

噪声主动控制研究的发展与动向

陈端石 关元洪

(上海交通大学动力与能源工程学院 上海 200030)

2000 年 2 月 28 日收到

摘要 本文回顾了噪声主动控制的典型设计方法和常见的算法, 结合当前较新的鲁棒控制方法, 指出今后噪声主动控制的一些发展动向, 为这一技术的实用性提供借鉴。

关键词 噪声控制, 鲁棒控制, 噪声主动控制

Development of active noise control

Chen Duanshi Guan Yuanhong

(School of Power & Energy Eng, Shanghai Jiao Tong U., Shanghai 200030)

Abstract Some typical design methods and algorithm of Active Noise Control (ANC) are reviewed in this paper. Combined with the novel robust control method, some development directions of further ANC research are also pointed out.

Key words Noise control, Novel robust control method, Active noise control (ANC)

1 引言

传统的噪声控制多为被动控制, 即“无源”控制, 然而这种控制在低频段控制效果不理想。故人们发展了噪声主动控制 (Active Noise Control, 简称 ANC), 即“有源”控制, 它能在中低频段范围内进行有效的噪声控制, 弥补了传统噪声控制的不足。其基本原理早在 1933 年就由德国物理学家 Paul Lueg 在一项专利中提出: 在原始噪声上, 叠加一反相的声音, 形成相干抵消而降低原噪声。由于当时电子技术的限制, 这一控制方法未能实现。到了 60、70 年代, 随着当代电子技术的发展, 尤其是 80 年代以来, 大规模、超大规模集成电路的制造, 高速信号处理器 (DSP) 的开发

成功, 噪声主动控制技术得到飞速发展。现在世界上主要的工业国纷纷开展 ANC 技术的研究。如英国南安普敦大学的声振研究所, 美国 Nelson 工业公司, 加州大学 Berkeley 分校, 澳洲 Adelaide 大学等等。我国在 80 年代也进行了 ANC 的研究, 如南京大学, 西北工业大学, 中科院声学所等。

ANC 控制系统在工程应用中, 必须有效解决以下三方面的问题:

- (1) 控制系统的快速跟踪能力, 即控制速度应能跟上原噪声的变化;
- (2) 控制系统的有效性, 即应具有满足应用要求的降噪量、控制频率和空间范围;
- (3) 控制系统的稳态性和经济性, 即应能稳定工作且性能价格比高。

为较好地解决这些问题,人们进行了多方面的努力,使 ANC 技术得到很快的发展。随着 ANC 技术的发展,ANC 控制器出现了以下几大类型:

2 自适应主动控制器 (AANC)

50、60 年代早期的有源控制器多为固定参数结构,一般采用模拟电子线路来实现,如早期的 Olson 电子消声器,Conver 消声装置等。但这类控制器只能适用于某一特定对象,功能单一,降噪能力有限,无法适应实际复杂系统的需要。随着控制技术和电子技术的高速发展,人们开始利用自适应控制理论来设计噪声主动控制器,于是出现了自适应主动控制器 (Adaptive Active Noise Controller, AANC)。研究表明, AANC 控制器的结构及采用的自适应算法对系统的工作性能起着决定性的作用。AANC 控制器按其结构来分,主要有 3 种:

(1) 前馈控制器 (Feed-forward Controller)

前馈控制器以预先提取的参考信号作为控制器的输入信号。以管道噪声主动控制为例,一般提取上游的参考信号 $r(t)$, 经过控制器 K 的控制,经次级声源发出反相信号 $y(t)$, 从而使管道下游的噪声 $e(t)$ 得到降低。系统结构图如图 1 所示:

图 1 中 $H_1(s), H_2(s)$ 分别为初级通道、次级通道的传递函数。这类控制器的优点是系统没有额外的极点,系统的控制稳定裕度大,不需要精确的建模,只要控制器 $K(s)$ 是稳定的,就可以保证系统能稳定运行^[1]。而且,当上游的信号变化较大时,控制器能马上感知这种变化,从而使下游的噪声能控制在允许的范围内(宽带或窄带噪声都适合),因此这类控制器结构在实际的系统中,运用很广。其缺点是:系统需要一参考信号 $r(t)$, 而且 $r(t)$ 必须与待控制的实际信号有很强的相关性,它只能降低与参考信号相干的噪声分量。但是,实际上,这种信号较难获得。如果采用声传感器,

则自动产生声反馈通道 $H_3(s)$, 参考信号 $r(t)$ 受到 $y(t)$ 的“污染”(见图 2), 在控制器系统的传递函数中引入一极点,使系统的稳定性变差。这时,可以采用相应的算法来弥补,见下文分析。另外,也可以采用非声传感器方法来获得参考信号,如转速脉冲信号、振动信号、磁信号,甚至光信号等来避免声反馈的发生。

