

文章编号:1000-582x(1999)06-0071-05

① 71-76

适于 pH 值控制的自学习专家控制器

TQ063

游 滨¹, 黄 席 樾², 陶 桂 宝³

TP273

(1.《重庆大学学报》编辑部,重庆 400044; 2. 重庆大学自动化学院; 3. 重庆大学机械工程学院)

摘 要: 针对 pH 值控制特点,提出一种自学习算法并设计了适于 pH 值控制的自学习专家控制器。通过仿真验证了自学习算法的有效性。

关键词: pH 值控制; 自学习算法; 专家控制器

中图分类号: TP 182

文献标识码: A

化工生产过程

化工生产反应过程中,反应物 pH 值的精确控制是公认的难题之一^[1]。在工业废水中和、酸洗、生化反应、锅炉供水处理等化工过程中, pH 值的控制都非常重要。由于反应过程原料浓度的波动时有发生,原料加入量受人为因素影响大,传感器动态特性也易受环境变化影响,以及一些随机性噪声干扰,造成 pH 值常常偏离设定值,影响产品质量。目前工业上普遍采用的 pH 值控制方法主要有:非线性 PID 控制、脉冲式 PID 控制、模糊控制、仿人智能控制等。笔者以白炭黑(一种硅酸系列白色颜料或填料,分子式为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)生产反应过程反应物 pH 值控制为例,设计出适于 pH 值控制的自学习专家控制器,数字仿真结果表明,自学习算法十分有效。

1 控制要求

pH 值是表征白炭黑产品质量的关键参数^[2]。在生产反应过程中,均以 pH 值达到某一设定值作为反应结束的标志,若超过设定值则整批产品报废。因此,其精确控制非常重要。由于控制过程难以精确建模,且受较多不确定因素影响,pH 值静态特性呈非线性,传感器呈变动态特性,精确控制也十分不易。

白炭黑制备方法之一为“二步法”^[3]。图 1 为一步反应中期望的 pH 值变化曲线^[3]。其中 β 表示随时间变化的 pH 值,从 t_0 到 t_1 时刻为粗控段,控制精度要求不太严格;从 t_1 到 t_2 时刻为精控段,控制精度要求较高。为保证充分反应,一步反应时间

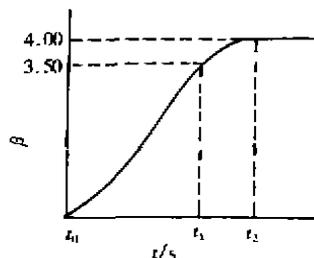


图 1 一步反应中期望的 pH 值变化曲线

• 收稿日期:1998-09-07

作者简介:游滨(1968-),女,重庆人,重庆大学学报(社科版)编辑,工程师,硕士。

•• 优质活性白炭黑研制技术报告,重庆大学化工学院,1995

约需 30 min.

2 自学习专家控制器设计

2.1 自学习算法

设 R_i 为第 i 个采样点的期望值, Y_i 为第 i 个采样点的实测值, e_i 为第 i 个采样点实测值的百分误差, 则有

$$e_i = \frac{Y_i - R_i}{R_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$; n 为采样点个数。

又设 $E_k(t)$ 是自学习控制器第 k 次迭代学习时的参考输入, $E_{k+1}(t)$ 是控制器第 $k+1$ 次迭代学习时的参考输入, $\Delta E_k(t)$ 是控制器第 k 次学习时的误差修正量(第 k 次学习时积累的经验)。其中, $k = 1, 2, \dots; t \in [(k-1)T, T]$, T 为学习迭代周期。第 k 次学习时, $E_k(t)$ 与 $\Delta E_k(t)$ 之和将存入数据库, 并作为第 $k+1$ 次学习时的参考输入 $E_{k+1}(t)$ 。定义学习系数为

