

学校代码	10406
分类号	TG115
密级	
学号	080080402015

题目 大型观览车主轴系统声发射  
信号研究

作者 袁俊

学科、专业 测试计量技术及仪器

指导教师 沈功田研究员 卢超教授

申请学位日期 2011年5月

分类号：TG115.28

学校代码：10406  
学号：080080402015

南昌航空大学  
硕士学位论文  
(学位研究生)

# 大型观览车主轴系统声发射信号特征研究

硕士研究生：袁俊

导师：沈功田研究员 卢超教授

申请学位级别：硕士

学科、专业：测试计量技术及仪器

所在单位：测试与光电工程学院

答辩日期：2011年6月

授予学位单位：南昌航空大学

# **Investigation of Acoustic Emission Signal Characteristics of Main Spindle on Giant Wheel**

A Dissertation

Submitted for the Degree of Master

On Measuring and Testing Technologies and Instruments

**by Yuan Jun**

Under the Supervision of

Prof. **Shen Gongtian** and **Lu Chao**

(School of Measuring and Optical Engineering)

Nanchang Hangkong University, Nanchang, China

June, 2011

## 摘要

近年来,随着我国经济的快速发展,大型观览车的高度不断地被刷新,承载人数也不断地增多,它不仅是游乐园的标志,而且是城市的标志,目前国内 A 级大型观览车(高度 $\geq 50\text{m}$ )约有 35 台。主轴系统是大型观览车结构的重要部件,其失效可能直接导致整个观览车发生事故,并造成人员伤亡。目前,主轴系统方面还没一种有效检测手段,不拆卸检测观览车主轴是检验部门迫切需要解决的难题。

因此,研究有效的大型观览车主轴系统的故障检测和诊断方法,及时发现和预报故障,是保障设备安全运行的重要措施。故本文结合“十二五”国家科技支撑计划资助项目(课题编号:2011BAK06B05)和国家质检总局科技计划项目课题《大型观览车主轴声学检测探索研究》(课题编号:2009QK016),主要从观览车模拟实验装置实验和现场试验来开展观览车主轴声发射检验,最终得到观览车主轴系统在正常情况下的声发射信号特征规律,并进行声发射信号特征分析与特征提取方面的研究,主要研究内容及结论如下:

(1) 按照滚动轴承故障产生机理的不同,可以分为疲劳、磨损、腐蚀、胶合、压痕以及断裂等。磨损和疲劳是滚动轴承两种常见的故障形式,所有这些滚动轴承故障的产生和发展过程中,都会伴随着声发射现象的产生。

(2) 大型观览车主轴系统试验模拟装置在实验室能实现主轴系统在变载荷、变转速、设置故障等不同运行工况下的运行情况。

(3) 在实验室里观览车模拟实验装置共运行了 1160 圈,根据声发射参数变化特征将整个变化趋势可分为五个阶段。

(4) 声发射 RMS 参数对滚动轴承信号最敏感,声发射能量、振铃计数、持续时间和上升时间参数次之,且这四个参数变化趋势类似;声发射幅度和撞击数最不敏感。

(5) 宜兴观览车主轴声发射能量、振铃计数、持续时间和幅度参数历程图在一个周期里有一较大的峰值,其中能量率历程图最明显。

(6) 北京石景山大型观览车主轴中的异常响声可通过声发射检测技术进行定位,定位方式可选用线性定位和柱面定位。该观览车主轴中异常声发射信号为低频信号,其声发射信号幅度高,能量大,持续时间长。

**关键词:** 大型观览车, 声发射, 滚动轴承, 主轴系统

## Abstract

In recent years, with the rapid development of our economy, the height of the giant wheel has been constantly refreshed, the carrying number of also constantly increasing. It is not only a symbol of the amusement park, but also of the city. At present there are 35 A-level (height  $\geq 50\text{m}$ ) giant wheel in China. The main spindle is one of the most important parts of the giant wheel. If it fails, a large accident and casualties will be directly caused. There is no effective detection method to the main spindle detection at present, the detection of the main spindle online is an urgent problem to be solved for the safety inspection.

Therefore, the study of an effective mechanical fault detection and diagnosis method to the main spindle, and timely discovery and forecast fault, are important measures to ensure safe operation of the equipment. By referring to the project “The Explore Search of Acoustic detection to main Spindle on the giant wheel” subsidized by the 12th five-year National Science and Technology Support Program project (No.2011BAK06B05) and AQSIQ Science and Technology plan project(2009QK016), So this article is mainly from the giant wheel simulation device experiment and field test to carry out the acoustic emission inspection to the main spindle on giant wheel, finally we obtain the acoustic emission signal characteristics of spindle system on giant wheel under normal condition, and carry out the research about acoustic emission signal analysis and feature extraction, the main research contents and conclusions are as follows:

(1) According to the different fault mechanisms rolling bearing produces, fault can be divided into fatigue, wear and corrosion, agglutination and creasing and fracture, etc. Wear and fatigue is two common fault forms of rolling bearing, all these rolling bearing faults process of produce and the development, will be accompanied by acoustic emission phenomenon occurring.

(2) The main wheel simulation experiment device in the laboratory can achieve spindle system operation in the different operation conditions such as changing load, variable speed, setting fault and so on.

(3) The main wheel simulation experiment device in lab runs 1160 circles, the whole change trend can be divided into five stages according to the variation characteristics of acoustic emission parameters.

(4) acoustic emission signal RMS parameters is the most sensitive to the rolling bearing signal, acoustic emission energy, counts, duration time and rise time parameters

is the second sensitive to the rolling bearing signal, and the change trend of four parameters is similar; Acoustic emission amplitude and hit is the least sensitive.

(5) the experience figure of the main spindle on giant wheel in Yixing acoustic emission energy, ringing count, duration and amplitude course has a bigger peak at a cycle, among energy rate is the most obvious.

(6) The abnormal noise in the main spindle on giant wheel in Beijing Shijingshan can be located through the acoustic emission technology, location way can choose linear location and cylinder location. The acoustic emission characteristics of the abnormal sound on the main spindle are low frequency signals, of which amplitude is high, energy is big, duration time is long.

**Key words:** Giant Wheel, Acoustic Emission, Rolling Bearing, Main Spindle

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题来源 .....	1
1.2 选题依据、目的和意义 .....	1
1.3 观览车和观览车主轴系统检测现状 .....	3
1.3.1 观览车结构概述 .....	3
1.3.2 观览车检测现状 .....	3
1.3.3 观览车主轴系统检测现状 .....	5
1.4 声发射技术在轴承故障检测中的研究现状 .....	8
1.4.1 滑动轴承声发射检测研究现状 .....	8
1.4.2 滚动轴承声发射检测研究现状 .....	10
1.4.3 国内外轴承声发射检测标准现状 .....	15
1.5 主要研究内容和技术路线 .....	16
1.5.1 主要研究内容 .....	16
1.5.2 技术路线 .....	17
第 2 章 滚动轴承故障特征及声发射机理分析 .....	18
2.1 滚动轴承结构 .....	18
2.2 滚动轴承故障类型 .....	18
2.3 滚动轴承声发射检测 .....	20
2.3.1 滚动轴承声发射源信号 .....	20
2.3.2 滚动轴承声发射检测机理 .....	20
2.3.3 滚动轴承中声发射现象 .....	21
2.4 滚动轴承振动分析 .....	22
2.4.1 滚动轴承振动类型 .....	22
2.4.2 滚动轴承固有振动频率 .....	23
2.4.3 滚动轴承故障特征频率 .....	24
2.5 本章小结 .....	24
第 3 章 观览车模拟试验装置及声发射试验研究 .....	25
3.1 观览车模拟试验装置 .....	25
3.1.1 装置简介 .....	25
3.1.2 性能参数 .....	26
3.1.3 使用环境条件 .....	26
3.1.4 两种运转状态的转换 .....	26
3.1.5 GL02 电气控制说明 .....	26
3.1.6 各部位轴承润滑 .....	27
3.1.7 观览车模拟试验装置计算 .....	27
3.2 观览车模拟试验装置声发射试验研究 .....	28
3.2.1 实验对象及仪器设备 .....	28
3.2.2 传感器布置 .....	29
3.2.3 试验方法 .....	29
3.2.4 试验结果与分析 .....	30
3.3 本章小结 .....	51
第 4 章 大型观览车现场试验研究 .....	53

4.1 实验目的 .....	53
4.2 宜兴市某公园 65 米观览车试验 .....	53
4.2.1 被检设备基本情况 .....	53
4.2.2 检测仪器 .....	53
4.2.3 传感器布置 .....	54
4.2.4 试验结果与分析 .....	54
4.3 北京某游乐园 54.9 米观览车试验 .....	56
4.3.1 被检设备基本情况 .....	56
4.3.2 检测仪器 .....	57
4.3.3 传感器布置 .....	57
4.3.4 试验结果与分析 .....	58
4.4 本章小结 .....	61
第 5 章 结论与展望 .....	62
5.1 结论 .....	62
5.2 展望 .....	63
参考文献 .....	64
攻读硕士学位期间发表的论文和参加科研情况 .....	67
致 谢 .....	68
南昌航空大学硕士学位论文原创性声明 .....	69

## 第1章 绪论

### 1.1 课题来源

本论文的研究工作是结合国家“十二五”科技支撑计划资助项目课题《基于风险的机电类特种设备事故预防关键技术研究》(课题编号: 2011BAK06B05)和国家质检总局科技计划项目课题《大型观览车主轴声学检测探索研究》(课题编号: 2009QK016)——“大型观览车主轴系统声发射信号特征研究”中的关键技术研究来开展的。

### 1.2 选题依据、目的和意义

游乐设施是指在特定的区域内运行,承载游客游乐的载体。它的含义较为广泛,广义上它除可包括具有动力的游乐器械外,还包括为游乐而设置的构筑物和其他附属装置以及无动力的游乐载体。在我国现阶段游乐设施根据其运动形式划分为14类<sup>[1]</sup>,即:转马类、滑行车类、陀螺类、飞行塔类、赛车类、自控飞机类、观览车类、小火车类、架空游览车类、光电打靶类、水上游乐设施类、碰碰车类、电池车类及无动力类游乐设施。目前我国在用固定式游乐设备总数达16000多台套,其中大型A级游乐设备总数有1000多台,近几年的游乐设备年度增长率超过20%。

观览车是由一个名叫乔治的美国工程师发明的,1893年出现在芝加哥的一个游乐园里,作为大型游艺机群中的一个新成员,很快受到了游客的青睐。近年来,随着我国经济的快速发展,大型观览车的高度不断地被刷新,它不仅是游乐园的标志,而且成为了城市的标志。目前国内大约已有371个游乐园,其中有大型观览车(高度 $\geq 50\text{m}$ )的游乐园约有35个。于2000年2月开放的为迎接新世纪到来的“伦敦眼”观览车,全高135m,装有32个空调设备的透明胶囊型吊厢可载800人,转动一周用时30min,每小时最大载客量可达1600人,已成为伦敦市标志性的建筑,世界旅游的一大景点。我国上海游艺机工程公司设计的“南昌之星”观览车,于2006年5月开放,全高160m,装有60个透明吊厢可承载480人,转动一周用时27min,每小时最大载客容量可达近1000人,也成为南昌市标志性的建筑,成为国际性的旅游景点。新加坡于2007年10月建成168m观览车,将所有吊厢“拍卖”,用买主的名字命名各个吊厢,体现了人性化。目前,我国首都北京正在筹建“朝天轮”观览车,高度达208m,将成为世界之最。日本目前在熊本、福冈、

大阪、东京等地有7台百米以上的观览车在运行。我国自2002年在上海锦江乐园建成108m观览车以来,已有9台百米以上的观览车投用运行,这些都成了旅游的亮点<sup>[2]</sup>。

随着观览车的高度不断地被刷新,承载人数不断地增加,在日常游乐园营业中,人们总是期望观览车能安全正常地运转,使其充分发挥效益。主轴系统是大型观览车结构的重要部件,其失效可能直接导致整个观览车发生事故,并造成人员伤亡,因此,研究大型观览车主轴系统的故障检测和诊断方法,是保障设备安全运行的重要措施。主轴系统主要由轴承和主轴两部分组成,目前国内现阶段,大型观览车所采用的轴承属于不可拆卸的滚动轴承,一旦拆卸就得报废;主轴检测都是在安装前在厂内对主轴进行常规的超声、磁粉无损检测,在安装完成后,对于轴承检测只是测量其温度变化来判断轴承故障,对于主轴一旦安装投入使用后很难进行拆卸,采用超声检测从原理上来说似乎可以解决,但目前尚无成熟的应用,故对于主轴结构的故障基本没有有效检测手段。因此,对于重要部件不能拆卸或者拆卸后会提高检测成本,这样在运行中就会出现重要部件的失效。据统计,旋转机械的故障有30%是由滚动轴承故障引起的<sup>[3]</sup>。在大型观览车中,轮毂中的承受重载的轴承和主轴一旦出现裂纹,如果是要更换这些部件,拆卸量占设备总体结构的50%以上<sup>[4]</sup>。因此,十分需要有对大型观览车主轴系统进行不拆卸的无损检测与评价方法,也是目前迫切需要解决的问题。

声发射技术是材料或结构受外力或内力作用而发生变形或断裂,以弹性波形式释放出应力应变能的现象<sup>[5]</sup>。声发射检测技术可以通过对设备运行过程中的在线检测、监测,获取结构中活性声发射源的信息,以达到对设备的故障诊断、安全性评价等,声发射技术已经在压力容器、金属储罐、气瓶、管道、起重机械等特种设备的安全检测、监测方面得到了比较成功的应用,但在轴承等旋转机械结构件的故障诊断方面开展的研究还很少。声发射检测技术由于接收信号的频率范围宽(30kHz到1mHz)、检测灵敏度与分辨力高,适用于探测结构缺陷发出的高频应力波信号,而且其高频特性可以有效抑制周围环境噪声的干扰,提高诊断的准确性;另外,对大型构件声发射技术可提供在线不拆卸的整体或局部快速检测,可以检测动态性缺陷,在缺陷萌生和扩展过程中能实时发现,适用于在线过程监控及早期或临近破坏的预报<sup>[6]</sup>。鉴于声发射技术的特点,因此,声发射技术能解决观览车主轴检测中遇到的问题。但由于大型观览车属于低速重载大型游乐设备,此类设备的突出特点是承载量大、工作转速低、运行工况呈典型的间歇性且运行中承受较大的冲击载荷,早期故障信息特征微弱,易受低频工作环境噪声信号等各种情况的干扰,这给大型观览车主轴系统的声发射故障特征提取带来了困难。

目前,将声发射检测技术应用于轴承的故障诊断,是当前研究的一个热点领域,而国内外在观览车主轴的声发射信号特征研究方面还是空白。鉴于此,本课题主要从大型观览车主轴系统的声发射信号故障特征提取方面开展研究,通过实验室模拟装置试验和现场试验来获取大型观览车主轴系统运行过程中的典型声发射信号,并进行声发射信号特征分析与特征提取方面的研究。

因此,本课题通过实验室和现场试验的研究,得到大型观览车主轴系统的声发射信号特征,为进一步实现大型观览车主轴系统的在线声发射检测及故障诊断奠定基础,即有利于提高特种设备使用单位和检验机构的安全、科学管理水平,又可以实现观览车故障的早期预警,从而最大限度的减少事故发生和保护乘客安全,具有重要的社会意义和巨大的经济效益<sup>[7-8]</sup>。

### 1.3 观览车和观览车主轴系统检测现状

#### 1.3.1 观览车结构概述

观览车是有多个乘坐轿舱绕水平轴慢速转动、垂直回转类的大型游艺机。主要结构由一个巨大的支架和一个巨大的轮盘组成。支架撑起一根水平的主轴,轴承支撑主轴旋转,轮盘绕主轴缓缓旋转,在巨型轮盘的周边,均匀地悬挂着许多的吊厢,游客乘坐在吊厢之中。观览车根据自身的主体结构特点可以分为三类:一是桁架结构,由钢管组成,通过法兰连接,例如“南昌之星”(如图1-1所示);二是拉索结构,其受力部位由拉索承受,例如天津永乐桥“天津之眼”(如图1-2所示);三是以上两者结合的结构,例如“上海大转盘”(如图1-3所示)。



图 1-1 南昌之星



图 1-2 天津之眼



图 1-3 上海大转盘

#### 1.3.2 观览车检测现状

目前国内的大型观览车由中国特种设备检测研究院游乐设施部开展观览车类游乐设施的监督检验和定期检验,检验依据为《游乐设施安全技术监察规程(试行)》、《游乐设施监督检验规程(试行)》、GB8408-2000《游艺机和游乐设施安全》、GB18164-2000《观览车类游艺机通用技术条件》。目前主要从资料审查、

安装及连接、动力装置检验、机械传动检验、乘人设施检验、电气及控制系统检验、安全保护、运行检验这六个方面开展观览车类游乐设施的检验:

(1) 首先进行资料审查,包括设计资料,关键零部件和焊缝探伤报告、产品出厂合格证及使用说明书、重要零部件的材料证明、标准机电产品合格证书、基础验收资料等,看是否达到要求,有效。

(2) 安装及连接、动力装置检验,包括基础检查、地脚螺栓、重要零部件间螺栓、销轴连接、焊缝表面质量检验、重要焊缝磁粉(或渗透)探伤、中心轴对水平面的垂直度、两立柱中心线距离与设计误差、主轴倾斜度、转盘径向圆和端面圆跳动、转盘可调拉筋检查、液压或气动系统设置、液压油温检查、系统过压保护装置检查、油质及油箱密封检查、系统渗漏检查。其中重要焊缝(如座舱吊挂焊缝)在检验时应进行不低于20%的磁粉(或渗透)探伤抽检,磁粉(或渗透)探伤方法按照JB/T4730-2005标准相关规定进行,缺陷等级评定不低于III级。如抽检不合格,扩深至50%,再发生缺陷,则全部检测。

(3) 机械传动检验,包括电动机、减速机和联轴器的安装、齿轮传动、皮带和滚子链传动、轴承温度和温升、重要轴、销轴材料及其表面硬度、重要轴、销轴的超声波和磁粉(或渗透)探伤、重要轴和销轴的磨损和锈蚀检查、乘人部分钢丝绳、制动装置等检验。其中对轴承检验,要求滚动轴承的端盖温升不大于 $30^{\circ}\text{C}$ ,且最高温度不大于 $65^{\circ}\text{C}$ 。滑动轴承油孔处的温升不大于 $35^{\circ}\text{C}$ ,且最高温度不大于 $70^{\circ}\text{C}$ 。轴承及接触表面有相对运动的部位,应有润滑措施,并便于添加润滑剂,不允许形成滴油现象,无相对运动部位不应渗油。对重要轴和销轴宜采用力学性能不低于45号钢的材料,调质后的硬度一般为 $\text{HB}200\sim 280$ 。吊舱吊挂轴等每年应进行不低于20%的超声波和磁粉(或渗透)探伤,主轴在安装前进行超声波和磁粉(或渗透)探伤,安装后至少在大修时应探伤,超声波探伤方法及质量评定按照GB/T4162中有关规定执行,检验质量等级不低于A级。磁粉(或渗透)探伤方法按照JB/T4730-2005标准相关规定进行,缺陷等级评定不低于III级。如抽检不合格,扩探至50%,再发生缺陷,则全部检测。钢丝绳绳夹固定方法和钢丝绳直径与绳夹的数量、间距应符合GB8408-2008,提升钢丝绳必须设有防止钢丝绳过卷或松弛的装置,钢丝绳的终端在卷筒上应留有不少于3圈的余量。制动装置必须协调可靠,在动力电源突然断电或设备发生故障时,仍需保证正常工作。制动闸衬的磨损量不大于原厚度的50%。

(4) 乘人设施检验,包括乘客可触及之处检查、乘人部分框架材料及尺寸、把手、安全带或安全压杠、乘人舱门锁紧装置、吊厢吊挂轴的保险装置、吊厢门窗拦挡物检查、防止吊厢摆动装置、玻璃钢件等检查。吊厢吊挂轴处,应设有效的保险装置。转盘直径超过40m时,应设防止吊厢摆动装置。

(5) 电气及控制系统检验, 包括低压配电系统接地型式、接地要求和接地电阻、电动机起动时其端电压、电动机满载电流检查、控制系统检查、紧急事故开关及开关型式检查、防止超速的控制装置、绝缘电阻等检验。其中低压配电系统保护接地电阻应不大于 $10\ \Omega$ , 带电回路与地之间的绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\ \Omega$ 。

(6) 安全防护、运行检验, 包括安全栅栏出入口、站台设置、阶梯检查、事故状态疏导乘客措施、风速计、避雷装置、安全标识、空载运行检查、偏载运行检查、满载运行检查、圆周速度等检验。游乐设施高度超过 $15\text{m}$ 时, 应设避雷装置, 避雷装置接地电阻应不大于 $10\ \Omega$ 。空载、满载、偏载时运行应正常, 启、制动应平稳可靠, 不允许有爬行和异常的振动、冲击、发热和声响等现象。

由上述观览车检验规程得知, 在观览车的各项检验中对钢丝绳没有进行无损探伤, 轴承只是测量其温度变化来判断轴承故障状态, 主轴虽然在安装前进行了超声和磁粉探伤, 但在安装完成后每年定检时基本不做无损探伤, 只是规定在大修时进行超声和磁粉探伤。因此, 在观览车的检验中急需加强对钢丝绳、轴承和主轴的无损检测力度, 特别是轴承和主轴, 十分需要有对大型观览车轴承和主轴进行不拆卸的无损检测与评价方法, 也是目前迫切需要解决的问题之一。

### 1.3.3 观览车主轴系统检测现状

大型观览车主轴系统由轴承和主轴两部分组成。现阶段, 我国大型观览车所采用的轴承有滑动轴承和滚动轴承, 大多数观览车轴承属于不可拆卸的滚动轴承, 一旦拆卸就得报废。大型观览车主轴根据结构形式, 可分为空心轴和实心轴两种, 根据主轴的运动形式, 又可以分为轴动和轴不动两种, 目前大多数大型观览车主轴都是空心轴、轴动形式。

目前, 国内主要是中国特种设备检测研究院开展国内大型观览车检验, 对主轴的检测都是在安装前在厂内对主轴进行常规的超声、磁粉无损检测, 在安装完成后及每年定检时, 对于轴承检测也只是测量其温度变化来判断轴承故障状态, 对于主轴基本不检, 只有在大修时进行常规的超声、磁粉无损检测。在大型观览车中, 轮毂中的承受重载的轴承和主轴一旦出现裂纹, 如果是要更换这些部件, 拆卸量占设备总体结构的50%以上。

因此, 大型观览车主轴系统的不拆卸检测问题, 是困扰设备使用单位的难题, 也是特检机构、监察机构非常关心的问题。目前还没有一种有效、可靠的方法, 这也是本课题研究的主要目的。

目前, 滚动轴承故障诊断方法有很多种, 主要是根据监测与诊断所采用的状态量来分类的, 即按照测量取得的信号性质分类。按照这一分类方法, 滚动轴承工况监视与故障诊断可采用的方法有<sup>[9,10]</sup>: 温度法、油样分析法、接触电阻法、

振动信号分析法、声发射检测法、光导纤维探测法等。

### (1) 滚动轴承检测方法

**振动诊断技术：**当轴承元件的工作表面出现疲劳剥落、压痕或局部腐蚀时，轴承运行中会出现周期性的脉冲信号。这种周期性的信号可由安装在轴承座或箱体上的振动传感器来接收，通过对振动信号的分析与处理来判断轴承的故障状态。在各种滚动轴承诊断方法中，基于振动信号的诊断技术应用最为广泛。该技术可分为简易诊断和精密诊断两种方法。简易诊断利用振动信号的各种参数，如幅值、波形因素、波峰因素、峭度，以及各种解调技术对轴承状态进行初步判断以确认是否出现故障；精密诊断则是利用各种现代信号处理技术来分析和判断出现故障轴承的故障类别及原因，如时频分析等。振动检测方法对于诊断轴承早期微小故障，特别是在噪声干扰下的微弱故障效果不是很理想。

**油样分析法：**指对正在使用的轴承润滑油进行系统分析，从而了解润滑与磨损状态，并对各种故障隐患进行早期预报，查明产生故障的原因和部位。实践证明，由理化分析、污染度测试、发射光谱分析、红外光谱分析、铁谱分析等构成的油样分析系统在设备状态监测中可以发挥重要作用。这种方法只适用于油润滑轴承，而不适用于脂润滑轴承。另外，这种方法易受其它非轴承损坏剥落的颗粒的影响，因此，具有一定的使用局限性。

**油膜电阻诊断技术：**在旋转过程中，润滑良好的轴承，由于油膜的作用，内、外圈之间有很大的电阻，可达上亿兆欧以上；当油膜破坏时，则内圈和外圈之间的电阻可以降至0欧姆左右。故可以利用这一特性，通过测量轴承内、外圈的电阻，可对轴承的异常做出判断。其特点为：对不同的工况条件可使用同一评判标准；对表面剥落、压痕、裂纹等异常的诊断效果差，不适用于点蚀类故障，适用于旋转轴外露的场合。

**光纤监测诊断技术：**光纤监测是一种直接从轴承套圈表面提取信号的诊断技术。用光导纤维束制成的位移传感器包含有发射光纤束和接收光纤束。光线由发射光纤束经过传感器端面与轴承套圈表面的间隙发射回来，由接收光纤束接收，经光电元件换成电信号，通过对电信号的分析处理，可对轴承工况做出评估。其特点为：光纤位移传感器灵敏度高，直接从轴承表面提取信号，提高了信噪比；可直接反映滚动轴承的制造质量、表面磨损程度、载荷、润滑和间隙等情况，适用于可将传感器安装在轴承座内的机器。

**温度诊断技术：**通过监测轴承座（或箱体）处的温度来判断轴承工作是否正常。温度监测对轴承载荷、速度和润滑情况的变化反映比较敏感，尤其对润滑不良而引起的轴承过热很敏感。但是，当轴承出现诸如早期点蚀、剥落、轻微磨损等比较微小的故障时，温度监测基本上没有反应，只有当故障达到一定的严重程

度时,用这种方法才能监测到。温度监测不适用于点蚀、局部剥落等所谓的局部损伤类故障。其特点为:诊断简单,对轴承烧伤判断较好,适用于机器中轴承的简单常规诊断。

**声发射诊断技术:**声发射(AE)是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象。材料受到外载荷作用时,由于内部结构的不均匀及各种缺陷的存在造成应力集中,从而使局部应力分布不稳定。当这种不稳定的应力分布状态所积蓄的应变能量达到一定程度时,将发生应力的重新分布,从而达到新的稳定状态。通过安装在轴承座或轴承临近位置的声发射传感器来采集和分析轴承各部件(内圈、外圈、滚动体、保持架等)由故障引起的声发射信号的方法。声发射信号是结构本身由于能量释放而产生的应力波信号,其信号频率高,不易受周围环境噪声的干扰。轴承的早期微软故障就会被周围相对幅度较大的、低频的环境噪声所淹没从而无法有效检测出故障存在。故障引起的振动信号会被周围相对幅度较大的、低频的环境噪声所淹没,从而无法有效检测出故障存在,而基于声发射的检测方法由于其本身的特点则可以检测到故障的存在,声发射检测对于早期微弱故障的检测效果明显。但它需要较昂贵的专用设备,在生产中应用受到了一定的影响。

