

高声强双层穿孔结构的吸声计算

俞悟周^{1,2}, 贺银芝^{2,3}, 姜在秀^{1,2}, 孙浩钧¹

(1. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;
3. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 对高声强下不同的穿孔结构非线性声阻抗模型进行比较, 分析入射声压对穿孔吸声结构声阻抗的影响, 并提出双层穿孔结构的改进传递矩阵法。不同声阻抗模型的实验和计算结果表明, 入射声压级小于 140 dB 时, Park 模型和 Maa 模型的计算结果与实验数据吻合良好; 入射声压级为 140 ~ 150 dB 时, Laly 模型的计算结果更接近实验结果。对于高声强下的双层及多层穿孔结构, 在所提出的改进传递矩阵法中, 根据传递矩阵计算得到各层板表面声压级, 每层穿孔的声阻抗根据声压级和穿孔参数进行计算, 进而得到总声阻抗。结果表明, 入射声压级为 120~150 dB 时, 双层穿孔结构的改进传递矩阵法计算结果与实验数据吻合良好。

关键词: 降噪; 吸声; 双层穿孔结构; 高声强; 非线性声阻抗
中图分类号: O429 **文献标志码:** A

Sound Absorption Calculation of Double-Layered Perforated Sound-Absorbing Structure at High Sound Intensity

YU Wuzhou^{1,2}, HE Yinzi^{2,3}, JIANG Zaixiu^{1,2},
SUN Haojun¹

(1. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Different nonlinear acoustic impedance models at high sound intensity are compared, and the influence of incident sound pressure on the acoustic impedance are investigated. An improved transfer matrix method is proposed to calculate the acoustic impedance of double-layered perforated panels. A comparison of the

calculation by different nonlinear acoustic impedance models and experiment results at different incident sound pressure levels indicates that the results obtained by the Park model and the Maa model agree with the measurement results well when SPL is lower than 140 dB, while Laly model can get better results when SPL is 140 - 150 dB. For structure composed of double-layered or multi-layered perforated panels at high sound intensity, according to the improved transfer matrix method, the sound pressure level of each layer is calculated by transfer matrix, and acoustic impedance of each layer is calculated based on sound pressure level and perforation parameters. Results of double-layered perforated panels calculated by improved transfer matrix method coincide with measurement results for incident sound pressure level at 120 - 150 dB.

Keywords: noise reduction; sound absorption; double-layered perforated panel; high sound intensity; nonlinear acoustic impedance

高声强会引发穿孔声阻抗的非线性效应, 导致穿孔线性声阻抗模型的实验结果与计算结果存在不可忽略的偏差^[1]。穿孔板孔口在较高入射声压级条件下存在脉动效应, 对穿孔吸声结构的声阻抗产生显著影响^[2]。

针对高声强下穿孔板的非线性理论和声阻抗模型已开展许多研究^[2-14]。Ingard 等^[1-3]通过实验方法建立单层穿孔结构的穿孔板声阻抗与穿孔内质点速度之间的关系。Maa^[4]考虑到高声强导致的高质点振速和摩擦引起的黏性损失, 并通过电力声类比根据孔口的质点振速计算穿孔结构的比声阻抗。Laly

收稿日期: 2023-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000); 国家自然科学基金(11874290); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 俞悟周, 副教授, 理学博士, 主要研究方向为环境声学, 交通工具声学仿真及降噪, 新型声学结构。
E-mail: ywzh@tongji.edu.cn

通信作者: 孙浩钧, 理学硕士, 主要研究方向为噪声控制。E-mail: sunhaojun_97@163.com



论文
拓展
介绍

等^[5]和Park^[6]对单层穿孔结构考虑穿孔率、孔径、穿孔板厚度和入射声压对非线性声阻抗的影响。Laly等^[5]和Zhou等^[15]在宽带声源激励下对双层穿孔结构进行了高声强实验,但没有提出计算方法。

较低声强下双层或多层穿孔结构的声阻抗计算,可采用电力声类比法、传递矩阵法^[16]、阻抗传输法^[17]。高声强下穿孔板的声阻抗与入射声压相关。本文结合非线性声阻抗模型,基于改进传递矩阵法计算高声强下双层及多层穿孔结构声阻抗,可为发动机消声短舱提供优化设计。

