编号_____

# 南京航空航天大学

# 毕业设计

题　目　基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验及诊断研究


| | |
|---|---|
| 学生姓名 | 姜卡澜 |
| 学　　号 | 070830214 |
| 学　　院 | 民航学院 |
| 专　　业 | 民航机务工程 |
| 班　　级 | 0708302 |
| 指导教师 | 陈果　教授 |


二〇一二年六月

# 南京航空航天大学

# 本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）（题目：_____）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽本人所知，除了毕业设计（论文）中特别加以标注引用的内容外，本毕业设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。

作者签名：　　年　月　日

（学号）：

# 基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验及诊断研究

## 摘要

滚动轴承在旋转机械中应用极为广泛，其运行状态往往直接影响到整台机器的精度、可靠性及寿命。由于滚动轴承的寿命离散性很大，无法进行定时维修，因此，对滚动轴承实施状态监测与故障诊断具有重要意义。本文基于压气机转子试验器，采用基于经验模式分解的包络解调方法，研究了滚动轴承的故障诊断，主要工作如下：

（1）基于压气机转子试验器，进行了滚动轴承故障的模拟实验。首先采用电火花线切割技术在滚动轴承上加工了内圈故障、外圈故障和滚动体故障；然后对压气机进行了拆解，分别用加工有内圈故障、外圈故障和滚动体故障的轴承代替原来的正常轴承；最后通过安装在轴承座上和机匣上的传感器分别获取了轴承在各种故障下的振动信号。

（2）研究了基于经验模式分解的包络解调方法。首先研究了传统包络解调方法的原理；然后通过仿真实验研究了经验模式分解的原理；最后研究了基于经验模式分解的包络解调方法，分析了该包络解调方法较传统包络解调方法的优势。

（3）在上述工作的基础上，采用基于经验模式分解的包络解调方法进行了压气机试验器的滚动轴承故障诊断研究。分别基于轴承座加速度信号和机匣加速度信号，采用基于经验模式分解的包络解调方法，对内圈故障、外圈故障和滚动体故障进行了诊断研究。结果表明，根据本征模函数的包络谱，可以准确地诊断出压气机转子试验器滚动轴承的内圈故障和外圈故障，但难以诊断出滚动体的故障。因此，对于滚动体故障有必要进一步研究其它诊断方法。

**关键词**：故障诊断，滚动轴承，压气机，经验模式分解，包络解调

# The studies in diagnosing of fault simulation experiment of rolling bearing based on the compressor rotor tester


## Abstract

Rolling bearing is one of the most widely used key components in rotating machinery. Its working state will influence the accuracy，reliability and duration of the whole machine .As the service life of rolling bearing dispersed greatly，it is unable to carry out timing repair. Therefore，it is of importance to study fault diagnosis technical for it .In this paper，based on the compressor rotor tester. The envelope demodulation method which based on the EMD was used to study the fault diagnosis of the rolling bearing.

1.Based on the compressor rotor tester ，we did a fault simulation experiment of rolling bearing. First， the micro wire electrical discharge machining was used to process the three fault patterns(failures of inner ring，outer ring and rolling element )on the rolling bearings. Then disassembled the compressor ,using the fault bearings instead of the normal bearing .Finally ， using the sensors installed on the bearing housing and the casing to obtain the vibration signals of bearings under various faults.

2. The envelope demodulation method which based on the EMD was studied. First of all, we studied the principle of the traditional envelope demodulation method. Then we studied the principle of EMD by doing simulation experiment. At last we studied the envelope demodulation method which based on the EMD, and analysised its advantages and disadvantages.

3.On the basis of the works above，we did the rolling bearing fault diagnosis of the compressor tester by using the envelope demodulation method which based on the EMD. And we using the envelope demodulation method which based on the EMD in the inner ring fault ，the outer ring fault and rolling element fault diagnosis based on the acceleration signals of the bearing housings and the casing. The results show that the envelope spectrum of intrinsic mode functions can

diagnose the faults of inner ring and outer ring ， but it is difficult to diagnose the failure of rolling element. Therefore，a new method that can diagnose the failure of rolling element was needed.

Key words: Fault diagnosis; Rolling bearing; Compressor; Empirical Mode Decomposition; Envelope demodulation

# 目录

摘要 ..... i
Abstract ..... ii
第一章 绪论 ..... 1
1.1 研究意义 ..... 1
1.2 滚动轴承故障诊断的方法 ..... 1
1.3 滚动轴承振动监测与诊断技术发展概况 ..... 3
1.4 本文内容安排 ..... 4
第二章 基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验 ..... 6
2.1 压气机转子试验器 ..... 6
2.1.1 压气机试验器总体结构 ..... 7
2.1.2 压气机转子结构 ..... 8
2.1.3 压气机静子结构 ..... 8
2.2 基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验 ..... 8
2.2.1 B&K 压电式 4508 加速度传感器 ..... 8
2.2.2 实验过程 ..... 9
第三章 基于经验模式分解的滚动轴承故障包络解调诊断方法 ..... 13
3.1 引言 ..... 13
3.2 传统包络解调诊断方法 ..... 13
3.2.1 滚动轴承的振动机理 ..... 13
3.2.2 滚动轴承故障特征频率计算 ..... 15
3.2.3 滚动轴承故障的包络解调诊断方法 ..... 17
3.3 经验模式分解 ..... 19
3.3.1 基本原理 ..... 19
3.3.2 仿真研究 ..... 22
3.4 基于经验模式分解的包络解调诊断方法 ..... 23
第四章 压气机转子试验器的滚动轴承故障诊断实例 ..... 24

4.1 内圈故障诊断 ..... 24
4.1.1 基于轴承座加速度信号的诊断 ..... 24
4.1.2 基于机匣加速度信号的诊断 ..... 26
4.2 外圈故障诊断 ..... 28
4.2.1 基于轴承座加速度信号的诊断 ..... 28
4.2.2 基于机匣加速度信号的诊断 ..... 31
4.3 滚动体故障诊断 ..... 33
4.3.1 基于轴承座加速度信号的诊断 ..... 33
4.3.2 基于机匣加速度信号的诊断 ..... 36
第五章 总结 ..... 39
参 考 文 献 ..... 40
致 谢 ..... 41

# 第一章 绪论

## 1.1 研究意义

滚动轴承是各种旋转机械中应用最广泛的一种通用机械部件，它的运行状态是否正常往往直接影响到整台机器的性能（包括精度、可靠性及寿命等）。与别的机械零部件相比，滚动轴承有一个很大的特点，这就是其寿命离散性很大，即用同样的材料，同样的加工工艺，同样的生产设备，同样的工人加工出一批轴承，其寿命相差很大。由于轴承的这个特点，在实际使用中就出现这样一种情况，即有的轴承已大大超过设计寿命而依然完好地工作，而有的轴承远未达到设计寿命就出现各种故障。所以，如果按照设计寿命对轴承进行定时维修，则势必出现以下情形：一方面，对超过设计寿命而完好工作的轴承拆下来作为报废处理，造成浪费；另一方面，未达到设计寿命而出现故障的轴承或者坚持到定时维修时拆下来报废，使得机械在轴承出现故障后和拆下前这段时间内工作精度下降，或者未到维修时间就出现严重故障，导致整个机械出现严重事故。由此看来，对重要用途的轴承来说定时维修是很不科学的，要进行工况监视与故障诊断，改传统的定时维修（TBM：Time Based Maintenance）为视情维修（CBM：Condition Based Maintenance）或预知维修（PRM：Predictive Maintenance），这不但可以防止机械工作精度下降，减少或杜绝事故发生，而且可以最大限度地发挥轴承的工作潜力，节约开支，具有重要意义。因此，滚动轴承的工况监视与故障诊断引起了国内外许多科技人员的重视。

## 1.2 滚动轴承故障诊断的方法

滚动轴承在运转的过程中，通常都伴随有振动和噪声现象发生，同时还可能伴有温度升高，表面材料剥落等现象。滚动轴承的状态故障诊断就是通过对滚动轴承在各种工况下表现出来的振动、噪声、温度、工作参数、气味、泄露等信息的综合分析来对其工作状态、故障类型和故障严重程度进行综合评价的过程，主要包括检测技术、信号处理技术、识别技术和预测技术四项基本技术，从而实现检测和发现异常、诊断故障状态和部位、分析故障类型、提出诊断方案和诊断结论的目的。故障诊断技术是一门集数学、力学、摩擦学、测控技术、计算机技术、信号处理技术、模式识别技术、人工智能技术、决策科学、信息学等众多科学技术于一体的现代工程新学科，受到越来越多的重视和关注[3]~[8]。而根据分析信号性质的

不同，滚动轴承的监测和诊断技术大体又分为温度分析法、油样分析法和振动分析法。

温度分析法是通过测量轴承座或箱体处的温度来判别其工作状态是否正常的方法。温度分析法操作简单，对轴承的载荷、转速和润滑状况变化较为敏感，尤其是对润滑不良而引起的轴承过热和烧伤现象很敏感。但是，当轴承出现早期点蚀与剥落、轻微磨损等故障时，温度监测基本上是失去效用。只有当轴承故障累积到一定的损伤程度后，温度监测法才能够有效地监测到。所以，温度分析法具有很大的应用局限性。

油样分析法是通过从滚动轴承所使用的润滑油中提取油样，收集和分析其中金属颗粒的大小和形状来判断轴承工作状态的方法。其代表性的分析方法就是铁谱诊断技术油样分析法。具有操作简单、效果好的特点，可做轴承磨损机理性的研究，能够发现早期的疲劳损伤。但是，油样分析法的缺陷同样也是明显的，显然，油样分析法只适用于油润滑的轴承，对于脂润滑轴承检验则很困难。另外，这种方法还易受到来自其它零部件损伤脱落颗粒的干扰，严重影响了其分析结果的准确性[21]。

振动分析法是通过安装在轴承座和箱体上的振动传感器来监测轴承的振动信号，并对其进行分析和处理的方法。滚动轴承故障诊断的方法很多，从振动信号中提取反映轴承状态的特征信息进行故障识别是最常用的方法，也是最有效的方法之一。这是由于滚动轴承在运转时会受到各种载荷而引起振动，从而对机组的寿命、可靠性产生影响；振动是最重要的信息来源，是机械设备运行状态信息的载体，它蕴涵了丰富的机械设备异常或故障信息，振动特征是机械设备运行状态特征的本质反映，并且振动分析法适合于各种类型各种工况的轴承，可有效诊断出轴承的早期故障，信号测试方便，分析简单直观，诊断结果可信度高。因此，在工业生产和科学研究中，振动分析法得到了极为广泛的重视。目前，国内外开发生产的各种滚动轴承监测诊断仪器和系统中绝大多数都是根据振动原理研制的，有关轴承监测和诊断方面的文献 80%以上也都是讨论振动分析法[9]~[15]。

此外，还有一些其他的诊断方法，如油膜电阻诊断法、光纤诊断法和声发射诊断法等。它们适用的局限性较大，只能针对特殊工况条件下的滚动轴承进行有效地监测和诊断。

## 1.3 滚动轴承振动监测与诊断技术发展概况

滚动轴承的故障诊断大概开始于 20 世纪 60 年代。最原始的轴承故障诊断方法是将听音棒接触轴承部位[1]。通过听觉来判断有无故障，后来逐步发展为使用各种测振仪器仪表测量其位移来判断有无故障。而这些技术在几十年里也不断的提高着。总的来说，可以将滚动轴

承的故障诊断技术分为四个发展阶段。

第一阶段：利用通用的频谱分析仪诊断轴承故障。20 世纪 60 年代中期，由于快速傅立叶变换(FFT)技术的出现和发展，振动信号的频谱分析得到了很大的发展。人们根据对滚动轴承元件有损伤时产生的振动信号特征频率的计算和采用频谱分析仪实际分析得到的结果进行比较来判断滚动轴承是否有故障。

第二阶段：利用冲击脉冲技术诊断轴承故障。在 60 年代末期，首先由瑞典 SPM 仪器公司开发出冲击脉冲计，根据冲击脉冲的最大幅值来诊断轴承故障，将滚动轴承的故障诊断水平提高了一个档次。这种方法能比较有效地检测到轴承的早期损伤类故障。

第三阶段：利用共振解调技术诊断轴承故障。1974 年，美国波音公司的 D.R.Harting 发明了一项叫做“共振解调分析系统”的专利[1]。共振解调技术与冲击脉冲技术相比，对轴承早期损伤类故障更有效。共振解调技术不但能诊断出轴承是否有故障，而且可以判断出故障发生在哪个轴承元件上以及故障发生的大致严重程度。

第四阶段：开发以微机为中心的滚动轴承监视与故障诊断系统。20 世纪 90 年代以来，随着微机技术迅猛发展，开发以微机为中心的滚动轴承故障诊断系统引起了国内外研究者的重视。微机信号分析和故障诊断系统不但具有灵活性高，适应性强，易于维护和升级的特点，而且易于推广和应用。随着信号检测技术、计算机技术、数字信号处理技术、人工智能技术的迅速发展，轴承故障诊断已经成为融合数学、物理、力学等自然科学以及计算机技术、数字信号处理技术、人工智能技术的综合学科[2]。模糊理论、灰色系统理论、小波变换、神经网络、专家系统等在机械设备故障诊断中越来越多的应用，为滚动轴承故障诊断提供了新的方法。

## 1.4 本文内容安排

目前，包络解调法在滚动轴承故障诊断中得到了普遍认可，但是，该方法中的窄带滤波参数(如中心频率、带宽等)的选择对分析结果的影响很大，要求选择者具有丰富的专业知识和大量的经验积累，这为包络解调方法的工程推广增加了难度。经验模式分解是一种自适应的信号分解方法，其本质上相当于一个自适应的滤波器，利用经验模式分解的该特点，在滚动轴承故障的包络解调诊断中，可以首先利用经验模式分解对原始振动信号进行分解，得到一系列本征模函数，然后对高频的本征模函数进行包络解调，从而实现对滚动轴承的故障诊

断，该方法可以克服传统包络解调方法需要人工确定窄带滤波参数的问题。本文以压气机转子试验器为对象，采用基于经验模式分解的包络解调方法，研究了滚动轴承的故障诊断。本文的结构安排如图 1.1 所示。

