

文章编号: 1000-6893(2005)03-0371-05

基于循环统计量的直升机齿轮箱轴承故障早期检测

陈仲生, 杨拥民, 胡 政, 沈国际

(国防科技大学 机电工程研究所 341 室, 湖南 长沙 410073)

Early Detection of Bearing Faults in Helicopter Gearbox Based on Cyclic Statistics

CHEN Zhong sheng, YANG Yong-min, HU Zheng, SHEN Guo-ji

(Faculty 341, Institute of Mechatronics Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

摘 要: 在分析齿轮箱振动信号的基础上, 提出了基于循环统计量的轴承故障早期检测方法, 阐述了表征故障的一维和二维循环平稳特征。该方法利用信号与噪声具有不同循环频率的特性实现了信噪分离, 能够比较容易地从复杂背景中提取出微弱的特征信息。最后在某型直升机齿轮箱轴承故障的早期检测中进行了实验验证。结果表明, 该方法优于功率谱和解调分析, 能够提取故障的早期特征。

关键词: 直升机齿轮箱; 故障检测; 循环统计量; 循环频率; 谱相关密度函数

中图分类号: TP206+.3; V263.6 文献标识码: A

Abstract: On the basis of analyzing gearbox signals, one novel method of detecting early bearing faults based on cyclic statistics is presented. Then one dimensional and two dimensional cyclostationary features of faults are put forward and they can be used to separate useful signals from noise and detect weak faults easily. In the end the proposed method is used to detect early bearing faults in one helicopter gearbox and the results demonstrate that it is superior to power spectrum density (PSD) and demodulation analysis and can be used to extract early fault features.

Key words: helicopter gearbox; fault detection; cyclic statistics; cyclic frequency; spectrum correlation density function (SCDF)

轴承是直升机齿轮箱中故障率较高的一类动部件, 研究其故障的早期检测方法对提高直升机的可靠性和安全性具有重要意义^[1]。

直升机齿轮箱的振动信号十分复杂, 由于故障发生时所伴随的冲击、摩擦等因素的作用, 常常存在调制现象, 而且是时变的^[2]。时变调幅信号就是一种常见的故障特征信号, 如果能有效地提取出调制参数, 就可以实现轴承故障的早期检测。但是由于这种调制信号是时变的, 且故障早期产生的调制源一般比较微弱, 常常被其它的干扰信号或环境噪声淹没, 因此常用的高阶谱方法和解调技术存在局限性^[3,4], 难以提取出表征故障的调制参数信息。

理论分析表明^[5], 时变调幅信号具有循环平稳性, 即其统计量是随时间周期变化的, 因此利用循环统计量可以提取调制参数。其优点是根据信号和噪声具有不同循环频率的特性可以实现信噪分离, 能够比较容易地从复杂背景中提取出微弱的信号特征信息, 适合于齿轮箱轴承故障的早期检测。

1 时变调幅信号的循环平稳特征

考虑一般的调幅信号

$$x(t) = a(t)p(t) + v(t) \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 是调制信号; $p(t)$ 是载波信号; $v(t)$ 是加性平稳噪声。由此可见, 在调制作用和噪声影响下, 往往使得测量的特征信号信噪比大大降低, 增加了故障特征提取的难度。

研究表明^[5], 式(1)表示的时变调幅信号具有一种特殊的非平稳性, 即循环平稳性, 且调制参数隐含在信号的循环平稳特征里, 因此利用信号的循环平稳性能有效分离故障特征信号和噪声, 可以提取微弱的故障特征。

以下面的典型时变调幅信号为例

$$x(n) = [1 + \beta \sin 2\pi f_1 n] \sin 2\pi f_2 n + v(n) \quad (2)$$

当幅值调制现象比较微弱, 即 β 值很小时, 频率 f_2 的边带并不明显, 再加上各种噪声 $v(n)$ 的干扰, 常用的谱分析方法难以提取调制频率 f_1 以及识别信号的调制方式。

