

文章编号: 1001-0920(2005)12-1346-04

焦炉模糊免疫自适应 PD 控制的应用研究

高宪文, 赵亚平

(东北大学 a 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, b 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 针对焦炉温度控制的难点, 借鉴生物免疫反馈响应过程的调节作用和模糊逻辑推理的自适应性, 提出了一种模糊免疫自适应 PD 控制策略. 该控制方法集合了 3 种控制方法的优点, 对焦炉温度系统的适应性好, 抗干扰能力强, 具有较快的响应速度和较强的鲁棒性. 理论分析和仿真研究证明了该控制方法的可行性和有效性.

关键词: 模糊自适应 PD 控制; 免疫反馈; 焦炉控制系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application Research on Fuzzy Immune Adaptive PD Control in Coke Oven

GAO Xianwen, ZHAO Yaping

(a Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry Education, b School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: GAO Xianwen, E-mail: gaoxianwen1@sina.com)

Abstract: After analyzing the difficulties of coke oven temperature control, a fuzzy immune adaptive PD control is presented based on the immune feedback regulating law and the adaptive ability of fuzzy logic ratiocination. It obtains the merits of three different control methods, which is adaptable, having strong anti-disturbance ability, fast response and great robustness. The theoretical analysis and simulation results show the feasibility and effectiveness of the control method.

Key words: Fuzzy adaptive PD control; Immune feedback; Coke oven control system

1 引言

焦炉是钢铁企业中的耗能大户, 在炼焦厂的总能耗中, 焦炉加热用的煤气量约占总能耗的 70%. 因此, 如何降低能耗、提高焦炭的产量和质量是焦炉控制和管理的核心问题. 焦化过程是一个传热和化学变化过程. 焦炉炉体结构复杂, 操作条件恶劣, 检测手段落后, 控制较为困难^[1,2]. 焦炉温度大多采用常规 PD 控制和以经典控制理论为基础结合多种控制手段的控制方法. 然而, 对于焦炉这种集大惯性、纯滞后、非线性和时变性于一体的复杂对象, 采用单一传统的控制手段很难达到精确控制.

针对某焦化厂的实际工艺状况, 本文提出了一

种基于免疫反馈机理的模糊自适应 PD 控制方法, 并对这种控制方法的可行性进行了深入研究. 仿真结果表明, 该控制方法可行且有效.

2 模糊免疫自适应 PD 控制方法的设计

2.1 免疫系统原理^[3,4]

免疫系统是机体对生物性干扰的防御系统, 它对于外来侵犯的抗原可产生相应的抗体 (Antibody). 以体液免疫响应为例 (见图 1), 免疫系统淋巴细胞由胸腺产生的 T 细胞和骨髓产生的 B 细胞组成. 当抗原侵犯机体时, 免疫系统将信息传递给 T 细胞, T 细胞进一步分化为增强细胞 T_H (Helper T-cell) 和抑制细胞 T_s (Suppressor

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-09-16

基金项目: 教育部高校骨干教师计划项目 (42105010).

作者简介: 高宪文 (1955—), 男, 辽宁盘锦人, 教授, 工学博士, 从事复杂工业生产过程的建模、控制与优化的研究;
赵亚平 (1982—), 女, 河南驻马店人, 硕士生, 从事模糊控制理论与应用的研究.

T-cell); 然后刺激 B 细胞 (T_H 能增加 B 细胞的产生, 反之 T_S 将减少 B 细胞的产生) 产生相应的抗体, 以消除外来抗原, 从而自由抗原减少. 随着抗原的减少, 体内的 T_S 细胞增多, 它抑制了 T_H 细胞的产生, 从而 B 细胞也随之减少. 经过一段时间间隔后, 免疫反馈系统趋于平衡. 由抑制机理知, 主反馈机理之间的相互协作是通过免疫反馈机理对抗原的快速反应和稳定免疫系统完成的

