

混沌优化与模糊控制在混沌控制中的应用

修春波, 刘向东, 张宇河

(北京理工大学 自动控制系统, 北京 100081)

摘要: 为了解决延迟反馈控制中参数难以选取的问题, 将混沌优化和模糊控制的方法应用到混沌系统的延迟反馈控制中, 采用混沌优化方法确定出延迟反馈控制的延迟时间, 利用模糊控制技术确定出控制刚度等参数, 从而得到延迟反馈控制方法的参数. 同时, 利用本文算法, 可以一次确定出混沌系统的多个不稳定周期轨道的周期. 仿真结果验证了本文算法的有效性.

关键词: 混沌控制; 延迟反馈; 模糊控制; 混沌优化

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Applications of chaos optimization and fuzzy control in chaos control

XIU Chun-bo, LIU Xiang-dong, ZHANG Yu-he

(Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Chaos optimization and fuzzy control were applied in chaos control by time-delayed feedback method. Chaos optimization could find the proper delay time and fuzzy control could determine the control amplitude, which resolved the problem that the parameters in chaos control by time-delayed feedback method were difficult to be determined. Furthermore, the proposed method can also find several periods of unstable periodic orbits (UPO-s) in one search. The experimental results show that the proposed method is effective.

Key words: chaos control; time-delayed feedback; fuzzy control; chaos optimization

1 引言(Introduction)

1990 年, 美国 Maryland 大学的 Ott, Grebogi 和 Yorke^[1]提出了一种参数微扰法(OGY 方法)对混沌系统进行控制, 但该方法的扰动仅在系统的状态靠近不动点时才加上去. 附加外部振子反馈法克服了这一缺点, 扰动可以在任何时刻切入. 但该方法的困难在于设计特殊的振子. 1992 年 Pyragas^[2]提出了一种时间延迟反馈控制混沌的方法, 直接把系统的输出信号取出一部分, 经过时间延迟后再反馈到混沌系统中去作为控制信号. 该方法不需要知道控制系统具体的动力学模型, 只假设能观测到系统的某个输出量, 并且可以引入外力来控制, 同时它可以在任意时刻起控等等. 应用该方法的难点是参数的确定, 即延迟时间和控制刚度 K 的确定. 本文将混沌优化和模糊控制相结合应用到混沌系统的控制中, 利用混沌优化方法确定延迟时间, 利用模糊控制确定控制刚度, 从而解决了延迟反馈控制方法的参数选取问题.

2 时间延迟反馈控制方法(Chaos Control by time-delayed feedback method)

假设用一组常微分方程描述一非线性动力系统^[3], 同时可以引入外部力来控制.

$$\begin{cases} \dot{y} = P(y, x) + F(t), \\ \dot{x} = Q(y, x). \end{cases} \quad (1)$$

式中 y 是输出信号, x 为状态向量, $F(t)$ 为控制信号. 假设在 $F(t) = 0$ 时系统处于混沌状态, 时间延迟反馈控制的微扰形式为

$$F(t) = K[y(t - \tau) - y(t)] = KD(t), \quad (2)$$

$y(t)$ 是输出信号, τ 是时间延迟, K 是控制刚度, 当 $y(t - \tau) \approx y(t)$ 时, $F(t) \approx 0$. 延迟反馈控制方法可以在任意时刻加入控制信号, 但由于允许初始微扰较大可能会引起多重稳定解, 因此 Pyragas 引入了对外力的如下限制:

$$\begin{cases} F(t) = -F_0, & KD(t) \leq -F_0, \\ F(t) = KD(t), & -F_0 < KD(t) < F_0, \\ F(t) = F_0, & KD(t) \geq F_0. \end{cases} \quad (3)$$

这里 $F_0 \geq 0$ 是外加微扰范围的一个阈值. 在对外加力加此限制之后, 使得多重稳定解得到控制. 目前没有简单通用的方法来确定延迟反馈法控制中 τ 和 K 等参数的选取.

3 延迟时间 τ 的确定 (Choice of the delay time τ)

对于式(2), 如果延迟时间与第 i 个不稳定周期轨道(UPO)的周期相同 $\tau = T_i$, 那么对式(1)的与该UPO相应的解 $y(t) = y_i(t)$ 来说扰动变为零. 这意味着扰动不会改变系统(1)的第 i 个UPO的解. 这样选择一个适当的反馈权重 K 可以实现轨道的稳定化. 混沌由于具有遍历性和随机性等独特性质而在优化计算中具有很好的应用前景^[4]. 本文利用混沌优化方法在搜索空间内同时搜索 m 个局部极小点, 这些点就分别对应着不稳定周期轨道的 m 个周期. 这样就可以一次确定出混沌系统的多个UPO的周期值, 解决了 τ 的选取问题.

