

基于 Hilbert-Huang 变换的 水轮机非平稳压力脉动信号分析

冯志鹏, 褚福磊

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京市海淀区 100084)

TRANSIENT HYDRAULIC PRESSURE FLUCTUATION SIGNAL ANALYSIS OF HYDROTURBINE BASED ON HILBERT-HUANG TRANSFORM

FENG Zhi-peng, CHU Fu-lei

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University,
Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Hydraulic pressure fluctuation is inevitable in the operation of hydroturbines. It features nonstationarity, especially in the transients. With the analysis of hydraulic pressure fluctuation in draft tube during the starting process as an example, it attempts to find its time variation with the operation conditions. In order to alleviate the computational burden and improve the resolution of time frequency analysis, the on-site acquired signal is down-sampled via multi-rate filter firstly. Then, it is analyzed based on the nonlinear and nonstationary time series analysis method-Hilbert-Huang transform, and the frequency components and their time variation with the operation conditions are identified clearly. From the analysis result, it can be concluded that the hydraulic pressure fluctuation features low frequency and strong nonstationarity. The amplitude and frequency are time varying, and closely related with the operation conditions, but not proportional to the speed. Compared with the other time-frequency analysis methods, such as the short time Fourier transform, wavelet transform, and Wigner-Ville distribution, it is demonstrated that the Hilbert-Huang transform possesses high time-frequency resolution and applicability to analysis of nonstationary low-frequency hydraulic pressure fluctuation signal.

KEY WORDS: Hydroturbine; Hilbert-Huang Transform; Nonstationary Signal; Time-frequency Analysis; Hydraulic Pressure fluctuation; Transients

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。

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

摘要: 水力压力脉动在水轮机的运行过程中是不可避免的现象, 而且在过渡过程中具有较强的非平稳性。以机组启动过程中的非平稳尾水管水力压力脉动信号分析为例, 研究压力脉动在过渡过程中的时变特征。为了降低时频分析的计算量, 提高时频分辨率, 首先应用采样率转换技术对现场测试信号进行预处理, 然后应用 Hilbert-Huang 变换进行时频分析, 识别确定信号中的频率成分及其相对机组运行条件的变化情况。分析结果表明: 水轮机尾水管中的水力压力脉动以低频成分为主, 其时变性与运行条件密切相关, 但是在过渡过程中, 其频率成分相对时间的变化情况与机组转速变化不成比例; 与其它时频分析方法相比, Hilbert-Huang 变换时频分辨率高, 适合分析非平稳低频水力压力脉动信号。

关键词: 水轮机; Hilbert-Huang 变换; 非平稳信号; 时频分析; 压力脉动; 过渡过程

1 引言

水力是水轮机的直接动力源, 水力压力脉动在水轮机的运行过程中是不可避免的现象, 是导致机组振动的主要原因之一, 在一定条件下甚至引起结构的固有振动, 严重影响机组的稳定运行和过流部件的使用寿命, 因此, 对水轮机的水力压力脉动进行监测分析, 研究其变化规律, 对于机组的运行维护具有重要意义^[1-3]。

水力压力脉动信号一般是非平稳的, 特别是在过渡过程中, 其时变性更强, 应该采用时频分析方法进行研究。大多数时频变换使用的基函数固定不变, 应用矩形网格铺砌时频平面, 难以准确匹配信号的时频结构, 而且时频分辨率受 Heisenberg 不确

定性原理的限制^[4-5]。Hilbert-Huang变换将通过经验模式分解自适应生成的本质模式函数作为基函数,对于时频平面的铺砌方式没有任何限制,能够更加准确地描述信号幅值和频率的时变特征,而且强调信号的局部特征,时频分辨率高^[6-14]。作者应用该方法对水轮机过渡过程中尾水管水力压力脉动的现场测试数据进行分析,提取信号幅值和频率的时变特征,研究水轮机水力压力脉动规律,并将分析结果与短时Fourier变换、小波变换和Wigner-Ville分布等其它时频分析方法进行了对比。

