

时变工况的风电机组齿轮箱无转速计阶次跟踪方法研究

万书亭¹, 王燕杰¹, 张 雄¹, 顾晓辉²

(1. 华北电力大学河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室, 河北 保定 071003;
2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对时变工况风电机组齿轮箱振动信号受噪声干扰和频率模糊问题, 通过研究无转速下风电机组齿轮箱振动信号与转频波动规律间的联系, 提出了基于 VMD-SET 时变工况的风电机组齿轮箱无转速计阶次跟踪方法。该方法利用变分模态分解(VMD)滤波, 利用同步提取变换(SET)对齿轮箱振动信号时频分析, 分别从轴承故障时域振动信号中初步提取故障特征频率趋势, 从正常齿轮啮合调制时域振动信号中提取啮合频率时频脊线, 进一步利用精细化时频脊线交叉解耦优化瞬时频率提取效果, 再用提取的转速曲线对轴承故障振动信号进行阶次跟踪, 从角域阶次谱中得到故障特征阶次的单根谱线。通过仿真及实验验证了所提方法的优越性和有效性。

关键词: 故障诊断; 风电机组齿轮箱; 时变工况; 无转速计; 阶次跟踪; 时频分析

中图分类号: TH165⁺.3; TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0266-14
DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.028

引 言

风电机组齿轮箱作为增速传动部件极易受损, 其内部结构复杂, 运行环境恶劣, 深入研究风电机组齿轮箱故障具有重要意义。风电机组齿轮箱转速波动导致传统信号处理方法失效, 角域重采样将时域非平稳转化为角域平稳信号, 再用传统信号处理方法提取故障特征, 用无转速计阶次跟踪估计转轴瞬时频率(Instantaneous Frequency, IF), 可避免转速计输出数据噪声干扰, 便于风电机组离线振动监测, 降低了安装在线监测设备成本。

针对时变冲击间隔、噪声干扰等带来的频谱模糊, IF 估计困难等问题, 诸多学者提出了有效的方法。近年来, 有关 IF 估计的研究大都适用于单分量信号, 工程实际中振动信号一般为多分量信号, 基于时频分析(Time-Frequency Analysis, TFA)的 IF 估计方法在一定条件下适用于分析多分量信号。文献[1-2]利用短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)方法估计转轴 IF, 该方法计算速度快, 噪声鲁棒性好; 荆双喜等^[3]提出了 STFT 与连续小波变换结合的 IF 估计方法, 利用无转速计阶次跟踪检测齿轮故障; 徐晓迪等^[4]利用同步压缩 ST-

FT 方法, 将时频谱压缩重排再逆变换优化能量脊线, 改进了非线性非稳态多分量信号的 IF 估计精度。孟玲霞等^[5]对时变行星齿轮箱振动信号进行 Wigner-Ville 时频分析, 取对数再进行重排, 采用 Crazy climber 方法提取重排后时频谱中的峰值脊线, 将脊线转换为时频脊阶次谱; 赵明等^[6]提出自适应短时 Chirp-Fourier 变换的 IF 估计方法, 该方法较以 STFT 进行 IF 估计精度高; 刘永强等^[7]将隐马尔科夫模型中的 Viterbi 法引入 IF 估计, 提高了计算速度和 IF 估计精度; Yu 等^[8]提出了同步提取变换(Synchroextracting Transform, SET)时频分析方法, 该方法与传统 TFA 方法相比, IF 精度高、时频谱能量集中; 张文海等^[9]利用 SET 方法提取了 IF, 再利用 Vold-Kalman 滤波阶次跟踪方法较为准确地提取特征阶次成分; 变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)^[10]是一种针对非平稳信号的自适应分解方法; Luo 等^[11]对齿轮箱啮合振动机理进行研究, 对振动信号进行分割和重构, 分析了故障冲击与啮合冲击间的关联性; 许志华等^[12]研究了基于 VMD 的风电机组齿轮箱振动信号降噪方法, 剔除干扰噪声, 提取有用成分进行重构, 避免了分解过程出现模态混叠现象。多数研究者对风电机组齿轮箱启动、制动等非周期性转频进行了估计, 很

收稿日期: 2021-05-16; 修订日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275109); 河北省自然科学基金资助项目(E2022502007); 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室开放基金资助项目(KF2020-28)。

少对周期、复杂转频进行估计。

针对上述问题,本文提出了基于VMD-SET时变工况的风电机组齿轮箱无转速计阶次跟踪方法,通过对比STFT,SET和同步压缩变换(Synchrosqueezing Transform, SST)方法,验证了本文方法可有效提升IF估计精度,改善频率模糊现象。

1 基本原理

1.1 变分模态分解

VMD^[10]是一种自适应、变分问题构造和求解的信号分解方法,VMD算法步骤如下:

1)参数初始化,模态分解得到的 k 个分量初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$ 、各分量的中心频率初始化 $\{\hat{\omega}_k^1\}$ 、拉格朗日乘子初始化 $\{\hat{\lambda}_k^1\}$ 以及迭代次数 $n=0$ 。

2)按照下面表达式,交替迭代更新,得迭代 $n+1$ 次后, k 个模态函数分量 u_k^{n+1} 和 k 个模态分量的中心频率 ω_k^{n+1} 。

更新各模态频谱,表达式如下:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^{n+1})^2} \quad (1)$$

式中“ $\hat{\cdot}$ ”表示傅里叶变换, $f(\omega)$ 为原始信号, \hat{u}_k^{n+1} 为迭代 $n+1$ 次 k 个时域模态分量傅里叶变换, $\lambda(\omega)$ 为拉格朗日乘法算子, α 为二次惩罚因子, ω_k^{n+1} 为迭代 $n+1$ 次 k 个模态分量对应的中心频率。

更新中心频率 ω_k^{n+1} ,表达式如下:

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (2)$$

式中 $\hat{u}_k(\omega)$ 为 $u_k(t)$ 的傅里叶变换, k 为模态分量个数, n 为迭代次数。

3)迭代更新拉格朗日乘子 λ ,表达式如下:

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (3)$$

式中 τ 为保真系数。

4)对于给定的判断精度 $\epsilon > 0$,判断是否满足如下迭代停止条件,若满足则迭代终止,否则,返回步骤2)继续执行。

$$\sum_k \|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2 / \|u_k^n\|_2^2 < \epsilon$$

1.2 同步提取变换

SET^[8]是一种时频分辨率高、能量集中、无参数化的TFA方法,该方法是基于STFT提出的,在低

信噪比下,具有良好的噪声鲁棒性。它改善了ST-FT谱能量发散的问题。SET实现过程如下:

1.2.1 STFT时频谱计算

首先根据STFT计算时域信号 $s(t)$ 的时频谱,STFT时频谱表达式如下:

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) \cdot s(u) \cdot e^{-j\omega u} du \quad (4)$$

式中 $g(u-t)$ 为可移动的窗函数。

令 $g_\omega(u) = g(u-t) \cdot e^{j\omega u}$,依据帕塞瓦尔定理对式(4)进行修正,进一步STFT表达式如下:

$$\begin{aligned} G(t, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) \cdot (g(u-t) \cdot e^{j\omega u})^* du = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) \cdot (g_\omega(u))^* du = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\zeta) \cdot (\hat{g}_\omega(\zeta))^* d\zeta \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\hat{s}(\zeta)$ 为信号 $s(u)$ 的傅里叶变换, $(\hat{g}_\omega(\zeta))^*$ 为 $g_\omega(u)$ 傅里叶变换后的复共轭。

考虑到 $\hat{g}_\omega(\zeta)$ 的计算公式如下:

$$\hat{g}_\omega(\zeta) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) \cdot e^{j\omega u} \cdot e^{-j\zeta u} du \quad (6)$$

令 $u-t=t'$,进一步 $\hat{g}_\omega(\zeta)$ 的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \hat{g}_\omega(\zeta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') \cdot e^{j\omega(t+t')} \cdot e^{-j\zeta(t+t')} dt' = \\ &= e^{j\omega t - j\zeta t} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') \cdot e^{j\omega t' - j\zeta t'} dt' = \\ &= e^{j\omega t - j\zeta t} \cdot \hat{g}(\omega - \zeta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\hat{g}(\omega - \zeta)$ 为窗函数的傅里叶变换。

将式(7)代入式(5)得:

$$\begin{aligned} G(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\zeta) \cdot (e^{j\omega t - j\zeta t} \cdot \hat{g}(\omega - \zeta))^* d\zeta = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\zeta) \cdot e^{-j\omega t + j\zeta t} \cdot \hat{g}(\omega - \zeta) d\zeta = \\ &= e^{-j\omega t} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\zeta) \cdot \hat{g}(\omega - \zeta) \cdot e^{j\zeta t} d\zeta \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)两边同乘相位因子 $e^{j\omega t}$,STFT时频谱表达式如下:

$$\begin{aligned} G_e(t, \omega) &= G(t, \omega) e^{j\omega t} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) \cdot s(u) \cdot e^{-j\omega(u-t)} du = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\zeta) \cdot \hat{g}(\omega - \zeta) \cdot e^{j\zeta t} d\zeta \end{aligned} \quad (9)$$

