[文章编号] 1003－4684(2025)05-0043-08

基于 EDSE-VKF 的旋转机械轴心轨迹的时频表示

付　波，李乐全，赵熙临，王诗雯
（湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068）

[摘　要] 针对经典时频表示方法存在分辨率低的问题，提出基于 EDSE-VKF 的旋转机械时变多分量信号时频表示方法，首先受同步提取算法启发，联合欧几里得距离重构时频矩阵，提出 EDSE 瞬时频率估计新方法，不但提高信号的时频聚集性，而且使时频矩阵具有更好的极值点连贯性，避免极值点偏移，从而更准确地检出时频脊线，并估计信号基频分量瞬时频率值；然后，采用 Vold-Kalman 滤波器直接在时域中提取旋转机械振动信号的基频分量和谐波分量，并计算谐波分量的瞬时全谱参数，构建转子信号的高分辨率时频表示。通过对旋转机械转子系统模拟仿真信号和油膜振动信号分析，说明所提出的轴心轨迹的时频表示不仅具备良好的时频分辨率，而且展现了轴心轨迹的进动方向。

[关键词] 同步提取算子；瞬时频率；谐波分量；瞬时全谱参数
[中图分类号] TV734　　[文献标识码] A

旋转机械作为工业自动化不可或缺的一部分[1]，在生产实践中被广泛使用，如水轮机、航空发动机、车床等。因此基于信号处理技术分析研究旋转机械非稳定信号[2-3]，分析其中参数信息有助于探明机械状态。时频分析方法[4]作为表征旋转机械非平稳多分量信号时变特征的有效工具，目前已经发展了很多年，成为研究非平稳信号的主要手段之一，经典时频表示方法[5]包括短时傅里叶变换、小波变换和 Wigner-Ville 分布。近些年人们提出了一些先进的后处理方法[6-8]，如 Yu[9]等提出同步提取变换，该方法能够将频谱分解结果重新分配和挤压，接近真实的瞬时频率，其瞬时频率值是通过严格的数学推导得到的。高冠琪等[10]成功应用故障特征频率提取提高了原方法的精度，但同步提取方法在处理频谱距离较近的分量时，其时频分辨率依然较低。为更加全面地提供相关旋转机械健康状况重要信息。李延峰等[11-12]基于 Vold-Kalman 滤波自适应分离和提取复杂多分量非平稳信号的微弱故障特征，有效验证了该方法对噪声抑制的实用性和优越性。温广瑞等[13-14]将 Vold-Kalman 滤波阶次跟踪技术和分数阶傅里叶变换与全息谱结合实现转子启停车故障特征的提取。

针对同步提取方法无法处理频谱距离较近分量的问题，本文提出了一种旋转机械时变多分量信号高分辨率时频表示方法。首先通过基于欧氏距离的同步提取方法重构时频矩阵（euclidean distance based synchronous extraction method，EDSE）的时频脊线获取精准的旋转机械瞬时频率，然后采用 Vold-Kalman 滤波器在时域信号中分离基频和其谐波分量，并计算谐波分量轴心轨迹的瞬时全谱参数，最终构建旋转机械轴心轨迹的高分辨率时频表示。

1　理论基础

1.1　同步提取算法

假设单分量信号 $s(u)$ 是纯谐波信号，数学表达式为：

$$s(u)=A(t)\cdot e^{i\varphi(t)} \tag{1}$$

其中 $A(t)$ 表示信号 $s(u)$ 的幅值，$\varphi(t)$ 表示信号的相位。信号的短时傅里叶变换结果：

$$G_e(t,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}s(u)\cdot g(u-t)\cdot e^{-i\varphi'(t)(u-t)}\mathrm{d}u=\int_{-\infty}^{+\infty}A(t)\cdot e^{i\varphi(t)}\cdot g(u-t)\cdot e^{-i\varphi'(t)(u-t)}\mathrm{d}u\approx A(t)\cdot\hat{g}(\cdot)(\omega-\varphi'(t))\cdot e^{i\varphi(t)} \tag{2}$$

$g(\cdot)$ 表示窗口函数，ω 表示相位的导数，$\hat{g}(\cdot)$ 表示窗函数的傅里叶变换。

为了进一步进行参数估计，$\partial_t G_e(t,\omega)$ 可以通过以下公式计算：

$$\partial_t G_e(t,\omega)=\partial_t\left(A(t)\cdot\hat{g}(\cdot)(\omega-\varphi'(t))\cdot e^{i\varphi(t)}\right)=G_e(t,\omega)\cdot i\cdot\varphi'(t) \tag{3}$$

瞬时频率估计算子 $\omega_0(t,\omega)$ 可由下式得到：

[收稿日期] 2023－02－23
[基金项目] 湖北省重点研发计划项目(2021BAA193)
[第一作者] 付　波(1973－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学教授，研究方向为图像处理和智能控制。

$$\omega_0(t,\omega)=\varphi'(t)=-i\cdot\frac{\partial_t G_e(t,\omega)}{G_e(t,\omega)} \tag{4}$$

即同步提取算子就可以写为

$$\mathrm{SEO}(t,\omega)=\delta\left(-i\cdot\frac{\partial_t G_e(t,\omega)}{G_e(t,\omega)}\right) \tag{5}$$

由于迪利克雷函数 $\delta()$ 性质，同步提取算子可以按以下公式计算：

$$\mathrm{SEO}(t,\omega)=\begin{cases}1, -i\cdot\dfrac{\partial_t G_e(t,\omega)}{G_e(t,\omega)}=0\\ 0, -i\cdot\dfrac{\partial_t G_e(t,\omega)}{G_e(t,\omega)}\neq 0\end{cases} \tag{6}$$

