

# 基于改进型遗传算法的 九点控制器参数自整定方法

刘教瑜, 杨 艳, 陶 亮

(武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 九点控制器是一种新型的基本逻辑控制器。重点介绍了九点控制器原理, 即当被控对象偏离设定值时, 九点控制器自动加入一个反作用力, 迫使系统响应回归到设定值附近。改进型遗传算法在原有实数编码策略中加入了择优和判断终止操作; 阐述了其选择、交叉、变异、择优、判断终止 5 种操作过程。给出了九点控制器系统的结构方框图及程序框图; 随机产生 20 个种群, 每个种群 8 个个体经过 10 代、20 代、50 代和 100 代的参数整定, 系统性能对比表明: 九点控制器的参数可以自整定, 整定效果满足系统的约束条件。

**关键词:** 九点控制器; 遗传算法; 参数自整定

**中图分类号:** TM 744; TM 761

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2005)04-0028-04

九点控制器<sup>[1]</sup>作为一种新型的模糊逻辑控制器, 具有控制结构简单、效果优良等特点。九点控制器中的九个控制参数对控制效果的影响明显, 在此之前人们是通过九点控制器的参数特性进行手工赋值的, 这不适应于九点控制器的广泛应用, 需要对九点控制器的给定参数进行自整定。对非线性系统参数估计, 通常是寻找一种能确定模型待定参数的参数估计方法, 从而建立非线性系统的数学模型传统的辨识方法, 但这种方法只能给出局部最优解而不易获得全局最优解。近代发展的遗传算法(GA)则较好地解决这些问题。遗传算法具有全局搜索能力强、计算简单、鲁棒性强、易于并行化和通用性好等特点, 因此, 适用于求解非线性系统的参数估计问题。

## 1 九点控制器原理

九点控制器采用拟人化控制, 大大简化了控制规则并提高了控制效果, 抓住了模糊控制各参数的本质含义和实际意义, 可以有效地克服比例、积分、微分(PID)控制所存在的某些问题。其控制思路是: 当被控对象偏离设定值时, 控制器自动加上一个反作用力, 迫使系统响应回归到设定值附近<sup>[2]</sup>。其控制规则如表 1 所示。其中  $\pm e_0$  为系统允许偏差, 定义偏差  $e = \text{输出量} - \text{输入量}$ ;  $\dot{e}_0$  为系统允许偏差变化

率, 定义偏差变化率  $\dot{e} = \text{本次偏差} - \text{上次偏差}$ 。

根据偏差、偏差变化率的组合形成的九种工况采取相应的控制策略, 及时向被控对象进行能量补充和消耗, 即施加一定的正向或反向作用力, 从而达到控制目的和跟踪性能要求。每一时刻仅对应 1 种控制策略。因为系统的偏差及其变化率实时变化, 控制器根据偏差和偏差变化的逻辑关系, 不断在九种策略中来回切换, 直至系统被控制在预定的状态下。

九点控制器相当于一个变比例控制器  $K$ , 通过在不同工况设定  $K_0 \sim K_4$  的值从而实现控制作用。由于控制规则表与相平面一一对应, 故可以用相平面分析方法对九点控制器进行辅助设计<sup>[3]</sup>, 主要是设定表格中的各个参数, 如图 1 所示。图中  $L_1$  和  $L_2$  所夹区域构成期望偏差变化率  $\dot{e}$  的零带,  $L_3$  和  $L_4$  所夹区域构成期望偏差  $e$  的零带。

