

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209982

基于模糊PID的供暖设备控制系统设计*

李泽豪 冯寿廷

(华南师范大学物理与电信工程学院 广州 510006)

摘要: 针对日前市场上销售的供暖设备安全性低、恒温调节缓慢且效果差、智能化程度低的问题,设计了一款基于模糊PID的供暖设备控制系统。该系统通过传感器阵列和功率调节模块,完成了对温湿度度的采集、智能交互控制功能。同时,系统利用模糊PID控制算法,实现了对环境温度的精准控制,并能对一些造成安全隐患的行为做出及时的预判和处理。经过MATLAB系统仿真和实际测试,该模糊PID控制系统可基本实现无超调,且震荡周期和调节时间较传统PID分别缩短了46%和25%,并兼具较高的鲁棒性。此外,系统还能出色地对各类安全隐患行为进行处理,较大地提升了供暖时的安全性,具有良好的市场前景。

关键词: 模糊PID;智能供暖设备;自动控制;传感器阵列

中图分类号: TP273;TU832 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Design of heating equipment control system based on fuzzy PID

Li Zehao Feng Shouting

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problems of low safety, slow thermostat adjustment, poor effect and low intelligence of the heating equipment currently on the market, a heating equipment control system based on fuzzy PID was designed. The system completes the acquisition of temperature and humidity as well as intelligent interactive control functions through sensor arrays and power adjustment modules. At the same time, the system uses the fuzzy PID control algorithm to achieve precise control of the ambient temperature, which can make timely prediction and processing of some behaviors that cause potential safety hazards. After MATLAB system simulation and actual test, the fuzzy PID control system can not only achieve no overshoot basically, but also have high robustness. When compared with the traditional PID, both the oscillation period and adjustment time are shortened by 46% and 25% respectively. In addition, the system can also handle all kinds of potential safety hazards well, which greatly improves the safety during heating and has a good market prospect.

Keywords: fuzzy PID; intelligent heating equipment; automatic control; sensor array

0 引言

供暖设备作为一种御寒取暖的工具,已被广泛运用于家庭、公共场所和生产车间等场所^[1]。以暖风机为代表的循环空气供暖设备,因其简单的生产过程和良好的供暖效果,在供暖设备中占据着重要地位,因而本文研究的控制系统将重点围绕该类型的供暖设备进行。众所周知,目前供暖设备普遍存在的安全隐患便是:当设备被其他易燃物品遮挡覆盖时不能自动停止运行,容易造成安全事故^[2]。

不仅如此,它们所采用的控制逻辑大都较为简单,如文献[3]利用继电器进行控制,电路系统虽简单,但恒温效果

较差;少数则使用PID算法来改进温度控制效果,如文献[4]加入了PID算法,但该PID算法是在特定环境下调试的,通用性较低,且缺乏一定的智能控制手段。现今无论哪一种控制逻辑,由于环境系统的大惯性和测量滞后的影响,供暖时都容易出现恒温调节缓慢、温度忽高忽低的现象。此外,传统供暖设备控制系统的单一传感器测量方法,会导致测量温度时存在空间局限性,进而影响PID控制效果,最终使得供暖舒适性下降。

