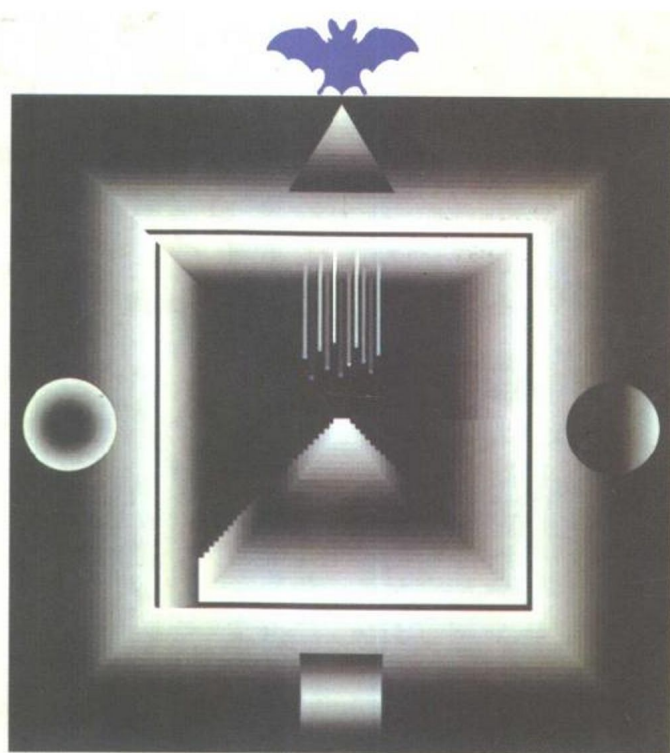


ULTRASONICS HANDBOOK ULTRASONICS HANDBOOK

超声手册

ULTRASONICS HANDBOOK

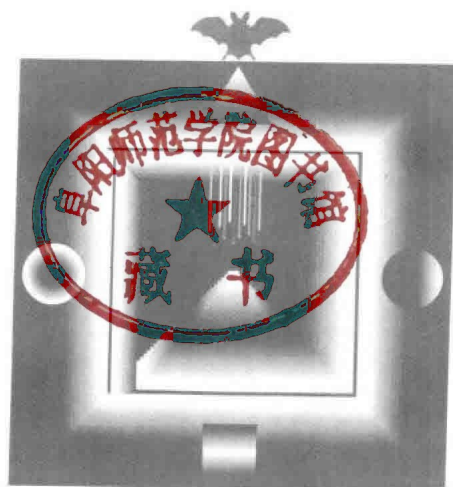
冯若 主编



南 京 大 学 出 版 社

超声手册

主 编 冯 若
副主编 姚锦钟 关立勋



南 京 大 学 出 版 社

书 名 超声手册 (ULTRASONICS HANDBOOK)

著 译 者 主编 冯 若 副主编 姚锦钟 关立勋

责任编辑 李曾沛

(版式设计)

装帧设计 郑小焰

责任校对 孙 辉

出版发行 南京大学出版社

(南京汉口路 22 号南京大学校内 邮编 210093)

印刷 丹阳教育印刷厂

经销 全国各地新华书店

开本 787×1092 1/16 印张 70.5 字数 1843 千 插页 20

1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—800

定价 105.00 元

ISBN 7-305-03354-5/O·237

声明:(1) 版权所有,侵权必究。

(2) 本版书若有印装质量问题,可与经销书店联系调换。

发行部电话: 3592317、3319923、3302695

主编与作者介绍



冯若 男,汉,1932年10月生于河北省抚宁县,共产党员。1954年毕业于东北师范大学物理系,1961年获前苏联列宁格勒大学理学副博士学位(按85国科干字090号通知,它等同于欧美国家博士学位)。现任南京大学教授,兼任重庆医科大学、赣南师院和荆州师专名誉教授,中国科联经济发展中心研究员,英国 Coventry 大学与我国云南大学校外博导,《Ultrasonics Sonochemistry》、《应用声学》、《中国超声医学杂志》等国内外6种杂志的编委,中国声学学会常务理事、生物医学超声工程学会主任委员,中国超声医学工程学会常务理事、超声生物效应委员会主任委员,计划生育委员会专家组成员,全国医电标准化技委会超声设备分技

