

摘 要

滚动轴承是机械设备中最常见的零部件，它的运行状态直接影响到整台机器的功能。本文首先从理论上分析总结了滚动轴承结构的振动机理，失效形式、振动类型及发生故障的原因，针对滚动轴承故障缺陷的特点，本文采用了冲击脉冲法分析滚动轴承故障，轴承信号经过带通滤波，包络检波，冲击脉冲值转化，得出轴承运行状态，然后将小波包滤波引入到冲击脉冲法中来，提出了基于小波包滤波的冲击脉冲法，并通过试验验证了这种方法的正确性，最后设计研发了基于 LabVIEW 软件的滚动轴承故障诊断系统，该系统有效地提取了滚动轴承的故障特征，诊断识别出了滚动轴承的故障缺陷。

关键词：滚动轴承，故障诊断，冲击脉冲，小波包，虚拟仪器

ABSTRACT

Rolling bearing is one of the most familiar components in rotating machinery, and the running states will affect the whole machine's functions directly. Firstly, the fault vibration property, the failure forms and the failure cause are analyzed. Aiming at the characteristics of the bearing faults, shock pulse method (SPM) is proposed in this paper to diagnose bearing fault. The signals are processed by band-pass filtering, envelope demodulation, vibration signals transformation into decibel value and amplitude analysis. Then a new method is brought forward for the fault diagnosis, which based on the wavelet packets and shock pulse method (SPM), the new methods have been verified by the experiments. Finally the software for the fault diagnosis system of the rolling bearings is designed by LabVIEW, which can extract the fault characteristics and diagnose the fault of the rolling bearing effectively.

Lou Yuanyuan (Mechanical and Electronic Engineering)

Directed by ass-prof. Wan Shuting

KEYWORDS: rolling bearing, fault diagnosis, shock pulse method, wavelet packet, virtual instruments

摘 要

滚动轴承是机械设备中最常见的零部件，它的运行状态直接影响到整台机器的功能。本文首先从理论上分析总结了滚动轴承结构的振动机理，失效形式、振动类型及发生故障的原因，针对滚动轴承故障缺陷的特点，本文采用了冲击脉冲法分析滚动轴承故障，轴承信号经过带通滤波，包络检波，冲击脉冲值转化，得出轴承运行状态，然后将小波包滤波引入到冲击脉冲法中来，提出了基于小波包滤波的冲击脉冲法，并通过试验验证了这种方法的正确性，最后设计研发了基于 LabVIEW 软件的滚动轴承故障诊断系统，该系统有效地提取了滚动轴承的故障特征，诊断识别出了滚动轴承的故障缺陷。

关键词：滚动轴承，故障诊断，冲击脉冲，小波包，虚拟仪器

ABSTRACT

Rolling bearing is one of the most familiar components in rotating machinery, and the running states will affect the whole machine's functions directly. Firstly, the fault vibration property, the failure forms and the failure cause are analyzed. Aiming at the characteristics of the bearing faults, shock pulse method (SPM) is proposed in this paper to diagnose bearing fault. The signals are processed by band-pass filtering, envelope demodulation, vibration signals transformation into decibel value and amplitude analysis. Then a new method is brought forward for the fault diagnosis, which based on the wavelet packets and shock pulse method (SPM), the new methods have been verified by the experiments. Finally the software for the fault diagnosis system of the rolling bearings is designed by LabVIEW, which can extract the fault characteristics and diagnose the fault of the rolling bearing effectively.

Lou Yuanyuan (Mechanical and Electronic Engineering)

Directed by ass-prof. Wan Shuting

KEYWORDS: rolling bearing, fault diagnosis, shock pulse method, wavelet packet, virtual instruments

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于冲击脉冲法的滚动轴承故障诊断方法研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 姜源元 日 期： 09.1.7

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 姜源元

导师签名： 石书亭

日 期： 09.1.7

日 期： 09.1.10

第一章 引言

1.1 课题研究的意义

随着现代工业的飞速发展，生产过程中基本上实现了自动化，这时品质检测的自动化和智能化引起了人们的重视。现代机械的主流之一是被称为“传动系统”的动力机械和传动机械。而传动系统最关键、最重要的部件则是轴承。轴承部件相对于整台机械来说是价格低廉的部件，但却是故障率最高的部件。有关资料统计，机械故障的70%是振动故障，而振动故障中有30%是由滚动轴承引起的^[1]。这是因为轴承是机械设备中工作条件最为恶劣的部件。轴承在机械设备中起着承受载荷、传递载荷的作用，因而其运行状态直接影响到整台机器的功能。轴承部件故障所造成的整台设备损坏、引发灾难性事故、造成重大经济损失的事例不胜枚举^[2]！

作为基础零部件的滚动轴承广泛应用于各种机械设备中。滚动轴承运行状态的识别与诊断一直是人们关注的研究课题。研究滚动轴承的缺陷和故障识别技术及方法无疑具有重要的意义。滚动轴承在运行过程中，受到力、热、以及摩擦磨损等多种作用，其运行状态不断发生变化。一旦发生故障，往往会导致严重的后果。因此，必须在事故发生以前就能诊断出故障并加以消除，即必须在滚动轴承运行过程中对其运行状态及时做出判断，采取相应的对策，杜绝事故的发生。这样做，就可大大提高机器运行的可靠性，进一步提高机器的使用率。因此滚动轴承故障诊断技术是机械设备故障诊断技术的重要组成部分，分析研究滚动轴承故障诊断技术具有重大的科学意义和实际意义。

1.2 滚动轴承故障诊断技术的研究现状与发展趋势

1.2.1 国内外研究动态

滚动轴承的工况监视与故障诊断在国外大概开始于20世纪60年代。在其后几十年的发展时间应用的领域不断扩大，诊断的有效性不断提高。总的来说，滚动轴承故障诊断的发展经历了以下几个阶段^[3-5]。

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。20世纪60年代末，瑞典仪器公司根据各个钢制轴承元件表面损伤后在受载情况下接触时要产生冲击引起高频压

缩波的现象开发了一种成为冲击脉冲计(Shock Pulse Meter)的仪器来监测轴承故障,并且不需要进行频谱分析,所以它一经发明便很快被美国、英国等工业发达国家所采用。早期的冲击脉冲计只用来检测轴承的局部损伤类故障,后来,随着这一技术的不断发展和完善,世界上其他一些国家的公司可厂家相继开发出各种更新换代的产品,这些仪器不但用于监测轴承局部损伤类故障,而其用来监测轴承的润滑情况甚至油膜厚度等。尽管 SPM 技术已经产生了几十年时间,但现在仍然在广泛的使用^[6]。

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^[7]。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那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。

在国外,机械设备的故障诊断发展比较早,美国是最早开展设备故障诊断的国家之一。最早进行滚动轴承故障诊断方面研究的是美国学者 Guatafsson 和 Tallian,他们于1962年提出初始故障可以用加速度传感器所采集的信号峰值变化来检测,即用测量信号的峰数值与标准信号的峰数值对比方法来评价轴承状态^[8]。

1976年,日本新日铁株式会社研制了 MCV 系列机器检测仪(Machine checker),可分别在低频、中频、高频段检测轴承的异常信号。该公司还推出了油膜检测仪,它是利用超声波和高频电流对轴承的润滑状态进行监测,检测油膜是否破裂,而导致金属间的直接接触。1976-1983年,日本精工公司(NSK)相继研制出了 NB 系列轴承检测仪器。利用 1-15KHz 范围内的轴承振动信号测量有效值和峰值来检测轴承故障。英国 Dyer 等首先采用峭度系数法在轴承寿命机上检测滚动轴承损伤情况,指出峭度系数不随载荷和转速变化,只与故障程度有关^[9]。Koizumi, Reif, Wheeler 等采用信号的均方根幅值,峰值作为参数来诊断故障,效果也比较理想^[10-11]。Taylor 比较了润滑不足和多种故障的频谱特点,并提出尺寸故障计算方法^[12]。Randall 进行倒频谱分析,并指出倒频谱分析比功率谱更好^[13]。Mathew 等针对 FFT 技术的不足,采用共振解调法和 AR 模型来检测低速轴承故障,取得了满意的效果^[14]。

我国的故障诊断技术研究起步较晚。从1979年到1983年,设备故障诊断技术从初步认识进入到初步实践阶段,主要是学习国外的先进技术和经验。对滚动轴承的故障诊断,在国内虽然起步较晚,但近年来发展较快。较早进行研究的是上海交

通大学,对滚动轴承故障诊断进行了较全面、系统的研究;重庆大学的雷继尧等在轴承寿命实验机上进行了大量实验,发现了“高频峰群”现象,并据此开发了一套微机诊断系统^[15];南京航空航天大学等开发了一套轧钢机轴承在线监测和诊断系统,提出了同一轴承内多个同类故障的诊断方法^[16]。国内很多院校也都将滚动轴承故障诊断作为研究的一项主要内容。吉林大学的陈向东等人利用神经网络的函数逼近和记忆能力实现了滚动轴承运行状态的故障监测;吉林大学的陈向东等利用神经网络的逼近函数和记忆能力实现了滚动轴承运行状态的故障监测^[17]。西北工业大学的王平利用共振解调技术和BP神经网络技术实现了滚动轴承故障在线智能诊断^[18-19],该仪器具有自动化和智能化的优点,且故障诊断准确性高,使用方便。从国内召开的全国机械设备故障诊断学术会议论文集来看,研究开展的情况也比较活跃。国内还研制开发了一些检测仪器,如JK8241轴承齿轮故障分析仪、HBA-2电脑轴承分析仪等。

1.2.2 发展趋势

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、力学等自然科学和计算机技术、数字信号处理技术、人工智能技术的综合学科。与传统的诊断方法相比,目前的研究方向主要表现在以下几个方面^[20-25]:

1 小波变换

从80年代后期开始,作为应用数学的一个分支,小波变换得到了迅速的发展。由于小波变换在时、频域的局部化和可变时频窗的特点,与传统的傅立叶变换相比,小波变换更适合分析非稳态信号。因为滚动轴承的损伤故障信号是典型非稳态信号,所以用小波变换处理轴承振动信号,可更为有效地获得故障特征信息。

2 专家系统

近年来随着人工智能技术的发展,专家系统技术得到了迅速的推广。所谓的专家系统就是一个智能的计算机程序,它能模拟专家在处理问题时的一些推理方法,利用已有的知识和经验建立模型,解决问题。将基于知识的专家系统技术应用于故障诊断领域可以使滚动轴承诊断分析和决策分析更加准确可靠。

3 模糊诊断

由于滚动轴承振动信号中故障特征振动与故障类型不存在绝对的对对应关系,一种故障可能引起多种特征,而一种故障特征可能对应多类故障,因此近年来,模糊理论被引进到轴承故障诊断领域。轴承故障模糊诊断中的概念是模糊概念,可以用模糊集合来表示,而模糊变换运算是用来讨论模糊判断和推理的。

4 神经网络

轴承故障诊断的目的，是从故障定位到确定故障性质，进而确定故障发生的程度，由于神经网络具有处理复杂多模式及进行联想，推测和记忆的功能，因而近年来在故障诊断领域引起了广泛的研究。

1.2.3 滚动故障诊断的基本环节

滚动轴承故障诊断要识别滚动轴承运行状态，研究其运行状态的变化在诊断信息中的反映。它的内容包括对滚动轴承运行状态的识别、故障预测和故障监视等，概括为以下 5 个方面^[26-29]：

- 1 测取：根据滚动轴承的工况，选择并测取能够反映滚动轴承工作情况或状态的信号；
- 2 特征(征兆)提取：从状态信号中提取与滚动轴承故障对应的特征信息(征兆)；
- 3 监视(状态识别)：根据特征信息，识别滚动轴承的故障(故障识别)；
- 4 诊断(状态分析)：根据滚动轴承运行时的征兆和故障，进一步分析故障的部位、类型、原因和趋势等；
- 5 决策干预：根据滚动轴承的故障及其发展趋势，做出评价和决策，包括控制、自诊治、调整、维修、继续监测等措施。整个诊断过程如图 1-1 所示。

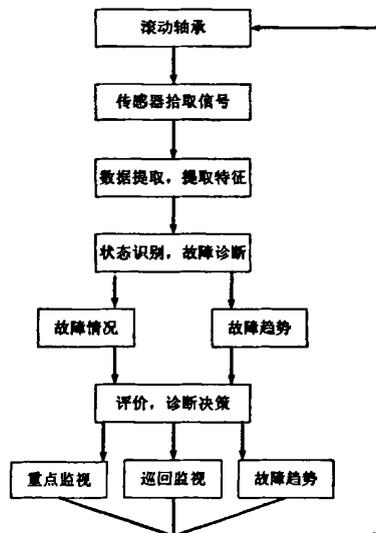


图 1-1 滚动轴承故障诊断的过程

基于振动信号分析的机械监测诊断技术，目前仍然是轴承诊断的主要手段之一。振动法是通过安装在轴承座适当方位的振动传感器监测轴承的振动信号，并对

此信号进行分析处理来判断轴承的状况和故障。由于振动法具有：①适用于各种类型、各种工况的轴承；可以有效诊断出早期故障；③信号测试与处理简单直观；诊断结果相对可靠等优点，所以在实际中得到了广泛的应用。

1.3 本论文的内容

本论文主题在如何有效地运用冲击脉冲法从滚动轴承振动信号中提取故障信息，继而判断滚动轴承是否存在故障及其故障程度。围绕这个主题，本文的研究内容如下：

第一章：概述滚动轴承故障诊断技术研究的意义、研究现状和发展趋势。

第二章：系统的介绍了滚动轴承的主要失效形式、振动机理以及其典型故障的振动特征。

第三章：详细的阐述了冲击脉冲法原理、希尔伯特变换（Hilbert）原理，并通过试验验证了该方法的有效性。

第四章：详细阐述了基于小波包滤波的冲击脉冲原理，提出了基于小波包变换的滚动轴承故障诊断方法，并通过试验验证了该方法的有效性。

第五章：在前面分析的基础上，采用 LabVIEW 软件编写了基于虚拟仪器的滚动轴承故障诊断系统。该系统可以实现滚动轴承参数的设置、信号的时域和频域分析，信号的故障冲击脉冲值显示与诊断等功能。

第二章 滚动轴承故障特征分析

轴承是机械系统中重要的支撑部件，其性能与工况的好坏直接影响到与之相联的转轴以及安装在转轴上的齿轮乃至整个机器设备的性能。据统计，在使用轴承的旋转机械中，大约有 30% 的故障都是由轴承引起的，因此，开展对轴承的故障诊断很有现实意义。根据其工作原理的不同，轴承可分为滚动轴承和滑动轴承两大类。在生产实际中，滚动轴承应用较广泛，所以，在本文中我们只讨论滚动轴承的故障诊断。

2.1 滚动轴承的失效形式

滚动轴承在运行过程中，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，经过一段时间后，轴承也会出现疲劳剥落和磨损而不能正常工作。总之，滚动轴承的损伤形式是十分复杂的。下面列出滚动轴承的主要损伤形式及原因^[30]。

2.1.1 滚动轴承的正常疲劳失效

滚动轴承在其运行总小时数超过轴承计算寿命后，所发生的疲劳剥落为正常疲劳失效。产生正常失效的原因是滚动表面的金属由于运转时的应力循环数超过材料的疲劳极限，从次表层开始萌生疲劳裂纹，并向表面层开裂而落下金属碎片一剥落。正常疲劳失效所表现的特征：疲劳裂纹的萌生在次表层，故看不见，用普通仪器也无法侦听到。剥落的屑片表面粗糙而不规则，原滚动表面留下疤痕状小坑，称为点蚀。点蚀一旦出现，即迅速扩展，短时间内即引起全面疲劳剥落，应及早更换轴承，否则将引起轴承的事故性报废，可能对安装部位甚至对整机带来严重的后果。

超过计算寿命的疲劳剥落，实际上是不可避免的最终必然发生的现象，这时材料的潜力已被充分利用。如用户在工作寿命方面的要求仍不满足，可在轴承的润滑剂中加添合适的极压添加剂，改用性能更高或尺寸更大的轴承，或选用真空冶炼，多次真空重炼等钢材所制轴承。

2.1.2 滚动轴承的正常磨损失效

滚动轴承在其运转总小时数或总转数超过轴承的计算寿命，或超过磨损寿命后的过度磨损，为正常磨损失效。产生原因是：滚动轴承的运动都伴有微小滑动，所受负荷也总有一定波动，因而润滑可以延缓磨损但实际不能避免两界面的固体接触，即不能完全避免磨损。它所表现出的特征是：滚动表面沿运动方向发生较光滑的磨损条纹，新条纹有显著的金属光泽。滚动轴承的正常磨损也有三个阶段，即短

