

武汉理工大学

硕士学位论文

光纤光栅振动实时监测系统的设计与研究

姓名：熊靖

申请学位级别：硕士

专业：计算机科学与技术

指导教师：姜德生

20100501

摘要

日常生活中存在着复杂的动力学问题，振动状态纷繁复杂。由于建筑物或设备的异常振动而造成的事故时有发生，常常会给人带来巨大的伤亡和损失，倘若我们可以在事故发生之前就检测到存在的危险，并及时做出适当的防治措施，就可以更好的保卫我们的生命安全。因此，一套功能全面的振动监测系统迫在眉睫，通过对振动信号进行高质量的分析测试，了解设备结构振动的状态，得出它的一般规律，就可以通过对振动信号的处理分析得出我们常见的设备故障，以确保设备、工程的安全进行，对经济及社会有重大的意义。

早在二十世纪初，就有研究者对振动现象进行了测试与研究。传统振动监测系统多采用电磁类加速度传感器，它存在着较差的抗电磁干扰能力，较短的信号传输距离，不易于远程监控等诸多缺陷。随着社会的发展，工程结构不断大型化，这使得这类传感器的缺陷日益突出，越来越无法满足大型工程振动监测的需要，极大的制约了振动监测技术的发展。本课题是基于光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器设计出一套振动监测系统。该系统通过光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器将测得的振动信号输入到光纤光栅振动解调仪上，对振动光信号进行解调处理，使其转换为电信号，然后经过电荷放大器将其放大、滤波，再由采集器进行采集后输入计算机，由我们自主研发的振动监测软件对该信号进行分析、处理，从中提取振动状态的相关信息，如波形、频谱、速度、加速度及位移等，从而实现了对振动物体振动状态的监测。

该系统采用光纤 *Bragg* 光栅传感器不仅克服了传统传感器抗电磁干扰差等缺陷，而且它还具有电绝缘性很好、本质安全、灵敏度高、响应速度快等诸多优点。并且采用双光栅匹配滤波解调技术，外界温度的变化使两光栅中心波长发生同向漂移，这样便实现了温度的自补偿，两根光栅同时参与传感使灵敏度也有了很大提高。本系统中设计的振动监测软件是采用 VisualC++ 进行编译的，利用了多线程技术、数据库技术以及动态链接库技术，通过对振动信号进行时域分析和频域分析，得到振动状态的相关参数，实现了振动状态的全面监测。为我们提前做好预防工作打下了良好的基础。

关键词：光纤 *Bragg* 光栅，加速度传感器，振动监测，数据采集，时频分析

Abstract

The complex dynamic problems exist in our daily life, so the state of vibration is extremely complicated. Abnormal vibration of the building or equipment often lead accident and bring enormous casualties and losses to human beings. If we can examine the exist danger before the accident occur and make appropriate and timely protection, we can protect our lives better. Therefore, a set of comprehensive vibration monitoring system compels in the eyebrow. Through high-quality analysis and testing to the vibration signal, we can learn about the condition of the equipment structure vibration, from which we can understand some common equipment failures. Thus, we can guarantee that the equipment works securitly, which is very significant to our economic and social.

As early as the beginning of the twentieth century, researchers have carried out testing and research of vibration. The traditional vibration monitoring system use electromagnetic acceleration sensor. There is less resistance to electromagnetic interference, and the transmission distance is so short that it's not easy to remote monitoring. With the large-scale engineering structures, its dynamics become more and more complex, and the shortcomings of the electromagnetic sensors are increasingly obvious. The electromagnetic sensors are increasingly unable to meet the needs of large-scale projects vibration monitoring, which greatly restrictes the level of safety assessment of vibration monitoring techniques. In this topic, we design a set of vibration monitoring system which based on fiber Bragg grating accelerometer. In the system, fiber Bragg grating accelerometer will be fixed to the vibrating object. The sensor will vibrate when the object vibrate, and then vibration signals will be input to the fiber grating vibration demodulator, which demodulate the optical signal and make it convert to electrical signal. After that, the electrical signal will be amplified and filtered by charge amplifier. Then collector will collecte it and input it into the computer. Our own vibration monitoring software will analyze and process the signal, and extract information about the state of vibration, such as waveform, spectrum, speed, acceleration and displacement, so as to monitor the vibration condition successfully.

The system uses fiber Bragg grating sensors, which is not only to overcome the defect of traditional anti-electromagnetic interference, and has many other advantages such as good electrical insulation, intrinsically safe, high sensitivity and response speed, measuring object widely and so on. And in this system we use double-grating matched filter demodulation technique. The outside temperature changes, which lead center wavelength of the two grating drift in the same direction. And make self-compensation of temperature possible. The two grating which involved in sensing greatly improve sensitivity. The software functions of the system is also extremely comprehensive. Through analysis of vibration signal in time domain and frequency domain, we can obtain vibration parameters. And with VisualC++ compiler, we can achieve a comprehensive monitoring of vibration. which has laid a good foundation for our advanced prevention.

Key words: Fiber Bragg Grating, Acceleration sensor, Vibration monitoring, Data collection, Time-frequency analysis

独创性声明

本人声明,所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其它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。

签名: 熊清 日期: 2010.5.28

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名): 熊清 导师(签名): 姜世生 日期 2010.5.28

第一章 绪论

1.1 本课题研究的目及意义

在我们的日常生活与工作中，振动是无处不在的，周围的各种现象时常都伴随着振动。如大型设备及建筑物的振动，交通工具的振动，仪器及仪表等设备的振动，以及自然环境造成的地震等自然现象的振动，等等。这些振动若发生异常，则会给我们的生活造成意想不到的危害，极大地影响了我们的生命安全。例如：大型机械设备使用不当或使用时间过长产生的不良振动，以至发生许多严重的机械故障；许多空中事故也都是由于飞机的异常振动引起的；桥梁与房屋的振动也存在安全隐患，可能危及我们人类的生命安全；汽车等交通工具的振动时常会让人颠簸得头晕恶心想吐，影响人们的身体健康；许多电器振动时会产生噪音，而这些噪音时常会影响我们的日常生活，给我们带来不必要的烦恼；最让人恐惧的当数如今时有发生的地震现象，它不仅会破坏我们生活的家园，使我们失去亲人，还严重危及我们的生命安全。

这些异常振动给我们带来的危害是令人瞠目的。全球第一大铜生产国智利，在2010年2月27日凌晨，发生里氏八点八级特大地震，并引发海啸袭击太平洋沿海国家。据估计，约两百万人受到地震影响，一百五十万栋房屋坍塌。我国2008年发生的汶川512事件也是血的事实，里氏八级地震使多少人流离失所，多少人失去了至亲，全国人民都陷入了无限的悲痛之中。直到08年9月，政府已核实在此次灾难中69227人遇难、374643人受伤、17923人失踪。1972年日本海南电厂中的一台六十万千瓦的汽轮发电机组^[1]，在试用期间，因异常振动致使整个机器毁坏，联轴节与汽轮机的叶片飞到厂房外数百米，使工作人员险些受伤。这些由振动而造成的事故频频发生，常常会给人类带来巨大的伤亡和损失，倘若我们可以在事故发生之前就检测到存在的危险，并及时做出适当的防治措施，就可以避免灾难的发生，更好的保卫我们的生命安全。

由此可见，若能了解设备结构振动的状态，得出它的一般规律，就可以通过对振动信号的分析得出我们常见的设备故障。因此，一套功能全面的振动监测系统迫在眉睫，通过对振动信号进行高质量的分析 and 测试，以确保设备、工程的安全进行，避免振动事故的发生，对经济及社会有重大的意义。

早在二十世纪初，就有研究者对振动进行了测试与研究，传统的振动监测系统多采用电磁类加速度传感器，它存在着较差的抗电磁干扰能力，较短的信号传输距离，等诸多缺陷。随着社会的发展，工程结构规模越来越大，这种电磁类传感器的缺陷日益突出，越来越无法满足大型工程振动监测的需要，极大的制约了振动监测技术的发展。本课题是基于光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器设计出一套振动监测系统，该系统通过光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器将振动信号输入到光纤光栅振动解调仪上，对振动光信号进行解调，使其转换为电信号，然后经过电荷放大器将其放大、滤波，再由采集器进行采集后输入计算机，由我们自主研发的振动监测软件对该信号进行分析、处理，从中提取振动状态的相关信息，如波形、频谱、速度、加速度及位移等，从而实现对振动物体振动状态的监测。采用光纤 *Bragg* 光栅传感器不仅克服了传统传感器抗电磁干扰差的缺陷，而且它具有电绝缘性很好、本质安全、灵敏度高、响应速度快、测量对象广等诸多优点。正是由于它的这些优势其他类型传感器无法比拟，因而它必将广泛应用于振动监测领域。

1.2 振动传感测量技术研究现状及发展趋势

1.2.1 振动传感测量技术研究现状

二十世纪初，研究者们就开始对振动测量技术进行探索研究。在他们不断的研究和实践中，振动测量技术逐渐走向成熟，传感测量方法因其独有的优势也逐步发展起来。振动测量主要是测量振动的重要参数，如振幅、频率、速度、加速度及位移等动态参数。将传感器测得的振动信号进行解调并转换为电信号，接着进行信号放大、滤波等处理工作，再将该信号进行分析、显示的整个过程即为动态测量，振动测量属于动态测量^[2]。

振动测量技术随着工程中对振动监测需求的与日俱增而不断发展，涌现出大量高质量的测量设备和先进的测量方法。目前，振动测量的方法主要包括机械式、电气式和光学式三类。

(1) 机械式测量方法以杠杆原理为基础，将测得的振动信号放大后直接记录下来。这种测量方法的抗干扰能力较强，但是测量的频率范围较窄，精度较低；

多用于测量低频、大振幅振动。

(2) 电气式测量方法目前应用较为广泛，它是用电量测试仪来测量振动信号。这种测量方法灵敏度较高，但是难以抵抗电磁场的干扰，很难确保生产的安全性。

(3) 光学式测量方法是采用光学传感器，将振动信号的变化转换为光信号的变化来测量。这种测量方法弥补了机械式测量方法和电气式测量方法的缺陷，具有测量精度高、频带宽，响应速度快、抗干扰能力强、远距离测量等诸多优点。

二十世纪二十年代，大型机械设备的迅速发展使得机械式测振仪已经无法满足要求了，于是研究者们开始研究将非电量信号转换为电信号来测量的方法，这样就研究出磁电式传感器。二次大战结束后，研究者们又研究出体积小、测量频率宽、动态量程大的压电式传感器，直到现在仍广泛应用于在许多工程项目中^[3]。近些年来，微电子技术大力发展，为使振动测量可在各种恶劣的环境下进行，又出现了集成电路式压电传感器、变电容传感器以及电涡流传感器，提高了测量精度和抗干扰能力。随着光纤传感技术的发展，为了利用其抗干扰能力强、传输距离远、灵敏度高的特点，研究者们又投入到光学式振动测量方法的研究中。

信号的探测、采集和分析是振动测量的核心。计算机技术的飞速发展使信息处理技术有了突飞猛进的提高，数据的采集和处理技术已逐步走向成熟。但是目前在工程中应用较多的振动测量技术主要还是基于传统的机械式测量方法，绝大多数振动测量系统都是采用的电磁类传感器，其灵敏度较低、测量距离短、抗干扰能力差，远远无法满足工程应用的需求，极大地制约了振动测量领域的进一步发展。这主要表现在以下几个方面^[4]：

(1) 传统传感器的有效输出是由部分被测能量组成的，这使得传感器的输出能量较小、内阻较高且灵敏度很低。

(2) 有的传感器在使用之前需要先将其调零，这使得传感器的长期稳定性

降低。

(3) 传统传感器的抗干扰能力都不太可观，对常见的随机干扰波都无法起到屏蔽或抑制的作用，并且测量频率范围较窄。

(4) 传统传感器不能实现测量的智能化。

因此，采用新型振动传感器来改善现有振动监测系统中的缺陷是振动测量技术的关键问题。振动测量技术的迅速发展以及工程应用中对高精度测量技术的需求，使得研制高性能的振动传感器来进行振动信号的测量成为必然。光纤传感技术的出现使传感器领域有了突飞猛进的发展，目前国内外研究者们已经成功研制出了很多光纤振动传感器，克服了传统振动传感器的诸多缺陷，具有测量精度高、范围广、抗电磁干扰能力强、适合各种恶劣环境等优点，受到了业内人士的广泛重视。

1.2.2 光纤光栅传感技术发展状况

随着光纤传感技术的不断发展，研究人员开始在此基础上进行光纤光栅传感技术的研究。光纤光栅传感器不仅具有光纤传感器的优点，还拥有其自身独特的优势。其中，传感信号为波长调制型是光纤光栅传感器最突出的优点之一。这种传感机制的优势在于：光源的起伏、光纤弯曲耗损、光纤连接耗损以及探测器老化等因素都不会影响振动信号的测量；不像其它干涉型传感器，它相位测量清晰并可以不需要固有参考点；便于采用波分复用的方式，通过在一根光纤中串连多个 *Bragg* 光栅来实现分布式测量。此外，在材料中很容易埋入光纤光栅，从而实现对其内部的温度及应变进行高分辨率的、大范围的测量。就在 1989 年，Morey 第一次将光纤光栅用于传感并将其报道^[5]，在当时引起了世界范围内研究者的关注，人们也开始越来越重视光纤光栅传感器的研究并将其应用与各个领域。

近年来，在对振动信号的研究中发现，从振动加速度信号中可以提取出振动信号的特征参数如速度、位移等，有效的反应的振动的状态。因此，人们在振动测量领域的探索方向逐渐转向光纤光栅加速度传感器。在国外，研究者们视光纤光栅加速度传感器为宠儿，使其在各个领域得到了广泛的应用。A.D.

Kersey^[6]于1992年首次将光纤 *Bragg* 光栅和非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪结合, 来测量振动现象, 得到相当高的动态应变灵敏度; Todd 在1998年将两个矩形梁与一个质量块组合在一起, 用双挠性梁作为转换器, 研制出光纤光栅加速度计^[7], 利用点接触将质量块焊接在两平行梁之间, 在第二个矩形梁底部粘贴上 FBG。传感器接收到振动信号后, 质量块由于惯性也随之振动, 两个矩形梁在质量块的带动下发生振动并引起应变, 从而引起 FBG 波长变化。这样的例子不胜枚举!