## (2) 检测方法选取

目前国内外所采用的滚动轴承诊断方法如上文所述,前五种诊断方法在各自适应的情况下应用是成功的,这些方法各有其特点,能在一定程度上反映故障特性,但受到某些因素的影响,在应用于滚动轴承故障检测中会受到不同程度的限制。如测量温度存在滞后效应,不能达到预测预报故障的目的;测量主油道润滑油压力不能反映非油压原因引起的轴承故障;测油膜厚度及轴心轨迹时传感器安装复杂,且受机器结构的限制;油样分析只适用于油润滑轴承,而不适用于脂润滑轴承,而且这种方法易受其它非轴承损坏剥落的颗粒的影响。此外测油压油温同样不能对故障轴承定位;而振动信号具有信息丰富、传感器安装方便等优点,但信号的主要能量集中在1500Hz以下的低频区,而干扰信号的频率也多为低频,从而使信号分离较为困难。

鉴于现有的轴承故障诊断技术的种种局限性,故本文提出了利用声发射技术检测轴承故障的方法。与传统的测润滑油温度、轴承温度的办法相比,声发射信号具有响应时间短、迅速反映故障的特点;与测油膜厚度方法相比,声发射方法具有传感器安装简便的特点;与光谱分析方法相比,声发射检测方法具有及时指示并且定位故障的特点;与普通振动分析方法相比,特征频率明显,声发射信号具有较宽的频率范围,信息量更大,利用高频段信号进行故障诊断,可以有效地排除其它低频干扰信号,提高检测正确率,因此,信噪比更高。在设备的载荷和

工作转速等完全相同的条件下,同时用声发射和振动信号检测轴承工作状态时,由于轴承微裂纹扩展需要经过一个慢扩展阶段,这个阶段还不足以引起轴承明显振动,而声发射信号已经比较明显了,因而声发射法能早期预报和诊断故障。

声发射诊断技术的特点是特征频率明显、预报故障时间早,但需要昂贵的专用设备,在轴承工况监测中应用较少。这种诊断方法是一种动态无损检测技术,可以提供缺陷随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时或连续信息,因而,适用于工业过程在线监控及早期或邻近破坏预报。故可利用声发射技术对轴承进行研究,以降低成本,将其推广应用于滚动轴承早期故障的在线检测,以保障设备运行的安全。

## 1.4 声发射技术在轴承故障检测中的研究现状

由于轴承在旋转机械中的重要性,其运行状态监测和故障诊断一直是许多科技人员所研究的一个重要课题,将声发射技术用于轴承状态监测和故障诊断,国内外研究人员特别是国外研究人员在这方面做了很多有价值的研究工作。

### 1.4.1 滑动轴承声发射检测研究现状

#### (1) 国外滑动轴承声发射检测研究现状

在国外,1983年日本科学家佐藤原野等人<sup>[11]</sup>做过汽轮机滑动轴承接触摩擦的实验研究,通过在实验轴承下方布置加压活塞施加载荷,并通过测量油膜电阻法确认轴颈与轴瓦的接触。实验检测到反映声发射能量的振铃计数率伴随轴承金属温度的上升而显著提高。德国的卡尔斯鲁厄大学的学者A. Albers和W. Burger等人<sup>[12]</sup>,通过实验验证了关于转速和摩擦系数的关系曲线(Stribeck-curve),同时通过模拟故障的实验研究发现,与油温、油液谱分析等分析手段相比,声发射信号能更早发现轴承的早期故障。韩国标准科学<sup>[13]</sup>研究所利用声发射信号监测技术开展了滑动轴承模拟系统中润滑质量的研究。他们在润滑油中分别加入0.01~0.05%不同粒径(分别为0.1 $\mu\text{m}$ 、1 $\mu\text{m}$ 、8 $\mu\text{m}$ 和38 $\mu\text{m}$ )的氧化铝微粒,选择适当的载荷和速度,保证滑动轴承工作时的最小油膜厚度为15 $\mu\text{m}$ ,然后利用声发射技术监测润滑系统的破坏程度(判据为声发射信号的有效值电压参数)。结果表明,粒径在8 $\mu\text{m}$ 以下时,对滑动轴承的摩擦损伤不大,主要是腐蚀破坏;而当粒径大于最小油膜厚度(如本实验38 $\mu\text{m}$ )时,首先使轴承产生磨损,损坏程度随粒径的增大而增大,转速越高,同等情况下的轴承损伤越严重,声发射信号的幅值越大。

#### (2) 国内滑动轴承声发射检测研究现状

在国内滑动轴承的声发射研究方面,虽然起步较晚,但是近几年来越来越多的学者投入到此项研究中,并取得了一些成果。1996年张艾萍教授<sup>[14]</sup>对汽轮机组滑动轴承的运行状态进行了声发射监测研究,通过分析汽轮机发电机组径向轴承在摩擦或过载时所表现出的声发射特性,得出声发射振铃计数率的大小可以区分出故障的种类(摩擦、过载)及程度,提出了用声发射技术在线监测轴承过载及碰磨的方法,并将该方法用于实践,结果证明,该方法具有快速、准确和早期发现故障的特点,非常适合于设备状态监测和故障预测。

在随后的2000年,秦萍教授<sup>[15]</sup>将声发射检测应用到动载荷的柴油机滑动轴承故障诊断上来,在试验台上采用从正常润滑状态逐步向干摩擦状态过渡的方法模拟故障,把轴与轴瓦之间是否产生一定程度的接触干摩擦作为判断轴承故障的依据,选择总振铃计数对滑动轴承进行在线状态监测和故障诊断,证明了声发射适用于往复式柴油机滑动轴承上诊断的可行性,后来通过与振动信号对比,得出了声发射检测的优越性;随后对柴油机主轴承进行了受力分析及接触摩擦机理分析<sup>[16]</sup>,发现了声发射源激励主要是冲击载荷和摩擦力,并指出了柴油机声发射现象与传统声发射现象的差别,同时再次比较了振动信号分析和声发射分析,利用小波分析对信号进行了处理,提出了声发射信号的归一化事件数的概念。

刘凌厉<sup>[17]</sup>对柴油机滑动轴承故障进行了声发射诊断研究,在实验台上通过静力加载和控制油压的方法模拟滑动轴承故障,测出故障工况下的声发射信号及温度变化(作为辅助方法)等。结果表明,可用声发射事件率的变化监测轴瓦是否已经进入全周期磨损阶段(声发射传感器采集到的强度大于3V的脉冲电压波称为声发射事件),从而及时给出报警信号,并指出今后研究工作的关键在于通过大量实验给出不同情况下声发射事件的阈值及其发生频度,以确定轴承的磨损状况,从而及时给出报警信号。

李录平等人<sup>[18]</sup>开展了滑动轴承的声发射信号特征与轴承运行状态关系的实验研究。作者通过对国产300MW汽轮机组的4号轴承(汽轮机低压转子后轴承)和5号轴承(发电机前轴承)作为测试对象进行试验,来探明声发射信号特征参数随轴承转速、温度、载荷的变化关系,通过试验研究,发现随着转速(轴瓦温度、负荷)的增加,声发射信号事件计数和振铃计数减少,反之增大;信号总能量、信号幅度、信号中心频率幅度、频谱能量不稳定性、自相关最大值则增加。

王晓伟等人<sup>[19]</sup>进行了基于声发射的可倾瓦径向滑动轴承碰磨故障诊断研究。在大型汽轮发电机组中,瓦块颤振是造成可倾瓦径向滑动轴承上瓦块损坏的主要原因。瓦块颤振能够导致瓦块定位销和销孔的磨损,由于轴的涡动,颤振的瓦块将会与转轴发生碰磨,进而导致严重的轴承故障。裂纹与碰磨故障声发射信号的特征不同,裂纹产生信号幅值随着裂纹的扩展而不断增强,且信号主要成分

的频率范围也变化,故这些信号特征可区分转子碰磨故障和转子裂纹故障。通过对实验数据的分析,得出声发射信号能够诊断出轴承瓦块与轴的碰磨,并且发现瓦块与轴承碰磨产生的声发射信号幅值随着转速的升高而增大。通过合理布置传感器在轴承座上的位置,根据声发射信号到达多个传感器的时间、均方根值及轴承结构可以推断出与轴发生碰磨的瓦块位置。

黄琪等人<sup>[20]</sup>开展了基于声发射检测的滑动轴承状态诊断实验研究,首先通过理论计算得出不同润滑参数下,滑动轴承声发射信号能量的大小,以确定滑动轴承声发射信号的最佳参数,利用小波分析和传统的傅立叶变换对滑动轴承声发射信号进行分析处理,分别提取了轴承声发射信号的事件计数率和中心频率。然后通过300MW汽轮发电机组模拟转子试验台上模拟工程实际中滑动轴承的两类常见异常工况,得到了滑动轴承不同运行状态下的声发射信号特征参数变化规律,也验证了理论分析结果。

通过阅读上述大量国内外滑动轴承声发射检测研究文献,得出以下结论:

(1) 滑动轴承的常见故障是轴瓦与轴颈的接触干摩擦,当轴颈与轴瓦之间发生接触干摩擦,导致轴瓦表面擦伤、表面层脱落或其它故障时,都会引起缺陷周围区域的应力再分布,导致晶格的错位与滑移,伴随这些动态过程的同时将以弹性应力波的形式释放能量,产生声发射信号。国内外研究都是基于轴瓦与轴颈之间产生的接触干摩擦声发射信号特征,根据轴与轴瓦之间是否产生一定程度的接触干摩擦作为判断点蚀、胶合、剥离、断裂等轴承故障的依据。

(2) 点蚀、胶合、剥离、断裂等轴承故障所产生的接触干摩擦声发射信号特征不同,通过选择合适的声发射参数(如振铃计数率、幅值)对滑动轴承进行在线状态监测和故障诊断。

(3) 与油温、油液谱分析、振动分析等分析方法对比,证明声发射检测方法具有快速、准确和早期发现故障等特点。

(4) 在滑动轴承声发射检测研究中多采用声发射参数分析法来判别滑动轴承故障,很少从声发射波形分析方面来分析判别滑动轴承故障。

#### 1.4.2 滚动轴承声发射检测研究现状

##### (1) 国外滚动轴承声发射检测研究现状

在国外,滚动轴承声发射检测研究工作较多和成熟,主要从声发射参数分析、模式识别、轴承声发射信号传播衰减、波形频谱分析、检测方法对比开展轴承故障诊断和机理研究等方面。

在声发射参数分析方面,Tandon<sup>[21]</sup>利用振铃计数和峰值两个参数,在变载荷、变转速、变故障尺寸的工况下对承受径向载荷的故障轴承进行诊断分析,认为峰

值更有利于故障诊断,能够区别较小的故障,且发现声发射技术在轴承低速运转时具有同样的检测效果,这是振动检测无法做到的。Choudhury<sup>[22]</sup>利用振铃计数-事件数、峰值-事件数统计分布图两种参数分析方法,分析了变载荷、变故障尺寸、变转速情况下的脂润滑圆柱滚子轴承的内圈和滚子故障,得出振铃计数是检测轴承早期故障的有效参数,通过事件数随振铃计数和峰值变化的规律可以诊断和预测轴承故障的发展趋势。Rogers等人<sup>[23]</sup>将声发射用于港口起重机的在线检测,在低速转动轴承的裂纹定位分析中,比较了振动方法和声发射方法的优劣。在转速大于5r/min时采用振动信号峭度分析,可以得到很好的效果,而当转速继续降低时,加速度传感器没有拾取到低频的振动信号,证明该方法已不适用。另外在相同条件下通过在轴承座上下两端安装两个声发射传感器采集故障信号,采用幅度-计数分布图分析法实现了轴承故障裂纹源的定位,取得了理想的效果。Tan, C C<sup>[24]</sup>分析了滚动轴承滚过故障时的声发射脉冲信号,通过计算幅值曲线下的积分面积及对信号进行频域分析,得知了随着故障尺寸和转速的增加,声发射事件呈指数增长,事件的持续时间和上升时间也随着故障尺寸的增大而增加。M. Elforjani和D. Mba<sup>[25]</sup>通过实验研究了利用声发射技术检测低速运转轴承缺陷的方法,证明利用声发射技术能够有效检测出低速运转状态下轴承中裂纹缺陷的扩展过程,并提出声发射信号能量参数在滚动轴承故障的判别中起着十分重要的作用。

在模式识别方面, Li<sup>[26]</sup>提出了一种基于自相关系数的线性判别方法。在对声发射信号进行高通滤波和中值平滑后,计算其短时能量函数和短时平均过零率,然后分别计算两者的自相关函数,据此可以获得声发射信号脉冲出现的频率和两个自相关函数曲线的峰峰值。前者用于定位故障产生的部位,后者用于确定故障是否产生。以正常故障和故障轴承的两个峰峰值训练并确定线性判别函数,完成模式分类器的设计。并利用该系统提出了三个线性判别函数,可以鉴别出正常轴承与滚珠故障轴承、正常轴承与外圈故障轴承、单外圈故障轴承与多外圈故障轴承。Kaewkongka<sup>[27]</sup>提出了一种三维空间的模糊C均值聚类分析方法,对测得的故障声发射信号计算其事件持续时间、峰值和能量指标参数,然后利用这三个参数在三维空间内进行模糊C均值聚类分析,经过训练后进行模式识别,其判断准确率为97%,误判率很低。D.Mba等人<sup>[28-30]</sup>利用声发射检测超低速滚动轴承的零部件故障,将信号处理技术用于声发射特征提取,并利用声发射信号自回归系数作为特征进行了分类,取得了实效。N.Jamaludin和D.Mba<sup>[31]</sup>对极低转速运转(小于2r/min)滚动轴承的状态监测技术进行了研究,指出在极低转速条件下利用振动检测技术难以检测出故障隐患。提出利用声发射技术并结合自回归系数对轴承故障类型进行辨别,结果证明声发射技术对极低转速运转轴承监测的有效性。

关于滚动轴承声发射信号的衰减,不同的研究人员得出了并不相同的结论,Catlin<sup>[32]</sup>认为,超声频的声发射信号衰减很快,可以用来区别轴承故障与其他干扰源(如不对中、不平衡等),要求传感器尽量接近轴承,否则由于信号的衰减而不能测得有效的故障信号。与此不同的是,Li CJ等人<sup>[26,33]</sup>对比了滚动轴承故障声发射和振动信号的衰减,在远离轴承30cm的情况下,声发射信号可以拾取到故障特征,振动信号则不能。Morhain<sup>[34]</sup>的研究表明声发射信号在同一介质传播中衰减小,而越过介面传播的衰减较大,认为声发射信号的衰减与传播介质的几何尺寸关系不大,而更多依赖于不同传播介质的接触面。接触面越多越复杂,则衰减越严重。

基于小波分析、模式识别等现代信号处理方法应用于滚动轴承声发射信号分析的文献国外还很少,部分归因于声发射信号是宽频信号,其次由于采样频率很高,信号数据量大,复杂的信号处理算法需要很长的计算时间。Hawman<sup>[35]</sup>对声发射信号进行包络解调,再对包络信号进行谱分析,在外圈故障频率附近看到了明显的突出成分,但内圈和滚动体故障特征频率在频谱图上并不能明显区分。Barclay<sup>[36]</sup>介绍了一种对声发射信号进行包络、低频滤波、然后进行频谱分析的谱发射能量方法,该方法能够有效地判断故障的发生,瑞典SKF公司采用该技术已开发出专用的轴承故障诊断仪。Tavakoli<sup>[37]</sup>对声发射信号各单元段的RMS值进行包络和FFT分析,成功提取了轴承外圈和内圈故障特征频率成分分布特征。

基于轴承温度、油样分析、振动和声发射等滚动轴承故障检测方法很多,且各有其优缺点,关于声发射与其他检测方法对比分析,研究人员也做了大量研究工作。Schoess.J.N<sup>[38]</sup>比较了火车车厢轴承故障诊断中常用的六种方法:温度、加速度、霍尔效应轮速、声发射、红外高温、应力监测,认为声发射最好,同时指出了声发射的缺点:设备昂贵、误报警、需要电缆等。Al-Ghamdi.A.M和Mba.D<sup>[39]</sup>对比了声发射和振动信号的RMS、幅度、峭度,认为在轴承早期故障诊断中声发射比振动方法有效。N.Tandon,G.S.Yadava和K.M.Ramakrishna<sup>[40]</sup>针对振动、声发射、冲击脉冲与定子电流谐波四种方法在感应电机轴承外圈故障、润滑污染监测中的应用进行了分析比较,认为声发射方法最为有效。Abdullah M. Al-Ghamd等人<sup>[41]</sup>对球轴承外圈故障的声发射信号和振动信号进行了研究对比,认为对于球轴承缺陷的检测和识别,声发射信号的有效值、最大幅值和峭度值等指标都要比振动信号更灵敏。作者还进一步指出声发射信号的持续时间与缺陷沿滚道方向的长度成正比,而声发射信号幅度与背景噪声的比值与缺陷的宽度(垂直滚道方向)成正比。

## (2) 国内滚动轴承声发射检测研究现状

国内关于声发射方法在滚动轴承故障诊断中的应用在20世纪90年代中期开

始,取得了一定的成果。但是总体来说,我们国内在轴承声发射检测技术的研究与应用方面所做的工作还比较少,距离国外在这方面的研究水平还有很大的差距。

黄涛,张辉<sup>[42]</sup>针对轧钢机输送辊道两端的支撑轴承,对声发射信号进行希尔伯特解调,从解调器获得的包络信号是以损伤冲击周期为周期的振铃信号,称为共振解调波,对其进行频谱分析,可在故障特征频率处看到清晰的谱峰,而不含故障的信号在共振解调频谱图中不会出现谱峰,因此很容易发现和确定故障件。将理论计算的故障频率与频谱图中谱峰相对照,即可判断轴承有无故障及故障所发生的部位,且峰值的大小与故障严重程度有关。

理华等人<sup>[43]</sup>利用声发射信号参数分析方法,设计了一种低速轻载的铁路货车轴承的声发射监测仪器。该仪器对铁路货车轴承故障声发射信号高通滤波、包络分析、低通滤波滤除时域尖峰信号后,采用双阈值(对故障信号的幅度和宽度分别设立独立阈值)逻辑相与的关系,才认为故障发生,这样不仅能有效地识别故障严重程度且极大地防止误报。如果信号超过双阈值报警达到一定次数,则判断出现故障。该仪器已经在北京铁路局所属各车辆段投入使用,检测效果明显,大大提高了检测效率。理华等人<sup>[44]</sup>还通过基于特征频率的小波包分解消噪方法,提取特征频带的声发射信号,通过波形分析能够区分缺油轴承和内圈严重锈蚀以及滚子锈蚀的故障轴承。

姜诚君等人<sup>[45]</sup>对铁路火车轮对轴承采集声发射信息,进行频谱处理,从频谱图可清楚地看出,各状态轴承的AE信号能量都较集中且峰值明显,其峰值出现的频率有很大的差异。当轴承出现损伤时,不同损伤部位会有不同的特征频率,针对保持架、滚子、外圈故障,发现各故障AE信号频谱峰值频率与理论特征频率存在一定联系,作者提到可通过大量的实验来测定各状态轴承峰值频率与特征频率的倍频范围,从而借助于专家判断系统来进行具体故障发生部位的判别。

陈春朝等人<sup>[46]</sup>结合声发射检测的特点和货车滚动轴承故障检测的现状,将声发射检测技术应用于货车轴承故障检测中,因正常轴承和内圈、滚子故障信号频段有重叠区间,仅从峰值频率很难判断故障存在的具体位置,为了更好识别轴承故障,提出了在频域有较高分辨率的小波包分析提取轴承声发射信号能量特征向量的方法,不同频段信号能量特征向量能准确地反映轴承故障信号能量随状态变化而变化,可用于轴承早期故障在线诊断,并利用概率神经网络的模式识别功能进行轴承故障状态的识别。实践证明能对轴承故障达到很好的诊断效果。

赵转哲等人<sup>[47]</sup>将声发射技术用于铁路货车轴承故障信号的采集,用DB5小波进行带通滤波,从而减少背景噪声和其他工况的干扰,再进行频谱分析,发现正常和有故障的轴承AE信号在时域和频域中均有区别。在时域,滚动体损伤信号

的波峰值比较大,且分布在整个时间段内,而正常轴承信号的波峰值相应较小,且持续时间也较短;在频域,滚动体损伤AE信号的能量较大,而正常轴承的AE信号频带相当宽,但振幅却小得多,故能成功地将正常轴承与故障轴承区分出来。

李凤英等人<sup>[48]</sup>对滚动轴承声发射信号进行带通滤波处理后,利用希尔伯特变换实现包络解调,再对包络信号进行频谱分析,获得了与故障特征频率匹配的频谱特征,能准确地预报轴承发生及判断轴承故障类型。并且与振动方法作详细地比较,发现声发射信号可以明显反映故障的变化,信号单纯干净,抗干扰性好,能够较早、可靠地预报故障的发生,因此声发射可作为一种可靠的用于滚动轴承的在线监测方法。

郝如江<sup>[49]</sup>用声发射事件数、幅值、均方根值和峭度值等参数分析方法研究了不同工况下、不同故障类型的滚动轴承声发射信号和振动信号特征变化规律,声发射信号的幅值、计数、均方根值等参数对轴承转速的变化最敏感,对故障严重程度变化的变化次之,对承受载荷的变化最不敏感。振动信号的峭度值能够明显地反映故障是否发生,但对于不同工况的变化,峭度值、均方根值及峰值参数均表现得不敏感。振动信号的分析只能有效地诊断故障是否发生,对不同工况变化的反映及不同类型故障的区分没有效果。通过优化选取Morlet小波参数,采用连续小波变换的尺度谱和希尔伯特谱能揭示信号在不同时刻、不同频段上的能量分布特征,可以明确、细致地比较不同工况下声发射信号的特征信息变化规律,用离散小波变换定量描述了不同频段上的信号能量分布规律。相比于振动信号分析,声发射检测技术对于全面揭示不同测试环境下的故障特征变化规律效果更明显,诊断结论更准确。

中国特种设备检测研究院近期开展了首次国内大型观览车主轴系统的声发射监测与诊断技术研究,先后对北京市石景山游乐园的54.9m摩天轮和江苏省宜兴市龙背山森林公园的65m观览车主轴系统进行了声发射在线检测探索研究,通过合理布置探头线性定位找出了北京石景山游乐园摩天轮运行过程中发生响声的位置。

通过阅读上述大量国内外滚动轴承声发射检测研究文献,得出以下结论:

(1) 在国外,滚动轴承声发射检测研究工作较多和成熟,主要从声发射参数分析、模式识别、轴承声发射信号传播衰减、波形频谱分析、检测方法对比方面开展轴承故障诊断和机理研究等。

(2) 在国内,虽然滚动轴承声发射检测研究方面相对国外而言起步晚,但也取得了一定的成果。国内滚动轴承声发射检测研究主要是从波形频谱分析方面开展的,但在滚动轴承声发射检测机理研究方面还不是很多,大型的实验研究也比较少,进行的试验研究也只是针对某一个具体的方面,而很少综合考虑各种故

障存在的可能性，因此，所得的试验数据大都有一定的局限性。

(3) 研究表明声发射信号在同一介质传播中衰减小，而越过介面传播的衰减较大，声发射信号的衰减与传播介质的几何尺寸关系不大，而更多依赖于不同传播介质的接触面。接触面越多越复杂，则衰减越严重。因此，在进行声发射检测时，要尽量使传感器接近于轴承的故障源位置。

(4) 采用声发射信号参数分析方法在滚动轴承故障诊断方面已开展了大量的研究，认为对于轴承故障判断，参数分析方法是有效的，但不同的研究人员得出的结论不一致。因此，还需要研究和完善各种参数条件的确定准则，针对轴承故障在不同工况下信号参数的变化规律来预测故障的发展趋势，为设备状态监测和维修提供可靠的参考依据。

(5) 对于轴承故障的声发射信号，可以通过小波分析等现代频谱分析方法，获得与理论故障特征频率相匹配的频谱特征或者是理论故障特征频率的倍频关系，能准确地预报轴承发生及判断轴承故障类型，同时可以根据频率峰值的大小，进一步判断故障的严重程度。

(6) 与其它轴承检测方法如温度、油样分析、振动方法作了详细地比较，发现声发射信号可以明显反映故障的变化，信号单纯干净，抗干扰性好，能够较早、可靠地预报故障的发生。

(7) 以故障诊断为目的的故障行为与故障信息特征关系研究尚处于初级阶段，由于检测仪器和对象的多样性，不同的研究人员得出的结论不一致，研究结果与实际故障演变的契合程度以及指导故障诊断的实践效果都有待检验。

### 1.4.3 国内外轴承声发射检测标准现状

目前关于轴承故障诊断的国外声发射标准只有ISO 22096: 2007 (E)《机器状态监测与诊断—声发射》<sup>[50]</sup>，国内还没有这方面的标准。该标准由前言、引言、范围、规范性引用文件、术语和定义、声发射技术的原理和应用、数据采集等部分组成。该标准规定了在一定状态和环境应用声发射进行机器状态监测和诊断所遵循的一般原则，适用于所有机器及相关部件，但仅涉及对结构进行测量。规定了声发射、声发射监测、声发射传感器/接收器、声发射信号、声发射特性、背景噪声、耦合剂等相关术语和定义。介绍了声发射技术的原理，并对声发射现象、声发射技术的优点和缺点进行了说明。从声发射进行机器状态监测和干扰因素两个方面来介绍声发射技术的应用，声发射技术可广泛用于各种机器的状态监测，如对于汽轮机能诊断轴承损伤、机械密封异常摩擦、润滑剂污染和润滑剂损耗、严重不对中、安装故障轴承故障类型；对于发电机能诊断轴承损伤、润滑剂污染和润滑剂损耗、严重不对中、安装故障轴承故障类型；对于机械加工机器能

诊断轴承损伤、磨损、润滑剂污染和润滑剂损耗轴承故障类型；对于低速旋转机器（转速通常小于60转/分）能诊断轴承损伤、润滑剂污染和润滑剂损耗、严重不对中、安装故障、过程监测（包括泄漏，性能等）轴承故障类型。

从系统安装、AE仪器和传感器、传感器的安装和结构监测的耦合剂三个方面提出对规定数据采集的要求。准备和执行检查、解释结果之前必须了解的相关信息，如机器的名称和编号，详细的运行工况，运行、维护保养记录、故障历史等信息。最后对数据分析和结果报告进行规定，通过数据分析将AE测量结果与运行状态联系起来，以便识别机器的状态，标准中列举了一些声发射评价机器运行状态采用的准则以便参考，例如声发射活性随时间的延续持续增大，稳态运行期间巨大的声发射活性，在故障重复频率出现幅值调制信号等。

通过阅读大量机电设备故障诊断的相关研究文献可以发现，国内外的研究大多集中在中高速轴承旋转设备和往复设备的故障诊断，而观览车属于低速重载大型游乐设备，此类设备的突出特点是承载量大、工作转速低、外界冲击信号强、运行工况呈典型的间歇性、运行中承受较大的冲击载荷且故障信息难以获取，因此相关研究相对较少。尤其在低速重载的观览车主轴系统早期故障监测诊断方面，可资借鉴的国内外科技文献是空白，此种状况既为本项目的开展增加了很大的难度，同时也证明了其开展的重要性和紧迫性。

