

热工过程的免疫控制系统设计及稳定性分析

吴 婕, 沈 炯, 李益国

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 借鉴生物免疫应答反馈机理模型, 模拟抗原, T细胞及B细胞浓度关系, 设计抑制T细胞与B细胞浓度之间的非线性函数关系, 提出一类针对热工过程对象的免疫反馈控制器结构。利用Popov超稳定定理, 分别针对两类热工对象免疫控制系统进行超稳定性分析; 将Popov超稳定图像解推广至解析解, 得到保证系统绝对稳定的控制器参数范围解析解。选取有自平衡能力的过热汽温对象以及无自平衡能力的汽包水位对象仿真验证。通过辨识并利用Popov超稳定定理分析系统, 验证所得参数设计范围解析解的有效性。

关键词: 免疫反馈机理; 免疫反馈控制器; Popov超稳定性解析解; 热工对象
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of the Immune Control System for Thermal Engineering Process and Its Stability Analysis

WU Jie, SHEN Jiong, LI Yi-guo

(School of Energy and Environment, Southeast University,
Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Motivated by biological immune feedback models, a novel immune feedback controller for thermal processes is derived. First, relations among antigens, T-cells and B-cells are relatively completely imitated and a new nonlinear function describing the reaction between restrain T-cells and B-cells is proposed. Then the Popov super-stability analyses for two types of thermal process immune control systems are present respectively. The nonlinear gain of the control system is gained and the design scale of IFC parameters is derived through extending the Popov super-stability from image solution to analytical solution. Finally, simulation results of the self-balanced superheated stream immune control system and the non-balanced water immune control system prove the analytical solution validation of parameters scope through identifying the processes and analyzing the control system with Popov super-stability theory. The simulations results of thermal process immune control systems with tracking performance show that the proposed immune control system for thermal process is satisfying.

Key words: Immune Feedback Theory; Immune Feedback Controller; Popov Super-stability Analytical Solutions; Thermal Engineering Processes

1 引言 (Introduction)

热工过程机理复杂, 建模对象形式多样, 控制策略更是不尽相同。近年来, 智能免疫控制器发展迅速。目前, 具有代表性的免疫反馈控制设计类型主要有三种^[1,2]: 1) 从生物免疫反馈应答机理出发而构造出与传统控制器完全不同的仿生免疫控制器^[3,4]; 2) 构造出的免疫控制器再与其他智能算法或传统PID控制器相结合^[5,6,7,8]; 3) 利用免疫算法, 结合神经网络, 遗传算法等优化PID控制器参数。第一种构造最具创新, 仿生性最强, 然而现有免疫控制器虽表现优良, 但在分析设计免疫控

制器时与生物体免疫应答机制有一定出入, 如未考虑抗原对B细胞的直接刺激, 以及两种T细胞之间作用, 或者采用免疫宏观作用因子而未分析微观免疫细胞之间作用而设计控制器等。本文在对生物体免疫应答机制更加完整模拟的基础上, 分析设计抑制T细胞对B细胞浓度变化的函数关系, 提出了一类针对热工过程的免疫控制器 IFC (Immune Feedback Controller); 利用Popov超稳定定理, 针对有自平衡能力和无自平衡能力的热工对象免疫控制系统进行超稳定性分析, 得到热工对象免疫控制的非线性增益, 通过将Popov超稳定图像解推广至解析解并得到 IFC的参数设计范围解析解。最后,

选取有自平衡能力的过热汽温对象以及无自平衡能力的汽包水位对象进行分析仿真验证。通过对对象辨识并利用Popov超稳定定理进行系统分析，验证了所得参数设计范围解析解的有效性。仿真结果显示了设计的热工对象免疫控制系统具有较强跟踪性能。

2 基于免疫反馈机理的免疫控制器设计 (Design of immune controller based on immune feedback mechanism)

2.1 免疫应答反馈过程 (Immune feedback process)

免疫应答过程由两种淋巴细胞：T细胞和B细胞执行完成。免疫系统内存在的反馈机制，可确保短时间内消灭侵入机体的抗原并保证在抗原被消除后，整个免疫系统有能力调节恢复到抗原侵入以前的平衡状态^[9]。被识别的病原体（抗原）可刺激T细胞及B细胞进行特异性免疫应答，其中B细胞在应答过程中可产生袭击抗原的物质（抗体），而T细胞在免疫响应过程中起重要的调节作用^[9,10]。本文的免疫反馈描述主要基于免疫系统的T细胞反馈调节原理。设对一种病原已找到与该抗原匹配的特异性极高的B细胞^[10]，且袭击抗原的主要力量为抗体对抗原的中和作用^[9]，可得到免疫反馈原理图（见图1）。

