

工程声学 文集

北京声学学会编

北京大学出版社

(II)

ENGINEERING ACOUSTICS

工 程 声 学

文 集 (Ⅱ)

北 京 声 学 学 会 编

北 京 大 学 出 版 社

新登字(京)159号

工 程 声 学

文 集 (Ⅱ)

北京声学学会 编

责任编辑: 李采华

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092毫米 16开本 13.75印张 340千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数: 0001—1500册

ISBN 7-301-01649-2/O·262

定价: 9.80元

内 容 简 介

本文集是由北京声学学会主办的,共有文章25篇。内容包括声环境、噪声与振动、音质设计与评价、声学测量、电声技术、超声应用、声学设计进展及光声技术等8个方面。

本文集是我国应用声学方面的第二本文集,旨在沟通有关工程声学的科技信息,推广新技术,提高我国声学学科的水平及开拓声学在四化建设中的应用。

文中用到大量图表,有较大实用和参考价值。

《工 程 声 学 文 集》编 委 会

主 编：杜连耀

副主编：车世光 姜天仕 项端祈

编 委：（按姓氏笔划）

车世光	王炳麟	王 崢	叶恒健	刘发臣	刘永祥
冯瑀正	庄文雄	李 翔	李昌立	李先明	李明轩
杜连耀	项端祈	姜天仕	骆学聪	范宝元	赵志诚

前 言

在北京科协领导的关怀及广大会员的热心支持下,《工程声学文集》第二册又与读者见面了。

此次文集共选登了 25 篇文章,其中有些是特约国内声学专家撰写的,有些是北京声学学会会员的研究或设计成果,还有些是国外有关声学专著的译文,总计约30余万字。

工程声学是北京声学学会主办的学术性文集,主要选登学会会员及爱护本会的学者,在声学领域的研究成果、新设计、新技术或有关的著述。欢迎大家投稿。

限于能力和经验,书中的立论和观点,选稿及安排,难免有欠妥之处,恳切希望读者不吝赐教,以便改正。

杜连耀

1990年8月

目 录

●特 约 稿●

组合微穿孔板吸声结构	马大猷 (1)
国外厅堂音质设计的一些新进展	王季卿 (10)
关于厅堂音质主观评价方法的建议	包紫薇 (20)
论立体声电影院声学设计	柳孝图 (27)
光声热波技术及其在半导体工业中的应用	张淑仪 (34)

●音 质 设 计 与 评 价●

北京歌剧院的声学设计	项端祈 苏 纹 葛砚刚 (40)
关于厅堂音质评价指标的几个问题	王炳麟 (58)
小型多功能音乐录音棚的声学设计实践	项端祈 (63)
沈阳体育中心扩声设计	王以真 毛志荣 张贵权 (75)

●噪 声 与 振 动 控 制●

居住区环境噪声控制的研究	陈金京 王 峥 (84)
硬质塑料薄膜吸声体的特性研究	周 迪 庄文雄 袁 皓 金人端 (93)
空调通风系统噪声的计算及计算程序	王 峥 陈金京 (97)
芭蕾舞排练厅地面弹跳适应度的研究	项端祈 (101)
城市常见工业设备振动源的特点及其对城市环境振动的影响	张 翔 陈道常 盛经纬 战嘉恺 涂瑞和 (106)

●声 学 测 量●

声场瞬态特性的数字化测量	刘志超 王炳麟 (113)
用声学方法确定多孔材料的细孔参数	汤道敏 (117)

●电 声 技 术●

我国专业音响技术现状及前景	王福津 (124)
生产车间背景音乐设计初探	王 峥 陈金京 刘发臣 (128)

●超 声 及 换 能 器●

压电高聚物PVDF及其在水声换能器中的应用	栾桂冬 (134)
超声互相关流量计研究	洪 玮 姜天仕 (140)

● 声学设计进展 ●

多功能剧场声学设计的新突破	项端祈(160)
开敞式办公室的声学设计	Joel A.Lewitz, P.E.(166)
台北文化中心的声学设计	H.Kuttruff(171)
俾尔根 Grieg 纪念堂的声学设计	S.Strøm et al.(182)

● 声光谱技术 ●

大气监测	Jørgen Christensen(191)
------------	-------------------------

CONTENTS

Invited Papers

- Combination Microperforated-Panel Construction..... Ma Dahyou (1)
New Development of Auditorium Acoustical Design in Abroad
..... Wang Jiqing (10)
Proposals Related to Subjective Assessment of Sound
Quality in Auditorium..... Bao Ziwei (20)
Discussion on Acoustical Design of Stereophonic Sound Cinema
..... Liu Xiaotu (27)
Photoacoustic Thermal Wave Techniques and Their Applications
in Semiconductor Industries Zhang Shuyi (34)

