

CAMBRIDGE

# 固体中的超声导波

Ultrasonic Guided Waves in Solid Media

[美] 约瑟夫·罗斯 (Joseph L. Rose) 著

高会栋 崔寒茵 王继锋 译

刘 洋 校



科学出版社



# 固体中的超声导波

Ultrasonic Guided Waves in Solid Media

〔美〕约瑟夫·罗斯 (Joseph L. Rose) 著

高会栋 崔寒茵 王继锋 译

刘 洋 校



科学出版社

北 京

图字：01-2015-4022

## 内 容 简 介

本书是作者及其团队在超声导波领域 30 多年研究工作的总结，共 21 章，内容包括弹性力学基础，波动力学、超声体波、表面波、界面波，以及各种板材和管材中的超声导波的传播规律、研究方法和实际应用。

本书可作为相关领域学生、研究人员以及工程技术、管理人员的教材或参考书，同时读者可在剑桥大学出版社网站下载本书相关的超声传播模拟视频软件包和习题答案，网址 <http://www.cambridge.org/9781107048959>。

*Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*(978-1-107-04895-9) by Joseph L. Rose first published by Cambridge University Press 2014

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Science Press Ltd. 2019

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Science Press Ltd.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

Copies of this book sold without a Cambridge University Press sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Cambridge University Press 防伪标签，无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

固体中的超声导波 / (美)约瑟夫·罗斯(Joseph L. Rose) 著；高会栋，崔寒茵，王继锋译。—北京：科学出版社，2019.3

书名原文：Ultrasonic Guided Waves in Solid Media

ISBN 978-7-03-059567-6

I. ①固… II. ①约… ②高… ③崔… ④王… III. ①声检验②超声检测  
IV. ①TG115.285②TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261871 号

责任编辑：朱晓颖 王迎春 / 责任校对：郭瑞芝

责任印制：张 伟 / 封面设计：迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张：23

字数：588 000

定价：128.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

## 作者简介

约瑟夫·罗斯博士是美国宾夕法尼亚州立大学工程科学与力学系的 Paul Morrow 冠名教授，也是 FBS 公司的首席科学家及总裁。FBS 公司致力于超声导波技术在无损检测及结构健康监测领域的产品开发、技术转化和咨询。罗斯博士 1970 年在德雷塞尔大学获得博士学位。他在超声领域做出了突出的贡献，有 20 余项专利、4 部专著、600 余篇技术论文，培养了 60 多名博士研究生以及 150 多名硕士研究生。他是美国无损检测学会 (ASNT)、美国机械工程师学会 (ASME)、国际电气和电子工程师协会 (IEEE) 以及英国无损检测学会的会士。罗斯博士在无损检测以及结构健康监测领域的杰出贡献也为他赢得了无数奖项，其中包括 2011 年国际光学和光电子学会 (SPIE) 终身成就奖、2012 年宾夕法尼亚州立大学研究生教育奖，他也是美国《发现》(Discover) 杂志 1995 年航空航天创新奖章的决赛入围者。

## 译者序

超声导波技术是长距离无损检测和结构健康监测技术的一个重要组成部分。Ultrasonic Guided Waves in Solid Media 一书作者美国宾夕法尼亚州立大学约瑟夫·罗斯教授和他带领的团队在近 30 年里一直致力于超声导波技术的基础研究和应用开发,为全世界超声导波技术的发展做出了突出的贡献。该书以罗斯教授在宾夕法尼亚州立大学讲授的超声导波课程为基础,结合了 30 年(1985~2014 年)的主要研究成果及教授对未来导波技术发展的展望,是一部超声导波领域的系统性著作。

高会栋博士在 2003~2007 年师从罗斯教授进行超声导波研究,主要研究方向为导波在多层复合材料中的传播及在健康监测方面的应用。深受罗斯教授对导波研究热情的鼓舞,在随后的几年里协助罗斯教授进行该书的策划和撰写工作。近年来,导波检测已经逐渐被美国无损检测学会(ASNT)、美国机械工程师学会(ASME)、美国石油学会(API)等行业协会认可,现场应用领域也不断扩大。我们相信,超声导波技术在中国也将得到更深度的开发和广泛应用,因此产生了将该书翻译成中文的想法,以方便相关领域的科研和应用人员系统地了解导波的基础知识和应用方向。同时,该书前半部分系统地介绍了固体中超声波传播的基础知识,可作为波动力学、弹性力学、固体中超声波及超声无损检测课程的参考教材。希望该书中文版的出版能够为中国的科研工作者、在校学生及有意向使用超声导波技术来提高检测效率的工程技术人员带来一定的便利。

本书由超声导波检测领域的多位博士合作完成,具体分工如下:第 1~7 章、第 9~11 章和附录 C 由中国科学院声学研究所崔寒茵博士翻译,第 8 章、第 12~21 章和附录 D 由高会栋博士翻译,附录 A 和附录 B 由上海市特种设备监督检验技术研究院王继锋博士翻译。同时,高会栋博士主持了全书的翻译工作并对稿件进行多次整理和校正,法国洛林大学齐水宝博士为第 8、14 和 17 章的初稿翻译作出了重要贡献,美国怀俄明大学刘洋博士对全书进行了通读校审。

感谢剑桥大学出版社、科学出版社以及罗斯教授对本书翻译出版工作的大力支持,同时感谢南京大学声学研究所张淑仪院士、北京工业大学何存富教授对我们的鼓励!

