

基于二次剩余序列的扩散吸声体的研究

盛胜我 王毅刚 赵松龄

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1994 年 7 月 8 日收到

摘要 本文对基于二次剩余序列的声学结构的吸声性能进行实验研究,并定性分析了它的吸声机理。研究表明,除了结构振动所产生的损耗之外,更重要的吸收源是结构表面由于声干涉所形成的附加声阻抗的影响。

关键词 吸声,二次剩余序列,扩散体

A Study on Sound Absorption of QRD

Sheng Shengwo, Wang Yigang, Zhao Songling

(Institute of Acoustics Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract This paper studies the sound absorption of quadratic residue-diffuser (QRD) and attempts to explain the high sound absorption at low-frequencies.

Key words Sound absorption, quadratic residue sequence, diffuser

1 引言

目前,以数论为基础的新一代声学结构的研究在国际上正蓬勃开展^[1]。70年代末德国 Schroeder 教授首先提出将数论与声扩散联系起来,设计一种具有非常良好的扩散效果的平面反射表面,这种结构的局部声阻抗沿表面按数论中的二次剩余序列规律变化。由理论推导可得出,当声波入射到结构表面时,能得到各个散射波幅值相等的扩散效果^[2]。从这项开创性的工作开始,工程师们发展了各种适合于不同场合的扩散体,给声学结构的设计注入了崭新的思想^[3]。

段路要走。

近年来,日本 Fujiwara 教授发现,这种扩散体同时还具有良好的吸声效果,特别在低频范围^[4]。实际上这种结构已成为一种兼有两种效果的扩散吸声体。在他的工作中采用二维声学结构,分别在混响室与驻波管内进行了实验分析^[5],但是对于这种扩散吸声体的吸声机理,尚未作出满意的解释。

本文以更为实用的一维扩散吸声体为基础,进一步对其吸声性能作实验研究,并且对其吸声机理作定性的分析。分析表明,除了结构振动所产生的损耗之外,更重要的来源在于扩散吸声体表面附加的声阻抗的影响。本文的实验结果以及初步的理论分析,为深入了解这种

参 考 文 献

[1] Kenreth Mck. Eldred, "Airport Noise: Solving a World Class Problem", Proceedings of Inter-

noise 92, Toronto, 1992, 3—12.

[2] 吕如榆,程明昆,吴卫彬,中国安全科学学报,1992, 2(1): 27—34.

[3] Alice H. Suter, Noise/News, 1993, 1(3): 131—151.

结构的声学性能、掌握其规律提供了有力的依据。

2 基于二次剩余序列的扩散吸声体

基于二次剩余序列的扩散吸声体的基本结构如图 1。在这种结构中,各个槽的深度 d_n 按二次剩余序列的规律排列。数论中的二次剩余序列的形式为:

$S_n = n^2$ 取模 N 后的最小非负余数
 N 为奇素数。这个序列关于 $n = 0$ 与 $n = (N$

$- 1)/2$ 为对称并以 N 为周期,例如取 $N = 7$ 时, S_n 序列为下列数字组成: 0,1,4,2,2,4,1,0,1,……。

这种扩散吸声体通常可做成一维或二维两种类型,分别是槽形与井字形两种形式。图 2 为 $N = 7$ 的条件下两种形式的深度示意图。扩散吸声体一般采用胶合板制作,四周边框采用较厚的板作为框架,其中隔板采用较薄的板,也有采用塑料成型制作,在建筑中通常结合不同的条件采用各种设计。



图 1 基于二次剩余序列 ($N = 17$) 扩散吸声体的基本结构

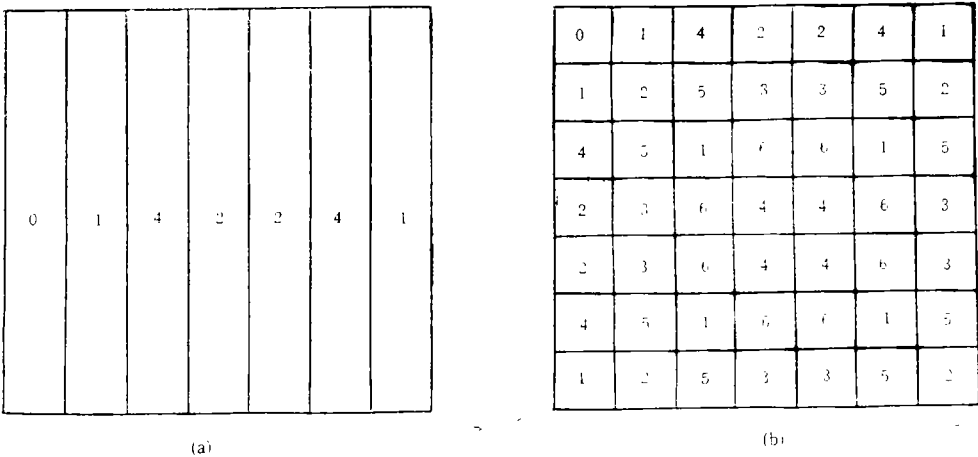


图 2 扩散吸声体深度示意图 ($N = 7$)
(a) 一维形式 (b) 二维形式

3 扩散吸声体吸声性能的研究

基于二次剩余序列的扩散吸声体,其扩散性能在理论和实验上都已有较为透彻的分析^[2],并且在建筑声学设计中已被大量采用来增加或调节厅堂或房间的扩散特性^[3]。但是,这种扩散吸声体的吸声性能,除日本学者对二维扩散体作了一些初步的实验之外,尚未见其它文章

