

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.05.008

基于固有时间尺度分解的风电机组轴承故障特征提取

安学利, 蒋东翔, 刘超, 陈杰

(电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室, 清华大学热能工程系, 北京市 100084)

摘要: 针对风电机组调心滚子轴承故障振动信号非平稳、非线性的特点, 提出了基于固有时间尺度分解(ITD)的轴承故障特征提取方法。ITD方法可以将复杂信号分解成若干个固有旋转分量和一个趋势分量之和, 能准确地展示非平稳信号的动态特性, 有较高的拆解效率和频率分辨率。分析结果表明, ITD方法能有效地提取风电机组轴承故障特征, 可用于在线故障诊断。

关键词: 风电机组; 调心滚子轴承; 故障诊断; 固有时间尺度分解; 特征提取

0 引言

风能作为最具规模开发潜力的可再生新能源, 近年来发展十分迅速。据世界风能协会(WWEA)统计, 截止到2010年底, 全球风电总装机容量为197 GW, 中国风电总装机容量为44.73 GW, 已经超过美国(40.18 GW), 成为全球头号风电大国^[1]。由于风电机组的运行环境较为恶劣, 随着机组累计运行时间的增加, 机组部件极易出现故障^[2-5]。因此, 有必要对风电机组进行在线监测, 以便及时地掌握机组运行状态, 确保其安全、稳定运行。在风电机组故障中, 轴承故障占很高的比例^[6], 其振动信号非常复杂。

固有时间尺度分解(ITD)方法^[7-8]是Frei和Osorio提出的信号处理方法, 它将复杂的非平稳、非线性信号分解成若干个固有旋转分量, 能够准确地提取非平稳信号的动态特性, 有较高的拆解效率和频率分辨率, 适合实时分析处理大量具有时变特性的非平稳信号。ITD方法没有插值和筛选过程, 它获得的瞬时幅值和瞬时相位能实时反映信号的时频信息。同时, 在许多旋转机械故障信号中, 故障频率主要在调制信号的幅值信息中反映^[9]。基于此, 本文采用ITD方法对风电机组调心滚子轴承故障振动信号进行分解, 提取主要分量的瞬时幅值, 对瞬时幅值进行频谱分析, 以获取风电机组的轴承故障特征。

1 ITD方法

ITD方法可以把振动信号分解成一系列的固有旋转分量和一个趋势分量之和, 分别对固有旋转分量的瞬时幅值和瞬时频率进行频谱分析, 能获取振动信号的调幅特征和调频特征。对信号 X_t , 定义 ξ 为基线提取因子, 使得从信号 X_t 中抽取一个基线后剩下的余量信号成为一个固有旋转分量。信号 X_t 的一次分解为^[7-8]:

$$X_t = \xi X_t + (1 - \xi) X_t = L_t + H_t \quad (1)$$

式中: $L_t = \xi X_t$ 为基线信号; $H_t = (1 - \xi) X_t$ 为固有旋转分量。

假设 $\{\tau_k | k=1, 2, \dots\}$ 为信号 X_t 的局部极点, 定义 $\tau_0=0$ 。为简化符号, 分别用 X_k 和 L_k 表示 $X(\tau_k)$ 和 $L(\tau_k)$ 。假设在 $[0, \tau_k]$ 上定义了 L_t 和 H_t , 且 X_t 在 $t \in [0, \tau_{k+2}]$ 有定义。在连续极点间隔 $(\tau_k, \tau_{k+1}]$ 上定义分段线形基线提取因子 ξ :

$$\xi X_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) (X_t - X_k) \quad (2)$$

$$L_{k+1} = \beta \left[X_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (X_{k+2} - X_k) \right] + (1 - \beta) X_{k+1} \quad (3)$$

式中: $\beta \in (0, 1)$, 通常取0.5。

一次分解得到一个基线信号和一个固有旋转分量, 后者表示信号中的局部相对高频成分。将基线信号作为新的输入信号继续分解, 直到获得一个单调信号。这就将原信号分解成若干个从高到低不同频率段的固有旋转分量之和与一个单调趋势分量。整个过程可表示为:

$$X_t = \psi X_t + \xi X_t = \psi X_t + (\psi + \xi) \xi X_t = \left[\psi(1 + \xi) + \xi^2 \right] X_t = \left(\psi \sum_{k=0}^{p-1} \xi^k + \xi^p \right) X_t \quad (4)$$