假设频率为 ω_0 的谐波信号为 $s(t) = A e^{j\omega_0 t}$,将其转化为频域如下:

$$\hat{s}(\zeta) = 2\pi A \cdot \delta(\zeta - \omega_0) \quad (10)$$

式中 A 为谐波信号幅值, ζ 为频率, $\delta(\cdot)$ 为指示函数。

将式(10)代入式(9),进一步展开得到STFT时

频谱表达式如下:

$$G_e(t, \omega) = A \cdot \hat{g}(\omega - \omega_0) \cdot e^{i\omega_0 t} \quad (11)$$

由式(11)得,时频谱中 $\omega = \omega_0$ 处的时频系数峰值最大,距离 ω_0 越远的时频系数幅值越小。

1.2.2 瞬时频率估计

瞬时频率表达式如下:

$$\omega_0(t, \omega) = -i \cdot \frac{\partial_t G_e(t, \omega)}{G_e(t, \omega)} \quad (12)$$

式中 $\partial_t G_e(t, \omega)$ 为 $G_e(t, \omega)$ 对时间 t 偏导数。

1.2.3 提取瞬时频率

利用同步提取算子(SEO)剔除能量发散的时频系数,保留时频脊线上的时频系数,SEO是一个与信号幅值无关的量,故可以用于微弱故障特征提取。SET时频谱表达式如下:

$$T_e(t, \omega) = G_e(t, \omega) \delta(\omega - \omega_0(t, \omega)) \quad (13)$$

式中 $\delta(\omega - \omega_0(t, \omega))$ 为同步提取算子(SEO)。

IF重构,得到如下表达式:

$$\begin{cases} s(t) = \frac{\text{Re}(T_e(t, r(t)))}{\hat{g}(0)} \\ \hat{g}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) dt \end{cases} \quad (14)$$

式中 $r(t)$ 为IF变化轨迹,Re为对 T_e 取实部。

1.3 基于VMD-SET的转速波动提取流程

VMD-SET的转速波动提取流程如图1所示,对齿轮啮合信号频谱分析,啮合频率出现模糊现象

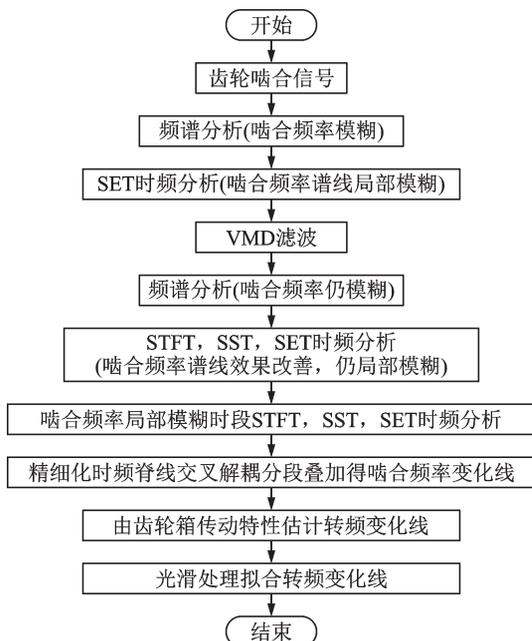


图1 基于VMD-SET的转速波动提取流程图

Fig.1 Flow chart of speed fluctuation extraction based on VMD-SET

(啮合频率分布在一个频带范围内),SET时频谱啮合频率谱线部分时段模糊,VMD滤波频谱中啮合频率仍分布在一个频带范围内,时频分析后啮合频率谱线效果有所改善,但仍存在局部模糊现象,进一步精细化时频脊线(含大量振动能量)交叉解耦,分段叠加优化啮合频率提取效果,再根据齿轮箱传动链传动比,估计转频曲线,最后光滑处理拟合转速曲线。

1.4 阶次跟踪

齿轮箱轴转频波动时,传动链上故障特征频率、啮合频率等都是固定线性转频,导致传统时频分析方法失效。阶次跟踪^[13]算法将时域非周期转化为角域周期性信号,再用传统的时频分析方法提取特征阶次。阶次为转轴每转出现冲击次数。

阶次表达式如下:

$$O = 60f/n \quad (15)$$

式中 n 为参考轴的转速(r/min), f 为对应振动频率(Hz)。

利用振动传感器测齿轮箱振动信号,从振动信号提取转速曲线。因转轴每转一圈故障点冲击次数固定,故角域振动信号具有平稳性。

阶次跟踪算法推导如下:

根据参考轴转频波动规律,参考轴在 t 时刻转角表达式如下:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (16)$$

式中 a_0, a_1 和 a_2 为常数。

三个初值条件确定 a_0, a_1 和 a_2 的值,选择等角度增量 $\Delta\delta$,对应的三个时刻点 t_0, t_1 和 t_2 :

$$\begin{cases} \theta(t_0) = 0 \\ \theta(t_1) = \Delta\delta \\ \theta(t_2) = 2\Delta\delta \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得到:

$$\begin{cases} \theta(t_0) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 = 0 \\ \theta(t_1) = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_1^2 = \Delta\delta \\ \theta(t_2) = a_0 + a_1 t_2 + a_2 t_2^2 = 2\Delta\delta \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)确定 a_0, a_1, a_2 值,再将其回代到式(16),得到任意转角对应的时刻点 t ,得到等角度间隔对应时刻点的表达式:

$$t_{k-1} = \frac{1}{2a_2} \left[\sqrt{4a_2(k\Delta\theta - a_0) + a_1^2} - a_1 \right], \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

式中 $\Delta\theta$ 为等角度采样间隔; k 为插值系数。其中 $\Delta\theta = \Delta\delta/k$ 。

2 时变工况风电机组齿轮箱振动信号模型

2.1 风电机组齿轮箱输入轴转频波动规律模型

2.1.1 风剪切和塔影效应

风剪切是不同高度梯度风速大小不同;塔影效应是叶片每转到被塔筒遮挡部分风速发生变化。某1.5 MW风电机组在风剪切和塔影效应^[14-15]影响下,风轮转速表达式如下:

$$\omega_i(\beta, \gamma) = \omega_0 \frac{1}{M} \left[1 + \frac{1}{V_H} (\nu_{eq_w} + \nu_{eq_n}) \right] \cos \gamma \quad (20)$$

式中 ω_0 为不考虑风剪切和塔影效应影响以及偏航误差因素下的理想转速, V_H 为轮毂风速, M 为风速转换系数, ν_{eq_w} 为剪切风速, ν_{eq_n} 为塔影风速, γ 为偏航角, $\omega_i = d\theta/dt$ (其中 θ 为风轮转角)。

选择轮毂风速 $V_H = 10$ m/s, 偏航角 $\gamma = 0$ 下, 风轮转速波动曲线如图2所示, 图中风轮每旋转一圈出现三次周期性波谷。

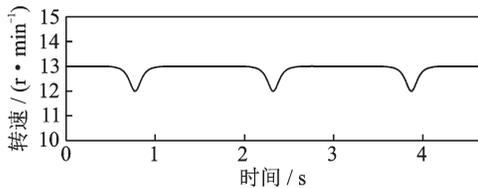


图2 风剪切和塔影效应下风轮转速曲线

Fig. 2 Wind wheel speed curve under wind shear and tower shadow effect

2.1.2 叶片质量不平衡

风轮叶片长期受雨雪、沙尘暴等天气影响,会造成风轮叶片质量不平衡,引起风轮转速波动。某1.5 MW风电机组单叶片10%质量不平衡^[16-17]风机输出的机械转矩表达式如下:

$$T_w = T_{w0} + mgR \sin(\omega_w t + \phi_w) \quad (21)$$

式中 T_{w0} 为气动转矩, ω_w 为风机叶片旋转角速度, ϕ_w 为叶片初始角。

选择轮毂风速 $V_H = 10$ m/s, 风轮叶片转速为12.1 r/min, 上述参数下风轮转速波动曲线如图3所示, 图中转速近似正弦周期性波动。

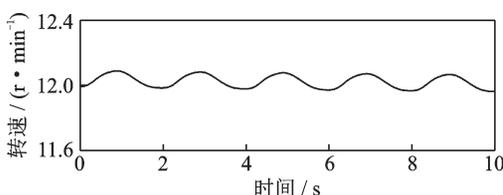


图3 单叶片10%质量不平衡下风轮转速曲线

Fig. 3 Speed curve of wind turbine under 10% mass imbalance of single blade

2.2 风电机组齿轮箱振动信号模型构建

2.2.1 轴承仿真信号模型

构建1级行星2级平行轴齿轮箱输出轴轴承外圈故障时域振动模型, 表达式如下:

$$x(t) = A_1 \sum_{m=1}^N e^{-2\pi f_n g_1 (t - T_m)} \cdot \sin\left(2\pi f_n \sqrt{1 - g_1^2} (t - T_m)\right) + n(t) \quad (22)$$

