

# 模糊免疫 PID 控制器及其在苛化过程中的应用

李国栋, 王孟效

(陕西科技大学电气与电子工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 在实际生产中, 苛化工段温度控制系统中常用的常规 PID 控制器难以获得理想的控制效果。该文设计一种基于免疫反馈机理的 PID 控制器, 采用 Centroid 反模糊化方法, 得到每个模糊控制器的输出, 使 PID 控制器的 3 个参数随控制器输出的变化而变化。仿真结果证明, 该设计的控制效果优于常规 PID 控制, 能适应对象参数的变化, 具有良好的控制品质、较强鲁棒性和自适应能力。

**关键词:** 模糊控制; 免疫 PID; 苛化过程

## Fuzzy Immune-PID Controller and Its Application in Caustic Process

LI Guo-dong, WANG Meng-xiao

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021)

**【Abstract】** It is difficult to obtain the satisfactory controlling performance with the normal PID controller in the temperature controlling system in practice. A PID control algorithm based on the immune feedback principle is presented. The Centroid defuzzification method is adopted in order to get the output of the controller. The 3 coefficients of the PID controller change with the variation of output of the controller. Simulation results show that the Fuzzy-Immune-PID control strategy is adaptive to the object's parameter variations, and its controlling performance is better than that of the traditional PID control strategy. The system obtains the performance of strong robustness and self-adaptability.

**【Key words】** fuzzy control; immune-PID; caustic process

### 1 概述

碱回收是造纸工业的重要内容之一, 苛化工段是碱回收车间的成品工段, 其运行效果关系到碱回收能否丰产丰收<sup>[1]</sup>。其中, 苛化器内温度是重要参数, 它直接影响苛化反应的速度和苛化度。由于温度高会使氢氧化钙溶解度降低、碳酸钙溶解度增加, 因此提高温度不利于苛化度。而降低温度会使苛化速度下降。苛化器温度控制会对后续环节, 如过量灰的降低、白泥的洗涤、白泥残碱及稀白液总碱的降低产生影响, 因此, 必须严格控制苛化器温度。实际生产过程存在各种干扰, 且具有时变、不确定和非线性等特性, 由于模型参数的不确定性以及控制系统运行过程中出现的一些问题, 使得传统 PID 控制器的控制效果不理想。

近年来, 专家控制、模糊控制等智能控制技术被极大关注, 其最大特点是不需要建立精确的对象数学模型, 而是根据控制行为调整控制器输出。常规 PID 控制与模糊控制相结合的控制策略极大优化了控制性能。本文结合免疫反馈机理<sup>[2]</sup>, 提出一种新的模糊 PID 控制器优化设计方法, 即模糊免疫 PID 控制器。笔者将其用于碱回收苛化工段的温度控制系统, 得到了很好的控制效果。

### 2 模糊免疫 PID 控制器的设计与实现

#### 2.1 免疫 PID 控制原理

免疫系统是机体对生物体干扰的防御系统, 对外来侵犯的抗原可产生相应的抗体来抵御。抗体和抗原结合后会产生一系列反应以消除抗原影响, 通过吞噬作用或产生特殊酶的作用毁坏抗原。免疫响应过程是免疫细胞对抗原的识别、活化、分化和效应过程。生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成, 淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞(分别为辅助细胞  $T_H$

和抑制细胞  $T_S$ ) 和骨髓产生的 B 细胞组成( $T_H$  和  $T_S$  是 2 种较重要的免疫调节细胞)。当抗原侵入机体并经周围细胞消化后, 将信息传递给 T 细胞, 然后刺激 B 细胞。B 细胞产生抗体以消除抗原。当抗原较多时, 机体内的  $T_H$  细胞较多, 而  $T_S$  细胞较少, 因此, 会产生较多 B 细胞。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, 则 B 细胞随之减少。经过一段时间间隔后, 免疫反馈系统趋于平衡, 抑制机理和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<sup>[3]</sup>。