本书能够顺利完成,更离不开我们家人的大力支持和付出,感激之情,无以言表。

译者

2018 年 10 月

# 前 言

本书以 1999 年出版的专著《固体中的超声导波》为基础,为读者提供了超声导波领域研究的最新信息。除了几个章节和前书相同以外,本书加入了近年来关于超声导波的最新研究成果,可作为学生、研究人员以及管理人员超声导波研究的基础教材和参考资料,同时对进一步研究起到抛砖引玉的作用。超声导波作为一种独立的无损检测方法,已经纳入美国无损检测学会(ASNT)、美国机械工程师学会(ASME)以及美国交通部(DOT)的相关无损检测规程,希望通过对超声导波无损检测新技术的完善和突破来改善人体的健康、工业设备及国家重大基础设施的安全。

我非常荣幸地见证了 1985 年以来超声导波技术在无损检测及结构健康监测领域研究和应用的快速发展。我对推进超声波诊断技术从而确保设备安全非常感兴趣。超声波可用于测量材料参数及关键结构的缺陷检测。这些技术已经用在质量控制以及对国民生产和公共安全至关重要(如飞机、管道、桥梁、核电等领域)的特种设备的安全检测中。

1970~1985 年,我的早期研究工作主要是在脉冲回波及一发一收超声无损检测的基础上进行信号处理和模式识别。我主导开发了新的超声计算层析成像技术,使用了特殊的超声特征来进行缺陷定征。这些技术是对常规的基于幅度的 C 扫描成像技术的一个有效补充和替代。20 世纪 70 年代末,超声研究应用扩展到医疗领域。我研究了一维相控阵技术在实时医疗成像中的应用,参与了对恶性、良性组织生长的区分工作。

超声导波检测技术的萌芽大约是在 1985 年,当时人们使用斜入射声波进行粘接检测,但是检测过程烦琐且难以控制。和斜入射声波一样,超声导波也可以方便地产生纵向和横向的振动分量,因此有了使用导波进行粘接检测的尝试,进一步的研究工作表明超声导波(沿着表面或者杆、管、板状结构传播的波)不但可以产生和斜入射体波类似的二维振动,而且比传统的逐点检测方式效率更高。关于超声导波技术的研发还在继续,导波技术已经被成功用于多种实际检测工作中,如电厂管道检测、化工行业管道检测、长输油气管道检测。使用特定的波型模式,导波检测可以用来实现长距离检测、带保温层及涂层的检测、恶劣环境下的检测等。

从事超声波无损检测的工程师、技术人员和学生会发现这是一部非常实用的参考书,本书也可以帮助超声无损检测行业的管理人员理解相关的工程技术术语,从而实现有效的沟通。管理人员可以忽略某些具体和复杂的数学描述,将其作为一个“黑匣子”来处理,只要采用适当的输入参数,就可以产生合理的输出,从而有效地分析相速度、群速度以及波结构。

总体来说,本书关于波动力学(特别是关于超声导波力学)的描述,为读者提供了一个有效的知识框架。基于这些知识,读者可以开创新的数据采集信号处理方法来解决超声波无损检测及结构健康监测领域的诸多实际问题。因此,我希望本书可以作为超声波无损检测领域各个层次工作人员的参考书,以及高年级本科生或研究生的教材。我也衷心希望本书可以帮助推动和拓展导波技术的应用。

