

大面积多周期伪随机序列扩散体群的一种优化布置方案

卢婕宁 沈 勇

(南京大学声学研究所 近代声学国家重点实验室 南京 210093)

2003 年 7 月 9 日收到

摘要 伪随机序列扩散体具有良好的扩散效果,但是大面积周期布置时会在扩散方向产生大量旁瓣。为了消除这些旁瓣,并得到符合使用者要求的扩散声压响应曲线,本文提出一种实现伪随机序列扩散体群大面积最佳布置方案的布置方法。

关键词 伪随机序列扩散体,周期排列,布置方法

A prediction method of layout plan of large area and periodical pseudorandom sequence diffusers

LU Jie-Ning SHEN Yong

(State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Pseudorandom sequence diffusers provide good scattering, but when multiple periods are used, the diffusion pattern will be narrowed into specific directions. This paper presents a method of layout plan of large area pseudorandom sequence diffusers to cut down the diffuse peaks and to meet user's demand.

Key words Pseudorandom sequence diffusers, Periodical layout, Layout method

1 引言

20 世纪 70 年代, Schroeder 结合数论原理和声学理论提出了一种具有良好扩散性能的扩散体,称为伪随机序列扩散体或数论扩散体^[1]。这种扩散体是一种表面为平面的声学结构,由一维阱或二维管道组成。每个阱或管道的深度按伪随机序列(最大长度序列,二次剩余序列,原根序列等)来选择。这些扩散体符合 Schroeder 定义的最优扩散体的条件。但这仅仅针对单周期伪随机序列扩散体而言。在实际应

用中,扩散体总是大量放置的。当伪随机序列扩散体按周期并排大量放置时,由于散射声波干涉的作用,在扩散方向会产生大量不易消散的散射波瓣,这时扩散体群相对于平板扩散性能的改善是非常有限的。解决的方法可以是使用序列数比较大的扩散体,但是序列数越大,扩散体的制造成本就越高。James A.S.Angus 提出利用扩展频谱调制的方法布置伪随机序列扩散体群^[2,3],简单易行,效果良好,但是这种方法没有考虑单个扩散体由于布置位置变化产生的相位变化,而且也不是最优的布置方案。本

文提出一种大面积伪随机序列扩散体群的布置方法, 利用不同序列长度, 或者不同设计频率的单个伪随机序列扩散体, 按一定顺序排列, 以达到需要的扩散声压响应曲线。本文讨论了这种方法的原理和作用。

2 理论预测方法

扩散体所有的预测方法都基于 Helmholtz-Kirchoff 积分方程^[4]。设扩散体外一点的散射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, 扩散体外某点的散射声压为:

$$P_s(r) = \frac{1}{4\pi} \iint_s [P(r_s) \nabla G(r, r_s) - G(r, r_s) \nabla P(r_s)] \cdot n_s dS \quad (1)$$

其中 $G(r, r_s)$ 是格林函数, 对自由场有

$$G(r, r_s) = \frac{e^{-ik(r-r_s)}}{|r-r_s|} \quad (2)$$

式 (1) 中各量见图 1, 箭头表示矢量方向。

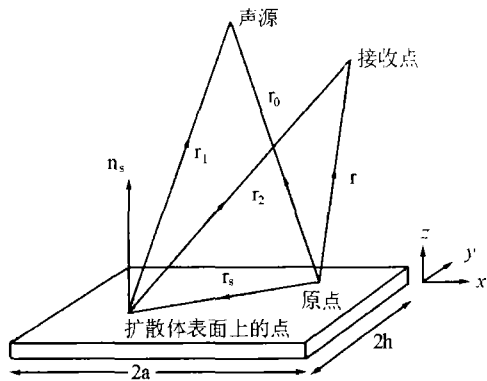


图 1 扩散体散射示意图

当扩散体的长度较大, 利用 Kirchoff 边界条件, 假设边界外的声压为 0; 再设扩散体是刚性硬表面, 可以忽略扩散体的吸声和弯曲效应; 并设阱的深度方向的阻抗只与深度有关; 扩散体安装在墙面上, 可以不考虑低频衍射效

