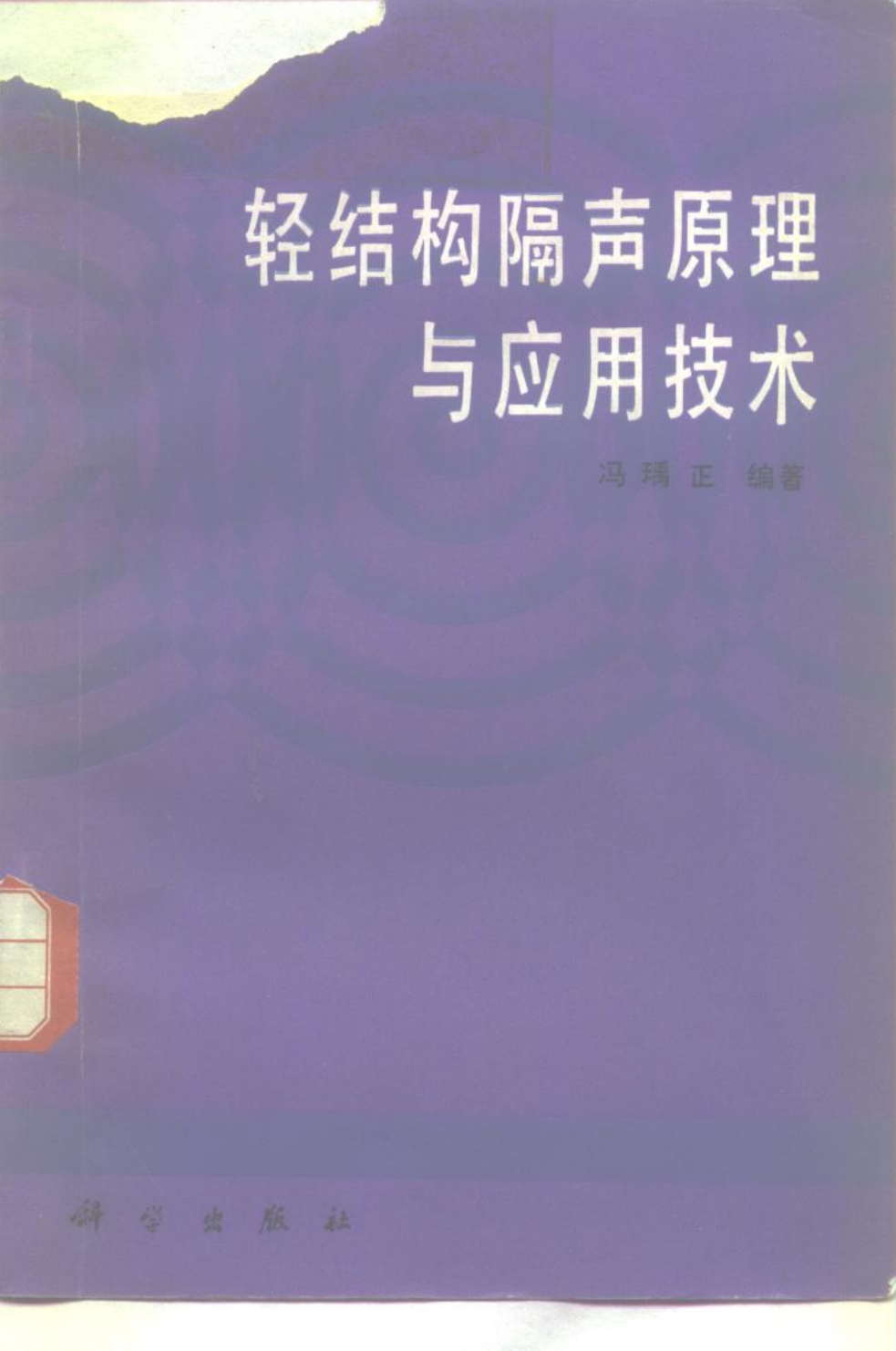




轻结构隔声原理 与应用技术

冯珉正 编著



科学出版社

轻结构隔声原理与应用技术

冯瑞正 编著

科 学 出 版 社

1987

内 容 简 介

本书清楚、简要地阐明了轻结构的隔声理论,重点介绍各种隔声结构、器件的设计与计算方法。全书共分九章,主要内容有:单、双层墙、障板、门、窗和孔缝等的隔声理论;各种测量和评价隔声的方法;近年来发展较快的隔声罩与隔声间的设计与技术问题,一些典型的结构;固体声的隔绝问题;与隔声设计有关的吸声与通风消声器问题。