在我国, 国家大力支持光纤光栅传感技术的研究与应用, 设立各种国家基金, 如国家自然科学基金、863计划等, 其他部委专项基金也加以资助, 光纤光栅传感技术取得了突飞猛进的发展^[8]。

1996年, 清华大学在研究FBG特性时, 就提出了光纤光栅加速度计的设计思路; 南开大学为实现FBG加速度测量付出了很多努力, 研究出采用宽带光源解调和光纤增敏光信号解调等解调方法; 重庆大学提出了FBG与非本征F-P干涉复用的结构, 并结合非平衡M-Z干涉技术具体研究了分布式加速度的测量, 这也是不断探究FBG加速度传感器的成果; 北京科技大学的巩宪锋等人利用碳纤维悬臂梁代替弹簧, 将它的一端固定在基座上并在另一端上放置质量块, 在悬臂梁的固定端旁边贴上FBG, 测量时将传感器与振动源固定, 传感器随着振动源振动, 致使传感器内部质量块发生振动, 拉升和挤压光纤光栅, 从而引起 *Bragg* 光栅波长的变化, 根据 *Bragg* 光栅波长的变化来测量振动状态。在光纤光栅传感理论方面, 清华大学、吉林大学、中科院半导体所、上海光机所等深入研究光纤的光敏性、成栅机理、光波传输规律等问题; 在光纤光栅传感的关键技术方面, 武汉理工大学、南开大学、重庆大学以及深圳朗科公司、上海紫珊公司等单位都各有创新, 各具特色。

二十年来, 武汉理工大学光纤研究中心在光纤传感技术方面做了大量的研究和应用开发工作, 成为光纤传感技术国家重点工业性试验基地和光纤传感与信息处理教育部重点实验室。波长解调器是光纤研究中心自主研发的光纤传感关键技术; 光纤研究中心还探索出一套适用于不同应用领域和不同传感信息的光纤 *Bragg* 光栅封装方法; 并成功地利用光纤传感技术长期监测武汉长江二桥和武汉阳逻长江大桥的结构健康, 探测镇海炼化、广州石化、金陵石化、武汉石化、国家石油储备油库等国家大型石化行业储油罐区的火灾情况, 以及沪蓉西隧道和陕西终南山隧道等大型隧道的火灾情况。大力应用和推广了光纤传感技术。

1.3 本文的主要工作及创新点

本文的主要工作就是基于光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器设计出一套振动监测系统，该系统采用光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器从振动信号中提取有关信息，该振动信号经过解调、预处理后，被采集输入到计算机中，通过本文自主研发的振动监测软件对其进行分析、处理及显示，从而得到我们所需要的振动重要参数。本文的主要安排如下：

第一章，首先介绍了本课题研究的目的和意义，接着介绍了该课题研究的内容在国内外的的发展状况。

第二章，主要对光纤光栅振动监测系统的各个部分进行介绍。首先介绍了目前存在的几种振动传感器以及它们的不足，从而引出本文所使用的光纤 *Bragg* 光栅传感器；接着介绍了本系统中光纤光栅解调法，以及振动信号采集方法，信号预处理技术、振动信号的重要参数及分析方法。

第三章，主要讲述光纤光栅振动实时监测系统软件部分的设计。首先介绍软件开发的语言以及软件程序中使用到的主要技术；然后对软件体系的总体结构和功能进行了介绍；接着对软件中实现的功能如启动画面、参数设置、数据采集、波形及频谱显示，重要参数计算、静态历史数据显示等进行逐一讲解。

第四章，主要介绍在实验室进行的振动监测系统测试，并对该系统在武钢水泵中的应用做了介绍。

第五章，对本文所研究的系统做出总结，并对下一步的发展研究进行了展望。本文的创新点主要体现在：

(1) 国内外的研究者们还是初步研究高频响应光纤光栅加速度传感器，将光纤光栅加速度传感器应用于振动测量还是一个全新的研究领域。

(2) 采用双光栅匹配滤波解调技术，外界温度的变化使两光栅中心波长发生同向漂移，实现了温度的自补偿，两根光栅同时参与传感使灵敏度有了很大提高。

(3) 在软件中采用多线程技术、数据库技术以及动态链接库技术，并构造快速傅立叶变换算法的动态链接库来对采集到的振动信号进行频域分析，便于日后对此算法进行进一步的改进和完善。该软件通过对振动信号的分析处理实现对振动信号重要参数如波形、频谱、速度、加速度及位移等的全面监测。

第二章 光纤光栅振动实时监测系统

本章主要对光纤光栅振动监测系统的各个部分进行研究。介绍了光纤 *Bragg* 光栅传感器的优势,并提出了本系统所使用的光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器,以及双光栅匹配滤波解调法,还对系统中运用的振动信号采集方法,信号预处理技术、振动信号的重要参数和处理方法进行了详细介绍。

2.1 振动传感器概述

2.1.1 振动传感器简介

随着振动测量技术的飞速发展,涌现出大量高质量的测量设备和先进的测量方法。目前主要使用的振动传感器包括机械式测振仪、电气式传感器和光纤振动传感器三类^[9]。

(1)机械式测振仪:早期测量振动主要采用记录式机械振动表,现在有少数工程现场仍在使用的千分表式机械振动表。这类测振仪读数不是很方便、精度较低并且振动信号不能传送,因此已将近淘汰。

(2)电动式传感器:按照工作原理的不同,电动式传感器可分为电容型、电感型、速度型、加速度型、电涡流型等^[10]。但是由于电容型和电感型传感器极易受到周围介质的影响,因此目前几乎没有使用。下面对这几种类型简单介绍如下:

①电容式传感器:电容式传感器可进行非接触测量,主要用于测量振动、位移、压力等,操作简单,灵敏度高,稳定性强,但是对污染的抵抗能力非常差。

②速度传感器:它的输出可以反应被测物体的振动速度。这种传感器非常便于测量,在10~1000Hz频率范围内,测量振动位移或振动速度是非常理想的选择。

③压电式传感器:在振动测量中使用得较为广泛的压电式传感器主要是压电式加速度计。它是利用压电陶瓷或压电石英晶体作为敏感元件来进行测量的,具有体积小、测量频率范围宽、可用于高频振动的测量等优点,但是不适用于

测量低频振动位移。

④应变式加速度传感器：它主要是利用半导体应变片或金属丝应变片作为敏感元件来对振动信号进行测量的。这种传感器重量轻、体积小、输出阻抗低，适用于桥梁、建筑物及交通工具等振动信号的测量。

⑤电涡流式传感器：根据工作原理的不同，可将其划分为高频反射型和低频透射型。它也可以进行非接触测量，并且结构非常简单、灵敏度较高、抗干扰能力强。在科学研究和工业生产中得到了广泛的应用。

(3) 光纤振动传感器：这种传感器采用光学式传感原理，将振动信号转换成光信号来进行测量，它弥补了机械式和电气式传感器的诸多缺陷，测量频率范围广、精度高，并且具有良好的抗干扰能力，在下一节中我们将进行详细介绍。

2.1.2 光纤光栅传感器

光纤传感器较之传统的机械式、电动式传感器具有诸多优点^[9]：

(1) 具有良好的抗电磁干扰能力。由于光波的频率比常见的电磁辐射的频率要高得多，因此在光纤传感器中的光信号不会受到电磁波的干扰。

(2) 具有良好的电绝缘性能，因此非常安全、可靠。光纤是由石英构成的，不需要电源驱动，因此在油、气等易燃易爆的化工生产中使用也非常安全。

(3) 测量范围非常广，测量频带宽、灵敏度高。

(4) 重量轻、体积小，并可以根据工程应用的需要设计其几何形状结构。

(5) 在传输时的损耗很小，因此可以进行远距离监测。

(6) 传输容量相当大，因此可以实现多点式分布测量。

(7) 不易受到腐蚀，化学性能非常稳定。由于光纤是由石英构成的，其化学性质分成稳定，因此各种恶劣的环境都不影响光纤传感器的使用。

随着光纤传感技术的不断发展，研究人员开始在此基础上进行光纤光栅传感技术的研究。光纤光栅传感器不仅具有以上介绍的光纤传感器的这些优点，还拥有其自身独特的优势。其中，传感信号为波长调制型是光纤光栅传感器最突出的优点之一。这种传感机制的优势在于：光源的起伏、光纤弯曲耗损、光纤连接耗损以及探测器老化等因素都不会影响振动信号的测量；不像其它干涉

型传感器，它相位测量清晰并可以不需要固有参考点；便于采用波分复用的方式，通过在一根光纤中串连多个 *Bragg* 光栅来实现分布式测量。此外，在材料中很容易埋入光纤光栅，从而实现对其内部温度及应变进行高分辨率的、大范围的测量。因此，本文采用光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器来设计振动实时监测系统，有效克服传统传感器所存在的不足，提高了振动监测系统的灵敏度、抗干扰能力以及远距离传输等各方面的性能。通过从振动加速度信号中提取振动状态的相关信息如速度、位移等，有效的反应的振动的各个状态。

2.2 光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器概述

2.2.1 光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器基本原理

光纤材料具有光敏性，即当外界光源入射时，光纤纤芯内的锗离子会与入射光子相互作用，使折射率发生永久性变化，空间相位光栅就会在纤芯内部形成，起着窄带透射、反射滤波镜或反射镜的作用，许多性能独特的光纤无源器件就是利用这一特性构成的^[11]。光纤 *Bragg* 光栅的折射率调制周期以及纤芯折射率会影响光栅的反射或透射峰的波长，而光纤光栅的折射率调制周期和纤芯折射率又会受到外界温度或应变变化的影响，因此光纤光栅的反射或透射峰波长的变化会受到外界温度或应变的影响，光纤 *Bragg* 光栅传感器就是这样运行的。

当光纤 *Bragg* 光栅有宽带光源入射时，折射率会发生改变，从而产生折射、透射或反射，其中符合下式，即布喇格条件：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \times \Lambda \quad (2-1)$$

则会发生反射现象， λ_B —光栅反射波长， n_{eff} —有效折射率， Λ —光栅周期。

光纤 *Bragg* 光栅传感器就是以此为基础的。我们在设计光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器时，就是采用这个原理来间接测量加速度的。在设计传感器的结构时巧妙利用弹性元件，使其产生受力并引起光纤光栅的应变，把加速度量转化 *Bragg* 光栅的应变变量，进而演变 *Bragg* 波长变化，通过测量波长的变化来测量加速度。

2.2.2 光纤 Bragg 光栅加速度传感器结构

以光纤 *Bragg* 光栅的振动传感特性为基础^[12,13]，根据以上分析，我们采用如下结构。在该结构中，由于钢管的弹性模量比较适中，故弹性元件以钢管为材料。而质量振子需要密度较大的材料，考虑到铜密度大，故质量块以铜为材料。传统光纤传感器易发生温度漂移，并产生横向干扰，灵敏度也不高。为了克服这些问题，我们在该结构中采用双光栅，也就是以质量振子为中心，在其上下距离相等的位置装上两个中心波长相近的 *Bragg* 光栅，波段为 1302nm 。

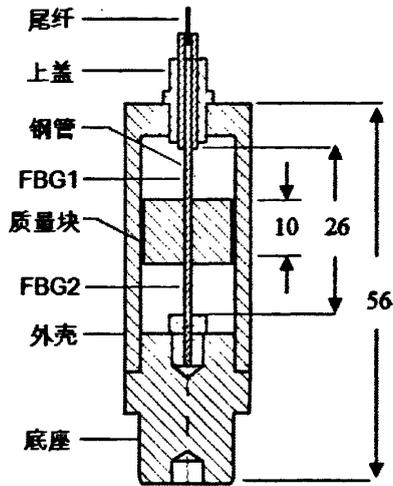


图 2-1 光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器结构图

在该传感器结构中，首先将 *FBG1* 与 *FBG2* 串联焊接，然后用环氧型粘合剂刚性粘贴在钢管内，再将质量块穿过钢管，并采用激光焊接技术将质量块固定在钢管上两个光栅的正中心，这样钢管、质量块和两个 *Bragg* 光栅就构成了整个传感器的弹性系统^[14]。

当待测物振动时，固定在其上的传感器也随之发生振动，传感器内弹性系统做受迫振动，使质量块上下移动，其上下两侧分别产生相反的应变，致使粘贴在质量块上下两侧的 *Bragg* 光栅波长发生互为反向的漂移。两个 *Bragg* 光栅的反射谱会交叠在一起，其包络面积的变化从而导致总反射光强度发生变化，物体振动加速度变化与总反射光强度变化规律一致。光信号输出后经光电转换器转换成电信号输出，再经数据采集系统采集后，在电脑上通过振动监测软件

对数据进行分析处理后即可得到被测物体振动的相关参数。

2.3 光纤光栅解调技术

2.3.1 常用的解调方法

(1) 直接解调法

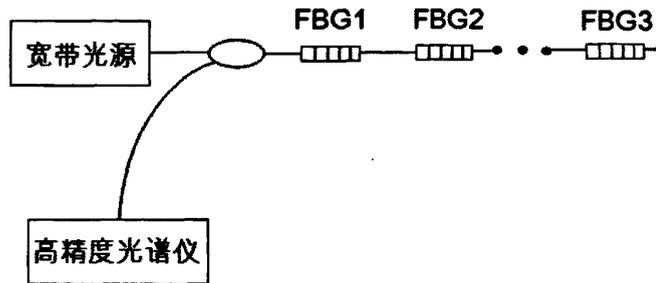


图 2-2 光谱仪检测光纤光栅波长

运用光谱仪、单色仪或波长计来检测波长是光纤光栅解调最直接的方法^[15]。但由于这些仪器都存在价格高、体积大、不易携带等缺陷，因此多用于实验室。并且光的波长是直接显示在光谱仪上的，通过这个光纤光栅波长变化我们就可以得到被测物量的相关参数。但是目前光纤光栅传感器的应用发展对测量的分辨率有较高要求，而传统的光谱仪很难满足其需求。对于高分辨率光谱分析仪，虽然其分辨率能够达到要求，但价格相当高，体积也相当大，不适合工程应用。因此，在实际应用中，我们不大可能用这类光谱仪来测量光纤光栅的波长。还有一个很大的原因是，它无法直接输出与波长变化相对应的电信号。这非常不利于我们记录、存储和显示测量数据。

(2) 匹配滤波解调

按照光纤光栅的分布，匹配滤波法可划分为单点匹配解调和多点匹配解调。单点匹配解调是以反射式为基础，而多点匹配解调是以透射式为基础。

匹配滤波法的工作原理就是指使用两个光纤光栅，其中一个为测量光栅，另一个作为参考光栅。驱动元件发出的驱动信号可以使参考光栅与测量光栅的波长变化一致，被测物的应力或温度就可以通过测量驱动信号来获得，这样我们就可以利用参考光栅来实现传感光栅的解调了。图 2-3 即为光纤光栅匹配滤波解

调原理图。

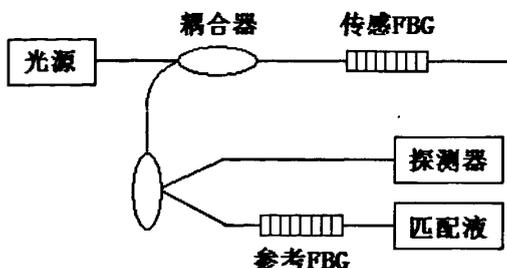


图 2-3 匹配光栅滤波解调示意图

反射型解调是当入射光照射在被测 *FBG* 上时，发生反射现象，其反射光经过参考光栅后再次发生反射，若这两束反射光波长相同，探测器就会接收到这两束光并将其输出，根据此时的驱动信号就可以测得我们所需要的振动参数。因此 *Davis* 等人对透射型解调法进行了研究。透射型不同于反射型，它的光电探测器不是用来接收反射光，相反是用来接收透射光，通过透射光的情况来判断光栅的匹配情况，这样就避免了测量微弱的光强信号^[16]。

匹配滤波法的优点是成本低，结构简单、精度高且信噪比高等。但由于光路中使用的耦合器较多，造成系统的光损耗增大，并且传感光栅的测量范围受到参考光栅应变量的限制，驱动元件的响应速度也时常无法满足我们的需求。

(3) 可调谐法布里-珀罗腔法

可调谐法布里-珀罗腔 (*F-P* 腔) 法不同于匹配滤波法，它用可调谐法布里-珀罗腔代替参考光栅。与光纤光栅工作谱区相比，*F-P* 腔的自由光谱范围较大，可保证总能检测到光纤光栅的反射信号^[17,18]。

F-P 腔起着窄带滤波器的作用。当一定波长范围内的平行光入射到 *F-P* 腔时，某些满足相干条件的光会发生干涉现象。*FBG* 传感器就是利用 *F-P* 腔的这个特性来检测反射波长的。其工作原理如图 2-4。

光由宽带光源发出，经隔离器入射到 *FBG* 后发生反射，该反射光经耦合器照射到可调谐 *F-P* 腔上，可调谐 *F-P* 腔利用锯齿波扫描电压，并调整压电元件腔间隔，扫描一定范围内的窄通带。当 *FBG* 的反射波长与可调谐 *F-P* 腔的透射波长相匹配时，*FBG* 反射的信号即可通过，探测器上显示的就是最大光强。因此光纤光栅反射峰位置可由可调谐 *F-P* 腔驱动电压与透射波长关系测得^[19]。

