

空间有源消声的微机控制

冯津伟 杜学超 沙家正

(南京大学声学研究所 南京 210093)

1995年7月31日收到

摘要 本文讨论用通用微机控制空间有源消声,以修正的PID(比例、积分、微分)算法加上逻辑判断构成的控制软件,使得系统收敛迅速,跟踪速度快,消声效果令人满意,而且系统工作稳定可靠。

关键词 微机控制,有源消声,次级声源

Computer control of active noise control in space

Feng Jinwei, Du Xuechao, Sha Jiazheng

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract A method of active noise reduction in space applying a computer is discussed. The control software using modified PID algorithm and logical judgements makes the noise cancelling system converge rapidly and trace the reduction effect with a high speed. The system is practical to use because of its stability and satisfying performance.

Key words Computer control, Active noise reduction, Secondary source

1 引言

近几年来,电子技术的迅猛发展以及有源消声方法本身的优点,使空间有源消声技术越来越向实用化靠近。目前,有源消声系统的硬件构成大致分两大类。一类由模拟电路来完成信号处理任务^[1],另一类则是用自适应滤波的方法^[2]。模拟电路系统的不足是显然的,它需要操作者根据消声效果进行判断,并调整系统的参数来完成最佳降噪状态的寻找,另外,系统缺乏跟踪能力。自适应系统由于其本身的稳定性问题以及昂贵的代价阻碍了它的进一步实用。而通用微机控制有源消声则是一种既经济又有效的途径。曾有研究者成功地进行了管道有源消声的微机控制^[3],不足的是仅进行了单

参数的控制,本文则是实现了空间有源消声的微机自动控制。

在空间有源消声的实现过程中,我们一般采用声压信号馈给方式对初源产生的声场进行采样,为避免次级声信号在采样传声器上的回输而引起系统的自激啸叫,我们采用了文献[1]所描述的单指向性声源作为次级源。另外,用单指向性传声器拾取噪声信号。本文是在[1]文的基础上引入了微机技术。

2 理论

当声场是无界、半无界或空间范围较大且边界吸收也很强,同时噪声源的尺寸相对于辐射声波波长很小时,我们可以在噪声源的附近布置若干个次级源达到消声目的。这是一种简

单但又不失实用背景的声学模型. 本文工作正是以解决这类消声为目标的.

2.1 单次级源系统

在空间有源消声中, 由一个初级声源和一个次级声源所组成的两源系统是前文所提问题的最基本的消声系统模型. 由于多源系统可以看作是由一系列这些基本系统组成, 故对这种系统的研究具有重要的理论意义.

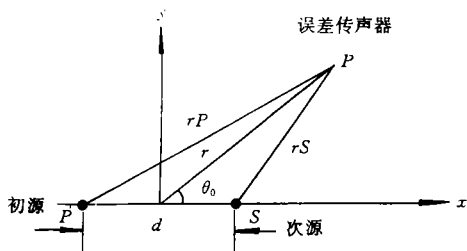


图1 单次级源消声系统坐标系

如图1所示, 初级点源源强为 $q_p(\omega)$, $(1 + \cos\theta)$ 指向性次级声源的等效中心源强为 $q_s(\omega)$, 设初、次源辐射的远场声压为 $P_p(r, \theta)$ 、 $P_s(r, \theta)$, 得:

$$P_p(r, \theta) = \frac{j\omega\rho_0}{4\pi \cdot r} \cdot q_p(\omega) \cdot e^{-jk(r + \frac{1}{2}d\cos\theta)} \quad (1)$$

$$P_s(r, \theta) = \frac{j\omega\rho_0}{4\pi \cdot r} \cdot q_s(\omega) \cdot (1 + \cos\theta) \cdot e^{-jk(r - \frac{1}{2}d\cos\theta)} \quad (2)$$

令在监测传声器处声压为零, 即总声压 $P(r, \theta_0) = P_p(r, \theta_0) + P_s(r, \theta_0) = 0$, 得:

$$q_s(\omega) = -q_p(\omega) \cdot \frac{e^{-jkdcos\theta_0}}{1 + \cos\theta_0} \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta, \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

上式表明, 为了使监测传声器处声压为 0, $q_s(\omega)$ 的幅值与相位随着监测传声器所处的角度、噪声源频率而有不同要求. 此时, 在右半空间所形成的远场声场 $P(r, \theta)$ 为:

$$P(r, \theta) = P_p(r, \theta) \cdot \left[1 - \frac{e^{-jkd(\cos\theta - \cos\theta_0)}}{1 + \cos\theta_0} \cdot (1 + \cos\theta) \right]$$

应用声学

$$\left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta, \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

显然要使全右半空间得到声降低, 须使:

$$|P(r, \theta)|^2 / |P_p(r, \theta)|^2 < 1 \quad (5)$$

即须使:

$$\cos[kd(\cos\theta_0 - \cos\theta)] > \frac{1 + \cos\theta}{2(1 + \cos\theta_0)} \quad (6)$$

上式说明, 对于给定 θ_0 , 为达到全右半空间的声降低, kd 不能超过某一最大值. 当 $\theta_0 = 54^\circ$ 时, kd 取极值, 这意味着监测传声器处于该角度时, 对 kd 约束最低. 根据不同的消声要求, 须合理布放监测传声器的位置.

