

DOI: 10.3901/JME.2017.06.010

# 基于层状周期性结构的声波调控技术研究\*

朱晓辉<sup>1</sup> 李隆球<sup>1</sup> 张广玉<sup>1</sup> 周强<sup>1</sup> 吴英丹<sup>1</sup> 乔菁<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 根据工程实际对声波隔离的需求提出一种特殊的一维层状周期性结构——全反射结构。建立一维层状周期性结构的理论模型和声波传播过程的全弹性有限单元模型,采用传递矩阵法研究了结构的声学特性,包括频带结构和传播特性,分析了层状周期性结构对声波传播的影响。根据设计要求,建立一维层状周期性全反射结构的数学模型,根据优化目标、设计变量和约束条件,确定了基于遗传算法的结构设计方法,并给出了详细的设计方法和设计流程。以两相多层结构为例,应用所提出的方法设计了钢/铝两相五层结构,并搭建了超声试验平台,测试了钢五层结构、铝五层结构和钢/铝两相五层结构的超声波透射系数,通过对比试验法验证了钢/铝两相五层结构对 900~1 200 kHz 超声波的反射能力。

**关键词:** 隔声;层状周期性结构;全反射结构;传递矩阵法

**中图分类号:** O422

## Investigation of Acoustic Manipulation by Layered Periodic Composites

ZHU Xiaohui<sup>1</sup> LI Longqiu<sup>1</sup> ZHANG Guangyu<sup>1</sup> ZHOU Qiang<sup>1</sup> WU Yingdan<sup>1</sup> QIAO Jing<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** According to the practical demand of engineering for acoustic isolation, a special kind of one-dimensional (1D) layered periodic structure, total-reflective structure, is proposed. The theoretical model of 1D layered periodic structure and the completely elastic finite element model of acoustic wave propagation are established. Applying transfer matrix method, the acoustic characteristics of the structure are studied and its impact to acoustic wave propagation is analyzed, including band structure and transfer characteristic. Based on the design requirement, the mathematical model of total-reflective structure is established, including optimal object, design variables and constraints. Adopting genetic algorithm, the complete system and detailed method of design are proposed. Using the proposed method, a steel/aluminum structure with five layers is designed. And the ultrasonic platform for ultrasonic wave during 900-1 200 kHz is set up to test the propagation characteristics of steel five-layered structure, aluminum five-layered structure and steel/aluminum five-layered structure respectively. From the contrasting test, the reflection capability of the designed structure and the feasibility of total-reflective structure are verified.

**Key words:** acoustic isolation; layered periodic structure; total-reflective structure; transfer matrix method

## 0 前言

声波是一种具有多频段显著差异性的机械波,其特定频段的差异性主要体现在传播能量的大小、束射性的强弱及透射与反射性能的强弱等方面。不同频段不同特性的声波被广泛应用于工业、农业、

医疗等各个领域,其调控技术也变得尤为重要,对特定频段声波的隔离和选择是其中的难点之一。研究声波的全反射技术是实现特定频段声波隔离和声波频段选择的基础,也是声波调控技术的重要组成部分。

一般对声波的隔离主要是利用各种隔声结构和吸声材料。典型的隔声结构有轻质薄板墙、钢塑轻型墙板、钢质岩棉复合板<sup>[1-3]</sup>等,利用声波在结构表面的反射实现对声波的隔离。吸声材料的隔声机理则是让声波进入材料内部,将声能转化为热能从

\* 国家自然科学基金(51574098)、高等学校学科创新引智计划 (B07018) 和中国博士后基金(2012M520720)资助项目。20160310 收到初稿,20170104 收到修改稿

