

◇ 研究报告 ◇

基于薄膜编码超表面的宽频超薄声散射体*

赵 晗^{1,2} 贾 晗^{1,2†} 孙雪聪^{1,2} 杨 军^{1,2†}

(1 中国科学院声学研究所 噪声与振动重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文提出了一种基于薄膜编码超表面的宽频超薄声散射体。利用附加质量块的薄膜和空气腔组成的薄膜结构构建了反射声波相位差接近 180° 的两种共振单元。将两种共振单元按照一定的顺序进行排列,可以组成深亚波长尺寸下的声学超表面。所构建的声学超表面可以产生宽频有效的散射声场。通过有限元仿真软件对多个频率的近场散射声场分布、远场声指向性和扩散系数进行了仿真计算,仿真结果显示,该散射体可以高效地散射入射声波,并且散射效果在一定的频率范围内是宽频有效的。

关键词: 超表面; 薄膜共振单元; 声散射体

中图法分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)02-0276-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.02.010

Broadband ultrathin sound diffuser based on the membrane-type coding metasurface

ZHAO Han^{1,2} JIA Han^{1,2} SUN Xuecong^{1,2} YANG Jun^{1,2}

(1 Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A broadband ultrathin sound diffuser based on the membrane-type coding metasurface is proposed in this paper. The resonance units are constructed with mass-decorated membrane and air cavity. Two kinds of resonance units are designed with a reflection phase difference of 180° . The acoustic metasurface consisted of these two units can produce broadband diffuse sound field. The near-field sound pressure distribution, the far-field sound pressure levels directivity patterns and the diffusion coefficient are calculated by the simulation software and compared with those of the flat plate. The simulation results show that the sound diffuser can effectively diffuse the incident waves and operate in a broadband frequency range.

Keywords: Metasurface; Membrane resonator; Sound diffuser

2021-12-28 收稿; 2022-02-16 定稿

*广东省重点领域研发计划项目(2020B010190002), 国家自然科学基金项目(11874383,12104480), 中国科学院声学研究所前沿探索项目(QYTS202110)

作者简介: 赵晗(1994-), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 研究方向: 声人工结构的设计与应用。

†通信作者 E-mail: hjia@mail.ioa.ac.cn; jyang@mail.ioa.ac.cn

0 引言

声散射体可以将入射声波的能量向多个方向进行散射^[1-2],在厅堂声学^[3-5]、噪声控制^[6-7]、超声成像^[8]等领域均有着广泛的应用。声散射体实现散射效果的原理是通过将具有不同声学特性的结构单元进行组合,在散射体表面形成特定的反射相位排布^[9-10]。传统的声散射体如施罗德散射体等主要依靠不同深度的凹槽结构对反射声波和入射声波之间的相位差进行调节,因此散射体的最大厚度可能接近于声波的半波长。这一特性使得传统的声散射体在低频下可能存在体积过大的问题,实际应用受到很多限制。声学超材料可以借由人工设计的结构来实现各种材料的物理参数以及对声波的调控,为构造超薄的声散射体提供了新的技术思路^[11-18]。Zhu等^[19]提出一种基于Helmholtz共振器的结构单元,可以在深亚波长尺度下对反射声波相位进行调控,并在此基础上设计了超薄的施罗德散射体。Cao等^[20]用编码超表面的概念设计了一种超薄的反射超表面,可以在宽频范围内调控反射声场。这些工作中,构建散射体的结构单元的性质往往是由结构的几何参数决定的,结构确定后其声学性质就确定了,难以进行调节。Yang等^[21]提出一种由边界固定的薄膜和附加质量块组成的声学超材料单元,可以通过改变薄膜的表面张力来对结构的声学特性进行调节,因此结构具有更多的灵活性和实用性。Chen等^[22]验证了利用这种薄膜结构单元进行声波调控的可行性。这种薄膜结构的优良特性使其具有构建宽频超薄声散射体的潜力。

