

计及板材料性能影响的微穿孔板吸声特性仿真计算

孙文娟^{1,2}, 苏巧平³, 孔德义¹, 段秀华^{1,2}, 赵聪^{1,2}, 尤晖¹, 赵湛⁴

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230026;

3. 安徽新华学院 电子通信工程学院, 合肥 230088; 4. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 针对经典微穿孔板理论模型假设板为刚性、忽略其自身材料性能对吸声特性影响、而计及该影响时模型精确度降低之问题, 在计及板材料性能影响的微穿孔板等价多孔材料模型理论上, 采用 VA ONE 软件的 foam 模块建立微穿孔板等价模型模拟其在扩散场中的吸声特性, 并与经典理论模型仿真计算结果及混响室实验测试结果进行对比, 该等价模型较经典模型更接近实际使用值, 且该模型对复杂多层微穿孔板同样有效, 均具较高的工程意义及应用价值。

关键词: 微穿孔板; 材料性能; 多孔材料; VA ONE; 扩散场; 混响室

中图分类号: TB5 文献标识码: A

Calculation of acoustical characteristics of micro-perforated panel considering the effect of panel properties

SUN Wen-juan^{1,2}, SU Qiao-ping³, KONG De-yi¹, DUAN Xiu-hua^{1,2}, ZHAO Cong^{1,2}, YOU Hui¹, ZHAO Zhan⁴

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Department of Automation, Hefei 230026, China;

3. Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China;

4. State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The classical model of micro-perforated panel assumes that the panel is rigid. As a result, the effect of panel properties is ignored and the precision of the model is decreased. An equivalent model of micro-perforated panel was established to simulate the acoustical characteristics in diffuse field by using the FOAM module of VA ONE software to consider the effect of panel properties. The conclusion is that the results of the equivalent model of micro-perforated panel are much closer to the experimental results compared with the classical model. This equivalent model can also be used in the case of complex multilayer micro-perforated panel and is helpful in engineering application.

Key words: micro-perforated panel; panel properties; porous material; VA ONE; diffuse field; reverberation chamber

微穿孔板吸声体 (Micro-Perforated-Panel, MPP) 由穿孔直径在 1 mm 以下薄板和板后空腔或其它介质组成。经典 MPP 理论 (简称 Maa-MPP) 由马大猷^[1-5] 首次提出。该理论基于无限大板, 并假设板为刚性, 忽略板自身固体部分运动, 仅考虑孔中空气振动, 忽略板自身材料特性对 MPP 吸声性能影响。只要适用, 板可为任何材料^[5]。该理论在板为刚性情况下精确性较高; 当板刚性变小、重量变轻时, 该模型精确性迅速下降。因实际需要, 轻质薄型 MPP、塑料板、胶合板、有机玻璃等^[6], 以及透明材料^[7-8] 越来越多场合得以应用。

Lebedeva 等^[9] 对穿孔板运动对声阻抗影响进行研究。Takahashi 等^[10-11] 在计算无限大 MPP 吸声系数时, 用板的张力 (tension) 表示板横向刚度对吸声性能影响。Kim 等^[12] 在计算无限大 MPP 时, 在 Maa-MPP 理论上增加板密度对吸声性能影响, 考虑板固体部分自身运动。Yoo^[13] 称此模型为 Maa-Flex MPP 模型。实验表明, 当板的材料越轻、刚度越小时, 经典 Maa-MPP 理论模型与 Maa-Flex MPP 模型的计算结果相差较明显。

已有研究几乎均以赫姆霍兹共振器为基础, 如将微穿孔板比拟为机械阻尼谐振系统或等价声电类比图^[1-5]。MPP 吸声机理与多孔材料理论存在微妙关联, 若将方向从赫姆霍兹共振器转向多孔材料, 可将微穿孔板视为薄的多孔材料结构进行模拟。Atalla 等^[14] 指出刚性 MPP 可用刚性多孔材料建模, 从而为 MPP 建

