

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160433

超声导波检测技术的发展与应用现状

曲志刚, 武立群, 安 阳, 白 萌, 方 日, 颜达现
(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘 要: 超声导波技术相较于传统超声检测,其优点在于传播距离远、检测效率高且范围广,因而有着良好的商业前景。如今,超声导波技术在管道无损检测领域已有较为成熟的应用,同时也有学者在其他领域开始了相关的探索工作。本文介绍了超声导波的概念及其传播机理,采用与传统超声对照的方式探讨了超声导波在无损检测领域的应用,并结合该技术在国内外的发展现状对其前景进行了展望。

关键词: 超声导波; 无损检测; 管道; 在线测量

中图分类号: TP29;TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2017)04-0001-08

Development and Application of Guided Wave Ultrasonic Testing Technique

QU Zhigang, WU Liqun, AN Yang, BAI Meng, FANG Ri, YAN Daxian

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The guided wave ultrasonic is a non-destructive testing technique which is now attracting wide attention from both the academia and industry. Compared with the traditional ultrasonic testing, the guided wave ultrasonic has a good commercial prospect because of its long propagation distance, high detection efficiency and wide detection range. Nowadays, the guided wave ultrasonic technique has been used in the field of non-destructive testing (NDT) for pipelines, and some scholars have carried out some relevant research work in other fields as well. This paper introduces the concept and the propagation theory of the guided wave ultrasonic. By contrasting with the conventional ultrasonic technique, this paper discusses the applications of the guided wave ultrasonic in the field of NDT and its prospect based on the development of the technique in China and abroad.

Key words: guided wave ultrasonic; non-destructive testing; pipeline; on-line measurement

超声导波(guided waves ultrasonic)技术是一项近年来广受关注的无损检测技术。导波是一种由于介质边界的存在而被限制在介质中传播的,同时其传播方向平行于介质边界的波。关于超声导波的发展大致可分为两个时期。一是理论研究时期,较早期的研究由一些著名的学者完成,如 Stokes^[1]、Poisson^[2]、Rayleigh^[3]、Navier^[4]、Hopkinson^[5]、Pochhammer^[6]、Lamb^[7]、Love^[8]、Davies^[9]、Mindlin^[10]、Viktorov^[11]、Graff^[12]、Miklowitz^[13]、Auld^[14]和 Achenbach^[15],他们在波动力学和弹性力学方面为超声导波的理论研究提供了基础。其中英国力学家 Lamb 发现了薄层中传

播的导波,并推导出此类导波的 Rayleigh-Lamb 超越方程,此导波后被称为兰姆波(Lamb wave)^[7]。1923年, Ghosh^[16]首先推导出了空心圆柱壳中波传播的线弹性解, Love^[17]基于板壳理论对超声导波在空心圆柱壳中的传播规律进行了分析及研究。1957年, Cooper 等^[18-19]分析了在空心圆柱壳中非轴对称波的传播规律。1959年, Gazis^[20-22]研究空心柱体中导波的传播规律,得到了空心柱体中纵向模态及扭转模态导波的表达式。Armenakas 等^[23]研究超声导波在空心圆柱中的传播规律,提出了导波的多模态特性,并基于频散曲线给出了导波的各种模态。然而,此时业界

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674176);天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目(15JCZDJC39200)

作者简介: 曲志刚(1980—),男,天津人,教授, zhigangqu@tust.edu.cn

对超声导波的认识仅停留于理论阶段,相对而言,其应用并不成熟.

近 20 年来,对超声导波的研究已渗透到了管道、实心柱体以及复合板材等介质中,其中对于在管道中传播的超声导波的研究最成熟. 国外对于超声导波的研究与应用较早,已有较完整的理论指导. 国内对超声导波的探索始于本世纪初,其中北京工业大学相对突出,另外国内众多知名高校和研究机构,如复旦大学、北京大学、南京大学、上海交通大学以及中科院声学研究所等都对超声导波理论以及相关应用进行了探索.

本文通过对比的方法从超声导波的频散现象及数学模型出发,直观地对导波的传播机理与检测原理进行介绍,并结合国内外科研成果对超声导波在无损伤检测中的优势以及其发展前景进行评价,以期对超声导波感兴趣的科研工作者提供参考.

