

文章编号:1007-6492(2001)03-0059-03

# 数字信号的包络分析方法

杨金才<sup>1</sup>, 梁川<sup>1</sup>, 盛兆顺<sup>2</sup>, 董辛旻<sup>1</sup>, 李金光<sup>1</sup>

(1. 郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 中原油田华大利精细化工厂, 河南 濮阳 457061)

**摘要:** 研究了在往复机械和振动机械故障诊断中非常有效的包络分析, 分析了描绘包络线的过程, 让计算机能够自动抓取包络线的特征点, 在此基础上, 经过去均值、光滑不等距插值等处理逐阶分解拟合信号, 能很好地提取各阶包络信号, 为故障诊断提供了一种有力的分析工具. 经过对模拟信号和工程信号的分析, 证明本文方法是有效可行的.

**关键词:** 信号处理; 包络分析; 故障诊断

**中图分类号:** TH 17 **文献标识码:** A

## 0 引言

包络线分析是工程信号分析中较常用的一种方法, 在往复机械故障诊断和振动机械信号分析中有很重要的作用. 在工程实际中, 从设备中检测得到的信号波形有些虽然比较复杂, 但其包络线有一定的规律或一定的趋势, 在此情况下, 利用包络线分析方法可以对该波形高频成分的低频特征或低频率事件作做详细的分析. 例如有缺陷的齿轮在啮合中存在低频、低振幅的重复事件所激发的高频、高振幅共振, 对此进行包络分析可以对缺陷作出判断<sup>[1,2]</sup>. 包络分析的理论并不复杂, 可以较容易地描绘包络信号, 但让计算机自动描绘出包络线却并非易事, 本文给出了一种不仅可以描绘包络线, 而且可以逐阶分解信号的有效算法.

## 1 包络线特征点的抓取

仔细分析可以发现, 连接成包络线的特征点都是一些极值点. 人工描绘包络线时, 在大脑中经过取舍后, 可以直接绘出最终的低频包络线, 而计算机则必须依据极值点这一特点, 逐阶分析才能得到最终的低频包络线特征点. 对一个复合信号, 在分析时的具体做法是:

(1) 在信号中找出所有极大值(或极小值)点, 作为一阶包络特征点;

(2) 在一阶包络特征点中找出所有极大值

点, 作为二阶包络特征点;

(3) 在  $m$  阶包络特征点中找出所有极大值点, 作为  $m+1$  阶包络特征点, 直至得到的相邻两特征点所构成直线的斜率基本相等为止(即包络特征点基本在一条直线上), 假定此时为  $n$  阶包络特征点.

## 2 拟合各阶包络线

在求取包络线特征点时由于求的是极值, 因此包络线均值产生了漂移, 同时包络特征点之间间距较大且不相等. 为此, 在拟合包络线时应进行去均值和插值处理.

### 2.1 去均值处理

设某阶特征点序列为  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$ , 则去均值计算公式为

$$x'_i = x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad (1)$$

### 2.2 插值处理

由于特征点之间间距较大, 直接画图为一段段折线, 也无法对该包络信号进行分析, 因此必须进行插值才能进行后续分析处理, 这里介绍一种较为理想的光滑不等距插值方法<sup>[3]</sup>.

设经式(1)处理后的某阶的  $n$  个不等距特征点为  $x'_0 < x'_1 < \dots < x'_{n-1}$ , 相应的函数值为  $y_i (i = 0, 1, \dots, n-1)$ .

若在子区间  $[x'_k, x'_{k+1}] (k = 0, 1, \dots, n-2)$  上的

收稿日期: 2001-05-10; 修订日期: 2001-06-10

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(984060800)

作者简介: 杨金才(1968-), 男, 河南省嵩县人, 郑州大学讲师, 硕士, 主要从事机械设备故障诊断方面的研究.

