理论声学

（上 册）

〔美〕P. M. 莫尔斯　K. U. 英格特 著

科 学 出 版 社

理论声学

（上册）

〔美〕P. M. 莫尔斯　K. U. 英格特 著

吕如榆　杨训仁 译

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书详尽地论述了现代声学各分支所涉及的理论基础. 不仅介绍用各种数学方法解决声学问题时的思路和演绎过程，而且还着重阐明问题的物理前提和数学结果的物理涵义，使读者能获得一个完整而清晰的概念. 本书对声波的辐射和传播、反射和透射、散射和衍射、吸收和频散等现象均有系统叙述；对现代声学有重要意义的声耦合现象作者特别重视，有专章讨论. 此外，作者首次系统地论述了近年发展起来的非线性声学、等离子体声学、运动媒质的声现象、声光电的相互作用等新的声学分支和课题. 本书可作为各声学分支硕士研究生第一学年的声学理论教材. 对大学本科声学专业的师生和从事声学研究工作的科研人员也有参考价值.

本书共分十四章，中译本分为两册出版. 上册包括第一至八章，是基础理论；下册包括第九至十四章，偏重于各声学分支的专题理论.

P. M. Morse K. U. Ingard

THEORETICAL ACOUSTICS

McGraw-Hill, 1968

理 论 声 学

（上 册）

〔美〕P. M. 莫尔斯 K. U. 英格特 著

吕如榆 杨训仁 译

责任编辑 赵惠芝

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年9月第一版 开本：850×1168 1/32

1984年9月第一次印刷 印张：17 3/4

印数：0001—6,000 字数：461,000

统一书号：13031·2651

本社书号：3651·13—3

定价： 3.25 元

译　者　序

大约六、七年以前，马大猷教授曾安排我们为声学研究所中级科技人员开设“理论声学”讲座．一方面给学员系统讲述现代声学的基本理论和数学方法；另一方面帮助他们提高外文阅读能力．该讲座即以本书为教材．

参加讲座的同志普遍反映颇有收益，一致认为《理论声学》这本书对声学研究工作很有参考价值．并且就我们所知，在近年出版的国内外声学著作中，本书在理论的系统性、反映现代声学各分支的全面性、以及论述问题的深入性和科学性等方面都是较好的一本．为此，我们把此书翻译出版，以供广大读者参考．

原书中有不少笔误，也有计算上的错误，我们都尽力作了更正，其中除了对重要差错作出相应的译注以外，为了避免过于烦琐，其他没有一一注明．但限于译者的水平和时间，本译本中仍难免有甚至是原则性的差错，希读者指正．

本书篇幅较大，所以中文版分为两册出版．上册属于基础声学的理论；下册属于专题声学有关的理论．上册第一至五章及序和符号汇编由吕如榆译，第六至八章由杨训仁译，全书由吕如榆在名词术语上作了统一．

马大猷教授给我们多方指导和鼓励，并审阅了部分译稿，我们深表感谢．

吕如榆　杨训仁

1982 年 12 月

作 者 序

从《振动与声》首次出版以后的三十年中，声学已向很多方面扩展．喷气年代的产物增加了对解决有关噪声发生和传播问题的积极性；现在水声的功能既具有经济价值，又具有科学和军事的重要性．为解决耦合声系统问题发展了新的数学方法；声学测量技术中相应的重大进展，使理论不只具有纯学术的意义．声学测量正日益增多地用于探测物质的性质；声场与电磁波之间的相互作用是等离子体物理学的一个重要部分；磁流体动力波是一种在气象学和天体物理学中重要性正在增长的现象．声学现象在科学和技术两方面都变得具有新的重要意义．

