

# 滚动轴承非接触式声学故障诊断方法研究及应用

于江林<sup>1</sup>, 戴光<sup>2</sup>, 王美波<sup>2</sup>, 余永增<sup>2</sup>

(1.大庆炼化公司, 黑龙江大庆 163411; 2.大庆石油学院, 黑龙江大庆 163318)

**摘要:** 基于非接触式声学诊断方法, 以滚动轴承人工缺陷为对象进行试验测试, 通过统计参量分析, 对滚动轴承有无故障进行判断, 并对轴承声学信号传播特性进行了研究。分别用与特征频率密切相关的触发数, 小波包分析与BP神经网络结合两种分析方法对故障模式进行识别, 提高了轴承故障诊断的有效性和准确性。

**关键词:** 滚动轴承; 故障诊断; 声学; 非接触式

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0034-05

## Research on non-contacting acoustics fault diagnosis method and application to rolling bearing

YU Jiang-lin<sup>1</sup>, DAI Guang<sup>2</sup>, WANG Mei-bo<sup>2</sup>, YU Yong-zeng<sup>2</sup>

(1. Daqing Refining & Petrochemica Company, Daqing 163411, Heilongjiang, China;

2. Daqing Petroleum Insititute, Heilongjiang Daqing 163318, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Based on the non-contacting acoustics method, some experiments are made on rolling bearings with contrived failure. Through analysis of statistical parameters, the fault of bearing can be judged. And the propagation characteristics of acoustic signal is studied. By respectively utilizing the two methods, i.e. the triggering number related to characteristic frequency and the wavelet packet analysis associated with BP neural network, to identify the condition and fault pattern of bearings, the validity and the accuracy of bearings fault diagnosis can be enhanced.

**Key words:** rolling bearing; fault diagnosis; acoustics; non-contacting

## 1 概述

滚动轴承在旋转机械中是最容易损坏的机械零件之一, 约有30%的旋转机械故障是由于轴承的损坏造成的<sup>[1]</sup>。滚动轴承被广泛用于石化、铁路等行业, 对轴承工作状况进行实时监测和故障诊断的研究越来越受到人们的重视。声发射(Acoustic Emission)是材料变形或破坏时储存的应变能释放产生弹性波的现象<sup>[2]</sup>。广义的声发射现象还包括诸如滚动轴承出现故障时所产生的周期性撞击信号等多种声学信号, 其频率范围涵盖10kHz~1.5MHz。目前, 国内外将声发射方法用于滚动轴承故障诊断研究多数是接触式的, 即所用传感器是与被测轴承表面相互接触的, 这种检测方式不能满足在某些不能将传感器直接布置在构件表面的场合, 例如铁路行业中行进列车的故障监测。鉴于此, 本文采用非

接触式声学检测方法对滚动轴承外圈、滚动体以及二者组成的混合缺陷进行故障诊断研究, 为现场检测提供了方便, 同时也是对滚动轴承故障诊断方法的一次有益探索。

## 2 滚动轴承非接触式声学检测原理

声发射检测技术的基本原理就是用灵敏的仪器来接收和处理采集到的声发射信号, 通过对声发射源特征参数的分析和研究, 推断出材料或结构内部活动缺陷的位置、状态变化程度和发展趋势<sup>[3]</sup>。本文采用的非接触式检测方法将传感器与被测构件相隔离, 此方法能够满足处于行进当中的设备的检测要求。

当滚动轴承出现故障时, 在运转过程中缺陷位置会产生突发型的撞击信号, 并且是周期性出现的, 而在无故障时, 产生的信号是平稳的连续型信号。滚动轴承故障声源位置处产生的声发射的波形通常是一种形式比较简单的宽带阶梯或者脉冲, 但是被检测信号是由声发射源到传感器之间, 通过波传播一段距离以后所形成的复杂信号, 具体检测原理如图1所示。

收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2007-11-21

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目资助(11521004);  
黑龙江省自然科学基金项目资助(E2007-02)

