◇ 研究报告 ◇

薄膜超构表面声扩散体扩散性能研究*

关浙文 盖晓玲 李贤徽 † 邢 拓 蔡泽农 王 芳

(北京市劳动保护科学研究所 环境噪声与振动北京市重点实验室 北京 100000)

摘要 针对传统的声扩散体结构复杂、加工不便的缺点,该文提出了一种薄膜型声学超材料扩散体,通过有限 元软件建立了扩散体的有限元模型。分析了薄膜张力、质量块大小及背腔深度对声波相位调控的影响,并与传 统施罗德扩散体的扩散性能进行比较,发现调控后的薄膜超构表面声扩散体对声能的吸收降低,并使入射声 能更均匀地向全方向扩散。在相同的尺寸情况下,与传统施罗德扩散体相比,薄膜超构表面声扩散体在所需频 段内扩散性能更优,结构更优,体积更小,质量更轻,加工更方便,更适用于工程应用。 关键词 声散射,薄膜,有限元,扩散系数,声学超结构

中图法分类号: O424 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)06-0926-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.003

Diffusion properties of membrane-type metastructure acoustic diffuser

GUAN Xiwen GAI Xiaoling LI Xianhui XING Tuo CAI Zenong WANG Fang

(Beijing Key Laboratory of Environment Noise and Vibration, Beijing Municipal Institute of Labor Protection, Beijing 100000, China)

Abstract Aiming at the shortcomings of traditional acoustic diffuser structure and inconvenient processing, a film-type acoustic metamaterial diffuser has been proposed. The finite element model of the diffuser is established by finite element software. The effects of film tension, mass size, and back cavity depth on the phase regulation of sound waves were analyzed, and compared with the diffusion properties of traditional Schroder diffusers, the decrease of the absorption of sound energy by the superficial surface acoustic diffusers was observed. The incident acoustic energy is more uniformly propagated in all directions. Compared with the traditional Schroder diffuser, the film superstructure surface acoustic diffuser has better diffusion performance, better structure, smaller volume, lighter weight and more convenient processing.

Key words Acoustic scattering, Membrane, Finite element, Diffusion coefficient, Acoustic metasurface

²⁰¹⁹⁻⁰³⁻²⁶ 收稿; 2019-05-30 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (11604015), 北京市自然科学基金项目 (1172007, 1182011), 北京市劳动保护科学研究所 2019 年改革与发展经费自立课题

作者简介:关浙文(1994-),男,湖北潜江人,硕士研究生,研究方向:噪声与振动控制。

[†]通讯作者 E-mail: lixianh@vip.sina.com

0 引言

声波在物体表面上的反射很大程度上取决于 物体表面结构。施罗德扩散体(Schroeder diffuser, SD)^[1-2]的提出,为有序控制声波扩散奠定了重要 基础,自此,各种扩散体设计方法被提出用以改进 声波扩散方向和适用频带。最经典的施罗德扩散体 与随机分布相比,采用了周期结构,通过二次剩余 序列设计每一个阱的深度,人为设计声波的反射方 向实现声音的漫反射,但施罗德扩散体并没能实现 声波尽可能均匀的在所有方向上反射,而且适用的 频带较窄。Cox^[3-4]等将凹槽之间的隔板去掉,通 过迭代算法得到阶梯型扩散体。这种扩散体吸声, 且均匀扩散性能较低。D'Antonio等^[5-6]运用几何 分形理论,通过傅里叶合成和阶梯函数方法调制较 小基数结构,设计成幅度格栅扩散体,改善高频扩 散性能。Angus^[7-8]将扩散体及其反相扩散体按二 进制伪随机序列排布推导出调制相位反射格栅扩 散体。在此基础上将吸声面和反射面按最大长度序 列排布,研究了一维振幅反射格栅扩散体的散射性 能,扩散性能提高,但镜面反射增强。RPG 公司开 发了 Binary Amplitude Diffuser^[9],将面板的某些 部分按规律弯曲一定角度,使得扩散体扩散方向更 均匀。Cox等^[10-11]和Xiao等^[12]采用三元序列使 入射波与反射波在镜面反射方向发生干涉互相抵 消,改进了扩散效果,但在偶数倍频程频率处干涉会 失效。以上都是对传统施罗德扩散体的改进,共同 的缺点在于体积庞大、结构复杂,不利于实用。近年 来由于声学超材料的兴起,利用声学超材料构建扩 散体能有效降低扩散体尺寸引起了学界的兴趣,文 献[13-15]提出了通过激发局域共振在亚波长尺度 内产生有限大小的传播相位突变的思路,利用超薄 的非经典亥姆霍兹谐振腔构建出厚度仅为SD十分 之一的超构表面施罗德扩散体。但结构过于精细, 给工程加工带来了很大的不便。薄膜作为常用的声 学材料,具有良好的声学性质,一直都用于吸隔声, 而薄膜型超材料已被证实具有更优良的声学性质, 如Naify等^[16]发现其在低频传递损失峰值处有效 动态质量密度为负。Mei等^[17]设计出在170 Hz能 吸收86%入射波的薄膜材料,在某些低频频率处能 吸收99%入射波的双层材料等。本文考虑利用薄膜 超材料构建声扩散体,利用薄膜的物理特性和超材 料的结构特性,在实现声能均匀扩散的同时,确保结构简单,加工方便。