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2011-10-07。
国家自然科学基金资助项目(51174273); 中国博士后科学基金资助项目(20090460273)。

式中: $\psi \xi^k X_t$ 为第 $k+1$ 层固有旋转分量; $\xi^0 X_t$ 为单调趋势分量或在单调趋势分量得到之前停止分解提取到的最低频率的基线。

ITD 方法提出了一种新的定义瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率的方法。其中, 瞬时相位 θ_t 定义为:

$$\theta_t = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \left(\frac{X_t}{A_1} \right) & t \in [t_1, t_2) \\ \frac{\pi}{2} \left(\frac{X_t}{A_1} \right) + \pi \left(1 - \frac{X_t}{A_1} \right) & t \in [t_2, t_3) \\ \frac{3\pi}{2} \left(-\frac{X_t}{A_2} \right) + \pi \left(1 + \frac{X_t}{A_2} \right) & t \in [t_3, t_4) \\ \frac{3\pi}{2} \left(-\frac{X_t}{A_2} \right) + 2\pi \left(1 + \frac{X_t}{A_2} \right) & t \in [t_4, t_5) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A_1 > 0, A_2 > 0$, 分别表示一个全波的正半波和负半波部分的幅度; t_1 和 t_5 为上过零点时刻; t_2 为正半波的极大值点 (A_1) 时刻; t_3 为下过零点时刻; t_4 为负半波的极小值点 ($-A_2$) 时刻。

全波是指 2 个相邻的上过零点之间的信号, 半波是指 2 个过零点之间的信号, 单调区间是指 2 个相邻的极值点之间的信号。

瞬时频率 f_t 是瞬时相位 θ_t 的微分, 即

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_t}{dt} \quad (6)$$

瞬时幅度 A_t 以半波为单位定义, 即 2 个过零点之间的信号的极值点的值, 在每一个半波内是一个定值, 即

$$A_t = \begin{cases} A_1 & t \in [t_1, t_3) \\ -A_2 & t \in [t_3, t_5) \end{cases} \quad (7)$$

2 基于 ITD 的特征提取方法

为了更好地对设备状态进行有效分析和识别, 可以应用 ITD 方法把所采集到的振动信号分解成一系列的固有旋转分量和一个趋势分量。分别对固有旋转分量的瞬时幅值和瞬时频率进行频谱分析, 能获得振动信号的调幅特征和调频特征。

假设一个调幅-调频仿真信号为:

$$x(t) = (1 + 0.5 \cos(2\pi \times 5t)) \cos(2\pi \times 100t + 1.5 \sin(2\pi \times 7t)) + 0.5 \sin(2\pi \times 30t) \quad t \in [0, 1] \quad (8)$$

仿真信号 $x(t)$ 的时域波形如附录 A 图 A1 所示, 其 ITD 结果如附录 A 图 A2 所示。可知, 信号 $x(t)$ 分解得到 5 个固有旋转分量 (记为 c_1 至 c_5) 与一个趋势分量 (记为 r)。 c_1 和 c_2 能量较大, 为主要分量, 其余能量很小, 为分解误差。图 1 为由 ITD 方法获得的第 1 个固有旋转分量 c_1 的瞬时幅值

$a_1(t)$ (可由式 (7) 求得), 以及对其进行快速傅里叶变换 (FFT) 求得的调幅特征。图 2 为 c_1 的瞬时频率 $f_1(t)$ (可由式 (5) 和式 (6) 求得), 以及对其进行 FFT 求得的调频特征。由图 1 和图 2 可知, 第 1 个固有旋转分量 c_1 中的调制频率 5 Hz 和 7 Hz, 分别对应了原信号中的调幅分量和调频分量。第 2 个固有旋转分量 c_2 的幅值和频率与原信号中的 $0.5 \sin(2\pi \times 30t)$ 对应。这说明 ITD 方法所分解出的分量具有一定物理意义, 能有效反映原始信号的特征, 适合分析含调幅-调频成分的信号。