而被吸收<sup>[4]</sup>。目前最热门的吸声材料之一是金属吸声材料，分为金属纤维材料和多孔泡沫金属材料两大类。金属纤维材料和多孔泡沫金属材料内部都存在许多微孔结构，当声波进入材料微孔后引起空气运动，空气在微孔内与孔壁发生摩擦，由于空气的黏滞性声能转化为热能，同时金属良好的热传导性使热能被迅速导出，从而实现吸声的目的。现有的金属纤维材料有不锈钢纤维<sup>[5]</sup>、铝纤维<sup>[6]</sup>、FeCrAl纤维<sup>[7]</sup>、铜纤维<sup>[8]</sup>等，金属泡沫材料有Al<sup>[9]</sup>、Ni<sup>[10]</sup>、Cu<sup>[11]</sup>等。金属橡胶具有隔振吸声的功能，也属于金属吸声材料<sup>[12]</sup>。高分子复合材料是吸声材料另一活跃领域，通过高分子聚合物、金属或无机填料等的有机结合，利用多孔吸声机理、阻尼吸声机理和共振吸声结构的合理匹配，实现对声波最大程度的吸收。例如，聚氨酯复合材料<sup>[13]</sup>、聚氯乙烯复合材料<sup>[14]</sup>、聚丙烯复合材料<sup>[15]</sup>等。基于压电材料的主动吸声方法也是热点之一<sup>[16]</sup>。然而，这些隔声结构、吸声材料或其复合结构，对声波的有效作用频段大多局限在可听声波段，同时，对目标频段的选择性不强，无法实现对特定频段声波的隔离。

因此，本文研究了声波在层状周期性结构中的传播特性，提出了一种全反射结构，可以通过对结构关键参数的设计，直接控制声波的传播过程，实现对特定频段声波的全反射，在减振降噪、声波频段选择等方面具有广泛的应用前景。

## 1 一维周期性结构模型及其声学特性

### 1.1 一维周期性结构声波传播理论建模

本文采用一维层状周期性结构模型。理论上，结构由无数个完全相同的单元组成，研究时只需要取其中一个单元即可。单元模型如图1所示。每个单元包含 $n$ 层子材料，其中 $E^{(j)}$ 、 $\rho^{(j)}$ 、 $c^{(j)}$ 和 $d^{(j)}$ 依次表示第 $j$ 层子材料的弹性模量、质量密度、波速和层厚。波速 $c$ 和弹性模量 $E$ 、质量密度 $\rho$ 满足关系： $c = \sqrt{E/\rho}$ 。假设每一层材料都是均匀且各向同性的。

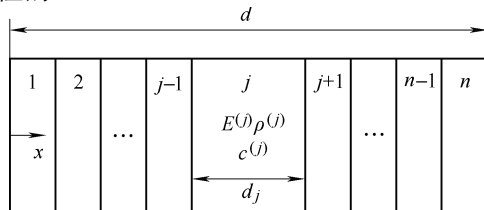


图1 一维层状结构单元模型

声波是一种机械纵波，在非均匀介质中传播时满足控制方程

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + f \quad (1)$$

式中， $\rho$ 表示密度， $\rho = \rho(x)$ ； $f$ 表示外力， $f = f(x)$ ； $u$ 表示位移， $u = u(x, t)$ ； $\sigma$ 表示应力， $\sigma = \sigma(x, t)$ 。

同时，任一点处应力满足

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

式中， $E$ 表示弹性模量， $E = E(x)$ 。

取一个单元为研究对象，单元内层与层之间的界面应满足应力 $\sigma$ 和位移 $u$ 的连续性。假设外力 $f = 0$ ，则式(1)在第 $j$ 层的解为

$$u(x, t) = [A_+^{(j)} \exp(ik^{(j)}x) + A_-^{(j)} \exp(-ik^{(j)}x)] \times \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

式中， $A_+^{(j)}$ 、 $A_-^{(j)}$ 分别表示第 $j$ 层向前行波和向后行波的复振幅； $k^{(j)}$ 表示第 $j$ 层波数， $k^{(j)} = \frac{\omega}{c^{(j)}}$ 。

### 1.2 传递矩阵法

传递矩阵法是一种用矩阵来描述多输入多输出线性系统的输出与输入之间关系的手段和方法。在这里采用传递矩阵法来定量表示一维层状结构对声波传播的影响。结合式(2)、(3)，忽略时间项，将声波在介质中传播时任意点的位移和应力用矩阵形式表示，即

$$\begin{pmatrix} u(x^{jR}) \\ \sigma(x^{jR}) \end{pmatrix} = T_j \begin{pmatrix} u(x^{jL}) \\ \sigma(x^{jL}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T_j = \begin{pmatrix} \cos(k^{(j)}d^{(j)}) & (1/Z^{(j)})\sin(k^{(j)}d^{(j)}) \\ -Z^{(j)}\sin(k^{(j)}d^{(j)}) & \cos(k^{(j)}d^{(j)}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中， $Z^{(j)} = \rho^{(j)}c^{(j)2}k^{(j)}$ 。令 $y(x) = \begin{pmatrix} u(x) \\ \sigma(x) \end{pmatrix}$ ，可得

