

②
99-104

非线性系统的模型参考自适应控制 TP271.62

TP273.2

刘小河, 崔杜武

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 讨论了一类非线性系统的自适应模型跟随控制问题。首先给出了系统的描述, 然后研究了该系统模型跟随控制的存在条件, 最后, 在保证局部稳定性的前提下, 讨论了自适应控制系统的设计。仿真实例说明这种方法对较小范围的扰动抑制是很有效的。

关键词: 非线性系统; 自适应控制; 模型跟随; 仿真

模型跟随控制

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274X(1999)02-0099-06

模型参考自适应控制, 是应用最广泛的两大类自适应控制方式之一。对于线性系统, 已形成一套以稳定性理论为基础的设计方法。对于非线性系统, 因其对象的复杂性及多样性, 至今尚未提出自适应控制的有效设计方法。近年来, 虽对基于神经网络的非线性系统的稳定自适应控制问题有所研究^[1~4], 但对象多局限于单输入-单输出的非线性仿射系统, 对一般的非线性系统, 研究结果则很少。

工程中所遇到的非线性系统往往是非仿射的, 同时, 对非线性系统往往要求在若干工作点附近的一段工作范围内为渐近稳定的。这样, 一方面, 我们必须研究一般非线性系统的自适应控制问题; 另一方面, 全局稳定的自适应控制可能极难实现, 或因条件太强而无实用意义。但是局部稳定自适应控制的实现比较容易, 且具有一定的工程实用价值, 故本文重点研究局部稳定的非线性系统的自适应控制问题。

1 系统的描述

由非线性系统的分解定理^[5], 大多数非线性动态系统在很弱的条件下可以分解为一个非线性静态系统和一个线性动态系统的串联组合。因此, 不失一般性, 我们设非线性自适应控制系统的结构如图1所示。在这里, 我们采用信号综合自适应的控制方式。设系统满足下列条件:

① 控制对象的非线性特性可逆, 即 $X_P = g_P(Y_P) = f_P^{-1}(Y_P)$ 存在, 且 $\partial g_P / \partial y_P$ 连续。这里, $X_P \in R^n, Y_P \in R^m$ 。

② $f_M(\cdot)$ 可由神经网络或其他方法建模, 且满足当 $\|X_M - X_P\| < \delta$ 时, $\|f_M(X_M) - f_P(X_P)\| < \epsilon$ 。在这样的前提下, 我们认为 $f_M(\cdot)$ 和 $f_P(\cdot)$ 是完全等同的, 记为 $f(\cdot) = f_M(\cdot) = f_P(\cdot)$, 因此, $g(\cdot) = f^{-1}(\cdot)$ 存在, 且 $g(\cdot)$ 具有连续的一阶导算子。

由以上讨论可得出系统描述如下:

参考模型

$$\dot{X}_M = A_M X_M + B_M U_M, \quad (1a)$$

$$Y_M = f(X_M). \quad (1b)$$

控制对象

$$X_P = A_P X_P + B_P U_P, \quad (2a)$$

$$Y_P = f(X_P). \quad (2b)$$

控制信号

$$U_P = U_{P1} + U_{P2}, \quad (3a)$$

其中

$$U_{P1} = K_U U_M - K_P Y_P, \quad (3b)$$

$$U_{P2} = \Delta K_U(v, t) U_M + \Delta K_P(v, t) Y_P. \quad (3c)$$

$$\text{广义状态变量误差} \quad e_x = X_M - X_P, \quad (4a)$$

$$\text{广义输出误差} \quad e = Y_M - Y_P, \quad (4b)$$

$$\text{自适应机构} \quad v = D e. \quad (5)$$

上列各式中, $X_M, X_P, Y_M, Y_P \in R^n, U_M, U_P, U_{P1}, U_{P2} \in R^m, f(\cdot): R^n \rightarrow R^n$ 为向量函数, A_M, A_P 为 $n \times$

收稿日期: 1998-03-07

基金来源: 陕西省自然科学基金资助项目(95x14); 机械部教育司科研基金资助项目(97251325)

