

北京化工大学

硕士学位论文

大型装备系统状态监测及故障诊断集成方法研究

姓名：刘占涛

申请学位级别：硕士

专业：机械电子工程

指导教师：杨国安

20090602

大型装备系统状态监测及故障诊断集成方法研究

摘要

大型装备系统是生产设备的大型化、集成化,海洋平台即是由上百台设备构成的大型装备系统。随着石油资源的日趋紧张,大陆石油的开采量正逐年减少。在经济和社会发展面临资源短缺的压力下,利用和开发海洋油气田资源具有十分重要的战略意义。建立海洋平台这样的大型装备系统是开采海洋石油的必要条件,我国目前各种在用海洋平台已逾百台。但是由海洋平台及设备不可靠引起的故障频繁出现,造成了巨大的经济损失。解决这一问题的唯一方法是对海洋平台运行状态进行监测,以此来预防故障,杜绝事故,延长海洋平台运行周期,最大限度发挥海洋平台的生产潜力。因此,针对海洋平台开展状态监测与故障诊断研究已成为刻不容缓的重要课题。

本论文的研究内容主要分为两部分:一是根据中石化胜利油田海上采油平台安全保障项目实际,开发了基于 VC++和 Windows 系统的海洋平台实时在线监测系统。论文详细阐述了海洋平台实时在线监测系统的总体方案设计,并重点介绍了各个软件模块的功能及应用,现场应用表明该系统能够有效地反映海洋平台作业设备的运行状态。二是非平稳信号分析方法研究。从平台作业设备采集的信号大多数属于非平稳信号,对于这类信号,难以用传统的傅里叶变换进行有效的分析,因此,本文从小波分析理论入手,充分利用小波变换在非平稳信号分析中的优势,并结合 VC++中

ActiveX 控件的创建方法，开发了小波信号分析控件。进而针对轴承故障信号，应用小波变换进行了大量的数据仿真及实验研究，提出了一种基于小波多尺度分解的时域参数向量法用于提取轴承故障信号特征。

关键词：海洋平台，在线监测，故障诊断，小波变换，非平稳信号

INTEGRATION METHOD RESEARCH OF STATUS MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS FOR LARGE-SCALE EQUIPMENT SYSTEM

ABSTRACT

Large-scale equipment systems are large, integrated production equipment. The offshore platform is a large-scale equipment system which consists of hundreds of devices. With the increasing shortage of petroleum resources, the oil production on land is decreasing year by year. Under the condition that our economic and social development is facing a shortage of resources, it is a great strategic significance to use and exploit offshore petroleum and gas, but there is a request of setting up such large-scale equipment systems as offshore platforms. At present there are more than one hundred platforms in use in our country, however, faults caused by the offshore platform and the device's unreliability appear frequently, which results in enormous economic losses. The only way to solve this problem is to monitor the operation state of the platform so as to prevent failure, eliminate accidents, extend the operation cycle, and maximize the productive potential. Therefore, carrying out condition monitoring and fault diagnosis for offshore platforms has become an important issue without delay.

The content of this paper is mainly divided into two parts. The first part is the development of the online monitoring system based on VC++ and Windows according to the offshore platform security project of SINOPEC

Shengli Oil Field. The thesis elaborated on the overall program design of the real-time online monitoring system, and introduced the function and application of every software module. The on-site application showed that the system could effectively reflect the running condition of the operating devices on the offshore platform. The second part of the paper is the analysis method research of the non-stationary signals. Because the majority signals acquired from the devices belong to non-stationary signals which can not be analyzed effectively by traditional Fourier transform, the wavelet analysis theory which has an advantage of analyzing non-stationary signals was used, and a wavelet analysis control for such signals was developed with the method of creating ActiveX in VC++. And then for rolling bearing fault signals, wavelet transform was used for simulation of large mounts of data and experimental study, a new method for rolling bearing fault signature extraction based on time domain parameter vectors of wavelet multiple-dimensional decomposition was presented.

KEY WORDS: offshore platform, online monitoring, fault diagnosis, wavelet transform, non-stationary signals

北京化工大学学位论文原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名： 刘与清 日期： 2009.6.2.

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京化工大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京化工大学。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磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

保密论文注释：本学位论文属于保密范围，在2年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

作者签名： 刘与清 日期： 2009.6.2

导师签名： 杨明安 日期： 2009.6.2

第一章 绪论

大型装备系统，顾名思义是现代生产设备的大型化集成，这类系统往往包含多个子系统，并且各个子系统之间互有联系，因此其结构一般来说比较复杂，自动化程度也很高，当然随之而来的是其造价也必然非常昂贵。海洋平台即属于此类系统，一座海洋平台的造价成本动辄上百万，多则甚至上亿元，人们斥巨资建立这样的大型装备系统是为了社会生产、经济发展的需要，一座海洋平台若在服役期内无故障地完成作业任务，确实能够带来巨大的经济效益和社会效益，但如果发生故障，其损失将非常惨重。目前，无论是国内还是国外，人们对于单个生产设备以及机组的故障诊断研究得比较多，取得了较大的成果，形成了比较完善的技术理论，但对于海洋平台这样的大型装备系统，人们研究得还很少。因此，为了避免不必要的生产事故以及经济损失，开展对海洋平台的状态监测与故障诊断研究是十分重要的。

1.1 开展海洋平台故障诊断研究的重大意义

随着石油能源的日趋紧张，大陆石油资源的可开采量正逐年减少。海洋平台作为向海洋要油的必要条件，正逐步向深度和广度展开，我国目前各种在用海洋平台已逾百台。但是由海洋平台及设备不可靠引起的故障频繁出现，国内外海洋平台倾覆和爆炸造成台毁人亡的事故也偶有发生^[1,2]。比如，1988年7月6日位于北海的Piper Alpha石油钻井平台发生平台爆炸和火灾；1969年我国渤海2号平台被海冰推倒，并使一号平台严重受损，造成直接经济损失2000多万元；1974年海冰推倒了渤海四号平台的烽火台；我国从日本进口的“渤海二号”自升式平台，1979年在渤海湾倾覆沉没，死亡72人；我国“爪哇海”(Glomar Java Sea)钻井船，1983年在南海的莺歌海海域沉没，死亡81人。除此之外，多个平台在风浪、海流和地震作用下产生过剧烈的振动。一座中心平台在服役期间发生倾覆的直接经济损失达几十亿，甚至上百亿元，再加上环境污染和人员伤亡，其损失将是难以估量的。因此，提高海洋平台及其设备的可靠性、确保海洋作业安全的问题日益突出。

众所周知，损伤在海洋平台结构服役期间是不可避免的。确保人的生命安全和减少财产损失的唯一方法是诊断出结构的损伤，并能及时进行修复，以此来预防故障，杜绝事故，延长海洋平台运行周期，缩短平台设备维修时间，使设备能够安全、稳定、长周期、满负荷运行，最大限度发挥海洋平台的生产潜力。新平台的质量评价、旧平台的残余寿命估计和在役平台的结构、装备远程实时监测及安全分析系统安全保证将成为日益突出的问题，海洋平台结构的状态监测与损伤诊断已成为刻不容缓的重要课题，而且，这一技术的发展将带动陆地重大工程结构状态监测技术的发展和应

有广阔的应用前景。

海洋平台的状态监测和故障诊断技术可借助现代科学中的系统论、控制论、可靠性理论、失效理论、信息论、机械振动、转子动力学等理论深入研究和认识平台设备的故障机理；以包括传感器在内的仪表设备和计算机为技术手段，测量与监测平台设备运行过程中的振动、噪声、温度、压力、流量等参数；利用信号分析和数据处理技术，对这些参数的模型或者数字信息进行分析处理；建立动态信息与设备故障之间的联系，运用人工智能对平台设备进行综合诊断；以计算机技术为核心，建立状态监测与故障诊断系统^[3]。

海洋平台状态监测与故障诊断系统有针对性的对各个运行参数进行连续监测，对平台上的设备状态做出实时评价，不但可以判断和识别设备的工作状态和故障，而且可以对故障进行早期预报、识别，防患于未然，变故障停机为计划停机，减少停机或避免事故扩大化，使企业对平台作业设备的维修管理从计划性维修，事故性维修逐步过渡到以状态监测为基础的预防性维修。从而保证平台设备安全、稳定、长周期、满负荷优质运行，避免“过剩维修”造成的不经济，不合理现象。

发展海洋平台状态监测和故障诊断技术在现在和将来都具有重要的现实意义，主要表现在以下四个方面^[4]：

- (1) 提高各子平台的设备管理水平，以便集成化管理；
- (2) 提高海洋平台作业设备的可靠性和可维修性；
- (3) 避免重大事故的发生，减少事故危害性；
- (4) 可以获得潜在的巨大的经济效益和社会效益。

1.2 海洋平台状态监测与故障诊断技术现状

世界经济的高速发展，必然要消耗大量能源，寻找价格合适而充足的能源，已成为各国经济发展中的重要课题。由于石油具有易开采、运输及利用价值高的特点，目前仍然是世界各国的主要能源。我国是一个能源消费大国，但目前国内陆地石油可开采量正逐年减少，无法满足经济发展的需要。在我国经济和社会发展面临资源短缺压力下，利用和开发海洋油气田资源具有十分重要的战略意义。而当前通过海洋开采石油的唯一途径是建立海洋平台，对于海洋平台各方面的运行监测以及维护，人们已经做了一些基础研究工作。日后，随着科技的不断发展，人们对海洋平台状态监测与故障诊断技术的研究也将会愈加深入。

海洋平台经历长时间的使用，影响其安全运行的主要问题有：

- (1) 海洋平台承载结构体累积损伤；
- (2) 海洋平台生产设备连续安全运行状况；
- (3) 海啸、台风、浮冰以及过往船只撞击海洋平台、火灾、天然气泄漏发生爆炸

等偶然事件的影响。

以上三个方面极大地威胁着平台的正常使用和耐久性；因此，加强海洋平台的实时状态监测和安全分析是十分必要的。

1. 海洋平台结构健康监测^[5,6]

关于海洋平台结构的状态监测研究开始于 20 世纪 70 年代，但到目前为止研究工作还开展得不多，对平台承载结构的监测，采用的方法也各异，可以分为局部损伤检测法和基于振动的整体损伤探测法，目前平台结构损伤检测的方法主要采取人工目测、超声波、磁场法、放射法、热力场等局部检测方法。然而，较弱的视觉观测条件以及损伤部位有可能被生长的海洋生物覆盖着，所以利用这类局部损伤检测技术对海洋平台结构进行损伤诊断是不可靠的。此外，这些技术要求结构的损伤区域是已知作为先决条件，水下检测难度很大，要求配备特殊额外的测试设备和专业人员，因此，这些方法的检测成本较昂贵。而基于振动的平台结构健康监测综合评估系统是前些年研究的热点，但经过多年的研究进展缓慢，很难将其应用于实际环境中，大多数处于实验和理论研究阶段，其致命缺点是类似海洋平台这样超大规模的装备，裂纹等微损伤导致振动模态的改变是微乎其微的，周围任何微小的扰动和模型误差所带来的影响都要远比裂纹损伤或腐蚀带来的变化高得多。局部损伤检测方法虽然能够精确识别海洋平台是否存在损伤，但是不能够对海洋平台的损伤状况做实时诊断；而目前的实时海洋平台状态监测系统尚不成熟，基于振动的损伤诊断方法经过多年发展，虽提出并发展了许多方法，但是在实际运用于大型结构(如海洋平台)存在一定的局限性，有的方法仅仅数值模拟验证效果较好，有些方法无法适用于复杂的大型土木工程结构物。其存在的主要问题有：

(1) 噪声的影响

由于测试条件、仪器设备的限制以及人为操作过程误差的存在导致测试数据中存在着噪声。而噪声的存在必然会对振动参数的识别带来一定的影响，甚至导致模态参数识别的错误。

(2) 线性假设误差

现在的理论研究是基于线弹性假设，而实际结构在服役期间材料和结构存在非线性。这对大型结构物的损伤诊断必然带来影响。

(3) 结构测试模态不完备：

其一，自由度的不完备，特别是结构转动自由度无法测试，即每个测点最多可以测试两个自由度；

其二，模态参数阶数不完备，即结构的某些模态不能够被环境激励所激发出来。

此外，低阶模态损伤算法尚不成熟，考虑到结构测试模态的不完备性，测试可靠的结构健康监测系统必须利用结构的低阶模态信息进行损伤诊断。大多数损伤诊断算法都是基于有限元模型的完备模态，这对于大型的土木工程结构而言是无法得到的。

基于振动的海洋平台结构整体损伤探测法人工施加激励难度大、成本高；采用人工激励影响了实际结构的正常工作，必然造成经济损失。发展在线实时的结构状态监测系统必须采用结构环境激励下的模态参数识别技术。在环境激励下结构测试模态存在不完备性，因此可靠的结构状态监测系统必须利用结构的低阶模态信息进行损伤诊断，如何将现有方法进行改进，以适应实际结构振动测试中只能获得结构的低阶频率及不完备的实测振型的情况，这已成为把海洋平台结构损伤诊断方法由理论推向实践的瓶颈问题，是目前尚无法解决的问题。

基于声发射的结构损伤监测技术是相对简单、成本较低的，被公认为是较有发展前景的方法。声发射监测是一种动态监测方法。若能明确来自损伤的声发射信号，就可以长期连续地监测损伤的动态变化过程，这是其他监测方法难以实现的。对声发射信号处理技术国内外开展了大量的研究，国内刘时风、沈功田、耿荣生、戴光^[7,8]等提出了许多好的方法，这些方法对有效地识别压力容器、管道以及一些复合材料的缺陷起到了很好的推动作用。在国内，对声发射监测海洋平台结构损伤的研究目前还是空白；在国外，声发射用于结构监测的方法研究较多，特别在声发射波理论研究方面提出了许多新思想，为声发射的工业应用起到了划时代和奠基性的作用。国外目前尚未开展对海洋平台声发射监测的专门研究。众所周知，美国 PAC 物理声学公司在声发射技术方面走在世界的前列，率先使用声发射技术进行了大型结构完整性的监测，据了解他们与 CAN(offshore) Limited 公司达成服务协议，为其海洋平台进行监测服务。从了解的情况看，他们仍采用时域特征参数法，采集的数据要拿到美国的公司总部由专业人员进行分析，很难完成对平台损伤的有效识别，为这一技术的普及带来困难。

2. 海洋平台作业设备实时在线监测

海洋平台作为海洋油田开发的主要设备，是由船舶航行设备(固定平台除外)、安装泊定设备、钻井设备、开发设备或修井设备、动力设备、起吊设备、生活服务设备及消防设备等上百台设备构成的大型装备，是具有明显串联特征的流程设备系统。其中每一台设备又可看成是由若干机械、液压、气动、电气、仪器仪表等元器件构成的子系统。其投资占到了海洋石油开采总投资的 70%左右，一旦发生事故，不仅影响石油的正常生产，还可能危及整个平台的安全以及作业人员的生命。目前国际上对海洋平台作业设备基本上实现了实时状态监测；在国内对海洋平台作业设备的维护仍采用传统的计划、定期维修，智能状态监测仍是空白。计划维修带有很大盲目性，设备有无故障、故障类型、故障部位、故障程度难以准确把握。另外，由于良好部位的反复拆卸，机械性能往往不理想，甚至低于检修前。意外停机引起生产损失，过剩维修导致维修费用增加。过剩维修还有可能引起人为维修故障^[9]。而且，没有必要的超前维修也带来人力、物力的巨大浪费，对于海洋平台所承载的作业设备目前缺乏有效的监测方法和手段。未开展关键作业设备的实时状态监测和基于全员维修理念的机泵群点检管理。

3. 海洋平台危险化学品气体监测

平台作业过程中会产生大量烷烃气体,甚至会产生像硫化氢、二氧化硫等有毒气体,鉴于重庆开县境内发生的硫化氢泄漏造成重大人身伤亡,目前海洋平台上均配备了气体探测传感器,用于探测生产过程中的有毒、易燃、易爆气体,目前安装的这些气体探测传感器全是基于化学反应的(俗称电子鼻),只有当泄漏气体与传感器接触时,才可能探测到气体泄漏,对于像平台这样的开放环境,用这类传感器是不适合的,由于海风的影响,即使有泄漏也无法监测到,这些传感器在海洋平台上应用其实起不到任何作用,因此,有必要改变危险化学品气体的探测方式。超声测泄漏技术国外于 20 世纪 60 年代初就开始了研究工作,目前在石油化工、天然气和核能等行业广泛应用;主要应用于阀门、管道的在线泄漏监测,国内超声监测技术最近 20 年有了一定的发展,在航空航天及岩石大坝等领域取得了成功,超声技术应用在海洋平台气体泄漏监测中的主要优点是对海洋平台完整性无影响,通过布置高灵敏度的传感器可监测到气体是否泄漏;不影响正常的生产;结果直观,既能定性,也能定量;对被检泄漏点的接近程度要求不高,可用于难于或不能接近的环境下监测,如高低温、核辐射、易燃、易爆或毒性等环境。保证设备安全运行,减少环境污染和降低检维修成本。

4. 海洋平台安全监测网络建设

海洋平台安全监测网络系统建设对于实现海洋采油作业信息化是十分必要的,国外海洋平台均实现了互联网信息共享,在国内,由于维护问题,目前在陆地与平台间尚未铺设海底光缆,平台与陆地间的网络传输采用 GPRS 传输方式, GPRS 数传模块相对于无线专网运行费用较高, GPRS 是按流量计费,那样通过网络侵入的无用信息也会被计费。通信协议比专网复杂很多。受公网业务开通状况及信号覆盖范围的影响较大,能否在某处使用,完全取决于运行商的系统建设情况,不如无线专网灵活。实时性差,尤其是节假日系统的负荷会达到高峰,系统及网络堵塞严重,信息不畅,不能及时发送或收到有用信息,贻误大事。大部份产品“掉线”及“死机”问题比较严重,尤其是“死机”后,一般很难自行恢复正常工作,需要人工复位,极为不便。系统安全性较差,由于 GPRS 是通过互联网发送数据,而目前的网络安全性不高,越来越容易受到攻击,造成瘫痪。服务质量受制于运营商的服务,因为系统一旦发生故障,集成商或用户是无法独立解决问题的, GPRS 的售后服务工作较困难, GPRS 的数据通讯服务功能有限,只是过渡系统而已,生命周期很短,一旦系统升级,软件、硬件都要全面修改,损失较大。而海洋平台信息化,对无线数据通信的需求越来越强烈,而且,对于海洋环境,这种无线数据传输必需是高可靠的,并能抵抗工业现场的各种电磁干扰。于 2004 年正式问世的 Zigbee 协议能满足海洋环境下无线传输的一切要求, Zigbee 网络主要是为工业现场自动化控制数据传输而建立的。Zigbee 是一个由可多到 65000 个无线数传模块组成的一个无线数传网络平台,每一个 Zigbee 网络数传模块类似移动网络的一个基站,在整个网络范围内,它们之间可以进行相互通信;每个网络

节点间的距离可以从标准的 75 米，到扩展后的几百米，甚至几公里；它具有低功耗，低成本，使用免费的 ISM 频段，高的抗干扰性能，高保密性，高集成度和高的可靠性；因此，Zigbee 技术很适合作为海洋平台数据传输的搭载工具。目前，北京化工大学杨国安教授在这一方面做了一些工作，并取得了成果。

1.3 海洋平台作业设备状态监测与故障诊断概述

如上所述，由于海洋平台是一个非常庞大的装备系统，因此对其开展状态监测与故障诊断研究需要从各方面加以考虑，包括平台结构、作业设备、危险化学气体、网络传输等。本论文主要研究第二方面，即海洋平台作业设备的状态监测与故障诊断，因此，下面对海洋平台各子平台上的生产设备的状态监测与故障诊断技术作一系统的阐述。

若抛开海洋平台这一大的工程背景，各个子平台上的作业设备与陆地采油设备基本上完全相同，因此，对于陆地采油设备的一些故障诊断理论和方法可以完全应用于海洋平台的作业设备上。

1.3.1 设备故障诊断技术发展阶段

早在 1967 年美国就开展了故障诊断技术的研究与开发，并制定了一系列有关静态设备设计、制造、试验和故障诊断及预防的标准规程，目前正在研究推行设备的声发射诊断技术。美国在航空、核工业以及军事部门中诊断技术占有领先地位，日本则在某些民用工业，如钢铁、化工、铁路等部门占有一定优势。目前，有关故障诊断的基础理论和应用技术研究的机构已遍及美国、日本的许多研究部门。由欧洲著名的国际测量学会技术诊断委员会于 1982 年发起的国际性学术会议，每隔一年或二年举行都要进行一次，这对促进诊断技术的发展起了积极的推广和推进作用^[10]。

总体来讲，状态监测与故障诊断技术的发展，大致可分为以下五个阶段^[11,12]：

第一个阶段是在 19 世纪，当时机械设备本身的技术水平和复杂程度都很低，因此主要采用事后维修方式。

第二个阶段是 20 世纪初到 20 世纪 50 年代，随着大生产的发展，机械设备本身的技术复杂程度有了提高，设备故障或事故对生产的影响显著增加，在这种情况下出现了定期预防维修方式，故障诊断技术处于孕育时期。

第三个阶段是 20 世纪 60 年代到 70 年代，随着现代计算机技术、传感器技术、电子技术和信号处理技术的发展，机械设备诊断技术在欧美等一些国家得到了发展，出现了更科学的按设备状态维修的维修方式。

第四个阶段始于 20 世纪 80 年代后期，人工智能技术和专家系统、神经网络等开始

发展,并在实际工程中应用,使机械设备诊断技术达到了智能化的程度。虽然这个阶段发展历史并不长,但是已有研究表明,机械设备诊断技术具有十分广阔的发展前景。

第五个阶段是从20世纪90年代末以来,网络化监测诊断成为故障诊断系统的一个重要发展方向。在网络系统构成上,充分利用企业现有的Internet资源与企业的内部网,做到资源共享、节省投资并方便实现远程诊断。这时很多非线性信号处理方法,如分形理论、混沌理论等被引入到机械设备的故障诊断工作中,而且在设备管理工作上,诊断技术正在逐步向设备诊断工程方向迈进。

1.3.2 故障诊断技术的发展前景

近30年来,机械设备故障诊断技术不断汲取现代科学技术发展的新成果,从理论到实际应用都有了迅速的发展,至今已成为集数学、物理、力学、化学、电子技术、计算机技术、信息处理、人工智能等各种现代化科学技术为一体的新兴交叉学科。其故障机理的研究、人工智能专家系统和神经网络、故障诊断装置的开发研究都在飞速发展,具有十分广阔的前景。反映当代故障诊断技术的发展有以下几个主要方向^[13]:

(1) 诊断装置系统化。为实现诊断自动化,把分散的故障诊断装置系统化,并使之与电子计算机相结合实现自动采集信号、提取特征、识别状态;能以显示、打印、绘图等各种方式输出诊断报告。

(2) 诊断装置的集成化。随着电子集成化程度的提高,电子元器件的尺寸越来越小,便携式计算机的发展给诊断装置集成化提供了保证。

(3) 服务于现场的诊断系统。检测装置集成化,使得现场测试仪器的功能越来越强,许多原来必须在实验室的分析现在可以在现场完成。现场诊断系统具有实时、直观、测量次数不受限制,不需要原始数据和转换过程的优点。

(4) 智能化专家系统。故障诊断专家系统是一种拥有人工智能的计算机系统,它不但具有系统诊断技术的全部功能,而且它还将多专家的经验、智慧和思想方法同计算机的巨大运算和分析能力相结合,组成共享的知识库。这是故障诊断技术的高级形式,其研制与应用是必然的趋势。

(5) 标准化的定时诊断。第一代的故障诊断装置以针对个别部位随机诊断为主,而今后凡重要的故障诊断均向标准化的定时诊断发展。

(6) 机械应具有适应性。第二代故障诊断装置要求被检测的机械设备具有适应性,如设计有诊断插座、窥视孔或在相关部位布置好传感器,以确保实施状态监测和故障诊断的方便和快捷。

(7) “机械设备故障诊所”的建立。随着维修制度的变化,合理的预知维修将逐步取代定时维修,因而有可能建立“机械设备诊所”。目前国外已开展此类业务,例如

对数控机床实行遥控技术,可在“诊所”利用专线进行遥测,并将被测信号处理、分析后与“诊所”的标准进行比较,从而得到诊断结果。

(8) 建立机械设备故障数据库。随着计算机网络的发展,使得大型机械设备数据库的建立成为可能。这个数据库将包括设备的使用维修档案,为设备故障诊断提供必要资料。随着故障诊断技术的广泛应用,数据库的大型化和公用化将是发展趋势。

综上所述,机械设备故障诊断技术的发展趋势是“四化”:不解体化、高精度化、智能化、网络化。

1.3.3 状态监测与故障诊断系统概述

状态监测与故障诊断系统以现代科学中的机械振动、转子动力学、可靠性理论、失效理论等为理论基础;以计算机程序设计为主要技术手段,借助传感器等仪器仪表测量与监测设备运行过程中的振动、噪声、温度、压力、流量等参数;利用信号分析和数据处理技术,对这些参数的模型或者数字信息进行分析处理;运用人工智能建立动态信息与设备故障之间的联系,对设备进行综合诊断。

近几年来,随着科学技术的发展,人们越来越重视安全生产,认识到对设备进行状态监测与故障诊断的重要性和必要性,状态监测与故障诊断系统日益广泛应用,不断出现各种针对不同监测对象,不同类型的状态监测与故障诊断系统。

状态监测与故障诊断系统主要分为基于台式机和便携式的两大类。台式机系统主要是针对专门的大型设备如汽轮发电机组、空压机组等设计的,监视功能齐全,有较强的分析和诊断功能。但由于台式机体积庞大难以随身携带,在生产现场也难以展开等,这些都限制了它的使用范围,且对中小型机械设备来说投资高,不利于广泛推广。便携式系统因其质量轻、体积小、携带方便等优点,可以弥补基于台式机系统的不足,以便实现简易、迅速的定期巡回检测和分析诊断,了解设备的工作状态。

当前对机械设备进行状态监测系统主要有三种方式:在线监测系统、离线监测系统和便携式监测系统。在线监测系统适用于对一台或几台关键设备的部分关键参数进行连续监测和及时的故障预报、诊断,其系统构成复杂,费用昂贵,专用性强。离线监测系统较简单,主要是依靠现场信号采集,然后进行数据分析与故障诊断,不能实时处理、分析,因此很难及时提供设备维修的建议。而便携式监测系统既能在线监测诊断,又能离线分析诊断,具有分析功能强大、便携轻巧、价格较低、操作简便、灵活,能自己供电,可以实现简易、迅速的定期巡回检测和分析诊断等优点。它是在线监测系统的补充,具有可临时替代功能,也可进行一些特殊的采集和故障分析^[14]。所以对于在生产流程工业中占绝大多数的中小型关键性设备,大多采用便携式状态监测与故障诊断系统。

1.4 平台作业设备故障诊断技术的工作原理及工作方法

平台作业设备状态监测与故障诊断技术的实质是了解和掌握海洋平台上各种生产作业设备在运行过程中的状态，评价、预测设备的可靠性。早期发现故障，并对其原因、部位、危险程度等进行识别，预报故障的发展趋势，并针对具体情况做出决策。

由此可见，海洋平台作业设备状态监测与故障诊断技术包括识别设备状态和预测设备故障发展趋势两方面的内容。具体过程分为状态监测、分析诊断和治理预防三个基本环节^[15](图 1-1)。

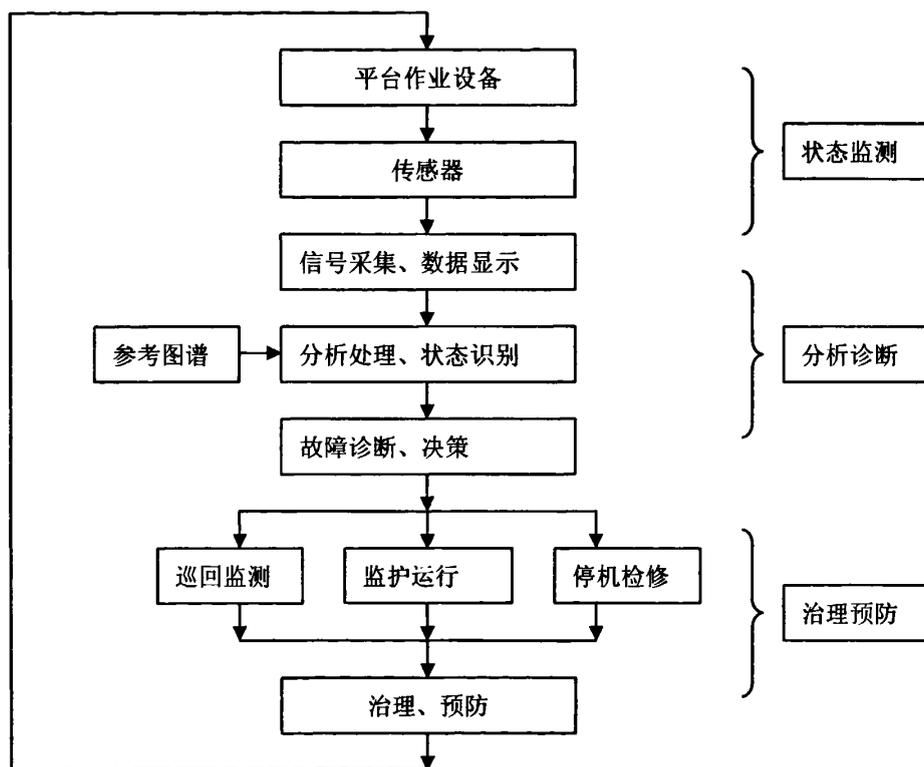


图 1-1 平台作业设备状态监测与故障诊断的三个阶段

Fig.1-1 Three phases of condition monitoring and fault diagnosis

1.4.1 故障诊断技术的工作原理

在设备监测和故障诊断技术中，异常及故障的表现叫做征兆，征兆的特点叫模式。和医学诊断相似，为了进行机械故障诊断，要将故障征兆进行分类(如振动、噪声、变形、残留物、松动、斑点、凹坑、断裂等)，弄清故障类别(磨损、裂纹、腐蚀、不平衡、不对中泄露)，性质(渐发性、扩展性)和程度(局部故障、整机故障等)，在掌握了故障具体类别之后，就可根据故障的机理预测其发展情况，提出相应对策。故障

