

自适应带阻滤波器的相位误差 分析及其应用

徐 茂 莲

(中国科学院东海研究站)

就一般滤波器而言,我们知道,当滤波器有关参数发生变化时,就会严重影响滤波器的性能。对于自适应带阻滤波器而言,将会怎样呢?由下面的分析看到,当误差在一定范围内时,自适应带阻滤波器仍保持良好的性能。正因为如此,将自适应带阻滤波器应用在频域内的以声消声中,就能得到较为理想的效果。在本文中,我们将分析自适应带阻滤波器的相位补偿误差以及参考信号的相位误差对输出信号的影响,然后介绍它在以声消声中的实际应用。

二、误差分析

自适应带阻滤波器的原理如图1所示。图中, $\gamma_1(t)$ 、 $\gamma_2(t)$ 为两个正交参考信号, $x(t)$ 为输入信号, $\varepsilon(t)$ 为输出信号, φ_1 是相位补偿角,它表示 f_0 频率的信号从D/A输入端到A/D输出端引起的相移。利用相关法不难证明,它的工作原理和一般的自适应带阻滤波器^[1, 2]的工作原理是一样的。对于一般的自适应带阻滤波器有:

$$\omega = \omega_0 \text{ 时 } |H(j\omega_0)| = 0 \quad (1)$$

$$\omega \text{ 远离 } \omega_0 \text{ 时, } |H(j\omega)| \approx 1 \quad (2)$$

$$\text{-3分贝带宽为 } \Delta\omega = \frac{2uc^2}{T} \quad (3)$$

式中 $H(j\omega)$ 是自适应带阻滤波器的传递函数。

1、相位补偿的误差

若一个 f_0 频率的信号从D/A输入端到A/D输出端的相移为 $\varphi_1 + 180^\circ$, 而补偿的相移为 φ_2 , 且

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$$

为了分析方便起见,我们不妨假设 $\varphi_1 = 0$, 则不难得到图1系统的模拟信号的动态方程为

$$\varepsilon(t) = x(t) - \frac{2uc^2}{T} \left\{ \sin(\omega_0 t + \phi + \Delta\varphi) \cdot \int_0^t [\varepsilon(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \phi)] dt + \cos(\omega_0 t + \phi + \Delta\varphi) \int_0^t [\varepsilon(t) \cos(\omega_0 t + \phi)] dt \right\} \quad (4)$$

对上式连续求两次导数并整理得

$$\varepsilon''(t) + \frac{2uc^2}{T} \cos\Delta\varphi \cdot \varepsilon'(t) + (\omega_0^2 - \frac{2uc^2}{T} \omega_0 \sin\Delta\varphi) \cdot \varepsilon(t) = x''(t) + \omega_0^2 x(t) \quad (5)$$

由上式可知,当 $|\Delta\varphi| < 90^\circ$, $\frac{2uc^2}{T} > 0$ 时,系统总是收敛的,根据式(5)可得频域中的传递函数为

$H(j\omega)$

$$= \frac{1}{1 + \frac{2uc^2}{T} \cdot \frac{j\cos\Delta\varphi \cdot \omega - \sin\Delta\varphi \cdot \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}} \quad (6)$$

由上式可知,当 $\omega = \omega_0$ 时, $|H(j\omega_0)| = 0$, 因此在阻带中心频率处仍能形成无限深的零点。当 ω 远离 ω_0 时, 也有 $|H(j\omega)| \approx 1$, 不过系统的带宽略有变化。

2、参考信号的相位误差

如果两个参考信号之间不是正交的, 设

$$\begin{aligned} \gamma_1(t) &= \sin(\omega_0 t + \phi) \\ \gamma_2(t) &= \cos(\omega_0 t + \phi + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

则仿照式(5)的推导可得

$$\begin{aligned} \varepsilon''(t) + \frac{2uc^2}{T} \left[1 - \sin\Delta\varphi \cdot \sin(2\omega_0 t + 2\phi + \Delta\varphi) \right] \varepsilon'(t) + \left[\omega_0^2 - \frac{6uc^2}{T} + \omega_0 \cdot \sin\Delta\varphi \cdot \cos(2\omega_0 t + 2\phi + \Delta\varphi) \right] \varepsilon(t) \\ = x'' + \omega_0^2 x(t) \end{aligned} \quad (8)$$

这时系统的动态方程就不是一个时不变的线性微分方程。然而, 只要 $|\gamma_1(t)| \neq |\gamma_2(t)|$, 我们还是可以看出阻带中心频率处的稳态特性。例如, 若 $x(t) = \sin(\omega_0 t + \alpha)$ 则式(8)就有一个特解 $\varepsilon(t) = 0$, 由它的唯一性可知, $\varepsilon(t) = 0$ 就是式(8)的稳态解。因此, 当参考信号有误差时, 该系统仍能阻断 f_0 频率的信号。但是, 该情况除类似于(1)的影响外, 还不利于系统的动态范围。

