

模糊遗传算法的自适应 PID 控制器

方 千 山

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 针对遗传算法运算速度慢不利于实时控制现象, 提出一种基于模糊推理的遗传算法, 并将其应用于自适应 PID 控制器上. 仿真实验表明, 该算法具有较好的寻优能力, 能满足实时控制的要求.

关键词 模糊逻辑推理, 遗传算法, 自适应 PID

中图分类号 TP 273+.4

文献标识码 A

PID 控制器具有结构简单、容易实现、鲁棒性强等特点, 因而被广泛应用于工业过程控制. 但在实际的工业过程控制中, 许多被控过程机理复杂, 具有高度非线性、时变不确定性和纯滞后等特点. 在噪声、负载扰动等因素的影响下, 过程控制甚至模型结构都会发生变化. 因此要求 PID 控制不仅其参数的整定不依赖于对象的数学模型, 且其参数能在线调整, 以满足实时控制的要求. 自适应 PID 控制将是解决这一问题的有效途径之一^[1~3]. 近年来, 随着遗传算法理论的研究与发展, 遗传算法在搜索和参数寻优方面的能力和优势已得到了普遍的认可. 出现许多基于遗传算法 PID 控制器, 并已成为自适应 PID 控制器研究的热点^[1]. 然而在现有的文献中, 基于遗传算法的 PID 控制器设计一般都是在对象数学模型已知的情况下, 运用 Ziegler-Nichols 法或 ISTE 最优设定法得到控制器的初始参数以确定搜索范围. 在遗传算法的寻优过程中, 由于种群规模的限制使得算法对搜索范围的依赖性比较强, 初始参数选择不合适等是影响遗传算法运行速度的主要原因之一^[4~7]. 本文提出基于模糊推理的遗传算法. 通过对系统输出和参考输入的误差, 以及误差的变化情况经模糊推理, 将得到的结果作为遗传算法的初始参数, 实现对自适应 PID 控制器参数的优化. 仿真实验表明, 该方法具有很好的寻优能力和较高的参数优化的能力, 能满足实时控制的要求.

1 PID 控制原理

常规 PID 控制器是一种线性控制器, 其连续形式为

$$u(t) + K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]. \quad (1)$$

在式(1)中, $e(t) = r(t) - y(t)$ 为系统误差, K_p , T_i , T_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数. 其离散增量形式可表示为

$$\Delta u = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]. \quad (2)$$

其传递函数的形式为

$$G(s) = U(s)/E(s) = K_p (1 + 1/T_i s + T_d s). \quad (3)$$

从上式可知, 控制系统的动态过程是不断变化的. 在系统的动态过程中, 对于比例控制、积分控制、微分控制作用的要求是不同的, 常规 PID 控制中难以实现.

2 模糊遗传算法

从遗传算法的本质可以知道, 变异算子对保持种群多样性同样具有不可替代的作用^[8]. 应用模糊逻

辑推理, 针对算法中关键的搜索范围和变异算子作进一步改进. 算法以 ΠAE 作为标准, 按照这一标准约束并引导遗传算法的搜索. 同时, 结合模式识别的优势, 通过模式识别得到输出曲线的特征参数. 即误差 e 、误差变化率 α , 以及最大超调 M_p 和调整时间 t_s .

在寻优的初始阶段, 经由模糊逻辑推理得到 GA 的初始参数以确定搜索范围, 从而, 减小算法搜索的时间. 而在算法进入到后期, 采用模糊变异的方法指导变异个体的变异方向和大小. 克服使用随机数变异的盲目性, 使得算法对变异率的依赖性大大减小. 以此来提高参数优化的能力, 模糊遗传算法的系统框图, 如图 1 所示.

