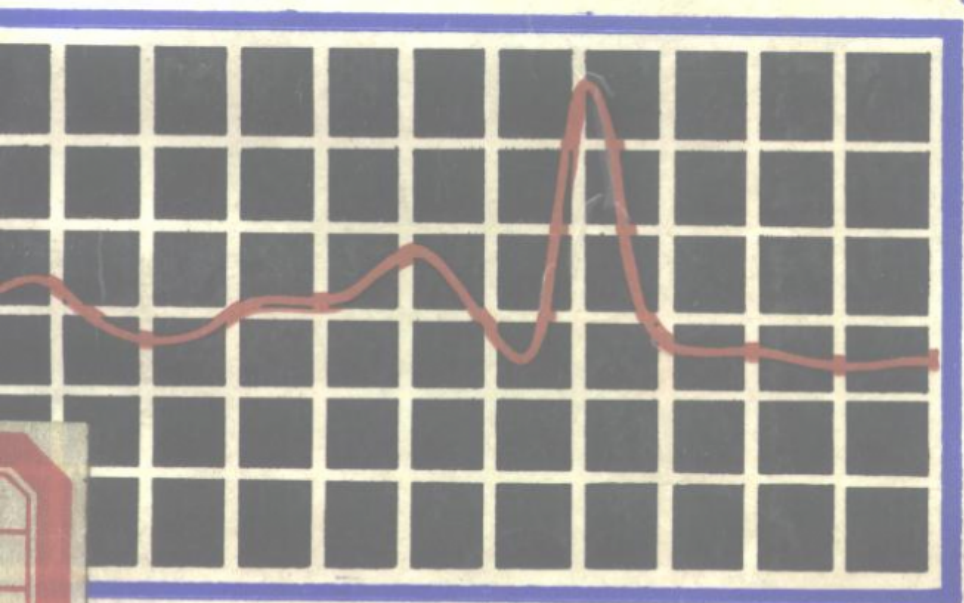


# 超声换能器

袁易全 著



南京大学出版社



# 超声换能器

袁易全 著

南京大学出版社

1992·南京

# (苏)新登字第011号

## 内 容 简 介

超声换能器是水声、无损检测、通讯、雷达、地球物理及生物医疗等设备的關鍵部件。本书是著者完成多项国家‘七·五’攻关科研项目后的理论总结。

本书共十一章,分两个部分,第一部分为声学换能器基础理论(前五章),紧扣换能器主题,由浅入深、系统地讲解如下原理:声波导、广义变幅器、体声波辐射、反射和折射,以及压电体声换能器(标准和非标准压电试样)、梅森等效电路图等。

第二部分为超声换能器的结构、设计和应用(后六章)。包括:压电短圆柱、纵向功率振子、有限长薄壳压电宽带声源、新型高分子PVDF压电薄膜器件及3-3连结复合压电换能器等。

结合著者多年的科研新成果,本书充分注意换能器二维分析,并反映国外最新换能材料及器件的成就。本书可供有关专业研究生、本科生及工程技术人员阅读参考。

责任编辑 李曾沛

## 超 声 换 能 器

袁易全 著

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 丹阳练湖印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张14.25 字数370千

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数:平装本1000册

精装本100册

ISBN 7-305-01504-0/O·80

定价:平装本12.0元

精装本13.0元

## 序

超声学是一门经典的学科，但在近代科技发展中，它却十分活跃，深入应用到各个领域，如工业无损检测和无损评价，医用诊断和治疗，资源勘探，水声和模拟信号处理等等。在社会需求的驱使下，各个不同领域中大量科技人员不得不从事超声方面的研究开发，但是因为缺乏超声换能器方面的基础知识和技术而遇到困难。超声换能器往往是各种应用的关键和核心技术，如B超探头。感谢袁易全同志为广大读者撰写了一本系统阐述超声换能器的书，它有简明的物理描述，也有深入的数学推导。

为了适应各种应用的需求，超声换能器近年来有不少新发展，如PVDF换能器、复合换能器等。这本书相当全面地介绍了这些最新发展，更令人高兴的是本书几乎没有遗漏地包括我国在这个领域中的全部研究内容。谨此将本书介绍给读者。

