

双层板结构隔声性能阻抗法分析

王佐民, 姜在秀

(同济大学 声学研究所, 上海 200092)

摘要: 应用阻抗分析法与少量试样测试相结合的研究途径, 探讨具有确定平面尺寸和边界条件的双层板结构的隔声量, 进而得到相应的半理论半经验拟合公式. 对 3 种不同夹层形式的双层板结构的倍频程隔声量进行实例分析, 得到各自的拟合公式. 3 种夹层形式分别为吸声材料夹层、空气夹层(空腔)和空气-吸声材料夹层. 利用这些拟合公式, 可以便捷、高效地开展隔声结构参量的工程筛选.

关键词: 隔声; 双层板; 阻抗分析法

中图分类号: O 422.8

文献标识码: A

Impedance Analysis Method for Sound Insulation of Double Panels

WANG Zuomin, JIANG Zaixiu

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The sound insulation of double panels with a certain plane dimensions and boundary condition can be analyzed by a combinative way of impedance analysis method and a few measurements, and an expert formula can be obtained. Three kinds of sandwich material constructions were analyzed respectively. Its sound insulations and expert formulae were obtained in octave band. These three kinds of sandwich materials are absorbing sandwich, air sandwich, and air-absorbing sandwich. It will be convenient and high efficient to screen insulation construction parameters by these expert formulae in engineering design.

Key words: sound insulation; double panels; impedance analysis method

预测模型和相应的测量规范^[1-7].

由于影响结构隔声性能的因素甚多, 至今未得到一种普适的预测模型. 主要的影响因素有板的厚度、密度、刚度、阻尼, 夹层材料的吸声特性、吻合频率、共振频率, 有限尺度结构的特征模态、边界约束条件和声波入射角度等. 现有的各种预测模型不仅均有严格的限定条件, 而且存在较大的预测误差. 文献[1]的分析结论是: 多数模型单频率隔声量的预测误差为 20 dB, 计权隔声量的预测误差 15 dB; 少量模型单频率隔声量的预测误差为 10 dB, 计权隔声量的预测误差 5 dB.

基于上述现状, 在目前的工程设计中, 基本上仍是通过大量样品的系列测量来进行隔声结构的选型. 这就需要投入相当的人力、财力和较长的研发周期. 因此, 有必要寻找一种理论与实测相结合的途径来提高隔声结构的筛选效率.

阻抗分析法的基本思路是首先获得隔声结构各层的阻抗, 然后求出各层组合后结构整体的阻抗, 再根据声波的反射定律来计算无限大结构的隔声量^[8]. 但是, 工程中应用的隔声结构都不是无限大的, 这将引入有限结构的特征频率和边界约束条件, 从而使得实际结构的隔声量明显偏离阻抗分析法的理论值. 而且, 这个偏离值很难进行定量的理论计算.

笔者以工程中广泛应用的双层板隔声结构为研究对象, 探讨阻抗分析法与少量样品的实测数据相结合, 得到相应的拟合公式, 然后通过拟合公式进行该类型隔声结构参量筛选的研究.

1 计算公式

阻抗分析法是一种结构隔声量计算的常规的方法, 文献资料和专业教材中都有详细阐述. 这里, 仅

隔声结构, 特别是轻型的薄板结构, 广泛应用于建筑、汽车、船舶、航空和宇航等领域. 自 20 世纪中叶开始, 国内外声学工作者对隔声结构的理论模型、仿真分析和样品测量等开展广泛研究, 提出数十种

收稿日期: 2010-06-07

第一作者: 王佐民(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为环境声学、噪声与振动控制. E-mail: zmwang@tongji.edu.cn

通讯作者: 姜在秀(1977—), 男, 讲师, 理学博士, 主要研究方向为环境声学、噪声与振动控制. E-mail: sh7783@gmail.com

列出本文应用阻抗分析法计算时所涉及的一些计算公式,其推导过程请参阅相关的文献资料^[8-9].