约瑟夫·罗斯

2014 年



# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 1  |
| 1.1 引言 .....              | 1  |
| 1.2 体波和导波的比较 .....        | 2  |
| 1.3 超声导波综述 .....          | 3  |
| 1.4 无损检测和结构健康监测的区别 .....  | 4  |
| 1.5 各章内容预览 .....          | 4  |
| 1.6 小结 .....              | 6  |
| 参考文献 .....                | 8  |
| 第 2 章 频散原理 .....          | 9  |
| 2.1 引言 .....              | 9  |
| 2.2 张紧弦中的波 .....          | 9  |
| 2.2.1 控制方程 .....          | 9  |
| 2.2.2 分离变量法求解 .....       | 10 |
| 2.2.3 达朗贝尔解 .....         | 11 |
| 2.2.4 初值条件 .....          | 11 |
| 2.3 弹性基础上的弦 .....         | 12 |
| 2.4 频散波传播的例子 .....        | 14 |
| 2.5 黏性基础上的弦 .....         | 15 |
| 2.6 黏弹性基础上的弦 .....        | 15 |
| 2.7 频散系统的图解法 .....        | 15 |
| 2.8 群速度概念 .....           | 16 |
| 习题 .....                  | 19 |
| 参考文献 .....                | 21 |
| 第 3 章 无界介质中的声波 .....      | 22 |
| 3.1 引言 .....              | 22 |
| 3.2 各向同性介质 .....          | 22 |
| 3.2.1 运动方程 .....          | 22 |
| 3.2.2 膨胀波和等容波 .....       | 23 |
| 3.3 各向异性介质的克里斯托费尔方程 ..... | 24 |
| 3.4 关于速度、波和慢度面 .....      | 28 |
| 习题 .....                  | 31 |
| 参考文献 .....                | 32 |
| 第 4 章 反射与折射 .....         | 33 |
| 4.1 引言 .....              | 33 |
| 4.2 垂直入射波的反射系数 .....      | 33 |
| 4.3 斜入射波的斯涅尔定律 .....      | 36 |
| 4.4 临界角与波型转换 .....        | 38 |

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 4.5 折射的慢度图和临界角分析        | 39        |
| 习题                      | 40        |
| 参考文献                    | 41        |
| <b>第5章 斜入射</b>          | <b>42</b> |
| 5.1 引言                  | 42        |
| 5.2 反射和透射系数             | 42        |
| 5.2.1 固-固界面             | 42        |
| 5.2.2 固-液界面             | 44        |
| 5.2.3 液-固界面             | 45        |
| 5.3 展望                  | 46        |
| 习题                      | 46        |
| 参考文献                    | 46        |
| <b>第6章 板中的导波</b>        | <b>48</b> |
| 6.1 引言                  | 48        |
| 6.2 自由边界条件板问题           | 49        |
| 6.2.1 势函数分析法            | 49        |
| 6.2.2 部分波分析法            | 51        |
| 6.3 瑞利-兰姆频率方程的数值解       | 53        |
| 6.4 群速度                 | 55        |
| 6.5 波结构                 | 56        |
| 6.6 压缩波和弯曲波             | 59        |
| 6.7 杂项议题                | 59        |
| 6.7.1 纵向位移占主导的兰姆波       | 59        |
| 6.7.2 液体耦合弹性层的零点和极点     | 63        |
| 6.7.3 模式的截止频率           | 64        |
| 习题                      | 64        |
| 参考文献                    | 65        |
| <b>第7章 表面波和次表面波</b>     | <b>67</b> |
| 7.1 引言                  | 67        |
| 7.2 表面波                 | 67        |
| 7.3 表面波的激发和接收           | 71        |
| 7.4 次表面纵波               | 72        |
| 习题                      | 73        |
| 参考文献                    | 74        |
| <b>第8章 导波力学分析的有限元方法</b> | <b>75</b> |
| 8.1 引言                  | 75        |
| 8.2 有限元方法综述             | 75        |
| 8.2.1 使用有限元方法来求解问题      | 75        |
| 8.2.2 二次单元              | 79        |
| 8.2.3 动态问题              | 79        |
| 8.2.4 误差控制              | 80        |
| 8.3 有限元法在导波分析中的应用       | 81        |
| 8.3.1 板中二维表面波激发         | 81        |



|                        |            |
|------------------------|------------|
| 8.3.2 钢管中的导波传播和缺陷检测    | 82         |
| 习题                     | 83         |
| 参考文献                   | 84         |
| <b>第9章 半解析有限元方法</b>    | <b>86</b>  |
| 9.1 引言                 | 86         |
| 9.2 平板结构的半解析有限元分析      | 86         |
| 9.3 基于正交性的模式分类         | 89         |
| 9.4 群速度频散曲线            | 90         |
| 9.5 导波能量               | 91         |
| 9.5.1 坡印亭矢量            | 91         |
| 9.5.2 能量速度             | 91         |
| 9.5.3 各向异性板中的偏转角现象     | 91         |
| 9.6 半解析有限元方法解的收敛性      | 92         |
| 9.7 8层准-各向同性板中的自由导波    | 93         |
| 9.8 柱状结构中的半解析有限元计算     | 96         |
| 习题                     | 98         |
| 参考文献                   | 99         |
| <b>第10章 管中的导波</b>      | <b>100</b> |
| 10.1 引言                | 100        |
| 10.2 轴向传播的导波           | 100        |
| 10.2.1 解析求解方法          | 100        |
| 10.2.2 激发条件和周向能量分布     | 107        |
| 10.2.3 激发源的影响          | 109        |
| 习题                     | 113        |
| 参考文献                   | 113        |
| <b>第11章 管中周向导波</b>     | <b>115</b> |
| 11.1 引言                | 115        |
| 11.2 周向导波的控制方程推导       | 115        |
| 11.2.1 单层环中的周向水平剪切波    | 116        |
| 11.2.2 单层环面上的周向类兰姆波    | 118        |
| 11.3 多层环面中的周向波         | 121        |
| 11.4 周向导波控制方程的数值解      | 123        |
| 11.4.1 CSH 波的数值模拟结果    | 124        |
| 11.4.2 CLT 波的数值计算结果    | 128        |
| 11.4.3 解析公式的数值计算局限     | 132        |
| 11.5 管中保护覆层对周向导波传播的影响  | 134        |
| 习题                     | 137        |
| 参考文献                   | 137        |
| <b>第12章 层状材料中的超声导波</b> | <b>139</b> |
| 12.1 引言                | 139        |
| 12.2 界面波               | 139        |
| 12.2.1 固-固界面波: 斯通莱波    | 139        |
| 12.2.2 固-液界面: 肖特基波     | 141        |