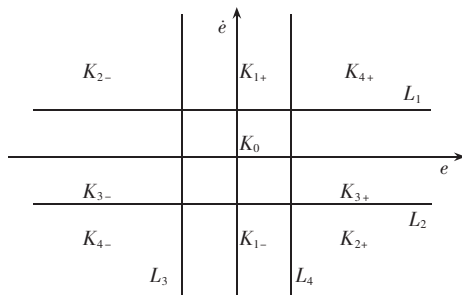


图 1 九点控制器相平面图

Fig.1 The phase plane of nine-point controller

表 1 九点控制器控制策略

Tab.1 The control strategy of nine-point controller

| 偏差            | 偏差变化率                    |                         |                           |
|---------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
|               | $\dot{e} \geq \dot{e}_0$ | $ \dot{e}  < \dot{e}_0$ | $\dot{e} \leq -\dot{e}_0$ |
| $e \geq e_0$  | 强加 ( $K_{4+}$ )          | 稍加 ( $K_{3+}$ )         | 弱加 ( $K_{2+}$ )           |
| $ e  < e_0$   | 微加 ( $K_{1+}$ )          | 保持 ( $K_0$ )            | 微减 ( $K_{1-}$ )           |
| $e \leq -e_0$ | 弱减 ( $K_{2-}$ )          | 稍减 ( $K_{3-}$ )         | 强减 ( $K_{4-}$ )           |

## 2 改进型遗传算法

遗传算法的显著特点是它交替地在编码空间和解空间中工作, 它在编码空间对染色体进行遗传运算, 而在解空间对解进行评估和选择, 自然选择联结了染色体与它所表达的解的性能。采用实数编码策

略比用 Holland 的二进制编码策略具有精度高、搜索范围大、表达自然直观等优点。因此,在解决非线性系统参数估计问题时,大多采用实数编码策略。在实数编码策略的遗传算法中,算法的效率及全局优化性能与选择操作、交叉操作和变异操作密切相关。同时为了加快成熟过程,满足系统要求的实时性,该算法改进了原有的实数编码策略,增加了择优操作和判断终止操作。

## 2.1 选择操作

遗传算法的基本原理就是自然选择原理<sup>[4]</sup>,选择是遗传算法的推动力。选择压力是一个内含的准则,压力过大搜索会过早终止;压力过小又会产生不必要的缓慢。算法的初始阶段宜采用低的选择压力,这有利于扩展搜索空间,而在终止阶段建议采用较高的选择压力,这有利于找到最好的解域,这样选择就能将遗传搜索引向最优解。然而,选择操作只能在现有群体内寻优,它不能产生与父代解不同的个体。

## 2.2 交叉操作

交叉是最主要的遗传运算,它同时对两个染色体操作,组合二者的特性产生新的后代。遗传算法的性能在很大程度上取决于采用交叉运算的性能。

实数编码方案的交叉算法为

设  $p_1=(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ,  $p_2=(v_1, v_2, \dots, v_n)$  是两个父向量,而  $q_1=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ ,  $q_2=(w_1, w_2, \dots, w_n)$  是通过交叉操作获得的两个后代。整数编码的交叉运算为:首先在  $(0, 1)$  之中随机产生  $n$  个随机数  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , 则两个后代  $q_1, q_2$  分别为

$$q_1=[a_1 u_1+(1-a_1) v_1, a_2 u_2+(1-a_2) v_2, \dots, a_i u_i+(1-a_i) v_i, \dots, a_n u_n+(1-a_n) v_n] \quad (1)$$

$$q_2=[a_1 v_1+(1-a_1) u_1, a_2 v_2+(1-a_2) u_2, \dots, a_i v_i+(1-a_i) u_i, \dots, a_n v_n+(1-a_n) u_n] \quad (2)$$

另外也可以取  $a_1=a_2=\dots=a_n$ 。从上式可以看出算术交叉产生的后代,其分量仍然在其定义的区间内。由于算术交叉不是像二进制交叉和离散交叉那样简单的交换位置,而是像数值插值中插值运算一样,在两个父解向量的周围插值生成两个新的后代,因此,算术交叉的搜索范围比离散交叉要大,且具备了局部搜索能力。

## 2.3 变异操作

变异是一种基本运算,它在染色体上自发地产生随机的变化。在遗传算法中,变异可以提供初始种群不含有的基因或找回选择过程中丢失的基因,其目的是使算法具有局部搜索的能力。当遗传算法已经接近最优解邻域时,变异可以加速向最优解收敛。