期的“跑合”磨损，长时间的平缓磨损，以及短期的剧烈磨损，最终使轴承的精度丧失，或引起振动和噪声而不能继续使用。

超过额定寿命或磨损寿命的磨损失效，在现有技术水平条件下实际上也是不可避免的。如用户在工作寿命方面的要求仍不满足，可改进轴承的润滑方式，选用更有效的润滑剂，或按具体情况加添合适的油性添加剂或抗磨添加剂，提高轴承及其润滑剂的清洁程度，改进密封等。

2.1.3 滚动轴承的疲劳失效

疲劳是滚动轴承的另一种失效形式，常表现为滚动体或滚道表面剥落或脱皮。初期是在表面上形成不规则的凹坑，以后逐渐延伸成片。滚动轴承在工作时，由于滚动体与内、外圈接触面积很小，因此接触应力很大。在高速旋转时，由于巨大交变接触应力多次反复作用，轴承元件金属表面就会发生疲劳，产生剥落形成小凹坑。造成剥落的主要原因是载荷引起的交变应力，有时是因为润滑不良强迫安装。

2.1.4 滚动轴承的胶合失效

胶合发生在滚动接触的两个表面间，为一个表面上的金属粘附到另一个表面的现象。当滚子在保持架内卡住，由于润滑不良、速度过高和惯性力的影响，保持架的材料粘附到滚子端面上形成螺旋型污斑状的胶合。

2.1.5 滚动轴承的磨损失效

磨损是滚动轴承最常见的一种失效形式，是轴承滚道、滚动体、保持架、座空或安装轴承的轴颈，由于机械原因或润滑杂质引起的表面磨损。在工作环境恶劣的情况下，许多杂质会混杂在润滑油中，进入轴承，从而就会在滚动体和滚道上产生磨料磨损，在滚动体和滚道上出现不均匀的划痕。磨料的存在，是轴承磨损的基本原因。

2.1.6 滚动轴承的烧伤失效

滚动轴承的烧伤失效损伤结果是：表面局部软化，降低使用寿命。滚动轴承的烧伤失效损伤特征是：滚道面、滚动体面、挡边面变色、软化、熔体滚动轴承的烧伤失效损伤原因是：装配不当，润滑不良。

2.1.7 滚动轴承的腐蚀失效

疲劳是滚动轴承的另一种失效形式，常表现为滚动体或滚道表面剥落或脱皮。初期是在表面上形成不规则的凹坑，以后逐渐延伸成片。滚动轴承在工作时，由于滚动体与内、外圈接触面积很小，因此接触应力很大。在高速旋转时，由于巨大交变接触应力多次反复作用，轴承元件金属表面就会发生疲劳，产生剥落形成小凹坑。

造成剥落的主要原因是载荷引起的交变应力，有时是因为润滑不良强迫安装。

2.1.8 滚动轴承的破损失效

滚动轴承的破损失效损伤结果是：导致产生裂纹，断裂，使轴承失效。滚动轴承的破损失效损伤特征是：外环或内环裂纹；滚动体产生裂纹；保持架断裂。滚动轴承的破损失效损伤原因是：冲击载荷过大，装配不当，胶合发展；冲击载荷，热处理不当(制造原因)；对中不良，润滑不良，异物载荷，转速过快，异物进入。

2.1.9 滚动轴承的压痕失效

压痕是由于轴承过载，撞击或异物进入滚道内使得滚动体或滚道表面上产生局部变形而出现的凹坑。其原因主要是由于装配不当，有时也可能是过载或撞击造成。

2.2 滚动轴承故障振动的诊断

滚动轴承不同类型的故障会引起轴承系统不同性质的振动，如图 2-1 所示^[31]：

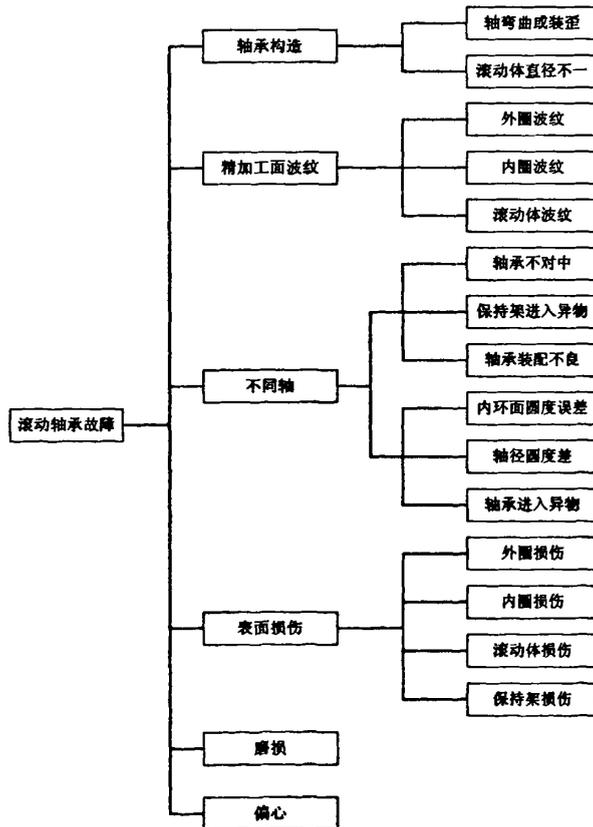


图 2-1 滚动轴承故障框图

2.2.1 引起滚动轴承振动的原因和特征频率

引起滚动轴承振动和噪声的原因，除了外部激励因素（如转子的不平衡、不对中、流体激励、结构共振的振动传递）之外，属于轴承本身内部原因产生的振动可分如下三种类型^[32]。

第一类 由于轴承结构本身引起的振动。这部分包括：滚动体通过载荷的方向产生的振动；套圈的固有振动；轴承弹性特性引起的振动。

第二类 由于轴承形状和精度问题引起的振动。这部分包括：套圈、滚道和滚动体波纹度引起的振动；滚动体大小不均匀和内、外圈偏心引起的振动。

第三类 由于轴承使用不当或装配不正确引起的振动。这部分包括：滚道接触表面局部缺陷引起的振动；润滑不良，由摩擦引起的振动；装配不正确，轴颈偏斜产生的振动。

下面将分别叙述滚动轴承发生振动的各类故障原因和特征。

1 滚动体通过载荷方向产生的振动

轴承在外载荷的作用下，最下面的滚动体受力最大，最上面的滚动体受力最小，其余的滚动体的受力依据其位置的不同是不相同的。

轴在旋转过程中，最下面的滚动体从载荷中心线下面向非载荷中心线位置滚动，其接触力由大变小，并且引起轴颈中心 δ 的位移。轴颈中心不仅有上下方向的微动，随着滚动体接触位置的变动，还有水平方向的微动。因此，只要轴在旋转，每个滚动体通过载荷的中心线时，就会发生一次力的变化，对轴颈或轴承座产生激励的作用。

2 套圈的固有振动

套圈的固有振动主要表现在外圈上，因为一般轴承中外圈与轴承壳体为动配合，外圈在壳体内可以自由活动，因此轴承上受到任何冲击性的激励力，均可激起外圈固有频率的振动。内圈因为与轴为静配合，固有振动频率较高，振动相对要小。套圈径向弯曲振动的固有频率可近似地按下式计算。

$$f_{en} = \frac{n(n^2 - 1)}{2\pi(D/2)^2 \sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{EIg}{\rho A}} \quad (\text{Hz}) \quad (2-1)$$

式中 E —材料的弹性模数，Pa，钢材为 210Gpa；

I —圆环纵向截面的惯性矩， m^4 ； g —重力加速度， m/s^2 ；

ρ —材料密度， Kg/m^3 ； A —圆环纵向截面面积， $A=bh$ ， m^2 ；

h —圆环厚度，m； b —圆环宽度，m；

D —圆环中性轴直径, m^2 ; n —振动阶数。

3 轴承弹性特性引起的振动

轴承弹性特性除了引起套圈振动之外, 滚动体也会像一个“弹簧”那样产生弹性变形, 但是它的刚性很高, 并且具有非线性弹簧的特性。如果润滑不良, 容易出现非线性振动。振动频率有轴的转速频率、高次谐波和分数谐波。不过球轴承的弹性特征具有对称的非线性, 一般产生奇数倍的谐波振动。

有游隙的大型轴承, 承受径向载荷或作低速旋转时, 滚动体从负荷区进入非负荷区变成自由运动, 因滚动体自身重力使其位置超前或滞后, 将冲撞保持架和套圈, 产生自由振动。

轴承套圈的固有频率从数千赫兹至数十千赫兹, 而滚动体的固有频率可达数百千赫, 可见滚动轴承元件的固有频率都是很高的。轴承接触表面的缺陷所产生的冲击力, 能够激起轴承元件的固有频率振动, 一般在 20-60kHz 范围内总是有它的振动响应, 因此很多振动诊断方法利用这一频段作为检测频带。

4 套圈、滚道和滚动体波纹度引起的振动

轴承内、外圈经过精加工的, 虽然明显的起伏波纹并不存在, 但是一些微小的加工波纹也会引起轴承的振动, 波纹度是引起轴承振动的主要原因之一。振动频率与波纹数 n 的关系和所处的元件有关。当球轴承承受轴向载荷, 内圈旋转、外圈静止时, 其沟道上的波纹峰数与外圈振动频率的关系见表 2-1 所示。

表2-1 轴承滚动面波纹度与振动频率的关系

轴承元件	波纹峰数		振动频率	
	径向或角度方向	轴向	径向或角度方向	轴向
内圈滚道	$nz \pm 1$	nz	$nzf_i \pm f$	nzf_i
外圈滚道	$nz \pm 1$	nz	nzf_c	nzf_c
滚动体滚动面	$2n$	$2n$	$2nf_o \pm f_c$	nzf_o

注: n —正整数 ($n=1, 2, 3\cdots$);

z —滚动体数; f —轴转速频率;

f_i —一个滚动体在内圈上的通过频率； f_c —保持架转速频率；
 f_o —滚动体相对于保持架的转速频率。

从表 2-1 中看到，只有当内、外圈的加工波纹峰数为 $mz \pm 1$ 是，才会产生外圈的径向移动，而当波纹峰数为 mz 时，外圈不产生径向移动。

5 滚动体大小不均匀和内、外圈偏心引起的振动

滚动体大小不均匀，不仅使大的滚动体受到较大的应力，过早产生疲劳剥落，而且轴承在工作中容易发生颤振，发出噪声。研究证明，大小不同的滚动体运转后的磨耗程度是不相同的，小球的磨耗反而大于大球，而且球的大小相差愈大，磨耗愈明显，结果是轴承游隙增大，运转精度降低，振动和噪声增加。所以对直径较小的滚动轴承（直径 $D < 15\text{mm}$ ），一般规定滚动体直径大小相差不超过 0.002mm ，较精密的轴承不大于 0.001mm ，超精轴承要求不大于 0.0006mm 。

6 滚道接触表面局部性缺陷引起的振动

滚动轴承可能由于润滑不良，载荷过大，材质不良，轴承内落入异物，修饰等原因引起轴承工作表面上的剥落、裂纹、压痕、腐蚀凹坑和胶合等离散型缺陷或局部损伤。当滚动体通过一个缺陷时，就会产生一个微弱的冲击脉冲信号，好像小榔头敲击一样。轴承内产生的冲击能量可激起轴承和轴承座各零件以其固有频率振动，振动能量随着机械结构的阻尼而衰减。因此，这种由局部缺陷所产生的冲击脉冲信号，其频率成分不仅有反映轴承故障特征的间隔频率（即通过缺陷处的冲击频率），而且还包含有反映轴承元件自振频率的高频成分。

7 润滑不良，由摩擦引起的振动

滚动轴承发生摩擦，主要由下列几部分产生：滚动体与滚道之间的滚动与滑动摩擦；滚柱轴承的滚动体端面与套圈挡边之间的滑动摩擦；滚动体与保持架之间的滑动摩擦；保持架与套圈引导面之间的滑动摩擦；软化剂、空气对轴承运转元件的摩擦；密封装置的滑动摩擦。

在上述这几部分的摩擦中，滚动体与滚道之间除了滚动摩擦之外，还有一定量的滑动摩擦。

滚动轴承中存在各个元件之间的滑动摩擦，摩擦导致磨损、擦伤、疲劳剥落和裂纹的损伤，如果润滑剂不足或润滑不良，滚动体在滚道上不能形成良好的油膜，金属之间的直接摩擦在滚道上产生更多的缺陷或损伤，使轴承工作时振动加大。

保持架的引导面与滚动体之间无油膜隔离，则可能使滚动体在保持架内被卡住，滚动体在滚道上以滑动代替滚动，产生摩擦发热，保持架的材料胶合到滚动体上。润滑不良首先会使保持架产生异常的振动和噪声，这种振动是由于滚动体和保持架之间发生摩擦，引起保持架的自激振动所致。

8 装配不正确，轴颈偏斜产生的振动

如果轴承在轴上装歪或者旋转轴发生了弯曲，轴在旋转时相当于转子的角度不对中现象，将表现出以转速频率 f 为特征的振动频率。但在滚动轴承中，由于轴的弯曲式轴承单侧受力，因此又具有滚动体通过频率 f_c 的特征，两者结合成为 $f_c \pm f$ ，成为这种故障振动的主要频率成分。

2.2.2 滚动轴承缺陷产生的间隔频率

当滚动体和滚道接触处遇到一个局部缺陷时，就有一个冲击信号产生。缺陷在不同元件上，接触点经过缺陷的频率是不同的，这个频率就称为冲击脉冲的间隔频率或特征频率。间隔频率可以根据轴承的转速、轴承零件的形状和尺寸由轴承的简单运动关系分析中得到。

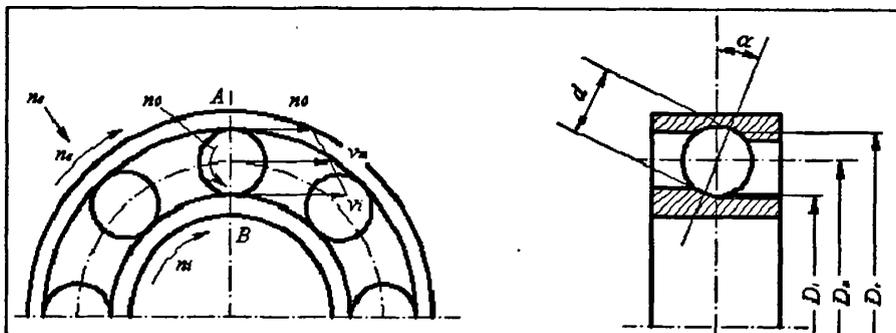


图2-2 滚动轴承中各元件的运动关系

如图 2-2 所示，设外圈和内圈滚道上分别有一接触点 A 和 B，如果径向游隙为零，则 A 点和 B 点的圆周速度分别为：

$$v_o = \frac{\pi D_o}{60} n_o \quad (2-2)$$

$$v_i = \frac{\pi D_i}{60} n_i \quad (2-3)$$

式中 v_o 、 v_i —外圈、内圈滚道接触点处的圆周速度，mm/s；

D_o 、 D_i —外圈、内圈滚道接触点处的直径，mm；

n_o 、 n_i —外圈、内圈的转速，r/min。

令
$$\gamma = \frac{d}{D_o} \cos \alpha \quad (2-4)$$

式中 d —滚动体直径，mm；

D_m —滚动体中心圆直径, mm ;

α —接触角, 指接触中心线与滚动体中心线在轴承轴向平面上的夹角, rad 或 ($^\circ$)。

滚动体的公转线速度也就式保持架中心圆的线速度。

保持架的转速为:

$$n_c = \frac{1}{2}[n_i(1-\gamma) + n_e(1+\gamma)] \quad (2-5)$$

内圈相对于保持架的转速为:

$$n_{ic} = n_i - n_c = \frac{1}{2}(n_i - n_e)(1+\gamma) \quad (2-6)$$

外圈相对于保持架的转速为:

$$n_{ec} = n_e - n_c = \frac{1}{2}(n_e - n_i)(1-\gamma) \quad (2-7)$$

绝大多数滚动轴承在实际应用中总是保持外圈静止, 内圈与轴一起旋转, 当轴的转速为 n 时, 则: $n_i = n$ $n_e = 0$

由上面式 (2-6) 可得内圈相对于保持架的转速:

内圈相对于保持架的转速:

$$n_{ic} = \frac{1}{2}n(1+\gamma) = \frac{1}{2}n\left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D_m}\right) \quad (2-8)$$

因为保持架上有 z 个滚动体, 所以内圈上某一点每分钟通过的滚动体数为:

$$N_i = n_{ic}z = \frac{1}{2}n\left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D_m}\right)z \quad (2-9)$$

