

# 玻璃纤维复合材料板隔声性能的研究

徐 宁, 徐 颖, 邹伟仁, 王常力

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 选择树脂基玻璃纤维复合材料板, 测量其辐射效率和损耗因子, 研究纤维排布方式及纤维用量的影响, 结果表明, 纤维正交和单向铺设对玻璃纤维板辐射效率的影响基本相同, 纤维的用量在 10%~70% 变化时, 也没有明显的变化; 对损耗因子的影响, 在 160~1000Hz 范围内, 单向玻纤复合材料板的阻尼比正交排布的低, 而在 2000~8000 Hz 范围两者基本相同的。在中低频范围内, 正交排布比单向排布对阻尼的影响更加显著。通过测试复合材料和金属铁的隔声量, 在 160~8000Hz 范围内, 玻璃纤维复合材料板没有出现隔声谷。提出纤维复合材料板中纵波波速公式, 计算复合材料板的隔声量, 与测量结果吻合良好。

**关键词:** 玻璃纤维; 复合材料; 隔声; 吻合效应

中图分类号: TB31

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-05-0416-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.05.012

## Experimental study of sound insulation performance of glass fiber reinforced composite plates

XU Ning, XU Ying, ZOU Wei-ren, WANG Chang-li

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To investigate effects of fiber arrangement and amount on sound transmission of resin-based glass fiber composite plates, the relevant radiation ratio and loss factor have been measured. The experiments identify that the radiation ratios of orthogonal and parallel arrangements are the same, as well as when the fiber amount increased from 10% to 70%. As for the effect on the loss factor, the damping ratio of parallel arrangement is lower than that of orthogonal arrangement in the frequency range of 160 Hz to 1000 Hz. The damping ratios of orthogonal and parallel arrangements are close to each other from 2000 Hz to 8000 Hz. In medium and low frequency range, the orthogonal arrangement affects the damping ratio more significantly than the parallel arrangement does. Comparing the sound transmission losses of resin-based glass fiber composite plates with iron, it is found that there is no sound insulation valley in the sound transmission loss curve of the composite s plates. The calculation method of the longitudinal wave has been developed. The calculation results are in agreement with the experimental results.

**Key words:** glass fiber; composite; sound insulation; coincidence effect

## 0 引 言

随着社会经济和现代工业的发展, 人们生活质量的提高, 对减振和降噪的要求日益增高。

在复合材料中, 纤维增强材料一直是人们关注的焦点。玻璃纤维的特点主要有耐高温、阻燃、抗腐、隔音性好、抗拉强度高等一系列优异的性能。如今玻璃纤维已渗透到国民经济的各个领域, 如交通、电子、建筑、化工、造船、航空、航天等, 已成为不可缺少的优良材料。相比传统的材料, 纤维复合材料的声学特性对减振降噪和控制具有十分

重要的意义<sup>[1]</sup>。

纤维复合材料属各向异性材料, 与均相金属材料相比其内部结构复杂, 两种材料制成的板, 其辐射效率、阻尼等参数也有很大的差异。因此, 声与振动的传播特性也有别于金属材料。在减振降噪方面, 哈尔滨工业大学蔡俊秦等<sup>[2]</sup>根据声波与材料作用原理, 制备了一种新型降噪复合材料, 对这种材料采用驻波管法声学测试隔声性能, 用有限元法进行声学分析, 结果与实验数据较为吻合, 这种复合材料具有良好的隔声性能。浙江理工大学傅雅琴等制备了玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料, 利用双通道声学分析仪, 分析研究隔声性能, 结果表明该复合材料的隔声性能优于单一材料的隔声性能。继而又研究复合结构与隔声性能之间的关系<sup>[3,4]</sup>, 改变增

收稿日期: 2012-10-19; 修回日期: 2013-01-08

作者简介: 徐宁(1985—), 男, 安徽宿州人, 硕士, 研究方向为噪声与振动控制。

通讯作者: 徐宁, E-mail: xuning4243@163.com

强材料的排列方式,采用混响室-静音箱法对其隔声性能进行了测试分析,研究表明增强材料的排列方式对复合材料的隔声性能有明显的影响。Hanifi Binici 等<sup>[5]</sup>对工业噪声隔声效果,采用增强纤维墙体复合材料,结果表明隔声性能得到显著的改善。Yan-Min Kuo 等<sup>[6]</sup>考察了弹性波在正交各向异性复合材料中的传播来解释增强纤维塑料的隔声机理,采用传递矩阵法进行数值模拟分析,并通过实验与数值结果进行了比较,结果表明数值模拟能够有效地评估正交各向异性复合材料的隔声能力。

