

基于遗传算法的统一混沌系统比例-积分-微分控制*

王东风

(华北电力大学自动化系,保定 071003)

(2004 年 7 月 15 日收到;2004 年 12 月 6 日收到修改稿)

提出了一种并行遗传算法用于比例-积分-微分(PID)控制器结构和参数的同时优化,遗传算法采用浮点数和二进制混合矩阵编码.优化后的 PID 控制器用于统一混沌系统的控制,仿真研究结果表明:1)用一个比例-积分(PI)调节器可将统一混沌系统控制到零不动点;2)用三个 PI 调节器可将统一混沌系统控制到非零不动点;3)所提出的并行遗传算法具有很强的全局优化能力,较好地克服了简单遗传算法的过早收敛问题;4)整个控制系统具有很好的调节品质和很强的鲁棒性,对 PID 调节器用于控制混沌系统具有重要的参考价值.

关键词:混沌,统一混沌系统,遗传算法,比例-积分-微分控制

PACC:0545

1. 引 言

混沌控制由于具有广阔的应用前景而成为非线性科学中一个十分活跃的研究领域^[1].1990 年,Ott, Grebogi 和 Yorke 基于参数扰动的方法,成功实现了混沌系统的 OGY 控制^[1].自此,关于混沌系统控制问题的研究引起了人们的重视,新的研究成果不断涌现.现有的许多控制方法,如反馈线性化^[2]及智能控制方法^[3],或者需要知道精确的数学模型,或者不容易工程实现,比例-积分-微分(PID)控制是一种被广泛使用的控制方法,近年来被引入混沌系统的控制,如 Jiang 等^[4]和杨志红等^[5]分别用状态比例-积分(PI)调节器实现了连续混沌系统和离散混沌系统的控制,蔡远利等^[6]和韩保红等^[7]用输出反馈实现了 Duffing 混沌运动的 PID 控制.对于复杂的统一混沌系统^[8],

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (25\alpha + 10) y - x, \\ \frac{dy}{dt} &= (28 - 35\alpha)x - xz + (29\alpha - 1)y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - (\alpha + 8)z/3, \end{aligned} \quad (1)$$

如何使 PID 调节器较好地对其进行控制,值得探索.最新研究表明:系统(1)在参数区间 $\alpha \in [-0.016, 1.15]$ 均是混沌的^[8],该系统有三个平衡点,分别是

$$S_0(0, 0, 0), S_+(\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, \sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, 27-6\alpha), S_-(-\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, -\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, 27-6\alpha)$$

其中 S_0 为鞍点, S_+ 和 S_- 为不稳定焦点.对此系统或者其特殊情形的控制,近年来已成为一个较为热门的研究课题^[8-12].

从简单性和实用性出发,本文提出一种并行遗传算法(PGA)对 PID 调节器结构和参数同时进行优化,目标是使得优化后的 PID 调节器能够胜任在不同参数、不同初始条件下,将统一混沌系统控制到任意平衡点或任意非平衡点.

2. 统一混沌系统与 PID 控制

大量实践表明,PID 控制器各项增益控制效果明确,这种简明的控制分量独立整定效果对于工程应用操作是十分方便而且往往也是十分有效的.

对于典型的反馈控制系统,PID 控制器表示为

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2)$$

用传递函数形式描述为

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (3)$$

式中,偏差 $e = R - y$, y 为过程被控量, R 为被调量设定值; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数.

* 国家留学基金(批准号 2004813090)和华北电力大学博士基金(批准号 D2060106)资助的课题.

现考虑受控的统一混沌系统如下：

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (25\alpha + 10) y - x + u_1, \\ \frac{dy}{dt} &= (28 - 35\alpha)x - xz + (29\alpha - 1)y + u_2, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - (\alpha + 8)z/3 + u_3, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 u_1, u_2, u_3 是控制量, 本文考虑由 PID 控制器得到. 从控制理论的观点看, 这是一个 3×3 的多变量受控系统, 原则上应设计 3×3 的 PID 控制器才能达到较好的解耦控制效果. 因此, 我们设计 PID 控制器如下：

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $G_{ij}(s)$ ($i, j = 1, 2, 3$) 为形如 (3) 式的 PID 控制器, 记

$$G_{ij}(s) = \frac{u_i(s)}{E_j(s)} = K_{p_{ij}} + \frac{K_{i_{ij}}}{s} + K_{d_{ij}}s. \quad (6)$$

按照这种思路, 与 Duffing 混沌系统的控制器设计相比, 统一混沌系统 PID 控制器的参数设计是很复杂的, 目前还没有非常有效的方法进行多变量系统的 PID 控制器参数整定. 因此我们采用一种 PGA 进行 PID 控制器的优化.

