

基于专家—模糊 PID 的通用温度控制系统研究

蔡恩丰, 石守东*

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了解决温度控制系统易受外界干扰、自身参数时变不确定以及控制难度大等问题, 采用了模糊 PID 控制算法结合专家判断, 组成专家—模糊 PID 控制器的方法来控制温度. 将该方法应用于通用智能温度控制器中, 调试运行结果表明: 该方法解决了常规 PID 适应性差、不能在线进行参数自整定的问题, 不仅具有 PID 控制精度高的优点, 同时具有良好的动、静态特性, 可满足在通用智能温度控制器中的应用.

关键词: 温度控制; 参数整定; 智能; 模糊 PID 控制器; 专家控制

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 01-0048-05

生产、生活中使用的烘箱、培养箱等产品中都大量使用了温度控制器, 温度控制器正在向通用智能化方向发展. 然而目前的温度控制器算法多为 PID 算法, PID 算法在固定的模型下控制性能较好, 能消除静态误差. 但对不同的对象或同一个对象随其负荷变化或外界干扰, 其控制效果往往会变差. 如果采用传统的 PID 控制, 需要根据外界影响状况, 针对不同的控制对象频繁地调整 PID 参数, 这不仅增加了使用者的工作量, 同时还可能因参数调整的不合适导致控制精度达不到要求^[1-2]. 纯模糊控制能解决传统 PID 难以解决的复杂系统的模型不确定以及非线性的问题, 但存在精度不够的缺点^[3-4]. 文献[5-6]对神经元 PID 与模糊 PID 进行了相关的研究和改进, 具有一定的优化作用.

为解决上述控制过程中存在的问题, 笔者采用模糊 PID 控制结合专家推理的方法, 该方法既具有模糊自适应 PID 控制算法简便、实用性强、能够达到较高控制精度的优点, 又具有专家控制能够有效地克服温度滞后的特点.

1 专家—模糊自适应 PID 控制算法设计

由于本系统中的被控对象通常具有滞后较大、规格参数不一、难以得到精确的数学模型等问题,

目前应用较多的做法是将 PID 控制和模糊控制相结合, 实现优势互补, 以减少系统的振荡性和调节时间^[1]. 但是这样的模糊 PID 控制算法的模糊规则和隶属度函数都是人为预设的, 一旦确定以后就难以满足时变及滞后性的动态要求^[7]. 为解决这一问题, 本设计考虑将专家控制引入模糊自适应 PID 控制, 提出专家—模糊 PID 算法, 以提高控制器对系统时变和大滞后过程的控制效果. 专家—模糊自适应 PID 控制器如图 1 所示.

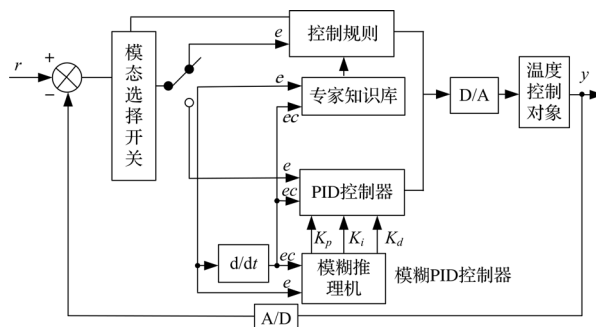


图 1 专家—模糊自适应 PID 控制器

该设计主要有专家控制器和模糊 PID 控制器两部分组成, 其中模态选择开关用于选择其中的一个控制器来作用于被控对象. 这样所设计的温度控制器既具有模糊 PID 控制的精度高的优点, 同时又具有专家控制的灵活性和自适应能力.

收稿日期: 2013-03-04.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省教育厅科研项目 (Y201121251) .

第一作者: 蔡恩丰 (1988—), 男, 江西上饶人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式软件及应用. E-mail: 810157091@qq.com

*通信作者: 石守东 (1966—), 男, 浙江宁海人, 博士/副教授, 主要研究方向: 计算机应用及仪器仪表. E-mail: shishoudong@nbu.edu.cn

由图 1 可以看出, 模态选择开关根据温度偏差 e 和偏差的变化率 ec 选择采用专家控制还是模糊 PID 控制. 专家控制的作用是当达到较小的精度时, 避免温度在设定值附近发生震荡^[3].