针对以上的问题,本文设计了一款模糊控制与PID控制融合的供暖设备控制系统,使得PID的参数可根据当前环境温度及时调整。另外,系统借助传感器阵列技术,既能解决

收稿日期:2022-05-17

* 基金项目:广东省基础与应用基础研究基金(2019B1515120025)项目资助

单一传感器存在的空间局限性问题^[5],还能消除传统供暖设备存在的安全隐患和无人使用却持续运转的能源浪费。

1 硬件系统的设计方案

控制系统的硬件主要由 32 位 MCU 主控制器、传感器阵列和功率调节模块构成,如图 1 所示。

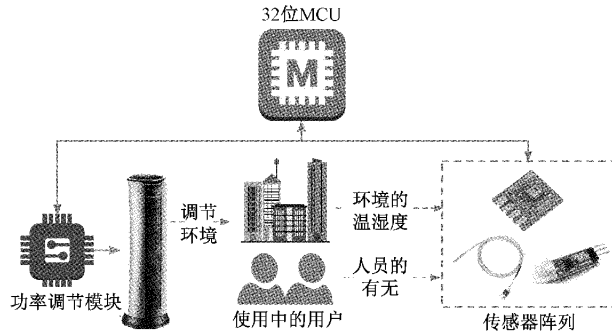


图 1 控制系统的构成框图

图中的 32 位 MCU 负责对采集到的数据进行分析处理,并根据当前的温度值与期望值的偏差,按照一定的模糊规则对 PID 的参数进行实时整定。整定后的参数值,通过 PWM 波的方式输出到可控硅构成的功率调节模块,进而线性调节交流电压的大小,从而改变金属发热管或 PTC 陶瓷发热片的热功率和供暖设备的风量,实现模糊 PID 控制供暖设备的功率的功能^[6]。

图中的传感器阵列由部署在不同位置的传感器模块构成,以便于实现多维度对人员有无的判断及空间整体温湿度的采集,有利于克服数据采集过程中的不稳定并减少误判的情况发生^[7]。得益于这些传感器采集的数据,系统便可实现“人走关机,人来启动”的节能减排与智能控制目的;

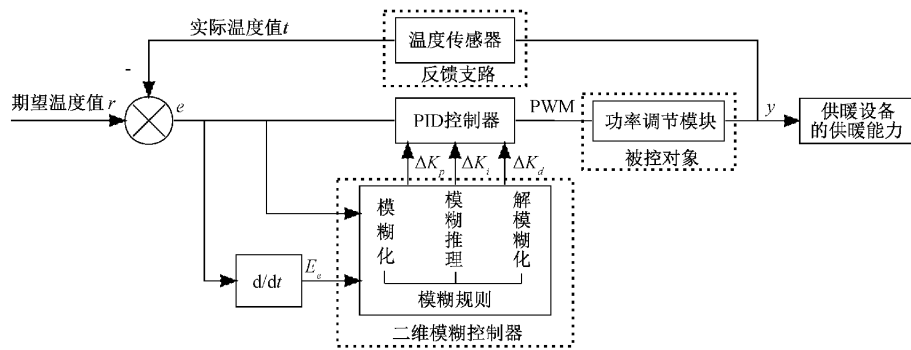


图 2 模糊 PID 温度控制器的原理

图 2 中的 e 为实际温度值 t 与期望温度值 r 的偏差,即 $e = r - t$; E_e 为偏差的变化率, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为 PID 控制器的三个参数的增量。二维模糊控制器将在偏差 e 及其变化率 E_e 的共同作用下,根据一定的模糊规则,完成对 PID 的 3 个参数自动整定功能^[8],以确保 PID 控制器能最优地调整供暖设备热功率和风量,从而改善供暖性能和效果。

并避免了因长期供暖使得环境干燥而对人体皮肤造成的伤害。各传感器的具体参数如表 1 所示。

表 1 传感器的参数

传感器型号与名称	分辨率	测量范围	功能	数量
K-01 型热电偶	—	0 °C ~ 600 °C	供暖设备内部温度的测量	1
AHT21B 温湿度传感器	0.024 %RH 0.01 °C	0 ~ 100 %RH -40 °C ~ +120 °C	环境温湿度的测量	4
HC-SR505 红外人体感应模块	—	0 ~ 5 m	人员有无的监测	4

2 模糊 PID 温度控制器的设计

2.1 传统 PID 温度控制器的不足

传统 PID 温度控制系统的 3 个参数 K_p, K_i, K_d , 往往是在特定环境下调试的最优结果。对于环境温度这类非线性的惯性系统而言,当供暖设备所处的环境改变时, PID 的输出将不再是最优解,使得 PID 控制效果下降,严重时会使温度反复跳变无法收敛。因此,在供暖设备控制系统中,有必要实现 PID 参数的自整定,本文利用的是模糊控制理论对传统 PID 温度控制器加以改进。