基金项目: 国家重点基础研究发展项目计划 (973 计划) (2011CB302104)

收稿日期: 2012-04-01 修改稿收到日期: 2012-05-18

第一作者 孙文娟 女, 硕士生, 1986 年生

通讯作者 孔德义 男, 研究员, 1966 年生

模提供全新思路。Kang^[15]认为该建模方式可扩展到据不同材料柔软及弹性特性的多孔材料模型模拟不同材料微穿孔板吸声体,并应考虑板材料性能对MPP吸声特性影响。用刚性多孔模型模拟刚性MPP,柔软多孔(limp porous)模型对应Maa-Flex MPP,弹性多孔(elastic porous)模型模拟计及板弹性性能的弹性MPP。现有声学软件大多包含多孔材料模块,为估计特定材料的MPP吸声性能提供了方便、直接手段。本文采用VA ONE软件的foam模块建立MPP等价多孔材料模型,模拟扩散场中的声学特性。

1 经典Maa-MPP理论模型

文献[1-5]利用Rayleigh对微管中声波分析的严格理论及Crandall的简化推导,采用声电类比方法获得适合微穿孔板的基本理论。Rayleigh考虑空气媒质与管壁之间热交换产生的热损耗;而在Crandall的简化推导中,将圆管中空气视为由大量厚度极薄的同轴圆柱层组成,每层沿轴向运动受惯性及与轴向速度在径向梯度成正比的粘滞阻力限制,声波入射时,孔中空气柱产生振动过程中由于克服粘滞阻力而消耗声能。

经典Maa-MPP理论中,声能吸收原因为:①假设管壁刚性时孔中空气粘滞力引起;②孔中空气媒质与管壁间热交换产生的热损耗。MPP结构及等效电路如图1所示。

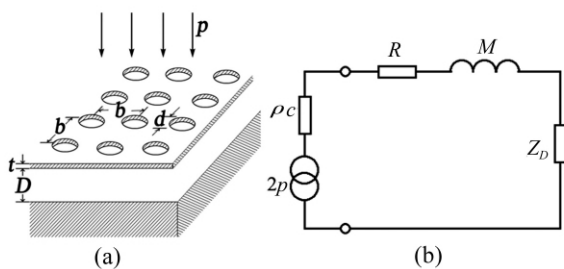


图1 微穿孔板吸声体结构及等效电路

Fig. 1 Construction and equivalent electrical circuit of MPP

图1(a)为单层MPP结构,d为穿孔直径(mm),b为孔间距(mm),t为板厚(mm),p为穿孔率(穿孔部分面积与总面积之比),D为板后空腔深度(mm)。图1(b)为采用声电类比法所得等效电路图,其中R、M分别为微穿孔板声阻与声质量;ρc为空气特性阻抗,ρ=1.21(kg/m³)为空气密度,c为空气中声波传播速度,常温c=340(m/s),Z_D为板后空腔声阻抗率。

整个微穿孔板吸声体声阻抗率为:

$$Z = R + j\omega M + Z_D \tag{1}$$

式中:ω为入射声波角频率。

相对声阻抗(用ρc进行归一化)为:

$$\frac{Z}{\rho c} = r + j\omega m - j\rho c \cot(\omega D/c) \tag{2}$$

其中:相对声阻r(声阻与空气特性阻抗ρc之比)与相对声质量m(声质量与空气特性阻抗ρc之比)分别为:

$$r = \frac{32\mu t}{\rho c d^2} \left[\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}k}{8} \frac{d}{t} \right] \tag{3}$$

$$m = \frac{t}{\rho c} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \tag{4}$$