3. 基于 PGA 优化的统一混沌系统 PID 控制

3.1. PGA

遗传算法 (GA) 是模仿生物进化过程的一种优化方法^[13]. 但对于大型复杂系统优化问题的求解, GA 仍有许多缺陷, 如无法保证收敛到全局最优解、群体中最好的染色体的丢失、进化过程的过早收敛等.

提高 GA 全局收敛性能的方向之一是采用 PGA. 目前 PGA 的研究可分为主从式模型、粗粒度模型和细粒度模型三种, 其中粗粒度模型是适应性最强和应用最广的遗传算法并行化模型. 从实现策略看, 粗粒度模型适合进行分布式并行计算.

然而现有的 PGA 基本是简单 GA (SGA) 的简单扩展, 因为各子群体 (EC) 均是同一进化类型的 SGA. 本文则在各子群体中使用不同类型的改进

GA, 如自适应 GA (AGA)、混沌 GA (CGA)、模糊 GA (FGA)、免疫 GA (IGA) 和模拟退火 GA (SAGA) 等, 这也更符合人类社会的群体分布和不同区域的进化模式. 根据上述分析, 本文采用主从式模型和粗粒度模型结合的 PGA, 其网络拓扑结构如图 1 所示.

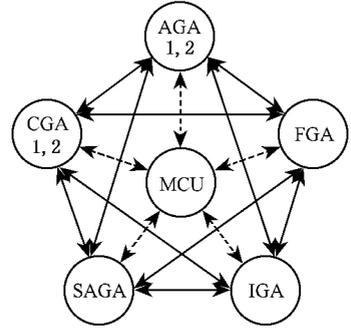


图 1 并行遗传算法网络拓扑结构示意图



在图 1 中, MCU 是主控制模块, 完成优秀个体的再分配任务. 本文的 PGA 还要引入迁移算子^[13], 个体迁移的选择方法为按适应度挑选个体作为迁移对象. 根据图 1 所示的网络拓扑结构, 本文迁移发生在所有子种群, 即所谓“一传多”的迁移策略. 为博众家之长, 各子群体的进化策略分别采用前人积累的研究成果, 则图 1 中的 AGA1, AGA2, CGA1, CGA2, FGA, IGA, SAGA 作为 PGA 的 M ($M = 7$) 个独立进化子群体. 在此基础上, 下面给出 PGA 的算法步骤.

第 1 步 对 M 个子群体分别设置有关系数, 如交叉概率 P_{ci} 、变异概率 P_{mi} 等, 并随机产生子群体初始种群, 假定均为 N 个. M 个子群体分别称之为 EC_{0i} ($i = 1, 2, \dots, M$), 以后第 k 代进化子群体称为 EC_{ki} ;

第 2 步 各子群体 EC_{ki} 按预定的迁移概率和迁移间隔与其他群体交换个体, 完成迁移策略;

第 3 步 各子群体同时独立进化, 以 P_{ci} 交叉并以 P_{mi} 变异产生新的 N 个个体, 称之为 EC_{mki} .

第 4 步 对 $(EC_{ki} + EC_{mki})$ 共 $2N$ 个个体分别计算适应值.

第 5 步 对此 $2N$ 个个体按适应值排序选择产生 $0.5N$ 个个体.

第 6 步 对此 $2N$ 个个体按轮盘转产生 $0.35N$ 个个体.

第 7 步 对第 i 个进化子群体随机产生新的 $0.1N$ 个补充个体.

