

山东大学

硕士学位论文

小波时频分析方法在超声波信号处理中应用

姓名：房曙光

申请学位级别：硕士

专业：信息与信号处理

指导教师：刘琚

20090409

摘 要

对钢材内部质量的检测是加工制造过程中较为重要的一道工序，而对测试信号分析的方法也是长期研究的方向。论文对超声波在钢材料中传播的特点进行详细的分析，对超声检测系统进行建模，建立超声波发射信号、超声波传播过程和超声回波信号的数学模型，并在 MATLAB 软件中编程仿真出发射信号和回波信号的时域及频域图形。超声发射信号经钢材内部传播，携带钢材内部结构的信息和噪声到达接收端成为超声回波信号，该信号具有非平稳的特点，对该信号的分析需要采用时频分析的方法。

小波分析法是一种新的时频分析方法，论文选用了 DB 小波母函数，在 MATLAB 环境下对回波信号进行小波去噪分析，消除部分高频噪声。使用小波分析工具箱对去噪后的回波信号进行小波多分辨率分析，将信号分解为高频部分和低频部分，根据小波时频分析的结果及超声波的传播特点，确定出钢材内部缺陷以及缺陷的位置。

首先，对超声波无损检测的原理及特征进行分析，讨论了超声波的基本物理量和超声波的基本特性，给出了超声波检测钢材的检测模型。根据超声波在钢材料中传播的特点，对比了传统的傅里叶分析法的缺点，确定了对回波信号进行分析所采用的方法——小波时频分析方法。

其次，简要介绍了小波时频分析的基本理论，包括连续小波变换、离散小波变换和小波快速算法，特别分析了在超声回波信号检测中所使用的小波基，对小波基的特性进行了详细的研究。通过比较不同小波基的特性，选取了 DB 小波作为超声回波信号小波时频分析的小波母函数。

再次，针对超声波传播的特点，分析了超声发射过程、超声传播过程和超声接收过程的特点，并对各个过程分别进行数学建模，分析了超声发射中发射波的时频特性和接收到的回波信号的时频特性。根据发射信号和接收回波信号的数学模型，在 MATLAB 环境下，通过编程仿真出信号的波形。

然后，根据超声波信号的特点，使用小波分析的方法对回波信号进行消噪处理。根据不同阈值选择的准则，使用小波分析工具箱，给出了回波信号在不同阈值下消噪后的图形。对比不同阈值下消噪的结果，选择了启发式阈值对回波进行消噪处理。同时，比较不同小波基下消噪的统计特性，确定出了 DB6 小波作为超

声波分析的小波母函数，在此小波基下对信号进行消噪和多分辨率分析。

最后，在 MATLAB 环境下使用一维小波分析工具对超声波信号进行多分辨率分析，将信号分 5 层进行分解，得出各层的高频信息和第 5 层的低频信息。根据第 1 层的高频信息，确定出反射回波信号奇异点出现的时刻，并根据超声波在钢材中传播的速度等参数，计算出钢材内部出现缺陷的位置。

关键词：小波，时频分析，建模，超声波，小波母函数

ABSTRACT

It is an important procedure to detect the inner quality of steels in the process of manufacturing. It is also a long-term research direction in the methods of testing signal analysis. In this thesis, the characteristic of ultrasonic transmitting in steel is analyzed. The ultrasonic testing system is modeled and it is built that the mathematical model of ultrasonic emitting signals, ultrasonic transmission and the ultrasonic echo signals. The time-domain and frequency-domain graph of the emission signal and the echo signal is simulated in MATLAB. The ultrasonic launch signal transmits in the internal dissemination of steel, and carries the information of the steel internal structure and noise, and it becomes the ultrasonic echo signal in the receiver. The echo signal has non-stationary characteristics, and we adopt the time-frequency analysis method to analyze the signal.

The wavelet analysis is a new time-frequency analysis method. The DB wavelet generating function is selected to de-noise the echo signals using MATLAB and eliminates some high-frequency noise. The echo signals after de-noising is analyzed in wavelet analysis toolbox by the multi-resolution analysis method. Then the signal is decomposed into low-frequency part and high-frequency part. According to the results of wavelet analysis and transmission characteristic of ultrasonic, we determine the internal defects in steels as well as the location of the defects.

First, we analyze the principle and characteristics of ultrasonic nondestructive testing, and discuss the basic physics and characteristics of ultrasonic, and design the model for detecting steel. According to the characteristic of ultrasonic transmitting in steel material and comparing to the disadvantage of traditional fourier analysis, we select the wavelet time-frequency analysis method to analyze the echo signals.

Secondly, the basic theory of wavelet time-frequency analysis is brief introduced, including the continuous wavelet transform, the discrete wavelet transform and the wavelet fast algorithm. The wavelet generating function is detailed discussed which is used in analyzing the ultrasonic echo signals, the characteristic of wavelet generating

function is studied in detail. By comparing the characteristics of different wavelet generating function, we select the DB wavelet as the wavelet generating function for analyzing the ultrasonic echo signal.

Thirdly, according to the characteristic of the ultrasonic transmission, we analyze the traits of the ultrasonic launching process, the ultrasonic transmission and the ultrasonic receiving process, and build mathematical model for each process. We analyze the time-domain and frequency-domain traits of the ultrasonic launching signal and the ultrasonic receiving signals. Based on the mathematics model of the launch signals and the echo signals, their waveform is drawn in MATLAB by program.

Then, according to the characteristics of the ultrasonic signals, we de-noise the echo signals using the wavelet analysis method. According to the threshold selection criteria, we use wavelet analysis toolbox to draw figure in different threshold. Based on the result of de-noising in different threshold, and we select the heuristic threshold to de-noise the signals. Comparing to the statistical features of de-noising, the DB6 wavelet is selected as the wavelet generating function to analyze the signals by de-noising and multi-resolution analysis.

Finally, we analyze the ultrasonic signal using the tool of one-dimensional wavelet under MATLAB environment. The signal is decomposed into 5 layers and gain high-frequency information of each layer and the low-frequency information of the fifth layer. According to the first layer's high-frequency information, we can know the time that the singularity of the echo signal is appearing and calculate the position of the internal structural defects by the ultrasonic transmission speed in steel.

KEY WORDS: wavelet, time-frequency analysis, model, ultrasonic wave, wavelet generating function

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：房曙光 日期：2009^L年4月9日

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：房曙光 导师签名：王升 日期：2009.4.9

第一章 绪论

1.1 选题意义

无损检测是指采用声、光、电磁等各种物理方法，在不损及被检材料、零件或机械结构装置使用性能的情况下，测定内部或表面的缺陷、应力以及其他各种物理量的检测方法。尽管无损检测本身并非一种生产技术，但其技术水平能反映该行业、该地区甚至该国家的工业技术水平。无损检测技术所基于小波分析的碳纤维复合材料超声波检测能带来的经济效益十分明显，例如，德国奔驰公司汽车几千个零件经过无损检测后，整车运行公里数提高了一倍；日本机车在 30%零件采用无损检测后，质量迅速超过美国。无损检测技术是机械工业的四大支柱之一，可以说现代工业是建立在无损检测基础上的^[1]。

超声波是频率在 $2 \times 10^4 \text{Hz}$ 以上的声波，超声波的波长比一般声波短，具有较好的方向性，且能穿透透明和不透明的物质，被广泛用于金属探伤、距离测量、厚度测量，并在海洋探查与开发、无损检测与评价、医学诊断等领域发挥着不可取代的作用。超声检测技术（UT）是五大常规检测技术中使用最多的一种。与其它常规检测技术相比，它具有检测范围广，检测深度大；缺陷定位准确，灵敏度高；成本低，使用方便；速度快，对人体无害以及便于现场使用等特点。因此，超声检测技术（UT）是国内外应用最广泛、使用频率最高，且发展较快的一种无损检测技术^[1]。

钢材是由两种或两种以上性质不同的材料组合而成的，一般来说，钢材的特点是综合机械性能高于各类铸铁，不仅强度高，而且具有优良的塑性和韧性，此外焊接性能好，因此，适于制造形状复杂、强度和韧性要求高的零件。钢材在工程中主要用于飞机制造、汽车制造、造船、化工、家具与电器设备等领域，应用范围广，前景十分广阔^[2]。在钢材材料中不可避免存在各种缺陷，这些缺陷对加工而成的零件存在或多或少的影 响，不仅能影响零件的使用寿命，而且对整机的使用寿命能产生较大的影响，从而对生产部门产生较大的经济损失。要提高零件的使用寿命，提高企业的生产效益，就应该对零件的原材料——钢材进行质量检测，

常用的检测方法是超声无损检测，对检测后的信号分析处理是无损检测中至关重要的过程，选用适当的处理方法能到达事半功倍的效果。

小波时频分析法是当前分析非平稳信号的最佳方法，它作为一种新兴的信号处理工具是数学发展史上的重要成果。小波时频分析方法是傅立叶分析的继承和发展，是一种对信号进行时域-频域分析方法，具有良好的时域、频域局部化特性^[4]。多分辨分析是小波时频分析中的最重要的概念之一，它能够提供一种构造小波的统一框架，而且能够提供函数分析与重构的快速算法，对分析非平稳信号非常便利、有效。采用小波时频法分析钢材探测信号对检测钢材内部缺陷是非常有价值的。

1.2 国内外研究现状概述

1.2.1 超声检测的研究现状

目前，超声波无损检测技术被用于产品的质量控制在、运行监测、寿命评估等，并带来了巨大的经济效益和社会效益，已在世界各主要工业国家得到重视和应用。我国在这方面起步较晚，但近年来也加快了步伐。

根据超声波在材料内部缺陷区域和正常区域的反射、衰减与共振的差异来确定缺陷的位置与大小。超声波检测主要分为脉冲反射法、穿透法和反射板法，根据不同的缺陷来选择合适的检测方法。超声波不仅能检测复合材料构件中的分层、孔隙、裂纹和夹杂物等，而且在判断材料的疏密、密度、纤维取向、曲屈、弹性模量、厚度等特性和几何形状等方面的变化也有一定作用。文献[5]利用超声检测技术对复合材料进行超声检测与评价，文献[6]将超声检测应用在夹层板的检测中。在文献[7]中使用超声波检测离心球墨铸铁管球化率和壁厚进行了详细的研究。对于一般小而薄、结构简单的平面层压板及曲率不大的构件，可采用水浸式反射板法；对于小且稍厚的复杂结构件，可采用水浸或喷水脉冲反射法和接触延迟块脉冲反射法；对于大型结构和生产型的复合材料构件的检测宜采用喷水穿透法或喷水脉冲反射法。此外，还有许多新技术已被应用如：利用声热效应和液晶所特有的温度-颜色效应的液晶显示超声全息法；ALOK 成像技术（来源于德文 Amplituden und Laufzeit Orts Kurven，又称振幅与传输时间轨迹曲线法），可用于厚壁构件的无

损检测,可给出缺陷位置、尺寸和形状^{[8][9]}。文献[1][2]等对铸钢件超声检测技术进行分析和应用,提出了比较有用的方法。近年来国内外在超声波技术、声发射新技术、新型超声非接触换能方法、超声信号处理与模式识别等方面有若干研究成果,这些超声检测新成果既有学术前沿性,又有相应的应用背景。

超声波检测材料的关键步骤是回波信号的采集、识别及分析。在超声波检测中,对缺陷参数的确定即求解超声理论中的逆问题,是当前研究的热点和难点。载有缺陷信息的回波信号除了与缺陷的形状、大小有关外,还和换能器特性、换能器的相对位置、换能器与介质的耦合条件以及激励信号等多种因素有关,直接从回波信号中提取特征是难以实现的,可以采用各种解卷积的方法来获得缺陷的脉冲响应系统,以获得更明显的特征。在实际应用中,随着70年代末时频变换、人工神经网络、小波分析等新概念的提出和推广,人们开始在超声检测的信号处理方面进行了新的尝试。文献[9]已经将小波变换和神经网络方法应用在复合材料结构损伤检测中。文献[10]提出了一种基于小波和神经网络的自适应超声无损检测系统,指出超声回波信号的消噪在确定缺陷位置的重要性,并结合人工神经网络,通过实验方法验证了超声检测缺陷的有效性。

1.2.2 时频分析和小波分析的研究现状

能够在时域和频域同时进行信号分析的方法一般被称为时频分析。时频分析方法在地震信号分析、雷达信号分析、混凝土检测等各领域得到了广泛的应用和发展^[11]。文献[12]将时频分析方法应用在通信领域中——线性调频雷达信号检测,从二维时频域角度对信号进行了直观简单的分析。文献[13]指出常用的时频分析方法有线性和非线性两种,线性时频分析法有短时傅里叶变换和连续小波分析等;非线性时频分析法有 Wigner-Vill 分布, Gabor 变换和 Cohen 类分布等,文献通过对各种时频分析方法的比较,得出连续小波分析对非平稳信号有很强的自适应能力,在高频段有较高的时间分辨率,在低频段有较高的频率分辨率。

小波分析是一种窗口大小(即窗口面积)固定但其形状可改变,即时间窗和频率窗都可改变的时频局部化方法,是对短时傅里叶分析的一种改进方法。小波分析的这种动态分析能力在符合不确定原理的基础上,实现了对信号的精细分析。

这个过程相当于对概貌部分进行宏观观察，而对细节部分进行微观观察。因此它常被称为“信号处理的显微镜”。

小波分析有如下特点，这些特点使它广泛应用于各个领域^{[4][13]}：

1. 小波分析的灵活性。小波分析的灵活性可以体现在两个方面：基函数的选择或构造，多尺度分析中尺度的选择等。小波分析中所用到的小波函数具有不唯一性，即小波函数具有多样性，一般只要满足“容许条件”即可。因此有许多构造小波的方法，也形成了多种小波函数，例如 Harr 小波、Daubechies (dbN) 小波系、Morlet 小波、样条小波等。用不同的小波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，傅立叶变换只能用三角函数去逼近信号，没有可选性。而研究发现，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，因此我们可以根据所期望的分析结果来自由选择小波分解的尺度。

2. 小波算法的快速性。多尺度分析大大提高了小波分析的效率，可以从尺度函数和尺度关系来推导出小波系数，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。频带分析从表面上看比频率分析粗糙，然而分析信号的目的，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，小波分析还可以对所需要的细节进行频带细分，以起到“显微镜”的作用并获得更细微的分析。这一点是傅立叶变换或短时傅立叶变换无法比拟的。

3. 小波分析的双域性。小波与 Gabor 变换相比，它又具有优越的时域窗，即窗口面积固定但形状却可以变化，因此更增加了时频分析的灵活性。

4. 小波分析的等 Q 性。小波基函数在频域具有带通特性，但其品质因数却不随尺度变化，是一组频率特性等 Q 的带通滤波器组。生理学研究表明，人类感觉（视觉、听觉）的生理过程机制与小波分析颇有类似之处。小波分析还广泛应用于语音特性提取等领域。

5. 小波分析数学基础的严密性。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、调和分析等近代数学理论

基础上的，有着严密的数学理论基础。

6. 小波应用的广泛性。小波分析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，而傅立叶变换只能对平稳的周期信号进行分析。也正因为如此，小波分析从最早的处理地震信号数据到现在已深入到图像处理、雷达回波信号处理、语音识别与合成、分形等领域，应用十分广泛。

1.2.3 小波分析在超声检测中的应用

超声检测中的常用技术是把超声波短脉冲发送至被测物体，让它自物体的非连续性结构（缺陷）面或边界返回，从中获取回波信号，进而判别材料的质量状况。回波信号中含有大量有关缺陷特性的信息，但同时也掺杂着各种干扰信号，这些干扰信号会给信号的后续处理带来误差，严重时甚至会淹没信号，造成缺陷的误检和漏检，因此，要想获得反映缺陷本质特征的信号就必须进行降噪处理。

目前，超声检测中采用的信号分析方法主要有时域分析法，幅度、相位、频域分析法等，一些现代的信号处理技术被用来超声信号的降噪，如空域复合法、频率复合法、解卷积、自适应滤波法、谱分析方法、人工神经网络和裂谱分析法等，为回波信号的定性定量检测提供了有力的手段，但是它们中的绝大多数都是仅在时域或仅在频域分析信号。超声缺陷检测中，回波信号通常是一种被探头中心频率调制的宽带信号，这种信号是一种时频有限的非平稳信号，因此用时频分析技术处理该信号更为有效。而小波变换技术便具有优良的时频局部化能力，因此用小波变换技术进行缺陷信号的增强，获得了较好的降噪效果^{[14][15]}。