吻合效应与声辐射特性和阻尼密切相关,国内外的研究热点在复合材料阻尼。Bin Niu 等<sup>[7]</sup>论述了复合材料层合板的声振理论的优化,包括实现纤维角度、叠层顺序和选择材料应用的优化,并提出了几个例子证明了这种理论。F.T.K. Au 等<sup>[8]</sup>论述了正交各向异性板在受迫振动下的声辐射,基于瑞利积分法,从载荷大小、阻尼和边界条件等方面研究了板的动态响应和声场分布,取得了一些成果。

本文主要是研究玻纤复合材料板的辐射效率和阻尼等特性,进行隔声量的计算。

## 1 实验部分

### 1.1 玻璃纤维复合材料制备

选用 802 型不饱和聚酯树脂作为基体材料,玻璃纤维选用无纺无碱玻璃布,玻璃纤维直径为 0.03 mm,格子间距为 0.4 mm。工艺采用模压法制备不饱和聚酯树脂基玻纤复合材料。

### 1.2 测量系统

辐射效率采用半球面法测量,激发频率带宽 160~8000Hz,自由边界条件,测点布置如图 1 所示,以白噪声激励激振器带动板的振动,因为测量板平均振动速度,故不考虑激发力的大小和振型,板平均速度可由加速度传感器测量得到。工程中常用结构振动振幅随时间的衰减率来衡量系统的阻尼特性,测试采用自由振动法来测量板的阻尼。测量实验均在半消声室中完成。激振系统包括: B&K3160 模块、功率放大器、激振器。数据采集及分析系统包括: 加速度传感器、传声器, B&K3160 模块<sup>[9]</sup>。

隔声测量采用 GBJ 75-84 混响室消声室法测量,混响室尺寸为 5.72m×3.22m×4.78m,下限频率为 160Hz,开口尺寸为 1000mm×1200mm,消声室内传声器均匀排布,与样品距离为 500mm。以上测量均为 CPB 分析 1/3 倍频程测试数据。

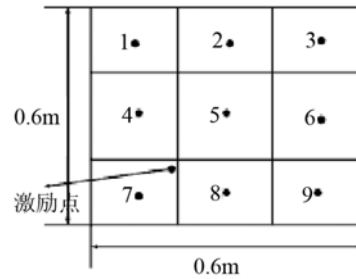


图 1 平板表面加速度测点布置示意图  
Fig.1 Arrangement of acceleration measuring points on flat surface

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 玻璃纤维复合材料板辐射效率

#### 2.1.1 正交排布纤维复合材料板辐射效率

实验样品为不饱和聚酯基玻璃纤维复合材料板,其中样品 1(曲线 1)玻纤含量为 10%(wt)(聚酯树脂含量 87.6%),样品 2(曲线 2)的玻纤含量为 45%(wt)(聚酯树脂含量 53.5%),样品 3(曲线 3)的玻纤含量为 70%(wt)(聚酯树脂含量 29.2%),样品尺寸均为 600mm×600mm×7mm,密度分别为  $1.474 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.445 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.462 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , Fe 板尺寸为 600 mm×600 mm×2 mm,密度为  $7.865 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,其辐射效率测量结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,正交排布纤维复合材料板辐射效率从频率 3150 Hz 开始提高,并随频率的增加而提高,当频率为 8000Hz 时,辐射效率为 0.52。

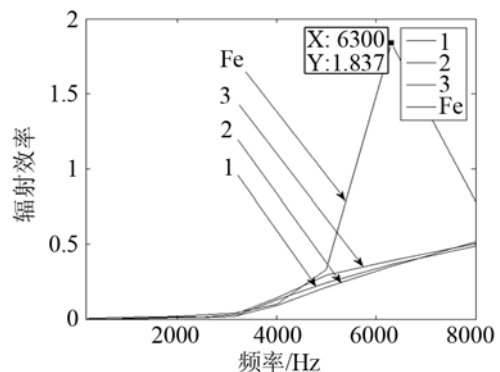


图 2 正交排布玻纤复合材料板的辐射效率  
Fig.2 The radiation efficiency of orthogonal configuration fiberglass composite material plates

