

文章编号: 1000-8055(2007)08-1340-06

基于旋转坐标系转轴振动信号的滚动轴承故障诊断方法

雷剑宇, 廖明夫

(西北工业大学 旋转机械与风能装置测控研究所, 西安 710072)

摘 要: 实验验证了基于旋转坐标系转轴振动信号的滚动轴承局部故障诊断方法. 建立起滚动轴承故障实验台, 采用压电晶体加速度传感器测取转轴的振动. 通过滚动轴承内环、外环、滚动体和保持架四种典型故障的实验分析结果, 证明了该方法的可行性, 并发现转轴振动信号的传递路径相对简单, 对轴承内环、滚动体和保持架早期微小故障的发现与诊断可能是有利的.

关 键 词: 滚动轴承; 局部故障; 旋转坐标系; 加速度传感器; 频谱; 包络解调谱

中图分类号: TH133

文献标识码: A

A diagnostic approach to rolling element bearing based on vibration signal of shaft in a rotating reference frame

LEI Jian-yu, LIAO Ming-fu

(Institute of Monitoring and Control for Rotating Machinery and Wind Turbines
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to diagnose local defects in a rolling element bearing, an approach was developed based on vibration signal of shaft in a rotating reference frame. A test rig for rolling element bearing was established, and piezoelectric accelerometers were used to measure the vibration signals of shaft. The feasibility of this approach was demonstrated by the experimental results from four typical defects involving inner race, outer race, rolling element and cage. It was found that the transmission path of vibration signals of shaft is relatively simple, contributing to early detection and diagnosis of minor defects for inner race, outer race, rolling element and cage.

Key words: a rolling element bearing; local defect; rotating reference frame; piezoelectric accelerometer; spectrum; envelope spectrum

滚动轴承是旋转机械中的重要部件,也是最容易损坏的零件之一.滚动轴承发生故障时,故障信息会在支座振动信号中得到体现,而用压电晶体加速度传感器拾取支座振动信号,从而获取故障信息是目前最简便、最廉价的途径.因而目前滚动轴承的诊断方法研究大都围绕着支座振动信号展开,并形成了一系列分析与诊断的方法.但是某

些类型故障的信息从支座振动信号中不易获取,故在实用中应用效果并不理想^[1].

造成这种状况的最主要原因是从故障源到测点的传递途径复杂,同时支座振动信号也容易受到噪声的干扰.当轴承运转时,滚道接触面上的高低不平 and 局部缺陷所产生的冲击振动,将以机械波的形式从故障点出发呈半球形波面向外传播.

收稿日期: 2006-07-10; 修订日期: 2006-10-16

作者简介: 雷剑宇(1982-),男,湖北崇阳人,博士生,主要研究方向为转子动力学、旋转机械故障诊断和信息信号处理等.

在信号传播的路径上如果遇到材料的转折处、尖角形状或两个零件的配合界面时,机械波将会发生转折、发射而引起很大的能量损耗,以至于每经过一个中间界面能量将损失 80 %^[1-2]. 当传感器的检测位置离故障部位较远时,信号在支座中传递不但能量损失很大,而且叠加了多种其它频率成分. 同时,这种信号不只是反射信号、多振源信号的简单叠加,往往还会因为互调作用等原因而产生非线性现象,使故障特征在信号中的表现形式更加复杂^[1]. 轴承故障的诊断中,外环故障由于冲击振动明显、传递路径相对简单,传感器所能拾取到的信号品质是最好的,因此外环故障也是最容易诊断的. 内环故障的传递路径相对就复杂许多,而滚动体和保持架故障引起的冲击本身就很微弱,经过多层传递之后,就更加难以提取故障特征信息^[3].

由于故障引起的冲击振动不但沿支座传递,同时也沿转轴传递,因而转轴振动信号中也将包含轴承故障信息. 由于转轴更接近于内环、滚动体和保持架故障点,应能更容易地发现轴承早期微小的故障. 本文将研究基于旋转坐标系转轴振动信号的滚动轴承故障诊断方法,分析包含故障信息的原始信号的基本形态,验证该方法的可行性,为滚动轴承故障信息的提取、分析与诊断提供一种方法与手段.

