

人工免疫智能控制算法的研究与应用

赵 静,李建勇

(西北工业大学明德学院,陕西 西安 710124)

摘要:人工免疫系统是模仿生物免疫系统抵御外界信息侵入等各种原理和机制而发展的一种计算机智能控制方法。这种方法主要用以解决传统方法难以处理的复杂系统的控制问题。根据生物免疫系统的概念和工作原理,人工免疫系统很适合解决具有自适应性、鲁棒性及动态性要求较高的实际工程问题。针对加热炉温度控制系统具有非线性、耦合性、模型不确定性等复杂特点,为了使系统更好地适应工况的变化和干扰量的影响,对加热炉温度控制提出一种改进的人工免疫控制算法,并把这种控制算法与PID相结合提出一种新型人工免疫PID控制器,同时对加热炉温度分别进行串级控制、改进的人工免疫算法控制和新型人工免疫PID控制。通过仿真曲线对三种控制进行比较,实验结果表明,新型人工免疫PID控制器具有鲁棒性强、控制精度高等优点。

关键词:人工免疫系统;串级控制;改进的人工免疫控制算法;新型人工免疫PID控制器

中图分类号:TP183

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)11-0128-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.11.026

Research and Application of Artificial Immune Intelligent Control Algorithm

ZHAO Jing, LI Jian-yong

(Northwestern Polytechnical University Ming De College, Xi'an 710124, China)

Abstract: Artificial immune system (AIS) is a computer intelligent control method developed by imitating various principles and mechanisms of biological immune system to resist the invasion of external information, which is mainly used to solve the control problems of complex systems which are difficult to handle by traditional methods. According to the concept and working principle of biological immune system, artificial immune system is suitable for solving practical engineering problems with high requirements of adaptability, robustness and dynamics. Aiming at the complex characteristics of heating furnace temperature control system, such as non-linearity, coupling and model uncertainty, an improved artificial immune control algorithm is proposed for heating furnace temperature control in order to make the system better adapt to the change of working conditions and the influence of disturbance. A new type of control algorithm is proposed by combining this control algorithm with PID. Artificial immune PID controller, cascade control, improved artificial immune algorithm control and new artificial immune PID control are used to control the temperature of heating furnace respectively. The simulation curves are used to compare the three kinds of control. The experiment shows that the new artificial immune PID controller has strong robustness and high control precision.

Key words: artificial immune system; cascade control; improved artificial immune control algorithm; new artificial immune PID controller

0 引言

智能控制^[1]是无需人为干预,智能机器自主地实现其目标的自动控制,也是使用计算机模拟人类智能的一个重要领域。智能控制以计算机科学、人工智能^[2]、控制理论等学科为基础,扩展了很多相关的控制算法和理论技术。随着智能控制技术的深入研究,智能控制在众多领域得到了应用,多用于解决工业过程自动控制系统、机器人控制系统、交通控制系统等各

类复杂被控对象的控制问题。

加热炉是炼油、冶金、化工生产过程中的重要设备之一,其任务是把原料油加热到人们所期望的温度,以保证下道工序能顺利进行。加热炉的出口温度具有时变性、滞后性、大惯性,传统控制很难达到理想的控制效果。现把加热炉温度作为研究对象,设计一种新型人工免疫控PID控制器,并对其进行参数整定实现对加热炉的温度控制,验证新型人工免疫PID控制器的

收稿日期:2018-10-26

修回日期:2019-02-26

网络出版时间:2019-06-27

基金项目:陕西省2019年度教育专项科学研究计划(19JK0870);陕西省教育科研计划项目(18JK1171)

作者简介:赵 静(1983-),女,硕士研究生,讲师,研究方向为控制理论与控制工程。

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190627.1053.002.html>

优越性。

1 人工免疫算法

人工免疫系统^[3] (artificial immune system, AIS) 是通过模仿生物免疫系统的一种智能控制方法, 构建其具有动态性、自适应性和自组织性的信息防御系统^[4], 以此来抵御外部无用、有害和干扰信息的侵入, 从而保证系统接受信息的有效性与无害性。通过不同的角度对生物免疫系统机制进行模拟便能形成不同的人工免疫算法。使用人工免疫算法求解问题时, 应将问题里的有关元素与生物免疫系统中相对应的免疫物质建立映射关系, 继而建立免疫元素的数学模型, 最后根据免疫机制设计出相对应的人工免疫算法^[5]。人工免疫算法框图如图 1 所示。

