

低频噪声的有源控制

吕武轩 王志民

(劳动人事部劳动保护科学研究所)

1983年4月15日收到

本文概述了国内外在噪声有源控制方面的研究情况。随着控制论、数字信号处理技术及微电子学逐步应用于有源控制系统,有源消声的推广价值不断增加。文中介绍了有源控制技术在抵消重复噪声(如柴油机排气噪声)、随机噪声(管道或风洞噪声)及空间噪声(变压器噪声)中的应用实例。

一、概 述

噪声的有源控制研究已有五十年的发展史。早在本世纪三十年代,德国的 P. Lueg 就研制出“电子消声器”,并获得了专利。他的成就在于解决了单频正弦波或非正弦波的声抵消问题。

本世纪五十年代,美国的 H. F. Olson 发表了两份研究报告^[1-2],重又提出将有源控制技术用于消声和减震。文中阐述了基于反馈理论电子消声器的结构、等效电路以及组成元件的性能要求和测试曲线。Olson 认为有源控制有以下用途:在驾驶员(或机器操作者)头部附近空间建立无噪声区;制做消声头盔或耳罩;管道消声;机器消声;作为无源消声器的补充(用以消除低频噪声);室内角落吸声;减震。

与此同时, W. B. Conover 在变压器噪声有源控制的研究中取得了进展。他在 15000 kVA 的变压器上进行了试验。控制电路是一组对电源频率的各次谐波分别移相、放大的电路。实验结果表明,在 20 度角的扇形区域内,可于距变压器 50 英尺(15.25m)处降噪 30dB, 125 英尺(38.1m)处降噪 10dB^[3]。

六十年代初, M. Jessel 开发了“Jessel 有源吸声系统”^[4]。他用单极和偶极次级声源组成的管道消声器效果较好。其后,又发展为“带

传声器的三极次声源组 (Tripole with sensing microphone)”,布成阵列以实现变压器噪声的有源控制。

七十年代是有源控制研究工作获得某些突破性成果的时期。1972 年, M. A. Swinbanks 就长管道内平面声波的传播与控制的某些理论问题和实践技术进行了研究。他用了两只扬声器并在其驱动电路加入了时延环节构成单指向性次声源。H. G. Leventhall 和 Kh. Eghtesadi 等开发了所谓“Chelsea 系统”,其中的 Chelsea 单极系统是把通常接在传声器后面的固定时延电路代以具有适当传递函数的有源校正网络。把向上游辐射的声反馈支路作为整个控制系统的一部分来考虑,从而克服了一般单极系统的某些弊病。

G. Mangiante 比较系统地研究了惠更斯(Huy-gens)原理在有源控制中的应用及其工程近似问题,并在计算机上仿真^[5-6]。Kido 和 Onada 研究了应用合单指向性次级声源对变压器噪声实现有源控制。Hessalman 和 C. F. Ross 等均在变压器噪声的有源控制研究试验中取得了进一步成功。

1980 年以来,有源控制系统的研究与设计指导思想逐渐体现了应用控制论、数字信号处理技术和微电子器件的趋势,以应付某些难以用纯声学方法奏效的复杂工程问题。值得指出的是 Essex 大学 B. Chaplin 教授领导下的小

组开发了“Essex 有源抵消系统”，采用微处理器实时控制管道内的随机噪声和柴油机排气的同步噪声。基于同一原理，又开发了“选择性有源消声耳罩”，建立了驾驶室或座舱内的局部无噪空间^[7]。Ross 发表了设计宽带有源控制系统的专门算法，同时将自适应数字滤波技术用于有源消声，对风洞中的环境噪声进行了抵消实验，其结果与理论预估值十分接近^[8~9]。J. C. Burgess 提出了自适应管道有源消声器的理论分析结果和计算机仿真研究的方案，为设计自适应有源消声器提供了有价值的数据和曲线^[10]。近几年的国际噪声控制会议上又不断有新的成果报道，重点是自适应消声系统和空间消声的理论与工程实施方案探讨。

我国在有源控制噪声方面的研究工作起步较晚，于七十年代末和八十年代初才开始研究管道有源消声器^[11]。前期工作内容侧重于解决单指向性次级声源，近一、二年来在吸声机理和工程应用方面有了新的进展。