1 滚动轴承故障实验装置

1.1 滚动轴承故障实验台

图 1 给出了滚动轴承故障实验台简图. 旋转坐标系中的转轴振动信号通过安装在转盘 4 上的 Br üel & Kj ü 4391 型压电晶体传感器测量. 同时,为了便于比较和验证,在故障轴承支座的水平方向上采用常规方法测量支座的横向振动.

1.2 旋转坐标系转轴振动信号测取方法

图 2 中压电晶体加速度传感器 1 和 2 配为一对,并安装在转盘直径方向上^[4-5]. 传感器 1 和 2 感受到的转轴振动信号传递到滑环引电器,并由滑环引电器传至信号调理器,调理后的信号由 A/D 转换器转成数字信号,然后读入计算机.

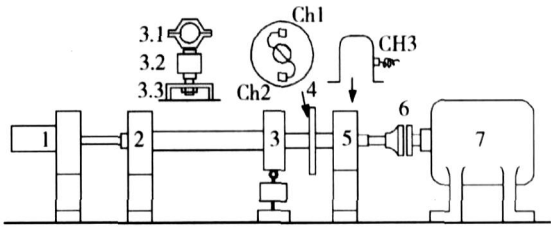
传感器 1 测得的信号

$$a_1 = R\varepsilon + a_y \cos \theta - a_x \sin \theta \tag{1}$$

传感器 2 测得的信号

$$a_2 = R\varepsilon - a_y \cos \theta + a_x \sin \theta \tag{2}$$

其中 a_x, a_y 分别表示转轴在 X 和 Y 方向上的加



1 引电器;2 轴承座 1(正常轴承);
3 可调节负载,3.1 拉压力轴承座,
3.2 拉压力传感器,3.3 拉压力支座;
4 传感器安装盘;5 轴承座 2(故障轴承);
6 柔性联轴器;7 电机

图 1 滚动轴承故障实验台简图

Fig. 1 Test rig for the rolling element bearing

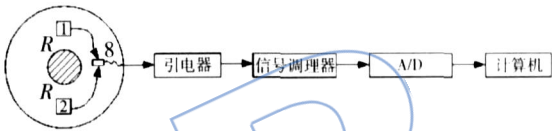


图 2 旋转坐标系加速度信号测取方法示意图

Fig. 2 Schematic picture of measuring vibration signal of shaft in rotating reference frame

速度, θ 为转子转角, ε 为角加速度.

两信号相加,即可消除横向振动 a_x, a_y 的影响^[4-5],得到转轴的扭振信号.

(1) + (2) 得

$$a_1 + a_2 = 2R\varepsilon \tag{3}$$

而两式相减,则可以滤去扭振信号,从而提取出横向振动分量,

(1) - (2) 得

$$a_1 - a_2 = 2(a_y \cos \theta - a_x \sin \theta) \tag{4}$$

1.3 轴承故障模拟

本文采用 6307 深沟球轴承,模拟了四类典型故障,分别是外环划痕、滚动体划痕、内环点蚀和保持架断裂. 具体故障参数在表 1 中给出. 故障轴承由西安海红轴承总厂精密轴承研究所负责制作,划痕故障通过电蚀得到,点蚀由强酸腐蚀而成,保持架断裂通过机械冲压制成.

1.4 故障判断标准

轴承工作表面上如果存在离散型缺陷或局部损伤,当滚动轴承另一工作表面通过某个缺陷点时,就会产生一个微弱的冲击振动信号. 随着转轴的旋转,工作表面不断与缺陷点接触冲击,从而产生一个周期性的冲击振动信号. 缺陷点处于不同的元件工作表面,冲击脉冲信号的周期间隔也即频率是不相同的,这个频率就称为冲击的间隔频

率或滚动轴承的故障特征频率^[2,6]. 对于同一种故障类型,通过支座振动固定坐标和转轴振动旋转坐标所测得的冲击振动信号的周期间隔是不会改变的,因而这两种方法的故障判断标准也应该是相同的.

