


无损检测技术丛书

相控阵 超声成像检测

施克仁 郭寓岷 主编

Phased Array
Ultrasonic Imaging



 高等教育出版社

无损检测技术丛书

XIANGKONGZHEN CHAOSHENG

CHENGXIANG JIANCE

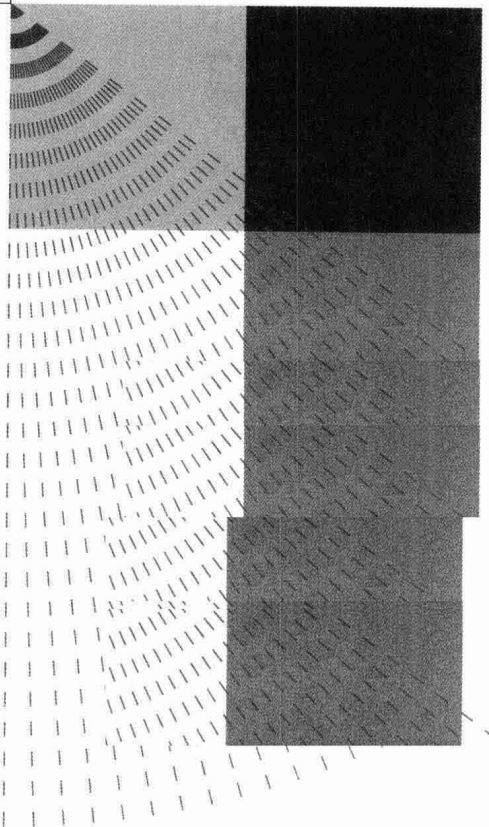
Phased Array
Ultrasonic Imaging
and Testing

相控阵 超声成像检测

施克仁 郭寓岷 主编

其他作者

霍 健 阙开良 徐西刚
杨 平 香 勇 鲍晓宇



 高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书论述作者研究的超声检测中的热门技术——相控阵超声成像检测技术。内容新颖，含有创新的思想和技术内容。

本书内容涉及相控阵超声声场理论、相控阵列换能器的理论分析与设计、相控阵超声成像声场控制模式、相控阵超声治疗声场控制模式、相控阵多通道超声波发射和接收系统、发射和接收超声波的相位控制技术、相控阵超声成像检测的数字系统、声束控制技术、相控阵超声自适应信号补偿技术、自适应聚焦数字相控阵超声成像技术、柔性阵列探头相控阵超声成像检测技术、混频相控阵技术、面阵相控阵超声三维成像检测技术等前沿的研究内容。

本书适合于从事无损检测技术及相关领域的研究人员，工程技术人员，相关专业的教师、研究生及本科生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

相控阵超声成像检测/施克仁,郭寓岷主编. —北京:
高等教育出版社, 2010. 8

ISBN 978 - 7 - 04 - 029494 - 1

I. ①相… II. ①施… ②郭… III. ①相控阵 - 超声
成像 - 超声检测 IV. ①TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 126540 号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 查成东 封面设计 刘晓翔
版式设计 王莹 责任校对 杨雪莲 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 唐山市润丰印务有限公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 23.75
字 数 480 000
插 页 6

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 8 月第 1 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷
定 价 79.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 29494 - 00

前 言

相控阵超声成像检测技术是采用多阵元的阵列换能器(探头),依靠计算机技术控制阵列中各阵元发射超声波的时间(相位)来控制各阵元的声束在声场中偏转、聚焦;或控制接收阵列换能器中各阵元接收超声回波信号的时间(相位),进行偏转、聚焦成像检测的一种高端技术,是目前超声检测技术中的发展热点之一。相控阵技术起源于先进的相控阵雷达,海洋地貌探测和反潜的先进声纳也采用相控阵技术。相控阵超声成像首先应用在医疗超声影像技术中,近年来在工业无损检测方面也开始了应用,取得了良好的效果。相控阵超声成像检测涉及声场理论、相控阵声场控制技术、阵列换能器的设计理论、阵列换能器的材料和制作工艺技术、相控阵超声波的发射与接收技术(包括相位控制技术)、相控阵超声计算机数字系统的集成和软硬件技术等。技术层次高,属于超声检测设备中的高端产品,目前国内暂时还没有生产相控阵超声成像检测设备,所用的相控阵超声成像检测的设备都是从国外知名公司进口的,价格昂贵。

