

文章编号: 1000-8055(2003)01-0109-05

齿轮故障诊断的时延相关解调法

孟 涛, 廖明夫, 李 辉

(西北工业大学 旋转机械与风能装置测控研究所, 陕西 西安 710072)

摘要: 为诊断齿轮与滚动轴承的故障, 常常对其振动信号进行包络解调, 以获取故障特征。但所测振动信号中, 包含大量的噪声, 严重地影响解调结果, 使得齿轮或滚动轴承的故障特征难以凸现。为此, 本文提出了时延相关解调法以实现降噪解调。该方法利用相关函数的降噪特性, 首先对振动信号进行相关分析, 得信号的自相关函数。然后对自相关函数适当延迟以尽量避开噪声影响, 再进行 Hilbert 变换, 以求得解调结果。本文进行了仿真信号验证和实验验证, 证明时延相关解调法与直接解调法相比, 噪声影响大幅减小, 故障信息得以凸现。

关键词: 航空、航天推进系统; 齿轮; 故障诊断; 解调法; 时延相关解调

中图分类号: TH132; V 214. 3⁺ 3

文献标识码: A

Detection and Diagnosis of the Gear Fault by the Delayed Correlation-Envelope Technique

MEN G Tao, LIAO Ming-fu, LI Hui

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to reveal the defect signature of rolling element bearings or gearboxes, the vibration signals measured on them are usually demodulated by the envelope analysis, i.e. Hilbert Transform. However, the defect signature obtained by this demodulation is often masked by noise. In this paper, a new method of demodulation, Delayed Correlation-Envelope analysis is established to suppress the noise. The autocorrelation functions of vibration signals measured on bearings and gearboxes are first computed, which will reduce the noise greatly, but not change the modulation signature of the signals. Then the autocorrelation functions are delayed for some time lags, which will reduce the noise further. The delayed autocorrelation is then demodulated by Hilbert Transform. The effect of time delay on the demodulation results is also discussed here. The effectiveness of this method is confirmed by both simulation and experiment.

Key words: aerospace propulsion; gears; fault diagnosis; demodulation;
delayed correlation-envelope

1 引言

齿轮和滚动轴承的振动信号呈现调制特征, 调制频率往往反映故障特征。通常对振动信号进行包络解调处理^[1~4], 以期得知调制频率大小。故

识别调制频率成分成为齿轮和滚动轴承故障诊断的关键环节^[5, 6]。但是, 齿轮振动信号多利用加速度传感器直接从箱体上测取, 这样的信号信噪比低, 尤其是在早期故障发生时, 故障信号的能量很小。对此振动信号直接解调, 调制信息常常淹没在