保持架相对于外圈的转速:

$$n_{ec} = \frac{1}{2}n(1-\gamma) = \frac{1}{2}n\left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D_m}\right) \quad (2-10)$$

外圈上某一点每分钟通过的滚动体数为:

$$N_e = n_{ec}z = \frac{1}{2}n\left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D_m}\right)z \quad (2-11)$$

滚动体自转速度为:

$$n_o = -\frac{D_m}{2d}n(1-\gamma^2) = -\frac{D_m}{2d}n\left(1 - \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{D_m^2}\right) \quad (2-12)$$

当内圈、外圈、滚子出现点蚀等故障时，会产生一定（特征）频率的冲击，引起轴承振动，机器运行会出现周期性脉冲。在外圈固定，内圈与轴一起旋转的情况下，假如内圈滚道、外圈滚道或滚动体上有一处局部缺陷（剥落或裂纹），则两种金属在缺陷处相接触时的冲击振动间隔频率见表 2-2。

表2-2 由局部缺陷引起的冲击振动间隔频率

缺陷位置		冲击振动发生的间隔频率 /Hz	备注
内圈		$f_i = \frac{n}{2 \times 60} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) z$	Z 个滚动体通过内圈上一处缺陷的频率
外圈		$f_e = \frac{n}{2 \times 60} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) z$	Z 个滚动体通过外圈上一处缺陷的频率
滚动体	冲击单侧滚道	$f_{o1} = \frac{n}{2 \times 60} \frac{D_m}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cos^2 \alpha\right)$	即滚动体的自转频率
	冲击两侧滚道	$f_{o2} = \frac{n}{60} \frac{D_m}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cos^2 \alpha\right)$	滚动体上一处缺陷冲击内、外圈滚道的频率
保持架与外圈摩擦		$f_{ac} = \frac{n}{2 \times 60} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$	即保持架的频率
保持架与内圈摩擦		$f_{ic} = \frac{n}{2 \times 60} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$	亦即一个滚动体通过内圈上某一点的频率

2.3 本章小结

本章详细阐述了滚动轴承结构的振动机理、失效形式、振动类型及发生故障的原因，为以后几章的滚动轴承振动信号的故障分析提供了理论依据。

第三章 冲击脉冲法在滚动轴承故障中的研究

冲击脉冲法（英文称 SPM，即 Shock Pulse Method），是由瑞典 SPM Instrument AB 公司在上世纪 60 年代末最先提出的一套系统监测方法，专门用于滚动轴承多种失效的诊断，尤其对疲劳失效、磨损失效、润滑不良等失效的诊断准确率相当高，是滚动轴承失效诊断的主要方法。目前被公认为对诊断滚动轴承局部损伤故障工程实用性最强。

3.1 冲击脉冲法介绍

20 世纪 60 年代末，瑞典仪器公司根据各个钢制轴承元件表面损伤后在受载情况下接触时要产生冲击引起高频压缩波的现象开发了一种成为冲击脉冲计 (Shock Pulse Meter) 的仪器来监测轴承故障，并且不需要进行频谱分析，所以它一经发明便很快被美国、英国等工业发达国家所采用。早期的冲击脉冲计只用来检测轴承的局部损伤类故障，后来，随着这一技术的不断发展和完善，世界上其他一些国家的公司可厂家相继开发出各种更新换代的产品，这些仪器不但用于监测轴承局部损伤类故障，而其用来监测轴承的润滑情况甚至油膜厚度等。尽管 SPM 技术已经产生了几十年时间，但现在仍然在广泛的使用。

3.1.1 冲击脉冲法基本原理

传统的振动分析技术是直接对振动信号作 FFT 分析，得到“振动频谱”。该频谱中含有：机器转子不平衡、支承对中不良等因素引起的低频振动的多阶频谱、轴承故障损伤引起冲击的若干阶频谱等，轴承故障冲击的谱线实际上是看不到的。

在转动机械及其轴承故障诊断领域所论的振动，通常是指周期振动，即与机器转动有关的、周而复始的、其频谱相对于引起该现象周期作用力之重复频率仅数倍以内的运动，而冲击则是相对于引起该现象周期作用力的重复频率有几乎无限丰富的高阶频谱的特殊振动。振动主要是由连续的不平衡作用力引起的，而冲击则主要由不连续的冲击力所致的碰撞引起。则主要由不连续的冲击力所致的碰撞引起^[39]。

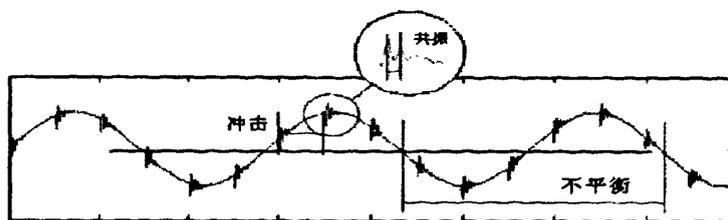


图 3-1 冲击和振动的瞬时信号

尽管冲击的基本重复频率也与振动的重复频率相同或相近，但是，初期故障引起的冲击的量值常常远小于振动值。这是因为振动表现为上述的持久过程，能量是持续释放的，积累量值较大，而冲击则是异常短暂的过程，峰值能量也许较大，但积累能量甚微。

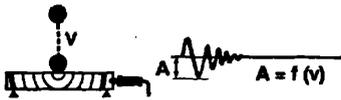


图 3-2 冲击脉冲的形成过程

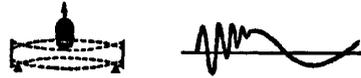


图 3-3 振动的形成过程

共振，同样是人们司空见惯的物理现象：如果外力的激励频率与物体的固有频率相同，则将激起物体产生很大的振动。如果物体的阻尼很小的话，振动将趋于无穷大。但是，上面的论述，仅仅描述了共振的一个方面。值得注意的另一种共振现象是，任何一个谐振系统，不管激励它的外部作用的重复频率如何不同于其固有频率，只要外作用力的高阶频谱落在以固有频率为中心的一个通带内，也将激起该系统的共振现象发生。

我们可以应用共振的这一独有特征，来提取深埋于正常振动信息中的轴承故障冲击的信息。由于正常的振动中不含高频的分量，而轴承等故障冲击中则含有，因此，可设一个高频的，正常振动频率所不达的谐振系统，剔除正常振动，响应冲击激励，实现冲击信息的提取。

由此得出冲击脉冲的理论依据：在一个滚动轴承内，当内圈、外圈或滚动体损伤时，在其受载相接触时要产生冲击，该冲击在轴承内外圈滚道上产生压力波，并且以不连续的冲击脉冲波形式传递到轴承座上。在这个冲击力作用下，轴承元件或结构的某一部分的固有频率可能被激发。尽管冲击脉冲的重复率远低于轴承的固有频率，但只要这个冲击产生的高阶频率落在轴承固有频率的通带内，也会激起轴承系统的共振现象。冲击脉冲法正是通过检测冲击点处的冲击波幅值来判断轴承内滚动体与滚道间的碰撞程度，从而有效识别出轴承的工作状态与故障类型。

轴承的冲击振动激起其固有频率的减幅振荡，经轴承座传播到加速度传感器上，这个振动的幅度与轴承故障的严重程度成正比。对此加速度信号进行采集，经过带通滤波器，滤除轴承附近的中低频的机械干扰，只让反映冲击脉冲振动的高频成分通过，其高频信号经过可调衰减器和放大器，再经包络检波得到解调后的信号，对此信号进行分析处理，最终显示出冲击脉冲值来确定轴承的运行状态。冲击脉冲信号处理的过程如图 3-4 所示^[34]，信号变换过程如图 3-5 所示：

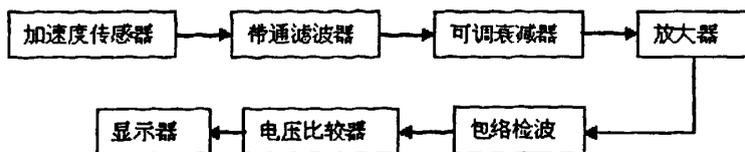


图 3-4 脉冲信号的处理过程

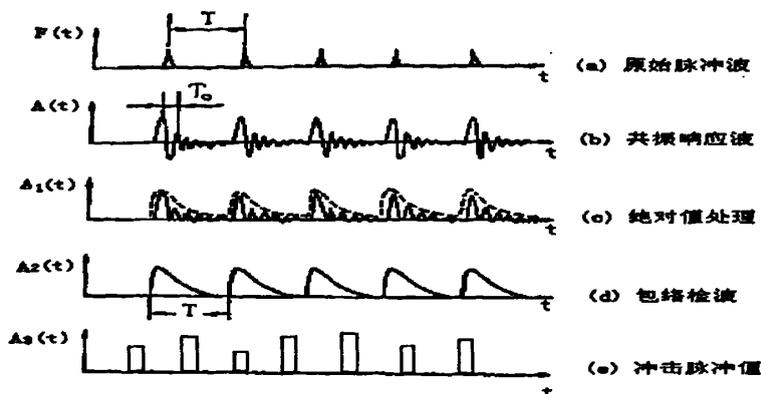


图 3-5 冲击脉冲法的信号变换过程

采用冲击脉冲诊断滚动轴承，只能判明其总体的状态，不可确定其中哪个元件损坏，这在生产现场设备中已经足够，因为对于滚动轴承来说只要其中任何一个元件损坏，都得进行总体更换，无需将故障定位到某个元件。

3.1.2 滚动轴承的寿命及其评定参数

3.1.2.1 SPM 法轴承寿命定义

滚动轴承的寿命是以同一批型号的轴承，在相同运转条件下 90%的轴承不发生破坏前的转数或工作小时数作为轴承的寿命，并把这个寿命叫做额定寿命。而冲击脉冲对轴承寿命的定义为，一只完好的新轴承有一个初始冲击振动值，当冲击振动值达到初始冲击振动值的 1000 倍左右时，就认为该轴承已经达到使用寿命的终点。用分贝 (dB) 表示时，轴承寿命终点的冲击振动值为 60 dB，即：

$$20 \times \lg 1000 / 1 = 20 \times \lg 10^3 = 20 \times 3 = 60 \text{ (dB)} \quad (3-1)$$

3.1.2.2 SPM 法轴承状态评定参数

dBsv: 冲击脉冲值的绝对分贝，是用来衡量冲击脉冲能量强度的绝对值。

dBi: 冲击脉冲值的背景分贝，即滚动轴承初始值。其数值大小取决于滚动轴承内径大小和转速的大小。

$$dBi = 20 (\lg n + 0.6 \lg d - \lg 2150) \quad (3-2)$$

式中：n—滚动轴承转速（转/分）， d—滚动轴承内圈直径（毫米）。

dB_n: 冲击脉冲值的标准分贝，用来评定滚动轴承工作状态的标准。dB_n=dB_{sv}-dB_i。

$$dB_n = 20 \lg \frac{2000SV}{nd^{0.6}} \quad (3-3)$$

式中：SV—初级仪表量度得到的轴承冲击值

n—滚动轴承转速（转/分）， d—滚动轴承内圈直径（毫米）。

dB_m: 冲击脉冲值的最大分贝，表示滚动轴承元件损坏的最大程度。

dB_c: 地毯分贝。其数值为每秒产生 200 个冲击脉冲信号的最高读数。表示滚动轴承的润滑状态。一个工作状态良好的滚动轴承，地毯值低于 10 dB_n。

3.1.2.3 滚动轴承状态的识别

SPM 法是以标准分贝 dB_n 为评判标准的，滚动轴承评判标准如图 3-6 所示：

底部黑色区域——读数为 0—20 dB_n。表示滚动轴承处于正常良好状态。

中间白色区域——读数为 20—35 dB_n。表示滚动轴承已出现轻微的失效或表示滚动轴承有降低工作状态的趋势存在。

顶部黑色区域——读数为 35—60 dB_n。表示滚动轴承已出现较重或严重缺陷。

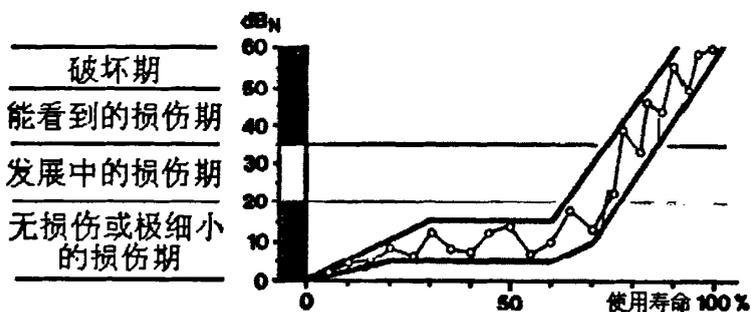


图 3-6 冲击脉冲的判别标准

冲击脉冲最大值 dB_m 用于定义轴承状态等级，而 dB_m 与 dB_c 之间的差值用于对轴承损坏状态的原因进行分析。

- (1) 当 dB_c<10dB_n, dB_m≤20dB_n 时，当轴承状态良好。
- (2) 当 dB_c< dB_m≤35dB_n 时，轴承存在劣化倾向。
- (3) 当 35dB_n< dB_m≤50dB_n 时，轴承状态不良，应检查处理。

(4) 当 $\text{dBm} > 50\text{dBn}$ 时, 轴承严重损伤。

轴承故障与润滑有着密切的关系, 所以在诊断中, 应把轴承的润滑状况检测作为轴承诊断的主要内容。当 dBc 和 dBm 在同一范围内, 一般 $\text{dBm} > \text{dBc} > 20\text{dBn}$ 时, 说明轴承润滑不良, 或轴承存在干运转现象, 已达到需要保养的程度。

3.2 希尔伯特变换定义及解调原理

3.2.1 希尔伯特变换定义

希尔伯特 (Hilbert) 变换是信号分析中的重要工具, 希尔伯特变换的许多数学基础是德国数学家 Hilbert 提出来的。给定一连续的时间信号 $x(t)$, 其希尔伯特变换定义为:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t-\tau)}{\tau} d\tau = x(t) \frac{1}{\pi t} \quad (3-4)$$

即 $x(t)$ 的希尔伯特变换是 $x(t)$ 与 $1/\pi t$ 的卷积。又由于 $1/\pi t$ 的傅里叶变换为:

$$H(j\Omega) = -j \text{sign}(\Omega) = \begin{cases} -j & \Omega > 0 \\ j & \Omega < 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

$x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(j\Omega)$ 。利用卷积定理 $\hat{x}(t)$ 的傅里叶变换为:

$$\hat{X}(j\Omega) = H(j\Omega)X(j\Omega) = -j \text{sign}(\Omega)X(j\Omega) \quad (3-6)$$

即 $\hat{x}(t)$ 的傅里叶变换信号 $x(t)$ 在频域作相移, 在正频延迟 $\pi/2$, 在负频内超前 $\pi/2$ 。

设 $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换, 定义:

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (3-7)$$

为信号 $x(t)$ 的解调信号。对上式两边作傅里叶变换, 有:

$$Z(j\Omega) = X(j\Omega) + j\hat{X}(j\Omega) = X(j\Omega) + jH(j\Omega)X(j\Omega) \quad (3-8)$$

$$Z(j\Omega) = \begin{cases} 2X(j\Omega) & \Omega > 0 \\ 0 & \Omega < 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

这样, 由 Hilbert 变换构成的解析信号, 只含有正频率成分, 且是原信号正频率分量的 2 倍。

3.2.2 希尔伯特变换解调原理

希尔伯特变换的一个最主要的应用就是处理带通信号的解调。用希尔伯特的一

个实信号表示成复信号（即解调信号），不仅使理论讨论很方便，更重要的是可以由此研究信号的包络，瞬时相位和瞬时频率。在此只介绍其用于幅值解调的情况。

设窄带信号 $x(t)$ 为：

$$x(t) = A(t) \cos[2f_0 t + \phi(t)] \quad (3-10)$$

因此构成解调信号：

$$z(t) = x(t) + \hat{x}(t) = A(t)e^{j2\pi f_0 t + \phi(t)} \quad (3-11)$$

当 $x(t)$ 为解调信号时， $z(t)$ 具有下列形式：

$$z(t) = A(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (3-12)$$

其中 f_0 为载波频率。

而 $A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$ ，给出了调幅信号的包络即调制信号的信息。在这种情况下，希尔伯特变换可用于幅值解调^[35]。

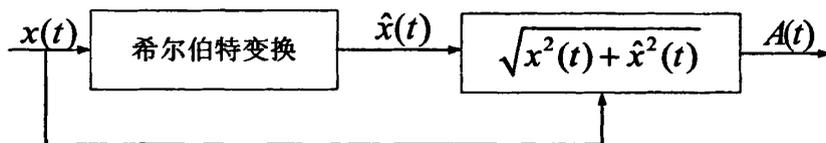


图 3-7 幅值解调原理

3.3 轴承振动分贝值变换

在运转过程中，轴承零件随时间而变化的弹性变形及除轴承功能所必须的运动以外的其他一切偏离理论位置的运动均称为轴承振动。某一频带范围内的振动加速度均方根值与参考加速度值之比的常用对数，再乘以 20 所得之数值称为振动加速度级。轴承轴线为水平时，轴承内圈旋转，外圈静止。在外圈外圆柱面宽度二分之一处某点的径向振动加速度级即为轴承振动加速度级。

