

基于平稳小波包分解的 水轮机非平稳振动信号希尔伯特谱分析

冯志鹏¹, 李学军², 褚福磊³

(1. 北京科技大学车辆工程研究所, 北京市 海淀区 100083; 2. 湖南科技大学机械设备健康维护
省重点实验室, 湖南省 湘潭市 411201; 3. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京市 海淀区 100084)

Application of Stationary Wavelet Packets Decomposition Based Hilbert Spectrum to Nonstationary Hydraulic Turbine Vibration Signal Analysis

FENG Zhi-peng¹, LI Xue-jun², CHU Fu-lei³

(1. Institute of Vehicular Engineering, University of Science and Technology Beijing, Haidian District, Beijing 100083, China;
2. Hunan Province Key Laboratory of Machinery Health Maintenance, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan 411201, Hunan Province, China; 3. Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The multi-band decomposition based on stationary wavelet packets transform avoids the defects inherent with Hilbert-Huang transform, such as the pseudo mode functions from empirical mode decomposition and the instantaneous frequency ripple of relatively high frequency intrinsic mode functions. The modification of Hilbert spectrum via stationary wavelet packets decomposition improves its resolution in analyzing the high frequency wide band signals, and enables it more suitable to process the complicated multi-component nonstationary signals. It is employed to analyze the nonstationary vibration signal of a hydroturbine during the shut-down and start-up transient processes. It is found that the main shaft vibration is mainly composed of the rotating frequency and its harmonics, and the rotating frequency is dominant. The comparison with Hilbert-Huang transform verifies its feasibility and effectiveness in analyzing the nonstationary vibration signals of hydroturbine during transient processes.

KEY WORDS: nonstationary signal; time frequency analysis; Hilbert spectrum; stationary wavelet packets transform; hydroturbine; transient process

摘要: 应用平稳小波包变换对信号进行窄带分解, 避免了经

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50425516); 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金; 湖南省机械设备健康维护重点实验室开放基金项目(KFJJ0505)。

Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50425516).

验模式分解过程中虚假模式分量的产生以及高频本质模式函数瞬时频率的波动, 改善了 Hilbert 谱对于高频宽带信号的频率分辨率, 使其更加适合复杂多分量的非平稳信号分析。针对水轮机过渡过程中转子振动响应的复杂性和非平稳性, 应用该方法对停机和起动过程现场测试信号进行分析, 识别了信号的时频结构特征, 主轴振动响应主要由转速频率及其谐频成分组成, 其中主导成分为转速频率。与 Hilbert-Huang 变换的对比验证了该方法在分析水轮机过渡过程非平稳振动信号方面的有效性。

关键词: 非平稳信号; 时频分析; 希尔伯特谱; 平稳小波包变换; 水轮机; 过渡过程

0 引言

机械设备在运行过程中经常出现各种非平稳信号, 其中蕴含着关于设备运行状态的丰富信息, 能够反映机械设备自身和环境激励的变化特点。时频分析针对非平稳信号成分的时变频谱特征, 通过二维的时间-频率密度函数表示一维的时间信号, 从而揭示信号中的频率成分, 以及各频率分量的时变情况。目前, 各种时频分析方法在机械设备非平稳信号处理中得到了广泛应用, 如短时 Fourier 变换、小波变换和 Cohen 类时频分布等^[1-3]。Hilbert-Huang 变换是分析处理非线性非平稳时间序列的新方法^[4-10], 首先通过经验模式分解将信号分解为若干本质模式函数, 即根据信号的局部变化时间尺度, 利用 3 次样条拟和方法自适应地将信号分解为反映波动

模式的单分量成分, 然后对分解结果进行 Hilbert 变换, 由本质模式函数计算瞬时频率, 得到表示信号幅值/能量-时间-频率分布的 Hilbert 幅值/能量谱。Hilbert-Huang 变换虽然算法效率高, 对信号具有自适应性, 而且具有良好的局部时频聚集能力, 但是该方法的核心——经验模式分解仍然存在一些缺陷:

(1) 分解结果由样条拟和得到, 不适合统计分析。

(2) 对信号的奇异点敏感, 容易产生模式混合, 得到虚假的本质模式函数。

(3) 对高频宽带信号的频率分辨率低, 导致高频分量本质模式函数的瞬时频率波动幅度大。

针对上述问题, Olhede 和 Walden^[11-12]提出了基于平稳小波包分解的 Hilbert 谱, 该方法应用平稳小波包变换对信号进行窄带分解, 构造 Hilbert 谱进行时频分析, 既克服了经验模式分解存在的缺陷, 又保持了 Hilbert 谱的良好时频分辨能力。本文应用该方法对水轮机过渡过程中转子非平稳振动信号进行分析, 识别了信号中的频率成分及其时变特征。

1 基于平稳小波包分解的 Hilbert 谱

1.1 概述

非平稳信号的瞬时频率和能量一般相对时间变化, 时频分析的主要目的就是研究信号成分的瞬时频率及其幅值/能量的时变情况。Hilbert 谱通过 Hilbert 变换计算信号的幅值/能量在时频平面上的三维表示, 强调信号的局部特征, 对时频平面的铺砌方式没有任何限制, 具有良好的时频聚集能力。该方法的基础是信号瞬时频率的准确计算, 对于单分量信号, 瞬时频率可以通过局部相位微分法计算, 实际应用中的信号一般为复杂多分量信号, 为了计算瞬时频率, 需要分解为满足单分量信号要求的窄带分量。经验模式分解利用3次样条拟和方法将信号分解为若干本质模式函数, 其实质是将信号投影到时频平面上, 使得每个投影构成 1 个单分量信号, 保持任意时刻的频率变化特征, 以便研究信号的瞬时频率。在任意时刻, 经验模式分解按照频率由高到低的顺序依次提取本质模式函数, 若以白噪声信号为研究对象, 经验模式分解与小波分解过程近似, 即按照分解的先后顺序, 本质模式函数的频率中心和带宽依次减半, 导致经验模式分解对高频宽带信号的频率分辨率低, 高频分量本质模式函数的瞬时频率存在大幅度波动, 不利于实际应用^[9-10]。

为了解决该问题, 可以考虑应用小波包分解代替经验模式分解, 提高对高频信号的频率分辨率, 降低本质模式函数瞬时频率的波动幅度。平稳小波包变换没有传统小波包变换中的下采样过程, 不仅提高了信号分析的频率分辨率, 保持了时间分辨率, 而且其中的零相位滤波保证了瞬时频率的精确计算, 因此, 应用该方法将信号分解为窄带分量, 构造 Hilbert 谱对信号进行时频分析。

1.2 平稳小波包变换

平稳小波变换是传统小波变换的变化形式, 没有下采样过程, 不同分解层次中的细节信号和逼近信号长度与原始信号长度相同, 而且通过零相位滤波得到, 具有时间平移不变性, 因此称为平稳小波变换^[13]。与传统小波变换相比, 平稳小波变换具有以下主要性质:

(1) 传统离散小波变换在第 i 层次要求信号长度是 2^i 的整数倍, 而离散平稳小波变换可以对任意长度的信号进行处理。

(2) 离散平稳小波变换的小波系数和尺度系数具有循环移动不变性, 若时间序列循环移动了任意点数, 则小波系数和尺度系数也将循环移动相应的点数。

(3) 离散平稳小波变换的小波系数和尺度系数通过零相位滤波得到, 其时域特征与原始时间序列在时域内严格对应, 可以提取事件发生的时间信息。

离散平稳小波变换的上述性质使其适合信号滤波、消噪和奇异点检测。

平稳小波包变换是平稳小波变换的推广, 继承了传统小波包变换的思想, 对平稳小波变换的小波系数和尺度系数进行多层次分解, 由于无下采样过程, 避免了传统小波包变换时间分辨率低的固有缺陷, 不仅提高了频率分辨率, 而且保持了时间分辨率^[13]。

对于信号 $x(t)$, (其中 $t=0, 1, \dots, N-1$), 第 i 层次第 k 个子频带离散平稳小波包变换的小波包系数为

$$w_{i,k}(t) = \sum_{t=0}^{L_i-1} f_{i,k}(t)x[(t-t) \bmod N] \quad (1)$$

其中 $\{f_{i,k}(t)\}$ 为第 i 层次第 k 个子频带的平稳小波包滤波器, 其长度 $L_i=(2^{i-1})(L-1)+1$ 。平稳小波包滤波器由小波包分解过程中小波滤波器 $\{h_i(t)\}$ 和尺度滤波器 $\{g_i(t)\}$ 的具体应用顺序确定: 对于第 i 层次第 k 个子频带的平稳小波包系数 $w_{i,k}(t)$, 若 k 为偶数, 则应用低通尺度滤波器 $\{g_i(t)\}$ 对其进行滤波处理,