委专家委员等。在国内外杂志上发表有关分子声学、超声生物物理学、医学超声及声化学等方面科学论文180多篇,主编与主笔的专著有《超声治疗学》、《超声诊断设备原理与设计》、《声化学及其应用》及《生物医学超声》,参与撰稿的专著有《超声医学》、《Advanced Sonochemistry》等19部。获国家教委科技进步三等奖三项,铁道部科技进步一等奖一项,国家科技进步三等奖一项,获世界生物医学超声联合会(WFUMB)及美国医用超声学会(AIUM)联合颁发的“先驱奖”(Pioneer Award),获英国剑桥IBC颁发的荣誉证书(Decree of Merit),获中国超声诊断创建40周年《突出贡献奖》等。

通讯地址:南京市 南京大学声学研究所 邮编:210093 电话:025-3594964



姚锦钟 男,1938年生,汕头超声仪器研究所所长,高级工程师。1960年开始从事超声仪器研究和制造。1963年在国内率先研制成功符合人体诊断要求的超声波诊断仪并大批量投入生产。此后主持设计成功27种工业超声检测仪和医用超声诊断仪器,有22项获国家、部、省级等科技成果奖,并在国内获得广泛应用,为我国超声仪器工业的形成和发展做出了杰出贡献。多次率团出席国际有关超声检测的学术会议,并发表学术论文多篇。于1978年被全国科学大会授予全国先进科技工作者称号;1979年被国务院授予全国劳动模范;1984年被国家人事部批准为有突出贡献中青年专家;1990年被国务院批准为享受政府特殊津贴的

国家级专家;1992年被广东省委、省政府授予广东省优秀中青年专家;1994年获汕头市首届科技人员突出贡献奖特等奖;1995年获国家科技进步三等奖;1996年获广东省科学技术突出贡献奖一等奖,同年,在日本获有关无损检测方面的石井金质奖章和奖状;1997年获中国科协首次授予的全国优秀科技工作者荣誉称号。是第五、六、七届全国人大代表。

通讯地址:汕头市 金沙中路2号超声仪器研究所 邮编:515041 电话:0754-8250150

4017256



关立勋 男,1933年4月生,哈尔滨市人,高级工程师。历任武汉医疗器械研究所室主任,国家计生委超声技术应用顾问,国家科委发明评选委员会特邀评审员,国家武汉医用超声设备检测中心技术顾问。50年代从事广播技术,60年代介入生物医学工程,70年代参加超声诊断设备设计工作,80年代主持全国医用超声技术标准化和检测方法的研究工作,先后编写四种标准文件。在国内较早提出:医用超声换能器的非相关测试法,B超图象品质的综合评价原则,同步动态聚焦法,使用模块测试B超等。出版专著7部(含合作),发表科技论文多篇。获部属科技进步三等奖一项,参加国际与国内学术组织5个。

通讯地址:武昌中北路岳家咀国家医用超声设备监督检测中心 邮编:403377
电话:027-86792293



卜书中 男,1945年3月出生于河南省荣阳市。1969年毕业于上海交通大学,毕业后留校任教。1980年调上海医用电子仪器厂从事技术开发工作,先后任课题组长、室主任、副所长。1995年调上海麦迪逊医疗器械有限公司任换能器部经理,高级工程师,兼任中国生物工程学会传感技术分会委员,中国超声医学工程学会仪器工程开发委员会委员,全国医用电器标准化技术委员会医用超声标准化分技术委员会委员,全国声学标准化技术委员会超声水声分委会委员。因在“六五”“七五”国家重点科技攻关中研制线阵、凸阵、穿刺、机扫和相控阵探头,在国家重点企业技术开发项目中开发高频、经直肠、经阴道和R20小凸阵探头,获国家科