步骤1 确定不稳定周期轨道的优化函数形式为

$$J = \sum_{i=1}^n |y(t_0 + ih - \tau) - y(t_0 + ih)|. \quad (4)$$

式中, h 为混沌控制系统的步长; t_0 为初始时刻; n 为步数. 混沌优化的目的就是在给定的寻优空间 $[a, b]$ 内, 寻找能够使式(4)取得局部极小的 m 个延迟时间 $\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_m^*, \tau_i^* \in [a, b]$.

步骤2 选取式(1)的混沌序列 $y_k \in [y_{\min}, y_{\max}]$ 作为混沌载波信号, 即

$$y_{k+1} = f(x_k, y_k). \quad (5)$$

步骤3 为式(5)赋初值, $x_k = x_0, y_k = y_0$; 设定两不稳定周期之间的距离阈值 ΔT_0 ; 将当前优化函数值 $J_1^*, J_2^*, \dots, J_m^*$ 赋较大的初值.

步骤4 利用式(5)计算 y_{k+1} , 利用式(6)将其变换到寻优空间中

$$\tau = a + \frac{(y_{k+1} - y_{\min})}{(y_{\max} - y_{\min})} \cdot (b - a). \quad (6)$$

按式(4)计算 $J(\tau)$ 后, $x_k = x_{k+1}, y_k = y_{k+1}$.

步骤5 重复 r 次步骤4, 得到 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r$ 及相应的 $J_1(\tau_1), J_2(\tau_2), \dots, J_r(\tau_r)$.

步骤6 将所得的 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r$ 及相应的 $J_1(\tau_1), J_2(\tau_2), \dots, J_r(\tau_r)$ 与当前最优值 $\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_m^*$ 及相应的 $J_1^*, J_2^*, \dots, J_m^*$ 放在一起, 得到 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{r+m}$ 和 $J_1(\tau_1), J_2(\tau_2), \dots, J_r(\tau_{r+m})$, 按下面的规则选取新的 $J_1^*, J_2^*, \dots, J_m^*$ 及 $\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_m^*$:

规则1 $J_1^*, J_2^*, \dots, J_m^*$ 是 $J_1(\tau_1), J_2(\tau_2), \dots, J_r(\tau_{r+m})$ 中较小的 m 个;

规则2 将 J_i^* 对应的 $\tau_i^* (i = 1, 2, \dots, m)$, 按照从小到大的顺序排列, 对于任意的 i 满足 $x_{i+1} - x_i > \Delta T_0$.

步骤7 返回步骤4, 直到达到指定迭代步数.

按照上述方法所寻得的 $\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_m^*$ 对应着混沌系统的 m 个UPO的周期值.

4 控制刚度 K 的选择 (Choice of the control amplitude K)

延迟反馈控制中, 控制刚度的选取比较困难, 而且一旦确定后, 整个控制过程中控制刚度不变, 当系统存在噪声或系统参数发生变化时, 往往会导致控制失败. 由于模糊控制具有不需要系统的数学模型和鲁棒性强的特点^[5], 为非线性控制提供了有效的方法. 为了提高系统的鲁棒性, 可以采用模糊控制器来确定控制刚度 K .

采用双输入单输出的模糊逻辑控制器, 系统结构如图1所示.

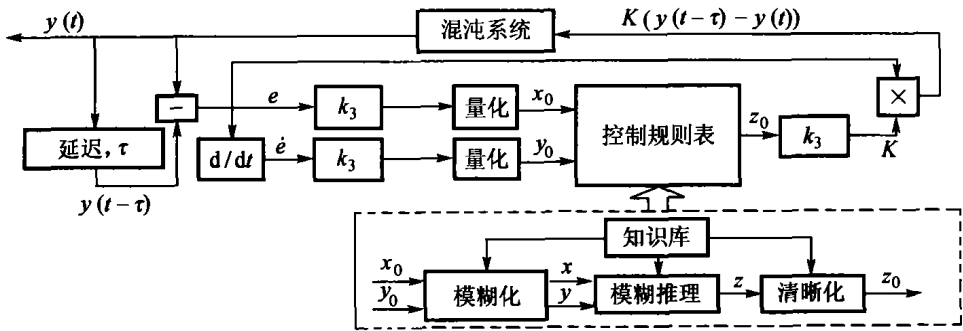


图1 系统结构
Fig. 1 Structure of the system

$e = y(t - \tau) - y(t)$ 为误差; $\dot{e} = e(t) - e(t - 1)$ 为误差的导数, 即误差的变化率; k_1, k_2, k_3 为尺度变

换的比例因子.

