



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

理论声学

■ 张海澜 编著

Theoretical Acoustics



高等教育出版社
Higher Education Press



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

理论声学

■ 张海澜 编著

Theoretical Acoustics



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书系统地介绍了声学的基本理论和研究方法,着重介绍了近几十年来的新发展。全书大致分为两部分。第一部分是与声学有关的振动理论;第二部分是声学理论,包括声传播、辐射、散射、声波导和房间声学等基本内容,还包括低频和高频近似、固体中的声波、换能器、非线性声学 and 数值计算等方面的内容。

本书可作为研究生的理论声学课的教材,也可供相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论声学/张海澜编著. —北京:高等教育出版社,
2007.3

ISBN 978-7-04-020686-9

I.理… II.张… III.声学 IV.O42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021613 号

策划编辑 王 超 责任编辑 郭亚嫒 封面设计 王凌波 责任绘图 吴文信
版式设计 王 莹 责任校对 俞声佳 责任印制 韩 刚

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 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 35
字 数 670 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 3 月第 1 版
印 次 2007 年 3 月第 1 次印刷
定 价 58.00 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 20686-00

中国科学院研究生院教材编审委员会

主 任：白春礼

顾 问：余翔林

副主任：马石庄（常务） 刘志鹏 韩兴国 苏 刚

委 员（以姓氏笔画为序）：

石耀霖 刘嘉麒 杨 乐 李伯聪 李 佩 李家春

吴 向 汪尔康 汪寿阳 张文芝 张增顺 徐至展

黄荣辉 黄 钧 阎保平 彭家贵 裴 钢 谭铁牛

物理学科编审组

主 编：李家春

副主编：苏刚

编 委：丁亦兵 马中骥 邓祖淦 王鼎盛 叶甜春 李国华

张肇西 洪友士 赵 刚 詹文山 詹明生

总 序

在中国科学院研究生院和高等教育出版社的共同努力下，凝聚着中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血和汗水的中国科学院研究生院教材面世了。这套教材的出版，将对丰富我院研究生教育资源、提高研究生教育质量、培养更多高素质的科技人才起到积极的推动作用。

作为科技国家队，中国科学院肩负着面向国家战略需求，面向世界科学前沿，为国家作出基础性、战略性和前瞻性的重大科技创新贡献和培养高级科技人才的使命。中国科学院研究生教育是我国高等教育的重要组成部分，在新的历史时期，中国科学院研究生教育不仅要为我院知识创新工程提供人力资源保障，还担负着落实科教兴国战略和人才强国战略，为创新型国家建设培养一大批高素质人才的重要使命。

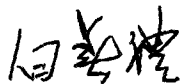
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源，中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式，在突出科学教育和创新能力培养的同时，重视全面素质教育，倡导文理交融、理工结合，培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

研究生教材建设是研究生教育中重要的基础性工作。由一批活跃在科学前沿，同时又具有丰富教学经验的科学家编写的中国科

学院研究生院教材，适合在校研究生学习使用，也可作为高校教师和专业研究人员的参考书。这套研究生教材内容力求科学性、系统性、基础性和前沿性的统一，使学习者不仅能获得比较系统的科学基础知识，也能体会蕴于其中的科学精神、科学思想、科学方法，为进入科学研究的学术殿堂奠定良好的基础；优秀教材不但是体现教学内容和教学方法的知识载体、开展教学的基本条件和手段，也是深化教学改革、提高教育质量、促进科学教育与人文教育结合的重要保证。

“十年树木，百年树人”。我相信，经过若干年的努力，中国科学院研究生院一定能建设起多学科、多类型、多品种、多层次配套的研究生教材体系，为我国研究生教育百花园增添一枝新的奇葩，为我国高级科技人才的培养作出新的贡献。

中国科学院 常务副院长
中国科学院研究生院 院长
中国科学院 院士



二〇〇六年二月二十八日

前 言

过去五年作者在中国科学院研究生院讲授理论声学,介绍声的物理性质和声学的基本理论,在介绍传统内容的同时,特别注重声学理论的新发展,本书就是在授课讲义的基础上整理而成的。

