Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2019, 8(1), 39-47
Published Online February 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2019.81006

Hans汉斯

Experimental Study on the Fault Diagnosis of Rolling Bearing

Limin Lu

Huaneng Shanghai Power Service Co. Ltd., Shanghai
Email: lulmhn@yeah.net

Received: Jan. 20th, 2019; accepted: Feb. 11th, 2019; published: Feb. 18th, 2019

Abstract

This paper introduces the common faults of rolling bearing, including outer ring, inner ring of the rolling bearing and rolling element, and carries out experimental research on the faults of rolling bearings. It obtains the normal signal and fault signal by using fault simulation experiment table and gets the frequencies of different faults according to relevant empirical formulas. It is found that time domain analysis and frequency-domain analysis method have their own advantages through the analysis of fault by means of time domain and frequency domain method and the fault diagnosis results are in consistent with the actual faults, indicating that experiment table can well simulate the fault of rolling bearing.

Keywords

Rolling Bearing, Fault Diagnosis, Experimental Study, Time Domain Analysis, Frequency Domain Analysis

滚动轴承故障诊断实验研究

陆黎敏

华能(上海)电力检修有限责任公司，上海
Email: lulmhn@yeah.net

收稿日期：2019年1月20日；录用日期：2019年2月11日；发布日期：2019年2月18日

摘　要

本文介绍了滚动轴承的常见故障，包括滚动轴承外圈故障、内圈故障和滚动体故障，并对滚动轴承故障进行实验研究。利用故障模拟实验台获得了正常信号和故障信号，通过经验公式求得不同故障的频率；

文章引用: 陆黎敏. 滚动轴承故障诊断实验研究[J]. 机械工程与技术, 2019, 8(1): 39-47.
DOI: 10.12677/met.2019.81006

采用时域方法和频域方法对故障进行分析，发现时域分析方法和频域分析方法有各自的优点，故障诊断结果与实际故障相符，表明该实验台可以较好地模拟滚动轴承的故障。

关键词

滚动轴承，故障诊断，试验研究，时域分析，频域分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

滚动轴承作为旋转机械的核心零部件之一，其状态影响着机械设备的运行。据统计，机械设备中大约 1/3 的故障由滚动轴承的故障引起，因此对滚动轴承的故障诊断具有重要意义[1]。当滚动轴承元件出现缺陷或结构不规则时，运行时将激发各个元件以其固有频率振动，轴承元件的固有频率取决于本身的材料、外形和质量[2]。目前，在电力、机械等工程培训或实训行业的部分场合，需要对滚动轴承的故障进行模拟，以揭示滚动轴承故障的机理并提供培训。对旋转机械故障诊断进行模拟的试验台相对来说比较少。本文利用类似于文献[3]的人工故障缺陷的模拟的方法，利用旋转机械故障模拟试验台，模拟了滚动轴承的内圈、外圈、滚动体的故障。滚动轴承故障振动诊断方法有多种，为了对滚动轴承模拟故障信号进行考察，本文采用最基本的故障诊断方法，即量纲参数分析法和功率谱分析法。在故障特征提取方面，分别使用在时域分析方法，频域分析方法内对滚动轴承进行特征提取，并进行故障诊断[4]。

2. 轴承常见故障及信号特征

滚动轴承的振动比较复杂，其故障与正常信号特征存在显著差异。如果在运动的接触面存在缺陷，如内圈故障、外圈故障、滚动体故障，都会产生机械冲击，出现变化剧烈的冲击力，进而会引起多个频率成分的叠加。滚动轴承几种故障的特征频率计算公式如式(1)~(3)所示[5] [6] [7]。

外圈故障频率：

$$\left(\frac{n}{60}*0.5\right)*N*\left[1-\frac{d}{D}*\cos\alpha\right] \tag{1}$$

内圈故障频率：

$$\left(\frac{n}{60}*0.5\right)*N*\left[1+\frac{d}{D}*\cos\alpha\right] \tag{2}$$

滚动体频率：

$$\left(\frac{n}{60}*0.5\right)*\frac{D}{d}*\left[1-\left(\frac{d}{D}*\cos\alpha\right)^2\right] \tag{3}$$

式中：$D=(d_1+d_2)/2$；d_1、d_2 为轴承的内外圈直径；n 为转速；N 为滚动轴承中滚动体的数目；d 为滚动体的直径；D 为轴承节径；α 为接触角。