Acoustical Designs and Evaluations

- Acoustic Design of Beijing Opera House
..... Xiang Duanqi Su Wen Ge Yangang (40)
Some Problems on the Criteria of the Evaluation of Room
Acoustics Wang Binglin (58)
Acoustic Design of Small Multi-Purpose Music Recording Studio
..... Xiang Duanqi (63)
The Design of the Audio Amplification System of Shenyang
Sports Centre..... Wang Yizhen Mao Zhirong Zhang Guiquan (75)

Noise and Vibration Control

- A Study of the Environmental Noise Control in Residential
Area Chen Jinjing Wang Zheng (84)
A Study of the Properties of Hard Plastic Decorative Acoustic
Absorber Zhou Di Zhuang Wenxiong Yun Hao Jin Renduan (93)
Noise Calculation and the Calculation Program of Air Conditioning
Ventilation Systems Wang Zheng Chen Jinjing (97)
Research on Floor Resilience Adaptability of Ballet Rehearsal
Room Xiang Duanqi (101)
Characteristics of Common Urban Industrial Vibration Sources
and Their Effects on Urban Environment Vibration
..... Zhang Xiang Chen Daochang Cheng Jingwei
Zhan Jiakai Tu Ruihuo (106)

Acoustic Measurements

- Digitalization Method in the Measurement of the Properties of
Transient Sound FieldLiu Zhichao Wang Binglin(113)
An acoustic Method for Determining the Pore Parameters of
Porous Materials..... Tang Daomin(117)

Electroacoustic Techniques

- Present Status and Future Prospects of Professional Audio
Technology in China.....Wang Fujin(124)
Primary Discussion on Background Music Design in Workshops
.....Wang Zheng Chen Jinjing Liu Fachen(128)

Ultrasonics and Transducers

- Piezoelectric Polymer PVDF and Its Application in Underwater
Acoustic Transducers..... Luan Guidong(134)
A Study on Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeters
..... Hung Wei Jiang Tianshi(140)

Acoustical Designs and Advances

- New Break—Through in Acoustic Design of Multi-Purpose
TheaterXiang Duanqi(160)
Acoustic Design of Open Plan Offices.....Joel A.Lewitz, P.E.(166)
Acoustic Design of Taipei Cultural Centre H.Kuttruff(171)
Acoustical Design of the Grieg Memorial Hall in Bergen..... S.Strøm et al.(182)

Photoacoustic Spectroscopy (PAS) Technique

- Monitor the Atmosphere..... Jørgen Christensen(191)

组合微穿孔板吸声结构

马 大 猷

(中国科学院 声学研究所)

一般穿孔板吸声结构,因穿孔比较大(几毫米甚至几厘米),穿孔板本身所供给的声阻有限,只能靠板后另加玻璃绵、矿渣绵等多孔性材料以增加声阻与大气声阻匹配,加大吸收,而穿孔板的穿孔面积在总面积的20%以上,只能起护面板的作用,保护多孔性吸声材料。理论证明,穿孔的声阻与其直径平方成反比,如果把孔径减小到丝米级,就可以不必另加吸收材料,穿孔板就具有足够的声阻。而穿孔板的声抗(质量抗)则与孔径无关,因此可在一定程度上分别控制穿孔板的声阻和声抗,加上后腔,做成宽频带的良好吸声结构。这就是微穿孔板吸声结构。这种结构的吸声特性可以相当准确地预计,因而可以根据需要和要求相当准确地设计和制备,不依靠经验。微穿孔板可用任何材料制成(从纸板、玻璃布、胶合板直到不锈钢板),因而可以根据环境要求,选择合适的材料。制备则根据材料,用针刺、冲、压、钻等方法。所以微穿孔板吸声结构是简单、高效的吸声体,应用范围广,它的正入射吸声半宽度(吸声系数大于最高吸声系数之半的频率范围)一般可达到一至二倍频程;在混响场中则更宽。用双层微穿孔板结构可使吸声范围向低频再扩展一个倍频程,高频吸收则不变。这都是行之有效的。下面还要提到另一方法,在单层微穿孔板上做两种穿孔(按照不同频率要求)也可以达到双层微穿孔板结构的性能,甚至更好。