通过同步提取算子可以得到同步提取算法的数学表达式：

$$SET(t,\omega)=Ge(t,\omega)\cdot\delta(\omega-\omega_0(t,\omega)) \tag{7}$$

1.2 基于全频谱的轴心轨迹瞬时特征参数

设转子在互相垂直方向上的运动方程[15]为：

$$\begin{cases}x_i=a_i(t)\cos(\omega_i(t)t+\varphi_{xi}(t))\\ y_i=b_i(t)\cos(\omega_i(t)t+\varphi_{yi}(t))\end{cases} \tag{8}$$

式中：$\omega_i(t)$（$i=1,2,\cdots$）是若干时变的谐波分量；$a_i(t)$ 和 $b_i(t)$ 分别是谐波 $\omega_i(t)$ 在两方向上的幅值；$\varphi_{xi}(t)$ 和 $\varphi_{yi}(t)$ 分别是互相垂直方向上谐波 $\omega_i(t)$ 的测量信号相位；t 是时间变量。

根据全频谱理论分析，式(8)可以写成

$$\begin{cases}x_i=x_c\cos\omega_i(t)t-x_s\sin\omega_i(t)t\\ y_i=y_c\cos\omega_i(t)t-y_s\sin\omega_i(t)t\end{cases} \tag{9}$$

其中，

$$\begin{cases}x_{\mathrm{cit}}=a_{\mathrm{it}}\cos\varphi x\mathrm{it}\\ y_{\mathrm{cit}}=b_{\mathrm{it}}\cos\varphi_{\mathrm{yit}}\\ x_{\mathrm{sit}}=a_{\mathrm{it}}\sin\varphi x\mathrm{it}\\ y_{\mathrm{sit}}=b_{\mathrm{it}}\sin\varphi_{\mathrm{yit}}\end{cases} \tag{10}$$

其中，$a_{\mathrm{it}}=a_i(t)$、$b_{\mathrm{it}}=b_i(t)$、$\varphi x\mathrm{it}=\varphi_{xi}(t)$ 和 $\varphi_{\mathrm{yit}}=\varphi_{yi}(t)$。

以转子简谐运动轴心轨迹分析为例，根据式(9)三角函数关系与简谐运动轨迹联立可得：

$$\begin{cases}x_{\mathrm{cit}}=|x_{\mathrm{fit}}|\cos\alpha_{\omega\mathrm{it}}+|x_{\mathrm{rit}}|\cos\beta_{\omega\mathrm{it}}\\ x_{\mathrm{sit}}=|x_{\mathrm{fit}}|\sin\alpha_{\omega\mathrm{it}}+|x_{\mathrm{rit}}|\sin\beta_{\omega\mathrm{it}}\\ y_{\mathrm{cit}}=|y_{\mathrm{fit}}|\sin\alpha_{\omega\mathrm{it}}-|y_{\mathrm{rit}}|\sin\beta_{\omega\mathrm{it}}\\ y_{\mathrm{sit}}=|y_{\mathrm{rit}}|\cos\beta_{\omega\mathrm{it}}-|y_{\mathrm{fit}}|\cos\alpha_{\omega\mathrm{it}}\end{cases} \tag{11}$$

即得：

$$\begin{cases}\alpha_{\omega\mathrm{it}}=\arctan\dfrac{x_{\mathrm{sit}}+y_{\mathrm{cit}}}{x_{\mathrm{cit}}-y_{\mathrm{sit}}}\\ \beta_{\omega\mathrm{it}}=\arctan\dfrac{x_{\mathrm{sit}}-y_{\mathrm{cit}}}{x_{\mathrm{cit}}+y_{\mathrm{sit}}}\end{cases} \tag{12}$$

假设转子的振动由给定时刻 t 处的瞬时参数决定且暂态稳定，则时刻 t 处的第 i 次谐波瞬时轨道定义为 o_{it}，表示为：

$$o_{\mathrm{it}}{}^2=x_i^2+y_i^2 \tag{13}$$

o_{it} 的最大值和最小值分别位于椭圆轨道的长轴和短轴的末端。将式(7)带入式(12)中表示为：

$$o_{\mathrm{it}}^2=f(\gamma)=(a_{\mathrm{itcos}}(\omega_{\mathrm{it}}+\varphi_{\mathrm{xit}}))^2+(\omega_{\mathrm{it}}\cos(\gamma+\varphi_{\mathrm{yit}}))^2 \tag{14}$$

在函数一阶导数为 0 且二阶导数为正数时取到长轴值，二阶导数为负数时取到短轴值计算函数 $f(\gamma)$ 对 γ 的导数。

$$\frac{\mathrm{d}f(\gamma)}{\mathrm{d}\gamma}=-2a_{\mathrm{it}}^2\sin(2\gamma+2\varphi x\mathrm{it})-2b_{\mathrm{it}}^2\sin(2\gamma+2\varphi_{\mathrm{yit}}) \tag{15}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2f(\gamma)}{\mathrm{d}\gamma^2}=-4a_{\mathrm{it}}^2\cos(2\gamma+2\varphi x\mathrm{it})-4b_{\mathrm{it}}^2\cos(2\gamma+2\varphi_{\mathrm{yit}}) \tag{16}$$

椭圆长轴和短轴的坐标点应是上式极值点处取到，即：

$$\frac{\sin(2\gamma+2\varphi_{\mathrm{xit}})}{\sin(2\gamma+2\varphi_{\mathrm{yit}})}=-\frac{b_{\mathrm{it}}^2}{a_{\mathrm{it}}^2}=M \tag{17}$$

得到函数在极值点的值为：

$$\gamma_{\mathrm{it}}=\frac{1}{2}\arctan\frac{M\times\sin(2\varphi_{\mathrm{yit}})-\sin(2\varphi_{\mathrm{xit}})}{\cos(2\varphi_{\mathrm{xit}})-M\times\cos(2\varphi_{\mathrm{yit}})} \tag{18}$$