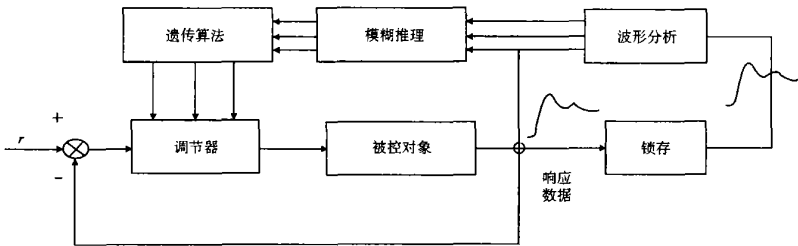


图 1 基于模糊遗传算法的自适应 PID 控制框图

在算法的初始阶段, 经采样获取控制量的精确值, 并与给定值比较, 得到误差信号 e 和误差变化率 α 作为模糊控制器的输入, 其输出为 PID 控制器的 3 个参数 K_p, K_i, K_d . 将得到的 K_p, K_i, K_d 值作为遗传算法的搜索范围的内核, 其模糊推理结构如图 2 所示.

在算法的中期和后期, 为了增加算法搜索的范围和能力, 采用随机数代替的方法. 即在搜索范围内, 随机地选择一个数代替需要变异的个体, 同时在线检测群体中个体的多样性. 当多样性已减少到一定水平确认已进入进化后期(图 3)时, 对于需要变异的个体, 经由模式辨识, 得到此时系统输出曲线的最大

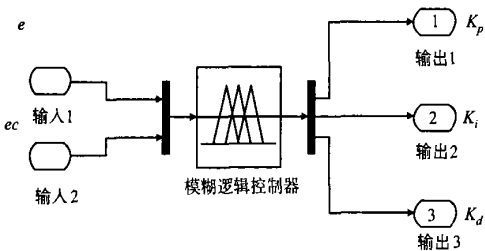


图 2 进化初期的模糊逻辑控制器的输入输出

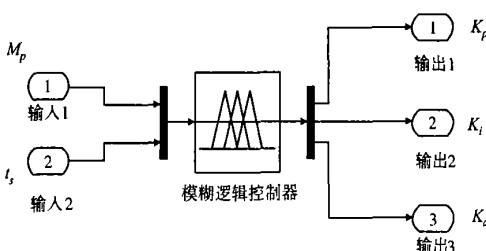


图 3 进化后期的模糊逻辑控制器的输入输出

超调 M_p 和调整时间 t_s , 作为模糊控制器的输入. 将输出代替对应的需变异的个体, 得到该组 PID 参数变异后的参数, 其模糊推理结构如图 3 所示.

3 模糊遗传算法设计步骤

对于上述 PID 控制器的参数寻优问题, 按照 ΠAE 标准将其转化成如下约束最优化问题. 其中最小规模为

$$J = \int_0^{\infty} t | e | dt,$$

目标转为

$$\left. \begin{aligned} (1-\alpha)K_{p0} < K_p < (1+\alpha)K_{p0}, \\ (1-\alpha)K_{i0} < K_i < (1+\alpha)K_{i0}, \\ (1-\alpha)K_{d0} < K_d < (1+\alpha)K_{d0}. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

在式(4)中, J 为目标函数, K_p, K_i, K_d 分别是控制器的 3 个参数, K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 是控制器的 3 个初始值, α 为参数的搜索范围系数. 下面论述具体设计步骤.

3.1 编码

使用浮点数编码, 将 PID 控制器的每个参数作为一个基因. 由此, 可以得到基于浮点数的 PID 参数

编码(染色体)分别为 K_p, K_i, K_d .