1 超声导波简介

1.1 超声导波与超声波

超声在无限介质中是以体波(bulk wave)形式传

播的,相对于导波而言,体波是在无限介质中传播的波,而导波则是由于介质边界的存在而产生的波.

体波的传播是基于介质微粒间的压缩运动(纵波)或相对剪切运动(横波). 纵波或横波在介质中的传播,其传播方向总是垂直于介质边界或斜指向边界,如图 1 所示.

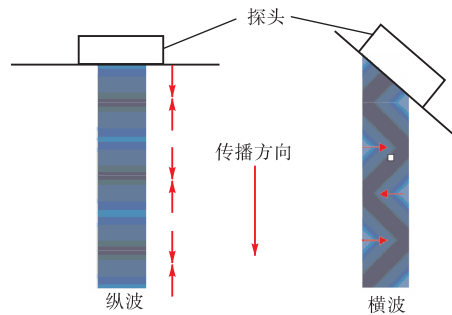


图 1 纵波与横波

Fig. 1 The compression wave and the shear wave

超声导波的传播与传统超声波的传播方式不同,其特点见表 1. 导波的传播方向不是指向介质边界,而是与边界平行. 它是在整个厚度范围内,介质各质点振动的结果.

表 1 超声波与超声导波传播特性对比

Tab. 1 Propagation characteristics of ultrasonic wave and the guided wave ultrasonic

名称	影响波速的因素	介质中的传播方式	按传播方式分类
超声波	介质	体波	横波、纵波
超声导波	频率和介质	自由表面间传播	对称和非对称纵波、扭转波、弯曲波

超声导波在平板介质中以兰姆波形式传播,它是因物体两个平行表面所限而形成的纵波与横波组合的波,其在整个物体内部传播,质点作椭圆轨迹运动,分为对称型和非对称型,如图 2 所示.

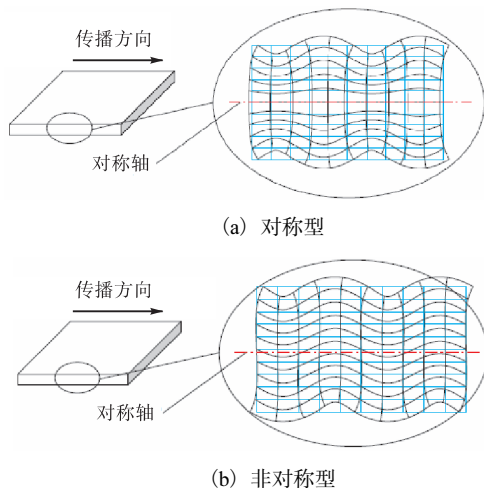


图 2 对称型兰姆波和非对称型兰姆波

Fig. 2 Symmetrical Lamb wave and asymmetric Lamb wave

管道中的超声导波传播分为 3 种基本模式:纵向模式、扭转模式和弯曲模式. 扭转模式与纵向模式的超声导波常用于导波检测,其传播方式见图 3.

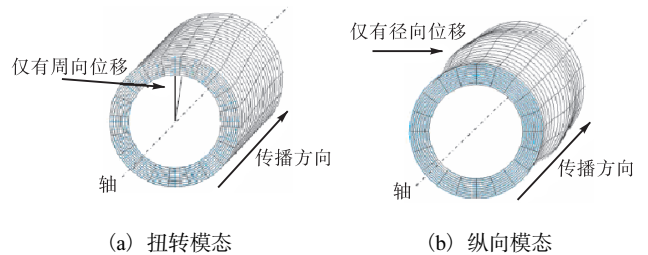


图 3 管道中扭转模式与纵向模式导波

Fig. 3 The torsional mode and the longitudinal mode waves in pipelines

1.2 超声导波的频散特性与多模态特性

超声导波的频散特性和多模态特性与导波在介质中的传播速度密切相关. 通常,在三维尺寸较大的介质中,体波(即纵波和横波)的相速度等于群速度,即波速,其仅决定于介质的力学性能,而与波的频率

无关.但当在薄板或管壁中传播时,导波的相速度和群速度都与其频率有关,且二者通常并不相等^[24].波速与频率有关的特性,称为频散特性.而多模态特性是指在同一频率下,在特定规格的波导介质中可激发出多个导波模式,且随频率的增加,导波中的模式数目也随之增加.

