

斜置微穿孔板结构声学特性计算与试验研究

胡 鹏, 赵晓丹

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要:采用声电类比法计算斜置微穿孔板结构吸声性能存在误差。运用阻抗转移法计算斜置结构的吸声系数,用假想平面将斜置微穿孔板结构离散为若干个等宽定空腔的吸声单元,建立简化模型,采用阻抗转移计算每个吸声单元的吸声系数,综合各单元吸声系数,获得整个结构的吸声系数。设计相应的实验比较计算结果表明,采用阻抗转移法计算结果与实验结果吻合良好,声电类比法计算结果偏离实验结果较大。声电类比法采用集中参数分析,需将空腔声阻抗进行近似,造成误差;阻抗转移法不存在这一误差,计算更合理和准确。

关键词:微穿孔板;斜置;阻抗转移;声电类比;吸声

中图分类号:TB535

文献标识码:A

The Experiments and Calculation on the Absorptivity of Micro-perforated Panel Absorber with Alterable Air-cavity

HU Peng, ZHAO Xiaodan

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

Abstract: The absorptivity of Micro-perforated Panel Absorber (MPA) with the alterable air-cavity, calculated by electro-acoustic circuit approach (EC), exists the calculation error. The absorptivity is estimated by the impedance transfer method (ITM). The imaginary planes are adopted to divide the MPA with alterable the air-cavity into several absorbers with equal width. The absorptivity of each absorber is calculated by ITM after the simplification of the model. By synthesizing the absorptivity of each sound absorption unit, the sound absorption coefficient of the whole structure is obtained. And the corresponding experiments are carried out. A comparison is made with the absorptivity calculated by ITM and EC. It shows that the theoretical results calculated by ITM agree well with experimental results, and is more close to the experimental results than the theoretical results by EC. EC is a kind of concentrated parameter analysis method. 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 their calculations are more accurate than EC.

Key words: microperforated panel; alterable air-cavity; impedance transfer; equivalent circuit; sound absorption

0 引言

微穿孔板结构是一种绿色吸声体,能应用于高温、潮湿等特殊环境,可在灰尘和油污较严重的场合使用^[1-9],能解决传统吸声材料不耐久和存在二次污染的问题,在噪声控制领域有很好的应用前景。

目前人们对于定空腔微穿孔板结构的研究已较成熟,但定空腔共振吸声结构频带宽度有限。在许

多实际工程场合中,希望在较宽范围内有较大的吸声系数,因此提出了斜置微穿孔板结构。斜置微穿孔板结构可使共振频率在一定的范围内分布,能拓宽吸声频带^[10]。采用声电类比法计算斜置微穿孔板结构的声学特性存在误差,实际工程中是通过驻波管实验先做小样品吸声性能分析,反复比较后取出较优者,确定斜置结构的各项参数,工作周期长。

收稿日期:2012-03-19

基金项目:2012年江苏省研究生创新计划基金资助项目(CXZZ12_0675);江苏省动力机械清洁能源与应用重点实验室开放基金资助项目(QK09008);江苏大学高级专业人才培养基金资助项目(11JDG096);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目(苏政办发[2011]6号)

作者简介:胡鹏(1986-),男,湖北天门人,博士生,主要从事内燃机噪声控制、排放控制的研究,E-mail:hptmisme717@126.com。赵晓丹(1963-),男,江苏镇江市人,副教授,主要从事噪声与振动控制及信号处理的研究,E-mail:zhaoxiaodan@126.com。

本文采用阻抗转移法计算斜置微穿孔结构的声学特性,并进行实验验证。对比研究阻抗转移法和声电类比法的计算精度,说明采用阻抗转移法分析计算斜置微穿孔板结构声学特性的计算精度更高,更适用于斜置结构的分析计算。