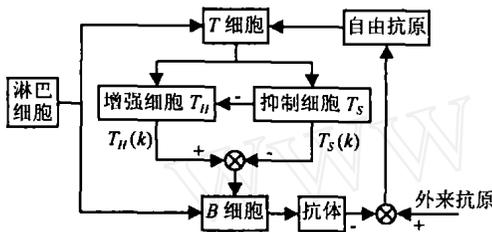


图 1 体液免疫系统示意图

2.2 免疫 PD 控制器的设计

基于上述免疫原理, 提出如下假设^[3,5]: 假设第 k 代的抗原数量为 $\epsilon(k)$, 由抗原刺激的来自增强 T 细胞 T_H 的输出为

$$T_H(k) = k_1 \epsilon(k), \quad (1)$$

式中 k_1 为激励因子, 符号为正. 抑制 T 细胞的 T_S 会影响 B 细胞的产生, 因而可将其用于反馈控制, 假设 T_S 细胞对 B 细胞的影响为 $T_S(k)$, 则

$$T_S(k) = k_2 f(\Delta s(k)) \epsilon(k). \quad (2)$$

式中: k_2 为抑制因子, 符号为正; $f(\bullet)$ 为一个非线性函数, 表示抑制细胞 T_S 的抑制量, 它的输出限制在 $[0, 1]$. 则 B 细胞接受的总刺激为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) = (k_1 - k_2 f(\Delta s(k))) \epsilon(k). \quad (3)$$

此式相当于一个免疫反馈控制

免疫响应的主要功能是在保证免疫系统稳定的同时, 快速响应入侵抗原. 免疫系统的总目标是使生物体在抗原和大抗体浓度下受到的总伤害最小. 而在控制系统的动态调节过程中, 也要求在保证系统稳定性的前提下能快速消除偏差, 这与免疫系统的目标是一致的. 二者的关系比较如表 1 所示.

常用的增量式 PD 控制器的离散形式如下:

$$u_{PD}(k) = u(k-1) + K_P(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)), \quad (4)$$

式中 K_P, K_I, K_D 分别为比例、积分和微分系数. P 控制器的控制规律如下:

$$u(k) = K_P e(k). \quad (5)$$

根据表 1, 可将免疫反馈机理应用在控制中, 则控制规律可设计如下:

$$u(k) = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) e(k) = K_{PI} e(k). \quad (6)$$

式中: $K = k_1$ 为控制反应速度, K 增大, 响应速度会增大; $\eta = k_2/k_1$ 为控制稳定效果, η 增大, 系统的超调量减少, 合理地调整 K 和 η 可使控制系统具有较快的响应速度和较小的超调; $f(\bullet)$ 为抑制细胞 T_S 的抑制量 $f(u(k), \Delta u(k))$, 是关于 $u(k)$ 和 $\Delta u(k)$ 的非线性函数. 可见, 基于免疫反馈原理的控制器实际上是一个非线性 P 控制器, 其比例系数 $K_{PI} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ 随控制器输出的变化而变化, 具有很强的自适应能力, 其中 K 为增益. 但 P 型免疫控制器不能补偿噪声或非线性干扰引起的控制误差. 为此, 本文采用 PD 型免疫控制器, 将 PD 型控制器的输出 $u(k)$ 作为抗原 $\epsilon(k)$ 的量. 由此免疫 PD 控制器的输出为

$$u(k) = u(k-1) + K_{PI}(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)). \quad (7)$$

2.3 免疫反馈规律 $f(\bullet)$ 的模糊自调整

根据模糊控制器能逼近任意线性和非线性函数的特点, 本文采用一个二维模糊控制器 FC 来实现免疫反馈规律中的非线性函数 $f(\bullet)$ ^[6,7].

FC 的输入为免疫控制器的输出 $u(k)$ 以及输出的变化 $\Delta u(k)$ 的模糊量, 分别表示为正 (P) 和负 (N); 输出为非线性函数 $f(\bullet)$ 的模糊量, 分别表示为正 (P), 零 (Z) 和负 (N). 模糊推理规则由李亚普诺夫综合法推导得出, 以保证 $f(\bullet)$ 对系统的稳定性.

