

有源消声耳罩控制器的实现

张 耿 连小珉 朱彦武 蒋孝煜

(清华大学汽车工程系 北京 100084)

1998 年 6 月 29 日收到

摘要 本文用传递函数描述了复合式有源消声耳罩的系统模型, 确定了模拟式消声控制器的合理阶次。对于前馈控制器和反馈控制器, 均给出了成熟的电路实现方案。最后, 实际设计了复合式有源消声耳罩, 并实测了控制器特性和消声效果, 验证了本文提出的控制器实现方法的有效性。

关键词 有源消声, 耳罩, 控制器

Implementation of the controller for a compound active noise-cancellation earmuff

Zhang Geng Lian Xiaomin Zhu Yanwu Jiang Xiaoyu

(Automotive Department of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A system model of a compound active noise-cancellation earmuff(CANCE) is described by means of transfer function, and the optimal order of the controllers is discussed. Practical circuits are given to implement both the feedforward controller and the feedback controller. A practical CANCE is fabricated, and the noise cancellation effect is tested, so that the effectiveness of the implementation method is verified.

Key words Active noise-cancellation, Earmuffs, Controller

1 引言

传统耳罩的降噪主要靠耳罩的隔声作用, 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, 利用耳机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的弱点, 使耳罩在各频段得到比较均匀的降噪效果。

有源消声耳罩的研究包括几个方面: 系统模型的描述、控制器参数设计以及控制器的实现方法。国外对有源消声耳罩的研究已经比较

完善, 目前已有成熟的产品出售。国内在这一领域尚处于理论研究阶段。发表的文章主要集中在探讨消声耳罩的系统模型和控制器参数设计^[1,2], 关于控制器实现方法的文章并不多见。而消声控制器的实现方法是有源消声耳罩走向实用化和产品化必须解决的问题。

清华大学汽车工程系振动与噪声控制课题组在有源消声耳罩研究上取得了一定成果, 提出了已获得国家专利的复合式有源消声耳罩结构^[3], 探讨了控制器参数的优化设计方法^[4]。本文则主要探讨有源消声控制器的实际实现方

法，以解决有源消声耳罩实用化道路上的最后障碍。

有源消声控制器有模拟式和数字式两大类，其中模拟式控制器因其体积小和成本低的特点，更具有实用性，所以本文针对的是模拟式控制器的实现方法。

2 复合式有源消声耳罩系统及其控制器

运用传递函数的分析方法，复合式有源消声耳罩的系统框图如图 1 所示。图中， H_{em} 为耳罩的频率特性函数，它反映了噪声从耳罩外部到耳罩内部的传递特性； H_{ep} 为耳机的频率特性函数，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函数； H_b 为反馈控制器的频率特性函数； P_n 为耳罩外部噪声声压； P_h 为耳罩内部所听见声音的声压。

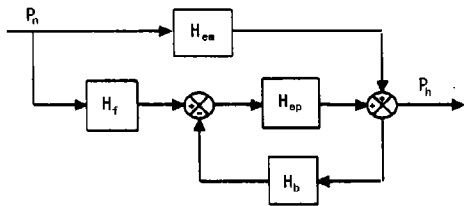


图 1 复合式有源消声耳罩的原理框图

根据图 1 的原理框图进行推导，得到复合式有源消声耳罩中的有源消声效果为：

$$\Delta L_f = 20 \log \left| \frac{H_{em} + H_{ep} H_f}{H_{em}} \right| \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$\Delta L_b = 20 \log \left| \frac{1}{1 + H_{ep} H_b} \right| \text{ (dB)} \quad (2)$$

其中， ΔL_f 为前馈控制器的噪声衰减量， ΔL_b 为反馈控制器的噪声衰减量。

当耳机和传声器在耳罩内安装好之后，耳罩特性 H_{em} 和耳机特性 h_{ep} 即已确定。由式 (1) 和式 (2) 可知， ΔL_f 和 ΔL_b 的数值取决于前馈控制器 H_f 和反馈控制器 H_b 。为了使噪声衰减量尽可能大，前馈控制器的设计目标

应为：

$$H_f \rightarrow -H_{em}/H_{ep} \quad (3)$$

反馈控制器的设计目标应为：在保证稳定性的前提下，使 $|1 + H_{ep} H_b|$ 尽可能大。

设计消声控制器时，首先需要确定合理的控制器阶数。从消声效果考虑，控制器阶数应当尽可能高，因为控制器阶数越高，能够实现特性越复杂，消声效果就会越好；但从有源消声耳罩的实用化考虑，控制器阶数应当尽可能低，因为控制器阶数越低，相应的电路体积就会越小。所以，控制器阶数的选择要综合考虑消声效果和电路体积两个因素。