$$y(x^{nR}) = Ty(x^{1L}) \quad (6)$$

式中， $T$ 表示结构的传递矩阵， $T = T_n \cdots T_2 T_1$ 。

### 1.3 频带结构

频带结构是周期性结构的固有属性，它能阻止某一频率范围的波在结构中传播，即这种结构本身存在“禁带”，与之相对的，波能通过的频率范围称为“通带”。这一概念最初是在光学领域提出的，现在它的研究范围已扩展到微波与声波波段。本文中频带结构特指“声通带”和“声禁带”的分布。声波在周期性结构中传播时满足弗洛凯定理

$$y(x+d) = \exp(ikd)y(x) \quad (7)$$

式中， $d$ 表示单元厚度， $d = d^{(1)} + d^{(2)} + \cdots + d^{(n)}$ 。

令 $x = x^{1L}$ ，结合式(6)、(7)，可得

$$Ty(x^{1L}) = \exp(ikd)y(x^{1L}) \quad (8)$$

式(8)是一个典型的特征值问题,对于任意给定的频率  $\omega$ ,可以直接计算出相应的传递矩阵  $T$ ,然后解特征值问题求出矩阵  $T$  的特征值  $\exp(ikd)$ ,从而得到波数  $k$  与角频率  $\omega$  之间的关系,即频带结构,绘制  $k-\omega$  曲线,即频散曲线。

结构的波数  $k$  是一个复数,可以写成  $k = k_{real} + ik_{imaginary}$ ,在完全弹性模型中, $k$  的取值可以分为两种情况:①  $k = k_r$ ,此时  $y(x+d) = \exp(ik_r d)y(x)$ ,声波通过结构,波的振幅未发生变化,仅相位变化,满足该条件的频带范围定义为声通带;②  $k = ik_i$ ,此时  $y(x+d) = \exp(-k_i d)y(x)$ ,声波通过周期性结构时,波的振幅指数衰减,相位未变化,满足该条件的频带范围定义为声禁带。

#### 1.4 反射系数和传递系数

为定量分析周期性结构对声波传播的调控作用,本文引入完全弹性有限单元模型来计算结构对声波的反射系数和传递系数<sup>[17]</sup>,结构模型如图 2 所示。结构由  $m$  个完全相同的单元构成,结构左右两边都是无限大均匀介质。声波从左边均匀介质传入,将周期性结构作为一个整体,一部分声波穿过周期性结构进入右边均匀介质,另一部分声波被结构反射返回左边均匀介质。

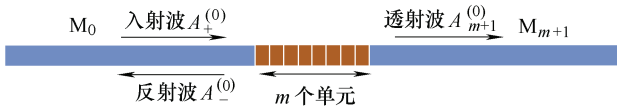


图 2 有限单元模型

定义结构的反射系数、传递系数为

$$R = \frac{A_-^{(0)}}{A_+^{(0)}} \quad (9)$$

$$T = \frac{A_+^{(m+1)}}{A_+^{(0)}} \quad (10)$$

利用位移  $u(x)$  和应力  $\sigma(x)$  的连续性,可推导出反射系数和传递系数的计算公式如下

$$R = \frac{A_-^{(0)}}{A_+^{(0)}} = -\frac{K_{21}}{K_{22}} \quad (11)$$

$$T = \frac{A_+^{(m+1)}}{A_+^{(0)}} = K_{11} - \frac{K_{12}K_{21}}{K_{22}} \quad (12)$$

$$K = L_{m+1}^{-1} B_{m+1}^{-1} T^m B_0$$

$$L_j = \text{diag} \{ \exp(ik^{(j)}d), \exp(-ik^{(j)}d) \}$$

$$B_j = \{ 1, iZ^{(j)}, -iZ^{(j)} \}$$

## 2 全反射结构设计

### 2.1 设计目标

基于一维层状周期性结构声学特性的分析,针对特定频段声波隔离的需求,提出了一种特殊的结构——全反射结构。设计目标如图 3 所示,在入射介质和目标介质之间布置一层全反射结构,实现声波的全反射或者绝大部分反射,确保最终能够传递到目标介质的声波信号强度在可容忍范围内。

