

# 有源消声耳罩中的通信信号补偿

张 耿 连小珉 刘 锋 蒋孝煜

(清华大学汽车工程系 北京 100084)

1998年11月6日收到

**摘要** 在有源消声耳罩的很多应用场所,耳罩中引入了通信信号,在提高有源消声量的同时,还要保证通信信号的清晰。本文针对有源消声耳罩的不同消声结构,分析了其中通信信号所受到的影响,对于通信信号受影响较大的消声结构,提出了相应的补偿方案,推导了补偿器的理论补偿公式,并且实际设计了消声耳罩和相应的通信信号补偿器,实测了通信信号的补偿效果,就实验结果分析了通信信号补偿方案的有效性。

**关键词**

## Compensation of communication signal in active noise-cancellation earmuffs

Zhang Geng Lian Xiaomin Liu Feng Jiang Xiaoyu

(Automotive Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** In many applications of Active Noise-Cancellation Earmuff(ANCE), communication signal is introduced into the earmuff while the function of active noise cancellation is being realized. Keeping the clarity of communication signal is as important as enhancing the ability of active noise cancellation. This paper will analyze the influence on the communication signal in different types of ANCEs, and then propose a compensation method for the type of ANCE in which the communication signal is affected. A design of the compensator for the communication signal is realized and its compensation effect is tested with the result that the effectiveness of the compensation method is verified.

**Key words**

### 1 引言

传统耳罩的降噪主要是靠耳罩的隔声作用,它在低频段的降噪效果较差。有源消声耳罩将有源消声技术应用于传统耳罩中,利用耳罩主动发出的声音抵消耳罩内残余的低频噪声,从而弥补了传统耳罩在低频段降噪不足

弱点,使耳罩在各频段得到比较均匀的降噪效果。

在有源消声耳罩的很多应用场所,如发动机实验室和飞机、坦克的驾驶舱,耳罩中还引入了通信信号,并且通信信号的清晰度对于工作任务和战斗任务的完成具有十分重要的

意义。这时不仅要求消声耳罩有一定的消声效果，而且要避免其对通信信号清晰度的削弱。

国内外关于有源消声耳罩的研究工作及文献，主要集中于消声耳罩系统模型的描述方法、不同消声结构的对比探讨以及有源消声量的提高。其系统模型有电声类比模型、传递函数模型等，消声结构有前馈式、反馈式和复合式，有源消声效果在 1000Hz 以内的频段上可以达到 15dB 左右。与之相比，有源消声耳罩中引入的通信信号则被研究得较少，仅有一些定性的分析和原理性的补偿方案<sup>[1,2]</sup>。本文的目的就是具体分析有源消声耳罩对通信信号的影响程度，并探讨相应的补偿方法，以提高耳罩中通信信号的信噪比和清晰度。

## 2 有源消声耳罩对通信信号的影响

有源消声耳罩对通信信号的影响与所采用的消声结构有关，常见的消声结构有前馈式、反馈式和复合式，而复合式可以看作是前两种结构的线性迭加，所以下面分别就前馈式结构和反馈式结构分析通信信号所受到的影响。

### 2.1 前馈式消声结构对通信信号的影响

前馈式消声结构的结构简图及其相应的原理框图如图 1 和图 2 所示。图中  $H_{em}$  为耳罩的开环频率特性，它反映了噪声从耳罩外向耳罩内的传递效果； $H_{ep}$  为耳机的频率特性，它反映了耳机在耳罩内发声的电声特性； $H_f$  为前馈控制器的频率特性。

根据图 2 的原理框图进行推导，在前馈控制器作用下，耳罩内部声压的频谱为

$$P_h = (H_{em} + H_{ep}H_f)P_n + H_{ep}P_s \quad (1)$$

前馈控制器不作用时，相当于式(1)中  $H_f=0$ ，此时耳罩内部声压的频谱为：

$$P'_h = H_{em}P_n + H_{ep}P_s \quad (2)$$

式(1)和式(2)所示的耳罩内部声压的频谱中，等式右边含有  $P_n$  的项为噪声成分，含有  $P_s$  的项为通信信号成分。比较前馈控制器作用

前后耳罩内部声压频谱的变化可知，前馈消声只衰减了耳罩内部声压中的噪声成分，对通信信号本身没有影响，即前馈式有源消声结构对通信信号的衰减量为零，对噪声声压的衰减量为

$$\Delta L_f = 20 \lg \left| \frac{H_{em} + H_{ep}H_f}{H_{em}} \right| \text{ (dB)} \quad (3)$$