从大量的设计实例中发现，二阶消声控制器是一种比较合适的方案。用二阶开环控制器和二阶闭环控制器，在 SONY MDR - 84 耳罩上得到了很好的消声效果，在 50-2000Hz 范围内有源消声量大于 15dB，在 150Hz 附近窄带消声量达到 35dB。这样的消声效果已经达到了国际文献报导的先进水平。对于更高阶次的控制器，其消声效果的改善并不明显，而控制器的体积明显增大。所以，用模拟电路实现消声控制器时，最好采用二阶控制器。

3 控制器的电路实现

3.1 前馈控制器电路

二阶前馈控制器传递函数的一般型式可以表示为

$$H_f(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

式中 b_2 ， b_1 ， b_0 ， a_1 ， a_0 为实系数。以 $\text{Min}(\Delta L_f)$ 为目标对前馈控制器参数进行优化设计。优化得到的参数中的 b_2 值往往很小，即使限定 $b_2=0$ ，对消声效果影响也不大，并且 a_1 和 a_0 往往满足 $a_1^2 - 4a_0 > 0$ ，所以二阶开环控制器可以分解为两个一阶环节

$$H_f(s) = \frac{1}{s + \omega_1} \times \frac{b_1 s + b_0}{s + \omega_0} \quad (5)$$

上面的优化设计结果可以作如下的定性解释：耳罩过滤噪声时相当于一个低通滤波器，它

对高频噪声有很好的衰减效果, 所以 H_{em} 在高频段的幅值很小; 而好的耳机的幅频特性是很平直的, 虽然耳机在耳罩中发声时受到耳罩特性的一些影响, 它在高频段仍应有很好的发声能力, 所以 H_{ep} 在高频段的幅值仍然很大。由式 (3) 所示的前馈控制器设计目标可以看出, H_f 在高频段的幅值必然很小, 甚至趋向于零。也就是说, 优化得出的前馈控制器的极点数应当大于零点数。当限定前馈控制器为二阶控制器时, 优化得到的结果必然是双极点、单零点的控制器。

这种结果给前馈控制器的电路实现带来了方便, 用两个一阶环节串联实现的二阶控制器比双二次特性的二阶控制器要简单得多。可以用图 2 所示电路实现二阶前馈控制器。

当 $b_1 > b_0$ 时, 选用电路型式 A; 当 $b_1 < b_0$ 时, 选用电路型式 B。这些电路的传递特性很容易推导, 相应的电路参数设计也很简单, 此处不再详述。

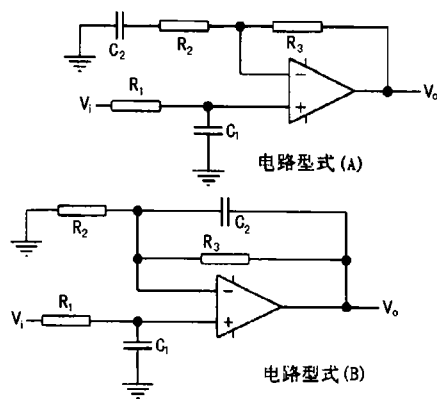


图 2 二阶前馈控制器电路

3.2 反馈控制器电路及其设计方程

二阶反馈控制器传递函数的一般型式为:

$$H_b(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

式中 b_2 , b_1 , b_0 , a_1 , a_0 为实系数。以 $\text{Min}(\Delta L_b)$ 为目标对反馈控制器参数进行优化设计。优化得到的参数不具有前馈控制器那样的特点, 不能分解为两个一阶环节。也就是应用声学

说, 二阶反馈控制器必须是双极点、双零点的二阶控制器。

反馈控制器的优化结果可作如下的定性解释: 二阶反馈控制器相当于一个二阶反馈滤波器, 但它与通常的滤波器又有所不同。通常的滤波器只要求通带和阻带效果, 而二阶反馈控制器为了保证系统的稳定性, 同时实现尽可能大的消声效果, 要求其幅频特性和相频特性比较复杂。优化过程中不可能出现前馈控制器那样的零点退化现象, 限定控制器阶数为二阶时, 必然得到双零点、双极点的控制器。

随着复合式有源消声耳罩选用的耳机、耳罩和传声器的不同, 测得的耳罩特性 H_{em} 和耳机特性 H_{ep} 也不同, 相应的消声控制器特性的变化范围很大。所以选择二阶反馈控制器电路时, 要求它能实现尽可能广的双二次特性。实际选用的电路型式如图 3 所示。电路中有两个选择开关 S_1 和 S_2 , 根据控制器参数的不同, S_1 和 S_2 的选择也不同。

