

文章编号: 1001-0920(2001)04-0457- 05

联姻遗传算法在 CSTR 系统中的应用

林 峰, 杨启文

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 将基于联姻遗传算法的模型参考自适应控制方法引入连续搅拌反应釜这一复杂的非线性系统, 通过运用新型的联姻遗传算法对控制系统的 PD 参数进行在线调整, 使模型参考自适应控制达到理想的控制效果。仿真结果表明了该方法的良好控制性能。

关键词: 联姻遗传算法; 在线遗传算法; 早熟收敛; 模型参考自适应控制

中图分类号: TP 206

文献标识码: A

Application of Allied Genetic Algorithm to the CSTR System

L IN Feng, YAN G Qiwen

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the allied genetic algorithm a new Model Reference Adaptive Control(MRAC) method is presented. An application of this method to the control of the Continuous Stirred Tank Reactor(CSTR) system which is a complex nonlinear system is studied. Using the novel allied genetic algorithm to optimize the on-line PD s control parameters, desirable control effect is obtained. Simulation results show the validity of the method.

Key words: allied genetic algorithm s; on-line genetic algorithm s; premature convergence; MRAC

1 CSTR 系统

连续搅拌反应釜系统(CSTR)是一种复杂的非线性化学反应器系统。在进行以下符合实际情况的假设: 1) 混合是完全的; 2) 流出物料的体积流量等于进入物料的体积流量。同时为不失一般性, 假定反应釜中所发生的是一级不可逆放热反应。则由热力学及化学动力学知识, 可得该系统的数学模型^[1]如下

$$\frac{dx_1}{dt} = -x_1 + 0.112(1-x_1)e^{x_2/(1+x_2/19.186)} \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -28.12x_2 + 16.07 \times 0.112 \times$$

$$(1-x_1)e^{x_2/(1+x_2/19.186)} + 27.12u \quad (2)$$

$$y = x_2 \quad (3)$$

2 联姻遗传算法

CSTR 系统作为一种复杂的非线性系统, 一般常规的 PD 控制已不能满足要求。为此, 近年来人们对模型参考自适应控制在 CSTR 系统中的应用给予了更多的关注, 理论分析和仿真表明这种控制方案具有独特的优越性。本文将联姻遗传算法应用于 CSTR 系统, 取得了良好的控制效果。

遗传算法作为一种有效的寻优手段, 已广泛应

收稿日期: 2000-05-19; 修回日期: 2000-07-27

作者简介: 林峰(1969—), 男, 浙江舟山人, 讲师, 博士, 从事智能控制、交流调速等研究; 杨启文(1969—), 男, 江苏常州人, 博士生, 从事进化计算、模糊系统等研究。

用于交通、通信、电力、制造系统、材料科学等领域^[2]。与传统的寻优算法不同，它不苛求于问题的动力学信息(如连续、可微等)，具有全局收敛的特性^[3]。遗传算法自正式提出至今已有 20 多年的历史。目前，人们针对其存在的问题和缺点提出了许多改进型算法，主要包括两方面内容：1) 遗传策略的改进：如保留最优个体(Elitist Strategy)^[4]，迁移及人工选择策略(GAMAS)^[5]；2) 遗传算子及其操作概率的改进^[6-9]：遗传算子因编码方式不同而不同，如自适应操作概率AGA^[6]。这些改进措施大大提高了遗传算法的优化能力。

遗传算法具备并行处理的能力，随着并行分布式计算机的推广应用，遗传算法的并行处理算法越来越受到人们的重视。为了进一步提高遗传算法的搜索效率，本文对遗传策略和遗传算子分别提出了改进措施，得到一种可并行处理的遗传算法——基于联姻策略的并行遗传算法(PGAAS)。

2.1 联姻策略

Craig Potts 等人提出一种可并行实现的基于迁移和人工选择的 GAMAS 算法。该算法采用 4 个功能不同的种群，通过各种种群间最佳个体有目的迁移来保持种群内个体的多样性，并在此基础上寻求新的最佳个体。GAMAS 不足之处在于：种群数目较多，算法计算量大；种群内的进化采用 SGA，收敛速度慢；不同种群间的联系较疏松，每一代产生的最佳个体间没有发生作用，因此这些优秀个体所携带的有效基因没有开发出来。