2 Hilbert-Huang 变换

2.1 概述

Hilbert-Huang变换是美国工程院院士Norden E. Huang在1998年提出的一种处理非线性非平稳时间序列的分析方法,该方法主要由经验模式分解(EMD)和Hilbert谱组成^[6-8]。EMD根据信号的局部变化时间尺度,自适应地将其分解为反映信号波动模式的若干本质模式函数(IMF),IMF没有固定的表达式,而是根据信号的波动情况自适应确定,适合计算瞬时频率。对EMD分解结果进行Hilbert变换,由IMF计算瞬时频率,得到表示信号幅值-时间-频率分布的Hilbert谱。Hilbert-Huang变换算法效率高,具有良好的局部时频聚集能力和自适应性。目前,该方法已经在地球物理、生物医学、土木工程、机械工程和多种领域得到了研究和应用^[6-14]。

2.2 瞬时频率

非平稳信号的幅值和频率一般相对时间变化,在Hilbert-Huang变换中,瞬时频率通过Hilbert变换由局部相位微分方法定义。

对于实际信号 $x(t)$,其解析信号

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)\exp[j\theta(t)] \quad (1)$$

式中 $y(t)$ 为 $x(t)$ 的Hilbert变换; $a(t)$ 为瞬时幅值; $\theta(t)$ 为瞬时相位。对于单分量信号,瞬时频率定义为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

2.3 本质模式函数

实际信号一般为复杂的多分量信号,不能直接根据式(2)计算瞬时频率。IMF适合计算瞬时频率,满足以下条件:

(1) 在整个数据集中,极值点和过零点数目相等或至多相差1个。

(2) 在任意时刻,由局部极大值和局部极小

值定义的上下包络的均值为0。

条件(1)类似于平稳Gauss过程的传统窄带要求;条件(2)将传统的全局性要求修改为局部性要求,避免了非对称波形导致的瞬时频率波动。

2.4 经验模式分解

EMD根据信号的局部时间尺度,自适应地筛选生成IMF,将信号展开为若干IMF和的形式,分解过程是完备的,自适应的,而且在实际应用中几乎是正交的。

对于实际信号 $x(t)$,EMD算法的具体步骤如下:

(1) 初始化:令 $r_0(t) = x(t)$, $i = 1$

(2) 筛选第 i 个IMF

1) 初始化:令 $j = 0$, $h_{ij}(t) = r_{i-1}(t)$ 。

2) 确定 $h_{ij}(t)$ 的局部极大值和局部极小值。

3) 应用三次样条进行插值,分别由局部极大值和局部极小值构造 $h_{ij}(t)$ 的上下包络。

4) 计算上下包络的瞬时均值 $m_{ij}(t)$ 。

5) 令 $h_{ij}(t) = h_{ij}(t) - m_{ij}(t)$ 。

6) 若 $h_{ij}(t)$ 满足IMF筛选终止条件,则令第 i 个IMF $c_i(t) = h_{ij}(t)$,否则,令 $j = j + 1$,返回步骤2)。

(3) 令 $r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t)$ 。

(4) 若 $r_i(t)$ 满足EMD终止条件,则 $r_i(t)$ 作为信号残余,分解过程结束,否则, $i = i + 1$,返回步骤(2)。

根据EMD结果,信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

即信号分解为 n 个IMF $c_i(t)$ 和1个残余 $r_n(t)$,其中,残余 $r_n(t)$ 可能是信号中的趋势项或常数项。若剔除残余 $r_n(t)$,则重构信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (4)$$

2.5 Hilbert 谱

Hilbert谱是信号的幅值-频率-时间的三维表示,能够反映非平稳信号幅值和频率的时变特征。对式(4)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谱

$$H(t, f) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp[j \int 2\pi f_i(t) dt] \right\} \quad (5)$$

3 水力压力脉动信号分析

3.1 概述

水轮机的水力压力脉动一般源于导叶前后的

动力绕流、Karman 涡列和尾水管涡带，在导叶出口、蜗壳进口和尾水管等位置表现明显，其中，由尾水管涡带引起的水力压力脉动虽然频率较低（一般为转速频率的 1/2~1/6），而且只有在特定条件下才会出现，但是严重时将破坏机组的运行稳定性，因此，尾水管水力压力脉动是水轮机运行过程中需要重点监测的内容之一^[1-2]。