本书主编从2000年开始先后投入五名博士生和一名硕士生从事相控阵超声成像检测技术的研究,对相控阵超声的声场理论、阵列换能器的理论和设计、相控阵超声成像声场控制模式、相控阵多通道超声波发射和接收技术、阵列换能器中各阵元发射和接收超声波的相位控制技术、相控阵超声成像检测的数字系统、相控阵超声自适应信号补偿技术、自适应聚焦相控阵超声成像技术、柔性阵列换能器相控阵超声成像检测技术、混频相控阵技术、二维阵列相控阵超声三维成像检测技术、超声束二维和三维成像的信号处理和软件技术等进行了系统的研究。

本书是在施克仁教授所指导从事上述相控阵超声成像检测研究的博士论文和硕士论文的研究成果基础上写成的。全书按章排列,第一章超声检测原理与超声成像检测技术,第二章相控阵超声成像检测的物理依据,第三章相控阵列换能器的理论分析与设计,第四章基于统计学方法的二维随机稀疏阵列设计及优化,第五章二维周期型稀疏阵列,第六章稀疏阵列的(MRLA + GA)设计法,第七章子阵合成相控阵,第八章二维相控阵列的声场控制模式(包括相控阵超声治疗的声场控制模式),第九章混频相控阵,第十章相控阵超声成像检测自适应信号补偿技术,第十一章数字相控阵超声成像检测系统;第十二章自适应聚焦相控阵超声成像检测,第十三章

柔性阵列换能器相控阵超声成像检测技术，第十四章二维阵列相控阵超声三维成像检测技术，结束语。其中第一章依据鲍晓宇博士的博士论文部分内容，主编进行了改编与增写；第二至五章和第八章的依据是霍健硕士的硕士论文；第六、七、十四章的依据是杨平博士的博士论文；第九章的依据是香勇博士的博士论文；第十章的依据是徐西刚博士的博士论文；第十一至第十三章的依据是阙开良博士的博士论文；结束语由主编撰写。为了便于读者了解，注明了作者的姓名及简介。全书由主编进行构思和内容编排，并对上述各章所选用的素材进行适当的删节和修改。

本书的特点是从应用技术角度来写相控阵超声成像检测技术的相关理论和具体技术，作者根据已有的理论公式结合具体应用对象进行计算、仿真和实验研究，得出有实用价值的相关应用理论和具体技术，本书将作者的研究心得和成果贡献给读者，希望对我国相控阵超声成像检测技术的发展在理论和技术层面上有促进作用。

本书虽然论述的是工程无损检测领域的相控阵超声成像检测技术，但和医疗相控阵超声影像技术同属一种技术领域。对于目前用于海洋地貌探测和反潜用的相控阵声纳技术，除了使用的声波频率段不同、采用换能器的材料与结构不同外，其他技术都是相似的。因此本书除了适合于从事无损检测技术及相关领域的研究人员，工程技术人员，相关专业的教师、研究生及本科生参考阅读外，对从事医疗相控阵超声影像技术、海洋地貌探测及反潜相控阵声纳技术的研究人员和操控人员也具有参考价值。相信国内的海洋军事爱好者对本书的内容也会有阅读的兴趣。

任何研究成果均是在前人工作的基础上发展的，因此在本书中因研究工作需要，参考和引用了前人的已有公式、图片与学术观点，引用部分尽量以参考文献标出(参考文献按各章独立列举)，如有疏漏，敬请谅解。同样，任何研究工作都有其局限性和不足之处，本书也难免有谬误和局限性，敬请读者谅解和批评指正。

