

声发射分析用于轴承状态监测的研究

李圣怡

C. James Li

(精密机械与仪器系)

(哥伦比亚大学机械系)

摘要 为了对轴承局部损伤进行自动检测与诊断,本文对声发射分析的新方法进行了探讨。损伤的特征量由短时信号处理技术来提取,用模式识别技术进行分析,用散布矩阵进行评价。实验和分析的结果表明这种新方法优于振动分析法。

关键词 声发射, 轴承, 监控, 模式识别

分类号 TH165.4

近几十年来,轴承滚动部件的状态监控一直受到人们的重视,这是因为回转机械的主要故障来自于轴承的损坏。轴承滚动部件的损坏形式往往是局部性的,常常表现为随着轴承运行而不断移动或扩大的接触面疤坑。这种疤坑常常是由于周期性接触压力下轴承金属疲劳坑蚀而造成^[1]。因此,轴承故障报警也常是基于对检测这类局部损坏而作出的。

传统的检测轴承局部损坏的方法往往采用测量靠近轴承处的振动和噪声信号。处理信号方法的研究已有大量文献报道^[2]。

基于振动信号检测方法的缺点及对分析和诊断带来的一些困难,本文着重研究以下几个方面:①用声发射(AE)信号检测来探讨更好检测方法的可能性;②证实用我们开发的新分析方法处理AE信号的优越性。

1 声发射分析用于轴承故障检测的原理与特点的分析

轴承运行时,损坏点通过轴承滚子与内圈或外圈的撞击产生一周期性振动信号分量。该信号的频率可以用理论公式进行计算和估计^[1]。该频率称之为轴承的损坏特征频率。不同位置(内圈,外圈,滚子)上的损坏有不同的特征频率。轴承损坏的检测原理是基于对特征频率能量的检测,其原理框图如图1所示。

对于振动法而言,轴承损坏特征频率信号被轴承振动信号所调制,频率为5~20kHz范围内。而对于AE法而言,由于轴承振动与撞击使金属材料内部产生变形而形成AE信号,该信号对特征频率进行调制,其带宽约为30kHz~1MHz范围。因此有以下明显优点。

(1) AE信号频率很高。容易通过高通滤波器来提取,避免了其他振动源和噪声的影

* 1990年7月5日收稿

响。

(2) 适用于短时越零率处理。

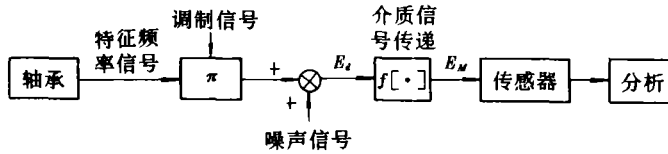


图1 检测原理框图

短时越零率对不连续信号的处理极为敏感，而振动信号常因为其他干扰影响产生“断层”不连续。如图2(a)所示。因此要经过非线性滤波处理。图2(b)就是中值平滑非线性滤波处理后的波形。而AE信号“抗干扰”能力强，多次实验从未发现类似“断层”不连续，无须用非线性滤波处理。

