

声信号的主分量分析应用于滚动轴承故障诊断

李常有¹, 徐敏强¹, 郭 耸²

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 利用声信号来进行故障诊断具有“采集比较容易, 非接触式测取, 设备简单, 速度快, 无须事先粘贴传感器, 不影响设备正常工作, 易于实现早期预报和在线监测, 并可在不易测量振动信号的场合得到广泛应用”等优点。由于外界噪声的影响, 有效信息的提取较为困难。采用主分量分析对传声器测取的声信号进行了预处理; 在此基础上应用基于 Morlet 小波变换的包络分析和频谱分析来提取故障特征向量, 并以滚动轴承为例进行实验。结果表明, 这是诊断滚动轴承早期故障的一种可选方法。

关键词: 滚动轴承; 故障诊断; 主分量分析; 声信号; 包络分析

中图分类号: TH133.33

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-02-0271-04

Fault diagnosis of rolling element bearing based on principal component analysis of acoustic signal

LI Chang-you¹, XU Min-qiang¹, GUO Song²

(1. School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; 2. School of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Fault diagnosis of using acoustic signal generated by a machine has a lot of advantages, such as easier signal collection, non-contact measurement, no requirement of sticking sensors in advance, no influence of the collection system on the machine, easier actualization of early forecasting and on-line monitoring, and able to be widely used in the occasion where it is difficult to collect vibration signal. However, it is more difficult to extract the characteristic signal due to the effect of environment noise. Therefore, the principal component analysis is employed to preprocess the original acoustic signal. Then, Envelope analysis based on Morlet wavelet transform and spectrum analysis are applied to extract the fault characteristic vector. The proposed method has been applied to the fault diagnosis of rolling element bearing. The experimental results show that the proposed method in this paper is effective to diagnose early fault of rolling element bearing.

Key words: rolling element bearing; fault diagnosis; principal component analysis; acoustic signal; envelope analysis

1 引 言

滚动轴承故障诊断的研究始于上世纪 60 年代初期, 一直是广大科技工作者的热门研究课题。到

目前为止, 已经取得了可喜的研究成果, 并应用于实际生产中。但使用的信号几乎全是振动信号, 而对于同样包含滚动轴承运行状态的声信号研究甚少。文献[1]、[2]涉及了这方面的内容, 但相对于振动信号来说, 只是一个开始。

声信号采集比较容易, 采用非接触式测取, 设备简单, 速度快, 无须事先粘贴传感器, 不影响设备正常工作, 易于实现早期预报和在线监测, 并可在不易

收稿日期: 2007-04-09; 修回日期: 2007-07-20

作者简介: 李常有(1980-), 男, 贵州人, 博士研究生, 研究方向为故障诊断技术。

通讯作者: 李常有, E-mail:lichangyou@hit.edu.cn

测量振动信号的场合得到广泛应用。

传声器测取的声信号,一般都包含了大量的环境噪声,也就是说表征滚动轴承运行状态的有用信号被环境噪声所污染,所以,降噪是基于声信号的滚动轴承故障诊断的关键。文中采用主分量分析来消除环境噪声的影响。主分量分析(principal component analysis)是将分散在一组变量上的信息集中到某几个综合指标(主分量)上的探索性统计分析方法。故可通过适当选取主分量来达到降噪的目的。

当滚动轴承具有疲劳点蚀类故障时,整个系统在运行过程中就会受到周期性的冲击载荷并随之产生振动,同时此振动向空气中传播出去--声信号。包络分析是一种最常用的提取冲击成分的信号处理方法。本文采用基于 morlet 小波变换的包络分析来实现这一目的。此外,基于 morlet 小波变换的包络分析由于其中是实施小波变换,故可以对信号进行频带的分解,这样进一步达到了降噪的目的。

2 主分量分析^[3,4,5]和包络分析^[6,7]

主分量分析是一个典型的基于对随机变量统计描述的统计学分析方法。假设有一随机向量 $X=(X_1, X_2, \dots, X_m)^T$, 其均值为 $\mu_x=E\{X_i\}$, 协方差矩阵为 $C_x=E\{(X_i-\mu_x)(X_j-\mu_x)^T\}$ (1)