1 微穿孔板结构吸声系数计算

图1为单层微穿孔板结构示意图。图中, d 为微孔直径, t 为微穿孔板厚, D 为微穿孔板背后空腔的距离。微孔面积 $S_0 = \pi d^2/4$,微穿孔板面积 $S = S_0/\sigma$,其中 σ 为穿孔率。在末端有一声负载,设其声阻抗为 Z_{a3} ,带负载的整个微穿孔板结构声阻抗记为 Z_{a1} ,微穿孔板后的声阻抗记为 Z_{a2} 。根据阻抗转移公式^[11]可得

$$Z_{a2} = \frac{\rho c}{S} \frac{Z_{a3} + j \frac{\rho c}{S} \tan(kD)}{\frac{\rho c}{S} + j Z_{a3} \tan(kD)} \quad (1)$$

$$Z_{a1} = \frac{\rho_e c}{S_0} \frac{Z_{a2} + j \frac{\rho_e c}{S} \tan(kt_e)}{\frac{\rho_e c}{S_0} + j Z_{a2} \tan(kt_e)} \quad (2)$$

式中: ρ 和 c 分别为空气密度和声速; $k = \omega/c$ 为波数; ρ_e 为微孔里媒质有效密度; t_e 为微穿孔板有效厚度。 ρ_e 和 t_e 分别为

$$\rho_e = \rho / \left\{ 1 - \frac{4 J_1(kd/2)}{kd J_0(kd/2)} \right\} \quad (3)$$

$$t_e = nb + \frac{8}{3\pi} \left(1 - \frac{5}{4} \sqrt{\sigma} + \frac{\sigma^2}{4} \right) \quad (4)$$

式中 J_0 和 J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数^[12]。

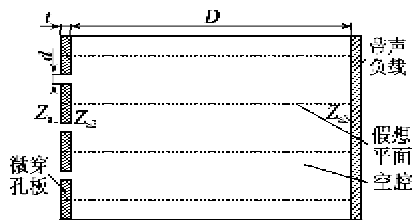


图1 带声负载的单层微穿孔板结构

由式(1)、(2)联立并化简,可得

$$Z_{a1} = \frac{\frac{\rho c}{S} + j \rho c \tan(kt) \frac{\text{Stan}(kD)}{Z_{a3} + j \frac{\rho c}{S} \tan(kD)} + j Z_{a3}}{\frac{\text{Stan}(kD)}{Z_{a3} + j \frac{\rho c}{S} \tan(kD)} + j \frac{S_0 \tan(kt)}{\text{Stan}(kD)}} \quad (5)$$

微穿孔板结构板很薄, $kt_e < 0.5$, 即 $2\pi t_e/\lambda < 0.5$ 时, 利用 $\tan x \approx x$, 即 $S_0 \tan(kt_e) \approx S_0 kt_e$ 。又 $|\text{Stan}(kD)| \geq S k D$, 则 $\frac{S_0 kt_e}{S k D} \leq \frac{S_0 t_e}{S D} \rightarrow 0$, 从而式(5)可进一步简化为

$$Z_{a1} = \frac{j \rho_e c \tan(kt_e)}{S_0} + \frac{\frac{\rho c}{S} Z_{a3} \cot(kD) + j \left(\frac{\rho c}{S} \right)^2}{\frac{\rho c}{S} \cot(kD) + j Z_{a3}} \quad (6)$$

对于微穿孔部分的声阻抗要考虑粘滞性影响, 因此将式(6)中的 $j \rho_e c \tan(kt_e)/S_0$ 改为微穿孔的声阻抗 Z_s ^[13], 故带声负载的单层微穿孔板结构声阻抗为

$$Z_{a1} = Z_s + \frac{\frac{\rho c}{S} Z_{a3} \cot(kD) + j \left(\frac{\rho c}{S} \right)^2}{\frac{\rho c}{S} \cot(kD) + j Z_{a3}} \quad (7)$$

单层微穿孔板结构的末端被刚性壁面所封闭, 即体积振动速度恒为0, 也即末端的声阻抗 Z_{a3} 为无穷大, 根据式(7)可得到单层微穿孔板结构声阻抗为

$$Z_{a1} = Z_s - j \frac{\rho c}{S} \cot(kD) \quad (8)$$

对于双层微穿孔板结构, 将第二层微穿孔板结构视为第一层微穿孔板结构的声负载, 这样就可利用式(7)计算获得双层微穿孔板结构声阻抗为

$$Z_{a1} = Z_{s1} + \frac{\frac{\rho c}{S} Z_2 \cot(kD_1) + j \left(\frac{\rho c}{S} \right)^2}{\frac{\rho c}{S} \cot(kD_1) + j Z_2} \quad (9)$$