1 非线性穿孔声阻抗模型比较

1.1 Park模型

Park模型是半经验声阻抗模型^[6],将入射声压当作主要变量,声阻率为线性声阻率和非线性声阻率的叠加,非线性部分为空气密度 ρ_0 、穿孔直径 d 、穿孔厚度 t 、穿孔率 σ 、空气中声速 c 和穿孔中质点速度均方根 \bar{u}_0 的函数。根据Bernoulli定律^[18],通过电-力-声类比,建立入射声压均方根 \bar{p}_i 与穿孔中质点速度均方根的关系。

$$\frac{\bar{u}_0}{c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma}{1 - \sigma^2} \left(\sqrt{0.25 + \frac{2\sqrt{2}\bar{p}_i}{\rho_0 c^2} \frac{1 - \sigma^2}{\sigma^2}} - 0.5 \right) \quad (1)$$

得到入射声压均方根 \bar{p}_i 和质点速度均方根 \bar{u}_0 的关系后,根据实验数据拟合得到非线性比声阻率为

$$r_{nl} = r_1 + 1.59 \left(\frac{d}{t} \right)^{0.06} \sigma^{-0.845} \left[\sigma \left(\sqrt{0.25 + \frac{2\sqrt{2}\bar{p}_i}{\rho_0 c^2} \frac{1 - \sigma^2}{\sigma^2}} - 0.5 \right) \right] \quad (2)$$

式中: r_1 为Maa线性模型^[19]中的比声阻率。

Park模型采用Maa非线性模型中的比声阻率,即

$$x_{nl} = \frac{\omega t}{c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + k_p^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \left(1 + \frac{\sqrt{2}\bar{u}_0}{\sigma c} \right)^{-1} \right) - \cot \left(\frac{\omega D}{c} \right) \quad (3)$$

式中: $k_p = 0.5d\sqrt{\rho_0\omega/\eta}$, η 为空气黏滞系数, ω 为角频率; D 为空气背腔深度。

1.2 Laly模型

Laly模型^[5]在Johnson-Allard线性等效流体阻抗模型^[20]基础上进行拓展,得到高声强声阻抗模型。Laly模型中的比声阻抗率为

$$Z_{MPP} = j \frac{\omega t}{\sigma c} \alpha_{\infty nl} \left(1 + \frac{2\eta \alpha_{\infty nl}}{\sigma \phi_i \Lambda^2} \right) + \frac{\phi_i t}{\rho_0 c} - j \cot \left(\frac{\omega D}{c} \right) \quad (4)$$

式中: $\alpha_{\infty nl}$ 为非线性曲折度, $\alpha_{\infty nl} = 1 + 2\epsilon_{enl}/t$, ϵ_{enl} 为考虑穿孔之间相互作用的长度修正量; Λ 为黏性特征长度; ϕ_i 是流阻率,为线性流阻率 ϕ 与非线性流阻率 ϕ_{nl} 之和,即

$$\phi_i = \frac{8\eta}{\sigma r^2} + \beta \frac{\rho_0(1 - \sigma^2)}{\pi t \sigma C_D} v_a \quad (5)$$

式中: β 为1.6; C_D 取值0.64; v_a 是穿孔中质点速度。

1.3 不同模型比较

对不同穿孔结构在不同声压级下的吸声系数采用不同模型进行计算,并和实验结果进行比较,穿孔结构参数见表1。图1为穿孔结构A~结构D在入射声压级为115~150 dB时的结果比较。图1中的计算模型见文献[4-6],图1a、1b中的实验值引用文献[6]的实验数据。图1c、1d、1e、1f中的实验值引用文献[5]的实验结果。

表1 穿孔结构参数

Tab. 1 Parameters of perforated panels

结构	板厚/mm	孔径/mm	穿孔率/%	空腔深度/mm
A	1.00	1.000	5.14	100
B	0.86	1.517	5.23	25
C	1.20	1.000	4.17	40
D	1.00	1.380	4.90	30