作者简介: 刘小河(1955-), 男, 副教授

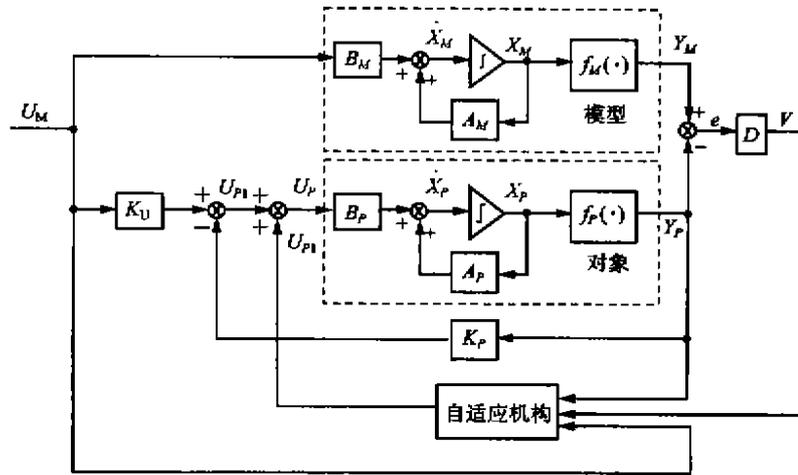


图 1 自适应控制系统结构图

Fig. 1 The Structure Drawing of Adaptive Control System

n 维矩阵, B_P, B_M 为 $n \times M$ 维矩阵, K_U 为 $m \times m$ 维矩阵, K_P 为 $m \times n$ 维矩阵, D 为 $n \times n$ 维矩阵。由上述各式可以得出

$$\begin{aligned} \dot{e}_x = & \dot{X}_M - \dot{X}_P = A_M e_x + (A_M - A_P) X_P + \\ & B_P K_P Y_P + (B_M - B_P K_U) U_M + \\ & B_P \Delta K_P(v, t) Y_P + B_P \Delta K_U(v, t) U_M. \end{aligned} \quad (6)$$

不难看出, 当 $e_x = X_M - X_P = 0$ 时, 必有 $e = f(X_M) - f(X_P) = Y_M - Y_P = 0$ 。

2 非线性系统模型跟随控制的条件

对于线性系统, 只要满足一定的代数条件, 就可实现线性系统的模型跟随控制^[6]。对前述的非线性系统, 我们考察其模型跟随控制存在的条件。

令式(6)中 $\Delta K_P(v, t) = 0, \Delta K_U(v, t) = 0$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{e}_x = & A_M e_x + (A_M - A_P) X_P + B_P K_P Y_P \\ & + (B_M - B_P K_U) U_M, \end{aligned} \quad (7)$$

若要保证 $e_x = 0$, 则应有下列条件成立:

① A_M 所有的特征值实部均为负, 即 $e_x = A_M e_x$ 所描述的系统是渐近稳定的;

$$\begin{aligned} (A_M - A_P) X_P + B_P K_P Y_P + \\ (B_M - B_P K_U) U_M = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

条件①通常都能满足。而为使条件②对任何分段连续的 U_M 均成立, 并考虑到 $X_P = g(Y_P)$, 则应有

$$B_M = B_P K_U, \quad (9)$$

$$(A_M - A_P) g(Y_P) + B_P K_P Y_P = 0, \quad (10)$$

注意到 $B_P K_P$ 为 $n \times n$ 矩阵, 设其为非奇异的, 则

$(B_P K_P)^{-1}$ 存在, 故式(10)可以写为

$$Y_P = (B_P K_P)^{-1} (A_P - A_M) g(Y_P) \triangleq g_1(Y_P). \quad (11)$$

设 $Y_P \in \Omega \subset R^n$, 则 $g_1(Y_P)$ 是 $\Omega \subset R^n$ 到其自身的一个连续映射。若 Ω 是一个非空的闭子集, $g_1(Y_P)$ 是 Ω 到自身的压缩映射, 则 $g_1(Y_P)$ 在 Ω 内有唯一的不动点^[7]。即有

$$\hat{Y}_P = (B_P K_P)^{-1} (A_P - A_M) g(\hat{Y}_P), \quad (12)$$

注意到 $A_M, A_P, B_P, g(\cdot)$ 都是由对象或参考模型规定的, 因此, 要改变 \hat{Y}_P 的数值, 只能通过改变反馈矩阵 K_P 。一旦 K_P 决定, \hat{Y}_P 就是确定的。这一点, 与线性系统的模型跟随控制有着根本的区别。