利用信号 $x(n)$ 的二阶循环平稳性^[5], 根据定义计算其循环自相关函数得到

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos 2\mathcal{F}_2 \tau + \frac{\beta^2}{2} \cdot \cos 2\mathcal{F}_1 \tau + R_v(\tau) & \alpha = 0 \\ \frac{\beta}{2} \cos \mathcal{F}_2 \tau \cos \mathcal{F}_1 \tau & \alpha = \pm f_1 \\ \frac{\beta^2}{8} \cos 2\mathcal{F}_2 \tau & \alpha = \pm 2f_1 \\ \frac{1}{4} f_1 + \frac{\beta^2}{2} \cos 2\mathcal{F}_1 \tau & \alpha = \pm 2f_2 \\ \frac{\beta^2}{4} \cos \mathcal{F}_1 \tau & \alpha = \pm (2f_2 \pm f_1) \\ \frac{\beta^2}{16} & \alpha = \pm (2f_2 \pm 2f_1) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可见:调制频率 f_1 及其二倍频包含在信号的二阶循环频率 α 中;进一步对 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 进行傅立叶变换得到谱相关密度函数 $S_x^{\alpha}(f)$,可以发现在 $\alpha = f_1$ 的截面上具有频率分量 $f_2 \pm f_1/2$,从而说明频率 f_1 调制了频率 f_2 。因此调制频率 f_1 可以通过一维循环平稳特征 α 或二维循环平稳特征 (α, f) 来表征,不同的是二维特征提供了更丰富的调制信息。另外,由于平稳噪声没有非零的循环频率,故上述特征提取方法理论上均完全抑制了加性平稳噪声,能提取微弱的调制参数信息。

2 直升机齿轮箱的振动信号模型

安装在直升机齿轮箱箱体表面的振动传感器采集的振动信号是各零部件振动信号相互作用的复合信号。当零部件发生故障时,箱体振动信号会发生不同形式的变化,通过检测这些变化可以识别零件的故障模式。因此,建立与故障诊断直接相关的齿轮箱振动信号模型是十分必要的(为简单起见,本文信号建模时假定轴是完全对中的)。

当轴承处于正常状态时,它产生的振动信号可以忽略不计。此时齿轮箱的振动信号主要是齿轮的啮合振动信号,即

$$y(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(2\pi k f_m t + \phi_k(t)) \quad (4)$$

式中: f_m 是啮合频率; k 是谐波阶次; $A_k(t)$, $\phi_k(t)$ 分别是其第 k 阶谐波分量的幅值和相位。

而当轴承发生故障时,其故障表面会与其它表面产生撞击,从而会产生与故障特征频率 f_F 相联系的振动信号。对直升机齿轮箱来说,轴承振动信号和齿轮啮合信号不再是简单的叠加关系,往往具有复杂的乘性关系^[6],即存在调制现象,因

此齿轮箱振动信号模型可以简化为

$$y(t) = (1 + \sum_{i=1}^l \cos(2\pi f_F t)) \cdot \sum_{k=1}^K A_k(t) \cdot \cos(2\pi k f_{m_1} t + \phi_k(t)) + v(t) \quad (5)$$

式中: i 是故障特征频率的谐波阶次; $v(t)$ 表示加性噪声。

通过提取故障特征频率 f_F 就可以识别轴承故障的模式和位置。正如前述,利用循环统计量能提取与故障特征频率 f_F 有关的一维和二维循环平稳特征,实现轴承故障的早期检测。

3 某型直升机中减速器实验数据分析

本文的实验验证是在某型直升机中尾减速器生产厂的试车台上完成的(如图1所示),实验对象是某型直升机中减速器上的圆锥滚动轴承。振动信号通过安装在中减速器箱体上的8个压电加速度传感器采集,采样频率为10 kHz,中减速器齿轮的啮合频率为 $f_{m_1} = 1698$ Hz。