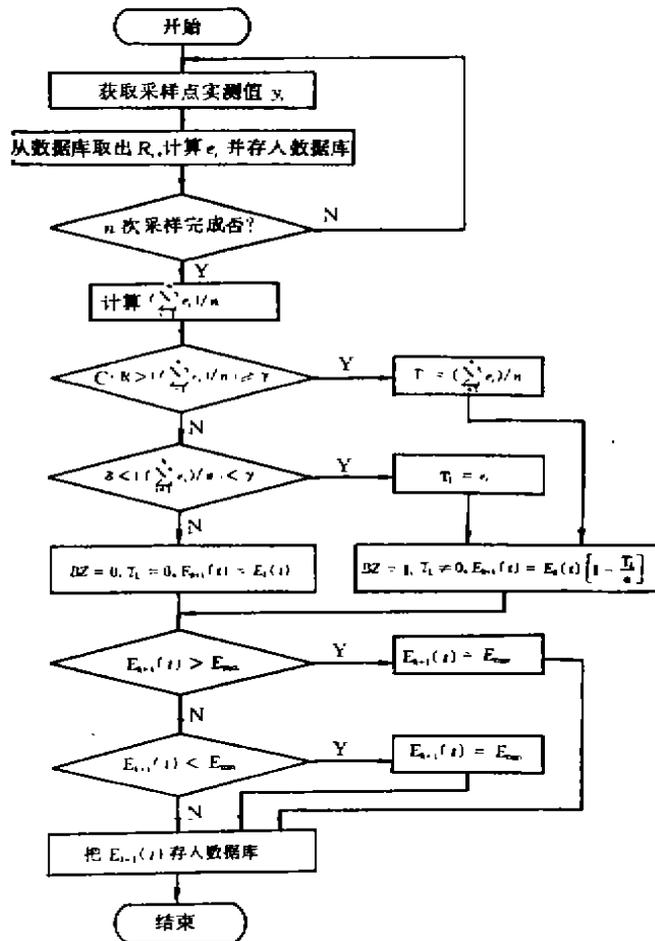


图 2 自学习算法流程图

T_L 、学习系数的修正因子为 α ，则有

$$E_{k+1}(t) = E_k(t) + \Delta E_k(t) = E_k(t) \left(1 - \frac{T_L}{\alpha} \right) \quad (2)$$

式中 $\Delta E_k(t) = -\frac{T_L}{\alpha} \cdot E_k(t)$ 。

学习系数 T_L 由经验和试算得到，取大了易引起振荡，取小了学习效果较差。笔者选取 T_L 的方法可保证较好的控制精度：

1) 若 $c \cdot R > \left| \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right| \geq \gamma$ (即偏差较大时)，则 $T_L = \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n$ (平均学习法)；

2) 若 $\delta < \left| \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right| < \gamma$ (即偏差较小时)，则 $T_L = e_i$ (逐点调整学习法)。

其中 γ 为一设定的偏差门限值，可根据控制精度要求调整； δ 为最小允许偏差； $c \cdot R$ 为最大的偏差极限， c 可根据专家知识和经验整定。

第 $k+1$ 次学习时的输入将基于第 k 次学习时的经验和输入获得，且随其中“有效”经验的不断积累而使 $e_i \rightarrow 0$ ， $Y_i \rightarrow R_i$ ，从而使实际值可望通过“学习”而逐渐逼近期望值。

图 2 为自学习算法流程图。图中， BZ 为学习标志， $BZ = 0$ 表示不需学习 ($T_L = 0$)， $BZ = 1$ 表示需要学习 ($T_L \neq 0$)； E_{\max} 为控制器允许的最大输入， E_{\min} 为控制器允许的最小输入，可根据需要调整。

学习过程为：当偏差在最小允许值范围内时 ($\left| \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right| \leq \delta$)，不需学习 ($BZ = 0$)，

