

基于遗传算法的混沌系统二自由度比例-积分-微分控制研究

牛培峰 张 君 关新平

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2006 年 8 月 18 日收到, 2006 年 12 月 10 日收到修改稿)

二自由度比例-积分-微分(PID)控制算法简单、实用,但将其应用于复杂非线性系统控制时参数整定困难.运用改进的遗传算法进行二自由度 PID 控制器参数优化,参数优化的收敛速度快、准确,将其应用于 Chen 氏混沌系统和同步电动机混沌系统的控制中,仿真研究收到良好的控制效果.

关键词:混沌系统,遗传算法,比例-积分-微分控制

PACC: 0545

1. 引 言

混沌运动是一种貌似无规则的运动,它是非线性动力学系统所特有的一种运动形式.长期以来,由于混沌系统的复杂性,使得人们认为混沌系统是不可控制的.然而,自从 1990 年 Ott, Grebogi 和 Yorke 基于参数扰动的方法,成功地实现了混沌系统的 OGY 控制^[1-4].自此混沌系统的控制问题逐渐引起了人们的重视^[5,6],许多新的研究成果不断涌现^[7],许多控制方法也被应用到混沌系统的控制中^[8].如,反馈线性化控制方法^[9,10]、智能控制方法^[11]、比例-积分-微分(PID)控制方法^[12-16]等.而在上述这些控制方法中,PID 控制方法是实用性最强的一种控制方法,但在常规的 PID 控制器中只能设置一种控制器参数,这种参数需要在干扰抑制最佳参数和设定跟踪最佳参数之间进行折衷设置,因此很难得到系统的最佳控制效果,故将此类控制器称为单自由度 PID 控制器.为了获得更好的控制效果,解决参数设置需要折衷考虑的矛盾,二自由度 PID 控制器的设计思想被提出来了.二自由度 PID 控制器并不是由两个独力的 PID 控制器组成的,但它却能够独力地设定两组 PID 参数,使干扰抑制特性和设定跟踪特性同时达到最佳.对于一个线性系统,有一些经验整定公式对二自由度 PID 控制器进行参数整定设置,而对于非线性混沌系统则没有参数设置的经验整定公式.因此,本文采用一种改进的遗传算法来进行二自

由度 PID 控制器的参数寻优,并将其应用于混沌系统控制中,仿真实验收到良好的控制效果.

2. 二自由度 PID 控制器

二自由度 PID 控制器的结构形式是多种多样的,本文采用设定值滤波型二自由度 PID 控制器,其混沌控制系统如图 1 所示.

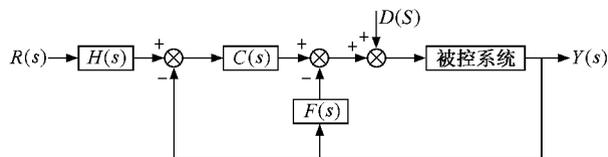


图 1 二自由度 PID 混沌控制系统

在图 1 中, $R(s)$ 为设定值输入, $H(s)$ 为设定值滤波器, $C(s)$ 和 $F(s)$ 组成微分先行 PID 控制器, $D(s)$ 为随机干扰信号, $Y(s)$ 为系统输出.其中 $C(s)$ 和 $F(s)$ 的表达式为

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (1)$$

$$F(s) = K_p \left(\frac{T_d s}{1 + 0.1 T_d s} \right). \quad (2)$$

2.1. 二自由度 PID 控制器的设计

根据 $C(s)$ 和 $F(s)$ 的设计来实现干扰的最佳抑制,因此,实现干扰抑制的算法为

$$\begin{aligned} & \alpha(s) + F(s) \\ & = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + 0.1 T_d s} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

调整(3)式中的 T_i , T_d , K_p 可以实现干扰的最佳抑制.

2.1.1. 设定最佳跟踪算法

由 $H(s)$ 和 $\alpha(s)$ 的设计来实现设定最佳跟踪, 因此实现设定跟踪的算法为

$$H(s)\alpha(s) = K_p \left[\alpha + \left(\frac{1}{T_i s} - \frac{\beta}{1 + T_i s} \right) + \frac{\gamma T_d s}{1 + 0.1 T_d s} \right], \quad (4)$$

式中 $0 < \alpha, \beta, \gamma < 1$, 是 T_i , T_d 和 K_p 的二自由度化系数, 通过调整设定 α, β, γ , 可以实现设定最佳跟踪特性.

