

# 基于 MATLAB 的振动信号采集与分析系统的研究

## 摘要

本文研究的主要目的是开发可以实时采集与分析振动信号的软件系统。编写实时数据采集程序和实时数据分析程序,同时开发了输入未知情况下模态参数识别程序。系统仅基于一种编程语言平台—MATLAB,增强了软件的可维护性、可移植性等性能。系统主要包括如下几部分:

首先,开发了数据采集模块。应用的主要硬件是研华公司的 PCI-1712 采集卡与压电式传感器。第一步:建立硬件与软件平台之间的联系。第二步:开发实时数据采集程序。主要依据 MATLAB 的数据采集工具箱的编程规则编程。同时,利用 PCI-1712 采集卡的先进先出的缓冲特点。将一定时间间隔的数据从缓冲区删除(这里需要保证删除掉的数据已经进行了保存)进而采集新的数据,以保证数据的实时性。

其次,利用 MATLAB 中的信号处理工具箱实现了振动信号的实时处理,包括如下四部分内容:信号预处理:消除趋势项,平滑处理等;信号时域处理:滤波处理、相干函数等;信号时域处理,主要包括各种谱函数:自相关函数、自功率谱密度函数、频响函数等;模态参数识别:频域法识别、时域法识别,进行结构的模态、阻尼比、振型识别。上述信号处理功能的实现主要依赖于 MATLAB 强大的计算功能以及完善的库函数。

再次,利用 MATLAB 强大的矩阵运算功能实现几何模型和振型的动画显示。

最后,利用 MATLAB 的图形用户界面功能,开发出了友好的、功能强大的系统操作界面。

**关键词:** 数据采集, 信号处理, 模态参数识别, MATLAB

# **A Vibration Signal Acquisition and Analysis System Based on MATLAB**

## **Abstract**

The main purpose of this paper is to design a real-time vibration signal acquisition and analysis system. The innovations are that designing real-time data acquisition program and designing real-time signal processing program, while designing parameter identification program under unknown input load. The main contents are as following.

Firstly, the data acquisition module is developed. The main hardware are PCI-1712 data acquisition card and piezoelectricity sensor. The first step is to build the link between hardware and software platform. The second step is to design real-time data acquisition program based on the program rule of Data Acquisition Toolbox and the FIFO buffer of PCI-1712 data acquisition card. With removing the used data from the buffer at intervals (Be sure the data has been saved) and then gather new data, the data's real-time performance can be obtained.

Secondly, the signal processing module is developed with Signal Processing Toolbox. The contents include four parts as following. The pretreatment of signal, the signal processing in time domain mainly about filter, the signal processing in frequency domain mainly about spectrum function and the parameter identification module. All the present of the above functions are based on the powerful numeration performance and perfect functions of MATLAB.

Thirdly, with the powerful matrix numeration function, the model of structure and the movie play of Normal Modal are obtained.

Finally, friendly mutual system is developed with GUI of MATLAB.

**Keywords: Data Acquisition, Signal Processing, Parameter Identification ,  
MATLAB**

# 1 绪论

## 1.1 论文的研究背景及意义

测试是具有试验性质的测量。试验是对迄今为止未知事物探索性的认识过程，测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。

测试是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一，是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的途径，是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。

测试属于信息科学范畴，又被称之为信息探测工程学。

信息，一般可理解为消息、情报和知识，信息本身不是物质，不具有能量，但信息的传输却依靠物质能量。一般说，传输信息的载体称为信号<sup>[1]</sup>。

人类认识世界，是以感官感知自然信息开始。物质的颜色、形状、声响、温度变化，可有由人的视觉、听觉、触觉等器官感知，但人的感官感知事物的变化有局限性，人类感官的延伸——传感器，是近代信息探测工程学中的重要内容，传感技术的发展，扩展了人类感知信息的智能。

信息探测<sup>[2-4]</sup>涉及到任何一项工程领域，无论是生物、海洋、气象、地质、雷达、通信以及机械、电子等工程，都离不开测试与信息处理。

作为工程信息的一个实例，一台机器，或者一座桥梁，它本身具有抵抗外力的能力，这是物质的固有特性。怎样探测这一客观存在？当所研究的系统受到外力激励后，所发生的位移-时间历程就包含了描述该系统的固有频率和阻尼的信息。因此，对位移-时间信号进行分析，就可以获得该系统的刚度。

工程中的信息处理，是指从传感器等软件获得初始信息，再用一定设备手段进行分析处理的过程，包括了信息的获得、传输、转换、分析、变换、处理、检测、显示及应用等过程。因为信息是以信号形式传输的，故而信息处理又可称之为信号处理。通常又把研究信号的构成和特征值成为信号分析；把信号再经过必要的加工变换，以期获得有用信息的过程成为信号处理。

测试信号中携带着人们所需要的有用信息，也常还含有大量人们不感兴趣的其他成分，后者成为干扰噪声。对信号的分析处理，例如，滤波、变换和估值

等，就是对信号的加工变换，其目的是改变信号形式，便于分析和识别；滤除干扰噪声，提取有用信息，便于对所研究事物作出估计。

信号分析的经典方法有时域分析与频域分析法。时域分析又称波形分析，是用信号的幅值随时间变化之图形或表达式来分析，可以得到信号任一时刻的瞬时值或最大值、最小值、均值、均方根等；也可以通过信号的时域分解，研究其稳定分量与波动分量；对信号的相关分析，可以研究信号本身或相互间的相似程度；研究信号的幅值的分布状态，可以了解信号幅值取值的概率及概率分布情况，此又称为幅值域分析。

测试信号的频域分析是把信号的幅值、相位或能量变换为以频率表示的函数，进而分析其频率特性的一种方法，又称为频谱分析。例如，幅值谱、相位谱、能量谱密度、功率谱密度等。对信号进行频谱分析，可以获得更多的有用信息，是近代信息技术发展中的一个重要手段。

50年代以前，信号分析技术主要是模拟分析方法，进入50年代，大型通用数字计算机在信号分析中有了实际应用。进入60年代，人造卫星、宇航探测及通信、雷达技术的发展，对信号分析的速度、分辨能力提出了更高的要求。

现阶段是向多功能<sup>[2-3]</sup>、集成化、智能化发展，进行参数和动态测量，是自动化过程控制系统中的重要一环，其主要是微电子与计算机技术。传感器与微计算机结合，形成了进行信号测试的软件系统。

目前信号分析技术的发展目标是：(1) 在线实时的能力提高；(2) 分辨力和运算精度的提高；(3) 扩大和发展新的专用功能；(4) 专用机构小型化，性能标准化，价格低廉。

本文研究的振动信号采集与分析系统，基于上述发展目标。内容包括振动测试和模态分析技术两大部分。

### 1. 振动测试技术

无论机械、海洋平台<sup>[4]</sup>、土木工程结构<sup>[5-6]</sup>、船舶、桥梁<sup>[7-8]</sup>等大型结构建筑物，还是工件<sup>[9-11]</sup>、电脑主板、人体<sup>[12]</sup>等结构，振动都是一种常见的现象。多数情况下，振动是有害的，振动影响机械设备的性能和寿命，影响大型建筑物的安全性，影响新产品的合格性等。

尽管振动的理论研究已经发展到了很高的水平，但是由于实践中遇到的振动

问题远比理论所设想的复杂得多，复杂结构中的许多参数，如阻尼参数和边界条件，还只能通过试验来确定，理论的正确与否还必须通过实践来验证。这使得振动测试在工程技术中起着重要作用。

工程中的振动测试主要有如下几部分的作用：

- 对工作的结构或部件的振动进行实时测量和分析，测量的内容包括振动强度、频谱等以及一些更深入的分析。这些测量有助于人们了解被测结构的振动状况和寻找振动源。
- 测定结构或部件的动态特性<sup>[9-10]</sup>。这是以某种激励力作用在被测结构上，使它产生受迫振动，同时测定输入和输出，并以此确定被测结构的频率响应，然后进行模态分析，求得各阶模态的动态参数。
- 对新产品进行振动试验。确定产品是否到达合格标准所要求的性能。
- 对新材料进行振动测试，测试其硬度等性能指标。
- 进行结构振动的模拟<sup>[7]</sup>试验，寻找结构的最大抗震限度或者模拟现场结构物的受振情况，进行故障诊断或寻找破坏源等。

## 2. 模态分析技术

模态分析技术是用于对机械系统、土建结构、桥梁等几乎无所不包的工程结构系统进行动力学分析的现代化方法和手段。模态分析的最终目标是识别出系统的模态参数，为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断及预报以及结构动力特性的优化设计提供依据<sup>[10-14]</sup>。模态分析可定义为对结构动态特性的解析分析和试验分析，其结构动态特性用模态参数来表征。在解析分析中，模态参数是力学系统运动微分方程的特征值和特征向量；在试验分析中，模态参数试验测得系统的固有频率<sup>[15-18]</sup>、阻尼比和模态振型。目前，对结构动态特性的预测、测试和修改已经不是一件十分困难的事，其中，模态分析技术成为了最重要的技术之一。

模态分析技术主要是指试验模态分析技术。所谓试验分析技术是利用振动测试、信号处理和参数识别的方法，获得表征结构动态特性的模态参数的一种动态分析方法。它通过对结构的输入激励和输出响应的测试，在模态参数未知的情况下，由计算机进行信号处理，通过参数识别找出振动系统的模态参数，建立结构的模态模型，非常直观地了解各阶模态振动的情况，可以为结构设计

部门设计和修改等。正是由于试验模态分析技术巨大的工程实用价值，使其成为利用振动理论解决工程问题的最重要、应用最广泛的技术手段。

试验模态分析可分为以下几个主要环节：

### (1) 激振技术

为了测得结构的动力响应，有时需要人为地给结构加入一个激振源，这就是所谓的激振技术。

激振技术分为<sup>[19-20]</sup>稳态正弦激振和宽频带激振两大类。稳态正弦激振是振动测试中的经典方法，六十年代，跟踪滤波器开发成功，稳态正弦激振成为试验模态主要的也是唯一的方法。七十年代以来，随着以 FFT 为核心的动态信号分析仪的出现和广泛使用，各种宽频带激振方法相继提出和推广。宽频带激振与 FFT(快速傅立叶变换)分析配合，逐渐成为试验模态中的主要激振方法。宽频带激振主要包括瞬态激振、阶跃激振、快速正弦激振、伪随机激振、纯随机激振、周期随机激振和瞬态随机激振等。

试验模态分析方法，最早采用单点稳态正弦激振实验方法，在新的分析方法推动下，发展为多点宽频带激振实验方法，以及瞬态脉冲激振、随机激振及多点多次激振等方法，它们各有其特点及适用范围。

### (2) 测试技术

六十年代主要采用稳态正弦激振和测试技术，航空航天业界主要方法是基于多点激振的相位共振技术，机械工业产品则在基于正弦慢扫频激振的频率响应测试仪开发成功后，利用实频、虚频特性的相位分离技术或导纳圆拟合的识别方法来确定被测结构得的动力特性。

七十年代，试验模态分析技术蓬勃发展，基于快速傅立叶变换的动态测试技术和在小型计算机上实现的多自由度频域、时域模态识别方法，成为试验模态分析的主流，并在各种机械工程以及航空、航天、汽车、舰船、土建、化工、冶金等领域普遍应用推广。试验模态分析不仅直接应用于振动排故，而且用于有限元数学模型优化、结构动力学修改以及系统建模与优化设计。试验模态分析的应用反过来又对试验模态技术提出了更高的要求。

八十年代，试验模态分析，无论是激振、测试技术、测试设备、FRF（频响函数）估计和模态识别方法都有新的突破，进入了一个崭新的阶段。多输入

频响函数测试技术的实现，为发展现代的多输出识别方法奠定了基础。现代的多输入多输出识别方法，能量分布合理，试验时间短，识别精度高。

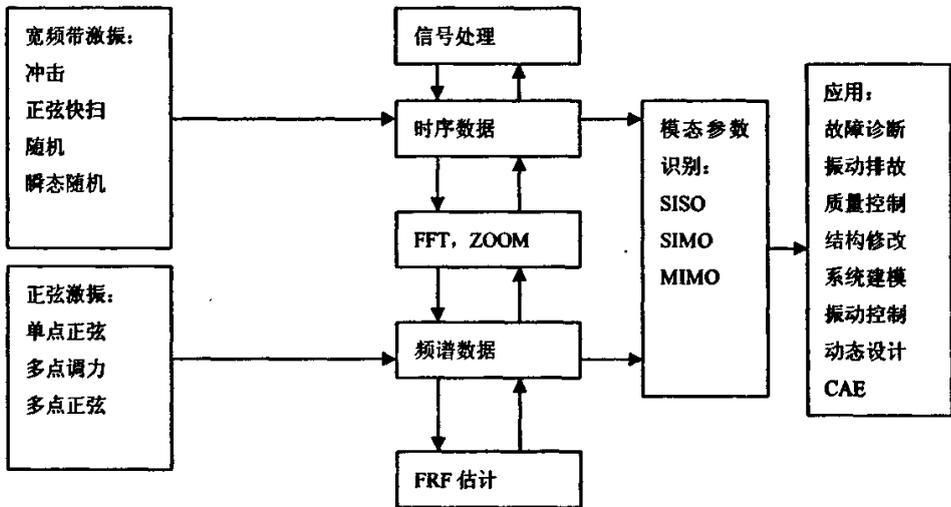


图 1.1 模态分析的各个环节

### (3) 模态参数识别

模态参数的识别是系统识别的一种。有很多工程实际问题，系统的物理特性、物理参数、其所服从的力学规律，是完全不知道的（所谓 Black box）或不完全知道的（所谓 Grey box）。按着一定的准则，通过试验数据与数据分析相结合的方法，来建立振动的数学模型（可以是数学公式，也可以是数学表格、曲线或计算程序），称为系统识别。

以试验数据和系统的物理参数<sup>[20]</sup>（如质量、阻尼和刚度）来建立参数模型（如运动方程）的系统识别，称为参数识别。而对非参数（如频响函数、脉冲响应函数）模型的识别，称为非参数识别。识别参数模型通常要困难一些。

若用模态参数(主要是指频率、振型)来描述系统的动特性，这种参数识别就称为模态参数识别。而对物理参数（即结构参数）模型的识别，称为物理参数识别。

进行结构模态参数识别时，按识别是在频率域进行还是在时间域进行，模态参数识别可分为频域识别和时域识别。频域模态参数识别是利用频响函数的测试数据，提取模态参数的方法。时域模态参数识别是利用振动响应（自由响应、脉冲函数响应、白噪声激励响应）的时间历程数据，进行参数识别的方法。

频域法发展较早，也较成熟。因频域法的物理概念清楚直观，不易遗漏模态或产生虚假模态，精度高，抗噪能力强，故至今仍是模态参数识别的主要方法在广泛应用。但频域法需有输入输出的实测数据，并将实测的激励和响应得时域信号，变换成频域信号，求得频响函数，再识别模态参数。此外，频域法要求数据的信噪比比较高，故频域法多在试验室内或中、小型结构上使用。

时域法是近 20 多年来随着电子计算机发展而迅速发展起来的模态参数识别方法，它直接利用系统响应的时间历程，不需要激励信息，即可进行模态参数识别，故便于在现场运行条件下，进行“在线”识别，这对动态监控和故障诊断<sup>[21]</sup>十分方便，特别是激励荷载很难测量的情况下，时域法更显出其独特的优越性。此外，时域法可用于任何阻尼，也不受模态耦合的限制，并可直接估计物理参数。

时域法目前存在的主要问题是精度低；对噪声很敏感，故常引起虚假模态的出现；无输入数据，故不能求得完整的模态；由于仪器处理的工作转到计算机中去，故数据处理工作量大。这些问题有待进一步解决。

时域识别法<sup>[21]</sup>可分为两类：一类是在结构动力学基础上发展起来的 Ibrahim 时域法（简称为 ITD 法，该方法通过解特征方程来获得模态参数，利用最小二乘法提高精度；另一类是从自动控制和信息工程中引入的方法，如 ARMA 时序法、卡尔曼滤波法等。

模态分析技术现阶段主要应用以下几个方面：

- 评价现有结构系统的动态特性

在处理结构的振动问题时，必须对其动态特性有全面的了解。结构的动态特性通常用各阶模态参数（如模态频率、阻尼比及模态振型等）来描述。通过对结构的模态分析可以求得上述动态特性参数，从而评价结构的动态特性是否符合要求，并校验理论计算结果的准确性。结构的动态特性虽然可用有限元方法计算，但是由于实际结构的复杂性，在建立有限元模型时所引进的一系列人为假设往往很难与实际结构相符，因此，计算结果与实际情况往往不相吻合。模态分析是建立在实验基础上的，因此，所得到的动态特性参数比较准确，特别是可以识别系统的阻尼。

- 在新产品中设计进行结构动态特性的预估及优化设计

在新产品设计中，通常采用有限元分析方法计算结构的动态特性，但是，正如上面所指出的，由于在建立有限元模型时，在边界条件的处理及力学模型的简化上，往往与实际结构相差较大。用模态分析得到的模态参数对有限元模型进行修改，使其更能符合实际，从而提高有限元分析的精度。

用模态分析的结果进行结构动力修改，使动力特性到达预定的要求，并使其优化，这亦是模态分析的目标之一。模态分析进入产品的设计阶段，并与有限元、CAD、CAT、CAE 相结合构成所谓“理想设计过程”(Ideal Design Process)，是模态分析技术的一个发展方向。

- 诊断及预报结构系统的故障

近年来结构故障技术发展迅速，而模态分析已经成为故障诊断的一个重要方法。利用结构模态参数的改变来诊断故障是一种有效的方法。例如根据模态频率的变化，可以判断裂纹的出现；根据振型的分析，可以确定断裂的位置；根据转子支承系统阻尼的改变，可诊断与预报子系统的失稳等等。

- 控制结构的辐射噪声

结构辐射噪声是由于结构振动所引起的。结构振动时，各阶模态对噪声的“贡献”并不相同，对噪声贡献较大的几阶模态成为“主导模态”。抑制或调整主导模态，便可以降低噪声。而主导模态的确定，必须建立在试验模态分析的基础上。