$E_{k+1}(t) = E_k(t)$ ；当偏差达到或超过规定的最大极限值时 ($\left| \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right| \geq c \cdot R$)，采取强控措施，也不学习 ($BZ = 0$)， $E_{k+1}(t) = E_k(t)$ ；当偏差在最小允许值和最大极限值之间时

($\delta < \left| \left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right| < c \cdot R$)，则需学习 ($BZ = 1$)， $E_{k+1}(t) = E_k(t) \left(1 - \frac{T_L}{\alpha} \right)$ ，其中 T_L 的选取分两种情况：若控制器输入超过允许范围时 (大于 E_{\max} 或小于 E_{\min})，则应限幅，可令 $E_{k+1}(t) = E_{\max}$ 或 $E_{k+1}(t) = E_{\min}$ 。

2.2 自学习专家控制器

专家控制器的一般模型表示为：

$$U = f(E, K, I)$$

其中 f 为智能算子，其基本形式为 $\text{if}(E \text{ and } K) \text{ then } (\text{if } I \text{ then } U)$ ； E 为控制器输入集； K 为知识库中的经验数据与事实集； I 为推理机构的输出集； U 为控制器输出集。根据输入信息和知识库中的经验数据与规则推理，由推理结果输出相应的控制行为^[4]。

自学习专家控制器的知识库结构如表 1。

表 1 知识库结构

状态条件	控制模式	控制规则	期望值	实测值	学习标志	学习系数
$0.00 < \beta \leq 3.50$	粗控(控制精度为 γ_1)	规则 1	R_1	Y_1	BZ_1	T_{L1}
$3.50 < \beta \leq 4.00$	精控(控制精度为 γ_2)	规则 2			BZ_2	T_{L2}

知识库内容说明: 1) 对应 pH 值两种状态条件采用不同控制模式和规则(粗控和精控, 规则 1 和规则 2)。2) 学习标志 BZ 和学习系数 T_L 如前述。粗控时可取 $\gamma = \gamma_1$, 精控时可取 $\gamma = \gamma_2$ 。3) 控制规则依据自学习算法得到, 由产生式规则表示。

推理机制: 由数据库提供某一时刻的工况事实(pH 值实测值与期望值之偏差), 采用正向推理, 依次寻找与之相匹配的规则, 然后采用相应调节措施。

自学习控制器通过学习, 自动获取知识并用所学知识不断修改控制规则, 改善控制性能。

3 数字仿真

3.1 仿真框图(图 3)

广义对象包括: 反应釜(含执行器) 动态特性 $\left(\frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1}\right)$, pH 传感器动态特性 $\left(\frac{K_2 e^{-\tau_2 s}}{T_2 s + 1}\right)$, pH 滴定曲线的非线性特性等。控制器根据偏差调整原料的输入流量 Q , 由于对象传递函数反映输出 pH 值与输入两种原料滴加量之体积比 V 的关系, 故控制器后加一积分环节, 转化 Q 为 V 。对象参数模型和动态模型的建立详见文献[3]。通过阶跃响应曲线测试得到参考模型的参数值: $K_0 = 1; K_1 = 1, T_1 = 180, \tau_1 = 60; K_2 = 1, T_2 = 7, \tau_2 = 1$ 。