声学的内容非常丰富,涉及很多方面,材料的取舍,前后贯通一致都颇费斟酌。由于作者知识面有限和时间仓促,错误和不足之处在所难免。为了有所补救,本书出版后将在中国科学院声学研究所的网站上建立一个网页,刊登一个不时更新的勘误表。网站上还会发表一些上课用的课件和相关的材料,供读者参考。欢迎读者把阅读中发现的错误和不妥通过网站提供的方法反馈作者,一旦确认,即编入勘误表,并列出最早指出这个错误的读者的姓名。欢迎读者把对本书的评论和批评以及各种相关的课件发给作者,通过网站与大家分享。本书的网站是 <http://edu.ioa.ac.cn/theoacoust>

作者在教学和编书的过程中,得到中国科学院声学研究所和研究生院以及高等教育出版社的许多老师和同学的鼓励和帮助,特别是张秀梅同学通读书稿,纠正了许多错误,作者对此深表感谢。

作者 2006 年 9 月于北京

符 号 表

$*$	复数的共轭	D	指向性函数
a	加速度		均方差
a	简正坐标	D	电位移
A	加速度的复振幅	e	电压
A	简正坐标复振幅, 频谱	E	能量密度
$\mathcal{A}$	刚度算子		交流电压的复振幅
B	磁感应强度		杨氏模量
B/A	非线性参数		期望值
c	声速	E_0	偏压
c	劲度系数张量	E_T	动能密度
c_0	声速	E_V	势能密度
c_E	能流速度	E	电场强度
c_g	群速度	$\mathcal{E}$	能量
c_l	纵波速度	$\mathcal{E}_d$	耗能函数
c_p	相速度	$\mathcal{E}_T$	动能
c_R	表面波速	$\mathcal{E}_V$	势能
c_s	横波速度	f	频率
c_{ijkl}	劲度系数张量		力
C	电容		力的分布密度
C_0	钳定电容	f_a	力的振幅
C_a	声顺, 声容	f_c	截止频率
C_m	力顺, 顺性系数	f_0	固有频率, 共振频率
d	距离	$\bar{f}$	归一化频率
	阵元间隔	f	力矢量

II 符号表

	体积力	J	声场互易参量
	广义外力	k	波数
F	力的复振幅	$\mathbf{k}$	波矢
	频谱	K	劲度系数
$\mathbf{F}$	力矢量的复振幅, 频谱		回转半径
$\mathcal{F}$	傅里叶变换算子	K_c	耦合劲度系数
g	重力加速度	K_s	绝热体积劲度系数
	概率密度	$\mathbf{K}$	刚度矩阵
$g(t, t')$	简单振子格林函数	l	长度
$g_0(t, t')$	无阻尼简单振子格林函数	L	拉格朗日量密度
$g_0(x, t)$	弦的格林函数		电感
$g_0(x, t; x', t')$	弦的格林函数		非均匀介质的特征尺度
$g(\mathbf{r}, t)$	声场的格林函数	$\bar{L}$	平均自由程
$g(\mathbf{r}, t; \mathbf{r}', t')$	声场的格林函数	$\mathcal{L}$	拉格朗日量
$\mathbf{g}_0(t)$	格林函数矩阵	m	质量
$\mathcal{G}_0(x, t)$	格林积分算子	m_r	同振质量
G	电导	$\mathbf{m}$	质量矩阵
$G(\omega)$	简单振子的稳态格林函数	M_s	声质量
$G(x, x'; \omega), G(x - x' , \omega)$	弦的稳态格林函数	Ma	马赫数
$G_0(x, x'; \omega), G_0(x - x' , \omega)$	弦的稳态格林函数, 不计阻尼	n	单位矢量
$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega)$	二维和三维的稳态格林函数	p	声压
	声场的稳态格林函数	p_A	峰值声压
$h_{m,l}$	压电系数	p_e	有效声压
$H(\omega)$	位移传递函数	P	声压的复振幅
$H_0(\omega)$	不计阻尼的位移传递函数	$\mathbf{P}$	波印廷矢量
H_0	传递函数矩阵	$\mathbf{P}^{(j)}$	能流密度
$H(t)$	阶跃函数	$\mathcal{P}^{(k)}$	投影矩阵
i	$\sqrt{-1}$	q	投影算子
i	电流		体积速度
I	声强	$q_j(t)$	自由电荷密度
	转动惯量	$\mathbf{q}$	简正坐标的广义力
	交流电流复振幅	Q	广义力矢量
Im	虚部	Q_m	体积速度的复振幅
		Q	力学品质因素
			简正坐标广义力复振幅