技进步三等奖两次,国家医药局科技进步二等奖两次,三等奖一次,国家教委科技进步三等奖一次。1989年被评为上海市优秀科技工作者,1991年9月2日在全国“七五”科技攻关表彰大会上被评为有突出贡献的科技人员,1992年起享受国务院政府特殊津贴。

通讯地址:上海市浦东金桥出口加工区金沪路1135号麦迪逊医疗器械有限公司
邮编:200032 电话:021-58530064



牛凤岐 男,生于1941年1月,1966年毕业于中国科学技术大学高分子物理专业并进入中国科学院声学所工作至今。现为该所研究员,享受政府特殊津贴专家,国家医疗器械评审专家委员会专家评审员、全国医电标准化技委会超声设备分技委委员、全国声学标准化技委会超声水声分技委委员、中国声学学会生物医学超声工程分会委员、中国生物医学工程学会医学超声工程分会委员、中国超声医学工程学会计划生育超声专家组成员、中国科学院声学计量测试站超声测试室主任。其主要工作领域为超声材料与工程、水声材料与工程、振动噪声控制材料与工程、声学计量与标准化。主要成就是系统研究了多种材料的声学特性,研制成

功了超声仿人体组织材料、仿组织超声体模、超声吸声内衬和超声换能器用无源材料,发表论文20余篇,起草国家标准、行业标准、计量检定规程各1项,是《水声材料手册》的主要编著者之一,获得科技成果奖6项,优秀论文奖1项。

通讯地址:北京中关村路17号中国科学院声学所 邮编:100080 电话:010-62554012



王玉泉 男,生于1936年1月。大学毕业,现任南京东南大学无线电工程系高级工程师。主要贡献:1969~1971年主持研制“水声自由场声压标准装置和水听器电子测量专用设备”。1975~1977年负责主持研制“模拟声源”。以上两项成果,当时属国内首创,于1978年均获中国科学大会奖。1977~1979年负责研制的“SC-3”型水综合测量仪,达国内先进水平,获江苏省科技成果三等奖。1980年参加“SH-100”型多普勒导航声呐部分研究工作,该项目获中国造船公司优秀科技三等奖。1985~1994年参加“鱼雷脱靶量及末弹道测量系统”的预研及试制工作,获95年国家教委一等奖。同时在1993~1995年间独立研制了“国防水声计量一级站”八五规划中的KDG系列专用宽带功率放大器,共完成了8台。1995~1996年间研制了磁性材料测量专用宽带功率源3台,其中第一台获江苏省科技成果三等奖。主要著作有全国高等学校通用教材《水声设备》(1985年12月国防工业出版社出版)。目前正在研制中国造船公司750试验场的KDG-1000专用宽带功率放大器(输出1000W,宽频带)。

通讯地址:南京市东南大学无线电工程系 邮编:210018 电话:025-3794273



汤劲松 男,1963年1月生于湖北省咸宁市,1984年毕业于成都电讯工程学院电子材料系,获学士学位。1988年毕业于华中理工大学研究生院,获电子材料与元件专业工学硕士学位。1984年到1985年间在四川压电与声光技术研究所从事压电陶瓷材料与器件的研究,1988年至今在该所从事压电薄膜材料与器件的研制工作,现任高级工程师。主持并参与了多项部级的研究项目,并获部级科技成果三等奖一项。在国内外刊物及学术会议上发表学术论文七篇。研究兴趣覆盖压电陶瓷与薄膜材料、超导薄膜及器件、微波声学器件、致动器与微机械、压电陀螺。

通讯地址:重庆市2513信箱四室 邮编:630060 电话:023-62808382-2373(O)
023-62825742(H)