本书的研究工作承蒙清华大学一期“985”重点基金(编号 012 - 081100501)资助，在此表示衷心的感谢。

施克仁

2010年1月于清华大学

目 录

第一章 超声检测原理与超声成像检测技术	3
1.1 超声检测的一般概念	3
1.2 超声成像检测原理和特点	6
1.3 超声成像检测技术的发展和分类	7
1.3.1 扫描超声成像	7
1.3.2 超声全息	8
1.3.3 超声显微镜	10
1.3.4 超声 CT	11
1.3.5 ALOK 超声成像	12
1.3.6 衍射传播时间技术	12
1.3.7 合成孔径聚焦技术	14
1.3.8 相控阵超声成像	15
1.4 相控阵超声成像数字控制技术.....	16
1.4.1 相位延时	16
1.4.2 动态聚焦	17
1.5 相控阵超声成像检测研究现状.....	23
参考文献	26
第二章 相控阵超声成像检测的物理依据	31
2.1 波动方程.....	31
2.2 连续波声场理论及仿真模型.....	32
2.2.1 单源换能器的辐射声场	32
2.2.2 阵列换能器的辐射声场	33
2.2.3 矩形阵元辐射声场的快速算法	34
2.3 基于空间冲激响应的脉冲场模型.....	35
2.3.1 辐射声场模型	36
2.3.2 散射场模型及相控阵超声成像仿真模型	37

2.3.3	空间脉冲回波响应	38
2.3.4	阵元空间冲激响应的计算	39
2.4	相控阵超声波束的时空控制	39
2.4.1	声束的偏转	40
2.4.2	声束的聚焦	40
2.4.3	聚焦声束的偏转	41
2.4.4	二维阵列换能器的声束控制	42
2.5	相控阵超声成像检测的声学特性	43
2.5.1	空间分辨率问题	43
2.5.2	伪像问题	45
	参考文献	47
第三章	相控阵列换能器的理论分析与设计	49
3.1	二维相控阵列的设计准则	50
3.2	二维相控阵列的参数分析与设计	52
3.2.1	阵元间距的分析	52
3.2.2	阵元大小的分析	54
3.2.3	阵元数目及阵列孔径的分析	54
3.3	二维相控阵列的总体设计准则及方法	56
3.4	二维相控阵列性能分析	56
3.4.1	方孔径阵列的声学特性分析	57
3.4.2	圆孔径阵列的声学特性分析	59
3.4.3	圆孔径变迹阵列的声学特性分析	60
	参考文献	62
第四章	基于统计学方法的二维随机稀疏阵列设计及优化	65
4.1	问题的提出与背景	65
4.2	二维稀疏相控阵列的设计方法	66
4.2.1	不等间隔非周期型阵元分布	66
4.2.2	基于统计学方法的二维稀疏阵列的设计	68
4.3	稀疏阵列连续波声场的统计学分析	68
4.3.1	稀疏阵列旁瓣特性的研究	70
4.3.2	稀疏阵列主瓣特性的研究	71

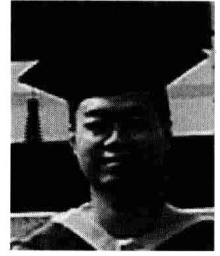
4.4	稀疏阵列的声学特性分析	71
4.4.1	圆孔径满采样参考阵列的性能分析	72
4.4.2	稀疏阵列的性能分析	73
4.5	稀疏阵列阵元分布的遗传算法优化	75
4.5.1	遗传编码原理	76
4.5.2	适应度函数的设计	77
4.5.3	稀疏阵列遗传算法优化中的参数控制	78
4.5.4	优化实验结果及分析	79
4.6	成像仿真实验	82
4.7	参考阵列的选取	83
4.8	本章小结	86
	参考文献	86
第五章	二维周期型稀疏阵列	89
5.1	一维周期型稀疏阵列的设计	90
5.1.1	有效孔径的概念	90
5.1.2	一维周期型稀疏阵列的孔径设计策略	92
5.2	二维周期型稀疏阵列的设计	94
5.2.1	二维有效孔径	94
5.2.2	二维周期型稀疏阵列的孔径设计策略	94
5.3	二维周期型稀疏阵列的性能分析	99
5.3.1	二维周期型稀疏阵列仿真分析条件	99
5.3.2	二维周期型稀疏阵列的性能仿真结果	100
5.4	讨论	105
5.5	结论	105
	参考文献	106
第六章	稀疏阵列的 (MRLA + GA) 设计法	109
6.1	最小冗余度阵列和遗传算法结合 (MRLA + GA) 设计一维稀疏阵列	109
6.1.1	最小冗余度阵列简介	109
6.1.2	计算机求解最小冗余度阵列的方法	110
6.1.3	一维稀疏阵列设计结果、分析和实验验证	111
6.2	最小冗余度阵列和遗传算法结合 (MRLA + GA) 设计二维稀疏阵列	115

