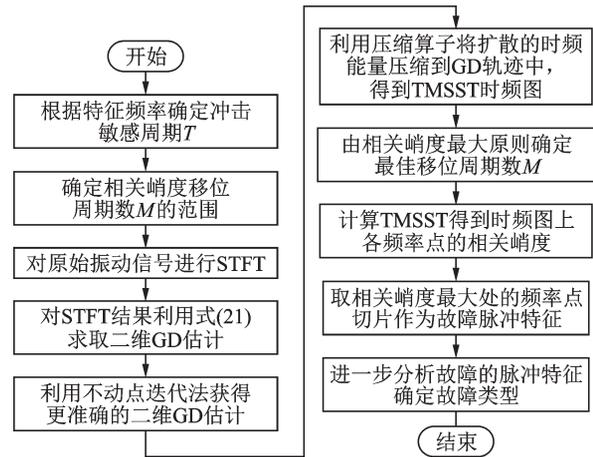


图3 本文方法流程图

Fig. 3 Method flow chart of this paper

2 柔性薄壁轴承振动信号特征提取

将本文所提方法用于柔性薄壁轴承内、外圈故障特征提取。柔性薄壁轴承故障测试实验平台如图 4 所示,其中轴承内圈装在椭圆凸轮轴上。图 5 为试验用柔性薄壁轴承,其中图 5(a)为正常柔性薄壁轴承,图 5(b)为外圈故障柔性薄壁轴承,图 5(c)为内圈故障柔性薄壁轴承,其型号均为 SHF-32-120,主要参数如表 1 所示。图 5(b)和(c)中的外圈和内圈故障(宽 1 mm,长 3 mm,深 1 mm)由电火花线切割加工而成。测量柔性薄壁轴承振动信号的 PCB 压电式单向加速度传感器型号为 352C33,其灵敏度为 10.2 mV/(m/s²),测量幅值范围为 ±490 m/s²,测量频率范围为 0.5~10000 Hz。在实验过程中,径向力加载块对柔性薄壁轴承两边施加的压力设定为 200 N。轴承转速分别为外圈故障轴承测试转速 1050 r/min,内圈故障轴承测试转速 900 r/min。

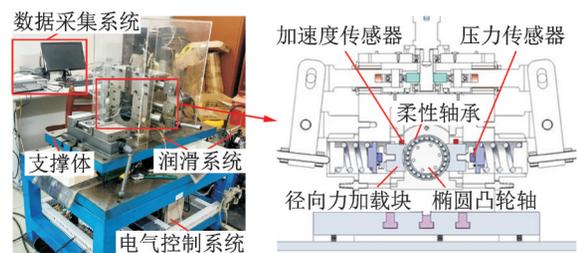


图4 柔性薄壁轴承测试试验台

Fig. 4 Test bench for flexible thin-wall bearing testing



图5 试验用柔性薄壁轴承

Fig. 5 Flexible thin-walled bearing for test

表1 柔性薄壁轴承尺寸参数

Tab. 1 Parameters of flexible thin-walled bearing

参数	数值
内圈滚道的外半径 r_b /mm	29.501
节圆直径/mm	69.4
内圈滚道长轴半径 a /mm	30.231
内圈滚道短轴半径 b /mm	29.101
滚动体个数 z /个	23
滚动体半径 r_g /mm	3.572
接触角/(°)	0

柔性薄壁轴承装配到椭圆轴后,其内外圈为椭圆,故障特征频率和普通滚动轴承完全不同,对于外圈损伤和内圈损伤,柔性薄壁轴承的故障特征频率可用下式表示^[6,23]:

$$f_{bfo} = z \cdot \frac{f_i(2\rho - r_b)}{2(\rho + r_g)} \quad (28)$$

$$f_{bfi} = z \cdot \frac{f_i(r_b + 2r_g)}{2(\rho + r_g)} \quad (29)$$

式中 f_{bfo} 为柔性薄壁轴承外圈故障振动频率; f_{bfi} 为柔性薄壁轴承内圈故障振动频率, z 为滚动体的数量, f_i 为转频, r_b 为内圈滚道的外半径, r_g 为滚动体的半径, ρ 为内圈椭圆滚道极径,表达式为:

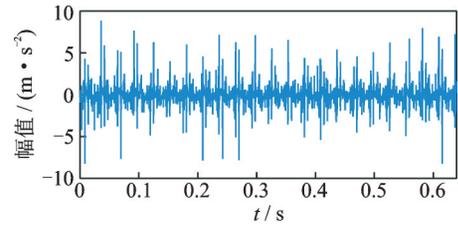
$$\rho = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \quad (30)$$