表 1 免疫系统与控制系统的比较

免疫系统	控制系统
抗原、抗体等繁殖的第 k 代	离散系统的第 k 个采样时刻
第 k 代的抗原浓度 $\epsilon(k)$	第 k 个采样时刻的偏差 $e(k)$
第 k 代的 B 细胞接受的总刺激 $S(k)$	第 k 个采样时刻的控制器输出 $u(k)$

假设将免疫PD控制器中非线性函数 $f(\bullet)$ 转换或简化成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = H(x_1, x_2) + G(x_1, x_2)f. \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_1, x_2 分别表示 $u(k)$ 和 $\Delta u(k)$; f 表示 $f(u(k), \Delta u(k))$. 由式(8)可以看出, \dot{x}_2 与 f 成正比. 本文采用一个二维模糊控制器FC得到控制量 $f(x_1, x_2)$. 为使被控对象在平衡点 $(0, 0)^T$ 渐近稳定, 选择李亚普诺夫函数

$$V(x_1, x_2) = (x_1^2 + x_2^2)/2, V(0, 0) = 0$$

$V(x_1, x_2)$ 在平衡点的邻域正定, 则

$$\dot{V}(x_1, x_2) = x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2 = x_1x_2 + x_2x_2 \quad (9)$$

要使系统在平衡点是渐近稳定的, 在平衡点的邻域应有

$$x_1x_2 + x_2x_2 < 0 \quad (10)$$

注意到 \dot{x}_2 与 f 成正比, 由式(10)可得表2所示的模糊规则

表2 $f(\bullet)$ 的模糊规则表

x_1	x_2	
	P	N
P	N	Z
N	Z	P

2.4 PD参数 K_I 和 K_D 模糊自调整

根据PD参数整定原则, 将焦炉温度的变化 e 和温度变化率 ec 以及2个输出 ΔK_I 和 ΔK_D 的变化范围都定义为模糊集上的论域: $(-6, -5, -4, -3,$

表3 ΔK_I 的模糊校正规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表4 ΔK_D 的模糊校正控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6)$, 其模糊子集为 e, ec , $\Delta K_I, \Delta K_D = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 子集中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 由焦炉温度调节的实际操作经验和PD参数整定规则, 得到对参数 ΔK_I 和 ΔK_D 整定的模糊控制表^[8,9], 如表3和表4所示.

本文采用三角形函数和S形函数的组合来描述 ΔK_I 和 ΔK_D 隶属函数的确定. 根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计PD参数的模糊矩阵表, 在线修正PD参数, 计算公式为

$$K_x = K_{x0} + \Delta K_x, \quad (11)$$

其中 $x = I, D$. 根据表中整定出的49条模糊控制规则, 进行参数 ΔK_I 和 ΔK_D 的自适应校正

3 仿真研究

3.1 仿真对象模型及仿真条件

焦炉是一个十分复杂的被控对象, 目前还没有精确的焦炉整体数学模型. 根据焦炉大滞后、大惯性的特点, 以一个炭化室为被控对象, 将焦炉简化为一个带有纯滞后的一阶惯性环节, 其传递函数为

$$G(s) = K_0 e^{-\tau s} / (T_s + 1). \quad (12)$$

本文对采用常规PD控制、模糊自适应PD控制以及模糊免疫控制在被控对象炼焦不同煤质情况下的控制效果进行仿真比较. 根据焦炉的大滞后特性, 采样时间不能过短, 本文设为20s, 并取 $K_0 = 7.5, T = 100, \tau = 10s$

由焦炉实际操作经验知, 当焦饼中心温度达到950 ~ 1050 时, 焦炭已经成熟, 并且在这个温度范围内既能保证焦炭的质量, 又能保证推焦时炉墙所受的压力较小. 因此将目标火道温度设定为1000.

3.2 仿真结果及分析

根据前面所设定的条件和仿真模型, 分别对模糊免疫自适应PD控制、模糊自适应PD控制和常规PD控制方法的仿真曲线进行比较. 仿真结果如图2~图4所示, 其中实线为模糊免疫自适应PD控制曲线, 点划线为模糊自适应PD控制曲线, 虚线为常规PD控制曲线.

由图2可以看出, 3种控制方法中, 模糊免疫自适应PD控制具有更快的响应速度和更好的跟踪性能, 基本实现了系统的无差控制. 而模糊自适应PD和常规PD控制分别存在响应速度慢、滞后时间和调节时间过长、超调量过大等缺点.

