

# 微穿孔板吸声体非线性声学特性初探

刘克<sup>1</sup>, 焦风雷<sup>1</sup>, 乔五之<sup>2</sup>

(1. 中科院声学研究所, 北京 100080; 2. 北京轻工业学院, 北京 100037)

**摘要:** 文章以马大猷教授提出的微穿孔板非线性声阻公式为依据, 提出了非线性声阻作用的临界条件, 并由此进行应用于高声强下微穿孔板吸声体的计算机辅助设计。通过实验对宽频带微穿孔板的非线性特性进行初步分析和实验验证。

**关键词:** 微穿孔板吸声体; 非线性; 声阻抗率

中图分类号: TB535 文献标识码: A

## Rudimentary researches on nonlinear properties of microperforated panel

LIU Ke<sup>1</sup>, JIAO Feng-lei<sup>1</sup>, QIAO Wu-zhi<sup>2</sup>

(1. Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Department of Mechanical Engineer, Beijing Institute of Light Industry, Beijing 100037, China)

**Abstract:** According to Prof. Maa Dah-you's equation of nonlinear acoustic resistance of microperforated-panel (MPP) absorber, some critical condition equations of nonlinear acoustic resistance are proposed in this paper. Additionally, these critical conditional equations are applied to computer aided design (CAD) on MPP under higher sound intensity. Though experiments of MPP, on which the diameter of perforations is less than 0.3 mm, the rudimentary researches of nonlinear properties of MPP are made also. And then, the practicability of CAD on MPP under higher sound intensity is proved experimentally.

**Keywords:** microperforated panel absorber; nonlinear properties; acoustic resistance

### 引言

对于微穿孔板吸声体<sup>[1]</sup>, 为了取得高的吸声系数, 其穿孔率常要低到 1% 以下, 这样, 即使入射声压不太高时, 孔内的质点速度也能达到相当高的值, 孔端出气的高速度要形成喷注。此时, 穿孔板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, 在高压下更为显著, 从而将影响微穿孔板的声阻和它的声学特性。对于微穿孔板吸声体的非线性声学特性有学者已进行了一些研究, 得到了有意义的结论<sup>[2]</sup>。最近, 微穿孔板吸声体的准确理论<sup>[3]</sup>中对该结构低声强下的线性特性做了细致的研究, 揭示出微穿孔板吸声体的吸声频带宽度将达到 3~4 个倍频程。该结构在有高速气流和高声强的管道中, 非线性效应相当显著, 依据线性理论进行结构设计已不再适用。为此本文对宽频带微穿孔板吸声体的非线性声学特性及设计进行探讨。

### 1 高声强下的微穿孔板吸声体理论

高声强下微穿孔板的相对声阻和低中声场强度

下线性理论中的相对声阻比较, 只增加了非线性声阻项<sup>[4]</sup>, 则总相对声阻可以写为:

$$r = r_L + r_N \quad (1)$$

$r_L$  表示公式中小信号时的线性相对声阻。高声强时, 总相对声阻增加  $u_0/\rho c$ 。

对于微穿孔板吸声体, 在共振时, 入射声压为:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho u_0 c (1 + r) \quad (2)$$

式中的  $u$  为质点速度,  $u_0$  为质点速度的峰值。当入射声压提高时, 穿孔内质点速度增加, 微穿孔板的声阻增加, 而声质量减小。声质量的减小是有限的, 而声阻的增加几乎是无限的。因此, 高声强对微穿孔板吸声体吸声性能的影响极为可观。若  $r_L > 1$ , 随着声强的增加, 吸声性能逐渐降低。声强很高时, 其吸声性能几乎完全丧失。根据非线性相对声阻公式可知, 如果降低  $r_L$ , 使得  $r_L < 1$ , 则随着声强的提高, 声阻趋近于 1, 吸声性能增加。这样, 就可以使微穿孔板吸声体适用于更高声强。当然, 声强超过一定限度, 吸声性能又开始下降。

### 2 关于非线性声阻作用的临界条件

基于非线性声阻公式, 本文提出如下一些关于非线性声阻作用的临界条件, 这有一定的实用意义。为简单起见, 讨论限于共振情况。

收稿日期: 2000-01-15; 修回日期: 2000-12-02

作者简介: 刘克(1956-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事非线性声学、物理声学、噪声控制等研究工作。

(1) 分析低中强度最佳设计参数, 提出以非线性声阻值达到线性声阻一半时的入射声压作为临界值。用  $r_N = \frac{u_0}{\rho c} = \frac{1}{2} r_L$ , 求得临界入射声压为:

$$P_i = \sqrt{\frac{2}{8}} p^2 \rho c^2 \left( 1 + \frac{3}{2} r_L \right) \quad (3)$$

