

# 多层吸声材料吸声系数的理论计算

朱从云<sup>1</sup>, 黄其柏<sup>2</sup>

(1. 中原工学院机电学院, 郑州 450007; 2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 目前由穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多层吸声材料的吸声系数还没有理论方法求解, 本文提出了一种多层吸声材料吸声系数的理论解法。首先, 对于由穿孔板和空腔或穿孔板和吸声材料组成的多层吸声材料, 用等效声电类比图求出声阻抗, 从而求得吸声系数; 然后, 对由穿孔板和空腔以及吸声材料组成的多层吸声材料, 利用递推方法求得声阻抗, 从而求得吸声系数。最后, 对由不同层材料组成的多层吸声材料的吸声系数进行了理论计算, 并与实验结果进行了对比, 结果表明: 用该方法理论计算多层吸声材料的吸声系数是可行的。

关键词: 多层吸声材料; 吸声系数; 递推; 声电类比; 声阻抗率

中图分类号: TU55

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-01-0101-05

## Calculation of absorption coefficient of the multiple-layer absorbers

ZHU Cong-yun<sup>1</sup>, HUANG Qi-bai<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Zhongyuan university of technology, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Lechnology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Owing to the fact that no existing theoretical formula can be used to calculate the absorption coefficient of the multi-layer absorbers composed of perforated plates, cavities and porous absorbers, a theoretical method for this calculation is proposed in this paper. First, the acoustic impedance and the absorption coefficient of the multi-layer absorbers composed of perforated plates and cavities or perforated plates and porous absorbers are calculated by using the sound-electro analogy. Then, the acoustic impedance and the absorption coefficient of the multi-layer absorbers composed of perforated plates, cavities and porous absorbers are calculated by using stepped deductions. Theoretical calculation of the absorption coefficients of three types of multi-layer absorbers composed of different materials including perforated plates is carried out, and the results indicate that using this method to calculate the absorption coefficients of the multi-layer absorbers is feasible in contrast with the experimental results.

Key words: multiple-layer absorbers; absorption coefficient; stepped deducing; sound-electro analogy; sound impedance

## 1 引言

在人们的生活空间中无处不存在噪声, 噪声污

染已经成为世界三大污染之一, 它不仅影响人们的身体健康, 影响人们的正常的工作与休息, 而且也是降低工作人员的劳动效率、导致发生各种事故的主要根源, 因此必须对噪声进行控制。通常控制噪声有振动与噪声阻尼控制、吸声降噪、隔声降噪、消声等几种方法<sup>[1,2]</sup>。其中吸声降噪根据其吸声机理可以分为多孔吸声材料吸声、穿孔板吸声、阻抗复合吸声等。吸声材料可以是前述的任意一种材料, 也可以是

收稿日期: 2007-09-29; 修回日期: 2007-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075029)

作者简介: 朱从云(1971-), 男, 江苏人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 振动与噪声控制; 机电系统动力学。

通讯作者: 朱从云, E-mail: zcy711126@163.com

几种材料的组合。通常将吸声材料分为单层吸声材料和多层吸声材料。多层吸声材料能吸收宽带声波,因而在日常生活中比较常见,例如水下吸声结构,汽车的内部结构等等<sup>[3]</sup>。对于由多孔吸声材料组成或多孔吸声材料和空气层组成的多层吸声材料,可以用传递矩阵的方法求得多层吸声材料的吸声系数<sup>[3-7]</sup>,但是当多层吸声材料包含穿孔板时,就不好用传递矩阵的方法求吸声系数,为此,本文对包含有穿孔板的多层吸声材料的吸声系数进行了理论求解。赵松龄先生对于多层吸声材料声阻抗的讨论只是定性的,提出了多层吸声材料不同组合方式对吸声系数的影响,并未进行定量的讨论<sup>[8]</sup>。马大猷先生提出微穿孔共振吸声结构以来,相应的讨论确实很多。但是一般集中于微穿孔板和空腔的组合方式<sup>[1]</sup>。而对微穿孔板,多孔吸声材料和空腔的组合方式的研究特别是理论计算方面在国内外的文献还未见报道。同时,本文所提的微穿孔板,多孔吸声材料声阻抗的计算方法也与国内研究该方面的专节专家所提的计算方法不同。Beranek 和 Ver<sup>[9]</sup>提出了穿孔板声阻抗的精确表达公式,该表达式中说明了穿孔板的厚度,孔径,孔间距,开孔率对声阻抗的影响。Delany 和 Bazley<sup>[10]</sup>提出了多孔吸声材料的复波数和特征阻抗可以用流阻率、波数、空气密度和声波频率来表示。Qunli<sup>[11]</sup>用大量的实验数据证明了多孔吸声材料关于波数和特征阻抗表述的正确性。Davern<sup>[12]</sup>做了一个包含穿孔板,多层吸声材料和空腔的三层吸声材料的实验。但是对于包含穿孔板,多层吸声材料和空腔的多层吸声材料的吸声系数的理论求解在国内目前还是一个空白。为此,本文提出了一种多层吸声材料吸声系数的理论解法。首先,对于由穿孔板和空腔或穿孔板和多孔吸声材料组成的多层吸声材料,用等效声电类比图求出声阻抗,从而求得吸声系数;然后,对由穿孔板和空腔以及吸声材料组成的多层吸声材料,利用递推方法求得声阻抗,从而求得吸声系数。最后,对由不同层材料组成的多层吸声材料的吸声系数进行了理论计算,并与实验结果进行了对比,结果表明:用该方法理论计算多层吸声材料的吸声系数是可行的。