6.2.1 设计的思路与方法	115
6.2.2 实验验证	117
参考文献	119
第七章 子阵合成相控阵	121
7.1 子阵合成相控阵	121
7.1.1 合成孔径技术的启示与子阵合成相控阵方法的提出	121
7.1.2 子阵合成相控阵中子阵划分方案的确定	124
7.2 模拟实验验证	132
参考文献	134
第八章 二维相控阵列的声场控制模式	135
8.1 单焦点扫描声场模式	135
8.2 多焦点直接合成声场模式	136
8.2.1 基于伪逆矩阵的声场合成算法	136
8.2.2 声强增益的优化	137
8.2.3 激励向量的优化	139
8.3 超声成像检测的声场模式	140
8.3.1 实时三维超声成像的扫描方式	140
8.3.2 检测声场纵向模式	142
8.3.3 检测声场横向模式	146
8.4 高强度聚焦超声 HIFU 的声场模式	147
8.4.1 热疗场的声场模式	147
8.4.2 二维阵列热疗场的声场模式仿真	148
8.5 本章小结	153
参考文献	153
第九章 混频相控阵	157
9.1 相控阵超声激励频率优化	158
9.1.1 对比度分辨率分析	158
9.1.2 超声衰减特征	158
9.1.3 阵元带宽的影响	162
9.1.4 相控阵列的频率优化	163

9.1.5 实验研究	170
9.2 混频相控阵简介	173
9.2.1 混频相控阵的提出	174
9.2.2 激励向量优化	175
9.2.3 混频相控阵的本质及实现	179
9.2.4 仿真实验	184
9.2.5 实验研究	186
参考文献	192
第十章 相控阵超声成像检测自适应信号补偿技术	197
10.1 声束的相位畸变模型	198
10.1.1 超声信号的畸变	198
10.1.2 声束畸变原因分析	199
10.1.3 相位偏差分析模型	205
10.2 基于相关分析法的相位偏差矫正	207
10.2.1 超声信号的相关分析法	208
10.2.2 邻近相关分析方法	210
10.2.3 集总相关分析方法	218
10.2.4 混合相关分析方法	223
10.3 超声信号幅度畸变及其补偿方法	228
10.3.1 超声信号幅度畸变模型	228
10.3.2 超声信号幅度畸变补偿方法	231
10.3.3 幅度畸变的自适应补偿算法	233
10.3.4 实验结果	235
10.4 超声信号畸变补偿算法的改进	236
10.4.1 声束合成信号的快速重构	236
10.4.2 检测信号的补偿	239
10.4.3 实验结果	243
10.5 基于自适应信号补偿的相控超声检测与目标分辨	244
10.5.1 基于自适应信号补偿算法的相控超声检测	244
10.5.2 主声束域中存在多个缺陷时的目标分辨	249
10.5.3 人工缺陷试块上的自适应相控超声检测实验	252
10.5.4 小结	253

参考文献	253
第十一章 数字相控阵超声成像检测系统	257
11.1 数字相控阵超声成像检测系统的方案设计	257
11.2 数字相控阵超声成像检测硬件系统	260
11.2.1 超声发射电路的设计分析	260
11.2.2 相控阵超声接收通道	266
11.3 相控阵超声成像检测系统的同步与相位控制	273
11.3.1 相控阵超声成像检测系统同步方案	273
11.3.2 相控阵超声成像检测系统相位控制设计	276
11.4 数字相控阵超声成像检测系统独立通道数的优化选择	282
11.4.1 系统独立通道数与系统空间分辨率	282
11.4.2 系统独立通道数与系统对比度分辨率	287
11.5 数字相控阵超声成像检测系统模/数转换环节的设计	287
11.5.1 系统模/数转换速度选择	287
11.5.2 系统模/数转换精度研究	291
11.6 数字声束合成技术	292
11.7 影像显示技术	292
11.8 数字相控阵超声成像检测系统的软件	292
参考文献	296
第十二章 自适应聚焦相控阵超声成像检测	297
12.1 超声成像检测声束聚焦控制技术	297
12.1.1 超声成像检测声束的几何聚焦控制	297
12.1.2 超声成像检测声束的电子聚焦控制技术	298
12.2 相控阵超声成像检测中的自适应聚焦技术	299
12.2.1 相控阵超声自适应聚焦方法的分析	300
12.2.2 相关法时间延迟估计	301
12.2.3 声束偏转自适应聚焦	315
参考文献	319
第十三章 柔性阵列换能器相控阵超声成像检测技术	323
13.1 柔性阵列换能器分析	323