应; 不计各阱之间的耦合关系。由于大多数二维散射的性质可以由一维情况直接推出, 所以本文讨论的都是一维情况。设声波垂直入射, 对伪随机序列扩散体有散射声压:

$$P_s(r) = \frac{-ikP_0}{2\pi} W \sum_{-N/2}^{N/2} \frac{e^{ik(r_1+r_2)}}{r_1 r_2} [\cos(n_s, r_1) + \cos(n_s, r_2)] e^{-2ikd(n)} \quad (3)$$

其中 k 为波数, P_0 为入射声压, W 为单位阱宽, $W = \lambda_h/2$, 其中 λ_h 为伪随机序列扩散体设计高频的波长, N 为整个扩散体的长度, $d(n)$ 为阱深序列, $d(n) = \frac{\lambda_1 S(n)}{2N}$, 其中 λ_1 为设计低频的波长, $S(n)$ 为伪随机序列, 如二次剩余序列、原根序列等。 n_s 、 r_1 、 r_2 见图 1。

当声波入射到扩散体, 在阱底部反射, 当阱深不同时, 反射波具有不同的相位, 式 (3) 体现了这种相位差。利用这种相位关系可以优化扩散体群的扩散响应曲线。将伪随机序列扩散体群周期放置对这种相位关系的利用非常有限。以二次剩余序列扩散体为例, 通常周期放置的二次剩余扩散体群的扩散响应曲线的曲线形状与平板的曲线比较相似, 见图 2(a)、只是相对平坦一些。Angus 提出的扩展频谱调制方法, 基于在远场的情况下, 式 (3) 近似一个傅立叶变换, 远场时, 见式 (4)。

$$P_s(\sin \alpha) \approx A \sum_{n=1}^N e^{-2ikd(n)} e^{-iknW \sin(\alpha)} \quad (4)$$

其中

$$A = \frac{-ikP_0}{\pi} \frac{e^{-ik(r+r_0)}}{rr_0} W \quad (5)$$

r 、 r_0 见图 1。

$P_s(\sin \alpha)$ 相当于反射角 α 正弦值的频谱, 当用一个频谱类似白噪声的伪随机序列调制单周期伪随机序列扩散体时, 得到的扩散响应近似单周期扩散体的响应。调制的方法是当调制用伪随机序列值为 1 时, 保持扩散体不变, 序列值为 0 时, 取原来扩散体序列值的“补码”, 如序列长度为 7 的 QRD, $S(n) = 0, 1, 4, 2, 2,$

4, 1, “补码”为 $7 - S(n)$, 序列值变为 7, 6, 3, 5, 5, 3, 6。但是取“补码”与调制用伪随机序列的 0, 1 的对应关系并不明确, 并且式 (4) 省略了 $\frac{e^{ik(r_1+r_2)}}{r_1 r_2}$ 一项, 也即忽略了由于单个扩散体布置位置不同产生的差异。如果能计算各个单周期伪随机序列扩散体的所有排列的组合方式, 挑选一种最符合需要的布置方式, 就能充分地利用这种相位关系。

首先确定需要的扩散响应曲线及需要优化的频段, 通常最优扩散体有两种情况: 一类是所有角度的散射声能均匀分布, 另一类是在镜像方向的散射声能为 0, 其他角度散射声能均匀分布。也可以根据用户需要给出其他形状的扩散响应曲线。然后挑选几种伪随机序列扩散体, 可以是序列长度不同或者设计频率不同的扩散体, 可以是“补码”扩散体, 也可以是“镜像”扩散体, 即取原伪随机序列扩散体序列的对称, 将 $d(n)$ 变为 $d(N - n)$ 。然后计算这些扩散体的所有排列方式, 在结果中选择最符合条件的扩散体排列方案。

对第一类理想扩散体, 条件设为:

$$\varepsilon_{\text{opt}} = \frac{\partial |P_{\text{opt}}(\alpha)|}{\partial \alpha} \quad \varepsilon_{\text{opt}} = \varepsilon_{\text{min}} \quad (6)$$