计算 C_x 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 和对应的归一化特征向量 U_1, U_2, \dots, U_m : $C_x U_i = \lambda_i U_i, i=1, 2, \dots, m$, 其中, $U_i=[u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]^T$ 。理论上已证明,特征向量 U_1, U_2, \dots, U_m 就是满足条件的输入的特征。不妨设特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, 则 $y_i=U_i^T \bar{X}$, ($i=1, 2, \dots, m$) (其中 $\bar{X}=(X_1-\mu_x, X_2-\mu_x, \dots, X_m-\mu_x)$) 就是输入对特征向量的投影,即为 X 的第 i 个主分量。用矩阵表示为 $Y=U^T \bar{X}$ 。其中,特征向量矩阵 $U=[u_1, u_2, \dots, u_m]$ 满足 $U U^T=E$, 而 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ 。因此,通过特征向量矩阵 U 将输入的 m 维的向量 \bar{X} 变换成特征空间中的 m 维的向量 Y , Y 的某一分量 y_i 为输入 \bar{X} 的第 i 个主分量。

通过特征选择获得了所有的主分量,而在信号处理过程中,则选择主要的特征而舍弃次要的,到达降噪的目的。由推导可知:

$$C_Y = \begin{bmatrix} \lambda_1, 0, \dots, 0 \\ 0, \lambda_2, \dots, 0 \\ \vdots \\ 0, 0, \dots, \lambda_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可以看出自协方差矩阵 C_Y 取决于原输入 X 的自协方差矩阵。在对 Y 进行截断时,要保证截断是均方误差意义下最优,可以根据决定主分量的特征向量所对应的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$) 进行截断。特征向量所对应得特征值越大,它在重构时的贡献越大,而特征值越小,该特征向量在重构时的贡献就越小。采用其处理传声器采集的声信号时,可以选择特征值较大的主分量进行重构,达到降噪的目的。

在小波变换中,选取母小波为 $\psi_g(t)=\exp(j\omega t) \cdot \exp(-t^2/2)$ (称为 morlet 小波), 其实部 $\psi_{gr}(t)=\cos\omega t \cdot \exp(-t^2/2)$, 虚部 $\psi_{gi}(t)=\sin\omega t \cdot \exp(-t^2/2)$ 。从傅里叶变换的角度看, morlet 小波的实部为一偶函数,经傅里叶变换后仍未实偶函数,所以实部作为滤波器是一无相移滤波器;而其虚部由 $F\{\psi_g(t)\}=-j\text{sgn}(F\{\psi_{gr}(t)\})$ 可知,同实部相比相移了 -90° , 但两者的幅频特性相同。使用其对信号 $f(t)$ 进行小波变

换,可得: $W_{fd}(a, b)=W_{fr}(a, b)+jW_{fi}(a, b)=\int f(t)\psi_{ab}(t)dt$ 。

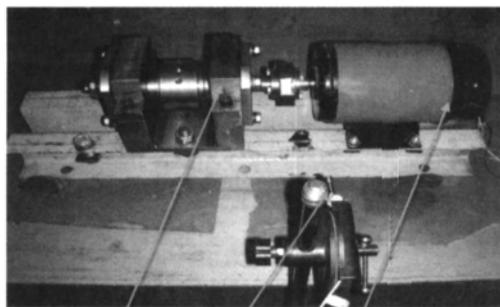
就得到信号 $f(t)$ 经过带通滤波后的解析信号 $W_{fd}(a, b)$ 。其中实部 $\psi_{fr}(a, b)$ 和虚部 $\psi_{fi}(a, b)$ 具有相同的频率成分,但 $\psi_{fi}(a, b)$ 比 $\psi_{fr}(a, b)$ 延迟 90° ; 两者具有正交关系。 $A(t)=\sqrt{W_{fr}^2(a, b)+W_{fi}^2(a, b)}$ 为信号 $f(t)$ 不同频率段的包络。

3 实验与讨论

实验装置由电动机、转子、两个滚动轴承、滚动轴承座以及支撑组成,如图 1 所示。实验中的声信号由图中的传声器拾取。可以知道,在其工作过程中有两个声源:电动机和滚动轴承系统。电动机产生的声信号表征了电动机的工作状态,而滚动轴承系统产生的声信号表征了滚动轴承的工作状态。在滚动轴承故障诊断中,电动机产生的声信号为噪声信号,需要给予消除。

本部分采用本文介绍的方法分别对滚动体、外圈、内圈上有疲劳点蚀(电火花分别在滚动体、外圈、内圈上加工出 0.4mm 的凹坑)的轴承在运行过程中产生的声信号进行分析。在实际应用中,输入向量矩阵这样构造:设 $f(x)$ 为原始信号,其长度为 n , 则输入向量矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} f(1) & f(2) & \dots & f(n-m) \\ f(2) & f(3) & \dots & f(n-m+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(m) & f(m+1) & \dots & f(n) \end{bmatrix}$$



