

Technical Principles and Applications of
Ultrasonic Guided Wave in
Pipeline Non-destructive Testing

超声导波管道无损检测 技术及应用

唐志峰 吕福在 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

超声导波管道无损检测 技 术 及 应 用

唐志峰 吕福在 著

北 京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书在介绍超声导波研究背景基础上综述了国内外管道无损检测研究现状;详细阐述了超声导波的基本概念以及频散、多模态和波结构等超声导波特性;介绍了超声导波在管道中传播特性的理论基础和有限元数值仿真方法;建立了非轴对称管道导波声场调控理论;全面介绍了超声导波换能器及检测仪器的类型和特点,并给出了实际检测的应用案例;介绍了管道导波检测最新的研究成果包括相控阵技术、周向扫查成像检测技术、非轴对称导波对螺旋焊管和缺陷定征方面的检测应用;最后介绍了管道导波监测技术的研究内容 and 应用实例。

本书可供超声导波研究者或相关无损检测技术从业者学习阅读。

图书在版编目(CIP)数据

超声导波管道无损检测技术及应用/唐志峰,吕福在著. —
北京:冶金工业出版社,2019.8
ISBN 978-7-5024-8171-1

I. ①超… II. ①唐… ②吕… III. ①超声检验—管道
检测—研究 IV. ①U178

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 169916 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8171-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京联合互通彩色印刷有限公司印刷
2019 年 8 月第 1 版,2019 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm;13 印张;255 千字;200 页

89.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgcb.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

超声导波无损检测技术经过了近三十年的基础理论和应用研究。近十余年来,随着计算机技术、数值仿真技术、电子仪器技术及信号处理等交叉学科的综合发展,超声导波检测从实验室研究逐渐走向现场实际应用。

超声导波检测具有单点激励、传播距离远和衰减小的特点,对于管道、缆索、钢轨和钢板等长距离、大范围结构的无损检测,可以极大地提高检测效率,在一些传统检测仪器不可到达的场合如穿越管道、高空管道等具有独特优势。超声导波具有多模态和频散特性,且其传播过程依赖于波导结构本身,管道的结构类型(如无缝管和螺旋焊管)、防腐层材质、焊接支架、管道上的支管和仪表管、弯头等因素都可能对导波传播特性带来影响。因此,要发挥好超声导波检测的技术优势,必须深入理解超声导波的原理和基本特性。

本书系统总结了著者课题组十余年的研究成果。其中,第1章介绍了超声导波的基本概念、主要特性及管道超声导波检测研究的现状。第2章系统阐述了管道超声导波传播的基础理论。第3章介绍了管道导波的有限元数值仿真,并以轴对称导波模态仿真做了应用示范。第4章介绍了非轴对称管道导波声场调控理论。第5章介绍了超声导波换能器及检测仪器的种类、原理和各自特点,并列举了一些磁致伸缩超声导波检测仪现场应用案例。第6章介绍了磁致伸缩导波管道检测的新技术及应用,包括磁致伸缩相控阵导波检测技术、基于管道B扫导波成像检测方法、基于非轴对称管道导波的缺陷分类和定征技术、基于非轴对称导波的螺旋焊管检测技术和管道轴向缺陷定量化检测技术,并列举了相关新技术的现场应用实例。第7章介绍了管道腐蚀超声导

波监测技术,对导波监测信号的影响因素和信号处理方法进行了分析,并介绍了实验室模拟缺陷监测的验证过程和现场实际应用案例。希望本书能为管道无损检测技术人员了解超声导波检测技术有所帮助。

著者相关科研工作得到了国家重点研发计划项目(项目编号:2018YFC0809000)、国家自然科学基金(项目编号:51275454、51875511和U1709216)和浙江省科技计划项目(项目编号:2019C03112和2012C01015-2)的支持,在此表示衷心感谢。

本书是著者以及所指导的博士、硕士研究生共同的科研成果,对张小伟、陈会明、李绍星、袁琪楠、刘军、柳伟续、郑国军和骆苏军等的辛勤工作表示感谢!书中的大量现场应用案例来自杭州浙达精益机电技术股份有限公司,在此一并表示感谢!

