

文章编号: 1000-8152(2007)04-0613-04

基于 ϵ 滤波和反馈误差学习原理的自适应逆控制

付梦印, 刘巧歌

(北京理工大学 信息科学技术学院 自动控制系, 北京 100081)

摘要: 如何调节逆控制器是自适应逆控制的一个关键. 本文采用基于 ϵ 滤波和反馈误差学习原理的方法来解决这个问题. 利用反馈误差学习原理调节逆控制器, 利用 ϵ 滤波方法在线构造反馈控制器, 从而构成一个非线性自适应逆控制系统, 使得被控对象的输出跟随指令输入. 仿真结果表明了这种方法的有效性.

关键词: 自适应逆控制; ϵ 滤波; 反馈误差学习原理

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Adaptive inverse control based on ϵ -filtering and feedback-error-learning

FU Meng-yin, LIU Qiao-ge

(Department of Automatic Control, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: How to adjust the inverse controller plays an important role to the adaptive inverse control method. The algorithm based on ϵ -filtering and feedback-error-learning principle is proposed to solve this problem in this paper. The inverse controller is regulated based on the feedback-error-learning principle and the feedback controller is produced online by the ϵ -filtering method. With this algorithm, a nonlinear adaptive inverse control system is built up which can make the output of the controlled plant track its target value.

Key words: adaptive inverse control; ϵ -filtering; feedback-error-learning principle

1 引言(Introduction)

如何在线调节参数是用智能化方法实现控制器时需要解决的首要问题. 自适应逆控制系统中, 逆控制器无论是线性滤波器还是非线性滤波器, 都需要根据学习误差来调节参数. 本文将反馈控制与自适应逆控制结合, 用滤波方法构造反馈控制器, 用反馈误差学习原理调节逆控制器, 最终用逆控制器取代反馈控制器, 产生一个自适应逆控制系统. 并将这种方法用于对被控对象进行在线建模、在线控制.

2 自适应逆控制(Adaptive inverse control)

自适应逆控制^[1](adaptive inverse control, AIC)是由Stanford的B. Widrow教授于1986年提出的采用自适应信号处理方法解决自适应控制问题方法. 其思路是用被控系统的逆作为串联控制器对系统的动态特性作开环控制, 反馈仅在自适应过程中采用, 并不参与系统的控制过程.

AIC的基本结构如图1所示. 系统的控制目的是

使系统输出 y_s 跟随指令 r , 理想的控制器应该为被控对象的逆模型. 控制器 C 为一个自适应滤波器, 利用系统误差 e_s 按某一自适应算法来实现调节过程. 因此, 为了调节控制器 C 的参数, 如何获得 C 的学习误差是关键.

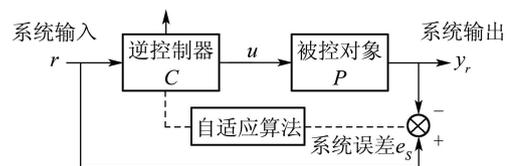


图 1 自适应逆控制基本结构

Fig. 1 Basic structure of adaptive inverse control

如果自适应逆控制系统采用线性滤波器, 由于运算顺序可以交换, 所以可以直接用被控对象的逆模型作为前向控制器, 如图2所示. PM 是被控对象 P 的模型, 由 PM 生成逆模型 Iv , 即

$$Iv(PM(x)) = x. \quad (1)$$

如果 PM 和 Iv 充分接近,则

$$Iv(PM(r)) = r. \quad (2)$$

由于运算顺序可以交换,则

$$Iv(P(r)) = P(Iv(r)). \quad (3)$$

所以,复制逆模型 Iv 作为主通道的控制器 C ,即 $C = Iv(r)$,则

$$P(C(r)) = r. \quad (4)$$

因为被控对象的输出为

$$y_s = P(u) = P(C(r)). \quad (5)$$

根据(4)式,则在控制器 C 的作用下,被控对象的输出能够跟踪指令.即

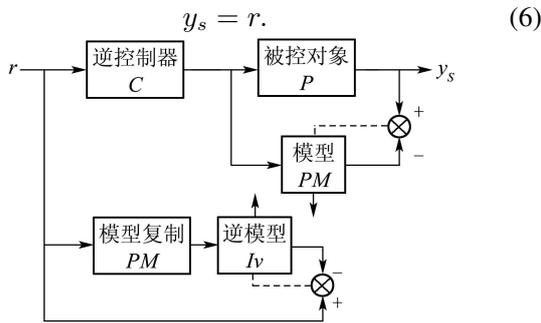


图2 线性自适应逆控制系统

Fig. 2 Linear adaptive inverse control system

对于未知的或者非线性的被控对象,常用神经网络等非线性方法对其建模或者控制.如果自适应逆控制系统采用了非线性滤波器,由于运算顺序不可交换,所以按照图2中得到控制器并不能保证被控对象 P 的输出 y_s 跟踪指令 r ,只能按照图1的正向顺序来调节 C .因此,需要研究如何在图1所示的系统中获得 C 的学习误差的方法.

