

基于谱峭度和 AR 模型的滚动轴承故障诊断*

从飞云, 陈进, 董广明

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海, 200240)

摘要 提出基于自回归(Autoregressive, 简称AR)预测滤波的谱峭度分析方法, 将其应用于滚动轴承的早期故障诊断。通过结合AR预测滤波器提取轴承故障信号共振衰减成分的特性, 利用谱峭度方法对AR预测滤波器滤波后的信号进行处理, 实现了滚动轴承早期微弱故障的识别。通过滚动轴承的疲劳全寿命加速实验获取滚动轴承的自然故障信号, 克服了传统轴承故障诊断人工加工故障的不足。通过试验数据的分析表明, 基于AR预测滤波的谱峭度方法不仅能够消除干扰成分提取故障特征, 还能增加谱峭度方法的稳定性。

关键词 谱峭度; AR 预测滤波; 全寿命加速试验; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号 TH165.3; TN911; TH17

引言

近年来, 众多学者对轴承信号的分析 and 处理进行了广泛研究, 其中大多数方法的核心思想集中于特征提取, 即将故障特征信号有效地从原始信号中提取出来。振动信号分析方法已经被广泛应用到轴承的故障诊断领域。当滚动轴承发生故障时, 其振动信号表现为一种幅值特性^[1]。谱峭度思想最早是由 Dwyer 作为一种统计学信号处理方法提出的^[2], Antoni 从数学上严格论证了谱峭度方法, 同时提出了快速算法^[3-5]。该算法把短时傅里叶变换和有限冲击响应滤波器相结合, 将原始信号中的故障信号有效提取出来。也有学者研究谱峭度方法在故障诊断中的应用, 王晓冬等^[6]利用多小波谱峭度的方法对滚动轴承进行故障诊断。

由于谱峭度方法对信号的噪声水平非常敏感, 同时抗干扰鲁棒性不强, 笔者从降噪的角度出发, 提出了基于AR预测滤波的谱峭度方法, 利用轴承的全寿命加速试验中形成的自然故障数据实现了对滚动轴承的故障诊断。结果显示此方法具有一定的消除干扰能力, 提高了传统谱峭度方法的鲁棒性。

1 AR 预测滤波器

AR 模型是一种基于有理传递函数的参数化建

模方法。由于AR模型的参数包含了系统的重要状态特征且对系统的状态变化非常敏感, 将其应用于时间序列的分析具有重要的价值^[7-8]。

当数据序列沿整个信号序列滑动就形成信号的自适应AR谱。时间序列AR模型的参数估计就是选择合适的参数使模型的残差 ϵ_k 为白噪声。常用的方法有时序理论法和优化理论估计法, 设存在一时间序列 x_n , 则存在一正整数 p , 使得

$${}^p\Gamma x_n = a_p \quad (n > p) \quad (1)$$

其中: Γ 为 Wold 分解算子; p 为分析阶数; a_p 为 AR 模型参数。

关于时间序列 x_n 的AR模型可表示为

$$Y_k = \sum_{i=1}^p a_i x_{i+k} + \epsilon_k \quad (2)$$

其中: ϵ_k 为一个白噪声过程, 其方差大小表示了AR线性预测滤波器的估计误差^[9]。

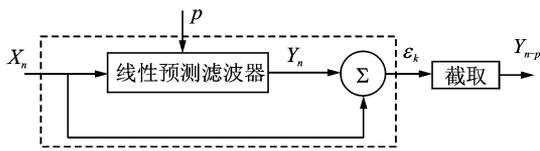
利用AR模型进行线性预测滤波的过程如图1所示, 原始信号经过 p 阶AR线性滤波器进行预测滤波后得到新的信号 Y_n , 由于在滤波过程中的卷积操作, 还需要对 Y_n 进行截取, 得到信号 Y_{n-p} 。

2 谱峭度方法

峭度作为一个时域分析的无量纲指标, 其对信号的瞬时特征非常敏感, 被广泛应用于机械设备的故障

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50875162, 51035007); 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2006AA04Z175)

收稿日期:2010-12-15; 修改稿收到日期:2011-03-04



x_n 为原始时间序列; p 为预测滤波器阶数; Y_n 为 p 阶滤波器滤波后的信号; ϵ_k 为预测滤波误差; Y_{n-p} 滤波后通过截取得到的信号

图1 AR 预测滤波器的滤波过程

诊断。定义信号 $X(t)$ 的激励响应为 $Y(t)$, 表示为

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi fi} H(t, f) dX(f) \quad (3)$$

其中: $H(t, f)$ 为系统传递函数, 表示 $Y(t)$ 在 f 处的复包络; X 为白噪声信号。

基于四阶谱累积量的谱峭度定义为

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y} - 2S_{2Y}^2(f) \quad (4)$$

S_{2nY} 表示 $2n$ 阶瞬时矩, 其定义为

$$S_{2nY}(f) = \frac{E\{|H(t, f)dX(f)|^{2n}\}}{df} = E\{|H(t, f)|^{2n}S_{2nX}\} \quad (5)$$