3 非线性系统的局部自适应模型跟随控制

由以上讨论可知, 对非线性系统, 一旦系统的结构、参数已定, 只有某些固定的 \hat{Y}_P , 可能存在模型跟随控制。这样, 当系统的参数发生变化时, 要想实现全局范围的自适应控制是极其困难的。而对工程实际所遇到的系统来说, 系统的合适工作状态是可以确定的, 由对象不确定因素造成的输出偏移通常也是有限的。这就提示我们考察在给定 \hat{Y}_P 附近的局部自适应模型跟随控制问题。

设图 1 所示系统对于要求的 \hat{Y}_P , 存在 K_P^0, K_U^0 , 满足模型跟随控制条件, 即有

$$B_M = B_P K_U^0, \quad (13)$$

$$\hat{Y}_P = (B_P K_P^0)^{-1} (A_P - A_M) g(\hat{Y}_P). \quad (14)$$

令 $Y_P = \hat{Y}_P + \Delta Y_P, Y_M = \hat{Y}_P + \Delta Y_M$, 则 $e = Y_M - Y_P =$

$\Delta Y_M - \Delta Y_P = \Delta e$, 再对 $X_M = g(Y_M), X_P = g(Y_P)$ 取一阶近似

$$e_x = g(Y_M) - g(Y_P) \approx g(\hat{Y}_P) + \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \Delta Y_M - [g(\hat{Y}_P) + \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \Delta Y_P] = \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \Delta e, \quad (15)$$

故 $\dot{e}_x = \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \dot{\Delta e}, \quad (16)$

将式(13)~(16)代入式(6)有

$$\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \dot{\Delta e} = A_M \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \cdot \Delta e + B_P \{ B_P^+ [(A_M - A_P) \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} + (K_P - K_P^0 - \Delta K_P(v, t)) \Delta Y_P + (K_U^0 - K_U + \Delta K_U(v, t)) U_M] \}. \quad (17)$$

其中, B_P^+ 是 B_P 的广义逆。上式又可写为

$$\dot{\Delta e} = (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} A_M \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} \Delta e + (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} B_P \omega_1, \quad (18)$$

其中

$$\omega_1 = -\omega = -\{ B_P^+ [(A_P - A_M)] \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P} + (\Delta K_P(v, t) + K_P^0 - K_P) \Delta Y_P + [K_U^0 - K_U + \Delta K_U(v, t)] U_M \}. \quad (19)$$

对自适应机构有

$$v = D e = D \Delta e, \quad (20)$$

式(18)~(20)构成一个等价反馈方框,如图 2 所示。

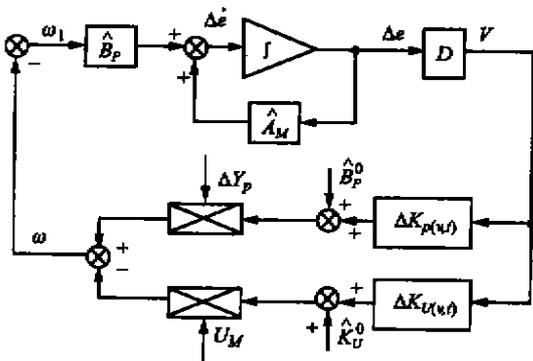


图 2 等价反馈方框图

Fig. 2 Equivalent Feedback System

其中

$$\hat{A}_M = (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} A_M \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P}, \hat{B}_M = (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} B_P, \hat{K}_P^0 = K_P^0 - K_P + B_P^+ (A_P - A_M) \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P}, \hat{K}_U^0 = K_U^0 - K_U.$$