式中 A_1 为位移常数, N 为故障冲击次数, f_n 为固有频率, g 为阻尼系数, T_m 为第 m 次故障冲击对应的时刻; $n(t)$ 为高斯白噪声。

定轴齿轮箱第2级输出轴转频表达式如下:

$$f_r = f_c i_1 i_2 i_3 \quad (23)$$

式中 f_c 为行星齿轮箱输入轴转频, i_1 为行星传动比, i_2 为第1级定轴传动比, i_3 为第2级定轴传动比。

由式(22), (23)得故障冲击间隔的迭代方程组如下:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{1}{C_0 f_r(T_0)} \\ T_m = \frac{1}{C_0 f_r(T_{m-1})}, m = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (24)$$

式中 C_0 为轴承外圈标准故障特征系数。

2.2.2 齿轮仿真信号模型

构建1级行星2级平行轴齿轮箱输出轴正常齿轮啮合调制时域振动信号模型, 表达式如下:

$$x(t) = A_2 \left[1 + B \cos\left(2\pi \int f_r(t) dt\right) \right] \cdot \cos\left[2\pi \int f_z(t) dt + \beta \sin\left(2\pi \int f_r(t) dt\right)\right] \quad (25)$$

式中 A_2 为信号幅值, $f_r(t)$ 为齿轮箱输出轴转频, B 为幅值调制指数, β 为调频调制系数, $f_z(t)$ 为齿轮啮合频率, $f_z(t) = Z_4 f_r(t)$ (其中 Z_4 为输出轴齿轮齿数)。

3 风电机组齿轮箱故障特征提取仿真分析

针对时变工况频谱分析无法准确获取特征频率趋势, 时频分析建立频率与时间关系。本文研究某1.5 MW双馈式风电机组齿轮箱, 增速箱采用1级行星2级平行传动, 传动过程如图4所示。

3.1 轴承仿真分析

设轴承外圈标准故障特征系数 $C_0 = 3.67$ 。本文以图2中的曲线为理论转速, 齿轮传动相关参数如

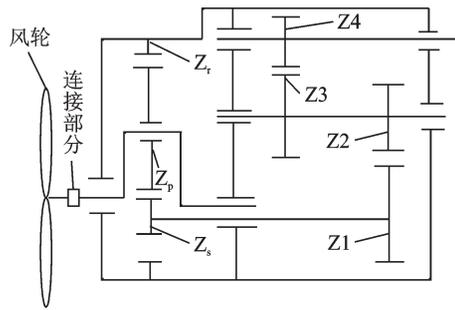


图4 齿轮箱传动图

Fig. 4 Transmission diagram of gearbox

表1所示,传动比 $i_1=5.71$, $i_2=3.56$, $i_3=4$ 。轴承仿真信号相关参数如表2所示。

表1 各级齿轮传动相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of all levels of gear transmission

齿轮箱		齿数	
		第一级	第二级
行星齿轮箱	齿圈	99	—
	行星轮(个数)	39(3)	—
	太阳轮	21	—
定轴齿轮箱	输入轴	82	—
	中间轴	23	88
	输出轴	—	22

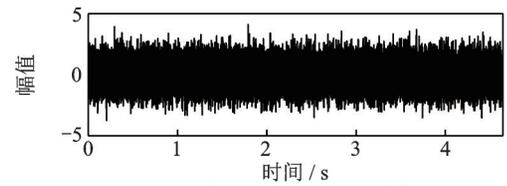
表2 轴承仿真信号相关参数

Tab. 2 Relevant parameters of bearing simulation signal

相关参数	数值
固有频率 f_n /Hz	2200
位移常数 A_1	1.5
阻尼系数 g_1	0.05
信号时长 t /s	4.64
采样频率 f_s /Hz	9000
高斯白噪声 $n(t)$ /dB	-12

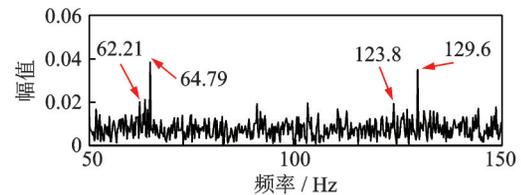
由仿真模型及相关参数得仿真信号波形及时频谱,如图5所示。图5(a)和(b)分别为时域波形及其包络谱,由于强噪声干扰和时变工况影响,无法准确获取轴承故障特征频率成分。包络谱中62.21~64.79 Hz频带频率成分峰值较为明显,123.8~129.6 Hz频带频率成分有两处较为突出的峰值,在理论轴承外圈故障特征频率波动频带59.67~64.66 Hz以及二倍频119.34~129.32 Hz附近,考虑故障特征频率及其倍频出现模糊现象。SET包络时频谱如图5(c)所示,图中故障信息被噪声淹没,无法获取轴承故障特征频率趋势。

为获取轴承故障特征频率趋势,对轴承仿真信号VMD滤波^[18-19],通过观察中心频率的变化,确定



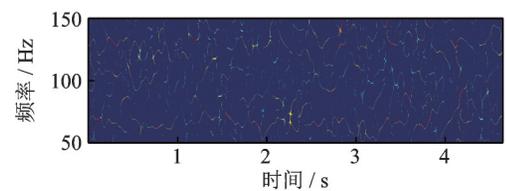
(a) 仿真故障轴承信号时域波形

(a) Time domain waveform simulation of fault bearing signal



(b) 仿真故障轴承信号(特征频段)包络谱

(b) Envelope spectrum of simulation fault bearing signal (characteristic frequency band)



(c) 仿真信号SET包络时频谱

(c) SET envelope time spectrum of simulation signal

图5 仿真信号波形及时频谱

Fig. 5 Time spectrum of simulated signal waveform

模态分量个数 $K=5$,二次惩罚因子采用VMD默认值 $\alpha=2000$,结合包络谱峰值因子指标,VMD各阶模态分量时域波形及其包络谱如图6(a)和(b)所示。图中只有第3模态分量携带大量轴承外圈故障特征信息(轴承外圈故障特征及其倍频频带)且峰值明显,故选择第3模态分量为宜,滤波后信号波形及时频谱,如图6所示。选择图6(b)红色区域(第3模态分量包络谱中50~150 Hz特征频带)分析,如图6(c)所示,包络谱中60.27~65.44 Hz以及127~130.2 Hz频带频率成分集中且峰值较明显,与理论轴承外圈故障特征频率以及二倍频波动频带基本吻合,进一步考虑轴承故障特征频率出现模糊现象,对比滤波前(图5(b)),噪声有所抑制,故障特征频带较为明显。STFT包络时频谱如图6(d)所示,图中初步看到故障特征频率及其2倍频曲线,但时频分辨率很低,能量发散;SET包络时频谱如图6(e)所示,特征谱较图6(d)能量集中;SET包络时频脊线如图6(f)所示,得到轴承故障特征频率曲线,红色区域有三次明显波动,与理论值相比波动时段大致反映了实际波动规律,但整个分析时段特征频率均在波动,轴承故障特征频率趋势很模糊。进一步用量化指标评价脊线拟合精度,不同偏差评价指标下分析结果如表3所示。表中均方根误差 $RMSE$ 数值远大于零,说明拟合精确度很差;选用衡量预测值相对于理论值拟合好坏程度的统计学评价指标: R^2 决定