1 数值仿真

本文采用薄膜超材料,将施罗德扩散体的设计 方法类比到薄膜超材料上,表面格林函数方程为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{N} SW_i(r)^2}{\iint \rho W_i^2 \,\mathrm{d}S \times (\omega_i^2 - \omega^2)},\tag{1}$$

其中,S和ρ分别是表面积和面密度,W_i(r)²和ω_i是 第*i*个振动模态和固有频率。薄膜和空腔的阻抗可 以表示为表面格林函数的函数,结构胞元总阻抗就 是单元阻抗并联之和。图1显示了设计的薄膜超构 表面声扩散体结构,通过在四周固支约束的薄膜表 面附加金属质量块,以质量块提供额外的约束,限制 薄膜的振动,同时薄膜提供给质量块的弹性作用使 薄膜超材料减少吸收入射声波能量,并对声能进行 各方向的均匀扩散,薄膜上附加张力依次为1 MPa、 3 MPa、5 MPa,其本征频率分别为286 Hz、525 Hz、 762 Hz。构型框架高度为10 mm,背腔厚度为5 mm, 薄膜直径为50 mm,厚度为1 mm,质量块处于薄膜 正中央,厚度为1 mm,宽度为4 mm。



Fig. 1 Model section

利用 Comsol Multiphysics 建立薄膜超构表面 声扩散体的有限元模型, 薄膜选用的 PET 材料密 度和声速为 $\rho_1 = 900 \text{ kg/m}^3$, $c_1 = 2700 \text{ m/s}$, 用于 构建声学扩散器的框架的密度和声速分别设定为 $\rho_2 = 7850 \text{ kg/m}^3 和 c_2 = 5200 \text{ m/s}$, 远大于空气密 度 $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$, $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 。在薄膜与框架 的连接处, 为薄膜施加周向拉力, 假设框架结构为刚 体材料, 不因声波在其上的传播发生形变等, 框架的 边界条件设置为固定约束,质量块和薄膜之间的连 接也采用固定约束。当入射平面波撞击在这种胞元 结构的平面阵列上时,通过声扩散体胞元结构表面, 互相干涉产生特定的反射场。通过调整作为二次声 源的薄膜超材料表面亚波长尺度胞元,有序安排声 波的波前。基于此,选择运用 PET 薄膜并在其表面 附加质量块,将其拓展到三维以实现本文提出的声 学扩散体的设计。

2 分析与讨论

由声学理论可以得出入射平面波以正入射的 方式直接传播到构件上,会引起薄膜附加质量块的 震动,通过对张力的调节以及薄膜材料的选择,各个 单元结构之间的微小差异得到不同的反射波相位 以及不同扩散角度的反射波。以3000 Hz为例,调 节薄膜张力,分别附加1 MPa、3 MPa、5 MPa的张 力,得到如图2所示的结果,从结果可以看出,随着 薄膜张力的增加,扩散声能显著增加,减少了声能转 化为扩散体振动产生的内能。当张力由1 MPa 增加 到5 MPa时,扩散瓣的平均声压级由 120 dB 增加 到135 dB。同时三种张力情况下,扩散体的扩散均 匀性保持良好。质量块的大小对扩散体的性能的影 响如图3所示,质量块厚度不变,宽度由4mm增大 为6 mm、8 mm会增加扩散声能的耗散,均匀性略 微减弱,等效质量的增加使得薄膜超构表面声扩散 体的阻尼增加,从而扩散瓣的平均声压级几乎都削 减了5dB。而随着背腔深度增大,扩散声能增加,如 图4所示。