这就是非线性系统在 \hat{Y}_P 附近的线性化自适应

控制系统的等价反馈方框。根据线性系统的自适应控制理论^[6],当采用以超稳定性理论为基础设计模型参考自适应控制系统时,首先应将系统分解为等效反馈方框(这一步图 2 已完成),然后选择 D 使前向通道的传递函数为严格正实的,反馈方框通过选择 $\Delta K_P(v, t), \Delta K_U(v, t)$ 使其满足波波夫不等式,则线性系统对于任意初始参数的自适应控制过程就是渐近稳定的。对于非线性系统来说,这样可保证系统在 \hat{Y}_P 附近的自适应控制是局部渐近稳定的。为使前向方框的传递函数为严格正实的,则要求

$$H(S) =$$

$$D(SI - (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} [A_M \frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P}] (\frac{\partial g}{\partial Y} |_{\hat{Y}_P})^{-1} B_P) \quad (21)$$

为严格正实的传递函数矩阵。为使反馈方框满足波波夫不等式,即

$$\int_0^t v^T \omega dt \geq -\gamma^2 \forall t_1 > 0, \quad (22)$$

可取熟知的积分+比例自适应律^[6],即取

$$\Delta K_P(v, t) = \int_0^t F v \Delta Y_P^T dt + F_1 v \Delta Y_P^T + \Delta K_P(0), \quad (23)$$

$$\Delta K_U(v, t) = \int_0^t M v U_M^T dt + M_1 v U_M^T + \Delta K_U(0). \quad (24)$$

其中, F, M 为正定矩阵, F_1, M_1 为半正定矩阵。

4 仿真实例

现通过电弧炉电极调节系统自适应控制系统的设计来看上述方法的应用。图 3-a 是电弧炉电极调节器的简化框图,调节器的任务是对于给定电弧电流,能迅速调节电机使电机升降以得到合适的电弧弧长,从而获得合适的电弧电流以熔炼金属^[8]。图 3-a 中,电弧炉主电路经过简化可以转换为一个非线性静态环节,其特性如图 3-b 所示^[10]。为了分析方便,我们将弧长和电流都变换为相对值,坐标上的单位值 1 对应额定值。对具体电弧炉,电流的额定值在 5~20kA 之间,弧长的额定值在 50~200mm 之间,在冶炼过程的氧化期内,被熔金属表面由于脱碳反应而沸腾,造成弧长的周期性扰动。当采用 PID 调节器时,对于弧长扰动的抑制能力很差,现场上常常出现电极反复调节,电弧电流波动,并进而引起电网电压的波动的情形。

对上述系统,当给定 I_m 且无弧长扰动时,系统的稳定工作状态 I_0 总存在,且 $I_0 = I_m$ 。由于弧长的

扰动范围有限,故我们可考虑采取在稳定工作状态 I_0 附近的局部自适应模型跟随控制。

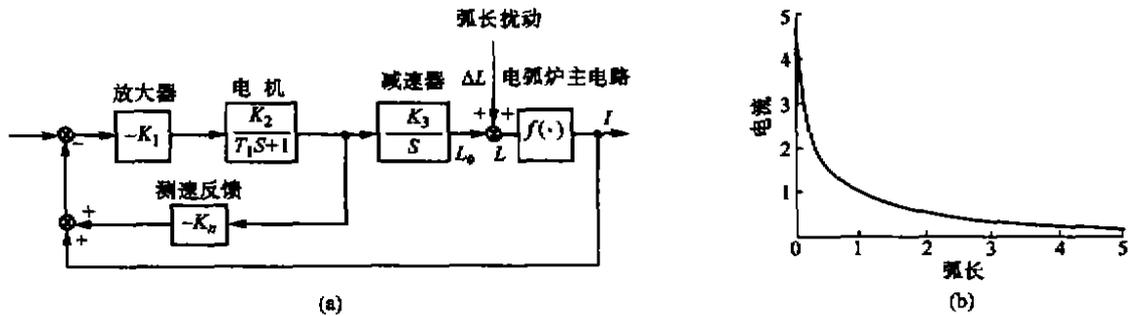


图 3 电弧炉电极调节器结构图及主电路特性

Fig. 3 The Structure Drawing of Arc Furnace Electrode Regulator and the Characteristic of Main Circuits