利用四阶谱的阶矩定义谱峭度为

$$K_Y(f) = \frac{S_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} - 2 \quad (6)$$

3 滚动轴承故障诊断方法流程

良好的信号预处理手段可以提高谱峭度方法的可靠性和有效性。由共振解调原理可知, 谱峭度方法可从信号高频共振区域解调出低频的故障成分, 注重于高频共振部分的研究。根据信号的高频共振原理可知, 其过程为一个周期衰减过程, 笔者应用AR预测滤波器能够比较准确地识别此周期衰减过程^[10]。应用AR预测滤波器将高频共振成分提取出来, 消除大的噪声干扰, 结合谱峭度较强的诊断能力取得较好的诊断效果。流程如图2所示, 具体的诊断步骤如下:

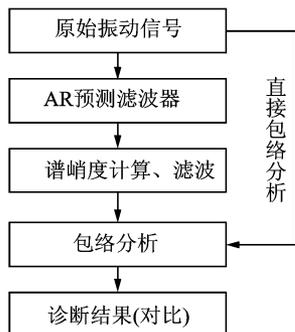


图2 滚动轴承诊断流程图

- 1) 对采集信号进行AR预测滤波;
- 2) 将滤波后的信号进行谱峭度计算处理, 得到信号共振衰减的频带, 以此频带为中心设计带通滤波器, 将高频共振带提取出来;
- 3) 对利用谱峭度滤波后的信号进行包络分析, 得到信号的包络谱;
- 4) 将得到的包络谱与原始信号直接包络分析得到的包络谱进行比较, 得出诊断结果, 发掘本研究方法的优点。

4 试验研究

轴承是旋转机械中的关键部件, 也一直是故障状态监测领域的热点研究对象。在以往的研究中, 往往是采用人为的方式在轴承不同部位加工出点蚀来仿真各种故障类型或者是加工不同点蚀大小来仿真其故障的严重程度。然而, 轴承故障的发生是一个复杂的过程, 很难用这种简单的人为加工故障来说明实际运行过程中产生的故障过程。鉴于此, 笔者与联合国援助杭州轴承试验研究中心国家检测实验室(CNAS No. L0309 ISO/IEC 17025 国际互认)合作, 利用国际化的轴承疲劳试验装置进行轴承的全寿命周期加速试验, 本次试验采用的轴承型号为6307, 轴承从正常开始, 通过数据采集装置采集其振动信号, 直至轴承失效位置。图3为本次试验的现场设备装置全图, 振动信号通过加速度传感器首先经过NI的scxi信号调理模块进行抗混叠滤波, 然后接入NI的PCI数据采集卡6023e进行数据采集, 采集软件使用NI的Labview平台进行编写, 系统采样频率设置为25.6 kHz, 每隔1 min保存一组振动信号数据, 每组数据长度为20 480。设备从开始到出现报警停机共采集1 062组数据。停机对轴承检测后发现轴承的内圈出现明显的点蚀现象。

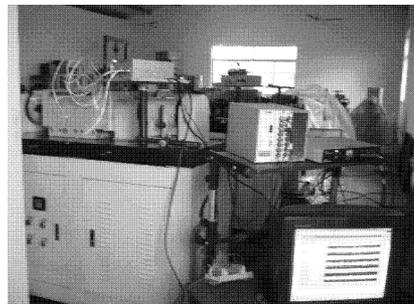


图3 试验设备安装图

根据滚动轴承的运动学公式, 计算得到6307型

号的轴承特征频率为

$$\begin{cases} f_r = 50 \text{ Hz} \\ f_b = 102 \text{ Hz} \\ f_o = 153 \text{ Hz} \\ f_i = 246 \text{ Hz} \end{cases} \quad (7)$$

其中: f_r , f_b , f_o , f_i 分别为转频、滚动体故障特征频率、外圈故障特征频率和内圈故障特征频率。

图4为整个全寿命数据的振动有效值(RMS)的时间历程(有效值是在工程上应用最广泛的轴承性能评估指标),可见在979 min时,轴承的振动有效值经历了一个突变过程,其值突然增大了几倍,可认为此时轴承已经发生了故障。

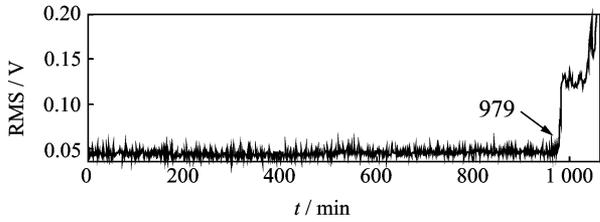


图4 全寿命RMS指标

为了显示笔者提出方法的有效性和准确性,在对试验数据进行谱峭度分析时,选取第974 min时的数据进行分析,图5为第974组数据的原始波形,从图中可知其信号基本被噪声淹没。对其进行谱峭度分析,得到谱峭度滤波后的信号如图6所示,由图可知,滤波后得到的时域信号其冲击成分相对原始信号明显了许多,其峭度值也从原始信号的0.6变为3.4。为了进一步了解此方法的诊断效果,对其作包络谱分析。