二、应 用

目前，国内外在有源控制方面的研究工作侧重于以下几个方面：管道消声；柴油机排气与同步噪声抵消；变压器噪声衰减；消声头盔和耳罩；座舱（或驾驶室）内局部无噪声空间的建立；喷气噪声衰减；压缩机噪声衰减；冲击噪声衰减；减震。

本文因篇幅所限，只介绍前四个方面的内容。

1. 管道有源消声器

管道有源消声器在理论与实践方面均较用于其他对象的有源控制系统成熟。这是由于管道内声传播可视为平面波，易于处理。一些随机因素（如介质流速、温度等）也有一定的代表性，作为自适应控制对象有一定的吸引力。同时，管道噪声中的低频分量在工程上造成的危害也逐渐受到重视而提到治理日程上来。

管道有源消声器从机理上可分为吸收式和反射式。前者是将噪声的能量“吸收”掉，在下

游区实现消声；后者则将噪声反射回上游区，上游能量增加，下游实现消声。

为着叙述方便，下面将按次级声源的组合形式来介绍单极系统和多极（偶极和三极）系统。

(1) 单极系统 (Monopole System)

(a) 经典单极系统 这种早期的单极系统由以下几个基本部件组成：传声器、移相器、放大(反相)器和扬声器(图 1)。由次声源(扬声器)辐射的反相声波同时向下游和上游传播。辐射到下游的反相声波与噪声相抵消；辐射到上游的反相声波形成驻波，使系统难以稳定地工作。解决的途径不外乎有两种：其一，采用单指向性传声器或次级声源，以减少声反馈的影响；其二，把声反馈支路作为整个控制对象的一部分，确定其传递函数，设计相应的电子补偿网络，不仅可以消除声反馈的影响，还可以在某种程度上补偿对象特性和参数（介质流动状态、温度、扬声器频响等）变化所引起的偏差。

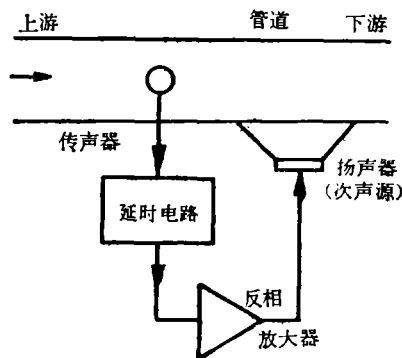


图1 经典单极系统

(b) 改型单极系统(图 2) 由 Leventhall 和 Eghtesadi 等开发的‘Chelsea 单极系统’把经典单极系统的延时电路代以具有传递函数为

$$G_1(s) = e^{-s\tau} / 1 - e^{-2s\tau}$$

的电子补偿网络，从而可消除声反馈的影响^[12]。如若考虑扬声器的非理想频率特性

$$L(\omega) = |L(\omega)| e^{-i\theta(\omega)},$$

闭环传递函数为

$$G(s) = -A|L(\omega)| e^{-s\tau} \cdot e^{-i\theta} / 1 - e^{-2s\tau} + A|L(\omega)| e^{-2s\tau} \cdot e^{-i\theta(\omega)}$$

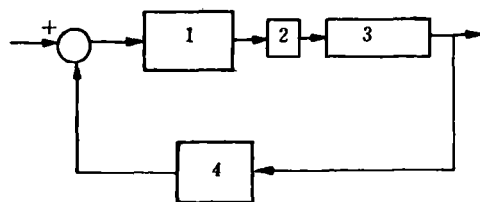


图2 改型单极系统

1. $G_1(s) = -e^{-s\tau}/(1 - e^{-2s\tau})$ 补偿网络,
2. 反相放大器 $-A$,
3. 扬声器 $L(\omega) = |L(\omega)|e^{-i\theta(\omega)}$,
4. 声反馈支路 $G_2(s) = e^{-s\tau}$.