本书在编写过程中参阅了有关著作和文献资料,对文献作者表示感谢!参考文献中如有遗漏,敬请谅解。由于著作水平所限,书中难免有局限性和不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2019年5月于杭州

目 录

1 超声导波	1
1.1 超声导波的研究背景	1
1.2 超声导波与超声体波	3
1.3 超声导波的基本特性	4
1.3.1 群速度和相速度	5
1.3.2 频散与多模态特性	6
1.4 超声导波无损检测技术特点	9
1.5 管道超声导波无损检测的研究现状	11
1.5.1 理论研究	11
1.5.2 应用研究	14
参考文献	16
2 超声导波在管道中的传播理论	21
2.1 管道超声导波传播特性分析	21
2.1.1 超声导波解析模型	21
2.1.2 超声导波有限元模型	23
2.1.3 超声导波传播特性	27
2.2 管道超声导波波源分析	30
2.2.1 简正模态展开法	31
2.2.2 外载荷扰动分析	33
2.3 超声导波衰减特性分析	43
2.3.1 带防腐层管道超声导波检测	44
2.3.2 埋地管道超声导波检测	49
参考文献	55
3 管道导波的有限元仿真及应用	56
3.1 有限元软件 ABAQUS	56
3.2 轴对称导波的有限元仿真	58
3.2.1 建立三维模型	58

3.2.2 定义分析步和输出	59
3.2.3 相互作用	59
3.2.4 施加载荷和边界约束	59
3.2.5 网格划分	60
3.2.6 后处理 (分析)	60
3.3 仿真实例	61
3.3.1 纵向模态导波的有限元仿真	61
3.3.2 扭转模态导波的有限元仿真	62
参考文献	63
4 非轴对称管道导波声场调控方法	64
4.1 非轴对称管道导波声场调控理论	66
4.1.1 基于螺旋换能器的非轴对称导波激励方法	66
4.1.2 基于圆周相控阵列换能器的非轴对称导波激励方法	70
4.2 非轴对称管道导波传播特性仿真	74
4.2.1 基于螺旋换能器的非轴对称导波传播仿真	74
4.2.2 基于圆周相控阵列换能器的非轴对称导波传播仿真	82
4.3 两种调控方法的特点	89
参考文献	90
5 超声导波换能器及检测仪器	91
5.1 压电式导波换能器	92
5.2 磁致伸缩式导波换能器	94
5.2.1 磁致伸缩效应	94
5.2.2 磁致伸缩导波换能器结构	97
5.2.3 磁致伸缩换能器优化	98
5.3 电磁超声式导波换能器	103
5.4 激光超声式	107
5.5 超声导波检测仪器	108
5.5.1 导波仪原理介绍	108
5.5.2 超声导波方向控制	109
5.5.3 超声导波距离幅值分析	112
5.5.4 国内外超声导波仪器	113
5.6 超声导波检测案例	115
案例 5.1: MSGW 超声导波仪在多个弯头管道检测中的应用	115

案例 5.2: MSGW 超声导波仪在带保温层管道检测中的应用	116
案例 5.3: MSGW 超声导波仪在架空管道检测中的应用	116
案例 5.4: MSGW 超声导波仪在长距离管道检测中的应用	117
案例 5.5: MSGW 超声导波仪在竖直接管检测中的应用	118
案例 5.6: MSGW 超声导波仪在弯头检测中的应用	119
案例 5.7: MSGW 超声导波仪在海上钻井平台检测的应用	119
案例 5.8: MSGW 超声导波仪在埋地管道检测中的应用	121
案例 5.9: MSGW 超声导波仪在其他管道检测中的应用	122
参考文献	124
6 磁致伸缩导波管道检测新技术及其应用	126
6.1 超声导波相控阵检测技术研究	126
6.1.1 超声导波相控阵检测原理	126
6.1.2 导波相控阵检测研究	127
6.2 基于 B 扫导波成像的检测方法	130
6.2.1 B 扫查成像原理	130
6.2.2 合成孔径聚焦 SAFT	131
6.2.3 超声导波的 B 扫查成像检测研究	134
6.2.4 超声导波的 B 扫查检测应用研究及案例	135
6.3 基于非轴对称导波的管道缺陷分类和定征技术	139
6.3.1 基于非轴对称导波的管道缺陷分类与定征数值仿真	140
6.3.2 基于非轴对称导波的管道缺陷分类技术	140
6.3.3 基于非轴对称导波的管道缺陷定征技术	147
6.3.4 基于非轴对称导波的管道缺陷分类和定征检测研究	152
6.4 基于非轴对称导波的螺旋焊管缺陷检测技术研究	154
6.4.1 基于非轴对称导波的螺旋焊管缺陷检测数值仿真	155
6.4.2 基于非轴对称导波的螺旋焊管缺陷检测及工程应用	161
6.5 管道轴向缺陷大小定量化检测技术	165
6.5.1 超声导波回波信号分析	165
6.5.2 基于匹配追踪算法的管道轴向缺陷大小定量分析原理	166
6.5.3 检测方法验证	167
参考文献	171
7 超声导波管道腐蚀监测技术	173
7.1 管道腐蚀监测技术	173

