

武汉科技大学

硕士学位论文

金属薄板的超声兰姆波无损检测

姓名：王杜

申请学位级别：硕士

专业：材料加工工程

指导教师：陈贻宏

20070501

## 摘 要

与常规超声波无损检测相比,兰姆波检测具有快速高效的特点,非常适合于板形结构的大面积无损检测。尽管金属薄板的无损检测是兰姆波技术的最早应用领域,但是由于兰姆波理论及检测机理的复杂性,此项技术至今仍未取得重大突破,还存在许多不一致的观点和未解决的问题,大大地限制了它在工业生产中的应用。

首先采用短时傅立叶变换(STFT)对薄钢板中的兰姆波检测信号进行模式识别。通过对比缺陷前后信号的时域、频域以及时频域特征参数,从而对薄板中的模拟缺陷进行无损检测以及研究不同形态的缺陷对兰姆波传播的影响,并对模拟缺陷进行定位研究。其次推导出板中质点振动位移公式,并绘出各兰姆波模式的质点振动位移曲线,结合实验数据对目前还存在争议的关于质点振动与兰姆波对不同深度缺陷探伤敏感性之间是否存在对应关系以及存在何种对应关系这一问题进行了探讨。最后采用一种新的非平稳信号处理方法希尔伯特-黄变换(HHT)对兰姆波检测信号进行分析,提取了信号瞬时幅值这一新的特征参数并对其峰值数据进行线性回归分析,并从实验角度对采用这一方法研究兰姆波信号的合理性进行分析。

通过实验分析和研究,结果表明:(1) STFT能够对检测信号中的Lamb波模式进行有效识别。(2) 采用时域分析法和频域分析法以及STFT时频分析均能有效识别板中存在的孔型和狭缝型模拟缺陷。(3) 孔型缺陷不易使兰姆波产生模式转换,兰姆波的能量随孔型缺陷直径的增加变化规律简单;狭缝型缺陷容易使兰姆波产生模式转换,兰姆波的能量随狭缝型缺陷深度的增加变化规律复杂。(4) 时间延迟估计法和通过理论时频分布曲线计算法都可以对缺陷进行定位,相比较而言前者计算简单,后者定位精度高。(5) 初步确定质点振动位移垂直分量绝对值 $|V|$ 的大小与对应深度处孔型缺陷的反射兰姆波能量存在正比关系。(6) 采用改进后的HHT方法能够对多模式兰姆波信号进行有效分析。

**关键词:** 无损检测; Lamb波; 金属薄板; 短时傅立叶变换; 希尔伯特-黄变换

本文的研究得到湖北省自然科学基金(项目编号2004ABA019), 以及湖北省教育厅(项目编号2004D009), 宁波市自然科学基金(项目编号2006A610025)的资助。

## Abstract

Compared with the conventional ultrasonic nondestructive testing techniques, Lamb waves method is rapid and efficient and especially suitable for nondestructive testing of large plate-shaped structure. The nondestructive test in metal sheet is the most early application domain of Lamb wave technique, however, because of the complication of the theory and mechanism of Lamb waves, this technique has not yet achieved significant breakthrough. There are also a lot of inconsistent viewpoints and unresolved problems which have greatly limited its application in the industry.

Short-time Fourier Transform (STFT) is used to recognise the modes of Lamb waves propagating in steel sheet. By analyzing the signals of Lamb waves in time domain, frequency domain and time-frequency domain, the artificial defects is detected nondestructively, the effects of different defects on propagation of Lamb waves, and positioning of defects are studied. The vibration displacement formula is deduced and the vibration displacement curves of Lamb waves are plotted. Also, The relationship between the vibration mode and sensitivity of Lamb waves is discussed according to the experimental data. Finally, a new non-stationary signal processing method, Hilbert-Huang Transform (HHT), is apply to analysis the Lamb wave signals. Instantaneous amplitude is extracted to characterize the defects in metal sheet, the rationality of this method for Lamb wave signals analysis is also discused from experimental viewpoint.

Through experimental analysis and research, conclusions can be drawn as following: (1) Lamb wave modes can be effectively recognised by STFT. (2) hole-type defects and slot-type defects in the sheet can all be detected effectively by time domain analysis method, frequency domain analysis method or STFT method. (3)hole-type defects are not prone to cause mode conversion and Lamb wave energy changes simply with the increase of the diameter; slot-type defects are prone to cause mode conversion and Lamb wave energy changes complexly with the increase of slot depth. (4)Time-delay Estimation method and the method calculating by theoretical time-frequency distribution curves can both position the given defects, the former is simpler for calculation and the latter is preciser for positioning. (5) The direct proportion relationship between the vertical component of the vibration displacement and the energy of the reflected wave in this depth is determined primarily. (6) Multimode Lamb waves singels can be analysed effectively by improved HHT.

**Key words:** Nondestructive testing;Lamb wave;Metal sheet;Short-time Fourier Transform;

Hilbert-Huang Transform

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究的背景和意义

板形构件尤其是厚度在6mm以下的薄板件,无论是在航空航天工业、汽车工业、船舶工业,还是在压力锅炉,大型化工容器方面均有广泛的应用。但是由于板件在成形过程中所带入的缺陷,如分层,夹杂,孔形缺陷,裂纹等,都会对制件的使用安全造成威胁。同时板件由于外部加载以及使用环境的变化,都可能引起其内部细小缺陷源的扩展,进而造成疲劳破坏事故。因此需要对这类板形构件进行无损检测。作为五大常规无损检测技术之一的超声波无损检测技术常用来检测制件内部的缺陷,由于它的检测能力强,甚至可以深入几米深的金属内部,同时作用于材料的超声强度有足够的低,最大作用应力远低于材料的弹性极限,此外所需的设备简单,对制件以及周围环境没有危害和污染<sup>[1]</sup>,所以在无损检测中应用得非常广泛。超声检测是使超声波进入待测试件,通过超声波与试件的相互作用,就反射、透射和散射的波进行研究,从而对试件进行宏观缺陷检测。超声无损检测常用的是纵波(压缩波)和横波(切变波)检测,可是对于薄板(尤其是厚度2mm以下的薄板)无论是横波探伤还是纵波探伤都很困难。事实上无论是横波斜入射还是纵波垂直入射进薄板中,当超声波传播一定距离之后由于薄板上下表面的不断反射使得此时的超声波已不再是普通的横波或者纵波了,而是一种新的超声波形式即兰姆波(Lamb wave)。Lamb波是超声波无损检测中最常见的一种导波形式,与常规超声的逐点扫查不同,Lamb波检测一次扫查一条线,并且收发探头可置于试件的同一侧,这在很多场合下是方便的,所以Lamb波检测对于薄板无损检测具有纵波和横波难以比拟的快捷、高效的特点,非常适合于板形结构的大面积无损检测。

尽管金属薄板的无损检测是Lamb波技术的最早应用领域<sup>[2]</sup>。但是由于Lamb波理论及检测机理的复杂性,此项技术至今仍未取得重大突破,还存在许多不一致的观点和未解决的问题,如分层对Lamb波的散射机理,如何选择最佳探伤参数,如何克服有时可能发生的分层漏检,如何对缺陷进行定性、定量分析以及人工缺陷的选型等,这些都大大地限制了它在工业生产中的应用。国外有些大型钢铁公司曾在板材生产线上采用Lamb波自动探伤,但是效果不明显。美国材料试验学会标准(ASTM)及宇航材料规范(AMS)均提出对金属薄板探伤可采用Lamb波,但是对其具体实施方法却未涉及<sup>[3]</sup>。J·Krautkramer<sup>[4]</sup>在他的著名“超声检测技术”中也未提出具体的办法,只是指出:“最佳角度与波型往往是用缺陷已知的试件试验时凭经验求出”。由于Lamb波传播和反射机理的复杂性,国外对Lamb波无损检测至今尚未制订相关标准,国内虽已先后制订了两项国标和一项专业标准<sup>[5-7]</sup>,但是这并不能说明这些问题都已得到妥善解决,这些标准仍有许多争议甚至是错误的地方<sup>[8]</sup>。Lamb波不仅可以用于薄板检测,还可以用于各种复合材料的检测与健康评价、用于大型桥梁、压力容器和输油气管道的在线无损检测及安全监控,以及用于设计成全新概念的超声延迟线等<sup>[2]</sup>。对金属薄板中Lamb波无损检测技术的研究是基础,这对于Lamb波更深入的应用有着十分重要的意义。

## 1.2 金属薄板Lamb波无损检测概况及国内外研究现状分析

Lamb波的发现是在1917年。当时英国力学家兰姆(H. Lamb)按平板自由边界条件解波动方程,得到了一种特殊的波动解<sup>[9]</sup>。后人把这种波动命名为Lamb波以纪念它的发现者。超声Lamb波是一种在厚度与激励声波波长为相同数量级的声波导中(如金属薄板)由纵波和横波合成的特殊形式的应力波<sup>[10]</sup>,它在不同厚度及不同激发频率下会产生不同的传播模式。Lamb波有对称Lamb和反对称Lamb两种类型,而对应每种类型又有多种模态。它是板中的导波,通常也称“板波”。板波是个总名词,当板的上下界面在力学上自由时,这种特殊的波就叫Lamb波<sup>[11]</sup>。Lamb波进行无损检测和无损评价的早期研究主要集中于均质、各向同性的介质中<sup>[12]</sup>,目前主要用于复合材料、胶接结构等的无损检测和评价。但是由于Lamb波在激励、传播、接收以及信号处理方面的复杂性,大大限制了它在工业生产中的广泛应用,而所有这些特点都是由于Lamb波的多模式和频散特性所决定的。

20世纪40年代末,美国人 F. A. Firestone (此人也是超声探伤的发明者)首先将Lamb波应用于薄板探伤。后来美国通用电器公司的工程师D.C. Worlton<sup>[13]</sup>首先指出了铝和锆的频散曲线的模式特征可以应用于材料无损检测。随后的十年中,许多的研究机构和学者,如日本无损检测学会、日本科学家尾上守夫,德国科学家P. Holler等都对Lamb波进行较为深入的研究,证实了Lamb波技术作为无损检测方法有效性<sup>[14]</sup>。60年代,俄罗斯科学家I. A. Victorov出版了一本关于瑞利波与Lamb波的专著。1967年这本书被译为英文在美国出版,这是一本关于瑞利波和Lamb波的经典著作<sup>[15]</sup>。1978年Sachse等人探索了频散波的波数与相速度的测量,他们将频散信号进行傅立叶变换映射到频域,利用相位角的平移动,用相位频谱法计算出各个频率的相速度<sup>[16]</sup>。

20世纪80年代到90年代初期,人们开始将Lamb波技术应用于复合材料的缺陷检测。美国航空航天局(NASA)的Saravanos等人从理论及实验上证实了利用Lamb波检测复合材料梁结构的分层缺陷<sup>[17,18]</sup>。英国国防与评估研究机构的Percival和Birt则研究使用两种基本的Lamb波传播模式来检测材料缺陷<sup>[19]</sup>。20世纪90年代末,美国橡树岭国家实验室的Stephen W. Kerckel等采用贝叶斯参数估计对传播的多模式Lamb波进行了有效的分离,并对缺陷信号进行了成功识别<sup>[20]</sup>。

最近一些年,Lamb波被广泛应用于各向同性和各向异性材料的机构安全检测中<sup>[21-23]</sup>。在2005年,美国阿拉莫斯国家实验室已经把Lamb波应用在大型管道的结构安全监控系统SHMS(Structural Healthy Monitor System)中,通过采用更为先进且廉价的超声换能器材料MFC(Macro-Fiber Composite)代替传统的PZT(压电陶瓷晶片)材料,大幅地降低了成本,并且极大地提高了检测精度与效率<sup>[24]</sup>。

在国内,我国航空材料研究所李家伟等也对Lamb波探伤进行了广泛地研究<sup>[25]</sup>。尤其是中国科学院声学研究所应崇福、张守玉和沈建中用光弹方法对Lamb波的应力分布进行了直接观察,这是世界上首次对Lamb波的应力分布进行直接观察,他们还对Lamb波传播与散射进行了观察和研究<sup>[11]</sup>。同济大学声学研究所的刘镇清、他得安采用二维傅立叶变换对Lamb波模式的识别和相速度检测进行了研究,在一定程度上识别出传播的Lamb波模式<sup>[26]</sup>。

北京工业大学的郑祥明等对垂直耦合方式下单层铝板中的声—超声信号及多模式兰姆波的时频表示进行了研究,他们采用Cohen类等几种主要的时频分布对多模式Lamb波进行了对比研究,也在一定程度上识别出传播的Lamb波模式<sup>[27]</sup>。南京航空航天大学智能材料与结构研究所的袁慎芳教授研究小组研究了主动结构健康监控在航空领域的应用,利用神经网络的方法、小波变换方法、HHT方法提取出缺陷信号,进行在线监测<sup>[28-30]</sup>。

### 1.3 Lamb波无损检测的信号处理技术

Lamb波的主要特点就在于它的多模式和频散,在任一给定的激发频率下,至少存在两种Lamb波模式<sup>[31]</sup>,而各模式的相速度又随着激发频率的改变而发生变化,即频散。各模式的频散特性使Lamb波检测变得非常复杂,所以,Lamb波检测中很关键的一个方面在于缺陷信号的提取和精确的信号解释。从理论上讲,当超声波通过被测材料时,被测部分材料的不连续性或不均匀性(Discontinuity)信息就已隐藏在超声信号中,这就决定了信号分析与处理技术在超声应用技术中的重要地位。

目前,信号处理方法主要可以分为以下三类<sup>[32]</sup>:时域、频域、时频域。最早使用的也是最直观的是时域方法,如阈值法,相关法等,它通过分析信号中波包的到达时间、幅度变化等信息来对缺陷有无进行判定和确定缺陷的位置,具有操作简单、概念直观等优点<sup>[33]</sup>。但是采用这种信号处理方法对检测装置的精度要求高,即要求多次检测时的实验条件要保持高度一致,否则得到的信号波形由于存在时间偏差而不具有可比性。美国阿拉莫斯国家实验室的研究者Andy Thien、Heather Chiamori等就是采用时域分析法,把Lamb波应用在大型管道的结构安全监控系统SHMS中,实验中他们通过对比Lamb波凸缘反射波包幅值的衰减以及缺陷引起的波形畸变的到达时刻来进行缺陷识别和缺陷位置的确定,从而实现管道的快速高效无损检测。

而基于傅立叶变换的频域分析方法则是从频域观察信号组成。由于出现严重缺陷必然会导致结构的一些参数发生变化,通过频域特性的观察能较清楚地发现响应信号频率成分和频谱峰值的变化<sup>[34,35]</sup>,对于一些结构严重受损的情况,用频谱的方法观测检测信号不失为简单又有效的方法。但是时域和频域方法只适合于平稳信号,对于局部频率变化剧烈的非平稳信号是不合适的。而Lamb波检测信号属典型的非平稳信号,由于Lamb波的频散特性,使得单纯地从时域或频域都不可能详尽地揭示信号所包含的信息。Lamb波分析是一个需要同时观测时域与频域信息的过程。既要通过时域观察不同散射源引起的到达信号的位置、区分不同模式的波包成分,又要从频域进行观察确定信号的频率成分和频谱峰值的变化,判定不同频率信号的到达时刻、确定Lamb波传播的频散特性。因此,最理想的是采用时频分析对信号进行较全面的观察<sup>[36]</sup>。时频分析的引入,把Lamb波传感信号展开到二维时频空间上观察,可以同时观察信号在不同频率处的时间历程,能更精确、更本质、更全面地反映出分析信号的特征。

从二十世纪四十年代以来,时频分析就被受关注,如今已经取得很多成果,在工程、物理、天文学、声学、地球物理学、生物学、医学等领域得到了广泛应用<sup>[37]</sup>。时频分析的研究对象主要是非平稳或时变信号,其主要意图是描述信号的频谱成分是怎样随时间变化

的,研究并了解时变频谱在数学物理上的概念和含义。时频分析的最终目的是要建立一种分布,以便能在时间频率上同时表示信号的能量,得到这种分布后,就可以对信号进行分析处理,提取信号中所包含的特征信息。时频分析的方法很多,总体来说可分为线性表示方法和二次型表示方法两类<sup>[38]</sup>。其中线性时频表示主要有短时傅立叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)和小波变换(Wavelet Transform, WT)以及Gabor变换,它们能够提供较明确的物理意义,并且不会出现交叉项,因此更适合定量分析Lamb波检测信号。二次型表示方法主要包括Cohen类时频分布和Affine类时频分布<sup>[39]</sup>,其中Cohen类时频分布最典型的是魏格纳-维利(Wigner-Ville)分布。虽然它们改进了短时傅立叶变换的时窗和频窗分辨率矛盾的问题,但是又在分析中有引进交叉项干扰为后期信号的解释增加了难度<sup>[40]</sup>。国内外众多研究人员在应用时频分析方法来研究Lamb波信号方面做了大量的工作,如Prosser<sup>[41]</sup>采用PWVD方法对宽带Lamb波回波信号进行了分析,从实验中重演频散曲线,Marc<sup>[42]</sup>采用多种时频分析方法对宽带Lamb波回波信号进行了分析,并比较各种方法的优缺点。目前一些较成熟的时频分析方法的工具包已在信号处理领域得到较广泛的应用。NI的图形化虚拟仪器软Labview就有专门开发的时频分析工具包,Matlab也有与之相关的时频分析工具包<sup>[40]</sup>。

1996年,NASA的美籍华人Norden E. Huang(黄锷)等人独创性地提出了希尔伯特-黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT)<sup>[43]</sup>这种新的的信号处理方法,它被称为是近年来对以傅立叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破。HHT是分析非线性与非稳态的数据的又一新时频分析方法,可用于地震工程、地球物理探测、潜艇设计、结构缺陷检测、卫星资料分析、血压变化和心律不整等各项研究<sup>[44-46]</sup>。HHT方法是目前第一种不需要利用特定函数形式(如Fourier变换的三角函数,小波变换的小波基函数等)对数据进行分解的具有自适应能力的先进时频域信号处理方法<sup>[45]</sup>。该方法提出后引起信号处理界的广泛关注并获得了2001年度NASA的研究与设计大奖。HHT方法首先在海洋工程得以应用<sup>[47, 48]</sup>,随后扩展到地震信号处理、土木工程结构健康监测<sup>[49, 50]</sup>等领域。虽然目前HHT方法不尽完善,但在处理某些问题时,已显示出了其独特的优越性和强大的自适应能力。

本文将分别采用时域波形对比法、傅立叶谱分析法和时频分析中的短时傅立叶变换以及HHT变换来对Lamb波信号进行分析和处理,具体方法将在第四章、第五章和第六章中详尽揭示。

#### 1.4 全文的主要工作内容

本文旨在对金属薄板Lamb波无损检测系统进行研究,采用傅立叶谱分析、短时傅立叶变换和希尔伯特-黄变换等信号处理方法分别对Lamb波检测信号进行分析和处理,从而对薄板中的模拟缺陷进行无损检测以及研究不同形态的缺陷对Lamb波传播的影响,并对模拟缺陷进行定位研究。本文主要工作内容如下:

1. 进行Lamb波的理论研究,探讨Lamb波在结构中的传播特性以及检测原理,通过Matlab编程求解瑞利-兰姆方程,绘制出Lamb波频散曲线。
2. 对Lamb波检测方案进行研究,并组建薄板Lamb波无损检测系统。制作出人工缺陷

来模拟薄板中的缺陷。采用普通横波斜探头以及纵波直探头做为Lamb波激励和接收换能器，在薄钢板中激发出Lamb波。

3. 采用短时傅立叶变换对Lamb波检测信号进行模式识别，并通过对比不同缺陷形态下信号的时域、频域以及时频域特征参数得出不同形态的缺陷对Lamb波传播的影响。从而对板结构中不同类型的模拟缺陷进行检测，并对板中模拟缺陷的定位问题进行研究。
4. 推导出板中质点振动位移公式，通过实验初步验证钢板中质点振动位移与Lamb波对不同深度缺陷的敏感性是否存在对应关系以及探讨究竟存在何种对应关系。
5. 介绍希尔伯特-黄变换(HHT)这一新的信号处理方法的理论以及算法实现，并采用HHT对Lamb波检测信号进行分析处理，提取相应特征参数来识别不同缺陷对Lamb波传播的影响。最后通过与频谱分析方法对比，验证采用这种新的信号处理方法对Lamb波信号处理的合理性。



## 第二章 Lamb 波理论及其无损检测原理

### 2.1 Lamb波概述

Lamb波是1917年英国力学家兰姆按平板自由边界条件求解波动方程时得到了一种特殊的波动解而发现的。它是一种在厚度与激励声波波长为相同数量级的声波导(如金属薄板)中由纵波和横波合成的特殊形式的应力波<sup>[10]</sup>,它是板中的导波,通常也称“板波”。板波是个总名词,当板的上下界面在力学上自由时,这种特殊的超声波就叫Lamb波<sup>[11]</sup>。Lamb波定义为弹性扰动在自由边界板中的传播,是在具有两个平行表面的结构中由横波和纵波相互耦合而成的一种应力波。它的位移不仅发生在波的传播方向,垂直板的方向上也有。在无限均匀各向同性弹性介质中,横波和纵波分别以各自的特征速度传播而无波形耦合,而在板中则不然。在板的某一点上激励超声波,由于超声波传播到板的上、下界面时,会发生波形转换。经过在板内一段时间的传播之后,因叠加而产生“波包”,即所谓的板中Lamb波模态。Lamb波在板中传播时,存在不同的模态,各种模态的叠加效果即为Lamb波。

根据板内质点振动位移的分布形态不同,Lamb波被分为对称型Lamb波和反对称型Lamb波,他们的传播形式如图2.1所示。同时对于不同类型的Lamb波,还有不同的阶次,通常用 $S_0, S_1, S_2, \dots$ 表示不同的对称型Lamb波模式, $A_0, A_1, A_2, \dots$ 表示不同的反对称型Lamb波模式。Lamb波在板中传播时,板中质点的振动轨迹是椭圆形的,质点的振动可以分解为水平分量 $U_z$ 和垂直分量 $U_x$ 。对称型Lamb波的特点是薄板中质点的振动对称于板的中心面,上下两面相应质点振动的水平分量方向相同,而在垂直分量方向相反,且在薄板的中心面上质点是以纵波形式振动的。反对称型Lamb波的特点是薄板中质点的振动不对称于板的中心面,上下两面相应质点振动的垂直分量方向相同,水平分量方向相反,且在薄板的中心面上质点是以横波形式振动的。

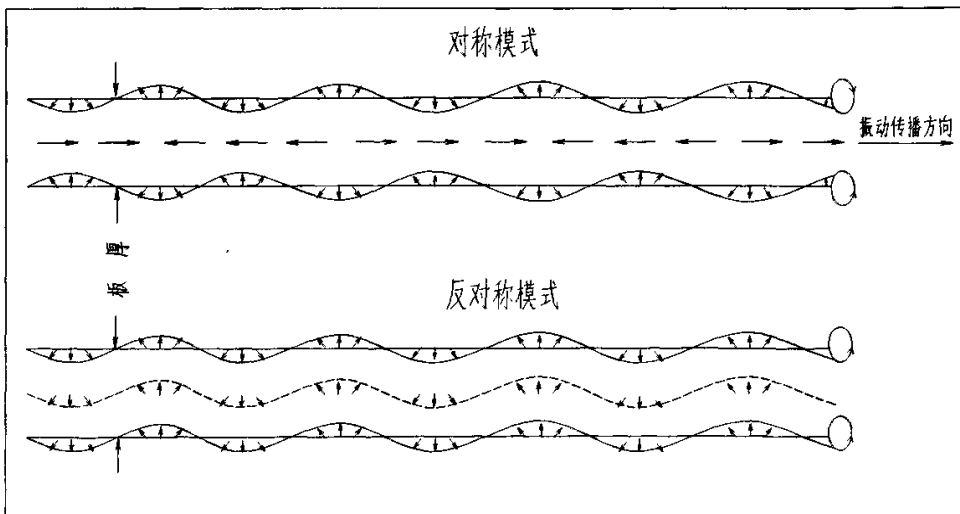


图2.1 对称型Lamb波和反对称型Lamb波

Lamb波是超声无损检测中最常见的一种导波形式,与常规超声的逐点扫查不同,Lamb

波检测时一次扫查一条线，并且收发探头可置于试件的同一侧，这在很多场合下是方便的，所以，Lamb波检测对于薄板检验具有纵波和横波难以比拟的快捷、高效的特点，非常适合于大面积板形结构的无损检测<sup>[6]</sup>。

## 2.2 Lamb波检测原理

一般采用超声波换能器耦合在板的表面来充当驱动器和传感器。通过信号发生器来产生电激励信号，然后通过换能器底部压电晶片的逆压电效应把电激励信号转化为超声波信号，之后通过耦合剂进入被测薄板中，由于薄板自由边界的约束，此时在板中传播的就已经是Lamb波了，最后通过接收换能器底部压电晶片的正压电效应把超声波信号转化为电信号供我们进一步分析。Lamb波在板中传播时，在如遇到基体组织发生显著变化的情况，类似分层、孔洞等缺陷时，会发生反射和散射现象，使得接收到的响应信号的波包幅值、频率成分以及模式可能会发生变化。这时基体组织中的缺陷信息就会包含在响应信号之中，通过对响应信号进行采集，分析提取出其中所包含的缺陷信息，就可以对缺陷的存在、当量大小、类型以及位置等进行判别，从而实现对基体材料的无损检测与评价。

## 2.3 Lamb波传播特性

Lamb波的传播特性十分复杂，主要体现在它的频散特性以及多模式现象，所谓的频散特性就是Lamb波的速度随频率的变化而发生改变，而多模式现象就是同一频率下对应着不止一种Lamb波模式。各模式的频散特性使Lamb波检测变得非常复杂，大大限制了它在工业生产中的广泛应用。为了更好的应用Lamb波，必须从理论上对它的传播特性进行深入理解。

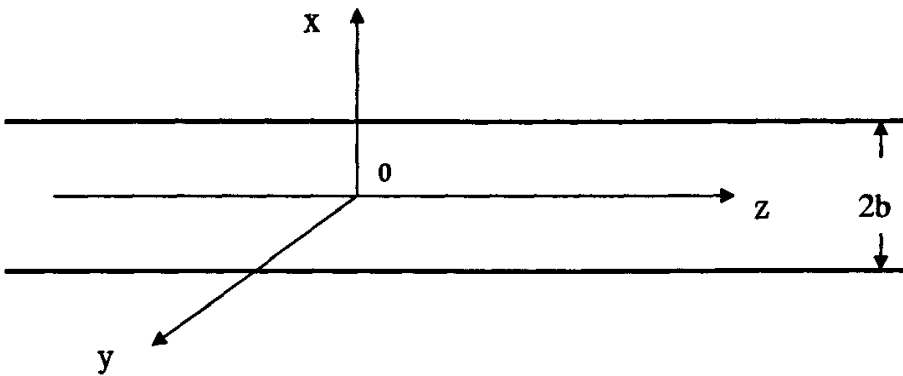


图2.2 大薄板坐标系的建立

现在我们来推导Lamb波波动特性方程。考虑一块在y和z方向为无限大，而在x方向的厚度为2b的固体平板，如图2.2所示，b与超声波波长的数量级相接近。假设板外是真空，板的上下两面因此是自由的。按照基本传播方程，板内的波应满足波动方程(2.3.1)和(2.3.2)：

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.3.1a)$$

$$\nabla^2 \Psi_i = \frac{1}{c_i^2} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial t^2} \quad (2.3.1b)$$

而  $\Phi$  和  $\Psi_i$  满足边界条件:

$$\sigma_{xz} = 0 \quad \text{在 } x = \pm b \text{ 处} \quad (2.3.2a)$$

$$\sigma_{xx} = 0 \quad \text{在 } x = \pm b \text{ 处} \quad (2.3.2b)$$

由于沿  $y$  方向所有声学量没有变化, 所以  $\partial/\partial y = 0$ ,  $u_y = 0$ , 于是有  $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0$ 。这时可以令  $\Psi_x = \Psi_z = 0$ 。设声波在时间上是简谐的, 则波动方程的解可以写作:

$$\Phi = (A \cos k_{0l}x + B \sin k_{0l}x)e^{-i(\omega t - k_0 z)} \quad (2.3.3a)$$

$$\Psi_y = (C \cos k_{0s}x + D \sin k_{0s}x)e^{-i(\omega t - k_0 z)} \quad (2.3.3b)$$

式中,

$$k_{0l}^2 = \left(\frac{\omega}{C_l}\right)^2 - k_0^2, \quad k_{0s}^2 = \left(\frac{\omega}{C_s}\right)^2 - k_0^2$$

$k_0$  是沿  $z$  方向的波数, 它是待定的量。引用边界条件(2.3.2), 可以得到确定待定系数

A、B、C、D 的方程组。我们先把  $\Phi$  和  $\Psi_y$  分解成对称模式:

$$\Phi^s = A \cos k_{0l}x e^{-i(\omega t - k_0 z)}, \quad \Psi_y^s = D \sin k_{0s}x e^{-i(\omega t - k_0 z)} \quad (2.3.4)$$

和反对称模式:

$$\Phi^a = B \sin k_{0l}x e^{-i(\omega t - k_0 z)}, \quad \Psi_y^a = C \cos k_{0s}x e^{-i(\omega t - k_0 z)} \quad (2.3.5)$$

因为,

$$u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi_y}{\partial x}, \quad u_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_y}{\partial z} \quad (2.3.6)$$

所以这里对称或反对称最终反映在  $u$  的  $z$  分量  $u_z$  上。如上分解后, 分别把式(2.3.4)和式(2.3.5)代入边界条件(2.3.3), 以得出确定系数 A、B、C、D 的联立方程。A、B、C、D 要有非平凡解, 联立方程系数矩阵的行列式必须为 0。由此, 可以得出下列关系式:

对称模式:

$$\frac{\tan k_{0s}b}{\tan k_{0l}b} = -\frac{4k_0^2 k_{0l} k_{0s}}{(k_0^2 - k_{0s}^2)^2} \quad (2.3.7a)$$

反对称模式:

$$\frac{\tan k_{0s}b}{\tan k_{0l}b} = -\frac{(k_0^2 - k_{0s}^2)^2}{4k_0^2 k_{0l} k_{0s}} \tag{2.3.7b}$$

式(2.3.7)就是著名的瑞利—兰姆(Rayleigh-Lamb)方程<sup>[10,11]</sup>，式中各参数的意义为：  
 $k_0$ ：沿板水平方向的波数， $b$ ：1/2板厚， $\omega$ ：角频率， $\omega=2\pi f$ ， $C_l$ ：纵波速度(常数)，  
 $C_s$ ：横波速度(常数)。

2.4 Lamb波相速度频散曲线的数值求解

式(2.3.7)就是描述Lamb波波动特性的方程，这两个超越方程看起来容易令人误以为很简单，事实上并非如此。虽然瑞利—兰姆方程早在19世纪末就已经导得，但直到20世纪六十年代才由Mindlin<sup>[51]</sup>详细地揭示。

这组方程决定了Lamb波是多模式、频散的，即 $k_0$ 与 $\omega$ 的关系不是线性的，而且不同的模式有不同的非线性关系。由于 $k_0$ 与 $\omega$ 的关系不是线性，声相速 $C_p = \omega/k_0$ ，因此不是常数，而是随频率的变化而发生改变。所谓相速度就是指声波相位变化的速度。Lamb波的这种特性反映在相速度—频厚(频率与厚度的乘积)平面内就表现为一系列曲线，这些曲线就是Lamb波的相速度频散曲线。人们一般不用 $\omega$ 作为 $C_p$ 的自变量，而常用 $b\omega/\pi$ ，即 $fd$  (其中 $d$ 为板厚)作为自变量。 $fd$ 称为频厚积，可以认为它是包含了板厚 $2b$ 的归一化频率。采用Matlab编程对上述瑞利—兰姆方程进行数值求解，得到相速度频散曲线，如图2.3所示。本文实验中采用的是Q235热轧薄钢板，所以在计算中取纵波速度 $C_l=5940\text{m/s}$ ，横波速度 $C_s=3240\text{m/s}$ 。

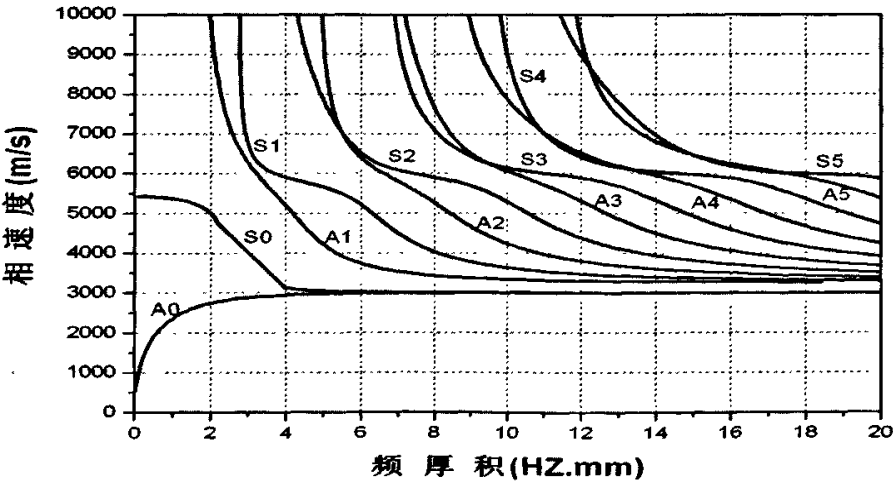


图2.3 Q235热轧钢板中相速度频散曲线

2.4.1 群速度频散曲线和激发角曲线

具有有限带宽的脉冲声波，在薄板波导中将以群速度

$$c_g = \frac{d\omega}{dk_0} \tag{2.4.1}$$

传播，这个速度一般不同于相速度，所谓群速度就是Lamb波能量传播的速度，即Lamb波波包最大幅值的传播速度。如果把群速度随频率的变化反映在群速度—频厚平面内就得到了群速度频散曲线，群速度曲线可以通过相速度曲线导出。由于 $\omega$ 与 $k$ 的关系复杂，所以由公式(2.4.1)来求解群速度曲线比较困难。由于 $k_0 = \omega/C_p$ ，所以式(2.4.1)可以变化为：

$$c_g = \frac{d\omega}{d(\frac{\omega}{C_p})} = \frac{d\omega}{\frac{C_p d\omega - \omega dC_p}{C_p^2}} = \frac{C_p}{1 - \frac{\omega}{C_p} \cdot \frac{dC_p}{d\omega}} \tag{2.4.2}$$

由式(2.4.2)就可以通过相速度频散曲线来确定 $C_g$ 与 $fd$ 的关系，即可绘制出群速度频散曲线，如图2.4所示。

频散曲线是进行Lamb波检测中不可缺少的参考，如果用斜楔探头激发Lamb波，还可以由相速度频散曲线来计算Lamb波激发角曲线，即激发角—频厚积曲线，如图2.5所示。

$$\sin a = \frac{C_l}{C_p} \tag{2.4.3}$$

式中 $a$ 为纵波入射角，即激发角； $C_l$ 为透声斜楔中纵波传播速度； $C_p$ 为板中所激发的Lamb波相速度。一般地，透声斜楔材料为有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯)，其 $C_l$ 为2700m/s。