所以，对于加有通信信号的前馈式消声结构，有源消声在抵消环境噪声的同时提高了通信信号的信噪比，从而也就增加了通信信号的清晰度。因此，在前馈式消声结构中，没有必要对通信信号进行补偿。

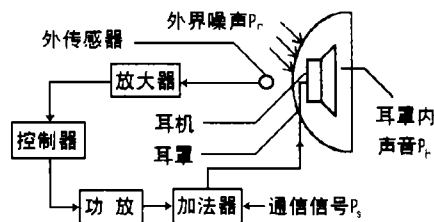


图 1 前馈式消声结构的结构简图

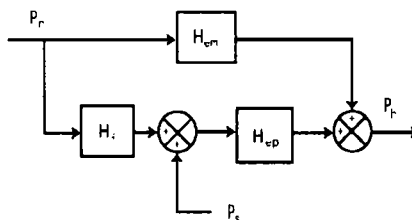


图 2 前馈式消声结构的原理框图

### 2.2 反馈式消声结构对通信信号的影响

反馈式消声结构的结构简图及其相应的原理框图如图 3 和图 4 所示，通信信号简单地在功放前面加入。图 4 中， $H_b$  为反馈控制器的频率特性，其它符号的意义与图 2 中相同。

根据图 4 的原理框图进行推导，在反馈控制器作用下，耳罩内部声压的频谱为：

$$P_h = \frac{H_{em}}{1 + H_{ep}H_b} P_n + \frac{H_{ep}}{1 + H_{ep}H_b} P_s \quad (4)$$

反馈控制器不作用时,相当于式(4)中  $H_b=0$ , 此时耳罩内部声压的频谱为:

$$P'_h = H_{em}P_n + H_{ep}P_s \quad (5)$$

比较反馈控制器作用前后耳罩内部声压频谱的变化可知,反馈消声控制器  $H_b$  对耳罩内部声压中的噪声成分进行衰减的同时,也使通信信号成分产生相同程度的衰减。反馈式消声结构对噪声声压和通信信号的衰减量为:

$$\Delta L_b = \Delta L_s = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + H_{ep}H_b} \right| \text{ (dB)} \quad (6)$$

其中,  $\Delta L_b$  和  $\Delta L_s$  分别为噪声衰减量和通信信号衰减量。也就是说,在反馈式消声结构中,反馈控制器对噪声声压的衰减程度越大,对通信信号的削弱也就越大,通信信号并没有因为噪声的衰减得到信噪比的提高。因此,在反馈式消声结构中,为了提高通信信号的信噪比和清晰度,需要对通信信号进行补偿。

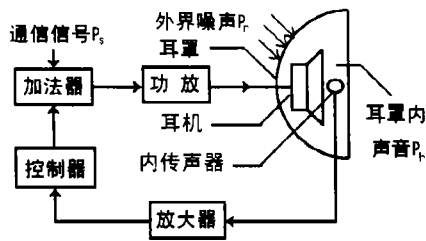


图3 反馈式消声结构的结构简图

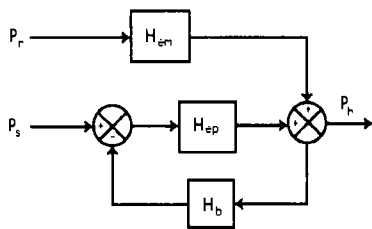


图4 反馈式消声结构的原理框图

### 3 通信信号的补偿方案

由前面的分析可知,有源消声技术在消除环境噪声的同时,有时会使通信信号受到了影响,所以有必要对通信信号进行补偿。前馈式消声结构对通信信号没有影响,所以下面的补偿方案是针对反馈式消声结构的补偿方案。

带通信信号补偿器的反馈式消声耳罩的原理框图如图5所示。图5中  $H_s$  为通信信号补偿器的频率特性,其它符号的意义与图2和图4中相同。

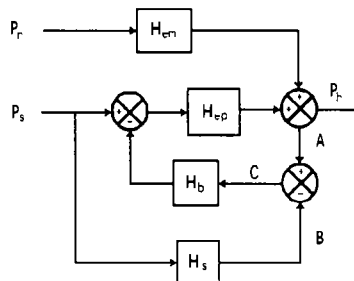


图5 带通信信号补偿器的反馈式消声耳罩原理框图

在反馈消声控制器和补偿器同时作用下,耳罩内部声压的频谱为:

$$P_h = \frac{H_{em}}{1 + H_{ep}H_b} P_n + \frac{1 + H_b H_s}{1 + H_{ep}H_b} H_{ep} P_s \quad (7)$$