表 1 轴承故障具体参数表

Table 1 Different types of simulated faults on the rolling element bearing

故障类型	故障宽度/mm	深度/mm	说 明
外环故障	0.25	0.1	划痕(滚道中央轴向长度为 5mm)
滚动体故障	0.25	0.1	划痕(球表面)
内环故障	3		点蚀圆的直径(滚道中央)
保持架故障			断裂(保持架剪出 1/2 宽度的缺口)

轴承不同元件的故障特征频率可以通过轴承简单的运动关系分析,根据轴承的转速、轴承零件的形状和尺寸参数计算得到^[2,6],本文不予详述.

2 实验数据的分离

图 3(a),3(b)中给出了传感器 1 和 2 测得的

一组信号.可以看出,该信号主要由低频信号和冲击振动信号叠加而成.图 3(c),3(d)为信号的频谱,其上存在幅值明显占优的低频成分.一般来说,滚动轴承局部故障引起的冲击振动的频率比通常意义上的低阶转轴的扭转振动和横向振动要高许多,因此可以认为原始信号中的低频分量是转轴的扭转振动和横向振动引起的,而轴承故障冲击振动信号则包含在高频分量中.

将低频分量分离后,得到信号 3(图 4(a))和信号 4(图 4(b)),同样通过式(3)和式(4)可从中分解出高阶扭转振动分量(图 4(c))和横向振动分量(图 4(d)).可以看出,高阶横向振动分量呈现出清晰、规律的冲击振动形态,而高阶扭振信号中也存在轴承故障引起的冲击振动,但并不清晰,也不规律.因而,可以确定轴承故障引起的冲击振动沿转轴传递最主要还是反映在横向振动信号上,扭转振动信号上也有体现,但并不明显.总的来说,本文中的旋转坐标系加速度信号可以分为低频信号段和高频信号段,低频信号代表着转轴的常规振动状态,而高频信号中则包含着滚动轴承故障特征信息.对于轴承局部故障的诊断来说,需滤去信号的低频成分.

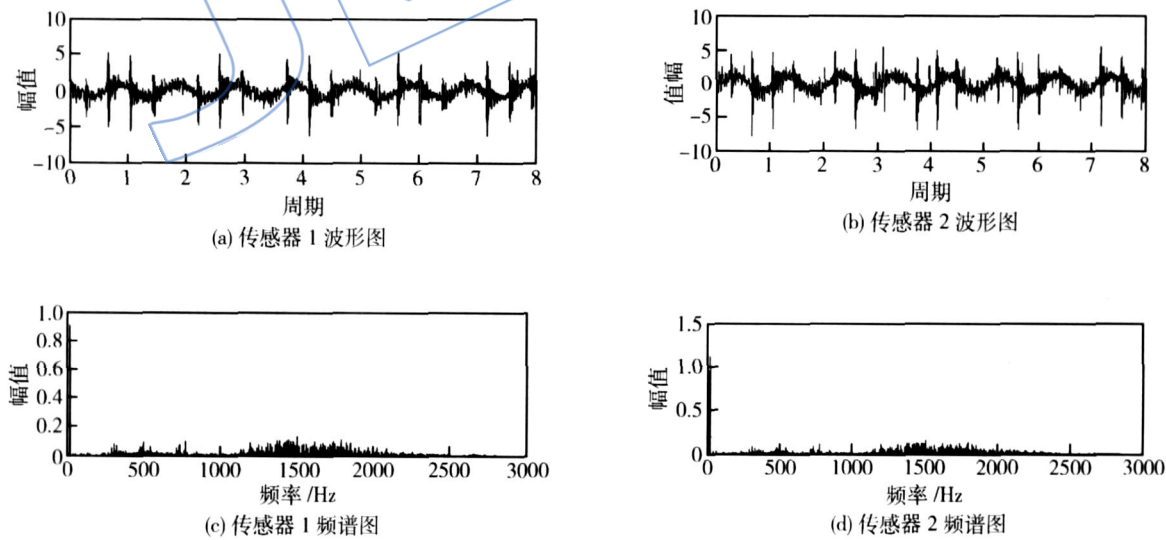
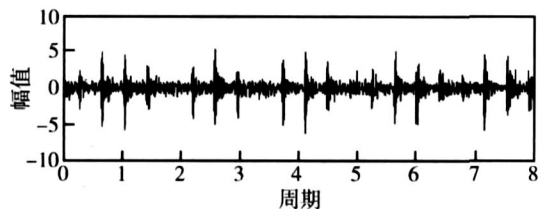
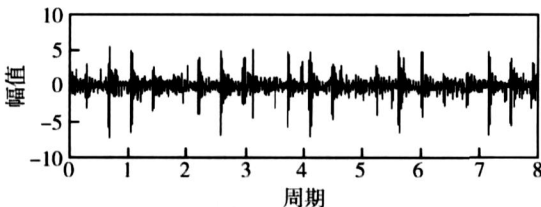