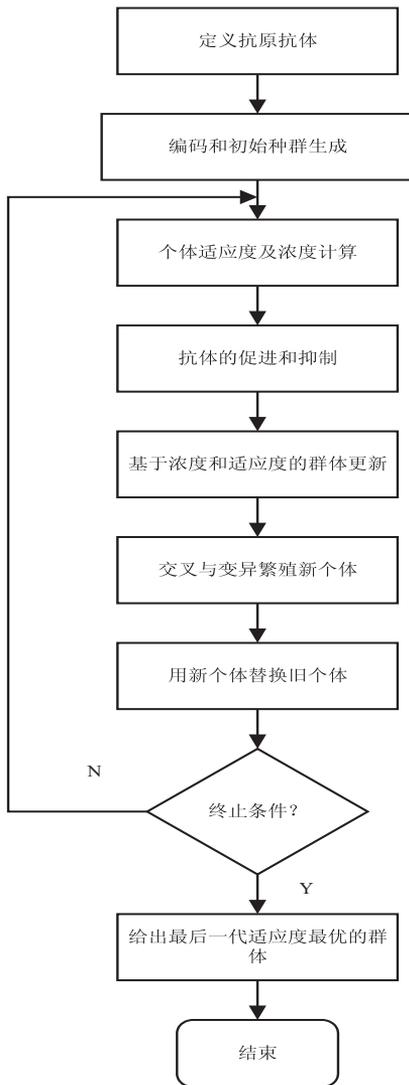


图 1 人工免疫算法框图

2 人工免疫算法的改进

该算法是将人工免疫算法与遗传算法相结合, 抗原为待求解的优化设计问题, 抗体为问题的解, 通过抗

原和抗体的亲和力来描述可行解与最优解^[6]的逼近程度。在此基础上, 提出一种改进的人工免疫遗传算法。

2.1 编码方式的改进

在遗传算法^[7]中对染色体采用二进制数进行编码^[8], 虽然二进制编码简单, 但是想要提高解的精度, 需要在遗传算法中不断地对染色体进行编码和解码, 导致计算解的速度太慢。考虑到二进制编码的缺陷, 提出一种实数编码, 算法中的染色体由实数向量组成。通过验证, 实数编码虽然可以提高解的速度, 但编码方式过于繁琐, 且根据经验选取解空间, 若选取解空间不精确有可能计算不出最优解。

针对此问题, 现将遗传算法控制中的二进制编码和实数编码相结合, 提出一种优化改进的编码方式。这种编码方式要随机产生一定位数的二进制数, 并且用十进制整数和它相对应, 进一步对二进制数表示的十进制数进行系数整定, 就能得到一定的解空间。在计算适应度和浓度时, 也可参考实数编码将解空间里的变量进行选择 and 计算, 由于输出值是解空间里选择的实数, 二进制数仅仅在交叉及变异^[9]时使用, 因此该编码的运行速度比二进制编码速度快很多。这种改进的编码方式对人工免疫算法起着至关重要的作用。

2.2 适应度值计算方法的改进

遗传算法中的适应度值^[10]计算是判断一个个体好坏的唯一标准。适应度可用目标函数^[11]表示, 适应度值越大, 得到的解越优。在下式中, 目标函数为 $f(x)$, 适应度函数为 $F(x)$, C_{\min} 是目标函数的最小估计值, C_{\max} 是目标函数的最大估计值。

(1) 若对目标函数求最大值, 见式 1:

$$F(x) = \begin{cases} f(x) + C_{\min}, & f(x) + C_{\min} > 0 \\ 0, & f(x) + C_{\min} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 若对目标函数求最小值, 见式 2:

$$F(x) = \begin{cases} C_{\max} - f(x), & f(x) < C_{\max} \\ 0, & f(x) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

若 $f(x) = 0.001x^2$, 求 $x = [0, 100]$ 的最小值, 其适应度函数 $F(x) = 10\,000 - f(x)$, 计算得到的适应度值基本类似, 得不到最优解, 就无法进行下一步复制、变异和交叉操作。所以, 在求目标函数最小值问题上即求适应度对应概率时, 提出了一种新的方法, 如下:

$$p(i) = \left(1 - \frac{f(i)}{f(\text{sum})}\right) / (n - 1) \quad (3)$$

其中, $p(i)$ 为第 i 个个体目标函数值的概率; n 为种群中的个体总数; $f(i)$ 为第 i 个个体的目标函数值; $f(\text{sum})$ 为 n 个个体的总目标函数值。

