DOI:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2008.03.036
第20卷 第3期 甘肃科学学报 Vol.20 No.3
2008年9月 Journal of Gansu Sciences Sep.2008

基于模糊自适应控制的悬臂梁振动主动控制算法研究

缑新科,刘 巍,杨 星
(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要: 基于模糊逻辑系统的自适应滤波方法,针对柔性悬臂梁,设计了相应的前馈振动控制器,解决一类参考信号与外扰呈非线性函数关系的前馈主动控制问题.仿真结果表明,采用的控制器对于改善振动快速控制是非常有效的.

关键词: 柔性悬臂梁;前馈振动控制;模糊自适应滤波;残余振荡
中图分类号: TP273+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0366(2008)03-0075-03

Algorithmic Study on Active Control of Vibration in Flexible Cantilever Beam Based on Fuzzy Adaptive Control

GOU Xin-ke, LIU Wei, YANG Xing
(*College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: A new feed-forward vibration control based on fuzzy adaptive filter to cancel the residual vibration in the flexible cantilever beam is proposed. By studying the fuzzy logic and adaptive principle, a feedback vibration controller is designed, which is capable of suppressing a primary disturbrance of a nonlinear function of the reference singal. The simulated results show this method can effectively supress the vibration. It is proved to have a good performance.

Key words: flexible cantilever beam; feed-forward vibration control; fuzzy adaptive filter; residual vibration

空间站、挠性机器人等具有挠性机械环节的系统,其阻尼往往很小,在阶跃作用下,系统表现出长时间的振动,称为"残余振动".使用输入整形技术[1]能够有效抑制由输入指令产生的振动,而对于由外部干扰引起的振动效果不好.另一方面,一般地输入整形技术都需要或多或少的了解系统参数,因此由建模不确定性所引起的系统参数的误差也会对输入整形器的鲁棒性产生影响.

随着微处理器技术的飞速发展,模糊控制技术受到了更多的重视,并在模糊规则的获取和优化、隶属函数的选取以及控制系统稳定性等方面得到了一定的研究[2~4].但总的来说,研究还处于初步的算法仿真和模型试验阶段,还有大量的问题有待于进一步研究.如Zadeh[5]创建的模糊控制理论,使模糊控制迅速发展并得到广泛应用.然而对于那些时变的、非线性不确定的复杂系统,该方法要求模糊控制具有较完善的控制规则.后来,Singer等[6]改进了这种方法的鲁棒性,将之称为时滞滤波器(TDF),这是一种前馈型的开环控制方法,可以在一定程度上避免激发对象的振动模态来消除残余振动.

为了研究挠性构件的振动抑制,以下选用了挠性构件的一种——柔性悬臂梁,作为被控对象.在已有模糊控制和自适应方法相结合的控制基础上,提出了一种基于模糊逻辑的自适应前馈振动控制方

收稿日期: 2007-10-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(10472039);甘肃省自然科学基金项目(3ZS051-A25-033);兰州理工大学优秀青年教师资助项目

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

法，该算法以模糊控制理论为核心，从仿真结果可以看出该方法具有抑制低频振动效果好、能适应未知干扰和结构参数的不确定等优点，可保持结构始终处于较低的振动水平，表明能有效消除残余振动，提高系统的响应速度.

1 系统模型

悬臂梁系统压电控制系统一般动力学方程为

$$\ddot{q}(t)+2\xi\omega_k\dot{q}(t)+\omega_k^2q(t)=Bu(t), \qquad (1)$$

其中 $q(t)$ 为模态向量，w_k 为模态固有频率，ξ 为阻尼比率，B 为作动器位置矩阵，$u(t)$ 为控制输入向量. 该模型描述的分布有压电片的智能板系统，在受到外部点力作用下系统的响应. 这样，可以通过设计合适的控制器，来增加悬臂梁系统的主动阻尼.

2 控制器的设计

2.1 模糊自适应前馈主动控制系统的原理

模糊自适应滤波的基本思想[7] 是根据实际系统性能与要求性能之间的偏差，让它的输出通过作动器产生控制力作用于受控对象，使受控对象中对振动水平有一定要求的位置上的响应与外扰在这些位置上的响应相抵消，达到消除(或减小) 受控对象振动的目的. 参考图 1 可见，用于学习算法的误差信号不是直接来自于滤波器的输出，而是经过一个误差通道传递函数，包括控制输入位置与误差传递传感器输出位置间系统响应特性，以及作动器和误差传感器的响应特性等.

