

基于模糊 PID 控制的窖池温度监控设计

The environment monitoring system of cellar based on fuzzy PID control

罗 一 石 艳

LUO Yi SHI Yan

(四川轻化工大学, 四川 宜宾 644000)

(Sichuan University of Science and Engineering, Yibing, Sichuan 644000, China)

摘要:目的: 解决白酒入窖温度控制不精确的问题。方法: 基于嵌入式平台构建了用于窖池参数集结的 ZigBee 无线传感器网络, 通过 NB-IOT 与云平台实现窖池环境数据的传输、存储与显示, 以酒醅表面温度为控制对象, 运用模糊 PID 控制算法, 实时优化输出参数 K_p , K_i , K_d , 实现窖池温度的精准控制。最后验证温度控制系统的性能。结果: 模糊 PID 控制算法测定温度与设定温度最大偏差为 0.25 °C, 超调量为 1.6%, 通过人工测量数据与监控系统采集数据对比误差在 5% 以内。结论: 采用模糊 PID 控制策略可快速准确地控制入窖温度。

关键词: STM32; 温度监控; 模糊 PID 控制; 监控系统

Abstract: **Objective:** Solve the problem of inaccurate temperature control of liquor entering the cellar. **Methods:** Based on the embedded platform, a ZigBee wireless sensor network for cellar parameter aggregation is constructed. The cellar environmental data transmission, storage and display were realized through NB-IOT and cloud platform. Algorithm, real-time optimization of output parameters K_p , K_i , K_d , to achieve precise control of cellar temperature. Finally verify the performance of the temperature control system. **Results:** The maximum deviation between the measured temperature and the set temperature by the fuzzy PID control algorithm is 0.25 °C, the overshoot is 1.6%, and the error is within 5% by comparing the manual measurement data with the data collected by the monitoring system. **Conclusion:** The temperature of entering the cellar can be controlled quickly and accurately by using the fuzzy PID control strategy.

Keywords: STM32; temperature monitoring; fuzzy PID control; monitoring system

基金项目: 四川省科技厅科技计划项目(编号: 2020YFSY0036); 宜宾市科技计划项目(编号: 2021GY011)

作者简介: 罗一, 男, 四川轻化工大学在读硕士研究生。

通信作者: 石艳(1971—), 女, 四川轻化工大学教授, 博士。

E-mail: sy71Email@163.com

收稿日期: 2022-04-06 **改回日期:** 2022-06-28

入窖发酵是白酒酿造的重要工序, 窖池环境中发酵温度、发酵时间、酒醅温度、酒醅含水量、酒醅物性黏度和环境温度等因素直接影响酒醅微生物的种类和菌群数量^[1], 其中酒醅温度对发酵过程影响最为显著, 是确保酒醅稳定性的决定性因素。在不破坏酒醅密闭性的情况下, 对于酒醅内部温度的估计, 取决于入窖前的初始条件, 但是酒醅表面温度可人工控制。通过对窖池温度进行实时监控, 可得到适宜的酒醅表面温度, 有利于微生物的正常繁殖代谢, 对白酒品质的稳定与提高起着关键作用。众多学者对窖池温度监控技术进行了积极的探索研究。凌鹏鹏等^[2]采用 ZigBee 和 RS485 技术在线检测窖池温度, 解决了人工采样破坏窖池密闭性问题, 但没有做到数据的无线传输, 在有线传输布置困难的场景中无法应用。刘刚^[3]使用无线射频芯片 SI4463 和微处理器 STM32, 设计了一套酿酒房温湿度监测系统, 达到了通过上位机软件监测整个系统的目的, 但是人机交互界面的人性化需进一步提高。Sainz 等^[4]提出了一种用于葡萄酒发酵过程的温度控制系统, 但对温度控制的时间和精确度没有研究。

研究拟设计一种基于模糊 PID 技术的窖池温度监控系统, 应用单片机与传感器技术采集发酵环境参数, 通过 ZigBee 自组网和 NB-IOT 通信模块实现参数无线传输, 最后基于 B/S 架构的云平台实现数据接口与可视化, 并驱动工业空调运用模糊 PID 算法实现对酒醅表面温度的精确控制。