两个端点处满足以下4个条件

$$\begin{cases} y_k = f(x'_k); \\ y_{k+1} = f(x'_{k+1}); \\ y'_k = g_k; \\ y'_{k+1} = g_{k+1}. \end{cases} \quad (2)$$

则在此区间上可以唯一确定一个三次多项式

$$s(x) = s_0 + s_1(x - x'_k) + s_2(x - x'_k)^2 + s_3(x - x'_k)^3. \quad (3)$$

并且就用此三次多项式计算子区间中的插值点  $x$  处的函数近似值.

根据阿克玛几何条件,  $g_k$  与  $g_{k+1}$  由下式计算

$$g_k = \frac{|u_{k+1} - u_k| |u_{k-1} + u_{k-2}| + |u_{k-1} - u_{k-2}| |u_k|}{|u_{k+1} - u_k| + |u_{k-1} - u_{k-2}|}, \quad (4)$$

$$g_{k+1} = \frac{|u_{k+2} - u_{k+1}| |u_k + u_{k-1}| + |u_k - u_{k-1}| |u_{k+1}|}{|u_{k+2} - u_{k+1}| + |u_k - u_{k-1}|}. \quad (5)$$

其中,

$$u_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{x'_{k+1} - x'_k},$$

并且在端点处有

$$u_{-1} = 2u_0 - u_1; \quad u_{-2} = 2u_{-1} - u_0;$$

$$u_{n-1} = 2u_{n-2} - u_{n-3}; \quad u_n = 2u_{n-1} - u_{n-2};$$

当  $u_{k+1} = u_k$  与  $u_{k-1} = u_{k-2}$  时,

$$g_k = \frac{u_{k-1} + u_k}{2}; \quad (7)$$

当  $u_{k+2} = u_{k+1}$  与  $u_k = u_{k-1}$  时,

$$g_{k+1} = \frac{u_k + u_{k+1}}{2}. \quad (8)$$

最后可以得到区间  $[x'_k, x'_{k+1}]$  ( $k = 0, 1, \dots, n-2$ ) 上的三次多项式的系数为

$$\begin{cases} s_0 = y_k; \\ s_1 = g_k; \\ s_2 = (3u_k - 2g_k - g_{k+1}) / (x'_{k+1} - x'_k); \\ s_3 = (g_{k+1} + g_k - 2u_k) / (x'_{k+1} - x'_k)^2. \end{cases} \quad (9)$$

插值点  $t$  ( $t \in [x'_k, x'_{k+1}]$ ) 处的函数近似值为

$$s(t) = s_0 + s_1(t - x'_k) + s_2(t - x'_k)^2 + s_3(t - x'_k)^3. \quad (10)$$

### 2.3 拟合各阶包络线

在2.1节的基础上经2.2节求得某阶包络线在各插值区域的插值函数后,把各插值点连接起来得到了该阶包络曲线.参见后面实例中的图1.

## 3 用包络分析解析信号

工程信号一般都包含有多种频率成分,也可以说是由这些频率成分的单频信号合成而来的.

在工程分析中,有时需要将这些信号分解开来,或将其中的某个单频信号分解出来.下面介绍用包络分析来分解信号的方法.

对复杂信号进行逐阶包络分析,最终都会得到一条直线.设进行  $m$  阶包络分析时初次得到直线包络,则  $m-1$  阶包络线为复合信号中最低频信号,将  $m-2$  阶包络线减去  $m-1$  阶包络线,则可得次低频信号,若将  $m-3$  阶包络线减去  $m-2$  包络线则可得到更高一阶的单频信号.

设复合信号  $y(x) = \sum_{k=0}^m A_k(x)$ , 又设  $B_m(x)$  为信号  $y(x)$  的第  $m$  阶包络线,则

$$A_k(x) = B_k(x) - B_{k-1}(x), \quad (11)$$

式(11)即为用包络分析解析信号的计算公式.

## 4 分析实例

### 4.1 模拟分析

为了能使分解结果与理论结果相对比,本文给出一个由三个单频信号组成的模拟复合信号

$$y(t) = A_1(t) + A_2(t) + A_3(t),$$

其中,

$$A_1(t) = A_{m1} \sin(2\pi f_1 t), \quad A_{m1} = 30, \quad f_1 = 5;$$

$$A_2(t) = A_{m2} \sin(2\pi f_2 t), \quad A_{m2} = 20, \quad f_2 = 25;$$

$$A_3(t) = A_{m3} \cos(2\pi f_3 t), \quad A_{m3} = 15, \quad f_3 = 250.$$

信号在离散时的采样频率为 1000 Hz.

