

离子交换树脂工艺中温度的模糊智能控制

薛岳钊,于军琪,于 瑛

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院,西安 710055)

摘要:提出模糊智能控制算法实现了对离子交换树脂吸附环节中温度的良好控制,解决了目前国内在氰化物废液回收中尚存在过程缓慢、吸附困难及树脂法吸附、解吸及再生过程有效控制的问题。系统仿真与实验运行结果表明,系统的稳态误差小于2%,吸附率提高了5%,氰化物含量降低到0.5mg/L以下,达到国家排放标准。

关键词:离子交换树脂;吸附;温度;模糊控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A

Fuzzy-Intelligent Control for Temperature in the Process of Ion-exchange Resin

XUE Yue-zhao, YU Jun-qi, YU Ying

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Fuzzy-intelligent control algorithm is proposed, which has gained a good control property to the temperature in the process of the ion-exchange resin adsorption, and solved the problems of the difficulty of adsorption, process slowness and noneffective to control adsorption, desorption and resin recover in recycling cyanide-containing wastewater. The error of system is less than 2%, ratio of adsorption is improved by 5% and the concentration of cyanide falls down 0.5mg/L by system simulation and the experimental operation.

Key words: ion-exchange resin; adsorption; temperature; fuzzy control

氰化物是一种剧毒物质,如果未达标氰化尾液直接外排会造成严重的环境污染,甚至威胁人类的生命安全。而目前国内广泛使用的成熟的酸化法因其自身的原因,在使用时均受到不同因素的制约,使得人们一直在寻找一种更好的方法来替代酸化法,这就是离子交换树脂法。它在国外已达到工业应用阶段,但在国内,由于尚存在过程缓慢、吸附困难、吸附容量小及树脂法吸附、解吸及再生过程尚无智能化控制手段,效益和效率相对较低等问题仍处在

半实验半工业阶段^[1,2]。本文针对整个工艺中吸附环节中的温度采用模糊控制算法^[3],实现了对其良好控制,满足了工艺的要求。

1 控制方案设计

1.1 工艺介绍

根据离子交换树脂的工作原理可将工艺简单分解为吸附、解析和树脂再生三个环节。其中,吸附环节的原理图如图1。

收稿日期:2005-12-26;修订日期:2006-06-21

基金项目:国家863项目资助项目(2003AA32X090)

作者简介:薛岳钊(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为智能控制与信息多源融合;于军琪(1969-),男,信息与控制工程学院教授,硕士生导师,主要研究方向为智能控制与智能自动化;于瑛(1979-),女,机电工程学院硕士研究生。

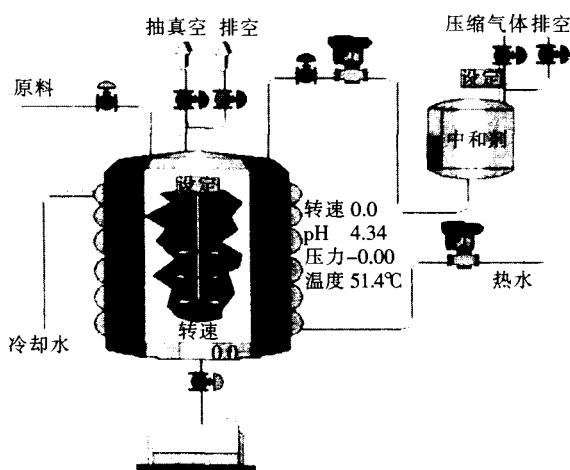


图 1 吸附环节的原理图

Fig.1 Fundamental sketch of process of adsorption

吸附环节可用公式 $z=f(a,b,c,d,e,h)$ 表示吸附率,其中 z 为吸附环节的吸附率,参数 a,b,c,d,e,h 为其主要影响因素,分别为温度、pH 值、压力、流速、氰化物浓度和树脂量。

根据文献[1]知离子交换过程实质是可逆性化学吸附过程,为吸热反应。在氰化尾液回收工艺中的吸附过程中的最佳温度为 25℃。又知该工艺过程具有时变、非线性,无法建立精确的数学模型的特点。而模糊控制就是一种不依赖于被控过程数学模型的仿人思维的控制技术,通过计算机来模拟人们用自然语言来描述的控制过程,从而实现对工业生产的自动控制。因此,本设计就是根据以上结论,通过设计一个二维模糊控制器使吸附过程的温度始终保持在 25℃附近,提高吸附率。

