

(原著第二版)

环境声学 与 建筑声学

[日]前川善一郎
[丹麦]J·H·林德尔 著
[英]P·罗德

燕 翔 译

中国建筑工业出版社

013038738

X121
01

环境声学与建筑声学

(原著第二版)

[日] 前川善一郎
[丹麦] J·H·林德尔 著
[英] P·罗德

燕翔 译



X121
01

中国建筑工业出版社

807K00010

著作权合同登记图字：01-2011-5817号

图书在版编目 (CIP) 数据

环境声学 & 建筑声学 (原著第二版) / (日) 前川善一郎, (丹麦) 林德尔 (Rindel, J.H.), (英) 罗德 (Lord, P.) 著; 燕翔译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012.6

ISBN 978-7-112-14229-3

I. ①环… II. ①前…②林…③罗…④燕… III. ①环境声学
②建筑声学 IV. ①X121②TU112

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第064704号

Enviromental And Architectural Acoustics, 2e/Z. Maekawa, J.H. Rindel and P. Lord, ISBN 13978-0415449007

Copyright © 1993, 1997 Z. Maekawa and P. Lord

Copyright © 2011 Z. Maekawa, J.H. Rindel and P. Lord

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by Taylor & Francis Group.

Chinese Translation Copyright © 2013 China Architecture & Building Press

China Architecture & Building Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout China.No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由英国 Taylor & Francis Group 出版公司授权中国建筑工业出版社独家出版并在中国销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the Couer are unauthorized and illegal.

本书贴有 Taylor & Francis Group 出版公司的防伪标签, 无标签者不得销售

责任编辑: 董苏华 责任设计: 董建平 责任校对: 陈晶晶 刘 钰

环境声学 & 建筑声学 (原著第二版)

[日] 前川善一郎

[丹麦] J·H·林德尔 著

[英] P·罗德

燕翔 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×960毫米 1/16 印张: 18 字数: 359千字

2013年4月第一版 2013年4月第一次印刷

定价: 58.00元

ISBN 978-7-112-14229-3

(22269)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

自本书第一版以来，15年转瞬即过。这期间，声学技术进步颇多，主要得益于数字计算机的辉煌成就。因此，我欣然接受了出版社编著再版的建议，以涵盖计算机技术的发展。尽管如此，物理声学理论并未改变，而数字技术仅是一种出色的研究工具，难于滴水不漏地用在本书的所有角落。本书的目标一如既往，正如上一版前言中所述，让所有读者都能很好地领略声学基础。

林德尔（J.H. Rindel）教授作为一位新的合著者加入进来是我的荣幸，他对第一版有兴趣，并发给我诸多改进建议。我相信本书比前版在主题上范围更广，深度更深。

我两位年轻的同事，神户大学（Kobe University）的森本（M. Morimoto）教授和阪上（K. Sakagami）副教授，我们共同探讨了许多有价值的问题。他们的论文，包括他们各自研究的结论，受益匪浅。

衷心地感谢另一位合著者，罗德（P. Lord）教授，他耐心的评阅和英文的校对是本书的关键。

本书中全部图表，除了另有标注外，再版均得到共立出版社（Kyouritu-Shuppan Co. Ltd）的许可。

前川善一郎（Z. Maekawa）

于日本大阪

目 录

前 言

第 1 章 声波与听觉基本原理	1
1.1 声波	1
1.2 声速	2
1.3 阻抗	4
1.4 声强与声强级	4
1.5 反射、吸收与透射	8
1.6 干涉、拍与驻波	11
1.7 混响	12
1.8 响度与响度级	13
1.9 听觉范围	14
1.10 音高与音调	15
1.11 声掩蔽	17
1.12 双耳效应及声音定位	18
1.13 语音特性	18
1.14 语言可懂度	20
第 1 章 习题	21
第 2 章 噪声振动的测量与评价	22
2.1 声音的测量	22
2.2 噪声评价	27
2.3 振动的测量	33
2.4 振动污染及其分布	36
2.5 次声和低频噪声	37
第 2 章 习题	38
第 3 章 室内声学	39
3.1 室内声场	39