得到第 $i+1$ 层次第 $2k$ 个子频带的平稳小波包系数 $w_{i+1,2k}(t)$, 应用高通小波滤波器 $\{h_i(t)\}$ 对其进行滤波处理, 得到第 $i+1$ 层次第 $2k+1$ 个子频带的平稳小波包系数 $w_{i+1,2k+1}(t)$; 若 k 为奇数, 则应用高通小波滤波器 $\{h_i(t)\}$ 对其进行滤波处理, 得到第 $i+1$ 层次第 $2k$ 个子频带的平稳小波包系数 $w_{i+1,2k}(t)$, 应用低通尺度滤波器 $\{g_i(t)\}$ 对其进行滤波处理, 得到第 $i+1$ 层次第 $2k+1$ 个子频带的平稳小波包系数 $w_{i+1,2k+1}(t)$ 。其中, $\{h_i(t)\}$ 和 $\{g_i(t)\}$ 是第 i 层次的高通小波滤波器和低通尺度滤波器, 长度 $L_i=(2^{i-1}-1)(L-1)+1$, 由长度为 L 的传统离散小波变换的小波滤波器 $\{h(t)\}$ 和尺度滤波器 $\{g(t)\}$ 得到。对于第 i 层次, 它们的脉冲响应序列是传统离散小波变换滤波器的上采样形式, 分别在序列 $\{h(t)\}$ 和 $\{g(t)\}$ 的相邻元素之间插入 $2^{i-1}-1$ 个零得到, 即

$$\begin{aligned} \{h_i(t)\} &= \{h(0), \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{i-1}-1}, h(1), \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{i-1}-1}, \dots, h(L-1)\} \\ \{g_i(t)\} &= \{g(0), \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{i-1}-1}, g(1), \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{i-1}-1}, \dots, g(L-1)\} \end{aligned}$$

第 i 层次第 k 个子频带的信号分量为

$$d_{i,k}(t) = \sum_{t=0}^{L_i-1} f_{i,k}(t) w_{i,k}[(t-t) \bmod N] \quad (2)$$

在第 i 层次, 信号可以通过平稳小波包分解得到的各子频带信号分量进行重构

$$x(t) = \sum_{n=0}^{2^i-1} d_{i,k}(t) \quad (3)$$

通过平稳小波包分解, 各子频带信号为窄带分量, 基本满足单分量信号要求, 而且其中的零相位滤波保持了各信号分量的相位信息, 使得子频带信号分量适合计算瞬时频率。在平稳小波包分解的基础上, 可以构造 Hilbert 谱, 对信号进行时频分析。

1.3 Hilbert 谱

Hilbert 谱是信号的幅值/能量-时间-频率的三维表示。对式(3)进行 Hilbert 变换, 构造解析信号, 表示为极坐标形式, 并取实部, 得 Hilbert 幅值谱

$$H(t, f) = \text{Re}\left\{\sum_{k=0}^{2^i-1} A_k(t) \exp[j\int 2\pi f_k(t) dt]\right\} \quad (4)$$

其中 $A_k(t)$ 为第 k 个子频带信号分量的瞬时幅值, 且

$$A_k(t) = [d_{i,k}^2(t) + \tilde{d}_{i,k}^2(t)]^{1/2} \quad (5)$$

其中: $\tilde{d}_{i,k}(t)$ 为 $d_{i,k}(t)$ 的 Hilbert 变换; $f_k(t)$ 为第 k 个子频带信号分量的瞬时频率, 且

$$f_k(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dq_k(t)}{dt} \quad (6)$$

其中 $q_k(t)$ 为第 k 个子频带信号分量的瞬时相位

$$q_k(t) = \arctan\left[\frac{\tilde{d}_{i,k}(t)}{d_{i,k}(t)}\right] \quad (7)$$

由 Hilbert 幅值谱可以得到 Hilbert 能量谱

$$S(t, f) = \sum_{k=0}^{2^i-1} A_k^2(t) d[f - f_k(t)] \quad (8)$$

其中 $d(\cdot)$ 为 Dirac 函数。

Hilbert 谱强调信号的局部特征, 具有良好的时频聚集能力。基于平稳小波包分解的 Hilbert 谱能够避免高频信号分量瞬时频率的波动现象, 改善对高频宽带信号的时频分辨率, 更加适合实际的复杂多分量非平稳信号分析。