7.1.1	结构健康监测技术简介	173
7.1.2	管道腐蚀监测技术简介	173
7.1.3	超声导波管道腐蚀监测技术的特点及优势	175
7.1.4	超声导波管道腐蚀在线监测系统	176
7.2	磁致伸缩超声导波监测信号影响因素分析	177
7.2.1	声波耦合层	178
7.2.2	温度变化	179
7.2.3	偏置磁场	181
7.2.4	仪器稳定性	182
7.3	残差分析监测算法	182
7.3.1	建立参考信号库	182
7.3.2	残差分析算法	183
7.3.3	缺陷特征提取	186
7.3.4	残差分析监测算法实现流程	190
7.4	监测算法实验验证	191
7.4.1	监测系统功能验证	191
7.4.2	监测系统性能验证	194
7.5	监测案例及其分析	196
案例 7.1:	UGPM 导波监测技术在某站外埋地管道的监测应用	196
案例 7.2:	UGPM 导波监测技术在某站内架空管道的监测应用	198
参考文献		199

1 超声导波

本章介绍了目前我国工业管道的使用现状,以及目前用于管道无损检测的相关技术手段;分析传统无损检测方法和超声导波用于管道检测的技术特点。通过与传统超声体波检测技术的比较,说明超声导波无损检测技术的可行性与先进性;针对超声导波的频散特性和多模态特性,介绍管道超声导波的三种主要振动模态:纵向模态、扭转模态和弯曲模态,并分析造成导波频散的原因;最后回顾了超声导波管道无损检测技术的发展历程和相关重要研究成果。

1.1 超声导波的研究背景

管道运输不仅关系经济命脉,更会影响公共安全。以压力管道为主要代表的工业管道,在运行过程中不可避免地会产生不同程度、不同类型的破坏和失效,这种破坏一旦加剧并引起泄漏或断裂,往往容易引发严重的恶性事故,对国家能源运输安全和人民生命财产安全及周边生态环境造成极大危害。良好的油气管道建设是保障民生安全的重要举措,我国的油气管道建设还存在储运安全风险较大以及管道腐蚀情况严重等问题,亟待改进。我国近2万千米的管线中服役时间不到10年以及接近30年的都超过50%,处于事故高发阶段,管道安全运行压力巨大^[1]。据不完全统计,1970~1990年的20年间,国内管道共发生大小事故628次,其中设备故障占了30.3%,腐蚀事故占了21.3%,两者占了事故总数的50%以上^[2]。在管材质量和施工质量标准都更高的美国,1985~2000年,共发生1318起事故,其中因管道腐蚀造成管道失效的比例占到28.1%^[3]。一旦触发油气管道安全事故,经济损失不可避免,更容易造成人员伤亡,对人民生活产生深远影响。例如2014年7月发生在台湾省高雄市的石化气管道爆炸事故(图1.1(a)),石化气泄漏导致多个区域发生连环爆炸,32人丧生,300余人受伤,多条重要道路严重损坏,2.3万多户居民停气,1.2万多户断电,严重影响周边企业和居民的生产和生活。2013年11月,山东省青岛市一条输油管线发生爆燃(图1.1(b)),事故导致62人丧生,130余人受伤,道路大面积受损,原油泄漏还造成超过3000平方米海面过油,严重影响生态环境^[4]。经过调查,上述事件都是由于市政雨水渠道与油气管道交叉,油气管道被严重腐蚀发生泄漏,最终导致爆炸事故的发生。



