

文章编号 1000-5013(2005)04-0397-04

神经网络辨识的自适应逆控制

王 启 志

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 逆模型控制是一个新颖的控制方法,但在实现上会遇到很多困难,如被控对象的大滞后、时变性和不确定性等,使精确的对象数学模型难以建立.文中根据工业对象的特点及对控制系统高鲁棒性与高自适应性的要求,提出一种改进的神经网络的模型参考自适应逆控制系统.仿真试验表明,此系统具有良好的跟踪给定信号和消除对象干扰的作用.

关键词 逆控制器,神经网络,自适应辨识,Butterworth 滤波器

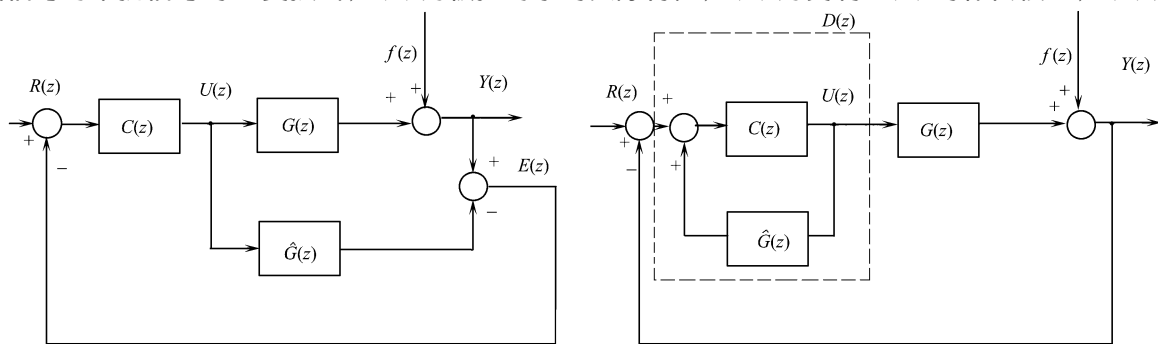
中图分类号 TP 273⁺.2; TP 183

文献标识码 A

自适应逆控制在控制系统和调节器的设计中是一种很新颖的方法^[1],它由美国斯坦福大学 Widrow 教授于 1986 年首次提出后,引起学术界广泛关注^[2].Widrow 提出了利用一个控制器与被控对象串联,该控制器的传递特性与被控制对象特性互为逆^[3],因此该控制器称为逆控制器.这种系统其实是一种模型补偿系统.时至今日,逆控制器仍被自动化领域广泛应用.例如,电力拖动、过程控制、仪器仪表、随动系统等,都应用到逆控制器的概念与方法.逆控制器具有理想的低通滤波器特性,可以将 Butterworth 滤波器的理论引入系统的设计.若将系统神经网络自适应辨识与最优低通滤波器结合,可以实现强控制功能与强鲁棒性的系统.

1 逆控制器系统的理想低通滤波特性

系统构成可用图 1 表示.图中 $R(z)$, $Y(z)$, $U(z)$ 和 $f(z)$ 分别为系统的给定信号、被控信号、控制输出信号与干扰信号的 Z 变换式, $G(z)$ 为被控对象的实际特性, $\hat{G}(z)$ 为复制 $G(z)$ 的补偿模型, $C(z)$ 为控



(a) 原系统模型

(b) 等效模型

图 1 模型补偿控制系统

制器 Z 的变换模型.图 1(b) 为图 1(a) 的等效变换,虚线框中为等效控制器 $D(z)$ 的模型为

$$D(z) = \frac{C(z)}{1 - \hat{G}(z)C(z)}. \quad (1)$$

因此有

收稿日期 2005-03-15

作者简介 王启志(1971-),男,助理研究员,主要从事系统优化与智能控制的研究. E-mail: wangqz @hqu.edu.cn

基金项目 国务院侨务办公室科研基金资助项目(04QZR06)

$$Y(z) = H(z) R(z) + F(z) f(z), \quad (2)$$

其中

$$H(z) = \frac{G(z) C(z)}{1 + [G(z) - \hat{G}(z)] C(z)}, \quad F(z) = \frac{1 - \hat{G}(z) C(z)}{1 + [G(z) - \hat{G}(z)] C(z)}. \quad (3)$$