滚动轴承 传声器 直流电动机

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

这样构造的目的是使 X 包含更多的滚动轴承运行状态信息。

图 2、3 和 4 分别是滚动轴承的滚动体、内圈和外圈故障时, 传声器采集的声信号直接进行频谱分析和采用本文建议的方法处理的结果对比图。各图中的 (a) 为原始信号的时域图; (b) 为对原始信号首先进行基于 hilbert 变换的包络分析, 然后再采用频谱分析的结果; (c) 为对原始信号进行主分量分析, 选择特征值最大所对应的特征向量重构后的时域信号; (d) 为重构信号经过基于 morlet 小波变换的包络分析(高频部分)后的频谱图。

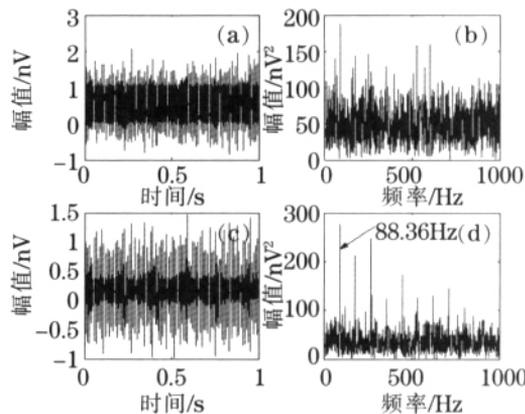


图 4 外圈故障

Fig.4 Outer race with fault

实验用轴承为深沟球轴承(6207), 其参数分别是轴承滚道直径 $D_m=53.5\text{mm}$, 滚动体的直径 $d=11.113\text{mm}$, 轴承内滚动体数量 $Z=9$, 滚动轴承压力角 $\alpha=0$ 。当轴的旋转频率 $f_n=24.5\text{Hz}$, 根据理论分析, 滚动体、内圈以及外圈故障时的特征频率分别为 110.54Hz 、 125.55Hz 、 90.07Hz 。

分别从图 2、3、4 中的 (b) 可以看出, 故障特征频率的能量与众多频率成分的能量非常相近, 故没有办法判断出滚动轴承是否出现了早期的故障; 根据图 2、3、4 中的 (c) 可以观察到, 由于滚动轴承出现早期故障而产生的冲击声信号明显凸现出来了, 但信噪比还不是很高; 图 2、3、4 中的 (d) 分别在 108.57Hz 、 127.54Hz 、 88.36Hz 处出现了极大的峰值, 这刚好分别与滚动体、内圈以及外圈出现早期故障时的特征频率相近似, 故可以根据此判断出滚动轴承出现了早期故障。

4 结 论

本文根据滚动轴承在运行过程中产生的声信号来诊断轴承的运行状态, 采用主分量分析对原始信号进行降噪, 然后应用基于 morlet 小波变换的包络分析进一步提高信噪比和实现包络, 最后把包络信号变换到频域以提取故障特征向量。实验结果表明:

- (1) 主分量分析可以提高信噪比, 也即实现降噪的目的。
- (2) 基于 morlet 小波变换的包络分析不但可以实现对信号的包络, 而且还可以实现进一步提高信号的信号比。
- (3) 应用滚动轴承在运行过程中产生的声信号, 采用本文提出的处理方法, 可以准确地发现滚动轴承的早期故障及诊断出故障的类型。