本文利用薄膜共振结构构建了1-bit声学编码超表面的两种基本单元,并以此为基础设计了一定带宽内宽频有效的深亚波长尺度的声散射体。利用Comsol Multiphysics有限元软件,对散射体的近场散射场分布、远场声指向性和扩散系数进行了仿真计算。计算结果表明文中设计的声散射体在一定的宽频范围内具有良好的散射性能,并且所设计的散射体厚度远小于工作频率对应的声波波长。本文提出的这种新型的超薄宽频声散射体具有较大的应用潜力和研究价值。

1 薄膜共振理论

本文采用的薄膜结构单元示意图如图1所示。单元由边界固定并附加质量块的薄膜及其背后的

腔体组成。单个单元对于入射声波的响应可以通过阻抗理论来进行分析^[21-23],在平面波入射条件下单元的声反射系数可以写作

$$R = \frac{Z_0 - Z}{Z_0 + Z}, \quad (1)$$

其中, Z_0 和 Z 分别是空气和结构表面的声阻抗。结构表面的阻抗 Z 由附加质量块的薄膜的阻抗 Z_m 和空气腔的阻抗 Z_c 相加得到。这两部分阻抗和结构参数之间的关系满足

$$Z_c = (-i\omega h / \rho_0 c_0^2)^{-1}, \quad (2)$$

$$Z_m = (-i\omega / \langle G_m \rangle)^{-1}, \quad (3)$$

其中, ρ_0 和 c_0 分别代表空气的质量密度和空气中的声速, $\langle G_m \rangle$ 是附加质量块薄膜表面的面平均格林函数,格林函数与薄膜参数之间的关系为

$$\langle G_m \rangle = \sum_{i=1} \frac{S \langle W_i(r) \rangle^2}{\iint \rho W_i^2 dS \cdot (\omega_i^2 - \omega^2)}, \quad (4)$$

其中, S 和 ρ 分别是薄膜的面积和质量密度; $W_i(r)$ 和 ω_i 分别表示单元的第 i 阶振动模态和共振角频率。从上述公式可以看出,通过调节薄膜的各种几何与材料参数,可以对单元阻抗进行调节,进而调节反射波的相位。此外,薄膜往往存在一定损耗,可能会使单元产生吸收,但在实际设计中可以适当地选取薄膜和对薄膜参数进行一些调节,使薄膜损耗不能与空气阻抗匹配,大大降低在共振频率处的吸收系数。另一方面,共振单元的声吸收仅在共振频率点处达到最大值,本文设计的单元实际工作频率往往是偏离这一频率的,因此在工作频率处的声吸收还会比共振峰值处降低很多,声吸收的影响将更进一步的降低。

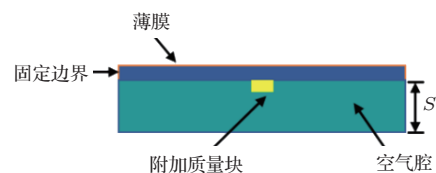


图1 结构单元示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the unit cell

2 单元与散射体模型

为了设计基于编码超表面的宽频有效的声散射体,首先需要设计在宽频范围内能够保持接近 180° 相位差的两种共振单元。所采用的单个单元

的薄膜直径为5 cm,腔体深度为0.5 cm。通过对所设计的结构单元中薄膜的杨氏模量进行调节,可以调节反射系数的相位。对于频率为3000 Hz的平面波入射情况,单个单元的反射声波与入射声波之间的相位差和杨氏模量之间的关系如图2所示。可以看到当薄膜的杨氏模量在图2中所示的范围内变化时,反射波与入射波的相位差的变化范围达到了接近270°,因此可以通过调节杨氏模量的大小构建两个反射相位相差为180°的单元。本文的编码超表面所采用的0单元和1单元所对应的薄膜杨氏模量以及单元反射相位如图2中星型标记所示,将其中薄膜杨氏模量较低的单元定义为0单元,薄膜杨氏模量高的单元定义为1单元。图2的插图中展示了这两种单元的振动模态,可以看到由于模量的差异,两种单元在同一频率下存在截然不同的共振模态以及不同的反射相位。如果能够在一定频率范围内将这一相位的差值维持在接近180°,就可以满足构建宽频有效的声散射体的需要。

