

热合装置 PLC 温度控制系统研究与开发

孟凡兴¹, 李丽娟¹, 程国清²

(1.南京工业大学, 南京 210009; 2.常熟三禾精工科技有限公司, 苏州 215000)

摘要: **目的** 更精确地控制热合机热合装置的温度, 提高热合装置压合袋口时的封口质量。**方法** 提出了一种基于模糊自整定 PID 的温度控制器方案。把常规的 PID 控制方式同模糊控制结合起来, 对 PID 参数进行在线修正。将常规 PID 和模糊 PID 温度控制算法在西门子 PLC 中编程实现, 并将该方式与常规 PID 控制方式进行了对比。**结果** 模糊控制方式较传统的 PID 控制能更稳定控制加热温度, 有效提高了响应速度和控制精度。**结论** 模糊 PID 温度控制系统具有更好的温度控制效果, 能够提高热合装置的封口质量。

关键词: 模糊 PID; PLC; 热合装置; 温度控制

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0128-06

Research and Development of PLC Temperature Control System of Heating-sealing Device

MENG Fan-xing¹, LI Li-juan¹, CHENG Guo-qing²

(1.Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2.Changshu Sanhe Precision Machinery & Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

ABSTRACT: In order to more precisely control the temperature of heating-sealing device and improve the quality of pocket lamination, a design scheme for temperature controller was put forward based on fuzzy self-tuning PID. This design combined the traditional PID control mode and the fuzzy control and adjusted PID parameters online. It applied the traditional PID and the fuzzy PID control algorithms to the programming of Siemens PLC. Compared with the traditional mode, the fuzzy PID control method was more stable in controlling the heating temperature and effectively improved the response speed and the control accuracy. Fuzzy PID temperature control system has better effect on temperature control and can improve the sealing quality of heat-sealing device.

KEY WORDS: fuzzy PID; PLC; heating-sealing device; temperature control

随着自动包装技术的自动化和智能化程度显著提高, 热合封口机已经广泛应用到生产和生活的各个领域。其中的热合装置用来对袋子热合封口, 其温度控制的精度直接影响到热合机封口的质量和速度^[1]。市场上热合装置的温度控制一般采用定值开关控制或者常规 PID 控制。定值开关控制的原理, 是当测量的温度低于设定的温度值, 打开控制开关对热合装置进行电加热, 相反, 则关闭开关不再对

系统进行电加热。定值开关控制方式原理简单, 容易实施, 但未考虑温度变化过程的时变性和时滞性等特点, 热合效果较差。常规 PID 控制器是应用最广泛的温度控制器^[2], 其易于整定, 适应性强, 同时 PID 的控制品质对控制对象变化不太敏感, 极大地提高了调节的有效性; 但是 PID 控制对难以建立精确数学模型、非线性的系统却不能很好地控制^[3]。

针对这些问题, 提出一种基于模糊 PID 算法的

收稿日期: 2016-01-06

作者简介: 孟凡兴 (1991—), 男, 山东临沂人, 南京工业大学硕士生, 主攻包装机械的自动化控制。

通讯作者: 李丽娟 (1976—), 女, 山西文水人, 博士, 南京工业大学副教授, 主要研究方向为复杂工业过程建模及先进控制。

温度控制器，实时地对温度进行监控和控制，根据不同输入在线修正 PID 参数，使系统一直保持较好的控制效果^[4]。将该系统应用于热合装置温度控制中，能够在热合过程中实现高精度、高速度的温度控制，具有一定的市场应用价值。

1 热合机的动作流程

热合机由供袋机构、夹带机构、称量机构、热和机构、皮带输送机等功能单元构成。带有真空吸盘的吸袋器从供袋器上把包装袋吸住，然后向上提升到位后，传送给传送器。在导向板、接袋器、吸盘和光电开关的作用下，包装袋定位在包装机的中心线上。张袋机构气缸动作，夹袋气缸收缩，手指气缸打开，夹袋臂合拢，夹住袋子。夹袋气缸伸出，夹袋臂打开，袋子落在输送带上。热合装置开始热合封包，热合气缸推杆向前移动，对袋口进行热合，完成整个热合封口动作。

