

# Experimental Study of Rolling Bearing Fault Diagnosis Technology

Shuyong Liu, Liang Deng, Yongxiang Zhang

Ship Structure and Power College, Naval University of Engineering, Wuhan  
Email: lsydh@sina.com

Received: Oct. 6th, 2011; revised: Oct. 27th, 2011; accepted: Nov. 15th, 2011.

**Abstract:** The rolling bearing is an important part in equipment. It is significant to research the diagnosis technology of the bearing in practical engineering. The combination of fractal diagnosis and characteristic frequency is presented in this paper, and the fault was determined on the basis of analyzing the vibration signal. The experimental structure and measuring program are designed, and an intelligent diagnosis system is finished. Experimental results show that the fractal dimension is increased when the fault occurs, and the fault location is identified by the intelligent diagnosis system.

**Keywords:** Rolling Element Bearing; Fault; Experimental Study

## 滚动轴承故障综合诊断试验研究

刘树勇, 邓亮, 张永祥

海军工程大学船舶与动力学院, 武汉  
Email: lsydh@sina.com

收稿日期: 2011年10月6日; 修回日期: 2011年10月27日; 录用日期: 2011年11月15日

**摘要:** 滚动轴承是机械设备中非常重要的部件, 如何有效地实施滚动轴承故障诊断是值得深入研究的问题。本文提出轴承分形理论和故障特征频率综合诊断法, 通过对轴承振动信号进行分析实现其故障诊断。设计了试验台架和振动测试方案, 研制了基于故障特征频率的智能诊断系统。试验结果表明, 当滚动轴承出现故障时, 振动信号分形维数明显增加, 同时综合应用智能诊断系统识别了轴承的故障部位。

**关键词:** 滚动轴承; 故障; 试验研究

### 1. 引言

滚动轴承是机械设备中的重要部件之一, 如舰用柴油机、齿轮箱、滑油泵等设备中都使用了滚动轴承。然而, 滚动轴承由于其设计制造存在误差、使用安装不合理以及长时间运行等原因, 会出现不同形式的故障, 如疲劳剥落、磨损、塑性变形、腐蚀、断裂、胶合等。如何有效地提取滚动轴承的故障信号, 对滚动轴承的状态进行评价以及根据测试信号进行滚动轴承故障诊断一直是机械设备状态监测与诊断领域中的热点和难点问题。除了传统的共振解调<sup>[1]</sup>方法以外, 还有很多学者进行了其他方法的研究。如李风英等人研

究了滚动轴承声发射检测技术, 探讨了滚动轴承声发射信号的采集处理以及诊断方法的特点<sup>[2]</sup>, 随后郝如江等人对滚动轴承故障的声发射检测技术进行了综述<sup>[3]</sup>。进行了研究。王小卉等人则采用二阶循环平稳分析方法对滚动轴承故障提取方法进行研究<sup>[4]</sup>。分析了循环自相关和循环谱密度的各种谱图, 提出了切片集合分析方法, 提高了分析的可靠性, 减少计算量, 有效地排除了故障干扰频率。此外, 一些神经网络方法也用于对滚动轴承故障模式进行识别<sup>[5]</sup>。随着混沌理论的深入研究, 分形技术在工程实际中得到了广泛的应用。国内外已将分形理论用于滚动轴承故障诊断<sup>[6,7]</sup>和齿轮的故障诊断<sup>[8]</sup>, 发现故障对分形维数值有一定

的影响。同时,在实际应用过程中,考虑到噪声的污染,采用了小波包降噪技术。这些研究促进了设备状态监测与故障诊断方法的发展。本文综合利用分形诊断理论以及轴承故障诊断系统,对轴承故障进行了精密诊断。