振动加速度级、轴承振动加速度级和基础振动加速度级的单位均用“分贝”(dB)表示。零“分贝”相应于地球重力加速度值的千分之一。“分贝”数的计算公式为：

$$L = 20 \log \frac{\alpha}{\alpha_0} \quad (3-13)$$

式中： α —某一频率范围内的振动速度均方根值（有效值）或峰值， m/s^2 ；

$\alpha_0 = 9.81 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$, 为参考加速度。

3.4 冲击脉冲法在滚动轴承故障诊断中的应用

3.4.1 滚动轴承试验设备

在专用滚动轴承试验台上, 模拟生成滚动轴承典型故障, 测量分析滚动轴承在无故障和各种典型故障下运行时的振动信号, 为滚动轴承故障诊断提供依据。

图 3-8 示出轴承故障试验台结构, 试验轴承直接安装在电机输出轴上, 由电机直接带动轴承转动。电机固定在轴支座上。轴承内圈靠轴向挡圈定位。轴承外圈安装在一个轴承室内, 两边用端盖定位。轴承室下端联接一个载荷预调机构, 可以通过调整旋钮改变加在轴承上的载荷大小。

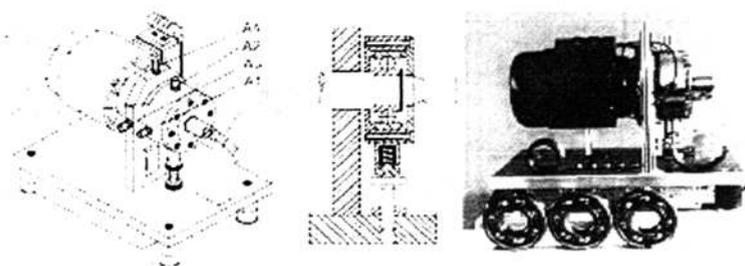


图 3-8 滚动轴承故障实验台

电机参数: ADBE-56-N4 型交流电机, 额定功率 0.09 kW, 额定转速 1350 转/分 (22.5 转/秒)

测量系统传感器、信号调理、计算机数据采集分析系统等几部分组成, 如图 3-9 所示。传感器测量的振动信号经过放大滤波处理后送到采集板进行模数转换, 得到的数字信号存入计算机进行分析处理。测量系统由软件控制实现测量和数据分析。

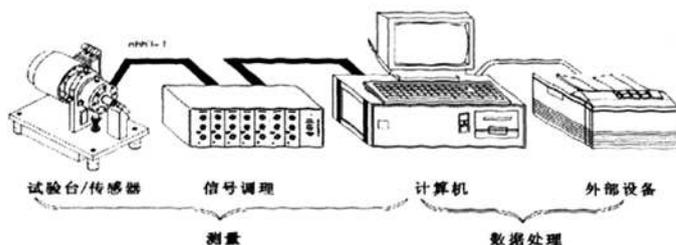
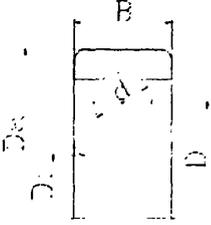


图 3-9 测量系统

轴承参数：型号 6350，几何尺寸及有关特征频率见表 3-1：

表 3-1 试验用轴承参数和特征频率

几何尺寸	特征频率 (Hz)		
	D = 43.6	外圈通过频率 BPFO	57.44
	d = 11.8	内圈通过频率 BPFI	100.06
	Dc = 62	滚动体故障频率 BSF	38.52
	Di = 25	保持器冲击频率 FTF	8.2
	B = 17		
n = 7			
o = 0			

试验台上安装四个振动加速度传感器（丹麦 B&K 公司 4371 型），两个传感器安装在支承座上垂直和水平方向，两个传感器安装在轴承室上垂直和水平方向，安装位置和传感器编号如图 3-8 所示。在电机轴自由端安装一个红外传感器，利用其每转输出的脉冲信号进行数据采集板的外触发测量控制，实现转速同步测量。

选用四个轴承进行试验，其中一个轴承为无故障轴承，另外三个轴承为故障轴承，利用电刻笔在金属表面模拟制作点蚀和凹坑的方法，分别模拟生成外圈故障、内圈故障和滚动体故障，如图 3-10 所示。

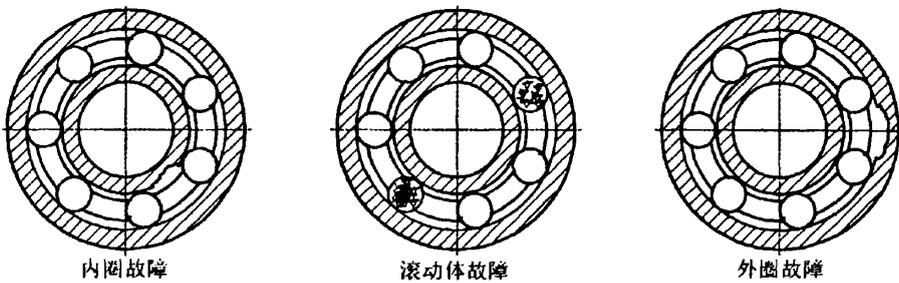


图 3-10 滚动轴承模拟故障

3.4.2 滚动轴承振动信号分析

设置采样频率 5760Hz。分析频率为 2880Hz，采样点数 1024。滚动轴承的背景分贝值可以用公式 (3-2) 计算得出： $\text{dB}_i = 12.73 \text{ (dB)}$ 。

图 3-11 是滚动轴承发生外圈故障时传感器 A2 所采集的时域振动信号（即加速度信号）。

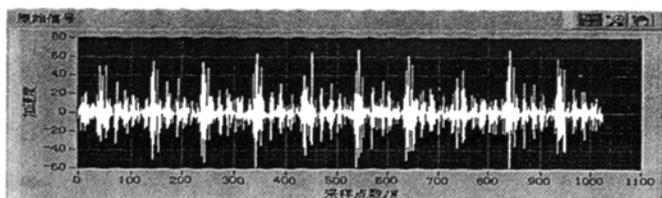


图 3-11 外圈原始信号

在原始信号中包含有机器转动产生的噪声和机器转子不平衡、支承对中不良等因素引起的低频振动等等噪声和振动，有用信息淹没在这些振动和噪声中，如果直接对原始信号进行频率谱分析，并从中发现轴承的故障是不可能的。因此对信号进行滤波降噪处理，提取信号中有用信息，滤波后的信号如图 3-12 所示：

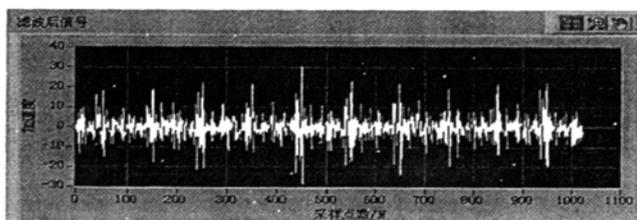


图 3-12 外圈滤波后信号

信号经过滤波后再经希尔伯特 (Hilbert) 变换检波处理。图 3-13 是处理后所得到的包络信号。

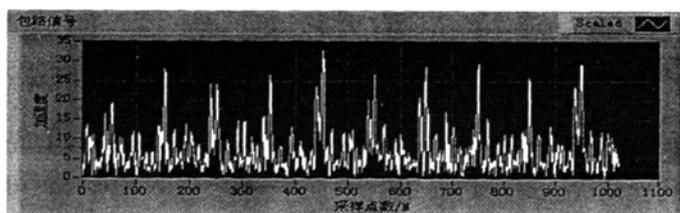


图 3-13 外圈包络信号

经过包络检波处理后，通过公式 (3-13) 计算出处理后信号的分贝值，最终的分析结果以条状图的形式显示出来，结果直观易读有利于分析人员对故障的诊断。处理后信号的冲击脉冲值如图 3-14 所示：

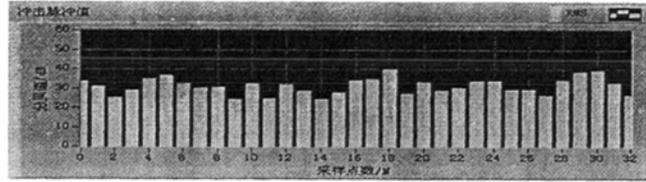


图 3-14 外圈信号冲击脉冲冲值

从图 3-14 中可以看出冲击脉冲冲值最大分贝值 dBm 约为 40dBn，地毯分贝值 dBc 约为 25dBn。表明轴承出现故障，应该对该轴承多加监视，并及时更换。

图 3-15 是滚动轴承发生内圈故障时传感器 A2 所采集的时域振动信号（即加速度信号）。

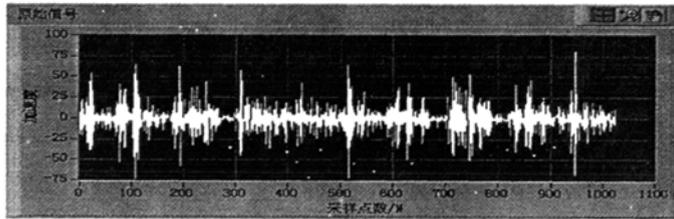


图 3-15 内圈原始信号

在原始信号中包含有机器转动产生的噪声和机器转子不平衡、支承对中不良等因素引起的低频振动等等噪声和振动，有用信息淹没在这些振动和噪声中，如果直接对原始信号进行频率谱分析，并从中发现轴承的故障是不可能的。因此对信号进行滤波降噪处理，提取信号中有用信息，滤波后的信号如图 3-16 所示：

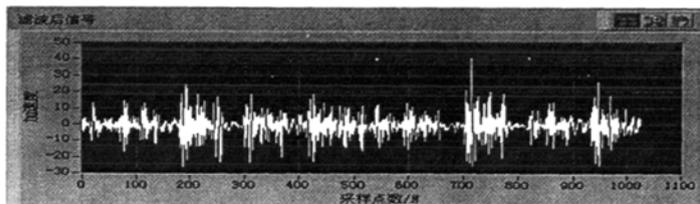


图 3-16 内圈滤波后信号

信号经过滤波后再经希尔伯特（Hilbert）变换检波处理。图 3-17 是处理后所得到的包络信号。

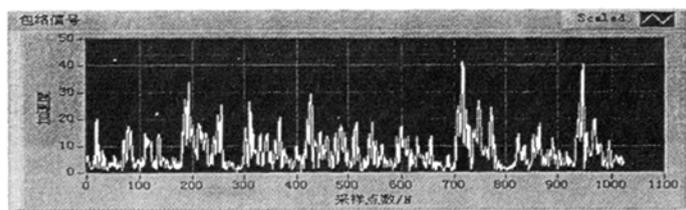


图 3-17 内圈包络信号

经过包络检波处理后，通过公式 (3-13) 计算出处理后信号的分贝值，最终的分析结果以条状图的形式显示出来，结果直观易读有利于分析人员对故障的诊断。处理后信号的冲击脉冲值如图 3-18 所示：

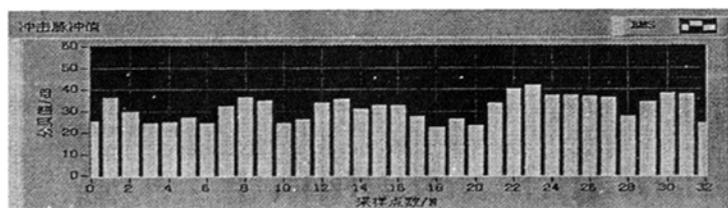


图 3-18 内圈信号冲击脉冲值

从图 3-18 中可以看出冲击脉冲最大分贝值 dBm 约为 42dBn，地毯分贝值 dBc 约为 22dBn。表明轴承出现故障，应该对该轴承多加监视，并及时更换。

3.5 本章小结

通过以上分析，本章可以得出以下结论：

采用冲击脉冲法诊断滚动轴承故障简便可靠，能有效提取轴承故障信息，可直接得到轴承损伤程度，可轻易获得轴承早期故障信息，诊断快捷、准确，可作为滚动轴承监测的主要手段，是较为理想的设备劣化诊断方法。并且本文通过试验分析验证了该理论方法的正确性。

第四章 小波包在冲击脉冲法应用中的研究

随着小波理论的发展，小波分析作为新型的信号处理方法，已日益广泛地应用于生物医学，故障诊断，信息检测等广大领域。虽然小波变换由于其良好的时频局部化和多分辨率的特征满足了这种非平稳信号的分析，但是它对高频部分没有再分解。小波包变换则弥补了这一不足，它对信号在全频带内进行多层次划分，通过对信号在不同尺度上的分解和重构，得到分布在不同频带内的分解序列，从而得到原信号在不同频段上分布的详细信息，更为有效地提取了各频段的信息成分，为滚动轴承的非平稳振动信号的监测诊断提供了理想的工具。

本章根据滚动轴承缺陷信号的特点，提出了基于小波包滤波和冲击脉冲法相结合的滚动轴承故障诊断方法。首先将采集的轴承振动信号进行小波包变换滤波重构，并经希尔伯特变换得到包络信号，然后经分贝值转换得到冲击脉冲值，最后通过试验分析了滚动轴承的故障。

4.1 多分辨率分析思想

多分辨率分析又称为多尺度分析，小波包分析是多分辨率分析的推广，是一种比小波分析更为精细的信号分析方法，它将频带进行多层次划分，对小波分解没有细分的高频部分进行了分解，并能根据被分析信号的特征，自适应地选择频带，使之与信号频谱相匹配，从而提高时频分辨率。关于小波包分析的理解，我们在这里一个三层的分解说明，其小波包分解树如图4-1所示：

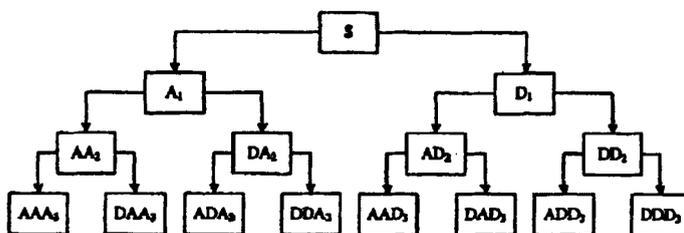


图 4-1 三层小波包分解树示意图

在图4-1中，A表示低频，D表示高频，末尾的序号数表示小波包分解的层数（即尺度数）。分解的关系为：

$$S = AAA_3 + DAA_3 + ADA_3 + DDA_3 + AAD_3 + DAD_3 + ADD_3 + DDD_3$$

多分辨率分析的基本思想是把信号投影到一组互相正交的小波函数构成的子

空间上, 形成了信号在不同尺度上的展开, 从而提取了信号在不同频带特征, 同时保留了信号在各尺度上的时域特征。

由小波函数的伸缩形成了系列闭包 W_j , 考虑如下 L^2 的闭子空间:

$$V_j = \dots + W_{j-2} + W_{j-1}$$

该组闭子空间若满足一下条件:

(1) 一致单调性: $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$

(2) 渐进完全性: $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \phi \cup \bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j = L^2(R), j \in \mathbb{Z}$

(3) 二进制伸缩规则性: $f(\frac{t}{2^j}) \in V_j \Leftrightarrow f(t) \in V_0, j \in \mathbb{Z}$, 伸缩性体现了尺度的变换、逼近正交小波函数的变化和空间的变化具有一致性。

(4) 平移不变性: $f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(t-n) \in V_0, k \in \mathbb{Z}$

(5) 正交基存在性: 存在 $\phi(t) \in V_0$, 使得 $\{\phi(t-n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 成为 V_0 的正交基, 即 $V_0 = \overline{\text{span}\{\phi(t-n)\}}$ 且 $\langle \phi(t-n), \phi(t-m) \rangle = \delta(n-m)$

通常称 V_j 为尺度是 j 的尺度空间 $\phi(t)$ 称为多分辨率分析的尺度函数。

把平方可积的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 看成的某一级逼近的极限情况。每级逼近都是用某一级低通平滑函数 $\phi(t)$ 对 $f(t)$ 做平滑的结果, 在逐级逼近时平滑函数 $\phi(t)$ 也做逐级伸缩, 这就是“多分辨率”, 即用不同分辨率来逐级逼近待分析函数 $f(t)$ 。

把空间做逐级二分产生一组逐级包含的子空间:

$$\dots, V_0 = V_1 \oplus W_1, V_1 = V_2 \oplus W_2, \dots, V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}, \dots$$

j 是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整数, j 值越小空间越大, 当 $j=4$ 是如图 4-2 所示。

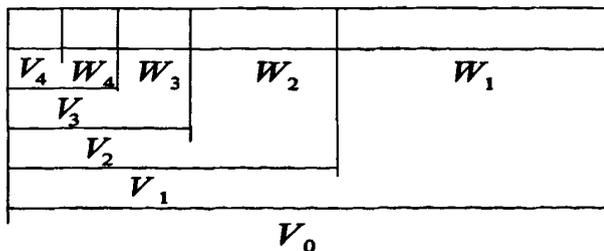


图 4-2 $j=4$ 函数空间的剖分

空间剖分是完整的, 即当 $j \rightarrow -\infty$ 时, $V_j \rightarrow L^2(R)$, 包含整个平方可积的实变函数空间, $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j = L^2(R)$ 。

当 $j \rightarrow +\infty$ 时, $V_j \rightarrow 0$, 空间最终剖分到空集为止, $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = (0)$ 。

这种剖分方式使得空间 V_j 与空间 W_j 正交, 各个 W_j 之间也正交, 即: $V_j \perp W_j$, $W_j \perp W_{j'}, j \neq j'$.

