

滚动轴承故障的谱相关特征分析

柳亦兵¹ 辛卫东¹ 李 宏² 滕 伟¹ 周雁冰¹

1. 华北电力大学, 北京, 102206 2. 河南省电力勘测设计院, 郑州, 450007

摘要: 滚动轴承的振动响应信号包含确定性成分和随机成分, 两者都能反映轴承发生故障的信息。利用随机成分进行故障定性诊断, 可以只使用较少的振动信号数据, 计算效率高, 有利于工程实际应用。针对轴承振动信号中随机成分能量较低、分布频率范围较宽的特点, 采用对数谱相关函数灰值图反映信号中随机成分对循环平稳特性的影响, 定性判断故障引起的谱相关函数中随机成分的变化, 然后通过共振区切片进行故障解调分析, 提取特征信息。通过实测正常轴承和内圈点蚀故障轴承振动信号的对比分析, 表明即使在较低频率分辨率条件下, 谱相关密度也能实现故障信息的解调, 并可以提高计算效率。

关键词: 滚动轴承; 振动; 故障; 循环平稳; 谱相关分析

中图分类号: TH17

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2013.03.014

Spectral Correlation Feature Analysis for Rolling Bearing Faults

Liu Yibing¹ Xin Weidong¹ Li Hong² Teng Wei¹ Zhou Yanbing¹

1. North China Electric Power University, Beijing, 102206

2. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou, 450007

Abstract: Vibration signals of rolling bearing contained deterministic components and random components, both of them reflected the failure information of the bearing. For qualitative diagnosis of bearing faults using random components less vibration signal data was needed, that increased the computational efficiency for cyclostational analysis. It was proposed herein logarithmic contour maps of spectral correlation density was used firstly to reveal the change of weak random components caused by bearing faults, and then to take the slice at a resonance frequency to extract the fault information. An analysis example with real bearing vibration signals shows that even in condition of lower frequency resolution, spectral correlation density can realize the demodulation of fault information, achieve the purpose of fault feature extraction, and improve the calculation efficiency.

Key words: rolling bearing; vibration; fault; cyclostationarity; spectral correlation analysis

0 引言

滚动轴承是旋转机械设备的主要部件, 应用广、故障率高, 因此一直是机械故障诊断领域的主要研究对象之一。振动监测是滚动轴承运行状态监测与故障诊断的主要方法, 技术比较成熟, 国内外已取得了研究成果^[1]。由于机械设备类型繁多, 结构和运行条件差别很大, 导致轴承振动状态往往非常复杂, 测量信号受到设备交叉干扰和噪声的影响。因而, 如何消除干扰噪声影响, 从测量信号中提取对故障敏感的特征信息一直是轴承故障诊断的研究难点和热点, 近年来信号分析领域出现的许多新方法都在轴承故障诊断方面得到应用^[2]。

滚动轴承振动主要包含旋转产生的周期性和随机性振动以及故障引起的周期性冲击振动, 它们相互作用, 产生复杂的信号调制现象, 因此解调分析是轴承故障特征提取的主要方法。常用的基

于希尔伯特变换的解调分析、广义检波滤波解调分析等方法对于复杂调制信号的分析存在局限性, 而循环平稳分析方法可以抑制干扰影响, 提取信号中更深层次的故障信息^[3-4], 因而近年来针对轴承振动信号循环平稳特性及故障特征提取方法的研究成为热点^[5-9]。但是循环平稳分析存在计算量大、计算时间长的问题。由于轴承振动信号中的随机成分同样包含故障信息^[4], 故可以利用少量数据, 根据其随机成分的变化初步判断是否发生故障, 以提高计算效率和故障判断的实时性。本文探讨轴承故障产生的随机成分的变化对信号循环平稳特性的影响, 针对轴承振动信号中随机成分的能量较低、分布频率范围较宽的特点, 利用谱相关密度三维对数等高图对故障引起的信号随机成分的变化进行显示, 进一步确定谱相关密度的切片部位。通过多组实测正常轴承和内圈点蚀故障轴承振动信号的对比分析, 对上述方法进行定性分析, 验证该方法的应用效果。

