

文章编号: 1001-0920(2004)10-1175-03

## 一种基于 RBF 网络的非线性自适应逆控制系统

柳晓菁, 易建强, 赵冬斌, 王 伟

(中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 改进了原有的  $\epsilon$  滤波自适应逆控制系统, 引入自适应扰动消除器和反馈补偿, 构成一种新的自适应逆控制系统。反馈补偿能消除自适应逆控制系统中的直流零频漂移, 自适应扰动消除器能最大限度地消除扰动。将神经网络引入自适应逆控制系统, 采用基于径向基函数网络的非线性滤波器, 对非线性系统进行建模、逆建模、控制器及自适应扰动消除器的设计。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 径向基函数网络; 模型参考自适应逆控制; 自适应扰动消除器

中图分类号: TP183

文献标识码: A

## A kind of nonlinear adaptive inverse control system based on RBF networks

L I U X iao-jing, Y I J ian-qiang, Z H A O D ong-bin, W A N G W ei

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China Correspondent: L I U X iao-jing, E-mail: xiaojing\_liu@mail.ia.ac.cn)

**Abstract:** A MRAIC system based on filtered- $\epsilon$  algorithm, which comprises an adaptive disturbance canceler and feedback compensation, is presented. The feedback compensation can counteract the MRAIC system's direct current zero-frequency drift. The adaptive disturbance canceler can best erase disturbances. A nonlinear filter based on RBF networks is used in nonlinear plant modeling, inverse plant modeling, design of controller and adaptive disturbance canceler. Simulation result shows the effectiveness of the method.

**Key words:** RBFN; MRAIC; adaptive disturbance canceler

### 1 引 言

自适应逆控制<sup>[1]</sup>的基本思想是用一个来自控制器的信号去驱动对象, 而该控制器的传递函数就是该对象传递函数的逆(倒数)。系统控制的目的既可使对象的输出跟随指令输入(参考模型为 1 时), 又可跟随经延迟或平滑过的指令输入。此时所用的平滑模型成为参考模型, 该系统称为模型参考自适应逆控制系统<sup>[2]</sup>。在自适应逆控制技术中, 控制器的参数是通过对被控系统进行自适应逆辨识而获得的。控制器可用自适应横向滤波器来实现, 其权值采用

均方误差性能测度的算法(如 LMS 算法)来调整, 无论被控系统是否为最小相位系统, 都可确保控制器的稳定性<sup>[3]</sup>。自适应逆控制是用被控对象传递函数的逆作为串联控制器, 对系统的动态特性进行开环控制, 从而避免了因反馈而引起的不稳定问题; 同时又能对系统动态特性的控制与对象扰动的控制分开处理而互不影响<sup>[4]</sup>。从系统动态特性控制的原理上看, 自适应逆控制与传统的控制是截然不同的, 反馈仅在自适应过程本身采用, 并不控制系统的信号流动, 从而可以改善系统的动态特性。

收稿日期: 2003-10-27; 修回日期: 2003-12-30

基金项目: 中国科学院百人计划资助项目

作者简介: 柳晓菁(1976—), 男, 山西运城人, 博士生, 从事智能控制等研究; 易建强(1963—), 男, 江西萍乡人, 研究员, 博士生导师, 从事智能控制、机器人控制等研究

辨识线性对象时,一般采用线性LMS滤波器,因为它简单并且算法收敛速度较快,然而要辨识非线性对象,使用线性LMS滤波器显然是不行的,必须采用非线性滤波器。基于神经网络的非线性系统辨识,就是利用神经网络能逼近任意非线性函数的这一特性<sup>[5]</sup>。基于神经网络的自适应逆控制在实验室和生产上已有许多应用<sup>[6,7]</sup>。RBF网络既有生物背景又符合逼近理论,当中心点选择适当时,使用很少的神经元便可获得良好的逼近效果。其网络的隐层和输出层的连接权与输出成线性关系,可采用保证全局收敛的线性最优算法<sup>[8]</sup>。将神经网络引入自适应逆控制系统,是非线性自适应逆控制的一种有效方法。

本文改进了原有的 $\epsilon$ 滤波自适应逆控制系统<sup>[9]</sup>,引入自适应扰动消除器和能克服直流零频漂移的反馈补偿<sup>[3]</sup>,构成一种新的自适应逆控制系统。采用基于RBF网络的非线性自适应滤波器,对系统进行自适应建模、逆建模及控制器的设计,构成了消除扰动能力强的非线性自适应逆控制系统。仿真研究证明了该系统收敛速度快,克服扰动能力强。