## 2. 滚动轴承振动机理

滚动轴承在工作时,外圈与轴承座或机壳相联接,固定或相对固定;内圈与机械传动轴相联接,随轴一起转动。在机械设备运转时,滚动体便在轴承内、外圈滚道上滚动,由于本身结构的原因,每个滚动轴承在不同位置会承受不同的交变载荷,而且承受载荷的滚动体数量是不同的,这种承载刚度的变化必然会引起轴承产生振动。另外,在加工过程中,内外轨道表明粗糙程度、波纹度以及形位误差等原因产生交变激励力也会使轴承产生振动。虽然这些加工装配因素造成的激励力大多具有周期性的特点,但由于实际构成因素十分复杂,各因素之间也不存在特定的关系。所以,总体上而言这些激励力随机性较强,含有多种频率成份。因而轴承系统在这些激励力的作用下所产生的振动当然也具有多种频率成分并具有较强的随机性。

更为重要的是,当轴承出现故障时更容易导致异常振动的产生。在工程实际中主要包括两类故障,一类是由于磨损产生的振动,一类是由于疲劳剥落、点蚀等产生的振动。对于前者,其振动特征主要体现在振幅增加。对于后一类故障,其振动特点是使系统产生高频的固有振动。这一故障信号和其他信号混合在一起,且由于其能量非常低,因此传统的方法难以提取其故障特征。共振解调方法的研究为该问题提供了强有力的手段。但工程界中通常容易忽略这样一个事实,即滚动轴承在实际运转过程中,由于结构等非线性因素的存在,不可避免地产生非线性振动。如何应用非线性时间序列分析方法来处理这些振动信号也是值得探讨的重要问题。本文应用分形维计算方法来分析实际滚动轴承振动信号,为轴承故障诊断提供有效参考。

## 3. 分形维数计算

根据非线性动力学理论可知非线性动力学系统的行为在相空间体现为有序结构。虽然在时域或频域很难发现这种有序性,但在相空间中可以观察到吸引子

的分形结构。在具有分形性质的吸引子上任选择一个局部区域,由于其自身具有自相似性,对它进行放大后,得到的图形会显示出与原图类似的特性,即它的形态、不规则性和复杂程度等各种性质与原图相比均不会发生变化,这种特性称为无标度性。相似性具有层次结构上的差异,数学中的分形具有无穷嵌套的层次结构,而自然界的分形只有有限层次的嵌套,而且要进入到一定的层次结构后才有分形的规律。自然界的分形通常具有一个最小标度和最大标度,在此区间内才存在标度不变性。在实际中一般可以通过经典的G-P算法计算混沌吸引的关联维数,其主要特征是对吸引子的不均匀性反应敏感,能够反映吸引子的静态结构,同时它的物理意义非常明确。G-P算法的主要思想是先统计不同半径小球内的点数,然后通过关联积分和半径之间的双对数曲线的斜率来确定关联维数。

根据关联维数的计算方法,通常采用下式进行计算:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_i^N \sum_j^N \theta(r - |Y_i - Y_j|) = \frac{1}{N^2} \sum_i^N \sum_j^N \theta(r - r_{ij}) \quad (1)$$

式中, $C(r)$ 表示距离 $r_{ij}$ 小于 $r$ 的点对在所有点对中所占的比例, $C(r) = N_1(r)/N(r)$ ; $\theta(x)$ 是Heaviside函数:

$$\theta(r - r_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当}(r - r_{ij}) \geq 0 \text{时} \\ 0, & \text{当}(r - r_{ij}) < 0 \text{时} \end{cases} \quad (2)$$

从(2)式中可以看出实际系统对 $r$ 的要求。 $r$ 值太大或者太小两种情况都不能反映系统内部的性质。如果 $r$ 的取值太大,那么所有点对之间的距离 $r_{ij}$ 都不会超过 $r$ ,这时 $N_1(r) = N(r)$ , $C(r) = 1$ ,取对数后 $\ln C(r) = 0$ ,这样的值当然反映不了系统内部的性质,没有任何意义。如果 $r$ 的值取得太小,那么所有点对之间的距离 $r_{ij}$ 都将大于 $r$ ,这时 $N_1(r) = 0$ ,于是 $C(r) = 0$ 。这样的 $r$ 值也反映不出系统内部的性质,也没有意义。只有 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线的中间一段, $r$ 值才对应无标度区,才能够反映系统的分形性质。