本书可供从事科研、建筑、机械、环保、劳保的科技人员及大专院校师生参考。

轻结构隔声原理与应用技术

冯瑀正 编著

责任编辑 赵惠芝 李秀清

科学出版社 出版

北京朝阳区门内大街157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

*

1987年2月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年2月第一次印刷 印张:9 3/8

印数:0001—3,500 字数:213,000

统一书号:15031·3398

本社书号:4204·13—3

定价:2.20 元

前 言

在现代化的城市中，人们每天工作和生活在一个噪声的环境里。这些噪声包括了人群活动的社会噪声和交通运输噪声以及工业设备噪声。要想解决这些噪声问题，寻求一个安静舒适的环境，无疑要进行隔声。因此，隔声方法是降低各种噪声的重要手段之一。

五十年代末期，由伦敦（A. London）和克莱末（L. Cremer）等所完成的、以质量定律为代表的隔声理论，是前期隔声理论与实验工作的总结，但运用这些理论来解决现代的多层复合结构的隔声问题，还必须要考虑由于具体问题而产生的多种因素的影响。如城市高层建筑的隔声结构、运载器的隔声舱壁、工业设备的防声外壳、具有隔振阻尼的隔声罩、通风吸声的隔声室等，都有其特殊的隔声问题。有关这些问题的理论研究与实际应用的报道多分散在各种著作与文献之中，尚缺乏专门的论著。

作者从五十年代末期开始从事专题的隔声与工业噪声控制方面的研究工作，并致力于解决一些工程上的技术问题，在研究与实践的基础上结合所收集到的国内外有关文献与资料，写成此书，希望它对解决各种行业中遇到的隔声问题，都有一定的参考价值。本书在注意保持隔声理论完整性的同时，还详尽介绍了各种隔声结构和器件的设计与计算方法。为了满足建筑、机械、环境保护、劳动保护和专业厂家等方面实际的需求，本书有目的地选择了一些已经取得较好效果的应用实例，供参考与选用。

全书共分九章,第一至五章系统讨论有关单、双层墙,障板,门,窗和孔缝等的隔声理论。第六章介绍各种测量和评价隔声的方法。第七章讨论近年来发展较快的隔声罩与隔声间的设计与技术问题,并介绍一些典型的结构。第八章讨论固体声的隔绝问题,包括隔振、阻尼与撞击声的传播、控制等。第九章简略介绍与隔声设计有关的吸声与通风消声器问题。最后给出了某些隔声标准、实物照片与文献目录。

南京大学声学研究所沙家正同志对本书进行了审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

冯瑞正

1985年7月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 隔声研究概况	1
§ 1.2 声学术语及表达隔声的量	3
§ 1.3 声波在分层媒质中的传播	7
第二章 单层墙的隔声理论	11
§ 2.1 单层墙隔声的基本解	11
§ 2.2 柔软板的质量定律	13
§ 2.3 符合效应与伦敦力阻	16
§ 2.4 隔声量计算公式	19
§ 2.5 单层墙隔声量的频率特性	24
§ 2.6 经验的质量定律	28
§ 2.7 多孔材料的隔声特性	31
第三章 双层墙的隔声	40
§ 3.1 同质量双层墙的隔声理论	40
§ 3.2 不同质量双层墙的隔声理论	44
§ 3.3 双层墙的低频共振频率与符合效应	50
§ 3.4 影响双层墙隔声的其它因素	52
§ 3.5 双层墙隔声的理论曲线	56
§ 3.6 双层墙隔声的经验公式与计算方法	60
§ 3.7 附加多孔吸声层的振动板的隔声	64
§ 3.8 垂直与无规入射隔声量的对比	69
第四章 用统计能量分析方法计算结构隔声	71
§ 4.1 概况	71
§ 4.2 统计能量分析方法的描述	72
§ 4.3 悬挂板的声辐射与单墙隔声	75