则实现完全消声的条件是 $G(s) = -e^{-s\tau}$. 代入上式整理后得

$$(1 - A|L(\omega)|e^{-i\theta(\omega)})(1 - e^{-2s\tau}) = 0$$

当两个括号中的任一个为零时,即可实现理想消声。总之,改善单极系统性能的主要途径是通过数字的或模拟的电子电路来补偿次级声源的非理想频率特性。

(c) 紧耦合单极衰减器(图3)这种衰减器的特点如下:(i)检测点与次级声源位于一处,故时延近于零。从理论上讲,该系统在所有频率上都能实现有效的声抵消。(ii)一般单极系统的频率响应为

$$H = -e^{-s\tau}/(1 + e^{-s\tau})$$

当 $\tau = 0$ 时, $H = -\frac{1}{2}$. 考虑到管道内与自由声场之差异,故用 D 表示管道对传声器与扬声器声回路的影响(图4)。此时,闭环传递函数为

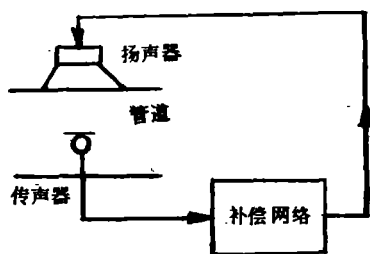


图3 紧耦合单极系统

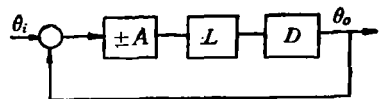


图4 考虑管道对传声器和扬声器影响时的系统框图

应用声学

$$H = ALD/(1 - ALD)$$

当 A 很大时, $H \approx 1$. 对于理想系统而言, A 可以取得很大而不致引起不稳定。这样,即可自动地补偿扬声器频率响应和管道频率响应 D 的随机变化。此外,这种系统在理论上不受管道内介质流动状态和温度变化的影响。(iii)简单可靠,成本低廉。

这种系统可在 500Hz 以下的频段内获得良好的衰减效果。Leventhall 领导下的小组,曾研制了 1m 长的紧耦合式管道有源消声器,可在音频范围内获得 30dB 的降噪效果。

(d) 用贝塞尔滤波器作为移相器的宽频管道消声器

文献[13]提出的方案是采用双二阶贝塞尔滤波器作为移相器(图5)。滤波器的传递函数为

$$T(s) = \{(s - R_0/2L)^2 + [1/Lc - (R_0/2L)^2]\} / \{s + R_0/2L\}^2 + [1/Lc - (R_0/2L)^2]\}$$

实验结果表明,跟踪频率可达四个三分之一倍频程(衰减 10dB)。需选用单指向传声器。

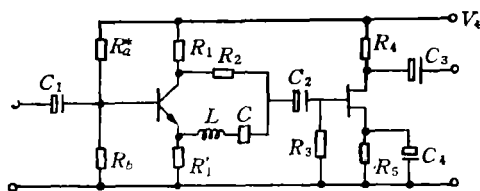


图5 双二阶贝塞尔滤波器

(e) 桥式衰减器

在管道中采用传声器作检测元件时,往往在其周围形成湍流,于是产生“自身噪声”。这个噪声信号被放大后,注入扬声器,则在管道内又增加了一部分噪声。为了消除这一无用信号,最好的办法是不用传声器,而是用作为次级声源的扬声器兼作噪声信号的检测器。

如所周知,扬声器的辐射阻抗 Z_r 是根据自己辐射的能量在其纸盆上产生的反力来确定的。若扬声器向有外界(环境)噪声的区域内辐射,外界声场也向扬声器的纸盆上施加一作用力,于是,扬声器的辐射阻抗将随之变化。其变

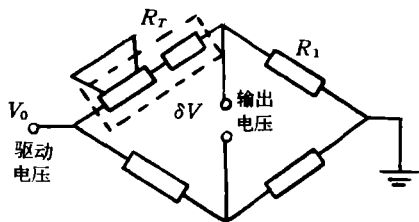


图6 桥式衰减器原理图

化量反映这个声场的综合信息。为鉴别这一微小的变化，最方便的办法是测量扬声器总电气阻抗 Z_{ET} 的增量。可以通过阻抗桥路（图6）将此增量转化为桥路的输出电压。

若将桥路的输出信号经放大和修正相位之后再接到自身的驱动端子上，则此装置可检测任何的外界（环境）声场，并驱动自身产生一个与外界声场大小相等、相位相反的声场，从而实现有源消声。桥式衰减器的结构框图示于图7。