2.2 二次级源系统

文献[4]详细讨论了多次级源的个数 M 与多误差传声器个数 L 对系统稳定性的影响, 并指出当 $L \geq M$ 时, 尽管误差传声器处声压降为 0, 但远离误差传声器的空间噪声实际上得到了增强. 在这里, 我们对采用二个心形指向性次级源与一个误差传声器的消声系统作初步的探讨. 如图2, 两单指向性次级源源强为 Q_{s1} 和 Q_{s2} , 令 H 为次级源至误差传声器的传递函数, 故在误差传声器处的总声压为:

$$P = P_p + H(Q_{s1} + Q_{s2}) \quad (7)$$

其中, P_p 为初级源辐射的声压. 为使监测传声器处的声压为零, 对 Q_{s1} 和 Q_{s2} 的合理解为^[4]:

$$Q_{s1} = Q_{s2} = -\frac{P_p}{2H} \quad (8)$$

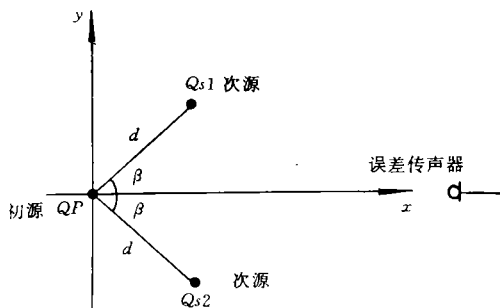


图2 二次级源系统

现在来看看这种二次级源系统的右半空间远场声压, 为此, 把单指向性条件代入式(8):

$$Q_{s1} = Q_{s2} = -Q_p \cdot \frac{e^{-jkd\cos\beta}}{2(1 + \cos\beta)} \quad (9)$$

Q_p 为初级源强, 当 kd 取 $\pi/8$, β 取 30° 时, 计算表明二次级源系统消声效果比单次级源系统有所提高.

2.3 微机控制原理

由(3)式和(9)式, 微机主要是实时地完成信号相移和放大, 而且, 消声系统中的各器件性能会随着外界条件的变化而变化, 我们把微机技术引入, 要使之具有初步的自适应功能, 即微机对参数不断地进行动态调整, 维持在最佳消声状态.

微机控制的关键是如何稳定、快速有效地趋近最佳消声状态, 也即被控参数趋向最佳值. 本文使用了 PID 算法的修正形式来决定参数的变化速度, 用逻辑判断来确定参数变化的方向. 实践证明, 这是行之有效的. 关于收敛问题, 文献[4]证明了当把误差信号均方值作为目标函数时, 目标函数是关于次级源复强度的正定二次型. 正定二次型函数有且只有一个最小值, 也就是说, 通过调节次级源复强度的幅值和相移总可以找出最佳消声点. 这一结

$$\Delta P(n) = P(n) - P(n-1)$$

$$= K_p[e(n) - e(n-1)] + K_i e(n) + K_d[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (10)$$

式中 K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数, $n-1$ 表示 $n-1$ 次采样值, $P(n)$ 为控制量, $\Delta P(n)$ 为控制量变化步长. 如果选用 PI 调节, 那么 $K_d=0$. 根据消声系统的具体情况, 作者对(10)式进行了改动. 首先, 由于需同时控制相移与幅值二个参数, 故采用了先相移调节, 再幅值调节, 然后又相移调节... 的循环方法. 其次, 为减小运算量, 对(10)式修改为分级控制, 即相移与幅值的变化步长决定于(10)式值所处的范围.

3 微机应用的方法

图 3 是实验装置框图. 图中的初级声源为 8 吋扬声器闭箱, 用一个开口箱背后垫以适当吸声棉构成单指向性次级源. $mic1$ 是心型指向

论, 为我们微机自动控制提供了理论依据.