1.1 薄板的声阻抗率

通常,多层隔声结构的面层材料是密实薄板.考虑薄板材料的损耗因子,对弯曲振动的薄板,声阻抗率为

$$z_m = j\omega \rho_s \left(1 - \frac{f^2}{f_c^2} \sin^4 \theta_i\right) + \eta \omega \rho_s \frac{f^2}{f_c^2} \sin^4 \theta_i \quad (1)$$

其中: ρ_s 为薄板面密度; f 为声波频率; θ_i 为声波入射角,对正入射, $\theta_i = 0$; η 为薄板的损耗因子,典型值 $\eta = 0.010 \sim 0.0001$; ω 为声波的圆频率, $\omega = 2\pi f$.

1.2 夹层材料的声阻抗率

对于多层隔声结构,常以吸声材料(或空气层)作为夹层材料.假定第 n 层夹层材料的有效密度为 ρ_e 、复声速为 c_e 、厚度为 D ,则有^[9]刚性背面的材料层法向声阻抗率

$$z_n = \rho_e c_e \coth(j\omega D/c_e)$$

若材料背面的法向声阻抗率是 z_{n+1} ,则材料前表面的法向声阻抗率 z_n 为

$$z_n = \frac{z_{n+1} \coth(j\omega D/c_e) + \rho_e c_e}{\coth(j\omega D/c_e) + z_{n+1}/\rho_e c_e} \quad (2)$$

材料的 ρ_e 和 c_e 可以实测得到,对有些纤维性吸声材料,也可理论估算^[10].

1.3 多层介质平面波传播的阻抗转移定理

设定无限大均匀媒质层的密度为 ρ_e 、声速为 c_e 、厚度为 D ,材料层后表面处的法向声阻抗率为 z_{n+1} ,则材料层前表面处的法向声阻抗率可由式(2)计算.

1.4 多层介质平面波传播的质点速度转移定理

对声波垂直入射情况,材料层后表面处的质点振动速度为 v_{n+1} ,则材料层前表面的质点振动速度 v_n 为 $v_n = (v_{n+1}/z_e)[z_e \cos(kD) + jz_{n+1} \sin(kD)]$ (3) 其中, $k = \omega/c_e$; $z_e = \rho_e c_e$.

1.5 隔声计算

根据隔声量 R 的定义,假定隔声结构的前后两侧均是空气介质,则对于入射角 θ_i 的入射声波

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\tau_p(\theta_i)} &= \frac{p_i}{p_t} = \frac{1}{1 - r_p(\theta_i)} \cdot \frac{v_i}{v_t} \\ R(\theta_i) &= 20 \lg |1/\tau_p(\theta_i)| \\ r_p(\theta_i) &= (z_f \cos \theta_i - 1)/(z_f \cos \theta_i + 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: $\tau_p(\theta_i)$ 为入射角在 θ_i 时隔声结构的声压透射系数; p_i 为隔声结构前界面的入射声压, p_t 为隔声结构后界面的透射声压, v_i 为隔声结构前界面的质点振动速度; v_t 为隔声结构后界面的质点振动速度; z_f 为隔声结构前界面处的总声阻抗率; ρ_0 为空气密度; c_0 为空气声速.

如果隔声结构的面板厚度 h 很小,一般假定薄板两侧的质点振动速度相等.

对于无规入射情况,可用式(5)计算扩散声场的隔声量.理论上,式(5)中的积分上限是 $\pi/2$.但是,工程计算时积分限取 $0^\circ \sim 78^\circ$ 更合适.

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\pi/2} \tau_p^2(\theta_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i}, \bar{R} = 10 \lg \frac{1}{\bar{\tau}} \quad (5)$$

1.6 薄板的吻合频率

声波入射无限大薄板,当薄板的受迫弯曲波的速度与自由弯曲波速度相吻合时,薄板失去传声阻力.这种现象称为吻合效应.满足吻合效应的最低频率称为吻合临界频率 f_c .

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho_m(1-\sigma^2)}{E}} \quad (6)$$

其中: E 为薄板材料杨氏模量; ρ_m 为薄板材料密度; σ 为薄板材料泊松比.