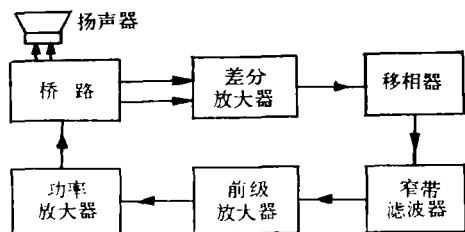


图7 桥式衰减器结构框图

(f) 用自适应时域滤波器抵消通风管道中随机噪声的“Essex系统”(图8)

这是一种典型的应用微处理器和自适应滤波技术的闭环控制系统。由风扇产生的噪声在管道内自左向右传播。检测传声器拾取噪声信号，经第一滤波器处理后，注入扬声器。扬声器辐射的反相噪声传向右方，与同时到达的风扇噪声相互抵消。但是，由于扬声器是全向辐射的（在低频区），反相噪声也向左端传播，并由检测传声器拾取。为消除这一无用信号，利用电子线路将其从传声器的输出中减去。微处理器用来取得对于特定管道和扬声器的脉冲响应，同时从残留噪声信号中提取幅度与相位信息，以便操作第二自适应滤波器。

图9所示为这种系统用于 $2' \times 3'$ ($0.61\text{m} \times$

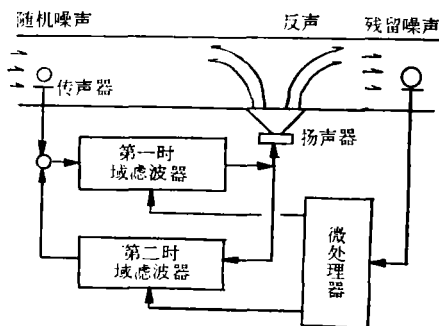


图8 “Essex有源抵消系统”。利用自适应时域滤波器抵消随机噪声

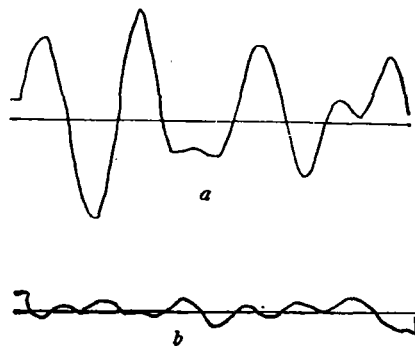


图9 用自适应滤波器抵消管道内随机噪声的效果
(a) 抵消前，(b) 抵消后。

0.91m)工业通风管道内抵消随机噪声的结果。

(g) Burgess自适应有源管道消声器

许多有源消声器属于开环控制系统。设计这类系统时基于下列假设：(i) 构成系统的所有部件在操作频率范围内的相移必须接近于零；(ii) 系统的不可控参数（管道内的温度和流速等）必须保持不变。这样才不致于影响到传声器与扬声器之间的传递时间。然而，实际系统中的各个部件的相移都不可能为零，系统的不可控参数也是不断变化的。Burgess在自适应回波抵消器和自适应杂音抵消器的基础上开拓了用于管道内的“自适应消声器(ASC)”。在计算机上进行仿真研究的原理图参见图10。理论分析和仿真实验结果详见文献[10]。

(2) 多极系统

改善单极系统性能的另一途径是合成单指向次级声源。Swinbanks, Jessel 和 Leventhall等的早期工作重点是围绕这一问题而设计出各

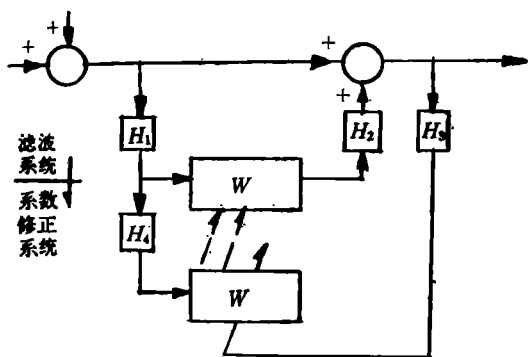


图 10 ASC 仿真原理图

种多级系统。虽然这类系统曾获得良好的效果，而且在理论上和实际应用方面为有源消声的进一步发展奠定了基础，但因其结构复杂，不易装配与调试，工程应用尚感不便。故仅作简单介绍。