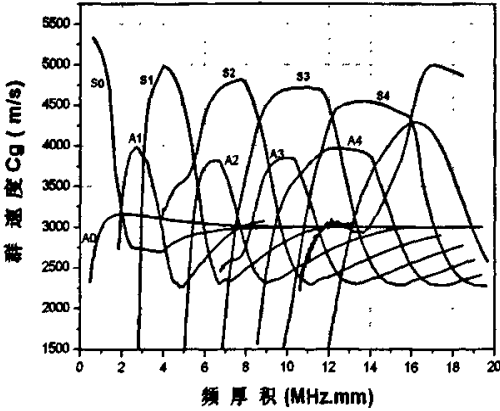


图2.4 Q235热轧钢板中群速度频散曲线

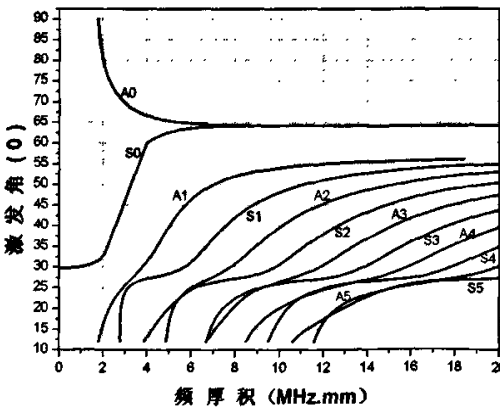


图2.5 Q235热轧钢板中激发角曲线

从图2.3、图2.4和图2.5中可以看出，薄钢板的Lamb波频散曲线有如下特点：

(1)除了 $S_0$ 模式外，其它模式均存在截止频率，在截止频率以上，Lamb波是正常传播的，在截止频率以下，它是凋落的。当激发的Lamb波频率低于某一频率时仅有 $S_0$ 模式可以被激

发以及传播。

(2)在任一频厚积处，会同时产生两种(或两种以上)的Lamb波模式，且各模式的相速度、群速度各不相同。随着频厚积的增大，可能激发出的Lamb波模式增加。

(3)各模式均存在频散现象，无论相速度还是群速度都随着频厚积的变化而变化。

(4)当采用斜入射法来激发Lamb波时，同一激发角可能产生不同的Lamb波模式。随着激发角角度的降低，可能激发出的Lamb波模式增加。

(5)由于有的模式在同一频厚积处的群速度相差无几，因此Lamb波在传播过程中可能会发生模式转换，即一种模式转换为与它群速度相近的其它模式。

2.4.2 Lamb波理论时频分布曲线

时频分布是在时间—频率空间(文中表示为时间—频厚空间)对信号进行描述的，它所表示的是信号在时频空间的能量分布密度，Lamb波的群速度是声波能量传播的速度，Lamb波群速度频散曲线是在速度—频厚空间描述Lamb波的能量传播特性的，所以，Lamb波的时频分布与群速度频散曲线应有一定的对应关系<sup>[27]</sup>。传播距离以两探头入射点之间的距离162mm计算，将图2.4所示的群速度频散曲线转换到时间—频厚空间，可得到各模式Lamb波的理论时频分布曲线(如图2.6所示)。这样就可以通过对比图2.6中的理论时频分布曲线和实际检测信号的时频分布图，从而识别出信号中包含的Lamb波模式。

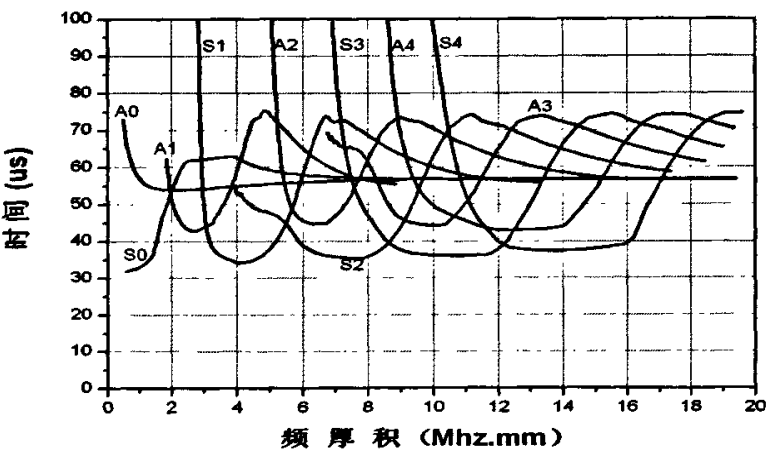


图2.6 传播距离为162mm时Q235热轧钢板中Lamb波理论时频分布

2.5 本章小结

本章首先简要介绍了Lamb波的基本理论和特点以及检测原理，重点探讨了Lamb波传播特性，通过Matlab编程对瑞利—兰姆方程进行数值求解，得到了Q235热轧钢板中理论频散曲线。通过分析频散曲线，表明Lamb波的传播特性十分复杂，主要表现在它的多模式和频散特性。即在任一给定的激发频率下，至少存在两种Lamb波模式，而各模式的相速度和群速度又随着激发频率的改变而发生变化，即频散特性。各模式的频散特性使得Lamb波检测信号变得非常复杂，同时Lamb波在传播过程中可能发生的模式转换也为后期的信号解释带来不便。

第三章 Lamb 波无损检测系统的组建

3.1 Lamb波的激发与接收

Lamb波信号的激发与接收主要有两种分类方式：(1)单探头式和双探头式。所谓单探头式也叫单发单收方式，即用一个探头既承担信号的发射任务，同时也要完成信号的接收任务。而所谓双探头式也叫一发一收方式，即用一个探头完成信号的发射任务，用另一探头完成信号的接收任务。现在还有采用多个换能器组成探头阵列来激发和接收Lamb波，即采用一个压电传感器作为激励传感器，用多个压电传感器作为接收传感器，组成多通道Lamb波检测系统。(2)纵波斜射法和垂直耦合法。所谓纵波斜射法即采用一定角度的透声楔(一般为有机玻璃)使纵波直探头以一定入射角度射入被测板中，这种激发方式与普通的横波检测方式相同。不同的Lamb波波型是通过选择不同的探头入射角来实现的。而所谓的垂直耦合法即用超声纵波直探头垂直耦合在被测板形件表面发射超声波，这种方法也被称为声—超声方法。垂直耦合时板中传播的超声波模式主要是多模式的Lamb波<sup>[52]</sup>。

目前还没有一种在结构中激发Lamb波的标准或最优方法。很多实验中采用的是干涉仪或激发器和接收器等设备来产生和接收Lamb波，由于这些设备比较昂贵，使用难度大。本论文中采用本课题组自行开发的12位A/D 100MHz采样Ultra-NDT超声发射/接收卡作为超声发生和接收设备。该卡将超声波发射与接收、高速A/D集合为一体，采用大规模现场可编程技术，大大降低了硬件配置和体积，降低了成本。同时该系统采用标准PCI长卡形式，只占用一个PCI插槽；12位A/D，最高100MHz的采样率，单卡即为一台通用数字化超声无损探伤仪；鼠标操作，全数字化调节，使用方便，而且检测结果可以存盘分析。本文分别采用不同中心频率的斜探头和直探头以单发单收、一发一收的方式进行检测，其中斜探头一发一收方式的实验装置原理框图如图3.1所示，其它方法实验原理框图类似。Ultra-NDT超声发射/接收卡所采用的激励信号为矩形尖脉冲，即采用的是宽带激发，因此产生的是宽带超声波，通过探头的逆压电效应作用于平板结构产生Lamb波，由于探头的选频作用在板中产生的是具有一定带宽的Lamb波。

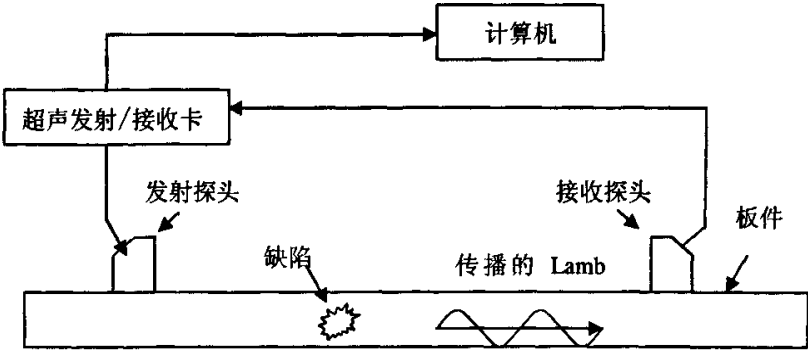


图3.1 斜探头一发一收方式的实验装置示意图

### 3.1.1 压电元件激励 Lamb 波

压电元件以其灵敏度高、动态范围较宽、既可作传感器也可作驱动器<sup>[53]</sup>，被广泛应用于智能材料与结构的各个领域。当压电元件被施加外力产生机械变形时，就会引起原本重叠的内部正负电荷中心产生相对移动而产生电的极化，从而导致元件两个表面上出现符号相反的束缚电荷，而且电荷密度和外力成比例，这一现象称为正压电效应。它反映了压电材料具有将机械能转变为电能的能力。通过检测压电元件上的电荷变化可得压电元件结构的变形量，从而反映与压电元件紧密相连的结构形变，此时的压电元件可充当传感元件的角色。在压电元件两端加电压，施加电场的作用，造成原本重叠的内部正负电荷中心产生相对位移，导致压电元件的变形。这一现象称为逆压电效应，它反映了压电材料具有将电能转变为机械能的能力，利用逆压电效应，可以将压电材料制成驱动元件<sup>[54]</sup>。在一般情况下，压电效应都是线性的，即外力作用下晶体表面产生电荷多少与形变大小成正比，外电场作用下晶体形变大小与电场强度成正比。

通常用于制作超声探头的压电材料分为压电单晶和压电陶瓷<sup>[55]</sup>。常用的压电单晶有石英( $\text{SiO}_2$ )、碘酸锂( $\text{LiIO}_3$ )、铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )等，压电陶瓷有钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )、锆钛酸铅(PZT)、钛酸铅( $\text{PbTiO}_3$ )、偏铌酸铅( $\text{PbNb}_2\text{O}_4$ )等。压电超声探头的种类繁多，用途各异，但它们的基本结构有共同之处。它们一般均由压电晶片、阻尼块、保护膜组成。此外，还必须与仪器相连接的高频电缆插件、支架、外壳等。普通超声波探头主要有斜探头(也叫横波探头)和直探头(也叫纵波探头)。超声探头又称超声波换能器，是激发和接收超声波的传感元件。为了更加全面地研究 Lamb 波，本文选用三种规格的探头，分别为汕头超声研究所生产的 2.5MHz 斜探头(型号为 2.5Z14 $\times$ 14K3)两只和山东济宁模具厂生产的 1.25MHz 直探头(型号为 1.25Z20)两只、2.5MHz 可变角探头(型号为 2.5P10 $\times$ 12 0 $\sim$ 80 $^\circ$ )两只。

### 3.2 Lamb 波无损检测实验系统

Lamb 波金属薄板无损检测实验系统由硬件系统和软件系统组成。其中硬件系统包括试验基体材料、压电探头、Ultra-NDT 超声发射/接收卡、工控机、各种传输线以及耦合剂等。实验的硬件系统组成如图 3.2 所示。



图 3.2 实验的硬件系统组成



图3.3是装在工控机PCI插槽上的Ultra-NDT超声发射/接收卡，它是超声发生和接收设备。图3.4是实验中采用的各种超声波探头及它们在检测时在被测板件上的布置。



图3.3 装在工控机PCI插槽上的Ultra-NDT超声发射/接收卡

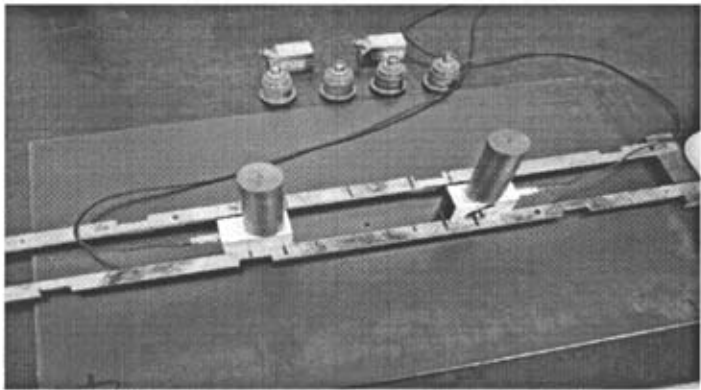


图3.4 使用的各种超声波探头

软件系统是利用本课题组自行开发的通用数字化超声检测系统，如图3.5所示，该软件包括信号采集设置，信号显示、存储以及数据处理等几个部分。

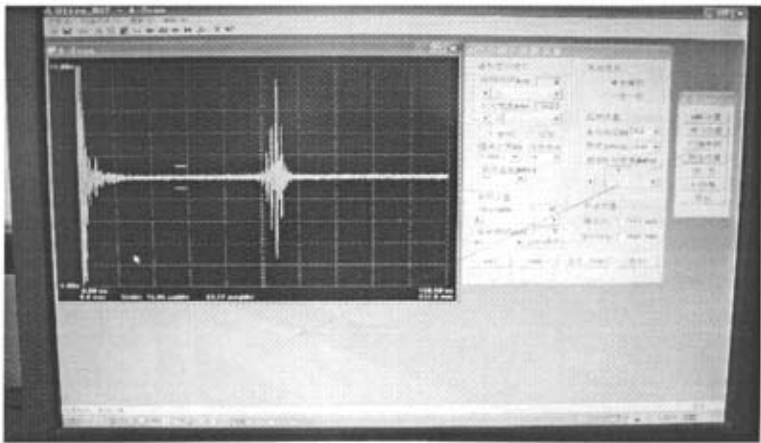


图3.5 软件系统面板

### 3.3 Lamb波激励信号

Lamb波在不同厚度板及不同激发频率下会产生不同的传播模式，而不同的传播模式对不同的缺陷会有不同的敏感性。因此，正确选择Lamb波的模式对缺陷探测十分重要。而激励信号是决定响应中所产生的Lamb波模式的主要因素。因此在Lamb波缺陷检测中，激励信号的选取是一个很重要的问题。总体来看，Lamb波激励方法按激励信号的频带宽度可分为窄带激励与宽带激励。以往采用的较为实用的、成熟的激励信号大多为窄带脉冲信号<sup>[24]</sup>，因为窄带信号的激励响应为简单平稳的信号，且频带窄易于分析，而宽带信号在材料中传播情况复杂，宽带激励响应一般为非线性非稳态信号，为信号的获取以及后期的分析带来很多不便。而最新的研究表明<sup>[60]</sup>，宽带激励响应对材料与结构的多种缺陷和多处缺陷的反应更敏感、更全面。

以往的采用超声Lamb波进行缺陷检测的工作一般集中在窄带脉冲信号的选取上，主要是选择脉冲信号的形状和中心频率，即在检测的过程中根据实际中的板结构的材料、厚度等因素来选取窄带激励脉冲信号的中心频率。式(3.3.1)是简化的窄带激励信号的数学表达式，即通过高斯信号包络正弦信号获得。正弦信号的频率为脉冲信号的主频。

$$u(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{a^2}} \sin(2\pi ft) \quad (3.3.1)$$

其中， $t_0$  决定产生信号的相位， $f$  决定产生信号的频率， $a$  决定产生信号的带宽。一般情况下， $a$  越小，信号的带宽越宽，即所在信号有效能量范围内包括的波动越少。

采用窄带激励的主要优点是能简化Lamb波在结构中传播的模式，使响应信号的成分简单，容易识别；但由于采用不同模式的Lamb波来发现距表面不同深度的缺陷的灵敏度不同<sup>[37]</sup>，因此，如果采用窄带激发，则需要采用不同频率的窄带信号来激发不同模式的Lamb波对结构进行全面地检测。如此以来确定使用哪一个频率附近的窄带激励信号变成了采用窄带激励检测缺陷的一个突出的问题。特别当结构复杂，如检测面积大、材料不均匀、厚度不一致、检测通道较多等情况下，不同的通道的物理状态不尽相同，它们对不同中心频率的激励信号敏感程度也不同，采用同一种频率的窄带激励信号很可能造成忽视那些对这一频率不敏感的通道经过的区域的检测。要权衡所有通道适用的频率，为窄带激励检测带来很多困扰。若同时采用多个频率的Lamb波激励信号对结构进行检测，可以避免采用单一频率窄带激励的不足，但是同一通道要进行多次检测，耗时较长，不适合在线使用。

采用宽带激励Lamb波来检测平板缺陷的主要思想，就是能从一次检测的宽带激励响应中，使用时频分析等信号等信号处理方法分析不同频段的结构响应，从而进一步全面地分析结构的缺陷情况，可减少检测次数，提高检测效率和检测精度。由于Lamb波的复杂性，当多模式和频散同时存在时，对检测信号进行识别通常是很困难的。所以在检测过程中，选择频率时往往选取模式少、频散现象不明显的频段。但是近期研究表明<sup>[56]</sup>，以前尽量避免的频散现象恰恰可以作为检测的重要参数，可以利用Lamb波的频散特性对分层和脱胶等危害复合材料的损伤进行检测。

将宽带信号激发Lamb波用于平板结构的缺陷检测是最近几年出现的, 由于基于宽带激励Lamb波的缺陷检测所采用的设备要求较高、信号处理工作复杂, 所以目前还没有得到广泛的应用。目前, 大量的工作集中在对宽带激励响应信号的分析上。正是因为宽带激发所具有的优点和广阔前景, 本文采用宽带激励方式来激发Lamb波。采用的激励信号为矩形尖脉冲, 即采用的是宽带激发, 因此产生的是宽带超声波。通过探头的选频作用使得在板中产生的Lamb波为具有一定带宽, 且频带处在探头中心频率附近。

3.4 Lamb波检测响应信号初步分析

图3.6给出的是在厚度为3.8mm的Q235热轧钢板上, 采用一发一收方式, 用中心频率为2.5MHz的斜探头(K值为3)激励出的Lamb波的时域波形图和傅立叶功率谱图, 时域信号的采样频率为50MHz。这块的钢板尺寸为300mm×120mm, 检测时两探头均摆放在钢板沿长度方向的中心线上, 两探头关于板的中心对称分布且它们的入射点之间距离相距为162mm。由于有用信号波包到达的时间在58μs到70μs之间, 所以为了分析的方便, 只截取有用信号部分来分析, 截取时间段为: 50μs到80μs。

图3.7给出的是在厚度为4.8mm的Q235热轧钢板上, 采用一发一收方式, 用中心频率为1.25MHz的直探头激励出的Lamb波的时域波形图和傅立叶功率谱图, 时域信号的采样频率为25MHz。这块的钢板尺寸为500mm×316mm, 检测时两探头均摆放在钢板沿长度方向的中心线上, 两探头关于板的中心对称分布且它们的入射点之间距离相距为135mm。由于最快的Lamb波模式的在板中要传播135mm的距离也需要25μs, 所以为了分析的方便, 同时减少初始脉冲带来的干扰, 只截取有用信号部分来分析, 截取时间段为: 20μs到140μs。

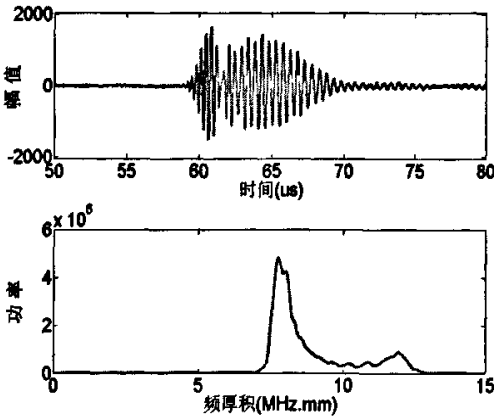


图3.6 3.8mm板中的无缺陷时的时域波形图及功率谱图

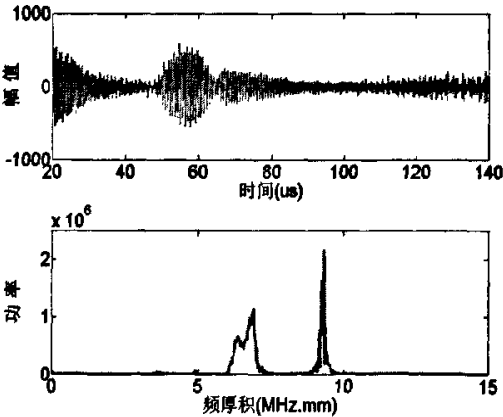


图3.7 4.8mm板中的无缺陷时的时域波形图及功率谱图

说明: 这里时域波形图的纵坐标单位为采样单位, 根据本文实验中采样卡的参数可知2048采样单位相当于1V, 所以如果要把数据转化到以电压为单位, 则需要把采集的数据除以2048。因为并不影响数据的分析结果, 所以这里以及下文所有实验中时域波形图的纵坐标单位均为采样单位。

由图3.6可以看出, 当采用中心频率为2.5MHz的斜探头作为收发探头时, 从时域波形

图(上图)分析有两个波包,但是无法确定信号中所包含的Lamb波模式成分。下图是检测信号的傅立叶变换后的功率谱图,从图中可以得出在信号中主要存在两种频率成分,且低频部分信号占主要,高频成分次之,由此可判断信号中可能含有两种模式的Lamb波但是不能识别出到底含有哪些Lamb波模式。从时域波形图中可以看出信号中的两个波包可能分别是某种模式的Lamb波,但是两个波包在时间轴上都延续了一段时间,即同一模式的Lamb波的到达时间是不一样的,这说明该模式的Lamb波的群速度随着频率不同是变化的,即验证了Lamb波的频散特性。从功率谱图中还可以得出,当采用斜探头作为收发探头来检测时,由于探头的选频作用,所产生的Lamb波的频带范围主要集中在探头的中心频率附近。

由图3.7可以看出,当采用中心频率为1.25MHz的直探头作为收发探头时,从时域波形图(上图)分析波包成分比较复杂,无法确定信号中所包含的Lamb波模式成分。下图是检测信号的傅立叶变换后的功率谱图,从图中可以得出在信号中主要存在两种频率成分,且高频部分信号占主要,低频成分次之,高频部分频带较窄,信号能量相对较高,低频部分频带较宽,能量相对较低,也不能从图中识别出信号中的Lamb波模式。从功率谱图中还可以得出,当采用直探头作为收发探头来检测时,由于探头的选频作用,所产生的Lamb波的频带范围也集中在探头的中心频率附近。当用超声纵波直探头垂直耦合在被测板形件表面发射超声波,作为模拟的声发射信号进行无损检测时,这种方法被称为声—超声方法。声—超声方法在被测板件厚度较薄时,板中传播的超声波模式主要是多模式的Lamb波<sup>[3]</sup>。从功率谱图中也可以验证所激发是多模式的Lamb波。

### 3.5 本章小结

本章首先简要介绍了Lamb波的激发与接收主要有两种分类方式以及超声波压电探头的正压电效应和逆压电效应。接着介绍本文的实验系统软硬件系统组成,对比分析了窄带激发和宽带激发这两种Lamb波激励信号的优缺点,本文选择采用宽带激发方式。最后采用宽带激励信号在薄钢板中激发出Lamb波,并对检测信号进行了初步分析,可知无论采用斜探头还是采用直探头在薄板中均能激发出Lamb波。同时验证了Lamb波的频散特性,即Lamb波的群速度随着激发频率的改变而发生变化。以及得出结论认为仅从时域或者频域都无法对Lamb波这一非平稳信号进行模式识别。

## 第四章 基于 STFT 的 Lamb 模式识别

Lamb波信号处理主要有以下两个方面内容：(1)模式识别，指通过一定的信号处理方法对检测信号进行有效识别，从而得到信号中包含的Lamb波模式。模式识别是Lamb波探伤参数选定及优化的基础，也是进一步进行缺陷检测的基础。由于Lamb波在板中的传播比较复杂，常常不止一种模式，且可能发生模式转化，因此进行有效的模式识别是十分重要的。(2)缺陷检测，指在模式识别的基础上经过进一步的信号处理，从Lamb检测信号的各种特征参数中提取缺陷信息，从而确定结构中缺陷的存在，以及缺陷的类型、当量大小，确定缺陷在结构中的位置，最后对检测结果作出无损评价，评估缺陷对板件寿命的影响。Lamb波的模式识别在本章中论述，缺陷检测部分将在下一章中展开论述。

### 4.1 非平稳信号与时频分析

在大量的科学和工程问题中，信号的统计量起着极其重要的作用，最常用的统计量为均值(一阶统计量)、相关函数与功率谱密度(二阶统计量)。此外还有三阶、四阶等高阶矩和高阶谱等高阶统计量。用统计量来叙述，各阶统计量与时间无关的信号称为平稳信号，而某阶统计量随时间改变的信号则称作非平稳信号或者时变信号。最常见的非平稳信号是自相关函数或者功率谱密度随时间变化的信号<sup>[38]</sup>。

分析和处理平稳信号的最常用也是最主要的方法是傅立叶分析。傅立叶变换建立了信号从时域到频域的变换桥梁，而傅立叶反变换则建立了信号从频域到时域的变换桥梁，这两个域之间的变换为一对一的映射。从上一章的图3.4中我们可以看出，时域和频域构成了观察一个信号的两种方法。傅立叶变换是在整体上将信号分解为不同的频率分量，而缺乏局域性信息，即它并不能告诉我们某种频率分量发生在哪些时间内，而这对非平稳信号是十分重要的。另外，傅立叶谱定义了统一的谐波成分，因此它需要许多额外的谐波成分来模拟信号，结果把能量扩展到了一个更宽的频率范围。更严重的是，傅立叶变换还产生了负的频率。所以，傅立叶谐波成分虽然具有数学意义但是并不真正具备物理含义。

在自然界和科学研究中，非平稳信号似乎无处不在，如我们说话的声音信号、鸟儿的叫声、人体的心电图信号、地震信号、雷达信号等等都是非平稳信号。对这些信号的研究导致了非平稳信号处理方法的出现。上世纪四十年代，非平稳信号分析的研究就已经开始了。1964年，Gabor<sup>[67]</sup>在他那篇题为“通信理论”的经典论文中强调指出：“迄今位置，通讯理论的基础一直是由信号分析的两种方法组成的：一种将信号描述成时间的函数，另一种将信号描述成频率的函数(Fourier分析)。这两种方法都是理想化的……。然而，我们每一天的经历——特别是我们的听觉——一直是用时间和频率两者来描述信号的。”本文所研究的Lamb波也是典型的非平稳信号。

时频分析的方法很多，总体来说可分为线性时频分析和二次型时频分析两类，线性时频分析主要有短时傅立叶变换(STFT)、小波变换(WT)以及Gabor变换，二次型时频分析主要有Cohen类时频分布和Affine类时频分布。其中Cohen类时频分布中最典型的的就是魏格纳-维利(Wigner-Ville)分布。短时傅立叶变换和小波变换的出现和发展为线性时频分析

开创了广阔的前景,它们能够提供较明确的物理意义,并且不会出现交叉项,因此更适合定量分析Lamb波检测信号。二次型表示方法虽然改进了STFT的时窗和频窗分辨力矛盾的问题,但是在分析过程中出现的交叉项为后期信号的解释增加了难度。国内外众研究人员在这方面做了大量的工作,Prosser采用PWVD方法对宽带Lamb波回波信号进行了分析,从实验中重演频散曲线,Marc采用多种时频分析方法对宽带Lamb波回波信号进行了分析,并比较各种方法的优缺点。目前一些较成熟的时频分析方法的工具包已在信号处理领域得到较广泛的应用。NI的图形化虚拟仪器软件Labview就有专门开发的时频分析工具包,Matlab也有与之相关的时频分析工具包。

#### 4.2 基于STFT的时频分析方法

为了研究信号在局部范围内的频率特性,1964年Gabor提出了著名的Gabor变换,之后又进一步发展为短时傅立叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)<sup>[38]</sup>。STFT的基本思想是:通过分析窗函数 $g(t)$ 把信号划分为许多小的时间间隔,并假定信号在窗函数 $g(t)$ 的一个短的时间间隔内是平稳的,用傅立叶变换分析每一个时间间隔,以确定在那个时间间隔内存在的频率。如果让窗函数沿着时间轴不断移动,便能够对信号逐段进行频谱分析。

连续信号 $z(t)$ 的STFT定义为

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [z(\tau) g^*(\tau - t)] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.2.1)$$

式中 $*$ 代表复数共轭。由定义可以看出,信号 $z(t)$ 在时刻 $t$ 的STFT就是信号 $z(t)$ 乘上一个此时刻以 $t$ 为中心的分析窗函数 $g^*(\tau - t)$ 所作的傅立叶变换,所以STFT就是信号 $z(t)$ 在分析时刻 $t$ 附近的局域谱。

对于任何实际应用而言,我们都需要将STFT离散化。为此我们考虑STFT在等间隔时频网格点 $(mT, nF)$ 处的采样,其中 $T > 0$ 和 $F > 0$ 分别是时间变量和频率变量的采样周期, $m$ 和 $n$ 为整数。令 $z(k)$ 为离散信号,于是得到STFT的离散化形式。

$$STFT(mT, nF) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} z(k) g^*(kT - mT) e^{-j2\pi(nF)k} \quad (4.2.2)$$

信号经过短时傅立叶变换之后就可以得到信号的时频表示,这样我们可以通过谱图(Spectrogram)来描述信号的时间-频率能量分布(即“瞬时功率谱密度”)。谱图定义为短时傅立叶变换的模数的平方。

$$SPEC(t, f) = |STFT(t, f)|^2 \quad (4.2.3)$$

STFT作为其他时频分析方法的基础,是应用最广泛、发展最成熟的时频分析方法,它概念明确,并且不会带入交叉项干扰,更适合定量分析非平稳信号,因此本章采用它来分析Lamb波检测信号。但它也有明显的局限性,即STFT的分辨率受不确定性原理即

Heisenberg不等式的制约, 不能同时得到最高的时间分辨率和频率分辨率<sup>[68]</sup>。

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (4.2.4)$$

式中的  $\Delta t$  和  $\Delta f$  分别称为时间分辨率和频率分辨率, 它们表示的是两时间点和两频率点之间信号的区分能力。当窗函数选定后, 若要得到较高的频率分辨率, 则要求选择的窗函数为时宽较宽的窗函数; 若要得到较高的时间分辨率, 则要求选择的窗函数为时宽较窄的窗函数。窗函数的选择对于短时傅立叶变换后的结果有重要影响, 选择合适的窗函数有利于得到和理论时频分布相符得很好的时-频构造。本文选择用Hamming窗作为分析窗函数。经过多次实验, Hamming窗的参数做如下选择时, 所得到的谱图的时间分辨率和频率分辨率达到较佳组合。窗函数的参数为:  $h = \text{Hamming}(\text{odd}(N/4))$ ;  $N = \text{length}(y)$ ; 其中  $y$  是Lamb波检测信号,  $h$  即为选取的分析窗函数,  $\text{odd}()$  函数为Matlab中自带的求奇函数。

### 4.3 Lamb波模式的识别

进行Lamb波探伤时, 关键是要确定最佳探伤参数, 这就要求必须首先选择适当的Lamb波模式。而Lamb波的主要特点就在于它的多模式和频散, 在任一给定的激发频率下, 至少存在两种Lamb波模式。即便是采用斜探头以某一固定角度的激发方式, 由于探头制造工艺偏差以及有机玻璃斜楔角度的微小偏差等等原因就可能破坏正常的相位关系以及产生多模式, 因而也不可能仅仅得到设想的单一模式。此外Lamb波在传播的过程中遇到端面产生反射以及在缺陷处产生散射都可能会发生模式的转换, 使入射Lamb波和接收到的Lamb波并不一定具有相同的模式。因此进行准确的Lamb波模式识别是十分关键的。通过上一章对Lamb波检测响应信号的初步分析可知, 由于Lamb波的复杂性, 仅在时域或者频域是不能识别出信号中包含的Lamb模式成分。

在Lamb波检测中, 常用的模式识别方法有动态光弹法、二维傅立叶变换、贝叶斯参数估计法和时频分析法。前面几种方法分别作简要介绍, 本文主要采用时频分析方法中的STFT来识别Lamb波模式。

#### 4.3.1 动态光弹法识别Lamb波模式

所谓动态光弹法回避了传统的电学测量方法, 直接从板的侧面观察了Lamb波的形成、传播、散射等过程, 并对它在板端面的散射做了理论上的分析。中国科学院声学研究所应崇福、张守玉和沈建中用光弹方法对Lamb波的应力分布进行了直接观察, 这是世界上首次对Lamb波的应力分布进行直接观察<sup>[11]</sup>。在他们进行的实验中, 从光弹照片辨别Lamb波的低阶模式是很准确的。但是高阶模式的情况不一样, 他们的应力分布比较复杂。此外, 激发单一的模式比较困难, 常会同时激发几个模式叠加在一起, 这时就只好分辨。采用动态光弹法, 他们大概可以识别出 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $S_0$ 、 $S_1$ 及部分情况下的 $S_2$ 、 $A_2$ 等几个低阶模式。

#### 4.3.2 二维傅立叶变换识别Lamb波模式

当被激励的不同模式Lamb波的群速度在激发频率范围内比较接近, 则进行Lamb波速度测量和模式识别就比较困难了。所谓的二维傅立叶变换就是将接收到的幅度-时间记录转

换为各个离散频率点的幅度-波数记录,从而分解出单个Lamb波,并可对其幅值进行测量<sup>[68,69]</sup>。二维傅立叶变换最大的优点就是可同时测量Lamb波的幅值和相速度。通过对接信号的二维傅立叶变换,得到其二维傅立叶变换的三维图象,再得到二维傅立叶变换的等高线图,然后与理论计算所得到的波数-频率的频散曲线进行对比,从而确定检测信号中所包含的Lamb波模式。这种方法能够在一定程度上识别出Lamb波模式,但是由于受二维傅立叶变换的分辨率的限制,尚不能在实验上将两个挨得很近的模式更清楚的检测出来<sup>[26]</sup>,而且这种方法需要对信号进行二维采样,对设备要求较高。

#### 4.3.3 贝叶斯参数估计法识别Lamb波模式

美国橡树岭国家实验室的研究者Stephen W. Kercel 等采用贝叶斯参数估计(Bayesian Parameter Estimation)对传播的多模式Lamb波进行了有效的分离<sup>[20]</sup>。他们认为“Lamb波其实存在于任何超声检测的地方。不同于一般体波,它们虽然仅受有限的边界条件限制,却产生了几乎是无限可能的模式。任何试图控制严格的初始激发条件以得到所需要的单一模式是花费昂贵的,在许多情况下也是不切实际的。Lamb波的频散揭示了材料的内在特性,但是要有效地利用这些信息,首先就需要识别其所包含的模式,并估计每一种模式的参数从而能分离出需要的模式。普通的模式分析方法都是使信号和一个线性的过滤器发生卷积,而卷积会使原信号变宽。换句话说,也就是线性过滤会使原叠加信号更加混淆不清。贝叶斯参数估计方法不是线性的,它是基于贝叶斯定理,实际的作用是使信号不同的部分分开而不是使其搅合在一起。在采用Lamb波对大量焊缝的探伤实验中,贝叶斯分离技术能够很好的识别并分离出不同的模式。”

#### 4.3.4 STFT识别Lamb波模式

时频分布是在时频空间(文中表示为时间-频厚空间)对信号进行描述的,它所表示的是信号在时频空间的能量分布密度,Lamb波的群速度是声波能量传播的速度,Lamb波群速度频散曲线是在速度-频厚空间描述Lamb波的能量传播特性的,所以,Lamb波的时频分布与群速度频散曲线应有一定的对应关系。当传播距离一定时,可将Lamb波的群速度频散曲线转换到时间-频厚空间,得到Lamb波的理论时频分布曲线。这样就可以通过对比理论时频分布曲线和实际检测信号的时频分布图,来确定信号的组成。反过来,也可以通过时频分析来确定Lamb波的群速度频散特性。