(2) 对于  $r_L < 1$  的情况, 随着  $P_i$  的增加, 总声阻逐渐增加到 1, 使得吸声系数达到 100%。由此导出达到最佳吸声时的入射声压为:

$$P_i = \sqrt{\frac{2}{2}} p^2 \rho c^2 (1 - r_L) \quad (4)$$

(3) 对于  $r_L < 1$  的情况, 随着入射声压的增高, 吸声系数总是先经过一个极大值, 然后又开始下降。在下降时其吸声系数值以不低于线性声阻理论中所估计的值作为临界条件, 即

$$P_i = \sqrt{\frac{2}{4}} p^2 \rho c \frac{(1 - r_L)(1 + r_L)^2}{r_L^2} \quad (5)$$

### 3 高声强下微穿孔板吸声体的设计步骤

运用上面提出的临界公式, 本文提出对应用于高声强下微穿孔板吸声体的计算机辅助设计, 即: 由低中声场强度下的线性声阻所估计的最大吸声系数和最佳吸声时的入射声压  $P_i$ , 来设计结构参数。主要设计步骤为:

- (1) 求得低中声场强度下最大吸声系数要求的线性相对声阻  $r_L$  (其中  $r_L < 1$ );
- (2) 由最佳吸声时的入射声压公式(4), 导出穿孔率  $p$ ;
- (3) 求出不同  $d$  时, 保证合适穿孔率的板厚  $t$ ;
- (4) 确定腔深  $D$ ;
- (5) 由公式(3)给出按吸声系数不低于线性声阻理论所估计的入射声压  $P_i$ 。

### 4 实验结果与分析

本实验中对仪器进行了校准, 用探管式传声器

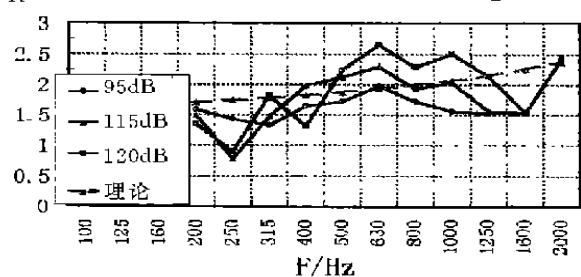


图 1 样品 I 不同声压级下的相对声阻

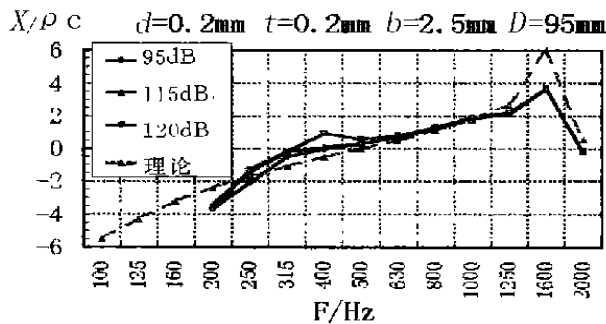


图 2 样品 I 不同声压级下的相对声抗

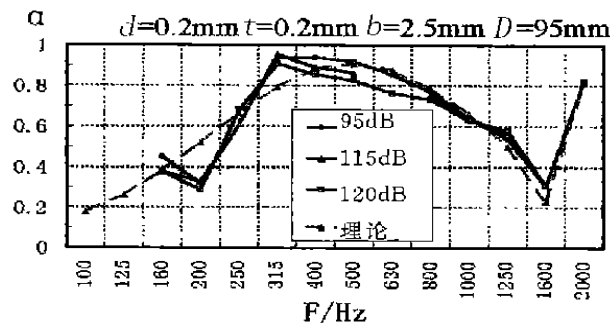


图 3 样品 I 不同声压级下的吸声特性

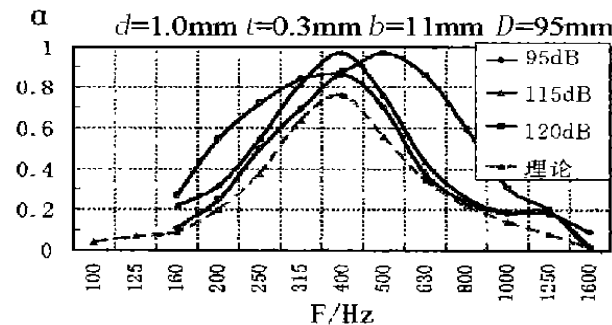


图 4 样品 II 不同声压级下的吸声特性

可获得驻波管中的绝对声压级。

线性声阻  $r_L = 1.87 > 1$  的不锈钢样品 I 为激光穿孔, 穿孔直径  $d = 0.2\text{mm}$ , 板厚  $t = 0.2\text{mm}$ , 孔间距  $b = 2.5\text{mm}$ 。样品 I 在不同声场强度下采用声压极大值作为参考进行了测量, 相对声阻、相对声抗和吸声系数的实测曲线见图 1、图 2 和图 3。图中虚线是根据线性理论计算得到的理论曲线。从图 1 看出, 随着声强的提高, 共振频率时的相对声阻增加, 与理论分析一致, 但值得注意的是, 在整个吸声频带内声阻的变化规律性不强。而从图 2 可知在整个吸声频带范围声抗在较高声场强度下与线性理论分析的相差不大。初步分析, 整个频带内声阻变化的规律性不强, 是因为微穿孔板吸声体的吸声特性还受板共振等其它因素影响。图 3 明显看出, 声强提高后, 吸声系数下降许多, 而频带宽度变化不大。

