

# 黏胶剂生产过程温度的模糊免疫PID控制

湛腾西 (湖南理工学院物理与电子信息系, 湖南岳阳 414006)

**摘要** 针对大惯性、纯迟延、非线性、时变的黏胶剂生产过程, 提出一种模糊免疫PID控制算法, 该算法根据模糊控制原理对PID参数模型中的 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 进行在线修改, 利用生物免疫机理调整非线性函数, 然后用免疫修正进一步调整PID系统参数, 较好地实现了反应釜温度的跟踪控制。仿真结果表明, 该算法具有一定的较常规的PID控制算法优越性。

**关键词** 胶黏剂, 模糊免疫PID控制; 免疫机理

中图分类号 TP273 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)30-13464-02

## Fuzzy Immune PID Control of the Temperature during Adhesive Preparation Processing

ZHAN Teng-xi (Department of Physics and Electronic Information, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyan, Hunan 414006)

**Abstract** Aiming at the characteristics of adhesive preparation process (lengthy, nonlinear, time-varying, big inertia and pure delay), Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm was proposed, in which the main parameters including  $k_p$ ,  $k_i$ , and  $k_d$  were adjusted on line, according to the fuzzy control rules. Nonlinear function was adjusted by using biologic immunity mechanism. Then, the system parameters of PID were further tuned by immune regulation, thus, the temperature of polymerizing kettle could be tracked and controlled. The simulation results verified the effectiveness and superiority of the control algorithm.

**Key words** Adhesive; Fuzzy immune PID control; Immune mechanism

近年来, 随着我国人造板工业的快速发展和产量的迅速增长, 黏胶剂用量大幅度提高, 带动我国木材黏胶剂生产迅速发展。黏胶剂生产过程中的化学反应为不平衡的可逆反应, 现在大多通过控制温度的方式来控制反应过程。若温度不能按照设定的温度曲线进行控制, 会造成黏胶剂的质量极不稳定, 引发凝胶、冲罐事故, 甚至造成企业停产<sup>[1-3]</sup>。因此, 企业迫切需要先进的黏胶剂生产过程的温度控制技术。

黏胶剂生产过程机理复杂, 存在较大的随机干扰、非线性、时变、严重的热惯性和热滞后等特性, 其精确数学模型难以建立。常规PID控制系统主要针对有确切模型的线性过程, 其PID参数一经确定就无法调整, 随着环境变化, 对象的参数甚至是结构都会发生变化, 原先整定好的PID参数实施控制, 很难达到理想的控制效果<sup>[4]</sup>。模糊控制适用于数学模型未知的控制对象, 但是由于其简单的模糊信息处理, 使控制系统的精度较低, 要提高精度就必须提高量化程度, 因而会增大系统的搜索范围<sup>[5-7]</sup>。生物的免疫系统是一个具有抗病原机理的复杂系统, 它能够识别外部有害物质和自身组织, 并且通过进化学习构造自己-非己的非线性自适应网络产生抗体清除病原, 保持有机体的稳定, 具有自适应、自组织、学习、识别和记忆等功能以及全局搜索能力和搜索精度高的特点<sup>[8-10]</sup>。

针对黏胶剂生产过程复杂动态非线性特性, 笔者通过将模糊控制、免疫调节、PID 3种技术的集成, 构建一种模糊免疫PID控制系统, 较好地实现了反应釜温度的跟踪控制。