式中: $Z_2 = Z_{s2} - j \frac{\rho c}{S} \cot(kD_2)$; D_1 和 D_2 分别为第一、二层厚度; Z_{s1} 和 Z_{s2} 为第一、二层微穿孔板声阻抗。

2 斜置微穿孔板结构计算

2.1 斜置微穿孔板结构模型的简化

2.1.1 单层斜置微穿孔板结构简化

图2为斜置单层微穿孔板结构示意图。图中, θ 为微穿孔板相对于背板的倾角, h_i 为左端高度, a 为微孔半径。其平面简化模型如图3所示。用假想平面将斜置微穿孔板结构分成 n 个等宽空腔吸声单元, 其中第 i 个吸声单元的空腔深度为 h_i , α_i 为吸声系数, 吸声单元面积为 s_i , 整个斜置微穿孔板结构吸声系数应为不同空腔微穿孔板结构吸声系数的平均值。

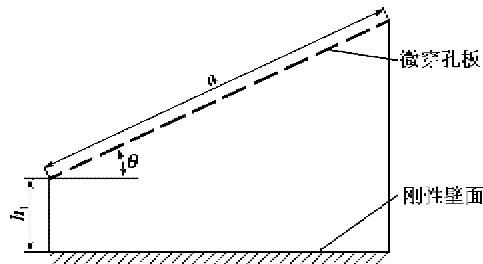


图2 单层斜置微穿孔板吸声结构

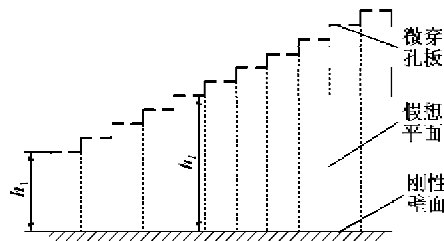


图3 单层斜置微穿孔板结构简化模型

2.1.2 双层斜置微穿孔板结构简化

文献[14]中提出了双层穿孔板不平行布置的吸声结构,同样微穿孔板结构也可有类似的结构,进一步拓宽吸声频带,如图4所示。图5为双层斜置微穿孔板结构简化模型,其简化过程与单层斜置微穿孔板结构类似,第*i*个吸声单元的吸声系数按双层定空腔微穿孔板结构计算。

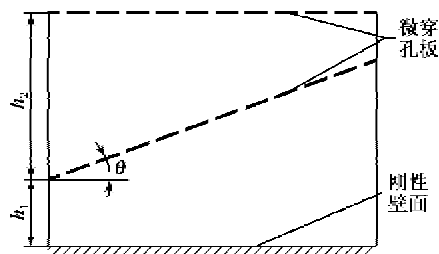


图4 双层斜置微穿孔板结构

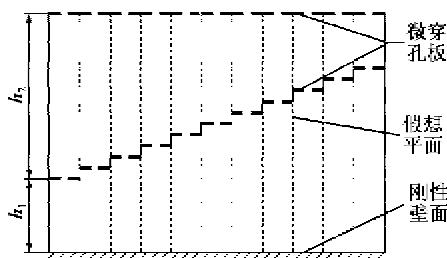


图5 双层斜置微穿孔板结构简化模型

2.2 斜置微穿孔板结构吸声系数计算

将斜置微穿孔板结构等效为若干个等宽定空腔的吸声单元,每个吸声单元的吸声系数采用阻抗转移计算,综合各单元吸声系数,获得整个结构的吸声系数。

对于单层斜置微穿孔结构,第*i*个吸声单元的

声阻抗采用式(8)计算,其表达式为

$$Z_{si} = Z_{si} - j \frac{\rho c}{s_i} \cot(kD_i) \quad (11)$$

计算获得吸声单元的声阻抗后,可获得声波垂直入射时第*i*个吸声单元的吸声系数为

$$\alpha_i = \frac{\text{Re}\left(\frac{Z_{si}s_i}{\rho c}\right)}{\left[1 + \text{Re}\left(\frac{Z_{si}s_i}{\rho c}\right)\right]^2 + \left[\text{Im}\left(\frac{Z_{si}s_i}{\rho c}\right)\right]^2} \quad (12)$$

式中 $M_i = T_{ai} / (T_{bi} \rho_0 c)$; Re 和 Im 分别为实部和虚部。

斜置微穿孔板结构的吸声系数为

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i / \sum_{i=1}^n s_i \quad (13)$$