由式 3 可知, 如果第 i 个个体的目标函数值很大, 即对应适应度的概率就很小, 通过计算可得 n 个个体

适应度的概率和是 1。因此,利用式 3 可简便地计算出个体适应度的解的优劣。

2.3 基于信息熵的浓度计算

在人工免疫遗传算法中,使用抗体群^[12]的平均信息熵表示浓度^[13]。信息熵越大,抗体群浓度越大,种群多样;信息熵越小,抗体群浓度越小,种群单一。考虑系统的多样性,设抗体的种群规模为 N ,每个抗体含有 m 个基因,等位基因数为 s ,基因用二进制数表示,则 $s=2$,所以抗体群在第 j 个基因上的信息熵为:

$$E_j(N) = \sum_{k=1}^s -p_{kj} \log(p_{kj}) \quad (4)$$

其中, p_{kj} 为 N 个抗体中第 k 个字符出现在第 j 个基因位置上的概率。

若在抗体第 j 个基因位上的基因全都相等,即 $p_{kj}=1$,则 $E_j(N)=0$ 。所以 m 个基因的抗体群的平均信息熵为:

$$E(N) = \frac{E_1(N) + E_2(N) + \dots + E_m(N)}{m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_j(N) \quad (5)$$

定义两个抗体分别为 u 和 v ,其两者之间的相似度用 ay_{uv} 表示:

$$ay_{uv} = \frac{1}{1 + E(2)} \quad (6)$$

其中, $E(2)$ 为抗体 u 、 v 之间的信息熵; ay_{uv} 的取值范围在 0、1 之间。抗体 u 的浓度见式 7:

$$C_u = \frac{\text{与抗体 } u \text{ 的亲合力大于 } \theta \text{ 的个数}}{N} \quad (7)$$

其中, θ 为亲合力常数,通常取值范围是 $0.9 \leq \theta \leq 1$ 。

人工免疫遗传算法的浓度计算保持了种群的多样性,又能使算法既避免陷入局部最优解还可以搜索到

全局最优解^[14],使得人工免疫算法的寻优过程更加有效,在人工免疫算法中起着非常重要的作用。

2.4 抗体期望繁殖率的改进

在人工免疫算法中,适应度和个体之间的浓度是选择下一代个体的重要标准,一般会选取适应度高而浓度低的个体,这样选取既可加快搜索进程,又可防止最终结果陷入局部最优解。选择下一代的标准是抗体期望繁殖率^[15]的使用, e_k 定义为:

$$e_k = \frac{f_k}{c_k^\beta} \quad (8)$$

其中, f_k 为抗体的适应度; c_k 为抗体的浓度; β 为抗体适应度 f_k 和浓度 c_k 在期望繁殖率中的参数。由式 8 可知,期望繁殖率与抗体的适应度成正比,而抗体的浓度反比于期望繁殖率,但是在人工免疫算法的后期,基于染色体群体中每一个个体的品质已被优化改进,所以须加快人工免疫算法的收敛速度。基于此问题,现对 e_k 进行改进,选用期望繁殖率 e_k 为:

$$e_k = a \cdot f_k + (1 - a) \cdot c_k \quad (9)$$

其中, f_k 为抗体适应度; c_k 为抗体浓度, a 为可调参数,其值设为 0.8 ~ 0.85 之间。

在算法进化初始,抗体浓度起主要作用,适应度起次要作用;在算法进化最后,适应度所占权值相应变大,而浓度所起的作用变小。

3 新型人工免疫 PID 控制器

人工免疫控制器实质上是一种变增益的比例控制器^[16],根据误差变化率对控制器输出进行调节,也存在比例控制中的静态偏差现象。基于此,提出一种新型人工免疫 PID 控制器,即把改进的人工免疫算法和常规 PID 控制器相结合,这样可有效提高系统控制精度及控制性能。人工免疫控制器结构如图 2 所示。