频散曲线描述出各个频率的谐波在介质中的传播特性,以及不同模式导波的波速与衰减.基于频散曲线的信息,可对介质中的导波模式进行选择,继而找到适合进行导波检测的特定模式.关于求解频散曲线的方法,有矩阵法、有限元法、半解析有限元法和级数展开法等,其中最常用的是有限元法和半解析有限元法.有限元分析是对波的传播进行频域分析,通过对波导施加特定的边界条件,求解频域方程的特征值,进而得到频散曲线.半解析有限元法基于有限元分析,在波传播方向采用解析解,而在波导截面采用有限元法求解,求解效率明显提高.基于有限元分析和边界元分析的比例边界有限元法于近些年提出,适用于对不规则截面结构的波导介质进行频散分析.仿真软件如 ANSYS、COMSOL 和 ABAQUS 等有限元分析软件都可对特定的波导结构进行频散分析,Disperse 软件还可直接绘制频散曲线.

2 超声导波与无损探伤

2.1 超声导波检测原理

20 世纪六七十年代,基于成熟而深入的理论研究,超声导波从理论逐渐走向应用. Silk 和 Bainton^[25]首先实现了用压电探头从管道内壁激励,在蒸汽管道中激励 $L(0, 1)$ 模式超声导波,并用于管道裂纹检测. Brook 等^[26]在管道一端截面处激励 $L(0, 2)$ 模式导波,对管道进行检测.二者证实了超声导波技术对管道无损检测的有效性和可行性.此后, Lowe 等^[27]证明了 $L(0, 2)$ 模式在管道中频散现象弱、传播速度快,适用于干、湿隔离条件下的管道无损检测.

超声导波具有沿传播路径衰减小的优点,适用于进行长距离、大范围的缺陷检测.相较传统超声检测需要逐点扫描的方法,大大节省了成本和人力.以管道检测为例,超声导波与传统超声波技术相比,有两大明显的优势:第一,传播距离远.在管道一端激励特定模式的导波,则该导波可沿构件传播约几十米的距离.第二,覆盖范围广.导波的传播是介质中所有质点共同振动的结果,所以在导波传播过程中,声场

可覆盖整个介质.基于这两个优点,当从管道一端激励一个特定的导波信号时,从几十米外的另一端就可以接收到该信号,而该信号携带了传播路程中所有介质的信息.

2.2 超声导波的激励与接收

在用超声导波进行无损检测时,传感器主要用于导波的激励和接收.导波在管道中的传播特性与所采用的传感器及其放置方式、导波模式、激励频率、管道几何尺寸、管道内输送的介质和管道外包裹物等有密切关系.目前,现有的超声导波检测产品中所使用的传感器主要分为压电式和电磁式两种.如英国焊接研究院(TWI)研发的 Teletest Focus⁺长距离管道测试系统利用压电式传感器阵列激励和接收超声导波;而美国西南研究院(SwRI)研发的 MsS 长距离超声导波检测系统中使用的则是薄带状的磁致伸缩式传感器来收发导波信号.

2.2.1 压电式传感器

压电式传感器是利用压电材料的压电效应来激励超声波;同时基于压电材料的逆压电效应,压电式传感器又可接收超声波.其在波导结构中激发超声导波的实质是通过耦合剂或干耦合的方式,将振动间接或直接地传递到被测工件中.常见的压电材料有压电晶体、压电陶瓷以及压电复合纤维.利用压电材料的压电效应,可制成不同形状及尺寸的传感器,如压电片、压电斜探头、梳状传感器等.

压电片是最基础的激励导波的元件,如图 4 白色部分所示,为超声导波检测中单向振动的压电片.当压电式传感器用于管道中导波激励的时候,通常会将其沿管道周向布置组成对称的传感器阵列,以激励对称模式的超声导波(纵向模式和扭转模式).

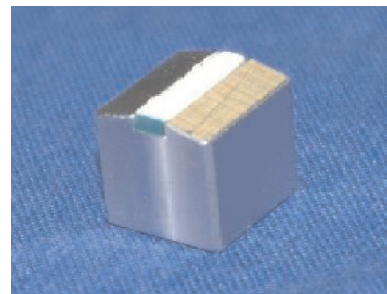


图 4 压电式传感器

Fig. 4 Piezoelectric transducer

根据斯涅尔定律(Snell's Law),当一束超声波斜射入波导介质时,由于横波和纵波波速不同,二者在穿过介质边界时折射的角度有变化.根据这一原理,

可激发波导介质中导波不同的模式. 在实际应用中, 常用压电式斜探头组成阵列来进行导波的激励.