1.7 夹层板的共振频率

若两平行薄板间充满有效压缩模量为 B_e 的吸声材料,材料厚度为 D ,前、后薄板的面密度分别为 ρ_{s1} 和 ρ_{s2} ,则夹层板的共振频率 f_0 为

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa(\rho_{s1} + \rho_{s2})}{\rho_{s1}\rho_{s2}}} \\ \kappa &= \text{real}(B_e)/D \\ B_e &= \rho_e c_e^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

这里,弹性系数 κ 由 B_e 的实部求得.

当夹层内充满空气时,建议采用修正公式

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\rho_0(\rho_{s1} + \rho_{s2})}{\rho_{s1}\rho_{s2}D}} \quad (8)$$

1.8 材料层的阻尼系数

由 B_e 的虚部可得到材料的阻尼系数 r_m

$$r_m = \text{Im}(B_e)/\omega D \quad (9)$$

需要注意,空腔空气层的实际阻尼系数(吸声系数)很小.在噪声控制工程中,建议在温度 20°C 时采用吸声系数简化公式^[11]

$$\alpha = 7.4 \times 10^{-8} f^2 D/\Phi$$

其中, Φ 为空气的相对湿度.

文献[3]认为,考虑结构边界等因素的作用,计算时所取的空腔空气的有效吸声系数应远大于空气的实际值.

1.9 多层材料串联组合的等效弹性系数和等效阻尼系数

有些夹层是多层吸声材料的串联组合结构.假

定相邻两层的弹性系数分别为 κ_1, κ_2 , 阻尼系数分别为 r_1, r_2 , 则二者串联后的等效参量是^[12]

$$\left. \begin{aligned} \kappa_m &= \frac{\kappa_1 A + \kappa_2 B}{(\kappa_1 A + \kappa_2 B)^2 + \omega^2 (r_1 A + r_2 B)^2} \\ r_m &= \frac{r_1 A + r_2 B}{(\kappa_1 A + \kappa_2 B)^2 + \omega^2 (r_1 A + r_2 B)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中: $A = 1/(\kappa_1^2 + \omega^2 r_1^2)$; $B = 1/(\kappa_2^2 + \omega^2 r_2^2)$.

2 实例分析

大多数隔声理论讨论的模型是无限大平面的隔声结构. 而实际(包括实验室测量)的隔声结构都是大小有限的. 这样就会产生两方面的影响, 一是有限尺寸面板的(弯曲)振动模态, 二是结构的边界约束. 通常实际的约束条件比较复杂, 既不会是完全自由的边界, 也不会是完全嵌定的边界. 对于这些影响, 可以定性地讨论分析, 但是很难定量地计算. 因此, 需要探讨一种理论与实测相结合的方法筛选隔声结构设计的参量.

图1是4种常用的轻质隔声结构类型. 图1a是单层薄板, 由于在文献[13]中可以查到多种不同材质、不同厚度的单层薄板的隔声量, 这里不讨论. 图1b是两层薄板之间填充吸声材料的夹层结构. 图1c是两层薄板之间为空气层. 图1d是两层薄板间为空气层和吸声层串联组合的夹层结构. 现对后3种结

构类型分析讨论, 所用测量数据均引自文献[13].

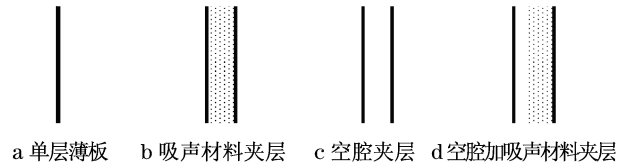


图1 4种隔声结构

Fig.1 4 kinds of insulation constructions

2.1 吸声材料夹层结构

对文献[13]中的8种吸声夹层结构进行算例分析. 这里仅列出两侧面板分别为2 mm和1 mm的钢板, 夹层厚度分别为65, 80和100 mm, 重度为 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 超细玻璃棉3种结构的分析结果, 从而得

$$R = R_1 - 38 \lg f_{\text{oct}} + 94 \quad (11)$$

其中: R 为结构的倍频程隔声量, dB; R_1 为由阻抗法计算的倍频程隔声量, dB; f_{oct} 为倍频程中心频率, Hz.