这种解调方法操作简单、灵敏度高、光能利用率高、 $F-P$ 腔调谐范围宽并且系统稳定性很好，因此在工程应用中使用较为广泛，但若要求精细度高则价格也较昂贵并且滤波损耗也较大。故使用这种解调方法的关键就是在保证精度的前提下，采用某些技术来降低系统成本。

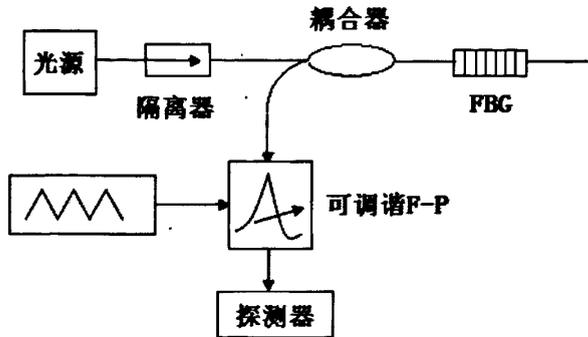


图 2-4 可调谐 F-P 腔解调原理图

2.3.2 本系统的解调方法

信号的解调是振动传感系统的核心部分，传感系统检测性能的好坏与选择的解调方法息息相关。因此选择适当的方法进行解调是至关重要的。为此我们做了大量研究，最终决定使用双光栅匹配滤波解调技术对该系统进行解调。这种解调方法与之前介绍的匹配滤波法类似。不同的是本系统中的两根 FBG 都是作为传感光栅，若其中一根光栅被压缩则另一根光栅被拉长，这使测量灵敏度有了很大提高。若外界温度发生变化，传感探头内的两根 FBG 光栅中心波长就会发生漂移，这种同向同步的漂移使温度的自补偿成为现实，并使温度与应变之间避免了交叉敏感。下面我们来对这种实现原理进行推导。下图为光纤光栅加速度传感器的光学原理图。

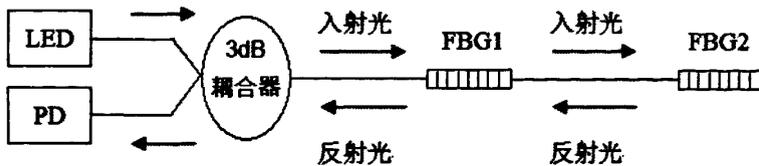


图 2-5 FBG 加速度传感器的光学原理图

光由 LED 宽带光源发出后经过耦合器，入射到传感器中经过两个光纤光栅

并都发生反射现象，反射光再次经过耦合器后由光电转换器接收。由高斯函数得到 $FBG1$ 的反射谱为^[20]：

$$r_1(\lambda) = R_1 e^{-4 \ln 2 \times \frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{\delta_1^2}} \quad (2-2)$$

式中 R_1 是峰值反射率， λ_1 和 δ_1 分别是 $FBG1$ 的中心波长和半峰值处带宽，由高斯函数得到 $FBG2$ 的反射谱为：

$$r_2(\lambda) = R_2 e^{-4 \ln 2 \times \frac{(\lambda - \lambda_2)^2}{\delta_2^2}} \quad (2-3)$$

式中 R_2 是峰值反射率， λ_2 和 δ_2 分别是 $FBG2$ 的中心波长和半峰值处带宽。

设 LED 入射光光功率为每纳米 $4I_0$ ，当光经过 $3dB$ 耦合器后，入射到 $FBG1$ 上的光分成两束，其中一束光经反射后再次通过 $3dB$ 耦合器并被光电转换器接收，设 P_1 为这束光的强度，则有：

$$P_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 r_1(\lambda) d\lambda \quad (2-4)$$

另一束光透射到 $FBG2$ 上并被其反射，该反射光再次经过 $FBG1$ 并透射到 $3dB$ 耦合器上并被光电转换器接收，设 P_2 为这束光的光强，则有：

$$P_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 t_1(\lambda) r_2(\lambda) t_1(\lambda) d\lambda \quad (2-5)$$

输出光强总量为：

$$P = P_1 + P_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 r_2(\lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 t_1(\lambda) r_2(\lambda) t_1(\lambda) d\lambda \quad (2-6)$$

$$P = \frac{\sqrt{\pi} I_0}{\sqrt{\ln 2}} \left(\frac{R_1 \delta_1 + R_2 \delta_2}{2} - \frac{R_1 R_2 \delta_1 \delta_2}{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} e^{-4 \ln 2 \times \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2}} + \frac{R_1^2 R_2 \delta_1 \delta_2}{2 \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} e^{-4 \ln 2 \times \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{\delta_1^2 + 2\delta_2^2}} \right) \quad (2-7)$$

查阅器件参数可知 $I_0 = 1mw/nm$ ， $R_1 = R_2 = 0.95$ ， $\delta_1 = \delta_2 = 02nm$ ，根据上式可得到两个光栅的中心波长差 $(\lambda_1 - \lambda_2)$ 与输出光功率 P 的关系曲线如图 2-6 所示。在这个曲线中我们可以看到，波峰的两侧各有一段区域的变化近似线性，我们主要就是利用这两个线性区域进行匹配光栅边沿滤波解调的。将式(2-7)对

$(\lambda_1 - \lambda_2)$ 求二阶导数并令其为零就可得到其最佳工作点，最佳工作点处这两个光栅的波长差为：

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \sqrt{\frac{(\delta\lambda_1)^2 + (\delta\lambda_2)^2}{8 \ln 2}} \quad (2-8)$$

这里 $\delta_1 = \delta_2 = 0.2nm$ ，故可得到两个光栅中心波长差在最佳工作点处为 $0.12nm$ 。为了使光纤光栅加速度传感器的动态响应范围达到最大，选取波长匹配最合适的两个光栅是非常重要的。

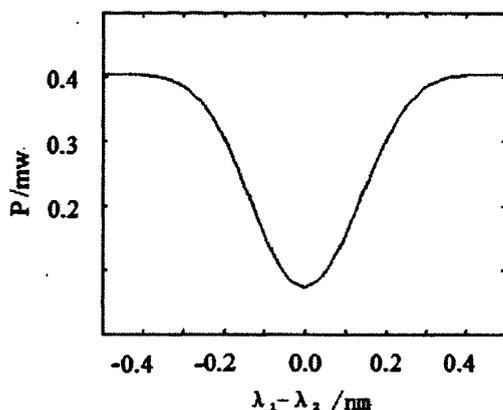


图 2-6 输出功率与两光纤光栅波长差关系

2.4 振动信号采集与处理技术

2.4.1 振动信号采集技术

实际工程中检测的信号多数是模拟量，这些模拟量在时间上连续变化。对于数据信息的处理，我们希望能向用户反映被检测量的特征数值或曲线图，而这需要由计算机来完成。因此我们就需要将模拟量转化为数字量，实现信号的采样与重构，这是数据采集的关键。下图为本系统中数据采集系统的简化图。

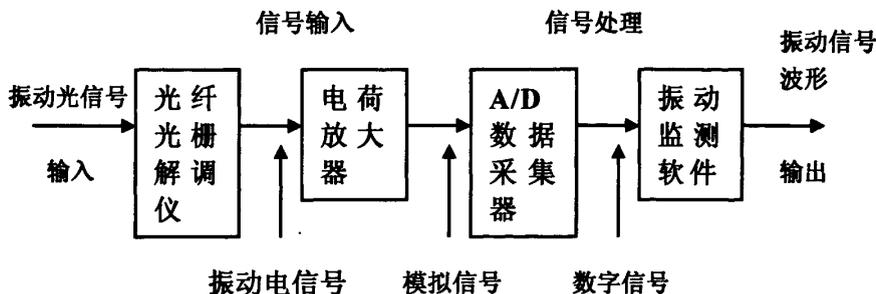


图 2-7 光纤光栅信号采集系统简图

首先进行模拟信号的预处理，由传感器输出的振动光信号经过光纤光栅振动解调仪对其进行解调，并将光信号转换为电信号，然后通过电荷放大器进行信号放大和高通滤波，再由 A/D 采集器对振动信号进行采集，并将模拟信号转换为数字信号，最后由计算机软件对该数字信号进行分析处理，实现我们所需要的振动重要参数的检测及图形的显示^[21]。

根据采样定理，设连续模拟信号 $X(t)$ ，其截止频率（即最高频率） f_h ，则一组时间间隔不大于 $1/2f_h$ 秒的均匀采样值能使其唯一确定。这也就是说在信号频率最高时，一周期内至少采集两个数据。通常我们将这个最大采样间隔 $T = 1/2f_h$ 称为奈奎斯特 (Nyquist) 间隔。则其最小采样频率 $f_s = 2f_h$ ，将它的一半称为 Nyquist 频率。相应带宽叫做 Nyquist 带宽。据此，模拟信号和相应的离散信号被联系在一起，为了避免出现混叠，采样信号的最高频率或带宽需低于离散系统的 Nyquist 频率^[22]。

数据采集系统要想实现预期的功能，其关键环节是精确识别 FBG 反射波长信号以及其相对的扫描电压。使用数字存储示波卡进行数据采集，检验系统设计是否合理、可行，从而收集、处理和显示经过 A/D 转换器后的电信号。实际应用中通常使用优采系列和 NIUSB 系列采集卡。优采系列采集卡采样频率最高可达 40M，自带的虚拟示波器使我们可以直接得到所需的信号数据。NIUSB 系列采集卡是基于 USB 接口的，采样速率高达 1.25MS/s，并能够提供高达 80 个模拟输入通道。采集卡数据采集设备配以相应软件可以达到很好的人机接口，操作性好。

采集信号时，随时间变化的被测物理量如加速度、频率、应变以及温度等，都是模拟信号。根据采样定理，我们应使被采样信号 $X(t)$ 成为有限带宽的信号

并保证采样频率 f_s 大于带宽限制频率最高频率 f_h 的 2 倍以防止产生混叠干扰^[23]，下图是一个典型的光纤光栅数据采集系统示意图。

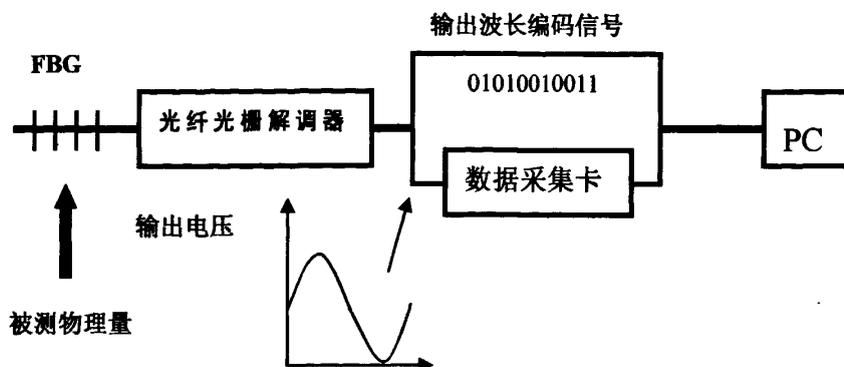


图 2-8 光纤光栅数据采集系统示意图

振动信号由 *FBG* 加速度传感器感测，经过光纤光栅解调器进行双光栅匹配滤波解调，并将光信号转换为电信号后输出，再由数据采集卡对其进行采集。采集卡将采集到的数字信号传入计算机，由计算机对其进行数据的分析处理，得到我们所需要的参数及波形。

2.4.2 振动信号预处理技术

振动信号常常会受到各种因素的干扰，使其夹杂一些噪声信号，只有消除这些干扰信号，得到有用信号供进一步的数据分析和处理，才能有效降低误差避免错误结论的产生。因此，我们在对振动信号进行分析和处理前需对其进行预处理，从而提高有效信号的质量、数据的精度以及故障分析结果的精确度。

振动信号预处理技术主要有以下三个方面的功能^[24,25]：

(1) 剔除异常数据

监测过程中常常会发生一些突发事件，如噪声干扰、传感器失灵等，这都会使信号中混入一些杂乱值，导致产生一些过高或过低的异常点，这将大大降低分析结果的准确性，因此我们应该预先将这些异常点剔除。

(2) 信号放大

对于传感器输出的微弱信号，我们很难进行数据分析、处理及显示，这就要求我们将传感器输出的信号放大。输入 *A/D* 转换器的电压信号要求在 $\pm 5V$ 范

围内, 超过此范围的就会发生截波现象, 但是太小的信号又会影响信号的精度。因此, 在经 A/D 转换之前, 我们需将信号放大到适当的范围。

振动监测中常常使用电荷放大器和电压放大器作为前置放大器。它们将信号进行放大, 并将加速度传感器的输出阻抗降低, 以便后续信号的分析 and 处理。本系统在实验与应用中使用的均为电荷放大器。电荷放大器是高增益运算的放大器, 具有电容反馈且输入阻抗极高, 而电压放大器是放大加速度传感器的输出电压量。另外, 它们还具有以下调节信号的功能:

①在与灵敏度不同的加速度传感器配合使用时, 通过调节可使相同的振动加速度输出相同的电量, 归一化传感器的灵敏度。

②它还带有可以将加速度传感器输出的加速度信号积分得到位移和速度信号的积分器。

③它带有可以调节低频及高频响应极限的可调滤波器, 从而防止频率响应线性段以外的信号以及电噪声的干扰。

(3) 滤波处理

之前提到现场采集的信号常常混有各种干扰, 即噪声干扰, 如电器干扰或附近机器部件的振动干扰等, 若此干扰过大则有用信号就不突出, 降低了故障分析的准确度。我们将信号和噪声的比例关系称为信噪比。降低噪声干扰, 剔除信号中混入的噪声信号, 以提高信号的信噪比是信号预处理的核心内容。滤波技术来提高信号的信噪比的主要手段。滤波技术的实质是允许信号中特定范围的频率通过, 而使某些频率范围内的信号极大的衰减, 阻止其通过。这将有效地剔除噪声信号的干扰, 便于进行数据分析和处理^[26]。同时在测量振动信号速度和位移时, 需对加速度信号进行积分累加运算, 这就会导致趋势项的产生, 而趋势项通常变化较平缓且频率很低, 因此在本系统中我们采用的是高通数字滤波器来滤除趋势项以及干扰噪声信号。

2.4.3 振动信号重要参数

从振动信号中我们可以得到振动物的各种状态信息。当设备老化或发生故障而出现异常振动时, 振动的各个状态就会发生改变, 如振动速度变化、加速度变化、位移变化、幅值变化、频率变化、相位变化等, 因此我们用速度、加速度、位移、振幅、振动频率、相位等与振动有关的参数来表示振动物的状态

特征参量^[27,28]。

(1) 速度、加速度、位移

设振动速度 $v(m/s)$ 、加速度 $a(m/s^2)$ 、位移 $d(m)$ 。本系统使用的是光纤 Bragg 光栅加速度传感器，由该加速度传感器的基本原理可知，通过检测波长的变化即可实现振动加速度的测量，将该加速度积分可以得到速度，再次积分即可得到位移。若是正弦信号则它们的关系为：

$$v = a / (2\pi f) \quad (2-9)$$

$$d = a / (4\pi^2 f^2) \quad (2-10)$$

(2) 振幅

振幅可以由速度、加速度或位移得到，主要用来表示振动物体振动的严重程度或烈度。通过监测振动物的振幅变化，我们就能够很轻易地得知它的振动状态，从而判断待测物是否运转正常。

设随时间变化的振动速度为 $v(t)$ ，则振幅可表示为：

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T V^2(t) dt} \quad (2-11)$$

其对应的离散形式可表示为：

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (2-12)$$

峰值：

$$\hat{X} = \max|x(t)| \quad (2-13)$$

平均值：

$$\bar{X}_p = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2-14)$$

均方根幅值：

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2-15)$$

方根幅值：

$$X_r = \left(\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^{1/2} dt \right)^2 \quad (2-16)$$