谐波轴心轨道长轴如下：

$$R_{\mathrm{ait}}=\sqrt{a_{\mathrm{it}}^2\cos(\gamma_{\mathrm{it}}+\varphi_{\mathrm{xit}})^2+b_{\mathrm{it}}^2\cos(\gamma_{\mathrm{it}}+\varphi_{\mathrm{yit}})^2} \tag{19}$$

谐波轴心椭圆轨迹的长轴垂直于短轴，短轴表示为：

$$R_{\mathrm{bit}}=\sqrt{a_{\mathrm{it}}^2\cos\left(\gamma_{\mathrm{it}}+\varphi_{\mathrm{xit}}+\frac{\pi}{2}\right)^2+b_{\mathrm{it}}^2\cos\left(\gamma_{\mathrm{it}}+\varphi_{\mathrm{yit}}+\frac{\pi}{2}\right)^2} \tag{20}$$

瞬时轴轨道正向进动分量和反向进动分量表示为：

$$\begin{cases}R_{\mathrm{it+}}=\dfrac{R_{\mathrm{bit}}+R_{\mathrm{ait}}}{2}\\ R_{\mathrm{it-}}=\dfrac{|R_{\mathrm{ait}}-R_{\mathrm{bit}}|}{2}\end{cases} \tag{21}$$

谐波椭圆轨道(在转子旋转方向)的正进动表示 $R_{\mathrm{it+}}>R_{\mathrm{it-}}$；反进动表示 $R_{\mathrm{it+}}<R_{\mathrm{it-}}$。

2 基于 EDSE-VKF 的转子时变复杂信号时频表示方法

2.1 基于 EDSE 的时频脊线提取方法

转子旋转速度作为 VKF 重要的输入参量，其准确性直接影响 VKF 的提取能力，所以在转子多分量非平稳信号中精确提取瞬时频率非常重要。由此，本节提出基于 EDSE 的时频脊线提取方法，首先由同步提取联合欧几里得距离重构时频矩阵，提高基频分量时频聚集性，解决了传统方法无法高精度提取多分量复杂信号时频脊线的弊端。

1)首先将初始时频矩阵经同步提取算子压缩得到待处理的时频矩阵，即得：

$$\mathrm{SET}(t,\omega)=\mathrm{Ge}(t,\omega)\cdot\delta(\omega-\omega_0(t,\omega)) \tag{22}$$

将时频矩阵离散化处理，该矩阵列代表时间步长，行表示频率，设离散化时频谱图矩阵 TFM 如：

$$\mathrm{TFM}=-\mathrm{ST}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}\\ a_{21}&a_{22}&a_{23}\\ a_{31}&a_{32}&a_{33}\end{bmatrix}$$

2)以更新 a_{11} 为例时，根据原始值与根据欧式距离计算的惩罚值重构坐标值，以达到寻优和限制频率跳跃的目的。

$$D_{x_1y_1,x_2y_2}=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2} \tag{23}$$

$$\begin{cases}\text{tip}_{11}=\min\{a_{13}+p\times D_{11,13},\\ \qquad a_{23}+p\times D_{11,23},a_{33}+p\times D_{11,33}\}\\ a'_{11}=a_{11}+\text{tip}_{11}\end{cases} \tag{24}$$

式中：D 代表两个点之间欧氏距离；tip 表示当前索引最小值；value 表示更新前坐标值；value′表示更新后坐标值；p 为惩罚系数；本次以惩罚系数 2 为例计算。

3)对最后一列应用惩罚产生最后一列的最小值 tip_{11}，将最后一列中的最小值与当前索引值相加 value'_{11}，进而更新第 1 列中其余元素的值，如：

$$\boldsymbol{ST}_1=\begin{bmatrix}a'_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a'_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a'_{31} & a_{32} & a_{33}\end{bmatrix}$$

4)使用上述相同的步骤过程，用惩罚因子重新计算前一列的值，获取后序列的新值。最终矩阵为：

$$\boldsymbol{ST}_1=\begin{bmatrix}a'_{11} & a'_{12} & a'_{13}\\ a'_{21} & a'_{22} & a'_{23}\\ a'_{31} & a'_{32} & a'_{33}\end{bmatrix}$$

5)从矩阵的最后一列开始，找出最小值，跟踪最小值坐标索引，它们构成了组成时频脊线的路径 $f_i(t)$。

$$\begin{cases}f_i(t)=\arg[\max(\text{TFM}_f(t,f))]\\ \max(\text{TFM}_f(t,f)=\min_f(\text{ST}_f(t,f))\end{cases} \tag{25}$$

在本例中，采用三阶正弦信号进行验证。

$$\text{TFM}=-\text{ST}=\begin{bmatrix}4 & 3 & 2\\ 2 & 2 & 2\\ 3 & 3 & 5\end{bmatrix}$$

经计算得

$$\text{ST}_1=\begin{bmatrix}10 & 15 & 14+2\sqrt{2}\\ 8 & 12 & 16\\ 5+2\sqrt{5} & 11+2\sqrt{2} & 18+2\sqrt{2}\end{bmatrix}$$

重构时频矩阵的列最小值坐标为(1,2)，(2,2)，(3,2)，这与所构成矩阵的第 2 行的正弦波能量路径相匹配，验证了方案的可行性。

2.2　基于 EDSE-VKF 的旋转机械时变多分量信号时频表示方法

基于 EDSE-VKF 的旋转机械时变多分量信号时频表示的构建由以下步骤组成，其流程如图 1 所示。

1)通过基于经验模态分解(empirical mode decomposition，EMD)的多尺度小波阈值降噪算法处理原始信号，得到降噪后的旋转机械振动信号。

2)为进一步在时域中分解振动信号的基频分量及其谐波分量，需获取旋转机械瞬时频率，通过基于 EDSE 的时频脊线提取方法从时频分析结果中提取时频脊线，并获得其瞬时频率估计值，将轴向与径向信号瞬时频率估计值分量均值作为转速的估计值。

