

微穿孔板声阻抗的直接准确测量

马 大 猷

(中国科学院声学研究所)

1983年3月28日收到

摘 要

微穿孔板吸声结构的构造简单,适用范围广,吸收特性好并且可以比较准确地预计和设计。它的性能主要由微穿孔板的声阻和声质量决定。为了可靠地估计微穿孔板结构的性能,微穿孔板的准确特性是必要的。在本文中,作者提出直接测量微穿孔板声阻抗的简单方法(这方法也适用于一般穿孔板,或在一定范围内适用于一般吸声材料),由于直接了当地分别测出声阻和声抗,不必经过任何转换,所得结果可达到比一般方法更为准确的程度。应用这个方法,对微穿孔板的阻抗特性进行了测量,得到线性和非线性的现象。在本文中,将报告一些初步成果。

一、引 言

穿孔板的穿孔如缩小到毫米以下,穿孔率也适当降低,就成了微穿孔板^[1]。微穿孔板的特点是用控制穿孔直径和穿孔率的方法可以使其本身的声阻大到可与空气特性阻抗相比的程度,而声质量较小,因此不必另加多孔性材料就可使所作成的穿孔板结构具有吸声好,频率宽的吸声特性。此外,微穿孔板可以用任何材料制成(从纸板、胶合板一直到金属板),因而可以适用于任何环境和用途,是经济有效的吸声材料。微穿孔板吸声结构的构造和等效电路如图1所示。

微穿孔板吸声结构的吸声特性可根据其等效电路求得。设 R 和 M 分别为微穿孔板的声阻率及声质量率, D 为板后空间的深度,微穿孔板吸声结构的吸声系数为

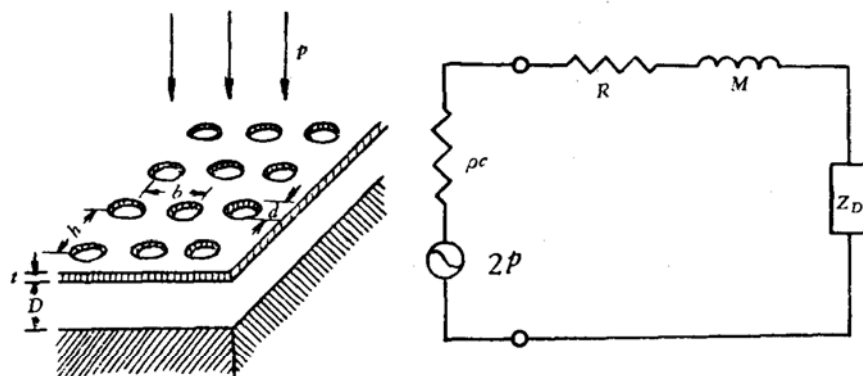


图1 微穿孔板吸声结构及其等效电路

The microperforated panel absorption construction and its equivalent circuit

$$\alpha = \frac{4R\rho c}{(R + \rho c)^2 + [\omega M - \rho c \operatorname{ctg}(\omega D/c)]^2} \quad (1)$$

式中 ρ 和 c 分别为空气的密度和声速. 在共振频率时,

$$\omega_0 M - \rho c \operatorname{ctg}(\omega_0 D/c) = 0 \quad (2)$$

最大吸声系数为

$$\alpha_{\max} = \frac{4R\rho c}{(R + \rho c)^2} \quad (3)$$

吸声系数为最大值的一半的条件是

$$[\omega M - \rho c \operatorname{ctg}(\omega D/c)]^2 = (R + \rho c)^2 \quad (4)$$