对于双层斜置空腔微穿孔板结构,每个吸声单元空腔声阻抗计算采用式(9)计算,即第*i*个吸声单元的声阻抗为

$$Z_1 = Z_{ai} +$$

$$\frac{\frac{\rho c}{s_i} \left[Z_{ai} - j \frac{\rho c}{s_i} \cot(kD_{2i}) \right] \cot(kD_{1i}) + j \left(\frac{\rho c}{s_i} \right)^2}{\frac{\rho c}{s_i} \cot(kD_{1i}) + j \left[Z_{ai} - j \frac{\rho c}{s_i} \cot(kD_{2i}) \right]} \quad (14)$$

则双层斜置微穿孔板结构第*i*个吸声单元的吸声系数采用式(12)计算,然后采用式(13)可计算得到整个结构的吸声系数。

3 实验验证与结果分析

实验仪器使用北京声望公司的 sw200 型驻波管,实验装置如图6所示。试验时由电脑输出某一单频信号,信号经调整功率放大后,驱动扬声器产生声波。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,拉动传声器小车慢慢离开,找到一个声压极大值,然后找出相邻的第一个声压极小值,计算得到吸声系数。每隔 50 Hz,调整信号频率,重复上述步骤,得到吸声系数曲线。

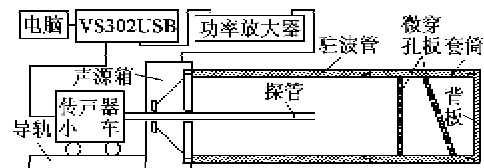


图6 驻波管法测量吸声系数实验装置图

为了保证计算结果的可靠性,首先对比阻抗转移法计算单层和双层微穿孔板结构的吸声系数与试验测量结果。图7、8分别为采用阻抗转移法计算单

层和双层吸声结构的吸声系数和试验测量结果的对比曲线。

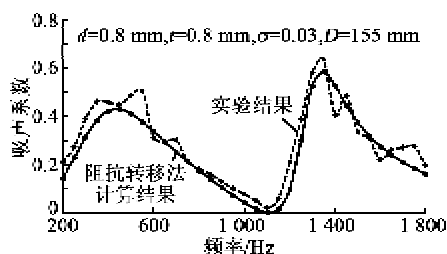


图7 单层结构理论与实验结果对比

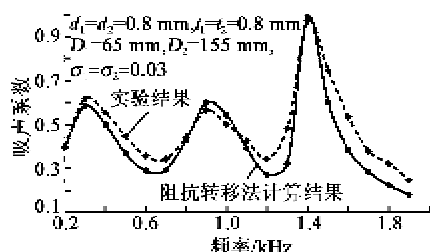


图8 双层结构理论计算结果与实验结果对比

由图7、8可知,阻抗转移法计算结果与实验结果吻合良好,表明阻抗转移法计算的可靠性,接着用阻抗转移法计算斜置微穿孔板结构吸声单元的吸声系数。

图9、10分别为采用阻抗转移法计算斜置的单层和双层微穿孔板结构的吸声系数和试验测量结果的对比曲线。

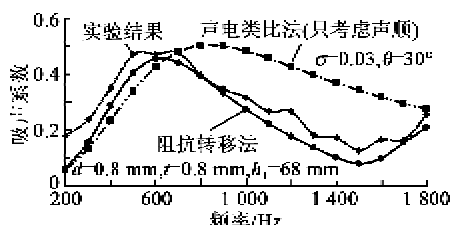


图9 单层斜置结构计算结果与实验结果对比

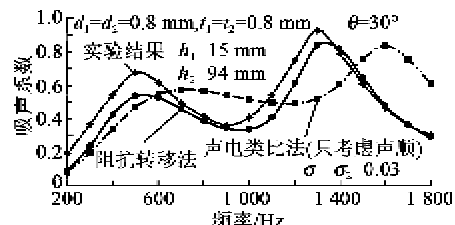


图10 双层斜置理论结果与实验结果对比

从图9、10可看出,采用阻抗转移法计算斜置结构的吸声系数与实验结果吻合良好,采用声电类比法计算结果存在误差,且误差随频率增加而增大。

分析原因,声电类比法中将空腔视为“集总”元件来进行处理,空腔声阻抗常被近似为声顺,忽略声质量的影响,适合于空腔距离较小的情况。空腔距

离增大后,集总参数的运算方法误差增加^[15]。对于斜置微穿孔板结构,空腔距离不均匀,其中有一部分空腔距离较大,这一部分采用声电类比法等近似计算产生误差,这部分误差最终影响整个结构吸声性能的计算精度。阻抗转移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出,更合理。