13.1.1	柔性阵列换能器的结构设计	323
13.1.2	柔性阵列换能器阵元间互扰分析	325
13.2	柔性阵列换能器相控阵超声成像检测	327
13.2.1	柔性阵列换能器阵元定位	327
13.2.2	柔性阵列换能器阵元有效检测区域判定	329
13.2.3	柔性阵列换能器相控阵超声成像检测中的自适应聚焦技术	331
13.2.4	柔性阵列换能器相控阵超声成像检测步骤	331
13.3	柔性阵列换能器相控阵超声成像检测实验结果与分析	332
	参考文献	333
第十四章	二维阵列相控阵超声三维成像检测技术	335
14.1	二维阵列相控阵超声成像检测技术	335
14.1.1	研究二维阵列相控阵超声成像检测技术的必要性	335
14.1.2	国外二维阵列相控阵超声成像检测研究现状	337
14.1.3	二维阵列相控阵超声成像检测的主要难点	338
14.2	二维阵列相控阵超声三维成像	340
14.2.1	空间波束采样定理的导出和数据扫描方案的确定	341
14.2.2	波束合成简介与波束合成方案选择	346
14.2.3	直接波束合成方案	348
14.2.4	二维阵列相控阵超声三维成像实验	351
14.2.5	低信噪比背景下相关相位校正	353
14.2.6	适合于低信噪比信号的混合相关相位校正	358
	参考文献	361
	结束语	365



作者简介：鲍晓宇博士，男，1970年出生于湖南省长沙市，汉族。1987年9月—1991年7月，国防科学技术大学精密机械系，获学士学位。1995年9月—1998年7月，清华大学机械工程系，获硕士学位。1998年9月—2003年1月，清华大学机械工程系攻读博士学位。2003年7月获清华大学工学博士学位。

学术方向：无损检测技术，数字超声仪器技术，相控阵超声成像检测技术。

第一章 超声检测原理与超声成像检测技术

鲍晓宇

1.1 超声检测的一般概念

超声波是一种在弹性介质中传播的机械波，又称为弹性波，其振动频率范围约在 20 kHz 至几 GHz，因超过了人耳可听见的声波频率范围，故称为超声波（图 1-1）。其质点振动方向和声波传播方向一致的叫纵波(longitudinal wave)，质点振动方向和声波传播方向垂直的叫横波或剪切波(shear wave)，其他还有表面波(瑞利波 Rayleigh wave)、蓝姆波等，在一定条件下，波型可以相互转换。

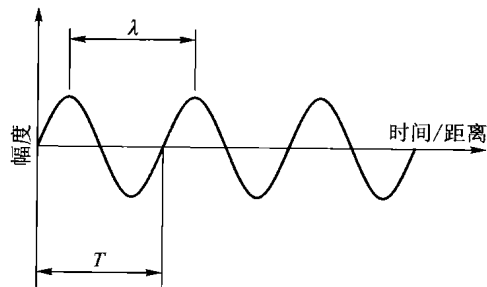


图 1-1 超声波是一种机械波

λ —波长； T —周期

根据有关教科书上介绍，超声波在无限大固体介质中传播的速度为

(1) 纵波声速 c_1

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1-1)$$

式中， E ——杨氏弹性模量；

σ ——泊松比， $\sigma = -\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ ， ε_1 为横向应变， ε_2 为纵向应变；

ρ ——介质密度。

(2) 横波声速 c_t

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}} \quad (1-2)$$

式中, G ——切变弹性模量。

由式(1-1)和式(1-2)可知, 超声波在介质中传播速度(声速 c)与介质的弹性模量 E 和密度 ρ 有关。不同介质的弹性模量和密度不同, 因此不同介质中的声速不同。

超声波检测的物理依据:

1) **超声波传播的指向性**: 由物理声学可知, 超声波在介质中的传播具有指向性(图 1-2)。就是超声波传播的能量大部分在交角 θ 的范围内。线外区域的声压减少到轴线上声压的 30% 时这个交角的一半叫做半扩散角, 习惯上用 θ_{30} 表示。

$$\theta_{30} = \arcsin\left(1.22 \frac{\lambda}{D}\right) \quad (1-3)$$

式中, D 为发射超声波的压电晶片的直径, λ 是超声波的波长, 说明半扩散角的大小和压电晶片的直径成反比, 和超声波的波长成正比。依据这个物理特性, 超声波可以定向发射、传播, 可以确定反射波的方向, 从而确定缺陷的方向或反射超声波的介质内部某结构的区域。