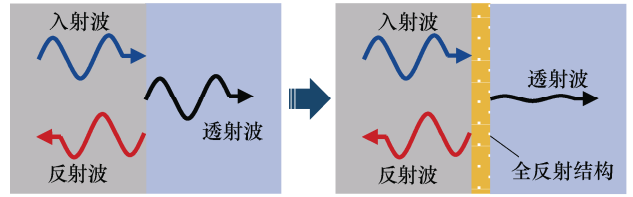


图 3 全反射智能结构设计目标

在明确了“全反射”这一设计目标之后,需要对设计目标进行解析,将问题简化为单纯的数学问题,并建立相应的数学模型,用于计算分析,同时给出完整而详细的设计方法。

### 2.2 数学模型及设计方法

“全反射”这一设计目标的数学表达形式即“反射系数  $R=1$ ”。在全反射结构的设计中,采用完全弹性层状周期性结构模型。当目标频带为周期性结构的声禁带时,反射率最大,接近 1。故只需要令在给定的频带范围内,声禁带所占的比例最大即可。该问题是一个典型的优化问题,数学模型如下。

(1) 约束条件:目标频段、材料及其物理性质、单元数和总厚度、单个单元内子材料层数等。

(2) 优化目标:目标频带内声禁带最大化。

(3) 设计变量:单元各层厚度。

已确定全反射智能结构的设计问题为优化问题,故先确定优化算法。由于设计变量间的相关性较高,故选择遗传算法作为本设计的优化算法。遗传算法的优点在于:在搜索过程中不易陷入局部最优,即使在所定义的适应度函数是不连续、非规则的或有噪声的情况下,它也能够遗传算子的作用下保持搜索的全局化,并且以较大的概率找到全局最优解<sup>[18-19]</sup>。以遗传算法为框架构造全反射智能结构的设计体系。遗传算法的流程如图 4 所示。

### 2.3 两相多层全反射结构设计

本文以最简单的两相多层周期结构为例,详细说明第 2.2 节中给出的设计方法的具体应用。两相

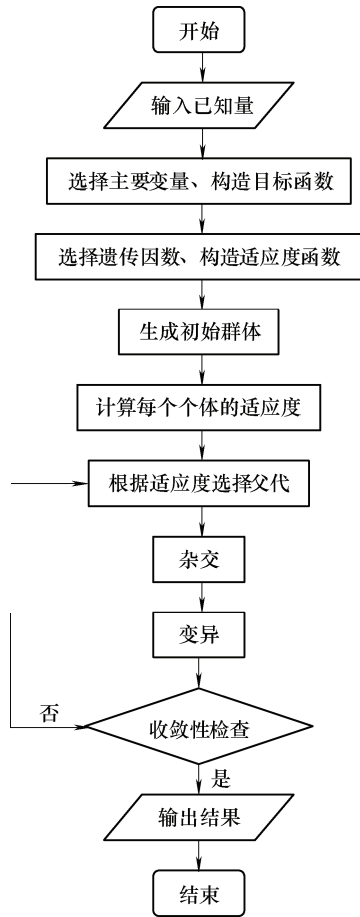


图4 遗传算法流程

多层周期性结构模型如图5所示。设计流程如下。

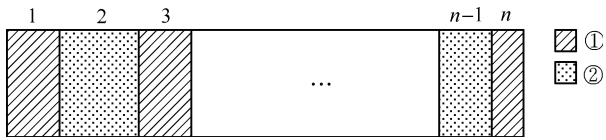


图5 两相多层周期性结构单元

(1) 确定已知量、输入量和设计变量，给出目标函数如下。

已知量：两种不同材料交错排列。

输入量：两种材料的弹性模量、质量密度，单元总厚度、层数，目标频带。

设计变量：各层厚度  $d(1)$ ,  $d(2)$ , ...,  $d(n)$ 。

目标函数：目标频带的禁带率。

(2) 选择遗传因数、构造适应度函数。

遗传因数：种群大小  $P=16$ ，遗传代数  $M=50$ ，选择率  $s=0.5$ ，突变率  $m=0.2$ 。

适应度函数：取目标函数的相反数。

(3) 根据适应度选择父代。

本文选择的是基于排列顺序的旋转轮盘法，将各单元根据其适应度大小进行排序，根据序号计算被选择的比例，序号值越小被选择的可能性越大。根据各个个体被选择比例在旋转轮盘上分配各个个