§ 4.4	用统计能量分析方法解决楼板与双层墙隔声问题	78
§ 4.5	与传统方法的比较	82
第五章	特殊结构的隔声	83
§ 5.1	障板的隔声	83
§ 5.2	孔缝的透声	91
§ 5.3	窗的隔声	96
§ 5.4	门的隔声	115
§ 5.5	管道隔声	123
第六章	隔声测量、评价与标准	127
§ 6.1	构件隔声的测量	127
§ 6.2	构件隔声的单值评价法	148
第七章	隔声器件	157
§ 7.1	隔声罩	157
§ 7.2	隔声间	182
§ 7.3	护听器	196
第八章	隔振、阻尼及撞击声的降低	201
§ 8.1	隔振	201
§ 8.2	阻尼	213
§ 8.3	固体声与撞击声的隔绝	218
第九章	吸声结构与消声器	232
§ 9.1	吸声材料与结构	232
§ 9.2	消声器	247
附录		268
(一)	城市区域环境噪声标准	268
(二)	工业企业噪声卫生标准	269
(三)	住宅隔声标准	271
(四)	标准噪声源	273
(五)	住宅现场隔声简易测试方法	275
(六)	常用计权特性曲线 (<i>A</i> 、 <i>B</i> 、 <i>C</i> 、 <i>D</i>) 数值表	281
(七)	隔声测量设备与隔声器件(照片)	282
参考文献		290

第一章 概 论

§ 1.1 隔声研究概况

(一) 隔声结构

隔声是研究在各种结构或设备中声传递现象的一门理论与技术，也就是研究如何防止外部的声音传入一个封闭空间的内部，或防止内部的声音传到外部。隔声问题主要包括以下几个方面：

墙或板的传声，

楼板的撞击噪声与固体传声，

管道与孔缝的漏声，

专用隔声器件(如隔声罩、门、窗和护耳器等)。

构成隔声结构的材料大致可分为三类：密实板，如混凝土板、钢板、木板和塑料板等；多孔板，如玻璃棉、矿棉、泡沫塑料和毛毡等；减振板，如阻尼板、橡胶板和软木板等。

(二) 隔声理论发展简况

十九世纪，数学家泊松(S. D. Poisson)和拉普拉斯(P. S. Laplace)等曾对声波在不均匀媒质中的传播问题进行过理论计算。后来，瑞利(Lord Rayleigh)总结了前人的研究成果并有所发展，在他的名著《声理论》(Theory of Sound)一书中提出了不可压缩无限大墙的隔声理论，并得到薄墙的“质量定律”。

1942年，克来末提出斜入射声波与板中弯曲波符合的弯

曲波理论,解释了实际构件的隔声低谷现象,并进一步解决了楼板的撞击噪声辐射、板中固体声的传播等理论问题。1948—1950年间,伦敦提出了混响声场中单、双层墙的隔声理论,从而解决了声波在无规入射情况下的墙的隔声问题。因此,克来末和伦敦两人的研究工作为现代隔声理论奠定了基础。

后来,哥式雷(K. Gösele)从实验上验证并促进了隔声理论的发展。以后瓦特斯(B. C. Watters)用三折线(隔声平台)方法简化了构件隔声的计算,得到了更有实用价值的结果。黑克尔(M. Heckl)对墙尺寸 L 的影响进行了研究,得出声波频率在符合临界频率以上时,墙的隔声将减少 $10 \lg L$ (dB)的结论。

札鲍罗夫(В. И. Заборов)将作用于隔板上的声压分解为对称与反对称的两个部分,利用材料力学与弹性力学的方法研究了各种隔声结构,从而得到了系统的理论结果。劳恩(R. H. Lyon)等人利用统计能量分析方法,成功地解决了板与空间相互作用的理论问题,得到一些具有实际应用价值的结果。

(三) 隔声测量方法研究简况

最早测量隔声的方法是测量建筑中间隔墙的隔声,以后发展为测量构件隔声的混响室方法。这一方法的要点是将试件放在两个相邻混响室隔墙的中间。1962年,国际标准化组织(ISO)正式将这一方法定为国际标准,并一直作为测量构件隔声的主要方法。

另一种测量小型轻结构隔声的方法,在1948年由白瑞纳克(L. Beranek)等人提出。以后布鲁苏(E. Brosio)将这一方法完善并与混响室方法进行了对比实验。1978年,我国研究出一种测量轻结构隔声的方法,称为混响-隔声消声箱方