### 2 非线性自适应滤波器

非线性自适应滤波器的结构如图1所示。将输入信号馈送到抽头延迟线,抽头信号用来驱动一个构成非线性自适应滤波器的RBF网络。非线性滤波器的输出构成输出信号,将输出与期望响应进行比较而得到误差信号。这里,所有的权系数都按最速下降法进行自适应调整,得到最小化的均方误差。

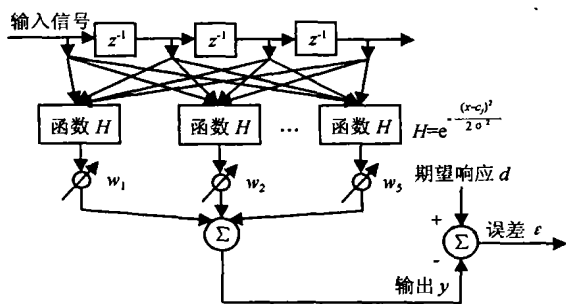


图1 基于RBF网络的非线性自适应滤波器

### 3 自适应逆控制系统的设计

本文设计的自适应逆控制系统包括模型辨识、逆模型辨识、逆控制器扰动消除、反馈补偿和自适应扰动消除等环节,其结构如图2所示。

在 $\epsilon$ 滤波的自适应逆控制中,整个系统的误差是通过对象逆进行滤波,用来对控制器进行自适应控制。最小化这个误差的均方值就是优化这个控制

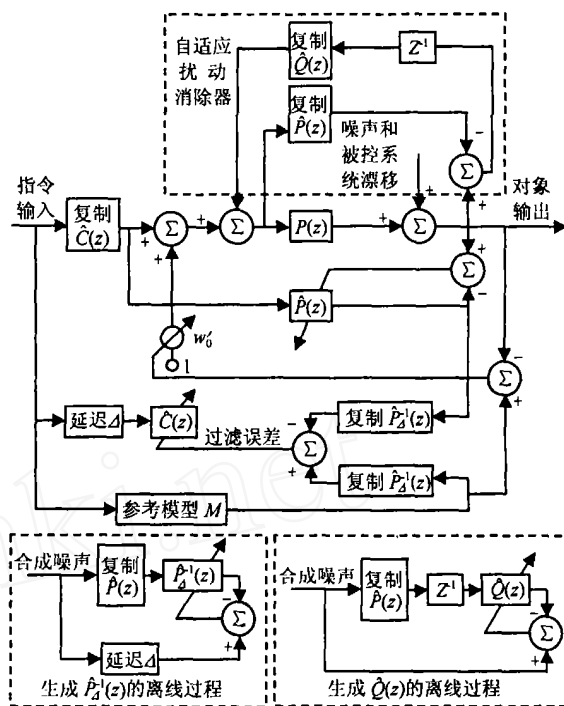


图2 带反馈补偿和自适应扰动消除器的 $\epsilon$ 滤波自适应逆控制系统

器,而具有精确的对象逆对于最小化这个误差并非至关重要。因此,采用 $\epsilon$ 滤波的自适应逆系统,对于对象误差具有低灵敏度和强鲁棒性。 $\epsilon$ 滤波算法应用于线性系统时,一般使用LMS算法。

本文使用基于RBF网络的非线性算法,可将它推广到非线性系统。当对误差进行滤波时,只要逆对象模型 $P_{\Delta}^{-1}(z)$ 的输入信号与对象输出具有可比的统计特性和动态范围,则其工作是正常的。如果期望总体误差与对象输出相比幅值非常小,则 $P_{\Delta}^{-1}(z)$ 的复制模块将不能很好工作。为完成对误差的正常非线性滤波,本文采用两个恒等的非线性滤波器 $P_{\Delta}^{-1}(z)$ 复制模块,每个都带有近似正确的幅值、动态范围和统计特性的输入信号。其输出相减,为求得逆控制器 $\hat{C}(z)$ 的自适应过程提供一个误差信号。

将自适应扰动消除器引入 $\epsilon$ 滤波的自适应逆控制系统。自适应扰动消除器可最大限度地消除扰动和噪声,它的最优性在文献[9]中已得到证明。采用带自适应扰动消除器的自适应逆控制系统能有效地消除扰动和噪声。

在自适应逆控制系统中,经常会遇到被控系统漂移的问题。即在被控制系统的输出端迭加了一个低频随机分量,而这个分量是自形成的,并非被控系统对输入的响应。当这种影响强到必须加以克服时,可采用反馈补偿的方法来克服其影响。该方法在文