2.2 模糊 PID 温度控制器的原理

本文设计的模糊 PID 温度控制器主要由 PID 控制器、二维模糊控制器、被控对象和反馈支路构成,如图 2 所示。

2.3 模糊化

结合实际需要,将温度偏差 e 和偏差的变化率 E_e 的实际论域设定为 $[-9, 9]$; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的实际论域设定为 $[-0.3, 0.3], [-0.06, 0.06]$ 和 $[-2, 2]$ 。根据实际论域的模糊规则^[9],将 e 和 E_e 的模糊论域都选为 $[-9, 9]$,则它们的量化因子均为 1;而 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊论域都选为 $[-3, 3]$,则它们的比例因子分别为 0.1、0.183、0.67。

同时,该二维模糊控制器使用7个语言变量,以便能精确描述其模糊子集:NB[负大]、NM[负中]、NS[负小]、ZO[零]、PS[正小]、PM[正中]、PB[正大],因此二维模糊规则库中将有 $7 \times 7 \times 3 = 147$ 条规则。模糊论域上的模糊子集选用三角形函数作为隶属度函数^[10],在MATLAB中 e 和 E_e 的隶属度函数如图3所示。

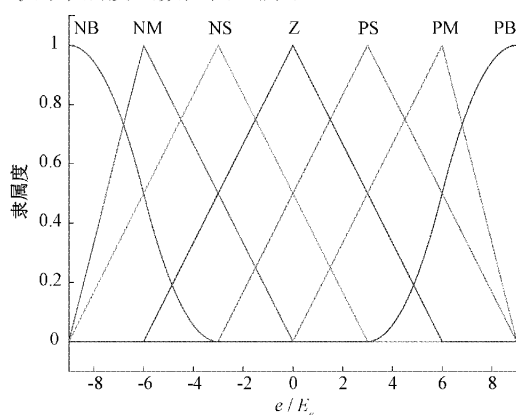


图3 模糊控制器中 e 和 E_e 的隶属度函数

2.4 模糊规则

模糊规则是进行模糊推理的基础,它直接决定了模糊控制器的控制性能。因此在制定模糊规则时,需要充分考虑二维模糊控制器的输入端的各种情况,按照一定的方法设计。具体的设计方法如下:

1) 比例项 K_p 反映的是系统的响应速度,为实现低温时(即偏差 e 较大时)快速供暖,在调节初期取较大的 K_p 以便于供暖区域的快速升温,而在中期取较小的 K_p 以减小或消除温度的超调,并在后期取较大的 K_p 以减小静态误差,提高控制精度^[11]。

2) 积分项 K_i 反映的是系统的稳态偏差,在调节初期取较小的 K_i 以防止积分饱和而产生较大的温度超调,而在中期取适中的 K_i 以免影响系统的稳定,并在后期取较大的 K_i 以减小静态误差使环境温度维持恒定^[12]。

3) 微分项 K_d 反映的是系统的动态特性,在调节初期取较大的 K_d 以减小或避免超调,而在中期取较小的 K_d 以维持调节特性,并在后期取微小的 K_d 以减小制动作用,补偿初期较大的 K_d 所带来的调节时间的增加^[13]。

按照以上方法,模糊PID控制器的参数增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的规则变化曲面如图4所示。

2.5 模糊推理

模糊推理是建立在隶属度函数和模糊规则的基础上,对二维输入变量 e 和 E_e ,求出输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的对应解的过程。本文采用“重心法”去实现模糊推理,即根据 e 和 E_e 的隶属度的值,在各输出变量的模糊规则表中,找到对应的输出解。具体的模糊规则如表2所示。