4 结束语

阻抗转移法能有效计算平行放置微穿孔板结构的声学特性,本文将这种方法引入计算斜置微穿孔板结构吸声系数。阻抗转移法计算斜置结构吸声系数的结果与驻波管试验测量结果吻合良好,其计算精度显著高于声电类比法。阻抗转移法可用于斜置微穿孔板结构声学特性的工程计算分析。

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.
ZHANG Junfeng, WANG Mingqing, LIU Yansen, et al. Experimental research on instable combustion of fire-box with micro perforated panel absorber as acoustic restraining equipment[J]. Fire Control & Command Control, 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.
ZHANG Junfeng, WANG Mingqing, LIU Yansen, et al. Study on acoustic characteristic of double layer micro-perforated panel absorber at high temperature[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(2):139-141.
- [3] 王鹏,王敏庆,刘彦森,等.并联微穿孔板吸声结构研究[J].压电与声光,2008,30(4):489-491.
WANG Peng, WANG Mingqing, LIU Yansen, et al. Study on the parallel microperforated panels[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(4):489-491.
- [4] 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.
HOU Xianjun, TIAN Cuicui, LIU Zhien, et al. Design and test of a double layer micropunch plate muffler[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8):1094-1096.
- [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

- (11):128-130.
- LI Yufang, DANG Yuhao. The application and study of the micro perforation board resonance sound absorption structure used in the controlling of airplane's jet wasb. noise[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engin-eering, 2005, 11(11):128-130.
- [6] 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.
- ZHANG Liqiang, HOU Hong, YANG Jianhua, et al. Noise control of a range hood by a guide flow dome with micro-perforation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engine-ering, 2010, 29(8): 1021-1024.
- [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.
- ZHAO Xiaodan, ZHANG Xiaojie, LI Shoucheng. Application of micro-perforated plate to noise attenuation of vehicle NJI043DE [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(6): 488-490.
- [8] 张德满, 李舜酩. 面向工程的微穿孔板吸声结构设计方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 130-135.
- ZHANG Deman, LI Shunming. Engieering-oriented design method of micro-perforated absorber structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 130-135.
- [9] 张德满, 李舜酩, 尚伟燕. 工程机械机外噪声声源分析及降噪处理[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 362-365.
- ZHANG Deman, LI Shunming, SHANG Weiyan. Outside noise analysis and control for construction machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(3): 362-365.
- [10] 彭小云. 工业降噪材料-微穿孔金属板吸声体的研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(4): 21-23.
- PENG Xiaoyun. Noise rediction material factory buildings—the study of metal microperforated absorber's absorption properties [J]. Industrial Construction, 2002, 32(4): 21-23.
- [11] 何琳, 朱海潮, 邱小军, 等. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2006.
- [12] 赵松龄. 噪声的降低与隔离(上册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [13] 李湘辉, 贺志勇, 蒋安邦. 新型吸声体的研究[J]. 工程建设与设计, 2002(2): 47-48.
- LI Xianghui, HE Zhiyong, JIANG Anbang. The research on a new absorption structure[J]. Const-ruction & Design for Project, 2002(2): 47-48.
- [14] 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.
- MA Dayou. General theory and design of microperforated-panel absorbers[J]. Acta Acustica, 1997, 22(5): 385-393.
- [15] 赵晓丹, 赵燕燕. 空腔声质量对双层微穿孔板计算影响的研究[J]. 噪声与振动控制, 2008(5): 157-159.
- ZHAO Xiaodan, ZHAO Yanyan. Influence of cavity sou-nd mass on double layer micro-perforated panel calcula-tion [J]. Noise and Vibration Control, 2008(5): 157-159.

《压电与声光》免费索阅卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____
 地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____
 企业产品: _____

索阅期号: _____ 年 _____ 月 (每次仅限壹期)

复印有效