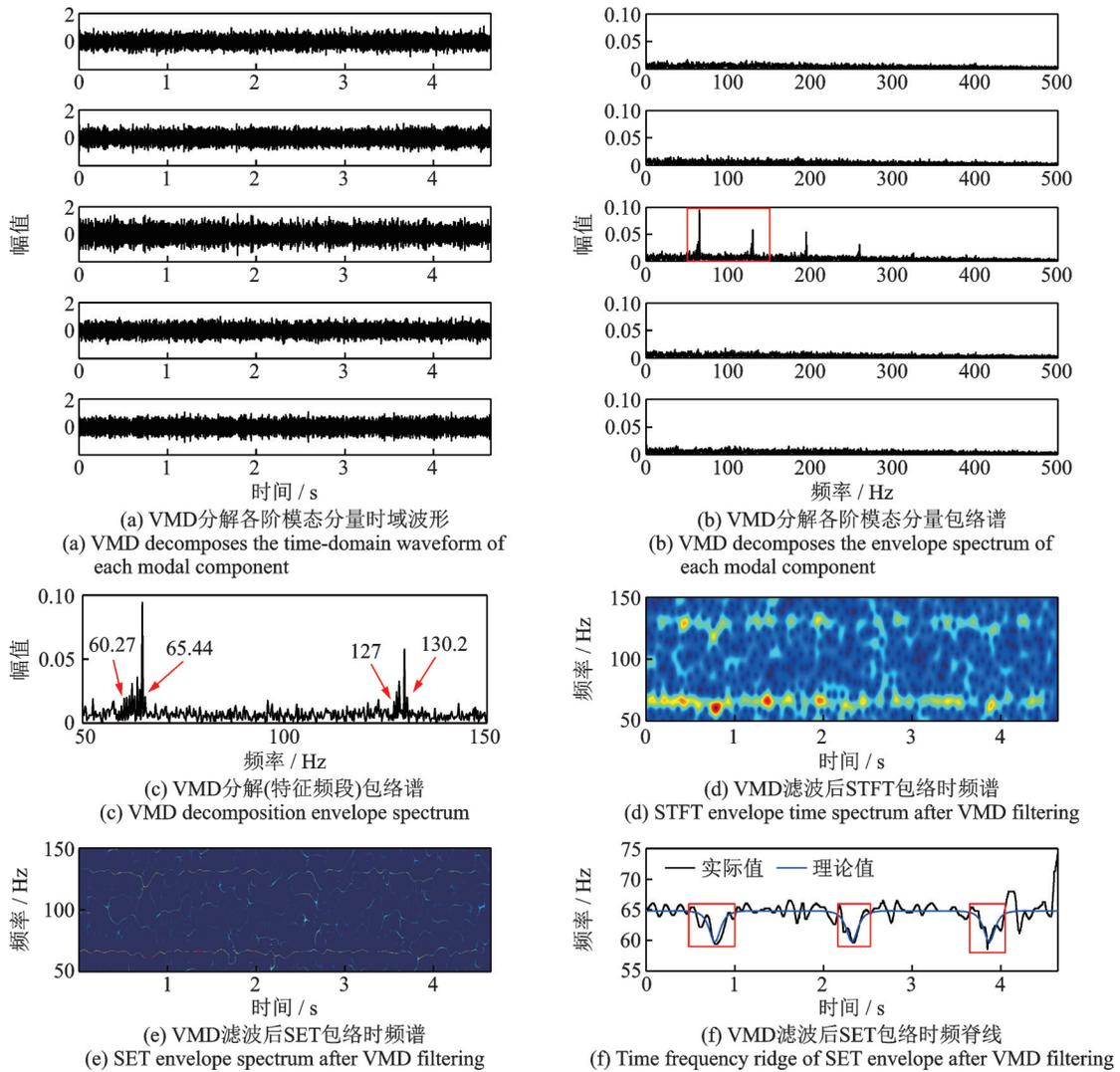


图 6 VMD 滤波信号波形及时频谱

Fig. 6 Time spectrum of VMD filtered signal waveform

表 3 不同偏差评价指标下分析方法结果

Tab. 3 Analysis method results under different deviation evaluation indicators

分析方法	偏差评价指标数值	
	均方根误差 $RMSE$	决定系数 R^2
VMD-SET	46.9558	<0

系数^[20],表中数值小于零,而正常表征实际值与理论值偏差指标 R^2 取值为 0~1 之间,值为 1 说明预测值完全复现理论值,值为 0 和负值均说明预测值比理论值求平均值的预测效果还差。

3.2 齿轮仿真分析

基于齿轮啮合成分具有明显的幅值优势,为较为精确获取轴承故障特征频率趋势,本文从齿轮啮合信号中提取啮合频率曲线,由齿轮箱传动特性,得转频曲线。齿轮啮合信号仿真模型相关参数,如表 4 所示。

由仿真模型及相关参数得信号波形及时频谱,

表 4 齿轮仿真信号相关参数

Tab. 4 Relevant parameters of gear simulation signal

相关参数	数值
信号幅值 A_2	1
幅值调制指数 B	1
调频调制系数 β	1
信号时长 t/s	4.64
采样频率 f_s/Hz	9000
高斯白噪声 $n(t)/dB$	-8

如图 7 所示。图 7(a)和(b)分别为时域波形及时频谱,由于强噪声干扰和时变工况的影响,无法准确获取齿轮啮合频率信息。频谱图中 386.2~389 Hz, 403.2~406.4 Hz 以及 422.6~423.9 Hz 频带频率成分峰值较为明显且分布较为集中,在理论输出轴齿轮啮合频率波动频带 357.72~387.64 Hz、啮合频率+输出轴转频波动频带 373.98~405.26 Hz 以及啮合频率+2 倍输出轴转频波动频带 390.24~422.88 Hz 附近,考虑齿轮啮合频率信息出现模糊现

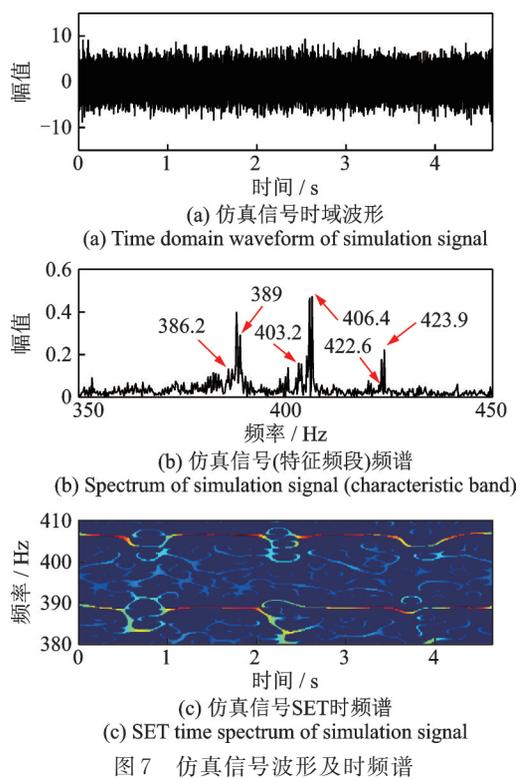


图7 仿真信号波形及时频谱

Fig. 7 Time spectrum of simulated signal waveform

象。SET时频谱如图7(c)所示,图中粗略看到啮合频率、啮合频率+转频曲线,但谱线部分时段很模糊。

为优化啮合频率趋势提取效果,对齿轮仿真信号VMD滤波^[18-19],通过观察中心频率的变化,确定模态分量个数 $K=5$,二次惩罚因子采用VMD默认值 $\alpha=2000$,根据各模态分量频谱特征信息含量选择第1模态分量,滤波后信号波形及时频谱,如图8所示。图8(a)和(b)分别为VMD分解的时域波形及其频谱,频谱中386.1~389 Hz,403.3~406.3 Hz以及422.5~423.9 Hz频带频率成分峰值较为明显且分布较为集中,同样地,啮合频率信息依然分布在一个理论频带附近,进一步考虑齿轮啮合频率信息出现模糊现象。STFT时频谱如图8(c)所示,谱线模糊时段有下降的趋势,时频谱中啮合频率有明显规律性波动,但由于时频分辨率问题,无法准确提取波动位置的时频曲线趋势;SST时频谱如图8(d)所示,与图8(c)图相比,时频分辨率有所改善,但波动段的时频特征仍很模糊,SET时频谱如图8(e)所示,与图8(c)相比,时频分辨率高,时频谱能量集中,与图(d)相比,波动段时频特征表达效果好;SET时频脊线如图8(f)所示,波动段时频特征表达较滤波前有所改善。SET较大程度上改善了时频分辨率,但波动段时频分辨率精度较低,脊线仍不能准确反映啮合频率实际趋势。