## 4. 滚动轴承故障诊断试验

### 4.1. 试验台组成

滚动轴承故障诊断试验台如图1所示。主要由滚

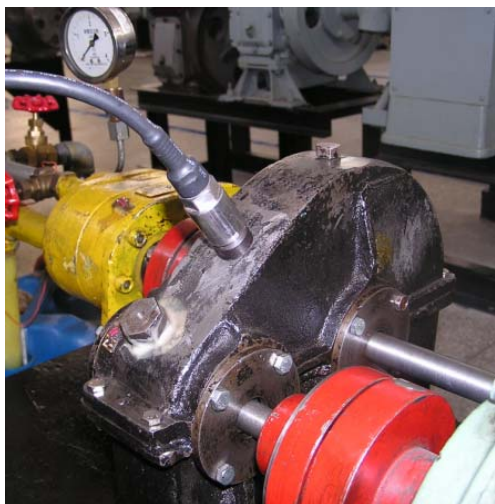


Figure 1. Basic structure of experimental rig  
图 1. 实验台的基本结构

动轴承(型号 6004)、齿轮、电机、滑油泵等部分组成。其工作原理是电机通过弹性连轴节带动齿轮运转,滚动轴承安装在齿轮箱上,齿轮箱输出端通过连轴节和滑油泵连接。试验过程中,主要采用有故障和无故障两种滚动轴承进行振动测试。故障的模拟主要采用线切割方法在外环滚道或者内环滚道上线切割一道故障痕,测点的布置如图 2 所示。

#### 4.2. 试验流程

滚动轴承故障诊断试验流程图如图 3 所示,主要包括信号采集、信号调理、故障特征频率的提取以及计算信号的关联维数,对轴承故障进行诊断。当轴承未出现故障时,对其工作状态进行评估或者对未来的工作状态进行预测,当轴承出现故障时,对其原因进行分析,判断故障的部位和严重程度。因此,轴承故障诊断的主要研究内容包括测试方法的研究、状态评估方法的研究和故障诊断预测等等。

#### 4.3. 数据采集与分析

1) 智能诊断系统的应用。为了测试滚动轴承的振动信号,采用了压电式加速度传感器测量其振动加速度。在进行电机启动前的盘车检查后,给系统通电。应用光电转速传感器测量其转速为 2920 rpm。由于故障特征频率处于低频阶段,设置采样频率为 3000 Hz,足以包含所要分析的故障特征频率成分。采用自研的轴承故障诊断系统对信号进行采集,如图 4 所示,通

过调用智能处理程序可以得到的部分诊断结果如图 5 所示。频谱图中在约 263 Hz 位置的能量非常突出,为故障特征频率。结合该型滚动轴承几何参数和运动参数,应用故障特征频率计算公式,不难计算出外圈、内圈以及滚动体等故障特征频率的具体数值。将该数值 263.866 Hz 和频谱图比较,就可以推断出滚动轴承内圈出现了故障,这和试验模拟的故障位置是吻合的。

#### 2) 分形计算的结果

采用式(2)计算无故障和有故障时振动信号的关联维数曲线如图 6 和图 7 所示。通过无标度区间的斜率计算,得到无故障时关联维数为 0.692。有故障时,根据测量的数据可以计算其关联维数为 1.712,即有故障时分形维明显增加,这表明,故障出现时,其系统的响应更加复杂。

### 5. 结论

滚动轴承在实际运转过程中,由于结构等非线性因素的存在,不可避免地产生非线性振动。本文应用非线性时间序列分析方法来提取轴承振动信号的分形特征,为轴承分形诊断提供了重要参考,通过计算,得到了试验轴承在不同状态下振动信号的关联维数。发现它有故障时分形维明显增加。由于分形维数对吸引子的不均匀性反应敏感,能够反映吸引子的内部结构,这表明,当故障出现时,系统的响应更加复杂。同时,综合应用基于轴承故障特征频率分析研制的滚动轴承故障智能诊断系统,可以对轴承的故障大小、故障部位进行诊断。