将这样的分解(如图4-2所示)一层一层进行下去, 也就实现了多分辨率分析。这种多分辨率分析也就是所期望的“低频信号需要频域高分辨率, 高频新需要频域低分辨率”的要求。

4.2 小波包变换滤波原理

小波变换具有多分辨率分析的特点, 多分辨率分析的基本思想是把信号投影到一组互相正交的小波函数构成的子空间上, 形成信号在不同尺度上的展开, 从而提取信号在不同频率段的特征, 同时保留信号在各尺度上的时域特征。由于小波变换只对信号的低频部分做进一步分解, 而对高频部分, 即信号的细节部分不再继续分解, 所以小波变换只能很好的表征一大类以低频信息为主要成分的信号, 但不能很好的分解和表示包含大量细节信息的信号。小波包变换可同时在低频和高频部分进行分解, 自适应地确定信号在不同频段的分辨率, 进行更好的时频局部化分析^[34]。

所谓正交小波包, 是一函数族, 由它们可构造 $L^2(R)$ ($L^2(R)$ 指 R 上平方可积函数构成的函数空间。即 $f(t) \in L^2(R) \Leftrightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < +\infty$) 的标准正交基库, 从此库中可以选出 $L^2(R)$ 的许多组标准正交基, 通常的正交小波基是其中的一种, 小波函数是小波包函数族中的一个, 所以, 小波包是小波函数的推广。

设 $\{h_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 是正交尺度函数 $\varphi(t)$ 对应的正交低通实系数滤波器, $\{g_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 正交小波函数 $\psi(t)$ 对应的正交高通滤波器, 其中 $g_n = (-1)^n h_{1-n}$, 则它们满足以下两尺度方程和小波方程:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \varphi(2t - k) \\ \psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \varphi(2t - k) \end{cases} \quad (4-1)$$

为了便于表示小波包函数, 引入以下新的记号:

$$\begin{cases} u_0(t) := \varphi(t) \\ u_1(t) := \psi(t) \end{cases} \quad (4-2)$$

于是, 上式可以表示为: 由于尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 存在以下的关系:

$$\begin{cases} u_0(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_0(2t - k) \\ u_1(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_0(2t - k) \end{cases} \quad (4-3)$$

通过 u_0 、 u_1 、 h 、 g 固定尺度下可定义一组成为小波包函数。

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_n(2t-k) \\ u_{2n+1}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_n(2t-k) \end{cases} \quad (4-4)$$

递归定义的递归函数 $u_n(t)$ ($n=0,1,2,3,\dots$) 称为正交尺度函数 $u_0 = \varphi(t)$ 确定的小波包。小波包可以用一个完全二叉树表示, 如图 4-3 所示:

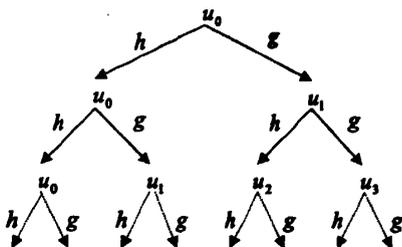


图 4-3 小波包分解完全二叉树

对于任意非负整数 n , 若它的二进制表示为:

$$n = \sum_{j=1}^{\infty} \varepsilon_j 2^j, \quad \varepsilon_j = 0 \text{ 或 } 1 \quad (4-5)$$

则小波包 $u_n(t)$ 的傅立叶(Fourier)变换为:

$$\hat{u}_n(\omega) = \prod_{j=1}^{\infty} m_{\varepsilon_j} \left(\frac{\omega}{2^j} \right) \quad (4-6)$$

式中:

$$\begin{cases} m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_k e^{-ik\omega} \\ m_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k g_k e^{-ik\omega} \end{cases} \quad (4-7)$$

从式(4-7)可以得出, 小波包变换相当于对原始信号进行了一系列带通滤波的操作。因此选择适当的小波包和分解层次, 就可以得到原始信号在不同频段的振动特性。

从多分辨分析的角度看, 小波包分析就是对 $L^2(\mathbb{R})$ 进行正交分解, 即

$$L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j \quad (4-8)$$

其中, 每个小波包空间 W_j 都可由小波基 $\{\psi_{j,k}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 生成。设 $\psi(t)$ 及其傅立叶变

换 $\hat{\psi}(\omega)$ 的窗口半径分别为 $\Delta(\psi)$ 和 $\Delta(\hat{\psi})$ ，随着尺度 j 的增大， W_j 的基函数 $\psi_{j,k}$ 的窗口宽度随之减小，而其傅立叶变换的窗口宽度却随之增大，也就是说，随着尺度 j 的增大，相应的小波基函数的空间局部性将变得越好，即空间的分辨率越高，而其频谱的局部性变得越差，即频率分辨率越低，这一特性是正交小波基的一大缺陷。为克服这一不足，需要对 W_j 做进一步的分解。

小波包对小波空间 W_j 进行更精细的分解，使得在新的标准基下，能够对包含大量细节的信号进行更好的时频局部化分析。

对任意非负整数 $n \in Z_+$ 和任一整数 $j \in Z$ ，令 U_j^n 表示由小波包 u_n 的二进伸缩和平移生成的 $L^2(R)$ 的闭子空间，则

$$\begin{cases} U_j^0 = V_j, j \in Z \\ U_j^1 = W_j, j \in Z \end{cases} \quad (4-9)$$

其中， $\{V_j\}$ 是由尺度函数 $u_0 = \varphi$ 生成的 $L^2(R)$ 的多分辨率，而 $\{W_j\}$ 是由小波函数 $u_1 = \psi$ 生成的正交小波子空间序列。

可将其正交分解

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j, j \in Z \quad (4-10)$$

改写为：

$$U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1 \quad (4-11)$$

对于任意非负整数 $n \in Z_+$ ，有

$$U_{j+1}^n = U_j^{2^n} \oplus U_j^{2^{n+1}}, j \in Z \quad (4-12)$$

我们通常关心的是 $L^2(R)$ 的某个子空间 $V_L = U_L^0$ 的小波解和小波包分解，现以 $L=3$ 为例，比较 $V_3 = U_3^0$ 的小波分解和小波包分解。

从图4-4中可以看出小波包具有划分较高频率频带的能力，可以对高频信息进行更进一步的分解，具有较好的频率局部化，能够更好的提取所需频带的信息。

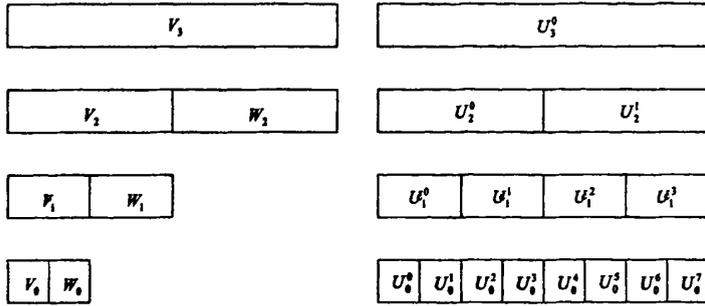


图 4-4 小波分析和小波包分析的空间剖分

记 $f(t)$ 在子空间 $u_j^{2^n}$ 和 $u_j^{2^{n+1}}$ 上的投影系数分别为 $d_j^{2^n}$ 和 $d_j^{2^{n+1}}$ ，则根据 Mallat 算法，小波包的快速分解为：

$$\begin{cases} d_j^{2^n}[k] = \sum_{l \in \mathbb{Z}} h_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \\ d_j^{2^{n+1}}[k] = \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \end{cases} \quad (4-13)$$

小波包的重构为：

$$d_{j+1}^n[k] = \sum_{l \in \mathbb{Z}} h_{k-2l} d_j^{2^n}[l] + \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{k-2l} d_j^{2^{n+1}}[l] \quad (4-14)$$

分解和重构如图 4-5 所示：

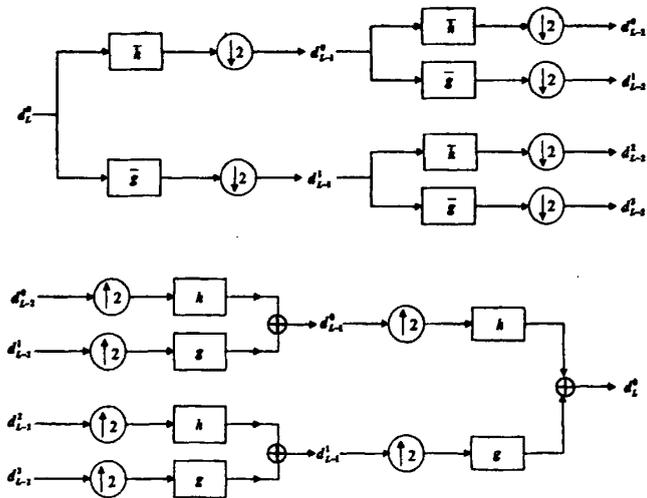


图 4-5 小波包系数的分解和重构

从式 (4-14) 看出，小波包重构时没有涉及到尺度函数和小波函数的具体形式，

而是直接运用了低通滤波器和带通滤波器的系数 $\{h_{l-2k}\}$ 和 $\{g_{l-2k}\}$ 参与运算。

小波包分解的实质是对检测信号的多带滤波，一般说来，正常运行状态与故障状态下的信号各频带成分是不同的。

小波包重构的优点在于可根据需要选择全部或部分频段的信息，而其余频段置零，对信号进行重构。因此只要能将信号的有用成分与噪声干扰成分分解到不同频段上，就可以很方便地重构出滤除了噪声干扰的原信号有用成分。

如前面所述，当滚动轴承出现局部损伤类缺陷时，所形成的脉冲冲击信号具有衰减振荡特性，为了突出缺陷信号的这一特性，并能够从混有噪声的振动信号中检测出缺陷，根据滚动轴承固有频率和信号采样频率等参数，选择具有衰减性的小波包函数和分解层数，将包含滚动轴承固有频率的共振频带的分解结果保留，令其它频带小波包系数为零，而后进行小波包系数重构。小波包重构之后的振动信号就只保留了滚动轴承固有频率的共振频带成分。因此小波包分析就可以替代传统的滤波器对轴承信号进行滤波分析。

4.3 滚动轴承信号分析

采用同第三章的相同的故障轴承试验台，将上述三个轴承分别安装在轴承室内，开启电机在额定转速下运转，在传感器A2上各测量一组振动信号。设置采样频率5760Hz，采样点数1024。

首先对A/D采样信号进行小波包分解，用以下函数实现：

$T = \text{wpdec}(X, N, 'wname', 'shannon')$

其中X代表被分解信号，N代表分解层数，wname表示分解时所采用的小波函数，shannon表示所采用的熵标准。

小波包系数重构： $X = \text{wprcoef}(T, N)$

其中X表示重构信号，N表示重构的点。采用db10小波对信号进行3层分解，处理过程如下：

图4-6是滚动轴承发生外圈故障时传感器A2所采集的时域振动信号（即加速度信号）。

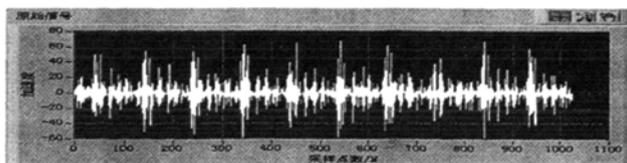


图4-6 外圈原始信号

经过小波包滤波后，重构信号如图 4-7 所示：

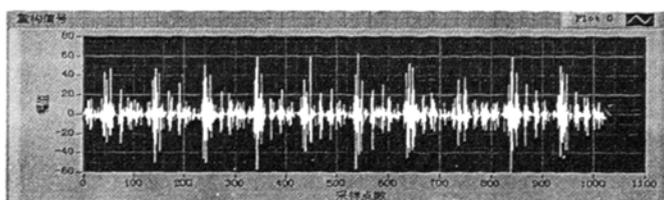


图4-7 外圈重构信号

信号经过滤波后再经希尔伯特 (Hilbert) 变换检波处理。图 4-8 是处理后所得到的包络信号。

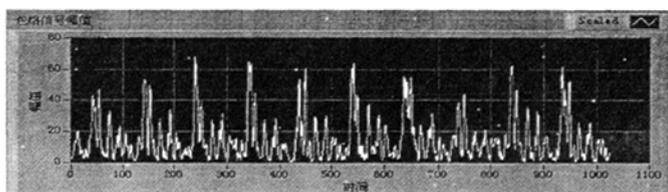


图4-8 外圈包络信号

经过包络检波处理后，通过公式 (3-13) 计算出处理后信号的分贝值，最终的分析结果以条状图的形式显示出来，处理后信号的冲击脉冲值如图 4-9 所示：

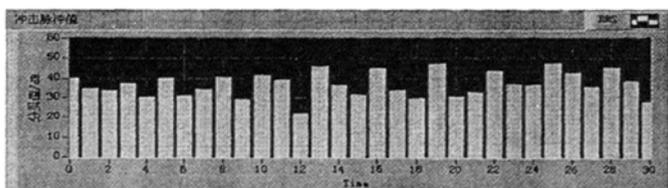


图4-9 外圈冲击脉冲值

从图 4-9 中可以看出冲击脉冲值最大分贝值 dBm 约为 47dBn，地毯分贝值 dBc 约为 22dBn。表明轴承出现故障，应该对该轴承多加监视，并及时更换。

图 4-10 是滚动轴承发生内圈故障时传感器 A2 所采集的时域振动信号(即加速度信号)。

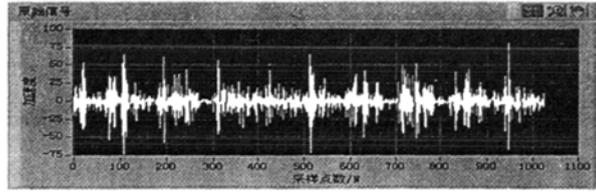


图4-10内圈原始信号

经过小波包滤波后，重构信号如图 4-11 所示

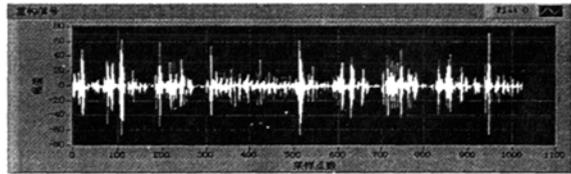


图4-11内圈重构信号

信号经过滤波后再经希尔伯特 (Hilbert) 变换检波处理。图 4-12 是处理后所得到的包络信号。

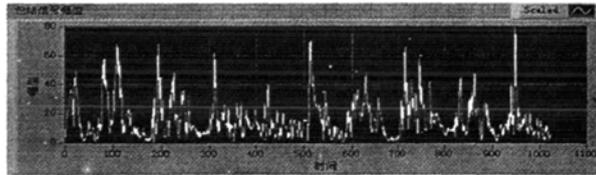


图4-12 内圈包络信号

经过包络检波处理后，通过公式 (3-13) 计算出处理后信号的分贝值，最终的分析结果以条状图的形式显示出来，处理后信号的冲击脉冲值如图 4-13 所示

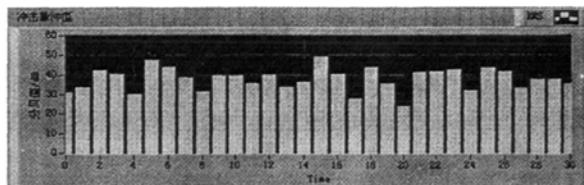


图4-13 内圈冲击脉冲值

从图 4-13 中可以看出冲击脉冲值最大分贝值 dBm 约为 48dBn, 地毯分贝值 dBc 约为 24dBn。表明轴承出现故障, 应该对该轴承多加监视, 并及时更换。