对第二类理想扩散体, 条件设为:

$$\text{a. } |P_{\text{opt}}(\alpha_{\text{mirror}})| = |P_{\text{min}}| \quad (7)$$

$$\text{b. } \varepsilon_{\text{opt}} = \frac{\partial |P_{\text{opt}}(\alpha_{\text{notmirror}})|}{\partial \alpha} \quad \varepsilon_{\text{opt}} = \varepsilon_{\text{min}} \quad (8)$$

3 布置方案

图 2 是目标为第一类理想扩散体群的布置方案。所用扩散体是序列长度为 11, 设计低频为 $f_{10} = 500\text{Hz}$ 的二次剩余序列扩散体 (S_1), 及同长度, 设计低频为 $f_{20} = 300\text{Hz}$ 的“补码”二次剩余序列扩散体 (S_2), 周期数为 7, 优化频率为 300Hz 。优化排列为 $S_2, S_2, S_1, S_1, S_2, S_1, S_2$ 。图 2(a), 2(b) 中各曲线分别是 $f = 300\text{Hz}$ 和 3000Hz 的远场的散射声压级幅度。图中虚

线为平板的扩散响应曲线, 细线为 S_1 按周期排列的曲线, 粗线为优化曲线。可见优化布置

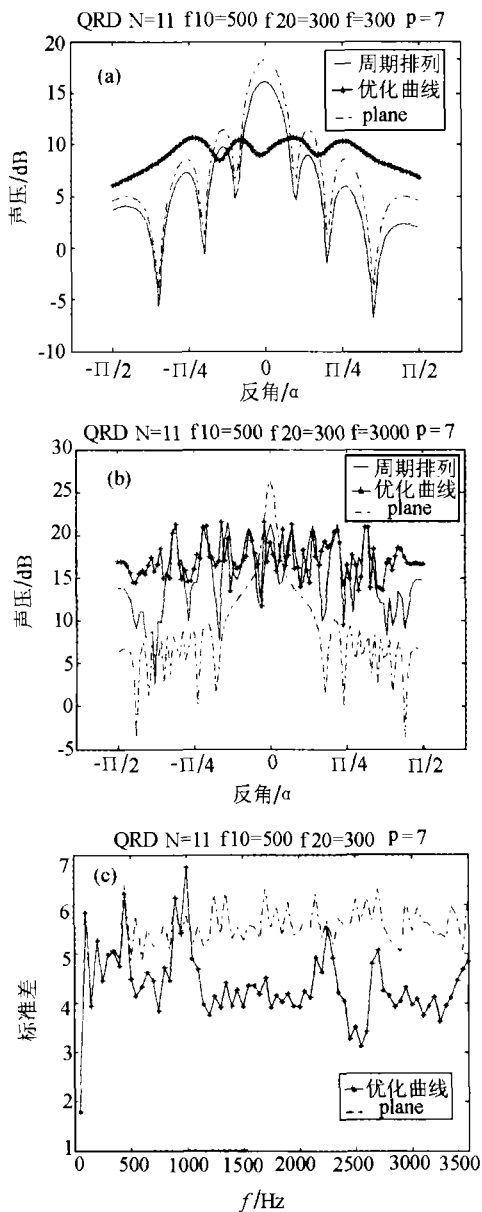


图 2 (a) 第一类优化布置与周期布置及平板扩散响应比较 ($f = 300\text{Hz}$)
(b) 第一类优化布置与周期布置及平板扩散响应比较 ($f = 3000\text{Hz}$)
(c) 第一类优化布置在不同频率下及平板按角度散射声压标准差

消减了镜像区声压,提高了非镜像区声压,同时大大减少了旁瓣的数目。需要指出这里优化排列是针对优化频率 300Hz 的。见图 2(c) 中曲线代表散射声压按反射角度的标准差在不同频率下的值,优化布置的标准差是有起伏的,即优化布置在不同频率的扩散效果是有起伏的,但是相对平板的优化是明显的。