一、微穿孔板的声阻抗

首先考虑微穿孔板的声学特性。板上每个小孔可以看做一个细管,管两端之间加一压差,引起管内气体流动,如二者都是交变的,其比值即是小管的声阻抗。声阻抗值可以严格计算。管内空气的运动满足波动方程。在管壁上,由于摩擦,空气基本不动,在管中心,振动速度最大;中间变化的情况则与空气的粘滞性有关。据此可求得小管声阻抗率的严格公式:

$$Z_1 = \frac{\Delta P}{\bar{u}} = j\omega\rho t \left[1 - \frac{2}{x\sqrt{-j}} \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x\sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中 ΔP 是小管两端的压差, $\bar{u}$ 是管内振动速度的平均值, $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, ρ 是空气密度, t 是小管长度(板厚), $x = d\sqrt{\omega\rho/4\eta}$ 大约是细管直径与粘滞性附面层厚度之比, η 是粘滞系数(空气的), J_0 和 J_1 分别是零阶和一阶贝塞耳函数。这个式子很复杂,前人已求出其在 $x > 10$ 和 $x < 1$ 时的近似式:

$$Z_1 \xrightarrow{x < 1} \frac{4}{3} j\omega\rho t + \frac{32\eta t}{d^2} \quad (2)$$

$$\xrightarrow{x>10} j\omega\rho t + \frac{4\eta t}{d} \sqrt{\frac{\omega\rho}{2\eta}} (1+j) \quad (3)$$

Z_1 的实部是声阻率 R_1 ，虚部是声抗率 X_1 ，可写做 $j\omega M_1$ ， M_1 是声质量。从(2)、(3)式可求得

$$\frac{R_1}{\omega M_1} \xrightarrow{x<1} \frac{6}{x^2} \quad (4)$$

$$\xrightarrow{x>10} \frac{1}{1+x/\sqrt{2}} \quad (5)$$

$\omega M_1/R_1$ 相当于电路中的品质因素 Q 。以上两式表明，在 $x<1$ 时频带宽度可以达到极大数值，而 $x>10$ 时，频带就极窄。微穿孔板就是工作于 x 小时，但使 x 达到1以下比较困难(特别是频率高时)，一般在1与10之间。而普通穿孔板的 x 常在10以上，只有增加多孔吸声材料才可使 $R_1/\omega M_1$ 较大。为要寻求微穿孔板计算公式，必须把(2)、(3)两式中间的空白填起，可求得：

$$Z_1 = \frac{32\eta t}{d^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + j\omega\rho t \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + x^2/2}}\right) \quad (6)$$

此式在 x 小时可略去 x^2 项，即得(2)式，在 x 大时略去根号中的常数项即成为(3)式。(6)式可用于任何 x 值，图1是(6)式与(1)式的比较，实线代表(1)式的声阻值和质量抗值(均除以 $\omega\rho t$ 以便绘制)，圆圈则是从(5)式计算所得，可以看出(5)式几乎完全与

(1)式符合，最大相差处也不到5%。图1可用以读出 Z_1 值。(6)式加上末端改正后，除以板上穿孔面积所占的百分数，就是穿孔板的声阻抗率，再除以空气中的特性阻抗 ρc ，就得到微穿孔板的相对声阻抗 z 。代入各常数的值： $c = 340\text{m/s}$ ， $\eta = 1.789\text{kg/s}\cdot\text{m}$ ， $\rho = 1.2\text{kg/m}^3$ ，并且改变单位： d, t 用 mm ，频率 f 用 kHz ，面积比 p 用百分数，微穿孔板的相对声阻抗就是