考虑到这些发展，修订《振动与声》确实难于定夺．《振动与声》的第二版仍可用作初级教程；简单地加入过多的必然是较高深的新材料，就会破坏原书的简洁性，从而可能会降低它对初学者的实用价值．因此，我们决定以新的书名写一部新书．前书中的某些内容予以保留，以作为较高深部分的初阶，并使本书尽可能完备．结果，本书就成为一部适用于研究生、而不适用于大学生的教程，并且希望它对愿意学习声学理论新发展的物理学家和工程师也有用处．同《振动与声》一样，每一章开始先讨论基本的物理概念和较初等的理论；后面各节可以作为以后重新细读或参考的材料．

当然，新材料的选取不得不受到单卷本篇幅的限制．实验设备和技术未予讨论；这领域由其他的书去承担．超声、水声和弹性固体中的波动等专门知识均未论及．本书内容主要局限于下列各方面课题：流体媒质中压缩波的产生、传播、吸收、反射和散射，这种波由粘滞性、热效应和固体边界所引起的畸变，以及通过由于这些波引起振动的墙和透声板产生的耦合．新的材料包括运动媒质声学、等离子体声学、非线性效应和声光间的相互作用．很多这

符 号 汇 编

本书中一般用斜体或正体的拉丁字母和希腊字母代表标量(实数或复数),用黑体的拉丁字母和希腊字母代表矢量,用大写德文字母代表矢量算符(并矢式,张量). 符号$|\,|$一般是某量“幅值”的意思;$|\mathbf{A}| = A$等于矢量$\mathbf{A}$各分量平方之和的平方根; $|f|$是复数$f = u + iv$虚部和实部平方之和的平方根. 星号“$*$”表示共轭复数, $f^* = u - iv$. 符号$\simeq$意思是“近似等于”; 符号$\to$意思是“趋于极限”; 符号$\equiv$意思是“按定义等于”. 对流体中的某个性质f, 表式df/dt代表跟随着流体运动时f的时间变化率;表式$\partial f/\partial t$代表空间中固定一点上f的时间变化率[见式(6.1.10)].

本符号表只收集一节以上要用到的符号. 本表只给出一个或几个常用意义, 后面的圆括号标明定义该符号的方程编号或章节编号(如定义不甚明显处,就用章节编号).

a 圆柱、圆盘或球的半径

A 振幅

b_e 电子漂移迁移率(12.1.1)

$B_m = |dh_m(\xi)/d\xi|$ 球的辐射振幅(7.2.15),附表 VIII

$\mathbf{B}$ 磁感应(12.3.1)

c 波速(4.1.3),(6.1.8)

c_φ 相速(9.1.17)

c_g 群速(9.1.18)

$c(\infty)$ 信号速度(节 9.1.6)

$\cos z$ 余弦函数(1.2.3), 附表 I 和 II

$\cosh z$ 双曲余弦(1.2.10),附表 I 和 II

C 振幅(1.2.8)

$C = 0.8905$ (7.3.2),(10.1.6)

C_a 声顺,(类比电容)(9.1.11),(9.1.21)

C_p 定压比热(6.1.3),(6.4.3)

C_v 定容比热(6.1.3),(6.4.3)

C_r　反射系数(6.3.5),(6.3.14)

d_v, d_h　热和粘滞性边界厚度 (6.4.31)

D　粘滞损耗率(6.4.10)

D_i　$\mathbf{D}$ 的分量(7.1.7)

D_{ij}　$\mathfrak{D}$的分量(6.4.8)

$\mathbf{D}$　偶极子强度(7.1.7),(7.1.13)

$\mathfrak{D}$　切变应力张量(6.4.8)

e　电子电荷(12.1.2)

$e = 2.71828\cdots$,　自然对数的底

E　系统的能量(1.3.2),内能 (节 6.4.11)

$E_m = |dH_m(u)/du|$　圆柱的辐射振幅(7.3.7),附表 V

E　电场强度(12.1.1)

f　一般函数,有时表力

$f(x,t)$　力密度(4.4.3)

F 或 $\mathbf{F}$　机械力(1.1.1),(6.2.11)

$F(\omega)$　$f(t)$ 的傅里叶变换(1.3.16)