梳状传感器可实现单模态超声导波的激励与接收. 美国宾夕法尼亚州立大学和英国帝国理工大学的学者们对这种传感器进行了研究. 北京工业大学的何存富等^[28-29]在薄板上对梳状传感器的特性进行分析, 为进一步应用奠定了基础. 其特点是传感器间距等于欲激发模式导波的波长. 当对每个指条同时激励同频率、同相位的信号时, 由于波的相干作用, 使波长等于指间距的模式导波相加, 而其他模式导波相消, 从而激励出所需要的单一模式导波.

2.2.2 电磁式传感器

电磁式传感器多适用于导电材料或铁磁性材料, 其原理是基于洛伦兹力或磁致伸缩效应, 在导电或是铁磁波导介质中激励出超声导波. 此类传感器通常由偏置磁体、线圈、试样组成. 基于洛伦兹力的电磁式传感器应用于非铁磁试样, 而磁致伸缩式传感器则主要应用于铁磁性材料. 与压电式传感器相比, 电磁式传感器的明显优点是可实现快速非接触式测量, 且不需耦合剂, 可激励出大功率的超声导波, 但对被测对象要求有限制. 清华大学黄松岭等^[30-31]完成了电磁超声导波检测模型的建立, 并实际应用于油气管道检测系统中, 在胜利油田进行了相关实验, 取得了较好的效果. 大连海洋大学李松松等^[32-33]完成了多模式管道探测用磁致伸缩式传感器的设计, 考察了基于洛伦兹力的电磁式传感器和磁致伸缩式的异同, 讨论了激励线圈的形状与导波类型的关系, 基本实现了对磁致伸缩式传感器信号的发射、接收、放大及采集, 其设计的磁致伸缩式传感器检测系统的分辨率达到 1 mm, 检测准确率达到 80% 以上.

基于磁致伸缩效应的传感器与洛伦兹力式传感器相比可激发的功率更大. 北京工业大学刘增华等^[34-37]设计了可用于激发纵向模式和扭转模式的两种传感器, 并申请了专利, 此类传感器可在管道中激励 L(0, 2) 和 T(0, 1) 模式的导波, 并能用于工业无损检测. 此外, 刘增华等^[38]还设计了一种全向型双模式兰姆波磁致伸缩式传感器, 实现在铝板中对称和非对称模式兰姆波的激励.

2.3 信号检测与处理方法

2.3.1 时间反转法

在超声导波检测中, 当检测信号遇到缺陷时, 基于惠更斯原理, 缺陷的存在反射后可看作新的波源. 在反射后导波模式会发生变化, 同时传播速度也

发生变化. 在接收回波信号的时候, 对信号的分析极为困难. 时间反转法的好处是可以有效抑制频散现象, 并能使回波信号于缺陷处聚焦, 经聚焦后, 这些不同模式的波会同时到达, 提高了信号强度和检测精度. 时间反转法基于互易原理, 是将回波信号在时域上进行反转, 并在传感器上重新加载的过程. 法国巴黎第七大学的 Wu 等^[39]率先提出超声检测中的时间反转法, 实现了超声信号在非均匀介质中的聚焦, 增强了接收信号的强度, 有效抑制了频散. 北京工业大学吴斌等^[40-41]在时间反转理论的基础上, 提出了一种基于时间-空间聚焦理论的管道大范围超声导波检测技术, 实现了对缺陷的定位.

2.3.2 相控阵法

为实现导波在缺陷处的聚焦, 提高缺陷检测的灵敏度, 相控阵法也是一种有效的方法. 相控阵法的优点在于弥补了单个传感器激励导波的局限性, 其通过控制多个激励单元的相位和幅值进行导波模式选择和能量聚焦, 可实现大面积的快速测量, 提升了信号幅度与信噪比. 20 世纪末, Demol 等^[42]用等间距梳状传感器激励兰姆波, 分别采用同相激励和相控激励两种方法证明了相控激励可实现模式增强. 基于相位控制技术, Rose 等^[43]结合时延技术实现了导波的单向激励和接收, 之后采用环形换能器阵列, 实现了钢板中全方向的导波激励和模式控制^[44]. 国内对相控阵法进行超声导波检测的研究与应用也在深入, 孙亚杰等^[45]采用相控阵激励兰姆波, 并结合图像增强方法对铝板及复合材料结构的损伤进行了检测; 王维斌等^[46]提出利用相控阵法控制纵波探头阵列激励大功率导波, 并对储罐底板进行了检测.

