

# 基于模糊控制的模温机控制器的设计与实现

濮辉, 曾碧, 叶雄杰

(广东工业大学 计算机学院 智能工程与软计算研究所, 广东 广州 510006)

**摘要:** 在借鉴解析式模糊控制方法的基础上, 剖析了系统存在较大超调的原因, 进而引入跟踪受控对象瞬时状态的升温速率因子, 并提出根据该因子在控温过程中从宏观上合理安排控制策略的分层控制方法, 用以实现模温机的温度控制。实验数据表明该方法能有效抑制超调现象, 从总体上优化系统的控制性能。

**关键词:** 模温机; 模糊控制; 温度控制; 超调; 升温速率

中图分类号: TP273.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)05-0111-04

## Design and implementation of mold temperature machine controller based on fuzzy control

Pu Hui, Zeng Bi, Ye Xiongjie

(College of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** By drawing on formulation fuzzy control method, considering the reasons for large overshoot existing during the control process, introduce a heating rate factor which could trace the instantaneous state of the controlled object, advance a method to reasonably arrange control tactics with this factor at macro level. This method has been applied to temperature control on Mold Temperature Machine. Experimental data show that the method could effectively suppress overshoot and optimize the system control performance on the whole.

**Key words:** mold temperature machine; fuzzy control; temperature control; overshoot; heating rate

在注塑工业中, 注塑机配备了专用的模具温度控制系统, 一般称为模温机, 用来加热或冷却模具并保持它的工作温度, 保证注塑件品质稳定并优化加工时间。模温机由电器部分及流体输送部分构成, 前者包括控制器、开关/安全元件、温度传感器等, 后者包括加热器、冷却器、主泵、安全元件等。其中, 控制器作为模温机的神经中枢, 负责安排模温机的整个工作流程, 并关系到其工作性能的好坏。因此, 设计一套性能优越、功能齐全、操作简便的控制系统, 是模温机设计技术的核心和关键所在。

传统模温机的温度控制模块大多采用 PID 控制算法, 虽然精度高且稳定性好, 但当起始温度与目标温度相差较大时, 系统响应时间长。另外, PID 参数的调整也比较困难, 这将大大降低系统的自适应能力。鉴于此, 本文着重从模糊控制的角度设计模温机控制器的温度控制模块。问题是由于模温机可能需要替换不同功率的加

热器, 而且各种注塑原料其热学物理特性也存在差异, 基于专家经验的模糊控制方法将不能很好地适应这种控温环境的变化。这使得在一种控温环境下正常工作的模糊控制策略可能会在另一种控温环境中导致超调的不良现象。对此, 本文通过引入升温速率因子, 提出一种有效抑制超调的模糊控制方法, 使系统在一定程度上能够适应控温环境的变化。

### 1 系统总体设计

综合考虑产品成本、系统性能等因素, 模温机控制器选用宏晶科技公司生产的 STC10F12XE 作为微控制器。STC10F12XE 属于 STC11/10xx 系列单片机, 工作在单机器周期下, 指令代码完全兼容传统的 8051, 速度却快了 8~12 倍, 有效保证了系统控制的实时性, 并具有低功耗和超强抗干扰的优点, 同时芯片内部还集成了 12 KB 的 Flash 程序存储器、512 KB 的 SRAM 以及 1 KB 的 EEPROM, 足以存放实现复杂控制算法的程序代码以及

系统运行所需的相关参数,完全能够胜任本系统工业智能控制的应用场合。围绕 STC10F12XE 设计硬件系统,模温机控制器主要由以下几个部分组成:电源电路、复位电路、时钟电路、显示电路、温度采集电路、按键检测电路、相位检测电路等,如图 1 所示。