可以看出,辐射效率没有发生突变,没有超过 1。Fe 板的辐射效率在 5000~8000 Hz 范围发生突变,在 6300 Hz 时出现最大值 1.8,这是由 Fe 板的吻合效应引起的。

#### 2.1.2 单向排布纤维复合材料板辐射效率

实验样品为不饱和聚酯基玻璃纤维复合材料,

其中样品4(曲线4)玻纤含量为10%(wt)(聚酯树脂含量87.6%),样品5(曲线5)的玻纤含量为45%(wt)(聚酯树脂含量53.5%),样品6(曲线6)的玻纤含量为70%(wt)(聚酯树脂含量29.2%),样品尺寸均为600mm×600mm×7mm,密度分别为 $1.458 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.479 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.482 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。其辐射效率测量结果如图3所示。

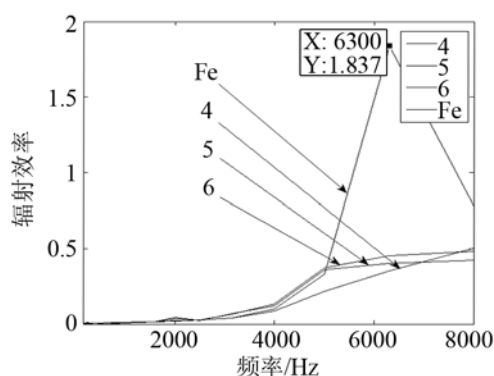


图3 单向排布玻纤复合材料板的辐射效率  
Fig.3 The radiation efficiency of one-way configuration fiberglass composite material plates

从图3可以看出,单向玻璃纤维复合材料板的辐射效率从3000 Hz开始提高,到8000 Hz达到最大为0.52,在小于8000 Hz的范围内辐射效率均较低,未在相应的频率出现吻合效应特征,即未在一定频率处辐射效率超过1。玻纤含量的增加对复合材料板的辐射效率影响并不大。

从以上的分析可以看出,纤维复合材料板中的纤维的分布,即正交和单向铺设,对材料的辐射效率的影响基本相同的,在小于8000 Hz的范围内辐射效率没有发生突变。与均相材料Fe板相比有很大的不同,Fe板在6300 Hz时出现吻合效应,而纤维复合材料板未出现明显的吻合效应。这是由于纤维复合材料内部呈现非均质、不连续的复杂结构及阻尼因素,对辐射进入的声能,其作用是复杂的,并不能像均相材料Fe板那样可以引起板的共振。

## 2.2 玻璃纤维复合材料板阻尼

### 2.2.1 正交排布纤维复合材料板阻尼

测试阻尼的样品与2.1.1的样品相同。其结果如图4所示。

由图4可以看出,正交排布的玻纤复合材料板的阻尼均比Fe板高。在160~2000 Hz范围,复合材料板的阻尼与Fe板相差较大,最大可相差一个数量级。当玻纤含量为70%时,在中低频段阻尼可以达到较高值。在500~8000 Hz范围,玻纤含量为45%和70%的阻尼基本相同;玻纤含量为10%的阻尼在1600 Hz以下比前两者都低,超过1600 Hz后,

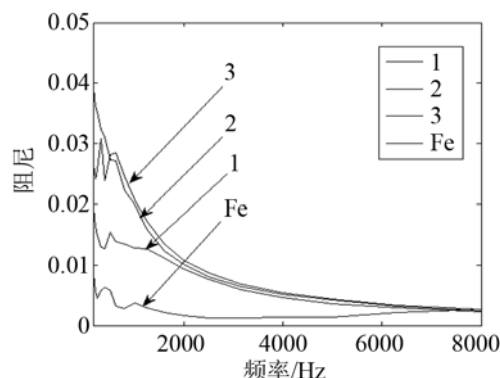


图4 正交排布玻纤复合材料板阻尼  
Fig.4 The damping of orthogonal configuration fiberglass composite material plates