3.2	房间共振的简正模式	39
3.3	混响时间	46
3.4	室内声能分布	51
3.5	回声及其他特殊现象	54
3.6	室内声学的测量与评价	55
	第3章 习题	70
第4章	材料和结构的吸声	71
4.1	吸声机理的类型	71
4.2	吸声系数的测量与声阻抗	72
4.3	多孔吸声特性	79
4.4	板/膜型吸声特性	82
4.5	单共振器吸声体的特性	84
4.6	穿孔或开槽板吸声结构	85
4.7	商业化产品、设计与施工	89
4.8	特殊的吸声装置	90
	第4章 习题	91
第5章	室外声传播	92
5.1	室外声传播与噪声	92
5.2	声屏障降噪	99
	第5章 习题	104
第6章	空气声的隔绝	105
6.1	隔声量	105
6.2	空气声隔声的测量与评价	108
6.3	单层墙隔声质量定律	110
6.4	隔声的吻合效应	113
6.5	单层墙的频率特性	116
6.6	双层墙的隔声	117
6.7	孔洞和缝隙的影响	121
6.8	侧向传声	123
6.9	通风管中的降噪	125
	第6章 习题	131

第 7 章 结构噪声与振动的隔离	132
7.1 结构声的传播与辐射	132
7.2 结构噪声的降低	136
7.3 撞击声隔绝的测量与分级	139
7.4 隔振原理	142
7.5 设备和机械系统的振动控制	146
7.6 浮筑结构	147
第 7 章 习题	148
第 8 章 环境中的噪声与振动控制	150
8.1 基本策略	150
8.2 所需降噪量的确定	151
8.3 噪声振动控制的组织	153
8.4 噪声控制规划举例	156
第 8 章 习题	162
第 9 章 厅堂音质设计	164
9.1 设计目标	164
9.2 厅堂体形设计	164
9.3 混响设计	172
9.4 计算机模拟与音质模型分析	173
9.5 室内音质设计实例	179
第 9 章 习题	184
第 10 章 电声系统	185
10.1 电声系统的功能和目的	185
10.2 扩声系统概述	187
10.3 电声设备	194
10.4 啸叫保护	198
10.5 建筑规划与设计	199
10.6 电声系统的性能测试	201
第 10 章 习题	202

第 11 章 补遗	203
11.1 波动方程	203
11.2 电气系统、机械系统和声学系统的类比与时间常数	208
11.3 傅立叶变换与相关函数	215
11.4 听觉器官概述	219
11.5 计算响度级 (A) 的兹维克法	221
11.6 计算响度级 (B) 的斯蒂文斯法	223
11.7 噪度的计算	224
11.8 耦合房间的混响	225
11.9 测量混响时间的施罗德法	226
11.10 多层吸声物的吸声特性	227
11.11 史密斯圆图与驻波法	230
11.12 不同国家建筑隔声标准	233
11.13 声源的功率级与声源指向性测量	236
11.14 沿屏障及其他障碍物的声绕射	238
11.15 统计能量分析原理 (SEA)	245
11.16 人对声环境的主观评价	246
11.17 室外声环境设计	247
附录	249
参考资料	262
索引	272
译后记	278

声音在物理上视为一种波动，可在各种弹性介质中传播，称作声波。另一方面，声音也是因声波刺激引起的一种人耳主观感觉，称之为听觉。听觉属于心理学范畴，听觉现象是前沿的研究课题。

1.1 声波

声波可在兼具惯性和弹性的介质中传播，声音传播经过的空间叫做声场。声场中，介质质点在初始位置附近做重复往返运动。在介质中，质点会引起相邻质点的位移，用 ξ 表示，这种反复的运动产生了波动。也就是，介质中质点之间可传播振动。质点运动的方向与声波传播的方向一致，则称之为纵波。如图 1.1 所示，质点在某处聚集时产生高压强，而在邻近点处，质点被分散，从而降低了压强。波动中交替出现稠密与稀疏两类点位，因此，在某固定点，压强会随着交替到达的稠密与稀疏的波形成高低变化，我们将这种压强的波动称为声压。介质质点运动的速度称作质点速度，用 v 表示。