1 温度控制设计

1.1 控制原理

在发酵过程中会产生酒精和大量的二氧化碳, 通过测量二氧化碳浓度可估计发酵进度^[5], 进而掌握每个发酵阶段酒醅所需的最佳温度。以浓香型白酒为例, 在入窖阶段, 酒醅温度讲究“前缓, 中挺, 后缓落”的趋势, 低温前入窖有利于酒醅温度的缓慢上升, 防止酒醅中杂菌生长过快, 何朝玖等^[6]研究表明入窖温度控制在 21~22 °C

时,出酒率和酒品均得到了提高。

在实际酿酒过程中,入窖前的酒醅温度大多高于 22 ℃,大多数企业采用冷风摊凉设备来对酒醅进行降温,然而这种设备只能控制风速大小,对于送风的温度无法调节,因此使用工业空调对酒醅进行温度控制。

1.2 算法设计

由于温度具有滞后性和非线性特点,并且容易受到其他因素的影响,因此采用在温度控制领域具有代表性的模糊 PID 算法。

1.2.1 PID 的窖池温度控制流程 将模糊控制算法与 PID 控制算法进行结合即为模糊 PID。模糊控制系统主要由模糊化、模糊推理和清晰化 3 个部分构成。图 1 为模糊 PID 控制结构图,由于模糊 PID 不需要控制精确的数学模型而是通过实时测量的温度值与设置温度的差值作为控制量的大小,因此输入不同的控制对象均能得到最佳的 PID 调整^[7]。在 PID 的窖池温度控制模型中,设 $R(k)$ 为酒醅的理想温度值,如 21.5 ℃, $T(k)$ 为传感器获取的酒醅温度初始值 18 ℃,当 $R(k) \neq T(k)$ 时,系统准备进行模糊 PID 计算。

1.2.2 模糊 PID 设计的可用性

(1) 模糊化设计:模糊 PID 控制器以设定温度 $R(k)$ 和传感器获取的反馈温度 $T(k)$ 之间的误差 e 以及误差相对时间的变化率 e_c 作为模糊化的输入量,其中 $e = R(k) - T(k)$, $e_c = de/dt$;以最佳入窖温度 21 ℃ 为例,将酒醅表面温度控制为 15~27 ℃,温度误差 $e \in [-6, 6]$ ℃, $e_c \in [-3, 3]$ ℃。将输出量参数 K_p, K_i, K_d 设定 7 个模糊子集:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。将这些模糊子集量化为论域:

$K_p, K_i, K_d = \{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$ 。(1)

考虑到算法的简便和实用性,选择用三角形隶属度函数作为输入和输出变量的模糊隶属度函数对其进行模糊化处理即确定隶属度函数^[8]。

(2) 模糊推理:根据模糊规则表求取输出值的隶属度。根据文献^[9]建立 K_p, K_i, K_d 的模糊规则表,如表 1~表 3 所示。

K_p, K_i, K_d 调教参数控制曲面如图 2~图 4 所示。

(3) 清晰化:重心法能够全面考虑模糊量的有关信

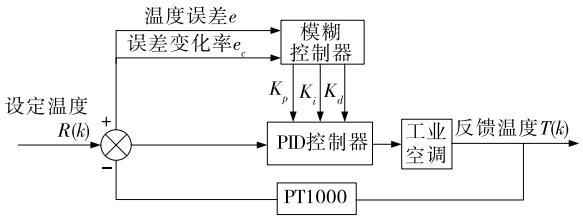


图 1 模糊 PID 控制结构图
Figure 1 Fuzzy PID control structure diagram

表 1 K_p 模糊规则表
Table 1 K_p fuzzy rule table

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NS	NM
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO