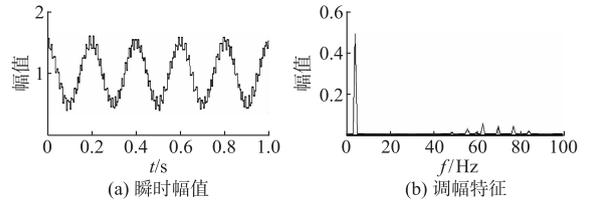


图 1 c_1 的瞬时幅值及其调幅特征

Fig. 1 Instantaneous amplitude and amplitude-modulated feature of c_1

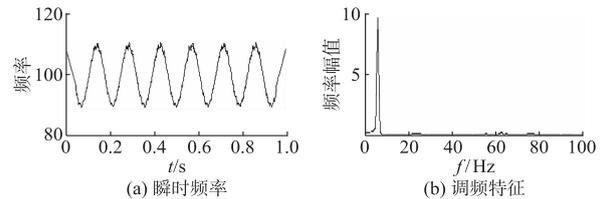


图 2 c_1 的瞬时频率及其调频特征

Fig. 2 Instantaneous frequency and frequency-modulated feature of c_1

3 基于 ITD 的风电机组轴承故障特征提取方法

风电机组的风源有较强的不稳定性, 且轴承故障具有高度随机性和非线性特征。因此, 当风电机组轴承发生故障时, 其振动信号通常含有复杂的调制成分, 为了提取出轴承故障特征, 需要对振动信号进行有效解调。本文首先在直驱风电机组实验台上进行调心滚子轴承外圈、内圈和滚动体故障实验; 然后, 采用 ITD 方法对轴承故障的振动加速度信号进行有效分解, 得到若干个固有旋转分量 c_i , 对含有明显周期性冲击成分的 c_i 的瞬时幅值进行频谱分析, 提取轴承故障特征。

3.1 实验系统

风电机组实验台如附录 A 图 A3 所示, 该系统由小型风洞提供风源, 主要由风轮、主轴轴承与发电机组组成。主轴轴承为调心滚子轴承, 主要承受径向载荷, 同时也可承受由于风对风轮作用产生的部分

轴向载荷。采用联轴器连接风轮主轴和发电机。发电机输出端通过交直流转换器连接至蓄电池。采用风速传感器测量风速,光电开关转速传感器测量风轮的转速。轴承座上装有加速度传感器,用来采集轴承的振动加速度信号。在2个主轴承之间的风力机主轴上安装互相呈 90° 的2个位移传感器,用来获取主轴的振动位移信号,实验采样频率为2 kHz。考虑到调心滚子轴承的局部损伤可能发生在外圈、内圈和滚动体上,分别用4个22206型的调心滚子轴承进行实验,其中3个轴承分别被设置有内圈、外圈和滚动体局部故障,1个为无故障轴承。故障是通过线切割在内圈、外圈或滚动体上开槽来设置的,槽宽为0.2 mm,槽深为0.3 mm,设置的故障程度属较轻程度,故障轴承安装在靠近风轮侧。

3.2 调心滚子轴承故障频率计算

为便于对风电机组轴承故障进行分析研究,需要计算轴承故障振动频率。轴承内圈、外圈或滚动体发生局部故障时,故障特征频率的理论公式如下^[10]:

$$f_i = \frac{1}{2} f \left(1 + \frac{d_r}{D_m} \cos \alpha \right) Z \quad (9)$$

$$f_o = \frac{1}{2} f \left(1 - \frac{d_r}{D_m} \cos \alpha \right) Z \quad (10)$$

$$f_r = f \left[1 - \left(\frac{d_r}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right] \frac{D_m}{d_r} \quad (11)$$

式中: f_i 为内圈故障特征频率; f_o 为外圈故障特征频率; f_r 为滚动体故障特征频率; f 为轴颈旋转频率; Z 为滚子个数; d_r 为滚子直径; D_m 为轴承节径; α 为轴承压力角。

由于实际轴承的几何尺寸可能会有误差,轴承安装后会有变形,以及风电机组转速的不稳定,会使计算所得频率与实际特征频率有一定的差别。

由于风轮主轴承承受的载荷非常大,而且轴很长,容易变形,因此要求轴承必须有良好的调心性能。一般情况下风电机组风轮主轴由调心滚子轴承支撑,轴承故障具有高度的随机性和非线性特征,轴承的故障特征一般表现得比较复杂。