3)在已知谐波分量阶次和转速信号前提下，通过 VKF 将基频和谐波阶次分量从原始信号中分离。通过希尔伯特变换求解基频分量和谐波阶次分量的幅值包络、瞬时相位和瞬时频率。

4)根据基于全频谱的旋转机械轴心轨迹瞬时特征参数计算各阶谐波分量的瞬时轨道的长轴、短轴、瞬时轨道的正反向分量以及形状指向系数。

5)将谐波分量轴轨道的正向分量和反向分量幅值投影到时频图三维坐标中，得到谐波分量高分辨率时频表示。所有谐波时频表示的叠加是原始信号的转子时频表示。

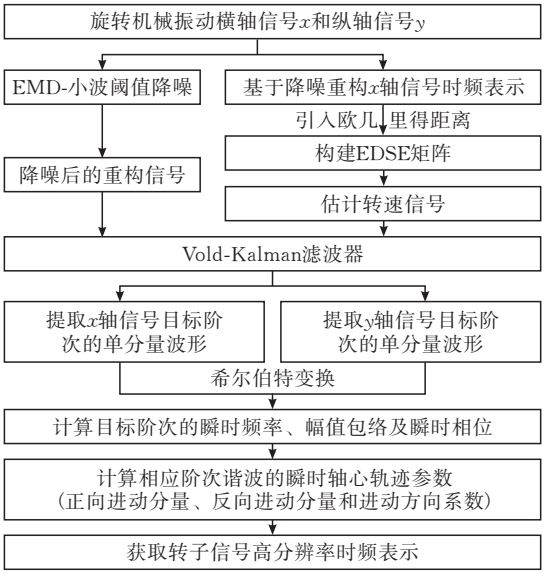


图 1　基于 EDSE-VKF 的转子时变复杂信号时频表示方法流程

3　试验分析

3.1　模拟信号仿真分析

在模拟信号仿真分析过程中，通过对旋转机械仿真信号的参数进行精确控制，可以对比本方法所提取的信号特征与理论信号特征，检验该方法的性能，证明方法的普适性。数值模拟仿真信号包含两个非平稳分量，它们模拟停机过程中转子的振动响应，其数学表达式为：

$$\begin{cases}x=\sum_{i=1}^{2}\exp(-\chi_x it)\cos\left[2\pi i\times\int f_i(t)\,\mathrm{d}t\right]\\ y=\sum_{i=1}^{2}\exp(-\chi_y it)\cos\left[2\pi i\times\int f_i(t)\,\mathrm{d}t+\varphi_i\right]\end{cases} \tag{26}$$

式中：x 为转子横轴振动信号；y 为转子纵轴振动信号；信号 x 基频分量阻尼系数 χ_x 被设置为 0.6；信号

y 基频阻尼系数 χ_y 被设置为 0.5；$f_1(t)=160-220t+110t^2$、$f_2(t)=2f_1(t)$，分别表示两个分量的瞬时频率；x 和 y 的相位差由 φ_i 表示，分别设置 $\varphi_1=\pi/3$、$\varphi_2=4\pi/3$。

信号 x 和 y 的瞬时频率相同，采样频率设置为 2048 Hz，采样时间设置为 1 s，在信号 x 和 y 中，人工分别加入信噪比为 0.78 dB 高斯白噪声。噪声信号分析如图 2 所示，由快速傅里叶变换获得的 x 和 y 的频域波形如图 2c 和 d 所示，可以看出噪声很强，无法从频谱中找到有用的信息。

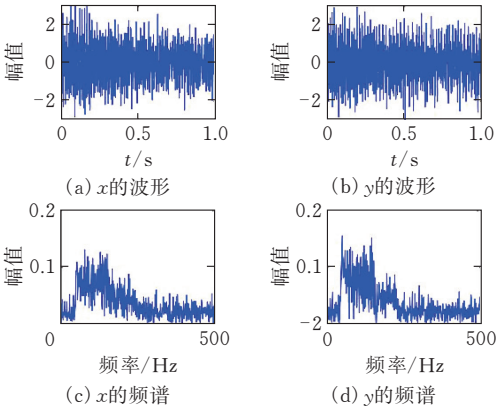


图 2　原始信号时域波形及频域波形

将原始信号通过经验模态分解，算法将振动信号分解为本征模态分量，以 x 轴信号为例分解结果如图 3 所示。

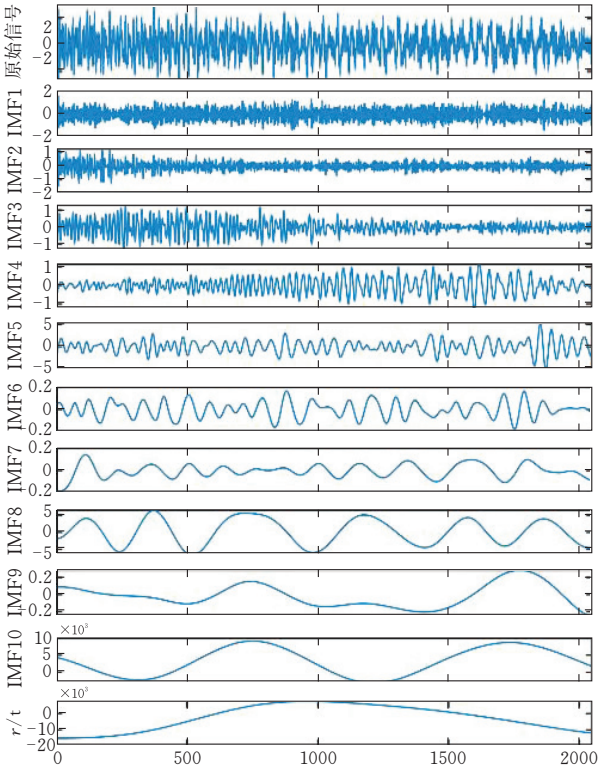


图 3　信号 x 的 EMD 分解

对比使用小波阈值降噪技术处理的小波基参数和小波分解层数的主要技术指标，可以选用 db2-db9 的正交小波基和三层、四层小波分解层数，对本征模态分量进行小波分析，再通过软阈值技术对信号进行处理，并对处理结果进行平均，以提升信噪比。所得信噪比和均方根误差如表 1 所示，使用基函数 db5 正交小波基、三层分解的小波阈值降噪技术处理结果为最优选。