(a) 高雄石化气管道爆炸事件



(b) 青岛石油管线爆燃事故

图 1.1 油气管线爆炸事故现场

为了获取真实有效的管道结构健康信息,对管道运行寿命进行科学合理的评估,提供可靠的维修或更换决策依据,需要发展一种经济实用、高效可靠的无损检测和结构健康监测方法对管道进行在线检测和长期监测。无损检测(non-destructive testing, NDT)是指在不损害或不影响被检测对象使用性能,不伤害被检测对象内部组织的前提下,利用材料内部结构异常或缺陷存在引起的热、声、光、电、磁等反应的变化,以物理或化学方法为手段,借助现代化的技术和设备器材,对试件内部及表面的结构、性质、状态及缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化进行检查和测试的方法^[5,6]。传统的无损检测方法主要有射线检测 RT、超声检测 UT、涡流检测 ECT、磁粉检测 MT 和渗透检测 PT 等。

(1) 射线检测。射线在穿透工件过程中会与工件发生相互作用,因吸收和散射使其强度减弱,由于缺陷部位和基材对射线的衰减能力不同,因此可根据透过被检工件的射线强度来判定是否存在缺陷。射线检测是工业领域应用最广泛的无损检测方法之一,可用于各种材料的检验,具有检测结果显示直观、检测结果可长期保存等优点,但同时具有检测成本较高、检测效率低、对裂纹缺陷有方向限制等缺点,且射线对人体有害,需要进行妥善的防护。

(2) 超声检测。超声检测是利用声波能量进行检测和测量的技术。当超声波入射到待检工件,并与其内部组织结构发生作用后会产生携带被检工件内部信息的超声信号,通过对这些信号进行处理与分析,可以实现对工件本身以及缺陷形状、大小、位置等特征的评估。超声检测适用于金属、非金属和复合材料等多种试件的检测,可检测试件较大厚度范围内的内部缺陷,缺陷定位精准、灵敏度高,且对人体和环境无害,已成为最常用的无损检测方法。但是,超声检测由于逐点检测而使检测效率较低。

(3) 涡流检测。基于电磁感应原理,当载有交变电流的检测线圈靠近待检工件时,金属工件表面会感生出涡流。涡流的大小、相位及流动形式受到工件性质(电导率、磁导率、形状、尺寸)及缺陷情况的影响而产生变化,并反作用于检测线圈,使其电感发生变化,最后通过测量线圈电感的变化程度,就可以判

断出工件的性质、状态及有无缺陷存在。涡流检测是一种非接触式的测量方法,可在高温环境下应用,并且易于实现高速、高效率的自动化检测。然而,该技术仅限于对导电金属材料的表面和近表面缺陷的检测,检测结果易于受到材料本身及其他因素的干扰。

(4) 磁粉检测。铁磁性材料或工件被磁化后,由于结构局部的不连续,工件表面和近表面的磁力线发生局部畸变而产生漏磁场,使吸附施加在工件表面的磁粉形成在合适光照下目视可见的磁痕,从而显示出损伤的位置、形状和大小。磁粉检测能够直观地显示缺陷形状、位置、大小,并可大致确定其性质,灵敏度高,对于裂纹、发纹、折叠、夹层和未焊透等类型的缺陷极为灵敏,且几乎不受试件大小和形状的限制。然而,磁粉检测只能检测部分铁磁性材料表面和近表面的缺陷,对于埋藏较深的缺陷无能为力,并且需在检测完成后增加退磁工序。

(5) 渗透检测。渗透检测是检测非疏孔性金属和非金属试件表面上开口缺陷的方法。将溶有荧光染料或着色染料的渗透剂施加在试件表面,渗透剂由于毛细作用渗入到表面开口的细小缺陷中,清除多余渗透剂,经干燥和施加显像剂后,渗透液回渗到显像剂中,形成放大的缺陷显示,从而可探测出缺陷的形貌及分布状态。渗透检测可检测多种材料,具有较高的灵敏度,且显示直观、操作方便、检测费用低。但是,渗透检测方法只能检出表面开口的缺陷及其表面分布,难以对缺陷做出定量评价,检出结果受操作者的影响也较大,在操作时还需注意防护渗透剂的毒性和腐蚀性。