PID 控制基本算法如下:

$$u = k_p [e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt}] \quad (1)$$

进行离散化可得

$$u(k) = k_p [e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1))] \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + k_p [(e(k) - e(k-1)) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))] = u(k-1) + k_p (e(k) - e(k-1)) + k_e e(k) + k_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (3)$$

其中,  $e$  为系统偏差, 其值等于系统给定值减去系统实际值;  $k_p, k_i, k_d$  分别为系统比例、积分和微分系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数。

基于上述免疫反馈原理, 本文在常规增量式 PID 控制的基础上提出免疫 PID 控制器的设计原理: 假设第  $k$  代的抗原

**作者简介:** 李国栋(1982 - ), 男, 硕士研究生, 主研方向: 工业过程高级控制; 王孟效, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2008-03-29 **E-mail:** liguodongjiesse@yahoo.com.cn

数量为  $\varepsilon(k)$ ，由抗原刺激的  $T_H$  细胞的输出为  $T_H(k)$ ， $T_S$  细胞对  $B$  细胞的影响为  $T_S(k)$ ，则  $B$  细胞接收的总刺激为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k)$$

其中， $T_H(k) = k_1 \varepsilon(k)$ ； $T_S(k) = k_2 f(S(k), \Delta S(k)) \varepsilon(k)$ 。

若以抗原数量  $\varepsilon(k)$  作为偏差  $e(k)$ ，以  $B$  细胞接收的总刺激  $S(k)$  作为控制输入  $u(k)$ ，则  $\Delta S(k) = \Delta u(k)$ 。

且有如下反馈控制规律：

$$\begin{aligned} u(k) = & k_p [e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1))] = \\ & k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)) = \\ & K_1 [1 - \eta_1 f_1(u(k), \Delta u(k))] e(k) + K_2 [1 - \eta_2 f_2(u(k), \Delta u(k))] \sum_{j=0}^k e(j) + \\ & K_3 [1 - \eta_3 f_3(u(k), \Delta u(k))] (e(k) - e(k-1)) = \\ & k'_p e(k) + k'_i \sum_{j=0}^k e(j) + k'_d (e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $k'_p = K_1 [1 - \eta_1 f_1(u(k), \Delta u(k))]$ ； $k'_i = K_2 [1 - \eta_2 f_2(u(k), \Delta u(k))]$ ； $k'_d = K_3 [1 - \eta_3 f_3(u(k), \Delta u(k))]$ ； $K_1, K_2, K_3$  为控制反应速度； $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  为控制稳定效果； $f_1(\cdot), f_2(\cdot), f_3(\cdot)$  为选定的非线性函数，它们表示细胞抑制刺激能力的大小。

## 2.2 模糊免疫 PID 控制算法与设计

本文在设计中使用 3 个模糊控制器，利用模糊规则可逼近非线性函数  $f_1(\cdot), f_2(\cdot), f_3(\cdot)$  让每个输入变量被 2 个模糊集模糊化，分别是“正(P)”和“负(N)”。输出变量被 3 个模糊集模糊化，分别为“正(P)”、“零(Z)”和“负(N)”。上述隶属度函数都定义在整个  $(-\infty, +\infty)$  区间，按“细胞接收的刺激越大，则抑制能力越小”以及“细胞接收的刺激越小，则抑制能力越大”的原则，对模糊控制器采用以下模糊规则：

- If u is P and u is P then f(u, u) is N(1)
- If u is P and u is N then f(u, u) is Z(1)
- If u is N and u is P then f(u, u) is Z(1)
- If u is N and u is N then f(u, u) is P(1)
- ...