3.2 初始参数

取控制器的 3 个参数 K_p, K_i, K_d 的误差 e 及误差变化率 ec , 则其模糊子集均为

$$e, ec = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}.$$

将 e, ec 变化范围定义为模糊集上的论域, 有

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}.$$

采用三角形隶属函数、重心法解模糊、极大-极小合成推理, 其结果作为遗传算法的搜索范围内的初始值. 参量关系表示为

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K'_p + \{e_i, ec_i\}_p, \\ K_i &= K'_i + \{e_i, ec_i\}_i, \\ K_d &= K'_d + \{e_i, ec_i\}_d. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

3.3 初始化种群

初始化参数, 一般为种群大小 $\text{Pop_Size} = 50$, 基因数为 $\text{Num_Gene} = 3$, 搜索范围系数为 $\alpha = 0.6$. 因此, 初始化种群为

$$P = \begin{bmatrix} K_{p1} & K_{i1} & K_{d1} \\ K_{p2} & K_{i2} & K_{d2} \\ M & M & M \\ K_{p(n-1)} & K_{i(n-1)} & K_{d(n-1)} \\ K_{pn} & K_{in} & K_{dn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $n = \text{Pop_Size}$, K_{pj}, K_{ij}, K_{dj} 的取值范围满足式(4).

3.4 交叉操作^[9]

$$X' = \beta X + (1 - \beta) Y, \quad Y' = (1 - \beta) X + \beta Y,$$

其中 $\beta \in (0, 1)$, X, Y 为交叉前的两个个体, X', Y' 为交叉操作后得到的后代个体.

3.5 寻优与变异操作

以 ITAE 的标准确定标准传递函数的性能数据, 建立确定最大超调 M_p 、调整时间 t_s 和控制器参数之间的模糊规则^[10]. 同时, 定义最大超调 M_p 、调整时间 t_s 的模糊子集及论域, 即

$$M_p, t_s = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\},$$

$$M_p, t_s = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}.$$

采用三角形隶属函数、重心法解模糊、极大-极小合成推理. 将得出的 K_p, K_i, K_d 作为需要变异个体变异后的值, 进入种群中参与下一次的迭代过程. 其参量关系为

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K'_p + \{M_{pi}, t_{si}\}_p, \\ K_i &= K'_i + \{M_{pi}, t_{si}\}_i, \\ K_d &= K'_d + \{M_{pi}, t_{si}\}_d. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3.6 计算适应度值

个体适应度值为

$$J = \int_0^\infty t |e| dt. \quad (8)$$

适应度值线性变换为

$$J' = K - J. \quad (9)$$

在式(9)中, K 为某一较大的常数.

3.7 算法停止准则

在参数的寻优过程中, 始终以 ITAE 的标准指导算法的搜索方向, 即得到一组 PID 控制器参数使得适应度值 J 最小. 因此, 当连续若干代最优个体适应度值的平均值与当代最优个体适应度值之差在所要求的范围之内时, 就可以认定算法已不再具有继续优化的能力. 此时, 就可以终止算法的寻优; 否则, 返回到节 3.1 模糊遗传算法运行框图, 如图 4 所示.