诊断技术一般有如下四个方面的工作内容。

(1) 信号检测 就是正确选择测试仪器和测试方法, 准确地测量出反映设备实际状态的各种信号(应力参数, 设备故障劣化的征兆参数, 运行性能强度参数等), 由此建立起来的状态信号属于初始模式。

(2) 特征提取 将初始模式的状态信号通过放大或压缩、形式变换、去除噪声干扰等处理, 提取故障特征, 形成待检模式。

(3) 状态识别 根据理论分析结合故障案例, 并采用数据库技术所建立起来的故障档案库为基准模式, 把待检模式与基准模式进行比较和分类, 即可区别设备的正常与异常。

(4) 预报决策 经过判别, 对属于正常状态的设备可继续监测, 重复以上程序; 对属于异常状态的设备则要查明故障情况, 做出趋势分析, 估计今后发展和可继续运行的时间以及根据问题所在提出控制措施和维修策略。

海洋平台作业设备故障诊断的基本过程如图 1-2 所示。

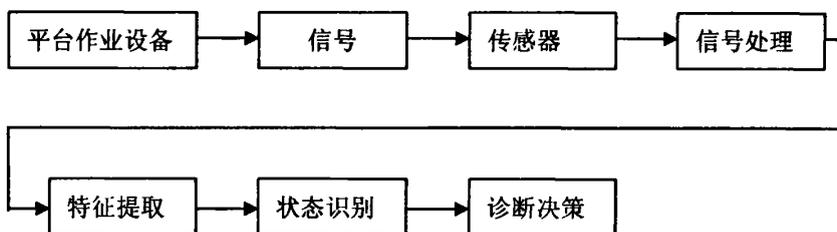


图 1-2 设备故障诊断的基本过程和原理

Fig.1-2 Basic processes and principles of equipment fault diagnosis

1.4.2 故障诊断技术的工作方法

故障诊断方法的分类是一门非常重要的研究课题, 许多学者提出了不同的分类方法。表 1-1 列出了一些常用的故障诊断工作方法及应用场合。

表 1-1 故障诊断技术的工作方法和应用场合

Table 2-1 Working methods and applications of fault diagnosis technology

序号	故障征兆	工作方法	应用场合
1	振动	强度测定、频谱分析、SPM 脉冲诊断	旋转机械、往复机械、流体机械、转轴、轴承、齿轮等
2	温度	红外测温、红外热像、热电偶	热工设备、工业窑炉、电动机、电器、电子设备等
3	油液	油品的理化性能、磨粒的铁谱分析及油液的光谱分析	设备润滑系统、有摩擦副的传动系统、电力变压器等
4	声学	噪声、声阻、超声波、声发射等	压力容器及管道、流体机械、工业阀门、断路开关等

5	强度	载荷、扭矩、应力、应变等	起重运输设备、锻压设备、各种工程结构等
6	压力	压力、压差、压力联动等	液压系统、流体机械、内燃机、液力耦合器等
7	点蚀和裂纹等	着色渗透、X射线、磁粉探伤、声发射等	设备及零件的表面损伤、换热器及管道内孔等
8	电气参数	电流、电压、电阻、功率、电磁特性、绝缘性能等	电动机、电器、输变电设备、微电子设备、电工仪表等
9	工况指标	设备运行中的工况和各项主要性能指标等	流程工业或生产线上的主要生产设备等

选用上述工作方法要根据对象不同而有所区别，其中以振动、油液、温度及声学的方法应用最多。

1.5 课题的主要研究内容

1.5.1 课题的提出

本课题是根据中石化胜利油田海上采油平台安全保障系统项目提出的。该项目以海洋平台的安全隐患(如结构累积损伤、腐蚀，平台生产设备的不正常运行，危险化学气体 H_2S 和烷烃气泄漏等)为研究背景，攻克复杂海洋环境下平台结构累积损伤、腐蚀的状态监测与安全分析技术，平台生产设备远程诊断、预警与安全分析技术，基于 Zigbee 无线网络平台的危险化学气体无线预报技术和机泵群无线巡检技术。研发具有自主知识产权的平台综合智能维护系统或模块化分析系统，提高产品运行的稳定性、可靠性、安全性及使用效率和寿命。

本课题主要研究内容分为两方面，一是海洋平台作业设备状态监测与故障诊断研究，为满足对海洋平台不同设备进行巡回检测和分析诊断，确保生产设备的安全、充分了解多台机组运行情况，预防故障的发生，开发了海洋平台设备状态分析与故障诊断系统。二是非平稳信号分析方法研究，从平台作业设备采集的信号大多数属于非平稳信号，对于这类信号，难以用传统的傅里叶变换进行有效的分析，因此，本文从小波分析理论入手，充分利用小波变换在非平稳信号分析中的优势，开发了离线小波分析控件，并进而针对轴承故障诊断，结合小波分析理论初步提出了一种新的故障诊断方法。

1.5.2 论文的整体结构

课题在广泛研究平台作业设备故障诊断机理和数字信号处理的基础上，开发了实时在线监测系统，并对非平稳信号的分析方法做了研究。论文各章的主要内容如下：

第一章对海洋平台状态监测与故障诊断技术做了简要的、系统的阐述，说明论文的主要研究内容。

第二章介绍了系统的设计要求、总体构架和开发环境，通过系统框架图，展示了系统的工作过程和主要功能。

第三章介绍了系统在线监测的各部分功能，包括添加机组、打开/删除机组、报警值/危险值设置、参数设置、实时监测界面、数据保存等。

第四章介绍了离线小波分析控件的开发，包括小波控件开发的过程以及实际数据在控件中的应用。

第五章介绍了一种新的基于小波多尺度分解的时域参数向量法在滚动轴承故障诊断中的应用，并做了大量的信号仿真及实验研究。

第六章对课题和论文工作进行概括总结，并结合工作中的体会对下一步工作提出了展望。

1.6 本章小结

本章主要介绍了开展海洋平台故障诊断研究的重大意义以及海洋平台状态监测与故障诊断技术的发展现状。根据本论文的研究内容，着重介绍了海洋平台作业设备的状态监测及故障诊断技术，包括设备故障诊断的发展阶段、应用前景、工作原理以及工作方法。最后介绍了课题背景和论文的整体结构。

第二章 海洋平台在线监测系统总体方案设计

本课题主要针对海洋平台作业设备开展实时在线监测的研究,属于海洋平台安全保障系统的一部分。对海洋平台作业设备实施状态监测的目的主要是了解被监测设备当前的运行状况,判断设备状态未来的发展趋势,诊断设备故障的发生部位,以及检查和验收大修或临时维修的效果,以实现设备故障早知道、早预报、早诊断,把故障消灭在萌芽之中,并针对具体情况做出实施维护决策的技术。海洋平台在线监测系统总体方案设计包括对硬件的要求及软件模块的设计。

2.1 系统设计过程中要考虑的因素

系统方案设计的好坏是系统成败的关键,它不仅直接影响系统的质量,还决定着系统将来的发展与维护。系统的方案设计必须结合海洋平台作业设备的实际情况,充分发挥能动性,在保证可靠性的前提下,力求功能实用、分析可靠、操作简单,另外还要有良好的兼容性和扩展性。

为了使该系统满足上述要求,在生产实际中发挥作用,设计时必须着重考虑以下因素:

(1) 可靠性。可靠性是系统设计所要考虑的首要因素。系统应用于所监测和诊断的对象,其目的是为了确保其安全运行,延长其使用寿命,因此系统本身应比监测的对象具有更高的可靠性。如果一味追求功能指标而不注意可靠性问题,则将失去其工程价值。由于本系统面向海洋平台这个大的工程背景,现场情况复杂,噪声、振动很大,工作环境恶劣,尤其当系统正在对海洋平台的机组进行监视时,任何一个微小的错误都可能导致系统的崩溃或者错误的结果,因此保证系统的可靠性是一项艰巨的任务。

(2) 实时性。平台作业设备的故障按形成速度分为突发性故障和缓变性故障。突发性故障一旦发生就使工况急剧恶化,轻者使机器不能正常运行,严重时甚至导致整机损坏乃至灾难性后果,因而突发性故障是设备故障诊断预防的重点。要求系统处于在线监测情况下具有实时性,就是为了及时了解工况,预防突发性故障的发生。缓变性故障发展缓慢,有早期征兆,可早期发现,一般不影响机器的继续运行,但随着故障发展,缓变性故障也可能转化为突发故障,所以需要进行实时监测,以密切注意其发展趋势,防止故障扩大。

(3) 高效性。由于本系统要实现海洋平台多种设备进行管理,对象动态可变,因此参数设置和维护十分频繁,同时采样监测工作十分复杂,数据处理的量也很庞大,只有系统各项任务的处理工作简洁、高效,才能实现系统的实时性。同时分析手段应

力求丰富、有效，分析结果应力求准确、可靠，才能使用户对现场工况进行综合分析，做出正确判断。

(4) 扩展性。系统在设计及研制时应考虑到今后的扩展和自开发问题，以满足技术发展的连贯性和一致性需要。可维护性也是一个重要的因素，开发好的系统应该充分考虑用户在现场使用时进行维护的便利性，模块的更换，系统的检查维护等都应十分方便，易于操作。同时还要注意系统的独立性，本系统是在设备原有监测仪表基础上的功能拓展，因此要做到使用或断开情况下不影响已有生产仪表的正常工作，也就是说即使系统开路或短路、接地等都对现场仪表的正常指示无影响。

2.2 系统的工作过程

在实际进行平台作业设备故障诊断时，仅凭借工人的经验可以判断出设备是否有故障，但是并不能指出设备发生了什么故障。要想判断故障类型和故障部位，就必须使用完整的状态监测与故障诊断系统，对设备状态进行详细分析。基于计算机辅助的在线监测与诊断系统的主要环节如图 2-1 所示。

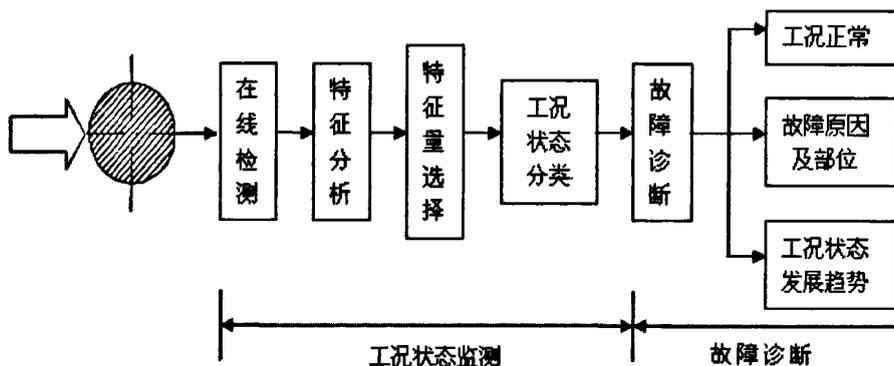


图 2-1 设备状态监测与故障诊断系统的主要环节

Fig.2-1 Main links of equipment condition monitoring and fault diagnosis system

采用在线监测与故障诊断系统进行故障诊断，不能像有经验的工人那样凭经验，而是必须通过采取系统运行状态的特征参数，运用一定的分析方法来确定系统的状态，本质上是一个系统识别的过程。其主要的实施过程如下^[16,17]：

(1) 信号的在线检测：信号的在线检测必须满足两方面的要求。一是在线，这是针对系统而言，是指对于连续运行的海洋平台作业设备运行过程中信号的检测，是生产线上进行的，否则达不到监测与诊断的目的。二是动态过程具有多方面的信息，但不是所有的信息都能反映设备的故障状态，没有必要都检测，所选择的信号及其在机器上的部位都要能敏感地反映工况特征信息的变化。此外，在信号在线检测中，所选

用的传感器必须能完整的将信号采集下来。

(2) 信号的特征分析：鉴于直接检测信号大都是随机信号，它包括了大量的与故障无关的信息，一般不宜用作判别量。需要用现代信号分析和数据处理方法把直接检测信号转换为能表达工况的特征量。对于某些有规律的信号，也可从波形结构上提取特征量。特征分析目的是用各种信号处理方法作为工具，找到工况状态与特征量的关系，把反映故障的特征信息和与故障无关的特征信息分离开来，达到“去伪存真”的目的。因此，信号处理是特征分析的一种工具，但不是唯一工具，用作特征分析的方法有频域分析、时域分析、统计分析、小波分析及波形结构分析等等。

(3) 特征量的选择：将初始模式向量进行维数压缩、形式变换，去掉冗余信息，提取故障特征，形成待检模式。在实际生产中，各个特征量对工况状态变化的敏感程度不同，应当选择敏感性强、规律性好的特征量，达到“去粗取精”的目的。选择对具体的平台作业机械最敏感的特征量，才能加强监视诊断的针对性，提高诊断的准确性。特征量的选择还要考虑判别的实时性，要求计算简单，如能在一定程度上表达工况状态的物理含义，就更有利于对工况状态变化进行的分析。

(4) 工况状态识别：工况状态识别就是状态分类问题，分类与诊断往往是一个概念，此处从生产过程不同的目的考虑，把“分类”分成监视与诊断两个问题，工况监视的目的是区分工况状态是正常还是异常，或者哪一部分不正常，便于进行运行管理，强调在线和实时性。因为主要是正常与异常两种状态，用模式识别及模型参数判别都很有效。

(5) 故障诊断：故障诊断首先需要根据监视系统提供的信息，对当前工况状态及其发展趋势做出确切的判断。故障诊断的主要任务是针对异常情况，查明故障部位、性质、程度，这就不仅需要根据当前机组的实际运行工况，而且还需要考虑机组的历史资料及该领域专家的知识，才能做出精确诊断。诊断和监测不同之处在于诊断精度放在第一位，而实时性是第二位。

2.3 系统总体构架

该系统以海洋平台现场监测为主，针对海洋平台作业设备进行实时在线监测。为了满足现场的使用要求，系统硬件、软件依据模块化设计思想，分为数据采集、在线监测、数据管理等模块，既可以在 Windows 98 系统中运行又可以在 Windows XP 系统中运行。

系统整体结构如图 2-2 所示：

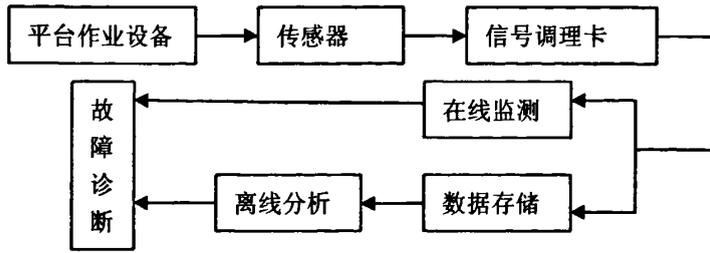


图 2-2 系统整体结构图

Fig.2-2 Overall structure of the system

2.3.1 系统的硬件实现

系统硬件部分的基本功能即信号调理和 A/D 转换。采用压电式加速度传感器对监测设备进行信号采集。把采集到的模拟信号，经过抗混滤波、放大、A/D 转换，然后将所得数字信号传送到 PC 机进行处理、分析和保存。信号采集系统的硬件基本组成如图 2-3 所示。

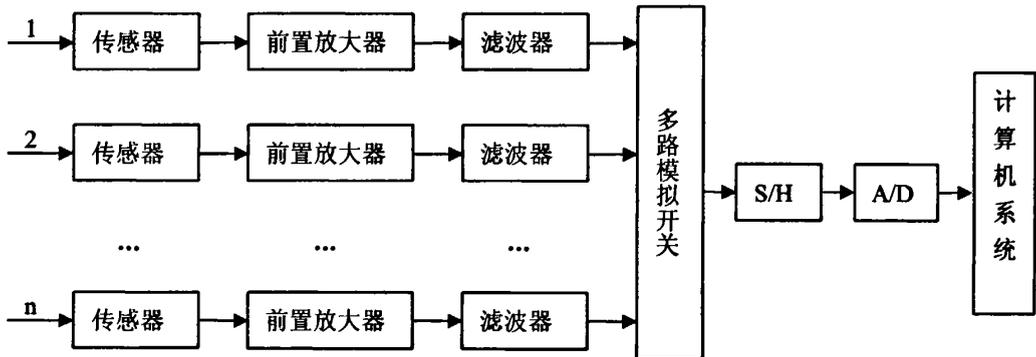


图 2-3 信号采集系统硬件结构原理图

Fig.2-3 The hardware structure of signal acquisition system

1. 传感器：亦称变换器，它能将所测量的某一物理量，按一定规律转换为与之对应的另一种物理量并输出。传感器是实现自动检测与自动控制的首要环节，如果没有传感器对原始信息进行准确可靠的捕获与转换，那么自动检测和自动控制都将无法实现^[18]。

传感器一般由敏感器件与其他辅助器件组成。敏感器件是传感器的核心，它的作用是直接感受被测物理量，并将信号进行必要的转换输出。如应变式压力传感器的弹性膜片是敏感元件，它的作用是将压力转换为弹性膜片的形变，并将弹性膜片的形变转换为电阻的变化而输出。

传感器的种类繁多，在工程测试中，一种物理量可以用不同类型的传感器来检测；

而同一种类型的传感器也可测量不同的物理量。数据采集中常用的传感器基本类型见表 2-1。

表2-1 数据采集中常用的传感器

Table 2-1 Sensors commonly used in mechanical engineering

传感器类型	名称	被测量	变换量
机械式	弹性转换元件	力、压力、温度	力、压力、温度—位移
电气式	电阻式传感器	位移	位移—电阻
	电阻丝应变片	力、位移、应变	形变—电阻
	半导体应变片	力、加速度	形变—电阻
	电容式传感器	位移	位移—电容
	电涡流传感器	位移	位移—自感
	电感式传感器	位移、力	位移—自感
	差动变压器	位移、力	位移—互感
	压电元件	力、加速度	力—电荷
	压磁元件	力、扭矩	力—磁导率
	热电偶	温度	温度—电势
	霍尔元件	位移	位移—电势
	光敏晶体管	转速、位移	光—电流
热敏电阻	温度	温度—电阻	

传感器的分类方法很多，按被测物理量来分，可分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器、温度传感器等。

选用传感器时应考虑以下基本原则^[6]：

(1) 灵敏度

一般来讲，传感器的灵敏度越高越好，因为灵敏度高，意味着传感器所能感知的变化量越小，即被测量稍有微小变化时，传感器就有较大的响应。

在实际应用中，欲测知某一系统的特性时，往往不可能令系统的变化量值无限增大，因为这会改变系统的正常工作状态；此外，高精度的机械系统，其运动误差量是非常微小的，甚至在微米级以下，欲获得能够检测或辨别这样微小量值的条件，必须要求传感器具有较高灵敏度。

当然，也应考虑到，当灵敏度愈高时，与测量信号无关的外界噪声也容易被混入，并且噪声也会伴随着被电子放大系统放大。这时必须考虑既要检测微小量值，又要噪声小。为保证此点，往往提出要求，信噪比愈大愈好，即要求传感器本身噪声小，且不易从外界引进干扰噪声。

与灵敏度紧密相关的是量程范围，当输入量增大时，除非有专门的非线性校正措施，传感器工作不应进入非线性区域，更不能进入饱和区域。某些测试工作要在较强的噪声干扰下进行。这时，对传感器来讲，其输入量不仅包括被测量，也包括干扰量，两者的叠加不能进入非线性区。显然，过高的灵敏度会影响其适用的测量范围。

此外,当被测量是一个向量时,并且是一个单向向量,那么要求传感器单向灵敏度愈高愈好,而横向灵敏度愈低愈好;如果被测量是二维或三维向量,那么对传感器还应要求交叉灵敏度愈低愈好。

(2) 响应特性

传感器的响应特性是指在所测频率范围内,保持不失真的测量条件。实际传感器的响应总有一定延迟,但希望延迟时间愈短愈好。

一般讲,利用光电效应、压电效应等物性型的传感器,响应时间小,可工作频率范围宽;而结构型,如电感、电容、电磁感应型传感器,出于受到结构特性的影响,往往受到机械系统惯性质量的限制,其固有频率低,影响到传感器的工作频率范围。

在动态测量中,传感器的响应特性对测试结果有直接影响,在选用时,应充分考虑到被测物理量的变化特点(如稳态、瞬变、随机等)。

(3) 线性

任何传感器都有一定的线性工作范围,在线性范围内输出与输入呈比例关系。线性范围愈宽,则表明传感器的工作量程愈大。

传感器工作在线性区内,是保证测量精度的基本条件,例如,机械式传感器中的测力弹性元件,其材料的弹性极限是决定测力量程的基本因素,当超出测力元件的允许测力范围时,将产生非线性误差。

然而,任何传感器,保证其绝对工作在线性区也是不容易的,某些情况下,在许可限度内,也可以取其近似线性区域。例如,变间隙型的电容、电感传感器,其工作区域选在初始间隙附近。选用时必须考虑被测量变化范围,令其非线性误差在允许限度以内。

(4) 稳定性

稳定性表示传感器经过长期使用以后,其输出特性不发生变化的性能。影响传感器稳定性的因素是时间与环境。

为了保证稳定性,在选定传感器之前,应对使用环境进行调查,以选择较合适的传感器类型。例如,电阻应变式传感器,湿度会影响其绝缘性;温度影响其零漂,长期使用会产生蠕变现象。又如,变间隙型的电容传感器,环境湿度或油剂浸入间隙时,会改变电容器介质。光电传感器的感光表面有尘埃或水汽时,会改变感光性质。磁电式传感器或霍尔效应元件等,当在电场、磁场中工作时,亦会带来测量误差。滑线电阻式传感器表面有尘埃时,将改变滑线运动的均匀性,从而引入噪声,或改变其工作过程。往往要求传感器能长期地使用而不需经常更换或校准,在这种情况下,应对传感器的稳定性有严格的要求。例如,用于热轧机系统控制钢板厚度的 γ 射线检测装置,用于自适应磨削过程的测力系统或用力零件尺寸的自动检测装置等,往往是在比较恶劣的环境下工作,尘埃、油剂、温度、振动等干扰是很严重的,对于这种场合下使用的传感器,必须优先考虑稳定性因素。

(5) 精确度

传感器的精确度,表示传感器的输出与被测量的对应程度。前已述及,传感器处于测试系统的输入端,因此,传感器能否真实地反映被测量值,对整个测试系统具有直接影响。

然而,也并非要求在所有场合下使用的传感器的精确度愈高愈好,因为还应考虑到经济性。传感器的精确度愈高,价格越昂贵。因此应从实际需要出发来选择。首先应了解测试目的,判定是定性分析还是定量分析。如果是属于相对比较性的试验研究,只须获得相对比较值即可,那么应要求传感器的重复精度高,而无须要求绝对量值。当然,如果是定量分析,那么必须获得精确量值。在某些情况下,要求传感器的精确度愈高愈好。例如,现代超精密切削机床,其运动部件的定位精度,主轴回转运动误差、振动及热变形等,往往要求测量精确度在 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 范围内,欲测得这样的量值,必须有高精确度的传感器。

(6) 测量方式

传感器在实际条件下的工作方式,也是选用传感器时应考虑的重要因素。例如,接触与非接触测量;破坏与非破坏性测量;在线与非在线测量等,条件不同,对传感器的要求亦不同。

在机械系统中,运动部件的被测参数(例如旋转轴的误差、振动、扭力矩),往往采用非接触测量方式。因为对运动部件的接触式测量,有许多实际困难,诸如测量头的磨损、接触状态的变动,信号的采集等问题,都不易妥善解决,也易造成测量误差。这种情况下采用电容式、电涡流式等非接触传感器很方便。若选用电阻应变片,则需配以遥测应变仪。

在某些条件下,可以运用试件进行模拟实验,这时可进行破坏性检验。然而有时无法用试件模拟,因被测对象本身就是产品或构件,这时宜采用非破坏性检验方法,如电涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤测厚以及声发射检测等。非破坏性检验可以直接获得经济效益,因此应尽可能选用非破坏性检验方法。

在线测试是与实际情况更加一致的测试方法,特别是实现自动化过程的控制与检测系统,往往要求真实性与可靠性,而必须在现场条件下才能达到检测要求。实现在线检测是比较困难的,对传感器与测试系统都有一定特殊要求。例如,在加工过程中,实现表面粗糙度的检测,以往的光切法、干涉法、触针法等都无法运用,而代之的是激光、光纤或图像检测法。实现在线检测的新型传感器的研制,也是当前测试技术发展的一个方面。

(7) 其他

除了以上选用传感器时应充分考虑的一些因素外,还应尽可能兼顾结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修、易于复制等条件。

本课题根据海洋平台现场环境和监测位置的实际情况,选取测量振动信号的压电

式加速度传感器。压电式传感器与其他类型的传感器相比,具有灵敏度高,频率范围宽,线性动态范围大,体积小,安装形式多样等一系列优点,在现场振动诊断中得到广泛应用,是振动测量的主要传感器型式^[19]。在现场作一般性检测时,可采用磁座吸附在设备上数据进行数据采集。

2. 数据采集卡:实现传感器输入信号交流和直流分量的分离,并由模拟开关实现对通道信号的交流/直流分量的选择测量以及对各个交流分量的积分、放大、滤波等预处理。

海洋平台作业设备数据采集的过程主要包括信号预处理和 A/D 转换采样。

(1) 信号预处理

信号预处理是指在数字处理之前,对信号用模拟方法进行的处理。对信号处理的目的是把信号变成适于数字处理的形式,以减小数字处理的难度。信号预处理主要包括以下几种设备、仪器或电路。

① 解调器

在测试技术中,许多情况下需要对信号进行解调。例如被测物理量经传感器变换以后为低频缓变的微弱信号时,需要采用交流放大,这时需要解调;电容、电感等传感器都采用了调频电路,这是将被测物理量转换为频率的变化;对于需要远距离传输的信号,也需要先进行调制处理。因此,在对信号进行 A/D 转换、数据采集之前,需要先进行解调处理,以得到信号的全貌。

② 放大器(或衰减器)

对输入信号的幅值进行处理,将输入信号的幅值调整到与 A/D 转换器的动态范围相适应的大小。实际工程中,这一部分功能一般通过接口箱内的插卡电路来实现。

③ 滤波器

滤波器是一种选频装置,可以使信号中特定的频率成分通过(或阻断)而极大地衰减(或放大)其他频率成分,在测试装置中,利用滤波器的这种选频作用,可以滤除干扰噪声或进行频谱分析。

根据滤波器的选频作用,一般分为低通、高通、带通和带阻滤波器。

④ 隔直电路

由于很多信号中混有较大的直流成分,会造成信号超出 A/D 转换的动态范围,但对故障诊断没有意义,因此需要使用隔直电路滤掉被分析信号中的直流分量。

除解调器外,后三种设备或电路几乎是所有数字信号处理系统中都有的,特别是放大(衰减)器和抗混滤波器,是信号预处理的关键部分。

(2) 信号采集

信号采集是将预处理后的信号转换为数字信号,存入到指定的位置。其核心是 A/D 转换器。信号采集系统的性能指标(精度、采样速度等)主要由 A/D 转换器来决定。

围绕 A/D 转换器还有以下几部分电路或器件。

① 采样保持电路

这个电路在 A/D 转换器之前,是为保证 A/D 转换期间保持输入信号不变而设置的。对于模拟输入信号变化率较大的信号通道,一般都需要采样保持电路,而对于直流或者低频信号通道则不需要。采样保持电路对系统精度起着决定性的影响。

② 时基信号发生器

产生定时间间隔的脉冲信号,控制采样。

③ 触发系统

这个系统决定了采样的始点,有了它才有可能捕捉到瞬时的脉冲输入信号或将采下的信号进行同步相加。

④ 控制器

对多通道数据采集进行控制。控制 A/D 转换器的工作状态(同时采集或顺序采集等)。

2.3.2 系统的软件部分

海洋平台实时在线监测系统的软件部分控制着硬件的数据采集,并对采集的数据进行实时的计算,显示和保存。主要包括以下几个功能模块:

(1) 实时采集

实现多监测点、多参数和多方法的监测功能,并能切换显示在线监测界面,可以实时显示各个通道的振动信号。既可以进行正常工况监测,也可以进行启停机状态监测。

(2) 计算、显示

计算和显示各个通道的有效值、峭度、峰值、峰峰值等敏感参数,能进行简单的频谱显示,用来初步判断设备是否出现故障。

当设备振动测量值超过报警阈值时,系统自动报警,并保存数据,同时生成监测报告。

(3) 保存数据

手动保存数据和自动保存数据,为离线分析和故障诊断提供了充足的数据源。

根据以上设计要求,系统菜单结构图 2-4 所示:

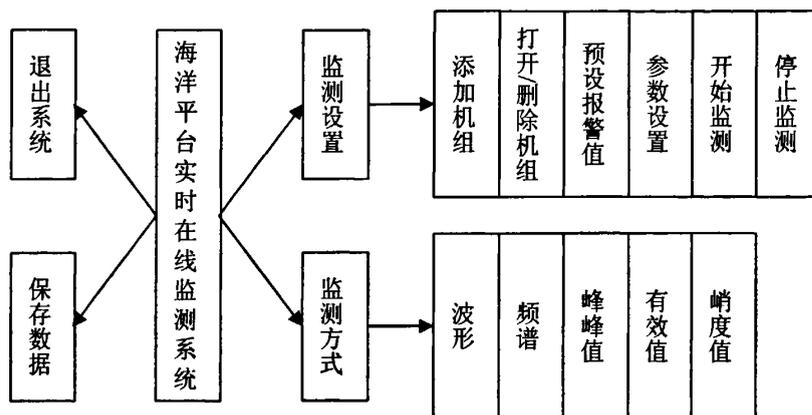


图 2-4 系统菜单图

Fig.2-4 The menu of the system

2.4 系统开发环境

硬件是系统的实体，软件是系统运行的灵魂。一个完善可靠的系统不仅需要高质量的硬件支持，还需要配以高质量的软件。软件环境的选择是实现一项设计方案之前需要考虑的重要因素，是开发一套功能完善、性能可靠的应用软件的基础。软件环境的选择包括软件平台选择和程序开发工具的选取。

2.4.1 软件平台的选择

本系统是海洋平台工程应用系统，直接面向现场用户，这就要求系统拥有一个统一友好的用户界面，简单易学、操作简便。同时所选择的平台应便于快速高效地进行系统开发，起到事半功倍的效果。操作系统起着系统调度、内存管理、文件管理、输入输出管理等重要功能，是应用软件生存和工作的基础。

考虑到以上这些因素，本系统采用 Windows 操作系统作为软件运行和开发的平台。它是目前 PC 机上的主流操作系统，具有一致的图形用户界面，使得用户易学易用，方便地利用熟悉的窗口、菜单、对话框等界面元素进行参数设置、数据管理等一系列复杂的操作。与设备的无关性使得用户能够所见即所得，方便地在各种输出设备上(如打印机)得到当前屏幕上观察到的机组监视画面和各种分析图谱。与微型机上所使用的其他一些操作系统相比，Windows 操作系统更适合于作为本系统的软件平台，因为它具有如下一系列优良特性^[20-22]。

(1) 抢先式多任务：这种抢先式的分时处理可解决 Windows3.x 中协同多任务模式下因一个任务崩溃而导致整个系统死锁的现象。

(2) 多线程：这实际上是多任务在一个应用程序内的反映。有了多线程的支持，Windows 系统下的应用程序更能发挥系统的优势，本系统即应用了这一特性，使系统性能有了很大提高，可靠性更好。

(3) 多个消息队列：每个应用程序都有自己的消息队列，可防止因某程序失败而不能接收消息，导致系统死锁的现象。

(4) 独立的内存空间：每个进程都有自己单独的地址空间，各程序间的内存相互独立，一个应用程序产生的错误不可能影响到另一程序，稳定性更好。同时可更高效地支持大于 64K 的数组等数据对象，算术运算性能高，运行速度快，这对于本系统数据量大、数据处理频繁、实时性要求高的特点有着重要意义。

(5) 强大的网络功能：提供了 TCP/IP 组件，可以很方便地设置使用，便于网络通讯，数据传输。

2.4.2 开发语言的选择

Windows 编程是一种新的编程方式，无论其程序控制、资源使用，还是程序的调试运行，都与 DOS 程序的开发有很大的不同。DOS 程序是单线程、顺序执行的，其程序在运行时独占系统资源，其输入和输出完全由程序本身控制；而 Windows 程序则是多线程、事件驱动、消息循环的，在程序运行时，单个程序不能独占系统资源，系统资源被多个同时运行的程序所共享，其输入和输出必须通过 Windows 的输入/输出功能实现。这些差异导致 Windows 程序设计及运行依赖于 Windows 所提供的编程机制和系统功能。而且，Windows 还为用户提供了大量的可以直接使用的基础类库的支持，用户可以使用这些基础类库方便地完成程序的设计和代码的实现。

当前开发 Windows 程序的较为流行的语言有 Borland 公司的 BC (Borland C++)、DELPHI，Microsoft 公司的 VB (Visual BASIC)、VC (Visual C++)，Sun 公司的 JAVA 等。VB 和 DELPHI 可视化编程能力较强，简单易用，但数据类型较少，计算能力不强，对复杂的实时性工程的驾驭能力不如 BC 和 VC。JAVA 是当前比较流行的语言，它的最大优点是可移植到其他平台，但是使用一个“虚拟机”来运行可移植的字节码而非本地机器码，使得程序的编译速度变慢。VC 和 BC 都是用 C++ 进行可视化编程的工具。C++ 是一门优秀的程序设计语言，它是 C 语言的扩展，继承了 C 语言高效、简洁、快速、可移植性好的传统，同时还提供了面向对象的特性和模板特性。它融合了三种独立的编程传统——C 语言代表的过程性语言传统，C++ 在 C 语言基础上添加的类代表的面向对象语言的传统，C++ 模板支持的通用编程传统，因此既可以进行过程化程序设计，也可进行面向对象的程序设计和通用编程。C++ 实现了类的封装、数据隐藏、继承及多态，使得其代码容易维护及高度可用。随着 C++ 成为 ANSI 标准，这种新的面向对象程序设计语言迅速成为了程序员使用最广泛的工具。几乎在所有的

计算机研究和应用领域，都能看到 C++ 的影子^[23]。

早期的 Windows 程序多采用 BC 开发，但 VC 后来居上，Visual C++ 是 Microsoft 公司推出的强有力的 Windows 编程工具，它与 Windows 操作系统更加紧密的结合及其良好的集成开发环境，使得它已成为当今世界最流行的软件之一，与 BC 相比具有如下特点^[24-27]：

(1) 具有强大的类库功能和完善的类库框架。Visual C++ 所提供的 Microsoft 基础类库 (Microsoft Foundation Class Library, 简称为 MFC)，对 Windows 95/NT 所用的 Win32 应用程序接口 (Win32 Application Programming Interface) 进行了十分彻底的封装，它为编程者提供了一个应用程序框架，这个应用程序框架为编程者完成了很多 Windows 编程中的例行性工作，如管理窗口、菜单和对话框，执行基本的输入和输出、使用集合类来保存数据对象等等，这使得可以使用完全的面向对象的方法来进行 Windows 95/NT 应用程序的开发，从而大量地节省了应用程序的开发周期，降低了开发成本，也使得 Windows 程序员从大量的复杂劳动中解救出来，用 MFC 编写的程序也更加便于维护和扩充。

(2) 编译功能强大，优化编译效果好。MFC 类库应用程序几乎与 Windows SDK 一样短，运行速度有时比相应的 Windows SDK 程序更快。

(3) 简便的消息处理机制和强大的在线帮助能力，给程序的开发带来了极大的方便，使 Windows 编程不再深奥和晦涩，而是一件有意义并且有趣的事情。

(4) 完善的向导功能。所提供的 Appwizard、Classwizard 及资源编辑器等极大地减小了编程的繁杂程度，提高了程序的设计效率。高度集成化的工作平台使应用程序一些界面特性，如属性页 (也叫标签对话框)、打印和打印预览、浮动的和可定制的工具条变得更加容易，同时给程序设计、调试带来极大的方便。

2.4.3 面向对象程序设计方法

面向对象 (OO, Object-Oriented) 程序设计的基本思路是基于面向对象方法的。面向对象方法的本质是强调从客观世界固有的事物出发来构造系统，用人类习惯的思维方式认识世界、理解和描述客观事物，强调最终建立的软件系统能够映射问题域，对象及对象之间的关系能够如实反映问题域中的事物及其关系^[28-33]。

从本质上讲，Visual C++ 是一种面向对象的程序设计语言，它具有面向对象程序设计语言的许多特征，如自底向上的设计方法、基于类、封装特性、继承特性、抽象特性、多态特性、自引用、动态绑定等。

1. 面向对象的基本概念

(1) 数据抽象

数据抽象 (Data Abstraction) 是面向对象程序设计的一个基本特征。它是指从较为

特殊的类或对象中抽出一般属性以建立一个超类的过程，即从对象中抽出所需要的一些特征的过程。在数据抽象过程中，需要研究目标程序所要解决的问题，以及组成该问题的概念性的实体，以找出有助于解决问题的一些特性，从而得到对该问题的抽象结果。

在面向对象的程序设计过程中，常常需要进行不同级别的抽象过程。对于高级抽象，一个问题可能会抽象为一些特定对象的交互行为；而对于低级抽象，这些特定对象的交互行为可以分解为更小的对象的交互行为。

例如，用户要设计一个公司的办公管理系统，可以将系统理解为该公司某些不同部门之间的信息交流；而在另一个级别上，对于各部门又可以理解为一些不同的小组之间工作的相互配合。

由于在数据抽象过程中，每一层的抽象会带来不同的可重用代码。因此，常常需要对同一问题分别进行不同级别的抽象。

实际上，Visual C++语言所提供的类的概念，就是对一些概念和问题进行抽象的结果，而对象则是这些类的实例。

(2) 封装

封装(Encapsulation)是将方法和数据放在同一对象中，从而使对数据的存取只能通过该对象本身的方法进行，程序的其他部分不能直接作用于此对象的数据，对象之间通过消息进行交互。

对于一个全局变量或子程序(函数)，因其无法封装其自身，所以其他程序可以任意引用(或调用)。正因为如此，这些数据有可能被不恰当地使用，从而为程序带来隐患。

通过定义类可以尽可能地将数据、函数等封装起来，只是通过类所规定的接口，外界才能访问类中的数据，从而大大增加了程序的可靠性。

数据封装也是面向对象程序设计的一个基本特征。只有类中的对象才能自由地存取其所属类的数据成员。

(3) 继承性

继承性(Inheritance)是面向对象程序设计的一个独特的基本特性。在其他类型的程序设计中，数据类型之间没有父子的层次关系。在面向对象程序设计中，一个类可以继承另一个类中所有的数据成员和成员函数，而且这个类还可以定义其自己的数据成员和成员函数。按照这种方法，程序既可以使用类中的对象来实现其特定的功能，也可以使用该类的基类所提供的功能来完成较为普通的任务。

(4) 消息

消息(Message)也是面向对象的一个基本机制。在面向对象程序设计系统中，通过消息来请求对象的动作，对象间的相互联系也通过消息来完成。发送消息的对象称为发送者，接收消息的对象称为接收者。消息中只包含发送者的请求，并不指示接收

者具体的处理方法。确定对象如何处理所接收消息的过程称为实现方法。接收者所拥有的实现方法决定该对象如何处理所接收到的消息。

实际上,用户在实现 Visual C++语言的 Windows 编程时,也仅仅关心消息的发送、接收以及接收后的处理。所有 Windows 程序均是通过消息来实现信息的交互。

一个对象可以接收若干不同形式、不同内容的消息,相同形式的消息也可以发送到不同接收对象,不同的对象对于相同形式的消息也可以有不同解释,从而做出不同的响应。

因此,也可以说,只要给出对象的所有消息模式及其对应于每一个消息的处理方法,便定义了一个对象的外部特征。

(5) 多态性

多态性(Polymorphism)是指同一消息被不同的对象接收后解释为不同含义的功能,它与类的继承性密切相关。利用多态性,用户可以通过发送统一的消息,由各个接收者来完成不同的实现细节。

用户在编写程序时,常常希望对象的类型在编译阶段就确定。如果一个函数要处理一个特定的对象,用户可以给函数传递该类的对象或该类的派生类对象。

支持多态性的语言允许用户根据具体的类来定义一些类成员。对于这些成员,程序在执行时再自动判断其对象的真实类型,然后根据类型的不同来使用不同的版本。利用这种特性,在程序运行时,针对不同的派生类就可以进行不同的处理。

(6) 动态链接

动态链接(Dynamic Binding)是指将程序各组成部分连接起来的过程,通过继承和多态性可以实现动态链接。当面向对象的程序运行时,程序发送一些基本的消息,这些消息可以被不同的类对象接收。通常情况下,类的基类中就定义了处理该消息的普通方法,在派生类中可以对此消息进行特定的定义。当需要处理该消息时,程序通过接收该消息的类动态地找到其对应的处理方法,从而实现了运行时刻的动态链接。

2. 面向对象程序设计方法的优点

面向对象程序设计方法由于其所具有的自底向上的设计、封装、抽象、继承、多态等特性,决定了其在程序设计方面的诸多优点。主要体现在如下几个方面:

- (1) 自底向上的设计方法极大地提高了模块重用的潜在可能性。
- (2) 封装特性使得对以面向对象风格而实现的模块的访问仅仅是通过它们的接口才能实现,编程人员只需知道其接口就可以了,该接口相当于模块功能的规格说明。
- (3) 继承、类属性或其他形式的多态性使异常处理变得更容易,并且能提高系统的可扩展性。
- (4) 维护是局部的,所以代价不高且出错率低,即使面临需求改变的情况下也是这样。
- (5) 继承特性使得有可能清晰地定义并运用一些功能不完备的模型,允许对其扩

展而不改变其他模型或应用程序的操作。

(6) 形式化规格说明以及原型开发方法解决了软件的正确性及健壮性问题，并且能与面向对象的方法协调一致。

(7) 面向对象系统的“开放性”以及“封闭性”同时支持可维护性、重用性以及验证性。

(8) 消息传递机制使得模块以及外部系统和遗留系统之间的接口描述变得更加容易。

2.5 本章小结

本章根据海洋平台实时在线监测系统的工作过程及现场实际情况，分析了系统所要达到的设计要求和需要重点考虑的因素，在此基础上提出了系统总体设计方案，并对系统的硬件部分和软件系统进行了简要介绍，最后讨论了系统运行平台和开发语言的选择，以及采用的面向对象的设计方法。

第三章 海洋平台实时在线监测系统

海洋平台实时在线监测系统是对海洋平台作业设备进行实时监测，动态、详尽地显示平台作业设备的运行信息，主要包括数据采集和数据处理两部分。实时数据采集是最基本且最重要的环节之一，是工况监视及故障诊断的前提和基础。在采集数据正确的前提下，确保采集的高速有效性，对于正确捕捉设备的运行状况至关重要。振动信号采集与处理系统的性能主要由信号采集与处理精度、采样速度及采集数据量三方面来衡量，且它们是相互矛盾的。实际系统设计时要折中考虑三方面的要求，特别是根据其应用领域，充分利用研究对象的特点，以便以较低的投资获得较高的性能。在线监测的流程如图 3-1 所示。

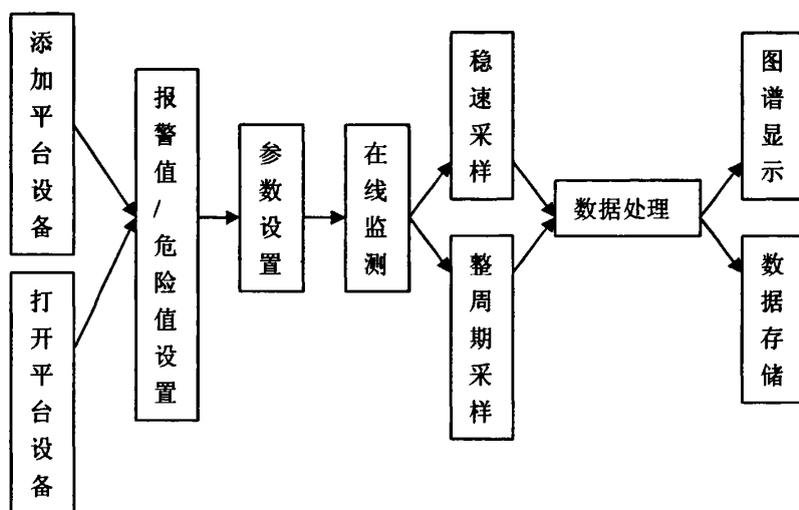


图 3-1 在线监测流程图

Fig.3-1 The flow chart of online monitoring

3.1 海洋平台设备管理

海洋平台作业设备种类繁多，在线监测系统不可能是只针对某一具体的设备而开发的，所以海洋平台的机组、测点等大部分信息是不确定的。随着生产发展的需要，可能会增加新的子平台或者拆掉旧的子平台，而且子平台上的各种机组也会有不同的变化。不同机组的结构、传感器个数和安装位置都有所不同，各机组测点数目、位置、每次数据的采集和保存、实时监测、状态分析等要求都有可能不同。

寻找一个理想的方案既能够让用户灵活方便的处理上述情况，同时又能给系统其他功能模块的自身内部实现带来方便，是首先需要解决的问题，以下所述即为本系统所采取的措施。

采用向导式页面来引导用户逐步完成添加机组到开始监测的整个过程。向导是由

若干有一定次序的对话框组成，采用向导式页面，整个设置工作将一步步根据提示方便快捷地完成，使现场操作人员易学易用；在设置过程中还能及时发现设置中的错误并方便地进行修改，从而有效避免参数设置错误或不全而导致系统的可靠性降低。

3.1.1 添加设备

各子平台设备是通过不同的名称进行区别的，设备信息文件被用于存放后续设置的所有信息，因此首先必须提供设备名称和存储设备参数信息的文件的保存路径，当其路径未被正确设置之前，系统应拒绝进行下一步设置工作，并给出提示信息。在选择“添加设备”菜单后弹出的添加设备设置向导，可通过点击按钮，设置设备路径，然后填写平台（区域）名称和设备名称后，点击“完成”按钮，完成设备添加进入下一步。这时会在对应设备路径中生成相应设备信息文件和数据文件夹。

为了方便操作，添加设备时不需要详细的测点位置，在保存数据时再进行具体设置。如果只是观察机组运行状态，不保存数据，那么设置测点信息则没有意义，只会使操作繁杂。

3.1.2 打开/删除设备

如果要打开已经存在的平台设备或者删除已经存在的平台设备，可通过“打开/删除设备”菜单实现。在设备列表中选择要打开的设备，点击“打开”按钮进入下一步，或者“删除”按钮，删除所有平台设备信息和数据文件，在这一步中，为了防止用户错误删除有用的设备信息，当用户选择了要删除的设备点击“删除”按钮时，系统会弹出提示对话框，请用户确认要删除的设备信息是否正确。

3.2 采样参数设置

3.2.1 报警值，危险值设置

不同的机械设备由于工作要求、结构特点、动力特性、功率容量、尺寸大小以及安装条件等方面的区分，其对应于各等级运行状态的振动烈度范围必然是各不相同的。所以对各种机械设备是不能用同一标准来衡量的，但也不可能对每种机械设备专门制定一个标准。

ISO2372 将常用的机械设备分为六大类，使每一类的机械设备用同一标准来衡量其运行质量。机械设备分类情况如下^[13,34]：

第一类：在其正常工作条件下与整机连接成一整体的发动机和机器的零件（如

15kw 以下的发电机)；

第二类：设有专用基础的中等尺寸的机器(如 15~75kw 的发电机)及刚性固定在专用基础上的发动机和机器(300kw 以下)；

第三类：安装在测振方向上相对较硬的、刚性的和重的基础上的具有旋转质量的大型原动机和其他大型机器；

第四类：安装在测振方向上相对较软的基础上具有旋转质量的大型原动机和其他大型机器；

第五类：安装在测振方向相对较硬的基础上具有不平衡惯性力的往复式机器和机械驱动系统；

第六类：安装在测振方向相对较软的基础上具有不平衡惯性力的往复式机器和机械驱动系统等。

表 3-1 常用机械设备的振动标准——ISO2372

Table 3-1 Vibration standard commonly used in mechanical equipment- ISO2372

振动烈度的分级范围		机械设备的类别			
振动速度的有效值/ (mm/s)	分贝/ (dB)	第一类	第二类	第三类	第四类
0.071~0.112	71~81	良好	良好	良好	良好
0.112~0.18	81~85				
0.18~0.28	85~89				
0.28~0.45	89~93	容许	容许	容许	容许
0.45~0.71	93~97				
0.71~1.12	97~101				
1.12~1.8	101~105	可容忍	可容忍	可容忍	可容忍
1.8~2.8	105~109				
2.8~4.5	109~113				
4.5~7.1	113~117	不允许	不允许	不允许	不允许
7.1~11.2	117~121				
11.2~18	121~125				
18~28	125~129				
28~45	129~133				
45~71	133~137				

由于实际情况是千变万化的，表 3-1 中所示的机器运行质量与振动烈度的关系也只能作为参考。实践表明：比较可靠准确的办法是用振动烈度的相对变化来表示机器的运行质量。可以考虑以机器“良好”运行状态的量级为参考值，在此基础上若增大 2.5 倍(8dB)，表明机器的运行状态已有重要变化，此时机器虽尚能进行工作，实际上已处于不正常状态，若从参考状态的基础上增大 10 倍(20dB)，就说明该机器已需进行修理；再继续增大，机器就将处于不允许状态。上述振动烈度相对变化与机器运行

质量间的关系常用于以振动信号进行故障诊断时的依据。

本系统主要监测对象为海洋平台生产设备，采用第二类机械设备振动标准，再结合实际现场经验，来设定符合实际生产情况的报警值和危险值。所设定的值默认为速度有效值。

报警值/危险值设置可以参考 ISO2372&ISO3945 机械振动标准，从报警值和危险值的下拉框中选择数值，从而设定相应的现场报警值和危险值。报警值和危险值设置有自动保存功能，下次打开会自动显示最近一次的设置值，不需要每次都进行设置。危险值必须大于等于报警值，否则弹出提示。通过程序的自我检查，尽量减少和避免人为的操作失误。

3.2.2 参数设置

在数据采集开始前，要对系统的各个参数进行正确设置，这样才能保证采集到的数据的准确。各个参数的详细说明如下：

通道设置：可以进行单通道、双通道、三通道、四通道的数据采集和显示。在同一次数据采集中，通道号应该与传感器号，测点位置相对应，以免混淆。

采样长度：即采样点数，为了保证信号的完整和较高的频率分辨率，信号采样要有足够的长度。一般选为 2 的整数次幂，使用较多的有 512、1024、2048、4096 等。

分析频率：为了用 FFT 完整地分析信号中包含的所有频率成分，分析频率应该大于信号截止频率(最高频率)。一般取经过抗混滤波后分析信号中的最高频率。

采样频率：根据 Shannon 采样定理，为了防止频率混淆，采样频率应该大于 2 倍的信号截止频率(最高频率)，一般取 2.56 到 4 倍。这里取采样频率为分析频率的 2.56 倍。

包络设置：可以通过硬件对信号进行包络检波，主要用于滚动轴承的故障诊断。

耦合方式：交流耦合多用于采集振动信号，需要对信号做隔直处理；直流耦合多用于采集压力、流量、温度等缓变信号，不对信号做隔直处理。

转速信号：选中该项，可以通过速度传感器进行速度信号采集，用于起停机分析和现场动平衡等操作。

抗混设置：在采样前，应把比所需信号更高的频率成分滤掉，保证所需信号不受高频信号的干扰。

放大倍数：一般可通过程序，根据被测信号的幅度波动自动调整。对于那些波动范围很大很不平稳的振动信号，可以通过手动设置。

触发方式：默认禁外触发，使用内部信号进行触发

低通积分：如果用加速度传感器进行数据采集，不加积分为信号的加速度值；一次积分为信号的速度值；二次积分为信号的位移值。

低通拐点：设置低通滤波的拐点频率。

高通设置：设置高通滤波的截止频率。

3.2.3 开始监测/停止监测

参数设置完成之后，从菜单栏“监测设置”菜单下，选择“开始监测”命令，系统即可开始对平台设备的在线监测，同样，在这一菜单下，有“停止监测”选项，点击此选项，即可停止对已开始监测设备的监测，但此时系统仍在运行，系统并没有退出，点击“开始监测”可重新开始对设备的在线监测。

3.3 系统的实时监控

根据现场设备具体情况，在线功能默认进入多通道监测界面，实时显示时域波形、频谱图，以及监测过程中的峰值、峰峰值、峭度、有效值等。并可实时显示各时域参数趋势。多通道任选，方便快捷。图形显示简洁明快，转速显示实时刷新。