李耀堂 1938年12月生,男,汉族,湖北应城市人。工作单位电子工业部第二十六研究所,历任研究室技术主任、副总工程师、副所长。研究员级高级工程师。兼任的社会工作主要有中国声学学会常务理事、中国声学学会超声电子学分会主任委员、四川声学学会副理事长、全国频率控制与选择用压电器件标准化技术委员会副主任委员等。长期从事“声表面波技术”及“声体波技术”研究和主管研究所科研任务以及质量、设备仪器等工作,为研究所的发展作出了贡献。参与了“声表面波滤波器”、“声表面波谐振器”、“声表面波抽头延迟线”以及“中频声体波延迟线”等课题的研究工作,其中“LMNG型声表面波带通滤波器”获得1982年电子工业部科技成果一等奖,“LMNJ-14型声表面波残余边带滤波器”获1983年电子工业部科技成果二等奖。发表论文20余篇,主要有“我国声表面波研究十年”、“声表面波抽头延迟线扩频调制解调技术”、“金属条反射栅谐振滤波器”、“声表面波器件研制及其应用”、“声表面波滤波器在民用电子设备中的应用”、“超声电子技术的进展”等。主持制订了“压电与声光”的十年发展规划和“八·五”规划,以及制订了本专业的行业规划和声表面波滤波器基础标准等。

通讯地址:重庆2513信箱 邮编:630060 电话:023-62808382-2229



寿文德 男,1941年7月生,1964年毕业于上海交通大学水声工程专业留校任教至今。从事超声医学工程教学与研究。现任生物医学工程系教授、博士生导师、系副主任,兼任 IEC/TC87/WG8 成员、中国超声医学工程学会上海分会理事、上海市声学学会理事等职。出版专著有:《医学超声技术词典》等7部(含合著)。科研成果有:水下超声电视试验装置,3种超声功率计,PVDF 压电薄膜水听器,高频微型水听器,CX-960-I 多功能超声诊断仪(主研机扫探头)获1991年国家医药管理局科技进步二等奖。首创宫内超声剂量和腹部超声衰减测量法,指向性水听器校准,超声功率自易法测量。主编国家标准和行业标准各2项,发表

学术论文40余篇。

通讯地址:上海交通大学生物医学工程系 邮编:200030 电话:021-62812830,62812832



何正权 男,1938年5月出生于上海,1962年毕业于成都电讯工程学院(1986年更名为电子科技大学),毕业后留校工作至今。现为电子科技大学自动化系教授,中国超声医学工程学会理事,仪器工程开发委员会副主任,中国生物医学工程学会信息与控制分科学会委员,四川省超声医学工程学会常务理事。近十多年来主要从事与医学超声相关的教学与科研工作,取得科研成果十余项,曾获电子部一等奖一项,全国国防工办二等奖一项,北京市三等奖一项,机械电子部三等奖一项,以第一作者名义在电子学报等学术刊物发表论文28篇,参编出版教材和专著4部。

通讯地址:成都市建设北路电子科技大学自动化系 邮编:610054 电话:028-3203155



何桂鸣 男,59岁,电子工业部第二十六研究所高级工程师,1964年毕业于清华大学无线电电子学系,毕业后主要从事薄膜电路、声表面波器件和声光器件的研究工作。在声光器件方面,主持并参与过声光偏转器、声光调制器和声光可调滤光器课题的开题和研究工作,研究成果获部级科研成果奖、科技进步二等奖,发表学术论文十余篇。