$F_L(s)$　$f(t)$ 的拉普拉斯变换(1.3.23), 附表 2.1

F_0　F 的幅值

$g(x|x_0)$　无限长的弦或无限大的板的格临函数(4.4.11),(5.3.17)

$g_\omega(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = e^{ikR}/4\pi R$　无限空间的格临函数(7.2.31),(7.3.14)

G　一般的格临函数(4.4.7),(7.1.15)

G_ω　频率 $\omega/2\pi$ 的格临函数

h　板的半厚度(5.3.1),(10.1.21)

$h_n(x)$　球汉克耳函数(7.2.9),附表 VII

H　哈密顿函数(1.3.2),(4.1.10)

$H_m^{(1)}(z)$　柱汉克耳函数(10.1.37),附表 III

i　整数

$i = \sqrt{-1} = -j$ (节 1.2.3)

$\mathrm{Im}(x)$　双曲贝塞耳函数 (5.3.3),附表 IV

$\mathrm{Im}f$　f 的虚部

$\mathbf{I}$　声强(6.2.15)

$\mathcal{I}$　单位张量,$(\mathcal{I})_{ij} = \delta_{ij}$

j　整数

$j = -i$ （节 1.2.3)

j　电流密度(12.3.1)

$J_m(x)$　贝塞耳函数 (1.2.5),(5.2.20), 附表 III

$j_n(z)$　球贝塞耳函数(7.2.12), 附表 VII

$\mathbf{J}$　通量矢量(6.1.15)

$\mathfrak{S}$　动量流张量(6.2.10)

k　阻尼常数(2.2.1),(3.2.8)

$k = \omega/c = 2\pi/\lambda$　波数(4.3.4),(7.1.5)

$\mathbf{k}$　波数矢量(8.1.14)

K　弹簧劲度(2.1.1),(3.1.1)

K　导热率(6.4.1)

$\mathbf{K}$　空间傅里叶变换的波数矢量(7.1.31),(8.1.15)

l　弦的长度(4.3.9)

$l_h = k/\rho c C_p$　导热的特征长度(6.4.20)

$l_v = \mu/\rho c$　粘滞性的特征长度(6.4.20)

$\ln z$　z的自然对数

L　拉格朗日密度(4.1.8),(6.2.13)

L_a　声感(类比电感)(9.1.10),(9.1.22)

L_{bh}, L_{bv}　表面上的功率损失(6.4.37)

m　整数

m　质量(1.1.1)

M　分子量(6.1.4)

$M = V/c$　马赫数(11.1.1)

$\mathbf{M}$　波的动量(6.2.16)

n　整数

$n_m(z)$　球诺埃曼函数(7.2.12),附表 VII

N　单位体积的质点数目(12.1.2)

$N_m(x)$　诺埃曼函数(5.3.15),(7.3.2),附表 III

p　声压(6.1.2),有时也表弦的动量密度(4.1.9)

P　声压幅值

P　平衡压力(6.1.2)

$P_n(\eta)$　勒让德函数(7.2.4),表 VI

$\mathfrak{P}$　应力张量(6.2.10),(6.4.9)

q　流体的引进速率(7.1.19)

$q=\mu-i\nu$　矩形管的驻波常数(9.2.14),附表IV

$q=\sqrt{\kappa^2-K^2}$　(10.1.11),(10.1.23)

Q　杨氏模量(5.1.1)

$Q=\omega_0 m/R$　系统的 Q (2.2.4)

Q_{ij}　$\mathfrak{Q}$ 的分量(7.1.9)

$\mathfrak{Q}$　四极子强度张量(7.1.10)

r　离源的径向距离(7.1.1);偶而,在不会与球坐标产生混淆的场合,亦用于表示柱坐标的径向距离.