$$z = Z_1/p\rho c = r + j\omega m \quad (7)$$

$$r = \frac{0.147}{d^2} \frac{t}{p} k_r$$

$$k_r = \sqrt{1 + x^2/32} + 0.1768xd/t \quad (8)$$

$$\omega m = 1.847 \frac{ft}{p} k_m$$

$$k_m = 1 + (3^2 + x^2/2)^{-1/2} + 0.85d/t \quad (9)$$

其中：

$$x = 10d\sqrt{f} \quad (10)$$

可以看出声质量常数 k_m 的变化不大， ωm 基本与角频率 ω 或频率 f 成正比，图1的 ωm 曲线也说明此点。由(8)、(9)式可求得

$$\frac{r}{\omega m} = \frac{8}{x^2} \frac{k_r}{k_m} \quad (11)$$

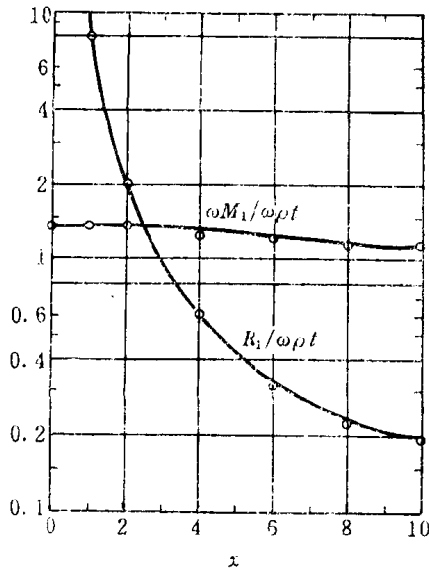


图1 细管的声阻抗率
——准确值 •••近似值

$$\approx \frac{8}{x^2} \quad (12)$$

因在现实设计中 k_r 与 k_m 相差不多，有时 k_r/k_m 与 1 相差较多时，式 (12) 这个比例关系仍很有用。在 ωm 已定时， r 与 x^2 成反比，即

$$rx^2 \approx 8\omega m \quad (12a)$$

或将 (10) 式 x 值代入，也可表为声阻与孔径的关系，

$$rd^2 \approx m/2 \quad (13)$$

式 (13) 可用来帮助选择 r 或 d 。 $x = 10d\sqrt{f}$ 小或 d 小，是获得良好吸收性质的条件。

二、微穿孔板结构的吸声特性

微穿孔板结构是声阻加声质量，配以后腔就成为共振吸声体了，其构造和等效电路如图 2 所示。微穿孔板可直接装在墙前，留一空隙，就是后腔，腔中只需必要的支撑。

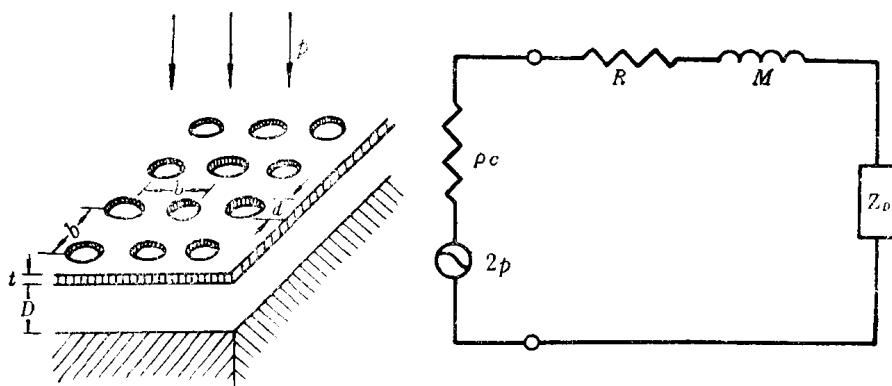


图 2 简单微穿孔板吸声结构的构造和等效电路

等效电路中，按照 Thevenin 理论，源是板完全反射时（“开路”）板上的声压 $2p_i$ ，内阻是空气中的特性阻抗 ρc ，微穿孔板的声阻抗是 $R = r\rho c$ 和 $M = m\rho c$ ，空腔的声阻抗则为 $Z_D = -j\rho c \operatorname{ctg}(\omega D/c)$ ，正入射时的吸声系数可求得为：

$$\begin{aligned} a_N &= \frac{(2p_i)^2 R}{|\rho c + R + j\omega M - j\rho c \operatorname{ctg}(\omega D/c)|^2} \cdot \frac{p_i^2}{\rho c} \\ &= \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \operatorname{ctg}(\omega D/c))^2} \end{aligned} \quad (14)$$

共振频率满足：

$$\omega m - \operatorname{ctg}(\omega D/c) = 0 \quad (15)$$

这时最大吸声系数为：

$$a_{\max} = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (16)$$

最大吸收之半处, $\alpha_N = \alpha_{\max}/2$, 为:

$$\omega m - \operatorname{ctg}(\omega D/c) = \pm(1+r) \quad (17)$$

在 $\omega D/c \leq 1$ 时, 余切可取近似值:

$$\operatorname{ctg}(\omega D/c) = c/\omega D - \omega D/3c \quad (18)$$

由此可求得共振角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$:

$$\omega_0 = [(m + D/3c)D/c]^{-1/2} \quad (19)$$

或

$$\omega_0 m = c/\omega_0 D - \omega_0 D/3c \quad (20)$$

半宽度(17)式两角频率之差

$$\Delta\omega = (1+r)/(m + D/3c)$$

或相对半宽度:

$$\begin{aligned} B &= \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0 \\ &= (1+r)\omega_0 D/c \end{aligned} \quad (21)$$