式中:μ为空气运动粘度系数(常温1.48×10⁻⁵m²/s)。为设计简便,采用圆孔正方形排列(穿孔率p=πd²/4b²)。式(4)中穿孔常数k为:

$$k = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \tag{5}$$

声学上主要用吸声系数衡量材料、结构的声学性能,吸声系数通常与声波入射方向有关,一般表示吸声系数有两种方法^[16]:①法向吸声系数,由驻波管测定;②对各方向漫入射的平均吸声系数或称扩散声场吸声系数,由混响室测定,可反映不同入射角的平均效果,与实际使用情况较接近。当平面声波垂直入射时,微穿孔板吸声体吸声系数(被吸收的声功率与入射声功率之比)为:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + [\omega m - \cot(\omega D/c)]^2} \tag{6}$$

当声波与法线成θ角入射时,吸声系数为:

$$\alpha_\theta = \frac{4r \cos\theta}{(1+r \cos\theta)^2 + [\omega m \cos\theta - \cot(\omega D \cos\theta/c)]^2} \tag{7}$$

扩散场内统计吸声系数为各方向漫入射的平均值:

$$\bar{\alpha} = \int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \sin(2\theta) d\theta = \int_0^{\pi/2} \frac{8r(\cos\theta)^2 \sin\theta d\theta}{(1+r \cos\theta)^2 + [\omega m \cos\theta - \cot(\omega D \cos\theta/c)]^2} \tag{8}$$

MPP在扩散场内的吸声性能呈现与垂直入射时不同的吸声特性^[1]。扩散场内的吸声频带显著加宽,总体吸收频带向高频方向移动,整条曲线相比垂直入射时更平坦,但整体吸声系数普遍降低。

2 不同板材料对MPP吸声特性影响

为说明材料对微穿孔板吸声性能影响,选用三种不同材料:铝合金、环氧树脂、聚四氟乙烯,采用机械冲孔方法加工相同尺寸微穿孔板,见表1。与铝合金及环氧树脂相比,聚四氟乙烯刚度小,机械性质软,三种材料主要性能参数见表2。采用驻波比法驻波管AWA6128A分别测量三个MPP的法向吸声系数,每个样品均测量三次取平均值。与经典Maa-MPP理论对比(图2)发现,铝合金及环氧树脂材料的MPP实际测量法向吸声系数与经典Maa-MPP理论计算垂直入射吸声

系数结果基本吻合,而因材料本身性能不同,聚四氟乙烯材料的 MPP 实验值与理论计算出入较大。

表1 MPP 结构参数

Tab.1 Parameters of micro-perforated panel

	d/mm	t/mm	$p/\%$	D/mm
结构参数	0.6	2	1.27	30

表2 三种材料主要性能参数

Tab.2 Parameters of materials

	E	ρ	ν
铝合金	72	2 600 - 2 800	0.33
环氧树脂	86	1 750 - 1 800	0.35
聚四氟乙烯	0.5	2 100	0.40

注: E 为杨氏模量(GPa) ρ 为密度($kg \cdot m^{-3}$) ν 为泊松比。

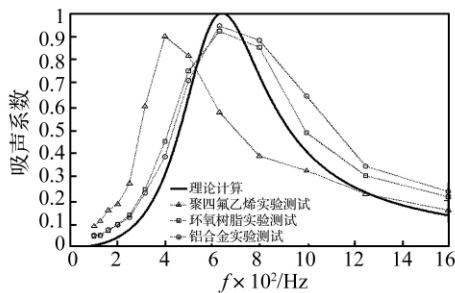


图2 MPP 理论计算与驻波管测试垂直入射吸声系数比较图

Fig.2 Comparison of normal incident absorption coefficients of MPP between Maa-MPP modal and standing wave tube measurement

由图2明显看出,材料对 MPP 吸声系数影响较大。而经典 Maa-MPP 理论因假设板为刚性,仅在材料为刚性时有足够精确度,当材料变轻、变软时,此模型不能很好预测 MPP 的吸声性能,与实验值相差较大。

3 计及板材料性能的 MPP 等价多孔材料模型

在 MPP 等价多孔材料模型中,穿孔板可转化为等价吸声材料建模,进而由传递矩阵获得声学特性。则在仿真分析过程中无需再对穿孔板进行处理,只需修改 MPP 对应的吸声材料仿真参数即可。

