

文章编号:1674-2869(2008)04-0093-03

## 橡胶硫化温度的模糊控制

赵振华

(武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**根据橡胶硫化温度为大滞后、非线性难控对象的特点,提出了模糊控制的方案;在分析范特霍夫方程式和阿累尼乌斯方程式基础上讨论了确定硫化温度和硫化时间的方法;详述了模糊控制器设计:双输入单输出结构,输入温度偏差  $E$  为5个模糊子集,输入温度偏差的变化率  $dE$  分3个模糊子集,电热丝的加热量  $U$  为4个模糊子集;给出了模糊条件语句和相应的程序设计流程。实验表明:模糊控制具有在线运算量小、无需精确数学模型、适应性强、性能优良等优点,控制精度可达  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,可以满足橡胶硫化过程的温度控制。

**关键词:**硫化过程;温度;模糊控制

中图分类号:TP 273.1 文献标识码:A

### 0 引言

在橡胶制品生产中,硫化是最关键的环节。平板硫化机是橡胶硫化的主要设备,一般具备控制硫化条件(硫化温度、硫化时间、硫化压力)的能力,其控制精度,尤其是硫化温度的控制将直接影响橡胶制品的质量。

我国硫化设备的总体水平较低<sup>[1]</sup>,主要表现在系统可靠性差、自动化水平较低、温度控制精度不高,一些新的控制理论、控制技术和控制手段没有及时和广泛的应用到硫化设备上。

通过实验和分析可知,橡胶硫化温度是一个不确定、大滞后、非线性的难控对象,建立它的数学模型十分困难,不适合采用需要事先建模的现代控制算法,而采用传统的PID控制又将使过渡过程时间很长。

模糊控制是一种无需控制对象精确数学模型的方法,它基于模糊集合理论,模仿人的控制经验,运用模糊推理方法,根据输出直接映射出被控对象的控制量,因此可以不依赖对象的数学模型而实现人类的某些智能,适合在橡胶硫化控制系统中使用。

### 1 硫化条件的确定

#### 1.1 硫化压力

为了使胶料易于流动和充满模具槽,防止在硫化过程中产生气泡,提高胶料的致密性和物理机械性能,除胶布等薄壁制品外,橡胶硫化时都要施加压力。

硫化压力的选取由胶料的配方、可塑性、产品结构等因素决定,其值可从橡胶工艺手册中查到。

一旦产品确定,即可通过一次性调整液压泵的出口压力实现硫化压力控制,不需另设控制系统。

#### 1.2 硫化温度和硫化时间

硫化温度的高低主要取决于胶料配方,硫化时间是由胶料配方、硫化温度和压力决定的。

对于给定的胶料而言,在一定的硫化温度和压力下,有一最适宜的硫化时间(正硫化时间),时间过长产生过硫,时间过短产生欠硫,过硫和欠硫都会影响橡胶制品的性能。

硫化温度和时间是相互制约的,它们的关系可用范特霍夫方程式或阿累尼乌斯方程式表示。

根据范特霍夫法则,硫化温度和硫化时间的关系为

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = K^{\frac{t_1 - t_2}{10}} \quad (1)$$

式(1)中: $\tau_1$ 为温度为 $t_1$ 时所需的硫化时间;

$\tau_2$ 为温度为 $t_2$ 时所需的硫化时间;

$t_1 - t_2$ 为温度差;

$K$ 为硫化温度系数,一般在1.5~2.5之间,可通过硫化仪测定。

由式(1)可知,当 $K=2$ ,硫化温度相差 $10^\circ\text{C}$  ( $t_2 - t_1 = 10$ )时,硫化时间将相差两倍。因此,若要在不同的硫化温度下达到相同的硫化效果,就必须利用式(1)计算出不同硫化温度下的等效硫化时间。

同样,利用阿累尼乌斯方程式可导出硫化温度与硫化时间的关系:

$$\lg \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{E}{2.303R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right) \quad (2)$$

式(2)中: $\tau_1$ 为在温度为 $t_1$ 下的正硫化时间(min);

$\tau_2$  为在温度为  $t_2$  下的正硫化时间(min);  $T_2$ 、 $T_1$  为硫化温度(绝对温度, K);  $R$  为气体常数,  $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ;  $E$  为硫化反应活化能(kJ/mol), 由实验测得。

