

文章编号:1006-7329(2002)06-0005-05

应用统计能量分析计算墙体隔声的初探*

黄险峰¹, 吴硕贤²

(1. 华南理工大学 建筑学系, 广东广州 510640; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要:应用统计能量分析(Statistical Energy Analysis, 简称 SEA)理论对墙体隔声计算进行研究,将“房—墙—房”隔声系统划分为若干子系统,建立相应的统计能量分析隔声模型。在系统中利用声功率平衡矩阵方程和考虑房间与墙体、房间与房间的耦合关系,推导出声源室和受声室之间吻合时和非吻合时的声压级差的计算方法。同时介绍了相应的隔声测试方法和实验仪器,实验结果表明:与应用质量定律进行隔声计算相比,应用统计能量分析的进行隔声计算方法更精确、可靠。这是由于统计能量分析模型能反映出吻合效应、构造、材料等对隔声量的影响。

关键词:墙体隔声; 统计能量分析; 耦合损耗系数

中图分类号:TU112.52

文献标识码:A

墙体隔声的好坏是衡量建筑声质量的一个重要指标,许多国家制定了相应的规范来保证墙壁体的隔声达到要求。但实际情况是,有许多建筑在完工后,其隔声质量很差,达不到隔声指标,例如,在有些国家,将近三分之一的新建住宅隔声达不到隔声标准,除了设计、施工的原因外,一个重要的原因就是缺乏在设计之初对完工后的建筑隔声的准确预测。

传统的隔声预测和计算方法采用的是隔声的质量定律(Mass Law)计算隔声量 R (dB):

$$R = 20 \log \rho + 20 \log f - 48 \quad (1)$$

式中: ρ 为墙体的面密度(kg/m^2); f 为声波的频率(Hz)。

可见, R 与和 f 有关,两者越大,隔声量越高。应用质量定律只能对墙体的隔声进行粗糙的预测,往往是这样一种情况:在设计时,采用隔声性能达标的建筑材料和构件,但在完工后隔声指数却低于规范。这是由于质量定律没有考虑以下因素对隔声的影响:隔墙两边的房间特性对隔声的影响;墙体构造与隔声的关系;共振和吻合效应所引起的隔声量的下降。统计能量分析(Statistical Energy Analyses,简称 SEA)是在上世纪60年代为了研究航空、宇航结构对湍流噪声和喷射噪声的响应而产生的。这种方法不要求去求解复杂的数理方程,而是用统计的方法研究多元系统之间能量的传递和平衡。隔声问题就是声能在结构和声场间的传递的问题。对于一个复杂系统(System),可以将其划分为一些储存能量的振动模式群,称为子系统(Subsystem)。在计算墙体隔声时,先建立SEA模型,将各种墙的隔声计算变成求解声振动功率的线性代数方程,再对方程组的系数(SEA参数)的赋值进行讨论,可分析影响墙体隔声的相应因素^[1]。本文以具有普遍规律的隔声系统进行研究,并通过实验进行对比来说明SEA在隔声方面的应用。

1 SEA 隔声模型的建立

R. H. Lyon 提出;耦合系统空间的功率流正比于两个子系统的平均模态能量之差,且总是从具有高模态能量的子系统流向低模态能量的子系统,这是SEA的基本原理^[2]。图1是最常见的“房—墙—房”的情况和其SEA模型,即由声源室、隔墙和受声室组成的隔声系统。将其划分为三个子

* 收稿日期:2002-10-10

基金项目:广西大学科研基金(CC0308)