图7(a)和(b)分别为原始信号和滤波后信号的

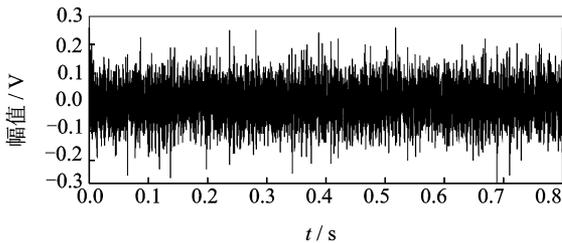


图5 第974组数据时域信号

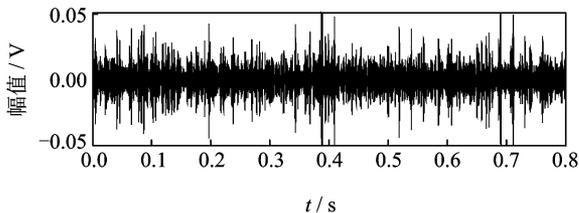
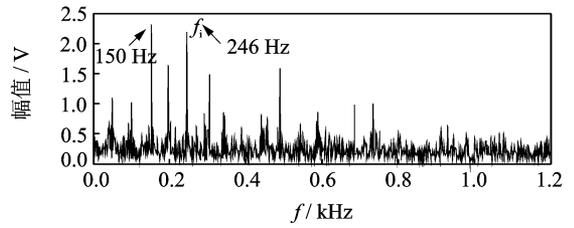
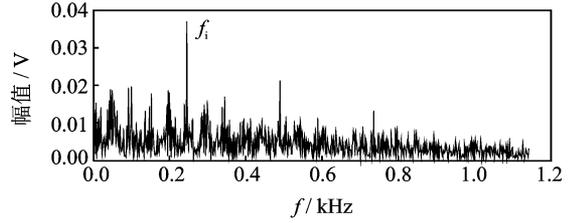


图6 滤波后的第974组数据时域信号



(a) 原始信号的包络谱



(b) 滤波后信号的包络谱

图7 包络谱分析

包络谱,可知当原始信号直接进行包络谱分析后,其频率成分除了内圈故障特征频率外,还存在150 Hz的干扰频率成分,当采用笔者提出的AR预测滤波结合谱峭度方法处理后得到的包络谱清晰地显示出了内圈故障特征频率。可见,本研究方法在一定程度上具有消除信号干扰、增强鲁棒性的功能。

5 结束语

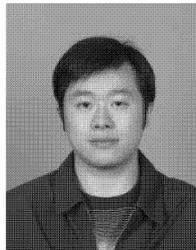
通过AR预测滤波与谱峭度分析相结合的方法实现了对滚动轴承早期微弱故障的诊断。利用AR预测滤波器将故障信号的共振周期衰减成分提取出来,经过谱峭度进一步处理滤波后得到结果信号。通过对轴承全寿命加速试验信号的分析可知,本研究方法对于滚动轴承早期微弱故障的诊断具有明显优势,其诊断结果通过传统的包络谱对比分析可知,在消除信号干扰成分、提高谱峭度分析方法的稳定性方面具有较好的作用。

参 考 文 献

[1] McFadden P D, Smith J D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96 (1): 69-82.

[2] Dwyer R F. Detection of non-gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-Proceedings. Boston, USA: [s. n.], 1983: 607-610.

- [3] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2):282-307.
- [4] Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1):108-124.
- [5] Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2):308-331.
- [6] 王晓冬,何正嘉,訾艳阳. 滚动轴承故障诊断的多小波谱峭度方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3):77-81.
Wang Xiaodong, He Zhengjia, Zi Yanyang. Spectral kurtosis of multiwave for fault diagnosis of rolling bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3):77-81. (in Chinese)
- [7] 王真,杜利珍,程远胜. AR参数灵敏度及结构损伤控制图识别[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4):394-399.
Wang Zhen, Du Lizhen, Cheng Yuansheng. Sensitivities of autoregressive coefficients of time series model and structural damage identification using control charts[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):394-399. (in Chinese)
- [8] Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2):350-362.
- [9] 徐峰,王志芳,王宝圣. AR模型应用于振动信号趋势预测的研究[J]. 清华大学学报, 1999, 39(4):57-59.
Xu Feng, Wang Zhifang, Wang Baosheng. Research on AR model applied to forecast trend of vibration signal[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(4):57-59. (in Chinese)
- [10] Cong Feiyun, Chen Jing, Dong Guangming. Research on the order selection of the autoregressive modelling for rolling bearing diagnosis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224:2289-2297.



第一作者简介:从飞云,男,1982年10月生,博士研究生。主要研究方向为旋转机械状态监测、信号处理和故障智能识别等。曾发表《Research on the order selection of the autoregressive modeling for rolling bearing diagnosis》(《Journal of Mechanical Engineering Science》2010, Vol. 224)等论文。

E-mail: congfeiyun@hotmail.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊入选EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,为双月刊,每逢双月末出版,每本定价20元,全年120元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn

网址:http://zdcns.nuaa.edu.cn