本文针对控制刚度的选取问题, 将混沌优化与

模糊控制相结合,先利用混沌优化方法为模糊参数粗略限定范围,然后再进行模糊分割.混沌载波信号仍采用式(5)的形式.

寻优对象为

$$J = \sum_{i=1}^n e^2(t_M + ih). \quad (7)$$

其中 e 为在 K 控制下的误差, J 为在 K 控制下,系统从 t_M 开始的误差累计.利用混沌优化方法求出在给定的寻优次数内使式(7)最小的控制刚度 K_0 ,及在该 K_0 控制下的误差和误差导数的变化范围 $[0, e_{\max}]$ 和 $[0, \Delta e_{\max}]$. 在 $[0, \gamma K_0]$, $[0, \gamma e_{\max}]$ 和 $[0, \gamma \Delta e_{\max}]$ 范围内进行模糊分割, γ 为扩展系数.

以误差和误差变化率作为模糊系统的输入,输出为控制刚度 K , 误差和误差的变化率在施加控制后越来越小,最终使混沌系统稳定在期望的轨道上.因此,误差或误差变化率较大时,选取较大的控制刚度.根据这样的原则来设计模糊控制规则表.

5 仿真实验(Simulation results)

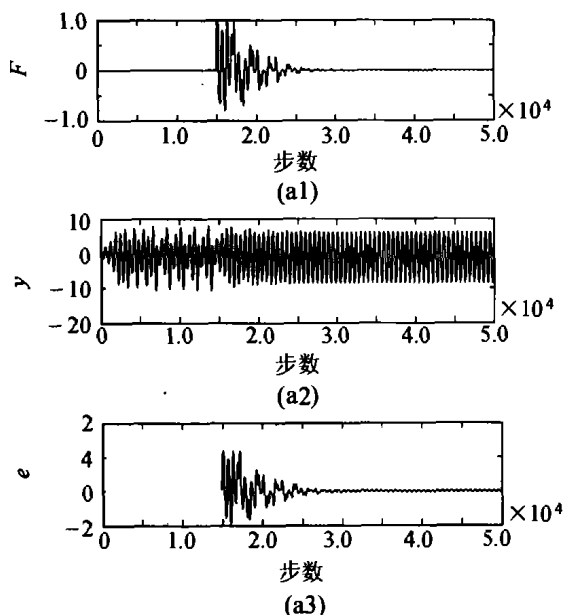
例1 Rossler 系统的控制.

Rossler 系统的形式和参数为

$$\begin{cases} dx/dt = -y - z, \\ dy/dt = x + 0.2y + F(t), \\ dz/dt = 0.2 + z(x - 5.7). \end{cases} \quad (8)$$

将输入信号 $F(t) = K(\gamma(t - \tau) - y(t))$ 仅扰动式(8)的第2式.

利用混沌优化方法一次寻找到 Rossler 的第1, 2, 3个UPO的周期 T_1, T_2, T_3 如表1所示.



不稳定周期轨道的周期	混沌寻优结果	期望值 ^[3]
T_1	5.9	5.9
T_2	11.73	11.75
T_3	17.47	17.5

利用模糊控制方法,在不改变控制器参数的情况下,可以分别将 Rossler 系统控制在周期1, 2, 3.而采用 Pyragas 方法就要根据不同的UPO周期而改变参数.图2给出了分别采用模糊控制和 Pyragas 方法控制时周期1的控制效果,其中仿真步长为0.01.

图2中的(a1)~(a3)分别为采用本文方法时的输入信号 F , 系统变量 y 和误差 e 的控制过程图; (b1)~(b3)分别为采用 Pyragas 方法时的输入信号 F , 系统变量 y 和误差 e 的控制过程图.与 Pyragas 方法相比,本文方法可以更快地将系统控制在期望的周期轨道上.当系统中加入噪声时,利用本文算法在不改变任何参数的情况下仍然可以控制到期望的周期轨道上,而采用 Pyragas 方法则很难找到合适的控制刚度 K .图3给出了在系统中加入振幅为0.5的均匀分布的噪声的情况下,将系统控制在周期2, 3时的相轨迹图.

可见,采用本文方法可以分别将混沌系统控制在不同的不稳定周期轨道上,同时与 Pyragas 方法相比,本文方法具有较强的鲁棒性,更快的控制速度和更好的控制效果.