### 1 生产工艺描述

以用于竹胶板的水溶性酚醛树脂胶生产过程为研究对象, 其参考生产工艺如图1所示(适于苯酚与甲醛在强碱氢氧化钠用量较少的情况)。

(1) 将已熔化的苯酚加入反应釜, 开动搅拌机, 加入氢氧化钠溶液和水, 升温到42~54, 保温25 min。

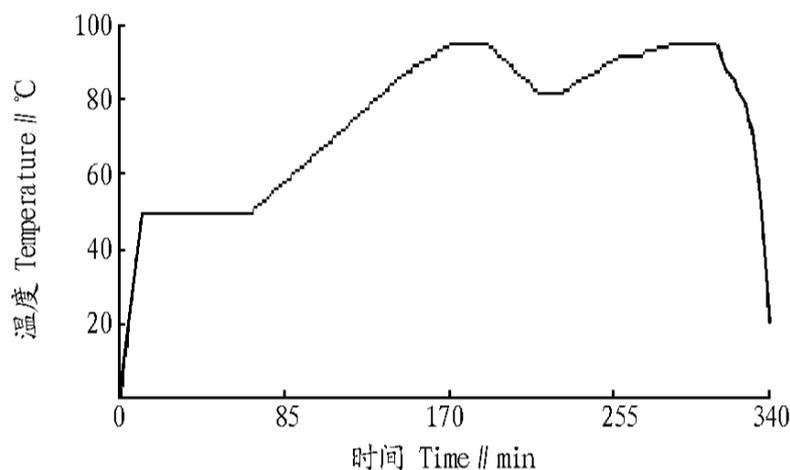


图1 温度—时间经验曲线

Fig.1 Experience curve of temperature - time

(2) 加入第1批甲醛(总量的80%), 在45~50保持30 min, 在74 min内由50升温至87, 再在24 min内由87升温至95, 并在95~96保持18~20 min。

(3) 保温后, 在34 min内冷却到82, 加入第2批甲醛(总量的20%), 在82下保持13 min后, 在30 min内由82升温至92, 并在92~96继续反应20~60 min(视黏度而定), 黏度达到要求后, 立即向夹套通入冷水, 冷却到40以下放料。

分析胶黏剂生产过程的动态特性, 由于系统是一个具有多干扰的非线性系统, 且难以求得对象的精确数学模型, 若采用单一的、传统的控制方法很难达到理性的控制特性, 因此, 笔者提出一种黏胶剂温度的模糊免疫PID控制算法。该算法根据模糊控制原理对PID参数模型中的 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 进行在线修改, 利用生物免疫机理调整非线性函数, 然后用免疫修正进一步调整PID系统参数, 实现反应釜温度更为精确的跟踪控制。

### 2 模糊免疫PID控制算法

由于黏胶剂生产过程温度具有非线性、大滞后、大惯性等特点, 难以求得精确的数学模型, 通过试验仿真以及现场调试, 笔者提出一种模糊免疫PID控制算法实现对黏胶剂温度的控制。其原理如图2所示, 虚线框内模糊推理、免疫修正调节、模糊PID控制组成了模糊免疫PID控制器。

**2.1 生物免疫机理** 生物免疫系统可认为是一种具有很强

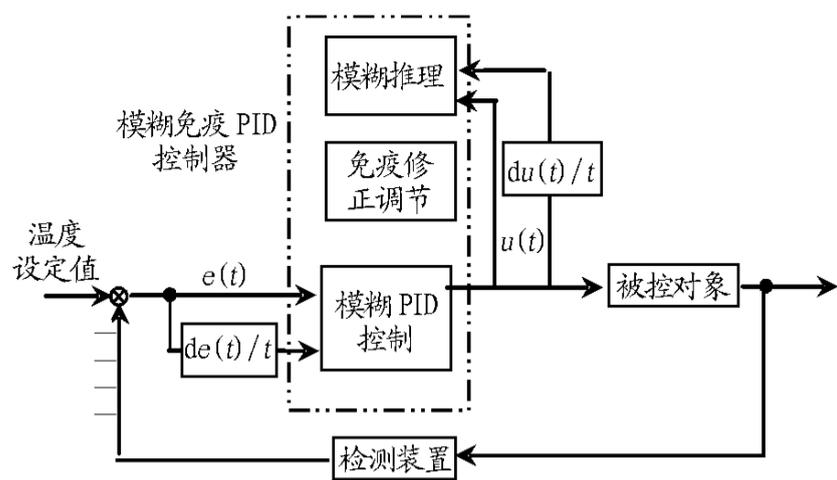


图2 模糊免疫PID控制原理

Fig 2 Principle of fuzzy immune PID control

鲁棒性和自适应性的系统,没有免疫系统的保护,生物体不可避免地会受到感染并导致死亡。模糊免疫PID控制器,就是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器。免疫是生物体的一种特性生理反应。生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原,可产生相应的抗体来抵御。抗原和抗体结合后,会产生一系列的反应,通过吞噬作用或产生特殊酶的作用而毁坏抗原。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(分为辅助T细胞TH和抑制T细胞TS)和骨髓产生的B细胞组成。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,即传递给TH细胞和TS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TH细胞也较多,而TS细胞却较少,从而会产生较多的B细胞。随着抗原的减少,体内TS细胞增多,它抑制了TH细胞的产生,则B细胞也随着减少。经过一段时间,免疫反馈系统便趋于平衡。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很快的稳定免疫系统完成的。

