

模糊免疫 PID 控制在淀粉浓度控制中的应用*

何景峰¹ 沈刚¹ 丛大成¹ 白晓东¹ 韩俊伟¹ 唐晖²

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 长春职业技术学院工程技术分院, 长春 130033)

【摘要】 在分析比较传统 PID、Smith 预估 PID 和模糊免疫 PID 原理的基础上, 提出了利用模糊免疫 PID 调节淀粉生产线中的淀粉浓度。通过对淀粉生产线中浓度控制回路进行数学建模, 对传统 PID、Smith 预估 PID 和模糊免疫 PID 3 种控制器进行了设计与仿真。仿真结果表明, 模糊免疫 PID 在控制效果上明显优于传统 PID 并且其鲁棒性高于 Smith 预估 PID。最后, 利用 Matlab 的 DDE 协议和 ActiveX 与淀粉生产线的上位机 RSVIEW32 进行数据交换, 将 Matlab 中模糊免疫 PID 控制算法传输到上位机上, 实现了模糊免疫 PID 控制在淀粉浓度控制中的应用。

关键词: 淀粉生产线 控制系统 模糊免疫 PID Smith 预估 PID

中图分类号: TP273+.4; TS23

文献标识码: A

Application of Fuzzy Immune PID Control in Density of Starch Production-line

He Jingfeng¹ Shen Gang¹ Cong Dacheng¹ Bai Xiaodong¹ Han Junwei¹ Tang Hui²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. School of Engineering Technology, Changchun Vocational Institute of Technology, Changchun 130033, China)

Abstract

An idea that using fuzzy immune PID to regulate the density of the starch production-line was put forward after the analysis and comparison of the principle of tradition PID, Smith prediction PID and fuzzy immune PID. A mathematical model of one of density loop of starch production-line was built to design and simulate these three controllers. The simulation results show that the fuzzy immune PID is better than tradition PID on the hand of control effect and its robustness is higher than Smith prediction PID. DDE protocol and ActiveX of Matlab were adopted to realize data exchange with RSVIEW32 of the starch production-line and transmit the algorithm of fuzzy immune PID to RSVIEW32.

Key words Starch production-line, Control system, Fuzzy immune PID, Smith prediction PID

引言

在采用分散控制系统设计淀粉生产线时, 对淀粉乳液的浓度控制是过程控制中很重要的被控变量。工业生产过程中的浓度通常是时变的, 具有明显的滞后特性。PID 控制是最早发展起来的工业过程控制方法, 也是应用最为广泛的控制策略之一, 它所涉及的设计算法和控制结构非常简单, 易于参数调整。传统的淀粉生产线大多采用常规的 PID 控制策略, 但是大多浓度控制具有时变、不确定和非线

性等特性, 所以采用常规的 PID 控制很难取得满意的控制品质。Smith 提出了一种纯滞后补偿模型, 即与 PID 控制器并接一个补偿环节, 该环节称为 Smith 预估器。Smith 预估器控制的鲁棒性差, 系统的性能过分依赖于补偿模型的准确性, 因而限制了它在实际过程控制系统中的应用^[1]。

将生物免疫原理与常规 PID 控制相结合, 可以相互取长补短, 以进一步提高系统的控制性能^[2~3]。

为了提高浓度控制的精度和鲁棒性, 本文在分

收稿日期: 2008-03-04 修回日期: 2008-05-28

* 哈尔滨工业大学与北大荒九三薯业股份有限公司合作项目(070716-028HB100130)

作者简介: 何景峰, 讲师, 主要从事液伺服仿真与试验及 DCS 控制系统研究, E-mail: hjfeng@hit.edu.cn

通讯作者: 韩俊伟, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机控制技术及电液伺服控制技术研究, E-mail: hjw@hit.edu.cn

析传统 PID、Smith 预估 PID 和生物免疫反馈机理的基础上,比较 3 种控制算法的优劣。并利用 Matlab 实现模糊免疫 PID 控制算法运算,在 Matlab 与罗克韦尔公司的上位机 RSView32 之间通过动态数据交换 (DDE) 协议和 ActiveX 对过程变量、控制变量和设定值进行实时更新,将模糊免疫 PID 控制应用到淀粉生产线控制系统中。

