

识别强化的双因子免疫控制器及其特性分析

付冬梅¹, 位耀光², 郑德玲¹

(1. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 目前完全从生物免疫机理出发构造的免疫控制器都属于自适应变结构比例型控制器, 这类控制器不能无偏差地跟踪恒定输入. 本文基于一种描述生物免疫功能的双因子免疫非线性反馈模型, 结合控制系统的特点, 构造出一个识别强化的双因子免疫控制器模型, 给出了它的结构形式. 对这种识别强化的双因子免疫控制器的一阶跟踪特性和能力进行了理论分析, 理论研究和仿真试验均表明该免疫控制器具有无偏差跟踪恒定输入的特性. 文中针对一类大滞后被控对象仿真研究了该免疫控制器的记忆特性和抗干扰能力.

关键词: 人工免疫; 免疫控制器; 一阶跟踪; 仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A recognition-intensified two-cell controller and its characteristic analysis

FU Dong-mei¹, WEI Yao-guang², ZHENG De-ling¹

(1. College of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: The current immune controllers constructed completely based on the biological immune mechanism are all self adaptive, structure-changing and proportional controllers. They can not track the invariable input without an error. In this paper, based on the two-cell immune nonlinear feedback model for describing the biology function, and combining it with the control system characteristics, we present a structure form of a recognition-intensified two-cell immune controller. The theoretical analysis is then carried out for the first-order tracking ability of the recognition-intensified two-cell controller. Both the theoretical analysis and the simulation indicate that this immune controller can track the invariable input with null error. The simulations were performed on a class of controlled systems with large values of time-delay, for testing the memory characteristic and the interference-rejection ability of this immune controller.

Key words: artificial immune; immune controller; first-order tracking; simulation

1 引言(Introduction)

现代智能控制中有两类重要研究内容: 一是控制律的无模型化; 另一个是控制系统的鲁棒性. 所谓控制律的无模型化, 并不是指控制律没有模型, 而是在建立控制模型时不需要知道被控对象的模型; 所谓鲁棒性是指, 当控制系统中的参数发生摄动或模型发生变化时系统仍能正常工作. 在生物免疫系统的调控中, 这两类重要的智能控制目标都得到了合理而协调的实现, 生物免疫系统具有的这种无模型化和鲁棒性, 使许多学者开始研究基于免疫的控制方法, 为现代控制工程的发展提供新的方向. 目前引起广泛关注的人工免疫系统主要集中在免疫机理的

模仿上, 特别是模仿免疫系统的特异性免疫机理方面^[1], 已经有人将这种免疫机理用于控制系统的控制器设计方面^[1~7].

目前构造免疫控制器的一般方法大致可分为: ① 完全从生物免疫机理出发, 构造出与传统控制器完全不同的免疫控制器^[2]; ② 构造出免疫控制器后, 再将它们与传统的PID结合起来^[1,6,7]; ③ 将模型参考^[3]、神经网络^[4,5]、基因算法^[1]等其他方法与免疫算法相结合, 构成一种组合优化算法来优化PID控制器的参数. 显然第一种方法是最具创新性和启发性的, 文献^[1,6,7]中提出的人工免疫控制器就是完全从生物免疫机理出发的, 但是这几种免疫

控制器在本质上是自适应变结构变参数的比例控制器, 因此不具有消除系统稳态余差的能力. 本文试图依据双因子免疫动力学模型, 建立具有定值跟踪能力(相当于传统控制器中的积分作用)和优良的抗纯滞后能力的免疫控制器.

2 基本双因子调节免疫动力学方程(Basic two-cell regulation dynamics equation)

Sergei G和Yuri M^[8]提出了一种基于识别因子(recognition cell)和杀伤因子(killing cell)的双因子免疫非线性反馈模型, 该模型是一个双线性模型, 在一定程度上较好地描述了生物体内识别因子、杀伤因子和抗原之间的关系. 这一过程可大致用图1来近似表示. 图中: $\oplus$ 表示促进作用, $\ominus$ 表示抑制作用.