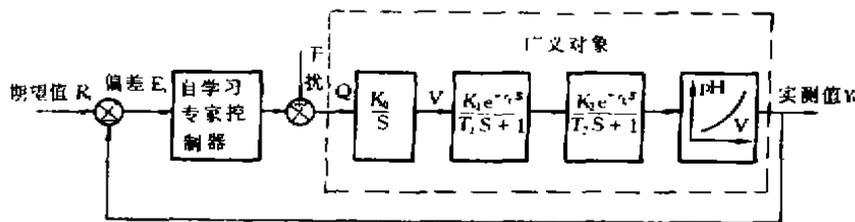


图 3 数字仿真框图

3.2 仿真目的

白炭黑生产反应过程中, 由原料浓度的波动引起反应物 pH 值偏离期望值的情况最容易出现。当原料浓度变化时, pH 特性会发生改变, 从而引起对象增益 K (即 $K_0 \cdot K_1 \cdot K_2$) 的变化。流量阀的实际输出与控制器的期望值往往也存在系统偏差, 也会引起对象增益的变化。另外, pH 传感器动态特性发生变化(等效于 T_2 的变化), 反应釜输入输出流量的变化将会引起 T_1 的变化, 同时也存在对象特性参数的辨识误差。由于系统含有的积分环节对随机干扰具有一定抑制作用。故着重考察对象特性参数 $K_0, K_1, K_2, T_1, T_2, \tau_1, \tau_2$ 受干扰影响发生变化时自学习算法的学习效果。

3.3 仿真流程图(图 4)

采用离散相似法仿真, 仿真计算步距为 0.3 s。

3.4 仿真结果

1) 当 K 由 1 变为 0.85 时(生产中最易出现的原料浓度波动情况)。

输出 pH 值随时间 t 的变化曲线(β - t 曲线)见图 5, 其中 β 代表随时间 t 变化的 pH 值。曲

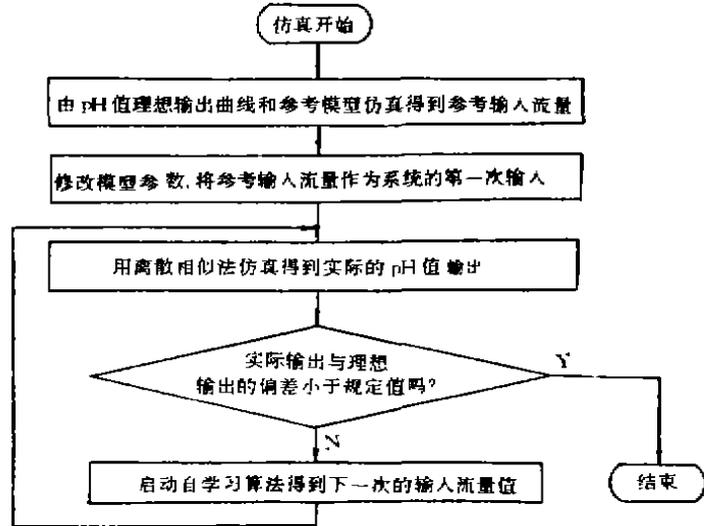


图 4 仿真流程图

线 0 为理想的 $\beta-t$ 标准曲线; 曲线 I 为 K 改变后未学习时的 $\beta-t$ 曲线; 曲线 II、III 分别为学习一、二次后的 $\beta-t$ 曲线。为更清楚显示学习效果, 图 6 为其对应的实测值百分误差 e 随 t 的变化曲线。曲线 I 为未学习时的 $e-t$ 曲线, 曲线 II、III 分别为学习一、二次后的 $e-t$ 曲线。图 5 表明: 经两次学习后, 被控量在粗控段 ($0.00 < \beta \leq 3.50$) e 的最大值仅为 -2.61 , 在精控段 ($3.50 < \beta \leq 4.00$) e 的最大值仅为 -0.22 , 均符合控制精度要求。

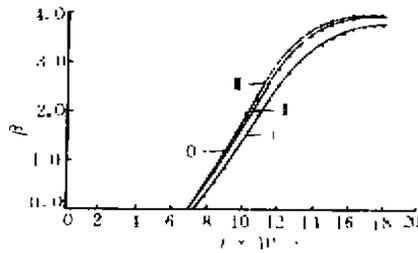


图 5 当 K 改变后 pH 值随 t 的变化曲线

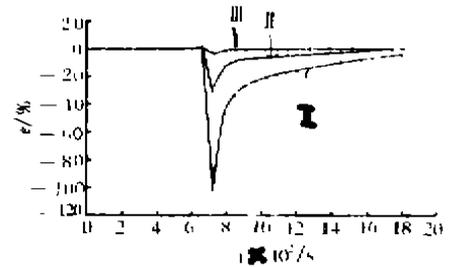


图 6 当 K 改变后 e 随 t 的变化曲线

2) 当 K 由 1 变为 0.85, T_1 由 180 变为 360, T_2 由 7 变为 14, $\tau_1 + \tau_2$ 由 61 变为 122 时 (K, T, τ 均发生变化)。