|        |                 |     |
|--------|-----------------|-----|
| 12.3   | 半无限基底上层状材料中的声传播 | 143 |
| 12.3.1 | 瑞利-兰姆型波         | 143 |
| 12.3.2 | 勒夫波             | 146 |
| 12.4   | 多层材料中的导波        | 147 |
| 12.4.1 | 全局矩阵法           | 148 |
| 12.4.2 | 转移矩阵法           | 151 |
| 12.4.3 | 实例              | 153 |
| 12.5   | 带液体负载的多层结构      | 157 |
| 12.5.1 | 超声波反射和透射        | 157 |
| 12.5.2 | 漏导波的传播          | 161 |
| 12.5.3 | 非镜面反射和透射        | 162 |
|        | 习题              | 162 |
|        | 参考文献            | 163 |
| 第 13 章 | 导波激发源的影响        | 165 |
| 13.1   | 引言              | 165 |
| 13.2   | 积分变换法           | 165 |
| 13.3   | 正交模式分解法         | 168 |
| 13.3.1 | 简谐波激发时的正交模式分解   | 169 |
| 13.3.2 | 瞬态激发时的源影响       | 172 |
|        | 习题              | 180 |
|        | 参考文献            | 180 |
| 第 14 章 | 水平剪切波           | 181 |
| 14.1   | 引言              | 181 |
| 14.2   | 频散曲线            | 181 |
| 14.3   | 相速度和截止频率        | 183 |
| 14.4   | 群速度             | 184 |
| 14.5   | 主要结论            | 184 |
|        | 习题              | 185 |
|        | 参考文献            | 185 |
| 第 15 章 | 各向异性介质中的导波      | 186 |
| 15.1   | 引言              | 186 |
| 15.2   | 相速度频散曲线         | 186 |
| 15.3   | 传播方向对导波的影响      | 189 |
| 15.4   | 波束偏转            | 192 |
| 15.5   | 多层复合材料中的导波传播    | 193 |
| 15.5.1 | 正交复合材料          | 194 |
| 15.5.2 | 准各向同性复合材料板      | 195 |
|        | 习题              | 197 |
|        | 参考文献            | 197 |
| 第 16 章 | 管道中的导波相控阵       | 198 |
| 16.1   | 引言              | 198 |
| 16.2   | 导波相控阵聚焦理论       | 198 |
| 16.3   | 数值计算            | 203 |

|               |                     |            |
|---------------|---------------------|------------|
| 16.4          | 导波聚焦的有限元模拟          | 207        |
| 16.5          | 实时聚焦实验              | 208        |
| 16.6          | 导波合成孔径聚焦            | 211        |
| 16.7          | 合成孔径聚焦实验            | 213        |
|               | 习题                  | 215        |
|               | 参考文献                | 215        |
| <b>第 17 章</b> | <b>黏弹性介质中的导波</b>    | <b>217</b> |
| 17.1          | 引言                  | 217        |
| 17.2          | 黏弹性模型               | 217        |
| 17.2.1        | 黏弹性材料模型             | 217        |
| 17.2.2        | 凯尔文-沃伊特模型           | 218        |
| 17.2.3        | 迈克斯韦模型              | 218        |
| 17.2.4        | 滞回模型和凯尔文-沃伊特模型的其他细节 | 218        |
| 17.3          | 测量黏弹性参数             | 219        |
| 17.4          | 黏弹各向同性板             | 220        |
| 17.5          | 黏弹正交各向异性板           | 220        |
| 17.5.1        | 问题界定和求解             | 220        |
| 17.5.2        | 数值计算结果              | 221        |
| 17.6          | 黏弹性介质层中的兰姆波         | 223        |
| 17.7          | 黏弹复合板               | 224        |
| 17.8          | 黏弹涂层的管              | 228        |
|               | 习题                  | 229        |
|               | 参考文献                | 230        |
| <b>第 18 章</b> | <b>超声振动</b>         | <b>232</b> |
| 18.1          | 引言                  | 232        |
| 18.2          | 超声共振的实际应用展望         | 235        |
| 18.2.1        | UMAT 概念示例           | 235        |
| 18.2.2        | UMAT 实际应用           | 237        |
|               | 习题                  | 240        |
|               | 参考文献                | 240        |
| <b>第 19 章</b> | <b>导波阵列换能器</b>      | <b>241</b> |
| 19.1          | 引言                  | 241        |
| 19.2          | 理论分析模型              | 241        |
| 19.2.1        | 线性梳状换能器             | 242        |
| 19.2.2        | 环状换能器               | 245        |
| 19.3          | 相控阵换能器              | 248        |
| 19.3.1        | 相控阵的解析模型            | 248        |
| 19.3.2        | 相控阵激发示例             | 248        |
|               | 习题                  | 252        |
|               | 参考文献                | 253        |
| <b>第 20 章</b> | <b>非线性导波介绍</b>      | <b>254</b> |
| 20.1          | 引言                  | 254        |
| 20.2          | 弱非线性材料中的体波          | 254        |