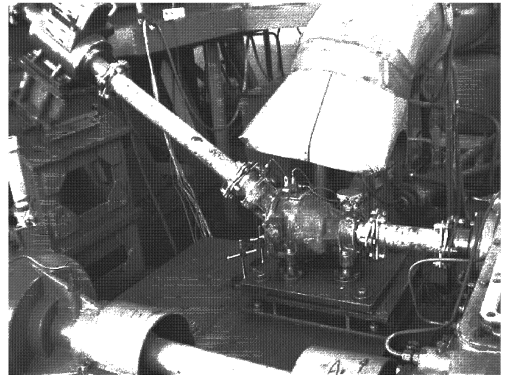


图1 某型直升机中减速器实验台

Fig 1 Experiment set up of a helicopter gearbox

(1) 轴承外环故障一维循环特征的提取

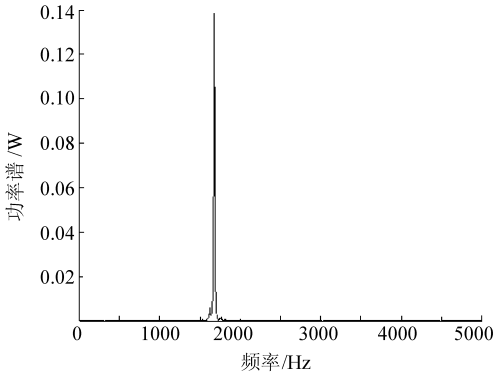
第1次实验中,轴承故障设置为外环局部剥落。这种情况下,轴承故障特征频率为外环通过频率 f_{op} 及其倍频,理论计算得到 $f_{op} = 475.6$ Hz。

理论分析表明,式(5)表示的振动信号具有二阶循环平稳性,故通过二次非线性变换可以再生出谱线^[5]。而且循环频率 α 与故障特征频率具有紧密的联系,因此,利用一维循环平稳特征 α 可望提取轴承外环故障的早期特征。

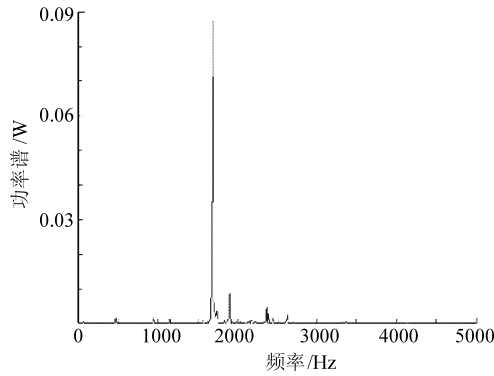
实验在工况2下分别采集了轴承正常状态和外环故障时的振动信号,其功率谱分别如图2(a)和图2(b)所示。

比较图2(a)和图2(b)可见:频谱主要分量是齿轮啮合频率 f_{m_1} ,而故障情况下外环通过频率 f_{op} 并不明显。

为此,使用一维参数 α 来提取故障特征。首先估计外环故障振动信号的二阶循环频率 α 如图 3 所示^[7] (置信度 $\beta=0.01$, 延迟量 $\tau=1$, 查表可得阈值为 $X_{\beta}^2(2)=9.21$, $W_L(n)$ 取矩形谱窗, 窗的长度取 $L=99$)。



(a) 正常状态



(b) 外环故障

图 2 振动信号的功率谱(工况 2)

Fig 2 The PSD of vibration signal (condition 2)