袁易全 1992年于南京大学

# 前 言

人们常感到，超声换能器“看起来容易，做起来困难”。超声换能器究竟是怎样一门学问？它虽属于一门经典的学科，但它的独立学科地位却几乎被人遗忘。只是近十多年来，随着电子技术迅猛发展，它才受到人们重视，发展迅速。这门年轻的边缘学科，内容是极其丰富的。概括地说，超声学是物理学的重要分支，超声换能器又是超声学的核心课题之一。它涉及广泛学科，包括：数学、物理学、化学、力学、光学、波动学、电子学、工程材料学、地震学、生物医学以及信号与信息处理等理论和技术领域。超声换能器在工程材料的无损检测、生物医学诊断、地球物理勘探以及水声、通讯(如体波延迟线、脉压线)等电子设备中均是关键部件。改善超声换能器的性能，研究新型的超声换能器乃是人们十分重视的迫切课题。有关工程技术人员、高等学校有关专业的教师和学生迫切希望能找到一本既有深入的原理论述又能全面反映超声换能器当今研究水平的科技读物，为此，本人经过多年教学和科研的积累，撰写了本书。它大致有以下四个特点：

第一，本书触及了超声换能器学科的难点，如换能器理论分析中的二维问题。书中结合典型常用器件，由浅入深地加以系统剖析，如短圆柱、有限长圆管超声换能器。

第二，本书突出了超声换能器的实用性。例如对超声换能器的声匹配和电匹配作了深入的论述；对低Q值、宽频带及窄脉冲检测类超声换能器和大功率低损耗及高效率功率型超声换能器均作了较多的分析介绍。

第三，本书强调了基础理论。例如，对每一种超声换能器具

体结构，均列出了物理模型、边界条件、振动模式及其等效电路图(尤其是Mason等效电路图的广泛应用)。本书约有70%以上的内容是涉及换能器的结构原理设计和诸物理性能的公式推导、图解及表格的。

第四，本书尽可能多地引入了近年来国内外换能器新技术、新材料及新器件。根据自己完成的多项“七·五”攻关科研项目，及时作了总结介绍；同时，尽可能反映80年代以来，超声换能器中具有划时代意义的内容(如高分子PVDF压电薄膜换能器及复合压电换能器等)。

本书在撰写过程中始终得到南京大学声学研究所水永安教授与王耀俊教授的鼓励、关怀和热忱指导。水永安教授对本书作了序；王耀俊教授为本书作了详细的审阅。本书共十一章。由东南大学雷家煜副教授撰写了本书的第三、第四章。在此一并表示感谢。

由于本人经验和水平有限，书中错误在所难免，恳请读者批评指正。

袁易全

1992年6月于东南大学





# 目 录

<b>第一章 超声换能器概述</b> .....	( 1 )
第一节 超声换能器的学科内容及其发展.....	( 1 )
第二节 超声纵波及介质的声阻抗特性.....	( 2 )
第三节 超声波的衰减及吸声材料.....	( 7 )
第四节 超声波的主要物理特性.....	( 10 )
一、波动特性.....	( 10 )
二、束射特性.....	( 11 )
三、射线特性.....	( 11 )
四、吸收特性.....	( 12 )
五、多普勒效应.....	( 13 )
六、空化效应.....	( 13 )
第五节 超声换能器的主要性能指标及单位.....	( 13 )
一、超声换能器的主要性能指标.....	( 13 )
二、超声换能器设计计算时采用的单位.....	( 18 )
参考文献.....	( 19 )
<b>第二章 固体中的声波及变幅杆</b> .....	( 21 )
第一节 弹性固体受力的基本概念.....	( 21 )
一、外力.....	( 21 )
二、应力.....	( 22 )
三、位移与应变.....	( 23 )
第二节 刚度、柔顺张量及胡克定律.....	( 26 )
第三节 固体中的声学动力学方程.....	( 29 )
第四节 超声变幅杆.....	( 36 )

一、等截面变幅器 .....	( 36 )
二、变截面杆变幅器 .....	( 40 )
三、半波长变截面变幅器 .....	( 43 )
四、指数形号筒的声学特性 .....	( 46 )
参考文献 .....	( 49 )

### 第三章 波的反射、折射和波导传播 .....

第一节 概述 .....	( 50 )
第二节 流体中的声波 .....	( 50 )
第三节 固体中的声波 .....	( 53 )
一、纵波 .....	( 53 )
二、横波 .....	( 54 )
三、纵波和横波的速度势函数 .....	( 55 )
第四节 平面波在分界平面上的反射和折射 .....	( 56 )
一、流体-流体界面 .....	( 56 )
二、固体-气体界面 .....	( 61 )
三、流体-固体界面 .....	( 66 )
四、固体-固体界面 .....	( 71 )
五、表面波 .....	( 72 )
第五节 声在波导中的传播 .....	( 74 )
一、声波在流体平面平行波导中的传播 .....	( 74 )
二、声波在圆管中的传播 .....	( 80 )
参考文献 .....	( 84 )

