

二次余数扩散结构复合穿孔板扩散吸声研究^{*}

蔡 俊^{1†} 包 飞¹ 王亚晨¹ 王彦琴²

(1 上海交通大学环境科学与工程学院 上海 200240)

(2 交通运输部公路科学研究院 北京 100088)

2014 年 1 月 15 日收到

2015 年 12 月 4 日定稿

摘要 声学结构研究一直以来都是学术领域的研究热点, 扩散吸声结构 (Diffusor) 由于兼具扩散和吸声性能而具有很好的研究意义。本研究将具有良好扩散性能的二次余数扩散 (Quadratic residue diffusers, QRD) 结构和具有良好共振吸声性能的穿孔板结构进行组合, 依据标准 AES-4id-2001 对二次余数扩散结构及其与厚度为 1 mm, 穿孔率分别为 3%, 5%, 8% 的穿孔板复合后结构的扩散性能进行了实验研究, 得到了相应的反射声能极坐标图和扩散系数。结果表明, 复合结构在 100 Hz 至 800 Hz 的频率范围内仍具有良好的扩散性能; 复合结构反射声能在穿孔板共振频率范围内有明显的下降 (平均超过 2 dB)。本研究可为扩散吸声结构的设计与研制提供依据。

PACS 数: 43.55, 43.20

A study on diffusion and absorption properties of the quadratic residue diffuser structure composited with perforated plate

CAI Jun¹ BAO Fei¹ WANG Yachen¹ WANG Yanqin²

(1 School of Environment Science and Engineering, Shanghai JiaoTong University Shanghai 200240)

(2 Research Institute of Highway Ministry of Transport Beijing 100088)

Received Jan. 15, 2014

Revised Dec. 4, 2015

Abstract Acoustic structure study always is the research interest of the academic area. Diffusion absorbing structure (Diffusor) has good research value because it has both diffusion and sound absorption property. Quadratic residue diffusers (QRD) structure which had good diffusion property was combined with perforated plate which had good sound absorption property in this study. According to standard AES-4id-2001, the diffusion experiments were carried out to study QRD structure and ones composited with perforated-plates which had 1 mm-thickness and perforated percentage of 3%, 5%, 8% respectively. The polar coordinate diagrams and diffusion coefficients of different structures were derived and analyzed. Results showed that the composite structure still had good diffusion performance in the frequency range from 100 Hz to 800 Hz. The reflection sound energy of composite structure reduced obviously in the perforated plate resonance frequency range where there was about 2 dB reduction averagely. The study result can provide the reference for the design and development of diffusorber.

引言

二次余数扩散结构 (Quadratic residue diffusers,

简称 QRD) 是将数论理论和漫反射原理结合起来设计出的一种具有良好扩散效果的反射结构, 这种结构的局部声阻抗沿表面按照二次余数序列规律变化, 关于该结构盛胜我等进行了许多相关研究^[1-2]。有

^{*} 国家自然科学基金 (11004133) 和公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题资助

[†] 通讯作者: 蔡俊, Email: juncai@sjtu.edu.cn

研究表明, 该结构能够在较宽的频率范围取得较好的扩散效果^[3]。同时, 在之前的研究基础上, 为了优化结构的扩散吸声效果, 研究人员也进行了很多改进, 古林强等在 QRD 结构凹槽内填充多孔性纤维材料拓宽结构的扩散角度^[4], Wu 和 Cox 等在 QRD 结构凹槽口复合穿孔板以增加结构的吸声效果^[5]。

穿孔板结构就是在薄板上钻一系列的孔洞以共振为原理的板状结构, 该结构类似于一系列单个赫姆霍兹共振器的并联组合^[6-7]。关于穿孔板的吸声性能, 专家们做了许多相关研究。左言言等研究表明, 穿孔板吸声性能与赫姆霍兹共振器类似, 在共振频率范围十分良好, 吸声性能具有较强的选择性^[8]。田汉平等对穿孔板吸声结构的频率特性进行了分析, 推导出穿孔板吸声结构吸声的中心频率、频带宽度等, 为穿孔板吸声结构的设计提供了参考^[9]。盛胜我等还对穿孔板背后紧贴薄层的吸声性能进行研究以改善吸声^[10]。

