

声屏障和有源噪声控制声屏障

邵 军 沙家正 张自力

(南京大学声学研究所 南京 210093)

1995 年 7 月 4 日收到

摘要 概述了声屏障降低噪声的原理和常用方法,提出了存在的不足;介绍了有源声屏障的降噪性能与发展动态;提出了进一步研究的设想。

关键词 声屏障,有源噪声控制,有源声屏障

Noise barrier and actively controlled noise barrier

Shao Jun, Sha Jiazheng, Zhang Zili

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract This paper outlines the principle and the common methods of analysis of noise attenuation by sound barrier, points out the disadvantage of the barrier, describes the function and the development of the actively controlled noise barrier, and proposes some tentative idea of further study.

Key words Noise barrier, Active noise control, Actively controlled noise barrier.

1 引言

用声屏障控制机器、交通等噪声是环境保护的一种重要措施。通过在噪声源与接收点之间引入适当屏障,可以把噪声源辐射出来并指向接收点的声能部分地屏蔽掉,使接收点处噪声降低到一个较低的水平上。

屏障降噪的效果与噪声的频率特性有关,理论分析和实地测量均表明,屏障对低频噪声的降低效果比对高频的要差。对于噪声源辐射主要是低频成分的情形,为获得较好的降噪效果,对声屏障的高度要提出较高要求,这有时导致在工程上难以实现。这是声屏障降噪的一大局限。

近年来有源噪声控制理论与技术迅速发展,并已成功地应用于管道噪声和闭空间噪声的控制中。开空间噪声有源控制亦得到很大发展。最近有报导,国外开始有人将有源控制理论技术应用到声屏障噪声控制中。所取得的初步研究结果显示,藉此弥补声屏障对低频噪声衰减能力不足的缺陷,使声屏障在不增加高度的前提下,性能得到较大改善。本方法有着美好的前景。

本文概述了声屏障降噪的原理、常用分析方法,提出了存在的问题;简要介绍了有源声屏障的降噪性能与发展动态,提出了对此研究成果进一步发展的设想。

2 声屏障降噪

声屏障降噪的机理是在噪声源与接收点之

间引入声屏障以后, 声波必须通过绕射才能传到接收点, 声传播路径因而加长, 从而导致噪声的降低, 当然这里有一个前提性假设: 声屏障应是无孔质量足够大的, 从而能保证经由屏障透射到接收点的声能可忽略. 在屏障设计中, 通常使屏障至少具有 10 kg/m^2 的面密度并提供 20 dB 以上的传输衰减来加以保证.

自 60 年代始, 国际上有关声屏障的研究报道大量涌现. 进入 80 年代以后, 国内亦不断有这方面的报导. 总的看可以大致把已有工作分为三类: 理论性研究、缩尺模型实验和实际使用环境条件下关于屏障的广泛试验. 而它们的研究对象, 也可大致归类为薄屏障、尖劈形屏障、厚屏障(建筑物)、其它形状屏障与无限长、有限长, 刚性、吸声的组合.

工程上通常用近似的方法来实现屏障的设计或对已有屏障进行性能分析. 用得比较多的, 一是由 Maekawa^[2]归纳的能成功地处理薄屏障和尖劈形屏障的近似计算与图表法; 一是由 Kurze^[1]在 Pierce^[3]工作基础上引入的用以处理厚屏障的近似方法. 本质上讲, 它们都是以对于与惠更斯-菲涅耳衍射理论结果相符的实验数据进行近似分析为基础的. 根据菲涅耳衍射理论, 只有靠近屏障(无限长)上端边缘的人射声场区对屏障的绕射声场有明显贡献. 对于声影区(图 1 中 II 区)中离开屏障一定距离的接收点来说, 绕射声场表现为沿屏障上边缘虚线声源的辐射. 这个虚线声源的强度与该处入射声场的强度相对应. 绕射对声影区与亮区之间的小范围过渡区也有一定的影响.