报道。因此,有必要对它的吸声性能作进一步的实验研究,并且试图从理论上搞清它的吸声机理。

我们的实验主要是在低频驻波管中进行,驻波管截面 $60\text{cm} \times 60\text{cm}$,可测频率范围 $80\text{—}400\text{Hz}$ 。测量垂直入射的吸声系数。试件为用 3mm 胶合板制作的二维扩散吸声体,其深度按 $N = 7$ 的序列排列 (见图 2b),总厚度为

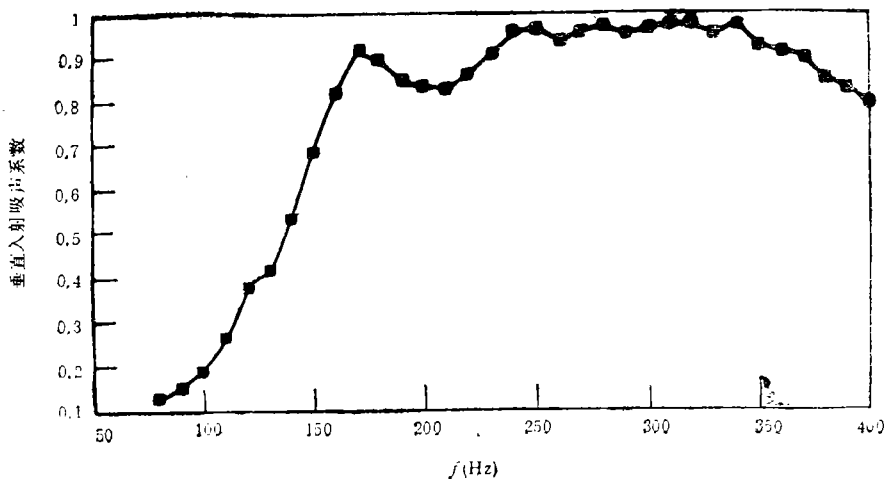


图3 二维扩散吸声体的垂直入射吸声系数 ($N = 7$)

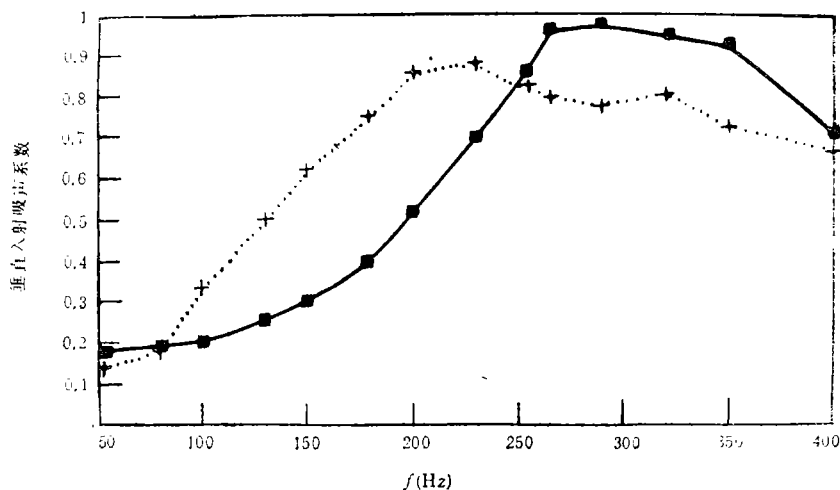


图4 一维扩散吸声体垂直入射吸声系数 ($N = 7$)

—— 表面未加泡沫塑料 表面附加1cm 泡沫塑料

30cm。测量结果如图3。实验结果表明,这种扩散吸声体具有良好的低频吸声效果,不但共振时吸声系数高,而且有较宽的吸声频带。从图中可见,其共振吸声频率在150Hz附近,与结构的总厚度有关。

图4表示 $N = 7$ 的一维扩散吸声体的吸声性能,试件制作采用改进的形式,以缩短整个结构的厚度。由于槽的深度分布中,在0,1,2间隔后面实际上存在多余的空间,因此,可将深度为4的槽向两边侧折弯,从而在保证最大深度的前提下将总厚度缩短至25cm。从图4中的实