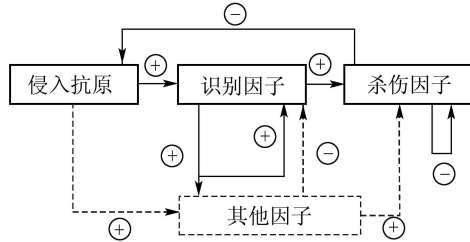


图1 免疫宏观机理示意图

Fig. 1 Macroscopical immune mechanism

设 $I(t)$ 表示 t 时刻抗原的数量; $R(t)$ 表示 t 时刻识别因子的数量; $K(t)$ 表示 t 时刻杀伤因子的数量. 又设抗原在机体内复制自己的速率为 $\alpha > 0$, 则在 Δt 时间间隔内抗原自我复制的数量为^[8]

$$\Delta I_1(t) = \alpha I(t) \Delta t. \quad (1)$$

如果抗原与杀伤因子相遇, 则抗原有可能被消灭, 其可能性与抗原和杀伤因子在单位时间内相遇的几率成正比^[8], 故假设在时间间隔 Δt 中抗原的减少量为

$$\Delta I_2(t) = -\eta I(t) K(t) \Delta t. \quad (2)$$

其中 $\eta > 0$ 为杀伤因子对抗原的杀伤比率.

由式(1)(2)可知抗原在时间间隔 Δt 内变化量为 $\Delta I(t) = \Delta I_1(t) - \Delta I_2(t) = (\alpha I(t) - \eta I(t) K(t)) \Delta t$,

$$\dot{I} = \alpha I(t) - \eta I(t) K(t). \quad (3)$$

根据免疫学知识, 当识别因子与抗原相遇并成功识别抗原后将触发两个过程^[9]: 一是识别因子将以比抗原自我复制快得多的速度复制自己, 二是识别因子激活杀伤因子. 假设在时间间隔 Δt 内识别因子的变化量与抗原数量的平方成正比^[8]:

$$\Delta R(t) = \kappa I^2(t) \Delta t. \quad (4)$$

用微分形式表示:

$$\dot{R}(t) = \kappa I^2(t), R(0) = R_0 > 0. \quad (5)$$

对于杀伤因子来说, 一方面它受识别因子的激发而活跃; 另一方面, 杀伤因子在杀灭抗原的同时会死亡. 对于第一方面, 设在单位时间内被识别激活的杀伤因子的数量正比于同一时间间隔内识别因子的数量^[8,10], 其比例系数为 $\nu > 0$:

$$\Delta K_1(t) = \nu R(t) \Delta t. \quad (6)$$

对于第二方面, 设自然死亡率为 $\mu > 0$, 杀灭抗原造成的死亡率为 $\lambda > 0$, 于是单位时间内杀伤因子的死亡数量为

$$\Delta K_2(t) = (-\mu K(t) - \lambda I(t)) \Delta t. \quad (7)$$

合并式(6)(7), 并表示成微分方程

$$\dot{K}(t) = -\mu K(t) - \lambda I(t) + \nu R(t). \quad (8)$$

至此, 已经得到了特异性免疫的双因子反馈调节的动力学方程

$$\begin{cases} \dot{I}(t) = \alpha I(t) - \eta I(t) K(t), \\ \dot{R}(t) = \kappa I(t)^2 R(0) = R_0, \\ \dot{K}(t) = \nu R(t) - \lambda I(t) - \mu K(t). \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\alpha > 0, \eta > 0, k > 0, \nu > 0, \mu > 0, R_0 > 0, I(t) \geq 0, K(t) \geq 0, R(t) \geq 0$.