第 8 步 对每个子群体, 第 5、第 6、第 7 步产

生的共 $0.95N$ 个个体组成新的第 k 代进化子群体 $EC_{k,i} (i = 1, 2, \dots, M)$ 还有 $0.05N$ 个个体由第 11 步得到。

第 9 步 将第 4 步产生的个体中的 5% 优秀个体传送至主控模块 MCU。

第 10 步 主控模块 MCU 对 M 个子群体传递的共 5% 的 NM 个个体进行评价,如满足终止条件则结束,否则进行下一步。

第 11 步 对 M 个子群体,MCU 在 5% 的 NM 个最佳个体中分别随机选择 $0.05N$ 个个体分配到 $EC_{k,i} (i = 1, 2, \dots, M)$,从而完成主控模块的再分配任务,返回第 2 步继续。

3.2. 遗传优化 PID 控制器的混合矩阵编码

遗传算法进行优化问题求解时,一般均涉及编码、群体初始化、适配值函数、选择、交叉、变异、终止准则和算法参数等问题^[13]。本文主要介绍编码和适配值函数的选取问题,采用一种适于本文问题求解的浮点数和二进制混合矩阵编码方法,在本节予以介绍。对于适配值函数的选取问题,则在下面介绍。其他方面则同于一般 GA 或一般矩阵编码 GA 的设计^[13]。本文的混合矩阵编码为

$$A_{4 \times 9} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{13} \\ K_{p11} & K_{p12} & \dots & K_{p13} \\ K_{i11} & K_{i12} & \dots & K_{i13} \\ K_{d11} & K_{d12} & \dots & K_{d13} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,第一行为开关参数 $\delta_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$,是一位二进制编码,当 $\delta_{ij} = 1$ 时,表示使用 PID 控制单元 $G_{ij}(s)$ 当 $\delta_{ij} = 0$ 时,表示不使用 PID 控制单元 $G_{ij}(s)$,目的是尽可能减少 3×3 的 PID 控制器元素的个数。除 $\delta_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 外,其余各参数均采用浮点数编码,第 2、第 3、第 4 行分别为比例系数、积分系数和微分系数的编码。

3.3. 遗传优化 PID 控制器适配值函数选取

由于统一混沌系统描述的是一族混沌系统,其中有一个参数 α ,我们的目的则是用固定参数的 PID 控制器,使得 α 为 $[-0.016, 1.15]$ 之间的任意值时,统一混沌系统(1)均得到良好的控制。这样,从理论而言,需要在区间 $[-0.016, 1.15]$ 内遍历 α 进行优化,但这是不可能的。这意味着只能选取有限个 α 进行 PID 控制器的优化。为了减少优化工作量,我们选取几个典型的 α 进行优化工作,即取 α 为 5 个典

型值: $\alpha = -0.016, 0, 0.8, 1, 1.15$ 。 α 为其他取值的情况,则作为考察控制器的鲁棒性进行验证。

设遗传进化过程中个体 i 对应的系统能量函数为 E_p , 则适应度函数 $F(p)$ 可直接定义为 E_p 的函数。本文的适配值函数选取如下:

$$F(p) = 1/(E_p + \text{const}), \quad (8)$$

式中 const 为大于零的常量,引进此常量的目的是避免算法因分母接近于零而溢出。由于本文同时考虑 5 个 α , 则 E_p 应为 5 个 α 产生的能量函数 $E_{\alpha_k} (k = 1, \dots, 5)$ 之和

$$E_p = \sum_{k=1}^5 E_{\alpha_k}. \quad (9)$$

(9) 式表明 E_p 是同时考虑 5 个典型 α 情况下的综合控制效果。

3.4. 统一混沌系统的 PID 控制仿真研究

为便于比较^[8,14],下面的仿真研究多数是在初始值为 $(1, 1, 1)$ 的条件下, $t = 10$ s 开始激活控制器,此前为自由混沌运动。

3.4.1. 控制统一混沌系统到零不动点

当目标是控制统一混沌系统到零不动点 $S_0(0, 0, 0)$ 时,并行遗传算法的优化结果仅 $\delta_{22} = 1$, 其他 $\delta_{ij} = 0$, 而且 $K_{p22} = 67.68, K_{i22} = 10.51, K_{d22} \approx 0$ 仿真实验时实际取 $K_{d22} = 0$, 这表明,仅需要一个 PI 调节器即可将统一混沌系统控制到零不动点。此时,在初始条件为 $(1, 1, 1)$ 时的仿真曲线如图 2 所示。