3. 实验研究

为了研究滚动轴承的故障特征，通过齿轮箱故障诊断实验台，采集轴承的内圈故障、轴承的外圈故障以及滚动体故障的振动信号，探索不同故障信号的故障特性。

3.1. 故障诊断试验装置

旋转机械故障诊断实验台，如图 1，可以快速模拟齿轮箱的几种故障，并进行故障信号采集与数据处理。实验台是通过变速驱动电机提供动力，经过皮带轮、联轴器、轴的传动，将动力输出给齿轮箱及滚动轴承，其组成参见表 1。利用传感器等对齿轮箱的振动信号进行采集，本文主要是对滚动轴承故障进行模拟。

采集的故障数据，通过数据采集卡进行采集。其中信号采集卡的型号 ADA16-8/2(LPCI)，8 通道，16 位精度。

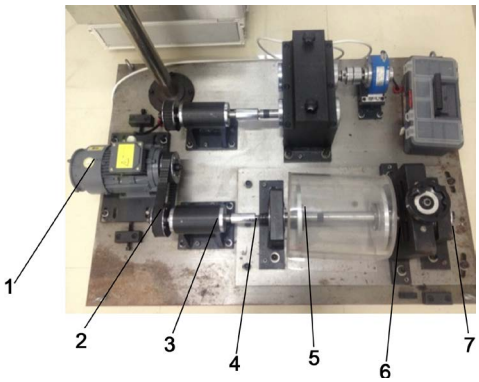

Figure 1. Fault diagnosis test-bed for rotating machinery
图 1. 旋转机械故障诊断试验台

Table 1. Composition of fault diagnosis test-bed for rotating machinery
表 1. 旋转机械故障诊断试验台组成

1	三相交流变频电机
2	传动轴支座
3	刚性联轴器
4	轴承座
5	旋转轴
6	轴承更换端轴承座
7	轴承更换处

3.2. 故障的设置

1) 轴承内、外圈故障：通过在轴承外(内)圈面上加工出小凹槽，以模拟轴承内、外圈磨损故障。

2) 轴承滚动体故障：通过在轴承一个滚动体上加工出小的凹槽，以模拟轴承滚动体磨损故障。

3.3. 滚动轴承振动信号的时域分析与频域分析

通过模拟滚动轴承内外圈、内圈、滚动体的故障，利用数据采集仪进行信号的采集，然后利用时域和频域的方法对故障进行分析。用所得结果与经验公式求得的频率进行比较，观察时域分析与频域分析方法是否可以用于轴承的故障诊断中。根据经验公式所求几种滚动轴承的故障频率，如表 2 所示。

Table 2. Fault frequency of rolling bearing
表 2. 滚动轴承的故障频率

故障名称	轴承内圈故障	轴承外圈故障	轴承滚动体故障
故障频率	177.53 Hz	120.26 Hz	42.09 Hz

3.3.1. 时域分析与频域分析方法

1) 时域分析

通过有量纲与无量纲的时域指标对故障信号进行分析[8] [9] [10] [11]，如表 3 和表 4 所示，然后与正常信号的值进行对比，从而进行故障诊断。

Table 3. Dimensional indices
表 3. 有量纲指标

峰-峰值	峰值	均值	均方值
$X_{p-p}=\max\{X(t)\}-\min\{X(t)\}$	$X_p=\lvert X(t)\rvert_{\max}$	$\mu_x(t)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i(t)=E[X(t)]$	$\psi_x^2(t)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2(t)=E[X^2(t)]$

Table 4. Dimensionless indices
表 4. 无量纲指标

峰值因数	峭度指标	脉冲因数	波形因数
$C=\frac{X_p}{X_{rms}}=\frac{\text{峰值}}{\text{有效值}}$	$K=\frac{N\sum_{i=1}^{N}X_i^4}{X_{rms}^4}$	$I=\frac{X_p}{\overline{X}_p}$	$S=\frac{X_{rms}}{\overline{X}_p}$
裕度因数	平均幅值	方根均值	均方根值
$L=\frac{X_p}{X_r}$	$\overline{X}_p=\frac{1}{T}\int_0^T\lvert x(t)\rvert dt$	$X_r=\left[\frac{1}{T}\int_0^T\lvert x(t)\rvert^{\frac{1}{2}}dt\right]^2$	X_{rms}