水轮机水力压力脉动具有较强的非平稳性，特别是在过渡过程中，由于机组的运行条件，如转速、功率和桨叶开度等变化幅度大，因此导致机组响应信号具有很强的时变性。EMD 在提取信号低频分量方面非常有效，而且 Hilbert 谱强调信号的局部性质，具有良好的时频分辨率，因此，Hilbert-Huang 变换适合分析低频非平稳的水力压力脉动信号。鉴于上述考虑，笔者应用该方法对水轮机过渡过程中的尾水管水力压力脉动信号进行了分析，并与其它时频分析方法如短时 Fourier 变换、小波变换和 Wigner-Ville 分布等进行了对比。

3.2 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，其中水轮机的额定转速为 88 r/min（1.467 Hz），额定功率 80 MW，工作水头约 26 m。

在机组起动过程中，现场测试的信号采样频率为 400 Hz，信号时间长度为 35.84s（共 14336 点数据）。尾水管水力压力脉动的时域波形、频谱以及桨叶开度、转速、功率和机组开关相对于时间的变化情况分别如图 1、图 2 所示。

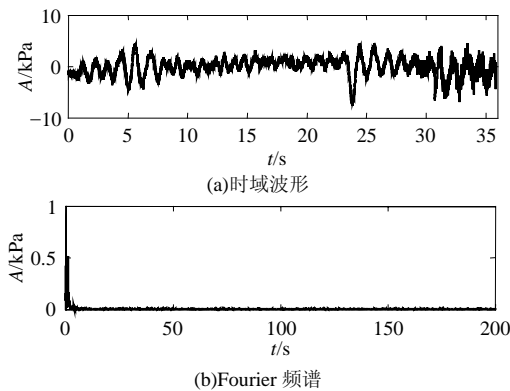


图 1 压力脉动信号及频谱

Fig. 1 Pressure fluctuation signal and its spectrum

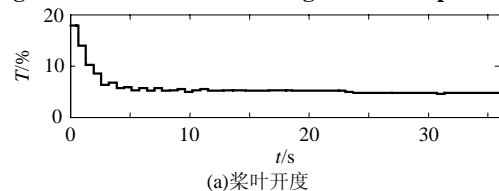


图 2 机组运行参数

Fig. 2 Operation parameters

3.3 信号预处理

水轮机的振动是水力-机械-电磁三者相互耦合作用的结果，响应信号的频率成分复杂，分布频带宽，既有中高频的机械振动和电磁作用成分，也有低频的水力脉动成分，因此，机组监测系统的采样频率较高，以满足具有不同频率分布性质的信号分析的要求。但是，对于尾水管中的低频水力压力脉动而言，过高的采样频率将导致信号数据量大，包含冗余信息，结果使时频分析的计算量大，不利于分析结果的可视化。为解决该问题，作者应用采样率转换方法对信号进行重采样，以降低采样频率，这样既能够满足分析低频水力压力脉动信号的频带要求，又可以减少数据量，便于后续计算和分析。

采样率转换的基本原理为：对于已知信号，若希望将其采样频率转换为原来的 L/M 倍，则首先应该对信号进行 L 倍的插值，即每相邻两个数据之间补 L 个 0，然后进行低通滤波处理，以去除由信号插值造成的频域冗余映像，避免后续信号抽取时发生频率混叠，最后对信号进行 M 倍的抽取，即每隔 M 个数据抽取一个数据。

由于 Hilbert-Huang 变换中的瞬时频率由局部相位微分方法定义，因此，要求信号预处理应该尽量保持信号的相位信息，本文中，采样率转换中的低通滤波使用零相位数字滤波器。

经过采样率转换预处理之后，采样频率降低为 $400/14=28.571$ Hz，数据量减少为 1024 点，处理后信号的时域波形和频谱如图 3 示。

3.4 时频分析

水轮机水力压力脉动的产生原因复杂，特别是

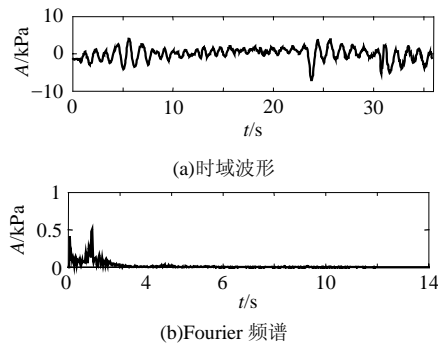


图3 采样率转换后压力脉动信号及频谱

Fig. 3 Multi-rate filtered signal and its spectrum

在过渡过程中,由于机组运行条件变化幅度大,必然会出现非线性和非平稳现象。Hilbert-Huang变换是分析非线性非平稳时间序列的有效方法,为研究水轮机水力压力脉动提供了比较理想的分析工具。