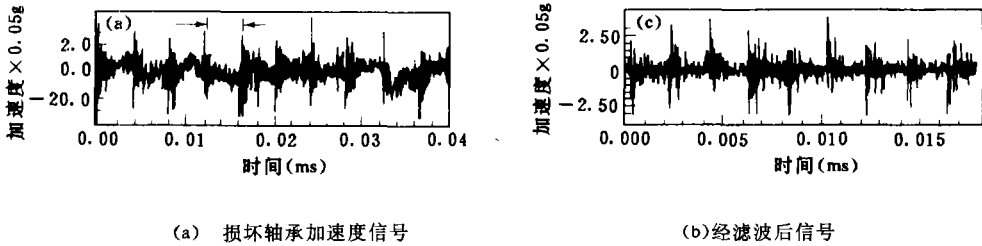


图2 非线性中值平滑滤波处理

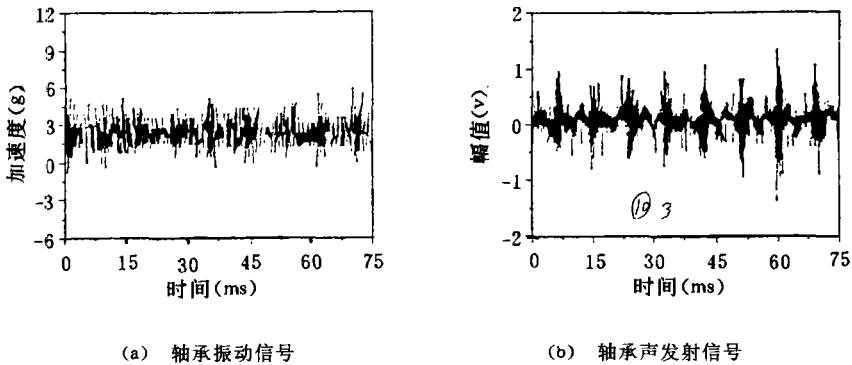


图3 远离轴承处测得的信号

$f[\cdot]$ 为介质传递函数，振动信号的 $f[\cdot]$ 取决于介质质量，交接介面特性及固紧程度等。而AE信号靠金属材料内部传递声波的特性。令AE信号源能量为 E_d ，AE传感器接受能量的 E_M ，则有：

$$E_d = f[\cdot]E_M$$

$f[\cdot]$ 在同一介质中随传递距离而衰减，很难用数学模型描述。实验中的定性结论为：

相对于加速度信号传递而言, AE 信号在同一介质传递中衰减减小, 而越过介面传递的衰减较大, 可见这是有利于特征信号的检测与其他 AE 源的隔离的。分别用加速度计和 AE 噪声传感器在同一点检测轴承损坏, 不断向远离轴承外套方向移动传感器。在大约离轴承中线 300mm 处加速度信号只剩下噪声信号了 (见图 3(a)), 而在同一点上声发射信号仍保持明显的特性频率成分。

2 试验装置

我们在文献^[2]中使用的实验装置是专用的排除了其他振源的单一皮带一轴承传动系统。为了接近于机床工作环境, 我们设计了安装在普通车床上的实验装置如图 4 所示。轴承支架可在 x 、 y 、 z 方向移动和锁死以调整轴承的位置和加载。机床主轴可在 0 到 2200 转/分连续可调。AE 传感器和加速度传感器安装在轴承外壳的同一点处进行检测和比较。

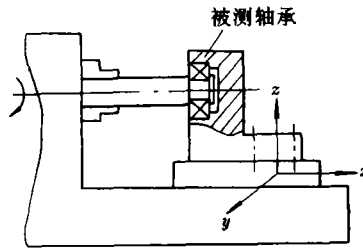


图 4 安装在车床上的实验装置

模拟的轴承局部损坏是用电火花加工机在轴承内圈、外圈或滚子上打出浅孔或沟槽。缺陷的大小可在电火花加工时严格加以控制。

3 信号处理与模式识别

3.1 数据采集与压缩

AE 信号频率很高 (可达 1MHz), 而轴承损坏特征频率成分很低。AE 信号的采样频率应兼顾计算机内存开销, 处理量与排除振动噪声干扰等因素, 我们采用 200kHz 采样频率并配有 16K 高速存储区, AE 信号预先经 30kHz~100kHz 带通滤波器滤波。而加速度信号经 5kHz~20kHz 带通滤波器用 40kHz 采样频率进行采样。AE 信号采样频率高, 数据量大, 数据压缩处理显得更为重要。短时能量法和短时越零率法显示出其优越性。

短时能量函数定义如下:

$$E_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m)W(n-m) \quad (1)$$

这里, 如果 $0 \leq n \leq N-1$, 则 $W(n)=1$, 否则 $W(n)=0$ 。 $x(n)$ 为采样信号, N 为窗口宽度。

短时越零率表示在窗口内离散信号改变代数符号的次数。它是在时域中对信号频率进行简单测量的一种方法, 定义如下:

$$Z_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |\text{Sgn}[x(m)] - \text{Sgn}[x(m-1)]|W(n-m) \quad (2)$$

这里: 如果 $x(n) \geq 0$, 则 $\text{Sgn}[x(n)]=1$; 如果 $x(n) < 0$, 则 $\text{Sgn}[x(n)]=0$; 如果 $0 \leq$

$n \leq N-1$, 则 $W(n) = \frac{1}{2}N$, 否则 $W(n) = 0$.