作者简介: 于江林(1969-), 男, 黑龙江省双鸭山市人, 博士研究生, 从事设备管理、检测与评价方面的工作。

通讯作者: 余永增, E-mail: yuyongzeng509@sina.com

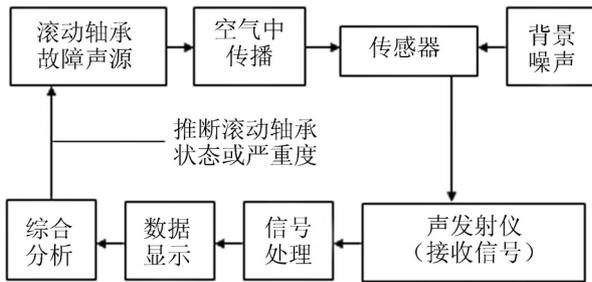


图 1 非接触式声学检测技术原理  
Fig.1 Non-contacting acoustics method

### 3 实验系统

本次实验采用圆锥滚子轴承，尺寸为外径  $D=150\text{mm}$ ，内径  $d=85\text{mm}$ ，人工制作缺陷类型为：轴承滚子上人工制作一长条形缺陷，长为  $20\text{mm}$ ，宽为  $4\text{mm}$ ，深度依次为  $0.5\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2.0\text{mm}$ ，外圈上同样制作一长条形缺陷，尺寸同上。实验采用宽带传感器，2/4/6 型前置放大器以及由美国 PAC 公司生产的 PCI-II 双通道数据采集卡。声发射参数设定见表 1。轴承声发射信号频率一般在  $50\text{kHz}$  到几百  $\text{kHz}$  之间<sup>[4]</sup>，因此选取采样频率为  $1\text{MHz}$ ，采样长度为  $6\text{ks}$ ，使频率分辨率达到近  $200\text{Hz}$ ，经过反复实验确定门槛值为  $30\text{dB}$  以屏蔽外界噪声，结合轴承声发射信号频率范围及仪器既定滤波器范围，数字滤波器低、高通选取应保证信号特征的有效采集。

表 1 声发射参数设定表  
Table 1 The parameter set up of acoustic emission

参数	前置放大器 增益/dB	采样长度 /kbit	采样率 /MHz	门槛 /dB	数字滤波 器/Hz
通道 1	40	6	1	30	20k~3M
通道 2	40	6	1	30	20k~3M

本次实验以非接触式实验为主，同时为了与接触式方法进行对比，在轴承座表面放置了一个同类型传感器（耦合良好通道 1），进行同时测试。由于应力波源产生的应力波要经过一定媒质的传播后才能被传感器接收，而且在应力波传播过程中要产生衰减，出于对接收效果的考虑，非接触式测试用传感器与被测滚动轴承等高布置，两者之间保持一定的间距  $s$ ，其值分别取  $100\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ 、 $400\text{mm}$ 、 $500\text{mm}$ 。测试在可调转速的实验台上进行，分别在以下转速： $n=60\text{r/min}$ 、 $90\text{r/min}$ 、 $120\text{r/min}$ 、 $160\text{r/min}$ 、 $200\text{r/min}$  对无故障轴承和人工缺陷轴承进行测试。

### 4 结果分析

#### 4.1 滚动轴承非接触式测试参量分析研究

声发射信号的处理与表征方法通常用非统计参量和统计参量两种，针对轴承声学信号，本文选取声发射信号的幅度范围作为判断轴承有无故障的均依据，以深度为  $1.5\text{mm}$  滚动轴承四个转速下  $30\text{s}$  内实测数据为例（为滤波后数据），得到以下结果：无故障时幅度范围为  $30\text{dB}\sim 33\text{dB}$ ，滚子缺陷幅度范围为  $33\text{dB}\sim 44\text{dB}$ ，外圈缺陷幅度范围为  $35\text{dB}\sim 45\text{dB}$ ，混合缺陷幅度范围为  $40\text{dB}\sim 58\text{dB}$ ，由此可知当轴承无故障时，其声学信号的幅度较低，出现故障时声学信号的幅度偏高，比无故障时要大  $5\text{dB}\sim 15\text{dB}$  左右。

其次，非接触时声学信号的总事件数要远小于接触式测试时的情况，其数量值相差约  $50\sim 100$  个，产生以上现象的原因可归纳为以下几点：(1) 由于实际工装过程中，不可能保证轴承完全不产生振动，因此很大程度上一部分信号是由振动引起的；(2) 可调转速式实验台存在其它旋转部件，也要产生一定的声学信号，被接触测试用传感器所接收。非接触测试时采集的信号较少，实际上是滤除掉了部分噪声信号的干扰，如上述振动及其它原因引起的声信号，这在一定程度上保证了采集信号的真实性和准确性，为数据分析提供了方便。(3) 由参量分析可得，声学信号在经过了一段空气传播过程以后，产生了明显的衰减现象，幅值减小了  $20\text{dB}\sim 35\text{dB}$ 。部分信号大幅度衰减使非接触传感器未能接收到。