通讯地址:重庆2513信箱 邮编:630060 电话:023-62808382-2303



林仲茂 男,1932年8月生。1956年南京工学院(现东南大学)无线电系毕业,同年到北京中科院电子所工作。1963年波兰科学院研究生毕业,获科学技术博士学位。中国科学院声学研究所研究员,中国声学学会常务理事,功率超声分会主任,《应用声学》编委,中国地区开发促进会科技委员会委员。曾任陕西师大应用声学所、中国科技大学研究生院的研究生教学工作。主要从事大功率超声的研究和技术应用,“多孔结构夹心式压电换能器”获国家科技进步二等奖;“局部共振超声振动系统及其在脆性非导电材料深小孔加工的研究”(合作)获国家发明三等奖;“超声冷拔钢管”、“CH-1-1000型超声熔接机”、“CX-500,CX-1000型超声清洗机”、“超声处理机”等分别获部、省市级科技进步奖。“油泵油嘴深盲孔超声清洗装置”(合作)获发明专利。主要著作有:《超声变幅杆的原理和设计》、《超声学》(合著)、《化工百科全书》第二卷超声词条(合著)等。在大功率超声换能器、变幅杆振动系统的研究,超声清洗、焊接、搪锡和乳化等技术应用,以及声化学等方面在国内外核心刊物发表论文60余篇。

通讯地址:北京市中关村路17号,中科院声学研究所 邮编:100080 电话:010-62565803



张德俊 男,1936年7月出生于河南安阳。中国科学院武汉物理与数学所研究员,中国声学学会和中国超声医学工程学会常务理事。1958年郑州大学物理系毕业。1958~1965年中科院声学所从事超声空化机理及其效应研究,获中科院重大科技成果奖。1965年以来,在中科院武汉物理所负责研制成精密超声延迟线,达到当时国外先进水平。主持院重点项目声全息水下显示,研制成 64×64 方阵系统,在水下几十米距离内取得良好显示结果。获全国科学大会奖及院三等成果奖三次。应邀担任原武汉军区总医院院外协作组长,研制成军内首台水囊耦合干式体外碎石机,获中国人民解放军科技进步二等奖。1989年以来从事近场声全息研究,已获重要进展。发表科学论文70余篇。

通讯地址:武汉市71010信箱 邮编:430071 电话:027-7869204(O),7867867(H)



郭延芬 女,东南大学无线电工程系水声电子工程专业副教授,主要从事“水声设备”、“计算机科学基础”课程的教学工作,曾参加多项国防重大科研项目的工作。在这些项目中,主要承担“水声信号处理、计算机终端显示及软件”的编制工作。其中国家重大项目“鱼雷末弹道轨迹测量”获国家科学技术进步二等奖。主持并参加的国家“八·五”预研项目“被动声呐仿真技术研究”获中国船舶工业总公司科技进步三等奖。

通讯地址:南京市东南大学无线电工程系 邮编:210018
电话:025-3794273



钱梦骏 男,1942年7月生,1963年同济大学数理力学系毕业后,在中国计量科学研究院和中国计量分院从事声和振动的国家标准的建立及传感器的研究工作。1978年考入同济大学声学研究所攻读硕士学位,1981年获理学硕士后留校工作。1988~1989年赴英国剑桥大学Cavendish实验室在微结构物理组从事扫描电子声显微镜的研究工作。1988年晋升为教授。1993年经国务院学位委员会批准为博士生导师。现任同济大学声学研究所所长,中国声学学会理事兼检测分会副主任委员及光声检测学科组组长,上海市声学学会副理事长,南京大学近代声学国家重点实验室学术委员。目前主要从事光、热、电与声之间的能量转换及新的检测技术的研究。主要研究方向为光声学、超声检测、激光超声学及声化学等。已发表学术论文70多篇,出版合作专著一册。1991年获“做出突出贡献的中国博士(硕士)学位获得者”称号,1992年获美国NASA的Langley中心杰出论文奖。