式中 $x(t)$ 是信号的时间历程， T 是采集周期， $P(x)$ 是 $x(t)$ 的概率密度函数。

通常情况, 振幅值的任何变化, 无论是增大或者减小, 都说明被测物的振动状态发生了变化, 都需要对设备进行调查。

(3) 频率

物体每秒振动的次数即为振动频率, 单位次/s, 通常用 Hz 来描述, 频率越高振动也就越快。结构不同、零部件不同、故障源不同, 产生的振动频率也不同。振动频率由基频和倍频组成, 基频即周期的倒数, 倍频即各次谐波频率。它是描述被测物振动状态, 测量和分析被测物振动情况的重要特征参数。特定的故障往往都对应特定的振动频率, 因此在评定设备状态时, 监测和分析其振动频率是非常有必要的^[29]。

(4) 相位

加速度超前速度 90° , 超前位移 180° , 即加速度与速度之间存在相位差 $\pi/2$, 与位移之间存在相位差 π 。振动源不同, 其振动相位也各不同。若振动相位相同, 则可能会因发生合拍共振而造成严重后果; 若振动相位相反, 则可能会因发生振动抵消而起到减振作用。因此相位也是反应振动状态的重要特征参数。

2.4.4 振动信号分析方法

振动信号分析就是分析和处理我们检测到的信号, 并通过一定的算法获取信号或其特征值, 以得到我们所需要的参数的过程。通过分析信号, 让操作员更容易识别、解释及分析检测对象内部蕴含的特征, 更加深入细致地揭示出检测对象的特有属性。信号分析和处理主要有时域分析和频域分析^[24]这两种方法。

(1) 时域分析

振动波形是在振动物体振动的过程中, 其振幅的瞬时值随着时间不停改变所形成的动态图形。时域波形分析是通过观察和分析波形的振幅大小、变化快慢、形状等特征, 从而在系统运行时构建与其状态相对应的关系, 以此来检查设备运行是否正常。因为时域分析在对系统进行分析时, 是直接的时间域中进行的, 因此具有准确、直观的优点。

通常情况下, 振动是由各种简谐振动和其他随机振动叠加而形成的, 其简谐振动分量的频率一般受振动物体的固有频率或转速的影响, 非线性的自激振动则会产生不规则振动。通过对振动物体的波形进行时域分析, 我们可以知道波形中频率成分的复杂程度, 振动信号发生怎样的变化, 波形中是否存在明显

的调制和冲击的成分，这样我们就可以直观地对故障做出判断。

时间波形便于理解而且一目了然。根据振动信号的时间波形，我们可以对某些故障信号做出初步判断，这是因为它是初始信号，信息量相当大。但是也正因为它是初始信号，没有经过进一步的分析处理，因此它与设备故障之间的联系不是很明显。以水泵机组为例，当其发生严重的不平衡故障时，其旋转频率就会成为信号周期成分中的明显特征；而若故障是由不对中引起的时候，在信号的周期中比旋转频率大一倍高频成分增大相当明显。当我们需要从混有噪声的信号中得到我们所需要的周期分量时，可以采用时域同步平均法来对振动信号进行分析处理。

对振动随机信号进行时域平均处理，当平均次数 N 趋向无限大时可获取信号的平均值即信号的直流分量，起到滤波的作用。当确定性的周期信号包含在随机信号中时，我们可以截取采样时间与周期 T 相同的信号，并对其进行叠加平均，这样就可以从随机信号、非随机信号或者其它周期不一致的信号中，将此周期信号提取出来而将指定的高频谐波分量和周期分量保留起来，这将极大的提高了周期信号的信噪比。即便我们所研究的周期信号相对较弱，也可以使用这种方法将它分离出来，时域同步平均法基本的思想就是这样的。

(2) 频域波形分析

目前，在故障信号分析和处理领域，频域分析应用最为广泛。可以通过频域分析法得到故障信号的幅值、相位及特征频率等信息，以此来判断故障发生的部位和原因^[30]。

我们知道振动信号是由大量简谐振动分量、随机噪声分量以及其他分量相迭加而形成的。我们对振动信号进行频谱分析就是为了解析信号中所有这些分量，使其变成各种振幅、频率和相位的简谐振动的组合。在振动信号中，原有的简谐振动分量经过分解还是简谐振动，而随机噪声分量和其他分量经过分解可以得到简谐振动分量的组合。在频域分析中我们常用的有幅值谱和功率谱，幅值谱表示各频率分量所对应的振幅及其分布情况，功率谱则表示各频率分量上对应的振动能量及其分布情况。而对于旋转机械中的振动信号，很多频率分量往往是转速频率的倍数，因此用幅值谱来表示时，我们可以很直观地由其谱线的高度得到对应频率分量的振幅大小。并且在幅值频谱中，频率分布的不同常常表示着各种不同的振动原因，这样我们就可以根据振动信号中包含的振动分量比较容易分析出引起振动的的原因。因此在本系统中我们对振动信号进行频

域分析时也是采用幅值谱来表示的。

在传统信号处理中，频域分析最主要的、采用得最多的方法就是傅立叶变换算法，它是频谱分析的基础并广泛应用于各个领域。它将各种混噪复杂信号进行分解，使其变换为大量不同频率的简谐分量的叠加，并通过一定的算法将信号从时间域转换为频率域，进而形成时域和频域两种监测信号的方法。其主要的特点就是傅里叶变换把时间域和频率域联系在一起，并通过域变换来实现时域到频域的转换，这使得在时间域往往很难观察到的规律和现象，在频率域内却可以很清楚地观察分析到。本系统中对振动信号的分析采用的就是快速傅立叶变换(FFT)算法，这大大地简化了信号的分析 and 运算量，其实用价值相当强。

对于长度为 N 的离散时间序列 $x(n)(n=0,1,2,\dots,nN-1)$ ，其傅立叶变换可表示为^[31]：

$$X(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{-nk} \quad (2.17)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi kn/N} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{nk} \quad (2.18)$$

式 (2.17) 说明了离散时间周期信号能够分解成为各谐波关系的组合，这些谐波均为复指数正弦信号，且式(2.18)可确定各次谐波的频谱系数 $X(n)$ ，表示相位谐波的幅度值和相位值。

但是我们可以看出，如果想得到某一点处的 $X(K)$ 值，就需要先进行 N 次复数乘法，再进行 $N-1$ 次复数加法，这样若想得到 N 个点的 $X(K)$ ，则需要先进行 $N \times N$ 次复数乘法，再进行 $N \times (N-1)$ 次复数加法，计算量相当大。就拿采样点数 $N=1024$ 时来说，要得到全部的 $X(K)$ 共需要先进行 4194304 次实数乘法，再进行 4192256 次实数加法，可见计算量之大。

由于 $W_N^{-kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ 的周期性和对称性，及 $W^0 = 1, W^{N/2} = -1, W^N = 1$ ，因此我们可以得到：

$$W_N^{-kn} \text{ 的对称性: } W_N^{k(N-n)} = W_N^{-kn} \quad (2.19)$$

$$W_N^{-kn} \text{ 的周期性: } W_N^{-kn} = W_N^{(n+N)k} = W_N^{(k+N)n} \quad (2.20)$$

我们在这里使用到的快速傅立叶变换算法(FFT)就是极为灵活地利用了 W 的周期性和对称性，大量简化了离散傅立叶变换算法(DFT)公式中所包含的大

量重复计算。与 DFT 的计算量相比, FFT 的计算量下降为 $(N \log_2 N)/2$, 一跃成为信号分析处理中最为简便的运算方法。

2.5 本章小结

本章主要对光纤光栅振动监测系统的各个部分进行介绍。了解光纤 *Bragg* 光栅的基本原理及特性, 提出了本系统中设计的光纤 *Bragg* 光栅加速度传感器的结构, 并介绍了几种常用的光纤光栅解调法, 提出了本系统中使用的双光栅匹配滤波解调法, 这是本文的一个创新点, 两根光栅同时参与传感使灵敏度有了很大提高, 外界温度的变化使两光栅中心波长发生同向漂移, 实现了温度的自补偿。最后讲到了振动信号采集方法, 信号预处理技术、振动信号的重要参数和处理方法。

第三章 光纤光栅振动实时监测软件

本章主要介绍光纤光栅振动实时监测系统软件部分的设计。在介绍软件开发的语言以及软件程序中使用到的主要技术后，设计出软件体系的总体结构和功能，并对软件中实现的功能进行了详细说明。

3.1 面向对象编程法

3.1.1 面向对象程序设计

在计算机应用领域中，面向对象编程(OOP)技术近几年发展非常迅速^[32]，它使程序设计方法学发生了一次前所未有的实质性的革命。在这以前，程序设计的主流方法是结构化程序设计，即面向过程的程序设计。这种设计方法的正确性不易保证，有一定的局限性，而面向对象程序设计弥补了它的不足，其数据和操作连结非常紧密，不易受到外界的影响。

面向对象程序设计中包括对象、类、继承、数据抽象、数据封装、多态性、消息传递等方法。这使它与面向过程程序设计相比，具有更多的优势：

- (1) 在保持外部接口不变的情况下，可以通过数据抽象改变内部实现从而减少甚至避免对外界的干扰；
- (2) 使用继承的方法，可大幅减少多余代码，扩展现有代码，从而提高编码效率，降低出错概率，使软件更易于维护；
- (3) 结合面向对象分析、面向对象设计法，将问题域中的对象直接映射到程序中从而减少软件开发过程中中间环节的转换过程；
- (4) 通过对对象的辨别、划分，将软件系统分割为若干相对为独立的部分，这使控制软件复杂度变得更容易；
- (5) 以对象为中心的设计方法，可以帮助开发人员从静态属性和动态方法两个方面把握问题从而更好地实现系统；

3.1.2 Visual C++6.0 简介

光纤 *Bragg* 光栅振动实时监测系统的设计主要集中在软件部分，主要包括数

据的采集、处理、显示和保存。该软件是在WindowsXP操作系统下，使用Visual C++来进行开发的。

VisualC++软件开发工具是由美国Microsoft公司推出的，目前已成为国内高级程序设计语言的主流，现在使用得最多的是6.0版。它具有很好的稳定性和兼容性，并且有很多资源可供利用。它是一个集成开发工具，提供了面向对象的应用程序框架微软基础类库MFC(Microsoft Foundation Class)，使程序员的编程工作得到了简化，模块的可重用性得到了提高。MFC 兼容于所有 Windows 操作系统。在 Windows 出现新版本时，它会进行扩展、增加新特性以适应新的系统。MFC 中包含了大量Windows 代码，这些代码都是正确的、优化的、功能相当强大的，可以实现我们自己可能很难实现的功能，大大提高了程序开发的速度。

VisualC++还提供了基于 CASE 技术的可视化软件自动生成和维护工具 AppWizard、ClassWizard、VisualStudio 等，使程序员设计程序的用户界面时直观、可视，使编写和管理各种类、维护程序源代码变得更加方便，从而提高了软件开发效率。

3.2 软件体系涉及的主要技术

光纤光栅振动监测软件体系中涉及到的主要技术包括接口通信技术、图形界面技术、数据采集技术、多线程技术、数据库访问技术以及动态链接库技术等。这里主要介绍多线程技术、数据库访问技术和动态链接库技术。

3.2.1 多线程技术

Windows操作系统中的进程(process)是指调入内存并且准备执行的程序，包括数据、程序代码以及同步对象、文件等系统资源。一个进程可以包含多个并发线程并且这些线程可以共享该进程的数据、资源以及地址空间^[33]。在Win32中，进程会自动在多个线程间进行切换从而实现多线程并发执行，同时完成多个任务。线程在进程的内存空间中执行并通过全局变量通信，操作系统为各个线程分配可利用的CPU时间。因此多线程技术具有很大的优越性：

(1)在我们进行其他操作时，用户界面可以处于活动状态从而大大提高了程

序的响应速度，便于用户操作；

(2) 若当前没有任务要处理，则处理器会将时间空出，留给其它任务运行；

(3) 对于那些占用大量处理时间的任务，可在分配的时间片使用完后，将处理器时间留给其它任务；

(4) 可随时将任务终止。

当系统需要采集大量数据并同时进行处理时，由于数据量太大可能会使数据采集和处理在时间上发生冲突，使程序响应速度变慢并影响其正常运行。为使数据传输准确、连续并能及时解析和处理，我们在软件设计中使用了多线程技术。

3.2.2 数据库访问技术

数据采集到后在磁盘上加以存储，用来进行数据分析。当前有专用和通用两种数据库接口。专用数据库可伸缩性差且接口局限性大；通用数据库接口提供统一接口供异构的、不同的数据库系统通信。有了这种通用数据库接口，在实现对多种类型数据库的操作时，有时只需写一段代码就可以。

目前Windows系统上数据访问接口大部分是以下这些：数据库访问对象(Database Access Object)简称DAO，AedveX数据对象(Aetivex Data Object)简称ADO，对象链接嵌入数据库(OLEDataBase)简称为OLEDB，及开放式数据库连接(Open Database Connectivity)简称ODBC，其中ADO和OLEDB是非常前沿的技术。OLEDB提供COM接口能访问非关系类型的数据源，ADO是以OLEDB为基础建立的。ADO(Aetivex Data Object)技术的数据库访问技术的特点^[34]：

(1) ADO是一种在OLEDB接口的基础上，面向对象的、高层口技术，而OLEDB(oLEDataBase)是基于COM接口的由VisualC++提供底层接口技术；

(2) 有多种方法访问数据库；

(3) 考虑到COM的一些特有性质，很多编程环境ADO技术都可以适应，只要COM得到该环境的支持，例如VB，VJ++，VC++等等；

(4) 学起来很简单。

考虑到以上几点，一般在存储数据时可采用 ADO 来作为数据库的访问接口方法，本系统中就是使用 Aceess 数据库，ADO 接口来完成数据的存储工作的。

3.2.3 动态链接库技术

动态链接库 DLL(Dynamic Linkable Library)，我们可以把它看成是一个仓库，该仓库提供了很多变量、函数和类，可供我们直接使用。

动态链接库与静态链接库是程序中共享代码的不同方法。若我们在程序中使用静态链接库，那么不管我们使不使用它，最终生成的 EXE 文件中都会直接包含 lib 中的指令。但是如果我们采用 DLL 技术，DLL 文件与 EXE 文件独立，因此在最终生成的 EXE 文件可以不必包含该 DLL 文件，并且在 EXE 文件执行时可以动态地将其调用和卸载。

动态链接库技术还具有下列优点^[35]：

(1). 节省内存空间，减少了交换操作。在内存中多个进程是可以同时共享一个 DLL 副本的，同时对其进行调用。然而应用程序中使用的每个静态链接库都必须在内存中加载一个该库代码的副本。

(2). 节省磁盘空间。在磁盘上多个应用程序可共享一个 DLL 副本。然而，应用程序中的每个静态链接库均会在内存中生成单独的副本。

(3). 更容易升级 DLL。当我们需要改动或更新函数算法时，动态链接库中只要函数的返回值和参数不变就不需要重新编译或链接其主程序，而静态链接库中其对象代码需要重新编译链接应用程序。

(4). 提供售后支持。如应用程序交付时对某种显示器不可用，就可以通过修改显示器驱动程序 DLL 来使其适应于我们所需要的显示器。

(5). 支持多语言程序。DLL 在编写成功后，都有供不同编程语言使用的函数方法，按照这种方法不同语言编写的程序就可以使用同一个 DLL。

(6). 可扩展 MFC 库类。可以从原有的 MFC 类中派生新的类并将它们放到 MFC 扩展动态链接库中供 MFC 应用程序使用。

(7). 可轻松完成国际版本的创建。我们可以使不同的语言版本加载相应的资源并将其放到 DLL 中，从而轻松完成应用程序国际版本的创建。

3.3 软件体系的总体结构和功能

3.3.1 软件体系的总体结构

振动信号的采集与处理一般分为两种工作方式：在线式和离线式。在线式多用于实时监测振动信号，而离线式则是将事先存储的静态历史数据进行分析处理。本系统采用在线式处理方法进行动态数据的分析处理，来实现现场环境下各种振动信号的采集、处理、显示及存储等任务。但由于物体的振动状态纷繁负责，采集的数据量相当大，处理起来非常耗费时间，因此我们还设计了离线式静态数据分析模块。该振动监测软件在程序设计中采用了主菜单方式，便于系统功能的扩展。当我们需要在软件中增加新的功能时，只用在主菜单程序的菜单中增加该功能的内容，再对其进行编译即可，而不必整个程序中做大量变动。这十分便于软件功能的扩充，充分体现了面向对象的编程思想及模块化设计方法的优越性^[35]。