调心滚子轴承的振动故障频率可以用式(9)一式(11)计算,但轴承滚子直径 d_r 、轴承节径 D_m 和轴承压力角 α 不易直接测量,在轴承手册和机械设计手册中也无法查到,所以需要先确定这些参数,然后再计算故障频率。调心滚子轴承参数的确定方法可参见文献[10]。本文实验采用的轴承型号为22206型,滚动体为双列结构,单列滚子个数 $Z=13$,外径为62 mm,内径为30 mm,厚度为20 mm。可计算出 $\cos \alpha=0.978$, $D_m=46$ mm, $d_r=8.18$ mm。将所

得参数代入式(9)一式(11),可得到轴承各元件的振动故障频率。实验平均转速为280 r/min,计算该转速下轴承故障特征频率:

$$f_i = \begin{cases} 35.61 \text{ Hz} & \text{单列滚子数目}(Z=13) \\ 71.22 \text{ Hz} & \text{双列滚子数目}(Z=13 \times 2) \end{cases}$$

$$f_o = \begin{cases} 25.06 \text{ Hz} & \text{单列滚子数目}(Z=13) \\ 50.12 \text{ Hz} & \text{双列滚子数目}(Z=13 \times 2) \end{cases}$$

$$f_r = 12.74 \text{ Hz}$$

3.3 外圈故障识别

风电机组主轴承外圈故障的振动加速度信号时域图、频域图如附录A图A4所示。可以看出,信号的时域、频域成分都非常复杂,不能从图中获得轴承外圈故障特征。采用ITD方法对该信号进行分解,得到7个固有旋转分量(c_1 至 c_7)与一个趋势分量(r),如附录A图A5所示。可以看出, c_1 具有明显的故障性冲击特征,对其瞬时幅值作频谱分析,得到频谱图,如图3所示。由图3可以看出,在轴承外圈故障特征频率25.39 Hz处存在明显的谱线,与理论计算所得频率25.06 Hz接近,说明调心滚子轴承存在外圈故障。外圈故障频率是 $Z=13$ 时的故障特征频率,这是因为实验所用轴承为新轴承,轴承的一致性比较好,滚子差异性很小,故取单排滚子数目计算的轴承外圈故障频率明显。

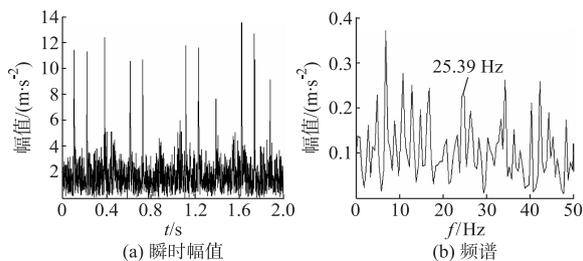


图3 外圈故障时 c_1 的瞬时幅值及其频谱
Fig. 3 Instantaneous amplitude and its spectrum of c_1 with outer race fault

3.4 内圈故障识别

从风电机组主轴承内圈故障的振动加速度信号时域图和频域图中依然不能获得轴承内圈故障特征。限于篇幅,图未给出。采用ITD方法对该信号进行分解,得到8个固有旋转分量(c_1 至 c_8)与一个趋势分量(r),前3个分量(c_1, c_2, c_3)的时域图见附录A图A6。可以看出, c_1 含有明显的周期性冲击成分,对其瞬时幅值作频谱分析,得到如附录A图A7所示的频谱图。可以很清楚地看到,轴承内圈故障特征频率为35.64 Hz,与理论计算频率35.61 Hz接近,说明调心滚子轴承存在内圈故障。

3.5 滚动体故障识别

风电机组主轴承滚动体故障的振动加速度信号

时域图、频域图同样相当复杂,仅从图中不能获得滚动体故障特征。采用 ITD 方法对该信号进行分解,得到 7 个固有旋转分量(c_1 至 c_7)与一个趋势分量(r),前 3 个分量(c_1, c_2, c_3)的时域图见附录 A 图 A8。可以看出, c_1 含有明显的周期性冲击成分,对其瞬时幅值作频谱分析,得到如附录 A 图 A9 所示的频谱图。可以清楚地看到,轴承滚动体故障特征频率为 13.18 Hz,与理论计算频率 12.74 Hz 接近,说明调心滚子轴承存在滚动体故障。