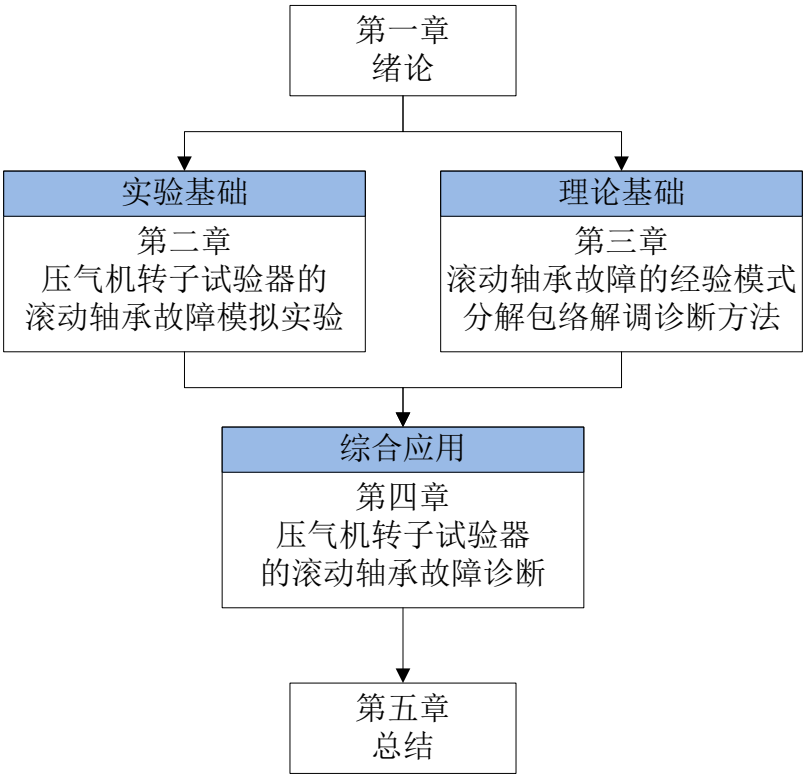



**图 1.1 本文结构安排**

具体章节安排如下：

第一章介绍了滚动轴承故障诊断的意义、方法以及滚动轴承振动监测与诊断技术的发展概况。

第二章主要介绍了本文的实验基础，首先介绍了压气机转子试验器的结构以及工作原理；然后介绍了基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验的过程，主要包括滚动轴承故障的加工方法、故障模拟的实验方案以及数据的采集方法。

第三章主要介绍了本文的理论基础，首先介绍了传统包络解调方法的原理；然后介绍了经验模式分解的原理；最后介绍了基于经验模式分解的包络解调方法。

第四章在前面两章的基础上，基于压气机转子试验器的滚动轴承数据，利用基于经验模式分解的包络解调方法研究了滚动轴承的故障诊断。

第五章对全文进行了总结。

# 第二章 基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验

## 2.1 压气机转子试验器

本次实验所使用的试验台为 YSQ-1 压气机试验器（图 2.1）

它是由由电动机带动压气机转子旋转，在规定的转速范围内产生振动信号。

其真实图片展示如图 2.1 所示：

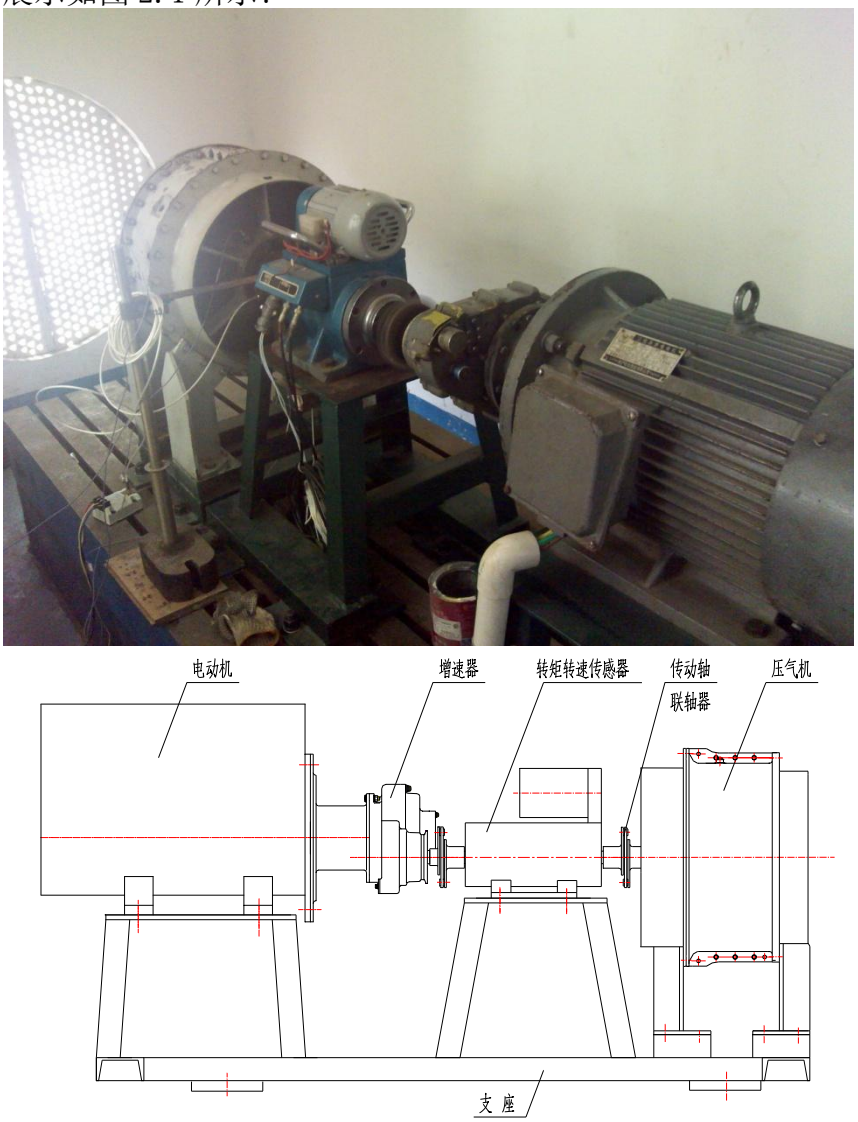



图 2.1 压气机试验器

### 2.1.1 压气机试验器总体结构

压气机试验器总体结构电机、增速器、转矩转速传感器和压气机（图 2.2）依次连接，

通过转接轴、膜片联轴器传递扭矩。

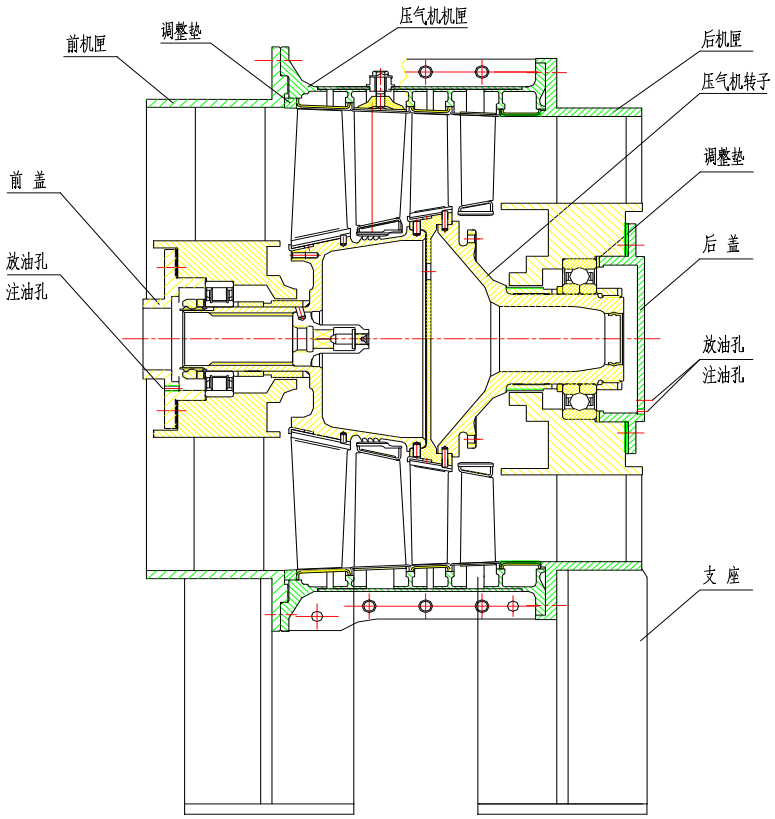



图 2.2 压气机结构图

变频调速器（图 2.3）输入端通过导线与三相 380 伏动力电源相连，输出端通过导线与电动机相连，并与 220 伏电源相连。

图 2.3 MZ-P2 变频器

### 2.1.2 压气机转子结构

压气机转子由两级轮盘和工作叶片、滚子轴承、球轴承及轴承封油螺套等零件组成。

轮盘上篦齿与整流环的封气环构成挡气封严装置。轮盘上有安装叶片的燕尾形榫槽。前

轴颈内腔有与花键轴连接的花键槽，外径上装有滚子轴承、滚子轴承封油螺套和轴承螺母、锁紧垫片等零件。后轴颈上装有球轴承、调整垫、球轴承封油螺套和锁紧垫片等零件。

工作叶片用榫头安装在轮盘上，靠榫槽内的销钉和锁片作轴向定位。

### 2.1.3 压气机静子结构

压气机静子由中机匣、整流环、工作外环、前机匣和后机匣等零件组成。

中机匣沿垂直平面分为左右两半。中机匣靠前止口与前机匣定位，靠后止口与后机匣定位，加强半环供整流环和工作环定位。中机匣上轴向对应一、二级工作叶片的位置分别加工有 8 个 M16 螺纹孔，用来安装测试传感器接头。

前机匣和后机匣分别装有前端盖和后端盖，端盖上下方各有两个螺纹孔，上方为注油孔，下方为放油孔。装配油孔螺钉时用封严胶。

整流环沿垂直方向切成两半，靠外环翻边的外径表面与机匣加强半环的内径表面定心，通过凸台用螺钉固定在机匣上。

## 2.2 基于压气机转子试验器的滚动轴承故障模拟实验

### 2.2.1 B&K 压电式 4508 加速度传感器

在大型机械的故障诊断和状态监测的振动测量中常用到加速度、速度、位移三个参量，但在实际的振动测试中通常用加速度传感器来获取信号。因为加速度参量相对于位移和速度参量来说测量比较方便和经济，而加速度信号经过一次积分可得到速度信号，再积分可得到位移信号，这样，通过对加速度信号的提取与运算就可以间接地获得比较全面的信息。另外，基于本系统中所用到的航空发动机转子试验器的实际考虑，应用加速度传感器这种接触式的信号获取器件，可以更有效、更全面、更真实地反映试验器的实际运行情况，从而为实现对故障的诊断提供可靠的源数据。本实验将采用性能上比较优越，价格上比较经济，使用上比较方便的的 B&K 压电式 4508 加速度传感器，即内置集成电路的压电传感器。（见图 2.4）。

### 2.2.2 实验过程

首先对正常轴承状态下的压气机转子试验器进行测试。

第一步要在压气机的前机匣，前机匣轴承座，后机匣，后机匣轴承座上安装加速度传感器为了能够使电涡流位移传感器与压气机紧密结合从而减小误差，同时也是为了能使加速度传感器更好的贴住，先要用砂纸用力将压气机上述的四个位置的漆给磨掉，再用 502 胶水将

加速度传感器的底座粘在上面即可。

为了能够测出转速，在电动机转轴上嵌入了一颗螺钉，再将电涡流位移传感器靠近嵌有螺钉的那一圈转轴，这样电动机转轴每旋转一圈，就会通过螺钉与其正常表面产生的高度差带来的不同电压来产生脉冲信号。这里要注意不能将电涡流位移传感器离转轴过近，以免接触到转轴。在电动机转轴上贴上铁片也能产生脉冲从而测量出转速。

接通上述五个通道后，打开电源总开关和压气机所联接的电动机开关，这时候压气机会在电动机的带动下进行高速旋转，通过调整变频调速器可以得到使压气机在不同转速的情况下进行测试。测试现场情况（见图 2.5,图 2.6）

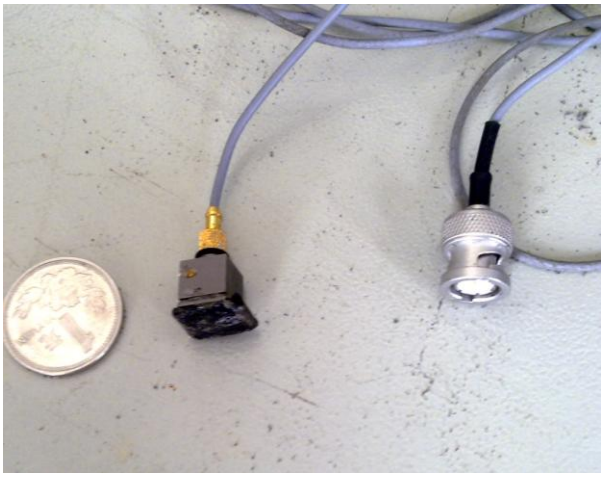


图 2.4 加速度传感器

图 2.5 采集信号图

图 6 展示了四个加速度传感器的实际位置以及电涡流位移传感器的实际位置

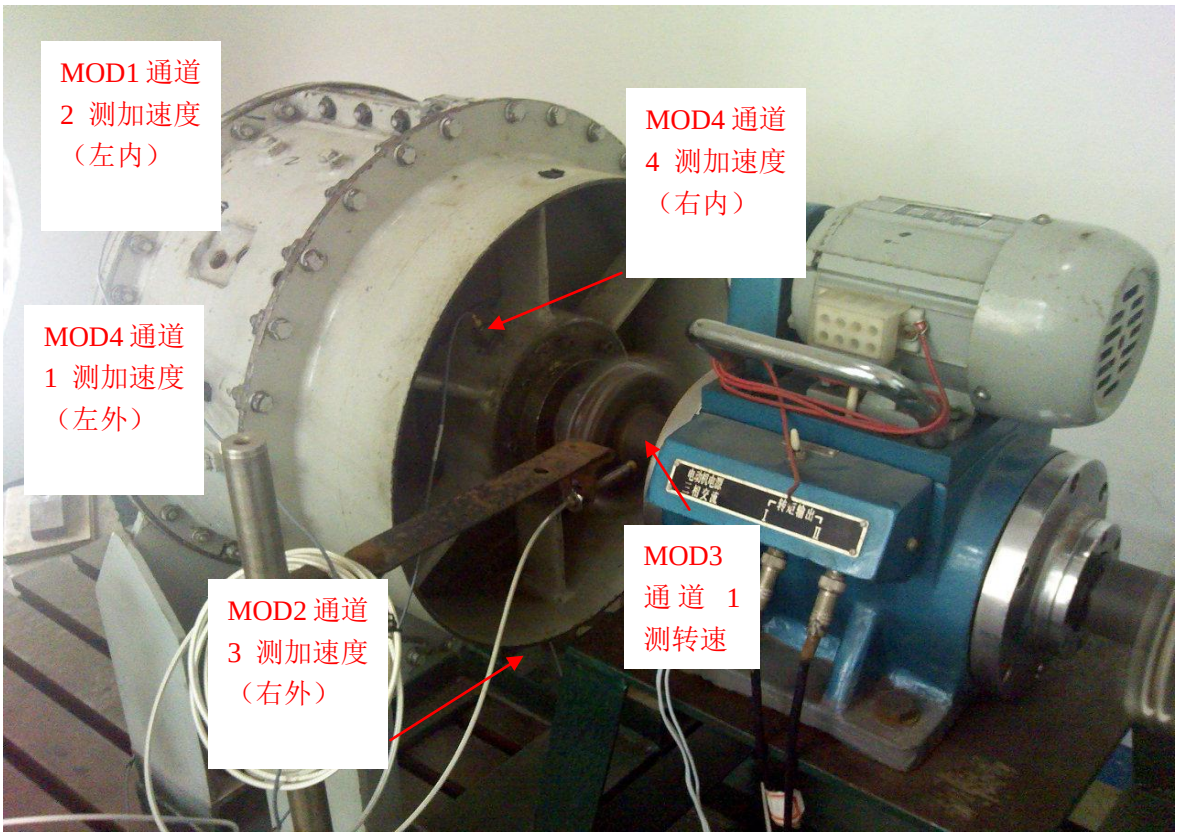



图 2.6 测试现场图

表 1 通道配置

| NI 采集器 | 模块 | 通道 | 内容 |
|---|---|---|---|
| 9234 | MOD3 | CH1 | 转速 |
| | | CH2 | |
| | | CH3 | |
| | | CH4 | |
| | MOD4 | CH1 | 压气机机匣轴承座处加速度（左外） |
| | | CH2 | 压气机机匣顶部处加速度（左内） |
| | | CH3 | 压气机机匣轴承座处加速度（右外） |
| | | CH4 | 压气机机匣顶部处加速度（右内） |