如果取近似值, 在 $x < 1$ 时(或在 $x - n\pi < 1$ 时, n 为整数, 但近似式(5)右面的 x 应代以 $x - n\pi$, 下面的近似式(6), (7)也有不同),

$$\operatorname{ctg} x \approx \frac{1}{x} - \frac{x}{3} \quad (5)$$

从(2)、(4)两式可求得共振角频率的近似值

$$\omega_0 \approx \frac{\rho c}{\sqrt{\rho D(M + \rho D/3)}} \quad (6)$$

和吸收峰半宽度

$$\Delta\omega \approx \frac{R + \rho c}{M + \rho D/3} \quad (7)$$

从(3)和(7)二式可看出, 如果使 R 接近 ρc , 使 M 值很小, 就可能使微穿孔板结构在较宽频率范围内具有较大吸声系数. 因此 R 和 M 的值是很重要的. 实验结果证实这些结论. 但在前文^[1]中, 一些由吸声系数测量结果所推出来的声阻大于理论值^[1], 其中可能有非线性声阻的作用^[2], 但线性声阻与非线性声阻的关系和适用范围还有待确定. 因此, 准确的声阻抗测量是非常必要的. 用一般驻波管测量声阻抗的方法需要比较复杂的超越方程转换^[3], 这从现代计算技术上来说虽没有困难, 但不如直接测量更能保证准确程度. 本文提出直接测量声阻和声质量的方法, 并用于微穿孔板的测量. 由于准确程度提高, 过去不能分清的因素已能分清, 穿孔的声学性能也就清楚了. 本文给出初步结果.

二、共振时的测量

直接方法的关键是在共振时进行测量. 测量时所用的是 BK 4002 驻波管设备. 但其中

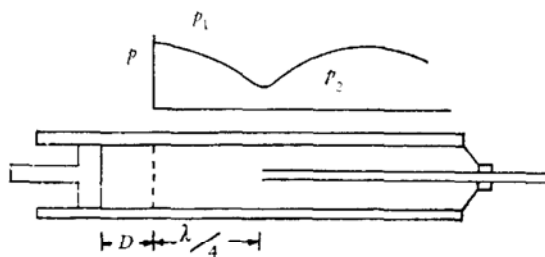


图2 驻波管及共振时的声压分布

Standing wave tube and sound pressure distribution at resonance

探声器所用的传声器已换成电容传声器 BK 4144, 以取得较大的稳定性和便于校准. 将微穿孔板固定于刚性管端前, 距离为 D 处. 调整扬声器声源的频率和电压, 使微穿孔板正好在声压极大点或极小点. 这一点的标志是下一个极小点或极大点与微穿孔板的距离恰好是四分之一波长 $\lambda/4$, 这也等于驻波管中任一个极大点与其相邻的极小点的距离. 这只能在微穿孔板吸声结构正在共振时才发生. 另一个变通的办法, 也许是更好的办法, 是声源的频率和强弱不变, 而调整刚性管端 (改变距离 D) 使微穿孔板上的声压为极大值或极小值, 但所用普通驻波管还没有这种调整装置. 驻波管及共振时的声压 (有效值) 分布即如图 2.

在驻波管中, 微穿孔板前的声压反射系数是

$$\frac{p_r}{p_i} = \frac{Z - \rho c}{Z + \rho c} \quad (8)$$

式中

$$Z = R + j\omega M - j\rho c \operatorname{ctg}(\omega D/c) = R + jX \quad (9)$$

为微穿孔板结构的声阻抗率. 在一般情况, 反射声压 p_r 和入射声压 p_i 有相位差, 因此在微穿孔板上二者不是直接相加或相减而形成极大或极小. 只是在离开微穿孔板一个距离 r 处入射波和反射波才同相或反相而形成极大或极小, 条件是

$$\frac{(Z - \rho c) \exp(j\omega r/c)}{(Z + \rho c) \exp(-j\omega r/c)} = \text{实数}$$

可求得

$$\tan(2\omega r/c) = \frac{2X\rho c}{R^2 + X^2 - (\rho c)^2} \quad (10)$$

只有 $X=0$ 时, $r=0$ 才是解, 即穿孔板结构共振时, 穿孔板才位于极大或极小. 这时, $Z=R$, 而反射系数

$$\frac{p_r}{p_i} = \frac{R - \rho c}{R + \rho c} \quad (11)$$

p_i 和 p_r 同相 ($R > \rho c$ 时) 或反相 ($R < \rho c$ 时). (11) 式可改写为

$$\frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = \frac{R}{\rho c} \quad (12)$$