收稿日期: 2002- 04- 15; 修订日期: 2002- 10- 08

作者简介: 孟涛(1976-), 男, 河北盐山人, 西北工业大学航空动力与热能工程系博士生

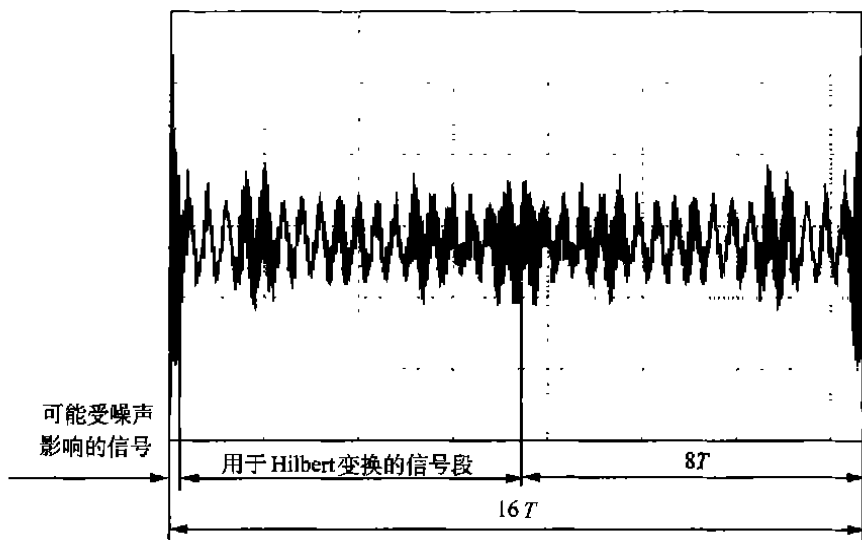


图 1 振动信号的自相关函数

Fig 1 The autocorrelation function of the vibration signal

噪声中。针对如何有效识别调制频率,同时有效降低噪声影响,本文提出了时延相关解调法,数字仿真信号和实验结果证明对齿轮故障诊断这是一种行之有效的方法。

2 时延相关解调法的基本原理

首先对相关解调法的原理加以分析,从而引出时延相关解调法。顾名思义,相关解调法就是先对信号进行相关分析,得到相关函数;然后再对相关函数进行 Hilbert 解调。相关函数具有降噪特性,这种特性在信号处理和分析中已有广泛的应用^[7];同时它还不改变信号的调制特性。这正是相关解调法降噪解调的理论基础。下面仅对相关函数的调制特性加以分析。

设调幅信号为:

$$x(t) = A e^{j\omega t} e^{j\Omega t} \quad (1)$$

式中: ω 为调制频率, Ω 为载波频率, A 为常数。

$x(t)$ 的自相关函数为:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int x^*(t) x(t + \tau) dt \quad (2)$$

式中: $x^*(t)$ 为 $x(t)$ 的共轭函数。

把式(1)代入式(2),得:

$$R_x(\tau) = A^2 e^{j\omega \tau} e^{j\Omega \tau} \quad (3)$$

可见,调幅信号的自相关函数仍为调幅信号,调制频率和载波频率均不改变。齿轮故障特征信息与调制频率成分密切相关,这表明自相关函数也保留了齿轮故障特征信息。这种特性可在齿轮

故障诊断中加以应用。

然后对振动信号的自相关函数 $R_x(\tau)$ 进行 Hilbert 变换,即:

$$\hat{R}_x(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_x(\lambda)}{\tau - \lambda} d\lambda \quad (4)$$

进而构造包络函数:

$$p(\tau) = \sqrt{\hat{R}_x^2(\tau) + R_x^2(\tau)} \quad (5)$$

然后再对 $p(\tau)$ 进行频谱分析,就可得到信号的相关解调谱。

根据相关函数的上述性质,首先对测得的振动信号进行相关分析,以降低噪声。众所周知,对于宽带随机信号,其自相关函数 $R_x(\tau)$ 随着 τ 的增大很快衰减为 0,图 1 示出了可能受噪声影响的信号段这是相关函数可供充分利用的重要特性。为进一步降低噪声的影响,对相关函数 $R_x(\tau)$ 进行 Hilbert 变换时,将延迟较大的 τ 值后再开始进行,如图 1 所示。由此,将更加凸显相关分析的降噪效果。为此,原始信号的样本长度应选择得较长为宜。本文中信号样本长度为 $16T$ (T 为转子旋转周期),时延为 $T/4$ 。最后对包络函数 $p(\tau)$ 进行频谱分析,得到相关解调谱。这一方法本文称为时延相关解调法。

3 数字仿真验证

仿真信号:

$$x(t) = 1.0 \times \sin(2\pi \times 62.5t) \times \sin(2\pi \times 4500t) + 0.8 \times \sin(2\pi \times 4500t) +$$

