

窄带噪声主动控制中的波形综合法研究^{*}

刘恩泽 严济宽

(上海交通大学振动、冲击、噪声实验室 上海·200030)

文本讨论了在窄带噪声主动控制技术中采用的波形综合法的特性。通过窄带主动噪声控制 FXLMS 算法的步长 μ 、滤波器长度 L 、以及由于二次通道的存在而导致的滞后等因素对该方法传递特性的影响研究,进一步探讨窄带噪声控制技术为工程实际的应用研究奠定了基础。

A study on waveform synthesis method in the active control of narrow band noise

LIU Engze YAN Jikuan

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai · 200032)

The properties of waveform synthesis method, which is widely applied in the active control technique of narrow-band noise, is discussed in this paper. With the detailed study in the influencing factors to the transmission property of the adaptive filter involved in this method, such as the step length μ of algorithm FXLMS, the adaptive filter length L , and the delay caused by the presence of secondary channel, the foundation on which further applicative research on the active control method to the narrow-band noise is setup.

1 引言

对噪声的控制可分为被动控制和主动控制两种方法。对前者的研究已经较为成熟。而主动噪声控制作为近期发展起来的一种方法,正引起越来越多专家和学者的关注。在对窄带噪声的主动控制中,由于窄带噪声信号本身的特性和信号获取方式的特点,可以采用更加有针对性的方法,对窄带噪声进行更加有效的消减。窄带噪声主动控制技术的主要特点是:

(1) 可以采用加速度传感器、转速传感器等非声学传感器获取噪声信号。为了避免

使用在声源上游的参考麦克风,则由二次源向参考输入的反馈通道不复存在。

(2) 由于噪声的频带较窄,使因果性的限制条件放松,二次源的布置更加灵活。

(3) 系统内部产生的参考信号具有可调性。所以可以更有针对性地消减某一指定频率的噪声。

(4) 由于频带较窄,声通道的传递函数只需要在噪声频带附近建模,这将显著地降低系统的复杂性,而且仅需很小的滤波器阶数即可实现较高精度的滤波。

Chaplin 最早提出了针对窄带噪声主动控制的波形综合方法。检差传感器放置于希

* 第一作者:刘恩泽,男,1971年10月生,博士研究生

收稿日期:98-2-9;修回日期:98-6-4

望获得最大声压降的地方, 它将余音信号传至自适应算法单元, 通过该单元的计算, 重新综合出新的降噪波形, 这些波形根据其产生的顺序, 逐次驱动二次声源发声, 并锁相于同步信号。图 1 描述了波形综合法的结构。

波形综合法的基本思想是将驱动二次声源的电信号波形顺序存放于一段连续的内存中, 通过同步信号又驱动一环状指针, 顺次取得不同时刻的消声序列。这些序列通过 D/A 转换器和反混叠滤波器后, 驱动二次声源发声。即有: $y(n) = w_{[n \bmod L]}(n)$ (1)

其中, L 表示了滤波器的长度, $\{w_l(n), l=0, 1, \dots, L-1\}$ 表示了 n 时刻滤波器的 L 个单元中存储的波形值。

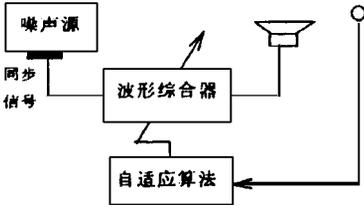


图 1 波形综合法的结构原理图

在实际算法中, 各滤波器的参数必须根据余音信号作出相应的改变, 以达到某种意义上最优, 即有:

$$w_l(n+1) = \begin{cases} w_l(n) + \mu \epsilon(n) & (n - \Delta) \bmod L \\ w_l(n) & \text{other } l \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δ 定义为:

$\Delta = [\tau T]$, τ 电声通道的滞后时间, T 采样周期, $[x]$ 表示取大于 x 的最大整数。

2 波形综合法的 FXLMS 算法原理

理论上波形综合法可看作是用自适应的 FIR 滤波器通过周期为 N 的单位冲击函数所激发的输出响应来驱动二次声源。故可将周期为 N 的单位冲击函数作为参考信号:

$$x(n) = \sum_{k=-} \delta(n - kN) \quad (3)$$

其中, $N = T_o / T$, T_o 是具有基频为 ω 噪声的

周期, T 是采样周期。

由于 $d(n)$ 是窄带周期噪声信号, 可以将其写成以下形式:

$$d(n) = \sum_{k=-N+1}^{N-1} d_k e^{jk(2\pi N)n} \quad (4)$$

它代表了由 N 个归一化后的正弦频率 k/N ($k=0, 1, \dots, N-1$) 所描述的周期信号。对上式作离散傅里叶变换, 有:

$$D(\omega) = \sum_{k=-N+1}^{N-1} d_k \delta(\omega - \frac{2\pi k}{N}) \quad (5)$$

