

有源头靠系统中次级声源和控制 电路的参数优化研究*

祖峰磊 吴 鸣 邱小军†

(近代声学教育部重点实验室 南京大学声学研究所 南京 210093)

摘要 在有源头靠系统中, 针对次级声源和控制电路两部分对模拟反馈有源控制系统(ANC)参数进行优化。为了达到更好的噪声抑制效果, 次级声源的有效辐射频带应和待控制噪声的主要频谱相近, 在使用电动扬声器作为次级声源时, 其谐振频率应在要控制噪声频谱的下端。在优化控制电路参数时, 根据经典控制理论提出合适的目标函数, 通过差分演化算法进行优化。在有源头靠系统中, 可通过适当调整两通道间距离, 或将两通道间耦合纳入参数优化算法中, 以保证系统稳定性和抑制“水床效应”的影响。模拟和实验表明两种方法各有利弊。在实际应用中需根据不同需要采用不同的优化方法。

关键词 模拟反馈, 差分演化, 水床效应

Parameter optimization of secondary loudspeakers and compensators in active headrest

ZU Feng-Lei WU Ming QIU Xiao-Jun

(Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract In application of active headrest, parameters of the secondary loudspeakers and compensators of analog feedback control systems should be chosen suitably. The effective radiation frequency of the secondary loudspeaker should be designed near the main frequency of the noise. If an electro-dynamic loudspeaker is used as the secondary loudspeaker, its resonant frequency should be designed near the lower end of the main frequency band of the noise. For the compensator optimization, the cost functions based on the classical control theory could be minimized by the differential evolution algorithm to obtain the best frequency response of the compensator. In the active headrest system, either tuning the distance between the two channels or counting the coupling affect into the cost functions should be performed to ensure the stability of the system and to restrict the waterbed effect. The results of simulation and experiment show that way to be chosen depends on the different situations of practical applications.

Key words Analog feedback, Differential evolution, Waterbed effect

2007-12-3 收稿; 2008-5-19 定稿

*国家自然科学基金资助项目(10604030 和 10674068)

作者简介:祖峰磊(1982-), 男, 江西景德镇人, 硕士研究生, 研究方向: 噪声控制。

吴鸣(1982-), 男, 博士后。

邱小军(1968-), 男, 教授, 博士生导师。

†通讯作者:邱小军, E-mail:xjqiu@nju.edu.cn

1 引言

在设计头靠式有源噪声控制系统时, 基于模拟电路设计的反馈控制系统由单路或多路反馈回路构成, 每一路回路都由误差传声器, 次级声源和模拟控制电路组成。与数字反馈/前馈式有源噪声控制系统相比, 模拟反馈式有源噪声控制系统成本较低, 易于推广使用。

模拟有源控制系统中, 次级通道传递函数优化可以通过改变次级声源本身频响来完成, 也可以通过改变次级声源到误差传声器的声传播路径来完成。对于已系统优化了控制源和误差传声器位置的有源控制系统, 次级通道传递函数的进一步优化可通过设计合适的次级声源来完成。已有的研究一般假设次级声源是理想的频率响应平直的扬声器, 本文将探讨能否优化次级声源的频率响应特性使其在所要求频段有更好的降噪性能。

对模拟控制电路传递函数优化方法已有大量研究^[1-2]。一般思路是先构造一个和系统降噪性能有关的目标函数, 然后通过优化目标函数得到模拟控制电路的各个参数。例如, Bai 等 1997 年提出 H_∞ 控制理论^[1], Bao 等同年提出直接采用模拟电路求控制器传递函数的方法^[2]等。本文尝试通过经典控制理论中的补偿滤波器原理, 以电路中的电阻、电容值直接作为控制器参数进行优化, 以保证所设计控制器的物理可实现性。为获得参数的最优值, 本文提出使用差分演化算法, 该算法在其它领域被证明对大多数测试情况有较好的收敛特性^[3]。