	简正坐标广义力频谱	x_a	位移振幅
r	半径	x_g	位移的通解
	弦的阻尼	x_p	位移的特解
	反射系数	x_k	间断距离
r	点的坐标,位置矢量	x	质点系位移矢量
s	慢度矢量		坐标
s_{ijkl}	顺性系数张量		广义坐标
R	电阻	X	位移的复振幅
R_a	声阻	X_a	声抗
R_m	力阻,阻力系数	X_m	力抗
R_r	辐射阻	X_r	辐射抗
Re	实部	X	位移矢量的复振幅,频谱
S	面积	Y	电导纳
t	时间	z	波阻抗
T	周期		声阻抗率,特性阻抗
	特征时间	z_f	远场距离,近场距离
	弦的张力	z_n	法向声阻抗率
	膜的张力	Z	电阻抗
T	转换矩阵	Z_a	声阻抗
$\mathcal{T}$	转换算子	Z_c	互力阻抗
T_0	固有周期	Z_j	钳定力阻抗
u	位移	Z_{jk}	输入力阻抗
u	位移矢量		转移力阻抗
v	速度	Z_m	力阻抗
v	速度矢量	$Z_m(x, x')$	转移力阻抗
v_a	速度振幅	$Z_m(x, x)$	输入力阻抗
V	速度的复振幅	Z_r	辐射力阻抗
	体积	α	衰减系数
w	体积速度密度		吸声系数
W	体积速度密度的复振幅	α_x	热传导引起的衰减系数
	阵列声源强度的密度	β	复的角频率
W_1	偶极子源强度的密度		非线性系数
$\mathcal{W}$	功率	β_a	绝热体积压缩系数
x	坐标,广义坐标	β_{ij}	反介电系数
	位移	γ	衰减因子

IV 符号表

	定压比热与定容比热之比	σ_n	正应力
δ	δ 函数	σ_n	应力矢量
ε	弦的线密度	τ	衰减模量
ε	应变张量		弛豫时间
η	黏度	ϕ	角度
θ	角度		相位
θ_0	主瓣方向	ϕ_0	初始相位
θ_{cr}	临界入射角	$\Delta\phi$	相位差
θ_w	主瓣宽度	Φ	流体声场的速度势
λ	波长		固体声场的标量位移势
	拉密系数	χ	热传导系数
μ	拉密系数	ψ	波函数
ν	泊松比	Ψ	矢量位移势
2ξ	蜿蜒指数	ω	角频率, 圆频率
ρ	密度	ω_0	简单振子的固有角频率
σ	弦和棒的内力	ω_c	截止角频率
	膜的面密度	$\omega^{(j)}$	质点系的固有角频率
	散射截面	Ω	立体角
σ	应力		

目 录

绪论	1
第 1 章 简单振子的振动	8
§ 1.1 自由振动	8
§ 1.2 阻尼振动	15
§ 1.3 稳态的受迫振动	20
§ 1.4 受冲击脉冲力作用的受迫振动	31
§ 1.5 受一般外力作用的受迫振动	35
§ 1.6 简单振子的电路类比	47
习题	52
第 2 章 质点系的振动	54
§ 2.1 双质点三弹簧耦合振动系统	54
§ 2.2 例子	64
§ 2.3 有限个自由度系统的振动	69
§ 2.4 简正坐标中的振动	73
§ 2.5 质点系的等效电路	82
习题	84
第 3 章 弦和棒的振动	86
§ 3.1 无限长的弦和棒中的波	86
§ 3.2 无限长的弦的模式	100
§ 3.3 有限长的弦和棒的波动	109
§ 3.4 有限长弦的模式	119