式中 a, b 分别是内圈椭圆滚道的长、短轴半径; $\beta = \omega_i t$,其中 ω_i 为内圈旋转角速度。

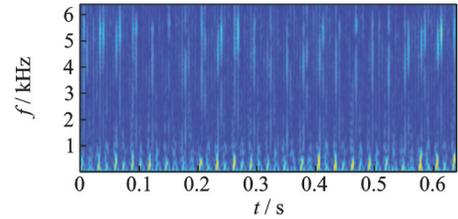
2.1 外圈故障柔性薄壁轴承振动特征提取

对外圈故障的柔性薄壁轴承的振动信号进行分析,振动信号采样频率为 12800 Hz,采样点数为 8192,转频 $f_i = 17.5$ Hz。图 6(a) 为外圈故障时域波形,图 6(b) 为其 STFT 后的时频图。根据式(28)和(30)计算外圈故障频率范围为 176.78~184.33 Hz,平均频率为 180.56 Hz。由图 6 可以看出柔性薄壁轴承外圈故障信号在高频和低频处都存在明显的周期性冲击,其中高频处的冲击为故障频率被高频载波调制形成,低频处的冲击为柔性薄壁轴承正常运转时变为椭圆形后的长短轴交替产生的冲击^[7]。

对上述信号的 STFT 时频图做 TMSST,文献[24]验证了对于轴承故障冲击的提取,S变换相比 STFT 和 CWT 具有更好的效果,故本文同时对信号做 S 变换进行效果对比。图 7 为 TMSST 和 S 变换后的时频图,其中图 7(c)和(d)分别为图 7(a)和(b)红色矩形框内的细节放大图。由图 7 可知,TMSST 相比于 S 变换可以得到能量更为集中的时



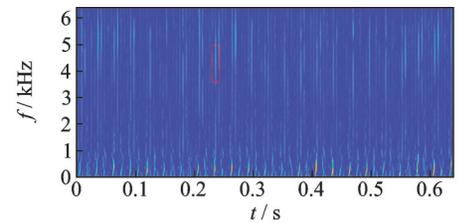
(a) Time domain waveform diagram



(b) Time-frequency diagram by STFT

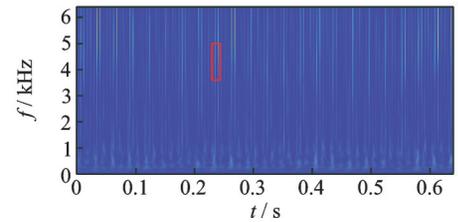
图6 外圈故障信号及其STFT结果

Fig. 6 Outer ring fault signal and its STFT result



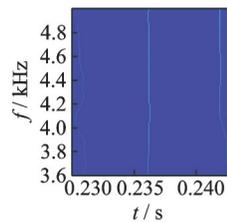
(a) TMSST结果图

(a) TMSST result



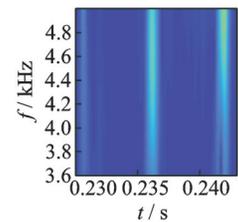
(b) S变换结果图

(b) S-transform result



(c) TMSST细节放大图

(c) TMSST zoomed versions



(d) S变换细节放大图

(d) S-transform zoomed versions

图7 TMSST和S变换时频图

Fig. 7 TMSST and S-transform time-frequency diagram

频图,但是由于噪声等因素的影响,使得压缩后的宽频带脉冲分量不是一条理想的直线,为了更好地提取故障脉冲特征,则要选取合适频率点进行更进一步分析。

对于频率点的选取,文献[16]选取冲击能量最大处的频率点,并用于深沟球轴承故障的提取取得较好的效果。该方法先对 TMSST 结果的每个频率点利用下式求取特征量:

$$TFES(\omega) = \max \left| \int_{-\infty}^{+\infty} (|Ts^{[N]}(t, \omega)| - \phi(\omega)) e^{-i\omega t} dt \right| \quad (31)$$

式中 $\phi(\omega)$ 表示 TMSST 结果在频率点 ω 的平均值。方程(31)可以表示 TMSST 结果具有最突出的脉冲特征的频率点。分析该式可知,该式本质上取每个频率点切片去均值化后求频谱,取频谱幅值最大值作为该频率点特征值。因为幅值大小对应着能量,同时频谱提取的是周期性变化量,所以该特征值可以反映频率点处能量最大的周期性分量的能量大小。然后取使 $TFES(\omega)$ 达到最大的 ω 作为特征频率点。

对图 7 中 TMSST 得到的时频图采用 $TFES$ (式(31))和本文提出的 $TFCK$ (式(26))进行频率点的选取。图 8 为以 $TFES$ 为特征量选取频率点得到的故障冲击特征。其中图 8(a)为各频率点处的 $TFES(\omega)$,当 $\omega = 256.3$ Hz 时 $TFES(\omega)$ 取得最大值。取 $\omega = 256.3$ Hz 时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲特征,如图 8(b)所示。进一步分析该脉冲特征频谱,如图 8(c)所示,可明显看出二倍转频及相应的倍频成分,这是由柔性薄壁轴承正常工作时变为椭圆形以及受力特性产生的冲击成分,不是外圈故障导致。从这一结果可见该方法不适用于柔性薄壁轴承外圈故障提取。