## 1.5 主要研究内容和技术路线

### 1.5.1 主要研究内容

本论文以大型观览车滚动轴承的声发射状态监测和故障诊断为工程应用背景，通过实验室试验和现场试验来获取大型观览车主轴系统运行过程中的典型声发射信号，再进行声发射信号特征分析与特征提取方面的研究与应用，主要研究内容包括以下三个方面。

#### (1) 观览车主轴系统运行过程的声发射源机理分析

大型观览车主轴系统由轴承和主轴两部分组成。主轴在屈服点附近出现声发射计数高峰，预示着微观裂纹的形成。一旦裂纹形成，主轴局部地区的应力集中得到卸载，产生声发射信号。滚动轴承故障主要有磨损、疲劳、腐蚀、断裂、压痕和胶合等形式。磨损和疲劳是滚动轴承两种常见的故障形式。所有这些故障的产生和发展过程中，都会伴随着声发射现象的产生。只有弄清其声发射机理分析，才便于开展轴承声发射技术特征研究。

#### (2) 观览车模拟试验装置和实验室试验

参考国家相应标准，设计和构建大型观览车主轴系统模拟实验装置，在实验

室能实现主轴系统在变载荷、变转速、设置故障等不同运行工况下的运行情况。通过观览车主轴系统模拟装置在不同运行工况下声发射检测试验,获取主轴系统在正常运行过程中的典型声发射信号,并从声发射参数、波形分析和定位等手段得出观览车主轴系统的声发射信号特征规律。

### (3) 大型观览车主轴系统现场试验

通过开展大量的大型观览车主轴系统的现场声发射检测试验,获取主轴系统在正常运行过程中的各种典型干扰源及其典型声发射信号,并从声发射参数、波形分析和定位等手段得出观览车主轴系统的声发射信号特征规律。

## 1.5.2 技术路线

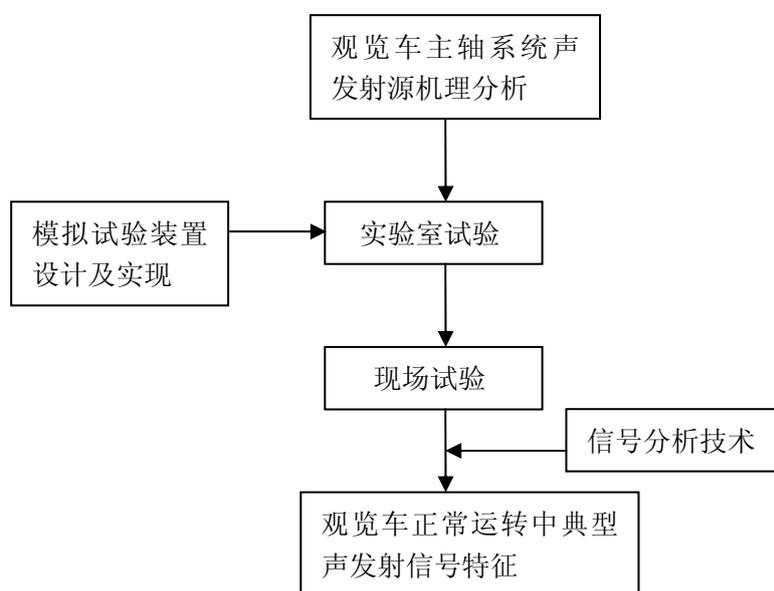


图 1-4 本文研究的技术路线框图

## 第2章 滚动轴承故障特征及声发射机理分析

滚动轴承是旋转机械的主要基础部件之一，它具有效率高、摩擦阻力小、装配较为方便、润滑易实现等优点。因此，在中、小型旋转机械上应用较为普遍。滚动轴承在正常工作条件下，由于装配不当、润滑不良、水分和异物侵入、腐蚀和过载等都可能使轴承过早损坏；即使不出现上述情况，经过一段时间的运转，轴承也会出现疲劳剥落和磨损而不能正常工作。因此，滚动轴承是旋转机械中较为薄弱的环节，故开展对滚动轴承的故障诊断具有重大的现实意义。

### 2.1 滚动轴承结构

滚动轴承由内圈、外圈、滚动体和保持架元件组成。内圈、外圈分别与轴颈及轴承座孔装配在一起，外圈不动，而内圈随轴旋转。滚动体是滚动轴承的核心元件，其形式有球形、锥柱形和鼓形等。滚动体可在内、外圈滚道上进行滚动，使相对运动表面间的滑动摩擦变为滚动摩擦。图2-1为滚动轴承结构示意图。

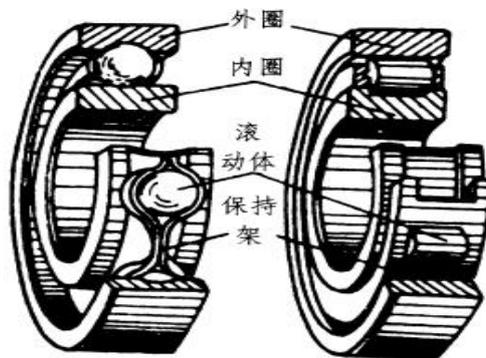


图2-1 滚动轴承结构示意图

### 2.2 滚动轴承故障类型

滚动轴承在运转过程中可能会由于各种原因引起损坏，如装配不当、润滑不良、水分和异物侵入、腐蚀和过载等都会导致轴承过早损坏。即使在安装、润滑和使用维护都正常的情况下，经过一段时间运转，轴承也会出现疲劳剥落和磨损而不能正常工作。总之，滚动轴承的故障原因十分复杂的。按照故障产生机理的不同，可以分为疲劳、磨损、腐蚀、胶合、压痕以及断裂等，其主要故障形式与原因如下<sup>[51]</sup>：

**疲劳剥落:** 滚动轴承的内、外滚道和滚动体表面既承受载荷又相对滚动时, 由于交变载荷的作用, 首先在表面下一一定的深度处形成裂纹, 续而扩展到接触表面使表面剥落坑, 最后发展到大片剥落, 这种现象就是疲劳剥落。疲劳剥落会造成运转时的冲击载荷、振动和噪声加剧。通常情况下, 疲劳剥落往往是滚动轴承失效的主要原因, 一般所说的轴承寿命经是指轴承的疲劳寿命。试验规程规定, 在滚道或滚动体上出现面积为 $0.5\text{mm}^2$ 的疲劳剥落坑就认为轴承寿命终结。滚动轴承的疲劳寿命分散性很大, 同一批轴承中, 其寿命与最低寿命可以相差几十倍乃至上百倍, 这从另一角度说明了滚动轴承故障监测的重要性。

**磨损:** 由于尘埃、异物的侵入, 滚道和滚动体相对运动时会引起表面磨损, 润滑不良也会加剧磨损, 磨损的结果使轴承游隙增大, 表面粗糙度增加, 降低了轴承运转精度, 因而也降低了机器的运动精度, 振动及噪声也随之增大。对于精密机械轴承, 往往是磨损量限制了轴承的寿命。此外, 还有一种微振磨损。在轴承旋转的情况下, 由于振动的作用, 滚动体和滚道接触面间有微小的、反复的相对滑动而产生磨损, 在滚道表面上形成振纹状磨痕。

**压痕:** 当轴承受到过大的冲击载荷或静载荷时, 或因热变形引起额外的载荷, 或有硬度很高的异物侵入时都会在滚道表面形成凹痕。这将使轴承在运转过程中产生剧烈的振动和噪声。而且一旦有了压痕, 压痕引起的冲击载荷会进一步引起附件表面的剥落。

**腐蚀:** 腐蚀是滚动轴承最严重的问题之一, 高精度轴承可能会由于表面腐蚀导致精度的丧失而不能继续工作。轴承零件表面的腐蚀分三种类型。一是化学腐蚀, 当水分或酸、碱性物质直接侵入轴承或者使用含酸的润滑剂, 都会引起轴承的腐蚀。二是电腐蚀, 当轴承内部有电流通过时, 电流有可能通过滚道和滚动体上的接触点处, 很薄的油膜引起电火花而产生电腐蚀, 在表面上形成搓板状的凹凸不平。三是微振腐蚀, 是轴承套圈在机座座孔中或轴颈上的微小相对运动所导致。结果使套圈表面产生锈斑, 轴承的腐蚀锈斑就是以后损坏的起点。

**断裂:** 通常是指滚动体的破碎、内外圈及保持架的断开。主要是由于磨削或热处理引起的, 也有的是由于运行时载荷过大、转速过高、润滑不良或装配不善, 是轴承某个部位发生应力集中, 产生裂纹, 最后导致轴承元件断裂。这种现象也比较常见且后果严重。

**胶合:** 在润滑不良、高速重载情况下工作时, 由于摩擦发热, 轴承零件可以在极短时间内达到很高的温度, 导致表面烧伤及胶合。所谓胶合是指一个零部件表面的金属粘附到另一零部件表面上的现象。

另外, 若按照轴承故障元件的不同, 又可以分为滚动体损伤、内外圈损伤以及保持架损伤等。分析以上故障类型特点, 这些故障均可以引起滚动轴承报废,

使设备安全受到威胁,应及时诊断,在轴承故障发生的初期将轴承进行检修,避免产生不可挽回的损失。

## 2.3 滚动轴承声发射检测

### 2.3.1 滚动轴承声发射源信号

在运行不良的滚动轴承里面,突发型和连续型的声发射信号都有可能存在。轴承各组成部分(内圈、外圈、滚动体以及保持架)接触面间的相对运动,以及由于失效、过载等产生的诸如表面下的裂纹(产生和扩展直至轴承表面的过程)和孪晶成长、磨损、压痕、切槽、咬合、润滑不良造成的表面粗糙、润滑油污染颗粒造成的表面硬边以及通过轴承的电流造成的点蚀等故障,都会产生突发型的声发射信号。

连续型声发射信号则主要来源于润滑不良(如润滑油膜的失效、润滑质中外来物的浸入)导致轴承表面产生氧化磨损而产生的全局性故障、过高的温度以及轴承局部故障的多发等<sup>[52-58]</sup>,这些因素造成短时间内的大量突发型声发射事件,从而产生了连续型声发射信号。

考虑到制造精度和装配精度的影响,完好轴承在运转过程中内外圈和滚动体及保持架之间的滚动接触也会产生声发射信号,但是与故障引起的声发射信号相比非常微弱,它是一种连续型声发射信号,不具有间断的脉冲特性,这种连续的微弱声发射信号可以作为研究故障突发型声发射信号的背景噪声。

### 2.3.2 滚动轴承声发射检测机理

滚动轴承的故障主要有磨损、疲劳、腐蚀、断裂、压痕和胶合等形式。故障的位置一般是在外圈、内圈、滚动体及保持架。磨损和疲劳是滚动轴承两种常见的故障形式。滚动轴承的疲劳故障,首先是由于轴承经常受到交变的冲击载荷作用,使轴承零件的金属表面产生位错运动和塑性变形,由此形成疲劳裂纹,然后沿着最大切应力方向向内部扩展,当裂纹扩展到某一临界尺寸时就会发生瞬时断裂,这种故障经常发生在滚动轴承的外圈上。而轴承的磨损是由于循环接触压应力周期性地作用在轴承零件摩擦表面上,使表面材料疲劳而产生微粒脱落的现象。这种故障的发生过程,在初期阶段金属内晶格发生弹性扭曲,当晶体的应力达到弹性临界值后,出现微观裂纹。微观裂纹再进一步扩展,就会在滚动轴承的内、外圈滚道上出现麻点、剥落等疲劳损坏故障。所有这些滚动轴承故障的产生和发展过程中,都会伴随着声发射现象的产生。因此,拾取轴承转动过程中的声发射信号并进行处理与分析便可有效地识别滚动轴承的断裂和疲劳故障。

基于上述机理,对于材料的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展,就可以利用声发射监测轴承来提供他们的动态信息。声发射源往往是材料灾难性破坏的发源地,由于声发射的活动往往在材料破坏之前很早就会出现,因此,根据这些声发射的特点及其强度,不仅可以推知该声发射源的目前状态,而且可以知道它形成的历史,预报其发展趋势,从而进行状态监测和故障诊断。

### 2.3.3 滚动轴承中声发射现象

(1) 滚动轴承故障中的声发射信号之一

当轴承发生擦伤、凹痕、压痕、腐蚀这类故障时,随着轴承的旋转,轴承内的滚珠与内表面,外表面相互碰撞时,会产生一个很强的突发性声发射事件,它所引起的传感器输出信号可以简化近似为指数衰减的正弦波,可以表示为:

$$V = V_p e^{-\beta t} \cos \omega t \quad (2-1)$$

式中 $V$ -瞬时电压;  $V_p$ -峰值电压;  $\beta$ -衰减系统;  $t$ -时间;  $\omega$ -角频率,又可以表示为 $\omega = 2\pi f$ ;  $f$ -信号频率。

若把检测的阈值电压设为 $V_t$ ,以 $N_{ec}$ 表示事件的振铃计数,则可以把 $V_t$ 表示为:

$$V_t = V_p e^{-\beta N_{ec} \frac{1}{f}} \cos(2\pi f) N_{ec} \frac{1}{f} = V_p e^{-\beta N_{ec} \frac{1}{f}} \quad \text{即} \quad \frac{V_t}{V_p} = e^{-\beta N_{ec} \frac{1}{f}} \quad (2-2)$$

那么一个故障信号的振铃计数可表示为:

$$N_{ec} = \frac{f}{\beta} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (2-3)$$

从式(2-3)可见一个故障信号的振铃计数 $N_{ec}$ 与衰减系数 $\beta$ 、工作频率 $f$ 、信号峰值电压 $V_p$ 和阈值电压 $V_t$ 有关。这种计数方法简单,因此,在声发射检测中得到了广泛应用。但是在这种方法中,故障信号的振铃计数受到工作频率的影响。频率高的故障会受到大的振铃次数。这没有真实地反映轴承故障信号能量的大小。因此,在轴承故障检测中,用声发射信号持续时间 $T_e$ 来检测轴承的故障,把(2-3)式变为:

$$T_e = \frac{N_{ec}}{f} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (2-4)$$

再把(2-2)代入式(2-4)中,则有:

$$T_e \approx \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{1}{V_t} \frac{2.5mKW^{\frac{1}{2}} \Delta A}{YBL} \right) \quad (2-5)$$

由式(2-5)式中可以看出,故障轴承的声发射信号的持续时间与衰减系数

$\beta$ 、阈值电压  $V_t$ 、应力强度因子以及裂纹扩展时所扫过的面积有关。因此，通过检测信号的持续时间就可以确定故障的基本情况。

### (2) 滚动轴承故障中的声发射信号之二

材料的变形与破坏的声发射试验表明，当滚动轴承发生辗皮、剥落、裂损、断裂这类故障时，大多数金属和合金中均匀塑形变形时所呈现的声发射特性是在屈服时出现的声发射高峰。滚动轴承的故障检测也遵循这一规律。因此，通过监测产生的信号的高能量声发射信号就可以识别轴承的故障与否。

从线弹性断裂力学可以知道，在弹性裂纹尖端附近的应力是受单一的参数  $K$  控制， $K$  被称为应力强度因子。这个参数取决于物体的几何形状、大小、加载方式等因素。对于任何已知的几何形状或一组载荷情况。总是可以按足够的精度来确定  $K$ 。应力强度因子法研究断裂问题的基本原理就是用应力强度因子  $K$  达到  $K_c$  为特征来解释的。

一般可把应力强度因子写成下列形式：

$$K = \sigma \sqrt{a} Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{P}{BW} \sqrt{a} Y\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2-6)$$

式中  $\sigma$  是特征应力； $P$  是特征载荷； $a$  是特征裂纹长度； $W$  是特征尺寸； $Y\left(\frac{a}{W}\right)$  是所研究的特定物体确定  $K$  的标定函数。目前已经从理论上证明了应力强度因子与声发射波动峰值幅度的关系为

$$V_p \approx \frac{2.5mKW^{\frac{1}{2}}\Delta A}{YBL} \quad (2-7)$$

式中  $Y$ 、 $B$ 、 $L$  为试样的几何参数， $\Delta A$  为裂纹所扫过的面积， $m$  为比例常数。由此可见声发射的峰值幅度与应力强度因子以及裂纹扩展时所扫过的面积成正比。

## 2.4 滚动轴承振动分析

### 2.4.1 滚动轴承振动类型

滚动轴承在工作时，一般是外圈与轴承座或机壳相联接，保持固定或相对固定的状态；内圈与机械的传动轴相联接，随传动轴一起转动。机械运转过程中，由于轴承本身的结构特点、加工装配误差及运行过程中出现的故障等内部因素，以及传动轴上其它零部件的运动和力的作用等外部因素，因此，当传动轴以一定的速度并在一定的载荷下运转时，将对轴承和轴承座或外壳组成的振动系统产生激励，使该系统产生振动，其振动产生的机理可用图 2-2 表示。

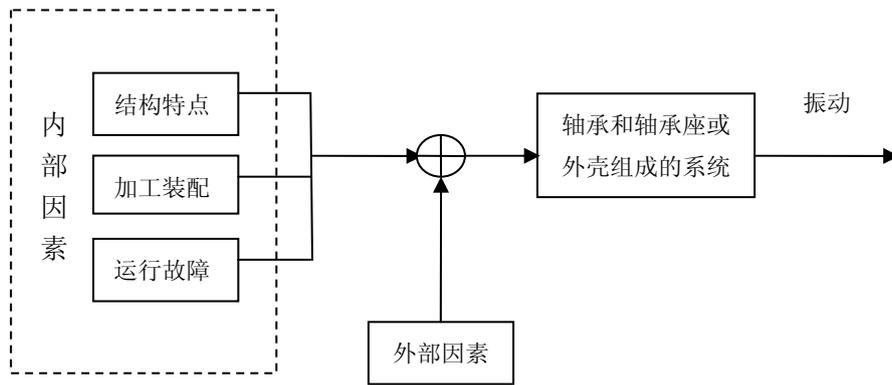


图 2-2 滚动轴承的振动产生机理

在工作过程中，滚动轴承造成的振动通常分为以下三类：

(1) 与轴承变形有关的振动。轴承是一弹性变形体，轴承承受载荷时，由于所承受滚动体的不断变换使得轴承在运行时发生弹性振动。

(2) 与轴承加工有关的振动。轴承各元件在加工中不可避免地出现加工误差。如表面波纹、轻微的擦痕和装备误差等均会引起轴承振动。

(3) 与轴承使用有关的振动。由于轴承在装备啊、安装及其使用过程中所产生的轴承零件工作表面的伤痕或疲劳剥落点，均能引起轴承的异常振动和噪声。

滚动轴承的实际故障诊断过程中，人们通过布置在轴承座或外壳适当位置的传感器拾取轴承的故障声发射信号，拾取到故障声发射信号是上述各种内部和外部机理源施加于轴承以及轴承座和外壳组成的振动系统的综合振动。如果不考虑轴承加工和装配误差，在综合振动中，最感兴趣的是运行故障这一内部因素所引起的故障声发射信号。

#### 2.4.2 滚动轴承固有振动频率

轴承工作时，滚动体与内圈或外圈之间可能产生冲击而诱发轴承元件的振动。这种振动是一种强迫振动，当振动频率与轴承元件固有频率相等时，振动会加剧。固有频率仅取决于元件本身的材料、形状和质量，与轴的转速无关。滚动体钢球的固有频率为：

$$f_b = \frac{0.424}{r} \sqrt{\frac{E}{2\rho}} \quad \text{即} \quad f_b = 4.8 \times 10^4 / r \quad (2-8)$$

其中， $r$ 为钢球的半径（mm）， $\rho$ 为材料密度（ $\text{kg/m}^3$ ）， $E$ 为钢球的弹性模量（ $\text{N/m}^2$ ）。

当滚动轴承为钢材时，其内外环的固有频率可用下式计算：

$$f_n = 9.40 \times 10^5 \times \frac{h}{D^2} \frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1}} \quad (2-9)$$

其中,  $h$  为圆环的厚度 (mm),  $D$  为圆环中性轴直径 (mm),  $n$  为固有频率的阶数。轴承元件的固有频率可能在20-60kHz范围内, 我们通常将此频率段作为诊断频带。

### 2.4.3 滚动轴承故障特征频率

滚动轴承在运行过程中, 当内圈、外圈、滚子出现点蚀等表面损伤类故障时, 轴承元件的工作表面损伤点反复撞击与之相接触的其它元件表面而产生低频振动, 频率一般在1kHz以下, 该频率称为轴承故障特征频率。

滚动轴承的故障特征频率是滚动轴承故障的重要信息之一。对采集信号进行频谱分析, 将理论计算的故障频率与频谱图中谱峰相对照, 即可判断轴承有无故障及故障所发生的部位, 且峰值的大小与故障严重程度有关。下面我们将给出滚动轴承各元件单一缺陷的故障特征频率:

$z$ 个滚动体与内圈上某一损伤点接触的故障特征频率为:

$$f_i = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D}\right) f_r \quad (2-10)$$

$z$ 个滚动体与外圈上某一损伤点接触的故障特征频率为:

$$f_i = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D}\right) f_r \quad (2-11)$$

滚动体上某一损伤点与内圈或外圈接触的故障特征频率为:

$$f_b = \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{D^2}\right) f_r \quad (2-12)$$

式中,  $f_r$  为轴的旋转频率 (Hz),  $z$  为滚动体数量,  $d$  为滚动体直径 (mm),  $D$  为轴承的节径 (mm),  $\alpha$  为接触角。

## 2.5 本章小结

本章主要分析了滚动轴承的结构, 主要失效故障的基本形式及原因, 目前滚动轴承的各种诊断方法, 通过分析得出以下结论:

(1) 按照滚动轴承故障产生机理的不同, 可以分为疲劳、磨损、腐蚀、胶合、压痕以及断裂等。故障位置一般在外圈、内圈、滚动体及保持架上。

(2) 磨损和疲劳是滚动轴承两种常见的故障形式, 所有这些滚动轴承故障的产生和发展过程中, 都会伴随着声发射现象的产生。

(3) 对采集信号进行频谱分析, 将理论计算的故障频率与频谱图中谱峰相对照, 即可判断轴承有无故障及故障所发生的部位, 且峰值的大小与故障严重程度有关。

## 第3章 观览车模拟试验装置及声发射试验研究

为了开展大型观览车主轴系统的声发射技术检验,必须要找出大型观览车主轴运行过程中的声发射信号规律,才能进行大型观览车主轴系统在线声发射检测和监测。本章设计了观览车主轴系统模拟试验装置,该装置能够实现观览车主轴系统在变载荷、变转速、设置故障等不同运行工况下的运行情况。在实验室开展了观览车主轴系统正常运行过程中的声发射信号特征研究,监测了1160圈数信号,并得到了主轴运行过程中规律,其结果为现场检测试验提供了依据。

### 3.1 观览车模拟试验装置

#### 3.1.1 装置简介

根据本文试验装置的要求,由沈阳市松陵游乐设备制造厂参考国家标准,制造了本文的GL2型模拟试验观览车装置。观览车模拟实验装置由支柱支架、转轮、转动系统、吊斗、驱动装置、电气等部分装置组成,结构尺寸如图3-1所示。左右各一个23138CA型调心滚子轴承,可以在中心轴随转轮转动或中心轴不随转轮转动这两种状态下,进行顺时针或逆时针旋转模拟试验,通过变频器可以调节电机转速。本设备依据《特种设备安全监察条例》、GB8408-2008《游乐设施安全规范》、GB/T18164-2008《观览车类游艺机通用技术条件》进行设计,符合相关规范的设计要求。保证该设备运行平稳、噪音小、造型美观、运行可靠。观览车模拟试验装置实物图如图3-2所示。

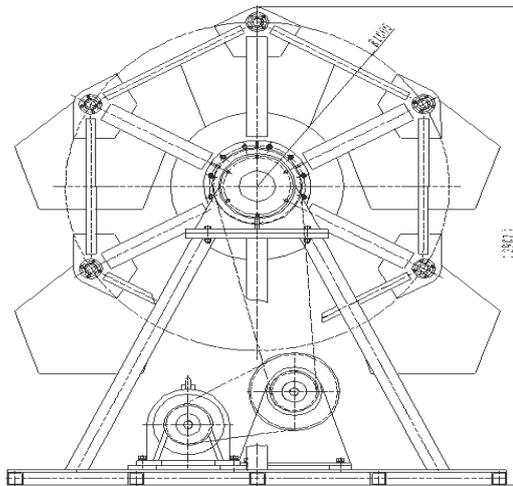


图3-1 观览车模拟试验装置结构尺寸图



图3-2 观览车模拟试验装置实物图

### 3.1.2 性能参数

GL2型模拟实验观览车，总高为2.907米，转轮直径为2米，沿轮缘均布6个吊斗，单斗模拟载荷为1500Kg，全载荷为9000 Kg。吊斗圆周最高线速度为0.0262m/s，每旋转一周最快 $\leq 4$ 分钟，动力装置为1台2.2kW减速电机，安装在室内运转实验。通过转换套可以在中心轴随转轮转动或中心轴不随转轮转动这两种状态下，进行顺时针或逆时针旋转模拟实验。

### 3.1.3 使用环境条件

设计规定使用环境条件：

使用环境温度： $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；

使用环境湿度： $< 90\%$ ；

安装地区地震烈度： $\leq 8$ 度。

### 3.1.4 两种运转状态的转换

鉴于安全及安装方便方面的考虑，观览车模拟试验装置的两种运转状态的转换必须得在停机状态下完成，转换套的具体部位如图3-3所示，具体方法如下：

(1) 将转换套通过螺栓固定到右侧轴承盖上时，观览车启动后，中心轴随转轮一起旋转。

(2) 当转换套通过螺栓固定到左侧轴座承盖上时，观览车启动后，中心轴不旋转，只有转轮旋转。

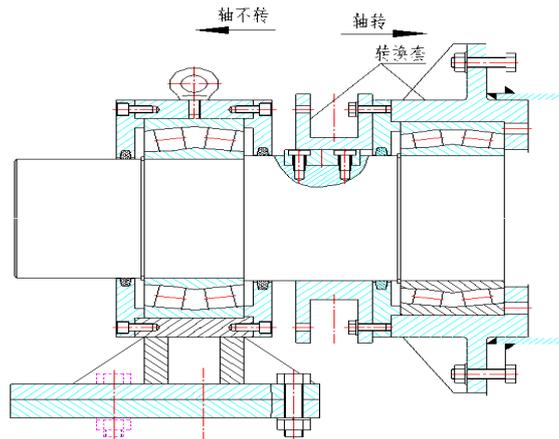


图 3-3 转换套

### 3.1.5 GL02 电气控制说明

GL02 设备主要由变频调速器，计数器及减速电机组组成。电气控制系统采

用了工频/变频电压互备手动切换运行方式，以保证设备在不同使用条件下适宜选用所需要的运行状态。计数器的动态输入量与设定量实时比较，达到所设定的预定值后运行的设备将会自动停止。操作说明：

依电气控制原理图，确认主电气回路应无短路，断路现象，二次控制回路导线连接无误情况下，将控制回路断路器(QF1)闭合，该箱面上的白色指示灯(HW)显示电源接入，顺时针旋转钥匙开关(SE)，计数器(PC)显示预置的需求。

修改计数设值，确认运行方式，选择开关(SA1)掷于工频或变频位置，选择开关(SA2)掷于正转或反转位置。

若使设备运行按下(ST)启动按钮，设备进入事先选择的方案模式运行，且有相对应的运行指示灯显示。设备在正常运行时，注意与电机(M)同时运行的风扇(FS)是否正常，避免电机温升过高。