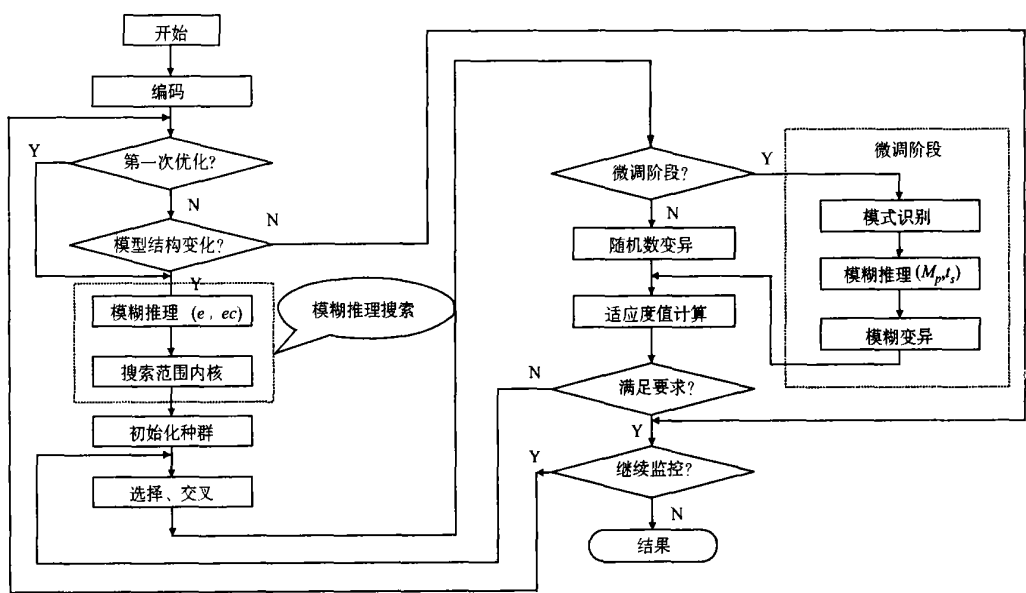


图 4 模糊遗传算法运行框图

4 实验与仿真

某温度控制系统^[11], 要求系统稳定工作且最大超调小于 5% . 由阶跃飞升曲线得系统传递函数为

$$G(s) = \frac{\Delta h(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{2.6}{93s + 1} e^{-53s} .$$

取种群规模 Pop_Size= 50, 交叉率 P_c 按照自适应率调整. 算法得到最优解的标志为当前最优个体的适应度值. 控制器参数及系统稳态误差(σ)进化曲线, 如图 5 所示. 图 5 中 N 为迭代次数. 图 6 是本文设计方法(FUZZY-GA), 与一般的遗传算法(GA), Ziegler Nichols 法(ZN) 和 SPAM 法, 所得到的控制器对系统阶

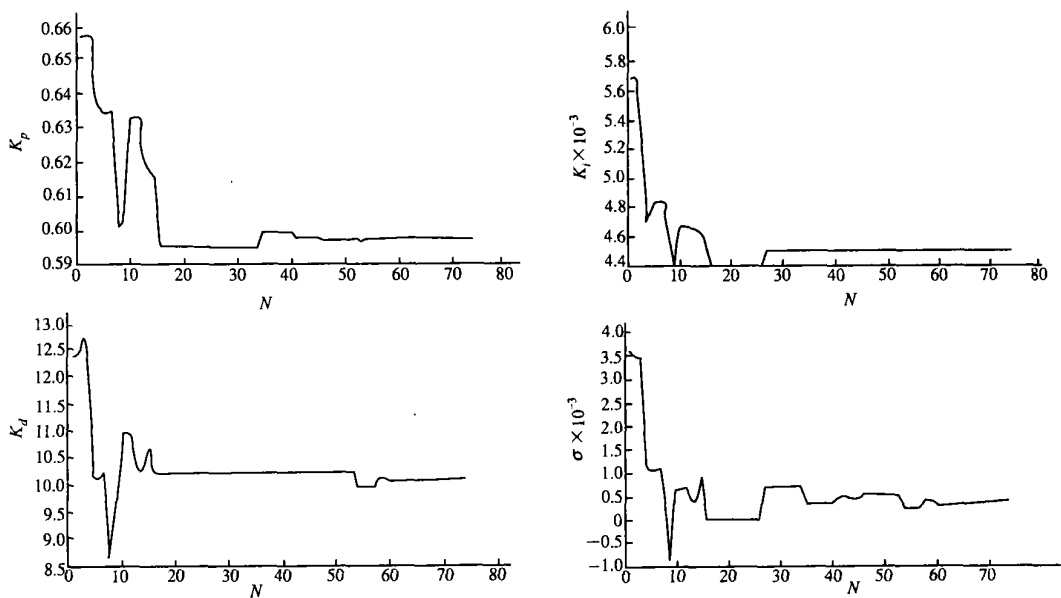


图 5 控制器参数及系统稳态误差进化曲线

跃响应. 为了验证该算法的实时性及系统的鲁棒性, 在仿真中取对象增益 K 在 2.6~ 6.6 间变化、时间常数 t 在 93~ 133 间变化, FUZZY-GA 系统的响应, 如图 7 所示. 图 6, 7 中, Y 为输出值 .