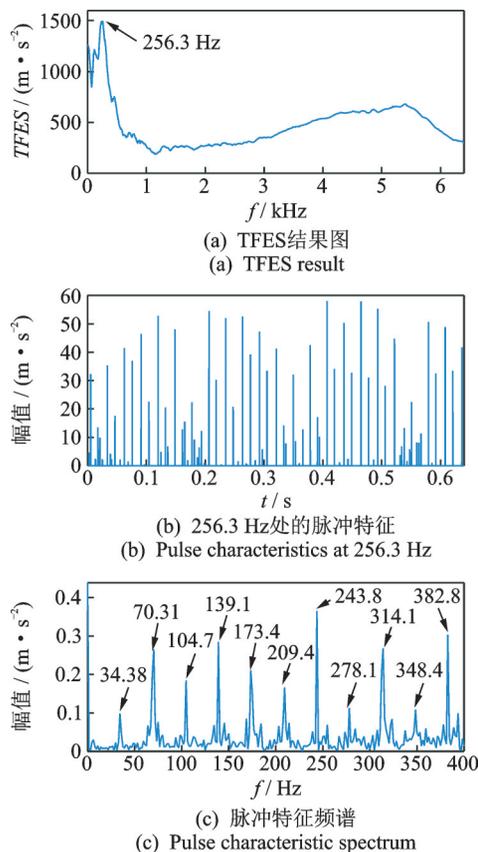


图 8 以 $TFES$ 为指标提取的特征

Fig. 8 Pulse characteristics extracted by $TFES$

接下去采用相关峭度法对此信号的 TMSST 结果进行处理。其中故障特征频率取平均故障特征频率,根据式(27)计算得到 $T = 71$ 。取 $T = 71$ 计算不同移位周期数 M 时原始信号的相关峭度值,结果如表 2 所示。由表 2 得 $M = 1$ 时,相关峭度值最大,故取 $M = 1$ 。

表 2 不同移位周期数 M 的相关峭度值

Tab. 2 Correlation kurtosis values of different shift periods M

M	相关峭度
1	3.24×10^{-4}
2	7.88×10^{-8}
3	1.40×10^{-11}
4	1.30×10^{-15}
5	1.09×10^{-20}

图 9 为 $T = 71, M = 1$ 时以 $TFCK$ 选取频率点得到的故障冲击特征。其中图 9(a)为各频率点处的 $TFCK(\omega)$,当 $\omega = 4847$ Hz 时 $TFCK(\omega)$ 取得最大值。取 $\omega = 4847$ Hz 时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲特征,如图 9(b)所示,上方小图为红框处的放大图。相比于图 8(b)中的脉冲特征,图 9(b)中提取的脉冲特征效果更好。进一步分析该脉

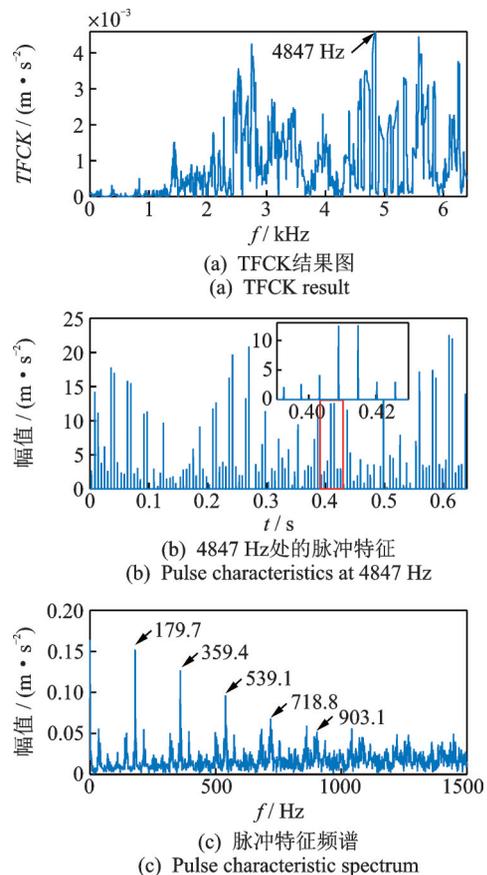


图 9 $TFCK$ 为指标提取的脉冲特征

Fig. 9 Pulse characteristics extracted by $TFCK$

冲特征频谱,如图 9(c)所示,有 179.7 Hz 频率及相应的倍频成分,这与该轴承外圈故障特征频率均值计算值接近相等。同时采用 S 变换结合相关峭度进行分析对比,利用下式进行频率点的选取:

$STCK(\omega) = CK(|ST(t, \omega)| - \phi(\omega), T, M)$ (32)
 式中 $ST(t, \omega)$ 为 S 变换结果, $\phi(\omega)$ 表示 S 变换结果在频率点 ω 处的平均值。

图 10 为 $T=71, M=1$ 时以 $STCK$ 选取频率点得到的故障冲击特征。其中图 10(a) 为各频率点处的 $STCK(\omega)$, 当 $\omega=5123$ Hz 时 $STCK(\omega)$ 取得最大值。取 $\omega=5123$ Hz 时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲特征,如图 10(b) 所示。