表 2 K_i 模糊规则表
Table 2 K_i fuzzy rule table

e	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	NB	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	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 模糊规则表
Table 3 K_d fuzzy rule table

e	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

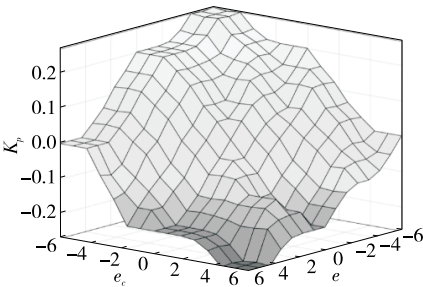
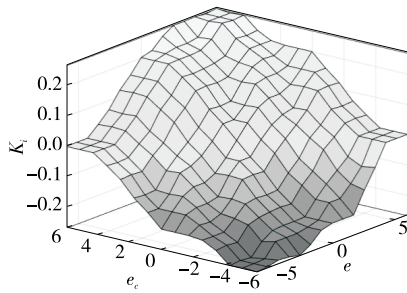
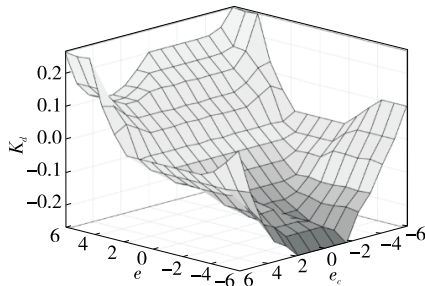


图 2 K_p 系数调参控制曲面图
Figure 2 K_p coefficient parameter adjustment control surface diagram

图3 K_i 系数调参控制曲面图Figure 3 K_i coefficient parameter adjustment control surface diagram图4 K_d 系数调参控制曲面图Figure 4 K_d coefficient parameter adjustment control surface diagram

息,并反映输出的模糊推理结果,且执行运算较容易,因此选取重心法来解模糊^[10]。

1.3 系统总体架构

窖池温度控制系统分为3层,各层的功能见图5。

1.3.1 采集层 该层负责窖池中参数的采集工作。该层的主要任务是由 PT1000 和 MG812 分别获取窖池的温度和二氧化碳浓度数值,采用 STM32F103C8T6 作为主控

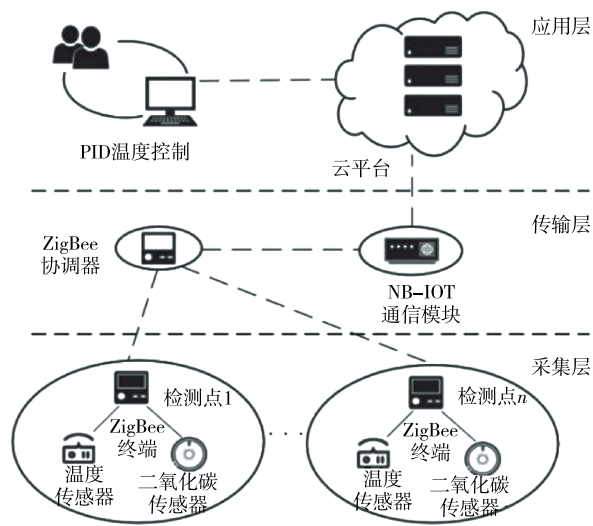


图5 系统总体结构图

Figure 5 Overall system structure drawing

核心来处理获取的数值。

1.3.2 传输层 系统中参数的传输主要是由 ZigBee 和 NB-IOT 来完成,其中 ZigBee 终端节点在主动扫描协调器后并通过使用 CC2530 为主控的 ZigBee 组网将采集到的参数集结到 ZigBee 协调器节点,最后再通过 NB-IOT 通讯模块与云平台进行无线通讯。

1.3.3 应用层 该层主要是将窖池温度监控系统部署在云平台,可显示温度和二氧化碳的实时数值,对所获温度进行分析与控制。

2 具体实施方案

系统单片机通过 RS485 协议发出脉冲频率来控制工业空调压缩机的电机转速,进而对窖池进行温度控制,功率为 3 000 W。发酵车间分布有 20 个窖池,窖池由多个砖块堆砌而成,每个窖池尺寸为 $2\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$,相邻窖池间的距离为 0.2 m。为了避免多个传感器因数据采集信号存在噪声和信号相互影响,在每个窖池先设置 1 个测量点来获取入窖温度,测量时将安装温度传感器的测量杆底部插入酒醅中来获取酒醅的表面温度,在杆的中部绑定二氧化碳传感器来获取二氧化碳浓度。