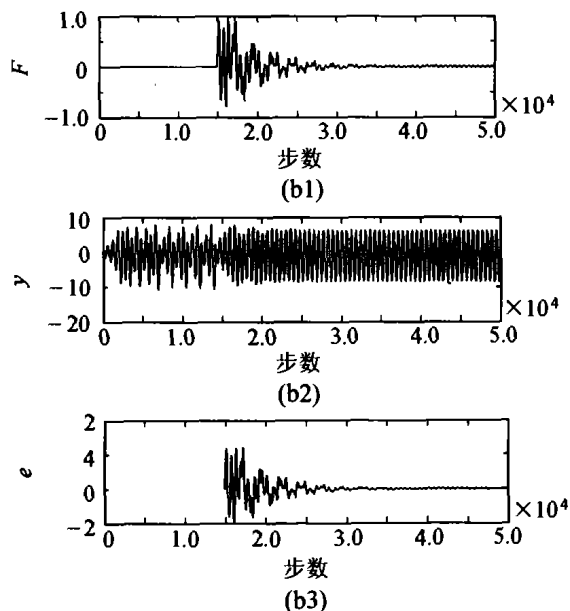


图2 本文方法和 Pyragas 方法的一周期控制结果

Fig. 2 Control results by the proposed method and Pyragas

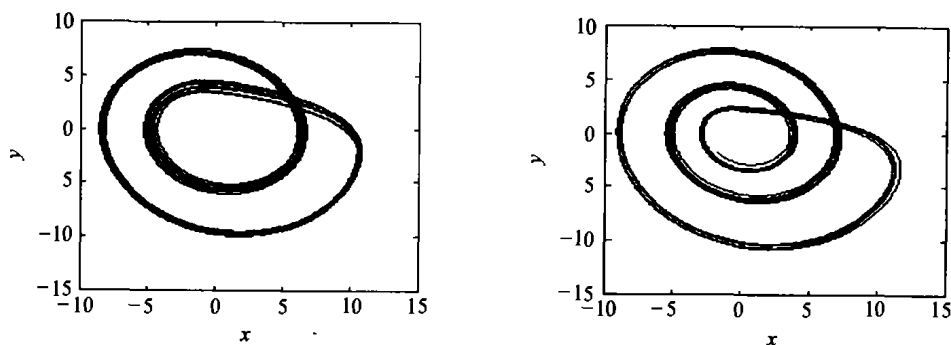


图3 在加入噪声情况下将系统控制在周期2,3轨道上的相轨迹图

Fig. 3 Control results of Rossler system with noise to period-2 and period-3 orbits

例2 Logistic系统的控制.

对于离散系统,本文选取对Logistic系统进行控制,Logistic系统的形式为

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n). \quad (9)$$

$\mu = 4$ 时,系统处于混沌状态.

利用本文方法与Pyragas延迟反馈控制分别对其进行控制,结果如表2所示.

从表2可见,本文方法可以更容易地将Logistic系统控制在高周期的轨道上,而且具有更快的控制速度.

表2 Logistic系统的控制结果

Table 2 Control results of Logistic system

延迟时间	系统的周期点	控制步数	
		本文方法	Pyragas 延迟反馈控制
1	0.75	8	12
2	(0.904509, 0.345492)	28	35
3	(0.969846, 0.116978, 0.413176)	120	无法控制

例3 蔡氏电路的控制.

蔡氏电路具有着复杂的混沌动力学特性^[6],其电路结构如图4所示.

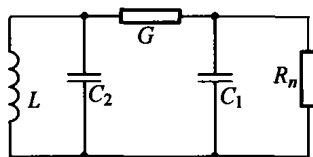


图4 蔡氏电路图

Fig. 4 Chua's circuit diagram

R_n 为非线性元件,系统方程可描述如下:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} = G(v_{c2} - v_{c1}) - g(v_{c1}), \\ C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} = G(v_{c1} - v_{c2}) + i_L, \\ L \frac{di_L}{dt} = -v_{c2}. \end{cases} \quad (10)$$

其中分段线性函数 $g(v_{c1}) = m_0 v_{c1} + 0.5(m_1 - m_0)(|v_{c1} + B_p| - |v_{c1} - B_p|)$, $m_0 = -0.5$, $m_1 = -0.8$, $B_p = 1$. 当电路参数 $C_1 = 9.0$, $C_2 = 1.0$, $L = 1.0/7$, $G = 0.7$ 时,系统呈现混沌行为. 将输入信号 $F(t) = K[y(t - \tau) - y(t)]$ 仅扰动式(10)的第一式.