如果非线性滤波器用神经网络实现,则AIC系统属于一类神经网络控制系统.常用的调节方法有BPTM(backprop through plant model)^[2,3]方法和全局优化^[4]方法等. BPTM需要被控对象的梯度信息,但是仿真表明,该方法受模型精度的影响较大.而对于全局优化方法,多存在计算复杂、计算时间长等缺点,不适于在线使用.

因此,本文研究基于 ϵ 滤波和FEL的自适应逆控制(ϵ -FEL-AIC)方法,并基于此建立自适应逆控制系统.

3 基于 ϵ 滤波和FEL的自适应逆控制(AIC based on ϵ -filtering and feedback-error-learning (ϵ -FEL-AIC))

ϵ -FEL-AIC方法基于 ϵ 滤波原理和反馈误差学习原理(FEL)而提出的.

3.1 基于 ϵ 滤波的自适应逆控制(AIC based on ϵ -filtering)

该方法由Widrow教授^[1]提出,用于解决非线性自适应逆控制问题^[5],并按图1的正向顺序调节由非线性滤波器实现的逆控制器,具体结构如图3所示.利用逆模型 Iv 分别对系统的输入 r 和被控对象的输出 y_s 进行滤波.将滤波后的输出进行相减,用差值 e_c 作为 C 的学习误差.调节的目标是希望控制器 C 逼近理想控制器 C^* ,即系统输出 y_s 跟随期望输出 r .其推导过程可参见文^[1].

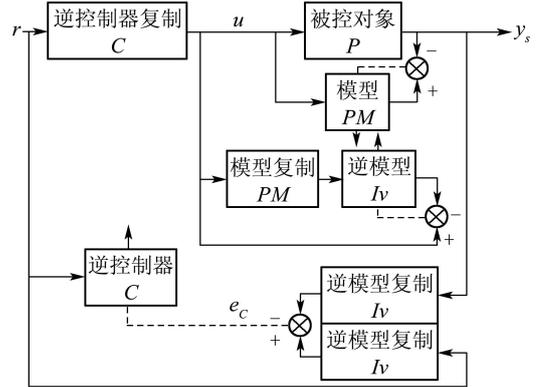


图3 ϵ 滤波自适应逆控制

Fig. 3 ϵ -filtering adaptive inverse control system

3.2 反馈误差学习(Feedback-error-learning)

反馈误差学习(feedback-error-learning, FEL)原理是由Kawato教授提出的用于调节神经网络控制器的方法^[6,7],如图4所示.用反馈控制器 FC 的输出作为调节前向控制器 C 的误差,目的是使得 FC 的输出为零,即用前向控制器 C 取代反馈控制器 FC 以控制被控对象.

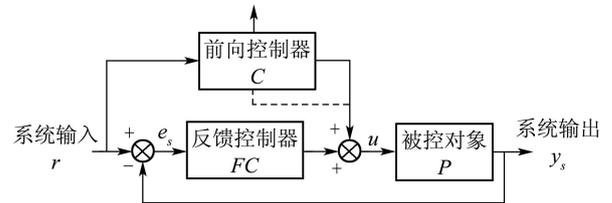


图4 基于反馈误差学习原理的控制系统

Fig. 4 Control system with FEL

3.3 ϵ -FEL-AIC算法(ϵ -FEL-AIC algorithm)

本文将反馈控制与自适应逆控制结合,提出基于滤波和FEL原理的自适应逆控制方法(ϵ -FEL-AIC).

控制结构如图5所示.用类似于图3的 ϵ 滤波方法产生反馈控制量,即用逆模型 Iv 分别对系统输入 r 和系统输出 y_s 进行滤波,二者的差作为反馈控制量 u_{fb} .同时,用系统输入 r 激励逆控制器 C ,生成前馈控制量 u_{ff} .反馈控制量和前馈控制量的和作为被控对象的控制作用 u .

构造 ϵ -FEL-AIC算法主要是基于以下几点考虑:

· 对于 ϵ 滤波自适应逆控制系统, 由于没有反馈控制, 控制系统对参数变化的鲁棒性较差. 尤其是在初始阶段, 各个非线性滤波器参数的调节过程还没有趋于平稳, 参数变化范围较大, 会影响系统的控制效果. 而反馈控制可以提高系统对参数变化的鲁棒性, 所以在参数调节过程尚未平稳时, 反馈控制可以保证系统的控制效果不会恶化.