三、应用

根据以上的误差分析可知, 即使系统的相位参数存在一定的误差, 自适应带阻滤波器抑制 f_0 频率信号的性能不变。在频域以声消声中, 由于声场易受环境的影响, 相位的补偿往往不精确, 当采用自适应带阻滤波器

后, 就能得到较满意的效果。

图2是采用多个自适应带阻滤波器来实现的频域以声消声系统。图中, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ 是信号从D/A到A/D之间对于不同频率 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ 的信号所引起的相移。实现该电路的主要器件是单片微型机TMS320、D/A、A/D以及扬声器等组件(见图3所示), 其主要工作原理是: 由转速测速器产生的转速数值输入给TMS320, 根据此值, TMS320内部就产生相应的不同频率和正弦参考信号, 然后, 按图2原理进行运算。此结果通过D/A、功放等部件输入给扬声器, 并由扬声器发出一个在传声器附近与噪声相位相反、幅度相等的声波, 从而达到消声的目的。消声的范围与噪声的传播方向以及频率大小有关, 利用这种方法, 可以抑制很强的频率为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ 的低频噪声, 而不影响语言信号。

四、实验结果

1. 相位补偿的误差实验

实验电路如图1所示, 且 $f_0 = 100\text{Hz}$,

$$\frac{2uc^2}{T} \approx 0.628, \text{ 电路背景噪声为}$$

$$\sigma_\varepsilon = 2.7\text{mV}$$

其中 σ_ε 为 $\varepsilon(t)$ 的均方根差

当 $\Delta\varphi = 45^\circ$, $\sigma_x = 1\text{V}$ 时, 实际测得

$$\sigma_\varepsilon = 2.8\text{mV}.$$

2、参考信号的相位误差

在该实验中, 相位补偿误差为0, 参考信号的相位误差仍取 $\Delta\varphi = 45^\circ$, 实际测得

$$\sigma_\varepsilon = 2.9\text{mV}$$

由以上两个实验可知, 实际测到的值近似等于背景噪声, 这就验证了当存在相位误差时, 系统仍能有效地抑制 f_0 频率的信号。

3、频域以声消声的实验