图1表明,入射声压级(SPL)为125 dB和135 dB时,在共振频率附近Maa模型和Park模型的结果与实验数据吻合度较好,Laly模型偏差较大,且随着频率提高偏差增大。在入射声压级为140 dB和150 dB时,在共振频率附近,Laly模型的计算结果和实验结果较为接近,Park模型和Maa模型偏差逐渐增大。Laly模型、Park模型和Maa模型的准确性都与入射声压级相关,在入射声压级小于140 dB的时候,Park模型和Maa模型能得到较好的结果,在入射声压级大于140 dB时,Laly模型准确度更高。

2 高声强下双层穿孔结构的吸声

2.1 计算模型

传递矩阵法在计算多层穿孔结构的吸声特性方面比电力声类比法更便捷,通过计算穿孔板与第一层空腔的传递矩阵,可以得到入射到第二层穿孔板表面的声压,从而可以得到高声强对每层穿孔板声阻抗的影响。本文基于Laly和Park穿孔非线性声

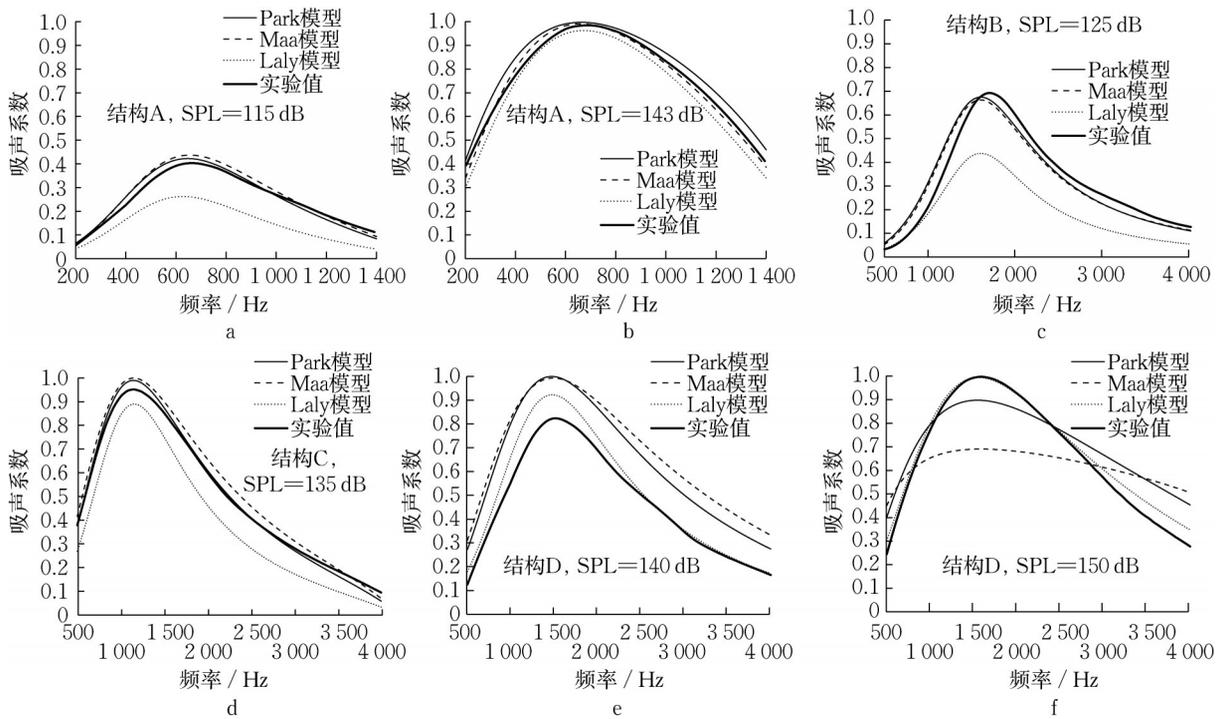


图 1 不同模型不同穿孔结构的吸声比较

Fig. 1 Absorption coefficient of perforated panels by different models

阻抗模型^[5-6],结合传递矩阵法,提出改进传递矩阵法。图2为双层穿孔吸声结构示意图。

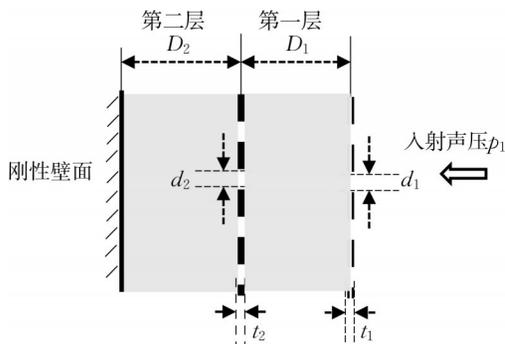


图 2 双层穿孔吸声结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double-layer perforated panels