3 双因子调节免疫控制器的设计与实现(Design and realization of the two-cell regulation immune controller)

如果假设控制系统的偏差 $e(t)$ 是抗原 $I(t)$, 对被控对象的控制量 $u(t)$ 是杀伤因子 $K(t)$, 根据式(9)就可以得到双因子免疫控制器模型, 但是所得到的该免疫控制器共有7个可调变量, 不利于实际使用. 在借鉴生物免疫模型构建免疫控制器时, 既要考虑生物免疫的主要特点继承下来, 又要考虑工程控制中的实际情况. 因此对式(9)重新构造如下:

实际控制系统中, 偏差 $e(t)$ 的存在不利于控制系统, 往往需要使其趋向于0, 这一过程与生物免疫中的抗原清除过程一致, 因此以偏差 $e(t)$ 代抗原 $I(t)$. 另外, 免疫系统中的抗原具有自我复制能力, 而偏差 $e(t)$ 不具有自我复制能力, 故省略免疫动力学模型(9)中抗原的自我复制项. 又实际控制过程中偏差 $e(t)$ 会有正有负, 故此令

$$\dot{I}(t) = \eta |K(t)| I(t). \quad (10)$$

生物免疫学认为, 识别因子的数量受入侵抗原的刺激将以快于比例关系的速度增加^[9, 10], 但是到目前为止这种增加的速率并没有准确定量的描述. 本文假设识别因子的自我复制速度是抗原的三次方:

$$\dot{R}(t) = \kappa I(t)^3, R(0) = R_0. \quad (11)$$

考虑式(10)(11), 则式(9)变为如下经过适当改造的动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{I}(t) = \eta |K(t)| I(t), \\ \dot{R}(t) = \kappa I(t)^3 R(0) = R_0, \\ \dot{K}(t) = \nu R(t) - \lambda I(t) - \mu K(t). \end{cases} \quad (12)$$

定义 1 (广义识别算子) 定义

$$P(t) = I(t) + R(t),$$

称 $P(t)$ 为广义识别算子。

令 $\nu = \lambda$, 并考虑广义识别因子, 由式(12)可得到模型

$$\begin{cases} \dot{P}(t) = (\kappa e^2(t) + \eta |u(t)|) e(t), & P(0) = P_0, \\ \dot{u}(t) = -\mu u(t) + \nu P(t). \end{cases} \quad (13)$$

由于此模型中识别因子的自我复制速度是偏差(抗原)的三次方, 即当偏差增大时识别因子将更加快速地繁殖和识别, 因此称式(13)为识别强化的双因子免疫控制模型。将式(13)合并成一个微分方程得到

$$\begin{cases} \ddot{u}(t) = -\mu \dot{u}(t) + (\gamma e^2(t) + \beta |u(t)|) e(t), \\ u(0) = u_0. \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\gamma = \nu \kappa > 0$, $\beta = \nu \eta > 0$, 识别强化的双因子免疫控制器结构如图2所示。

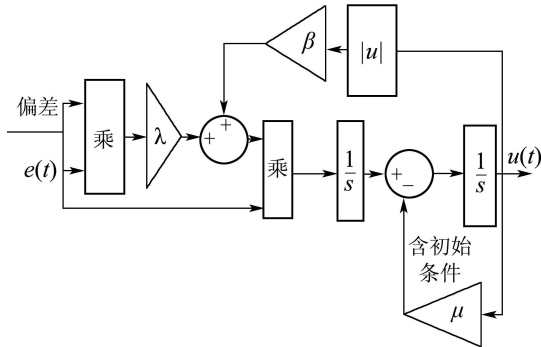


图2 识别强化的双因子免疫控制器结构示意图

Fig. 2 Structure of recognition-intensified two-cell immune controller

4 识别强化的双因子免疫控制器的一阶跟踪特性(First order integrating characteristic of the recognition-intensified two-cell immune controller)

积分特性(又称为一阶跟踪特性)是PID传统控制器的一个重要特性, 它保证了被控系统具有无差跟踪恒定输入控制信号的能力。控制器具有无差跟踪恒定输入控制信号的能力这一特性在工业应用中具有重要的实际意义。

将识别强化的免疫控制器用于SISO控制系统, 可以得到如图3所示的一般形式的SISO免疫控制系统。其中: $f(e, u)$ 表示免疫控制器, $G(s)$ 表示线性被控对象, $x(t)$ 表示系统的输入信号, $v(t)$ 表示系统干扰, $y(t)$ 表示系统输出。