2 反馈有源控制系统

反馈式有源噪声控制系统如图 1 所示^[4]。

其中 $G(s)$ 是反馈控制电路的传递函数, K 是放大器增益, $C(s)$ 是次级通道传递函数, $u(t)$ 是控制信号, $d(t)$ 是外部噪声, $e(t)$ 是在误差传声器处外部噪声和控制声叠加得到的输出信号。控制后误差传声器处噪声信号为:

$$E(s) = \frac{D(s)}{1 - KG(s)C(s)} \quad (1)$$

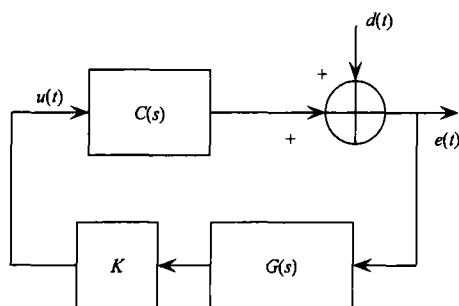


图1 反馈控制的有源噪声控制系统原理框图

假设外部噪声信号的功率谱密度为 $S_{dd}(\omega)$, 由式(1)可知控制后误差传声器处噪声信号功率谱密度为:

$$S_{ee}(\omega) = \frac{S_{dd}(\omega)}{|1 - KG(j\omega)C(j\omega)|^2} \quad (2)$$

由式(2)可知, 如果反馈环增益 $|1 - KG(j\omega)C(j\omega)| \gg 1$, 控制后误差传声器处噪声信号功率谱密度 $S_{ee}(\omega)$ 就会变得很小, 即噪声被很好地衰减。由上式可知, 反馈环增益越大, 所能取得的噪声衰减量也就越大。但由于系统稳定性的要求, 增益 K 不能无限增大。逐步增大增益 K , 当某个频率点 ω_H 恰好满足下列两个条件^[5]:

$$\angle C(j\omega_H) + \angle G(j\omega_H) = 0 \quad (3)$$

$$K|C(j\omega_H)||G(j\omega_H)| = 1 \quad (4)$$

系统将变得不稳定, 发生自激振荡即啸叫。

3 次级声源的选择

选择合适的次级声源使得有效辐射频带

和要控制噪声的主要频谱相近。由于有源噪声控制系统主要应用在低频，因此主要考虑次级声源在低频时的响应函数。电动扬声器在低频时的响应函数相当于一个二阶高通滤波器，其一般形式为^[6]：

$$C(j\omega)=j\frac{\rho S_D}{2\pi r}A\frac{\omega^2T_c^2}{(j\omega)^2T_c^2+(j\omega)\frac{T_c}{Q_c}+1}e^{-j\omega(r-a_0)}$$

(5)

其中 $\omega_c=1/T_c$ 表示扬声器的谐振频率， Q_c 表示扬声器的品质因数， ρ 是空气密度， S_D 是振膜面积， A 是与扬声器本身固有属性有关的量， r 是扬声器中心位置距场点的距离， a_0 是扬声器振膜的半径。其幅度响应峰值出现在频率点：

$$\omega'=\frac{\omega_c}{\sqrt{1-\frac{1}{2Q_c^2}}}$$

(6)

对于有源噪声控制系统有 $\omega_H \gg \omega'$ ，如果设

$$G(j\omega)=\frac{-r\omega^2+j\omega\{r[2(G_1+G_3)+G_2]-aG_2-2bG_3\}+[rG_2(G_1+G_3)-bG_2G_3]}{-\omega^2+2jG_1\omega+G_1G_2}$$

(8)

计 ω_c 在要控制噪声频谱的下端，调整 Q_c 使得以 ω' 为中心的有效辐射频带与要控制噪声频谱相近，此时幅度响应 $|C(j\omega)|$ 将达到最大，由(2)知反馈环增益将进一步增大，从而有效增加噪声衰减量。

4 模拟反馈控制电路的设计

在有源头靠控制系统中，两路控制器相隔较远，相互耦合影响较小，可以当作两路分离式单通道反馈控制系统来设计。在设计单通道控制器时，由(1)可得灵敏度方程^[7]：

$$S(j\omega)=\frac{E(j\omega)}{D(j\omega)}=\frac{1}{1-KC(j\omega)G(j\omega)}$$

(7)

$C(j\omega)$ 是次级通道传递函数， K 是放大倍数， $G(j\omega)$ 是控制器传递函数，可由二阶模拟电路实现。如图 2 所示^[8]，可由 G_1, G_2, G_3, a, b, r 六个参数确定，见式(8)：