同样, 利用式(2)可算出不同温度下的等效硫化时间。实验表明, 用阿累尼乌斯公式计算结果比范特霍夫公式更准确。

在实际应用中, 先根据橡胶制品的橡胶种类、配方、使用要求和经验选定一个合适的硫化温度。在该硫化温度下, 选用合适方法测出相应的正硫化时间, 然后根据阿累尼乌斯方程式换算出  $N$  个硫化温度与硫化时间的组合。在保证橡胶制品性能的前提下, 选用其中一个效率最高的硫化温度与硫化时间的组合作为工艺参数。橡胶硫化控制系统的任务, 就是将温度控制在工艺给定值, 根据实际温度的波动情况, 利用阿累尼乌斯方程式计算和修正实际需要的硫化时间, 即等效硫化时间。

## 2 模糊控制器设计

### 2.1 模糊控制器结构

模糊控制器采用双输入单输出结构<sup>[2]</sup>;

输入 1: 模糊集合  $E$ , 取自温度偏差  $e$  的模糊化, 论域为  $X$ 。

输入 2: 模糊集合  $dE$ , 取自温度偏差变化率  $de$  的模糊化, 论域为  $Y$ 。

输出: 模糊集合  $U$ , 反映电热丝加热量的变化, 论域为  $Z$ 。

其中: 温度偏差  $e = T_0 - T$ ;

温度偏差变化率  $de = T_1 - T_2$ ;

$T_0$  为给定温度;  $T$  为实测温度;  $T_1$  为本次测得温度;  $T_2$  为上次测得温度。

### 2.2 建立模糊数模型

2.2.1 模糊集合  $E$  设温度偏差  $E$  由五个模糊子集组成<sup>[3]</sup>:

$B$ (大), 对应于  $e > \Delta t_1$ ;  $M$ (中), 对应于  $\Delta t_2 < e < \Delta t_1$ ;  $S$ (小), 对应于  $\Delta t_0 < e < \Delta t_2$ ;  $Z$ (零), 对应于  $e = 0$ ;  $N$ (负), 对应于  $e < 0$ 。

其中,  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  是设定的温差值, 且  $\Delta t_1 > \Delta t_2 > 0$ 。

2.2.2 模糊集合  $dE$  设温度偏差变化率  $dE$  由 3 个模糊子集组成。

$P$ (正), 对应  $de > \Delta t_3$ ;  $Z$ (零), 对应  $-\Delta t_3 < de < \Delta t_3$ ;  $N$ (负), 对应  $de < -\Delta t_3$ 。

其中,  $\Delta t_3$  是设定的温度偏差变化率, 且  $\Delta t_3 > 0$ 。

2.2.3 模糊集合  $U$  设电热丝加热量  $U$  由四个模糊子集组成:

$B$ (大),  $M$ (中),  $S$ (小),  $Z$ (零), 它们和加在电

热丝上的电压相对应。

2.2.4 模糊语句表达的控制规律<sup>[4]</sup> 根据对硫化过程手动控制策略的总结, 得到一组用模糊条件语句表达的控制规律:

If  $E = B$  and ( $dE = P$  or  $dE = Z$  or  $dE = N$ )  
then  $U = B$

If  $E = M$  and ( $dE = N$  or  $dE = Z$ ) then  $U = M$

If  $E = M$  and  $dE = P$  then  $U = S$

If  $E = S$  and ( $dE = P$  or  $dE = Z$  or  $dE = N$ )  
then  $U = S$

If  $E = Z$  and ( $dE = P$  or  $dE = Z$ ) then  $U = Z$

If  $E = Z$  and  $dE = N$  then  $U = S$

If  $E = N$  and ( $dE = P$  or  $dE = Z$  or  $dE = N$ )  
then  $U = Z$

根据上述模糊条件语句, 可写出模糊控制规则表, 如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

| $dE$ | $U$ |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | $E$ |     |     |     |     |
|      | $B$ | $M$ | $S$ | $Z$ | $N$ |
| $P$  | $B$ | $S$ | $S$ | $Z$ | $Z$ |
| $Z$  | $B$ | $M$ | $S$ | $Z$ | $Z$ |
| $N$  | $B$ | $M$ | $S$ | $S$ | $Z$ |

设偏差  $e$  的基本论域为  $[-15^\circ\text{C}, +15^\circ\text{C}]$ , 如选  $E$  的论域  $X = \{5, 3, 1, 0, -1\}$ , 则偏差  $e$  的量化因子  $K_e = 5/15 = 1/3$ 。

设偏差变化率  $de$  的基本论域为  $[-5^\circ\text{C}, +5^\circ\text{C}]$ , 如选  $dE$  的论域  $Y$  为  $\{1, 0, -1\}$ , 则偏差变化率  $e$  的量化因子  $K_{de} = 1/5$ 。

设电热丝加热量  $u$  的基本论域为  $[0, +30]$ , 如选  $U$  的论域  $Z$  为  $\{5, 3, 1, 0\}$ , 则电热丝加热量  $u$  的比例因子  $K_u = 30/5 = 6$ 。