通讯地址:上海同济大学声学研究所 邮编:200092 电话:025-65031274



蔡清福 男,1942年1月生,福建省晋江市人,汕头超声仪器研究所副研究员。1964年毕业于厦门大学物理系,后在上海科技大学进修日语。发表科技论文50多篇,同他人合作翻译出版《超声探伤法》、《超声检测技术》、《超声探伤B》、《无损检测手册——超声探伤法》等书,独自翻译《医用超声仪器手册》。1988年被评为汕头市首批优秀专家和拔尖人才,1994年被评为广东省劳动模范。由于在引进日立超声显像诊断仪生产技术、消化吸收和国产化工作中做出重要贡献,1994年获得汕头市科技进步突出贡献特等奖,同年被国务院批准为享受政府特殊津贴的有突出贡献的专家。现任《无损检测》杂志编委。

通讯地址:汕头市金沙中路2号超声仪器研究所 邮编:51504 电话:0754-8250150

序 言

声学是物理学的一个分支。

70年代初,国际上一些著名物理学家在展望物理学发展前景时,曾指出:“声学在物理学中是‘外在性’最强、然而也是研究得最不充分的一个分支”。这表明,声学尚有十分广阔的领域有待研究和开发应用。

如今,人们研究的声波频率范围已从 10^{-4} 赫兹到 10^{13} 赫兹,覆盖17个数量级,且根据人耳对声波的响应不同,把声波划分为次声、可听声和超声。

超声技术出现于本世纪初。近一个世纪的发展表明,超声是声学发展中最为活跃的一部分,她已渗透到国防建设、国民经济、人民生活及科学技术等各个领域。如60年代后相继兴起的超声诊断(B超、彩色多普勒血流显像)和超声治疗(超声外科及碎石等)技术,已在现代医学中占有重要位置;70年代兴起的声表面波技术正在电子对抗及信息高速公路建设中发挥重要作用;而80年代兴起的声化学,已构成化学新分支,并在开创安全、廉价及无污染的“绿色”化学工业的探索中崭露头角……。1995年9月在德国召开的首届世界超声学大会(WCU),集中体现了超声学发展的这一强劲势头。

《超声手册》正是顺应这一发展形势,由中国声学学会常务理事、南京大学声学研究所冯若教授出任主编,组织十余名长期从事超声教学、科研工作且有较高造诣的专家教授共同执笔完成。该书包括超声技术

发展的所有主要内容,她既力求反映国际上的最新进展,又注意报道我国科学工作者的研究成果。

我相信,该书的出版,对于超声界的读者朋友是个福音,对促进我国超声学的发展与提高,将会起到积极作用,特为之序。

周光吕

前 言

声学的发展历史越来越清楚地表明,向其他科技领域广泛渗透的特点,使得这门古老的学科永葆青春,焕发勃勃生机!

超声学是声学发展中最为活跃的一部分。超声波作为一种信息载体,它已在海洋探查与开发、无损评价与检测、医学诊断及微电子学等领域发挥着不可取代的独特作用;与此同时,超声波作为一种能量形式,通过它(或它引发的超声空化)与传声媒质相互作用而产生的种种效应,已在物理、化学、生物及医学等基础研究和应用技术开发中展示出十分广阔的前景。

1983年马大猷先生等编著出版的《声学手册》,汇集了声学各分支的原理、公式、图表和数据,对促进我国的声学队伍成长和声学工作的发展起了巨大作用。但近二、三十年来,超声学和超声技术的飞速发展,热切地呼唤超声学领域应另辟专册,对她在各个方面所涉及到的原理、技术和应用给出全面的论述与介绍,以迎接我国面临21世纪高新技术和未来产业的巨大挑战!