为验证控制器的有效性,我们还做了大量的实

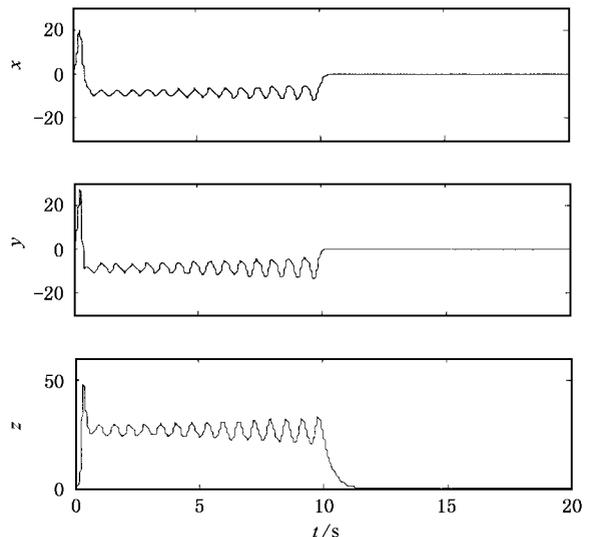


图 2 $\alpha = 0$ 控制到 S_0 时的仿真结果

验.结果表明,当选取不同的 α 或者选取不同的初始条件时,仿真结果同样是很好的.

3.4.2. 控制统一混沌系统到非零不动点

当目标是控制统一混沌系统到非零不动点 S_+ 或 S_- 时,并行遗传算法的优化结果为 $\delta_{ii} = 1 (i = 1, 2, 3)$, 其他 $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$, 而且 $K_{p11} = 35.22$, $K_{i11} = 77.5$, $K_{d11} \approx 0$; $K_{p22} = 55.47$, $K_{i22} = 9.3$, $K_{d22} \approx 0$; $K_{p33} = 13.89$, $K_{i33} = 16.57$, $K_{d33} \approx 0$. 仿真实验时实际取 $K_{d11} = 0$, $K_{d22} = 0$, $K_{d33} = 0$. 这表明, 仅需 3 个 PI 调节器即可将统一混沌系统控制到非零不动点. 此时, 在初始条件为 (1, 1, 1) 时的仿真曲线如图 3 所示.

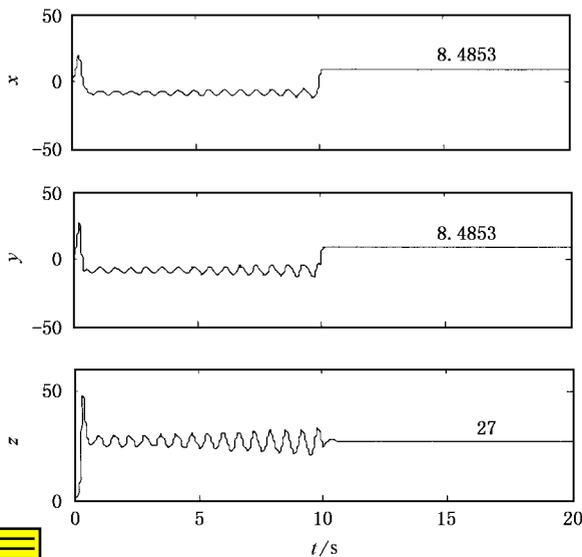


图 3 $\alpha = 0$ 控制到 S_+ 时的仿真结果

为验证 α 取优化值 -0.016, 0, 0.8, 1, 1.15 以外情况下的控制效果, 随机选择若干 α 值或取不同的初始条件时, 大量的仿真结果同样表明所优化的 PI 控制器具有良好的调节品质. 限于篇幅, 仿真结果从略.

3.4.3. 控制统一混沌系统到非平衡点

以上对平衡点 S_+ 和 S_- 进行了优化, 我们的仿真研究结果表明, 所优化得到的控制器同样可以将统一混沌系统控制到非平衡点. 图 4 给出了随机选取 α 为 0.126, 随机选取初始值 (-18, 3, 12), 且随机选取一控制目标点 (-21, 5, 24) 时的仿真结果.