### 第四章 声波辐射和换能器的指向性 .....

第一节 均匀脉动球源 .....	( 85 )
一、振源强度 .....	( 85 )
二、辐射阻抗 .....	( 86 )
第二节 声偶极子 .....	( 89 )
一、偶极子声场 .....	( 89 )

二、偶极子等效辐射阻 .....	( 92 )
<b>第三节 点声源组成的离散阵</b> .....	( 92 )
一、声压的一般表示式 .....	( 92 )
二、等间距均匀点源直线阵 .....	( 94 )
三、互辐射阻抗的影响 .....	( 98 )
四、等间距不均匀点源直线阵 .....	( 99 )
五、相位控制的点源直线阵 .....	( 102 )
<b>第四节 连续直线阵</b> .....	( 105 )
一、有限长均匀连续直线阵 .....	( 106 )
二、不均匀连续直线阵 .....	( 106 )
三、相位控制的连续直线阵 .....	( 111 )
<b>第五节 无限大障板上平面状辐射器</b> .....	( 112 )
一、平面圆形活塞的辐射 .....	( 113 )
二、辐射阻抗 .....	( 118 )
三、振速按 $v_{00}(1 - \frac{r'^2}{a^2})^2$ 分布的平面图形辐射器 .....	( 121 )
<b>第六节 乘积定理</b> .....	( 123 )
<b>第七节 近场方向特性</b> .....	( 125 )
一、近场声压 .....	( 126 )
二、平面振源的近场方向性 .....	( 128 )
<b>参考文献</b> .....	( 129 )
<b>第五章 压电体声换能器基础</b> .....	( 130 )
<b>第一节 压电换能材料概述</b> .....	( 130 )
一、引言 .....	( 130 )
二、压电晶体的物理特性 .....	( 132 )
<b>第二节 压电线性静态方程及耦合系数</b> .....	( 138 )
一、压电线性方程 .....	( 138 )
二、压电耦合系数 .....	( 141 )
<b>第三节 压电振子的等效电路图</b> .....	( 144 )
一、梅森(Mason)等效电路 .....	( 144 )

二、克里姆霍尔兹等效电路·····	(159)
<b>第四节 压电陶瓷参数测量</b> ·····	<b>(161)</b>
一、测量项目与试样·····	(161)
二、压电陶瓷材料独立常数的测量·····	(162)
三、压电陶瓷材料其他常数求导方法·····	(163)
四、标准样品压电元件等效电路参数的测量·····	(165)
五、非标准试样实用压电元件的参数测定·····	(175)
<b>第五节 典型压电陶瓷参数及其影响</b> ·····	<b>(180)</b>
一、小信号下诸典型压电陶瓷特性参数·····	(180)
二、压电陶瓷的老化和高静态应力下的效应·····	(190)
<b>参考文献</b> ·····	<b>(191)</b>
<b>第六章 压电短圆柱及薄圆片换能器</b> ·····	<b>(195)</b>
<b>第一节 概述</b> ·····	<b>(195)</b>
<b>第二节 径、厚耦合时压电圆片的等效电路</b> ·····	<b>(195)</b>
<b>第三节 短圆柱型各向同性自由振动模式</b> ·····	<b>(204)</b>
一、薄圆盘情况·····	(205)
二、长棒情况·····	(207)
三、介于圆盘与长棒之间的情况·····	(209)
四、振动方式和振幅比·····	(209)
五、厚度振动模式·····	(209)
<b>第四节 短圆柱型换能器的方向特性</b> ·····	<b>(211)</b>
一、方向特性与位移分布的关系·····	(211)
二、短圆柱换能器方向特性公式·····	(212)
<b>第五节 薄圆片换能器</b> ·····	<b>(221)</b>
一、压电薄片换能器的构成·····	(221)
二、薄片谐振器的数值分析·····	(223)
三、压电薄片激励体波换能器·····	(226)
<b>第六节 压电薄圆片弯曲振动模式</b> ·····	<b>(231)</b>
一、压电薄圆片弯曲振动方程及边界条件·····	(231)
二、自由边界压电薄板的弯曲振动分析·····	(232)