在实际中，常常需要刻画局部时间范围内的频谱信息，单纯的时域或频域分析不能满足检测的要求，时频分析法尤其是小波分析由于具有联合表示时域和频域特性的能力，近年来在超声检测信号处理得到广泛的应用。多分辨分析是小波分析中的最重要的概念之一，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，而且能够提供函数分析与重构的快速算法。由尺度函数 ϕ 生成的多分辨分析，能够使我们获得一个信号\函数的多分辨表

示,通过分析信号\函数在不同分辨率下的低频和低频信息,达到分析原信号\函数的目的。小波变换还能应用于检测信号的奇异性以判别损伤^[16]。信号中的奇异点及小规则的突变部分经常带有比较重要信息,它是信号重要特征之一。利用小波变换来分析信号的奇异性 and 奇异度的大小是比较有效的。例如,采用小波变换的模极大值点来刻画信号奇异性,进行损伤识别,不仅能对不同损伤类型进行分类,还能准确判断损伤位置^[17]。

1.3 论文主要工作

本论文是在对超声波在钢材中传播特性进行分析的基础上,针对超声信号非平稳的特点,提出使用小波时频分析法分析超声回波信号。首先,详细分析了超声检测系统的原理与过程,针对钢材内部可能出现的缺陷和检测的条件,建立了超声检测的模型。其次对超声检测系统的三个过程进行建模与研究,根据建模的方程在 MATLAB 环境下仿真出超声波发射信号和超声回波信号。最后,选择适当的小波基函数和尺度,对信号进行去噪处理,对去噪后信号进行小波多分辨率分析,根据分析的结果,最终确认钢材中是否存在缺陷以及缺陷所在的位置。信号的小波去噪和小波多分辨率分析使用了 MATLAB 环境中小波分析工具箱,在该工具箱中实现了各项功能。

本论文的具体内容包含以下几个方面:

1. 根据钢材中超声波检测的原理和超声波信号在钢材中传播的特点,分析了超声波检测钢材的模型,选择合适的检测指标,对钢材进行超声无损检测。超声回波信号中包含了发射信号的特征,钢材内部结构特征和噪声。小波时频分析根本任务是对回波信号进行消噪处理,并检测出包含钢材内部结构特征的信息,根据这些信息来判断钢材内部的缺陷。

2. 详细分析超声检测系统中的超声波发射过程,超声波传播过程和超声波接收过程的组成部分和特点,建立了数学模型。并在 MATLAB 环境下通过编程,仿真出各个过程中的信号时域波形和频谱。

3. 对小波时频分析理论进行简要介绍,详细介绍了小波快速算法和小波基的选择原则和标准,比较了不同小波基特点,选择了 DB 小波作为超声回波信号时频

分析的母函数。。

4. 对超声回波信号进行小波消噪和多分辨率分析。小波消噪的目的是消除回波信号中混杂的部分噪声信号，小波消噪的结果主要由小波母函数和消噪阈值二者共同决定的，因此选择小波母函数和阈值是该部分的核心内容。加性噪声是一非平稳信号，其统计特性与小波基呈对应关系，小波基不同，其消噪后信号的统计特性就不同。使用 MATLAB 的小波分析工具箱，通过比较选择 DB6 小波对超声回波信号进行去噪处理，并对去噪后的信号进行小波多分辨率分析，根据分析结果中提取回波反射信号出现畸变的时刻和超声信号在钢材中传播的速度，从而确定了钢材中缺陷的位置。

第二章 超声检测技术

超声波是超声振动在介质中的传播，是一种频率高于 $2 \times 10^4 \text{Hz}$ ，波长很短的机械波。超声波具有弹性波的特性如穿透性、界面的反射、透射性、迭加、干涉、衰减等，而且能量高、穿透能力强。机械振动和波动是超声波检测的物理基础。由于超声波同时具有了几何声学 and 物理声学的这些特性，使得超声波广泛应用于无损检测。超声波的频率远高于声波，而声强（能量）与频率的平方成正比，所以比声波的能量高出很多，而且超声波在大多数介质中传播时，传播的能量损失小，传播距离远，穿透性强。此外，还可利用它的几何声学特点，它在介质中沿直线传播，遇到界面会产生反射、折射和波形转换等。这些特性使我们在固体材料检测时，可以通过测量和计算反射能量的幅值或透射能量的幅值、传播的时间等参数，进行材料结构与缺陷的检测和评定^{[9][18]}。

超声波检测钢材缺陷的基本原理：

1. 超声波的传播路径中如有缺陷，会使其传播速度降低，即传播时间延长。因此，可以根据超声波的变化来检测材料的缺陷。
2. 有缺陷的试样，其超声信号不同于正常钢材试样，可采用数学方法分析，配合接收超声波的波幅和波速检测来判断缺陷的位置，应用小波变换对信号进行分析与处理可以判定材料的损伤程度。

综上所述，根据超声波在固体中的传播特性，即在界面处发生反射、折射，缺陷处的散射、干涉、衍射、绕射等，在进行钢材材料检测时，分析超声波在材料中的传播速度和衰减系数，对钢材的结构与缺陷进行检测和评定。本文选用小波时频分析技术对钢材的超声信号进行处理，小波分析可以对信号进行全面细致的分解，因此从后者角度出发，可以提取的表征参量很多，应根据研究对象及研究目标的不同，进行合理选择。

2.1 超声波的基本物理量

按质点振动方向分类，超声波可分为纵波（L）、横波（S）、板波（也称兰姆波）：纵波是介质中质点的振动方向与波的传播方向相同的超声波，固体介质可以承受拉压应力的作用，故可以传播纵波，而液体和气体虽不能承受拉压应力，但在压应力的作用下会产生容积的变化，因此也可以传播纵波；横波是质点振动方向垂直于波的传播方向的超声波，固体介质能够承受切应力，而液体气体不能，故只有固体才能传播横波；板波是在板厚和波长相当的弹性薄板中传播的超声波，质点的振动介于纵波和横波之间，沿着表面传播，振幅随深度增加而迅速衰减的波称为表面波。表面波质点振动的轨迹是椭圆形，其长轴垂直于传播方向，短轴平行于传播方向。也由此可以判断本实验所用超声波为板波^{[19][20]}。

超声场即充满超声波的空间，或者说在介质中超声振动波及的质点所占据的范围成为超声场。它包括近场（N 为近场长度）和远场两个部分。在近场区的声压分布是不均匀的，超声波线在此区域更紧密，以致互相发生干涉，因此近场区越小越好，而在远场区中的声压则随着距离的增大呈单调下降变化。近场区的长度与换能器的晶片直径和超声波的波长有关，在近场区的超声波束呈收敛状态，在近场区末端，亦即从近场区进入远场区的过渡点上声束直径最小（故也将此点称作自然焦点），进入远场区后声束将以一定角度发散，声束边缘的斜度用半扩散角 θ 表示，声束的半扩散角同样与换能器的晶片直径和超声波的波长有关。

超声场常用声压（ p ）、声强（ I ）、声阻抗、质点振动位移和质点振动速度等物理量进行描述。

1. 声压，超声场中某一点在某一瞬间所具有的压强 p_1 与没有超声场存在时同一点的静态压强 p_0 之差定义为该点的声压，常用 p 表示，单位为 p_a 。

2. 声强，在超声波传播方向上，单位时间内单位截面上的声能称为声强，单位是 W/cm^2 。透射率 T ，它是超声波的传播特性之一，用公式表征：

$$T = \frac{I_t}{I_o} \quad (2.1)$$

也就是界面上的透射波的声强 I_t 与入射波的声强 I_o 的比值。

3. 声阻抗特性，声阻抗特性能直接表征介质的声学性质，其有效值等于传声介质的密度 ρ 与声速 c 之积，记作 $Z = \rho c$ 。声波在两种介质的界面上反射能量与透射能量的变化，取决于这两种介质的声阻抗特性。两种介质的声阻抗特性差愈大，则反射波的强度愈大。例如，气体与金属材料的声阻抗特性之比，接近于 1: 80000，所以当声波垂直入射在空气与金属的界面上时，几乎是百分之百地被反射。温度的变化对声阻抗特性值有显著的影响，实际中应予以注意^[2]。

2.2 超声波的基本特性

超声波与一般声波相比，它的振动频率高，而且波长短，因而具有束射特性，方向性强，可以定向传播，其能量远远大于振幅相同的一般声波，并且具有很高的穿透能力。超声波在钢材中甚至可穿透 10 米以上的厚度。

超声波在均匀介质中按直线方向传播，但到达界面或者遇到另一种介质时，也像光波一样产生反射和折射，并且服从几何光学的反射、折射定律。超声波在反射、折射过程中，其能量及波型都将发生变化。

超声波在界面上的反射能量与透射能量的变化取决于两种介质声阻抗特性。和其它声波一样，两介质的声阻抗特性差愈大，则反射波的强度愈大。例如钢与空气的声阻抗特性相差 10 万倍，故超声波几乎不通过空气与钢的介面，全部反射。

超声波在介质中传播时，随着传播距离的增加，能量逐渐衰减，能量的衰减决定于波的扩散、散射（或漫射）及吸收。扩散衰减，是超声波随着传播距离的增加，在单位面积内声能的减弱；散射衰减，是由于介质不均匀性产生的能量损失。超声波被介质吸收后，将声能直接转换为热能，这是由于介质的导热性、粘滞性及弹性造成的^[21]。

在弹性介质中传播的超声波遇到异质界面时会发生反射与折射，并有波型转换发生。在超声波检测中利用超声波在界面上的折射特性以达到波型转换的目的，例如把一般压电晶体产生的纵波转换成横波、瑞利波、兰姆波等，以适应不同工件以及不同情况下的检测，其转换条件与界面两侧介质的声速比（折射率）和入射、折射角度（正弦函数）有关：

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2} \quad (2.2)$$

如图 2.1 所示： α 为入射角， c_1 为第一介质中入射超声波的速度； β 为反射或折射角， c_2 为在第一介质中反射或者在第二介质中折射的超声波声速。在相同介质中相同波型有相同的波速，因此对于 $L_{反}$ 的反射角 β 与 L 的入射角 α 相同，在同一介质中横波的速度小于纵波速度，因此对于反射横波 $S_{反}$ 的反射角 β 小于 L 的入射角 α ；从折射情况来看，同样也是由于在同一介质中横波的速度小于纵波速度，因此折射横波 $S_{折}$ 的折射角小于折射纵波 $L_{折}$ 的折射角，式 (2.2) 也称为斯涅尔定律-折射定律^[22]。

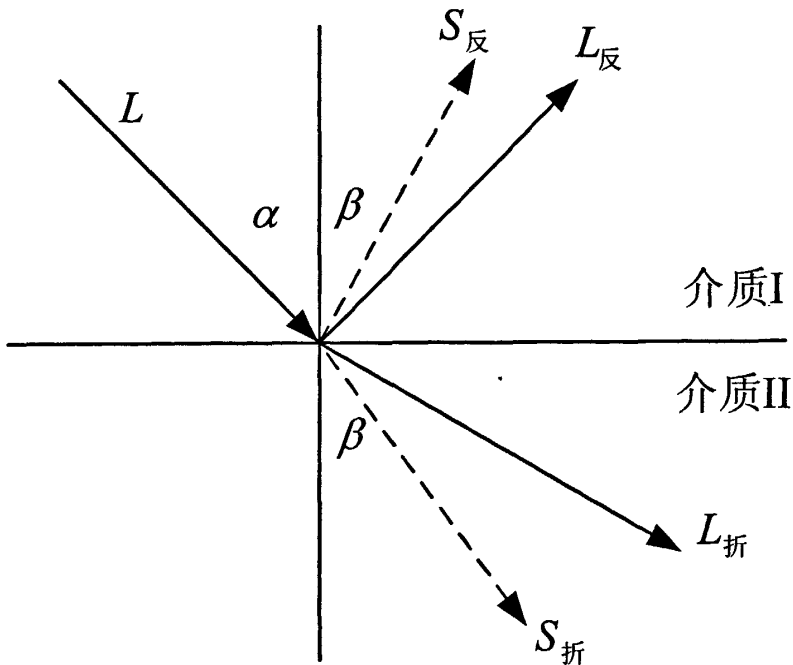


图 2.1 超声波反射与折射时的波形转换^[3]

在超声波检测中利用超声波的反射特性探测材料中的缺陷。下面以最常用的 A 型显示（波形显示）的超声脉冲反射法探测为例：超声波探伤仪的高频脉冲电路产生的高频脉冲振荡电流施加到超声换能器（探头）中的压电晶体上，激发出超声波并传入被检工件，超声波在被检工件中传播时，若在声路（超声波的传播路径）上遇到缺陷（异质）时，将会在界面上产生反射，反射回波被探头接收并转

换成高频脉冲电信号输入到探伤仪的接收放大电路，经过处理后在探伤仪的显示屏上显示出与回波声压大小成正比的回波波形（图形），根据显示的回波幅度大小可以评估缺陷大小，显示屏上的水平扫描线（时基线）可以调整为与超声波在该介质中的传播时间（距离）成正比（俗称“定标”），然后就可以根据回波在显示屏水平扫描线上的位置判定缺陷在工件中的位置^[23]。

声波在介质传播过程中，其能量随传播距离的增加而逐渐减小的现象称为声波能量的衰减^{[24][25]}。能量的衰减有以下几种方式：

1. 声波的扩散衰减（几何衰减）

不同振源在介质中产生的波型是不同的，它们的传播状态也不同。对有限面积的声源来说，其声波将会扩散，随传播距离的增加扩散程度会加大。因此，单位面积上的声波能量和声压将随传播距离的增加而减小，这种随波振面的扩散而引起的声波能量和声压的减小，称为扩散衰减（几何衰减）。

2. 声波的散射衰减

当声波在介质中传播时并在传播方向遇到某个障碍物时，如果障碍物尺寸远远大于声波的波长，那么就发生反射和折射现象；如果障碍物尺寸和声波波长可比时，就发生显著的绕射现象；如果障碍物尺寸小于波长的波长，声波可以绕过障碍继续传播，同时有一部分声能被这些障碍物散射掉。

复合材料中的缺陷会引起超声波的反射和折射，甚至引起波型转换，造成散射衰减。单位长度上衰减量的大小可以用衰减系数 α 来表示。

3. 声波的吸收衰减

超声波在材料中传播时，除了散射衰减外，内吸收造成的衰减是能量衰减的另一个重要原因，它与材料的粘滞性、热传导、边界摩擦、弛豫现象有关，使得超声能量以热和溶质原子迁移等形式被消耗掉，此外，还有位错运动（如位错密度、长度的变化，空穴与杂质的存在）以及磁畴壁运动、残余应力造成声场紊乱等等，这些都能导致超声能量的衰减。和散射衰减相对应，我们把这些原因所导致的超声能量衰减统称为吸收衰减。

由此可见，超声波在材料中的衰减机理很复杂，以综合衰减来考虑，假定距离振源 $X = 0$ 处的声压振幅为 p_0 ，经过距离 X 后的声压振幅为 p_x ，则：

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.3)$$

式中的 α 称为衰减系数，它可以被分为两部分，即：

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_a \quad (2.4)$$

式中的 α_s 为散射衰减系数， α_a 为吸收衰减系数。因此，以 α 表示的衰减系数是一个材料的综合性参数，它一般会随超声波频率的提高而增大。在超声检测中，可以测定超声波通过材料后声能的减小程度（例如超声脉冲反射法中工件底面反射回波幅降低程度的评定-称为底波损失评定或简称底反射损失，或者如超声波穿透法），来评定材料纤维组织的性质、形态及分布，例如检测金属材料的粗晶、过热与过烧、魏氏组织（金属锻件中的一种过热组织）、碳化物不均匀度、球墨铸铁的碳化物球化率、碳钢的室温拉伸强度以及应力测定等等。

2.3 超声检测在钢材缺陷检测中的应用

超声波检测是目前应用最为广泛的无损检测方法之一。它具有花费少、速度快、对环境无污染等优点，对裂纹等危害性缺陷有较高的检出率。若按超声波的种类来区分，超声波检测可分为连续波检测法和脉冲波检测法；按其原理分，可以分为反射法，穿透法和共振法。根据项目技术指标的要求，以及参考国内外的设计经验，选用脉冲反射法^[22]。

脉冲反射法是应用最广泛的一种超声检测方法，它是一种利用超声波探头发射脉冲到被检测试块内，根据反射波的情况来检测试件缺陷的方法。脉冲反射法又包括缺陷回波法、底波高度法和多次底波法等。按具体耦合方式的不同，脉冲反射法又可分为固体耦合、液体耦合。液体耦合方式下超声探头角度可以灵活调整，但是声能损失较大。因为钢材表面并不光滑平整，很可能会附着铁锈等杂质，故采用液体耦合方式。超声波类型为纵波，检测方式为脉冲反射法中的缺陷回波法。