三者的阻尼基本相同,因此,纤维含量仅影响中低频率的阻尼,对中高频的影响不大。

玻纤复合材料是各向异性材料,其阻尼机理与金属材料完全不同。由于内部结构复杂,消耗能量的途径较多,因此阻尼较大。但当频率大于1600 Hz,阻尼相差不大。

### 2.2.2 单向排布纤维复合材料板阻尼

测试阻尼的样品与2.1.2的样品相同。其结果如图5所示。

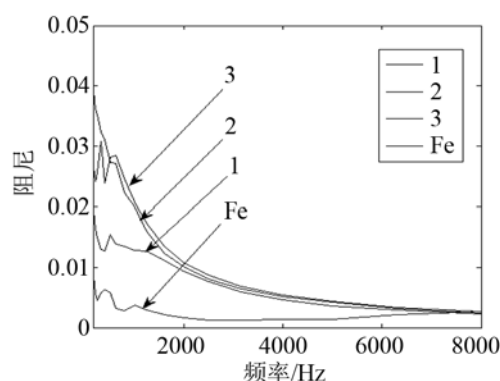


图5 单向排布玻纤复合材料板阻尼  
Fig.5 The damping of one-way configuration fiberglass composite material plates

从图5可以看出,单向玻纤复合材料板的阻尼均比Fe板高。纤维含量对阻尼的影响不大。在160~1000 Hz范围内,单向玻纤复合材料板的阻尼比正交排布的低,而在2000~8000 Hz范围两者基本相同的。因此在中低频范围内,正交排布比单向排布对阻尼的影响更加显著。

## 2.3 正交玻纤复合材料板隔声量

### 2.3.1 正交玻纤复合材料板和Fe板隔声量测量值

混响室-消声室法隔声量 $TL$ (单位: dB)计算公式为

$$TL = L_1 - L_2 \quad (1)$$

式中,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为发声室和接收室内的声压级。结合消声室内部构造和传声器距离样品远近, 隔声实验不需修正测量结果。

样品 7(曲线 7)的玻纤布含量为 35%(wt)(聚酯树脂含量 63.3%), 样品尺寸为: 1100mm×1300mm×3mm, 密度为  $1.465 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。对比样品采用 Fe 板, 尺寸为 1100mm×1300mm×2mm, 密度为  $7.865 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 其隔声量测量结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 在 160~5000Hz 范围内, Fe 板的厚度小于复合材料板, 但其隔声量大于玻纤复合材料, 平均高 5 dB。这是由于 Fe 的面密度大于玻纤复合材料, 且弹性模量(210GPa)更是远大于不饱和聚酯树脂基玻纤复合材料(7~10 GPa)(理论参考文中公式(6))。

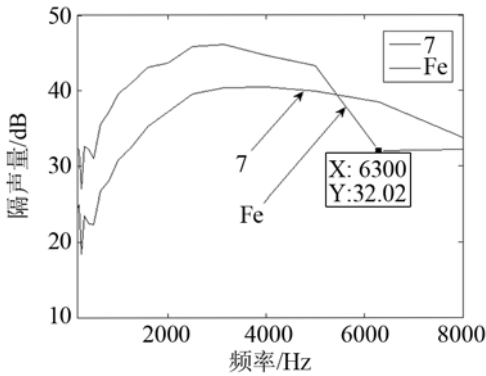


图 6 玻纤复合材料板的隔声量测量值  
Fig.6 The measured sound insulation curve of orthogonal configuration fiberglass composite material plates

当频率在 5000~8000 Hz 范围内, 由于 Fe 板的吻合效应, 使其辐射效率很大, 因此出现隔声谷。而复合材料板在这个范围内, 由于没有吻合效应, 因此其隔声量较 Fe 板大。

### 2.3.2 正交玻纤复合材料板隔声量理论值

当声波作用在板上时, 由结构声辐射可知, 可以将有界板的响应视作由两部分组成, 即(1) 无界板的响应分量, 由于强迫分量存在而引起; (2) 有界板的响应分量, 由于共振分量存在而引起。前者受质量控制, 后者受阻尼控制。

无界板质量控制和有界板阻尼控制的辐射功率分别为<sup>[10]</sup>:

$$W_f = p_e^2 \frac{\pi \rho c S}{M^2 \omega^2} \quad (2)$$

$$W_r = p_e^2 \frac{\sqrt{12} \pi c^3 \rho S \sigma_{rad}^2}{2M^2 \omega^3 c_l h \eta_t} \quad (3)$$