|        |                  |     |
|--------|------------------|-----|
| 20.3   | 二次谐波的测量          | 255 |
| 20.4   | 二次谐波和微结构的关系      | 257 |
| 20.5   | 弱非线性波动方程         | 258 |
| 20.6   | 板中高次谐波的产生        | 261 |
| 20.6.1 | 相位匹配             | 261 |
| 20.6.2 | 非线性能流            | 263 |
| 20.6.3 | 群速度匹配            | 264 |
| 20.6.4 | 实验结果示例           | 264 |
| 20.7   | 非线性超声导波的应用       | 268 |
|        | 习题               | 268 |
|        | 参考文献             | 269 |
| 第 21 章 | 导波成像方法           | 271 |
| 21.1   | 引言               | 271 |
| 21.2   | 一发一收式导波成像方法      | 271 |
| 21.3   | 缺陷轨迹分布图          | 274 |
| 21.4   | 透射导波二维层析成像       | 275 |
| 21.5   | 板材中的导波相控阵        | 277 |
| 21.6   | 长距离超声导波管检测图      | 280 |
|        | 习题               | 281 |
|        | 参考文献             | 282 |
| 附录 A   | 超声无损检测原理、分析和显示技术 | 284 |
| A.1    | 引言               | 284 |
| A.2    | 波的干涉             | 286 |
| A.3    | 单点源的计算模型         | 288 |
| A.4    | 柱形单元的方向函数        | 290 |
| A.5    | 超声场的描述           | 291 |
| A.6    | 近场计算             | 292 |
| A.7    | 扩散角的计算           | 292 |
| A.8    | 超声波束的控制          | 292 |
| A.9    | 求解超声场技术中应注意的问题   | 293 |
| A.10   | 时域和频域分析          | 294 |
| A.11   | 脉冲超声场效应          | 294 |
| A.12   | 成像技术介绍           | 296 |
| A.13   | 超声波幅度减小的原因       | 297 |
| A.14   | 分辨率和穿透原理         | 297 |
| A.14.1 | 轴向分辨率            | 297 |
| A.14.2 | 横向分辨率            | 298 |
| A.15   | 相控阵和波束聚焦         | 298 |
|        | 习题               | 299 |
|        | 参考文献             | 299 |
| 附录 B   | 弹性理论的基本公式和概念     | 300 |
| B.1    | 引言               | 300 |
| B.2    | 术语               | 300 |