- 识别结构的荷载

某些结构在工作时所承受的荷载很难测量，这时，可以通过实测响应和由模态分析所得到的模态参数来加以识别。此方法在航空、航天及工程中应用广泛。

## 1.2 国内外振动信号采集与分析软件现状

国内外大型的动态信号测试与分析软件，尤其是模态分析软件发展迅速。随着 MATLAB 编程语言的问世，在 MATLAB 强大的计算功能基础上，丹麦 B&K 公司的设计师开发出了最新的模态分析软件 ME'scopeVES，它可以对机械结构的动态特性进行分析和计算，同时能在被测结构的三维模型上显示振动、声强及其它一些工业数据，ME'scopeVES<sup>[22]</sup>软件还可以显示一个大型结构的工作振型 (ODS)、模态振型、应力应变、温度、压力等。通过多年的实践检验和改进加

上 ME'scopeVES 软件的强大功能, 目前全世界一些大型企业都在使用这套模态分析软件, 使其成为了一套全球化的软件系统。随着试验模态分析技术的日趋完善, 伴随着 B&K 公司在这方面的成功, 国外一些成熟的试验模态分析系统也相继诞生, 如比利时 LMS<sup>[23]</sup>公司的 CADA—X 系统, 美国 MTS<sup>[24]</sup>公司的 I-DEAS 系统, 美国 NI<sup>[25]</sup>公司的数据采集软件, M+P<sup>[26]</sup>公司的 SmartOffice, 日本 RION<sup>[27]</sup>公司的 DSPS 动态信号采集分析系统、MAS 模态分析软件等。

相比国外, 国内开发的动态信号采集与分析软件系统也在不断涌现。其中具有代表性的有: DAS-1 动态信号分析与故障诊断系统、北京东方振动与噪声技术研究所的 DASP<sup>[28]</sup>系统、南京航空航天大学 VAMS<sup>[29]</sup>系统、北京波谱科技有限公司开发的 Vib'SYS<sup>[30]</sup>振动信号采集、处理和分析软件 V1.02 等。它们在信号采集、谱分析、模态参数识别等方面都有自己的优点, 在工程结构设计、故障诊断、试验教学等方面发挥着重要作用。然而, 综观国内开发的这些大型软件, 可以看出它们需要解决以下问题:

(1) 上述大型软件的开发采用了各种编程语言相结合、取各自所长进行配合使用的手段进行开发, 如数据采集程序使用汇编语言编写, 同时利用 C 编写计算程序, 而主界面的开发采用 LabView<sup>[22-30]</sup>进行开发。这样尽管可以扬长避短, 但是不利于开发成员之间程序的通用性。同时如果用 C 或汇编语言编写计算程序, 加大了程序开发的难度也增加了程序的复杂性, 降低了编程的效率。

(2) 上述软件在开发的过程中, 所采用的硬件设备都是单一的, 如美国 NI 公司的数据采集软件采用的硬件是本公司的 NI 数据采集卡, 并不附带与其它硬件连接的驱动程序, 也就是说, 上述大部分软件的硬件不具有多样性, 所以这样做的结果就是不利于整个程序的通用性和硬件的可扩展性。

(3) 上述大部分软件不能实时地采集数据以及实时地进行数据分析。本文利用 MATLAB 的数据采集工具箱和信号处理工具箱实现了数据采集和分析的实时性。

(4) 上述模态分析软件大多只适用于进行试验测试, 即局限于在实验室<sup>[31-32]</sup>使用, 这是因为软件所采用的模态参数识别方法主要是频域法, 依据结构动态响应的频响函数。但是, 大多数情况下结构所受荷载是未知的。所以, 频域法识别结构的模态参数具有一定的局限性。本文编写了荷载未知条件下利用随机

减量法进行模态参数识别的程序，进一步完善了上述软件的不足。

### 1.3 论文研究的主要内容

振动信号采集与分析系统实现的功能需按照常规测试的流程进行实现。系统进行采集时，首先，由传感器将结构的振动信号输入到电荷放大器，再由电荷放大器输送到数据采集卡，接着输入到计算机进行一系列的处理和分析。

在上述流程中，要实现的基本功能如下：

首先，振动信号测试中由传感器得到的数据在大多数情况下与真实的振动信号之间存在一定的差距，所以未经分析处理、修正，直接采用测试得到的振动信号作为结果往往会产生误差，有时甚至得出错误结论。振动信号处理就是通过一些数学运算方法对振动测试所得的信号进行加工，去伪存真，计算出我们需要了解的内容，以便做进一步的分析研究。振动信号处理关心的是振动信号的表示<sup>[2][33]</sup>、变换和运算以及振动信号所包含的信息。

通过传感器、放大器或中间变换和数据采集仪对被测试物体进行振动测试所得的信号由于测试过程中测试系统外部和内部各种因素的影响必然在输出过程中夹杂着许多不需要的成分。这样就需要对所得信号作初步处理，修正波形的畸变，剔除混杂在信号中的噪声和干扰，削弱信号中多余内容，强化突出感兴趣的部分，使初步处理的结果尽可能地还原成实际信号。通常振动信号预处理包括<sup>[17]</sup>：消除多项式趋势项，可将由于基线偏离所造成的波形畸变加以修正；平滑处理：消除混杂于信号中的高频噪声的干扰和影响。

其次，振动信号的时域处理又称为波形分析，主要是对时域波形信号的分析处理。滤波<sup>[33][34]</sup>是时域信号处理的重要内容。根据需要，滤除或保留实测信号波形的某些频率成分可通过滤波处理来实现。波形的最大值、最大值、有效值，分析波形与波形之间的相似程度的相关函数以及将位移、速度和加速度进行相互转换的积分和微分变换也属于振动信号的时域处理的范畴。对于随机振动信号的时域处理，除了上述处理方法外，更常用的是一些概率和数理统计的方法，如概率分布函数、概率密度函数、均值、相关分析等。

再次，进行信号的频域处理。频域处理是建立在傅立叶变换基础上的时频变换，处理得到的结果是以频率为变量的函数，称为谱函数。频域处理的主要方法是傅立叶变换，通过傅立叶变换得到结果的实虚部可转换为幅值谱和相位

谱。随机振动信号的频域处理主要以功率谱密度函数为基本函数。通过自功率谱函数和互功率谱函数可以导出相干函数和频响函数。频响函数是试验模态参数识别的基础。

最后，试验模态参数识别。试验模态参数识别是通过实测振动信号数据对所测结构的固有频率、阻尼比和振型等动力特性参数进行识别的处理方法。模态参数识别方法适用于线性时不变系统。试验模态参数识别方法分为频域识别法和时域识别法两类方法。

系统研究内容的大致框架如图 1.2 所示。

本文将基于 PC 机设计开发一套面向工程应用的振动信号采集与分析系统。论文的具体研究内容如下：

1. 基于 MATLAB 的数据采集工具箱，开发多功能数据采集系统。包括开发实时数据采集程序、数据显示与存储程序、人机交互界面等。
2. 基于 MATLAB 的信号处理工具箱以及 MATLAB 库函数功能，开发实时数据分析系统。包括利用 MATLAB 的库函数和递归调用算法开发实时数据分析程序、利用 MATLAB 信号处理工具箱的函数功能，开发诸如消除多项式趋势项、滤波(包括四种数字滤波器)、频谱函数、自功率谱函数等数据分析程序、利用 MATLAB 的人机界面功能，开发友好的界面系统。
3. 基于 MATLAB 的绘图功能，开发几何模型生成模块。利用 MATLAB 强大的绘图功能，实现二维、三维几何模型的生成，为结构的模态参数识别建立了基础。
4. 开发模态参数识别系统。首先，编写结构的模态参数识别程序，包括时域识别法和频域识别法。频域法主要包括：导纳圆拟和法、最小二乘迭代法、有理分式多项式法等，时域法包括：ITD 法、随机减量法、STD 法等。然后，编写振型动画显示程序。
5. 利用 MATLAB 的 GUI (人机界面功能) 开发简洁、功能齐全、友好的人机界面系统。

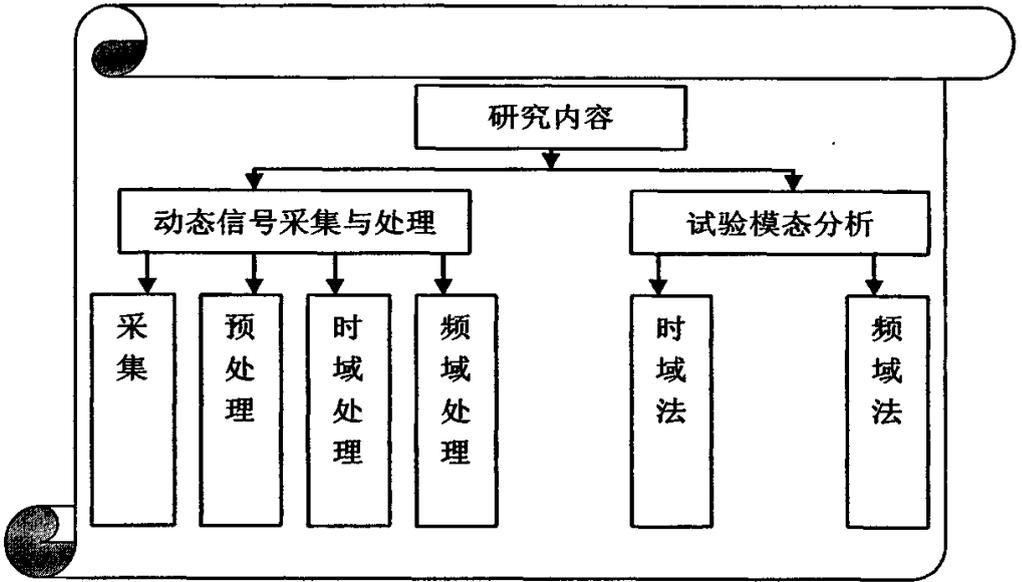


图 1.2 论文的研究框架

## 2 系统的设计方案

本系统基于 MATLAB 编程语言，利用 PC 机+高性能多功能数据采集卡+软件系统的形式实现通用的振动信号实时采集与分析系统。

### 2.1 软件设计的基本思想与特点

应用软件的开发<sup>[36]</sup>突破了传统仪器以硬件为主体的模式，它充分利用现有计算机资源，配以独特设计的软硬件，实现普通仪器的全部功能以及一些在普通仪器上无法实现的功能。使用者操作具有测试软件的计算机进行测量，通过友好的图形用户界面，以点击菜单来达到观测计算等操作目的，犹如在操作自己定义、自己设计的一台测试仪器。传统仪器的硬件是其关键，功能由厂商定义，因此其扩展性能较低。而实用的工程软件是以计算机硬件为平台，由传感器、硬件接口卡以及应用软件函数库构成虚实并存的测量系统，软件是其关键。与传统仪器相比，工程应用软件去掉了仪器箱、操作面板、电源以及显示电路等许多实体部件，具有强大的计算功能和图形化功能，是仪器智能化、集成化、远程化以及测控一体化设计的典型范例。

其主要特点如下：

1. 由于其以 PC 机为核心，使得许多数据处理的过程不必像过去那样由测试仪器本身来完成，而是在软件的支持下，利用 PC 机 CPU 的强大的数据处理功能来完成，使得基于工程应用软件的测试系统的测试精度、速度大为提高，可实现自动化、智能化、多任务测量。
2. 可方便地存储和交换测试数据，测试结果的表达方式更加丰富多样。
3. 工程应用软件可在较高性价比的条件下，降低系统开发和维护费用，缩短技术更新周期。

### 2.2 系统的主要构成模块

系统模块构成如图 2.1 所示。其基本构成包括如下几个方面：

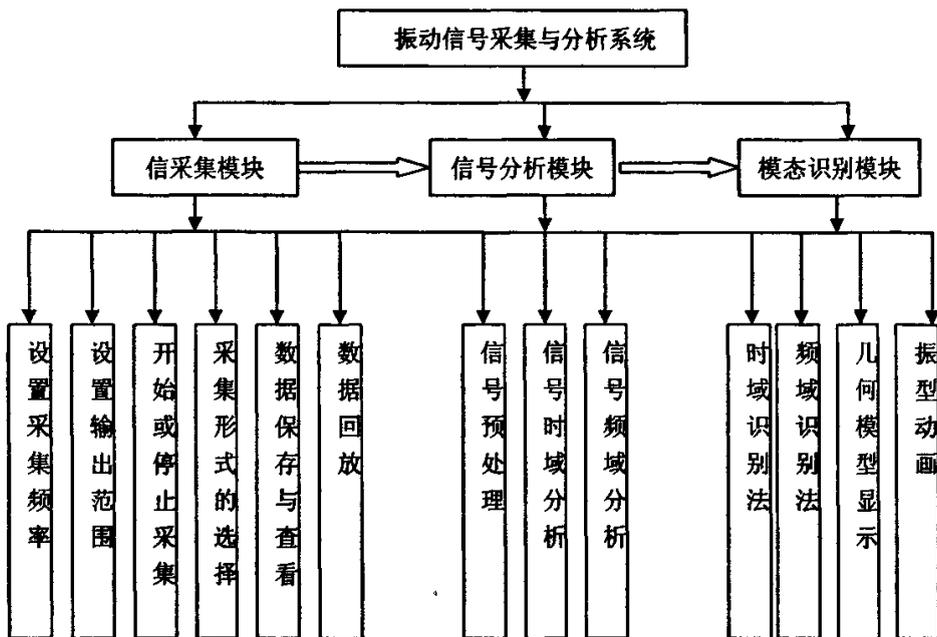


图 2.1 模态分析软件整体系统框图

### 1. 信号采集模块

该系统包括两大单元：

- (1) 数据采集设置与控制单元。该单元实现对系统数据采集硬件系统的各种操作，包括各输入通道采样频率的设置、增益调整、采样点数的设置等，利用该单元可进行连续采集也可以进行定点采集。
- (2) 数据的保存、显示与回放单元。该单元能够实现对采集到的数据进行定时或手动的保存，能够实现数据的显示，同时，可以实现对一定时间，一定通道数据的回放功能。

### 2. 信号分析模块

该模块主要包括以下几部分功能：信号的预处理、信号的时域分析、信号的频域分析等功能。预处理部分提供信号的消除趋势项处理、平滑处理等，第二部分主要包括信号的滤波处理，第三部分主要包括信号的各种谱分析功能的实现。

### 3. 模态分析模块

该模块的功能主要包括以下两部分：几何模型的建立和模态参数的识别。几何模型的建立可以实现多维几何模型的建立；模态参数识别的方法包

括频域识别法和时域识别法，主要识别模型的固有频率、阻尼比以及振型。

## 2.3 系统设计的硬件平台

系统硬件构成如图 2.2 所示。被测结构的振动信号经传感器输入到电荷放大器，经电荷放大器将信号放大一定的增益后，信号输入到多功能数据采集卡，然后由多功能数据采集卡将采集到的信号输入到 PC 机。最后，采集到的信号经过振动信号采集与分析系统进行信号的处理。

在本系统中，采用的 PC 机的 CPU 主频为 2.0GHZ，型号为 Intel Pentium IV，传感器选用的是 CA-YD-117 压电式陶瓷片，电荷放大器选用 YE5857 电荷放大器，该仪器具有 3 位十进制的传感器灵敏度调节器，可适应不同灵敏度的压电传感器，以得到归一化的输出，有 6 档接近 10 分贝的量程供切换，从而提高信噪比。下面重点介绍系统核心部件—多功能数据采集卡。

本系统采用的是研华公司<sup>[27]</sup>的 PCI-1712 多功能数据采集卡主要的性能指标如下：

### (1) 模拟输入

通道：8 路差分

数字输入通道：16 个

输入模式：双极性或单端

分辨率：12 位

最大采样频率：1MHz

最大 1K 字节的 A/D 缓冲空间，32K 字节的 D/A 缓冲空间

具有 FIFO 缓冲区

### 2) 模拟输出

D/A 转换器：2 个

分辨率：16 位

输出范围：0—+10V，-5—+5V 等

16 个数字数出通道

3 个 16 位可编程计数器/定时器

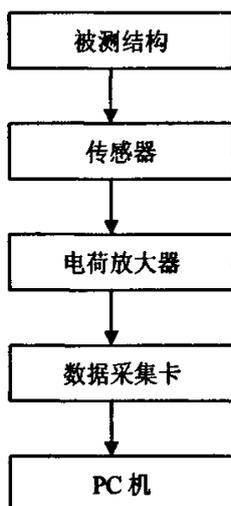


图 2.2 系统硬件构成

## 2.4 系统的软件设计平台

由于整个振动信号采集与分析系统的硬件是建立在 PC 机基础之上的，所以选择将相应的软件系统建立在 Windows XP 操作系统之上。其原因在于，首先振动信号采集与分析系统是一个多任务系统，而 WindowsXP 是 32 位视窗操作系统，它集成了新的设备驱动程序模型，新的文件系统，32 位图形引擎以及多媒体等子系统，十分适合于多任务操作，而且它基于 Windows NT 内核系统安全性较高；其次，Windows 操作系统的丰富资源，无论是访问硬件设备还是编制人机交互系统都可以有效降低编程工作量；

程序设计以 MATLAB 作为编程工具。MATLAB 是 Windows 平台下主要的应用程序开发环境之一，MATLAB 编程语言是一种面向对象的 Windows 编程语言，基于 MATLAB 几乎可以开发出 Windows 应用的各方面的程序，从底层软件一直到直接面向用户的软件。另外，研华公司的 PCI-1712 数据采集卡提供使用 MATLAB 来开发驱动程序的接口函数，所以可以很好地建立硬件平台与软件平台之间的联系。

此外，选择利用 MATLAB 语言作为编程工具，主要是因为 MATLAB 具有强大的数值计算功能，给应用系统本身及其开发带来很大的改善：首先，大量数学工具包的直接调用避免了程序设计中的重复性劳动，使研究开发的周期和成本得到了控制；其次，由于提供的数学工具包都针对运算过程和结果进行了

专门的优化，减少了开发人员实现算法的困难，这将有效地提高应用系统的精确度和稳定性，在实践中有着很高的实用价值。

### 2.4.1 MATLAB简介

MATLAB 是美国 MathWorks 公司<sup>[38]</sup>开发的大型数学计算应用软件系统，它提供了强大的矩阵处理和绘图功能，简单易用，可信度高，灵活性好，因而在世界范围内被科学工作者、工程师以及大学生和研究生广泛使用，目前已经成为国际市场上科学研究和工程应用方面的主导软件。掌握 MATLAB 并借助它解决理论与应用问题已经成为每一个从事科学研究和工程技术人员应该具备的技能。