2) 频域分析

频域分析是一种常用的信号分析方法，通过傅里叶变换，将时域信号转换成频域，常用频谱和功率谱进行分析。

3.3.2. 滚动轴承滚动体故障的时域和频域分析

1) 滚动轴承滚动体故障的时域分析

为了进行滚动轴承滚动体故障的时域分析和频域分析，对发生滚动体故障的时域信号进行采样，得到时域图，如图 2 所示。

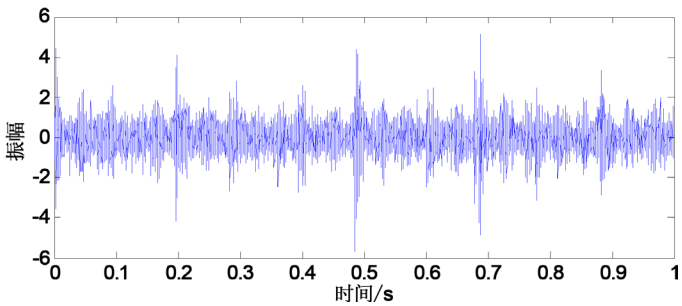

Figure 2. Time domain diagram of bearing roller fault
图 2. 轴承滚动体故障的时域图

Table 5. Parameter of dimensional indices
表 5. 有量纲指标参数值

	峰值	峰-峰值	均值	均方根值	方差
正常轴承	2.3151	4.3045	−0.0091	0.5460	0.2981
滚动体故障	6.9983	12.8662	−0.0095	0.7223	0.5217

从表 5 可得，滚动体故障的有量纲参数与正常轴承的参数大部分都有差别。

a) 滚动体故障的峰值参数为 6.9983 是正常轴承的参数 2.3151 的三倍左右，说明故障振动图象离横坐标偏差大大增加。

b) 故障信号的峰－峰值相对正常轴承的数值也有较大增加。

c) 均值方面两者均值基本相同都为−0.0009 近似为 0，说明两者图形都大致关于横坐标对称。

d) 均方根值又称有效值，它用来反映信号能量的平均大小，有滚动体故障的轴承运行中因为故障部位的影响会增大冲击，能量会大大增加，均方根值也会大大增加。

Table 6. Parameter of dimensionless indices
表 6. 无量纲指标参数值

	波形指标	峭度指标	峰值指标	裕度指标	脉冲指标
正常轴承	1.2851	3.0000	4.2398	6.5114	5.4485
滚动体故障	1.3353	5.9946	9.6887	15.6804	12.9372

从表 6 中可以看出，有滚动体故障的时域特征值与无故障的滚动轴承时域特征值比较起来有明显的变化。

a) 滚动体故障的峭度系数为 5.9946，而正常轴承的峭度值为 3.0，滚动体故障的峭度指标与正常比明显增加。

b) 从振动信号的峰值指标可以发现，滚动体故障的滚动轴承峰值指标相对正常的轴承指标有大大增加。

c) 滚动体故障轴承的裕度指标相对正常轴承的大幅增加，裕度指标用于描述振动信号的整体离散度，滚动体故障的滚动轴承的裕度指标相对正常轴承大大增加，说明滚动体故障的轴承振动信号更加离散；

d) 滚动体故障的脉冲指标比正常轴承的要大，而脉冲指标表示振动信号图像的陡峭程度，故障信号的脉冲指标大于正常轴承信号，说明滚动体故障的图像比正常轴承的图形更加陡峭；

e) 波形指标主要反映振动信号的时域波形，有滚动体故障的振动图形和无故障的振动图形波形趋势都大致形同。

2) 滚动轴承滚动体故障的频域分析

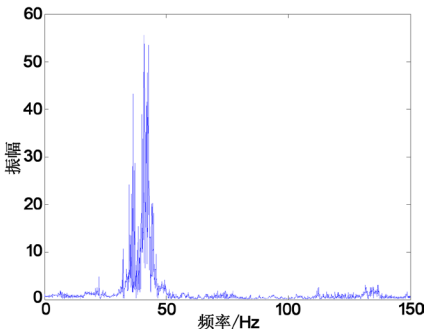

Figure 3. PSD diagram of bearing roller fault
图 3. 滚动体故障的功率谱图

观察轴承滚动体故障的功率谱图，即图 3，可以看出，在频率为 44 Hz 左右时，振幅突然增大，这说明此滚动轴承含有故障，并且此功率谱跟正常的比较振幅发发增加。这与根据经验公式 3 算的故障频率为 42.09 Hz，二者非常接近，这说明使用功率谱的方法可以看出故障频率的数值。