图2同时给出测量值和公式计算值, 其最大偏差在 $D = 65 \text{ mm}$, $f_{\text{oct}} = 4000 \text{ Hz}$ 处, 测量值66 dB, 偏差8 dB. R_{w1} 和 R_{a1} 分别表示计算值的平均 R_w (计权隔声量) 和 R_a (平均隔声量), R_{w2} 和 R_{a2} 分别表示测量值的平均 R_w 和 R_a , 对应数值位于纵轴.

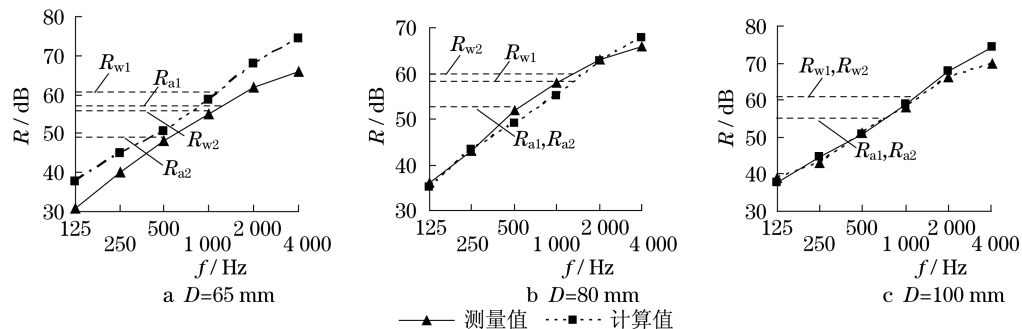


图2 吸声夹层结构隔声量测量

Fig.2 Sound insulation of an absorbing sandwich construction

由于无法得到文献[13]测量结构中所用超细玻璃棉的实样, 计算时其声学参量是根据文献[10]的理论估算的. 利用式(11), 就可以对吸声夹层结构的参量筛选研究.

2.2 空腔夹层结构

若在两并行薄板之间不填充任何材料, 即成为图1c所示的空腔夹层结构. 在处理这类结构前, 首先要确定空气层的阻尼系数(吸声系数). 前面已提及, 空气层的实际吸声系数很小. 然而, 有些文献建

议, 计算时可取远大于实际值的“有效吸声系数”.

分别对这2种阻尼系数(吸声系数)分析讨论. 如果采用“有效吸声系数”, 可以得到与式(11)相仿的拟合公式, 仅修正项的系数有些不同. 但这需要反复试探“有效吸声系数”的经验值, 可能会很不方便.

如果采用实际值则不需要多次试探, 但得到的拟合公式形式会与式(11)有所不同. 例如, 对于前面层3 mm钢板、中间层80 mm厚空腔、后面层3 mm

钢板的结构(图3),拟合公式为

$$R = R_1 - 45.4 \lg f_{\text{oct}} + 1/[0.0315 + (f_{\text{oct}} - 2000)^2] + 1/[0.03 + (f_{\text{oct}} - 4000)^2] + 117 \quad (12)$$

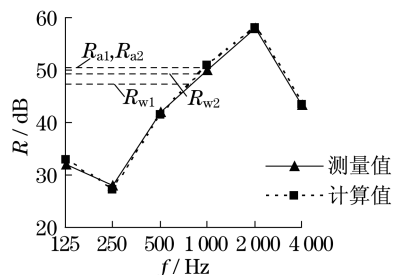


图3 空腔夹层结构隔声量

Fig.3 Sound insulation of an air sandwich construction

图3同时给出测量值和计算值,其最大偏差在 $f_{\text{oct}} = 250$ Hz处,测量值为28 dB,偏差值为0.9 dB.