由于 r 和 m 都不是常数, 上面的推导和所得结果都只是近似的。但是 m 值随频率的变化不大, r 值的变化虽然比较大, (16) 式表明 α 不甚受 r 变化的影响, 所以在实际上这些近似结果很有意义。(16)、(20) 和 (21) 三式加上节的微穿孔板公式(8)、(9)、(10)、(12)(或(13)) 是微穿孔板吸声结构的设计或计算的根据。

例如要求 $f_0 = 0.8\text{kHz}$, 半宽度约 2 倍频带的吸声结构, 由 (21) 式知频带宽要求 $\omega_0 D/c$ 大, 但 $\omega_0 D/c$ 大则使 $\omega_0 m$ 小((20)式), 因而 r 小或 d 小, 所以只能折衷, 取 $D = 50\text{mm}$, $\omega_0 D/c = 0.739$ 。由此可求得 $\omega_0 m = 1.106$ ((20)式), $rd^2 = 0.1106$ ((13)式)。 r 应较大(接近 1) 才可使吸收大((16)式)、频带宽((21)式), 但 d 太小不容易制备。取折衷值 $d = 0.4\text{mm}$ 。这时 r 大于 0.5, 最大吸收还接近于 1。 $x_0 = 10d\sqrt{f_0} = 3.578$ 。设板厚为 0.5mm (也是折衷值, 免得太薄时不稳定), 就可以根据(9)式算出 $k_m = 1.975$ 和 $t/p = 0.3869$, 而 $p = 1.29$ 。板上穿孔可以按任何方式排列, 只要孔间距离比波长小得多就可以。如果是按正方格排列, 穿孔面积比就是 $p = 25\pi(d/b)^2\%$, 孔中心距 b 可算出为 3.12mm 。为制备方便, 取整数 $b = 3\text{mm}$, 穿孔面积即为 $p = 1.396\%$ 。在上面选择 $\omega_0 D/c$ 值、 d 值、 t 值等时都不影响共振频率和带宽, 但调整 b 值要改变 p 值或 t/p 值, 则使 $\omega_0 m$ 改变, 因而改变共振频率。从(9)式和(20)式可以看出 ω_0 或 f_0 大致与 b 值成反比。将 b 值取整数为 3, 要使共振频率由 0.8kHz 增为 0.82kHz 。由此可用(8)式算出 $k_r = 1.705$, $r = .562$ 。最大吸声系数(16)为 $\alpha_{\max} = .92$, 相对半宽度(21)为 $B = 1.1835$ 。由此可求得吸收频带为 $468-1438\text{Hz}$, 为 1.62 倍频带。

由上例可见, 在设计和计算中, D, r, d, t, b 各值的选择或调整时, 对吸收性质、制备等方面都有折衷考虑的问题, 五者互相影响, 但也容许一定范围内的出入。图 3 和图 4 可做为考虑时的参考。图 3 是微穿孔板结构各参数的关系, 图 4 是孔径对共振频率和半宽度的影响。某一参数和吸收特性都可在一定范围内选择, 以符合对结构的要求。

以上讨论都是正入射情况。声波以 θ 角斜入射时, 可证明其影响是把 r, m 和 D 的有效值乘以 $\cos\theta$ 倍。 m 和 D 降低使最大吸收移向高频, r 的变化如在一定范围(例如在 $1/2$ 到 2 的范围)内对最大吸收几乎无甚影响。在混响场内, 有各方向入射, 可预期更宽的吸收频带。