按偏差的比例(P)、积分(I)、微分(D)控制是过程控制中应用最广泛的一种控制规则. 由 PID 控制规则构成的 PID 调节器是一种线性调节器, 这种调节器是将设定值 U 与实际输出值 Y 构成控制偏差: $e=U-Y$, 按比例、积分、微分通过线性组合构成控制量. 比例项的物理意义是只要出现偏差, 立即就有一个相应的调节作用, 它能及时克服扰动干扰, 使被调参数稳定在给定值附近. 积分调节器输出的变化速度与输入偏差的大小成正比, 只要存在偏差, 调节器输出的调节信号就不断地变化, 执行器就不断地动作, 直到把偏差信号消除. 微分调节项则是根据偏差的变化趋势(即变化速度)来动作的, 这样就可以减小偏差的变化幅度. 在实际应用中, 根据对象特征和控制要求, 可灵活地改变其结构, 取其中一部分构成控制规律. 例如, 比例(P)调节器、比例积分(PI)调节器、比例微分(PD)调节器等. 在本文中, 由于被控对象是稳态噪声, 故选用 PI 调节器. PID 算法的数字化增量表达式[5]为:

性动圈传声器, $mic2$ 、 $mic3$ 是驻极体传声器. 用 HP 35665A 实时频谱分析仪记录消声前后结果. 实验时初、次级源相距 50 cm, $mic1$ 与初级源相距 9 cm. 微机的功能是实时地完成逻辑判断与信号的数字相移、数字放大.

程序编制过程中, 主要注意两个问题: (1) 采样速度的选取. 一是考虑到采样电路本身能达到的速度, 二是采样周期必须大于中断服务子程序运行时间. (2) 为了节省运行时间开销, 程序中用了循环队列技术.