从图 57 中可以看出, 模糊遗传算法对 PID 控制器参数的优化迭代 10 次, 其最优个体的适应度值平均值差不超过 10^{-4} . 它具有参数优化时间快速的优点 . 与一般的遗传算法(GA)、工程整定法(ZN) 和 SPAM 法相比, 本法具有更优的控制特性, 更强的鲁棒性, 其对象参数的变化, 对 FUZZY-GA 系统的响应

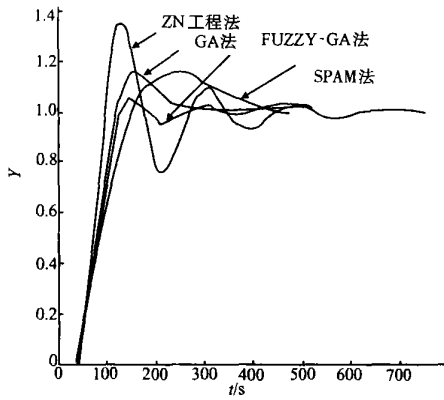


图6 系统阶跃响应

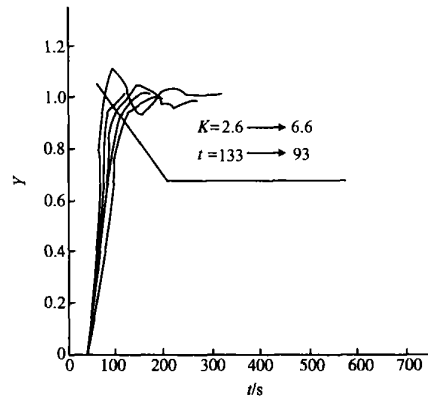


图7 FUZZY-GA 系统的阶跃响应

影响不大。

5 结束语

本文提出基于模糊推理的遗传算法,对 PID 控制器参数的进行设计与传统的 ZN 工程法、GA 法和 SPAM 法具有明显的先进性,系统具有较好的动态品质.特别在算法的优化性能和效率上都有了显著提高,具有快速的参数优化的能力,能满足系统对 PID 参数自适应的要求。

参 考 文 献

- 1 Collins R J. Studies in artificial evolution[M]. California: The University of California Press, 1992. 20~ 40
- 2 Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Michigan: The University of Michigan Press, 1975. 116~ 128
- 3 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999. 25~ 30
- 4 陈丽燕,吴新余. 关于遗传算法过早收敛现象的特征分析[J]. 南京邮电学院学报,1997,17(3): 96~ 99
- 5 何 琳,王科俊. 最优保留遗传算法及其收敛性分析[J]. 控制与决策,2000,15(1): 63~ 66
- 6 陈国龙. 遗传算法在求解全局优化问题中的应用[J]. 福州大学学报(自然科学版),1999,27(5): 14~ 18
- 7 方咸云,方千山,王永初. 双变异率自适应遗传算法及其应用[J]. 南昌航空航天学院学报,2002,16(2): 36~ 40
- 8 李敏强,寇纪淞,林 丹. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002. 48~ 51
- 9 袁慧梅. 具有自适应交换率和变异率的遗传算法[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2000,21(3): 14~ 20
- 10 孙增圻. 系统分析与控制[M]. 北京:清华大学出版社,1994. 55~ 58
- 11 梁 军,符雪桐,吕勇哉. 自适应 PID 控制基本原理与算法[J]. 浙江大学学报(自然科学版),1994,28(5): 523~ 529

Adaptive PID Controller Based on Fuzzy Genetic Algorithm

Fang Qianshan

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Directing against the disadvantage of conventional genetic algorithm to real time control due to slowness in operating rate, the author puts forward a new genetic algorithm on the basis of fuzzy inference and applies it to adaptive PID controller. This new genetic algorithm is fairly good in optimizing capability and is able to fulfill the requirement of real time control, as shown by simulation experiment.

Keywords fuzzy logical inference, genetic algorithm, adaptive PID