

# 基于改进人工免疫算法的 PID 参数优化研究

刘国联<sup>1,2</sup>, 谭冠政<sup>1</sup>, 何燕<sup>2</sup>

LIU Guo-lian<sup>1,2</sup>, TAN Guan-zheng<sup>1</sup>, HE Yan<sup>2</sup>

1.中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083

2.湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412000

1.School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2.Hunan Railway College of Science and Technology, Zhuzhou, Hunan 412000, China

**LIU Guo-lian, TAN Guan-zheng, HE Yan. Parameters optimizing of PID controller based on improved artificial immune algorithm. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(19): 84-86.**

**Abstract:** Aimed at the drawback of the conventional optimization method of PID controller parameter, an improved artificial immune algorithm is proposed. The algorithm has the main features, the new method of antibody density and variety policy, the floating-point coding and elitism strategy. The algorithm is applied to the optimization of PID parameter, compared to SGA. The simulation results show that the performance of PID controller based on IAIAE is superior to that of PID controller based on SGA.

**Key words:** immune algorithm; PID control; parameter optimization

**摘要:** 针对传统 PID 控制器参数优化方法存在的不足, 提出了一种改进的人工免疫算法(IAIAE)。该算法的主要特点是, 采用了基于抗体浓度的调节机制和多样性保持策略的新方法, 使用了浮点数编码方法和 Elitism 策略。将该算法应用于 PID 控制器参数的优化, 并与具有精英保留的 SGA 进行比较。仿真实验结果表明, 用 IAIAE 算法优化 PID 控制器参数, 其效果优于 SGA。

**关键词:** 免疫算法; PID 控制; 参数优化

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.19.024 **文章编号:** 1002-8331(2008)19-0084-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP18

## 1 引言

PID 控制器成功地应用于控制领域并取得了丰硕成果, 因此 PID 参数的优化成为人们关注的问题。目前, 工程上优化 PID 参数的方法有衰减曲线法、Z-N 法、ISTE 最优设定方法、快速整定法和继电器法等, 虽然这些方法都具有良好的寻优特性, 但常常是通过实验确定, 或通过试凑、经验公式来整定。而在 PID 参数优化过程中多采用梯度法和单纯形法, 但易陷入局部最优点。随着智能技术的迅速发展和广泛应用, 许多 PID 控制器融合了模糊控制、神经网络、专家系统和遗传算法等智能技术, 使得 PID 控制器具备了自学习的能力, 扩大了 PID 控制器的应用范围。

本文在介绍 PID 控制和人工免疫系统原理的基础上, 提出一种改进的人工免疫算法(Improved Artificial Immune Algorithm of Elitism, IAIAE)。该算法借鉴生物免疫机理, 提出了基于抗体浓度的调节机制和多样性保持策略的实现方法, 采用了浮点数编码方式和精英策略(Elitism Strategy), 最后利用该算法对 PID 参数进行了优化仿真实验。

## 2 PID 控制原理

PID 控制是工业过程控制中应用最广的策略之一, 它具有简单的控制结构。线性 PID 控制器系统原理框图如图 1 所示, 系统主要由 PID 控制器和被控对象组成。PID 控制器根据给定值  $r(t)$  和实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差  $e(t) = r(t) - y(t)$ , 将偏差按比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制, 其控制规律为:

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d}{dt} \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

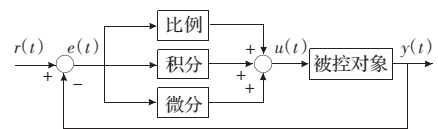


图 1 PID 控制系统原理框图

式中,  $u(t)$  是 PID 控制器产生的控制量,  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数。在数字 PID 控制器系统中, 式(1)可表示为:

**基金项目:** 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.50275150)。

**作者简介:** 刘国联(1973-), 男, 讲师, 研究方向: 电工电子技术、计算机与控制方面的教学和研究工作; 谭冠政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域: 智能机器人系统与控制, 人工智能与认知系统, 先进控制理论与先进算法等; 何燕(1976-), 女, 讲师, 研究方向: 机械制造、计算机与数控。

**收稿日期:** 2008-02-18

**修回日期:** 2008-04-28

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

式中,  $K_i = K_p T / T_i$ ,  $K_d = K_p T_d / T$ ,  $T$  为采样周期,  $u(k)$  为  $kT$  时刻的控制量,  $e(k)$  为  $kT$  时刻的偏差,  $K_i$  称为积分系数,  $K_d$  称为微分系数。

PID 控制器各校正环节作用如下:

(1) 比例环节。及时成比例地反映控制系统的偏差信号  $e(t)$ , 偏差一旦产生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。

(2) 积分环节。主要用于消除静差, 提高系统的无差度。

(3) 微分环节。能反映偏差信号的变化趋势, 并在偏差信号值变大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度减少调节时间。

因此, 设计 PID 控制器实际上就是要确定这三个参数的值。那么如何配置 PID 的三个参数 ( $K_p, K_i, K_d$ ) 使整个控制系统得到良好的性能就显得至关重要。本文就是运用人工免疫系统的免疫机理, 更深层地研究了三个参数的配置算法。

### 3 PID 参数优化的人工免疫算法

#### 3.1 人工免疫算法的基本原理

人工免疫算法是基于生物免疫原理提出的一种智能算法。它将实际求解问题的目标函数对应为抗原, 而问题的解对应为抗体。由生物免疫原理可知, 生物免疫系统对入侵生命体的抗原通过细胞的分裂和分化作用, 自动产生相应的抗体来抵御, 这一过程被称为免疫应答。在免疫应答过程中, 部分抗体作为记忆细胞保存下来, 当同类抗原再次侵入时, 记忆细胞被激活并迅速产生大量抗体, 使再次应答比初次应答更快更强烈, 体现了免疫系统的记忆功能。抗体与抗原结合后, 会通过一系列的反应而破坏抗原。同时, 抗体与抗体之间也相互促进和抑制, 以维持抗体的多样性及免疫平衡, 这种平衡是根据浓度机制进行的, 即抗体的浓度越高, 则越受抑制; 浓度越低, 则越受促进, 体现了免疫系统的自我调节功能。

#### 3.2 PID 参数优化问题的改进的人工免疫算法

针对 PID 参数优化问题的特点, 构造了求解该问题的改进的人工免疫算法 (IAIAE)。

##### (1) 抗原、抗体的确定

由于设计 PID 控制器实际上就是确定控制器三个增益系数  $K_p, K_i, K_d$  的值, 所以采用 IAIAE 算法对 PID 控制器进行优化设计时, 可将控制器的性能指标作为优化问题的目标函数, 视为抗原; 而将增益系数  $K_p, K_i, K_d$  作为优化问题的解, 视为抗体。

##### (2) 抗体编码

由于二进制编码方式复杂, 且在编码和解码的过程中需耗费大量的系统时间。因此, 本文选用最自然的浮点编码方式建立参数空间和参数编码空间的一一对应关系。

##### (3) 初始抗体群的产生

假设  $K_p, K_i, K_d$  的取值范围分别为  $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ ,  $[K_{imin}, K_{imax}]$ ,  $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ ; 在它们的范围内任取  $K_p^k, K_i^k, K_d^k$  组成第  $k$  个抗体, 即  $K^k = K_p^k + K_i^k + K_d^k$ 。由此随机组成  $m$  个初始抗体群。

##### (4) 适应度评估

对于抗体群  $N$ , 抗体  $K (K=1 \sim N)$  的适应度值计算:

$$f_k = \frac{1}{J(ITAE_k)} \quad (3)$$

其中  $J(ITAE_k)$  为第  $k$  个抗体所提供的 PID 增益 ( $K_p^k, K_i^k, K_d^k$ ) 时控制系统误差泛函  $J(ITAE)$  的值, 误差泛函  $J(ITAE)$ :

$$J(ITAE) = \int t |e(t)| dt \quad (4)$$

它综合考虑了系统响应的上升时间  $t_r$ 、调节时间  $t_s$ 、超调量  $M_p$  以及稳态误差  $e_s$  等动态和稳态性能指标, 其值越小, 表示系统的控制性能越好。

(5) 基于抗体浓度的调节机制和多样性保持策略

定义 1 在给定抗体群中, 抗体相似度:

$$1 - \varepsilon \leq Q_s(v, w) = \frac{f_v}{f_w} \leq 1 + \varepsilon \quad (5)$$

上式成立, 则称抗体  $v$  与抗体  $w$  相似。  $\varepsilon$  称为抗体相似度阈值。  $\varepsilon$  值越小,  $Q_s(v, w)$  越接近 1,  $v$  与  $w$  相似程度越高, 多样性程度越低, 反之亦然。