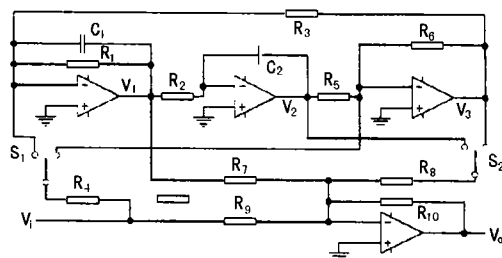


图 3 二阶反馈控制器电路

A: S_1 左, S_2 左 B: S_1 左, S_2 右
C: S_1 右, S_2 左 D: S_1 右, S_2 右

定义两个判据 DA 、 DB :

$$DA = b_2 a_1 - b_1$$

$$DB = b_2 a_0 - b_0$$

$DA > 0$, $DB < 0$; $DA > 0$, $DB = 0$; $DA < 0$, $DB = 0$; $DA < 0$, $DB < 0$ 时, 分别对应图 3 中 A、B、C、D 四种情况。

由于电路中有 10 个电阻和 2 个电容, 相当

于12个变量,而控制器参数只有5个,所以,电路参数的确定相当于求解不定方程,电路的实现方式可以有很多种。电路参数选择不当时,也会出现一些问题:中间运放处的信号超载会使实测特性与理论特性不符;中间运放处信号太小又会使干扰信号变得明显,导致输出信号与输入信号之间相关性太差。所以,设计电路参数时主要要注意中间运放的放大倍数。

以情况D为例,分析图3中前三级运放的输出,可以得到:

$$V_1 = \frac{R_1 R_6}{R_3 R_4} \times \frac{a_1 s}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (7)$$

$$V_2 = -\frac{R_5}{R_4} \times \frac{a_0}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (8)$$

$$V_3 = -\frac{R_6}{R_4} \times \frac{s^2 + a_1 s}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (9)$$

实际采用的设计方程如下:

$$\begin{aligned} R_{10} &= R_0 & C_1 &= C_2 = C_0 \\ R_1 &= \frac{1}{a_1 C_1} & R_4 &= \frac{R_1}{K_1} \\ R_5 &= K_2 R_4 & R_6 &= K_3 R_4 \\ R_2 &= \frac{1}{R_5 a_0 C_1 C_2} & R_3 &= R_6 \\ R_7 &= \frac{R_{10}}{R_4 C_1 |b_2 a_1 - b_2|} & R_9 &= R_{10} a_0 / b_0 \\ R_8 &= \frac{R_6 R_{10}}{R_2 R_4 R_5 C_1 C_2 |b_2 a_0 - b_0|} \end{aligned}$$

对于情况C, R_8 改为

$$R_8 = \frac{R_{10}}{R_2 R_4 C_1 C_2 |b_2 a_0 - b_0|}$$

对于情况A, B, C, R_9 改为

$$R_9 = R_{10} / b_2$$

将设计方程代入式(7)、(8)、(9)中,可以得到:

$$V_1 = K_1 \frac{a_1 s}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (10)$$

$$V_2 = -K_2 \frac{a_0}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (11)$$

$$V_3 = -K_3 \frac{s^2 + a_1 s}{s^2 + a_1 s + a_0} V_{in} \quad (12)$$

由式(10)、(11)、(12)可以看出,中间运放的输出 V_1 、 V_2 、 V_3 可以通过常数 K_1 、

K_2 和 K_3 的选择得到控制。所采用的设计方程可以很方便地控制中间运放的放大倍数。

对于A、B、C三种情况,中间运放的输出同样可以通过设计方程中的常数 K_1 、 K_2 和 K_3 进行调节,此处不再详述。

4 控制器设计实例

选用 SONY MDR-85 耳机和松下驻极体传声器设计了复合式有源消声耳罩。先测出耳罩特性 H_{em} 和耳机特性 H_{ep} , 然后根据式(1)和式(2),以 $\text{Max}|\Delta L_f|$ 和 $\text{Max}|\Delta L_b|$ 为目标,对二阶前馈控制器和二阶反馈控制器参数进行优化设计,最后用图2和图3所示的电路实现控制器,并实测控制器频率特性及其相应的消声效果,结果如图4到图9所示。