表 1　小波基函数和分解层数对降噪后信号信噪比的影响

小波基函数	小波分解层数	均方根误差	信噪比
db2	三层	0.4200	2.3443
	四层	0.4310	2.2252
db3	三层	0.4253	2.2829
	四层	0.4349	2.1858
db4	三层	0.4299	2.2375
	四层	0.4430	2.1069
db5	三层	0.4064	2.5025
	四层	0.4246	2.2932
db6	三层	0.4244	2.4070
	四层	0.4239	2.3013
db7	三层	0.4180	2.3667
	四层	0.4255	2.2831
db8	三层	0.4174	2.3734
	四层	0.4327	2.2079
db9	三层	0.4310	2.2256
	四层	0.4371	2.1635

降噪后信号分析如图 4 所示。

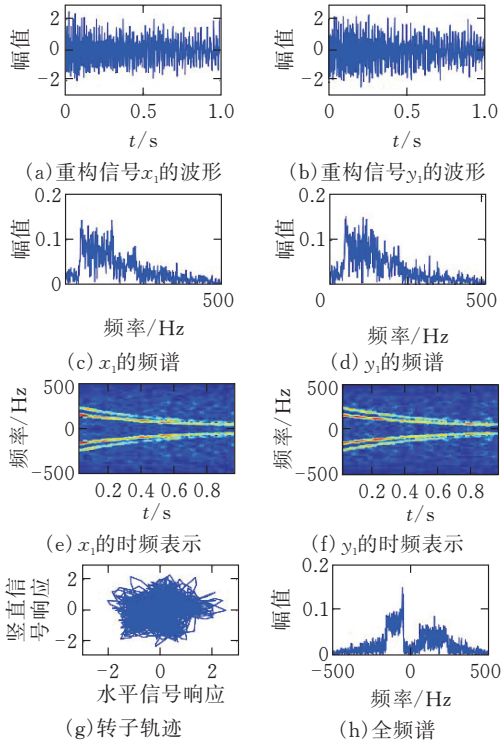


图 4　降噪后信号分析

由短时傅里叶变换获得的 x_1 和 y_1 的频谱如图 4c 和 d 所示，可以直观看出经过经验模态分解结合小波阈值降噪，有效滤除了部分高频噪声，信号信噪比提高了一倍，同时保留了信号特征。从时频谱图

可以看出，信号由两个分量组成，然而，两个分量从 0.4 s开始出现时频谱图一倍分量和二倍分量混叠迹象，难以直观区分，从原始转子轨迹图和全谱也无法获得更多信息。

通过基于 EDSE 的时频脊线提取方法对由短时傅里叶变换得到的初始时频图谱进行处理，提取转子横轴和纵轴信号的时频脊线并获取瞬时频率估计值，如图 5 所示（蓝色线段为 EDSE 方法所得的拟合值，红色实线为信号真实值，绿色线为同步压缩变换所得到的拟合值），将瞬时频率估计值均值作为转子转速信号应用于 VKF，直接从时域信号中提取信号谐波分量，并构建转子谐波分量的瞬时轴心轨迹谐波分量，提取结果如图 6、图 7 所示。通过希尔伯特变换求取幅值包络、瞬时相位和瞬时频率。

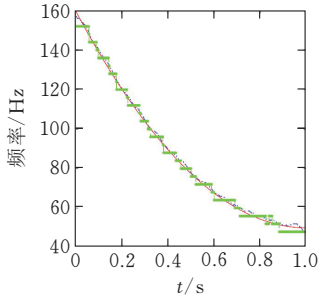
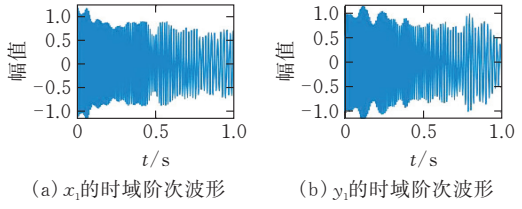


图 5　瞬时频率估计值与理论值对比



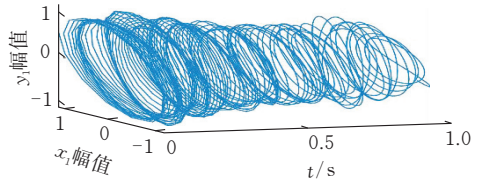


图 6　1 倍谐波分量时域分析

将理论谐波分量与通过 VKF 所提取的谐波分量进行对比，如图 8 所示（左侧为信号 x 的重构谐波信号，右侧为信号 y 的重构谐波信号）。为验证准确度，定义所构建谐波分量的特征平均绝对百分比误差（mean absolute percentage error，MAPE）和均方根误差（root mean square error，RMSE）指标对其进行评价。

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{x_r(i)-x_e(i)}{2}\right| \tag{27}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_r(i)-x_e(i)\right)^2} \tag{28}$$