考虑到 QRD 结构中低频良好的扩散性能及穿孔板共振频率范围良好的吸声性能, 能否将穿孔板与 QRD 结构复合, 以获得能够兼具良好扩散性和吸声性的结构呢? Naderzadeh 等对 QRD 结构的凹槽中部加上穿孔板的声吸收进行过研究^[11], 但其研究内容仅仅针对结构吸声性能而未考察结构扩散性, 而目前我国国内, 相关的研究更是刚刚起步^[12]。本研究主要依据上述方向, 将穿孔板吸声结构和 QRD 扩散结构复合, 考察复合前后结构的扩散性能的变化, 并结合穿孔板结构的共振吸声频率分析复合对反射声能的影响, 从而为扩散吸声结构的设计提供参考。

1 理论

1.1 复合结构的声扩散吸收

如图 1 所示, 为 $N=7$ 的 QRD 复合穿孔板结构示意图, 其中图 1(a) 为复合结构截面图, 图 1(b) 为复合结构实物图。由图 1(a) 截面图可以看出, 该复合结构由不同深度的井组成, 井口复合穿孔板之后形成空腔^[13-14]。

根据亥姆霍兹-基尔霍夫积分方程, 扩散体外一点的扩散声压是来自扩散体表面的“次声源”的积分。对于一个单频点声源, 扩散体外任一接受点处的声压为:

$$p(r) = p_i(r, r_0) + \iint_S \left(p(r_s) \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} - G(r, r_s) \frac{\partial p(r_s)}{\partial n(r_s)} \right) ds, \quad (1)$$

式中, $r = \{x, y, z\}$ 为任一点的空间位置, r_0 为声源位置, r_s 为扩散体上任意点位置, $p(r_s)$ 为扩散体上 r_s 处声压, $p_i(r, r_0)$ 为 r 处来自声源的直达声压, n 为扩散体表面法向矢量, $p(r)$ 为空间位置 r 处的声压。

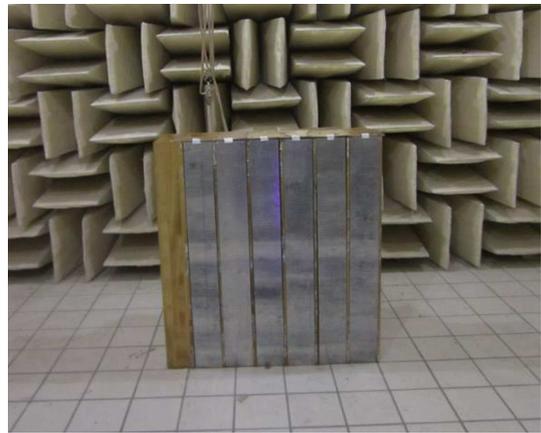
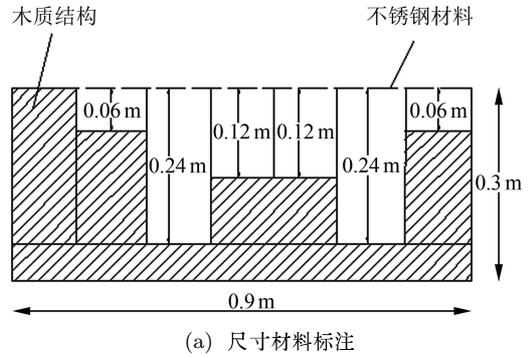


图 1 $N=7$ 的 QRD 复合穿孔板结构示意图

$G(r, r_s)$ 是格林函数。对自由场有:

$$\iiint_V (G \nabla^2 p - p \nabla^2 G) = \iint_S \left(G \frac{\partial p}{\partial n} - p \frac{\partial G}{\partial n} \right), \quad (2)$$

$$(\nabla^2 + k^2) = 0, \quad (3)$$

式 (3) 中 ∇^2 是拉普拉斯算符。

当声波垂直入射时, 正对声源表面的声压可以近似为:

$$p(r_s) = [1 + R(r_s)] p_i(r_s, r_0), \quad (4)$$

式中, R 是表面的反射系数。若已知声阻抗, 可根据下式求得:

$$R(\theta) = \frac{Z \cos \theta - 1}{Z \cos \theta + 1}, \quad (5)$$

式中, θ 为反射角度; Z 是声阻抗, 其一般为复数量, $Z = R_a + jX_a$, 其中实部 R_a 是声阻, 虚部 X_a 是声抗, 声阻引起声能的耗散。一般声扩散主要考虑声阻抗的虚部, 吸声主要考虑声阻抗的实部。