定义 2 在给定抗体群中, 与抗体  $v$  相似的抗体 (包括抗体  $v$  自身) 的个数称为抗体  $v$  的浓度, 记为  $c_v$ 。

定义 3 在给定抗体群中, 抗体  $v$  的期望繁殖率  $e_v$  可由下式表示:

$$e_v = \frac{f_v}{(c_v)^\beta} \quad (6)$$

式中,  $f_v$  为抗体  $v$  的适应度;  $c_v$  为抗体  $v$  的浓度;  $\beta$  是反映抗体的适应度和浓度各自在期望繁殖率中相对重要性的一个参数。一般, 在免疫算法进化过程的初期和中期 (约占进化过程的  $2/3$ ), 希望  $\beta$  取较大的值 ( $\beta > 1$ ), 以使群体保持良好的多样性, 避免算法陷入局部最优; 但在进化过程的后期, 希望  $\beta$  取较小的值, 以加速算法的收敛速度。

期望繁殖率与适应度成正比, 与浓度成反比。依据期望繁殖率进行选择操作, 在人工免疫算法中实现了自然免疫系统的浓度调节机制, 即对浓度低的抗体进行促进, 对浓度高的抗体进行抑制, 从而保持了抗体的多样性, 防止算法陷入成熟前收敛。

##### (6) 克隆选择、交叉和变异

在给定抗体群中, 抗体  $v$  被选择复制的概率  $P_w$  由下式计算:

$$P_w = \frac{e_v}{\sum_{i=1}^m e_i} \quad (7)$$

其中,  $m$  表示抗体群规模,  $e_v$  为抗体  $v$  的期望繁殖率。从公式可看出, 人工免疫算法的选择概率不仅与个体的适应度有关, 而且还与个体的浓度有关。

选择采用精英保留策略。首先, 找出当前群体中适应度最高的抗体; 然后, 若当前群体中最佳抗体的适应度比总的迄今为止的最好抗体的适应度还高, 则以当前群体中的最佳抗体作为新的迄今为止的最好抗体。

随机挑选两个抗体按事先设定的交叉概率进行交叉。在交叉之后的抗体群中随机挑选两个抗体按事先设定的变异概率进行变异。

### 3.3 算法的具体执行步骤

算法的执行步骤如下:

步骤 1 设定  $\varepsilon, \beta, NC, P_c, P_m$  及群体规模  $m$  等参数的值; 设置变量  $a_0^*$  和一维向量  $a_d^* = [K_p^*, K_i^*, K_d^*]$ , 分别用于存放精英抗体和三个 PID 增益的值; 赋  $a_0^*$  和  $a_d^*$  的初值为零。

步骤 2 随机产生  $m$  个抗体, 组成初始抗体群。

步骤 3 令迭代指针  $t=1$ 。

**步骤 4** 对每个抗体  $k(k=1,2,\dots,m)$ , 将  $K_p^k$ 、 $K_i^k$  和  $K_d^k$  送入到 PID 控制器中, 对控制对象执行一次完整的控制活动, 计算出抗体  $k$  的适应度  $f_k$ 。然后, 将抗体群中适应度最大的抗体作为精英抗体, 并将精英抗体复制一份分别保存到变量  $a_b^*$  和  $a_d^*$  中。转到步骤 8。

**步骤 5** 对每个抗体  $k(k=1,2,\dots,m)$ , 获得其对应的增益值  $K_p^k$ 、 $K_i^k$  和  $K_d^k$ ; 然后将  $K_p^k$ 、 $K_i^k$  和  $K_d^k$  送入到 PID 控制器中, 对控制对象执行一次完整的控制活动, 计算出抗体  $k$  的适应度  $f_k$ 。

**步骤 6** 如果这一代抗体群中没有与精英抗体适应度相同的抗体, 则将保存在  $a_b^*$  中的精英抗体复制一个到该抗体群中, 并将该抗体群中适应度最小的抗体删除; 否则, 继续。

**步骤 7** 如果这一代抗体群中适应度最大的抗体其适应度的值大于精英抗体的适应度的值, 则将这个适应度最大的抗体复制一个, 并以它作为新的精英抗体替代保存在  $a_b^*$  和  $a_d^*$  中的精英抗体; 否则, 继续。

**步骤 8** 依据抗体的相似度定义, 即公式(5), 计算每个抗体的浓度。

**步骤 9** 依据公式(6)计算每个抗体的期望繁殖率; 依据公式(7)计算每个抗体的选择概率; 根据选择概率采用“轮盘赌法”对抗体群执行选择和复制操作。

**步骤 10** 对抗体群执行交叉操作。

**步骤 11** 对抗体群执行变异操作。

**步骤 12** 令  $t \leftarrow t+1$ , 若  $t \leq NC$ , 则返回到步骤 5; 否则, 输出保存在变量  $a_d^*$  中的最优 PID 增益  $\{K_p^*, K_i^*, K_d^*\}$ , 算法结束。