短时傅立叶变换(STFT)是一种应用最为成熟的时频分析方法,它概念简单有效、意义明确,许多情况下,给出了与我们的直观感知相符得很好的时-频构造,并且不会带入交叉项干扰。因此本文采用它来分析Lamb波信号,通过信号分析证明采用它来识别Lamb波模式取得了较好效果,能在一定程度上识别出信号中所包含的Lamb波模式。由于本文所做的实验较多,每一组实验数据都需要分析其中所包含的Lamb波模式,如果要一一列举识别结果则显得冗长,因此仅列举对三次实验数据的分析结果。

实验一:

采用的探头为汕头超声研究所生产的2.5MHz普通斜探头(型号为2.5Z14×14K3)两只,探头中心频率为2.5MHz,晶片尺寸为14×14mm,K值为3。采用一收一发的方式,通过机



油耦合在厚度为3.8mm的钢板上，钢板板材料为Q235热轧钢板，探头在钢板上的位置如图4.1所示。

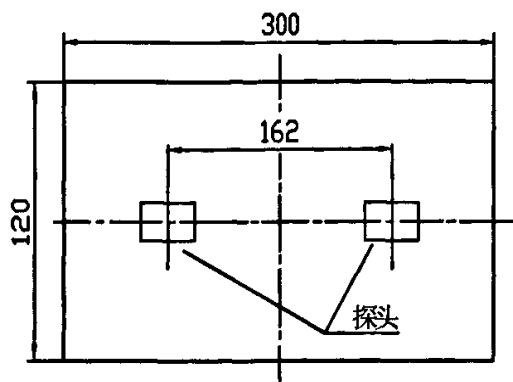


图4.1 实验一的探头位置示意图

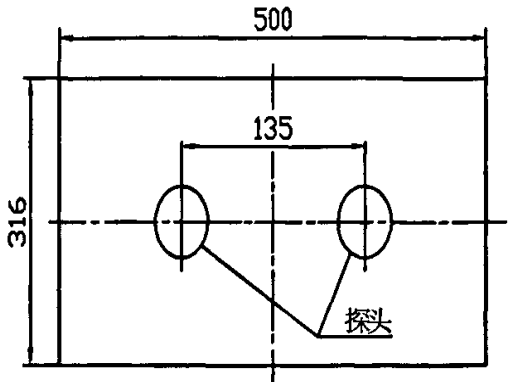


图4.2 实验二和实验三的探头位置示意图

两探头入射点之间距离为162mm，通过50MHz数字采样所测得的时域信号如图4.3上图所示。图4.3的左下图表示的是信号的功率谱图，右下图为信号的时频分布图。为了更正确、直观地识别出信号中所包含的Lamb波模式，把理论时频分布曲线和实际信号的时频分布图合绘在一张图上。同时由于此信号中所包含的Lamb波模式只存在于某些频段，所以只截取了该模式理论时频分布曲线的一部分以便于分析比较。通过图4.3的右下图我们可以清楚地看出该信号中主要包含两种Lamb波模式，即S1模(低频部分)和A3模(高频部分)。且S1模的时频分布谱图颜色较深，表明它所占的能量也较大，是主要的模式，而A3模所占能量较小，为次要模式。由检测信号的时频分布图可清楚地看到，信号中包含的Lamb波模式的频率随着时间发生了变化，即验证了Lamb波的频散效应。透过时频分布图我们再来分析信号的时域波形图和傅立叶功率谱图，就能很清楚的对信号进行全面的分析，能够从时域和频域对Lamb波模式进行标示区分，标示结果如图4.3中所示。

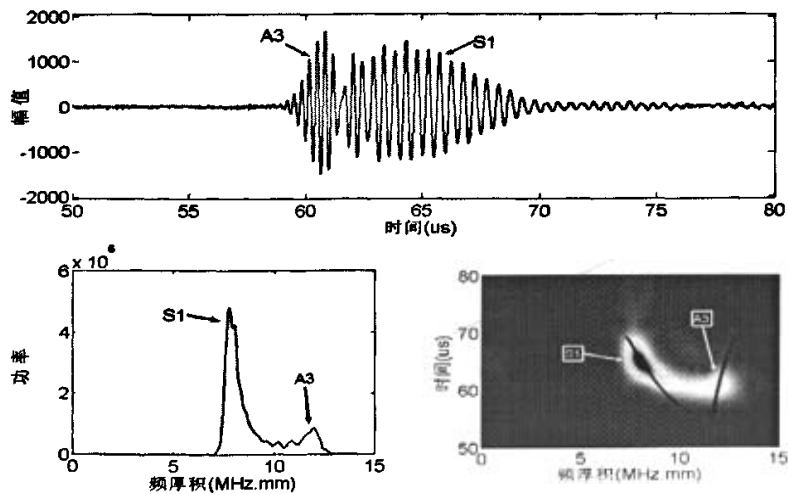


图4.3 实验一的检测信号分析结果

实验中所采用的探头为中心频率2.5MHz普通斜探头，K值等于3，当超声波由介质Ⅰ（有机玻璃）进入介质Ⅱ（钢板）时，在界面处发生折射，根据折射角定理(式4.3.1)，计算得到此探头的入射角 $\alpha$ 为 $53.2^\circ$ 。

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_{I1}}{C_{I2}} \tag{4.3.1}$$

式中 $\alpha$ 为斜探头入射角，即激发角； $\beta$ 为横波在介质Ⅱ中的折射角，根据探头K值定义(K值等于折射角的正切值)求得 $\beta=71.6^\circ$ ； $C_{I1}$ 为透声斜楔(有机玻璃)中纵波传播速度，且 $C_{I1}=2700\text{m/s}$ ； $C_{I2}$ 为钢板中横波传播速度，且 $C_{I2}=3240\text{m/s}$ 。

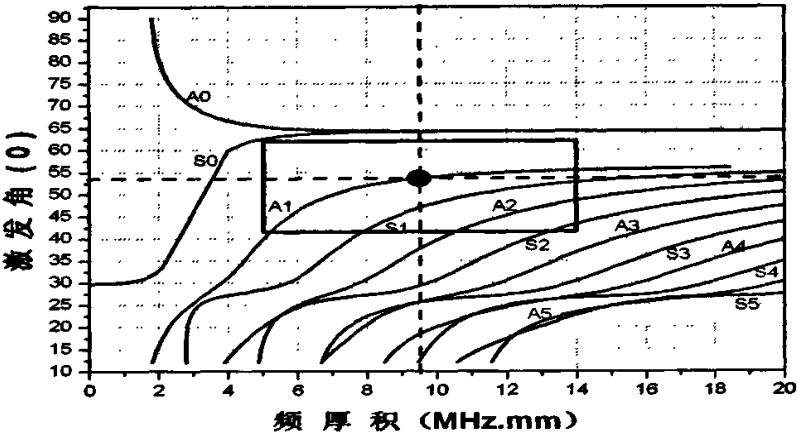


图4.4 理论激发角曲线分析

Q235热轧钢板中理论激发角曲线如图4.4所示，实验中板厚为3.8mm，探头中心频率为2.5MHz，这样频厚积就等于 $9.5\text{MHz} \cdot \text{mm}$ ，当入射角为 $53.2^\circ$ 时，可以从图中得出激发的Lamb波模式理论上应该为A1模，但是对实际检测信号进行时频分析得到的却是S1模和A3模。为什么会这样呢？笔者认为主要是因为超声波束是以一定扩散角度进入检测试件的，此外还可能是由于探头制造工艺的偏差，导致探头的中心频率、K值等与标称的量存在误差。因此在理论激发角曲线的实际应用中，要考虑的不是一个交叉点，而是一个区域范围，如图4.4中的矩形框所示，在这个区域之内的模式都可能被激发。由此可知，不能简单地认为，只要板厚和探头的中心频率确定时，就可以通过理论激发角曲线查得要激发的某一模式的激发角。必须通过实际检测，并对信号进行时频分析检验是否激发的就是那种模式。

实验二：

采用的探头为济宁模具厂生产的1.25MHz普通直探头(型号为1.25Z20)两只，晶片尺寸为 $F20\text{mm}$ ，探头中心频率为1.25MHz。收发方式采用一发一收，通过机油垂直耦合在厚度为4.8mm的钢板上，钢板材料为Q235热轧钢板，探头在钢板上的位置如图4.2所示。

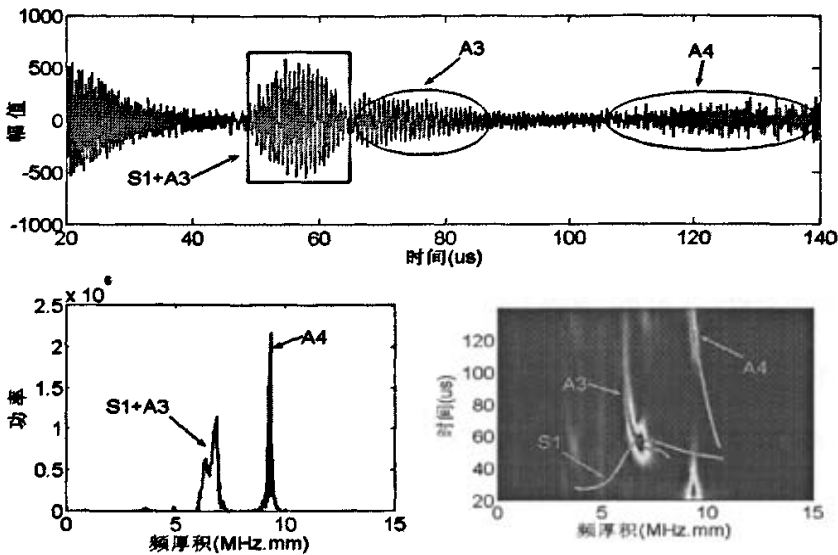


图4.5 实验二的检测信号分析结果

实验中，两直探头中心点之间距离为135mm，通过25MHz数字采样所测得的时域信号如图4.5上图所示。图4.5的左下图表示的是信号的功率谱图，右下图是信号的时频分布图。同样这里把理论时频分布曲线和实际信号的时频分布图合绘在一张图上。同时由于此信号中所包含的Lamb波模式只存在于某些频段，所以只截取了该模式理论时频分布曲线的一部分以便于分析比较。通过图4.5的右下图我们可以清楚地看出该信号中主要包含三种Lamb波模式，即S1模和A3模(低频部分)和A4模(高频部分)。40 $\mu$ s以前的那段信号(频厚积约为9.5MHz.mm)是初始脉冲产生的非有用信号。其中S1模和A3模相互叠加在一起，叠加部分处于50 $\mu$ s~65 $\mu$ s，而在65 $\mu$ s~90 $\mu$ s这段时间信号中主要是A3模式。110 $\mu$ s~140 $\mu$ s时间段信号中主要是A4模式。透过时频分布图我们再来分析信号的时域波形图和傅立叶功率谱图，我们就能很清楚的对信号进行全面的分析。如通过时频分布图我们判断出S1模和A3模叠加部分的时频分布谱图亮度较高，因此信号的能量较大，同时处于信号的低频部分且频带较宽，所以我们就能在傅立叶功率谱图标定哪部分频率段对应的是S1模和A3模，同理可以标定A4模。从功率谱图中我们可以发现信号中的A4模的功率峰值最大，但相对频带宽度却很窄，能量反而较小；S1模和A3模叠加部分的功率峰值次之，但相对频带宽度却比较宽，能量反而较大，这在时域波形图中也可得到佐证：在S1模和A3模所占的时宽50 $\mu$ s~90 $\mu$ s部分，信号的幅值明显要比A4模所占的时宽110 $\mu$ s~140 $\mu$ s部分的信号幅值要大。所以比较信号中的Lamb波模式成分所占能量大小不能仅通过傅立叶功率谱图的峰值比较来判定，要综合考虑信号功率谱峰值和峰值部分所占的频带宽度。所有标定结果如图4.5中所示。

### 实验三：

采用的探头为济宁模具厂生产的2.5MHz可变角探头两只，收发方式为一发一收。实验方案与实验二相同，探头布置如图4.2所示，但是由可变角探头代替实验二的直探头。可变角探头入射角为35°，两探头中心相距为203mm。

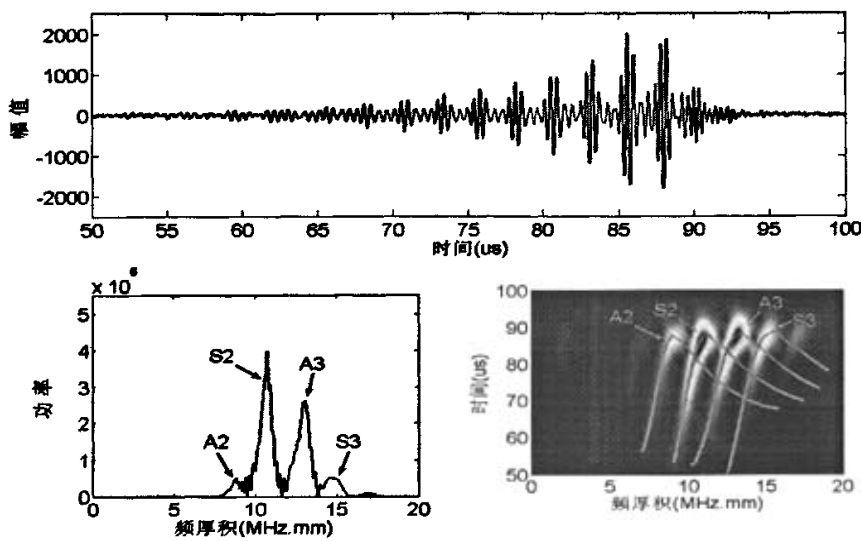


图 4.6 实验三的分析结果

实验中，两探头入射点之间距离为203mm，通过50MHz数字采样所测得的时域信号如图4.6上图所示。由于最快的Lamb波模式的在板中要传播203mm的距离也需要40μs，有用信号波包在65μs之后才陆续到来。所以为了分析的方便，只截取了有用信号部分，截取时间段为：50μs到100μs。

图4.6的左下图表示的是信号的功率谱图，右下图为信号的时频分布图。同样这里把理论时频分布曲线和实际信号的时频分布图合绘在一张图上。同时由于此信号中所包含的Lamb波模式只存在于某些频段，所以只截取了该模式理论时频分布曲线的一部分以便于分析比较。通过图4.6的右下图我们可以清楚地看出该信号中主要包含四种Lamb波模式，即由低频到高频分别为A2模、S2模、A3模和S3模。透过时频分布图我们再来分析信号的时域波形图和傅立叶功率谱图，我们就能很清楚的对信号进行全面的分析。通过时频分布图的亮度不同以及频厚积的不同可判断出傅立叶功率谱图中的各功率峰值所代表的Lamb波模式，标示结果如图4.6的左下部分所示。此外由时频分布图可知，信号中四种模式的Lamb波到达接收探头的时间比较接近，均在70μs~90μs之间，由于时间分布较窄各模式的Lamb波相互叠加在一起，从时域上无法分辨出哪个波包对应着哪种Lamb波模式。

4.4 本章小结

本章首先简要介绍了时频分析这种较为先进的信号处理方法的基本概念，接着论述了非平稳信号和时频分析的基础理论以及STFT的原理及优缺点。简要介绍了几种Lamb波模式识别方法如动态光弹法、二维傅立叶变换、贝叶斯参数估计法，最后采用基于STFT的时频分析方法来识别检测实验中的Lamb波信号，取得了较好效果，对于频散曲线上没有相互叠加的Lamb波模式无论是低阶的还是高阶的都能够较好地识别，对于相互叠加的频段上的Lamb波模式尚无法有效识别，但是能大体上判断是哪几种模式的叠加。

## 第五章 钢板中模拟缺陷检测信号的分析与处理

### 5.1 钢板中缺陷的Lamb波检测

和传统的超声波一样,当Lamb波遇到板结构中缺陷的时候,其传播特性会发生变化。Lamb波对板中缺陷的检测关键是要提取检测信号的特征信息,并对缺陷特征参数进行提取,最终完成对板中缺陷的检测。板结构缺陷检测主要要解决下面四个问题,即:(1)判断是否存在缺陷,(2)确定缺陷的大小和类型,(3)确定缺陷的位置,(4)确定缺陷对结构寿命的影响<sup>[60]</sup>。

目前,缺陷检测所采用的信号处理方法主要可以分为以下三类:时域法、频域法、时频域法。最早使用的也是最直观的是时域分析法,如阈值法,相关法等,可分析信号的到达时间、幅度等信息,具有分析简单、概念直观等优点。由于时域分析法主要比较的是信号的整体幅值变化,在实际检测中难以定量提取幅值衰减量,所以比较适合于定性判断缺陷是否存在。特别是当信号中的Lamb波信噪比高、模式成分较为单一且频散小时,表现在时域波形上就是波包峰值大、波包窄,这时采用时域分析法是很合适的。但是由于Lamb波的多模式和频散特性,不同的模式往往混叠在一起,会对时域方法分析信号产生干扰,此外检测过程中往往会带入大量的干扰,如随机噪声、工频噪声等。因此,当信噪比不高时,仅仅采用时域的方法对信号进行分析,容易出现不准确性和误判缺陷的情况。

频域分析法则基于傅立叶分析从频域观察信号组成。由于出现严重缺陷必然会导致结构的一些参数发生变化,通过频域特性的观察能较清楚地发现响应信号频率成分的变化,对于一些结构严重受损的情况,用频谱的方法观测传感信号不失为简单又有效的方法。频谱分析法是目前为止在信号处理领域使用最广、最为基础的方法,从本质上讲,信号的功率谱代表信号中各频率成分的能量分布情况,信号的功率谱峰值的变化可能与结构中缺陷大小的变化存在一定对应关系,同时对于特定类型的缺陷可能造成信号的频谱成分发生改变,这样就可以通过比较信号的功率谱峰值以及频谱成分的变化情况来确定缺陷的大小和类型。但是这一方法对于什么时间出现某种频率信号的问题没有办法解决,即它不能确定缺陷的位置。

时频分析法是目前为止最为理想的Lamb波信号分析方法。时频分析的引入,把传感信号展开到二维时频空间上观察,可以同时观察信号在不同频率处的时间历程,能更精确、更全面地反映出分析信号的特征。信号的时频谱图表示的是信号在时频空间上的能量密度分布情况,因此当结构中存在缺陷时,信号在时频空间上的能量密度或多或少会发生变化,主要表现为时频谱峰值的变化和时频谱成分的改变。这样通过这两个特征参数不仅可以确定板中是否存在缺陷以及缺陷的大小和类型,而且可以确定缺陷在板中的位置。本文采用短时傅立叶变换这一时频分析方法中最基础、应用最为广泛的方法来对检测信号进行时频分析。

在解决板结构缺陷检测的四个主要问题中,它们都有各自的用处,而且有时是相辅相成的,具体的用法将在本章下面的内容中予以揭示。从而完成对板结构缺陷的检测。

5.1.1 缺陷存在的判定

下面分别采用时域、频域和时频域分析方法对钢板中模拟缺陷进行检测。

(一). 时域分析法

时域分析法即通过波形对比，找出各种缺陷对波形的影响，确定缺陷的种类、形状大小，以及在被测板件中的位置。当信噪比较高时，时域波形对比法概念简单、直观不烦琐，不失为一种很好的缺陷检测方法。美国阿拉莫斯国家实验室的研究者Andy Thien、Heather Chiamori等就是采用时域分析法，把Lamb波应用在大型管道的结构安全监控系统SHMS中取得了较好的效果<sup>[24]</sup>。他们的实验装置示意图如图5.1和5.2所示。

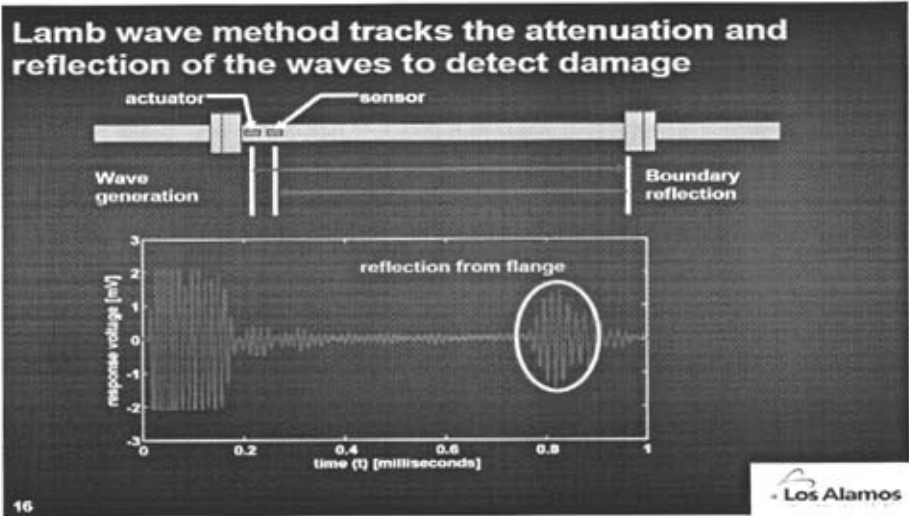


图5.1 无缺陷时的时域波形图

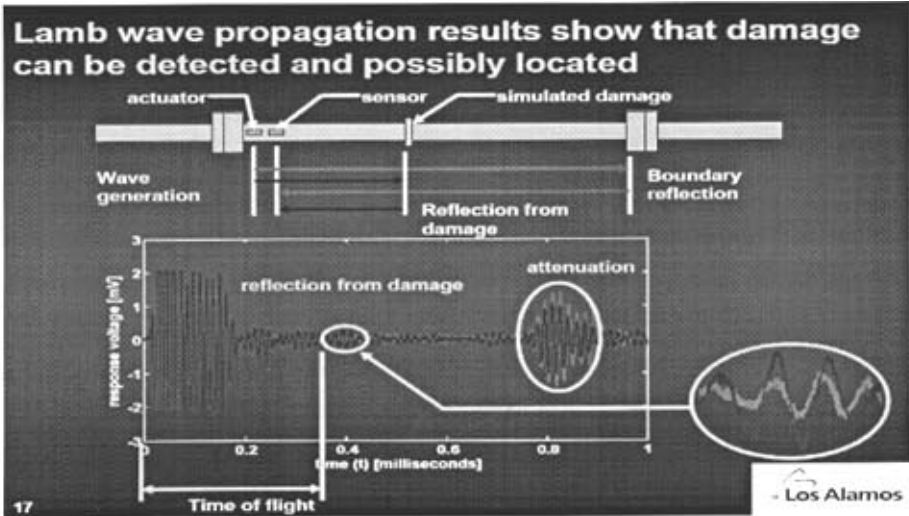


图5.2 有缺陷和没有缺陷时的时域波形图对比

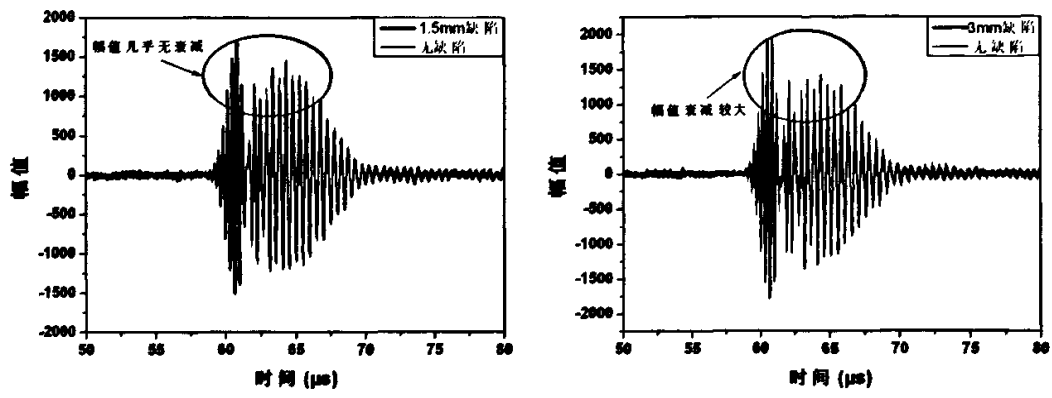
图5.1的上部分为超声传感器的布置图，下部分为测得的管道中无缺陷情况下的时域波形图，用蓝色表示。其中黄色标示部分为Lamb波遇到边界反射回来的波包。图5.2的上部

分为超声传感器的布置图,其中缺陷位于超声传感器与反射边界的中间部位;下部分为测得的管道中有缺陷情况下的时域波形图,其中红色波形图为有缺陷情况下的时域波形数据,黄色标示部分为Lamb波遇到边界反射回来的波包。为了比较方便,他们把没有缺陷时测得的波形数据(如图5.2中所示的蓝色波形图)和有缺陷时的波形数据放在一起。很明显,当管道中有模拟缺陷存在时,Lamb波传播到缺陷位置时有一部分发生了反射和散射,大部分还是绕过了缺陷继续向前传播,当遇到大的反射边界时又反射回来被超声接收传感器接收。由于缺陷对Lamb波传播的“阻隔”作用使得最终接收到的Lamb波信号能量比没有缺陷时变小了,反映在时域波形上就是反射波包的幅值变小,如图5.2的下部分波形图中的黄色标示部分所示。此外由于模拟缺陷对Lamb波的反射作用,使得有一部分Lamb波反射回去被接收传感器接收,这时就会有有一个小的波包出现(大约在0.4ms时),与原来没有缺陷的波形图对比波形发生了较大畸变。通过波形对比观察,如果边界反射波包幅值有衰减,就可判断接收探头与反射边界之间存在缺陷。根据边界反射波包的衰减程度可以判断缺陷的大小。同时还可以根据缺陷反射波包的畸变程度或者幅值大小来判断缺陷的大小,通过它在时间轴上出现的时间来计算出具体缺陷位置。

为了找出各种缺陷对Lamb波传播的影响,首先需要制作人工缺陷来模拟板中存在的各种自然缺陷。目前金属薄板Lamb波检测用对比试块上人工缺陷均是在垂直于板材表面的方向上钻制通孔、平底孔,并且通孔直径大小与板材厚度有关。考虑到钢板内部的缺陷主要为分层,夹杂孔以及裂纹等且分层缺陷的危害性最大。所以制作通孔、平底孔等来模拟板中的夹杂、孔洞型缺陷,采用点火花线切割加工出来的狭缝来模拟分层缺陷。从实验的角度看,目前还没有人能够做出真正能模拟自然分层的人工缺陷,无论是从板的端面用线切割方法加工出来的半无限大狭缝还是在板材侧面用电火花方法加工出来的小面积狭缝,都有较大的层厚,而且其边缘较宽,因而具有一定的“端面”反射作用,但是自然分层常常压合得很紧密,因而只有很小的层厚,而且其边缘往往更薄,因此常常不具有“端面”反射作用<sup>[61]</sup>。尽管如此,这也是目前我们模拟自然分层缺陷最好的方法。下面的两个实验分别在3.8mm厚的钢板上钻制直径不等的孔来模拟钢板中的夹杂、孔洞型缺陷,在4.8mm厚钢板上通过线切割加工出不同深度的狭缝来模拟钢板中的分层缺陷。然后通过对比分析缺陷前后板中Lamb波时域波形图来判断缺陷的有无、大小以及大概类型。

#### 实验一:

采用一发一收法,用中心频率为2.5MHz的斜探头(入射角为 $53.2^\circ$ )在厚度为3.8mm的钢板(尺寸为300mm×120mm)上激励出Lamb波。检测时两探头均摆放在钢板沿长度方向的中心线上,两探头关于板中心对称分布且它们的入射点之间距离相距为162mm。首先记录没有制作人工缺陷之前在钢板中所测的信号,然后在钢板的中心位置先后制作直径为1.5mm、3mm、4mm、5mm的通孔,分别记录测得的信号。图5.3(a)是没有缺陷和人工缺陷为直径1.5mm的通孔的时域波形图。图5.3(b)是没有缺陷和人工缺陷为直径3mm的通孔的时域波形图。为了方便比较把没有缺陷和有缺陷时的时域波形图合放在同一张图上。



(a) 无缺陷和缺陷孔径为1.5mm时的波形图对比 (b) 无缺陷和缺陷孔径为3mm时的波形图对比

图5.3 无缺陷和不同孔径大小通孔模拟缺陷的时域波形图对比结果

由图5.3(a)可知，当板中有直径为1.5mm通孔缺陷时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比几乎没有幅值衰减。这样时域分析法就不能检测出这个缺陷的。考虑到超声波探伤能探测到的缺陷最小尺寸为超声波波长的一半，我们来估算一下此Lamb波的波长。由式(5.1.1)代入各量：群速度 $v$ 约等于2500m/s，频率取2.5MHz，得到波长 $\lambda$ 大约等于1mm，于是可以得到此Lamb波可以探测到的缺陷最小尺寸为0.5mm。这只是理论上的推算，实际上由于本实验中的人工缺陷为直径1.5mm的通孔，它对兰姆波传播构成反射的迎波面是通孔的部分柱面，也就是说实际的反射面的当量尺寸可能还不到0.5mm，所以发生漏检也是可能的。

$$\lambda = v T = \frac{v}{f} \tag{5.1.1}$$

由图5.3(b)可知，当板中有直径为3mm通孔缺陷时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比波包幅值发生了较大衰减。这是因为此通孔缺陷使一部分传播的Lamb波发生了反射和散射，从而使到达接收探头的Lamb波能量发生衰减，反映在波形图上就是波包幅值发生较大衰减，这样通过时域分析法就能对这个缺陷进行有效检测。

实验二：

本次实验一共准备四块同样大小的4.8mm厚钢板（尺寸为330mm×120mm），首先分别记录没有制作人工缺陷之前在四块钢板上测得的信号，接着在第一块和第二块钢板中部沿板宽度方向采用线切割方法分别切割出深度为1.2mm、2.4mm，宽度为1mm的切缝。在第三块钢板的中部沿板宽度方向切割出宽度为1mm，长度为70mm的横向贯穿切缝。在第四块钢板的中部沿板长度方向切割出一个宽度为1mm，长度为50mm的纵向贯穿切缝。用线切割方法制作好这些人工缺陷之后，分别用斜探头测得信号。实验中采用一发一收法，用中心频率为2.5MHz的斜探头(入射角为53.2°)作为收发探头。检测时两探头均摆放在钢板沿长度方向的中心线上，两探头关于板中心对称分布且它们的入射点之间距离相距为174mm。



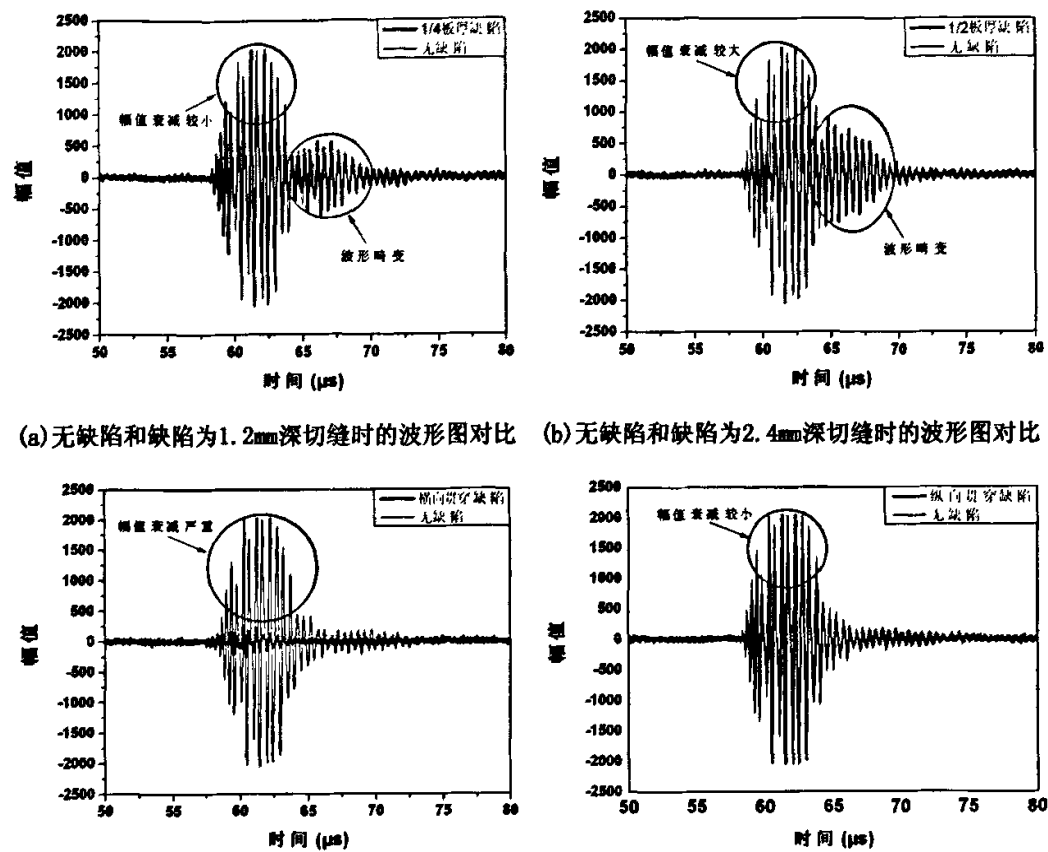


图5.4 无缺陷和不同狭缝模拟缺陷的时域波形图对比结果

由图5.4(a)可知，当钢板中有深度为1.2mm(1/4板厚)，宽度为1mm的切缝时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比主要波包的幅值衰减较小，但是在65 $\mu$ s~70 $\mu$ s之间波形发生了较大畸变，这说明板中存在较为严重的缺陷。由图5.4(b)可知，当钢板中有深度为2.4mm(1/2板厚)，宽度为1mm的切缝时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比主要波包的幅值衰减较大，而且在65 $\mu$ s~70 $\mu$ s之间波形也发生了较大畸变，这说明板中存在很严重的缺陷。由图5.4(c)可知，当钢板中有宽度为1mm，长度为70mm的横向贯穿切缝时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比波包的幅值衰减非常严重，这说明板中存在异常严重的缺陷。由图5.4(d)可知，当钢板中有宽度为1mm，长度为50mm的纵向贯穿切缝时所测得的时域波形图(蓝色)，与无缺陷时板中所测得的Lamb波时域波形图(红色)相比波包的幅值衰减比较小，虽然板中存在非常严重的缺陷，但是仅由时域波形对比还无法判断出这种缺陷，这说明缺陷的取向对检测结果影响很大。

由此可知，采用时域波形对比法可以在一定程度上检测出板结构中的缺陷。通过对比缺陷前后的时域波形图，如果波包幅值有较大衰减或者有波形畸变则证明板结构中存在缺陷。当板中的缺陷为孔型缺陷时，波包幅值会发生衰减，但是还未发现有波形畸变现象；

当缺陷为狭缝类缺陷时，波包幅值也会发生明显的衰减，同时还会出现波形畸变，但是狭缝的取向对分析结果有很大影响，当狭缝取向垂直于Lamb波传播方向时波包幅值会出现明显衰减还会出现波形畸变，但是当狭缝取向平行于Lamb波传播方向时波包幅值没有明显衰减也没有出现波形畸变。

(二). 频域分析法

频域分析法是基于傅立叶分析从频域观察信号成分变化。通过频域特性的观察能较清楚地发现有缺陷存在时响应信号频率成分和功率谱峰值的变化，由此可确定缺陷在板结构的存在。下面用两个实验来说明频域分析法在薄板Lamb波无损检测中的应用。

实验三：

本次实验采用本章实验二的检测信号，分别对无缺陷、有 1.2mm 深切缝缺陷、2.4mm 深切缝缺陷以及横向和纵向贯穿切缝缺陷时测得的信号进行傅立叶变换，作出各自的功率谱图，如图 5.5 所示。为了方便比较，把它们合画在同一张图上。

由图5.5我们可以清楚地看出，当钢板中存在切缝缺陷时，信号的功率谱峰值发生了明显衰减，当切缝深度增加时，功率谱峰值衰减也增大，并且频率成分也发生了变化，产生了新的频率成分，这些说明板中存在较为严重的缺陷。