但 $p_i + p_r = p_1$ 为微穿孔板上的声压. 根据 (11) 式, $R > \rho c$ 时, p_i 与 p_r 同相, p_1 是极大, 而在 $R < \rho c$ 时, p_i 与 p_r 反相 (相对于 p_i , p_r 是负值), p_1 是极小. $p_i - p_r$ 是距微穿孔板四分之一波长处的声压极小 (或极大) 值 p_2 . (12) 式可写做

$$\frac{R}{\rho c} = \frac{p_1}{p_2} \quad (13)$$

测得共振时微穿孔板上的声压 p_1 及邻近的极端值 (极小或极大) p_2 , 就可以直接算出声阻率 R . 这种测量只需要相对值, p_1/p_2 可以是探声器的电压输出比. 在另一方面, 声质量可以从共振条件 (2) 直接算出

$$\frac{M}{\rho c} = \frac{1}{\omega_0} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi D}{\lambda}\right) \quad (14)$$

如上所述 $\lambda/4$ 是驻波中二相邻极端值之间的距离, 从而测得波长 λ , 不必从声速转算.

在声强较高时, R 和 M 都与质点速度有关, 因此有必要测定通过小孔的质点速度. 显见,

微穿孔板前的质点速度为

$$u = \frac{p_1}{R} \quad (15)$$

而孔中的质点速度为

$$v = \frac{p_1}{\sigma R} \quad (16)$$

式中 σ 为穿孔率, 即穿孔的总面积与板的总面积之比. 这时需要 p_1 的绝对值.

三、初步结果

图 3 是测量结果. 微穿孔板是用厚 1mm 铝板制成, 上穿直径 1mm 孔, 穿孔率 $\sigma = 0.011$,

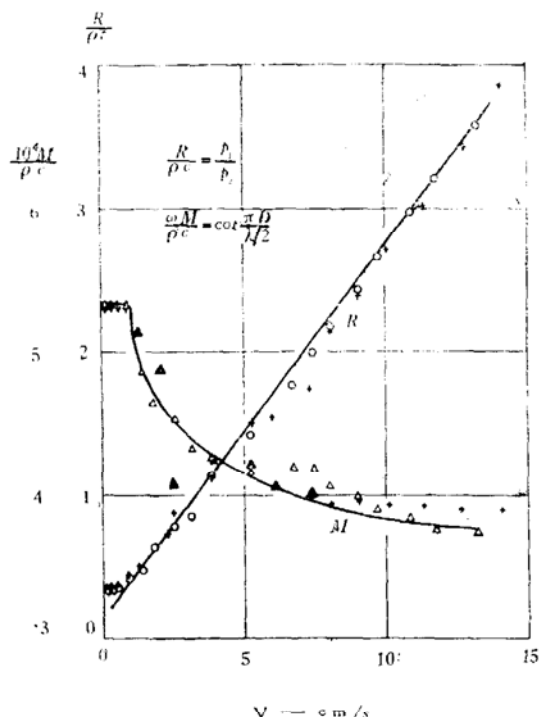


图 3 微穿孔板测量结果

Results of measurement for microperforated panel

及

$$\frac{M}{\rho c} = \frac{t}{\sigma c} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + x^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (18)$$

$$x = \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \frac{d}{2} \quad (19)$$

式中 μ 为空气的运动粘滞系数, t 为板厚, d 为穿孔直径. 在 $\omega = 500\pi$ 时 (相当于 $D = 190$ mm 时), 可算出 $R/\rho c = 0.3$, $M/\rho c = 5.75(10)^{-4}$ s, 这些计算值和上面的测得值是符合的.