上述算法中, 核心内容是:

(1) 抗体依据期望繁殖率进行选择操作, 在人工免疫算法中实现了自然免疫系统的浓度调节机制, 保证了抗体的多样性;

(2) 人工免疫算法不仅与个体的适应度有关, 而且还与个体的浓度有关, 这一点公式(7)很直观地给出;

(3) 通过调节抗体相似度阈值  $\varepsilon$ , 可以控制抗体群的相似程度;

(4) 采用浮点编码方式。

## 4 实验仿真分析

仿真实验在 MATLAB2006a 上执行。设被控对象为  $G(S)=1.1/(S^2+1.6S+1)$ , 采样时间  $T=1$  ms, 输入为单位阶跃信号。

为了验证 IAIAE 的性能, 将具有精英保留的 SGA 与 IAIAE 相比较, 分别用于 PID 参数的优化中。设定  $K_p$  的取值范围为  $[0, 20]$ , 而  $K_i$  和  $K_d$  的取值范围都为  $[0, 5]$ 。SGA 和 IAIAE 均选取初始种群数为 40, 并采用单点交叉, 交叉率为 0.6, 变异率为 0.01, 迭代次数  $NC=50$ 。在 IAIAE 中设  $\varepsilon=0.1, \beta=1.6$ 。将  $J(ITAE)$  作为目标函数, 则经过 50 代进化后, 可以得到图 2 以及表 1 和表 2。

由表 2 可知, 虽然超调量  $M_p$  以及稳态误差  $e_{ss}$  在两种方法

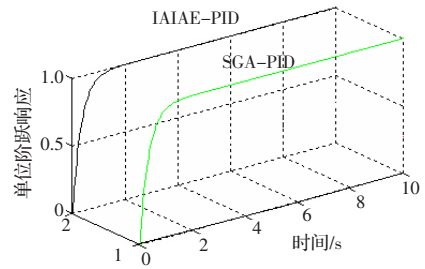


图 2  $G(S)$  的单位阶跃响应

表 1  $G(S)$  的 PID 控制器增益

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
IAIAE	7.966 9	4.985 1	4.985 0
SGA	7.340 9	4.631 7	4.527 9

表 2 优化后的系统性能指标

	$M_p/\%$	$t_r/s$	$t_s/s$	$e_{ss}$
IAIAE	0.000 0	0.440 2	0.790 8	0.000 0
SGA	0.000 0	0.470 3	0.831 5	0.000 0

中没有不同, 但 IAIAE 的上升时间  $t_r$ 、调节时间  $t_s$  都较 SGA 有所减少。综合考虑, 通过 IAIAE 算法获得的控制效果要优于具有精英保留的 SGA 算法。

## 5 结束语

用 IAIAE 算法优化得到的控制器有较好的控制效果, 优于具有精英保留的 SGA, 表现为上升时间  $t_r$  减少、调整时间  $t_s$  短等。

## 参考文献:

- [1] 何宏, 钱锋. 基于免疫进化算法的 PID 参数整定[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1174-1176.
- [2] 刘屹, 田联芳, 毛宗源. 一种新型人工免疫算法的 PID 自整定研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4): 83-85.
- [3] 万佑红, 李新华. 用遗传算法实现 PID 参数整定[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(7): 7-8.
- [4] 郑日荣, 毛宗源, 罗欣贤. 改进人工免疫算法的分析研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(34): 35-37.
- [5] 江敏, 陈一民. 遗传算法在 PID 控制器参数寻优中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 85-87.
- [6] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
- [7] 侯志祥, 申群太, 李河清. 基于改进遗传算法的 PID 参数整定及其在加热炉中的应用[J]. 计算机工程, 2004, 30(6): 165-167.
- [8] 陈丹, 方康玲, 陈乔礼. 遗传算法在 PID 参数优化中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(3/1): 35-36.
- [9] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接 75 页)

- [7] Ibanez L, Schroeder W. The ITK software guide: the insight segmentation and registration toolkit[M]. New York: Lydia Ng and Josh Cates Publisher by Kitware Inc, 2003.
- [8] IBM Corporation. IBM visualization Data Explorer (DX)[M]. 4th ed. USA: IBM Corporation, 1993.
- [9] Schroeder W, Martin K, Lorensen B. The visualization toolkit: an

object oriented approach to 3D graphics[M]. 3rd ed. New York: Kitware Inc Publisher, 2001.

- [10] 周箭. 虚拟仪器及其技术研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 34(6): 686-689.
- [11] 北京市地质调查局. 北京城市地质信息管理与服务系统需求分析[R]. 2005.