作者简介:黄险峰(1965-),男,江苏人,博士生,副教授,主要从事建筑物理方面的研究。

系统:发声室为子系统1;隔墙为子系统2;受声室为子系统3。

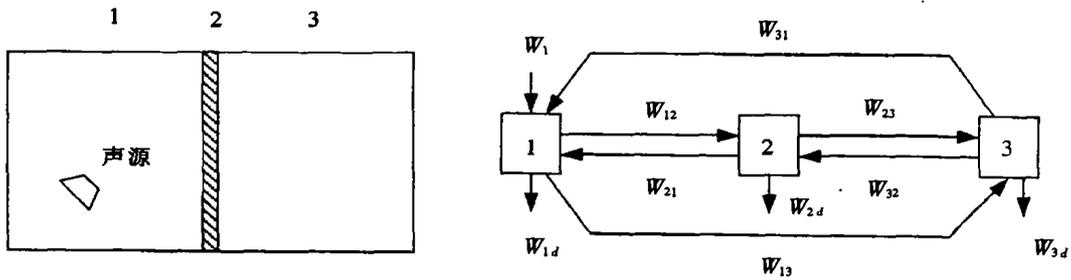


图1 三个系统的 SEA 模型

两房间的声压级差 D (dB) 可用 $D = L_1 - L_3$ 表示, L_1 :发声室的声压级; L_3 :受声室的声压级。在工程上,常用隔声量 R (dB) 来衡量隔声的好坏: $R = 10 \log \frac{1}{\tau}$, τ 为透声系数。 R 又可表示为: $R = L_1 - L_3 + 10 \log \frac{S}{A_3}$, S :两房间共有隔墙的面积(m^2); A_3 :受声室的吸声量。由此可见,确定 D 是计算 R 的关键。图1中的 W_{ij} (如 W_{12} 、 W_{21} ……) 是从子系统 i 到子系统 j 声功率 (W); W_i (如 W_1 、 W_2 ……) 是系统外的声源向子系统 i 的输入的声功率 (W); W_{id} (如 W_{1d} 、 W_{2d} ……) 子系统的内损耗功率 (W)。

2 系统的平衡方程

在声能的传递过程中,各子系统处于动态的能量平衡状态,即输入某个子系统的功率等于该子系统的输出的功率。对于子系统1,输入功率为: W_1 、 W_{21} 、 W_{31} ;输出功率为: W_{1d} 、 W_{12} 、 W_{31} 。则其能量平衡方程为:

$$W_1 + W_{21} + W_{31} = W_{1d} + W_{12} + W_{31} \tag{2}$$

同理对于子系统2、3有:

$$W_2 + W_{12} + W_{32} = W_{2d} + W_{21} + W_{23} \tag{3}$$

$$W_3 + W_{13} + W_{23} = W_{3d} + W_{31} + W_{32} \tag{4}$$

η_{ij} 是子系统 i 与子系统 j 的耦合损耗系数; η_{id} 为子系统 i 的内损耗系数。因此可给出声功率在子系统之间传递的关系,即 $W_{ij} = E_i \omega \eta_{ij}^{[3]}$, E_i 是子系统 i 的声能 (J); ω 是声的圆频率 (s^{-1}), 则(2)、(3)、(4)表示为:

$$\begin{cases} W_1 + E_2 \omega \eta_{21} + E_3 \omega \eta_{31} = E_1 \omega \eta_{1d} + E_1 \omega \eta_{12} + E_1 \omega \eta_{13} \\ W_2 + E_1 \omega \eta_{12} + E_3 \omega \eta_{32} = E_2 \omega \eta_{2d} + E_2 \omega \eta_{21} + E_2 \omega \eta_{23} \\ W_3 + E_1 \omega \eta_{13} + E_2 \omega \eta_{23} = E_3 \omega \eta_{3d} + E_3 \omega \eta_{31} + E_3 \omega \eta_{32} \end{cases} \tag{6}$$

每个子系统的总损耗系数用来表示,则对于每个子系统:

$$\begin{cases} \eta_1 = \eta_{1d} + \eta_{12} + \eta_{13} \\ \eta_2 = \eta_{2d} + \eta_{21} + \eta_{23} \\ \eta_3 = \eta_{3d} + \eta_{31} + \eta_{32} \end{cases} \tag{5}$$

将(6)式代入(5)式并作变换,可用矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} -\eta_1 & \eta_{21} & \eta_{31} \\ \eta_{12} & -\eta_2 & \eta_{32} \\ \eta_{13} & \eta_{23} & -\eta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{W_1}{\omega} \\ -\frac{W_2}{\omega} \\ -\frac{W_3}{\omega} \end{pmatrix} \tag{7}$$