屏障降噪的性能特征可由图 2 看出. 这是刚性薄屏障和尖劈形屏障对点噪声源降低效果的 Maekawa 近似图表. 其中 $N = 2(A + B - d)/\lambda = 2\delta/\lambda$, 称为菲涅耳数, λ 为声波波长. 可以看出, 对于相同频率的声波, N 大即相应 δ 大, 屏障降噪效果就好; 而当 δ 一定时, 则 λ 小降噪效果好, 这反映了屏障对不同频率噪声将表现出不同性能: 高频特性优于低频特性. 为了增强低频降噪性能, 必须增加屏障高度. 而这种对策在工程上往往是难以实施的, 还会

带来许多不良后果.

已有研究结果还表明, 当屏障是平行设置的一对屏障时, 对屏障近源一侧采取吸声措施是有效的; 相同的屏障设置在刚性地面或吸声性地面上, 其效果也有差异^[1].

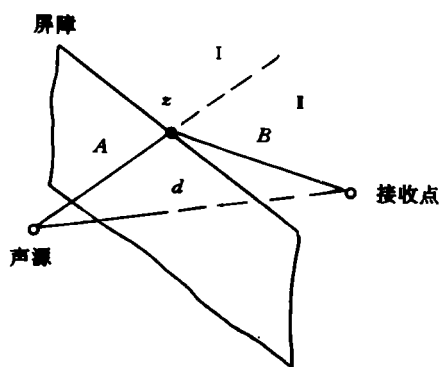


图 1 屏障透视图.

I 区: 亮区 II 区: 声影区.

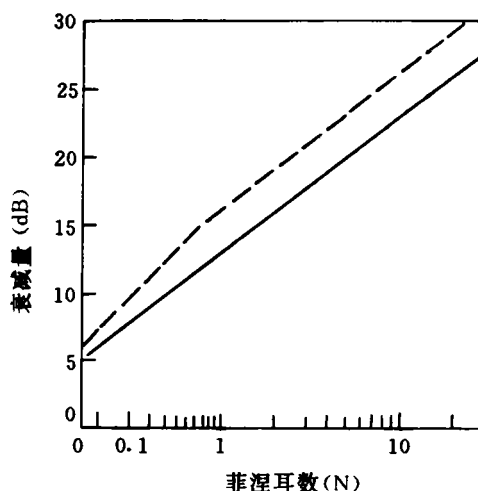


图 2 屏障降噪图表.

“—”实验曲线 “---”理论近似曲线.

近几年来, 不断有关于新型屏障的研究报导. 人们试图通过引入新型屏障来解决降噪能力与屏障高度的矛盾. 就降噪能力而言, 比较成功的有两种型式: 一种是横截面为 T 形的屏障; 一种是 T 形结构的变形——在普通吸声屏障上边缘放置由两吸声圆柱构成的横截面似哑铃状的结构物, 两吸声圆柱分置屏障两侧. 模

型试验结果表明^[4, 5], 由此在一定范围内可获得较高等普通吸声屏障高 5 dB 以上的噪声衰减量, 从而能在一定程度上解决屏障高度与降噪性能的矛盾。但是其低频性能仍相对较差, 而且难于进一步增大衰减量。所有这些都反映了传统屏障降噪能力的不足。后面的讨论将显示, 有源声屏障可以弥补这个不足。

3 有源声屏障的发展动态

关于有源声屏障的研究起步较晚, 1991 年才开始有报导。目前相关报导尚不多, 基本上还处于初始研究阶段。

1991 年, Ise 等人, Omoto 等人先后发表了关于有源声屏障降噪的初步研究结果^[6, 7]。以此为起点, Omoto 等人继续进行研究并于 1993 年发表了进一步研究的结果^[8], 得到了一些有价值的结论。

如前所述, 根据菲涅耳衍射理论, 对于无限长屏障来说, 只有靠近屏障上边缘的入射声场对绕射声场有明显贡献。这种贡献可以等价地看成是由屏上端边缘处虚线声源产生的。基于此, 可以设想, 如果通过引入次级源能使得屏上端边缘处处声压为 0, 就能获得控制效果。但在实际中要使屏障上边缘处处声压为 0 是困难的。Omoto 等人在考虑初级源是点源的情形时, 通过引入多个点次级源, 使屏障上边缘多个离散点处声压为 0 (声压相消) 来实现有源控制的目的。他们先采用数值模拟的手段研究了