常规 PID 控制器的控制作用方式为:

$$u(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + \frac{T_d de(t)}{d(t)}),$$

写成传递函数形式为:

$$G(s) = U(s) / E(s) = k_p(1 + 1/(T_i s) + T_d s),$$

其中: k_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数.

连续 PID 控制算法需采用离散化方法, 我们用采样时刻 kT 代表连续时间 t , 以一阶后向差分代替微分, 即:

$$\begin{cases} t \approx kT \ (k=0,1,2,\dots), \\ \int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) = \\ e(k) - e(k-1) / T, \end{cases}$$

从而可以得到离散 PID 的表达式:

$$\begin{aligned} u(k) = & k_p e(k) + k_p (T/T_i) \sum_{j=0}^k e(j) + k_p (T_d/T) e(k) \cdot \\ & k_p (T_d/T) - e(k-1) = k_p e(k) + \\ & k_i \sum_{j=0}^k e(j) T k_d (e(k) - e(k-1)) / T, \end{aligned}$$

其中: $k_i = k_p / T_i$, $k_d = k_p T_d$, k 为采样序号, T 为采样周期.

1.1 输入输出变量的确定及其模糊化

这里将实际测量温度值 T 和设定温度值 T_d 的偏差 $e = T - T_d$ 及偏差的变化率 ec 作为模糊控制器的输入参数, Δk_p , Δk_i , Δk_d 作为控制器的输出. 为了实现控制的粗调与细调, 通过如下方法将其转化为模糊论域:

$$\begin{aligned} |E| = & \begin{cases} \ln(|e|/3), & |e| > 3, \\ 0, & -3 \leq e \leq 3, \end{cases} \\ |\Delta K_p| = & \begin{cases} \ln(\Delta K_p/3), & |\Delta K_p| > 3, \\ 0, & -3 \leq \Delta K_p \leq 3. \end{cases} \end{aligned}$$

同理可得其他几个输入输出参数的模糊论域, 进行模糊量化处理后的模糊论域为:

$$\begin{aligned} E \in [-3, 3], \quad Ec \in [-3, 3], \quad \Delta K_p \in [-3, 3], \\ \Delta K_i \in [-3, 3], \quad \Delta K_d \in [-3, 3]. \end{aligned}$$

定义 E , Ec , ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊子集为 $[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]$, 其中 NB 表示负大, NM 表示负中, NS 表示负小, Z 表示零, PS 表示正小, PM 表示正中, PB 表示正大.

设 e , ec , Δk_p , Δk_i 和 Δk_d 都服从正态分布, 量化因子都为 1. 各个模糊子集在相应模糊论域上的隶属度函数可以有多种表示形式, 这里采用三角形(trimf)表示形式. 三角形隶属度函数表达式为:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b, \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x, \end{cases}$$

其中: x 为变量的论域范围; a, b, c 为指定三角形函数形状. 相应的模糊子集和模糊化等级如图 2 所示.

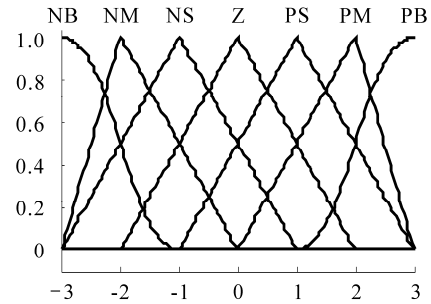


图 2 模糊子集和模糊化等级

1.2 模糊控制规则的设计

根据仿真和实际现场调试结合专家控制理论, 再结合 k_p , k_i , k_d 3 个参数对系统的影响情况, 得到本系统的控制规则^[8]:

(1) 当偏差 $|e|$ 较大时, 为了提高系统的响应速度, 应该使 k_p 取较大值, 同时为了避免开始阶段 e 的微分饱和, 应该使 k_d 取值较小. 但为了防止出现较大的超调, 应对积分进行限制, 取 $k_i = 0$.