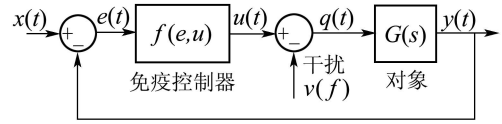


图3 免疫控制系统示意图

Fig. 3 Immune control system

PID控制器的积分就是数学上的对时间的积分。但是非线性控制器的一阶跟踪特性在数学上的表现形式上将更加广泛, 它可能无法用明确的数学关系来表示。下面给出一阶跟踪特性的定义。

定义 2 (SISO的一阶跟踪特性) 如果由非线性控制器组成的如图3所示的SISO控制系统是内部稳定的, 当系统的外界输入均是恒定值 $x(t) = r$, $V(t) = z$, 输出为 $y(t)$, 那么,

1) 当 $V(t) \equiv 0$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y(t) - r\| = 0$, 则称此非线性控制系统对恒定输入具有一阶跟踪特性。

2) 当有 $x(t) \equiv 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y(t)\| = 0$, 则称此非线性控制系统对恒定干扰 Z 具有不变性。

如果系统的跟踪特性是由图3中非线性控制器引起的, 那么则称该非线性控制器对恒定输入或对恒定干扰具有一阶跟踪特性。

根据上述定义可知: 如果SISO系统满足条件:

- 1) 控制输入 $u(t) = r$ (r 为常数);
- 2) 系统的定态为 X^0 , 定态对应的系统输出为 $y^0 = r$, 该定态是稳定的平衡点;
- 3) 系统的状态能够趋向于定态。则该SISO系统具有对控制输入的一阶跟踪特性。

设如图3所示的免疫控制系统中被控对象模型是

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}. \quad (15)$$

其中: $a_0 \neq 0$, $b_0 \neq 0$, $a_n = 1$, $m = n - 1$, $G(s)$ 中不存在不稳定极点, 并假设也没有零极点对消。以下的讨论都是在这样的假设成立的条件下进行。

若将识别强化的双因子免疫控制器模型与被控对象(15)组成如图3所示的控制系统, 那么该系统的模型可以表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) = [b_0 \ b_1 \ \cdots \ b_{n-1}] X, \quad X = CX, \\ \ddot{u}(t) = -\mu \dot{u}(t) + (\gamma e^2(t) + \beta |u(t)|) e(t), \quad u(0) = u_0, \\ e(t) = r - y(t) = r - CX. \end{cases} \quad (16)$$

其中 r 是控制系统的恒定控制输入。

定理 1 式(16)表示的免疫控制系统有一个奇点(定态):

$$\begin{bmatrix} \frac{r}{b_0} & 0 & \cdots & 0 & \frac{a_0 r}{b_0} & 0 \end{bmatrix}_{(n+3) \times 1}^T.$$

证 令 $x_{n+1} = u(t)$, $x_{n+2} = \dot{u}(t)$, $x_{n+3} = e(t)$, 则式(16)可表示成

$$\begin{cases} \dot{\underline{X}} = A^* \underline{X} + \Theta, \\ y = C^* \underline{X}. \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$\underline{X} = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n \ x_{n+1} \ x_{n+2} \ x_{n+3})^T,$$

$$C^* = (b_0 \ b_1 \ \cdots \ b_{n-1} \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$A^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -a_0 & -a_1 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -\mu & 0 \\ -a_0 b_{n-1} & b_0 - a_1 b_{n-1} & \cdots & -b_{n-1} & 0 & 0 \end{pmatrix}_m,$$

$$m = (n+3) \times (n+3),$$

$$\Theta = (0 \ \cdots \ \gamma(r - CX)^3 + \beta |x_{n+1}|(r - CX) \ 0)^T_{m'},$$

$$m' = (n+3) \times 1.$$

所谓系统的奇点就是使 $A^* X + \Theta = 0$. 由此式可以解得奇点为

$$X_0 = \begin{bmatrix} \frac{r}{b_0} & 0 & \cdots & 0 & \frac{a_0 r}{b_0} & 0 \end{bmatrix}_{(n+3) \times 1}^T.$$

证毕.

定理 2 如果免疫控制系统(16)的奇点是稳定的, 那么系统在恒定控制输入 r 作用下的响应是无余差的, 同时该识别强化的免疫控制器具有一阶跟踪特性.