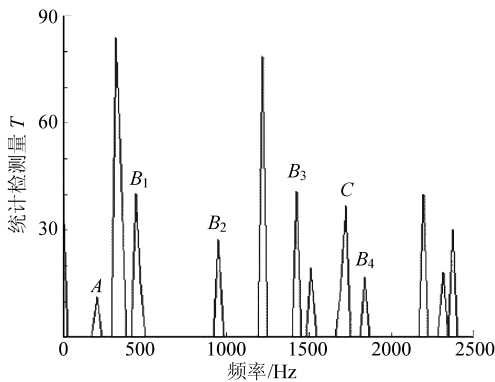


图 3 外环故障时的二阶循环频率估计

Fig 3 Estimation of second order cyclic frequencies

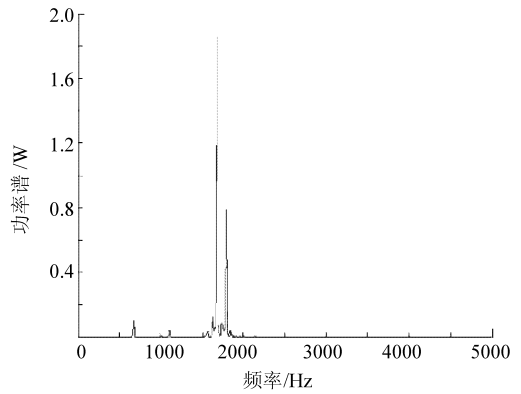
由图 3 可见: 根据统计检验, 振动信号在 f_{op} 及其倍频处存在明显峰值(图 3 中 B_1, B_2, B_3 和 B_4 点), 因此二阶循环频率 α 中包含了 f_{op} 及其倍频, 这说明提取出了外环的故障特征频率; 另

外 α 中还包含啮合频率(C 点)以及 $B_1 \sim B_4$ 点处的边带。

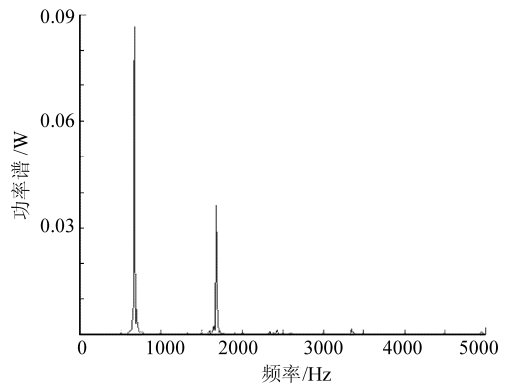
(2) 轴承滚动体故障二维循环平稳特征的提取

第 2 次实验中, 轴承故障为滚动体表面剥落。这种情况下, 轴承故障特征频率为滚动体通过频率 f_{bc} 及其倍频, 计算得到 $f_{bc}=218.98 \text{ Hz}$ 。

同样利用振动信号的二阶循环平稳性, 可以通过二维循环平稳特征(α, f) 提取滚动体故障的特征。实验在工况 1 下分别采集了轴承正常状态和滚动体故障时的振动信号, 其功率谱分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。



(a) 正常状态



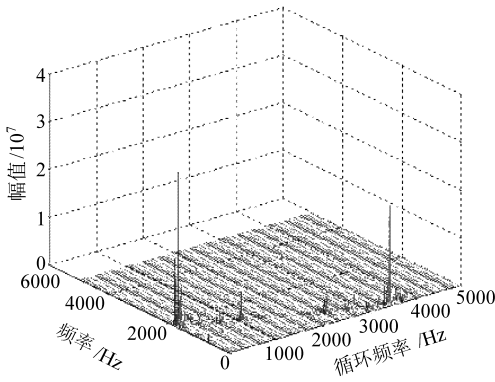
(b) 滚动体故障

图 4 振动信号的功率谱(工况 1)

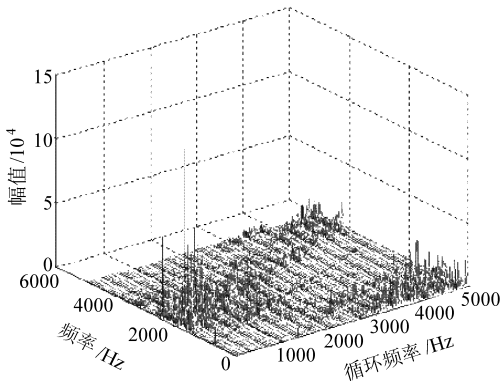
Fig 4 The PSD of bearing vibration signal (condition 1)