(a) Swinbanks 吸声器 图 11 为这种吸声器的原理图。采用两只扬声器，其间插入时延电路构成单指向次级声源。由于是吸收式消声器，下游区的原始噪声被抵消。因此，位于上游的传声器不会接收到次级声源的辐射能量，避免了驻波的形成。

(b) Jessel 吸声器 该装置由单极和偶极组成单指向次级声源(图 12)。图中 B 为单极，A、C 为偶极。接入一个可在全频段产生 90 度相位滞后的放大器。吸声器的频率响应为 $H = \sin(kl/2)$ ，当 $kl/2 = \pi/2$ 时获得最大程度的声衰减；当 $kl/2 = \pi$ 时衰减效果最差。

(c) Chelsea 偶极系统 与前两种吸声器的

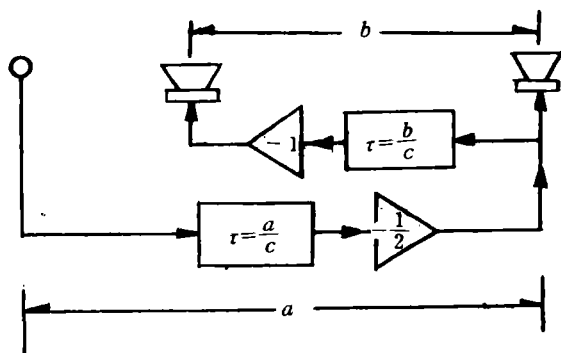


图 11 Swinbanks 衰减器原理图

应用声学

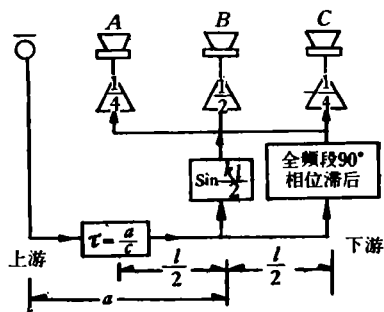


图 12 Jessel 吸声器

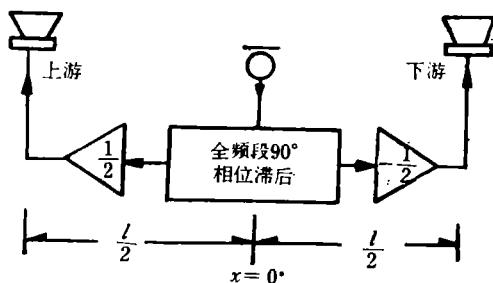


图 13 Chelsea 偶极系统

区别在于把传声器置于两只扬声器之间，从而在传声器附近实现声衰减(图 13)。偶极次声源向上游和向下游辐射的声场是反相的，且与驱动信号的相位相差 90°。系统的频率响应也是 $H = \sin(kl/2)$ ，当 $kl/2 = \pi/2$ 时获得最大程度的声衰减。

2 柴油机排气噪声与同步噪声抵消

“Essex 有源抵消系统”用于柴油机排气噪声与机器同步噪声的抵消相当成功。控制系统原理图示于图 14。转速传感器将信息输入微处理器，产生自适应抵消声波，在几秒钟之内，即将排气噪声完全抵消。自适应过程见图 15。在 60Hz 附近可衰减 20dB。该系统的特点是：凡与柴油机同步的噪声均可被抵消，其他声音(如交通噪声、安全声信息等)则不在抵消之列。

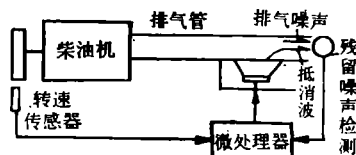


图 14 Essex 有源抵消系统控制原理图

故尤其适用于车辆、地下工程以及隧道用大功率柴油机的消声。Essex 大学已将此系统成功地用于六千马力 ($441.3 \times 10^4 \text{W}$) 的‘圣奥兰’号轮船上。这种系统还可进一步推广应用于座舱或驾驶室内部的局部空间消声。