2.6 解模糊化

解模糊化是将求解后的模糊量,转换成精确量的过

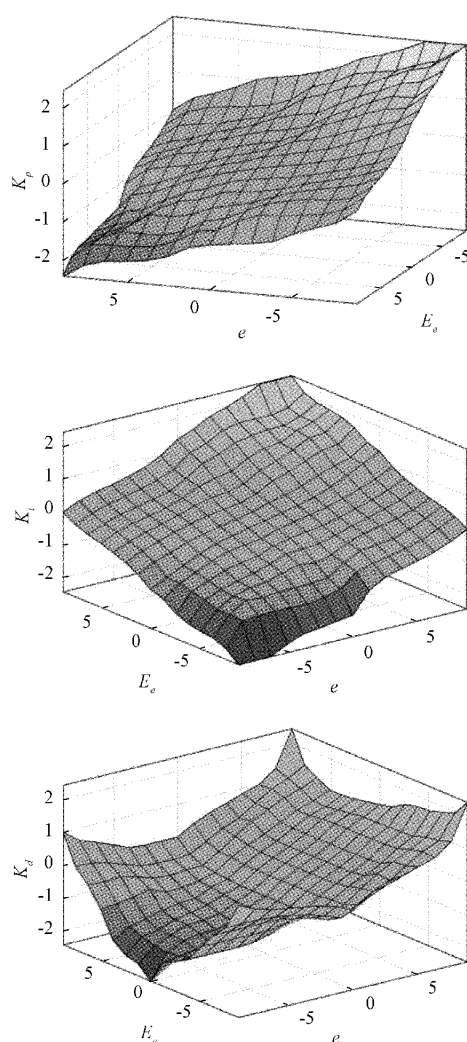


图4 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的变化曲面

程,其目的是为了得到最终的PID参数值。本文采用的是“线性加权法”来完成解模糊化^[14]。

$$\begin{cases} K'_p = K_p + \alpha \cdot \Delta K_p \\ K'_i = K_i + \beta \cdot \Delta K_i \\ K'_d = K_d + \gamma \cdot \Delta K_d \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为解模糊化后的PID参数的增量; α 、 β 、 γ 为加权系数,可根据实际情况进行调整,本文中取值均为1; K_p 、 K_i 、 K_d 为前一次解模糊化的PID参数值; K'_p 、 K'_i 、 K'_d 为本次模糊控制器输出的PID参数值。

3 软件系统的设计方案

系统的软件设计采用模块化的设计方法,即将系统的软件设计划分为各个子模块进行设计^[15],便于后续与维护与升级。各模块的具体设计如下:

3.1 传感器阵列的数据采集与处理

温湿度传感器和红外人体感应模块均位于用户所在的空间“前、后、左、右”的4个方位,以保证能够全方面地采

表 2 $\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ 的模糊规则表

ΔK_p ΔK_i ΔK_d	E_c						
	NB[负大]	NM[负中]	NS[负小]	ZO[零]	PS[正小]	PM[正中]	PB[正大]
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PB/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/ZE/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
e ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/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/PS/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

集到空间各个区域的温湿度值和人员的有无,如图 5 所示。

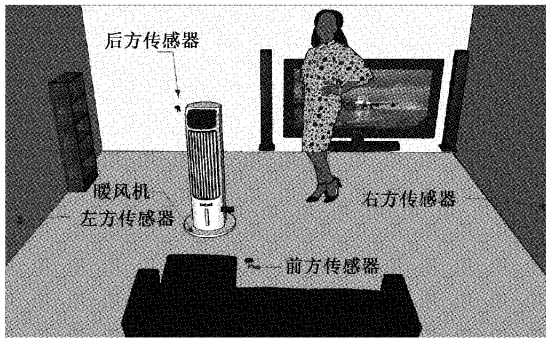


图 5 传感器阵列的三维空间方位图

由于环境系统属于大惯性系统,温度值不会发生突变。利用该特点,可将某些传感器因受外界干扰,导致测量异常的数据剔除,然后对剩余数据求算术平均值,得到总体的温度值。剔除时,应根据模糊集理论中的容许函数阈值来进行^[16],具体如下:

设某传感器在某一段时间内测得的数据分别为 x_1, x_2, \dots, x_n , 该时间段内传感器测量的算术平均值为

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

则传感器第 i 次测量值 x_i 到 y 的距离为

$$d_m = x_i - y \quad (3)$$

参考前人的数据,本文将容许函数 $R(x, y)$ 设定为一阈值函数^[17]。

$$R(x, y) = \begin{cases} 1, & |d_m| < 0.2y \\ 0, & |d_m| \geq 0.2y \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)可知,当测量值 x_i 与算术平均值 y 的距离小于 $0.2y$ 时,容许度较大,表明测量无异常,应予以保留;当测量值 x_i 与算术平均值 y 的距离大于等于 $0.2y$ 时,容许度较小,表明测量有异常,应予以剔除。