其中,  $p_e^2$  为入射声压的均方值;  $M$  为板的面密度;  $c_l$  为板材料中的纵波波速;  $h$  为板厚度;  $\eta_t$  为板的材料阻尼与声阻尼之和;  $S$  为板的面积;  $\rho c$  为空气

特性阻抗;  $\sigma_{rad}$  为板的辐射效率。

入射声的输入功率为

$$W_i = \frac{p_e^2}{4\rho c} S \quad (4)$$

因此, 有限板的透射考虑到强迫波和共振波两种情况后的透射系数  $\tau$  为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\frac{p_e^2 S}{4\rho c}}{p_e^2 \frac{\pi \rho c S}{M^2 \omega^2} + p_e^2 \frac{\sqrt{12} \pi \rho c^3 S \sigma_{rad}}{2\omega^3 M^2 c_l h \eta_t}} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{M\omega}{2\rho c} \right)^2 \left( \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{3}c^2 \sigma_{rad}}{\omega c_l h \eta_t}} \right) \quad (5)$$

则材料板的隔声量为

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

由于  $\eta_t$  和  $\sigma_{rad}$  的基本理论较为复杂, 因此可通过测量得到。而  $c_l$  的声学理论与弹性模量有关, 通过理论可以确定  $c_l$ , 其过程如下所述。

如图 7 所示的正交各向异性板中<sup>[11]</sup>, 为计算简便, 取  $x, y$  轴平行于弹性主方向, 则有:

$$D_1 = \frac{E_1 h^3}{12(1-\mu_1 \mu_2)}$$

$$D_2 = \frac{E_2 h^3}{12(1-\mu_1 \mu_2)} \quad (7)$$

$$D_k = \frac{G h^3}{12}$$

其中:  $D_1$ 、 $D_2$  分别为弹性主方向(即  $x, y$  方向)的抗弯刚度;  $D_k$  为板的抗扭刚度;  $E_1$ 、 $E_2$  分别为板主方向(即  $x, y$  方向)的弹性模量;  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为板主方向(即  $x, y$  方向)的泊松比;  $G$  为板平面的剪切模量;  $h$  为板的厚度。

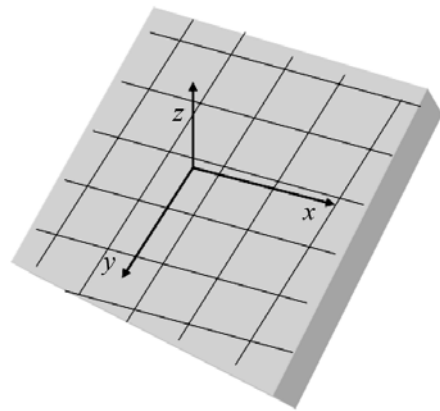


图 7 正交各向异性板示意图  
Fig.7 Schematic diagram of orthogonal anisotropic plate

弹性模量、泊松比和剪切模量可通过测试得到, 板 7 各参数测量值见表 1。

表 1 各参数测量值  
Table 1 Measured values of relevant parameters

$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$G/\text{GPa}$	$\mu_1$	$M_2$
10.31	7.28	3.23	0.172	0.117

由于纤维增强复合材料内部结构复杂,到目前为止并无简明有效的声学理论,因此参考各向异性固体中纵波方程的形式<sup>[12]</sup>,结合板的厚度与长度的因素,提出正交各向异性纤维复合材料板中纵波公式为

$$c_l = \frac{\sqrt{12}}{h} \times \sqrt{\frac{D_1 + D_2 + 2D_k h/l}{2\rho_0 h}} \quad (8)$$