## 2 穿孔板、空腔、多孔吸声材料的声阻抗

多层吸声材料中第  $n$  层圆形开孔、正方形分布的穿孔板的声阻抗为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} Z_{np} = \frac{\rho_0}{\varepsilon_n} \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{t_{pn}}{2a_n}\right) + j \frac{\omega\rho_0}{\varepsilon_n} \left[ \sqrt{\frac{8\nu}{\omega}} \left(1 + \frac{t_{pn}}{2a_n}\right) + t_{pn} + \delta_n \right] \\ \varepsilon_n = \frac{\pi a_n^2}{b_n^2} \\ \delta_n = 0.85 \times (2a_n) \times \theta_n(\varepsilon_n) \\ \theta_n(\varepsilon_n) = 1 - 1.47\sqrt{\varepsilon_n} + 0.47\sqrt{\varepsilon_n^3} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\rho_0$  为空气的密度,  $\nu$  为空气运动粘滞系数, 室温下  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $\omega$  为声波的角频率,  $t_{pn}$  为穿孔板的厚度,  $a_n$  为穿孔板的孔半径,  $b_n$  为穿孔板的孔间距,  $\varepsilon_n$  为穿孔板的开孔率,  $\delta_n$  为粘性边界层的厚度。

多层吸声材料中第  $n$  层均匀且各向同性的多孔吸声材料的声传播常数和特性阻抗的经验公式为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} k_{an} = \frac{\omega}{c_0} \left[ 0.189 \left( \frac{\rho_0 f}{R_{in}} \right)^{-0.595} \right] + j \frac{\omega}{c_0} \left[ 1 + 0.0978 \left( \frac{\rho_0 f}{R_{in}} \right)^{-0.7} \right] \\ Z_{an} = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0.057 \left( \frac{\rho_0 f}{R_{in}} \right)^{-0.754} \right] - j \rho_0 c_0 \left[ 0.087 \left( \frac{\rho_0 f}{R_{in}} \right)^{-0.732} \right] \end{cases} \quad (2)$$

那么, 第  $n$  层均多孔吸声材料的声阻抗的为:

$$Z_{an} = Z_{an} \coth(k_{an} t_{an}) \quad (3)$$

其中,  $\rho_0$  为空气的密度,  $c_0$  为空气声速,  $f$  为声波的频率,  $t_{an}$  为第  $n$  层多孔吸声材料的厚度。  $R_{in}$  为第  $n$  层多孔吸声材料单位厚度单位面积的流阻 (比流阻率)。

多层吸声材料中第  $n$  层空腔的声传播常数和特性阻抗的公式为:

$$\begin{cases} k_{cn} = jk_c \\ Z_{cn} = \rho_0 c_0 \end{cases} \quad (4)$$

如果第  $n$  层空腔的背面是刚性壁, 则空腔的声阻抗为:

$$Z_{cn} = -j \rho_0 c_0 \cosh(k_c t_{cn}) \quad (5)$$

其中,  $t_{cn}$  为第  $n$  层空腔的厚度。

对于由穿孔板, 多孔吸声材料和空腔组成的多层吸声材料, 实际中有意义的组成方式有: 穿孔板和空腔的组合; 穿孔板和多孔吸声材料的组合; 多孔吸声材料的组合; 穿孔板和空腔以及多孔吸声材料的组合。多孔吸声材料组合的多层吸声材料的吸声系数可以用传递矩阵的方法计算, 在此不再叙述, 下面进行另外三种组成方式的多层吸声材料吸声系数的理论计算。