当质点速度加大时, 要产生非线性效应. Ingard-Ising 证明^[4]在质量速度高时

$$p = \rho v^2$$

或

$$\frac{R}{\rho c} = \frac{v}{\sigma c} \quad (20)$$

即 $R/\rho c$ 对 v 的关系是直线关系, 其斜率为 $1/\sigma c$. 由图 3 可看出, 当 v 大于 1m/s 时, $R/\rho c$ 的确对 v 呈直线关系, 线的斜率为 0.259 . 由 $1/\sigma c$ 算出的值为 0.267 , 也完全符合. 但是将这直线延长至 $v = 0$, 在 $R/\rho c$ 轴上的截距不是上面求出的由粘滞性引起的线性声阻 0.33 , 而是 0.15 , 大约是线性声阻的一半. 这说明线性声阻和非线性声阻不是直接相加. 当质点速度增加时, (17) 式中最末一项的端修正(来源于声波在小孔附近平板上的摩擦)是要减小的, 因而使线性声阻减小, 但测得结果似乎减少得过多一点, 这个问题值得继续探讨.

声质量随质点速度改变的规律还是未知的. 测得结果说明质点速度超过大约 1m/s (声压级超过大约 100dB) 后, $M/\rho c$ 值迅速降低, 以后降低渐慢, 最后在质点速度大(大约大于 10m/s) 时逐渐达到一稳定值, $3.9(10)^{-4}\text{s}$ 左右. 大约是低速值的 70% . 这差不多相当于低速值内最末一项端修正值减少一半. 这是合理的, 因为端修正相当于小孔两端的声辐射影响, 质点速度大时, 一端的振动空气被“吹掉”因而辐射影响只剩了一半.

四、结 论

1. 在本文中, 著者提出了直接测量微穿孔板声阻抗的方法. 方法简单、准确, 可用于一般穿孔板或在一定范围内用于一般吸声材料.

2. 应用本文方法初步对微穿孔板声阻抗作了研究, 得到其小信号线性声阻抗及其变化, 及其非线性阻抗. 结果说明大约在声压级 100dB 以下(穿孔内质点速度大约在 1m/s 以下)声阻抗遵守线性规律, 由运动粘滞系数决定. 在高声强(大约 100dB 或 1m/s 以上), 线性阻抗要逐渐减小, 非线性声阻逐渐成为主要控制因素. 因此在一般应用中, 完全可用线性阻抗(17)和(18)作信号阻抗; 只是在高强度时非线性阻抗才重要, 这时穿孔大小的影响就不重要了.

本文的实验工作主要是穆秀敏同志做的.

参 考 文 献

- [1] 马大猷, “微穿孔板吸声结构的理论和设计”, 中国科学, 1975年, 第一期, 38—50.
- [2] 赵松龄, 卢元伟, “关于穿孔板的非线性声阻”, 物理学报, 27(1978), 600—603.
- [3] Morse, P. M. and Ingard, K. U., “*Theoretical Acoustics*”, (Mcgraw-Hill, New York, 1968), 469—471.
- [4] Ingard, K. U. and Ising, H., “Acoustic Nonlinearity of an Orifice”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 42(1967), 6—17.

DIRECT AND ACCURATE MEASUREMENTS OF ACOUSTICAL IMPEDANCE OF THE MICROPERFORATED PANEL

MAA DAH-YOU

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Received March 28, 1983

ABSTRACT

Microperforated panel absorption constructions are simple in construction, versatile in application, with good absorbing properties and afford prediction and design with relatively good accuracy. Their performance depends mainly on the acoustical resistance and mass of the microperforated panels. The exact properties of the microperforated panel, therefore, are necessary in order to estimate the performance of the microperforated panel construction reliably. In this paper, a simple and direct method of impedance measurements for microperforated panel (also suitable for ordinary perforated panels and in a limited sense for other absorbents) is proposed. Better accuracy is attained because of the straightforward nature of the resistance and reactance determination, avoiding the complex transformation of transcendental functions. When applied to actual panel, new light is shed on the nonlinear properties of the acoustical impedance of small apertures and microperforated panels. Preliminary results are presented.