补偿器的补偿目标是使式(7)右边的通信信号成分(含  $P_s$  的项)还原到式(5)中的水平,即不受反馈控制器影响的程度。比较式(5)和式(7),补偿器的设计目标应为

$$H_s \rightarrow H_{ep} \quad (8)$$

从信号流来分析这个问题,图5中A处信号为内传声器(见图3)拾取到的耳罩内部的声压信号,其中既有噪声信号成分,也有通信信号成分;B处信号为通信信号补偿器提供的补偿信号;C处信号为反馈控制器的控制参考信号。没有通信信号补偿器时,C处信号与A处信号相同,也就是说,反馈控制器直接以内传声器拾取的信号作为控制参考信号。所以,反馈控制器对噪声信号和通信信号均进行了衰减。加上通信信号补偿器,并且使  $H_s \rightarrow H_{ep}$  时,B处的补偿信号与A处信号中的通信信号

成分正好相同, 经过加法器作用之后, C 处的控制参考信号只包含了噪声信号成分。这样, 反馈控制信号只起到抵消噪声成分的作用, 对通信信号成分没有削弱。

从本质上讲, 这种通信信号补偿方案是一种前馈补偿方案, 它用通信信号补偿器模拟了通信信号经过耳机、耳罩内部声场和传声器的传递过程, 使得内传声器拾取信号中的通信信号成分被补偿信号所抵消, 避免了消声的同时对通信信号的削弱。当噪声信号被衰减, 而通信信号保持不变时, 通信信号的信噪比得到提高, 其清晰度也就提高了。

#### 4 实验结果及分析

根据上面的补偿方案, 选择 SONY MDR-85 耳机实际设计了反馈式有源消声耳罩及相应的通信信号补偿器。先测出系统特性  $H_{em}$  和  $H_{ep}$ , 然后根据式 (6) 以  $\text{Max}|\Delta L_b|$  为目标设计反馈控制器  $H_b^{[3]}$ , 用实际电路实现该反馈控制器  $^{[4]}$ , 得到的实测消声效果如图 6 所示。

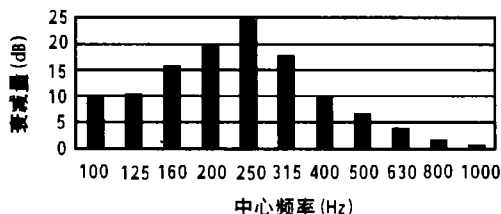


图 6 反馈控制器实测消声效果

通讯信号补偿器的参数设计和电路实现可以借鉴消声控制器的设计和实现方法  $^{[3,4]}$ , 只是设计目标有所差异。根据式 (8), 应当以  $\text{Min}|H_s - H_{ep}|$  为目标设计通信信号补偿器  $H_s$ 。通讯信号补偿器的实现结果如图 7 和图 8 所示, 其中曲线 1 为  $H_{ep}$  的测试结果, 曲线 2 为  $H_s$  的实现结果。由图可见, 在 100-1000Hz 范围内,  $H_s$  和  $H_{ep}$  比较接近, 而在此频率范围之外,  $H_s$  和  $H_{ep}$  相差较大。这主要是因为  $H_{ep}$  是实测得到的特性, 而  $H_s$  是有限阶次的实现结果 (图 7 和图 8 中为二阶实现结果),

所以两者不可能完全一致。考虑到反馈控制器消声频段和相应的通讯信号衰减频段都集中在 100-1000Hz, 通讯信号补偿器设计中主要关心 100-1000Hz 频段上  $H_s$  和  $H_{ep}$  的接近程度, 所以图 7 和图 8 中的实现结果已经可以接受。

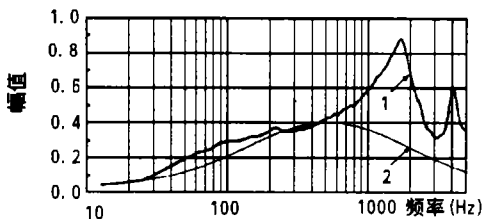


图 7  $H_{ep}$  和  $H_s$  的幅频特性

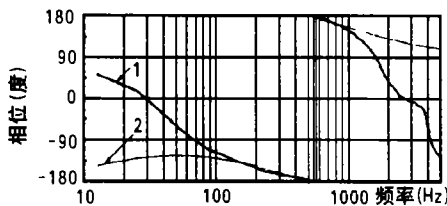


图 8  $H_{ep}$  和  $H_s$  的相频特性

在没有外界噪声的情况下 (图 5 中  $P_n=0$ ), 从  $P_s$  处引入白噪声信号, 测量通信信号的衰减量。断开通信信号补偿器, 比较反馈控制器作用前后, 耳罩内部声压频谱  $P_h$  的大小, 即可得到补偿前通信信号的衰减量。然后接上通信信号补偿器, 再次比较反馈控制器作用前后, 耳罩内部声压频谱  $P_h$  的大小, 即可得到补偿后通信信号的衰减量。实际测量结果如图 9 所示。