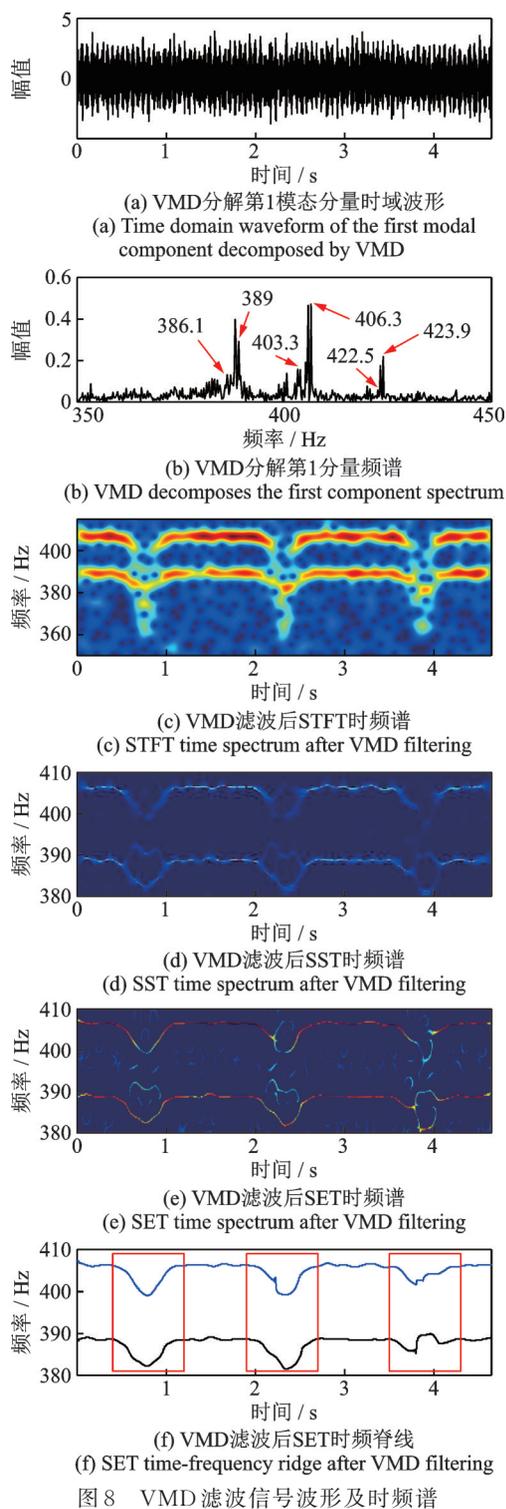


图8 VMD滤波信号波形及时频谱

Fig. 8 Time spectrum of VMD filtered signal waveform

为解决TFA方法中时频分辨率和曲线精度问题,对VMD滤波后信号时频脊线采用精细化时频脊线交叉解耦优化处理,流程如下:

1) 时域加窗

如图8(f)所示,红色区域三个波动段分别为0.4~1.2 s,1.9~2.7 s和3.5~4.3 s。

2) 趋势分析

0.4~1.2 s时段的STFT时频谱如图9(a)所示,图中时频分辨率差,时频谱出现能量流失、发散情况,考虑到啮合频率及啮合频率+转频时频曲线理

论间距不大,导致两条时频曲线出现交叉、能量流失、模糊现象,基于两条时频曲线理论上不会出现交叉现象,大致认为 STFT 时频谱中最下方、最上方时频曲线分别为啮合频率、啮合频率+转频信息。

3) 能量集中

SST 时频谱如图 9(b)所示,与图 9(a)相比,能量较集中,时频分辨率较高,但波动明显时段时频特征仍很模糊,图 9(d)为 SET 时频谱,与图 9(a)相比,能量集中,时频分辨率高,与图 9(b)相比,较好地显示了 IF 的总体变化趋势,波动明显时段时频特征表达有所改善。

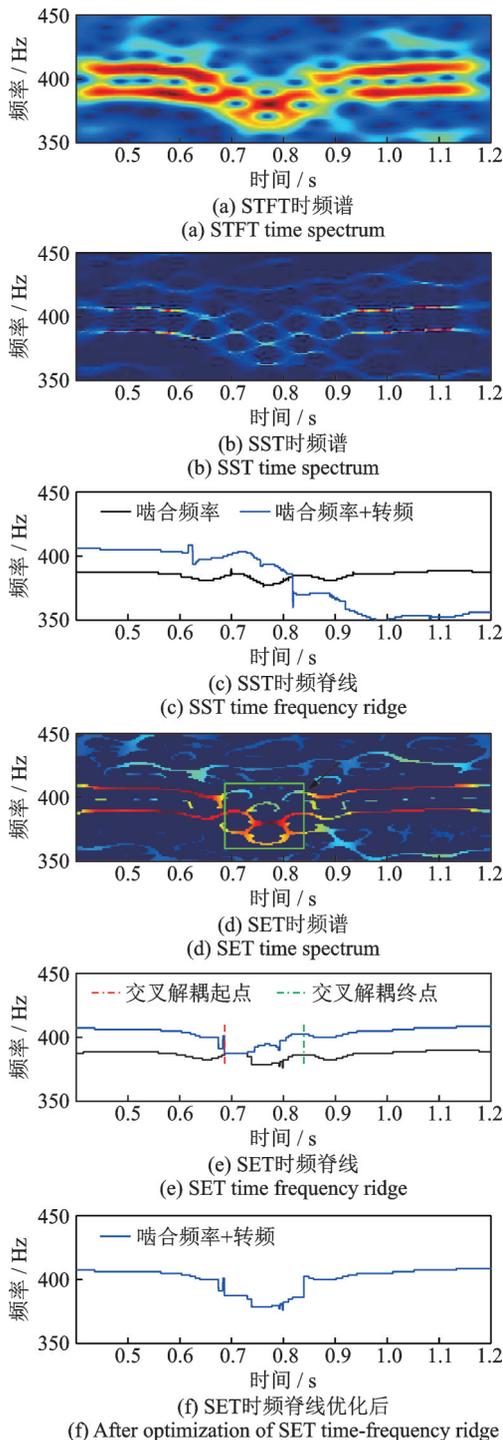


图 9 0.4~1.2 s 时频谱
Fig. 9 0.4~1.2 s time spectrum

4) 脊线提取

图 9(c)和(e)分别为 SST、SET 时频脊线,黑、蓝色脊线分别为啮合频率、啮合频率+转频曲线。显然图 9(c)中两条脊线交叉点后的蓝色脊线非对应 SST 时频谱中啮合频率+转频信息,而是时频谱能量低的啮合频率-2X 转频信息,SET 较 SST 时频谱时频特征表达效果好,对应的脊线准确性更高,但二者均无法准确恢复与信号真实 IF 匹配的脊线。

5) 交叉解耦

SET 时频脊线提取时频谱中能量高的成分,导致提取的两条特征线存在交叉,实际提取交叉干扰时段的啮合频率脊线为啮合频率+转频成分,其中交叉解耦时段如图 9(e)所示,选择两条时频脊线初始交叉点为交叉解耦起点,选择图 9(d)绿色交叉重叠区域箭头指向处(啮合频率+转频谱线能量由低到高变化临界点)为交叉解耦终点,将交叉解耦时段 SET 时频脊线中啮合频率曲线部分替换到啮合频率+转频对应部分,实现交叉替换,如图 9(f)所示,在曲线波动位置得到较为合理的啮合频率+转频脊线。

按上述流程对剩余两时段分析,再对优化后的 SET 脊线分段叠加,得到全局时段内啮合频率+转频 SET 脊线,再根据啮合频率与转频的线性关系,得到啮合频率变化线,叠加后 SET 脊线如图 10 所示,与优化前(图 8(f))相比,波动位置的特征信息表达更合理。

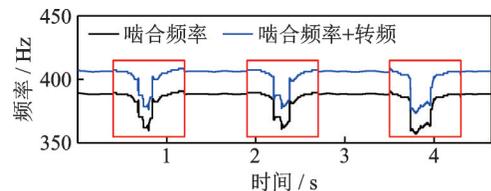


图 10 叠加后 SET 时频脊线
Fig. 10 SET time frequency ridge after stack

根据转频与啮合频率的线性关系,得输出轴转频波动实际值,如图 11 所示,对转频曲线用 Matlab 拟合工具箱平滑处理得到拟合值,与理论值相比较较好地复现了理论转频曲线。进一步用量化指标评价脊线拟合精度,不同偏差评价指标下 VMD-SET 分析结果如表 5 所示,表中均方根误差 RMSE 数值接

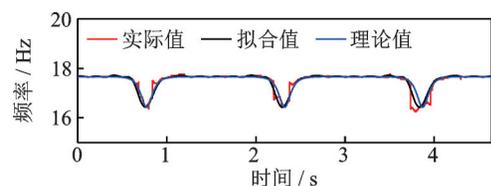


图 11 齿轮箱输出轴转频变化线
Fig. 11 Gearbox output shaft rotation frequency variation line

表 5 不同偏差评价指标下 VMD-SET 分析结果

Tab. 5 VMD-SET analysis results under different deviation evaluation indicators

分析方法	偏差评价指标数值	
	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
VMD-SET	0.0926	0.9053

近零,说明拟合值偏差较小;而决定系数 R^2 的值接近 1,说明拟合优度较高。

3.3 轴承信号阶次跟踪

为进一步优化轴承故障特征提取效果,利用拟合的转速曲线对轴承信号阶次跟踪,以行星架所在轴为参考轴,行星架(即行星齿轮箱输入轴)转频为 1 阶次;传动链上齿轮、轴承的特征阶次由自身几何参数唯一确定。特征频率及特征阶次表,如表 6 所示。

表 6 特征频率及对应阶次表

Tab. 6 Characteristic frequencies and corresponding orders

特征频率	理论变化频率	对应阶次
行星架转频(叶轮) f_c /Hz	0.2~0.22	1
齿轮箱输出轴转频 f_o /Hz	16.26~17.62	81.31
齿轮箱输出轴轴承外圈故障特征频率 f /Hz	59.67~64.66	298.41
齿轮箱输出轴上齿轮啮合频率 f_c /Hz	357.72~387.64	1788.82