法，这种方法可同时进行声波在垂直与无规入射两种情况下的隔声测量。目前，这两种方法还未得到更广泛的应用，也未标准化。近年来也有一些新型的隔声测量方法，如脉冲法、模拟法、模型法等，它们各在一定的条件下得以应用。

(四) 隔声技术的应用

建筑隔声发展得最早，砖墙、门、窗的隔声作用早被人们所熟知。为了提高墙的隔声，那时只有增加墙的厚度，也就是增加重量。后来有了双层墙，双层墙的出现是建筑隔声方面的一大进步。随着工业化的发展，到了三十年代，开始了隔声罩的研究与应用，但它还存在着局限性。五十年代人们注意到对飞机隔声舱的研制，轻型隔声结构的应用才得到重视。从七十年代开始，为保护城市环境，减少机动车辆对附近居民的干扰，开展了障板隔声理论与应用的研究，并在一些国家交通干线两侧得到了广泛的应用。随着对工人劳动保护和对居民噪声环境的日益重视，用隔声方法消除噪声已经得到普遍应用。在今天，专用的隔声间、飞机与舰艇的特殊隔声舱已达到较高的水平，工业设备的现代化已将隔声罩作为设备本身结构的一部分。因此，隔声的理论研究与技术开发将有着广阔的应用前景。

§ 1.2 声学术语及表达隔声的量

空气密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ ，在大气压力为 $P(\text{mHg})$ ，温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ 时，有

$$\rho = 1.29 \cdot \frac{273}{273 + \theta} \cdot \frac{P}{0.76} \quad (1.1)$$

在一般情况下，取 $P = 0.751 \text{ mHg}$ ，室温 $\theta = 22^{\circ}\text{C}$ 时，我们有

$$\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3.$$

空气中声速 $c(\text{m/s})$, 在不同的温度下有

$$c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} \approx 331.4 + 0.607\theta. \quad (1.2)$$

特性阻抗 $\rho c(\text{kg/m}^2\text{s})$, 当温度为 22°C , 大气压力为 0.751 mHg 时, $\rho c = 407 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

有效声压 $p(\text{N/m}^2)$, 常简称声压, 它是在一段时间 $T(\text{s})$ 内, 瞬时声压 $p(t)$ 的方均根值

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}. \quad (1.3)$$

声强 $I(\text{W/m}^2)$, 对自由传播的平面波或球面波, 有

$$I = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (1.4)$$

声能密度 $D(\text{J/m}^3)$, 对自由传播的平面波, 有

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2}. \quad (1.5)$$

声功率 $W(\text{W})$, 指某声源在单位时间内所辐射的声能.

声压级 L_p , 简写为 $L(\text{dB})$,

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (1.6)$$

其中 $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ 为基准声压.

声强级 $L_I(\text{dB})$,

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (1.7)$$

其中 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 为基准声强.

声功率级 $L_W(\text{dB})$

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0}, \quad (1.8)$$

其中 $W_0 = 10^{-12} \text{W}$ 为基准声功率。

透射系数 τ , 表示声波透射的比率,

$$\tau = \frac{I_t}{I_i}, \quad (1.9)$$

式中 I_i 为入射波的声强, I_t 为透射波的声强。

隔声量 R (或透射损失 TL), 表示构件隔声的大小,

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}. \quad (1.10)$$

τ 与 R 之间的关系可用式 (1.10), 也可利用图 1.1 中给出的对应关系进行估算。一个构件的隔声量是由构件本身的声学性质所决定的, 而与它所处的环境无关。