1 普通 PID 控制及 Smith 预估控制原理

常规增量式 PID 控制器的离散形式为^[4]

$$u(k) = u(k-1) + k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) = u(k-1) + k_p((e(k) - e(k-1)) + \frac{k_i}{k_p}e(k) + \frac{k_d}{k_p}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))) \quad (1)$$

式中 k_p, k_i, k_d ——比例、积分、微分系数
 e ——误差
 k ——离散采样点

带有纯延迟的单回路控制系统如图 1 所示, y 为控制系统的输出, x 为被控对象的输出。其闭环传递函数为^[5]

$$\phi(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \quad (2)$$

其特征方程为 $1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s} = 0$

式中 s ——传递函数因子 τ ——纯延迟时间
 $G_c(s)$ ——控制器的传递函数
 $G_0(s)$ ——被控对象的传递函数

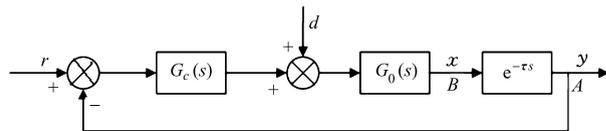


图 1 具有纯延迟的单回路控制系统框图

Fig. 1 Single loop control system with pure delay

特征方程中出现了纯延迟环节,使系统稳定性降低,如果 τ 足够大,系统将不稳定,而 $e^{-\tau s}$ 之所以在特征方程中出现,是由于反馈信号是从系统 A 点引出来的,如将反馈信号从 B 点引出,则把纯延迟环节移到控制回路的外边,针对这种问题,Smith 提出了 Smith 预估控制模型,如图 2 所示。

离散化后可得

$$e_2(k) = e_1(k) - x_m(k) + y_m(k) = r(k) - y(k) - x_m(k) + y_m(k) \quad (3)$$

其中 $e_1(k) = r(k) - y(k)$
 式中 r ——系统设定值 y ——系统输出值
 e_1 ——外环误差 e_2 ——控制器的输入

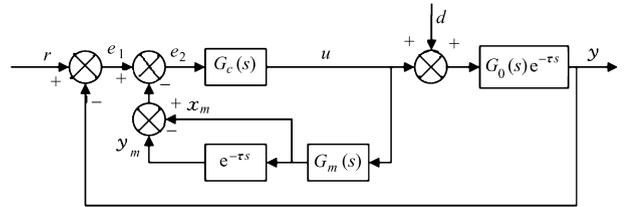


图 2 Smith 预估控制系统

Fig. 2 Smith prediction control system

如果模型是精确的且负载扰动 $d=0$,则有

$$y_m = y \quad x_m = x$$

2 模糊免疫 PID 控制原理

免疫系统是机体对生物性干扰的防御系统。免疫系统对于外来侵犯的抗原可产生相应的抗体来抵御。抗体和抗原结合后会产生一系列的免疫反应,通过吞噬作用或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。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 T_H 细胞和 T_S 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 细胞也较多,而 T_S 细胞却较少,从而产生较多的 B 细胞。当抗原较少时,体内 T_S 增多,它抑制了 T_H 细胞的产生,则 B 细胞也随着减少。经过一段时间后,免疫系统重新回到正常状态以保持免疫系统的有效功能,此时为免疫稳定阶段。 T_H 细胞和 T_S 细胞的调节过程就可以分别视为免疫应答的正反馈和负反馈调节过程^[6-8]。

基于上述原理可得, B 细胞接受的总刺激为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (4)$$

其中

$$T_H(k) = k_1 \epsilon(k)$$

$$T_S(k) = k_2 f(S(k), \Delta S(k)) \epsilon(k)$$

式中 $\epsilon(k)$ ——第 k 代的抗原数量

$T_H(k)$ —— T_H 细胞的输出

$T_S(k)$ —— T_S 细胞对 B 细胞的影响

$f(\cdot)$ ——细胞抑制刺激能力的大小

若将 $\epsilon(k)$ 作为偏差 $e(k)$, $S(k)$ 作为 $u(k)$, 可得 $\Delta S(k) = \Delta u(k)$, 则控制规律为

$$u(k) = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))e(k) = k_{p1}e(k) \quad (5)$$

其中

$$K = k_1 \quad \eta = k_2/k_1$$

式中 K ——反应速度控制系数

η ——稳定效果控制系数

按照“细胞接受的刺激越大,则抑制能力越小”,可以构造出以下 4 条模糊规则:

(1) 免疫应答处于促进阶段

If u is P and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is N

(2) 从促进阶段向抑制阶段转化

If u is P and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is Z

(3) 应答处于抑制阶段

If u is N and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is Z

(4) 从抑制阶段向稳定阶段转化直至稳定

If u is N and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is P

该 4 条模糊规则经仿真后,输入隶属函数和输出隶属函数如图 3 所示^[9]。

免疫控制实际上是一个将比例系数(k_{p1} , 其中 K 为增益)采用模糊免疫调节的变比例控制,参数 η

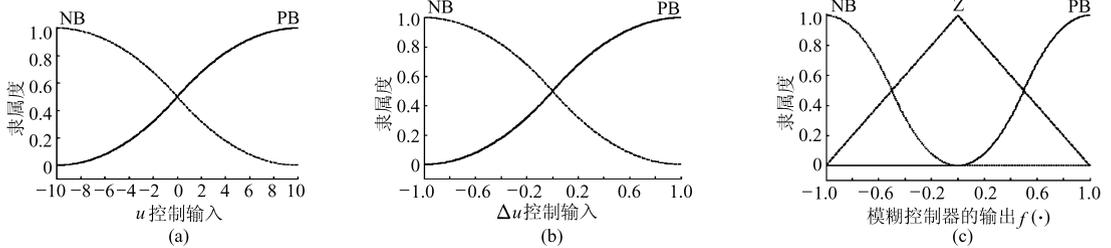


图 3 模糊控制器的输入和输出隶属函数

Fig.3 Input and output function of fuzzy controller

(a) u 的隶属函数 (b) Δu 的隶属函数 (c) $f(\cdot)$ 的隶属函数

控制稳定效果,参数 K 控制反应速度。因此,合理地调整 η 和 K 可以使系统响应加快,减小超调量。则免疫 PID 控制器的输出为

$$u(k) = u(k-1) + k_{p1}((e(k) - e(k-1))) +$$

$$\frac{k_i}{k_p}e(k) + \frac{k_d}{k_p}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (6)$$

3 建模与仿真

3.1 浓度控制建模

图 4 为淀粉乳液密度测量装置,它由微差压变送器(密度计 DT3614)、测量筒、标准筒和密度计显示器等组成。筒的材质可根据淀粉乳液和 CIP(清洗)时的腐蚀性决定,标准筒填充硅油;测量筒内为待测量的淀粉乳液,与测量筒连接的 3 根不锈钢管分别为引压管、进液管和出液管。两个筒分别通过引压管把各自的溶液产生的压力传送给密度计 DT3614,密度计经处理后输出 4~20 mA 的电流信号,送给现场的显示器和 MCC 间的 PLC 中,PLC 经程序运算处理后在 OCC 的上位机上显示出淀粉乳

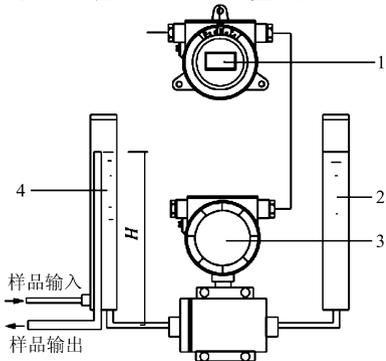


图 4 淀粉乳液密度测量装置结构简图

Fig.4 Structure of starch densitometer

1. 密度计显示器 2. 标准筒 3. 微差压变送器 4. 测量筒

液的浓度^[10]。其中密度计工作原理如图 5 所示,图中

$$\begin{cases} p_+ = Hg\rho_1 \\ p_- = hg\rho_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta p = p_+ - p_- = Hg\rho_1 - hg\rho_2 \quad (8)$$