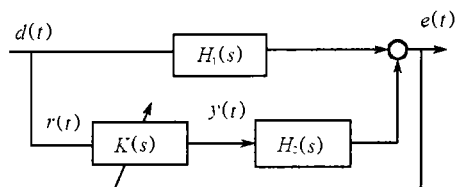


图 1 前馈 ANC 系统结构图

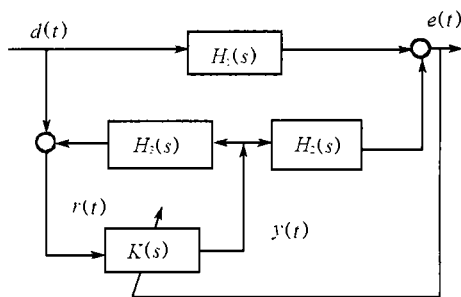


图 2 带声反馈的前馈 ANC 控制结构

(2) 反馈控制器 (Feed-back Controller)

反馈控制器直接利用控制器点的误差信号作为控制器的输入信号,无需参考信号。实际系统中,常常无法或很难获得准确的参考信号,如管道湍流噪声,多声源多路径传播声场(混响声场)等,无法使用前馈型 ANC 结构。这时,可以用反馈型 ANC 结构,如图 3 所示:

反馈 ANC 系统也可以采用类似前馈 ANC 的自适应算法,但是它只能降低可预测噪声分量,如周期噪声或窄带噪声,而对宽带噪声,由于受到从次级声源到误差传感器间的时延大小所限制,时延越大,可降低的频带宽越窄,故宽带噪声较难适用,而且控制器的阶次相对较高。另外,由于引入附加的极点,系统的稳定鲁棒性降低^[2]。

(3) 混合型控制器 (Hybrid Controller)

综合前馈和反馈型控制器的特点, 设计出混合型结构, 如图 4 所示, 控制器的输入信号为参考信号和误差信号之和:

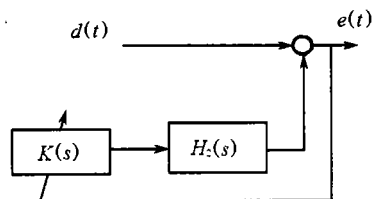


图 3 反馈 ANC 系统结构图

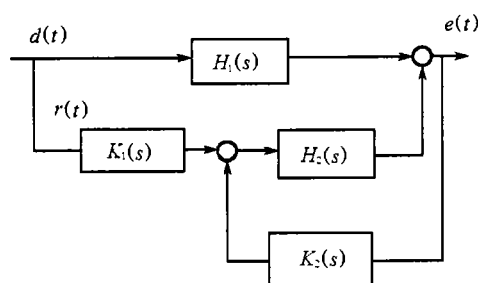


图 4 混合型 ANC 控制结构

该结构包含两个控制器: 前馈控制器 $K_1(s)$ 和反馈控制器 $K_2(s)$, 因此控制器的设计灵活度大为增加。这样 $K_1(s)$ 可降低与参考信号相干部分的噪声; $K_2(s)$ 可降低参考信号观察不到的窄带信号, 而且可降低前馈控制器 $K_1(s)$ 的负担, 特别是对周期信号。研究表明^[3], 混合型 ANC 结构的降噪能力比前馈和反馈结构都有所增强, 不过系统的复杂性增大。

实际应用时, 应根据不同的声场条件, 选用不同的 ANC 控制结构, 才能获得满意的效果。

影响 AANC 控制器的性能的因素除了其结构外, 还有其控制算法。AANC 按控制器算法的准则分, 主要有 2 种:

(1) 基于最小均方 (LMS)^[4] 准则的算法

基于最小均方 (LMS)^[1] 准则: 使当前误差信号的一阶统计特性最小, 系统的期望函数可表示为

$$\xi(n) = E\{e^2(n)\} \quad (1)$$

式中 $e(n)$ 为误差传感器获得的信号。为了计算方便, 常常将上式中的数学期望值改为当前值, 即系统的期望函数化简为

$$\bar{\xi}(n) = e^2(n) \quad (2)$$

由此, 有一系列的算法, 如滤波 -X LMS(FxLMS) 算法, 变步长 FxLMS 算法, 频域 LMS 算法, 为解决声反馈的 FULMS 算法等, 这类算法计算量小 (正比于滤波器阶数 N), 是目前最常用的算法。但其收敛速度较慢, 且通常仅能收敛到系统的局部最小值, 而且若信号随时间变化较大, 则系统稳定性较差, 较难满足控制系统快速跟踪能力的要求。

(2) 基于最小平方 (LS) 准则的算法^[5]