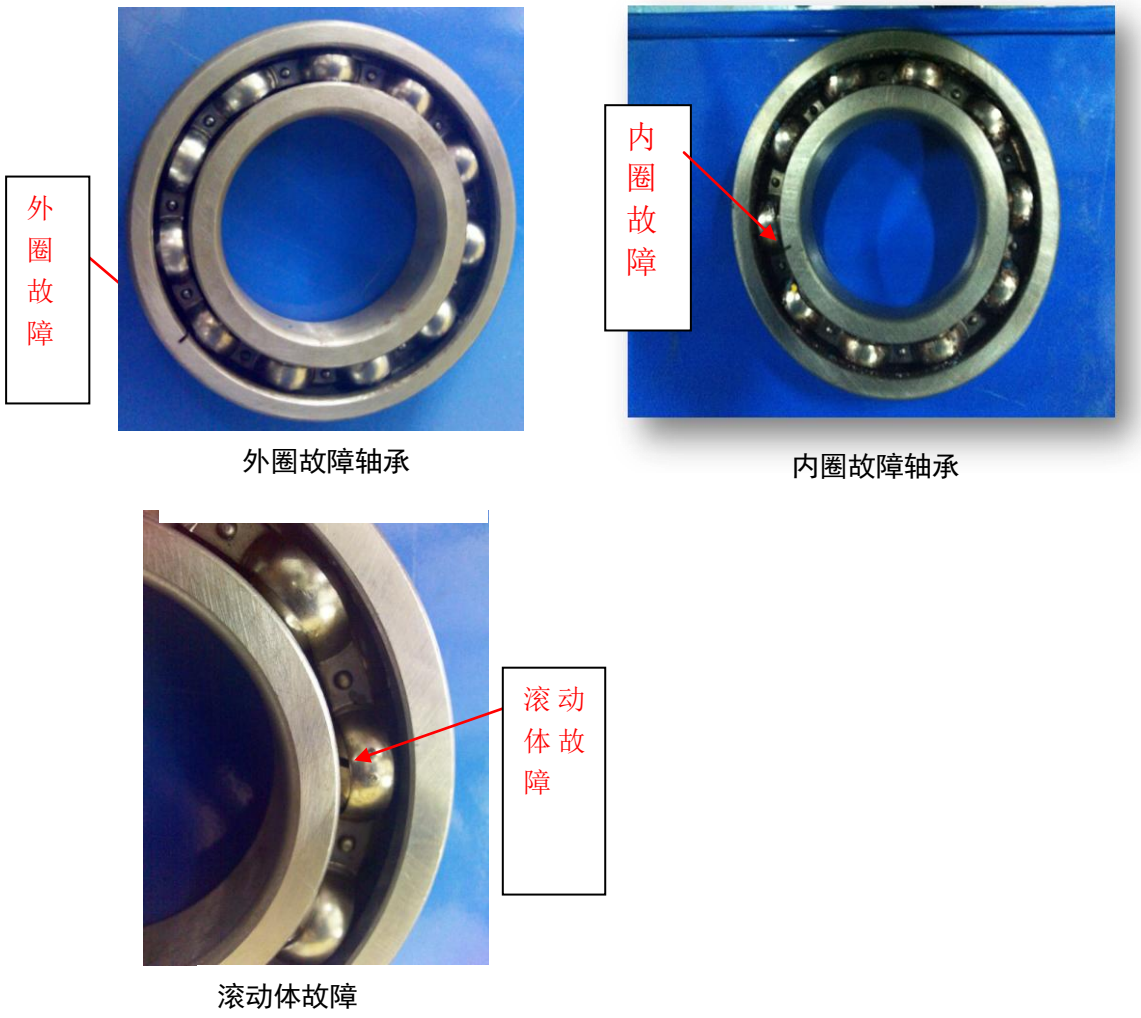
表 2 实验数据

| 实验次数 | 方案 |
|---|---|
| 1 | 转速 1500rpm |
| 2 | 转速 1800rpm |
| 3 | 转速 2000rpm |
| 4 | 转速 2400rpm |

对使用正常轴承状况下的压气机测试完后，接下来分别更换上内圈故障，外圈故障，滚珠故障轴承。

更换故障轴承时，首先将压气机与电动机联接部分分离开，然后松掉机匣座与机匣之间的相联接的螺丝。为了防止压气机下坠，可以事先用木块垫在压气机下，再卸下联接螺丝的时候，可将两个处于对角的螺丝最后卸下。将压气机与机匣分离后，接下来将装有滚珠轴承的后机匣卸下。将后机匣连同滚珠轴承的这部分取下来后，通过反向敲击将后机匣盖和滚珠轴承取下，换上需要测试的故障轴承，敲实后将后机匣装上，拧上螺钉，期间不断旋转轴以确保轴能够正常转动而不产生碰磨。当出现碰磨时可通过从后机匣方向敲击轴承来确保轴承水平放入了后机匣。最后将压气机整体再次固定在机匣座上，联接好电动机与压气机转子后进行实验。通过这种方法更换三次故障轴承再按照测试正常轴承时的方法进行测量可以分别得到压气机在内圈故障，外圈故障，以及滚珠故障时的振动加速度的时间波形。

图 2.7 展示的是外圈故障，内圈故障和滚动体故障实物图图片




外圈故障轴承　　内圈故障轴承

滚动体故障

图 2. 7 三种故障轴承图片

# 第三章 基于经验模式分解的滚动轴承故障包络解调诊断方法

## 3.1 引言

滚动轴承是机械设备中故障常发部件之一。设备运行时，磨损、疲劳、腐蚀、过载等原因都可能造成滚动轴承的局部损伤故障。当局部损伤通过轴承载荷区时会产生冲击，从而激励轴承系统的固有频率振动。这些固有频率振动为高频，且表现出幅值调制特性。研究表明，该调幅信号中低频调制信号的频率与滚动轴承故障类型有关，因此，提取相应的故障特征频率是诊断滚动轴承故障的关键。包络解调是目前常用的滚动轴承故障诊断方法[1-2]。包络解调方法中，信号首先要通过窄带滤波，以便将高频振动信号从低频噪声中分离出来。窄带滤波参数(如中心频率、带宽等)的选择对分析结果的影响很大[3-4] 。要求选择者具有丰富的专业知识和大量的经验积累，这为包络解调方法的工程推广增加了难度。为解决这一问题，文献[5]提出了小波包络技术。这里，小波分解被用作带通滤波器组以分离高频振动信号，然后用包络分析方法提取故障特征频率，诊断轴承故障。但小波分解的缺点是每一次分解信号频带被二分一次，缺乏必要的灵活性，可能会造成故障信息的扭曲。

本章介绍了一种基于经验模式分解(Empirical Mode Decomposition，EMD)[6]的滚动轴承故障包络解调诊断方法。该方法利用经验模式分解的自适应分解特性分离受损伤轴承振动信号中的高频故障特征信息与低频噪声，然后用包络分析方法提取滚动轴承故障特征频率，从而实现滚动轴承的故障诊断。

## 3.2 传统包络解调诊断方法

### 3.2.1 滚动轴承的振动机理

滚动轴承在工作时，一般是外圈与轴承座或机壳相联接，固定或相对固定；内圈与机械的传动轴相联接，随轴一起转动。在机械运转时，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，当轴以一定的速度并在一定载荷下运转时相对轴承和轴承座或外壳组成的振动系统产生激励，使该系统振动，其振动产生的机理可用图 3.1 表示。

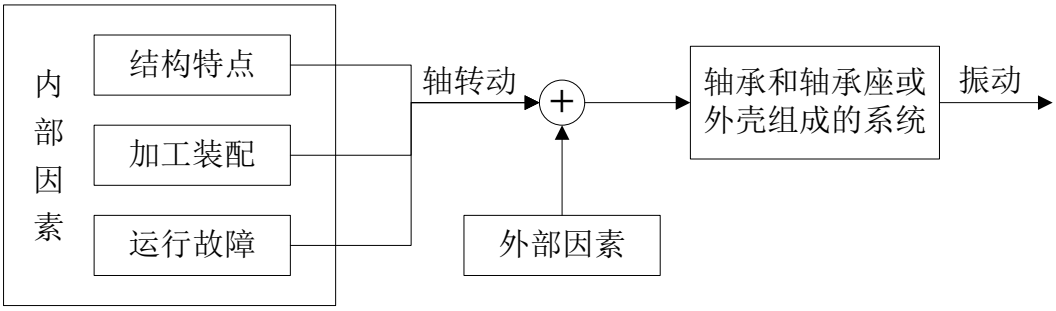



**图 3.1 滚动轴承振动产生机理**

显然，在实际诊断中，人们通过布置在轴承座或外壳适当位置的传感器拾取的振动信号是上述各种内部和外部激励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，在这一综合振动中，我们最感兴趣的是运行故障这一内部因素所引起的振动信号。那么，如何从综合振动中把运行故障引起的振动信号突出出来，从而有效的诊断出轴承的运行故障呢？这是滚动轴承故障诊断技术的关键所在。为了能够更有效地把故障特征从综合振动中提取出来，首先需要研究轴承内部三种因素引起的振动信号各自的特征。

（1）轴承本身结构特点及加工装配误差引起的振动　当轴承旋转时，滚动体便在轴承内、外圈滚道上滚动，即使对加工装配毫无误差的轴承来说，由于滚动体在不同位置时所受的力大小不同，同时承载的滚动体的数目也不同，这些轴承本身的结构特点造成承载刚度的变化，引起轴承振动，当轴的转速一定时，这一振动具有确定性质；轴承元件加工时留下的表面波纹度、粗糙度及形位误差以及装配误差等原因产生交变激振力使轴承系统振动，虽然这些加工装配因素造成的激振力大都具有周期性的特点，但由于实际构成因素十分复杂，各因素之间也不存在特定的关系，所以，总体上说这些激振力随机性较强，含有多种频率成分，那么轴承系统在这些激振力的作用下所产生的振动当然也具有多种频率成分并具有较强的随机性。

（2）轴承运行故障引起的振动　滚动轴承在运行过程中出现的故障按其振动信号的特征不同可分为两大类：一类称为表面损伤类故障，包括点蚀、剥落、擦伤等；另一类称为磨损类故障。

1）磨损，在正常使用情况下，滚动轴承工作表面磨损故障经历时间较长，是一种渐变性故障。轴承表面磨损后产生的振动同正常轴承的振动具有相同性质，即两者的波形都是无规则的，随机性较强。但磨损后振动水平（幅值）明显高于正常轴承，这就是磨损类故障引起的振动信号的基本特点。

2）表面损伤 对于表面损伤类故障，当损伤点滚过轴承元件表面时要产生突变的冲击脉冲力，该脉冲力是一宽带信号，所以必然覆盖轴承系统的高频固有振动频率而引起谐振，从而产生冲击振动。这就是损伤类故障引起的振动信号的基本特点。

损伤故障产生的冲击振动成分从性质上可分成两类：

其一，是由于轴承元件的工作表面损伤点在运行过程中反复撞击与之相接触的其它元件表面而产生的低频振动成分，有的文献上称之为轴承的“通过振动”。其发生周期$T_c$是有规律的，可以从转速和轴承的几何尺寸求得。并且，损伤发生在内、外圈或滚动体上时，该频率$f_c(=1/T_c)$不同。这一轴承“通过振动”发生的频率称为故障特征频率成分，若有，则可根据这些频率成分的大小进一步确定故障发生的部位（是内、外圈或是滚动体上）。

滚动轴承故障特征频率一般在 1kHz 以下，是滚动轴承故障的重要特征信息之一。

其二，是由于损伤冲击作用而诱发的轴承系统的高频固有振动成分。这里所说的“高”是相对故障特征频率而言的。轴承系统的高频固有振动很复杂，如轴承内、外圈的径向弯曲固有振动，滚动体的固有振动，甚至测振传感器的固有振动等都可由于损伤冲击而产生并反映在轴承的振动信号中。在这些固有振动中，因为通常测轴承振动时往往把传感器布置在轴承座上测外圈的振动，所以轴承外圈的径向弯曲固有振动时我们所关注的。

通过检测轴承振动信号中是否存在高频固有振动是目前滚动轴承振动诊断中所采用的行之有效的包络解调法的基本出发点。

### 3.2.2 滚动轴承故障特征频率计算

下面以角接触球轴承为例通过分析轴承各元件之间的相对运动关系来推出轴承故障特征频率的计算公式。

图 3.2 所示为滚动轴承各元件之间运动关系示意图。

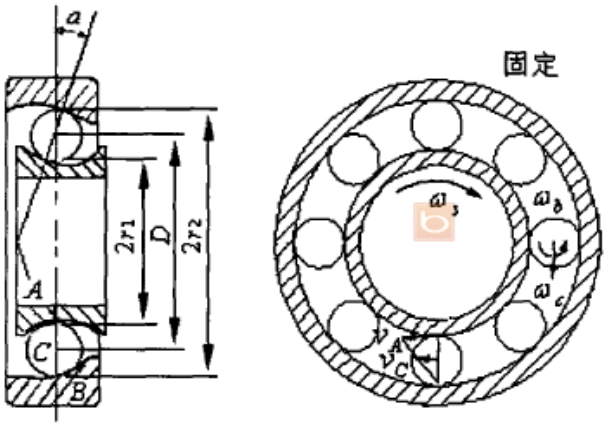



图 3.2 轴承各元件之间的运动关系

为简单起见，设轴承外圈固定，内圈（即轴）的旋转频率为 $f_s$，轴承节径为 $D$，滚动体直径为 $d$，接触角为 $\alpha$，滚动体个数为 $z$；并假定滚动体与内外圈之间纯滚动接触。