式中 Δp ——压差 H ——测量筒液面高度
 ρ_1 ——淀粉乳液的密度 ρ_2 ——硅油密度
 h ——标准筒硅油液面高度

当 H, h 和 ρ_2 一定时, $\Delta p = f(\rho_1)$, 测出压差即可得到淀粉乳液的浓度。

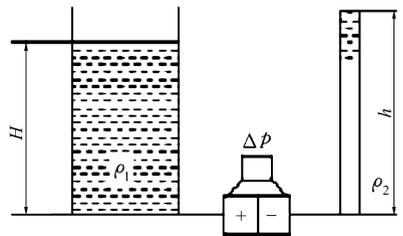


图 5 淀粉乳液密度计工作原理图

Fig.5 Principle of starch densitometer

其控制系统如图 6 所示,当 DCV3614 闭环控制的设定值 (SP) 增大时,偏差信号增大,调节阀 DCV3614 的输入电流增加,阀开口减小,调节阀输

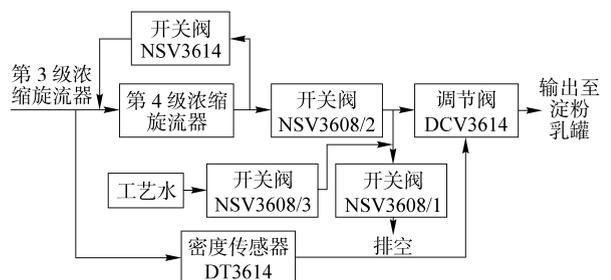


图 6 浓缩站淀粉密度控制系统框图

Fig.6 Principle of starch density in concentrated station

出流量减小,淀粉浓度上升。这时密度计的反馈值(PV)对应的电流也相应增加,使偏差信号减小直至反馈电流与设定值产生的电流接近为止,此时,反馈值(PV)便增加到与设定值(SP)相适应的值。如要求淀粉浓度减小,只需将设定值(SP)在上位机中调低,工作过程相反。在整个工作过程中,调节阀DCV3614随着淀粉浓度的变化调节其开度大小,同时其他4个开关阀NSV3614、NSV3608/1、NSV3608/2和NSV3608/3也会作出相应的动作共

同调节淀粉的浓度。

图7为淀粉浓度控制系统的方框图模型。图中 $y_{out}(s)$ 为淀粉浓度测量的拉式变换, $U(s)$ 为调节阀开度的拉式变换, $R(s)$ 为淀粉浓度设定值的拉式变换, $D_l(s)$ 为负载的拉式变换, $D_m(s)$ 为测量干扰的拉式变换, K 为调节阀开度变化引起的淀粉浓度测量值变化与阀门开度变化的比值, $1/(Ts+1)$ 为淀粉浓度的动态特性, $e^{-\tau s}$ 为调节阀DCV3614到密度传感器DT3614之间的管道引起的时间延时。