该光纤光栅振动实时监测系统的软件部分包括数据采集、时域分析、波形显示、频域分析、频谱显示、特征频率识别、振动参数计算、数据存储、静态数据分析显示等几个部分。并通过在主界面中设计系统设置和数据显示两个模块将这几个部分集成在一起。该振动监测系统软件部分设计的总体方案如下图所示：

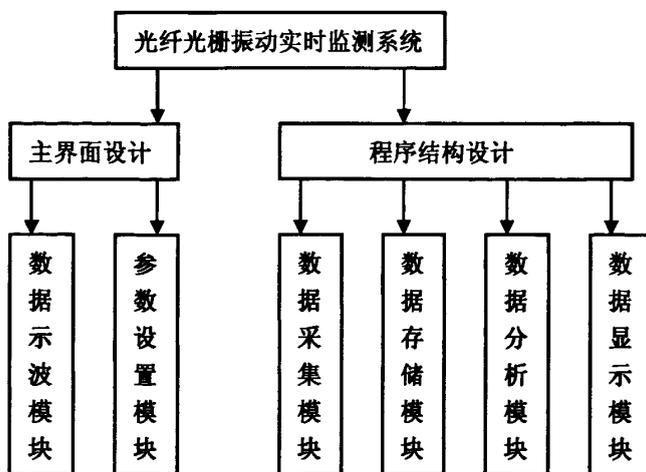


图 3-1 振动监测软件设计方案

从图中我们看出，软件程序结构部分包含四大模块，对应于主界面两大模块中的各个控件功能。在点击主界面菜单中的不同控件时，编译的程序中会分别发出不同的消息，进行不同的消息响应处理，从而可以选择和切换不同的测试任务。其软件主程序流程图如下：

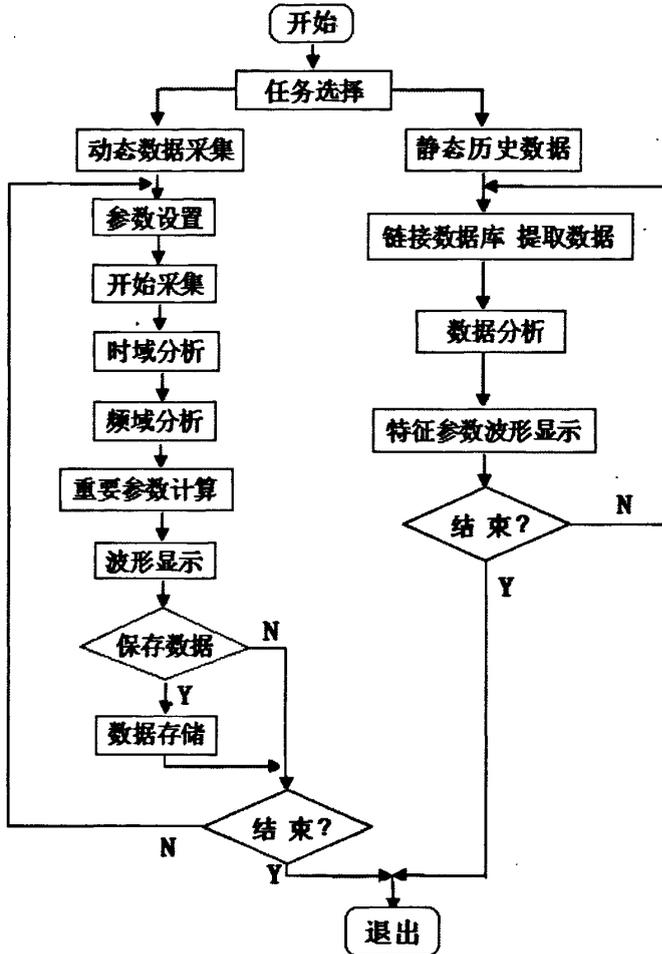


图 3-2 振动监测软件主程序流程图

3.3.2 软件体系的功能

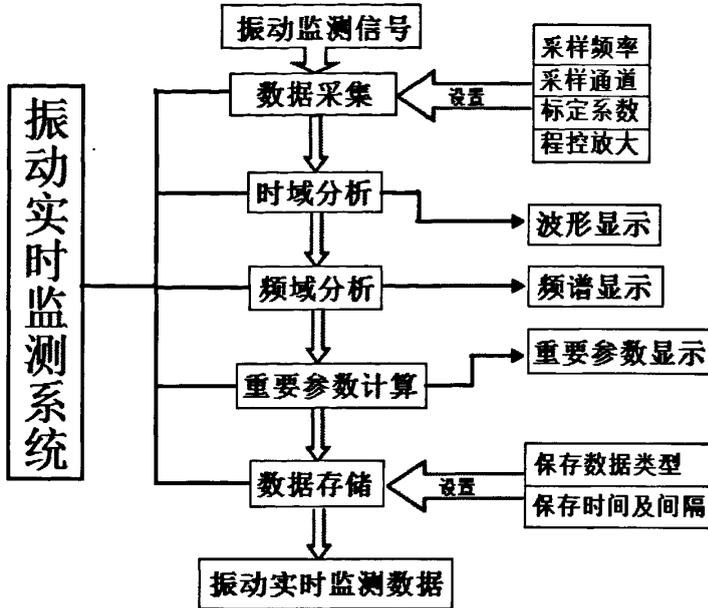


图3-3 振动实时监测软件功能说明框图

(1) 数据采集

该光纤光栅振动实时监测系统中采用的是UA302/H型A/D采集器，该采集器采用的是美国新型16位A/D转换芯片、测量精度相当高、速度也非常快、编程简便、且使用USB接口连接方便、无需外接电源即插即用、支持16或32模式输入通道。本软件采用单独的线程来采集数据以达到数据采集与波形显示的同步。在参数设置对话框中设置好起始通道、通道数、采样频率以及程控放大倍数后，点击菜单中的数据采集按键就可启动该线程进行数据采集。数据采集部分是通过调用采集器自带的动态链接库中提供的相关函数来实现的^[36]。

(2) 利用快速傅立叶变换进行时域和频域的转换

频谱是表征振动体振动状态的重要参数，因此我们有必要对其频谱特性进行分析，这就要求我们能在软件中实现信号的时域、频域转换。通过傅立叶变换就可以将时域信号转换成频域信号。然而傅立叶变换是通过连续函数进行积分来实现的，运算量相当大并且不利于电脑实现。本系统中设计的软件是使用快速傅立叶变换算法（FFT）来达到频谱分析的目的。我们创建了一个动态链

接库FFT.dll,并在其中编写了快速傅立叶变换算法的类,再将其生成的lib文件链接到程序中。这样,当我们需要使用到傅立叶变换算法时,通过包含其头文件并实例化该类的对象,即可以实现对动态链接库FFT.dll中的函数的调用,大大减少了程序的运算量,并使日后对傅立叶变换算法的改进变得更加方便、更加容易。

(3) 静态历史数据管理模块

这里的数据采集模块主要是对振动信号数据进行采集。由于振动信号数据量相当大,在内存中刷新也就相当快,而我们实时监测的动态数据主要是由内存提供的,这样对于数据的保存就有很高的要求。并且我们还需要提取已存储的振动信号对其进行静态历史数据分析处理,在这个过程中所使用到的数据都是由数据文件提供的,但其数据量相当大且不易保存。而Access数据库的功能非常齐全,容量也相当大,并且对于数据的共享和管理也相当方便,因此本文所设计的系统软件中采用Access数据库来对采集的数据进行存储,并使用ADO接口技术来实现Windows系统上数据的访问。

3.4 软件体系功能的实现

3.4.1 启动画面

为了减少等待程序加载过程中的枯燥感,并能向用户显示软件的名称和出处等信息,我们在该振动监测软件中使用了启动画面程序^[37,38,39]。

①首先选择启动画面图像,保存为bmp格式。在资源中插入此位图并将该位图ID改为IDB_LOGO。

②新建一个对话框IDD_LOGO并基于该对话框创建一个公有继承CDialog的类CLogoDlg。在该对话框中创建一个Picture控件,打开其属性对话框,在常规选项中选择类型为位图,图像为IDB_LOGO,这样就将启动图像添加到该对话框中了。

③创建基于CWinThread的类CSplashThread来完成显示启动画面的功能。首先在CSplashThread类的头文件中包含CLogoDlg的头文件:

```
#include "LogoDlg.h"
```

并声明一个基于CLogoDlg的对话框对象指针:

protected:

```
CLogoDlg* m_pSplashDlg;
```

利用该指针对象在 CSplashThread 类中添加创建、关闭和退出显示画面对话框 IDB_LOGO 的功能。

④在主程序头文件 PRO. h 中包含 CLogoDlg 和 CSplashThread 的头文件

```
#include "LogoDlg.h"
```

```
#include "Splash.h"
```

声明指针:

public:

```
CSplashThread* pSplashThread;
```

```
CLogoDlg* m_pSplashDlg;
```

并在主程序源文件 PRO. cpp 中的 InitInstance() 函数中添加如下代码:

```
pSplashThread
```

```
=(CSplashThread*)AfxBeginThread(RUNTIME_CLASS(CSplashThread),  
    THREAD_PRIORITY_NORMAL, 0, 0); // 启动画面
```

```
Sleep(1000); //模拟主线程的初始化过程
```

```
if ( pSplashThread != NULL) //在创建了主对话框并初始化了
```

```
pSplashThread->HideSplash(); //各个子对话框以后,隐藏启动画面
```

这样整个启动画面程序的代码就编写完成了,经过调试在程序启动时可以很好的显示我们所选择的图像。如下图:



图 3-4 软件启动画面

3.4.2 参数设置

在主界面中参数设置模块中，我们设计了示波参数设置、显示内容设置、坐标值设置和报警范围设置。示波参数设置中包括采样频率、起始通道、当前通道、程控放大和标定系数的设置。显示内容设置中包括波形、频谱、加速度、速度和位移显示。坐标值设置中包括 X 轴刻度设置、Y 轴刻度设置和 Y 轴中心值设置。报警范围包括报警参数上限设置和报警参数下限设置。

①首先创建对话框 IDD_OPTION，并按照以上内容对其进行编辑。

②接着构造公有继承 CDialogBar 的类 COptionDlgBar，并在该类的源文件中对对话框 IDD_OPTION 中的各个控件编辑相应的消息响应函数。该类的使用方法如下：

```
COptionDlgBar m_wndOptionDlgBar;
m_wndOptionDlgBar.Create(this,   IDD_OPTION,   CBRS_ALIGN_RIGHT,
ID_VIEW_OPTION);
m_wndOptionDlgBar.EnableDocking(CBRS_ALIGN_RIGHT |
CBRS_ALIGN_LEFT);
DockControlBar(&m_wndOptionDlgBar);
```

③在框架类 CMainFrame 的头文件中包含类 COptionDlgBar 的头文件：

```
#include "OptionDlgBar.h"
```

构造 COptionDlgBar 类的对象：

```
public:
    COptionDlgBar m_wndOption;
声明函数：
public:
    void CreateUserOption();
```

并在其源文件中对函数 CreateUserOption() 进行代码编译，创建 IDD_OPTION 对话框，并对其中的控件进行初始化。最后在 CMainFrame 的 OnCreate() 函数中增加代码：

```
CreateUserOption();
```

这样我们就实现了参数设置对话框的创建^[40,41,42]，通过参数设置对话框设置我们所需要的参数，为后面的振动信号分析处理做好准备工作。如下图：

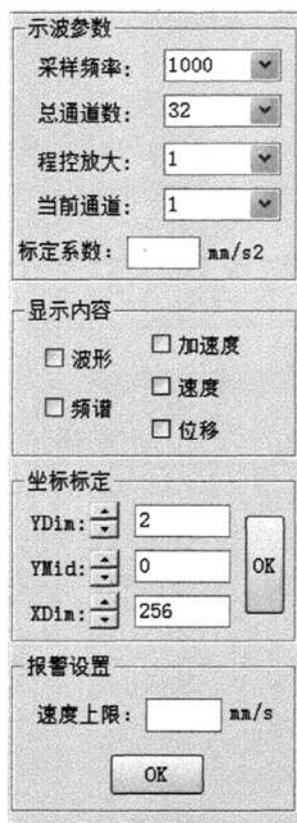


图 3-5 参数设置对话框

3.4.3 动态数据采集

该光纤光栅振动实时监测系统所设计的软件是一个多文档应用程序 MDI^[43], 包括动态数据采集和静态历史数据显示两个文档类, 动态数据采集主要是对实时数据进行采集、分析、处理及显示^[44,45], 而静态历史数据显示主要是对已存储的历史数据进行分析、处理及显示。如下图所示:

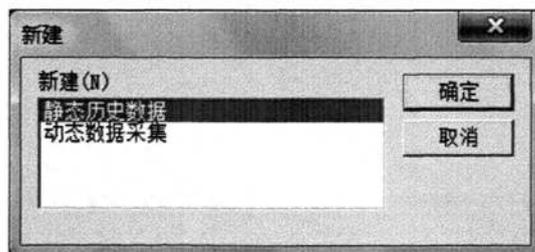


图 3-6 选择任务文档对话框

本系统采用 UA302/H 型 A/D 采集器来进行实时数据的采集, 该采集器提供自带的专用动态连接库 UA300.DLL, 其中包含了很多高效简洁的采集控制函数以实现 UA302/H 采集器的各种功能。下面简单介绍一下本系统软件中使用到的几个主要函数。

1. OpenUA300

其函数形式为:

```
HANDLE _stdcall OpenUA300()
```

此函数用来打开UA302/H采集器设备, 得到指向该设备的句柄, 要想对UA302/H进行操作则必须首先执行该函数。返回值为指向该采集器的句柄。

2. CloseUA300

其函数形式为:

```
HANDLE _stdcall CloseUA300(HANDLE husb)
```

此函数用来关闭UA302/H采集器, 结束对UA302/H的操作时需使用该函数来关闭设备, 输入参数为在打开该采集器时OpenUA300函数返回的设备句柄。

3. Minit2

其函数形式为:

```
void _stdcall minit2(HANDLE husb, short fch, short chn,  
                    unsigned short fcode, short gain)
```

此函数主要用在单通道或多通道的多点数据采集初始化的时候。当我们需连续采集多点数据的时候, 需要首先使用该函数, 然后用函数readdata2来读取采集到的数据。输入参数中: husb是打开该采集器时返回的句柄; fch是第一个输入通道号(0-31); chn是通道数(1-32), 单通道采集时应设通道数为1, 多通道采集时采集通道数应是连续的; fcode是频率码, 取值为6000000(HZ)/采样频率(HZ); gain是放大倍数代码(0 = 1倍, 1 = 2倍, 2 = 4倍, 3 = 8倍, 4 = 16倍...)