### 3 穿孔板和空腔或多孔吸声材料组成的多层吸声材料的声阻抗

穿孔板和空腔或穿孔板和多孔吸声材料组成的多层吸声材料的布置如图 1 所示。

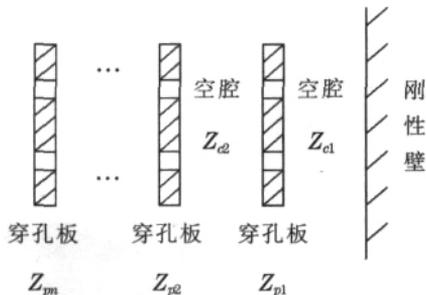


图 1 穿孔板和空腔的布置图

Fig.1 Arrangement of perforate plate and cavities

将图 1 的声学结构图表示为声电类比图, 如图 2 所示:

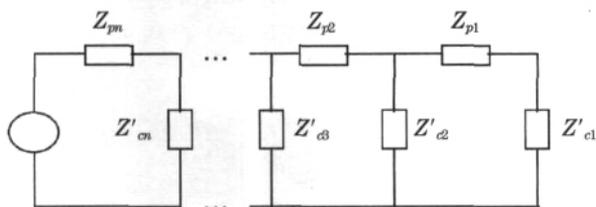


图 2 多层吸声材料声电类比图

Fig.2 The equivalent electrical circuit of the multi-layer absorber shown in Fig.1

图中的声阻抗见前面的计算公式。由图 2 可得多层吸声材料的声阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{r+1} = \frac{Z_r Z_{c(r+1)}}{Z_r + Z_{c(r+1)}} + Z_{p(r+1)} & (r=1, 2, 3 \dots n-2, n-1) \quad (6) \\ Z_1 = Z_{c1} + Z_{p1} \end{cases}$$

由公式(6)的递推关系可知, 当  $r=n-1$  时, 计算所得的  $Z_n$  就是穿孔板和空腔组成的多层吸声材料的声阻抗。当多层吸声材料是由穿孔板和多孔吸声材料组成时, 只要将图 2 中的  $Z_{c\alpha}$  用  $Z_{a\alpha}$  代替即可, 相应的公式(6)中的  $Z_{c\alpha}$  用  $Z_{a\alpha}$  代替。

### 4 穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多层吸声材料的声阻抗

穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多层吸声材料的布置如图 3 所示。

将由穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多

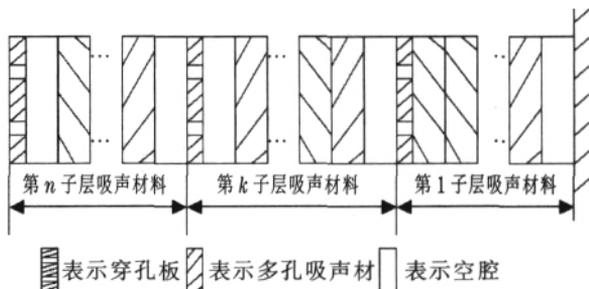


图 3 穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多层吸声材料的布置图  
Fig.3 The arrangement of the multi-layer absorber composed of perforated plates and airspaces and Porous materials

层吸声材料分成第  $n$  层子层吸声材料, 每个子层吸声材料由一块穿孔板和任意块多孔吸声材料以及任意层空腔组成, 如图 3 所示。对于第一子层, 声阻抗的计算如下:

第 1 子层的每一层材料表面的声阻抗和背面的声阻抗的关系为:

$$Z_{f1j(r+1)} = \frac{Z_{fjr} \cosh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)}) + Z_{1j(r+1)} \sinh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)})}{Z_{fjr} \sinh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)}) + Z_{1j(r+1)} \cosh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)})} \quad (r=0, 1 \dots m-1) \quad (7)$$