献[3]中有详细论述

### 4 仿真研究

#### 4.1 非线性对象建模仿真

任意给定非线性对象

$$P(z) = \frac{0.4}{1 - 0.4z^{-1}} \frac{1}{1 + e^{-1}} \frac{0.8}{1 - 0.8z^{-1}}$$

输入信号为幅值为 1 的正弦信号 用线性 LMS 滤波器为对象建模, 所得结果如图 3 所示

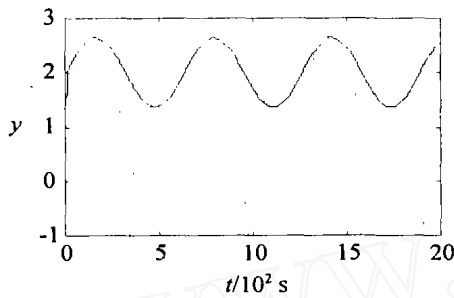


图 3 对象输出和自适应线性模型输出

用图 1 的 RBF 网络为对象建模, 有 5 个隐层单元, 一个输出单元, 网络隐层单元的中心值分别为 (-2, -1, 0, 1, 2), 选取宽度为 1. 所得结果如图 4 所示 其中: 虚线表示自适应模型输出, 实线表示对象输出

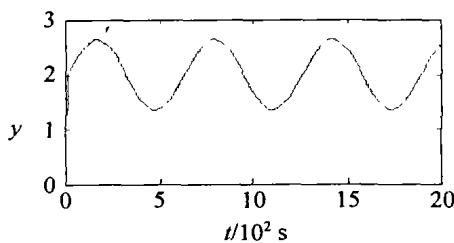
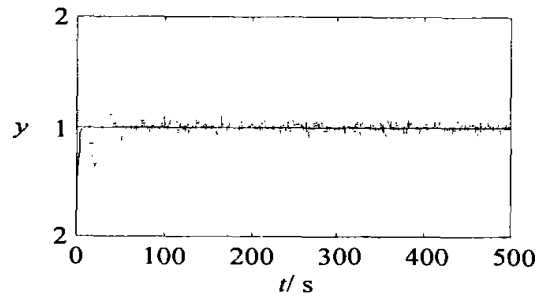


图 4 对象输出和自适应非线性模型输出

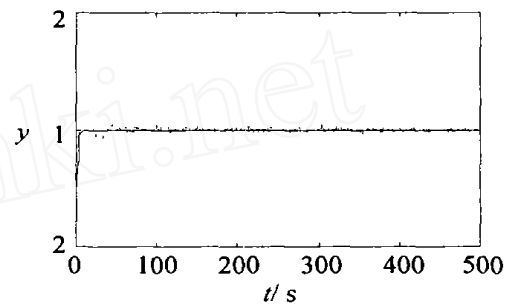
仿真结果表明, 使用线性滤波器为非线性对象建模的精度很低; 采用基于 RBF 网络的非线性滤波器可以更好地为非线性对象建模, 由于采用基于梯度下降的最速下降法, 收敛速度较快

#### 4.2 自适应逆系统仿真

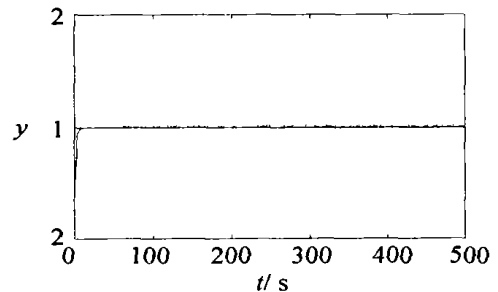
用图 1 的非线性滤波器对图 2 的自适应逆控制系统进行建模, 逆建模, 控制器和自适应扰动消除器的设计. 参考模型选为  $M(z) = \frac{0.5}{1 - 0.5z^{-1}}$ , 输入信号是幅值为 1 的阶跃信号, 噪声信号为方差为 0.001 的限带白噪声 在  $\hat{P}(z), \hat{C}(z), \hat{Q}(z), \hat{P}_\Delta^{-1}(z)$  模块中, 网络隐层单元的中心值分别为 (-2, -1, 0, 1, 2), 选取宽度为 1. 仿真结果如图 5 所示 从仿真结果