在变频调速运行状态时，可通过调解(WP)电位器，观察频率表(Hz)显示值，确定电机的转速。一般要求电机的正常运行频率在25Hz以上，避免因长时间运行使电机(M)温升高，造成电机(M)烧毁。

通过靠在电机一侧的主轴内侧安装计数器(PC)，主轴每转动一周计数器(PC)经行程开关(QS)的脉冲信号录下来，与预设值比较，当主轴的转动圈数与设定值相等时，运行的设备将自动停止运行。

### 3.1.6 各部位轴承润滑

设备润滑是一项经常性工作，对于游乐设施的安全运行和使用寿命有着十分重要的意义。因此，各部轴承均应采用钙基润滑脂或201#润滑油，适当进行清洗换油。

润滑部位及加油量如下：

- (1) 转轮中心轴承加至轴承空隙的 $1/2 \sim 2/3$ 。
- (2) 其余轴承加至轴承空隙的 $1/3 \sim 1/2$ 。
- (3) 链条每天加注锭子油1~2次。

### 3.1.7 观览车模拟试验装置计算

设备要保证它的强度和变形。在工程实际中，对某些受弯构件，除要求具有足够的强度外，还要求变形符合要求，即要求构件有足够的刚度，不因发生过大弹性变形而失效，以保证结构正常工作。本文此分析采用美国通用结构有限元软件SAP2000，根据SAP2000分析计算与设计，可知，其结构在最不利组合情况下稳定性和强度都没有问题，计算所得的各构件的安全系数均大于5，最小为6，最大为29.3，安全系数均满足规范《游乐设施安全规范》GB8408-2008要求。

## 3.2 观览车模拟试验装置声发射试验研究

### 3.2.1 实验对象及仪器设备

#### (1) 试验对象

GL2 型观览车模拟实验装置试验滚动轴承采用 23138CA/W33 型调心滚子轴承，其尺寸参数为：内径  $d$ : 190mm；外径  $D$ : 320mm；厚度: 104 mm；重量: 34.4kg，其实物图见图 3-4。



图 3-4 23138CA/W33 型调心滚子轴承示意图

#### (2) 声发射检测系统

试验所用的声发射仪器是德国 Vallen 公司生产的 AMSY-6 型 12 通道全波形数字化声发射检测仪，包括硬件系统和软件系统，可以实时显示出声发射信号的波形和参数数据列表及各种类型的图表，仪器设备如图 3-5 所示。声发射传感器、电缆线、采集卡、分析软件均为其配套产品，其最大特点是经前置放大的信号不必再经过一系列模拟电路的处理，而是直接转换成数字信号，同时进行常规特征参数提取与波形记录，这不仅改善了电路的稳定性和可靠性，而且大大强化了系统信号的处理能力。

试验中，声发射仪器的数据采集参数阈值设为 40 dB，采样点个数为 8192，采样率为 10mHz。



图 3-5 检测仪器

### 3.2.2 传感器布置

为了减少声发射信号在传播过程的衰减,将传感器直接安装在轴承座上预先打磨的地方,采用真空脂耦合,磁吸附固定传感器。

传感器采用 VS45-H 型宽频和 VS150-RIC 型谐振型的两种声发射传感器,共采用 4 个传感器,其中 S1 和 S2 为宽频的, S5 和 S6 为谐振式的。VS150-RIC 型谐振型内置前置放大器, VS45-H 型宽频的前置放大器为 vallen 公司的 AEP4 型,增益为 34dB,带宽为 2.5 kHz~3 kHz。VS45-H 型宽频传感器的频率响应范围为 20 kHz~450 kHz, VS150-RIC 型谐振式传感器频率响应范围为 100 kHz~500 kHz,其谐振频率为 150kHz。传感器布置见图 3-6、图 3-7 所示。

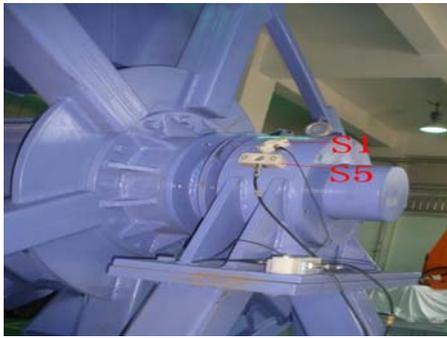


图 3-6 北面传感器布置图



图 3-7 南面传感器布置图

### 3.2.3 试验方法

#### a. 降噪措施

试验过程中可能会产生一些声发射干扰源,如计数行程开关与挡板接触分开、试验装置仪器电子噪声干扰,试验装置振动干扰等。因此,在试验中采取以下措施,以减少其噪声的干扰:

(1) 通过参数滤波设置,过滤掉计数行程开关与挡板接触所产生的高幅值信号,另外可主要分析另一没有装行程开关的一侧声发射信号。

(2) 试验开始前,利用枕木垫平观览车模拟试验装置底座平台与地面的空隙,以减少因不平稳而引起的振动影响。

(3) 试验开始前,测定背景噪声,如有试验装置设备的动力源引起的电子噪声干扰源存在,可以利用导线,将声发射仪器与观览车模拟试验装置相连接接地,以消除电子噪声干扰。

#### b. 试验步骤

本实验具体操作过程如下:

(1) 传感器布置:传感器按图 3-6、图 3-7 布置,采用真空脂耦合,磁吸附固定传感器。

(2) 连接声发射仪器：按照要求将传感器、电脑、仪器连接好，另用铅笔芯折断模拟声发射源，在各传感器附近断铅三次，测试传感器的幅度响应和耦合情况。

设置滤波器去除噪声干扰，只观察断铅高频信号，标定结果如表 3-1 所示。另外通过断铅，可以发现在北部的传感器附近断铅，只被北部的传感器所接收，南部的传感器接收不到，故信号不能通过中心轴传播，同样在南部的传感器附近断铅，北部的传感器接收不到，说明主轴不能线性定位。

表 3-1 传感器断铅标定灵敏度

断铅	1	2	3	平均灵敏度
S1	94.2	94.5	93.8	94.2dB
S2	95.3	96.4	94.5	95.4 dB
S5	93.0	95.6	96	94.9 dB
S6	90.4	92.7	94.5	92.5 dB

(3) 仪器试验参数设定：接通观览车模拟实验装置、声发射仪器和电脑电源后，测定实验环境的背景噪声，根据所测定背景噪声水平，设置仪器参数。

(4) 在设备空载、工频、正转、轴转动工况下启动观览车模拟实验装置，转动一圈需 188s，按照图 3-8 采集方案采集数据，主要采集了以下运行周期：11-50, 62-70, 101-119, 201-210, 251-260, 351-360, 395-405, 451-456, 491-510, 551-560, 592-605, 621-633, 681-685, 701-710, 751-760, 802-812, 851-860, 901-910, 951-960, 1001-1010, 1051-1060, 1101-1110, 1151-1160。

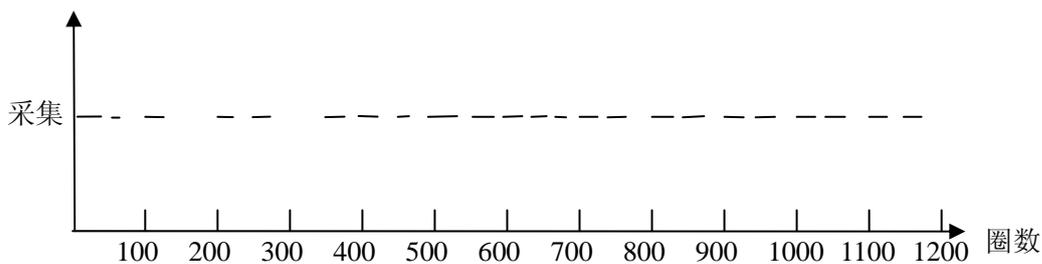


图 3-8 采集方案

### 3.2.4 试验结果与分析

#### a. 背景噪声信号特征

在启动观览车模拟试验装置之前，测量背景噪声 10 分钟，门槛值 34dB，只有少量信号出现，幅度低，能量小，主要分布在 34~37 dB，试验过程中门槛值设置为 40dB。

### b. 设备振动对声发射信号影响分析

由于地面不平,设备放在室内地面上对测试是否会有一定的影响。为此,先让设备运行一段时间后进行振动测试:

第一步把 S5 号传感器布置在北侧支架上,让设备运行,采集信号,分析得知其信号幅度在 47 dB 以下,且信号较少。

第二步把 S5 号传感器布置在轴承座上,让设备运转进行采集信号,分析其信号得知信号幅度在 53dB 以下,且信号较少。

第三步把 S6 号传感器布置在南侧轴承座上,让设备运转进行采集信号,分析其信号得知信号幅度在 53dB 以下,且信号较少。

综上所述,可得知由于观览车模拟实验装置底座平台与地面不平而引起设备的振动对我们试验影响很小,故可不考虑其影响。

### c. 行程开关挡板干扰

试验中为了便于记圈数,在南边轴承内侧加了个行程开关(QS),而在南边齿轮内侧上装有挡板,主轴每转动一周挡板触动行程开关,计数器(PC)经行程开关(QS)的脉冲信号记录下来。行程开关与挡板刚接触时会产生高的幅值信号(S2:92dB 左右),并能听到两次响声,接触过后也会产生高的幅值信号(S2:95dB 以上),且后面的挡板离开行程开关产生的声音大于刚开始接触产生的声音。

其挡板与行程开关的接触撞击产生的典型时域及频谱图如图 3-9 所示,由图可知其信号能量很大,频率在 50kHz 附件富集。在分析试验数据时,可通过设置幅度小于 90dB,来过滤掉此类信号的影响。

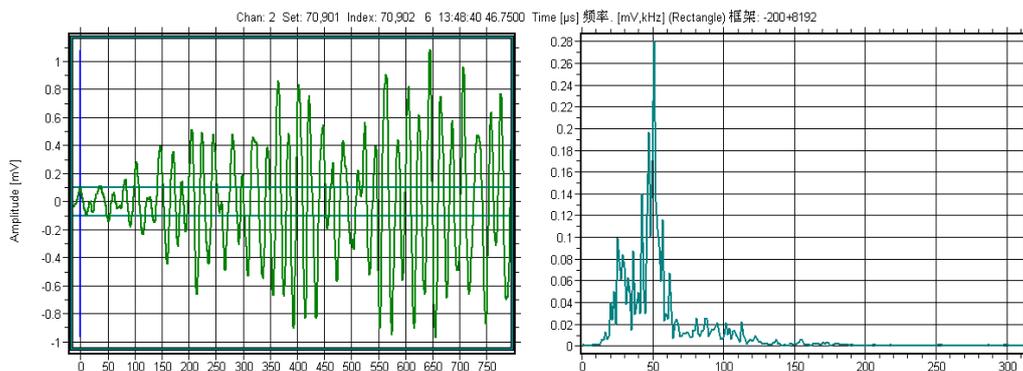


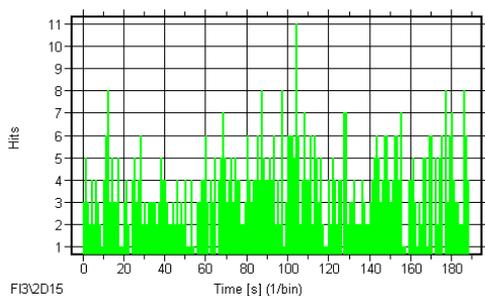
图 3-9 挡板与行程开关的接触撞击产生的典型信号时域及频谱图

### d. 滚动轴承声发射信号特征分析

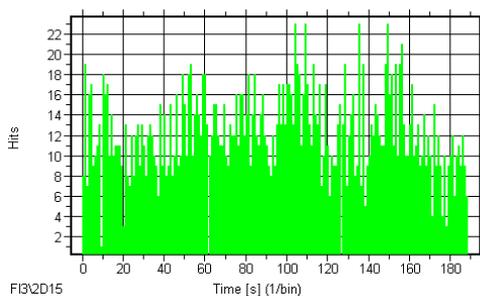
#### (1) 谐振式与宽频传感器采集信号对比

实验采用两种传感器,下面选用第 353 圈的信号,对 S5 谐振式传感器与 S1 宽频式传感器所采集的滚动轴承声发射信号从参数特征和波形频谱方面进行对比分析。

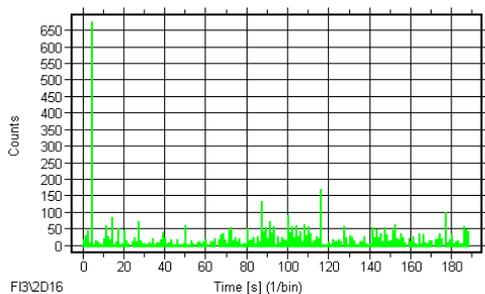
#### 1) 参数特征



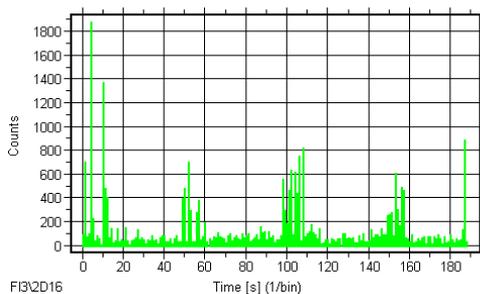
(a) S5 撞击数历程图



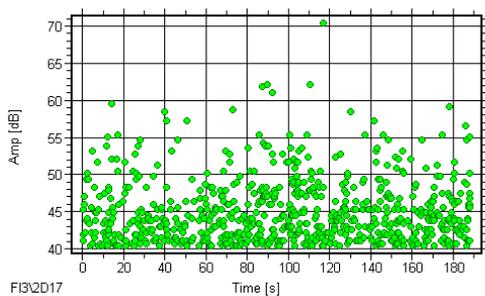
(b) S1 撞击数历程图



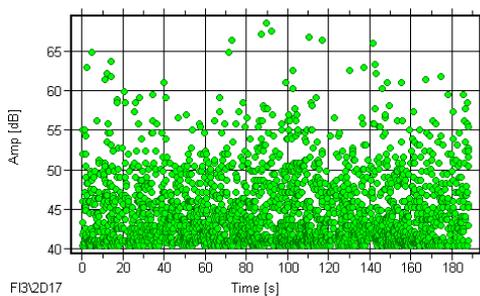
(c) S5 振铃计数历程图



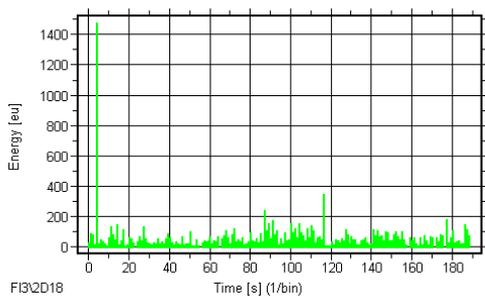
(d) S1 振铃计数历程图



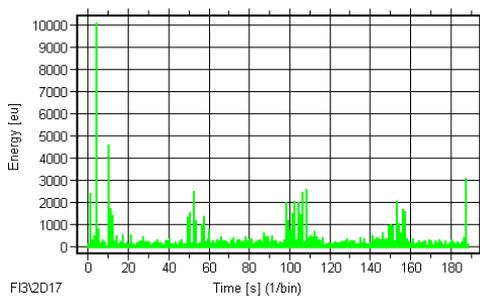
(e) S5 幅度历程图



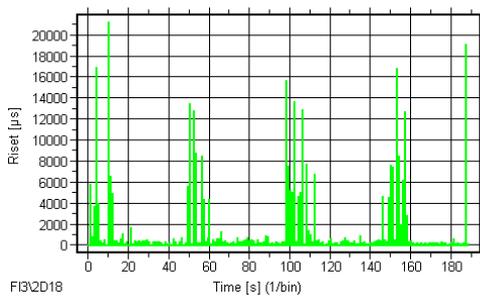
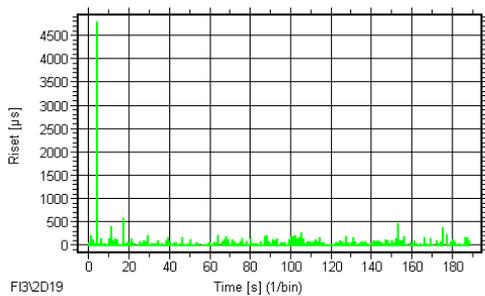
(f) S1 幅度历程图



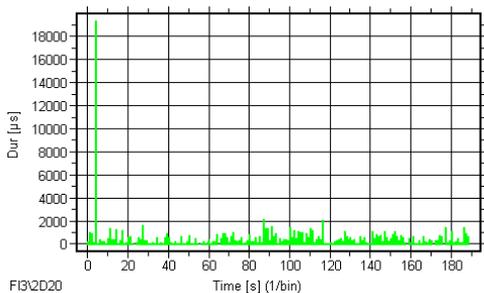
(g) S5 能量率历程图



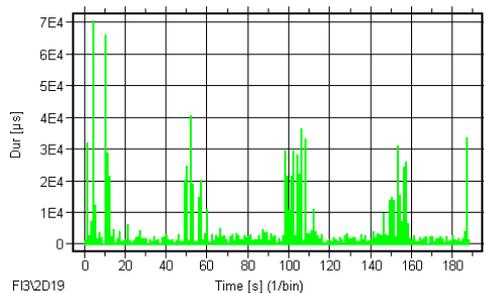
(h) S1 能量率历程图



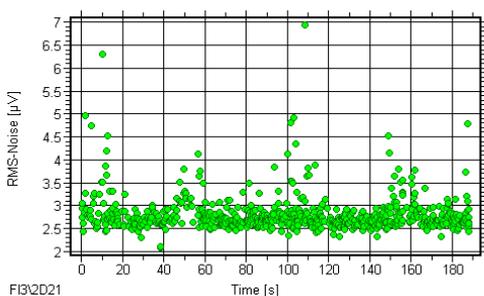
(i) S5 上升时间历程图



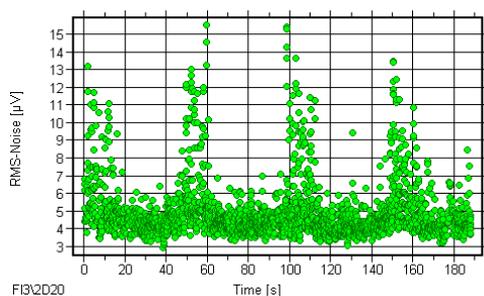
(j) S1 上升时间历程图



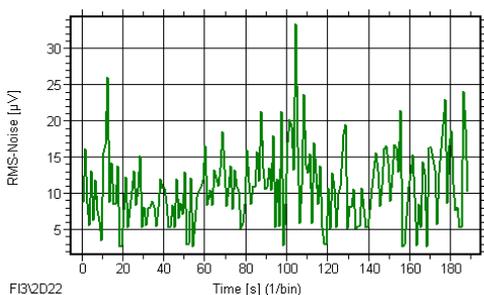
(k) S5 持续时间历程图



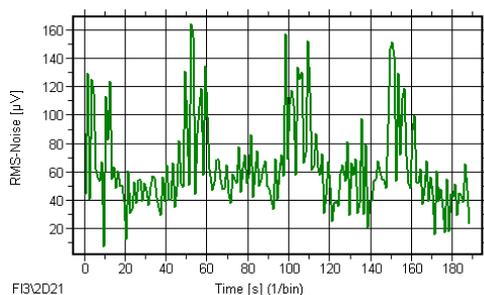
(l) S1 持续时间历程图



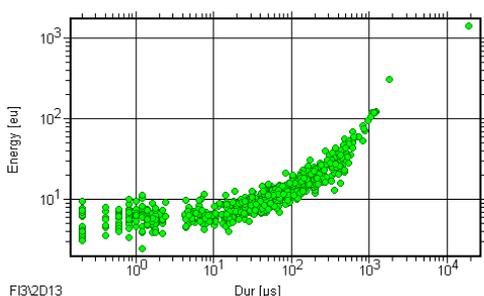
(m) S5 RMS(点状图)历程图



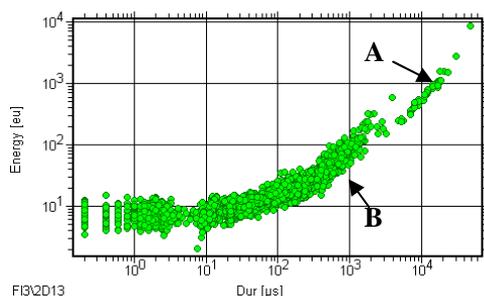
(n) S1 RMS(点状图)历程图



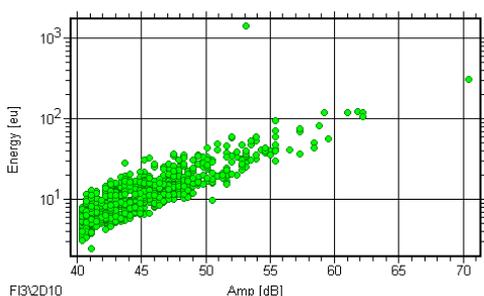
(o) S5 RMS(线性图)历程图



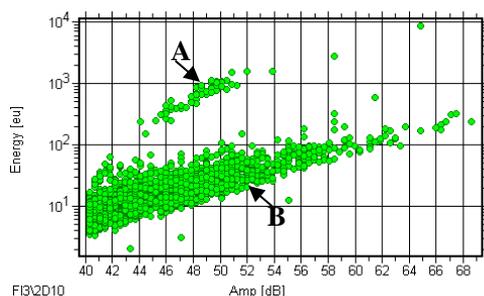
(p) S1 RMS(线性图)历程图



(q) S5 能量与持续时间关联图



(r) S1 能量与持续时间关联图



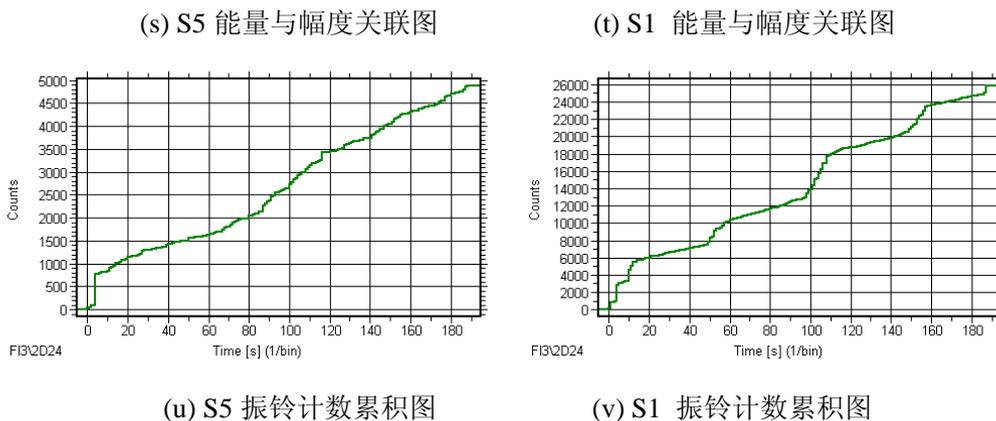


图 3-10 第 353 圈 S5 谐振式与 S1 宽频传感器声发射信号参数图对比

2) 波形频谱特征:

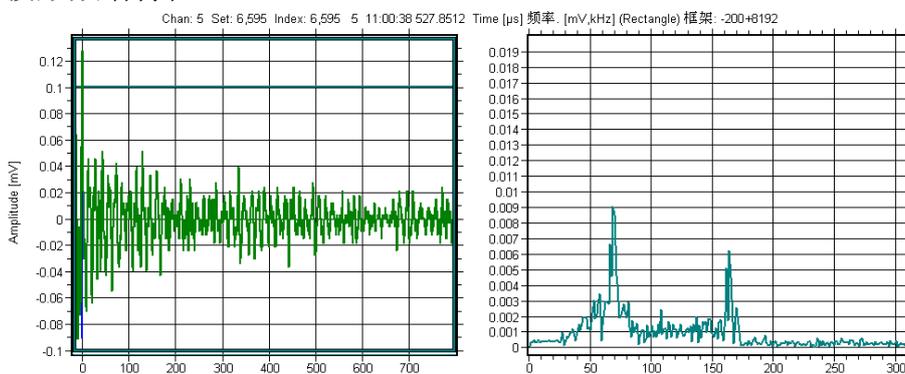
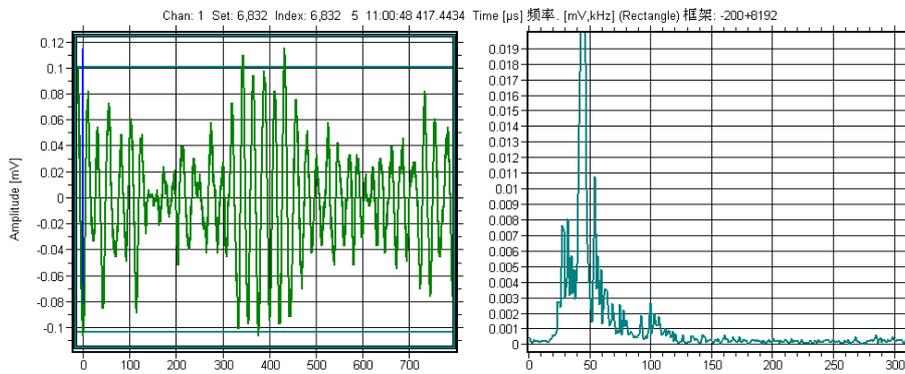
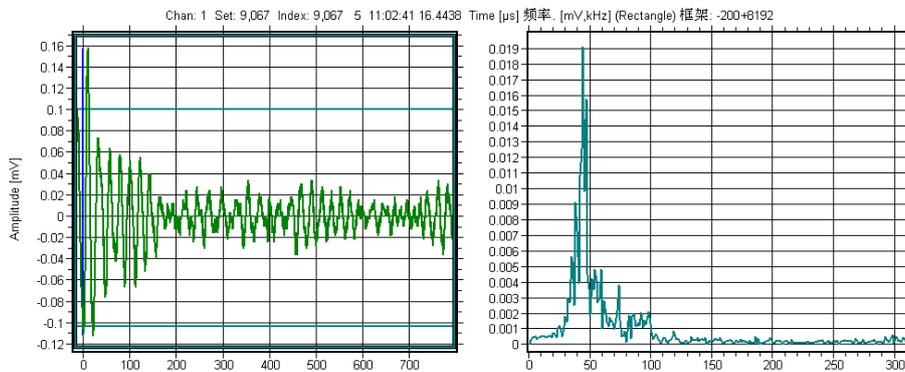


图 3-11 第 353 圈 S5 典型信号波形和频谱图



(a) A 类信号波形和频谱图



(b) B 类信号波形和频谱图

图 3-12 第 353 圈 S1 典型信号波形和频谱图

在第 353 圈信号中, 通过比较 S1 宽频传感器与 S5 谐振式传感器同时接收到的声发射信号参数图和频谱图, 由图 3-10、图 3-11、图 3-12 可以看出:

① S1 宽频传感器接收的声发射信号具有一定的规律性, 声发射振铃计数、上升时间、持续时间、能量、RMS 参数的经历图具有明显的四个峰值, 每个峰值间隔约为 50S; 声发射撞击、幅度参数的经历图不具有明显的特征。而 S5 谐振式传感器接收的声发射信号各参数经历图除了 RMS 以外都不具有明显的特征规律性, RMS (点状图) 参数经历图有四个峰值, 其特征不是很明显, 且每个峰值的间隔也为 50S。声发射振铃计数、上升时间、持续时间和能量参数历程图变化趋势类似, 以后只分析其中一个参数特征。

② S1 接收的声发射信号比 S5 要多, 两种传感器的 RMS 经历图 (点状图) 具有相似四个峰值特征。

③ S1 的三个声发射参数关联图可以区分出两种不同变化趋势的信号, 而 S5 的三个关联图中没有。

④ S5 信号属于突发性信号, 频谱图中有两个峰值存在, 主要能量分布在 20 kHz~200 kHz, 其中在 70 kHz 和 170 kHz 附近有峰值。S1 信号有两种不同的 A 和 B 型信号: 经分析, A 型信号属于峰值信号, 为连续性信号, 频谱图中有一个峰值, 主要能量分布在 20 kHz~120 kHz, 其中集中在 50 kHz 附近; B 型信号为突发性信号, 频谱图中有一个峰值, 主要能量分布在 20 kHz~100 kHz, 集中在 42 kHz 附近。

⑤ 宽频传感器更适合于采集滚动轴承声发射信号, 也说明了滚动轴承正常的声发射信号为低频信号。故以后主要采用宽频带传感器来采集滚动轴承声发射信号, 本节后面主要分析宽频传感器所采集的声发射信号。

## (2) 前 200 圈滚动轴承声发射信号特征

前 200 圈内的滚动轴承声发射信号变化趋势类似, 故选第 40 圈的 S1 信号对其分析。

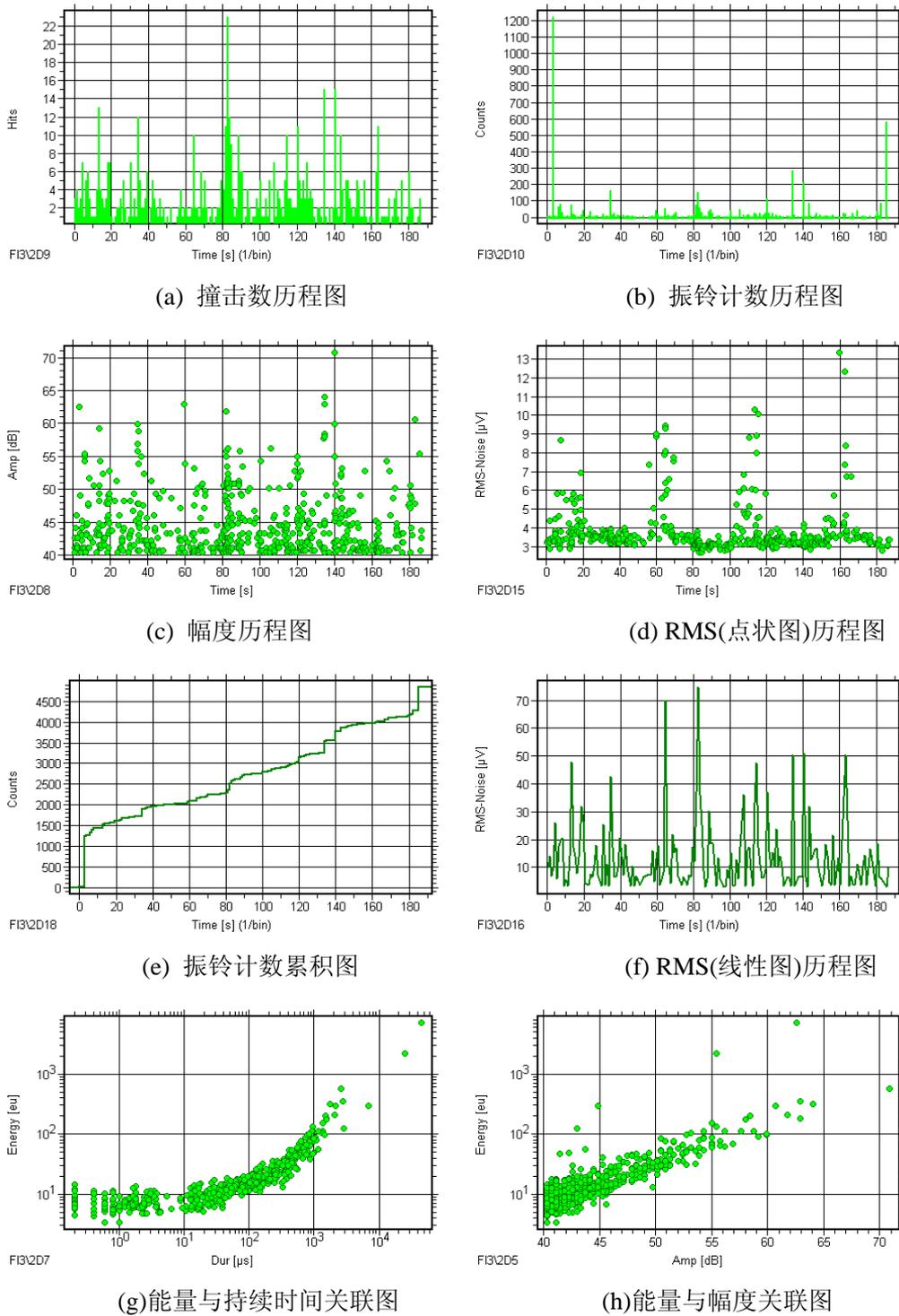


图 3-13 第 40 圈 S1 传感器声发射信号参数图

图 3-13 为第 40 圈 S1 传感器接收的滚动轴承声发射信号参数历程图、关联图和分布图，据图可知：

- ① 振铃计数、能量、上升时间和持续时间参数的经历图变化趋势类似，在 0S 和 188S 处有两较大峰值，期间在 34S、80S、134S 处有幅度不是很高的峰值。RMS 经历图（点状图）在 10S、60S、110S、160S 处有四个峰值，峰值间隔约为

50S。幅度分别在 65dB 以下，最大幅度为 70.8dB，RMS 经历图（线性图）跟撞击数参数经历图特征不明显。声发射信号振铃计数参数的累计曲线图在每个周期的 0S 和 188S 处有突然增加，中间呈线性增长趋势。

② 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有两种不同的信号：一种主要出现在四个峰值附近的信号，此类信号为连续型信号，其持续时间和上升时间长，振铃计数大，能量高，而且此信号开始很少，但随着圈数增加而逐渐加强；第二种信号是比较多的信号，其贯穿出现在整个试验过程中，包括峰值附近的部分信号。

③ 第 40 圈的滚动轴承声发射信号主要参数总量见表 3-2 所示。

表 3-2 第 40 圈 S1 传感器声发射信号参数总量

AE 参数	总数	AE 参数	总数
撞击数	574	上升时间( $\mu$ s)	39326.4
振铃计数	4856	持续时间( $\mu$ s)	187647.6
幅度(dB)	25712.54	RMS( $\mu$ V)	2160.641
能量(nu)	22924.9		

④ 图 3-14 为第 40 圈的滚动轴承声发射信号的典型波形图和频谱图，主要频带在 20~50kHz 范围内，主要集中在 40kHz 附近。

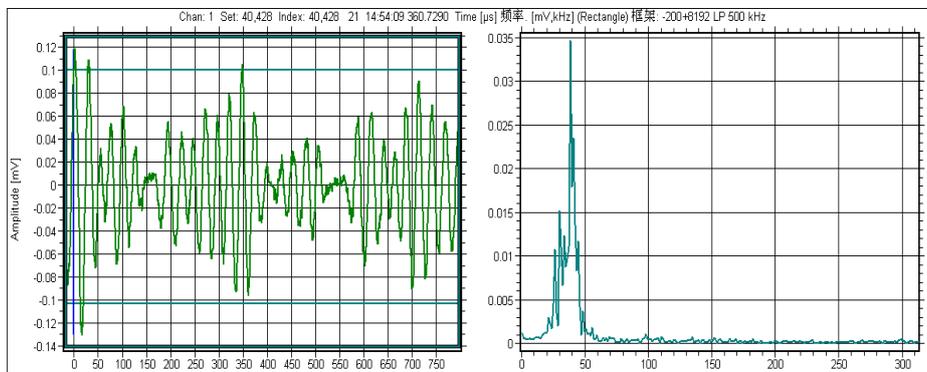


图 3-14 第 40 圈声发射信号波形与频谱图

综上所述，前 200 圈内的滚动轴承声发射信号主要参数只有 RMS（点状图）参数历程图始终具有四个峰值特征，每个峰值间隔约为 50S，而且峰值特征随着圈数增加明显，其他参数历程图无明显特征规律。另外从能量、幅度和持续时间参数的关联图可看出存在 A、B 两种不同的信号，A 信号开始很少，随着圈数的增加而增加，B 信号是主要的信号。

（3）第 201~450 圈滚动轴承声发射信号特征

第 201~450 圈内的滚动轴承声发射信号变化趋势类似，故选第 353 圈的 S1 信号对其分析。

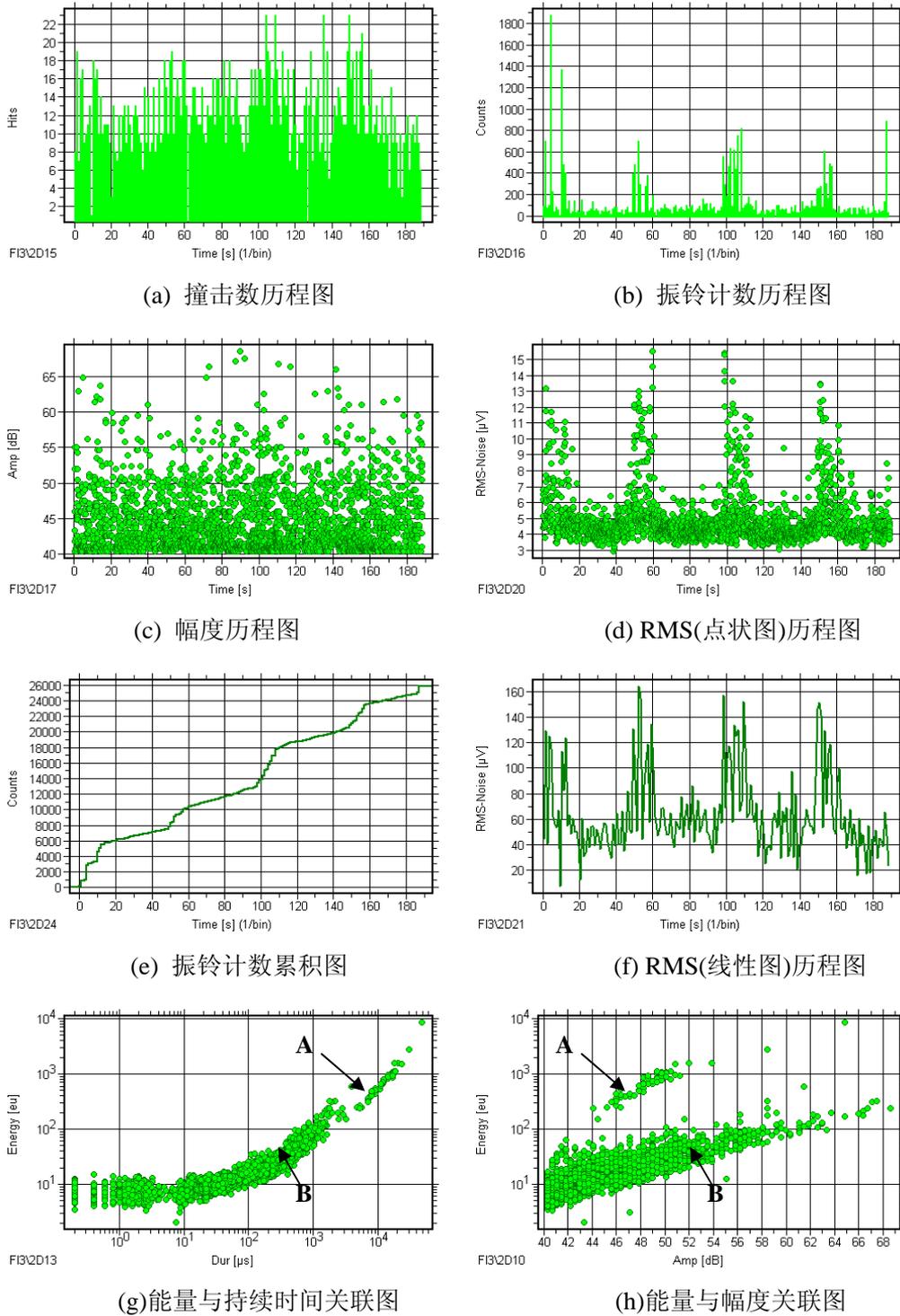


图 3-15 第 353 圈 S1 传感器声发射信号参数图

图 3-15 为第 353 圈 S1 传感器接收的滚动轴承声发射信号参数历程图、关联图和分布图，据图可知：

① 声发射振铃计数、能量、上升时间和持续时间参数的经历图变化趋势类似，振铃计数、能量、上升时间、持续时间、RMS 参数的经历图具有最好的四个峰值特征，在 0S、50S、100S、150S 处有明显的峰值，峰值间隔约为 50S，撞

击数和幅值参数的经历图没有典型的四个峰值特征。最大幅值为 68.6dB。声发射信号振铃计数的累计曲线图在每个周期的 RMS 峰值位置有突然增加。

② 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有两种不同的信号：一种主要出现在四个峰值附近的信号，此类信号为连续型信号，其持续时间和上升时间长，振铃计数大，能量高，而且此信号逐渐加强；第二种信号贯穿出现在整个试验过程中，包括峰值附近的部分信号，此类信号得到加强。

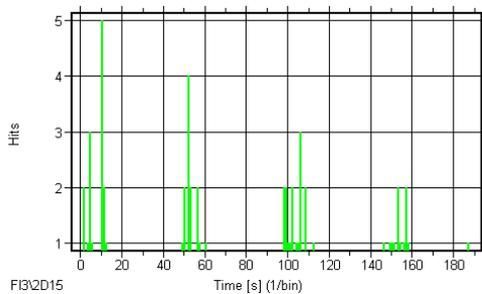
③ 第 353 圈的滚动轴承声发射信号主要参数总量见表 3-3 所示。

表 3-3 第 353 圈 S1 传感器声发射信号参数总量

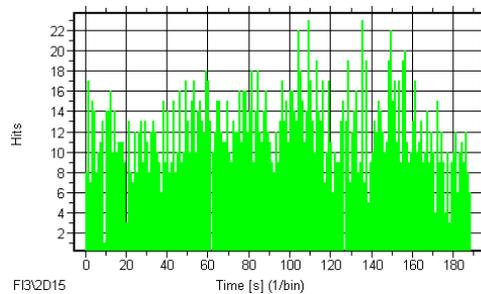
AE 参数	总数	AE 参数	总数
撞击数	2343	上升时间( $\mu$ s)	350645.8
振铃计数	25925	持续时间( $\mu$ s)	1124987
幅度(dB)	105607.5	RMS( $\mu$ V)	11998.82
能量(nu)	97764.13		

从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有 A、B 两种不同的信号，现将 A、B 两种不同的信号进行对比分析，见下图 3-16。

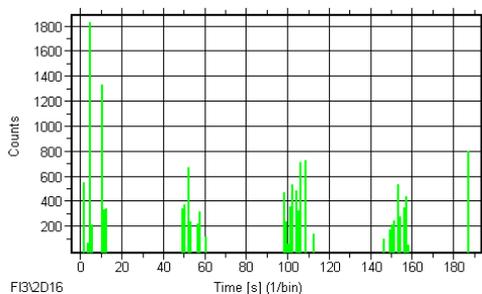
### 1) 参数方面



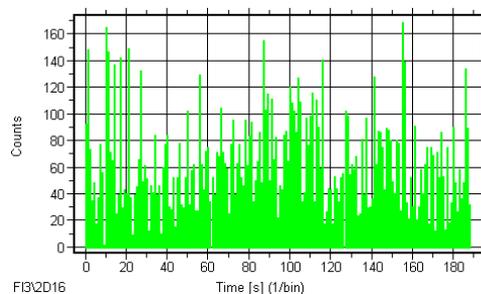
(a) A 信号撞击数历程图



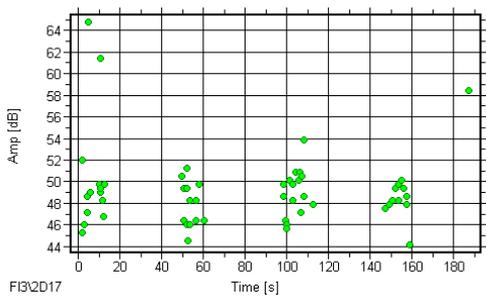
(b) B 信号撞击数历程图



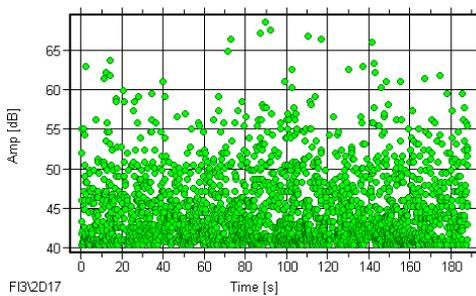
(c) A 信号振铃计数历程图



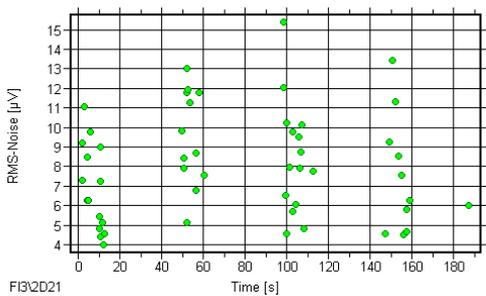
(d) B 信号振铃计数历程图



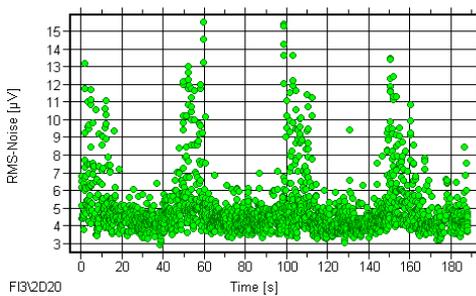
(e) A 信号幅度历程图



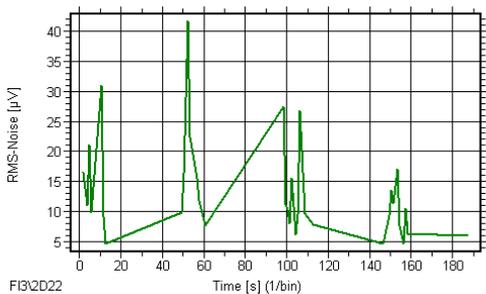
(f) B 信号幅度历程图



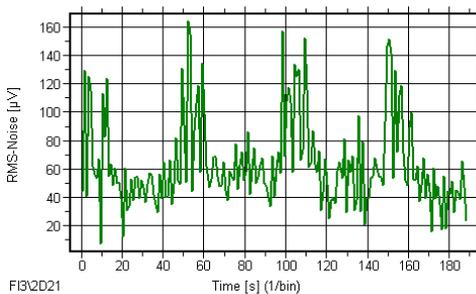
(g) A 信号 RMS(点状图)历程图



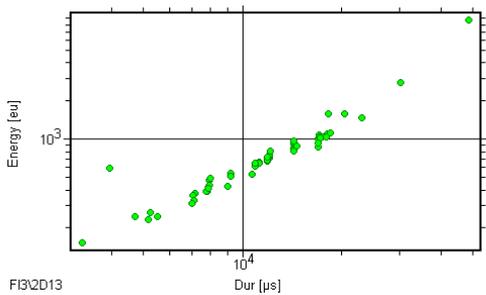
(h) B 信号 RMS(点状图)历程图



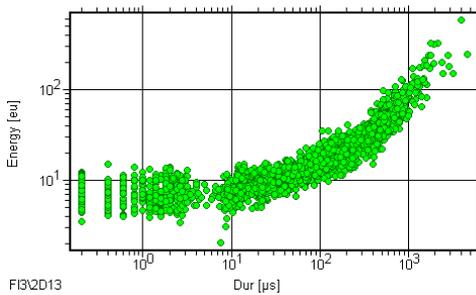
(i) A 信号 RMS(线性图)历程图



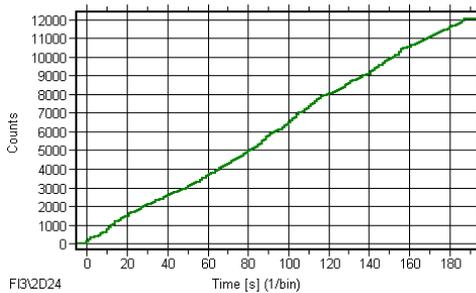
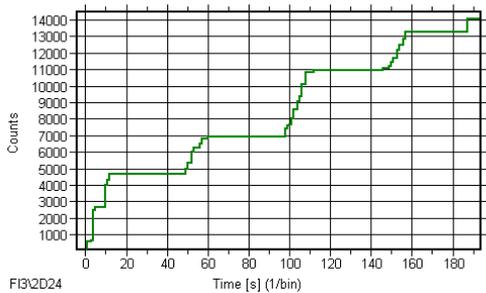
(j) B 信号 RMS(线性图)历程图



(k) A 信号能量与持续时间关联图



(l) B 信号 能量与持续时间关联图



(m) A 信号 振铃计数累积图                      (n) B 信号 振铃计数累积图

图 3-16 第 353 圈 A 信号与 B 信号声发射信号参数图对比

2) 波形频谱方面

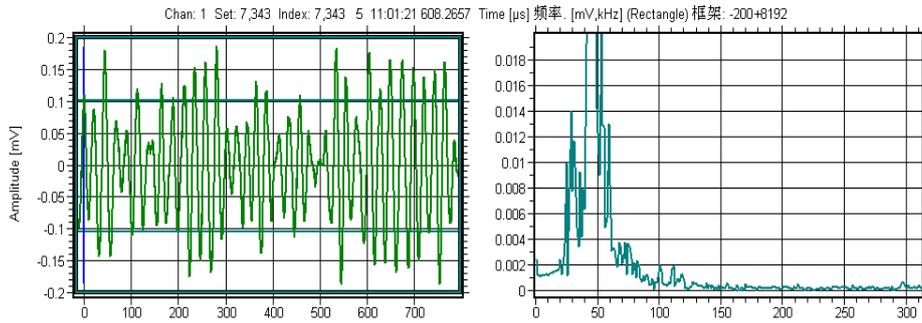
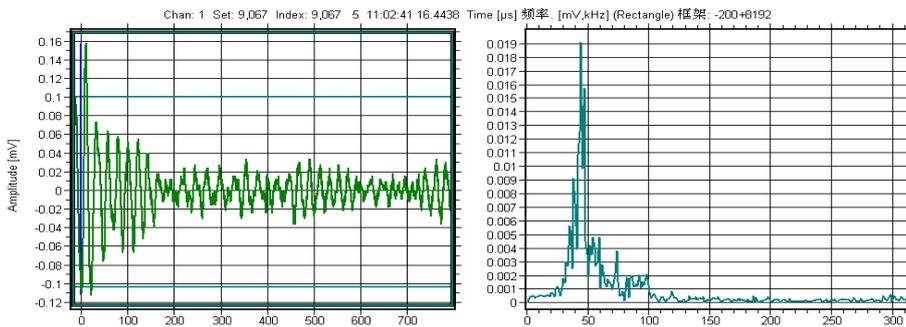
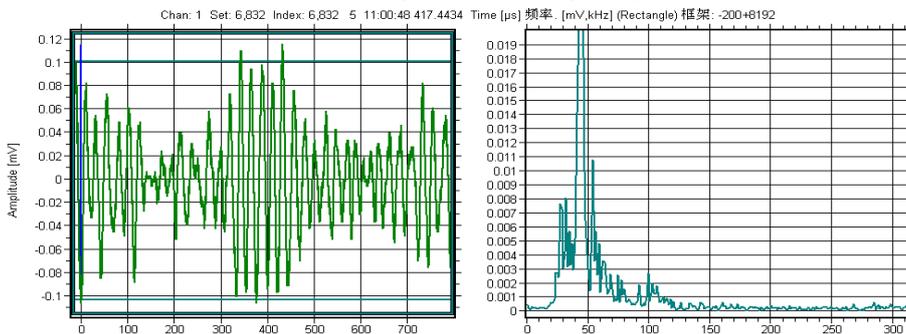


图 3-17 A 信号波形图和频谱图



(a) 以上波形为 B 型主要的信号



(b) 以上信号属于混在 B 型信号中的 A 型峰值信号

图 3-18 B 型信号波形图和频谱图

由图 3-16、图 3-17、图 3-18 可知：

① A 型信号为峰值信号，其能量大，持续时间和上升时间长，振铃计数大。A 型信号没有 B 型信号数量多。

② A 型信号撞击数、幅值、振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数历程图在 0S、50S、100S、150S 处有峰值特征，每个峰值间隔约为 50S。B 型信号只有 RMS 参数历程图具有四个峰值特征，在 0S、50S、100S、150S 处有峰值，每个峰值间隔 50S，其他参数经历图不具有峰值特征，

③ A 型信号撞击数、幅值、振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数总量随时间的变化曲线图变化相同，在峰值处都有一个跳跃增长，每次都是在原来基础上累积增加。B 型信号撞击数、幅值、振铃计数、能量、上升时间、

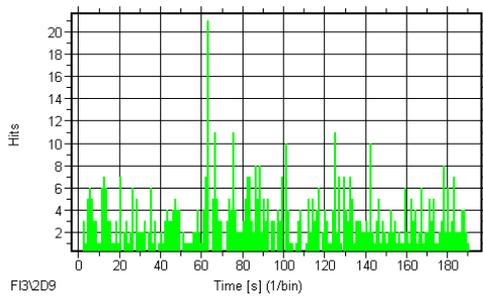
持续时间和 RMS 参数总量随时间的变化曲线图变化相同，在一个循环里呈线性增长。

④ A 型信号时域波形为连续性信号波形，频谱图中有一个峰值，其能量主要集中在 50kHz 附近，主要分布在 20kHz~120kHz 范围内。B 型信号是观览车滚动轴承中一直存在的主要的突发型信号，但含有部分 A 型峰值连续型信号，频谱图中有一个峰值，能量主要集中在 45kHz 附近，主要分布在 20kHz~120kHz 范围内。

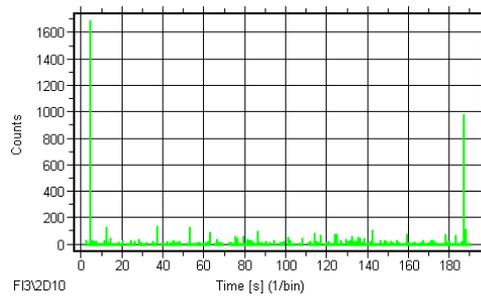
综上所述，第 201~450 圈的滚动轴承声发射信号从第 201 圈开始其声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数经历图变化趋势类似，具有四个峰值特征，每个峰值间隔为 50S。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图更可以明显看出滚动轴承在一个周期里有两种不同的信号。随着圈数的增加，这些特征得到加强更明显。