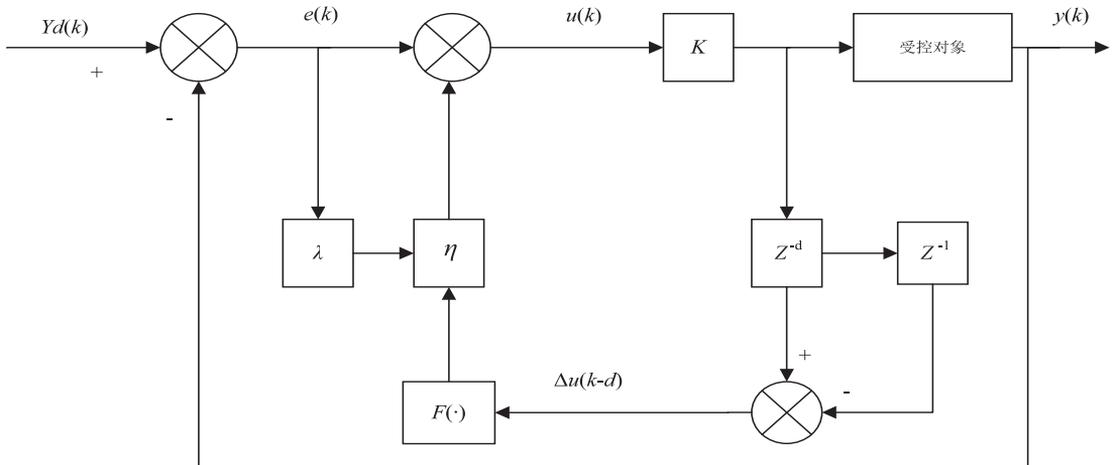


图 2 人工免疫控制器结构

人工免疫控制器表达式如下:

$$u(k) = K \{ 1 - \lambda \eta f [\Delta u(k - d)] \} e(k) \quad (10)$$

其中,参数 K 控制系统响应速度;参数 η 控制系统稳定作用; λ 表示系统响应过程中的免疫促进 ($\lambda =$

-1)、免疫抑制 ($\lambda = 1$) 和免疫稳定 ($\lambda = 0$) 三种状态。

离散 PID 控制规则是:

$$u_{PID}(k) = K_p(1 + \frac{K_i}{z-1} + K_d \frac{z-1}{z})e(k) \quad (11)$$

其中, K_p, K_i, K_d 分别为增益系数、积分作用系数、微分作用系数; z 为零阶保持器。

新型人工免疫 PID 控制器结构如图 3 所示。

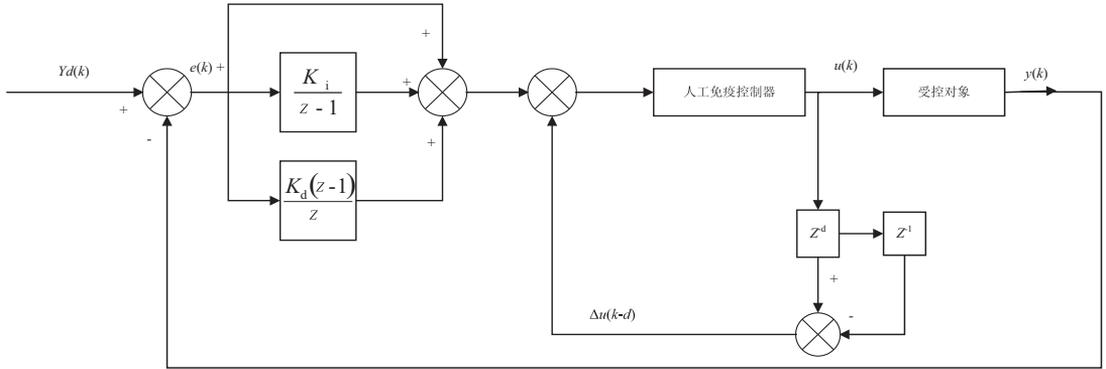


图 3 新型人工免疫 PID 控制器结构

新型人工免疫 PID 控制器的输出为:

$$u(k) = K\{1 - \lambda\eta f[\Delta\mu(k-d)]\} * [K_p(1 + \frac{K_i}{z-1} + K_d \frac{z-1}{z})e(k)] = K\{1 - \lambda\eta f[\Delta\mu(k-d)]\} e^*(k) \quad (12)$$

新型人工免疫 PID 控制器是把 PID 控制线性组合后的 $e^*(k)$ 作为新型人工免疫控制器的抗原输入,通过利用 PID 消除静态偏差,当 $\eta = 0$ 时,新型人工免疫 PID 控制器的输出 $u(k)$ 和常规 PID 控制是相同的。