根据传递矩阵法^[16]可以得到每层穿孔板的声阻抗 Z_{si} 、入射声压 p_1 、透射声压 p_2 以及空腔传递矩阵 S_i 之间的矩阵关系,如式(6)、(7)所示。

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} \cos kD_i & (j\rho_0c) \sin kD_i \\ \left(\frac{j}{\rho_0c}\right) \sin kD_i & \cos kD_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: u_1 和 u_2 分别为穿孔板前后的质点速

度; ρ_0 为空气密度; c 为空气中的声速; k 为波数; Z_{si} 为穿孔板的声阻抗; D_i 为空腔的深度;序号 i 表示穿孔板的第 i 层。穿孔板的传递矩阵 P_i 可以表示为

$$P_i = \begin{bmatrix} 1 & Z_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

高声强下,声阻抗 Z_{si} 与入射声压密切相关,无法仅根据穿孔板的几何参数计算获得。因此,需要改进传递矩阵方法来计算 Z_{si} 。

根据上述对不同非线性声阻抗模型的分析,不同频段下的 Z_{si} 可以根据声压级采用Park模型或Laly模型进行计算。在改进传递矩阵法中,当声压级大于140 dB时使用Laly模型得到声阻抗 $Z_{si-Laly}$,当声压级小于140 dB时使用Park模型得到声阻抗 $Z_{si-Park}$,如式(9)所示。

$$Z_{si} = \begin{cases} Z_{si-Laly} & \text{SPL} \geq 140 \text{ dB} \\ Z_{si-Park} & \text{SPL} < 140 \text{ dB} \end{cases} \quad (9)$$

计算中先根据入射到第一层穿孔板的声压 p_1 计算得到 Z_{s1} ,乘以空腔的传递矩阵,得到 p_1 和 p_2 之间的关系如下:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} S_1 \begin{pmatrix} p_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

然后将 p_2 视为入射到第二层穿孔板表面的声压,从而计算出第二层穿孔板的声阻抗 Z_{s2} ,得到第二层穿孔板的传递矩阵 P_2 。对于多层穿孔板结构,

以此类推,将第*i*层板的传递矩阵 P_i 依次与第*i*层空腔的传递矩阵 S_i 相乘,得到总传递矩阵 T 如下:

$$T = P_1 S_1, \dots, P_i S_i, \dots, P_n S_n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于刚性壁面质点速度为零,因此声波垂直入射时穿孔结构的声阻抗与声压反射系数之间存在如下关系:

$$Z = \frac{p_1}{u_1} = \rho_0 c \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \quad (12)$$

式中: γ 为声压反射系数。

$$\gamma = \frac{T_{11} - \rho_0 c T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c T_{21}} \quad (13)$$

得到 Z 后,双层乃至多层穿孔结构在高声强时的吸声系数由式(14)计算。

$$\alpha = \frac{4 \left(\frac{Z}{\rho_0 c} \right)}{\left[1 + \operatorname{Re} \left(\frac{Z}{\rho_0 c} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{Z}{\rho_0 c} \right) \right]^2} \quad (14)$$

2.2 与实验结果的比较

不同参数的双层穿孔结构在不同入射声压级下其改进传递矩阵法计算结果和实验数据的比较如图3所示,图中电力声类比法和阻抗传输法中每层板的孔声阻抗采用传递矩阵法得到。表2为进行计算的双层穿孔结构的几何参数。