在生物的进化过程中，一般存在着这样一种现象：近亲繁殖的后代，其许多性能往往比父辈差，而血缘关系相差大或地域差异大的父母所产生的后代，往往表现出非常优异的特性。因此，作为高等生物的人类自觉或不自觉地采取了异地联姻的方式，尽可能地避免同族间(特别是具有一定血缘关系的个体间)发生婚配关系。

在单种群的遗传算法中，由于种群的大小受到限制，其后代都是由有限个父母所产生，有相当一部分后代很可能源于具有相同基因结构的同一父母，因此很容易导致算法的早熟收敛。本文将人类的这种联姻方式引入到遗传算法中，提出一种多种群并行进化的遗传算法。

设有 M ($M \geq 2$) 个种群并行进化，当种群与种群之间满足某种条件时，不同种群间的当代最佳个体两两联姻，并将联姻后代中的最佳个体复制到相关的两种群中，参与下一代的进化过程。由于联姻后

代携带了另一种群的基因，因此联姻策略一方面能保持种群中基因的多样性，避免了近亲繁殖带来的危害；另一方面，由于引进其它种群的优良基因，因而能加快算法的搜索过程。为防止最佳个体在进化过程中的消失，本文同时扩展了单种群 GAs 的最佳个体保留策略，即比较各种群的最佳个体以及联姻后代的最佳个体，保留其最优者，并作为“种子”参与各种群的下一代进化过程。这就是联姻策略的主要思想。两种群联姻模式如图 1 所示。

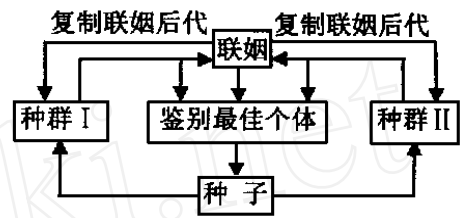


图 1 两种群联姻模式

2.2 逻辑算子(遗传算子)

对于二进制编码的遗传算法，杂交算子通常为一点杂交、两点杂交、多点杂交和均匀杂交。在这 4 种杂交算子中，由 {0, 1} 构成的基因都是作为符号进行遗传操作的，而“0”和“1”在数字技术(如计算机技术)中是两种逻辑状态，其行为方式可通过定义不同的逻辑运算来实现。本文将“0”和“1”的逻辑功能赋与 GAs 中的基因，这样便可得到一种全新的遗传算子——逻辑算子：

杂交算子：与 / 或

变异算子：同异 / 异或

例如：

	父	母	后代	算子
杂交	110100101	010100001	111101101	“与”运算
	011101001	111101101	111101101	“或”运算
变异	1101 00 101	110001101	110001101	“异或”运算
	0111 01 001	011100001	011100001	“同或”运算

其中“·”表示两染色体该处基因发生变异。

2.3 PGAAS 描述及算法流程

根据文献[10]对单种群 GAs 的描述，PGAAS 算法可描述为

$$PGAAS = \begin{matrix} M \\ \vdots \\ M \end{matrix} (P_i(0), N_i, l, S_i, g_i, p_i, f_i, c_i, t), M \quad 1 \quad (4)$$

其中， M 为种群规模； $P_i(0)$ 为初始种群； N_i 为每个种群的大小； l 为染色体长度，为保证联姻成功， l 必须保证相同； S_i 为遗传策略，联姻策略为其中之一；

g_i 和 p_i 分别表示遗传算子和遗传概率; f_i 为适合值计算法; c_i 为联姻条件; t 为算法终止准则。

PGAA S 相应的算法流程如下:

- 1) M 个种群分别初始化;
- 2) 每个种群独自进化(单种群遗传算法);
- 3) 若满足联姻条件 c_i , 则种群两两联姻(见图 1);
- 4) 判断是否满足终止准则 t , 若条件成立, 则程序终止, 否则转向 2)。

此处的联姻条件 c_i 设定为每进化一代联姻一次。在具体实现中, 我们将不同种群间的当代最佳个体两两联姻, 并将联姻后代中的最佳个体复制回相关的两种群中, 取代原种群中的最差个体, 参与下一代的进化过程; 同时比较各种群的最佳个体以及联姻后代的最佳个体, 取其中的最优者作为“种子”保留下来, 参与各种群的下一代进化过程。