3 超声导波检测技术研究现状与展望

3.1 研究现状

3.1.1 国内研究现状

超声导波检测技术与传统超声波检测相比, 优点在于传播距离远、检测效率高、检测范围广, 因而在无损检测领域有着良好的商业前景. 在理论研究的基础上, 越来越多基于超声导波的检测系统被开发出来, 超声导波也应用于更为广泛的领域. 在国内, 越来越多的高校和研究机构开始从事超声导波方向的研究.

在工业检测中, 北京工业大学研究人员在用超声导波对钢绞线^[34, 37, 47-48]、风力叶片^[49-51]等的无损

检测方面提出了一系列方法并建立了测试系统,还基于时间反转法和时间空间聚焦理论研发了管道的测试系统^[35, 52-54],对超声导波传感器进行了改进. 北京大学励争等^[55-56]与南京大学杨京等^[57]主要研究超声导波在复合板材与航天材料里的传播情况. 清华大学黄松岭与李松松等^[30-33]将电磁传感器应用于管道与钢轨的无损探伤.

在信号处理与导波应用方面,暨南大学马宏伟等^[58-62]对超声导波的测试理论提出新的思路,将混沌振子检测系统用于超声导波检测,总结出了考虑信噪比、缺陷参数、管道参数、导波参数的超声导波有效检测距离的评估方法. 北京工业大学刘增华^[63]提出了板材中导波离散椭圆定位的技术,上海大学张海燕等^[64]提出导波成像的理论,将超声导波用于板材、管道的层析成像,为导波定量评价开辟了新思路.

在医学领域,复旦大学他德安团队将超声导波应用于医学长骨评价,其将长骨近似看作充液黏管道^[65-69],拓宽了超声导波检测技术的应用范围.

总体上,目前我国国内对于超声导波的研究与应用还大多停留于评价管道、柱体和复合板材的结构损伤上,且尚停留于理论与试验阶段,关于导波的理论创新不多.

3.1.2 国外研究现状

国外对于超声导波技术的研究要先于国内,帝国理工学院的 Cawley 团队和宾夕法尼亚州立大学的 Rose 团队为导波理论及应用奠定了基础. Cawley 等^[70-75]对板材和管道中导波的传播进行了深入的研究,并首先将其应用于无损探伤领域. 其团队开发了 Disperse 软件,应用于导波模态分析和频散曲线绘制;对管道无损检测创造性地提出了一系列理论,包括导波成像、缺陷表征以及复杂结构导波的检测及分析方法. 此外,宾夕法尼亚州立大学的 Rose 教授对超声导波的理论进行整理,出版了《Ultrasonic Waves in Solid Media》,书中完整叙述了超声导波理论来源与数学模型,着重介绍了超声导波在安全评定和故障诊断中的应用,是超声无损评估领域的指导性著作. 英国焊接研究院(TWI)基于上述的理论,将研究进一步深入,最终将成果商业化为一套较为成熟的长距离管道测试系统 Teletest Focus⁺,在业内获得了广泛的肯定.

在国外一些知名高校的研究过程中,超声导波的理论不断丰富. Shen^[76]分析结构健康检测中线性导波和非线性导波的相互作用,并进行了数学建模. Mariani^[77]利用压电空气耦合式传感器对钢轨的缺陷

进行了检测. Ma^[78]研究充液管道的在线测量,提出了充液管道中液体声学特性的测量方法以及管道中堵塞的检测. Farhidzadeh^[79]将导波用于建筑物的无损检测,结合模式识别算法,可以识别建筑钢混结构的后天损伤,实现了对建筑结构损伤的实时监测.