由(1)式和(4)式可以求得设定值滤波器为

$$H(s) = \frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s} + \frac{T_i s}{1 + T_i s} \left(\frac{-\beta}{1 + T_i s} + \frac{\gamma T_d s}{1 + 0.1 T_d s} \right). \quad (5)$$

2.2. 二自由度 PID 控制器参数寻优

2.2.1. 传统二自由度 PID 控制器参数优化

一般传统的二自由度 PID 控制器的设计方法分两步进行, 首先采用常规的 PID 参数整定方法来设置 T_i , T_d 和 K_p , 使干扰抑制为最佳, 然后根据经验值选定二自由度化系数 α, β 和 γ , 以满足给定值跟踪特性的要求. 这种方法不仅十分麻烦, 而且其整定的结果并不是最优的参数. 二自由度化系数的经验值见表 1.

表 1 二自由度化系数的经验值

综合控制算法	α	β	γ
P-I-PD	0.4	0	0
PI-PID	0.4	0.15	0
PID-PID	0.4	0.15	0.48

2.2.2. 基于改进遗传算法的二自由度 PID 控制器参数寻优

显然遗传算法已经取得了广泛的应用, 但仍然存在着计算效率低, 收敛速度慢等缺陷. 为了提高遗传算法的性能, 这里采用如下的改进措施^[17].

措施 1 初始种群的生成: 在问题解的空间中, 用均匀分布采样点的方法取代基本遗传算法中用随机方法产生初始化代码串群. 这样通过适当选择代码串的长度和种群数, 可以在开始的几代内找到各极值点所在的区域, 以加快搜索步伐.

措施 2 变种群数 N 的遗传算法: 采用种群数 N 逐次递减的方法. 在算法初期, 采用大的种群数, 并结合均匀分布码串群的方法, 可快速搜索到最优解的区域. 随着遗传代数的增加, 种群数 N 逐次下降, 使码串群迅速收敛到最优解所在的区域, 淘汰掉适应值低的码串群, 这样就解决了基本遗传算法中种群 N 选择的矛盾, 大幅度减少计算量, 并且提高计算的效率, 加快收敛速度.

措施 3 交叉与变异策略: 在基本的遗传算法中, 交叉概率 P_c 是固定不变的, 这就给 P_c 的选取带来困难. 如果在算法的初期采用大的交叉概率 P_c 来加剧种群的变化, 以便加快寻找优良种群所处的区域. 随着遗传代数的增加, P_c 的值递减, 这样就解决了由于 P_c 的取值过大而使适应问题环境值高的代码串很快被破坏掉和取值过小使搜索速度缓慢的矛盾. 此外, 采用新的变异策略, 一方面减小原有变异概率 P_m , 另一方面, 在优良种群周围进行小步距大变异, 这样可避免算法陷入局部极小又极大地降低了再次产生无用的劣质解发生的概率, 加快了收敛速度, 提高了计算效率.

措施 4 采取最优保留的进化策略: 这样可以保证算法的全局收敛.

为了解决传统二自由度 PID 控制器参数优化存在的问题, 我们采用改进的遗传算法整定二自由度 PID 控制器的参数. 其整定寻优过程如下^[18].

步骤 1 采用传统的参数整定方法, 先粗略地确定各个参数的取值范围.

步骤 2 确定相应的编码方法.

步骤 3 采用在解空间中均匀分布采样点的方法, 产生初始代码串群 (N 个串).

步骤 4 确定适应度函数.

步骤 5 确定种群数 N 、交叉概率 P_c 、常规变异概率 P_m 及小步距变异概率 P_{mm} .

步骤 6 确定每一码串的适应度值.

步骤 7 判定是否满足精度要求, 若满足, 表示种群收敛, 终止计算. 种群中适应度最好的代码串所表示的参数即为所求参数, 否则, 转向步骤 8.

步骤 8 采用改进的遗传算子产生下一代由 T_i , T_d 和 K_p 或 α, β 和 γ 组成的代码串群, 返回到步骤 6 继续执行.