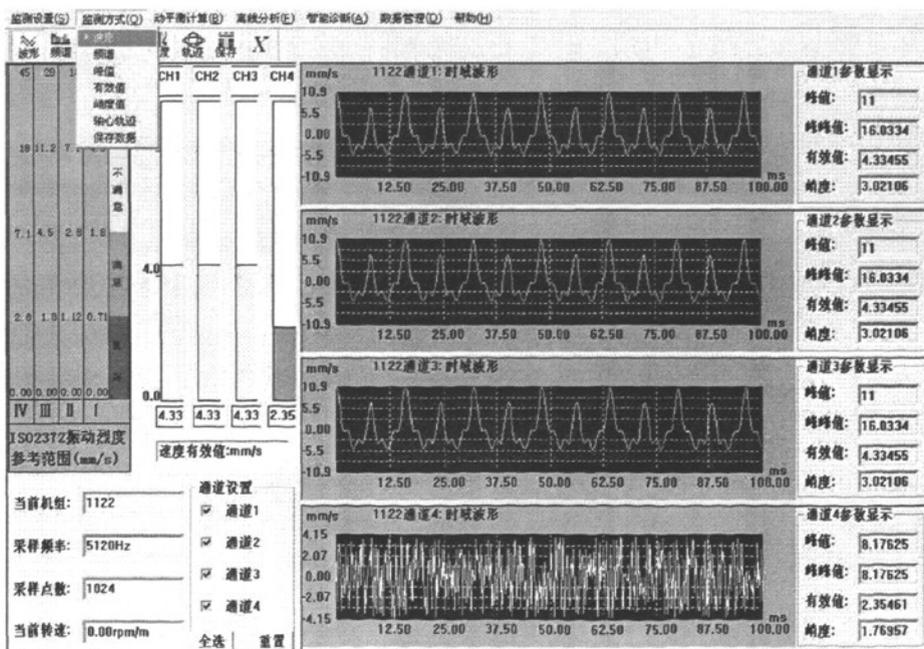


图 3-2 在线监测波形界面

Fig.3-2 Waveform interface of online monitoring

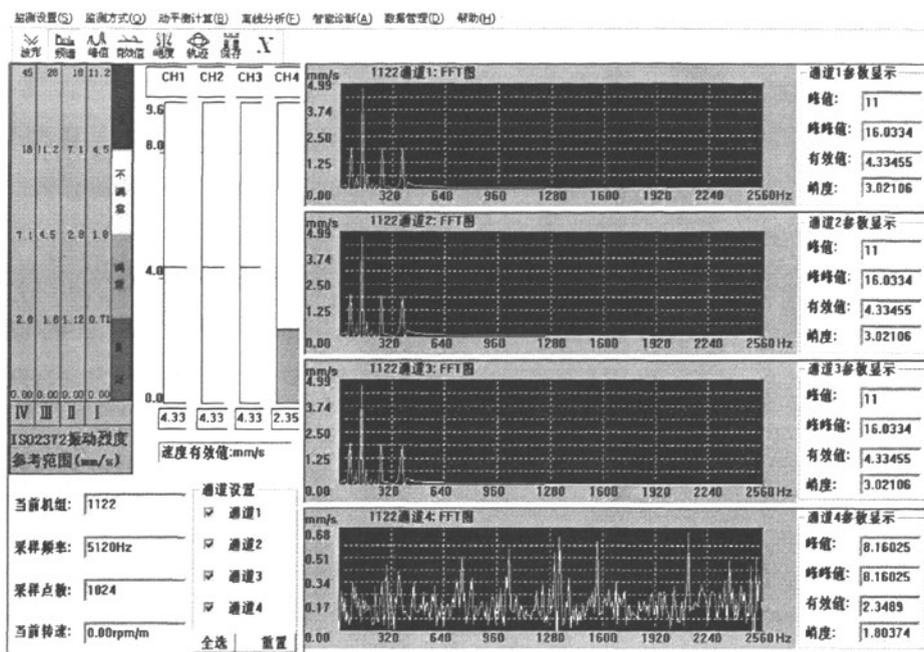


图 3-3 在线监测频谱界面
Fig.3-3 Spectrum interface of online monitoring

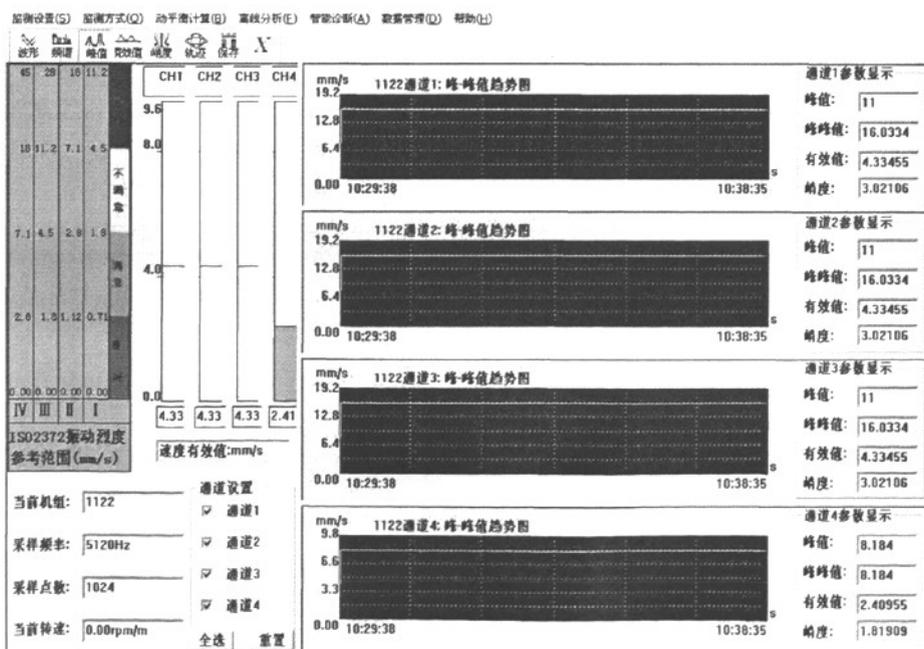


图 3-4 在线监测峰峰值趋势界面
Fig.3-4 P-P value trend interface of online monitoring

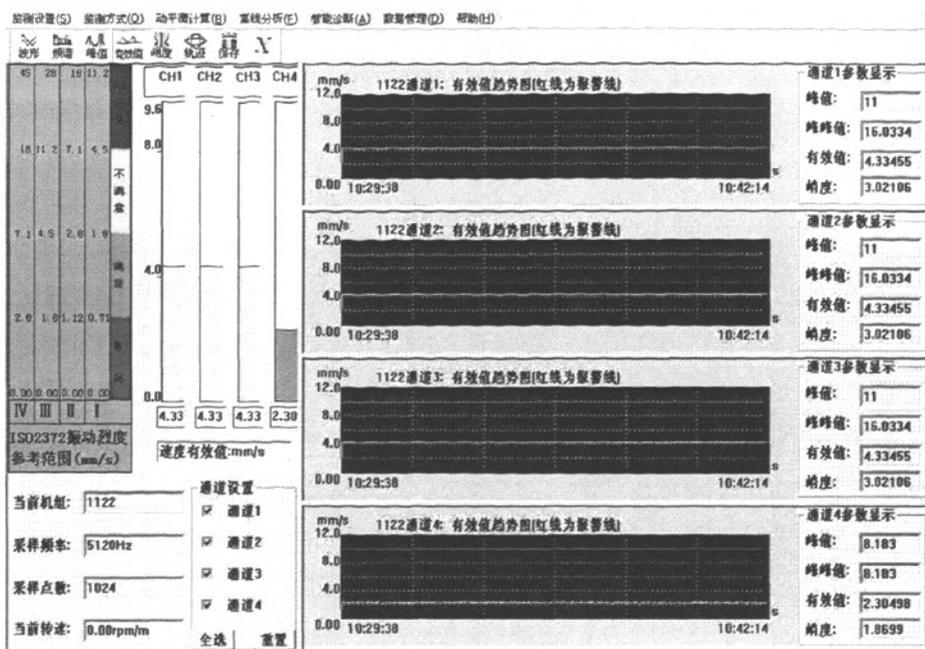


图 3-5 在线监测有效值界面

Fig.3-5 RMS value trend interface of online monitoring

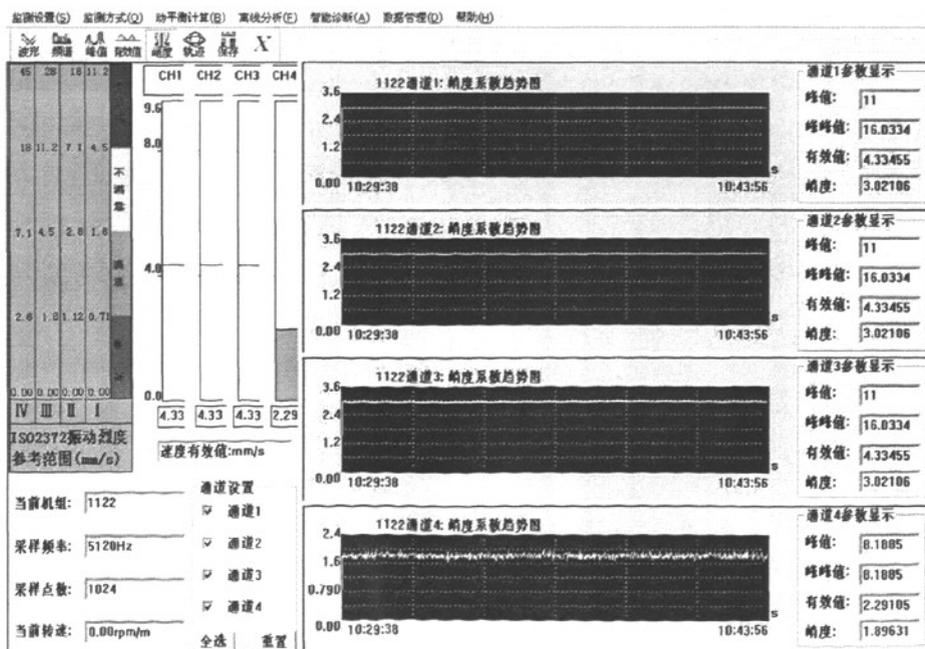


图 3-6 在线监测峭度值趋势趋势界面

Fig.3-6 Kurtosis value trend interface of online monitoring

(1) 四个通道的实时棒图,可分别显示加速度的峰峰值,速度的有效值和位移的峰值。棒图根据前面预设的报警值和危险值,分三种颜色显示:低于报警值,棒图显示为绿色,说明设备运行良好;超过危险值,棒图显示为红色,此时应考虑停机,避免危险事故发生;在报警值与危险值之间,棒图显示为黄色(可能有故障),加强监测密度,做好应对的准备工作。

界面的左下角显示了当前机组、当前转速、采样频率和采样点数等基本信息。

(2) 四个通道的实时图形,根据通道设置和监测方式的不同选择,可分别显示当前数据的波形图、频谱图、趋势图等,将原始数据以不同形式显示出来。可以通过通道设置,选中某个通道,然后单击工具栏图标,就可以只显示选中通道的波形、频谱等,没有被选中的通道保持不变。如只选中通道1和通道3,将其切换到频谱显示,那么只有通道1和通道3转换为频谱显示,通道2和通道4仍为波形显示。这样更便于操作人员多角度地了解机组运行工况,其实质就是一个工况实时在线分析的过程。

(3) 界面右边的参数显示部分,可以实时显示每个通道的峰值、峰峰值、有效值和峭度。峰值是指波形上与零线的最大偏移值,它在指示短时连续冲击的能级上特别有价值,一般用于加速度测量。峰-峰值是指振动波形的最大偏移量,它反映机器的机构强度,尤其在低频段,机构的破坏直接与之有关,故它一般用于位移测量,尤其是在低速大型设备振动测量上。有效值是振动测量中用的最多的物理量,它定义为振动信号的均方根值,既考虑了振动的时间历程,同时又表征了机械振动能量的大小。峭度是反映振动信号分布特性的数值统计量,为归一化的4阶中心矩,它对信号中的冲击特性比较敏感,常用于滚动轴承的故障诊断中。

3.4 数据保存

如何科学地组织和存储庞大的数据,高效的获取和处理这些数据,关系着本系统工作的成败,是本系统的核心问题之一。数据管理是指对数据的组织、编目、定位、存储、检索和维护等。

3.4.1 手动保存

当机组添加完成后,会在选择的机组信息路径中,自动生成以子平台(区域)加设备名称命名的设备信息文件夹,其中包括临时数据文件夹、历史数据文件夹、报警数据文件夹、标准谱文件夹和设备信息文件。

用户可以根据需要,保存相应的通道以及测点数据,这些数据可存储为临时数据、历史数据、报警数据或标准谱。

3.4.2 自动保存

当机组处在正常运行情况下,系统根据所设定的时间间隔自动把所有原始振动信号数据存盘一次,以备报表打印,并作为机组的运行档案长期保存。此数据称为历史数据。

起停数据对工况判断有极为重要的意义。例如,利用起停数据的三维谱图可以观察机器振动的暂态过程,可判断临界转速、阻尼比和振源等。对连续运行的设备,起停数据的获得比较难得,因而起停数据应全部自动保存。可在每次起停结束后将文件拷出,永久保存。

异常报警时,系统自动保留报警前10分钟数据,其后数据在30分钟内实行滚动刷新,此数据称为报警数据。

在稳速监视状态下,监视系统以设定时间间隔采样,并形成采样数据文件。一旦发生报警,这些数据就成为分析故障原因的宝贵资料。因此,为满足工厂至少保存报警前十分钟数据的要求,系统以设定的采样时间间隔将采样数据以文件形式保存,这些数据文件始终记录着最近十几分钟的机组工况,一旦发生报警,就将这些最新原始数据转至报警目录下保存。但对机组运行正常的情况来说,则没有必要如此频繁地保存数据。因而这些数据始终在滚动刷新,即在监视过程中,不断删去最早形成的文件,添加最新文件。可见,在正常工况下,这些文件的生命期极短,称之为临时数据。

通过趋势分析可了解设备振动状态的变化。对各特征值变化趋势进行比较,有助于诊断故障原因,对缓变过程,还可推测设备未来情况,因而趋势数据是监测系统中的重要数据。趋势数据文件中保存的是由采样数据计算得到的特征量,本系统只保存短时趋势数据文件。

3.5 本章小结

本章依次介绍了在线监测系统的主要功能:机组管理,报警值/危险值设置,采样参数设置,在线监测界面和数据的保存管理。在线监测系统应该采用更多的新技术,不断改进和完善,提高其数据采集的实时性和可靠性。

第四章 基于 VC++ 的小波分析控件的开发

在机械信号检测和故障诊断中，我们常常要对获得的信号进行信号分析，从已知的信号中提取最能反映故障特征的成分。在故障诊断领域中振动信号分析一般采用以快速傅里叶变换(FFT)为核心的经典处理方法，也就是平常所说的频谱分析方法。频谱分析方法适用于平稳信号，即信号的统计特征不随时间变化。但是当机械设备出现摩擦、松动、剥落和冲击等故障时，所测得的动态信号就包含了大量的非平稳成分。这就需要从时频两个方面去分析动态信号。因此，在进行故障诊断和信号监测过程中，应该对信号进行时间—频谱分析，以便对信号有更深刻的分析和认识。而对信号进行时频分析就要求有一种数学方法，能同时将信号进行时域和频域的局部化。最近几年才发现并得以应用和发展的小波分析(Wavelet Analysis)是为了克服传统的傅里叶分析和卷积滤波分析的局限性而提出的一种时频信号分析方法。由于它在时域和频域的局部化和可变时频窗的特点使得用它分析非稳态信号具有比传统的傅里叶分析更为显著的优点^[40]。开发小波控件的目的就是对采集到的非平稳信号进行分析，以更加全面地分析信号的特征，从而识别出设备的故障状态。而且，将小波分析的各种功能开发成为控件，避免了在多个应用程序中重复编写代码，提高了编程效率。

4.1 小波分析基本理论

小波分析(Wavelet Analysis)是傅里叶分析发展史上里程碑式的发展，近年来在法、美、英等国家成为众多学科共同关注的热点。它被看作是调和这一数学领域半个世纪以来工作的结晶，其理论知识涉及到泛函分析、傅里叶分析、信号与系统、数字信号处理等诸方面，同时具有理论深刻和工程应用十分广泛的双重意义。由于传统的傅里叶分析(Fourier Analysis)只是一种纯频率的分析方法，它在频域的定位性是完全正确的(即频域分辨率最高)，而在时域无任何定位性(或分辨能力)。后来发展起来的短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform)以固定大小的窗函数对时域特性有了一定的分析能力。但是，小波变换通过小波函数的伸缩和平移，克服了短时傅里叶变换窗口大小不随频率变化，缺乏离散正交基的缺点。因而，它是一种非常适合对非平稳信号进行处理的数学工具，被誉为数学显微镜^[41]。

小波变换(Wavelet Transform)的概念是1984年法国地球物理学家 J.Morlet 在分析处理地球物理勘探资料时提出来的。小波变换的数学基础是19世纪的傅里叶变换，其后理论物理学家 A.Grossman 采用平移和伸缩不变性建立了小波变换的理论体系。1985年，法国数学家 Y.Meyer 第一个构造出具有一定衰减性的光滑小波。1988年，比利时数学家 I.Daubechies 证明了紧支撑正交标准小波基的存在性，使得离散小波分

析成为可能。1989年, S.Mallat 提出了多分辨率分析概念, 统一了在此之前各种构造小波的方法, 特别是提出了二进小波变换的快速算法, 使得小波变换完全走向实用。

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定但其形状可改变, 时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法, 即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 所以被誉为数学显微镜。它已经渗透到信号处理、数值计算等领域, 被认为是近年来在工具及方法上的重大突破。小波分析源于信号处理, 源于函数的伸缩和平移, 是 Fourier 变换、Gabor 变换、短时傅里叶变换发展的直接结果。

4.1.1 小波基函数^[42]

小波(Wavelet), 即小区域的波, 是一种特殊的长度有限、平均值为零的波形。

设函数 $\psi(t) \in L^1(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$, 并且 $\hat{\psi}(0) = 0$, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$, 则称 $\psi(t)$ 为一个基

小波或母小波。对母小波 $\psi(t)$ 做伸缩和平移得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (4-1)$$

称 $\psi_{a,b}(t)$ 为小波函数, 简称小波。其中, a 为尺度因子, b 为平移因子。变量 a 反映函数的尺度(或宽度), 它的作用是将基本小波 $\psi(t)$ 做伸缩, a 越大, $\psi(\frac{t}{a})$ 越宽, 小波持续时间随 a 变大而增宽; 增幅与 \sqrt{a} 成反比减小, 但小波的形状保持不变。 $\psi_{a,b}(t)$ 中 $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 的作用是使具有不同值的小波 $\psi_{a,b}(t)$ 的能量保持相等, 即 $\|\psi_{a,b}(t)\|_2 = \|\psi(t)\|_2$ 。而变

量 b 检测小波函数在 t 轴上的平移位置。母小波还需满足以下允许条件:

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (4-2)$$

由此可知, 小波函数不仅要求具有一定的振荡性, 即它包含着某种频率特征, 而且还要求具有一定的局部性, 即它在一个区间上恒等于 0 或很快地收敛于 0。

小波分析在工程应用中, 一个十分重要的问题就是最优小波基的选择问题, 因为不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果。在检测奇异信号时, 所选小波基往往应具有以下特性:

(1) 紧支性: 小波函数只有在有限区间非零; 紧支小波基是首要的选择。由小波

基时频特性可知，当紧支集的长度增加时，小波函数带通滤波器的带宽就减小，频率分辨率提高，因此可通过改变紧支集的大小来调整通频带的带宽。在选择小波基的时候，紧支撑区间越大，反映频域局部性态的能力越强；而当紧支撑区间越小，反映时域局部性态的能力则越强。

(2) 消失矩：小波函数的消失矩是突变信号检测中的一个重要概念。如果 $\psi(t)$ 对于 $0 \leq k < n$ ，有 $\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0$ ，则称 $\psi(t)$ 具有 n 阶消失矩。

(3) 正则性：小波基的可微性；一般来说足够的消失矩能够保证其正则性要求。

(4) 对称性：对称或反对称的尺度函数和小波函数可以构造紧支的正则小波基，且具有线性相位，能避免信号在小波分解和重构时的失真。在奇异信号检测中，更关心的是奇异性位置，一般不要求信号重构，因此对称性要求可以放宽。

可见，具有对称性的小波不产生相位畸变；具有好的正则性的小波，易于获得光滑的重构曲线和图像，从而可减小误差。

以下简要介绍几种常用小波。

1. Haar 小波

Haar 函数是小波分析中最早用到的一个具有紧支撑的正交小波函数，也是最简单的小波函数。在所有的正交小波中，它具有最短的支集。而因只有一阶消失矩，故不太适合用来逼近光滑函数

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-3)$$

其小波图形如图 4-1 所示。

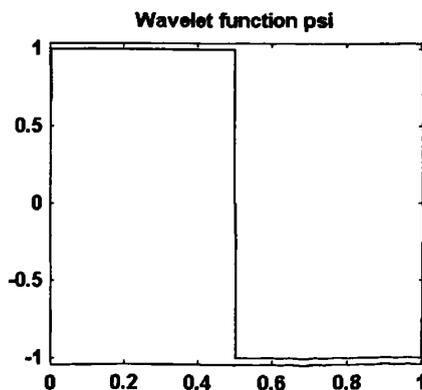


图 4-1 Haar 小波形状图

Fig.4-1 Haar wavelet shape

2. Daubechies (dbN) 小波

Daubechies 小波是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数, 简写成 dbN , N 是小波的阶数。小波和尺度函数中的支撑区为 $2N-1$, 小波函数的消失矩为 N 。除 $N=1$ 外, dbN 不具有对称性, 也没有明确的表达式。图 4-2 是常用的 $db2$ 小波函数的图形。

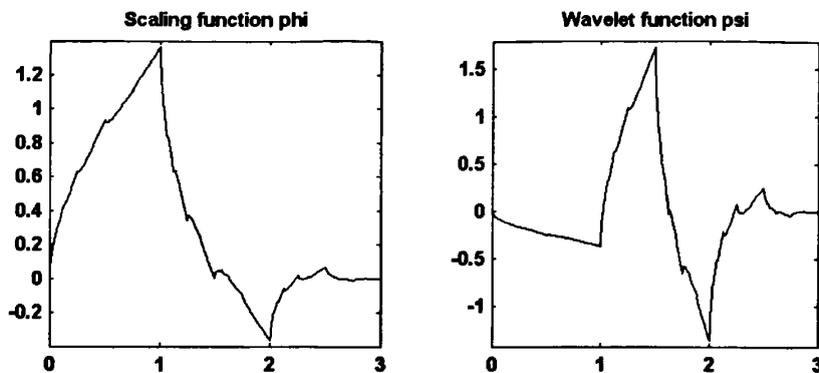


图 4-2 $Db2$ 小波尺度函数和小波函数

Fig.4-2 Scaling function and wavelet function of $Db2$ wavelet

Db 小波具有以下特点:

- (1) 在时域上是有限支撑的, 且其最高原点矩 $\int t^p \psi(t) dt = 0$, $p=0 \sim N$; N 值越大, $\psi(t)$ 的长度越长。
- (2) 在频域上 $\psi(\omega)$ 在 $\omega=0$ 处有 N 阶零点。
- (3) $\psi(t)$ 和它的整数位移正交归一, 即 $\int \psi(t) \psi(t-k) dt = \delta_k$ 。
- (4) 小波函数 $\psi(t)$ 可以由所谓的“尺度函数” $\phi(t)$ 求出来。尺度函数 $\phi(t)$ 为低通函数, 长度有限, 支撑域在 $t=0 \sim 2N-1$ 范围内。

3. Mexican Hat (mexh) 小波

Mexh 函数为 Gauss 函数的二阶导数:

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{\pi}}} (1-t^2) e^{-t^2/2} \quad (4-4)$$

该函数满足小波允许条件和紧支性要求, 在时间域和频率域都有很好的局部化, 消失矩为 2, 因而在奇异性检测中具有重要应用。由于它不具有尺度函数, 故此小波函数不具有正交性, 其小波图形如图 4-3 所示。

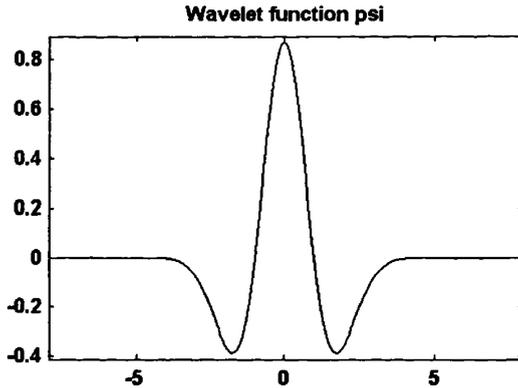


图 4-3 mexh 小波形状图
Fig.4-3 Mexh wavelet shape

4. Morlet 小波

它是 Gauss 包络下的单频率复正弦函数：

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} e^{i\omega_0 t} \quad (4-5)$$

该小波的时频局部性能较好（尽管在严格意义上不是紧支撑的），仅当 $\omega_0 \geq 5$ 时才近似满足允许条件，且不存在尺度函数。其小波图形如图 4-4 所示。

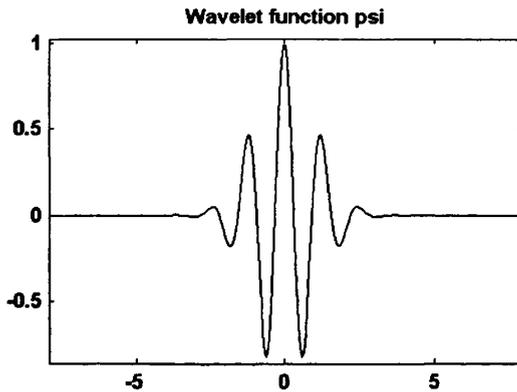


图 4-4 Morlet 小波形状图
Fig.4-4 Morlet wavelet shape

4.1.2 连续小波变换（CWT）与离散小波变换（DWT）

1. 伸缩与平移

小波变换的思想来源于伸缩与平移，它是尺度参数 a 和时间参数 b 的函数。下面对其分别进行说明^[42,43]。

(1) 尺度伸缩(Scaling)

对波形的尺度伸缩就是在时间轴上对信号进行压缩与伸展。在不同尺度下，小波

的持续时间随 a 加大而增宽，幅度则与 \sqrt{a} 成反比减小，但波的形状不变。

(2) 时间平移 (Shifting)

时间平移就是指小波函数在时间轴上的波形平行移动。

由于小波基函数在时间、频率域都具有有限或近似有限的定义域，显然，经过伸缩和平移后的函数在时、频域仍然是局部性的。

连续小波基函数的窗口面积不随参数 a, b 的变化而变化。Heisenberg 测不准原理告诉我们： Δt 、 $\Delta \omega$ 的大小是相互制约的，它们的乘积 $\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2}$ ，且只有当 $\psi(t)$ 为 Gaussian 函数时，等式才成立。将不同 a, b 值下的的 $\psi_{a,b}(t)$ 的时频窗口绘在同一张图上，就可以得到小波基函数的相平面，如图 4-5 所示。

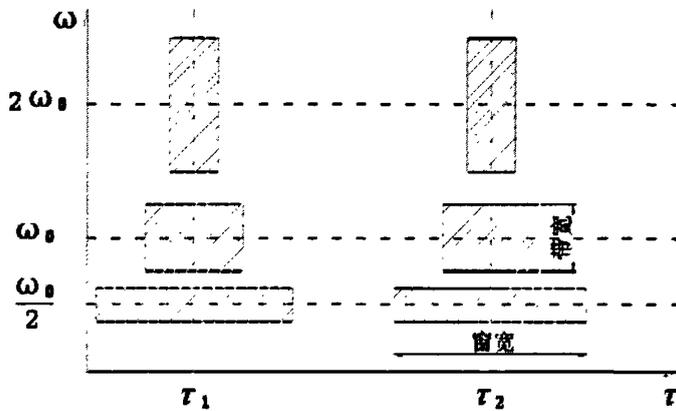


图 4-5 小波函数的时频分析特点

Fig.4-5 Characteristics of time-frequency analysis for wavelet function

由此，可得出如下几点结论：

(1) 尺度的倒数 $1/a$ 在一定意义上对应于频率 ω ，即尺度越小，对应的频率越高，尺度越大，对应频率越低。如果将尺度理解为时间窗口的话，则小尺度信号为短时间信号，大尺度信号为长时间信号。而这与信号时频分布的自然规律是相符的，在实际生活中高频信号必然持续时间很短，低频信号必然持续时间很长。

(2) 在任何时间 τ ，小波的时、频窗口的大小 Δt 、 $\Delta \omega$ 都随频率 ω (或尺度 a) 的变化而变化。

(3) 在任何尺度 a 、时间点 τ ，窗口面积 $\Delta t \cdot \Delta \omega$ 保持不变，也即时间、尺度分辨率是相互制约的，不可能同时提高。

(4) 小波基函数作为带通滤波器，具有恒 Q 性质，即

$$Q_{a,\tau} = \frac{\Delta\omega_{a,\tau}}{\omega_{a,\tau}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = Q \quad (4-6)$$

2. 连续小波变换

对于 $f(t) \in L^2(R)$ ，其连续小波变换定义为

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle f, \psi_{a,b} \rangle \quad (4-7)$$

其中， $a \neq 0$ ， b 、 t 均为连续变量， $\psi^*(t)$ 表示 $\psi(t)$ 的复共轭。连续小波变换的卷积表达式为

$$WT_f(a,b) = \sqrt{|a|} f * \bar{\psi}_{|a|}(b) \quad (4-8)$$

其中， $\bar{\psi}_{|a|}(t) = |a|^{-1} \psi^*(-t/a)$ 。故小波变换也可以视为信号与滤波器的卷积运算，而 $\psi_{|a|}(t)$ 可理解成（高通）滤波器。可见，它较之于加窗的 Fourier 变换的显著优越性在于后者的窗口大小和形状固定不变，不能敏感地反应信号的突变，而这也就决定了小波变换在突变信号处理中的特殊功能及地位。

在此，进一步说明如下：

(1) 在小波变换过程中，所采用的小波必须满足“容许条件”，反变换才存在。由式(4-2)可推断出：能用作基本小波 $\psi(t)$ 的函数至少必须满足 $\psi(\omega=0)=0$ 或 $\int_R \psi(t) dt = 0$ ，也就是说 $\psi(\omega)$ 必是有正负交替的振荡波形，使得其平均值为零，这便是称之为“小波”的原因。

(2) 在实际中，对基本小波的要求往往不局限于满足容许条件，对 $\psi(t)$ 还要施加所谓的“正则性条件”，使 $\psi(t)$ 在频域上表现出较好的局限性，要求 $|WT_f(a,\tau)|$ 随 a 的减小而迅速减小，所以这就要求 $\psi(t)$ 的前 n 阶原点矩为零，且 n 值越高越好，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0 \quad (4-9)$$

$k=1 \sim n$ ，且 n 值越大越好。

此要求在频域内表示就是， $\psi(\omega)$ 在 $\omega=0$ 处有高阶零点，且阶次越高越好（一阶零点就是容许条件），即

$$\psi(\omega) = \omega^{n+1} \psi_0(\omega) \quad (4-10)$$

$\psi_0(\omega=0) \neq 0$, n 越大越好。

式(4-9)和式(4-10)就是正则性条件。

不难发现, 连续小波变换具有如下重要性质:

(1) 线性

连续小波变换为线性变换, 一个函数的连续小波变换等于该函数的分量的变换和, 即

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t)$$

$$f(t) \leftrightarrow WT_f, \quad f_1(t) \leftrightarrow WT_{f_1}, \quad f_2(t) \leftrightarrow WT_{f_2}$$

则

$$WT_f = WT_{f_1} + WT_{f_2} \quad (4-11)$$

(2) 平移不变性

$$f(t) \leftrightarrow WT_f(a, b), \quad f(t-t_0) \leftrightarrow WT_f(a, b-t_0) \quad (4-12)$$

(3) 时标定理 (伸缩共变性)

$$f(t) \leftrightarrow WT_f(a, b), \quad f(ct) \leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{c}} WT_f(ca, cb) \quad (4-13)$$

(4) 微分运算

$$WT_{a,b} \left(\frac{\partial^m f(t)}{\partial t^m} \right) = (-1)^m \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{\partial^m}{\partial t^m} \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (4-14)$$

(5) 能量守恒

小波变换幅度平方的积分和信号的能量成正比, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |WT_f(a, b)|^2 \frac{dadb}{a^2} \quad (4-15)$$

(6) 冗余度

连续小波变换存在内信息的冗余度, 即在 $a-b$ 半平面上各点小波变换的值是相关的。

3. 离散小波变换

在实际应用中, 为了方便使用计算机进行分析、处理, 信号 $f(t)$ 都要离散化为离

散序列, 小波基函数 $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 中 a 和 b 也必须离散化, 令参数 $a = 2^{-j}$,

$b = k2^{-j}$, 其中 $j, k \in Z$, 则离散小波为

$$\psi_{2^{-j},k2^{-j}}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4-16)$$

在这种情况下,常用 $\psi_{j,k}(t)$ 记 $\psi_{2^{-j},k2^{-j}}(t)$ 。

对应的离散小波变换为

$$WT_f(j,k) = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*(2^j t - k) dt \quad (4-17)$$

4.1.3 多分辨分析 (MRA) 和 Mallat 算法

多分辨分析是小波分析中最重要的概念之一,它从函数空间的高度研究函数的多分辨表示——将一个函数表示为一个低频成分与不同分辨率下的高频成分。更重要的是,多分辨分析能够提供一种构造小波的统一框架,并且能够提供函数分解与重构的快速算法——Mallat 算法^[40-43]。

1. 多分辨分析的定义

多分辨分析的基本思想是先在平方可积空间 $L^2(R)$ 的某个空间中建立基底,然后用简单的伸缩和平移,把子空间的基底扩充到 $L^2(R)$ 中。

令 $V_j, j \in Z$, 为 $L^2(R)$ 中的一个函数子空间序列。若下列条件成立:

(1) 单调一致性: $V_j \subset V_{j+1}$, 对任意 $j \in Z$

(2) 渐进完全性: $\bigcup_{j \in Z} V_j = \Phi, \text{close} \left\{ \bigcup_{j \in Z} V_j \right\} = L^2(R)$

(3) 伸缩完全性: $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$

(4) 平移不变性: $\forall k \in Z, \phi(2^{-j/2}t) \in V_j \Rightarrow \phi_j(2^{-j/2}t - k) \in V_j$

(5) Riesz 基存在性: 存在 $\phi(t) \in V_0$, 使得 $\{\phi_j(2^{-j/2}t - k) | k \in Z\}$ 构成 V_j 的 Riesz 基。

关于 Riesz 的具体说明如下:

若 $\phi(t)$ 是 V_0 的 Riesz 基, 则存在常数 A, B , 且使得

$$A \|\{c_k\}\|_2^2 \leq \left\| \sum_{k \in Z} c_k \phi(t - k) \right\|_2^2 \leq B \|\{c_k\}\|_2^2 \quad (4-18)$$