经过采样率转换预处理之后,水轮机尾水管水力压力脉动信号的EMD分解结果如图4所示(图中,从上至下依次为: x 为原始信号, $c_1\sim c_5$ 为 $IMF_1\sim IMF_5$, r_5 为残余)。可见,信号的主要能量包含在第一个IMF中,从全局的角度分析,其波动周期约为1s,对应频谱上的峰值频率;从局部的角度分析,在0~10s和20~36s的时间范围内,存在明显的调幅过程。

信号的Hilbert谱如图5示,其中,右侧是颜色参考坐标,以下同。由该图可以分析水力压力脉动幅值和频率的时变情况。就脉动幅值而言:在0~10s的时间范围内,转速逐渐增大,桨叶开度逐渐减小,而其它参数保持不变,脉动幅值逐渐增大;在10~24s的时间范围内,只有转速继续增大,而其它参数均保持稳定,脉动幅值较小;在大约24s时,转速达到额定值,突然出现较大的脉动幅值;在24~30s的时间范围内,桨叶开度和转速稳定在额定值,机组功率逐渐增大,但并未切换至发电状态,脉动幅值趋于减小;在大约30s时,机组切换至发电状态,其后,脉动幅值较大,而且基本趋于稳定。就脉动频率而言:围绕1Hz上下波动的频率成分基本存在于整个机组起动过程中;在大约5s时,桨叶开度达到了额定值,脉动信号中出现了小于1Hz的频率成分;在大约20s时,桨叶开度和转速均达到了额定值,并趋于稳定,低频脉动频率成分变得更为明显;在大约30s时,机组切换至发电状态,功率出现波动,该现象在Hilbert谱中也有清晰反映,即约1Hz的频率及次高频率存在明显的跳跃。由上述分析可见:水轮机尾水管中的水力压力脉动以低频成分为主,其幅值和频率的时变性与运行条件

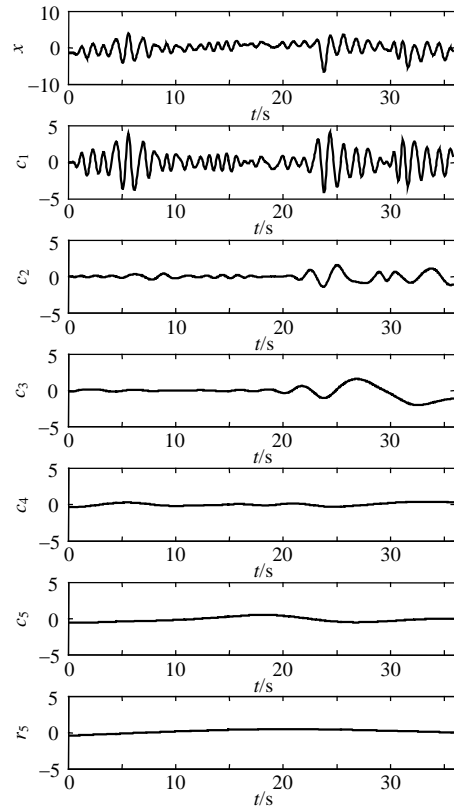


图4 EMD结果

Fig. 4 EMD result

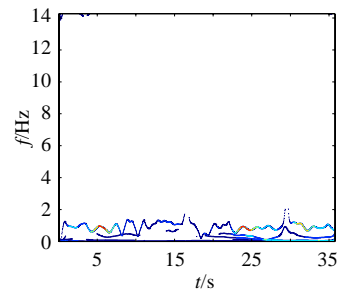


图5 Hilbert谱

Fig. 5 Hilbert spectrum

密切相关,但是在过渡过程中,其频率成分相对时间的变化情况与机组转速变化不成比例,该特点与旋转机械的振动情况存在明显差异;Hilbert谱的时频分辨率高,能够比较准确地识别信号中的频率成分,确定事件出现的具体时间。