2 控制系统硬件设计

2.1 控制系统方案设计

热合装置控制系统框图见图 1。温度控制系统由 PLC 控制器、固态继电器、热电偶、触摸屏等工艺设备组成。热合装置温控系统工作时，铜条内部的 K 型热电偶实时采集铜条的温度，把它转变成相应的电压信号，经 EM231 热电偶输入通道转化为数字量后，送达 PLC 与设定的温度值进行比较，对数据进行处理得到偏差 e 及其变化率 e_c ，然后送入模糊 PID 控制器，通过模糊推理得到对应的参数增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的值^[5]。通过计算得到 K_p, K_i, K_d 的值，然后进行 PID 运算，将得到的输出量转化为占空比^[6]，确定固态继电器开通和关断时间，调节电热丝的有效加热功率，从而实现对热合装置的温度控制。

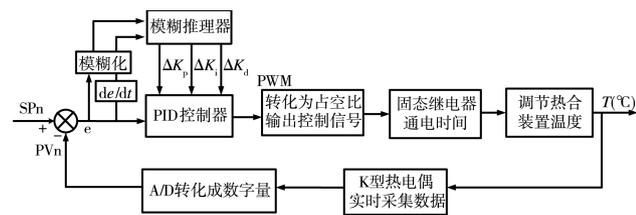


图 1 热合装置控制系统框图
Fig.1 Block diagram of control system

2.2 硬件设备选型

根据热合装置的结构与工艺流程，控制系统主控制器选取西门子 PLC CPU226 类型，24 个输入点，16 个输出点。EM231 模拟量输入模块带有四路热电偶输入通道，能够方便地将电压信号转化为数字信号。温度传感器选用东台仪达 K 型热电偶，它的测量精度高，使用方便。固态继电器选用欧姆龙系列，其开关频率高，性能优良。触摸屏采用北京昆仑通态的 MCGS TPC7062KS 型号触摸屏，系统的硬件结构见图 2。

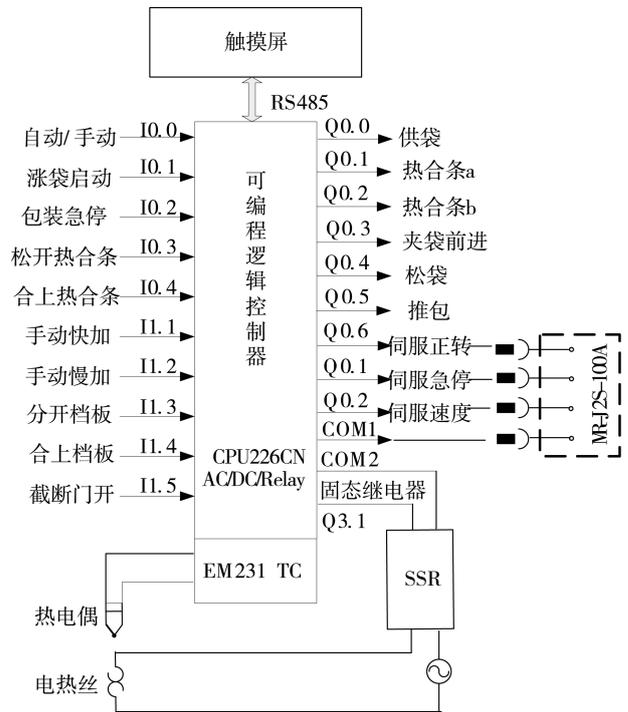


图 2 系统硬件结构
Fig.2 Hardware structure

3 热合装置温度加热模型

热合装置最初通电时的温度是室温，从开始加热到热平衡期间，电源提供的能量一部分转化为电热丝内能，使热合装置温度升高，另一部分扩散到外界而损失^[7]，于是有能量转化关系：

$$Pd\tau = P_1d\tau + P_2dt \tag{1}$$

式中： P 为电源有效加热功率； P_1 为热合装置向外界散热的扩散功率； P_2 为热合装置每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 吸收的能量； dt 为 $d\tau$ 时间内热合装置升高的温度。