由于外圈固定，所以滚动体上 B 点的速度为零，而 A 点的速度 $v_A = 2v_C = \pi f_s(D - d\cos\alpha) = 2\pi f_c D$，由此可以得到

$$f_c = \frac{f_s}{2}(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha) \qquad (3\text{-}1)$$

其中 $f_c$ 为滚动体的公转频率，即保持架的转动频率。

设滚动体的自动频率为 $f_b$，则 $f_b$ 可以这样求得：给整个轴承加一转动角速度“$-f_c$”（相当于站在保持架上看轴承运动），则此时保持架固定不动，外圈以 $-f_c$ 转动，滚动体只有自转角速度 $f_b$，根据纯滚动关系，此时 B 点的速度（注意此时滚动体上的 A 点绕其中心 C 转动）

$$v_B = \pi d f_b = \pi(D + d\cos\alpha) f_c \qquad (3\text{-}2)$$

由此可得

$$f_b = \frac{D}{2d}[1 - (\frac{d}{D})^2 \cos^2\alpha] f_s \qquad (3\text{-}3)$$

由此进而推得

（1）$z$ 个滚动体与外圈上某一固定点接触的频率为

$$f_o = z f_c = \frac{z}{2}[1 - \frac{d}{D}\cos\alpha] f_s \qquad (3\text{-}4)$$

（2）$z$ 个滚动体与内圈上某一固定点接触的频率为

$$f_i = z(f_s - f_c) = \frac{z}{2}[1+\frac{d}{D}\cos\alpha]f_s \qquad (3\text{-}5)$$

（3）滚动体上某一固定点与外圈或内圈接触的频率为

$$f_r = f_b = \frac{D}{2d}[1-(\frac{d}{D})^2\cos^2\alpha]f_s \qquad (3\text{-}6)$$

$f_o$，$f_i$，$f_r$ 分别称为外圈、内圈和滚动体的通过频率。当上述的“某一固定点”是局部损伤点（例如点蚀点、剥落点、烧伤点等）时，$f_o$，$f_i$，$f_r$ 分别成为局部损伤点撞击滚动轴承元件的频率，所以又分别称为外圈、内圈和滚动体的故障特征频率。

### 3.2.3 滚动轴承故障的包络解调诊断方法

根据振动理论，对于图 3.3 所示的质量—弹簧—阻尼系统，其固有振动频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{n}} \qquad (3\text{-}7)$$

在系统平衡状态下，如向系统施加一脉冲力 $f(t) = F\delta(t)$，则系统在此脉冲力的作用下的振动位移为

$$y(t) = y_0 e^{-\xi\omega_n t}\sin\omega_n\sqrt{1-\xi^2}t \qquad (3\text{-}8)$$

式中，$\xi$ 为阻尼比，$y_0$ 为一位移常数。

这就是说，系统在脉冲力的作用下将作一振幅呈指数衰减性质，振动频率为 $\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ 的衰减振荡，如图 3.4 所示。

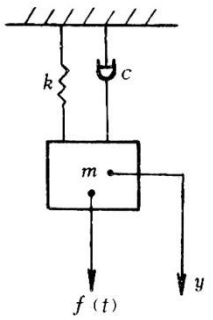



图 3.3 单自由度振动系统示意图

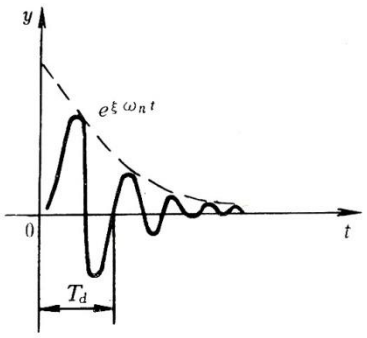



图 3.4 脉冲响应曲线

这里的脉冲函数是纯数学意义上的脉冲，即

$$\delta(t)=\begin{cases}1, & t=0\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{3-9}$$

我们知道，通常所谓“共振”的概念是这样的：对于图 3.3 所示的系统，当外加的激振力 $f(t)$ 是正弦激振力且其角频率 $\omega$ 等于系统的固有频率时，系统振动的振幅将达到最大值（无阻尼时，从理论上讲是无穷大）。并且，只要此正弦激振力不撤去，系统将不停地作振幅不衰减的简谐振动。

那么，为什么给系统加一瞬时脉冲力也会激起系统以固有频率 $\omega_n$（实际上是 $\omega_d$，但通常 $\xi$ 比较小，两者基本上一样，所以常以 $\omega_n$ 代 $\omega_d$）作衰减振动呢？这可从数学上的傅里叶分析原理来加以解释。公式（3-9）所示的单位脉冲函数的傅里叶变换为 1。这就是说，从频域来看，$\delta(t)$ 是一无限带宽信号，它含有任何频率成分，并且沿整个频率轴能量均布。如果将 $\delta(t)$ 作三角分解，那么它可以看成所有频率的正弦量的迭加。既然如此，$\delta(t)$ 必含系统固有振动频率成分，也就必然引起系统的固有振动，只是脉冲力能量有限，不象单一频率正弦激振力那样持续激振，所以系统只能作衰减振动。

由上述分析可知，即使施加于系统的激振力不是纯数学意义上的脉冲力。只要该激振力的频域带宽覆盖系统的固有振动频率，也同样可激起系统的固有振动。

现在来考查滚动轴承的振动。按振动信号特征可把轴承在运行过程中的故障分为两大类：元件工作表面损伤和磨损。其中，元件工作表面损伤故障包括点蚀、剥落、裂纹、擦伤等，是滚动轴承最常见的一类故障。所以，对这类故障的诊断引起了国内外有关人员的高度重视。目前，对这类故障国内外普遍采用的办法是所谓的“包络解调”法。其出发点即上述原理。当轴承某一元件表面出现损伤时，在受载运行过程中损伤点要撞击其它元件表面而产生冲击脉冲力，这一冲击脉冲力的强度及持续时间长短与轴承元件的相对运动速度、所承受的载荷等因素有关。只要频域带宽 $f_T$ 覆盖轴承系统的固有频率，损伤产生的冲击同理想脉冲一样可激起系统的固有振动。通常，冲击脉冲的带宽都包含轴承系统的各个固有频率，所以会激起系统的各个固有振动。但矩形脉冲不象理想脉冲那样能量沿频率轴均布，而是频率越高，能量分布越小。所以，在损伤大小和轴承运动速度一定的条件下，在轴承系统的多个固有振动中，损伤更容易引起频率较低的固有振动而更难以引起频率较高的固有振动。另一方面，损伤越小，轴承运动速度越快，更高频率固有振动的能量就越大。另外，在滚动轴承中，由于

损伤点再运动过程中周期性地撞击其它元件表面，所以产生周期性的脉冲力，也就产生一系列高频固有衰减振动。

包络解调法诊断轴承损伤类故障的原理可用图 3.5 来比较完整地概述：当轴承某一元件表面出现局部损伤时，在受载运行过程中要撞击与之相互作用的其它元件表面，产生冲击脉冲力，由于冲击脉冲力的频带很宽，必然包含轴承外圈、传感器甚至附加的谐振器（可以使机械式的，也可以是电的）等的固有频率而激起这个测振系统的高频固有振动。根据实际情况，可选择某一高频固有振动作为研究对象，通过中心频率等于该固有频率的带通滤波器把该固有振动分离出来。然后，通过包络检波器检波，去除高频衰减振动的频率成分，得到只包含故障特征信息的低频包络信号，对这一包络信号进行频谱分析便可容易地诊断出轴承的故障来。

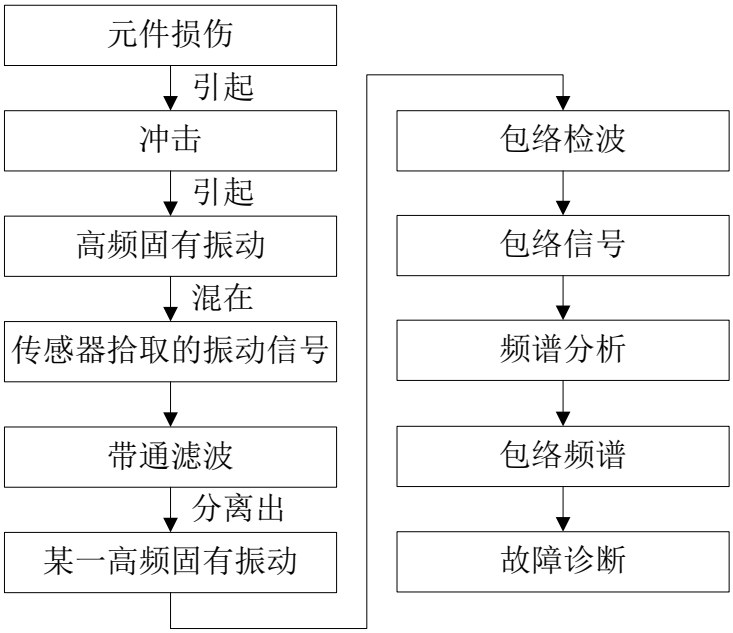



图 3.5 包络解调的原理

## 3.3 经验模式分解

### 3.3.1 基本原理

由瞬时频率的物理意义可知，并非任何信号都能讨论瞬时频率，只有当实信号的表达式具有：

$$x(t) = a(t)\cos\phi(t) \tag{3-10}$$

的形式，或复信号的表达式具有：

$$x(t) = a(t)e^{j\phi(t)} \quad (3\text{-}11)$$

的形式时才能计算瞬时频率。

为了计算瞬时频率，Norden E.Huang 定义了本征模函数（Intrinic Mode Fuction，IMF），它是满足单分量信号物理解释的一类信号，在每一时刻只有单一频率成分，从而使得瞬时频率具有了物理意义。直观上，本征模函数具有相同的极值点和过零点数目，其波形与一个标准的正弦信号通过调幅或调频得到的新信号相似，其正式定义如下。

一个本征模函数必须满足以下两个条件：

1.函数在整个时间范围内，局部极值点和过零点的数目必须相等，或最多相差一个；

2.在任意时刻点，局部最大值的包络上包络线和局部最小值的包络下包络线平均必须为零。

第一个条件是很明显的，它与传统稳态高斯信号的窄带要求类似；第二个条件是一个新的思想，它把以前的全局要求修改为局部要求，这个条件是必要的，是为了防止由于波形的不对称所形成的瞬时频率的不必要的波动，在理想的情况下，这个条件应为“数据的局部平均为零”。对于非稳态数据来说，为了计算“局部平均”，关系到“局部时间尺度”的概念，而这个概念是很难定义的，因此就用数据极大值包络和极小值包络的平均为零作为一个代替，使信号的波形局部对称。为了避免定义局部平均时间尺度的概念，这是一个必须的近似。由于采用了这种近似，求瞬时频率所用的方法就不能保证在任何条件下都能得到较好的瞬时频率，但是，Norden E.Huang 等人研究表明：在一般情况下，瞬时频率符合所研究系统的物理意义。

本征模函数表征了数据的内在的波动模式。由本征模函数的定义可知：由过零点所定义的本征模函数的每一个波动周期，只有一个波动模式，没有其它复杂的骑波；一个本征模函数没有约束为一个窄带信号，既可频率调制又可幅值调制，还可以是非稳态的；只有频率或幅值调制的信号也可以成为本征模函数。一个典型的本征模函数应该满足：过零点和极值点的数目相等，极大值和极小值的包络关于零值对称，或包络平均为零。

对于本征模函数，可以用 Hilbert 变换构造解析信号，然后求出瞬时频率。而对于一般的不满足本征模函数条件的复杂信号，先要采用经验模式分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）方法将其分解。EMD 方法将一个复杂的信号分解为若干各本征模函数之和，它基于一个基本的假设：任何复杂的信号都是由一些不同的本征模函数组成，每一个

本征模函数不论是线性或是非线性、非平稳的，都具有相同数量的极值点和过零点，在相邻的两个过零点之间只有一个极值点，而且上、下包络线关于时间轴局部对称，任何两个模态之间是相互独立的；任何时候，一个信号都可以包含许多本征模函数，如果模态函数相互重叠，便形成复杂信号。在此假设基础上，可以采用 EMD 方法通过下面步骤对任何信号 $x(t)$ 进行分解：

（1） 确定信号 $x(t)$ 的所有局部极值点，用三次样条线分别将所有的局部极大值点和局部极小值点连接起来形成上、下包络线，上下包络线的平均值记为 $m_1$，求出

$$x(t)-m_1=h_1 \tag{3-12}$$

理想地，如果 $h_1$ 是一个 IMF，那么 $h_1$ 就是 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量。

（2）如果 $h_1$ 不满足 IMF 的条件，把 $h_1$ 作为原始信号，重复第一步，得到上下包络线的平均值 $m_{11}$，再判断 $h_{11}=h_1-m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件，如不满足则重循环 k 次，得到 $h_{1(k-1)}-m_{1k}=h_{1k}$，使得 $h_{1k}$ 满足 IMF 的条件。记 $c_1=h_{1k}$，则 $c_1$ 为信号 $x(t)$ 的第一个满足 IMF 条件的分量。

（3）将 $c_1$ 从 $x(t)$ 中分离出来，得到：

$$r_1=x(t)-c_1 \tag{3-13}$$

将 $r_1$ 作为原始数据重复步骤（1）~（2），得到 $x(t)$ 的第二个满足 IMF 条件的分量 $c_2$，重复循环 n 次，得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量。这样就有：

$$\left.\begin{aligned} r_1-c_2&=r_2\\ &\vdots\\ r_{n-1}-c_n&=r_n \end{aligned}\right\} \tag{3-14}$$

当 $r_n$ 成为一个单调函数不能再从中提取出满足 IMF 条件的分量时，循环结束。这样由式（3-13）和式（3-14）得到：

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i+r_n \tag{3-15}$$

式中，$r_n$ 称为残余函数，代表信号的平均趋势。

EMD 的分解过程其实是一个“筛分”过程，在“筛分”的过程中，不仅消除了模态波形的叠加，而且使波形轮廓更加对称。EMD 方法从特征时间尺度出发，首先把信号中特征时间尺度最小的模态分离出来，然后分离特征时间尺度较大的模态函数，最后分离特征时间尺度最大的分量，因此可以把 EMD 方法看成是一组高通滤波器。

### 3.3.2 仿真研究

为了演示 EMD 的分解过程，下面给出一个 EMD 分解实例，它由调幅信号和正弦信号合成，该信号由式（2.5）给出：

$$x(t)=4\sin(20\pi t)\sin(\frac{2\pi}{10})+\sin(10\pi t)\quad t\in[0,1] \tag{3-16}$$

其时域波形如图 3.6 中 $x(t)$ 所示，经 EMD 方法分解得到 2 个 IMF 分量和一个残余函数 $r_2$，两个 IMF 都具有物理意义，第一个 IMF 分量对就着调幅信号，仍然保留着调幅信号的特征，是信号中频率成分最高，特征时间尺度最小的分量，第二个 IMF 分量对应着一个正弦信号，对应着信号中特征时间尺度最大的分量。