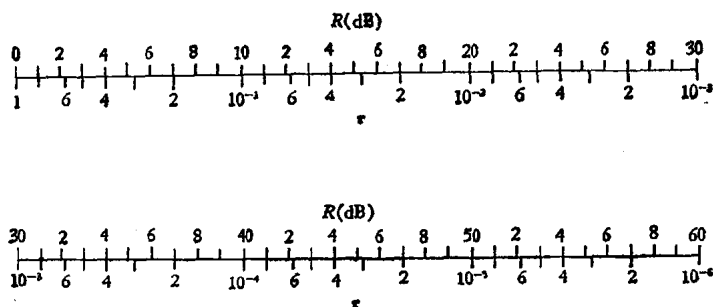


图 1.1 透射系数 τ 与隔声量 R 的关系

插入损失 $IL(\text{dB})$, 表示隔声结构出现前后, 空间某固定点的噪声声压级的降低,

$$IL = L_1 - L_2. \quad (1.11)$$

用插入损失表示构件的隔声效果, 不仅与构件本身的声学性质有关, 而且还与环境条件有关。

减噪量 (噪声降低) $NR(\text{dB})$ 或实际隔声 $R_{\text{实}}$, 这个量有

时也称为声压级差 ΔL ，它表示构件前后(或内外)平均声压级的差值，

$$NR = R_{\text{等}} = \Delta L = L_1 - L_2, \quad (1.12)$$

式中 L_1 表示在构件前声源所在一侧的平均声压级 (dB)， L_2 表示在构件后声源另一侧的平均声压级。

声衰减量 δ (dB/m)，表示声波在均匀衰减的材料或结构中传播时单位长度的衰减值。对厚度为 l 的材料，总的衰减量为

$$R' = \delta l. \quad (1.13)$$

显然 δ 值只与材料或结构的声学特性有关。

各隔声量之间的关系如下：

在比较 R, IL, NR 与 δ 各量之间的关系时，我们可以看出， R 与 δ 只由构件本身的声学特性决定，而 IL 与 NR 除与构件特性有关外，还受到环境和位置的影响。对于一般情况，这四个量之间没有固定的关系，但在一些特定条件下，它们之间却有着某种确定的关系。例如，在两个混响空间内，如果声音主要通过中间的隔墙，则隔墙的隔声量 R 与两室间平均减噪量 NR 之间有如下关系：

$$NR = L_1 - L_2 - 10 \lg \frac{S}{A}, \quad (1.14)$$

式中 L_1 为声源室的平均声压级 (dB)， L_2 为接收室的平均声压级 (dB)， S 为墙的透声面积 (m^2)， A 为接收室的总吸声量 (m^2)。

如果某一无限大的隔声构件后面是一个无反射的空间，则当平面声波垂直入射时（一个行波管中间插入一个隔声构件也与此相似），我们有关系

$$R = IL = NR - 3 \text{ dB}.$$

§ 1.3 声波在分层媒质中的传播

(一) 波动方程及其解

声波在媒质中的传播满足三维波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial Z^2} \right). \quad (1.15)$$

对自由行波来说,有

平面波

$$p(x, t) = A_1 e^{j(\omega t - kx)}, \quad (1.16)$$

柱面波

$$p(r, t) = \frac{A_2}{\sqrt{r}} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (1.17)$$

球面波

$$p(r, t) = \frac{A_3}{r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (1.18)$$

式中 A_1, A_2, A_3 是与振幅有关的三个常数,它由边界条件确定。在实际情况下,该常数仅取实部。

(二) 声波的反射与折射

在理想媒质中,设某平面声波与法线交角为 θ 入射到媒质 1 与 2 的交界面上,媒质 1 与媒质 2 的特性阻抗分别为 $R'_1 = \rho_1 c_1$, $R'_2 = \rho_2 c_2$ (参见图 1.2),我们有

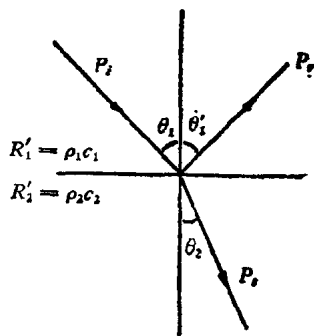


图 1.2 平面波的反射与折射

$$\left. \begin{aligned} p'_i &= p_i e^{j\omega t - jk_1(X\cos\theta_1 + Y\sin\theta_1)}, \\ p'_r &= p_r e^{j\omega t - jk_1(-X\cos\theta'_1 + Y\sin\theta'_1)}, \\ p'_t &= p_t e^{j\omega t - jk_2(X\cos\theta_2 + Y\sin\theta_2)}, \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