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| B.3    | 应力、应变和本构方程 .....          | 301 |
| B.4    | 弹性常数间的关系 .....            | 302 |
| B.5    | 矢量和张量变换 .....             | 302 |
| B.6    | 主应力和主应变 .....             | 303 |
| B.7    | 应变-位移方程 .....             | 303 |
| B.8    | 波动控制方程推导 .....            | 304 |
| B.9    | 各向异性弹性常数 .....            | 305 |
|        | 习题 .....                  | 307 |
|        | 参考文献 .....                | 307 |
| 附录 C   | 导波信号处理 .....              | 308 |
| C.1    | 引言 .....                  | 308 |
| C.2    | 快速傅里叶变换 .....             | 308 |
| C.2.1  | FFT 应用例子: 解析包络 .....      | 312 |
| C.2.2  | FFT 应用例子: 模式识别的特征 .....   | 312 |
| C.2.3  | 离散傅里叶变换的特征 .....          | 313 |
| C.3    | 短时快速傅里叶变换 .....           | 313 |
| C.4    | 二维快速傅里叶变换 .....           | 318 |
| C.5    | 小波变换 .....                | 320 |
|        | 习题 .....                  | 324 |
|        | 参考文献 .....                | 324 |
| 附录 D   | 导波模式和频率选择窍门 .....         | 325 |
| D.1    | 引言 .....                  | 325 |
| D.2    | 模式和频率选择的一些例子 .....        | 326 |
| D.2.1  | 表面开口缺陷 .....              | 326 |
| D.2.2  | 轻微腐蚀和壁厚减薄 .....           | 327 |
| D.2.3  | 钢轨头部的横向裂纹检测 .....         | 327 |
| D.2.4  | 铝板和补丁层之间的黏合面检测 .....      | 329 |
| D.2.5  | 有水负载的结构 .....             | 329 |
| D.2.6  | 管道检测中的频率扫描 .....          | 331 |
| D.2.7  | 超声导波测冰 .....              | 332 |
| D.2.8  | 除冰 .....                  | 332 |
| D.2.9  | 管道中的导波实时相控阵聚焦 .....       | 332 |
| D.2.10 | 飞机检测的几个应用 .....           | 334 |
| D.2.11 | 使用周向导波进行涂层脱黏检测和裂纹检测 ..... | 336 |
| D.2.12 | 多层结构 .....                | 339 |
| D.2.13 | 结束语 .....                 | 339 |
|        | 习题 .....                  | 340 |
|        | 参考文献 .....                | 341 |
|        | 名词翻译 .....                | 343 |
|        | 致谢 .....                  | 350 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

在过去的十年里,超声导波的研究突飞猛进,论文数量、研究课题以及在质量控制和在役检测方面的应用都有飞速发展。本书是在我1999年出版的《固体中的超声波》的基础上,加入了近十年超声导波研究新的进展。最近,美国无损检测学会(ASNT)、美国机械工程师学会(ASME),以及美国交通部(DOT)的相关无损检测的规程已经将超声导波接纳为一种独立的无损检测方法。类似于常规超声、射线等无损检测方法,超声导波相关的培训和认证已经在上述机构全面展开和被广泛接受。

超声导波可用于无损检测(NDT)、结构健康监测(SHM)以及其他工程领域。在无损检测领域,导波检测已经在管道、铁轨、钢材、船舶、飞机很多领域得到应用,如管道中气体滞留的检测、固定翼和旋转翼飞机上的结冰检测及除冰等。相比传统超声,超声导波方法更为快捷、经济,在某些特定应用场合检测精度也更高。例如检测保温层下的腐蚀,传统方法需要拆除所有保温层,然后逐点扫查,而使用超声导波,只需要在准备布置探头的若干位置拆除保温层即可。

导波检测的成功与否在很大程度上取决于波型模式的选择和信号分析。一个波导结构中存在很多种波型模式。这给检测提供了很多可能性,同时增加了检测规程设计和信号分析的复杂性。近年来,利用数值计算技术,我们可以更加准确地了解超声导波的传播规律,从而根据需要进行模式选择和优化。以前的很多技术难题现在都得到了解决。以前,为了节省运算时间,很多问题用边界元方法来解决。边界元方法需要研究人员有深厚的数学功底,能解决的问题也有很大的局限性。而如今,很多工程和研究人員都可以用有限元软件来解决复杂的问题,而不需要了解具体的数学细节和编程。

从无损检测理念到结构健康监测理念的转变也带动了超声导波技术的飞速发展。使用超声导波,可以使用少量的传感器实现设备关键部分的大面积监测,从而提高设备的安全性和可靠性。本书介绍的基本理论为传感器设计、系统设计和软件设计提供了一个理论框架。已经有很多科研工作者以此为基础发表了数百篇文章,为各种实际应用找到了解决方案。未来的几十年内,超声导波将在结构健康监测领域得到广泛应用。同时,超声导波还可以用在很多其他领域,例如:

- (1)瞬态响应问题,包括动态冲击响应;
- (2)利用应力波来研究材料的力学性能,如杨氏模量、各向异性参数、本构方程;
- (3)工业以及医疗超声;
- (4)声发射无损检测分析;
- (5)结合低频振动分析和高频超声分析的超声波振动研究;
- (6)其他创造性应用,如管道中气体的截留、各种结构的除冰、液体的黏滞性测量等。

历史上,波传播的问题主要为力学研究者所感兴趣。很多著名的科学家完成了早期的工



作,例如 Stokes、Poisson、Rayleigh、Navier、Hopkinson、Pochhammer、Lamb、Love、Davies、Mindlin、Viktorov Graff、Miklowitz、Auld、和 Achenbach。Graff(1991)为我们描述了超声研究的历史。本章末引用的文献可以帮助读者进一步了解波动力学的基础工作。互联网时代给文献调研带来了很大便利。因此,本书没有详细收录和导波相关的所有工作,与后续各章相关的关键文献在每章中分别列出。