4 实验结果

我们利用图 3 所示的实验装置用单次级源系统和二次级源系统在消声室进行了一系列的实验. 在次级源正前方 1.7 m 以外空间区域,

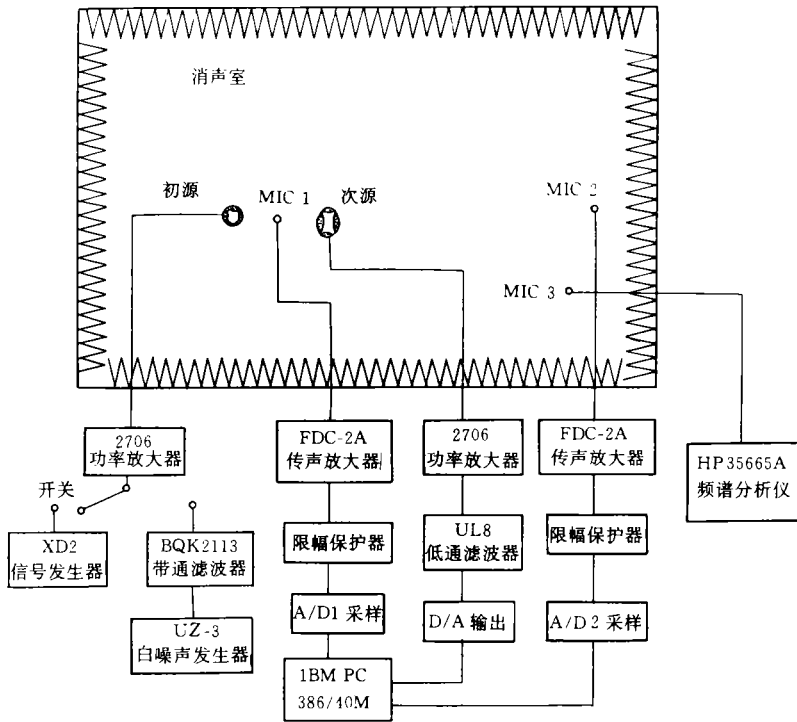


图3 微机控制有源消声系统示意图

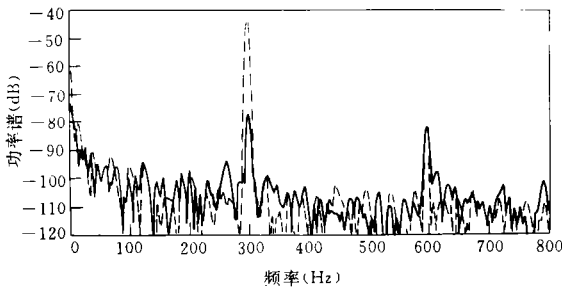


图4 单次级源, 300 Hz, 正前方消声结果

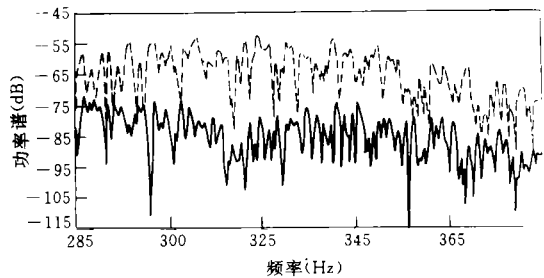


图5 单次级源、中心频率为315 Hz的1/3倍程噪声消声结果

取得单频声 30 dB 左右、1/3 倍频程噪声 20 dB 左右的消声结果。误差传声器均置于 0 度方向上。结果见图 4、图 5 和表一所示。

另外，还测试了系统的跟踪速度。我们先使次级声源输出为 0，在下游测到的信号是原噪声声压时，启动消声系统，把消声过程用应用声学

记录仪记录下来，电平记录仪的走纸速度 1 cm/s。结果如图 6，该图表明，微机在 2 s 左右便找到了最佳消声点，中间虚框部分是相位调节阶段，此时实际上已找到了相位最佳值。曲线下下降平均速度约 10—20 dB/s。这就是说，当外界条件有变化而引起消声指数下降时，系

统能以这个速度加以修正,使保持在最佳消声状态,我们把这个速度称之为系统的跟踪速

度。微机找到最佳消声点后,程序仍处于动态收索之中,努力使下游噪声消至本底。

表 1 消声系统在右半空间、消声室水平面上的消声量(dB)

中心频率(Hz)		125	160	200	250	315	400	500
单次级	单频消声量	5-32	3-30	0-29	-5-32	-7-32	-8-31	-10-32
源系统	1/3 倍频程消声量	5-14	3-16	0-15	-1-7	-3-20	-5-15	-8-14
二次级	单频消声量	17-30	15-30	12-29	5-32	1-33	0-30	1-31
源系统	1/3 倍频程消声量	8-13	6-15	5-16	3-17	2-19	0-14	0-14

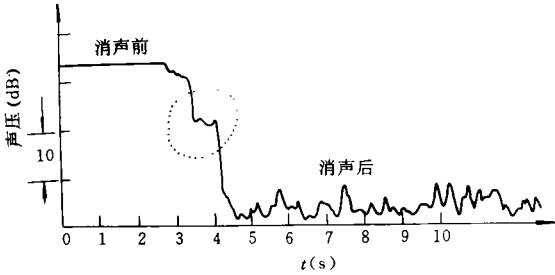


图 6 跟踪速度曲线

5 结论

(1) 通用微机能够完成有源消声的控制任务,系统工作稳定可靠,消声效果好,用一个或二个次级源可实现大空间角度内的消声。使用单指向性传声器与单指向性次级源则避免了由于声反馈而引起的系统自激。

(2) 消声系统对低频噪声比对高频噪声、用二次级源比用单次级源有着更大的空间消声

角。

(3) 当消声量最大时,系统初、次级源之间存在着一有限的位相差,它与频率、初次源间距及电声器件特性有关。

(4) 虽然采用单指向性次级源及单指向性传声器很好地解决了声反馈问题,但是由于电声器件特性的非理想性,而微机只能进行线性相位、线性增益补偿,所以这将给此类型的有源降噪系统在全空间、宽频带噪声的消声带来困难。这有待于电声器件性能的提高及进一步的理论研究。

参 考 文 献

- [1] 杨楠,沙家正等. 应用声学, 1992, 11(5): 14-19.
- [2] Eriksson L J, J. Acous. Soc. Am., 1991, 89(1): 257-265.
- [3] 沙正明,沙家正. 应用声学, 1987, 6(3), 35-39.
- [4] Nelson P A, et al. Active Control of Sound, (Academic Press, 1992), 379-410.
- [5] 黄贤武. 微型计算机工业控制. 南京: 南京大学出版社, 1992, 248-264.

新型宽频高效吸声体通过鉴定

由上海市环保局下达、上海大学承担、同济大学协作完成的新型宽频高效吸声体于1996年10月30日通过了科学技术鉴定。

新型宽频高效吸声体,是在分析研究国内外现有吸声体的基础上,采用经济实用的玻璃棉管和硬质矿渣棉板吸声材料,通过不同布置方法的科学组合,充分发挥并提高了吸声材料的降噪作用,取得了低频吸声系数高(α_{125} 为0.5-0.8、 α_{250} 为0.8-1.0)、单位吸声量的重量轻($<20 \text{ kg/m}^2$)、单位吸声量的价格低

(100元/ m^2)的成果,解决了常用吸声材料和吸声结构低频吸声系数低的问题,填补了国内空白,具有国内领先水平。

该型吸声体广泛应用于建筑声学 and 噪声控制工程,例如各类体育馆、礼堂、剧院、百货商场、候机室、工厂车间等,可有效地控制室内混响时间和降低混响声,具有推广价值。该型吸声体已在上海郑广和汽水厂罗茨风机房应用,降噪5-6 dB(A)。

(中船总第九设计研究院 吕玉恒)