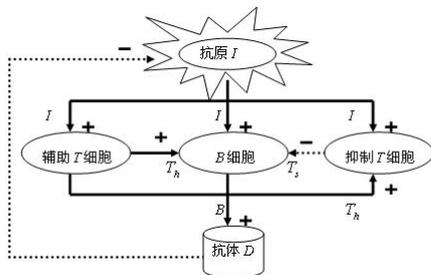


图1 免疫反馈原理图

Fig. 1 Immune Feedback Theory

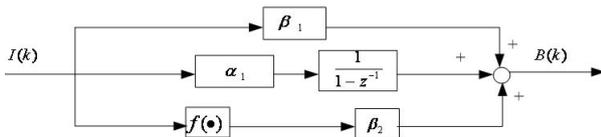


图2 免疫控制器 IFC

Fig. 2 Immune Feedback Controller (IFC)

抗原I入后，直接激发抗原特异性B细胞，辅助T细胞（ T_h ）及抑制T细胞（ T_s ）。 T_h 细胞又将激励B细胞和 T_s 细胞。B细胞经克隆增殖分化产生消灭抗原I抗体。当抗原I浓度减至一定程度达到免疫应答末期， T_s 胞将迅速反作用于 T_h 细胞和B细胞以减少两种细胞的浓度，同时抗原的消失

也使免疫细胞的浓度增长失去了刺激。经过一段时间该种抗原被清除，生物机体又恢复至抗原侵入前的平衡状态^[10]。

2.2 免疫控制器模型推导 (Eduction of immune feedback controller)

对2.1所述反馈机理进行简化，定义在第k代抗原数量为 $I(k)$ ，由抗原刺激的 T_h 细胞的输出为 $T_h(k)$ ， T_s 细胞的输出为 $T_s(k)$ ，B细胞接受的总刺激为 $B(k)$ 。则有：

$$\begin{cases} \dot{T}_h(k) = k_1 I(k), \\ T_s(k) = k_2 I(k) + k_3 T_h(k), \\ B(k) = k_4 I(k) + k_5 T_h(k) + k_6 f[T_s(k)]. \end{cases} \quad (1)$$

式中， $k_1 \sim k_6$ 均为增益系数。由于免疫应答过程中的抗原数量 $I(k)$ 为非负值，而若以 $I(k)$ 代表正负不定的控制器输入（即系统偏差，取为设定值与系统输出之差），为实现免疫应答过程需设计非线性函数 $f(\bullet)$ 。

由式（1）可知 $f(\bullet)$ 的输入与系统偏差成正向变化，应答初期系统偏差为较大正值， $f(\bullet)$ 输出应为较大正值；应答中期偏差减小， $f(\bullet)$ 的输出应迅速减小；应答末期差减小趋于0， $f(\bullet)$ 的输出应饱和为0；反之亦然。由上分析可设 $f(x)$ 为：

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \exp(-x^2/r), & x > 0 \\ \exp(-x^2/r) - 1, & x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

对于不同的 r 取值可对应不同种类抗原的免疫应答特性。对于免疫效应剧烈的过程，应采取较小 r 值，反之亦然。本文取 $r = 10$ 。

若抗原 $I(k)$ 为输入，抗体 $B(k)$ 为输出，则免疫控制器 IFC (Immune Feedback Controller)的简化输入输出关系如式（3）及图2所示。

$$B(k) = \beta_1 I(k) + \alpha_1 \sum_{j=0}^k I(j) + \beta_2 f[I(k)] \quad (3)$$

3 热工对象免疫控制系统超稳定性分析 (Super-stability analysis for thermal processes immune control system)

由于免疫控制系统本质为非线性的，而非线性控制稳定性分析一直是一个难点课题^[6]。从20世纪60年代开始逐步发展起来的超稳定定理为此提供了一条途径^[11]。本文将利用Popov超稳定^[2]定理，针对有自平衡能力和无自平衡能力的热工对象设计免疫控制器，并进行闭环系统的稳定性分析。