在 1s 内声波振动的次数称作频率，一般用 f 表示，单位是赫兹 (Hz)，声音 1s 内传播的距离称为声速，用 c (ms^{-1}) 表示，如果我们用 λ 代表波长，那么则有：

$$\lambda = c/f \text{ (m)} \tag{1.1}$$

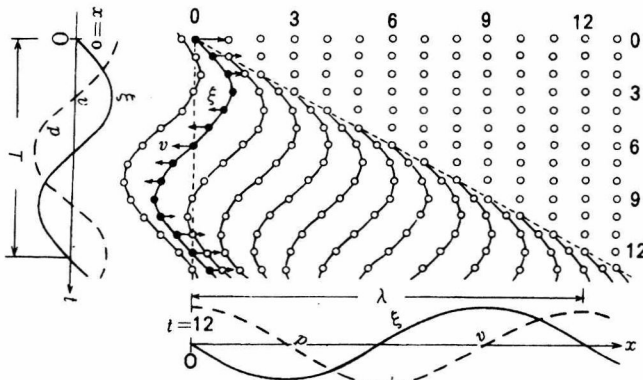


图 1.1 质点运动与波的传播

ξ : 质点位移; v : 质点速度; p : 声压级; λ : 波长; T : 周期

如果用数学方程表达波动,沿 x 方向空气质点移动位移 ξ 可用以下公式表示:

$$\xi = AF(t - x/c) \quad (1.2)$$

式中, F 是个函数,包含两个独立变量,分别为时间 t 和距离 x ; 波速 c 和振幅 A 是恒量。当声源产生简谐波动时,方程变为:

$$\xi = A \cos \omega(t - x/c) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.3)$$

式中, ω 是角频率, $\omega = 2\pi f$ 且 $k = \omega/c$ 。声压和质点速度也可用同样的形式表示,式(1.3)中,当 t 变为 $(t+1s)$, x 变为 $(x+c \times 1s)$ 时,

$$\xi = A \cos \omega [(t+1) - (x+c)/c] = A \cos \omega(t - x/c)$$

因此,表达形式并没有改变。这表明时间一秒内波动变化传递距离为 c ,因此 c 是声速。如果我们考虑某一处,例如,当式(1.3)中 $x=0$ 时,则 $\xi = A \cos \omega t$,这时是正弦波。同样,假设在某时刻,例如 $t=0$, $\xi = A \cos(-kx)$,表明各个位置上运动质点,形成了正弦图谱。当 $kx = 2\pi(x/\lambda)$ 在 (x/λ) 为整数值处, ξ 值相同,以 λ 为间隔的质点具有相同的相位。 $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 称为波长常数或波数。

[3] 波动的数学描述中,一般都是用复数表示,例如,声压 p 可表示为:

$$p = P e^{j\omega(t-x/c)} = P e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.4)$$

式中, P 是声压幅度, $j = \sqrt{-1}$, 利用欧拉公式有:

$$p = P [\cos(\omega t - kx) + j \sin(\omega t - kx)]$$

因此,如果取其实部,关系式与式(1.3)形式相同,代表了该物理现象,而虚部可视为方便计算的附加项。

当声源尺寸相对于波长较小时,从声源发出的声波以球形方式传播,这称之为球面波,声源可当做点声源。就尺寸有限的实际声源而言,当听者与声源的距离和声源尺寸相比足够大时,可当做点声源。当声源极远时,波阵面可大致看做平面,声音可看做平面波。严格地讲,平面波只沿一个方向传播,垂直于传播方向平面上的声压和质点速度是相同的,且相位相同。

1.2 声速

密度为 ρ , 体积弹性模量为 κ 的流体中,声速为:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} (\text{ms}^{-1}) \quad (1.5)$$