其检测原理具体如下：发射端由垂直于钢材表面的超声波探头向钢材内部发射出一组超声波脉冲后，接收端探头接收钢材内部缺陷和另一表面的回波，探头首先接收到由钢材表面反射的回波，称为前波，随后接收到由钢材内部缺陷产生的回波称为缺陷波或一次底波、二次底波，探头至管道壁内表面的距离 A 与管道

壁厚度 T ，可以通过前波时间，以及前波和缺陷波、底波或一次底波和二次底波的时间差来确定。超声波检测的原理图如图 2.2 所示。

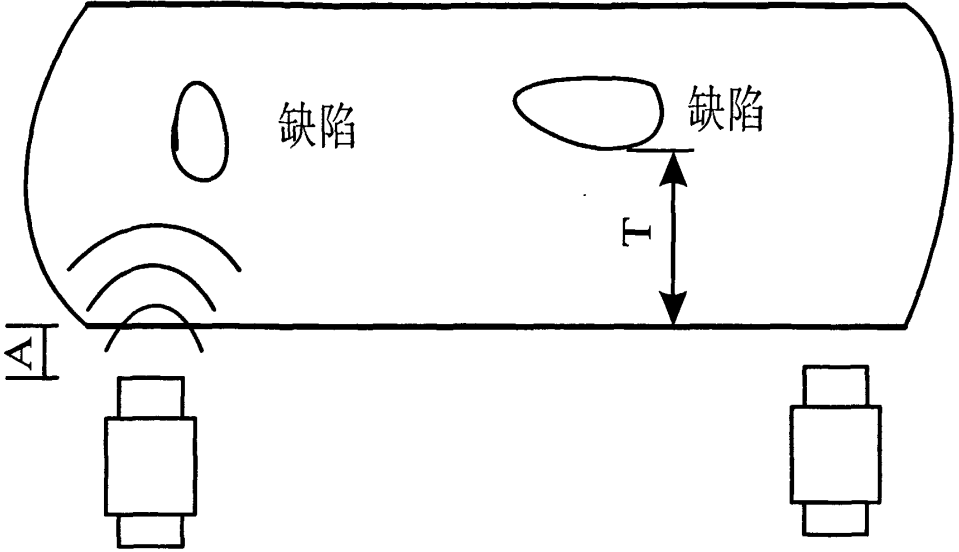


图 2.2 超声波检测原理图

其中：

$$A = v_c t_c / 2 \quad T = v_s t_s / 2$$

式中：

t_c ——第一次反射回波（前波）时间。

t_s ——第二次反射回波(底波或缺陷波)时间。

v_c ——超声波在空气中的声速，340m/s。

v_s ——超声波在钢材中的声速，取 5200m/s。

这样可以根据检测缺陷波的初至时刻和超声波在钢材介质中传播的速度来确定缺陷是否存在以及缺陷的位置和缺陷的大小。

钢材超声检测的技术指标：

1. 检测对象：圆形钢材，直径为 $\phi 100-300\text{mm}$ 。最大允许变形量 $\pm 2.5\%$ 。

2. 检测能力: 检测出 10mm 长的缺陷。
3. 环境温度: 5~60°C。
4. 检测速度: 150mm/s。
5. 检测距离: 一次 1m
6. 环境压力: 不大于 2Mpa

第三章 小波分析基础

3.1 小波分析概述

小波变换是近年来信号分析领域兴起的一种新的数学工具，它已广泛用于图像处理、语音信号分析以及地震信号处理等领域。其基本原理是多尺度下的时频分析，通过分析数据在不同尺度下的分解结果获得数据的各种特征达到信号分析的目的。

3.1.1 小波变换的产生背景

在人们生活的周围，每天都有大量的信号需要进行分析，例如说话的声音、机器的振动、金融变化数据、地震信号、音乐信号、医疗图像等。相当多的信号需要进行有效的编码、压缩、消噪、重建、建模和特征提取，因此，人们一直在努力寻找各种有效的信号处理方法。

自从 1822 年傅立叶 (Fourier) 发表“热传导解析理论”以来，傅立叶变换一直是信号处理领域中应用最广泛的一种分析手段。傅立叶变换的基本思想是将信号分解成一系列不同的连续正弦波的叠加，或者从另外一个角度来说是将信号从时间域转到频率域。对于许多情况，傅立叶分析是能够很好的满足分析要求的。但是傅立叶变换有一个严重的不足，那就是在做变换时丢掉了时间信息，无法根据傅立叶变换的结果判断一个特定的信号是在什么时候发生的。也就是说，傅立叶变换只是一种纯频率域的分析方法，它在频域的定位是完全准确的（即频域分辨率最高），而在时域无任何定位性（或无分辨能力）^{[4][14]}。

为了研究信号在局部时间内的频率特征，1946 年 Gabor 提出了著名的 Gabor 变换，之后进一步发展成为短时傅立叶变换 (STFT，又称为加窗傅立叶变换)。其基本思路是给信号加一个小窗，信号的傅立叶变换主要集中在对小窗内的信号进行变换，因此可以反映出信号的局部特征。但由于 STFT 的定义决定了其窗函数的大小和形状均于时间和频率无关而且保持固定不变，这对于分析信号来说是不利

的，高频信号一般持续时间很短，而低频信号持续时间较长，因此，期望对高频信号采用小窗，对于低频信号则采用大时间窗进行分析。在进行信号分析时，这种变时间窗的要求同 STFT 的固定时窗（窗不随频率而变化）的特性是相矛盾的，这也就表明 STFT 在处理这类问题时已无能为力，为此，在进行数值计算时，人们希望将基函数离散化，以节约计算时间和存储量，但 Gabor 基无论怎样离散，都不能构成一组正交基，给数值计算带来不便。

以上 Gabor 的不足正是小波变换的特长所在，小波变换不但继承和发展了 STFT 的局部化思想，而且克服了窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交基的特点，是一种比较理想的信号处理方法^[26]。

3.1.2 小波变换的发展过程

小波变换的概念是由法国从事石油信号处理的工程师 J.Morlet 在 1974 年首先提出的，通过物理的直观和信号处理的实际需要经验建立了反演公式，当时未能得到数学家的认可，正如 1807 年法国的热学工程师 J.B.J.Fourier 提出任一函数都能展开成三角函数的无穷级数的创新概念未能得到著名数学家 J.L.Lagrange, P.S.Laplace 以及 A.M.Legendre 的认可一样。幸运的是，早在七十年代，A.Calderon 表示定理的发现、Hardy 空间的原子分解和无条件基的深入研究为小波变换的诞生做了理论上的准备，而且 J.O.Stromberg 还构造了历史上非常类似于现在的小波基；1986 年著名数学家 Y.Meyer 偶然构造出一个真正的小波基，并与 S.Mallat 等合作指出小波正交基的构造可纳入一个统一的框架，并提出了多尺度分析的概念，至此，小波分析才开始蓬勃发展起来，其中比利时女数学家 I.Daubechies 撰写的《小波十讲 (Ten Lectures on Wavelets)》对小波的普及起了重要的推动作用。与 Fourier 变换、窗口 Fourier 变换 (Gabor 变换) 相比，它是一个时间和频率的局域变换，因而能有效的从信号中提取信息，通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析 (Multiscale Analysis)，解决了 Fourier 变换不能解决的许多困难问题，从而小波变换被誉为“数学显微镜”，成为分析发展史上里程碑^[4]。

3.1.3 小波变换在工程检测中的应用

傅里叶变换是分析平稳信号最有力的工具，而小波分析则是分析非平稳信号的有力工具，它有局部化分析信息的功能。同时，小波分析对信号具有自适应性，这是传统信号处理方法无法比拟的。所以，小波分析在工程检测中得到了广泛应用，且发展速度甚快。

小波分析在工程检测中的应用列举如下：

1. 信号的奇异性检测

Fourier 变换是研究稳态信号的理想工具，但它只能确定一个信号奇异性的整体性质，而难以确定奇异点在空间的位置及分布情况。实际上，信号中不规则突变部分和奇异点往往包含重要信息，如脑电波中的尖波和棘波、图像中各物体的边缘、具有时变频谱特性的复合材料超声检测信号和机械故障检测信号等。小波变换突破了 Fourier 变换在时域中没有任何分辨率的限制，它具有多分辨率分析的特点，而且在时频两域都有表征信号局部特征的能力，是一种窗口大小固定不变而形状可改变，时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法，很适合于探测正常信号中带有瞬间反常现象并展示其成分的物体，所以被誉为分析信号的显微镜^[27]。

2. 信号自相似性检测

小波分解可通过计算信号和小波之间的“自相似指数”得到。这里的自相似指数也就是小波系数，如果自相似系数较大，则信号的自相似程度就高，反之亦然。如果一个信号在不同的尺度上都相似于它本身，那么自相似指数即小波系数在不同的尺度上也是相似的。

3. 信号的抑制与衰减

利用小波分析进行信号抑制是小波分析在实际中的重要应用之一。在利用具有信号抑制特性的小波进行小波分解时，小波可以抑制信号中的规则部分，而对信号的不规则部分不起作用。再次，可以通过对规则信号的抑制来达到分析不规则信号的目的。抑制信号中的某些成分还可以将小波分解中的某些分解系数强制性的置为零，再将修改后的小波分解系数进行重构，就可对该信号的某些部分进行抑制。

4. 信号去噪与提取

小波分析在信号噪声处理中，去噪效果明显优于传统的傅立叶变换方法。在信号分析中很多情况下需要提取弱信号，这一点在 FT 中是做不到的。在很多情况下，某些有用信号都非常微弱，被其它信号或噪声信号所淹没。为了有效地提取这一微弱信号，可以用小波分析理论，对信号进行小波分解，把信号分解为各个频段的信号，再根据需要选取包含所需信息的频段序列，进行深层次处理。

5. 信号压缩

小波变换具有一种“集中”的能力，因此可以使一个信号的能量在小波变换域集中于少数系数上，那么相对来说，这些系数的取值必然大于在小波变换域中能量分散于大量小波系数上的信号或噪声的小波系数值。这就意味着对小波系数进行域值处理可以在小波变换域中除去低幅度的噪声和我们所不期望的信号，然后再进行小波逆离散变换即可。尽管所恢复的信号失去了一些细节，但仍能恢复出所期望的信号。

3.2 小波时频分析基本理论

3.2.1 小波变换的定义

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。它有两个特点：一是“小”，即在时域和频域都具有紧支集或近似紧支集；二是正负交替的“波动性”，也就是直流分量为零。傅立叶分析是将信号分解成一系列不同频率的正弦波的叠加，同样小波分析是将信号分解成一系列小波函数的叠加，而这些小波函数都是由一个小波母函数经过平移与尺度伸缩得来的。从感性上即可分析：用不规则的小波函数来逼近尖锐变化的信号显然要比光滑的正弦曲线要好。这里讨论的是一维的情况，小波分析同样可以用于二维图形的分析，但因本论文选用的材料是钢材，其检测信号为超声信号，故只考虑一维情况。

3.2.1.1 连续小波变换

小波函数的确切定义为：设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数，若其傅立叶变换 $\psi(\omega)$ 满

足条件^[27]:

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (3.1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数。将其伸缩和平移后, 得到小波基函数:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0, b \in \mathbb{R} \quad (3.2)$$

从上面的公式可以看出, 我们选择了一个母小波, 就意味着选取了一组小波函数, 并且构成某一空间的基, 小波母函数的特征是:

1. 函数的定义域是紧支撑的, 即在一个很小的区域之外, 函数的值全为零, 也即函数具有速降性, 具有空间局域化的特征;

2. 函数的平均值为零, 即 $\int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0$, 而且 $\psi(t)$ 的高阶矩也为零, 有:

$$\int_{\mathbb{R}} t^k \psi(t) dt = 0, k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.3)$$

信号 $f(t)$ 在变换过程中没有任何能量损失, 能量是守恒的, 有下式成立:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 \frac{dad b}{a^2} \quad (3.4)$$

总之, 小波就是一个定义在有限间隔且平均值为零的函数。

所谓的小波变换就是把信号 $f(x) \in L^2$ 在上述小波基下进行展开:

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3.5)$$

小波系数 W_f 能反映出随着时间的变化信号频率成分的变化情况, 这种反映可以在相空间中清楚表达出来。

3.2.1.2 离散小波变换

为了便于在计算机上实现, 连续小波必须加以离散化。

连续小波进行离散化的过程, 也就是用计算机作近似数值积分的过程, 最简单的方法是采用矩阵法。令 $t = nT_s$, $b = kT_s$, 则 (3.5) 式变为:

$$W_f(a, kT_s) = \frac{\Delta T}{\sqrt{a}} \sum_n f(nT_s) \overline{\psi\left(\frac{(n-k)T_s}{a}\right)} \quad (3.6)$$

其中 $\Delta T = T_s$ 是采样间隔。上式简化可：

$$W_f(a, k) = \frac{\Delta T}{\sqrt{a}} \sum_n f(n) \psi\left(\frac{n-k}{a}\right) \quad (3.7)$$

它表明了对每一个给定 a 值，依次求出不同 k 值下的乘积和，可得到该 a 值下一组 W_f 系数，这里 a 的取值也必须是离散的。如果取尺度参数 a 和平移参数 b 分别为： $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$ ，其中， $j \in Z$ ，扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定的数值，则对应的离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 可以写成：

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (3.8)$$

而离散小波变换的系数可以表示为：

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt = (f(t), \psi_{j,k}) \quad (3.9)$$

3.2.1.3 小波快速算法

小波快速算法是在多分辨率分析（多尺度分析）的基础之上，由 S.Mallat 在研究图像处理问题时建立起来的，多分辨率分析不仅为正交小波基的构造提供了一种简单的方法，而且为正交小波变换的快速算法提供了理论依据。

多分辨率分析是指在空间 $L^2(R)$ 中的一串嵌套式闭子空间逼近序列 $\{V_j\}_{j \in Z}$ ，它满足下列要求：

1. $\dots \subset V_j \subset V_{j+1} \subset \dots \subseteq L^2(R), \bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}, \bigcup_{j \in Z} V_j = L^2(R)$;
2. $V_j = \text{span}\{\phi_{j,k}(t) \mid \phi_{j,k} = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), k \in Z\}$;
3. $\phi(t) = \sum_n h_n \phi(2t - n), \{h_n\} \in l^2$;
4. $\{\phi(t - k)\}$ 是 Riesz 基。即对任何 $f(t) \in V_0$ ，存在唯一序列 $\{\alpha_k\} \in l^2$ ，使 $f(t) = \sum_{k \in Z} \alpha_k \phi(t - k)$ 。

其中 $\phi(t)$ 是多分辨率分析对应的一个尺度函数， $\phi(t)$ 经伸缩平移后的函数序列 $\{\phi_{j,k}(t)\}$ 是空间 $L^2(R)$ 的一个基，由它张成了 $\{V_j\}$ ，即生成了多分辨率分析。

Mallat 算法是由多分辨率分析、尺度函数和小波函数推导而来的，它表明 $f(t) \in L^2(R)$ 可分解为无穷多个小波分量的直和^{[4][27]}。

小波快速算法包括快速分解和快速重构算法，在 MATLAB 的小波工具箱中具有小波快速算法的功能，因此可以在计算机上实现测得回波信号的小波快速分解和快速重构。

3.2.2 小波基的选取

虽然已经构造除了许多小波函数，但在信号处理方面应用成熟的却不多，并非所有的小波基函数都适合于钢材超声检测信号的分析，因此在应用中需要对各种小波基进行比较，找出适合本研究的小波基，不同的小波基具有不同的时频特性，同一信号运用不同的小波基进行分析往往表现出不同的结果，这给突变信号的检测带来了困难。因此，对如何进行小波基的选择进行研究，进而对突变信号进行刻画，并分析突变信号与背景噪声在小波变换中所表现出的差异，以说明小波变换适合于超声探测信号的检测与识别具有重要的意义。

3.2.2.1 小波基的特性

在傅立叶变换中，基函数是唯一的，而在小波变换中有许多小波基可以选择。这种不唯一性一方面满足了实际问题的需要，另一方面，不同的小波基具有不同的时频特性，这就给小波基的选择带来了困难。从频域分析的观点来看，小波本质上是一组带通滤波器。在不同的应用领域中被分析的信号各具特点，为了提取信号的有用信息需要不同时频特性的小波基，所以对小波基的时频特性进行分析具有实际的应用价值。小波基的主要特性有：紧支性和衰减性、消失矩、正则性、对称性。以上特性关系到如何选择合适的小波基，以便有效地分析信号。