收稿日期: 2012-05-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(11QX48)

1 循环平稳信号

统计特性随时间发生周期性变化的随机信号 $x(t)$ 称为循环平稳随机信号, 其中自相关函数具有周期性的信号称为二阶循环平稳信号。即自相关函数可以表示为

$$R_x(t, \tau) = R_x(t + T, \tau) \quad (1)$$

式中, T 为周期。

将式(1)中的 $R_x(t, \tau)$ 展开成傅里叶级数:

$$R_x(t, \tau) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_x^a(\tau) e^{j2\pi m t} \quad \alpha = m/T \quad (2)$$

其中, $R_x^a(\tau)$ 为傅里叶系数, 其表达式为

$$R_x^a(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi m t} dt \quad (3)$$

$R_x^a(\tau)$ 称为循环自相关函数, α 称为循环频率。如果在某个循环频率 α ($\alpha \neq 0$) 处, 循环自相关函数 $R_x^a(\tau) \neq 0$, 表明信号在该循环频率下具有二阶循环平稳特性。

循环自相关函数可表示为^[3]

$$R_x^a(\tau) = \langle x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi m t} \rangle \quad (4)$$

式中, $x^*(t)$ 为 $x(t)$ 的复共轭; $\langle \cdot \rangle$ 为求平均计算。

循环自相关函数的傅里叶变换称为循环谱密度函数, 或称谱相关函数:

$$P_x^a(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x^a(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (5)$$

循环谱密度函数是以频率 f 和循环频率 α 为自变量的二维函数。将其中一个自变量固定, 得到循环谱密度与另一个自变量的变化关系, 也称为切片。对循环谱密度沿频率轴切片得到各循环频率的能量分布情况; 沿循环频率轴切片反映信号在当前循环频率处时延的周期变化情况, 即该循环频率处时延的功率谱密度。

类似经典谱估计, 循环谱密度估计方法也主要有自相关法和周期图法, 自相关法计算精度和效率都很低。工程应用中更多采用循环周期图法, 其基本表达式为

$$\hat{P}_x^a(f) = \frac{1}{T} [X_T(f + \frac{\alpha}{2}) X_T^*(f - \frac{\alpha}{2})] \quad (6)$$

式中, $X_T(f)$ 为有限长测量信号 $x_T(t)$ 的傅里叶变换。

2 滚动轴承振动的循环平稳特性

滚动轴承运行中产生的振动主要源自滚动体与内外圈接触产生的激励。正常状态下, 振动信号主要呈平稳随机信号特征。如果轴承上出现局部故障, 在旋转过程中, 每当故障点发生接触, 将产生冲击激励, 导致振动信号中出现周期性冲击响应, 相应的频率称为轴承的故障特征频率。故障特征频率与故障部位及轴承结构尺寸有关, 可

以通过计算得到。实际轴承在工作过程中, 滚动体与轴承内外圈之间存在相对滑动, 故障特征频率在一定范围内会发生瞬时变化。

轴承故障点每次接触产生的冲击响应可以视为某个结构共振频率下的指数衰减振荡:

$$B(t) = e^{-at} \cos(2\pi f_r t) \quad (7)$$

式中, f_r 为结构的有阻尼固有振动频率; a 为与阻尼有关的衰减系数。

根据信号分析理论, 故障轴承的周期性冲击振动 $x(t)$ 可以视为单个冲击振动响应 $B(t)$ 与一个脉冲串函数卷积的结果, 即

$$x(t) = B(t) * \sum_n A_n \delta(t - nT) + u(t) = \sum_n A_n B(t - nT) + u(t) \quad (8)$$