气体的情况下，与声波相关的压强变化是绝热的，等容恒压条件下的比热为 γ (见 11.1 节)，有：

$$\kappa = \gamma P_0 \quad (1.6)$$

式中， P_0 为标准大气压。在 0°C ，一个标准大气压下，空气中 $\gamma=1.41$, $P=101300\text{Nm}^{-2}=1013\text{mbar}$, $\rho=1.29\text{kgm}^{-3}$, $c=331.5\text{ms}^{-1}$ 。

ρ 随温度而变化，而大气压是恒定的，温度为 $t^\circ\text{C}$ ，声速为：

$$c=331.5 \left(1 + \frac{t}{273} \right)^{1/2} \approx 331.5 + 0.61t \quad (\text{ms}^{-1}) \quad (1.7)$$

不同材料的特性阻抗及声速

表 1.1

[4]

材料	声速 c (ms^{-1})	密度 ρ (kgm^{-3})	特性阻抗 ρc ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
空气 (1 大气压 20°C)	343.5	1.205	415
水	1460	1000	146×10^4
橡胶	35—230	1010—1250	$3.5—28 \times 10^4$
软木	480	240	12×10^4
木 (松木、柏木)	3300	400—700	$1.3—2.3 \times 10^6$
钢	5000	7800	39.0×10^6
混凝土	3500—5000	2000—2600	$7—13 \times 10^6$
玻璃	4000—5000	2500—5000	$10—25 \times 10^6$
大理石	3800	2600	9.9×10^6
砂	1400—2600	1600	$2.3—4.2 \times 10^6$

经共立公出版公司 (Kyouritsu-Shuppan) 许可复制。

因此， 340ms^{-1} 可作为常温下的声速，湿度的影响可忽略不计。固体的情况下，密度是 ρ ，杨氏模量为 E ，纵波的波速可用以下形式表示：

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.8)$$

如表 1.1 所示，声音在固体中传播的声速大于在空气中的传播速度 (橡胶除外，因此橡胶可作为一种特殊的建筑材料使用)。

使用式 (1.8)，在合适条件下测出 c 值，可计算出材料中杨氏模量 E 。固体中，不仅可产生纵波，也会产生横波，因此，每一部分建筑结构中都包含着复杂的振动 (见第 7 章)。

1.3 阻抗

一般的,某点处的交变作用将产生相应的效应,有,作用/效应 $=Z$,称作这一点的阻抗。例如,由于电路中电压 E 产生交变电流 I 的交变作用,则有,

$$E/I=Z_e \quad (1.9a)$$

[5] 这就是电路中该点的电阻抗。如果 E 是恒定电压, I 是直流电流,这个表达式可简化为欧姆定律。

同理在机械振动系统中,在外力 F 的作用下,形成了速度 v ,则有,

$$F/v=Z_m \quad (1.9b)$$

我们称之为机械阻抗。

对于声音来说,声压 p 为作用量,产生质点速度 v ,

$$p/v=Z \quad (1.9c)$$

这称为声波在该点的阻抗。

严格来讲,所考虑的声压和质点速度都在单位面积上时,式(1.9c)中, Z 即为比声阻抗或声阻抗密度。假设管道横截面面积是 S ,声压 p 产生体积速度是 Sv ,则有,

$$p/Sv=Z_A \quad (1.10)$$

称作声阻抗(见11.2节)。与振动有关的阻抗可用复数表示,这是因为作用和效果相位通常不同,由此,

$$Z=R+jX=|Z|e^{j\varphi}=|Z|\angle\varphi \quad (1.11)$$

式中,绝对值 $|Z|=\sqrt{R^2+X^2}$,相位角 $\varphi=\tan^{-1}(X/R)$ 。

在无任何能量损失的介质中,平面波以自由空间形式传播,其声阻抗总是实数,由介质密度 ρ 和声速 c 决定(见11.1节),

$$Z=p/v=\rho c \quad (1.12)$$

(Z 是介质的特有值),称作特征阻抗或比声阻抗。标准状态下,空气特征阻抗是 $415\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$, (单位 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 称作瑞利),不同材料的特征阻抗值见表1.1。阻抗的倒数称作导纳。