1. 紧支性和衰减性

如果描述尺度函数的低通滤波器组表征为有限冲击响应滤波器，那么尺度函数和小波函数只在有限区间非零，称这种小波函数具有紧支性。紧支性是小波的一项重要性质，紧支小波不需要人为的截断，应用精度也很高。一个高效的小波

基最好能在时域和频域上同时表现出紧支性，这样就可以避免频域上交叉项的影响，在时域上也不会引起泄露。然而，根据测不准原理可知，同时具有紧支性是不可能的，一般希望小波基在时域上具有紧支性。常见紧支小波基有：Db 小波基、Sym 小波基、Coif 小波基等^[28]。

2. 正则性

正则性表现为小波基的可微性，在数学上，设 $f(x)$ 在点 x_0 的 Lipschitz 指数为 α ，正则度定义为 α 的上确界。连续可微的小波基对于在小波变换中有效地发现信号的奇异点是很重要的，对于大部分正交小波基来说，正则性越高意味着具有更高的消失矩。

3. 消失矩

对于所有的 $m, M \in \mathbb{Z}$ 满足 $0 \leq m \leq M$ ，如果有 $\int_{-\infty}^{\infty} t^m \psi(t) dt = 0$ ，则称小波函数 $\psi(t)$ 具有 m 阶消失矩。分析突变信号时，为了能够有效地检测出奇异点，所选的小波基必须具有足够高的消失矩。常见的小波函数的消失矩如表 3.1 所示。

表 3.1 常用小波的支撑长度与消失矩

小波名称	尺度函数支撑长度	小波函数消失矩
Daubechies 小波系	2N-1	N
Symlets 小波系	2N-1	N
Coiflets 小波系	6N-1	2N

4. 对称性

对称或反对称的小波函数和尺度函数是非常重要的，因为它可以构造出紧支的正则小波基，而且具有线性相位。在信号分析中，尺度函数和小波函数能够作为滤波函数，如果滤波器具有线性相位，则能够避免信号在小波分解和重构时的

失真。

Daubechies 已经证明,除了 Harr 小波基外,不存在对称的紧支正交小波基。而对于双正交小波基可以合成具有对称或反对称的紧支撑小波基。在小波分析中,信号的突变包括两方面的含义,一是位移的突变,二是频率的突变,所以信号的突变主要从两个方面进行刻画,首先要确定信号的突变时刻,其次要区分不同的突变类型。对于位移的突变来说,从时间-位移曲线上可以识别一些大的变化,但是当突变信号被淹没在其他信号中时,突变时刻就很难确定,另外,从时间-位移曲线上也很难区分奇异类型,从信号的频谱曲线上也可以看出一些突变时刻的信息,但是信号的频谱曲线没有时间概念,不可能给出准确的突变时刻。

3.2.2.2 小波基的选取

分析突变信号,就是将信号在小波基上展开后分解到不同的频带上。实际上,信号的小波分解(小波级数)是无限和的形式,由于采样频率和计算机的限制,往往将这个和式截取到某个期望尺度而得到信号的一个近似表示,这个信号的近似优劣程度完全依赖于小波基的选择,如何选择合适的小波基在不同的领域有不同的要求。

目前在小波基的比较方面主要有以下几个典型代表:第一种是直接比较小波基的各种数学参数,该方法能从理论上根本解决小波基的选择问题,但由于小波的各种数学参数完全地从数学角度建立,具有一定的理论深度,这对于不熟悉小波理论的人来说会有很大的难度;第二种是选择某几个特定的小波基定性比较它们在某一方面应用中的效果差异,该方法的优点是结合了工程实际;第三种是依赖于传统的信息价值函数对小波基进行比较,该方法的优点是希望通过较少的评价参数定量地比较各种小波基,但是时间证明传统的信息价值函数并不适用。本课题采用第一、二种评判标准相结合的方法来选择小波基,即通过比较各种小波的重要性质及其处理信号的实际效果来判定小波的适用性,并由此选择小波基。从数学参数上比较小波主要考虑以下方面:

1. 小波基函数 $\psi(t)$ 、小波变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 、尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 的支撑长度:表示这些函数在从 ∞ 趋于零时的衰减速度,它使得在时间和频率上有局部

化分析的能力。另外，支撑长度不一，它们对时间和频率的局部刻画也不一样。小波或尺度函数在支撑域外的值很小或为零，说明它紧支撑，可以得到时间上的局部化分析。

2. 对称性：在信号的分析 and 重建中避免相位偏差。

3. 小波基函数 $\psi(t)$ 及尺度函数 $\varphi(t)$ 的消失矩数目，这对于去噪很有用。消失矩的数目越大，频域的局部化能力越强。

4. 正则性：它对信号的重构获得较好的平滑效果是非常有用的。

为了具有快速算法、节省编码空间，应进一步考虑小波基是否具有下列性质。

5. 尺度函数 $\varphi(t)$ 是否存在。

6. 是否具有正交性和双正交性。

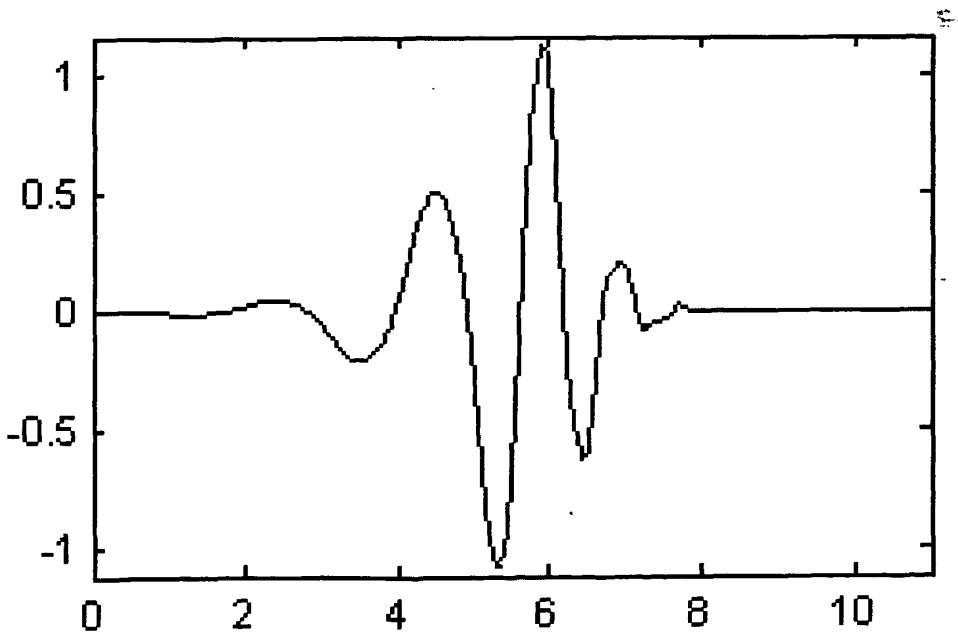


图 3.1 db6 小波函数

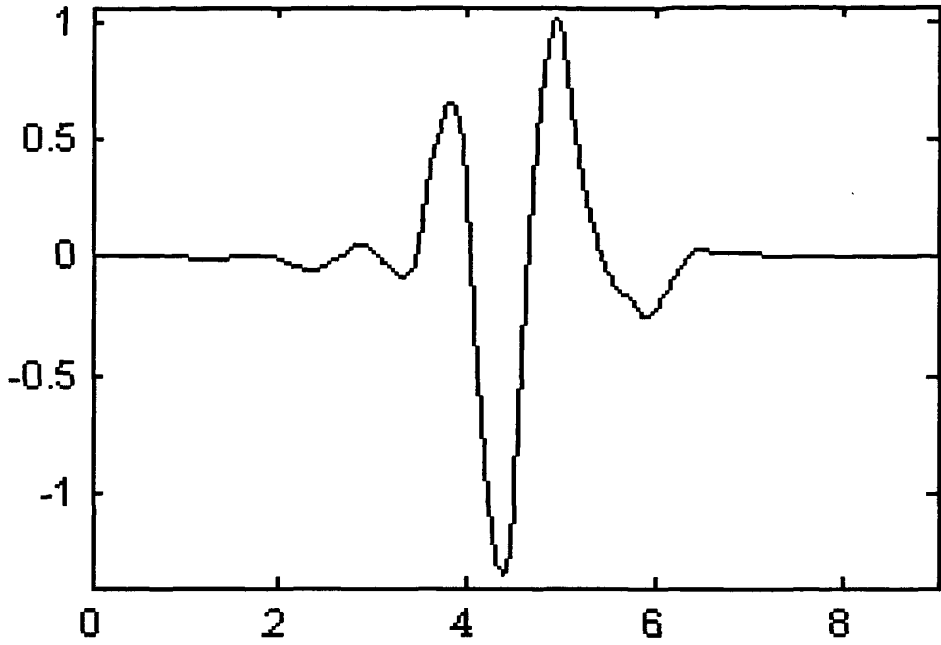


图 3.2 sym5 小波函数

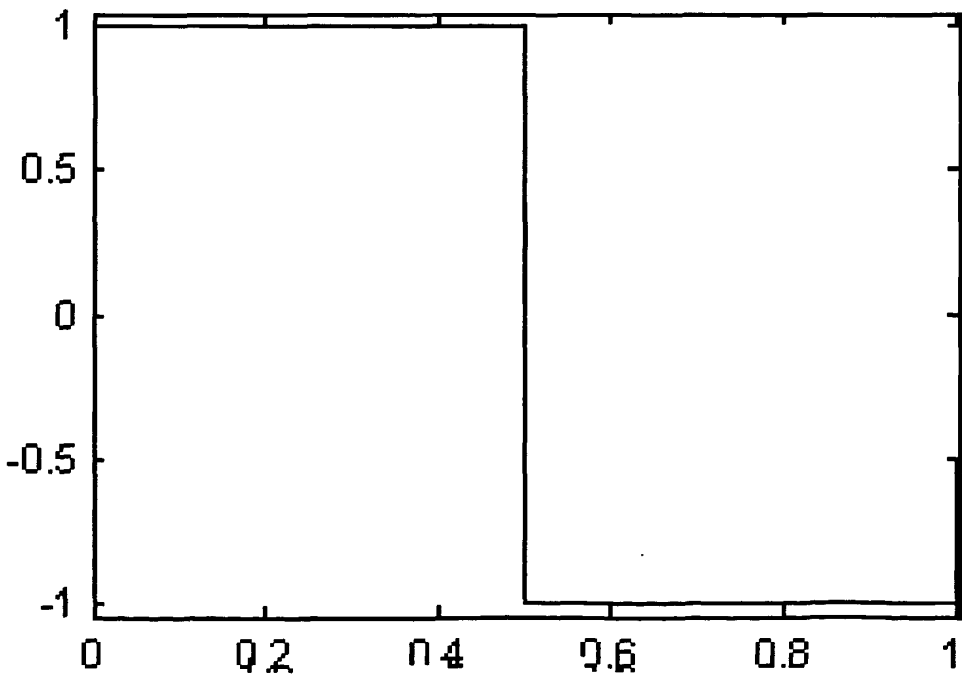


图 3.3 haar 小波函数

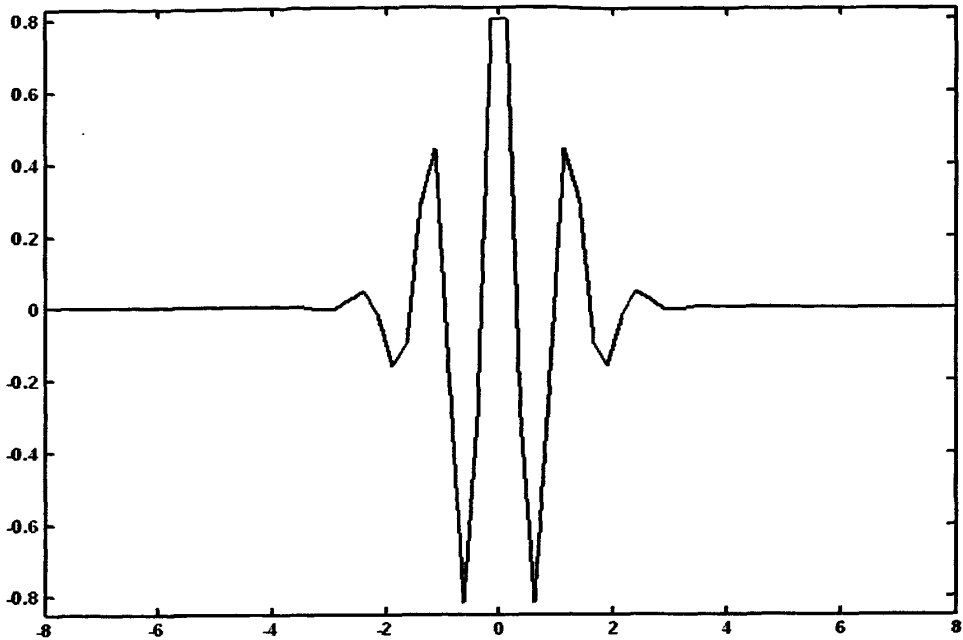


图 3.4 Morlet 小波函数

常见的小波母函数如图 3.1-图 3.4 所示。通过比较以上几种性质并参考有关文献可得以下结论：Haar 小波不具有对称性，且不连续；Morlet 小波不具备正交性和紧支撑性而且没有快速算法，计算量大，耗时长；而 DBN 小波基在正交性、紧支撑性、支撑长度等方面都优于前两种小波基，所以在回波信号分析中选择 DB 小波。经多次实验验证，DB6 小波效果较好^[29]。

第四章 超声检测信号的小波时频分析

4.1 超声检测的模型

在超声波无损检测中，任何一个超声检测系统都可以分为以下几个环节：超声波发射过程，超声波传播过程和超声波接收过程。整个超声波检测过程如图 4.1 所示，超声波信号经历了电声转换、超声信号的传播反射、声电转换，最后被接收机接收处理。超声波检测的过程是：激励信号产生一高频的电信号，电信号在超声波换能器中转换成超声信号，由换能器发射到被测物体中。超声波在被测物体中传播，遇到不同介质界面将发生反射和折射，其中以反射为主。反射信号经换能器转换成超声回波电信号，最后被接收电路接收。接收到的回波信号经分析处理就可以得到被测物体内部的结构信息。

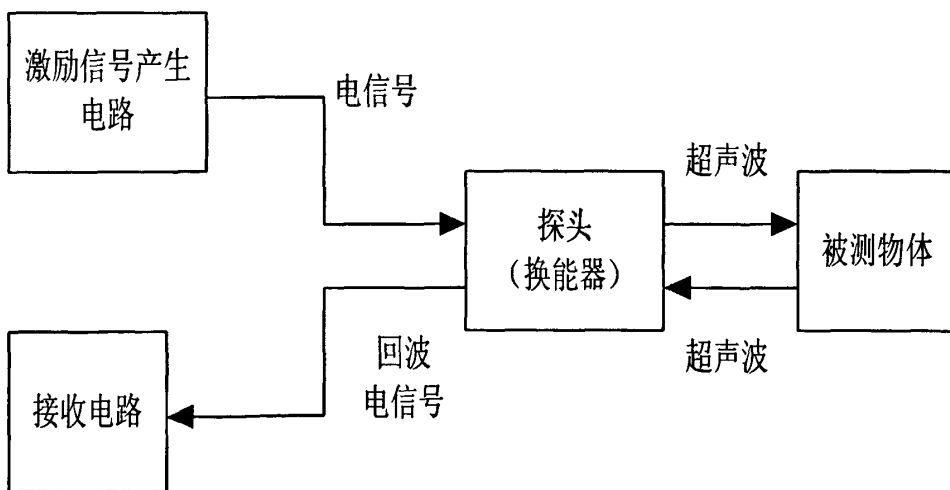


图 4.1 超声检测信号流程图

4.1.1 超声波发射过程

超声波发射过程主要包括超声激励脉冲发生器、电缆和换能器三个部分，脉冲发生器可以简化为包括一个电压源和一个串联电阻的器件。在实际超声检测中，所用的超声频率在 1MHz 到 20MHz 之间，根据超声的不同应用领域，超声激励脉冲发生器可以产生单频载波脉冲信号、调频脉冲信号、编码脉冲信号、脉冲串信号、正弦波连续信号以及伪随机信号^{[30] [31]}。在本文中，选择单频载波脉冲信号作为脉冲发生器所输出的信号，亦即脉冲选通的单频连续波。其数学模型可表示为：

$$s(t) = p(t) \cos(2\pi f_c t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & -\frac{t_c}{2} < t - nT < \frac{t_c}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 $p(t)$ 是幅度、脉宽和周期分别是 A 、 t_c 和 T 的脉冲函数。在 MATLAB 环境下编程可得到 $s(t)$ 的时域波形和频域波形，如图 4.2 和图 4.3 所示。图中信号的幅度为 1，载波频率为 4MHz。