免疫反馈响应过程如图3所示,抗原由抗原呈递细胞APC(Antigen presenting cell)消化后,首先活化TH细胞,并释放淋巴因子,进而活化B细胞产生抗体;APC呈递的抗原还能缓慢活化TS细胞,活化的TS细胞可以对TH细胞和B细胞产生抑制作用,以保证免疫系统的稳定性。

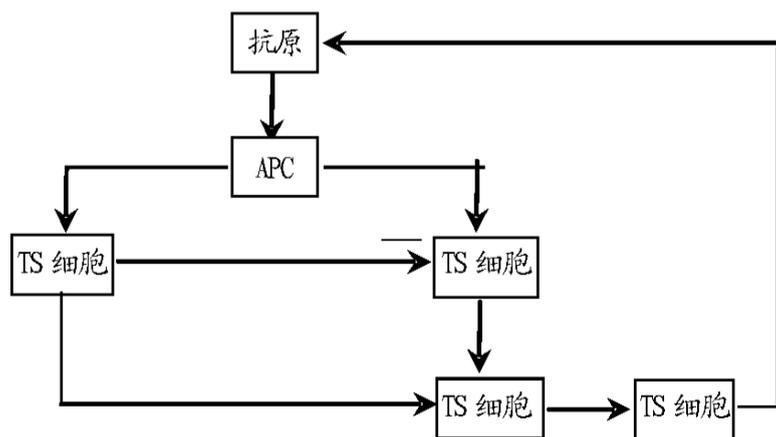


图3 免疫反馈原理

Fig 3 Principle of immune feedback

**2.2 模糊免疫PID算法** 免疫系统虽然十分复杂,但其抵御抗原的自适应能力却十分明显。生物信息系统的这些智能行为,为科学和工程领域提供了各种理论参考和技术方法。基于上述免疫反馈原理,设计了黏胶剂生产过程温度模糊免疫PID控制器。该控制器是根据模糊控制原理对PID参数模型中的 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 进行在线修改,从而满足不同的控制要求,使被控对象有良好的性能。其中控制器的输入/输出

分别为温度偏差 $e$ (其中 $e = T_0 - T_1$ ,  $T_0$ 代表检测的实际温度,  $T_1$ 代表设定温度)和蒸汽阀接通时间或进排水阀接通时间 $u$ 。令: $S = u$ ,  $S = u$ ,则有

$$u(k) = k_1 e(k) - k_2 f(S(k), u(k)) e(k) \\ = K[1 - f(u(k), u(k))] e(k) \quad (1)$$

式中, $k_p$ 为控制反应速度,  $k_i = k_2/k_1$ 为控制稳定效果,  $k_d = 0$ 时为常规比例控制器; $f(u(k), u(k))$ 采用模糊控制方法确定的非线性函数。式(1)构成了一个模糊自整定P控制器。比例系数为

$$k_p = K[1 - f(u(k), u(k))] \quad (2)$$

$k_p$ 是 $u(k)$ 和 $u(k)$ 的函数,因此随控制器输出变化, $K$ 为增益常数,采用模糊控制可以增强系统鲁棒性。当加入常规微分、积分控制作用即组成模糊免疫PID控制器。

模糊化过程:用免疫算法修正环节的输出 $u(k)$ 与输出变化 $u(k)$ 作为输入语言变量, $f(\cdot)$ 作为输出语言变量,各语言变量的论域为: $u(k) = [-3, 3]$ ,  $u(k) = [-3, 3]$ ,  $f(\cdot) = [-4, 4]$ ,输入语言变量 $u(k)$ 和 $u(k)$ 与输出语言变量 $f(\cdot)$ 的论域取值均为“负大”(NB),“负中”(NM),“负小”(NS),“零”(ZO),“正小”(PS),“正中”(PM),“正大”(PB)。根据经验建立的模糊控制规则如表1所示。

表1 模糊控制规则

Table 1 Rule of fuzzy control

$u(k)$	$u(k)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PM	PS	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