图 3 原始信号图

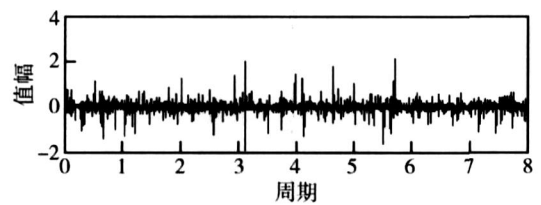
Fig. 3 Original vibration signal of shaft



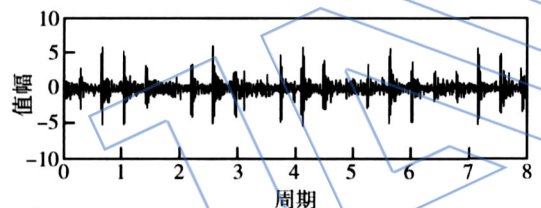
(a) 低频分离后的传感器 1 波形图



(b) 低频分离后的传感器 2 波形图



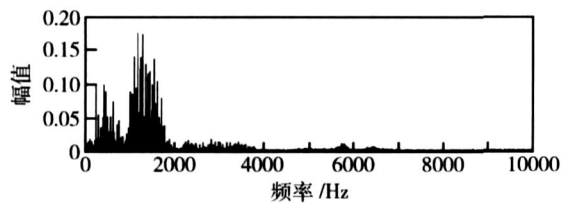
(c) 信号 a 的频谱图



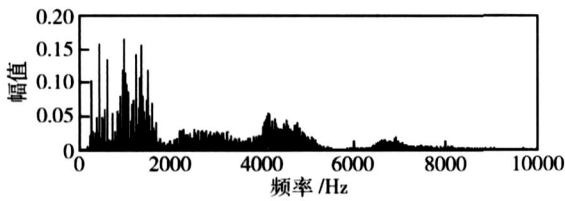
(d) 信号 b 的频谱图

图 4 包含故障特征信息的信号图

Fig. 4 Vibration signal of shaft with fault information



(a) 转轴信号频谱



(b) 支座信号频谱

图 5 内环故障转轴信号与支座信号频谱图

Fig. 5 Spectrum of the vibration signal of shaft and base with a fault on the inner ring

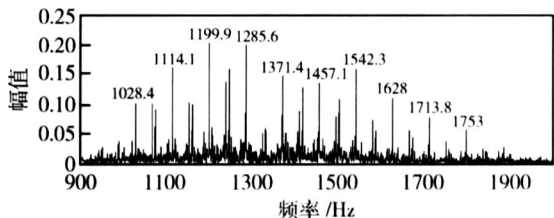
3 实验结果分析

3.1 内环故障

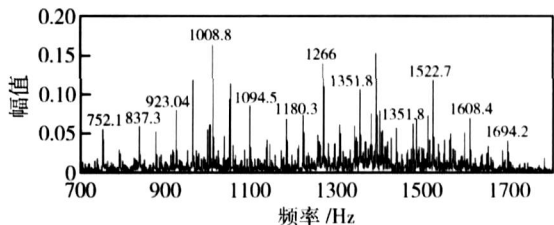
3.1.1 内环故障信号频谱特征

图 5 为内环故障转轴信号和支座信号的频谱图。支座信号频谱(图 5(b))中存在多个共振区,说明故障信号在支座传递过程中激起了多个频率成分。而相比之下,从旋转坐标系转轴振动信号中分离出的故障信号的频谱就要简单很多,说明其传递路径简单。