屏障上边缘声压相消点间隔大小和次级源排布两参数对有源控制效果的影响, 获得了两条有价值的结论, 然后在消声室中作了验证性实验。下面作一简单介绍。

为了使问题简化, Omoto 等人作了如下假定: 所有次级源对屏障的张角都是 θ_0 , 到屏障边缘距离都是 r'_0 ; 次级源数与屏上相消点数相同, 均为 N ; 相邻次级源之间间距与相邻声压相消点之间间距均为 d ; 同时假定只有一个点初级源。位置排布如图 3。

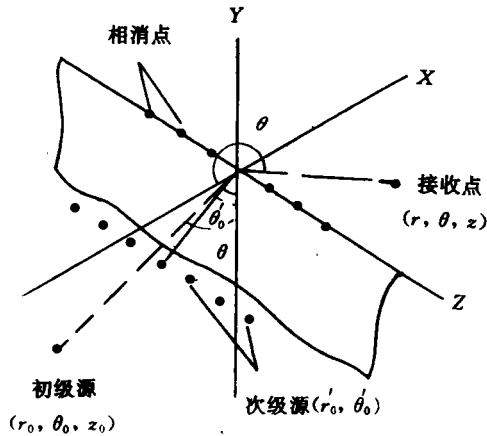


图 3 屏障, 源, 相消点, 接收点的位置关系。

在此情况下, 有源控制声场中接收点 P 处声压为:

$$\Phi(P) = \Phi_0(P) + \sum_{n=1}^N A_n \Phi_n(P) \quad (1)$$

其中

$$\Phi_n(P) = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_{1n}}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \left\{ \begin{aligned} & \operatorname{sgn}(\pi + \theta_0 - \theta) \frac{e^{ikR_n}}{\sqrt{k(R_{1n} + R_n)}} F[\sqrt{k(R_{1n} - R_n)}] \\ & + \operatorname{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta) \frac{e^{ikR'_n}}{\sqrt{k(R_{1n} + R'_n)}} F[\sqrt{k(R_{1n} - R'_n)}] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$F[X] = \int_x^\infty e^{i\mu^2} d\mu \quad (3)$$

sgn 为符号函数; k 为波数; $n=0$, 和 $1, 2, \dots$, N 分别代表初级源, 和第 $1, 2, \dots, N$ 个次级源; R_{1n} 为第 n 个源绕过屏障到接收点的最小距

离; R_n 和 R'_n 为第 n 个源及其关于屏障的镜象到接收点的直线距离; A_n 表示第 n 个次级源振幅与相位的复系数。由下式决定:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{e^{ikr_{11}}}{r_{11}} & \frac{e^{ikr_{21}}}{r_{21}} & \dots & \frac{e^{ikr_{N1}}}{r_{N1}} \\ \frac{e^{ikr_{12}}}{r_{12}} & \frac{e^{ikr_{22}}}{r_{22}} & \dots & \frac{e^{ikr_{N2}}}{r_{N2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{e^{ikr_{1N}}}{r_{1N}} & \frac{e^{ikr_{2N}}}{r_{2N}} & \dots & \frac{e^{ikr_{NN}}}{r_{NN}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{e^{ikr_{01}}}{r_{01}} \\ \frac{e^{ikr_{02}}}{r_{02}} \\ \vdots \\ \frac{e^{ikr_{0N}}}{r_{0N}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 r_a 和 r_m 分别为初级源和第 n 个次级源到第 i 个相消点的距离。

所获得的有源控制效果为：

$$\Delta L = -20 \log [\Phi_m(P) / \Phi_{off}(P)] \quad (5)$$

其中 Φ_{off} 和 Φ_m 分别表示次级源作用前后接收点处声压值。据此进行了数值分析，结果如图4，图5所示。图4反映了有源控制效果与相邻声压相消点(次级源)间隔的关系；图5则显示了次级源的不同排布对有源控制效果的影响。