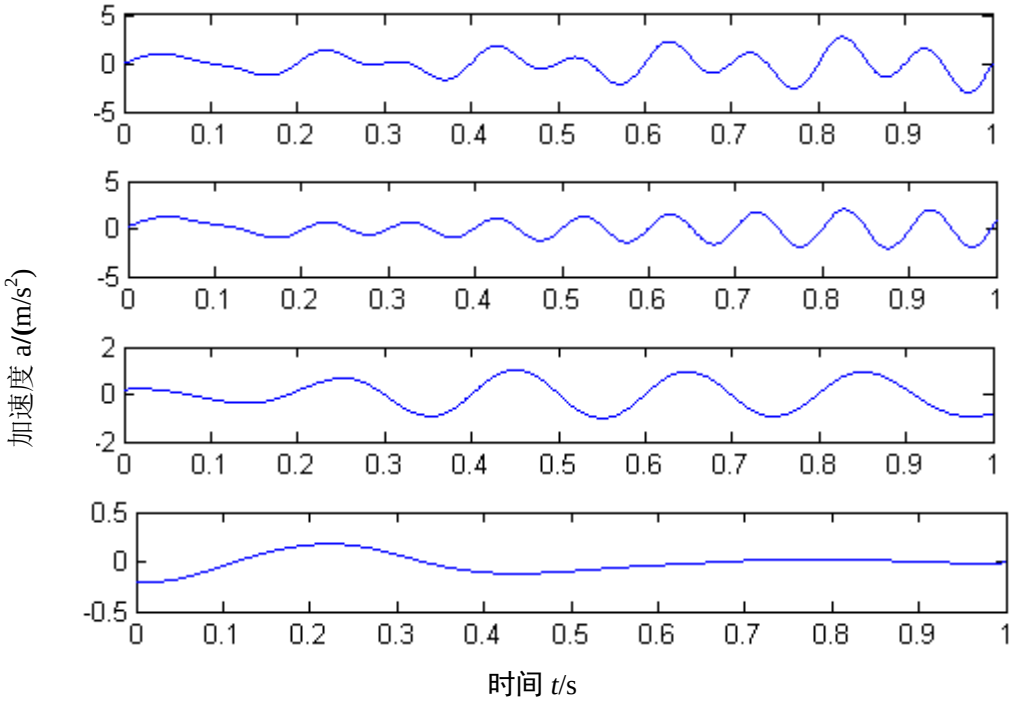



图 3.6 信号 $x(t)$ 的 EMD 分解图

## 3.4 基于经验模式分解的包络解调诊断方法

包络解调法目前已经在滚动轴承故障诊断中得到了普遍认可，但是，该方法中的窄带滤

波参数(如中心频率、带宽等)的选择对分析结果的影响很大，要求选择者具有丰富的专业知识和大量的经验积累，这为包络解调方法的工程推广增加了难度。经验模式分解是一种自适应的信号分解方法，其本质上相当于一个自适应的滤波器，利用经验模式分解的该特点，在滚动轴承故障的包络解调诊断中，可以首先利用经验模式分解对原始振动信号进行分解，得到一系列本征模函数，然后对高频的本征模函数进行包络解调，从而实现对滚动轴承的故障诊断，该方法可以克服传统包络解调方法需要人工确定窄带滤波参数的问题。基于经验模式分解的包络解调诊断方法如 3.7 所示。

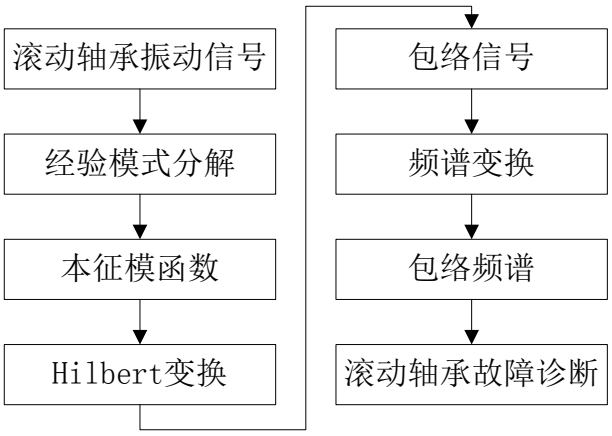



图 3.7 基于经验模式分解的包络解调诊断方法

# 第四章 压气机转子试验器的滚动轴承故障诊断实例

本章在前面两章的基础上，基于压气机转子试验器的滚动轴承数据，利用基于经验模式分解的包络解调方法研究了滚动轴承的故障诊断。

## 4.1 内圈故障诊断

本节采用基于经验模式分解的包络解调的方法，分别基于轴承座加速度信号和机匣加速度信号对压气机的滚动轴承的内圈故障进行了诊断。

### 4.1.1 基于轴承座加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为1793r/min下，从轴承座处测得的振动信号的时域波形如图4.1所示。根据第三章公式3-5计算，该内圈故障信号的特征频率为176.2Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图4.2所示。

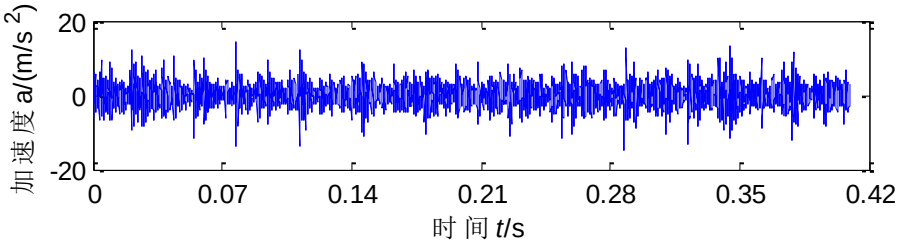



图 4.1 时域波形

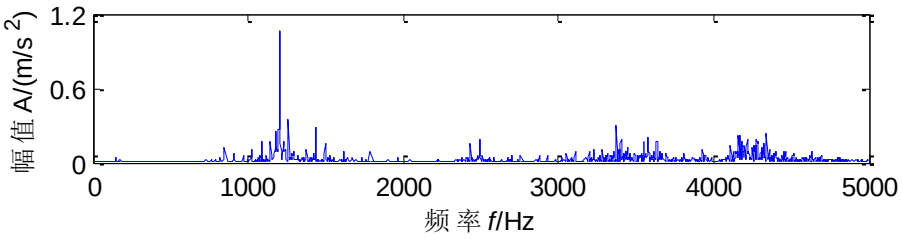



图 4.2 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前4个本征模函数如图4.3所示。进一步对这4个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图4.3所示。从图4.3可以看出，这4个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

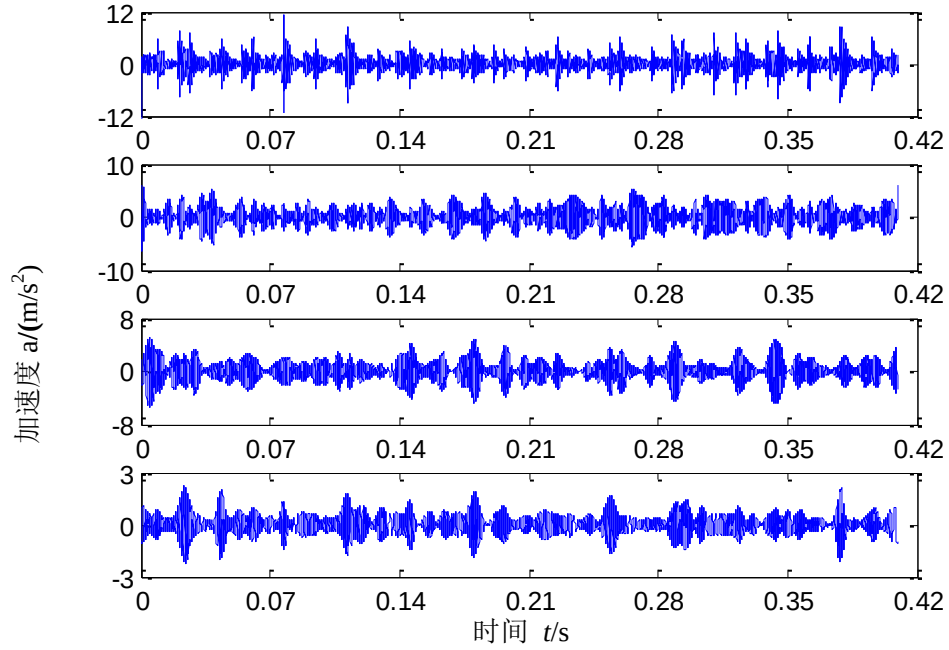



图 4.3 本征模函数

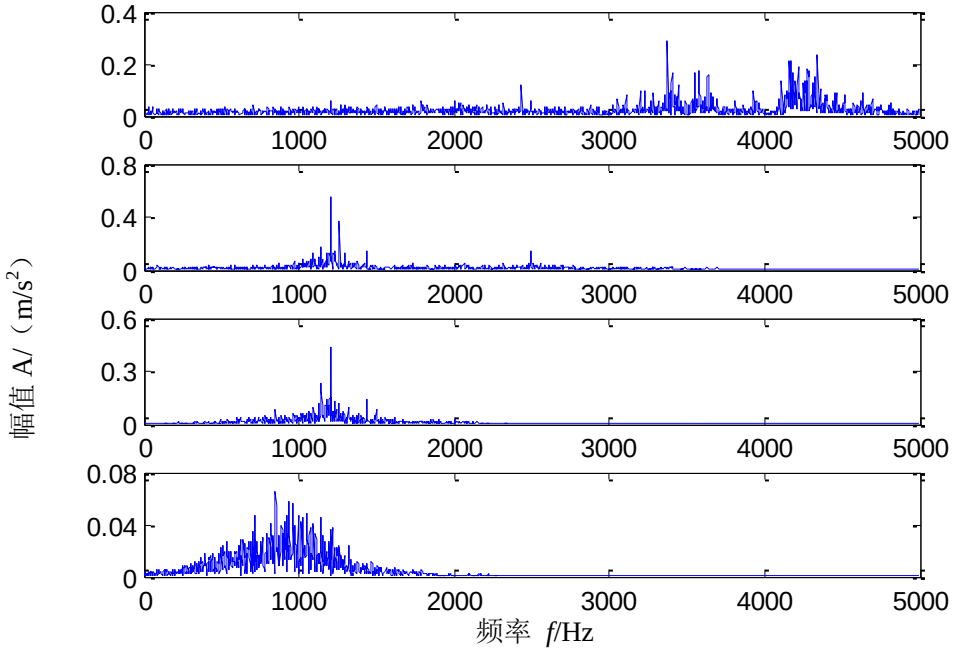



图 4.4 本征模函数的频谱

进一步对得到的 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.5 所示。在第一个和第二个本征模函数的包络谱可以清楚地发现内圈故障的特征频率 175.8Hz，约等于理论计算的特征频率 176.2Hz，从而可以判断滚动轴承存在内圈故障。

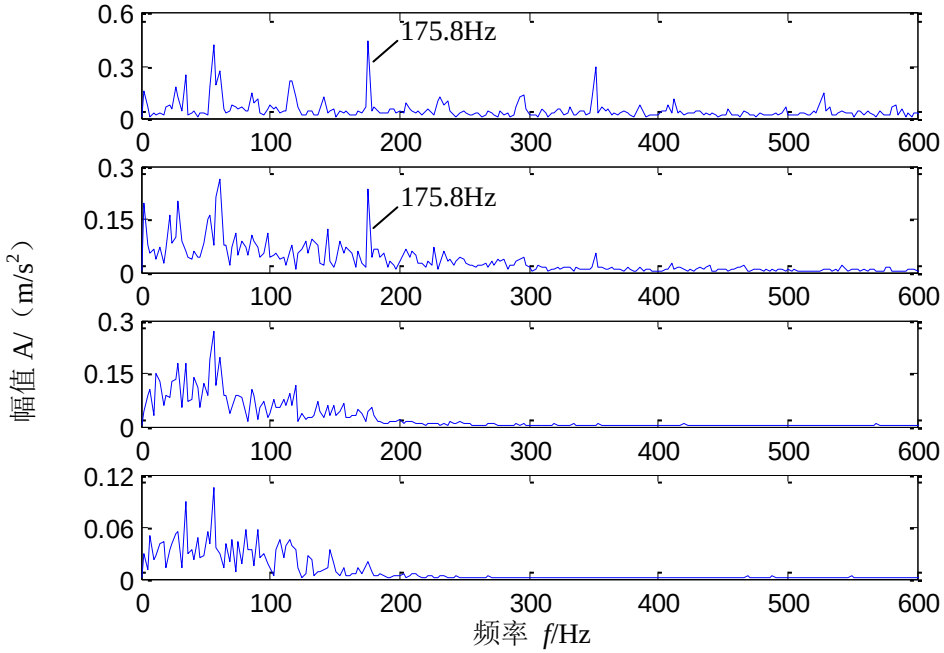



图 4.5 本征模函数的包络谱

### 4.1.2 基于机匣加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为 1793r/min 下，从机匣处测得的振动信号的时域波形如图 4.6 所示。根据第三章公式 3-5 计算，该内圈故障信号的特征频率为 176.2Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图 4.7 所示。

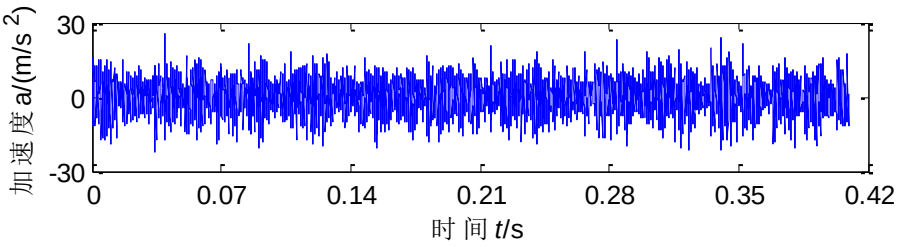



图 4.6 时域波形

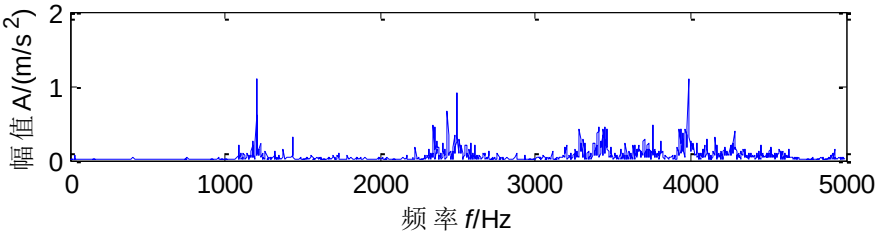



图 4.7 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前 4 个本征模函数如图 4.8 所示。进一步

对这 4 个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图 4.9 所示。从图 4.9 可以看出，这 4 个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