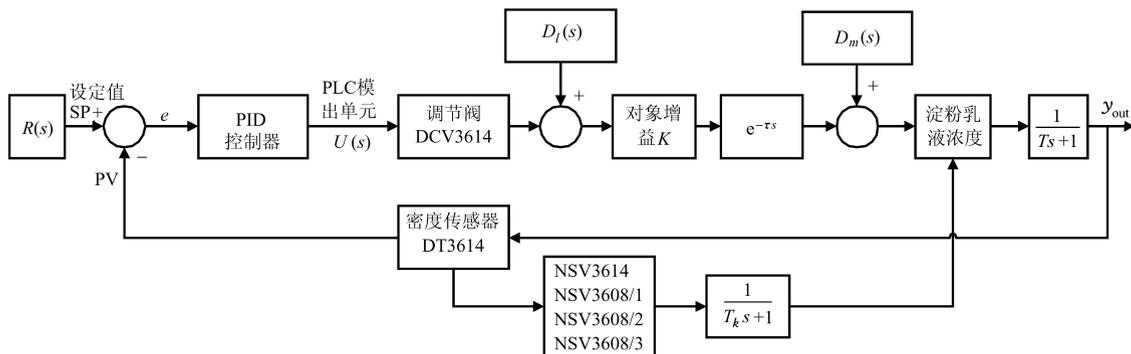


图7 淀粉乳液浓度控制系统原理图

Fig.7 Control system of starch density

实际上,淀粉浓度对象的动态特性为: $1/[(T_{\alpha} s + 1)(T_k s + 1)(T_p s + 1)(T_s s + 1)]$,其中, $1/(T_{\alpha} s + 1)$ 为调节阀DCV3614的动态特性; $1/(T_k s + 1)$ 为4个开关阀的阀门特性; $1/(T_p s + 1)$ 为新鲜水与淀粉乳液的混合过程; $1/(T_s s + 1)$ 为密度计DT3614的动态特性。这四者不易分别获得,并且 T_{α} 、 T_k 和 T_p 比 T_s 小得多,所以将4项的乘积近似用 $1/(T_s + 1)$ 来代替。为了建立具体的模型,采用工程测试法来求淀粉浓度控制对象的数学模型。待淀粉浓度相对稳定,控制算法采用普通PID控制且控制参数已知的情况下,把设定值每次上调一个固定的量,在上位机REView32上记录淀粉浓度的数据,并把这些数据用Matlab进行分析拟合,得到如图8所示的曲线。因为传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{2s + 1} e^{-3s}$$

3.2 仿真试验

采样时间为6s,采用传统PID、Smith预估PID和模糊免疫PID进行仿真比较。其中模糊免疫PID的 $K = 0.24$, $\eta = 0.001$,同样条件下 $k_p = 0.4$, $k_i = 0.02$, $k_d = 0.5$ 。输入指令分别为阶跃信号、方波信号和正弦信号,并且为了比较这3种PID控制器的鲁棒性,在第100、200和300个采样时间时加入一个干扰信号。在此控制系统中,干扰主要有2项,即 $D_l(s)$ 和 $D_m(s)$, $D_l(s)$ 是由浓缩站旋流器内淀粉浓度变换引起的,经实际测量可以获得。 $D_m(s)$ 是因淀粉的特性和密度计的结构而形成的,在系统有意义的频率范围内认为是一种白噪声。并且由于PLC控制系统的干扰源大都产生在电场、磁场、电流或电压剧烈变化的部位。在这些部位电荷剧烈移动就形成了干扰源,所以干扰信号选为 $\text{rin}(t) = 1$ 。

$T \approx 2$, $\tau \approx 3$,所以淀粉浓度对象的传递函数为

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

当激励信号分别为 $r(k) = 1$ 阶跃信号、 $r(k) = 1.0 \text{sign}(\sin(0.003\pi k))$ 方波信号及 $r(k) = \sin(0.003\pi k)$ 正弦信号时仿真结果如图9所示。仿真结果表明,模糊免疫PID与传统PID相比具有较好的控制效果并且其鲁棒性明显强于Smith预估PID,且Smith控制方法的前提是必须确切地知道被控对象的数学模型,在此基础上才能建立精确的预估模型,所以模糊免疫PID是一种很实用的算法^[11]。

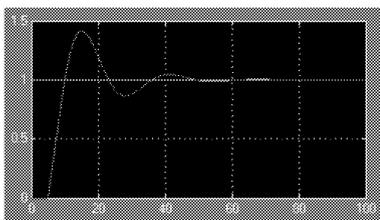


图8 工程测试响应曲线

Fig.8 Response curve of engineer test

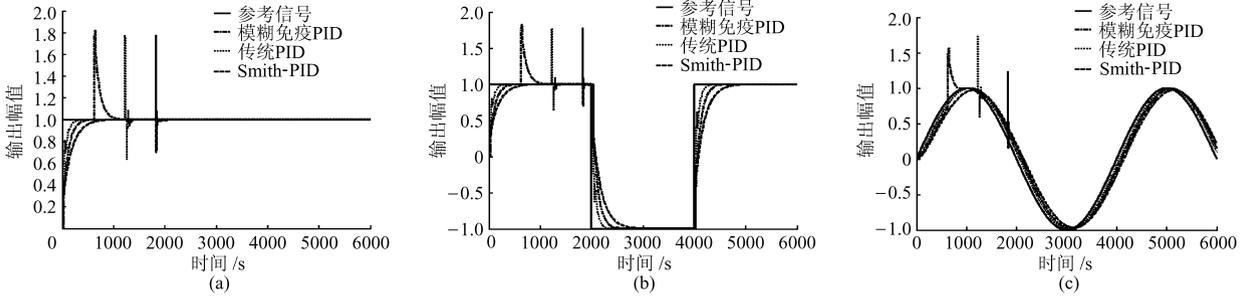


图 9 传统 PID、Smith-PID 及模糊免疫 PID 的响应曲线

Fig.9 Different response curves with tradition PID, Smith-PID and fuzzy immune PID