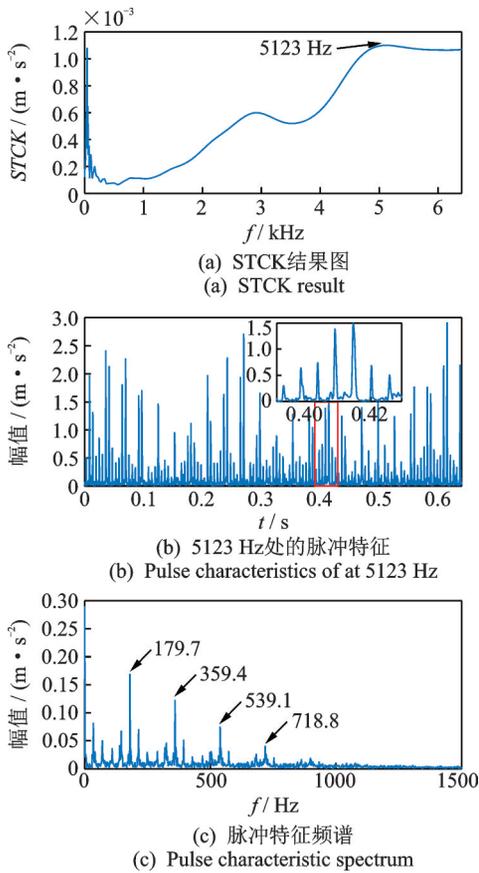


图 10 STCK 为指标提取的脉冲特征
 Fig. 10 Pulse characteristics extracted by STCK

相比于图 9(b) 中的脉冲特征,图 10(b) 中提取的脉冲特征的幅值差别较大且相对发散。进一步分析该脉冲特征频谱,如图 10(c) 所示。虽然也可明显看出 179.7 Hz 频率以及相应的倍频成分,但显然没有图 9(c) 突出,且可观察到的倍频更少。综合对比图 7, 9 和 10, 说明本文方法能够更清晰地反映信号的时频特性。

由式(28)和(30)可知,柔性薄壁轴承外圈故障频率本身在定转速下也具有时变性,但傅里叶频谱只能反映冲击信号的整体频率特征。为了验证故障

特征频率的时变性,进一步对图 9(b) 中提取的脉冲特征进行分析,因为两个相邻脉冲间隔时间为脉冲周期,因脉冲周期是故障特征频率的倒数,对于柔性薄壁轴承而言,这种脉冲周期是时变的,脉冲周期的倒数则为该处的冲击频率。对所有相邻脉冲间隔求取冲击频率,可以验证故障频率在时域下的波动性。考虑到实验采集信号会因为噪声等一系列干扰因素的存在导致求取的脉冲间隔周期存在粗大误差,采用图 11 所示方法来去除粗大误差,其中 $f[k]$ 为对所有相邻脉冲间隔分别求得的冲击频率集合。

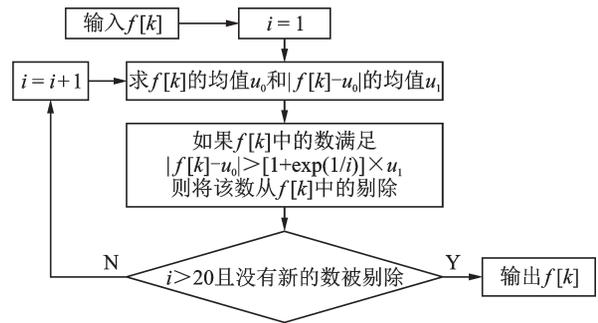


图 11 粗大误差剔除流程图
 Fig. 11 Coarse error elimination flow chart

对图 9(b) 和 10(b) 的脉冲特征分析其波动性,结果如图 12 所示。虽然本文方法和 S 变换结合相关峭度都能反映出柔性薄壁轴承外圈故障特征频率存在明显的波动,但 S 变换结果波动明显过大。为了定量进行描述,求取冲击频率波动方差,得到本文方法和 S 变换结合相关峭度求得的柔性薄壁轴承外圈故障冲击频率波动的方差分别为 16.0427 和 23.2897 Hz。说明本文方法能验证外圈故障频率的时变性且具有更好效果。

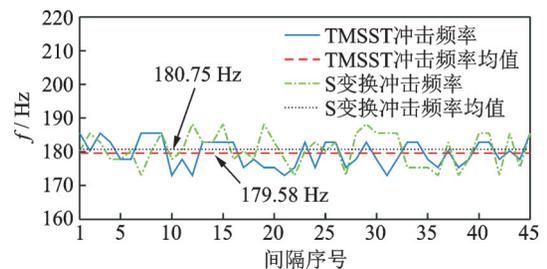


图 12 脉冲频率特征图
 Fig. 12 Characteristic diagram of pulse frequency

2.2 内圈故障柔性薄壁轴承振动特征提取

对内圈故障的柔性薄壁轴承的振动信号进行分析,振动信号采样频率为 12800 Hz,采样点数为 8192,转频为 $f_i=15$ Hz。根据式(29)和(30)计算故障频率范围为 187.00~193.47 Hz,平均频率为 190.24 Hz。图 13 为采集的外圈故障时域波形(图