式(7)中符号的意义表示为:  $Z_{f1j(r+1)}$  表示第 1 子层第  $r$  层材料表面的声阻抗。其中下标表示为:  $f$  表示表面, 1 表示多层吸声材料第 1 子层,  $j=a$  或  $c$ , 表示多孔吸声材料或者空腔,  $r$  表示第 1 子层中的第  $r$  层材料, 因为第一子层的最后一层材料的背面是刚性壁, 因此, 其背面的声阻抗为无穷大。由式(7)的递推关系可以计算得到第  $m$  层材料表面的声阻抗, 即穿孔板背面的声阻抗  $Z_{f1jm}$ , 此时, 有下面的声电类比图, 如图 4 所示。

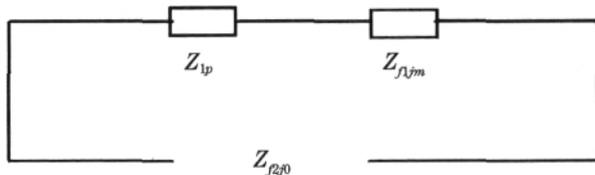


图 4 第一子层的声电类比图

Fig.4 The equivalent electrical circuit of the 1st sub-layer

由图 4 可得:

$$Z_{f2j0} = Z_{1p} + Z_{f1jm} \quad (8)$$

式(8)中  $Z_{f2j0}$  表示第 1 子层穿孔板表面的声阻抗, 也就是第 2 子层最后一层材料背面的声阻抗。对于第  $k$  子层, 有下面的关系:

$$Z_{fkj(r+1)} =$$

$$Z_{k_j(r+1)} = \frac{Z_{f_{k_j r}} \cosh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)}) + Z_{k_j(r+1)} \sinh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)})}{Z_{f_{k_j r}} \sinh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)}) + Z_{k_j(r+1)} \cosh(k_{1(r+1)} t_{1(r+1)})}$$

(k=1, 2, ..., n-1, n) (r=0, 1, ..., n-1) (9)

式(9)中符号的意义和式(8)中符号的意义一致, s表示第k子层共有s层材料(不包括第k子层的穿孔板)。同理,对于第k子层中第s层材料表面的声阻抗,即第k子层中穿孔板背面的声阻抗  $Z_{f_{k_j m}}$ , 有图5所示的声电类比图:

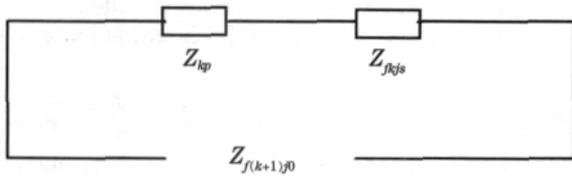


图5 第k子层的声电类比图

Fig.5 The equivalent electrical circuit of the kth sub-layer

由图5可得:

$$Z_{f(k+1)j0} = Z_{kp} + Z_{f_{k_j s}} \quad (10)$$

因此,由公式(7)、(8)、(9)、(10)以及图4和图5可以递推求得第n子层穿孔板表面的声阻抗,即多层吸声材料表面的声阻抗  $Z_n = Z_{f(n+1)j0}$

### 5 多层吸声材料吸声系数的理论计算

由前面的推导可以求得多层吸声材料表面的声阻抗  $Z_n$ ,  $Z_n$  可以表示为:

$$Z_n = \rho_0 c_0 (r + jx) \quad (11)$$

其中, r 表示对空气的相对声阻, x 表示对空气的相对声抗。对于正则入射的声波, 多层吸声材料表面的反射系数 R 为:

$$R = \frac{r - 1 + jx}{r + 1 + jx} \quad (12)$$

由式(12)可得多层吸声材料在正则入射下的吸声系数 a 为:

$$a = \frac{4r}{(r+1)^2 + x^2} \quad (13)$$

### 6 数值计算与实验

数值计算与实验所采用的多层吸声材料分别取三种情况, 第一种情况是穿孔板和空腔组合而成的多层吸声材料; 第二种情况是穿孔板和多孔吸声材料组合而成的多层吸声材料; 第三种情况是穿孔板和多孔吸声材料以及空腔组合而成的多层吸声材料。它们的结构示意图如图6所示:

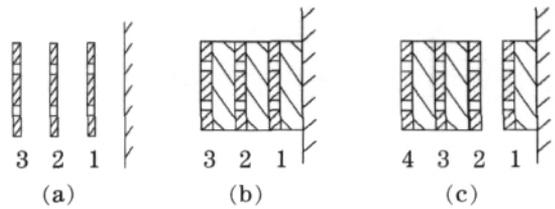


图6 数值计算与实验的多层吸声材料布置图

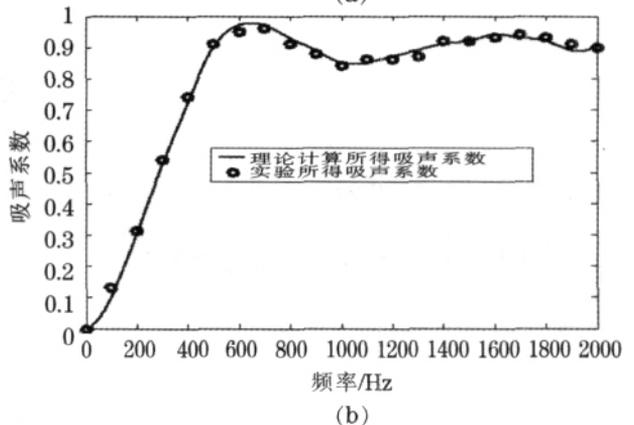
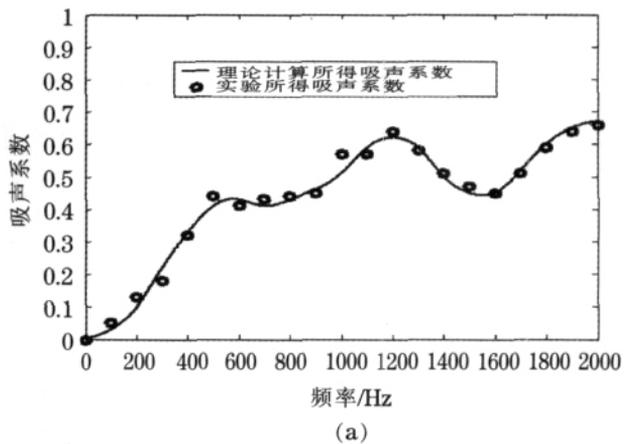
Fig.6 Three arrangements of multi-layer absorber for calculation and experiment

图6(a)第一种情况,  $t_{1p}=t_{2p}=t_{3p}=1\text{mm}$ ,  $t_{1a}=t_{2a}=t_{3a}=39\text{mm}$ ,  $b_1=b_2=b_3=6\text{mm}$ ,  $a_1=0.5\text{mm}$ ,  $a_2=0.75\text{mm}$ ,  $a_3=1.0\text{mm}$ ,  $\varepsilon_1=8.7\%$ ,  $\varepsilon_2=4.9\%$ ,  $\varepsilon_3=2.2\%$

图6(b)第二种情况  $t_{1p}=t_{2p}=t_{3p}=1\text{mm}$ ,  $t_{1a}=t_{2a}=t_{3a}=19\text{mm}$ ,  $b_1=b_2=b_3=6\text{mm}$ ,  $a_1=0.5\text{mm}$ ,  $a_2=0.75\text{mm}$ ,  $a_3=1.0\text{mm}$ ,  $\varepsilon_1=8.7\%$ ,  $\varepsilon_2=4.9\%$ ,  $\varepsilon_3=2.2\%$  多孔吸声材料的流阻率为  $\sigma=16000\text{Ns/m}^4$ 。

图6(c)第三种情况,  $t_{1p}=t_{2p}=t_{3p}=t_{4p}=1\text{mm}$ ,  $t_{1a}=t_{2a}=t_{3a}=t_{4a}=19\text{mm}$ ,  $b_1=b_2=b_3=b_4=6\text{mm}$ ,  $a_1=0.5\text{mm}$ ,  $a_2=0.75\text{mm}$ ,  $a_3=1.0\text{mm}$ ,  $a_4=1.25\text{mm}$ ,  $\varepsilon_1=13.6\%$ ,  $\varepsilon_2=8.7\%$ ,  $\varepsilon_3=4.9\%$ ,  $\varepsilon_4=2.2\%$  多孔吸声材料的流阻率为  $\sigma=16000\text{Ns/m}^4$ 。