$$\text{设 } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \\ L \end{bmatrix}, X_M = \begin{bmatrix} x_{M1} \\ x_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_M \\ L_M \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \\ f_2(L) \end{bmatrix},$$

$$Y_M = \begin{bmatrix} y_{M1} \\ y_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_M \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_M \\ f_2(L_M) \end{bmatrix},$$

$$\text{则 } X = \begin{bmatrix} n \\ g_2(I) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ g_2(y_2) \end{bmatrix} = g(Y),$$

$$\frac{\partial g}{\partial Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & g'_2(I) \end{bmatrix}, \left(\frac{\partial g}{\partial Y}\right)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/g'_2(I) \end{bmatrix}.$$

由图 3-a 可得出

$$A_P = \begin{bmatrix} -1/T_1 & 0 \\ K_3 & 0 \end{bmatrix}, B_P = \begin{bmatrix} -K_1 K_2 / T_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$K_P = [-K_n, 1].$$

设参考模型满足

$$A_M = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0/K_3 \\ K_3 & 0 \end{bmatrix}, B_M = \begin{bmatrix} b_0/K_3 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

对象处于稳态时,应有 $I_0 = I_n, n_0 = 0$,同理,对参考模型此时也有 $n_{M0} = 0, I_{M0} = f(L_{M0}) = I_n$. 由于 $g'_2(I_n) = -K_L (K_L > 0)$,故

$$\hat{A}_M = \left(\frac{\partial g}{\partial Y}\right)^{-1} A_M \frac{\partial g}{\partial Y} = \begin{bmatrix} -a_1 & a_0 K_L / K_3 \\ -K_3 / K_L & 0 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\hat{B}_M = \left(\frac{\partial g}{\partial Y}\right)^{-1} B_P = \begin{bmatrix} -K_1 K_2 / T_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

自适应调整部分 $\Delta K_P(v, t) = [\Delta K_{Pn}, \Delta K_{PI}]$,

$\Delta K_U(v, t) = \Delta K_U$, 选取比例+积分自适应律,并取

$F = f > 0, M = m > 0, F_1 = f_1 > 0, M_1 = m_1 > 0$, 则有

$$\Delta K_{Pn} = \int_0^t f v \Delta n d\tau + f_1 v \Delta n + \Delta K_{Pn}(0), \quad (27a)$$

$$\Delta K_{PI} = \int_0^t f v \Delta I d\tau + f_1 v \Delta I + \Delta K_{PI}(0), \quad (27b)$$

$$\Delta K_U = \int_0^t m v I_r d\tau + m_1 v I_r + \Delta K_U(0), \quad (27c)$$

应该注意的是,上述的 \hat{A}_M, \hat{B}_M 是在工作点 I_n 附近的线性化参考模型,自适应调节部分也只对工作点附近的增量误差进行调节,但对对象的输出为稳态值与增量之和,而线性化参考模型的输出为 Δn_n 和 ΔI_M ,故应对对象的输出进行修正,使其和模型的输出之差正好为增量之差。由于 $n_0 = n_{M0}$,故

$$\Delta e_1 = \Delta n_M - \Delta n = \Delta n_M - (n_0 + \Delta n) = \Delta n_M - n, \quad (28)$$

$$\text{而 } \Delta e_2 = \Delta I_M - \Delta I = \Delta I_M - (I - I_n), \quad (29)$$