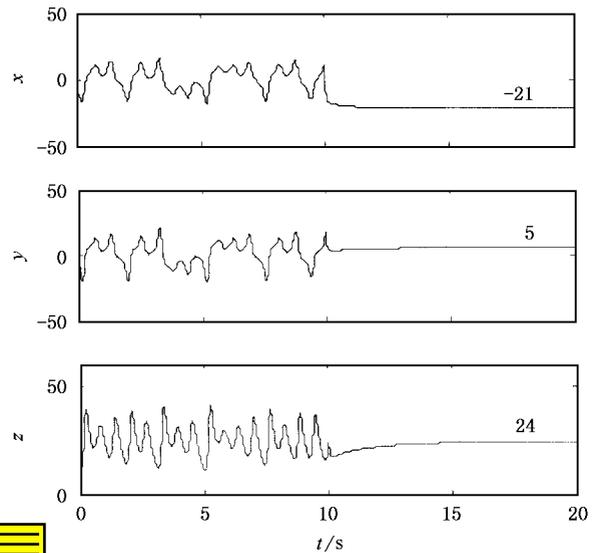


图 4 $\alpha = 0.126$ 控制到 (-21, 5, 24) 时的仿真结果

同样, 我们还进行了其他情况下的大量仿真研究, 即对 α 值、初始值和控制目标点随机选取, 研究结果均表明了控制方法的有效性.

4. 结 语

本文提出一种 PGA 优化 PID 调节器, 用于控制统一混沌系统. 实验结果表明, 优化后的 PID 调节器不仅结构简单, 而且能够很好地将统一混沌系统控制到任意平衡点或非平衡点, 具有良好控制品质和很强的鲁棒性.

[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 混沌控制及其在保密通信中的应用(北京:国防工业出版社)第 19 页]

[2] 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]

[3] 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]

[4] Jiang G P, Chen G R, Tang W K 2002 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **49** 1820

[5] Yang Z H, Yao Q H, Yang C H 2003 *Elec. Mach. Contr.* **7** 67 (in Chinese) [杨志红、姚琼英、杨昌宏 2003 电机与控制学报 **7** 67]

[6] 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]

[7] 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 光电与控制 **4** 54]

- [8] Chen G R , Lü J H 2003 *Analysis , Control and Synchronization of Lorenz Chaotic System*(Beijing : Science Press) p141 (in Chinese)
[陈关荣、吕金虎 2003 Lorenz 系统族的动力学分析、控制与同步(北京 科学出版社)第 141 页]
- [9] Lu J H , Chen G , Zhang S 2002 *Int . J. Bif. Chaos* **12** 351
- [10] Tao C H , Lu J A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 281 (in Chinese) [陶朝海、陆君安 2003 物理学报 **52** 281]
- [11] Guan X P , Fan Z P , Peng H P *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2108 (in Chinese) [关新平、范正平、彭海朋等 2001 物理学报 **50** 2108]
- [12] Liu J , Chen S H , Lu J A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1595 (in Chinese) [刘 杰、陈士华、陆君安 2003 物理学报 **52** 1595]
- [13] Wang L 2003 *Shop Scheduling with Genetic Algorithms* (Beijing : Tsinghua University Press) p140 (in Chinese) [王 凌 2003 车间调度及其遗传算法(北京 : 清华大学出版社)第 140 页]
- [14] Chang W , Park F B , Joo Y H *et al* 2002 *Inform. Sci.* **151** 217

Genetic algorithm optimization based proportional-integral-derivative controller for unified chaotic system *

Wang Dong-Feng

(Department of Automation , North China Electric Power University , Baoding 071003 , China)

(Received 15 July 2004 ; revised manuscript received 6 December 2004)

Abstract

Proportional-integral-derivative (PID) control of unified chaotic system (UCS) was researched. For optimization of PID controller 's structure and parameters , a parallel genetic algorithm (PGA) was proposed. In GA evolution process , hybrid decimal system and binary system matrix encoding technique was adopted. Simulation study results of optimal PID control for UCS show that : 1) UCS can be controlled to unstable zero equilibrium point by using only one PI controller. 2) UCS can be controlled to any unstable non-zero equilibrium point by using three PI controllers. 3) The proposed PGA owns global optimization ability , it can avoid premature problem of simple GA. 4) The control system obtained good regulating performance and strong robustness.

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

PACC : 0545

* Project supported by the National Scholarship Foundation of China (Grant No. 2004813090) and the Doctoral Foundation of North China Electric Power University , China (Grant No. 02060106).