基于最小平方准则的算法引入了遗忘因子 $\lambda(0 < \lambda < 1)$, 考虑当前及以前信号的一阶统计特性, 期望函数为

$$\xi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} e^2(i) \quad (3)$$

如滤波最小二乘 (FRLS) 算法、最小二乘格形 (LSL) 算法、快速横向滤波 (FTF) 算法等, 可解决上述基于最小均分准则算法的矛盾, 快速跟踪能力强, 但计算量大。

值得一提的是, 上述两种算法中的期望函数都只考虑误差信号的值, 在实际 ANC 系统中, 往往含有较高的低频噪声分量, 它将使次级源产生很大的非线性偏差。为解决这类问题, 可限制低频输出能量, 故系统的期望函数更改为

$$\xi(n) = e^2(n) + \gamma y^2(n) \quad (4)$$

式中 $y(n)$ 为系统的输出, γ 为输出的加权值 ($0 < \gamma < 1$)。这种算法是泄漏 LMS 算法。其控制器权值更新公式为

$$W(n+1) = vW(n) + \mu R'(x)e(n) \quad (5)$$

$$v = 1 - \mu\gamma$$

式中 $W(n)$ 为控制器权向量, $R(n)$ 为参考信号向量, μ 为计算步长。它与一般的 FxLMS 算法相比, 多了 $W(n)$ 前的计权 v 。研究指出, γ 的引入, 会增强系统的稳定性, 防止权向量的无限制增长, 但其误差估计过大, 带来一定的系统偏差, 降噪能力有所下降, 因此, 应用时根据实际情况, 调整 γ 值大小, 一般 γ 接近 1 为宜。

3 H_∞ 鲁棒控制器 (非自适应)

普通自适应控制器的设计时很少或没有考虑到测量噪声等的外界干扰信号和系统建模的不准确性, 抗干扰能力较弱, 容易造起系统不稳定。最近, 人们开展了基于 H_∞ 鲁棒控制理论的 ANC 研究 [6,7], 充分考虑了这些因素, 颇具成效。

其主要思想是: 系统可以看作是从输入信号空间到输出信号空间的一种“变换器”, H_∞ 范数就是刻划以上“变换器”的尺度, 它把待控制的噪声当作系统的干扰信号, 把系统的不确定环节、建模误差等在系统设计阶段一并考虑进去, 只要这些影响因素在数量上不超过一定的范围时, 该系统就能够进行有效稳定的控制, 故系统的抗干扰能力大大增强。这里以前馈型 H_∞ ANC 鲁棒控制器结构为例 (图 5 所示):

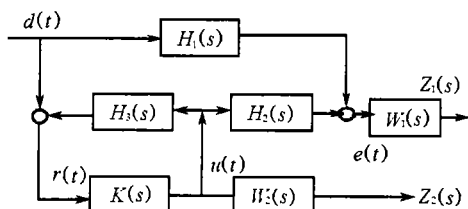


图 5 前馈型 H_∞ ANC 鲁棒控制器结构

图 5 中 $d(t)$ 为上游的声信号, $r(t)$ 为被声反馈污染的参考信号。根据 H_∞ 理论 [8], 为了兼顾系统的降噪性能和抗干扰的鲁棒性能, 分别对系统的输出信号 $y(t)$ 和系统的控制信号 $u(t)$ 进行 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 计权, 得到 $Z_1(s)$ 和

$Z_2(s)$ 信号。系统的降噪指标由 $W_1(s)$ 控制, 而模型的不确定抵消由 $W_2(s)$ 控制。根据 H_∞ 小增益理论 [8], 只要满足下式, 设计出的控制器就可稳定运行, 并且满足预设计的性能指标:

$$\left\| \begin{bmatrix} W_1 & F \\ W_2 & G \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (6)$$

式中 FF 为干扰信号 $d(t)$ 到下游的误差信号 $e(t)$ 间的传递函数: $F = H_1 + KH_2/(I - KH_3)$, G 为 $d(t)$ 到控制器的输出信号 $u(t)$ 间的传递函数: $G = K/(I - KH_3)$ 。

H_∞ 鲁棒控制器的优点是能同时满足系统的稳定鲁棒性和预定的降噪性能指标, 而且它可以用模拟或数字方式实现, 不需要进行复杂的自适应运算, 大大降低成本, 具有较好的经济性, 文献 [7] 中介绍的有源耳罩就是应用这类控制器来实现的。