1.2 模糊控制器的设计

(1)输入量的模糊化

二维模糊智能控制器^[4,5]的输入为反应器内温度的误差 e 及误差变化率 \dot{e} 。然后是输入的基本论域、模糊论域和模糊集的确定。基本论域就是变量的精确值变化范围,如误差 e 用 $[-e_{\max}, e_{\max}]$ 表示;模糊论域这里选择为 $\{-6, +6\}$,根据控制精度要求,可以适当增大;模糊集表示各模糊状态,这里取 $\{NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL\}$ 。根据 $k_e = \frac{n_a}{e_{\max}}$ 和 $k_{ec} = \frac{n_b}{\dot{e}_{\max}}$,可求

出 e 和 \dot{e} 的量化因子,根据控制要求, $e_{\max}=4, \dot{e}_{\max}=1$,量化档数 $n_a=n_b=6$,因此 $k_e=1.5, k_{ec}=6$ 。考虑对论域的覆盖程度和灵敏度与鲁棒性原则,这里隶属函数

选择为三角形隶属函数。

(2)模糊逻辑推理

由于推理机制是控制器的中心,可根据操作者和专家的经验知识建立知识库,并作为语言规则,其对应的模糊控制规则为

If E is A and EC is B then $U(\Delta U)$ is C

(用 E 和 EC 分别代替误差 e 和误差变化率 \dot{e} , A, B, C 为模糊子集)

误差 E 的模糊集 A 、误差变化的模糊集 B 和 ΔU 的模糊集 C 都为 $\{NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL\}$,根据规则数公式 $N=n_{out} \times (n_{lever})^{n_{in}}$,其中, $n_{lever}=7, n_{in}=2, n_{out}=1$ 可知规则数为 49 条。则采用十字交叉法并根据工艺控制经验可得控制规则表如表 1 所示。

表 1 控制规则表

Tab.1 Control rules

ΔU	E						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
EC	NL	NL	NL	NL	ZE	ZE	PS
	NM	NL	NL	NM	ZE	ZE	PM
	NS	NL	NL	NS	ZE	PS	PL
	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
	PM	NM	ZE	ZE	PM	PL	PL
	PL	NM	ZE	ZE	PL	PL	PL

则总的模糊关系为

$$R=R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_{49}$$

则输出的控制量模糊集为

$$\Delta U=(E \times EC) \cdot R$$

工程上常采用 max-min 方法求得相应的输出模糊集。

(3)反模糊化

模糊控制器根据参考输入和温度传感器的反馈输出,通过逻辑推理,模糊判决得到 0~20V 之间的电压信号调节电动阀的开度,从而通过控制热水流量来稳定吸附温度。经过模糊规则推理后得出的是控制量隶属于论域上不同模糊子集的隶属度,反模糊化就是将模糊输出量转化为能够直接控制执行部件的精确输出量的过程。这里就是研究如何根据模糊量判决出精确的控制电压。

本设计取输出 ΔU 的基本论域为 $\{-2, 2\}$;为了提高控制精度,取模糊论域为 $\{-8, 8\}$;模糊集 C 为 $\{NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL\}$ 。根据 $k_u = \frac{\Delta u_{\max}}{n_c}$,可得

比例因子 $k_u=2/8=0.25$ 。

反模糊化的主要方法有最大隶属度法、中位数法、重心法。本设计选择重心法,即:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)}$$

其中, u_i 为第 n 条规则结论部分隶属函数的特征值, $\mu(u_i)$ 是相对第 n 条规则的输出控制量模糊集的隶属度。因而,通过使用重心法得到的模糊集论域中的 $u(k)$ 乘以 k_u , 便可以得到控制量基本论域中的对应值。又因为控制器以增量 $\Delta U(k)=u(k) \times k_u$ 的形式输出控制量, 所以总输出以 $U(k)=U(k-1)+\Delta U(k)$ 表示。为防止控制输出饱和, 对 $U(k)$ 进行上、下限限幅, 设其上、下限为 U_{\max} 和 U_{\min} , 如果 $U(k) > U_{\max}$, 则 $U(k) = U_{\max}$, 当 $U(k) < U_{\min}$ 时, $U(k) = U_{\min}$, 以这样输出的控制量在工作点附近调节整个系统。