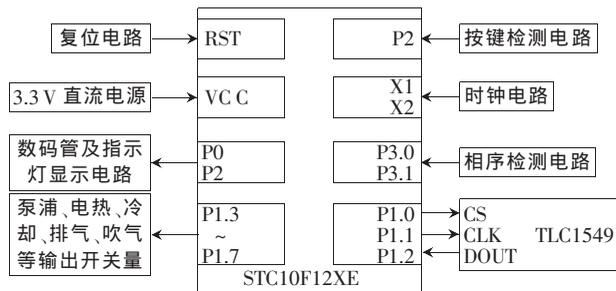


图 1 系统硬件设计框图

为增强系统在工业控制场合的抗干扰性,在硬件实现时将控制器分成主板和控制板两部分。主板主要包含以处理数字信号为主的复位电路、时钟电路、数码管、指示灯显示电路及按键检测电路。控制板则包括处理模拟信号为主的电源电路、相序检测电路、温度采集电路以及继电器开关电路等。由控制板的电源电路产生两个独立电源,分别为两块板的相关电路模块供电。由主板单片机向控制板发出的控制信号以及从控制板反馈回单片机的信号均通过光耦隔离,从而增强了系统的稳定性。

## 2 温度控制及相关模块设计

### 2.1 温度采集模块

本文采用外接 A/D 转换芯片的方法实现模温机控制器的温度采集模块,选用的芯片是德州仪器生产的 10 位模数转换器 TLC1549。该芯片可通过单片机串行控制,并以串行方式输出转换数据,只需占用单片机 3 个并行 I/O 引脚,最大误差为  $\pm 1$  LSB,配合 K 型感温线和信号放大电路就能够很好地完成温度采集。

按照 TLC1549 的工作时序要求,在 STC10F12XE 定时器 T0 的中断控制下,取时序电脉冲宽为 1 ms,即可平均每 25 ms 读取一次采样数据量,从而每 200 ms 可连续采样 8 次,最终对 8 次采样值按算术平均值滤波后求得有效采样值,而系统温度控制周期为 6 s,因此 5 次/s 的采样速率可以满足系统控制的实时性要求。本文采用线性插值的方法将采样数据量转换成实际温度值,具体做法为在存储器中存放一张查找表,记录了在 30℃~250℃ 的控温范围内每隔 5℃ 取一个温度值所对应的采样数据量。这样通过查表和简单的线性计算公式即可由采样数据量求得对应温度值:

$$TP=30+5 \times (i-1) + (Q-qform[i-1]) \times 5 / (qform[i]-qform[i-1]) \quad (1)$$

其中,  $Q$  为采样数字量,  $TP$  为温度值,  $qform$  为查找表,  $qform[i-1] < Q < qform[i]$ 。

### 2.2 解析式法模糊控制的性能分析

在模温机的控温应用场合中,环境噪声较大,而且

由于注塑原料物理特性的差异,以及模具容积与所要求的加热器功率的不同,无法为受控对象定义统一的数学模型。可见, PID 控制方法用于模温机的温度控制存在较大的局限性。模糊控制具有较强的优势,因为它可以利用人类的专家控制经验来弥补受控对象动态特性中的非线性和不确定性,不依赖对象的数学模型,具有较强的鲁棒性<sup>[1]</sup>。为简化推理过程,模糊控制领域有学者提出抛开控制表,引用简单解析式来实现控制规则,如式(2)<sup>[2]</sup>所示:

$$U = aE + (1-a)Ec, a \in [0, 1] \quad (2)$$

其中,  $E$  为偏差,  $Ec$  为偏差变化率,  $U$  为控制量,  $a$  为权重因子。

实质上,上式通过权系数  $a$  唯一决定了  $E$  与  $Ec$  的权重,因此可通过调整权系数  $a$  来调整控制规则,以适应动态变化的受控对象。为此,不少学者设计了权系数  $a$  的各种调整方法,其指导思想主要是根据特定受控对象在控制过程中的变化规律来定义权系数  $a$  与偏差  $E$ 、偏差变化率  $Ec$ 、偏差积分  $Ed$  的函数关系:

$$a = f(E, Ec, Ed) \quad (3)$$

其中,有人对偏差  $E$  的变化范围进行划分,分段指定权系数。而另一种较为典型的方法则是采用优选法对权重系数进行在线修正,稳态误差小且控制效果较优,所定义的解析式<sup>[3]</sup>如下:

$$\alpha(k+1) = \begin{cases} \alpha(k) + 0.618[1 - \alpha(k)], & |E| \geq 3 \\ 0.618 \times \alpha(k), & |E| < 3 \end{cases}$$

$$0.2 \leq \alpha(k) \leq 0.8, \alpha(0) = 0.5$$

$$\beta(k+1) = \begin{cases} \beta(k) + 0.618[1 - \beta(k)], & |E| \geq 3 \\ 0.618 \times \beta(k), & |E| < 3 \end{cases}$$

$$0.3 \leq \beta(k) \leq 0.7, \beta(0) = 0.5$$

$$U = \left( \frac{(\alpha + \beta)E}{2} + \frac{(1 - \alpha)Ec}{2} + \frac{(1 - \beta)Ed}{2} \right)$$

这类权系数调整方法侧重于从微观上捕捉受控对象的动态特性,对既定的受控对象有良好的控制效果。但无论是分段指定权系数还是在指定权系数初值后采用优选法在线修正权系数,权系数的变化规律都是一定的。因此,当受控对象变更时,其动态特性必然有所变化,若只按某种特定规律选取权系数来跟踪其动态特性,将存在一定的局限性。在实验室环境下,按照上述优选法解析式实现温度模糊控制算法,并通过在模温机控制器上外接功率分别为 500 W 和 1 000 W 的熔锡炉模拟模温机加热器对 700 g 锡进行加热控温实验,初始温度为室温(20℃),当目标温度设置在 120℃ 时,500 W 锡炉的超调量为 11℃,而 1 000 W 锡炉的超调量则达到了 20℃。对于注塑机实际应用场合,过高的超调量会对注塑件的品质产生不良影响。

本文所述控制器通过在每个控制周期计算继电器的闭合时间作为模糊控制的输出量,考虑到继电器的使

使用寿命,控制周期不能过短,本文中设为 6 s。而优选法权系数调整周期大致与系统控制周期一致,当受控对象升温速率较快(如 2~3 °C/s)时,权系数的调整将明显滞后。另一方面,由于论域过大会影响系统的控制精度,因此在模糊控制中往往选择大小合适的论域。这就意味着温控系统必须在偏差值落入某个较小论域后才开始模糊控制,此前加热器将一直持续工作,而在这个阶段系统并未对受控对象的动态特性进行有效跟踪,且初始温度偏差越大,则此未受控阶段越长。因此,系统是在对受控对象变化趋势一无所知的情况下进入模糊控制阶段的,这种滞后性很有可能导致模糊控制的失效并引起大幅度的超调。综上所述,系统的滞后性是引起超调的重要原因,有必要在模糊控制算法中引入能够全程调控受控对象的控制机制。

### 2.3 带升温速率因子的分层模糊控制方法

在传统模糊控制中,尽管系统进入模糊控制阶段前的未受控阶段较长,但该阶段未受控并不意味着不可控。为克服由此而直接引发的系统滞后性,本文通过引入分层模糊控制模型来延伸系统控制的覆盖面,以消除未受控阶段,该模型如图 2 所示。其中升温速率因子是一个模糊变量,用以描述受控对象的瞬时状态。整个升温过程可以分为两个层次,系统控制上层利用升温速率因子跟踪受控对象升温变化趋势,并据此从模糊控制策略库中提取控制策略;系统下层则根据所选控制策略实施控制子过程,完成后再回到系统控制上层继续检测升温速率因子。如此循环往复,从宏观和微观上对受控对象进行全面调控。