在 $d\tau$ 时间内，瞬时的热平衡的方程式：

$$Pd\tau = \alpha S(t - t_0)d\tau + cmdt \tag{2}$$

式中： α 为散热系数，数值等于1℃时每秒钟在热合装置单位面积扩散的能量； S 为热合装置的表面积； m 是热合装置的质量； c 为热合装置的比热容； t_0 为室内温度； t 为热合装置的温度。

令 $T = t - t_0$ ，则：

$$P d\tau = \alpha S T d\tau + cm dT \quad (3)$$

等式两边同时除以 $d\tau$ 有：

$$P = \alpha S T + cm \frac{dT}{d\tau} \quad (4)$$

求解微分方程(4)可得：

$$t = t_0 + \frac{P_{\text{额}}}{\alpha S} (1 - e^{-\frac{\alpha S}{cm} \tau}) U(\tau - \tau_0) \quad (5)$$

可知热合装置在恒功率加热下，温度随着时间按照指数形式增长。

温度控制系统在运行过程中，利用模糊PID控制器输出占空比 D ，控制每个周期固态继电器的通断时间^[8]，进而控制加热电路在一个周期的加热时间，调节加热电源的有效功率，瞬时的有效加热功率可以表示为：

$$P = P_{\text{额}} D \quad (6)$$

式中： P 为瞬时有效加热功率； $P_{\text{额}}$ 为加热丝的额定功率， $P_{\text{额}} = 1000 \text{ W}$ 。将式(5)带入式(4)，并进行拉普拉斯变换，得：

$$P_{\text{额}} D(s) = (\alpha S + cms) T(s) \quad (7)$$

由式(6)可得传递函数：

$$G(s) = \frac{T(s)}{D(s)} = \frac{P_{\text{额}}}{(\alpha S + cms)} = \frac{\frac{P_{\text{额}}}{\alpha S}}{(\frac{cm}{\alpha S} s + 1)} \quad (8)$$

由于实际的响应中系统具有热惯性，会使系统存在一个时间滞后 τ_0 ，因此完整的热合装置电加热模型可以用一阶纯滞后环节表示：

$$G(s) = \frac{\frac{P_{\text{额}}}{\alpha S}}{(\frac{cm}{\alpha S} s + 1)} e^{-\tau_0 s} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau_0 s} \quad (9)$$

对热合装置进行恒功率加热，用得到的升温曲线对式(5)进行曲线拟合^[9]，得到的拟合曲线参数值

为： $t_0 = 23.8$ ， $\frac{P_{\text{额}}}{\alpha S} = 477.2$ ， $\frac{\alpha S}{cm} = 1.0$ ， $\tau_0 = 27.5$ ，代入式(9)得到热合装置电加热模型的传递函数，为：

$$G(s) = \frac{477.2}{s + 1} e^{-27.5s} \quad (10)$$

4 模糊PID控制器的设计与仿真

4.1 输入输出隶属函数

将温度控制系统得到的 e 和偏差的变化率 e_c 作为输入量，PID控制器的3个控制参数的增量 ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d 作为输出量^[10]。 e 的物理论域为 $[-30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $30 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ，模糊论域为 $[-3, 3]$ ，量化因子是 0.1。 e_c 的物理论域为 $[-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $5 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ，模糊论域为 $[-3, 3]$ ，量化因子为 0.6。输出变量 ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d 模糊论域均为 $[-3, 3]$ 。 E ， E_c ， ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d 模糊子集的语言变量值都选择 7 档， $\{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ 。为了提高论域的灵敏度，子集的隶属函数都取成三角形^[11]。输入变量和输出变量的隶属函数分布见图 3。