13(a))及其STFT后的时频图(图13(b))。由图13可看出内圈故障柔性薄壁轴承在高频和低频处都存在明显的周期性冲击,冲击组成与外圈故障类似。

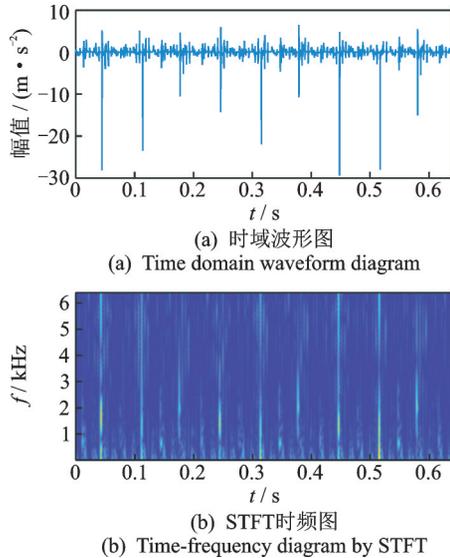


图 13 内圈故障信号及其STFT结果

Fig. 13 Inner ring fault signal and its STFT result

对上述信号做TMSST和S变换,图14为TMSST和S变换后的时频图,其中图14(c)和(d)分别为图14(a)和(b)红色矩形框内的细节放大图。

对图14中TMSST得到的时频图分别采用TFES和本文提出的TFCK进行频率点的选取。图

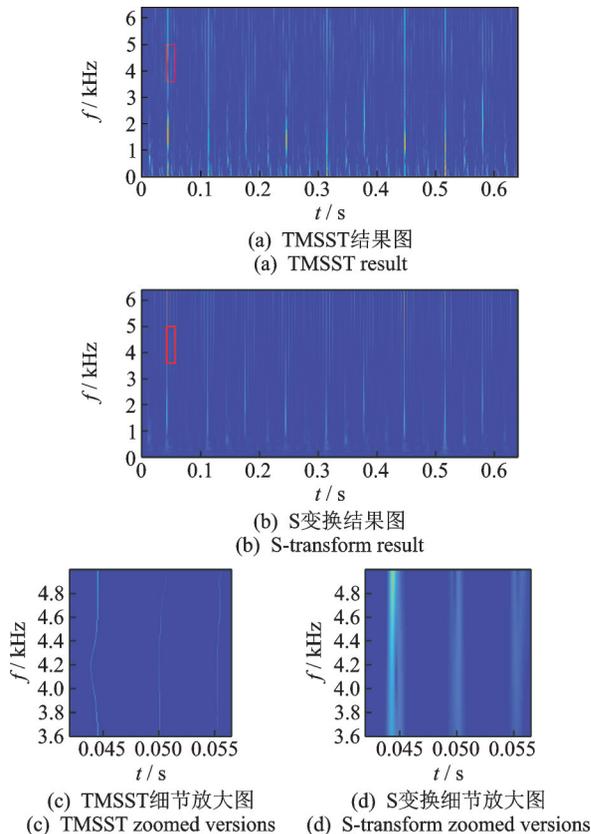


图 14 TMSST 和 S 变换时频图

Fig. 14 TMSST and S-transform time-frequency diagram

15为以TFES为特征量选取频率点得到的故障冲击特征。其中图15(a)为各频率点处的TFES(ω),当 $\omega = 89.06$ Hz时TFES(ω)取得最大值。取 $\omega = 89.06$ Hz时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲冲击特征,如图15(b)所示。图15(c)为图15(b)的频谱,可看出二倍转频以及相应的倍频成分,这是由柔性薄壁轴承正常工作时变为椭圆形以及受力特性产生的冲击成分,不是内圈故障导致。故该方法不适用于柔性薄壁轴承内圈故障提取。

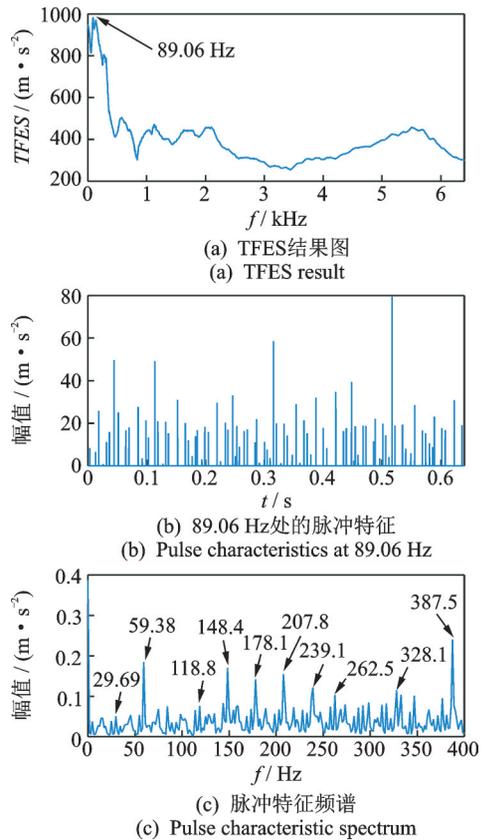


图 15 以 TFES 为指标提取的脉冲特征

Fig. 15 Pulse characteristics extracted by TFES

接着采用相关峭度法对此信号TMSST结果进行处理。根据式(27)计算得到 $T = 68$ 。取 $T = 68$ 计算不同移位周期数 M 时原始信号的相关峭度值,结果如表3所示。由表3得 $M = 1$ 时,相关峭度值最大,故取 $M = 1$ 。