(a) 阶跃响应 (b) 方波响应 (c) 正弦响应

4 应用研究

硬件选用美国 Alley Bradly(AB)公司的 SLCS/OS 作为现场操作级控制设备,软件采用罗克韦尔公司的组态软件进行程序设计及上位机人机画面设计。该软件借助 DDE、ActiveX 和 ODBC 兼容技术等,保证了用户与现场数据能够容易同其他应用软件实现集成。其中 RSView32 用来开发和运行人机界面,完成数据采集、处理、表示和操作控制;RSLinx 作为数据采集和监控系统的最底层数据接口,采集 PLC 的数据并把它们向其他应用程序传送;RSLogix500 用于对 PLC 进行逻辑编程、纠错并实现程序下载。控制系统方案如图 10 所示。

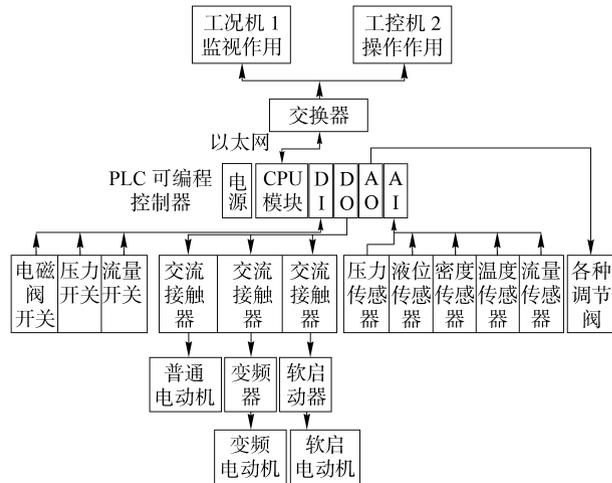


图 10 淀粉生产线控制系统示意图

Fig.10 Diagram of control system in starch production-line

Matlab 主要提供 2 种通讯接口,一种是 DDE 通讯接口,另一种是 ActiveX 通讯接口。罗克韦尔自动化公司的组态软件 RSView32 同样提供了 DDE、OLE 等开放的接口,并且将 ActiveX 技术嵌入其中,这就使得组态软件 RSView32 可以与 Matlab 方便地使用上述 2 种通讯接口进行数据交换。两者数据交换的总体框图如图 11 所示。

控制信息输出而 RSView 完成人机交互和控制等工作 Matlab 完成控制算法。在 RSView32 中的 VBA 中创建 ActiveX 控件即可实现对 Matlab 仿真图形的调用并且利用模糊免疫 PID 的 M 文件可将仿真数据送回 RSView32 上,实现对淀粉乳液浓度的 PID 回路的在线调整。在 RSView32 的全局脚本中,可以很方便地用 VB 语言实现淀粉乳液的浓度控制,其程序流程图如图 12 所示。