1.4 小波基函数与分解层次选择

任何分解都存在时频能量泄漏现象, 难以得到时域和频域同时具有有限支撑性质的信号分量。为了尽量提高小波包分解在高频带内的频率分辨率, Nielsen^[14]构造了具有最优渐进分辨率的 Fejer-Korovkin 小波, 在其基础上可以得到具有良好时频聚集性质的小波包滤波器。

小波包分解的子频带数目越多, 越符合窄带信号的要求, 但是时频能量泄漏现象也越严重。为了尽量减少能量泄漏, 在保证有效分离不同信号分量的情况下, 分解层次越低越好。Olhede 和 Walden^[12]推荐的最小分解子频带宽度为 Nyquist 频率的 1/16, 即分解层次最高为 4。

考虑水轮机过渡过程中转子振动信号的实际特点, 本文应用 22 阶 Fejer-Korovkin 小波对现场测试信号进行 4 层平稳小波包分解。

2 水轮机过渡过程振动信号分析

2.1 概述

水轮机经常经历起动、停机和增减负荷等过渡过程。在过渡过程中, 转速、功率、导叶开度和机组开关等运行参数变化范围较大, 会激发出多种振动现象, 因此, 研究过渡过程中的瞬态振动对于水轮机的设计、运行和维护等工作而言具有重要意义^[15-16]。

2.2 参数说明

某水电站水轮发电机组中水轮机型号为 ZZ(F23)-LH-700, 发电机型号为 SF75-68/11350, 水轮机的额定转速为 88 revolution/min (1.467 Hz), 额定功率为 80MW, 工作水头约为 26m。

该水轮机的某个停机过程持续了约 64s, 上导轴承处主轴摆度现场测试信号(采样频率 16Hz, 数

据长度 1024 点)如图 1 示,图(a)为时域波形,图(b)为 Fourier 频谱。相应的转速 n 、功率 P 、导叶开度 O 和机组开关 S 等运行参数的变化情况分别如图 2 (a)~(d)示。

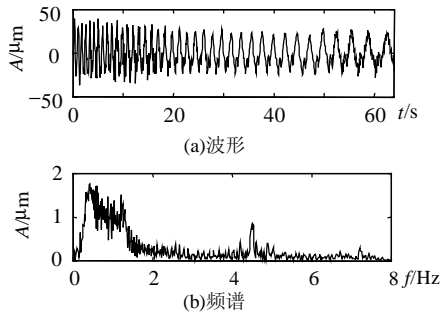


图 1 上导轴承摆度信号

Fig.1 Displacement signal at upper guide bearing

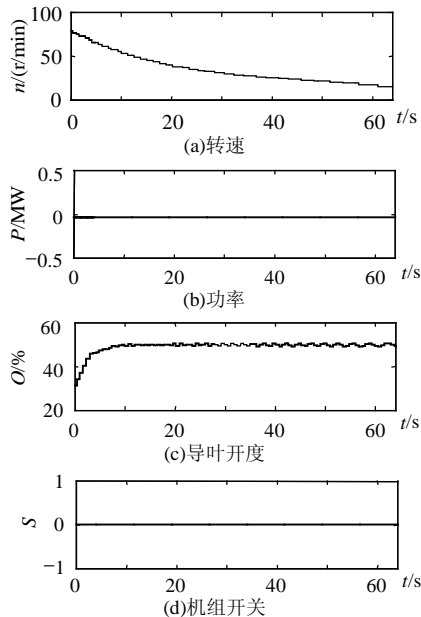


图 2 运行参数

Fig.2 Operation parameters

2.3 时频分析

由图 1 中信号的波形和频谱可见,信号的能量主要集中在 0~2Hz 的较低频率范围内,振动幅值和频率在停机过程中均表现出了明显的非平稳性,随着机组转速的降低,振动幅值逐渐减小,振动周期逐渐增大。虽然信号中有一些高频成分与周期性的简谐振动并存,但是由于转速的变化,根据时域波形或 Fourier 频谱难以识别它们与旋转频率之间的具体关系。

通过平稳小波包分解得到 16 个子频带信号分量,信号能量主要包含在前 3 个子频带分量 $x_1 \sim x_3$ 之中(如图 3 示),即集中在 0~1.5Hz 的频率范围内,而且呈现明显的调频调幅特征。