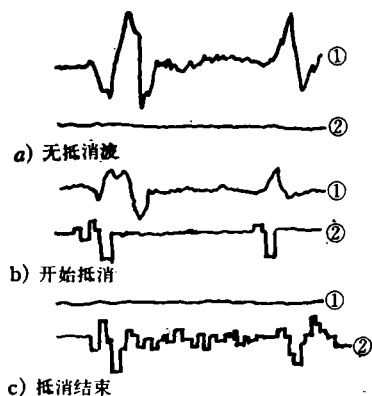


图 15 抵消过程

3. 空间有源消声

三维空间有源消声的理论模型已在文献[14]中论述。尽管如此,在工程实践中仍有许多具体技术问题难以解决。不过,近来由于控制论、数字信号处理技术和微电子器件不断引入有源控制系统,使空间有源消声技术向实用化的进展加快了步伐。例如,由 NRDC(英国国家科学开发委员会)资助的一项有源消声项目初获成效。对 Duxford 电站的一台大型压缩机的低频噪声,采用了 72 只扬声器作为次级声源,装设在 34 呎 (10.4m) 高的烟囱顶部。用 4 只传声器检测噪声,经延时电路和 12 个放大器推动扬声器组。剑桥大学为一台 15000 马力 (11MW) 的 Rolls-Royce 汽轮机的低频噪声治理,设计了一套有源控制装置,可在 20—50Hz 范围内衰减 15dB。

变压器噪声的有源衰减,因其噪声主要是由电源频率的各次谐波组成,致使问题大为简化,现已接近工程实用水平。下面介绍有代表性的三种方案。

方案 1^[17] 采用三套电路来分别控制噪声中的三个谐波分量 (100、200 和 300

Hz)。每套电路都有幅值和相位控制部分。用两只扬声器作为次级声源。试验曲线如图 16 所示。①处表示有一辆卡车从附近通过,系统适应过程于②处恢复。③处表示控制系统撤出工作。如增加传声器和扬声器数目,可增加有效方位角。取三只扬声器时,方位角可增至 40° 。

方案 2^[16] 采用图 17 所示电路驱动一只扬声器,对距离两台变压器 10m 远的值班室内进行有源消声。当扬声器装于现场的不同位置时,值班室内不同地点的衰减效果也各异。总的来看,100Hz 分量的抵消效果最好,可达 28 dB; 200Hz 和 300Hz 分量的抵消效果较差,在半径为 1m 的区域内只有 10dB。

方案 3^[17] 采用图 18 的电路,可在不同观测方向上获得 20—38dB 的衰减效果 (图 19)。

4. 听力保护器

普通的听力保护器 (如耳塞、耳罩) 对低频噪声的衰减效果甚差,而且是将一切声音都加以衰减。因此,妨碍了对话、通讯以及对安全音响信息的接收。这对于复杂机械的操作者来说十分不利。