将上述模糊数赋予表 1 中的模糊子集, 可得到模糊数查询表如表 2 所示。

表 2 模糊数查询表

Table 2 Fuzzy number polling list

| $dE$ | $U$ |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | $E$ |     |     |     |     |
|      | $B$ | $M$ | $S$ | $Z$ | $N$ |
| $P$  | 5   | 1   | 1   | 0   | 0   |
| $Z$  | 5   | 3   | 1   | 0   | 0   |
| $N$  | 5   | 3   | 1   | 0   | 0   |

## 3 系统实现

为实现模糊控制器的控制作用, 将查询表存放于计算机内存中。在实际控制过程中, 计算机直接根据测量和论域变换得到的以论域元素形式出现的  $E$  和  $dE$ , 由查询表的行和列找到跟  $E$  和  $dE$

对应的同样以论域元素形式出现的电热丝加热量  $U$ , 经过  $U$  与 PMW 的线性变换, 其结果用于控制硫化温度, 达到预期的控制目的。

程序设计流程如图 1 所示。



图1 程序设计流程

Fig. 1 Programming flow

系统硬件由 S3C44B0 为核心的微机控制系统组成。S3C44B0X 是 SAMSUNG 公司推出的一款高性能 32 位 MCU, 采用 0.25  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺制造, 特别适合低成本、低功耗应用。它的 CPU 采用 ARM 公司的 16/32 位 ARM7TDMI RISC 结构。S3C44B0X 通过在 ARM7TDMI 内核的基础上扩展一系列通用的外围器件, 使系统成本降低, 可靠性增加。由于 S3C44B0X 具有工作频率高 (75 MHz)、存储器寻址范围大 (256 MB)、内置硬件丰富 (1 个支持单色、灰度、彩色 LCD 的控制器, 5 个 PWM 定时器, 8 路 10 位 ADC) 等优点, 因此用它构成的控制系统硬件简单, 稳定可靠。

硫化温度的测量由镍铬-镍铜热电偶实现。热电偶输出的电势信号经过 INA128 仪表放大器的放大后, 送入 S3C44B0 内部的 ADC 电路, 完成从模拟量到数字量的转换。按照最大硫化温度为 250  $^{\circ}\text{C}$  计算, 其温度分辨率可达 0.25  $^{\circ}\text{C}$ 。

对电热丝的控制通过 S3C44B0 内部的 PWM 电路实现。控制程序将电热丝加热量  $U$  线性变换为 PWM 脉冲并作用于电热丝上, 实现对硫化温度的控制。

## 1 结 语

现代橡胶工业对硫化温度控制提出了越来越高的要求, 利用计算机技术和现代控制技术改造传统的橡胶硫化生产有着重要意义。上述橡胶硫化模糊控制系统, 具有软件设计简单、易实现、控制精度高等特点。实验表明, 该系统硬件简单, 运行稳定, 控制精度  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 可以满足橡胶硫化过程的温度控制。如果再适当增加模糊集中模糊子集的数量, 控制精度将会得到进一步提高。

## 参考文献:

- [1] 吴秀兰, 李贵君. 国外橡胶机械最新进展[J]. 橡胶工业, 2004, 47(1): 45-46.
- [2] 潘新民, 王燕芳. 微型计算机控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 278-284.
- [3] 刘秀红. 模糊自整定 PID 控制在电阻炉温度控制中的应用[J]. 计量技术, 2007, (3): 25-28.
- [4] 李文娟, 孙玉坤. 生物发酵过程温度模糊 PID 控制系统研究[J]. 微计算机信息, 2008, (7): 43-45.

## Fuzzy control of vulcanization temperature

ZHAO Zhen-hua

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Fuzzy control plan has been proposed according to the characteristic of vulcanization temperature which is greatly delayed, nonlinear, and hard to control. The method to determine vulcanization temperature and time has been discussed based on analyzing Van't Hoff equation and Arrhenius equation. The design of fuzzy controller has been explained thoroughly, these are: double input and single output structure, input temperature error  $E$  is 5 fuzzy subset, input temperature changing rate  $dE$  is 3 fuzzy subset, the quantity of heat of heater is 4 subset. Fuzzy conditioning statement and corresponding flow chart has been given. Experiment shows that the characteristics of fuzzy control are: small online computational amount, no need to accurate mathematical model, adaptive, good preference, control accuracy can achieve  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , which can meet the temperature control demand of vulcanization process.

**Key words:** vulcanization process; temperature; fuzzy control

本文编辑: 陈晓革