按文中所述方法的具体分析结果如下:图1为  $y(t)$  的波形、一阶包络线及其二阶包络线,显然其第三阶包络线已为近似直线.为了对比方便,本文把理论信号以虚线的形式和所求信号同时输出在一张图上,由图1可知,二个信号基本重合,效果良好.表1为理论值与分析结果的对比误差.

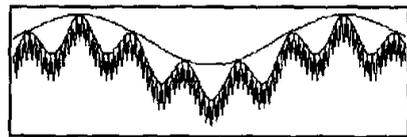


图1 原始波形及其一、二阶包络线

Fig.1 Original waveform and its 1st and 2nd order envelope curves

表1 包络信号误差分析

Table 1 Envelop signal error analyzing

信号	信号频率/Hz	信号幅值	P-P 值相对误差/%	相对平均误差/%
$A_1$	5	30	0.9	7.1
$A_2$	25	20	4.1	6.9
$A_3$	250	15	1.0	2.5

从表1中可以看出,由这种方法得出的结果误差较小,能够满足工程需要。

#### 4.2 工程实例

内燃机是一种常用机械,在正常工作状态下,它的缸套、活塞之间有一定间隙,间隙过小会产生卡环、拉缸故障;过大会使内燃机振动及噪声增大,甚至产生急剧磨擦,致使内燃机性能变差。通过大量的对比试验和理论分析证明:利用内燃机气缸体(或气缸套)上的振动响应信号,能够间接地确定内燃机实际运行下的这一间隙。确定间隙的特征之一是:时间波形随间隙的增大而发生滞后<sup>[4]</sup>。实际信号往往比较复杂,直接利用时间波形分析比较困难(如图2所示),而利用包络分析后的结果进行分析就清晰多了(如图3所示)。

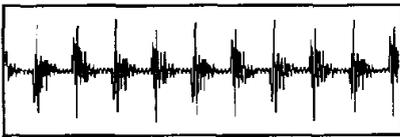


图2 内燃机振动信号

Fig.2 Vibrating signal of internal combustion engine



图3 包络分析结果

Fig.3 Results of envelope analysis

## 5 结论

(1) 用本文所述方法进行包络线分析,对各种频率成分的复合信号都是行之有效的。

(2) 用本文所述方法进行信号解析时,复合信号的频率成分之间相差倍数越大( $\geq 5$ 倍),结果越准确。

## 参考文献:

- [1] 寇 惠,原培新.故障诊断中的振动信号处理[M].北京:冶金工业出版社,1989.
- [2] 孙惠国,张瑞林.设备状态监测与故障诊断[M].郑州:河南科学技术出版社,1993.
- [3] 徐士良.C常用算法程序集[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [4] 陈国金.内燃机故障诊断微机系统设计的若干考虑[J].振动、测试与诊断,1991(9):44-51.

## Envelope Analysis Method of Digital Signal

YANG Jin - cai<sup>1</sup>, LIANG Chuan<sup>1</sup>, SHENG Zhao - shun<sup>2</sup>, DONG Xin - min<sup>1</sup>, LI Jin - guang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Huadali Fine Chemical Plant, Zhongyuan Oil Field, Puyang 457061, China)

**Abstract:** This paper studies the effective envelope analysis method used in the fault diagnosis of reciprocating and vibrating engines. After the analysis the process of drawing an envelope curve, it becomes possible for computer to detect the characteristic points of the curve. The envelope signal can be disassembled and fitted by removing mean and smooth interpolation by unequal distance. So we can get the exact envelope signal of every order, and a powerful method can be provided for fault diagnosis. The analysis examples of simulating signal and engineering signal prove that the method is effective.

**Key words:** signal processing; envelope analysis; fault diagnosis