3.3.3. 滚动轴承滚动体故障的时域和频域分析

1) 滚动轴承内圈故障的时域分析

为了进行滚动轴承内圈故障的时域分析和频域分析，对内圈故障的时域信号信号进行采样，得到时域图，如图 4 所示。

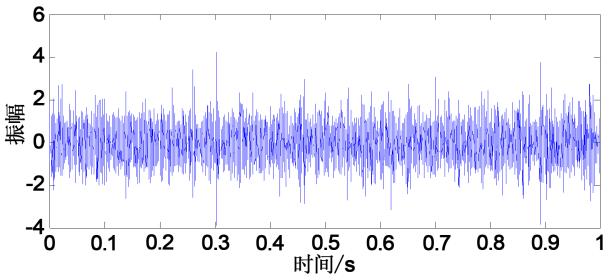

Figure 4. Time domain diagram of inner circle fault
图 4. 内圈故障的时域图

Table 7. Parameter of dimensional indices
表 7. 有量纲指标参数值

	峰值	峰-峰值	均值	均方根值	方差
正常轴承	2.3151	4.3045	−0.0091	0.5460	0.2981
内圈故障	5.4678	10.0537	−0.0090	0.7152	0.5114

从表 7 可得，内圈故障的有量纲参数与正常轴承的参数大部分都有差别。

a) 内圈故障的峰值参数是相对正常的参数增大一倍多，说明故障振动图象离横坐标偏差大大增加。

b) 峰－峰值相对正常轴承的数值也有较大的增加。

c) 均方根值比正常的轴承大，由于有故障的轴承，在运行过程中，因为故障部位的影响会增大冲击，能量会大大增加，均方根值也会大大增加。

d) 内圈故障振动信号的方差比正常的大大增加，说明故障数据的离散程度比正常的大大增加。

Table 8. Parameter of dimensionless indices
表 8. 无量纲指标参数值

	波形指标	峭度指标	峰值指标	裕度指标	脉冲指标
正常轴承	1.2851	3.0000	4.2398	6.5114	5.4485
内圈故障	1.2844	3.8605	7.6455	11.7169	9.8195

从表 8 可得，轴承内圈故障的时域特征值与无故障的滚动轴承时域特征值比较起来有明显的变化。

a) 内圈故障的峭度系数与正常轴承故障指标中峭度指标比有明显的增大。

b) 内圈故障轴承的裕度指标相对正常轴承的大幅增加，说明内圈故障的轴承振动信号更加离散。

c) 内圈故障的脉冲指标比正常轴承的要大，说明内圈故障的图像比正常轴承的图形更加陡峭。

d) 波形指标主要反映振动信号的时域波形，但内圈故障的振动图形和无故障的振动图形波形趋势都大致形同。

2) 滚动轴承内圈故障的频域分析

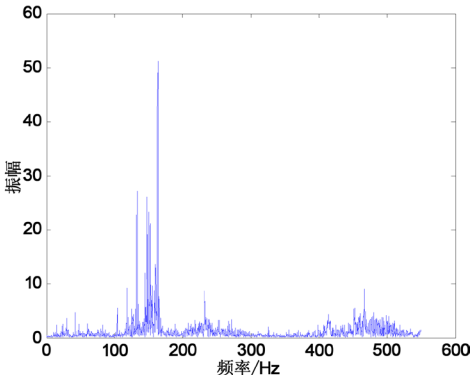

Figure 5. PSD diagram of inner circle fault
图 5. 内圈故障的功率谱图

从图 5 轴承内圈故障的功率谱图可以看出，能量在某一频率下突然增大，而这一频率为 175 Hz 左右时，振幅激增，这说明此滚动轴承含有故障，并且此功率谱跟正常的比较振幅大大增加。这与根据公式 1 算的其故障频率为 177.5 Hz，二者大致相同，这说明使用功率谱的方法可以看出内圈故障频率的数值。

3.3.4. 滚动轴承外圈故障的时域和频域分析

1) 滚动轴承外圈故障的时域分析

为了进行滚动轴承外圈故障的时域分析和频域分析，对外圈故障的时域信号进行采样，得到时域图，如图 6 所示。

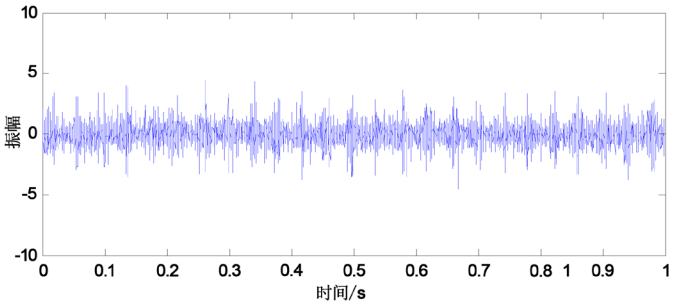

Figure 6. Time domain diagram of outercircle fault
图 6. 外圈故障的时域图

Table 9. Parameter of dimensional indices
表 9. 有量纲指标参数值

	峰值	峰-峰值	均值	均方根值	方差
正常轴承	2.3151	4.3045	−0.0091	0.5460	0.2981
外圈故障	6.3013	10.7559	−0.0088	0.7920	0.6272