脉冲信号经电缆传输到换能器的输入端，发射换能器可以简化成一两端口系统，换能器的框图如图 4.4 所示。设换能器的传递函数为 $T(\omega)$ ，换能器的输出为 $V(t)$ ，则^[32]：

$$V(t) = F^{-1}[T(\omega)] \otimes s(t) \quad (4.2)$$

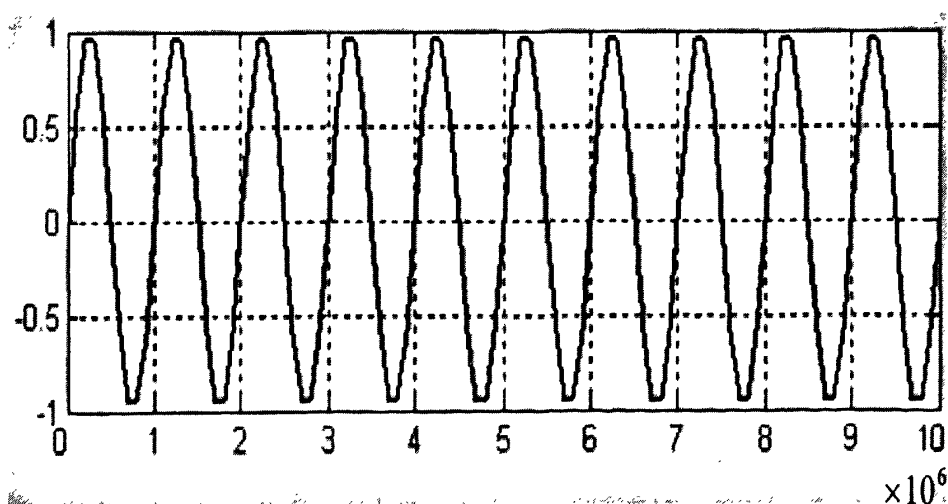


图 4.2 激励信号时域波形

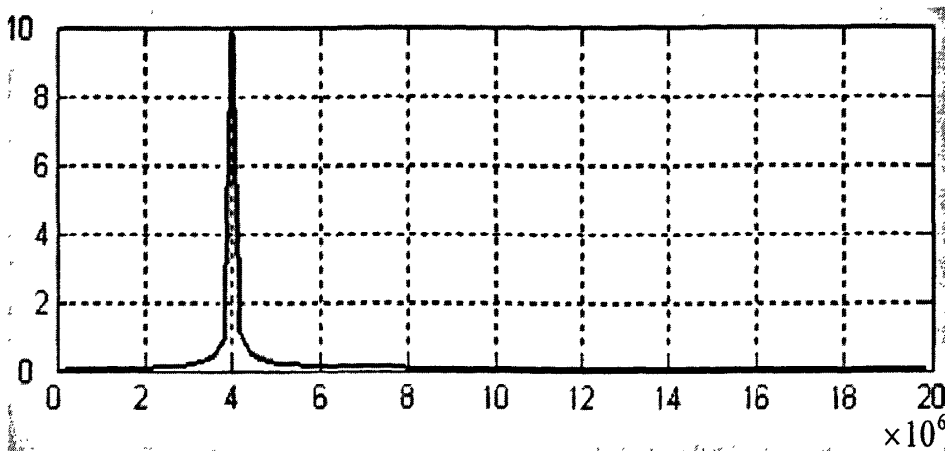


图 4.3 激励信号的频域波形

一般有:

$$T(\omega) = T_0(\omega)e^{-j\rho(\omega)}$$

$$\rho(\omega) = -\frac{\omega}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln |T(y)|}{y^2 - \omega^2} dy$$

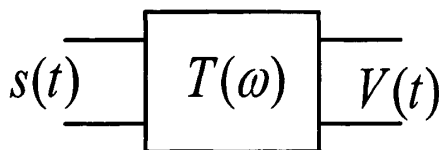


图 4.4 换能器模型

4.1.2 超声波接收过程

超声信号接收部分包括换能器、电缆和接收器。接收部分是发射部分的逆过程，入射到换能器的超声波主要包括三个部分：一是直接来自发射换能器，这部分称为超声直达波，包含着发射信号的特征；二是来自被检测物体，这部分超声波是由于在物体内部发生了折射，最后经多次折射达到接收端，它包含了物体中的材料特性；三是来自缺陷部分，当超声波信号在物体内部遇到与物体材料不一致的情况下，将产生不同反射角的反射波，与原始发射信号相比，这部分信号的相位将发生较大的变化，即将出现畸变，这些信号包含了物体中缺陷的信息，我们所需要的就是该部分信号。在接收端，超声波信号一部分在表面发生散射，另一部分入射到换能器内部并转换成电信号，接收端换能器也可简化成一端口网络。接收换能器的输出信号可以看成是发射信号经两次换能器调制作用后得到

的电信号，其表达式为：

$$s'(t) = \left(\frac{t}{T}\right)^m e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^2} \varepsilon(t) s(t) \quad (4.3)$$

上式中 T 是由换能器决定的时间常数， $\varepsilon(t)$ 为阶跃函数，取 $m=1$ ， $s(t)$ 为发射脉冲信号。

图 4.5 和图 4.6 给出了 $s'(t)$ 的时域和频域波形（忽略传播过程信号的损耗及噪声的影响）^{[33][34]}。这些波形都是在 MATLAB 中根据数学模型编程得到的。从频域波形可以看到，接收到的超声回波信号基本能保持发射时原始超声信号的频率。

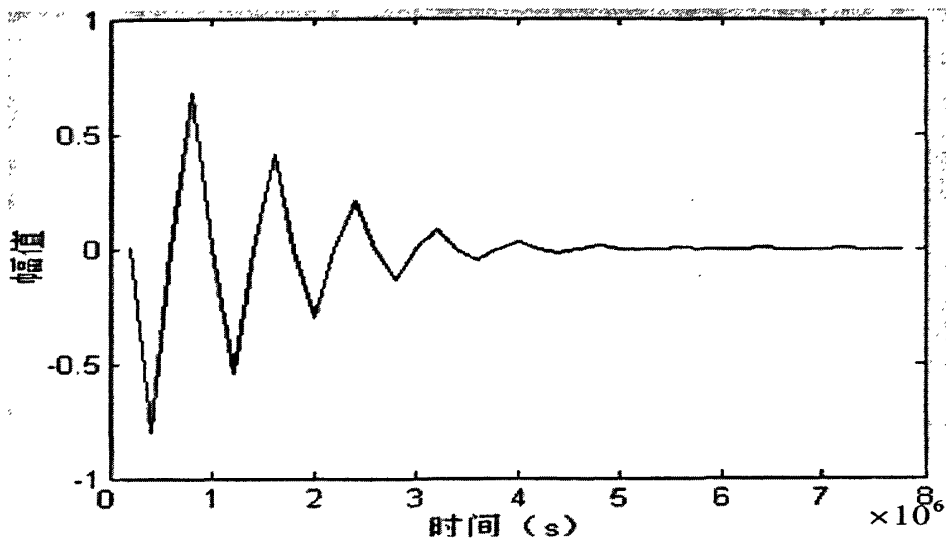


图 4.5 $s'(t)$ 的时域波形

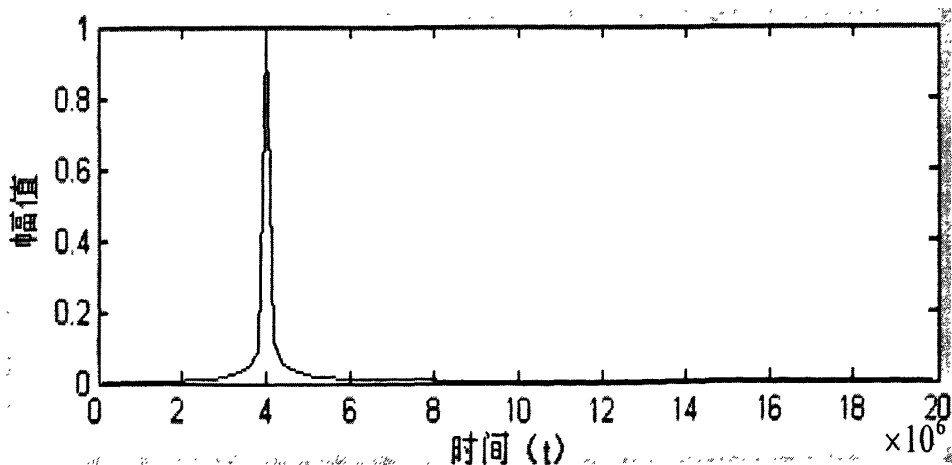


图 4.6 $s'(t)$ 的频域波形

4.1.3 超声波传播过程

超声波在介质中传播时，强度将会产生衰减，波形将会发生畸变，主要是声束散射、介质的吸收、不同介质界面的弹性反射和外界加性噪声的影响。

1. 声束散射：超声波在传播一定距离后，由于声场面积变大，声能会衰减。这部分衰减在发射超声波时可以减少到最小程度，因此可忽略不计。

2. 吸收衰减：超声波在介质中传播，由于介质组织的特性而产生吸收衰减。实验表明，介质的吸收衰减对超声波信号呈指数衰减形式，且随着传播距离的增大以及超声信号自身频率的升高，其衰减都会变大。整个衰减可近似成如下模型：

$$y(t) = s(t) \otimes h(t, x_i) \quad (4.4)$$

上式中， $h(t, x_i)$ 为吸收衰减函数，其频率响应为：

$$H(f, x_i) = e^{-\alpha x_i}$$

γ 为介质衰减系数， f 为超声频率， x_i 为测点深度的2倍。

3. 弹性反射：超声波在介质中传播时，当遇到不同阻抗界面时，会发生反射或散射现象而产生回波信号。交界面上两种介质的特性阻抗差异越大，被反射的超声波就越多，其模型如下：

$$y(t) = s(t) \otimes a(t) \quad (4.5)$$

$a(t)$ 代表发生反射（散射）现象时的衰减函数。

4. 加性噪声：实际待处理的超声回波信号中还混有噪声，其中有超声杂射散射回波、电噪声、热噪声，这些噪声都可以简化为加性高斯白噪声。

综合以上四个方面，对超声回波信号建模为：

$$y_i(t) = s_0(t) \otimes p(t) \otimes h(t, x_i) \otimes a(t) + N(t) \quad (4.6)$$

上式中 $s_0(t)$ 为超声激励信号， $p(t)$ 为发射和接收时探头的二次响应， $h(t, x_i)$ 为吸收衰减函数， $a(t)$ 代表发生反射（散射）现象时的衰减函数， $N(t)$ 为加性噪声。将上式中各个函数具体化，可得到超声检测钢材时单脉冲超声回波信号的模型公式：

$$r(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos[2\pi f_c(t-\tau)] \quad (4.7)$$

各参数取值如下： $\beta = 3.24$ ， $\alpha = 0.2$ ，延时 $\tau = 500$ ，超声信号频率 $f_c = 4\text{MHz}$ 。

在 MATLAB 环境下由式 4.7 可得到超声回波信号的波形如图 4.7 所示^[34]。而实际检测的超声回波信号是该信号的周期函数，具有周期性。

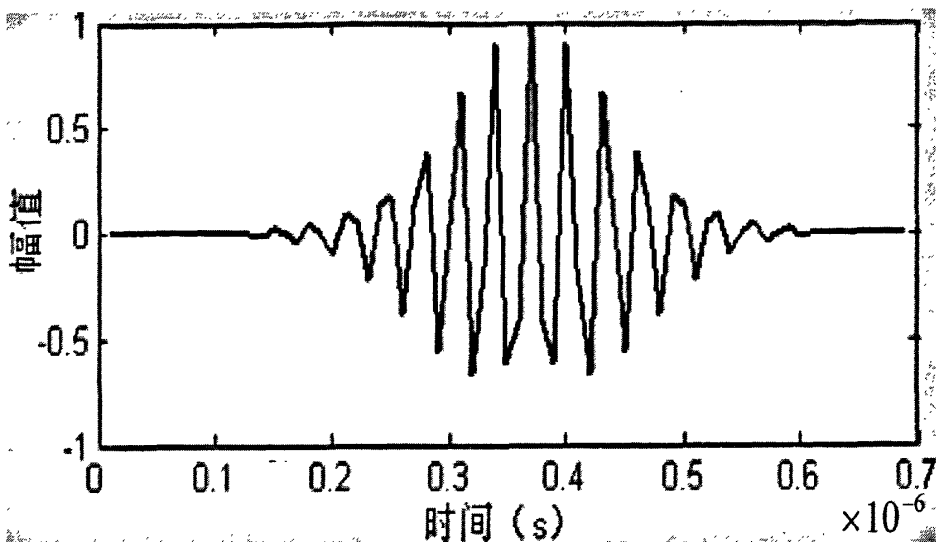


图 4.7 超声回波信号

由于在超声波传播过程中，不可避免要受到外界噪声的干扰，因此，需要在图 4.7 的基础上混合噪声信号，这里的噪声信号认为是高斯加性白噪声。图 4.8 是超声波回波信号加上加性噪声后所得到的接收器输出信号。混合噪声以后的回波信号，其信号在时间轴波形展宽，信号频带变宽。

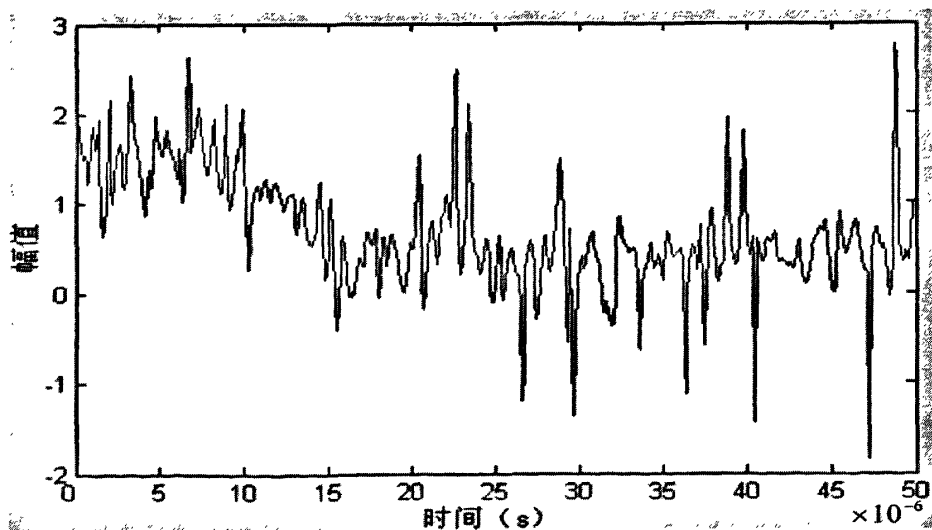


图 4.8 带噪声的超声回波信号

4.2 超声波信号的小波分析

4.2.1 Matlab 小波分析工具箱

在 Matlab7 中，小波工具箱的版本升级到了 Wavelet Toolbox 3.0，该版本增加了小波分析的新功能和新特性，如 New Wavelet for CWT 新小波的设计，图像融合，提升小波等。小波时频分析在 Matlab 中的实现主要通过小波工具箱中的小波图像用户接口 (GUI)，在 GUI 中不需要使用任何函数，更不需要编写任何程序，就可以形象地了解小波分析的强大功能。小波 GUI 的功能非常丰富，其主要功能如表 4.1 所示^[29]。

表 4.1 小波 GUI 的主要功能

主要功能	子功能	主要功能	子功能
一维小波分析	一维离散小波变换	一维小波分析专用工具	一维平稳小波消噪
	一维小波包变换		一维小波变换密度估计
	一维连续小波变换		一维小波变换回归估计
	一维连续复小波变换		一维小波系数选取
二维小波分析	二维离散小波变换		一维 FBM 产生
	二维离散小波包变换	二维平稳小波消噪	
小波显示	小波显示	二维小波分析专用工具	二维小波系数选择
	小波包显示		图形融合
小波构造	CWT 小波构造	延拓工具	信号延拓
			图像延拓