(4) 控制查询表

根据(1)~(3)的论述, 采用 max-min 方法, 按照重心法的定义, 得到控制查询表如表 2。

表 2 控制查询表
Tab.2 Control lookup

ΔU	E														
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6		
-6	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-4.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.3		
-5	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-7.3	-6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	3.8		
-4	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-6.6	-5.2	-2.6	0.0	0.0	0.0	2.6	5.2		
-3	-8.0	-8.0	-8.0	-7.3	-6.6	-5.2	-3.8	-1.9	0.0	0.6	1.2	3.9	6.6		
-2	-8.0	-8.0	-8.0	-6.6	-5.2	-5.2	-2.3	-1.2	0.0	1.2	2.3	5.2	8.0		
-1	-8.0	-7.3	-6.6	-5.2	-3.8	-2.5	-1.2	0.0	1.2	2.5	3.8	5.9	8.0		
EC	0	-8.0	-6.6	-5.2	-3.8	-2.3	-1.2	0.0	1.2	2.3	3.8	5.2	6.6	8.0	
	1	-6.6	-5.2	-3.8	-3.2	-1.2	0.0	1.2	3.2	3.8	5.2	6.6	7.3	8.0	
	2	-5.2	-3.8	-2.3	-1.2	0.0	1.2	2.3	3.8	5.2	6.6	8.0	8.0	8.0	
	3	-5.2	-3.2	-1.2	0.6	0.0	1.9	3.8	5.2	6.6	7.3	8.0	8.0	8.0	
	4	-5.2	-2.6	0.0	0.0	0.0	2.6	5.2	6.6	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
	5	-5.2	-2.6	0.0	0.0	0.0	3.3	6.6	7.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
	6	-5.2	-2.6	0.0	0.0	0.0	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

2 仿真分析

2.1 控制对象模型建立

因为模糊控制不需要精确的数学模型, 所以, 根据输入输出数据采用实验建模, 通过阶跃曲线(切点法), 得到被控对象的数学模型如下:

$$\frac{2.6e^{-2s}}{20s+1}$$

2.2 Matlab 仿真分析

运用 Matlab 的 Simulink 和 Fuzzy Logic Toolbox 进行仿真分析^[6,7], 可以使用两种方法建立模糊控制系统。一种是在线查表法, 一种是使用模糊控制器, 因为在线查表法运算速度快, 所以本设计采用前者作出控制仿真图如图 2 所示。

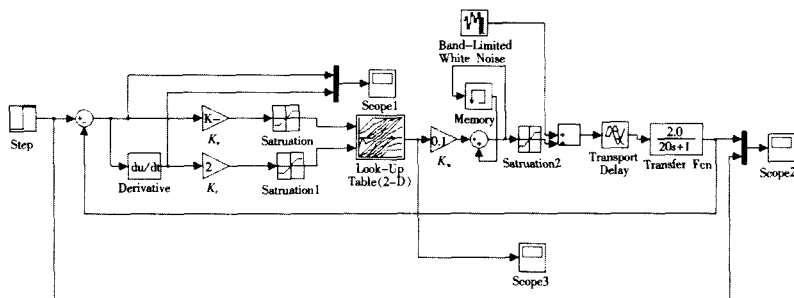


图 2 控制仿真图

Fig.2 Control system imitation

(1) 系统未加干扰时

系统阶跃给定 25, 代表温度 25℃, 仿真时间 1000s。经过调整比较, 当 $k_e=0.07$, $k_c=2$, $k_u=0.1$ 时, 效果最好。系统输出响应曲线如图 3 所示。

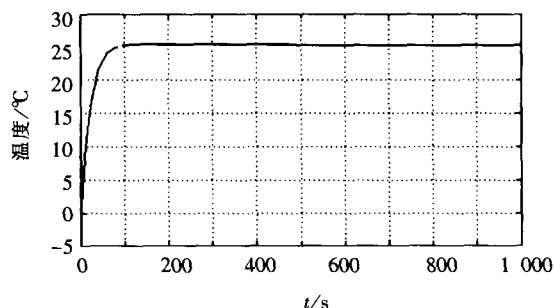


图 3 系统输出响应曲线

Fig.3 Response curve of system output

仿真分析结果如下:

1) 当给定固定值时(如给定值设为 25 对应于要求的 25℃), 分别调整各个参数, 通过仿真结果分析可得结论:

a. k_e 的影响 k_e 太小, 稳态误差越大; 随着 k_e 增大, 稳态误差减小, 上升速率增大; k_e 过大, 产生较大超调, 延长过渡过程, 动态品质变坏。

b. k_c 的影响 k_c 越小, 上升速率越大, 会产生较大超调和振荡; 随着 k_c 的增大, 超调得到很好的抑制, 减小了系统的稳态误差; k_c 越大, 上升速率越

小,系统变化越慢,过渡过程时间越长。

c. k_u 的影响 k_u 越小,达到稳定时间越长;随着 k_u 的增大,系统上升越快,同时减小了稳态误差,提高了响应速度;但 k_u 过大,会引起超调和振荡。

2) 当给定不同值时,通过整定 k_e 、 k_c 、 k_u 都能整定出良好的响应曲线(超调小、调节时间较小、稳态误差小于 4%)。但要找出在所有给定下都取得良好效果的 k_e 、 k_c 、 k_u 不太可能。