以上这些方法用于管道检测存在检测效率低、检测费用高且在很多工况难以应用等缺陷。常规无损检测技术中,超声和射线检测方法主要用于检测被检物的内部缺陷;磁粉检测与电涡流检测方法主要用于检测被检物的表面和近表面缺陷;渗透方法仅用于探测被检物表面开口的缺陷,无法检测被检物内部的面积型缺陷,如裂纹和焊缝等。显然上述方法都可以对管道进行检测,但考虑到检测的效率和实际可行性,对穿越高速公路、河流、湖泊等的地下管道,城市地下管网,高温区、辐射区管道等领域的检测难度非常大。因此,仅依靠传统无损检测方法,无法对庞大的压力管网实现高效可靠的无损检测和健康评估。

超声导波无损检测技术是一种新型的无损检测和结构健康监测方法。区别于传统的超声体波,超声导波是波导中受边界约束的超声波,由于单点激励、长距离检测、100%截面全覆盖等特点,逐渐被应用于工业中。随着超声导波理论研究的不断深入,基于超声导波的无损检测新技术如雨后春笋般不断涌现,应用范围也逐步扩大,涵盖了管道、金属板、复合材料、胶接结构、多丝缆索以及钢轨等各种结构。

1.2 超声导波与超声体波

当弹性介质的某一部分受力发生形变时,形变状态会通过介质中各相邻质点

的相互作用向前传递，从而形成声波。在无限均匀介质中传播的声波称为体波 (bulk wave)，包括纵波和剪切波。纵波和剪切波在无界介质中以各自的特定速度（相速度）进行传播，模态之间无相互耦合、互不影响，超声波是无限均匀固体介质中传播的体波，体波以各自的特征速度进行传播，所以体波的传播不需要边界来维持。

超声导波 (ultrasonic guided wave, UGW) 作为一种固体中的弹性波，可以看作由基本的体波构成。当介质中存在一个以上的交界面时，声波将发生反射，产生复杂的波型转换，波与波之间还将发生干涉，并沿弹性介质向前传播，从而形成超声导波。因此，导波可以被理解为传播状态受传播介质几何形状约束的机械弹性波。与体波不同的是，导波的波速不仅与波导的材料密度和弹性参数有关，还与波导的厚度及导波频率等因素密切相关^[8]。对于典型的波导，如板、管、杆以及其他复杂截面结构，由于它们都有边界约束，所以在弹性波导内传播的导波称为超声导波。与体波相比，导波特有的性质决定了超声导波检测技术的独特优势。由表 1.1 可知，导波检测具有检测速度快、检测距离长以及覆盖整个被测结构等特点，因此导波检测技术特别适用于长距离结构（如管道、缆索和钢轨等）和大范围构件（如板状结构）的在线检测和监测应用。

表 1.1 导波与体波检测技术对比

对比项	导 波	体 波
激励频率	低频段	高频段
检测范围	可全截面覆盖	局部检测
检测效率	效率高	效率低
检测距离	距离长	距离短
模 态	模态数量多	纵波与横波
检测特点	体检式快速检测	踩点式扫描检测

1.3 超声导波的基本特性

振动在空间中的传播称为波^[7,8,10]。弹性固体中的扰动之所以能够以波的形式向四周传播，其基本原因是组成弹性体的质点存在相互作用力。当弹性介质中一个质点受到力的作用发生振动时，与其相邻的质点也会受到大小相同、方向相反的弹性力作用，使它们在各自的平衡位置附近振动，这样弹性介质中一个质点的振动就会引起相邻质点的振动，相邻质点的振动又会引起更远质点的振动，导致振动就以一定的速度由近及远地传播开来，从而形成机械波。

不同形式的声波在无边界的介质中以各自特定的相速度传播，如传统的超声波探伤采用的频率较高，波长远远小于结构尺寸，波动方程中表示为无限边界条

件,其解只有纵波和横波两种波型,且它们的波速都是恒定的。如果声波在有限确定边界尺寸的介质中传播,经过介质内的不连续截面间时会发生多次往复反射、折射和模态转换,在传播过程中发生相长干涉和相消干涉,通过不断的叠加,就会形成能够在介质中传播的导波声波^[7],如图 1.2 所示。图中虚线和实线表示波在传播反射时,发生了频散,一束波变成了传播方向和性质不同的两束波。因此,超声导波可以理解为传播状态受传播介质几何形状约束的机械波。