3.6 轴承正常时振动信号

为便于比较,给出了风电机组主轴承正常时的振动加速度信号的 ITD 结果,如附录 A 图 A10 所示。对 c_1 的瞬时幅值作频谱分析,得到如附录 A 图 A11 所示的频谱图。可以看出,轴承无故障时,一倍转频(4.40 Hz)占主要成分,与理论计算转频 4.67 Hz 接近。

4 ITD 方法的计算效率

为了验证 ITD 方法的计算效率,应用 ITD 方法对风电机组调心滚子轴承外圈故障、内圈故障、滚动体故障以及无故障时的振动加速度信号进行拆解,并与近年来常用于非稳定信号分析的经验模态分解(EMD)^[11]方法进行比较,计算结果如表 1 所示。从表中可以看出,ITD 方法具有较高的拆解效率,适合于分析非平稳实时信号,能够满足在线故障诊断要求。

表 1 ITD 与 EMD 方法拆解信号效率比较

Table 1 Comparison of signal decomposition efficiency with ITD and EMD

算法	外圈故障	内圈故障	滚动体故障	无故障
ITD	0.110	0.125	0.093	0.047
EMD	2.093	1.610	1.562	1.094

5 结语

本文介绍了一种新的、适合于分析非平稳、非线性信号的 ITD 方法。针对风电机组轴承故障振动信号非平稳、非线性的特点,提出了基于 ITD 的轴承故障特征提取方法,分别对调心滚子轴承出现外圈、内圈和滚动体故障时的轴承振动信号进行了分析,结果表明该方法能有效地提取风电机组轴承故障特征。

将 ITD 方法与 EMD 方法拆解信号的效率进行了对比,结果表明 ITD 方法具有更高的拆解效率,可以实时处理大量数据,更适合发电机组在线故障诊断。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 世界风能协会. 2010 年度世界风能发展报告[R]. 2011.
- [2] HAMEED Z, HONG Y, CHO Y, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 1-39.
- [3] AMIRAT Y, BENBOUZID M, AL-AHMAR E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2629-2636.
- [4] 安学利, 蒋东翔. 风力发电机组运行状态的混沌特性识别及其趋势预测[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 15-19.
AN Xueli, JIANG Dongxiang. Chaotic characteristics identification and trend prediction of running state for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 15-19.
- [5] 郭艳平, 颜文俊, 包哲静. 风力发电机组在线故障预警与诊断一体化系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 83-86.
GUO Yanping, YAN Wenjun, BAO Zhejing. Design and application of online fault warning and diagnosis integrated system for wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 83-86.
- [6] 赵明浩. 风力机故障特征分析与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [7] FREI M, OSORIO I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2007(463): 321-342.
- [8] 安金坤, 田斌, 孙永军, 等. 一种基于 ITD 算法的直扩信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1178-1182.
AN Jinkun, TIAN Bin, SUN Yongjun, et al. An algorithm for direct sequence spread spectrum signal detection based on intrinsic time-scale decomposition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1178-1182.
- [9] 秦毅, 秦树人, 毛永芳. 基于小波脊线的解调方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 231-237.
QIN Yi, QIN Shuren, MAO Yongfang. Demodulation approach based on wavelet ridge and its application in fault diagnosis of rotating machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 231-237.
- [10] 李惠彬. 齿轮振动和减速机在线监测与故障诊断的研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [11] LI Y, TSE P, YANG X, et al. EMD-based fault diagnosis for abnormal clearance between contacting components in a diesel engine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1): 193-210.

安学利(1980—),男,通信作者,博士,现在博士后工作站进行研究,主要研究方向:发电机组振动及故障诊断。E-mail: anxl614@163.com

(下转第 102 页 continued on page 102)

(上接第 44 页 continued from page 44)

蒋东翔(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:
动力系统故障诊断。E-mail: jiangdx@tsinghua.edu.cn

刘超(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:发电
机组振动及机网耦合。

Bearing Fault Feature Extraction of Wind Turbine Based on Intrinsic Time-scale Decomposition

AN Xueli, JIANG Dongxiang, LIU Chao, CHEN Jie

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the non-stationary and nonlinear characteristics of the spherical roller bearing fault vibration signals in wind turbine, a bearing fault feature extraction method of wind turbine based on intrinsic time-scale decomposition (ITD) is presented. The ITD method can decompose a complex signal into several proper rotation components and a trend component. It can also reveal the dynamic characteristics of non-stationary signals, has higher decomposition efficiency and frequency resolution. The diagnosis results show that the ITD method can effectively extract the bearing fault characteristics of wind turbine and can be applied to online fault diagnosis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51174273) and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 20090460273).

