

# 基于瞬时频率估计的瀑布图分析

郭瑜, 罗德扬

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 提出了基于瞬时频率估计的瀑布图实现的新方法, 其优点: 简化了瀑布图实现对硬件的要求; 用软件的方法实现了旋转机械非平稳振动信号的瀑布图分析. 实际测试试验验证了本方法的正确性. 本方法实现了对旋转机械非平稳振动信号中参考轴瞬时转速的估计算法, 为瀑布图的实际应用提供了一条新途径, 是对原有瀑布图分析技术的有力补充.

**关键词:** 瞬时频率估计; 瀑布图; 旋转机械; 机械振动信号

**中图分类号:** TH115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)03 - 0042 - 04

## Waterfall Analysis Based on Instantaneous Frequency Estimation

GUO Yu, LUO De-yang

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** A new method of waterfall analysis based on Instantaneous Frequency Estimation (IFE) is proposed. Compared with traditional methods of waterfall analysis, this method has such outstanding advantages as simplified hardware and only software dependent for waterfall analysis. The validity of the method is testified through simulations and actual tests. The algorithms of IFE about the instantaneous speed of reference shaft by non-stationary vibration signal of rotating machinery are programmed. This method provides a new way to perform waterfall analysis, and is an effective supplement to traditional waterfall analysis.

**Key words:** Instantaneous Frequency Estimation; waterfall analysis; rotating machinery; mechanical vibration signal

## 0 引言

旋转机械的故障诊断中, 对升、降速阶段的分析有特别的意义, 因为在这些模式下更容易发现通常难以发现的系统缺陷. 在这样的背景下产生了专门针对旋转机械升、降速阶段非平稳振动信号的分析技术, 瀑布图分析就是其中的一种. 瀑布图又称为谱阵图, 它是将振动信号的功率谱或幅值谱随转速的变化叠置而成的三维谱图, 显示振动信号中的各种谐波成分随转速变化的情况<sup>[1]</sup>, 是目前动态信号分析仪器所具有的经典非平稳信号分析功能, 在工程实际中被广泛使用.

目前, 瀑布图在具体实现上除了需要常规频谱测量的振动传感器外, 还需要专门的转速传感器提供参考轴的转速信息, 这使得瀑布图分析的测量还是较为繁琐, 特别在不方便安装转速传感器的场合.

本文提出的基于瞬时频率估计 (Instantaneous Frequency Estimation, 简称为 IFE) 的瀑布图分析方法简化了瀑布图分析对硬件的要求; 用软件的方法实现了转速信号的提取, 是对原有技术的有力补充.

## 1 瞬时频率估计

### 1.1 瞬时频率

瞬时频率 (IF) 是最直观的概念之一, 但也是一个颇具争议的话题, 在相关文献<sup>[2~4]</sup>中有深入、详尽的讨论, 在此只作简单的介绍.

收稿日期: 2004 - 11 - 23. 基金项目: 云南省自然科学基金资助项目 (项目编号: 2004E0011Q).

第一作者简介: 郭瑜 (1971 ~), 男, 博士, 副教授. 主要研究方向: 测试技术、虚拟仪器技术、数字信号处理.

E - mail: kmgary@163.com

IF 比较明确的数学定义是基于 Gabor 提出的解析信号, 以及后来在此基础上由 Ville 给出的, 即若实信号表示为  $s(t) = a(t) \cdot \cos\phi(t)$ , 则 IF 被定义为其解析信号  $z(t)$  的相位对时间的导数<sup>[2]</sup>, 即:

$$f_i(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \arg(z(t)) \quad (1)$$

式中下标  $i$  表示瞬时。

另一种从时频分布——TFD (Time - Frequency Distributions) 的角度的定义是: 一个信号在时刻  $t_0$  的 IF 为在该时刻存在频率的加权平均<sup>[4,5]</sup>, 也称为 TFD 的一阶矩, 即

$$f_i(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f P_i(t, f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_i(t, f) df} \quad (2)$$

式中  $P_i(t, f)$  —TFD 估计。

## 1.2 瞬时频率估计

近年来, 在多种文献中<sup>[2~5]</sup> 论述了有关瞬时频率估计 (IFE) 的研究成果, 但这些方法大多只适用于单分量信号, 而只有基于时频分布 (TFD) 的 IFE 方法可以在一定条件下应用于多分量信号<sup>[3,4]</sup>, 此优点使其更适合工程实际需要。