角域阶次谱如图 12 所示,红色箭头所指分别为轴承外圈故障特征阶次及 2 至 4 倍阶次,对比 VMD 滤波后包络谱(图 6(c)),显然频率模糊现象有所改善,优化了轴承故障特征提取效果,通过仿真验证了本文方法的有效性。

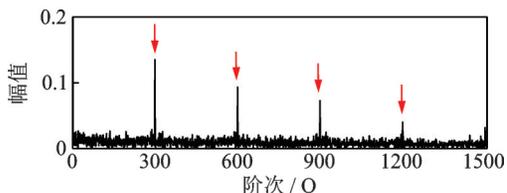


图 12 角域阶次谱

Fig. 12 Angular domain order spectrum

4 实验信号分析

4.1 实验说明

本实验利用美国 SpectraQuest 公司研发的动力传动故障诊断综合试验台(DDS)来实现。实验装置如图 13 所示,由 Motor Control 软件 1、电动机 2、

控制面板 3、动态信号采集分析系统 4、2 级平行轴齿轮箱 5、加速度振动传感器 6、可编程磁力制动器 7、角度编码器 8、数模转换器 9、东华动态测试系统 10 构成。平行轴齿轮箱为 2 级减速传动,参数如表 7 所示。为模拟平行轴齿轮箱的轴承故障,在中间轴靠近小齿轮的轴承滚动体上加工直径约 2 mm,深 0.5 mm 的点蚀故障,其中轴承滚动体标准故障特征系数 $C_b=2.322$,如图 14 所示。在平行轴齿轮箱轴承故障所在轴端盖安装加速度振动传感器,如图 15 所示,采集 Z 方向的振动信号,角度编码器安装位置如图 16 所示,振动及脉冲信号的采样频率均为 25.6 kHz。本文为验证风电机组叶片受风剪切和塔影效应影响下的叶轮转速每转出现三次周期性波谷,利用 SET 时频分析方法 IF 提取精度高,本实验

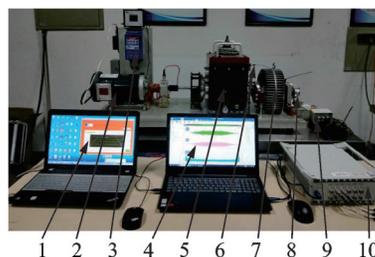


图 13 实验装置

Fig. 13 Experimental setup

表 7 平行轴齿轮箱参数

Tab. 7 Parameters of parallel shaft gearbox

齿轮	齿数	
	第 1 级	第 2 级
输入轴	29	—
中间轴	100	36
输出轴	—	90



图 14 轴承滚动体故障结构图

Fig. 14 Fault structure diagram of bearing rolling element

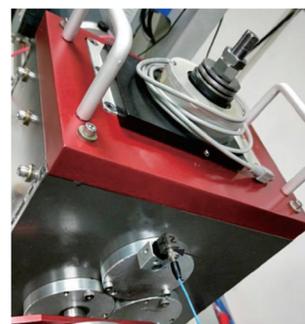


图 15 加速度传感器具体安装位置

Fig. 15 Specific installation position of acceleration sensor

以单波谷为例,从齿轮箱信号包络时频谱中提取轴承故障特征频率趋势;时频谱中提取啮合频率趋势,通过实验验证本文方法的优越性。Motor Control软件输入理论输入轴转频曲线如图17所示,转频波动趋势先线性减速,再匀速,最后线性加速。

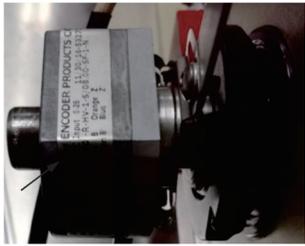


图16 角度编码器安装位置

Fig. 16 Installation position of angle encoder

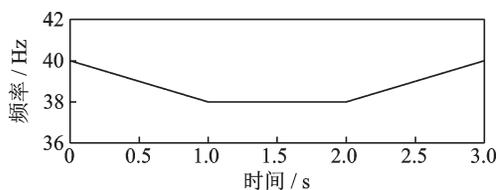


图17 Motor Control软件输入转频

Fig. 17 Motor Control software input rotation frequency

4.2 信号分析

4.2.1 输出轴转频

角度编码器测脉冲信号,如图18所示,通过计算得输出轴转频,如图19所示,图中测得的实际值与软件输入理论值基本一致。

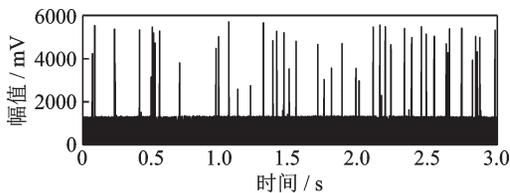


图18 脉冲信号

Fig. 18 Pulse signal

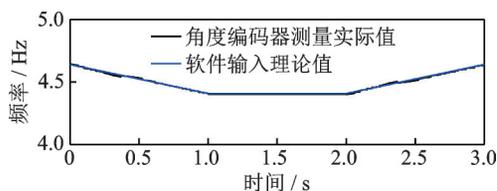


图19 输出轴转频

Fig. 19 Output shaft rotation frequency

4.2.2 轴承故障分析

从齿轮箱振动信号包络时频谱获取轴承故障特征频率曲线,振动信号如图20所示,包络谱如图21所示,图中频率成分4.3,11,22,26.7 Hz附近以及38.7~40.3,113.7~119 Hz频带频率成分峰值较为明显,且分布在理论输出轴转频波动频带4.41~

4.64 Hz、中间轴转频波动频带11.02~11.6 Hz、2倍中间轴转频波动频带22.04~23.2 Hz等特征频带附近,考虑各级轴转频及滚动体故障特征频率出现模糊现象。SET包络时频谱如图22所示,图中包含中间轴2倍转频、中间轴上轴承滚动体故障特征频率、输入轴转频曲线,但部分时段频率模糊,故障特征信息表达不清晰。

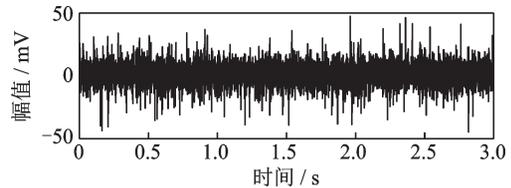


图20 齿轮箱时域振动信号

Fig. 20 Time domain vibration signal of gearbox

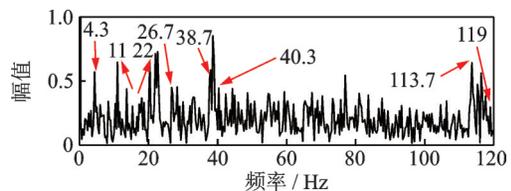


图21 包络谱

Fig. 21 Envelope spectrum

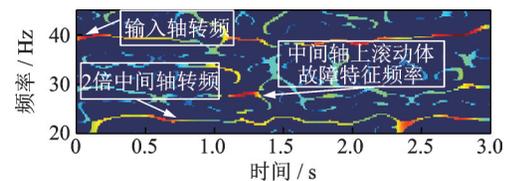


图22 SET包络时频谱

Fig. 22 Spectrum of SET envelope time

对齿轮箱振动信号VMD滤波^[18-19],通过观察中心频率的变化,确定模态分量个数 $K=3$,二次惩罚因子采用VMD默认值 $\alpha=2000$,采用包络谱峰值因子指标,再结合各模态分量包络谱特征(第1模态分量携带大量特征信息且峰值明显)、频谱特征(第1模态分量频谱频带包含大量各级齿轮啮合成分信息且峰值明显),综上选择第1模态分量为宜,如图23所示,包络谱如图24所示,图中4.3~5,10~11,27~30.1,38~38.67 Hz以及113.7~119 Hz频带频率成分峰值非常明显且分布较为集中,在理论各级轴转频及中间轴轴承滚动体故障特征频带附近,进一步考虑特征频率出现模糊现象。SET包络时频谱如图25所示,图中中间轴轴承滚动体故障特征频率曲线能量很低,时频分辨率低且曲线表达仍很模糊,输入轴转频信息表达比滤波前(图22)有所改善,SET包络时频脊线如图26所示,图中输入轴转频曲线与理论值相比存在波动,中间轴轴承滚动体故障特征频率曲线与理论值相比存在较大跳变且偏差较大,进一步用量化指标评价脊线拟合精度,不同偏差评价指标下VMD-SET分析方法评价结果如表8所

示,表中对比两条特征频率线,输入轴转频脊线均方根误差数值较小,拟合值偏差较小;而中间轴滚动体故障特征频率决定系数 R^2 为负值,拟合优度极差。因此SET包络时频脊线提取效果较差,IF估计精度还有待进一步提高。