Key words: wind turbine; spherical roller bearing; fault diagnosis; intrinsic time-scale decomposition; feature extraction

附录 A

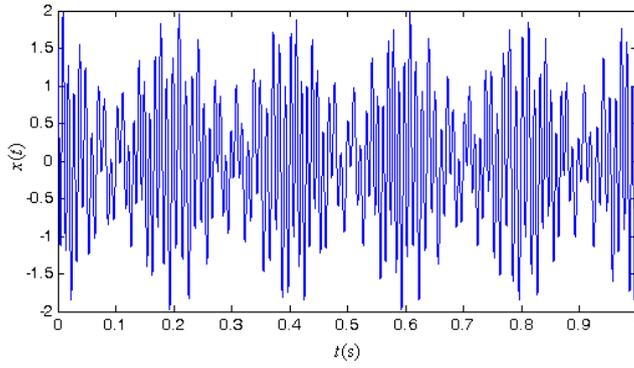


图 A1 仿真信号时域图

Fig. A1 Time-domain waveform of simulation signal

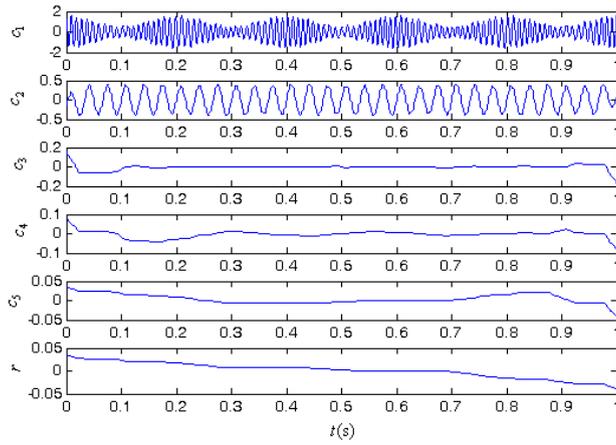
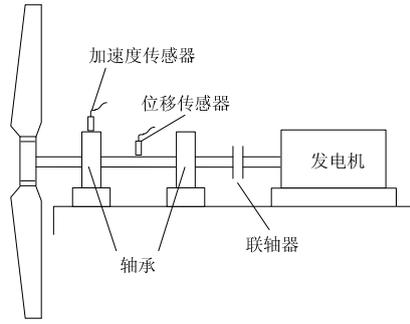
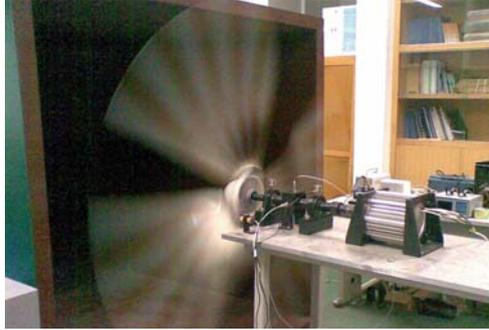


图 A2 仿真信号的 ITD 分解结果

Fig. A2 ITD decomposed results of simulation signal



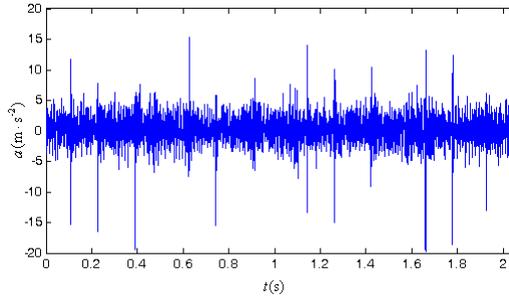
(a) 实验台结构简图



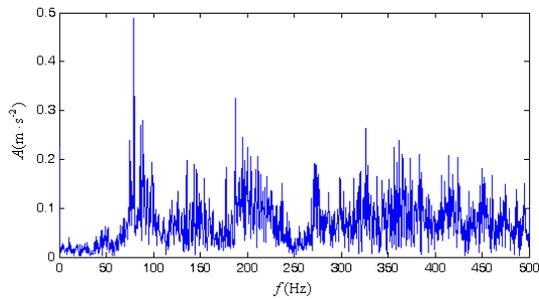
(b) 实物图

图 A3 直驱风力发电机组实验台

Fig. A3 Test stand of direct-drive wind turbine



(a) 时域图



(b) 频谱图

图 A4 风力发电机组主轴承外圈故障振动加速度信号

Fig. A4 Time signal and its spectrum of vibration acceleration signal for main bearing outer race fault of direct-drive wind turbine