通过 TFD 得到 IFE 的方法主要有两种: 通过式 (2) 直接计算; 由 TFD 的峰值得到 IFE<sup>[3]</sup>。后者最直观, 同时实现上也简单有效。在本方法中采用了后者, 理由在于这种方法最适合多分量信号的 IFE 用 TFD 峰值获得 IFE 的方法<sup>[3]</sup> 很多。在试验中采用了最容易理解的短时傅里叶变换——STFT。

本文提出的方法中需要获得的是参考轴转速所对应的 IFE 值, 在此声明, 在以下叙述中, 若没专门指出, 都指参考轴 (如主轴) 转速所对应的 IFE 值。

## 1.3 基于短时傅里叶变换谱峰值估计的 IFE

信号  $x(t)$

$$STFT_x^{(t)}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(\tau) * (\tau - t)] \exp(-j2\pi f \tau) d\tau \quad (3)$$

式中:  $*$  —复数共轭,  $(\tau - t)$  —时间宽度很小的时窗。

信号  $x(\tau)$  乘上一个以  $t$  为分布中心的“分析时窗  $(\tau - t)$ ”所作的傅里叶变换。由于乘以一个相当短的时窗  $(\tau - t)$ , 等价于取出信号在分析点  $\tau = t$  附近的一个切片, 所以  $STFT_x^{(t)}(t, f)$  可视为信号  $x(\tau)$  在“分析时间  $t$ ”时刻处的“局部频谱”<sup>[6]</sup>。STFT 频谱 (SPEC), 即 STFT 的时间 - 频率能量分布 (瞬时功率谱密度) 定义为  $STFT(t, f)$  模值的平方, 即

$$SPEC(t, f) = |STFT(t, f)|^2 \quad (4)$$

由式 (3)、(4) 不难得到 STFT 及其频谱的数字算法

$$STFT(n, k) = \sum_{i=0}^{N-1} [x(i) * (i - n)] \exp\left[-j\frac{2\pi k i}{N}\right] \quad (5)$$

$$SPEC(n, k) = |STFT(n, k)|^2 \quad (6)$$

式中:  $N$  —FFT 长度,  $n, k$  —STFT 频谱所表示时频面中的离散时间和频率网格“节点”。

应用中, 用 FFT 实现式 (5) 的快速算法。

## 2 基于瞬时频率估计的瀑布图分析

### 2.1 问题的提出

如前所述, 在瀑布图的实现上, 需要获得参考轴的瞬时转速—— $n_i(t)$ , 即转速  $n$  和时间  $t$  的函数关系, 下标  $i$  表示瞬时, 这启发我们想到信号时频分析技术中经常用到的物理量——瞬时频率  $f_i(t)$ , 显然参考轴转速与其对应的瞬时频率, 满足转速与频率的对应关系

$$n_i(t) = 60 \times f_i(t) \quad (7)$$

由此想到若能获得  $f_i(t)$ , 也就可得到  $n_i(t)$ , 进而获得参考转速。

## 2.2 基于 IFE 的瀑布图实现过程

本方法的实现过程如图 1 所示:由传感器拾取被测对象的振动信号,对该振动信号作时频分析获得信号的时频谱图,并用峰值搜索算法获得参考轴瞬时频率估计值(转速),再用获得的参考轴转速信号对原信号进行截取,获得各转速段的振动信号,最后用快速傅里叶变换(FFT)算法获得信号的瀑布图。

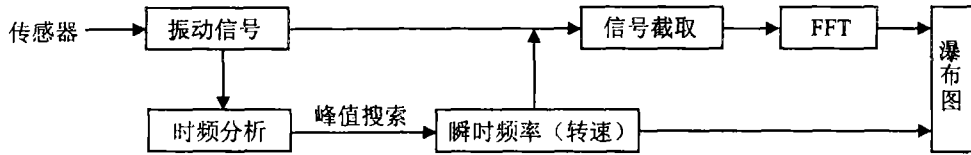


图1 基于IFE的瀑布图实现示意

Fig.1 Schematic of waterfall analysis based on instantaneous frequency estimation

由图 1 可看出,基于 IFE 的瀑布图分析只需直接通过对振动信号自身的时频分布的处理即可进行,与传统的瀑布图实现中需要同时提供振动信号和转速信号相比,节省了转速计等硬件和相关的安装需求。