热工部分进行详细分析,采用机理法和响应曲线法相结合的建模方式,可得加热炉主回路出口温度的传递函数 $W_{01}(s)$ 和副回路炉膛温度的传递函数 $W_{02}(s)$:

$$W_{01}(s) = \frac{8}{(1 + 15s)^2} \quad (13)$$

$$W_{02}(s) = \frac{1.125}{(1 + 25s)^2} \quad (14)$$

通过 METLAB 仿真,对加热炉温度采取串级控制,主控制器采用 PID 控制,副控制器采用 P 控制,加热炉温度串级控制系统仿真如图 4 所示。其中主控制器参数 $K_p = 0.4721$ 、 $K_i = 77.65$ 、 $K_D = 5.11$,副控制器参数是 $K_p = 0.04$ 。

4 仿 真

把加热炉的出口温度作为研究对象,对加热炉的

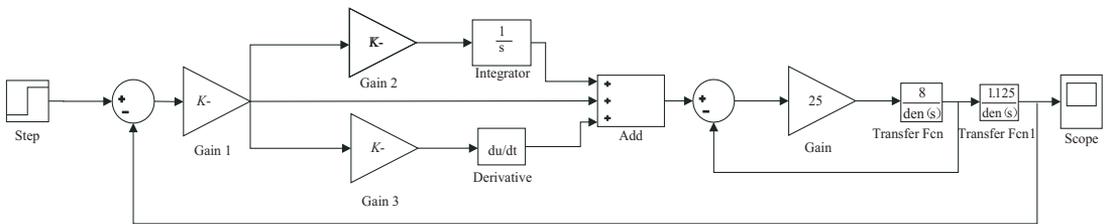


图 4 加热炉温度串级控制系统仿真

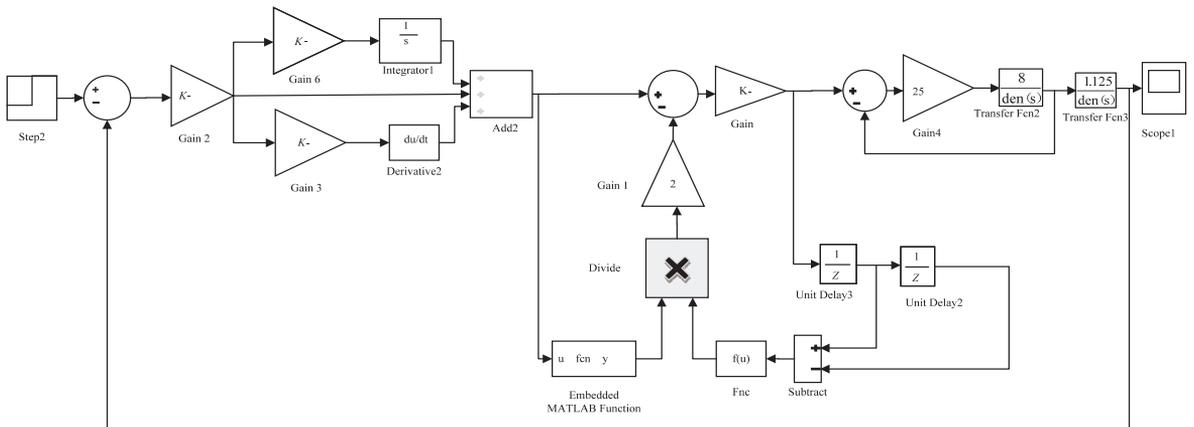


图 5 加热炉温度新型人工免疫 PID 控制系统仿真

对加热炉温度串级控制系统的主回路采用新型人工免疫 PID 控制器,副回路采用 P 控制,其中主回路的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 作为新型人工免疫 PID 控制器的抗体,把表示控制器性能积分参数作为抗原,调节免疫参数使 K 、 η 分别为 0.95 和 2,其仿真如图 5 所示。

若仅采用改进的人工免疫算法获得控制参数的串级控制,其中主控制器参数是 $K_p = 0.523$ 、 $K_i = 93$ 、 $K_d = 9.79$,副回路控制器的参数是 $K_p = 0.04$ 。

图 6 为控制器输出波形,图 7 为系统输出阶跃响应波形。图中曲线 1、2、3 分别是串级控制仿真曲线、改进免疫算法仿真曲线、新型人工免疫 PID 控制仿真曲线。