表 3 不同移位周期数 M 的相关峭度值

Tab. 3 Correlation kurtosis values of different shift periods M

M	相关峭度
1	1.73×10^{-4}
2	4.20×10^{-8}
3	8.23×10^{-12}
4	7.27×10^{-16}
5	4.65×10^{-20}

图 16 为 $T=68, M=1$ 时以 $TFCK$ 选取频率点得到的故障冲击特征。其中图 16(a) 为各频率点处的 $TFCK(\omega)$, 当 $\omega=3728 \text{ Hz}$ 时 $TFCK(\omega)$ 取得最大值。取 $\omega=3728 \text{ Hz}$ 时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲特征, 如图 16(b) 所示, 上方小图为红框处的放大图。图 16(c) 为图 16(b) 的频谱, 可明显看出 189.1 Hz 频率以及相应的倍频成分, 这与该轴承内圈故障特征频率均值的计算值非常接近, 说明本文算法可有效提取柔性薄壁轴承内圈故障特征。

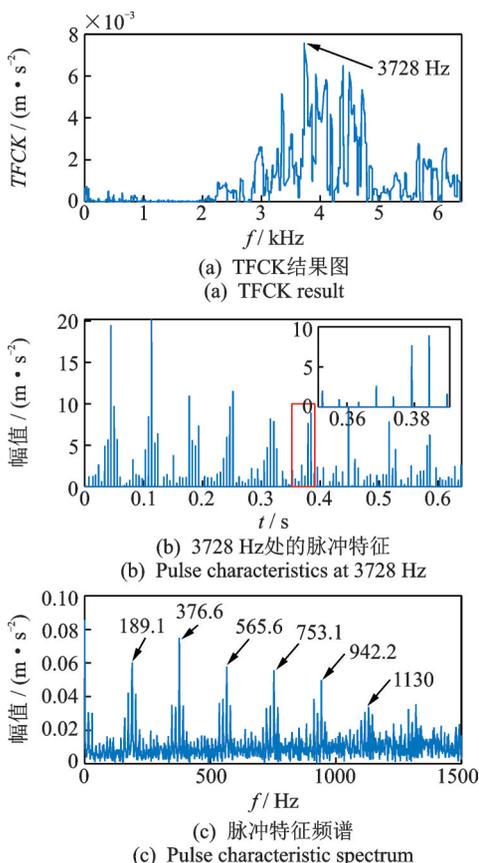


图 16 以 $TFCK$ 为指标提取的脉冲特征
Fig. 16 Pulse characteristics extracted by $TFCK$

同时采用 S 变换结合相关峭度进行分析对比, 利用式 (32) 进行频率点的选取。图 17 为 $T=68, M=1$ 时以 $STCK$ 选取频率点得到的故障冲击特征。其中图 17(a) 为各频率点处的 $STCK(\omega)$, 当 $\omega=3755 \text{ Hz}$ 时 $STCK(\omega)$ 取得最大值。取 $\omega=3755 \text{ Hz}$ 时对应时频矩阵的行向量作为该处的脉冲特征, 如图 17(b) 所示, 上方小图为红框处的放大图。相比于图 16(b) 中的脉冲特征, 图 17(b) 中提取的脉冲特征的幅值差别较大且相对发散。进一步分析该脉冲特征频谱, 如图 17(c) 所示。虽然也可明显看出 189.1 Hz 频率以及相应的倍频成分, 但显然没有图 16(c) 突出, 且可观察到的倍频更少。综合对比图 14, 16 和 17, 说明本文方法能够更清晰地反

映信号的时频特性。由式 (29) 和 (30) 可知, 柔性薄壁轴承内圈故障频率本身在定转速下也具有时变性, 采用图 11 流程处理图 16(b) 和 17(b) 的脉冲特征, 并分析其波动性, 结果如图 18 所示。对比本文方法和 S 变换结合相关峭度结果, S 变换结果波动明显过大。求取冲击频率波动方差, 得到本文方法和 S 变换结合相关峭度求得的柔性薄壁轴承内圈故障冲击频率波动的方差分别为 20.6794 和 77.3001 Hz 。说明本文方法能验证了内圈故障频率的时变性且效果更好。

