多层微穿孔板结构声学性能计算方法对比分析*

赵晓丹 胡 鹏 孙 平

(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要 计算多层微穿孔板结构声学特性方法传统主要用声电类比法,目前出现阻抗转移法和传递矩阵法,对比分析这三种计算方法,同时进行相应的实验验证。结果表明:阻抗转移法和传递矩阵法实质上是相同的,这两种方法计算结果与实验结果吻合良好。声电类比法在空腔较大时计算结果偏离实验值,原因是声电类比法采用集总参数分析,计算多层结构时,空腔单元只考虑声顺,忽略声质量,导致误差。阻抗转移法和传递矩阵法不存在这一误差,计算准确。

关键词 微穿孔板,阻抗转移,传递矩阵,声电类比

中图分类号: TB535 O422

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)03-0196-06

The comparative analyses of the calculation methods for absorptivity of multilayer micro-perforated panel absorbers

ZHAO Xiaodan HU Peng SUN Ping

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract The absorptivity of multilayer micro-perforated panel absorber (MPA) usually is estimated by the equivalent circuit (EC). Recently, there are attempts to use the impedance transfer method (ITM) or the transfer matrix method (TMM) to calculate the absorptivity. It is necessary to compare the three methods. The corresponding experiments are carried out for the comparison. Theoretical analysis and experimental results show that the ITM and TMM are the essentially same, and their calculation results are consistent with the experimental data. However, the calculations results using EC disagree with experimental data, especially for the structure with long cavity. EC is a kind of concentrated parameter analysis method. For a multilayer structure, this method only considers acoustic compliance, while ignores the effect of acoustic mass. Thus, it will cause calculation error. This kind of error does not exist in ITM and TMM, thus they are more accurate than EC.

Key words Micro-perforated panel absorber, Impedance transfer, Transfer matrix, Equivalent circuit

²⁰¹¹⁻¹¹⁻⁰³ 收稿; 2012-02-15 定稿

[&]quot;江苏大学高级专业人才科研基金项目 (11JDG096); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (苏政办发〔2011〕6 号); 江苏省动力机械清洁能源与应用重点 实验室开放基金项目 (QK09008) 资助

作者简介: 赵晓丹 (1963-), 男, 江苏镇江人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 内燃机噪声与振动控制。

胡鹏 (1986-), 男, 在读博士研究生。

孙平 (1963-), 男, 教授, 博士生导师。

[†]通讯作者: 胡鹏, E-mail:hptmisme717@126.com

1 引言

微穿孔板吸声结构利用穿孔自身的声阻控制 吸声结构相对声阻率,无须填充纤维类等吸声材料,能应用于高温、高速气流^[1-6]等特殊环境,可以 在灰尘和油污^[3,6-8]比较严重的场合使用,能够解决 传统吸声材料不耐久以及存在二次污染的问题,在 噪声控制领域有着很好的应用前景。

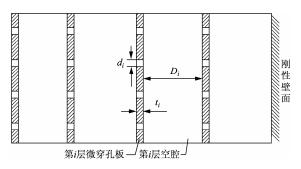
虽然微穿孔板吸声结构是宽频带吸声结构,但 是,单层微穿孔板结构的吸声频带范围有限,为了 拓宽结构的吸声频带,需要采用多层微穿孔结构。 采用双层微穿板结构获得的吸声系数曲线仍然不 够理想,有文献提出多层微穿板结构的优化设计, 并将优化后的四层、三层、双层微穿孔板结构吸声 系数进行对比,得出经过优化后的三层和四层微穿 孔板共振吸声结构反共振吸声系数得以提高, 在更 宽广频带上有着很好的吸声效果[10]。在制造成本许 可的情况下,增加微穿孔板结构层数,有利于获得 丰满的吸声系数曲线,多层微穿板结构声学性能计 算研究是一项有意义的工作。传统上,多层结构计 算方法主要是基于声电类比法, 空腔距离比较大或 频率较高时, 计算存在误差, 将给微穿孔板结构的 设计和优化带来问题。有研究者将阻抗转移法和传 递矩阵法引入多层微穿孔板结构声学特性的计算 中[11-12],但是没有引起足够的重视,目前主要采用 是声电类比法[2-3,8],因而有必要对这三种计算方法 进行对比分析。本文从理论和实验说明阻抗转移法 和传递矩阵法计算声学特性实质上是相同的:声电 类比法由于忽略空腔声质量, 计算多层微穿孔板吸 声结构声学特性时,则存在明显误差;而阻抗转移 法和传递矩阵法对空腔部分推导合理, 能解决空腔 声阻抗的近似计算带来的误差,适合多层微穿孔板 结构计算。