4 非线性控制器

常用控制器的设计是基于线性控制理论, 设计出线性控制器。由于声系统的二次通道传递函数为非最小相位, 理论上最优的控制器属非因果控制器; 而且声系统常常表现出非线性特性 (如管道噪声中, 由于扬声器的固有特性, 输入单频信号却常常发出含多次谐波的声音), 这种系统, 用线性控制器很难满足控制要求, 从而引导人们开展非线性控制器的研究。已经证明, 神经网络具有逼近任意非线性函数的能力, 通过训练或自学习, 能够从输入输出的历史数据中提取规律性的知识, 记忆于网络的权值中, 从而用作非线性控制器。

非线性控制器算法有: 人工神经网络 [9] (多层前馈网络, 径向基函数网络, Volterra 级数网络等) 控制算法、模糊控制算法 [10]、基因算法 [11] 等。仿真表明, 这类控制器对非线性系统有很好的降噪能力。不过, 由于当前神经控制的学习速度较慢, 模型非结构化, 不便于解析和分析, 因此还有待于进一步完善, 不可能

取代已有的控制方法,而应与其他方法相互结合,相互补充。

数调节能力和抗干扰能力,目前,正向自适应鲁棒控制器的设计方向发展。

5 自适应鲁棒控制器

如前所述,在现有的自适应主动控制器中,对被控制对象大都有如下假设:对象传递函数结构已知,仅参数未知(参数不确定性)。这种假设忽略了“结构式”和“非结构式”的不确定性和未知干扰等,故普通的自适应控制器在原理上有较大的局限性。而前文所述的鲁棒控制器虽然考虑了这些因素,但它把待控制的噪声完全当作系统的无规干扰信号,用一范围很宽的空间包括了原噪声的信号空间,忽略了原始噪声中可能具有的规律,引起系统未能充分发挥其降噪效果。因此,笔者认为很有必要要把这两类控制器结合起来,充分利用两者的优点,利用自适应控制器的参数调节能力和鲁棒控制器的抗干扰能力,设计出具有实用价值的自适应鲁棒性控制器,不过目前这类控制器的设计还处于探索阶段^[12]。

6 结论

噪声主动控制是目前世界各国研究的热门课题。工程上实用的控制器常常要考虑它的参

参 考 文 献

- 1 Morgan D R, *IEEE Trans. ASSP-28*, 1980, (Aug): 454-467.
- 2 Kh Eghtesadi, et al. *Noise Control Eng. J.* 1983, 20: 16-20.
- 3 Zangi K C. *Proc. ICASSP*, Vol.II, 1993, 351-354.
- 4 Bjarnason E. *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, Nov. 1995, Vol.3, 504-514.
- 5 Hisashi S, Adachi, Shuichi, et al. *Trans. of the JSME*, Part C, Vol 61 n 581, Jan 1995. 78-84.
- 6 Bai, Mingsian R, Lin Zhihsin. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Series C. Vol 18, n4, Aug 1997. 341-348.
- 7 Bai M R, Lin H H. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 206, n4, Oct 2 1997. 453-471.
- 8 申铁龙. 《 H_∞ 鲁棒控制》. 清华大学出版社, 1996.
- 9 Tokhi M O, Wood R. *Control Engineering Practice*, Vol 5, n9, Sep 1997. 1311-1322.
- 10 Oscar K, Ron H. "Use of fuzzy logic in active noise control", *Proc 3 Int Symp Uncert Model Anal Annu Conf North Amer Fuzzy Inf Process Soc* 1995. 577-582.
- 11 Tang K S, Man K F, Kwong S, et al. *Real-Time Systems*, Vol 11, n3, Nov 1996. 289-302.
- 12 Fan J, Masahiro B, Hiromitsu O, et al. "New robust adaptive algorithm for multichannel adaptive active noise control" *IEEE Conference on Control Applications-Proceedings* 1997. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 528-533.

上海市环保产业协会噪声与振动控制专业委员会

揭牌暨在沪举行学术活动

经上海市环保产业协会批准, 2001 年 5 月 22 日上海市环保产业协会噪声与振动控制专业委员会在上海市机电环保研究所挂牌成立并进行了学术交流活

动。专业委员会设名誉主任 1 人, 主任兼秘书长 1 人, 副主任 5 人, 副秘书长 3 人以及委员 25 人。章奎生教授任名誉主任, 吕玉恒高级工程师任主任兼秘书长。挂靠单位及办公室均为上海市机电环保研究所。

市环保局领导、市环保产业协会领导出席会议并

讲话。高等院校、科研设计单位以及公司、厂家等 50 余人参加了会议。会上学术交流的中心是噪声与振动控制新技术、新材料、新设备、以及大家关心的热门话题, 例如道路声屏障、轻轨噪声、高层建筑设备噪声控制、变电房噪声治理等。与会者表示, 目前是发展服务环保产业的最好时机, 我们要抓住机遇, 团结合作, 把上海环保产业噪声控制技术水平进一步提高。

(中国船舶工业第九设计研究院 吕玉恒)