

基于模糊控制的 PAC 控制器的设计

冯 超 陈双叶

(北京工业大学电控学院 北京 100124)

摘要:在工业制造生产过程中,对控制的需求越来越高。PAC 是一种新型的可编程自动化控制器,在控制性能、信息处理以及网络通信能力具有一些比较显著的优点。PAC 控制器结合了 PLC 固有的可靠性、坚固性和分布特性,同时与 PC 控制相比,PAC 使用实时操作系统,在处理性能上具有实时性、确定性等 PC 机不可比拟的优点。在传统 PAC 控制器的基础上,采用了改进 PID 控制算法、自整定模糊 PID 控制算法,能够提高控制精度、提高控制响应、满足更高的控制要求。

关键词:PAC 控制器;模糊 PID 控制;模糊推理;温度控制

中图分类号: TP273 TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

PAC controller design based on fuzzy control

Feng Chao Chen Shuangye

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract:In the process of industrial production, the demand of control precise is higher and higher. PAC is a new type of programmable automation controller, the control performance, information processing and network communication ability have some significant advantages. PAC controller combines the inherent reliability, robustness and distribution characteristics of PLC, and compared with PC control, the PAC using real-time operating system, on the processing performance with certainty and real-time PC incomparable advantages. On the basis of the traditional PAC controller, adopting the improved PID control algorithm, the adaptive fuzzy PID control algorithm, therefore can improve the control precision and the control response, higher control requirements.

Keywords: PAC controller; fuzzy-PID control; fuzzy inference; temperature control

1 引言

PAC 基于开放的工业标准、适应众多控制领域、高性能、高可靠性的运行能力,逐渐被广泛采用。在功能上,PAC 控制器具有 PLC 固有的可靠性、坚固性和分布特性,同时与 PC 控制相比,PAC 使用实时操作系统,在处理性能上具有实时性、确定性等 PC 机不可比拟的优点;在控制方面,PAC 提供了较传统 PLC 更佳的控制运算,高级控制算法不但需要强大的浮点运算处理器,需要大量的内存,PAC 平台可以同时提供这两项资源^[1-2]。

目前国内外已经有众多厂商参与到 PAC 控制器的设计及生产中,例如德国倍福、NI、研华、泓格等业内知名厂商陆续推出各自的 PAC 控制器产品,而且 GE、RockWell 等老牌 PLC 厂商也推出了全新的 PAC 产品。目前 PAC

控制器已经应用到食品、冶金、轨道交通、污水处理、机械制造、纺织、化工、建筑等诸多行业中^[3-5]。

在现代工业生产制造中,对控制的需求越来越高,被控系统模型越来越复杂。在传统工业应用中,较多的使用 PID 控制器,这是由于 PID 控制能使系统具有良好的动态特性及跟踪目标能力,控制结构简单,控制系统稳定,在较长的一段时间内,无法被其他方式取代。同时,近年来关于模糊控制的研究及应用已经达到非常迅猛的发展,在化工、冶炼、纺织等领域,控制对象往往具有时变性、非线性、大惯性等特点,仅仅依靠 PID 控制已经无法胜任项目高标准的要求,于是将 PID 与自整定模糊控制结合起来,能够使系统控制具有更好的动态特性及跟踪目标能力,对外界的干扰也具有很强的鲁棒性^[6]。这也是本文的主要研究目的。

2 硬件结构

本文设计的嵌入式 PAC 控制器采用意法半导体公司的 STM32F207ZET6 微控制器作为运算处理器,其采用 Cortex-M3 内核,并且内置很多常见的外设,如 UART、SPI、IIC、USB、CAN 控制器、以太网控制器等,以 120 MHz 高速运行时可达到 150 DMIPS 的处理能力,内置 128 K 字节的 SRAM,及 1 M 字节的片上闪存,较高的性能、丰富的外设能够保证系统运行。

如图 1 所示,嵌入式 PAC 控制器包含传感器输入采样电路、控制输出电路、以太网通信电路、RS-232、RS-485、CAN 总线等通信电路、复位电路、看门狗电路等。