2 微穿孔板结构吸声系数计算

2.1 声电类比计算微穿孔板结构

图 1 是四层微穿孔板结构和等效电路图, d_i,t_i,D_i 是第 i 层微穿孔板结构的微孔直径,板厚,空腔厚度,在等效电路图里通常各层空腔的声阻抗近似为空腔的声顺,根据微穿孔板结构理论,可以

由图 1 求得双层、三层和四层结构的声阻抗,对于层数更多的结构计算与上面方法相同。



(a) 微穿孔板结构示意图

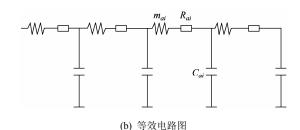


图 1 微穿孔板吸声结构示意图及等效电路图

首先求得第三和四层结构总的声阻抗为:

$$Z_{34} = R_{a3} + j\omega m_{a3} + \frac{1}{j\omega C_{a3}} \frac{\left(R_{a4} + j\omega m_{a4} + \frac{1}{j\omega C_{a4}}\right)}{\frac{1}{j\omega C_{a3}} + R_{a4} + j\omega m_{a4} + \frac{1}{j\omega C_{a4}}}, \quad (1)$$

则第二、三和四层总的声阻抗为:

$$Z_{234} = R_{a2} + j\omega m_{a2} + \frac{1}{j\omega C_{a2}} \frac{Z_{34}}{\frac{1}{j\omega C_{a2}} + Z_{34}},$$
 (2)

同理求得四层微穿孔板结构总的声阻抗为:

$$Z_{1234} = R_{al} + j\omega m_{a1} + \frac{1}{j\omega C_{a1}} \frac{Z_{234}}{\frac{1}{j\omega C_{a1}} + Z_{234}},$$
 (3)

其中, $Z_{ai} = R_{ai} + j\omega m_{ai}$, C_{ai} 分别是第i 层微穿孔板声阻抗,空腔声顺。声阻抗计算参考文献[16],声顺计算公式为 $C_{ai} = S_0 D_i / (\rho c_0^2)$ 。

2.2 阻抗转法计算微穿孔板结构

阻抗转移法从最后一层逐渐一层层向前推导,

最后得到管口的阻抗转移公式,文献[17]将该方法运用于微穿孔板结构声学特性分析与计算,计算过程如下。

单层微穿孔板结构的声阻抗是由微穿孔的声阻抗和空腔的声阻抗组成,所以第四层微穿孔板结构声阻抗可以记为:

$$Z_4 = Z_{a4} - j \frac{\rho_0 c_0}{S_0} \cot(kD_4), \tag{4}$$

第三层和第四层微穿孔板结构的声阻抗为:

$$Z_{34} = Z_{a3} + \frac{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} Z_4 \cot(kD_3) + j \left(\frac{\rho_0 c_0}{S_0}\right)^2}{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} \cot(kD_3) + j Z_4},$$
 (5)

第二、三和四层总的声阻抗为:

$$Z_{234} = Z_{a2} + \frac{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} Z_{34} \cot(kD_2) + j \left(\frac{\rho_0 c_0}{S_0}\right)^2}{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} \cot(kD_2) + j Z_{34}}, \quad (6)$$

四层微穿孔板结构总的声阻抗为:

$$Z_{1234} = Z_{a1} + \frac{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} Z_{234} \cot(kD_1) + j \left(\frac{\rho_0 c_0}{S_0}\right)^2}{\frac{\rho_0 c_0}{S_0} \cot(kD_1) + j Z_{234}}, \quad (7)$$

其中 Z_{ai} 分别是第i 层微孔的声阻抗, D_i 是第i 层空 腔距离。

采用声电类比法和阻抗转移法计算多层结构 声阻抗后,可得到整个吸声结构的相对声阻抗率 $r+jx=ZS_0/(\rho_0c_0)$,继而得到声波垂直入射时微穿 孔板结构的吸声系数为:

$$\alpha_0 = \frac{4r}{(1+r)^2 + x^2}$$
 (8)

