

有源控制在建筑声学中的应用

盛胜我

(同济大学声学研究所 上海·200092)

有源控制已在声学的各个领域内进行着富有成效的研究。在建筑声学领域内同样也有许多方面可以应用有源控制技术。本文介绍近年来有源控制在建筑声学中的一些研究状况。

Application of active control in building acoustics

SHENG Shengwo

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai · 200092)

Active control is now being vigorously investigated in various acoustic fields. In the field of building acoustics, there are many subjects to which active control could be effectively applied. In this paper, therefore, the recent works regarding active control for some major research targets in this field are introduced.

1 引言

近 10 年来,有源控制(Active Control)已在声学学科各个领域进行着广泛的研究,某些技术也已经开始进入实用阶段。在建筑声学领域内同样也有许多课题能够有效地应用有源控制技术。但就目前而言,除了暖气通风管道系统尝试采用有源技术进行降噪,其他的实用技术尚未能完全实现。本文介绍近年来有关有源控制的一些研究状况,着重于从建筑声学的观点加以分类,主要有隔声、吸声、声屏障、声场的控制与再现以及三维空间降噪等。

2 空气声与结构声隔绝中的有源控制^[1,2]

2.1 双层墙(板)结构的有源控制

在建筑声学及噪声控制工程中,当需要一种分隔墙体既具有质量轻的特点,又能提

供高的隔声量时,经常采用双层墙(板)结构,例如高层建筑中的分隔墙,移动式房间的墙体以及飞机壳体等。但是,这种结构在实用上有一个明显缺陷,即其低频的隔声量较差,主要原因在于两层墙(板)之间共振的缘故。采用有源控制能有效地提供解决的途径。虽然这种应用开始主要是研究飞机螺旋桨噪声传输至飞机壳体内的问题,但是就目前研究的进展来看,也有可能应用到建筑声学的实际领域内。这项技术包括有源的声控制(AAC)与有源的声振控制(AVAC)。AAC 技术是将小型的扬声器作为次级声源,放置在两层墙(板)之间的空气层内。AVAC 技术是采用激励器装置在辐射的墙(板)上作为次级振源。两种技术的控制单元是相同的。由于两层墙(板)之间空腔内的声场是主要的声耦合部分,因此这部分声场能够减小的话,那么整个结构的隔声量将会明显提高。

图 1 是研究有源控制在双层墙(板)结构

作者:盛胜我,男,1946年3月生,研究员

收稿日期:97-4-4;最后修回日期:97-10-16

中效果的实验装置。封闭隔声箱的一边放置待测的双层结构板。板为 1.5mm 厚铝板,四周用 10mm 厚、15cm 长的方形钢框固定。实验分别采用纯音与随机噪声两种声源,6 个测点在板上方 20cm 的平面上。ANC 控制单元的打开与闭合以后测点所测得的声压级的变化,显示了有源控制的插入损失。图 2 是典型的测试结果,噪声源分别是(a) 纯音和(b) 随机噪声。由图可见,在整个频率范围内声级都有降低,特别是在空腔共振频率附近更加明显(20dB 以上)。有源控制系统不仅适用于周期噪声源,对于随机噪声也有效。

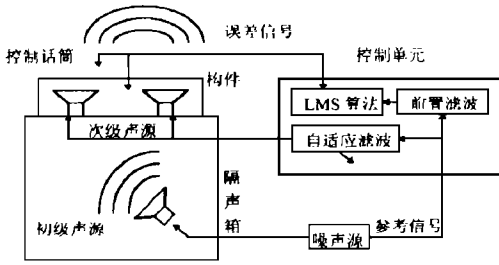
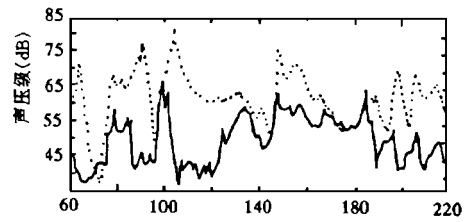


图 1 双层墙(板)结构有源控制实验简图

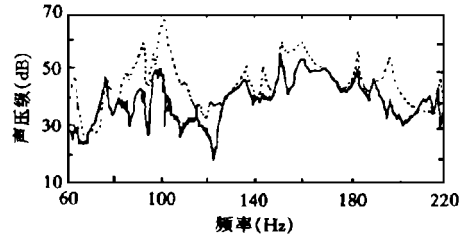
2.2 结构声的有源控制

在建筑工程与其他工业应用中,结构辐射噪声的问题始终是一个棘手问题。在许多场合中用常规的阻尼、吸声等方法都不能有效解决。采用有源控制的方法虽然在 30 年前已经有人提出,但是真正实现还是在近年来由于快速的微处理技术的迅速发展之后。有一些成功的应用已有报导,特别是在一维空间,对于低频的结构声有很好的效果,这在降低飞机舱内和汽车内噪声等工业应用中研究较多。随着研究的不断进展,在建筑声学中的应用将逐步拓展。