3.1 多孔材料吸声理论及模型

多孔吸声材料一般分为纤维材料及泡沫材料。Boit 将多孔材料视为流固两相介质,提出弹性多孔材料声传播理论;Allard 等^[17]对 Boit 理论进一步研究提出弹性多孔材料的传递矩阵法。

据多孔材料 Biot 理论,用三组参数描述多孔材料:弹性参数(杨氏模量、泊松比、损失因子、固体密度)、声学参数(流体密度、定压比热、定容比热、流体动力粘度

系数、流体热传导系数)及毛孔参数(孔隙率、流阻系数、毕奥因子、流体体积模量、曲折系数、特征粘性长度、特征热效长度)。多孔材料由固体(多孔材料骨架)与流体(介质)构成。据多孔材料骨架刚度不同,可将多孔材料模型分为三种^[18]。

(1) 刚性(rigid)模型:该模型骨架弹性模量较介质流体大得多。由于忽略骨架变形,只有声学参数与毛孔参数,刚性多孔材料也视为等效流体,材料骨架不动,此时声吸收为空气粘性耗散吸声,与刚性 MPP 吸声原理类似。

(2) 柔软(limp)模型:该模型与刚性模型类似,只增加能引起声速衰减的惯性负载对声波影响。固体部分可动,综合骨架密度与流体性能影响声振特性。

(3) 弹性(elastic)模型:该模型壁为弹性,考虑壁对吸声性能影响,增加流固耦合摩擦运动对声能的衰减。空气粘性-骨架振动相互摩擦。有三种形式的复合波在材料内部发生能量转移,每种波均存在于固体与流体中^[18]。其中压缩波与横波性能受骨架性能影响;另一种压缩波性能主要受流体特性影响。三种模型特征参数见表3。

表3 多孔材料模型参数

Tab.3 Parameters of porous materials modal

模型	Φ	σ	a_{∞}	Λ	Λ'	ρ	E	ν	β
刚性	✓	✓	✓	✓	✓				
柔性	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
弹性	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

注: Φ 为孔隙率 σ 为流阻系数($N \cdot m^{-4} \cdot s$) a_{∞} 为曲折系数, Λ 为特征粘性长度(m) Λ' 为特征热效长度(m) ρ 为固体骨架密度($kg \cdot m^{-3}$) E 为固体骨架杨氏模量 ν 为固体骨架泊松比, β 为固体骨架损失因子。

3.2 MPP 等价多孔材料模型

文献[14]等价模型中,刚性 MPP 可用刚性多孔材料 Johnson-Allard 模型建模,条件为 MPP 与所用多孔材料模型应具有相等的曲折系数。通过将 MPP 的结构参数转化为多孔材料模型对应的相关参数,即可用多孔材料模型模拟 MPP 吸声性能。表3中刚性多孔材料因忽略骨架变形,仅有声学与毛孔两组参数,而 MPP 声学性能受结构参数(孔径 d 、半径 r 、孔间距 b 、板厚 t 、穿孔率 p 、板后空腔深度 D)影响,两种模型参数转化为:

$$\text{孔隙率 } \Phi = p; \text{流阻系数 } \sigma = \frac{8\eta}{\phi r^2}$$

其中: η 为空气动力粘度系数,常温为 1.789×10^{-5} (kg/ms); $\Lambda = r$ 为特征粘性长度; $\Lambda' = r$ 为特征热效长度; a_{∞} 为曲折系数,与穿孔板背后介质(空气或其他吸声材料)有关。

当穿孔板背后附有其它吸声材料时:

$$a_{\infty} = 1 + \frac{\varepsilon_e}{t} [1 + \text{Re}(\alpha_p)] \quad (9)$$

式中: $\text{Re}(\alpha_p)$ 为所附吸声材料动态曲折系数实数部分。
常规 MPP 时:

$$a_{\infty} = 1 + \frac{2\varepsilon_e}{t} \quad (10)$$

圆孔正方形排列时^[14]:

$$\varepsilon_e = 0.48 \sqrt{\pi r^2} (1 - 1.14 \sqrt{p}), \sqrt{p} < 0.4 \quad (11)$$