这种改进的遗传算法计算效率高, 收敛速度快, 设计的二自由度 PID 控制器不仅具有满意的跟踪性能, 而且还能很好地抑制外界干扰, 使整个混沌系统

的鲁棒稳定性能也得到很大的提高。

本文优化问题的适应度函数 F 取为

$$F = C/J, \quad (6)$$

式中 $C = 10^n$, n 为整数. 当个体的适应度相差较大时, $n \leq 0$; 当个体的适应度相差较小时, $n \geq 0$; J 为二次型性能指标.

$$J = \int_0^t \left\{ w_1 e^2(t) + w_2 u^2(t) + w_3 \left[\frac{de(t)}{dt} \right]^2 \right\} dt \quad (7)$$

其中, $u(t)$ 为控制量; w_1 , w_2 和 w_3 是权值, 这里取 $w_1 = 100$, $w_2 = 10$, $w_3 = 1$.

3. 仿真研究

3.1. Chen 氏混沌系统

受控的 Chen 氏混沌系统为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) + u_1, \\ \dot{y} &= (c - a)x - xz + cy + u_2, \\ \dot{z} &= xy - bz + u_3. \end{aligned} \quad (8)$$

当未施加控制作用, 即当 $u_1 = 0$, $u_2 = 0$, $u_3 = 0$ 时, 并在 $a = 35$, $b = 3$, $c = 28$ 的情况下, 系统处于混沌状态^[19].

基于改进遗传算法的二自由度 PID 运行 200 步后的控制器参数优化结果为 $K_{p1} = 38.81$, $T_{i1} = 65.25$, $\alpha_1 = 0.42$, $\beta_1 = 0.65$; $K_{p2} = 58.15$, $T_{i2} = 7.81$, $\alpha_2 = 0.26$, $\beta_2 = 0.21$; $K_{p3} = 18.36$, $T_{i3} = 14.24$, $\alpha_3 = 0.18$, $\beta_3 = 0.57$; $T_{d1} \approx T_{d2} \approx T_{d3} \approx 0$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$. 因此, 只采用 PI 控制作用. 初始点选为 $(5, 10, 50)$, 基于 Matlab6.1/Simulink 编程, 分两种情况进行研究.

1) 当控制步数 $n \geq 1500$ 时, 加入控制作用和方差为 5 的白噪声干扰信号以及如下的参考输入信号:

$$\begin{aligned} x_r &= 10 + \sin(t), \\ y_r &= 20 + \sin(t), \\ z_r &= 25 + \sin(t). \end{aligned}$$

仿真实验结果如图 2 所示.

2) 当控制步数 $1500 \leq n \leq 5000$ 时, 加入控制作用和干扰信号以及参考输入信号, 此时的参考输入信号为

$$\begin{aligned} x_r &= 25 + \sin(0.3\pi t), \\ y_r &= 5\sin(0.2\pi t), \end{aligned}$$