体所占圆心角的大小，转动旋转轮若干次，观察指针的指向就可以确定各个个体被选择的次数。

(4) 杂交。

对“父”单元和“母”单元进行数学组合，产生两个子代。

$$p_{new1} = p_{ma} - \beta(p_{ma} - p_{da}) \quad (13)$$

$$p_{new2} = p_{ma} + \beta(p_{ma} - p_{da}) \quad (14)$$

(5) 变异。

给定公式，通过变异概率计算变异发生的位置，然后根据公式计算变异后的单元层厚。

### 3 全反射结构试验验证

第2.3节中给出了两相多层全反射结构的详细设计流程，利用 Matlab 中的 GUI 模块编写相应程序可以实现两相多层全反射结构的设计。在本节中，给出了钢/铝两相五层结构的设计结果，制备了钢/铝两相五层结构，并搭建了声波传输检测系统验证结构对声波的实际反射能力。

设计的已知条件如下：相①是钢，其质量密度和弹性模量分别是  $\rho_1=7810 \text{ kg/m}^3$ ， $E_1=200 \text{ GPa}$ ，相②是铝，其质量密度和弹性模量分别是  $\rho_2=2702 \text{ kg/m}^3$ ， $E_2=71 \text{ GPa}$ ；单元由五层材料复合而成，总厚度为  $10 \text{ mm}$ ；设计的目标频带是  $900 \sim 1200 \text{ kHz}$ 。

设计结果如下： $d_1=1.7 \text{ mm}$ ， $d_2=3.6 \text{ mm}$ ， $d_3=1.4 \text{ mm}$ ， $d_4=1.5 \text{ mm}$ ， $d_5=1.8 \text{ mm}$ 。

钢/铝两相五层结构的频带结构和反射系数如图6、7所示。图6中， $Q$ 表示结构的广义波数  $Q=kd$ ，其实部和虚部分别用实线和虚线表示。图7表示采用全弹性有限单元模型计算得到的反射系数，结构两侧无限大均匀介质设置为钢。由图观察得，在给定的目标频带  $900 \sim 1200 \text{ kHz}$  范围内结构的禁带率达到  $93.75\%$ ；在  $900 \sim 1180 \text{ kHz}$ ，即声禁带，结构对声波的反射系数都接近于  $1$ ，在  $1180 \sim 1200 \text{ kHz}$ ，即声通带，结构的反射系数有所减小。

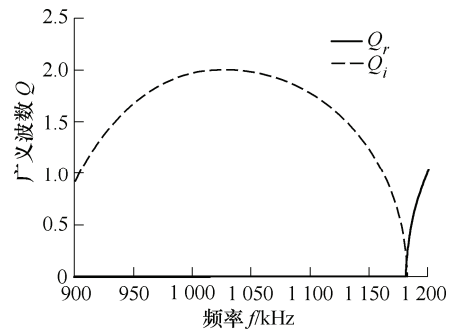


图6 频带结构图



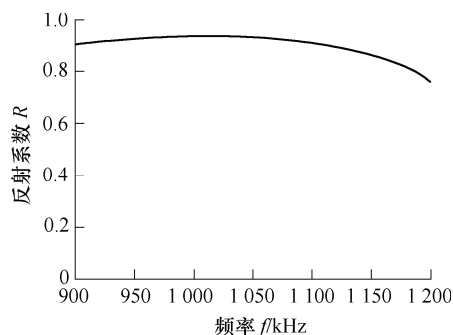


图 7 反射系数图

为验证全反射结构对声波的实际反射能力，对设计的钢/铝两相五层结构进行试验研究。结构中组成材料均需要打磨保证平行度和粗糙度。本试验选择检测传递波的强度，间接反映全反射智能结构对声波的实际反射能力。对传递波的检测方法采用的是超声检测法。超声检测系统原理图见图 8。给定频率的信号传播路径为：信号发生器—超声探头(发射)—样品—超声探头(接收)—示波器。