在 QRD 结构中, 其声阻抗可以用以下公式计算^[15]:

$$Z_{\text{well}} = \frac{\rho_0 c_0}{j \tan(2\pi d_n / \lambda_0)}, \quad (6)$$

式中, ρ_0 为介质的密度, c_0 为声速, d_n 为 QRD 结构第 n 个槽的实际槽深, λ_0 为设计声波波长, j 表示虚数。由式 (6) 可知, QRD 结构的声阻抗以声抗形式存在, 当入射声波作用到 QRD 结构表面后, 主要引起扩散反射, 而且 QRD 结构空腔的深度或数目的改变都会影响结构的扩散效果。

当在 QRD 结构槽口复合上穿孔板时, $Z_a = (Z_{\text{plate}} + Z_{\text{well}})$, 其中, Z_{plate} 为穿孔板的声阻抗, Z_{well} 为 QRD 结构的声阻抗。

穿孔板的声阻抗可以用以下公式计算^[16]:

$$R = \frac{\rho_0}{\pi a^2} \sqrt{2\omega\mu} \left[\frac{t}{a} + 2 \left(1 - \frac{\pi a^2}{b^2} \right) \right], \quad (7)$$

$$M = \frac{\rho_0}{\pi a^2} \left[t + 1.7a \left(1 - \frac{2.5a}{b} \right) \right], \quad (8)$$

式中, t 为穿孔板厚度, a 为孔径, b 为孔间距, 考虑到 N 个孔的情况, 根据式 (7) 和式 (8) 可以得到穿孔板的总声阻抗计算公式:

$$Z_{\text{plate}} = \frac{1}{N} (R + j\omega M). \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 穿孔板的声阻抗计算包括声阻和声抗两个部分, 声阻主要引起声能消散, 声抗主要引起声能反射, 所以当 QRD 结构加上穿孔板后, 穿孔板发挥作用, 复合结构对入射声能会存在较为明显的吸收作用。

同时依据上述系列公式可以计算得出 Z_a 和 $p(r_s)$, 对空间任意位置扩散反射声压值进行计算。

1.2 复合结构的共振频率范围

依据穿孔结构的共振频率计算公式^[17] 对该复合结构的不同深度空腔 (如图 1(a)) 进行了计算, 得出复合结构不同深度空腔的共振频率如表 1 所示。

表 1 复合结构不同深度空腔共振频率
(穿孔板厚 1 mm, 单位: Hz)

穿孔率	空腔 (0.06 m)	空腔 (0.24 m)	空腔 (0.12 m)
3%	781	295	494
5%	934	324	567
8%	1072	345	625

复合结构由不同空腔组成, 因此每种复合结构都有一个共振频率范围, 由表 1 中数据可以看出, 1 mm-3% 复合结构的共振频率范围为 250~800 Hz, 1 mm-5% 复合结构的共振频率范围为 315~1000 Hz, 1 mm-8% 复合结构的共振频率范围为 315~1000 Hz。

根据上述共振频率范围, 可以选择 3 种复合结构共有共振频率范围 (315~800 Hz) 内复合结构共振对扩散吸声的影响进行研究。

2 实验测试

扩散性能可以反映散射声能空间分布均匀性, 关于扩散性能的测定和研究有很多, 通常采用扩散系数表示扩散性能的好坏, 扩散系数在 0 到 1 之间, 越趋近于 1 表示扩散性能越好^[18-19]。扩散性能的测试可参照标准 AES-4id-2001^[20]。依据该标准方法, 测试结果可给出各 1/3 倍频带的表面散射声压级的极坐标图和扩散系数, 极坐标图用于评价散射声能的变化趋势, 扩散系数用于评价扩散性能^[21-22]。扩散性能实验测试布置平面图如图 2 所示。