为了研究信号中包含的具体成分及其时变情

况,对所有子频带信号分量进行了归一化处理,以避免时频分布中较大幅值分量对较小幅值分量的抑制影响。根据归一化信号分量得到的 Hilbert 能量谱如图 4 示,可见,在不考虑各频率成分幅值的情况下,由该图可以清晰识别信号中的具体成分及其与转速之间的关系。机组旋转频率的时变情况(如虚线示)在图中得到了准确的反映,基本存在于整个停机过程中。信号的频率成分与旋转频率密切相关,出现了倍频成分:在 0~18s 的时间范围内,转速频率的 2~4 倍频成分并存;在 18~30s 的时间范围内,2 倍频成分消失,但是 3、4 倍频成分仍然存在;在 30~40s 的时间范围内,3 倍频成分消失,只存在 4 倍频成分;在 40~50s 的时间范围内,2、4 倍频成分并存;在 50~64s 时间范围内,只有 2 倍频成分存在。在停机过程的初期(0~20s 时间范围内)和末期(50~64s 时间范围内)还出现了一些与旋转频率无关的分布在 4~8Hz 频率范围内的信号成分,信号时域波形中在相应时间范围内出现的高频信号成分验证了该现象。

据平稳小波包分解得到的 Hilbert 能量谱如图 5 示。虽然旋转频率在信号中占主导地位,但是由于其变化范围较小(<1.5Hz),而且机组负荷不变(功率为 0),因此,旋转频率幅值变化并不明显。可见在停机过程初期(0~20s 时间范围)出现的较大振动幅值和末期(50~64s 时间范围)出现的高频分量主要由叠加在旋转频率成分之上的高频微幅成分引起。

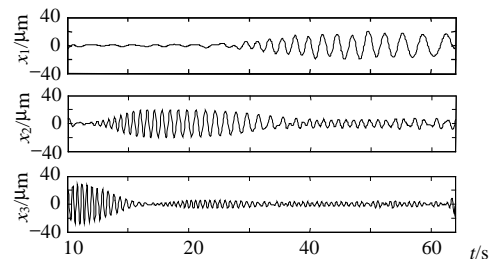


图 3 平稳小波包分解子频带信号分量
Fig.3 Sub-band signal components
from stationary wavelet packets decomposition

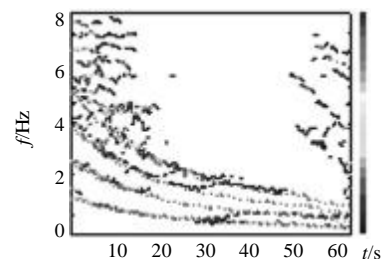


图 4 归一化平稳小波包分解 Hilbert 能量谱
Fig.4 Normalized Hilbert energy spectrum based on
stationary wavelet packets decomposition

作为对比，对信号进行了 Hilbert-Huang 变换。通过经验模式分解得到 7 个本质模式函数，其中幅值较大的第 1~4 个本质模式函数 $c_1 \sim c_4$ 如图 6 示。在大约 5 s 和 50 s 时刻，本质模式函数的振动幅值之间存在明显的间断连续特征。由于高频分量主要集中在第 1 个本质模式函数之中，而且在不同时刻的振动周期差别较大，因此瞬时频率波动现象将不可避免。

归一化的经验模式分解 Hilbert 能量谱如图 7 示。在停机过程的初期(0~18 s 的时间范围内)，3~7Hz 的频率范围内，瞬时频率波动幅度大，无法识别信号的具体频率或与旋转频率之间的关系。在整个停机过程中，0.2~1.8 Hz 的频率范围内，瞬时频率上下波动，逐步降低，其变化趋势基本反映了旋转频率的时变情况。信号中的倍频成分以及停机过程末期(50~64 s 时间范围内)的高频分量并没有识别出来。在整个停机过程中，0~0.2 Hz 的频率范围内，存在与旋转频率无关的低频分量，可能是在经验模式分解过程中产生的虚假分量。

根据经验模式分解得到的 Hilbert 能量谱如图 8 示，与图 5 相比，该图中信号时频分布的结构比较复杂，虽然根据主导信号成分的变化趋势能够基本识别旋转频率的时变情况，但是由于瞬时频率迹线的波动幅度较大，难以在任意时刻获得瞬时频率的准确信息，不利于实际应用。