证 因为系统(16)的奇点

$$\begin{bmatrix} \frac{r}{b_0} & 0 & \cdots & 0 & \frac{a_0 r}{b_0} & 0 \end{bmatrix}_{(n+3) \times 1}^T$$

是稳定的, 所以, 当 $t \rightarrow \infty$,

$$X(t) \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{r}{b_0} & 0 & \cdots & 0 & \frac{a_0 r}{b_0} & 0 \end{bmatrix}_{(n+3) \times 1}^T$$

成立. 此时, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} CX = r$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (r - y(t)) = 0$.

根据定义可知, 控制系统(16)具有对恒定控制输入的一阶跟踪特性. 证毕.

又控制系统(16)中的被控对象是0型的线性系统. 根据定义可知, 此时该识别强化的简化免疫控

制器具有一阶跟踪特性.

5 仿真研究(Simulation)

本文将识别强化的双因子免疫控制器应用于0型无震荡大滞后被控对象, 研究它的抗滞后、抗干扰及记忆特性等.

假设被控对象模型为

$$G_0(s) = \frac{e^{-\tau s}}{(10s+1)(s+1)}. \quad (18)$$

若 $\tau = 0$, 该模型的相位稳定余量约45°, 当 $\tau = 0.785$ 时该模型处于临界稳定状态, 在系统开环放大系数不变条件下, 当 $\tau > 3$ 时就难以用PID方法实现稳定控制.

5.1 记忆特性和抗纯滞后能力(Characteristic of memory and restraining lag)

为了能够展示双因子免疫控制器的记忆特性, 选择控制信号为一种方波信号, 方波信号的高限值为0.5, 低限值为-0.5. 先在纯滞后 $\tau = 0$ 条件下对免疫控制系统中免疫控制器进行参数校正, 校正结果 $\gamma = \beta = 0.05$, $\mu = 0.9$, $P_0 = 0.1$; 仿真时取被控对象的纯滞后参数 τ 分别为0, 1, 2, 4, 6, 不加外界干扰. 仿真结果如图4所示.

由图4所示的仿真曲线可见, 在识别强化的双因子免疫控制器的控制下, 第2次的响应明显快于第1次的响应. 这主要是由于双因子免疫控制器经过第1次控制学习以后, 在执行第2次阶跃控制响应时, 提高了反应速度所致. 当系统响应是一个缓慢响应过程时, 这种反应速度的提高有利于系统动态品质的改善. 由图4还可以得知, 随着纯滞后时间常数 $\tau = 0, 1, 2, 4, 6$ 的逐步增加, 尽管系统的控制品质有所下降, 但系统仍是稳定的. 如果采用PID控制器当 $\tau > 3$ 时就已无法使系统稳定. 这说明识别强化的双因子免疫控制器组成的SISO控制系统比PID控制系统具有更为优越的抗纯滞后能力. 最后, 从仿真结果可见: 该双因子免疫控制器对恒定输入具有无差跟踪能力, 即本文提出的双因子免疫控制器具有一阶跟踪特性.

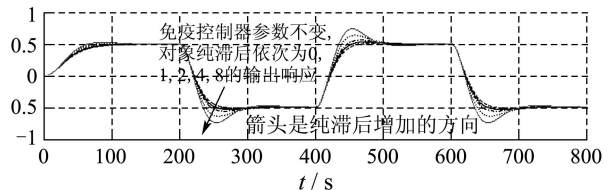


图4 方波信号作用下的输出响应曲线

Fig. 4 Output-responding curve of square wave signal

5.2 抗负载干扰能力(Characteristic of anti-loading disturbance)

负载干扰是工业控制中最常见的一种干扰类型, 本文假设输入信号是 $[-0.5, 0.5]$ 的方波信号, 负载

干扰信号是 $[-0.1, 0.1]$ 的方波信号, 负载干扰信号是在输入信号加入以后的第100s时加入. 其免疫控制器参数和被控对象参数与前面的一样, 为简单起见这里仅取 $\tau = 0$ (虚线), $\tau = 6$ (实线).