3.1 非线性免疫控制系统的超稳定性分析 (Super-stability analysis for nonlinear immune control systems)

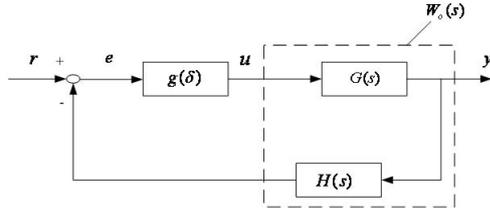


图 3 非线性免疫控制系统框图

Fig. 3 Nonlinear Immune Control System Frame

非线性免疫控制系统可由图 3 来表示。图中, $g(\delta)$ 为非线性 IFC, $G(s)$ 为被控对象, $H(s)$ 为测量函数。则开环传递函数的线性部分 $W_o(s)$ 为:

$$W_o(s) = H(s)G(s) \quad (4)$$

设 IFC 的非线性增益为, 定义为^[11]:

$$g(H) = \sup_{\substack{k_1 \neq k_2 \\ k_1, k_2 \geq 0}} \frac{|u(k_1) - u(k_2)|}{|e(k_1) - e(k_2)|} \quad (5)$$

式中, $u(k)$ 为图 3 中控制量, $e(k)$ 为系统偏差。图 3 中, 以 $e(k)$ 代表抗原浓度 $I(k)$, $u(k)$ 代表抗体浓度 $B(k)$, 由式 (3) 可得:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= (\beta_1 + \alpha_1)e(k) - \beta_1 e(k-1) \\ &\quad + \beta_2 f[e(k)] - f[e(k-1)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $f(\bullet)$ 为非线性映射 (见式 (2)), 输出与输入非增益关系。于是有:

$$\|\Delta u(k)\| \geq |\beta_1 + \alpha_1| \|e(k)\| + v_{max} \quad (7)$$

$$v_{max} = \max \beta_1 |e(k-1)| + \beta_2 |f[e(k)] - f[e(k-1)]|$$

故 $g(H) = |\beta_1 + \alpha_1|$, IFC 的非线性增益范围为 $[0, |\beta_1 + \alpha_1|]$, 由 Popov 超稳定定理^[7]得系统绝对稳定的充要条件为其 Popov 曲线在通过点 $(-\frac{1}{|\beta_1 + \alpha_1|}, j0)$ 的斜率为 $\frac{1}{q}$ 的斜线 l^* 右边。

3.2 有自平衡能力热工对象非线性免疫控制超稳定分析 (Super-stability analysis for self-balanced thermal processes immune control system)

设图 3 中被控对象 $G(s)$ 为有自平衡能力热工对象^[12]:

$$G_b(s) = \frac{K_b}{(1 + Ts)^n} \quad (8)$$

式中, $K_b > 0, T > 0, n$ 为自然数。测量传递函

数为 $H_b(s) = K_1$, 开环传递函数的线性部分频率特性为:

$$W_o(j\omega) = \frac{K}{(1 + T^2\omega^2j)^{n/2}} e^{-jn\theta} \quad (9)$$

式中, $\theta = \alpha \tan T\omega$ 。其 Popov 曲线与 X 轴交点横坐标为:

$$\begin{cases} \omega = 0 \text{ 时, } X = K \\ \omega = \frac{1}{T} \tan \frac{\pi}{n} \text{ 时, } X = \frac{\pm K}{(1 + \tan^2 \frac{\pi}{n})^{n/2}} \end{cases} \quad (10)$$

$\because K > 0$, 斜线 l^* 与 Popov 曲线的切点为 $(\frac{K}{(1 + \tan^2 \frac{\pi}{n})^{n/2}}, 0j)$ 。即当 IFC 参数满足:

$$|\beta_1 + \alpha_1| \leq \frac{(1 + \tan^2 \frac{\pi}{n})^{n/2}}{K} \quad (11)$$

时, 该免疫控制系统绝对稳定。

3.3 无自平衡能力热工对象非线性免疫控制超稳定分析 (Super-stability analysis for non-balanced thermal processes immune control system)

设图 3 中被控对象 $G(s)$ 为无自平衡能力热工对象^[12]:

$$G_u(s) = \frac{K_u}{T_a s(1 + Ts)^n} \quad (12)$$

测量传递函数为 $H_u(s) = K_2$ 。

同 3.2 节, 可得当 IFC 参数满足:

$$|\beta_1 + \alpha_1| \leq \frac{T_a \tan \frac{\pi}{2n} (1 + \tan^2 \frac{\pi}{2n})^{n/2}}{KT} \quad (13)$$