2.1 基于嵌入式的参数采集与传输

整个嵌入式系统主要包括 STM32 单片机、PT1000 温度传感器、MG812 二氧化碳浓度传感器、ZigBee 模块和 NB-IOT 模块。传感器用于窖池环境的参数采集,ZigBee 模块用于数据的集结,NB-IOT 模块负责对云平台完成数据上传的任务。系统硬件结构如图 6 所示。

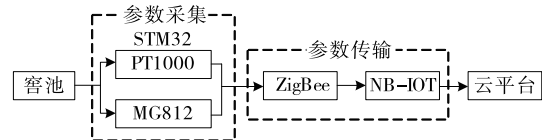


图6 嵌入式系统结构图

Figure 6 Embedded system structure diagram

采集的对象为入窖阶段中温度和二氧化碳浓度。采用 PT1000 采集窖池温度形成闭环控制空调的输出功率,通过 ADC 引脚进行采集,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量范围最高可达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足发酵过程的测温。它的探头采用不锈钢材质,稳定性好并且耐腐蚀,完全满足窖池在发酵工序下的温度采集;采用 MG812 采集 CO_2 浓度,其测量范围为 $0 \sim 10\,000\text{ mg/m}^3$,可精确测量窖池中 CO_2 浓度。

2.1.1 基于 ZigBee 的参数集结 为了方便优化系统,选择基于 TI 芯片 CC2530 的 ZigBee 进行模块化设计,构建了用于窖池参数集结的 ZigBee 无线传感器网络。它具有体积小、功耗低、可自组网等特点^[11],对于未覆盖移动网络的酿酒厂区,可对信息监测作出补充。ZigBee 底层采用直扩技术,网络的覆盖范围可以扩展很大,终端节点个数在理论上可达到 65 535 个,适用于多个窖池的无线数

据集结。所设计的系统利用终端节点获取传感器数据,然后通过自组网将数据传给协调器完成集结,ZigBee 核心板原理图如图 7 所示。

2.1.2 基于 NB-IOT 的参数上传 NB-IOT 是一种窄带物联网通信方式,采用一站式传输平台,对于采集到的窖池环境参数无需进行数据中转,可以实现快速部署 MQTT(消息队列遥测传输)协议,实现数据实时、稳定、

安全地接入云平台,解决多个窖池环境数据分散的问题。

系统采用的 NB-IOT 模块是联发科基于 MT2625 芯片平台研发的 BC26,具有多种工作模式,在无数据收发且达到一定时间时可由 Active 模式自动切换为 Idle 模式,降低能耗,延长续航,选用 2 000 mA 容量的锂电池,使用寿命可超过 4 年,符合实际生产要求。解决了通信设备续航要求比较高的问题。