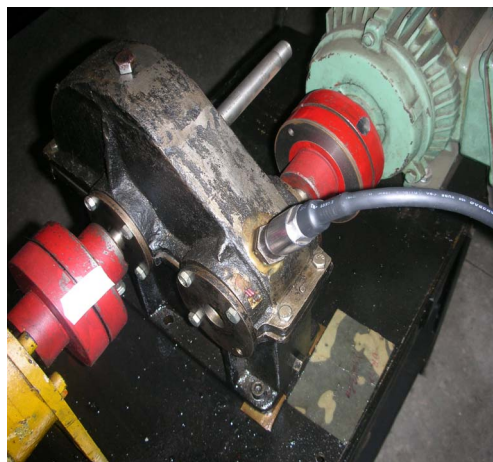


Figure 2. The location of vibration sensor  
图 2. 传感器的布置

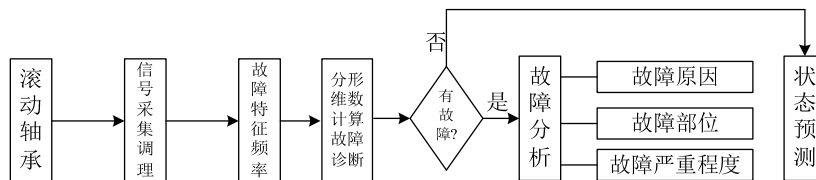


Figure 3. The flow chart of fault diagnosis  
图 3. 滚动轴承故障诊断流程图

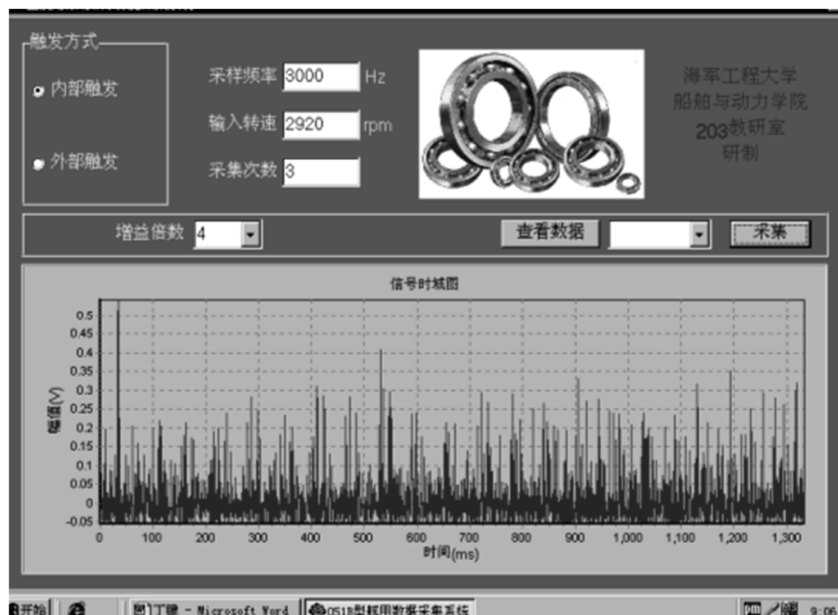


Figure 4. The software interface  
图 4. 诊断系统的界面

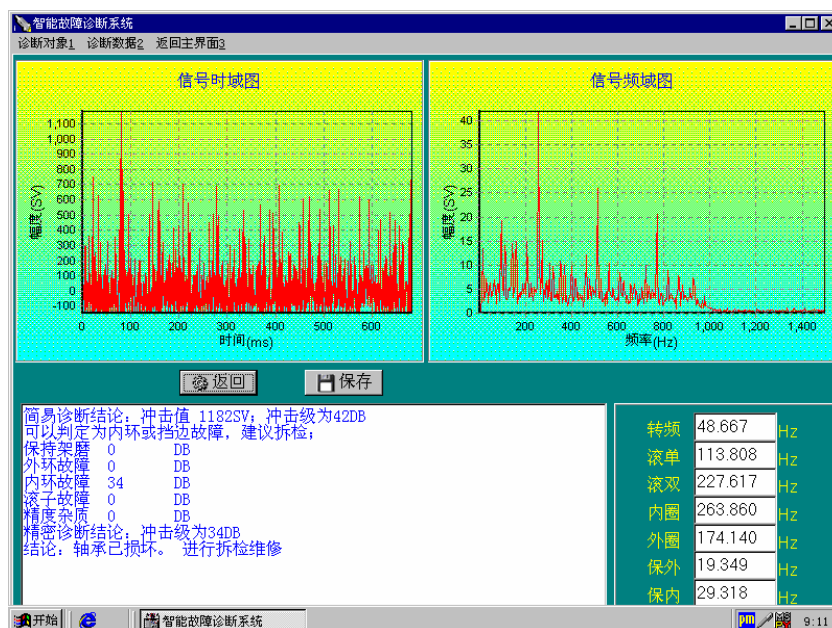


Figure 5. The diagnosis results  
图 5. 诊断的结果

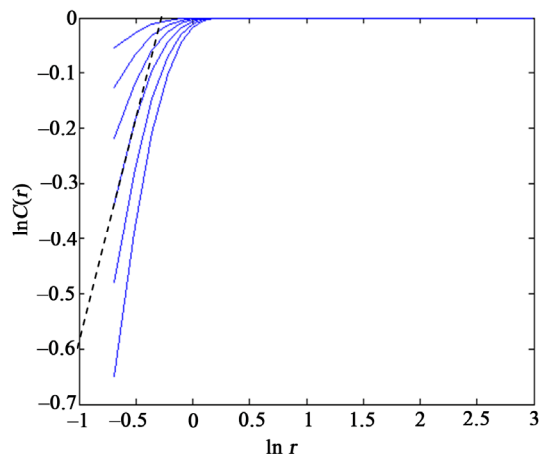


Figure 6. The fractal dimension of normal equipment  
图 6. 无故障时的分形曲线

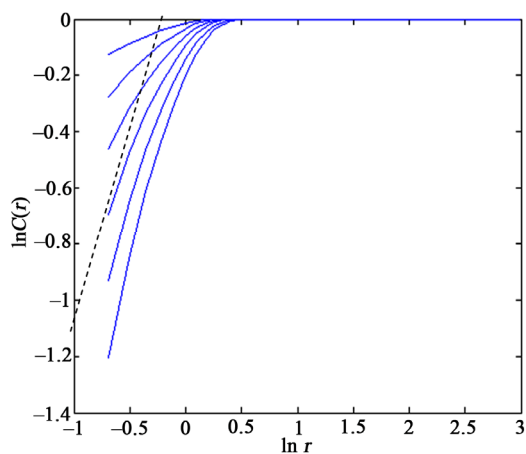


Figure 7. The fractal curve of fault equipment  
图 7. 有故障时的分形曲线

## 6. 致谢

本文得到海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)开放课题(1009)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 夏瑞花, 谢志明, 吴懂军. 滚动轴承监测与故障诊断的几种方法[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(1): 53-54.
- [2] 李风英, 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): 583-586.
- [3] 郝如江, 卢文秀, 褚福磊. 声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 75-79.
- [4] 王小卉, 李敏, 杨洁明. 轴承早期故障信号的二阶循环平稳分析[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 418-421.
- [5] 陆爽, 张子达, 李萌. 基于径向基函数神经网络的滚动轴承故障模式识别[J]. 中国工程科学, 2004, 6(2): 56-60.
- [6] 陈江海, 孙齐山. 基于分形和小波包理论的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2010, 2: 48-52.
- [7] 王静, 邓军, 王斌. 滚动轴承故障分形诊断中的信号处理[J]. 机床与液压, 2009, 37(1): 173-175.
- [8] 李兵, 张培林, 米双山. 齿轮故障信号多重分形维数的形态学计算方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 34(4): 450-453.