MATLAB 自 1984 年推向市场以来，在许多优秀程序设计和编制人员的不断努力和卓越贡献下，经过十几年的完善和扩充，使它从一个简单的矩阵分析软件逐渐发展为一个通用性高、带有规模大和覆盖面广的工具箱、有强大可视化功能的科学计算操作平台。因此 MATLAB 被誉为巨人肩上的工具。

MATLAB 系统的基本函数库具有初等函数、初等矩阵和矩阵变换、包括线性代数方程组和矩阵特征值问题等数值线性代数、多项式运算和求根、数据分析和傅立叶变换以及某些特殊的矩阵函数和数学函数等众多内容。

MATLAB 还包括一系列被称作工具箱(TOOLBOX)<sup>[39-41]</sup>的专业求解工具。工具箱实际上是 MATLAB 针对不同学科、不同专业所开发的专用函数库，用来求解各个领域的数值计算问题，包括数据采集工具箱、信号处理工具箱、图像处理工具箱、小波分析工具箱、控制工具箱等。随着 MATLAB 的不断升级，所含工具箱的功能越来越丰富，规模越来越庞大，因此，应用也越来越广泛，成为各种专业科研人员和工程技术人员的得力工具。

MATLAB 的另一个特点就是程序的开放性。除内部函数外，所有 MATLAB 基本函数文件和左右工具箱的函数文件都是可以进行修改的源文件。用户可以对源文件进行修改，加入自己编写的内容来构成新的专用工具箱。

MATLAB 具有二维、三维曲线和三维曲面绘图功能，使用方法十分方便。

#### 1. MATLAB 文件<sup>[39]</sup>的输入输出

文件是程序设计的一个重要概念。所谓文件，就是数据的集合。通常数据以文件的形式存放在计算机的外部存储器上，操作系统以文件为单位对数据进行

管理,也就是说,如果想找到外部存储器上的数据,必须先按文件名找到指定的文件,然后再从该文件中读取数据。要向外部存储器上存储数据也必须建立一个以文件名为标示的文件,才能向它输入数据。

和其它高级语言一样,在对一个文件进行读写之前应该打开该文件,在使用结束后应该关闭该文件。打开的文件在完成读写操作后一般需要立即关闭,删除文件指针,以免未关闭的文件指针造成混乱。

MATLAB 把文件看成字节的序列,根据数据的组织形式,可分为 ASCLL 码文件和二进制文件。在实际应用中,用的最多的是有格式的 ASCLL 码文件。ASCLL 码文件又称为文本文件,它的每一个字节存放一个 ASCLL 码,代表一个字符。

文件位置指针用于对二进制文件的读写操作。当打开一个二进制文件时,用户可调用有关函数将文件指针移动到需要进行读写操作的某个特定的位置,然后便可以照这个文件指针的位置进行读写操作。

表 1 是进行文件操作的函数表

## 2. MATLAB 的矩阵<sup>[40]</sup>运算命令

变量在 MATLAB 语言程序中最基本的单元,是以矩阵的形式存在的。与其他语言不同的是, MATLAB 语言不要求用户在创建变量的时候进行声明,也不需要指定其大小和类型, MATLAB 自动给该变量分配适当的内存。

MATLAB 的变量都以矩阵的形式进行存放,所以对矩阵的操作显得尤为重要。表 2 给出对于矩阵进行操作时的常用函数。

## 3. MATLAB 绘图<sup>[39-41]</sup>命令

前面介绍了 MATLAB 在数值计算方面的强大功能, MATLAB 可以处理大量的原始数据,得出分析后的数据结果。但是很难从离散的数据中得出重要的结论。因此,数据的可视化是人们研究科学、认识世界所不可缺少的手段。

MATLAB 可以给出数据的二维、三维甚至四维的图形表现。 MATLAB 提供了两个层次的图形命令:一种是对图形句柄进行操作的低级图形命令;另一种是建立在低级命令之上的高级命令。

MATLAB 语言提供了一套功能强大的图形程序,为计算过程和结果的可视化提供了极佳的手段。表 3 列出了振动信号处理中的需要经常用到的图形函数。

表 1 文件命令函数

函数名	函数功能
Fopen	打开文件
fclose	关闭文件
Fread	读取二进制的文件
fwrite	将数据写入二进制文件
fscanf	读取有格式文件的数据
fprintf	将数据转换为字符并写入到有格式文件中或显示在计算机屏幕
Fgets	按字符格式读取文件的一行数据
Fgetl	按字符格式读取文件一行数据，但不包括结束符
sscanf	按指定格式从字符串读取数据
sprintf	将格式化的数据写入与字符串中
Fseek	移动位置指针到文件的一指定位置
Ftell	获取当前文件位置指针所在的位置
frewind	重设文件位置指针到文件的开头处
Feof	检查文件位置指针是否到达文件尾部
Ferror	查询 MATLAB 关于文件输入和输出操作出错的信息函数
Save	保存变量到指定的文件
Load	从指定的文件调用变量到工作空间

表 2 矩阵运算命令

函数名	函数功能	函数名	函数功能
Abs	复数模	median	中位值
Real	复数实部	std	标准差
Imag	复数虚部	size	矩阵大小
Angle	相位角	sort	从小到大排序
unwrap	相位角展开	length	向量的维数
Min	最小值	sum	总和
Max	最大值	mod	模除求余
Mean	平均值		

表 3 绘图命令

函数名	函数功能	函数名	函数功能
Figure	创建图形窗口	box	箱形坐标轴设置
Plot	绘制二维折线图形	xabel	添加坐标轴标注
subplot	定义子图形区域	title	添加图形名称
Clf	清除图形窗口	legend	添加图例
plot3	绘制三维折线图形	text	添加文本字符串
Axis	坐标轴设置	hold	图形保持
Grid	坐标网格线设置	zoom	图形缩放

以上介绍了开发振动信号采集与分析系统的过程中应用到主要函数。

## 2.4.2 MATLAB图形用户界面功能

在 windows 操作系统出现之前, 计算机用户面对的界面一直都是以 DOS 为代表的一系列字符, 既单调乏味, 操作又极其不便, 令初学者望而生畏。然而随着 windows 操作系统的到来, 图形用户界面在人机交互方式中逐渐占据了主导地位。图形用界面是计算机用户与计算机或计算机程序进行通信、交互的方式, 是用户与计算机进行信息交流的方式。图形用户界面<sup>[41]</sup>(GUI) 包含窗口、菜单、控制框、对话框等各种图形对象的用户界面。它给用户带来了方便、快捷、实用。

### 1 图形句柄概述

句柄图形是一种面向对象的图形设计系统得概念, 是对图形底层的总称。通过操作图形句柄, 可以很方便地处理 MATLAB 的图形。

MATLAB 语言中的句柄图形对象如表 4 所示。

### 2.控件设计

在进行人机界面的设计过程中, 控件的设计是其基础部分之一。表 5 列出了 MATLAB 控件属性 style 的设置值。

表 4 句柄图形对象函数

句柄图形对象函数	对应的句柄图形
用户界面控件(Uicontrol)	可编程的用户界面控件
用户界面菜单(Uimenu)	图形窗口的可编程菜单
图形窗口(Figure)	图形窗口
用户界面上下文菜单(Uicontextmenu)	与其他图形相联系得上下文菜单
文本(Text)	图形窗口中的文本

表 5 MATLAB 语言 GUI 设计控件的 Style 属性值

控件名	Style 属性值
文本框文件	Edit
静态文本控件	Text
列表框控件	Listbox
按钮控件	Pushbutton
复选框控件	Checkbox
弹出式菜单控件	Popupmenu
图文框控件	Frame
单选按钮控件	Radiobutton

### 3.对话框

在 GUI 图形用户界面设计中，菜单设计和控件设计是两项非常重要的基础设计内容；除此之外，对话框的设计也是极其重要的。对话框是弹出显示的单独专用窗口，用来要求或提供信息。通过实用对话框中的按钮，用户可以通知计算机自己的选择信息，还可以将一些参数传递给计算机，而计算机也可以通过对话框将一些信息反馈给用户。

MATLAB 提供了大量的建立专用对话框的函数，非常方便用户的设计，同时也保证了图形设计界面的规范统一。

表 6 列出了 MATLAB 常用对话框。

表 6 专用对话框函数

对话框函数	对话框类型	对话框函数	对话框类型
Helpdlg	帮助对话框	Questdlg	提问对话框
Inputdlg	输入对话框	Msgbox	消息框对话框
Warndlg	警告对话框	Printdlg	打印对话框
Errordlg	错误提示对话框	Pagedlg	图形位置设置对话框

## 2.5 本章小结

本章介绍了整个系统的总体方案设计。在简单介绍了软件设计的基本思想后，详细介绍了整个系统的模块设计，其中包括硬件系统组成，软件设计平台，各模块的具体功能及其编程实现的主要函数。在后面的章节中将分别介绍各模块的具体设计方法。

### 3 信号采集、显示系统

#### 3.1 PCI-1712 多功能 I/O 卡基本开发方法

通常在 DOS 下编写信号采集与输出程序时,要求程序员对采集卡的各个 I/O 口的基本性能以及编程规则必须有清楚的了解,并且直接对计算机的底层 I/O 口进行读写操作,这样做的结果是计算机的执行效率低且容易出错。研华 PCI-1712 采集卡的驱动程序中包含有一个动态链接 `nwadvntech.dll`,其中包含有一系列对底层 I/O 口进行直接操作的函数,调用这些函数即可完成对 I/O 的操作,方便高效且不易出错。在 MATLAB 中调用这些驱动程序的方法是:在 MATLAB 的命令窗口中键入:`daqregister('advantech')`即可。通过这种方式就可以建立 PCI-1712 采集卡与软件平台 MATLAB 之间的联接,然后就可以利用 MATLAB 的数据采集工具箱编制相应的数据采集程序进行采集。

#### 3.2 数据采集的缓冲技术

随着计算机技术的发展,外设也在发展,速度也在不断提高,但它与 CPU 的速度仍相差甚远。这样就出现了 CPU 处理数据的速度与外设 I/O 速度不匹配的情况。

引入缓冲区的主要目的<sup>[44-45]</sup>:一是缓和 CPU 和 I/O 设备之间速度不匹配的矛盾;二是提高 CPU、通道与 I/O 设备间的并行性。

常规的数据采集系统采用单缓冲<sup>[28-30]</sup>技术,即系统首先在内存开辟一段缓冲区,然后执行数据采集,当一定量的数据点填满缓冲区后,系统停止采集,取出数据,执行处理、显示、存盘等操作。由于受缓冲区容量<sup>[46]</sup>的制约,通常一段时间后必须停止采集,以便进行数据处理等操作,所以,不能长时间实时工作。

针对上述单缓冲的缺陷,本文采用数据采集卡的 FIFO 缓冲区<sup>[46-47]</sup>与 CPU 缓冲区相结合的方法,开发实时数据采集程序。

FIFO(First In First Out)称为先进先出电路,是实现数据先进先出的存储器件,普遍用作数据缓冲区。

FIFO 通常是双端口的存储器,其中一个端口用于写入数据,而另一个端口

用于读出数据。

实时数据采集的具体实现方法<sup>[44-55]</sup>是：数据采集卡采集到的数据首先存储在自身的 FIFO 缓冲区中，然后将其中的一部分调入 PC 机的 CPU 缓冲区中，以供数据采集程序应用。当 CPU 缓冲区中的数据已经全部经过数据采集程序调用之后，那么就可以将这一部分数据进行保存然后从内存中删除掉，进而调入新的数据。由于 FIFO 具有先进先出的特点，那么就可以保证每次调入的数据之间都是连续的，进而实现数据的实时采集。实时数据采集的流程图如图 3.1 所示。

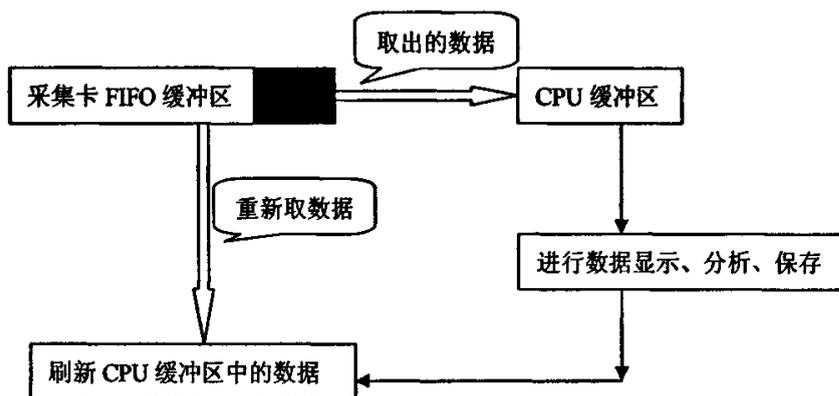


图 3.1 缓冲区实时采集数据示意图

上述图 1 是在缓冲区未满情况下的示意图，全满情况下与此类似。

### 3.3 多线程技术

#### 3.3.1 多线程机制

线程<sup>[45]</sup>是进程内的一条执行路径，它包含独立的堆栈和 CPU 寄存器。多线程是指程序中包含多个执行流，即在一个程序中可以同时运行多个不同的线程来执行不同的任务。一个进程内的所有线程使用同一个 32 位地址空间，每个线程共享所有的进程资源，包括打开的文件、信号标识及动态分配的内存等。线程有优先级别，优先权较低的线程必须等到优先权较高的线程执行完后再执行。

在抢占式多任务 Windows 操作系统下，每个独立线程被分配一些 CPU 时

间片，操作系统以轮转方式向线程提供时间片，由于每个时间片的时间很短，所以线程的切换和调度是非常快的，对用户来说仿佛各个线程是同步执行的。

### 3.3.2 线程的分类

Windows 提供了两种线程[44~45]：第一种为用户界面线程，这种线程通常用于通过窗口接收用户输入，它有自己的消息循环；第二种为工作线程，这种线程可以理解为一段不停工作的代码，用来处理一些长时间的操作，但是它没有消息循环。如果需要在后台作一些简单的计算，则首先应考虑使用工作线程，而当后台线程需要处理比较复杂的任务，确切地说，当后台线程的执行过程会随着实际情况的不同而改变时，就应该使用用户界面线程，以便能对不同的消息作出响应。

### 3.3.3 线程间通信的方式

通常，一个工作线程用于执行程序的某种特定类型的工作，程序自动创建的主线程和工作线程之间需要有一个联系的渠道。线程之间常用的通信方式有三种<sup>[40][45]</sup>：使用全局变量、使用 CEvent 类事件对象以及使用自定义消息。本研究中的通信方式全部采用全局变量通信。

由于进程中的所有线程均可以访问全局变量，所以使用全局变量是最简单的通信方法。具体实现方式为：用 global 定义变量类型。

## 3.4 系统编程实现

### 3.4.1 数据采集工具箱简介

数据采集工具箱里集成了用于数据采集的 M 文件格式的函数以及 MEX 文件格式的动态链接库。数据采集工具箱的主要特征<sup>[48]</sup>是：

1. 提供了将实时测量数据从数据采集硬件采集到 MATLAB 的架构中。支持模拟量输入(AI)、模拟量输出(AO)以及数字量 I/O 子系统，包括模拟量 I/O 实时转换。
2. 用户可以使用数据采集工具箱编辑工具包来创建工具箱尚未具备的硬件的相关函数。

### (1) M 函数

为完成任何一个任务用户必须在 MATLAB 环境下调用 M 函数。一般地，通过 M 函数可以完成以下工作：

- 创建设备对象，设备对象提供了硬件性能的控制方法，通过设备对象用户可以控制采集系统的行为。
- 获取或输出数据。
- 配置属性参数。
- 查看采集状态。

有关数据采集工具箱的 M 函数可以通过输入 `help daq` 来获取函数信息。

### (2) 数据采集引擎技术

数据采集引擎是 MEX 动态链接库文件，其作用是：

- 存储设备对象以及相应的用于控制数据采集过程的属性值。
- 控制事件的同步。
- 控制已获取或待发送数据的存储。

在引擎执行上述任务的过程中，用户可以使用 MATLAB 来执行其他的任务。也就是说，MATLAB 与引擎之间是异步的。

## 3.4.2 数据采集过程

数据采集过程包含了数据采集或输出的所有步骤，这些步骤是：

- 创建设备的一个对象——用户可以使用模拟输入、模拟输出或数字输出创建函数来创建一个设备对象。
- 添加通道或数据线——创建好对象后，必须向对象中添加通道或数据线。模拟量输入和模拟量输出对象中应该添加通道，而数字量输出中应该添加数据线。通道和数据线是硬件设备的基本元素，用户通过它们可以获取或输出数据。
- 配置属性——设定设备对象的行为，用户首先应通过设置函数属性作为相应的值，接着使用相应的值设定属性值。
- 获取或输出数据——为获取或输出数据，用户应执行设备对象。设备对象将按照用户先前配置的属性值或默认的属性值所设定的行为运行。当数据获取后，用户可以使用数据函数从引擎中提取数据。

- 清除——当用户不再执行设备对象时，应使用删除函数将设备对象从内存中清除，并使用清除命令将对象从 MATLAB 工作空间中清除。

### 1. 创建一个数据对象

设备对象是用于访问硬件设备的工具箱组件。本系统开发的过程中需要添加的设备是模拟量输入通道。调用 `analoginput` 函数设置一个模拟量输入设备。

2. 调用函数 `addchannel` 添加模拟量设备的通道。
3. 设置数据采集的 `SampleRate` 等属性值。
4. 调用实时数据采集程序进行数据的实时采集。

图 3.2 和 3.3 是系统的主界面以及数据采集的菜单。



图 3.2 系统的主界面

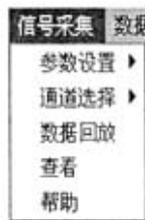


图 3.3 数据采集菜单

## 3.5 数据的查看、显示

### 1. 数据的查看

工程应用中，采集到的数据必须可以进行实时的查看，系统的查看界面如图 3.4、3.5 所示。

## 2. 数据显示

在工程应用中，技术人员关心的是数据中能够对结构产生重大影响的部分数据，诸如数据的最大值、最小值、均值、方差等。同时，数据显示应该可以实现数据的全部显示或者技术人员所需要的部分数据的显示。图 3.4 和图 3.5 给出了数据全部显示、部分显示的主界面。