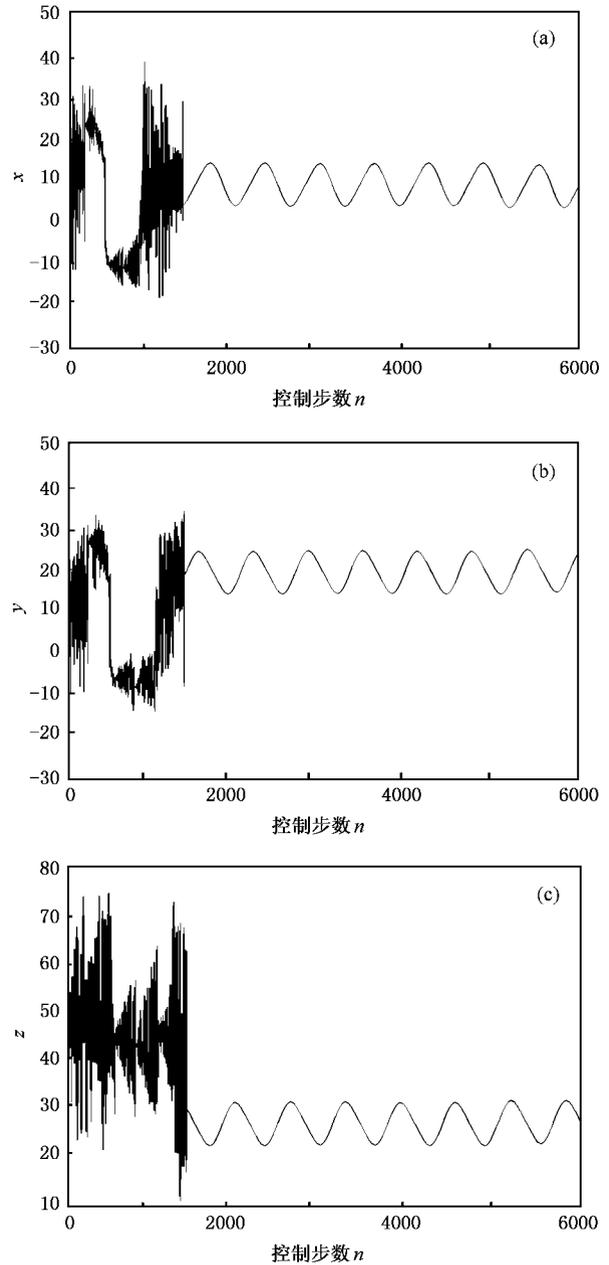


图 2 Chen 氏系统仿真曲线(1)

$$z_r = 25 + \sin(t).$$

在控制步数 $n > 5000$ 时, 取消控制作用、干扰信号和参考输入信号. 仿真实验结果如图 3 所示.

3.2. 同步电动机混沌系统

受控的同步电动机混沌系统可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x + yz + u_1, \\ \dot{y} &= -xz - y + az + u_2, \\ \dot{z} &= b(y - z) + u_3. \end{aligned} \quad (9)$$

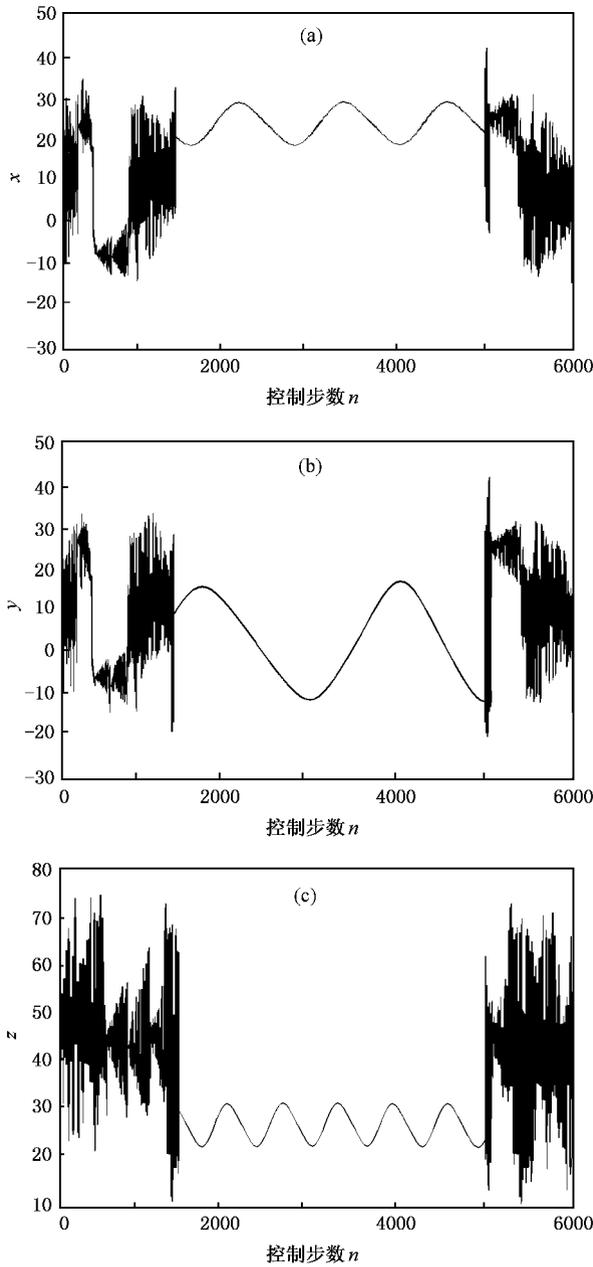


图 3 Chen 氏系统仿真曲线(2)

当未施加控制作用,即当 $u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0$ 时,在 $a = 20, b = 5.46$ 的情况下,系统处于混沌状态^[20].基于改进遗传算法的二自由度 PID 运行 200 步后的控制器参数优化结果为 $K_{p1} = 10.78, T_{i1} = 11.24, \alpha_1 = 0.13, \beta_1 = 0.43; K_{p2} = 50.83, T_{i2} = 5.21, \alpha_2 = 0.28, \beta_2 = 0.18; K_{p3} = 15.64, T_{i3} = 21.02, \alpha_3 = 0.42, \beta_3 = 0.51; T_{d1} \approx T_{d2} \approx T_{d3} \approx 0, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$.因此只采用 PI 控制作用.初始点选为 $(5, 10, 50)$,基于 Matlab6.1/Simulink 编程,分两种情况进行研究.