在各规则中，使用 Zadeh 的模糊逻辑 and 操作，并采用 Centroid 反模糊化方法可以得到每个模糊控制器的输出<sup>[4]</sup>。

由上述原理可以看出，基于免疫反馈原理的控制器实际上是一个非线性 PID 控制器，其各个系数  $k'_p, k'_i, k'_d$  随控制器输出的变化而变化，其中， $K_1, K_2, K_3$  为增益，免疫 PID 控制器的输出为

$$\begin{aligned} u(k) = & u(k-1) + K_1 [1 - \eta_1 f_1(u(k), \Delta u(k))] (e(k) - e(k-1)) + \\ & K_2 [1 - \eta_2 f_2(u(k), \Delta u(k))] e(k) + \\ & K_3 [1 - \eta_3 f_3(u(k), \Delta u(k))] (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) = \\ & u(k-1) + k'_p (e(k) - e(k-1)) + k'_i e(k) + k'_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (5)$$

## 3 碱回收苛化工段温度控制系统的设计与仿真

### 3.1 苛化工段温度控制回路系统

苛化工段温控对象具有大延迟、大惯性和时变等特性。过热器管道长度和蒸汽容积较大，当碱温水流量发生变化时，过热器出口蒸汽温度有较大延迟。当负荷变化时，主蒸汽温度的动态特性变化明显。主蒸汽温度具有分布参数和扰动多的特点。根据上述研究，设计如图 1 所示的温度控制系统

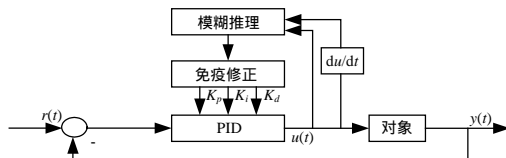


图 1 碱回收苛化工段温度控制系统

### 3.2 仿真实验

设上述控制系统对象的数学模型为

$$G(s) = \frac{k}{(T_s + 1)^2} e^{-\tau s} \quad (6)$$

式中， $k$  为模型增益系数； $T$  为时间常数； $\tau$  为时间滞后常数<sup>[5]</sup>。

针对某纸厂苛化工段温度控制系统进行仿真研究<sup>[6]</sup>，该对象各个参数如下： $k=3.45, T=18\text{ s}, \tau=30\text{ s}$ 。用 Matlab 工具箱中的 M 函数编程进行仿真，采样时间为 20 s， $K_1, K_2, K_3$  分别为 0.6, 0.3, 0.1， $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  分别为 0.80, 0.60, 0.10。系统在单位阶跃信号下外加干扰的仿真曲线如图 2 所示。

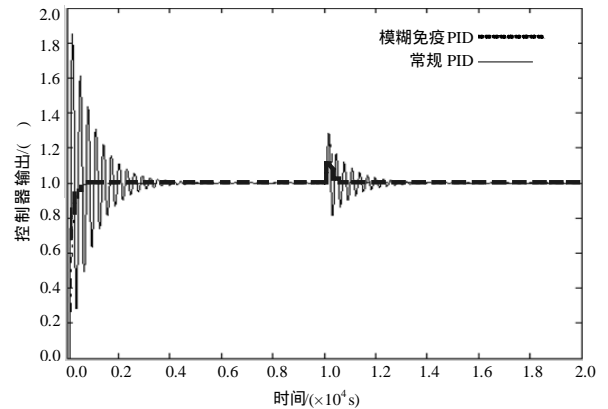


图 2 模糊免疫 PID 与常规 PID 控制的仿真曲线

由图 2 可以看出，模糊免疫 PID 控制器在外加干扰的情况下，比常规 PID 控制好，具有较强鲁棒性。在仿真过程中，控制器各系数  $k'_p, k'_i, k'_d$  自整定变化曲线如图 3~图 5 所示<sup>[7-8]</sup>。