3.2 超声导波检测技术展望

总体上,超声导波技术在当前的无损检测领域是一个热门且相对新颖的技术,无论是理论研究还是实际应用都还有较长的路要走. 当前的超声导波检测局限性较大,但是不可否认的是,与传统的超声波检测相比其优势显著,更重要的是可根据超声导波在波导介质中传播的特性对波导介质的结构缺陷进行大范围的实时监测.

以前超声导波主要应用于板材、管道、柱体的检测,现在已扩展到复合板材、充液管道、非均匀柱体,今后导波的理论会更加深入于有更多复杂结构的固体介质中. 此外,超声导波在黏弹性介质中的传播、波导介质受到的内力与外力作用以及在液体介质中的衰减,对这些方面的研究也将是实际测量中定量评价的前提. 克服介质结构与外界环境的复杂影响将是导波检测及定位技术的发展方向.

国内对超声导波检测技术的实际应用尚不成熟,暂未形成一套成熟的商业化的导波检测设备. 对于国内业界的科研工作者以及从事导波检测的工作者来说,这是一个机遇,也是一个挑战.

未来关于超声导波的研究将更具挑战性,如复杂结构中的导波频散抑制与模态选择及其相关算法、超声导波成像技术与缺陷的定量表征、对于复杂结构检测与导波信号分析算法的优化以及复杂环境及结构下导波传播模型等. 但总的来说,由于超声导波具有其独特的性质,即频散和多模态特性,今后对导波的研究与应用也将围绕这二者进行. 相信在不远的未来,超声导波技术不仅会应用于相关行业的无损检测及结构监测,也会在其他领域中有更广泛的应用.

参考文献:

- [1] Stokes G G. Smith's Prize examination[J]. Mathematics and Physics Papers, 1905, 5: 362.
- [2] Poisson S D. Mémoire sur la propagation du mouvement dans les milieux élastiques[J]. Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, 1831, 10: 549-605.
- [3] Rayleigh J W S. The Theory of Sound[M]. New York: Macmillan Company, 1894.
- [4] Navier C L M H. Mémoire sur les lois de l'équilibre et du

- mouvement des corps solides élastiques[J]. Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, 1827, 7(2): 375–393.
- [5] Hopkinson J. On the rupture of iron wire by a blow[J]. Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society, 1872, 11: 40–45.
- [6] Pochhammer B L. Biegung des kreisylindersfortpflanzungs-geschwindigkeit kleiner schwingungen in einem kreisylinder[J]. Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik, 1876, 81: 326–336.
- [7] Lamb H. On waves in an elastic plate[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1917, 93 (648): 114–128.
- [8] Love A E H. Some Problems of Geodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1911.
- [9] Davies R M. A critical study of the Hopkinson pressure bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1948, 240 (821): 375–457.
- [10] Mindlin R D. An Introduction to the Mathematical Theory of Vibrations of Elastic Plates[M]. Singapore: World Scientific, 1955.
- [11] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb Waves-Physical Theory and Applications(Ultrasonic Technology) [M]. New York: Plenum Press, 2014.
- [12] Graff K F. Wave Motion in Elastic Solids[M]. North Chelmsford: Courier Corporation, 1975.
- [13] Miklowitz J. The Theory of Elastic Waves and Waveguides[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [14] Auld B A. Acoustic Fields and Waves in Solids[M]. New York: Wiley, 1973.
- [15] Achenbach J. Wave Propagation in Elastic Solids[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [16] Ghosh J. Longitudinal vibrations of a hollow cylinder [J]. Bulletin of the Calcutta Mathematical Society, 1923, 24 (14): 31–40.
- [17] Love A E H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity[M]. 4th ed. New York: Dover Publications, 1944.
- [18] Cooper R M, Naghdi P M. Propagation of non-axially symmetric waves in elastic cylindrical shells[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1957, 29(12): 1365–1373.
- [19] Naghdi P M, Cooper R M. Propagation of elastic waves in cylindrical shells, including the effects of transverse shear and rotatory inertia[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(1): 56–63.
- [20] Gazis D C. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow cylinders[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(8): 786–794.
- [21] Gazis D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 568–573.
- [22] Gazis D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. II. Numerical results[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 573–578.
- [23] Armenakas A E, Gazis D C, Herrmann G. Free vibrations of circular cylindrical shells[J]. Suicide and Life-Threatening Behavior, 2013, 41(1): 110–116.
- [24] Rose J L. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [25] Silk M G, Bainton K F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves[J]. Ultrasonics, 1979, 17(1): 11–19.
- [26] Brook M V, Ngoc T D K, Eder J E. Ultrasonics inspection of steam generator tubing by cylindrical guided waves[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1990, 9: 243–249.
- [27] Lowe M, Alleyne D N, Cawley P. Mode conversion of guided waves by defects in pipes[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 1261–1268.
- [28] 何存富, 葛海燕, 焦敬品, 等. PVDF 梳状传感器及在超声导波检测中的应用[J]. 无损检测, 2007, 29(1): 32–35.
- [29] Jiao J P, Ge H Y, Wu B, et al. Fouling detection in food vessels using interdigital Lamb wave transducer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(1): 111–114.
- [30] 黄松岭, 叶朝峰, 王坤, 等. 天然气管道裂纹电磁超声检测器研制[J]. 无损检测, 2009, 31(10): 827–829.
- [31] Wang S, Huang S L, Zhao W, et al. Alternating winding magnetostrictive electromagnetic acoustic transducer for pipe torsional guided wave generation[C]//Proceedings of 2010 IEEE Sensors Applications Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 69–72.
- [32] Li S S, Chen X M, Guo X J. Optimum excitation of the Lamb wave modes in NDE[C]//Proceedings of International Conference on Computer, Mechatronics, Control