4. Readdata2

其函数形式为:

```
void _stdcall readdata2(HANDLE husb, short *addat, long leng)
```

此函数主要用在单通道或多通道多点连续数据采集的时候。在minit2函数进行初始化后, 可反复调用此函数来数据进行读取。若间隔不是很长则读取到的是连续数据。输入参数中: husb是打开该采集器时返回的句柄; leng是采样

数据的总点数，一点是16位字，需要注意的是必须是32的倍数，此参数为长整型，这意味着只要数据数组开的足够大就可以一次采集几十兆字节以上的数据。输出参数*addat是数据数组，采集到的数据就是存放在该数组中。

5. endread2

其函数形式为：

```
void _stdcall endread2(HANDLE husb)
```

此函数用来结束多点数据采集，在多点数据采集结束时必需使用此函数。

输入参数中husb也是打开该采集器时返回的句柄。

①该系统软件中首先在主程序头文件PRO.h中定义了struct SData数据结构

```
struct SData
{
    HWND NotifyWindow;
    HANDLE husb;        //打开该采集器时返回的句柄
    short ch_first;    //起始通道
    short ch_number;   //通道数
    short fcode;       //采样频率
    short gain;        //放大倍数代码
};
```

并在其头文件PRO.h中构建其对象：

```
SData m_SData;
```

在框架类源文件MainFrm.cpp中声明：

```
extern SData m_SData;
```

②在主程序源文件PRO.cpp中添加了一个线程函数：

```
UINT ThreadSample(LPVOID pParam)
{
    HANDLE husb;
    SData* pData=(SData*)pParam;
    short Array[32]; //定义存放数据的数组
    husb=pData->husb; //采集器设备句柄
    minit2(husb, pData->ch_first, pData->ch_number, pData->fcode,
    pData->gain );    //数据采集初始化
```

```

int times=0;
do{
    for(int j=0;j<GDATALENGTH-1;j++)
    {
        readdata2(husb, Array, 32); //多点连续数据采集
        for(int i=0;i<32;i++)
        {
            g_Data[i][j]=Array[i];
            g_Data[i][GDATALENGTH-1]=j; //存放数据
        }
    }
}while(g_Flag_Sample_Start);
endread2(husb); //结束多点数据采集
::PostMessage (pData->NotifyWindow , WM_SAMPLE, 0, 0);
return 0;
}

```

③在菜单中建立开始采集按钮，并在框架类源文件中产生其单击时的响应函数OnSampleStart()。在该函数中首先读取参数设置对话框中设置的参数，接着执行语句：

```

if(m_SData.husb=OpenUA300())//打开采集器
{
    Thread=AfxBeginThread(ThreadSample, &m_SData); //开启线程
}
else
{
    MessageBox("采集器未连接", NULL, MB_OK);
}

```

打开采集器，并判断采集器是否打开成功，若打开成功则返回设备句柄，并执行语句Thread=AfxBeginThread(ThreadSample, &m_SData);开启线程函数ThreadSample()；若不成功则弹出对话框显示“采集器未连接”。并对相关标签做相应的改变^[46]。

3.4.4 波形与频谱

根据之前讲到的时域数据分析和频域数据分析法，我们将采集到的振动信号进行分析处理。振动信号经过信号放大、高通滤波后^[40]，由 UA302/H 型 A/D 采集器采集，再由本系统中设计的振动监测软件对其进行采集、存储及显示。该软件通过类 CScope 来完成振动波形的绘制。

首先在参数设置对话框中可以设置我们所需要显示的参数图形，这里先选择波形。在主菜单中添加开始示波按钮 ID_SHOW_START，即可对参数设置对话框中选择的图形进行显示。在动态数据采集的视类源文件 PROView.cpp 中对开始示波按钮编译单击时响应的消息响应函数 OnShowStart ()，使其实现振动波形的显示。

```
void CDASPView::OnShowStart()
{
    if(m_Show_IDTimer)    //判断是否已设置定时器
        return ;
    m_Show_IDTimer = SetTimer(1,100,NULL); //设置定时器
}
```

该语句中调用了函数 SetTimer () 设置定时器，则每隔 100ms 就会调用一次 OnTimer () 函数。在 OnTimer () 中，我们利用 CScope 类的绘图功能读取之前采集到的数据并将其绘制出来。则每调用一次 OnTimer () 就多绘制一个数据，以此类推，即可显示出振动信号的振动波形图。

在 OnTimer () 函数中还对采集到的数据进行了频域分析，这主要是通过创建动态链接库 FFT.dll 来实现的。我们首先创建了一个动态链接库 FFT.dll，并在其中编写了快速傅立叶变换算法的类，再将其生成的 lib 文件链接到程序中。通过包含其头文件并实例化该类的对象，即可以实现对动态链接库 FFT.dll 中的函数的调用。这也使得我们日后在改进快速傅立叶变换算法时，不需要重新链接和编译其主程序，使算法的升级完善变得更加容易。

首先我们在主程序头文件 PRO.h 中添加 FFT 的头文件：

```
#include "FFT.h"
```

接着在动态数据采集的视类源文件 PROView.cpp 的 OnTimer () 中创造 FFT 对象，并调用其中的函数来对采集的数据进行频域转换：

FFT fourier;

```
fourier.ComplexFFT(m_Scope.m_ValueArr, 1024, max_f, 1);
```

当我们在参数设置对话框中选择频谱时，点击主菜单中的开始示波后程序就会使用绘图类 CScope 的对象将经过 FFT 变换后的数据绘制出来，实现频谱的显示。以下为实验室测试时，激振频率为 300HZ 时所测得的波形频谱图：

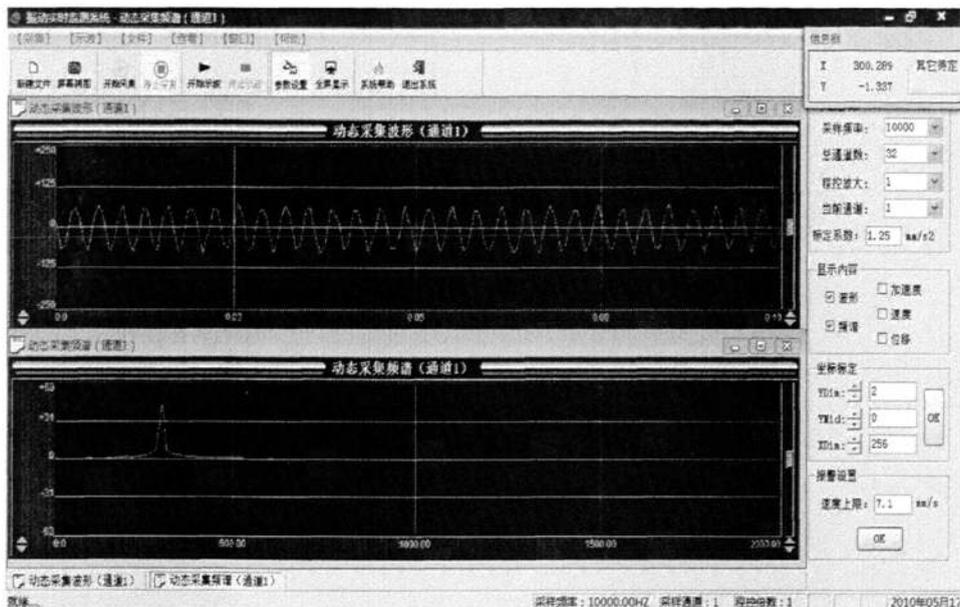


图 3-7 300HZ 波形频谱图

3.4.5 振动重要参数计算与存储

根据前面对振动信号重要参数的分析，我们知道振动信号的加速度、速度和位移是积分关系，将加速度积分可以得到速度，再次积分即可得到位移。下图为软件中速度、位移计算的流程图：

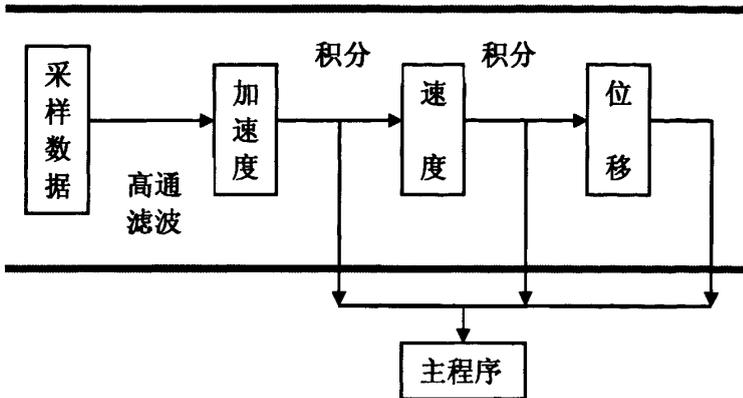


图 3-8 参数计算流程图

在测得我们所需要的参数波形后，我们可将需要的数据存储下来，以便日后使用，这里要使用到数据库公共类 ADOConn，该类包含了打开数据库、查询、删除、更新、插入及关闭数据库等函数功能。其成员变量及函数有：

```

class ADOConn
{
public:
    ADOConn();    //构造函数
    virtual ~ADOConn();    //析构函数
    void OnInitADOConn();    //打开数据库
    void ExitConn();    //关闭数据量
    BOOL ExecuteSQL(_bstr_t bstrSQL);    //数据库存储
    _RecordsetPtr& GetRecordSet(_bstr_t bstrSQL);    //查询数据库
    _ConnectionPtr m_pCon;
    _RecordsetPtr m_pRs;
};
  
```

我们在设计该系统软件的存储模块时，先使用 insert into Data() 函数，插入采集到的数据，然后执行存储语句：

```
g_pView->m_AdoConn.ExecuteSQL((_bstr_t)sql);
```

将采集到的振动信号数据存储于数据库中，便于日后调用，进行静态历史数据的分析和处理。以下为实验室测试时，激振频率为 300HZ 时所测得的重要参数波形显示：

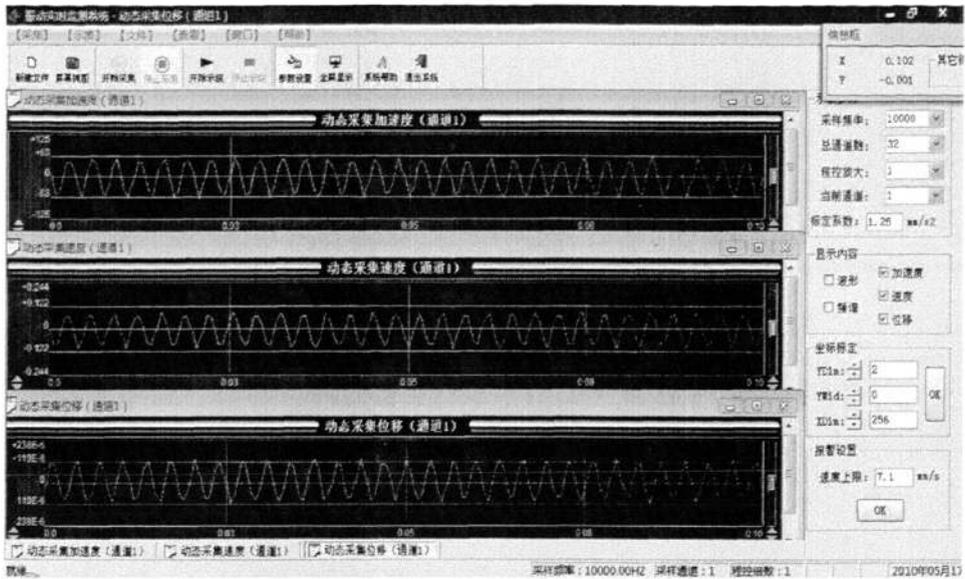


图 3-9 300HZ 重要参数波形显示

3.4.6 静态历史数据显示

根据前面的分析，振动信号采集与处理一般分两种工作方式：在线式和离线式。在线式多用于实时监测振动信号，即时进行分析和处理处理；而离线式则是先将事先存储的信号进行分析处理，多用于静态历史数据分析处理。由于振动采集数据量大，处理起来耗费时间，因此我们采用离线式在本系统中设计了静态数据分析模块。

这里，我们在读取存储在数据库中的数据时也使用到了数据库公共类 ADOConn，这个类我们在上一节中已经做了简单的介绍。具体操作方法如下：

①首先在静态历史数据显示文档所对应的视类 CStaticData 的头文件 StaticData.h 中包含数据库类的头文件：

```
#include "ADOConn.h"
```

并添加两个变量：

```
_RecordsetPtr m_pRs;
```

```
ADOConn m_AdoConn;
```

②在主程序初始化函数中添加：

```
::CoInitialize(NULL);
```

```
::CoUninitialize();
```

这样该数据库就可以使用了。

③在静态历史数据显示的视类对话框中创建显示按钮 IDC_BT_SHOWDATA, 并对其响应单击时的消息响应函数 OnBtShowdata(), 该函数对数据库中的数据进行查询, 读取后存储在数组中, 并利用绘图类 CScope 将其绘制出来:

```
m_pRs=m_AdoConn.GetRecordSet((_bstr_t)sql); //查询 SQL 语言
int Length=0;
double Value[1024]; //存放数据的数组
while((m_pRs->adoEOF==0)&&(1024>Length))// 判断记录集是否到了最后
{
    Value[Length]=atof((char*)(_bstr_t)m_pRs->
        GetCollect((_bstr_t)chn)); //取得记录集指针的某个值
    m_pRs->MoveNext(); //下一个记录
    Length++;
}
```

在参数设置中设置好相应参数并选择所需要显示的图形后, 点击显示按钮 IDC_BT_SHOWDATA, 即可按照前面讲到的动态数据分析处理的方法对数据进行分析处理, 测得我们所需要的参量。

3.4.7 其它功能介绍

为了使软件界面更加简单、直接、美观, 使软件功能更加更富, 操作起来更加方便, 我们还在该软件中增加了一下其它的功能, 如信息栏显示、全屏显示、状态栏显示等, 下面对此进行简单介绍。

1. 信息栏

首先创建信息栏对话框 IDD_DB_INFO, 接着构建公有继承类 CDialogBar 的类 CInfoDlgBar, 该类可以捕捉鼠标位置并将其显示出来。在框架类源文件 MainFrm.cpp 中添加构建信息栏对话框的函数 CreateInfoDlgBar(), 在该函数中实现信息栏的创建, 并在框架类的 OnCreate() 函数中调用此函数, 这样信息栏就创建成功了, 如下图:

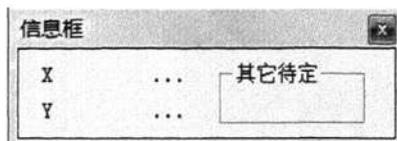


图 3-10 软件信息框

2. 全屏显示

在主菜单中添加全屏显示按钮 `ID_VIEW_FULLSCREEN`，并创建新的工具栏，在该工具栏中设置 ID 号也为 `ID_VIEW_FULLSCREEN` 的按钮，在框架类中生成单击 `ID_VIEW_FULLSCREEN` 按钮时的消息响应函数 `OnViewFullscreen()`，完成单击全屏显示按钮时使显示图形的视类全屏，并产生新的工具栏，单击此工具栏中按钮时将恢复全屏显示。

3. 状态栏显示

首先在主函数源文件中添加函数：

```
void Prompt(CString pmt,int ch)
```

该函数可以实现在状态栏上显示操作过程提示信息的功能，其中 `pmt` 表示要显示的信息；`ch` 为索引，0 为系统总的提示，1 为采样频率提示，2 为采样通道提示，3 为程控倍数提示，7 为系统时间提示。

在主框架的 `OnSampleStart()` 函数中首先读取参数设置对话框中设置的参数，再使用 `Prompt` 函数将采用频率、采样通道、程控倍数在状态栏中显示出来。设置定时器获取当前时间，并用 `Prompt` 函数将其在状态栏中显示出来。

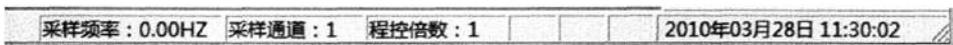


图 3-11 状态栏

4. 标签栏显示

由于该程序为对文档应用程序，可同时打开多个文档，为了使这些文档有条不紊，我们在程序中使用了 `CMDITabs` 类，并创建了该类的对象 `m_wndMDITabs`，通过该对象调用 `CMDITabs` 中的函数，来实现页面下方标签栏的创建，并在其中显示打开的文档名称。

