

基于 Hilbert 变换的包络分析及其在滚动轴承故障诊断中的应用

马 波¹ 魏 强² 徐春林¹ 江志农^{1*}

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 中石油辽阳石化分公司聚酯厂, 辽宁 辽阳 111003)

摘 要: 讨论了 Hilbert 变换的基本原理, 以及基于 Hilbert 变换的包络解调方法在轴承故障诊断中的应用。实践证明: 对于具有调制现象的滚动轴承故障诊断, 基于 Hilbert 变换的包络解调方法, 具有明显的诊断意义, 是一种可靠的诊断方法。

关键词: Hilbert 变换; 包络; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TH113; TPP206.3

引言

在滚动轴承故障诊断的种种方法中, 从实用性的观点来看, 没有比振动诊断更好的方法了^[1]。虽然振动作为预知滚动轴承异常的信息媒介, 具有很优良的性质, 但盲目地测定振动, 仍然不能成功地诊断滚动轴承的异常。目前国内外普遍采用的行之有效的方法是共振解调法, 又称高频共振法或包络分析法。其基本原理可用图 1 所示的框图简单表示^[2]。

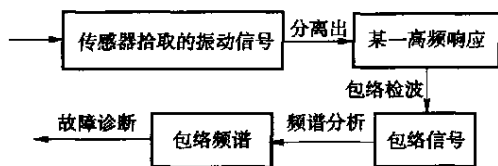


图 1 共振解调法的基本原理

Fig. 1 Principle of resonant demodulation

共振解调技术是对低频冲击所激起的高频共振波进行包络检波和低通滤波, 即解调, 获得一个对应于低频冲击的、而又放大并展宽了的共振解调波。通过对此共振解调波进行频谱分析, 判定故障的量值和类型。

常用的共振解调方法有基于 Hilbert 变换的包络解调方法和检波解调方法, 本文主要针对前者加以论述。

1 Hilbert 变换原理

通常, 机械故障诊断中所遇到的时域信号都是实信号。实信号的傅立叶变换含有负频, 给信号分析带来麻烦, 所以引入了解析信号。

设有一实信号的函数表达式为 $x(t)$, 其频率为 $X(\omega)$, 即

$$X(\omega) = X^-(\omega) + X^+(\omega)$$

$$\text{则, } x(t) = \text{Re} \left[\frac{1}{2} \int_0^{\infty} 2 X^+(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right]$$

令

$$x_a(t) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} 2 X^+(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

其中 t 表示时间, s ; ω 表示角频率, $1/s$ 。

则 $x_a(t)$ 就叫解析信号, 是一个复数。 $x_a(t)$ 的频率 $X_a(\omega)$ 为

$$X_a(\omega) = \begin{cases} 2 X^+(\omega), & \omega > 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases} \quad (1)$$

这表明解析信号 $x_a(t)$ 的频率是实信号正频率的两倍, 而负频率等于零。

因为解析信号是复信号, 所有它包含有实部和虚部, 令解析信号函数 $x_a(t)$ 为

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t)$$

其频率 $X_a(\omega)$ 为

$$X_a(\omega) = X(\omega) + jX(\omega) \quad (2)$$

其中

收稿日期: 2004-04-02

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(重点 03024)

第一作者: 男, 1977 年生, 博士生

*通讯联系人

E-mail: jiangzhihong @263.net

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

比较(1)式和(2)式可得

$$X(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) X^*(\omega)$$

$$= \begin{cases} -jX^*(\omega) & \omega > 0 \\ jX^*(\omega) & \omega < 0 \end{cases}$$

根据卷积定理^[3], 频域两函数的乘积等于时域两函数的卷积, 于是有

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{t} \left[F\left(\frac{1}{t}\right) = j \operatorname{sgn}(\omega) \right]$$

$$= -\frac{1}{t} * \frac{x(t-\tau)}{\tau} d\tau \quad (3)$$

$\hat{x}(t)$ 是实信号函数 $x(t)$ 的 Hilbert 变换, 其反变换为

$$x(t) = \hat{x}(t) * \frac{1}{t} = -\frac{1}{t} * \frac{\hat{x}(t-\tau)}{\tau} d\tau \quad (4)$$

式(3)和式(4)称为 Hilbert 变换对。

于是得 $x(t)$ 的解析信号函数为

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t) e^{j\phi(t)}$$

其中幅值 $A(t)$ 为

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$$

相位 $\phi(t)$ 为

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \right]$$

$A(t)$ 便为 $x(t)$ 的包络。

由以上分析可知, Hilbert 变换是一种将时域实信号变为时域解析信号的方法。变换所得解析信号(复数)的实部是实信号本身, 虚部是实信号的 Hilbert 变换, 而解析信号的幅值便是实信号的包络。

2 包络频域的分析

由于对原始信号经过了包络处理, 使原始信号变得光滑和平缓。按照通常时域处理的方法, 提取诸如: 波形因子、峰值因子、峭度因子、裕度因子等。这些时域上的参数从不同方面反映出包络信号的性质和特征, 同时也反映出故障的不同分类^[4]。但是利用时域参数不能精确诊断出故障所在。而通过对包络信号进行频率分析, 可以比较精确地确定出故障发生的部位和层次。在滚动轴承的故障诊断系统中, 包络分析是精确诊断的有效手段之一, 且被广泛地应用。它通过分析包络信号的频次和强度来得到诊断信息, 如对于滚动轴承来说, 它可以有效地识别出边频带, 从而找出调制信号的特性, 然后再结合对