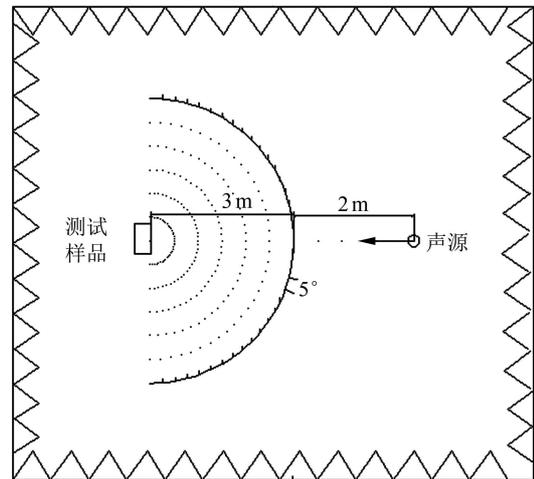


图 2 实验测量布置平面图

本实验测试对象为 $N = 7$ 的 QRD 扩散体及其与不同穿孔率穿孔板复合体, 复合结构如图 1 所示, 其中 QRD 结构采用全木质结构 (1 m×0.9 m×0.3 m), 凹槽隔断采用三夹板, 四周和底部采用 8 mm 木板, 凹槽宽度为 0.12 m, 凹槽深度依次为 0 m, 0.06 m, 0.24 m, 0.12 m, 0.12 m, 0.24 m, 0.06 m, 穿孔板为不锈钢材料, 厚度 1 mm, 穿孔率分别为 3%, 5%, 8%。实验在半消声室进行, 声源和 QRD 结构摆放位置如图 2 所示, 图中半圆周上的点为传感器的摆放位置 (每隔 5° 布置一个测点), 声源为指向性声源。实验首先对单一 QRD 结构扩散性能进行测试, 然后将 QRD 结构与同一厚度不同穿孔率的穿孔板复合, 分别进行测试, 用 cooledit 软件编辑生成扫描信号, 通过 ESI 声卡的 output 和 input 模块进行信号发射和接收, 通过 MATLAB 对所接收信号进行处理, 根据公式计算得出一系列 1/3 倍频程极坐标图和扩散系数。实验测试系统如图 3 所示。

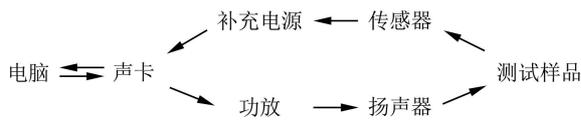


图 3 实验测试系统示意图

3 实验结果分析

3.1 穿孔板复合前后结构反射声能变化

对穿孔板复合 QRD 前后的结构进行测试,得到一系列反射声能数据,对不同 1/3 倍频程分别作出相应反射声能极坐标图,由于所测频率范围包含 16 个 1/3 倍频程,无法全部列出,故在低频、中频、中高频分别选取代表性频段 125 Hz, 500 Hz, 2500 Hz, 同时为了着重分析共振频率的影响,根据表 1 所得的结构共有共振频率范围 (315~800 Hz) 增加 630 Hz 频段进行分析,所作极坐标图分别如图 4 所示,图中极径单位为 dB。

由图 4(a) 可以看出,在 125 Hz 频段时,复合前后反射声能的均匀度都没有明显变化,复合后结构的扩散性能仍然良好,同时复合前后结构反射声能大小变化不大,穿孔板复合在 125 Hz 低频段时扩散性能良好但吸声作用不明显。

由图 4(b) 可以看出,在 500 Hz 频段,穿孔板复合前后结构的反射声能分布差异不大,复合后结构能够保持复合前 QRD 结构较好的扩散性能,穿孔板复合后结构较复合前反射声能有明显下降,平均下