图 3.4 数据全部显示界面



图 3.5 数据部分显示界面

### 3.6 文件的处理

一个完善的系统必须具备强大的文件处理功能。本系统的研究过程中，文件功能的开发主要依靠 MATLAB 强大的对话框功能进行实现。可以进行文件的打开、保存、另存为、打印、页面设置和退出 MATLAB 系统等功能。文件菜单如图 3.6 所示，保存界面如图 3.7 所示。



图 3.6 文件菜单



图 3.7 文件保存界面

### 3.7 本章小结

本章首先介绍了多功能数据采集卡 PCI-1712 的基本开发方法，然后介绍了 FIFO 缓冲技术的基本原理，并指出了其相对于单缓冲技术的优点并利用此技术开发了实时采集程序，另外还介绍了多线程机制，重点介绍了线程间通信的方式——全局变量。在此基础上，重点介绍了系统的采集与显示等功能。

## 4 信号分析系统

信号是数字信号领域中最基本、最重要的概念。简单地说，信号就是信息的载体，是信息的物理体现。几乎在科学技术的每一领域都要进行信号的处理。信号处理，就是以数值计算的方法对信号进行采集、变换、综合、估计与识别等加工处理。

MATLAB 中的信号处理工具箱就是为信号处理领域开发的专业工具箱，本文依据信号处理工具箱开发信号分析系统。信号分析的主菜单如图 4.1 所示。

### 4.1 数据实时分析原理

在数据分析模块中，数据分析功能的实现主要依据 MATLAB 的信号处理工具箱。MATLAB 的信号处理工具箱具有完善的、强大的数据处理与分析功能，所以保证了编程的高效性以及功能的完整性。

但是仅仅依据 MATLAB 的信号处理工具箱<sup>[33]</sup>是不能实现数据分析的实时性的，本文在研究的过程利用 MATLAB 的库函数——暂停函数实现数据的实时分析。

它实现的原理主要是：首先将采集的一部分信号进行所需要的分析，同时配合 MATLAB 的暂停函数暂停内部程序的运行，主要目的是为了保证进行数据分析时的源数据是实时的。那么这就必须做到暂停函数的暂停时间要与进行数据实时采集的时间间隔是一致的。然后利用编程算法，使得源程序能够实现递归调用即可保证信号分析的实时性。

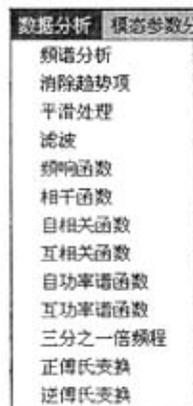


图 4.1 数据分析主菜单

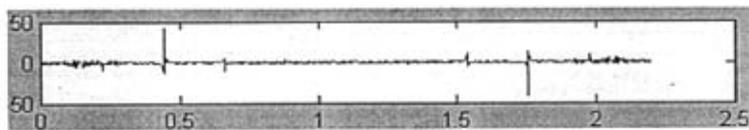
## 4.2 信号的预处理

信号的预处理包括：消除多项式趋势项和平滑处理。消除多项式趋势项的主要目的是消除偏离基线的信号，提高信号的正确性，常用的方法是最小二乘法。具体实现的程序如下：

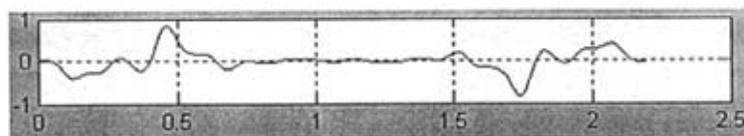
```
%最小二乘法消除多项式趋势项
m=4; %拟和阶数
x=d1(:,4);
n=length(x); %计算多项式系数
a=polyfit(t1,x,m); %用 x 减去多项式系数 a 生成的趋势项。
y=x-polyval(a,t1);
f=imag(fft(y));
subplot(413);
plot(t1,f);
title('虚部曲线');
m1=150; %平滑次数
%x=d1(:,2);
n1=length(f); %将 x 赋给 a
a=f; %循环 m 次进行平滑处理
for k=1:m1
b(1)=(3*a(1)+2*a(2)+a(3)-a(4))/5;
b(2)=(4*a(1)+3*a(2)+2*a(3)+a(4))/10;
for j=3:n-2
b(j)=(a(j-2)+a(j-1)+a(j)+a(j+1)+a(j+2))/5;
end
b(n-1)=(a(n-3)+2*a(n-2)+3*a(n-1)+4*a(n))/10;
b(n)=(-a(n-3)+a(n-2)+2*a(n-1)+3*a(n))/5;
a=b;
end
y1=a; %将 a 赋给 y
```

```
%subplot(211);  
%plot(t1,x);  
%grid on;  
subplot(414);  
plot(t1,y1);  
title('平滑处理后的虚部曲线');  
grid on;  
return
```

信号平滑处理的目的是消除信号中的噪声，提高振动曲线的光滑度。主要的方法有平均法和五点三次平滑法等方法。噪声信号经过消除多项式趋势项和平滑处理后的图形如图 4.2 所示。



(a) 信号的原始曲线



(b) 经过消除趋势项和平滑处理后的曲线

图 4.2 消除多项式趋势项和平滑处理

### 4.3 信号的时域处理

信号的时域处理主要是对时域波形的分析处理。滤波是时域信号处理的主要内容。本系统选择软件滤波的方式进行信号预处理，使用 MATLAB 设计了四种均具有低通、高通、带通和带阻滤波功能的 IIR 数字滤波器。

#### 4.3.1 IIR 数字滤波器的 MATLAB 设计

由于 FIR<sup>[48][55]</sup>数字滤波器设计过程较繁,幅频特性较差,且完成同样运算所需较高的阶数,尤其是在带通滤波器条件下,运算工作量大,系数灵敏度高,而 IIR 数字滤波器设计容易,具有良好的幅频特性,且所需阶数较低,运算量较小,所以本系统选择 IIR 数字滤波器。

IIR 数字滤波器的设计方法很多,如双线性变换法,脉冲响应不变法,原型转换设计法,直接法等等。随着 MATLAB 软件尤其是 MATLAB 的信号处理工具箱的不断完善,不仅数字滤波器的计算机辅助设计有了可能,而且还可以使设计达到最优化。

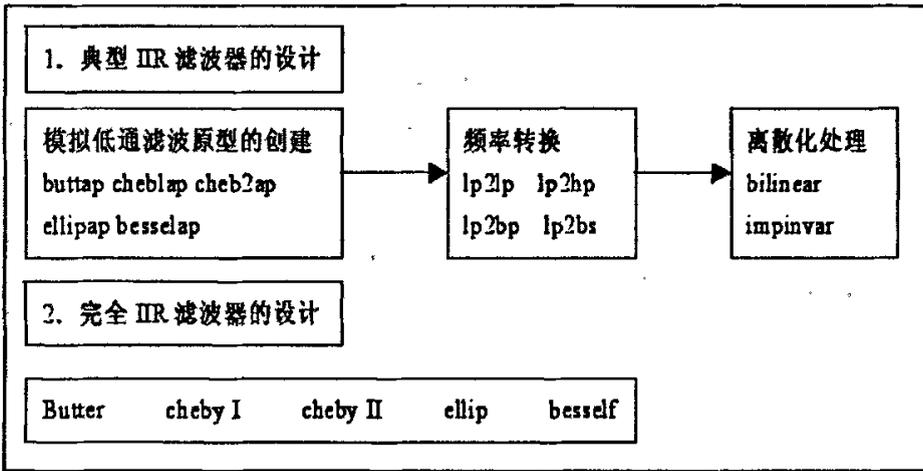


图 4.3 滤波器设计方法

MATLAB 信号处理工具箱提供了几个直接设计 IIR 数字滤波器的函数,它们把典型滤波器的几个步骤集成为一个整体,直接调用就可以设计滤波器了。这些函数与数字滤波器阶数选择配合使用,为特定的滤波器的设计返回所需的阶数和固有频率,这为我们设计滤波器提供了非常大的方便。图 4.2 是典型滤波器设计方法和完全滤波器设计方法的框图。

### 1. 巴特沃斯滤波器

巴特沃斯滤波器的特点是具有通带内最平坦的幅度特性,而且随着频率升高呈单调递减,因此巴特沃斯滤波器又称为“最平”的幅频响应滤波器。

N 阶低通巴特沃斯滤波器的特性函数为

$$|H_c(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}}$$

$N$  为滤波器的阶数,  $\Omega_c$  为通带宽度或 3dB 带宽。当阶数增大时, 特性愈接近于理想的矩形幅频特性  $|H_s(\Omega)|^2$ 。

## 2. 切比雪夫滤波器

巴特沃斯滤波器的频率特性在通带和阻带内部都是随着频率单调变化的, 因而如果在通带边缘满足指标, 则在通带内肯定会有富裕量, 也就是会超过设计的指标要求, 造成滤波器的阶数  $N$  比较高, 所以更有效的办法是将指标的精度要求均匀地分布在通带内, 或均匀分布在阻带内, 或同时均匀分布在通带与阻带内, 这时可以设计出满足设计要求, 阶数又比较低的滤波器, 这种精度均匀分布的办法可以通过等波纹特性的逼近函数来完成。

切比雪夫滤波器的幅度特性就是在一个频带中(通带或阻带)具有这种等波纹特性。一种是在通带中是等波纹的, 在阻带中是单调的, 称为切比雪夫 I 型; 一种是在通带内是单调的, 在阻带内是等波纹的, 称为切比雪夫 II 型。

切比雪夫 I 型滤波器的特性函数<sup>[39-41]</sup>为:

$$|H_s(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 C_N^2\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)}$$

其中,  $\varepsilon$  为小于 1 的正数, 它是表示通带波纹大小的一个参数,  $\varepsilon$  越大, 波纹也越大。  $\frac{\Omega}{\Omega_c}$  为  $\Omega$  对  $\Omega_c$  的归一化频率,  $\Omega_c$  为截止频率, 也是滤波器的某一

衰减分贝处的通带宽度。  $C_N(x)$  是  $N$  阶切比雪夫多项式, 定义为

$$C_N(x) = \begin{cases} \cos(N \cos^{-1} x), & |x| \leq 1 \\ ch(Nch^{-1} x), & |x| > 1 \end{cases}$$

切比雪夫 II 型滤波器的特性函数为

$$|H_s(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \left[ \frac{C_N(\Omega_n)}{C_N(\Omega_n/\Omega)} \right]^2}$$

其中  $\Omega_n$  是阻带衰减达到规定数值的最低频率。

## 3. 椭圆滤波器

切比雪夫滤波器在通带范围内具有良好的等波纹特性, 但是在通带范围以

外的特性与巴特沃斯滤波器相似，都是单调递减的。因此，过渡带的特性虽有好转，但是并不理想，它的主要原因在于两者的系统函数在截止频率的附近没有有限个零点，其零点在无限远处。考尔在 1931 年提出了采样有限零点设计的滤波器能够更好地逼近理想的低通滤波器特性。由于这种方法在确定零点位置时与椭圆函数的许多特性有关，所以称之为椭圆低通滤波器。

椭圆滤波器的特性函数为

$$|H(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 U_N^2\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)}$$

其中  $U_N(x)$  为  $N$  阶雅可比椭圆函数。阶数  $N$  由下式确定

$$N = \frac{K(k)K(\sqrt{1-k_1^2})}{K(k_1)K(\sqrt{1-k^2})}$$

其中

$$K = \frac{\Omega_p}{\Omega_s}, \quad k_1 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{A^2 - 1}}, \quad K(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - x^2 \sin^2 \theta}}$$

下面以椭圆滤波器为例介绍 IIR 数字滤波器的 MATLAB 设计具体方法。

### 1. 滤波器阶数选择

滤波器阶数的选择在整个滤波器设计中占有十分重要的地位和作用。可以利用  $[n, Wn] = \text{ellipord}(Wp, Ws, Rp, Rs)$ <sup>[39]</sup> 方式获得符合要求特性的椭圆滤波器最小阶数  $n$  以及固有频率  $Wn$ 。设计的要求是在通带内的衰减不超过  $Rp$ ，在阻带内的衰减不小于  $Rs$ ，通带和阻带的截止频率分别是  $Wp$  和  $Ws$ ，它们都是归一化的频率值，范围是  $[0, 1]$ ，其中 1 对应的是采样频率的一半（Nyquist 频率）。

### 2. 滤波器设计

可以利用  $[b, a] = \text{ellip}(n, Rp, Rs, Wn)$  方式设计出阶数为  $n$ 、截止频率为  $Wn$ 、通带波纹最小衰减为  $Rp$ 、阻带波纹最小衰减为  $Rs$  的数字低通滤波器，它的返回值  $a$ 、 $b$  分别是阶数为  $n+1$  的向量，表示数字低通滤波器的系统函数的分子和分母的多项式系数。滤波器的系数可以表示为

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}}$$

函数的截止频率  $W_n$  是指通带的边缘频率，在那里滤波器的幅值响应为  $-R_p$  dB，归一化的  $W_n$  的取值范围是 0 到 1，其中 1 对应的是采样频率的一半 (Nyquist 频率)。滤波器的过渡带宽取决于 3 个参数  $n$ 、 $R_p$ 、 $R_s$ ，当  $n$  不变时， $R_p$  越小， $R_s$  越大，过渡带就越宽。如果  $W_n$  是一个含有两个元素的向量  $[w1\ w2]$ ，则 `ellip` 函数返回值是阶数为  $2n$  的带通滤波器的系统函数有理多项式的系数，滤波器的通带范围为  $w1 < W < w2$ 。可以利用 `[b,a]=ellip(n, Rp, Rs, Wn, 'ftype')` 方式设计高通和带阻滤波器，其中参数 `ftype` 的形式确定了滤波器的形式。当它为 'high' 时，得到的滤波器为  $n$  阶的、截止频率为  $W_n$  的高通滤波器；当它为 'stop' 时，得到的滤波器是阶数为  $2n$ 、阻带范围为  $w1 < W < w2$  的带阻滤波器。

使用类似的方法，分别将 `buttord` 和 `butter` 函数、`cheblord` 和 `cheby1` 函数、`cheb2ord` 和 `cheby2` 函数配合使用就可方便地设计出巴特沃斯滤波器、切比雪夫 I 型滤波器以及切比雪夫 II 型滤波器。

### 3. 滤波器实现

可以使用 `filter` 函数来实现利用 IIR 滤波器对数据进行滤波，`filter` 函数是以转置直接 II 型结构 (见图 4.4) 实现的。

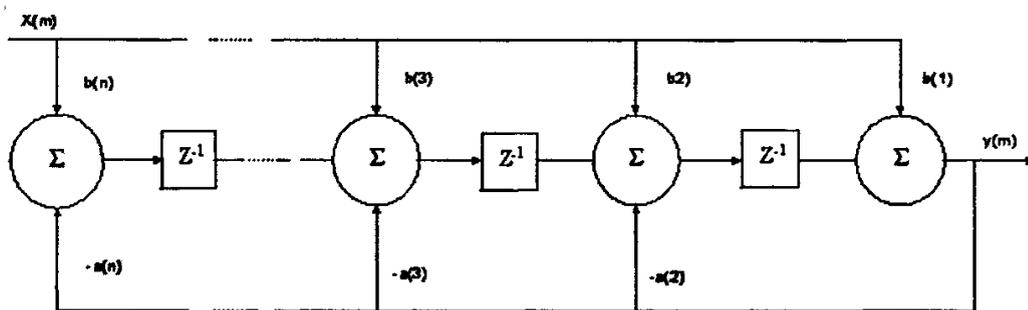


图 4.4 转置直接 II 型结构

最为简单的方式是：`y=filter(a,b,x)`，这样就可用由系数向量  $a$  和  $b$  描述的滤波器对向量  $x$  中的数据进行滤波，得到滤波后的数据向量  $y$ 。如果  $x$  是一个矩阵，则按列对  $x$  进行滤波。 $a(1)$  不能等于 0，如果  $a(1)$  不等于 1，`filter` 函数会根据  $a(1)$  对滤波器的系数进行归一化。

图 4.5 显示了使用图 4.3 所示参数设计的椭圆滤波器的滤波效果，处理的是以幅值为 5V、中心频率为 1KHZ、5 个波峰、100 点描绘一周期的窄带波作

为激励信号，采集得到的传感器信号。由图可见，滤波效果非常好，完全滤除了工频干扰信号。

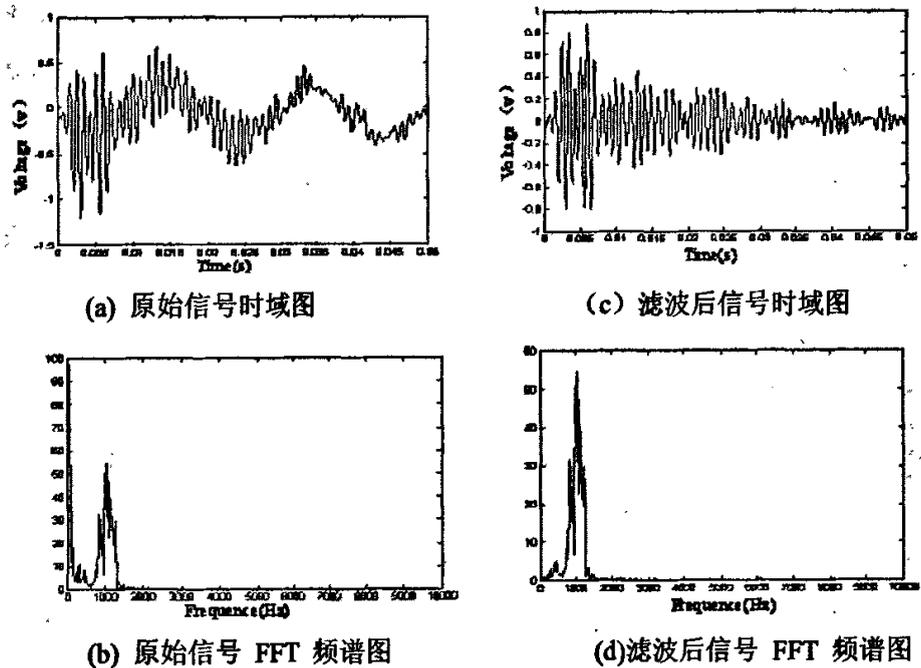


图 4.5 椭圆滤波器滤波效果图

## 4.4 信号的频域处理

频域处理的主要方法为傅立叶变换<sup>[48]</sup>。傅立叶变换的结果称为傅氏谱函数，是有实部和虚部组成的复函数。傅氏谱的模称为幅值谱，相角称为相位谱。振动信号的幅值谱可用来描述振动的大小随频率的分布情况，相位谱可以反映振动信号的各频率成分相位角的分布情况。随机振动信号的频域处理以建立在数理统计基础上的功率谱函数为基本函数。通过自功率谱函数可以得到频响函数和相干函数。频响函数是试验模态参数频域识别的基本数据。相干函数则是评定频响函数估计精度的一个重要参数。