现集中分析两信号中主要的高频共振区域(图 6)。发现转轴振动信号频谱中存在 1 028.4, 1 114.1, 1 199.9, 1 285.6, 1 371.4, 1 457.1, 1 542.3, 1 628, 1 713.8 和 1 753 Hz 的主要频率分量,其分别为内环故障特征频率(85.88 Hz, 转速为 1 176 r/min, 6307 轴承的主要参数:滚动体直径 14.5 mm, 中径 57.5 mm, 滚动体个数 7)的 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 和 20 倍。支座信号存在 752.1, 837.3, 923.04 以及 1 522.7 Hz 等主要分量,虽然它们之间的间隔与内环故障特征频率极为接近,但与内环故障特征频率已经没有了整倍数对应关系。这些主要分量中间的突出频率分量也是这种情况。也就是说,内环特征频率在旋转坐标系转轴振动信号频谱中得到了直接地体现,而在支座信号中却只是间接地体现。



(a) 转轴信号频谱显化图



(b) 支座信号频谱显化图

图 6 内环故障共振区域显化图

Fig. 6 Amplified spectrum of the vibration signal of shaft and base with a fault on the inner ring

3.1.2 内环故障转轴信号包络解调谱

图 7 给出转速 1 176 r/min 下的包络解调谱。从转轴信号包络解调谱(图 7)可以清楚地看到内

环故障特征频率 $m f_i$ (m 为整数) 分布特征, 据此可以确定该故障为内环局部故障. 分析的结果与模拟的故障是一致的. 包络解调谱上存在 $m f_i \pm 2 f$ (f 为转频) 分量, 这是由于载荷区分布引起的调制现象^[7], 但这对故障的判断不会产生影响.

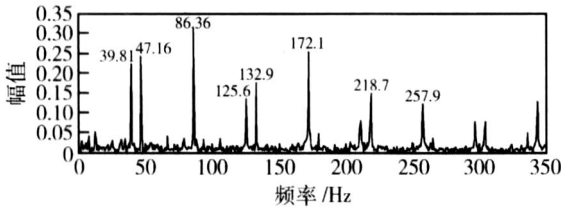


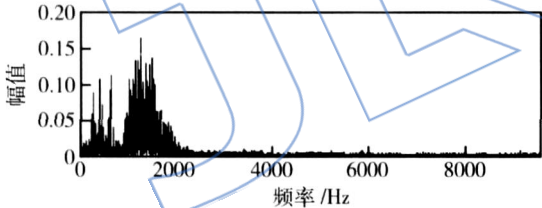
图 7 内环故障包络解调谱

Fig. 7 Envelope spectrum of the vibration signal of shaft with a fault on the inner ring

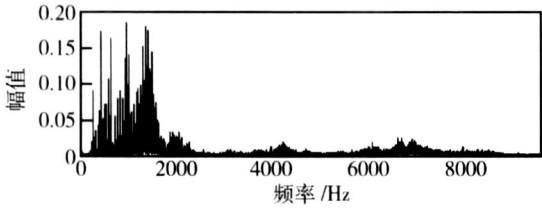
3.2 外环故障

3.2.1 外环故障信号频谱特征

虽然外环故障信号在支座中的传递路径相对于内环故障要简单得多, 但支座信号频谱 (图 8 (b)) 上仍然存在多个高频共振区. 转轴信号频谱 (图 8(a)) 频率成分仍然简单, 更为重要的是转轴信号外环故障和内环故障所激起的高频共振区基本相同, 约 1 000~2 000 Hz 之间, 此现象进一步说明该信号的传递过程是相对简单、稳定的.