有源结构声控制(ASAC)是研究当平面声波入射到板上,在辐射板上再加一个控制的点力激发,使由两者叠加而成的辐射声场达到最小化。为确定控制力的振幅以及位置,许多研究工作分别在理论上与实验上加以分析,并设计控制单元来实现。目前在这方面研究的主要兴趣是次级激励器方式的研究(包



(a) 纯音初级声源



(b) 随机初级声源

.....ANC 系统关闭 ——ANC 系统启动

图 2 测点声压级的平均值

括声或振动方式); 误差传感器的研究(包括加速度或声压方式); 有源控制算法的研究(包括自适应前馈或后馈控制); 激励器与误差传感器材料的研究(包括压电陶瓷、聚乙烯氟化物与形状记忆合金等); 声传输到闭合空间时的有源控制。

3 有源声吸收^[3,4]

有源声吸收又叫作自适应声吸收,实际上是用自适应方法控制声阻抗。众所周知,在一定条件下,声源可以成为一个吸声体。对于单极子点源,在自由场中吸声量为 $\frac{2}{4}$ (为声波波长)。因此在低频(例如 100Hz)一个理想喇叭大约能提供 0.93m^2 的等效吸声量。在室内声场中,为了抑制低频共振采用吸声处理,如果采用吸声材料,则体积显得很大,价格昂贵而且效率低,因此采用有源吸声方法比较有利。有源声吸收处理是在一个次级声源上施加与声场有关的信号,使次级声源前面产生和保持所需的声阻抗,其目的是为了改善房间的听音条件,使录音再现更为真切。另一个应用是控制混响时间。现有的

电声技术能延长混响时间,而采用一组辅助声源吸收声能可以减小混响时间。

图3是一个在管道内控制声阻抗的实验装置。在一个1.5m左右长的PVC管道一端用扬声器作初级声源,另一端用扬声器作为次级声源,采用自适应技术控制次级声源前方的声阻抗,造成吸声末端(无末端反射)。在实用中也有采用声强探头控制管道内末端声阻抗,它使自适应处理直接在频域内实现。在2m长,150mm边长的方形管道内采用有源控制方法造成无末端反射。用驻波管法测得的吸声系数如图4所示,圆点表示控制单元工作时的结果。在100~500Hz的范围,吸声系统都高达0.96以上。

目前,一种新的无源/有源混合系统能在500~2000Hz的宽频带范围内达到0.8~1.0的吸声系数。混合系统包括一层吸声材料层,距离壁面有一段空气层。壁面的运动基于有源控制,使材料层的背面阻抗与空气层的特性阻抗相匹配,从而达到消除空气层中的反射波,使吸声大幅度增加。

4 有源声屏障^[5~7]

利用隔声材料做成的声屏障,在降低道路环境噪声以及局部空间减噪中是一种有效

的手段。为了提高屏障效果,往往要增加屏障高度,这就势必增加造价,并且影响视觉与光线。另外,这种屏障对低频噪声的降低效果甚差。因此,将有源控制与传统的方法结合起来会取得更好的效果。