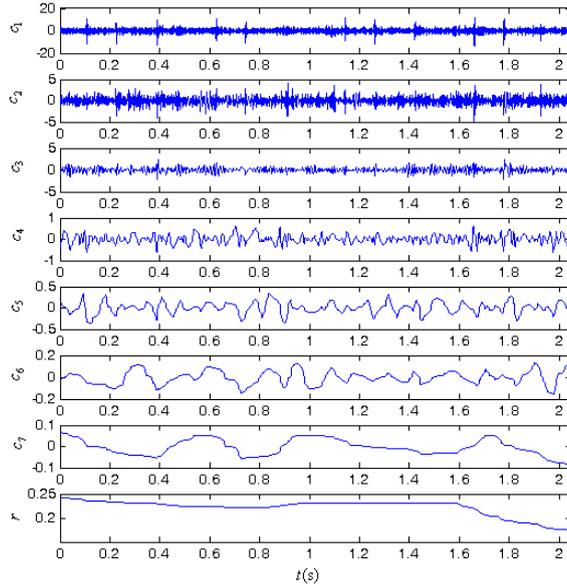


图 A5 主轴承外圈故障振动加速度信号的 ITD 分解结果

Fig. A5 ITD decomposed results of vibration acceleration signal for main bearing outer race fault

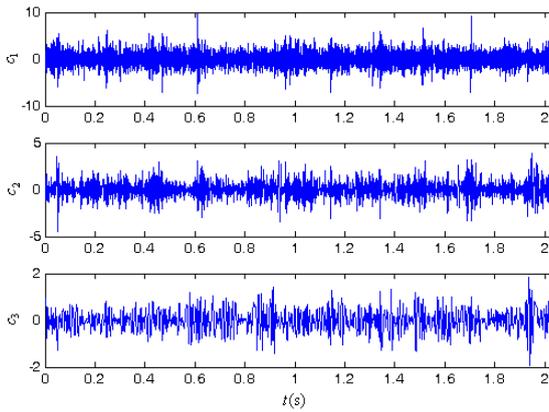
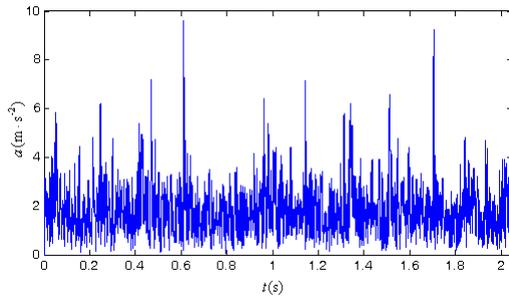
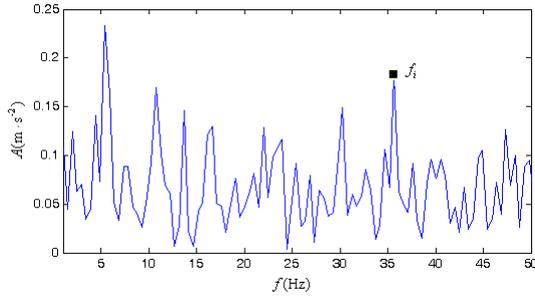


图 A6 主轴承内圈故障振动加速度信号的 ITD 分解结果

Fig. A6 ITD decomposed results of vibration acceleration signal for main bearing inner race fault



(a) 瞬时幅值



(b) 频谱图

图 A7 内圈故障时第一个 H 分量的瞬时幅值及其频谱图

Fig. A7 The instantaneous amplitude and its spectrum of the first H of the main bearing with inner race fault