#### (4) 第 451~625 圈滚动轴承声发射信号特征

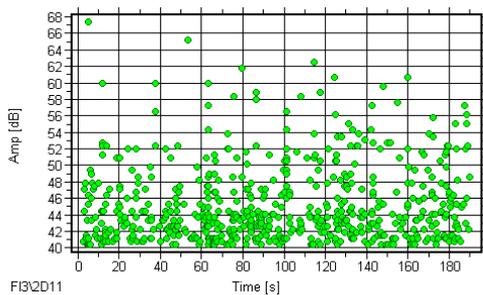
第 451~625 圈内的滚动轴承声发射信号变化趋势类似，故选第 600 圈的 S1 信号对其分析。



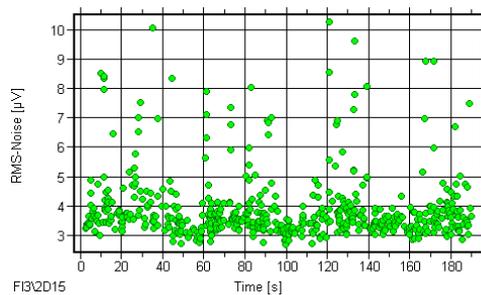
(a) 撞击数历程图



(b) 振铃计数历程图



(c) 幅度历程图



(d) RMS(点状图)历程图

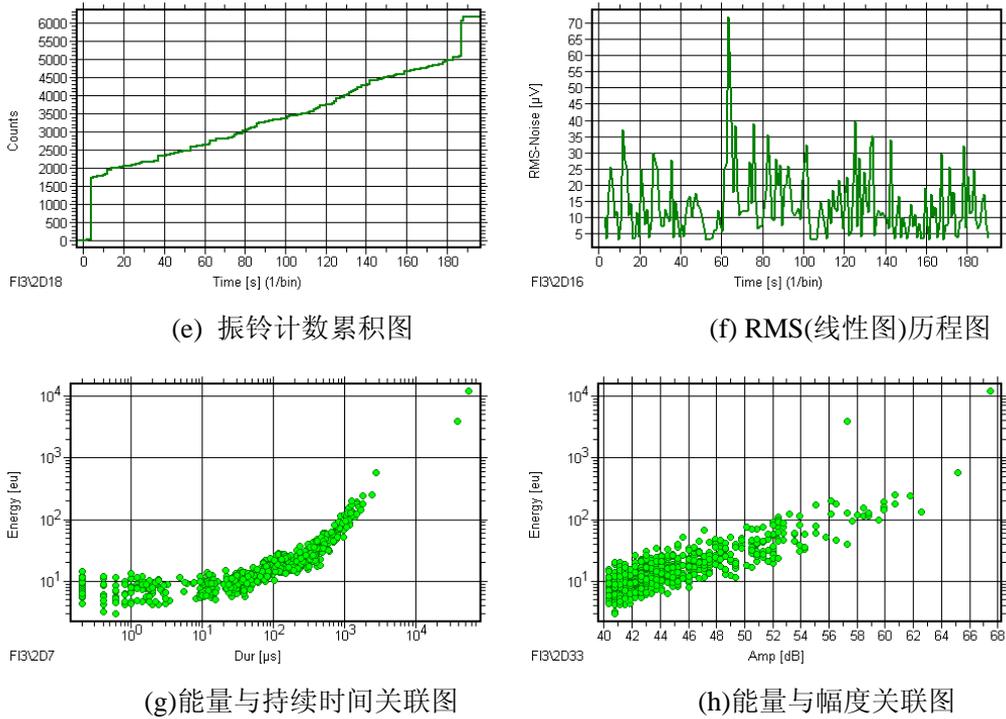


图 3-19 第 600 圈 S1 传感器声发射信号参数图

据图 3-19 可知：

① 声发射振铃计数、能量、上升时间和持续时间参数的经历图变化趋势类似但他们的经历图没有四个峰值特征，RMS 参数经历图在 30S、80S、130S、180S 处有不太明显的峰值，峰值间隔约为 50S，撞击数和幅值的经历图变化趋势类似但没有典型的四个峰值特征。最大幅值为 67.4dB。声发射信号振铃计数的累计曲线图为线性增长趋势在周期 0S 和 188S 位置有突然增加。

② 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有一种信号，A 信号消失，只剩下之前贯穿出现在整个试验过程中的 B 信号，B 信号相对于第 201~450 圈的 B 信号其数量减少了。

③ 第 600 圈的滚动轴承声发射信号主要参数总量见表 3-4 所示。

表 3-4 第 600 圈 S1 传感器声发射信号参数总量

AE 参数	总数	AE 参数	总数
撞击数	607	上升时间( $\mu$ s)	32905.2
振铃计数	6167	持续时间( $\mu$ s)	217461
幅度(dB)	27453.37	RMS( $\mu$ V)	2353.202
能量(nu)	31059.03		

图 3-20 为第 600 圈的滚动轴承声发射信号的典型波形图和频谱图，主要频带在 20~120kHz 范围内，主要集中在 42kHz 附近。

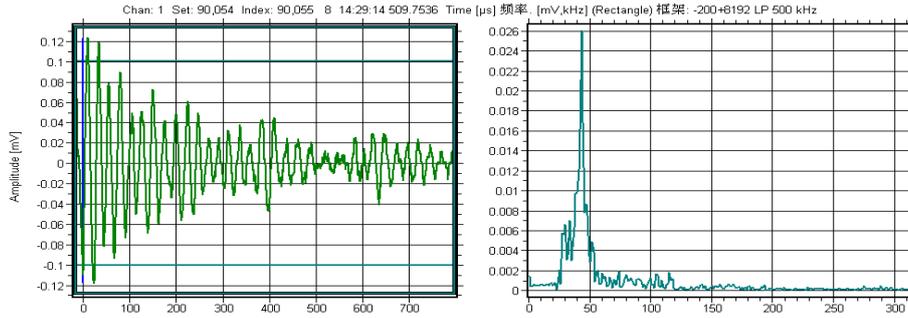
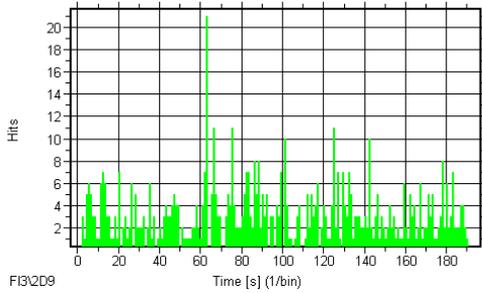


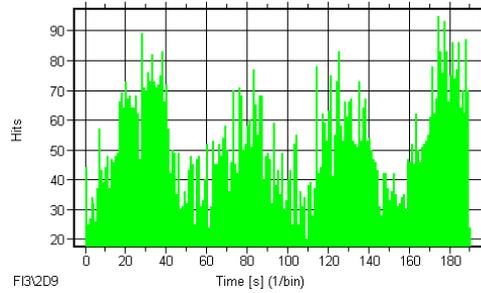
图 3-20 第 600 圈 S1 传感器声发射信号波形图和频谱图

从第 562 圈开始在 S1 附近增加了一个 S3 传感器, S3 为声华公司 SR40M 宽频带传感器, SR40M 型宽频传感器的频率响应范围为 15 kHz~70 kHz, SR40M 型宽频的前置放大器为声华公司的 AEP4 型, 增益为 40dB, 带宽为 2.5 kHz~3 kHz。S3 比 S1 频带更窄, 现对他们采集的信号进行对比分析如下:

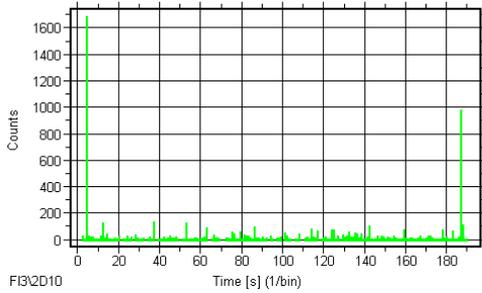
1) 参数方面



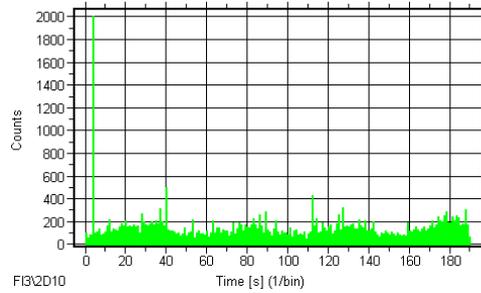
(a) S1 撞击数历程图



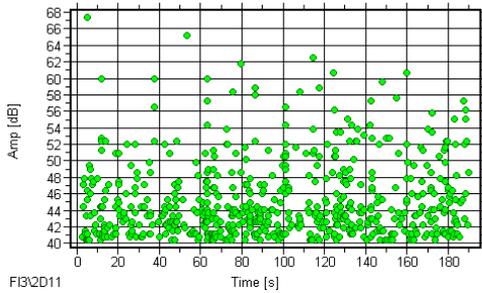
(b) S3 撞击数历程图



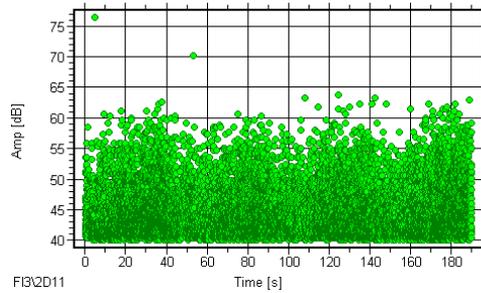
(c) S1 振铃计数历程图



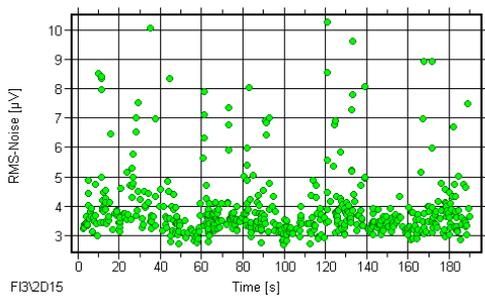
(d) S3 振铃计数历程图



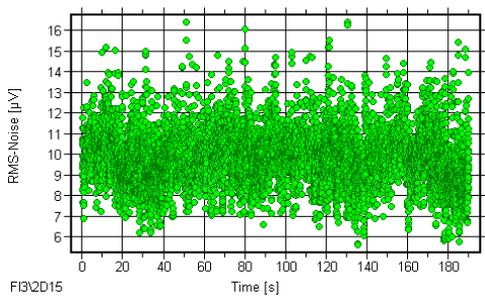
(e) S1 幅度历程图



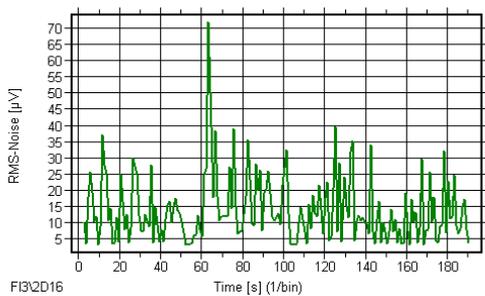
(f) S3 幅度历程图



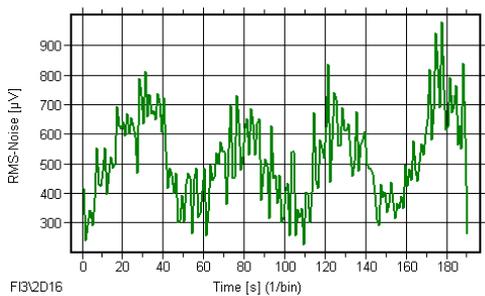
(g) S1 RMS(点状图)历程图



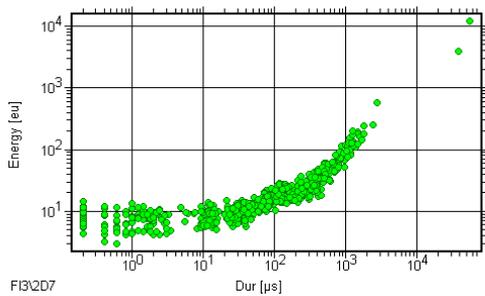
(h) S3 RMS(点状图)历程图



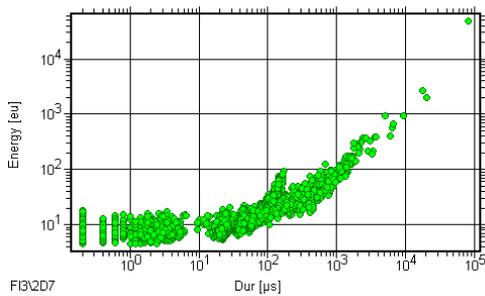
(i) S1 RMS(线性图)历程图



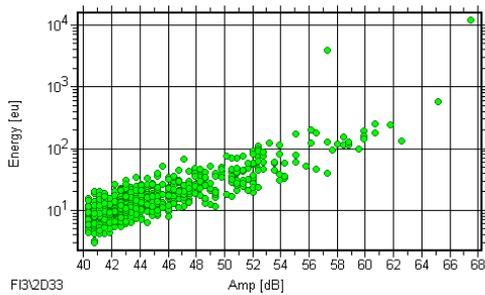
(j) S3 RMS(线性图)历程图



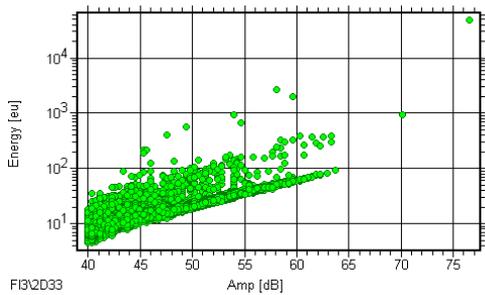
(k) S1 能量与持续时间关联图



(l) S3 能量与持续时间关联图



(m) S1 能量与幅度关联图



(n) S3 能量与幅度关联图

图 3-21 第 600 圈 S1 与 S3 传感器声发射信号参数对比

2) 波形频谱方面

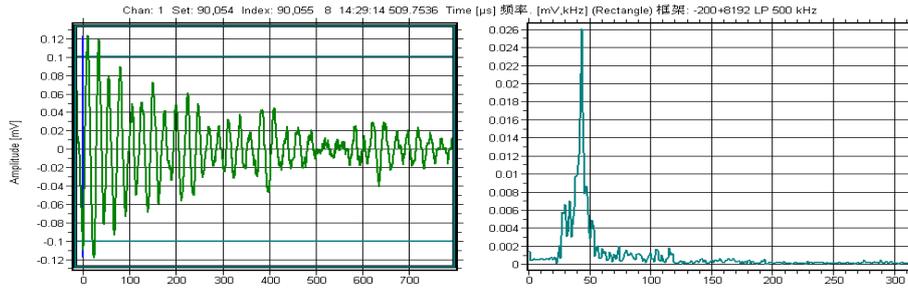


图 3-22 第 600 圈 S1 传感器声发射信号波形图和频谱图

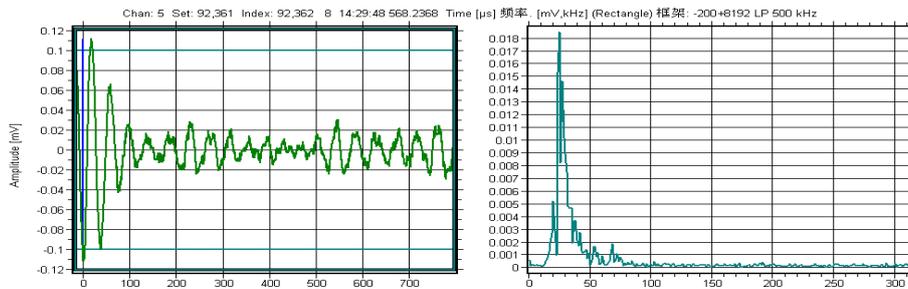


图 3-23 第 600 圈 S3 传感器声发射信号波形图和频谱图

由图 3-21、图 3-22、图 3-23 可知：

① S1 采集的声发射信号撞击数、振铃计数、幅度，RMS（线性图）参数经历图不具有峰值特征，RMS（点状图）有四个不太明显的峰值特征，每个峰值间隔约为 50S。而 S3 采集的声发射信号撞击数、振铃计数、幅度，RMS（线性图）的经历图具有四个峰值特征，其中以撞击数和 RMS（线性图）的经历图四个峰值特征最明显，每个峰值间隔约为 50S。

② 从声发射能量、幅度、持续时间参数的关联图可以看出，S1、S3 都只有一种信号。

③ 从采集的声发射波形图和频谱图可看出，S1、S3 采集的声发射波形图和频谱图不相同，S1 采集的信号分布在 20 kHz~120 kHz，主要集中在 42 kHz 附近，而 S3 采集的信号分布在 15 kHz~70 kHz，主要集中在 25 kHz 附近。

综上所述，从第 590 圈后主要分析 S3 传感器采集滚动轴承信号较好。第 451~625 圈内的滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数的经历图的四个峰值特征随着圈数增加而逐渐减弱到消失，A 信号也随着圈数的增加慢慢减少到消失。

#### （5）第 626~790 圈滚动轴承声发射信号特征

第 626~790 圈内的滚动轴承声发射信号变化趋势类似，故选第 710 圈的 S3 信号对其分析。

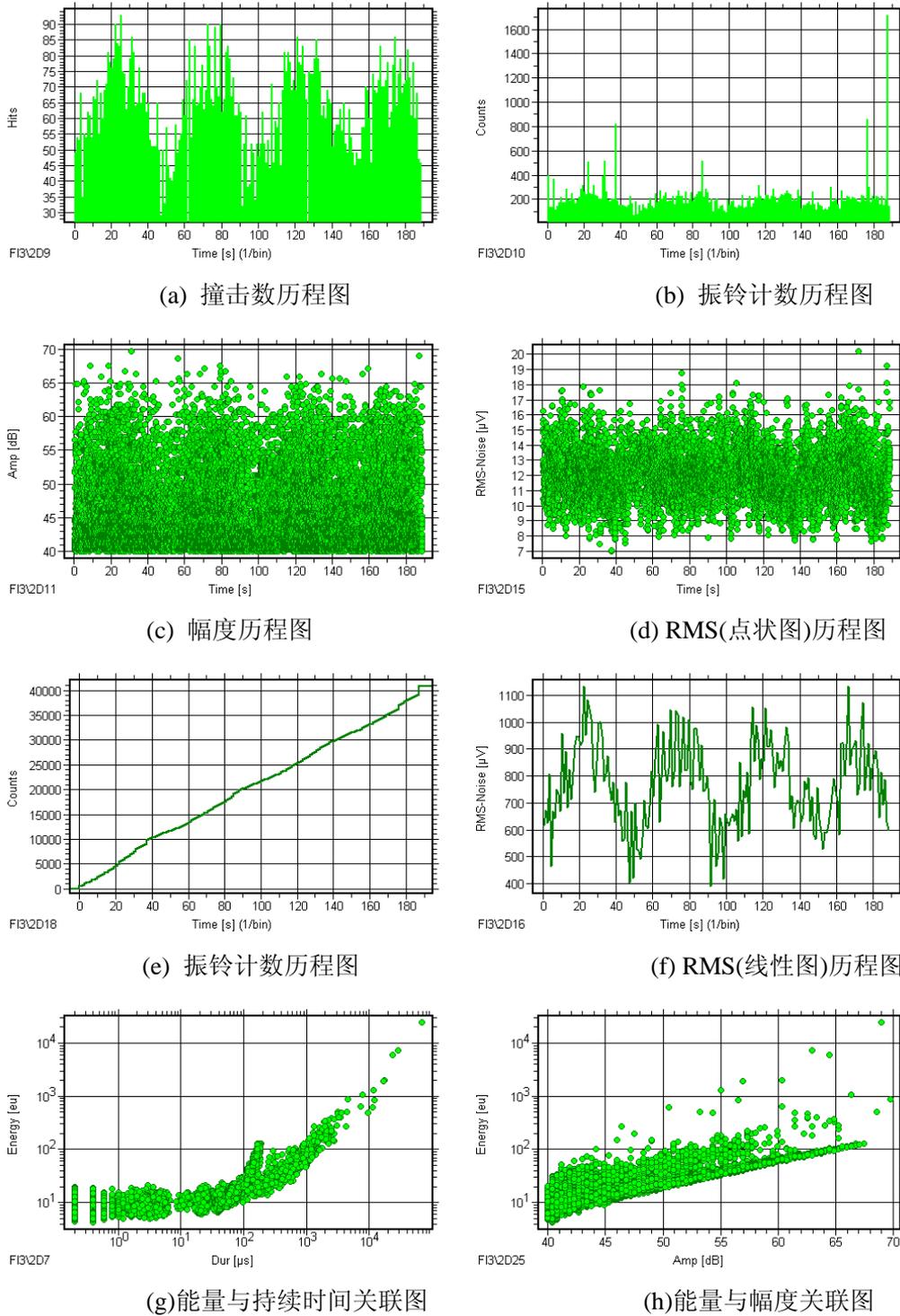


图 3-24 第 710 圈 S3 传感器声发射信号参数图

图 3-24 为第 710 圈 S3 传感器接收的滚动轴承声发射信号参数历程图、关联图和分布图，据图可知：

① 声发射振铃计数、能量、上升时间和持续时间参数的经历图变化趋势类似但他们的经历图没有四个峰值特征，撞击数、RMS（线性图）参数的经历图在 20S、70S、120S、170S 处有明显的峰值，峰值间隔约为 50S。RMS（点状图）、

幅值参数的经历图无典型特征规律,最大幅值为 69.7dB,主要分布在 40~65 dB。声发射信号撞击数的累计曲线图为线性增长趋势。

② 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知,滚动轴承在一个周期里只有一种信号。

③ 第 710 圈的滚动轴承声发射信号主要参数总量见表 3-5 所示。

表 3-5 第 710 圈 S3 传感器声发射信号参数总量

AE 参数	总数	AE 参数	总数
撞击数	12141	上升时间( $\mu$ s)	446447.4
振铃计数	40931	持续时间( $\mu$ s)	1602071
幅度(dB)	573540.3	RMS( $\mu$ V)	145771.3
能量(nu)	337261.5		

④ 图 3-25 为第 710 圈的滚动轴承声发射信号的典型波形图和频谱图,主要频带在 15~90kHz 范围内,主要集中在 25kHz 附近。

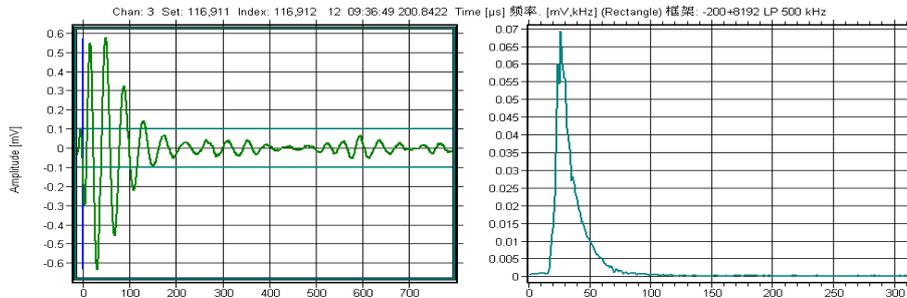
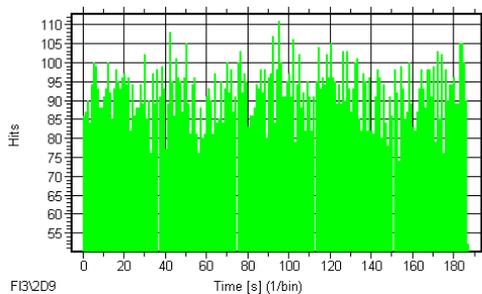


图 3-25 第 710 圈 S3 传感器声发射信号波形图和频谱图

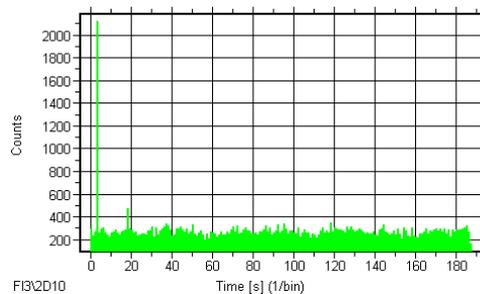
综上所述,第 626~790 圈内的滚动轴承声发射信号撞击数和 RMS(线性图)参数的经历图的四个峰值特征一直存在。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知,滚动轴承在一个周期里只有一种信号。

(6) 第 791~1160 圈滚动轴承声发射信号特征

第 791~1160 圈内的滚动轴承声发射信号变化趋势类似,故选第 1002 圈的 S3 信号对其分析。



(a) 撞击数历程图



(b) 振铃计数历程图

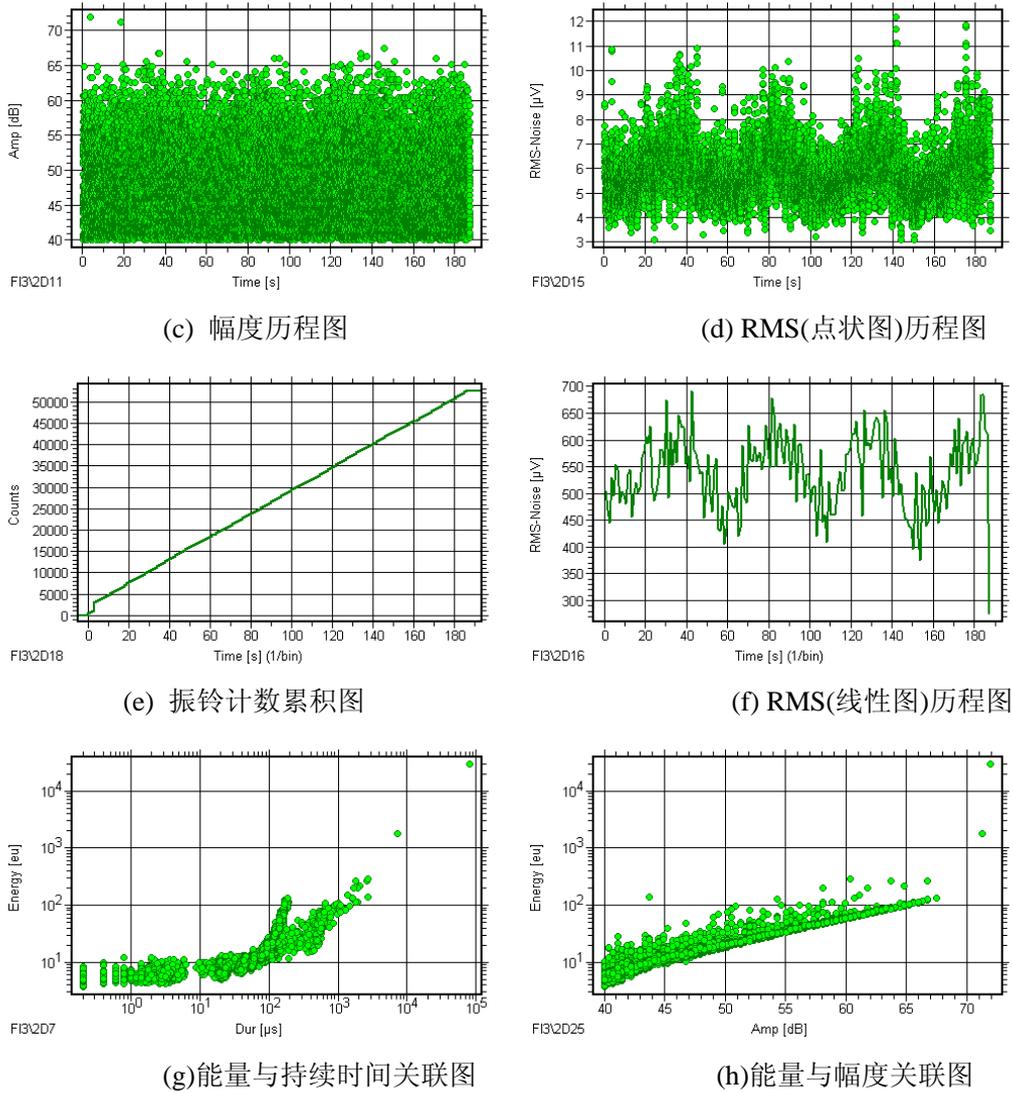


图 3-26 第 1002 圈 S3 传感器声发射信号参数图

据图 3-26 可知：

① 声发射振铃计数、能量、上升时间和持续时间参数的经历图变化趋势类似但他们的经历图没有四个峰值特征，只有 RMS（点状图和线性图）参数的经历图在 30S、80S、130S、180S 处有明显的峰值，峰值间隔约为 50S。撞击数、幅值的经历图无典型特征规律，最大幅值为 72dB，主要分布在 40~65 dB。撞击数的累计曲线图为线性增长趋势。