线可看到,一维扩散吸声体同样具有良好的吸声性能。图中虚线表示在这种结构表面上覆盖一层1cm聚氨酯泡沫塑料后的吸声情况,由于声阻的增加,其频谱曲线变得更为宽阔,具有高吸声性能的频段更加拓宽,显示了优越的声学性能。

另一种试件选择了 $N = 11$ 的二次剩余序列排列。对于扩散而言,这种结构的扩散性能较 $N = 7$ 的结构更好。下面我们比较它们的吸声性能。试件的总厚度仍为25cm,测得的吸声系数如图5。比较图5与图4的结果,可以

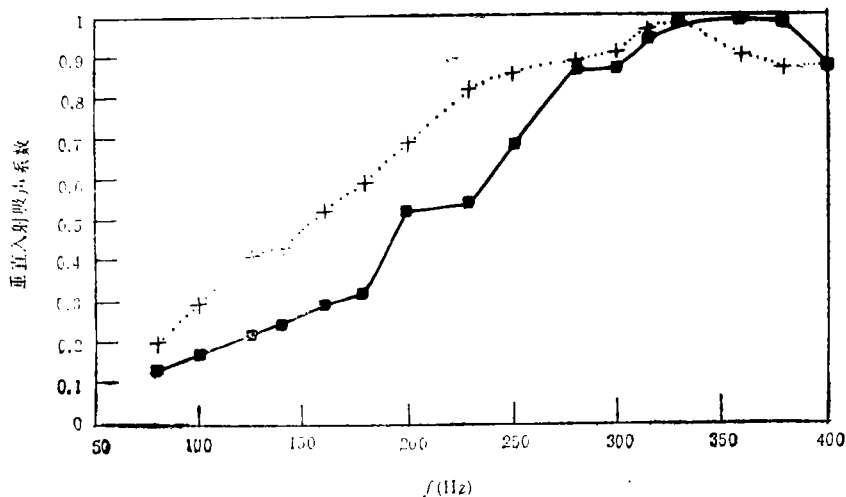


图5 $N=11$ 的扩散吸声体的垂直入射吸声系数

—— 表面未加泡沫塑料层 表面附加1cm 泡沫塑料层

发现,将素数 N 由7增加到11,即将分隔由7扩展到11,对吸声性能的改善是有限的。图5中的虚线反映了在表面附加1cm 泡沫塑料的结果。

由上可知,一维 $N=7$ 的扩散吸声体在吸声性能上,并未有明显的降低,考虑到这种结构制作简单,易于推广。因此,在工程上这类扩散吸声体可作为优先选择的一种结构形式。

4 扩散吸声体吸声机理分析

这种扩散吸声体为什么在低频较宽的范围会有如此高的吸声系数?对此,目前尚未作出满意的理论解释。

对于多支路薄板与一定形状的空腔形成的耦合共振系统,其通常被认为声波入射激起薄板的弯曲振动,使板本身产生内损耗以及板与固定边缘之间的摩擦引起声能量耗损。当薄板与空气层组成的振动系统发生共振时,声能的消耗最大。但是,这种机理引起的共振吸声系数不可能很高,其频带宽度也较窄。由于胶合板的损耗因子仅在0.1左右,常用木质薄板结构吸声系数一般在0.4左右,即使板与四周边缘适当填充多孔材料,最大吸声系数也仅在0.5左右^[6]。所以,这种解释尚不能令人信服。除了这种机理之外,必然还存在其它吸声机制才

能较好地解释形成高吸收的原因,换句话说,还存在另一类原因形成这种结构适当的声阻。

我们知道,当声波入射到扩散吸声体后,将从不同深度的槽穴反射回来,由于各个槽穴深度不同,声波在经历不同距离后相位将不一致,从而在结构表面处产生干涉的现象。可以认为产生能量耗散的重要原因在于相邻两个槽穴附近的声干涉形成的一部分附加的声阻抗,其线性部分取决于两个槽穴间的相对振速,相当于增加了一段槽深。非线性效应来源于隔板顶部的脱体绕流,即在顶部局部范围内形成的旋涡区内产生了强烈的声能损耗,只要相对振速不为零,非线性效应的影响是相当显著的。如果考虑线性与非线性这两部分声阻的影响,将不难解释这类扩散吸声体的高吸收机理。详细的理论推导与分析将另文发表。

参 考 文 献

- [1] 盛胜我. 声学技术, 1993, 12(3): 1—4.
- [2] Schroeder. M. R. J. *Acous. Soc. Am*, 1979, 65 (4): 958—963.
- [3] D'Antonio P. *Sound and Vibration*, 1992, October: 24—30.
- [4] Fujiwara K. and Miyajima. T. *Applied Acoustics*, 1992, Vol. 35: 149—152.
- [5] Fujiwara K. and Moriyasu. N. *Inter-Noise 93*, 1993: 1703—1706.
- [6] 郑长聚等. 实用工业噪声控制技术, 第一版, 上海科学技术出版社, 1982, 75—80.