[6] 1.4 声强与声强级

A. 声强

单位时间内(1s),通过垂直于声波传播方向的单位面积的声能,称作声强。这

也可当做单位面积能量。如上所述,若用电压代替声压,电流代表质点速度,则声强相当于电功率,这时传声途径可与电路类比。众所周知,电功率 = 电流 × 电压,因此声强 I 可以表示为:

$$I = pv \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (1.13)$$

由式 (1.12),

$$I = p^2/\rho c = \rho c v^2 \quad (1.14)$$

因此很明显,声强既与声压的平方成正比,也与质点速度的平方成正比。

式 (1.13) 与式 (1.14) 中,与交流电流一样,声压及质点速度都是有效值。有效值是瞬时值的均方根,图 1.2 中所示,由于平方的缘故,有效值不存在负数。振幅 A , 周期 T 的正弦波,有效值 RMS 表示如下:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (A \cos \omega t)^2 dt} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0.707A \quad (1.15)$$

除特别声明外,声压及质点速度的幅值用有效值表示。

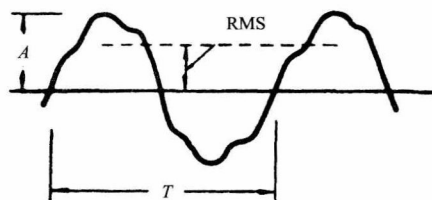


图 1.2. 有效值

B. 声能密度

平面波的声强 I 等于单位面积上 1s 声传播 c (m) 的能量,该空间的声能密度 E 可表示为,

$$E = I/c = p^2/\rho c^2 \quad (\text{Wsm}^{-3} = \text{Jm}^{-3}) \quad (1.16)$$

式中, c 为声速。采用声能密度可不考虑方向,描述房间中反射声来自各个方向的声场时,十分方便。

C. 分贝标度

实际应用中,我们采用对数刻度测量声强和声压,其单位是分贝 (dB)。分贝源自人耳的听觉,人耳感觉声强的变化范围极大,最大能量与最小能量之比高于 $10^{13} : 1$,且这种感觉与刺激声强的对数成正比(韦伯-费希纳定律 Weber-Fechner's Law, 见 1.8C)。

最初, 该单位表示了 W_1 和 W_0 两个能量比的对数, 称作贝尔, 但是贝尔过于粗略, 而采用其十分之一做单位, 称作分贝 (dB)。

$$\text{分贝值} = 10 \lg \left(\frac{W_1}{W_0} \right) = 10 \lg (n) \quad (\text{dB}) \quad (1.17a)$$

这不仅可用于相对比较, 还可以参考某标准值表示其绝对值。用标准值 $W_0 = 10^{-12}W$, 则声功率 W 可表示为:

$$\text{声功率级, } L_w = 10 \lg \left(\frac{W}{10^{-12}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.17b)$$

通常我们把对数刻度上的量级称之为“级”。

因此, 声强级 I (Wm^{-2}) 表示如下:

$$\text{声强级} = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.18)$$

式中, $I_0 = 10^{-12}Wm^{-2}$ 。

则由式 (1.14), 声压级 L_p 可由以下公式得出:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.19)$$

[8]

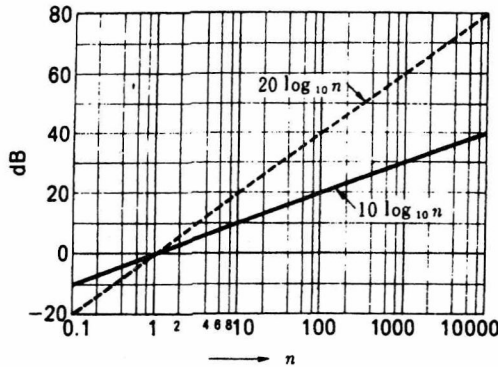


图 1.3 分贝

式中, $p_0 = 2 \times 10^{-5}Nm^{-2} = 20 \mu Pa$, 是在空气状态下的标准值。因为声压比声强更容易测量。所以我们一般用声压级来表示声场。当然, 在自由声场中平面波的声压级与声强级相等。其他情况下, 使用声压级来衡量声音的大小已成为惯例。计算室内声场时, 声能密度采用如下直接比较方式:

$$\text{声能密度级} = 10 \lg \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.20)$$