② 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里只有一种信号。

③ 第 1002 圈的滚动轴承声发射信号主要参数总量见表 3-6 所示。

表 3-6 第 1002 圈 S3 传感器声发射信号参数总量

AE 参数	总数	AE 参数	总数
撞击数	17270	上升时间(μs)	493960.2

振铃计数	52666	持续时间( $\mu$ s)	1680882
幅度(dB)	837392.7	RMS( $\mu$ V)	101213.1
能量(nu)	399594.8		

④ 图 3-27 为第 1002 圈的滚动轴承声发射信号的典型波形图和频谱图，主要频带在 15~90kHz 范围内，主要集中在 25kHz 附近。

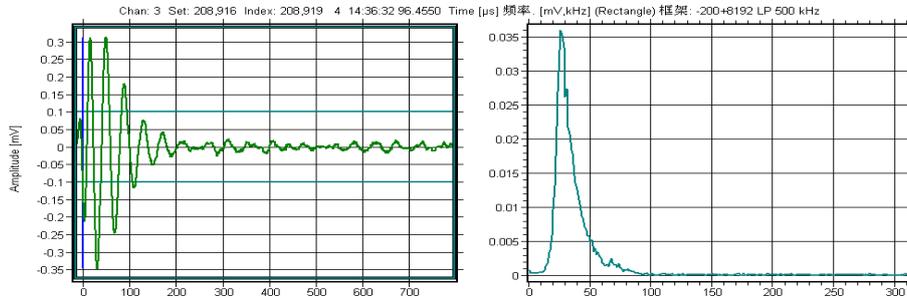


图 3-27 第 710 圈 S3 传感器声发射信号波形图和频谱图

综上所述，第 791~1160 圈内的滚动轴承声发射信号只有 RMS（点状图和线性图）参数的经历图的四个峰值特征一直存在。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里只有一种信号。

#### (7) 滚动轴承声发射信号各阶段比较

观览车模拟实验装置共运行了 1160 圈，根据声发射参数（主要是 RMS 参数）变化特征，整个变化趋势分为五个阶段，现对各阶段比较如下：

① 前 625 圈分析 S1 传感器接受的信号分为三个阶段：前 200 圈内滚动轴承声发射信号参数只有 RMS（点状图）参数历程图具有四个峰值特征，每个峰值间隔约为 50S，峰值特征随着圈数增加明显；存在 A、B 两种不同的信号，A 信号开始很少，随着圈数的增加而增加，B 信号是主要的信号。而第 201~450 圈滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数经历图具有四个峰值特征，每个峰值间隔约为 50S。在一个周期里还有两种不同的信号，随着圈数的增加，这些特征得到加强更明显。第 451~625 圈内滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数的经历图四个峰值特征随着圈数增加而逐渐减弱到消失，A 信号也随着圈数的增加慢慢减少到消失。

② 第 626~1160 圈分析 S3 传感器接受到的信号分为两个阶段：第 626~790 圈内滚动轴承声发射信号只有撞击数和 RMS（线性图）参数的经历图有四个峰值特征，而第 791~1160 圈内滚动轴承声发射信号只有 RMS（点状图和线性图）参数的经历图有四个峰值特征。626~1160 圈滚动轴承在一个周期里只有一种信号。

#### (8) RMS 峰值声发射信号特征

##### 1) VS45-H 型传感器 RMS 峰值声发射信号特征

从 0~625 圈主要是分析 VS45-H 型传感器声发射信号，其声发射 RMS 参数

具有四个峰值特征，现对第二个峰值进行分析，将 RMS 第二个峰值的最大值比上背景 RMS 值，选取第 40、110、203、258、353、492、560、600 圈的 RMS 第二个峰值得到一个比值随圈数的变化曲线如图 3-28 所示。

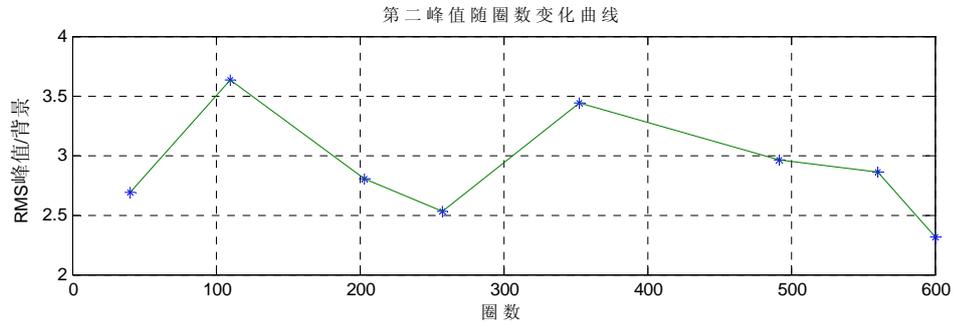


图 3-28 第二峰值随圈数变化曲线图

由图 3-28 可知，第二峰值随圈数变化整体上随着圈数的变化减少，其中第 40 圈增加到 110 圈，第 110 圈的值达到最高点，接着减少到第 258 圈，再从第 258 圈增加到 353 圈，第 353 圈后随着圈数的增加而减少。

#### 2) SR40M 型传感器 RMS 峰值声发射信号特征

从 626~1160 圈主要是分析 SR40M 型传感器声发射信号，同理按照上面的方法选取第 798、853、910、959、1010、1052、1103、1153 圈的 RMS 第二个峰值得到一个比值随圈数的变化曲线如图 3-29 所示。

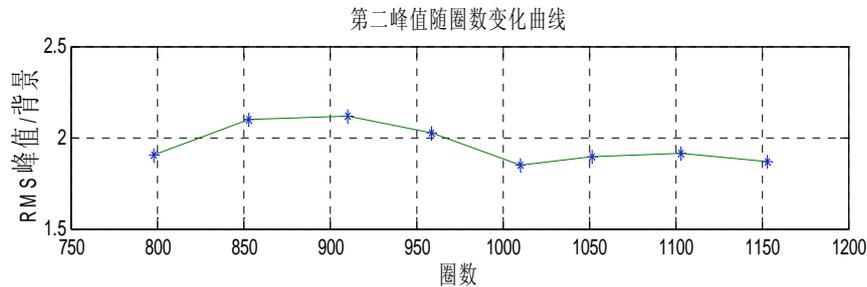


图 3-29 第二峰值随圈数变化曲线图

由图 3-29 可知，第二峰值随圈数变化整体上随着圈数的变化不大，在 2 上下浮动，其中第 798 圈到 1010 圈比值是先增加后减少，从第 1010 圈到 1153 圈比值变化浮动不大，趋于稳定，与实际试验结果相吻合。

### 3.3 本章小结

从观览车模拟试验装置的设计和搭建出发，介绍观览车模拟试验装置的结构组成、性能参数和设计计算说明，得到如下结论：

(1) 大型观览车主轴系统试验模拟装置在实验室能实现主轴系统在变载荷、变转速、设置故障等不同运行工况下的运行情况。

(2) 宽频传感器更适合于采集滚动轴承声发射信号，第 0~625 圈用 VS45-H

型传感器采集信号好, 625 圈后用 SR40M 型传感器较好, 也说明了滚动轴承正常的声发射信号为低频信号。

(3) 实验室里观览车模拟实验装置共运行了 1160 圈, 根据声发射参数的变化特征将整个变化趋势可分为五个阶段:

1) 前 200 圈内滚动轴承声发射信号只有 RMS (点状图) 参数历程图具有四个峰值特征, 每个峰值间隔约为 50S, 且峰值特征随着圈数增加明显。从能量、幅度和持续时间的关联图可看出存在 A、B 两种不同的信号, A 信号开始很少, 随着圈数的增加而增加, B 信号是主要的信号。

2) 第 201~450 圈滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数经历图具有四个峰值特征, 每个峰值间隔约为 50S。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图更可以明显看出滚动轴承在一个周期里有两种不同的信号。随着圈数的增加, 这些特征更明显。

3) 第 451~625 圈内滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 的经历图四个峰值特征随着圈数增加而逐渐减弱到消失, A 信号也随着圈数的增加慢慢减少到消失。从第 590 圈后主要分析 S3 传感器采集滚动轴承信号较好。

4) 第 626~790 圈内的滚动轴承声发射信号只有撞击数和 RMS (线性图) 的经历图有四个峰值特征, 峰值间隔约为 50S。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图看出滚动轴承在一个周期里存在一种信号。

5) 第 791~1160 圈内的滚动轴承声发射信号只有 RMS (点状图和线性图) 参数经历图有四个峰值特征, 峰值间隔约为 50S。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图看出滚动轴承在一个周期里存在一种信号。

(4) 声发射 RMS 参数对滚动轴承信号最敏感, 声发射能量、振铃计数、持续时间和上升时间参数次之, 且这四个参数变化趋势类似; 声发射幅度和撞击数最不敏感。

(5) 在滚动轴承声发射波形频谱方面, VS45-H 型传感器采集的波形频谱集中在 42kHz, 而 SR40M 型传感器主要集中在 25kHz 附近。

(6) 第 0~625 圈的 RMS 第二峰值整体上随着圈数的变化减少, 这与实际的 RMS 峰值变化一致的; 从 626~1160 圈的第二峰值随圈数变化整体上随着圈数的变化不大, 在 2 上下浮动, 1000 圈往后趋于稳定。

## 第4章 大型观览车现场试验研究

### 4.1 实验目的

为了达到大型观览车主轴系统声发射检测现场应用和相应标准的制定的目的，必须首先研究被检观览车主轴系统的声发射特性，观览车主轴系统基本上用滚动轴承结构。因此，本章采用声发射技术对现场正常的观览车主轴系统进行监测，以获取正常的观览车主轴系统的声发射特征。

### 4.2 宜兴市某公园 65 米观览车试验

#### 4.2.1 被检设备基本情况

宜兴市某公园 65 米观览车正常无故障，其整体外观图见图 4-1。观览车性能参数表见表 4-1。

表 4-1 观览车性能参数表

制造单位	上海西渡内河工程船舶修造厂		产品类别及级别	观览车类 (A 级)	
使用单位	宜兴市某公园有限公司		安装日期	2004 年 11 月	
座舱数量	36 个	驱动功率	22kW	旋转直径	56m
乘座人数	216 人	设备高度	65m	圆周速度	13.5m/min



图 4-1 宜兴市某公园观览车外观



图 4-2 检测仪器和现场

#### 4.2.2 检测仪器

本次试验采用目前世界上最先进的德国 Vallen 公司数字式 12 通道 AMSY-6 系列声发射系统，该系统附件主要包括传感器、计算机、电缆等。检测仪器见图

4-2 所示。传感器选用德国 Vallen 公司的 VS150-RIC 型高灵敏度传感器，频带范围为 100~450kHz，内置放大器，增益为 34dB。

### 4.2.3 传感器布置

本次试验采用了 VS45-H 型宽频和 VS150-RIC 型谐振型的两种声发射传感器，其中 S1, S3, S4, S5 为 VS150-RIC, S2 为 VS45-H，在观览车主轴系统的前后两边布置传感器，第一天传感器布置外观如图 4-3 所示，第二天没用 VS45-H 探头，把 S3 替换 S2, S6 替换 S4。传感器布置后采用仪器自标定功能，进行传感器灵敏度标定。图 4-4 为传感器灵敏度自标定及衰减表，由图 4-4 可知主轴不能定位。

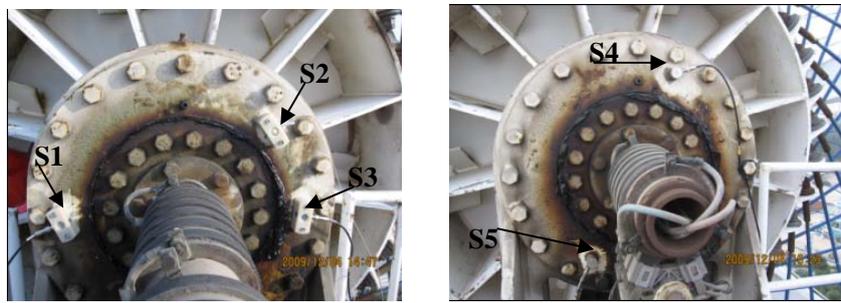


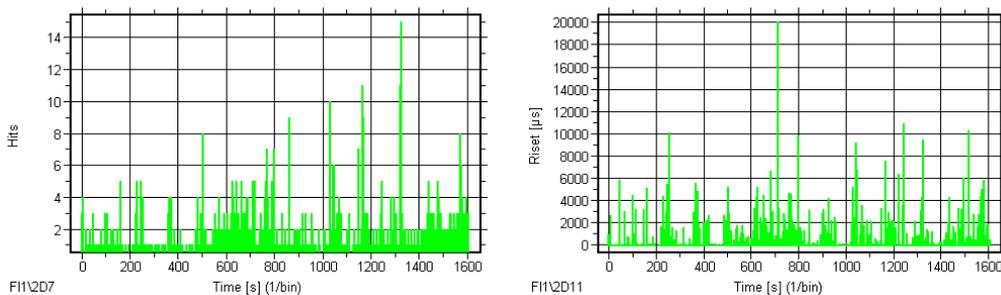
图 4-3 现场传感器布置外观图

	1	2	3	4	5
1	76	88	87		
2	82	82	99		
3	81	95	83		
4				80	76
5				79	82

图 4-4 传感器灵敏度自标定及衰减表

### 4.2.4 试验结果与分析

本次试验主要分析第二天的数据，图 4-5 为观览车主轴在两个周期里的谐振式传感器 S2 声发射信号参数图。



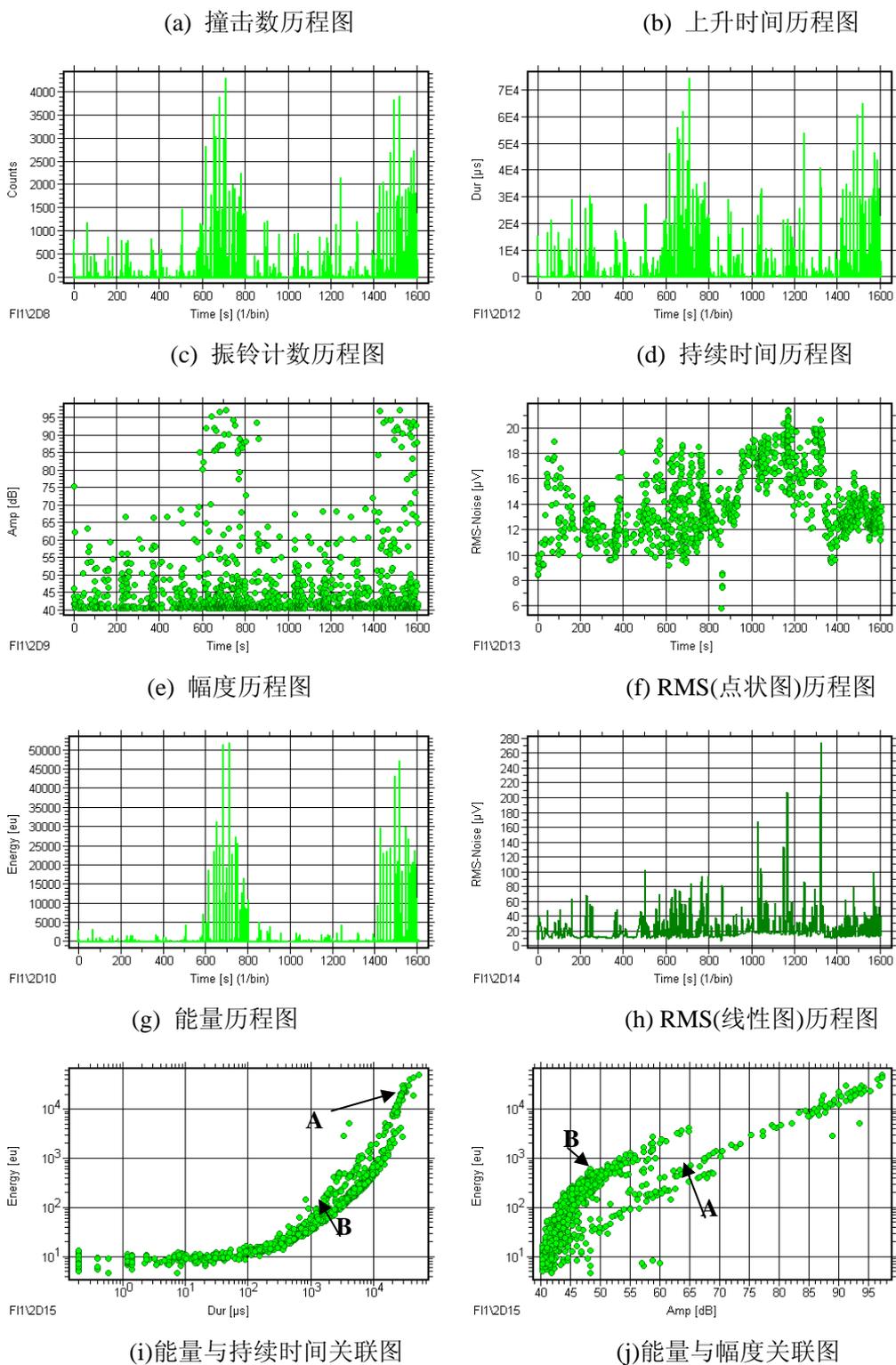
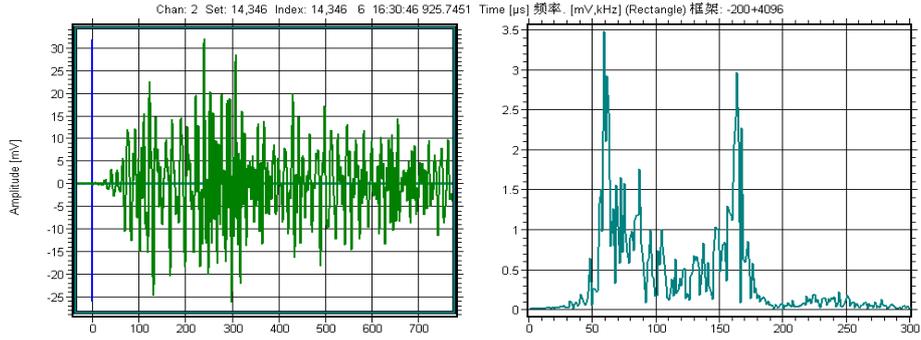
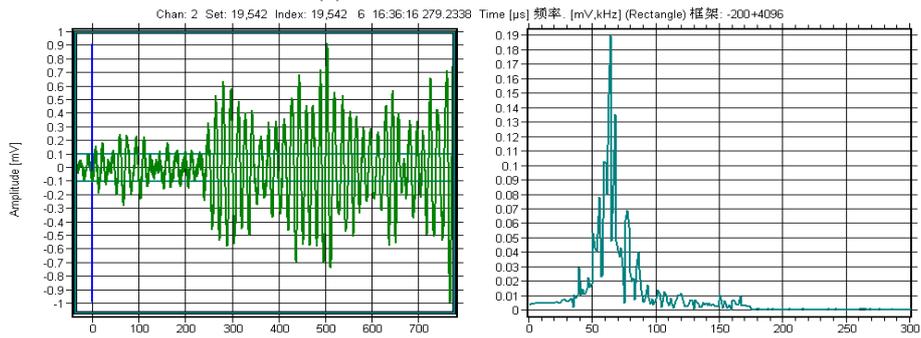


图 4-5 S2 传感器两个周期声发射信号参数图

图 4-6 为 S2 声发射信号波形图和频谱图。



(a)A 信号波形图和频谱图



(b)B 信号波形图和频谱图

图 4-6 S2 声发射信号波形图和频谱图

由图 4-5、4-6 可得知：

(1) 声发射能量、振铃计数、持续时间和幅度历程图在一个周期中有一较大的峰值，其中能量率历程图最明显。其他撞击数、上升时间和 RMS 的经历图在周期结束处没有峰值特征。

(2) 从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有 A、B 两种不同的信号：一种主要出现在峰值附近的 A 信号，其频率主要分布在 40~200 kHz，此类信号在 60 kHz、160kHz 处附近有明显最大峰值；第二种信号主要频率分别在 40~150 kHz，且在 65kHz 处附近有明显最大峰值。

### 4.3 北京某游乐园 54.9 米观览车试验

#### 4.3.1 被检设备基本情况

观览车性能参数表见表 4-2

表 4-2 观览车性能参数表

制造单位	日本泉阳机工株式会社		产品类别及级别	观览车类 (A 级)	
使用单位	北京某游乐园		安装日期	1986 年 10 月	
座舱数量	36 个	驱动功率	38kW	旋转直径	50.3m

乘坐人数	216 人	设备高度	54.9m	圆周速度	13m/min
------	-------	------	-------	------	---------

北京某游乐园 54.9 米观览车在运行过程中其主轴系统存在异常声响, 本试验对观览车主轴中的异常声响进行声发射在线检测, 监测其运行过程中异常声响产生的声发射现象, 获取异常声响的声发射参数、定位和波形特征。在第一次检测后 6 个月时, 对主轴结构进行第二次检测, 并根据两个检验周期的声发射检测结果, 初步确定了异常声响的位置及其信号的参数、定位和波形特征, 其整体外观图见图 4-7。



图 4-7 北京某公园观览车外观



图 4-8 检测仪器和现场图

### 4.3.2 检测仪器

本次试验采用目前世界上最先进的德国 Vallen 公司数字式 12 通道 AMSY-6 系列声发射系统, 该系统附件主要包括传感器、计算机、电缆等, 检测仪器如图 4-8 所示。传感器选用德国 Vallen 公司的 VS150-RIC 型高灵敏度传感器, 频带范围为 100~450kHz, 内置放大器, 增益为 34dB。

### 4.3.3 传感器布置

该观览车主轴直径 430mm, 其两侧盖板间距约 4000mm, 主轴通过轴套焊接在两侧盖板上。因此, 在主轴两侧盖板上布置了 7 个传感器 (S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7), 图 4-9 为传感器布置示意图 (图中, 括号内符号表示传感器布置于主轴另外一侧盖板上), 其中传感器 S2~S7 为 VS150-RIC 型, 用于声发射源的定位; 传感器 S1 为 VS45-H 型, 位于 S2 附近, 用于获取定位信号的全波形数据。通过该传感器布置方案, 可以进行线性定位、柱面定位两种不同的定位组合。耦合剂选用真空脂, 并采用磁夹具来固定传感器。试验中, 各通道的采样频率为 4MHz, 检测门槛为 45dB。

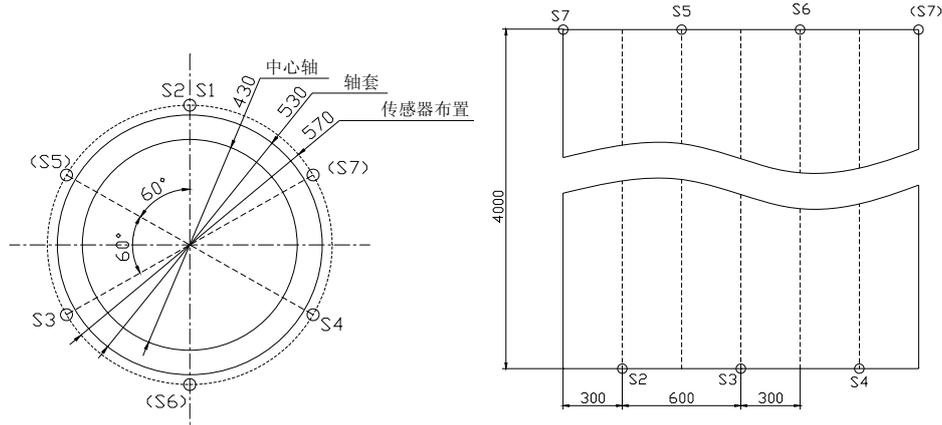


图 4-9 主轴结构的传感器布置示意图 (mm)

传感器布置后采用仪器自标定功能，进行传感器灵敏度标定。图 4-10 为其灵敏度自标定及衰减表。测试传感器平均灵敏度为 96 dB。

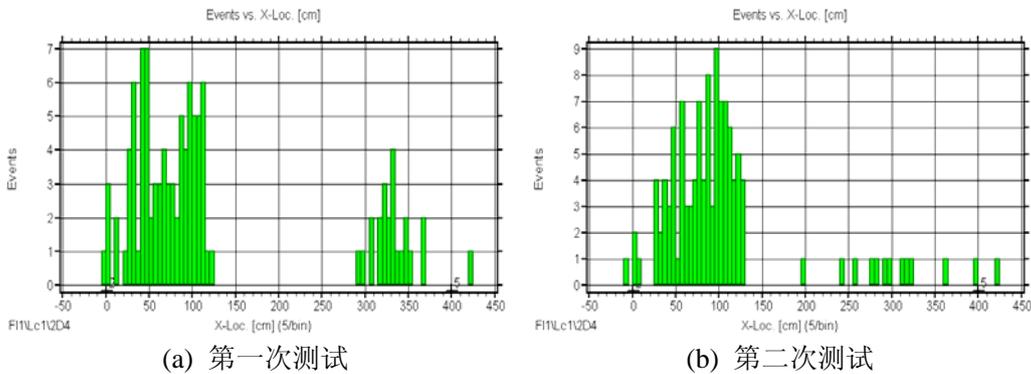
C1: 21 3:04:06							
	1	2	3	4	5	6	7
1	96	100	88	75	64	61	60
2	100	96	88	83	66	64	62
3	89	88	96	87	70	69	68
4	76	84	86	96	65	64	61
5	65	67	70	65	96	80	79
6	65	65	69	65	81	96	76
7	61	62	66	60	78	73	96

图 4-10 传感器灵敏度标定及衰减表

### 4.3.4 试验结果与分析

#### 1) 定位特征

观览车每运行一个循环中，均有异常“响声”出现，本次试验记录了观览车正转、反转运行一周的声发射现象。测试过程中，各通道持续有大量的声发射信号出现，声发射信号的幅度高，持续时间长，并且有声发射定位事件出现，图 4-11、图 4-12 是主轴结构分别采用声发射线性定位、柱面定位方式的定位结果图。



