

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210273

温室大棚环境动态测控系统研制*

任 壮¹ 汪 军² 孔 超² 李文睿¹

(1.安徽工程大学电气工程学院 芜湖 241000; 2.安徽工程大学计算机与信息学院 芜湖 241000)

摘要: 针对大棚环境测控系统在大面积应用时检测及路由节点过多,环境波动大的问题,利用巡检车和 LoRa 远距离传输网络设计了大棚环境测控系统,通过定点与移动采集相结合的方式,减少节点的数量;系统对环境进行调节时先判断作物的生长阶段,再由 Fuzzy-PID 算法进行动态调控,使环境始终保持在最适宜的状态,进而使农作物优质、高产。为验证本系统的优越性,以温度控制为例,利用 MATLAB 构建仿真模型,与传统 PID 控制相比,超调量降低 15.3%,调节时间降低 21%。田间实验结果表明,与开关量控制和传统 PID 控制相比,该系统控制精度更高,环境波动小,能有效使棚内环境保持稳定。

关键词: 大棚环境;LoRa;巡检车;模糊 PID

中图分类号: TP273+.4;S24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Development of dynamic measurement and control system for greenhouse environment

Ren Zhuang¹ Wang Jun² Kong Chao² Li Wenrui¹(1. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;
2. School of Computer and Information, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the problems of too many detection and routing nodes and large environmental fluctuation in the large-area application of greenhouse environment monitoring and control system, the greenhouse environment monitoring and control system was designed by using an inspection vehicle and LoRa remote transmission network. The number of nodes was reduced by combining fixed-point and mobile acquisition. When the system adjusts the environment, it first determines the growth stage of crops, and then dynamically adjusts and controls them by the Fuzzy-PID algorithm, so that the environment is always maintained in the most suitable state, thereby enabling high quality and high yield of crops. To verify the superiority of the system, taking the temperature control as an example, the simulation model is constructed by MATLAB. Compared with the traditional PID control, the overshoot is reduced by 15.3% and the adjustment time is reduced by 21%. The field experiment results show that compared with the switch control and the traditional PID control, the system has higher control accuracy and smaller environmental fluctuation, which can effectively keep the environment in the shed stable.

Keywords: greenhouse environment;LoRa;inspection vehicle;Fuzzy-PID

0 引 言

温室大棚的应用使得农作物的生长不受自然条件、地域、气候和季节的限制,极大提高了资源利用率,满足了人们对农产品丰富多样的需求,对我国农业生产和发展具有重要意义^[1]。而随着人们对作物品质要求的提高,在作物各个生长时期对环境的要求也更为严格,人工调节的方式已不能满足生产需求。将智能无线控制系统应用于农业大

棚生产中能够大大减轻劳动人民的负担,使其便于更加科学的管理农业事务,而且对这些环境因素进行实时、精确的检测与调节是实现大棚内农作物优质、高产的重要环节。

为了提高生产效率,实现农业生产的自动化、智能化,广大学者对此展开了研究^[2-3]。廖建尚^[4]利用 ZigBee 网络完成了基于物联网架构的农业大棚监控系统的设计,能监测温室大棚的空气温度、湿度、二氧化碳以及土壤湿度等农业环境信息,并进行相应设备的自动控制。赵荣阳等^[5]设

收稿日期:2022-06-10

* 基金项目:国家自然科学基金(61902001)、安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-020)资助