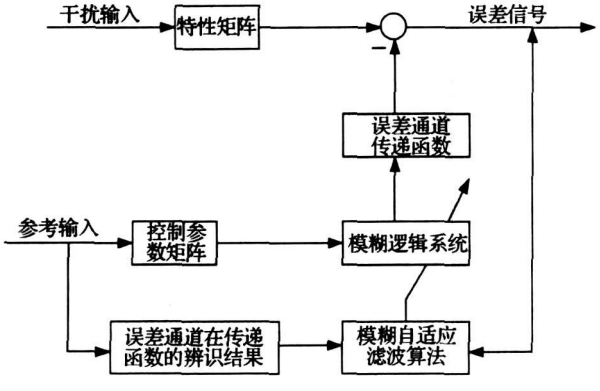

图 1 模糊自适应逻辑系统前馈主动控制

2.2 控制器的设计

定义 $x(k)=U_i(k)\in \mathrm{U}$ 为滤波器的输入，$y(k)\in \mathrm{R}$ 为滤波器的输出(U 和 R 分别为滤波器的输入空间和输出空间)，w 控制器参数矩阵，$e_u(k)$ 为受控对象在有控时的输出，又称为误差信号. 在输入空间 U 上定义 m 个模糊集合 $F_j(j=1,2,\cdots,m)$. 其相应的高斯形隶属函数形式为

$$\mu_{F_j}(x)=\exp\left[-\left(\frac{x-x_j}{\sigma_j^2}\right)^2\right], \qquad (2)$$

其中 $x_j=-1,-0.8,-0.5,-0.3,0,0.3,0.5,0.8,1$，相应的 $j=1,2,\cdots,9$. x_j,σ_j 是高斯型隶属函数的 2 个参数，分别代表隶属函数的中心和分算程度. 定义模糊逻辑函数 $u(k)$ 是参数集 $\Theta(k)$ 的函数，

$$\Theta(k)=(y(k),x_j(k),\sigma_j^2).$$

自适应模糊逻辑系统根据数值信息自适应修正上述模糊逻辑系统的参数，通过改变前馈控制参数矩阵 w，使控制输出的误差信号 $e_u(k)$ 在任意时刻都能达到最小. 如下式所示[8]

$$J(k)=\frac{1}{2}e_u(k)^2, \qquad (3)$$

其中 $k=1,2,\cdots$，使误差最小化是利用梯度下降算法自适应改变控制系统有关参数来实现的. 因此调整上述模糊逻辑系统的参数集 $\Theta(k)$. 在 $k=1,2,\cdots$ 时，按递推做如下计算参数集 $\Theta(k)$，有

$$\Theta(k+1)=\Theta(k)-\frac{\partial J(k)}{\partial\Theta(k)}, \qquad (4)$$

式(3) 中评价函数 $J(k)$ 关于参数的偏微分分别为

$$\frac{\partial J(k)}{\partial y}=-\frac{e_u(k)w}{\sum_{i=1}^{M}w},$$

$$\frac{\partial J(k)}{\partial x_j}=-\frac{2e_u(k)x_jw(y(k+1)-y(k))}{\sigma^2\sum_{i=1}^{M}w},$$

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \sigma_j}=-\frac{2e_u(k)x_j^2w(y(k+1)-y(k))}{\sigma^2\sum_{i=1}^{M}w}.$$

基于模糊自适应滤波的振动前馈控制要求预知参考信号 $u(t)$，选取一个好的参考信号对于保证振动控制效果是非常重要的. 选取参考信号的基本原则是与外扰信号具有较好的相关性(如图 2 所示).

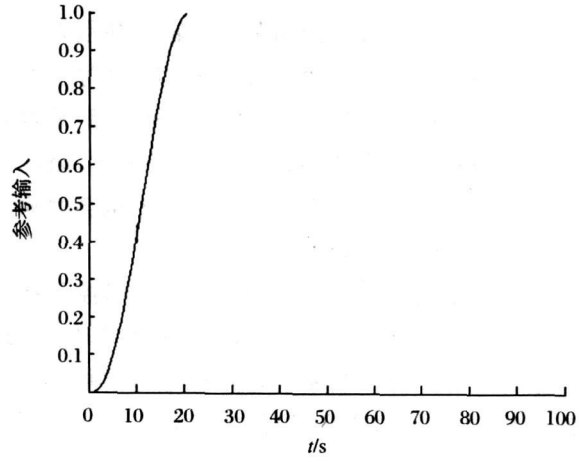

图 2 输入信号

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一般来说,压电自适应结构中的压电传感器的输出信号包含着丰富的外扰信息,与外扰信号存在着较强的相关性,因此,可从压电传感器的输出中提取参考信号.