(2) 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 处于中等大小时, 为使响应超调较小, 取较小的 k_p , 该情况下 k_d 对系统响应的的影响较大, 应使其取值适中, 以保证响应的速度.

(3) 当 $|e|$ 较小接近目标值时, 应加大 k_p 和 k_i 的取值来提高系统的稳态性能, 但为避免出现震荡, 并考虑到抗干扰性, 当 $|ec|$ 值较小时, k_d 值取大点; 当 $|ec|$ 值较大时, k_d 取值应小一点^[5].

根据上述在不同 e 和 ec 时参数 k_p , k_i 和 k_d 的自整定原则, 得 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊规则, 见表 1 至表 3.

表1 ΔK_p 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PM	PS	PM	PM	PM	PS	PM
NM	PB	PM	PB	PB	PB	PM	PS
NS	PB	PM	PB	PB	PB	PM	PS
Z	PB	PM	PB	Z	PB	PM	PS
PS	PB	PM	PB	PB	PB	PM	PS
PM	PB	PM	PB	PB	PB	PM	PS
PB	PM	PS	PM	PM	PM	PS	PM

表2 ΔK_i 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PS	PM	PB	PM	PS	Z
NM	Z	PS	PB	PB	PB	PS	Z
NS	Z	Z	PB	PB	PB	Z	Z
Z	Z	Z	PB	PB	PB	Z	Z
PS	Z	Z	PB	PB	PB	Z	Z
PM	Z	PS	PB	PB	PB	PS	Z
PB	Z	PS	PM	PB	PM	PS	Z

表3 ΔK_d 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	PB	PB	PS	PS	PB	PB
NM	PS	PS	PM	PM	Z	PS	PS
NS	PS	Z	Z	PS	PM	Z	PS
Z	PB	PB	PS	PS	PS	PS	Z
PS	Z	PS	PM	Z	PS	PS	PS
PM	PS	PS	PS	PS	PS	PM	PS
PB	PB	PB	PS	PS	PB	PB	PS

1.3 模糊推理及解模糊化

这里选择 Mamdani 推理法进行模糊推理。同时采用重心法来解模糊化, 将所有的输出值以及对应的输入 e 和 ec 制成表^[9]。在实际应用时, 将模糊控制规则换算成模糊控制表, 温度控制器运行的时候根据查表直接得到输出, 可以较好地提高控制速度和实时性^[10], 结果见表 4 至表 6。

系统运行时 PID 的 3 个参数的调整算式为:

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \{e_i, ec_i\}_p, \\ k_i = k'_i + \{e_i, ec_i\}_i, \\ k_d = k'_d + \{e_i, ec_i\}_d, \end{cases}$$

式中: k_p , k_i 和 k_d 为 PID 的 3 个控制参数; k'_p , k'_i 和 k'_d 为 k_p , k_i 和 k_d 的初始参数。

表4 ΔK_p 的模糊控制表

ΔK_p	输入变量偏差变化 ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	2	2	2	1	1	0
-2	3	2	2	1	1	0	0
-1	2	2	1	0	0	-1	-1
0	1	1	1	0	0	-1	-2
1	1	0	0	0	-1	-2	-2
2	0	0	-1	-1	-2	-2	-2
3	0	-1	-1	-2	-2	3	3

表5 ΔK_i 的模糊控制表

ΔK_i	输入变量偏差变化 ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-2	2	-2	0	0
-2	-3	-2	-2	1	-1	0	0
-1	-2	-2	-1	0	-2	0	1
0	-2	-1	0	0	-1	1	2
1	-1	0	0	0	0	2	2
2	0	0	0	-1	1	2	3
3	0	0	1	-2	1	3	3

表6 ΔK_d 的模糊控制表

ΔK_d	输入变量偏差变化 ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1	-1	-1	-2	-2	0	1
-2	1	-1	-1	-1	-1	0	0
-1	0	-1	-2	-2	-1	0	0
0	0	-1	-1	-1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	1
2	2	0	1	1	0	1	2
3	2	2	2	1	0	2	3

1.4 专家控制

由于升温控制系统滞后性比较大, 在升温阶段和平稳阶段的后期就需要对输出进行控制来确保后面的偏差在允许范围以内。本系统中我们通过知识库来获得这些数据, 用来分析需不需要进行预前控制以及进行预前控制的时间^[8]。可根据以下 4 种情况进行设计:

(1) 当 $|e| \geq m$ 时, 其中 m 为设定的误差界限, 表明此时误差很大, 控制器输出应调节到最大。

(2) 当 $e \times ec < 0$ 且 $e \times ec(k-1) < 0$ 时, 说明误差的绝对值在减小, 这时考虑让控制器的输出保持不变.