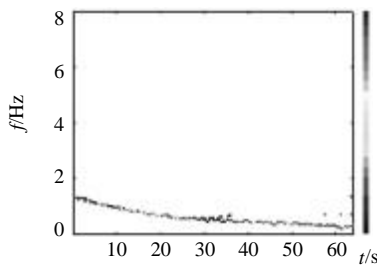


图 5 平稳小波包分解 Hilbert 能量谱
Fig.5 Hilbert energy spectrum based on stationary wavelet packets decomposition

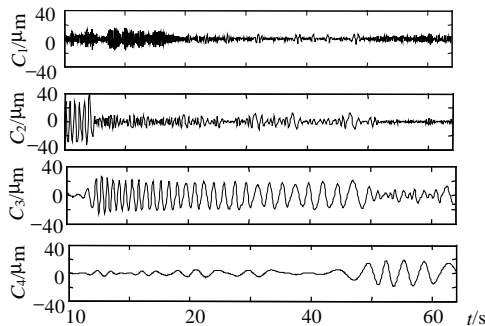


图 6 经验模式分解本质模式函数
Fig.6 Intrinsic mode functions from empirical mode decomposition

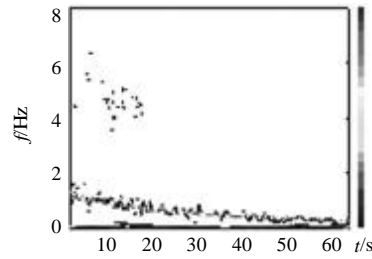


图 7 归一化经验模式分解 Hilbert 能量谱
Fig.7 Normalized Hilbert energy spectrum based on empirical mode decomposition

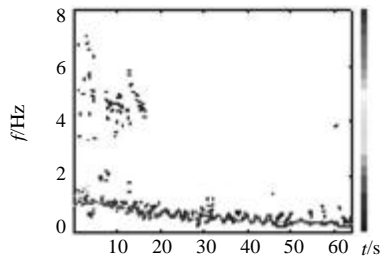
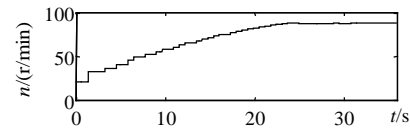
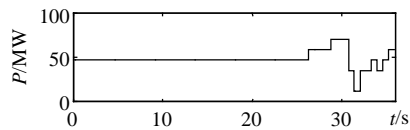


图 8 经验模式分解 Hilbert 能量谱
Fig.8 Hilbert spectrum based on empirical mode decomposition

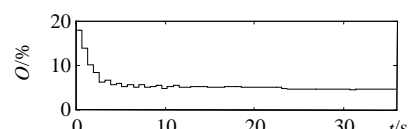
应用本文的方法对该水轮机的某个起动过程进行了分析，机组的运行参数如图 9(a)~(d)示，基于平稳小波包分解的 Hilbert 能量谱如图 10 示。可见，Hilbert 能量谱清晰地识别了信号中的频率成分及其时变情况，信号中的主导频率与机组转速频率吻合，而且存在于整个停机过程中。在大约 0~25 s 的时间范围内，虽然机组转速逐渐升高，但是由于其负荷不变(功率为 0)，因此转速频率幅值变化不大；在大约 25 s 时刻，机组开始励磁发电，转速频



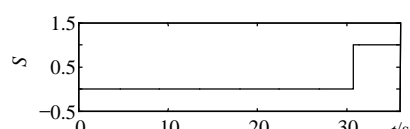
(a)转速



(b)功率



(c)导叶开度



(d)机组开关

图 9 运行参数
Fig.9 Operation parameters

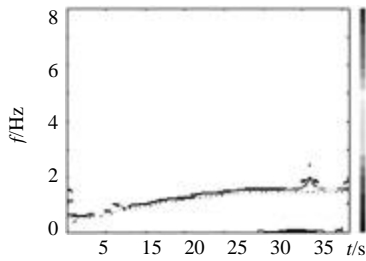


图10 平稳小波包分解 Hilbert 能量谱

Fig.10 Hilbert energy spectrum based on stationary wavelet packets decomposition

率的幅值也开始增大; 在大约 31 s 时刻, 机组切换至并网运行状态, 该事件在 Hilbert 能量谱中也得到了反映, 即信号的时频分布能量幅值出现了突变。

3 结论

(1) 平稳小波包变换没有传统小波包变换中的下采样过程, 不仅提高了频率分辨率, 保持了时间分辨率, 而且其中的零相位滤波保证了瞬时频率的精确计算, 应用该方法对信号进行窄带分解, 既避免了经验模式分解容易产生虚假分量以及高频本质模式函数瞬时频率存在大幅度波动的缺陷, 又保持了 Hilbert 谱良好的时频聚集能力, 改善了 Hilbert 谱对于高频宽带信号的频率分辨率, 使其更加适合复杂多分量的非平稳信号分析。