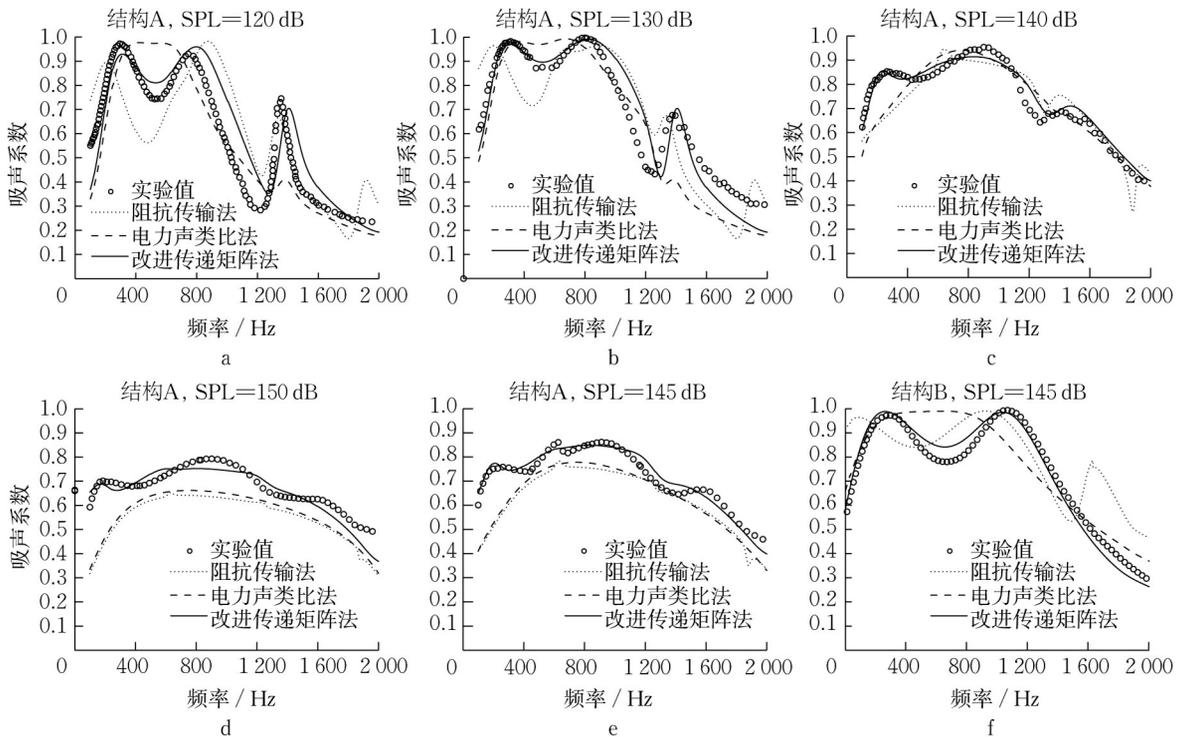


图3 高声强下双层穿孔结构的吸声

Fig. 3 Absorption coefficient of double-layer perforated panels at different sound pressure levels

表2 双层穿孔结构的几何参数

Tab. 2 Parameters of double-layer perforated panels

结构	位置	板厚/mm	孔径/m	穿孔率/%	空腔深度/m
A	第一层	1.00	1.00	2.41	80
	第二层	1.00	0.75	1.35	140
B	第一层	1.00	1.40	6.29	30
	第二层	1.00	1.33	4.65	30

图3a~3d为双层结构A在入射声压级为120~150 dB时的计算结果与实验数据的比较,图3e和图3f为双层结构A和B在入射声压级为145 dB时的计算结果与实验值的比较,图3a~3e中的实验值引用文献[15]的实验结果,图3f中的实验值引用文献

[5]的实验结果。由图3可知,改进传递矩阵法在全频段的计算值与实验值吻合良好,峰值频率和实测值吻合良好,吸声系数峰值的偏差不超过0.1,在整个频带的吸声系数偏差基本不超过0.2。电力声类比法和阻抗传输法的吸声系数计算值偏差较大,共振频率偏差也较明显,甚至在部分情况下吸声频谱特性不同。结果表明,在高声强条件下采用改进传递矩阵法计算双层和多层穿孔结构的吸声具有良好的准确性。