### 4.4.1 功率谱估计

频谱分析和数字滤波是数字信号处理的两个主要分支，它们之间存在着密切的联系。信号处理的目的在于分析并利用信号的特征。功率谱估计就是基于有限的信号寻找信号、随机过程或系统的频率成分。随机信号是无始无终的，

所以其傅立叶变换并不存在，因为它不满足绝对可积的条件。因此需要研究其在频域上的功率分布情况，即功率谱密度。

功率谱估计技术有很长的历史，在近 30 年又得到了飞速的发展，其内容和方法不断更新。一般来说，功率谱估计可分为经典谱估计和现代谱估计。而经典谱估计又可分为直接法与间接法；现代谱估计大致可分为参数模型谱估计和非参数模型谱估计。在本研究中重点使用经典谱估计法。下面详细介绍经典谱估计法。

### 1 功率谱<sup>[46-47]</sup>概念

平均周期图法的自功率谱密度函数定义为

$$S_{xx}(k) = \frac{1}{MN_{FFT}} \sum_{i=1}^M X_i(k) X_i^*(k)$$

式中： $X_i(k)$  为一随机振动信号的第  $i$  个数据段的傅立叶变换； $X_i^*(k)$  为  $X_i(k)$  的共轭复数； $M$  为平均次数。

自功率谱密度函数是实函数，是描述随机振动的一个重要参数。它展现振动信号各频率处功率的分布情况，使我们知道哪些频率是主要的。自功率谱被用来确定结构或机械振动的自振特性。在设备故障监测中，还可根据不同时段自功率谱的变化来判断故障发生的征兆和寻找可能发生故障的原因。

### 2. 自功率谱密度的编程实现

作用：估计信号的自功率谱函数。

函数形式： $P_{xx} = \text{pburg}(x, p, \text{nfft}, F_s)$

其中： $x$  为输入信号向量； $p$  为所使用滤波器的阶数； $\text{nfft}$  为傅立叶变换的长度，默认值为 256； $F_s$  为制定信号的采样频率。

利用上述函数编程实现的自功率谱界面如图 4.6 所示。

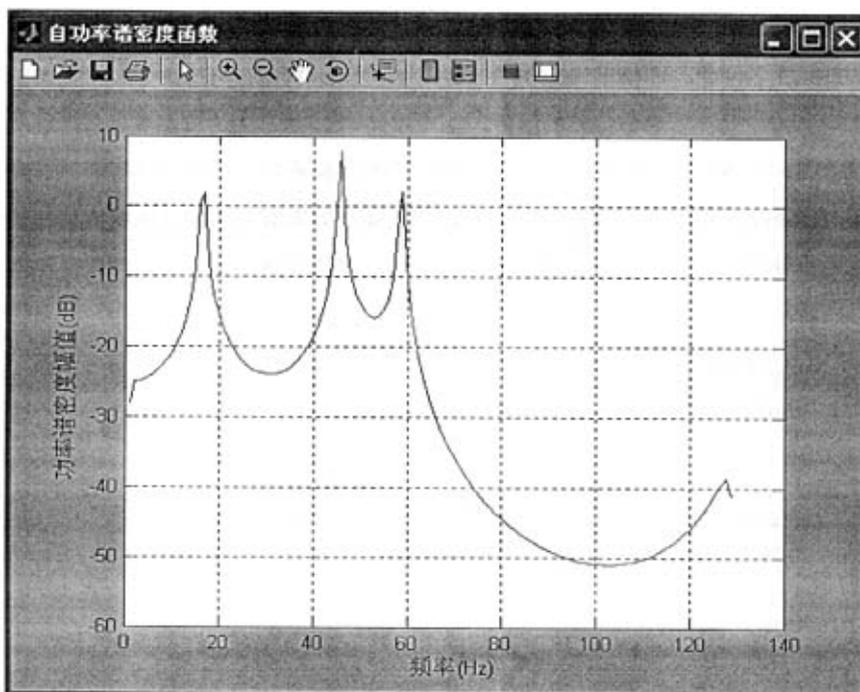


图 4.6 振动信号的自功率谱图

## 4.4.2 频响函数

### 1. 频响函数概念

单自由粘性阻尼系统时域中的运动微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (4.1)$$

对上式两边进行拉普拉斯 (Laplace) 变换, 并设初始值为零 (因为系统的特性与初始值无关), 即得拉氏域中的代数方程

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = F(s) \quad (4.2)$$

令

$$Z(s) = ms^2 + cs + k$$

它具有刚度的性质, 故称为系统的动刚度。在一定的激励力作用下, 其数值与系统的响应  $X(s)$  成反比, 即具有系统振动的特性, 故又称为系统的机械阻抗<sup>[48]</sup>, 简称阻抗。其倒数称为机械导纳, 简称导纳, 也称传递函数, 用  $H(s)$  表

示, 如下:

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (4.3)$$

由式 (3) 得

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)}$$

拉氏域中的传递函数变为傅氏域中的频响函数, 令  $s=j\omega$ , 则频响函数为

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + j\omega c + k}$$

由上式可见, 频响函数包含了幅值和相位两方面的信息。

若输入为力, 输出为运动位移, 则位移导纳、传递函数、频响函数都具有柔度 (刚度的倒数) 的性质, 故又都称为动柔度。在稳态线性振动的讨论中, 这三个名称经常混用, 并不严格加以区别。

## 2. 工程计算公式

在工程计算中, 频响函数为互功率谱函数除以自功率谱函数得到的商, 即

$$H(k) = \frac{S_{xy}(k)}{S_{xx}(k)}$$

式中:  $S_{xy}(k)$  和  $S_{xx}(k)$  分别为使用谱估计得到的随机信号的互功率谱密度函数和自功率谱密度函数。

频响函数是复函数, 它是被测系统的动力特性在频域内的表现形式, 也就是被测系统本身对输入信号在频域中的传递性的描述。输入信号的各频率成分通过该系统时, 频响函数对它们一些频率进行放大, 另一些频率进行了衰减, 经过加工后得到输出信号的新的频率成分的分布。因此, 频响函数对结构的动力特性测试具有特殊的重要意义。

## 3. 编程实现

函数调用形式:  $T_{xy} = tfe(x, y, nfft, Fs, window, noverlap)$

式中:  $x$  为信号的输入向量;  $y$  为信号的输出向量;  $nfft$  为傅立叶变换的长度;  $Fs$  为采样频率;  $window$  为所加的窗函数;  $noverlap$  为向量  $x$  分段时重叠的采样值;

调用上述函数进行测试得到的频响函数图如图 4.7 所示:

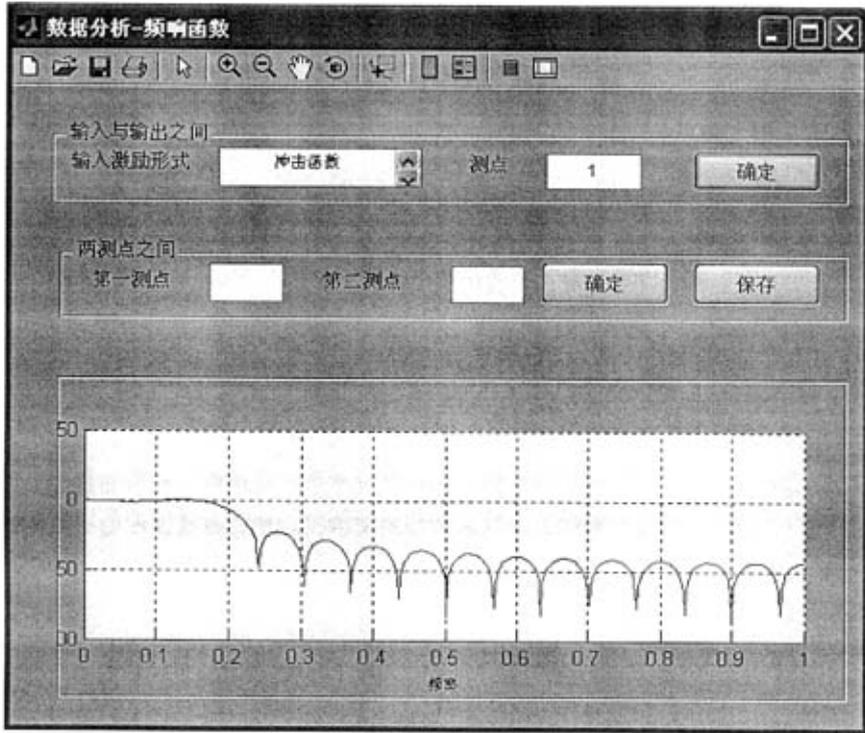


图 4.7 频响函数图

### 4.4.3 相干函数

#### 1. 相干函数概念

相干函数为互功率谱密度函数的模的平方除以激励和响应得自谱乘积所得到的商，即

$$C_{xy}(k) = \frac{|S_{xy}(k)|^2}{S_{xx}(k)S_{yy}(k)}$$

式中： $S_{xx}(k)$ 和 $S_{yy}(k)$ 分别为处理得到的随机振动信号的激励信号和响应信号的自功率谱密度函数的估计； $S_{xy}(k)$ 为激励与响应信号的互功率谱密度估计。

相干函数是两个随机变量在频域内相关程度的指标。对于一个随机振动系统，为了评价输入信号与输出信号的因果性，即输出信号中的频率响应中有多少是由输入信号的激励引起的，就可以用相干函数来表示。通常，在随机振动测试中，计算出来的相干函数的值为0~1之间的实数。越接近1，说明噪声的影

响越小，频响函数的估计结果越好。

## 2.编程实现

作用：估计两信号间相关函数平方的幅值。

函数调用形式： $C_{xy}=\text{cohere}(x, y, \text{nfft}, F_s, \text{window}, \text{noverlap})$

式中： $x$  为信号的输入向量； $y$  为信号的输出向量； $\text{nfft}$  为傅立叶变换的长度； $F_s$  为采样频率； $\text{window}$  为所加的窗函数； $\text{noverlap}$  为向量  $x$  分段时重叠的采样值；

调用上述函数进行测试得到的相干函数图如图 4.8 所示：

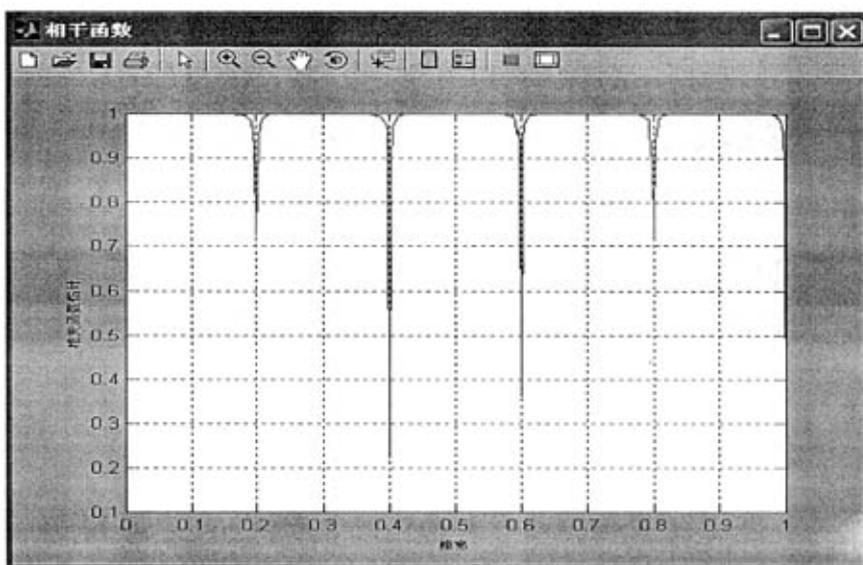


图 4.8 相干函数图

## 4.5 本章小结

本章介绍了信号分析模块开发的具体方法和实现的结果，主要包括：

- 重点介绍了实时数据分析实现的原理。
- 简单介绍了信号的预处理——消除多项式趋势项和平滑处理。
- 重点介绍了信号的时域处理方法中的滤波器的设计方法。
- 对于信号的频域处理方法，主要介绍了信号的自功率谱函数、频响函数和相干函数的基本原理及实现的方法。

## 5 模态分析系统

### 5.1 模态分析理论基础

系统的动态特性是指系统随频率、刚度、阻尼变化的特性，那么就首先介绍一下模态参数。以多自由度无阻尼自由振动<sup>[62]</sup>为例介绍这些基本概念。

多自由度系统的自由振动方程：

$$[M]\ddot{\{x\}} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (5.1)$$

设式 (5.1) 的解为

$$\{x\} = \{X\} \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (5.2)$$

式中  $X_i$  为振幅， $\omega_n$  为固有频率。将上式代入式 (5.1)，可得如下的振型方程：

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{X\} = \{0\} \quad (5.3)$$

式中  $\{X\}$  称为特征向量。上式的求解问题，称为与  $[K]$ 、 $[M]$  有关的特征值问题。

为将其化为标准的特征值问题的振型方程，用  $[M]^{-1}$  前乘式 (5.3) 得：

$$([S] - \lambda [I])\{X\} = \{0\} \quad (5.4)$$

式中  $[S] = [M]^{-1}[K]$  称为系统矩阵；

$\lambda = \omega_n^2$  称为系统矩阵  $[S]$  的特征值，简称特征值。

#### 1. 固有频率

要使式 (5.4) 中振幅矢量  $\{X\}$  不全为零（全为零不是振动）， $\{X\}$  的系数行列式须等于零：

$$|[S] - \lambda [I]| = 0 \quad (5.5)$$

上式称为频率方程或特征方程。其展开式是  $\lambda$  的  $n$  次代数方程，方程的  $n$  个  $\lambda_i$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n$ ) 即系统的特征值。特征值  $\lambda_i$  的平方根就是系统的  $n$  个固有频率  $\omega_i$ 。

由于系统的  $[M]$  是正定的实对称矩阵， $[K]$  是正定的或半正定的实对称阵，系统只能在稳定平衡位置附近作微幅振动，故从式 (5.5) 解得的  $n$  个特征值  $\lambda_i$  都

是正实数。固有频率按从大到小的顺序排列为

$$0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$$

各固有频率只决定于系统本身的物理性质。

## 2. 主振型

将求得各特征值  $\lambda_i$  代入式 (5.4)，可得与  $\lambda_i$  相应的  $\{X^i\}$ 。又因

$$([S] - \lambda_i [I])\{X^i\} = \{0\} \quad (5.6)$$

是齐次方程，其系数行列式为零时，各  $\{X^i\}$  的绝对值不能确定。但其相对比值

$$X_1^i : X_2^i : X_3^i : \dots : X_n^i$$

是完全确定的。这说明，当系统按某一固有频率  $\omega_i$  作谐振时，各点振幅之间有与  $\omega_i$  相应的确定比值  $\{X^i\}$ ，这一比值称为系统矩阵  $[S]$  的特征向量，也称主振型、振型矢量或固有振型，简称振型，振型是自由振动的特性，与激振位置无关。

于是，对于  $n$  个自由度的振系，总能找到  $n$  个固有频率（或特征值）以及相应得  $n$  个主振型（或特征矢量）。这是与单自由度振系的一个主要区别。

## 3. 主振动

将各  $\omega_i$  和  $X_j^i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 分别代回所设的 (5.1)，即得  $n$  组谐振动

$$x_j = X_j^i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

上式说明，各质点均以同一  $\omega_i$  和  $\varphi_i$  作谐振，在每一周期的振动过程中，各点都同时经过各自的平衡位置，又同时达到各自的最大振幅。各点位移之比永远是一个定值，即第  $i$  阶主振型。

如初始条件符合第一阶主振型，则各质点将只是以  $\omega_1$  作谐振

$$x_j = X_j^1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

作第一阶主振动，此时的振型称为第一阶振型。

同样，如初始激励符合第二阶主振型，则各质点将完全以  $\omega_2$  作第二阶主振动，此时的振型称为第二阶振型。

$n$  个自由度的振系有  $n$  个振型，可能产生  $n$  个主振动。

## 5.2 模态参数识别法原理

在系统的模态参数识别模块，作者编写了模态参数频域法和时域法中的常用方法的识别程序，主要包括的方法如图 5.1 所示。在系统的测试阶段，主要采用了其中的频域法中有理多项式识别法和时域法中的 ITD 识别法<sup>[63-65]</sup>，并将两种方法的识别结果作了比较，验证了程序的可行性。下面介绍上述两种方法的原理，其它识别法的原理请参考相关文献。

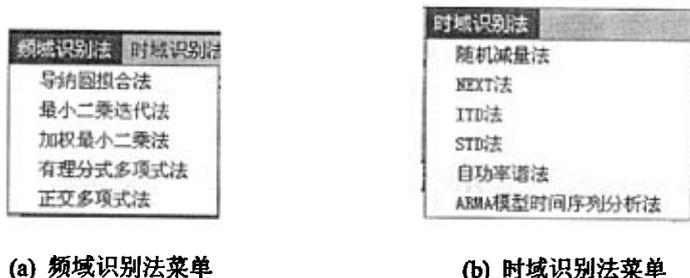


图 5.1 模态参数识别法

### 5.2.1 有理多项式识别法

有理分式多项式法也称 Levy 法或幂多项式法。用该方法进行模态参数识别的数学模型采用频响函数的有理分析形式，由于未使用简化的模态展式，理论模型是精确的，因而有较高的识别精度。一个多自由度粘性阻尼系统线性系统的传递函数可表示为

$$H(s) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{A_k}{s - s_k} + \frac{A_k^*}{s - s_k^*} \right) = \sum_{k=1}^{2N} \frac{A_k}{s - s_k} \quad (5.7)$$