为计算方便, E_0 可采用任意值。如上所述, 虽然使用 dB 表示数值, 但是应明确地定义参考值。

【例 1.1】图 1.3 中, 给出了 $L_1=10 \lg n$ (dB) $L_2=20 \lg n$ 和 (dB) 的图示。

D. 使用分贝进行能量求和与平均

(a) 设两频谱无规的声源同时发声, 噪声值分别为 L_1 (dB) 和 L_2 (dB), 其和为 L_3 (dB), 声能密度分别为 E_1 和 E_2 , 有 $E_3=E_1+E_2$, 则,

$$L_3=10 \lg \left(\frac{E_3}{E_0} \right) = 10 \lg \left(\frac{E_1 + E_2}{E_0} \right) = 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad (1.21)$$

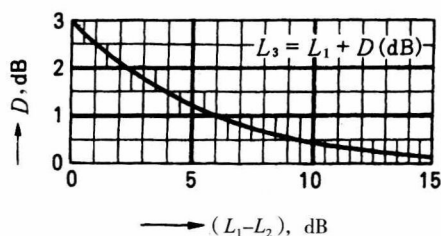


图 1.4 L_1 (dB) 与 L_2 (dB) 的和, $L_1 > L_2$

使用图 1.4 可使求和计算更加简便。然而, 如果 L_1 (dB) 和 L_2 (dB) 含有频率相等或相近的纯音成分, 因干涉效应 (见 1.6 节), 上式就不适用了。读者必须注意声音的性质。

【例 1.2】当采用 $L_3=L_1+D$ (dB), 来表示声能和 L_3 时, 按上述表达式 (1.21), 且 $L_1 > L_2$, 可得 D 与 L_2-L_1 的关系:

$$D=10 \lg (1 + 10^{-(L_1-L_2)/10})$$

由此得出图 1.4。

(b) 存在 n 个声源时, 声压级为 L_n (dB), 声能密度为 E_n , 则平均声压级 \bar{L} 为,

$$\bar{L}=10 \lg \left(\frac{E_1+E_2+\cdots+E_n}{nE_0} \right) \quad (1.22a)$$

或用声压 p_n ,

$$\bar{L}=10 \lg \left(\frac{p_1^2+p_2^2+\cdots+p_n^2}{np_0^2} \right) \quad (1.22b)$$

实际应用中使用:

$$\bar{L}=10 \lg \frac{1}{n} (10^{(L_1/10)} + 10^{(L_2/10)} + \cdots + 10^{(L_n/10)}) \quad (1.22c)$$

当 L_n 的最大值和最小值相差不超过 3—5dB 时, 使用算术平均值代替 \bar{L} , 误差可在 0.3—0.7dB 以内。

[10]

1.5 反射、吸收与透射

A. 吸声系数与传声损失

声音撞击到墙体时，其能量被分为三个部分。若入射总能量为 E_i ，则一部分被反射回来，其声能为 E_r ；一部分被墙体吸收，其能量为 E_α ，其余部分透射过去，其能量为 E_t ，如图 1.5，可表示为：

$$E_i = E_r + E_\alpha + E_t$$

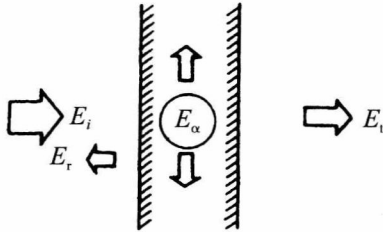


图 1.5 反射，吸收与透射

由此，吸声系数 α 定义为：

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{E_\alpha - E_t}{E_i} \quad (1.23)$$

其含义是，除了反射的声能，其余的声能都可被认为是吸收的。透射系数 τ 定义如下：

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} \quad (1.24)$$

也可用分贝表示，叫做传声损失或声衰减指数，分别用 TL 或 R 表示，定义如下：

$$TL \text{ (或 } R) = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{E_i}{E_t} \text{ (dB)} \quad (1.25)$$