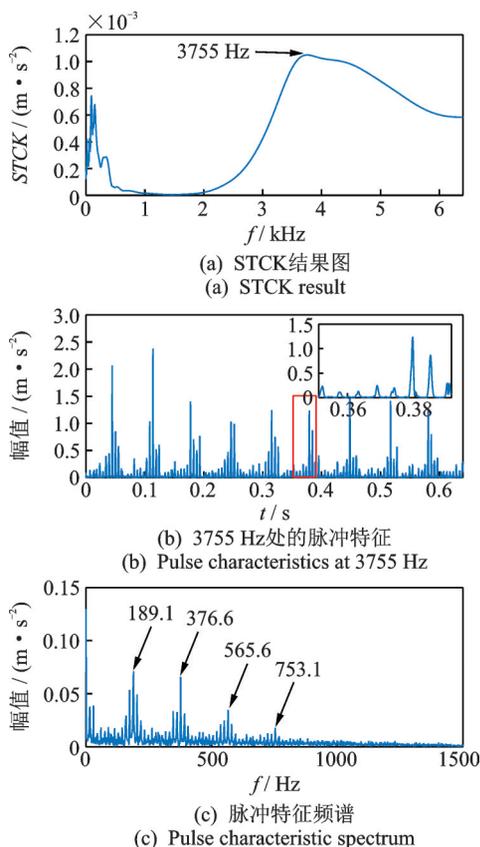


图 17 $STCK$ 为指标提取的脉冲特征
Fig. 17 Pulse characteristics extracted by $STCK$

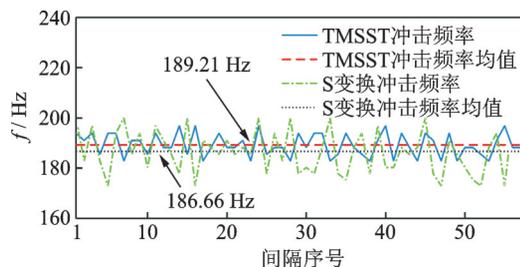


图 18 脉冲频率特征图
Fig. 18 Characteristic diagram of pulse frequency

3 结 论

针对柔性薄壁轴承故障特征频率定转速下存在

时变性的特点,本文利用时间重分配多同步压缩变换(TMSST)对类冲击信号良好的时频聚集性和相关峭度(CK)对于周期性冲击特征的识别能力,提出了一种TMSST结合相关峭度的柔性薄壁轴承故障特征提取方法。分析了基于STFT的TMSST方法的原理,该方法在STFT的基础上通过同步压缩过程提高其时间维度的能量聚集性,从而得到脉冲特征的理想时频图,进一步推导了基于STFT的TMSST方法的离散化算法。利用相关峭度准则,选取相关峭度最大的频率点处的脉冲特征进行分析,从而得到故障特征。将该方法用于柔性薄壁轴承内外圈故障特征提取,并将其与S变换结合相关峭度进行对比,结果证明本文方法在成功提取故障特征的同时能更好地反映柔性薄壁轴承的故障特征频率在定转速下的时变性。相比于传统的轴承故障频率提取算法围绕频谱进行分析而忽略时域特性,本文所提方法能够清晰反映故障特征的时频特性,同时定转速下故障频率时变性特征的提取也为柔性轴承故障诊断提供了一种新的参考指标。

参考文献:

- [1] 丰飞,王炜,唐丽娜,等.空间高精度谐波减速器的应用及其发展趋势[J].机械传动,2014,38(10):98-107.
Feng Fei, Wang Wei, Tang Lina, et al. Application and development trend of spatial high-precision harmonic reducer [J]. Mechanical Transmission, 2014, 38 (10):98-107.
- [2] 谢金瑞.国内外谐波传动的应用和发展[J].光学机械,1979(4):22-31.
Xie Jinrui. Application and development of harmonic drive at home and abroad [J]. Optics and Mechanics, 1979(4):22-31.
- [3] Kayabasi O, Erzincanli F. Shape optimization of tooth profile of a flexspline for a harmonic drive by finite element modelling[J]. Materials & Design, 2007, 28(2): 441-447.
- [4] Ostapski W, Mukha I. Stress state analysis of harmonic drive elements by FEM[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2007, 55 (1) : 115-123.
- [5] 姜祎,王亚珍,赵坤,等.谐波减速器柔性薄壁轴承的力学特性分析[J].轴承,2017(1):10-14.
Jiang Yi, Wang Yazhen, Zhao Kun, et al. Mechanical characteristics analysis of flexible thin-walled bearings of harmonic reducer[J]. Bearings, 2017(1):10-14.
- [6] 郭莹莹,赵学智,上官文斌,等.柔性椭圆轴承故障频率分析与CMWT-FH特征提取[J].机械工程学报,2019,55(23):154-161.
Guo Yingying, Zhao Xuezhi, Shangguan Wenbin, et al. Fault frequency analysis and CMWT-FH feature extraction of flexible elliptical bearings [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019,55(23):154-161.
- [7] 陈辉,李伟光,林鑫,等.谱峭度方法在柔性薄壁轴承故障特征频率提取中的应用[J].振动与冲击,2020,39(1):131-139.
Chen Hui, Li Weiguang, Lin Xin, et al. Application of spectral kurtosis method in fault feature frequency extraction of flexible thin-walled bearings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(1):131-139.
- [8] 刘兴教,赵学智,李伟光,等.基于峭度原则的EEMD-MCKD的柔性薄壁轴承故障特征提取[J].振动与冲击,2021,40(1):157-164.
Liu Xingjiao, Zhao Xuezhi, Li Weiguang, et al. Fault feature extraction of flexible thin-walled bearings based on EEMD-MCKD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(1):157-164.
- [9] 刘义亚,李可,陈鹏.基于同步压缩小波变换的滚动轴承故障诊断[J].中国机械工程,2018,29(5):585-590.
Liu Yiya, Li Ke, Chen Peng. Rolling bearing fault diagnosis based on synchronous compression wavelet transform [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (5): 585-590.
- [10] Sinha S, Routh P, Anno P, et al. Spectral decomposition of seismic data with continuous wavelet transform [J]. Geophysics, 2005, 70(6):19-25.
- [11] Daubechies I, Lu J, Wu H. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011,30(2):243-261.
- [12] Oberlin T, Meignen S, Perrier V. The Fourier-based synchrosqueezing transform [C]. 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal-Processing, Florence, Italy, 2014:315-319.
- [13] Huang Z, Zhang J, Zhao T, et al. Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 54(2): 817-825.
- [14] He D, Cao H, Wang S, et al. Time-reassigned synchrosqueezing transform: the algorithm and its applications in mechanical signal processing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 255-279.
- [15] Fourer D, Auger F. Second-order horizontal synchrosqueezing of the S-transform: a specific wavelet case study [C]. European Signal Processing Conference, 2021: 2200-2204.
- [16] Yu G, Lin T, Wang Z, et al. Time-reassigned multi-synchrosqueezing transform for bearing fault diagnosis of rotating machinery [J]. IEEE Transactions on Indus-

- trial Electronics, 2020, 68(2): 1486-1496.
- [17] McDonald G, Zhao Q, Zuo M. Maximum correlated kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33(1): 237-255.
- [18] Stanković L, Djurović I, Stanković S, et al. Instantaneous frequency in time-frequency analysis: enhanced concepts and performance of estimation algorithms [J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 1-13.
- [19] Dwyer Roger F. Fourth-order spectra of Gaussian amplitude-modulated sinusoids[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(2): 918-926.
- [20] 王新刚,王超,韩凯忠.基于优化VMD和MCKD的滚动轴承早期故障诊断方法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(3):373-380.
Wang Xingang, Wang Chao, Han Kaizhong. Early fault diagnosis method of rolling bearings based on optimized VMD and MCKD [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(3): 373-380.
- [21] McDonald G L, Zhao Q, Zuo M J. Maximum correlated Kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 237-255.
- [22] 王晓龙.基于振动信号处理的滚动轴承故障诊断方法研究[D].北京:华北电力大学,2017:47-50.
Wang Xiaolong. Research on fault diagnosis method of rolling bearings based on vibration signal processing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 47-50.
- [23] 赵学智,郭莹莹,李振,等.柔性薄壁轴承的损伤特征频率分析[J].振动工程学报,2020,33(6):1313-1323.
Zhao Xuezhi, Guo Yingying, Li Zhen, et al. Damage characteristic frequency analysis of flexible thin-walled bearings [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1313-1323.
- [24] 刘湘楠,赵学智,上官文斌.强背景噪声振动信号中滚动轴承故障冲击特征提取[J].振动工程学报,2021,34(1):202-210.
Liu Xiangnan, Zhao Xuezhi, Shanguan Wenbin. Feature extraction of rolling bearing fault impact in vibration signal with strong background noise [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 202-210.

A fault feature extraction method for flexible thin-wall bearings based on TMSST and correlation kurtosis

YU Chao-feng, ZHAO Xue-zhi

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For flexible thin-wall bearings, a fault feature extraction method based on time-reassigned multi-synchro-squeezing transform (TMSST) and correlation kurtosis is proposed. In this method, the compression operator is used to improve the time-frequency aggregation of STFT results. The pulse characteristics at the best frequency point are selected in combination with correlation kurtosis. The impulse frequency characteristics are obtained by analyzing the pulse characteristics. The method is applied to the feature extraction of fault signals of inner and outer rings of flexible thin-walled bearings, and compared with the correlation kurtosis of S transform. The results show that the method in this paper can successfully extract fault features and better reflect the time-varying frequency of fault features, which provides a new perspective of time-frequency analysis for bearing fault diagnosis.

Key words: fault diagnosis; flexible thin-wall bearing; characteristic frequency; time-reassigned multisynchrosqueezing transform; correlation kurtosis

作者简介: 虞超峰(1998—),男,硕士研究生。电话:18057058370;E-mail:ycf1103805262@163.com。

通讯作者: 赵学智(1970—),男,教授,博士生导师。电话:15360526062;E-mail:mezhaoxz@scut.edu.cn。