(a) 传统  $\epsilon$ -滤波非线性 MRAIC 系统



(b) 带自适应扰动消除器的  $\epsilon$ -滤波非线性 MRAIC 系统



(c) 带自适应扰动消除器和反馈补偿的  $\epsilon$ -滤波非线性 MRAIC 系统

图 5 3 种结构的  $\epsilon$ -滤波非线性 MRAIC 系统仿真结果可以看出, 本文提出的基于 RBF 网络的非线性自适应逆控制系统收敛速度快, 克服扰动能力强

### 5 结论

本文改进了传统的  $\epsilon$ -滤波自适应逆控制系统, 引入自适应扰动消除器和反馈补偿, 构成一种新的自适应逆控制系统 反馈补偿能消除自适应逆控制系统中的直流零频漂移, 自适应扰动消除器能最大限度地消除扰动 将神经网络引入自适应逆控制系统, 用基于 RBF 神经网络的非线性滤波器对非线性系统进行建模, 逆建模, 控制器及自适应扰动消除器的设计. 建模仿真和控制系统仿真验证了本文方法的有效性

(下转第 1182 页)

根据3.2节PD控制器稳定区域算法,取 $k_d = 0.75$ ,  $k_p-k_i$ 平面上8个棱边系统所对应的稳定区域如图4所示.由定理4知,8个棱边系统稳定区域的交集即为所求控制器的参数区域.在该区域上任选控制器参数( $k_p, k_i, k_d = 0.75$ ),系统(22)均为稳定的.

## 6 结 论

本文给出一种快速计算所有鲁棒PI和鲁棒PD控制器参数集的方法.该方法首先基于推广到时滞系统的棱边定理,在 $k_p-k_i$ 平面上绘制各个棱边系统的稳定边界线;然后确定所有稳定区域的交集,即为所求控制器参数集.数值算例表明了该方法的优越性和有效性.

### 参考文献(References):

- [1] Astrom K J, Hagglund T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning* [M]. Research Triangle Park: Instrument Society of American, 1995.
- [2] Kimura H. Robust stability for a class of transfer functions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(9): 788-793.
- [3] Doyle J, Glover K, Khargonekar P, et al. State space solution to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problem [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(8): 831-847.
- [4] Keel L H, Bhattacharyya S P. Robust, fragile or optimal [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1098-1125.
- [5] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P. On the stability and controller robustness of some popular PD tuning rules [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(9): 1638-1641.
- [6] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P. Robust control design using the PD controller [A]. *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Las Vegas, 2002. 1313-1318.
- [7] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *IEEE Trans on ASME*, 1942, 64: 759-768.
- [8] Smith O J. A controller to overcome dead time [J]. *ISA J*, 1959, 6(2): 28-33.
- [9] Soylemez M T, Munro N, Baki H. Fast calculation of stabilizing PD controllers [J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 121-126.
- [10] Ho M T, Datta A, Bhattacharyya S P. A linear programming characterization of all stabilizing PD controllers [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Albuquerque, 1997. 3922-3928.
- [11] Fu M, Olbrot A W, Polis M P. Robust stability for time-delay systems: The edge theorem and graphical tests [A]. *Proc of the 27th Conf on Decision and Control* [C]. Austin, 1988. 98-104.
- [12] Guo Zhi. A survey of satisfying control and estimation [A]. *Proc of the 14th IFAC World Congress* [C]. Beijing, 1999. 443-447.
- [13] Garcia S M, Guillen J C, Ibarrola J J. Robust controller design for uncertain system with variable time delay [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(9): 961-972.

(上接第1177页)

### 参考文献(References):

- [1] Widrow B, Walach E. *Adaptive Inverse Control* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [2] Astrom K J, Wittenmark B. *Adaptive Control* [M]. MA: Addison-Wesley, 1989.
- [3] 沈福民. 自适应信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. 204-211.
- [4] Widrow B, Mcool J M, Glover J R. Adaptive noise canceling: Principles and applications [J]. *Proc IEEE*, 1975, 63(12): 1692-1716.
- [5] 严平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 40-48.
- [6] Gross D C, Rattan K S. Adaptive multilayer neural network for trajectory tracking control of a pneumatic cylinder [A]. *Proc of the 1998 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. San Diego, 1998. 1662-1667.
- [7] Euliano R Neil. Adaptive and neural inverse control: Adaptively controlling a ventilator [J]. *PCAI*, 2000, 14(3): 24-27.
- [8] 张智星, 孙春在, 水谷英二. 神经-模糊和软计算 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [9] Widrow B, Walach E. 刘树棠, 韩崇昭译. 自适应逆控制 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.