若取 $G(z) = \hat{G}(z)$, 则给定信号作用的传递函数 $Y(z)/R(z) = H(z) = G(z) C(z)$, 外扰信号 $f(z)$ 的传递函数 $Y(z)/f(z) = F(z) = 1 - \hat{G}(z) C(z)$. 显然, 当控制器模型 $C(z)$ 取 $G(z)$ 的逆或 $\hat{G}(z)$ 的逆, 即

$$C(z) = G^{-1}(z) = \hat{G}^{-1}(z), \quad (4)$$

则有

$$H(z) \triangleq 1, \quad F(z) \triangleq 0. \quad (5)$$

利用 $z = e^{j\omega T}$ 代入, 则式(5)可演变成

$$H(\omega) \triangleq 1, \quad F(\omega) \triangleq 0, \quad \forall \omega < \omega_c. \quad (6)$$

逆控制器系统或模型补偿系统, 表现出理想的低通滤波特性, ω_c 为系统截止频率, $H(\omega) = 1$ 或 $H(\omega) = 1$. 其意义是, $Y(t)$ 可以复现 $R(t)$ 信号, $F(\omega) = 0$ 或 $F(\omega) = 0$, 表明系统可以完全或近似完全抑制频率低于 ω_c 的外干扰信号的不良影响. 这是人们所期望的一种理想的控制系统.

模型补偿控制系统(或逆控制器系统)实施必须有两个条件: (1) 对象模型可以较精确地辨识; (2) 对象模型的逆模型可以实现. 这两个条件也是逆控制器及其系统设计的关键.

2 对象模型辨识

当对象特性是定常、线性时, 可由离线测试求出 $G(z)$. 但当对象特性为时变特性时, 对象模型的辨识必须是在线的, 使得对象模型能及时更新, 达到自适应的效果. 例如, 利用对象的控制输入信号 u_k 与对象的输出信号 y_k 的自然信号, 按如下统计方法求出对象的脉冲响应函数 $g(t)$. 即

$$y_u(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) g(\tau) d\tau, \quad (7)$$

式中 $y_u(\omega)$ 为信号 y 与 u 的互相关函数, $u_u(\omega)$ 为信号 u 的自相关函数. 对象拉氏传递函数同对象的脉冲响应函数, 有关系为

$$G(s) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-st} dt. \quad (8)$$

对于定常线性系统, 这种辨识方法很有效, 但是当时变对象具有非线性时, 上述方法就不适用. 在这种场合下, 可以采用神经网络辨识方法辨识对象模型或制作成控制器^[4]. 于是设计了图 2 所示的 NN 自适应逆控制系统. 图中有两个自适应辨识器, 分别实施对象模型 $\hat{G}(z)$ 与控制器模型 $C(z) = \hat{G}^{-1}(z)$ 的辨识, 这里采用的是参考模型 NN 辨识方法. $\hat{G}(z)$ 以 $G(z)$ 作为参考, 以 y_k 作自适应信号, 以 u_k 作模型响应的激励信号. 开环系统 $C(z) G(z)$ 以 $M(z)$ 作参考, $M(z)$ 取 $C(z) G(z)$ 的预期模型, 即在最优控制状态下, 系统的理想开环传递函数. 以 e_k 作模型响应的激励信号, 以 p_k 作自适应信号.

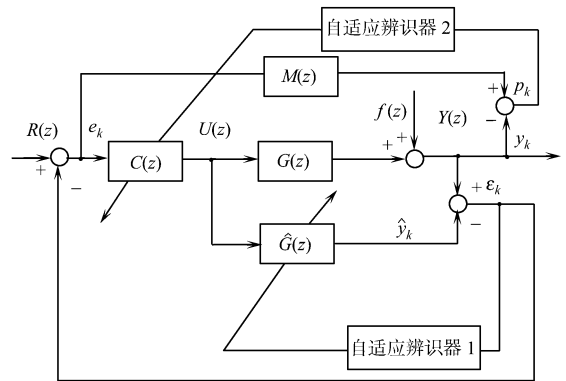


图2 NN 自适应逆控制系统

对于定常线性系统, 这种辨识方法很有效, 但是当时变对象具有非线性时, 上述方法就不适用. 在这种场合下, 可以采用神经网络辨识方法辨识对象模型或制作成控制器^[4]. 于是设计了图 2 所示的 NN 自适应逆控制系统. 图中有两个自适应辨识器, 分别实施对象模型 $\hat{G}(z)$ 与控制器模型 $C(z) = \hat{G}^{-1}(z)$ 的辨识, 这里采用的是参考模型 NN 辨识方法. $\hat{G}(z)$ 以 $G(z)$ 作为参考, 以 y_k 作自适应信号, 以 u_k 作模型响应的激励信号. 开环系统 $C(z) G(z)$ 以 $M(z)$ 作参考, $M(z)$ 取 $C(z) G(z)$ 的预期模型, 即在最优控制状态下, 系统的理想开环传递函数. 以 e_k 作模型响应的激励信号, 以 p_k 作自适应信号.