图2 分层模糊控制模型

升温速率因子按温度上升一定数值所经历的时间来定义模糊隶属度  $speed$ 。在定时器中断处理例程中,  $speed$  计算过程如下列伪代码所示:

```
count(time);
IF ntemp-ltemp>=ΔT THEN
  IF time<T1 THEN
    speed=0;
    reset(time);
    ltemp=ntemp;
  ELSE IF time<T2 THEN
    speed=0.5;
```

```
reset(time);
ltemp=ntemp;
END
END
IF time>T3 THEN
  speed=1;
  reset(time);
  ltemp=ntemp;
END
```

本文取  $\Delta T=2(^{\circ}\text{C})$ 、 $T_1=3(\text{s})$ 、 $T_2=5(\text{s})$ 、 $T_3=8(\text{s})$ , 所得的  $speed$  越小则表示升温速率越快,反之则越慢。由此,系统就能自始至终跟踪受控对象的变化趋势,而不再局限于某类受控对象的动态特性,且具有较强的实时性。基于上述分层控制模型,系统借助升温速率因子在较大偏差范围内对受控对象实施全程控制,具体流程如图 3 所示。

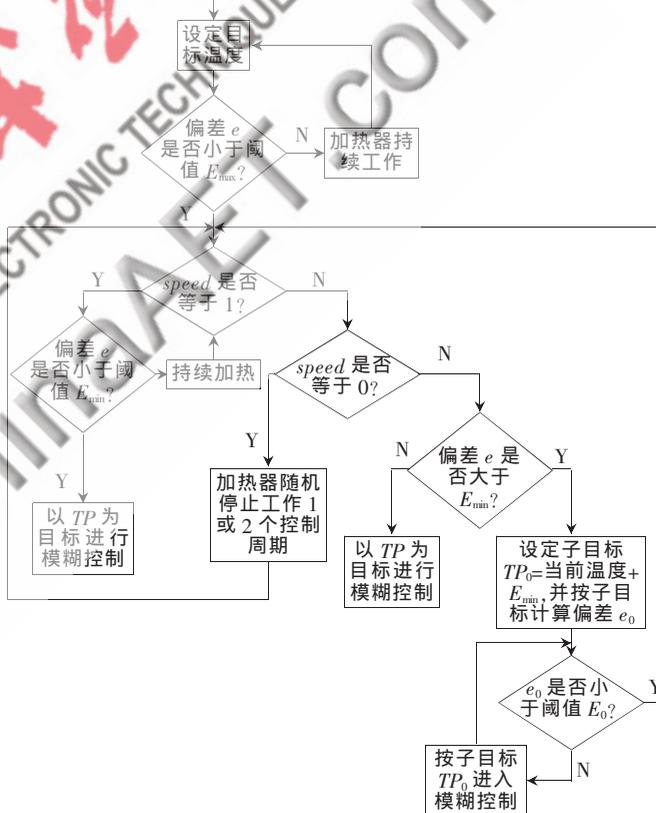


图3 带升温速率因子的温度控制流程图

设定目标温度  $TP$  后,系统实时计算升温速率因子的模糊隶属度,跟踪升温趋势。当温度偏差  $e$  进入一个较大阈值  $E_{\max}$ (如  $60^{\circ}\text{C}$ ) 范围内后,系统根据  $speed$  选择控制策略。

(1) 当  $speed=1$  时,则认为升温速率正常或偏慢,加热器可持续工作。

(2) 当  $speed=0$  时,则认为升温速率过快,可使加热器随机停止工作 1 或 2 个控制周期以缓冲升温速率。

(3)当  $speed=0.5$  时,则认为升温速率较快,若当前温度偏差  $e$  并未落入模糊控制论域  $E_{min}$  中,则可通过令  $TP_0=$ 当前温度 $+E_{min}$ ,系统以  $TP_0$  为子目标进行模糊控制,并按子目标计算偏差  $e_0$ 。通过比较  $e_0$  与阈值  $E_0$ ,当温度上升至靠近子目标  $TP_0$  时,则根据  $speed$  重新选择宏观控制策略。