时, 该免疫控制系统绝对稳定。

4 热工过程免疫控制系统超稳定性分析及仿真研究 (Super-stability analysis and simulations for thermal processes immune control system)

4.1 有自平衡能力热工对象免疫控制系统 (Immune control systems for self-balanced thermal processes)

以具有自平衡能力的过热汽温对象作为仿真被控对象进行跟踪实验。本文采用免疫控制器 IFC 为对过热汽温进行直接控制。其中被控对象及测量单元函数如下:

$$G_o(s) = \frac{9}{(1 + 15s)^2(1 + 25s)^3}, W_h(s) = 0.1$$

1) 过热汽温免疫控制系统超稳定性分析

过热汽温对象 $G_0(s)$ 可辨识为 $G'_o(s) = \frac{1}{(1+21s)^5}$ 。

由式(11)可得闭环系统稳定 IFC非线性增益须满足:

$$|\beta_1 + \alpha_1| \leq \frac{(1 + \tan^2 \frac{\pi}{n})^{n/2}}{K} = 3.2060 \quad (14)$$

同时可作出以 $ReW_o(j\omega)$ 为X轴, 以 $\omega ImW_o(j\omega)$ 为Y轴的 Popov曲线如图4所示。

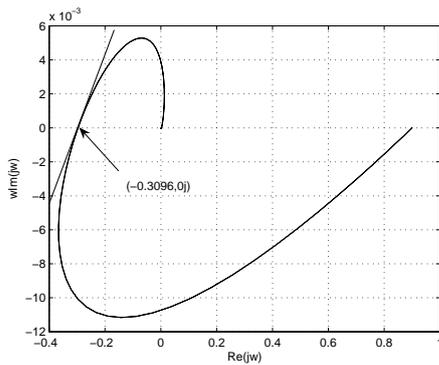


图4 过热汽温免疫控制系统 Popov曲线

Fig. 4 The Popov Curve of Superheated Stream Immune Control System

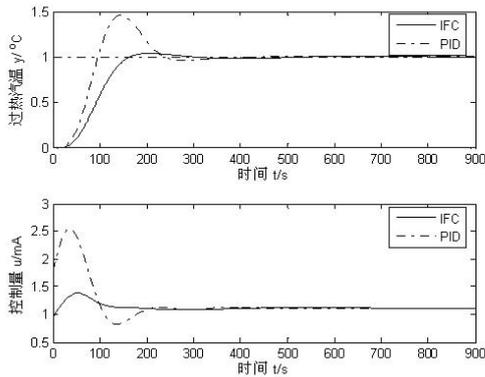


图5 过热汽温控制系统仿真

Fig. 5 Simulations of the Superheated Steam Immune Control System

由图4可见 Popov曲线穿过负实轴时 $ReW_o(s) = -\frac{1}{k_{max}} = -0.3096$, 则过热汽温免疫控制系统绝对稳定的充要条件为 $|\beta_1 + \alpha_1| \leq k_{max} = 3.2300$, 结果与式(14)所得解析解十分接近, 可知解析解为有效解。该结论同样可推广至其他一般有自平衡能力热工对象。

2) 系统跟踪性能仿真结果对过热汽温免疫控制系统进行阶跃信号跟踪。由式(14)选取 IFC参数

分别为: $\alpha = 0.012$, $\beta_1 = 0.1058$, $\beta_2 = 8.9500$ 为对比另选传统 PID控制器, 参数经工程整定为¹³: $k_p = 1.8$, $k_i = 0.032$, $k_d = 50$ 。仿真结果见图5。

由仿真结果可知, IFC控制系统可快速跟踪设定曲线, 且超调较小; 控制量变化平稳, 系统跟踪性能较好。

4.2 无自平衡能力热工对象免疫控制系统(Immune control systems for non-balanced thermal processes)

以无平衡能力的汽包水位对象作为对象进行跟踪仿真实验。以免疫控制器 IFC为主控制器采用三冲量前馈-反馈系统^[12]对汽包水位进行控制。控制系统如图6所示:

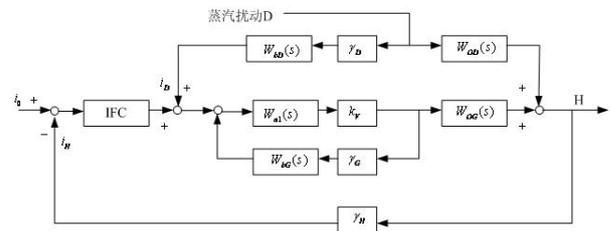


图6 汽包水位控制系统图

Fig. 6 Water Control System Frame

其中, 给水量对水位传递函数^[12]为 $W_{OG}(s) = \frac{0.037}{s(1+30s)}$, 蒸汽量对水位传递函数为 $W_{OD}(s) = \frac{0.037}{3.6s(1+15s)}$, 测量单元传递函数 $\gamma_D(s) = 0.075$, $\gamma_H(s) = 0.033$ 。给水流量反馈装置及蒸汽流量前馈装置传递函数 $W_{bG}(s) = 0.3$ 。副调节器 $W_{a1}(s) = 10$, $k_V(s) = 2$ 。

1) 汽包水位免疫控制系统超稳定性分析当蒸汽量扰动为0时, 由图6可得系统开环传递函数的线性部分 $W_o(s)$ 为:

$$W_o(s) = \frac{W_{a1}(s)k_V(s)W_{OG}(s)\gamma_H}{1 + W_{bG}(s)\gamma_D(s)\gamma_G(s)W_{a1}(s)k_V(s)} = \frac{0.01684}{s(1+30s)}$$

辨识 $W_o(s)$ 辨识为 $W'_o(s) = \frac{0.01684}{s(1+6s)^5}$ 。由式

(13) 可得闭环系统稳定IFC非线性增益须满足:

$$|\beta_1 + \alpha_1| \leq k_{max} = 4.1329 \quad (15)$$

同时可作出以 $ReW_o(j\omega)$ 为X轴, 以 $\omega ImW_o(j\omega)$ 为Y轴的 Popov曲线如图7所示。

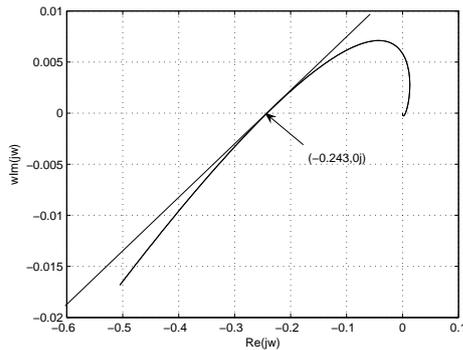


图 7 汽包水位免疫控制系统Popov曲线

Fig. 7 The Popov Curve of Water Immune Control System

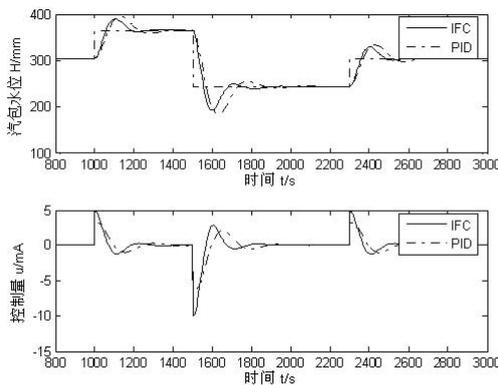


图 8 汽包水位控制系统跟踪仿真

Fig. 8 Tracking Performance of Water Immune Control System

由图 7 可见 Popov 曲线穿过负实轴时 $ReW_o(j\omega) = -\frac{1}{k_{max}} = -0.243$, 则汽包水位免疫控制系统绝对稳定的充要条件为 $|\beta_1 + \alpha_1| \leq k_{max} = 4.1152$, 结果与式 (15) 所得解析解十分接近, 可知解析解为有效解。该结论同样可推广至其他一般无自平衡能力热工对象。

2) 系统跟踪性能仿真结果

对图 6 所示汽包水位免疫控制系统进行方波信号跟踪。由式 (15) 选取 IFC 参数分别为: $\alpha = 0.0100$, $\beta_1 = 1.8878$, $\beta_2 = 2.9115$ 。为对比另选传统 PI 控制器, 参数经工程整定为 $k_p = 1.5084$, $k_i = 0.0156$ 。仿真结果见图 8。由仿真结果可知, IFC 控制系统可快速跟踪设定曲线, 且超调较小; 控制量变化平稳, 系统跟踪性能较好。