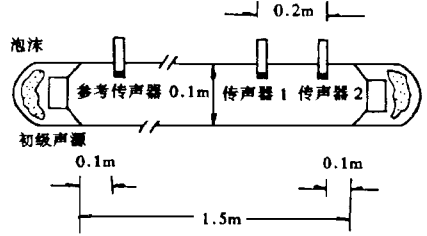


图3 有源控制声阻抗的实验装置

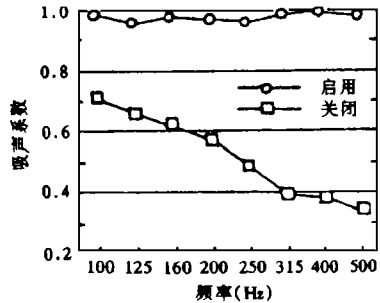


图4 管内进行有源控制造成无末端反射的效果

实验中的屏障采用两层石膏板中间夹玻璃棉层,7.9m宽、0.91m高,放置在半消声室的地坪上。噪声检测传声器放在噪声源的附近,误差传声器放在屏障的另一侧面。次级

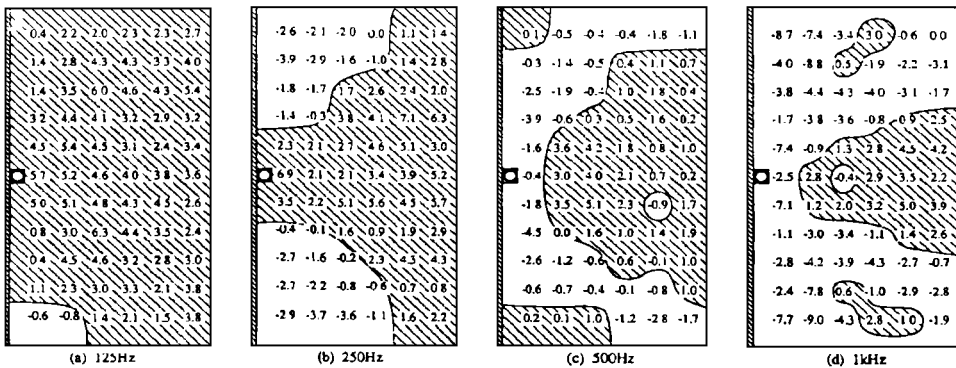


图5 有源声屏障实验中观察点平面上的有效度分布

声源是一个扬声器,安装在屏障的顶部。控制系统是一个自适应滤波器,可以调节其使误差传感器接收到的声压变得最小,这样在屏障侧面的一定范围内,噪声会得到降低。图5是典型的实验结果,由于系统工作后将观察点声压的降低量定义为有效度(effectiveness),正值表示声压降低(即阴影区部位),负值表示声压增加。由图可见,在中心频率为125Hz与250Hz的低频带内,有效的区域相当大。

以上是最简单的例子,更为复杂的是采用多个次级声源与多个误差传感器组成的控制系统,它能形成比单个控制系统更大的安静区范围,并使声功率输出的增加变小。研究表明,初级/次级源的排列,误差传感器位置安排是关键问题。另外,当考虑地面的反射时,条件的选择将更为严格。

5 声场控制及声场的再现^[8]

在厅堂室内声学的研究与设计中,针对不同的使用情况需要人工加以调节与控制其声场条件。近年来,有关声场有源控制的介绍,许多是利用电声技术与数字信号处理加以实现。这里主要介绍声场的再现技术。

首先,从经典的声学理论可以证明,声场是可以在空间与时间两方面完整地再现。但在实际上是一个不能理想实现的目标。在一个有限的空间区域,如果在原来声场中的有限个位置上记录声信号,那么当信号通过线性滤波阵,产生一定数量声源的输入信号,就能再现一个非常接近于原来的声场。在频域内的分析也证明了这种方法是有效的。图6是采用有源控制实现声场再现技术的方框图。 u 表示记录信号; v 表示输入到声源中用来达到声场再现的信号; d 是在声场中再现的信号; d 定义为需要被再现的信号,因此 $e = d - d$ 就是误差信号。矩阵 C 表示 v 与 d 之间的传递函数,矩阵 H 表示滤波器阵,作用于记录信号 u 上,从而确定声源输入信号 v 。

矩阵 A 是通过 u 来定义需要的信号 d ,这种方法由于在高频需要提供足够多的原声场的空间样本,因此在实用上高频会出现极限。

另一个需要考虑的问题是必须保证在再现声场中声波传播方向与原来声场中声波方向非常接近。采用有源控制的方法可以在更宽的频带范围内实现这个目标。与前几节的有源控制的区别在于,这一任务是如何再现一个预先确定其空间与时间特性的声场。当然,其兴趣主要在于精确地再现而不是抑制。

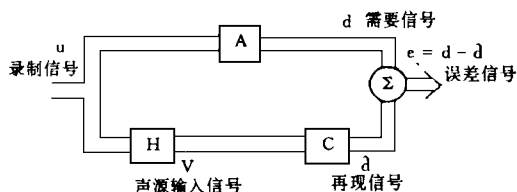


图6 声场再现技术的方框图

6 三维空间降噪^[9,10]