正方形孔正方形排列时^[19]:

$$\varepsilon_e = 0.48 \sqrt{A_{\text{perf}}} (1 - 1.25 \sqrt{p}) \quad (12)$$

当 $0 \leq p \leq 1$ ^[17] 时:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= (1 - 1.13\zeta - 0.09\zeta^2 + 0.27\zeta^3) \frac{8r}{3\pi} \\ \zeta &= 2 \sqrt{\frac{p}{\pi}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

整个 MPP 声阻抗率为:

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{4}{d} (t + 2\varepsilon_e) \frac{R_s}{p} + \frac{j\omega\rho}{p} (2\varepsilon_e + t) - j\rho c \cot(\omega D/c) \\ R_s &= \frac{\sqrt{2\eta\omega\rho}}{2} = \frac{\rho \sqrt{2\mu\omega}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由声阻抗率即可直接得到吸声系数随入射噪声频率变化的关系式。

文献[14]对金属双层 MPP, 分别采用经典 Maa-MPP 理论与刚性多孔材料等价模型建模。与驻波管实测测试结果对比表明, 刚性多孔材料等价模型较经典 Maa-MPP 理论模型更接近驻波管实验测试结果。

据多孔材料三种模型, 可类比获得 MPP 三种等价模型^[13-15], 即刚性 MPP 等价模型、柔软 MPP 等价模型、弹性 MPP 等价模型。由此可据 MPP 不同材料选择对应的 MPP 等价模型, 考虑板材料性能对 MPP 吸声特性影响, 如柔软 MPP 模型考虑板固体部分密度, 计入固相部分惯性影响; 弹性 MPP 等价模型既考虑固相部分惯性, 也考虑板材料弹性性能(由杨氏模量、泊松比、损失因子决定)对 MPP 声学性能影响, 将固体与流体中的三种复合波均计入, 考虑流固耦合综合影响。

然而, 解析计算繁琐复杂, 较有效方式为借助专业声学软件^[13]。文献[15]采用基于多孔材料 Biot 理论的声学软件 Comet/Acoustics-safe 对三种模型材料 MPP 仿真建模, 与驻波管测试结果吻合良好。验证了此模型对斜入射同样有效。当已知 MPP 结构参数与相关材料参数时, 经等价模型参数的转化, 即可借助含多孔材料模型的声学软件快速计算^[15]。

4 基于 VA ONE 的 MPP 仿真

VA ONE 是法国 ESI 集团于 2005 年推出的全频段振动噪声分析软件, 利用其特有的 Foam 模块, 可预测多层吸声材料(或结构)的吸声系数与插入损失^[20]。

Foam 模块采用基于多孔介质 Biot 理论优化后的 Allard 模型并对其进行延伸, 采用平面波传播模型, 在固体材料或泡沫结构框架中考虑纵波、横波及固体结构与空腔间的耦合作用^[17]。吸声材料可由薄弹性板、隔层、流体层(介质)、纤维层以及泡沫层组成^[21]。VA ONE 的 Foam 模块采用统计能量分析(SEA)方法, 所有声场均为扩散声场, 假设声波从所有方向以相等概率传播^[21]。VA ONE 用传递矩阵方程计算任意入射角度的平均吸声系数, 描述扩散场的声学特性, 并假设吸声材料(或结构)入射端为自由空气, 背面为刚性墙, 模拟在混响室中贴墙放置的吸声系数。

为验证其准确性, 采用 VA ONE 的 Foam 模块对典型纤维吸声材料矿渣棉进行仿真计算。该材料的中高频段吸声系数较高, 低频段较差, 材料参数见表 4。与混响室实验测量数值^[22]进行对比结果见图 3。