(2) 应用该方法对水轮机过渡过程中转子振动信号进行分析, 识别了信号的时频结构特征, 发现主轴振动响应主要由旋转频率及其谐频成分组成, 其中主导成分为转速频率。与 Hilbert-Huang 变换的对比验证了该方法在分析水轮机过渡过程非平稳振动信号方面的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Hammond J, White P. The analysis of non-stationary signals using time-frequency methods[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 190: 419-447.
- [2] 管霖, 吴国沛, 黄雯莹, 等. 小波变换在电力设备故障诊断中的应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(10): 46-49.
Guan Lin, Wu Guopei, Huang Wenying, et al. Study on the application of wavelet transform in fault diagnosis of electric devices [J]. *Proceedings of the CESS*, 2000, 20(10): 46-49(in Chinese).
- [3] 彭志科, 何永勇, 卢青, 等. 用小波时频分析方法研究发电机磁摩故障特征[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(5): 75-79.
Peng Zhike, He Yongyong, Lu Qing, et al. Using wavelet method to analyze fault features of rub rotor in generator[J]. *Proceedings of the CESS*, 2003, 23(5): 75-79(in Chinese).
- [4] 杨世锡, 胡劲松, 吴昭同, 等. 旋转机械振动信号基于 EMD 的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 102-107.
Yang Shixi, Hu Jingsong, Wu Zhaotong, et al. The comparison of

- vibration signal time-frequency analysis between EMD-based HT and WT method in rotating machinery[J]. *Proceedings of the CESS*, 2003, 23(6): 102-107(in Chinese).
- [5] 马孝江, 王凤利, 蔡悦, 等. 局域波时频分布在转子系统早期故障诊断中的应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 161-164.
Ma Xiaojiang, Wang Fengli, Cai Yue, et al. Application of local wave time-frequency distribution to early faults diagnosis of rotor system [J]. *Proceedings of the CESS*, 2004, 24(3): 161-164(in Chinese).
- [6] 冯志鹏, 褚福磊. 基于 Hilbert-Huang 变换的水轮机非平稳压力脉动信号分析[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(10): 111-115.
Feng Zhipeng, Chu Fulei. Transient hydraulic pressure fluctuation signal analysis of hydroturbine based on Hilbert-Huang transform [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(10): 111-115(in Chinese).
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1998, 454: 903-995.
- [8] Huang N E, Wu M C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 2003, 459: 2317-2345.
- [9] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 2004, 460: 1597-1611.
- [10] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 112-114.
- [11] Olhede S, Walden A T. The Hilbert spectrum via wavelet projections[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 2004, 460: 955-975.
- [12] Olhede S, Walden A T. A generalized demodulation approach to time-frequency projections for multicomponent signals [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 2005, 461: 2159-2179.
- [13] Walden A T, Contreras Cristan A. The phase-corrected undecimated discrete wavelet packet transform and its application to interpreting the timing of events[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1998, 454: 2243-2266.
- [14] Nielsen M. On the construction and frequency localization of finite orthogonal quadrature filters[J]. *Journal of Approximation Theory*, 2001, 108: 36-52.
- [15] Ohashi H. *Vibration and oscillation of hydraulic machinery* [M]. Aldershot: Avebury Technical, 1991.
- [16] 马震岳, 董毓新. *水轮发电机组动力学* [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.

收稿日期: 2006-04-14。

作者简介:

冯志鹏(1973—), 男, 博士后, 讲师, 主要研究机械动力学, 故障诊断, 信号处理, 计算智能, fengzhp@mail.tsinghua.edu.cn;

李学军(1969—), 男, 博士后, 教授, 主要研究机械动力学, 故障诊断;

褚福磊(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究旋转机械故障诊断, 转子动力学, 非线性振动, 振动控制。

(责任编辑 云爱霞)