式中：N 为信号长度；下标 r 表示实际值；下标 e 为

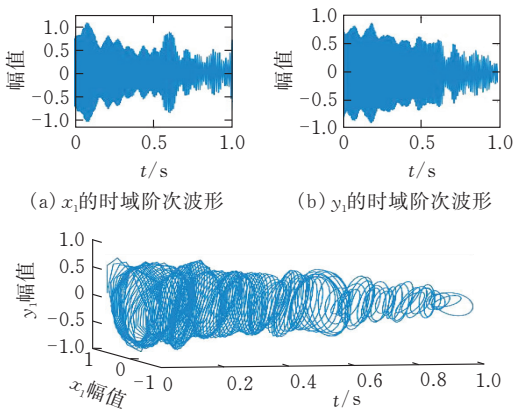
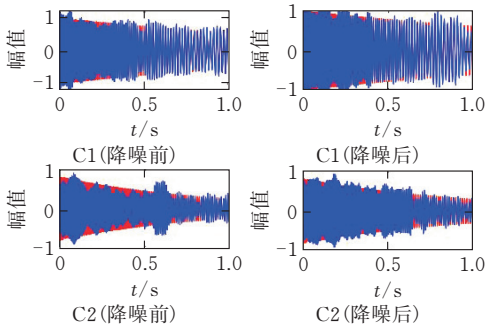


图 7　1.5 倍谐波分量时域分析

估计值。计算含噪各分量的各项指标，如表 2 所示。

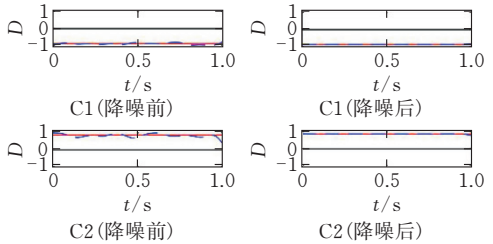


红色为真实分量，蓝色为拟合分量

图 8　真实谐波分量与拟合分量对比

通过图 8 所示，可直观说明本方法所提取的谐波分量与真实分量拟合度高，表明本文研究的方法对谐波信号提取精度高，噪声鲁棒性强。

旋转机械振动信号的进动方向系数 $D=\sin(\varphi_{x\mathrm{it}}-\varphi)$。其中 $\varphi x\mathrm{it}$、$\varphi_{y\mathrm{it}}$ 表示 x、y 谐波信号相位，估计结果如图 9 所示，左侧为含噪谐波信号方向系数图，右侧为不含噪谐波信号图。计算量化指标如表 2 所示。



红色为真实分量，蓝色为拟合分量

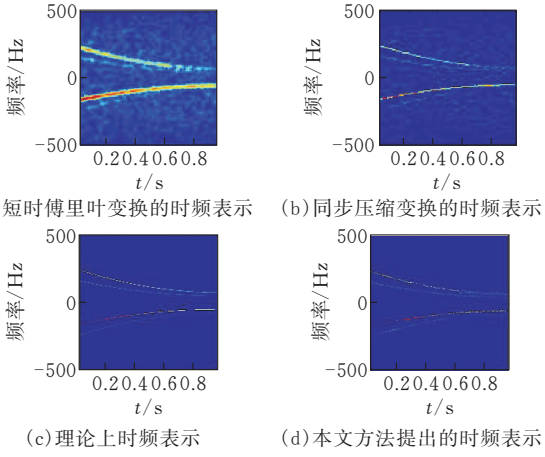
图 9　进动方向系数

表 2　进动方向系数量化指标

信号分量	量化指标	
	MAPE	RMSE
含噪信号 C1 分量	5.5	0.0057
含噪信号 C2 分量	9.3	0.0496
不含噪信号 C1 分量	0.36	$2.38\times e^{-4}$
不含噪信号 C2 分量	0.39	0.0017

进动方向系数实现了瞬时轨道方向性信息的定量表达，通过计算量化指标表明本文所提出的方法获得的谐波轨道瞬时进动方向系数估计值非常接近真实值。

最后，将各个谐波分量轴轨道的正向分量和反向分量振幅投影到时频图三维坐标中，得到谐波分量轴轨道时频表示。原始信号的转子信号高分辨率时频表示由两个谐波分量的高分辨率时频表示叠加得到。为验证方法的准确性和有效性，本文将短时傅里叶变换(图 10a)、同步压缩变换的时频表示(图 10b)、理论上的时频表示(图 10c)和本文所提出方法的结果(图 10d)进行对比，它具有良好的时频分辨率，C1 和 C2 分量的时频图可以清晰地分辨出来且不会发生混叠现象，与理论时频表示非常接近。由本方法提出的时频表示结果可以观察出分量轴心轨迹的进动特征，C1 分量反进动分量大于正进动分量，C2 分量正进动分量大于反进动分量，从信号的方向指向系数计算结果(图 9)可以证实高分辨率时频图所展示进动分量的正确性。



(a)短时傅里叶变换的时频表示 (b)同步压缩变换的时频表示

(c)理论上时频表示 (d)本文方法提出的时频表示

图 10 信号时频表示对比

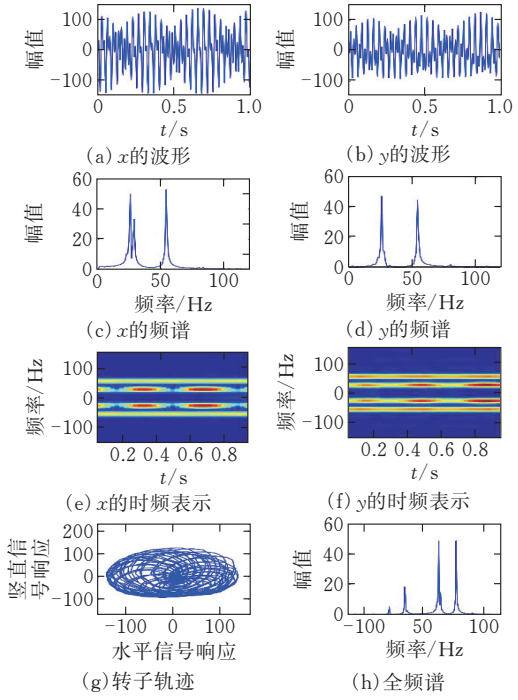
为分析时频分析方法产生结果的时频聚焦行，通过对不同方法产生的 renyi 熵进行计算，如表 3 所示，本文所提方法 renyi 熵值为 3.309，较短时傅里叶变换和同步压缩变化的时频表示相比，本文方法具有更高的时频聚集性。