表 4 矿渣棉参数

Tab. 4 Parameters of mineral wool

参数	Φ	σ	a_{∞}	Λ	Λ'	ρ	t
	0.95	60 000	3.2	0.000 05	0.000 106	33	50

注: t 为矿渣棉厚度(mm)。

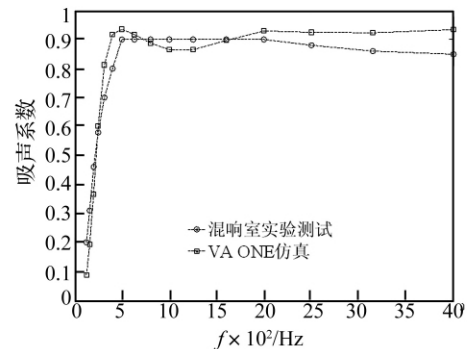


图 3 矿渣棉 VA ONE 仿真计算与混响室实验测试吸声系数比较图

Fig. 3 Comparison of absorption coefficients of mineral wool between VA One simulation and reverberation measurement

由图 3 看出, VA ONE 仿真值与混响室实测值吻合良好, 用 Foam 模块仿真多孔材料混响室吸声特性合理可行。

采用 VA One 的 Foam 模块建立 MPP 等价多孔材料模型仿真扩散场的吸声特性, 进而模拟混响室吸声系数。为保证准确性, 采用已有混响室测试结果^[23]作为对比依据, 并与经典 Maa-MPP 理论模型仿真结果对比。经典 Maa-MPP 理论模型所需 MPP 结构参数见表 5。

表 5 经典 Maa-MPP 模型参数

Tab. 5 Parameters of micro-perforated panel used in Maa modal

参数	$p/\%$	d	t	b	D
Maa	0.45	0.2	0.08	2.64	50

该 MPP 材料为透明 PC 塑料,机械性质柔软,弹性好,据 MPP 等价多孔材料模型理论分析,应选用弹性 MPP 等价多孔材料模型仿真。由式(10)、(11)转化后对应的相关参数见表 6。

表 6 MPP 等价弹性多孔材料模型参数

Tab.6 Parameters of micro-perforated panel used in elastic modal

Φ	σ	a_w	Λ	Λ'	ρ	E	ν	β
0.004 5	3.22e6	2.964	0.000 1	0.000 1	1220	2.2e9	0.37	0.31

由表 6 参数,采用 VA ONE 的 Foam 模块建立 PC 塑料 MPP 等价模型。为说明该模型的有效性,同时采用经典 Maa-MPP 理论关于计算扩散场内统计吸声系数相关公式,对同样结构(表 3)的 MPP 进行建模仿真,并与混响室测试结果^[23]对比,见图 4。由图 4 明显看出,VA ONE 仿真结果较经典 Maa-MPP 理论更接近实测结果。由于经典 Maa-MPP 理论模型中板为刚性且未考虑板运动及材料本身性能影响时准确性较高;而实验中所用 MPP 材料为透明 PC 塑料,刚度小,弹性大,导致计算准确性降低。采用 VA ONE 的 Foam 模块建立弹性等价 MPP 模型,由于考虑板运动及材料本身性能影响,较经典 Maa-MPP 理论计算更准确。且无需对微穿孔板进行处理、无需考虑精确结构,只修改等价吸声材料的仿真参数即可。该方法计算简单,速度快,高效省时。

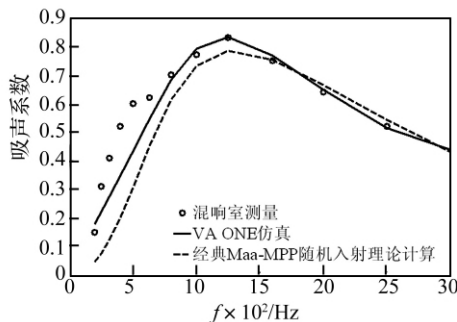


图 4 PC 塑料 MPP 经典理论计算、

VA ONE 仿真与混响室实测吸声系数比较图

Fig.4 Comparison of absorption coefficients of MPP

between Maa-MPP modal calculation、

VA ONE simulation and reverberation measurement

此等价模型同样适用于多层 MPP 结构。传统多层 MPP 理论计算较复杂、费时,尤其当 MPP 背衬多孔材料时,理论计算更繁复,而基于该等价模型的计算则简便、易行^[19,24]。