(a) 转轴信号频谱



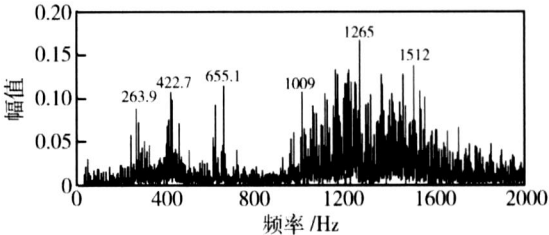
(b) 支座信号频谱

图 8 外环故障转轴信号与支座信号频谱图

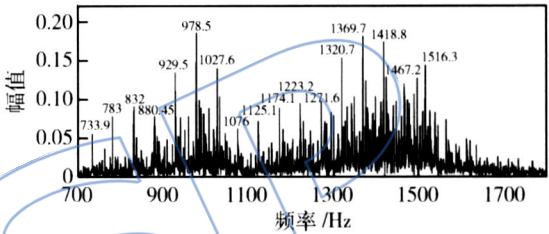
Fig. 8 Spectrum of the vibration signal of shaft and base with a fault on the outer ring

转轴信号频谱 (图 9(a)) 中已经不能清晰地分辨出主要频率成分, 其突出的分量 263. 9, 422. 7, 655. 1, 1 009, 1 265 和 1 512 Hz 也没有规律. 而在支座信号频谱 (图 9(b)) 中, 存在清晰的频率分量, 它们为 733. 9, 782. 9, 832, 880. 4, 929. 5, 978. 5, 1 027. 6, 1 076, 1 125. 1, 1 174. 1,

1 223. 2, 1 271. 6, 1 320. 7, 1 369. 7, 1 418. 8, 1 467. 2 和 1 516. 3 Hz, 这些分量为外环特征频率 f_e (48. 89 Hz, 转速为 1121 r/min) 的 K ($K = 15, 16 \cdots 31$) 倍关系. 因此, 与内环故障相反, 外环故障在支座信号频谱中可以得到直接的体现, 而在转轴信号中却得不到直接的体现.



(a) 转轴信号共振区域显化图



(b) 支座信号共振区域显化图

图 9 外环故障共振区域显化图

Fig. 9 Amplified spectrum of the vibration signal of shaft and base with a fault on the outer ring

3.2.2 外环故障信号包络解调谱

从下图 10 的结果可知, 在转轴信号包络频谱中除了明显的故障特征频率成分, 同样也存在 $m f_i \pm 2 f$ (f 为转频, 转速为 1121 r/min) 的调制分量. 但是, 此时虽然现象相同, 但引起的机理却是不相同. 这里的调制成分是由于传递路径调制因素引起的, 与内环故障由于载荷区引起的调制存在质的区别.

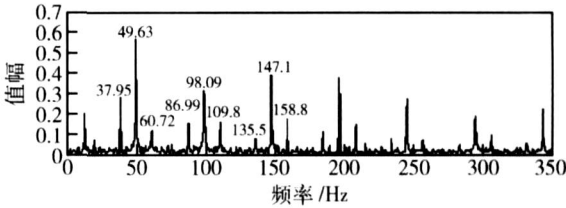


图 10 外环故障转轴信号包络解调谱

Fig. 10 Envelope spectrum of the vibration signal of shaft with a fault on the outer ring

3.3 滚动体故障包络解调谱

在转轴信号 (图 11(a)) 和支座信号包络谱 (图 11(b)) 中, 出现了滚动体故障 f_r 、保持架特征频率 $2 f_c$ 以及其调制频率 $f_r \pm 2 f_c$ 成分 (转速

1 333 r/min,此转速下滚动体的特征频率 f_r 为 82.46 Hz,保持架特征频率 f_c 为 8.5 Hz).这一分析结果与很多文献中的阐述是一致的^[2,7],滚动体故障的出现经常伴随着保持架故障频率成分和其调制成分.