$5.0 \times \text{Rand } G(0, 1)$

式中: $\text{Rand } G(0, 1)$ 是利用 C++ Builder 产生的高斯分布噪声, 均值为 0, 方差为 1。仿真信号中载

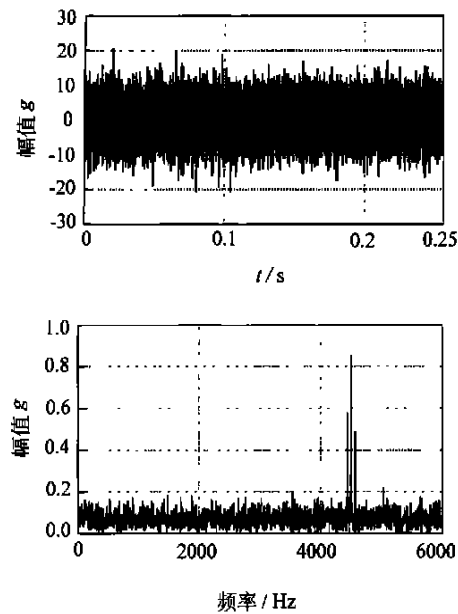


图 2 数字仿真信号时域波形及频谱

Fig 2 The waveform and spectrum of the simulated signal

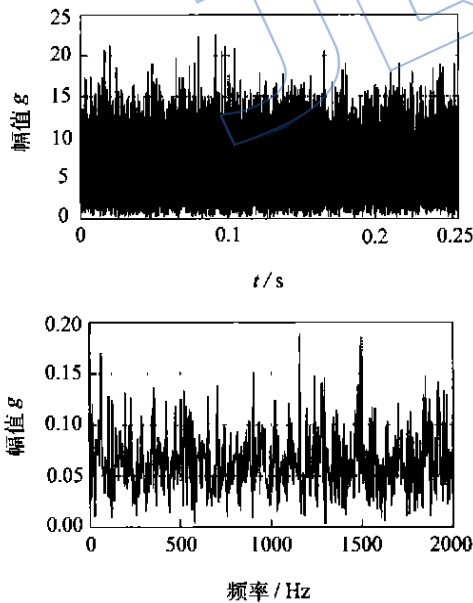


图 3 数字仿真信号包络线图及包络谱

Fig 3 The envelope and envelop-spectrum of the simulated signal

波频率为 4500 Hz, 调制频率为 62.5 Hz。整周期采样, 每周期采样 1024 点, 采样频率 62.5 kHz。

图 2 为数字仿真信号的时域波形及其频谱。可以从频谱图上看在 4500 Hz 附近有峰值存在, 但无法判断其边频确切大小。图 3 为仿真信号的包络线图及其包络谱。由于噪声的影响, 包络谱上谱线密集, 很难分辨调制频率的位置。图 4 为仿

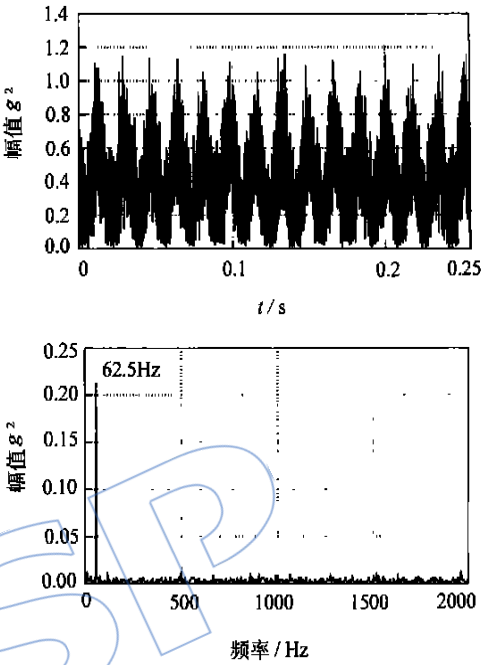


图 4 数字仿真信号相关后包络线图及时延相关解调谱

Fig 4 The envelope of the autocorrelation function and delayed correlation-envelope spectrum of the simulated signal

真信号相关后包络线图及其时延相关解调谱。可以从图 4 中的包络线图上看到, 其波形呈现周期性; 时延相关解调谱上在 62.5 Hz 处有一明显峰值, 这正是调制频率的大小。数字仿真结果证明, 时延相关解调法可以有效的降低噪声, 识别调制频率。

4 实验验证

应用的实验装置如图 5 所示。它由 JZQ-250 型齿轮减速机、交流驱动电机、变频器和抱闸等部件组成。齿轮 1 至 4 的齿数依次为 35, 64, 18 和 81。减速机和驱动电机均固定在平台上。变频器可调整电机转速在 100~3000 r/min 范围内运转。抱闸系统为齿轮箱提供扭矩负载, 其大小可由系统中的力簧调整。这种加载系统与工业中齿轮箱的负载类似, 且结构简单。联轴器上贴有反光纸, 光电传感器为振动采集提供相位信号。由加速