英国南安普顿振动与声学研究所试制成适合于喷气飞机驾驶员佩戴的电子消声耳罩 (图 20)。由于设计有电子反馈电路,使得低频响应

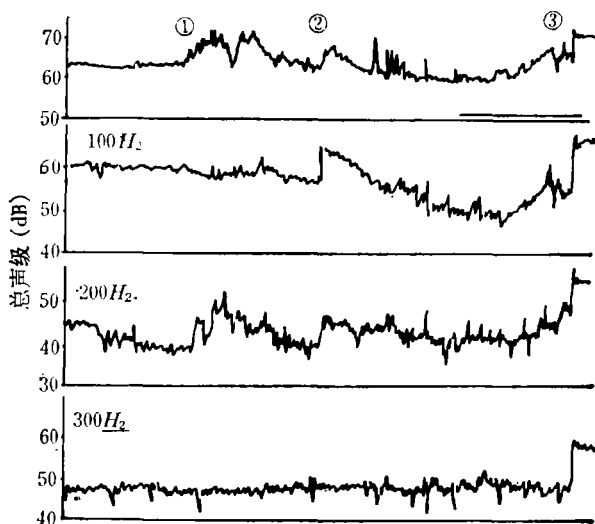


图 16 方案 1 的试验曲线

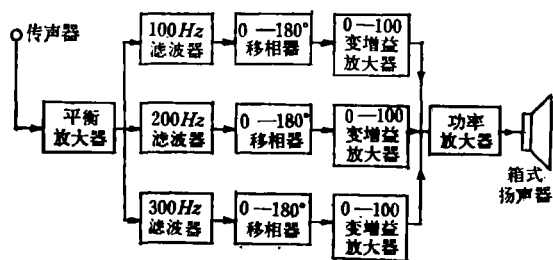


图 17 方案 2 的原理框图

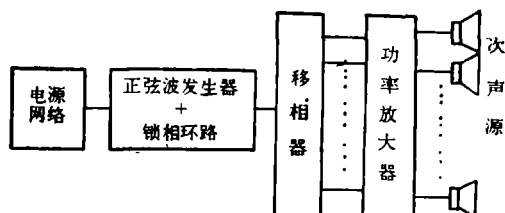


图 18 方案 3 的原理框图

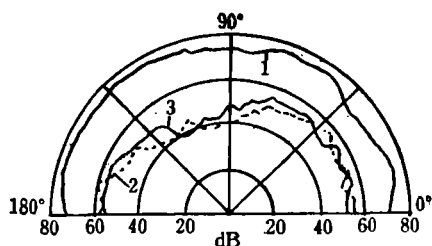


图 19 方案 3 的衰减效果

1. 原噪声值； 2. 计算值； 3. 实测值

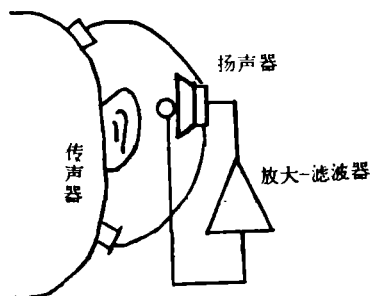


图 20 电子消声耳罩原理图

得以改善。

英国 Essex 大学研制的“选择性有源消声耳罩”(图 21)，只抵消与发动机同步的噪声。适用于由发动机、螺旋桨或旋翼产生的噪声环境中的通讯。其特点是非密闭式、不是衰减一切声音，安全信息等必须听见的声音仍可闻及。对于安全操作(驾驶)颇为有益。

应用声学

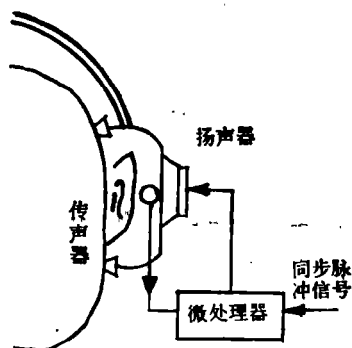


图 21 选择性有源消声耳罩原理示意图

三、结束语

有源消声器已崭露头角，正在逐步形成噪声控制工程中的一个新领域。我国在这方面的研究工作与国外相比差距悬殊。建议给予有源消声(也包括有源减震)的开发工作以足够的重视，俾使这一新技术尽快用于四化建设。

参考文献

- [1] H. F. Olson and E. G. May, *J. Acoust. Soc. Am.*, 25(1953), 1130—1136
- [2] H. F. Olson, *J. Acoust. Soc. Am.*, 28(1956), 966—972.
- [3] W. B. Covoner, *Noise Control*, 2(1956), 78—82 ;92.
- [4] M. Jessel and G. Mangiante, *J. Sound and Vibration*, 23 (1972), 383—390.
- [5] G. Mangiante, *Acoustica*, 36(1976), 287—293.
- [6] G. Mangiante, *Acoustica*, 37(1977), 175—192.
- [7] G. B. B. Chaplin, *Electronic Cancellation of Noise and Vibration*, Wolfson Centre Department EES Essex University.
- [8] C. F. Ross, *J. Sound and Vibration*, 80 (1982), 373—380.
- [9] C. F. Ross, *J. Sound and Vibration*, 80(1982), 381—388.
- [10] J. C. Burgess, *J. Acoust. Soc. Am.*, 70(1981), 715—726.
- [11] 沙家正等, *声学学报*, 3(1981), 137—141.
- [12] Kh. Eghtesadi and H. G. Leventhal, *Acoustics Letters*, 5(1982), 608—611.
- [13] 刘耀儒等, *劳动保护科学技术*, 1(1984), 26—32.
- [14] J. Piraux, *Inter- Noise 80*, 703—706.
- [15] K. Kido, *Inter- Noise 75*, 647—650.
- [16] C. F. Ross, *J. Sound and Vibration*, 61(1978), 473—480.
- [17] N. Hesselmann, *Applied Acoustics*, 11(1978), 27—34.