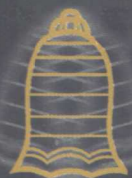




声学基础

杜功焕 朱哲民 龚秀芬 著



南京大学出版社

声学基础

(第2版)

杜功焕 朱哲民 龚秀芬 著

南京大学出版社

内 容 简 介

声学是一门既古老又迅速发展着的学科,近年来已渗透到几乎所有重要的自然科学和工程技术领域,并已融入于当代科学技术的前沿之中.本书系统地介绍了声学的基础理论,其中包括声的辐射、传播、接收与散射,并适当地介绍了近期活跃的非线性声学基础理论.

本书可作为高等院校的教材,也可供专业研究和工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

声学基础/杜功焕,朱哲民,龚秀芬著.—2版.—南京:南京大学出版社,2001.3

ISBN 7-305-03631-5

I. 声... II. ①杜... ②朱... ③龚...

III. 声学-基本知识 IV. 042

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 56066 号

书 名 声学基础(第2版)
著 者 杜功焕 朱哲民 龚秀芬
出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
电 话 025-3596923 025-3592317 传真 025-3303347
网 址 <http://www.njupress.com>
电子函件 nupress1@public1.ptt.js.cn
经 销 全国各地新华书店
印 刷 扬州鑫华印刷有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 17.875 字数 464 千
版 次 2001 年 3 月第 2 版 2001 年 3 月第 1 次印刷
印 数 1~4000
ISBN 7-305-03631-5/O·257
定 价 25.00 元

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

序

20 世纪 70 年代初美国曾出版过一部由好些物理学家共同撰写的《物理学展望》，其中有一段是从不同的方面把物理学各个分支进行对比，结论认为声学具有最大的“外在性”——也就是渗透到其他分支以至别的科技领域的部分最多，形成了若干新兴的边缘分支；对应用科学、技术、国防、文化生活以及社会等方面影响的潜力最大。可是声学又被评为研究得最不成熟的分支。我基本上同意这些评论。

声学的确具备着现代科学的各门学科相互交叉，从而形成边缘学科的特点，人们对许多声学问题还只是停留在感性认识的阶段。随着时代的进步，科技的发展，声学不断地开辟着新的科学上的生长点。毫无疑问，声学有蓬勃的生命力和广阔的前景。

物理学已习惯地划分为宏观的经典物理和微观的近代物理。自 19 世纪末以来，近代物理学发展的主流是向物质结构的更深层次去进行探索。但是人类对物质世界的认识总是后浪推前浪，科学的“前沿”不可能是孤立的。研究“基本粒子”的人可以不懂声学，但是费米在讲授他自己的 β 衰变理论时却应用了当年瑞利对封闭空间声传播模式的概念；最近物理学家研究氦 II 第三声却发现和“夸克”有了联系；固体物理学家正在自觉或不自觉地从声声学方面的问题。这种例子很多。声学既是跨层次又是跨学科的。

在如此广阔的领域中要编写一本无所不包的声学专著，显然是不可能的。在 50 年代初期本人曾开过《声学基础》课程，就感到以声学基本问题为线索的课本很少，一般是过于偏重于某一方面，而其基础即分散在其他课本中。事过廿多年，国外也出过一些这类的书，不是过窄就是宽到像蜻蜓点水式的百科全书，国内更是有个

A4627/07-17228

无问题.

本书作者累积多年来担任这门课的经验,博采众长而不落窠臼,有一定的特点.至于侧重点“著者说明”中已交代得清楚.学者在掌握本书以后,可以举一反三,而作者也拟在这书的基础上,撰写续编.本书问世后必将对声学的教学和科学研究起着一定的作用,这是可以拭目以待的.

魏荣爵

1980 年于南京大学物理系

声学研究所

著者说明

本书是多年来在南京大学物理系声学专业开设的“声学基础”课作为基础编写成的,希望对于其他从事声学方面研究工作的科技人员也有参考价值。

本书主要介绍一些传统性的声学基础方面的理论知识,其中包括声的辐射、传播、接收,以及对声学工作者应必备的关于振动学方面的基础。书中的讨论着重于,目前大多数声学问题的基础“理想流体媒质中的小振幅声波”,但为了适应近年来声学研究的发展,在书中对非理想流体媒质、大振幅声波以及固体中的声传播特性等也作了简要的基础性介绍。

由于声学是一门既古老而又迅速发展着的学科,近年来它的应用已渗透到几乎所有重要的自然科学和工程技术领域,形成了一个又一个独特的崭新的分支学科,因此要在一本基础方面的书籍中涉及无所不包的声学问题是不可能的。