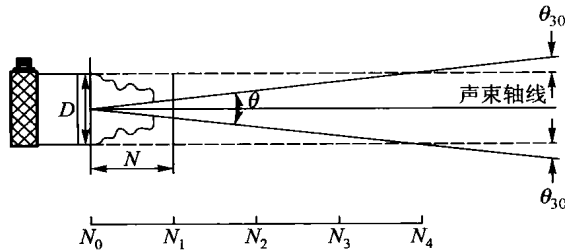


图 1-2 超声波传播的指向性

N —近场距离; D —换能器压电晶片直径

实际超声波的声场如图 1-3 所示, 横坐标就是 θ 角, 垂直于压电晶片平面的法线方向时 $\theta = 0^\circ$, 纵坐标为声压, 用分贝 (dB) 做单位, 习惯上用 $-dB$ 来表示。从图中可看出, 在 $\theta = 0^\circ$ 附近声压最强, 随着 θ 角的增大, 声场中的声压逐渐减弱。一般将减弱 -20 dB 以内的区域称为主瓣(看上去有点像花瓣), 减弱 -20 dB 以外的区域称为旁瓣。理想状态是只有主瓣没有旁瓣, 这样超声波的能量就完全集中在很小的范围内, 可以获得很高的成像分辨率。但实际上是不可能的, 只能追求主瓣尽量高而窄, 旁瓣尽量低。

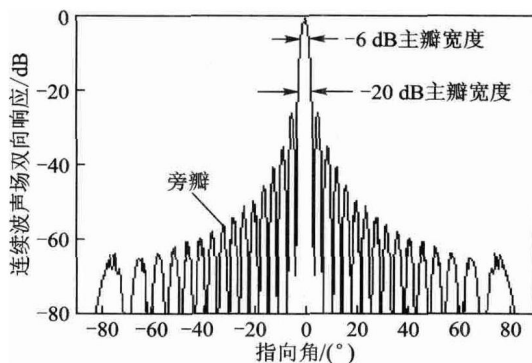


图 1-3 超声波的声场

2) **超声波的传播特性**: 超声波在介质中的传播速度与介质的弹性模量 E 和密度 ρ 有关, 不同介质的弹性模量和密度不同, 因此在不同介质中的声速不同。而传播速度的不同会引起波的折射和反射。根据物理声学中的论述, 在垂直入射的条件下, 其反射率 R 为

$$R = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1-4)$$

式中, P_0 为入射波的声压, P_r 为反射波的声压, Z_1 为第一介质(入射侧)的声阻抗, Z_2 为第二介质(透射侧)的声阻抗。

透射率 D 为

$$D = \frac{P_d}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1-5)$$

式中, P_d 为透射声波的声压。声阻抗 $Z = \rho c$, ρ 为介质密度, c 为声速。由式(1-4)和式(1-5)可知, 若 $Z_1 = Z_2$, 则 $R = 0$, $D = 1$ 。此时声波没有反射, 全部从第一介质透射入第二介质。若 $Z_2 \gg Z_1$, 则声波在界面上几乎全反射, 透射极少。若 $Z_2 \ll Z_1$, 亦得全反射, 但这时反射波的声压和入射波的声压将有 180° 相位改变, 反射率为负号。

能将任何其他形式的能量转换成超声波形式的能量, 并具有可逆效应, 即能接收超声波并能将其转换成其他形式能量的器件称为超声波换能器, 常用的是由电能量转换成超声波能量, 又能将接收到的超声波能量转换成电能量, 习惯上又称为探头, 本书两者混用。超声检测就是利用这个超声波的传播特性, 当超声波换能器发射超声波进入被检测的物体时, 超声波根据指向性原理沿与产生超声波的压电晶片垂直的方向传播。当超声波在传播方向上遇到材料的弹性模量 E 和密度 ρ 不同的区域, 其声阻抗 Z 就不同, 超声波就会发生反射, 反射回来的超声波被超声波换能