3.2 异常情况的处理

为确保系统能及时发现供暖设备被其他物品覆盖而引发危险的异常行为,本系统设定了一个最高优先级的异

常监视服务函数。当系统检测到供暖设备内部温度高于安全阈值时,将会自动关闭供暖设备,同时蜂鸣器将发出急促的警报声,从而提醒用户及时处理当前的危险情况,避免引发火灾等安全事故。

3.3 主程序的设计

该控制系统的主程序的流程如图 6 所示。

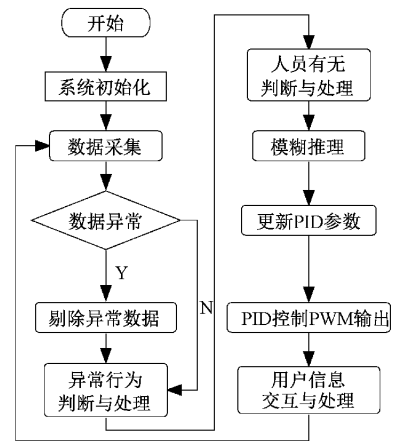


图 6 主程序流程

主程序首先需要完成上电后系统资源的初始化工作,然后循环执行数据采集与处理、异常行为及人员有无的监测、模糊 PID 控制等相关模块的子程序。

4 控制系统的仿真与测试

为了测试本文所设计的模糊 PID 算法的有效性,采用 MATLAB 自带的 Simulink 工具箱对系统进行建模仿真。同时,为了检测该模糊 PID 控制系统的实际效果,验证能否实现预期的功能^[18],本文对控制系统进行了实物测试。

4.1 模糊 PID 控制器的 Simulink 仿真

将模糊 PID 控制器的被控对象简化为一阶惯性加纯滞后的模型来描述,并使用 System Identification 工具箱来确定系统的传递函数,则该系统传递函数可简化为以下的数学模型^[19]:

$$G(s) = \frac{2.52}{837s + 1} e^{-64s} \quad (5)$$

在 Simulink 工具箱中搭建出模糊 PID 控制器和传统 PID 控制器的仿真模型,以便于比较两者的性能。同时,为了模拟供暖设备所处环境发生改变的情况,检验该模糊