(4)一旦偏差  $e$  落入模糊控制论域  $E_{min}$  中,则以  $TP$  为目标进入最后的模糊控制阶段。

按照上述控制规则,系统结合升温速率因子选择控制策略,从较大的偏差开始,在整个控制过程中将伴随若干以  $TP_0$  为子目标的阶段性模糊控制过程,从而合理协调了升温速率,尽管可能会牺牲一些温度上升的响应时间,但由于有效抑制了超调,相应地也减少了由于超调而花费的回调时间。从总体上看,系统性能得到一定程度的优化。

### 3 实验结果分析

在室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 下分别选用功率为  $500\text{ W}$  和  $1000\text{ W}$  的熔锡炉仿真模温机加热器对  $700\text{ g}$  锡进行加热控温实验。实验中分别采用了不带升温速率因子的普通模糊控制算法和带升温速率因子的分层模糊控制算法进行对比,具体数据如表 1 及表 2 所示。

表 1 500 W 熔锡炉加热控温实验数据

目标温度/ $^{\circ}\text{C}$	对比指标	不带升温速率因子	带升温速率因子
90	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	6	2
	控温时间/s	380	360
120	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	11	3
	控温时间/s	480	470
160	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	15	3
	控温时间/s	750	770

注:控温时间指从控温开始到温度稳定在目标温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 所经历的时间。

表 2 1 000 W 熔锡炉加热控温实验数据

目标温度/ $^{\circ}\text{C}$	对比指标	不带升温速率因子	带升温速率因子
90	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	13	4
	控温时间/s	300	290
120	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	20	4
	控温时间/s	420	410
160	最大超调量/ $^{\circ}\text{C}$	25	3
	控温时间/s	610	620

注:控温时间指从控温开始到温度稳定在目标温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 所经历的时间。

通过比较两种不同功率熔锡炉的实验数据可知,采用普通模糊控制方法进行控温,超调量将随着熔锡炉功率变大而显著变大,而带升温速率因子的分层模糊控制方法的超调量则几乎没有变化,且所需的控温时间也并不比普通模糊控制方法长。实验结果表明,带升温速率因子的分层模糊控制方法能有效抑制超调,且对控温环境的变化有良好的适应能力。

本文针对模温机应用场合控温环境时有变化的情况,讨论了普通系数自调整的解析式模糊控制方法的局限性,指出系统控制的滞后性是引发超调的重要原因。为能更准确地描述受控对象的变化趋势,本文引入了实时性较强的升温速率因子,并结合该因子在较大偏差范围内合理选择控制策略,使进入最后模糊控制阶段前相当长的时段不再成为控温“盲区”,能针对不同受控对象的动态变化特性协调整个控温过程。当受控对象升温速率过快时,系统通过在控温过程中插入若干控制子过程加以宏观调控。当受控对象升温速率正常时,系统控温过程则趋于普通的模糊控制。实验数据表明,本文提出的模糊控制方法有效抑制了超调现象,对控温环境的变化有良好的适应性。

#### 参考文献

- [1] 蔡自兴,徐光佑.人工智能及其应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
  - [2] 龙升照,汪培庄.Fuzzy 模糊控制的自调整问题[J].模糊数学,1982(8):105-112.
  - [3] 王伟,张航.公式法模糊决策的模糊控制器及其应用研究[J].计算机工程与应用,2007,43(27):246-248.
- (收稿日期:2010-10-09)

#### 作者简介:

濮辉,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统、智能算法。

曾碧,女,1963年生,教授,主要研究方向:嵌入式系统与智能技术,移动计算与物联网技术,智能计算与智能机器人,智能信息处理与应用软件。

叶雄杰,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统、智能算法等。