经过免疫环节修正PID参数,得到温度模糊免疫PID输出为

$$u(k) = k_p e(k) - 1 \\ + k_p [e(k) + k_{i1} e(k) + k_{d1} e^2(k)] \quad (3)$$

其中

$$k_{i1} = k_i/k_p \quad (4)$$

$$k_{d1} = k_d/k_p \quad (5)$$

$$e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (6)$$

$$e^2(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (7)$$

### 3 仿真研究

针对某竹胶板厂浸渍用黏胶剂生产过程中反应釜温度进行仿真研究,以第1次加入甲醛后升温阶段为例,其传递函数如下:

$$G(s) = \frac{141.4}{(7.6s+1)(5s+1)} e^{-4.3s} \quad (8)$$

由图4可见,采用模糊免疫PID控制算法,系统能够快速跟随曲线的变化,超调量明显小于15%,调节时间短,具有更快的动态响应时间。而常规的PID控制算法由人工经验确定PID参数,精度较低,上升时间和调节时间较长,并出现了较大的超调。(下转第13476页)

**2.4 研究对象及发展方向** 经过10余年的发展,生态水文学已经成为描述包括:干旱区生态系统、湿地生态系统和森林生态系统等各类生态系统中生态格局和生态过程水文学机制的学科。集中探讨植物如何影响水文过程及水文过程如何调节植物的生长和分布。该领域的学者公认植物是生态水文学研究的核心对象,植物与水的关系是关键内容,土壤水是联系植物和水的重要过程,尺度问题是生态水文学的重点<sup>[9,11-12]</sup>。同时,在实测资料的基础上,开展模拟研究已经成为生态水文学的一个重要方向<sup>[13]</sup>。

### 3 生态水文学的应用前景

云南省地处我国西南边疆地区,虽然纬度较低,境内河流水系众多,水资源总量较为丰富,但是因气候、地形和社会生产力等诸多限制因素的综合影响,仍然存在严重区域性或季节性的水质恶化、水资源短缺等诸多环境问题。而生态水文学所提供的解决措施因其操作性强,能为社会广泛接受的特性<sup>[4,14]</sup>,能有效解决目前面临的生态环境危机,实现人与自然和谐,子孙万代的健康、持续发展。该学科的理论和方法体系有望成为一套行之有效的应对环境危机的行动指南,为云南的可持续发展提供强有力的科技支撑。

#### 参考文献

[1] INGRAM H A. *Ecology of scottish peatlands*[J]. *Transactions of the Royal*

*Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1987, 78(4): 287 - 296.

- [2] 王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 314 - 323.
- [3] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 生态水文学研究进展[J]. *地理科学*, 2001, 21(5): 467 - 473.
- [4] ZALEWSKI M, JANAUER G A, JOLANKA G. *Ecology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources*[R]. Paris: UNESCO, 1997.
- [5] 夏军, 丰华丽, 谈戈, 等. 生态水文学——概念、框架和体系[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1): 4 - 10.
- [6] ZALEWSKI M. *Ecology——the scientific background to use ecosystem properties as management tools towards sustainability of water resources*[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 1 - 8.
- [7] ZALEWSKI M. *Guidelines for the integrated management of the watershed——phytotechnology and ecology*[Q]. 2002.
- [8] ZALEWSKI M, WAGNER-LOITKOWSKA I. *Integrated watershed management—ecology & phytotechnology manual*[Q]. UNESCO IETC, 2004.
- [9] 赵文智, 程国栋. 生态水文学——揭示生态格局和生态过程水文学机制的科学[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 450 - 457.
- [10] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 221 - 227.
- [11] BAIRD A, WILBY R. *Ecology: A plants and water interest and aquatic environment*[M]. London: Routledge, 1998: 346 - 373.
- [12] HUXMANT E, WILCOX B P, BRESHEARS D D, et al. *Ecological implications of woody plant encroachment*[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 308 - 319.
- [13] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 892 - 903.
- [14] ZALEWSKI M, ROBARIS R. *Ecology a new paradigm for integrated water resources management*[Z]. *The International Association of Theoretical and Applied Limnology ed. SL News*, 2003: 40, 1 - 5.