图 3 是目标为第二类理想扩散体群的布置方案。该方案基于 Feldman 原根扩散体^[5,6]。该扩散体是在原根扩散体的 S_n 序列前加 0,在设计频率的低频的 $(N-1)$ 倍频率,它的镜像反射方向的声压幅值为 0,当然这是对于单周期 Feldman 原根扩散体而言。周期布置时扩散响应产生大量的旁瓣,如图 3(a) 中的细线。图 3 中所用扩散体是设计低频为 $f_0 = 500\text{Hz}$ (S_1) 的 Feldman 原根扩散体和它的“补码”扩散体 (S_2),序列长度为 11,周期数为 7,优化频率 500Hz。优化排列为 $S_2, S_1, S_1, S_2, S_2, S_1, S_1$ 。图 3(a), 3(b) 中各曲线分别是 $f = 500\text{Hz}$ 和 1500Hz 的远场的散射声压级幅度。虚线为平板的曲线,细线为 S_1 周期排列的曲线,粗线为优化曲线。图 3(a) 可见优化布置实现了镜像区声压的衰减,同时消除了大量旁瓣。图 3(c) 可见,在所有频段,优化曲线在镜像区的平均散射声压都要小于平板,但是随着频率的增加逐步逼近平板的响应;图中 500Hz、1000Hz、1500Hz 处的谷点说明在优化频率 500Hz 的整数倍频率的镜像声压有明显衰减。

4 结论

伪随机序列扩散体在音乐厅,录音室,配音室,混响室等需要扩散的场合有大量的应用。本文提出一种搜索最优的伪随机序列扩散体群布置方法。预测扩散声压的方法是 Cox 和 Lam 推荐用于长度较长的扩散体的 Helmholtz-Kirchoff 方程费涅耳解。Cox 和 Lam 曾将几种扩散体预测方法与实验结果相比较^[4],证明在角度不太大的情况下,费涅耳解是精确的预测方法。可以看出,本方法对大面积伪随序列

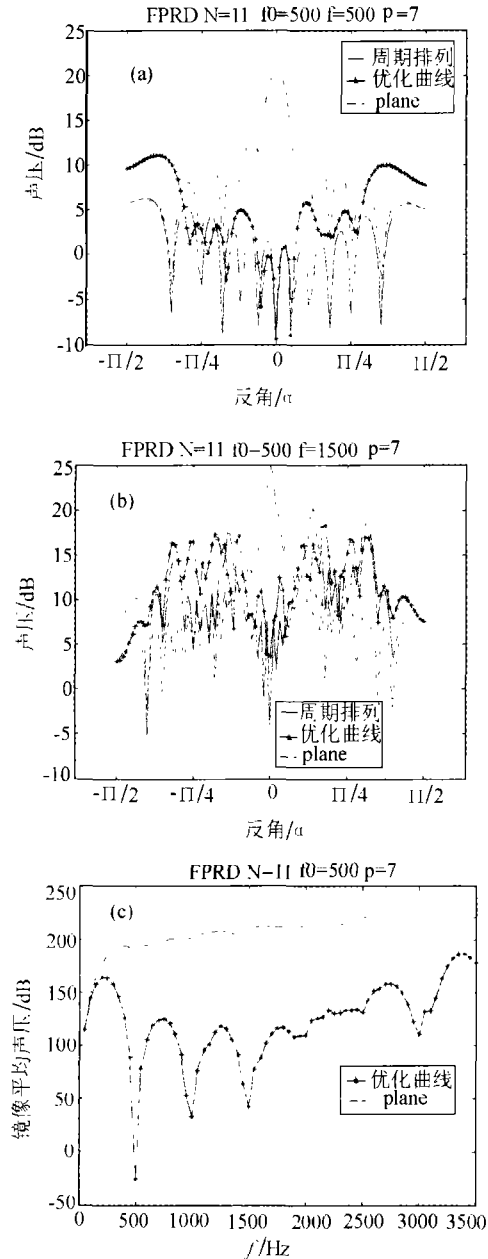


图 3 (a) 第二类优化布置与周期布置及平板扩散响应比较 ($f = 500\text{Hz}$)
(b) 第二类优化布置与周期布置及平板扩散响应比较 ($f = 1500\text{Hz}$)
(c) 第二类优化布置在不同频率下及平板镜像平均声压

(下转第 48 页)