式中, A_n 为第 n 次冲击振动响应的幅值; $u(t)$ 为零均值平稳高斯噪声。

图 1 为式(9)故障轴承振动信号的谱相关函数 $P_x^a(f)$ 在 $\alpha-f$ 平面上的峰值分布示意图。 $P_x^a(f)$ 为轴对称形式, 图中只画出 $\alpha-f$ 平面的第一象限(正值区间)。在频率 f 轴上共振频率附近的边带峰值点和循环频率 α 轴上共振频率附近的边带峰值点的斜连线的交点上, 谱相关函数出现峰值, 形成在 f 轴和 α 轴附近的三角形共振区 (α 轴上频率比 f 轴上频率大一倍)。根据谱相关函数三角形共振区的特征可以进行故障判断。共振区附近分别对 f 轴或 α 轴上对应的特征频率处切片, 即可得到相同的信号解调后的信息。

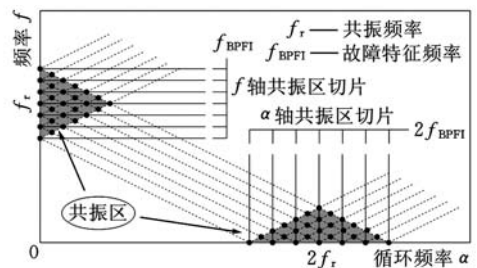


图 1 轴承故障信号的谱相关密度函数示意

3 滚动轴承故障分析实例

3.1 故障轴承振动信号

在滚动轴承试验台上用模拟生成滚动轴承典型故障进行方法验证。试验用轴承为单列向心球轴承 60350。轴承外圈固定, 内圈转动, 转速为 1350r/min, 对应旋转频率 22.5Hz。用安装在轴承座上的振动加速度传感器(丹麦 B&K4371 型)测取正常和故障轴承的振动信号。用转速脉冲信号控制实现转速同步测量, 角度采样率为 1024 点每转, 换算采样频率约为 23 040Hz。对多组测量振动信号进行分析处理, 下面给出一组分析实例。

图2为轴承正常状态和内圈存在局部点蚀故障的典型振动加速度信号。可以看出两种状态的振动信号差异较大。正常状态下,振动信号幅值偏低,呈现平稳随机特性。而故障状态下,振动信号仍然以随机成分为主,但信号幅值明显增大,信号中出现周期性冲击振荡成分。

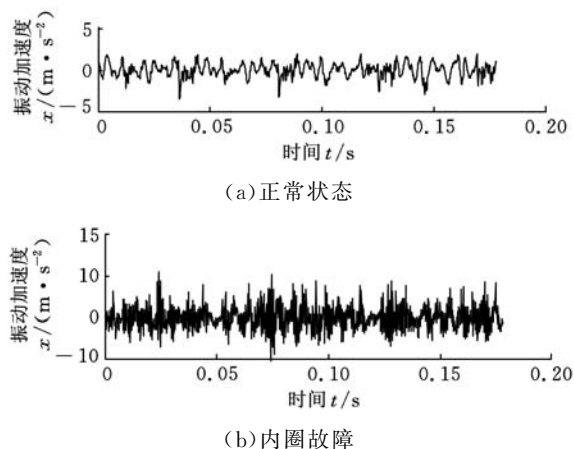


图2 轴承振动信号比较

图3为正常和故障轴承的振动信号功率谱。功率谱估计采用 Welch 法,FFT 分析点数 1024, Hanning 窗,平均次数 100。图中显示频率范围 0~4000Hz。对比可见,正常状态下,振动信号功率谱的能量主要集中在低频范围,在 1200Hz 附近有较微弱成分。内圈故障振动信号的功率谱除了低频区的峰值以外,分别在 1200Hz、2100Hz、3400Hz 附近出现突出共振峰值,每个峰值由若干边带峰值组成,表明局部故障的周期性冲击激励产生不同结构的共振响应。由于谱分析采用了较低的频率分辨率,故不能分辨出边带峰值对应的故障特征频率。