PID 的鲁棒性与稳定性,在仿真后半段时间(90 min 后),加入随机噪声来模拟环境发生改变的情况。仿真模型的结构如图 7 所示。

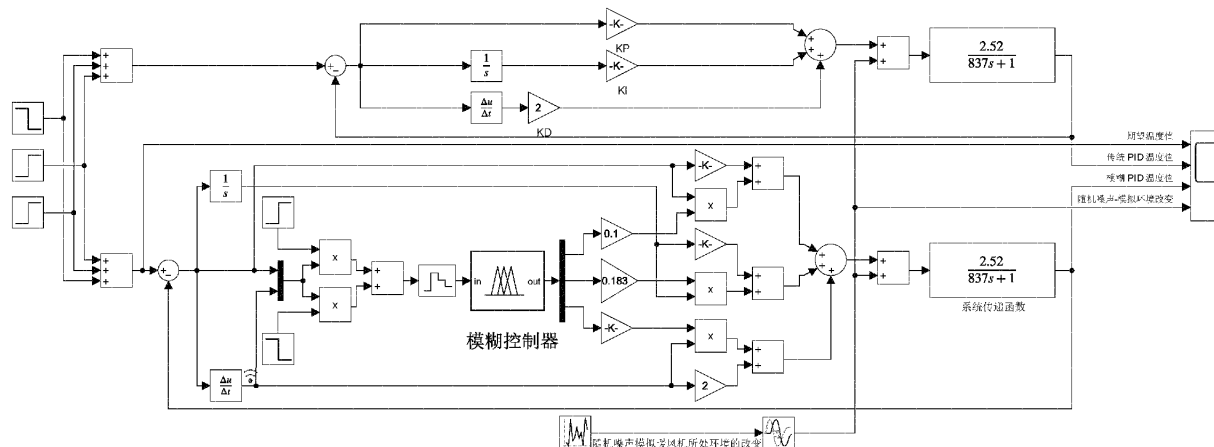


图 7 Simulink 仿真框图

为了不失一般性,仿真时采用“归一化”的思想对仿真数据进行处理,即:将实际温度值除以期望温度值得到归一化温度,并设初始温度温度为 0,期望温度为 1,得到图 8 所示的仿真结果图。

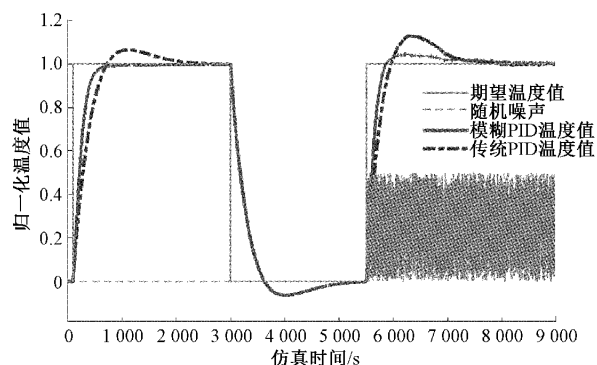


图 8 Simulink 仿真结果

由图 8 中可以看出,加入了二维模糊控制器后的 PID 算法,与传统供暖设备的 PID 算法相比,超调量更小、响应时间更短、收敛(调节)更快、鲁棒性更强,较大程度上改善了供暖设备的供暖性能和用户体验。

4.2 模糊 PID 控制器的实际测试

测试条件:初始温度为 20℃、面积约为 5 m² 的房间、温度测量采用 ATH21B 温湿度传感器、供暖设备采用最大功率为 2 200 W 的暖风机。

开启供暖设备和控制系统,并将目标温度设定为 28℃。分别测试继电器简单控制、传统 PID 控制、模糊 PID 控制共 3 类系统的控制效果,并用 MATLAB 对测试的数据进行拟合,拟合后的曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出,模糊 PID 温控系统在完成快速供暖的同时,基本实现了无超调,而继电器控制和传统 PID 控制均出现了温度忽高忽低的情况。同时,该系统震荡周期

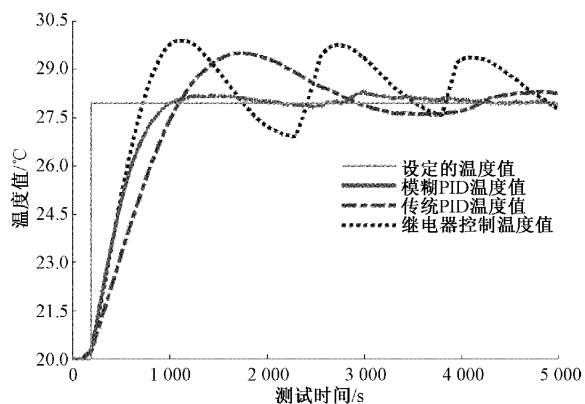


图 9 实际测试结果

较传统 PID 缩短约 46%,调节时间缩短约 25%,优势明显。

4.3 异常情况的实物测试

将衣服、毛巾、纸箱和木板依次覆盖住供暖设备的出风口,来模拟用户不慎发生危险行为的情况。为了避免实验结果的偶然性,本文对每一种异常情况均进行了 10 次测试,测试结果如表 3 所示。

表 3 异常情况下控制系统的处理结果

异常情况类型	10 次测试中能自动关闭供暖设备的次数	关闭时供暖设备出风口的温度/℃
被衣服覆盖	10	85
被毛巾覆盖	10	86
被纸箱覆盖	10	83
被木板覆盖	10	82