双层结构在高声强下的吸声特性受不同层的声压级及穿孔参数和空腔的影响,声阻随穿孔直径*d*

增大而减小,声抗随 d 增大而增大,共振频率偏向低频;声阻和声抗随穿孔板厚度 t 增大而增大,共振频率偏向低频;声抗随空腔直径 D 增大,共振频率偏向低频;声阻和声抗随穿孔率 σ 增大而减小,共振频率往高频移动;入射声压级增大,则声阻增大而声抗减小,共振频率移向高频。影响双层结构在高声强下吸声的参数众多,对于实际工程应用,可采用遗传算法确定满足目标吸声频谱的优化参量。

3 结论

由于非线性效应,高入射声压级会显著影响穿孔板的声阻抗。对不同穿孔非线性声阻抗模型在不同结构和声压级情况下进行计算,并将计算结果和试验结果进行比较。不同非线性声阻抗模型的结果差异比较大,模型计算准确度和入射声压级相关。在入射声压小于140 dB时, Park模型和Maa模型能得到较好的结果,在入射声压大于140 dB时, Laly模型准确度更高。计算双层或多层穿孔结构在高声强下的吸声特性时,每层穿孔的非线性计算模型需根据声压级确定。基于Laly模型和Park模型,提出改进传递矩阵法,对不同参数和不同入射声压级条件下的双层穿孔结构吸声性能进行了计算,并与实验结果进行比较。在入射声压级小于150 dB时,改进传递矩阵法在全频段的计算值与实验值吻合良好,峰值频率和实测值吻合,吸声系数峰值的偏差不超过0.1。在高声强条件下改进传递矩阵法可准确计算双层和多孔穿孔结构的吸声。

作者贡献声明:

俞悟周:研究思路,文章修改。
贺银芝:文章修改建议。
姜在秀:文章修改建议。
孙浩钧:实验数据整理,文章撰写。

参考文献:

- [1] INGARD U, ISING H. Acoustic nonlinearity of an orifice [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1967, 42(1): 6.
- [2] INGARD U, LABATE S. Acoustic circulation effects and the nonlinear impedance of orifices [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1950, 22(2):211.
- [3] INGARD U. On the theory and design of acoustic resonators [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(6): 1037.
- [4] MAA D Y. Microperforated panel at high sound intensity [J]. *Acta Acustica*, 1996, 21(1):10.
- [5] LALY Z, ATALLA N, MESLIOUI S A. Acoustical modeling of micro-perforated panel at high sound pressure levels using equivalent fluid approach [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 427: 134.
- [6] PARK S H. A design method of micro-perforated panel absorber at high sound pressure environment in launcher fairings [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(3): 521.
- [7] CHANG I J, CUMMINGS A. A time domain solution for the attenuation, at high amplitudes, of perforated tube silencers and comparison with experiment [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, 122(2): 243.
- [8] CUMMINGS A. Acoustic nonlinearities and power losses at orifices [J]. *AIAA Journal*, 1984, 22(6): 786.
- [9] CUMMINGS A. Transient and multiple frequency sound transmission through perforated plates at high amplitude [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986, 79(4): 942.
- [10] GUESS A W. Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, 40(1): 119.
- [11] HERSH A S, WALKER B E, CELANO J W. Helmholtz resonator impedance model, part 1: nonlinear behavior [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(5): 795.
- [12] TAYONG R, DUPONT T, LECLAIRE P. On the variations of acoustic absorption peak with particle velocity in micro-perforated panels at high level of excitation [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(5):2875.
- [13] KRAFT R E, YU J, KWAN H W. Acoustic treatment design scaling methods [R]. Cincinnati: National Cincinnati Aeronautics and Space Administration, 1999.
- [14] MELLING T H. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, 29(1):1.
- [15] ZHOU C, LI X, TIAN J. An experimental study of the nonlinear acoustic properties of a double-layered perforated panel absorber under broad-band noise excitations [C/CD]//36th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. 2007. Istanbul: Institute of Noise Control Engineering, 2007.
- [16] LEE D H, KWON Y P. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 278(4): 847.
- [17] LEE F C, CHEN W H. Acoustic transmission analysis of multi-layer absorbers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 248(4): 621.
- [18] MORSE P M, INGARD K U. *Theoretical acoustics* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1986.
- [19] MAA D Y. Potential of microperforated panel absorber [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(5): 2861.
- [20] ALLARD J F, DAIGLE G. Propagation of sound in porous media [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Modeling Sound Absorbing Materials, 1994, 95(5):2785.