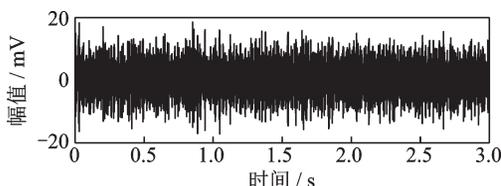


图 23 VMD 滤波后齿轮箱时域振动信号

Fig. 23 Time domain vibration signal of gearbox after VMD filtering

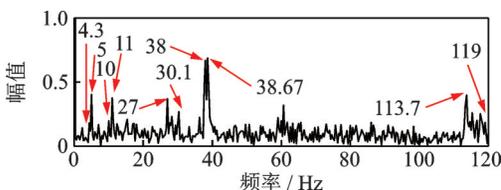


图 24 VMD 滤波后包络谱

Fig. 24 Envelope spectrum after VMD filtering

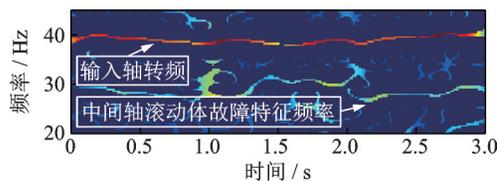


图 25 VMD 滤波后 SET 包络时频谱

Fig. 25 Spectrum of SET envelope time after VMD filtering

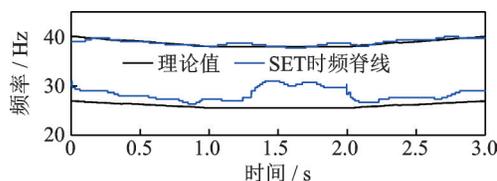


图 26 VMD 滤波后 SET 包络时频脊线

Fig. 26 Time frequency ridge of SET envelope after VMD filtering

表 8 不同偏差评价指标下评价结果

Tab. 8 Evaluation results under different deviation evaluation indicators

特征频率	偏差评价指标数值	
	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
输入轴转频 f_c	0.4359	0.5487
中间轴滚动体故障特征频率 f	2.6693	-36.3282

4.2.3 齿轮啮合分析

为进一步优化 IF 估计精度,根据齿轮啮合频率

获取转频曲线。齿轮箱振动信号频谱,如图 27 所示,图中红色箭头指出多个峰值明显的频率信息,且分布在第一级啮合频率-2倍输入轴转频至第一级齿轮啮合频率频带理论波动范围 1026~1160 Hz 附近,频率值 1135 Hz 右侧频率成分分布较密集,考虑齿轮啮合成分出现频率模糊现象。STFT 谱如图 28 所示,图中有第一级啮合频率+输入轴转频、第一级啮合频率-2倍输入轴转频曲线,但部分时段谱线模糊、时频分辨率低且能量发散。SET 时频谱如图 29 所示,图中特征曲线能量集中,但部分时段仍很模糊。输出轴转频 SET 时频脊线如图 30 所示,图中边缘时段脊线偏差还很大。

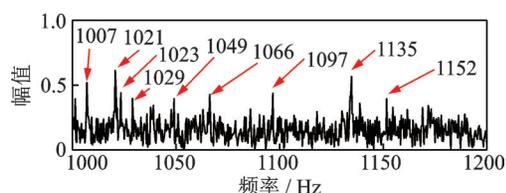


图 27 频谱

Fig. 27 Spectrum

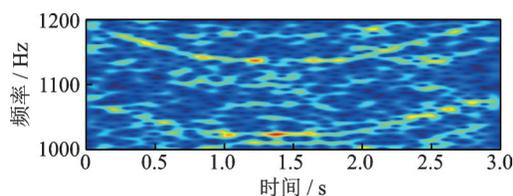


图 28 STFT 时频谱

Fig. 28 STFT time spectrum

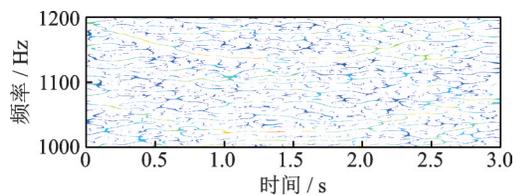


图 29 SET 时频谱

Fig. 29 Spectrum of SET

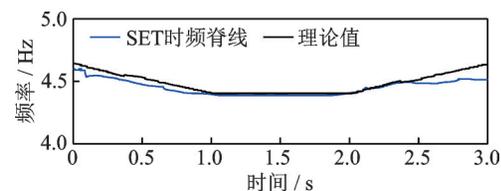


图 30 SET 时频脊线

Fig. 30 SET time frequency ridge

滤波后振动信号频谱,如图 31 所示,图中 1021, 1097 以及 1135 Hz 频率峰值非常明显且频率右侧存在大量较集中的频率成分,且分布在啮合频带理论波动范围 1026~1160 Hz 附近,进一步考虑齿轮啮合成分出现频率模糊现象。时频分析 STFT 时频谱如图 32 所示,图中时频谱特征表达较滤波前(图 28)

有所改善,由于两条特征曲线差值较大,不存在交叉干扰。对应频段 SST 时频谱如图 33 所示,图中时频谱能量较集中,但时频分辨率仍很低,SET 时频谱如图 34 所示,图中特征曲线能量集中,时频特征表达效果好。VMD 滤波后输出轴转频 SET 时频脊线如图 35 所示,图中脊线较滤波前(图 30)效果好,与理论值基本吻合,IF 估计精度高。进一步用量化指标评价脊线提取精度,不同偏差评价指标下分析方法结果如表 9 所示,VMD-SET 比 SET 分析方法的均方根误差 RMSE 数值小,说明拟合准确性较高,偏差较小;而决定系数 R^2 数值较大,说明拟合优度较高,偏差较小。

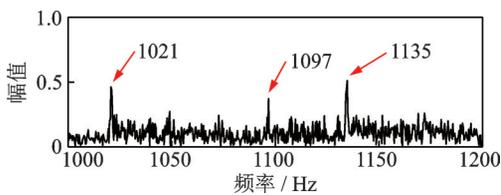


图 31 VMD 滤波后频谱

Fig. 31 Spectrum after VMD filtering

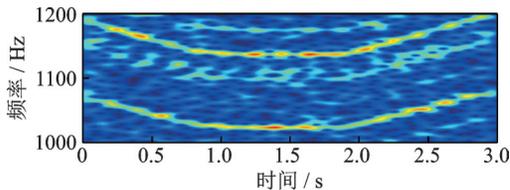


图 32 VMD 滤波后 STFT 时频谱

Fig. 32 Time spectrum of STFT after VMD filtering

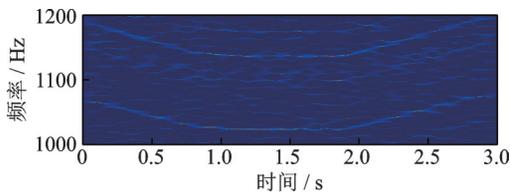


图 33 VMD 滤波后 SST 时频谱

Fig. 33 Time spectrum of SST after VMD filtering

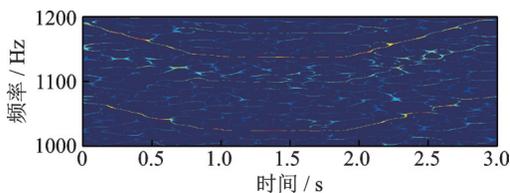


图 34 VMD 滤波后 SET 时频谱

Fig. 34 SET time spectrum after VMD filtering

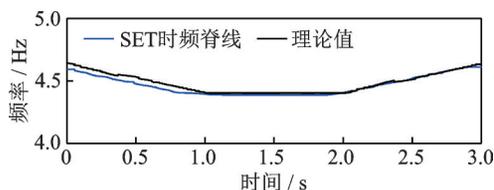


图 35 VMD 滤波后 SET 时频脊线

Fig. 35 Time frequency ridge of SET after VMD filtering

表 9 不同偏差评价指标下分析方法结果

Tab. 9 Results of analysis methods under different bias evaluation indicators

分析方法	偏差评价指标数值	
	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
SET	0.0537	0.4905
VMD-SET	0.0443	0.6530

4.2.4 阶次跟踪

本实验取输出轴转频为 1 阶次,其余传动链上齿轮、轴承的特征阶次由自身几何参数唯一确定。特征频率及特征阶次表如表 10 所示。

将图 35 的 SET 时频脊线代入齿轮箱振动信号,角域重采样得角域阶次谱如图 36 所示,图中得到峰值明显的中间轴上滚动体故障特征阶次及其 2 倍阶次、输出轴转频阶次及其 3 倍阶次、2 倍中间轴转频阶次成分,轴承滚动体故障特征成分从带宽变为单根谱线,改善了频率模糊现象,优化了轴承故障特征提取效果,通过实验验证了本文方法的有效性。