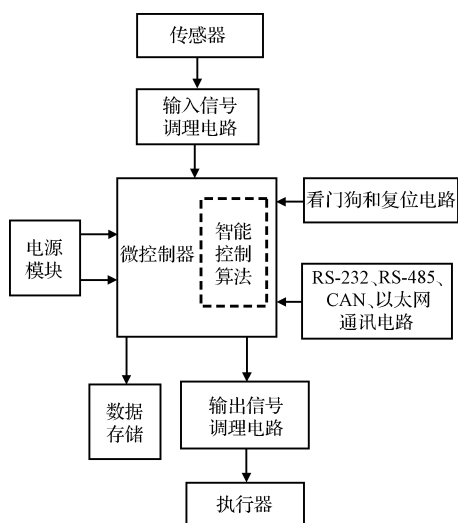


图 1 模糊 PID 控制器整体结构

其中传感器采样电路包括电压、电流、电阻信号的采样信号调理电路,可以实现常用传感器的信号高精度采集,如压力变送器、PT100 温度传感器、角度传感器、4~20 mA 的电流传感器等;控制输出电路、含有隔离单元,使用固态继电器等控制大电压大电流,使用 PWM 输出信号,控制输出精度高;另外还有用于参与运算的微控制器以及复位电路、看门狗电路等组成的最小系统;为了完成网络互连互通,还搭建了以太网、RS-232、RS-485、CAN 总线等通信电路。

在软件上,为了更好地与其他设备以及远程计算机网络相互兼容互通互联,实现了基于以太网的 Modbus-TCP 协议、基于串口 RS-232 和 RS-485 的 Modbus-RTU 协议以及基于 CAN 总线的 CAN-Open 协议。

3 系统组成

在自整定模糊 PID 控制系统中,控制系统需要包括以下 3 个方面:PID 参数的自整定、改进 PID 算法、模糊控制规则及模糊推理。3 个方面环环相扣;通过 PID 参数自整定可以获得 PID 运行的重要参数,基于此功能让 PID 控

制有一个较好的控制性能;通过对 PID 算法进行改进,能使 PID 控制运行具有更好的动态特性及稳态特性;在此基础上采用模糊控制根据系统运行变化在线实时地对 PID 参数进行微调,以获得一个更利于系统运行的 PID 参数。

3.1 PID 参数自整定

据统计,在工业过程控制,90% 以上的控制回路仍然采用 PID 结构。伴随着 PID 算法的普遍使用,PID 参数整定的方法也是层出不穷,其中最受欢迎的是由 Astrom 和 Hagglund 提出的 PID 参数继电器自整定方法^[7-8]。本文第 1 步就是利用 PID 继电器自整定方法获得 PID 参数的初始值,进而为自整定模糊 PID 做铺垫,该步在 3 个步骤中最为关键。

PID 继电器自整定结构如图 2 所示。

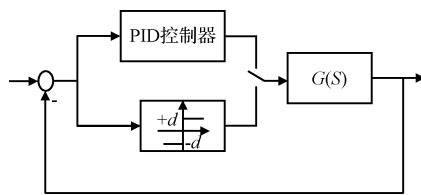


图 2 PID 继电器自整定结构

其中继电器特性的描述函数为:

$$N(X) = \frac{Y_1}{X} \angle \varphi_1 = \frac{4M}{\pi X}$$

由闭环特征方程为 $1 + N(X)G(j\omega) = 0$, 即 $G(j\omega) = -\frac{1}{N(X)}$ 。

当系统的线性部分和非线性部分满足上式时,系统是自持震荡的。

由上式可以得到:

$$\arg G(j\omega) = -\pi$$

$$K_u = \frac{4d}{\pi A} = \frac{1}{|G(j\omega)|}$$

式中: A 是通过测量输出的最大值和最小值计算求得, K_u 为临界振荡比例增益。

通过观察产生的振荡曲线,通过公式计算可以获得以上临界增益 K_u 及临界振荡周期 T_u , 由 Ziegler-Nichols 自整定方法的计算公式,如表 1 所示,可以根据需要的性能要求,计算出整定的 PID 参数,完成 PID 继电器自整定过程。

表 1 Z-N 自整定 PID 参数

控制器	K_c	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	—	—
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	—
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