输出 pH 值的百分误差 e 随 t 的变化曲线见图 7。图中: 曲线 I、II、III、IV、V、VI、VII 分别为未学习和学习一、二、三、四、五、六次后的 $e-t$ 曲线。图 7 表明: 经过六次学习后, 被控量在粗控段 A ($0.00 < \beta \leq 1.00$) 的 e 最大值为 -90.29 , 虽未达到控制精度要求, 但随学习次数增多, e 呈逐渐下降趋势, 且控制的关

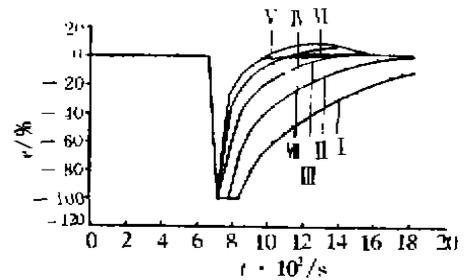


图 7 当 K, T, τ 均改变后 e 随 t 的变化曲线

键在精控段;在粗控段 $B(1.00 < \beta \leq 3.50)$ 的 e 最大值为 -5.98 , 在精控段 $(3.50 < \beta \leq 4.00)$ 的 e 最大值为 1.62 , 均符合控制精度要求。

仿真结果表明:1) 仅由对象增益 K 变化引起的输出误差通过学习算法能很好克服, 学习效果显著;2) 当对象增益 K 、时间常数 T 、滞后时间 τ 均发生变化, 学习算法也能较好克服, 学习效果较好, 输出误差随学习次数的增多呈逐渐下降趋势。

4 结束语

笔者以白炭黑生产反应过程反应物 pH 值的控制为例, 研究了一类化工生产过程的控制方法。提出的自学习算法和设计的自学习专家控制器对其它生产过程控制也具有一定借鉴意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] 陈民铀, 周其鉴. pH 过程的智能控制[J]. 信息与控制, 1987, 16(2): 1~5.
- [2] “橡胶配合剂 沉淀水合二氧化硅国家标准”宣贯材料[S].
- [3] 游滨. 白炭黑生产反应过程智能控制[D]. 重庆: 重庆大学硕士论文, 1997.
- [4] 许晓鸣, 厉勇, 席裕庚. 智能控制理论的新进展[A]. 贾永乐, 魏佑生. 工业过程模型化及控制(第五卷)[C]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993. 29~38.
- [5] 马建国, 夏焕彬, 吕玉康. 具有学习功能的智能控制系统[A]. 徐用懋, 王诗彦. 工业过程模型化及控制(第三卷)[C]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 247~251.
- [6] 邓志东, 张再兴, 孙增圻. 学习控制系统[J]. 信息与控制, 1996, 25(2): 94~102.
- [7] CHOI J Y, PANDIT H G. A Process Simulator for pH Control Studies[J]. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 1995, 19(5): 527~539.

A Self-learning Expert Controller Being Fit for Controlling pH Value

YOU Bin¹, HUANG Xi-yue², TAO Gui-bao³

(1. Editorial Office of Journal of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Automation, Chongqing University; 3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University)

ABSTRACT: In view of the characteristics of pH value, a self-learning algorithm is proposed, and a self-learning expert controller which being fit for controlling pH value is designed. The simulating results prove the effectiveness of the self-learning algorithm.

KEYWORDS: pH value controls; self-learning algorithm; expert controller

(责任编辑 吕赛英)