II 目录

§ 3.5 非均匀弦的模式	132
§ 3.6 振动系统的模式理论	139
§ 3.7 弦和棒的电路类比	143
习题	146
第 4 章 膜的振动	148
§ 4.1 无限大膜的振动	148
§ 4.2 矩形膜	158
§ 4.3 极坐标中的解和圆形波	164
§ 4.4 圆形膜	169
习题	172
第 5 章 声波的基本性质	174
§ 5.1 声的基本概念	174
§ 5.2 声波方程	177
§ 5.3 平面声波	187
§ 5.4 平面波在平面界面上的反射和透射	199
§ 5.5 瞬态波和有限宽波束的反射和透射	212
§ 5.6 声波的吸收	221
习题	224
第 6 章 声波的辐射	226
§ 6.1 球坐标系的声波方程和点声源	226
§ 6.2 球形和圆柱形声源	240
§ 6.3 组合声源	256
§ 6.4 平面声源	268
§ 6.5 赫尔姆兹惠更斯积分公式	286
习题	289
第 7 章 声波的接收和散射	291
§ 7.1 声波的接收	291

§ 7.2 圆球和圆柱对声波的散射	295
§ 7.3 多普勒效应	303
§ 7.4 非均匀介质的散射	307
§ 7.5 球面波在界面上的反射和透射	312
§ 7.6 平面波在界面边缘上的衍射	321
习题	324
第 8 章 声波导	326
§ 8.1 声波导中的一维波	326
§ 8.2 层状声波导	335
§ 8.3 管状声波导的模式	345
习题	356
第 9 章 房间声学	358
§ 9.1 房间声场的模式	358
§ 9.2 统计声学 and 扩散声场	369
习题	374
第 10 章 低频声学系统的集总参数模型	376
§ 10.1 集总参数模型的基本概念	376
§ 10.2 亥姆霍兹共鸣器及其应用	382
§ 10.3 低频管道系统	387
习题	389
第 11 章 射线声学	391
§ 11.1 射线的基本概念	391
§ 11.2 均匀介质中的射线	397
§ 11.3 不均匀介质中的射线	402
§ 11.4 焦线附近的声场	407
§ 11.5 运动介质中的射线	418
习题	421

IV 目录

第 12 章 固体中的声波 422

§ 12.1 固体介质的弹性性质	422
§ 12.2 固体中的声波方程	434
§ 12.3 平面波在平界面上的反射和透射	450
§ 12.4 声波导	458
§ 12.5 声表面波	467
§ 12.6 细梁和薄板的低频近似理论	472
习题	484

第 13 章 换能器基础 486

§ 13.1 力学声学混合类比电路	487
§ 13.2 电声换能器	491
§ 13.3 电声换能器的一般理论	499
习题	503

第 14 章 非线性声学基础 504

§ 14.1 一维的非线性行波	504
§ 14.2 非线性声波的相互作用	510
§ 14.3 黏滞介质中的有限振幅波	513
习题	516

第 15 章 声学中的数值计算 517

§ 15.1 有限差分法	518
§ 15.2 有限元方法	530
§ 15.3 其他几种计算方法	536

1. 声的基本概念

声即声音,通常指人耳能够感觉到的空气振动。广义地说,声音是各种弹性介质中的机械波,包括人耳不能感知的振动。声音不能在真空中传播,只能通过具有弹性的介质传播。介质可以是各种气体、液体和固体。例如,潜在水里的人也能听到声音,附耳于铁轨上可以听到远处的火车声。

我们生活在充满声音的世界里。声和日常生活的关系非常密切。语音是人类交换和获取信息的重要手段。优美的音乐可以陶冶性情,噪声能破坏情绪,甚至影响健康。大自然中充满了各种各样的声音,如风雨雷电、各种动物的叫声、江河湖海的水声等,每时每刻地包围着我们。随着科学技术的发展,音响的录放处理、噪声控制、超声治疗和诊断、工业超声检测和加工、水下声呐、语音处理和通讯等声学技术在人类生活中的作用越来越大。