2.3 传递矩阵法计算微穿孔板结构

文献[11]用传递矩阵法计算了穿孔板,文献[13] 和[14]将该方法运用到了微穿孔板的计算中,但是微孔部分的归一化声阻抗计算采用的是 Rao 和 Munjal^[15]的模型公式,这一模型中需要测量修正系数 $\delta_{\rm r}$ 。文献[12]将传递矩阵的微穿孔部分声阻抗率

用马大猷教授理论计算,不再需要进行试验测量, 这一计算过程如下:微穿孔板和空腔传递矩阵分别 为是^[12]:

$$\begin{bmatrix} P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(9)

$$[S] = \begin{bmatrix} \cos(kD) & (j\rho_0 c_0)\sin(kD) \\ \frac{j}{\rho_0 c_0} \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 Z_s 为微穿孔板的声阻抗率,计算公式参考文献 [16]。 ρ_0 , c_0 , k 分别是空气的密度、声速、波数, D (mm)是空腔距离。

对于多层微穿孔板结构,将各个单元微孔的传递矩阵 $[P_i]$ 与空腔的传递矩阵 $[S_i]$ 按顺序连乘,得总的传递矩阵 [T]

$$[T] = [P_1][S_1]...[P_i][S_i]...[P_n][S_n] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}. (11)$$

计算获得吸声结构的传递矩阵后,由吸声系数 计算公式^[14],可以得到结构吸声系数为:

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re} \left(\frac{T_{11}}{\rho_0 c_0 T_{21}} \right)}{\left[1 + \operatorname{Re} \left(\frac{T_{11}}{\rho_0 c_0 T_{21}} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{T_{11}}{\rho_0 c_0 T_{21}} \right) \right]^2} \cdot (12)$$

3 对比分析

用上述三种方法计算微穿孔板结构吸声系数,并与驻波管法测得的实验数据进行对比。实验仪器使用北京声望公司的 sw200 型驻波管,实验装置如图 2 所示。试验时扬声器发出某一单频信号,首先拉动传声器小车,初估信号的最大值,调整功率放大器,控制波幅处的声压级不超过 95 dB,保证其相对声阻率在线性范围内^[18]。按照驻波管测量规范进行测试,将探管端部移至微穿孔板表面处,慢慢离开,找到一个声压极大值,然后小心地找出相邻的第一个声压极小值,计算得到吸声系数。每隔100 Hz,调整信号频率,重复上述步骤,得到吸声系数曲线。

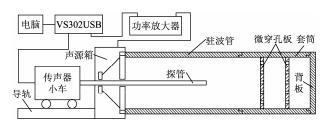


图 2 驻波管法测量吸声系数实验装置图

图 3 是空腔距离较小时实验结果与理论值对比曲线,而图 4 是当空腔距离较大时实验结果与理论计算值对比曲线。

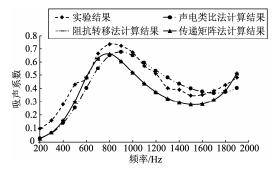


图 3 双层微穿孔板的结构理论与实验结果对比

$$d_1 = d_2 = 0.8 \text{ mm}, \ t_1 = t_2 = 0.8 \text{ mm}, \ \sigma_1 = 0.03$$

 $\sigma_2 = 0.03, \ D_1 = 23 \text{ mm}, \ D_2 = 32 \text{ mm}$

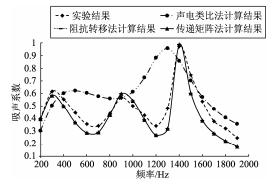


图 4 双层微穿孔板的结构理论与实验结果对比

$$d_1 = d_2 = 0.8 \text{ mm}, \ t_1 = t_2 = 0.8 \text{ mm}, \ \sigma_1 = 0.03$$

 $\sigma_2 = 0.03, \ D_1 = 65 \text{ mm}, \ D_2 = 155 \text{ mm}$

从图 3 和图 4 可以得出以下两个结论:

结论 1: 阻抗转移法计算曲线与传递矩阵法计算曲线重合,说明这两种方法计算结果一致。从计算公式上分析,用阻抗转移法对双层微穿孔板声阻抗的计算如等式(5),由等式(9)~(12),可得双层微穿孔板结构的传递矩阵法为:

$$\begin{split} & [T_2] = [P_1][S_1][P_2][S_2] \\ & = \begin{bmatrix} 1 & Z_{s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(kD_1) & (j\rho_0c_0)\sin(kD_1) \\ \frac{j}{\rho_0c_0} \sin(kD_1) & \cos(kD_1) \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 1 & Z_{s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(kD_2) & (j\rho_0c_0)\sin(kD_2) \\ \frac{j}{\rho_0c_0} \sin(kD_2) & \cos(kD_2) \end{bmatrix}. \end{split}$$

根据文献[15],建立微穿孔板左侧与刚性壁面的声 压与振动速度的矩阵关系为:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ u_3 \end{bmatrix},$$
(14)

其中 p_1 , u_1 分别为微穿孔板左侧的声压与振动速度, p_3 , u_3 为刚性壁面处得声压与振动速度。因为振动速度在刚性壁面为零,得 $u_3 = 0$,声阻抗率 Z_s 为:

$$Z_s = \frac{p_1}{u_1} = \frac{T_{11}}{T_{21}} \tag{15}$$

由上述关系,将 T_2 展开成计算公式后,得双层微穿 孔板的声阻抗表示为:

$$Z = \frac{p_{1}}{S_{0}u_{1}} = Z_{a1} + \frac{\rho_{0}c_{0}}{S_{0}} \left(Z_{a2} - j\frac{\rho_{0}c_{0}}{S_{0}}\cot(kD_{2})\right)\cot(kD_{1}) + j\left(\frac{\rho_{0}c_{0}}{S_{0}}\right)^{2}}{\frac{\rho_{0}c_{0}}{S_{0}}\cot(kD_{1}) + j\left(Z_{a2} - j\frac{\rho_{0}c_{0}}{S_{0}}\cot(kD_{2})\right)}.$$
(16)

可以看出,等式(16)与等式(5)是相同的,说明 阻抗转移法与传递矩阵法本质是一致的。

结论 2: 阻抗转移法和传递矩阵法计算结果与实验结果吻合好,而声电类比法计算结果在空腔距离比较小时,与实验结果吻合较好,但是在空腔距离较大时,计算结果与实验结果明显分离。分析原因,当空腔距离 D 比较小时声学上可以将空腔视为"集总"元件,空腔声阻抗近似用声顺来代替,忽略声质量的影响。但是空腔距离比较大时,不能简单地将其看作集总元件,而应该将其看作具有分布参数的系统,其声质量的影响不能被忽略。根据文献[19],长管道的等效电路如图 5 所示。集总

参数等效处理方法是声电类比法存在计算误差的 原因。

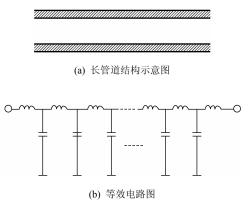


图 5 长管道的结构图及其等效电路图

在单层微穿孔板的计算方面,工程人员已经注意到这一问题,开始不采用声顺近似或声顺加声质量的近似,而直接采用空腔的准确公式。但是这一处理方式不能移植到多层微穿孔板结构,原因是在多层微穿孔板结构等效电路中前一层空腔的声质量与后面微穿孔板的声质量是串联的,而与空腔的声顺是并联的。使用声电类比法计算多层微穿孔板时,空腔部分必须进行声质量和声顺的近似等效;而阻抗转移法和传递矩阵法在计算过程中对空腔部分的计算处理,是根据平面波在管道中传播推导得出,更加合理。

增加微穿孔板层数,进一步进行实验验证,实验结果与理论计算结果进行了对比如图 6 和图 7 所示。

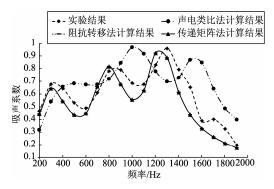


图 6 三层微穿孔板结构理论值与实验结果对比

$$\begin{aligned} d_1 &= d_2 = d_3 = 0.8 \text{ mm }, \ t_1 = t_2 = t_3 = 0.8 \text{ mm} \\ \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma_3 = 0.03 \ , \ D_1 = 65 \text{ mm} \\ D_2 &= 75 \text{ mm }, D_3 = 80 \text{ mm} \end{aligned}$$