将式 (5.7) 用有理分式多项式来表示，可写成

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_{2N}s^{2N}}{b_0 + b_1s + \dots + b_{2N}s^{2N}} = \frac{C(s)}{D(s)} \quad (5.8)$$

式中：N 为模态阶数； $a_k$  和  $b_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, 2N$ ) 为待定系数，均为有理数。

令  $j\omega = s$ ，并且令  $b_{2N} = 1$ ，则得到频响函数：

$$H(j\omega) = \frac{a_0 + a_1(j\omega) + \dots + a_{2N}(j\omega)^{2N}}{b_0 + b_1(j\omega) + \dots + b_{2N-1}(j\omega)^{2N-1} + (j\omega)^{2N}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum_{k=0}^{2N} a_k (j\omega)^k}{\sum_{k=0}^{2N-1} b_k (j\omega)^k + (j\omega)^{2N}} \\
 &= \frac{C(j\omega)}{D(j\omega)} \tag{5.9}
 \end{aligned}$$

对应一系列频率点  $\omega = \omega_i (i = 1, 2, \dots, L)$ ，实测频响函数值  $\bar{H}_i$  与理论频响函数值  $H(j\omega_i)$  之间的差值是一个误差函数  $\bar{e}_i$ ，表示如下：

$$\bar{e}_i = \frac{C(j\omega_i)}{D(j\omega_i)} - \bar{H}_i \tag{5.10}$$

通过以下的修改，将误差函数做线性处理。在式 (5.10) 的等式两边乘以  $D(\omega_i)$ ，即

$$e_i = \bar{e}_i D(\omega_i) = \bar{e}_i \left[ \sum_{k=0}^{2N-1} b_k (j\omega_i)^k + (j\omega_i)^{2N} \right] \tag{5.11}$$

式中： $e_i$  为加权误差函数。

由式 (5.11) 可导出：

$$\begin{aligned}
 e_i &= C(j\omega_i) - \bar{H}_i D(\omega_i) \\
 &= \sum_{k=0}^{2N} a_k (j\omega_i)^k - \bar{H}_i \left[ \sum_{k=0}^{2N-1} b_k (j\omega_i)^k + (j\omega_i)^{2N} \right]
 \end{aligned}$$

所有  $L$  个对应于频率点  $\omega = \omega_i (i = 1, 2, \dots, L)$  的加权误差函数构成一个误差向量：

$$\{e\} = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_L]^T$$

式中：角标 T 表示转置。

将加权误差向量的方程组表示为矩阵形式：

$$\{e\}_{L \times 1} = [P]_{L \times (2N+1)} \{a\}_{(2N+1) \times 1} - [T]_{L \times 2N} \{b\}_{2N \times 1} = \{w\}_{L \times 1}$$

其中

$$[P]_{L \times (2N+1)} = \begin{bmatrix} 1 & (j\omega_1) & (j\omega_1)^2 & \dots & (j\omega_1)^{2N} \\ 1 & (j\omega_2) & (j\omega_2)^2 & \dots & (j\omega_2)^{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (j\omega_L) & (j\omega_L)^2 & \dots & (j\omega_L)^{2N} \end{bmatrix}$$

$$[T]_{L \times 2N} = \begin{bmatrix} \bar{H}_1 & (j\omega_1)\bar{H}_1 & (j\omega_1)^2\bar{H}_1 & \dots & (j\omega_1)^{2N-1}\bar{H}_1 \\ \bar{H}_2 & (j\omega_2)\bar{H}_2 & (j\omega_2)^2\bar{H}_2 & \dots & (j\omega_2)^{2N-1}\bar{H}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{H}_L & (j\omega_L)\bar{H}_L & (j\omega_L)^2\bar{H}_L & \dots & (j\omega_L)^{2N-1}\bar{H}_L \end{bmatrix}$$

$$\{a\}_{(2N+1) \times 1} = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{2N}]^T$$

$$\{b\}_{2N \times 1} = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{2N-1}]^T$$

$$\{w\}_{L \times 1} = \begin{Bmatrix} (j\omega_1)^{2N} \bar{H}_1 \\ (j\omega_2)^{2N} \bar{H}_2 \\ \dots \\ (j\omega_L)^{2N} \bar{H}_L \end{Bmatrix}$$

定义目标函数为

$$E = \{e\}^H \{e\}$$

其中角标 H 表示共轭转置。

采用最小二乘法，使 E 最小，即

$$\frac{\partial E}{\partial \{a\}} = \{0\}, \frac{\partial E}{\partial \{b\}} = 0$$

可以导出以下方程组

$$\begin{bmatrix} [C] & [B] \\ [B]^T & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{a\} \\ \{b\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{g\} \\ \{f\} \end{Bmatrix}$$

其中

$$\begin{cases} [B]_{(2N+1) \times 2N} = -\text{Re}([P]^H [T]) \\ [C]_{(2N+1) \times (2N+1)} = [P]^H [P] \\ [D]_{2N \times 2N} = [T]^H [T] \\ \{g\}_{(2N+1) \times 1} = \text{Re}([P]^H \{w\}) \\ \{f\}_{2N \times 1} = \text{Re}([T]^H \{w\}) \end{cases} \quad (5.12)$$

通过解式方程组，可求得待定系数  $a_k (k = 0, 1, 2, \dots, 2N)$  和  $b_k (k = 0, 1, 2, \dots, 2N - 1)$ 。

(1) 为求得模态固有频率和阻尼比，需要求解传递函数的极点，可令

$$D(s) = b_0 + b_1 s + \dots + b_{2N-1} s^{2N-1} + s^{2N} = 0 \quad (5.13)$$

解上列高次方程，可求出  $N$  对复根  $s_i$  和  $s_i^*$ ，由于

$$\begin{cases} s_i = -\varepsilon_i \omega_i + j \omega_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2} \\ s_i^* = -\varepsilon_i \omega_i - j \omega_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2} \end{cases} \quad (5.14)$$

由  $s_i$  和  $s_i^*$  则可解出固有频率  $\omega_i$  和阻尼比  $\varepsilon_i$

$$\begin{aligned} \omega_i &= \sqrt{s_i s_i^*} \\ \varepsilon_i &= \frac{s_i + s_i^*}{2\omega_i} \end{aligned} \quad (5.15)$$

为计算模态振型，需要先求出留数。设  $q$  点处激励  $p$  点响应的传递函数  $H_{pq}(s)$  的第  $r$  阶留数为  $A_{rpq}$ ，可用下列公式计算留数

$$A_{rpq} = \lim_{s \rightarrow s_r} H_{pq}(s) \cdot (s - s_r) = \frac{C(s)}{D(s)} (s - s_r) \Big|_{s=s_r} \quad (r = 1, 2, \dots) \quad (5.16)$$

振型向量可以通过对一系列响应测点求出的留数处理得到。对于一个有  $M$  个响应测点的结构，首先需要从  $M$  个对应同一阶模态的留数中找出绝对值最大的测点，假设该点是测点  $m$ ，对应第  $r$  阶模态的归一化复振型向量可由下列公式求出

$$\{\phi_r\} = [A_{r1q} \quad A_{r2q} \quad \dots \quad A_{rMq}]^T / A_{rmq} \quad (5.17)$$

对于粘性比例阻尼结构，对应的第  $r$  阶模态的归一化实振型向量可由下列公式求出

$$\{\phi_r\} = [\text{Im}(A_{r1q}) \quad \text{Im}(A_{r2q}) \quad \dots \quad \text{Im}(A_{rMq})]^T / \text{Im}(A_{rmq}) \quad (5.18)$$

## 5.2.2 ITD识别法

ITD 法 (The Ibrahim Time Domain Technique) 是 S. R. Ibrahim<sup>[66-69]</sup> 于 20 世纪 70 年代提出的一种也能够结构自由振动响应的位移、速度或加速度时域信号进行模态参数识别的方法。ITD 法<sup>[63]</sup>的基本思想是粘性阻尼线性系统多自

自由度系统的自由衰减响应可以表示为其个阶模态的组合理论为基础, 根据测得的自由衰减响应信号进行三次不同延时采样的采样, 结构自由响应采样数据的增广矩阵, 即自由衰减响应数据矩阵, 并由响应与特征值的复指数关系, 简历特征矩阵的数学模态, 求解特征值问题, 得到数据模型的特征值的特征向量。再根据模型特征值与振动系统特征值的关系, 求解出系统的模态参数。以下作具体介绍。

一个多自由度系统的自由振动响应的运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (5.19)$$

假定式 (5.19) 的解可以表示为

$$\{x(t)\}_{N \times 1} = [\varphi]_{N \times 2N} \{e^{s t}\}_{2N \times 1} \quad (5.20)$$

其中

$$\{x(t)\} = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad \dots \quad x_N(t)] \quad (5.21)$$

$$[\varphi] = [\{\phi_1\} \quad \{\phi_2\} \quad \dots \quad \{\phi_N\}] \quad (5.22)$$

$$\{e^{s t}\} = [e^{s_1 t} \quad e^{s_2 t} \quad \dots \quad e^{s_{2N} t}] \quad (5.23)$$

式中:  $\{x(t)\}$  为系统的自由振动响应向量;  $[\varphi]$  为系统的振型矩阵即特征向量矩阵;  $S_r$  为系统的第  $r$  阶特征值;  $N$  为系统的自由度数, 也是系统的模态阶数。

因此将式 (5.20) 代入 (5.19), 得

$$(s^2[M] + s[C] + [K])[\varphi] = 0 \quad (5.24)$$

对于小阻尼的线性系统, 方程的特征根  $S_r$  是复数, 并以共轭复数的形式成对出现, 即

$$\begin{aligned} s_r &= -\varepsilon_r \omega_r + j \omega_r \sqrt{1 - \varepsilon_r^2} \\ s_r^* &= -\varepsilon_r \omega_r - j \omega_r \sqrt{1 - \varepsilon_r^2} \end{aligned} \quad (5.25)$$

式中:  $\omega_r$  为对应第  $r$  阶模态的固有圆频率;  $\zeta_r$  为响应的阻尼比。

于是系统的第  $i$  测点在  $t_k$  时刻的自由振动响应可表示为各阶模态单独响应的集合形式:

$$x_i(t_k) = \sum_{r=1}^N (\phi_{ir} e^{s_r t_k} + \phi_{ir}^* e^{s_r^* t_k}) = \sum_{r=1}^M \phi_{ir} e^{s_r t_k} \quad (5.26)$$

式中:  $\phi_{ir}$  为  $r$  阶振型向量  $\{\phi_r\}$  第  $i$  分量, 并且设  $\phi_{i(N+r)} = \phi_{ir}^*$ 、 $s_{N+r} = s_r^*$ 、 $M$  为系统自由度数的 2 倍, 即  $M=2N$ 。

设被测系统中共有  $n$  个实际测点, 测试得到  $L$  个时刻的系统自由振动响应值, 且  $L$  比  $M$  大的多。通常, 实际测点数往往小于系统自由度数的 2 倍 (即  $M$ )。甚至在很多情况下, 实际测点只有一个。为了使测点数等于  $M$ , 需要采用延时方法由实际测点构造虚拟测点。延时可取采样时间间隔  $\Delta t$  的整数倍。若令该整数为 1, 虚拟测点的自由振动响应可以表示为

$$\begin{cases} x_{i+n}(t_k) = x_i(t_k + \Delta t) \\ x_{i+2n}(t_k) = x_i(t_k + 2\Delta t) \\ \vdots \end{cases} \quad (5.27)$$

这样便得到由实际测点和虚拟测点组成的  $M$  个测点在  $L$  个时刻的自由振动响应值所建立的响应矩阵  $[X]$ , 即

$$[X]_{M \times N} = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_L) \\ x_2(t_1) & x_2(t_2) & \cdots & x_2(t_L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n(t_1) & x_n(t_2) & \cdots & x_n(t_L) \\ x_{n+1}(t_1) & x_{n+1}(t) & \cdots & x_{n+1}(t_L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_M(t_1) & x_M(t_2) & \cdots & x_M(t_L) \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

令  $x_{ik} = x_i(t_k)$ , 并将式 (5.26) 代入式 (5.28), 建立响应矩阵的关系式:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1L} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{ML} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1L} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{M1} & \phi_{M2} & \cdots & \phi_{ML} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{s_1 t_1} & e^{s_1 t_2} & \cdots & e^{s_1 t_L} \\ e^{s_2 t_1} & e^{s_2 t_2} & \cdots & e^{s_2 t_L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{s_M t_1} & e^{s_M t_2} & \cdots & e^{s_M t_L} \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

或简写为

$$[X]_{M \times N} = [\Phi]_{M \times M} [\Lambda]_{M \times L} \quad (5.30)$$

将包括虚拟测点在  $L$  个时刻的响应所构成延时  $\Delta t$ , 则由式 (5.26) 可得

$$\tilde{x}_i(t_k) = x_i(t_k + \Delta t) = \sum_{r=1}^{2N} \phi_r e^{s_r \Delta t} e^{s_r t_k} = \sum_{r=1}^{2N} \tilde{\phi}_r e^{s_r t_k} \quad (5.31)$$

其中

$$\tilde{\phi}_r = \phi_r e^{s_r \Delta t} \quad (5.32)$$

由  $M$  个测点在  $L$  个时刻的响应所构成延时  $\Delta t$  的响应矩阵可表示为

$$[\tilde{X}]_{M \times L} = [\tilde{\phi}]_{M \times M} [\Lambda]_{M \times L} \quad (5.33)$$

由式 (5.32) 的关系, 式 (5.33) 可化为

$$[\tilde{\Phi}]_{M \times M} = [\Phi]_{M \times M} [\alpha]_{M \times M} \quad (5.34)$$

式中:  $[\alpha]$  为对角矩阵。

$[\alpha]$  对角线上的元素为

$$\alpha_r = e^{s_r \Delta t} \quad (5.35)$$

将式 (5.33) 代入式 (5.30) 得

$$[\tilde{X}] = [\Phi][\alpha][\Lambda] \quad (5.36)$$

由式 (5.28) 和式 (5.29) 消去  $[\Lambda]$ , 经过整理后得

$$[A][\Phi] = [\Phi][\alpha] \quad (5.37)$$

式中: 矩阵  $[A]$  为方程  $[A][X] = [\tilde{X}]$  最小二乘解。

$[A]$  可以有二种解法, 它们的伪逆法求解表达式分别为:

$$[A] = [\tilde{X}][X]^T ([X][X]^T)^{-1} \quad (5.38)$$

$$[A] = [\tilde{X}][\tilde{X}]^T ([X][\tilde{X}]^T)^{-1} \quad (5.39)$$

式 (5.36) 是一个标准的特征方程。矩阵  $[A]$  的第  $r$  阶特征值为  $e^{s_r \Delta t}$  响应的特征向量为特征向量矩阵  $[\Phi]$  的第  $r$  列。设求得特征值  $V_r$  为

$$V_r = e^{s_r \Delta t} = e^{(-s_r \omega_r + j\omega_r \sqrt{1-\varepsilon_r^2}) \Delta t} \quad (5.40)$$

由此求得系统的模态频率  $\omega_r$  和阻尼比  $\varepsilon_r$ , 即

$$\begin{aligned} R_r &= \ln V_r = s_r \Delta t \\ \omega_r &= \frac{|R_r|}{\Delta t} \\ \varepsilon_r &= \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\text{Im}(R_r)}{\text{Re}(R_r)}\right)^2}} \end{aligned} \quad (5.41)$$

为计算模态振型，需要先求出留数。设测点  $p$  的第  $r$  阶模态留数为  $A_{rp}$ ，可用下列公式计算留数：

$$\begin{bmatrix} e^{s_1 t_1} & e^{s_2 t_1} & \dots & e^{s_{2N} t_1} \\ e^{s_1 t_2} & e^{s_2 t_2} & \dots & e^{s_{2N} t_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{s_1 t_L} & e^{s_2 t_L} & \dots & e^{s_{2N} t_L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{1p} \\ A_{2p} \\ \vdots \\ A_{(2N)p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_p(t_1) \\ x_p(t_2) \\ \vdots \\ x_p(t_L) \end{Bmatrix} \quad (5.42)$$

振型向量可以通过对以系列响应测点求出的留数处理得到。对于一个有  $n$  个响应测点的结构，首先需要从  $n$  个对应同一阶模态的留数中找出绝对值最大的测点，假设该点是测点  $m$ ，对应第  $k$  阶模态的归一化振型向量可由下式求出：

$$\{\phi_r\} = [A_{r1} \ A_{r2} \ \dots \ A_{rm}]^T / A_{rm} \quad (5.43)$$

### 5.3 几何信息/自由度的实现

此模块是模态分析软件系统的一个重要部分，主要的功能是显示结构的几何形状以及结构的振动形态。本模块所用数据主要就是采集到的各个节点的加速度，以及结构的几何尺寸与采集卡通道的对应关系。

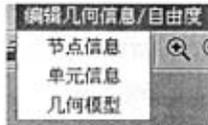


图 5.2 几何模型菜单

#### 5.3.1 几何模型模块的框架结构

该模块的主要功能是对被测结构建立简单的三维模型，该模型还要满足以后的动画显示要求，同时要将频响函数数据分配到相应的测量点，并且具有比较完善的数据完整性。由于结构模型的建立主要为了直观的显示模态振型，对实体模型没有复杂的要求，只要简单的表示一个结构即可，所以本系统三维模型的建立采用线段连接的方式来完成三维模型的绘制。模块的总体步骤及功能框图如图 5.3 所示。