对所有双无限可平方和序列 $\{c_k\}$, 即

$$\|\{c_k\}\|_2^2 = \sum_{k \in Z} |c_k|^2 < \infty \quad (4-19)$$

成立。

满足上述各条件的函数空间集合成为一个多分辨分析(MultiResolution Analysis), 如果 $\phi(t)$ 生成一个多分辨分析, 那么 $\phi(t)$ 为一个尺度函数。

可以用数学方法证明, 若 $\phi(t)$ 是 V_0 的 Riesz 基, 那么存在一种方法可以把 $\phi(t)$ 转化为 V_0 的标准正交基。这样, 只要能找到构成多分辨分析的尺度函数, 就可以够造出一组正交小波。

2. 多分辨分析的空间剖分

在多分辨分析中, 随着逼近空间 V_j 的不同, 尺度函数 ϕ 也不同 (常用具有紧支撑的函数), 从而对应不同的多分辨分析, 且必然存在系数序列 $\{h_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$, 使得

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k) \quad (4-20)$$

这就是两尺度方程。其中 $h_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \overline{\varphi(2x - k)} dx$, 它是一个低通滤波器系数。

但是, 一般地 $\{\phi_{j,k}(t)\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$ 不是 $L^2(\mathbb{R})$ 的标准正交基。由正交多分辨分析中的单调性可知 $V_j \subset V_{j+1}$, 于是存在 V_j 在 V_{j+1} 中的正交补空间 W_j , 使得

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \quad (4-21)$$

上述空间正交分解可对逼近空间 V_j 递归进行下去, $V_{j+1} = V_l \otimes_{k=l}^j W_k$, $l < j$ 。令 $j \rightarrow +\infty$,

$l \rightarrow -\infty$, 可得到 $L^2(\mathbb{R})$ 的正交分解:

$$L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j=-\infty}^{+\infty} W_j \quad (4-22)$$

上式表明, $L^2(\mathbb{R})$ 是由无穷个正交补空间的直和构成的, 而它的正交基就是反直和的子空间的正交基合并起来得到的, 故 $L^2(\mathbb{R})$ 空间的标准正交基为:

$$2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (4-23)$$

而二进正交小波的函数形式为

$$\psi_{k,n}(t) = 2^{-k/2} \psi(2^{-k}t - n) \quad k, n \in \mathbb{Z} \quad (4-24)$$

所以, 可称 ψ 为小波函数, 相应的 W_j 是尺度为 j 的小波空间。另小波函数也可以表示为

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \phi(2t - k) \quad (4-25)$$

其中 $g_k = (-1)^k h_{1-k}^*$ (*表示对复数取共轭), 它是一个高通滤波器系数。

由上可知, 空间 V_j 与空间 W_j 正交, 而各个 W_j 之间也正交。故可把频率空间如下剖分, 先将原始 $x(t)$ 占据的总频带 $(0 \sim \pi)$ 定义为空间 V_0 , 经第一级分解后 V_0 被分成两个子空间: 低频的 V_1 (频带 $0 \sim \pi/2$) 和高频的 W_1 (频带 $\pi/2 \sim \pi$)。经第二级分解后 V_1 又被分解成低频的 V_2 (频带 $0 \sim \pi/4$) 和高频的 W_2 (频带 $\pi/4 \sim \pi/2$) ……其中高频带反映信号的细节, 低频带反映信号的概貌, 如图 4-6。

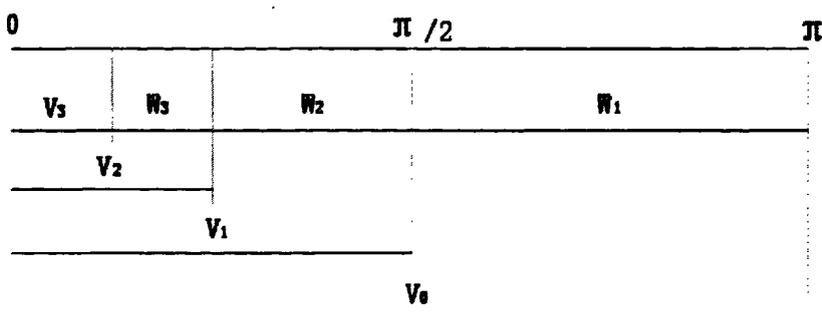


图 4-6 多分辨分析的空间剖分

Fig.4-6 space subdivision of MultiResolution Analysis

3. Mallat 算法

由于 $L^2(R) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$, 所以对任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 有

$$f(t) = \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} c_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (4-26)$$

用 $\psi_{j,k}$ 在该等式两边取内积, 并注意 $\{\psi_{j,k}(t)\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$ 是 $L^2(R)$ 的一个标准正交基, 可得 $c_k^j = \langle f, \psi_{j,k} \rangle$, 从而有

$$f(t) = \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (4-27)$$

又由于

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_M \oplus W_M \oplus W_{M+1} \oplus \dots \oplus W_{j-1} (M < j) \quad (4-28)$$

故 V_j 中的任意函数 f_j 都存在如下多分辨表示:

$$f_j = f_{j-1} + d_{j-1} = f_M + d_M + d_{M+1} + \dots + d_{j-1} \quad (4-29)$$

其中

$$f_l(t) = \sum_k c_k^l \phi_{l,k}(t) \in V_l, l = M, \dots, j \quad (4-30)$$

$$d_l(t) = \sum_k d_k^l \psi_{l,k}(t) \in W_l, l = M, \dots, j-1 \quad (4-31)$$

$f_M(t)$ 表示 f_j 的低频成分, 而 $d_l(t)$, $l = M, \dots, j-1$ 表示 f_j 在不同分辨率下的高频成分。

由下式

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) = \sum_k c_k^{j-1} \phi_{j-1,k}(t) + \sum_k d_k^{j-1} \psi_{j-1,k}(t) \quad (4-32)$$

由 ϕ , ψ 的二进平移和伸缩的正交性, 可计算出

$$c_k^{j-1} = \sum_n c_n^j \langle \phi_{j,n}, \phi_{j-1,k} \rangle = \sum_n c_n^j h_{n-2k}^* \quad (4-33)$$

$$d_k^{j-1} = \sum_n c_n^j \langle \phi_{j,n}, \psi_{j-1,k} \rangle = \sum_n c_n^j g_{n-2k}^* \quad (4-34)$$

式(4-33)和式(4-34)即为小波分解算法, 又有

$$c_k^j = \sum_n c_n^{j-1} \langle \phi_{j-1,n}, \phi_{j,k} \rangle + \sum_n d_n^{j-1} \langle \psi_{j-1,n}, \phi_{j,k} \rangle = \sum_n c_n^{j-1} h_{k-2n} + \sum_n d_n^{j-1} g_{k-2n} \quad (4-35)$$

式(4-35)即为小波重构算法。

小波分解与小波重构算法合起来就是一维情形下的著名的小波变换的 Mallat 算法。它的卷积表达式为

$$\begin{cases} c^{j-1} = D(c^j * \bar{h}^*) \\ d^{j-1} = D(c^j * \bar{g}^*) \end{cases} \quad (4-36)$$

$$c^j = (Uc^{j-1}) * h + (Ud^{j-1}) * g$$

其中, \bar{h}^* 表示滤波器 h 的共轭的反转; $c^j * \bar{h}^*$ 表示 c^j 与 \bar{h}^* 的卷积; $D(c^j * \bar{h}^*)$ 表示卷积 $c^j * \bar{h}^*$ 的二元下采样, 重构的情况类似。

根据 Mallat 算法, 一维信号的小波分解与重构过程可由两组滤波器的级联滤波而产生, 设 $\{c_k^m\}$ 为输入数列, $\{c_k^{m-1}\}$ 为经 i 次低通滤波而得到的输出, 一维信号的分级与重构过程如图 4-7 所示, 称为塔式分解。

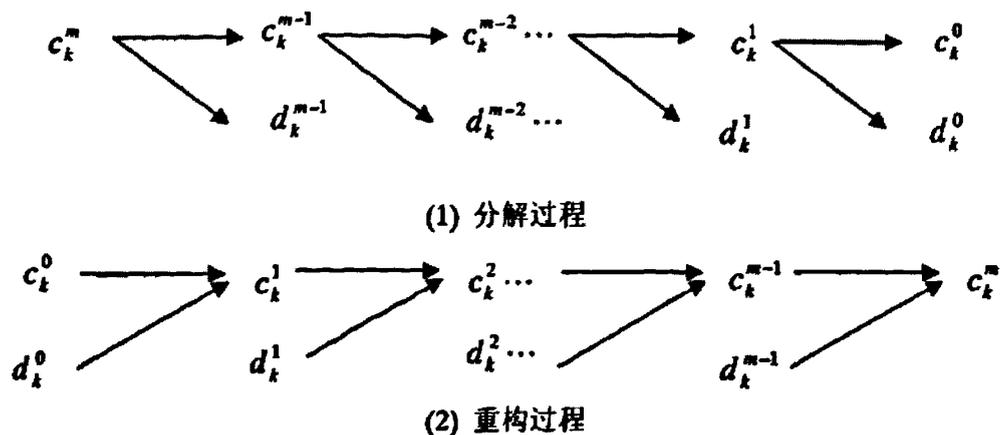


图 4-7 一维信号的分解与重构

Fig.4-7 Decomposition and reconstruction of one-dimensional signal

4.1.4 小波分析的突出特点

(1) 应用的灵活性。小波变换的灵活性主要体现在两个方面：一是基函数选择或构造，二是多尺度分析中的尺度的选择。小波变换中所用到的小波基函数具有不唯一性，即小波基函数具有多样性，一般只要满足“容许条件”即可。因此到目前为止学术界存在着多种构造小波基函数的方法，也存在着多种小波基函数，例如前面提到的 Haar 小波、Daubechies (dbN) 小波、Morlet 小波等等。用不同的小波基函数来分析同一个问题也许会产生不同的结果。因此可以利用不同的小波来分析不同的信号，甚至可以根据信号自身的特征来构造特殊的小波函数，以达到更好地分析信号的目的。相比较而言，傅里叶变换只能用三角函数去逼近信号，没有选择性。另外研究发现，在小波多尺度分析中，对不同信号选择不同的尺度来分析也是可以得到不同结果的，因此可以根据所期望的分析结果来自由选择小波分解或重构的尺度。这一点将在下一章中有明显的体现。

(2) 算法的快速性。多尺度分析大大提高了小波变换的运算效率，在分析解决具体问题问题时，可以从尺度函数和两尺度关系来推导小波系数，甚至不需要知道小波函数的解析表达式也可得到分析结果。尺度函数相当于低通滤波器，小波函数相当于带通滤波器。

将信号用低通和带通滤波器进行分解，显然比用频率点分解要快得多。频带分析从表面来看比频率分析显得粗糙，然而就分析信号的目的而言，很多情况下只是需要提取信号的特征或对信号局部点进行特殊分析，并不需要知道信号每一个点的信息。而且在需要的时候，小波变换还可以对所需要的细节将频带细分下去，以起到“显微镜”的作用并获得更细微的分析。这一点是傅里叶变换或短时傅里叶变换都无法比拟

的。

(3) 数学论证的严密性。小波分析的发展是由数学家和工程师们共同创造的，它是建立在实变函数、复变函数、泛函分析、调和函数等近代数学理论基础上的，有着严密的数学理论基础。这为小波变换理论的广泛应用打下了坚实的理论基础。

(4) 应用的广泛性和综合性。小波变换既可以分析平稳信号，也可以分析非平稳信号。既可以分析周期信号，也可以分析非周期信号。而傅里叶变换只能对平稳的周期信号进行分析。也正应如此，小波变换从最早的处理地震信号数据到现在已深入图像处理、雷达回波信号分析、语音识别与合成、分形等众多领域，应用十分广泛。另外，迅速发展的小波理论和技术对许多学科和应用领域产生了巨大的影响，同时也使小波变换渗透、融合到其他的方法和技术中，形成了小波神经网络、小波模糊神经网络、小波模糊聚类神经网络、基因小波分析、小波分形分析等方法，是分析非平稳、非线性问题的理想手段。

时至今日，小波变换作为一种比较成熟的数学分析方法，已经成功应用于图像处理、地质分析、典型信号特征识别和提取等各个领域，然而，小波变换理论还没有完全完善，离在工程上的广泛普及及应用还有很大的差距。在小波变换的应用中，小波基函数的选择是最大的问题^[44,45]。小波基函数的现状、正交性、紧支性、衰减性、对称性及光滑性的不同决定了小波特性的千差万别。在信号分解时，若采用了不适宜的基函数，则会由于特征信息被冲淡，反而给信号特征的检测和识别造成困难。因此，如何选择合适的小波基函数是小波变换能否取得突破性进展的关键。迄今为止，最优小波基仍然没有明确的选择标准和操作步骤，小波变换的使用还存在任意性。

4.2 小波分析控件的开发

4.2.1 ActiveX 控件基本知识

1. ActiveX 技术

ActiveX 是 Microsoft 公司提供的一组使用 COM(Component Object Model, 组件对象模型)技术使软件组件可以在网络环境中进行交互的技术集合。可以认为 ActiveX 技术是 OLE 技术在 Internet 上的一个扩展。由于 ActiveX 是针对 Internet 应用开发的技术，因此被广泛应用于各种 Web 服务器和客户端应用之中，也可以用于方便、快速地创建普通的桌面程序^[46]。

需要特别说明的是，ActiveX 并不是某种具体编程语言使用的技术，它与具体的编程语言无关，绝大多数 Microsoft 的程序设计环境都允许使用 ActiveX 技术进行程序设计。

ActiveX 既包括服务器端技术，也包括客户端技术，主要内容如下：

(1) ActiveX 控件

ActiveX 是 OLE 控件的更新版本, 控件(Control)是建立可编程部件(component)的主要元素。ActiveX 控件可以用于所有支持 COM 规范的容器(Containers)中, 或者作为 Internet 控件嵌入到 Web 页面中。用户访问该页面时, 将下载该控件并自动在本地注册。利用脚本描述语言(Script)可以在控件之间

以及客户与服务器之间通过设置属性(Property)、调用方法(Method)和激活事件(Event)进行通信。目前, 很多第三方开发商编制了各种各样的 ActiveX 控件, 在 Internet 上有一千多个 ActiveX 控件可供用户下载使用。

(2) ActiveX 文档

ActiveX 提供了传统的嵌入对象的扩展方法。ActiveX 文档对象可以包括多个页, 显示在整个客户区中, 并支持原有的菜单功能。ActiveX 文档可以作为对象嵌入到 Web 网页中, 并在 Web 上发布。

Microsoft Office97 提供了 Microsoft Office Builder, 用来生成并浏览 Microsoft Word、Microsoft Excel 或者用户定义的 ActiveX 文档等构成的复合文档。每一种文档类型都可以直接进行编辑修改。

(3) ActiveX 脚本描述语言

利用 VBScript 或者 JavaScript, 可以向 Web 页面中加入用于交互的 ActiveX 控件, 将数据预处理或者检验过程放在客户端运行, 然后将结果传给 Web 服务器。

(4) ActiveX 服务器框架

在 Web 服务器上创建扩展程序, 动态生成 Web 页面。使用 MFC 提供的 ISAPI 类可以方便地建立 Web 服务器端的扩展应用程序。

(5) 在 IE 中内置 Java 虚拟机

Java 虚拟机(Java Virtual Machine)使 Java Applet 能够在 Internet Explorer 中运行, 并可以通过脚本描述语言与 ActiveX 控件进行通信。

ActiveX 还提供了一种扩展编程语言(包括 Java 语言在内的)机制, 使 Java 的开发人员可以在 Applet 中直接嵌入 ActiveX 控件, 或者以 ActiveX 技术为桥梁, 将其他开发商提供的程序对象集成到 Java 程序中。

2. ActiveX 控件

ActiveX 控件是基于组件对象模型(COM)的可重用软件组件, 它支持广泛的 OLE 功能并可以满足多种软件需要。ActiveX 控件可以看作是任何 OLE 容器中使用的进程内服务器, 但要注意, 只有在支持 ActiveX 的 OLE 容器中使用, ActiveX 控件才能使用它的所有功能。现在的应用软件中, Microsoft FoxPro3.0/4.0/5.0/6.0, Microsoft Access2.0/3.0/4.0, Microsoft Visual Basic4.0/5.0/6.0 以及 Visual C++4.x/5.0/6.0 的 MFC 创建的 OLE 容器, 都完全支持 ActiveX 控件。这种容器类型(以后称为“控件容器”)使用控件的属性和方法来操作控件, 同时以事件的形式接收 ActiveX 控件的通知。

ActiveX 控件可以用于普通的 ActiveX 控件容器和网页中^[47]。

ActiveX 控件容器是完全支持 ActiveX 控件，可将 ActiveX 控件并入自己的窗口或对话框的容器。项目中的控件容器通常以两种形式出现：对话框和像窗体、视图这样类似对话框的窗口，在这类窗口中，ActiveX 控件处于对话框中的某个位置；应用程序中的窗口，在这类窗口中 ActiveX 控件用在工具栏中或用户窗口的其他位置。ActiveX 控件容器通过控件提供的公开的方法和属性来与控件交互。在 ActiveX 控件容器项目中，通过包装类访问这些可由控件容器访问和修改的方法和属性。嵌入的 ActiveX 控件也可以通过触发(发送)事件通知容器某个操作已经发生的方式与容器交互，控件容器则可以选择是否对这些通知进行处理。许多 Microsoft 应用程序支持 ActiveX 控件容器，例如 Internet Explorer, Visual Basic, Visual C++, Access, Excel, Word, FrontPage, PowerPoint, Visual InterDev 等。还有一些非 Microsoft 应用程序也支持 ActiveX 控件容器，例如 PowerBuilder, Delphi, C++ Builder, 以及带有相应插件的 Netscape Navigator。

(1) ActiveX 控件的基本组成部分

ActiveX 控件利用若干可编程的元素与控件容器或者用户进行交互，这些元素包括 COleControl 类、一系列事件驱动函数和调度映射表。

用户开发的所有 ActiveX 控件对象都从 MFC 基类 COleControl 中继承了一套功能强大的属性，包括内部激活性以及自动化逻辑。COleControl 类能提供控件对象以与 MFC 窗口对象相同的功能，包括事件驱动的能力，该类还能提供非窗口控件，这依赖于它们的容器所拥有的一些窗口提供的功能(如鼠标捕获、键盘焦点等)，但是，非窗口控件的显示则要快的多。

因为控件类从 COleControl 类中派生出来，它继承了发送(或称为“驱动”)消息(也称为“事件”)的能力，这些事件用于通知控件容器。当控件上发生一些重要的操作，用户可以通过附加参数在事件上，来发送关于控件的附加消息给控件容器。

调度映射表用于将一系列的函数(称为“方法”)和特性(称为“属性”)显示给控件用户。属性是允许控件容器或者空间用户以各种各样的方式使用控件，用户可以改变控件的显示，改变控件的某个值，或者请求控件，诸如访问控件包含的某些数据。这个接口是由控件开发者决定，并且使用 ClassWizard 来定义。

(2) 窗口控件和 ActiveX 控件容器之间的交互

当控件在控件容器中使用，它利用两种机制来通信：属性和方法的公开以及使用驱动事件。

所有控件与容器的通信是通过 COleControl 类完成的。COleControl 处理一些容器的请求，是调用控件类中执行的成员函数，所有的方法和部分属性也是用这种方式处理的。控件类还可以通过调用 COleControl 类的成员函数来初始化与容器的通信，事件的驱动也是通过这种方式。

(3) ActiveX 控件的活动状态和非活动状态

控件有两个基本状态：活动的和非活动的。这两种状态传统上是通过对该控件是否有窗口来区分，活动的控件有窗口，而非活动的控件没有窗口。但是，由于非活动窗口控件的出现，这种定义不再是绝对的了，不过对于大部分控件还是有效的。

当一个非窗口控件被激活，它可调用鼠标夺取、键盘焦点、窗口滚动以及容器的其他窗口服务。用户还可以提供非活动控件鼠标接口以及创建这些控件，它们一直等待到被激活以创建窗口。

当控件被激活，该控件就完全能与控件容器、用户、窗口进行交互。

(4) 窗口的串行化

串行化数据的功能，有时称为控件的连续性，允许控件将属性的值写入存储器单元中，然后控件通过从存储单元读出该对象的状态，重新创建控件。

请注意，一个控件是不能直接访问存储器的，而是通过控件容器作为存储中介来实现这些功能。

(5) 安装 ActiveX 控件类和工具

当用户安装 Visual C++6.0 时，如果选择安装了 ActiveX 控件(这是缺省选择)，MFC ActiveX 控件类和测试 ActiveX 控件运行 DLL 将被自动安装。

在缺省的情况下，ActiveX 控件类和工具安装在 \Program Files \DevStudio 路径下的下列子目录中：

* \VC \Bin

包含测试容器的可执行文件：TstCom32.exe 以及它的帮助文件。

* \SharedIDE \Bin

包含 RegSvr32.exe 文件

* \SharedIDE \Bin \IDE

包含 ActiveX ControlWizard 的可执行文件

* \SharedIDE \Help

包含 ActiveX 控件开发工具的帮助文件

* \VC \MFC \Include

包含开发 MFC 的 ActiveX 控件所必需的包含文件(include file)

* \VC \MFC \src

包含 MFC 中特定的 ActiveX 控件类的源代码

* \VC \MFC \Lib

包含开发 MFC 的 ActiveX 控件所必需的库文件

* \VC \

3. 用 VC++ 开发 ActiveX 控件

VC++ 提供了两种途径来开发 ActiveX 控件，即 MFC 和 ATL(Active Template

Library)。使用 MFC，可以不理睬控件接口的细节，而把注意力集中在控件本身的功能上，但是它生成的控件比较大。而且，如果客户端要运行此 ActiveX 控件，必须用有相应版本的 MFC 类库的 DLL，否则，必须同时下载这些巨大的类库。使用 ATL 时，由于不涉及 MFC 的标准类库，生成的控件相对较小，但开发者必须了解 COM、OLE 技术的细节。大多数情况下，可以使用 MFC 开发 ActiveX 控件，这样比较容易，而且，由于 Internet Explorer 提供了 MFC 类库，而 Internet Explorer 是 Windows95/98/NT 提供的组件，所以，只要 ActiveX 控件使用的是 MFC 或者更早的版本，多数情况下是不需要下载 MFC 类库的^[46,47]。

使用 MFC 开发 ActiveX 控件，可以用 MFC ActiveX Control Wizard 生成工程框架，VC 会自动生成如下三个类(假设 MyName 是控件的名字)。

(1) CMyNameApp: 从类 COleControlModule 派生，而类 COleControlModule 则派生自 CWinApp。

(2) CMyNameCtrl: 从类 COleControl 派生，而类 COleControl 则派生自 CWnd。

(3) CMyNamePropPge: 从类 ColePropPage 派生，而类 ColePropPage 则派生自 Cdialog。

编译生成 OCX 文件后，用 VC 提供的 ActiveX Test Container 测试这个控件，也可以用 OLE/COM Object Viewer 浏览此控件的接口信息及类型库。

4. 使用 ActiveX 控件的优点

对于开发者来说，使用 ActiveX 控件具有如下几个方面的优点：

(1) 由于只需要为某项功能开发一次代码，因此效率高。

(2) 一旦 ActiveX 控件开发完成，任何一个 ActiveX 控件容器立即对该控件提供支持。

(3) 可以为 HTML Web 页面添加标准或者自定义的 ActiveX 控件。

对于用户来说，使用 ActiveX 控件能够得到如下几个方面的方便：

(1) 使用创建好的 ActiveX 控件改善自己的应用程序。

(2) 直接为应用程序添加相应的 ActiveX 控件，而不必自己开发相应的 ActiveX 控件。

4.2.2 小波分析控件的功能

为了对振动非稳态信号进行分析，小波分析控件功能非常全面，对于一组采样数据，可以进行分解图、尺度图、树形图以及分解后各层信号的频谱图显示。而且，该控件集成了所有常用的小波函数，包含 Haar 小波、Daubechies 小波、Symlets 小波、Coiflet 小波、BiorSplines 小波、ReverseBior 小波和 DMeyer 小波。对于各种小波可以进行 1-6 层的小波分解计算，尺度图可以选择白—黑，红—黑，蓝—黑，黄—黑四种

不同颜色显示,除此之外,该控件还能进行小波分解的各层信号(包含原信号)统计量计算,包含平均值、最大值、标准差等。

小波控件的主要功能菜单如图 4-8 所示。

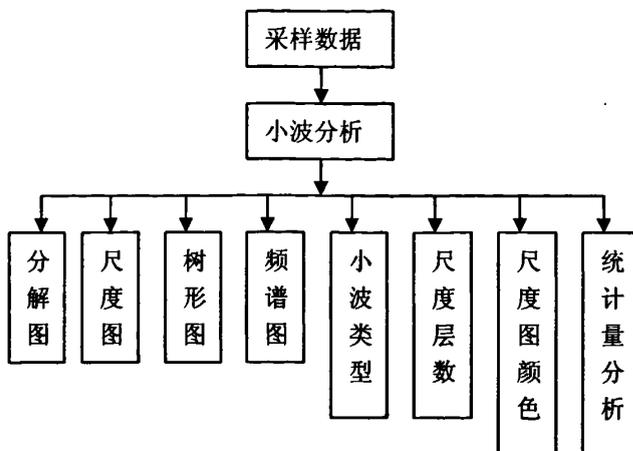


图 4-8 小波分析控件的主要功能菜单

Fig.4-8 Main function menus for wavelet analysis control

4.2.3 小波分析控件的开发步骤

为了编程简便而又保证小波控件的功能,采用 MFC 创建 ActiveX 的程序框架,然后依据控件的功能要求进行程序设计。

要显示小波分解的各图形,需要先实现图形显示区的绘制,在本程序中,以下四个函数

```

void DrawBackGround1(CDC* pDC);
void DrawBackGround2(CDC* pDC);
void DrawBackGround3(CDC* pDC);
void DrawBackGround4(CDC* pDC);
  
```

分别绘制小波分解图、尺度图、树形图和频谱图的图形框架。

以绘制分解图为例,其实现代码如下:

```

void CWaveletCtrl::DrawBackGround1(CDC* pDC)
{
    int i,j;
    int y1,y2;
    int m_StartPoint;
    CBrush *pOldBrush = NULL;
  
```

```

CPen   GreenPen(PS_SOLID,0,RGB(0,160,0));
CPen   RedPen(PS_SOLID,0,RGB(255,0,0));
CPen   BluePen(PS_SOLID,0,RGB(0,0,255));
CPen   CyanBluePen(PS_SOLID,0,RGB(0,128,255));
CPen   RedBluePen(PS_SOLID,0,RGB(255,255,0));//huangse
CPen   *pOldPen = NULL;
CString strLabel,strFromInt;
    pDC->SetMapMode(MM_ANISOTROPIC);
if(bPrinting)
{
    CSize s;
        s.cx=(int)(xClient*9.0/10.0);
        s.cy=(int)(yClient*8.0/10.0);

    int ox=(xClient-s.cx)/2,oy=(yClient-s.cy)/2;

    pDC->SetWindowExt(TotalWidth,TotalHeight);//逻辑窗口大小
    pDC->SetViewportExt(s.cx,s.cy);//设备窗口大小
    pDC->SetViewportOrg(ox,oy);
}
else
{
    pDC->SetWindowExt(TotalWidth,TotalHeight);//逻辑窗口大小
    pDC->SetViewportExt(xClient,yClient);//设备窗口大小
    pDC->SetViewportOrg(0,0);
}
.....
}

```

统计量的计算以对话框的形式在屏幕上显示，单独建立对话框类 CStatisticsDlg，包含头文件 StatisticsDlg.h 和实现文件 StatisticsDlg.cpp。

在控件主程序 Ctrl.cpp 中，由以下三个函数分别计算原信号、最后一层逼近信号和各层细节信号的统计参数。

```

void ComputeOriginal();
void ComputeDetail();
void ComputeApromax();

```

以计算原信号统计量为例，其实现程序为：

```
void CWaveletCtrl::ComputeOriginal()//原信号统计量计算
{
    //计算原信号的各统计量参数
    pDataA=new float[2*MaxAnalPointNum];
    pDataD=new float[2*MaxAnalPointNum];

    int i;

    for(i=0;i<MaxAnalPointNum;i++)
    {

        pDataA[i]=pStoreData[i];

    }
    OMax=pDataA[0];//计算最大值最小值
    OMin=pDataA[0];
    for (i=1;i<MaxAnalPointNum;i++)
    {
        if (OMax<pDataA[i]) OMax=pDataA[i];
        if (OMin>pDataA[i]) OMin=pDataA[i];
    }
    ORange=OMax-OMin;//计算范围
    //计算中间值
    float *pDataR,t;
    int k,m;
    pDataR=new float[2*MaxAnalPointNum];
    for(k=0;k<MaxAnalPointNum;k++)
    {

        pDataR[k]=pStoreData[k];

    }
    .....
    //计算中值偏差
```

```

float *pDataRAM;
.....
delete pDataA;
delete pDataD;
delete pDataCount;
delete pDataRAM;
delete pDataR;

}

```

4.2.4 小波控件的应用

ActiveX 控件开发完成后，需要注册才能在其他应用程序中使用，与编写 ActiveX 控件程序相比，对它的注册要简单的多。Visual C++对 ActiveX 控件的注册方法有两种：一是自动注册；二是手动注册。自动注册是将自己所编写的控件程序完全编译，那么系统将会自动注册 ActiveX 控件。手动注册是将控件程序编译生成的.ocx 文件拷贝至 C:\WINDOWS\system32 目录下，然后再打开“开始”—“运行”，输入“regsvr32+空格+所注册的控件名称”，点击确定，会弹出对话框提示控件是否注册成功。