此为系统的功率平衡方程表达式。

3 两房间的声压级差的计算

对于空气声,与 W_1 相比, W_2 和 W_3 可近似为零。大多数具有合理隔声量的墙体,从受声室返回到发声室的功率流之和远小于声源的声功率: $W_1 \gg W_{21} + W_{31}$; 同样,从受声室3返回墙2的功率流 W_{32} 远小于从发声室1到墙2的功率流: $W_{12} \gg W_{32}$ 。则(6)式可表示为:

$$\begin{cases} W_1 = E_1 \omega \eta_1 \\ E_1 \omega \eta_{12} = E_2 \omega \eta_2 \\ E_1 \omega \eta_{13} + E_2 \omega \eta_{23} = E_3 \omega \eta_3 \end{cases} \quad (8)$$

整理上式得:

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{\eta_{13}}{\eta_3} + \frac{\eta_{12} \eta_{23}}{\eta_2 \eta_3} \quad (9)$$

(9)式有两项,分别代表两种不同的声传递的特征。

当非吻合声传递时, $f < f_c$, f_c 是吻合临界频率。 $\eta_{12} \eta_{23} \ll \eta_2 \eta_3$, 则:

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{\eta_{13}}{\eta_3} \quad (10)$$

当 $f \geq f_c$, 是吻合声传递, $\eta_{13} \ll \eta_3$, 即:

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{\eta_{12} \eta_{23}}{\eta_2 \eta_3} \quad (11)$$

声源室: $E_1 = \frac{p_1^2 V_1}{\rho_0 c_0^2}$; 受声室: $E_3 = \frac{p_3^2 V_3}{\rho_0 c_0^2}$ 。其中 p_1 和 p_3 分别是发声室1和受声室3的声压(N/m²); ρ_0 是空气的密度(kg/m³); c_0 是声波在空气中的传播速度(m/s)则两房之间的声压级差 D 为:

$$D = 10 \log \frac{p_1^2}{p_3^2} = 10 \log \frac{E_1 V_3}{E_3 V_1} \quad (12)$$

则非吻合时的声压级差: $D_{1-3} = 10 \log \frac{\eta_3 V_3}{\eta_{13} V_1}$

吻合时的声压级差: $D_{1-2-3} = 10 \log \frac{\eta_{12} \eta_{23} V_3}{\eta_{13} \eta_{23} V_1}$ (13)

4 各损耗系数的计算

为了计算出(12)和(13)式的值,必须确定各个损耗系数(SEA 参数)。

首先,房间与墙的损耗耦合系数:

$$\eta_{12} = \frac{\rho_0 c_0^2 S f \sigma}{8 \pi V_1 \rho_s f^3} \quad (14)$$

ρ_{s2} : 墙的面密度(kg/m²); f : 声频率(Hz), σ : 声辐射系数,可用下式表示:

$$\sigma = \begin{cases} \left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{\frac{1}{2}}, & f > f_c \\ 0.45 \left(\frac{P f_c}{c_0}\right), & f = f_c \\ \frac{P c_0}{\pi^2 S f_c} \left(\frac{f}{f_c}\right)^{\frac{1}{2}}, & f < f_c \end{cases} \quad (15)$$

P : 墙的周长。

其次, 墙与房间的耦合损耗系数:

$$\eta_{23} = \frac{\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f \rho_s} \quad (16)$$

再者, 子系统 2 墙的总损耗系数 $\eta_2^{[4]}$:

$$\eta_2 = 0.1365 \left(\frac{hc_L}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sum L_i \alpha}{S} \quad (17)$$

其中, L_i : 墙的某一边的边长(m); α : 墙的吸声系数; c_L : 墙壁的纵波的波速(m/s); S : 墙的面积(m²)。

然后, 房间的总耦合损耗系数 η_1 和 η_3 :

$$\eta_1 = \eta_3 = \frac{2.2}{fT} \quad (18)$$

T : 房间的混响时间(s)。

由(14)、(15)、(17)式, 需要已知 c_L 和 f_c 。这些可以通过对墙体的测试获得。至此已将各损耗系数确定, 将(14)、(16)、(17)、(18)代入(12)和(13)可求出声压级差 D , 进而求出隔声量 R 。