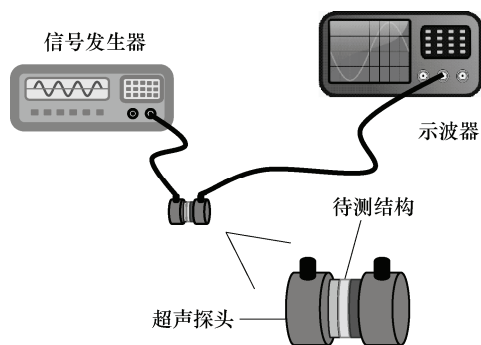


图 8 超声检测系统原理图

本试验选用的信号发生器为 SAMPLE F20；超声探头为北极星接触式纵波单晶探头，中心频率为 1 MHz，直径为 30 mm；信号发生器为 Agilent MSO-X 2012A。试验所用样品为  $\phi 30$  mm 的圆柱形试样，与探头尺寸相当。由于超声波在空气中的衰减极大，试验时样品与探头之间涂抹耦合剂，避免空气间隙对试验结果产生影响。

试验结果如图 9 所示。图中实线为幅值为 5 V、频率范围为 900~1 200 kHz 的声波穿过单个钢/铝两相五层结构单元后检测到的幅值，长虚线为穿过一个单元厚度的铝，短虚线为穿过相同厚度的钢。为排除层状结构组成材料界面对声波传递产生的影响，在用相同厚度的铝和钢进行对比试验时，采用的不是一体的铝柱和钢柱，而是与两相五层智能结构一样，由五层不同厚度的铝和钢组成。观察图中曲线，可以发现在 900~1 200 kHz 频段范围内，穿过层状结构被接收到的声波幅值极低，与图 7 中理论曲线相符。同时，穿过一单元全反射结构接收到的信号幅值远小于穿过相同厚度的单一铝结构和单

一钢结构，进一步说明全反射结构对声波的反射效果。

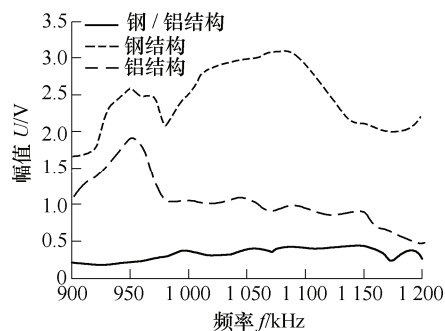


图 9 超声试验结果

本文只给出了一单元钢/铝两相五层结构、等厚度铝结构和等厚度钢结构的试验结果，采用对比试验的方法定性分析了钢/铝两相五层全反射结构对声波的反射能力。需要补充说明的是，当声波穿过两个单元时，已无法检测到传递波，再次说明了该结构对声波的全反射效果。同时，实例中给定的材料及目标频带等都是考虑试验的可操作性。真正应用于实际时，设计条件应根据实际需求给出。

## 4 结论

(1) 建立了一维层状周期性结构的物理模型和声波传播的全弹性有限单元模型，采用传递矩阵法研究了结构的声学特性，分析了结构对声波传播的影响。

(2) 根据工程实际对声波隔离的需求提出了一种特殊的一维层状周期性结构——全反射结构，给出了完整的设计体系和详细的设计方法。

(3) 应用所提出的方法设计了钢/铝两相五层结构，采用对比试验法定性分析了结构对声波的反射能力，验证了全反射智能结构的实际可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 钟祥璋. 我国隔声材料的进展[J]. 噪声与振动控制, 1993(3): 5-7.  
ZHONG Xiangzhang. The progress of the sound insulation materials in China[J]. Noise and Vibration Control, 1993(3): 5-7.
- [2] 宁少武, 史治宇, 李晓松. 流场中填充吸声材料夹层板结构与声腔的耦合特性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 177-185.  
NING Shaowu, SHI Zhiyu, LI Xiaosong. Performance of vibro-acoustic coupling of the sandwich structure with absorptive material and cavity in external convected