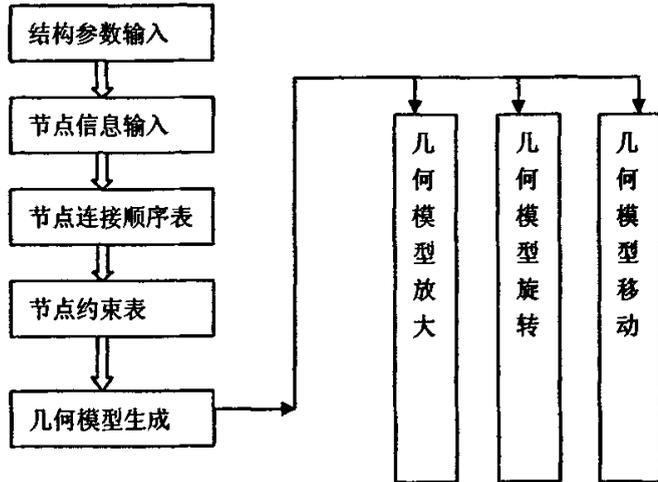


图 5.3 三维模型建立模块的步骤及功能图

建立三维模型，首先要有结构的输入功能。本系统结构的输入被简化为输入节点，包括以下几个步骤：子结构参数表的输入、各个节点坐标的输入、节点连接顺序输入、结构约束信息表的输入、组建和生成几何模型。前面三个步骤为以后几何模型的生成做准备，主要负责保存节点坐标和结构各线段的连接信息。结构约束信息表的输入主要为以后的动态振型显示做准备，主要负责对测量点和相应数据文件的对应。其中最主要的组建和生成几何模型，负责对前面输入的节点和线段信息在绘图环境下进行绘制，最后生成相应的结构模型。模型建立模块的主界面如图 5.5~所示。

### 5.3.2 几何模型的生成

MATLAB 具有强大的矩阵运算功能，要实现本模块的功能，就要用到矩阵运算。由于，MATLAB 在进行矩阵运算时不需要定义矩阵的维数，所以运算比较方便、高效。

首先介绍一下本模块所涉及到的主要的变量：

- 节点坐标变量 zbd

定义 zbd 为结构变量，主要功能是存放各个节点的初始坐标，生成结构的静态几何模型。变量 zbd 主要有三个元素 zbd.X、zbd.Y、zbd.Z，分别用来存放节点在 X、Y、Z 自由度上的坐标，且为三组等长度的数组变量。

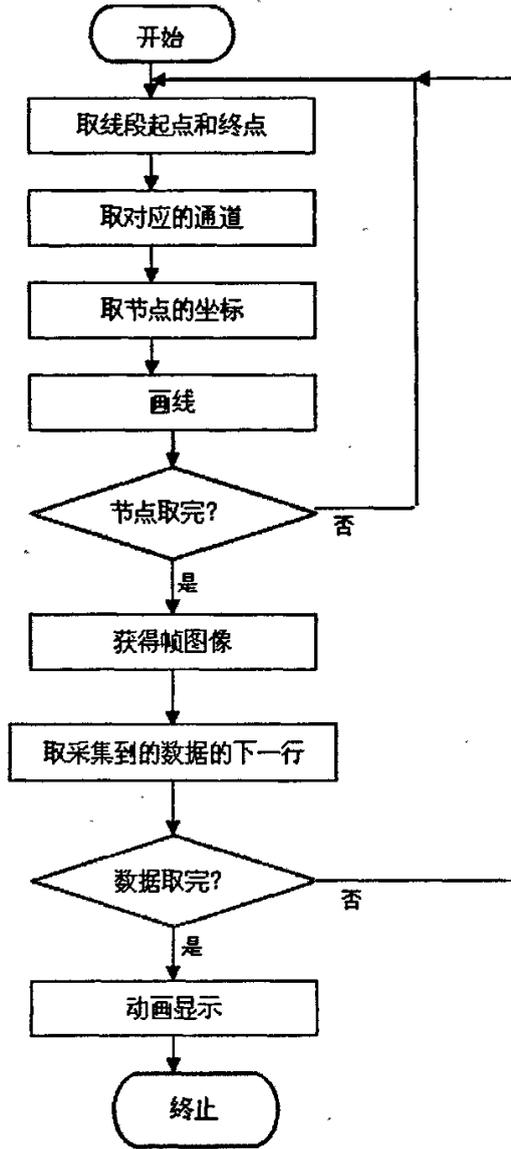


图 5.4 几何模型动画程序流程图

- 节点连接顺序变量  $qd$  和  $zd$

$qd$  和  $zd$  分别定义为等长度的数组，分别用来存放线段的起点和终点。主要的功能是生成几何模型。

- 节点与通道的对应关系变量  $td$

变量  $td$  定义为结构变量，包括单个元素： $td.X$ 、 $td.Y$ 、 $td.Z$ 。三个元素分别为三个等长度的数组，用于存放不同节点的不同自由度所对应的通道。

由此可见，要想生成结构的几何模型，则各个变量之间要有紧密的对应关系。

实现几何模型动画显示的 MATLAB 程序的流程图如图 5.4 所示。

### 5.3.3 人机界面显示系统

根据结构模型建立的基本步骤，首先要进行子结构信息表的登陆，如图 5.2 所示，输入结构的节点数目和节点顺序表数目等，为以后节点和顺序表的输入做准备。

然后进行节点坐标的登陆，如图 5.6 所示。依次输入每个节点的 X 轴、Y 轴和 Z 轴的坐标。



图 5.5 结构信息录入表

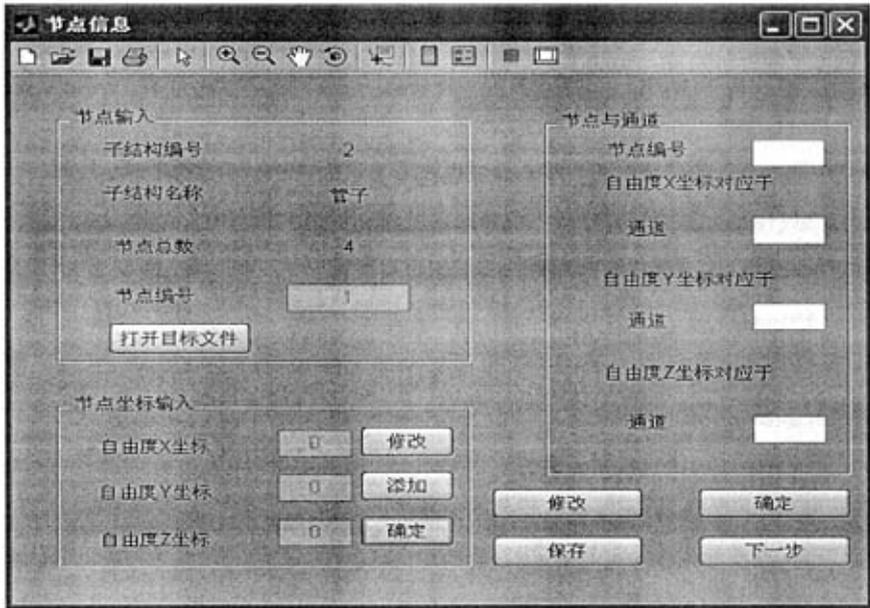


图 5.6 节点信息录入表

节点坐标登陆完毕后，要进行节点顺序表的登陆，即连接结构的各条线段。此系统采用登陆每条线段的起始点和终点的方法进行线段的连接，如图 5.7 所示。



图 5.7 节点连接顺序输入表

## 5.4 参数识别编程实现

### 5.4.1 有理多项式识别法的编程实现

首先，选择两个不同的变量，计算两变量之间的频响函数的实部和虚部。

```
x=tfed(d1(:, 3), d1(:, 4)); %取变量第3和第4通道的数据
y=real(x); %计算频响函数的实部和虚部数据
z=imag(x);
b=[y, z]';
nm=2*mn;
n=length(y); %取频响函数的长度
f=0:df:(n-1)*df; %建立离散频率向量。
w=2*pi*f; %建立离散圆频率向量
wi=w/max(w); %建立归一化离散频率向量
H=b(1, :)+i*b(2, :); %建立实测频响函数复数向量
[A, B]=invfreqs(H, wi, nm, nm, [], 100); %计算拟和频响函数的分子和分母系数向量
P=roots(B); %求多项式方程根
F1=abs(P)*max(w)/(2*pi); %计算模态频率向量
D1=-real(P)./(abs(P)); %计算阻尼比向量
for k=1:nm %计算振型向量系数
    if k==1
        p(1:nm-1)=P(2:nm);
    else
        p(1:k-1)=P(1:k-1);
        p(k:nm-1)=P(k+1:nm);
    end
    r=poly(p);
    S1(k)=polyval(A, P(k))/polyval(r, P(k));
end
[F2, I]=sort(F1); %将模态频率从小到大排列
```

```

m=0; %剔除方程解中的非模态项和共轭项
for k=1:nm-1
    if F2(k)~=F2(k+1)
        continue;
    end
    m=m+1;
    l=I(k);
    F(m)=F1(l); %模态频率
    D(m)=D1(l); %阻尼比
    S(m)=S1(l); %振型系数
End

```

#### 5.4.2 ITD 参数识别法编程实现

```

fin=input('ITD 法模态参数识别—输入数据文件名:','s');
fid=fopen(fin,'r');
mn=fscanf(fid,'%d',1); %模态阶数
%定义输入实测数据类型。ig=1 时为时域数据如冲击响应、自由振动、互相关函数、随机
减量法处理的结果。ig=2 时为频域数据如频响函数的实虚部数据。
ig=fscanf(fid,'%d',1); %ig=1 时 f 为采样频率，ig=2 时 f 为频率间隔。
b=fscanf(fid,'%f',[ig,inf]); %实测时域或频域数据
nm=2*mn; %建立特征方程矩阵的阶数
if ig==1
    sf=f;
    n=fix(length(b));
    h=b(1,1:2*n)';
    dt=1/sf; %计算时间间隔
    t=0:dt:(2*n-1)*dt;
else
    df=f;
    n=length(b(1,:));

```

```

f=0:df:(n-1)*df; %建立离散频率向量
H=b(1,:)+b(2,:)*i;建立对应正负频率的实测频响应函数向量。
H(n+1)=real(H(n));
H(n+2:2*n)=conj(H(n:-1:2));
H=real(iff(H)); %频响应函数经 IFFT 变换成脉冲响应函数
t=linspace(0: 1/df,2*n);
dt=t(2)-t(1);
end
L=length(h); %计算自由振动响应矩阵。
M=L/2;
for k=1:nm
    x1(k,:)=h(k:L-(nm-k+1));
    x2(k,:)=h(k+1:L-(nm-k));
end
B=x1\ x2; %用最小二乘法求解特征方程矩阵
[A,V]=eig(B);
for k=1:nm
    U(k)=V(k,k);
end
F1=abs(log(U'))/(2*pi*dt); %计算频率向量
D1=sqrt(1 ./ ((imag(log(U')) ./real (log(U'))). ^2)+1); %计算阻尼比向量
f=1; %计算振型向量
for k=0:(2*n-1)
    Va(k+1,:)=(conj(U).^k);
end
S1=inv(conj(Va')*Va)*conj(Va')*h;
[F2, I]=sort(F1); %将模态频率从小到大排列
m=0; %剔除方程解中的非模态项和共轭项
for k=1:nm-1

```

```
if F2(k)~=F2(k+1)
    continue;
end
m=m+1;
l=I(k);
F(m)=F1(l); %模态频率
D(m)=D1(l); %阻尼比
S(m)=S1(l); %振型系数
end
```

## 5.5 模态参数识别界面

为了对开发的系统进行检验，利用本系统对被测结构进行了振动信号采集与利用有理多项式进行模态参数识别，达到了良好的效果。被测结构如图5.8所示，测试仪器如图5.9所示。

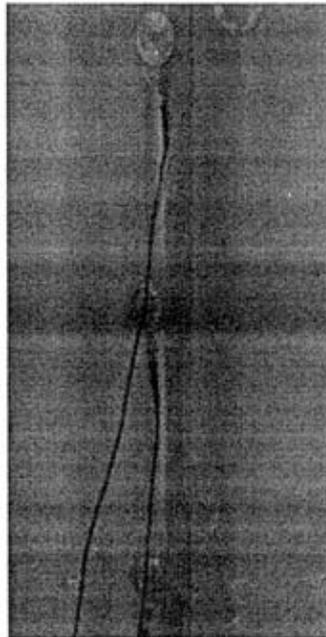


图5.8 被测结构

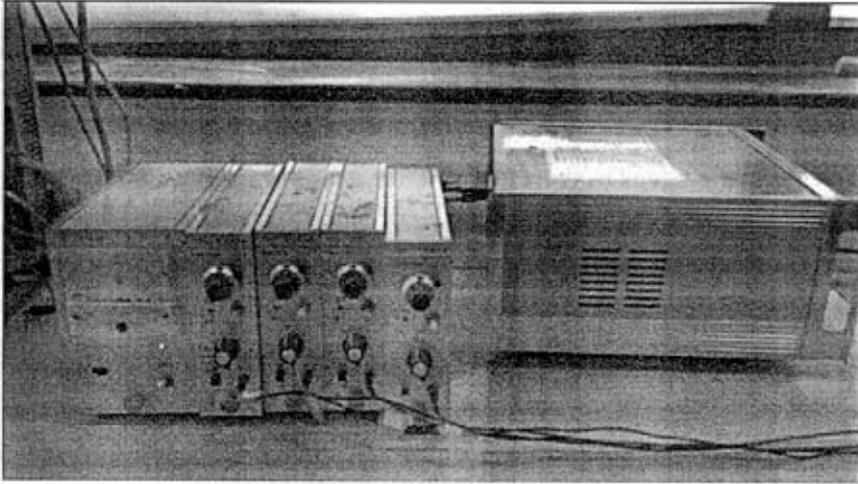


图5.9 测试仪器

模态参数识别的主界面如图5.10所示。它可以进行变量的实部、虚部的单独显示或者两者的同时显示，可以自由选择要显示的通道。同时，可以进行源文件参数的识别，如采样频率、数据长度等。

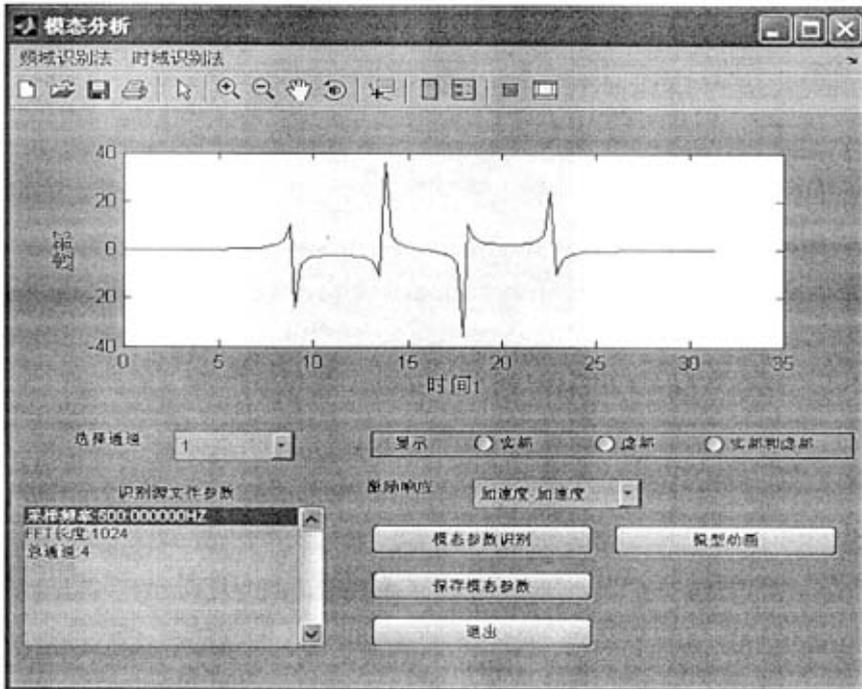


图 5.10 模态分析界面

模态参数识别的界面如图 5.11 所示。此界面可以实现的主要功能有：模态参数识别法的时域识别和频域识别。在使用频域法进行模态参数识别的过程中，需要输入初始参数数组，所以本界面还可以实现模态阶数、初始频率数组和初始阻尼比数组的输入。同时，打开目标文件按钮可以实现对特定数据段的模态参数识别，保存模态参数按钮可以实现模态参数的保存。



图 5.11 模态参数识别

结构振型的动画显示界面如图 5.12 所示。此界面包括如下几部分菜单：模型文件、振型属性设置、振型显示方式、振型操作方式和振幅缩放比。模型文件菜单可以实现不同模型的选择，振型属性设置菜单可以进行振型属性：模态类型、模态阶数等的设置，振型显示方式菜单可以选择显示方式：单显示和多显示的选择——单显示方式使得每一阶振型的图形形成单独的界面，而多显示方式使得全部振型显示在一幅图形上，所图 5.12 显示的方式。振型操作方式菜单可以选择静态显示和动画显示两种操作方法显示振型，振幅缩放比菜单可以

进行振型振幅的放大或缩小的操作。借助上述菜单的适当设置，可以使得操作人员的操作目标很好地实现。同时，对振型旋转角度的选择可以实现从不同角度对振型的观测。由有理多项式识别法和 ITD 法识别的振型结果如表 7 所示。

表 7 模态振型识别结果比较

一阶振型		二阶振型		三阶振型	
有理多项式法	ITD 法	有理多项式法	ITD 法	有理多项式法	ITD 法
0.125	0.123	0.325	0.331	0.056	0.059
0.245	0.239	-0.100	-0.983	-2.871	-2.980
0.302	0.313	-0.236	-0.243	0.118	-0.121

