

关于穿孔板的非线性声阻*

赵 松 龄 卢 元 伟
(同济大学声学研究室)

一、非线性声阻的半经验理论

由穿孔板和空腔组成的共振吸声结构在各种声学工程中有广泛的应用,近年来不另加阻性材料的微穿孔板结构受到了重视,对其低声强下的线性声学特性已作了细致的研究^[1]. 由于微穿孔板的穿孔率一般很低,在较高声强下孔中质点速度已相当大,致使非线性效应对穿孔板声阻的影响表现得很明显,在实际设计和应用中必须予以考虑;在甚高声强下,例如在喷气发动机燃烧室壁上采用共振结构以稳定燃烧过程,起阻尼作用的主要是穿孔板(或共振声槽)的非线性声阻.

这里非线性声阻来源于脱体绕流,即当流动雷诺数超过某一临界值后,在穿孔的进口或出口边缘处流线脱离板面,在自由流线和板面间形成的漩涡区内产生强烈的能耗散. 这时,穿孔两侧的声压差与质点速度的平方相关而不再与质点速度成正比. Ingard 和 Ising^[2] 曾讨论过穿孔的非线性效应问题,提出了与实验值相符的非线性声阻的半经验公式,但他们引入了较牵强的物理假定,且所得结论只适用于无限薄穿孔板情形. 最近, Panton 和 Goldman^[3] 利用量纲分析综合了许多实验数据,对声阻抗与诸参数的关系作了有益讨论. Громов 等人^[4] 对这个问题也作了实验研究. 但他们都未作出使人满意的理论分析. 为了加深对穿孔板声阻抗非线性效应的认识,我们结合对微穿孔板吸声结构的研究,提出了一种穿孔板非线性声阻的半经验理论.

设穿孔板的穿孔率在 5% 以下,孔与孔间相互干扰的影响近似可以忽略不计. 记穿孔板两侧的声压差为 Δp , 孔中横截面上平均质点速度为 u , 在正半周 ($\Delta p > 0$) 和负半周 ($\Delta p < 0$) 内,质点速度 u 的数值相同而相位相反. 假定 Δp 与 u 具有确定的函数关系,把 Δp 展成 u 的幂级数,略去高次项,可得

$$\Delta p = r_0 u + \xi \cdot \frac{\rho_0}{2} u |u|, \quad (1)$$

式中 ρ_0 为介质密度. 如果限于讨论声阻,那么系数 r_0 和 ξ 都是实数. 平方项记为 $u|u|$ 是为了保证(1)式在正负两半周内都适用. 可以看出, (1) 式右方当 u 为小值时线性项起主要作用,系数 r_0 就是孔的线性声阻率,可根据线性理论^[1,5] 求出. 当 u 为大值时,平方项起主要作用,与定常流动相比较,可知系数 ξ 就是穿孔板结构的阻损系数. 对于边缘为直角的穿孔板来说, ξ 是一个突缩及突扩的局部阻损系数及孔中摩擦阻损系数之和. 一

* 1977 年 11 月 25 日收到.

般地说, ξ 与流动雷诺数有关, 当雷诺数足够大, ξ 基本上为常数。记穿孔板厚度为 l , 穿孔直径为 d , 采用工程流体力学的经验数据, ξ 值与比值 l/d 的关系可由下表给出^[6]。

l/d	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	4.0
ξ	2.83	2.72	2.60	2.34	1.95	1.76	1.67	1.62	1.60	1.60	1.55	1.55

由以上说明可知, 非线性声阻对应于质点速度的平方项。当孔中速度 u 按正弦规律变化, 即设

$$u = u_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

由傅里叶级数展开得

$$u|u| = u_0^2 \sin \omega t |\sin \omega t| = \frac{8u_0^2}{3\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 3\omega t - \frac{1}{35} \sin 5\omega t \cdots \right). \quad (3)$$

可见相应的声压差 Δp 除了含有 $\sin \omega t$ 的基频项外, 还含有一些奇次谐波。孔的声阻率 r 可由按时间平均的能量耗散率 $\Delta p \cdot u$ 与速度平方 u^2 的比值来定义, 即

$$r = \frac{\Delta p \cdot u}{u^2}. \quad (4)$$

由正弦函数的正交性知, 声压差中存在的奇次谐波项实际上对声阻率并没有贡献。记声压差的基频幅值为 Δp_0 , 可得

$$r = \frac{\Delta p_0}{u_0} = r_0 + \frac{4\xi}{3\pi} \rho_0 u_0. \quad (5)$$

记穿孔板的穿孔率为 σ , 引入穿孔板的相对声阻率 $\mu = \frac{r}{\sigma \rho_0 c}$, 并记 $\mu_0 = \frac{r_0}{\sigma \rho_0 c}$ 为穿孔板的线性相对声阻率, (5) 式可改写成

$$\mu = \mu_0 + \frac{4\xi}{3\pi\sigma} \cdot \frac{u_0}{c}, \quad (6)$$

式中 c 指介质中的声速。必须注意, 对于穿孔板共振结构, 仅在共振频率附近 u_0 才能取较大值而产生较明显的非线性效应。自 (6) 式可以看出, 非线性效应对声阻率的相对影响取决于比值 $\frac{4\xi}{3\pi\sigma\mu_0} \cdot \frac{u_0}{c}$ 。当穿孔率为小值时, 即使比值 $\frac{u_0}{c}$ 不太大, 非线性效应仍可能相当显著, 这种情况与自由空间中大幅声波所产生的非线性效应有所不同。如果流动是定常的, 产生脱体绕流的雷诺数约为 100^[7], 而按我们的实验, 在非定常的交变振荡过程中, 即使雷诺数低至 30, 非线性效应对声阻率的影响已很明显。