由图3知, 当被控对象由于时变或加入煤料不同而发生改变时, 模糊免疫自适应PD控制具有很好的参数自调整能力和自适应能力, 控制焦炉的温

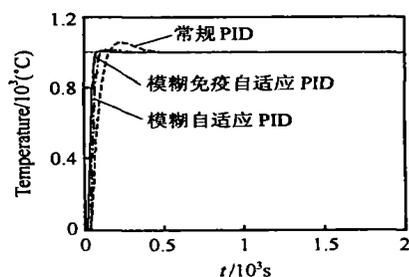


图 2 3 种控制方法的响应曲线比较

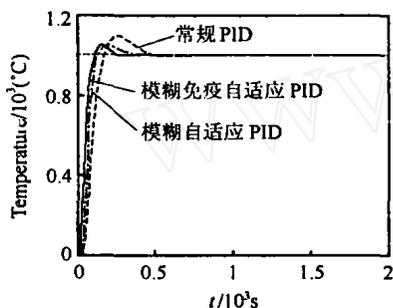


图 3 模型参数变化后的响应曲线比较

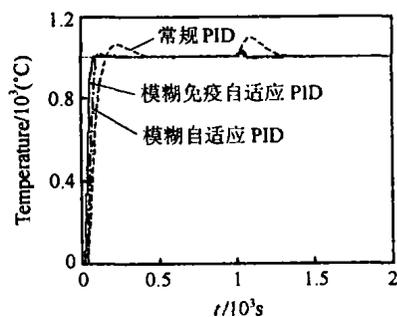


图 4 幅值为 30 扰动下的响应曲线比较

度使之迅速达到稳定状态; 而模糊自适应 PID 和常规 PID 控制下的温度则不能很快适应被控对象的变化而使之调节时间延长、超调量增加

由图 4 可以看出, 当外界由于煤气流量的输入或其他原因产生扰动时, 模糊免疫自适应 PID 控制能很快抑制扰动, 温度波动较小, 而且调节时间相对较短; 模糊自适应 PID 波动较小而调节时间过长; 常规 PID 控制则会使温度发生较大的波动和振荡

4 结 论

基于焦炉的特点, 提出了一种模糊免疫自适应 PID 控制方法. 此方法结合了常规 PID、模糊和免疫 3 种控制方法, 具有适应性强、鲁棒性好的优点. 从

仿真曲线可以看出, 采用模糊免疫自适应 PID 控制几乎无超调, 控制响应快, 调节时间小, 在抗干扰能力和对象参数变化时的适应性都优于另外两种控制方法, 具有更好的动态特性和稳定性能, 有效地减小了炉温的波动, 对于解决复杂的焦炉温度控制问题具有实用价值

参考文献 (References)

- [1] 吴宏博, 朱宏祥, 王新立, 等. 焦炉加热过程计算机控制的现状与发展[J]. *冶金自动化*, 2000, 24(6): 7-10
(Wu H B, Zhu H X, Wang X L, et al. Present State and Development of Computer Control for Coke Oven Battery Heating Process [J]. *Metallurgy Automation*, 2000, 24(6): 7-10)
- [2] Choi K I, Kim S Y, Suo J S, et al. A Mathematical Model for the Estimation of Flue Temperature in a Coke Oven [A]. *Ironmaking Conference Proceedings* [C]. Chicago, 1997: 107-113
- [3] Tarakanov A, Dasgupta D. A Formal Model of an Artificial Immune System [J]. *Biosystems*, 2000, 55(3): 15-18
- [4] Sergei Gutnikov, Yuri M elnikov. A Simple Non-linear Model of Immune Response [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2003, 16(1): 125-132
- [5] 王焱. 模糊免疫 PID 控制器的设计与仿真[J]. *计算机仿真*, 2002, 19(2): 67-69
(Wang Y. Fuzzy Immune PID Controller Design and Simulation [J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(2): 67-69)
- [6] Qiao W Z, Mizumo to M. PID Type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 78(1): 23-35
- [7] Euntai Kim. A New Approach to Numerical Stability Analysis of Fuzzy Control Systems [J]. *IEEE Trans on Systems*, 2001, 31(1): 107-113
- [8] 侯勇严, 孙瑜, 郭文强. 一种自适应模糊 PID 控制器的仿真研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2004, 22(2): 48-53
(Hou Y Y, Sun Y, Guo W Q. A Simulation Research of a Self-tuning Fuzzy PID Controller Based on Matlab [J]. *J of Shanxi University of Science & Technology*, 2004, 22(2): 48-53)
- [9] Tan S H, Yu Y. Adaptive Fuzzy Modeling of Nonlinear Dynamical Systems [J]. *Automatica*, 1996, 32(4): 637-643