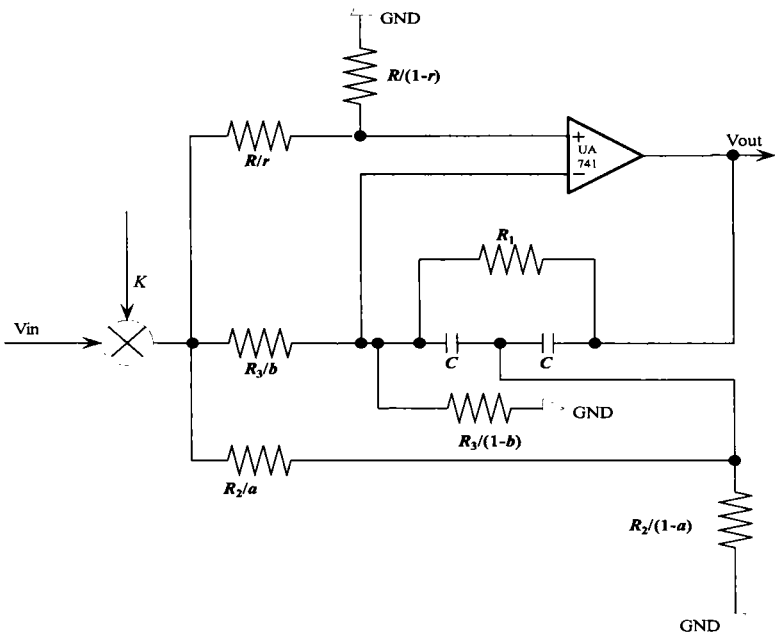


图 2 二阶模拟电路

图中, V_{in} 为输入信号, V_{out} 为输出信号, $R_i = 1/(G_i C)$ ($i=1,2,3$), R 可任取。为了能取得最好的性能, 控制器参数须要根据目标函数进行优化。

4.1 设计模拟控制器参数优化的目标函数

将需要最小化的目标函数分成四个部分^[3]:

4.1.1 与能量相关的目标函数

测量次级通道传递函数 $C(j\omega)$, 根据测量数据、方程(7)和方程(8), 与能量相关的目标函数可写成如下形式:

$$P_1(K, G_1, G_2, G_3, a, b, r) = \sum_{i=1}^N (|S(j\omega_i)|^2 W_i) \quad (9)$$

W_i 是频率选择权重, 可以通过它对较重要的频率点赋予较大的权重。 N 表示要计算的频率点数 (下同)。

4.1.2 与稳定相关的目标函数

与稳定相关的目标函数基于增益裕值和相位裕值的选择。这个选择必须满足系统稳定限制条件, 即系统在适当背离均值时不会导致系统不稳定。这个方程定义如下:

$$P_2(K, G_1, G_2, G_3, a, b, r) = \sum_{i=1}^N f_2(\omega_i) \quad (10)$$

$$f_2(\omega_i) = \begin{cases} 0 & \text{others} \\ 1000 & |\phi(\omega_i)| < \Phi \text{ and } \gamma(\omega_i) > \Upsilon \end{cases} \quad (11)$$

其中 Φ 定义为相位域值, $\phi(\omega_i)$ 是反馈环频响在频率 ω_i 的相位迁移, Υ 定义为幅度域值, $\gamma(\omega_i)$ 是反馈环频响在频率 ω_i 的增益幅值。 Φ 应当为包围 Nyquist 点的扇形区域的相位迁移, 在这样的区域里, $|\phi(\omega_i)|$ 应当小于 Υ 才能保证系统稳定。

4.1.3 与噪声增大相关的目标函数

由于“水床效应”的存在^[5], 在需要噪声衰减的频段内 $S(j\omega) < 1$ 必然导致其它频段 $S(j\omega) > 1$, 这样就必须考虑相应的噪声放大域值,

$$P_3(K, G_1, G_2, G_3, a, b, r) = \sum_{i=1}^N f_3(\omega_i) \quad (12)$$

$$f_3(\omega_i) = \begin{cases} 0 & \text{others} \\ 1000 & |S(j\omega_i)| > T(\omega_i) \end{cases} \quad (13)$$

$T(\omega_i)$ 是设定的噪声放大的最大值^[8]。

4.1.4 与电路参数相关的目标函数

为了使控制器是物理可实现的, 要求 G_1, G_2, G_3, a, b, r 六个参数满足实际可实现性条件。这个限制可表示如下形式:

$$P_4(K, G_1, G_2, G_3, a, b, r) = \begin{cases} 0 & \text{others} \\ 1000 & G_i < 0 \quad i=1,2,3 \\ & \text{or } a < 0 \text{ or } a > 1 \\ & \text{or } b < 0 \text{ or } b > 1 \\ & \text{or } r < 0 \text{ or } r > 1 \end{cases} \quad (14)$$