5 算例与实验验证

对于声传递实验室的两个房间, 尺寸皆为: $5 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$, 隔墙分别有: 混凝土砌块隔墙, 墙厚为: 0.1 m, 面密度是 160 kg/m^3 ; 木龙骨两侧 12 mm 厚石膏板各一层, 空腔 80 mm, 内填超细玻璃棉的轻质建筑构件, 面密度: 22 kg/m^3 ^[5]。墙的尺寸皆为: $4 \times 3 \text{ m}^2$ 。所用仪器: 声测试系统(Sound Power System); 声源(Sound Source); 话筒(Microphone); 话筒电源(Microphone Power Supply)。以上均为 B&K 仪器。测试采用 1/3 倍频程, 声源为白噪声。图 2 为测试的示意图。

将实验所测的结果分别与质量定律和 SEA 计算的结果相比较, 见图 3、图 4 所示。由此可见, 应用 SEA 预测比质量定律更接近于实测值。图 4 表明了应用 SEA 可以预测出重墙(混凝土墙、砖墙等)的吻合效应出现的位置和吻合谷的隔声情况; 由图 5 可以发现, SEA 理论模型可以预测出轻质墙体共振区和吻合谷出现的位置和这些位置的隔声量。在此类双层墙板, 带龙骨

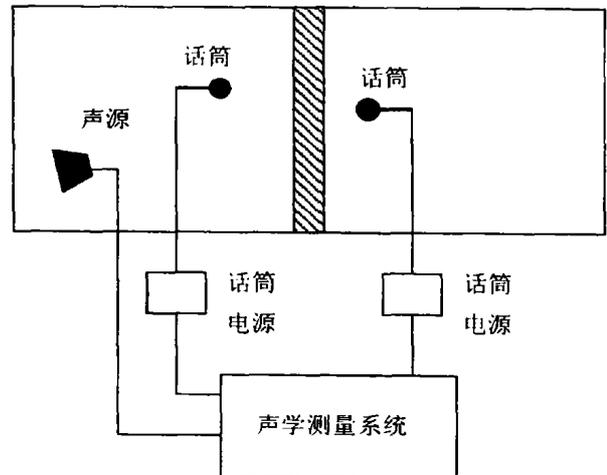


图2 隔声测试及仪器连接

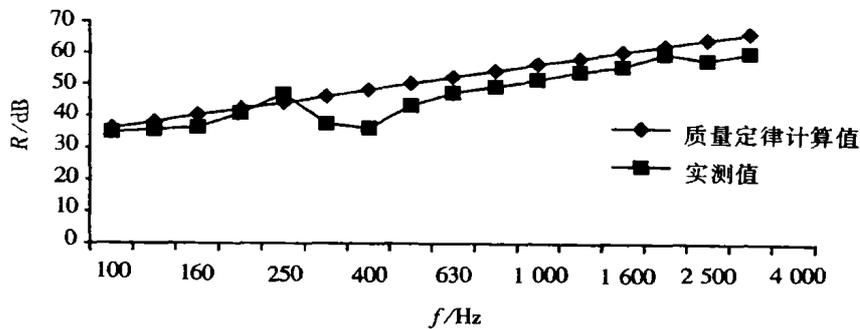


图3 混凝土砌块墙体隔声实测值与质量定律计算值的比较

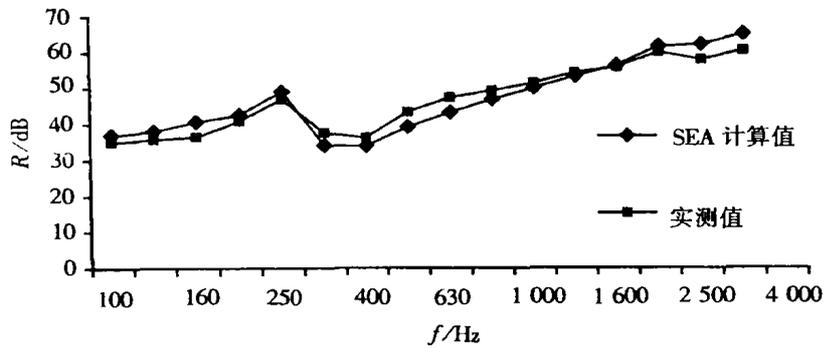


图4 混凝土砌块墙体隔声实测值与SEA计算值的比较

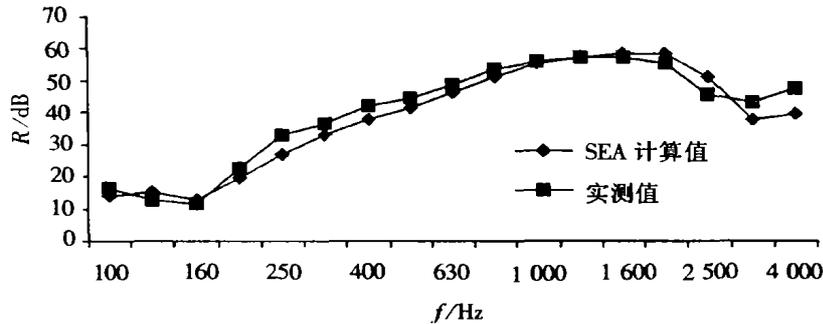


图5 石膏板构件的隔声实测与SEA计算值的比较

和空腔的构造,应将每层墙板、龙骨、空腔均视为子系统,分别计算出每个子系统的总损耗系数 η_i 和各个子系统 η_{ij} 之间的耦合损耗系数,根据声的传递方向,按上述方法可计算出相应的声压级差和隔声量。

6 结语

随着高层建筑的兴起,对建筑材料和构件的轻质化的要求越来越高,而在实际工程中轻质建材的隔声量往往达不到规范要求,从而影响整个建筑质量。如何提高轻质建筑材料和构件的隔声量是一个亟待解决的问题。应用SEA不仅在设计阶段,可以对墙体进行准确的隔声预测,还可以探索在不增加墙体重量的情况下,通过改变隔墙构造、房间的大小和形式来提高隔声量的方法,这对于轻质墙体材料和构件的生产、住宅及公共建筑隔声设计、施工有重要指导意义。

作者衷心感谢英国爱丁堡 Heriot - Watt 大学建筑工程系的 R. J. Craik 教授的指导以及 Heriot - Watt 大学建筑声学实验室实验师 Alistair. MacFarlane 和建材实验室的实验师 Tom. Scott 的热情帮助。

参考文献:

- [1] 秦佑国. 统计能量分析应用于墙隔声的研究[J]. 声学学报, 1982, 7(4): 106 - 10.
- [2] R. H. Lyon. Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems[J]. Theory and Applications, MIT Press. U. S. 1975, 126 - 128.
- [3] R. J. M. Craik. Advanced Building Acoustics[M]. Heriot - Watt University, Edinburgh, U. K., 2000.
- [4] R. J. M. Craik. Advanced Building Acoustics[M]. Heriot - Watt University, Edinburgh, U. K., 2000.
- [5] 吴硕贤, 张三明, 葛坚. 建筑声学设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

(下转第20页)

参考文献:

- [1] 陈建中. 古镇保护与旅游开发[J]. 现代经济探讨, 2001, (11): 57 - 59.