以下分析不同故障轴承信号幅度与测试距离、转速之间的关系。

##### 4.1.1 故障宽度一定(取为 $1.5\text{mm}$ )，幅度与距离、转速之间的关系

图 2 和图 3 是人工缺陷轴承在  $n=60\text{r/min}$ 、 $90\text{r/min}$ 、 $120\text{r/min}$ 、 $160\text{r/min}$ 、 $200\text{r/min}$  下测得的声学信号幅度随测试距离变化的相关图。由图 2、3 可得，非接触式检测时声学信号的幅度随测试距离的增加呈现减小的趋势，即存在衰减现象，并且在距离一定的情况下，随着主轴转速的提高，幅值逐渐增大，即测试距离和主轴转速是影响声学信号幅度的两个重要因素。

##### 4.1.2 转速一定(取为 $120\text{r/min}$ )，幅度与距离、故障深度之间的关系

图 4 和图 5 是人工缺陷轴承在深度分别为  $0.5\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2.0\text{mm}$  下测得的声学信号幅度随测试距离变化的相关图。由图 4、5 可得，非接触检测时声学信号的幅度随测试距离的增加呈现减小的趋势，同样存在衰减现象，且深度愈大，其声学信号的幅度愈大，同种条件下外圈故障时声

学信号的幅度略高于滚子故障时的信号幅度，约 2dB~4dB。主要是由于滚子故障时的声学信号较外圈受到固体材料吸收衰减的影响。

以上关联曲线采用拟合的方法可得到如下数学表达式：

$$y=c_1x^2-c_2x+c_3 \quad (1)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  均取正， $x$  为测试距离； $y$  为声学信号幅度，即声学信号的幅度与测试距离呈非线性的数学关系。

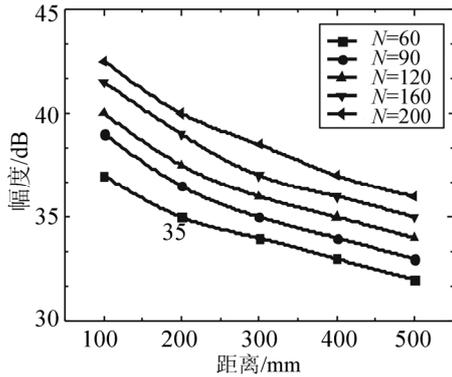


图2 五种转速下滚子缺陷声学信号幅度随距离变化的关系  
Fig.2 The relationship between the amplitude of roller defects and the distance at five different speeds

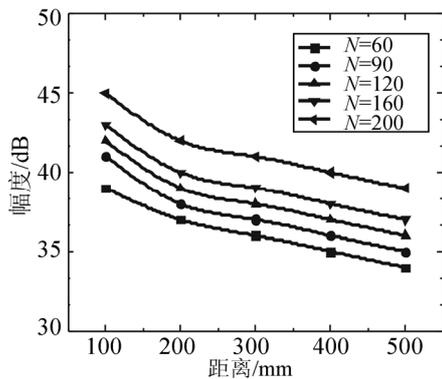


图3 五种转速下外圈缺陷声学信号幅度随距离变化的关系  
Fig.3 The relationship between the amplitude of outer ring defects and the distance at five different speeds

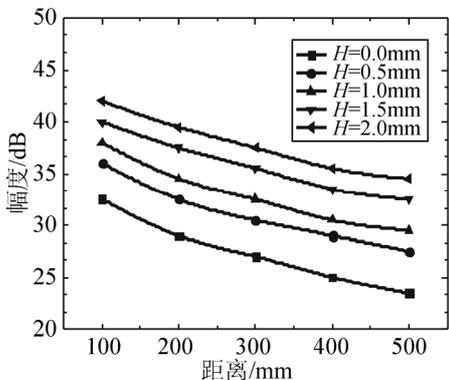


图4 五种深度下滚子缺陷声学信号幅度随距离变化的关系  
Fig.4 The relationship between the amplitude of roller defects and the distance at five different depth

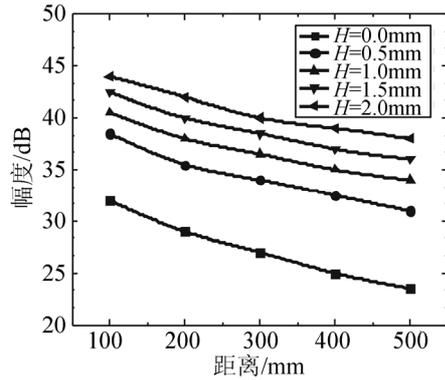


图5 五种深度下外圈缺陷声学信号幅度随距离变化的关系  
Fig.5 The relationship between the amplitude of outer ring defects and the distance at five different depth