为了消减噪声 $d(n)$, 则窄带噪声主动控制系统的参考信号中必须包含独立的 N 个谐波分量, 对 $x(n)$ 作离散傅里叶变换, 可得:

$$X(\omega) = \sum_{k=-}^{+} \delta(\omega - \frac{2\pi k}{N}) \quad (6)$$

比较 (5) 和 (6) 两式, 参考信号与噪声信号具有相同的频率成分 k/N , 故而可以通过参考信号给滤波器 $W(z)$ 提供必要的信息, 得到噪声消减信号:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n) x(n-l) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n) \sum_{k=-N+1}^{N-1} \delta(n - kN - l) \quad (7)$$

注意, 为了讨论的方便, 假设自适应滤波器的阶数 L 与脉冲序列的阶数 N 相等, 则式 (7) 中最右端仅有唯一的非零项, 可简化为:

$$y(n) = w_{[n \bmod L]}(n) \quad (L = N) \quad (8)$$

可以看出, 在 (7) 式的卷积运算中, 实际上并不需要作乘法和加法运算, 各个波形值仅仅需要从内存中直接读出即可。在波形综合法中, 可以设计一个环形指针, 在保证其旋转频率与同步信号同步的条件下, 顺序指示待输出的波形值。该方法可以将 (7) 式的 L 次乘法和 $L-1$ 次加法简化为一次内存读取。德州仪器厂的 TMS320C30 以上的 DSP、Motorola 的 DSP5600、9600 等都提供了旋转指针的硬件支持。

设 n 时刻的滤波器参数 w 和参考信号 x 为: $w_n^T = [w_n(0) w_n(1) \dots w_n(L-1)]$ $x_n^T = [x(n) x(n-1) \dots x(n-L+1)]$ (9)

故有输出信号为: $y(n) = w^n x_n$ (10)

代入 LMS 算法, 并假设初始时各滤波器的参数为零, 则有:

$$w^n = \mu \sum_{i=0}^{n-1} e(i) x_i \quad (11)$$

故 $y(n) = \mu \sum_{i=0}^{n-1} e(i) x_i^T x_n$

$$= \mu \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(n-l-kN) \quad (12)$$

令 n 趋于无穷, 等式两边同时取 z 变换, 可得: $Y(z) = E(z)G(z)$ (13)

其中 $G(z)$ 代表了由输出信号到检差信号的闭环传递函数,

$$G(z) = (\mu z^{-N}) / (1 - z^{-N}) \quad (14)$$

从图 1 可见, 由初始输入信号 $d(n)$ 到检差信号的闭环传递函数为:

$$H(z) = \frac{E(z)}{D(z)} = \frac{1}{1 + G(z)} = \frac{1 - z^{-N}}{1 - (1 - \mu)z^{-N}} \quad (15)$$

在以上的推导中, 没有考虑二次通道的存在对传递函数的影响。Widrow 等人证明了这样一个事实: 即在信号缓慢变化进入稳定工作状态的慢变系统中, 二次通道可以用一个单一的时间滞后环节 $S(z) = z^{-\Delta}$ 来模拟, 滞后的作用是将参考输入和检差信号在时间上对准。这样, 可以模仿前面的推导过程, 求出有二次通道存在的闭环传递函数:

$$H(z) = \frac{E(z)}{D(z)} = \frac{1 - z^{-N}}{1 - [1 - \mu S(z)]z^{-N}}$$

$$= \frac{1 - z^{-N}}{1 - (1 - \mu z^{-\Delta})z^{-N}} \quad (16)$$

3 讨论

在获得了闭环传递函数的基础上, 有必要将各种因素对它的影响作一个较为系统的讨论, 从而使我们在今后的工作中清晰地认识到这些因素对主动消声的影响效果。

3.1 滤波器阶数对传递函数的影响

图 2 中, 讨论了滤波器的长度对传递函数的影响。从图 2 可看出, 由于 L 增加, 在单一的噪声周期内, 信号的变化更加丰富。即二次声源的驱动信号可以对更多的噪声频率分