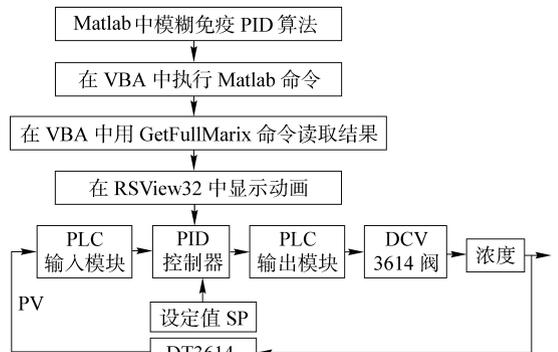


图 11 Matlab 与 RSView32 通讯接口

Fig.11 COM interface between Matlab and RSView32

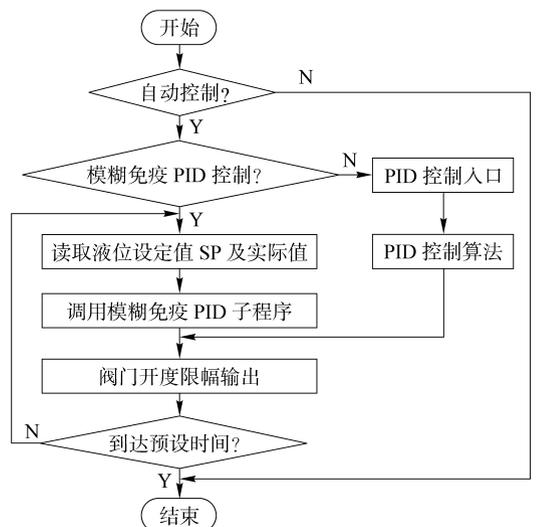


图 12 模糊免疫 PID 控制浓度流程图

Fig.12 Flow chart of starch density control with fuzzy immune PID

在该控制系统中,RSLogix500 完成数据采集和

5 结束语

基于生物免疫系统的反馈原理,结合淀粉生产线的浓度控制回路的要求,分析了传统 PID、Smith 预估 PID 及模糊免疫 PID 的优缺点,对这 3 种控制

器进行了设计。仿真结果表明,模糊免疫 PID 在控制效果上明显优于传统 PID 并且其鲁棒性高于 Smith 预估 PID;利用 Matlab 中的 DDE 和 ActiveX 与 RSView32 进行了数据传输,为模糊免疫 PID 应用于工业控制提供了可能。

参 考 文 献

- 辛箐,刘丁,杜金华,等. 基于遗传整定的模糊免疫 PID 控制器在液位控制系统中的应用研究[J]. 信息与控制, 2004, 33(4):481~485.
Xin Jing, Liu Ding, Du Jinhua, et al. Application of genetic tuning based fuzzy immune PID controller in liquid level control system[J]. Information and Control, 2004, 33(4):481~485. (in Chinese)
- Takahashi K, Yamada T. Application of an immune feedback mechanism to control systems[J]. JSME Int J: Series C, 1998, 41(2):184~191.
- 宋乃慧,任朝晖 闻邦椿. 递阶遗传算法优化的模糊神经网络的故障诊断应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 129~132.
Song Naihui, Ren Zhaohui, Wen Bangchun. Application of fuzzy neural networks optimized by hierarchical genetic algorithm to the machine fault diagnosis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 129~132. (in Chinese)
- 王斌,李爱平. 模糊免疫非线性 PID 控制的优化设计[J]. 控制工程, 2007, 14(Sup. 1):81~83.
Wang Bin, Li Aiping. Optimal design of fuzzy immune nonlinear PID control[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(Sup. 1):81~83. (in Chinese)
- 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- 谈英姿,沈炯,吕震中. 免疫 PID 控制器在汽温控制系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10):148~152.
Tan Yingzi, Shen Jiong, Lü Zhenzhong. Study of immune PID controller for surperheated steam temperature control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10):148~152. (in Chinese)
- 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.
- 于善谦,王洪海,朱乃硕,等. 免疫学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- 沈刚,丛大成,韩俊伟. 模糊免疫 PID 控制在淀粉生产线中的应用[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10):110~115.
Shen Gang, Cong Dacheng, Han Junwei. Application of fuzzy immune PID control in starch production-line [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):110~115. (in Chinese)
- 沈刚,黄其涛,白晓东,等. 淀粉生产线中浓度自动控制系统的设计[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(7):24~27, 20.
Shen Gang, Huang Qitao, Bai Xiaodong, et al. Automatic control of the starch production-line based on DCS [J]. Techniques of Automation & Applications, 2008, 27(7):24~27, 20. (in Chinese)
- 周国雄,熊达清,敬文举,等. 禽蛋孵化过程的混合智能控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1):118~122.
Zhou Guoxiong, Xiong Daqing, Jing Wenju, et al. Hybrid intelligent control for incubation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):118~122. (in Chinese)

(上接第 136 页)

- 白喜婷,朱文学,廉小梅,等. 加工过程对杜仲雄花茶中绿原酸含量的影响[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 264~267.
Bai Xiting, Zhu Wenxue, Lian Xiaomei, et al. Effect of process of *Eucommia* staminate flower tea on content of chlorogenic acid [J]. Food Science, 2007, 28(11): 264~267. (in Chinese)
- 王光亚. 保健食品功效成分检测方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002: 29~31.
- 湖南农学院. 茶叶审评与检验[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- 郭长强,程立方,赵正红,等. 蔓荆子及其不同程度炒制品总黄酮含量测定[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2005 (5): 30~32.
Guo Changqiang, Cheng Lifang, Zhao Zhenghong, et al. Ditermination of total flavone content in different kinds of parched medicinal materials of vitex trifolia L. [J]. World Science Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2005 (5): 30~32. (in Chinese)