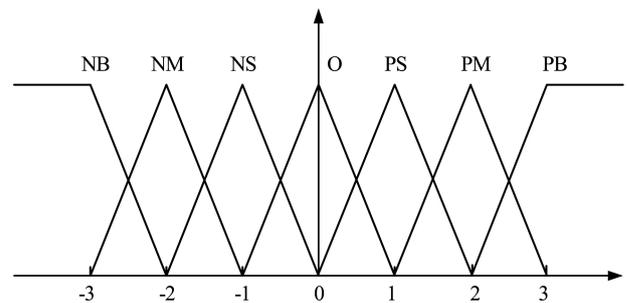


图 3 隶属度函数

Fig.3 Membership function

4.2 模糊控制规则

模糊控制规则表见表 1。模糊规则表设计的一般原则是：运行过程中当偏差 e 较大时， K_p 取较大， K_d 取较小，这样能够使系统快速响应并且避免超调，同时设置 $K_i = 0$ 。当 e 和 e_c 为中等大小时， K_p 应较小，这样可以避免系统的超调量过大，此时取合适的 K_i 和 K_d 。当温度距设定值较近时，应取较大的 K_p ， K_i ，尽可能减小稳态误差。同时取合适的 K_d ，以免系统出现过大的振荡^[12]。 e 和 e_c 经过模糊化后得到模糊控制量 E 和 E_c ，通过一般原则和现场的不断测试，归纳总结出偏差 e 及其变化率 e_c 和输出变量 ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d 之间的控制规则。

表 1 模糊规则($\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$)
Tab.1 Fuzzy rule

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NB/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NM/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

4.3 模糊推理与解模糊

根据系统的模糊输入量 E 和 E_C ，通过模糊推理可以调节 PID 的 3 个参数，实现在线自整定，映射过程为 $E \times E_C \rightarrow \Delta K_p \times \Delta K_i \times \Delta K_d$ 。模糊规则所构成的模糊关系 R ，模糊推理 $\Delta K = (E \times E_C) \circ R$ ，其中 ΔK 表示 $(\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d)$ 。去模糊化的过程，选用输出结果更为平滑的加权平均值法^[13]，可以得到清晰输出值 ΔK 。

$$\Delta K = \frac{\sum_{j=1}^{49} \Delta K_j \mu_K(\Delta K_j)}{\sum_{j=1}^{49} \mu_K(\Delta K_j)}$$

其中： ΔK_j 是输出论域上的元素作为隶属函数的加权系数； $\mu_K(\Delta K_j)$ 是论域上对应规则的隶属度。 ΔK_p 的模糊控制见表 2。这里只给出 ΔK_p 的模糊控制表^[14]，用同样的方法可以得到 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊控制表。

表 2 ΔK_p 的模糊控制
Tab.2 ΔK_p Fuzzy control table

E	E_C						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1.5	1.5	1	1	1	1	0
-2	1.5	1.5	1	1	1	1	0
-1	1	0.5	0.5	0	-0.5	-0.5	-1
0	1	0.5	0.5	0	-0.5	-0.5	-1
1	0.5	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
2	0	-0.5	-0.5	-1	-1	-1.5	-1.7
3	0	-0.5	-0.5	-1	-1	-1.5	-1.7

系统运行过程中，温度控制器通过不断采样和计算得到 e 和 e_c 的值，然后查询模糊控制表得到 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的清晰值。 K_p, K_i, K_d 参数最终值由式

(11) 得出：

$$\begin{aligned} K_{p(i)} &= K_{p(i-1)} + \Delta K_p \\ K_{i(i)} &= K_{i(i-1)} + \Delta K_i \\ K_{d(i)} &= K_{d(i-1)} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (11)$$