为了帮助读者掌握和运用书中所导得的重要理论公式,书中也涉及了一些实际问题,而这些问题中的大多数是偏重于音频声学范畴的,但是这并不是说本书只适用于作为音频声学的基础。

本书作为高等学校有关专业基础方面的教材,在推理方面力求做到自成体系,以使具备理工科大学有关基础知识的读者阅读本书时,对一些重要的理论结果能接受,而无需再查阅大量参考读物。

为了使读者更好地理解和掌握书中所讨论的主要内容,在书的前八章中提供了近 200 道习题。在书的附录中还列有常用的一些声学常数表,以及常用的数学公式与图表,以便读者查阅。

无论在教学以及书的编写过程中,都曾得到魏荣爵教授的多方指导,本校声学研究所与声学教研室不少同志也曾提出不少宝贵意见,并进行了有益的讨论,在此深表谢意。

著 者

再版说明

《声学基础》一书自 1981 年初版以来,深受读者厚爱.作者曾不断收到来自海内外读者朋友的鼓励乃至宝贵意见和建议.借此机会,谨表谢意.

近二十年来,我国的科学和教育事业经历了前所未有的发展.本书所服务的声学事业也幸逢盛世,一直生机勃勃.正如著名物理学家、声学家、中科院资深院士魏荣爵教授在为本书初版作序中所指出:“随着时代的进步,科技的发展,声学将不断开辟新的科学上的生长点.”因为“声学具有最大的外在性”的特点,近二十年间,不仅原有的分支不断发展、延拓,而新的分支又不断滋生.声学已经渗透到我国国民经济与社会文化的各个领域,并也已融入于当代科学技术的前沿之中.当前正值世纪之交,声学事业同样面临新的机遇与挑战.鉴于这种形势出版一部既能系统介绍声学基本原理又能反映当前声学发展的教材,已紧迫地提上日程.在本书初版问世近二十年间,虽然重印过多次,但供应一直不能满足广大读者的需要.再版本书对其作出必要的修正和补充,已成为我们不应推辞的时代职责.

当然作为一部具有基础教材性质的著作,不可能去包罗当前声学发展中的各种问题,但是它必须为广大读者提供必要的基础,以使它们能尽快适应这种发展,并担负起推动当代声学事业发展的重任.因此对本书修订时,我们一方面力求保持已为广大读者认同的原书风格和特色,同时也在不提升原有数理基础的要求上增补一些近年来声学发展中涉及基础范畴的内容和章节.例如第 5 章的“一维电声传输线类比”,第 6 章的“不相干小球源的线阵”与“有限束超声辐射场”,第 7 章的“声强计原理”与“水中气泡的散射”,第 8 章在室内混响一节中对若干国际最著名音乐厅混响时间研究的介绍以及第 11 章的“兰姆波的传播”等等.特别对第 10 章

作了较大的改动和补充,且更名为“非线性声学基础”。此外对原书作出一定修正以及积累长期教学经验对各章的习题作些扩充等工作当然也都是再版本内之劳。

本书的再版希望继续获得广大读者的欢迎。当然尽管我们作了努力,但肯定还有不足之处。因此也热忱期待着批评和指正。愿我们共同为祖国乃至国际声学事业的发展作出一份应有的贡献。

著者于南京大学 电子科学与工程系
声学研究所
近代声学国家重点实验室

目 录

序

著者说明

再版说明

1 质点振动学	1
1.1 质点振动系统的概念	2
1.2 质点的自由振动	3
1.2.1 自由振动方程	4
1.2.2 自由振动的一般规律	5
1.2.3 自由振动的能量	8
1.2.4 双弹簧串接与并接系统的振动	9
1.2.5 弹簧质量对系统固有频率的影响	11
1.2.6 振动问题的复数解	13
1.3 质点的衰减振动	14
1.3.1 衰减振动方程	14
1.3.2 衰减振动的一般规律	15
1.3.3 衰减振动的能量	17
1.4 质点的强迫振动	18
1.4.1 强迫振动方程	18
1.4.2 强迫振动的一般规律	19
1.4.3 质点的稳态振动	20
1.4.4 强迫振动的能量	26
1.4.5 振动控制:电声器件的工作原理	28
1.4.6 隔振原理	33
1.4.7 拾振原理	37