6年前,我国40多位医学超声专家,曾把一部代表我国水平的190多万字的《超声诊断设备原理与设计》巨著(中国医药科技出版社,1993年)奉献给广大读者,旨在对我国相关人材的培养和产品研制开发水平的提高做出贡献。今天,为编著好这本《超声手册》,我们调整班子,邀请我国工作在超声各个领域第一线上的资深专家来担任撰稿任务,历时4年有余,完成此书。

本书计分九章。第一章超声物理基础,由中国科学院武汉物理数学研究所张德俊研究员撰写;第二章超声工程材料,由中国科学院声学研究所牛凤岐研究员撰写;第三章超声换能器,由上海麦迪逊医疗器械有限公司卜书中高工和上海交通大学寿文德教授撰写;第四章超声检测,

由汕头超声仪器研究所蔡清福高工、姚锦钟高工和同济大学钱梦骏教授共同撰写；第五章声表面波与声体波器件，由电子部第26所李耀堂高工、汤劲松高工和何桂鸣高工撰写；第六章功率超声，由中国科学院声学研究所林仲茂研究员和南京大学冯若教授撰写；第七章医学超声，由成都电子科技大学何正权教授和南京大学冯若教授撰写；第八章水声技术，由东南大学王玉泉高工、郭延芬副教授撰写；第九章超声测量与标准化，由上海交通大学寿文德教授撰写；附录部分，由武汉医疗器械研究所关立勋高工汇集。此外，为弘扬民族工业，扩大信息量，在相关章节后，我们有选择地介绍我国一些有代表性企业及其产品的技术资料。

汕头超声仪器研究所为本书出版提供了决定性的资助，他们热情支持发展我国科技事业的崇高精神，已赢得我国超声界的广泛赞誉。

中国科学院洪家兰教授对本书的编著和出版给予了宝贵的关心与支持，中国科学院前院长、中国科协主席周光召先生在百忙之中，为本书执笔作序，在此表示我们最诚挚的谢意。另外，本书责任编辑李曾沛副编审在审校书稿中付出了大量的艰辛劳动，解修伦女士在改善书中插图等工作中给了巨大帮助，亦一并深表谢意。

本手册的内容涉及到物理、数学、声学、化学、电子、医学及计算机等诸多学科，且发展迅速，由于时间、篇幅及知识面有限，难免有错漏和欠妥之处，恳请读者指正。

冯 若

1999年1月14日于南京

目 录

第一章 超声物理基础

§ 1.1 超声学名词术语·····	张德俊
1.1.1 一般术语·····	2
1.1.2 检测超声术语·····	5
1.1.3 功率超声术语·····	8
1.1.4 医学超声术语·····	9
1.1.5 超声电子学术语·····	11
1.1.6 水下超声应用术语·····	13
1.1.7 超声非线性术语·····	16
§ 1.2 超声的基本量、符号、单位及物理关系·····	16
1.2.1 声压与质点速度·····	17
1.2.2 声速·····	18
1.2.2.1 气体中的声速·····	18
1.2.2.2 液体中的声速·····	19
1.2.2.3 固体中的声速·····	20
1.2.3 声阻抗与声阻抗率·····	22
1.2.4 声功率·····	23
1.2.5 声强·····	24
1.2.6 声辐射压力·····	25
1.2.7 声衰减与吸收·····	26
1.2.7.1 吸收衰减·····	26
1.2.7.2 散射衰减·····	27
1.2.7.3 扩散衰减·····	27
1.2.8 超声空化阈值·····	27

1.2.9	超声的非线性参量	28
1.2.10	级与分贝	30
1.2.10.1	声功率级	30
1.2.10.2	声强级	30
1.2.10.3	声压级	30
1.2.10.4	其他电声参量的级	30
1.2.10.5	分贝运算	31
§ 1.3	超声波的基本波型——波动方程及其解	33
1.3.1	流体中的波动方程	33
1.3.1.1	流体中的平面波	33
1.3.1.2	流体中的球面波	35
1.3.1.3	流体中的柱面波	36
1.3.2	固体中的波动方程	37
1.3.2.1	固体中的压缩波	39
1.3.2.2	固体中的切变波	39
§ 1.4	超声的产生与接收	40
1.4.1	自然界中动物的超声发射与接收	40
1.4.2	产生与接收超声的基本技术与设备	41
1.4.2.1	机械式超声产生设备	41
1.4.2.2	压电型超声换能器	42
1.4.2.3	磁致伸缩型超声换能器	42
1.4.2.4	光声型超声产生与接收设备	43
1.4.2.5	接收超声的基本技术与设备	44
§ 1.5	声-电-力类比	44
1.5.1	声-电-力参量及元件的类比关系	44
1.5.2	压电换能器的梅森等效电路	46
1.5.3	压电换能器的克里姆霍尔兹等效电路	47
§ 1.6	超声在气、液、固体媒质中的传播	48
1.6.1	单源换能器的辐射声场	48
1.6.2	换能器阵列的辐射声场	51
1.6.2.1	乘积定理算法	51
1.6.2.2	傅里叶变换法	52
§ 1.7	超声在不同媒质界面上的反射、透射及波型转换	54
1.7.1	声波入射到两种非固体媒质平界面上	54