由此可确定电弧炉电极自适应调节器如图 4 所示。

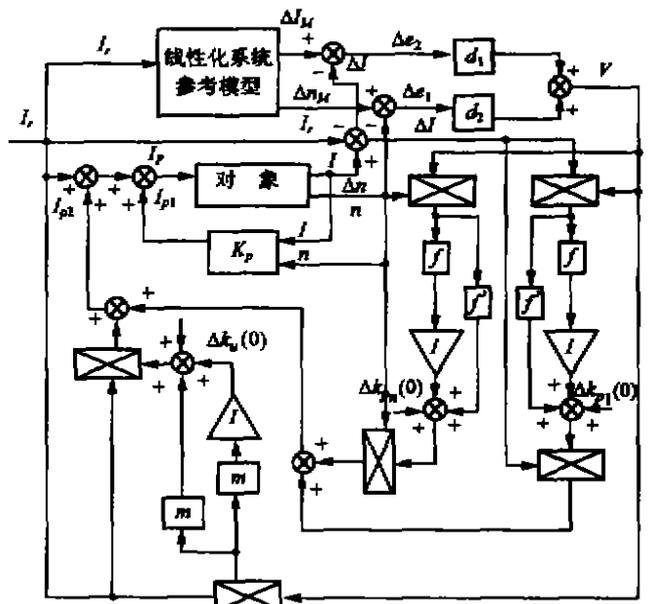


图 4 电弧炉电极自适应控制系统框图

Fig. 4 The Structure Drawing of Electrode Adaptive Control System of Arc Furnace

下面确定自适应机构的 d_1, d_2 。由图 4 及式 (25)~(26) 可导出前向线性方框的传递函数

$$H(S) = \frac{V(S)}{I_r(S)} = \frac{K_1 K_2 (d_1 + d_2 S)}{S^2 + a_1 S + a_0}, \quad (30)$$

$H(S)$ 必须为严格正实的函数。故有 $S^2 + a_1 S + a_0$ 须为严格的 Hurwitz 多项式且有 $d_1 > 0, d_2 > d_1/a_1$ 。

作者采用 Windows 环境下的仿真的仿真软件包 Matlab for Windows 4.2 (含 simulink), 对上面讨论的系统进行了大量的仿真实验, 现给出部分仿真结果。由于仿真的目的是检验在小范围的扰动下自适应控制系统的性能, 所以, 自适应部分在对象已进入稳定工作点后才加入。为了便于比较, 同时给出了采用 PID 调节器时, 电极调节器的对应仿真波

形。仿真时系统参数为: $T_1 = 0.172, K_1 = 30.49, K_2 = 2.45, K_3 = 0.038, K_n = 0.05, a_1 = 20, a_0 = 200, d_1 = 1, d_2 = 1, f = 1, f_1 = 1, m = 1, m_1 = 1, I_n = 1.5$ 。时间的单位为 S , 电流为相对值, 1 个单位代表 6kA。

图 5-a 是弧长发生正弦波形式的持续性扰动的仿真结果。从图中可以看出, 自适应控制有效地抑制了弧长波动对电弧电流波动的影响。从仿真结果可以看出, 同样大小的弧长扰动下 PID 控制时, 电流的波动范围接近工作点处电流的 40%, 而自适应控制电流波动范围在 3% 以下, 仅为 PID 控制的 1/14 左右。

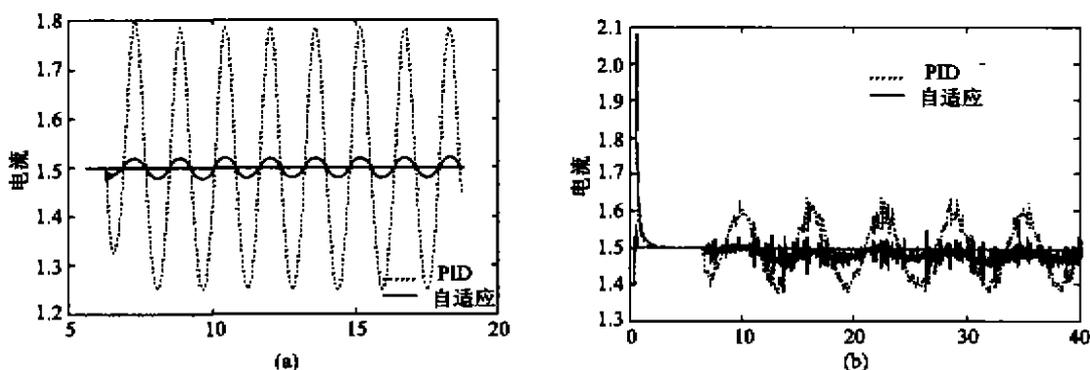


图 5 仿真结果

Fig. 5 The Results of Simulation

事实上, 弧长发生正弦形式波动的同时, 还常由于各种随机干扰附加产生随机波动。图 5-b 为增加了白噪声的正弦形式弧长扰动的仿真结果, 从图中可看出, 自适应控制仍比 PID 控制的效果优越的多。