1.5	周期力的强迫振动	42
	习题 1	47
2	弹性体振动学	54
2.1	弦的振动	55
2.1.1	弦的振动方程	55
2.1.2	弦振动方程的一般解	57
2.1.3	自由振动的一般规律——弦振动的驻波解	59
2.1.4	弦振动的能量	65
2.2	棒的振动	67
2.2.1	棒的纵振动方程	68
2.2.2	棒的纵振动的一般规律	70
2.2.3	棒的横振动方程	79
2.2.4	棒的横振动的边界条件	83
2.2.5	棒的横振动的一般规律	84
2.3	膜的振动	90
2.3.1	膜的振动方程	90
2.3.2	圆膜对称振动的一般解	91
2.3.3	圆膜对称自由振动的一般规律	93
2.3.4	圆膜振动的等效集中参数	95
2.3.5	圆膜的强迫振动	98
2.3.6	媒质对膜振动的影响	102
2.3.7	圆膜振动的非对称振动	104
2.4	板的振动	106
2.4.1	板的振动方程	107
2.4.2	周界钳定圆形板对称振动的一般规律	108
2.4.3	圆板振动的等效集中参数	110
	习题 2	112
3	电-力-声类比	116
3.1	电路中的基本概念	117

3.2	力学元件与基本力学振动系统·····	121
3.3	声学元件与基本声学振动系统·····	126
3.4	电-力-声线路类比·····	130
3.4.1	电路图的分析·····	132
3.4.2	力学系统的类比线路图·····	132
3.4.3	声学系统的类比线路图·····	138
3.4.4	阻抗型和导纳型类比线路图的互相转换·····	143
3.4.5	变量器·····	145
3.5	电-力-声类比线路应用举例·····	147
	习题3·····	158
4	声波的基本性质·····	163
4.1	概述·····	163
4.2	声压的基本概念·····	165
4.3	理想流体媒质中的声波方程·····	168
4.3.1	理想流体媒质的三个基本方程·····	168
4.3.2	小振幅声波一维波动方程·····	173
4.3.3	三维声波方程·····	176
4.3.4	速度势·····	177
4.4	特殊形式的声波方程·····	180
4.5	平面声波的基本性质·····	182
4.5.1	波动方程的解·····	182
4.5.2	声波传播速度·····	186
4.5.3	声阻抗率与媒质特性阻抗·····	188
4.6	声场中的能量关系·····	189
4.6.1	声能量与声能量密度·····	190
4.6.2	声功率与声强·····	192
4.7	声压级与声强级·····	193
4.8	响度级与等响曲线·····	195
4.9	从平面声波的基本关系检验线性化条件·····	197

4.10	声波的反射、折射与透射	199
4.10.1	声学边界条件	200
4.10.2	平面声波垂直入射时的反射和透射	201
4.10.3	平面声波斜入射时的反射与折射	205
4.10.4	声波通过中间层的情况	214
4.11	隔声的基本规律	220
4.11.1	单层墙的隔声	220
4.11.2	双层墙的隔声	222
4.12	声波的干涉	226
4.12.1	叠加原理	226
4.12.2	驻波	227
4.12.3	声波的相干性	228
4.12.4	具有无规相位的声波的叠加	230
	习题 4	233
5	声波在管中的传播	237
5.1	均匀的有限长管	238
5.1.1	管内声场	239
5.1.2	阻抗图	241
5.1.3	声负载的吸声系数	243
5.1.4	共振吸声结构	244
5.2	突变截面管	246
5.2.1	声波在两根不同截面的管中传播	246
5.2.2	中间插管的传声特性	248
5.2.3	扩张管式消声器	249
5.3	有旁支的管	250
5.3.1	旁支对传声的影响	250
5.3.2	共振式消声器	252
5.4	管中输入阻抗(声传输线阻抗转移公式)	254
5.5	截面积连续变化的管(声号筒)	259

5.5.1	号筒中声场的一般解	260
5.5.2	指数形号筒的传声特性	261
5.6	声波在管中的粘滞阻尼	267
5.6.1	管中粘滞运动方程	267
5.6.2	细管中声波传播特性	270
5.6.3	细管的声阻抗	273
5.6.4	毛细管中声波传播特性	275
5.6.5	毛细管的声阻抗	277
5.6.6	微孔管的声阻抗	278
5.7	声波导管理论	279
5.7.1	矩形声波导管	279
5.7.2	圆柱形声波导管	289
5.8	非刚性壁管	293
5.8.1	非刚性壁管中声波方程的解	293
5.8.2	管中主波的传播	294
5.9	一维电声传输线类比	296
5.9.1	电传输方程	297
5.9.2	电声传输线类比	298
5.9.3	不均匀传输线	299
5.9.4	传输线中反射系数	300
习题 5		302
6	声波的辐射	308
6.1	脉动球源的辐射	309
6.1.1	球面声场	309
6.1.2	声辐射与球源大小的关系	311
6.1.3	声场对脉动球源的反作用——辐射阻抗	313
6.1.4	辐射声场的性质	316
6.2	声偶极辐射	318
6.2.1	偶极辐射声场	319