由表 3 可以看出,本控制系统均能在各异常情况下自动关闭供暖设备,并发出报警提示用户。不仅如此,供暖

设备在监测到异常并予以处理后,供暖设备出风口的温度仍处于 100℃ 以下,远低于绝大多数物品的燃点,可从根本上杜绝火灾事故的发生,达到了安全供暖的目的。

5 结 论

本文针对传统供暖设备存在的问题,设计了一款基于模糊 PID 的供暖设备控制系统。该系统借助传感器阵列技术完成数据采集,并将二维模糊控制器与 PID 控制器有机结合,有效地解决了传统供暖设备无法自整定 PID 参数和供暖效果不理想的问题。测试数据表明,该控制系统比继电器控制系统和传统 PID 控制系统的供暖效果更好,并能广泛应用在家庭、商场、生产车间的供暖设备上,有一定的推广价值。不过,由于模糊化的设计与模糊规则的制定常根据人工经验,存在着部分局限。后期可将遗传算法或将 BP 神经网络与模糊 PID 控制器结合,以此搭建出更智能的供暖设备控制系统,进一步提升系统整体的性能。

参考文献

- [1] 张光明. 智能化供暖设备设计[D]. 天津:天津科技大学,2017:1-16.
- [2] 林玲.“小太阳”取暖器温暖过冬需谨慎[J]. 福建质量技术监督,2015(12):37-38.
- [3] 李仁明. 电动汽车 PTC 加热器控制改进[J]. 汽车电器,2019(12):17-20.
- [4] SUPRIVO B, DADI, WARJONO S, et al. PID based air heater controller implemented with Matlab/simulink and arduino uno[C]. International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering(ICITACEE),2018 5th, 2018:28-32.
- [5] 吴思楠. 基于物联网的智能家居控制系统设计与实现[D]. 扬州:扬州大学,2016:1-2.
- [6] 张涵,刘铁军,刘波,等. 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(11):215-222.
- [7] 闫转红,王伟. 基于气体传感器阵列的苹果甜度识别技术研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(10):71-76.
- [8] SHI D Q, GAO G L, GAO Z W, et al. Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace [J]. Procedia Engineering, 2012, 29(4):257-261.
- [9] 徐托,瞿少成,王安,等. 基于模糊 PID 的室内空气质量管理测控系统[J]. 电子测量技术,2022:1-6.
- [10] 高建思,王贵君,孙刚. 基于三角形隶属函数输入的 Mamdani 模糊系统的混沌遗传算法[J]. 东北师大学报(自然科学版),2019(1):13-17.
- [11] KRISHNA S, VASU S. Fuzzy PID based adaptive control on industrial robot system [J]. Materials Today: Proceedings,2018,5(5):13055-13060.
- [12] 韦宏利,周建波,王晴悦,等. 基于模糊 PID 的温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(9):119-124.
- [13] 沈跃杰,行鸿彦,王水璋. 基于粒子群优化的串级模糊 PID 无人机飞行控制系统[J]. 电子测量技术,2022,45(1):96-103.
- [14] 宋璐,卫亚博,冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设计与仿真[J]. 电子设计工程,2020(15):57-61.
- [15] 宋阳柳,易艺,郝建卫,等. 基于 STM32 的中央空调温度控制器的设计[J]. 国外电子测量技术,2018,28(21):125-128.
- [16] 张凯,陈令芳,张恒,等. 基于 STM32 的冷链物流监测系统的设计[J]. 现代电子技术,2018,41(4):23-26.
- [17] 李时辉. 数据融合技术在水果冷链物流监测中的应用[J]. 物流技术,2014(5):427-429.
- [18] 崔玉国,刘尔春,杨依领,等. 基于改进 PID 的压电微定位平台反馈控制[J]. 仪器仪表学报,2018,39(6):215-223.
- [19] CHEN J W, HE Z J, SONG J C, et al. Simulation of fuzzy self-turning PID control based on simulink[C]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 52-54:1644-1649.

作者简介

李泽豪,学士学位,主要研究方向为嵌入式系统。

E-mail:20192333035@m.scnu.edu.cn

冯寿廷(通信作者),博士,主要研究方向为运动控制、机器视觉、嵌入式系统。

E-mail:fst@scnu.edu.cn