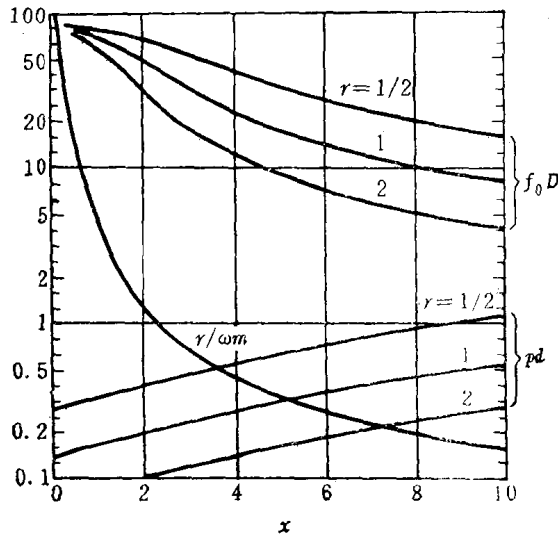


图3 微穿孔板的参数 $1/2 < r < 2$ 范围内最大吸声系数大于 0.9

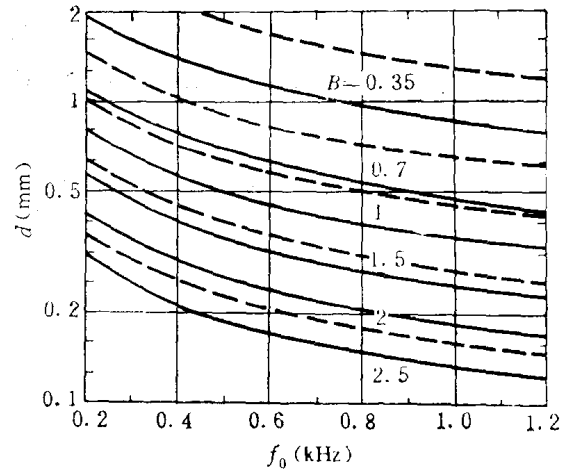


图4 孔径对最大吸收、共振频率和吸收带宽的关系
实线 $r = 1$; 虚线 $r = 1/2$

三、双 共 振

利用双共振加宽频带是声学 and 电子学常用的方法。微穿孔板吸声结构的吸收频带（指半宽度）达到两个倍频程一般无困难，利用双共振再扩大一个倍频程就可以满足普通宽频带吸收的要求。双共振可采用偶合回路或并联回路，各有其优点。

(1) 偶合结构

双层微穿孔板吸声结构是偶合结构，它是在简单共振结构前再有一空腔和微穿孔板，这样就做成两个共振结构通过前面的空腔偶合，构造和等效电路如图 5 所示。

双层结构的相对声阻抗可求得为

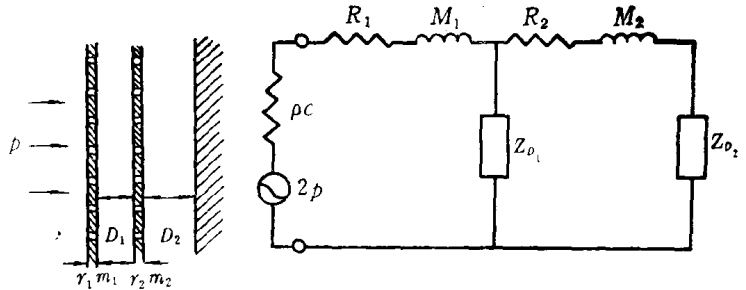


图5 双层微穿孔板吸声结构的构造和等效电路

$$Z = r_1 + j[\omega m_1 - \text{ctg}(\omega D_1/c)] + \frac{\text{ctg}^2(\omega D_1/c)}{r_2 + j[\omega m_2 + \text{ctg}(\omega D_1/c) + \text{ctg}(\omega D_2/c)]} \quad (22)$$

两个共振结构 r_1, m_1, D_1 和 r_2, m_2, D_2 各有其共振频率 ω_1 和 ω_2 ，偶合后形成两个新共振频率，频率相差比两个单独的共振频率相差要大， $\omega'_1 > \omega_1, \omega'_2 < \omega_2$ ，使吸收频率范围加大。式 (22) 所反映的阻抗特性以及吸收特性都可以严格计算。近似地可以把 r_1, m_1, D_1 看做主要共振结构，通过 $-\text{ctg}(\omega D_1/c)$ 与第二共振结构 $r_2, m_2, D_1 + D_2$ 偶合，改变其共振特性。频率甚高于 ω_1 时， $\text{ctg}(\omega D_1/c)$ 的值很小，式 (22) 的第三项变得越来越小，共振器的阻抗与 r_1, m_1, D_1 的阻抗相差不多，所以在高频率阻抗以及吸收特性不甚受影响。在低频率则不同，这时 $\omega \ll \omega_2$ ， $r_2 + j\omega m_2$ 与空腔声抗相比很小，可以看做短路，式 (22) 近似地成为：

$$Z \approx r_1 \left(1 + \frac{D_2^2}{(D_1 + D_2)^2} \right) + j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega(D_1 + D_2)/c} \quad (23)$$