3 模型参考自适应控制

根据上述分析, 我们提出一种基于联姻遗传策略的模型参考自适应控制方法, 其控制原理如图 2 所示。在实现过程中, 首先将 PD 参数编码成遗传算法的染色体, 用联姻遗传算法寻最优的 PD 参数。其中联姻遗传算法寻优的适合度函数依据系统期望输出与系统模拟输出的差值而定。

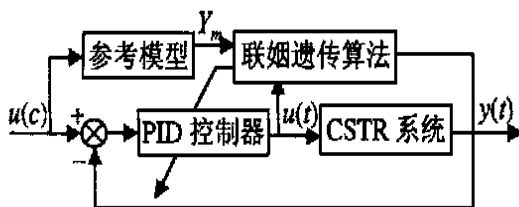


图 2 系统控制原理

4 联姻遗传算法的在线优化

遗传算法作为一种全局优化算法, 在各种不同的优化问题中得到广泛的应用。它的基本思想是在种群基础上一代代地进化, 因此其优化速度较慢, 通常用于离线优化问题。但其优异的性能促使人们对它在实时控制系统中的在线优化进行深入的研究^[12, 13], 这也是当今遗传算法研究中的一个新方向。遗传算法用于在线优化控制需要满足以下条件^[12]:

- 1) 被控对象的模型已知, 并且两次采样间的时

间间隔足够长, 以便让遗传算法收敛到一个较优值。

2) 遗传算法可用于只需很少先验知识的实时控制, 而且如果能用专家系统直接指导算法的优化过程, 则将得到更好的结果。

3) 用于遗传算法在线优化的控制器应是设计好的控制器, 例如对于一个用遗传算法优化的 PD 控制器, 其结构已经确定, 在线优化只是对这些参数进行在线调整。这样可以解决系统模型不精确或系统时变等问题。

由此可知, 要想完全实现遗传算法的在线优化确实有很大难度。在线优化的遗传算法不可能象离线 GA 那样, 经过许多代的进化和进行大量的运算得到一个最优解(在目前的硬件条件下难以实现), 通常只能进化几代或十几代, 仅对控制器中的某些参数进行微调。

本系统中, CSTR 系统的时间常数远远超过其采样周期, 所采用的适合度函数是系统期望输出与系统模拟输出的差值 ($Fitness[i] = 1/|y_i - y_m|$), 并且系统中 PD 控制器的结构已经确定, 因此为联姻遗传算法在线优化的实现奠定了基础。为使仿真过程更加符合实际系统实时性的要求, 这里限定最多进化 10 代。

5 数字仿真

在系统仿真实验中, 我们选取两种参考模型:

- 1) 非线性参考模型

$$\frac{dx_1}{dt} = -x_1 + 0.12(1-x_1)e^{x_2/(1+x_2/20)} \quad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -28x_2 + 17 \times 0.12(1-x_1) \times e^{x_2/(1+x_2/20)} + 27R \quad (6)$$

$$y = x_2 \quad (7)$$

- 2) 线性模型

$$\frac{dx_1}{dt} = -1.64x_1 + 0.64 \quad (8)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -28x_2 - 10.882x_1 + 27R + 10.882 \quad (9)$$

$$y = x_2 \quad (10)$$

仿真程序主要由两部分组成: 一是模型参考自适应控制部分; 二是联姻遗传算法(见第 2.3 节 PGAA S 算法流程) 寻优部分。其主程序流程如下:

- 1) 由参考模型计算期望输出 y_m ;
- 2) 调用 PGAA S 子程序, 求解最优 PD 参数(当

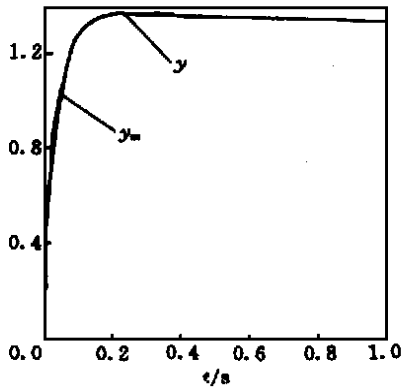


图3 非线性参考模型的曲线比较

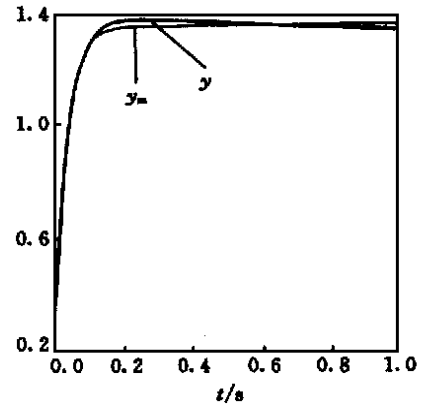


图4 线性参考模型的曲线比较

寻优过程超过 10 代时, 取前 10 代的最优解);

3) 将 PD 参数代入系统, 求得实际输出, 并返回 1)。

单种群遗传算法模块流程如下:

- 1) 种群初始化;
- 2) 解码得 PD 参数;
- 3) 代入系统模型得输出 y_i , 与 y_m 比较得适应度

$$\text{Fitness}[i] = 1/|y_i - y_m|;$$

- 4) 根据适合度再生种群;
- 5) 从种群中选择一对父母, 执行杂交和变异操作;

6) 判断种群是否出现染色体基本相同的情况, 若满足则进行迁移;

7) 反复执行 2) ~ 6), 直至找到一组使 y 与 y_m 间误差小于规定值时为止。

遗传算法所采用的参数是根据仿真调试的经验选取的, 此处 $(M, N, \lambda, P_c, P_m) = (2, 50, 48, 0.6, 0.1)$; 误差不大于 0.001, 采样周期 $T = 0.01s$ 。

利用上面提供的数据, 我们得到一组系统仿真曲线。采用非线性参考模型时, 其输出 y_m 与自适应控制系统输出 y 的比较曲线如图 3 所示; 采用线性参考模型时, 其输出 y_m 与自适应控制系统输出 y 的比较曲线如图 4 所示。

由图可见, 无论参考模型是非线性的还是线性的, 运用这种控制方法都可达到模型输出与实际输出基本重合的控制效果。

6 结 论

本文首先将遗传算法与 PD 控制相结合, 提出了运用遗传算法在线寻最优(或次优)PD 参数的模

型参考自适应控制算法, 实验结果证明效果良好。然后通过将人类在漫长的进化过程中不断总结形成的繁衍方式——联姻的思想引入到遗传算法, 提出一种基于联姻策略的并行遗传算法, 不仅提高了遗传算法的稳定性, 加快了遗传算法的收敛速度, 而且更加证实了遗传算法“不是一种单纯的优化算法, 而是一种以进化思想为基础的全新的一般方法论”^[21]这一观点。充分说明遗传算法在很大程度上遵循了生物的进化法则, 任何有助于物种繁衍和进化的自然规律, 都可作为遗传算法的改进措施。

参考文献

- [1] 陈申, 蒋静坪, 袁惠根 CSTR 的非线性自适应控制[J]. 信息与控制, 1992, 21(4): 124-128
- [2] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697-704
- [3] A E Eiben, E H Aarts, Van Hee K M. Global convergence of genetic algorithms: An infinite Markov chain analysis [A]. Parallel Problem Solving from Nature[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 4-12
- [4] J G John. Optimization of control parameters for genetic algorithms[J]. IEEE Trans on SMC, 1986, 23(1): 122-128
- [5] J Craig Potts, Terri D G, Surya B Y. The development and evolution of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(1): 73-86
- [6] M Srinivas, L M Patnaik. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(4): 656-666
- [7] 章珂, 刘贵忠 交叉位置非等概率选取的遗传算法[J]. 信息与控制, 1997, 26(1): 53-60

(下转第 464 页)