实验四：

实验中，采用中心频率为2.5MHz的可变角探头(型号为2.5P10×12 0~80°)，入射角为40°，采用一发一收法，两探头入射点相距为206mm。在厚度为4.8mm的钢板中激励Lamb波检测，钢板尺寸为500mm×316mm。首先记录没有制作人工缺陷之前的钢板中的信号，然后在钢板的中心位置钻制一个直径为1mm的通孔并记录信号，之后逐步在直径1mm的通孔基础上扩大孔径为2mm，3mm，4mm，分别进行检测。分别对这些检测信号进行傅立叶变换，得到如图5.6所示的功率谱图。为了方便比较，把五个功率谱图合画在同一张图上。由图5.6我们可以清楚地看出，当钢板中存在通孔缺陷时，信号各频率成分也就是各Lamb波模式的功率谱峰值发生了明显衰减，当通孔直径增加时，各功率谱峰值衰减也增大，这说明板中存在较为严重的缺陷。

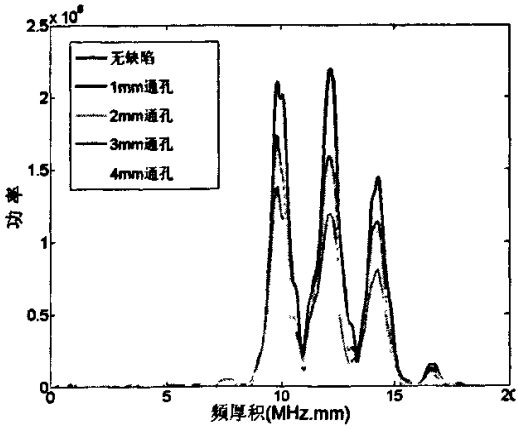
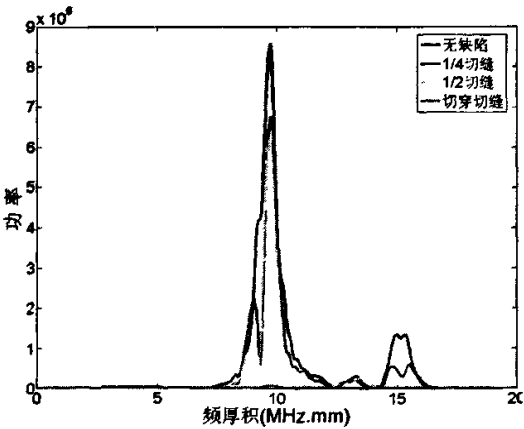


图5.5 无缺陷和不同狭缝缺陷时的功率谱图对比      图5.6 无缺陷和不同孔径缺陷时的功率谱图对比

通过上面两个实验可以发现频域分析法简单有效，敏感性较好，对通孔型缺陷以及线切割狭缝缺陷均能较好的检测。但是它要求信号在频域要有较好的分辨力，即要求信号中的Lamb波模式的能量要高且所占的频带小。

(三). 时频分析法

采用时频分析法，分别对本章实验二测得的检测信号进行短时傅立叶变换，作出各自的时频分布谱图，如图5.7(a)、(b)、(c)所示。

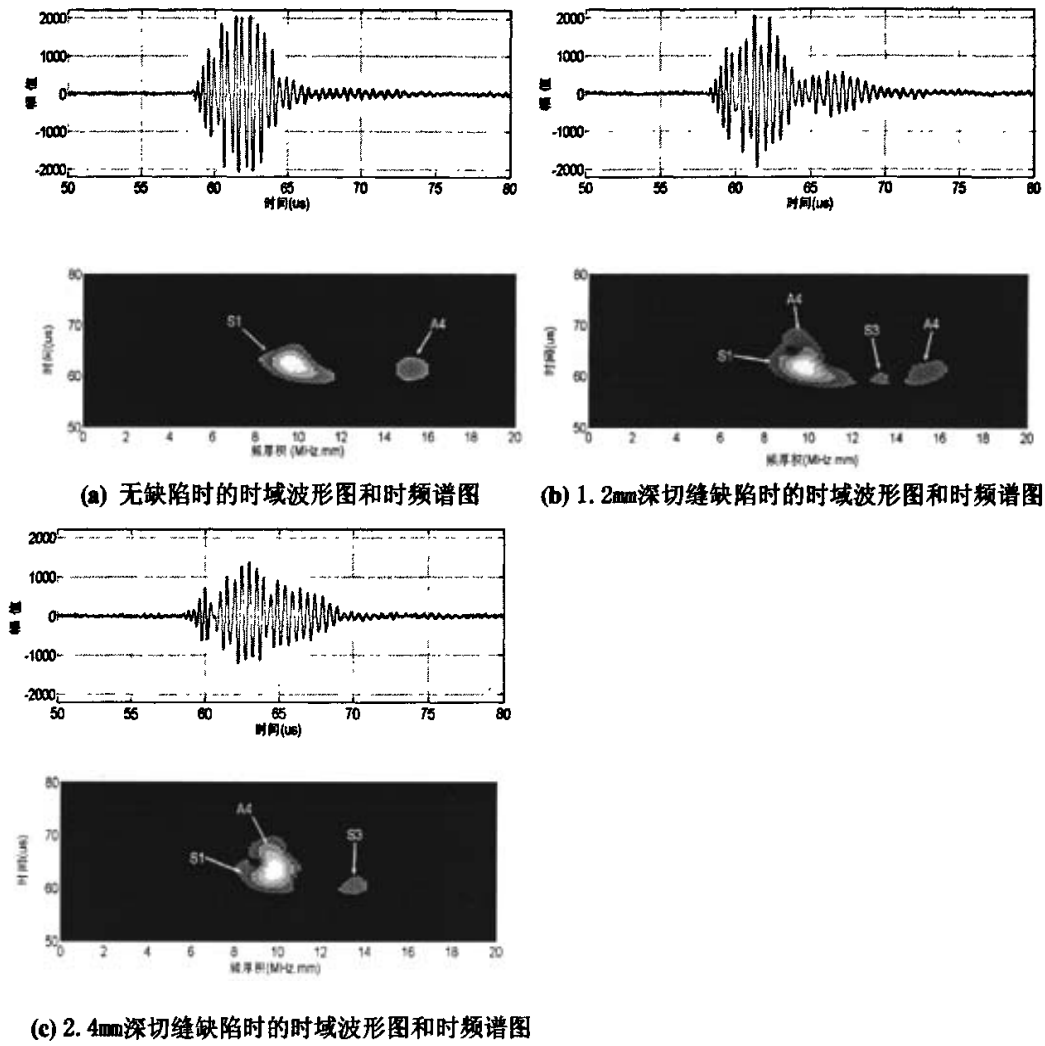


图5.7 无缺陷和有各种深度切缝缺陷时的时域波形图和时频分布谱图

由图5.7(a)可知，当钢板中无人工缺陷时，运用本文第四章所采用的Lamb波模式检测方法可以识别出此时检测信号中主要是S1模和A4模，且S1占为主要成分。图中经过短时傅立叶变换得到的谱图采用灰度表示，即亮白部分表示有信号能量存在，亮度越高表明信号的能量就越大。当板中有深度为1.2mm的横向切缝时，结果如图5.7(b)所示，可以通过时频分布谱图清楚地看到S1模能量有部分衰减，且发生了一定程度的模式转换，变为频率附近的A4模(低频部分)。同时高频A4模的能量也发生了少许衰减，而且还伴随着一定程度

的频散。另外由于模式转换还产生了一部分S3模。图5.7(c)是当板中存在的缺陷为2.4mm深横向切缝时的分析结果，由图可知，主要模式S1模发生了更加明显的模式转换，变为频率附近的A4模(低频部分)。同时高频A4模完全没有了，全部转换为S3模，使得S3模的能量比1.2mm深切缝时的有明显增加。这样的话就可以通过时频分析观察Lamb波的能量衰减（需要提取时频分布图中的时频谱峰值来进行判定）和模式转换，从而对板中缺陷进行检测。

由以上的实验分析可知，时域分析法和频域分析法以及时频分析法均能有效检测板中的缺陷，在实际应用中，常需要根据实际情况运用这三种信号分析方法来进行缺陷检测。

5.1.2 缺陷大小和类型的确定

根据前文的分析，Lamb波信号在通过薄板中的缺陷时除了发生幅值衰减外，还可能会发生模式转换，这使得利用Lamb波的能量衰减和模式转换对缺陷大小和类型进行定征成为可能。下面通过三个实验来对Lamb波对薄板中缺陷的大小和类型的定征方法进行研究。

实验五：

采用本章实验一的检测数据，分别对这些波形数据进行傅立叶变换和短时傅立叶变换，得到功率谱图和时频分布谱图，把三种图合并在一张图上。这里仅作出无缺陷以及缺陷通孔直径为5mm时的实验结果如图5.8(a)、(b)所示。

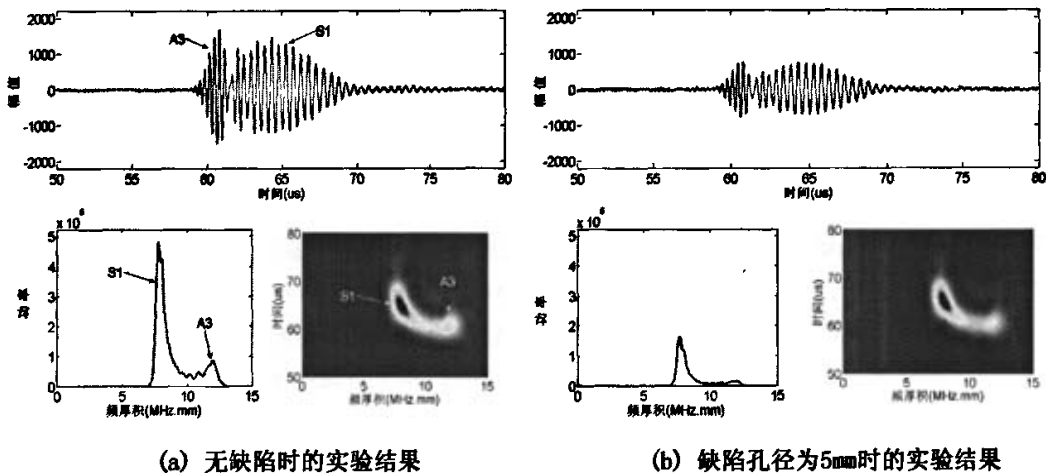


图5.8 无缺陷和缺陷孔径为5mm时的实验结果

通过模式识别可知，在3.8mm厚钢板上进行的5次检测信号中主要模式均为S1模式(信号的低频部分)，次要模式为A3模式(信号的高频部分)。通过时域波形比较和功率谱比较以及时频峰值比较都可以直观地感受到，对于通孔型缺陷，随着孔径的增大，两种Lamb波模式的幅值均单调减小，但是未发现模式转换。这可能与通孔型缺陷的形态有关，因为孔型缺陷的迎波面是通孔的部分柱面，随着孔径的增大，其柱面面积即缺陷反射面积也增大，因而使接收探头收到的Lamb波能量减小，反映在波形图上就是幅值变小，反映在功率谱图上就是功率谱峰值的衰减。同时由于通孔缺陷的迎波面的特殊形状和大小比较小，对Lamb波的“阻隔”作用较小，只是使一部分Lamb波发生了反射和散射，大部分的Lamb波还是通过衍射绕过了缺陷孔继续传播，因此发生模式转换的几率比较小，在本实验中还未发现有

模式转换现象。功率谱图描述的是信号中各频率成分的能量密度分布情况，因此可由信号的功率谱峰值变化来表示信号能量的衰减情况。图5. 9所示的是各组数据中S1模和A3模的频谱峰值随通孔模拟缺陷孔径大小的变化关系。其中，横坐标表示缺陷孔径大小，纵坐标表示功率谱峰值。由图可以发现，信号的功率谱峰值随缺陷孔径的增大基本上呈单调下降趋势。

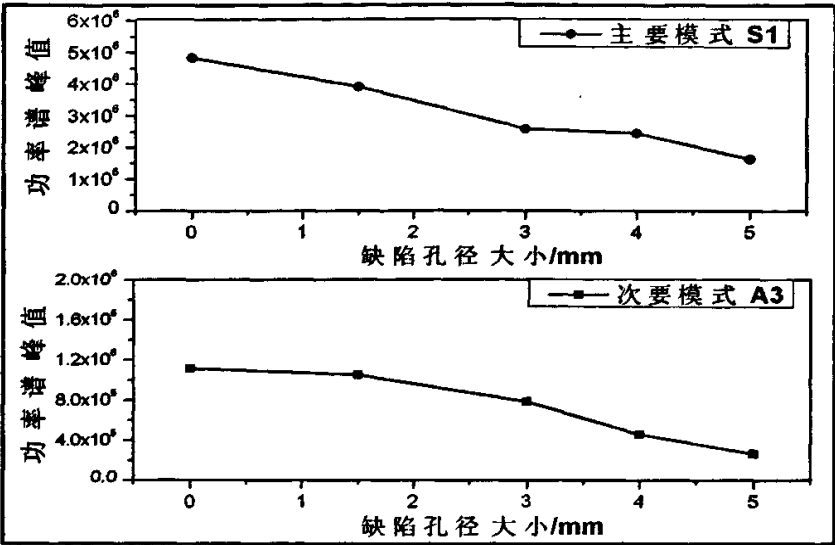


图5.9 实验五中Lamb波各模式成分的功率谱峰值比较

功率谱峰值随着通孔缺陷孔径的变大发生了明显衰减，提取图5. 9中的数据可得到功率谱峰值随缺陷通孔直径变大发生衰减的百分比，如表5. 1所示。由表可知，当板中的通孔缺陷直径由1mm增大到5mm时，S1模的衰减比较均匀。A3模在缺陷孔径为1mm时衰减还比较小，随着孔径的增大衰减明显加快。可见A3模式对小孔径通孔缺陷还不是很敏感，但是对大孔径缺陷非常敏感，但是目前本文对于A3模的衰减规律还无法给予解释。

表5.1 缺陷孔径增加时的功率谱峰值衰减百分比

信号中的Lamb波模式	缺陷孔径增加时的功率谱峰值衰减百分比				
	无缺陷	1. 5mm	3mm	4mm	5mm
S1	0%	19%	47%	49%	66%
A3	0%	6%	29%	59%	76%

实验六:

本次实验采用本章实验二的检测数据，分别对这些波形数据进行傅立叶变换和短时傅立叶变换，得到功率谱图和时频分布图，把三种图合并在一张图上。分析结果如图5. 10(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。

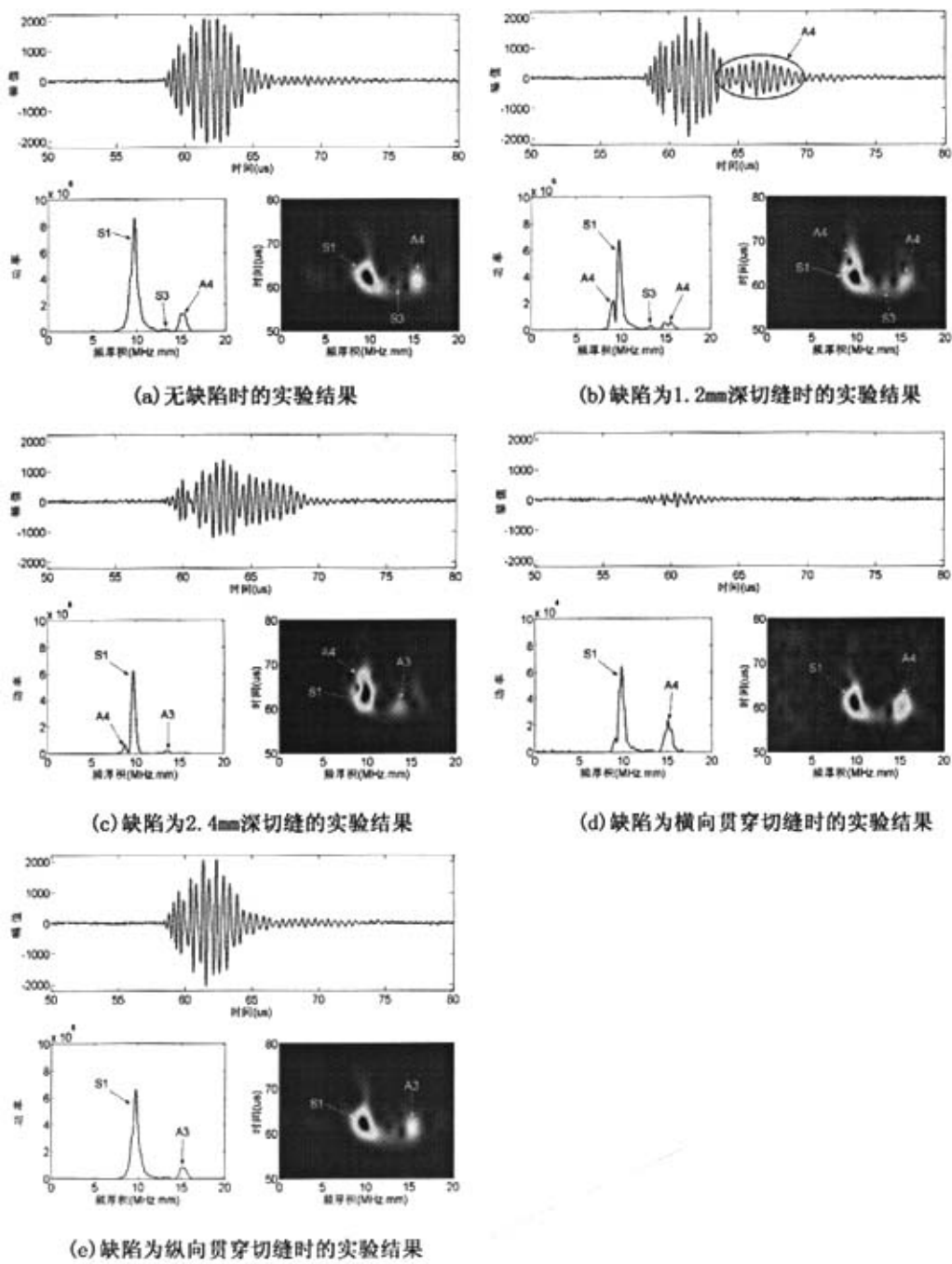


图5.10 无缺陷和缺陷为各种切缝时的实验结果

由于激发出的Lamb波模式相互叠加，从时域波形无法判断出信号中所包含的模式成分。通过上文所述的Lamb波模式识别方法可以识别出信号中所包含的Lamb波模式：当板中没有制作缺陷时，信号中有S1模，A4模（高频部分）以及S3模三种模式，其中S1模式为主要

成分，高频A4模式所占能量很小，为次要成分，S3模所占能量非常小，为次要成分；当板中有1.2mm深横向切缝时，波形主要成分发生了衰减和模式转换，即信号主要模式S1部分地转换为与其频率相近的A4模(低频部分)，表现在时域波形图上即为65μs~70μs时间出现的那个波包。高频部分的A4模式同时发生了模式转换现象和频散，高频A4模有一部分转换为S3模使得S3模的能量有所增加；当板中有2.4mm深横向切缝时，S1模发生了比较大的衰减，同时还发生了模式转换产生一部分A4模(低频部分)。高频A4模几乎消失，S3模能量增加，显然是由于A4模发生模式转换产生S3模使得在缺陷深度增加的情况下S3模能量非但没有减小反而增加。提取这三次检测信号各中模式成分的功率谱峰值进行比较，得出各模式成分的功率谱峰值随板中横向切缝深度变化的关系，结果如图5.11所示。其中，横坐标表示缺陷切缝的切入深度，纵坐标表示功率谱峰值。

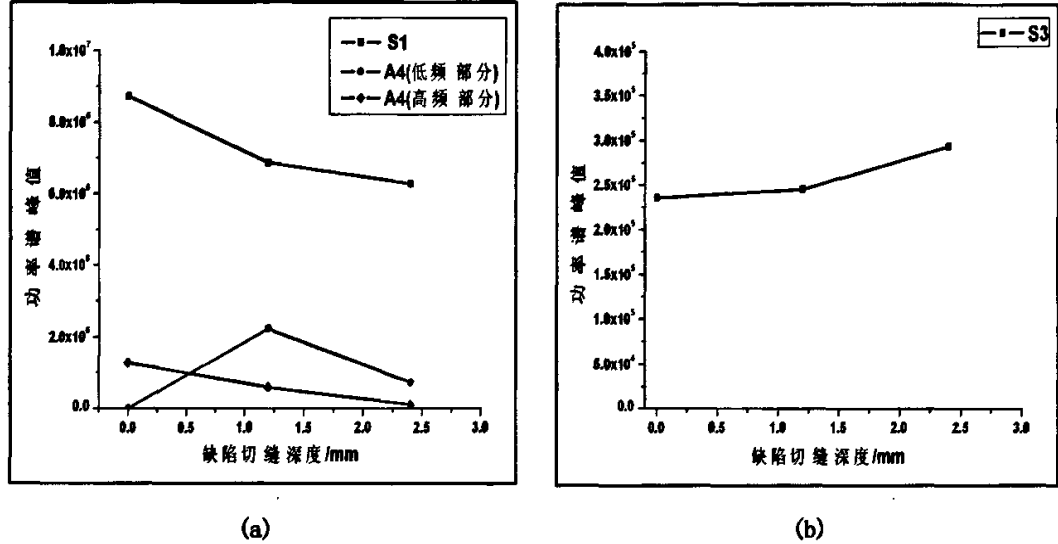


图5.11 实验六中Lamb波各模式成分的功率谱峰值随切缝缺陷深度变化的规律

提取图5.11中的功率谱峰值数据可得到信号中各Lamb波模式的功率谱峰值随横向切缝深度变化时的衰减百分比，结果如表5.2所示，注意S3模功率谱峰值衰减用负号表示，是为了说明此模式的能量随着横向切缝深度增加非但没有衰减，反而有所增加。由表可知，当板中的横向切缝深度由1.2mm增大到2.4mm时，S1模的衰减比较大，同时由时频谱图可知它发生了模式变换，产生了低频A4模，可见S1模在本实验中对线切割狭缝缺陷敏有较高的敏感性。A4模(高频部分)在信号中虽不是主要模式，但是它的能量随着切缝深度的增加发生了非常明显的衰减，同时由时频谱图可知它遇到缺陷时也有模式转换现象，产生了S3模。所以高频A4模对此类缺陷非常敏感。由此可知，采用一定条件来激发出较单纯的A4模来检测薄板中横向分布的分层、裂缝等缺陷可能是适合的。

表5.2 缺陷切缝深度增加时的功率谱峰值衰减百分比

信号中的Lamb波模式	横向切缝深度增加时的功率谱峰值衰减百分比		
	无缺陷	1.2mm深横向切缝	2.4mm深横向切缝
S1	0%	21%	48%
A4(高频)	0%	46%	100%
S3	0%	-56%	-67%

当切缝为贯穿切缝时，得到的结果如图5.10(d)和图5.10(e)所示。由图可知，信号中的模式成分与没有缺陷时相比没有变化，还是S1模和A4模。分别对信号中各模式成分的功率谱峰值进行比较得出结果如表5.3所示。由表5.3可知，当缺陷为横向贯穿切缝时，即切缝取向与Lamb波传播方向垂直时，无论是S1模还是A4模的功率谱峰值衰减都非常严重，大约为没有缺陷时各自功率谱峰值的百分之一。当缺陷为纵向贯穿切缝时，即切缝取向与Lamb波传播方向平行时，无论是S1模还是A4模的功率谱峰值衰减都不大，大约为没有缺陷时各自功率谱峰值的76%。可见缺陷的取向对Lamb波的传播有很大的影响。因此在实际的薄板检测过程中，应该在两个相互垂直的路径上进行扫查，以免发生漏检。

表5.3 不同取向贯穿切缝时的各模式频谱峰值比较

缺陷形态	S1	A4(高频部分)
无缺陷	$8.72 \times 10^6$	$1.27 \times 10^6$
缺陷为横向贯穿切缝	$5.9 \times 10^4$	$1.96 \times 10^4$
缺陷为纵向贯穿切缝	$6.66 \times 10^6$	$0.98 \times 10^6$

实验七:

本次实验采用与本章实验四相同的实验条件，具体的实验步骤如下：首先分别记录没有制作人工缺陷之前在三块钢板中的检测信号，然后在第一块钢板(记做B1板)的中心位置钻制一个直径为1mm的通孔并记录检测信号，之后逐步在直径1mm的通孔基础上扩大孔径为2mm，3mm，4mm，分别记录检测信号。在第二块钢板(记做B2板)的中心位置钻制一个直径为1mm、深度为2.4mm的盲孔并记录检测信号，之后逐步在直径1mm的盲孔基础上扩大孔径为2mm，3mm，4mm，孔的深度保持不变，分别记录检测信号。在第三块钢板(记做B3板)的中心位置钻制一个直径为1mm、深度为1.2mm的盲孔并记录检测信号，之后逐步在直径1mm的盲孔基础上扩大孔径为2mm，3mm，4mm，孔的深度保持不变，分别记录检测信号。分别对这些检测信号进行傅立叶变换和短时傅立叶变换，得到功率谱图和时频分布图，把它们和时域波形图合并画在一张图上，结果如图5.12所示。这里只作出了三块钢板无缺陷和缺陷孔径为4mm时的分析结果图。图5.12中的(a)、(b)表示的是B1板的信号分析结果；(c)、



(d) 表示的是B2板的信号分析结果；(e)、(f)表示的是B3板的信号分析结果。

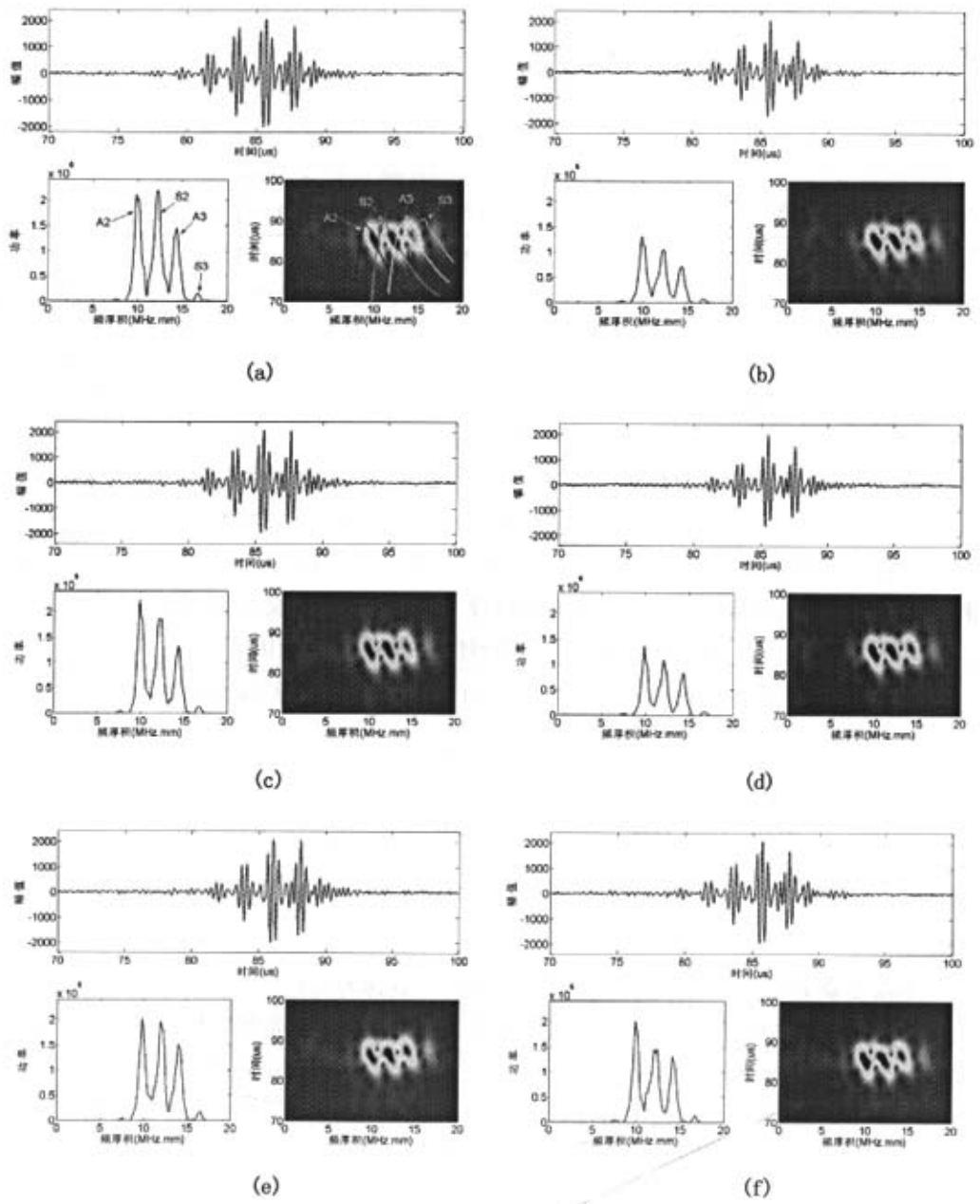


图5.12 三块钢板中不同孔型缺陷的信号分析结果

根据图5.12中的时频分布图，采用前文的Lamb波模式识别方法，可以识别在三块钢板中无论有无缺陷时的检测信号中的Lamb波模式均为A2模、S2模、A3模、S3模，其中A2模、S2模和A3模为信号主要成分，S3模在信号中所占能量非常小，为次要成分。由此可见，对于孔型缺陷，无论是通孔还是各种深度的盲孔，都不易使Lamb波发生模式转换现象。下面

分别提取信号中各模式的功率谱峰值以及时频谱峰值，从而研究信号中各模式的能量随不同深度缺陷孔径变化的规律，得到的结果如下图5.13所示。其中图5.13(a)、(b)分别为B1板检测信号中各模式的频谱峰值和时频谱峰值随通孔型缺陷孔径变化的规律；图5.13(c)、(d)分别为B2板检测信号中各模式的频谱峰值和时频谱峰值随2.4mm深盲孔缺陷孔径变化的规律；图5.13(e)、(f)分别为B3板检测信号中各模式的频谱峰值和时频谱峰值随1.2mm深盲孔缺陷孔径变化的规律。

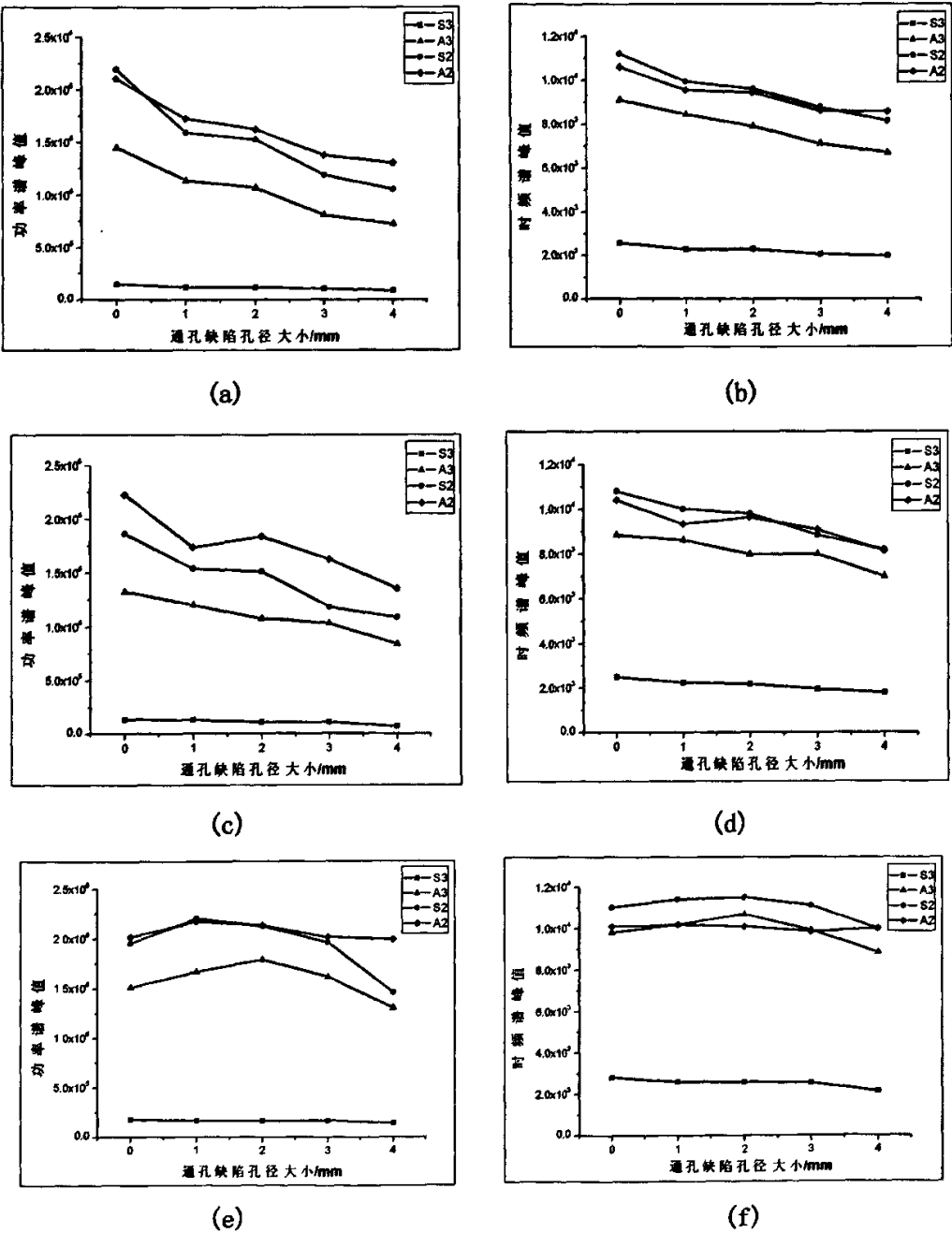


图5.13 三块板中各模式Lamb波的频谱峰值和时频谱峰值随不同直径孔型缺陷变化的实验结果

由图 5.13(a)、(b)可知,当人工缺陷为通孔缺陷时,随着通孔直径的变大,信号中各主要 Lamb 波模式的能量基本上是呈单调衰减的,尤其是 A3 模表现出良好的线性衰减。当板中从无人工缺陷到缺陷孔径为 4mm,从功率谱峰值变化规律看 S2 模和 A3 模均有 50%左右的衰减,但是从时频谱峰值变化规律来看它们都只有 30%左右的衰减;A2 模的功率谱峰值有大约 35%的衰减,但频谱峰值只有 20%左右的衰减。由此可见,对于通孔型模拟缺陷,功率谱峰值这一特征参数比时频谱峰值有更好的敏感性,采用功率谱峰值作为检测指标更为合适。

由图 5.13(c)、(d)可知,当人工缺陷为 2.4mm 深盲孔缺陷时,随着缺陷孔径的变大,信号中各主要 Lamb 波模式的能量大体上也是呈单调衰减的, S2 模和 A3 模都保持着较好的线性衰减,但是 A2 模表现出了一定程度的非线性衰减。

由图 5.13(e)、(f)可知,当人工缺陷为 1.2mm 深盲孔缺陷时,随着缺陷孔径的变大,信号中各主要 Lamb 波模式的能量不是呈单调衰减的,当缺陷孔径在 2mm 以前, A3 模的功率谱峰值呈现单调增加趋势,但是随着孔径的增大,又呈现出单调衰减趋势,且衰减比较迅速。A2 模的功率谱峰值在缺陷孔径为 1mm 以前是增加的,在 1mm 之后是衰减的,但是衰减的幅度非常小, S2 模也有类似的现象。出现这些现象可能与 Lamb 波在板中传播引起质点复杂的振动情况相关,当孔的深度比较浅时(此时为四分之一板厚),各模式的质点振动位移可能完全不同,这就决定了 Lamb 波对与缺陷作用的复杂性。将在本章第 5.2 节就质点振动位移与不同深度的孔型缺陷的关系进行探讨。