即低频按 $[(D_1 + D_2)/D_1]^{1/2}$ 比例向低频扩展。所以双层结构使简单共振器的低频响应向下扩展。但扩展比例不宜太大,主共振须较宽,否则中间频率的吸收要降低,出现低谷,如图6所示。

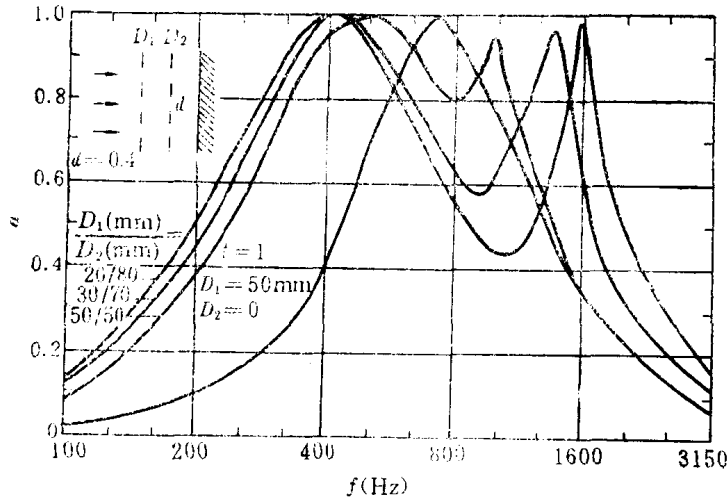


图6 双层微穿孔板吸声结构的频率特性,二板 $t=0.5\text{mm}$,
 $d=0.4\text{mm}$, $b=3.5\text{mm}$,空腔不同

此外,双层结构既然主要依赖空腔的作用,两层穿孔板可用同样构造, $r_1=r_2$, $m_1=m_2$,无损于双层结构的作用,所以设计比较简单。

(2) 并联结构

组合微穿孔板吸声结构只用一层微穿孔板,但板上有两组穿孔,孔径、阻抗各不相同,分别与空腔形成共振结构,等效电路为两个共振线路并联(图7)。

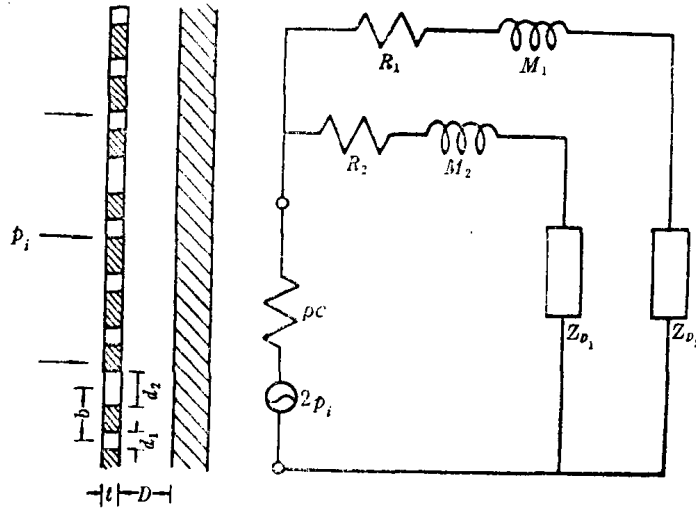


图7 组合微穿孔板吸声结构及其等效电路

组合结构的相对声阻抗为:

$$Z = \left(\frac{1}{r_1 + j\omega m_1 - j\text{ctg}\omega D/c} + \frac{1}{r_2 + j\omega m_2 - j\text{ctg}\omega D/c} \right)^{-1} \quad (24)$$

其声阻和声抗分别为:

$$r_{12} = [r_1 r_2 (r_1 + r_2) + r_1 x_2^2 + r_2 x_1^2] / [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2] \quad (25)$$

$$x_{12} = [x_1 x_2 (x_1 + x_2) + r_1 r_2^2 + r_2 r_1^2] / [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2] \quad (26)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \omega m_1 - \operatorname{ctg} \omega D/c \\ x_2 &= \omega m_2 - \operatorname{ctg} \omega D/c \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

正入射吸声系数仍按一般关系

$$\alpha_N = \frac{4r_{12}}{(1+r_{12})^2 + x_{12}^2} \quad (28)$$

计算直接了当。如果 Z_1 的共振选在较高频率如双层结构的主共振, Z_2 的共振可选在相当低的频率, 后者即起把主共振的吸收扩展到低频率的作用, 使吸收频带加宽。如果两个共振频率相距较远, 就可以不互相干扰, 而在两个共振频率之间, 因声抗符号相反, 二者互相帮助, 不致产生较深的低谷, 如双层结构。两个共振使用同一空腔, 可使构造简单, 所占空间减少 (取消双层结构的第二空腔), 但缺点是低频共振用较浅空腔, $\omega_0 D/c$ 值较小, 频带宽度受损失。现举例说明。