### 4.2 采用统计参量分析方法对滚子故障进行模式识别

非接触式声学测试中，滚子缺陷轴承在随主轴旋转的过程中，产生周期性的撞击信号，为探求撞击频率与滚动轴承特征频率之间的关联，根据公式：

$$f_r = \frac{D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right] f_s \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{z}{2} \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] f_s \quad (3)$$

式中： $f_r$ -滚子上某故障点与内圈或外圈接触的频率，Hz；

$f_0$ -外滚道某故障点与  $z$  个滚动体接触的频率，Hz；

$d$ -滚动体直径，mm；

$D$ -轴承节径，mm；

$\alpha$ -接触角，°；

$f_s$ -主轴旋转频率，Hz。

以转速  $n=90\text{r/min}$  为例，计算得  $f_r=5.03\text{ Hz}$ ，即每秒钟近似出现 5 次撞击， $f_0=12.16\text{ Hz}$ ，即每秒钟近似出现 12 次撞击。

以主轴转 2 转所用的时间(近似为 1.33s)为采样时间，考查出现的撞击数，当主轴转 2 转时，滚子缺陷应出现 6~7 次撞击，约 7 次撞击；外圈缺陷应出现 16 次撞击，分别如图 8 和图 9 所示，由图 8、9 可以看出实际出现的撞击数与理论计算相符，图示中撞击的出现不是等间隔产生的原因在于滚子实际运转中不可避免地要产生“丢转”现象。

### 4.3 基于小波包分析和 BP 神经网络的滚动轴承故障模式识别

轴承声发射信号常常会受到各种噪声的干扰，故障信息不能直接从时域或频域上得到。对各类故障轴承信号进行 7 层小波包分解后，得知轴承信号频率主要集中在前八个频率范围内，如表 2 所示。

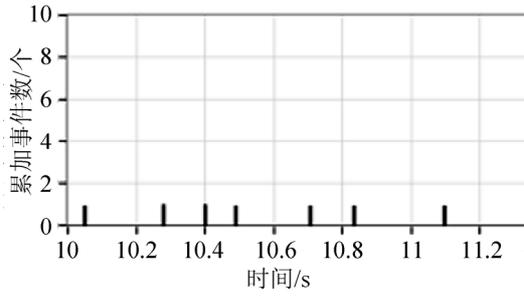


图 8 采样时间截取为 1.33s 时的关联图(滚子缺陷)  
Fig.8 The graph at the sampling time is 1.33 seconds

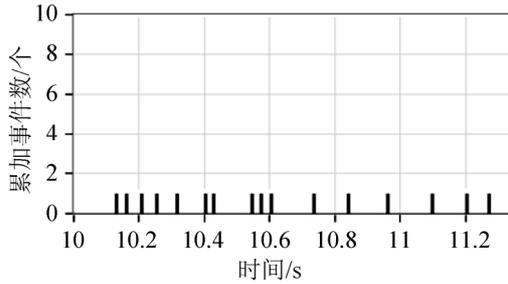


图 9 采样时间截取为 1.33s 时的关联图(外圈缺陷)  
Fig.9 The graph at the sampling time is 1.33 seconds

表 2 前八个频率成分所代表的频率范围

Table 2 The frequency range of the anterior eight frequency components

信号	频率范围/kHz	信号	频率范围/kHz
$S_{70}$	0~3.9063	$S_{74}$	15.625~19.5313
$S_{71}$	3.9063~7.8125	$S_{75}$	19.5313~23.4375
$S_{72}$	7.8125~11.7188	$S_{76}$	23.4375~27.3438
$S_{73}$	11.7188~15.625	$S_{77}$	27.3438~31.25

因此选取前八个频带范围内信号对小波包分解系数进行重构。以  $S_{70}$  表示  $X_{70}$  的重构信号,  $S_{71}$  表示  $X_{71}$  的重构信号, 其他依此类推。求选定频率段信号的总能量。由于输入信号是一个随机信号, 其输出也是一个随机信号。设  $S_{7j}(j=0,1,\dots,7)$  对应的能量为  $E_{7j}(j=0,1,\dots,7)$ , 则有:

$$E_{7j} = \int |S_{7j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |X_{jk}|^2 \quad (4)$$