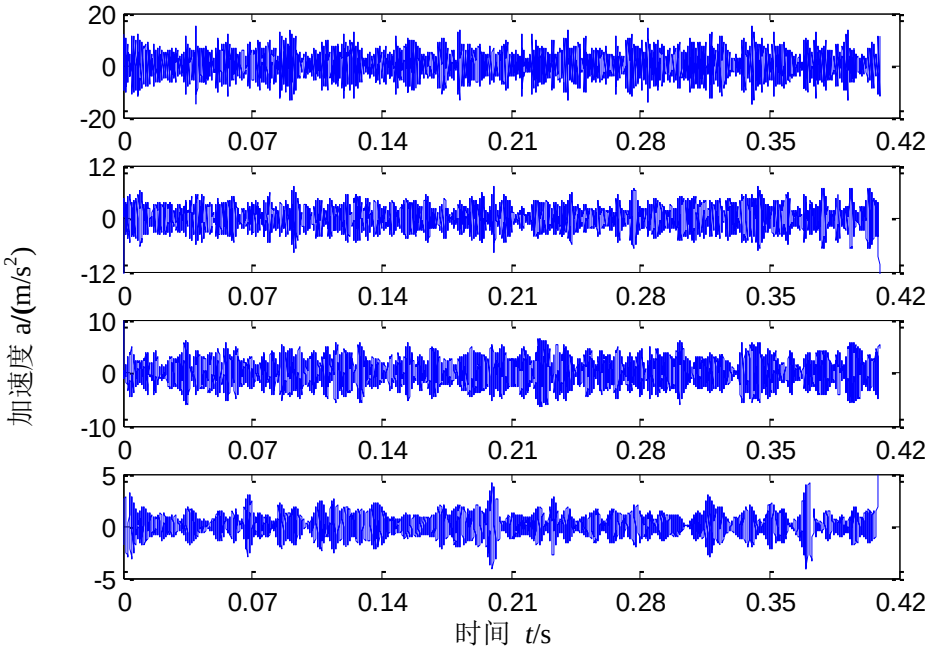



图 4.8 本征模函数

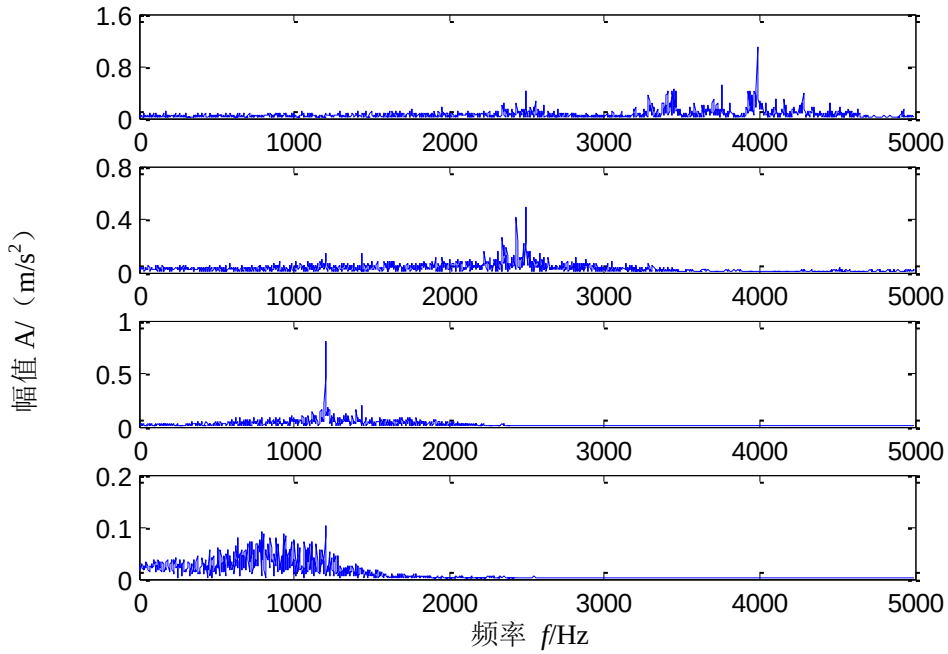



图 4.9 本征模函数的频谱

进一步对得到的 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.10 所

示。在第一个本征模函数的包络谱可以清楚地发现内圈故障的特征频率 175.8Hz，约等于理论计算的特征频率 176.2Hz，从而可以判断滚动轴承存在内圈故障。

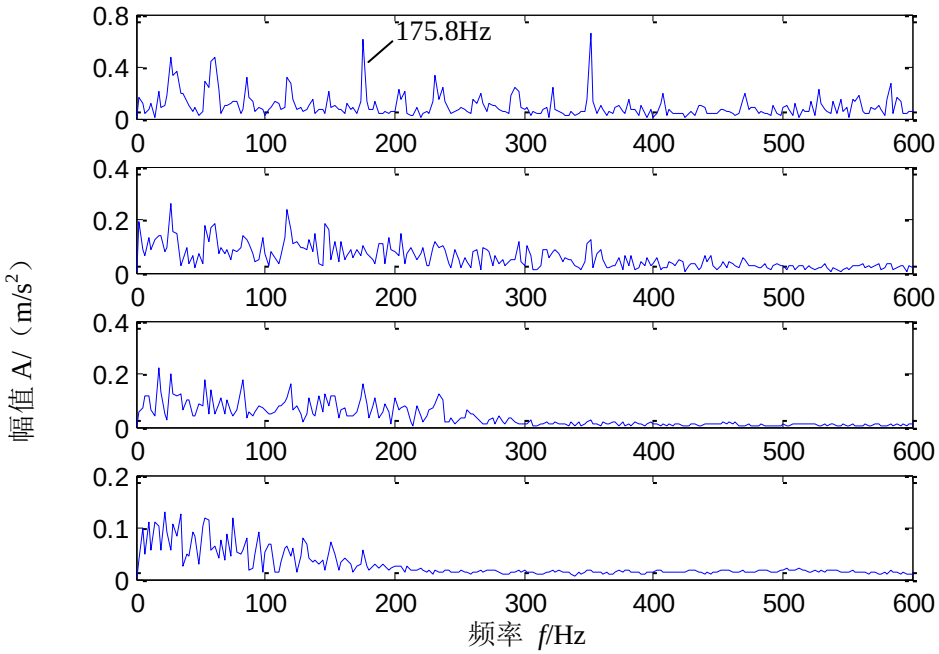



图 4.10 本征模函数的包络谱

## 4.2 外圈故障诊断

本节采用基于经验模式分解的包络解调的方法，分别基于轴承座加速度信号和机匣加速度信号对压气机的滚动轴承的外圈故障进行了诊断。

### 4.2.1 基于轴承座加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为 1826r/min 下，从轴承座处测得的振动信号的时域波形如图 4.11 所示。根据第三章公式 3-4 计算，该外圈故障信号的特征频率为 139.6Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图 4.12 所示。

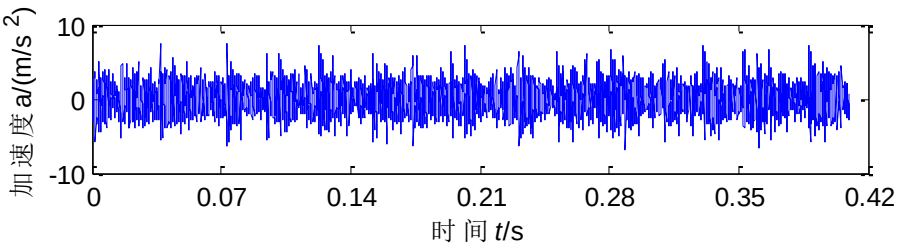



图 4.11 时域波形

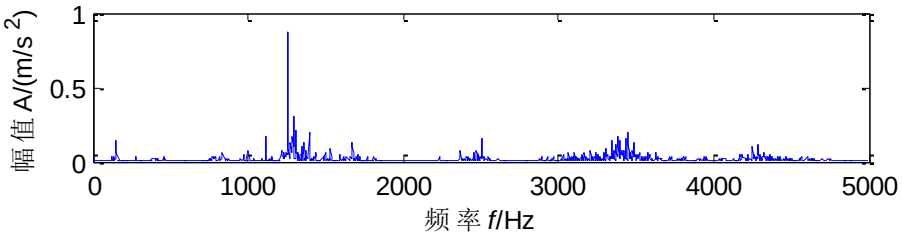



图 4.12 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前 4 个本征模函数如图 4.13 所示。进一步对这 4 个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图 4.14 所示。从图 4.14 可以看出，这 4 个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

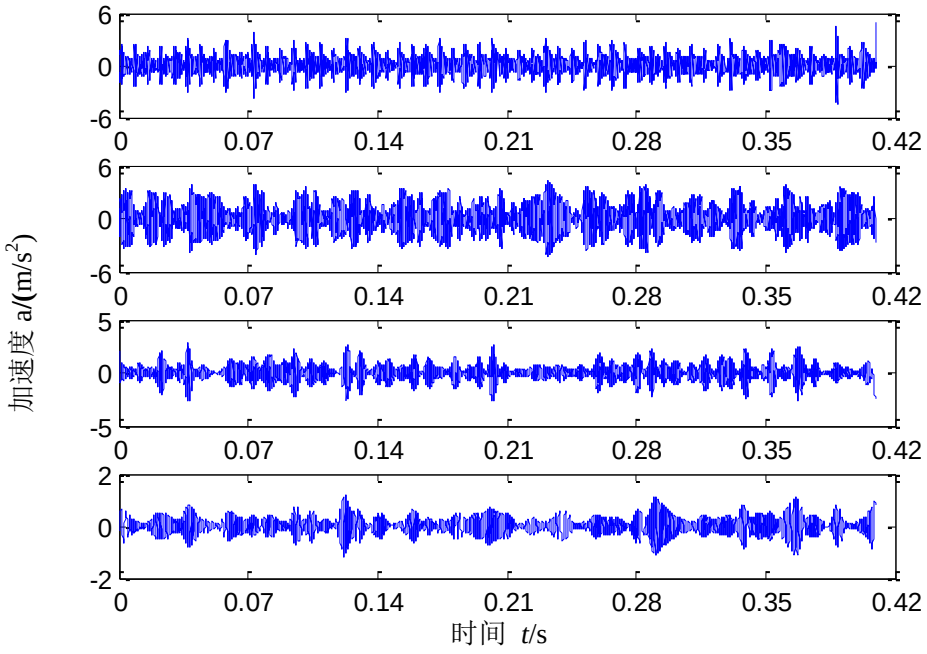



图 4.13 本征模函数

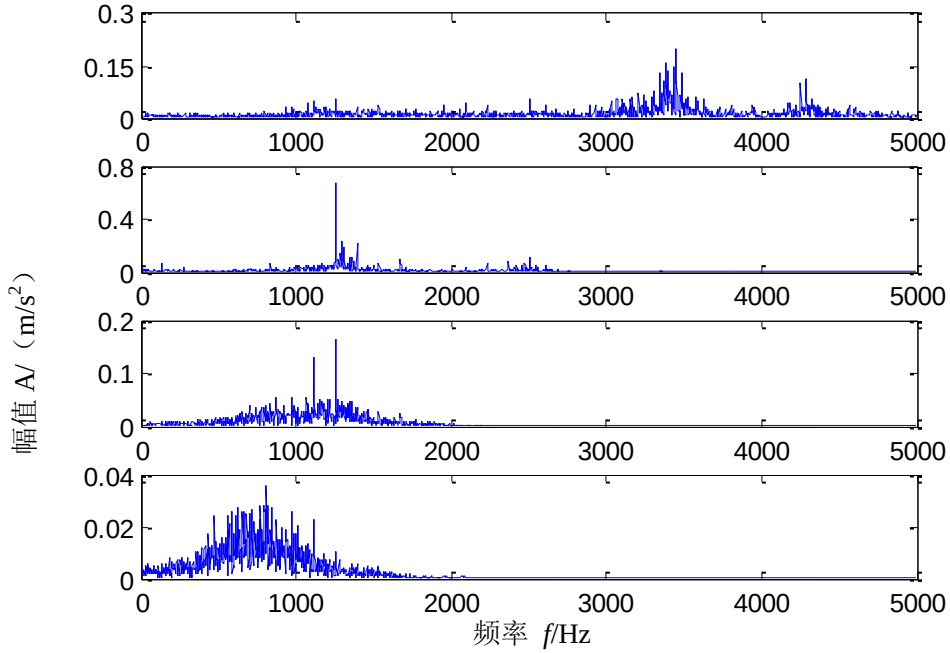



图 4.14 本征模函数的频谱

进一步对得到的 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.15 所示。在第一个和第三个本征模函数的包络谱均可以清楚地发现外圈故障的特征频率 139.2Hz，约等于理论计算的特征频率 139.6Hz，从而可以判断滚动轴承存在外圈故障。

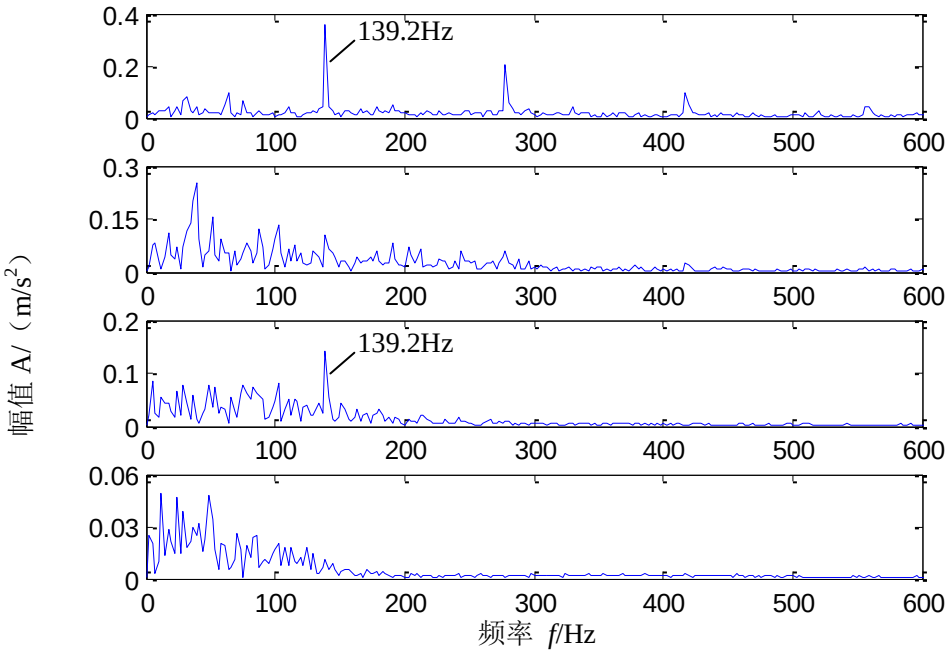



图 4.15 本征模函数的包络谱

### 4.2.2 基于机匣加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为 1826r/min 下，从机匣处测得的振动信号的时域波形如图 4.16 所示。根据第三章公式 3-4 计算，该外圈故障信号的特征频率为 139.6Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图 4.17 所示。