在使用实数编码<sup>[5]</sup>时,针对 Holland 的二进制编码遗传算法的缺陷,相继出现了反转变异、移位变异、非一致性变异、自适应变异等变异操作。自适应变异操作是在非一致性变异操作基础上发展的,其操作过程如下:

设  $p_i=(u_1, u_2, \dots, u_n)$  是解空间的一个父解向量,  $f_i$  是其适应值,  $f_{\max}$  是其最大适应值。其变异率定义为  $T=1-f_i/f_{\max}$ 。若分量  $u_j$  被选为进行变异,其定义区间为  $[a_j, b_j]$ , 则变异后的解为

$$p'_i=(u'_1, u'_2, \dots, u'_j, \dots, u'_n) \\ u'_j=\begin{cases} u_j+(b_j-u_j)(1-\gamma^{\lambda T}) & \gamma < 0.5 \\ u_j-(u_j-a_j)(1-\gamma^{\lambda T}) & \gamma \geq 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\gamma$  是  $(0, 1)$  上的一个随机函数;  $\lambda$  是决定变异程度的一个参数,其取值一般为  $2 \sim 5$ 。

自适应变异算法利用变异率的概念使得适应值大的个体在较小范围内搜索,而使得适应值较小的个体在较大范围内搜索,使得变异能根据解的质量自适应地调整搜索区域,从而能比较明显地提高搜索能力。

## 2.4 择优操作

变异操作是依一定的变异概率选择参加变异的个体。此时,优秀个体虽然有参加变异的机会,但不能确保一定被选中,而最差的个体有被选中的可能性。依据遗传算法的“适者生存,优胜劣汰”的进化原理,用交叉操作后形成的解群中的优秀个体替代最差个体,即用适应值最大的个体替代适应值最小的个体,可以使参加变异的优秀个体增加,增加在优秀个体局部邻域内搜索的机会,使搜索能朝着有利于最优解的方向发展。此时,  $T=1-f_i/f_{\max}$  应改进为  $T=1-f_i/(0.05+f_{\max})$ , 式中分母上增加 0.05 的目的是为了保证当  $f_i$  为最大时,变异率  $T$  不为零,这样保证了优秀个体在其很小的邻域内搜索。

## 2.5 判断终止操作

从上面介绍的实数编码的遗传运算可以看出,交叉和变异分别对算法的搜索效果有直接影响。以往算法的终止准则是设在变异操作之后。实际上,在实数编码的遗传运算经过交叉运算产生的后代,其分量仍在其定义区间内,即交叉后增加了每个个体中的每一位元素(基因)在其邻域内的搜索机会,已初步实现了父代解朝着最优解方向的改进。当交叉操作完成后,满足收敛条件的解(个体)可能已经出现,若此时再进行下一步变异操作,可能会暂时将最优解破坏。虽然最终仍然可寻到最优解,但增加迭代循环次数,使搜索最优解的时间延长<sup>[6]</sup>。因此,在交叉操作和变异操作之前各加上一个判断终止操作,以检验是否满足收敛条件,可以提高遗传算法的运算。

## 3 算法的仿真研究

九点控制器控制对象是将对象的输出“钳位”在误差允许的零带范围以内,即使  $|c-c_0| \leq e_0$ , 其中  $c$  为系统的输出量,  $c_0$  为系统的设定值,  $e_0$  为误差的允许范围<sup>[1]</sup>。根据系统设计要求,在引入遗传算法之后,系统的结构方框图如图 2 所示。

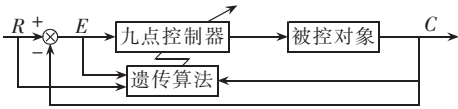


图 2 引入遗传算法的九点控制器系统结构方框图  
Fig.2 The block diagram of nine-point controller system with genetic algorithm

对于任意一个二阶系统  $G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\omega\xi s + \omega^2}$ ,

系统要求上升时间  $t_r \leq 1\text{ s}$ , 最大正超调量  $0 \leq \delta \leq 0.05$ , 最大负超调量  $-0.05 \leq -\delta \leq 0$ , 稳态误差  $e_{ss} \leq 0.01$ , 并且震荡次数  $N$  尽量的小。