5 结 论

通过对经典微穿孔板理论及不同材料板吸声特性

分析,并据 VA One 进行 MPP 仿真,结论如下:

(1) 经典微穿孔板理论忽略板自身固体部分运动及板自身材料性能对吸声特性影响,理论模型精确性随板的刚性减小、弹性增大而降低。

(2) 基于多孔材料模型理论的微穿孔板等价模型,可根据所用材料的不同,建立不同的微穿孔板等价模型,并计入板自身运动及板材料性能对吸声特性影响,可提高仿真的精确性。

(3) 采用 VA ONE 的 Foam 模块建立的微穿孔板等价模型可模拟扩散场中的吸声特性,更接近实际使用情况;且计算简单,速度快,高效省时,具有较大工程意义与应用价值。

参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, 38(1): 38-50.
MA Da-you. Theory and design of micro-perforated panel sound-absorbing constructions [J]. Sci Sinica, 1975, 38(1): 38-50.
- [2] Ma D Y. Micro perforated-panel wideband absorbers [J]. Noise Control Engineering Journal, 1987, 29(3): 77-84.
- [3] 马大猷. 微穿孔板结构的设计[J]. 声学学报, 1988, 13(3): 174-180.
MA Da-you. Design of micro-perforated panel sound-absorbing constructions [J]. Acta Acoustic, 1988, 13(3): 174-180.
- [4] 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): 386-393.
MA Da-you. General theory and design of micro-perforated panel absorbers [J]. Acta Acoustic, 1997, 22(5): 386-393.
- [5] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 481-484.
MA Da-you. Practical absorption limits of MPP absorbers [J]. Acta Acoustic, 2006, 31(6): 481-484.
- [6] Toyoda M, Mu R L, Takahashi D. Relationship between Helmholtz-resonance absorption and panel-type absorption in finite flexible micro-perforated-panel absorbers [J]. Applied Acoustics, 2010, 71(3): 315-320.
- [7] Kang J, Brocklesby M W. Feasibility of applying micro-perforated absorbers in acoustic window systems [J]. Applied Acoustics, 2005, 66(2): 669-689.
- [8] Asdrubali F, Pispola G. Properties of transparent sound-absorbing panels for use in noise barriers [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2007, 121(1): 214-221.
- [9] Lebedeva I V, Nesterov V S. Acoustical parameters of a lightweight perforated membrane [J]. Soviet Physics-acoustics, 1965, 10(3): 269-275.
- [10] Takahashi D, Sakagami K, Morimoto M. Acoustic properties of permeable membranes [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(5): 3003-3009.
- [11] Takahashi D A. New method for predicting the sound absorption of perforated absorber systems [J]. Applied Acoustics, 1997, 51(1): 71-84.

(下转第 172 页)

变得不理想,严重时也会导致响应发散。

5 结论

本文通过建立结构时滞 LSSVM-LQR 地震响应智能控制算法,基于 MATLAB 平台,编制时滞 LSSVM-LQR 算法的执行程序;用 3 层框架结构进行数值验证与比较。结论如下:

(1) 时滞对结构控制效果与稳定性具有极不利影响,对不同地震波敏感程度亦不相同,其敏感度与地震加速度正反变换速率相关。

(2) 时滞 LSSVM-LQR 可有效减小时滞对结构控制效果影响,但控制效果随时滞的过度加长而变差。

(3) 在时滞 LSSVM-LQR 中,径向基核函数参数的选取对结构地震响应控制效果有很大影响。

参考文献

- [1] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Lin C C, Chang C C, Chen H L. Optimal H_{∞} output feedback control systems with time delay [J]. Journal of Engineering Mechanics 2006, 132(10): 1096–1105.
- [3] 蔡国平, 黄金枝. 控制存在时滞的线性系统主动控制的滑移模态方法[J]. 力学季刊 2002, 23(2): 164–172. CAI Guo-ping, HUANG Jin-zhi. Sliding-mode control method for linear systems with time-delay in control [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2002, 23(2): 164–172.
- [4] 陈龙祥, 蔡国平. 地震作用下建筑结构的时滞最优控制[J]. 振动与冲击 2008, 27(4): 63–65, 169. CHEN Long-xiang, CAI Guo-ping. Optimal control method for seismically excited structures with multiple time delays in control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(4): 63–65, 169.
- [5] 刘军龙, 代晶辉, 张春巍, 等. 基于位移反馈控制的主动增

加时滞补偿方法及其试验验证[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 185–191.

LIU Jun-long, DAI Jing-hui, ZHANG Chun-wei, et al. Time delay compensation method based on displacement feedback and active increasing of time delays and its experimental verification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 185–191.

- [6] McGreevy S, Soong T T, Reinhorn A M. An experimental study of time delay compensation in active structural control [C]. Proc. 6th Int. Modal Analysis Conf. and Exhibits, Society for Experimental Mechanics, 1988: 1733–1739.
- [7] 徐龙河, 李忠献, 钱稼茹. 半主动预测控制系统的时滞与补偿[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 79–83. XU Long-he, LI Zhong-xian, QIAN Jia-ru. Time delay and compensation for semi-active predictive control system [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 79–83.
- [8] Vapnik V. Statistical learning theory [M]. New York: Wiley, 1998.
- [9] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Application of support vector regression machines to the processing of end effects of Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(3): 1197–1211.
- [10] David M, Bart B, Tony V G. Comprehensible credit scoring models using rule extraction from support vector machines [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1466–1476.
- [11] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural Processing Letters, 1999, 9: 293–300.
- [12] 顾燕萍, 赵文杰, 吴占松. 最小二乘支持向量机的算法研究[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2010, 50(7): 1063–1066, 1071. GU Yan-ping, ZHAO Wen-jie, WU Zhan-song. Least squares support vector machine algorithm [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2010, 50(7): 1063–1066, 1071.

(上接第 154 页)

- [12] Kim J W, Yoo T, Bolton J S, et al. The correlation of the performance of duct lining materials with their normal incidence properties [R]. Proceedings of Inter-Noise, 2005.
- [13] Yoo T. The modeling of sound absorption by flexible micro-perforated panels [D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2008.
- [14] Atalla N, Sgard F. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1): 195–208.
- [15] Kang H. Measurement and modeling of micro-perforated panels [D]. Indiana: West Lafayette, Purdue University, 2009.
- [16] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [17] Allard J F. Propagating of sound in porous media: modelling sound absorbing materials [M]. London: Elsevier Applied Science, 1993.
- [18] Kidner M R F, Hansen C H. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials [D]. South

Australia: The University of Adelaide, 2008.

- [19] Jaouena L, Bećot F X. Acoustical characterization of perforated facings [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2011, 129(3): 1400–1406.
- [20] 刘 恺. 基于 VA ONE 的多孔吸声材料的应用仿真研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [21] VA ONE Foam 2007 [A]. User's Guide, 2007.
- [22] Francesco D, Giulio P. Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room. [C]. Brazil: The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2005: 110–120.
- [23] 闻小明, 李丽群, 李昕荣, 等. 通风空调系统低频噪声控制新材料的研究与运用 [C]. 全国建筑环境与设备第 3 届技术交流会文集 [A]. 烟台: 中国勘察设计协会建筑环境与设备分会, 2009, 532–535.
- [24] Chevillotte F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer [J]. Applied Acoustics, 2012, 73(1): 56–60.