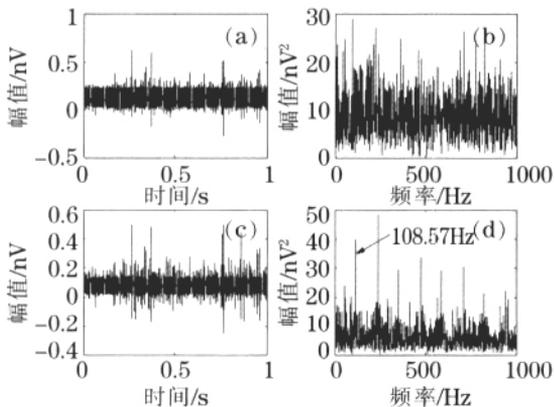


图 2 滚动体故障

Fig.2 Rolling elements with fault

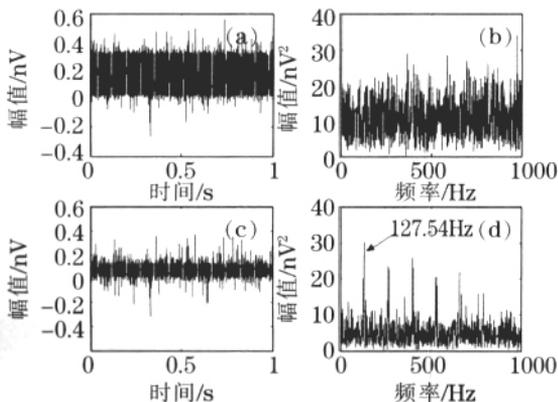


图 3 内圈故障

Fig.3 Inner race with fault

参 考 文 献

- [1] 周艳玲, 杨德斌, 徐金梧, 等. 基于声信号的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(2): 21-25.
ZHOU Yanling, YANG Debin, XU Jinwu, et al. A method for detection of defects in rolling element bearings based on acoustic signal analysis[J]. Journal of vibration and shock, 2002, 21(2): 21-25.
- [2] 张武军, 徐金梧, 杨德斌, 等. 声信号分析方法在轴承故障诊断中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(1): 58-60.
ZHANG Wujun, XU Jinwu, YANG Debin, et al. Machine sound using wavelet and application in rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(1): 58-60.
- [3] 高隼. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 154-160.
GAO Jun. Principle and simulation examples of artificial neural network[M]. Beijing: China Maching Press, 2003. 154-160.
- [4] Musulin E, Yelamos I, Puigjaner L. Integration of principal component analysis and fuzzy logic systems for comprehensive process fault detection and diagnosis[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45(5): 1739-1750.
- [5] Aminghafari Mina, Cheze Nathalien Poggi, Jean-Michel. Multivariate denoising using wavelets and principal component analysis[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2006, 50(9): 2381-2398.
- [6] 张绪省, 朱贻盛. 信号包络提取方法-从 Hilbert 变换到小波变换[J]. 电子科学学刊, 1997, 19(1): 120-123.
ZHANG Xusheng, ZHU Yisheng. The method of extracting signal envelope from Hilbert transform to wavelet transform[J]. Journal of Electronics, 1997, 19(1): 120-123.
- [7] 何玲松, 李巍华. 用 morlet 小波进行包络检波分析[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 119-122.
HE Lingsong, LI Weihua. Morlet wavelet and its application in enveloping[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 119-122.

中国声学学会 2008 年全国声学学术会议征文通知(第一轮)

2008年 10月 上海

主办单位: 中国声学学会 协办单位: 上海市声学学会

中国声学学会第六届第一次常务理事会决议, 每两年召开一次全国性学术年会, 2008 年全国声学学术年会将于 2008 年 10 月在上海召开。会议论文集将由《声学技术》期刊出版, 本次会议的主题为《创新与和谐——新世纪的声学》。会议的征文范围包括所有与声学有关的研究论文, 欢迎广大声科技工作者积极投稿, 踊跃参加会议。

征文截止时间:	2008 年 5 月 30 日	会议秘书处:	联系方式:
录取通知发出时间:	2008 年 7 月 30 日	北京市海淀区北四环西路 21 号	电话: 010- 62554285
预计会议时间:	2008 年 10 月 20- 25 日	中国声学学会办公室	传真: 010- 62561833
会议地点:	上海市	邮政编码: 100080	E- mail: asc@mail.ioa.ac.cn
中国声学学会网址:	http://www.aschina.org http://www.asc.ioa.ac.cn		

来稿要求:

1、内容具体, 突出作者的工作与研究成果, 具有较重要的学术价值, 未在国内外公开发行的刊物或全国性的会议上发表或宣读的论文。

2、来稿请准备论文全文, 按照通知所附的打印格式和分类方法完成, 并请各位作者采用 E- mail 方式投稿。

3、提交的论文必须有中、英文对照的题目、作者姓名、作者单位与通讯地址。篇幅不超过 2 页(包括图表与作者简介), 于 2008 年 5 月 30 日前将论文通过 E- mail 寄至会议秘书处, 论文一旦被录取即作为正式稿件并给作者发论文录取通知, 也可登陆学会网站查询, 未录取的稿件恕不退还。

4、请采用“word.”格式的文本文件。论文后要有参考文献, 参考文献不可略去。

5、请严格按照会议征文打印格式提交论文, 论文打印格式请登陆学会网站。

6、论文中凡涉及保密内容, 请作者单位审查, 责任自负。

附: 论文分类

A. 物理声学	B. 水声学	C. 超声学、量子声学与声学物理效应
D. 冲击与振动	E. 噪声、噪声效应及其控制	F. 结构与建筑声学
G. 语言声学与语音通讯	H. 生理与心理声学	I. 生物声学
J. 音乐声学	K. 气动声学与大气声学	L. 声学测量、信号处理与分析的方法、仪器
		M. 声学换能器

本次会议设有专题研讨会分会场:

- 1、矢量传感器的专题讨论(负责人: 杨德森)
- 2、环境噪声标准(负责人: 程明昆)
- 3、声波测井(负责人: 王秀明)
- 4、音频信息处理在多媒体中的应用(负责人: 颜永红)