针对已经建立的非线性系统模型结构, 采用某种方法不断地调整模型结构参数, 逐步搜索到使模型的输出值与系统的实测输出值的偏差为最小的模型参数估计值, 从而实现对非线性系统模型进行参数估计的目的。非线性系统模型变参数估计问题可描述为

$$e_p = |f_p(x_{pi}, v_{pj}) - f_{p0}| < \varepsilon \tag{4}$$

式中  $f_p(x_{pi}, v_{pj})$  为对应于第  $p$  组输入数据时的非线性系统模型输出量;  $f_{p0}$  为对应于第  $p$  组输入数据的实测输出量;  $x_{pi}$  为  $p$  组输入数据的第  $i$  个输入分量 ( $i=0, 1, 2, 3, \dots, n$ );  $v_{pj}$  为对应第  $p$  组的输入数据的第  $j$  个待定结构参数 ( $j=0, 1, 2, 3, \dots, m$ )。

式(4)表明, 每输入 1 组数据, 对于已经建立的非线性系统模型显然可寻找到满足要求的 1 组结构参数, 针对具体问题式(4)可以有所变动。实际上对已知模型变参数估计问题已经转化为寻找使目标函数为最小的结构参数寻优问题。用遗传算法能够比较简便、有效地解决此类问题。将改进后的遗传算法应用于解决非线性系统模型变参数估计问题中, 其程序框图如图 3 所示。

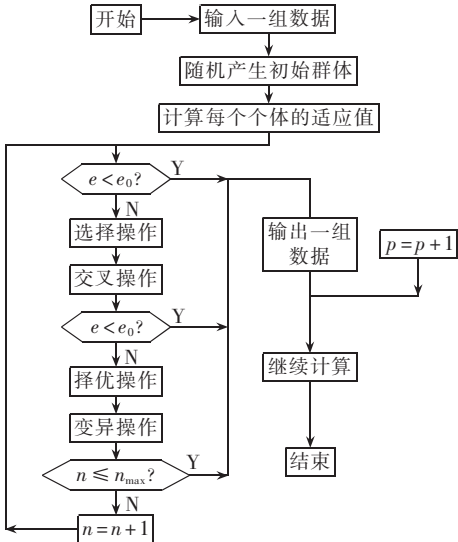


图 3 遗传算法的程序框图  
Fig.3 The flowchart of genetic algorithm

根据系统的设计要求, 随机给出 20 个种群, 每个种群有 8 个个体, 它们分别是: 4 个控制作用力  $k_{2+}, k_{4-}, k_{4+}, k_0$ , 上升时间  $t_r$ , 最大正超调量  $MP$ , 最大负超调量  $MN$  和稳态误差  $EZ$ 。每个个体都是精确到小数点后 5 位的实数。

经过 10 代、20 代、50 代和 100 代运算后的结果, 如表 2 所示。

表 2 经不同遗传代数参数整定的系统性能对比  
Tab.2 System performance contrast with parameters self-tuned through different generations

| 遗传代数 | $t_r/\text{s}$ | $MP$     | $MN$     | $EZ$    | $n$ |
|------|----------------|----------|----------|---------|-----|
| 10   | 0.602 74       | 0.278 24 | -0.095 6 | 0.005 2 | 2   |
| 20   | 0.507 57       | 0.107 81 | -0.021 2 | 0.006 1 | 3   |
| 50   | 1.595 13       | 0.025 24 | 0        | 0.003 4 | 0   |
| 100  | 0.933 93       | 0.014 67 | 0        | 0.000 6 | 2   |

注:  $n$  为震荡次数。

Matlab 软件<sup>[7]</sup>运行结果对比图, 如图 4 所示。

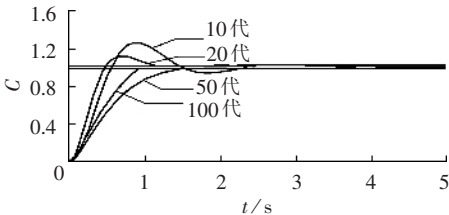


图 4 经不同遗传代数参数整定的系统响应对比  
Fig.4 System response contrast with parameters self-tuned through different generations