为 3mg/g 和 1mg/g。华涛^[12]在 ACF 对糠醛废水的吸附及超声脱附行为的研究中发现,他使用了 26kHz 和 40kHz 两种频率不同的超声波,在超声脱附开始的前期,26kHz 超声作用下的 ACF 就接近 40% 的解吸率,但此后就没有太大的变化,而 40kHz 超声作用下的 ACF 由于空化效应产生较慢,空化泡数量较少,开始时脱附效果不明显,但 10 分钟以后空化效应渐强,空化泡数量增加,解吸率超过了 26kHz 超声作用下的 ACF。他通过方差分析、显著性检验得:功率对脱附效果有显著影响,频率其次,交互作用不明显,对脱附效果的贡献率分别为:54.19%、28.73%。并且随功率增加,解吸率增加。

5 小结

超声波用于树脂的再生和传统的化学方法相比较,它经常能大幅度地提高处理速度、效率和质量,完成一般技术不能完成的处理工作。超声波用于树脂的再生,能使解吸物脱除彻底,树脂不发生中毒现象;降低树脂的再生费用;能减少洗涤水用量和污水排放。但超声技术是一门较新的多学科交叉边缘学科技术,很多的理论需进一步完善,尤其是在工业化的实际运用中。超声波用于树脂的再生,在不同的频率条件下产生不同的效果,有时会出现相反的情况,李忠^[3]等人对“苯酚水溶液 + 活性炭”

吸附体系施加超声波,当超声波的强度达到一定值时,活性炭开始出现明显的破碎,因此,在实际运用时,要根据树脂的种类和被解吸物的性质选择不同频率不同功率的超声波。

参 考 文 献

- 1 林仲茂. 应用声学. 1993, 12(1):1~5.
- 2 秦炜, 原永辉, 戴猷元. 化工进展, 1995, 1:1~5.
- 3 奚红霞, 李忠, 谢兰英. 化学工程, 2001, 29(5):10~14.
- 4 秦炜, 原永辉, 戴猷元. 清华大学学报, 1998, 38(2):23~29.
- 5 于淑娟, 高大维, 秦志荣. 甘蔗糖业, 1999, (6):25~29.
- 6 钟爱国, 戴秋萍, 王宏青. 离子交换与吸附, 1999, 15(5):460~463.
- 7 Rege S U, Yang R T, Cai C A. *AICHE Journal*, 1998, 44(7):1519~1528.
- 8 Breithbach M, Bethem D. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, 8(3):277~283.
- 9 Brdithbach M, Bathen D. *Ultrasonics*, 2002, 40: 679~682.
- 10 Yifang Lu, Linda K. Weaverks. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(3):232~237.
- 11 Brandon S Schueller, Ralph T Yang. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2001, 40(22):4912~4918.
- 12 华涛. ACF 对糠醛废水的吸附及超声脱附行为的研究. 长春: 东北大学出版社, 2002, 34~36.
- 13 韩扶军. 超声场“微扰效应”的研究. 北京: 清华大学出版社, 1996, 25~27.
- 14 丘泰球, 李月花, 陈树功. 声学技术, 1993, 12(1):15~20.
- 15 冯若, 李化茂. 声化学及其应用. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992.

(上接第 32 页)

扩散体的优化效果良好, 它的优点是可以针对不同的需要设计不同的布置方案, 并且扩散效果相对于周期布置有较大的改进。本文介绍的方法也可以用来设计单周期的伪随机序列扩散体。

参 考 文 献

- 1 Schroeder M R. *J. Audio Eng. Soc.*, 1975, 57(1):149~150.
- 2 James A, Angus S. *Applied Acoustics*, 2000, 60: 143~165.
- 3 D'Antonio P, Cox T J. *J. Audio Eng. Soc.*, 1996, 44(5):354~64.
- 4 Cox T J, Lam H W. *J. Acous. Soc. Am.*, 1994, 95: 297~305.
- 5 Felaman E. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 98: 623~634.
- 6 Cox T J, D'Antonio P. *Applied Acoustics*, 2000, 60:167~186.
- 7 M. 波恩, E. 沃耳夫. 杨荫荪等译校. 光学原理, 北京: 科学出版社, 1978. 489~505.