降幅度超过 2 dB,QRD 复合后结构的声吸收改善十分明显,同时,3 种复合结构的反射声能分布十分相似,不同穿孔率的穿孔板对复合结构的反射声能影响不大。

由图 4(c) 可以看出,在 630 Hz 频段,穿孔板复合后结构的反射声能分布甚至变得更加均匀,复合后结构能保持甚至改善复合前 QRD 结构的较好扩散性能,复合后结构的反射声能有比较明显的减小,平均减小幅度也达到约 2 dB,同时,不同穿孔率的穿孔板复合结构之间的反射声能区别不明显。

由图 4(d) 可以看出,在 2500 Hz 的频段,复合后反射声能大小变化不大,但均匀性明显变差,在 120° 到 180° 区域甚至出现了锯齿形图像,同时也可以看出不同穿孔率复合结构的反射声能区别不明显。

综上所述,穿孔板复合 QRD 后结构在 500 Hz 和 630 Hz 为代表的共振频率范围内反射声能下降比较明显,复合结构的共振能改善结构的声吸收,同时,复合后结构能较好保持反射声能分布的均匀性,具有良好的扩散性。在 125 Hz 为代表的低频段,复合后结构能够较好保持复合前 QRD 结构良好扩散性能,但是声能减小不明显。在 2500 Hz 为代表的中高频段,穿孔板复合前后结构的反射声能变化不大,穿孔板复合后不能改善结构的吸声性能,同时,复合后结构反射声能分布均匀性下降,扩散性能变差。在穿孔率影响方面,穿孔板的穿孔率变化对复合结构的反射声能大小和分布影响不明显。

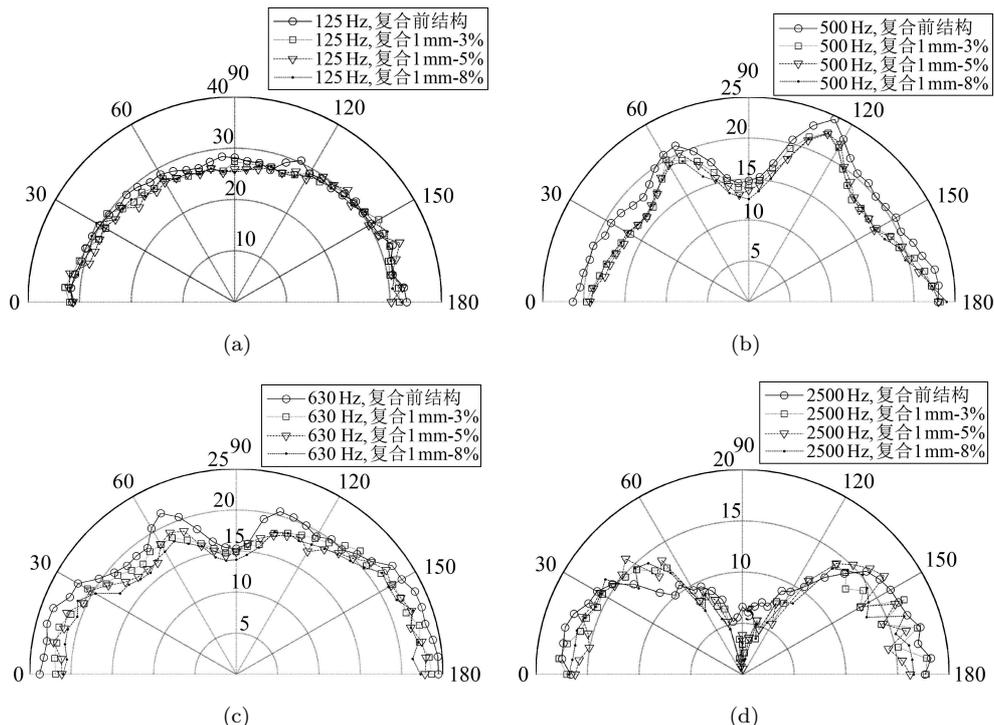


图 4 不同穿孔率 QRD 复合结构极坐标图

将实验所测的穿孔板复合前后结构不同角度的声压级求平均，然后计算并画出不同结构复合前后声压级差值(复合前-复合后)的频谱曲线，如图 5 所示。由图 5 可以看出，对于 3% 复合结构，250~800 Hz 频段范围的声压级差值较大，复合后结构平均声压级下降超过 2 dB，5% 和 8% 复合结构在 315~1000 Hz 频段范围差值较大，复合后结构平均声压级差值也基本达到 2 dB 以上，同时，在其他频率范围，复合前后平均声压级差值明显较小，这与之前所计算的共振频率范围(表 1)相一致，因此，穿孔板的共振作用提高了复合结构的声能吸收。