(上接第13465页)

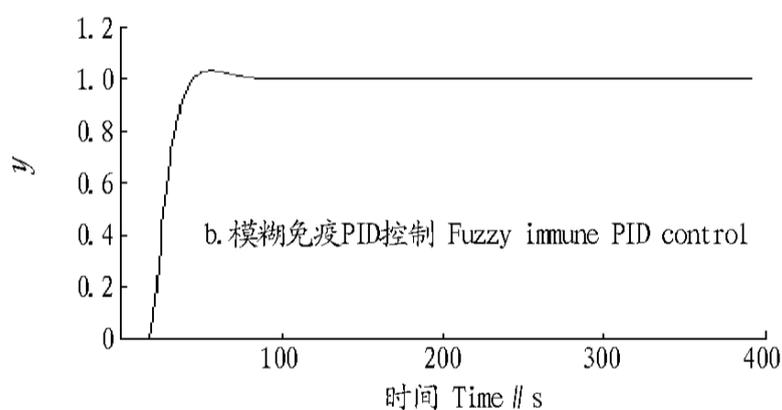
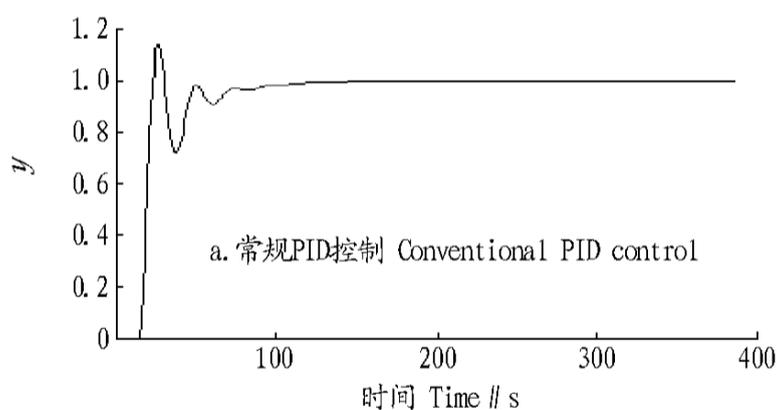


图4 单位阶跃响应曲线

Fig.4 Respose curve of unit step

### 4 小结

针对该黏胶剂生产过程温度的动态非线性特点,提出了一种模糊免疫PID控制算法。仿真结果表明,该算法较常规的PID控制算法有较大的优越性,可较好地保证黏胶剂生产过程中反应液的温度精确地跟踪已设定的工艺曲线变化,避免因人工操作不当造成的生产工艺达不到要求,保证黏胶剂的质量。

#### 参考文献

- [1] 张忠涛. 木材工业用胶黏剂生产现状、存在的问题与对策[J]. *林产工业*, 2006, 33(3): 3 - 5.
- [2] 吴舒辞, 张永忠, 喻寿益. 黏胶剂生产过程温度控制系统的研究[J]. *计算机工程*, 2004, 30(23): 145 - 146, 183.
- [3] 吴舒辞, 曾红兵, 张永忠. 基于模糊控制的黏胶剂生产过程温度控制系

统[J]. *计算机工程*, 2005, 31(23): 189 - 190.

- [4] AYLALINIEN, FAZIL KETEVA NIO LU, SEBAHAT ERDOGAN, et al. *Self-tuning PID control of jacketed batch polystyrene reactor using genetic algorithm*[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 138(1/3): 490 - 497.
- [5] 周国雄, 吴敏, 曹卫华, 等. 焦炉集气管压力的变结构模糊控制研究[J]. *信息与控制*, 2007, 36(6): 732 - 738.
- [6] 周国雄, 赖旭芝, 曹卫华, 等. 焦炉集气管压力智能解耦控制系统的研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006(3): 558 - 561.
- [7] 赖旭芝, 周国雄, 曹卫华, 等. 焦炉集气管的模糊专家控制方法及其应用[J]. *控制工程*, 2006, 13(2): 108 - 110.
- [8] 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.
- [9] 周国雄, 蒋辉平. 基于分层结构模糊免疫PID的孵化过程控制[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 167 - 170.
- [10] 肖人彬, 王磊. 人工免疫系统——原理、模型、分析及展望[J]. *计算机学报*, 2002, 25(12): 1281 - 1293.