3 NN 自适应算式的实现

控制器神经网络辨识与对象模型辨识均采用 BP 算法. 因此, 本文的自适应辨识器实际上是 BP 算法模型, 辨识的结果使

$$\hat{G}(z) \rightarrow G(z), \quad C(z) \hat{G}(z) \rightarrow M(z) \text{ 或 } C(z) \rightarrow M(z)/G(z). \quad (9a)$$

当 $M(z) = 1$ 时, 有

$$C(z) \rightarrow G^{-1}(z) = \hat{G}^{-1}(z). \quad (9b)$$

假设

$$G(s) = \frac{1}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0}, \tag{10}$$

利用双线性变换 $s = \frac{2}{T}(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}})$ 代入上式,得到 $G(z)$, $G(z)$ 为 z^{-1} 的有理多项式,且分子多项式与分母多项式同阶. 因此, $G(z)$ 可记成

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{Y(z)}{U(z)}. \tag{11a}$$

用同一结构形式的 BPNN 网络实现 $G(z)$ 与 $G(z)$, 其中 $G(z)$ NN 网络结构如图 3 所示. 辨识方程为

$$\hat{y}_k = -a_1 \hat{y}_{k-1} - a_2 \hat{y}_{k-2} - \dots - a_n \hat{y}_{k-n} + b_0 u_k + b_1 u_{k-1} + \dots + b_n. \tag{11b}$$

$G^{-1}(z)$ 运算为式 (11b) 的逆运算, 即

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_2 u_{k-2} - \dots - a_n u_{k-n} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + \dots + b_n. \tag{12}$$

将 $G(z)$ NN 网络辨识器的反馈线系数, 与输入线系数置换, 选用 $M(z)$ 替代 $G(z)$, 再用 e_k 替代 u_k , 并且使辨识器的输出再激励实际对象 $G(z)$, 得到的输出 y_k 同 $M(z)$ 的输出相比较, 产生 p_k 信号. 那么, 则可实现自适应 NN 逆控制器. 有

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}. \tag{13}$$

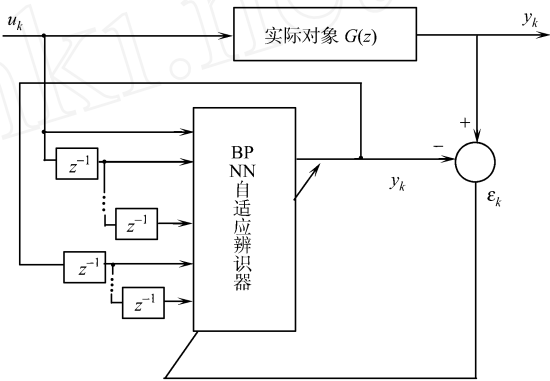


图 3 NN 网络

由于实际对象存在迟后甚至滞后, 将开环参考模型 $M(z)$ 取 1 是不现实的. 较合适的是选择二阶最优开环传递函数. 在工程系统的设计中, 常用的设计方法是安排系统由一对极点起主导作用, 其他极点则远离 s 复平面的虚轴. 到了上升时间以后, 除一对主极点外, 其他极点的作用消失, 因而可取 $M(s)$ 为二阶最优函数. 这不仅可使系统设计简化, 而且也符合控制工程原理. 最优开环传递函数 $M(s)$ 可由最优闭环传递函数 $W(s)$ 演变得到, 即

$$M(s) = \frac{W(s)}{1 - W(s)}. \tag{14}$$

以二阶最优闭环传递函数为例, $W(s) = \frac{1}{s^2 + 1.4142s + 1}$, 则 $M(s) = \frac{1}{s(s + 1.4142)}$. 于是有

$$M(z) = M(s) \Big|_{s=\frac{2}{T}(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}})} = \frac{0 + 1z^{-1} + 2z^{-2}}{1 + 1z^{-1} + 2z^{-2}}, \tag{15}$$

其中

$$\begin{aligned} 0 &= 1 = \frac{T^2}{2(1 + 1.4142T)}, & 2 &= \frac{T^2}{(1 + 1.4142T)}, \\ 1 &= \frac{-4}{2 + 1.4142T}, & 2 &= \frac{2 - 1.4142T}{2 + 1.4142T}. \end{aligned}$$

当系统离散时间间隔 T 选择为单位时间, 即 T 取 1. 这时有

$$0 = 1 = 0.1464, \quad 2 = 0.2929, \quad 1 = -1.1716, \quad 2 = 0.8284.$$

选择 $M(z)$ 为最优开环传递函数的优点是系统设计变得简单易行. $C(z)$ 辨识以后, 系统的开环传递函数就是最优的开环传递函数. 实施单位负反馈以后, 就可以得到最优的闭环控制系统, 不需要对控制器重新进行闭环调节的参数整定. 而且, 按最优低通滤波器 (如 Butterworth 滤波器) 设计闭环最优控制系统, 不仅方法简单, 系统的鲁棒也有保证^[5].