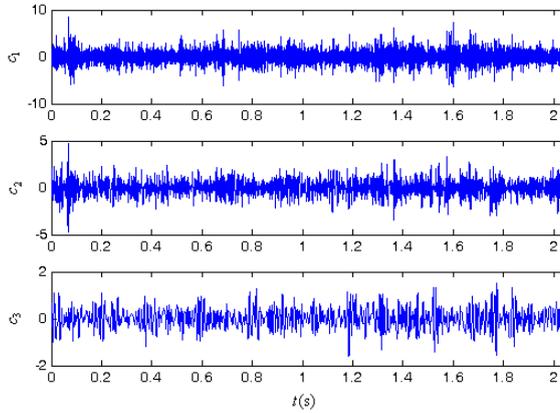
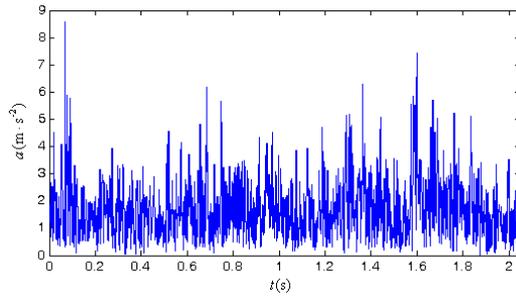
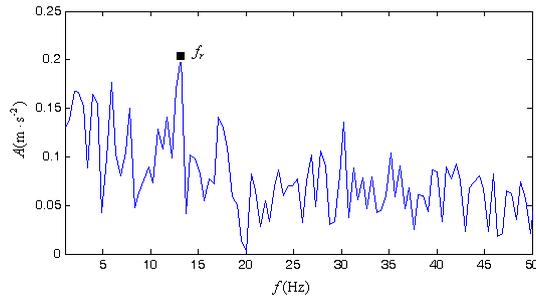


图 A8 主轴承滚动体故障振动加速度信号的 ITD 分解结果

Fig. A8 ITD decomposed results of vibration acceleration signal for main bearing roller race fault



(a) 瞬时幅值



(b) 频谱图

图 A9 滚动体故障时第一个 H 分量的瞬时幅值及其频谱图

Fig. A9 The instantaneous amplitude and its spectrum of the first H of the main bearing with roller race fault

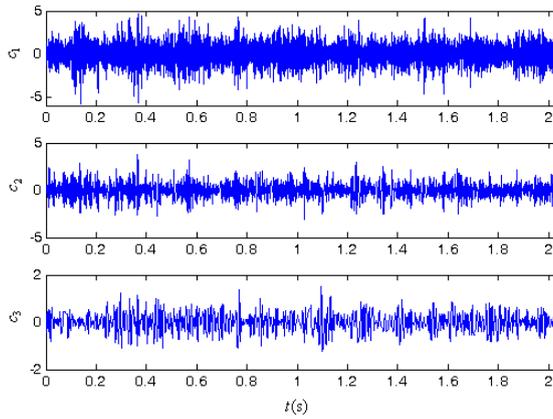
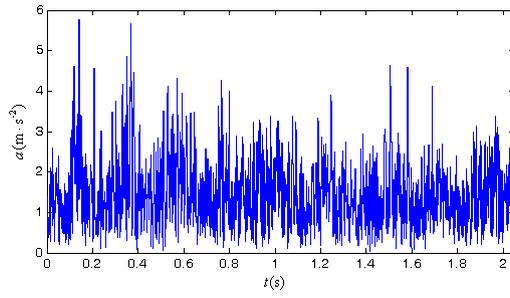
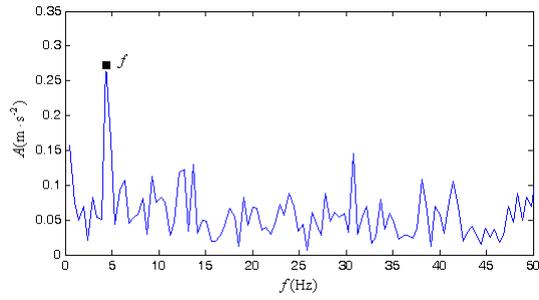


图 A10 主轴承正常时振动加速度信号的 ITD 分解结果

Fig. A10 ITD decomposed results of vibration acceleration signal from a normal bearing



(a) 瞬时幅值



(b) 频谱图

图 A11 无故障时第一个 H 分量的瞬时幅值及其频谱图

Fig. A11 The instantaneous amplitude and its spectrum of the first H of the main bearing with normal condition