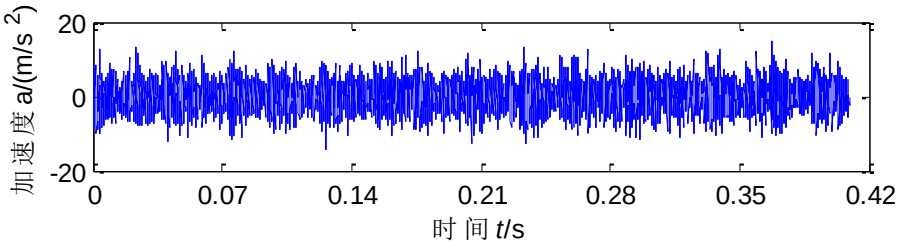



图 4.16 时域波形

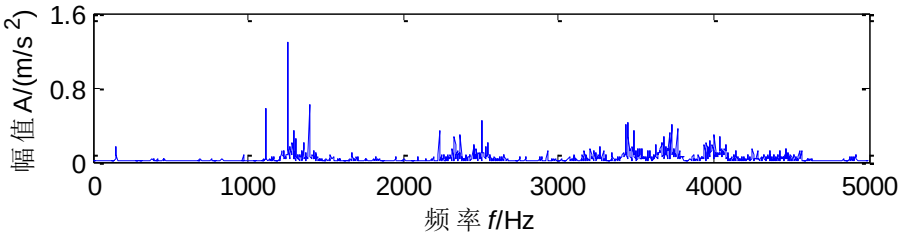



图 4.17 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前 4 个本征模函数如图 4.18 所示。进一步对这 4 个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图 4.19 所示。从图 4.19 可以看出，这 4 个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

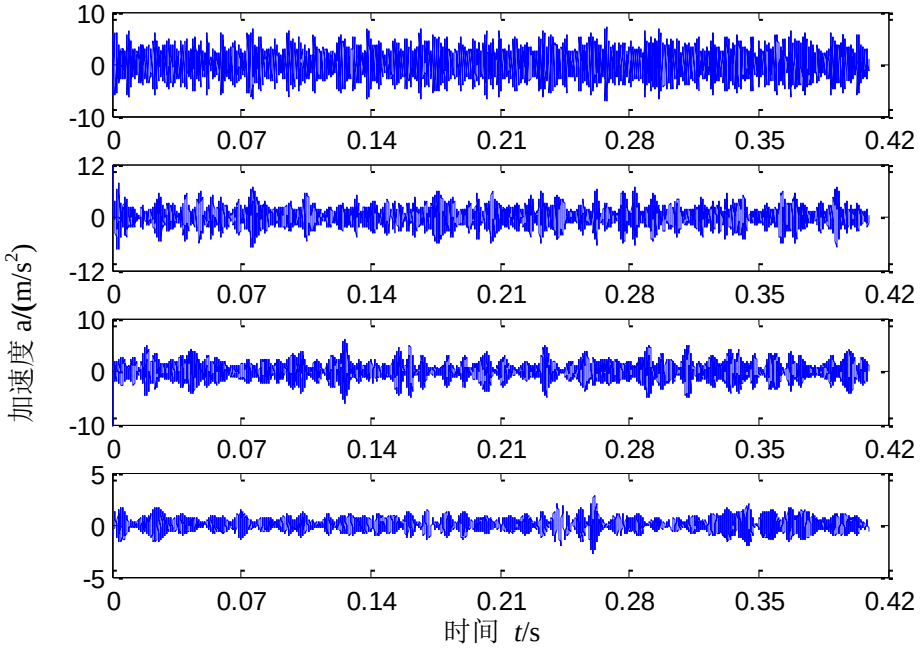



图 4.18 本征模函数

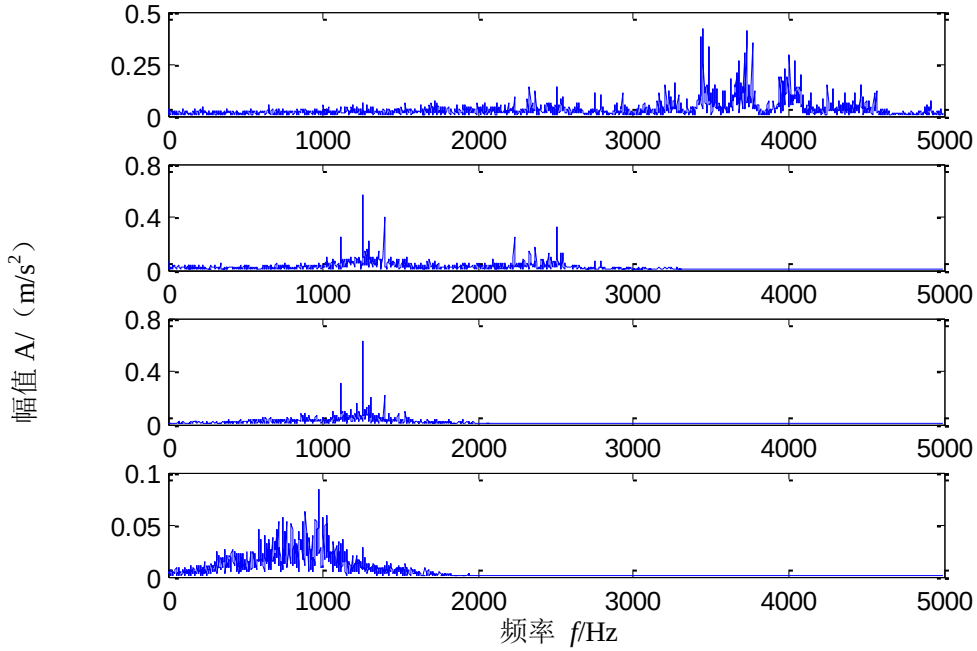



图 4.19 本征模函数的频谱

进一步对得到的 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.20 所示。在第一个和第二个本征模函数的包络谱均可以清楚地发现外圈故障的特征频率 139.2Hz，约等于理论计算的特征频率 139.6Hz，从而可以判断滚动轴承存在外圈故障。

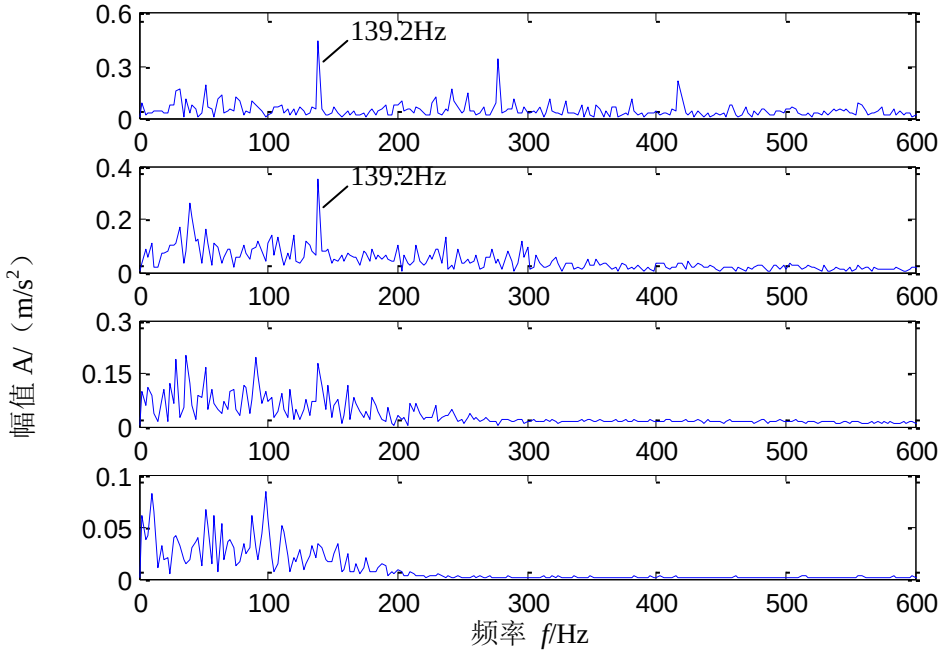



图 4.20 本征模函数的包络谱

## 4.3 滚动体故障诊断

本节采用基于经验模式分解的包络解调的方法，分别基于轴承座加速度信号和机匣加速度信号对压气机的滚动轴承的滚动体故障进行了诊断。

### 4.3.1 基于轴承座加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为1774r/min下，从轴承座处测得的振动信号的时域波形如图4.21所示。根据第三章公式 3-6 计算，该滚动体故障信号的特征频率为 159.5Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图 4.22 所示。

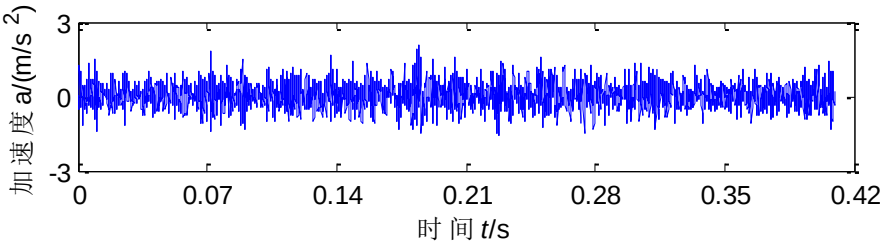



图 4.21 时域波形

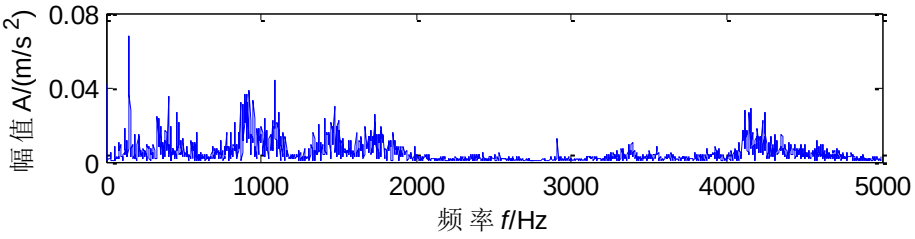



图 4.22 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前 4 个本征模函数如图 4.23 所示。进一步对这 4 个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图 4.24 所示。从图 4.24 可以看出，这 4 个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

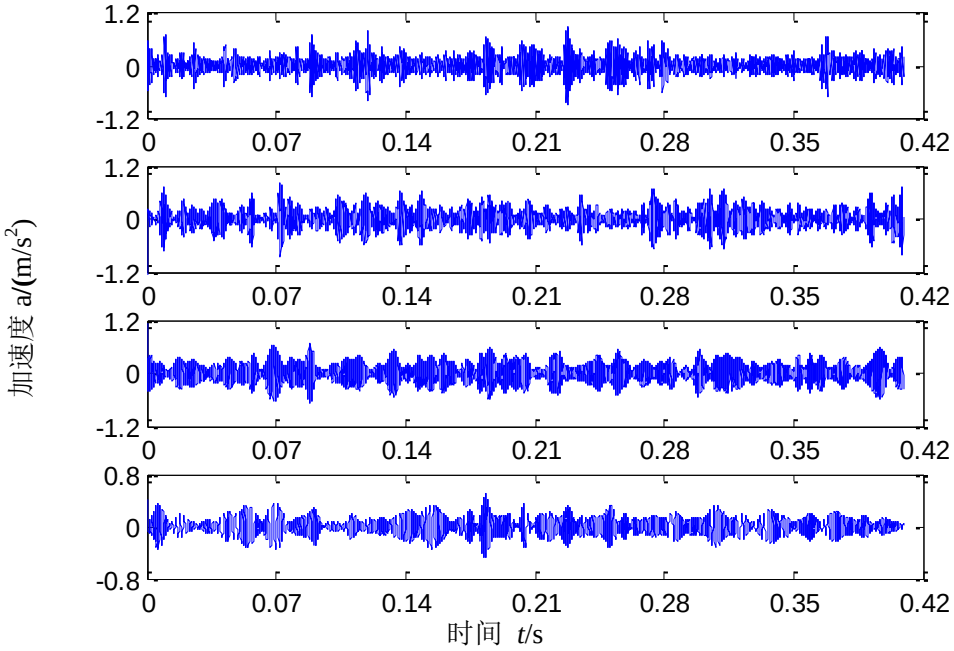



图 4.23 本征模函数

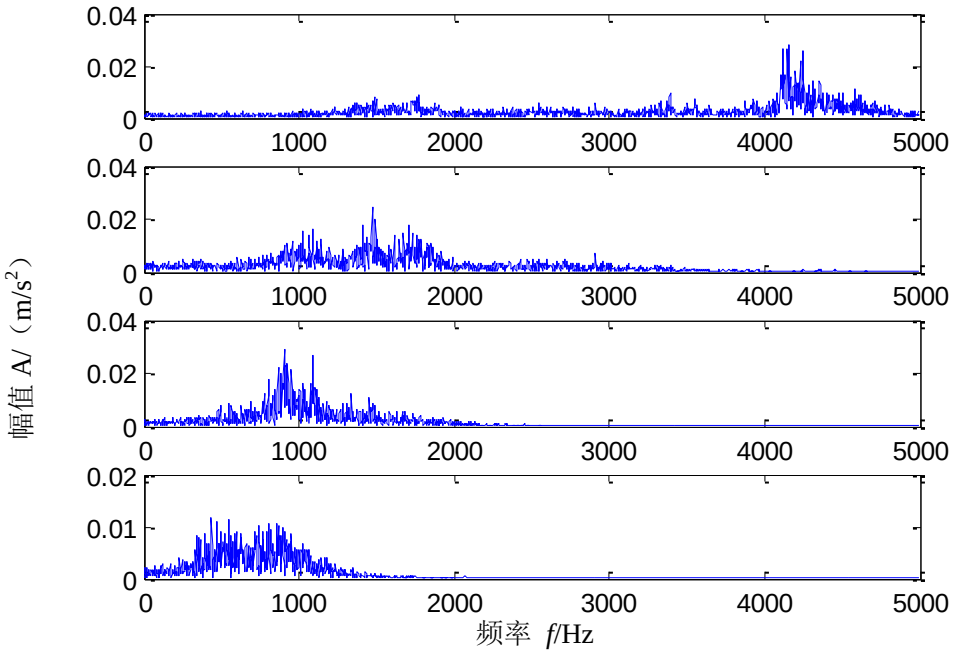



图 4.24 本征模函数的频谱

进一步对得到的 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.25 所示。在 4 个本征模函数的包络谱均没有发现滚动体故障的特征频率，这表明基于经验模式分解的包络解调方法难以诊断出该滚动体信号的故障，因此有必要进一步研究其它诊断方法对滚动体故障进行诊断。