[2] 老谭. 珍惜古镇[N]. 重庆晚报, 2001 - 02 - 19.

Discussion on Tourism Development and Protection for Old Towns in Chongqing

TIAN Xi - zhou

(Tourism College, Chongqing Technology and Commerce University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Since 90s of last century, tour to old town comes into being. It plays an important role in enriching the tourism product and adding income for farmers. Nowadays, tour to old town in China is developing quickly and its practice goes ahead the theory. How to develop and protect old towns and keep concord development for the both is a question, which has both theoretical and practical importance.

Keywords: old town in Chongqing; tourism development; old town protection

(上接第 9 页)

Calculation of Wall Sound Insulation by Statistical Energy Analysis

HUANG Xian - feng¹, WU Shou - xian²

(1. Department of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The Statistical Energy Analysis (SEA) theory has been employed in calculating sound insulation of walls. The "Room - Wall - Room" sound insulation system is divided into several subsystems, then, the SEA insulation model is set up. The power balance matrix equation has been applied and the couple relationships of room to wall and wall to wall have been taken into account under coincidence and non - coincidence situations. The calculating methods of sound pressure level difference between source and receive room are derived. Furthermore, the experiment equipment and skill are also introduced. Results show that there is better agreement between measurements and prediction by SEA than that by mass law, because the SEA model may predict the influence of coincidence effect, configurations and materials of system on sound insulation.

Keywords: sound insulation of walls; statistical energy analysis; coupling lose factor