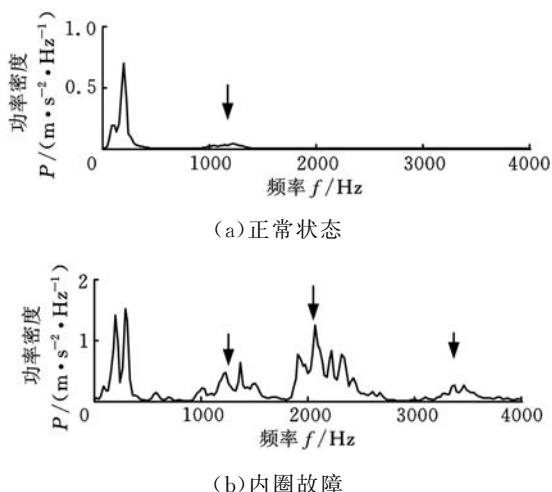


图3 振动信号功率谱比较

3.2 谱相关特征分析

采用平均周期图方法对正常和故障轴承振动信号进行谱相关函数估计计算。为了提高计算效

率,取较少数据点进行计算(1024点)。图4为正常和故障轴承谱相关函数的对数等高图。采用对数显示可以观察振动信号中能量较低的随机成分的循环平稳特性。对比两图可以看出,虽然分析数据短,频率分辨率较低,但谱相关函数中仍能看出故障引起的变化。振动信号中的低能量随机成分在谱相关图中集中在斜向的共振带上,在靠近坐标轴处形成三角形共振区。例如,正常状态在循环频率轴 200~500Hz、2000~2800Hz、7000~7500Hz 出现三角共振区。而轴承存在故障时,谱相关密度函数除了原有的共振带外,在循环频率 3800~4600Hz 出现突出共振区(图中箭头所指部位),而该共振区在正常状态下非常微弱,表明故障周期激励对该共振区的振动响应影响显著。

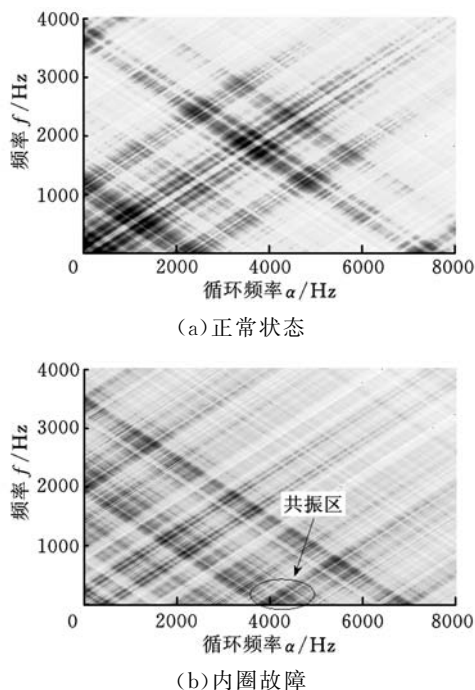
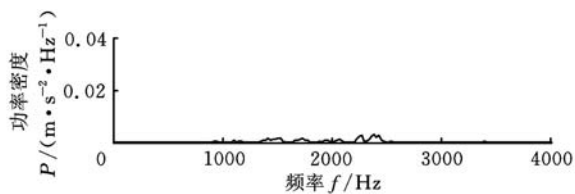


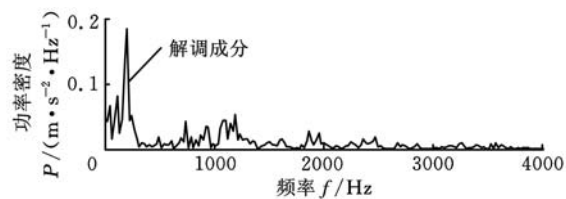
图4 振动信号的谱相关函数比较

图5为正常和故障信号循环谱密度在循环频率 $\alpha=4320\text{Hz}$ 处的切片对比。正常状态下,切片在整个频率范围内没有突出的成分,说明在该循环频率下的二阶循环平稳特性很弱。而故障状态切片在低频段出现突出峰值,该处峰值是对信号共振频段($f=2100\text{Hz}$)附近边带成分的解调结果。虽然由于计算频率分辨率低,解调成分不能准确识别故障特征频率,但是用该共振频率附近切片可以清楚反映故障产生的变化,可以有效表征故障。