$\mathbf{r}$　离源的径向矢量

R　源同观察者之间的距离(7.1.6)

R　力阻,(2.2.1),(2.3.2)

R　雷诺数(11.3.28),(12.3.11)

R_a　声阻(类比电阻),(9.1.12),(9.1.23)

$\mathrm{Re} f$　f 的实部

$\mathbf{R}=\mathbf{r}-\mathbf{r}_0$　声源到观察点的径向矢量(7.1.6)

s　单极子声源的强度密度(7.1.22)

s　泊松比(5.3.1)

$\sin z$　正弦函数(1.2.3),附表I和II

$\sinh z$　双曲正弦(1.2.10),附表I和II

S　截面面积(5.1.1),(9.1.10)

S　熵的平衡值(6.4.12)

S　单极子声源的强度(7.1.4)

t　时间

T　平衡温度(6.1.3)

T　张力(4.1.3),(5.2.1)

T_p　振动的周期(1.3.4),(14.1.8)

$\mathfrak{T}=\mathfrak{I}+\mathfrak{D}$　(6.2.11),(7.1.20)

u　声速(6.1.6)

$u(x)$　单位阶跃函数(1.3.22)

U　动能(4.3.3)

U　速度幅值

v　速度

dv 体积元

V 势能(1.1.4)

V 体积

$V(u)$ 变分表示式(4.5.22)

$\mathbf{V}$ 流速

w 声能密度(6.2.15),(9.5.1)

w 离柱轴的径向距离(在用 r 有可能与球矢径 $\mathbf{r}$ 混淆的场合时用),(7.1.1)

$w = \nu + i\mu$ 圆柱管的驻波常数(9.2.25),附图 V

x, y, z 直角坐标

X_m 力抗(2.3.2)

y 弦的位移(4.1.1)

$Y_{mn}^{\sigma}(\theta, \varphi)$ 球调和函数(7.2.7)

$z = p/u = \rho c\zeta = \rho c/\beta$ 声阻抗率(6.3.4)

$Z_m = F/u$ 力阻抗(2.3.2),(4.4.17)

Z_a 声阻抗(类比阻抗),(9.1.10),(9.1.29)

Z_s 简单声源的声阻抗(7.1.11),(9.2.12)

$\alpha = c/c_s$ (10.1.5); $= c/c_p$(10.2.1)

α_m, β_m 贝塞耳函数的特征数(5.2.23),(9.2.23),表 X

β 热膨胀系数(6.1.1)

$\beta = \rho c/z = \xi - i\sigma$ 比声导纳(6.3.4),(7.4.9)

γ 板的波数参量(5.3.9),(10.1.21)

γ 比热比(6.1.3)

γ_m 柱散射的相移(7.3.7),表 V

δ 声波引起的密度改变量(6.1.2)

$\delta(x)$ 狄喇克 δ 函数(1.3.24)

δ_m 球散射的相移(7.2.15),表 VIII

$\delta_{mn} = 1$ 当 $m = n$ 时;$=0$ 当 $m \neq n$ 时;克罗内克 δ 算子(1.3.9)

∂ 偏微分符号

ϵ 介电常数(13.1.1)

ϵ 线密度(3.3.2),(4.1.3)

$\epsilon_m = 1$ 当 $m = 0$ 时;$=2$ 当 $m \neq 0$ 时;诺埃曼算子(7.2.7)

$\zeta = z/\rho c = \theta - i\chi$ 比声阻抗(6.3.4)

η 容积粘滞性系数(6.4.8),(6.4.47)

η　膜或板的位移(5.2.1),(10.1.21)

ϑ　入射角(6.3.5)

ϑ　球坐标中的方位角(7.1.1)

θ　比声阻(6.3.4)

κ　压缩率,通常指绝热压缩率 κ_s(6.1.3)

κ_T　等温压缩率(6.1.1)

κ　管中横向方式的本征值(9.2.6)

$\lambda = 2\pi/k = 2\pi c/\omega$　波长(4.3.4)

Λ　光的波长(13.1.11)

Λ_n　高次方式按管截面平均的平方振幅(9.2.8)

μ　粘滞系数(6.4.4)

μ　耦合常数(3.1.2)

μ_n　波的分布参量(9.2.19),附图 IV 和 V.