表 10 特征频率及对应阶次表

Tab. 10 Characteristic frequencies and corresponding orders

特征频率	理论变化频率	对应阶次
输出轴转频 f_o /Hz	4.41~4.64	1.0
中间轴转频 f_i /Hz	11.02~11.6	2.5
输入轴转频 f_c /Hz	38~40	8.62
中间轴轴承滚动体故障特征频率 f /Hz	25.59~26.94	5.805

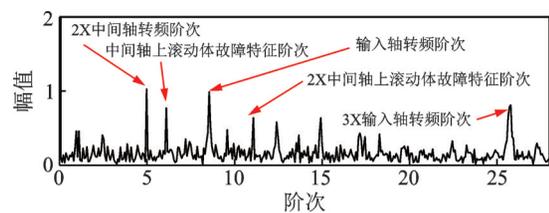


图 36 角域阶次谱

Fig. 36 Angular domain order spectrum

5 结 论

在时变工况、强噪声干扰下,利用时频分析方法提取轴承故障特征频率曲线精度低。基于轴承故障特征频率、转频、啮合频率间线性关系及齿轮啮合成分具有明显的幅值优势,高频啮合成分与低频转频、轴承故障特征频率在时频谱中分布在不同频段,故利用时频分析方法从齿轮啮合成分中提取转速曲线精度较高。本文利用 VMD-SET 无转速计阶次跟

踪方法优化了轴承故障特征提取效果。通过对本文所提方法分析和仿真及实验验证,得出以下结论:

1) VMD-SET 时频分析方法 IF 估计精度高,较 STFT、SST 时频分辨率高、时频特征表达效果好。

2) 对时频谱中局部模糊时段存在交叉干扰的特征信息进行精细化时频脊线交叉解耦优化处理,提高了时频分辨率以及 IF 估计精度。

3) 提取的转速曲线出现三次周期性波谷,考虑与风电机组风轮叶片受风剪切、塔影效应综合作用有关,当提取转速波动规律与风轮叶片质量不平衡及不平衡程度特征有关时,可以检测到风轮叶片存在质量不平衡故障,及时检修风轮叶片对风电机组的安全平稳运行意义重大。

4) 对齿轮箱振动信号 VMD 滤波,有效降低了噪声干扰,优化了时频谱时频分辨率,改善了 IF 估计精度。

参考文献:

- [1] 赵德尊,王天杨,褚福磊. 基于自适应广义解调变换的滚动轴承时变非平稳故障特征提取[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 80-87.
Zhao Dezun, Wang Tianyang, Chu Fulei. Adaptive generalized demodulation transform based rolling bearing time-varying nonstationary fault feature extraction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 80-87.
- [2] 郭瑜,秦树人,汤宝平,等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 32-36.
Guo Yu, Qin Shuren, Tang Baoping, et al. Order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 32-36.
- [3] 荆双喜,罗志鹏,冷军发,等. 基于时变滤波与CWT的齿轮箱无转速计阶次跟踪[J]. 机械传动, 2019, 43(6): 144-149.
Jing Shuangxi, Luo Zhipeng, Leng Junfa, et al. Tacholless order tracking for gearbox based on time-varying filter and CWT [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(6): 144-149.
- [4] 徐晓迪,王卫东,刘金朝,等. 基于同步压缩短时 Fourier 变换的信号瞬时频率提取方法[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 1085-1092.
Xu Xiaodi, Wang Weidong, Liu Jinzhao, et al. Instantaneous frequency components separation method based on synchro-squeezed short time Fourier transform [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6): 1085-1092.
- [5] 孟玲霞,徐小力,左云波. 时变工况行星齿轮箱对数时频脊阶次谱故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 163-169.
Meng Lingxia, Xu Xiaoli, Zuo Yunbo. Fault feature extraction of logarithmic time-frequency ridge order spectrum of planetary gearbox under time-varying conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 163-169.
- [6] 赵明,林京,廖与禾,等. 基于自适应短时 Chirp-Fourier 变换的瞬时转速估计及应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 8-14.
Zhao Ming, Lin Jing, Liao Yuhe, et al. Instantaneous rotating speed estimation using adaptive short-time Chirp-Fourier transform and its applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 8-14.
- [7] 刘永强,郝高岩,廖英英,等. 一种基于 Viterbi 法的改进瞬时转速估计算法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(5): 1018-1024.
Liu Yongqiang, Hao Gaoyan, Liao Yingying, et al. An improved instantaneous speed estimation algorithm based on Viterbi method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(5): 1018-1024.
- [8] Yu Gang, Yu Mingjin, Xu Chuanyan. Synchroextracting transform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8042-8054.
- [9] 张文海,胡明辉,江志农,等. 基于同步提取变换与 Vold-Kalman 滤波的燃机阶次跟踪方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(9): 1104-1108.
Zhang Wenhai, Hu Minghui, Jiang Zhinong, et al. Order tracking method for gas turbine combined with synchro extracting transform and Vold-Kalman filtering [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(9): 1104-1108.
- [10] Konstantin Dragomiretskiy, Dominique Zosso. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62: 531-544.
- [11] Luo Yingchao, Cui Lingli, Zhang Jianyu, et al. Vibration mechanism and improved phenomenological model of the planetary gearbox with broken ring gear fault [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(5): 1867-1879.
- [12] 许志华,潘庭龙. 基于变分模态分解的风机齿轮箱振动信号降噪方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(1): 129-132.
Xu Zhihua, Pan Tinglong. Noise reduction method of fan gearbox vibration signal based on variational mode decomposition [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(1): 129-132.
- [13] 张玉皓. 基于冲击特征的齿轮箱关键部件故障诊断方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2016.

- Zhang Yuhao. Research of fault diagnosis method of key parts for gear box based on impact feature[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2016.
- [14] 万书亭, 成立峰, 绳晓玲. 基于等效风速的风机功率波动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 127-131.
- Wan Shuting, Cheng Lifeng, Sheng Xiaoling. Analysis of wind turbine power oscillation characteristics based on the equivalent wind speed[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3): 127-131.
- [15] 成立峰. 风力发电机组偏航系统误差与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- Cheng Lifeng. Study on yaw system error and control strategy of the wind turbine [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 绳晓玲, 万书亭, 李永刚, 等. 基于坐标变换的双馈风力发电机组叶片质量不平衡故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 188-197.
- Sheng Xiaoling, Wan Shuting, Li Yonggang, et al. Fault diagnosis for blade mass imbalance of wind turbines with DFIG based on coordinate transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 188-197.
- [17] 绳晓玲, 万书亭, 李永刚, 等. 叶轮质量不平衡故障下双馈风力发电机特性分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1324-1332.
- Sheng Xiaoling, Wan Shuting, Li Yonggang, et al. Characteristic analysis of doubly-fed induction generator under blade mass imbalance fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1324-1332.
- [18] 刘长良, 武英杰, 甄成刚. 基于变分模态分解和模糊C均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3358-3365.
- Liu Changliang, Wu Yingjie, Zhen Chenggang. Rolling bearing fault diagnosis based on variational mode decomposition and fuzzy C means clustering [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3358-3365.
- [19] 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.
- Wang Xiaolong. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on vibration signal processing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [20] 张丽强, 丛伟, 董罡, 等. 基于多元线性回归的单相电表相别判断方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 144-156+187.
- Zhang Liqiang, Cong Wei, Dong Gang, et al. Method for single-phase electric meter phase identification based on multiple linear regression [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 144-156+187.

Tacho-less order tracking method of wind turbine gearbox under time-varying conditions

WAN Shu-ting¹, WANG Yan-jie¹, ZHANG Xiong¹, GU Xiao-hu²

(1. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In view of the problem of noise interference and frequency ambiguity of vibration signal of wind turbine gearbox under time-varying conditions, the method of tacho-less order tracking for wind turbine gearbox based on time-varying conditions and VMD-SET is proposed, which is based on the exploration of the relationship between vibration signal of wind turbine gearbox and rotation frequency fluctuation law in the circumstance of tacho-less. In this method, firstly time-frequency analysis to vibration signal of gearbox is processed using the method of SET (Synchroextracting Transform) after filtering by VMD (variational mode decomposition). And fault characteristic frequency trend is extracted preliminarily from bearing fault time domain vibration signal and time-frequency ridge lines of meshing frequency are also obtained from normal gear meshing modulation time domain vibration signal. By fine time-frequency ridge lines cross decoupling, local instantaneous frequency extraction effect is optimized. Then the extracted speed curve is used to track the order of the bearing fault vibration signal, and a single spectral line of the fault characteristic order is obtained from the order spectrum of the angular domain signal after order tracking. Simulations and experiments verify the superiority and effectiveness of the method proposed.

Key words: fault diagnosis; wind turbine gearbox; time-varying conditions; tacho-less; order tracking; time-frequency analysis

作者简介: 万书亭(1970—),男,教授,博士生导师。电话:(0312)7525455;E-mail:13582996591@139.com。

通讯作者: 顾晓辉(1988—),男,讲师。电话:15832185859;E-mail:guxh@stdu.edu.cn。