控件注册成功后，还需要在应用程序中加载该控件，并在其主程序中调用该控件，才能实现在应用程序中使用所编写的控件的功能。首先打开要添加控件的应用程序，在工具栏中点击“Project”，选择“Add to Project”—“Components and Controls...”，打开“Components and Controls Gallery”对话框，可以看到有两个文件夹目录，一个是 Registered ActiveX Controls，该文件夹包含的控件是系统自带的以及后来注册生成的；另一个是 Visual C++ Components，该文件夹包含安装 VC++程序后自动生成的控件。很明显，上面提到的注册的控件在第一个文件夹中，打开第一个文件夹，然后找到控件的名称，本章所介绍的小波控件命名为 Wavelet.ocx，所以在此对话框中相应地会有一名称为 Wavelet Control 的文件快捷方式。选择该文件，点击“Insert”按钮，会出现是否插入该控件的提示，点击“确定”，在出现的下一个对话框中点击“OK”，即完成了控件的加载。控件加载完成后，可以发现在应用程序中自动添加了 CWavelet 类，包含有 Wavelet.h 头文件和 Wavelet.cpp 实现文件。

为了应用加载的小波控件，需要为其添加相应的代码，以实现对该控件的调用。先在显示该控件的对话框类 CShow 的头文件中定义函数：

```
void Wavelet();
```

在实现文件中编写实现代码如下：

```
void CShowDlg::Wavelet()//小波
```

```

{
    m_pWavelet=new CWavelet();
    CRect Rect;
    GetClientRect(Rect);

    m_pWavelet->Create(NULL,WS_VISIBLE,Rect,this,1);
    m_pWavelet->SetData(OffLineData,OffOneData.strSampLen,OffOneData.strSam
pRate,OffOneData.strJizuName,OffOneData.strDataTime,atoi(OffOneData.strSensor),OffO
neData.strScale);
    m_pWavelet->SetSensorStatua(OffOneData.strSensor,OffOneData.strDataTime);
}

```

然后为相应的菜单按钮事件

```
afx_msg void Onwavelet();
```

添加消息响应，即可实现以菜单工具按钮的方式调用小波控件。

代码如下：

```
void CShowDlg::OnOffwavelet()
```

```

{
    // TODO: Add your command handler code here

    if(m_pWavelet != NULL)
    {
        delete m_pWavelet;
        m_pWavelet = NULL;
    }
    Wavelet();
}

```

下面以一组采样数据为例，说明小波控件在实际应用程序中的应用。

该组数据为一加速度信号，采样频率为 12800Hz，采样点数为 1024 点。运行程序后加载该组数据，从工具条的图形按钮进入小波分析界面，程序默认以 Db4 小波 4 层分解图显示，之后可以根据需要从右键的功能菜单中选择相应的分析功能进行分析。

各种分析功能界面如下图 4-9 至图 4-11 所示：

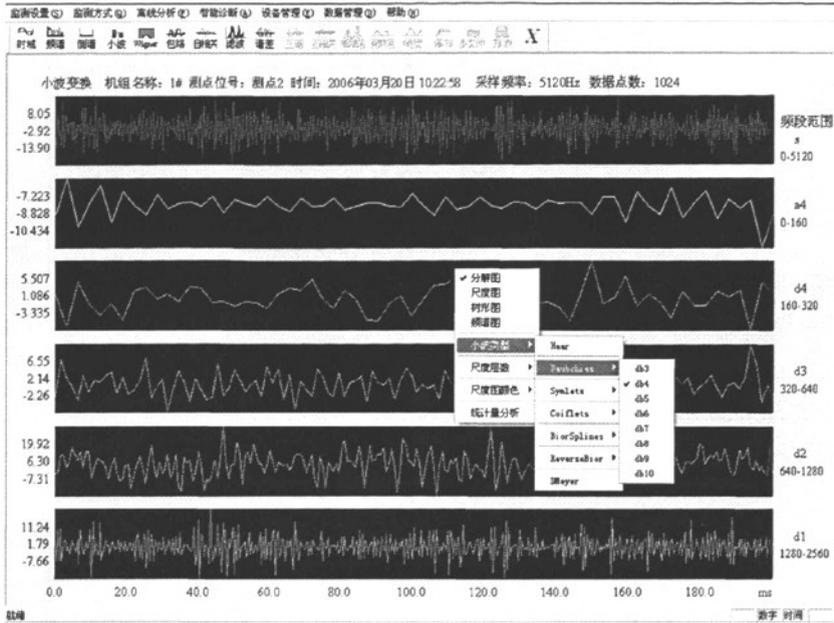


图 4-9 Db4 小波 4 层分解图显示
Fig.4-9 Db4 wavelet 4 layers decomposition graph

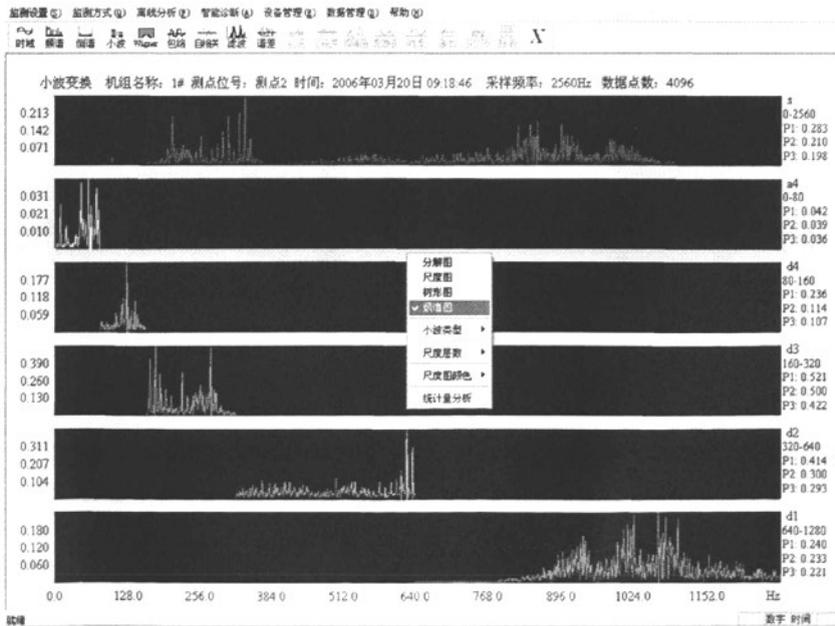


图 4-10 Db4 小波 4 层频谱图显示
Fig.4-10 Db4 wavelet 4 layers spectrum graph

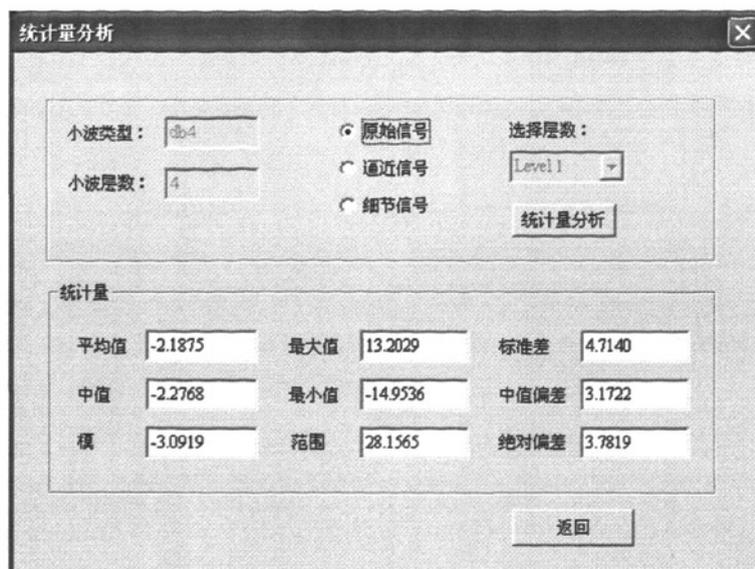


图 4-11 统计量分析对话框

Fig.4-11 The dialog of statistics analysis

4.3 本章小结

本章详细介绍了小波控件的开发过程。首先对于小波分析基本理论做了简单概括的介绍，然后针对 Visual C++ 中的 ActiveX 相关知识作了说明。最后介绍了小波控件的开发过程以及应用，包括小波分析功能代码的实现，小波控件的注册、加载和各个功能界面等。

第五章 小波多尺度分解在滚动轴承故障诊断中的应用

滚动轴承是旋转机械中应用最广泛的一种通用机械部件,也是大型装备系统的必用件之一。在旋转机械的各种故障中,滚动轴承故障占有相当大的比例,据不完全统计,旋转机械的故障中约有 30%是由滚动轴承引起的^[13]。这是因为滚动轴承是机械设备中工作条件最为恶劣的部件,它在机械设备中起着承受载荷和传递载荷的作用,其运行状态是否正常直接影响到整台机器的性能。与其他机械零件相比,滚动轴承有一个很大的特点,其寿命离散性很大。有的轴承已大大超过设计寿命而依然完好地工作,而有的轴承远未达到设计寿命就出现各种故障。所以滚动轴承的诊断方法,一直是机械故障诊断中重点发展的技术之一。滚动轴承故障的准确诊断可以减少或杜绝事故的发生,最大限度地发挥轴承的工作潜能,节约开支,具有重大意义^[48,49]。

5.1 滚动轴承故障的主要失效形式与原因

滚动轴承在运转过程中可能会由于各种原因引起损坏,如装配不当、润滑不良、水分和异物侵入、腐蚀和过载等都会导致轴承过早损坏。即使在安装、润滑和使用维护都正常的情况下,经过一段时间运转,轴承也会出现疲劳剥落和磨损而不能正常工作。总之,轴承的故障原因是十分复杂的。滚动轴承的主要故障形式如下^[13]:

(1) 疲劳剥落

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

(2) 磨损

由于尘埃、异物的侵入,滚道和滚动体相对运动时会引起表面磨损,润滑不良也会加剧磨损,磨损的结果使轴承游隙增大,表面粗糙度增加,降低了轴承运转精度,因而也降低了机器的运动精度,振动及噪声也随之增大。对于精密机械轴承,往往是磨损量限制了轴承的寿命。

此外,还有一种微振磨损。在轴承不旋转的情况下,由于振动的作用,滚动体和滚道接触面间有微小的、反复的相对滑动而产生磨损,在滚道表面上形成振纹状的磨

痕。

(3) 塑性变形

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

(4) 锈蚀

锈蚀是滚动轴承最严重的问题之一，高精度轴承可能会由于表面锈蚀导致精度丧失而不能继续工作。水分或酸、碱性物质直接侵入会引起轴承锈蚀。当轴承停止工作后，轴承温度下降达到露点，空气中水分凝结成水滴附在轴承表面上也会引起锈蚀。此外，当轴承内部有电流通过时，电流有可能通过滚道和滚动体上的接触点处很薄的油膜引起电火花而产生电蚀，在表面上形成搓板状的凹凸不平。

(5) 断裂

过高的载荷会可能引起轴承零件断裂。磨削、热处理和装配不当都会引起残余应力，工作时热应力过大也会引起轴承零件断裂。另外，装配方法、装配工艺不当，也可能造成轴承套圈挡边和滚子倒角处掉块。

(6) 胶合

在润滑不良、高速重载情况下工作时，由于摩擦发热，轴承零件可以在极短时间内达到很高的温度，导致表面烧伤及胶合。

(7) 保持架损坏

由于装配或使用不当可能会引起保持架发生变形，增加它与滚动体之间的摩擦，甚至使某些滚动体卡死不能滚动，也有可能造成保持架与内外圈发生摩擦等。这一损伤会进一步使振动、噪声与发热加剧，导致轴承损坏。

5.2 滚动轴承故障诊断及发展趋势

5.2.1 常用故障诊断方法综述

早期的机械设备状态监测与诊断主要是依靠人体的感官和人的经验，或者借助于某些简单的工具来进行。例如，有经验的工人常利用听音棒来判断滚动轴承及转子的状态。随着科技的不断发展，工业化程度的不断提高，机械设备的精密程度、复杂程度和自动化程度等越来越高，早期那种依靠人体感官和简单工具进行机械设备监测与诊断的方法已经远远不适用了，人们需要更准确更高效的诊断方法。滚动轴承作为机械设备的—个组成部分，其故障诊断也是如此。到目前为止，人们已经研究了多种现代化的诊断方法。当前根据诊断所采用的状态量来分类，滚动轴承故障诊断方法主要

可分为油温检测法、油液分析法、油膜厚度分析法、振动分析法以及声学法等等^[50]。

(1) 温度检测法

温度检测法是通过检测轴承的温度或温升来判断轴承工作是否正常的，是一种很早就被采用的轴承故障方法，具有简单、成熟、易于实现的优点。温度检测对轴承载荷、速度和润滑情况的变化反映比较敏感，尤其对润滑不良而引起的轴承过热现象比较有效。但是，对于表面剥落、点蚀等局部损伤类故障，温度检测法几乎不可能检测出。只有当故障达到一定的严重程度时，才能用这种方法发现故障。所以温度检测法不适用于早期故障诊断。

(2) 油液分析法

油液分析技术包含理化分析和光、铁谱分析。理化分析通过轴承所使用的润滑油、脂本身的理化性能来判断润滑剂的工作状态，用于防止因润滑不良而产生故障；光、铁谱分析通过收集和分析润滑油中金属颗粒的大小、形状和浓度来判别轴承的工作状态。这种方法可以用于轴承的早期诊断，但存在取样不便、实时性差、大颗粒分析困难等缺点。另外，这种方法还受其他非轴承损坏掉下的颗粒的影响。所以，这种方法有很大的局限性。

(3) 油膜厚度分析法

油膜厚度分析(接触电阻法)是通过测量轴承接触表面间的接触电阻来判断润滑状态的。接触电阻随轴承内的油膜厚度而变化。正常的轴承，油膜厚度至少是表面粗糙度的4倍，而当轴承零件出现剥落、腐蚀、裂纹或磨损时，油膜被破坏，接触电阻下降，这种方法对磨损、腐蚀类故障比较敏感，而对表面剥落、裂纹、压痕等故障的检测能力较弱，且不适用于低速、同一轴上有多个轴承和旋转轴不外露等情况，实际应用比较少。

(4) 振动法

振动法是通过安装在轴承座或箱体适当方位的振动传感器监测轴承的信号，并对此信号进行分析和处理来判断轴承状态与故障的。振动信号携带了大量的状态信息，不仅能检测运转中轴承的异常，还具有反映轴承早期故障的能力，因而在轴承监测、诊断中应用较多。此外，还因为振动信号拾取方便，传感器价格相对低廉，信号处理方法多样，人们对滚动轴承的振动特性掌握的比较多，诊断技术发展比较成熟等原因，目前国内外开发生产的各种滚动轴承监测与诊断仪器和系统中大都是根据振动法的原理研制成功的，有关轴承监测与诊断方面的文献80%以上讨论的都是振动法。从适用、实用、有效的观点来看，目前没有比振动法更好的滚动轴承监测与诊断方法了。

(5) 声发射诊断法

声发射(AE)属超声波信号，是一种弹性波。一般当承受负载的滚动体通过剥落处时，缺陷就扩展，同时就有声发射现象发生，并且具有周期性，根据周期可以判别故障类型和区别于其他AE信号，对AE检测的信号进行滤波，然后希尔伯特变换解调，

再对其频谱分析,不含故障的信号在频谱图上不会出现谱峰,而故障信号在频谱图上有谱峰^[51]。滚动轴承的故障越严重,转动时冲击强度越大,产生的声发射能量也越大,故障时域宽度越宽,则可以设定幅值阈值用于识别故障严重程度。

(6) 噪声分析法

这种方法是通过滚动轴承在运行过程中的噪声来判断其故障。用噪声法进行轴承的故障检测,优点是不必接触被测轴承就可得到检测信号;其弊端就是很难从周围环境的各种杂音中分离出轴承异常的声音信号。所以,噪声法一般很少被采用。但成功的例子也是有的,就是在方向性强的抛物线型音响器上安装传声器,收集轴承发出的声音信号,并用反向滤波器排除其他杂音,检测出轴承异音。

5.2.2 发展趋势

随着信号检测技术、计算机技术、数字信号处理技术、人工智能技术的迅速发展,轴承故障诊断已经成为融合数学、物理、力学等自然科学和计算机技术、数字信号处理技术、人工智能技术的综合学科。与传统的诊断方法相比,目前的研究方向主要表现在以下几个方面^[52-57]:

(1) 小波变换

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

(2) 专家系统

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

(3) 模糊诊断

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

(4) 神经网络

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

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

5.3 滚动轴承振动信号的特征

滚动轴承在运转时,由于轴的旋转,滚动体便在内、外圈之间滚动。如果滚动表面发生损伤,滚动体在这些表面转动时,便产生一种交变的激振力。由于滚动表面的损伤形状是无规则的,所以激振力产生的振动将是由多种频率成分组成的随机振动。从轴承滚动表面状况产生振动的机理可以看出,轴承滚动表面损伤的形态和轴的旋转速度决定激振力的频谱,轴承和外壳决定了振动系统的传递特性。最终的振动频谱是由上述二者共同决定。也就是说,轴承异常所引起的振动频率,由轴的旋转速度、损伤部分的形态及轴承与外壳振动系统的传递特性所决定^[58]。

通常,轴的旋转速度越高,损伤越严重,其振动的频率越高,轴承的尺寸越小,其固有频率越高。因此,轴承异常所产生的振动,对所有的轴承都没有一个共同的特定频率;即使对一个特定的轴承,当产生异常时,也不会只产生单一频率的振动。

5.3.1 滚动轴承的典型结构

滚动轴承的典型结构如图 5-1 所示,它由内圈、外圈、滚动体和保持架 4 部分组成。

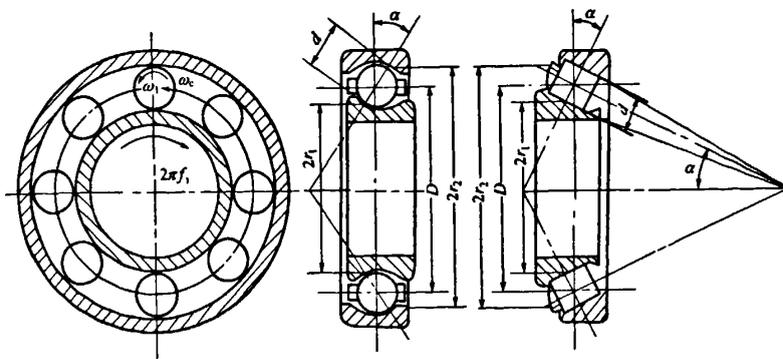


图 5-1 滚动轴承的典型结构

Fig.5-1 The typical structure of rolling bearings

滚动轴承的几何参数主要有:

轴承节径 D : 轴承滚动体中心所在的圆的直径

滚动体直径 d : 滚动体的平均直径

内圈滚道半径 r_1 : 内圈滚道的平均半径

外圈滚道半径 r_2 ：外圈滚道的平均半径

接触角 α ：滚动体受力方向与内外滚道垂直线的夹角

滚动体个数 Z ：滚珠或滚珠的数目

5.3.2 滚动轴承的故障特征频率^[13,59,60]

当轴承内、外圈、滚子出现点蚀等故障时，会产生一定(特征)频率的冲击，引起轴承振动，机器运行会出现周期性脉冲。这种周期性脉冲作用时间短，形状陡峭。根据轴承产生缺陷零件的不同，其相应的特征频率也不同。

为分析轴承各部运动参数，先做如下假设：

- (1) 滚道与滚动体之间无相对滑动；
- (2) 承受径向、轴向载荷时各部分无变形；
- (3) 内圈滚道旋转频率为 f_i ；
- (4) 外圈滚道旋转频率为 f_o ；
- (5) 保持架旋转频率(即滚动体公转频率)为 f_c 。

参见图 5-1，则滚动轴承工作时各点的转动速度如下：

内滑道上一点的速度为：

$$V_i = 2\pi r_i f_i = \pi f_i (D - d \cos \alpha) \quad (5-1)$$

外滑道上一点的速度为：

$$V_o = 2\pi r_o f_o = \pi f_o (D + d \cos \alpha) \quad (5-2)$$

保持架上一点的速度为：

$$V_c = \frac{1}{2}(V_i + V_o) = \pi f_c D \quad (5-3)$$

由此可得保持架的旋转频率(即滚动体的公转频率)为：

$$f_c = \frac{V_i + V_o}{2\pi D} = \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_i + \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_o \right] \quad (5-4)$$

单个滚动体在外轨道上的通过频率，即保持架相对外圈的旋转频率为：

$$f_{oc} = f_o - f_c = \frac{1}{2} (f_o - f_i) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (5-5)$$

单个滚动体在内轨道上的通过频率，即保持架相对内圈的旋转频率为：

$$f_{ic} = f_i - f_c = \frac{1}{2} (f_i - f_o) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (5-6)$$

从固定在保持架上的动坐标系来看，滚动体与内圈做无滑动滚动，它的旋转频率之比与 $d/2r_i$ 成反比。由此可得滚动体相对于保持架的旋转频率(即滚动体的自转频

率, 滚动体通过内滚道或外滚道的频率) f_{bc} :

$$\frac{f_{bc}}{f_{ic}} = \frac{2r_1}{d} = \frac{D-d \cos \alpha}{d} = \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (5-7)$$

$$f_{bc} = \frac{1}{2} \times \frac{D}{d} (f_i - f_o) \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \alpha\right] \quad (5-8)$$

根据滚动轴承的实际工作情况, 定义滚动轴承内、外圈的相对转动频率为 $f_r = f_i - f_o$ 。

一般情况下, 滚动轴承外圈固定, 内圈旋转, 即:

$$f_o = 0,$$

$$f_r = f_i - f_o = f_i \quad (5-9)$$

同时考虑到滚动轴承有 Z 个滚动体, 则滚动轴承的特征频率计算公式如下:

(1) 内圈上一点缺陷(剥落、凹坑等)与一个滚动体的接触频率:

$$f_f = \frac{1}{2} Z \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_r \quad (5-10)$$

(2) 外圈上一点缺陷与一个滚动体的接触频率:

$$f_n = \frac{1}{2} Z \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_r \quad (5-11)$$

(3) 滚动体上一个缺陷点与内圈或外圈的接触频率:

$$f_b = \frac{1}{2} \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \alpha\right] f_r \quad (5-12)$$

(4) 保持架的故障特征频率:

$$f_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_r \quad (5-13)$$

当轴承出现故障后, 在其振动频谱中会出现其特征频率的频谱。但在实际中, 频谱的频率并不总是精确地等于理论计算值, 这主要是因为滚动体并非纯滚动等因素(如轴承的几何尺寸误差、轴承安装后的变形等)造成的。所以在频谱图上寻找各种特征频率时, 需要在计算的频率值的上下一定范围内找与其近似的值作为诊断判断。随着故障程度的增加, 经常还会出现一些特征频率为主频, 以轴频为差值的调制边频现象, 而当内圈、外圈和滚子同时出现故障时, 由频谱分析明确诊断故障比较困难。

5.4 滚动轴承故障的振动诊断技术

5.4.1 振动分析诊断的基本原理

在滚动轴承的劣化过程中，早期故障主要是由疲劳、腐蚀、异物等原因导致的轴承元件滚动面局部损伤及保持架故障。带有早期故障的轴承在载荷的作用下继续运行，故障会逐渐扩大，最终导致轴承发热甚至烧毁。早期故障使得轴承在运行过程中产生异常的振动，基于振动的监测和诊断技术能够实现滚动轴承的早期诊断，是当前研究最广的诊断方法，本文提出的故障诊断方法也是一种基于振动的诊断方法。

滚动轴承是由内圈、外圈、滚动体和保持架四种元件组成的。一般情况下，滚动轴承在工作时其外圈与轴承座或机壳相连接，固定或相对固定；内圈与机械的传动轴相连，随轴一起转动。在机械运转时，滚动轴承的振动主要源自两个方面：一方面是诸如轴承本身的结构特点、加工装配误差和运行过程中出现的故障等内部因素，另一方面来自传动轴上其他零部件的运动和力的作用。当传动轴在一定的载荷下，以一定的转速运行时，对轴承和轴承座/壳体组成的振动系统产生激励，在多种因素的作用下使该系统产生振动响应。

在引起滚动轴承振动的诸多因素中，由轴承结构特点引起的振动，在轴承一定的转速下具有确定的性质，频率较低。由轴承制造和装配误差引起的振动在理论上大都具有周期性，例如由于各元件表面波纹引起的激励近似正弦，但是在实际情况中，由于各因素关系十分复杂，使得轴承振动呈现较强的随机性，且含有多种频率成分。由轴承内部缺陷或故障引起的振动往往是冲击性振动。这种振动信号的特点是每个冲击的作用时间很短，却具有很宽的频率范围；时域能量不大，频谱却很丰富；而且具有明显的周期性。由外部激励引起的振动一般在轴承总的振动能量中所占的比例不大，且以低频周期成分为主。

由上述分析可知，通过安装在轴承座上的传感器拾取到的振动信号，是由各种内外因素共同作用而成的。它除了反映有关轴承本身工作情况的信息外，还包含了很多来自设备或机组中其他运动部件和结构的信息。对轴承故障诊断来讲，这些信息多属于无用的噪声信息，称为背景噪声。一般情况下，在轴承现场诊断中都有较大的背景噪声，而滚动轴承早期故障引起的振动相对来说要弱得多，所以往往会淹没在背景噪声中而不易提取出来。因此，采用何种振动监测和信号处理技术来抑制背景噪声，提高信噪比，突出故障信息，从而有效地进行诊断，是滚动轴承故障诊断研究工作的重点所在。

5.4.2 常用的振动信号特征提取方法

1. 特征参数法

在滚动轴承状态监测和故障诊断的振动特征分析中，特征参数法占有重要位置。特征参数法的优点在于仅有少数指标用于解释轴承的状态，结果分析简单、方便。此外，采用特征参数法评定轴承状态时不需要轴承以前的历史记录，这是此技术另一项

具有吸引力的特征。

在滚动轴承诊断中常用的特征参数包括有效值、峰值等时域特征参数^[50]和重心频率等各种频域参数。

(1) 时域参数

在轴承故障诊断中,主要的时域特征参数有峰值、有效值(RMS)等有量纲参数和峰值指标、峭度指标等无量纲参数。若 $\{x_i\}$ 为采样所得一组离散数据 $i=1,2,\dots,N$, 那么:

$$\text{峰值 } x_{peak} = \max(|x_i|) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (5-14)$$

峰值反映了信号的强度,它适用于如表面点蚀损伤之类的具有瞬时冲击的故障诊断中。特别是对早期轴承表面损伤,非常容易由峰值的变化检测出来。另外,对于转速较低的情况(如 300r/min 以下),也常采用峰值进行诊断。但它对于滚动体对保持架的冲击及突发性外界干扰等原因引起的瞬时振动比较敏感,所以比起有效值来,测定值的变动可能很大。实际应用中很少直接应用真峰值而多用当量峰值,如把整个信号分为若干段,分别求峰值,然后再取平均作为当量峰值。

$$\text{有效值 (RMS)} \quad x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5-15)$$

有效值又称均方根值,随故障的发展而单调增加。一般地,故障轴承比无故障轴承的 RMS 值高,有多处故障的轴承信号 RMS 值比单个故障轴承信号的 RMS 高。RMS 稳定性强,在趋势分析中应用效果较好。而且由于是对时间的平均,所以对具有表面裂纹无规则振动波形的异常,可对其测量值进行恰当评价。但是对于表面剥落或伤痕等具有瞬变冲击振动的异常是不适用的。这是由于冲击波峰的振幅大,但持续时间短,如作时间平均,则有无峰值的差异几乎表现不出来。

有量纲特征参数多随轴承故障的发展而增大,故可用来表征故障的严重程度。但是有量纲特征参数与轴承运行工况密切相关,易受载荷、转速等工况条件的影响。

为了克服有量纲参数对载荷和转速等的变化比较敏感的缺点,可以采用一些无量纲参数指标。在轴承故障诊断中,最常用的无量纲参数指标有:

$$\text{峰值指标 (Crest Factor)} \quad C_f = \frac{x_{peak}}{x_{rms}} \quad (5-16)$$

利用峰值指标数值随时间变化的趋势,可以有效地检测出滚动轴承的早期故障,并能反映故障的发展变化趋势。正常轴承的峰值指标为一较小的稳定值,一般在 4 到 5 之间;一旦轴承出现了损伤,则会产生冲击信号,振动峰值会明显增大,但此时 RMS 尚无明显变化,故峰值指标增大,将达到 10 以上;当故障不断扩展,峰值逐步达到极限值后, RMS 则开始增大,波峰因子因此逐步减小,直至恢复到无故障时的大小。

正常轴承的振动信号幅值近似服从正态分布，其峭度指标约为 3。随着故障的出现和发展，峭度指标值具有与峰值指标类似的变化趋势。其定义为

$$\text{峭度指标 (Kurtosis Value)} \quad K_v = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4 \right) / x_{rms}^4 \quad (5-17)$$

当轴承出现故障时 K_v 值将增大，据此可以判断轴承是否发生了异常。峭度指标对早期局部损伤具有较高的敏感性，但是和峰值指标一样，当故障发展到一定程度时又会有所下降，稳定性不够好。但正是由于这个特点，峭度指标也可用于轴承故障发展的趋势分析中。当发现峭度指标升至最高点后开始下降时，有理由认为该轴承的故障已经扩展至中后期阶段了。