### 5.1.3 缺陷位置的确定

在结构缺陷定位研究中,常常采用时间延迟估计的方法。所谓时间延迟就是不同传感器测得的信号到达时间先后的时间差。在具体时间延迟运用中,可以考虑用信号能量峰值点对应的时间作为信号的到达时间,由此来估计各个通道信号之间的时间延迟。再通过一定的算法来计算出缺陷在结构中的位置。许多学者提出了可以采用如椭圆算法<sup>[62]</sup>和遗传算法<sup>[63]</sup>等来计算缺陷位置,但是这些方法需要采用多传感器技术进行多通道检测,所需设备较为复杂。本文基于现有实验条件,采用常规超声的脉冲反射原理来定位缺陷的位置。实验操作简单,算法直观,同时取得了较好的缺陷定位精度。下面通过一个实验来说明本文所采用的缺陷定位方法。

#### 实验八:

图 5.14 是实验示意图。对一块 4.8mm 厚的钢板,采用中心频率为 2.5MHz 的斜探头(入射角为  $53.2^\circ$ )来检测,采用单发单收的方式来激发和接收 Lamb 波。实验中使斜探头位于钢板沿长度方向的中心轴线上。在没有制作人工缺陷前,对板进行检测,测得的波形数据如图 5.15(a)所示。然后在钢板中制作一个孔径为 4mm 的通孔模拟缺陷,通孔位置如图 5.14 中所示,测得的波形数据如图 5.15(b)所示。实验中,使探头入射点距离板右端面为 328mm,记作 L2;使探头入射点距离孔中心距离为 80,记作 L1。

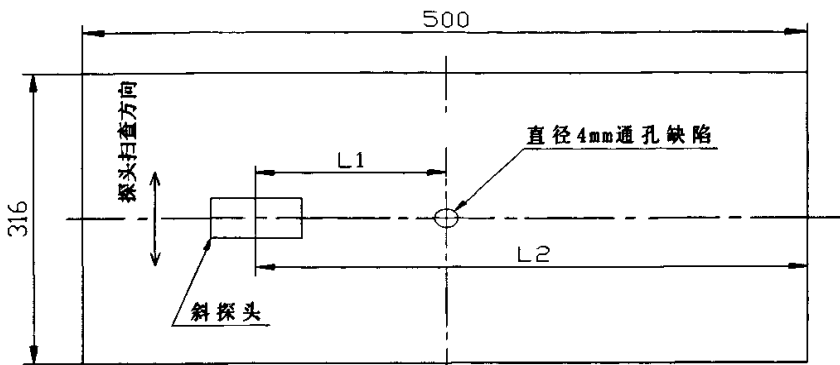
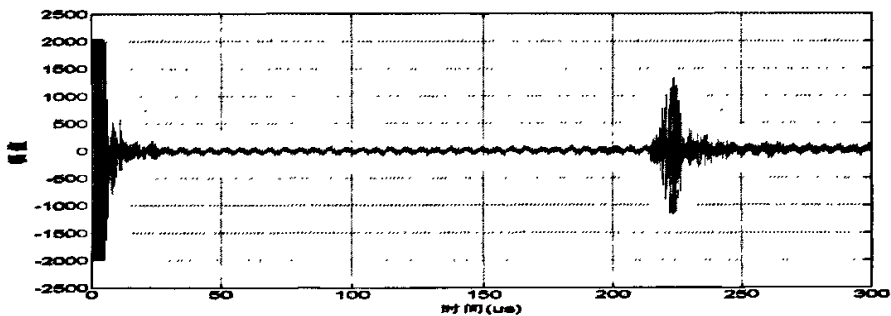
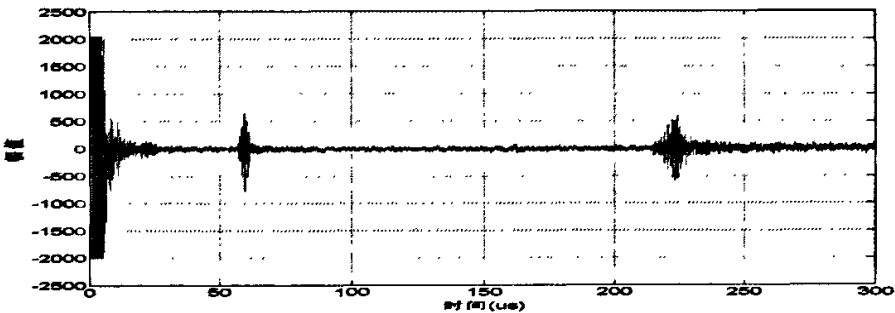


图5.14 实验示意图



(a) 无缺陷时的时域波形图



(b) 有缺陷时的时域波形图

图5.15 缺陷前后测得的时域波形图

观察图5.15，在信号的0~30  $\mu\text{s}$ 之间的那个波包是由初始脉冲产生的，不反映被测材料的任何有效信息，而且具有较宽的频带，会干扰信号的频域描述，在进行傅立叶变换前应人为地将时域信号中0~30  $\mu\text{s}$ 的数据清零，以消除初始脉冲的干扰。图5.15 (a) 是没有缺陷之前的波形图，在时间轴上大约225  $\mu\text{s}$ 处的波包是入射Lamb波遇到板右边端面后反射回来的端面反射波包。图5.15 (b) 是有缺陷之后的波形图，端面反射波包的位置几乎没有变化，只是幅值发生了比较大的衰减。在大约58  $\mu\text{s}$ 处的波包显然是入射Lamb波遇到通孔缺陷之后反射回来的缺陷回波。这和常规超声波检测原理是一样的，即可通过缺陷反射回波在时间轴上的位置来判断缺陷的位置，以及通过缺陷回波相对幅值的大小来判断缺陷的当量大小。这说明可以通过一定角度的斜探头，采用单发单收的方式，沿着薄板上某

一直线进行扫查，原则上是可以对探头前沿一定长度范围进行缺陷检测的。只要激发的 Lamb 波的能量足够高，同时采用一定降噪技术提高信噪比，是可以实现薄板大面积快速无损检测的。

取检测信号  $30\mu s$  以后的数据对缺陷前后的检测信号进行傅立叶变换得到各自的功率谱图，经过对比发现两次检测的 Lamb 波信号成分几乎没有变化，这也验证了前文所得到的“孔型模拟缺陷不易使传播的 Lamb 波信号产生模式转换”这一结论。

我们对板中无缺陷时的信号进行傅立叶变换分析其频谱组成发现在频厚积为  $10\text{MHz}\cdot\text{mm}$  左右集中了信号大部分的能量，而在其它频厚积位置处存在许多干扰噪声，为了提高信噪比，为进一步时频分析打下基础，需要对信号进行滤波处理。这里采用无限冲激响应数字滤波器(IIR)中的 Butterworth 滤波器对信号进行带通滤波，滤波器的阶数为 6 阶，带通滤波截止频率为： $[1.8\ 2.3]*2/f_s$ ，其中  $f_s$  为采样频率，等于  $10\text{MHz}$ 。图 5.16(a)、(b)分别是对无缺陷时检测信号进行滤波处理前后的时域波形图和功率谱图，通过比较发现信号经过带通滤波处理之后，滤掉了其他频带上的干扰噪声。再对滤波后的信号进行短时傅立叶变换，得到时频分布谱图，通过与理论时频分布曲线对比，结果如图 5.17 所示。从图中可以看出有两种模式叠加在时频谱最大位置处，由于信号持续时间较短，加上短时傅立叶变换分辨力的限制，使得我们不能识别出信号中究竟是 S1 模式还是 S2 模式或者是两种模式的叠加，但是这并不妨碍我们进一步的分析。

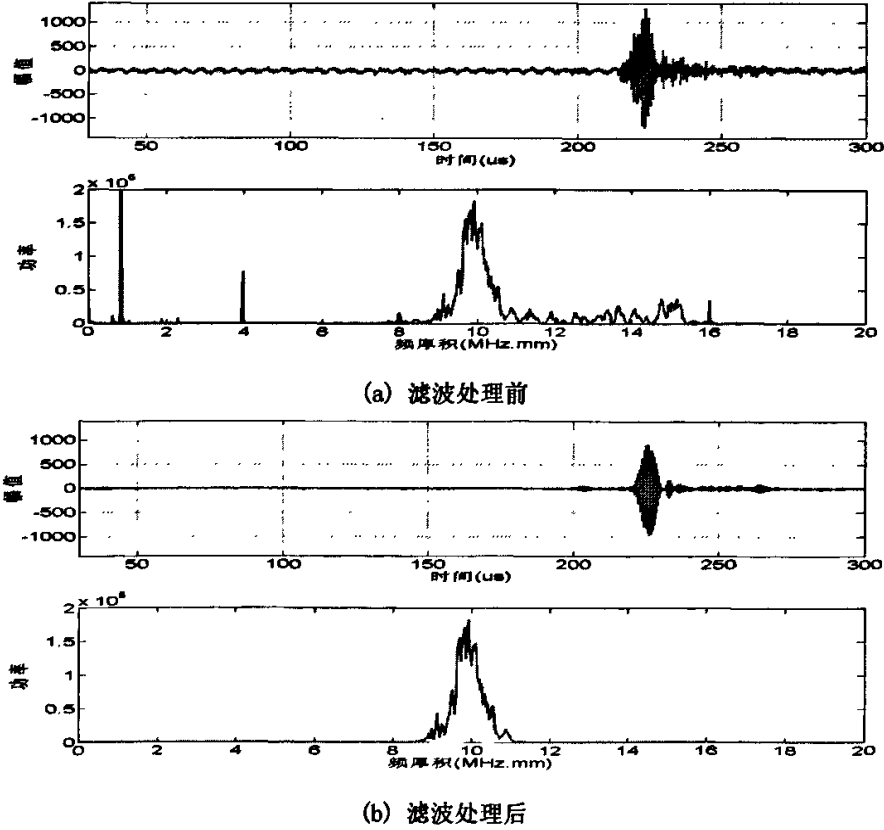


图5.16 对无缺陷时检测信号进行滤波处理前后的结果比较

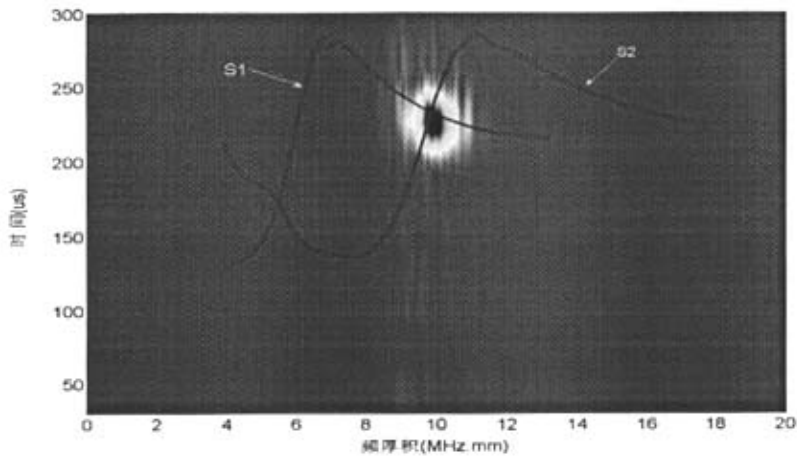


图5.17 实际信号的时频分布图与理论时频分布曲线对比结果

有两种方法可以确定缺陷孔的位置，即L1的大小。第一种方法是通过时间延迟估计法，第二种方法是通过时频分布曲线来计算。下面分别来采用这两种方法来确定L1的大小。

第一种方法，可以仅根据时域波包的到达时间来确定缺陷的位置，由图5. 15(b)可以知道，第一个波包为缺陷通孔的反射波包，波包幅值最大处对应的时间坐标为59. 5 μ s；第二个波包为板端面的反射波包，其最大幅值所对应的时间坐标为225 μ s。根据式（5. 1. 3）可以计算L1的大小。

$$2 L 1 = T 1 \times V \tag{5. 1. 2a}$$

$$2 L 2 = T 2 \times V \tag{5. 1. 2b}$$

得到：
 
$$L 1 = \frac{T 1}{T 2} \times L 2 \tag{5. 1. 3}$$

把T1=59. 5 μ s，T2=225 μ s，L2=328mm 代入到式（5. 1. 3）中得到L1=86. 74 mm，而实测的L1等于80mm，相对误差为8. 4%。

第二种方法，通过时频分布曲线来计算。时频分布中两种模式的Lamb波在某一频厚积处叠加在一起，说明这两种模式Lamb波在此频厚积处的群速度相同，只有这样它们的到达时间才会一致，从而产生信号叠加。可以通过时频分布图提取出信号能量最大处(渲染颜色最深最红的位置)的的频厚积和时间坐标。得到的结果为：频厚积和时间坐标为[9. 845 226. 300]。通过频厚积坐标值，对照Lamb波理论群速度曲线可以得到实验中Lamb波的群速度值为2818m/s，即为Lamb波的传播速度。

现在来分析图5. 16(b)有缺陷后的检测波形，时间轴上第一个的波包是显然是通孔缺陷所带来的反射波包。现在我们来推算此通孔缺陷中心的离探头入射点的距离，从而完成缺陷的定位。经过分析，信号的第一个波包幅值最大时对应的时间点记作T1，等于59. 5 μ s。通孔缺陷中心的离探头入射点的距离用L1来表示，波速用V来表示。根据：2L=T1\*V，就可

以确定 $L_1$ 等于83.84mm。这与实测的数据80mm相当接近,相对误差只有4.80%,这说明第二种方法能够较好地确定缺陷位置。

第一种缺陷定位法计算简单,但是精度相对较低,特别是当探测距离较长时,由于Lamb波的频散使得信号在时间轴上散得很开,使得定位精度更低,仅适合于缺陷初步定位或者对要求不高的场合。第二种缺陷定位方法处理过程相对较为复杂,精度相对较高,若是激发的Lamb波模式较为单一的话,信噪比较高时可以达到更高的定位精度。

#### 5.1.4 缺陷对结构寿命影响的评估

无损检测的最终目的都需要对缺陷对结构寿命的影响情况进行评估,得出结论并对检测过程进行规范。常规超声波无损检测技术比较成熟,对于许多特定的构件都已经有了国家标准或者行业标准进行规范。但是目前为止,对于Lamb波在薄板中的无损检测国外还没有制订相关标准,美国材料试验学会标准(ASTM)及宇航材料规范(AMS)均提出对金属薄板探伤可采用Lamb波,但是对其具体实施方法却未涉及。J·Krautkramer在他的著名“超声检测技术”中也未提出具体的办法,只是指出:“最佳角度与波型往往是用缺陷已知的试件试验时凭经验求出”。国内虽已先后制订了两项国标和一项专业标准,但是这并不能说明Lamb波薄板探伤技术已经成熟,这些标准仍有许多争议甚至是错误的地方。加上本文仅是采用有限的钢板,制作有限的人工缺陷进行实验,尚不能确定缺陷对板结构寿命的影响。要实现这一点,必须进行大量的试验,更多地采用有各种自然缺陷的薄板进行试验,不断积累,建立缺陷数据库,并在以后的检测实践中不断完善,才能建立Lamb波薄板无损检测评估体系。

### 5.2 质点振动位移与Lamb波探伤敏感性关系的研究

#### 5.2.1 质点振动位移曲线的绘制

由第二章可知,在板结构中Lamb波的传播路径上,板的整个厚度上的质点都在作复杂的振动。板中的质点沿椭圆轨迹振动,是纵向振动和横向振动的合成,且在不同深度层面上质点振动幅值和方向是变化的。把质点振动位移分解为沿x轴方向(板厚方向)的垂直分量V和沿z轴方向(传播方向)的水平分量U。这两个分量沿板厚度方向的变化曲线,代表着质点在两个方向上的振动幅度随距离表面深度的变化。由于Lamb波是特定条件下由横波和纵波合成的以特殊方式振动并传播的应力波,从本质上讲Lamb波在缺陷处的反射和衍射情况与质点振动位移之间有可能存在一定的对应关系。

但是由于Lamb波对缺陷的反射机理十分复杂,对于Lamb波反射回波与质点振动位移的U、V分量之间究竟存在怎样的对应关系,国内外尚没有统一的看法<sup>[6]</sup>。相关的实验结果也不能得到全面一致的规律。有文献<sup>[1]</sup>认为U分量的大小与缺陷检测灵敏度直接相关,还有文献<sup>[9]</sup>认为V分量的大小与缺陷检测灵敏度直接相关,但是有作者认为U、V分布均与缺陷检测灵敏度无直接关系,不能作为选择最佳探伤参数的主要依据<sup>[3]</sup>。

下面来绘制质点振动位移曲线为进一步的分析打下基础。由第二章2.3节的式(2.3.4)和式(2.3.5),代入到式(2.3.6)中,可以推导出板中质点振动位移方程式。得到的对称模式和反对称模式U、V分量的表达式<sup>[1]</sup>如下。

对称型:

$$U_s = -B \frac{2\pi f}{C_p} R_t \left\{ \frac{(1 + R_t^2)}{2R_t R_l} \frac{\text{sh}[\pi f d (R_l / C_p)]}{\text{sh}[\pi f d (R_l / C_p)]} \text{ch}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) - \text{ch}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) \right\} e^{j \frac{2\pi f}{C_p} z} \quad (5.2.1a)$$

$$V_s = -B \frac{2\pi f}{C_p} j \left\{ \frac{(1 + R_t^2)}{2} \frac{\text{sh}[\pi f d (R_l / C_p)]}{\text{sh}[\pi f d (R_l / C_p)]} \text{sh}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) - \text{sh}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) \right\} e^{j \frac{2\pi f}{C_p} z} \quad (5.2.1b)$$

反对称型:

$$U_a = -D \frac{2\pi f}{C_p} R_t \left\{ \frac{(1 + R_t^2)}{2R_t R_l} \frac{\text{ch}[\pi f d (R_l / C_p)]}{\text{ch}[\pi f d (R_l / C_p)]} \text{sh}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) - \text{sh}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) \right\} e^{j \frac{2\pi f}{C_p} z} \quad (5.2.1c)$$

$$V_a = D \frac{2\pi f}{C_p} j \left\{ \frac{(1 + R_t^2)}{2} \frac{\text{ch}[\pi f d (R_l / C_p)]}{\text{ch}[\pi f d (R_l / C_p)]} \text{ch}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) - \text{ch}(R_l \frac{2\pi f}{C_p} x) \right\} e^{j \frac{2\pi f}{C_p} z} \quad (5.2.1d)$$

式中 B、D均为常数项,  $C_p$ 为Lamb波相速度,  $f$ 为频率,  $x$ 为质点在板厚方向上的位置变量,  $z$ 为Lamb波传播的距离。  $R_t$  和  $R_l$  为中间变量, 它们的定义如下表5.4所示:

表5.4  $R_t$  和  $R_l$  的定义

	$C_p < C_t < C_l$ 时	$C_t < C_p < C_l$ 时	$C_t < C_l < C_p$ 时
$R_t$	$[1 - (C_p / C_t)^2]^{1/2}$	$-j[(C_p / C_t)^2 - 1]^{1/2}$	$-j[(C_p / C_t)^2 - 1]^{1/2}$
$R_l$	$[1 - (C_p / C_l)^2]^{1/2}$	$[1 - (C_p / C_l)^2]^{1/2}$	$-j[(C_p / C_l)^2 - 1]^{1/2}$

表中,  $C_t$ 为板的横波速度,  $C_l$ 为纵波速度, 当材料选定之后, 这两个量就是常量了。在本实验中采用的板为Q235热轧薄板, 其横波速度 $C_t$ 为3240m/s, 纵波速度 $C_l$ 为5960m/s。代入这些量就可以绘出不同模式在不同参数条件下的质点振动位移曲线。

在一块4.8mm厚的钢板上, 采用频率为2.5MHz(入射角度为 $40^\circ$ )的可变角探头在一块4.8mm厚的钢板上激发出Lamb波检测。收发方式为一发一收。钢板材料为Q235热轧板, 尺寸为500mm×316mm。两探头沿板长度方向的中心轴线上布置, 且探头入射点相距为207mm。首先记录没有制作人工缺陷之前在这块钢板中所测得的波形信号, 然后在钢板的中心位置钻制一个直径为3mm的盲孔, 盲孔的深度约为1.2mm(即为四分之一板厚), 并记录下检测



波形信号。之后保持孔径不便，逐步对这个盲孔进行加深使孔的深度变为2.4mm(即为二分之一板厚)，4.8mm(即为通孔)，分别记录检测波形信号。

图5.18是无缺陷时信号的波形数据以及信号的功率谱图和时频分布图。根据前面所讲的Lamb波模式识别方法可以对信号中所包含的Lamb波模式进行识别。采用STFT对信号进行模式识别，标示结果如图5.18的下部分所示。即信号中主要包含A2、S2、A3 三种模式，且它们的能量依次递减，还有非常少量的S3模式。

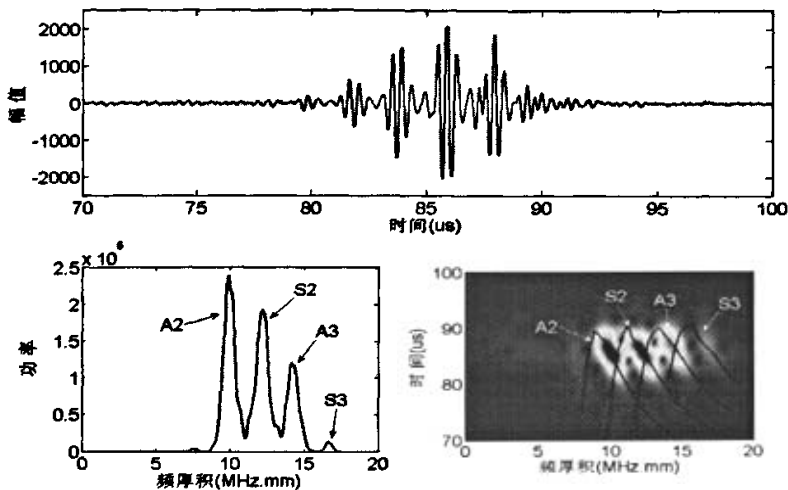


图5.18 无缺陷时的时域波形图及分析结果

由于时域信号中各模式相互叠加无法判断出每一种模式的能量随盲孔深度变化的规律，但是在频域和时频域中各模式均能很好地分辨。因此可以通过提取功率谱图中各模式的功率谱峰值或者提取时频谱图中各模式时频谱最大值来表示它们的能量。由于前文比较得出采用功率谱峰值作为检测参数比采用时频谱峰值有更好的灵敏度，图5.19表示的是各Lamb波模式的功率谱峰值随盲孔深度变化的规律。

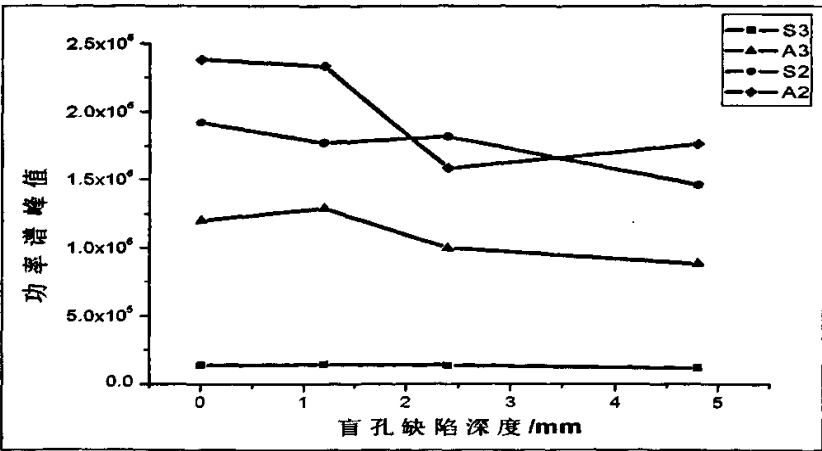


图5.19 各模式的功率谱峰值随盲孔深度变化的规律

由图5.19可以发现信号中各种Lamb波模式尤其是A2模随盲孔缺陷深度的增大，频谱峰

值均出现非线性变化，并且不同的模式表现出不同的非线性关系，这和常规超声检测的规律有很大的出入。上面实验中出现的非线性关系可能与Lamb波质点振动位移有关。下面来探讨它们之间可能存在的关系。

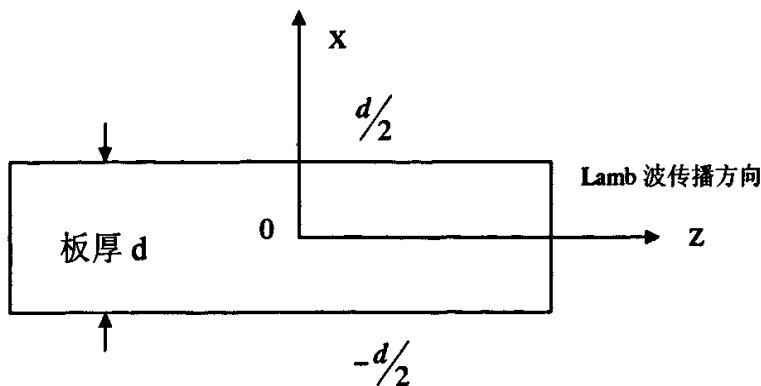
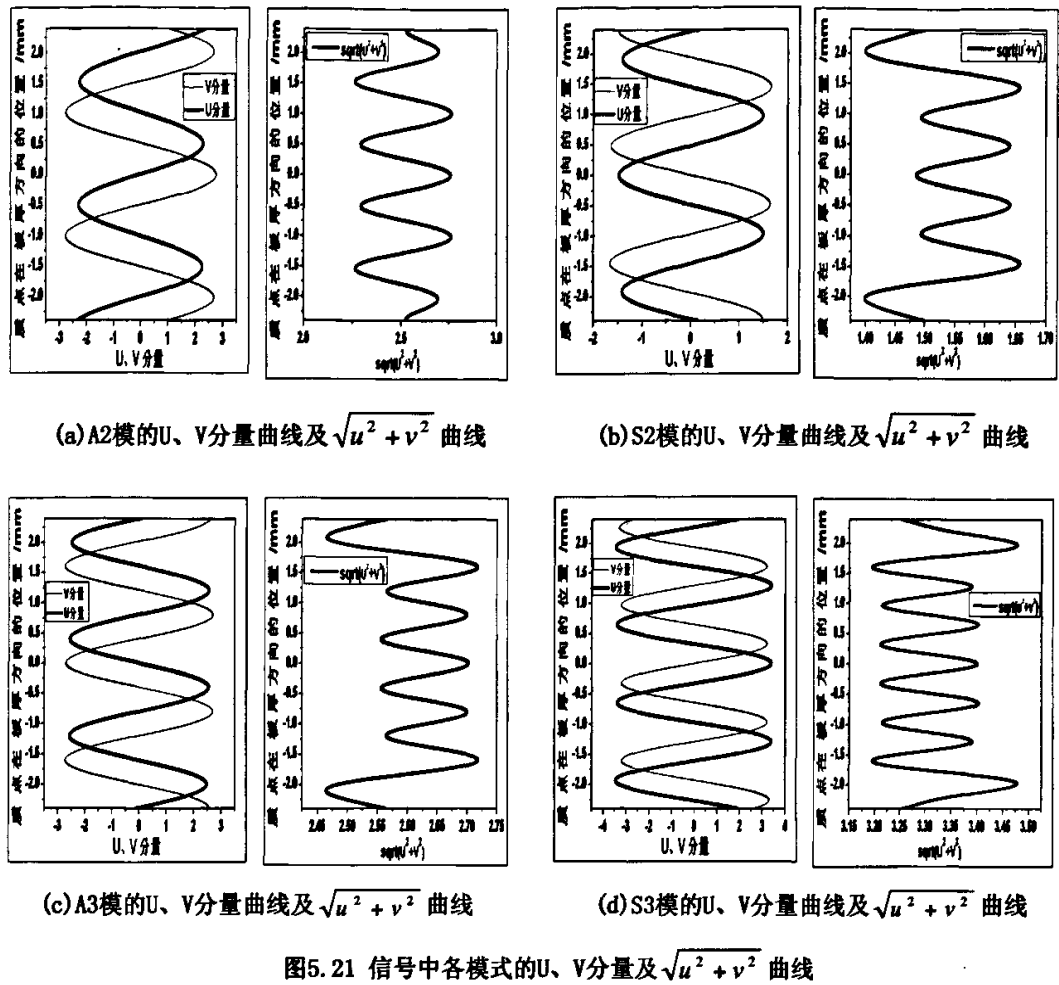


图5.20 大薄板坐标系的X0Z平面

大薄板坐标系的X0Z平面如图5.20所示，板厚为 $d$ ， $x$ 轴沿板厚方向， $z$ 轴沿Lamb波的传播方向。探头位于板的上表面，即位于坐标系中的 $d/2$ 位置处。本实验中被测钢板的纵波速度为 $5940\text{m/s}$ ，横波速度为 $3240\text{m/s}$ ，探头中心频率为 $2.5\text{MHz}$ ，但是由于各个模式的频率都在探头中心频率附近，所以在计算时需要确定各个模式各自的频率。由于信号中所包含的四种模式的在频域中分得比较开，所以可以很容易地从频谱图中提取功率谱峰值所对应的频率来作为这种模式的频率。代入这些已知条件，通过式(5.2.1)可以绘出检测信号中 $A_2$ 模、 $S_2$ 模、 $A_3$ 模、 $S_3$ 模的质点水平振动位移( $U$ 分量)曲线、垂直振动位移( $V$ 分量)曲线以及 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 曲线，如图5.21所示。

由图5.21可以看出每种模式的 $U$ 、 $V$ 分量曲线均不同，而且即使是同一种模式，不同的参数得到的曲线也可能不同，可见Lamb波板中质点振动情况的复杂性。由图可知，对称模式的 $U$ 分量关于板厚中心面对称，反对称模式的 $V$ 分量关于板厚中心面对称，无论是对称模式还是反对称模式的 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 都关于板厚中心面对称。由于 $U$ 、 $V$ 分量表示的是质点振动位移的水平 and 垂直分量，所以在实际应用中它们的绝对值大小才有实际意义，所以需要作出 $|U|-x$ 曲线、 $|V|-x$ 曲线。此外无论是对称模式还是反对称模式的 $U$ 、 $V$ 分量的绝对值在板厚中心面上上下对称的位置处都是相等的，所以无论是对称模式还是反对称模式的 $|U|-x$ 曲线、 $|V|-x$ 曲线都关于板厚中心面对称的，即板中关于板厚中心面对称的质点具有相同的振动幅值。这就决定了Lamb波检测只需要从板的一面进行即可，无需正、反两面都进行检测，这在很多场合都是很实用的。



从本质上讲Lamb波在板中是靠应力传播的，即通过质点的振动来传递能量而发生传播的。采用双斜探头一发一收的方式来检测时，盲孔缺陷位于两探头中间。当传播的Lamb波到达缺陷孔的位置时，一部分Lamb波由于衍射作用“绕过”了孔继续传播到达接收探头，还有一部分Lamb波在孔的迎波面处发生反射和散射，致使这部分Lamb波不能到达接收探头使得接收到的Lamb波发生一定的能量损失。所以从直观上分析，由于U分量是沿Lamb波传播方向上的质点振动位移分量，它的绝对值表示的是板中质点在沿Lamb波传播方向上的振动强弱，当|U|大时，质点在传播方向上的振动就强，能量就大，这样当Lamb波遇到一定大小的缺陷(非截断型缺陷)时，相邻质点的相互作用力就强，通过这个质点间的相互作用力使得Lamb波“绕过”缺陷的能力也就越强，这样通过缺陷继续传播的那部分Lamb波的能量就越高。所以Lamb波对不同深度缺陷探伤敏感性与质点振动位移曲线特别是(|U|-x)曲线可能存在一定对应关系。

5.2.2 质点振动位移与Lamb波探伤敏感性关系的确定

为了更直观地比较，需要按照图5.20中所示的大薄板的X0Z平面坐标系把图5.19的横坐标和图5.21(a)的横坐标统一到同一横坐标下。统一后的横坐标表示的是盲孔缺陷的深

度，变化区间为[-3 3]。图5.22(a)、(b)、(c)、(d)、(e)中的曲线分别是A2模的(U-x)曲线、(|U|-x)曲线、(V-x)曲线、(|V|-x)和 $\sqrt{u^2+v^2}$ 曲线。这几幅图中曲线上的黑点表示的是此深度时质点对应的理论质点振动位移值，这些黑点的连线段表示的是理论质点振动位移的各个分量随盲孔缺陷深度不同的变化规律。图5.22(f)是实测的A2模的功率谱峰值随盲孔缺陷深度变化的曲线。图中各数据点的横坐标：(2.4，1.2，0，-2.4)分别代表的盲孔深度为：0mm(没有缺陷)、1.2mm(1/4板厚)、2.4mm(1/2板厚)、4.8mm(通孔)。

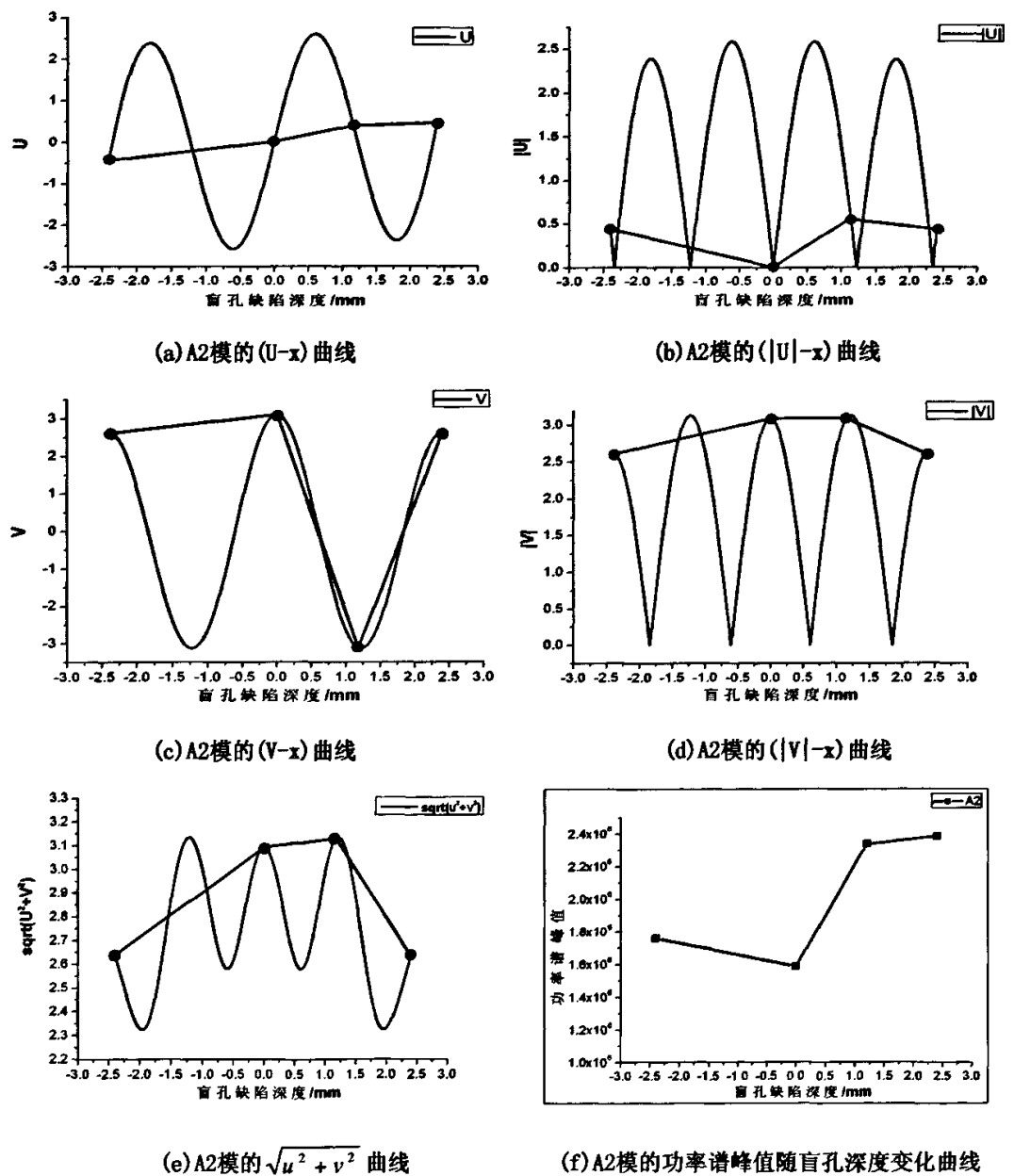


图5.22 A2模质点振动位移曲线与功率谱峰值随盲孔深度变化曲线

这样就可以分别比较这些曲线与图5.22(f)实测的A2模的功率谱峰值随盲孔缺陷深度变化的曲线来找到规律。观察图5.22可以知道,只有从 $(|U|-x)$ 曲线上提取的数据点联成的曲线的变化规律与图(f)的A2模的功率谱峰值随盲孔深度变化曲线大致相符。从其它形式的质点振动位移曲线上提取的数据点连成的曲线与图(f)中曲线的变化趋势完全无关。这说明 $|U|$ 分量的大小很可能与Lamb波对不同深度缺陷探伤敏感性存在关系。可以试着初步得出以下结论:

若采用两个斜探头一发一收的方式来检测,对位于两探头中间的不同深度的孔型人工缺陷, $(|U|-x)$ 曲线上 $|U|$ 分量随孔深度变化的趋势与接收信号的功率谱峰值(即信号的能量)随孔深度变化趋势基本类似。

进一步发现虽然这两者的变化趋势相关,但是并非完全类似。由于在横坐标值取0时, $|U|$ 的值等于0,是最小的,比横坐标取-2.4时的 $|U|$ 值要小,所以当横坐标取值为0变为-2.4时,即盲孔深度由2.4mm(1/2板厚)变为4.8mm(通孔)时,实际检测中接收探头收到的信号的能量反而还有少量增加,这是和上面的结论符合得很好的。但是当横坐标取值增大,由0变为1.2,再变为2.4时,即盲孔深度由2.4mm(1/2板厚)变为1.2mm(1/4板厚),再变为0mm(没有缺陷)时, $(|U|-x)$ 曲线上这三个数据连成的曲线与实际检测信号的功率谱峰值随盲孔深度变化的曲线不尽相同。后者的增大趋势要远高于前者,而且前者在横坐标由1.2变为2.4时 $|U|$ 值有少量减小,但是后者非但没有减小反而还有少量增加,这是为什么呢?