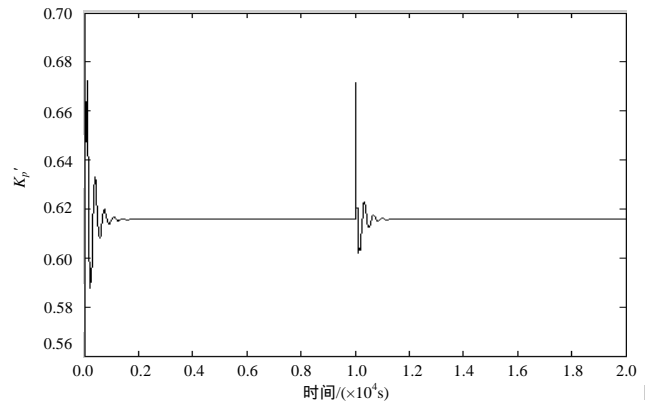


图 3 模糊免疫 PID 控制  $k'_p$  自整定变化曲线

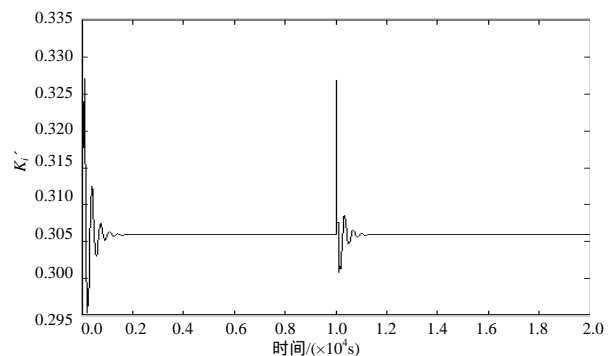


图4 模糊免疫PID控制  $K'_i$  自整定变化曲线

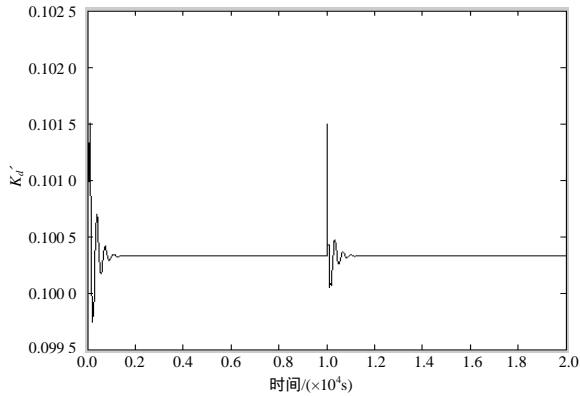


图5 模糊免疫PID控制  $K'_d$  自整定变化曲线

#### 4 系统控制效果

图6是从生产现场采回的苛化器温度的WinCC在线的信号历史趋势图,可以看出,当苛化器的温度稳定在  $100 \pm 1$  左右时,系统具有很好的控制效果。

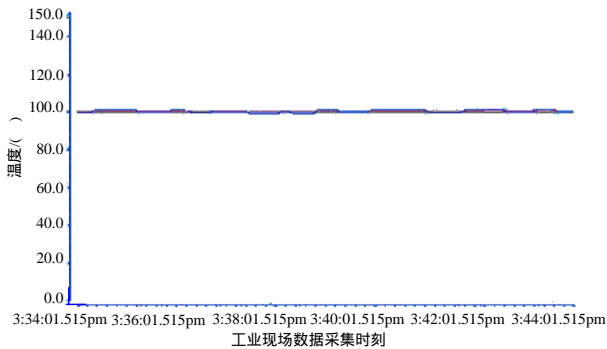


图6 苛化器温度 WinCC 在线历史趋势

(上接第 217 页)