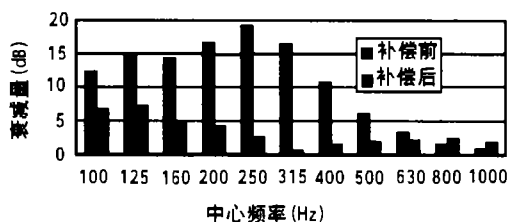


图 9 引入白噪声时的通信信号衰减量

将处引入的白噪声信号换成一段音乐信号, 重复上面的实验, 比较补偿前后的通信信

号衰减量, 实际测量结果如图 10 所示。

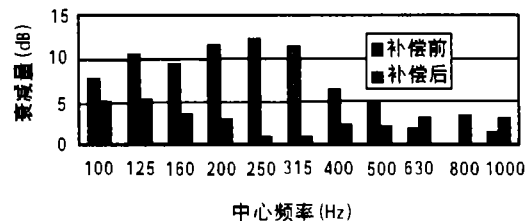


图 10 引入音乐信号时的通信信号衰减量

由图 9 和图 10 中的通信信号衰减量结果可知, 不加补偿时, 引入的通信信号受到较大程度的衰减, 并且其衰减效果与前面的理论分析结果一致, 即在噪声声压衰减程度越大的频段上, 通信信号的削弱也越大。所以, 反馈消声不能使通信信号的信噪比提高。加入补偿器后, 对引入的白噪声信号和音乐信号都取得了很好的补偿效果, 通信信号在各频段的受影响程度都被控制在 8dB 以内。特别是在环境噪声衰减量最大的 250Hz 处, 补偿前的通信信号衰减量分别为 19dB 和 13dB, 补偿后通信信号

衰减量均减小为 3dB 左右。

## 5 结论

有源消声耳罩的反馈消声结构在消除环境噪声的同时, 会严重削弱耳罩中引入的通信信号。通过理论分析和实际实验证明, 本文提出的前馈型通信信号补偿方案是一种行之有效的补偿方案, 对于具有反馈消声结构的有源消声耳罩中所引入的通信信号取得了较好的补偿效果。使通信信号的信噪比得到大幅度提高, 保证了在有源消声耳罩中实现清晰通信。

## 参 考 文 献

- 1 田静, 李明锋, 潘杰等. 电声技术, 1997, (4): 30-32.
- 2 Volker Bartels. *J.Audio Engineering Soc.*, 1992, 40 (4): 277-281.
- 3 张耿, 连小珉, 朱彦武等. 清华大学学报, 1998, 38(8): 92-95.
- 4 张耿, 连小珉, 朱彦武等. 应用声学, 1999, 18(2): 11-15.

(上接第 27 页)

(6) 当斜口管应用于降低空气锤进排气噪声的消声器内时是很有效的, 它可很明显提高高频降噪性能。但当消声器内已布置了较大面积的吸声材料时, 斜口管使高频的降噪性能改善甚微。

(7) 当采用两级扩张室和斜口管串联的消声器时, 可不必在第一级扩张室内设置吸声材料, 这样不但简化了结构, 同时还可提高降噪性能。

(8) 本文所研制的消声器可使空气锤进排气噪声由原来的 104dB(A), 降低到 78dB(A), 降噪量可达 26dB(A)。达到了噪声为 85dB(A) 及其以下的国标要求, 降噪效果显著。

(9) 在将基本滤波单元及其组合应用于空气锤进排气噪声控制时, 其降噪性能都要下降。减小消声器内紊流现象, 增大消声器件阻力和刚性的所有措施均可使降噪性能得到改善。

## 参 考 文 献

- 1 高乃光. 锻锤. 北京: 机械工业出版社, 1987, 1-3.
- 2 赵升吨, 刘浩, 张凤阁等. 锻压机械, 1996, 31(4): 10-12.
- 3 赵升吨, 高红娟, 史维祥. 声学技术, 1997, 16(2): 83-89.
- 4 赵涛. 周期性进排气噪声研究与消声器. 西安: 西安交通大学硕士学位论文, 1996, 20-22, 34-35.
- 5 马大猷. 噪声控制学. 北京: 科学出版社, 1987, 75-78.
- 6 方丹群, 王文奇, 孙家麒. 噪声控制. 北京: 北京出版社, 1986, 669-673.