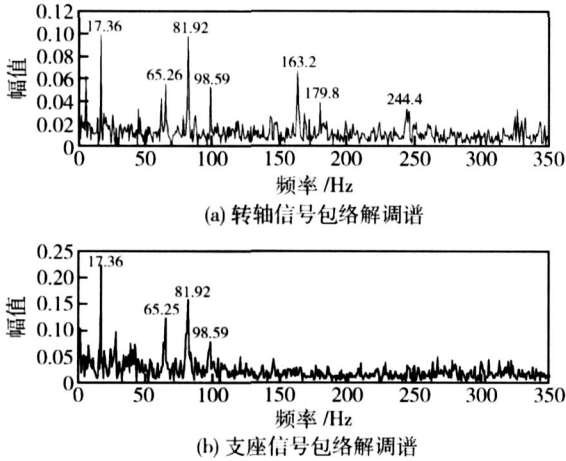


图 11 滚动体故障包络解调谱

Fig. 11 Envelope spectrum of the vibration signal of shaft and base with a fault on the rolling element

3.4 保持架故障包络解调谱

图 12(a) 为转轴信号的包络谱,图 12(b) 为支座信号的包络谱.在转轴信号的包络谱(图 12(a))中,保持架特征频率 $2f_c$ 分量明显占优,并且出现了滚动体故障频率 nf_r 成分及其和保持架特征频率 $2f_c$ 的调制频率 $nf_r \pm 2f_c$ 成分(转速 1333 r/min,此转速下滚动体的特征频率 f_r 为 82.46 Hz,保持架特征频率 f_c 为 8.5 Hz).而在支座信号的包络谱(图 12(b))中,滚动体故障频率

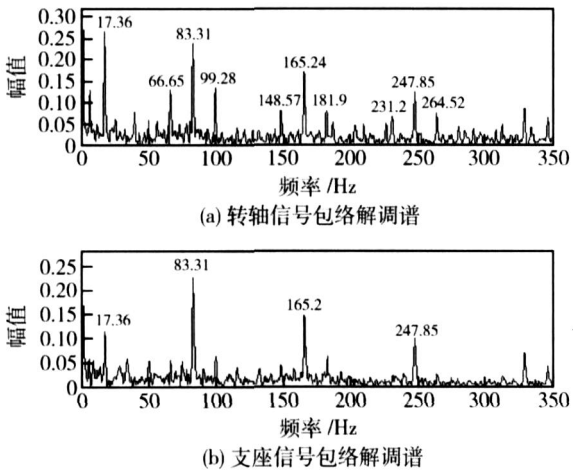


图 12 保持架故障包络解调谱

Fig. 12 Envelope spectrum of the vibration signal of shaft with a fault on the outer ring

nf_r 成分突出,保持架特征频率 $2f_c$ 成分并不凸显,调制现象也不明显.可见,直接测量的转轴振动信号中,保持架故障特征信息可能要比支座信号中的相应信息强,有利于诊断这类故障.

4 结 论

本文建立起了一种基于旋转坐标系转轴振动信号的滚动轴承诊断方法,分别通过滚动轴承内环、外环、滚动体和保持架故障实验,验证了该方法的可行性.通过对实验结果的分析,可以确定基于旋转坐标系转轴振动信号的诊断方法对于诊断滚动轴承内环、外环、滚动体和保持架故障都是有效的.可以初步确定转轴振动信号的传递路径相对简单,对轴承内环、滚动体和保持架早期微小故障的发现与诊断可能是有利的.

对于一些重要用途的滚动轴承,可以考虑在适当部位安装支座和转轴加速度传感器.这两种方法相互补充,对轴承实施长期或定期的状态监测与故障诊断.这不但可以防止机器工作性能下降,而且可以减少或杜绝事故发生,具有重要意义.

参考文献:

[1] 樊可清. 基于回转振动信号的机械诊断技术研究[D]. 西安: 西安交通大学,1998.

[2] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断理论·方法·系统[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

[3] McFadden P D, Smith J D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique-a review[J]. Tribol Int 1984, 17:3-10.

[4] 汪玉,刘东岳,廖明夫. 一种诊断转子故障的方法:中国, 200410028999. 7[P]. 2004-04-05.

[5] 雷继尧,罗东升. 压电角加速度式扭振遥测系统的研究[J]. 重庆大学学报,1985:36-43.

L EI Jirao, LUO Dongsheng. Research and design of system of piezoelectric angular acceleration used in remote measuring torsional vibration[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1985, 9:36-43.

[6] 孟涛. 齿轮与滚动轴承故障的振动分析与诊断[D]. 西安:西北工业大学,2003.

[7] McFadden P D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing [J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96:69-82.