Fig. 2 Effect of film tension change on diffusion performance



图 3 质量块大小变化对扩散性能的影响 Fig. 3 Effect of mass size change on diffusion performance



图4 腔深变化对扩散性能的影响

Fig. 4 Effect of cavity depth variation on diffusion performance

在实际情况中,声学扩散体通常需要用于有限 频带的声学信号,并且非常需要宽的工作频带。为 了在频率变化时定量评估不同扩散体的性能,采用 了一个扩散系数参数,通常用于表征特定频率下扩 散的有效性,公式定义如下^[18-19]:

$$d_{\varphi} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{L_{i}(\varphi)/10}\right)^{2} - \sum_{i=1}^{n} (10^{L_{i}(\varphi)/10})^{2}}{(n-1)\sum_{i=1}^{n} (10^{L_{i}(\varphi)/10})^{2}}, \quad (2)$$

其中,L_i(φ) 是极性响应中以分贝为单位的声压 级,n是接收点数量,下标φ是入射角。通过控制施 罗德扩散体和薄膜超构表面声扩散体的尺寸都为 87.1 cm×81.7 cm来比较两者之间性能的差异。通 过调节薄膜超构表面声扩散体胞元的张力,可以对 应用频带进行调节。这些明显优势取决于薄膜超构 表面特定胞元结构的构造,根据薄膜超材料的特性, 附加质量块的薄膜具有负有效质量和负有效刚度, 刚性质量块对声波存在较强的反射作用,薄膜对质 量块的牵引,可将复杂系统简化为质量块-弹簧振动 模型^[16]。受到声波的激励,薄膜牵引质量块运动产 生负的有效质量,然后当质量块和薄膜的相位相差 180°时,质量块与薄膜运动方向相反,相位差为0° 时,质量块与薄膜运动方向相同^[20]。附加质量在一 定程度上将入射的声波以局域共振的方式衰减,使 结构具有了更宽的共振频带。薄膜共振存在黏滞损 耗,利用Comsol Multiphysics热声模块,考虑到亚 尺度结构整体的黏滞效应,将边界的黏滞效应和薄 膜的阻尼的损耗等效设置为薄膜损耗因子,令薄膜 损耗因子从0.03~0.1变化,通过仿真结果发现,损 耗因子的变化对薄膜型散射体的声能分布没有太 大影响。图5给出了损耗因子为0.5和没有黏滞效 应的薄膜型扩散体的声能分布。





Fig. 5 Viscous and non-viscous sound field distribution

现实情况下,声波不可能实现非常完美的垂 直正入射,设计声波入射角度为30°、45°、60°得到 扩散体的扩散系数如图6所示,对比这三种情况下 薄膜超构表面声扩散体和传统施罗德扩散体的性 能优劣。其中蓝色和红色两条线表示两种胞元结 构厚度分别为10 mm的薄膜超构表面声扩散体和 50 mm的施罗德扩散体的扩散系数曲线。通过模 拟,可以看出,4000 Hz频带内,三种入射角情况下, 薄膜超构表面扩散体的性能都比施罗德扩散体的 扩撒性能要好得多。在高频处,由于高阶模态的存 在,扩散系数将减小,这表明通过调整结构参数来 提高截止频率可以实现薄膜超构扩散体的超宽带 宽的可能性。本文提出的扩散器具有简单性和有效 性,可为声学扩压器的设计提供一种替代方案。此 外,对于需要较大面积的扩散体,可以通过重复排列 扩散体胞元结构来构造它。



图 6 薄膜超构表面扩散体与施罗德扩散体扩散系 数对比图

Fig. 6 Comparison of diffusion coefficient between thin film superstructure surface diffuser and Schroeder diffuser 在本文设计中,可以通过调制每个单元的反射 相位来直接操纵反射声场。通过调节薄膜张力和质 量块质量,可以根据实际需要得到特定的反射波。 图7给出了相同尺寸的薄膜超构表面声扩散体和