二、实验结果

为了检验上述半经验理论是否正确, 在直径为 105 毫米的驻波管内对铝质微穿孔板试件在共振频率附近进行了一系列声阻抗测量。驻波管的探管传声器系统预先经过校准, 采取了措施保证试件边缘的气密性。微穿孔板试件厚度及孔直径皆为 1 毫米, 穿孔率 σ 为 1%, 在室温下测量了 250 赫及 500 赫两个频率, 相应的试件后面空腔深度分别为 175 毫米及 60 毫米。驻波管中基频声压级极大值的变化范围约从 75 分贝到 132 分贝, 微孔

中质点速度的推算值最小为 0.04 米/秒,最大达 9.2 米/秒. 实验表明,非线性效应对声阻的影响很显著,在前述声压级变化范围内声阻测量值最大相差达八倍多. 声质量抗则随声压级的提高而略有降低,整个系统则始终保持接近共振状态.

在驻波管中,当声压幅值为 p_{i0} 的平面声波垂直投射到微穿孔板共振结构表面时,孔中质点速度幅值应为

$$u_0 = \frac{2p_{i0}}{\sigma\rho_0c\sqrt{(1+\mu)^2 + \nu^2}} \quad (7)$$

在共振频率处结构的相对声抗率 ν 为零,将(7)式代入(6)式消去 u_0 解出 μ , 又记共振 μ 值为 μ_r , 则可得

$$\frac{\mu_r + 1}{\mu_0 + 1} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 + 4N}), \quad (8)$$

式中 N 表示正比于入射声波声压幅值的无量纲参数

$$N = \frac{4\xi}{3\pi(\mu_0 + 1)^2} \cdot \frac{2p_{i0}}{\sigma^2\rho_0c^2} \quad (9)$$

(8) 式提供了 $\frac{\mu_r + 1}{\mu_0 + 1}$ 关于参数 N 的归一化规律, 便于综合实验数据. 从实验数据计算

$\frac{\mu_r + 1}{\mu_0 + 1}$ 及相应的参数 N 需要用到 ξ 及 μ_0 两个数值. 显然 ξ 应采用前引表中 $l/d = 1$ 的

经验值 1.76 (当 σ 不很小或者孔缘并非直角,也可根据相应的阻损系数确定 ξ 值); 而 μ_0 则为孔内和末端修正两部分线性声阻之和,前者由熟知理论求出^[1], 后者在声压匀布假定下亦可算出^[5], 因为这时末端修正声阻相当于无限薄板上圆孔的线性声阻. 对所用试件, 250 赫及 500 赫的 μ_0 计算值分别为 0.29 和 0.37. 由图 1 中可以看出, 实验点子和(8)式的归一化理论曲线符合良好.

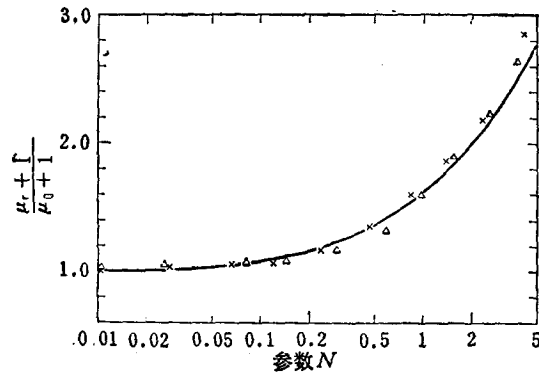


图1 实验点子及理论曲线图

“x”为 250 赫实验值; “Δ”为 500 赫实验值; 曲线按(8)式绘制

中国科学院物理研究所马大猷教授曾对本文实验结果提出过宝贵意见,谨此致谢.

参 考 文 献

- [1] 马大猷, 中国科学, (1975), 1, 38.
- [2] U. Ingard, H. Ising, *J. Acoust. Soc. Am.*, **42** (1967), 6.
- [3] R. L. Panton, A. L. Goldman, *Ibid.*, **60** (1976), 1390.
- [4] Ю. И. Громов и др., *АКУСТ. Ж.*, **23** (1977), 160.
- [5] 赵松龄, 卢元伟, 物理学报, **27** (1978), 437.
- [6] 采暖通风设计手册, 中国建筑工业出版社(1973).
- [7] P. M. Morse, U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill (1968), 759.

ON NONLINEAR ACOUSTIC RESISTANCE OF A PERFORATED PLATE

ZHAO SONG-LING LU YUAN-WEI
(Tongji University, Shanghai)