其中,  $X_{jk}(j=0,1,\dots,7,k=1,2,\dots,n)$  表示重构信号  $S_{7j}$  的离散点的幅值,  $E_{7j}$  为选定频率段信号的总能量。以能量为元素可以构造一个特征向量。特征向量  $T$  构造如下:

$$T = [E_{70}, E_{71}, E_{72}, E_{73}, E_{74}, E_{75}, E_{76}, E_{77}]$$

当能量较大时,  $E_{7j}(j=0,1,\dots,7)$  通常是一个较大的数值, 在数据分析上会带来一些不方便的地方。由此, 可以对特征向量  $T$  进行改进, 即对向量进行归一化处理, 令:

$$E = \left( \sum_{j=0}^7 |E_{7j}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$T' = [E_{70}/E, E_{71}/E, E_{72}/E, E_{73}/E, E_{74}/E, E_{75}/E, E_{76}/E, E_{77}/E] \quad (6)$$

向量  $T'$  即为归一化后的向量。

选取完好轴承、滚子故障、外圈故障, 混合故障轴承训练样本各 3 个, 测试样本各 2 个, 设定完好轴承理想输出(1, 0, 0, 0), 滚子故障输出(0, 1, 0, 0), 外圈故障则输出(0, 0, 1, 0), 混合故障轴承输出(0, 0, 0, 1)。实验数据均在轴承转速为 120r/min, 传感器与轴承间距 100mm 下所采集到的。BP 网络选用以下训练参数: 隐层节点数 7; 学习率 0.01; 训练步数 100; 最小梯度: 1e-12; 训练目标误差 0.0001; 采用 Levenberg Marquardt 算法对 BP 神经网络进行训练<sup>[5]</sup>, 经过 39 步网络达到要求, 训练后的 BP 神经网络就是滚动轴承的声学故障识别网络。神经网络诊断输出结果见表 3。由识别结果可以看出网络实际结果与理论输出达到了很好的吻合, 可见小波包分解后提取的 8 个频段能量涵盖了轴承状态声发射信号特征, 小波包与 BP 网络的结合有效地达到了滚动轴承故障诊断的目的。

表 3 BP 神经网络故障诊断结果

Table 3 The failure diagnosis result of BP neural network

轴承状态	理想输出	实际输出
完好	1, 0, 0, 0	1.0000, 0.0150, 0.0000, 0.0000
	1, 0, 0, 0	1.0000, 0.0355, 0.0000, 0.0000
滚子故障	0, 1, 0, 0	0.0000, 0.9978, 0.0000, 0.0000
	0, 1, 0, 0	0.0000, 0.9985, 0.0000, 0.0000
外圈故障	0, 0, 1, 0	0.0000, 0.0044, 1.0000, 0.0000
	0, 0, 1, 0	0.0000, 0.0179, 1.0000, 0.0000
混合故障	0, 0, 0, 1	0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.0000
	0, 0, 0, 1	0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.0000

## 5 结论

经过上述分析, 可以得出如下结论:

(1) 故障声学信号在空气中传播时, 随着传播距离的增大衰减现象愈加明显, 缺陷深度愈大其声学信号的幅度愈大, 随着主轴转速的增大, 声学信号的幅度呈逐渐上升的趋势;

(2) 无故障轴承的声学信号为连续型信号, 能量很低, 当发生故障时会产生突发型的声学信号, 能量较大, 据此可以对轴承有无故障及严重度进行判断;

(3) 利用一定采样时间内出现的总撞击数评判故障类型, 并与理论计算特征频率对比, 结果基本吻合。通过小波包分解和信号重构方法提取故障轴

承信号各层小波包分解系数序列的能量作为BP神经网络输入向量,结果表明,该方法能有效地突出故障特征,可以大大提高故障诊断的有效性和准确性。

#### 参 考 文 献

- [1] 韩捷. 旋转机械故障机理及诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 211-230.  
HAN Jie. The mechanism and diagnosis technology of rotary machines[M]. Bei Jing: Mechanical Industry Press, 1997. 211-230.
- [2] 戴光, 李伟, 张颖. 过程装备安全管理与检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 241-247.  
DAI Guang, LI Wei, ZHANG Ying. Process equipment safety control and examination[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 241-247.
- [3] 藤山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 139-148.  
Cane Shan Bangjiu. The application of acoustic emission[M]. Bei Jing: Metallurgy Technology Press, 1996. 139-148.
- [4] 李凤英, 沈玉娣, 熊军. 滚动轴承故障的声发射检测技术[J]. 无损检测, 2005, 27(11): 583-585.  
LI Fengying, SHEN Yudi, XIONG Jun. Acoustic emission technique for fault diagnosis of rolling bearing[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(11): 583-585.
- [5] Jae-Seob Kwak, Man-Kyung Ha. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147(1): 65-71.