小波分析工具箱的 GUI 界面如图 4.9 所示，在该交互界面中包含所有的小波分析功能，如一维小波分析，一维小波包分析等。可以根据实际信号分析的需要，选择其中的一种或多种分析方法。本次实验的超声信号是一维连续信号，故采用了一维连续小波分析，在对信号去噪方面，选择了一维小波去噪功能。调出小波分析工具箱的方法是在 MATLAB 命令行中输入 wavemenu 回车即可。

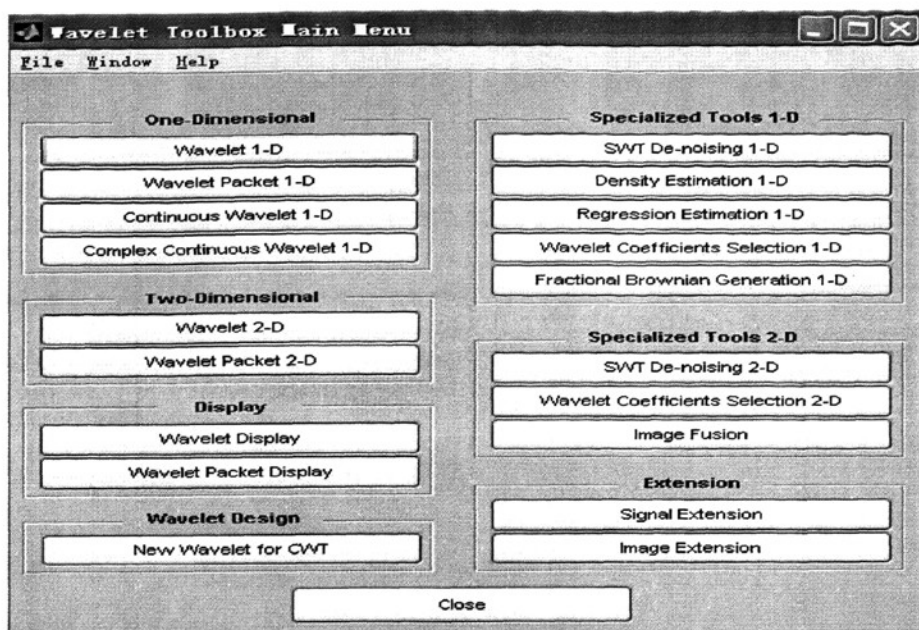


图 4.9 小波分析 GUI 界面

4.2.2 信号去噪

运用小波分析进行信号噪声消除是小波分析的一个非常重要的应用之一。超声探测信号里包括超声波发射信号、反射信号和噪声信号。当选择小波并确定分解层次时，噪声部分通常包含在高频中，对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理。最后根据小波分解的低频系数和经过量化后的高频系数进行小波重构，达到消除噪声的目的，即抑制信号的噪声，在实际信号中恢复真实信号。

在实际工程中，有用信号通常表现为低频信号或较平稳的信号，噪声信号则表现为高频信号，所以消噪过程可按以下方法进行处理^[34]。

首先对实际信号进行小波分解，选择小波并确定分解层次为 N ，则噪声部分通常包含在高频中，然后对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理，最后根据小波分解的第 N 层低频系数和经过量化后的 $1 \sim N$ 层高频系数进行小波重构，达到消除噪声的目的，即抑制信号的噪声，在实际信号中恢复真实信号。小波去噪的实现流程图如图 4.10 所示。阈值选取准则的确定是小波阈值去噪过程中较为关键的因素。

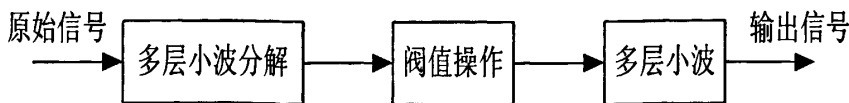


图 4.10 小波去噪的实现流程图

对于小波去噪流程中的阈值操作，除了阈值函数的选取之外，另一重要的步骤就是阈值选取准则的确定。阈值选取准则主要有以下四种：(1) rigrsure; (2) sqtwolog; (3) heursure; (4) minimaxi。具体情况如表 4.2 所示。

表 4.2 阈值选取准则

阈值选取准则	
-rigrsure	采用史坦(Stein)无偏似然估计原理(Sure)进行自适应选择
-sqtwolog	固定的阈值形式，它等于 $R\sqrt{2*\log(\text{length}(s))}$
-heursure	启发式阈值选择
minimaxi	用极大极小原理选择的阈值

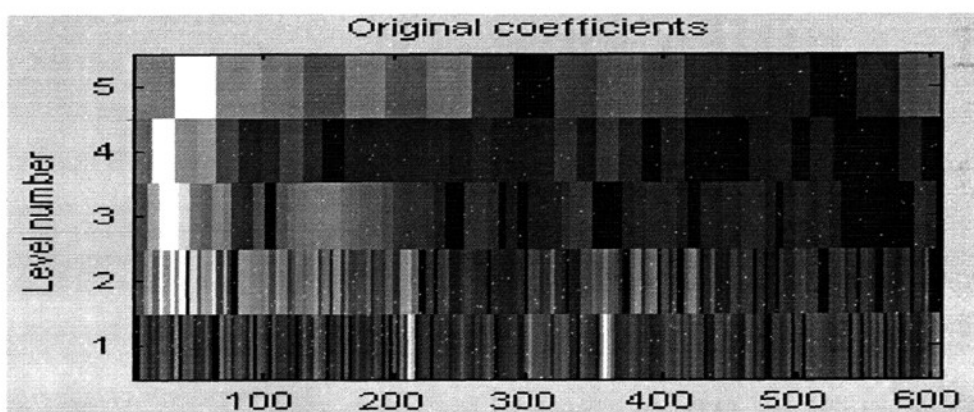
对于表 4.2 的四种阈值选取准则，-sqtwolog.采用的是固定阈值形式，它在噪声为白噪声的情况下对信号进行去噪可以得到较为理想的结果，但它的阈值风险要比理想选取风险大；-rigrsure 是一种软阈值估计器，它通过选取小于 $R\sqrt{\log_e N}$ 的阈值来减少阈值风险，通过最小化风险的估计，可以计算自适应于数据的阈值；-heursure 是启发式阈值选择，是最优预测变量阈值选择；-minimaxi 则产生一个最小均方差的极值，而不是无误差。

上述四种阈值选取准则在实际应用中各有优缺点，在小波去噪过程中，无论选择哪种阈值选取准则，必须根据具体应用来选择一种合适的准则以达到较为理想的去噪效果。值得注意的是当信号 $f(n)$ 的高频部分在噪声域很小时，阈值规则

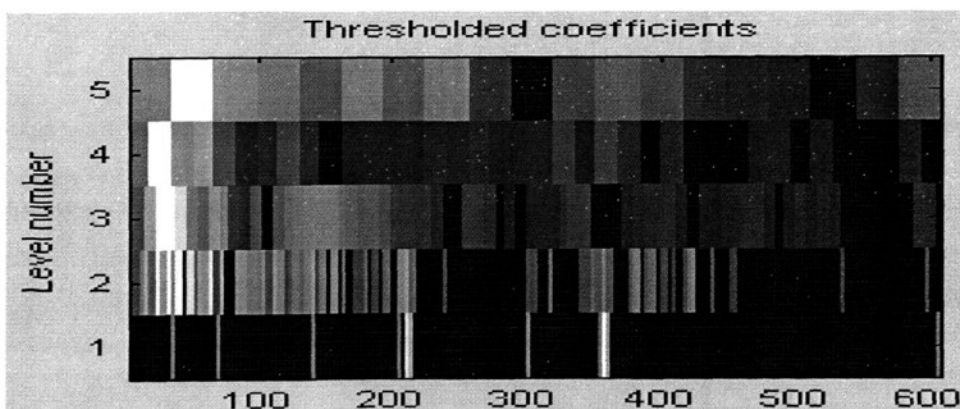
-Minimaxi 和-Rigrsure 更加保守(即不容易丢失信号中的有用成份)和更方便一些;另外两种阈值选取准则去除了较多的有用信号。

4.2.3 超声信号的小波去噪结果

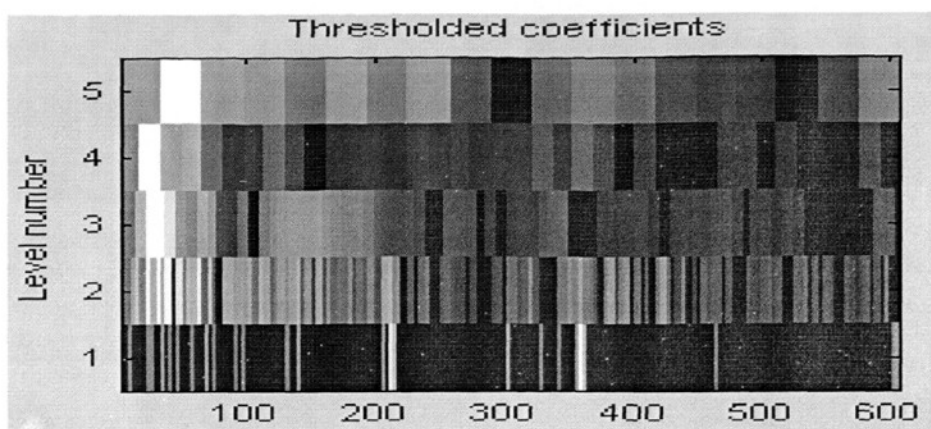
运用 Matlab7 小波变换工具箱中的 Wavelet 1-D 图形工具, 对所载入的信号做如下设置: Wavelet: db6; Level: 5; 然后选择 De-noise 功能, 在该功能下选择不同的阈值准则, 并设置如下参数: Select thresholding method——Minimax; Soft; Selectnoisestructure——Unscaledwhitenoise; 改动 Wavelet 选项中的小波设置, 得到如图 4.11 所示的去噪结果。其中 (a) 是原始信号没有经过去噪所得到的小波系数图, (b) — (e) 为基于不同去噪条件下的小波系数图。



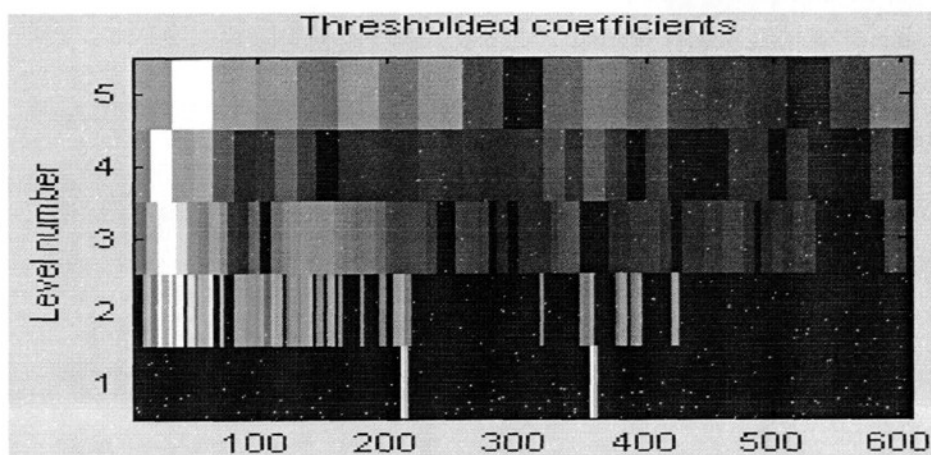
(a) 原始信号



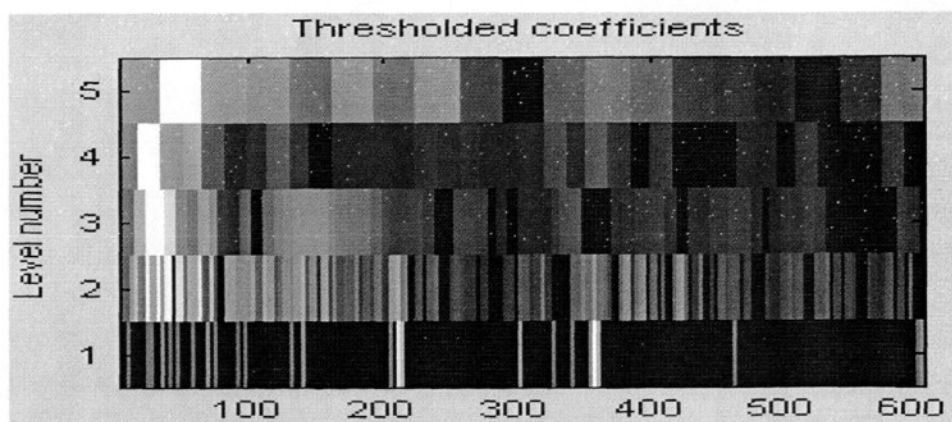
(b) 极大极小阈值



(c) 启发式阈值



(d) 固定阈值



(e) 自适应阈值

图 4.11 阈值选取准则不同的去噪结果

加噪信号与选择不同小波基做处理后的去噪信号，它们的统计特征（均值、标准方差、均方差）是不同的，其值如表 4.3 所示，统计特性中标准方差的大小可以作为评价信号去噪好坏的指标之一，其值越小说明去噪效果越好。

表 4.3 加噪信号及不同小波基去噪信号的统计特性

	加噪信号	小波基的选择.			
		Db6	Db4	Bior6.8	haar
均值	0.56440	0.5644	0.6099	0.6136	0.5644
标准方差	13.01	6.628	6.565	5.593	6.764
均方差	8.802	1.215	1.341	1.146	1.262

由上面的图 4.11 和表 4.3 可知：db6 小波在去噪信号的某些统计特性方面优于 haar 和 db4 小波；从去噪的图形方面则优于其它三者，其图形的平滑性更优；而且 db6 小波对信号进行去噪处理时，能够在基本不损失信号主要能量的同时能有效的滤除干扰噪声。通过用不同的小波函数不断的实验和反复的分析比较，确定了 db 小波系中的 db6 小波函数作为小波阈值去噪过程中的小波基函数。

4.2.4 超声波信号的小波快速分解

将超声回波信号装载进入 Matlab 软件才可进行分析，装载的关键程序步骤如下：

```
%采样频率
fs=100000;
fid=fopen('f:\work\data.dat','r');
ys1=fscanf(fid,'%g');
fclose(fid);
%时域波形
figure(1);
plot(ys1);
```

回波信号的图形见图 4.8 所示。从原始信号中很难识别或提取信号的特征，进

而判断材料的缺陷程度。因此，需要将原始信号进行处理，这里采用小波变换，然后再进行损伤判别。选用 db6 小波对被检信号进行变换。以下是对该信号进行 5 层分解，分层所用的工具仍然是小波变换工具箱，选择一维小波变换按钮，导入原始数据，然后选择 db6 小波，分层层数为 5 层，所得信号经多分辨分析后的各层信息如图 4.12—图 4.17 所示。