除了峰值指标和峭度指标，滚动轴承故障诊断中常用的无量纲特征参数还有：

$$\text{波形指标 (Shape Factor)} \quad S_f = \frac{x_{rms}}{\bar{x}} \quad (5-18)$$

$$\text{脉冲指标 (Impulse Factor)} \quad I_f = \frac{x_{peak}}{\bar{x}} \quad (5-19)$$

$$\text{裕度指标 (Clearance Factor)} \quad CL_f = \frac{x_{peak}}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|x_i|} \right)^2} \quad (5-20)$$

其中 \bar{x} 为信号的均值。

无量纲特征参数对轴承故障足够敏感，而且基本上不受轴承型号、转速和载荷等因素的影响，无须考虑相对标准值或与以前的数据进行比较；另外，它们不受信号绝对水平的影响，所以即使测点同以往的地方略有变动，也不致对诊断结果产生太大的影响。

(2) 频域参数

理论和实验表明：当轴承无故障运行时，能量基本上集中在低频段；有故障时，故障引起的冲击力或摩擦力激发起轴承的高频振动，能量向中频段及高频段转移。信号的功率谱反映了信号的能量随频率的分布情况，即信号中的频率成分以及各频率成分的能量大小情况。当信号中各频率成分能量比发生变化时，功率谱主能量的谱峰位置也将发生变化。另一方面，当信号的频率成分增多时，功率谱上能量分布将表现为分散；当信号中频率成分减少时，功率谱上能量分布将表现为集中。由此可以看出，通过描述功率谱中主频带位置的变化以及谱能量分布的分散程度，可以较好地描述信号频域特征的变化^[61]。频域参数主要有以下几个：

重心频率 FC

$$FC = \frac{\sum_{i=0}^N f_i S(f_i)}{\sum_{i=0}^N S(f_i)} \quad (5-21)$$

均方频率 MSF

$$MSF = \frac{\sum_{i=0}^N f_i^2 S(f_i)}{\sum_{i=0}^N S(f_i)} \quad (5-22)$$

均方根频率 $RMSF$

$$RMSF = \sqrt{MSF} \quad (5-23)$$

频率方差 VF

$$VF = \frac{\sum_{i=0}^N (f_i - FC)^2 S(f_i)}{\sum_{i=0}^N S(f_i)} \quad (5-24)$$

频率标准差 RVF

$$RVF = \sqrt{VF} \quad (5-25)$$

上面各式中的 $S(f_i)$ 为信号的功率谱, f_i 为离散频率。其中重心频率 FC , 均方频率 MSF , 和均方根频率 $RMSF$ 都是描述功率谱主频带位置变化的, 而频率方差 VF 和标准差 RVF 描述谱能量的分散程度。

采用频域参数可以对滚动轴承的故障进行粗略判断。当轴承无故障时, 频率成分主要集中在低频, FC 较小; 当出现局部损伤类故障时, 由于冲击引起的共振, 主频区右移, FC 增加。

上述这些时域和频域参数各有其适用范围, 主要用于简易诊断, 单独使用某一种指标往往不能得到准确的结果。因此, 在实际应用中应综合使用, 以便获得较好的效果。

2. 冲击脉冲法^[15]

冲击脉冲 (SPM) 法是一种用于提取滚动轴承在运转时所产生的冲击能量的方法。当滚动轴承存在缺陷时, 如有疲劳剥落、裂纹、磨损和滚道进入异物等, 在运转时就会产生冲击振动。由于阻尼的作用, 这种振动是一种衰减性的振动。研究表明, 这种振动中冲击的强弱反映了轴承在一定转速下的故障大小程度。冲击脉冲法就是基于这个原理。先让所采集的信号经过窄带滤波 (通常为 30~40Hz), 再利用谐振电路之谐振放大特点, 提取冲击能量或折算成脉冲值。脉冲值的大小就反映了轴承的损坏情

况，因此可以利用此值来判断轴承的好坏情况。

当轴承无损伤或极小的损伤时，脉冲值(dB)一般在某一水平线上下波动。当损伤越来越大时，脉冲值也随着增大，直到冲击能量达到初始值的1000倍(60dB)，就认为该轴承可以报废。规定总的冲击能量减去初始冲击能量叫做标准冲击能量。当标准冲击能量值在0~20dB之间时，表示轴承处于良好状态；在20~35dB之间时，表示轴承出现初期损坏；在35~60dB之间时，表示轴承有明显损伤，需要修理。

冲击脉冲法对诊断轴承早期故障是一种很有效的方法。但是由于润滑不良、轴承中混有异物、有干扰噪声等影响时，会使得冲击脉冲值异常。因此该方法适于在单纯背景下使用。

3. 功率谱分析法

利用特征参数可以对轴承进行简易诊断，即判断轴承是否有故障。发现故障后，就应进一步通过振动信号的频率分析，以判明故障的类别和原因，故障发生在哪个元件上，以及故障的严重程度等比较精确的信息。滚动轴承的振动其频率成分十分丰富，既含有低频成分，又含有高频成分。每一种特定的故障都对应特定的频率成分，需要通过适当的信号处理方法将特定的频率成分分离出来，从而指出特定故障的存在。

功率谱的估计方法很多，大致可分为经典谱估计和现代谱估计。

经典谱估计又可分为直接法和间接法。

直接法(周期图法)由数据直接用离散傅立叶变换求功率谱。在工程实际中，计算信号的自功率谱往往采用下列公式，即由信号的幅值谱直接计算：

$$S_x(f) = \frac{1}{N} |X(f)|^2 \quad (5-26)$$

间接法(相关估计法)是由数据的自相关序列求功率谱。用相关函数计算功率谱，设信号 $x(t)$ 的自相关函数为 $R_x(t)$ ，则功率谱密度函数为：

$$S_x = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-2\pi f\tau} d\tau \quad (5-27)$$

现代谱估计包括参数模型法和非参数方法。参数模型法又可分为自回归模型(AR模型)、滑动平均模型(MA模型)和自回归滑动平均模型(ARMA模型)；而非参数方法则包括：多窗口法(MTM)、多信号分类法(MUSIC)和特征向量法(EV)。

滚动轴承振动信号常常含有大量的噪声，直接对振动信号进行频谱分析，故障特征频率成分在频谱图上有时没有突出显示。为了能够在频谱图上凸显故障特征频率，常常须对振动信号进行降噪处理，然后再进行频谱分析。时域同步平均是常用的信号降噪处理方法，它可以提取感兴趣周期信号，抑制噪声与其他周期信号。另外，可用模拟或数字的方法对信号进行滤波、包络检波等处理，以提高信噪比，突出故障信息。

4. 倒频谱分析法

倒频谱(Cepstrum)分析是近代信号处理科学的一项新技术，倒频谱分析也称为二

次频谱分析,它可以处理复杂频谱图上周期结构,可以对卷积进行分解,从而通过测得的响应特性,识别源特性,或系统的传输特性。倒频谱分析技术作为谱分析方法之一,在振动、噪声分析、故障诊断、系统识别等方面,都获得了较有成效的应用^[62,63]。尤其对于分析具有同族谱频或异族谱频、多成分边频等复杂信号,找出功率谱上不容易发现的问题,非常有效。

倒频谱是对信号 $x(t)$ 的功率谱 $G_x(f)$ 的对数值进行傅里叶逆变换的结果,用 $G_x(q)$ 表示,即

$$G_x(q) = F^{-1} |\lg G_x(f)| \quad (5-28)$$

式中, F^{-1} 为傅里叶逆变换, q 为具有时间量纲的变量,称为倒频率,功率谱 $G_x(f)$ 常常取相对量,此时倒频谱单位为 dB。在某些场合使用倒频谱而不用自相关函数,是因为倒频谱在功率谱的对数转换时,给幅值较小的分量有较高的加权,其作用是既可判别谱的周期性,又能精确地测出频率间隔。

5. 包络分析法

包络分析是目前公认的最有效的滚动轴承故障诊断法,也是对其研究较为成熟的一种方法。包络分析就是取振动时域波形的包络线,然后对包络线进行频谱分析。由于包络处理可找出反复发生振动的规律,根据滚动轴承的特征频率,就可诊断出轴承故障的部位。研究表明,当滚动轴承无故障时,在包络解调频谱中没有高阶谱线;有故障时,包络解调频谱中出现高阶谱线。由于轴承故障而产生的冲击响应是一种宽带信号,所以其中一部分必然引起加速度传感器谐振,经中心频率等于加速度传感器的谐振频率的带通滤波器,然后进行数字包络检波(通常采用希尔伯特变换,也有的工作者采用能量算子解调)后得出与轴承的故障特征频率相似的周期序列,包络检波后的信号以故障特征频率及其倍频和它们的边频为主要频率成分的低频信号,故障信息被突出来。

(1) 用包络分析进行故障诊断的基本原理

当滚动轴承某一元件表面出现局部损伤时,在受载运行过程中要撞击与之相互作用的其他元件表面,产生冲击脉冲力,由于冲击脉冲力的频带很宽,就必然激起测振系统的高频固有振动。根据实际情况,可选择某一高频固有振动作为研究对象,通过中心频率等于该固有频率的带通滤波器把该固有振动分离出来。然后,通过包络检波器波,去除高频衰减振动的频率成分,得到只包含故障特征信息的低频包络信号,对这一包络信号进行频谱分析便可容易地诊断出故障来。包络分析法能将有关故障的信号从高频调制信号中提取出来,从而避免了与其他低频干扰的混淆,并能快速而正确地诊断出滚动轴承的故障及发生的部位,因而是目前最常用,最有效地诊断滚动轴承故障的方法之一。

包络分析法的具体步骤:

- ① 将信号通过适当的带通滤波器，以衰减其背景噪声；
 ② 求得由脉冲序列引起的包络线，即进行希尔伯特变换，构成以该脉冲信号为基础的某个复变函数；

③ 对所关注的频率，分析其包络线，检出重复的频率。

(2) 希尔伯特变换的定义

给定时域因果信号 $x(t)$ ($x(t) = 0, t < 0$)，其希尔伯特变换 $\hat{x}(t)$ 定义为：

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} * x(t) \quad (5-29)$$

设离散时间信号 $x(n)$ ，希尔伯特变换器的单位时间抽样响应 $h(n)$ 为

$$h(n) = \frac{1 - (-1)^n}{n\pi} = \begin{cases} 0 & n \text{ 为偶数} \\ \frac{2}{n\pi} & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (5-30)$$

则离散时间信号 $x(n)$ 的希尔伯特变换 $\hat{x}(n)$ 是为

$$\hat{x}(n) = x(n) * h(n) = \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{x(n-2m-1)}{2m+1} \quad (5-31)$$

(3) 希尔伯特变换的解调原理

设有实信号 $x(t)$ ，其 Hilbert 变换为 $\hat{x}(t)$ 。由 Hilbert 变换的定义，可得下列 Hilbert 变换对^[63]，即

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} * x(t) \\ x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t-\tau} d\tau = -\frac{1}{\pi t} * \hat{x}(t) \end{cases} \quad (5-32)$$

$\hat{x}(t)$ 可以看成是 $x(t)$ 通过一个滤波器的输出，该滤波器的单位冲击响应为 $h(t) = 1/\pi t$ 。

$x(t)$ 的解析信号为：

$$g(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (5-33)$$

$g(t)$ 的极坐标表达式为：

$$g(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (5-34)$$

其中：

$$\text{幅值} \quad A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (5-35)$$

$$\text{相位} \quad \phi(t) = \tan^{-1} \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \quad (5-36)$$

(4) 幅值 $A(t)$ 的计算方法

由式(5-31)可得:

$$\hat{X}(f) = X(f) \cdot F\left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (5-37)$$

$$-j \operatorname{sgn}(t) = F\left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (5-38)$$

$$\hat{X}(f) = X(f) \cdot [-j \operatorname{sgn}(t)] \quad (5-39)$$

$$\hat{x}(t) F^{-1}[\hat{X}(f)] \quad (5-40)$$

这样就可以利用式(5-34)来求出幅值 $A(t)$ ，进而可以求出滚动轴承冲击振动信号的幅值包络信号。对其进行频谱分析便能得到与轴承各种损伤对应的特征频率，由此判别轴承的相应的故障。

上述这些方法在滚动轴承故障特征信号提取的实际应用中取得了一定的效果，但是也存在一些不足，它们只是一种简易的诊断方法，即能判断出轴承有故障，但是不能判断出是轴承的哪个部位出现故障，更不能判断是否由轴承本身的故障引起的，因此，对轴承维修带来很大的不便。频域分析方法如倒频谱分析、包络线分析等要求信号是平稳的，而实际应用中所分析的滚动轴承的振动信号却常常表现为非平稳性。于是有必要研究适用于分析非平稳信号的方法。时频域分析是基于小波分析理论的一种分析方法，在机械故障诊断中得到了广泛的应用。小波变换是一种日益获得广泛应用的信号分析方法，已成为国际上非常活跃的研究领域，其在时域和频域中同时具有良好的局域性，能够很好地反映瞬态信号的特征，为诊断机械故障提供了有效的分析手段。结合本人课题的实际应用，下面将介绍一种应用小波变换来诊断滚动轴承故障的新方法。

5.5 基于小波多尺度分解的时域参数向量法

5.5.1 小波基的选择

由上一章可知信号的一维小波多尺度分解可通过 Mallat 算法实现^[65]。图 5-2 是信号 S 的三层小波分解示意图，其中 A_1, A_2, A_3 为低频信号(逼近信号)， D_1, D_2, D_3 为高频信号(细节信号)。

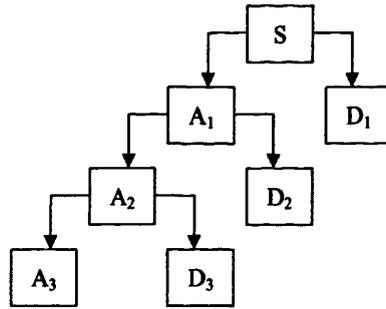


图 5-2 信号的三层小波分解

Fig.5-2 Three layers wavelet decomposition of signals

$S=A_3+D_3+D_2+D_1$ 。假设信号的采样频率为 $2f_0$ ，则分解后的频带分布如表 5-1 所示：

表 5-1 各层分解信号的频带分布

Table 5-1 Frequency distributions of discomposition signal for every level

信号	A ₃	D ₃	D ₂	D ₁
频带	$[0, f_0/8]$	$[f_0/8, f_0/4]$	$[f_0/4, f_0/2]$	$[f_0/2, f_0]$

四个信号 A₃, D₃, D₂, D₁ 频带正好不相交地布满整个频带，提供了信号 S 无冗余、无疏漏的全部信息^[67,68]。

当滚动轴承出现表面损伤类故障时，将产生冲击振动，同时引起轴承系统的瞬时高频共振。损伤故障振动信号的突出表现就是其非平稳特性。如何从轴承复杂的振动信号中提取出这种突变信号，是轴承故障诊断的关键。传统的傅里叶变换是一种全局的变换，不适合分析非平稳信号。小波变换(Wavelet Transform)是 80 年代后期发展起来的一种时频分析方法。它具有多分辨分析的特点，而且在时频域都具有表征信号局部特征的能力，是一种窗口大小固定不变但其形状可改变，时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法，很适合提取非平稳信号，被誉为分析信号的显微镜。由于小波变换在分析突变信号有明显的优势，因此本文提出采用小波多尺度分解分析轴承损伤类故障振动信号，以期获得更有效地诊断特征信息。

由轴承故障振动特性分析可知，轴承元件表面损伤点在运行中会反复冲击与之相接触的其他元件表面而产生低频振动成分，表现为周期脉冲振动的形式。二进正交小波由于以下几方面的原因，非常适合从轴承振动信号中提取反映损伤特征的低频冲击信号。

(1) 二进正交小波变换具有较好的降噪特性，文献^[66]证明了白噪声产生的模极大值随二进尺度的递增以半数减少。

(2) 传统的建立在傅里叶变换基础上的滤波方法，在提高空间分辨率和提高信噪比两项指标上存在矛盾。低通滤波固然能通过平滑抑制噪声，但同时会使信号的边沿变模糊，并不适合于突变信号的消噪。与之相比，二进正交小波，既可以消除高频噪声，又可以保留信号的突变特征。

(3) 采用 Mallat 算法计算二进正交小波变换，简单快捷。

二进正交小波的基本小波 $\psi(t)$ 一般都具有紧支撑或衰减极快的特点。增加紧支集长度，相当于降低了带通滤波器的同频带宽，反映局部性态的能力就越强；基本小波的消失矩阶数 M 越大，降噪能力越强^[66]。因此，选择二进正交小波的时候，应选择紧支撑区间大的，高阶消失矩的正交小波作为基本小波，这样能有效地消除噪声。Db 系列基本小波是典型的具有紧支光滑的正交小波，本文采用 db 系列小波作为二进正交小波的基本小波。

5.5.2 分析方法概述

由轴承特征频率计算公式(5-10)~(5-13)可以看出，滚动轴承在不同部位产生故障，其故障对应的特征频率也不相同，这就为利用小波多尺度分解将不同的故障特征频率分解到不同尺度上提供了依据。

对于特定的轴承振动信号，要识别出其所包含的不同故障，可以按照以下方法进行分析。分析框图如图 5-3 所示。

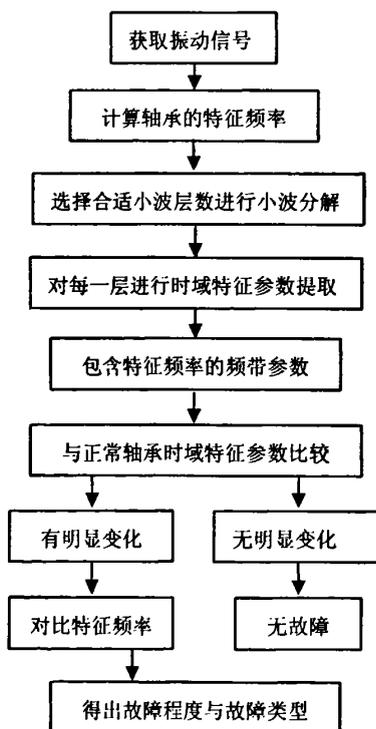


图5-3 分析方法框图

Fig.5-3 The diagram of analysis method

首先获得轴承的振动信号，由公式可知只要轴承内圈转速固定，则轴承不同部位

的故障特征频率即可确定。将内圈、外圈、滚动体、保持架的特征频率按照公式(5-10)~(5-13)计算出来,然后根据计算得到的特征频率选择合适的小波分解层数,将轴承振动信号进行小波分解,使理论计算得到的故障特征频率都分别处于不同的小波频带内;提取各层的时域特征参数,如峭度、有效值等,尤其是有轴承特征频率在内的层数,与轴承正常运转时的时域特征参数对比,若相差很大,即可判断轴承发生了故障,再根据发生故障的频段,即可确定故障的类型与故障发生的部位。

5.6 滚动轴承故障信号仿真实验

以脉冲调制信号模拟轴承产生振动的冲击信号,并加以白噪声模拟实际信号中的噪声信号。

5.6.1 只含一种故障的信号仿真

模拟轴承产生一种故障,所用脉冲调制信号的时域图和频谱图如图 5-4 所示。

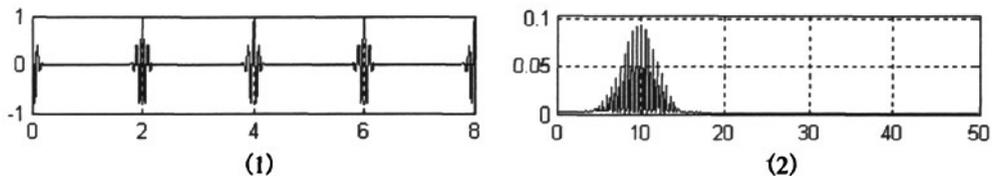


图5-4 单脉冲调制信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-4 Time-domain and frequency spectrum graphs of single pulse modulation signal

(1)Time-domain graph, (2) Frequency spectrum graph

加入随机白噪声后,时域图和频谱图如图 5-5 所示。

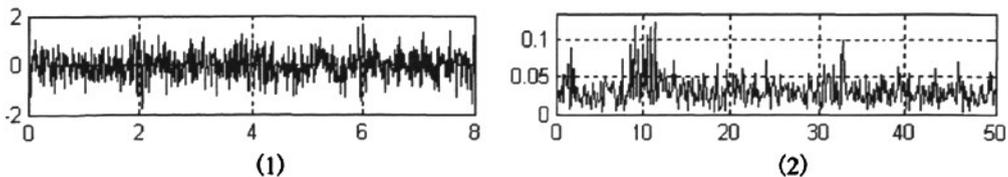


图5-5 含有随机噪声的单脉冲信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-5 Time-domain and frequency spectrum graphs of single pulse signal containing random noise

(1)Time-domain graph, (2)Frequency spectrum graph

由图可知产生脉冲调制信号的采样频率为 100Hz,在频谱图上其谱峰的频率范围大概为 5~15Hz,中心频率在 10Hz 左右。因此,要将这一频带内的信号分布在小波分解后的某一层上,需要首先确定小波分解的层数。按照采样频率的一半进行分层,若

分4层, 则各层的频带分布如表 5-2 所示。

表 5-2 只含一种故障的信号 4 层小波分解后的频带分布
Table 5-2 Frequency distributions of 4 layers wavelet decomposition
for signal only containing one kind of fault

信号	a4	d4	d3	d2	d1
频带 (Hz)	0~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25	25~50

由表可以看出, 小波 4 层分解后, 高频第 3 层的频带为 6.25~12.5Hz, 包含了脉冲调制信号的 95% 的频率值, 所以确定混杂噪声的信号的小波分解层数为 4, 小波函数选用 db10 小波, 因为 db 序列的小波扩展性比较好, 可以比较灵活地权衡增加支集长度(为了提高能量的集中程度)带来的边界问题。小波分解图如图 5-6 所示。

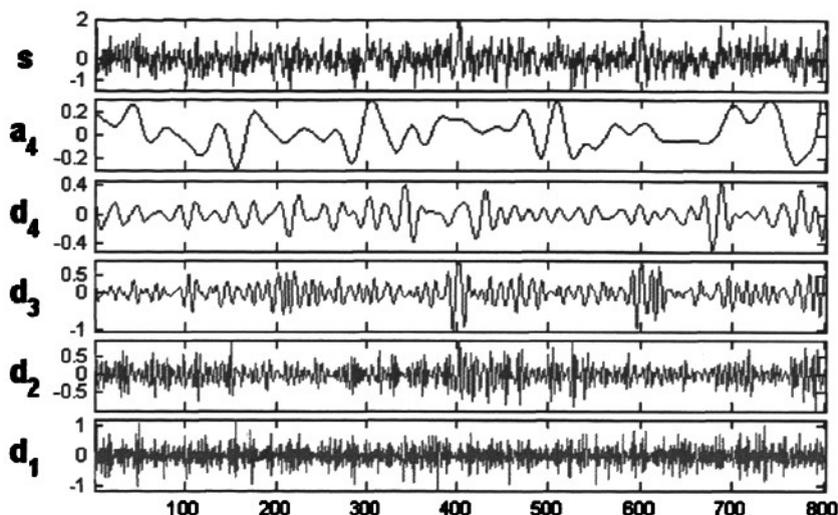


图5-6 模拟只含一种故障的信号小波分解图

Fig.5-6 Wavelet decomposition graph for the signal simulated with one kind of fault

可以看出, 在高频 d3 层, 有明显的脉冲冲击信号。因此, 小波分解的层数为 4 是合适的。据此, 计算小波分解后各层的时域特征参数。在轴承的时域特征参数中, 峭度值是绝对的, 一般认为无故障的轴承的振动信号的峭度值为 3, 若计算得到的实际信号的峭度值与 3 相差很大, 则认为轴承出现了故障。而其他时域特征参数, 如峰值、峰峰值、有效值等则是相对的, 这些值的大小与轴承的运转速度有关。因此, 这些值是否出现异常, 需要与轴承正常运转时的对应参数相比较, 而且不同的机械设备在不同的工况下正常参考值也不一样。为了讨论方便, 在此只计算各分层信号的峭度值。如表 5-3。

表 5-3 只含一种故障的信号 db10 小波 4 层分解后的各层信号峭度值

Table 5-3 Kurtosis values of every level signal after db10 wavelet 4 layers decomposition

信号	原信号	a4	d4	d3	d2	d1
频带 (Hz)	0~50	0~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25	25~50
峭度值	3.23	14.76	2.76	4.07	2.65	2.85

通过计算, 可知低频信号 a4 的峭度值很大, 这是因为出现了奇异点的缘故, 而仿真信号的脉冲冲击在高频段, 所以低频信号峭度值大对判断故障没有影响。对比高频信号, 发现在第 3 层, 信号峭度为 4.07, 远高于其他层的高频信号, 而且与正常信号峭度值 3 相差较大, 因此, 可以判定在频带 6.25~12.5Hz 范围内有故障信号发生, 若为实际采集的轴承信号, 再对比轴承故障特征频率, 即可判断轴承产生故障的部位。

5.6.2 含有两种故障的信号仿真

模拟轴承产生两种故障, 所用的脉冲调制信号的时域图和频谱图如图 5-7 所示。

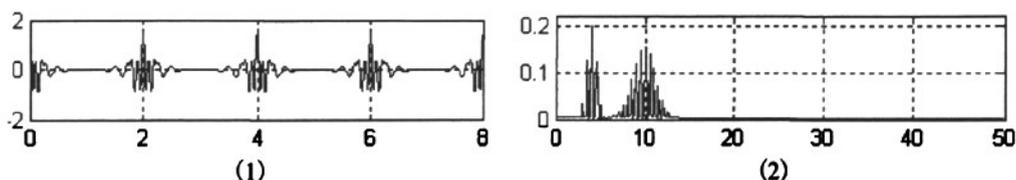


图5-7 双脉冲调制信号的时域图和频谱图

(1) 时域图, (2) 频谱图

Fig.5-7 Time-domain and frequency spectrum graphs of two-pulse modulation signal

(1) Time-domain graph, (2) Frequency spectrum graph

加入随机白噪声后, 时域图和频谱图如图 5-8 所示。

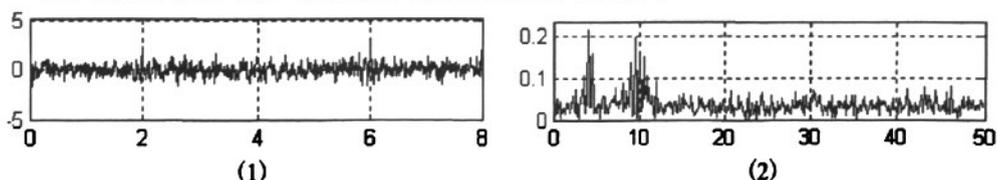


图5-8 含有随机噪声的双脉冲信号的时域图和频谱图

(1) 时域图, (2) 频谱图

Fig.5-8 Time-domain and frequency spectrum graphs of two-pulse signal containing random noise

(1) Time-domain graph, (2) Frequency spectrum graph

分析方法同只含一种故障的信号, 确定小波分解的层数为 5, 小波函数选择 db5。小波分解图如图 5-9 所示。

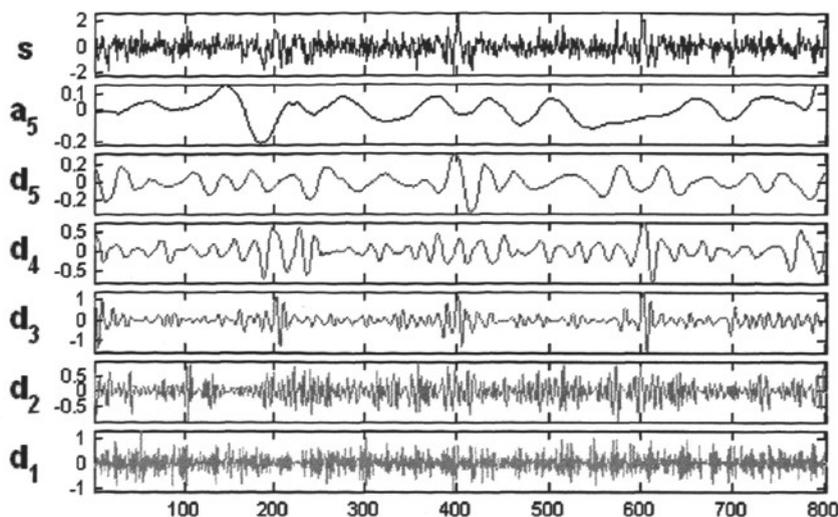


图5-9 模拟含有两种故障的信号小波分解图

Fig.5-9 Wavelet discomposition graph for the signal simulated with two kinds of fault

计算各分层信号的峭度值，如表 5-4。

图 5-4 含有两种故障的信号 db5 小波 5 层分解后的各层信号峭度值

Table 5-4 Kurtosis values of every level signal after db5 wavelet 5 layers discomposition

信号	原信号	a5	d5	d4	d3	d2	d1
频带 (Hz)	0~50	0~1.5625	1.5625~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25	25~50
峭度值	3.80	27.09	2.85	4.05	6.58	2.98	2.82

脉冲冲击信号分布在高频的第 3、4 层，由上表计算的峭度值可知，信号 d3、d4 的峭度值分别为 4.05 和 6.58，其他层高频信号峭度值与 3 相差不大，这样就检验出了原信号在这两个频带内存在脉冲冲击信号。若为实际轴承信号，则可判断两种故障产生的部位。