1.7.2	声波入射到液-固媒质的平界面上	56
1.7.3	声波入射到固-液、固-固媒质的平界面上	57
1.7.4	声波通过三重媒质平面层	57
1.7.5	声波通过多重媒质平面层	59
§ 1.8	超声在有限尺寸波导中的传播	59
1.8.1	固体自由面上的表面波	59
1.8.2	固体薄板内的兰姆波	62
§ 1.9	超声波的干涉与衍射	63
1.9.1	超声的干涉	64
1.9.2	超声的衍射	65
§ 1.10	超声波的散射与逆散射	66
1.10.1	超声波的散射	66
1.10.1.1	液体球的声散射	66
1.10.1.2	刚性小球的声散射	67
1.10.2	超声波的逆散射	69
§ 1.11	超声多普勒效应	69
1.11.1	多普勒效应	69
1.11.2	马赫数对多普勒效应的影响	72
§ 1.12	超声的非线性效应	73
1.12.1	非线性声学的基本方程	74
1.12.2	超声的某些非线性效应	75
1.12.2.1	非线性声参量	75
1.12.2.2	波形畸变与谐波滋生	76
1.12.2.3	附加衰减与声饱和	76
1.12.2.4	其他超声非线性效应	78
§ 1.13	超声空化及其效应	78
1.13.1	空化核	79
1.13.2	空化气泡的运动	80
1.13.3	空化气泡的闭合与反跳	82
1.13.4	空化的基本效应	83
1.13.4.1	高温效应	83
1.13.4.2	放电效应	84
1.13.4.3	发光效应	86

1.13.4.4 压力效应 88

1.13.4.5 其他有趣的效应 88

§ 1.14 超声与物质的相互作用 89

1.14.1 超声的机械作用 90

1.14.2 超声的热作用 90

1.14.3 超声的生物学作用 91

1.14.4 超声的化学作用 91

1.14.5 超声与光的相互作用 91

§ 1.15 超声连续波与脉冲波 91

§ 1.16 超声技术应用的基本分类 93

参考文献 95

第二章 超声工程材料

§ 2.1 材料(媒质)声学特性的表征 牛凤岐

2.1.1 用力学量描述材料的基本特性 98

2.1.1.1 弹性模量 98

2.1.1.2 静态模量与动态模量 98

2.1.1.3 各个模量之间的关系 98

2.1.1.4 复数模量 98

2.1.2 用声学量描述材料的基本特性 100

2.1.2.1 描述材料声学特性的基本参量 100

2.1.2.2 声学材料研究与应用中的常见波型 100

2.1.2.3 声学量与力学量的关系 100

2.1.2.4 复数声速和复数声阻抗率 101

2.1.2.5 复数声速与复数模量的相互换算 101

2.1.2.6 复数条件下的声阻抗匹配问题 102

§ 2.2 材料(媒质)声学特性的测量方法 102

2.2.1 密度测量方法 102

2.2.1.1 固体材料 102

2.2.1.2 有形状凝胶材料 103

2.2.1.3 无形状凝胶材料 103