## 1.2 体波和导波的比较

图 1-1 是体波检测和导波检测的原理示意图。对比图(a)和(b),读者很容易看出超声导波的覆盖区域比体波大了很多。传统超声有效检测区域为传感器下方声束扫描的有限区域,而导波检测可以大范围地覆盖被检测构件。所以在传统超声检测中,需要不断地移动传感器完成数据采集才能完成整个构件的检测。与之相对,超声导波仅需单点激励便可对整个构件进行检测。

图 1-1 简单描述了斜入射和梳状阵列换能器两种导波激励的方法。斜入射方法也可以用来激发传统的斜入射体波。斜入射传感器对体波或导波的激励是由其设计参数和使用频率决定的。当声波波长与结构几何尺寸在同一维度时,声波在结构内多次往复反射并进一步叠加干涉、几何弥散形成超声导波。导波的产生一般要求声波波长与结构的厚度相近或更大。

对于梳状阵列导波换能器,其换能片之间的距离是由要激励的导波模式的频率和波长决定的。一般梳状阵列换能器由多个换能片组成,多个换能片产生的波相互叠加干涉并与传播结构耦合激励出目标导波模式。

导波的激发受激发源的频率、分布和入射角度影响很大。不同的激发源可形成不同的干涉结果。所有导波模式的集合构成频散曲线。当激发源的参数和频散曲线所描述的点对应时,可以有效地激发对应的导波模式。其他情形下,波场不能长距离传播。

超声导波的主要优势是可以从一个固定探头位置检测较大的范围,而不需要进行多点扫描。虽然总体上导波被认为是一种预扫查工具,但是我们可以通过波结构分析、灵敏度分析等方法来进行模式优化以提高灵敏度。导波可以用来检测掩埋区域、水下结构、带涂层、保温层、埋地 and 水泥浇筑结构等。只

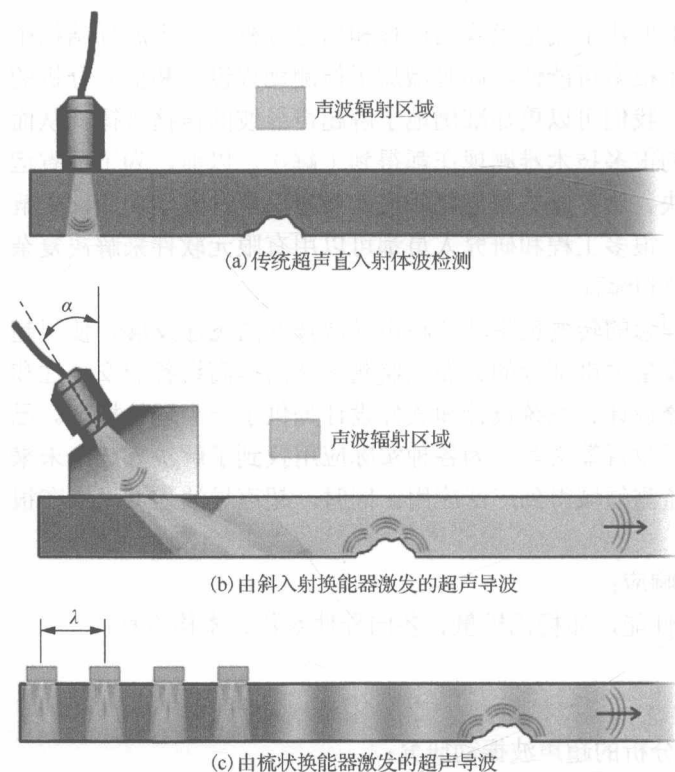


图 1-1 体波检测和导波检测原理比较

需要在探头位置处拆除保温层，导波检测需要的准备工作简便、快速、且成本较低，在很多情况下可以弥补传统方法的不足。

表 1-1 给出了各向同性介质中体波和导波的传播特性比较。表 1-2 是各向同性和各向异性材料中超声波传播特性的比较。注意：金属不都是各向同性的，例如，离心铸造的不锈钢具有长条形粗大晶粒，是各向异性的。体波和导波在板材和管材检测中更多方面因素的比较请参见表 1-3。

表 1-1 超声体波和超声导波的传播特性

|      | 体波     | 导波       |
|------|--------|----------|
| 相速度  | 常数     | 随频率变化    |
| 群速度  | 和相速度相同 | 通常和相速度不同 |
| 脉冲形状 | 非频散    | 通常具有频散性  |

表 1-2 各向同性和各向异性材料中超声波传播特性

|       | 各向同性   | 各向异性  |
|-------|--------|-------|
| 波速    | 不随方向变化 | 随方向变化 |
| 有角度偏转 | 否      | 是     |