4 系统仿真

由某控制对象的传递函数 $G(s) = \frac{2}{(s + 0.2)(s + 0.5)(s + 1)}$, 利用 $s = \frac{2}{T}(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}})$ 双线性变换替

代,并取 $T=1$. 可得到被控对象的 Z 变换模型 $G(z)$, 有

$$G(z) = \frac{0.1285 + 0.3855z^{-1} + 0.3855z^{-2} + 0.1285z^{-3}}{1 - 1.7679z^{-1} + 0.9636z^{-2} - 0.9636z^{-3}}.$$

取二阶 Butterworth 滤波器的传递函数

$$W(s) = \frac{1}{s^2 + 1.4142s + 1}$$

作为系统预期

$$M(s) = \frac{1}{s(s + 1.4142)}.$$

按图 2 构成 NN 自适应逆控制系统,仿真结果如图 4 所示(Y 为输出响应). 图中同时给同一对象理想 PID 控制系统单位给定值的响应仿真曲线,待给定值响应仿真曲线稳定一段时间后,再加入单位对象扰动响应. 从仿真试验可以看出,神经网络自适应逆控制无论是对给定值跟踪响应,还是对扰动的平抑响应,都比理想的 PID 控制的控制效果好,抑制干扰的效果也好.

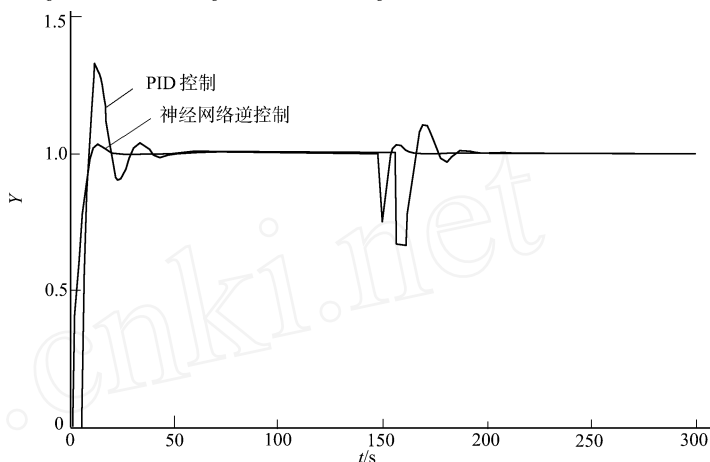


图 4 神经网络自适应逆控制与 PID 控制的比较

5 结束语

本文详细论证逆控制系统具有的理想低通滤波特性,并将 NN 网络、自适应辨识方法引入自适应系统. 由于模型参考系统采用 Butterworth 滤波器的结构与算式,不仅使系统具有最优化品质,而且无论是对给定值随动信号还是内外干扰,系统都有很强的自适应与鲁棒性. 因此,可望在过程控制中获得广泛应用.

参 考 文 献

- 1 Widrow B, Walach E 著. 自适应逆控制[M]. 刘树棠译. 西安:西安交通大学出版社,2000. 1~20
- 2 Chen W H. Nonlinear disturbance observer enhanced dynamic inversion control of missiles[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(1): 161~166
- 3 刘小勇, 杨清宇, 施仁. 基于 T 滤波最小均方算法的冲击振动自适应逆控制[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 144~148
- 4 Calise A J, Rysdyk R T. Nonlinear adaptive flight control using neural networks[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1998, 18(6): 14~25
- 5 王永初. 自动化设计的系统学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989. 32~39

Adaptive Inverse Control Based on Neural Network Identification

Wang Qizhi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Inverse model control is a novel control method, However, it will meet a lot of difficulties in realization, such as large time delay of controlled plant, time varying and uncertainty, so that it could be hard to establish accurate mathematical model. According to the character of industrial plants and the need for high robustness and high adaptability of control systems, the author gives here a model reference adaptive inverse control system based on the improved neural network. As shown in simulation test, this system possesses good effect of tracing preset signal and cancelling interference on the plant.

Keywords inverse controller, neural network, adaptive identification, Butterworth filter