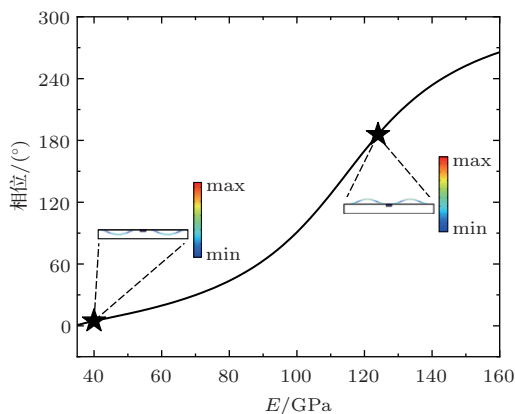


图2 编码超表面中0和1单元的共振振型示意图

Fig. 2 The resonance modal shapes of the 0 element and 1 element in the coding metasurface

为了验证利用所选的两种单元构建宽频编码超表面的可行性,可以使用COMSOL软件计算两种单元在2400~3100 Hz范围下对于入射平面波的反射相位的差值。两种单元的反射相位以及相位差如图3所示。图3中红色实线与黑色实线分别为0单元与1单元的反射相位,蓝色点划线为两种单元反射相位的之差再减去180°以后的差值。从图3中可以看出,在2450~2600 Hz以及2900~3050 Hz的频率范围内,0单元与1单元的相位差非常接近180°,最大的偏差的绝对值不超过30°,在这一频率范围内,两种单元显然可以满足设计编码超表面的需要;在其他频率处,两种单元的相位差偏差略大,

但最大偏差的绝对值依然不超过60°。总的来说,所设计的两种单元的反射相位差可以在一定的频段内保持在接近180°的水平。

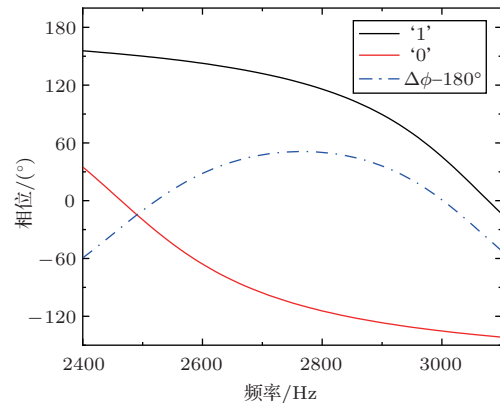


图3 两种单元的反射相位

Fig. 3 The reflected phase from 2400 Hz to 3100 Hz for the 0 elements and 1 elements

3 仿真分析

为了验证本文提出的声散射体的宽频有效性,对多个频率的散射声场进行了仿真计算。采用所得到的0单元和1单元两种结构单元来设计编码超表面,为了对入射声波实现反射效果,需要将两种单元按照一定的序列进行排布。本文采用了基于最大长度序列(Maximum-length sequence)的排布方式,由于最大长度序列具有平坦的功率谱,这种排列方式可以构建有效的声散射体^[1]。本文采用15个单元来构建散射体,该散射体的编码序列为“011010111100010”。图4(a)为散射体整体的示意图,整个散射体由15个单元组成,总长度为75 cm,厚度为0.5 cm。图4(b)~图4(d)分别为对应频率为2400 Hz、2800 Hz、3000 Hz的散射声场。可以看出对于不同频率的平面波入射,入射声能量均被散射到了多个方向。由于入射波的频率不同,以及所选取的0单元和1单元在不同频率处的相位差存在一定的不同,不同频率的散射声场存在一定差异,但都表现出良好的散射特性,这证明了散射体在宽频范围内具有良好的散射能力。此外,从图3中可以看出,当入射频率为2400 Hz时,0单元与1单元之间的相位差约为120°,与180°相差较大,但散射体仍然表现出较为良好的散射性能,也说明了本文所构建的散射体在一定频率的宽带范围内均具有良好的散射效果。