1)当控制步数 $1500 \leq n \leq 5000$ 时,加入控制作用和方差为 5 的白噪声干扰信号,将电机混沌系统从混沌状态控制到不稳定的平衡状态 $(-5, 10, 15)$.仿真实验结果如图 4 所示.

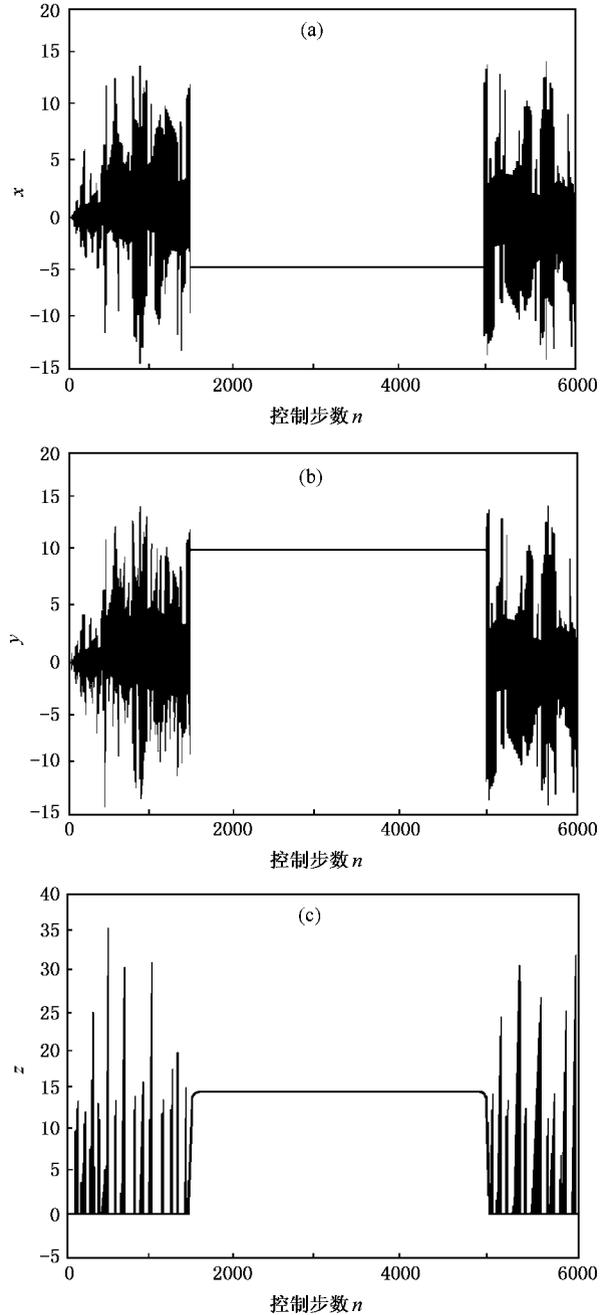


图 4 电机系统仿真曲线(1)

2)当控制步数 $n \geq 1500$ 时,加入控制作用和干扰信号以及如下的参考输入信号:

$$x_r = 3.2\sin(0.04\pi t),$$

$$y_r = 5\cos(0.02\pi t),$$

$$z_r = 15 + 8\sin(0.2t),$$

仿真实验结果如图 5 所示。

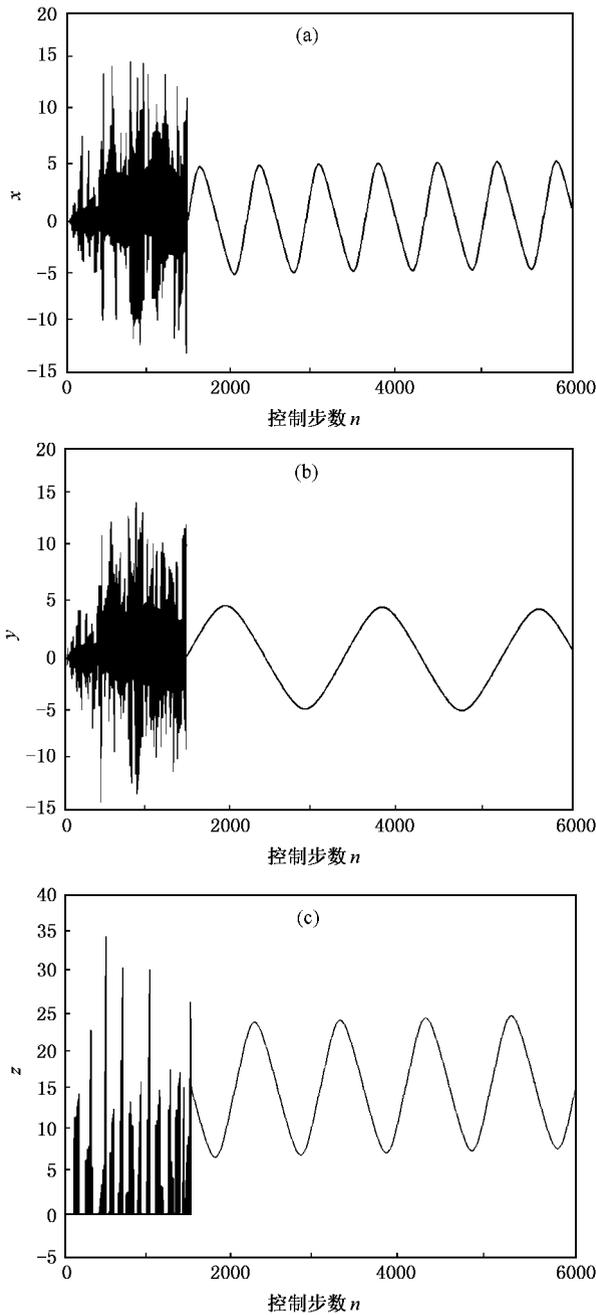


图 5 电机系统仿真曲线(2)

为了对比,我们对 Chen 氏混沌系统进行了基于改进遗传算法的单自由度 PID 控制的仿真实验研究.基于改进遗传算法的单自由度 PID 运行 200 步后的控制器参数优化结果为 $K_{p1} = 30.56, T_{i1} = 71.36; K_{p2} = 51.25, T_{i2} = 11.51; K_{p3} = 12.25, T_{i3} = 19.48; T_{d1} \approx T_{d2} \approx T_{d3} \approx 0$. 因此,只采用 PI 控制作

用.初始点选为(5,10,50),基于 Matlab6.1/Simulink 编程,当控制步数 $n \geq 1500$ 时,加入控制作用和方差为 5 的白噪声干扰信号以及如下的参考输入信号:

$$x_r = 10 + \sin(t),$$

$$y_r = 20 + \sin(t),$$

$$z_r = 25 + \sin(t),$$

仿真实验结果如图 6 所示.从图中可以看出,单自由度 PID 控制抑制干扰的效果较差.