量进行有效的消减。

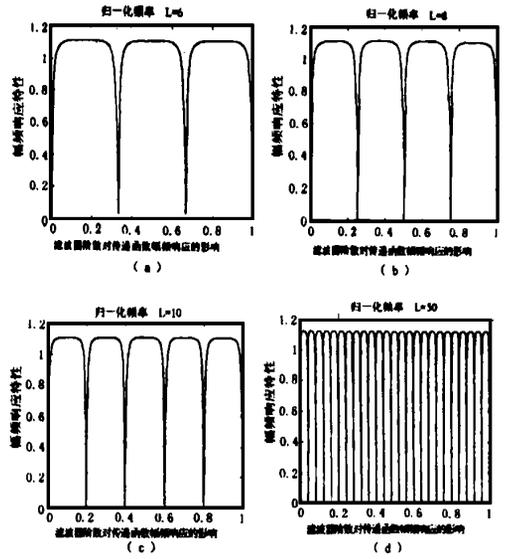


图 2 滤波器长度对传递函数的影响

3.2 FXLMS 算法步长对传递函数的影响

图 4 中给出了不同的步长 μ 对滤波器传递函数的影响。由图可见, 随着步长的减小, 陷波滤波器的减噪 3dB 带宽也减小, 滤波器只对噪声在很窄的频带内消减, 而对频带外的成分没有影响, 即滤波器的灵敏度很高。但是, 步长减小后, 收敛速度也随之降低。相反, 若步长太大, 则会导致算法发散, 所以, 必须较为妥善地根据具体情况, 选用合适的步长。

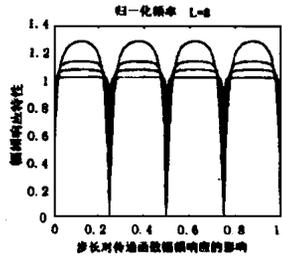


图 3 不同的算法步长对传递函数的影响

3.3 二次通道滞后环节对传递函数的影响

由于二次通道的存在, 信号必然产生滞后。在噪声主动控制的研究领域中, 对滞后环节的消除占据了很大的篇幅。因为滞后的因素对滤波器的滤波效果影响非常明显, 与之相对应的算法称为滞后-FXLMS 算法。若

时间滞后相对滤波器的阶数较小时, 滞后对系统闭环传递函数的影响并不明显。从零极点图可看出, 滞后环节对系统的零点并不产生影响, 但是极点结构发生了变化。图 4 分别是在不同的滞后时间上对传递函数的影响。

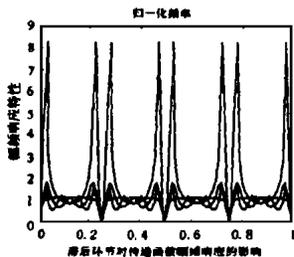


图 4 滞后环节对闭环传递函数的影响

从该图可知, 滞后环节如果不能较为准确地得到控制, 则算法很可能会发散。故在实际构建 ANC 系统时, 对相位要特别注意。

4 结论

本文对主动噪声控制中采用的波形综合法在不同因素的影响下的后果作了讨论。分析滤波器幅频特性对这些影响因素的变化, 可以得到以下结论:

(1) 滤波器长度增加, 可以对更多频率成分的噪声产生消减作用;

(2) FXLMS 算法的步长不能太大, 也不能太短, 必须根据具体的消声环境来确定;

(3) 滞后环节对闭环传递函数的影响较显著, 在实际的情况下必须对二次通道的时滞特性有明确的了解。

参考文献

- 1 S. J. Elliott, P. Darlington. Adaptive cancellation of periodic, synchronously sampled interference. IEEE ASSP, 1985; 33(3) (Jun)
- 2 G. Long, F. Ling et al. The LMS algorithm with delayed coefficient adaptation. IEEE ASSP, 1989; 37(Sep): 1397~1045
- 3 G. Long, F. Ling et al. Corrections to 'The LMS algorithm with delayed coefficient adaptation'. IEEE Trans. Signal Processing, 1992; 40(Jan): 230~232
- 4 S. M. Kuo, H. Chang. Development and experiment of narrowband active noise equalizer. Noise Control Eng. J., 1993; 41(Jul~Aug): 281~288
- 5 D. R. Morgan, C. Sanford. A control theory approach to the stability and transient analysis of the filtered X LMS adaptive notch filter. IEEE Trans. Signal Processing, 1992; 40 (Sep): 2341~2346

新产品和新技术报道

HWJ-1 海洋垂直温度剖面监测系统通过科技成果鉴定

HWJ-1 海洋垂直温度剖面监测系统是中国科学院东海研究站和声场声信息国家重点实验室联合研制的海洋测温仪器。中国科学院上海分院于 1998 年 10 月 31 日主持召开了该成果鉴定会, 专家组根据上海市科技成果水平检索证明, 并审查了项目组提供的 10 个技术文件, 对该系统的关键性技术指标进行了现场测试, 一致认为该成果在关键性技术上具有创造性, 在总体上达到了国际先进水平。该成果可直接用于浅海温跃层内波对声场影响的研究、声呐作用距离的预报、潜艇航行的安全保障, 同时也为海洋的环境调查提供了一种必不可少的仪器。该成果还能应用于工农业, 仓库等领域的温度监测, 具有广泛的应用前景。

中科院东海研究站钱炳兴