计了基于物联网的农业大棚生产环境监控系统,大棚内的节点采用 ZigBee 网络,实时采集农作物的生产信息。严朝阳等^[6]提出了一种基于远距离无线电(long range radio, LoRa)技术的物联网数据传输系统,构成星型网络,为用户提供一种简单的能实现远距离、易扩展的数据传输系统。过琦芳等^[7]利用 LoRa 技术建立了温室大棚监控系统,以各类传感采集系统为节点,实现了远程监测与控制。在智能控制方法方面,段科俊等^[8]根据模糊自适应 PID 控制的原理制定控制规则,仿真结果表明,平缓型隶属函数能够提升系统响应速度,但会引起系统超调;陡峭型隶属函数能够提升系统的控制精度,但会降低系统的响应速度。郝文彬等^[9]为控制室内温度达到目标温度,提出模糊 PID 的自适应模糊控制算法,根据试验,与传统的 PID 控制相比较,具有较小的超调量而且在受到外界干扰反应速度也很快。王嘉宁等^[10]通过模糊 PID 算法对温室内 CO₂ 浓度进行智能调节,实现了温室内 CO₂ 浓度的实时调控。冯江等^[11]基于自适应模糊 PID 控制算法研究母猪舍温湿度控制,较原有 PID 控制算法调控时间缩短 57.56%,调控温湿度偏差分别减少 1.8℃和 2.21%,表现出模糊 PID 控制的优势。

ZigBee 技术单跳距离短,随着覆盖面积的增加,路由跳数相应增加,降低了实时性和可靠性,且导致路由节点功耗大,在电池供电下的网络寿命低^[12]。而相比之下 LoRa 网络功耗低、传输距离远^[6,13]的特点更适合大面积的农业物联网应用。另一方面,不同的作物以及作物在不同的生长阶段对环境的要求不同,仅维持单一的环境参数无法满足实际需求。本文采取定点采集和移动采集相结合的方式,大棚内土壤数据通过埋设 LoRa 传感器组定点采集,空气数据使用巡检车在轨道上移动采集,同时收集土壤中采集节点的数据,对现场数据及时处理^[14]。系统采取双层控制策略,先判断作物的生长阶段,匹配最适宜的环境目标值,再由 Fuzzy-PID 控制算法进行调控,无论作物处于哪个生长阶段,始终保持环境处于最适宜的状态,进而使农作物优质、高产。

1 大棚环境测控系统构建

1.1 测控系统架构

大棚环境测控系统由终端节点(包括控制节点和采集节点)、巡检车、云平台服务器、用户访问平台四个部分构成,如图 1 所示,对应了无线传感器网络的体系结构。

采集节点埋设在土壤中,负责采集土壤数据。节点采用 STM32F103 作为控制核心,平时处于休眠状态,被唤醒时通过传感器获得土壤湿度等参数。传感器类型可由需要做调整。节点将数据通过 LoRa 网络上传至巡检车。巡检车搭载摄像头和传感器组等设备在预设轨道上移动,摄像头模块用来识别棚内作物的生长阶段,传感器组随时获取棚内空气温湿度、二氧化碳浓度、光照强度等影响作物生长的关键因素,作为控制系统的输入。控制系统先匹配当前

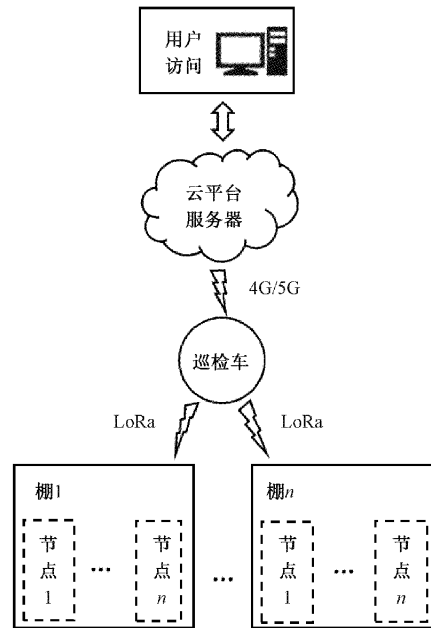


图 1 大棚环境测控系统架构

阶段的最佳参数范围,再将当前参数对比作物各个生长阶段的最佳参数做出控制决策,将控制命令下发给水泵、遮阳帘、风机等控制终端,动态调整棚内参数,使其始终保持在最适合农作物生长的状态。巡检车将重要数据上传至服务器,用户可随时远程监控系统状态或手动控制。