(下转第 139 页)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 2x + 4y - 12^{1/3}t = 2x_1 - 12^{1/3}t, \\ \eta_2 &= 2x + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}17^{1/3}2^{2/3}t \\ &= \frac{1}{2}y_1 - \frac{1}{2}17^{1/3}2^{2/3}t, \\ \eta_3 &= \frac{1}{2}x + y - \frac{1}{8}9^{1/3}8^{2/3}t \\ &= \frac{1}{2}x_1 - \frac{1}{8}9^{1/3}8^{2/3}t \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中参数的选取,使得式(4)和式(5)中的相互作用常数  $a(1, 2) = 0$ ,  $a(1, 3) \neq 0$ ,  $a(2, 3) \neq 0$ 。图 2(a)、2(b)和 2(c)中,时间  $t$  分别为 -15、0、8。显然图 2 显示的现象不同于图 1,两个 dromions 在相互作用之后形状发生了改变,也就是说 dromions 在相互作用过程中发生了能量和动量的交换。

本文给出了  $(2+1)$  维可积 mKdV 方程的 dromions 相互作用图象,在同一个方程中存在着不同的相互作用性质。依照耦合常数是否为零,出现了弹性和非弹性两种不同的碰撞性质。这种现象类

似于经典粒子的碰撞,该相互作用现象是否可能发生在其它的  $(2+1)$  维可积模型中值得进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] M. Boiti, J. J. P. Leon, L. M. Martina and F. Pempinelli, Scattering of localized solitons in the plane[J]. Phys. Lett. A, 1988, 132: 432
- [2] L. P. Nizhnik, Integration of multidimensional nonlinear equations by the method of the inverse problem[J]. Sov. Phys. Dokl, 1980, 25: 706
- [3] R. Radha and M. Lakshmanan, Singularity analysis and localized coherent structures in  $(2+1)$ -dimensional generalized Korteweg-de Vries equations [J]. J. Math. Phys., 1994, 35: 4746.
- [4] J. Hieterinta and R. Hirota, Multidromion solution to the Davey-Stewartson equation [J]. Phys. Lett. A, 1990, 145: 237.
- [5] H-y Ruan,  $(2+1)$  维 NLBQ 方程和 KP 方程的多 dromion 结构和相互作用的研究[J]. 物理学报, 1999, 48: 1781.
- [6] K. M. Tamizhmani, Lie symmetries of Hirota's bilinear equations[J]. J. Math. Phys., 1991, 32: 2635.

(上接第 136 页)

根据微穿孔板吸声体非线性特点,对应用于高声强下的吸声降噪而设计的吸声体,随着声强增加,其吸声性能将提高。根据上述的辅助设计,设计线性声阻  $r_L = 0.351 < 1$  的样品,即不锈钢样品 II(穿孔直径  $d = 1.0\text{mm}$ ,板厚  $t = 0.3\text{mm}$ ,孔间距  $b = 11.0\text{mm}$ ,加工方法为钻孔加工)。其实验结果图 5 表明,随着声强的提高吸声系数增加至最大,然后又开始下降,这与理论分析一致,极大值声压为 95dB 和 115dB 时吸声频带宽度变化不大,而 120dB 时,由于板共振的影响又出现了共振峰,且频带宽度增加了许多,这也说明可以利用板共振加宽吸声频带。

## 5 结束语

根据文献[4]提出的高声强下微穿孔板非线性声阻经验公式,本文提出了一些关于非线性声阻作用的临界条件,并运用上述临界公式对高声强下微穿孔板吸声体进行的计算机辅助设计。

孔径小于 0.2mm 样品 I 的实验结果,表明宽频带的微穿孔板随着声强的提高,相对声阻增加,从而吸声性能发生变化。样品 I 线性相对声阻  $r_L > 1$ ,

说明低中声强的最佳设计在低声强下吸声系数将大幅度下降。随着声强的提高,样品 I 在共振频率时的相对声阻增加但是整个频带范围的相对声阻的变化规律性不强,相对声抗与线性理论时相比相差变化不大。

根据本文提出的辅助设计,设计线性声阻  $r_L < 1$  的样品 II,其实验结果显示随着声强增加吸声性能将得到提高,即在声场强度较高环境下的吸声效果较好,说明本文提出的高声强下微穿孔板设计有一定的实用性。

本文对微穿孔板吸声体的非线性特性只是做了初步的研究,希望能为进一步的深入研究提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, 1: 38-50.
- [2] 杜功焕, 龚秀芬. 高声压级时穿孔结构非线性声学特性的研究[J]. 声学学报, 1984, 9(5): 326-332.
- [3] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1998, 23(1): 1-7.
- [4] 马大猷. 高声强下的微穿孔板[J]. 声学学报, 1996, 21(1): 10-14.