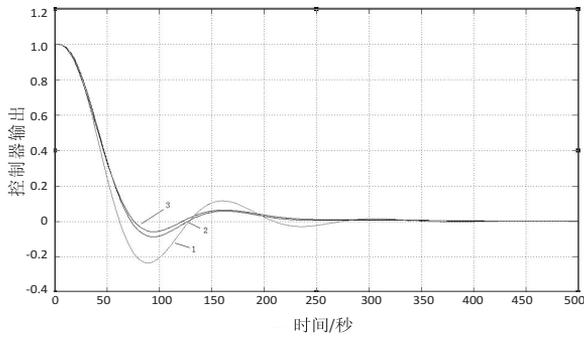


图 6 控制器输出波形

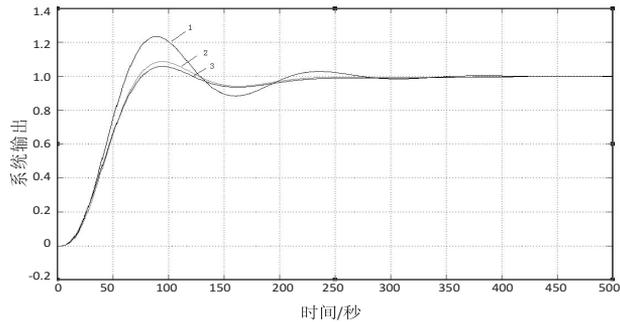


图 7 系统输出阶跃响应波形

由图 6 可见,新型人工免疫 PID 控制器输出波形变化更快,并且波动幅度最小;由图 7 可见,新型人工免疫 PID 控制器较其他两种控制器,其调节时间和超调量也是最小,进一步验证了新型免疫 PID 控制器在加热炉温度控制系统中,既可提高系统的控制性能又能改善系统的控制品质。

5 结束语

基于人工免疫算法的原理,提出了一种改进的人工免疫算法策略,提高了整体全局寻优能力。同时把这种改进算法和 PID 控制相结合构成的新型人工免疫 PID 控制器应用在加热炉温度控制系统中,通过仿真

曲线实验结果表明,新型人工免疫 PID 控制器具有良好的精确度和通用性,具有一定的工程推广应用价值。

参考文献:

- [1] 尚福华,李 军,王 梅,等. 人工智能及其应用[M]. 北京:石油工业出版社,2005:1-11.
- [2] TARAKANOV A, DASGUPTA D. A formal model of an artificial immune system[J]. Biosystems. 2000, 55(1-3): 151-158.
- [3] 洪 铭,柳培忠,骆炎民. 一种基于多智能体策略的人工免疫网络数据分类方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1): 151-155.
- [4] 汪 琰,张 铃. 用网格实现交叉操作的遗传算法[J]. 计算机工程与科学, 2000, 22(1): 18-20.
- [5] 冯 翔,马美怡,赵天玲,等. 基于复合免疫算法的入侵检测系统[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 43-47.
- [6] 马 佳,石 刚. 基于改进人工免疫算法的柔性车间调度问题[J]. 计算机仿真, 2014, 31(12): 375-379.
- [7] 钟燕飞,张良培,李平湘. 基于多值免疫网络的多光谱遥感影像分类[J]. 计算机学报, 2007, 30(12): 2181-2188.
- [8] 朱燕飞,蔡永昶,李中华,等. 人工免疫算法在过程数据分析中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(6): 205-207.
- [9] 谢仕宏,高筱筱,李林涛,等. 化工过程 PH 值的模糊免疫 PID 控制[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(1): 76-78.
- [10] 谈英姿,沈 炯,吕震中. 免疫 PID 控制器在汽温控制系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 148-152.
- [11] 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 289-291.
- [12] YANG Dongdong, JIAO Licheng, NIU Ruican, et al. Investigation of combinational clustering indices in artificial immune multi-objective clustering[J]. Computational Intelligence, 2014, 30(1): 115-144.
- [13] QI Yutao, LIU Fang, GONG Maoguo, et al. Multi-objective immune algorithm with Baldwinian learning[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(8): 2654-2674.
- [14] LI Zhonghua, ZHANG Yunong, TAN Hongzhou. An improved adaptive artificial immune system applied to complex optimization problems[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 4692-4700.
- [15] BOUDRIGA N, OBALDAT M S. Intelligent agent on the web: a review[J]. Computing in Science & Engineering, 2004, 6(4): 35-42.
- [16] TANG K S, MAN K F, CHEN Guanrong, et al. An optimal fuzzy PID controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 757-765.