其实,理想的实验方案中缺陷制作必须分别在板内部不同深度处制作缺陷,而非通过钻制不同深度的盲孔缺陷来代替。那样才可以保证在缺陷处于不同深度处所检测到的信号没有上次实验就已经存在的缺陷对信号的“污染”。但是由于现有缺陷加工方法的局限性,只能通过钻制不同深度的盲孔缺陷来代替,由于盲孔的深度是在上一次深度的基础上加深的,使得后检测的信号有上一次实验的影响,这就导致在后来检测的信号的能量比理想状况下要小。也就是说把实际检测信号的功率谱峰值随盲孔深度变化的曲线中无缺陷以及缺陷盲孔深度很小时所对应的功率谱峰值都减掉一个值进行修正,随着盲孔深度的增大,减去的这个值逐步减小。这样得到的修正后的曲线才和理论 $(|U|-x)$ 曲线有很好的类似关系。但是可以观察到,质点的 $(|U|-x)$ 曲线相当复杂,需要减去的这个值具体怎么取值仍然需要进一步研究,特别是当 $|U|$ 为最大值或者最小值时更难确定需要减去多少。

此外由于盲孔缺陷时由钻头钻制的,其底部并不是平面,还有一部分锥体深度比直孔部分要深。本实验中是采用直孔部分的最低点测量的,这将会导致一定误差。所以在本实验中,分析两条曲线时仅分析二者的变化趋势的相关性。

同理可以得到其它模式的质点振动位移曲线,如图5.23、5.24、5.25的(a)、(b)、(c)、(d)、(e)中的曲线分别是S2模、A3模、S3模的 $(U-x)$ 曲线、 $(|U|-x)$ 曲线、 $(V-x)$ 曲线、 $(|V|-x)$ 和 $\sqrt{u^2+v^2}$ 曲线。这几幅图中曲线上的黑点表示的是此深度时质点对应的理论质点振动位移值,这些黑点的连线段表示的是理论质点振动位移的各个分量随盲孔缺陷深度不同的变化规律。图(f)中的曲线分别是S2、A3模、S3模的功率谱峰值随盲孔缺陷深度变化

的曲线。分别比较这些理论质点振动位移曲线与图(f)中的曲线，无论S2模还是A3模或者S3模均得到同样的结论：只有从 $(|U|-x)$ 曲线上提取的数据点联成的曲线的变化规律与图(f)中的功率谱峰值随盲孔深度变化曲线大致相符，只是在横坐标取值由1.2变为2.4时两者的变化趋势不同，其原因与上面的分析相同。从其它形式的质点振动位移曲线上提取的数据点连成的曲线与图(f)中曲线的变化趋势完全不相关。通过上文所述的方法得到修正后的功率谱峰值随盲孔深度不同的变化曲线才和理论 $(|U|-x)$ 曲线有很好的类似关系，这也验证了上文所提出的结论。

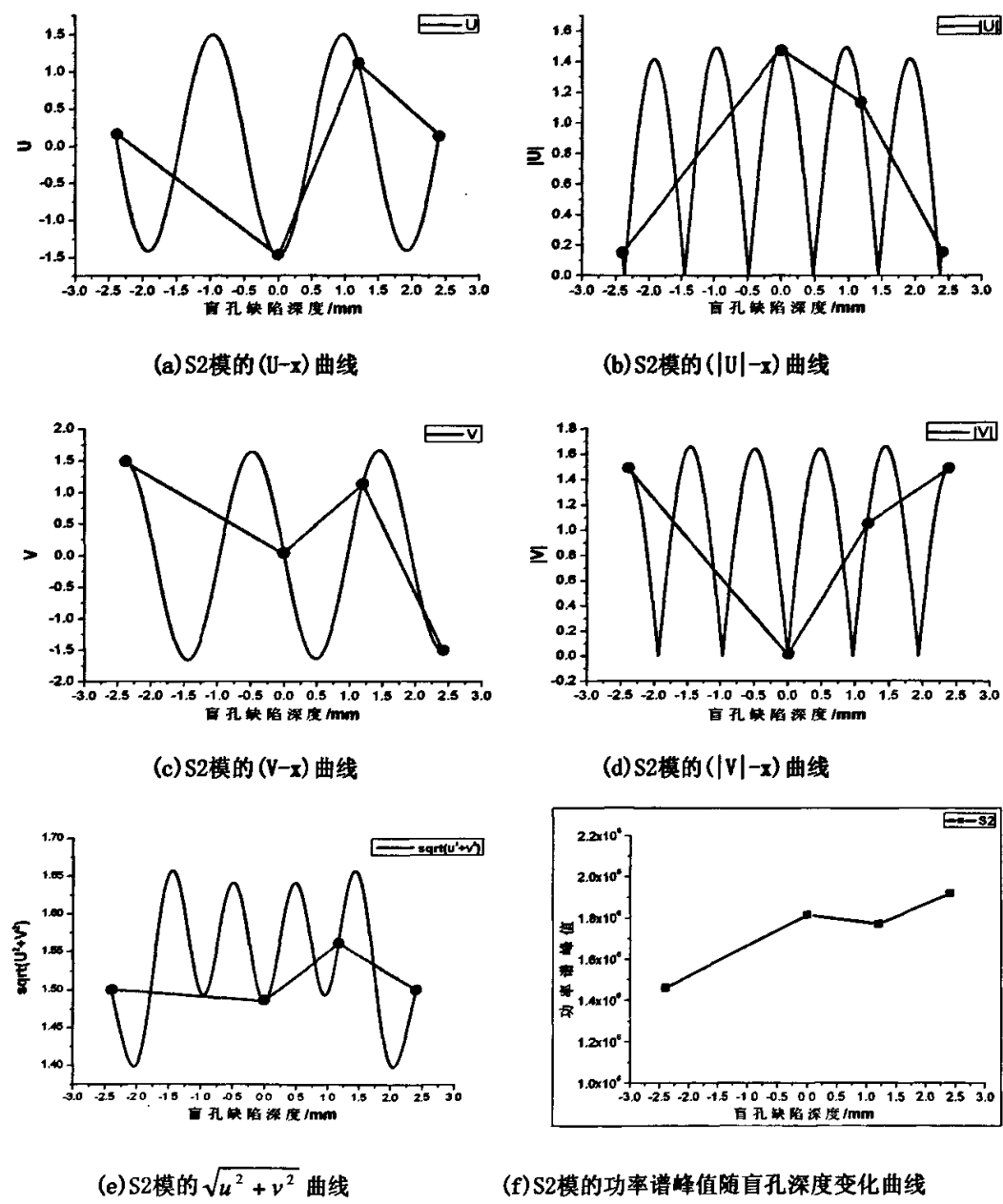
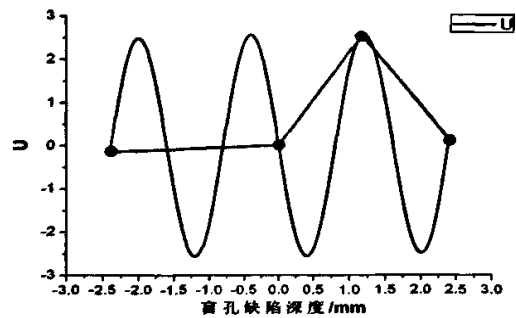
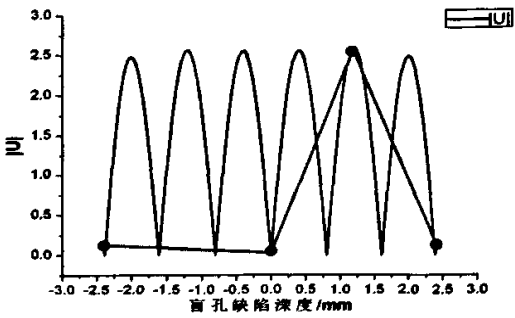


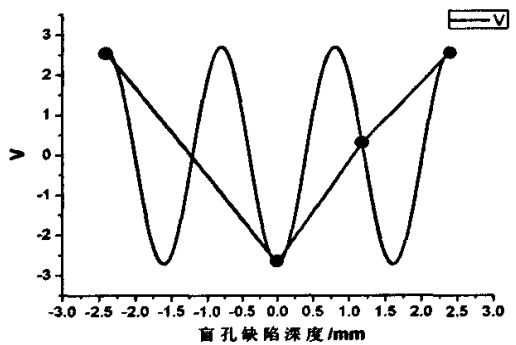
图5.23 S2模质点振动位移曲线与功率谱峰值随盲孔深度变化曲线



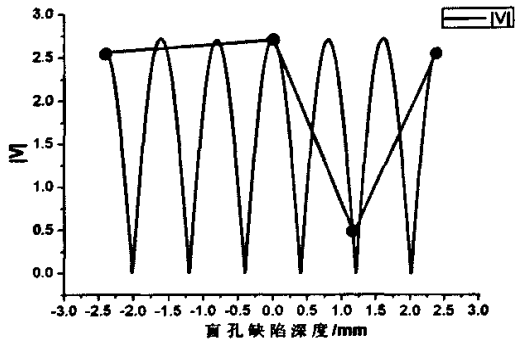
(a) A3 模的 (U-x) 曲线



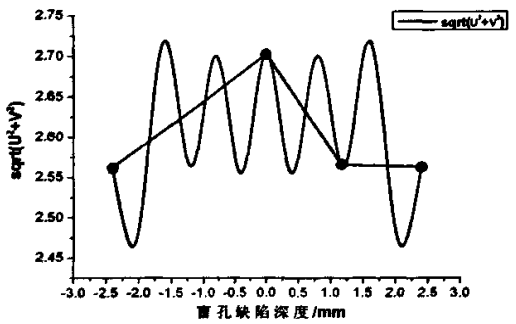
(b) A3 模的 (|U|-x) 曲线



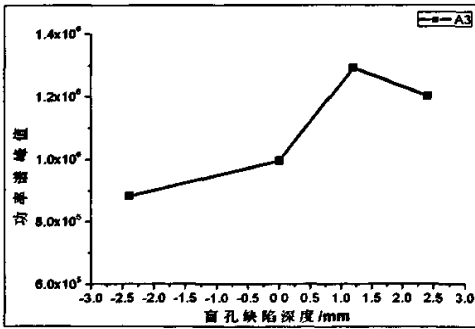
(c) A3 模的 (V-x) 曲线



(d) A3 模的 (|V|-x) 曲线

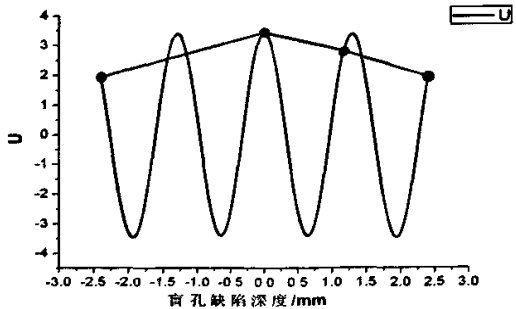


(e) A3 模的  $\sqrt{u^2 + v^2}$  曲线

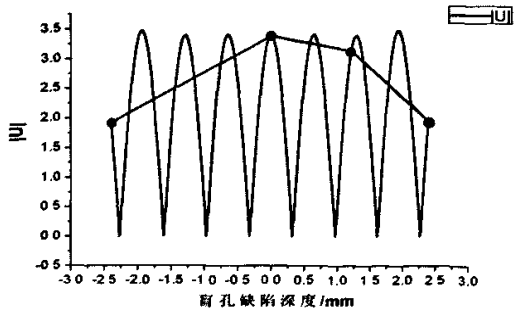


(f) A3 模的功率谱峰值随盲孔深度变化曲线

图 5.24 A3 模质点振动位移曲线与功率谱峰值随盲孔深度变化曲线



(a) S3 模的 (U-x) 曲线



(b) S3 模的 (|U|-x) 曲线

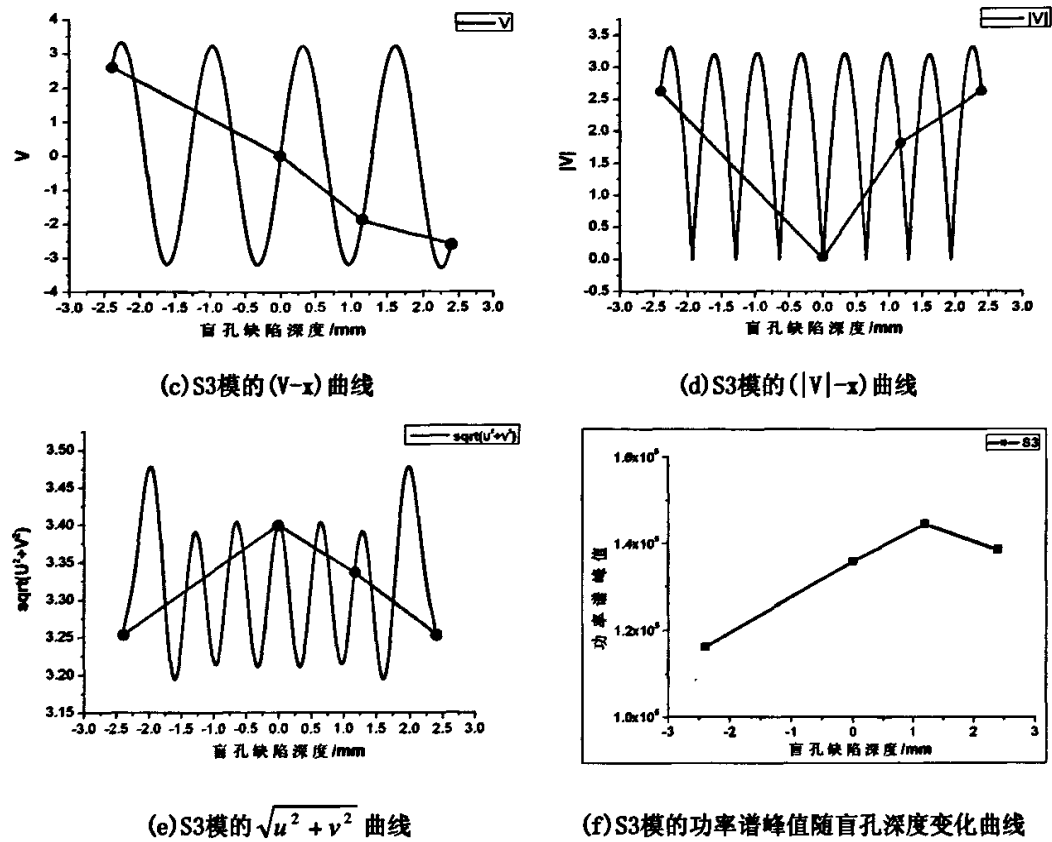


图5.25 S3模质点振动位移曲线与功率谱峰值随盲孔深度变化曲线

通过上面的实验数据分析可以发现质点振动位移的水平分量的绝对值 $|U|$ 与一发一收方式接收到的Lamb波的功率谱峰值存在对应关系，尚未发现垂直方向 $|V|$ 分量以及 $\sqrt{u^2+v^2}$ 分量与一发一收方式接收到的Lamb波的功率谱峰值之间存在何种对应关系。具体对应关系为：若采用两个斜探头一发一收的方式来检测，对位于两探头中间的不同深度的孔型人工缺陷， $(|U|-x)$ 曲线上 $|U|$ 分量大小随孔深度变化的趋势与接收信号的功率谱峰值（即信号的能量）随孔深度变化趋势基本类似。很显然可以得到如下初步结论：

(1) 接收Lamb波的能量与板中某深度处质点振动位移的 $|U|$ 分量之间存在正比关系。由于 $|U|$ 分量与 $|V|$ 分量的变化是成反比的，所以接收Lamb波的能量与板中某深度处质点振动位移的 $|V|$ 分量之间存在反比关系。

根据能量守恒定律可知，通过缺陷后继续传播被接收到的Lamb波的能量与被缺陷反射回去的反射Lamb波的能量应该是成反比的。这样就可以推导出如下结论：

(2) 反射Lamb波的能量与板中某深度处质点振动位移的 $|U|$ 分量成正比，与板中某深度处质点振动位移的 $|V|$ 分量成正比。

进一步可以归纳提出如下假设：采用单探头利用反射法来检测不同深度处缺陷时，需要选择在这些深度处质点振动位移的 $|V|$ 分量大的模式来检测。 $|V|$ 分量越大时，Lamb波对



此深度位置上的孔型缺陷越是敏感,发现缺陷的能力也越强。

文献<sup>[61]</sup>中也曾得出结论认为“A0, A1模垂直振动的位移位置上分层缺陷的反射回波之间存在良好的对应关系”,这里由于制作的人工缺陷为孔型缺陷与文献<sup>[61]</sup>中的实验条件不尽相同,但仍然具有一定可比性。

以上假设仅是在本实验有限的模式条件下初步得出的,能否推及到更为广泛的情况,则需要进一步通过大量实验进行验证,采集更多的数据点进行对比研究。而在板中不同深度处制作人工缺陷的方法也需要改进。目前来看,在板的侧面沿厚度方向上的不同深度处可以分别采用电火花加工的方法加工出很窄的贯穿切缝来模拟这一深度处的缺陷不失为一种更好的缺陷制作方法,因为那样就可以避免后一次加工的缺陷是在前一次加工的缺陷的基础上进行的,可以实验的准确度更高。

### 5.3 本章小结

本章就板结构缺陷识别主要要解决的前三个问题,即:(1)判断是否存在缺陷,(2)确定缺陷的大小和类型,(3)确定缺陷的位置来展开论述与分析,分别采用时域波形比较法、频域功率谱峰值比较法以及短时傅立叶变换这一应用最广的时频分析方法对一系列实验中的模拟缺陷识别,取得了较好效果,得出如下结论:

(1) 采用时域分析法和频域分析法以及短时傅立叶变换均能有效识别板中存在的孔型和狭缝型模拟缺陷。

(2) 对于孔型缺陷,无论是通孔还是各种深度的盲孔,都不易使Lamb波发生模式转换现象,随着通孔缺陷直径的增加Lamb波信号中各模式的功率谱峰值基本上都是单调衰减的,但是对于深度比较浅的盲孔缺陷这种衰减的非线性度增加,盲孔深度越浅功率谱峰值变化的非线性度越大;对于狭缝型缺陷,容易使Lamb波发生模式转换现象,使得Lamb波信号中各模式的功率谱峰值和时频谱峰值随着狭缝缺陷深度的增加发生的变化十分复杂。同时发现缺陷的取向对Lamb波的传播有很大的影响。因此在实际的薄板检测过程中,应该在两个相互垂直的路径上进行扫查,以免发生漏检。

(3) 分别采用时间延迟估计法和通过理论时频分布曲线计算法这两种方法对缺陷进行定位,发现第一种缺陷定位方法计算简单,定位精度相对较低,第二种缺陷定位方法处理过程相对复杂,但是定位精度相对较高。

最后推导出质点振动位移公式,同时绘出检测信号中所包含的各Lamb波模式的质点振动位移曲线,最后采用实验对比得到初步结论认为:(1)若采用两个斜探头一发一收的方式来检测,对位于两探头中间的不同深度的孔型人工缺陷,接收Lamb波的能量与板中某深度处质点振动位移的 $|U|$ 分量之间存在正比关系。(2)进一步推导提出“采用单探头利用反射法来检测不同深度处缺陷时, $|V|$ 分量越大时,Lamb波对此深度位置上的孔型缺陷越是敏感,发现缺陷的能力也越强”的假设。

## 第六章 希尔伯特-黄变换(HHT)在 Lamb 波信号处理中的应用

### 6.1 HHT(Hilbert-Huang Transform)概述

1996年,美籍华人Norden E. Huang(黄锔)等人在对瞬时频率的概念进行深入研究后,创立了希尔伯特-黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT)<sup>[43]</sup>这一新的信号分析方法。这一方法创造性地提出了固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)的新概念以及将任意信号分解为固有模态函数方法——经验模态分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD),从而赋予了瞬时频率合理的定义、物理意义和求法,初步建立了以瞬时频率为表征信号交变的基本量,以固有模态函数为基本时域信号的新时频分析方法体系。

作为一个崭新的时频分析方法, HHT完全独立于傅立叶变换。它是目前第一种不需要利用特定函数形式(如傅立叶变换的三角函数,小波变换的小波基函数等)对数据进行分解的具有自适应能力的先进时频域信号处理方法<sup>[43]</sup>。与基于傅立叶变换的其他信号处理方法相比,它最大的优点在于对非线性和非平稳数据的能力。它能够准确地反映出物理过程中能量在时间尺度上的分布规律,并在时频域内准确地测定特定事件的发生。该方法首先在海洋工程中得到应用,随后扩展到地震信号处理、土木工程结构健康检测等领域,在实际应用中显示出了独特的优点,取得了较好的效果。但是这一方法提出的时间还不长,在理论的建立和方法的完善方面还有待继续深入研究。

HHT分析主要分两步进行,第一步通过经验模态分解EMD(Empirical Mode Decomposition)把输入信号分解成有限个数的固有模态函数IMF(Intrinsic Mode Function),第二步通过希尔伯特变换,求出各阶IMF的瞬时频率IF(Instantaneous Frequency),再用以求解时频分布。

#### 6.1.1 希尔伯特变换与瞬时频率

频率是个极其重要的物理量,定义为信号周期倒数,其物理含义显而易见。对于平稳信号,经过傅立叶变换后分解得到正弦信号,它的频率为恒值,不随时间变化。但是对于非平稳信号,它的频率是随时间变化的函数,故提出瞬时频率概念。瞬时频率即表征信号在局部时间点上瞬态频率特性,整个持续期上的瞬时频率反映了信号频率的时变规律。

为了计算一个信号的瞬时频率,首先必须将分析的信号转化为其解析信号,通常采用的方法是Hilbert变换。解析信号的优点在于它剔除了实信号中的负频率成分,同时不会造成任何信息损失,也不会带来虚假信息<sup>[39]</sup>。

假设 $X(t)$ 是一个实的非平稳信号,它的Hilbert变换 $H(t)$ 定义为:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6.1)$$

即 $H(t)$ 是 $X(t)$ 与 $\frac{1}{\pi\tau}$ 的卷积,式中 $PV$ 表示取积分的主值,通过这一定义可以得到信号 $X(t)$ 的解析信号 $Z(t)$ :

$$Z(t) = X(t) + jH(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (6.2)$$

其中,

$$A(t) = |Z(t)| = |X(t) + jY(t)| \quad (6.3)$$

$$\theta(t) = \arg[Z(t)] \quad (6.4)$$

$A(t)$  为解析信号的瞬时幅值,  $\theta(t)$  为瞬时相位。根据式 (6.5) 就可以得到瞬时频率  $f(t)$ 。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\theta(t)]}{dt} \quad (6.5)$$

有定义可知, 希尔伯特变换只对零均值信号分析有效, 如果分析信号不是零均值, 相当于经过了一个直流滤波器, 滤掉了直流成分, 直接影响分析结果。因此在对信号进行希尔伯特变换前需要对信号进行均值化平稳处理, 而 EMD 的过程正是不断去除信号中的趋势, 使信号平稳化、均值为零, 得到各阶 IMF, 以便后期采用希尔伯特变换求解瞬时频率。

### 6.1.2 固有模态函数 (IMF)

在物理上定义一个有意义瞬时频率的必要条件是: 函数相对于局部零均值是对称的, 并且有相等的过零点个数和极值点个数。为了满足使用瞬时频率的要求, Huang 提出把信号分解为一系列的固有模态函数 (IMF) 分量。

固有模式函数 (IMF) 是在 HHT 中相当于傅立叶变换中的三角函数的作用, HHT 认为任何信号都可以通过经验模态分解 (EMD) 得到一有限系列的固有模式函数 (IMF)。它满足以下两个条件: (1) 在整个数据范围内, 极值点和过零点的数量必须相等或者最多相差一个; (2) 在任何点处, 所有极大值点形成的上包络线和所有极小值点形成的下包络线的平均值始终为零。

第一个条件是显而易见的, 它类似于高斯平稳过程的窄带要求。第二个条件把传统的全局条件调整到局部情况。只有满足了这个条件, 得到的瞬时频率才不会有因为不对称波形的存在而引起的不规则波动, 所以这一点是得到正确瞬时频率的必要条件。

一般的信号都不满足 IMF 的条件, 于是 Huang 等人创造性的提出了采用经验模式分解 (EMD) 方法, 把信号分解为所需的 IMF。

### 6.1.3 经验模态分解 (EMD)

EMD 分解的过程实质上是对信号的强制平稳化处理, 采用数值分析中的样条插值, 得到信号的平滑包络, 从而求得信号的最直接的变化趋势。当原信号减去这一趋势后则剩下最直接的振荡模式, 重复以上过程, 直到这个振荡模式为一零均值的、可以通过希尔伯特变换有效地求得各时间点上瞬时频率的信号时, 认为得到信号的一个振荡模式。从原信号中减去这个振荡模式后可继续分解, 从而得到一系列的振荡模式。Huang 把它们称为 IMF<sup>[43]</sup>。

这里以如图 6.1 所示的信号为例详细介绍 EMD 方法分解信号时的具体过程。这个信号是三个不同频率的正弦信号的和信号, 表达式为:

$$x(t) = \sin(2\pi \cdot t) + 2\sin(20\pi \cdot t + 1.27) + 3\sin(30\pi \cdot t + 5.28)$$

信号的时间范围为0s到2s，数据点数为201点。分解此信号的EMD具体过程如下：

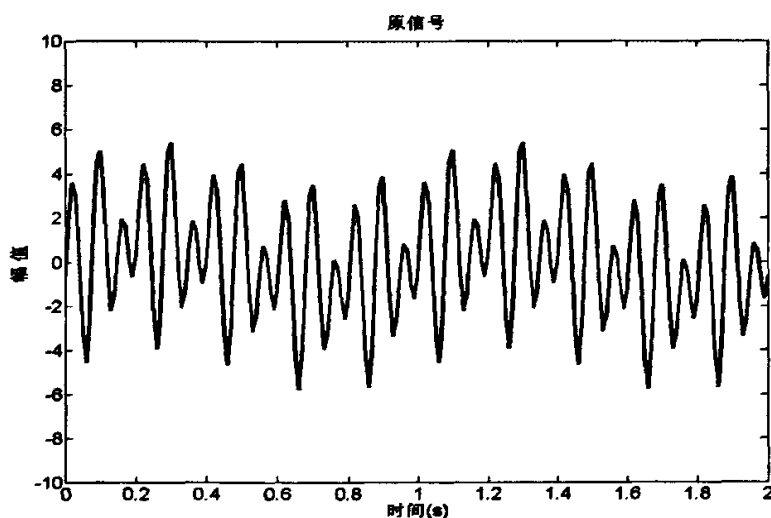
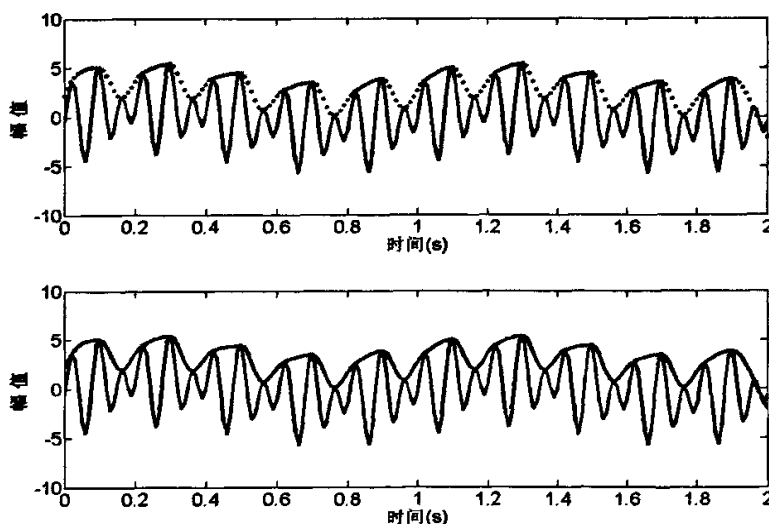
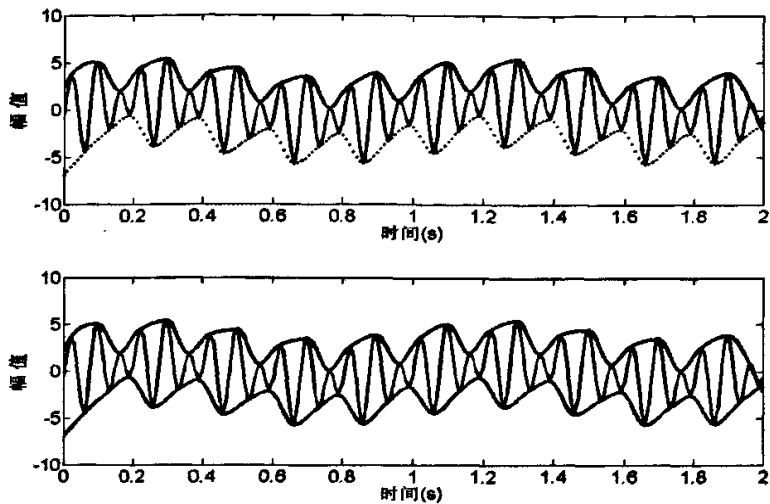


图6.1 原信号 $x(t)$

(1) 首先找出数据序列的所有局部极大值。在这里，为更好保留原序列的特性，局部极大值定义为时间序列中的某个时刻的值，其前一刻的值不比它大，后一刻的值也不比它大。而后用三次样条函数进行插值，得到原序列的上包络线 $x_{\max}(t)$ 。同样，可以得到序列的下包络线 $x_{\min}(t)$ 。上下包络过程如图6.2所示。



(a) 上包络过程



(b) 下包络过程

图6.2 求上下包络过程

(2) 计算上下包络线的均值  $m(t) = [x_{\max}(t) + x_{\min}(t)]/2$ ，得到均值曲线  $m(t)$ 。均值曲线如图6.3中上下包络线中间的“\*”连线所示。

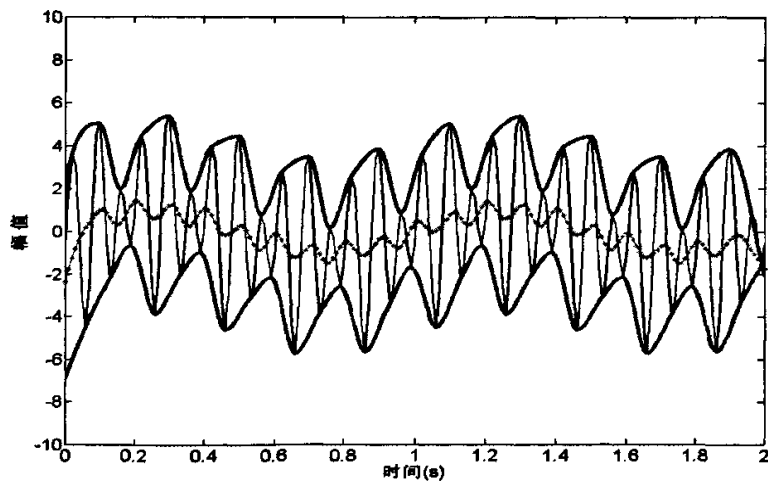


图6.3 计算上下包络的均值

(3) 用原信号  $x(t)$  减去均值  $m(t)$ ，得到第一个组件  $h(t) = x(t) - m(t)$ 。由于原始系列的差异，组件  $h(t)$  不一定就是一个IMF。如果  $h(t)$  满足固有模态函数的两个条件，就认为它是一个IMF；如果  $h(t)$  不满足固有模态函数的两个条件，就把  $h(t)$  当成原始信号，重复(1)~(3)，直到满足条件为止，这时把这个  $h(t)$  作为一个IMF，令  $IMF_1(t) = h(t)$ ，至此第一个IMF提取过程完成。从实验信号中得到的第一个组件如图6.4所示。