3.2 PID 算法改进

PID 控制器共包括 3 个环节:比例环节、积分环节、微

分环节。常规PID算法如果不加修改使用的话,会暴露出一些缺陷,比如容易超调,系统调节时间长,在稳定时会有较小等副振荡现象等缺点。

PID的一般形式是:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

式中: $U_{\min} \leq u(t) \leq U_{\max}$ 。

采用抗积分饱和算法来限制积分导致超调现象,又能快速提高上升时间。

当 $u_1(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \geq U_{\max}$ 时,令 $u_1(t) = U_{\max}$,其中令 $k_i \int_0^t e(t) dt = U_{\max} - k_p e(t)$,这样做的目的是为了保持比例环节,并且限制积分饱和。

其次改进微分的变化量,由于:

$$u_2(t) = k_d \frac{de(t)}{dt}, \{e(t) = r(t) - y(t)\}$$

式中: $r(t)$ 为设定值, $y(t)$ 为传感器采样值。然而当 $r(t)$ 设定值进行调整的时候,必然导致微分环节的瞬间变化,会增加系统的不稳定性,因此令:

$$u_2(t) = -k_d \frac{dy(t)}{dt}$$

从而能够根据 $y(t)$ 的变化,平稳的进行微分项的计算,减少突变输出对系统的损伤。

另外,为了减少在稳定时会有较小等幅振荡现象,需要抑制在稳定状态时的积分作用,即:当 $e_c < 0.1$ 时,积分值保持不变。

通过以上进行PID算法的改进,会使PID算法在进控制输出时有很大的改进,控制效果也有了明显提高。

3.3 自整定模糊PID控制

在本控制系统中,选用二维模糊控制系统模型。其与一维模糊控制系统相比,控制效果较好,能够捕获更多控制过程中的关键信息从而能够产生较好的控制效果;在计算复杂度上,比三维模糊控制系统相对较低,降低了系统设计的难度。在该模糊控制系统中,采用误差 e 及误差变化率 e_c 作为模糊控制系统的输入,经过模糊控制规则及模糊推理,从而对PID参数朝着更利于系统运行方向进行微调。模糊PID控制结构如图3所示。

自整定模糊PID控制算法^[9-11]是为了能根据误差 e 及

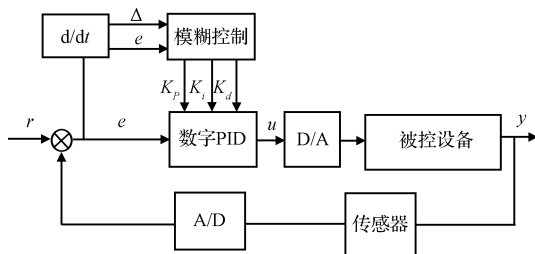


图3 模糊PID控制结构

误差变化率 e_c 推导出更利于系统运行的PID参数变化量,这样能够使系统在不同的阶段及时地修改PID参数值,从而能够利用PID控制对控制系统起到更好的控制效果,能够有较短的上升时间、较小的超调量、较高的抗干扰性能等。在模糊控制中首先将输入的数字量进行模糊化处理,然后根据论域对模糊输入输出变量划定隶属度函数,进而根据专家经验或其他方法创建模糊规则表,使用3个模糊规则表分别对PID参数各个值进行模糊推理,最后通过反模糊化得到PID参数变化值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 带入下式进行运算:

$$K_p = K_p' + \Delta K_p$$

$$K_i = K_i' + \Delta K_i$$

$$K_d = K_d' + \Delta K_d$$

式中: K_p' 、 K_i' 、 K_d' 为PID参数初始值,由3.1节PID自整定方法获得。

模糊控制表的建立不是唯一的,针对不同控制系统有所差异,但针对常见系统,使用表2~4模糊控制表^[4]均能满足控制要求。

表2 ΔK_p 模糊规则表

$e \setminus e_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	NM	NM	NS	ZO	NS	NM	NM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PM
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_i 模糊规则表

$e \setminus e_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PM
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表4 ΔK_d 模糊规则表

$e \setminus e_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

建立好了模糊规则表之后,需要确定系统的输入输出论域和隶属度函数,隶属度函数即确定输入的信号值所在区间范围的比重,在嵌入式设备中一般选用直线组成的曲线作为隶属度函数模型,为了方便嵌入式处理器计算,为以下模糊规则及解模糊做准备。