为了对比Hilbert-Huang变换和其它时频分析方法之间的性能,作者还应用短时Fourier变换、小波变换和Wigner-Ville分布等方法对尾水管水力压力脉动信号进行了分析,结果分别如图6~8示。可见,短时Fourier变换谱图比较准确地反映了信号的时频分布情况,但是相对Hilbert谱而言,其分辨率较低;小波尺度谱图对于低频分量的频率分辨率较高,但是时间分辨率较低,对于低频的水力压

力脉动而言，该方法难以确定事件出现的具体时间；Wigner-Ville 分布虽然时频分辨率较高，但是存在比较严重的交叉项干扰，不适合实际应用。

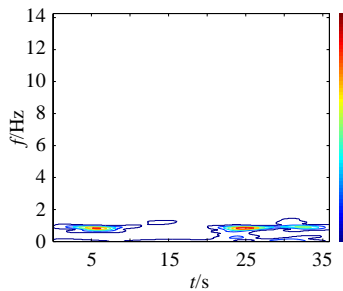


图 6 短时 Fourier 变换谱图

Fig. 6 Short time Fourier transform spectrogram

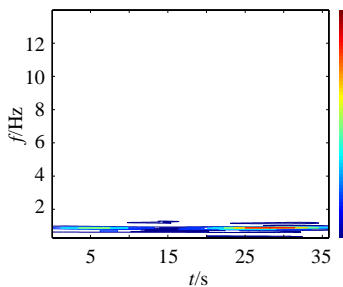


图 7 小波变换尺度谱图

Fig. 7 Wavelet transform scalogram

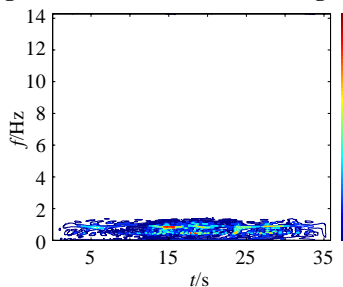


图 8 Wigner-Ville 分布

Fig. 8 Wigner-Ville distribution

4 结论

水轮机尾水管中的水力压力脉动具有频率低，时变性强等特点，而且与运行条件密切相关，但是在过渡过程中，其频率成分相对时间的变化关系与机组转速变化不成比例，该情况与旋转机械的机械振动特点存在明显差异。

Hilbert-Huang 变换的时频分辨率高，能够比较准确地识别信号的频率成分及其时变情况，确定事件出现的具体时间，适合于分析低频非平稳的水轮机水力压力脉动信号。

参考文献

[1] Ohashi H. Vibration and oscillation of hydraulic machinery[M]. Aldershot: Avebury Technical, 1991.
[2] 张伟, 吴玉林, 陈乃祥, 等. 蓄能机组压力脉动测试研究[J]. 水

力发电学报, 2001, (72): 72-78.

- Zhang Wei, Wu Yulin, Chen Naixiang *et al.* Research on pressure pulse measurement for energy storage units[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, (72): 72-78.
- [3] 陈铁华, 陈启卷. 模糊聚类分析在水电机组振动故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 43-47.
Chen Tiehua, Chen Qijuan. Fuzzy clustering analysis based vibration fault diagnosis of hydroelectric generating unit [J]. Proceedings of the CESS, 2002, 22(3): 43-47.
- [4] 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.* Zhou Hong. Study on the application of wavelet transform in fault diagnosis of electric devices[J]. Proceedings of the CESS, 2000, 20(10): 46-49.
- [5] 彭志科, 何永勇, 卢青, 等. 用小波时频分析方法研究发电机磁磨故障特征[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.
- [6] 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.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R *et al.* A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [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] Gloersen P, Huang N E. Comparison of interannual intrinsic modes in hemispheric sea ice covers and other geophysical parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1062-1074.
- [12] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 233-238.
Zhong Youming, Qin Shuren, Tang Baoping. Study on a new transform method for vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 233-238.
- [13] 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.
- [14] 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.

收稿日期: 2005-03-15.

作者简介:

冯志鹏(1973-), 男, 博士后, 主要研究机械动力学, 故障诊断, 信号处理, 计算智能;

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。