Table 10. Parameter of dimensionless indices
表 10. 无量纲指标参数值

	波形指标	峭度指标	峰值指标	裕度指标	脉冲指标
正常轴承	1.2851	3.1000	4.2398	6.5114	5.4485
外圈故障	1.3485	4.9347	7.9564	13.1462	10.7288

由表 9 和表 10 可以看出，滚动轴承的外圈故障的有无量纲的各项参数数值，与滚动轴承的内圈的故障的同类参数数值对比，变化程度很小。

2) 滚动轴承外圈故障的频域分析

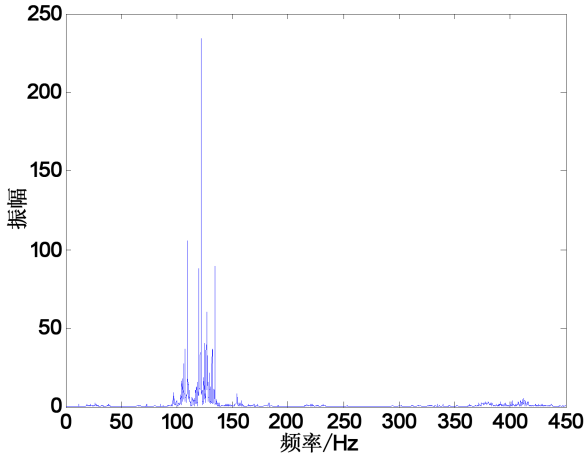

Figure 7. PSD diagram of outer circle fault
图 7. 外圈故障的功率谱图

通过图 7 观察轴承外圈故障的功率谱图可以看出在频率为 122 Hz 左右时振幅突增，说明此滚动轴承含有故障。这与根据公式 2 算的其故障频率为 120.26 Hz，二者大致相同，这说明使用功率谱的方法可以看出外圈故障频率的数值。

4. 实验研究

本文通过对滚动轴承故障的模拟，利用数据采集系统对故障信号进行提取，并对信号进行了时域分析和频域分析，得到结论如下：

1) 对滚动轴承部件的故障进行时域分析时，发现故障信号的有量纲参数数值和无量纲参数数值均高于正常工作状态下的数值。

2) 时域分析时：可通过数值看出故障时域波形偏离横坐标的偏差程度的大小、振动信号的离散程度、振动图形的波形趋势是否与正常状态下的轴承一致、波形陡峭程度等。

3) 频域分析时：使用功率谱的方法可以看出滚动轴承的外圈、内圈、滚动体故障频率的数值。

4) 通过对滚动轴承故障的模拟，发现时域分析与频域分析结合，对故障的判断会更加准确。

参考文献

[1] 汪嘉晨, 唐向红, 陆见光. 轴承故障诊断中特征选取技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 49(1): 1-9.

[2] 张春娟, 肖武清, 范雪飞, 司良群. 滚动轴承故障诊断与检测研究[J]. 现代制造技术与装备, 2018(8): 120-123.

[3] 余永增. 滚动轴承声信号特征提取和诊断试验研究[J]. 应用声学, 2018, 37(6): 1-6.

[4] 高彩霞, 吴彤, 付子义. 基于改进 EMD 的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 软件导刊, 2018(17): 36-40.

[5] 戴志强. 滚动轴承故障诊断与振动信号处理[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[6] 武栋梁. 滚动轴承常见故障及其振动信号特征[J]. 科技资讯, 2012(18): 85, 87.

[7] 张雪英, 刘秀丽, 栾忠权. 基于 VMD 与 FastICA 的滚动轴承故障诊断[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(5): 28-33, 87.

[8] 张津. 旋转机械振动信号故障诊断研究[J]. 装备机械, 2017(4): 55-60.

[9] 贺启盛, 张文豹. 基于自适应振动信号处理下旋转机械故障诊断的思考[J]. 科学技术创新, 2018(10): 35-36.
[10] 苏乃权, 熊建斌, 张清华, 黄崇林. 旋转机械故障诊断研究方法综述[J]. 机床与液压, 2018, 46(7): 133-139.
[11] 梁灿彬, 曹周键, 陈陟陶. 量纲分析简介(续 2) [J]. 大学物理, 2018, 37(2): 12-17.

Hans汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：met@hanspub.org