式中  $l$  为板长;  $\rho_0$  为板密度。

将式(8)、(6)代入式(5),可得到隔声量理论计算公式。通过该方法得到材料的隔声量计算与实验测试进行对比,结果如图 8 所示。测量曲线为样品 7 的隔声曲线。

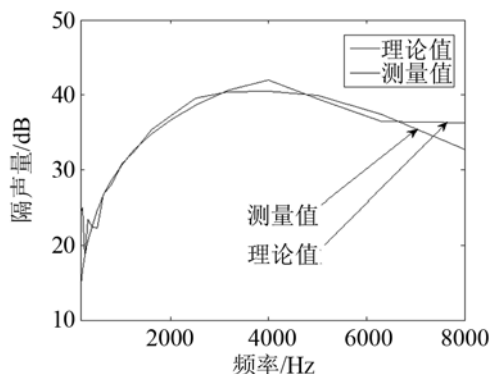


图 8 正交玻璃纤维复合材料板的隔声量

Fig.8 The sound insulation curves of orthogonal configuration fiberglass composite material plates

由图 8 可以看出,在频率低于 6500 Hz 的范围内,测量值与理论值吻合很好。因此,该方法的计算有一定的理论意义。

### 3 结 论

由以上分析可知:

(1) 纤维复合材料板中的纤维的排布方式,即正交和单向铺设,按不同布设方式所制成的玻璃纤维板的辐射效率基本相同,在小于 8000 Hz 的范围内辐射效率没有发生突变,最大为 0.52。

(2) 玻纤复合材料是各向异性材料,其阻尼机理与金属材料完全不同。由于内部结构复杂,消耗能量的途径较多,因此阻尼较大,但当频率大于 1600Hz,阻尼相差不大。

(3) 从辐射效率曲线和隔声量曲线可知,玻璃纤维复合材料板在测量频带内无明显的吻合效应

现象。

(4) 由于复合材料内部结构复杂,声学理论模型复杂繁琐,提出了玻璃纤维复合材料板中纵波波速公式以及计算方法,据此计算的理论隔声量值与实验值吻合良好。

### 参 考 文 献

- [1] 刘建勋, 祖群, 朱建勋. 新型高强度玻璃纤维制备及其增强环氧树脂性能[J]. 航空制造技术, 2010(17): 75-77  
LIU Jianxun, ZU Qun, ZHU Jianxun. Preparation of new high-strength glass fiber and performance of reinforced epoxy resin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 75-77.
- [2] 蔡俊, 秦川丽, 等. 隔声功能复合材料的有限元法分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1705-1707  
CAI Jun, QIN Chuanli, et al. Finite element method analysis of soundproof functional composite[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1705-1707.
- [3] 傅雅琴, 倪庆清. 玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料隔声性能[J]. 复合材料学报, 2005, 5(22): 94-99.  
FU Yaqin, NI Qingqing. Sound insulation performance of a glass fabric/PVC composite material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 5(22): 94-99.
- [4] 傅雅琴, 朱春燕. 增强材料的排列形式对复合材料隔声性能影响的试验研究[J]. 复合材料学报, 2008, 2(25): 68-73.  
FU Yaqin, ZHU Chunyan. Experimental study on effects of arrangement of reinforcements on acoustic insulation property of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 2(25): 68-73.
- [5] Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Derya Bakbak, et al. Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1035-1041.
- [6] Yan-Min Kuo, Hwei-Jeng Lin, Chao-Nan Wang. Sound transmission across orthotropic laminates with a 3D model[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(11): 951-959.
- [7] Bin Niu, Niels Olhoff, Eric Lund, Gengdong Cheng. Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(16): 2097-2114.
- [8] F.T.K. Au, M.F. Wang. Sound radiation from forced vibration of rectangular orthotropic plates under moving loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3-5): 1057-1075.
- [9] 陈克安, 曾向阳, 杨有粮. 声学测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010, 186-196.  
CHEN Ke'an, ZENG Xiangyang, YANG Youliang. Acoustic measurement[M]. Beijing: China Machine Press, 2010, 186-196.
- [10] 孙进才. 机械噪声控制原理[M]. 西北工业大学. 1988, 102-104.  
SUN Jincai. Mechanical noise control principle[M]. Northwestern Polytechnical University Press. 1988, 102-104.
- [11] 曹国雄. 弹性矩形薄板振动[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983, 85-89.  
CAO Guoxiong. Elastic rectangular thin plate vibration[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1983, 85-89.
- [12] 奥尔特 B A 著, 孙承平 译. 固体中的声场和波[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 186-210.  
Auld B A. SUN Chengping translation. Acoustic fields and waves in solids[M]. Beijing: Science Press, 1982, 186-210.