5.6.3 含有三种故障的信号仿真

模拟轴承产生三种故障，所用脉冲调制信号的时域图和频谱图如图 5-10 所示。

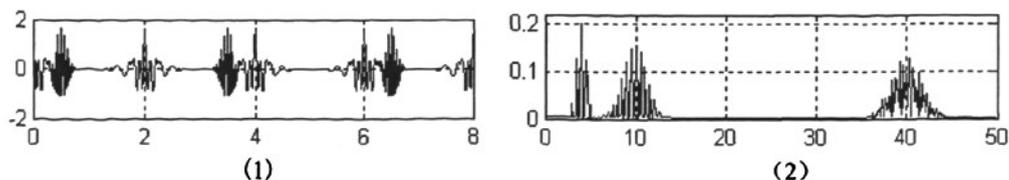


图5-10 三脉冲调制信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-10 Time-domain and frequency spectrum graphs of three-pulse modulation signal

(1)Time-domain graph, (2)Frequency spectrum graph

加入随机白噪声后，时域图和频谱图如图 5-11 所示。

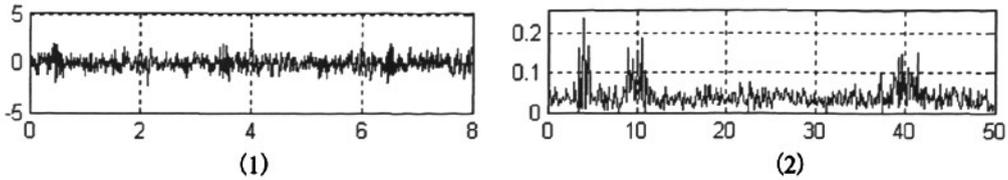


图5-11 含有随机噪声的三脉冲信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-11 Time-domain and frequency spectrum graphs of three-pulse signal containing random noise

(1)Time-domain graph, (2)Frequency spectrum graph

分析方法同单一故障信号和含有两种故障的信号，确定小波分解的层数为 5，小波函数选择 db5。小波分解图如图 5-12 所示。

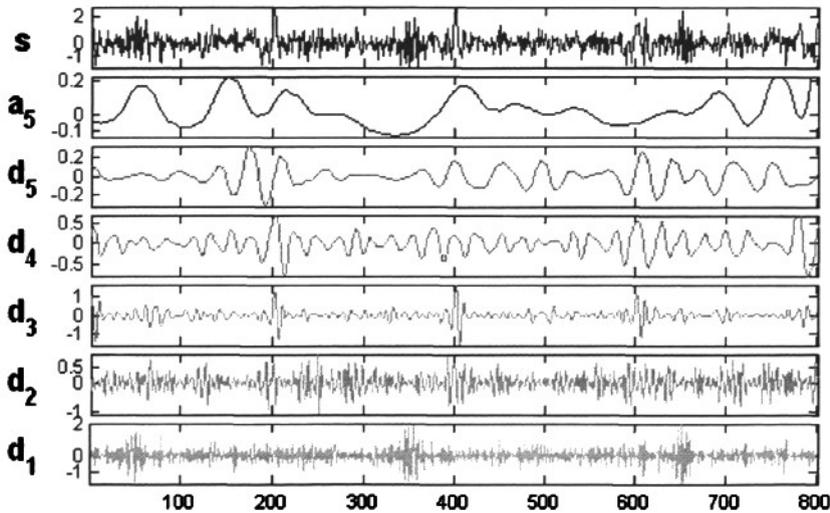


图5-12 模拟含有三种故障的信号小波分解图

Fig.5-12 Wavelet discomposition graph for the signal simulated with three kinds of fault

计算各分层信号的峭度值，如表 5-5。

表 5-5 含有三种故障的信号 db5 小波 5 层分解后的各层信号峭度值

Table 5-5 Kurtosis values of every level signal after db5 wavelet 5 layers discomposition

信号	原信号	a5	d5	d4	d3	d2	d1
频带 (Hz)	0~50	0~1.5625	1.5625~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25	25~50
峭度值	3.96	26.89	3.46	4.21	7.60	2.75	5.65

脉冲冲击信号分布在高频的第 1、3、4 层，由上表计算的峭度值可知，信号 d1、d3、d4 的峭度值分别为 5.65、7.60 和 4.21，其他层高频信号峭度值与 3 相差不大，这样就检验出了原信号在 d1、d3、d4 这三个频带内存在脉冲冲击信号。若为实际轴承信号，则可判断三种故障产生的部位。

5.7 实验研究

选用深沟球轴承 6205 进行故障实例分析, 试验台如图 5-13 所示(外圈固定, 内圈转动), 其结构参数如表 5-6 所示。

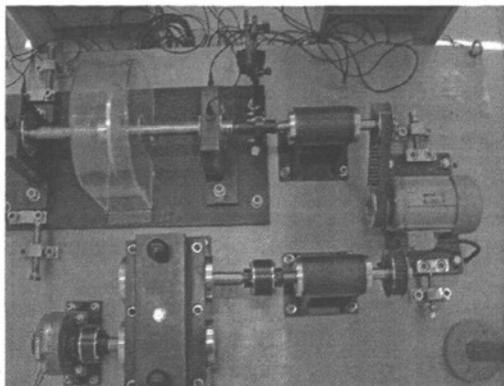


图5-13 试验台结构图

Fig.5-13 The structure of the test-bed

表 5-6 6205 深沟球轴承结构参数表

Table 5-6 The structure parameters of 6205 Deep Groove Ball Bearings

外圈直径 D	镗孔内径 d	节圆直径 dm	滚动体直径 d_b	轴承滚道宽 w	接触角 α	滚动体个数 z
52mm	25mm	39mm	8mm	15mm	0	9

试验中轴的转速为 50Hz, 经过计算得滚动轴承的各故障特征频率为: 内圈 $f_f = 271.15\text{Hz}$; 外圈 $f_n = 178.85\text{Hz}$; 滚动体 $f_b = 116.75\text{Hz}$; 保持架 $f_c = 19.87\text{Hz}$ 。

以采样频率为 12800Hz, 采集一组数据, 数据个数为 4096 个。其时域图和频谱图如图 5-14 所示。

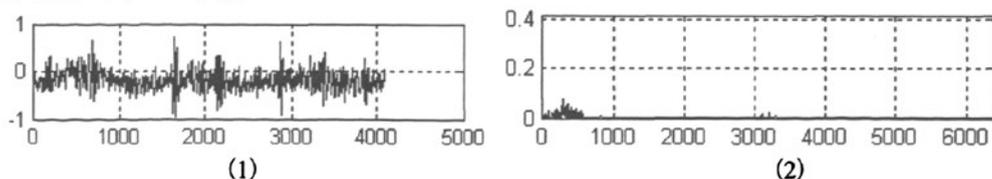


图5-14 单一故障轴承信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-14 Time-domain and frequency spectrum graphs of bearing signal with single fault

(1)Time-domain graph, (2)Frequency spectrum graph

对此信号进行小波变换, 要使所分解的频带包含轴承各个故障特征频率, 经计算小波的分解层数为 9, 此时各频带的分布如表 5-7 所示。

表 5-7 单一故障轴承信号 9 层小波分解后的频带分布

Table 5-7 Frequency distributions of 9 layers wavelet decomposition for signal with single fault

信号	A9	D9	D8	D7	D6
频带 (Hz)	0~12.5	12.5~25	25~50	50~100	100~200
信号	D5	D4	D3	D2	D1
频带 (Hz)	200~400	400~800	800~1600	1600~3200	3200~6400

含有故障特征频率的层数为 D9, D6, D5。前面曾提到过, 在实际中, 故障频率并不总是精确地等于理论计算值, 因此 D7 层也应加以考虑。

采用 db6 小波, 进行小波变换如图 5-15 所示。

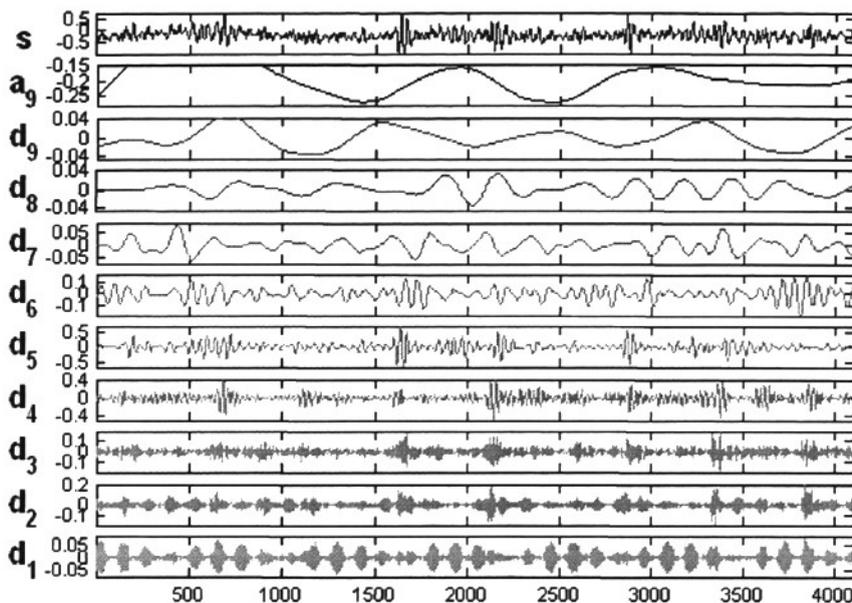


图5-15 单故障轴承信号的小波分解图

Fig.5-15 Wavelet decomposition graph for the signal with single fault

计算小波分解后高频信号前 5 层的峭度值以及原信号的峭度值, 如表 5-8。

表 5-8 单一故障轴承信号 db6 小波 9 层分解后的各层信号峭度值

Table 5-8 Kurtosis values of every level signal after db6 wavelet 9 layers decomposition

信号	原信号	D9	D8	D7	D6	D5
频带 (Hz)	0~6400	12.5~25	25~50	50~100	100~200	200~400
峭度值	4.41	2.23	2.75	2.70	2.59	5.51

由分解图和峭度值列表可以看出, 在高频信号 d5 层有明显的冲击信号, 且峭度值为 5.51>3。而其他包含故障特征频率的各层峭度值都与正常值 3 相差不大, 因此判定在 d5 层包含的故障特征频率处有故障产生。在 200~400Hz 范围内, 只有内圈的故障特征频率 271.15Hz 处于这一频段内, 所以判定滚动轴承内圈发生故障。与试验台上的轴承故障相对比, 分析结果与轴承实际故障吻合, 说明此方法对于判断出现一种故障的轴承是有效的。

重新更换一个有故障的 6205 深沟球轴承，轴的转频不变，采样频率为 2560Hz。采集一组数据，采样点数为 4096。其时域图和频谱图如图 5-16 所示。

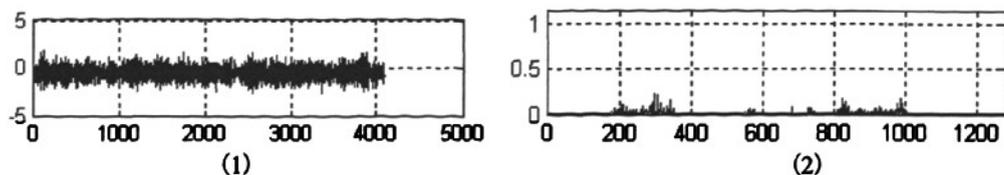


图5-16 含有两种故障的轴承信号的时域图和频谱图

(1)时域图, (2)频谱图

Fig.5-16 Time-domain and frequency spectrum graphs of bearing signal with two kinds of fault

(1)Time-domain graph, (2)Frequency spectrum graph

轴承的故障特征频率不变，要将各个特征频率包含在内，小波分解的层数应为 7 层。各频带的分布如表 5-9 所示。

表 5-9 含有两种故障的轴承信号 7 层小波分解后的频带分布
Table 5-9 Frequency distributions of 7 layers wavelet decomposition
for signal with two kinds of fault

信号	A7	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1
频带 (Hz)	0~10	10~20	20~40	40~80	80~160	160~320	320~640	640~1280

对比轴承的故障特征频率，应考虑(layer)的层数为 d7、d6、d4 和 d3 层。

采用 db4 小波进行分解，分解图如图 5-17 所示。

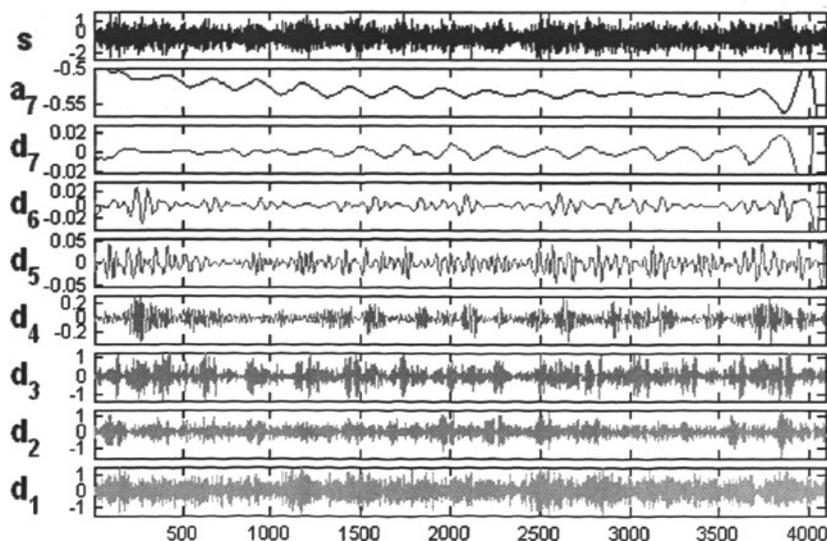


图5-17 含有两种故障的轴承信号的小波分解图

Fig.5-17 Wavelet decomposition graph for the signal with two kinds of fault

计算小波分解后高频信号前 5 层的峭度值以及原信号的峭度值，如表 5-10。

表 5-10 含有两种故障的轴承信号 db4 小波 7 层分解后的各层信号峭度值

Table 5-10 Kurtosis values of every level signal after db4 wavelet 7 layers discomposition

信号	原信号	D7	D6	D5	D4	D3
频带 (Hz)	0~1280	10~20	20~40	40~80	80~160	160~320
峭度值	3.07	14.57	6.50	2.73	3.84	3.03

峭度值异常的频带为 d7、d6 和 d4。d7、d6 与保持架特征频率有关，而 d4 层包含滚动体的特征频率，与实际轴承相对比，上述分析与实际故障相吻合。因此，该方法能够区分轴承的不同部位产生的故障。

上述分别对有一种故障和有两种故障的滚动轴承进行了实验研究。对实际信号的应用，说明该方法能够同时诊断出轴承存在故障以及故障产生的原因，对于含有多个 (>2) 故障的轴承信号亦是如此。相对于传统的诊断方法，该方法具有一定的优越性，并且对于多故障滚动轴承的诊断具有积极的意义。

5.8 结论

本章提出了小波多尺度分解的时域参数向量用于轴承故障信号特征提取的新方法，该方法首先根据轴承的故障特征频率确定小波分解的层数，对分解后的各层高频信号计算其时域特征参数，再将包含故障特征频率的各尺度时域参数与轴承正常运转时的时域参数相对比，从而判断轴承的故障及其产生故障的部位。通过多尺度分解可明显地提高故障信号所在尺度的信噪比，提高了峭度作为判断轴承不同故障的评价指标的稳定性，借助多尺度特征参数向量的分布形式可同时诊断出滚动轴承的不同故障原因，通过仿真和故障轴承的实验研究验证了该方法的有效性。

第六章 结论与展望

6.1 主要工作总结

海洋平台是海上采油的关键设备,而海洋平台上的作业设备又是海洋平台不可缺少的一部分。对海洋平台作业设备进行在线监测,可以提前预知设备的工作状态以及故障的发展趋势,这对保证海洋石油的安全生产具有重大意义。针对中石化胜利油田海上采油平台安全保障系统这一实际项目,本人在导师的指导下按期完成了海洋平台作业设备实时在线监测系统的开发,并对滚动轴承故障诊断提出了一种新的信号处理方法。该实时在线监测系统经过现场调试、应用,证明了其能够很好地满足现场实际的需要。

本文所完成的主要研究内容如下:

(1) 首先,完成了海洋平台作业设备实时在线监测系统的开发。整个系统采用了面向对象编程技术,分为机组管理、数据采集、在线监测等几个功能模块,易于维护、扩展和升级。在线监测界面直观形象,采用切分视图,用实时棒图、波形图、频谱图和趋势图以及峰值、峰峰值、有效值和峭度值等时域特征参数清楚地反映了设备的运行状态。

(2) 对于实时在线监测系统采集到的数据需要进行离线分析,以便更好地掌握设备的工作状态。针对这一情况,本文研究开发了离线小波分析控件。在软件编程过程中应用 Mallat 快速算法实现了离散小波变换的功能要求,该控件包含了信号一维小波分析的几乎全部功能,如分解图、尺度图、树形图以及频谱图的显示输出,各层信号的统计量计算等。而且,在该控件中,常用的七种基本小波都可以选择使用。将该控件加载到应用程序中进行实际数据验证,证明了所开发的小波分析控件功能的准确性和可靠性。

(3) 滚动轴承是所有大型装备系统中的常用件,也是一种十分容易损坏的部件。本文深入研究了滚动轴承的失效形式及原因,总结了滚动轴承常用的故障诊断方法。在此基础上,本文提出了一种新的基于小波多尺度分解的时域参数向量法来对滚动轴承故障信号进行分析处理。模拟轴承单一故障、两种故障以及三种故障的特征信号进行了 MATLAB 仿真,并对实际轴承的故障信号做了实验研究,结果表明,该方法能够行之有效地诊断出轴承的不同部位产生的故障。

6.2 进一步工作的展望

故障诊断技术是多学科的综合应用,而且其必须与工程实际相结合才能真正产生

经济效益，课题在完成过程中涉及到了很多问题，尽管做了大量的分析、研究和调试工作，但仍有很多不完善的地方。

(1) 就海洋平台实时在线监测系统来看，应对系统的结构进一步进行优化，以提高系统的灵活性，使各个功能模块可分可合；系统的硬件可以考虑更高性能的配置，以提高系统数据采集和处理的速度；还有，应进一步提高系统的通用性，同时加强针对转子、轴承、齿轮等部件的特殊监测和诊断。

(2) 小波控件的开发很好地应用了信号的时频分析方法。但一维小波变换只对分解的低频信号(即近似系数)进行分解，对高频信号不再进行分解，而小波包变换则不同，它对低频信号和高频信号都进行分解。在设备的故障诊断中，有时高频信号也很重要，可以考虑在小波分析控件的基础上进一步开发小波包分析控件。

(3) 针对滚动轴承故障诊断提出的小波多尺度时域参数向量法，通过大量的仿真以及实验研究，计算轴承信号小波分解后各层信号的峭度值，并与轴承正常运转时的峭度值相对比，证明了该方法的可行性。但是对于其他的时域特征参数，如有效值、峰峰值等，由于其相对性本文未做讨论。还有，在数据个数较大的情况下，小波分解有一定的局限性，使用小波包对信号进行处理可能会更有效。在今后的研究中，这些还需要进一步加以论证。

由于本人的理论知识和实践水平都有限，在课题研究和论文撰写过程中难免存在很多不足之处，恳请各位专家、老师批评指正！

参 考 文 献

- [1] 俞华. 海洋石油安全管理与监督体制[J]. 劳动保护, 2001, 6:11-12
- [2] 李士安. 巴西石油公司 P-36 号海上石油平台爆炸沉没事故[J]. 劳动保护, 2001, 6:46
- [3] 韩捷, 张瑞林等. 旋转机械故障机理及诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [4] 徐敏等. 设备故障诊断手册[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- [5] 赵永涛, 殷敏谦, 曾红军, 王成良. 海洋平台结构损伤检测研究[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(5): 23-26
- [6] 杨国安, 盖会明. 海洋平台结构健康监测新方法研究[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(3): 27-36
- [7] 李光海, 刘时风. 基于小波分析的声发射源定位技术[J]. 机械工程学报. 2004, 40(7):136-140
- [8] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测. 2002, 24(1): 23-28
- [9] Gao Jinji. A fault diagnosis and maintenance expert system for rotating machinery [A]. EVROMAITENANCE'98 Proceedings [C]. 1998: 247-254
- [10] Gao Jinji. New progress in plant diagnosis engineering distributed monitoring system and remote diagnosis system [A]. The Proceedings of the International Conference on Plant Engineering Guangzhou '97 [C]. China Machine Press, 1997: 53-59
- [11] 夏松波, 张嘉钟, 徐世昌. 旋转机械故障诊断技术的现状和展望[J]. 振动与冲击, 1997, 16(2): 1-5
- [12] 崔彦平, 傅其凤, 葛杏卫等. 机械设备故障诊断发展历程及展望[J]. 河北工业科技, 2004, 21(4): 59-62
- [13] 杨国安. 机械设备故障诊断实用技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007
- [14] 李江伟, 汪锐, 陈文戈等. 一种便携式旋转机械状态监测与故障诊断系统[J]. 电机电器技术, 2001, 3: 36-39
- [15] 盛兆顺, 尹琦领. 设备状态监测与故障诊断技术应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [16] 阴妍, 鲍久圣, 段雄. 机械设备状态监测及故障诊断综述[J]. 煤矿机械, 2004, 3: 125-126
- [17] J. S. 半切尔. 机械故障的分析与监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [18] 萧汉梁. 机械工况监测与故障诊断[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994
- [19] 高金吉. 高速涡轮机械振动故障机理及诊断方法研究[D]. 清华大学博士学位论文, 1993, 4
- [20] (美)Jim Boyc(著), 周志宇, 林峰(译). Windows 3.1 技术内幕[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [21] 王传华. Windows 3.X 简明教程[M], 北京: 清华大学出版社, 1996
- [22] Newsoft 创作室. Microsoft Windows 95 操作系统详解[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996
- [23] 刘翔, 胡韬. 中文版 Windows XP 标准教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005
- [24] Stephen Prata, 孙建春, 韦强(译). C++ Primer Plus (第四版) 中文版[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- [25] 徐晓刚, 高兆法, 王秀娟. Visual C++ 6.0 入门与提高[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [26] 辛长安, 梅林. Visual C++编程技术与难点剖析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [27] Davis Chapman, 骆长乐(译). 学用 Visual C++6.0[M]. 北京: 清华大学出版社, 西蒙与舒斯特国际出版公司, 1999
- [28] 吴金平. Visual C++ 6.0 编程与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004

- [29] 本书编写组. Visual C++ 6.0 MFC 类库参考手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- [30] Conor Sexton(英)著, 张红(译). C++简明教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [31] Bjarne Stroustrup. C++程序设计语言[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [32] Scott Meyers 著, 侯捷(译). Effective C++中文版(2nd Edition) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- [33] Scott Meyers 著, 侯捷(译). More Effective C++中文版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [34] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会编著. 中国机械工业标准汇编——机械振与冲击卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 429-435
- [35] David J.Kruglinski, Scot Wingo, George Shepherd. Programming Visual C++6.0 技术内幕(第五版) [M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2001
- [36] 刘杰, 廖卫华.VC 环境下 DLL 编程技术及应用[J]. 计算机与现代化, 2004, 106 (6): 47-48
- [37] 李江伟, 汪仁煌, 严仍友. 便携式旋转机械故障数据采集系统[J]. 广东工业大学学报, 2004, 21 (3): 47-50
- [38] 吴正平. 用 VC++6. 0 开发监控界面的方法[J]. 工业控制计算机, 2002, 15 (6): 43-45
- [39] 邓在雄, 赵惠清. 数据实时采集与处理系统软件开发中的若干问题的研究[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31 (6): 101-103
- [40] 潘旭峰, 谢波, 李晓雷. 小波变换理论及其在机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 1998, 17(1): 14-19
- [41] Ruzzene M, Fasana A, Garibaldi L et al. Natural Frequencies and Damping Identification Using Wavelet Transform[J]. Application to Real Data. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11 (2): 207-218
- [42] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [43] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [44] 陈涛, 屈梁生. 小波分析及其在机械诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 1997, Vol.33, No.3: 70-79
- [45] 何岭松, 吴波等. 小波分析及其在设备故障诊断中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1993, Vol.21, No.1: 8287
- [46] 北京博彦科技发展有限公司. Visual C++ 编程高手[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000
- [47] 王世同, 李强等. Visual C++ 编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [48] 沈水福, 高大勇. 设备故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [49] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986
- [50] 陈克兴, 李川奇主编. 设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991
- [51] 理华, 徐春广等. 滚动轴承声发射检测技术[J]. 轴承, 2002 (7): 13-17
- [52] Rubini R, Meneghetti U. Application of the Envelope and Wavelet Transform Analyses for the Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 2001, 15 (2): 287-302
- [53] 林京, 屈梁生. 基于连续小波变换的信号检测技术与故障诊断[J]. 机械工程学报. 2000, 35 (12): 95-100
- [54] 吴桂清, 姜宁, 罗文钦. 基于旋转机械的多故障诊断专家系统的实现[J]. 计算机工程与设计. 2002, 23 (12): 45-47
- [55] 陈波, 马孝江. 滚动轴承故障诊断数据库系统的设计与应用[J]. 组合机床与自动化加工技

- 术. 2002, 40(11): 37-39
- [56] Mechefske C K. Objective Machinery Fault Diagnosis Using Fuzzing Logic[J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 1998, 12(6): 855-862
- [57] Kaewkongka T, Au Y H J, Rakowski R. Continuous Wavelet Transform and Neural Network for Condition Monitoring of Roto-dynamic Machinery[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Budapest, Hungary, May 21-23, 2001
- [58] 阿拉科特, R.A. 机械故障的诊断与情况监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993
- [59] 丁玉兰, 石来德. 机械设备故障诊断技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994
- [60] 李川奇, 陈克兴. 滚动轴承的在线监测和诊断[J]. 机械工程, 1984, (特刊)
- [61] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断理论·方法·系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [62] 卢文祥, 杜润生. 工程测试与信息处理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992
- [63] 寇惠, 原培新. 故障诊断中的振动信号处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989
- [64] 胡广书. 数字信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [65] 董长虹主编. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [66] 谭善文, 秦树人, 汤宝平. 小波分析突发故障中小波基的选择[J]. 振动、测试与诊断. 2000, 20(增刊): 98-102
- [67] 杨国安, 钟秉林, 黄仁等. 机械故障信号小波包分解的时域特征提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 25-28
- [68] Bently D. Predictive maintenance through the monitoring and diagnostics of rolling element bearings[J]. Bently Nevada Co., Application Note, ANO44, 1989: 2-8

致 谢

时光如箭，岁月如梭，三年的硕士研究生生涯转瞬即逝。回首走过的路，深幸自己没有虚度时光，深幸自己在一天天的进步和成长。所有这一切都离不开那些帮助过我的人，在此向他们致以我最诚挚的谢意和问候！

首先我要特别感谢我的导师杨国安教授。在攻读硕士学位期间，无论是在学习、科研方面，还是生活、做人方面，杨老师都给了我许多无私的帮助和慈父般的教诲，他的言传身教，使我受益终生。作为学生，杨老师对学术研究的严谨作风和高屋建瓴的学者风范以及谦虚认真的工作态度，是我今后工作学习的榜样。

感谢机电工程学院故障诊断与自愈研究中心的所有老师们，感谢你们对我的帮助和指导，使我受益匪浅。

感谢同窗好友黄聪和张冬，在三年的研究生生活中，我们共同探讨问题，彼此互相帮助，互相学习，建立了深厚的友谊。感谢实验室里所有的兄弟姐妹，我的每一个进步都凝结着你们的汗水，是你们让我的研究生生活充满了美好的回忆，感谢你们陪我走过这段紧张而又充实，激荡而又温馨的生活。

感谢机研 0602 班的所有同学们，感谢你们所营造的良好的学习和工作氛围，以及在生活中给予我的帮助。

感谢我亲爱的爸爸和亲爱的妈妈，没有你们的含辛茹苦，就没有我的今天。感谢我亲爱的妹妹，谢谢你一直以来对我的支持和鼓励。在今后的工作中，我一定努力上进，不辜负你们对我的期望。

最后感谢北京化工大学对我七年来的培养，感谢培养过我的所有老师和我认识的所有朋友们，祝福学校明天会更好。

研究成果及发表的学术论文

发表及已接受的论文

1. Guoan Yang, Zhantao Liu, Zhenhuan Wu. A Research of Fault Auto-Diagnosis for Rotating Machine Based on the Fuzzy Multiple Attribute Decision-Making. *Proceedings of 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems Conference*. Beijing International Convention Center, Beijing, China. 27-30 October 2008, 1862-1867

作者和导师简介

作者简介:

刘占涛(1982-), 男, 汉族, 1982年10月5日出生, 北京化工大学机电工程学院机械电子工程专业研究生, 研究方向: 设备状态监测与故障诊断。

导师简介:

杨国安(1963-), 男, 汉族, 1963年3月25日出生, 教授, 最高学历博士, 主要研究领域: 设备状态监测与故障诊断。1985年毕业于石油大学炼油化工机械专业, 于东南大学机械制造及自动化专业取得博士学位。以第一作者在国内发表学术论文 40 多篇, 其中 SCI 收录 3 篇, EI 收录 8 篇, ISTP 收录 2 篇; 出版专著 1 部, 以第一负责人承担国家自然科学基金 2 项, 中石化重点项目 1 项, 在研横向项目 3 项。已完成九五国家攻关 1 项, 中石油、中石化项目 2 项, 横向项目十几项; 参与完成国家自然科学基金等纵向项目 2 项。鉴定成果 2 项, 专利 1 项。出版专著《机械设备故障诊断实用技术》。相继开发基于 GSM 的抽油机故障无线远程报警系统, 基于 GPRS 的抽油机状态无线远程监测系统, Y303 机械设备状态监测及故障诊断分析仪, Y101 机泵群点检管理系统, 海上采油平台安全保障系统。个人网站: www.ygazd.cn。