(a) 1000 Hz薄膜声扩散体指向性



(c) 1500 Hz薄膜声扩散体指向性



(e) 2000 Hz薄膜声扩散体指向性



(g) 2500 Hz薄膜声扩散体指向性





图 7 薄膜声扩散体与施罗德扩散提指向性对比图 Fig. 7 Contrast of directivity of film acoustic diffuser and Schroder diffusion



(b) 1000 Hz施罗德扩散体指向性



(d) 1500 Hz施罗德扩散体指向性



(f) 2000 Hz施罗德扩散体指向性



(h) 2500 Hz施罗德扩散体指向性



施罗德扩散体的指向性对比图,其中每个峰代表不同方向上散射声场的扩散瓣。薄膜超材料的反射声场能直接通过操纵胞元的设计进行调节,从图7扩散瓣的指向性与扩散性可以看出,薄膜超构表面声扩散体相较于施罗德扩散体而言,在图示的五个特定频率内,扩散瓣更多且声能分布更均匀。

3 结论

综上所述,本文基于超材料的波前处理的概念, 提出了一种薄膜超材料扩散体,它能够通过直接操 纵反射波的波前,以更易操作和更均匀的方式扩散 声能,形成更均匀的期望波场。通过与商业化施罗 德扩散体之间比较的数值结果证明,薄膜超构表面 扩散体优于施罗德扩散体,在更宽的频带内能产生 更均匀的反射波。黏度的影响可以忽略不计,因为 边界层厚度远小于元件的宽度。因此,可以通过调 整单个元件的尺寸来进一步扩大带宽,这是本文设 计的另一个独特优点。设计简单,性能更优,本文提 出的扩散器更有望在工程应用上提供一条途径。

参考文献

- Schroeder M R. Diffuse sound reflection by maximum length sequence[J]. 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]. 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]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(1): 297–305.
- [4] Cox T J. The optimization of profiled diffusers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(5): 2928–2941.
- [5] D'Antonio P. The reflection phase grating: design theory and application[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1984, 32(4): 228–238.
- [6] D'Antonio P, Konnert J. QRD diffractal: a new one-or two-dimensional fractal sound diffusor[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1992, 40(3): 117–129.
- [7] Angus J A S. Sound diffusers using reactive absorption grating [C]. 98th Convention Audio Engineering Society, 1995, 43: 390.
- [8] Angus J A S. Using modulated phase reflection gratings to achieve specific diffusion characteristics[C]. 99th Convention Audio Engineering Society, 1995, 43: 1097.
- [9] Cox T J, D'Antonio P. A brief history of room acoustic diffusers[J]. Acoustics Today, 2006: 18–25.

- [10] Cox T J, Angus J A S, D'Antonio P. Ternary and quadriphase sequence diffusers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(1): 310–319.
- [11] Cox T J, Avis M R, Xiao L. Maximum length sequence and Bessel diffusers using active technology[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 289 (4/5): 807–829.
- [12] Xiao L, Cox T J, Avis M R. Active diffusers: some prototypes and 2D measurements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 285(1/2): 321–339.
- [13] Zhu Y, Fan X, Liang B, et al. Ultrathin acoustic metasurface-based Schroeder diffuser[J]. Physical Review X, 2017, 7(2): 021034.
- [14] Li Y, Liang B, Gu Z M, et al. Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2546.
- [15] Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 460–472.
- [16] Naify C J, Chang C M, Mcknight G, et al, Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally

resonant acoustic metamaterials[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(11): 204301.

- [17] Mei J, Ma G C, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. Nature Communications, 2012, 3(2): 756.
- [18] Cox T J, Dalenback B I, D'Antonio P, et al. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surface[J]. Acta Acustica united with Acustica, 2006, 92(1): 1–15.
- [19] ISO 17497–1: 2004, Acoustic-sound-scattering properties of surface—Part 1: measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room[S].
- [20] 曹卫锋,白鸿柏,朱庆. 薄膜型声学超材料的低频吸收性能研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 188–194, 238.
 Cao Weifeng, Bai Hongbai, Zhu Qing. Analysis on the low frequency acoustic absorption performance of a metamaterial membrane[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 188–194, 238.