由上面的参数计算所得的多层吸声材料的吸声系数与实验所得的吸声系数结果如图7所示。



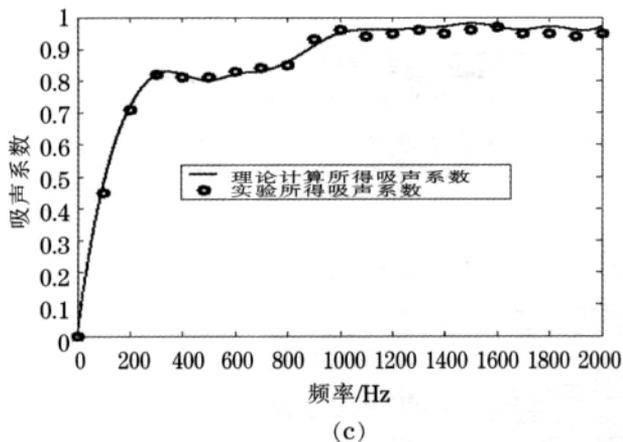


图 7 (a)第一种情况数值计算与实验所得的吸声系数图;(b)第二种情况数值计算与实验所得的吸声系数图;(c)第一种情况数值计算与实验所得的吸声系数图

Fig.7 (a)Calculated and measured absorption coefficients for the first type of absorber  
(b)Calculated and measured absorption coefficients for the second type of absorber  
(c)Calculated and measured absorption coefficients for the third type of absorber

由图 7(a)~图 7(c)可知:

(1) 在低频声波入射下,穿孔板背后有空腔的多层吸声材料理论计算和实验所得的吸声系数与背后是多孔吸声材料的多层吸声材料的吸声系数相差不多,但是在高频时,穿孔板背后留有空腔的效果就没有背后留有多孔吸声材料的效果好;

(2) 当穿孔板背后的多孔吸声材料的层数远大于空腔的层数时,空腔的吸声作用在高频时就很不明显,在低频时,有一定的效果,但是效果不明显。

(3) 对于不同组成方式的多层吸声材料,理论计算所得的吸声系数和实验所得的吸声系数误差不是很大,从而说明了用本方法计算多层吸声材料的可行性和正确性。

## 7 结 论

本文针对由穿孔板和空腔以及多孔吸声材料组成的多层吸声材料的吸声系数还没有理论方法求解这一现状,提出了一种多层吸声材料吸声系数的理论解法。首先,对于由穿孔板和空腔或穿孔板

和吸声材料组成的多层吸声材料,用等效声电类比图求出声阻抗,从而求得吸声系数;然后,对由穿孔板和空腔以及吸声材料组成的多层吸声材料,利用递推方法求得声阻抗,从而求得吸声系数。最后,对由不同层材料组成的多层吸声材料的吸声系数进行了理论计算,并与实验结果进行了对比,结果表明:用该方法理论计算多层吸声材料的吸声系数是可行的。

## 参 考 文 献

- [1] 马大猷, 沈嶸. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 225-228.  
MA Dayou, SHEN Hao. Sound note[M]. Beijing: Science press, 1983. 225-228.
- [2] 黄其柏. 工程噪声控制学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999, 5-9.  
HUANG Qibai. Noise control in engineering[M]. Wuhan: HUST Press, 1999, 5-9.
- [3] 何祚镛, 王曼. 水下均匀材料复合层吸声特性研究[J]. 应用声学, 1995, 15(5): 1-5.  
HE Zuoyong, WANG Man. Research on under water composed materials[J]. Applied acoustic, 1995, 15(5): 1-5.
- [4] Dunn I P, Davern W A. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers[J]. Applied acoustics, 1986, 19(7): 321-336.
- [5] Lee F C, Chen W H. Acoustic transmission analysis of multilayer absorbers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(4): 621-634.
- [6] L Jinkyoo, W George, J Swenson. Compact sound absorbers for low frequencies[J]. Noise Control Engineering Journal, 1992, 38(5): 109-117.
- [7] CHEN W H, Lee F C, Chiang D M. On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(6): 337-355.
- [8] 赵松龄. 噪声的降低与隔离[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983. 65-73.  
ZHAO Songling. Reduction and isolation of noise[M]. Beijing: Mechanical industry press, 1983. 65-73.
- [9] L Beranek, Ver I L. 1992 Noise and vibration control engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, 232-243.
- [10] Delany M E, Bazley E N. Acoustic properties of fibrous absorbent material[J]. Applied acoustics, 1970, 13(3): 105-116.
- [11] W Qunli. Empirical relations between acoustic properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam[J]. Applied acoustics, 1988, 25(8): 141-148.
- [12] Davern. Perforated facings backed with porous material as sound absorbers-an experiment study[J]. Applied acoustics, 1977, 10(5): 85-112.