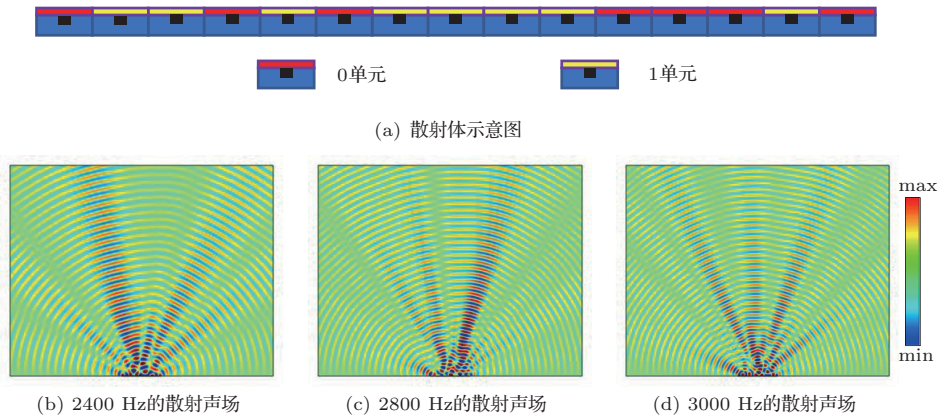


图 4 散射体示意图与不同频率下散射体的散射声场

Fig. 4 The schematic diagram of the diffuser and the simulated diffuse sound fields of the diffuser at different frequencies

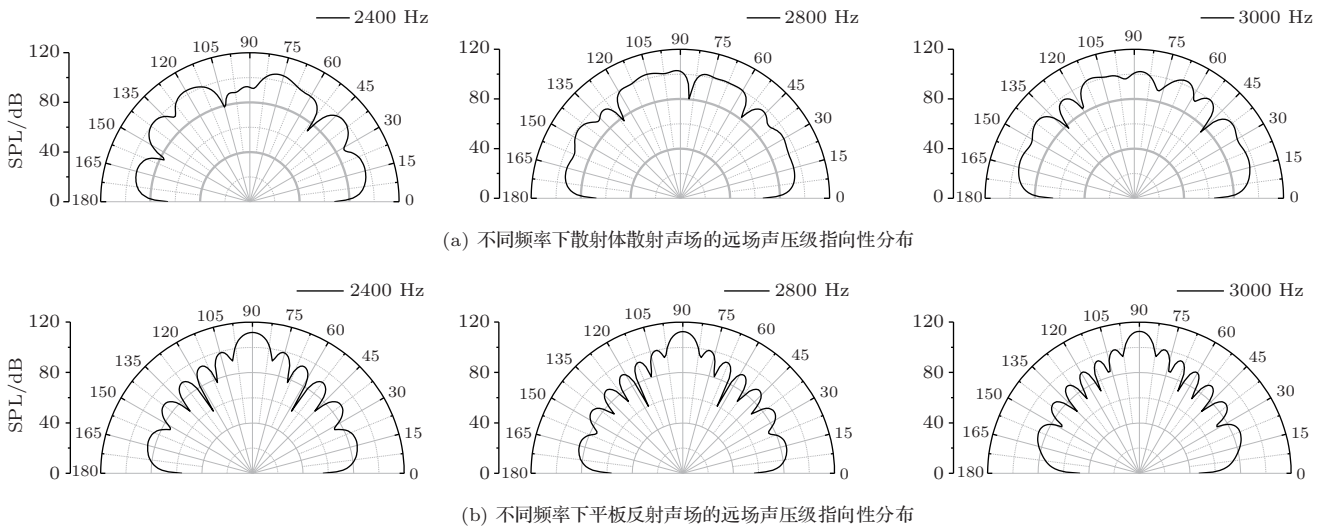


图 5 不同频率下散射体和平板的反射声场的远场声压级指向性分布

Fig. 5 The simulated diffuse sound fields of the diffuser at different frequencies