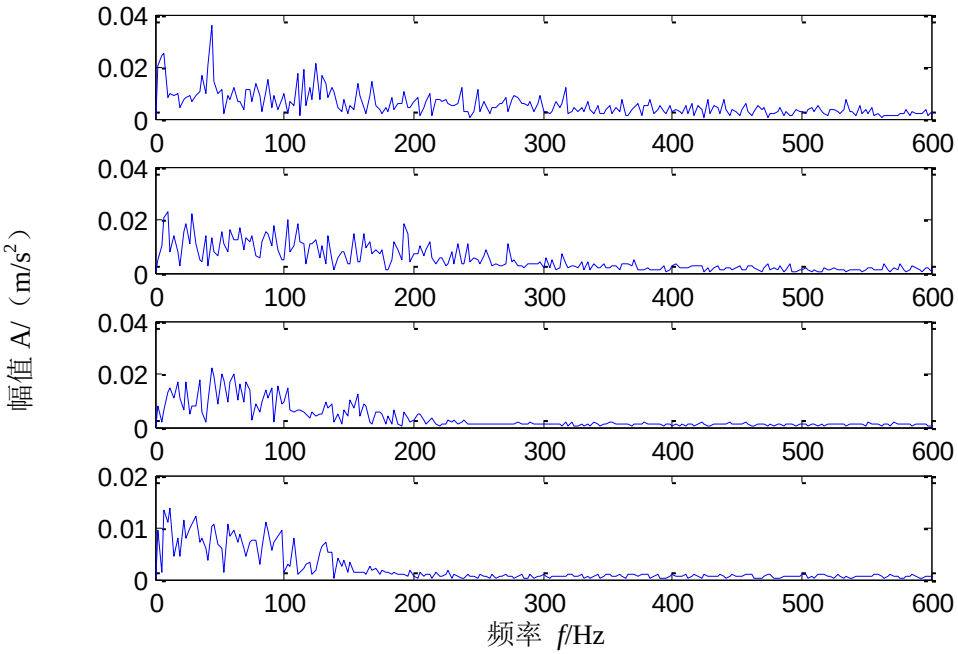



图 4.25 本征模函数的包络谱

### 4.3.2 基于机匣加速度信号的诊断

滚动轴承在转速为 1774r/min 下，从机匣处测得的振动信号的时域波形如图 4.26 所示。根据第三章公式 3-6 计算，该滚动体故障信号的特征频率为 159.5Hz。对该信号做傅里叶变换，得到的频谱如图 4.27 所示。

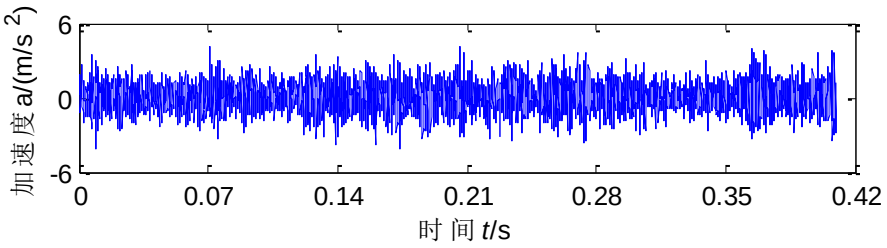



图 4.26 时域波形

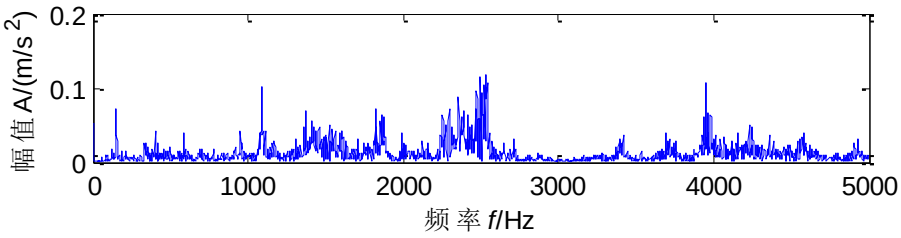



图 4.27 频谱

采用经验模式分解对该信号进行分解，得到的前 4 个本征模函数如图 4.28 所示。进一步对这 4 个本征模函数做频谱变换，得到的本征模函数的频谱如图 4.29 所示。从图 4.29 可以看出，这 4 个本征模函数的频率从高依次降低，这表明经验模式分解可以对信号的频带自适应地进行分解。

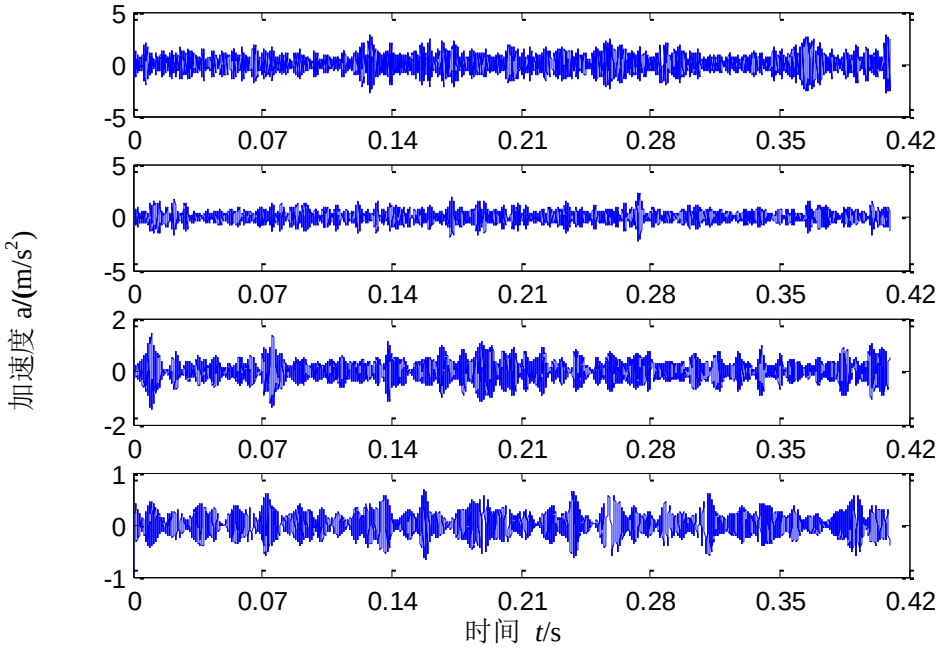



图 4.28 本征模函数

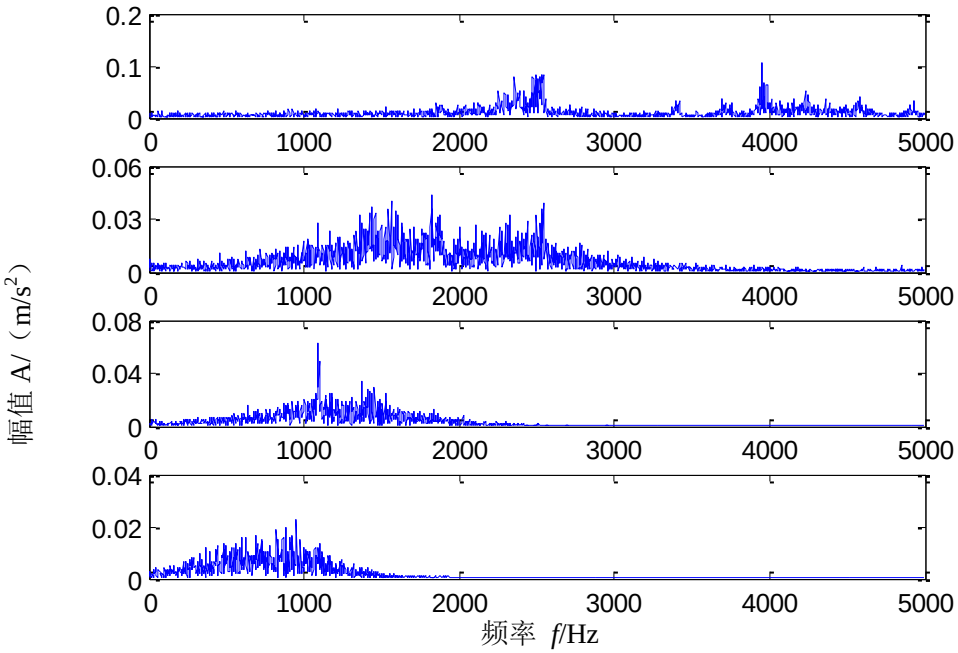



图 4.29 本征模函数的频谱

进一步对得到前 4 个本征模函数做 Hilbert 变换和频谱变换，得到的包络谱如图 4.30 所示。在 4 个本征模函数的包络谱均没有发现外圈故障的特征频率，这表明基于经验模式分解的包络解调方法难以诊断出该滚动体信号的故障，因此有必要进一步研究其它诊断方法对滚动体故障进行诊断。

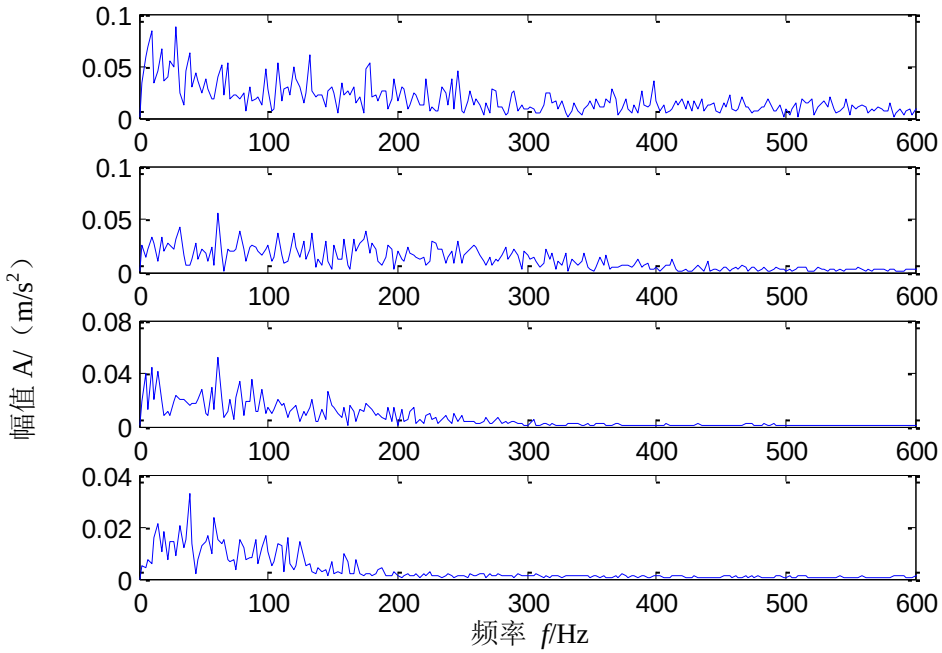



图 4.30 本征模函数的包络谱

# 第五章 总结

滚动轴承在旋转机械中应用极为广泛，其运行状态往往直接影响到整台机器的精度、可靠性及寿命。由于滚动轴承的寿命离散性很大，无法进行定时维修，因此，对滚动轴承实施状态监测与故障诊断具有重要意义。本文以压气机转子试验器为基础，从实验、理论以及应用的角度，研究了滚动轴承的故障诊断。

在实验方面，首先，本文采用电火花线切割技术加工了滚动轴承的内圈故障、外圈故障和滚动体故障；然后基于压气机转子试验器进行了滚动轴承在内圈故障、外圈故障和滚动体故障下的模拟实验，并获取了滚动轴承在各种状态下的振动数据。

在理论方面，首先，本文在分析了滚动轴承的振动机理、故障特征频率的基础上，研究滚动轴承故障诊断的经典方法——包络解调方法；然后，研究了一种新的自适应信号分解方法——经验模拟分解；最后，在分析了传统包络解调方法存在的不足之上，进一步研究了基于经验模式分解的包络解调诊断方法。

最后，文本在综合前面实验研究和理论研究的基础之上，采用实验研究中获取的滚动轴承故障数据，基于理论研究中的诊断方法，进行了滚动轴承故障诊断的研究。结果表明，基于经验模式分解的包络解调诊断方法对于内圈故障和外圈故障诊断均可以取得良好的效果，但是，难以诊断出滚动体的故障。因此，对于滚动体的故障诊断，有必要进一步研究其它的诊断方法。

# 参 考 文 献

[1] 陈进．机械设备振动监测与故障诊断[M]．上海：上海交通大学出版社，1999．
[2] 寇惠，原培新．故障诊断中的振动信号处理[M]．北京：科学出版社，2003．
[3] 韩捷，张瑞林，旋转机械故障机理及诊断技术.北京:机械工业出版社，1997
[4] 关惠玲，韩捷.设备故障诊断专家系统原理及实践.北京:机械工业出版社，2000.
[5] 钟秉林，黄仁.机械故障诊断学.北京:机械工业出版社，1998
[6] 吴凡.状态监测和故障诊断技术的现状与展望.国外电子测量技术，2006(3):6~7
[7] 徐玉妹，马孝江，张莹.故障诊断中滚动轴承数据库系统的设计及应用.机床与液压，2006(4):203~204
[8] 邱明，胡政，温熙森.FMS状态监控与故障诊断述评.中国机械工程，1999(7):810~816
[9] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996
[10] 陈果. 滚动轴承早期故障的特征提取与智能诊断[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 362~367
[11] Huang N E, Wu M, Long S R. the Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis [C]. Proceedings of the Royal Society London (Series A), 1998, 454, 903~995.
[12] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的Hilbert-Huang变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
[13] Tse P W, Peng Y H, Richard Y. Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis-Their effectives and flexibilities [J]. Journal Vibration and Acoustics, 2000, 123: 303~310
[14] Nikolaou N G. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets[J]. NDT&E International 2002, 35:197~205
[15] 高强,杜小山,范虹等. 滚动轴承故障的EMD诊断方法研究[J].振动工程学报, 2007, 20(1): 15~18.
[16] 王平,廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. 航空动力学报,2005，20(4):606~612.
[17] Robert B R,Jerome A. Rolling element bearing diagnostics——a tutorial[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2011,25:485~520.
[18] Peng Z K,Tse P W,Chu F L.A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: application to fault diagnosis for rolling bearing[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2005,19:974~988.
[19] 徐金梧，徐科.小波变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J].机械工程学报 1997，33(4):50~55
[20] Huang N E，Shen Z， Long S R. The Empirical Model Decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. Lond. A，1998(454):903~995
[21] Jason R.Stack. Fault signature detection for rolling element bearings in electric machines. The dissertation of the degree doctor of philosophy in the school of electrical and computer，2002，11l~131

# 致　　谢

在即将完成四年的学业之际，我深深感谢导师陈果教授对我悉心的指导。导师高尚的师德、严谨的治学精神、渊博的学识、先锋的学术抱负以及驾奴全局的谋略，使学生受益匪浅。导师忘我的工作精神深深的感染了我，在这三个月的毕设过程中，不仅使我学到了丰富的专业知识、科学的思维方法、独立思考和勇于开拓的精神，而且培养了我在面对困难时保持乐观、豁达、积极向上的态度。在此，再次向陈老师致以衷心的感谢！

同时我还要感谢陈老师的博士生郝腾飞学长以及两位研究生程小勇学长和王晶学姐，他们在我完成实验和论文的撰写过程中给予了我莫大的关怀和支持，他们的友好，热情感动了我，他们的勤奋，睿智让我从中受益匪浅。

感谢明殿臣同学在我实验过程中给予我的大力支持和帮助！

感谢民航学院的老师们在这四年内对我的谆谆教诲和辛勤付出！

感谢母校南京航空航天大学为我们成长成才所提供的一切！