如何将局部稳定条件扩展为在一定区域范围内的实用稳定性条件, 是一个需要继续研究的问题。我们将继续努力, 期待不久能取得新的进展。

在本文的仿真计算工作中, 研究生刘康平同学做了大量的工作, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Jin L, Nikiforak P N, Gupta M M. Adaptive tracking of SISO nonlinear systems using multilayered neural networks, Proc. of American Control Conference, Chicago, 1992.
- [2] CHEN Fu-chuang, LIU Chen-chang. Adaptively controlling of continuous-time systems using neural networks, Proc. of the American Control Conference, Chicago, 1992.
- [3] 刘延年, 忻欣, 冯纯伯. 基于神经网络的一类非线性连续系统的稳定自适应控制. 控制理论与应用, 1996, 13(1): 71-74.
- [4] 任雪梅, 高为炳. 基于神经网络的非线性系统辨识和控制的研究. 控制理论与应用, 1995, 12(2): 147-153.
- [5] 熊李成. 非线性传递函数理论及应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [6] [法] 朗道 I D. 自适应控制, 模型参考方法. 吴百凡译. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [7] 赵义纯. 非线性泛函分析及其应用. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [8] 花 德, 梁正敏. 炼钢电弧炉的电气设备. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [9] 刘小河, 崔社武. 一类非线性控制系统的全局稳定性. 西安理工大学学报, 1997, 13(1): 19-24.
- [10] 刘小河, 刘康平, 张成乾. 炼钢电弧炉过程控制的仿真研究. 张嗣瀛. 中国控制与决策第九届年会论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 1997. 1 182-1 185.

(编辑 曹大刚)

The research on adaptive control of model reference of nonlinear systems

LIU Xiao-he, CUI Du-wu

(Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The problems of adaptive model following control of some kind of nonlinear systems are discussed. First, the description of the systems is showed, then it is dealt with the condition of existing model following control for the systems. Then it is discussed the designing of adaptive controlling systems under prerequisite of local stability being satisfied. The examples of simulation show that the method is very effective in restraining the small extent of disturbance.

Key words: nonlinear systems; adaptive control; model following; simulation

· 学术动态 ·

1997 年陕西高校学报影响因子排序

根据 1998 年 10 月中国科技信息研究所发布的中国科技期刊引证报告, 陕西 17 所高等学校主办的理工类学报名列其中(见表 1)。它反映了这些学校 1995 年、1996 年发表的论文在 1997 年被引证的情况, 以及期刊影响因子状况。

表 1 1997 年陕西高校学报影响因子和被引频次排序

刊名	影响因子	陕西排序	在全国同类院校排序	被引频次	陕西排序	在全国同类院校排序
西北大学学报	0.241	1	3	138	4	17
西安建筑科技大学学报	0.195	2	11	72	8	48
西北农业大学学报	0.186	3	5	188	2	4
第四军医大学学报	0.175	4	5	165	3	5
西安交通大学学报	0.163	5	23	239	1	7
西北林学院学报	0.135	6	17	71	9	26
西北工业大学学报	0.113	7	49	113	6	27
西安地质学院学报	0.103	8	57	64	10	54
西安医科大学学报	0.094	9	15	116	5	11
西安石油学院学报	0.088	10	69	31	12	94
西安工业学院学报	0.075	11	83	18	14	119
陕西师范大学学报	0.070	12	15	105	7	2
西安公路学院学报	0.060	13	103	39	11	79
西北建筑工程学院学报	0.044	14	123	15	15	126
西安电子科技大学学报	0.025	15	141	21	13	112
陕西工学院学报	0.024	16	142	14	16	130
西安理工大学学报	0.009	17	150	4	17	157

* 全国高校分类为: 理工; 师范; 农林牧渔; 医学

(姚 远)