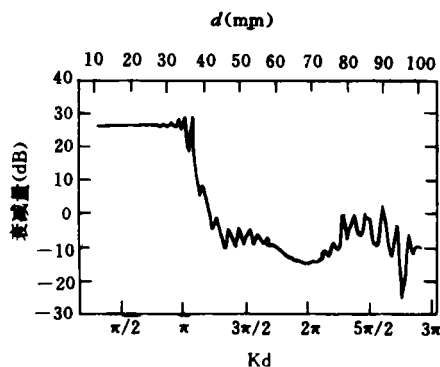


图4 有源控制效果与相消点间隔 d 的关系。

$$\begin{aligned} r_0 &= 0.5 \text{ m}, \quad r'_0 = 0.2 \text{ m}, \quad r = 1.0 \text{ m}, \\ \theta_0 &= \theta_0 = 60^\circ, \quad \theta = 300^\circ, \quad z_0 = z = 0.0 \text{ m} \\ \text{次级源(相消点)数 } N &= 51. \end{aligned}$$

由此，Omoto 等人得出两点结论：(1) 相邻声压相消点的间隔必须小于声波波长的一半，有源控制才能稳定而有效；(2) 为获得好的控制效果，次级源应尽可能地靠近初级源。

为了验证上述结论，Omoto 等人安排了一个自适应有源控制试验。由于实际情况的限制，次级源数 N 没有取 51 而仅限 8，次级源的输出由实时信号处理器实现自适应控制。对不同信号频率、不同次级源位置等诸条件的实验结果支持数值模拟所得结论，同时显示出，有源声屏障的确能对低频噪声构成较大的附加衰减。

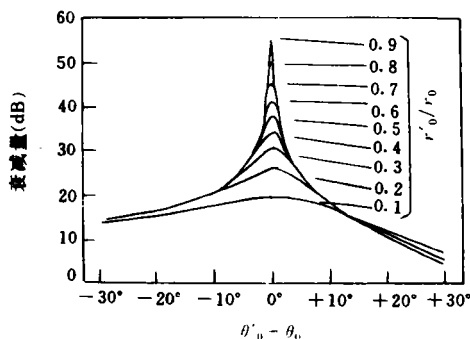


图5 有源控制效果与次级源排布的关系

$$\begin{aligned} d &= 20 \text{ mm}; \quad r'_0 = (0.1 - 0.9)r_0, \\ \theta_0 &= \theta_0 \pm 30^\circ; \quad \text{其它条件同图 4.} \end{aligned}$$

4 结语

可以看出，有源声屏障显示了很好的性能，Omoto 等人的工作已取得了一定的结果，关于有源声屏障降噪性能与机理已有初步认识。但是，要使之实用于实践却还有许多工作要做，诸如：有源控制效果与次级源个数及其位置排布的关系、与接收点位置的关系；有源控制作用机理等问题都还需要作进一步研究。目前尚未见进一步的报导。但已有工作所显示的有源屏障的性能特征、以及诸多尚待解决的问题，将使近几年内有源屏障的研究有较大发展。

参考文献

- [1] Kurze, U. J. *J. Acoust. Soc. Am*, 1974, **55**(3): 504—518.
- [2] Maekawa, Z. *Appl. Acoust*, 1968, No. 1: 157—167.
- [3] Pierce, A. D. *J. Acoust. Soc. Am*, 1974, **55**(5): 941—955.
- [4] Masaki Hasebe. *Proceedings of Inter-Noise'94*, 591—593.
- [5] Toshio Matsumoto, et al. *Proceedings of Inter-Noise'94*, 579—582.
- [6] Ise, S. et al. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 1991, No. 12: 299—302.
- [7] Omoto, A. et al. *Proceedings of Inter-Noise'91*, 513—516.
- [8] Omoto, A. et al. *J. Acoust. Soc. Am*, 1993, **94**(4): 2173—2180.