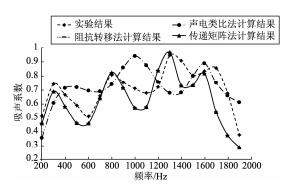


图 7 四层微穿孔板结构理论值与实验结果对比

$$\begin{aligned} d_1 &= d_2 = d_3 = d_4 = 0.8 \text{ mm} \;, \;\; t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 0.8 \text{ mm} \\ \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = 0.03 \;, \;\; D_1 = 56 \text{ mm} \\ D_2 &= 55 \text{ mm} \;, \;\; D_3 = 67 \text{ mm} \;, \;\; D_4 = 31 \text{ mm} \end{aligned}$$

从图 6 和图 7 中可以观察到: 微穿孔板结构增加到三层和四层以后,阻抗转移法和传递矩阵法计算结果与实验数据仍然吻合,声电类比法出现较明显的偏离。

4 结论

由于传统的关系,声电类比法目前是计算微穿孔板结构吸声性能的常用方法。该方法原理上采用集总参数分析,空腔距离小于 30 mm 时,该方法的计算结果与实验结果比较吻合。但是当空腔距离比较大或频率高时,声电类比法只考虑空腔声顺而忽略空腔声质量的影响,此时使用声电类比法计算多层微穿孔板结构声学特性存在误差,造成的计算误差随空腔厚度增加而增大。

阻抗转移法和传递矩阵法计算吸声系数在形式上不同,但本质上是相同的。这两种方法没有忽略空腔声质量的影响,计算结果与实验结果吻合良好,精度高于声电类比法。建议使用阻抗转移法或传递矩阵法代替声电类比法分析计算多层微穿孔板结构声学特性。

参考文献

- [1] 张军锋,王敏庆,刘彦森,等. 微穿孔板结构抑制声不稳定燃烧 试验[J]. 火力与指挥控制 2010, 35(8): 177-179.
- [2] 张军锋,王敏庆,刘彦森,等. 高温下双层串联微穿孔板结构声 学特性研究[J]. 压电与声光,2009,31(2):139-141.
- [3] 侯献军, 田翠翠, 刘志恩, 等. 双层串联微穿孔板消声器的设计与试验[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1094-1096.

- [4] 吕玉恒, 郁慧琴, 刘丽华, 等. 微穿孔板消声器应用于大型冷却 塔噪声治理[J]. 噪声与振动控制, 2005, S1: 254-258.
- [5] 李玉芳, 党宇豪. 微穿孔板共振吸声结构在飞机喷流噪音控制上的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2005, 11: 128-130.
- [6] 王占学, 乔渭阳, 李文兰. 微穿孔板消声器在 MA60 飞机 APU 排气管的应用[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 331-335.
- [7] 赵晓丹, 张晓杰, 李守成. 微穿孔板在降低 NJI043DE 汽车噪声中的应用[J]. 汽车工程, 2008, 30(6): 488-490.
- [8] 张立强, 侯宏, 杨建华, 等. 微穿孔导流罩用于油烟机的噪声控制[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1021-1024.
- [9] 隋林强, 赵晓丹, 祝瑞银. 遗传算法在双层微穿孔结构优化设计中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(2):49-52.
- [10] 张晓杰, 赵晓丹. 多层微穿孔板的优化设计[J]. 电声技术, 2008, 32(2): 71-74.
- [11] LEE D H, KOWN 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(4-5): 847-860.

- [12] 赵晓丹, 赵燕燕. 微穿孔板传递矩阵计算方法的改进及实验研究[J]. 声学技术, 2009, 28(2): 164-167.
- [13] 庞培森, 汪鸿振. 用传递矩阵法分析微穿孔板的吸声特性[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 48-51.
- [14] 张斌,陶泽光,丁辉.用传递矩阵法预测单层或多层微孔板的吸声性能[J].应用声学,2007,26(3):64-169.
- [15] RAO K N, MUNJAL M L. Experimental evaluation of impedance of perforates with grazing flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 108(2): 283-295.
- [16] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-393.
- [17 ZHOU J, SHEN Y, YANG J B, et al. A note on the prediction method of reverberation absorption coefficient of double layer micro-perforated membrane[J]. Applied Acoustics, 2006: 106-111.
- [18] 马大猷. 高强度下的微穿孔板[J]. 声学学报, 1996, 21(1): 10-14.
- [19] 赵松龄. 噪声的降低与隔离(上册)[M]. 上海:同济大学出版社, 1985: 48-128.