5 结论(Conclusions)

通过人工模拟生物免疫二次应答过程模型, 提出一种新型免疫控制器 IFC; 运用 Popov 超稳定定理分别对有自平衡能力和无自平衡能力的热工对象免疫控制系统进行稳定分析, 初步得到保证系统稳定的 IFC 参数设计范围解析解。分别对有自平衡

能力的过热汽温及无自平衡能力的汽包水位控制进行免疫系统控制分析, 验证了 Popov 解析解的有效性; 同时仿真结果证明其跟踪性能令人较满意。但免疫控制器 IFC 仍处于最初的探索阶段, 受制于生物体免疫反馈机理, 控制量变化速率较小及参数设置复杂等, 仍有待进一步改进; 由于存在非线性环节, 免疫控制系统各种性能分析以及非线性全局稳定性理论研究, 仍需大量的工作。

参考文献(References):

- [1] 付冬梅, 位耀光, 郑德玲. 识别强化的双因子免疫控制器及其特性分析. 控制理论与应用[J]. 2007, 24(4): 530-534. (FU Dongmei, WEI Yaoguang, Zheng Deling. A recognition-intensified two-cell controller and its characteristic analysis [J]. *Control theory and applications*, 2007, 24(4): 530-534.)
- [2] 韦巍, 张国宏. 工免疫系统及其在控制系统中的应用. 控制理论与应用[J]. 2002, 19(2): 157-166. (WEI wei, ZHANG Guohong. Artificial immune system and its applications in the control system [J]. *Control theory and applications*, 2002, 19(2): 157-166.)
- [3] 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器及其特性的仿真研究. 北京科技大学学报[J]. 2006, 28(2): 190-194. (FU Dongmei, Zheng Deling, WEI Yaoguang. An anamnestic and integral two-cell immune controller and its characteristic simulation [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(2): 190-194.)
- [4] TAKAHASHI K, YAMADA T. Self-tuning Immune feedback controller for controlling mechanical systems [C]. *Proceedings 1997 1st IEEE, ASME Int conference on advanced intelligent mechatronics*, 1997, 101.
- [5] 刘宝, 丁永生. 一种基于免疫存储记忆的智能控制器的设计与实现. 控制与决策[J]. 2005, 20(10): 1169-1172. (LIU Bao, DING Yongsheng. Design and implementation of an intelligent controller based on immune store-memory [J]. *Control and decision*, 2005, 20(10): 1169-1172.)
- [6] FU Dongmei, ZHENG Deling. The analysis of stability of immune control system based on small gain theorem [J]. *Communications, Circuits and Systems*, 2005 International Conference on Volume 2, 27-30.
- [7] 谈英姿. 人工免疫工程及其热工过程控制应用 [D]. 南京: 东南大学, 2002. (TAN Yingzi. Artificial immune system and its thermal process control application [D]. Nanjing: Southeast University, 2002.)
- [8] 丁永生, 任立红. 一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统. 控制与决策[J]. 2000, 15(4): 443-446. (DING Yongsheng, REN Lihong. A new fuzzy self-tuning immune feedback control system [J]. *Control and decision*, 2000, 15(4): 443-446.)
- [9] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [10] 漆安慎, 杜焱英. 免疫的非线性模型 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1998.
- [11] C.A. Desoer, M. Vidyasagar. *Feedback Systems: Input-Output Properties* [M]. New York: Academic Press, 1975.
- [12] 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [13] 李萌, 沈炯. 基于自适应遗传算法的过热汽温 PID 参数优化控制仿真研究. 中国电机工程学报 [J]. 2002, 22(8): 145-149.

(LI Meng, SHEN Jiong. Simulating study of adaptive GA-based PID parameter optimization for the control of superheated steam temperature [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(8):145-149.)

作者简介:

吴 婕 (1984—), 女, 东南大学博士研究生, 目前研究方向为热工过程免疫控制系统, E-mail: jiewu7@gmail.com;

沈 炯 (1957—), 男, 东南大学教授, 博士生导师, 主要从事先进控制理论在热工过程控制中的应用研究, E-mail: shenj@seu.edu.cn;

李益国 (1973—), 男, 东南大学副教授, 硕士生导师, 主要从事热工过程控制及电力市场研究, E-mail: lyg@seu.edu.cn;