4.4 本章小结

通过以上分析和比较, 本章可以得出以下结论:

1 小波包变换能将滚动轴承的原始振动信号分解到不同频率段, 然后对所需要的固有频率段信号进行重构, 滤除了其它多余信息的干扰。

2 对重构后的信号进行希尔伯特 (Hilbert) 变换得到包络信号, 再对包络信号进行冲击脉冲值转换处理可以有效的显示轴承故障程度, 并且通过试验分析验证了该理论方法的正确性。

第五章 滚动轴承故障诊断系统的研究与开发

基于虚拟仪器和冲击脉冲法的滚动轴承故障诊断系统的设计开发是本论文的重点之一，该软件不仅能够识别滚动轴承故障，而且对其故障程度进行判别，从而避免发展成恶性故障对其它的重要零件造成严重损伤。本章首先介绍了虚拟仪器技术，LabVIEW软件开发平台及其特点，然后概述了滚动轴承故障诊断系统的总体框架；最后详细介绍了滚动轴承诊断系统的主要分析模块的设计与测试。

5.1 虚拟仪器技术

虚拟仪器（Virtual Instrument，简称VI）是现代计算机技术和器技术深层次结合的产物，是当今计算机辅助测试（CAT）领域的一项重要技术。

5.1.1 虚拟仪器简介

20多年前，美国国家仪器公司（National Instruments）提出“软件即是仪器”的虚拟仪器（VI）概念引发了传统仪器领域的一场重大变革，使得计算机和网络技术得以长驱直入仪器领域，和仪器技术结合起来，从而开创了“软件即是仪器”的先河。所谓虚拟仪器，实际上就是一种基于计算机的自动化测试仪器系统。

虚拟仪器的实质是利用计算机显示器的显示功能来模拟传统仪器的控制面板，以多种形式表达输出检测结果，利用计算机强大的软件功能实现信号数据的运算、分析和处理，利用 I/O 接口设备完成信号的采集、测量与调理，从而完成各种测试功能的一种计算机仪器系统。“虚拟”主要包含以下两方面的含义。

1 虚拟仪器的面板是虚拟的

虚拟仪器的各种面板和面板上的各种“控件”，是由软件来实现的。用户通过对键盘或鼠标来对“控件”操作，从而完成对仪器的操作控制。

2 虚拟仪器的测试功能是由软件来控制硬件实现的

与传统仪器相比，虚拟仪器的最大特点是其功能由软件定义，可以由用户根据应用需要进行软件的编写，选择不同的应用软件就可以形成不同的虚拟仪器。

5.1.2 虚拟仪器的特点

虚拟仪器与传统仪器相比，有以下几个特点：

1 软件是虚拟仪器的核心

虚拟仪器的硬件确立后，它的功能，如抗混淆滤波、小波分析等，主要是通过软件来实现的，软件在虚拟仪器中具有重要的地位。

2 虚拟仪器的性价比高

一方面，虚拟仪器能同时对多个参数进行实时高效的测量，同时，由于信号的传送和数据的处理几乎都是靠数字信号或软件来实现的，所以还大大降低了环境干扰和系统误差的影响。此外，用户也可以随时根据需要调整虚拟仪器的功能，大大缩短了仪器在改变测量对象时的更新周期；另一方面，采用虚拟仪器还可以减少测试系统的硬件环节，从而降低系统的开发成本和维护成本，因此，使用虚拟仪器比传统仪器经济。

3 虚拟仪器具有良好的人机界面

在虚拟仪器中，测量结果是通过由软件在计算机屏幕上生成的、与传统仪器面板相似的图形界面由软面板来实现的。

4 虚拟仪器具有和其它设备互联的能力

如和 VXI 总线或现场总线等的接口能力，此外，还可以将虚拟仪器接入网络，如 IN-TRANENT 等，以实现对现场生产的监控和管理。作为新型仪器，它有许多传统仪器无法比拟的地方。这使得虚拟仪器的应用领域非常广泛，据估计，到下个世纪初中叶，我国将有 60% 的仪器为虚拟仪器。

5 仪器性能的改进和功能扩展只需相关软件设计更新，而不需购买新的仪器

6 研制周期较传统仪器大为缩短

5.2 滚动轴承故障分析软件

在滚动轴承故障特征分析完成的基础上，本课题设计了基于虚拟仪器的滚动轴承故障诊断系统，包括数据采集模块、数据库管理、数据文本存储模块、数据分析和处理模块、数据与波形显示、故障特征提取模块、使用帮助模块等的设计。总体设计框图如 5-1 所示：

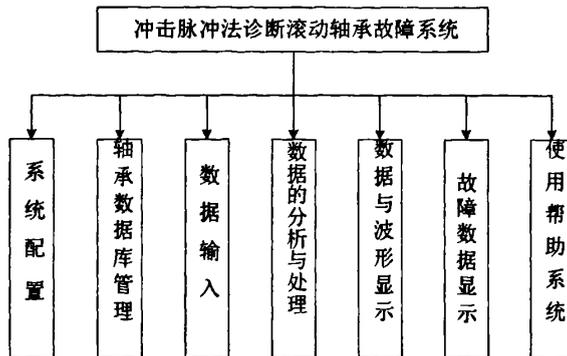


图 5-1 冲击脉冲法诊断滚动轴承故障系统总体设计框图

其中各个模块的作用如下：

- 1 系统配置模块：完成与整个系统相关的硬件、计算参数等的设置；
- 2 轴承数据库管理模块：建立了基于 SQL server2000 的数据库，实现对轴承数据的读取、查询和修改等操作；
- 3 数据输入模块：把采集到的滚动轴承的数据输入，以便对其进行分析处理；
- 4 数据分析和处理模块：利用 LabVIEW 的内置分析能力，对采集到的故障数字信号进行频域和时域的处理；
- 5 数据与曲线显示模块：以数字和曲线方式显示故障信号；
- 6 故障数据显示模块：首先通过滤波器滤波分析提取共振频带的信号，然后通过解调分析和冲击脉冲值转换，最后以条形图的形式显示数据，判断是否发滚动轴承故障；
- 7 帮助系统：为了更好的使用本软件，设计了帮助系统，介绍了滚动轴承故障时的故障特征和本软件的使用方法。

5.2.1 轴承型号及参数数据库的开发方法

利用LabVIEW开发应用软件时，某些应用场合不可避免地要进行数据库访问。使用数据库访问技术，用户可以创建一个使用数据库来管理复杂测试任务、存储测试数据并且能够总结测试结果的自动测试系统。但是LabVIEW本身并不具备数据库访问功能。通常解决这个问题有以下几种方式^[36]：

- 1 利用NI公司的附加工具包LabVIEW SQL Toolkit进行数据库访问。
- 2 利用LabVIEW的ActiveX功能，调用Microsoft ADO控件，利用SQL语言实现数据库访问。
- 3 利用LabVIEW开发的LabVIEW数据库访问的数据包LabSQL，这种方式避免了上两种方式中存在的问题。

Automation Open节点可以打开一个与ActiveX服务器相连的Refnum。然后该Refnum能够传递给模板中的其它节点函数，并通过编程实现具体功能。当Automation Refnum的输入为Microsoft Access application Refnum时，Automation Open将对其打开作为LabVIEW的一个ActiveX服务器使用，并在输出节点输出该服务器的Refnum。

Automation Close 关闭一个自动化 Refnum。在 LabVIEW 中为了回收系统资源，当下一步或终止应用程序这前不使用 Refnum 时，需要关闭 Refnum。

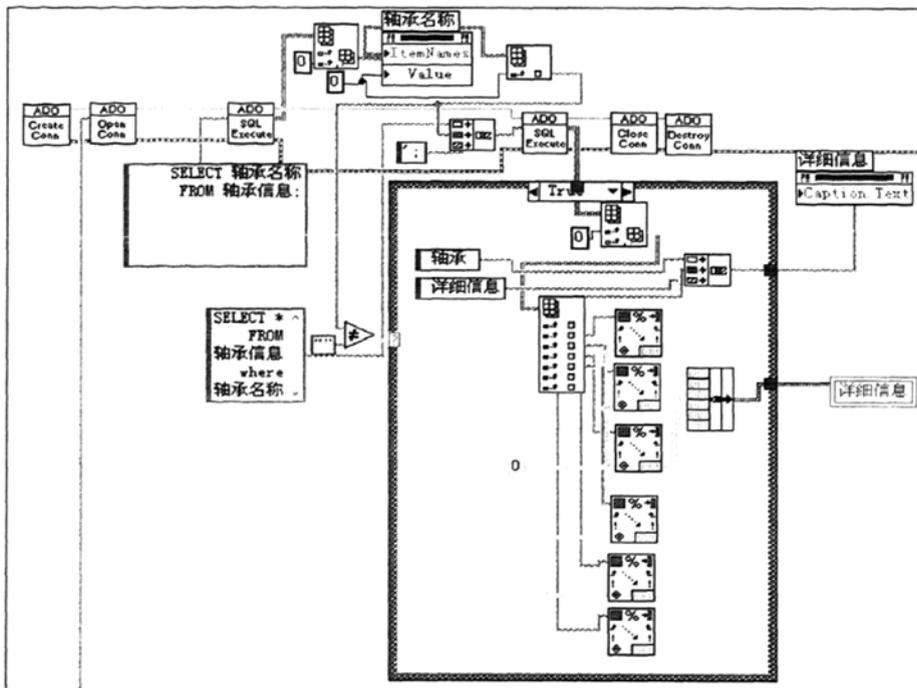


图 5-2 滚动轴承数据库设置程序框图

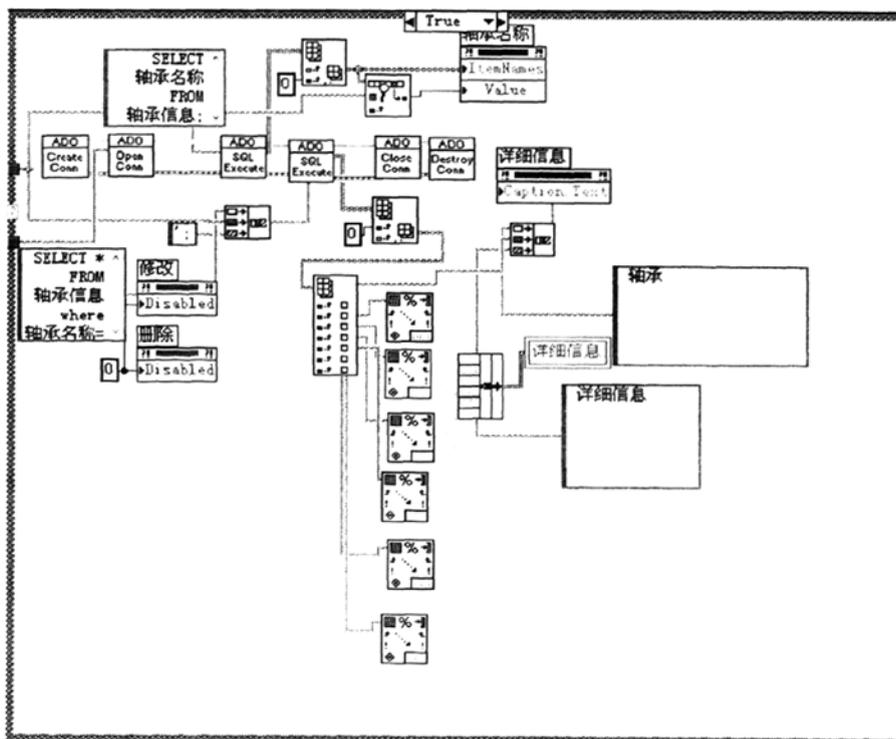


图 5-3 滚动轴承数据库新建操作程序框图

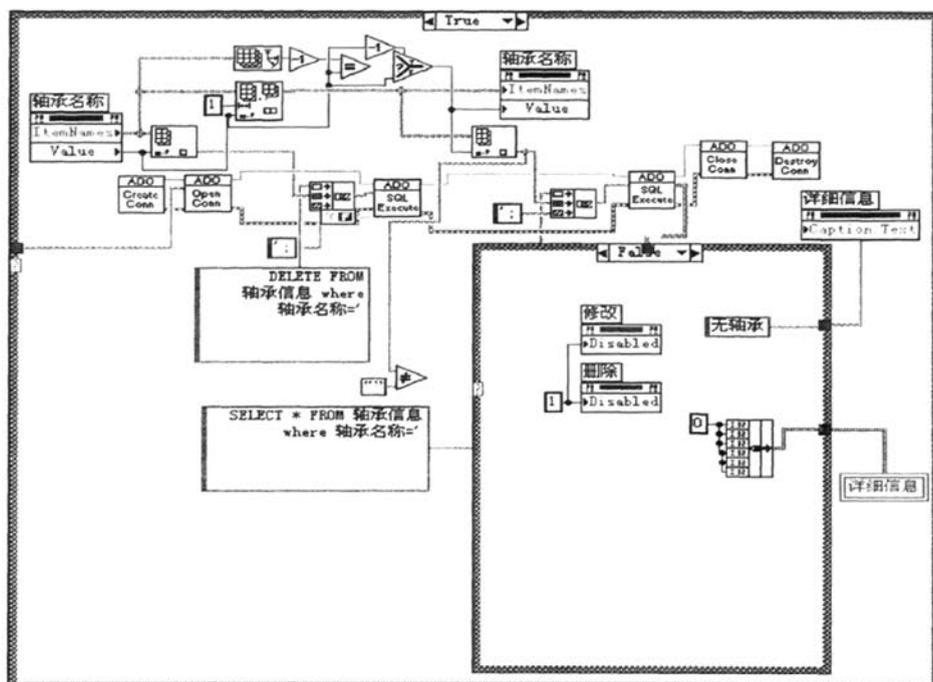


图 5-4 滚动轴承数据库删除程序框图

5.2.2 轴承故障分析软件的编制

通常在编制虚拟仪器的软件时可以采用两种编程方法：一种是传统的编程方法，采用高级语言，如VC++、VB等编写虚拟仪器的软件；另一种是采用现在流行的图形化编程方法，NI公司的LabVIEW（Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench，实验室虚拟仪器工作平台）。采用图形化编程的优势是软件开发周期短、编程容易，特别适合不具有专业编程水平的工程技术人员使用。本系统采用LabVIEW语言平台编制。

LabVIEW语言是一种图形化的编程语言。图形化的程序语言，又称为“G”语言。使用这种语言编程时，基本上不写程序代码，取而代之的是流程图或流程图。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念。使用图表表示功能模块，使得编程过程与思维过程非常近似。

5.2.2.1 故障软件界面设置

冲击脉冲法诊断轴承故障系统包含四个界面：

1 轴承参数设置界面：该界面主要用于轴承参数的设置，故障频率和背景分贝的计算。首先从左方中间处选择轴承型号，如需要添加新的轴承型号，可点击左下“新建”按钮，从弹出的对话框中输入所要添加的轴承的型号和参数尺寸。轴承参

数设置界面如图 5-5 所示。

2 频率分析界面：该界面主要用于输入从数据采集仪中采集的轴承信号，点击按钮输入采集的信号后再点击右下方的“开始分析”按钮，便会显示所采集的轴承原始信号的波形图和分析后的 FFT 谱图，应留意 FFT 谱图中信号峰值，即共振频带出现的位置，以便在下一界面滤波分析界面中确定滤波的范围。频率分析界面如图 5-6 所示。

3 滤波分析界面：该界面主要用于确定滤波器的类型，并且还需确定高、低频截止频率，这时就需用到频率分析界面中 FFT 谱中最大峰值（共振频带）出现的范围，以此范围来确定高、低频的截止频率。滤波阶数应视情况而定。滤波分析界面如图 5-7 所示。

4 冲击脉冲界面：该界面是轴承故障分析界面，通过滤波和包络解调分析，获得了故障信号的共振解调波，其中共振频带的信号其幅值将受到由轴承故障缺陷引起的脉冲激振力的调制，再经过冲击脉冲计算模块计算出信号的冲击脉冲值，便可判断轴承的运行状况。此界面只能判明其总体的状态，不可确定其中哪个元件损坏。冲击脉冲界面如图 5-8 所示。