三、边缘支撑压电薄片弯曲振动分析 .....	( 238 )
第七节 短圆柱换能器在电力变压器局放定位检测中 的应用 .....	( 242 )
一、概述 .....	( 242 )
二、局放短圆柱超声换能器的设计 .....	( 242 )
三、局放短圆柱超声换能器测量结果 .....	( 247 )
四、换能器在故障电力变压器上局放定位试验 .....	( 253 )
参考文献 .....	( 254 )
<b>第七章 纵向复合棒大功率换能器 .....</b>	<b>( 257 )</b>
第一节 概述 .....	( 257 )
第二节 纵向复合棒型换能器的理论分析 .....	( 258 )
一、压电方程的选择 .....	( 258 )
二、运动方程及机电等效图 .....	( 259 )
三、前后盖板的机电等效图 .....	( 261 )
四、频率方程、机电等效图及其解 .....	( 266 )
第三节 纵向复合棒型换能器的辐射特性和功率容量 .....	( 267 )
一、纵向复合棒型换能器的辐射特性 .....	( 267 )
二、纵向复合棒换能器功率容量、损耗及效率 .....	( 270 )
第四节 纵向复合棒换能器极限分析 .....	( 273 )
第五节 功率发射换能器的阻抗匹配 .....	( 276 )
一、功率换能器的直接串、并联调谐 .....	( 277 )
二、功率换能器的变压器调谐 .....	( 277 )
三、功率换能器的传输电缆影响 .....	( 281 )
第六节 大功率超声聚焦型纵向复合棒换能器 .....	( 282 )
一、大功率超声聚焦型纵向复合棒换能器结构 .....	( 282 )
二、工程简易设计原理和计算方法 .....	( 284 )
三、工程简易法与梅森等效图法的比较 .....	( 288 )
参考文献 .....	( 293 )

**第八章 有限长薄壳圆管型超声换能器**…………… (295)

第一节 薄壳压电陶瓷超声换能器的自由振动…………… (295)

- 一、理论模型…………… (295)
- 二、频率方程…………… (297)

第二节 有限长压电薄圆管的径、长耦合及发射频响 (301)

- 一、有限长压电薄圆管的径向振动发射频响…………… (301)
- 二、有限长压电薄圆管的轴向振动产生的径向发射频响…………… (302)

第三节 有限长压电多层环宽带发射换能器…………… (310)

- 一、概述…………… (310)
- 二、宽带设计的基本原理…………… (310)

第四节 切向极化分段压电陶瓷超声换能器…………… (317)

- 一、结构和特点…………… (317)
- 二、理论分析…………… (318)

第五节 压电陶瓷与非压电体镶嵌式换能器…………… (320)

- 一、结构和特点…………… (320)
- 二、理论分析…………… (320)

参考文献…………… (323)

**第九章 高分子PVDF压电薄膜平面状超声换能器**…………… (325)

第一节 高分子PVDF压电薄膜换能材料概述…………… (325)

第二节 高分子PVDF压电薄膜的物理性能…………… (326)

- 一、PVDF的物理常数…………… (326)
- 二、高聚物的压电性,热释性,电光及弹光效应…………… (328)

第三节 高分子PVDF压电材料及其制备…………… (332)

- 一、PVDF薄膜的简单制备工艺…………… (332)
- 二、工艺及环境对PVDF压电性的影响…………… (334)

第四节 高分子PVDF平面状高频水听器…………… (339)

- 一、PVDF平面状高频新型水听器概述…………… (339)
- 二、PVDF高频平面状水听器的结构和原理…………… (341)