· 常规的反馈控制器通常需要离线设计, 本文基于 ϵ 滤波原理来在线生成反馈控制器.

· 利用反馈误差学习原理来调节逆控制器, 用反馈控制器的输出作为逆控制器的学习误差.

· AIC的主要特点是对被控对象作开环控制, 如果利用反馈误差学习原理, 则系统结合了反馈控制后仍可以保证AIC的特点. 因为, 图4系统的目的是使得 C 取代 FC . 当这一点达到时, 图4的系统就又是一个开环系统.

但是, 结合了 ϵ 滤波方法后, 并不是直接用反馈量调节控制器, 而是反馈量的二倍作为控制器的学习误差. 本文给出如下定理来说明基于 ϵ 滤波产生的反馈量与 C 的学习误差之间的关系.

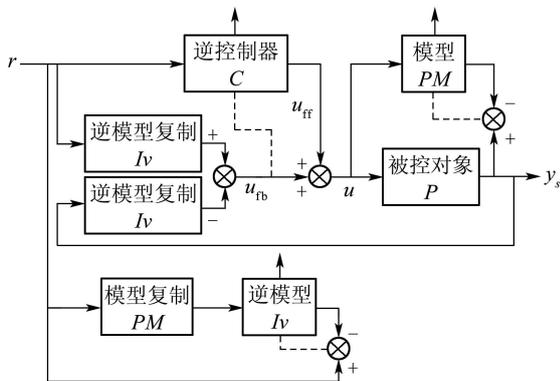


图5 基于 ϵ 滤波和反馈误差学习原理的自适应逆控制

Fig. 5 AIC based on ϵ -filtering and FEL

定理1 利用 ϵ 滤波构造反馈控制器、反馈误差学习(FEL)原理调节主控制器的自适应逆控制系统中, 逆控制器的学习误差等于反馈控制量的2倍.

证 下面以信号流的方法来进行推导.

被控对象的控制量为

$$u = u_{fb} + u_{ff}. \tag{7}$$

其中, 反馈控制量为

$$u_{fb} = Iv(r) - Iv(y_s). \tag{8}$$

前馈控制量为

$$u_{ff} = C(r). \tag{9}$$

被控对象的输出为

$$P(u) = P(u_{fb} + u_{ff}). \tag{10}$$

理想的控制器 C 应能够取代反馈控制器 FC , 并使得被控对象的输出跟踪指令信号. 即满足如下关系式成立:

$$\begin{cases} y_s^* = P(u^*) = P(C^*(r)), \\ y_s^* = r. \end{cases} \tag{11}$$

由 PM 生成逆模型 Iv , 即

$$Iv(PM(x)) = x. \tag{12}$$

如果 PM 和 P 充分接近, 即

$$PM(x) = P(x), \tag{13}$$

则

$$Iv(PM(r)) = Iv(P(r)) = r. \tag{14}$$

所以, 根据式(12)~(14)所表示的关系, 得

$$Iv(r) = Iv(P(u^*)) = Iv(PM(u^*)) = u^*, \tag{15}$$

$$Iv(y_s) = Iv(P(u)) = Iv(PM(u)) = u. \tag{16}$$

将式(1)(5)(15)(16)代入到式(8)中得

$$\begin{aligned} u_{fb} &= Iv(r) - Iv(y_s) = u^* - u = \\ &C^*(r) - (u_{fb} + u_{ff}) = C^*(r) - C(r) - u_{fb}, \end{aligned}$$

即

$$u_{fb} = C^*(r) - C(r) - u_{fb}, \tag{17}$$

所以

$$C^*(r) - C(r) = 2 \cdot u_{fb}. \tag{18}$$

即控制器的期望输出与实际输出之差等于反馈控制量的2倍.

证毕.

因此, 采用图5所示的结构, 控制器的学习误差为反馈控制量的2倍. 经过一段时间的学习, 最终使得前向控制器取代反馈控制控制, 并使得被控对象的输出达到期望值.

4 仿真(Simulation)

用图5给出的基于 ϵ 滤波和反馈误差控制原理的自适应逆控制方法控制一个具有饱和和非线性特性的被控对象. 选用由多层BP网络构成的非线性时延神经网络作为自适应逆控制中的非线性滤波器, 用来建立被控对象的模型、逆模型和逆控制器.

选择被控对象离散方程为

$$y_s(k) = \cos * (y_s(k-1)) + 0.5 * u(k-1). \tag{19}$$

其中: y_s 为被控对象的输出, u 为控制器输出的控制信号. 对比基于BPTM方法、基于 ϵ 滤波和FEL方法的自适应逆控制系统对被控对象的控制效果.