式中 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$, $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$, 而 $\theta_1, \theta'_1, \theta_2$ 分别代表入射角、反射角和折射角。利用 $x = 0$ 处的边界条件,

$$\text{声压连续} \quad p'_i + p'_r = p'_t,$$

$$\text{速度连续} \quad v'_i + v'_r = v'_t,$$

可得

$$\text{反射定律} \quad \theta_1 = \theta'_1. \quad (1.20)$$

$$\text{折射定律} \quad \sin\theta_1 / \sin\theta_2 = c_1 / c_2. \quad (1.21)$$

反射系数

$$\alpha = \frac{p'_r}{p'_i} = \frac{R'_2 \cos\theta_1 - R'_1 \cos\theta_2}{R'_2 \cos\theta_1 + R'_1 \cos\theta_2}. \quad (1.22)$$

透射系数

$$\tau = \frac{p'_t R'_1}{p'_i R'_2} = \frac{4R'_1 R'_2 \cos^2\theta_1}{(R'_2 \cos\theta_1 + R'_1 \cos\theta_2)^2}. \quad (1.23)$$

设 S_1 和 S_2 分别代表入射声束与透射声束的宽度, 可以证明

$$\alpha S_1 + \tau S_2 = 1. \quad (1.24)$$

(三) 分层媒质中声波的传播

声波在实际媒质中传播特性的计算是比较复杂的, 这里只讨论理想媒质中声波的传播问题。

多层媒质中最简单的情况是三层媒质 (见图 1.3)。设声波的人射角为 θ_1 , 在第二个媒质中的折射角为 θ_2 , 在第三个媒质中的折射角为 θ_3 , 并有 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$, $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$, $k_3 = \frac{2\pi}{\lambda_3}$, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为媒质 1, 2, 3 中声波的波长, p_i, p_r, p_+, p_- 及

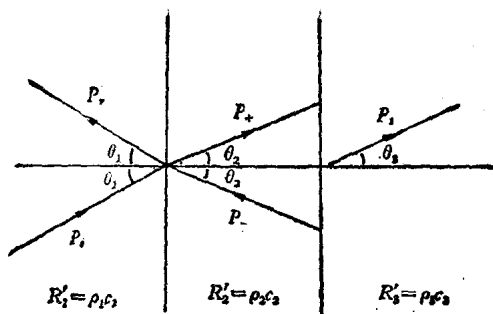


图 1.3 三层媒质中声波传播示意图

p_i 分别为 p'_i, p'_r, p'_+, p'_- 及 p'_t 各声波的幅值。可以写出声波的传播方程为

$$\left. \begin{aligned} p'_i &= p_i e^{j\omega t - jk_1(X\cos\theta_1 + Y\sin\theta_1)}, \\ p'_r &= p_r e^{j\omega t - jk_1(-X\cos\theta_1 + Y\sin\theta_1)}, \\ p'_+ &= p_+ e^{j\omega t - jk_2(X\cos\theta_2 + Y\sin\theta_2)}, \\ p'_- &= p_- e^{j\omega t - jk_2(-X\cos\theta_2 + Y\sin\theta_2)}, \\ p'_t &= p_t e^{j\omega t - jk_3(X\cos\theta_3 + Y\sin\theta_3)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

利用媒质界面处声压与速度连续的边界条件及声波的折射定律,可以得到

$$\left. \begin{aligned} p_i + p_r &= p_+ + p_- \\ \frac{\cos\theta_1}{R'_1} (p_i - p_r) &= \frac{\cos\theta_2}{R'_2} (p_+ - p_-) \\ p_+ e^{-i\beta_2} + p_- e^{i\beta_2} &= p_t e^{-i\beta_3} \\ \frac{\cos\theta_2}{R'_2} (p_+ e^{-i\beta_2} - p_- e^{i\beta_2}) &= \frac{\cos\theta_3}{R'_3} p_t e^{-i\beta_3}. \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

式中 $R'_1 = \rho_1 c_1$, $R'_2 = \rho_2 c_2$, $R'_3 = \rho_3 c_3$, $\beta_2 = k_2 \cos\theta_2$, $\beta_3 = k_3 \cos\theta_3$.

若方程(1.26)中入射波的幅值 P_i 已知, 则可求出 p_r , p_+ , p_- 及 P_t , 并得到声波在这三层媒质中的传播特性, 进而可求声波透过媒质 2 的透射系数 $\tau = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2$. 有实际应用意义的一些计算实例详见第二、三章。