比较图 4(a) 和图 4(b) 可见: 频谱主要分量是齿轮啮合频率 f_{m_1} , 而故障情况下不能发现滚动体通过频率 f_{bc} ; 另外在 675 Hz 处存在一个明显的频率分量, 经分析发现, 它恰好等于尾减速器齿轮的啮合频率 f_{m_2} (实验台的中、尾减速器构成一个闭环系统), 说明尾减速器的振动对中减速器的信号产生了影响。

接着计算了轴承正常状态和滚动体故障时振动信号的谱相关密度函数, 分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可以看出: 正常状态时, 仅仅在 $\alpha=0$ 平



(a) 正常状态



(b) 滚动体故障

图5 轴承振动信号的谱相关密度函数

Fig 5 The SCDFs of bearing vibration signal

面上有频率分量存在,它对应了信号的功率谱;而滚动体故障时,在很多 $\alpha \neq 0$ 平面上均有频率分量存在,这预示着故障导致信号具有明显的二阶循环性,这与信号模型的理论分析以及4.1节的结论是一致的。

特别地,取 $\alpha = f_{bc}$ 时的谱相关密度函数切面,如图6所示,明显看出在 $f = 566 \text{ Hz}, 780 \text{ Hz}, 1600 \text{ Hz}, 1800 \text{ Hz}$ 处存在峰值。进一步计算分析发现,上述4个频率分别对应 $f_{m_2} - f_{bc}/2, f_{m_2} + f_{bc}/2, f_{m_1} - f_{bc}/2, f_{m_1} + f_{bc}/2$,这说明了 f_{bc} 分别调制了齿轮啮合频率 f_{m_1}, f_{m_2} ,从而提取出滚动体故障的二维循环平稳特征

$$(\alpha, f) = \{(f_{bc}, f_{m_1} \pm f_{bc}/2), (f_{bc}, f_{m_2} \pm f_{bc}/2)\}$$

传统的方法常使用共振解调方法对轴承信号进行解调分析^[8],进而提取故障特征。这种方法在实践中解决了一些诊断问题,但是它仅对低转速的旋转部件比较有效,而对于高速旋转机械效果不佳^[6],特别是直升机齿轮箱。为了进行性能比较,计算了轴承滚动体故障信号的包络谱,如图7所示。

其中图7(a)是对采集信号进行Hilbert变换

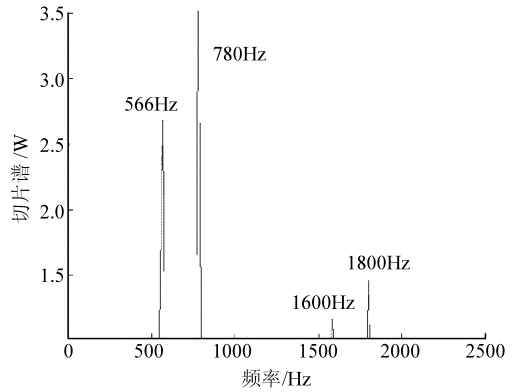
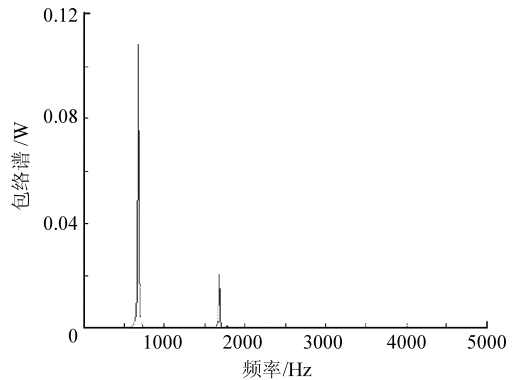
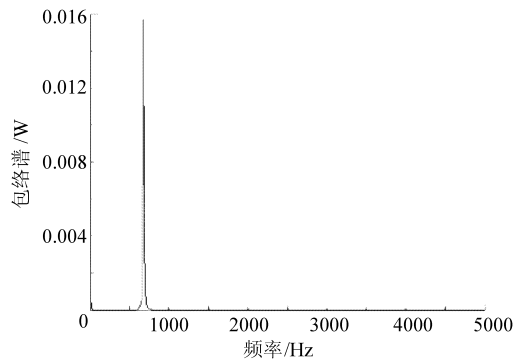