由图5可见, 加入负载干扰以后识别强化的双因子免疫控制系统仍可以较好的跟踪输入给定信号.

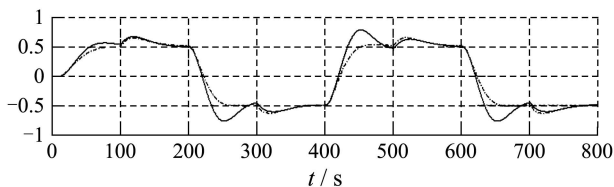


图5 有负载干扰的输出响应曲线

Fig. 5 Output-respondering curve with loading disturbance

6 结论(Conclusion)

本文基于生物免疫的双因子作用机理设计了识别强化的双因子免疫控制器, 并对这类双因子免疫控制器进行了一下研究:

- 1) 仿真研究表明本文提出的识别因子强化的双因子免疫控制器具有一定的记忆特性、抗负载干扰能力;
- 2) 从理论上证明了识别强化的双因子免疫控制器具有一阶跟踪特性, 即能够无偏差地实现恒值跟踪控制;
- 3) 与PID控制相比, 本文提出的识别因子强化的双因子免疫控制器具有好的抗纯滞后的特性.

参考文献(References):

- [1] TAKAHASHI K, YAMADA T. Application of an immune feedback mechanism to control systems[J]. *JSME Int Journal*, Series C, 1998, 41(2): 184 – 191.
- [2] TAKAHASHI K, YAMADA T. A self-tuning immune feedback controller for controlling mechanical system [C]//*Proc of IEEE Advanced Intelligent Mechatronics*. Tokyo, Japan: Springer, 1997: 101 – 107.
- [3] KIM D H, HONG W P, PARK J I. Auto-tuning of reference model based PID controller using immune algorithm[C]//*Proc of*

2002 World Congress on Computational Intelligence. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2002: 483 – 488.

- [4] KAWAFUKU M, SASAKI M, TAKAHASHI K. Adaptive learning method of neural network controller using an immune feedback law[C]//*Proc of 1999 IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1999: 641 – 646.
- [5] KIM D H. Tuning of a PID controller using a artificial immune network model and local fuzzy set[C]//*Proc of IEEE Int Symposium on Industrial Electronics*. Vancouver, BC, Canada: Springer, 2001, 5: 2698 – 2703.
- [6] 付冬梅, 郑德玲, 位耀光. 具有记忆与积分能力的双因子免疫控制其及其特性的仿真研究[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(2): 190 – 194.
(FU Dongmei, ZHENG Dingling, WEI Yaoguang. An anamnestic and integral two-cell immune controller and its characteristic simulation[J]. *J of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(2): 190 – 194.)
- [7] 谈英姿, 沈炯, 吕震中. 基于免疫进化算法的过热汽温自整定PID控制研究[J]. *热能动力工程*, 2003, 18(1): 58 – 62.
(TAN Yingzi, SHEN Jiong, LÜ Zhenzhong. A Study of the immune evolutionary algorithm based self-tuning PID control of superheated steam temperature[J]. *J of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2003, 18(1): 58 – 62.)
- [8] SERGEI G, YURI M. A simple non-linear model of immune response[J]. *Chaos Solitons and Fractals*, 2003, 16 (1): 125 – 132.
- [9] 漆安慎, 杜婵英. 免疫系统的非线性模型[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
(QI Anshen, DU Chanying. *Nonlinear Models in Immunity*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1998.)
- [10] TARAKANOV A, DASGUPTA D. A formal model of an artificial immune system[J]. *Biosystems*, 2000, 55(1/3): 151 – 158.

作者简介:

付冬梅 (1963—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 近期主要从事智能控制、人工免疫计算、策略和理论的研究与应用、红外图像技术、理论与实际应用等, E-mail: fdm2003@163.com;

位耀光 (1976—), 男, 博士, 讲师, 近期主要从事智能控制、人工免疫理论的研究与应用等, E-mail: wygzz@yahoo.com.cn;

郑德玲 (1939—), 女, 教授, 博士生导师, 研究领域为混沌理论、人工免疫理论、智能控制, E-mail: ft99@163.com.