图6为正常和故障信号循环谱密度在频率 $f=2160\text{Hz}$ 处的切片对比。由于谱相关密度函数为轴对称形式,在频率轴上某个部位的切片与循环频率轴上相应部位(频率相差2倍)的切片包含完全相同的信息。

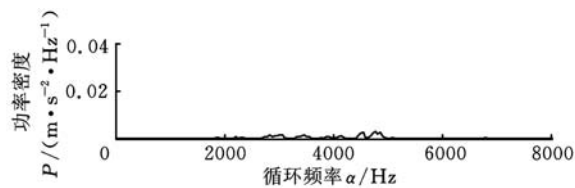


(a) 正常状态

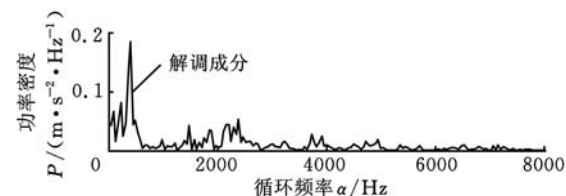


(b) 内圈故障

图 5 循环频率 $\alpha=4320\text{Hz}$ 处的切片对比



(a) 正常状态



(b) 内圈故障

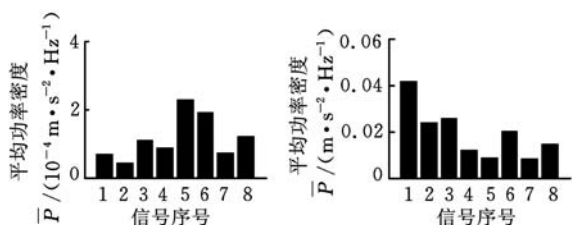
图 6 频率 $f=2160\text{Hz}$ 处的切片对比

3.3 故障特征提取

前面分析结果表明,谱相关函数共振区切片的低频部分(解调成分)能够清楚反映故障引起的变化。取 8 组正常信号和故障信号,计算谱相关函数切片低频区(图 6 中 $0\sim 500\text{Hz}$ 区)的平均功率密度作为特征值,结果如图 7a、图 7b 所示。作为比较,图 7c、图 7d 示出正常信号和故障信号的有效值。可以看出,轴承内圈故障导致振动信号的有效值有所增大,但不明显。而谱相关函数切片的低频平均功率密度增加了超过两个数量级,表明其对故障状态的表征更灵敏,对正常状态和故障状态的区分更清楚,有助于提高故障轴承诊断的准确性。

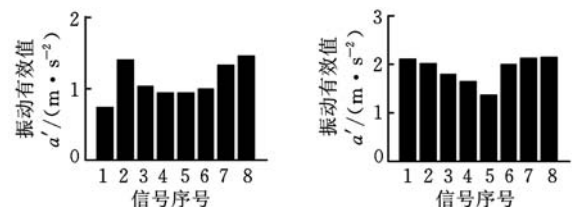
4 结论

(1)轴承局部点蚀故障激励导致振动信号在一些共振频带的能量增加,这种变化可以用对数谱相关函数图清楚地反映出来。以谱相关函数共振区切片低频部分(解调成分)的平均值作为特征值,该值对于故障状态引起的变化更加敏感,有助



(a) 正常

(b) 内圈故障



(c) 正常时有有效值

(d) 内圈故障时有有效值

图 7 轴承正常状态和故障状态的特征值对比

于提高故障轴承诊断的准确性。

(2)为了满足轴承故障诊断工程应用的基本要求,实现故障的定性分析,可以采用较短的高采样率振动信号进行谱相关函数分析,同样能够清楚反映轴承故障引起的共振带能量变化,实现故障信息的解调分析,这样可以提高分析效率,增加分析实时性。但是由于数据少,频率分辨率低,得不到准确的故障特征频率,因此不能对轴承故障类型做出判断。