1.2 巡检车结构

巡检车和终端节点通过定点采集与移动采集相结合的方式共同完成系统采集任务,结构如图 2、3 所示。采用 STM32F103RCT6 作为主控芯片,通过传感器组采集数据,巡检车作为系统的核心部件承担的任务较多,为保证及时响应,搭载了嵌入式操作系统,电源采用无线充电的方式,在轨道上设置充电点,可自动充电;巡检车及终端节点通过 LoRa 网络收发数据,采用 ALIENTEK 公司的 ATK-LoRa-01 模块,工作频率为 433 MHz,具有超远距离扩频调制通信、高抗干扰性和超低电流功耗的特点。

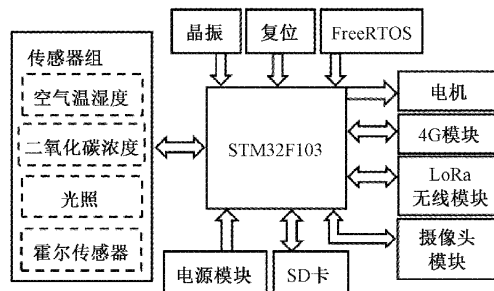


图 2 巡检车硬件结构

巡检车与节点构成星型网络结构,采用透明传输方式,每个节点都具有唯一地址且依次递增。巡检车在轨道上以固定速度行驶,在每个节点上方对应的轨道处设置磁铁定位标签,巡检车携带霍尔传感器,当检测到到达定位点时停

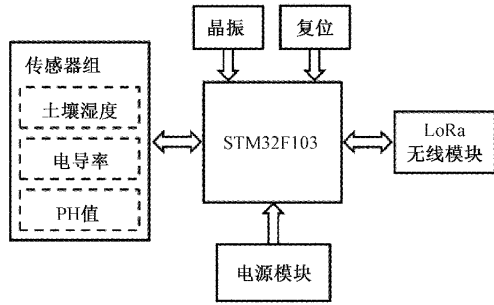


图 3 检测节点硬件结构

下,通过 LoRa 网络唤醒对应的节点并收集节点数据,完毕后巡检车地址自增与下一节点通信,依次收集完全部数据,如图 4。星型连接的拓扑结构简单,连接方便,管理和维护都相对容易,而且扩展性强,当节点没有发送和接收任务时,进入休眠状态也不会影响该拓扑,提高了系统的稳定性。

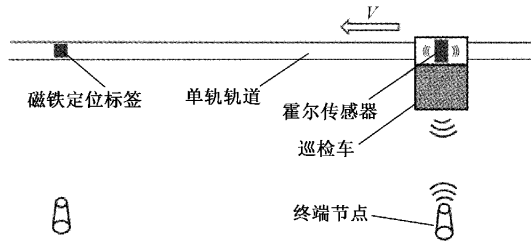


图 4 巡检车工作示意

2 大棚环境测控系统方法设计

2.1 传感器数据融合处理

为保证数据的准确可靠,传感器在采集数据时会多次

采集^[15],全部上传会大量消耗采集节点的能量,缩短网络寿命,而直接取平均值又会因部分“坏点”导致最终的结果产生较大偏差。本文采取先用莱以特准则法消除粗大误差^[16],再对其余数据取平均值的方法。具体如下:

1) 传感器连续多次测量获得一组测量值: X_1, X_2, \dots, X_n 。

2) 计算测量值的平均值 \bar{X} , 定义残差为:

$$V_i = X_i - \bar{X} \quad (1)$$

3) 标准偏差估计为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n V_i^2} \quad (2)$$