$P_{init}$	$P_{store}$	$P_{decode}$	$P_{idle}$
2.15	0.18	85.60	0.09

对该 LDPC 码选定算法后,在不同误码率下进行定点的蒙特卡罗仿真,设定最大迭代次数为 100,得出解码器在不同信噪比条件下的平均迭代次数,如图 3 所示。

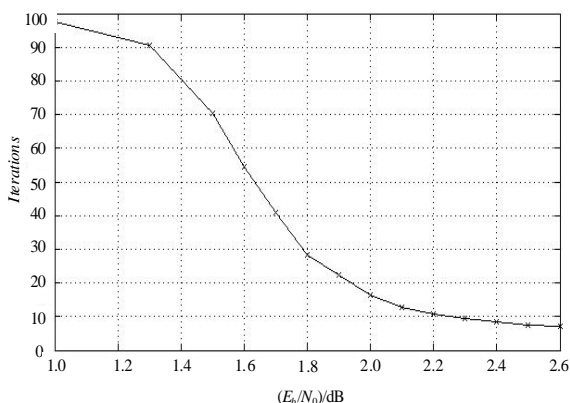


图3 1152 × 2304 的 LDPC 解码器在不同信噪比下的迭代次数

假设该 LDPC 解码器在系统中实际使用的吞吐量为 75 Mb/s,可以从图 3 中得到解码器在不同信噪比下工作时的平均迭代次数和工作时间比例。

根据以上数据和式(8)~式(11),得到不同信噪比下的最大

#### 5 结束语

本文提出的模糊免疫PID控制器结构简单、适应性强、易于实时控制,且充分利用了人工免疫算法的自适应能力,不需要对被控对象进行精确辨识,很大程度上克服了传统模糊控制器设计方法过于依赖专家经验、有很大主观性的缺点<sup>[9]</sup>。本文针对碱回收苛化温度控制对象进行仿真研究,结果表明该控制器可以有效控制大纯滞后对象,且具有很好的抗干扰能力。

#### 参考文献

- [1] 王孟效. 制浆造纸过程测控系统及工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 刑小军, 张洪才, 闫建国. 基于免疫原理的模糊控制器优化设计与仿真[J]. 计算机应用, 2006, 26(5): 1113-1115.
- [3] 韦 巍, 张国宏. 人工免疫系统及其在控制系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 158-160.
- [4] 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.
- [5] 李 艳, 李明辉, 王孟效. 基于 BP 网络的自整定 PID 控制算法及其在苛化工段的应用[J]. 中国造纸, 2005, 24(4): 42-44.
- [6] 郑恩让, 聂诗良. 控制系统仿真[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] 彭道刚, 杨 平, 王志萍, 等. 模糊免疫 PID 控制在主气温控制系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(3): 250-251.
- [9] Takahashi K, Yamada T. Application of an Immune Feedback Mechanism to Control Systems[J]. JSME Int'l Journal, 1998, 41(2): 184-191.

吞吐率和功耗,如表 1 所示。

表 1 1152 × 2304 的 LDPC 解码器在不同信噪比下的功耗

$E_b/N_0$	平均迭代次数	最大吞吐率/(Mb·s <sup>-1</sup> )	工作时间比例/(%)	解码器功耗/mW
1.8	28.46	134.93	55.58	48.91
2.0	16.48	233.01	32.19	35.42
2.2	10.64	360.90	20.78	18.34
2.4	8.37	458.78	16.35	15.35
2.5	7.50	512.00	14.65	12.96
2.6	7.05	544.68	13.77	12.19

#### 6 结束语

本文提出的 LDPC 解码器功耗估计方法综合了门级网表仿真的功耗估计精确性和蒙特卡罗仿真的方便性,在精确性和速度方面可取得良好效果,为低功耗设计提供了参考数据。

#### 参考文献

- [1] Gallager R G. Low-density Parity-check Codes[J]. IRE Trans. on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [2] Roy K, Prasad S. Low Power CMOS VLSI Circuit Design[M]. New York: Wiley Interscience Publication, 2000.
- [3] Radosavljevic P, Baynast A, Cavallaro J R. Optimized Message Passing Schedules for LDPC Decoding[C]//Proc. of the 39th Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Asilomar, USA: [s. n.], 2005: 591-595.
- [4] Ziemer R E, Tranter W H. Principles of Communications: Systems, Modulation and Noise[M]. 5th ed. New York: Wiley Interscience Publication, 2002.

[5] Wang Kai, Xu Zhiwei. Synopsys Prime Power Manual Release

U-2003.06-QA[M]. New York: McGraw-Hill Publishers, 2003.