例 高频共振设计用上面简单共振器的例子: $f_0 = 0.82\text{kHz}$, $t = 0.5\text{mm}$, $d = 0.4\text{mm}$, $b = 3\text{mm}$, $D = 50\text{mm}$, 吸收频带 $0.468\text{—}1.438\text{kHz}$ 。低频系统用同样空腔和板厚, 共振选在 0.3kHz 。可算出 $\omega_0 D/c = 0.277$, $\omega_0 m = 3.515$, $rd^2 = .9374$ 。取 $d = 0.6$, 知 $r \approx 2.604$, 这样可使吸收不太差而带宽较好。算出 $x = 10d\sqrt{f_0} = 3.286$, $k_m = 2.2855$, $t/p = 2.778$, $p = 0.181$, $b = 12.5$ 。为制作方便起见取 $b = 12\text{mm}$ 。共振频率增为 0.31kHz , $k_r = 1.873$, $r = 1.96$, $a = 0.9$, $B = 0.85$ 。吸收频带为 $0.21\text{—}0.47\text{kHz}$ 。高低频组合的吸收范围约 200 到 1400Hz , 低频系统的计算方法与上面高频系统的计算完全相同。

从原理上说, 简单共振结构做到二个倍频程带宽, 双共振系统做到三个倍频程带宽是不难的。但是由于对各参数间的折衷考虑, 特别是在组合结构用同一空腔, 使 $\omega_2 D/c$ 很低, 低频系统的带宽受限, 影响总带宽。不过, 以 50mm 的厚度, 半吸收的频率低到 200Hz (厚度为波长的 $1/34$), 这是多孔性材料或任何其它吸声结构不可能做到的。另一个上面未明提的折衷考虑是关于孔距。高频系统的孔距 $b = 3\text{mm}$, 低频系统的孔距 $b = 12\text{mm}$, 正好是成倍数关系。这样, 制备微穿孔板时就可选用 0.5mm 的纯铝板 (不用合金铝板以避免板的共振, 当然纸板、胶合板等也可以), 每隔 3mm 冲压 0.4mm 的孔, 其中从某一孔开始, 每隔三个孔把孔径增为 0.6mm , 组合微穿孔板就完成了。这样做, 简单、整齐、不易出错。高频系统的孔数比计算的少穿 $1/16$, 穿孔面积也是少 $1/16$, 影响高频共振有限。事实上, 按以上设计高频系统的有效孔距为 $3\sqrt{16/15} = 3.1\text{mm}$ 更接近未调整时的孔距, 高频的吸收峰也基本在 800Hz 。

图 8 为一宽带组合微穿孔板吸声结构的频率特性。与上面设计稍有不同, 空腔 $D = 40\text{mm}$, $f_{01} = 1\text{kHz}$, $d_1 = 0.4\text{mm}$, $b_1 = 2.5\text{mm}$; $f_{02} = 0.4\text{kHz}$, $d_2 = 0.6\text{mm}$, $b_2 = 10\text{mm}$; 板厚仍为 0.5mm 。在两个共振峰以外, $f > 1\text{kHz}$ 或 $f < 0.4\text{kHz}$, 组合的吸收特性基本与高、低频系统的单独特性相同。而在两个共振频率之间, $0.4\text{kHz} < f < 1\text{kHz}$, 吸收互相补充, 曲线接近水平。

根据以上讨论, 微穿孔板在低频范围有特殊优点, 不过, 除非用较大空腔, 简单微穿孔板结构的吸收频带还是比较窄的, 因此复合结构就优越了。图 9 是低频组合的一例, 两个共振频率分别取为 $f_1 = 0.3\text{kHz}$ 和 $f_2 = 0.1\text{kHz}$, 可求出 $D = 100\text{mm}$, $t = 0.75\text{mm}$, $d_1 = 0.5\text{mm}$, $b_1 = 7\text{mm}$ 和 $d_2 = 1\text{mm}$, $b_2 = 35\text{mm}$ 。在厚 0.75mm 的板上, 每 7mm 穿 0.5mm 孔, 每隔 4 个孔, 把孔加大为 1mm , 装在墙前 100mm 处, 就成为低频组合吸声结构了。半吸收范围是