三、PVDF 高频平面状水听器的灵敏度和方向特性理论 分析 .....	( 342 )
四、PVDF-ST-1-P 型水听器的用途 .....	( 352 )
<b>第五节 高分子PVDF平面状低旁瓣换能器</b> .....	<b>( 353 )</b>
一、PVDF 压电薄膜怎样实现低旁瓣特性 .....	( 353 )
二、PVDF 平面状低旁瓣换能器的声学结构 .....	( 355 )
三、低旁瓣设计对窄脉冲特性的影响 .....	( 358 )
四、PVDF 低旁瓣换能器的测量数据 .....	( 360 )
<b>第六节 高分子PVDF 平面状可逆式换能器</b> .....	<b>( 362 )</b>
一、PVDF 压电薄膜可逆式换能器 .....	( 362 )
二、PVDF 压电薄膜可逆式换能器结构及理论分析 .....	( 363 )
参考文献 .....	( 373 )
<b>第十章 高分子PVDF 压电薄膜圆管换能器</b> .....	<b>( 378 )</b>
<b>第一节 PVDF 压电薄膜微型环高频水听器</b> .....	<b>( 378 )</b>
一、概述 .....	( 378 )
二、结构及理论分析 .....	( 379 )
三、测量结果 .....	( 383 )
<b>第二节 PVDF 压电薄膜内贴式圆管水听器理论分析</b> ( 384 )	
一、概述 .....	( 384 )
二、PVDF 压电薄膜圆管水听器的壳体振动的静态理论 .....	( 386 )
三、PVDF 圆管水听器接收灵敏度 .....	( 390 )
四、PVDF 内贴式圆管水听器轴向加速度响应 .....	( 392 )
<b>第三节 PVDF 压电薄膜内贴式圆管水听器设计和         性能</b> .....	<b>( 393 )</b>
一、设计与性能综述 .....	( 393 )
二、高静水压下灵敏度变化特性 .....	( 395 )
三、常温、常压下灵敏度幅频、相频特性 .....	( 396 )
四、轴向加速度频响特性 .....	( 397 )
参考文献 .....	( 398 )

<b>第十一章 新型复合压电换能器</b> .....	( 399 )
<b>第一节 概述</b> .....	( 399 )
<b>第二节 3-3连结复合压电换能材料的物理特性</b> .....	( 401 )
一、PZT 压电陶瓷复合体概述 .....	( 401 )
二、致密-多孔-致密夹心 PZT 复合体结构及性能 .....	( 403 )
<b>第三节 3-3连结复合压电宽带发射换能器</b> .....	( 408 )
一、结构及设计原理.....	( 408 )
二、3-3 连结复合发射换能器的实验结果.....	( 411 )
<b>第四节 3-3连结复合压电接收换能器</b> .....	( 415 )
一、理论计算.....	( 415 )
二、实验数据.....	( 418 )
三、新型 3-3 连结复合材料换能器小结.....	( 421 )
<b>第五节 3-3连结复合换能器在地震模型实验中的应用</b> ( 422 )	
一、3-3 连结复合换能器在地震模型实验中的波形.....	( 422 )
二、3-3 连结复合换能器与其他换能器综合比较 .....	( 428 )
<b>第六节 3-3连结复合换能器在岩体无损检测中的应用</b> ( 431 )	
一、3-3 连结复合换能器在岩体上检测波形及分析 .....	( 431 )
二、3-3 连结复合换能器在岩体材料受力检测中的应用 .....	( 436 )
<b>参考文献</b> .....	( 440 )



# 第一章 超声换能器概述

## 第一节 超声换能器的学科内容及其发展

超声学是物理学的重要分支，超声换能器是超声学的核心部分。超声换能器有它自己独立的学科地位。超声学的内容涉及到：物理、化学、光学、波动学、电子学、数学以及信号处理等方面。超声换能器学科研究的方向是，研究尽可能满足工程实用要求的声波阻抗、脉冲响应、频率响应、阻抗匹配、声学结构、换能材料及振动模式等特性，并设计和协调这些基本特性，达到电与声之间的最佳转换。重点研究压电现象、磁致伸缩现象及洛仑兹力三种机理。研究声学边界现象，如反射、折射和衍射，是超声换能器设计的中心环节。最后是超声换能器的应用问题。超声换能器是一门实用性很强的学科，应用领域广泛，从而增加了许多特殊研究内容。如在雷达、声纳中涉及色散信号处理功能；在医学超声、无损检测中涉及相控阵列和声成像能力；在通讯学中注重换能器的声学品质因素等。总之，超声换能器学科随着工程材料学与电子学的发展，它已经悄然成长起来，并对应用工程作出巨大的贡献。

在我国，超声学也是一门较早受人注意的分支学科，早在1952年，就开展了超声探伤研究；1959年超声应用（探伤、加工、种子处理、显示、医疗、粉碎、乳化、染料等）取得了进展。在基础研究方面也有相当深度，如棒的声振动、超声乳化和水中气泡的超声吸收问题；建立了分子声学实验设备，对弛豫吸收、悬浮体的声吸收进行了系列研究；建立了固体中超声衰减的测量设备；对粘弹性和可压缩流体的声速和衰减进行了深入研究。