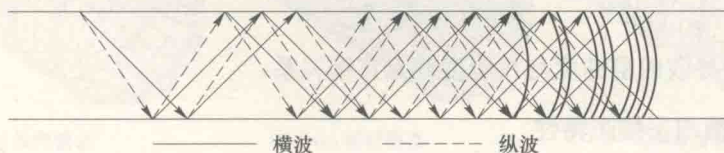


图 1.2 导波形成示意图

导波的传播介质称为波导,典型的波导包括管道、平板、缆索,以及其他一些截面变化较小、轴向长度长的结构。超声导波的传播特性,不仅与导波本身的频率有关,还与传播介质的尺寸和材料特性有关。因此,研究导波在各种介质中的传播特性之前,首先需要了解导波的频散和多模态特性。

1.3.1 群速度和相速度

相速度和群速度是导波理论中两个最基本的概念。导波在传播时,由于频散特性的存在,会使得导波存在多种频率的波在一起传播。群速度是关于一族频率相近的波的传播速度,即波包的速度是指脉冲波的包络上具有某种特性(如幅值最大)的点的传播速度,它是波群的能量传播速度。通俗地说,群速度是关于一族频率相近的波的传播速度。导波的相速度或相位速度简称相速,是指超声导波相位传播的速度,即波上相位固定的一点的传播速度。通俗地讲,就是导波形状向前变化的速度。在波导中,相速度往往比群速度要大。

Lord Rayleigh 曾说过:“群速度的概念常用下面的例子说明,即当一簇波列到达一个静止水面时,波群的速度比它所包含的每个子波的速度都要小;这些子波仿佛通过波群前进,当达到其内部极限时而消失。”所以说,群速度代表能量的传播速度。值得注意的是,导波以其群速度向前传播。如图 1.3 群速度与相速度的关系所示,波包 a 为弹性波在传播一定距离时得

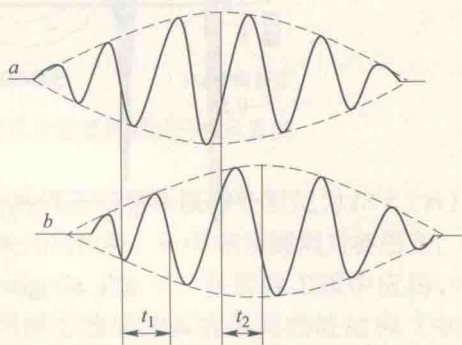


图 1.3 群速度与相速度的关系

到的一个导波波形。波包 b 为传播距离加大了 Δl 后得到的一个导波波形。比较图中的两个波包，波包 b 明显向前移动了一段时间 t_2 ，两个波形的等相位点（这里将其视为某一固定波形的过零点）相差的时间为 t_1 。在工程上，就可以借此粗略地估计这种模式导波的群速度 C_g 和相速度 C_p ：

$$C_g = \frac{\Delta l}{t_2} \quad (1.1)$$

$$C_p = \frac{\Delta l}{t_1} \quad (1.2)$$

可以看出，导波的群速度与相速度并无直接关系。

1.3.2 频散与多模态特性

波导介质中传播的超声导波具有的频散特性和多模态特性，是导波最重要的传播特性。理解超声导波在管道中的传播特性是应用超声导波管道无损检测技术的基础。

导波的频散特性是指导波在传播过程中其相速度和群速度随频率的变化而发生改变，引起频散的原因有几何频散和物理频散。几何频散是指由于波导的尺寸发生改变而引起的频散。物理频散是指由于波导的结构材料自身的物理特性（梯度材料）发生改变而引起的频散。导波的频散特性使得不同频率的导波传播速度不一致，从而引起相同结构特征的导波回波不同时到达换能器，由于波速的不同使得回波波包在时域上随着传播距离的增加而逐渐变宽，声能量分散在时域空间中，降低了检测信号的信噪比和灵敏度，如图 1.4 所示。