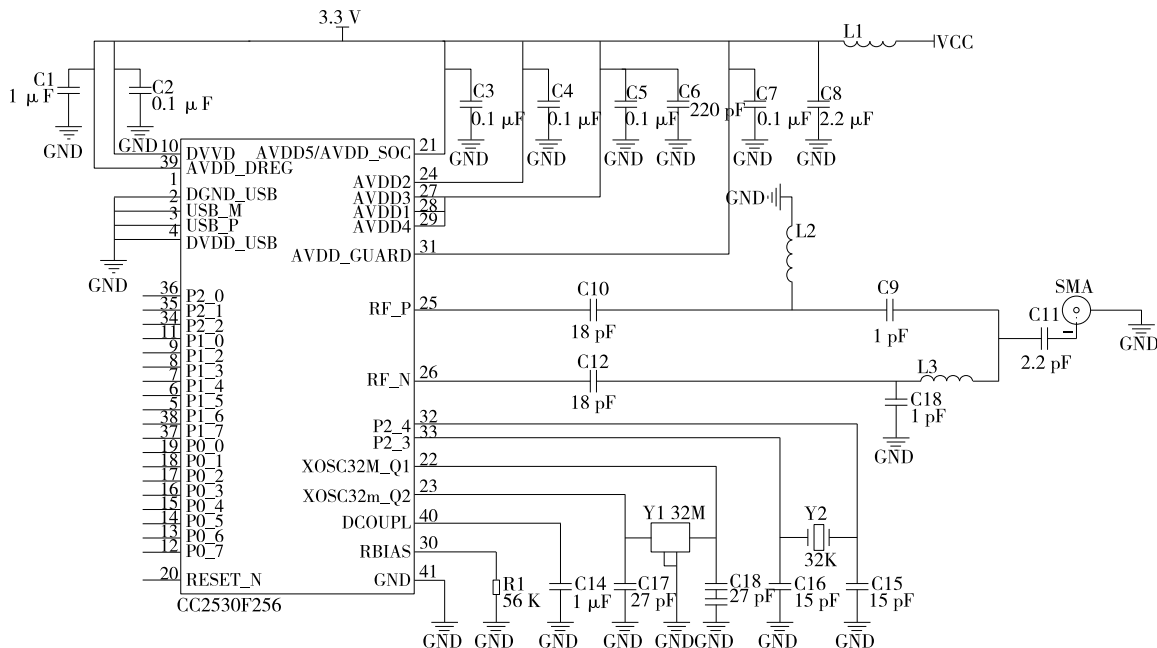


图 7 ZigBee 最小系统主板原理图

Figure 7 ZigBee minimum system motherboard schematic diagram

2.2 基于云平台的数据显示

为了保证数据的实时性、监测数据的长期存储性以及其远程传输的特点,利用云平台对上传的监测数据进行统一管理。云平台强大的数据存储与计算能力,可对数据进行实时接收、存储和提取。传感器采集的数据可以安全可靠的以 MQTT 协议与云平台建立数据通讯。基于 STM32 嵌入式平台,完成对三元组信息程序的定义和云平台相应参数的初始化,基于 NB-IOT 通信模块完成与云平台收发数据测试功能的检验,通过 NB-IOT 通信模块向云平台发送“CONNECT”和“SUBSCRIBE”形式的报文,得到对应的反馈信息,完成设备对云平台的接入,接入流程图如图 8 所示。

3 验证实验

为有效控制酒醅入窖温度,选择宜宾某酒厂的发酵车间进行测试,选取窖池 1 为测试窖池,图 9 为窖池监控示意图。

3.1 设计运行试验

图 10 为窖池温度监控的主界面,工作人员在通过对

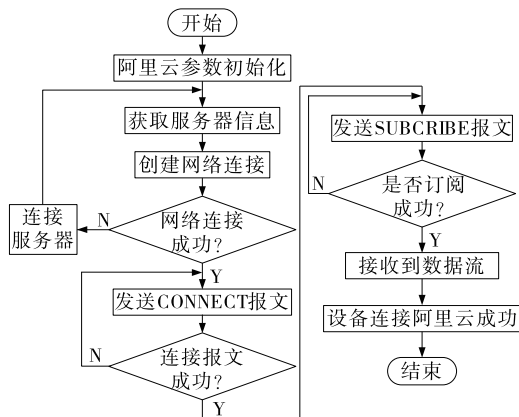


图 8 云平台接入流程

Figure 8 Cloud platform access process

应的账号和密码登录后可以远程查看该系统相关生产信息,包括窖池环境的实时数据、执行装置的工作状态和报警状态。在实际运行测试中,PT1000 和 MG812 每 2 s 上报一次参数,经过发酵前期大约周期为 4 d 的不断电测试,系统各项功能正常运行,且稳定。

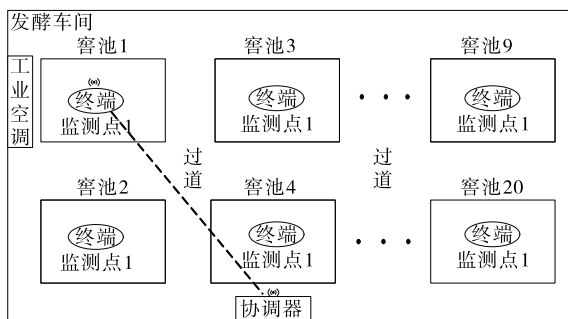


图 9 窖池监控示意图

Figure 9 Schematic diagram of cellar monitoring



图 10 窖池环境监控平台

Figure 10 Cellar environment monitoring platform

3.2 模糊 PID 温控试验

为了验证系统能准确快速的控制温度,先对系统进行基于 Matlab 的 Simulink 仿真试验,图 11 为模糊 PID 控制系统仿真模型,建立传递函数,选用纯滞后的一阶惯性环节模型对系统识别^[12],其数学模型为:

$$G(s) = \frac{1}{12.5s+1} e^{-s}, \quad (3)$$

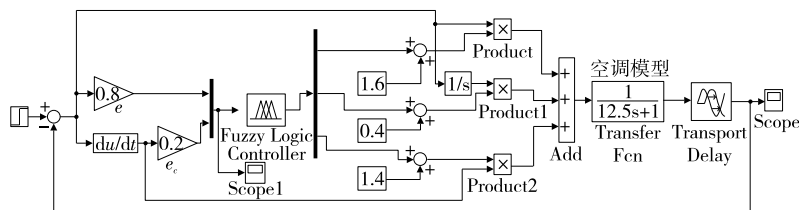


图 11 模糊 PID 控制系统仿真模型

Figure 11 Simulation model of fuzzy PID control system

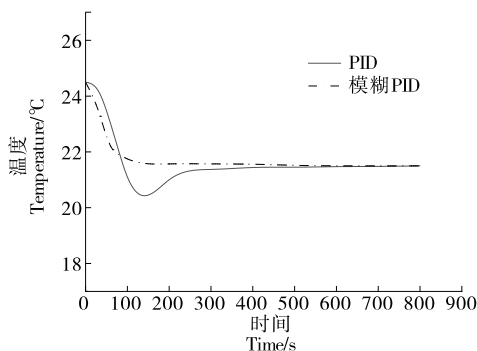


图 12 温度控制仿真结果图

Figure 12 Temperature control simulation result diagram

式中:

$G(s)$ ——传递函数;

s ——传递函数中的变量符号。

将代码移植到嵌入式系统中,对酒醅表面进行控温并达到稳定值后,提取控温时间和温度值并保存。

试验开始时窖池温度约为 24.5 °C,设定的目标温度为 21.5 °C,得到的 PID 控制和模糊 PID 控制仿真结果如图 12 所示,从窖池初始温度达到目标温度 21.5 °C 中,PID 控制方案下超出目标温度约 0.8 °C,超调量比较大;模糊 PID 控制达到 21.5 °C 后,温度波动很微小,并且保持稳定状态,所用的时间也明显变短,结果表明模糊 PID 控制窖池温度超调量更小且更稳定。

4 对比试验

试验采用相同的窖池,窖池环境因素均相同,设置温度目标值为 21.5 °C,初始窖池温度为 30 °C,每隔 30 s 记录下当前温度,当系统运行到 180 s 时,在测试点旁使用暖风机进行干扰,干扰时间为 40 s,试验数据图形如图 13,PID 控制方案下约 180 s 达到设定温度值 21.5 °C,超调量为 5.1%;模糊 PID 达到 21.5 °C 所用调节时间为 150 s,超调量为 1.6%。在加入暖风机干扰后,模糊 PID 相较 PID 控制调节时间节约 90 s。模糊 PID 控制方案下到达设定温度时间更短,稳定性更高,抗干扰能力更强。

根据云平台提供的温度和二氧化碳浓度的历史数据与通过人工现场测量的数据来看,误差在可接受的范围内。表 4 为入窖阶段终端节点 1 部分云平台显示的参数与人工测量的参数进行对比发现误差不超过 5%。

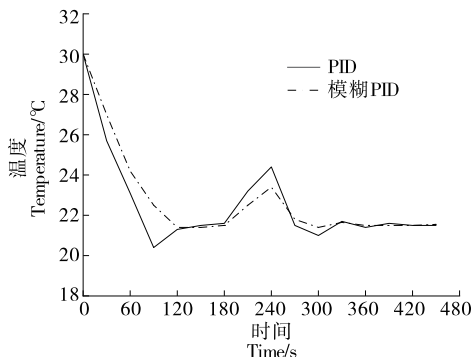


图 13 对比试验

Figure 13 Comparative test

表 4 监测点 1 部分参数对比表
Table 5 Comparison table of some parameters
in monitoring

控温时 间/s	二氧化碳/ %	温度/℃	人工测量 温度/℃	温度相对 误差/%
30	13	23.5	23.1	1.7
60	13	22.2	22.0	0.9
80	14	21.9	21.2	3.3
100	14	21.7	21.7	0.2
200	14	21.5	21.3	0.9
300	14	21.5	21.6	0.4