短时处理方法基于轴承信号在一个短时间片断中具有不变的有用特征。我们用一个短的时间片断（即窗口）把轴承信号的一部分和它的整个过程隔离开进行处理。该“窗口”可以移动并可以部分复盖。这样就可将原始数据量大大压缩而产生一个新的时间独立序列来表示原信号。AE 信号的特点是原始数据密度大，有用特征值密度小。因此窗口可适当加大，经短时处理后，AE 信号数据从 16K 压缩到 0.5K。图 5(a) 是一典型外圈损坏轴承的 AE 信号，图 5(b) 和图 5(c) 分别是它短时能量函数的短时越零率。

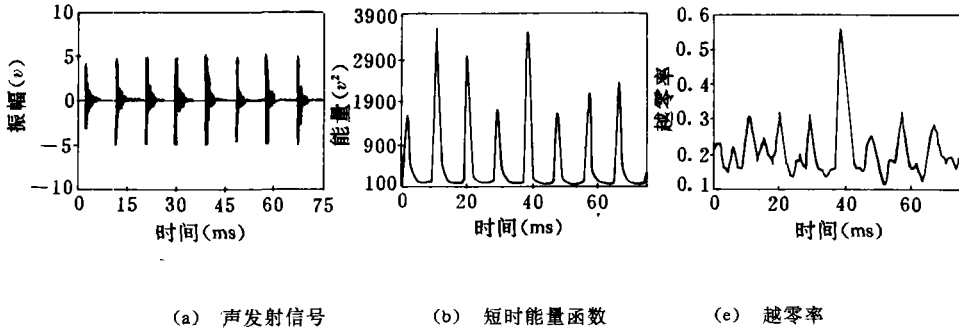


图 5 短时处理

3.2 特征提取

轴承缺陷的特征提取基于轴承 AE 信号的脉冲发生率及其强度。如果估计的脉冲发生率接近于任何一个损坏特征频率，而且其强度足够大，就可得出存在轴承局部损坏的结论。

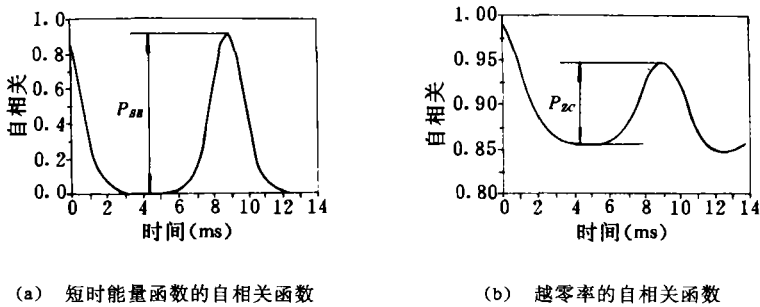


图 6 自相关处理提取特征值

图 6(a) 和图 6(b) 分别表示从图 5(b) 和图 5(c) 短时能量函数和越零率计算出的自相关函数。图 6(a) 中的第一峰是在延后 0.0089 秒处，它相对应于脉冲发生率为 112Hz，这就很靠近理论计算出的损坏特征频率 110Hz。从短时越零率的自相关函数也可得到类似的结果。把两个自相关第一峰处的速率分别标为 f_{SE} 和 f_{ZC} ，而该点处“峰”值与邻近“谷”值分别标记为 P_{SE} 和 P_{ZC} ，它反映了损坏轴承的 AE 信号在损坏特征频率附近的能量大小。 f_{SE} , f_{ZC} , P_{SE} 和 P_{ZC} 就是我们需要提取的特征值。

测量得到的损坏脉冲发生率进一步定义为 f_{SE} 和 f_{ZC} 的加权平均:

$$\text{脉冲发生率} = (P_{SE}f_{SE} + P_{ZC}f_{ZC}) / (P_{SE} + P_{ZC})$$

该脉冲发生率对照理论计算出的三个损坏特征频率进行比较。用以作为诊断轴承哪个部位有局部损坏的依据。

4 模式识别与评价

4.1 模式分类与训练

由于 P_{SE} 和 P_{ZC} 的大小是损坏脉冲强弱的量度。如果该值大,那么相应的局部损坏存在的程度就越肯定。因此以 P_{SE} 和 P_{ZC} 作坐标,对好的轴承而言其计算出的点 (P_{SE}, P_{ZC}) 应落在靠近原点的区域,而坏轴承的点应远离原点区域。

从已知的好与坏的两类轴承中各取一系列 (P_{SE}, P_{ZC}) 值。图 7 表示以 P_{SE} 和 P_{ZC} 为坐标的二维平面区分。棱形符号和黑方块符号分别表示从好和坏轴承信号中提取的特征值。两类特征值可用直线 $x-x$ 区分开来。在模式识别中用一线性区分函数可以进行这种不同类别的区分。