为了更直观展示散射体的散射效果，进一步计算了散射体在不同频率下的远场声压级指向性分布。为了进行对比，同时计算了对应频率下相同长度刚性平板的反射声场的远场声压级指向性分布。图 5(a) 展示了散射体在频率为 2400 Hz、2800 Hz、3000 Hz 平面波入射下的散射声场的远场声压级指向性分布的仿真结果。图 5(b) 展示了刚性平板在上述 3 个频率平面波入射下的反射声场的远场声压级指向性分布的仿真结果。从图中可以看出对于上述频率，散射体的远场声压级指向性表现出在几个方向内均匀分布的特性，并且和近场的仿真结果具有一定的一致性。而与之相反的，平板的反射声场声压级指向性分布非常集中，中间镜面反射方向的声压级非常强，明显表现出镜面反射的特性。这些结

果进一步证明了所设计的声散射体在宽频范围内具有良好的散射能力。

为了能够定量分析不同频率下散射体的散射效果，计算并对比了散射体和刚性平板在 2000~3500 Hz 范围内的散射系数。散射系数的计算公式^[19,24]为

$$D = \frac{\left(\sum_{i=1}^M 10^{L_i/10}\right)^2 - \sum_{i=1}^M (10^{L_i/10})^2}{(M-1) \sum_{i=1}^M (10^{L_i/10})^2}, \quad (5)$$

其中， L_i 代表不同方向的远场的声压级数值， M 为选取的角度的总数。散射系数的大小可以反映出散射声场的能量均匀程度。高散射系数表明声能量被更均匀地散射到了不同的方向。与之相反的，如果

所有能量被镜像反射到一个方向, 散射系数的数值为0。本文中用 1° 的角度间隔方式选取声压级数值, M 的数值为180。图6展示了2000~3500 Hz范围内散射体和刚性平板的散射系数计算结果。图6中黑色实线为散射体的散射系数, 红色点划线为刚性平板的散射系数。从图6中可以看出, 对于平板, 在计算频率范围内散射系数都极低, 基本不超过0.1, 表明反射声场的能量散射很小。而对于所设计的声散射体, 在计算频率范围内其散射系数均高于平板的散射系数。在2300~3100 Hz范围内, 散射体的扩散系数均为平板的2倍以上, 并且在2500~2900 Hz范围内散射体的散射系数达到了0.4以上。结合图3和图6可以看出, 当单元0和单元1之间的相位差比较接近 180° 时, 散射体的散射系数比较高, 在3000 Hz处, 散射系数高达0.58。当单元间相位差偏离 180° 时, 散射体的散射系数有所下降, 但只要相位差保持在一定范围内, 散射系数依然比较高。例如, 虽然在2700 Hz处单元间的相位差已经接近 120° , 但是散射系数依然达到了0.46, 说明此时散射体依然具有比较好的散射效果。对于散射系数的计算结果再次证明了本文提出的声学散射体在具有良好的宽频的声散射性能。

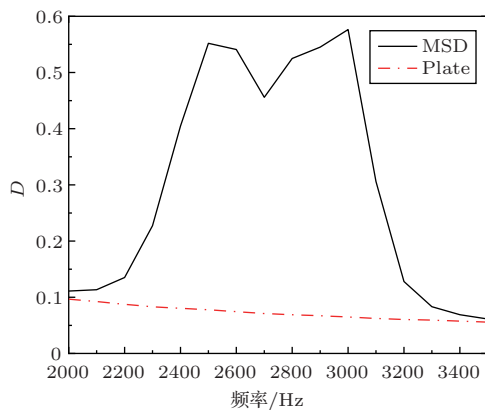


图6 散射体和刚性平板的散射系数的计算结果

Fig. 6 The simulated diffusion coefficients of the diffuser and the rigid plate

4 结论

利用编码超表面理论, 本文提出了一种宽频有效的声散射体。这种声散射体由两种相位差接近 180° 的基本单元组成, 这两种单元被定义为0单元和1单元。本文利用薄膜共振结构在共振处可以对反射相位进行大幅度调节的性质, 设计出了能