有源控制发展到80年代中期以后,应用环境转向三维空间,尤其是封闭空间。降低房间中的噪声是有源技术的一大目标,其主要途径有两个:一是整体控制,目标使闭合空间内总声能趋向最小;另一是局部控制,其目标使在某些区域内的声压降低,建立局部的安静区域。这方面较为成功的例子是船舶舱室、飞机舱室以及汽车驾驶室內的有源消声。例如在混响较强的船舶舱内,采用双通道有源控制系统,在离地面1.28m高平面上进行测量,结果表明在2/3以上的测量区域(10.5m)有降噪效果,最大降噪量为8dB。在螺旋桨飞机舱室内,由于其噪声是以螺旋桨通过频率为基频与高次谐波组成的分离线谱,因此有源控制技术可以获得成功,但不同工况下降噪量有很大差异。在汽车发动机噪声的有源控制系统中,由于轿厢内体积远比飞机座舱小,因此问题更容易解决。图7示出了在四缸汽车内采用有源控制系统后的结果,在转速3000rpm(发火频率100Hz)以上,

在车厢前部的降噪量有 10 ~ 15dB。这些成功的例子虽然主要是针对飞机、船舶及汽车等场合,但与建筑空间有相同之处。因此,在民用或工业的室内降噪采用有源控制技术,以上介绍的一些工作都是很好的借鉴。

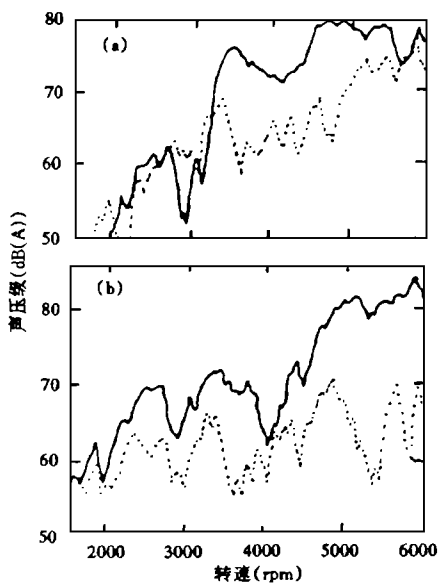
7 结束语

以上介绍了有源控制技术在建筑声学中的一些应用前景。但是,总的来说,这些研究在目前还未能完全应用到实际,其中主要的困难在于:(1)有源控制的应用仅对于低频(250Hz以下)的窄带噪声比较成功;(2)实际应用中需要多通道(多输入-多输出)系统,在硬件、软件实现方面都有相当难度;(3)系统中采用的自适应数字控制器对多数场合来说,价格还过于昂贵。在建筑声学领域内,通常的一些无源控制技术仍然是基本的措施与手段。有源控制技术亟待进一步从实际工程应用的角度加以研究与发展,推出适应市场需要的民用及工业噪声有源控制产品,以弥补传统技术的局限与不足。

在本文的撰写过程中,同济大学王季卿教授给予不少指点,并提供了有益的参考资料,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 A. Cops, Proc. Inter-Noise 94, Yokohama, Japan, 1994; 23 ~ 42
- 2 C. R. Fuller, J. Sound & Vibration 1990; 136 (1): 1 ~ 15
- 3 F. Orduna-Bustamante & P. A. Nelson, J. Acoust. Soc. Am, 1992; 91(5): 2740 ~ 2747
- 4 S. Beyene & R. A. Burdisso, J. Acoust. Soc. Am. 1997; 101(3): 1512 ~ 1515
- 5 A. Omoto & K. Fujiwara, J. Acoust. Soc. Am, 1993; 94(4): 2173 ~ 2180
- 6 S. Ise, H. Yano & H. Tachibana, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1991; 12: 299 ~ 306
- 7 J. Guo, J. Pan & C. Bao, J. Acoust. Soc. Am, 1997; 101(3): 1492 ~ 1501
- 8 P. A. Nelson, J. Sound & Vibration., 1994; 177(4): 447 ~ 477
- 9 S. J. Elliott, J. Sound & Vibration, 1994; 177 (5): 651 ~ 673
- 10 MA Dayou, Applied Acoustics, 1994; 41: 113 ~ 126



——系统关闭系统启用

(a) 车厢内前部 (b) 车厢内后部

图7 小型四缸汽车有源控制的效果

值得一提的是,在室内声场的有源控制研究中,我国著名声学家马大猷院士有着独创之处,他不是局限于有源控制技术上的研究,而是从对室内声场更深入的认识出发,获得最佳的处理方法。在室内混响声场以及断续噪声的有源控制研究中,从简正振动的基本理论出发,即房内一角的声压反映室内噪声源的所有信息,根据简正波抵消的原理,提出了在室内一角安装传声器-放大器-扬声器系统,用来降低室内混响噪声,比之现有的各种方法都要有效。这种根据对室内声场简正模式的分析得到的设想以及实践,更多地从物理的角度来探讨有源控制的作用原理,对于将这种技术运用于室内声场与房间降噪都有着很大的启迪作用。