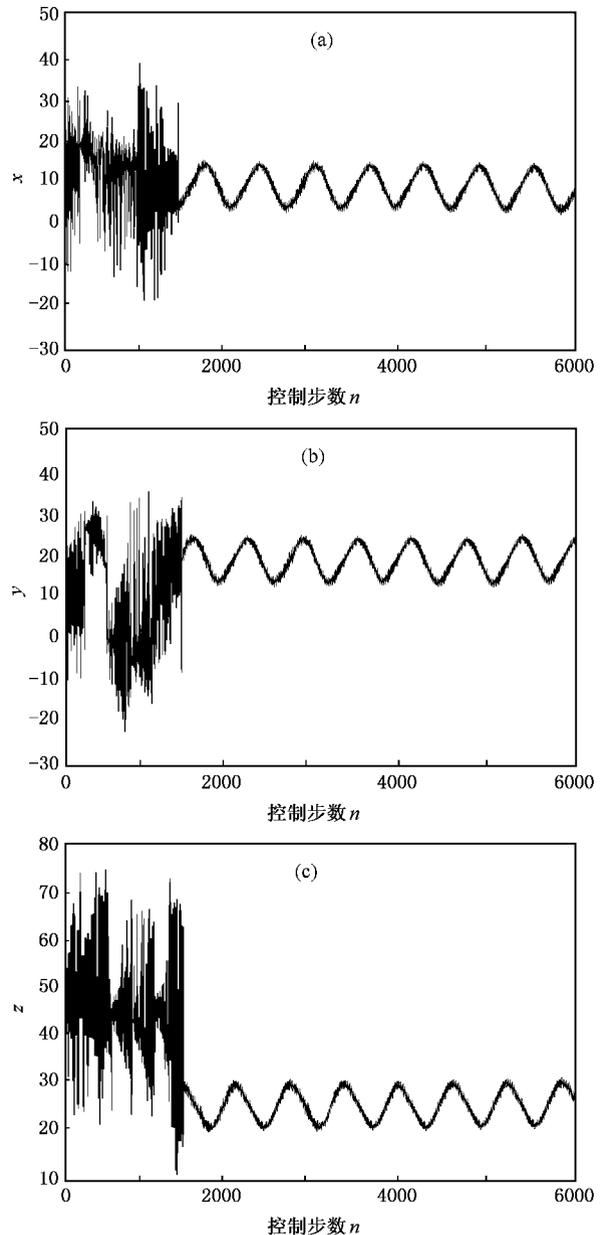


图 6 Chen 氏系统单自由度 PID 控制仿真曲线

另外,我们还应用基本遗传算法优化的二自由度 PID 控制器对 Chen 氏混沌系统进行了仿真实验

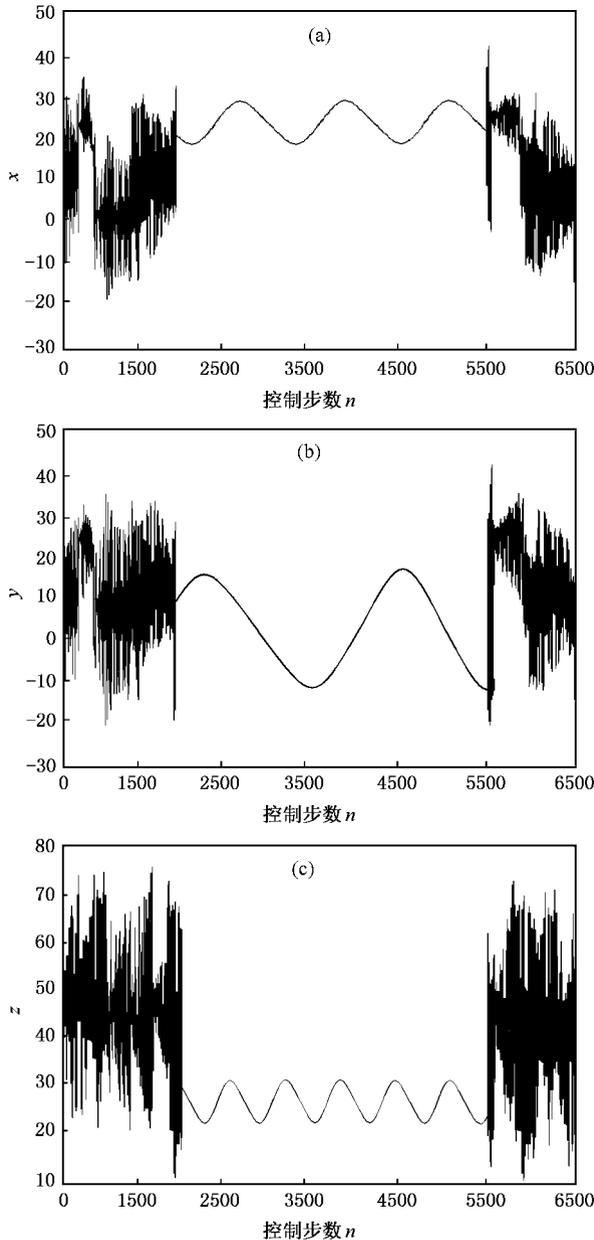


图 7 基本遗传算法二自由度 PID 控制器 Chen 氏系统仿真曲线

研究 结果是如果要想得到与采用改进遗传算法优化相同的控制效果,则优化运行步数至少需要达到 430 步才能获得如图 7 所示的仿真实验结果.因此,从上述给出的仿真实验结果可以看出,基于改进遗传算法的二自由度 PID 控制器对混沌系统能够实现有效的控制,无论是对干扰的抑制,还是对任意给定跟踪目标的控制,均能获得满意的控制效果.控制算法对被控混沌系统的先验知识要求很少,控制策略不改变被控混沌系统的参数和结构,因此,当取消控制作用后,被控混沌系统能够恢复原动力学状态,控制效果优于单自由度 PID 控制器的控制效果,其优化速度高于采用基本遗传算法优化的二自由度 PID 控制器,使其更适用于在实时控制中应用.