够实现所需要声散射体的0单元和1单元, 并利用其构建了声散射体。仿真计算结果表明, 该声散射体可以改变反射声场的分布, 将入射声能量均匀地散射进多个方向, 从而有效地形成扩散声场。在2400~3000 Hz的频率范围内, 声散射体可以形成良好的扩散声场, 并且声散射体厚度远远小于工作频率所对应的波长。在2400~3000 Hz的范围内, 声散射体的散射系数显著高于刚性平板, 同样证明声散射体具有较好的扩散性能。这种基于编码超表面的薄膜声散射体设计简便, 宽频有效, 厚度远小于波长, 便于布放, 具有比较强的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Schroeder M R. Diffuse sound reflection by maximum-length sequences[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(1): 149-150.
- [2] Schroeder M R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(4): 958-963.
- [3] Cox T J, Lam Y W. Prediction and evaluation of the scattering from quadratic residue diffusers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(1): 297-305.
- [4] D'Antonio P, Cox T J. Diffuser application in rooms[J]. Applied Acoustics, 2000, 60(2): 113-142.
- [5] Hargreaves T J, Cox T J, Lam Y W, et al. Surface diffusion coefficients for room acoustics: free-field measures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(4): 1710-1720.
- [6] Wang X, Mao D, Yu W, et al. Sound barriers from materials of inhomogeneous impedance[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(6): 3190-3197.
- [7] Mahmoud F, Kablief Z, Mohammadreza M, et al. Using the Schroeder diffuser to improve parallel noise barriers' performance[J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, 62(4): 210-217.
- [8] Huang J, Dupont P E, Undurtti A, et al. Producing diffuse ultrasound reflections from medical instruments using a quadratic residue diffuser[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2006, 32(5): 721-727.
- [9] Cox T J, D'Antonio P. Acoustic phase gratings for reduced specular reflection[J]. Applied Acoustics, 2000, 60(2): 167-186.
- [10] Cox T J, D'Antonio P. Schroeder diffusers: a review[J]. Building Acoustics, 2003, 10(1): 1-32.
- [11] Cummer S A, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(3): 1-13.
- [12] Xie Y, Wang W, Chen H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1-5.

- [13] 陆文佳, 毕亚峰, 贾晗, 等. 一种减小尺寸的声彩虹捕获效应结构[J]. 应用声学, 2018, 37(2): 214–219.
Lu Wenjia, Bi Yafeng, Jia Han, et al. A size-reduced acoustic rainbow trapping structure[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(2): 214–219.
- [14] 孙兆永, 贾晗, 杨军. 共形 Mikaelian 声透镜设计[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 16–21.
Sun Zhaoyong, Jia Han, Yang Jun. The design of a bending Mikaelian acoustic lens by conformal transformation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(1): 16–21.
- [15] Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734–1736.
- [16] Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(12): 460–472.
- [17] Ma G, Yang M, Xiao S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873–878.
- [18] Díaz-Rubio A, Li J, Shen C, et al. Power flow–conformal metamirrors for engineering wave reflections[J]. *Science Advances*, 2019, 5(2): eaau7288.
- [19] Zhu Y, Fan X, Liang B, et al. Ultrathin acoustic metasurface-based Schroeder diffuser[J]. *Physical Review X*, 2017, 7(2): 021034.
- [20] Cao W K, Wu L T, Zhang C, et al. A reflective acoustic meta-diffuser based on the coding meta-surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(19): 194503.
- [21] Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301.
- [22] Chen X, Liu P, Hou Z, et al. Implementation of acoustic demultiplexing with membrane-type metasurface in low frequency range[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(16): 161909.
- [23] Yang M, Ma G, Wu Y, et al. Homogenization scheme for acoustic metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(6): 064309.
- [24] Cox T J, Dalenback B I L, D’Antonio P, et al. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces[J]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, 92(1): 1–15.