综上所述: 将四个目标函数表示成统一的形式:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^4 P_i(\mathbf{x}) \quad (15)$$

这里, $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_7]^T$, 其中, $x_1 = K, x_2 = G_1, x_3 = G_2, x_4 = G_3, x_5 = a, x_6 = b, x_7 = r$ 。

为了最小化上述目标函数, 这里推荐使用差分演化算法。该算法是一种并行直接寻找方法, 在其它领域被证明对大多数测试情况有较好的收敛特性^[3]。关于该算法的详细求解过程本文不加赘述, 参见文献[3], 其他寻优算法只要与上述优化问题相适应均可使用。

4.2 考虑通道间耦合影响

为了设计模拟反馈有源头投靠系统, 需要考虑通道间耦合对两路系统的影响。一般情况下, 只需适当调整两路控制系统间距, 就能避免通道间耦合对系统性能的影响。但在某些特殊情况下, 如在两通道间距较小, 耦合强烈时, 须将通道间耦合影响纳入设计目标中去。

多通道误差信号矢量可以表示成如下形式^[9]:

$$\mathbf{E}(s) = [\mathbf{I} - \mathbf{C}(s)\mathbf{K}\mathbf{G}(s)]^{-1} \mathbf{D}(s) \quad (16)$$

其中, $D(s)$ 是干扰信号矢量。 $M \times M$ 矩阵 $[I - C(s)KG(s)]^{-1}$ 是灵敏度方程矩阵, 可以写成如下形式:

$$[I - C(s)KG(s)]^{-1}(s) = \frac{\text{adj}[I - C(s)KG(s)]}{\det[I - C(s)KG(s)]}$$
$$= \frac{\text{adj}[I - C(s)KG(s)]}{1 - \{1 - \det[I - C(s)KG(s)]\}} \quad (17)$$

这里, $\text{adj}[\]$ 表示伴随矩阵, $\det[\]$ 表示矩阵的特征值。

多通道反馈系统的目标函数可以类似于单通道反馈系统的方式来定义。 将方程(9)和(13)中的 $|S(j\omega_i)|$ 用灵敏度方程矩阵 $[I - C(s)KG(s)]^{-1}$ 的范数来代替, 反馈环传递函数用 $1 - \det[I - C(s)KG(s)]$ 来代替即可。

5 数值模拟和实验

5.1 选择合适的次级声源

比较谐振频率分别在 150 Hz 附近和 250 Hz 附近的次级声源的噪声抑制情况。 误差传声器距离次级声源的距离为 5 cm, 模拟反馈控制器用一阶 RC 电路实现。 次级通道传递函数由实测得到, 见图 3。 用差分演化算法优化 $R1$, $R2$ 及增益 K 分别使得两个系统都对 150 Hz 附近噪声衰减量达到最大, 模拟和

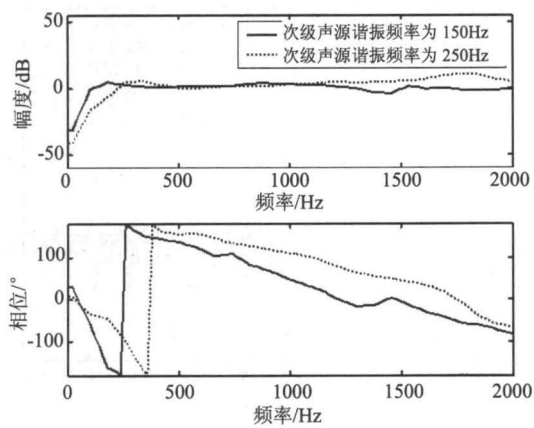


图3 实测的次级通道传递函数

实验的结果见图 4。 从图中可以看出采用谐振频率在 150Hz 附近的次级声源对 150 Hz 以上的噪声有很好的控制效果, 而采用谐振频率在 250 Hz 附近的次级声源对 250 Hz 以上的噪声有很好的控制效果。 对比模拟和实验的结果, 两者趋势基本一致。