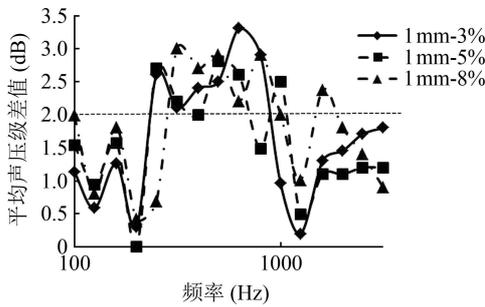


图 5 复合前后结构不同频率平均声压级差值

3.2 不同穿孔率穿孔板复合前后结构扩散系数分析

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

式(10)为扩散系数的计算公式，其中 L_i 为均匀分布的第 i 个传声器位置处(见图 2)的 1/3 倍频带声压级。当声波垂直入射时 θ 为 0，即可计算得到垂直扩散系数。将之前的测试数据进行处理，根据式(10)计算得出不同穿孔板复合结构 1/3 倍频程的垂直扩

散系数，

作出扩散系数曲线图，不同穿孔率的穿孔板复合前后结构的扩散系数曲线对比图如图 6 所示。

由图 6 可以看出，在 100 Hz 到 800 Hz 频段，3 种复合结构的扩散系数较复合前 QRD 结构不仅没有明显减小甚至在某些频段有变大的趋势，复合结构能够保持 QRD 结构在中低频良好的扩散性能；在 1000 Hz 之后的中高频段，复合后结构的扩散系数变差。整体上来说，穿孔板的穿孔率对复合结构的扩散性能影响不大，不同穿孔率的穿孔板复合后结构的扩散性能都呈现中低频良好，高频变差的现象。

4 结论

由前面的不同穿孔板复合结构复合前后的反射声能极坐标图和扩散系数分析可以得出，穿孔板吸声性能与 QRD 结构扩散性能相结合这一思路十分清晰，并且得出了较理想的测试结果，在复合结构的共振频率范围，穿孔板对复合结构的吸声性能贡献比较明显，同时能较好保持 QRD 结构原有的良好扩散性能，具体结论如下：

(1) 在 100 Hz 到 800 Hz 频段，穿孔板复合 QRD 后结构的扩散系数变化不大甚至变好，在这一频段范围，复合结构能够保持原 QRD 结构良好的扩散性能。在 1000 Hz 之后的中高频段，穿孔板复合后结构的扩散性能明显变差。

(2) 复合结构的反射声能在一定频率范围内有明显下降，平均声压级下降幅度超过 2 dB，这些频率范围与之前的共振频率计算结果相吻合，从而说明穿孔板的共振作用能改善复合结构的吸声性能。