2.3 空腔加吸声材料夹层结构

对于图1d所示的空腔加吸声材料夹层结构,同样存在如何确定空气阻尼系数的问题.基于上述理由,这里仅给出“有效吸声系数”的分析结果.对于前面层4 mm钢板、中间层50 mm空腔加吸声层 D_2 、后面层0.8 mm钢板的结构,拟合公式为式(13),隔声量频谱见图4.其中,吸声层重度 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的超细玻璃棉,厚度 D_2 分别为50,75和100 mm.

$$R = R_1 - 4 \times 10^{-6} f^2 + 0.0114f + 33.5 \quad (13)$$

图4同时给出测量值和计算值,其最大偏差在 $D_2 = 75$ mm、 $f_{\text{oct}} = 4000$ Hz处,测量值64 dB,偏差值4.4 dB.

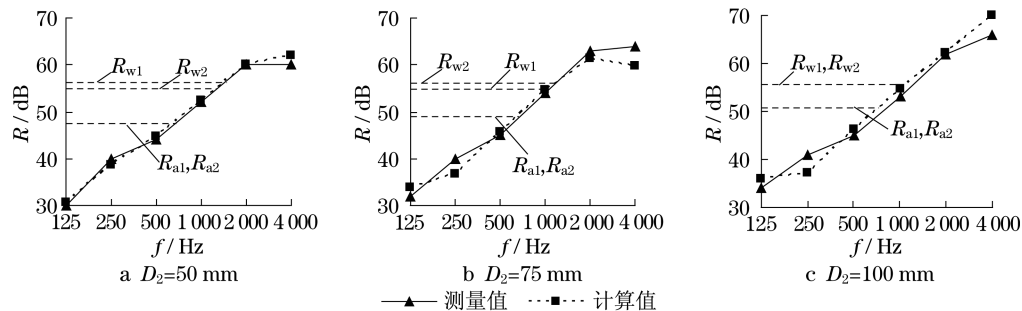


图4 空腔加吸声材料夹层结构隔声量

Fig.4 Sound insulation of an air-absorbing sandwich construction

2.4 吸声材料的作用

应用上述分析得到的拟合公式,估算前面层1.5 mm钢板、中间层厚度80 mm(4种不同材料)、后面层1.5 mm钢板结构的隔声量.4种夹层材料是空气以及重度分别为 $20, 40$ 和 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的超细玻璃棉.由图5可以看到,加入 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 低重度材料后,结构在中频区域满足共振条件,隔声量有所降低.除此之外,增加夹层玻璃棉的重度通常可增加结构在中高频区域的隔声量.

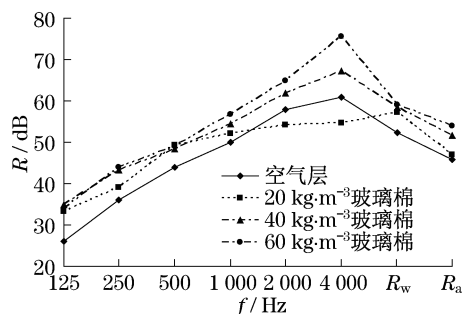


图5 4种夹层材料结构隔声量

Fig.5 Sound insulation of 4 kinds of sandwich constructions

3 结语

对拟研究开发的轻型薄板隔声结构类型,应用阻抗法分析,结合该类型少量不同结构参数样品的实测数据,可得到该类轻型薄板隔声结构隔声量的拟合计算式.然后根据拟合公式,选取结构的面板厚度、夹层厚度和夹层材料的不同参量值,筛选结构,可使设计的隔声结构能更好地满足工程实际的要求.

由于拟研究开发的实测样品的平面尺寸、边界条件会与相关文献^[13]中的数值不同,故得到的拟合公式也会与本文有所不同.但是,讨论的步骤应是相同的,本方法也可拓展至更多层次的薄板隔声结构.

参考文献:

- [1] Valtteri Hongisto. Sound insulation of double panels—comparison of existing prediction model [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2006, 92: 61.

(下转第1412页)