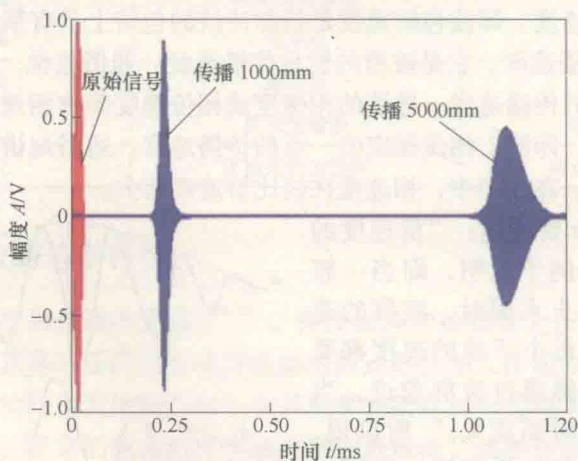


图 1.4 超声导波频散特性

多模态特性是指波导中同一频率下会存在多种模式的导波同时传播。具体到在管道中传播的导波，根据导波振动位移的圆周对称性，可以将导波分成三种模

态, 分别是纵向模态 (longitudinal mode)、扭转模态 (torsional mode) 和弯曲模态 (flexural mode), 如图 1.5 所示。

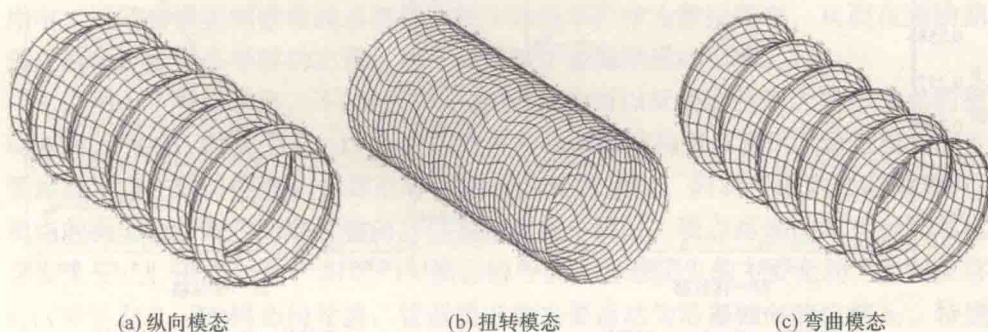


图 1.5 管道中导波模态示意图

实际检测应用中, 一方面, 导波的多模态特性会引起模态间的相互干扰, 使信号的信噪比降低, 增加导波模式控制、换能器设计的难度; 但另一方面, 不同模态对不同的缺陷有不同的敏感程度, 利用多模态的特性能够增加无损检测信息冗余度, 提高检测结果置信度, 拓展超声导波无损检测技术的操作空间。这是超声导波多模态的两面性和辩证性。

纵向模态和扭转模态均为圆周对称模态, 在管道截面处, 纵向模态导波振动位移以轴向和径向为主, 扭转模态导波振动位移以周向为主, 弯曲模态导波振动位移同时具有轴向、径向和周向分量, 故又称为非对称模态。图 1.6 所示为三种模态导波振动位移在管道截面的分布情况。

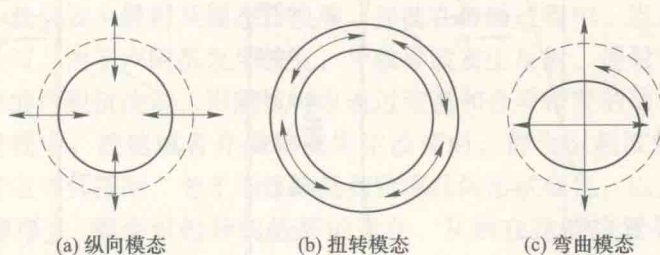


图 1.6 三种导波模态振动位移在管道截面的分布示意图

为了方便区分, 通常将纵向模态、扭转模态和弯曲模态分别记为 $L(n, m)$ 、 $T(0, m)$ 和 $F(n, m)$, 其中 n 表示导波的周向阶数, $n=0$ 表示圆周对称模态, $n>0$ 表示非圆周对称模态; m 表示族数, $m=1, 2, 3, \dots$ 。在实际工程中应用, 管状波导中存在数量巨大的导波模态, 不同模态的导波具有不同的波结构 (如图 1.7 所示, 其中横坐标表示管道中质点的归一化位移, 纵坐标表示壁厚), 其能量分布和可激发性等特征均有所不同。因此, 对于不同的被测结构和检测环境,