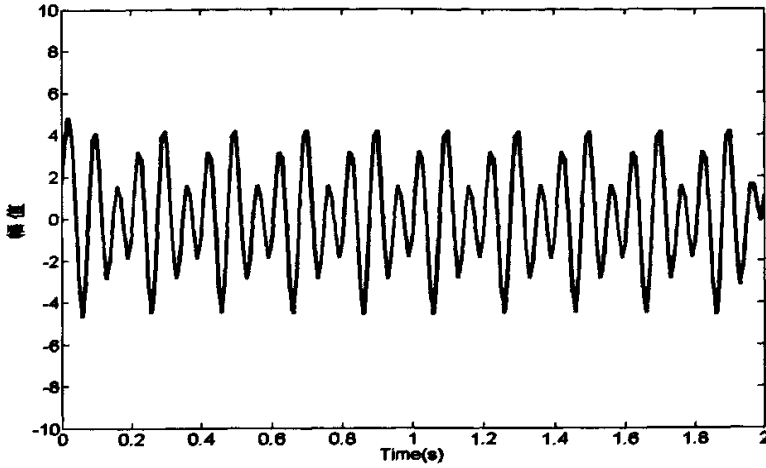


图6.4 第一次筛选后的结果

(4) 接下来, 从原始信号中减去第一个IMF分量  $IMF_1(t)$ , 得到剩余信号  $R_1(t)$ ,  $R_1(t) = x(t) - IMF_1(t)$ 。然后把  $R_1(t)$  作为一个新的信号, 按照以上的步骤, 依次提取第 2, 第3, …… , 直至第  $n$  阶固有模态函数  $IMF_n(t)$ 。最后, 由于剩余分量  $R_n(t)$  已经变成了一个单调序列或者常数系列, 终止筛选过程。这样信号  $X(t)$  经过EMD分解为一系列平稳信号  $IMF_1(t)$ ,  $IMF_2(t)$ ,  $IMF_3(t)$  ……  $IMF_n(t)$  和一个剩余信号  $R(t)$ 。其中,  $IMF_i(t)$  是各阶固有模态函数,  $R(t)$  是一个残余信号, 它是原信号整体的变化趋势或者一个常量。

$$X(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + R(t) \quad (6.6)$$

在这里, 直接通过IMF的定义来判定何时停止筛选显然不够方便, 所以Huang定义了标准偏差(Standard Deviation, 下简称 SD)来判断一个筛选何时完成。SD<sup>[43]</sup>可以由连续的两个筛选结果得到:

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[ \frac{|(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (6.7)$$

$h_{1(k-1)}(t)$  和  $h_{1k}(t)$  分别表示两个连续的筛选结果。理论上讲, SD的值越小, 所得的本征模式函数的线性和稳定性就越好, 能够分解出的 IMF 个数也就越多, 但是往往会带来一些问题。实践表明, 当SD值介于0.2~0.3之间时<sup>[43]</sup>, 既能保证本征模式函数的线性和稳定性, 又能使所得的本征模式函数具有相应的物理意义。

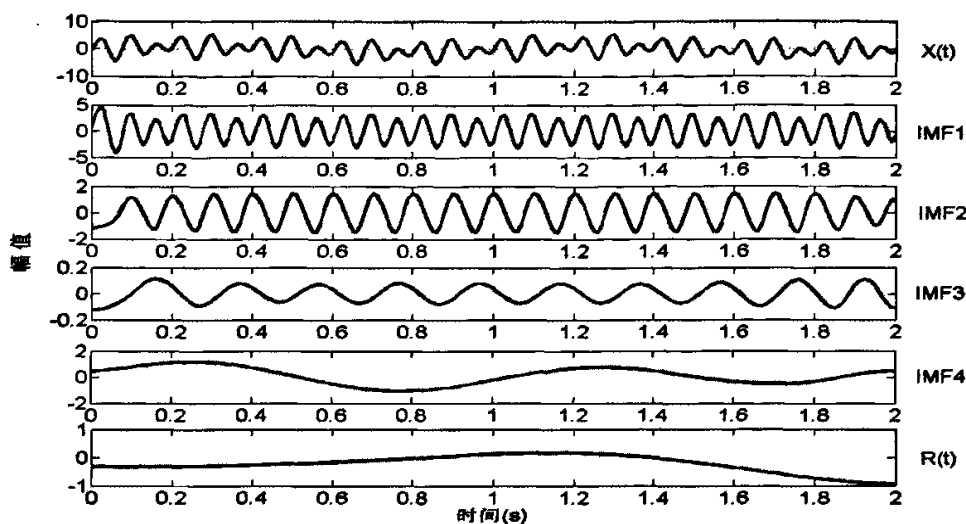


图6.5 信号的EMD分解结果

对上述信号进行EMD分解，得到的结果如图6.5所示。有图可知，信号被分解为4个IMF分量和一个残余信号 $R(t)$ 。其中第1、2、3阶IMF分量分别代表信号中的三个正弦信号成分，且分解得到的各阶固有模态函数的中心频率是由高到低出现的。第4阶IMF分量和残余信号均是代表信号整体的趋势并不表示具体的信号成分。一般来说，前面几阶IMF分量基本代表了信号中所包含的成分，后面几阶IMF分量以及残余信号不是我们感兴趣的部分，在信号分析中常常略去不加考虑。在对具体信号的分析中究竟该取前面的多少阶IMF分量来分析才算对信号分析得比较完整，这需要根据事先对信号的认知信息来具体确定。

6.1.4 边端效应的处理

HHT 方法的分析质量很大程度上取决于EMD分解的质量，而在应用EMD方法时的一个非常棘手的问题是，由于信号两端不可能同时处于极大值和极小值，这样筛选过程中构成上下包络的三次样条函数在数据序列的两端就会出现发散现象，即所谓的边端效应。如图6.3中的上下包络线就存在一定发散现象。另外，在进行Hilbert变换时，信号的两端也会出现严重的边端效应。对于一个较长的数据序列来讲，可以根据极值点的情况抛弃一些两端的数据来保证所得到的包络的失真度达到最小。但对于一个数据点数少的序列来讲，这样的操作就变得完全不可行。因此，必须对信号或其极值向外进行延拓，以确保包络线抵达端点。端点延拓的目的是确保上、下包络都与端点相交，以便有与每一个信号点对应的局部平均值。而上、下包络是由极大值和极小值连结而成的，因此只要对极大值和极小值进行延拓，而不必对信号本身进行延拓。目前常用的端点延拓方法主要有镜像闭合延拓法<sup>[64]</sup>、利用神经网络进行延拓法<sup>[65]</sup>、半周期半对称延拓法等来进行端点延拓。

由于本文研究的Lamb波信号采样点数比较大，均在1000点以上，而且真正包含有用信息的波包距离信号两端较远，因此完全可以直接把数据端点作极值点，在进行EMD计算时会自动舍弃信号两端极少数的数据，这对信号的影响几乎可以忽略。这样可以节省大量的

时间和运算量。

6.2 HHT算法的实现

通过对信号进行EMD分解之后得到各阶IMF分量之后，分别对每阶IMF分量进行希尔伯特变换，求出各个IMF分量的瞬时频率和瞬时幅值。这样就可以得到信号各成分的瞬时幅度谱、希尔伯特边际谱、希尔伯特时频谱，从而完成对信号的时域分析、频域分析以及时频分析。具体的算法需要编写程序来实现。编写这些算法比较复杂同时也不是本文的主要工作内容，鉴于目前Internet上存在一些前人编制的HHT算法工具箱，所以本文采用的HHT算法程序就是来自Internet的。通过在Matlab中运用工具箱中的函数来对检测中的Lamb波信号进行HHT分析。

6.3 Lamb 波信号的 HHT 分析

采用上一章5.1.2小节中实验七的检测数据作为原始数据进行HHT分析。为了论述的方便，这里仅说明一下实验钢板的编号情况。第一块钢板(记做B1板)上制作的缺陷分别为直径1mm、2mm，3mm，4mm的通孔；第二块钢板(记做B2板)上制作的缺陷分别为直径1mm、2mm，3mm，4mm，深度2.4mm的盲孔；第三块钢板(记做B3板)上制作的缺陷分别为直径1mm、2mm，3mm，4mm，深度1.2mm的盲孔；

这里只作出A1板无缺陷时的检测信号和它的EMD分解结果图，如图6.6所示，从上到下分别是检测信号的时域波形图和它的前四阶IMF分量，四阶以后的IMF分量由于能量非常微弱所以没有作出。经过计算，前三阶IMF信号的和信号与原信号的相关系数为0.996，这证明EMD对原信号分解得相当好，且前三阶IMF占原信号成分的主要部分。

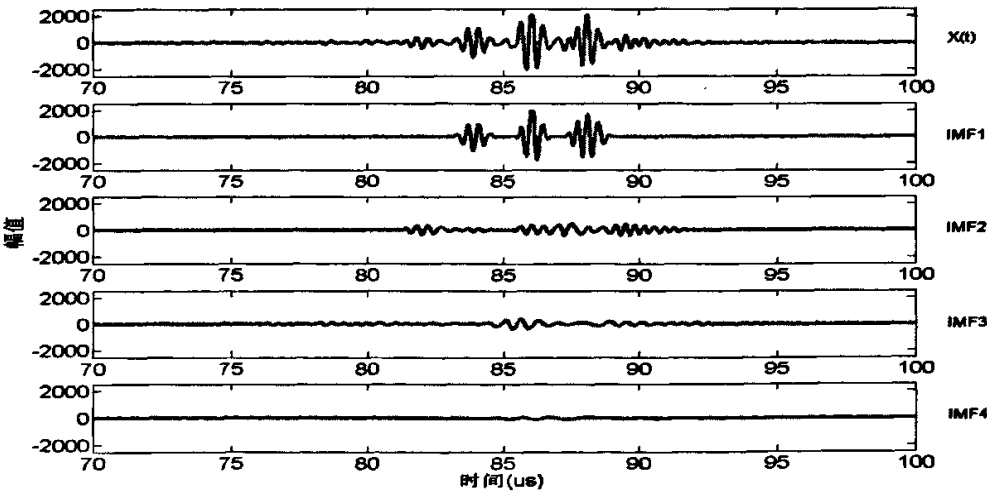


图6.6 B1板无缺陷时的检测信号及其前四阶IMF

图6.7作出的是B1板无缺陷时检测信号的功率谱图及其前三阶IMF的功率谱图，从能量上看，第一阶IMF分量占信号能量的绝大部分，因此对这阶IMF分量(记作IMF1)进行进一步分析。



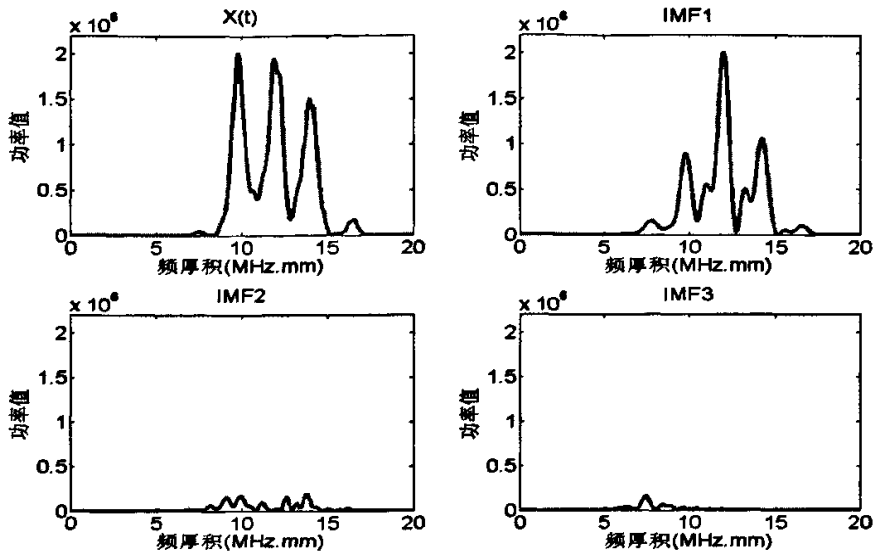


图6.7 B1板无缺陷时检测信号的功率谱图及其前四阶IMF的功率谱图

进一步通过HHT分析工具箱(由Matlab语言编写)来得到IMF1分量的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert边际谱、时频Hilbert谱图,从而完成对信号的时域分析、频域分析以及时频分析。

IMF1的瞬时幅值图如图6.8下部分所示,由图可知,IMF1的瞬时幅值与原信号时域波形图的上包络基本相符。进一步分别对比B1、B2、B3板中的没有缺陷以及有各种孔径大小的缺陷时检测信号的IMF1 的瞬时幅值图进行比较发现,各时间段出现的峰值大小规律凌乱,而且出现的时间段也毫无规律可循。原因可能是IMF1并不是从原信号中分解出来的具有唯一模式的Lamb波成分,这在对它进行傅立叶谱分析中也可以看出来。与原信号一样它也是由几种模式的Lamb波成分叠加在一起组成的,尽管它表现出平稳性,这样就使得瞬时幅值的变化没有规律可循。

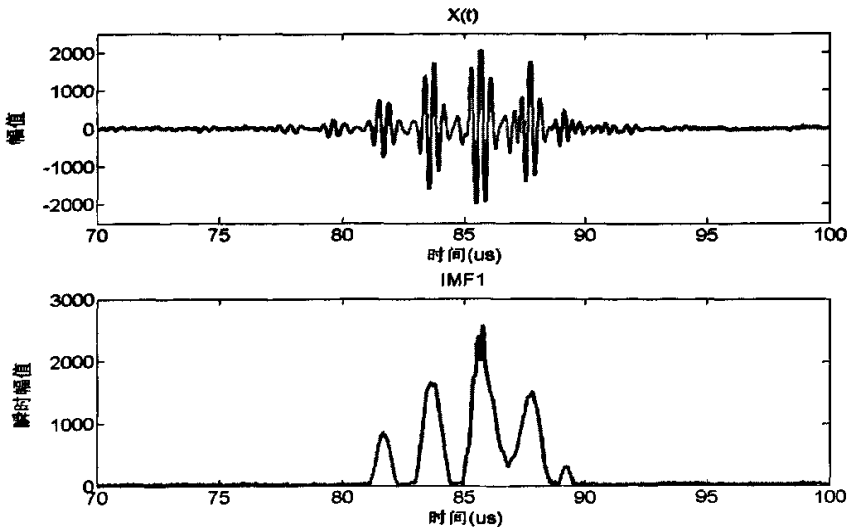


图6.8 B1板无缺陷时检测信号的时域波形图和IMF1的瞬时幅值图

图6.9, 6.10, 6.11分别是IMF1的瞬时频率图、Hilbert边际谱图、IMF1的时频Hilbert谱图。通过图6.9上部分发现大量的噪声造成干扰，虽然它们的能量很小，但是它们却存在于整个时间段，而且噪声的频带比较宽，降低了有用信号的瞬时频率分辨力，图6.9下部分是各部分有用信号的瞬时频率图的局部放大图。通过局部放大图我们可以发现，信号的瞬时频率是随时间变化的，且在探头中心频率(2.5MHz)附近上下无规则变化。图6.10也反映了噪声对信号Hilbert边际谱图的影响，它们虽遍布整个频带，但是能量相对很小。同时发现有用信号频带上的Hilbert边际谱规律杂乱，这也可能和IMF1实际包含了几种Lamb波模式有关。图6.11也发现上述问题，有用信号部分分辨力太低，被大量噪声淹没。

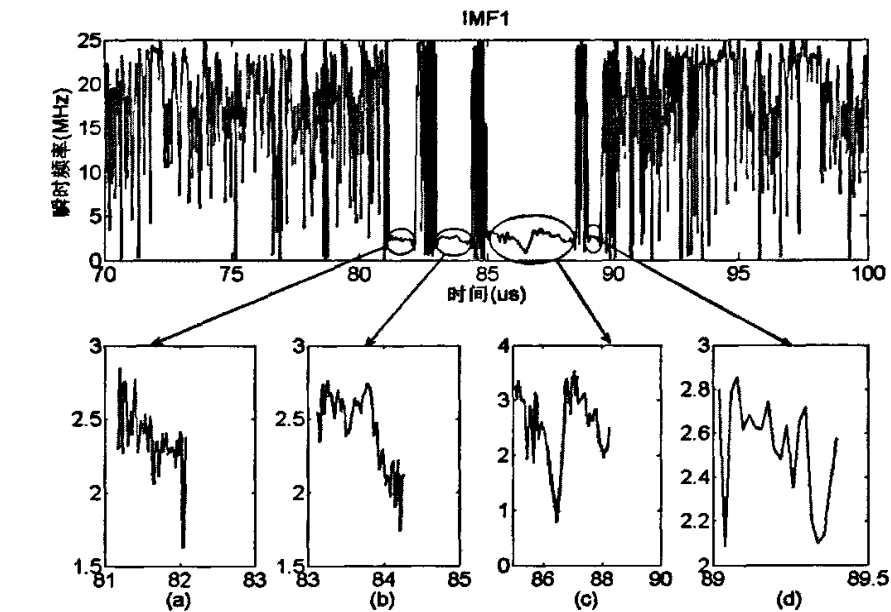


图6.9 IMF1的瞬时频率图

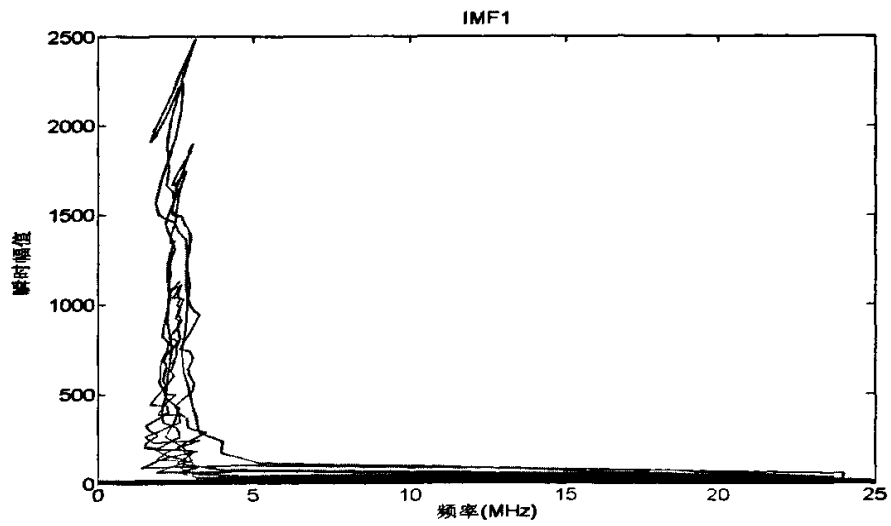


图6.10 IMF1的Hilbert边际谱图

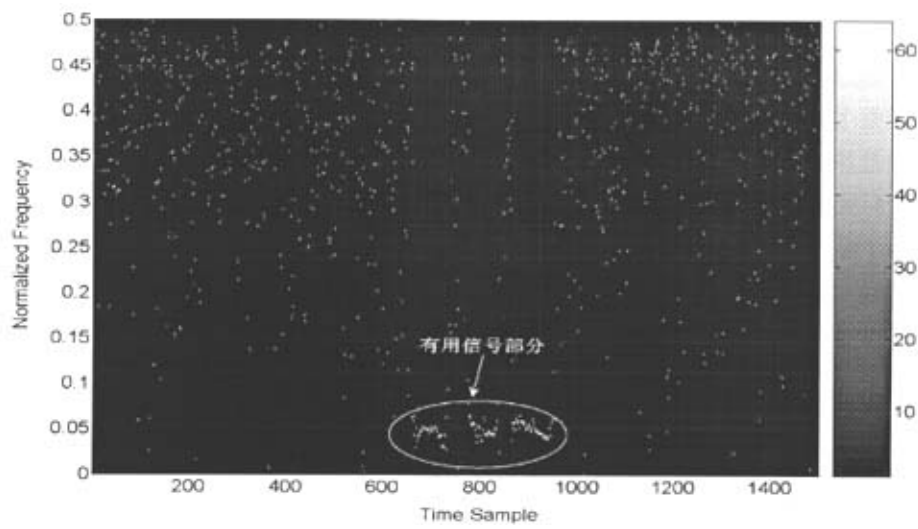


图6.11 IMF1的时频Hilbert谱图

由此可见，采用直接对多模式Lamb波信号进行EMD分解得到第一阶IMF分量，然后对IMF1进行Hilbert变换得到IMF1的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert边际谱、时频Hilbert谱图，进而完成对信号的时域分析、频域分析以及时频分析这一做法是不适合的。因为大量的噪声干扰不说，而且多模式的Lamb波也会相互干扰，从而不能提取有效的参数进行无损检测与评价。

针对上面发现的问题，可以对多模式Lamb波的HHT方法处理过程作一下改进。Yang, J. N.<sup>[66]</sup>等人认为当有如下两种情况(1)当各阶IMF的频率都比较高时，(2)当信号被高频噪声污染之一时，需要采用带通滤波技术对原信号进行处理之后才进行EMD分解。因为EMD分解得到的各阶IMF分量，首先得到的是最高频率分量，往后分解得到的IMF分量的频率依次减小。所以，如果信号存在上述两种情况之一时，提取的头几阶IMF分量往往不是包含着相互混叠的信号成分，就是包含有高频噪声的无用信号。这也说明对于多模式或者多成分的信号，特别是当这些模式或成分频率相近以及含有高频噪声时，不能对原信号直接进行EMD分解得到第一阶IMF。他们的做法是：(1)先对待分析信号进行傅立叶变换，作出频谱图。并找到各功率谱峰值。(2)从高频到低频设计带通滤波器，滤波器个数与频谱峰值个数相同。先采用高频的带通滤波器对信号进行带通滤波，得到信号中的高频成分，再对高频成分进行EMD分解得到的第一阶IMF作为原信号的第一阶IMF分量。(3)从高频到低频依次采用设计好的带通滤波器对原信号进行带通滤波，分别对得到的信号进行EMD分解，再把各自得到的第一阶IMF分别作为原信号的第二阶，第三阶，……第*i*阶IMF分量。

由于本实验的检测信号为多模式Lamb波，所以需要进行带通滤波之后才能进行HHT分析。根据图6.12中信号的功率谱图可以知道，信号的频谱峰值有四个，且频带比较接近。高频成分功率谱峰值很小可见能量很弱为次要信号成分，另外三种频率成分的功率谱峰值较大为主要信号成分。前面四章所有的功率谱图的横坐标均为频厚积(MHz·mm)，考虑到滤波器的设计，这里功率谱图的横坐标为频率(MHz)，如果要转化到频厚积—功率空间，只

需要把频率坐标量乘以板厚(本实验板厚为4.8mm)即可。

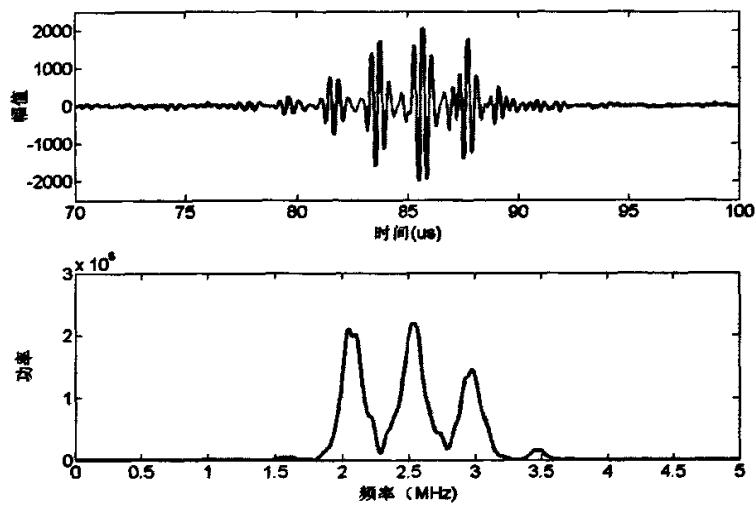


图6.12 B1板无缺陷时检测信号的时域波形图和功率谱图

这样就可以设计四个带通滤波器分别对信号进行滤波。这里带通滤波有两个作用(1)可把希望分析的那部分频带上的信号成分分离出来，从而避免和附近频带上其他的信号成分的叠加干扰。(2)可以滤掉大部分的噪声干扰。滤波器选用无限冲激响应数字滤波器(IIR)中的Butterworth带通滤波器，Matlab软件中有自带的中Butterworth带通滤波器函数，它的调用格式为： $[b,a]=butter(n,[\omega_L,\omega_H])$ 。其中 $[\omega_L,\omega_H]$ 为带通截止频率， $b,a$ 分别为滤波器传递函数分子和分母系数向量。截止频带设计如表6.1所示。

表6.1 带通滤波器中各带通频率的选择

IMF $j$	A1板		A2板		A3板	
	$\omega_L$ (MHz)	$\omega_H$ (MHz)	$\omega_L$ (MHz)	$\omega_H$ (MHz)	$\omega_L$ (MHz)	$\omega_H$ (MHz)
1	3.32	3.69	3.30	3.67	3.22	3.61
2	2.81	3.32	2.75	3.30	2.69	3.22
3	2.30	2.81	2.28	2.75	2.28	2.69
4	1.72	2.30	1.72	2.28	1.72	2.28

分别对经过带通滤波后得到的信号进行EMD分解，各自得到的第一阶IMF分量分别作为原信号的前四阶IMF分量，分别记作IMF1，IMF2，IMF3和IMF4，结果如图6.13所示。

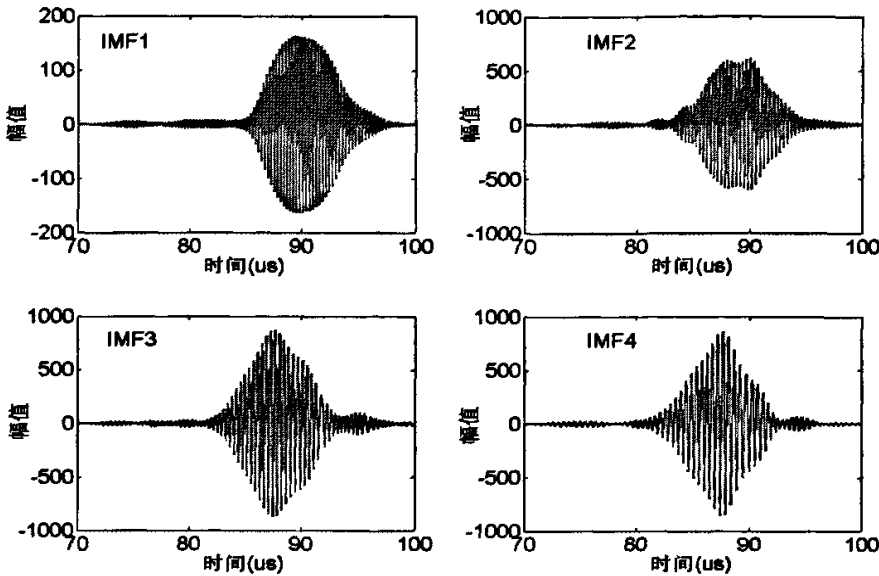


图6.13 B1板无缺陷时检测信号的前四阶IMF

分别对这四阶IMF分量进行Hilbert变换,求得各自的瞬时频率、瞬时幅值,从而可以绘出这四阶IMF分量的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert边际谱图、时频Hilbert谱图,分别如图6.14、6.15、6.16、6.17所示。由图可知,采用带通滤波后得到信号的IMF分量的瞬时频率、瞬时幅值与直接对多模式Lamb波信号进行EMD分解后得到的IMF分量的瞬时频率、瞬时幅值相比单纯了许多,而且几乎没有噪声干扰。这样有利于提取参数进行无损检测与评价。

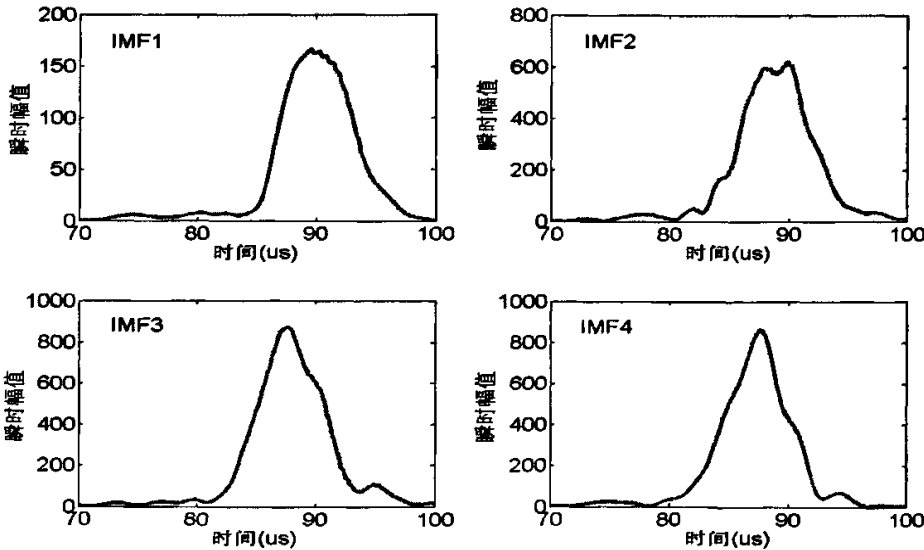


图6.14 B1板无缺陷时检测信号的前四阶IMF的瞬时幅值图

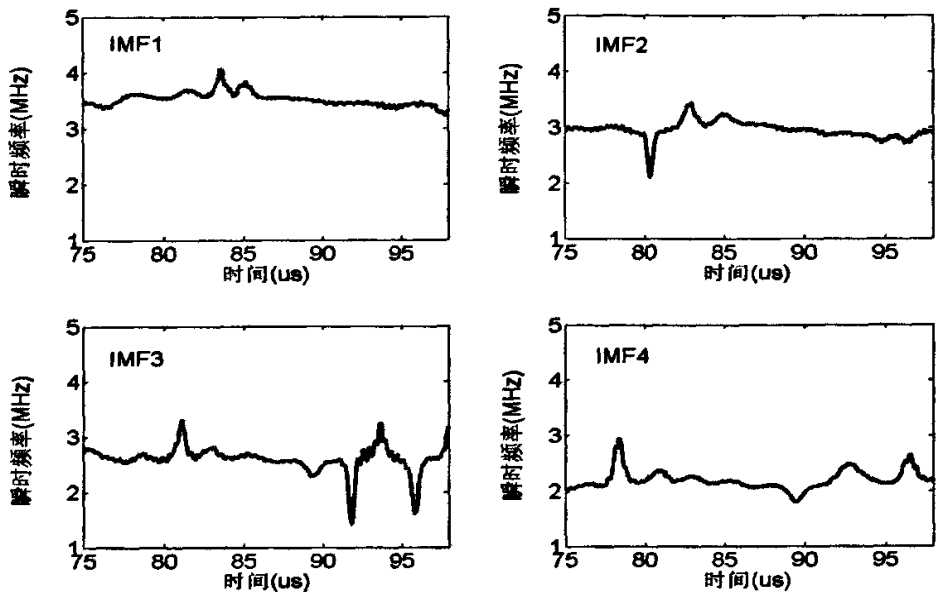


图6.15 B1板无缺陷时检测信号的前四阶IMF的瞬时频率图

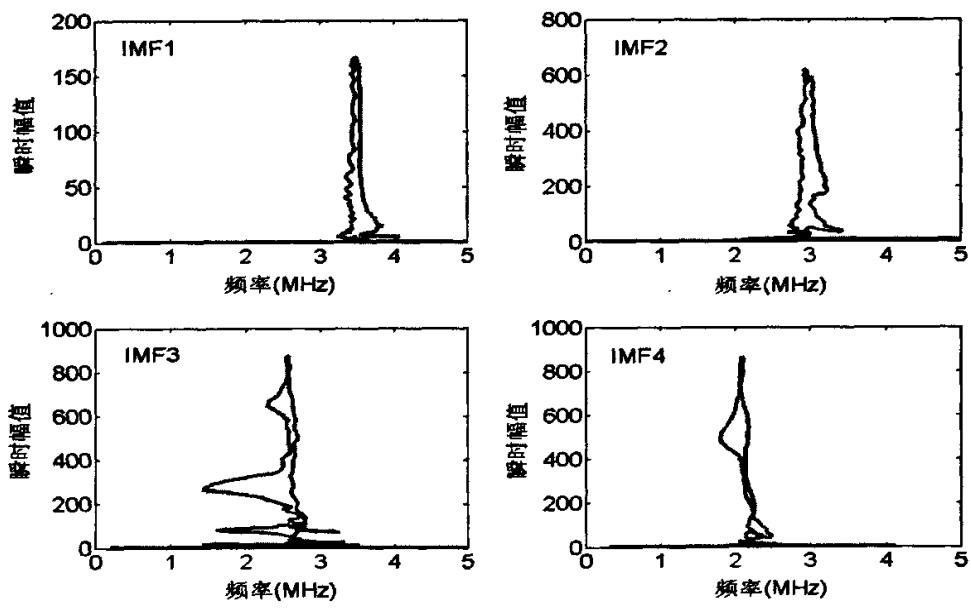


图6.16 B1板无缺陷时检测信号的前四阶IMF的Hilbert边际谱图

图6.17用灰度图来表示时频Hilbert谱图，白色亮度越大的部分说明信号的能量越高。由图可制，信号的时频集聚性较好，基本上观察不到图6.11所示的直接对多模式Lamb波信号进行EMD分解后得到的时频Hilbert谱图中的干扰噪声。图中纵坐标表示的是归一化频率，横坐标表示的是采样点数，采样点数除以采样频率(本实验采样频率为50MHz)就得到时间。

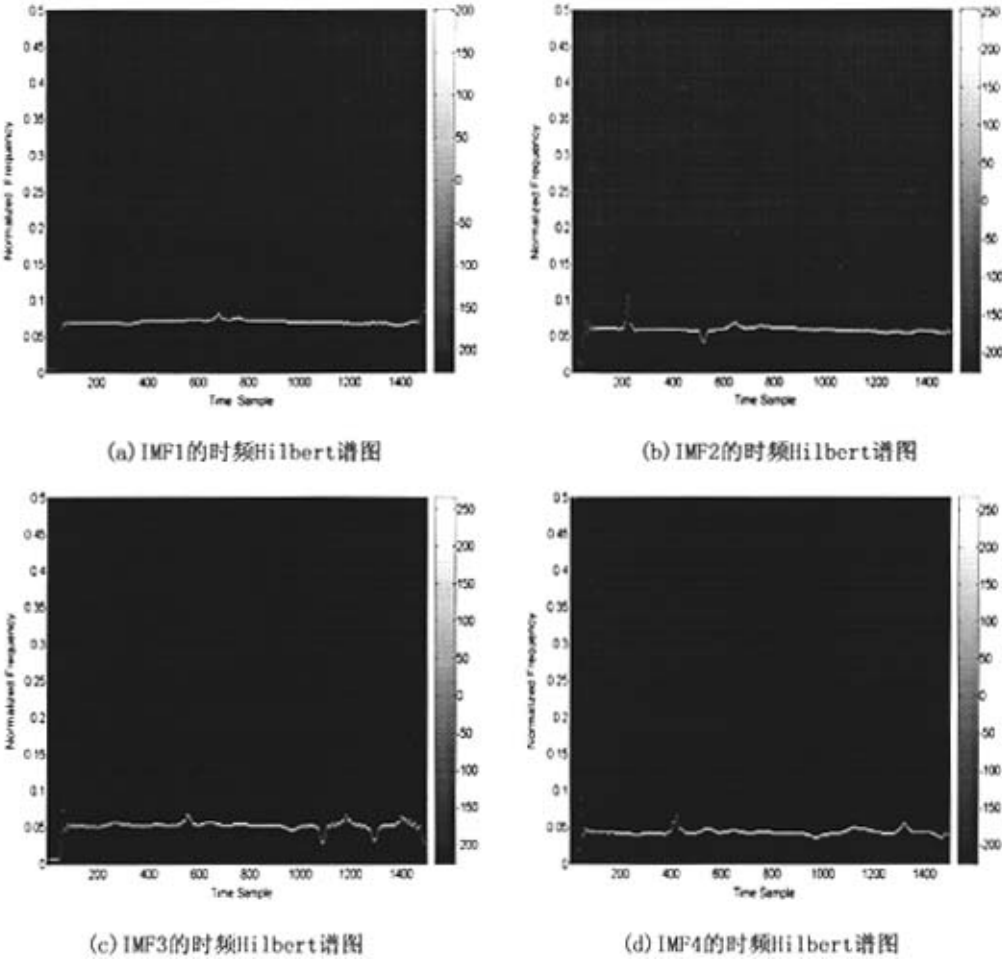
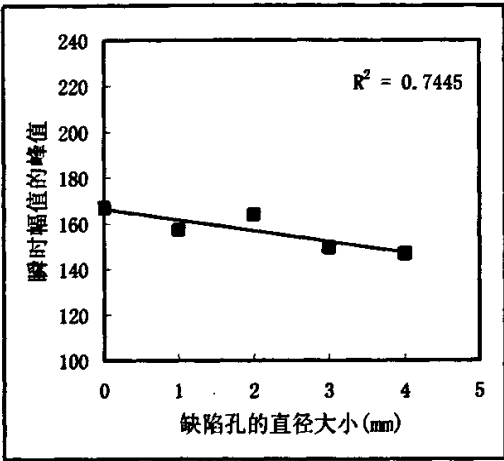