实际应用中，该术语通常用来描述隔声。

【例 1.3】如图 1.5 所示，某打开的窗户，则图 1.5 中的 $E_r=0$ ， $E_\alpha=0$ 。因此， $E_i=E_t$ ，吸收系数 $\alpha=1$ ，透射系数 $\tau=1$ ，表示完全透射，即 $TL=0\text{dB}$ 。这时传声损失 $TL=0\text{dB}$ 。此例可见，吸声系数很大的材料，隔声效果不见得好。

[11]

B. 反射、折射与绕射

(a) 与光波类似，平面声波入射到两种不同介质的界面时，同样会产生反射和折射现象。

如图 1.6 (a)，入射角 θ_i = 反射角 θ_r ，对于折射角 θ_t 则有，

$$c_1 \sin \theta_i = c_2 \sin \theta_t \quad (1.26)$$

如果 $c_1 < c_2$ ，那么，

$$\theta_i \geq \sin^{-1}(c_1/c_2) \quad (1.27)$$

条件下，发生全反射。这就是惠更斯原理（Huygens' principle）

基于此原理，图 1.6 (b) 以图示的方法给出了声音的传播路径及波阵面。其中， I_1 和 I_2 为镜像声源，显示声音传播路径的线称作声线，连接具有相同相位振动质点的表面称为波阵面。从点声源发出的声波在 t 秒后形成的波阵面是以镜像声源或声源为中心， ct 为半径的球面。不过，只有反射面与波长相比足够大时，这些反射原理才是有效的。

(b) 声波在空间传播时遇到障碍物，声波仍能绕到障碍物的后面，如图 1.7 所示，这种现象叫做绕射。绕射产生的声衰减取决于障碍物尺寸的大小。与物体尺寸相比，波长越短，声衰减越大，反之亦然。衰减理论将在后文详述（见 11.14 节）。当反射面不平整时，即使声波波长非常短，只要凹凸尺寸与声波波长相比很小时，凹下或凸起的部分对声波的反射几乎没有任何影响，仍为镜面反射。光学中，光波波长很短，产生的阴影非常明显，用绘图可表示反射路径，然而在声学中，声波波长相对较长（可听声波长 2—17cm），与实际物体尺寸相近，所以声场非常复杂。

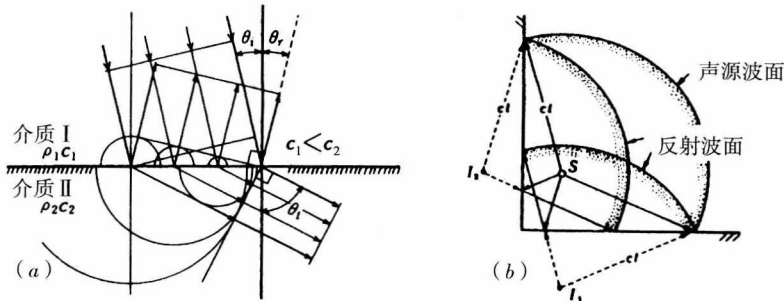


图 1.6 (a) 惠更斯原理的反射与折射示意图
(b) 直达声与反射声的波阵面

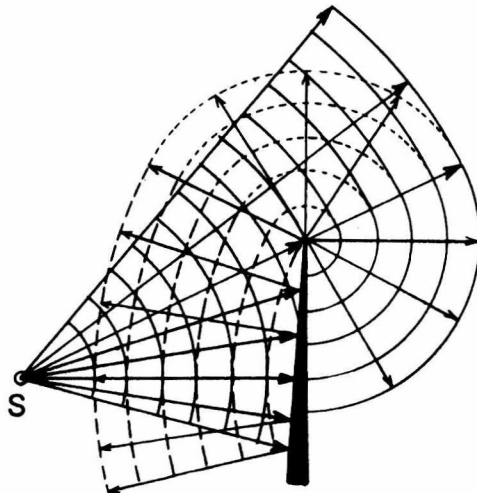


图 1.7 屏障的声反射与绕射

[12]