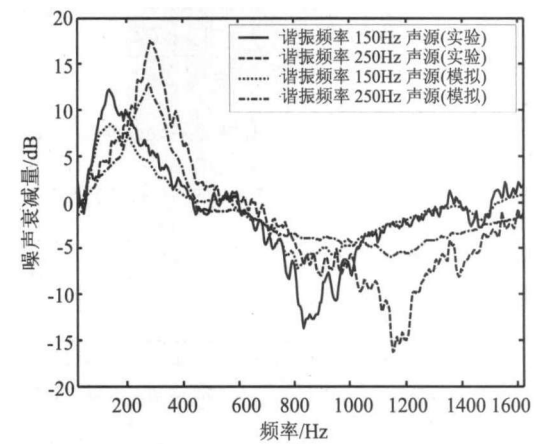


图 4 次级声源选择模拟和实验噪声衰减量比较

5.2 模拟控制电路参数优化

实验中采用两路控制系统, 如图 5 所示。 误差传声器置在高于相应的次级声源 5 cm 处, 两路控制器之间的距离为 22 cm。 两路次级声源和它各自对应误差传声器有相似的冲击响应特性。 次级通道传递函数通过 HP35665A 测得, 如图 6 所示, 其中次级声源 1 到误差传声器 1 的频响与次级声源 2 到误差传声器 2 相似, 次级声源 1 到误差传声器 2 的频响与次级声源 2 到误差传声器 1 相似。 扰动信号选用随机白噪声信号, 通过一个扬声器发出正好在次级声源 2 的右边 50cm 处。 在设计控制器参数目标函数时, 控制频带为 200~400 Hz, 预定义的相位裕值为 $\Phi = 10^\circ$, 增益裕值为 6 dB, 对应的 $\gamma = 0.5$ 。 噪声放大限制为不超过 6 dB, 相应的 $T(\omega) = 2$ 。

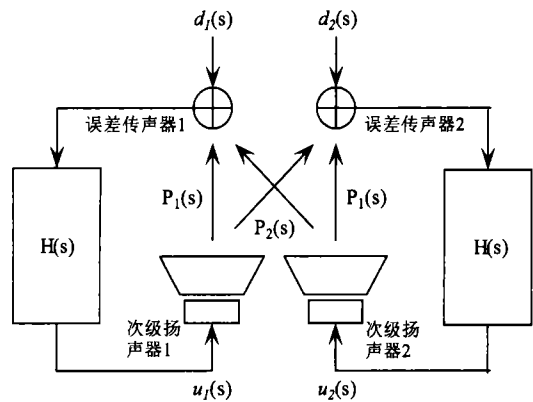


图5 简化的双通道反馈式有源噪声控制系统示意图

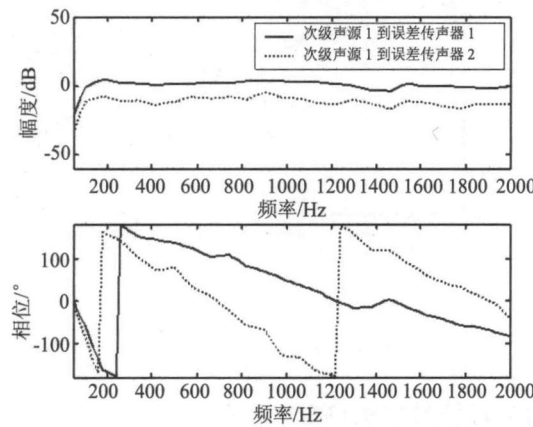


图6 次级通道传递函数

首先，不考虑通道间耦合进行优化，补偿控制电路由图 2 所示电路图实现。用 4.1 节中介绍的控制器的设计方法优化一路模拟反馈系统参数。图 7 是模拟和实验结果。从图中可以看出，在 200~400 Hz 频率范围内噪声有很大衰减，全频带噪声增强不超过 6 dB，满足设计要求。

其次，将上述优化的参数直接应用到有源头靠系统中。实验时两路控制器间距离为 22cm，测得次级声源到误差传感器的传递函数 H_{12} 和 H_{21} ，数值模拟中的噪声衰减量由下面两式得到：

$$\begin{pmatrix} e_1(j\omega) \\ e_2(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - KG(j\omega)C(j\omega) & -KG(j\omega)H_{21}(j\omega) \\ -KG(j\omega)H_{12}(j\omega) & 1 - KG(j\omega)jC(j\omega) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} d_1(j\omega) \\ d_2(j\omega) \end{pmatrix} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= 20 \log_{10}(\|d_1(j\omega)\|) - 20 \log_{10}(\|e_1(j\omega)\|) \\ \Delta L_2 &= 20 \log_{10}(\|d_2(j\omega)\|) - 20 \log_{10}(\|e_2(j\omega)\|) \end{aligned} \tag{19}$$