4 结语

通过上述仿真实验结果可以看出, 在引进了遗传算法之后, 九点控制器的参数可以自整定。同时整定的效果已经满足系统的约束条件。但由于系统设计的局限性, 还不能做到实时整定, 这是以后仍然需要改进的地方。同时, 在算法的选择上, 由于单种群中的个体过少, 只有 8 个, 使用实数编码只是在程序编译上较二进制编码容易, 而从物种多样性方面考虑仍是较后者反而不足, 这也是今后需要改进的地方。

参考文献:

[1] 孙晓明, 张南纶. 九点控制器[A]. 第 4 届世界智能控制与自动化大会论文集[C]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002. 644-648.  
SUN Xiao-ming, ZHANG Nan-lun. The nine-point controller [A]. **Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation** [C]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2002. 644-648.

[2] 孙晓明, 张南纶. 基本型逻辑控制器[A]. 中国人工智能进展论文集[C]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001. 188-189.  
SUN Xiao-ming, ZHANG Nan-lun. Basic logic controller[A]. **Proceedings of Evolve on Chinese Artificial Intelligence** [C]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001. 188-189.

[3] 谭思云, 徐武雄. 九点控制器的相平面分析[J]. 武汉理工

- 大学学报(信息与管理工程版),2002,24(5):114-116.
- TAN Si-yun,XU Wu-xiong. Phase-plane analysis of the nine-point controller [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering)**,2002,24(5):114-116.
- [4] 王小平,曹立明. 遗传算法的理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [5] 高铁红,李冲霄,韩彦芳,等. 改进遗传算法在非线性变参数估计中的应用[J]. 数据采集与处理,2002,17(3):271-275.
- GAO Tie-hong,LI Chong-xiao,HAN Yan-fang,*et al.* Improved genetic algorithm for varying parameter estimation in nonlinear system [J]. **Journal of Data Acquisition & Processing**,2002,17(3):271-275.
- [6] 谢晓锋,张文俊,阮 骏,等. 针对带约束非线性规划问题的遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2002,(21):64-67.

- XIE Xiao-feng,ZHANG Wen-jun,RUAN Jun,*et al.* Genetic algorithm for constrained nonlinear programming problems[J]. **Computer Engineering and Applications**,2002,(21):64-67.
- [7] 楼顺天,胡昌华. 基于 Matlab 的系统分析与设计——模糊系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版,2001.

(责任编辑:汪仪珍)

#### 作者简介:

刘教瑜(1957-),男,湖北武汉人,高级工程师,副教授,主要从事自动化检测与智能控制方面的研究(E-mail:liujiaoyu@eyou.com);

杨 艳(1980-),女,湖北阳新人,硕士研究生,主要从事自动化与计算机控制技术方面的应用与研究;

陶 亮(1981-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事智能控制方面的研究。

## Parameter self-tuning in nine-point controller based on improved genetic algorithms

LIU Jiao-yu,YANG Yan,TAO Liang

(College of Automation,Wuhan University of Technology,Wuhan 430070,China)

**Abstract:** The nine-point controller is a new type of basic logic controller. Its principle is emphasized,that is,when the controlled object deviates from the set value,a counterforce will be exerted to force it back. An improved genetic algorithm is introduced to the controller parameter tuning,in which optimal selection and stop judgment are added to real-coded strategy. The operations of selection,across,mutation,optimal selection and stop judgment are expounded. The block diagram and program flowchart of the nine-point controller system are offered. Simulations are carried out,in which 20 groups with 8 individuals in each group are optimized through 10,20,50 and 100 generations. The system performance contrast shows that the parameters of nine-point controller are self-tuned to satisfy the system constraint conditions.

**Key words:** nine-point controller; genetic algorithm; parameter self-tuning