于机械设备本身的了解, 进行故障诊断^[5]。在进行频域分析时, 主要是分析它的频谱图, 结合特征频率来识别故障, 而且往往要进行细化谱分析, 因为包络信号为一低频信号, 必须降低它的采样频率。

3 实例分析

以 210 系列轴承为例, 测点的转速频率为 15 Hz, 当轴承内圈有故障时, 该轴承的采样信号的时域波形经包络分析后对其进行相应的频谱分析, 得出轴承的内圈故障特征频率。如图 2 所示, 210 轴承振动信号的包络幅值谱图。

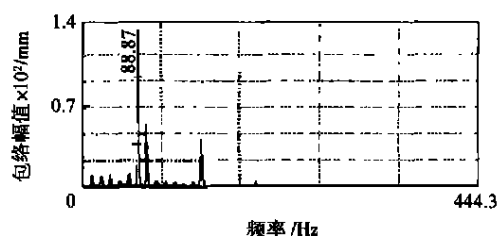


图 2 210 轴承振动信号的包络幅值谱图

Fig. 2 Envelope amplitude spectrum of bearing signal

从图 2 可以看出最大幅值处的频率为 88.87 Hz, 用特征频率计算公式求得的故障特征频率为 88.6 Hz。因此, 可以看出, 用基于 Hilbert 变换的诊断系统频谱分析求得的故障频率值与用计算公式求得的相近。从而说明用基于 Hilbert 变换的包络分析法进行诊断是比较准确的。

4 结论

由于滚动轴承的许多故障是以振动信号中调制情况为特征信息的, 用基于 Hilbert 变换技术的包络分析对这些调制信号进行幅值和频率解调, 放大和分离了故障特征信息, 极大地提高了信噪比, 从而可容易诊断出轴承的故障。因此, 基于 Hilbert 变换技术的包络分析方法是诊断滚动轴承故障的一种有用工具。

参 考 文 献

- [1] 雷继尧, 丁 康. 轴承故障诊断[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991
- [2] 梅宏彬, 林志航. 用于滚动轴承早期损伤诊断的模型及特征量[J]. 振动工程学报, 1995(8): 191 - 197
- [3] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [4] 李 智, 陈祥初, 刘政波. 包络分析及其在设备故障诊

断中的应用[J]. 测试技术学报, 2002, 16: 92 - 95

应用[J]. 山西矿业学院学报, 1997, 15: 163 - 164

[5] 杨树莲, 杨文献. Hilbert 变换及其在机械故障诊断中的

Envelope analysis based on Hilbert transformation and its application in ball bearing fault diagnosis

Ma Bo¹ Wei Qiang² Xu Chun-lin¹ Jiang Zhi-nong¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. PetroChina Liao Yang Petrochemical Company Polyester Factory, Liaoning Liaoyang 111003, China)

Abstract: The principle of Hilbert transformation, the envelope analysis based on Hilbert transformation and its application in the machinery fault diagnosis are discussed. The practice shows that the envelope demodulation method based on Hilbert transformation offers a reliable method for the ball bearing fault diagnosis with modulation phenomenon.

Key words: Hilbert transformation; envelope; ball bearing; fault diagnosis

(责任编辑 刘同帅)

“25MLB-100-1.5 型单端迷宫螺旋泵”通过鉴定

由机电工程学院黎镜中、张有忱等完成的“25MLB-100-1.5 型单端迷宫螺旋泵”项目 9 月 19 日通过了北京市科委主持和组织的技术鉴定。

鉴定委员会认真地审阅了鉴定资料, 听取了单端迷宫螺旋泵的工作报告、研制报告, 经认真讨论对项目的整体工作和水平进行了评价。

与会专家一致认为: 我校设计的单端迷宫螺旋泵为国内首次开发成功, 设计独特, 达到了国际先进水平。

25MLB-100-1.5 单端迷宫螺旋泵与国外同类产品相比有如下优点: 国外单端迷宫螺旋泵的转子螺线是单一齿型组成(单一螺线), 而我校的单端迷宫螺旋泵的转子螺线是两种以上齿型组成(复合螺线)。可以充分发挥每种齿型的性能优势。这种型号的单端迷宫螺旋泵的转子是整体结构, 可以减少迷宫螺旋泵的转子在制造和装配过程中的累积误差, 提高泵的转子精度。另外, 这种 25MLB-100-1.5 单端迷宫螺旋泵的定子是简单的圆柱形, 简化了加工, 提高了通用性。

通过长期运行考核, 证明该泵运行平稳, 使用寿命长, 维修方便, 可以部分替代柱塞泵、多级离心泵、旋涡泵等。

(科技处供稿)

征 订 启 事

《北京化工大学学报(自然科学版)》属自然科学类学术期刊, 向国内外公开发行人。本刊为中文“核心期刊”, 双月刊, 双月 10 日出版, 大 16 开, 112 页, 年定价 60 元。2005 年度的征订工作已开始, 欢迎读者向当地邮局订阅, 邮发代号 82-657。不方便订阅或漏订的读者, 也可直接汇款至本编辑部订刊。