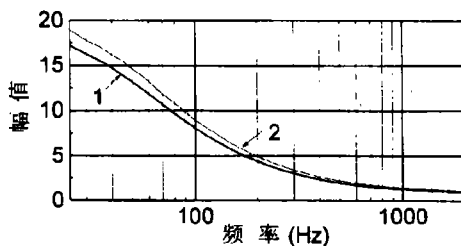


图4 二阶前馈控制器幅频特性

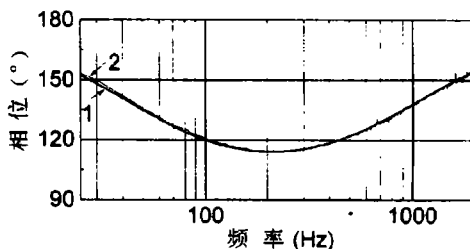


图5 二阶前馈控制器相频特性

图4到图9中,曲线1为理论控制器特性和理论消声效果,曲线2为实测控制器特性和实测消声效果。比较图4、图5、图7和图8中的曲线1和曲线2,可以看出,两条曲线吻合得很好,说明图2和图3的电路准确地实现了所要求的二阶前馈控制器特性和二阶反馈控制器特性。

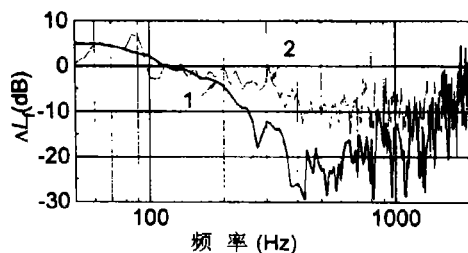


图 6 二阶前馈控制器消声效果

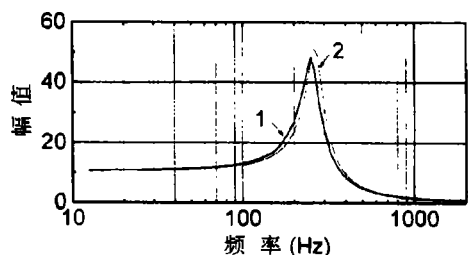


图 7 二阶反馈控制器幅频特性

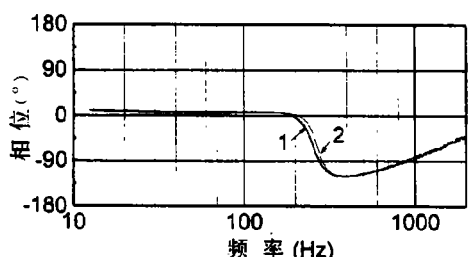


图 8 二阶反馈控制器相频特性

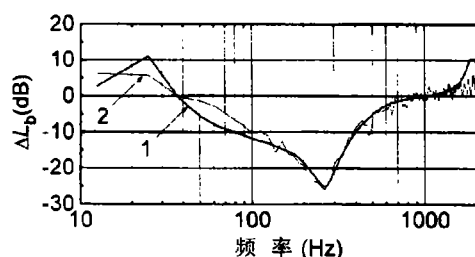


图 9 二阶反馈控制器消声效果

图 9 中, 反馈控制器的实测消声效果与理

论值吻合得较好, 而图 6 中前馈控制器的实测消声效果与理论值偏差较大。这是因为在不同人员佩戴耳罩时, 或者在同一人员的两次佩戴之间, 测得的耳机特性 H_{ep} 比较稳定, 而耳罩特性 H_{em} 变动较大。由式 (1) 和式 (2) 可知, 反馈消声效果只与耳机特性 H_{ep} 有关, 而前馈消声效果与耳罩特性 H_{em} 和耳机特性 H_{ep} 都有关系。所以, 实测的反馈消声效果比较稳定, 并且与理论值吻合得很好; 而实测的前馈消声效果变化较大, 并且与理论值有较大偏差。

比较前馈控制器消声效果和反馈控制器的消声效果还可看出, 反馈控制器消声效果集中在 250Hz 附近频段上, 而前馈控制器的消声效果集中在 300Hz 到 1000Hz 频段上, 二者的消声效果正好起到互相补充的作用。这也正是复合式有源消声耳罩的优点所在。

5 结论

复合式有源消声耳罩结构是一种比较合理的消声结构, 其前馈控制器和反馈控制器的消声效果具有互补作用。用模拟电路实现消声控制器时, 二阶控制器是比较合理的方案。本文给出的电路准确地实现了二阶前馈控制器和二阶反馈控制器特性, 取得了较好的消声效果。

参 考 文 献

- 1 田静, 沙家正, 李宁荣. 声学学报, 1991, 16(2): 122-127.
- 2 沈峰, 韩秀琴. 电声技术, 1993, (7): 2-6.
- 3 朱彦武, 连小珉, 蒋孝煜等. 声学学报, 1996, 21(2): 123-127.
- 4 张耿, 连小珉, 朱彦武等. 清华大学学报, 1998, 38(8): 92-95.