由以上两种识别法的比较结果可以看出，两种识别结果之间存在的误差是可以接受的。证明了程序的可行性。

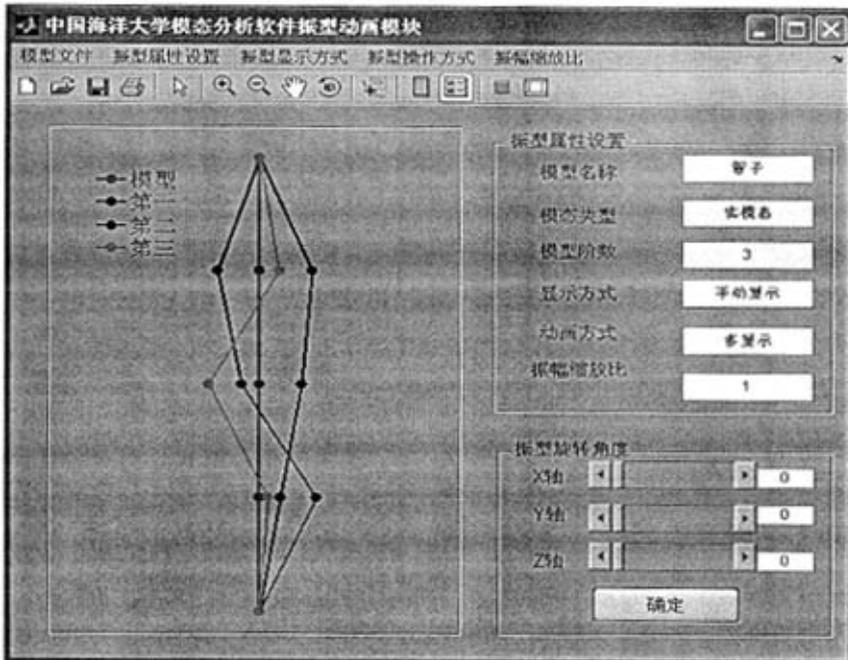


图 5.12 振型显示

## 5.6 本章小结

本章在简单介绍了模态分析的基础理论后，重点介绍了模态参数识别方法中的有理多项式法和输入未知情况下模态参数识别的原理以及编程实现。最后，介绍了模态参数识别模块的主要界面及其功能。本章的主要尝试开发了对输入未知情况下的模态参数识别程序的开发，取得了良好的效果。

## 6 结论与展望

### 6.1 总结及结论

作者在收集了大量资料, 阅读相关文献的基础上, 对大型振动信号采集与分析系统的特点进行了深入的了解和分析, 设计开发了中国海洋大学振动信号采集与分析系统的整体框架。在实现这一设计的过程中, 作者深入学习了高级面向对象开发语言 MATLAB, 利用了 MATLAB 现有的资源: 强大的矩阵运算、图形用户界面功能以及 MATLAB 强大的工具箱功能。这一框架的实现, 是中国海洋大学开发从数据采集到进行模态分析、损伤识别等一整套软件的基础。最后, 通过结构振动实例来检验本系统的实用性。目前主要的研究及开发工作已基本完成, 并达到了预期目标。现将本文的主要工作总结如下:

(1) 深入了解和总结现有国内外振动信号采集与分析软件的开发特点, 借鉴了它们开发过程中的优点, 同时利用 MATLAB 语言自身的特点弥补了一些软件开发时的缺点, 形成了一套利用 MATLAB 开发工程应用软件的理论和方法。

(2) 全面了解了振动信号采集与分析系统实现的主要功能, 把系统的主要功能分为: 数据采集模块、信号分析模块、几何模型实现模块以及模态参数识别模块四大部分, 分别采用不同的编程方法实现系统的主要功能。

(3) 在数据采集模块中, 首先利用 MATLAB 的数据采集工具箱开发了数据采集程序, 同时为了实现数据采集的实时性, 作者全面掌握了和利用了操作系统的缓冲技术以及多线程技术实现了数据的实时采集。然后, 利用 MATLAB 强大的图形用户界面功能开发了数据采集系统简洁、友好的人机界面。

(4) 在数据分析模块中, 主要实现了信号的预处理、信号的时域处理和信号的频域处理。其中在实现信号的时域处理过程中, 设计了信号的滤波处理——四种数字滤波器; 在信号的频域处理过程中, 实现了信号的各种谱分析。同时, 在此模块中, 作者利用 MATLAB 的信号处理工具箱和库函数, 实现数据分析的实时性, 更好地实现了系统的强大工具, 使得系统得开发更具有实用价值。

(5) 在几何模型模块中, 总结了诸多模态分析软件实现此功能的方法, 借鉴前人的长处, 实现了结构几何模型的实现功能, 为模态参数模块中振型的显示打下了基础。

(6) 在模态参数识别模块, 利用 MATLAB 强大的矩阵运算功能, 开发了模态参数识别的不同方法, 包括频域法和时域法。

(7) 深入研究了模态分析理论以及多种模态参数识别方法, 通过分析各种不同方法的特点, 提出了适用于本试验系统的方法: 有理多项式法和激励力未知情况下模态参数识别方法。将此方法作为开发试验模态分析软件系统的基本方法。

(8) 根据激励力未知情况下模态参数识别方法的基本原理, 利用 MATLAB 强大的矩阵运算功能和 MATLAB 工具箱, 开发了此方法的算法程序, 完成了试验模态分析的核心步骤—模态参数识别的软件实现, 并通过最后的实例检验了此算法是正确和可行的, 为整个系统的开发迈出了坚实的一步。

(9) 通过多方面的学习与研究, 结合实际需要, 完成了振动信号的采集与分析系统的设计和开发。该系统具备了基本的精度和可靠性要求, 界面美观, 使用方便, 易学易用, 为以后诸多功能的开发打下了良好的基础。

## 6. 2 问题与展望

在振动信号采集与分析软件方面, 由于采集技术、信息技术、计算机技术在众多领域中的广泛应用, 使得动态信号测试软件也层出不穷, 目前用的比较多的国外动态测试与模态分析软件为 B&K 公司的 ME'scopeVES 而国内则有东方振动和噪声技术研究所(COINV)与北京英维卡科技有限公司(BVI)联合开发的 DASP 数据采集和信号处理软件等。这些软件是现在市场上很常见的软件, 无论功能还是界面都已经比较成熟。相对来说, 本文开发的振动信号采集与分析软件系统, 由于刚刚开始对这方面的研究和开发, 还处于开发的起步阶段, 时间和条件的有限, 使系统在目前还存在很多的不足和缺陷。作者经过实际使用过程中的体验和总结, 认为还应在以下几个方面进行深入的研究和开发:

(1) 对于振动信号采集与分析系统来说, 数据的实时采集与实时分析是其基本也是其主要的功能。在研究的过程, 作者所采用的编程算法, 尽管可以实现数据的实时采集与分析。但是缺少对操作系统线程的深入应用, 所以不能够充分利用 CPU 的资源。在以后的开发过程中, 要充分利用和开发 CPU 资源, 提高系统的操作效率。

(2) 在数据采集模块中。本文仅仅利用了数据采集卡的模拟输入功能, 除此

之外，数据采集卡还具有强大的数字数出功能。系统的后续研究工作应该使得系统具有数字信号数出功能、信号生成功能等。同时，对于数据的显示模块要能够实现数据的回放功能。

(3) 在模态参数识别模块。作者尝试编写了利用时域法识别模态参数的程序。由于实验条件的限制，无法进行很精确的测试。所以，对于模态参数识别的时域识别法还应多加研究。

(4) 用软件系统对结构进行模态分析的时候，面对的更多的还是复杂结构，所以在模型的建立方面，应该实现用更简单的方法建立更复杂的模型。在外观方面，要使模型更接近于实际效果，在模态振型动画的时候可以用不同的颜色表现各节点的变化程度，能向人们更直观的展示结构的薄弱环节。

(5) 模态分析的结果是以后动态优化设计的依据，为此本系统还应该增加损伤检测、结构动力修改、灵敏度分析、响应计算等一系列相关功能，使系统能够最终实现动态优化设计的相关功能，达到预期的目标。

参考文献

- [1] 傅祖芸. 信息论基础. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社. 1984. 5~8
- [2] 张令弥. 振动测试与动态分析. 第 1 版. 北京: 航空工业出版社. 1992. 3~10
- [3] 卢文祥, 杜润生. 工程测试与信息处理. 第 1 版. 武汉: 华中理工大学出版社. 1994. 1~4, 188~189
- [4] S. Rubin. Ambient vibration survey of offshore platform. ASCE Journal. 1980.EM3
- [5] H. S. Ward and R. Crawford. Wind-induced vibration and building models ,Bulletin of Seismological Society of America. 1966. 56(4)
- [6] 黄本才. 高层建筑物钢结构振动阻尼比测试与分析. 结构工程师. 1997. 第 04 期. 20~25
- [7] 何新峰. 空气压缩机振动的测试分析. 压缩机技术. 1996. 第 01 期. 24~29
- [8] 杨家华, 管华. 印刷机振动的测试与分析. 北京工业大学学报. 2004. 第 01 期. 21~25
- [9] 魏俊英, 李翔晟. 摩托车车架振动模态测试与有限元计算. 中南林学院学报. 2003. 第 04 期.
- [10] 王柏生. 基于振动测试的大跨桥梁损伤检测. 振动工程学报. 2001. 100~104
- [11] 吴国梁. 人体承受局部振动的测试与评价. 噪声与振动控制. 1994. 第 06 期. 27~31
- [12] 战家旺, 夏禾, 姚锦宝. 既有桥梁墩台自振频率测试的冲击振动试验法. 北京交通大学学报. 2006.第 01 期. 98~103
- [13] Rytter A, Krawczuk M, Kirkegaard P H. Experimental and Numerical Study of Damaged Cantilever. Journal of Engineering Mechanics,2000,126(1):60-65
- [14] Myroll F, Dibiagio E. Instrumentation for Monitoring the SkarnsunderCable-stayed Bridge[A]. Krokeborg J Proceeding of the 3rd Symposiumon Strait Crossing[C]. Rotterdam:Balkema,1994: 207-215
- [15] Anderson E Y, Structural Monitoring on the Great Belt East Bridge [A]. Krokeborg J Proceeding of the 3rd Symposiumon Strait Crossing[C]. Rotterdam:Balkema,1994: 54-62
- [16] Grzegorz Kawiecki. Modal Damping Measurement for Damage Detection. Smart Materials and Structure,2001,10:466-471
- [17] Y.J.Yan, L.H.Yam. Online Detection of Crack Damage in Composite Plates Using Embedded Piezoelectric Actuators/Sensors and Wavelet Analysis. CompositeStructures, 2002,58:29-38

- [18] A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker. Modal Analysis of A Lightweight Structure-Investigation of The Effects of The Supports on The Structural Dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, 16 (2~3), 273~284.
- [19] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用. 第 1 版. 上海: 上海交通大学出版社. 2000.1~390
- [20] 许本文, 焦群英编著. 机械振动与模态分析基础. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社. 1998.8. 57~64, 177~191, 235~290.
- [21] 时战, 唐秀近等编著. 结构动态参数识别. 第 1 版. 大连: 大连理工大学出版社. 1995. 95~152.
- [22] ME' scopeVES 模态分析软件系统用户手册
- [23] LMS 公司主页 <http://www.lmschina.com/>
- [24] 美国 MTS 公司主页 <http://www.mtschina.com/>
- [25] 美国 NI 公司主页 <http://www.ni.com/>
- [26] 苏州声和振动科技有限公司主页: <http://www.sv-china.com/>
- [27] 日本 RION 公司产品介绍 <http://www.autol7.net/autol7/factory/japan/rion.html>
- [28] DASP 动态测试系统说明书 <http://www.coinv.com.cn/dasp/dasppro6.htm>
- [29] VAMS 振动测试系统用户手册 <http://aero.nuaa.edu.cn>
- [30] 北京波谱世纪科技发展公司主页 <http://earthquake.com.cn>
- [31] Chiu WK, Galea S C, Koss L L, N Rajic, et al. Damage Detection in Bonded Repairs Using Piezoceramics. *Smart Materials and Structures*, 2000, 9:466-475
- [32] Pohl Jurgen, Herold Sven, Mook Gerhard, Michel Fritz. Damage Detection in Smart CFRP Composites Using Impedance Spectroscopy. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10:834-842
- [33] 王济, 胡晓编著. MATLAB 在振动信号处理中的应用. 第 1 版. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社. 2006. 48~49, 118~235
- [34] 蔡庆喜. 大型结构试验模态分析方法研究与软件开发. 2004. 4~10
- [35] 应怀樵主编. 现代振动及噪声技术. 北京: 航空工业出版社. 2000. 85~88, 281~283
- [36] 郑人杰, 殷人昆, 陶永雷. 实用软件工程. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社. 1997.77~89
- [37] 研华公司主页 <http://www.advantech.com/>
- [38] MATLAB 公司主页 <http://www.mathworks.com>
- [39] 宋兆基, 徐流美等编著. MATLAB6.5 在科学计算中的应用. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社. 2005.1. 30~176, 244~288.

- [40] 黄忠霖, 黄京编著. MATLAB 符号运算及其应用. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社. 2004. 102~123.
- [41] 薛年喜. MATLAB 在数字信号处理中的应用. 第 1 版. 北京: 清华大学出版. 2003. 1~288.
- [42] 任满杰, 刘树刚, 李军红等编著. 操作系统原理实用教程. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社. 2006. 70~72, 190~192
- [43] Andrew S.Tanenbaum, Albert S.Woodhull. Operating Systems Design and Implementation. second edition. Prentice Hall, 1998. 88~95
- [44] 魏迎梅. William Stallings. 操作系统——内核与设计原理. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社. 2001. 110~120
- [45] 薛智文. 操作系统. 第 1 版. 北京: 铁道出版社. 2003. 58~65
- [46] 禹荣. 数据采集系统中缓冲区的设置方法. 工业控制计算机. 2006 年 19 卷第 5 期.
- [47] 张金平, 黄树红, 贺国强, 高伟. 基于 FIFO 的旋转机械在线多通道数据采集系统设计. 测控技术. 2006 年第 25 卷第 1 期. 20~24
- [48] 张明照, 刘政波, 刘斌等. 应用 MATLAB 实现信号分析与处理. 第 1 版. 北京: 科学出版社. 2006. 1~161
- [49] 刘天祥, 孔令富, 张世辉. MATLAB 环境下雕刻机监测系统的实时数据采集绘图. 工业控制计算机. 2006 年 19 卷第 3 期. 37~38
- [50] 王雪梅. VC 环境下高速实时数据采集的实现. 信息技术. 2006 年第 5 期. 147~149
- [51] 吴丽娜, 高敬阳. WINDOWS2000/XP 下通用实时采集设计与实现. 计算机应用. 2005 年 2 月第 25 卷第 2 期. 443~445
- [52] 白树森. 基于 VB 的数据采集系统. 山西电子技术. 2006 年第一期. 75~75
- [53] 王斌, 杨江. 实时数据采集及控制系统的设计与实现. 工业控制计算机. 2006 年第 19 卷第 3 期.
- [54] Perry Miller. Aspects of data acquisition system design. Data Acquisition. August 1999. 1~4
- [55] Considine J., Li F., Kollios G., Byers J., "Approximate Aggregation Techniques for Sensor Databases". In *ICDE '04*, Boston, MA, 2004. 45~49
- [56] Deligiannakis A., Kotidis Y., Roussopoulos N. Compressing historical information in sensor networks", In *SIGMOD '04*, Paris, France, 2004.
- [57] Fagin R., "Fuzzy Queries In Multimedia Database Systems", In *PODS '98*, Seattle, WA, 1998.
- [58] Intanagonwiwat C, Govindan R. Estrin D. "Directed diffusion: A scalable and robust

- communication paradigm for sensor networks”, In *MobiCOM'00*, Boston, MA, 2000.
- [59] Madden S.R, Franklin M.J, Hellerstein J.M., Hong W.,”The Design of an Acquisitional Query Processor for Sensor Networks”, In *SIGMOD'03*, San Diego, CA, 2003.
- [60] Madden S.R, Franklin M.J, Hellerstein J.M, Hong W. ”TAG: a Tiny AGgregation Service for Ad-Hoc SensorNetworks”, In *OSDI'02*, Boston, MA, 2002.
- [61] Shenker S, Ratnasamy S, Karp B, Govindan R, Estrin D. ”Data-centric storage in sensornets”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol 33-1, 2003
- [62] 张子明, 杜成斌, 江泉. 结构动力学. 第 1 版. 南京: 河海大学出版社. 2001. 129~142.
- [63] 李国强, 李杰编著. 工程结构动力检测理论与应用. 第 1 版. 北京: 科学出版社. 2002. 1~50.
- [64] D.J Ewins. *Modal Testing Theory and Practice*. Research Studies Press LTD. 1986:19~82
- [65] 李杰, 陈隽. 未知输入条件下的结构物理参数识别研究. *计算力学学报*. 1999. 第 16 卷第 1 期. 32~40
- [66] 唐委校, 梁志强, 郑效忠. 模态参数识别的时域新方法及其应用. *振动、测试与诊断*. 1998. 第 18 卷第 3 期. 190~196
- [67] 唐秀近等. 时序分析和数字仿真在结构参数识别中的应用. *大连理工学院学报*. 1984. 第 23 卷第 2 期.
- [68] Pandit. S. M. *Time Series and System Analysis with Application*. John Wiley. 1983.21(1)
- [69] Ibrahim .S. R. A Parametric Study of the Ibrahim Time Domain Modal Identification Algorithm. *Shock and Vibration Bulletin*. 1981.51(3)

## 致谢

本论文是在导师蒋济同老师的亲切关怀和悉心指导下完成的。在作者学习和写作论文期间得到了导师亲切的关怀和精心的指导。导师渊博的学识，严谨的治学态度，丰富的科研经验，勤奋的工作作风使作者学生受益匪浅，是作者学生一生学习的榜样，值此论文完成之际，特向导师致以衷心的感谢和美好的祝愿。

在求学期间，得到了刘德辅教授、李华军教授、黄维平教授、于定勇教授、杨永春教授、董胜教授、史宏达教授、拾兵教授等多位老师的殷切教诲，在此向各位老师表示最诚挚的谢意！

同时，还要衷心感谢几年来朝夕相处的舍友王华娟同学、王秀荣同学，还有实验室的曹庆愚同学、仲飞同学，师妹王熙堃、潘天妮，师弟李景龙、杨松，同班同学韩晓风，韩桂萍，康帅，王俊荣，范天会等，感谢他们给与作者的帮助和支持。在此，特别感谢王华娟、韩晓风、韩桂萍、康帅给与作者亲人般的关怀；特别感谢师妹王熙堃、潘天妮给作者带来的生活上的快乐！谢谢大家三年来的支持和帮助，共同的学习、生活将成为作者永久的美好回忆！

最后，还要向本人的家人表示深深的谢意，感谢你们在我求学期间不断地鼓励我、支持我，默默地为我付出。谨以此文献给你们！