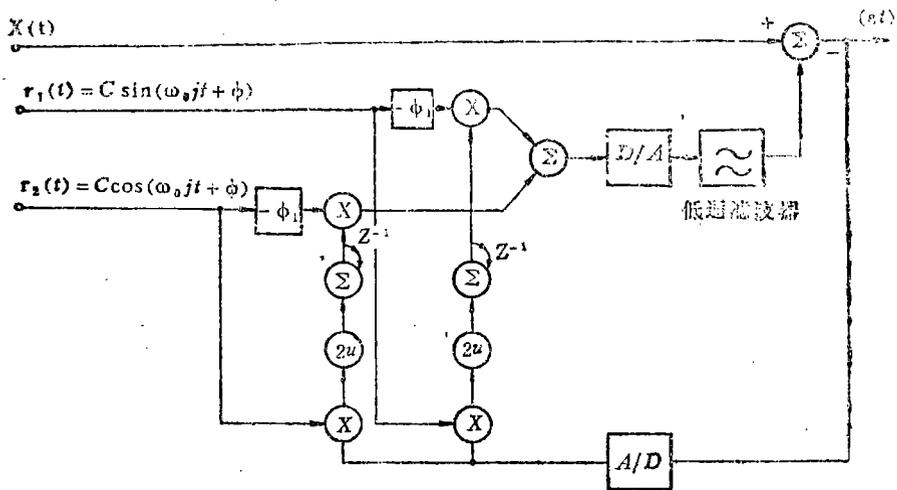


图1 带补偿相位的自适应带阻滤波器

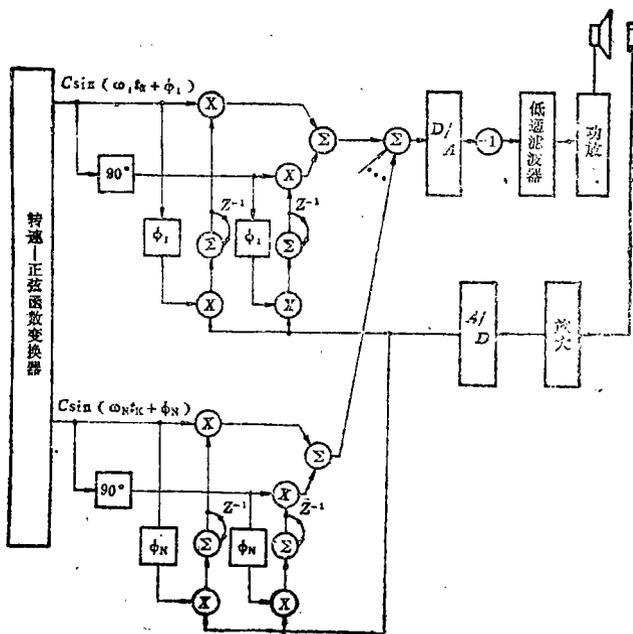


图2 频域中以声消声原理图

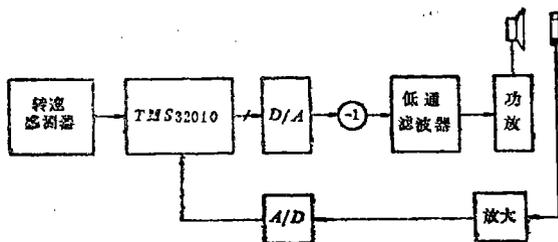


图3 频域中以声消声电路方块图

实验条件是：利用PS—85计算机产生9个不同频率的信号，该信号由一只扬声器发出作为噪声源，然后利用图3所示的系统，就能在传声器附近产生一个安静的区域。该实验的结果如图4、图5所示。图4是未抵消时的传声器附近的噪声谱，图5是抵消后传声器附近的噪声谱，它们是按同一规范化值绘制的。由图4、图5可知，被抵消的声频效果可达到40dB以上。

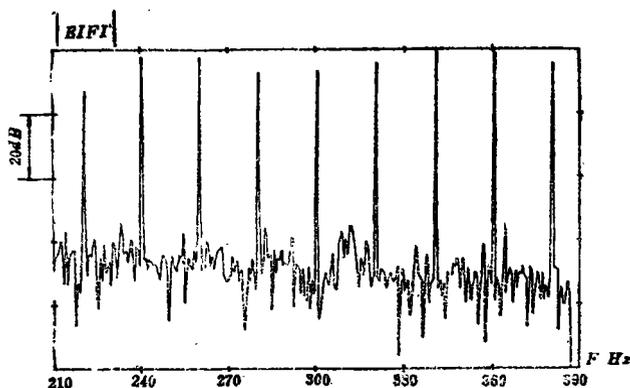


图4 抵消前传声器附近的噪声频谱

五、结束语

利用自适应带阻滤波器组来抵消由机器产生的噪声，其效果较为显著。这是因为自适应带阻滤波器具有较好地抑制阻带中心频率的性能。另一方面，机器产生的噪声一般频率较低，此时，用其它声学方法来消声往往效果不佳，该消声系统可用在坦克、舰船、拖拉机、变压器等消声场合。

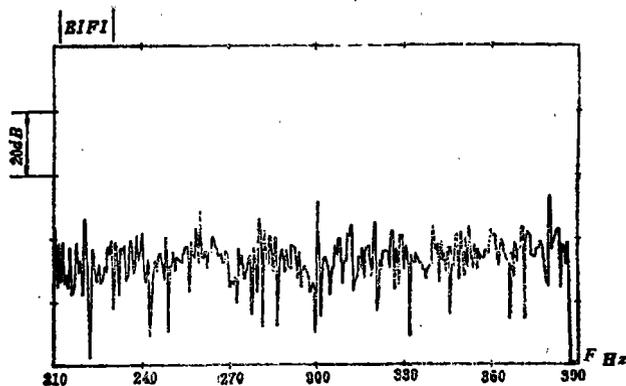


图5 抵消后传声器附近的噪声频谱

参 考 文 献

[1] R.Widrow et. "Adaptive Noise Canceling, Principles and Application" Proceedings of the IEEE Vol. 63, No.12, 1975

[2] 向大威 苏晓马：《自适应带阻滤波器》，中国仪器仪表学会成立大会《论文选集》第二册，1980

第十一届国际非线性声学会议

1987年8月24日—8月28日第11届国际非线性声学会议在苏联新西伯利亚举行。这次会议由苏联科学院西伯利亚分院流体动力学研究所，热物理研究所和理论与应用力学研究所共同主办。

会议共宣读了七十篇论文和三篇特邀报告，共分11个分组会议讨论，论文内容涉及全部非线性声学领域中的问题。可以认为生

物体内的非线性声学问题和多相介质中的非线性声学效应的研究是这届会议所显示的新进展和新方向。

参加这次会议的共有15个国家和地区。东道国出席的人员达160人。其他国家的人士约40人。会议期间组织参观了苏联科学院西伯利亚分院的流体动力研究所和热物理研究所。会议取得了圆满的成功，并于订于1990年在西德举行第12届国际非线性声学会议。

冯绍松