本文通过 QRD 结构及其复合穿孔板结构的扩

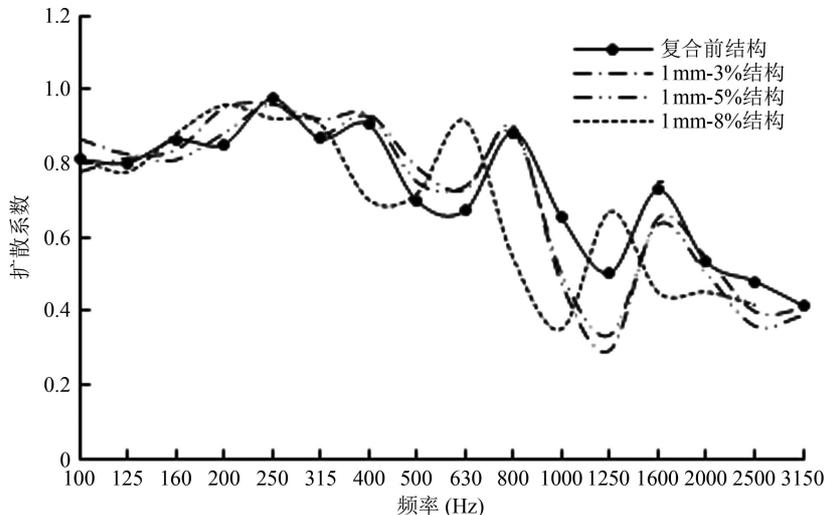


图 6 穿孔板复合前后扩散系数曲线图

散性能实验,得出了一些有关 QRD 及其复合结构的扩散吸声规律,为扩散吸声结构的设计和研制提供了一定的参考。扩散性能作为声学重要性能之一,特别是反射声能极坐标图可以直观的反映出反射声能的分布特征,如果能将反射声能的分布进行系统化的分析得出更普遍的规律,相信对以后声学结构的设计和改进行都会有很重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 盛胜我,王毅刚,赵松龄. 基于二次剩余序列的扩散吸声体的研究. *应用声学*, 1995; **14**(3): 7—9
- 2 Cox T J, Lam Y W. Prediction and evaluation of the scattering from quadratic residue diffusers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994; **95**(1): 297—305
- 3 Cox T J, D'Antonio P. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. Spon Press, 2004
- 4 古林强,盛胜我. 扩散吸声体的优化设计. *应用声学*, 2009; **28**(3): 184—189
- 5 Wu T, Cox T J. A profiled structure with improved low frequency absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001; **110**(6): 3064—3070
- 6 马大猷. *振动与噪声控制手册*. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 7 蔡俊. *噪声污染控制工程*. 北京: 中国环境科学出版社, 2011
- 8 田汉平. 穿孔板吸声结构的频率特性分析. *淮北煤炭师范学院学报*, 2005; **26**(1): 37—39
- 9 左言言,周晋花,刘海波等. 穿孔板吸声结构的吸声性能及其应用. *中国机械工程*, 2007; **18**(7): 778—780
- 10 盛胜我. 穿孔板背面紧贴吸声薄层时的声学特性. *声学技术*, 2003; **22**(1): 52—54
- 11 Naderzadeh M, Monazzam M R, Nassiri P *et al.* Application of perforated sheets to improve the efficiency of reactive profiled noise barriers. *Appl. Acoust.*, 2011; **72**(6): 393—398
- 12 包飞等. 微穿孔板复合对二次余数扩散结构扩散性能影响研究. *应用声学*, 2013; **32**(5): 383—387
- 13 Wu T, Cox T J, Lam Y W. From a profiled diffuser to an optimized absorber. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **108**(2): 643—650
- 14 Mechel F P. The wide-angle diffuser—A wide-angle absorber? *Acta Acustica united with Acustica*, 1995; **81**(4): 379—401
- 15 张敏. 基于微穿孔板的扩散板研究. 大连理工大学, 2013
- 16 Bai M R, Liao J. Acoustic analysis and design of miniature loudspeakers for mobile phones. *J. Audio Eng. Soc.*, 2005; **53**(1): 1061—1076
- 17 洪宗辉,潘仲麟. *环境噪声控制工程*. 北京: 高等教育出版社, 2002: 130—131
- 18 莫方朔,盛胜我. 室内界面声散射特性的评价与测量的研究进展. *声学技术*, 2004; **23**(1): 49—53
- 19 Hargreaves T J, Cox T J, Lam Y M *et al.* Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **108**(4): 1710—1720
- 20 AES-4id-2001. AES information document for room acoustics and reinforcement systems—Characterization and measurement of surface scattering uniformity. Audio Engineering Society Inc.
- 21 Robinson P, Xiang N. On the subtraction method for in-situ reflection and diffusion coefficient measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010; **127**(3): 99—103
- 22 Pogson M A, Whittaker D M, Gehring G A. Diffusive benefits of cylinders in front of a Schroeder diffuser. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010; **128**(3): 1149—1154