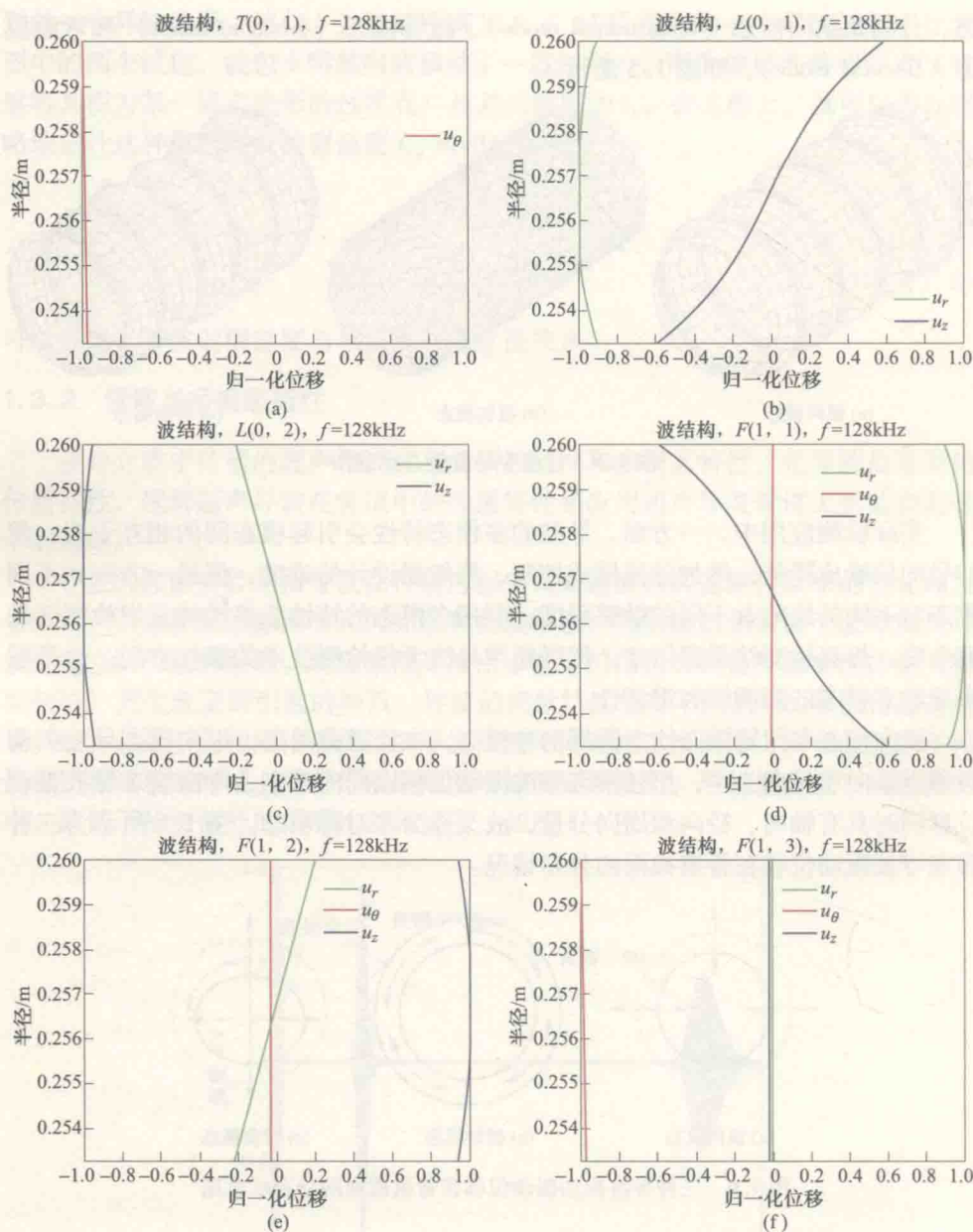


图 1.7 三类导波模式的波结构

选择合适的导波模式可有效地提高对不同类型缺陷的敏感度，大幅提高检测效率。同时，导波的多模式特性会使检测信号中包含多个模式的导波，从而让检测结果变得复杂且难以解释。因此在利用导波进行检测时，要注意对导波模式的控制，尽量减少导波的频散对检测结果的影响。实际应用中对于导波的模式控制