图 5-5 轴承参数设置界面

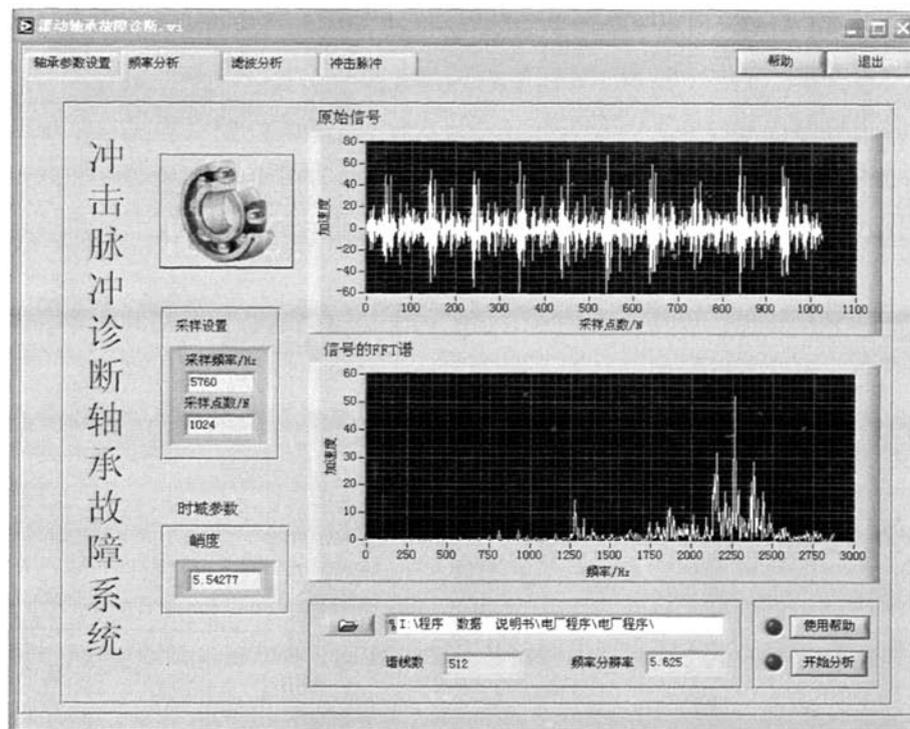


图 5-6 频率分析界面

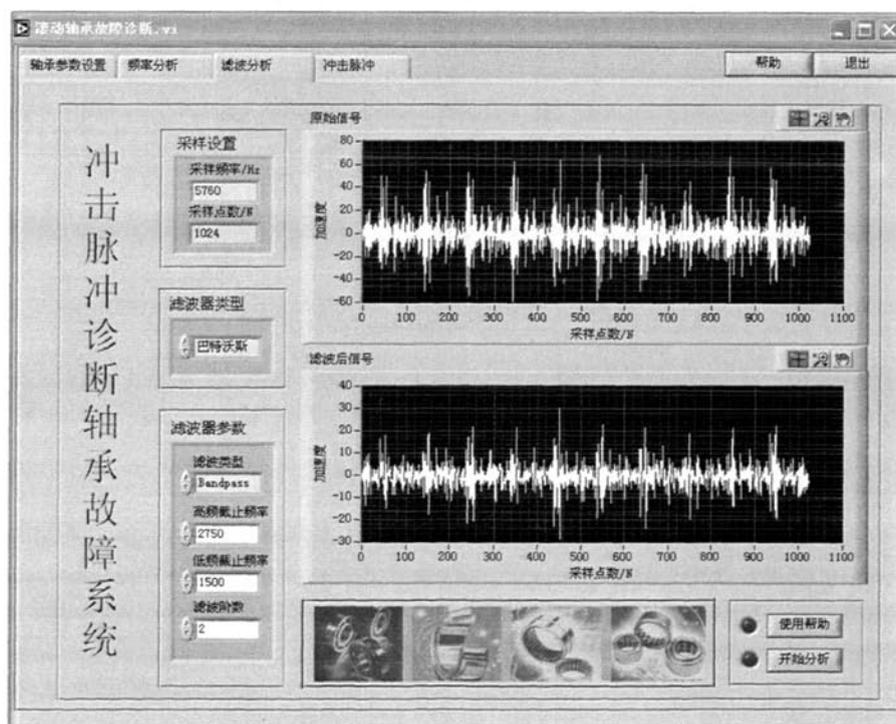


图 5-7 滤波分析界面

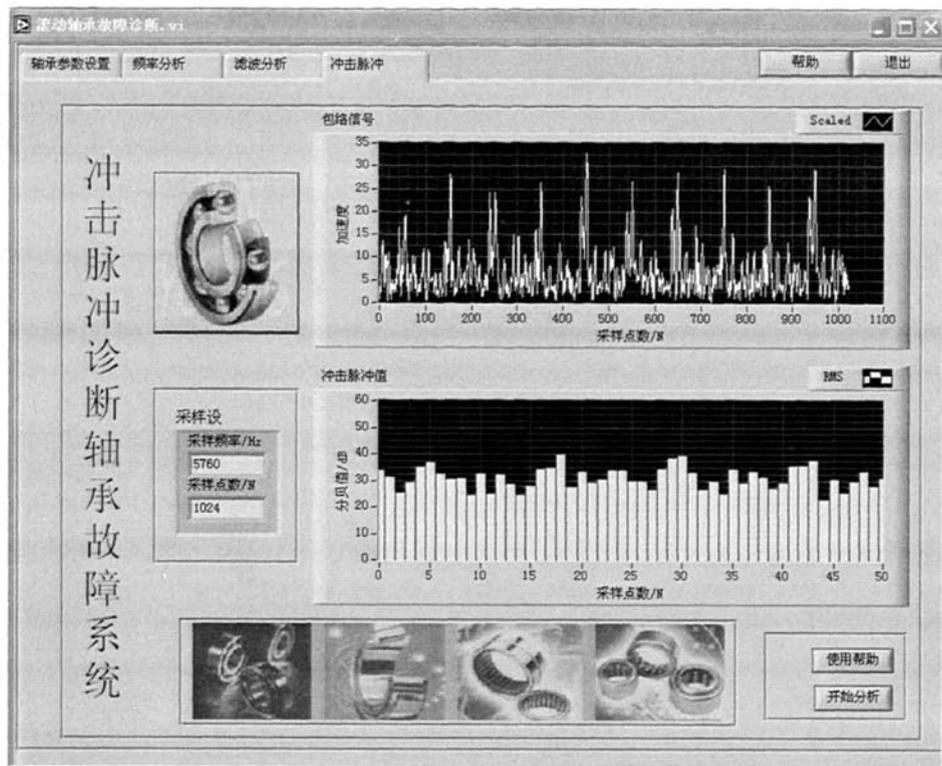


图 5-8 冲击脉冲界面

5.2.2.2 主要程序框图代码

1 Tab 页控制框图

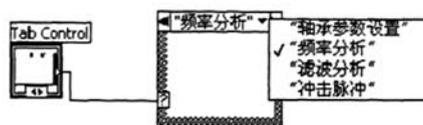
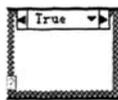


图 5-9 Tab 页控制框图

该图为 Tab 页控制框图程序的源代码，用于轴承参数设置、频率分析、滤波分析、冲击脉冲 4 个 Tab 页面的转换。



: Tab 页控制节点。用于 Tab 页的转换。



: 选择结构节点。相当与 C 语言中 Switch 语句中的表达式，用于 4 个 Tab

页间的转换。

2 事件结构框图

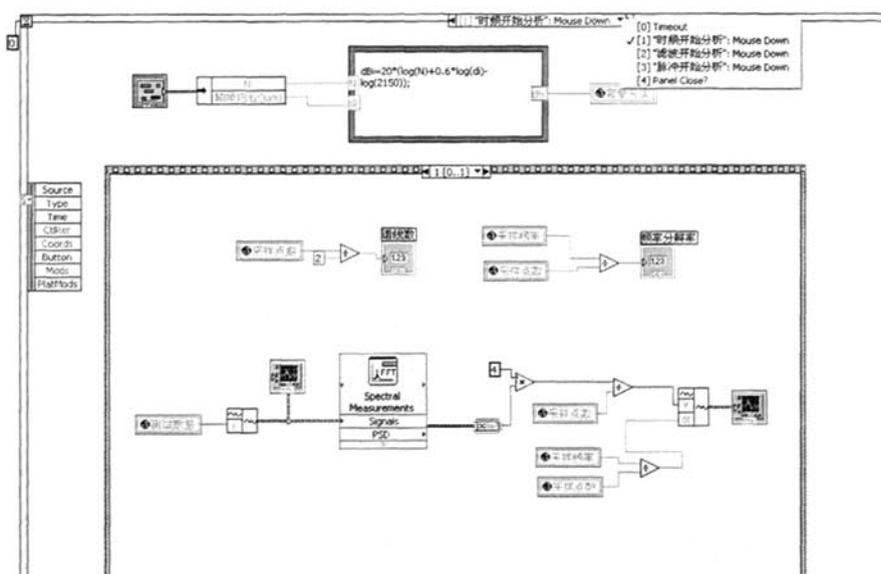


图 5-10 事件框图

该图为事件结构框图程序的源代码。该框图用于不同事件的驱动。在指定事件打钩后该事件处于运行状态。其他事件处于休息状态。

3 频率分析界面框图程序源代码

该界面主要进行频率分析，该界面中的主要框图如下：

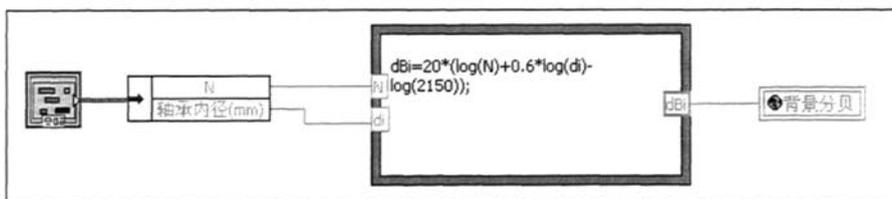


图 5-11 背景分贝框图

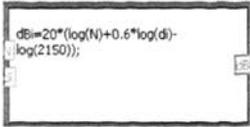
该图为背景分贝的计算框图程序的源代码，在频率分析界面中的“轴承参数设置”对话框中输入轴的转速和轴承的内径后，用图框中公式：

$$dB_i = 20(\lg n + 0.6 \lg d - \lg 2150)$$

计算出背景分贝值，以供最终冲击脉冲值计算所用。



: 簇节点，类似与 Pascal 语言中的 record 或 C 语言中的 struct。



: 基本公式节点。用于处理数学公式编程的特殊结构形式。其形式与标准的 C 语言类似。

4 采样设置框图

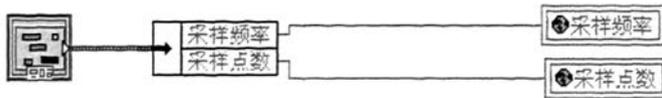


图 5-12 采样设置框图

该图为采样设置框图程序源代码，对应于频率分析界面中的“采样设置”对话框，在该对话框中输入“采样频率”和“采样点数”为下一步分析使用。

5 调入数据框图

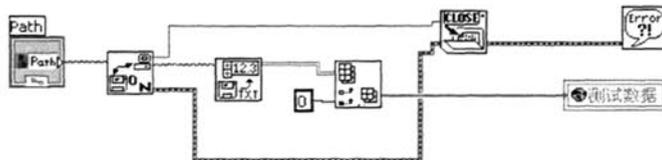


图 5-13 调入数据框图

该图为调入数据框图源代码，对应于频率分析界面中的“调入数据”对话框，点击调入所要分析的数据，对轴承进行故障诊断。



: 路径指示模块。相当于 Windows 的 UNC 文件名格式：\\<machine>\<share name>\<dir>\... \<file or dir>



: 打开/创建/覆盖文件节点。用于打开、覆盖一个已经存在的文件或创建一个新文件。



: 关闭文件节点。用于关闭一个指定的文件。



: 读电子表格文件节点。用于从一个电子表格文件中读取一定数量的数据，

并把这些数值字符串转换成单精度浮点数从一个二维数组或一维数组中返回。



：索引数组节点。返回索引指定的元素。

6 信号 FFT 谱框图

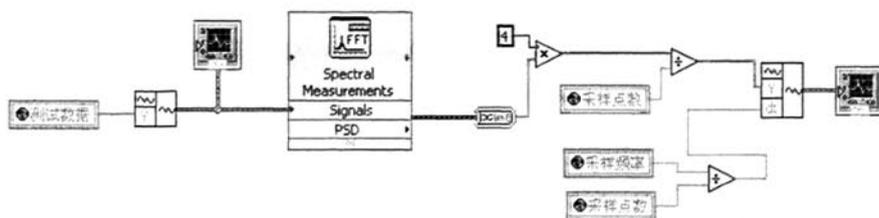


图 5-14 信号 FFT 谱框图

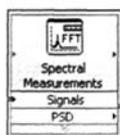
该图为信号 FFT 谱分析框图源代码，在“轴承参数设置”和“采样设置”对话框中输入轴承的参数和测试信号时所采用的采样设置参数，然后调入所采集的数据，点击“开始分析”按钮后经过该框图运行后即可得到信号的 FFT 谱，从中可以看到原始信号引起的共振频带，为下一步滤波分析所使用。



：建立波形节点。用于由数据到波形的转换。



：波形显示节点。用于显示波形。



：频谱分析节点，本程序中该节点的设置是分析信号的功率谱密度。

7 滤波分析界面框图程序源代码

滤波界面主要是对所要分析的数据进行滤波，因此滤波程序是本界面的主要框图程序，本界面有 3 个滤波程序框图的程序设置。如下：

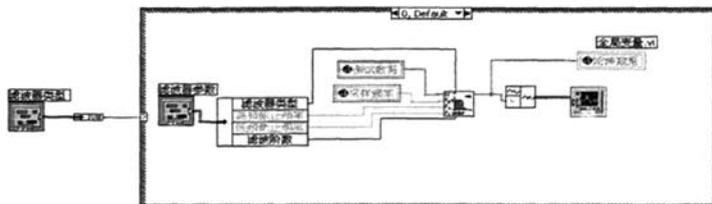


图 5-15 巴特沃兹滤波框图

该图为巴特沃兹滤波框图源代码。巴特沃兹滤波器拥有最平滑的频率响应，在截断频率以外，频率响应单调下降。在通带中是理想的单位响应，在阻带中响应为零。其优点是具有平滑的单调递减的频率响应，其缺点是通带和阻带之间过度缓慢。



：巴特沃兹滤波节点。用于信号的巴特沃兹滤波。

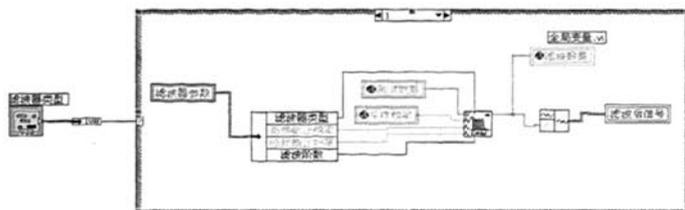


图 5-16 切比雪夫滤波框图

该图为切比雪夫滤波框图源代码。切比雪夫滤波器频率响应的特点是：在通带中是等幅的纹波，在阻带中单调衰减，过度迅速。与巴特沃兹滤波器相比，切比雪夫滤波器的优点是过度迅速，可以减小绝对误差，提高滤波速度。



：切比雪夫滤波节点。用于信号的切比雪夫滤波。

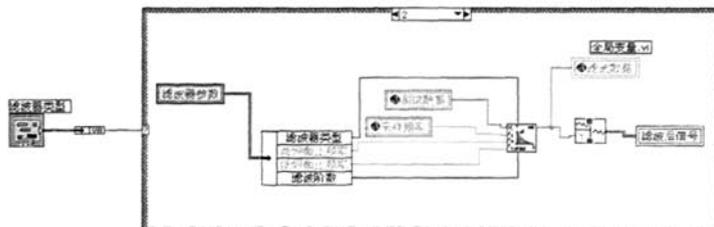


图 5-17 贝塞尔滤波框图

该图为贝塞尔滤波框图源代码。贝塞尔滤波器拥有最平稳的幅度和相位响应，在通带中相位响应近似于线性。但贝塞尔滤波器必须通过提高阶数以减少误差，因此它的应用不是很广泛。