- and Electronics Engineering. Piscataway: IEEE, 2010: 338–341.
- [33] Li S S, Han N, Chen X M, et al. Weak signal detection based on electromagnetic acoustic transducer[C]// Proceedings of the Second International Conference on Electric Technology and Civil Engineering. Piscataway: IEEE, 2012: 3515–3518.
- [34] 刘增华, 刘溯, 何存富, 等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 22–27.
- [35] 刘增华, 吴斌, 王秀彦, 等. 扭转模态在带黏弹性包覆层管道中缺陷检测的实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 564–567.
- [36] 何存富, 刘溯, 刘增华, 等. 一种用于钢绞线超声导波检测的磁致伸缩传感器: 中国, CN200710119319.6[P]. 2008–02–20.
- [37] Liu Z H, Liu S, Wu B, et al. Propagation characteristics of high order longitudinal modes in steel strands and their applications[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2008, 21(6): 573–579.
- [38] 刘增华, 胡亚男, 吉美宁, 等. 一种全向型双模态 Lamb 波电磁声传感器: 中国, CN201510379943.4[P]. 2015–07–01.
- [39] Wu F, Thomas J L, Fink M. Time reversal of ultrasonic fields: Part II. Experimental results[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1992, 39(5): 567–578.
- [40] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18–24.
- [41] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波小缺陷检测数值分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(7): 673–677.
- [42] Demol T, Blanquet P, Delebarre C. Lamb waves generation using a flat multi-element array device[C]//IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway: IEEE, 1995: 791–794.
- [43] Kannajosyula H, Lissenden C J, Rose J L. Analysis of annular phased array transducers for ultrasonic guided wave mode control[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 085019.
- [44] Borigo C, Rose J L, Yan F. A spacing compensation factor for the optimization of guided wave annular array transducers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(1): 127–135.
- [45] 孙亚杰, 袁慎芳, 邱需, 等. 基于 Lamb 波相控阵和图像增强方法的损伤监测[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1325–1330.
- [46] 王维斌, 冯展军, 艾慕阳, 等. 储罐底板缺陷的相控阵超声导波的图像重建[J]. 无损检测, 2010, 32(11): 847–849.
- [47] 刘增华, 张易农, 何存富, 等. 钢绞线中激励纵向模态的磁致伸缩型激励及接收器的选型[J]. 应用力学学报, 2009, 26(3): 507–512.
- [48] 刘增华, 张易农, 张慧昕, 等. 基于磁致伸缩效应在钢绞线中激励接收纵向导波模态的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 71–76.
- [49] 刘增华, 余锋祥, 于洪涛, 等. 基于群速度校准的超声导波技术及在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 8–15.
- [50] 吴斌, 李杨, 郑阳, 等. 水平剪切波在板表面附着物厚度检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 78–84.
- [51] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 232–238.
- [52] Deng F, Wu B, He C. A time-reversal defect-identifying method for guided wave inspection in pipes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2008, 130(2): 021503.1–021503.8.
- [53] Yu J, Wu B, Chen G. Wave characteristics in functionally graded piezoelectric hollow cylinders[J]. Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(9): 807–824.
- [54] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用斜探头在管道中选取纵向模态的实验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 246–250.
- [55] Gong K, Li Z. Caustics method in dynamic fracture problem of orthotropic materials[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(8): 614–619.
- [56] 刘瑜, 张伟, 励争. 基于连续小波变换的复合材料梁损伤检测技术研究[C]//北京力学学会第 14 届学术年会会议论文集. 2008: 161–162.
- [57] Yang J, Cui L J, Xu J, et al. An inverse method of elastic constants for unidirectional fiber-reinforced composite plate[J]. Frontiers of Physics, 2006, 1(2): 230–237.
- [58] 张伟伟, 马宏伟. 利用混沌振子系统识别超声导波信号的仿真研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 15–20.
- [59] 聂振华, 马宏伟. 基于重构相空间的结构损伤识别方法[J]. 固体力学学报, 2013, 34(1): 83–92.
- [60] 钟凯慧, 张伟伟, 马宏伟. 利用纵向导波进行管道裂纹参数识别的实验研究[J]. 机械强度, 2012, 34(6):