参考文献:

- [1] Tandon N, Choudhury A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings [J]. Tribology International, 1999, 32: 469-480.
- [2] Randall R B, Antoni J. Rolling Element Bearing Diagnostics—A Tutorial [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25: 485-520.
- [3] Antoniadis I, Glossiotis G. Cyclostationary Analysis of Rolling—Element Bearing Vibration Signals [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248 (5): 829-845.
- [4] 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.
- [5] Antonia J, Bonnardot F, Raad A, et al. Cyclostationary Modelling of Rotating Machine Vibration Signals [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(6): 1285-1314.
- [6] Antoni J. Cyclic Spectral Analysis of Rolling—element Bearing Signals: Facts and Fictions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(3/5): 497-529.

基于遗传算法的差值形态滤波尺度参数优化方法研究

吕博 张永祥 柯维
海军工程大学,武汉,430033

摘要:针对使用差值形态滤波提取故障特征时结构元素难以确定的情况,对尺度参数实行优化从而寻求其最佳尺度。首先对滚动轴承信号进行降噪处理,之后对信号进行差值形态滤波提取故障信号,通过遗传算法寻找到了结构元素尺度的最优解。通过仿真和试验研究表明,该方法取得的效果优于非优化的处理效果和包络解调法。

关键词:形态滤波;遗传算法;结构元素;故障诊断

中图分类号:TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.03.015

Research on Measure Parameter Optimization Method of a Difference Morphological Filtering Based on Genetic Algorithm

Lü Bo Zhang Yongxiang Ke Wei

Navel University of Engineering, Wuhan, 430033

Abstract: Scale parameters were optimized to search the best scale, which was due to the construction element was hard to be determined when fault characteristics were extracted using a difference morphological filtering. The noise in antifriction bearing signals was reduced, the fault signals were extracted through the difference morphological filtering, and then the best results of construction element scales were gotten through genetic algorithm. The experimental and simulation results show the new method presented herein is better than the method without optimization and the envelope demodulation method.

Key words: morphological filtering; genetic algorithm; structural element; fault diagnosis

0 引言

数学形态学是基于积分几何和随机集论建立起来的数学方法^[1],该方法的信号处理只取决于待处理信号的局部特征,利用预先定义的结构元

素来局部修正信号的几何结构,以达到提取信号、抑制噪声的目的,因此结构元素的选择对处理结果具有非常大的影响。差值形态滤波器作为形态滤波器的一种,具有良好的提取冲击信号的能力,因此常常用于轴承的故障诊断^[2-3]。目前轴承的故障诊断方法主要有包络解调与谱峭度法,但是包络解调方法需要选择窄带滤波参数,将高频振

收稿日期:2011-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50979109)

[7] 周福昌,陈进,何俊,等. 循环平稳信号处理在机械设备故障诊断中的应用综述[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 148-152.

Zhou Fuchang, Chen Jin, He Jun, et al. Survey of The Application of Cyclostationary Signal Processing in Machinery Fault Diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 148-152.

[8] 李力,屈梁生. 循环统计量方法在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(2): 116-119.

Li Li, Qu Liangsheng. Application of Cyclic Statistics to Fault Diagnosis of Rolling Bearings[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(2): 116-119.

[9] 杨龙兴,贾民平,许飞云,等. 齿轮裂纹故障的循环

矩诊断[J]. 中国机械工程, 2003, 14(19): 1621-1623.

Yang Longxing, Jia Minping, Xu Feiyun, et al. Cyclic Moment Diagnosis for Gear Crack Faults[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(19): 1621-1623.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:柳亦兵,男,1961年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为机械设备振动、测试与故障诊断。辛卫东,男,1962年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院博士研究生。李宏,男,1958年生。河南省电力勘测设计院机务部高级工程师。滕伟,男,1981年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院讲师、博士。周雁冰,男,1984年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院博士研究生。