(3) 当 $e \times ec \geq 0$ 时, 表明误差在增大; 如果这时 $|e| \geq n$ (其中 n 为设定的误差界限), 并且 $m > n$, 说明误差比较大, 应使控制器的输出保持较大功率^[9], 此时控制器的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \{k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\}.$$

如果 $|e| < n$, 表明误差在变大, 但是误差值并不是很大, 此时的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)].$$

(4) 当 $e \times ec < 0$ 且 $e \times ec(k-1) < 0$ 时, 如果这时误差值较大, 则应使控制器的输出保持较大的作用, 此时的控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e(k),$$

如果这时的误差较小, 应使控制器的输出保持较弱的作用, 此时的控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e(k),$$

其中: k_1 为增益放大系数, k_2 为抑制系数, 即 $k_1 > 1$, $0 < k_2 < 1$.

2 模型的建立及仿真

将该法应用于控制一个通风烤箱的温度, 等价的电路如图3所示. 其中 Q 表示温度控制器输出的热量; C_a , C_1 分别表示烤箱壳的热容及测量洞的热容; θ_a , θ_1 和 θ_e 分别表示烤箱的温度、测量洞的温度和烤箱外的温度; R 表示导管热向内传播时的热电阻, R_1 表示测量洞的热电阻, R_2 表示热量外散的热电阻; C_e 为烤箱外面的热容相当于无穷大.

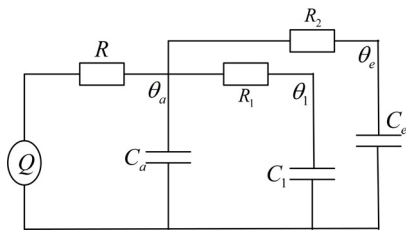


图3 烤箱等价电路图

根据热力学原理分析可得烤箱的热力学系统可用如下方程来描述:

$$Q = C_a \frac{d\theta_a}{dt} + C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_a - \theta_e}{R_2},$$

其中:

$$\theta_1 = \theta_a - R_1 C_1 (d\theta_1 / dt), \quad (1)$$

对(1)式进行拉普拉斯变换, 并经计算转化得:

$$\theta_a = (Q + \theta_e / R_2) R_2 (1 + R_1 C_1 p) / (1 + (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_a) p + R_2 R_1 C_1 C_a p^2),$$

$$\theta_m / \theta_a = 1 / (1 + R_m C_m p),$$

综合上述方程, 完整过程可用图4函数框图描述.

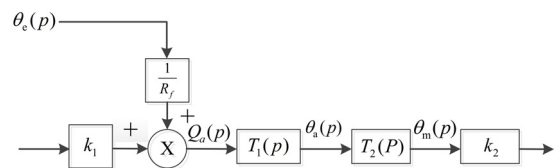


图4 完整过程框图

图中:

$$T_1(p) = R_2 (1 + R_1 C_1 p) / (1 + (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_a) p + R_2 R_1 C_1 C_a p^2),$$

$$T_2(p) = 1 / (1 + R_m C_m p).$$

3 结果与分析

设定好烤箱的参数取值进行仿真, 调节目标温度为 150°C , 仿真得各控制曲线如图5~图8所示.