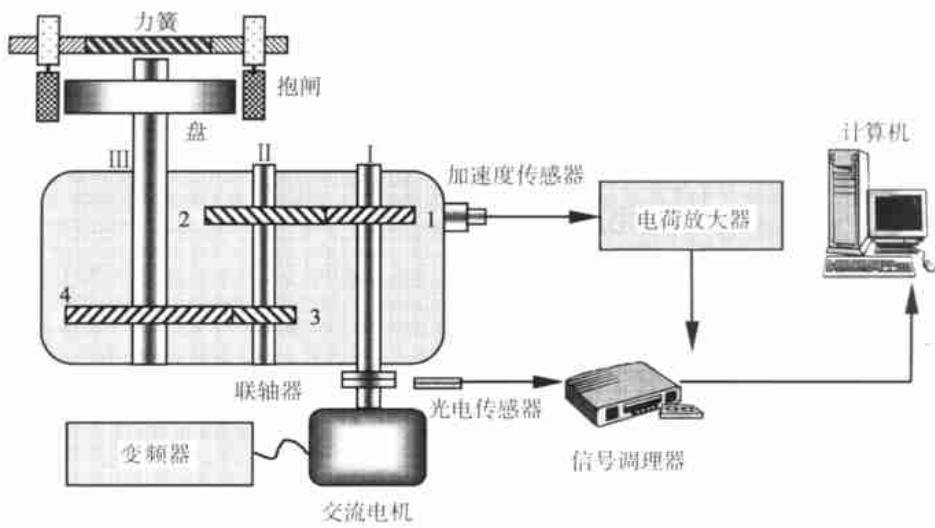


图 5 齿轮实验装置图

Fig 5 The test rig of gears

度传感器测得的箱体振动信号经电荷放大器,送至 CAMD-6100 型信号调理器预处理,最后由自行研制的“齿轮 & 滚动轴承状态监测与故障诊断软件包”分析。

$$f_{MII} = 214.43 \text{ Hz}$$

图 6 为齿轮箱体振动信号时域波形及其频谱。可以看到低频段有众多峰值。而 40~60 Hz 范围内峰值突出,一方面由于电流工频干扰,另一方面,轴 I 转频的 2 倍谐频、轴 II 转频的 4 倍谐频亦位于此范围。380~460 Hz 频段内峰值突出,初步判断由齿轮 3、4 的啮合频率的 2 倍谐频 428.86 Hz 引起。此频段谱峰密集,为了分辨边频(即调制

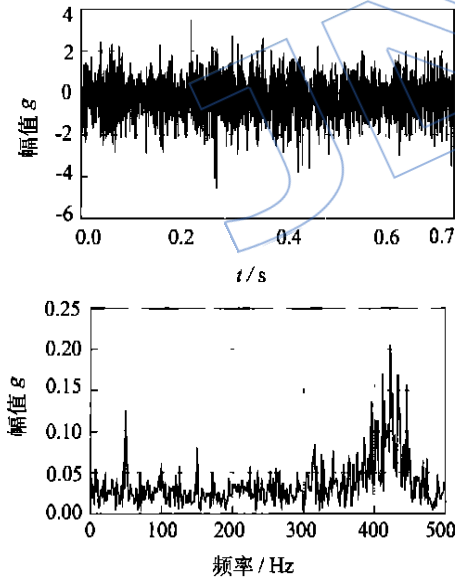


图 6 齿轮箱体振动信号时域波形及频谱

Fig 6 The waveform and spectrum of the vibration of the gearbox

测试时,电机转速为 1307 r/min。连续采样 16 周期,每周期 256 点。各轴转频及各齿轮副啮合频率如下:

$$\begin{aligned} f_I &= 21.78 \text{ Hz} & f_{II} &= 11.91 \text{ Hz} \\ f_{III} &= 2.65 \text{ Hz} & f_{MI} &= 762.42 \text{ Hz} \end{aligned}$$