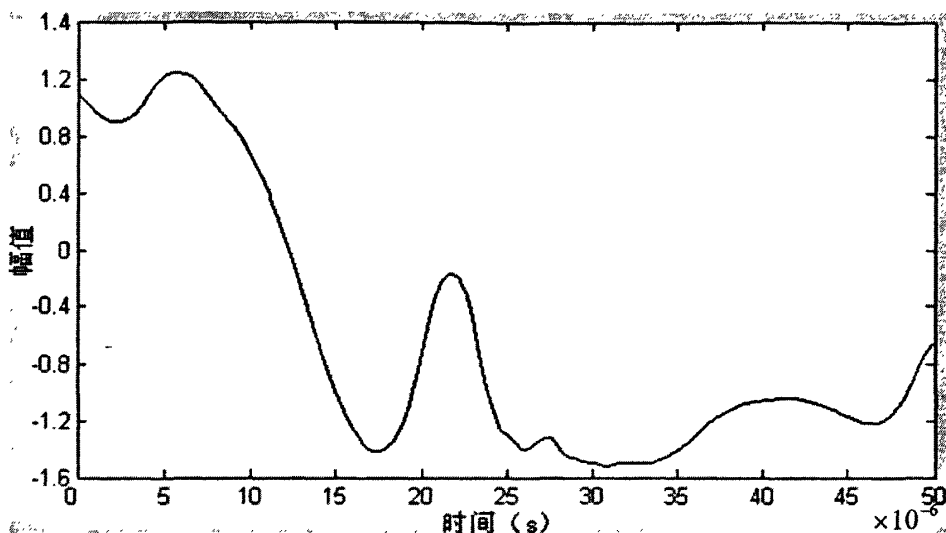


图 4.12 第 5 层低频信号分量

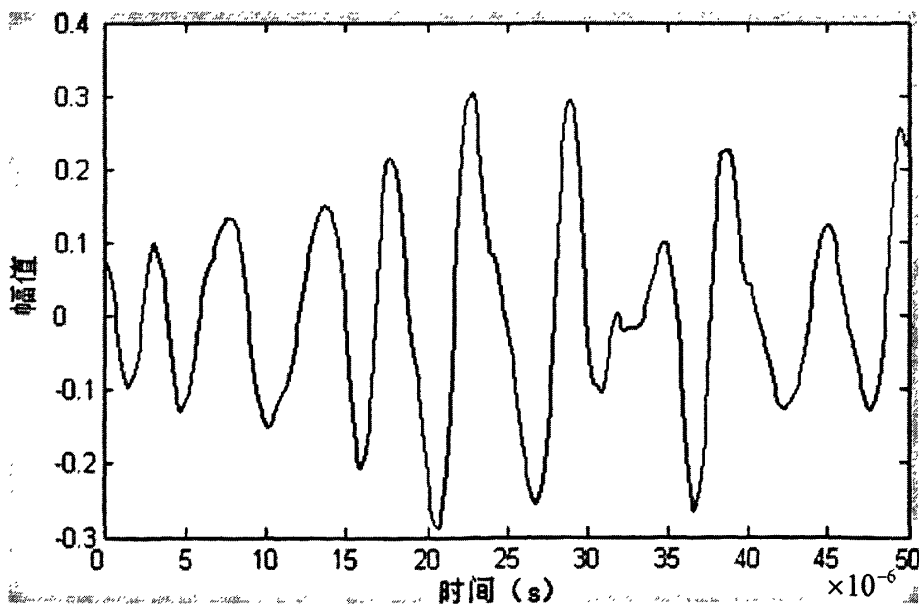


图 4.13 第 5 层高频细节分量

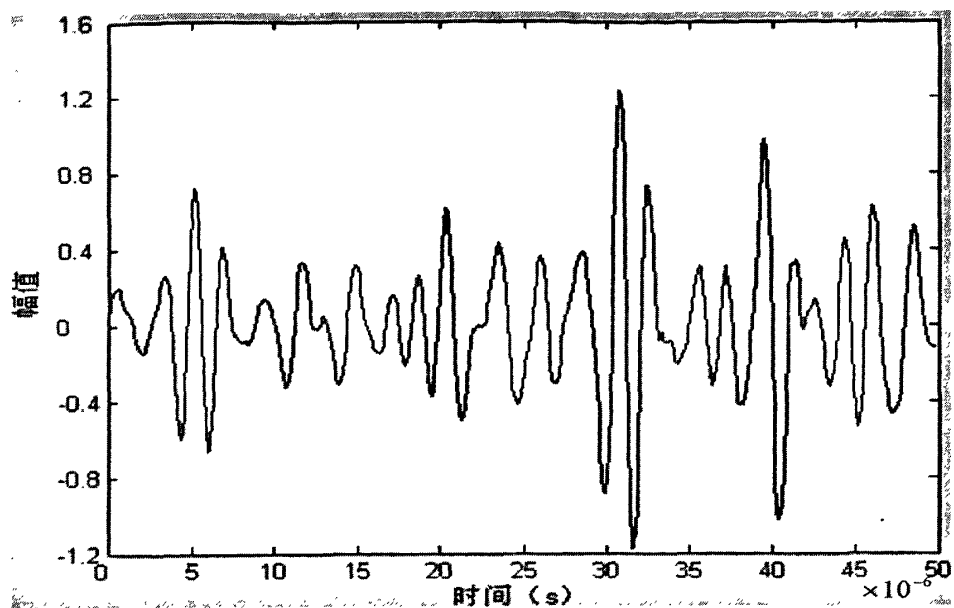


图 4.14 第 4 层高频细节分量

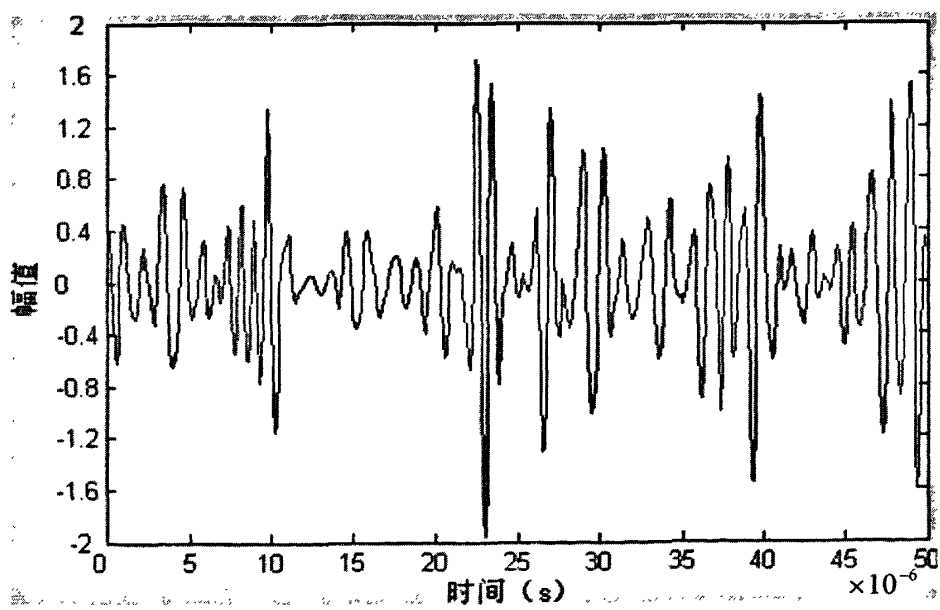


图 4.15 第 3 层高频细节分量

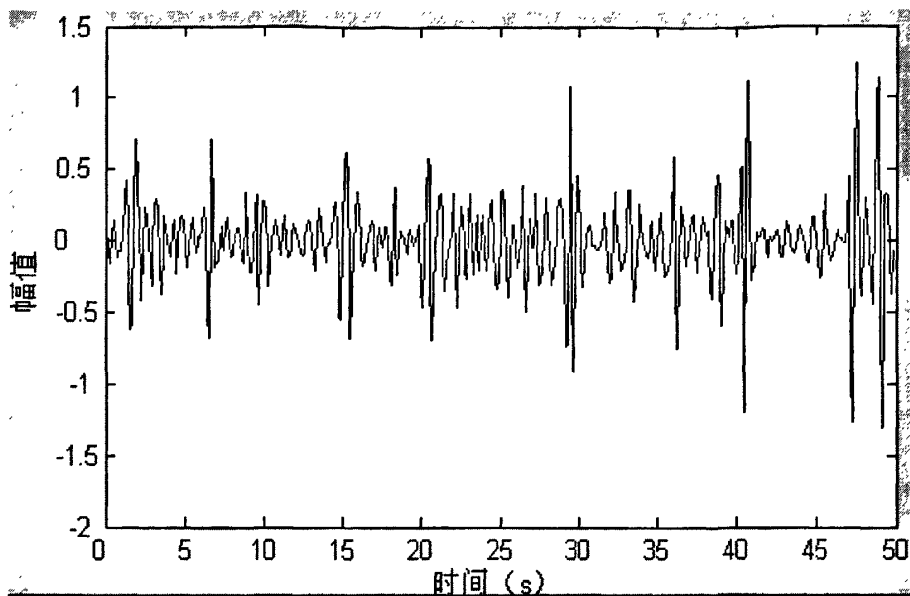


图 4.16 第 2 层高频细节分量

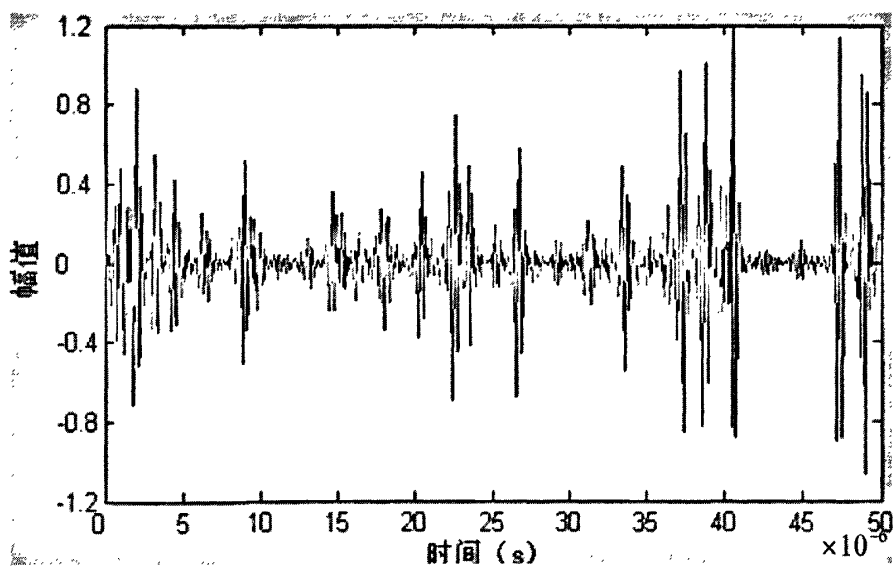


图 4.17 第 1 层高频细节分量

Db6 小波的分解层数越高，接收信号的平均信息（低频信息）和细节信息（高频信息）越清晰，且平均信息越接近原始信号，即第 5 层的低频细节代表的是超声波发射信号。第 1 层至第 5 层的高频细节反映的是发射超声信号在钢材内部及表面传播过程中所携带的信息，包含有自然噪声，钢材内部结构对信号的影响噪

声以及其它信息，对高频细节的分析就可以得出钢材内部是否存在缺陷以及缺陷所在的位置。第 1 层的细节信息相对其它层细节信息来说是最清楚的，因此把这一层的细节信息单独分离出来并进行分析，根据该层信号变换的特点，可以判断超声信号中发生突变信号的位置或时刻，从而判断出材料缺陷所在的位置。超声信号是非平稳信号，信号幅值分布不均匀，但幅值大小大部分都在一定区域之内，每个频率上的值都是对称分布。可以观察到，信号的细节信息里有突变信号，这些突变信号出现在不同的频率上，且峰值有大有小。其中第一个突变信号发生在 8×10^{-6} s 附近，第二个和第三个突变信号发生在 15×10^{-6} s 附近和 18×10^{-6} s 附近，根据超声波在钢材中的传播速度为 5200m/s，可以计算出第一个缺陷的位置在 $8 \times 10^{-6} \times 5200 = 4.1\text{mm}$ ，第二和第三个缺陷位置在 7.8mm 和 9.4mm 处，按此规律，可以判断出其它缺陷的位置。信号的分布状况说明，突变信号的存在证明了试件材料存在缺陷，如果突变信号出现得越多即突变信号分布越密，说明试件受损的位置越多，受损范围越大。

根据以上分析可以说明，使用小波时频分析方法可以较准确地判断出钢材是否具有缺陷，缺陷所发生的位置。

第五章 结论与展望

近年来, 钢材在工程中的应用迅猛增长, 主要用于飞机制造、汽车制造、造船、化工、家具与电器设备等领域。然而, 在钢材零件的制造过程中有可能产生缺陷, 引起质量问题, 甚至导致整个构件的报废, 造成重大损失。并且, 钢材在加工过程中由于加工工艺不稳定, 其材料缺陷将无法完全避免。钢材的缺陷的位置可能出现在外部, 也可能出现在内部。对于外部缺陷, 我们可以通过直观肉眼观察法来确定缺陷的位置和大小, 来判断是否对后续加工带来影响; 而对钢材的内部缺陷则无法通过观察确定缺陷的位置, 在不破坏材料结构的前提下, 只有使用无损检测的方法和手段来对钢材内部缺陷进行检测。在检测中主要涉及到检测方法的选择, 检测仪器的选择, 信号的发射和接收, 接收信号的处理等主要工作, 其中关于信号处理的工作至关重要, 它能决定检测的结果是否准确有效, 特别对于实时检测要求比较高的环境, 信号处理的速度显得尤为重要。

本论文将小波时频分析方法用于钢材材料的无损检测研究, 而无损检测方法则采用具有缺陷定位准确、灵敏度高等优点的超声脉冲反射法。小波变换是近年来信号分析领域兴起的一种新的数学工具, 它已广泛用于图像处理、语音信号分析以及地震信号处理等领域。其基本原理是多尺度下的时频分析, 通过分析数据在不同尺度下的分解结果获得数据的各种特征, 达到信号分析的目的。MATLAB 软件中具有了较多的小波分析函数和命令, 并且包含小波分析工具箱, 用户可以使用小波分析的函数命令或者小波分析工具箱对信号进行分析处理。在本论文中, 使用了小波分析工具箱对超声回波信号进行消噪处理和多分辨率分析, 并将分析结果以图形方式显示出来。

脉冲反射法是无损检测中应用最广泛的一种超声检测方法, 它是一种利用超声波探头发射脉冲到被检测试块内, 根据反射波的情况来检测试件缺陷的方法。该方法简单实用, 操作方便, 检测仪器比较成熟, 具有较好的推广应用价值。脉冲反射法的基本原理是: 发射端在垂直于钢材一表面的超声波探头向钢材内部发射出一组超声波脉冲后, 接收端探头接收钢材内部缺陷和另一表面的回波, 探头首先接收到由钢材表面反射的回波, 随后接收到由钢材内部缺陷产生的回波称为缺陷波或一次底波、二次底波, 探头至管道壁内表面的距离 A 与管道壁厚度 T ,

可以通过前波时间，以及前波和缺陷波、底波或一次底波和二次底波的时间差来确定

本课题研究的主要任务是：

一是根据钢材中超声波检测的原理和超声波信号在钢材中传播的特点，分析了超声波检测钢材的模型，选择合适的检测指标，对钢材进行超声无损检测。超声信号在传播过程中随着传播距离的增加将产生能量衰减，接收端收到的是幅度小，能量低的回波信号。回波信号中包含了发射信号的特征，钢材内部结构特征和噪声。小波时频分析根本任务是对回波信号进行消噪处理，并检测出包含钢材内部结构特征的信息，根据这些信息来判断钢材内部是否具有缺陷，缺陷的位置在哪里。

二是详细分析超声检测系统中的超声波发射过程，超声波传播过程和超声波接收过程的特点，根据各个过程的特点，建立了数学模型。对超声波发射过程主要包括超声激励脉冲发生器、电缆和换能器三个部分，论文中选择了超声激励脉冲发生器所产生单频载波脉冲信号作为超声发射信号，发射信号经换能器直接投射到钢材内部中。同时使用 MATLAB 编程，仿真出反射信号的时域波形和频谱。

超声信号接收部分包括换能器、电缆和接收器。接收部分是发射部分的逆过程，接收换能器的输出信号可以看成是发射信号经两次换能器调制作用后得到的电信号，建立了其数学模型，并仿真出时域波形和频谱。

超声传播过程主要涉及到超声波强度的衰减，波形发生畸变等影响，其建模过程比较复杂，只能采用近似方法。同时超声波传播过程受到外界噪声的影响，这些噪声可用一加法性高斯白噪声来代替，使用 MATLAB 编程，画出了带有噪声的超声回波信号的时域波形。

三是对小波时频分析理论进行简要介绍，分析了在小波分析中小波基的选择原则和标准，比较了不同小波基在对称性、正交性、紧支撑性、支撑长度、时域波形等方面的特点，选择了 DB 小波作为超声回波信号时频分析的母函数。

四是对超声回波信号进行小波消噪和分辨率分析。小波消噪的目的是消除回波信号中混杂的部分噪声信号，小波消噪的结果主要由小波母函数和消噪阈值二者共同决定的，因此选择小波母函数和阈值是该部分的核心内容。加法性噪声是一非平稳信号，其统计特性与小波基呈对应关系，小波基不同，其消噪后信号的统计特性就不同。我们给出了 DB6, DB4, Bior6.8 和 Harr 小波基下加法性噪声信号