用一个任意信号作为指令信号, 仿真结果如

图6,7所示. 其中: 虚线表示指令信号 r , 实线表示被控对象的输出 y_s , 横轴为 t/s , 纵轴为幅值.

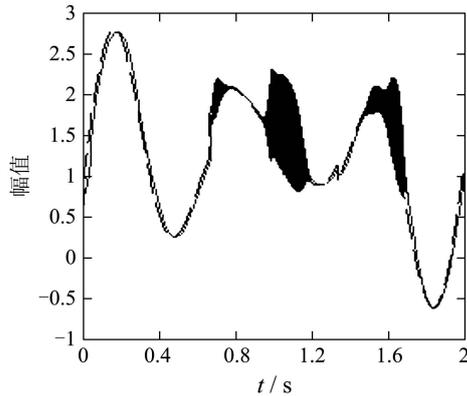


图6 基于BPTM的自适应逆控制系统的输出

Fig. 6 Output of AIC system based on BPTM

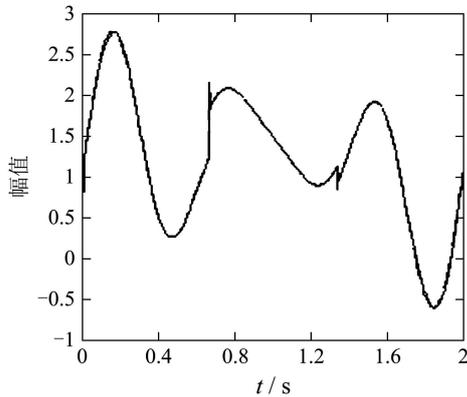


图7 基于 ϵ 滤波和FEL方法的非线性自适应逆控制

Fig. 7 Output of AIC system based on ϵ -filtering and FEL

从图中可以看出, 基于 ϵ 滤波和FEL方法的自适应逆控制系统过渡过程平滑, 而基于BPTM方法的控制系统在指令信号出现不连续点后就不能正常跟踪了指令信号了.

因此, 说明采用 ϵ -FEL-AIC算法构成的非线性自适应逆控制能够对非线性的被控对象有很好的控制效果.

5 结论(Conclusion)

与基本的自适应逆控制^[1]方法不同, 本文不仅将反馈用于逆控制器的自适应过程, 还用于自适应控制中. 用反馈误差学习原理调节逆控制器, 最终用逆控制器取代反馈控制器, 最终与文[1]中自适应逆控

制的核心思想相同. 反馈控制器基于 ϵ 滤波方法可以在线生成, 不用离线设计. 基于 ϵ -FEL-AIC算法的自适应逆控制方法不仅可以控制线性或非线性的被控对象, 还可以由线性或非线性滤波器构造自适应逆控制中的滤波器. 因此, 不仅提高了自适应逆控制方法适用范围, 而且提高了自适应逆控制系统的可靠性和对参数的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] 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.
(WIDROW B, WALACH E. Translated by LIU Shutang, HAN Chongzhao. *Adaptive Inverse Control*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.)
- [2] 张秀玲. 神经网络非线性系统模型参考自适应控制器统一设计法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 151-154.
(ZHANG Xiuling. Model reference adaptive controller uniform design for nonlinear neural network systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 151-154.)
- [3] 邢志伟, 封锡盛. 水下机器人神经网络自适应逆控制[J]. 控制工程, 2003, 10(3): 235-238.
(XING Zhiwei, FENG Xisheng. Adaptive inverse control of neural network for underwater vehicles[J]. *Control Engineering of China*, 2003, 10(3): 235-238.)
- [4] WANG Weiyen, CHENG Chih-yuan, Leu Yih-guang. An online GA-based output-feedback direct adaptive fuzzy-neural controller for uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 334-345.
- [5] 赵隽, 战兴群, 张炎华. 基于自适应逆控制技术的船舶操纵仿真控制[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1168-1171.
(ZHAO Jun, ZHAN Xingqun, ZHANG Yanhua. Simulation control of ship manoeuvring based on adaptive inverse control technology[J]. *J of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, 37(8): 1168-1171.)
- [6] DOYA K, KIMURA H, KAWATO M. Neural mechanisms of learning and control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(4): 42-54.
- [7] 童桦, 刘一江, 易理刚. 神经网络在线学习补偿自适应控制及其应用[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 579-583.
(TONG Hua, LIU Yijiang, YI Ligang. Neural network based on-line learning indemnity adaptive control and its application[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 579-583.)

作者简介:

付梦印 (1964—), 男, 教授, 工学博士, 研究方向为运动体控制、智能车辆等;

刘巧歌 (1978—), 女, 工学博士, 研究方向为运动体控制, E-mail: lqge@bit.edu.cn.