表 3 时频表示 renyi 熵

量化指标	时频表示方法			
	本文方法	短时傅里叶变换	小波变换	同步提取算法
renyi 熵	3.309	9.716	7.718	6.092

3.2 试验过程油膜振荡信号

本节将使用一组油膜振荡信号验证方案有效性。该信号沿垂直于转子的方向使用涡流传感器采集信号，通过将转子试验台转速从 0 提高到 4165 r/min，利用共振现象发现一阶临界转速在 1600～1700 r/min 范围内，然后速度下降到 0。实验过程中出现一定的油膜振荡现象。采集器采样频率设置为 1024 Hz。信号采集时转子转速为 6240 r/min (54 Hz)。信号 x、y 及其傅里叶频谱如图 11 所示。图 11e 为原轴轨道，图 11f 为信号全谱。



(a) x的波形 (b) y的波形

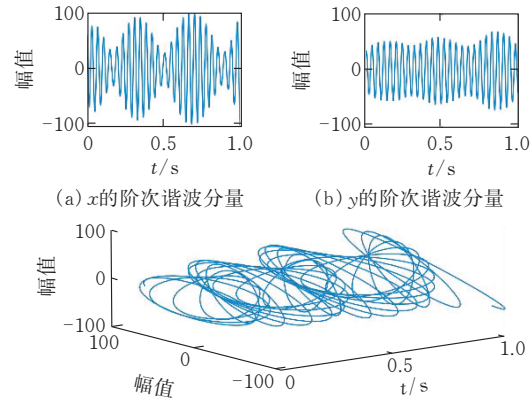
(c) x的频谱 (d) y的频谱

(e) x的时频表示 (f) y的时频表示

(g)转子轨迹 (h)全频谱

图 11 油膜振荡信号分析

油膜振荡信号的主要成分是旋转频率和特征频率。从图 11h 可以看出，转子 1 倍分量和 0.48 倍分量的进动方向都是正向的。从图 11g 可以推断，转子轴心轨道的形状可能是变化的。基于 EDSE-VKF 的信号提取结果如图 12 和 13 所示，油膜振荡信号的旋转频率分量和特征分量被很好地分开。



(a) x的阶次谐波分量 (b) y的阶次谐波分量

(c)谐波轴心轨迹

图 12 0.48 倍谐波分量时域分析

从图 12 和 13 可以看出，油膜振荡特征分量振幅波动较大，旋转频率分量较为平稳。计算谐波分量瞬时特征参数，进一步通过计算进动方向系数(图 14)，获取谐波分量的进动方向系数，C1 和 C2 始终保持正进动。

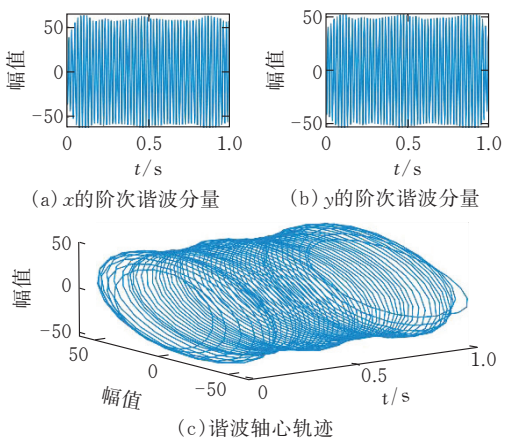


图 13　1 倍谐波分量时域分析

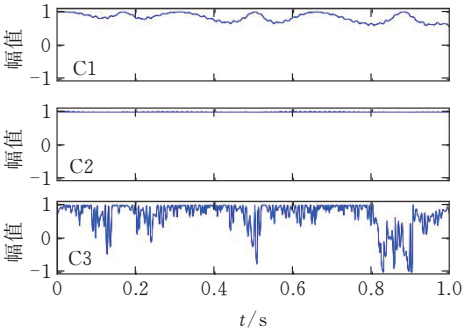


图 14　进动方向系数

此外，利用基于全谱瞬时参数计算构建相应谐波分量轴心轨迹的时频谱图，进而完成油膜振荡信号高分辨率时频图，从图 15 可以观察出，本文基于 EDSE-VKF 的高分辨率时频谱图与短时傅里叶变换、同步压缩变换的时频表示相比，该方法具有更高的时频分辨率，与小波变换相比不受交叉分量的影响，并且可以更清晰地看出信号在时频域的变化。