模糊控制系统的输入输出论域以及隶属度函数的选择需要根据具体的设备对象进行设定。下面以该控制器控制一个电加热炉为实验对象来进行具体的设定。

4 系统设计

以一个电加热炉为具体实验对象,电加热炉具有非线性、大惯性等特点,因此也具有非常好的代表性。通过控制电加热炉的输入功率来控制炉内温度,使用 PT100 热电阻作为采集温度传感器,通过使用 PWM(脉冲宽度调制)波控制固态继电器的快速吸合来调节电加热炉的输入功率对温度进行控制。

1)确定 PID 参数初始值。根据 3.1 节 PID 自整定实验,采集到的温度曲线如图 4 所示,根据 Ziegler-Nichols 自整定方法的计算公式,最终整定的参数为: $K_p=4.225$, $T_i=3.322$, $T_d=0.83$ 。

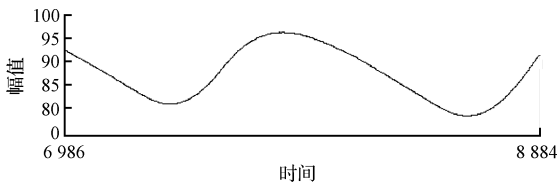


图 4 PID 继电器自整定温度曲线

2)确定输入输出论域,及隶属度函数。在嵌入式设备中一般选用直线组成的曲线作为隶属度函数模型。

考虑到电加热炉温度设定范围 $0 \sim 200^\circ$ 。误差 e 的论域范围取为: $-50 \sim 50^\circ$ 。误差 e 的隶属度函数图形如图 5 所示。

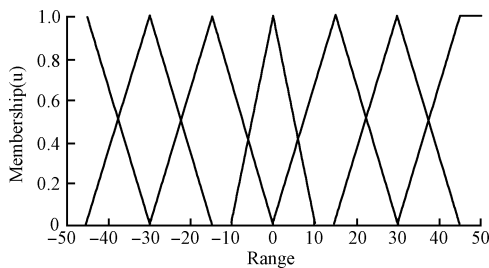


图 5 误差隶属度函数曲线

e_c 的论域需要根据其最大变化范围来控制,通过 PID 控制实验,发现 e_c 的最大变化率为 $\pm 0.27^\circ/\text{s}$, 备留一些裕度,比例系数取为 10,因此 e_c 的论域范围为 $-3 \sim 3$ 之间。误差变化率 e_c 的隶属度函数图形如图 6 所示。

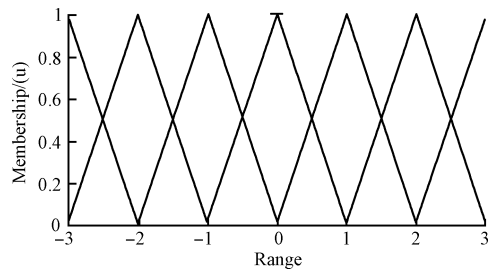


图 6 误差变化率隶属度函数曲线

输出论域需要根据人工经验计算获得。分别将 PID 控制中的比例环节、积分环节、微分环节计算输出,在确保稳定可控的情况下,根据输出大小大致可以取得 PID 参数的输出论域,本实验中 ΔK_p 论域为 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, ΔK_i 论域为 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, ΔK_d 论域为 $-0.3 \sim 0.3$ 之间。

3)根据 3.3 节自整定模糊 PID 控制中制定的模糊控制规则,具体模糊控制规则如表 2~4 所示。由于采用二维模糊控制结构,输入语言变量为 2 个,需要模糊关系合成运算,为了简单方便采用常用的 Mamdani 模糊推理方法和模糊规则进行推理,得到最终的控制量。其中 Mamdani 模糊推理方法采用取小(AND)合成运算方式进行模糊关系的计算,计算简单,在嵌入式系统中容易实现。

4)反模糊化^[12]。在模糊推理后,得到一组模糊输出集合,此时还是一个模糊变量形式,需要进行反模糊后得到清晰的输出变量。在本系统中,使用重心法进行反模糊化处理,通过计算所包含面积的重心点来获得最终的输出值。重心法能够平滑的对输出变量进行调节,利于保护系统运行的稳定性,如图 7 所示。

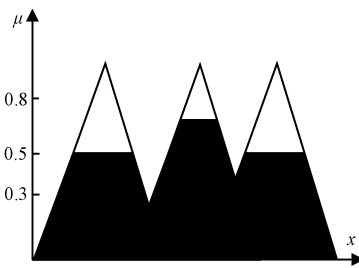


图 7 重心法反模糊化方法

即:

$$v_0 = \frac{\int_V v \mu_v(v) dv}{\int_V \mu_v(v) dv}$$

对于 m 个输出量化级数的离散域情况有:

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)}$$

5 系统验证

以电加热炉为实验对象,通过控制加热功率来进行温度控制,利用上位机软件 LabVIEW 实时检测采集到的温度值,将采集到的温度值导入到 MAT LAB 中绘制成曲线如图 8 所示。图中虚线为 PID 实验,其采用改进后的 PID 算法,PID 参数固定为 $K_p=4.225$, $T_i=3.322$, $T_d=0.83$ 。实线为自整定模糊 PID 控制曲线。通过数据也不难发现,PID 实验上升时间为 728 s,稳态误差为 $\pm 0.8^\circ\text{C}$,温升时间长,当有干扰发生时,回归稳态时间长;自整定模糊 PID 实验上升时间为 424 s,效率提升了近 40%,稳态误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。从上升时间、超调量、调节时间等性能参数来看,自整定模糊 PID 都具有非常良好的控制性能。

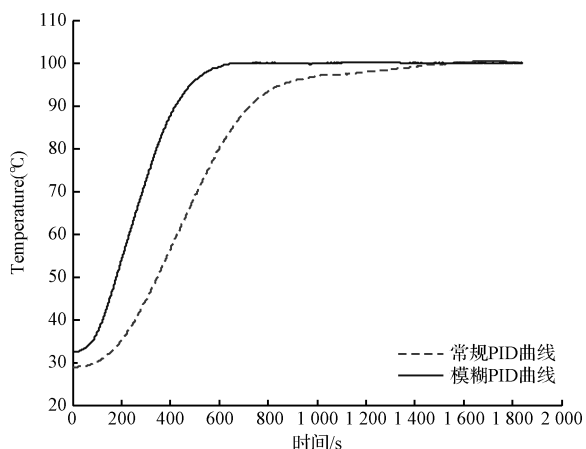


图 8 温度上升曲线

6 结论

本文设计了一款性价比较高功能丰富的嵌入式 PAC 控制器,并针对工业现场控制对象较为复杂,传统 PID 控制已经无法满足控制要求,本文在传统 PID 基础上进行改进,分别采用限制积分饱和、积分分离、改进微分等对 PID 进行改进,同时采用 PID 自整定算法进行 PID 参数自整定,并且使用模糊控制算法与 PID 算法相结合,设计并应用了模糊 PID 自整定算法。并以电阻炉为控制对象,验证了系统控制的高效性及稳定性。

参考文献

- [1] 时会美,张殿明. PAC 控制器的发展现状与应用前景[J]. 中国高新技术企业,2009(14):38-39.
- [2] 阮惠卿. PAC 系统的优势[J]. 科技信息,2012(6):275-276.
- [3] 美国国家仪器(NI)公司. NI 将视觉功能添加到 CompactRIO 和 Single-Board RIO[J]. 国外电子测量技术,2010,29(3):90.
- [4] 陈阵,武守真. GE PLC 在选煤厂集控系统中的应用[J]. 山东煤炭科技,2014(1):202-203.
- [5] 孙菲. 基于 LabVIEW 和嵌入式 PAC 的泵机组自控系统[J]. 国外电子测量技术,2009,28(11):54-56,70.
- [6] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2014:31-75.
- [7] 陈双叶,温世波,陈永峰,等. 基于增益调整型模糊 PID 的脉动真空灭菌器控制系统[J]. 计算机测量与控制,2015,23(6):2001-2003,2007.
- [8] 景倩. 基于 PAC 的自整定 PID 控制器的软件设计[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [9] 任亚奇,滕召胜,黄强,等. 电子分析天平模糊自适应 PID 平衡调节方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1424-1432.
- [10] 潘银松,刘艳,王攀峰,等. 基于 DSP 的无人机飞控系统研究[J]. 电子测量技术,2014,37(7):53-56.
- [11] 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.
- [12] 韩璞,董泽,王东风,等. 智能控制理论及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

作者简介

冯超,1989 年出生,男(汉族),山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为智能测控技术、嵌入式系统技术。

E-mail: tomchao2008@126.com

陈双叶,1970 年出生,男(汉族),湖南邵阳人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为检测技术与自动化装置、嵌入式系统技术等。