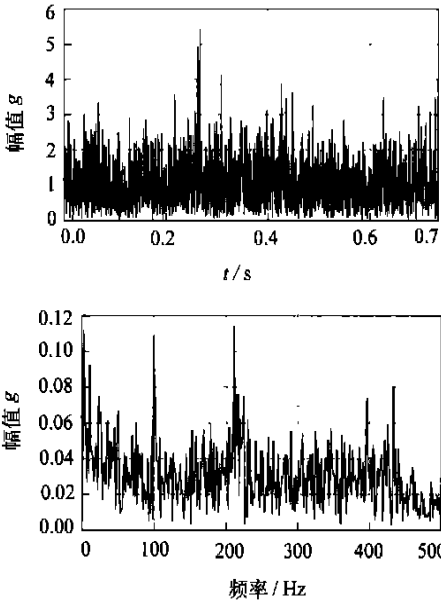


图 7 齿轮箱体振动包络线图及包络谱

Fig 7 The envelope and envelope-spectrum of the vibration of the gearbox

频率), 作包络分析如图 7 所示。在图 7 的包络线图上难以分辨其振动信号的周期性, 而包络谱图上谱峰密集, 亦无法辨别调制频率。100 Hz 处因受电流工频干扰, 峰值突出。图 8 为齿轮箱体振动延迟 $\tau = T/4$ 后相关包络图及时延相关解调谱。图 8 的相关包络线图中振动信号呈现明显的周期性; 而时延相关解调谱图上, 谱线成分明显简单, 噪音干扰降低。2.9 Hz 与 11.6 Hz 处峰值突出, 2.9 Hz 与Ⅲ轴转频接近, 而 11.6 Hz 与Ⅱ轴转频接近(由于频率分辨率的原因, 不完全相等), 此为

调制频率大小。因而判断故障发生在齿轮 3、4 上。拆开齿轮箱, 检查齿轮 3、4 发现, 齿轮 4 有一齿齿端轻微崩齿(长约 1.1 mm), 齿轮 3 一齿面有微小凹坑($\Phi = 1.2\text{ mm}$)。

5 结 论

齿轮和轴承出现故障时, 振动信号多呈现调制特征。对此调制信号进行解调是齿轮和滚动轴承故障诊断的主要途径。但在噪声干扰下, 传统解调方法难以奏效。数字仿真结果和实验结果证明, 本文提出的时延相关解调法能够很好的抑制噪声, 凸现信号调制信息, 是一种降噪解调方法。故本方法可在齿轮和轴承的故障诊断中加以利用。

参考文献

[1] Randall R B. The Relationship between Spectral Correlation and Envelope Analysis in the Diagnostics of Bearing Faults and Other Cyclostationary Machine Signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5): 945- 962

[2] 王新晴, 王耀华, 陈六海, 等. 齿轮传动中几种典型故障的振动图谱分析[J]. 机械传动, 1999, (3): 34- 36

[3] Mcfadden P D, Toozhy M M. Application of Synchronous Averaging to Vibration Monitoring of Rolling Element Bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(6): 891- 906

[4] 廖伯瑜. 机械故障诊断基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995

[5] WANG Wen-yi. Early Detection of Gear Tooth Cracking Using the Resonance Demodulation Technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2001, 15(5): 887- 903

[6] WANG Wen-yi, Albert K Wong. Some New Signal Processing Approaches for Gear Fault Diagnosis[A]. ISSPA '99[C]. Brisbane, Australia: 22- 25 1999

[7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995

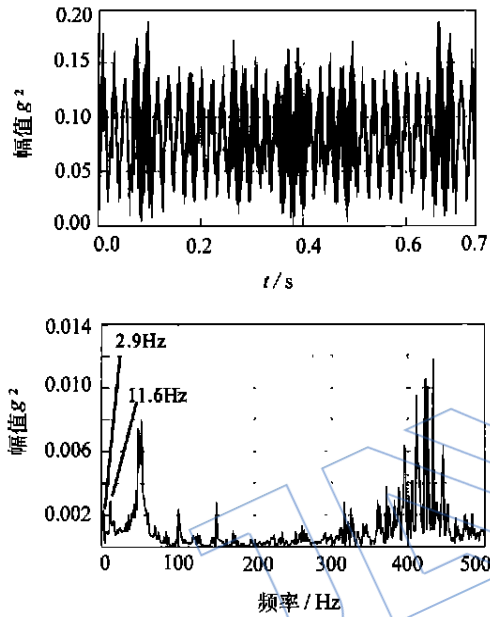


图 8 齿轮箱体振动延迟后相关包络图及时延相关解调谱

Fig 8 The envelope of the autocorrelation function and delayed correlation-envelope spectrum of the vibration of the gearbox