：贝塞尔滤波节点。用于信号的贝塞尔滤波。

8 冲击脉冲分析界面框图程序源代码

冲击脉冲界面中的主要框图程序是冲击脉冲的故障诊断程序，如图：

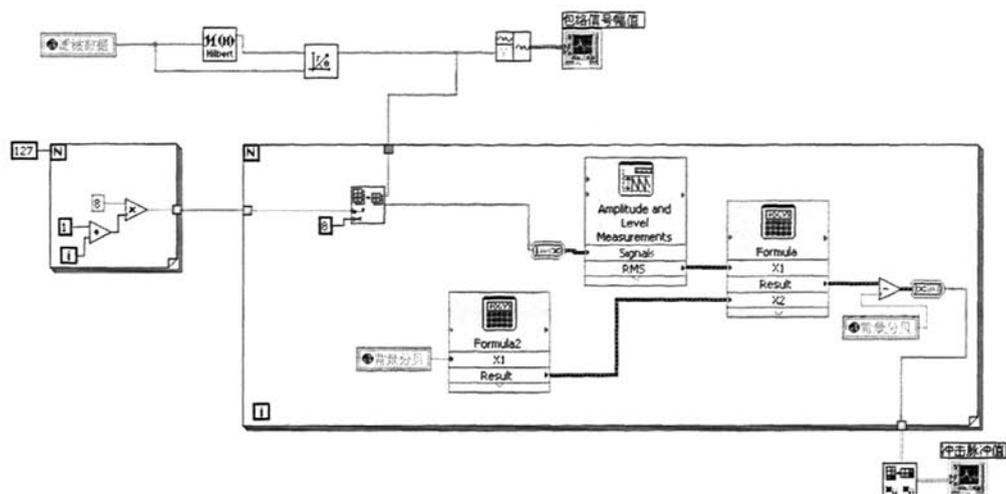


图 5-18 冲击脉冲分析界面框图

该图为冲击脉冲诊断框图程序源代码。滤波后数据经过 Hilbert 变化模块和一个直角坐标到极坐标变换模块后完成包络检波，并输出信号的包络图形。然后再对包络后的信号进行分组计算均方根值，并通过计算模块完成信号的加速度值与分贝值之间的转换，最后通过计算得到标准分贝，并输出冲击脉冲值完成对轴承信号的故障诊断。



: 快速 Hilbert 变换模块。用于信号的 Hilbert 变换。



: 直角坐标到极坐标变换。用于信号的直角坐标到极坐标的变换。



: 幅值测量，Express VI，选择如图所示设置，计算出每组信号的均方根值。



: 公式 Express VI，在对话框中输入所要设定的计算公式，点击“OK”即可。

5.2.2.3 滚动轴承的峭度分析

在频率分析界面中加入了峭度分析模块，峭度也是最常用的和最能反映轴承故障的时域指标。在滚动轴承损伤类故障发生时，由于周期性冲击振动信号的存在，会改变原有的周期性振动信号的幅值，改变信号的能量分布。因此，为判断滚动轴承是否出现故障，可先求出某些振动信号的时域参数并与其预先给定的标准值（如

企业标准、国家标准)进行比较,是否超过标准值的范围来判断轴承是否存在故障。有资料统计表明,使用峭度系数和有效值共同来监测滚动轴承振动情况,对判断滚动轴承故障的准确率达95%以上。

峭度(Kurtosis)K是反映振动信号分布特性的数值统计量,是归一化的4阶中心矩:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - \bar{x}]^4 p(x) dx}{\sigma^4} \quad (5-1)$$

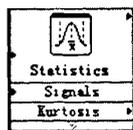
式中: $x(t)$ 为瞬时振幅; \bar{x} 为振幅均值; $p(x)$ 为概率密度; σ 为标准差。

对于一组给定的离散振动信号数据,其峭度系数K为:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_i} \right)^4 \quad (5-2)$$

式中: x_i 为信号值; \bar{x} 为信号均值; N为采样长度; σ_i 为为标准差。

峭度指标是无量纲参数,由于它与轴承转速、尺寸、载荷等无关,对冲击信号特别敏感,特别适用于表面损伤类故障、尤其是早期故障的诊断。在轴承无故障运转时,由于各种不确定因素的影响,振动信号的幅值分布接近正态分布,峭度指标值 $K \approx 3$; 随着故障的出现和发展,振动信号中大幅值的概率密度增加,信号幅值的分布偏离正态分布,正态曲线出现偏斜或分散,峭度值也随之增大。峭度指标的绝对值越大,说明轴承越偏离其正常状态,故障越严重,如当其值 $K > 8$ 时,则很可能出现了较大的故障。例如对滚动轴承初期阶段的表面剥落,峭度指标能非常容易检测出来,但用峭度指标对滚动轴承故障的判断非常单纯,且对由于灰尘、异物等引发的瞬时冲击较为敏感。



: 峭度分析模块,选择如图所示设置,计算出所输入信号的峭度值。

5.2.3 帮助文件简介

本系统帮助文件采用目前流行的电子书CHM格式。CHM是英语“Compiled Help Manual”的简写,即“已编译的帮助文件”。CHM是微软新一代的帮助文件格式,利用HTML作原文,把帮助内容以类似数据库的形式编译储存。

CHM文件格式是微软1998年推出的基于HTML文件特性的帮助文件系统,以替代早先的WinHelp帮助系统,它也是一种超文本标识语言,在Windows 98中把CHM类型文件称作“已编译的HTML帮助文件”。被IE浏览器支持的JavaScript、VBScript、ActiveX、Java Applet、Flash、常见图形文件(GIF、JPEG、PNG)、音频视

频文件(MID、WAV、AVI)等等,CHM 同样支持,并可以通过 URL 与 Internet 联系在一起。chm 文件因为使用方便,形式多样也被采用作为电子书的格式。

本帮助软件共有 9 个界面(9 个链接)来指引用户使用轴承故障分析软件,使用户更方便、快捷的对轴承信号进行分析,完成对轴承状态的诊断。用户如对软件的某个分析界面有疑惑就可以点击该界面的链接进入该界面。里面对软件的操作过程进行了详细的介绍,并且附上了正常轴承和故障轴承分析的实例使用户对软件的操作总体的认识,并能对分析结果有更深的了解。

本系统使用帮助如下图 5-19 所示:

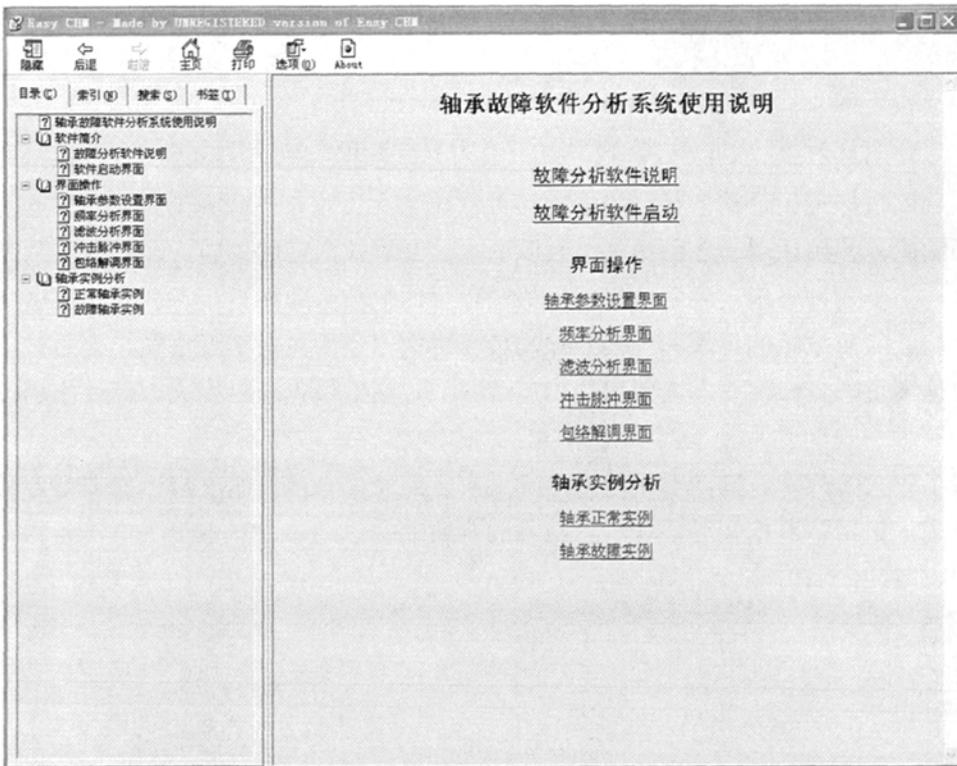


图 5-19 软件使用帮助界面

5.3 本章小结

在前几章研究的基础上,本章完成了基于虚拟仪器的滚动轴承故障诊断系统的设计,并对该系统的设计过程进行了介绍。该系统能够对采集的信号进行时、域分析和冲击脉冲分析,最后识别出了滚动轴承的缺陷故障。

第六章 结论

轴承部件相对于整台机械来说是价格低廉的部件，但却是故障率最高的部件。有关资料统计，机械故障的70%是振动故障，大约有30%的故障都是由轴承引起的，可见滚动轴承故障诊断是非常重要的研究课题。

本文首先分析总结了滚动轴承结构的振动机理、失效形式、振动类型及发生故障的原因，将冲击脉冲法应用于滚动轴承的故障诊断，然后提出了基于小波包滤波的冲击脉冲的滚动轴承故障诊断方法，并通过试验验证了这种方法的正确性，最后研制了基于虚拟仪器的冲击脉冲法诊断轴承故障诊断系统。

主要取得的研究成果有：

1 针对滚动轴承缺陷信号的特点，将冲击脉冲法引入到轴承故障诊断中来。首先将采集的轴承振动信号进行滤波，其次经希尔伯特变换得到包络信号，最后转变成冲击脉冲值。根据冲击脉冲值来判断轴承故障，并通过试验分析滚动轴承的故障，最终验证了该方法的正确性。

2 针对滚动轴承缺陷信号的特点，提出了基于小波包滤波的冲击脉冲分析方法。首先通过小波包滤波，将信号在全频带内进行多层次划分，通过对信号在不同尺度上的分解和重构，得到分布在不同频带内的分解序列，从而得到原信号在不同频段上分布的详细信息，更为有效地提取了各频段的信息成分，然后通过冲击脉冲分析轴承故障，并显示故障程度。最后通过试验分析滚动轴承的故障，验证了该方法的正确性。

3 研制了基于虚拟仪器的滚动轴承故障诊断系统。该系统能对采集的信号进行冲击脉冲分析，并得出故障的程度，从而有效地识别诊断出滚动轴承的故障及其故障程度。

结合在研究过程中出现的问题和今后滚动轴承故障分析和诊断的发展趋势，本人认为上述工作还须在以下几个方面进行拓宽。

1 在实际使用中，当背景噪声很强或有其他冲击源时，SPM诊断效果很差，如何有效地提取故障信息，分离噪声和干扰，需要作更进一步的研究。

2 冲击脉冲法对轴承的早期故障分析十分精确，但轴承在进入磨损期或故障期用冲击脉冲法诊断效果很差，需要作更进一步的研究。

3 基于虚拟仪器的冲击脉冲法诊断滚动轴承故障系统能对采集的信号的进行离线分析，识别诊断出滚动轴承的故障缺陷。但该系统不能进行滚动轴承的在线状态检测和故障诊断分析，该系统还需要进行进一步的开发研制。

参考文献

- [1] 何正嘉. 机械故障诊断案例选编. 西安: 西安交通大学出版社, 1991
- [2] 陈大禧, 朱铁光. 大型回转机械诊断现场实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [3] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断理论·方法·系统. 北京: 北京机械工业出版社, 1996
- [4] 万长森. 滚动轴承的分析方法. 机械工业出版社. 1987
- [5] 王德志. 滚动轴承的诊断与维护. 中国铁道出版社. 1994
- [6] 陈长征、胡立新. 设备振动分析与故障诊断技术. 北京: 科学出版社. 2007
- [7] 李洪, 曲中谦. 实用轴承手册. 辽宁科学技术出版社. 2001
- [8] O. G Gustantsson, T. Tallian. Detection of Damage in Assembled Rolling Bearing. Transactions of the ASLE, 1962, 5: 197~209
- [9] D. Dyer, R. M. Stewart. Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 1978, 100(4): 229~235
- [10] T. Koizumi, M. Kiso, R. Taniguchi. Preventive Maintenance for roller and Journal Bearings of Introduction Motor Based on the Diagnostic Signature Analysis. Transactions of the ASME. Journal of Vibration, Acoustics Stress and Reliability in Design, 1986, 108(1): 26~31
- [11] T. G. Wheeler. Bearing Analysis Equipment Keeps Down Time. Down Plant Engineering, 1968, 11(5) : 87~89
- [12] J. L Taylor. Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis. Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 1980, 102(4): 199~204
- [13] R. B. Randall. Analysis Techniques for Diagnosis of Gear and Bearing Faults. Proceedings of CSMDT 86. Shenyang China, 1986: 387~393
- [14] J. Mathew, A. Szezepanik. B, T. Kuhnall. Incipient Damage Detection in Low Speed Bearings Using Demodulation Resonance Analysis Technique. International Tribology Conference Melbourne, 2~4 December, 1987: 366~369
- [15] 雷继尧, 程善同. 轴承疲劳诊断仪. 重庆大学会议资料, 重资(86)004号
- [16] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学. 上海科学技术出版社, 1986
- [17] 陈向东. 基于神经网络的滚动轴承故障监测. 轴承, 2003, 23(2): 16~51
- [18] 王平, 廖明夫. 基于神经网络的滚动轴承故障包络信号的自动识别. 航空发动机, 2004, 2030(2): 23~26
- [19] 王平. 滚动轴承故障信息的自动提取方法研究. 机械强度, 2003, 6: 604~608

- [20] Rubini R, Meneghetti U. Application of the Envelope and Wavelet Transform Analyses for the Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001, 15 (2): 287~302
- [21] 林京, 屈梁. 基于连续小波变换的信号检测技术与故障诊断. *机械工程学报*. 2000, 35(12): 95~100
- [22] 吴桂清, 姜宁, 罗文钦. 基于旋转机械的多故障诊断专家系统的实现. *计算机工程与设计*. 2002, 23(12): 45~47
- [23] 陈波, 马孝江. 滚动轴承故障诊断数据库系统的设计与应用. *组合机床与自动化加工技术*. 2002, 40(11): 37~39
- [24] Mechefske C K. Objective Machinery Fault Diagnosis Using Fuzzy Logic. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1998, 12 (6): 855~862
- [25] Kaewkongka T, Au Y H J, Rakowski R. Continuous Wavelet Transform and Neutral Network for Condition Monitoring of Roto-dynamic Machinery . *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Budapest, Hungary, May21~23, 2001
- [26] 萧汉年主编, 机械工况监测与故障诊断, 人民交通出版社, 1994
- [27] 屈梁生、何正嘉编著, 机械故障诊断学, 上海科学技术出版社, 1986
- [28] 卢文祥、杜润生, 工程测试与信息处理, 华中理工大学出版社, 1992
- [29] 黄文虎、夏松波编著, 设备故障诊断原理、技术及应用, 科学出版社, 1997
- [30] 万良虹. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断方法的研究[硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2004
- [31] 吕路勇. 基于振动信号的滚动轴承故障诊断方法研究[硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2008
- [32] 沈庆根. 设备故障诊断. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [33] Measuring Shock Pulse another approach to Front Line Condition Monitoring. Louis Morando. SPM Instrumen Inc, 2004
- [34] 张颖、吕路勇、万书亭, 冲击脉冲法在滚动轴承故障诊断中的应用. *石油化工设备技术*. 2007, 28 (4): 60~64
- [35] 孙良环、李艳兰、熊晓燕. 希尔伯特变换原理在轴承故障诊断中的应用. *机械管理开发*, 2005, (2): 43~44
- [36] 王洪波、王枫、张彦斌. LabVIEW 与 Access 数据库访问接口研究. *微计算机信息* 2004, 20 (6): 56~57

致 谢

本文是在导师万书亭副教授的亲切关怀和悉心指导下完成的，从培养计划的制定、论文的选题、课题的研究到论文的完成等各个环节，每一部分工作都凝结着导师的无数辛勤的汗水。导师渊博的学识，严谨的治学态度，富于开拓的创新精神和丰富的科研教学经验都使我受益匪浅并将影响我的一生；导师在我攻读硕士期间不仅传授给了我许许多多工作方法和经验，更培养了我勤于思考、独立开展科研工作的能力，使我的知识结构和知识层次都有了很大地提高；其谦逊待人的品德和崇高的敬业精神对我产生了极深的影响。这一切都鼓励着我今后去取得更大的进步。不仅如此，导师还在学习和生活上时刻给予我无微不至的关怀和照顾。在此，谨向导师万书亭副教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！

此外，在华北电力大学学习的两年多时间中，研究室的各位老师和同学也给予了我许多的支持和帮助，在此对他们的帮助一并表示深深的谢意！

同时也要感谢我的父母，在我攻读硕士学位期间给予我巨大的支持和鼓励！

最后，向评阅论文以及参加论文答辩的专家、老师们致以崇高的感谢！

攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况

学术论文

- [1] 万书亭, 娄源元, 赵秀芳. 基于虚拟仪器和冲击脉冲法的滚动轴承故障诊断系统设计. 机械传动, 2009 (4) (待发表)

科研项目

国家自然科学基金 (50677017): 发电机故障的交叉特征分析及机电联合故障识别研究