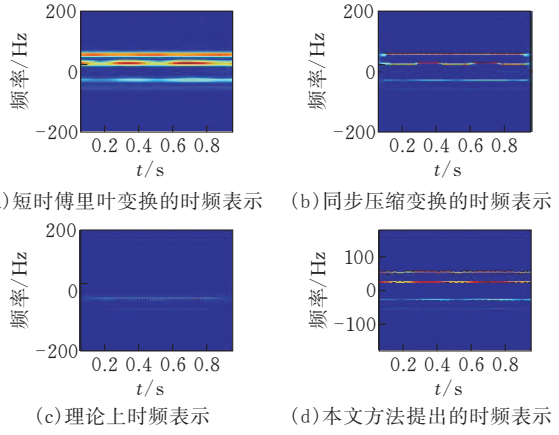


图 15　信号时频表示对比

4　结论

本文提出了基于 EDSE 的时频脊线提取方法，对由短时傅里叶变换得到的初始时频图谱进行处理，提高了时频聚集性和时频脊线连贯性，解决了同步提取变换处理近距离频率成分多分量信号的不足，准确提取转子横轴和纵轴信号的时频脊线并获取瞬时频率估计值，为 VKF 提取谐波信号分量提供精准的转子速度信号，并基于谐波分量瞬时特征参数构建旋转机械轴心高分辨率时频表示。该方法实现了旋转机械时变复杂信号的谐波分量提取，同时计算转子谐波信号的瞬时特征参数，可用于描述非平稳过程中转子谐波分量瞬时振动状态。通过仿真实验与转子油膜振动数据分析，基于 EDSE-VKF 的旋转机械时变复杂信号时频表示方法对旋转机械旋转频率估计精确，同时时频图具有高分辨率，并且可以获得旋转机械谐波分量的进动方向信息，为旋转机械振动信号分析提供更直观的特征，有利于非平稳过程中旋转机械的状态监测。

[参 考 文 献]

[1] LIU R，YANG B，ZIO E，et al. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery：A review[J]. Mechanical Systems & Signal Processing，2018，108(08)：33-47.

[2] CHEN X，WANG S，QIAO B，et al. Basic research on machinery fault diagnostics：Past，present，and future trends[J]. Frontiers of Mechanical Engineering，2018，13(02)：264-291.

[3] 党建. 大型旋转机械振动信号分析与早期故障辨识方法研究[D].西安：西安理工大学，2018.

[4] PONS-LLINARES J，ANTONINO-DAVIU J A，RIERA-GUASP M，et al. Advanced induction motor rotor fault diagnosis via continuous and discrete time-frequency tools[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2014，62(03)：1791-1802.

[5] VEDREÑO-SANTOS F，RIERA-GUASP M，HENAO H，et al.Diagnosis of rotor and stator asymmetries in wound-rotor induction machines under nonstationary operation through the instantaneous frequency [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2013，1(09)：4947-4959.

[6] AUGER F，FLANDRIN P，LIN Y T，et al. Time-frequency reassignment and synchrosqueezing：An overview[J]. IEEE Signal Processing Magazine，2013，30(06)：32-41.

[7] 黄现云. 旋转机械振动信号处理及故障诊断方法研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2018.

[8] 杨可玉. 旋转机械振动信号分析及故障诊断研究[D]. 大庆：东北石油大学，2021.

[9] GANG Y，YU M，XU C. Synchroextracting Transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2017，64(10)：8042-8054.

[10] 高冠琪，黄伟国，李宁，等.基于时频挤压和阶比分析的变转速轴承故障检测方法[J].振动与冲击，2020，39(03)：205-210.

[11] 李延峰. 齿轮箱非平稳多分量信号的故障诊断方法研究[D].太原:太原理工大学,2021.
[12] 李延峰,韩振南,王志坚,等.基于 VKF 与阶比分析的滚动轴承故障特征提取方法[J].轴承,2020(11):56-62.
[13] 温广瑞,江铖,李杨,等.基于弗德卡曼阶比跟踪的转子起停车故障特征提取方法及应用[J].振动与冲击,2016,35(02):64-68.
[14] 杜小伟,温广瑞,江铖,等.分数阶全息的转子起停车故障特征提取方法[J].振动.测试与诊断,2016,36(04):729-733.
[15] 崔晓龙. 水电机组轴系振动瞬时特征提取与识别方法研究[D].武汉:华中科技大学,2021.

Time-Frequency Representation of Axis Trajectory of Rotating Machinery Based on EDSE-VKF

FU Bo[1], LI Lequan[1], ZHAO Xilin[1], WANG Shiwen[2]
(*Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Addressing the issue of inadequate resolution in classical time-frequency representations for analyzing time-varying multicomponent signals in rotating machinery, this paper proposes a time-frequency representation method based on EDSE VKF for time-varying multi-component signals of rotating machinery. A new EDSE instantaneous frequency estimation method is proposed, which not only improves the time-frequency aggregation of the signal, but also makes the time-frequency matrix have better continuity to avoid the extreme point migration, so as to detect the time-frequency ridge more accurately and estimate the instantaneous frequency of the fundamental frequency component of the signal. Then, Vold Kalman filter is used to extract the fundamental and harmonic components of the rotating machinery vibration signal directly in the time domain, and the instantaneous full spectrum parameters of the harmonic components are calculated, and the high resolution time-frequency representation of the rotor signal is constructed. By analyzing the simulated signals of rotor system of rotating machinery and oil whip signals, it is shown that the proposed time-frequency representation of the shaft trajectory not only has good time-frequency resolution, but also shows the shape and directivity index.

Keywords: Synchronous extraction operator; Instantaneous frequency; Harmonic component; Instantaneous full spectrum parameters

[责任编校:赵 瞳]

(上接第 42 页)

Low Carbon Optimal Scheduling of Integrated Energy System Considering Integrated Demand Response and Hydrogen Coupling

ZHOU Yiru, TU Lingying, QIN Yu, LI Xi
(*School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan*, 430000, *China*)

Abstract: In order to explore the development demand potential of customer demand side and consider the impact of integrated energy system multi-energy coupling on the demand side, this paper establishes an electric-thermal-cooling-gas-hydrogen optimal dispatch model with price-based and incentive-based demand response. Firstly, a price-based IDR model based on the time of use tariff elasticity matrix is established for the characteristics of flexible electric loads. Secondly, an incentive-based IDR model based on step type subsidy is proposed considering the influence of temperature on cold and heat loads. Then, an IDR day ahead economic dispatch model with the objective of minimizing the sum of costs of step type subsidy, equipment operation, wind abandonment and energy purchase is established. Finally, the validity of the proposed model is verified by the analysis of calculation cases.

Keywords: Integrated energy system; Integrated demand response; Stepped subsidy IDR; Day ahead dispatch

[责任编校:赵 瞳]