表 1-3 体波和导波在板材和管材检测中的优缺点对比

| 体波              | 导波          |
|-----------------|-------------|
| 耗时费力            | 快速          |
| 逐点扫描(精确的矩形栅格扫查) | 全局扫描(近似线扫描) |
| 不可靠(可能会遗漏点)     | 可靠(整体覆盖)    |
| 需要大量的培训         | 需要少量的培训     |
| 探头与缺陷距离相对较小     | 检测范围大       |
| 缺陷需要可达          | 可对隔离区进行有效检测 |

1.3 超声导波综述

导波的传播需要满足特定的边界条件，这个边界可以是一个结构的上下表面。当波长和材料的厚度相比很小时，这个厚壁材料可以被视为一个半无限空间，这种波称为表面波，又叫瑞利波。瑞利波的波速和材料的泊松比有关。钢材中瑞利波的波速通常为 2900m/s 左右。这个边界也可以是薄板、杆、管 and 多层材料等自然波导结构的表面。超声波在表面之间往复反射，每次反射都会有纵波和横波的模式转换。各种模式转换出的波在传播过程中形成干涉，干涉结果可能是相长的、相消的或者是介于两者之间的。每个相长干涉情形对应一个导波模式。

我们可以从声传播的控制方程纳维尔 (Naviers) 方程加上特定的边界条件来求解导波问题。例如，在自由边界条件下，满足相长干涉条件的所有导波模式的集合构成了频散曲线。频散曲线可以通过图形表示为相速度和频率的关系。由于入射角和相速度之间由斯涅尔 (Snell) 定律来联系，使用斜入射探头激发时，频散曲线也可以描述为入射角和频率之间的关系。

每个结构有特定的频散曲线。随着计算技术的发展，我们现在可以得到很多自然波导结构的频散曲线。下面给出几个自然波导的例子：板材(飞机蒙皮)、棒材(圆钢、方钢、铁轨等)、

空心圆柱体(压力管道、管道)、多层结构、界面、半无限空间上的涂层和多层涂层结构。

理论上我们可以使用频散曲线上的任何一点来进行检测，有成百上千种方案可供选择。那么我们如何选择一种最佳的方案呢？这个模式选择的过程是非常重要的，因为不同的模式会有不同的检测效果。每一个点都具有特定的振动分布，我们称为波结构。有些点具有较大的平面内振动分量。由于与表面平行的平面内振动不会耦合到水中，这些模式可用来进行水下结构的检测。例如，检测一个多层材料中的弱粘接界面时，我们可以通过波结构分析，选择在界面上具有最大剪切应力的模式来提高对弱粘接的灵敏度。

选定导波模式后，我们可以进行探头的优化设计来增强激发和接收效果。每个斜入射换能器有一个特定的相速度分布，而激发脉冲也有一个特定的频率分布，称为源影响，我们会在本书的后面详细讨论，这里我们先假设理想情况。一个斜入射探头的激发曲线具有一个恒定的相速度值，当我们扫描不同的激发频率时，就可得到相速度频散曲线上对应不同频率的点。另一个比较常用的探头是梳状探头或叉指换能器。这种类型探头的激发曲线在频率相速度图上是 从原点开始的一根斜线，其斜率等于换能片的间隔长度，也等于最佳激发模式的导波波长。进行频率扫描就可以得到这根斜线和频散曲线相交的一系列导波模式。因此，我们可以通过改变入射角或换能器的周期，来得到频散曲线上的大部分点。

1.4 无损检测和结构健康监测的区别

无损检测的基本思路是携带仪器进行缺陷探测。结构健康监测的思路则是将换能器安装在被检测结构上，根据需要采集数据，并通过基准信号和测量信号之间的比较来显示损伤的变化。结构健康监测可用于复杂结构。表 1-4 是无损检测和结构健康监测的简单比较。

表 1-4 无损检测和结构健康监测的区别

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| 无损检测       | 结构健康监测                  |
| 离线评估       | 在线评估                    |
| 基于时间的维护方案  | 基于状态的维护方案               |
| 检测已有缺陷     | 确定是否继续适用以及剩余寿命          |
| 耗时长，花费大    | 花费和人力减少                 |
| 没有基准信号作为参考 | 需要基准参考信号<br>需要考虑环境因素的变化 |

1.5 各章内容预览

下面预览本书各章的内容。

第 2 章描述基本的频散原理，即波速随频率变化的现象，并给出波动力学的基本物理定律和方程。

第 3 章介绍各向同性和各向异性介质中体波的传播原理，内容包括克里斯托费尔方程的推导和偏转角概念的引入。在各向异性材料中，波速随角度会有明显的变化，群速度的方向也与相速度的方向不同，其夹角称为波束偏转角。

第 4 章讨论反射、折射以及能量转化系数。斯涅尔定律和模式转换是体波理论的一个重要方面。