## 2.3 峰值搜索

图 2a 为一实际测试获得的某发动机升速阶段噪声测试信号的 STFT 时频谱图,其中可以清晰地看出各阶分量的瞬时频率随时间的变化情况。

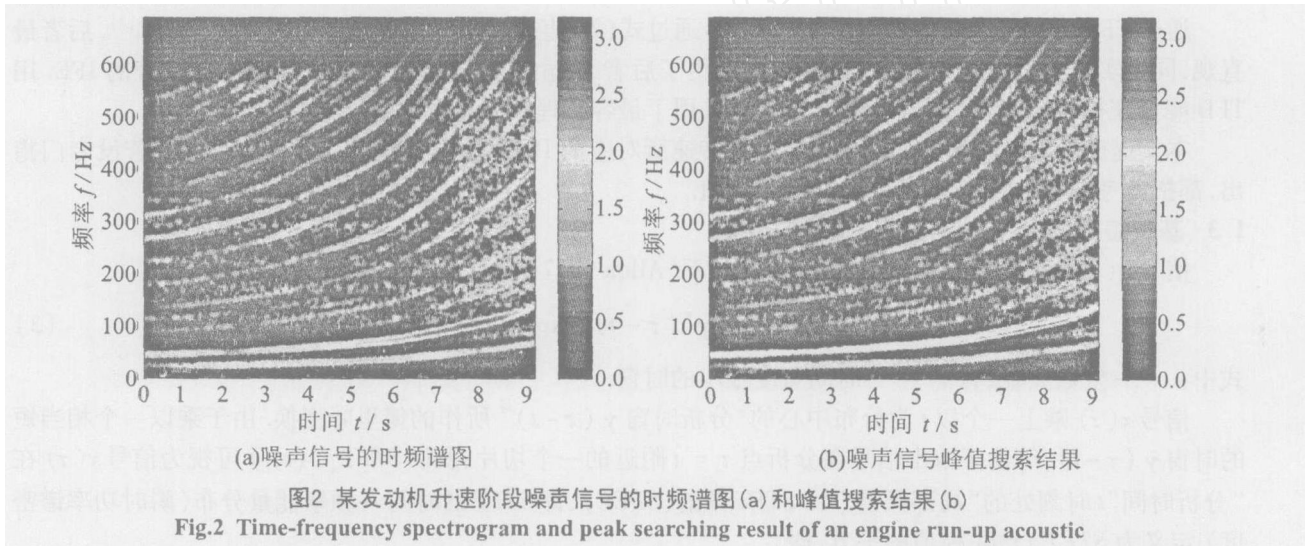


图2 某发动机升速阶段噪声信号的时频谱图(a)和峰值搜索结果(b)

Fig.2 Time-frequency spectrogram and peak searching result of an engine run-up acoustic

峰值搜索时,由测试人员在时频谱图中选定某一突出分量谱峰附近的一点,搜索局部极大值作为峰值搜索起始点.算法中采用下式

$$\begin{cases} SPEC(n_1, k_1) = \arg \max_{k_0-p < k < k_0+p} \{SPEC(n_1, k)\} \\ SPEC(n_i, k_i) = \arg \max_{\substack{n=n_{i-1} \\ k_{i-1}-p < k < k_{i-1}+p}} \{SPEC(n, k)\} \end{cases} \quad n_i = n_1 \pm 1, n_1 \pm 2, \dots, n_i \quad (0, N-1) \quad (8)$$

式中:  $\arg \max$ —取最大值的参数(在此为  $k$ );  $p$ —设定的搜索范围;  $(n_1, k_1)$ —时频面上由起始点确定的第一个峰值坐标。

起始点坐标  $(n_1, k_0)$  即为测试人员在时频谱图中的选定点.搜索完成后获得的峰值坐标点  $(n_i, k_i)$  即表示了  $n_i$  时刻的 IFE 值  $k_i$ , 记为  $f_i(n)$ 。

峰值搜索的基本步骤如下:

- 1) 用峰值搜索算法获得参考轴某阶突出分量信号的离散瞬时频率  $f_i^q(n)$  ( $q$  为阶次);
- 2) 利用公式(9)计算参考轴对应的离散瞬时频率  $f_i^1(n)$

$$f_i^1(n) = \frac{f_i^q(n)}{q} \quad (9)$$

式中:  $f_i^j(n)$ —第  $q$  阶分量的离散瞬时频率;  $q$ —选定搜索分量的阶次.