声音是由物体的振动产生的。产生声音的物体称为声源。声源的振动,先在其附近的局部介质中产生扰动,使一部分介质发生弹性变形,并开始离开平衡位置运动。这个扰动必然推动周围的介质,一方面使周围介质也发生运动,同时周围介质的反作用力又使先产生扰动的部分回到平衡位置。由于介质具有惯性,回到平衡位置后介质会“过冲”,产生相反方向的扰动。每一部分介质的扰动都会推动周围介质运动,同时周围介质产生反作用力,使运动的介质又趋向平衡位置。于是在介质弹性和惯性的联合作用下,声源附近的介质先在平衡位置附近振动,被它推动的周围介质随之振动,同时不断推动更远的介质产生振动。距离越远的介质的振动越为滞后。这样各部分的介质都在平衡位置附近振动,不断地压缩和膨胀,伴随着介质的密度和压强不断变化。图 0.1 是这个过程的示意图,这种由近及远向周围传播的机械振动就是声波。声波存在的空间是声场。声波传播的时候,介质的质点本身没有宏观的运动,只在平衡位置附近振动。当声波到达人耳时,引起鼓膜振动,产生听觉。声波牵涉到的是质点位移、速度、密度和压强等力学量,因此声波是机械波。

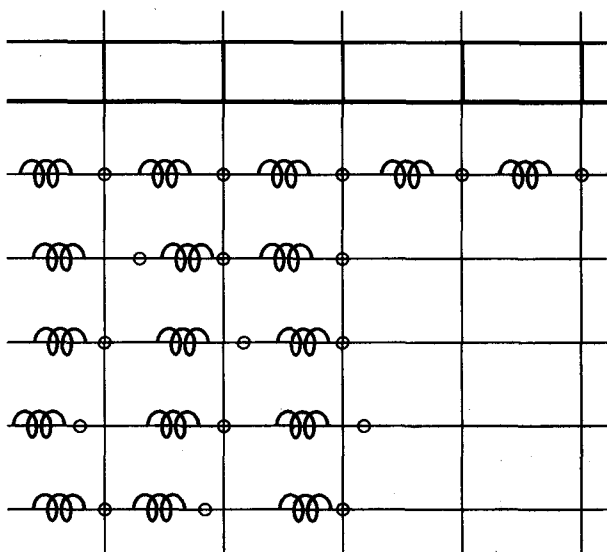


图 0.1 声波示意图

声音传播的时候,介质振动的频率即介质质点每秒钟振动的次数,是声音的频率 f ,它是声波的基本参数,单位是赫兹,简称赫,记作 Hz。频率的倒数是周期 $T = \frac{1}{f}$ 是完成一次振动所需要的时间。声波传播的速度 c 由介质的性质决定,常见的介质的声速从每秒几百米到几千米不等,最高的声速可以达到每秒上千米。声波的波长 λ 是声波振动一个周期时传播的距离,频率、声速和波长之间的关系是

$$c = f\lambda$$

图 0.2 是声波和电磁波的频率与波长之间的大致关系。图中横轴是频率,纵轴是波长。上面一条斜线是电磁波的频率与波长的关系,下面一条斜线是声波的频率与波长的关系。由于声波比电磁波的速度低 5 个数量级,因此声波的波长比同样频率的电磁波小得多。

现代声学研究的频段约为 $10^{-4} \sim 10^{14}$ Hz。频率低于 20 Hz 的声称为次声,大气中重力对于频率低于 0.003 Hz 的声波有重要的作用,这种声波称为重力波。至今人类测量到的次声的最低频率达到 0.000 1 Hz,周期是 3 h,波长是 3 400 km(地球直径大约是 13 000 km)。人耳能听到的声音的频率范围一般为 20 Hz ~ 20 kHz,称为可听声。频率高于 20 kHz 的声称为超声。狗、海豚、蝙蝠等动物可以听到一些超声。实验室里可以产生频率高达 10^{13} Hz 的声波,对应的波长为零点几纳米($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$),相当于原子间的距离。人虽然不能听到次声和超声,但是次声