3　仿真算例

这里仅考虑单一模态,频率为 $\omega_n = 20$ Hz,阻尼比为 $\xi = 0.05$,采样周期 $t = 0.05$ s,系统的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2},$$

系统的参考输入表达式为

$$u(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}\sin\left(t - \frac{1}{2}\right)\pi + \frac{1}{2}, 0 \leqslant t \leqslant 1 \\ 1, t \geqslant 1 \end{array} \right\}.$$

系统仅在参考输入作用下的响应如图(3)所示,参数输入通过模糊自适应滤波器后的波形如图(4)所示,将图(3)和图(4)比较,显然,从图中可以看出系统在参考输入的直接作用下产生了残余振动,系统不能准确定位于期望的位置;当引入模糊自适应滤波器以后,可以看出参考输入在经过模糊自适应滤波器后收敛速度大大加快,即几乎完全抑制了残余振动,结果表明采用的方法是可行的.

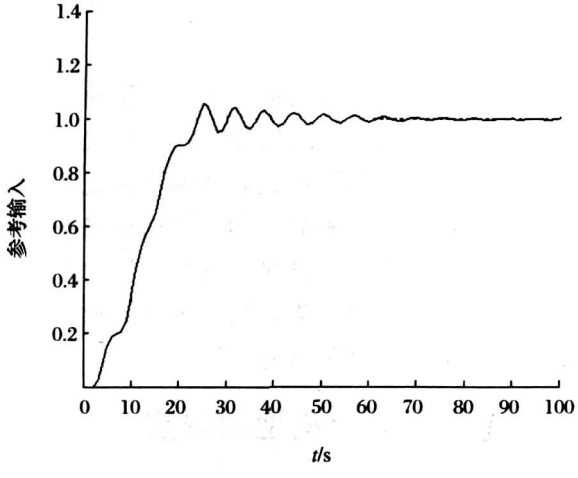

图 3　直接作用在对象上的系统响应

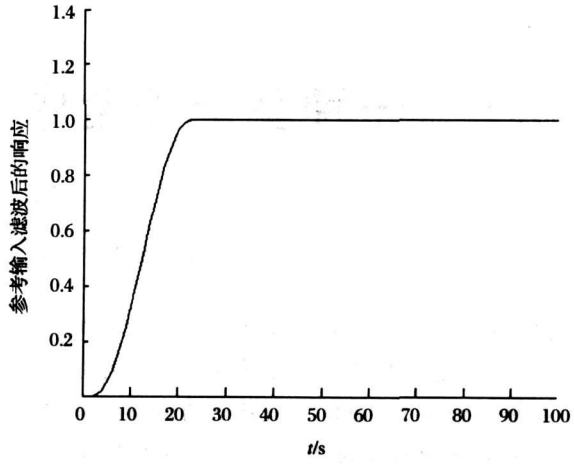

图 4　通过模糊自适应滤波器后的波形

4　结束语

研究给出了一种模糊自适应前馈控制方法,该方法能够有效地解决一些诸如前馈控制中参考信号与外扰呈非线性函数关系的非线性控制问题.针对柔性悬臂梁结构的仿真计算结果表明模糊自适应前馈滤波达到了预期的控制效果.

参考文献:

[1] 张静,马俊丽,李连,等.MATLAB 在控制系统中的应用[M].北京:电子工业出版社,2007,445-476.

[2] Elliott S J Stothers I M and Nelson P A.A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration[J].IEEE Trans.ASSP,1987,35(10):1 423-1 434.

[3] Li Z W,Lu Y F.On the Stability of a Multiple Channel Active Noise Control System[J].Proc.of IEEE ICIT 94,Guangzhou,China,1994,682-685.

[4] 张永恒,梁士轩,王良璧.应用人工神经网络求解边界微分方程[J].甘肃科学学报,2007,19(4):97-99.

[5] Zadeh L A.Fuzzy sets[J].Information and Control,1965,8(2):338-353.

[6] Singer N C,Seering W P.Preshaping Command In-puts to Reduce System Vibration[J].ASME Journal of Dynamic Systems,Measurement and Control,1990,112(3):76-82.

[7] 顾仲权,马扣根,陈卫东.振动主动控制[M].北京:国防工业出版社,1998.

[8] 屈文忠,邱阳,张陵,等.模糊自适应滤波的主动控制方法研究[J].振动工程学报,2000,13(1):112-116.

作者简介:

缑新科 (1966-)男,甘肃省天水人,1994 年毕业于西安交通大学电子系,获工学硕士学位,现任兰州理工大学电气工程与信息工程学院教授,主要从事智能结构及其动力学系统控制的研究.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net