图6 $\alpha = f_{bc}$ 时的谱相关密度函数切面

Fig 6 The slice of SCDF with $\alpha = f_{bc}$



(a) 滤波前



(b) 滤波后

图7 轴承滚动体故障信号的包络谱

Fig 7 The envelop spectrums of rolling element fault

后直接计算出的包络谱,而图7(b)是对采集信号进行Hilbert变换后经过低通滤波计算出的包络谱(选择了10阶ButterWorth低通滤波器,截止频率为1000 Hz)。由图7可见,Hilbert解调分析方法不能提取轴承滚动体故障的特征。

4 结论

直升机齿轮箱的振动信号十分复杂,干扰噪声大,传统的谱分析方法难以检测轴承的早期故障。本文介绍了一种基于循环统计量的信号分析

方法,并给出了表征故障的一维和二维循环平稳特征。该方法利用了振动信号的二阶循环平稳性,能够抑制加性平稳噪声,更易于提取微弱的轴承故障特征信息。最后将该方法用于某型直升机中减速器轴承外环和滚动体故障的早期检测中,取得了较好的效果。结果表明,该方法优于功率谱和解调分析。

参 考 文 献

- [1] Cronkhite J D. Practical application of health and usage monitoring (HUMS) to helicopter rotor, engine and drive system[A]. In: 1993 American Helicopter Society Annual Forum[C]. 1993. 1445- 1455.
- [2] Bouillaut L, Sidahmed M. Helicopter gearbox vibrations: cyclostationary analysis or bilinear approach[A]. International Symposium on Signal Processing and Its Application [C]. 2001. 13- 16.
- [3] 杨江天, 陈家骥, 曾子平. 基于高阶谱的旋转机械故障征兆提取[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 13- 17.
Yang J T, Chen J J, Zeng Z P. Extracting fault features using higher order spectra for rotating machinery [J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 13- 17. (in Chinese).
- [4] 薛萍, 刘泊, 唐德尧. 公务来车报警系统的共振解调检测分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(2): 71- 74.
Xue P, Liu B, Tang D Y. Resonance examination analyse based on outside alarm system [J]. Journal of Harbin Univ Sci & Tech, 2003, 8(2): 71- 74. (in Chinese)
- [5] 姜鸣, 陈进, 秦恺. 时变调幅信号的循环平稳特征[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(12): 1798- 1801.

- Jiang M, Chen J, Qin K. Performance for time varying amplitude modulation signal using cyclostationary approach [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(12): 1798- 1801. (in Chinese)
- [6] Antoni J, Randall R B. Differential diagnosis of gear and bearing faults [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 124: 165- 171.
- [7] 陈仲生, 杨拥民, 胡芑庆, 等. 二阶循环平稳分析在转子早期碰摩故障识别中的应用[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(2): 221- 223.
Chen Z S, Yang Y M, Hu N Q, *et al.* Application of second order cyclostationarity to identifying early faults of rub impact in rotors [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(2): 221- 223. (in Chinese)
- [8] 田涛, 丁康. 希尔伯特变换及其在故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 1996, 15(2): 23- 27.
Tian T, Ding K. Hilbert transformation and its application in fault diagnosis [J]. Journal of Vibration and Shock, 1996, 15(2): 23- 27. (in Chinese)

作者简介:



陈仲生(1977-) 男,安徽桐城人,国防科技大学机电工程研究所博士研究生,研究方向为机械信号处理和故障诊断, E-mail: czs_study@sina.com, 联系电话: 0731-4573394。

杨拥民(1966-) 男,湖南长沙人,国防科技大学机电工程研究所教授,硕士,1998年赴美国加利福尼亚大学伯克利分校进行访问研究,主要从事智能状态监控与故障诊断方面研究。

(责任编辑: 蔡 斐)