(a) 第一次测试

(b) 第二次测试

图 4-11 线性定位图

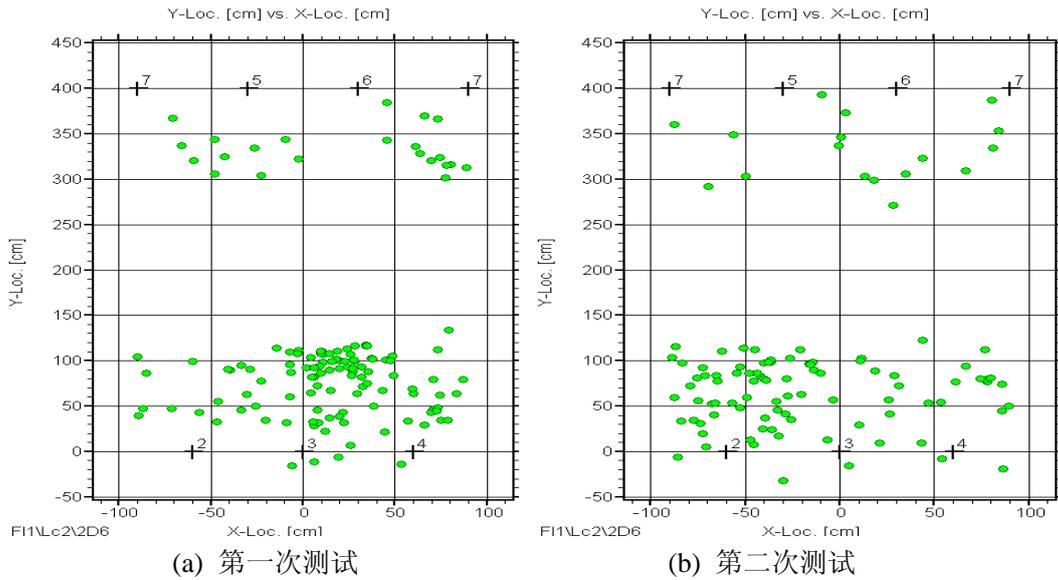


图 4-12 柱面定位图

由图 4-11、图 4-12 可以看出：

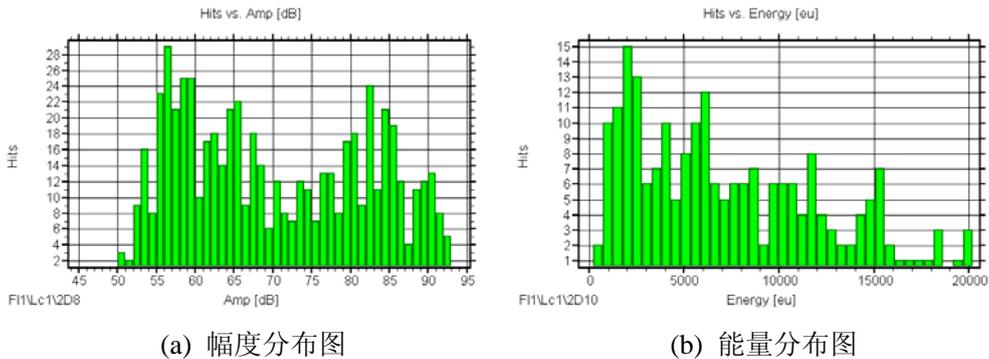
(1) 在线性定位图中，定位事件主要集中在主轴的两侧，距离 2 号传感器 0~1.2m 、3~3.5m 两个区域范围内，其中 0~1.2m 区域内定位事件数量较多，在主轴中间位置几乎没有定位事件发生。

(2) 在柱面定位图中，与线性定位结果相同，定位事件主要分布在主轴的两侧，而在中间部位 1.2~3m 区域内几乎无定位事件产生。

(3) 比较两次声发射检测的定位结果，两者在线形定位和柱面定位图中声发射定位事件的集中区域基本上是一致的；两次检测中的声发射定位事件总数基本相当，没有大的增加或减少，其中第二次检测中在 3~3.5m 区间内的声发射定位事件数量比第一次检测的减少了。

2) 定位信号的特征参数

根据声发射定位结果，分析声发射定位信号的特征参数分布。图 4-13 为声发射定位信号（2#传感器）的幅度、能量、振铃计数、持续时间、上升时间、有效值电压等参数的分布图，表 4-3 为主要参数的分布范围。由图 4-13 及表 4-3 可知，异常响声声发射定位信号的幅度高，能量大，持续时间长，振铃计数多。



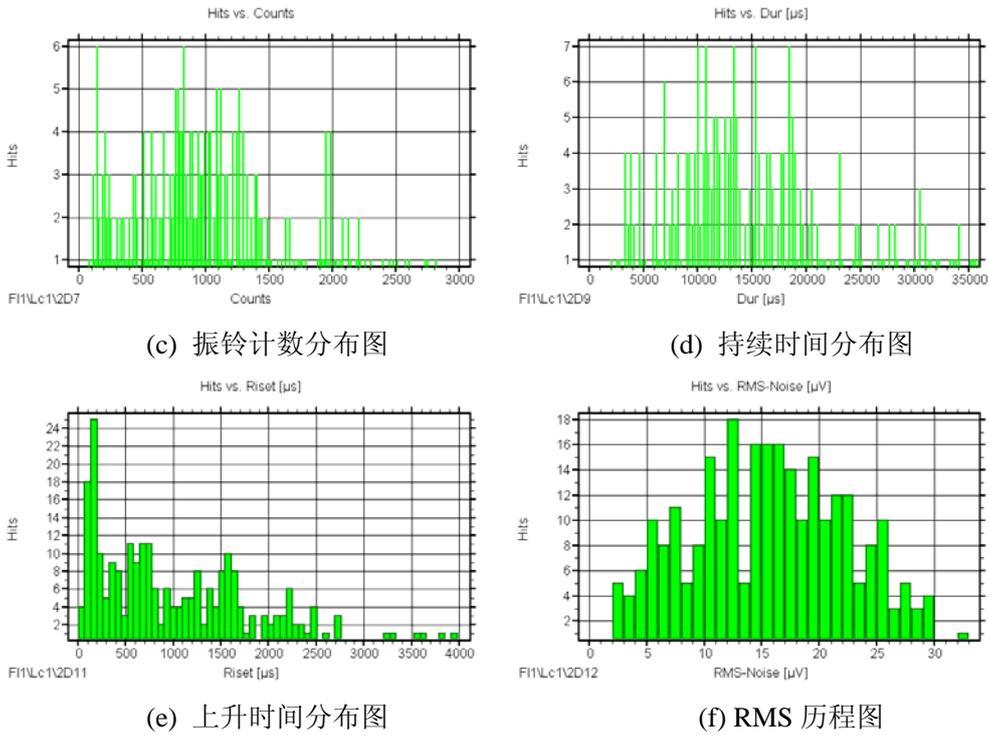


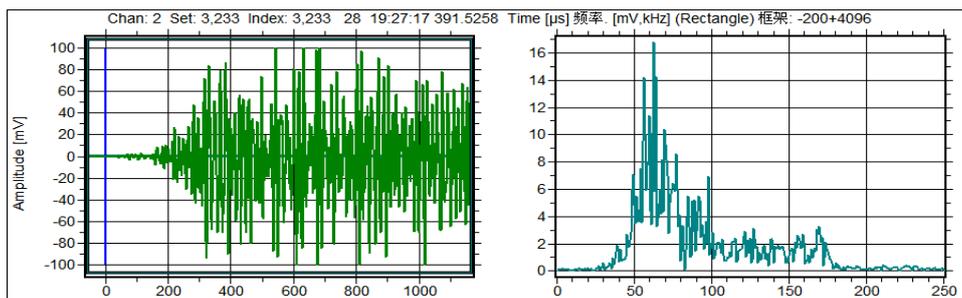
图 4-13 定位信号参数分布图

表 4-3 定位信号的主要参数分布范围

AE 参数	主要范围	AE 参数	主要范围
幅度(dB)	53~92	持续时间(μ s)	$4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$
能量(eu)	500~16000	上升时间(μ s)	20~1600
振铃计数	180~1300	RMS(μ V)	5~33

### 3) 定位信号的波形特征

图 4-14 给出了异常“响声”声发射定位信号的典型波形及频谱图，是同一声发射信号分别由 VS150-RIC 型和 VS45-H 型传感器接收到的波形数据。由图 4-14 可知，由 VS150-RIC 型传感器获得的声发射定位信号波形及频谱图可以看出，定位信号能量大，频率范围分布在 30-180kHz，在 50~100kHz 内富集；由 VS45-H 型获取的信号频谱特征可以看出，定位信号能量大，频率范围分布在 20-120kHz，在 30~50kHz 内富集。对于同一个声发射信号，由于两种传感器频带范围的差异，造成频率富集范围的不同，同时也说明该声发射源信号的特征频率主要处于低频区域（50kHz 以下）。



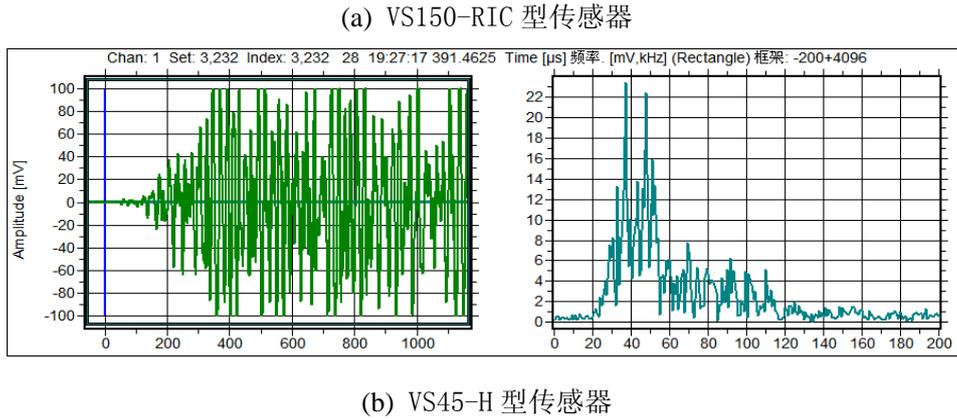


图 4-14 定位声发射信号波形图和频谱图

根据观览车主轴结构的声发射检测结果可以得到以下结论：

(1) 大型观览车主轴中的异常响声可通过声发射检测技术进行定位，定位方式可选用线性定位和柱面定位。

(2) 该观览车主轴中异常声发射信号为低频信号，其声发射信号幅度高，能量大，持续时间长。

(3) 声发射检测技术可以作为大型观览车主轴运行状态监控与安全评价的一种有效手段。

#### 4.4 本章小结

本章通过观览车模拟实验装置实验室试验和现场试验，得到结论如下：

(1) 宜兴某公园观览车主轴声发射能量、振铃计数、持续时间和幅度参数历程图在一个周期中有一较大的峰值，其中能量率历程图最明显。其他撞击数、上升时间和 RMS 的经历图在周期结束处没有峰值特征。从声发射的能量、持续时间、幅度三个参数的关联图可知，滚动轴承在一个周期里有 A、B 两种不同的信号：一种主要出现在峰值附近的 A 信号，其频率主要分布在 40~200 kHz，此类信号在 60 kHz、160kHz 处附近有明显最大峰值；第二种信号主要频率分布在 40~150 kHz，且在 65kHz 处附近有明显最大峰值。

(2) 北京某公园大型观览车主轴中的异常响声可通过声发射检测技术进行定位，定位方式可选用线性定位和柱面定位。该观览车主轴中异常声发射信号为低频信号，其声发射信号幅度高，能量大，持续时间长。

(3) 声发射检测技术可以作为大型观览车主轴运行状态监控与安全评价的一种有效手段。

## 第 5 章 结论与展望

### 5.1 结论

针对大型观览车主轴系统目前国内外还没有一种有效的在线检测方法,以及声发射技术在大型观览车主轴系统检测中的应用与相应标准目前空白,故本文以大型观览车主轴系统作为研究对象,通过观览车模拟实验装置实验和观览车现场试验,得到观览车主轴系统在正常情况下的声发射信号特征规律,综合本文的研究内容和成果,得到以下结论:

(1) 按照滚动轴承故障产生机理的不同,可以分为疲劳、磨损、腐蚀、胶合、压痕以及断裂等。磨损和疲劳是滚动轴承两种常见的故障形式,所有这些滚动轴承故障的产生和发展过程中,都会伴随着声发射现象的产生。故障的位置一般是在外圈、内圈、滚动体及保持架。

(2) 大型观览车主轴系统试验模拟装置在实验室能实现主轴系统在变载荷、变转速、设置故障等不同运行工况下的运行情况。

(3) 实验室里观览车模拟实验装置共运行了 1160 圈,根据声发射参数的变化特征将整个变化趋势可分为五个阶段:

1) 前 200 圈内滚动轴承声发射只有 RMS (点状图) 参数历程图具有四个峰值特征,每个峰值间隔为 50S,且峰值特征随着圈数增加明显。其他参数的历程图无明显特征规律。滚动轴承一个周期里存在 A、B 两种不同的信号,A 信号开始很少,随着圈数的增加而增加,B 信号是主要的信号。

2) 第 201~450 圈的滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数的经历图具有四个峰值特征,每个峰值间隔为 50S。滚动轴承在一个周期里有两种不同的信号,随着圈数的增加,这些特征更明显。

3) 第 451~625 圈内的滚动轴承声发射信号振铃计数、能量、上升时间、持续时间和 RMS 参数的经历图四个峰值特征随着圈数增加而逐渐减弱到消失,A 信号也随着圈数的增加慢慢减少到消失。

4) 第 626~790 圈内的滚动轴承声发射信号只有撞击数和 RMS (线性图) 参数的经历图有四个峰值特征,滚动轴承在一个周期里存在一种信号。

5) 第 791~1160 圈内的滚动轴承声发射信号只有 RMS (点状图和线性图) 参数的经历图有四个峰值特征,滚动轴承在一个周期里存在一种信号。

(4) 声发射 RMS 参数对滚动轴承信号最敏感,声发射能量、振铃计数、持续时间和上升时间参数次之,且这四个参数变化趋势类似;声发射幅度和撞击

数最不敏感。

(5) 宜兴某公园观览车主轴声发射能量、振铃计数、持续时间和幅度历程图在周期结束处有一较大的峰值,其中能量率历程图最明显。其他撞击数、上升时间和 RMS 的经历图在周期结束处没有峰值特征。北京某公园大型观览车主轴中的异常响声可通过声发射检测技术进行定位,定位方式可选用线性定位和柱面定位。该观览车主轴中异常声发射信号为低频信号,其声发射信号幅度高,能量大,持续时间长。

(6) 声发射检测技术可以作为大型观览车主轴运行状态监控与安全评价的一种有效手段。宽频传感器更适合于采集滚动轴承声发射信号,也说明了滚动轴承正常的声发射信号为低频信号。

## 5.2 展望

由于时间和本人能力的限制,加上本文所做的研究只是声发射技术在大型观览车主轴系统检测应用研究的第一步,故本文仍有许多方面的工作需要进一步改进和完善,主要有:

(1) 检测中有的现象不能用现有的声发射理论可以解释,很难确定所测得的声发射信号是何种声发射源产生的,因此,需要进一步加强声发射机理研究,为声发射检测应用提供理论支持。

(2) 由于滚动轴承型号的多样性,本文所获取的大型观览车主轴系统在正常情况下典型的声发射信号特征规律是否通用所有的大型观览车主轴系统,以及需要获取大型观览车主轴系统有缺陷情况下的声发射信号特征规律,都需要进一步做大量的试验工作,从而为将来更好地将声发射技术应用到大型观览车主轴系统检测及相应的标准制定奠定基础。

## 参考文献

- [1] 沈勇.游乐设施作业与管理[M].北京:学苑出版社, 2003:1-3.
- [2] 林伟明.游乐设施技术检验[M].北京:中国特种设备检测研究院游乐设施事业部,2009:1-8.
- [3] 钟秉林,黄仁.机械故障诊断学[M].北京:机械工业出版社, 2007.
- [4] 朱海容.基于虚拟样机技术的游乐设施安全分析方法探讨[J].中国安全科学学报,2004,第14卷(3期):12-15.
- [5] 沈功田.金属压力容器的声发射特性及识别方法的研究[D].清华大学工学博士论文,1998.
- [6] 吴占稳.起重机的声发射源特性及识别方法研究[D].清华大学工学博士论文,2008.
- [7] 沈庆根, 郑水英.设备故障诊断[M].北京:化学工业出版社, 2006.
- [8] 梅宏斌.滚动轴承振动监测与诊断学[M].北京:机械工业出版社, 2005.
- [9] 李国华,张永忠.机械故障诊断[M],北京:化学工业出版社,2001:127.
- [10] 梅宏斌.滚动轴承振动监测与诊断理论.方法.系统[M].北京:机械工业出版社,1995:2.
- [11] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M].北京:冶金工业出版社,1996.
- [12] A. N. Laktyushin, O.O. Smilovenko, and T.V. Laktyushina. Dynamics of a rotor in film Lubrication bearings [J].Journal of Engineering physics and Thermophysics, 2003, 76(5): 1131-1138.
- [13] Oh-Yang Kwon and Dong-Jin Yoon. Monitoring of lubrication quality in a simulated journal. Bearing system by acoustic emission[C]. The Asian-Pacific Conference on NDT, Shanghai, China, Sept:745~754.
- [14] 张艾萍,孙伟,叶荣学. 汽轮发电机组轴承运行状态声发射监测研究[J]. 汽轮机技术,1998,40(1):29-32.
- [15] 秦萍,阎兵,宋仁勇. 滑动轴承接触摩擦故障的状态监测[J].中国机械工程,2002,13(8):689-691.
- [16] 秦萍. 动载荷滑动轴承故障诊断的研究[D]. 西安:2004.
- [17] 刘凌厉,任宏,谭达明,闫兵.柴油机滑动轴承故障的声发射诊断[J].叉车技术, 2003,1:19-21.
- [18] 李录平,邹新元,饶洪德等人. 滑动轴承的声发射信号特征与轴承状态的关系试验研究[J]. 汽轮机技术,2009.51(5): 369-371.
- [19] 王晓伟,刘占生,张广辉等人. 基于声发射的可倾瓦径向滑动轴承碰磨故障诊断[J].中国电机工程学报,2009,29(8):64-68.
- [20] 黄琪,余波,李录平等人. 基于声发射检测的滑动轴承状态诊断实验研究[J].电站系统工程,2008,24(2):15-16.
- [21] Tandon N, Nakra B C. Defect detection of rolling element bearings by acoustic emission method[J]. Journal of acoustic emission.1990, 9(1):25-28.
- [22] Choudhury A, Tandon N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings [J].Tribology international.2000, 33:39-45.
- [23] Rogers L M. The application of vibration analysis and acoustic emission source location to online condition monitoring of antifriction bearings [J]. Tribology international, 1979, 12(2):

- 51-59.
- [24] Tan, C C. Application of acoustic emission to the detection of bearing failures. International tribology conference, reliability and maintainability through lubrication and wear technology, Australia. 1990, 12: 110~114.
- [25] M. Elforjani, D. Mba. Natural mechanical degradation measurements in slow speed bearings [J]. Engineering Failure Analysis 16 (2009) 521 - 532.
- [26] Li C J, Li S Y. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring [J]. Wear, 1985, 185: 67-74.
- [27] Kaewkongka T, Y. H. Jau. Application of acoustic emission to condition monitoring of rolling element bearings. Measurement and Control, 2001, 34: 245-247.
- [28] D. Mba, R.H. Bannister and G.E. Finadlay, Condition Monitoring of Low-Speed Rotating Machinery using Stress Waves. Proc Instn Mech Engrs, 1999, 213(part E): 153-185.
- [29] N. Jamaludin, D. Mba. Monitoring Extremely Slow Rolling Element Bearings: part I. NDT&E, International, 2002, 35: 349-358.
- [30] D. Mba and Raj B. K. N. Rao. Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines, and Rotating Structures. The Shock and Vibration Digest. 2006, 38(1): 3-16.
- [31] N. Jamaludin, Dr. D. Mba, Dr. R. H. Bannister. Condition Monitoring of Slow-speed Rolling Element Bearings using Stress Waves. Journal of Process Mechanical Engineering, I Mech E. Pro. Inst. Mech Eng., 2001, 215(E): 245-271.
- [32] Catlin J B. Jr. The use of ultrasonic diagnostic technique to detect rolling element bearing defects. Proceedings of the machinery and vibration monitoring and analysis meeting [J]. Vibration institute, IL. 1983, 4: 123-130.
- [33] 李圣怡, C. James, Li. 声发射分析用于轴承状态监测的研究 [J]. 国防科技大学学报, 1991, 13(3): 56-61.
- [34] Morhain A, Mba. D. Bearing defect diagnosis and acoustic emission [J]. Proc. Instn meeh engrs, Part J: Journal of engineering Tribology, 2003, 217: 257-272.
- [35] Hawman M. W, Galinaitis W.S. Acoustic emission monitoring of rolling element bearings [J]. Ultrasonics symposium, 1988: 885-889.
- [36] Barclay. J, Bannach. R. Multiparaeter Condition monitoring [J]. Noise and Vibration Worldw-ide, 1922, 3: 17-20.
- [37] Tavakoli, Massouds. Bearing fault detection in the acoustic emission frequency range [J]. Proceedings of the 11th National conference on noise control engineering, Tarrytown, NY, United States, 1991: 79-86.
- [38] Schoess. J. N. Development and application of stress-wave acoustic diagnostics for roller bearings. Proceedings of the SPIE. 2000, 3986: 58~70.
- [39] Al-Ghamdi, A.M, Mba, D.A Comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. Mechanical systems and signal processing. 2006, 20(7): 1537~1571.
- [40] N.Tandon, G.S.Yadava, K.M.Ramakrishna. A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. Mechanical systems

- and signal processing,2007, 21(1):244~256.
- [41] Abdullah M. Al-Ghamda, David Mba. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1537 - 1571.
- [42] 黄涛,张辉. AE 技术对滚动轴承故障诊断的研究[J]. *石油华工高等学校学报*.1996,9(1):49-52.
- [43] 理华,徐春广,肖定国等. 滚动轴承声发射检测技术[J].*轴承*,2002(7):24-26.
- [44] 理华,徐春广,郑军等. 小波包原理在滚动轴承声发射检测技术中的应用[J].*机械*,2002,29(4):11-12.
- [45] 姜城君,李孟源,杨黎明. 采用声发射技术对货车轮对轴承故障进行诊断[J].*铁道车辆*,2004, 42(1):20-21.
- [46] 陈春朝,李孟源,王恒迪等. 铁路货车轴承的声发射故障诊断及分析. *轴承*,2006(1):36-38.
- [47] 赵转哲,李孟源. 铁路货车轴承故障声发射信号的小波分析处理[J].*轴承*,2005,3:30-31.
- [48] 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):583-586.
- [49] 郝如江. 声发射和形态学方法在滚动轴承故障诊断中的应用[D].*清华大学工学博士学位论文*,2008.
- [50] ISO 22096:2007 (E) 《机器状态监测与诊断—声发射》[S].
- [51] 盛兆顺,尹琦岭. *设备状态监测与故障诊断技术及应用*[M].北京:化学工业出版社,2003, 6:224-250.
- [52] M.W. Hawman, W.S. Galinaitis. Acoustic emission monitoring of rolling element bearings. *Ultrasonics symposium*, 1988:885~889.
- [53] N. Tandon, A. Choudhury. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 1999, 32:469~480.
- [54] D. Mba, Raj B. K. N. Rao. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines: bearings, pumps, gearboxes, engines, and rotating structures. *The shock and vibration digest*,2006,38(1):3~16.
- [55] Balerston, H.L. The detection of incipient failure in bearings. *Materials evaluation*.1969, 27:121~128.
- [56] Catlin, J. B.Jr.The use of ultrasonic diagnostic technique to detect rolling element bearing defects. *Proceedings of the machinery and vibration monitoring and analysis meeting*, *Vibration institute, IL*.1983.4:123~130.
- [57] Juha Miettinen, Peter Andersson. Acoustic emission of rolling bearings lubricated with contaminated grease. *Tribology international*, 2000(33):777~787.
- [58] J Miettinen, P Andersson, V Wikstrom. Analysis of grease lubrication of a ball bearing using acoustic emission measurement, *Proc instn mech engrs Part J* 2001(215):535~545.

## 攻读硕士学位期间发表的论文和参加科研情况

### 一、攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 袁俊, 沈功田, 吴占稳, 卢超. 轴承故障诊断中的声发射技术[J]. 无损检测, 2011. 33(4):5-10.
- [2] 吴占稳, 沈功田, 袁俊, 王勇. 声发射技术在大型观览车主轴检测中的应用研究[J]. 无损检测, 2011. 33(5):39-42.
- [3] Zhanwen Wu, Gongtian Shen, Jun Yuan. Investigation of Acoustic Emission Signal Characteristics of Main Spindle on Giant Wheel[J], PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XV-The Japanese Society for NDI, 2010:175-180.

### 二、参加科研情况说明

- [1] 参与国家“十二五”科技支撑计划资助项目课题《基于风险的机电类特种设备事故预防关键技术研究》（课题编号：2011BAK06B05）和国家质检总局科技计划项目课题《大型观览车主轴声学检测探索研究》（课题编号：2009QK016）

## 致 谢

感谢导师沈功田教授和卢超教授在整个硕士论文期间给予的悉心指导、亲切关怀和无私帮助。导师严谨细致的治学态度，深厚的学术功底，丰富的实践知识和敏锐的思维方法，都使我受益匪浅。在导师的指导下，我学到了许多理论知识和专业技能，培养了踏实严谨的科研态度。值此论文完成之际，特向我尊敬的两位导师致以崇高的敬意和由衷的感谢！

在课题研究期间，非常感谢吴占稳博士在理论和实验方面所给予的指导和帮助，尤其在实验方法、数据收集与分析及论文写作上给予了我很大的帮助。小到传感器布置，试验的具体实施方案确定，大到课题总体把握和论文撰写，无不凝聚着吴博士的心血和智慧。本文的研究课题由中国特种设备研究院提供，在此，向吴博士以及中国特种设备检测研究院的各位领导和工作人员表示由衷的感谢！

在攻读硕士期间，中国特检院游乐设施部的全体同事给予了热心关怀和指导。在此，向中国特检院游乐设施部的领导和同事表示由衷的感谢！同时，对我的同窗好友王星星、王丹、王乃波、王丙阳、杨胜、金翠娥、夏美玲、门平等同学所给予的关心和帮助表示由衷的感谢！

在攻读硕士期间，我的父母及亲人给予我很大支持和鼓励，使我能顺利的完成学业。在此，我要特别向他们表达我深深的谢意！

最后，向热心评审本论文和参加答辩的老师致以诚挚的谢意！感谢所有给予我关心和帮助的老师、同学和同事！

## 南昌航空大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文，是我个人在导师指导下，在南昌航空大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确地说明并表示了谢意。本声明的法律结果将完全由本人承担。

签名：\_\_\_\_\_日期：\_\_\_\_\_

## 南昌航空大学硕士学位论文使用授权书

本论文的研究成果归南昌航空大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解南昌航空大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌航空大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内  
容。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

签名：\_\_\_\_\_导师签名：\_\_\_\_\_日期：\_\_\_\_\_