4. 结 论

将改进的遗传算法引入混沌系统的二自由度 PID 控制器参数优化的设计中,仿真实验获得了良好的控制效果.基于改进遗传算法的二自由度 PID 控制器可以同时满足抑制干扰和设定跟踪两种性能指标的要求,参数寻优的收敛速度快、准确,最终给出的 PID 控制参数是真正意义上的最佳参数,其控制性能大大优于单自由度 PID 控制器及基本遗传算法优化的二自由度 PID 控制器,完全可以满足复杂混沌系统控制的要求.

[1] Guan X P , Fan Z P , Chen C L *et al* 2002 *Chaos Control and Its Applications in Security Communication* (Beijing : National Defense Industry Press) p19 (in Chinese) [关新平、范正平、陈彩莲等 2002 混沌控制以及在保密通信中的应用(北京:国防工业出版社 第 19 页)]

[2] Yu D C , Wu A G 2005 *Chin. Phys.* **14** 914

[3] Yu D C , Wu A G 2006 *Chin. Phys.* **15** 95

[4] Yu D C , Wu A G 2006 *Chin. Phys.* **15** 306

[5] Liu H , Liu D , Deng L F 2006 *Chin. Phys.* **15** 1196

[6] Wu Z M , Lu J G , Xie J Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 1201

[7] Li H C , Zhang J S , Xiao X C 2005 *Chin. Phys.* **14** 2181

[8] Zhu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6248 (in Chinese) [朱志宇 2006 物理学报 **55** 6248]

[9] Wu C L , Ma S J , Sun Z K , Fang T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6253 (in Chinese) [吴存利、马少娟、孙中奎、方 同 2006 物理学报 **55** 6253]

[10] Xue Y J , Yin X H , Feng R P 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 641 (in Chinese) [薛月菊、尹逊和、冯汝鹏 2000 物理学报 **49** 641]

[11] Ren H P , Liu D 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 982 (in Chinese) [任海鹏、刘 丁 2002 物理学报 **51** 982]

- [12] Jing G P , Chen G R , Tang W K 2002 *IEEE Trans . Circ . Syst .* **49** 1820
- [13] Yang Z H , Yao Q H , Yang C H 2003 *Elec . Mach . Contr* **7** 67 (in Chinese) [杨志红、姚琼荃、杨昌宏 2003 中国电机工程学报 **7** 67]
- [14] Cai Y L , Xu J X 1993 *J . Nonlin . Dyn .* **1** 45 (in Chinese) [蔡远利、徐健学 1993 非线性动力学学报 **1** 45]
- [15] Han B H , Yan S , Zhang S Q 2001 *Elec . Opt . Contr .* **4** 54 (in Chinese) [韩保红、闫石、张淑琴 2001 电光与控制 **4** 54]
- [16] Wang D F 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1495 (in Chinese) [王东风 2005 物理学报 **54** 1495]
- [17] Xu H Z , Xu M T , Zhang F N 1998 *Journal of System Simulation* **10** 59 (in Chinese) [徐洪泽、徐漫涛、张福思 1998 系统仿真学报 **10** 59]
- [18] Wang Q , Ma L , Qiang W Y *et al* 2001 *Control and Decision* **16** 195 (in Chinese) [王强、麻亮、强文义等 2001 控制与决策 **16** 195]
- [19] Liu J H , Chen G R , Zhang S C 2003 *J . Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* **20** 123]
- [20] Zhang B , Li Z , Mao Z Y *et al* 2002 *Contr . Theory Appl .* **18** 796 (in Chinese) [张波、李忠、毛宗源等 2001 控制理论与应用 **18** 796]

Research on genetic algorithm optimization based on PID control with two degrees of freedom controller for chaotic system

Niu Pei-Feng Zhang Jun Guan Xin-Ping

(*Institute of Electric Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China*)

(Received 18 August 2006 ; revised manuscript received 10 December 2006)

Abstract

The proportional-integral-derivative (PID) control algorithm with two degrees of freedom are easy and useful . But when they are applied to nonlinear systems , the parameters are difficult to tune . Using improved genetic algorithm to optimize parameters of PID controller with two degrees of freedom , the convergence rate of parameter optimization is rapid and accurate . When applied to Chen 's chaotic system and synchronous motor chaotic system , good results are obtained in simulation experiments .

Keywords : chaotic system , genetic algorithm , proportional-integral-derivative control

PACC : 0545