式中： K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 分别为传统的 PID 参数， K_p, K_i, K_d 分别为整定后的 PID 参数。

4.4 仿真结果及分析

为了验证算法的可行性，在热合装置电加热模型的基础上，运用 Matlab 对 2 种控制器进行仿真。温度设定值为 150 °C，开始时均对 2 种控制算法同时施加阶跃信号，响应一段时间后，分别对这 2 个控制器加入脉冲干扰信号，得到的仿真曲线见图 4。

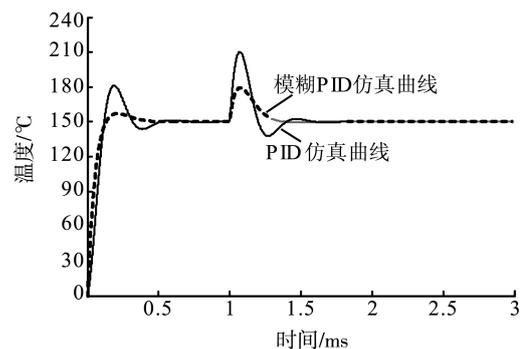


图 4 仿真曲线

Fig.4 Simulation curve

从图 4 可以看出，响应开始后，模糊 PID 控制响应速度快于传统 PID 控制，同时超调量较小。加入脉冲扰动之后，传统 PID 控制受到干扰引起的扰动比模糊 PID 控制大，且从扰动到恢复稳态所用的时间较传统 PID 快，表明模糊 PID 控制的鲁棒性优于常规 PID 控制，因此模糊 PID 控制具有更好的动态品质和稳态性能。

5 控制系统的软件设计与测试结果

5.1 PLC 控制系统软件设计

在 PLC 中实现模糊 PID 算法的流程见图 5。程序设计重点是将已经设计好的模糊查询表保存在 PLC 存储区，然后使用现场采集和处理的数据对模糊控制表进行查表操作^[15]。将得到的 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d ，按照式(11)计算得到 K_p , K_i , K_d ，然后进行 PID 运算得到最终的输出控制量^[16]。

5.2 模糊控制表的 PLC 实现方法及其查询

模糊控制表容量为 7×7 点，所以在程序的设计过程中使用的 V 寄存器为 VB10~VB156，共 147 点。分别将模糊控制表中的各元素顺序存于相应的寄存器中， K_p , ΔK_i , ΔK_d 在 V 存储器中地址分别为：VB10—VB58，

VB59—VB107, VB108—VB156，具体的排列顺序见表 3。

表 3 查询表(ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d)

Tab.3 The query table

E	E_C					
	-3	-2	-1	...	2	3
-3	VB10/VB59/ VB108	VB11/VB60/ VB109	VB12/VB61/ VB110	...	VB15/VB64/ VB113	VB16/VB65/ VB114
-2	VB17/VB66/ VB115	VB18/VB67/ VB116	VB19/VB68/ VB117	...	VB22/VB71/ VB120	VB23/VB72/ VB121
...
3	VB52/VB101/ VB150	VB53/VB102/ VB151	VB54/VB103/ VB152	...	VB57/VB106/ VB155	VB58/VB107/ VB156