如果模式矢量定义为: $y = (P_{SE}, P_{ZC})$, 则线性区分函数为:

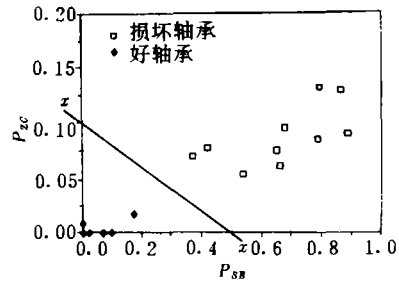


图 7 特征矢量分布

$$d_i(y) = a_i' y + a_0 \quad (4)$$

这里 a_i' 是区分函数的权矢量, a_0 是权矢量的附加成分, 它对应于 $d_i(y)$ 到轴的截点。

分类训练问题是相当于用一组训练数据来寻找线性区分函数的系数组, 而训练数据来自于从已知条件轴承测量的有效模式矢量组。上述方法用判据 $J(a)$ 求极小值来求得一组解矢量^[2]。

4.2 评价

我们用两个指标来评价 AE 信号法和振动信号法的检测效果——成功率和可信度。

在不同负载和转速下三种轴承中测量了 41 组 AE 信号, 成功率为 97.5%, 文献[2]中提供良好振动环境下的成功率为 91.5%, 而在车床工作环境下为 82.5%。

我们知道特征矢量样本在图 7 中离区分线越远则轴承好坏的判断可信度越高。定义下列函数。

第 i 类平均矢量 $m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{z \in z_i} x$	总平均矢量 $m = \frac{1}{n} \sum_{z \in z_i} x$
第 i 类中散度阵 $S_i = \sum_{z \in z_i} (x - m_i)(x - m_i)^T$	总散度阵 $S_w = \sum_{i=1}^c S_i$
类间散度阵 $S_B = \sum_{i=1}^c n_i (m_i - m)(m_i - m)^T$	

其中 X 为特征矢量, n_i 为 i 类样本数, n 为总样本数, c 为分类个数。定义指标 J 为:

$$J(x_j) = S_B(j, j) / S_w(j, j)$$

这里, $S_B(j, j)$ 和 $S_w(j, j)$ 分别为 S_B 和 S_w 阵中的第 j 个元素。 $J(x_j)$ 反映了同类中矢量集中程度与不同类的分散程度, $J(x_j)$ 的数值越大可信度越高。计算在相同条件下 AE 信号法与振动信号法的 J 值, 结果如下:

	AE 法	振动法
好轴承类	15.4	3.88
坏轴承类	1.169	0.506

可见 AE 法对好坏轴承的识别可靠性分别比振动法高。在实验中用示波器监视同种情况下的两个信号也可明显看出 AE 信号的信噪比和振动信号比较要高出 3—5 倍。这可能是导致识别可信度高的主要原因。

5 结论

本文的研究是作者在完成文献[2]所述研究工作后的进一步探讨和开发。用 AE 信号分析对轴承条件监控的尝试为应用提供了一种新的选择。它有如下优点:

- 1) 证明 AE 信号比振动与噪声信号对轴承缺陷更为敏感, 更易于测量。成功率很高。
- 2) 时域短时信号处理与自相关函数分析法数据压缩和处理速度快, 这对具有大量数据量的 AE 信号处理更具有优越性。
- 3) 方法简单, 计算机软件硬性开销小, 易实现在线实时监控。

参 考 文 献

- [1] Widner R L and Littmann W. E. Bearing Damage Analysis. National Bureau of Standard Special Publication, 1976, (423)
- [2] James Li and S M Wn. On-line Detection of Localized Defects in Bearings by Pattern Recognition Analysis. ASME J. of Engineering for Industry, 1989

Acoustic Emission Analysis for Research of Bearing Condition Detection

Li Shengyi C. James Li

(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

For automatic detection and diagnosis of localized defects in bearings, a new way by means of acoustic emission (AE) analysis is investigated in this paper. Feature of defects is extracted by short-time signal processing techniques, analysed by pattern recognition and evaluated by scattering matrices. The experimental and analysis results show that this new way is better than the vibration analysis method.

Key words acoustic emissions, bearing, monitoring, pattern recognition