- 854-861.
- [61] 张伟伟,武静,马宏伟. 基于 Lyapunov 指数的超声导波检测技术[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2) : 250-257.
- [62] 武静,张伟伟,马宏伟. 利用 Lyapunov 指数实现超声导波检测的实验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24) : 82-87.
- [63] 刘增华. 复合材料 Lamb 波检测方法研究[C]//北京力学学会第 22 届学术年会会议论文集. 2016:IV-44.
- [64] 张海燕,孙修立,曹亚萍,等. 基于时间反转理论的聚焦 Lamb 波结构损伤成像[J]. 物理学报, 2010, 59(10) : 7111-7119.
- [65] 他得安,黄凯,王威琪. 评价骨质状况及骨质疏松症的超声方法[J]. 中国医疗器械信息, 2009, 15(3) : 1-6.
- [66] 他得安,王威琪,汪源源. 超声轴向传播技术评价长骨的研究[J]. 应用声学, 2009, 28(3) : 161-165.
- [67] Xu K L, Ta D A, Wang W Q. Reflection and transmission characteristics of ultrasonic guided waves in fractured long bone[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2010, 75(3) : 220-229.
- [68] 许凯亮,他得安,王威琪. 超声导波在长骨裂纹处的反射与透射数值仿真[J]. 声学技术, 2008, 27(5) : 224-225.
- [69] 许凯亮,他得安,王威琪. 骨折长骨中超声导波传播特性的仿真研究[J]. 声学学报, 2009, 34(5) : 423-429.
- [70] Alleyne D N, Lowe M J S, Cawley P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(3) : 635-641.
- [71] Ahang F, Lowe M. Elastic waves guided by a welded joint in a plate[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009, 465(8) : 2053-2068.
- [72] Pettit J R, Walker A, Cawley P, et al. A stiffness reduction method for efficient absorption of waves at boundaries for use in commercial finite element codes[J]. Ultrasonic, 2014, 54(7) : 1868-1879.
- [73] Leinov E, Lowe M J S, Cawley P. Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 347(7) : 96-114.
- [74] Leinov E, Lowe M J S, Cawley P. Ultrasonic isolation of buried pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 363(2) : 225-239.
- [75] Huthwaite P, Ribichini R, Cawley P, et al. Mode selection for corrosion detection in pipes and vessels via guided wave tomography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(6) : 1165-1177.
- [76] Shen Y. Structural Health Monitoring Using Linear and Nonlinear Ultrasonic Guided Waves[D]. Columbia : University of South Carolina-Columbia, 2014.
- [77] Mariani S. Non-contact Ultrasonic Guided Wave Inspection of Rails : Next Generation Approach[D]. San Diego : University of California-San Diego, 2015.
- [78] Ma J. On-line Measurements of Contents Inside Pipes Using Guided Ultrasonic Waves[D]. London: Imperial College London, 2007.
- [79] Farhidzadeh A. Application of Pattern Recognition Algorithms and Nondestructive Evaluation Techniques for the Structural Health Monitoring of Civil Structures[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2014.

责任编辑:常涛