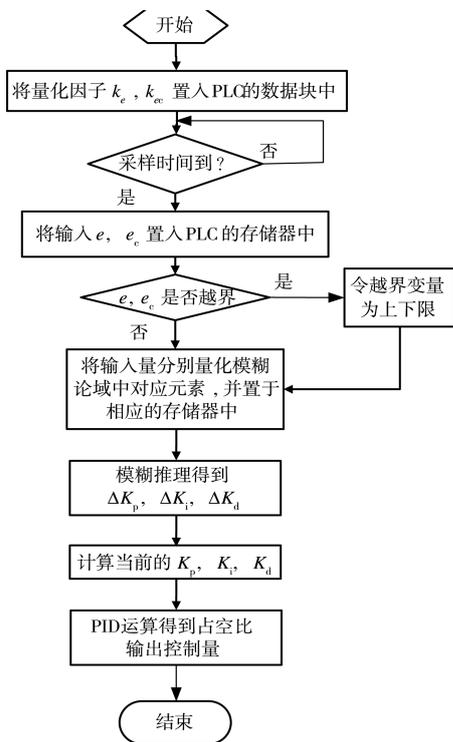


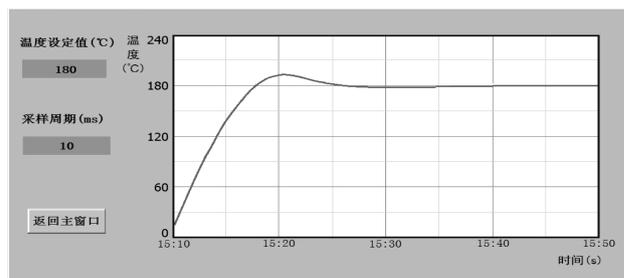
图 5 模糊 PID 算法流程

Fig.5 The flow chart of fuzzy PID algorithm

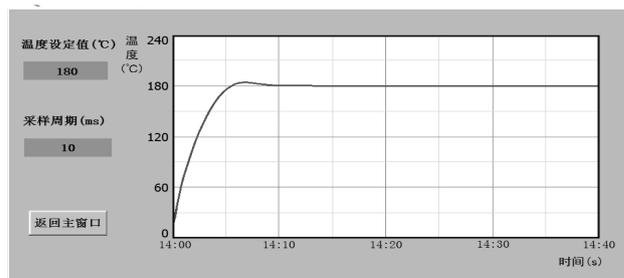
经过以上的计算过程，3 个变量模糊控制表的 7×7 总共 147 点，存储到了 VB10—VB156 寄存器中。根据误差 E 和误差变化率 E_C 模糊化 X_i 和 Y_j 的结果，找到对应的寄存器。

5.3 温度控制系统的测试结果

建立好整个温控系统后，运行整个系统进行测试。将热合装置温度的设定值设为 $180\text{ }^\circ\text{C}$ ，分别运用传统 PID 控制方式和模糊 PID 控制方式对温度进行控制，得到的实时温度曲线分别见图 6a 和 b。



a PID控制



b 模糊PID控制

图 6 PID 控制和模糊 PID 控制实时温度曲线

Fig.6 Real-time temperature curves of PID control and fuzzy PID control

从测试结果可以看出, 2 种控制方式最终都能使温度稳定在设定值, 稳定误差为 0。对比图 6a 和 b, 温度控制系统响应开始后, 模糊 PID 控制响应速度快于传统 PID 控制, 同时上升时间和调节时间均短于传统 PID 控制。说明模糊 PID 控制具有更好的动态品质。当温度达到设定的温度后, 传统 PID 控制产生的超调量明显大于模糊 PID 控制下的超调量, 同时传统 PID 从峰值回落到设定值的时间明显长于模糊 PID 控制, 说明模糊 PID 控制具有更好的稳态性能。测试结果表明, 较之于传统 PID 控制, 模糊 PID 控制具有更好的动态品质和稳态性能, 对于跟踪设定值滞后、实时性差和非线性的系统具有更好的控制效果。

6 结语

设计了一种基于模糊 PID 算法的温度控制系统, 很好地解决了热合装置在温控过程中实时性差, 时间滞后大等问题。在建立热合装置加热模型的基础上, 采用 Matlab 软件分别对传统 PID 控制和模糊 PID 控制进行仿真, 结果验证了模糊 PID 算法的优越性。将西门子 PLC 实现的模糊 PID 算法用于温控系统中, 检测结果表明设计的热合装置温控系统能够对温度进行快速调节, 能有效提高温度的控制精度, 具有很大的实际意义和应用前景。

参考文献:

- [1] 王龙, 曹恒, 陈诚, 等. PLC 控制的热封机温度控制系统开发与研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(1):7—10.
WANG Long, CAO Heng, CHEN Cheng, et al. Study on Temperature Control System of Heat Sealing Machine based on PLC[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(1):7—10.
- [2] 罗海波. PID 控制器设计与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(2):345—348.
LUO Hai-bo. Design and Simulation on PID Controller [J]. Computer Simulation, 2012, 29(2):345—348.
- [3] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum Settings for Automatic Controllers[J]. Trans ASME, 2006, 64:759—768.
- [4] 李泉, 宁芳青, 杨鹏, 等. 基于模糊 PID 的焦炉温度及优化控制[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(9):65—66.
LI Quan, NING Fang-qing, YANG Peng, et al. Research on Coke Oven Temperature System Based on GA Fuzzy PID Algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2015, 28(9):65—66.
- [5] 许成冰. 注橡机温度控制系统设计与实现[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [6] XU Cheng-bing. Design and Implementation of the Temperature Control System on Rubber Injection Molding Machine[D]. Changsha:Central South University, 2013.
王海青, 姬长英, 刘同召, 等. 模糊自整定 PID 温度控制系统的建模与仿真[J]. 计算机工程, 2012, 38(7):233—235.
WANG Hai-qing, JI Chang-ying, LIU Tong-zhao, et al. Modeling and Simulation of Fuzzy Self-tuning PID Temperature Control System[J]. Computer Engineering, 2012, 38(7):233—235.
- [7] 敖雯青, 王寿增, 张晋. 电阻式加热炉温控制数模模型研究[J]. 工业炉, 2012, 34(1):37—38.
AO Wen-qing, WANG Shou-zeng, ZHANG Jin. Study on Mathematical Model of Temperature Control of Resistance Furnace[J]. Industrial Furnaces, 2012, 34(1):37—38.
- [8] HA Q, NGUYEN Q, RYE D. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(1):38—46.
- [9] 张晓年. 线绕电阻器表面温升与功率关系的分析[J]. 中国电子商情:基础电子, 2012(3):70—71.
ZHANG Xiao-nian. The Analysis of Wirewound Resistors Surface Temperature and Power Relations[J]. China Electronic Market, 2012(3):70—71.
- [10] 马占有, 田俊忠, 马泽玲. 温度控制系统模糊自适应 PID 控制器仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10):160—163.
MA Zhan-you, TIAN Jun-zhong, MA Ze-ling. Emulation of Fuzzy PID Control in the Temperature Control System[J]. Computer Simulation, 2010, 27(10):160—163.
- [11] DU Chun-hua, CHEN Shao-ke, LIANG Xiao-ming. Application of Fuzzy Theory in Temperature Control System of Thermoforming Machine[J]. Procedia Engineering, 2011(15):639—643.
- [12] 吴渊. 基于模糊 PID 的循环水温度控制系统研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
WU Yuan. The Circulating Water Temperature Control System based on Fuzzy PID[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [13] AHN K K, TRUONG D Q. Online Tuning Fuzzy PID Controller Using Robust Extended Kalman Filter[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(6):1011—1023.
- [14] RADU-EMIL P, HANS H. A Survey on Industrial Applications of Fuzzy Control[J]. Computers in Industry, 2011, 62(3):213—226.
- [15] 张俊, 李明. 基于 PLC 的模糊控制器在定量包装秤中的应用[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5):110—112.
ZHANG Jun, LI Ming. Application of Quantitative Packaging Machine based on PLC Fuzzy Controller[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5):110—112.
- [16] 赵金, 刘洋. 基于模糊推理的专家自整定 PID 控制器[J]. 华中科技大学(自然科学版), 2010, 38(6):5—7.
ZHAO Jin, LIU Yang. Fuzzy Reasoning-based Expert Self-Tuning PID Controller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(6):5—7.