6.2.2	等效辐射阻	321
6.3	同相小球源的辐射	322
6.3.1	两个同相小球源的辐射声场	322
6.3.2	指向特性	323
6.3.3	自辐射阻抗和互辐射阻抗	326
6.3.4	互易原理	330
6.3.5	镜像原理	331
6.3.6	声柱	333
6.3.7	不相干小球源的线阵	338
6.4	点声源	340
6.5	无限大障板上圆形活塞的辐射	344
6.5.1	远声场特性	344
6.5.2	辐射的指向特性	347
6.5.3	近声场特性	351
6.5.4	声场对活塞声源的反作用——活塞辐射 阻抗	356
6.6	有限束超声辐射场	362
6.6.1	有限束超声场方程	362
6.6.2	有限束超声场举例(活塞, 高斯型与贝塞尔型 超声场)	366
6.7	球形声源的辐射	368
6.7.1	波动方程及其解的形式	369
6.7.2	辐射声场与球源线度的关系	373
6.7.3	球源辐射的声强和声功率	378
习题 6		382
7	声波的接收与散射	388
7.1	声波的接收原理	389
7.1.1	压强原理	389
7.1.2	压差原理	391

7.1.3	压强与压差复合原理	394
7.1.4	多声道干涉原理	397
7.1.5	声强计原理	399
7.2	声波的散射	402
7.2.1	刚性圆球的散射声场	402
7.2.2	刚性圆球上的总声压	407
7.2.3	液体中气泡的声散射	409
习题 7		414
8	室内声场	417
8.1	用统计声学处理室内声场	418
8.1.1	扩散声场	418
8.1.2	平均自由程	419
8.1.3	平均吸声系数	420
8.1.4	室内混响	422
8.1.5	空气吸收对混响时间公式的修正	426
8.1.6	稳态平均声能密度	428
8.1.7	总稳态声压级	429
8.1.8	声源指向性对室内声场的影响	431
8.2	用波动声学处理室内声场	432
8.2.1	室内驻波	432
8.2.2	简正频率的分布	434
8.2.3	驻波的衰减	438
8.2.4	法向声阻抗率与扩散声场吸声系数的 关系	440
8.2.5	各类波的混响时间	443
8.2.6	声源的影响	446
习题 8		449
9	声波的吸收	452
9.1	媒质的粘滞吸收	453

9.1.1	理想煤质运动方程的回顾	453
9.1.2	粘滞煤质运动方程	454
9.1.3	粘滞煤质运动方程的解	455
9.1.4	声速及吸收系数	456
9.2	媒质的热传导声吸收	461
9.3	声吸收经典公式的讨论	461
9.4	分子弛豫吸收简单理论	464
9.5	生物媒质中的超声衰减	472
	习题 9	473
10	非线性声学基础	475
10.1	非线性一维流体动力学方程及其解	477
10.2	非线性物态方程与非线性参量	479
10.2.1	非线性物态方程	479
10.2.2	非线性参量	480
10.3	声波的非线性传播与波形畸变	482
10.3.1	波形的畸变	482
10.3.2	间断距离	484
10.3.3	贝塞尔-富比尼解: 畸变波形的谐波 分析	485
10.3.4	波形畸变的图解分析	488
10.4	有限振幅声波的相互作用	489
10.4.1	非线性波动方程	490
10.4.2	非线性波动方程的近似解	491
10.4.3	两个不同频率声波的相互作用	492
10.5	粘滞媒质中有限振幅波的传播	495
10.5.1	伯格方程	496
10.5.2	伯格方程的解	498
10.5.3	粘滞媒质中的二次谐波声压特性	500
10.6	非线性振动	502

10.6.1	具有非线性恢复力无阻尼的强迫振动	502
10.6.2	具有非线性恢复力有阻尼的强迫振动	507
10.6.3	跳跃现象	509
10.6.4	分谐频振动	510
习题 10		512
11	固体中声波传播的基本特性	513
11.1	固体的基本弹性性质	514
11.1.1	固体中的应变分析	514
11.1.2	固体中的应力分析	516
11.1.3	广义虎克定律	518
11.1.4	拉密常数与杨氏模量、泊松比的关系 ...	520
11.2	固体中声波的传播	521
11.2.1	固体中的声波方程	522
11.2.2	声波的反射与折射	526
11.2.3	声表面波	531
11.2.4	薄板中的兰姆波	537
习题 11		541
附录		
A	媒质的声学常数	542
B	常用数学公式	544
C	一些特殊函数的图和表	551