- fluids[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 177-185.
- [3] 王晓乐, 孙玲玲, 高阳, 等. 圆柱壳体基础隔振系统导纳功率流特性[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 48-55. WANG Xiaole, SUN Lingling, GAO Yang, et al. Mobility power flow analysis of vibration isolation system with a circular cylindrical shell foundation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 48-55.
- [4] 魏振东, 李宝仁, 杜经民, 等. 基于声子晶体理论的舰船液压管路支承用隔振器轴向振动带隙特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 91-98. WEI Zhendong, LI Baoren, DU Jingmin, et al. Research on the longitudinal vibration band gaps of isolator applied to ship hydraulic pipe-support based on the theory of phononic crystals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 91-98.
- [5] KIRICHENKO O V, KLIMENKO V N, SHAPOVAL I V, et al. Filtering properties of porous materials made of thin stainless steel fibers[J]. Powder Metallurgy & Metal Ceramics, 2015, 54(3-4): 151-155.
- [6] 钟祥璋, 莫方朔. 铝纤维吸声板的材料特性及应用[J]. 装饰装修材料, 2000(11): 19-22. ZHONG Xiangzhang, MO Fangshuo. The properties and application of aluminum fiber acoustic board[J]. Architectural Decorating and Finishing Materials, 2000(11): 19-22.
- [7] 敖庆波, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. FeCrAl 纤维混合毡的吸声性能[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 780-782. AO Qingbo, TANG Huiping, ZHU Jilei, et al. The sound absorption properties of FeCrAl fiber mixed felt[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(6): 780-782.
- [8] 王常力, 徐颖, 邹伟仁, 等. 多层结构连续铜纤维材料吸声性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(5): 758-763. WANG Changli, XU Ying, ZOU Weiren, et al. Exploring sound absorption performance of multi-layer copper fiber structure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(5): 758-763.
- [9] 段翠云, 崔光, 刘培生, 等. 多孔泡沫金属材料吸声性能探讨[J]. 北京信息科技大学学报, 2014, 29(4): 1-5. DUAN Cuiyun, CUI Guang, LIU Peisheng, et al. Sound absorption properties of metal foams[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2014, 29(4): 1-5.
- [10] 卢淼, 姚欣宇, 刘培生, 等. 电沉积泡沫镍的中频吸声性能[J]. 稀有金属, 2015, 39(1): 49-54. LU Miao, YAO Xinyu, Liu Peisheng, et al. Sound absorption performance of nickel foam in range of intermediate frequency[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(1): 49-54.
- [11] RU Jinming, KONG Bo, LIU Yaoguang, et al. Microstructure and sound absorption of porous copper prepared by resin curing and foaming method[J]. Materials Letters, 2015(139): 318-321.
- [12] 姜洪源, 武国启. 金属橡胶材料非线性吸声特性研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 70-77. JIANG Hongyuan, WU Guoqi. Nonlinear sound absorption performance of metal rubber material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 70-77.
- [13] WILLEMSSEN A M, RAO M D. Dispersion of carbon nanotubes within polyurethane foams and its effects on acoustic absorption[C]// INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Institute of Noise Control Engineering, 2012: 4407-4418.
- [14] 范晓瑜, 姚跃飞, 虞华东, 等. 蛭石/PVC 复合材料的隔声性能研究[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(6): 647-650. FAN Xiaoyu, YAO Yuefei, YU Huadong, et al. Research on sound insulation property of vermiculite/PVC composite[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2014, 31(6): 647-650.
- [15] 梁基照, 朱波. 聚丙烯/中空玻璃微球复合材料隔声特性分析[J]. 塑料科技, 2014, 42(7): 49-52. LIANG Jizhao, ZHU Bo. Analysis on sound insulation performance of PP/HGB composites[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(7): 49-52.
- [16] 刘刚田, 吉晓民. 基于压电材料反射声压最小的主动吸声方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 141-145. LIU Gangtian, JI Xiaomin. Minimum active sound absorption method study based on the reflected sound pressure of piezoelectric materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 141-145.
- [17] SADEGHI H, NEMAT-NASSER S. Optimal design of layered periodic composites for mitigation of impact-induced elastic waves[J]. Spie Smart Structures & Materials, 2015, 12: 9438.
- [18] 杨阳, 李春, 缪维跑, 等. 基于多目标遗传算法的风力机叶片全局优化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 192-198. YANG Yang, LI Chun, MIAO Weipao, et al. Global optimal design of wind turbines blade based on multi-object genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 192-198.