5 结论

酒醅的入窖温度在白酒发酵过程中十分重要,因此建立了一种模糊 PID 温度控制设计系统,经过运行试验,完成了基于嵌入式设计的数据采集、传输与显示,设计运行平稳。与经典 PID 控制相比,模糊 PID 温控对于具有非线性和滞后性的温度控制更具优势,模糊 PID 控制超调量更小,控制精度更高,抗干扰能力强,控温速度快,温度达到 21.5℃ 相比 PID 控制节约了 90 s。综上,采用模糊 PID 控制策略可快速准确控制入窖温度,提高白酒质量。

参考文献

[1] 王耀, 张贵宇, 庾先国, 等. 数字孪生技术在白酒酿造行业的应用前景[J]. 食品工业, 2021, 42(10): 271-275.
WANG Y, ZHANG G Y, TUO X G, et al. The application prospect of digital twin technology in liquor brewing industry [J]. Food Industry, 2021, 42(10): 271-275.

[2] 凌鹏鹏, 肖无病, 沙文. 高浓度酒精环境的窖池在线监测系统[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 107-109.
LING P P, XIAO W B, SHA W. On-line monitoring system of cellar in high concentration alcohol environment [J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(7): 107-109.

[3] 刘刚. 酿酒监控系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 57.
LIU G. Design and implementation of brewing monitoring system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 57.

[4] SAINZ B, ANTOLÍN J, LÓPEZ-CORONADO M, et al. A novel low-cost sensor prototype for monitoring temperature during wine fermentation in tanks[J]. Sensors, 2013, 13(3): 2 848-2 861.

[5] 高畅. 葡萄酒酒精发酵过程二氧化碳浓度变化规律研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2000: 24-27.
GAO C. Study on the change law of carbon dioxide concentration during wine alcohol fermentation [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2000: 24-27.

[6] 何朝玖, 卫春会, 龙安, 等. 利用冷风摊凉控制酒醅入窖温度对浓香型白酒发酵的影响研究[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2021, 34(1): 23-28.
HE C J, WEI C H, LONG A, et al. Study on the effect of controlling the temperature of fermented grains entering the cellar with cold air on the fermentation of Luzhou-flavor liquor[J]. Journal of Sichuan University of Light Chemical Industry (Natural Science Edition), 2021, 34(1): 23-28.

[7] 陈忠华. 基于自适应遗传算法的模糊控制器优化设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011: 19-21.
CHEN Z H. Optimal design of fuzzy controller based on adaptive genetic algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2011: 19-21.

[8] 聂乐乐, 李丽娟, 王劲松, 等. 基于 Labview 的模糊 PID 温度控制系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(4): 58-60.
NIE L L, LI L J, WANG J S, et al. Fuzzy PID temperature control system based on Labview[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(4): 58-60.

[9] 黄平, 王英, 江先志. 基于 STM32 的直流电机模糊 PID 调速系统研究[J]. 机电工程, 2017, 34(4): 380-385.
HUANG P, WANG Y, JIANG X Z. Research on fuzzy PID speed regulation system of DC motor based on STM32[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2017, 34(4): 380-385.

[10] 张晓群. 基于 Fuzzy-PID 智能车舵机控制系统[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(2): 301-304.
ZHANG X Q. Control system of intelligent car steering gear based on Fuzzy-PID[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2011, 43(2): 301-304.

[11] 张璐璐, 孔国利. 基于 DSP 和 ZigBee 的农田灌溉水质监测控制系统设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 229-232, 237.
ZHANG L L, KONG G L. Design of farmland irrigation water quality monitoring and control system based on DSP and ZigBee [J]. Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 229-232, 237.

[12] 侯强, 徐颖, 田思庆. 基于模糊 PID 的豆粉喷雾干燥塔监控系统设计[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 108-112.
HOU Q, XU Y, TIAN S Q. Design of monitoring system for soybean flour spray drying tower based on fuzzy PID[J]. Food and Machinery, 2019, 35(12): 108-112.

本栏目主持

中国食品科学技术学会
食品装备与智能制造分会