的均值,标准方差和均方差,通过比较可以看出,DB6小波在对信号进行去噪处理中,能够在基本不损失信号主要能量的同时能有效的滤除干扰噪声。

小波多分辨率分析是分析非平稳信号最有力的方法,它是基于多尺度分析的快速小波塔式算法,奠定了离散小波变换信号处理、图像处理等领域的应用基础。其基本思想是:将信号分解为近似部分和细节部分,随着尺度由大到小变化,从而可以由粗及精地观察信号。分解尺度越多,信号细节部分显示出的特性就越明显,而信号的近似部分就接近信号的原始部分。小波多分辨率分析是在MATLAB中的小波分析工具箱中进行的,将超声回波信号在DB6小波基下进行5层分解,得到了1-5层的细节部分(高频部分)和第5层的近似部分(低频部分),通过分析第1层的细节部分,可以判断出钢材内部结构发生变化的位置,即缺陷的位置,然后根据超声信号在钢材中传播的速度,计算出缺陷的位置。

实际上,以上判定缺陷位置虽较为方便可行,但还是存在一定的缺陷,比如:缺陷位置的判定只限于分层缺陷,对于其它类型的缺陷该方法失效;该方法虽能判别缺陷发生的位置,但没有定量的给出缺陷的大小和范围。而且,每次判别需要富有经验的专业人员投入一定精力去分析判断,却不能让无经验者一目了然。得不到推广应用。

在超声检测系统仿真方面,仿真的检测过程不具有通用性,不能适合不同的超声检测手段,而只是一种特例。仿真的模型也是概括性理想化的,并不能非常接近实际检测环境。虽然存在这么多的问题,但本论文的研究方法和思路也为超声检测系统的虚拟仿真提供了方向,为今后的研究打下了基础。

本文认为,接下来的任务是:继续探讨比较可靠有效的超声检测系统的建模方法,使之与实际环境更加吻合,采用更科学先进的仿真技术,完成超声波信号,材料结构等各个过程的建模仿真;在不同缺陷类型的试件上进行实验研究,找到一种能同时判别不同种缺陷类型以及能确定缺陷面积大小的数字信号处理方法;将数字信号处理方法同人工智能神经网络结合起来,设定缺陷的判定规则并输入人工智能神经网络进行训练。经过训练的网络能够判定缺陷的位置和大小,同时输出结果,让人一目了然,能让更多的非专业人员参与使用。

如果这些问题解决了,那么超声检测系统就可以实现实时在线检测功能,那么超声无损检测又将向前迈进一步。

参考文献

- [1] 刘镇清, 陈广. 超声无损检测中的谱分析技术. 上海: 无损检测[J], 2001, 23(2): 85~88
- [2] 万升云. 铸钢件超声波探伤频率的选择及缺陷波形分析. 铸造技术[J], 2003, 5: 441~443
- [3] Charles K, Chui. An introduction to wavelets[M]. Boston: Academic Press, 1992, 77~80
- [4] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] 王小民, 李明轩. 复合材料的超声检测与评价. 北京: 应用声学[J], 1998, 17(6): 107~110
- [6] 鲁大伟, 李书. 小波变换在层板实时损伤检测中的应用. 北京航空航天大学学报[J], 2003, 29(11): 1047~1050
- [7] 李世强. 离心球墨铸铁管球化率和壁厚的超声检测研究: [硕士学位论文]. 大连理工大学, 2007, 12
- [8] Li X, M Lin, L Lei, et al. Evaluation of Thickness for NiCrAlY Coatings Sprayed on The Superalloy by Using Ultrasonic Spectral Analysis[J]. Key Engineering Materials. 2004
- [8] A bbate A. Application of wavelet transform signal processor to ultrasound[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 1992, 41(4):1147~1152
- [9] 齐魏. 基于小波神经网络木材缺陷类型超声检测机理的研究: [硕士学位论文]. 东北林业大学, 2005
- [10] Fairouz Bettayeb, Tarek Rachedi, Hamid Benbartaoui. An improved automated ultrasonic NDE system by wavelet and neuron networks[J]. Ultrasonics, 42(2004),853~858
- [11] ByoungGK, SekyungL, KishiT. Time-domain reflection field analysis for ultrasonic evaluation of thin layered media[J]. NDT&EInternational. 1996, 29(5): 317~320
- [12] 李含璞. 基于时频分析的线性调频信号检测, 仪器仪表学报[J], 2006, 3:

1245~1246

- [13] 董建华等. 几种时频分析方法的比较及应用, 工程地球物理学报[J], 2007, 10: 312~316
- [14] 黄晶, 阙沛文. 小波分析在管道缺陷超声检测中的应用. 传感技术学报[J], 2003, (3) : 263~266
- [15] 邹晓红. 小波分析在超声回波测量中的应用. 传感器技术[J], 2005, 24(7): 78~81
- [16] 杜文正, 黄先祥, 谢建等. 小波奇异性检测在超声信号处理中的应用. NDT 无损检测[J], 2005, 26 (6) : 319~321
- [17] YY Wang, etal. Detection of flaws in Sand wich Plates[J]. Composite Structure. 1996, 34: 409~418
- [18] 李世强. 焊接缺陷超声检测信号的小波分析与处理: [硕士学位论文]. 西安科技大学, 2003, 4: 11~26
- [19] JENN-YEUNIEH, JUNNI, L.JAMESLEE. Hot Plat welding of polypropylene part process simulation[J]. Polymer Engineering and Science, 1998,38(7): 1133~114
- [20] 袁慎芳, 陶宝祺, 朱晓荣, 石立华. 应用小波分析及主动监测技术的复合材料损伤监测. 测试技术学报[J], 2003, 17 (4) : 363~366
- [21] 谢常欢, 何湘铂, 陈国华, 张新梅. 小波分析在裂纹型缺陷超声无损定量检测中的应用研究[J]. 试验研究, 2005, 21 (4) : 5~9
- [22] 黄晶, 阙沛文. 小波分析在管道缺陷超声检测中的应用. 传感技术学报[J], 2003, (3) : 263~266
- [23] 许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [24] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [25] 金长善. 超声工程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- [26] V.Schmitz, K.J. Langenberg, S.Chakhlov. Calculation of high frequency ultrasonic signals for shear wave insonification in solid material[J]. Ultrasonics 42(2004), 249~252
- [27] 程正兴. 小波分析算法及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- [28] 张晓春. 小波变换及其在无损检测中的应用. 上海: 无损检测[J], 1997, 3: 61~63

- [29] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论及 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [30] Rhim J.Loo S W.A Network approach for damage detection and identification of structures[J]. AIAA, 94217532CP. 1994, 1994,173~182
- [31] 张维蕴等. 超声检测系统的建模研究. 计算机仿真[J], 2006, (23) : 78~80
- [32] 李衍. 超声相控阵技术. 无损探伤[J], 2008, 10 (5) : 25~34
- [33] Marcus Engholm, Tadeusz Stepinski. Designing and evaluating transducers for narrowband ultrasonic spectroscopy [J]. NDT&E International 40(2007): 49~56
- [34] 葛哲学, 陈仲生. MATLAB 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006

致 谢

值此论文完成之际，衷心感谢导师刘璐教授给予的悉心培养和指导。刘老师渊博的知识、睿智的思维、严谨的治学态度和高尚的人格对我影响至深。在论文写作过程中，碰到了很多的难点和疑点，对小波的理解以及应用都比较模糊，刘老师从不同的角度给我解释和讲解，指明了论文中需要研究的重点方向，使我的论文得以继续下去，最终按时完成任务。在此再次向刘老师表示深深地敬意和衷心的感谢。

同时感谢电子教研室所有老师对我的帮助和支持，感谢各位同学的关心和帮助，正是大家的帮助，使我顺利完成了论文工作。

最后，向对在百忙中抽出时间和精力审阅本文的专家和教授表示衷心的感谢！

房曙光

在读期间发表的文章

- [1] 超声检测的建模与仿真. 教育交流. 2009. 第一位

小波时频分析方法在超声波信号处理中应用

作者: [房曙光](#)
学位授予单位: [山东大学](#)

相似文献(7条)

1. 学位论文 [刘春](#) [数字信号处理在超声波探测和无损探伤中的应用研究](#) 2003

该文沿着这样的目标,针对超声波探测和超声波无损探伤的数字信号处理进行了应用研究,其主要内容是设计并实现了以Motorola DSP56824为基础的40kHz空气声纳实验系统,以及研究了针对采用超塑成形扩散连接工艺的部件的超声波无损探伤信号的处理算法,所实现的空气声纳实验系统使用了巴可码发射信号,提高了精度和可靠性。在超塑成形扩散连接工艺的自动化评估系统中,对于信号的去噪和参数估计,针对不同模型采用了子波变换和去卷积的算法;对信号的分类识别,采用了几何特性、神经网络及时频分析与图像处理相结合的方法。对于每一种模型假设和算法,均进行了仿真试验,并应用于实际信号,其结果证明了各种算法的有效性。

2. 期刊论文 [陈荷娟](#),[马宝华](#) [水中近距超声波探测器发射信号电路的设计](#) -[兵工自动化](#)2001, 20(4)

水中近距超声波探测器用于深弹接近目标的探测和引爆。根据多卜勒频偏检测原理,该探测器由发射机、转换电路、接收机和信号处理电路构成,发射信号是设计的关键。其时钟产生电路采用1MHz晶体振荡器,产生500kHz超声波脉冲;分频控制电路以500kHz为填充频率的脉冲信号,经过同步检波后变为多卜勒频偏值,作为填充的脉冲信号;发射信号电路考虑与水听器匹配,采用双发射管并联结构。这种高频非周期窄脉冲信号,具有频率高、能耗小、波长短、绕射现象小、方向性好、发射器体积小等优点,特别适合应用于深弹复合引信中。

3. 学位论文 [郑吉华](#) [水中超声波接收机自动增益和信号处理技术](#) 2007

火箭深弹是传统、有效的常规反潜武器,特别是它非常适合近海反潜。本文以火箭深弹新型多作用体制引信为应用背景,主要就引信声近炸模块主动超声波探测接收机信号处理电路进行了研究,目的是提高接收机对回波的处理能力,从而提高引信探测目标能力和近炸精度。

首先分析了火箭深弹新型引信声近炸模块的工作原理,对影响引信声近炸性能的因素作了研究,着重研究了增强超声波探测接收机性能的关键技术,即接收机自动增益和信号处理技术。

本文在分析自动增益控制AGC原理的基础上,采用集成运放OP37和数控增益衰减器AD7111A设计可数字控制的可变增益运放模块;采用高速A/D转换器LTC1405作为回波信号检测模块;采用复杂可编程逻辑器件CPLD作为核心控制模块,构成数字自动增益控制电路,并设计粗调和细调步进控制相结合的算法,对回波信号的增益进行精确而快速的调节控制,使回波信号幅值快速稳定在设计指标范围内,利于接收机后续信号处理电路对回波信号作进一步的处理。对该增益控制算法作了功能仿真和性能分析,验证了其可行性。

在分析信号混频原理基础上,设计基于CPLD的数字混频器;通过对混频后的带通滤波器设计的探讨,采用LTC1068单元式开关电源滤波部件设计了具有高选择性的带通滤波器,获得频谱纯净的多普勒频偏信号,利于后续检波电路对回波识别,提高接收机对回波的处理能力。

本文对接收机信号处理电路的研究设计,能够达到预期的目的,对今后的进一步研究火箭深弹声近炸引信具有一定的参考价值。

4. 学位论文 [姜萍萍](#) [人体胃肠道生理参数无创检测及胃肠压力信号处理识别方法研究](#) 2005

当前,胃肠动力障碍性疾病是临床常见病。反映胃肠动力学特性的胃肠运动生理参数检测及结果分析已成为动力障碍性疾病的重要诊断方法。作为消化系统三大基本生理功能之一的胃肠运动功能的研究同样依赖于消化道运动生理参数的检测和分析。但到目前为止,还没有一种方法能在无需清肠禁食的正常生理条件下对整个胃肠道运动生理参数进行长时间动态实时监测。这一现状不仅大大制约了临床对动力性疾病的诊断效果,也导致长期以来医学界对健康者和患者胃肠运动及其变化规律的不完全了解和掌握,对肠道动力性能的评价缺乏科学、客观、公认的“金”标准。因此本文将致力于解决人体消化道运动生理参数的无创获取、信号分析处理及利用等问题。

本文以国家自然科学基金资助项目和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目为依托,首先研究了人体胃肠道运动生理参数的无创检测方法,力图解决正常生理状态下,人体胃肠道温度、压力和pH值的长时间实时监测问题,为临床胃肠动力性疾病的诊断提供有力工具,为人体胃肠运动功能研究和胃肠动力性能评价提供定量依据。以此研究为基础,进一步探讨了压力检测信号的可行性和特征矢量对模式分类的有效性。

研究了基于压力信号特征矢量的胃肠动力性能智能诊断方法。采用GHSOM自组织神经网络和有导师监督学习算法(LVQ),对信号的特征空间按所代表的运动形式自组织的聚类,全部类群经监督学习并贴上类别标签后,就形成了从信号的特征矢量到胃肠动力性能诊断结论(正常或异常)之间的映射关系,从而为医生确定胃肠动力障碍发生与否及发生的具体肠段提供参考。为提高分类系统的有效性,本文还提出了改进的基于加权欧氏距离的GHSOM网络设计。

基于人体消化系统是典型的非线性动力学系统这一事实,研究了将非线性动力学方法应用于压力信号分析,计算了结肠慢传输型便秘患者和健康测试者的压力信号的多个非线性指标,包括Lorenz散点图、功率谱、关联维、李雅普诺夫指数和测度熵,尝试从动力学系统的角度出发解释计算结果及产生差异的原因,探讨了这一方法在深刻揭示消化系统动力学特性和辅助动力性疾病预防和诊断的可行性。

尽管本文提出了利用消化道无创检测系统及其检测结果实现消化道动力性能研究和辅助诊断的方法,但整个系统距离临床实用还有一定差距,在论文的最后,对整个论文的工作和研究成果进行了总结,并提出了下一步的研究工作内容。

5. 学位论文 [陈久久](#) [超声波透射法数据信息处理](#) 2003

本文首先将混凝土无损检测作了一个较全面的论述,并介绍了超声波检测的物理基础和信号处理的基础知识,为今后在这方面的更深一步的研究提供了基础。接着用物理实验的方法对超声波无损检测准确性进行了验证,通过数据分析可知声时、声幅可以比较好去判断和分析混凝土的特性,主频可以作为辅助手段,再接着用信号处理的手段对超声波的波形数据信息的处理进行了尝试,为非金属超声波探测仪智能化提供帮助。其次介绍了实际工作中超声波检测时遇到的检测管不平行的原因、检测管弯斜的类型以及检测管弯斜对超声波透射法检测数据的影响。根据其影响的原因,用了三种方法对其进行处理,得出异常特征推理消除法比较好的消除检测管不平行带来的影响。并介绍了桩身各类缺陷的判别式。为后面的超声波透射法的全自动智能化资料处理编程打下的基础。最后用工程实例验证了异常特征推理消除法的优点。

6. 会议论文 [刘春](#),[郑雪帆](#),[梅文博](#) [一种基于Motorola DSP56824的空气声纳](#) 2002

本文介绍了一种基于Motorola DSP56824的空气声纳系统。该系统使用40kHz超声波传感器,采用Motorola DSP56824进行信号处理。通过参考雷达系统中的概念和同类声纳设计,系统采用双巴可码发射体制,提高了测距精度和分辨率。

7. 学位论文 [李旭 无线电汽车防追尾告警技术研究](#) 2004

随着汽车工业的蓬勃发展以及汽车数量的日益增多,汽车防撞技术的研究已经成为提升汽车智能化水平的关键,对保障人民生命财产和提高运输业的经济效益起着非常重要的作用.该文针对汽车防追尾问题,在高速公路大雾天气的特殊情况下,主要利用超声波探测技术,提出了一套汽车防追尾告警系统方案,并从软硬件两个角度对方案的可行性做了详细的说明.首先,简单叙述了系统实现的原理和系统的硬件结构,然后,结合系统中各主要部分的任务,详细介绍了信号处理的各个步骤:通过实验比较,并结合接收信号的特点,选用带通滤波器、比例放大器、相干检波等技术对信号进行预处理;然后对获得的多卜勒信息进行采样和频谱分析;最后,用比较直观的形式显示数据结果,以及时准确地告警.该文主要开展了以下几个方面的工作:1.利用超声波探测技术,提出了一套基于超声波测速的汽车防追尾告警系统方案;2.以相干检波一般模型为基础,采用AD633模拟乘法器和有源低通滤波器实现了对多卜勒信息的提取;3.采用TMS320LF2407 DSP对信号的采集与FFT处理分别进行了研究;4.研究了基于FPGA的汽车防追尾告警系统信号采集与处理的实现方案,其仿真效果良好.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1562578.aspx

下载时间: 2010年5月31日