模拟和实验结果见图 8 实线和虚线部分。由于耦合的影响，在 1100 Hz 附近噪声放大超过预定义的噪声放大限制。

在某些特殊情况下不能增加两通道间距，为了限制噪声放大在设定范围内，须采用 4.3 节提出的考虑通道间耦合的优化方法设计控制器参数。图 8 长虚线和点划线部分为模拟和实验结果，可以看出考虑耦合优化克服了噪声放大超过限制的缺点，但代价是需抑制频段的噪声衰减量有所减小。

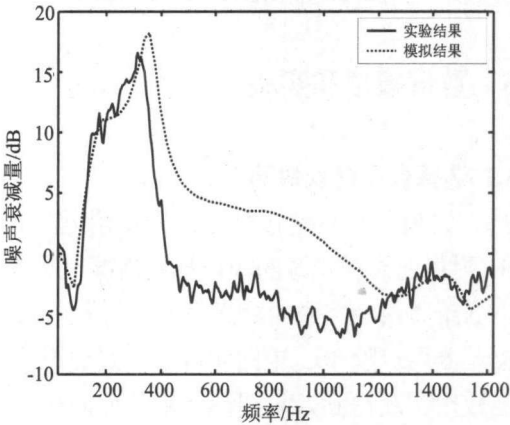


图 7 单通道模拟反馈有源控制系统噪声衰减量模拟和实验结果

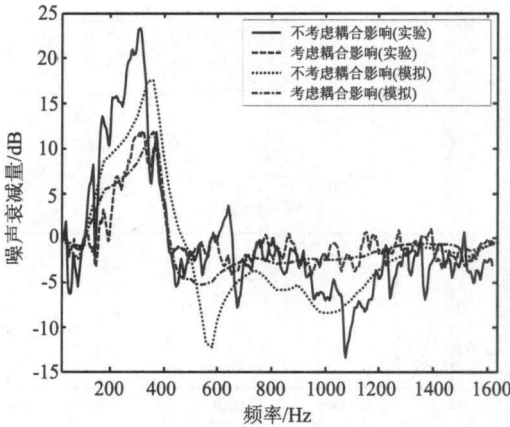


图8 有源头靠系统中分离式模拟反馈控制器在考虑耦合与不考虑耦合时的降噪效果比较

6 结论

本文从次级声源和控制电路两方面讨论了有源头靠系统用模拟反馈控制电路实现时降噪性能的优化问题。模拟和实验表明, 次级声源的有效辐射频带应和要控制噪声的主要频谱相近, 在使用电动扬声器作为次级声源时, 其谐振频率应在要控制噪声频谱的下端。在优化模拟反馈控制电路时, 基于经典控制理论提出与控制电路参数相关的目标函数, 用差分演化算法优化得到物理可实现的电路参数。在有源头靠系统中, 调整两通道间距以消除耦合对系统性能的影响, 在不能改变两通道间距并且相互耦合强烈时, 须将该影响纳入控制器参数优化的目标函数中去。

参 考 文 献

[1] Bai M S, Lee D J. Implementation of an active headset by using the H_{∞} robust control theory. *J. Acoust. Soc. Am*, 1997, 102(4):2184-2190.

- [2] Bao C, Pan J. Active feedback control in enclosures. *Proceedings of the 5th International Congress on Sound and Vibration*, Adelaide, Australia, 1997: 279-286.
- [3] Storm R, Price K. Differential Evolution – A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Berkeley: International Computer Science Institute, *Technical Report*, TR-95-012, 1995.
- [4] Elliott S J. *Signal Processing for Active Control*. London: Academic Press, 2001: 271-287.
- [5] Olson H F, May E G. Electronic sound absorber. *J. Acoust. Soc. Am*, 1953, 25(6): 1130-1136.
- [6] 曹水轩, 沙家正. 扬声器及其系统. 南京: 江苏科技出版社, 1991, 135-137.
- [7] Dorf R C. *Modern Control Systems*, 5th Edition. Boston: Addison-Wesley, 1989, 98-99.
- [8] Rafaely B, Elliott S J. H_2/H_{∞} Active Control of Sound in a Headrest Design and Implementation. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 1999, 7(1): 79-84.
- [9] Skogestad S, Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. England: John Wiley & Sons, 1996: 63-112.