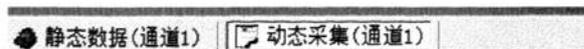


图 3-12 标签栏

3.5 本章小结

本章主要讲述光纤光栅振动实时监测系统软件部分的设计。介绍了软件开发的语言以及软件程序中使用到的主要技术，阐述了软件体系的总体结构和功能，并对软件中实现的功能如启动画面、参数设置、数据采集、波形及频谱显示，重要参数计算、静态历史数据显示等进行了详细说明。

第四章 光纤光栅振动实时监测系统实验测试及应用

4.1 振动实验测试

4.1.4 实验平台搭建

为了测试我们所设计的光纤光栅振动实时监测系统的稳定性、灵敏度、精确度以及能否实现我们预期的功能，我们在实验室进行了振动测试实验，实验原理图如下图所示：

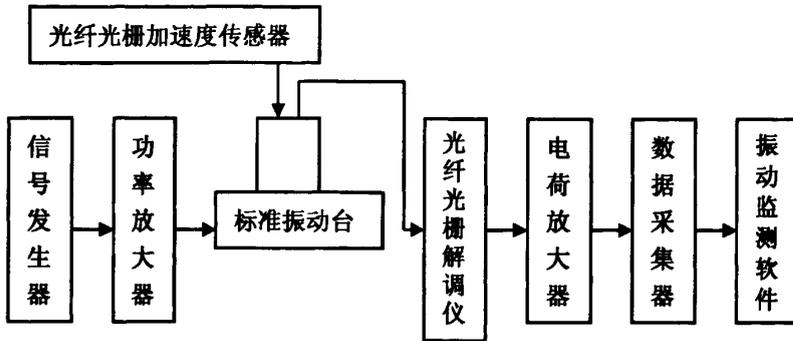


图 4-1 实验框架图

实验中，激振部分我们采用的是来自北京测振仪器厂的DF1010信号发生器、GF300(B)型功率放大器和激振器，解调部分采用的是理工光科自行研制的GVD-8型光纤光栅振动解调仪，信号预处理部分采用的是DLF-8型电荷电压滤波积分放大器，数据采集部分采用的是USB接口的UA302/H型A/D采集器，计算机处理部分采用的是我们用VisualC++6.0自主研发的振动实时监测软件。

整个实验可以分为激振部分和信号采集分析部分。这里的激振器、信号发生器和功率放大器组成了该实验的激振系统，产生的激励信号为稳态正弦信号。通过缓慢改变正弦激励信号的频率，稳态正弦信号可激发出系统的各阶主振动，并将激励能量集中在单一频率上，使得测量信号具有很高的信噪比，测试精度也相当高。信号发生器输出的电压信号^[47]由功率放大器进行放大，向激振器输入与电压信号成正比的电流，再由传感器对其进行探测。实验中所使用的激振装置如下图所示。

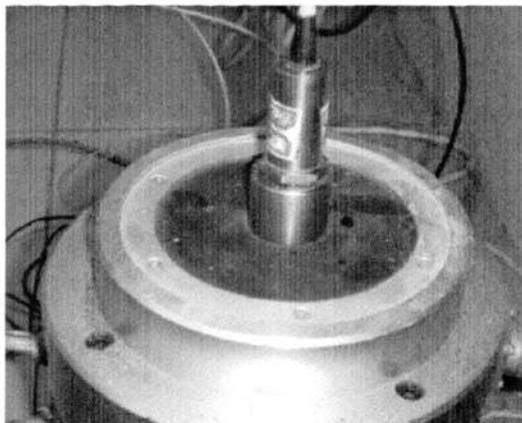


图4-2 激振装置

光纤光栅加速度传感器、光纤光栅振动解调仪、电荷放大器、采集卡以及计算机构成了系统的信号采集分析部分。其实验装置如下图所示：



图4-3 信号处理装置

4.1.2 振动实验结果及分析

我们将光纤光栅加速度传感器固定在振动平台上，由信号发生器产生的一定频率的正弦波经功率放大器后，驱动振动平台在一定方向上发生振动，加速度传感器也将随之一起振动，由传感器输出的振动信号再经过光纤光栅振动解调仪对其进行解调，将光信号转换为电信号，然后通过电荷放大器进行信号放大和高通滤波，再由UA302/H 型A/D 采集器对振动信号进行采集，将模拟信号

转换为数字信号，最后由计算机软件对该数字信号进行分析处理，即可得到我们所需要的振动相关信息。

如果振动平台的振动频率较高，那么即便是振动幅度很小，产生的加速度也会很大。因此，我们在实验中应该适当调节振动台的振动频率及幅度以便使光纤光栅加速度传感器在测量范围内工作。我们将激励频率从10Hz到4KHz之间连续调节，采用光纤光栅振动实时软件对其进行分析处理，得到了良好的输出波形。

以激振频率为700HZ时为例，以下为激振频率为700HZ时测得的波形图：

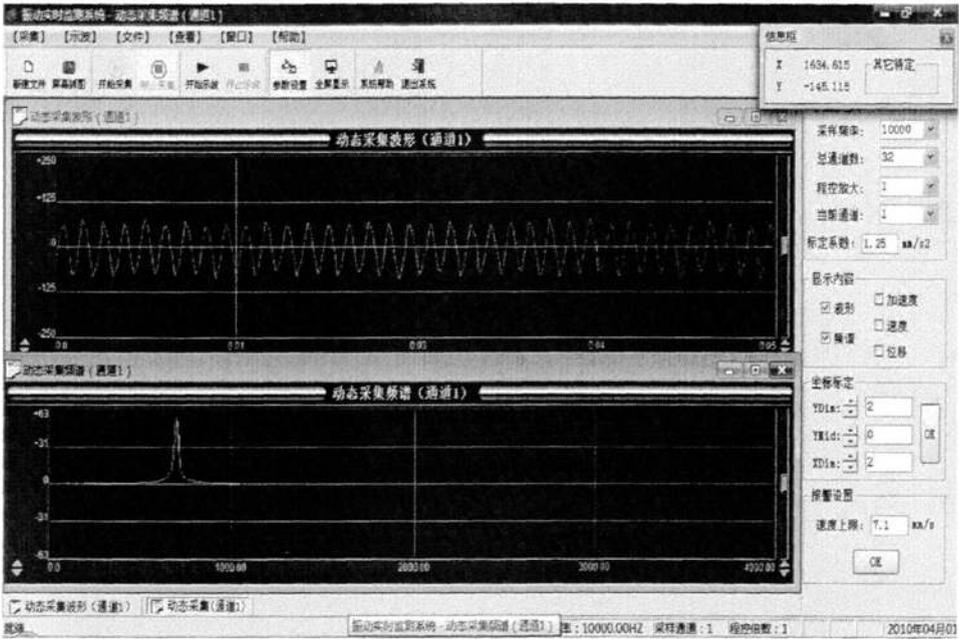


图4-4 波形频谱图

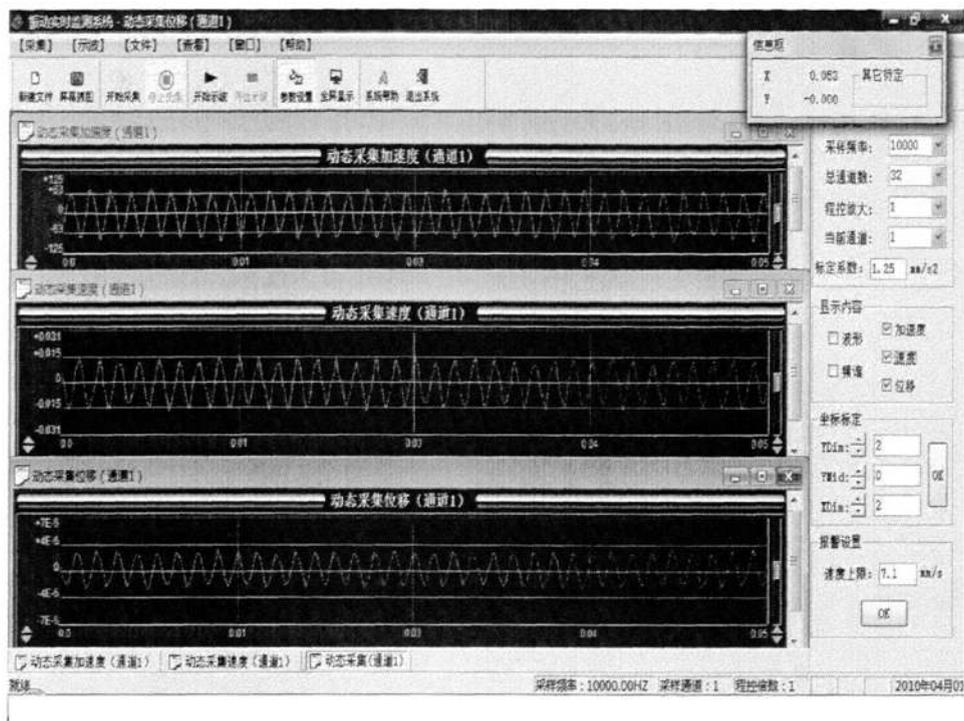


图 4-5 振动重要参数波形显示

从图中我们可以看出，采用本文所设计的振动监测软件所测得的传感器输出波形为标准的正弦波，与信号源的输出信号频率特征相吻合。符合软件设计的要求，达到预期的效果。

4.2 本系统在水泵振动监测中的应用

4.2.1 水泵振动监测的需求及任务

日常生活中存在着各种各样的振动，而建筑物和设备的异常振动常常会导致振动事故的发生。如在水泵机组运行过程中就存在着不同程度的振动超过一定限度时会对设备带来不同程度的危害的问题。水泵运行中产生的故障主要包括振动、噪音及发热等，其中由振动引起的故障居多。使水泵发生振动异常的原因很多，主要有轴承磨损、轴弯曲、泵轴与原动机对中不良、转子不平衡、地脚螺栓松动、转子零件松动或破损、叶轮中有异物等。在排水和污水处理行业

中，水泵是非常关键的设备，其运行是否稳定决定着水泵机组工作状态的好坏。水泵机组长期振动会导致其零部件的材质磨损甚至破坏，从而使机组的安全运行及在泵站系统中作用的正常发挥受到严重影响。

武钢水泵使用电机功率（850kw）较大，转速较高（987rpm），多次出现故障导致停机或电机损坏，带来较大损失。因此要求我们对水泵振动状态进行长期监控，实时监测其重点部位的振动情况，分析其发生异常振动的原因，在出现异常振动时及时发出报警，提醒工作人员提前采取预防措施。于是我们将本文中设计的光纤光栅振动实时监测系统应用于武钢水站中水泵振动情况的监测中，在出现异常振动时发出报警，及时停止工作，启动备用系统，能够减少不必要的损失。

该项目的主要工作任务包括：

- (1)对水泵重点部位（横向、纵向、轴向）的振动情况进行长期实时监控。
- (2)在水泵发生异常振动时发出报警，并分析发生异常振动的原因。
- (3)存储记录采集到的振动数据，为日后进行静态历史数据分析、判断异常振动原因提供数据支持。
- (4)能够提供便捷、友好的人机交互界面，能够方便地设定设备参数，能够以图形的形式及时地、清楚直观地反应设备的运行情况。
- (5)确保工程中安装的装置不会对其它的设备造成安全隐患。

4.2.2 振动监测系统现场安装要求

在水泵机组运行的过程中，其振动状态可由机身关键部位的横向，纵向和轴向三个方向的振动状态表现出来。通过分析这三个方向的振动情况，我们可以及时发现设备故障并对其产生原因做出初步判断。据此，我们在机身关键部位横向，纵向和轴向三个方向安装了三个光纤光栅加速度传感器，通过监测这三个部位的振动状态来分析水泵机组的振动情况，下图为光纤光栅加速度传感器安装图：

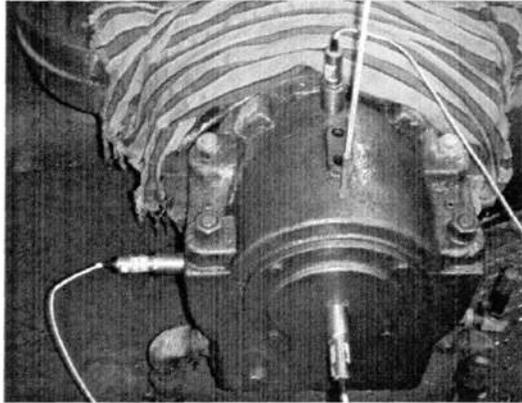


图 4-6 传感器安装图

接着我们将三个光纤光栅加速度传感器接到光纤光栅振动解调仪上，对加速度信号进行解调，将光信号转为电信号，并经过电荷放大器对其进行信号放大和高通滤波，接着我们用数据采集器将其采集，接入计算机，通过本系统自主研发的振动监测软件对其进行分析处理。得到水泵机组振动状态特征参数，并通过监测振动速度来推断电机的工作状态，设置报警值，在出现异常振动时发出报警。下图为现场监测装置图：