本例中  $q = 2$ , 若  $q = 1$ , 则表示参考轴的瞬时频率. 以此对应的伪转速信号通过分段最小二乘拟合多项式拟合的方法获得连续瞬时频率  $f_i^j(n)$ , 进而得到其瞬时转速  $n_i(t)$ .

有关本方法的详细内容请参阅相关文献<sup>[7]</sup>. 图 2(b) 为以 2 分量进行的峰值搜索结果 (对比图 2(a), 见图 2(b) 中沿 2 分量的亮点).

#### 2.4 基于 IFE 的瀑布图分析适用范围

对基于峰值搜索的 IFE 法, 在测试转速下, 当信号某阶分量 (参考转速的倍数) 在时频面上可以和其他信号成分分开时, 基于 IFE 的瀑布图分析可取得很好的测试结果.

### 3 实际测试试验

为验证本方法的正确性, 进行了多种仿真和实际测试试验. 以上面所提到的发动机升速阶段的噪声测试信号为例简述如下: 测试对象为某直列四缸发动机, 测试设备采用了 B&K 4165 型传声器 (灵敏度为 49.0 mV/Pa), B&K 2203 型精密声级计, NI 公司的 PCI-6024E 采集卡和 BNC2120 端子板, 计算机及所研发的基于 IFE 的瀑布图软件. 测试系统方框图如图 3 所示.

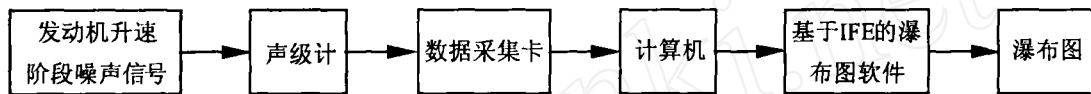


图3 测试系统方框图

Fig. 3 Block diagram of test system

用本方法得到的该发动机 300 ~ 3 000 r/min 下的瀑布图结果如图 4 所示. 图中清楚地反映出信号中各分量强度随转速的变化.

### 4 结语

理论和实际测试证明, 本方法在其适用条件下可取代传统的瀑布图分析技术, 是对传统技术的有力补充. 由于本方法在转速获取上完全由软件算法实现, 节省了对传统方法中转速计等硬件装置的依赖, 同时也不存在对这些硬件的安装要求, 有较好的应用前景.

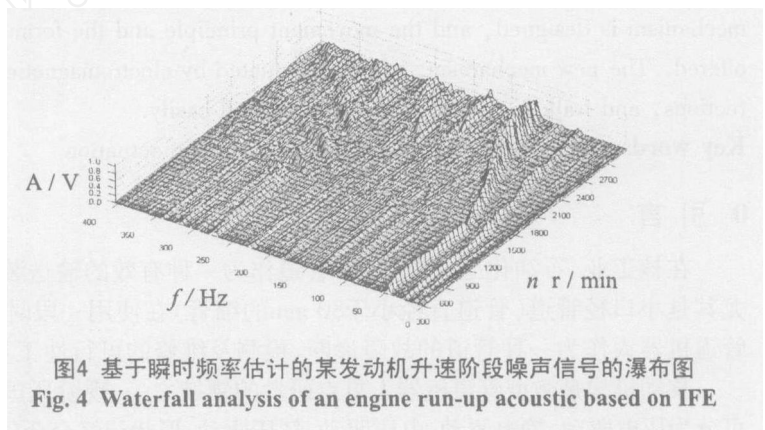


图4 基于瞬时频率估计的某发动机升速阶段噪声信号的瀑布图  
Fig. 4 Waterfall analysis of an engine run-up acoustic based on IFE

#### 参考文献:

- [1] 廖伯瑜. 机械故障诊断基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 74 ~ 78
- [2] Boashash B. Interpreting and estimating the instantaneous frequency of a signal - Part 1: Fundamentals [J]. Proc IEEE, 1992, 80: 520 ~ 538
- [3] Boashash B. Interpreting and estimating the instantaneous frequency of a signal - Part 2: Algorithms and Applications [J]. Proc IEEE, 1992, 80: 540 ~ 568
- [4] L. 科恩. 时-频分析: 理论与应用 [M]. 白宪居译. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. 98 ~ 100
- [5] Emresoy M K, El-Jaroudi A. Iterative instantaneous frequency estimation and adaptive matched spectrogram [J]. Signal Processing, 1998, 64: 157 ~ 165.
- [6] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 20 ~ 26
- [7] 郭瑜, 秦树人. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪 [J]. 中国机械工程学报, 2003, 39(3): 32 ~ 36