利用混沌优化方法,一次寻找到系统的第1,2个UPO的周期 $T_1 = 12.0$, $T_2 = 24.18$.

采用模糊控制可以分别将实际的蔡氏电路的混沌系统控制在期望的周期轨道上.图5为控制在周期1和2时的相轨迹图.

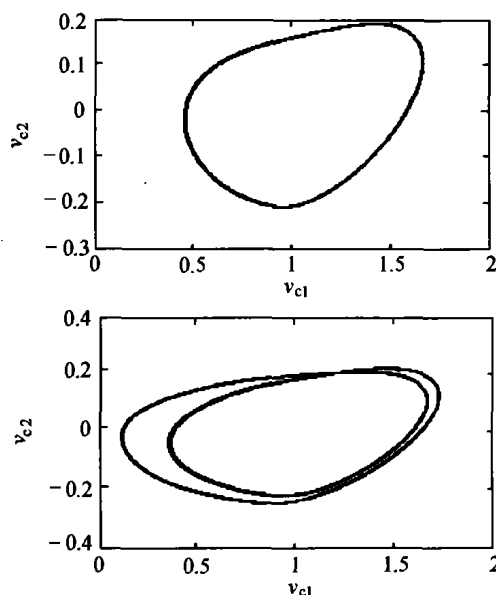


图5 蔡氏电路的控制结果

Fig. 5 Control results of Chua's circuit

(下转第71页)

- [4] 王广雄,袁欣,何朕.不稳定对象的PID控制[J].控制与决策,2002,17(5):611-613.
(WANG Guangxiong, YUAN Xin, HE Zhen. PID control of unstable plants [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(5): 611-613.)
- [5] DOYLE J, STEIN G. Multivariable feedback design: concepts for a classical/modern synthesis [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(1): 4-16.
- [6] WANG Guangxiong, WANG Xinsheng. H_∞ two-block design of servo systems [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (English*

edition), 2002, 9(2): 142-144.

作者简介:

张 静 (1968—),女,副教授,博士生,研究方向为鲁棒控制系统设计,E-mail: zh_liangyue@sina.com;

王广雄 (1933—),男,教授,博士生导师,研究方向为 H_∞ 控制理论及应用、控制系统的鲁棒设计,E-mail: gxwang@hope.hit.edu.cn;

何 朕 (1972—),女,副教授.研究方向为广义系统 H_∞ 控制、控制系统计算机辅助设计.

(上接第66页)

6 结束语(Conclusion)

将混沌优化算法和模糊控制应用到混沌系统的延迟反馈控制中,利用混沌优化算法可以一次确定出混沌系统的多个不稳定周期轨道的周期,从而解决了延迟反馈控制中延迟时间难以确定的问题.利用模糊控制技术确定延迟反馈控制中的控制刚度 K ,解决了控制刚度难以选取的问题.仿真结果表明,本文方法不但可以有效解决延迟反馈控制中参数选取的问题,同时提高了控制系统的鲁棒性和快速性.

参考文献(References):

- [1] OTT E, GREBOGI C, YORKE J C. Controlling chaos [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [2] PYRAGAS K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. *Physics Letters A*, 1992, 170(6): 421-428.
- [3] 王光瑞,于熙龄,陈式刚.混沌的控制、同步与利用[M].北京:国防工业出版社,2001,87-128.

(WANG Guangrui, YU Xiling, CHEN Shigang. *Control, Synchronization and Application of Chaos* [M]. Beijing: National Defence Industry Press. 2001, 87-128.)

- [4] 李兵,蒋慰孙.混沌优化方法及其应用[J].控制理论及应用,1997,14(4):613-615.

(LI Bing, JIANG Weisun. Chaos optimization method and its application [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(4): 613-615.)

- [5] 李函雄,陈关荣.传统模糊控制的双重特性[J].自动化学报,2001,27(4):447-459.

(LI Hanxiong, CHEN Guanrong. Dual features of conventional fuzzy logic control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(4): 447-459.)

- [6] MATSUMOTO G T. A chaotic attractor from Chua's circuit [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1984, 31(12): 1055-1058.

作者简介:

修睿波 (1978—),男,北京理工大学博士研究生,研究方向为混沌神经网络的应用,E-mail: xiuchunbo@sohu.com;

刘向东 (1971—),男,北京理工大学副教授,研究方向为非线性动力学、非线性控制、分叉混沌理论,E-mail: xdlu@bit.edu.cn;

张宇河 (1940—),男,北京理工大学教授,博士生导师,研究方向为机器人和运动控制,E-mail: zhangyuhe@bit.edu.cn.