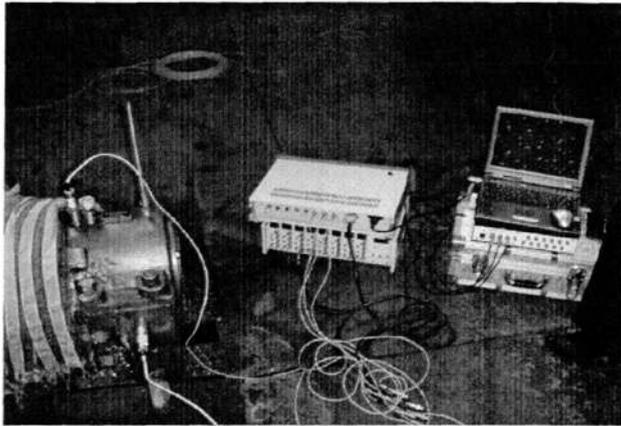


图 4-7 现场装置图

4.2.3 水泵振动监测结果及分析

在实验装置安装好后，打开设备及振动监测软件，开始对其振动状态进行监测，以下为本文所设计的振动监测软件所测得的三个通道的波形图：

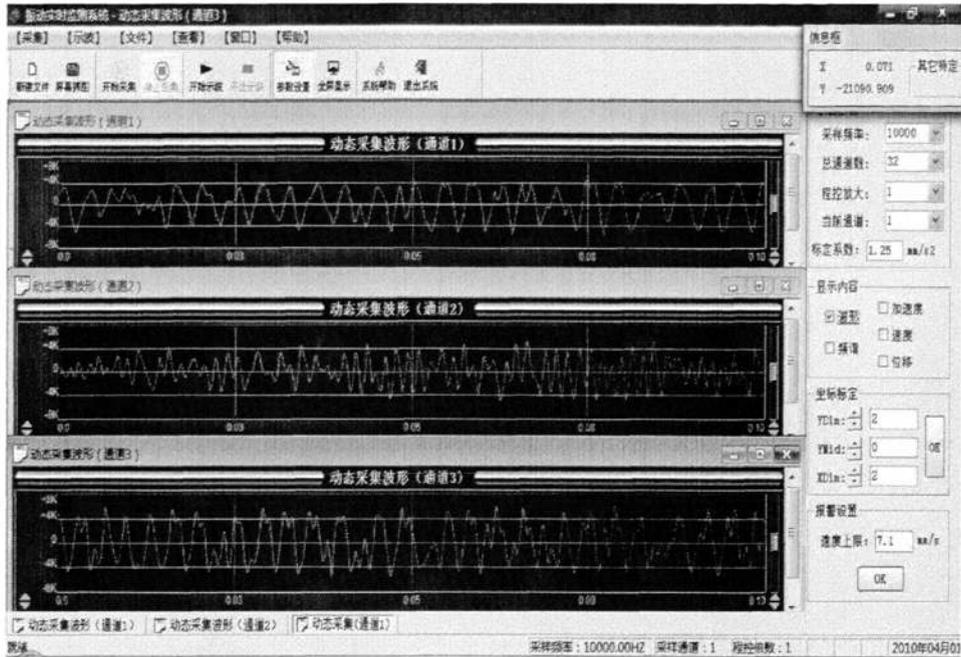


图 4-8 振动波形图

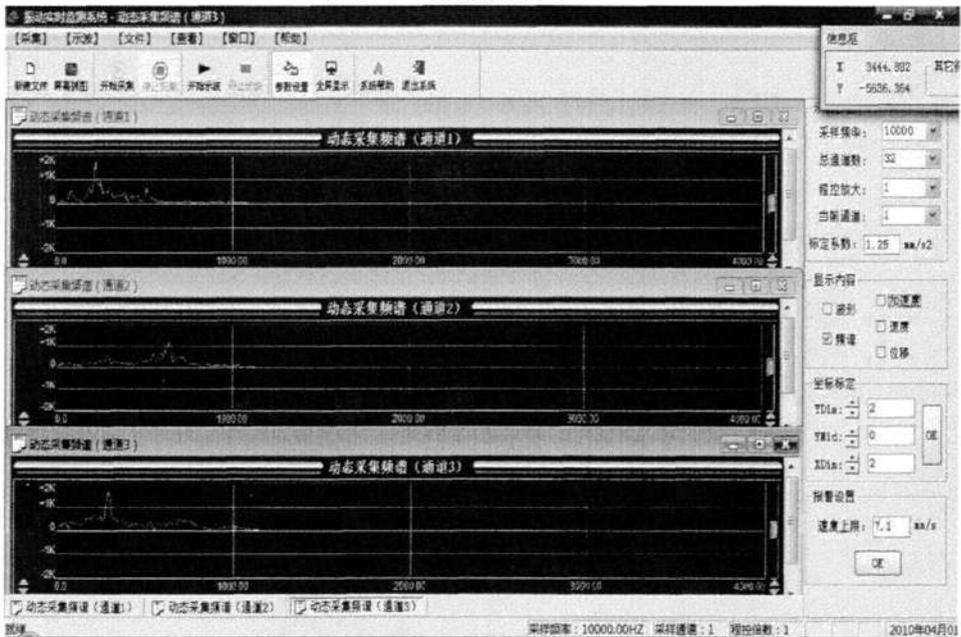


图 4-9 振动频谱图

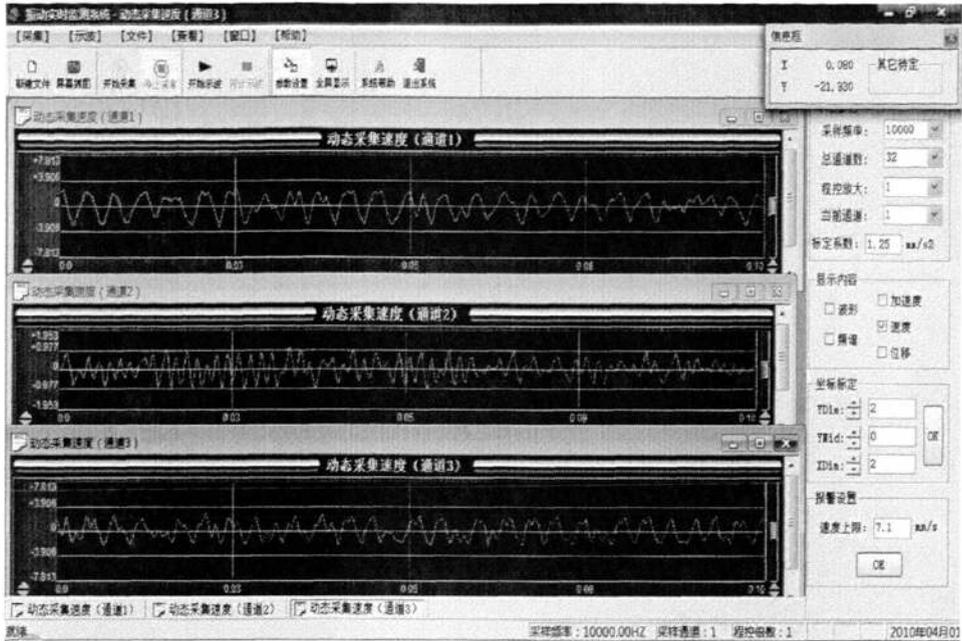


图4-10 振动速度波形图

由于在水泵监测中，我们是通过监测其振动速度来判断其工作状态是否正常，因此我们重点对水泵振动速度进行监测。这里我们设置振动速度报警值上限为7.1mm/s，在振动速度超过此范围时即发出警报，通告工作人员对设备进行检查处理，找出故障发生的原因，提前做好安全措施。这里，我们是根据机械振动的机理，结合设备三个重要部位的振动值、振动相位和振动方向来对故障发生原因进行分析判断的。

(1) 若我们所测得的横向振动值和纵向振动值都很大，而轴向振动值较小时，通常为不平衡振动。其横向和纵向振动相位差为90°。

(2) 若我们所测得的轴向振动值很大时，无论横向和纵向的振动情况如何，通常都是轴承不对中或者轴弯曲引起的。

(3) 若我们所测得的水泵各个方向的振动相位都相同，则是由于发生共振引起的。

(4) 若水泵机组纵向振动产生较大的相位差，则有可能是机组底角螺栓松动引起的。

4.3 本章小结

通过在实验室进行振动监测实验，检测系统设计的合理性以及软件功能的实现情况，经测试，实验非常成功，达到了预期效果。于是我们将该系统应用在武钢水泵项目中，通过监测水泵不同位置的振动情况，跟踪振动波形，来判断水泵机组的运行状态，达到设备发生异常振动时发出预警的效果。

第五章 总结与展望

目前, 光纤光栅传感技术已经在各种工程项目中得到了广泛的应用, 然而利用光纤光栅加速度传感器测量振动信号的研究还相对较少, 处于起步阶段。对振动信号进行采集处理的软件也相对较少, 功能也不完善, 无法全方位的监测振动物体的振动状态。本文设计了光纤光栅加速度振动实时监测系统, 采用光纤光栅加速度传感器, 克服了传统电磁类加速度传感器存在的抗电磁干扰能力差等缺陷, 并巧妙利用弹性元件, 使其产生受力并引起光纤光栅的应变, 把加速度量转化 *Bragg* 光栅的应变, 进而演变 *Bragg* 波长变化, 通过测量波长的变化来测量加速度。本系统的解调部分采用的是双光栅匹配滤波解调技术, 极大地提高了传感器的响应灵敏度, 并实现了温度漂移的自补偿。

本系统中的数据采集使用的是 UA302/H 型 A/D 采集器, 测量精度高速度快且使用 USB 接口连接方便, 并自带专用动态连接库 UA300.DLL, 编程方便。采用 Visual C++ 来对软件部分进行编写, 并在程序中使用了多线程技术, 数据库技术和动态链接库技术等; 在程序的编写中使用了 UA300.DLL, 并使用单独的线程来采集数据以达到数据采集与波形显示的同步; 使用数据库公共类 ADOConn 来实现数据的存储及读取; 程序中还构建了快速傅立叶变换算法的动态链接库 FFT.dll, 便于以后对快速傅立叶变换算法进行进一步的研究和改进。该软件中对采集到的振动信号数据进行时域和频域分析, 得到振动信号的波形图和频谱图, 并在特征频率识别后, 利用振动参数间的关系, 得到振动的速度、加速度及位移, 从而监测振动物体的振动状态。

该系统还应用到武钢水泵的振动监测中, 有效地实现了水泵振动状态的监测, 并在振动状态异常时发出报警, 提醒工作人员做好预防工作。总体来说, 该光纤光栅振动实时监测系统的研究对光纤光栅传感器在工程项目中的应用起到了进一步的推动作用。当然, 目前对光纤光栅的信号采集技术还处于初级阶段只能在小型的局域网系统中应用, 并且由于时间限制还有很多问题研究得不够深入, 还有一些地方存在不足, 需要进一步改进和完善。

(1) 不断地总结和改進數據處理的算法, 使程序的可讀性更強, 結構更加優化;

(2) 數據存儲過程中, 若在數據結構中存儲數據則數據存儲量有限, 若採用

多线程技术分时保存数据，则会由于建立数据库的连接时间过长而导致数据点的丢失；

(3) 只通过采集器及网络接口与计算机的组合，是不能完全满足实际数据采集的需要的。

作为一种新型的传感技术，光纤光栅传感技术的发展是非常可观的，其自身所具有的众多优点使其在动态测量领域具有广阔的发展前景。而由振动而造成的事故越来越多，往往会给人类带来巨大的伤亡和损失。这也势必使振动监测领域迅速发展，大量应用在设备及建筑物的健康状态监测中，避免因异常振动而引发事故。

参考文献

- [1]Ecke,W.,et al..Optical Fibre Grating Strain Sensor Network for X-38 Spacecraft Health Monitoring.Proc. of the SPIE (14th OFS Conference Venice),2000:888-891.
- [2]贾艳丽. 振动/温度光纤光栅传感技术研究. 西安理工大学硕士学位论文, 2008, 3:2-4.
- [3]Friebele, P., et al. .Fibre Bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures. Optics and Photonics News, 1998, Vol.9:33-37.
- [4]罗小东. 光纤光栅振动传感关键技术研究. 西北大学硕士学位论文, 2008, 5:2-4.
- [5]Morey W W.etal.Fiber Optical Bragg grating sensors[A].Proc SPIE[C], 1989,11(69):98-107.
- [6]A D Kersey,T A Berkoff,W W Morey. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J].Electron.Lett., 1992,28(3):236-238.
- [7]Todd.M.D, Johnson.G.A,Althouse.B.A etal. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. Photonics Technology Letters,IEEE,1998,11(10):1605-1607.
- [8]黄建辉, 赵洋. 光纤布拉格光栅传感器实现应力测量的最新进展. 光电子·激光, 2000, 11 (2) :217 — 220.
- [9]孙玉声. 振动传感器. 西安:西安交通大学出版社, 1991, 1.
- [10]李清娜. 光纤 Bragg 光栅振动传感技术研究. 西安理工大学硕士学位论文, 2007, 3:2-4.
- [11]Jaekson DA. RiheiroABL. ReekieLetal.Simple multiplexing seheme for a fiber-Opite grating sensor network. OptLett, 1993, 18(14):1192-1194.
- [12]T. A. Berkoff and A. D. Kersey. Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [13]M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow, J. P. Dakin. Optical in-fiber grating high pressure sensor. Electron. Lett., 1993, 29(4) :398-399.
- [14]姚开方. 高频响应光纤布拉格光栅加速度传感器的研究. 武汉理工大学硕士学位论文, 2009, 5
- [15]贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究:(博士学位论文). 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2000.
- [16]张东生, 郭丹, 罗裴等. 基于匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器的研究. 传感技术学报, 2007:18(2).
- [17]王立新, 沈竹. 光纤光栅振动传感器的新型解调方案. 武汉理工大学学报, 2003:26(6).
- [18]饶云江, 袁慎芳等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其

- 应用[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 85-88.
- [19]谢芳, 王慧琴. 用光纤 F-P 滤波器解调的光纤光栅传感器的研究[J]. 光电子. 激光, 2003, 14(4): 359-362.
- [20]廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社, 2000:197-224.
- [21]龙华伟, 顾永刚. DAQ 数据采集. 北京:清华大学出版社, 2008:127 — 145.
- [22]陈金华, 郑红, 基于 Msp430F148 的便携式测振仪. 微计算机信息, 2003, 19(2):45-46
- [23]陈涛. 虚拟振动测试系统的研究. 河北工业大学硕士学位论文, 2002, 3.
- [24]Wang, G., et al., Digital demodulation and signal processing applied to fibre Bragg grating strain sensor arrays in monitoring transient loading effects on ship hulls. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, 1997, pp.612-615.
- [25]张新庆. 便携式振动监测系统的研制及其在油田注水泵的应用. 上海交通大学工程硕士学位论文, 2007, 11: 27-28
- [26]李德葆, 张元润. 振动测量与实验分析. 北京:机械工业出版社, 1992, 200-225.
- [27]楼建忠. 大型旋转机械振动监测系统的研究. 浙江大学硕士学位论文, 2005, 12:13-14
- [28]王立荣. 设备振动监测分析振动系统研究. 华北电力大学硕士学位论文, 2008. 1:6-8
- [29]侯国章, 赵学曾. 测试与传感技术. 哈尔滨:哈尔滨工业出版社, 1982. 12. 56-100.
- [30]张思. 振动测试与分析技术. 北京: 清华大学出版社, 1992. 292-305.
- [31]姚天任, 江太辉. 数字信号处理. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [32]郭月强. 振动信号的测试与分析及其软件系统的开发. 北京工业大学硕士学位论文, 2002, 6:53-56
- [33]孙鑫, 余安萍. vC++深入详解. 北京:电子工业出版社, 2006, 6:557 — 659.
- [34]王瑞, 于速, 张雨. VisualC++数据库系统开发完全手册. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [35]郑云桥. 光纤光栅高速公路火灾监测系统设计与应用研究. 武汉理工大学硕士学位论文, 2009, 5.
- [36]王舜燕, 张晟. 光纤Bragg光栅桥梁振动监测系统软件的设计与实现. 产品开发与应用 2007, 2:49-50
- [37]姚天任, 江太辉. 数字信号处理. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [38]陈建春. Microsoft VisualC++图形系统开发技术基础. 电子工业出版社, 1998.
- [39]David J. Kruglinske, SeotWingo. GeorgeShePherd. Programing VisualC++6.0. MleorsoftPress, 1997
- [40]谢勇. VisualC++6.0 实例精通. 科学出版社, 2000.

- [41] 吕凤霁. C++语言基础教程. 清华大学出版社, 2000.
- [42] 谭浩强. C程序设计. 清华大学出版社, 1994.
- [43] 丁有和, 郑进, 周怡君. visualc++实用教程(第二版). 北京:电子工业出版社, 2001.
- [44] Norden E Huang, zhang shen, steven R Long, et al. The Empirical Mode Decomposition And the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis. Proceedings of Royal Society A [B], 1998, 454(4):903~995
- [45] Culshaw B. Fiber optic sensors and processing. Peter Peregrinus, Stevenage, 1984
中译本:高希才等译. 光纤传感与信号处理. 成都:成都电讯工程学院出版社, 1986.
- [46] 吴安. 光纤光栅传感系统数据采集软件的开发与应用. 武汉理工大学硕士学位论文, 2009, 5.
- [47] zhang L, Fallon R W, Gloag A, et al. Partial and Wavelength Multiplexing Architectures for Extreme Strain Monitoring System Using Identical-Chirped-Grating-Interrogation Technique. Proceedings of the Optical Fiber Sensors Conference, Williamsburg, VA, USA, 1997:452

致 谢

在论文即将完成之际，首先，我深深地感谢关心、帮助和指导我的导师姜德生院士，并致以崇高的敬意!祝愿姜老师身体健康，生活愉快!

感谢给予我很大帮助的南秋明老师，在整个研究设计阶段，他都给了我极大的关心、照顾及指导，使我不仅学到了扎实的专业知识和解决问题分析问题的科学方法，而且也教会了许多做人的道理，使我各方面的素质都得到了全面的提高。在此表示深深的谢意!

此外，还要感谢在平时学习和生活中给予我莫大支持和帮助的王玉华老师，感谢实验室的张小龙、王闵同学，在这三年的学习和生活上给与我的支持与帮助。

最后，感谢我的家人，特别要感谢的是我的父母，我的父母用自己的心血抚育我成长，在我的学习生涯中，我的父母不辞辛劳，一直坚定不移的支持我的学业，使我深深地感激，以后的工作中，我将以加倍的努力来报答我的父母。由于时间有限，还有很多不完善的地方，错误之处恳请指正。

攻读硕士学位期间发表的论文

[1]熊靖 基于光纤布拉格光栅加速度传感器的振动监测系统[J] 中国水运
2010. 1。