ν　动力粘滞率 $=\mu/\rho$, (节 11.3), (12.1.16)

$\nu = \omega/2\pi$　频率(节 1.2),(2.1.3)

ν_n　波的分布参量 (9.2.9),附图 IV 和 V

ξ　比声导(6.3.4)

$\pi = 3.14159\cdots$　圆的圆周与直径之比

Π　总辐射功率(7.1.5)

ρ　媒质的平均密度 (6.1.2)

ρ　体积密度(5.1.5)

σ　声波引起的熵的改变量(6.4.18)

σ　面密度(5.2.1)

σ　比声纳(6.3.4)

$\sum$　累加符号

Σ_s, Σ_a　吸收截面和散射截面(8.2.16),(8.2.17)

τ　声场的温度改变量(6.1.3)

τ　自相关函数的时差(1.3.13)

Υ　(自)相关函数(1.3.13),(7.1.32)

Υ　透射功率(4.5.9)

φ　球坐标中的轴向角(7.1.1)

ϕ　柱坐标中的轴向角(7.1.1)

ϕ_n　管截面高次方式的特征函数(9.3.24)

Φ　流阻(6.2.23)

Φ　相角(1.2.8),(9.1.3)

$\Phi_s(\vartheta)$　角分布因子(8.1.14),(8.2.15)

χ　比声抗(6.3.4)

χ　变分尝试函数(4.5.25),(9.3.13)

ψ_n　特征函数(5.2.16)

Ψ　速度势(6.2.9)

Ψ_n　管截面高次方式的特征函数(9.2.8)

$\omega = 2\pi\nu$　角频率,也称角速度(1.2.1),(节 1.2.2)

Ω　孔隙率(6.2.22)

$\Omega = 2\pi$　乘以光的频率(13.1.4)

$\nabla^2 = \mathrm{div}\cdot\mathrm{grad}$　拉普拉斯算符(5.2.3),(6.2.8),(7.1.3)

$\nabla \equiv \mathrm{grad}$　梯度算符(1.1.5),(7.1.1)

$\nabla \cdot \equiv \mathrm{div}$　散度算符(6.1.15),(7.1.2)

$\nabla \times \equiv \mathrm{curl}$　旋度算符(6.4.6)

$\mathbf{u}\cdot\nabla \equiv \mathbf{u}\cdot\mathrm{grad}$　指向性导数(6.1.14)

$$\nabla\cdot\mathfrak{D} = \sum_i \partial D_{ij}/\partial x_i;\ \mathfrak{D}\cdot\nabla = \sum_i \partial D_{ij}/\partial x_j$$

目　　录

第一章 引 论

1.1 定义和方法

本书的主题是应用经典动力学的方法描述声学现象．本书有两个目的：一是用叙述的和数学的形式，把声现象的特点提供声学领域的学生和专家；二是提供广泛的示例，说明数学物理有助于理解自然现象的某些侧面．

讨论任何科技问题，总有两个方面：物理方面，用日常语言说明事实，并用可由实验验证的方式说明结果；数学方面，利用微积分的符号逻辑表示出中间步骤．这两个方面同样重要，在每个问题中同时并用，相互印证．

解决本书所遇到的问题一般有三个步骤：问题提出，中间符号计算和答案说明．对求解问题的说明，并不总是研究中最容易的一环．我们必须对所研究的系统定出：哪些性质是重要的，哪些是可以略去的；哪些事实必须定量化，而哪些只需定性描述．当对本书中讨论的问题作了这些决定后，我们就能陈述如下：如此这般的一个物体系受到如此这般一组力的作用．

下一步是把这种语言陈述表达成一组方程，并解出这组方程(如有可能)．

然后又必须把数学解表述成物理陈述：如果我们对所讨论的系统加上如此这般的作用，那么系统将表现出如此这般的状态．重要的一点是要认识到，一组方程的数学解并不是物理问题的答案；我们必须把解表达成物理陈述，问题才算完成．

1.1.1 单位

力引起物体运动的改变这个物理概念，其相应的数学方程为