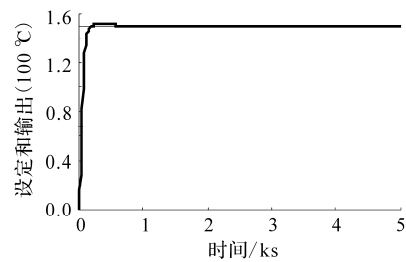


图5 设定温度和实际温度对比

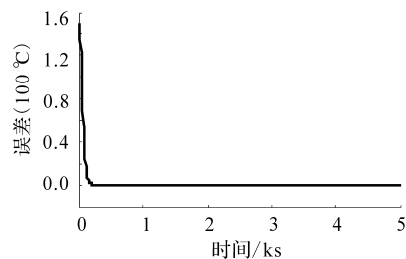


图6 温度偏差曲线

从图5~图8可以知道, 控制曲线整体十分理想, 温度超调量比较少, 最大超调量仅为 0.88°C ; 波动次数也比较少, 最大稳定性为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$; 达到控

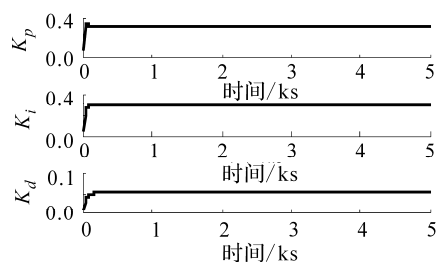


图7 3个控制参数的调整曲线

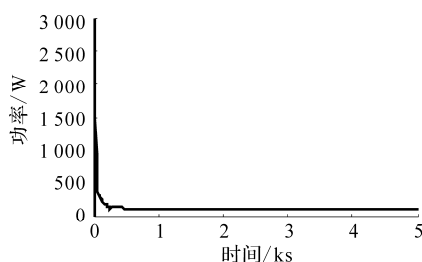


图8 输出功率曲线

制精度要求的时间明显缩短,在升温阶段约 200 s 时进入 $\pm 1^\circ\text{C}$ 误差的目标温度范围,之后有一个超调过程,但其超调量均不超过 1°C ,偏差在允许的范围内,符合实验要求。由此可见,专家-模糊 PID 控制方法不仅调节速度较快,且使系统的动态偏差得以改善,对干扰的克服能力也有所增强。该系统不仅有很好的动态响应曲线,且响应速度快,无稳态误差,能快速到达实验要求的温度稳定范围。

综上分析可知,用专家控制和模糊PID控制器相结合的控制方法,同时结合了模糊PID控制精度与稳定性高以及专家控制速度快的优点,将该方法应用于通用温度控制器的控制系统中,不仅取

得了良好的控制效果,而且具有较强的通用性和智能性。

参考文献:

- [1] 王军. 基于 ARM 的多路智能温度控制器的设计与研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [2] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2003:4-181.
- [3] 诸静. 模糊控制理论原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001:194-196.
- [4] Lu Zhen, Zhang Jili, Chen Yongpan, et al. Fuzzy control model and simulation of supply aircsystem in a test rig of low-temperature hot-water radiator system[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(3):386-392.
- [5] Xue Wei, Guo Yanling. Fuzzy neural network control in main steam temperature system[J]. ICIC Express Letters, 2009, 3(3):409-414.
- [6] Ning Wang. A fuzzy PID controller for multi-model plants//[C]. Proceedings International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002, 3:1401-1404.
- [7] 翟雁君. 模糊 PID 控制算法在木塑复合材料挤出温度控制中的仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [8] 周黎英, 赵国树. 模糊 PID 控制算法在恒速升温系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2):405-409.
- [9] Nie Hongfei, Li Xiaoping, He Yan. Temperature control system with multi-closed loops for lithography projection lens[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2009, 22(2):207-213.
- [10] 卢家暄. 基于 ARM 嵌入式温度控制器设计[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.

Expert-fuzzy PID Based Universal Temperature Control System

CAI En-feng, SHI Shou-dong*

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to solve the problems found in the temperature control system for being vulnerable to outside influence, and time-varying and difficult to control, we use fuzzy PID control algorithm and expert evaluation to design an expert-fuzzy PID controller. The proposed method is applied to the universal intelligent temperature controller. The debugging and running results show that the method can solve the problem identified with the temperature control system. It not only bears the advantage of PID control of high precision, but also manifests the good dynamic and static characteristics. Therefore it can be used in the universal intelligent temperature controller with promising commercialization prospects.

Key words: temperature control; parameter tuning; intelligent; fuzzy PID controller; expert control

(责任编辑 史小丽)