3) 在给定值为 25, 参数整定为 $k_e=0.07$ 、 $k_c=2$ 、 $k_u=0.1$, 被控模型为 $\frac{2.6e^{-2s}}{20s+1}$ 的输出响应曲线良好的情况下,改变时间常数,发现当时间常数 T 在 [9, 31] 范围变化时,该控制设计有极好的鲁棒性。但当 T 在该范围外时,该控制设计的控制品质将会很差。在 T 为临界状态时的输出响应如图 4 所示。

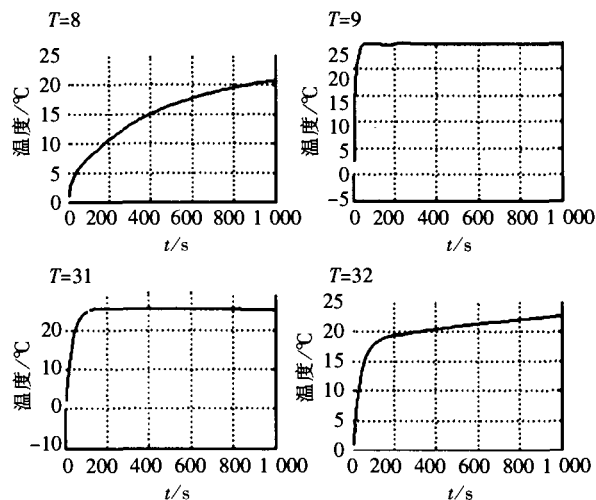


图 4 临界状态输出响应图

Fig.4 Output response of critical state

(2) 系统加干扰时(干扰源为 Random Number (随机数字))

该干扰源模块用于产生正态分布的随机信号,它能很好的模拟工业环境中的干扰因素。当给定值不变,量化因子、比例因子同(1)中不变时,系统响应图如图 5 所示。

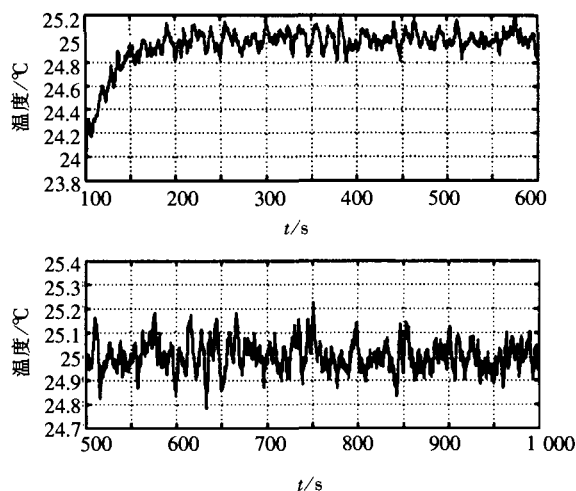
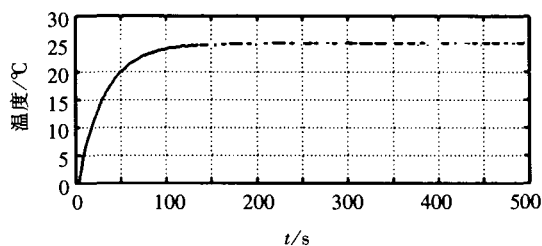


图 5 加干扰系统响应图

Fig.5 System response adding random number

以上图形将波形不断放大,仿真分析可知在 $t=[0, 1000]$ 时加干扰的情况下,波形变化最大范围 [24.8, 25.3], 稳态误差小于 2%, 具有很好的抗干扰性和鲁棒性。

3 结语

针对生产工艺中吸附环节的一个重要因素——温度的特性,采用二维模糊智能控制算法,解决了实际问题。但是,模糊控制器相当于非线性的 PD 控制器,无积分作用,因此必不可少的产生稳态误差。故可通过其它控制思想设计出复合控制的控制器得到更好的响应输出和控制品质,及更强的鲁棒性。如 PID 模糊控制、神经网络模糊控制等。

参考文献:

- [1] 陈德武, 兰新哲. 用 717 树脂处理氰化尾液的应用基础研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [2] 王碧侠, 兰新哲. 用离子交换树脂处理氰化尾液的方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [3] zadeh L A. Fuzzy logic, neural networks and soft computing[J]. Journal on Automatic Control, 1995, 13(2): 21~28.
- [4] 张国良, 曾静. 模糊控制及其 Matlab 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] 于军琪, 吴涛, 黄永宣, 等. 磨矿分级系统溢流浓度的模糊智能控制[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 30~34.
- [6] 飞思科技产品研发中心. Matlab7 辅助控制系统设计与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] Fuzzy logic toolbox for use with Matlab[M]. The Mathworks, Inc., 1999.