图6.17 B1板无缺陷时检测信号的前四阶IMF的时频Hilbert谱图

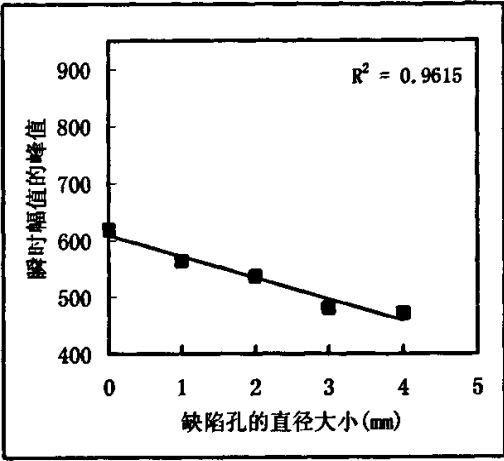
分别对B1板中有1mm、2mm、3mm和4mm通孔缺陷时的检测信号进行上面的处理过程，得到各自前四阶IMF分量的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert边际谱图、时频Hilbert谱图。按照同样的步骤来对B2和B3板中检测到的无缺陷和有不同类型缺陷时的检测信号进行处理。由于瞬时幅值表示的是信号幅度大小(或者能量强弱)在整个时间段上每一时刻的变化情况，瞬时频率表示的是信号频率在整个时间段上每一时刻的变化情况。所以可以采用它们作为特征参数来表征不同缺陷状况下检测信号的变化情况。

分别提取瞬时幅值图中瞬时幅值的峰值和瞬时频率图中瞬时频率的均值作为特征参数。由于瞬时频率在边界附近的误差很大，所以求均值时去掉首尾边界处十分之一的数值。得到A1板中有不同直径大小的缺陷通孔时前四阶IMF的瞬时幅值的峰值数据，并对这些数据点进行线性回归分析，得到各自的线性回归系数 $R^2$ 。结果如图6.18所示，图中小方框表示的是瞬时幅值的峰值数据，线段表示的是它的线性回归直线。由图可知后三阶IMF分量(信号的主要成分)的线性回归系数很高，尤其是IMF4和IMF2。这说明随着通孔缺陷直径的增

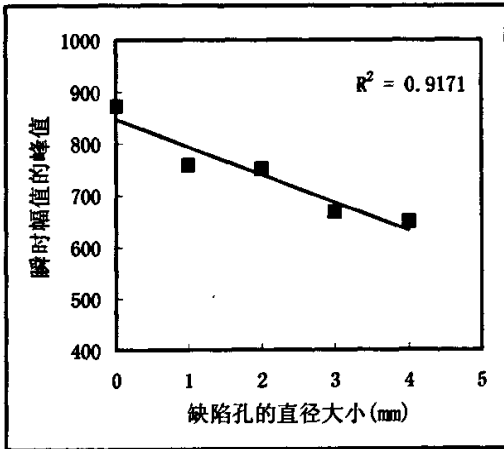
大，这三阶IMF的瞬时幅值的峰值变化基本上是线性递减的。IMF1(信号的次要成分)的线性回归系数没有其它三阶IMF分量的高，说明随着通孔缺陷直径的增大，它的瞬时幅值的变化表现出比较大非均匀性。



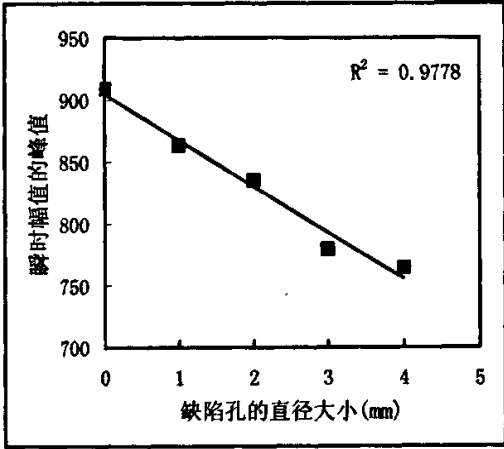
(a) IMF1的瞬时幅值的峰值的线性回归分析



(b) IMF2的瞬时幅值的峰值的线性回归分析



(c) IMF3的瞬时幅值的峰值的线性回归分析



(d) IMF4的瞬时幅值的峰值的线性回归分析

图6.18 B1板中检测信号的前四阶IMF的瞬时幅值的峰值的线性回归分析

图6.19是B1板中有不同直径大小的缺陷通孔时前四阶IMF的瞬时频率均值数据，并对这些数据点进行线性回归分析的结果。图中的圆点表示的是瞬时频率均值数据，线段表示的是它的线性回归直线。由图可知，各阶IMF分量的瞬时频率均值数据的线性度都不好，表明在通孔缺陷的直径变大时，各阶IMF分量的瞬时频率均值基本上是呈非均匀变化的，但都在某一频率附近变动。这也说明瞬时频率均值这一特征参数对于本实验没有发现明显的规律，不能用来对本实验中的缺陷进行评估分析。



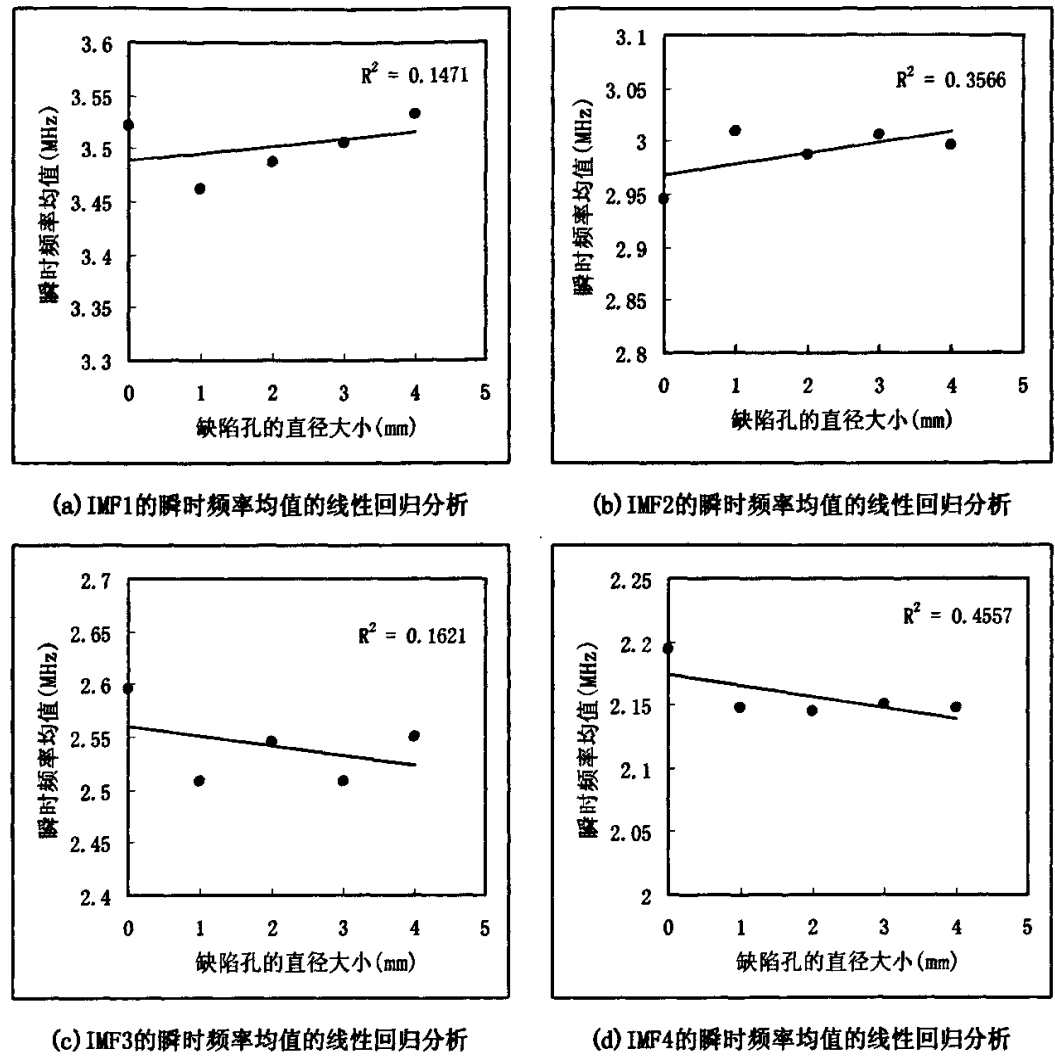


图6. 19 B1板中检测信号的前四阶IMF的瞬时频率均值的线性回归分析

进一步分析可知，由于线性回归直线表示的是一系列离散数据点的总体线性变化趋势，回归系数 $R^2$ 表示的是这些离散点与这一变化趋势的逼近程度也就是相关程度。所以当数据点呈现出线性变化时，它们的线性回归系数就高。对于线性回归系数高的数据系列，可以通过回归直线来对其它未实验的数据点进行预测，且线性回归系数越高，预测的准确度也越高。这样就可以利用线性回归系数高的IMF分量，通过有限的实验数据点，由瞬时幅值的峰值来推断缺陷孔径的大小。回归直线的变化趋势可用直线的斜率 $K$ 来表示。 $K$ 值有正负，正的 $K$ 值表示信号的瞬时幅值的峰值随缺陷通孔直径的变大是增大的，负的 $K$ 值表示信号的瞬时幅值的峰值随缺陷通孔直径的变大是减小的。而且 $K$ 值的绝对值越大时，表明当缺陷通孔的直径变大时，信号的瞬时幅值的峰值增大或者减小趋势越明显。显然 $K$ 值的绝对值越大的IMF分量，对缺陷孔径的变化越敏感。对于其它形式的缺陷变化情况，同样可以采用这种方法来提取相应的特征参数来对缺陷进行评估分析。

分别对B2板和B3板中的检测信号进行上面的处理过程。表6. 2是从B1、B2、B3板检测

信号中分解提取的前四阶IMF的瞬时幅值的峰值以及瞬时频率均值随缺陷孔直径大小变化的线性回归系数(分别记作 $R_a^2$ 和 $R_f^2$ )值, 以及各自线性回归直线的斜率(分别记作 $K_a$ 和 $K_f$ )的数值。

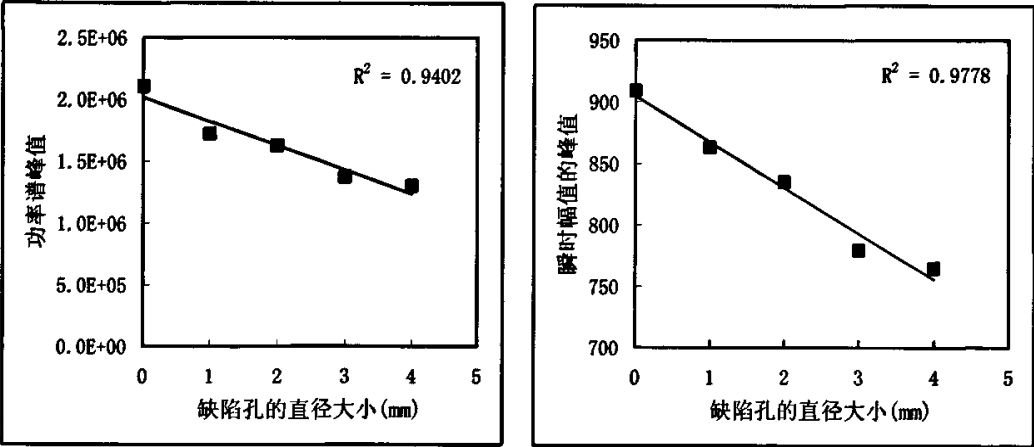
表 6.2 B1、B2、B3板中检测信号的前四阶IMF的瞬时幅值的峰值  
以及瞬时频率均值的线性回归分析数据

		IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
瞬时幅值的峰值线性 回归系数 $R_a^2$	B1板	0.7455	0.9615	0.9171	0.9778
	B2板	0.9614	0.9009	0.9256	0.6918
	B3板	0.7536	0.1277	0.0659	0.5628
瞬时幅值的峰值线性 回归直线斜率 $K_a$	B1板	-4.7366	-37.571	-53.706	-37.248
	B2板	-10.624	-35.095	-47.521	-27.21
	B3板	-10.956	-11.609	-6.2868	-17.899
瞬时频率均值线 性回归系数 $R_f^2$	B1板	0.1471	0.3566	0.1621	0.4557
	B2板	0.5023	0.1653	0.8589	0.077
	B3板	0.087	0.0954	0.3457	0.3299
瞬时频率均值线性回 归直线斜率 $K_f$	B1板	0.0068	0.0098	-0.0092	-0.0089
	B2板	-0.0075	0.0122	-0.0019	0.0046
	B3板	0.0061	-0.0062	-0.0083	0.0136

从表6.2中可以看出, 对于瞬时幅值的峰值和瞬时频率均值这两个特征参数, 无论是哪一阶IMF分量在同一实验条件下, 前者的线性回归系数都要远大于后者的, 这说明前者的线性度即特征参数随缺陷孔直径增大而变化的单调性要明显好于后者。前文提到为了提高预测的准确性需要选用线性回归系数大的数据系列, 所以在本实验中应该选用瞬时幅值的峰值作为特征参数。特征参数选定后, 再来考虑特征参数对缺陷孔径变化的敏感性问题, 显然这可以用线性回归直线的斜率K来判定。即K值的绝对值越大表明特征参数所对应的IMF分量对缺陷孔径的变化越敏感。

对于A1板(缺陷为通孔模拟缺陷时), IMF4、IMF3、IMF2的 $R_s^2$ 都很高, 相比较而言IMF1的 $R_s^2$ 不高, 这说明后三阶IMF(信号中的主要成分)的瞬时幅值的峰值随缺陷孔径变化的线性度比较好, 预测准确性也较高, 而IMF1(信号中的次要成分)不适合于这类缺陷的检测。IMF3的 $|K_s|$ 最大, IMF2和IMF4的 $|K_s|$ 次之, 而IMF1的最小, 这说明IMF3对于此类缺陷孔直径的变化最为敏感。对于这几种IMF分量, 综合考虑可选用IMF3作为最优IMF检测分量。对于A2板(缺陷为2.4mm深的盲孔模拟缺陷时)和A3板(缺陷为1.2mm深的盲孔模拟缺陷时)可采用同样的方法来分析得到最优IMF检测分量。

上一章中采用信号中各Lamb波模式的功率谱峰值随缺陷孔径的变化规律来比较不同缺陷类型对信号功率谱峰值的影响。信号的功率谱表示的是信号能量密度在频域上的分布情况, 瞬时幅值谱表示的是信号的瞬时能量在时域上的分布情况, 它们的峰值变化规律可能存在一定的关联性, 下面来进行验证。图6.20是B1板中检测信号的低频Lamb波模式分量(A2模)的功率谱峰值线性回归分析结果(图a), 以及信号的第四阶IMF(IMF4分量)的瞬时幅值的峰值的线性回归分析结果(图b)。由图可知, 它们的线性回归系数相差很小。



(a) A2模的功率谱峰值线性回归分析 (b) IMF4的瞬时幅值的峰值的线性回归分析

图6.20 B1板中检测信号的功率谱峰值以及瞬时幅值的峰值的线性回归分析结果

为了进一步来验证它们之间可能存在的关联性, 对三块钢板中所有的实验数据都进行相应的线性回归分析, 得到各自的线性回归系数如表6.3所示。在第四章已经对本实验中的Lamb波检测信号进行了模式识别, 发现从低频到高频, 信号中的模式成分依次为A2模、S2模、A3模和S3模。而信号的前四阶IMF分量是分别通过对原信号进行带通滤波后再经过EMD分解得到的, 它们还保留着相应频带上信号的大部分信息。所以按照它们之间的对应关系可知IMF1、IMF2、IMF3、IMF4分别对应着原信号中的S3模、A3模、S2模、A2模。

考虑到功率属于能量范畴而幅值则只可近似表征能量, 它们之间虽有一定联系但是并非完全相关联。所以从某种程度上说, 表6.3中的数据除了少数几种情况下有较大差异以

外，这两种特征参数其它的线性回归系数相差均不大。这从一个侧面反映了采用HHT变换提取信号的瞬时幅值的峰值来作为表征Lamb波信号能量变化的特征参数这一做法是合理的。至于究竟采用傅立叶变换得到的功率谱峰值还是采用希尔伯特-黄变换得到的瞬时幅值的峰值作为表征Lamb波能量变化的特征参数更合理，还有待进一步地实验研究。

表6.3 B1、B2、B3板中检测信号的功率谱峰值以及瞬时幅值的峰值的线性回归系数数据

		线性回归系数 $R^2$			
		S3/IMF1	A3/IMF2	S2/IMF3	A2/IMF4
B1板	功率谱峰值	0.9343	0.9563	0.9161	0.9402
	瞬时幅值的峰值	0.7445	0.9615	0.9171	0.9778
B2板	功率谱峰值	0.8696	0.9726	0.9468	0.8441
	瞬时幅值的峰值	0.9614	0.9009	0.9256	0.6918
B3板	功率谱峰值	0.6492	0.1652	0.4580	0.1769
	瞬时幅值的峰值	0.7536	0.1277	0.0659	0.5628

6.4 本章小结

本章首先介绍了希尔伯特-黄变换(HHT)这一新的信号分析方法，重点探讨了HHT中非常关键的一个步骤即EMD，结合实例来描述它对信号的分解步骤。采用HHT对实验中的Lamb波检测信号进行了分析，通过实验分析验证了直接对多模式Lamb波信号进行EMD分解来得到信号的瞬时频率和瞬时幅值这一做法是行不通的，之后采用改进后的HHT方法先对本章中实验信号分别进行带通滤波，然后再对得到的信号进行EMD分解得到各自的第一阶IMF分量，进而对这些IMF分量进行Hilbert变换得到原信号的前四阶IMF分量各自的瞬时频率和瞬时幅值以及时频Hilbert谱图。分别选取瞬时幅值的峰值和瞬时频率的均值作为检测信号的特征参数进行线性回归分析，经过对比它们的线性回归系数发现采用瞬时幅值的峰值作为检测特征参数比采用瞬时频率的均值这一参数要好。同时提出可采用瞬时幅值的峰值回归直线的斜率K来标定特征参数对缺陷孔径变化的敏感性，K值的绝对值大表明这一特征参数对缺陷孔径变化的敏感性高。最后通过对比信号功率谱峰值和瞬时幅值的峰值这两个表征Lamb波能量变化的特征参数的线性回归系数发现它们相差不大，关联性较好，从而验证了采用HHT变换提取信号的瞬时幅值的峰值来作为表征Lamb波信号能量变化的特征参数这一做法是合理的。

## 第七章 结论与展望

### 7.1 结论

本文通过对薄钢板的兰姆波无损检测系统进行研究,采用宽带激发得到多模式的Lamb波信号,对Lamb波的频散特性进行研究。重点采用不同的信号处理方法如傅立叶谱分析法、短时傅立叶变换(STFT)以及一种新的非平稳信号处理方法希尔伯特-黄变换(HHT)对Lamb波检测信号进行分析和处理,从而对薄板中的模拟缺陷进行无损检测以及研究不同形态的缺陷对Lamb波传播的影响,并对模拟缺陷进行定位研究。推导出板中质点振动位移公式,并绘出各Lamb波模式的质点振动位移曲线,对目前还存在争议的关于质点振动与Lamb波对不同深度缺陷探伤敏感性之间是否存在对应关系以及存在何种对应关系的这一问题进行了探讨,并从实验角度进行验证。本文的主要结论如下:

(1) 采用基于STFT的时频分析方法来识别检测实验中的Lamb波信号,取得了较好效果,对于频散曲线上没有相互叠加的Lamb波模式无论是低阶的还是高阶的都能够较好地识别,对于相互叠加的频段上的Lamb波模式尚无法进行识别,但是能大体上判断是哪几种模式的叠加。

(2) 采用时域分析法和频域分析法以及基于STFT的时频分析方法均能有效识别板中存在的孔型和狭缝型模拟缺陷。相比较而言,时域分析法和频域分析法概念简单,分析直观,但是它们要求信号要么有好的时域分辨力要么有好的频域分辨力。基于STFT的时频分析方法能够更全面地揭示信号中所包含的缺陷信息,但是受时频分析窗分辨力矛盾的限制使得时频谱图的空间分辨力在对包含有复杂模式成分的信号分析时出现困难。

(3) 对于孔型模拟缺陷,无论是通孔还是各种深度的盲孔,都不易使Lamb波发生模式转换现象,随着通孔缺陷直径的增加Lamb波信号中各模式的功率谱峰值基本上都是单调衰减的,但是对于深度比较浅的盲孔缺陷这种衰减的非线性度增加;对于狭缝型模拟缺陷,容易使Lamb波发生模式转换现象,使得Lamb波信号中各模式的功率谱峰值和时频谱峰值随着狭缝缺陷深度的增加发生的变化十分复杂。同时发现缺陷的取向对Lamb波的传播有很大的影响。因此在实际的薄板检测过程中,应该在两个相互垂直的路径上进行扫查,以免发生漏检。

(4) 采用时间延迟估计法和通过理论时频分布曲线算法这两种方法对缺陷进行定位研究,发现第一种缺陷定位方法计算简单,定位精度相对较低,第二种缺陷定位方法处理过程相对复杂,但是定位精度相对较高。

(5) 采用实验对比初步验证质点振动位移的 $|U|$ 分量与Lamb波对不同深度缺陷探伤敏感性存在如下对应关系:若采用两个斜探头一发一收的方式来检测,对位于两探头中间的不同深度的孔型人工缺陷,接收Lamb波的能量与板中某深度处质点振动位移的 $|U|$ 分量之间存在正比关系。通过进一步推导提出“若采用单探头利用反射法来检测不同深度处缺陷时,垂直分量 $|V|$ 分量越大时,Lamb波对此深度位置上的孔型缺陷越是敏感,发现缺陷的能力也越强”的假设。

(6) 通过实验分析验证了直接对多模式Lamb波信号进行EMD分解来得到信号的瞬时频率和瞬时幅值这一做法是行不通的。采用改进后的HHT方法来对Lamb波信号进行分析和分析, 分别选取瞬时幅值的峰值和瞬时频率的均值作为检测信号的特征参数进行线性回归分析, 经过对比它们的线性回归系数发现采用瞬时幅值的峰值作为检测特征参数比采用瞬时频率的均值这一参数要好。同时可采用瞬时幅值的峰值回归直线的斜率 $K$ 来标定特征参数对缺陷孔径变化的敏感性,  $K$ 值的绝对值大表明这一特征参数对缺陷孔径变化的敏感性高。最后通过对比信号功率谱峰值和瞬时幅值的峰值这两个表征Lamb波能量变化的特征参数的线性回归系数发现它们相差不大, 关联性较好, 验证了采用HHT变换提取信号的瞬时幅值的峰值来作为表征Lamb波信号能量变化的特征参数这一做法是合理的。

## 7.2 展望

由于Lamb波理论及检测机理的复杂性, 要得到实用的金属薄板的超声兰姆波无损检测系统还有许多工作要做。本文的研究还只是初步地探索, 还有许多方面需要进行深入的研究, 如:

(1) STFT的时窗和频窗分辨力存在矛盾, 可以尝试采用其它时频分析方法对Lamb波信号进行分析处理。

(2) 应该采用在板的侧面沿厚度方向上的不同深度处可以分别采用电火花加工的方法加工出很窄的贯穿切缝来模拟这一深度处的缺陷这一新的缺陷制作方法, 从根本上避免后一次实验的数据受前一次加工的缺陷的影响, 可使得对质点振动位移与Lamb波对不同深度缺陷的敏感性的研究准确性更高。

(3) 采用HHT对Lamb波信号进行更深入地分析, 从信号中提取更有用的特征参数。

(4) 通过对大量试件进行检测, 积累各种缺陷信息, 建立一个缺陷数据库, 集成相应的软硬件系统。

## 参 考 文 献

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002. 1.
- [2] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波. 无损检测. 1999, 21(9): 409-423.
- [3] 蒋福棠, 何双起, 沈建中. 兰姆波探伤中一些问题的探讨[J]. 材料工程, 1996, 41(10): 29-31.
- [4] J·Krautkramer 著, 李靖等 译. 超声检测技术. 广州: 广东科技出版社, 1984.
- [5] GB2108-80 薄钢板兰姆波探伤法.
- [6] GB8651-88 金属板材超声板波探伤方法.
- [7] QJ1269-87 金属薄板兰姆波探伤方法.
- [8] 徐可北. 金属薄板兰姆波检验技术[J]. 无损检测. 1999, 21(10): 32-36.
- [9] H. Lamb. On the Waves in an Elastic Plate. Proceedings of the Royal Society of London, 1917: 293-312.
- [10] [美]阿肯巴赫 著. 徐植信, 洪锦如 译. 弹性固体中波的传播. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [11] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [12] D. E. Chimenti and R. W. Martin. Nondestructive evaluation of composite laminates by leaky lamb waves. Ultrasonics. 1991, 29(5): 13-21.
- [13] D. C. Worlton, Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies, Journal of Applied Physics, 1961, 32(6): 967-971.
- [14] 李申. 超声兰姆波探伤研究与应用. 机械设计与制造. 2001, 42(6): 85-87.
- [15] Victorov I V. Rayleigh and Lamb waves Physical Theory and Applications, Plenum Press, New York, 1967.
- [16] W. Sachse, Y. H. Pao, On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, J. Appl. Phys, 1978, 49(8), 4320-4327.
- [17] Saravanos D. A., P. R. Heyliger. Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, (6): 350-362.
- [18] Saravanos D. A., Birman V., D. A. Hopkins. Detection of Delaminations in Composite Beams using Piezoelectric Sensors, Proceedings of the 35th Structure, Structural Dynamics and Materials Conference of the AIAA, 1994, 1754: 181-191.
- [19] Percival W. J., E. A. Birt, Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 1997. vol. 39. pp: 728-735.
- [20] Kerckel (S. W.), Klein (M. B.). Bayesian Separation of Lamb Waves in Laser Ultrasonics, In Applications and Science of Computational Intelligence III Proceedings of SPIE, 2000. Vol. 4055. pp: 350-361.
- [21] Quan Wang, Xiaomin Deng. Damage detection with spatial wavelets. International Journal of Solids and Structures, 1999. 3443-3468.

- [22] K. Worden, G. Manson, D. Allman. Experimental validation of a structural health monitoring methodology: Part I. Novelty detection on a laboratory structure, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, Volume 259 Issue 2, 323-343.
- [23] M. J. Sundaresan, P. F. Pai, A. Ghoshal, et al. Methods of distributed sensing for health monitoring of composite material structures, *composites*, 2001, 1357-1374.
- [24] Demma, A., Cawley, P., Lowe, M., Roosenbrand. The Reflection of Guided Waves from Notches in Pipes: a Guide for Interpreting Corrosion Measurements, *NDT&E International*, 2004. Vol. 37. pp: 167-180.
- [25] 李家伟, 云庆华等主编. 兰姆波及其在薄板探伤中的应用. 锅炉压力容器无损检测技术. 天津科学出版社, 1985.
- [26] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. *声学技术*, 2000, 19(4): 212-219.
- [27] 郑祥明, 顾向华 等. 超声兰姆波的时频分析[J]. *声学学报*, 2003, 28(4): 368-374.
- [28] 袁慎芳, 陶宝祺, 朱晓荣. 应用小波分析及主动监测技术的复合材料损伤监测. *材料工程*, 2001. (2): 43-46.
- [29] Shenfang Yuan, Lei Wang, Ge Peng. Neural network method based on a new damage signature for structural health monitoring. *Thin-Walled Structures*, 2005, Vol. 43 pp: 553-563.
- [30] 徐颖娣, 袁慎芳, 彭鸽. 二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究. *航空学报*, 2004 (5): 476-479.
- [31] 超声波探伤编写组. 超声波探伤[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [32] 张灵研, 石立华, 李炎新. Matlab 与 C 语言混合编程测试系统. *电子测量技术*, 2003. (6): 39-40.
- [33] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. *Discrete-time Signal Processing*. London: Prentice Hall, 2005: 826-870.
- [34] Farrar C. R. and K. M. Cone. Vibration Testing of the I-40 Bridge Before and After the Introduction of Damage, *Proceeding of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1995, 2460: 203-209.
- [35] West W. M. Single Point Random Model Test Technique Application to Failure Detection. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1982. 52(4): 25-31.
- [36] [美] L. 科恩 著, 白居宪 译. 时频分析理论与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. : 23-47.
- [37] 胡昌华, 周涛, 夏启兵等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—时频分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. : 5-16.
- [38] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998. : 52-62.
- [39] 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [40] 李刚. 时频分析方法在智能结构损伤在线检测中的应用研究[硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2005. : 4-6.
- [41] William H. Prosser, Michael D. Seale and Barry T. Smith. Application of the Pseudo Wigner-Ville Distribution to the Measurement of the Dispersion of Lamb Modes in



- Graphite/Epoxy Plates. the Eighth International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, 1997: 256-269.
- [42] Marc Niethammer, Laurence J. Jacobs. Time-frequency representations of Lamb waves. *J Acoust Soc Am*, 2001. 109:1841-1847.
- [43] Huang N E, Shen Z and Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and no-stationary time series analysis. *Pro R Soc Lond A*, 1998. 454:903-995.
- [44] 罗奇峰, 石春香. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题. 2003, 31 (6) :637-640.
- [45] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于 EMD 和奇异值分解技术的滚动轴承故障论断方法. *数据采集与处理*. 2004, 19(2):204-209.
- [46] Wei Huang, Zheng Shen and Norden E. Huang. Engineering analysis of biological variables: An example of blood pressure over 1 day. *Proc Natl Acad Sci U S A.*, 1998, 95(9):4816-4821.
- [47] 熊学军, 郭炳火, 胡筱敏等. EMD 方法和 Hilbert 谱分析法的应用与探讨. *海洋科学进展*. 2002. 20(2): 12-21.
- [48] 宋平舰, 张杰. 二维经验模分解在海洋遥感图像信息分离中的应用. *高技术通讯*, 2001. (9).
- [49] 陈隽, 徐幼麟. HHT 方法在结构模态参数识别中的应用, *振动工程学报*, 2003. 16(3).
- [50] Jann N. Yang, Silian Lin and Shuwen Pan. Damage Identification for Structures Using Hilbert-Huang Spectral Analysis. *Earthquake Eng and Struct Dyn.*, 2004. 32(9): 1443-1467.
- [51] R. D. Mindlin. Waves and vibrations in isotropic elastic plates. in: *Structural Mechanics*, ed. By J. N. Goodier and N. J. Hoff, New York, Pergamon Press (1960).
- [52] 刘镇清, 黄瑞菊. 薄板声—超声检测超声传播模式的实验研究. *声学学报*. 2000. 25(3): 268-273.
- [53] 于轮元. 电气测量技术. 西安:西安交通大学出版社, 1988. :232-236.
- [54] 石立华. 基于压电元件的损伤自诊断自适应智能结构研究[博士学位论文]. 南京:南京航空航天大学, 1996: 12-25.
- [55] 蒋危平等. 超声检测学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.
- [56] 刘镇清, 刘骁. 超声无损检测的若干新进展. *无损检测*, 2000. 22(9):403-405.
- [57] Gabor D. Theory of communication. *J. IEE*, 1946. 93:429-457.
- [58] Cohen L. Time-frequency distributions: a review. *Proceedings of the IEEE*. 1989. 77(7): 941-981.
- [59] W. H. Proser, Michael D. Seale. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes. *J. Acoust. Soc. Am*, 1999. 105(5): 2669-2676.
- [60] K. Worden, S. G. Pierce, G. Manson. Detection of defects in composite plates using Lamb waves and novelty detection. *International Journal of Systems science*, 2000. vol. 31(11):1397-1409.
- [61] 徐可北, 张德智. 钛合金板材兰姆波检测可靠性研究. *金属学报(增刊)*. 2002. 38(9): 675-678.

- 
- [62] Kehlenbach M, Hanselka H. Automated structural integrity monitoring based on broadband Lamb wave excitation and matched filtering. Structural Dynamics, and Materials Conference, 2003.
- [63] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用. 国防工业出版社, 1999.
- [64] 邓拥军, 王伟, 钱成春等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理. 科学通报, 2001. 46(3): 257-263.
- [65] 黄大吉, 赵进平, 苏纪兰. 希尔伯特变换-黄变换的端点沿拓. 海洋学报, 2003. 25(1): 1-11.
- [66] Yang, J N, Lei, Y. System identification of linear structures using Hilbert transform and empirical mode decomposition. Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, 2000. pp: 213-219.

### 攻读硕士期间发表的论文

1. 王杜, 郑祥明 等. 兰姆波在薄钢板无损检测中的应用研究. 无损检测, 2007, Vol. 29, No. 4 , pp:193-196.

## 致 谢

三年的研究生学习生活，瞬间即逝。紧张地学习，创新的追寻，不觉中仿佛时光凝滞：浩瀚学海，无限疑问！在论文的完成过程中我深切地感受到了学术道路上的艰辛，也逐渐培养了我对学术研究的浓厚兴趣。

本文是在三位导师郑祥明博士、陈贻宏教授和张诗昌副教授的悉心指导和关怀下完成的，三位导师渊博的学识、严谨的治学态度使我受益匪浅，并将终身受用。三位老师平易近人、循循善诱，作为我的科研启蒙导师，引导我步入科学殿堂的大门，在科研、学习、生活乃至为人处事各个方面给予我无微不至的关怀和指导。他们对我的指导不仅体现在毕业论文的写作过程中，而是贯穿了我的整个研究生学习过程。在此谨向三位老师致以崇高的敬意和诚挚的谢意！衷心地感谢恩师们对我的培养和教育！

感谢武汉科技大学材料与冶金学院的领导和老师在我研一时在武汉学习期间给予我的教育与关怀。同时还要感谢湖北汽车工业学院以及宁波工程学院的领导和老师在我做论文期间给予我生活上的关怀与帮助。

本文的研究得到湖北省自然科学基金和湖北省教育厅以及宁波市自然科学基金的资助。可以说本文的顺利完成与它们的资助是分不开的，在这里一并表示感谢！

还要感谢三年来与我朝夕相处的同学们，在论文的完成过程中，他们对我的论文提出了很多宝贵的意见。感谢研究生同学曾文峰、宗钦、胡斯尧、卜恒勇、戴宇杰、徐远军等给予我的帮助。同时也要特别感谢我的师弟杨齐，感谢他在我做实验期间给予的支持与帮助。并对为本文的完成提供过帮助的所有人一并表示感谢。

此外需要感谢我的父母以及我的女朋友叶平还有她的父母，感激他们对我这三年来生活和精神上的支持与鼓励。

王 杜

二零零七年五月于武汉科技大学