接的对应关系式(5.3)。

在位置调节过程中,位置系统设定值

$$S^* = S_0 + \Delta S \quad (5.6)$$

S^* 只与轧件扰动量 ΔP_d 有关,与位置调节过程本身无关,从而实现了动态设定(或设定一步到位)。

动态设定型变刚度模型实质上是在控制系统构成中使用了静态扰动观测器

$$\Delta P_d = \Delta P + M Q \Delta S / (M + Q) \quad (5.7)$$

动态设定型变刚度模型系统实用框图如图2所示

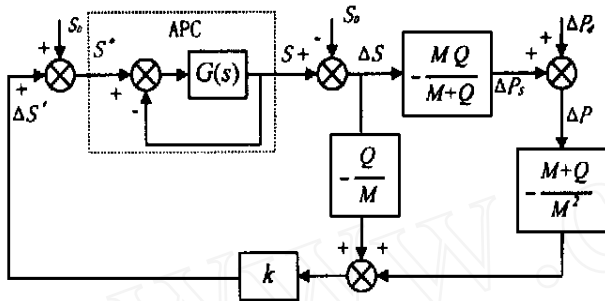


图2 动态设定型变刚度系统实用框图

示。动态设定型变刚度模型系统的控制算法表达式为

$$S^* = S_0 + \Delta S \quad (5.8)$$

$$\Delta S = \frac{-k\Delta S Q}{M} - \frac{k\Delta P (M + Q)}{M^2} \quad (5.9)$$

$$k = dM / (M + Q - cQ) \quad (5.10)$$

6 厚度计型和动态设定型变刚度模型的统一性证明

对于厚度计型和动态设定型AGC系统的统一性,作者在文献[5]中以控制算法表达式、控制系统框图和P-h图3种途径做了详细证明。同理,也可通过这3种途径详细证明厚度计型变刚度模型和动态设定型变刚度模型的统一性。为了简略,本文只从控

制算法上对上述问题加以证明。

变刚度模型控制算法的一般形式为

$$S^* = f(S, P, S_0, P_0) \quad (6.1)$$

对于厚度计型变刚度模型控制算法,将式(3.3), (4.9) ~ (4.12)代入式(3.1)得

$$S^* = S_0(M + Q) / (M + Q - cQ) - S c Q / (M + Q - cQ) - (P - P_0) c (M + Q) / M (M + Q - cQ) \quad (6.2)$$

对于动态设定型变刚度模型控制算法,将式(3.3), (4.9), (5.9)和(5.10)代入式(5.8),所得结果与式(5.2)完全相同。所以,厚度计型变刚度模型和动态设定型变刚度模型是统一的。

7 结 语

传统的厚度计型变刚度控制系统只是B ISRA变刚度系统和厚度计型AGC系统的简单复合,系统的动态品质并不理想^[3]。本文提出一种新的厚度计型变刚度控制系统,它具有良好的动态特性,并证明新的厚度计型变刚度系统与动态设定型变刚度系统是完全统一的。这一结果澄清了一些轧机变刚度控制中的认识问题,为变刚度方法的进一步研究与应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 日本钢铁协会 板带轧制理论与实践[M] 王国栋, 吴国良译 北京: 中国铁道出版社, 1990
- [2] 张进之 压力AGC系统参数方程及变刚度轧机分析[J] 冶金自动化, 1984, 8(1): 24-31.
- [3] 张进之 压力AGC分类及控制效果分析[J] 钢铁研究总院学报, 1987, 8(2): 87-94
- [4] 丁修堃 轧制过程自动化[M] 北京: 冶金工业出版社, 1986
- [5] 王君 厚度计型和动态设定型AGC系统的统一性证明[J] 控制与决策, 2000, 15(3): 333-335

(上接第460页)

- [8] 马钧水, 刘贵忠, 贾玉兰 改进遗传算法搜索性能的大变异操作[J] 控制理论与应用, 1998, 15(3): 404-407.
- [9] 伍永刚, 王定一. 一种改进的双基因遗传算法[J] 华中理工大学学报, 1996, 24(10): 47-50
- [10] 潘正君, 康立山, 陈毓屏 演化计算[M] 北京: 清华大学出版社, 1998
- [11] K J 奥斯特隆姆, B 威顿马克 自适应控制[M] 北京: 科

- 学出版社, 1992
- [12] P B Wilson, M C Macleod Low implementation cost IR digital filter design using genetic algorithms[A] Workshop on Natural Algorithms in Signal Processing [C] Essex, 1993 1-8
- [13] 刘妹琴, 邓燕妮, 廖晓昕 实时遗传算法在位置伺服系统中的应用[J] 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 5-9