若 V_i 满足下式,则认为 X_i 为粗大误差应去除。

$$|V_i| > 3\sigma\bar{X} \quad (3)$$

去除所有粗大误差后对剩余测量值取平均值,即得到最终值,采集节点每次上传时针对每种类型的数据只上传最终值。

以温度采集为例,如表 1 为传感器的一组测量结果,传感器刚上电时测量误差较大,导致 1 号测量值偏差较大,计算该组数据的平均值为 22.73°C 。通过莱以特准则可知 1 号为粗大误差应去除,计算剩余 7 个测量值的平均值得 $X^+ = 23.27^\circ\text{C}$,使用数字温度计测量实际温度为 23.5°C 。对比可知先用莱以特准则法消除粗大误差后,再对其余数据取平均值的方法可消除误差影响,有效提高采集精度。

2.2 数据传输格式

终端节点与巡检车的通信以事件的形式进行,包括采集终端上传、控制终端上传、巡检车发送和应答 4 种事件类型,每个事件类型有各自的数据帧及对应的解析函数。为避免误判,帧头设置为双字节,固定为 9AH 9AH,由有效

表 1 温度采集数据

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{X}	X^+
温度/ $^\circ\text{C}$	15.0	22.8	23.1	23.5	23.8	23.2	23.5	23.0	22.24	23.27

位数计算帧尾,最后两位为 CRC 校验。终端设备上传的数据中包含所在的棚号及自身设备号,采集终端上传传感器数据,控制终端则报告当前设备的工作状态,如表 2 和 3 所示。巡检车主要下发控制命令,控制采集终端的休眠和唤醒,以及控制继电器设备的启停和正反转,如表 4 所示;应答数据用来回应发送方,如表 5 所示。

表 2 采集节点上传数据帧格式 byte

帧头	有效位数	类型	棚号	设备编号	土壤湿度	pH 值	CRC
2	1	1	1	1	1	1	2

表 3 控制节点上传数据帧格式 byte

帧头	有效位数	类型	棚号	设备编号	工作状态	CRC
2	1	1	1	1	1	2

表 4 巡检车发送数据帧格式 byte

帧头	有效位数	类型	控制命令	CRC
2	1	1	1	2

表 5 应答数据帧格式 byte

帧头	有效位数	类型	应答信号	CRC
2	1	1	1	2

2.3 控制器目标值设定

不同的作物对生长环境的要求不同,作物在不同的生长阶段要求也会不同,单一的设定值必然存在局限性。本文依据农业经验导入多种作物在不同阶段最适宜的温湿度等数据,例如番茄^[17]等,如表 6 所示。通过摄像头进行识别,判断作物的生长阶段,自动匹配最佳设定值。

表 6 番茄各阶段适宜环境参数

番茄	温度/ ℃	湿度/ %	光强/ Lx	CO ₂ 浓度/ ppm
发芽	日	28~30		
	夜	28~30		
幼苗	日	20~25		
	夜	10~15	45~50	30 000~800~
开花	日	20~30		
	夜	10~20		
结果	日	25~28		
	夜	16~20		

2.4 Fuzzy-PID 控制器设计

PID 控制的效果主要取决于参数的设定,传统的 PID 控制方式参数无法自动调整,实际控制效果不佳^[18]。本文先通过摄像头进行识别,判断作物的生长阶段,自动匹配最佳设定值,再采用 Fuzzy-PID 的控制方法,通过模糊控制器动态调整 PID 的 3 个参数,增强其适应性^[19]。模糊 PID 控制器的结构如图 5 所示。

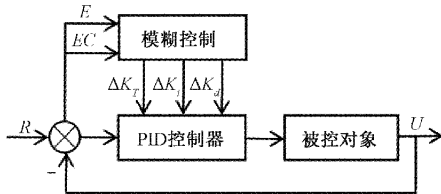


图 5 Fuzzy-PID 控制器结构

表 7 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的模糊控制规则

E	EC						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/PS/NB	PB/NS/NB	PM/NB/NM	PM/NB/NM	PS/NB/NS	Z/NM/Z	Z/PS/Z
NM	PB/PS/NB	PB/NS/NB	PM/NB/NM	PS/NM/NS	PS/NM/NS	Z/NS/Z	NS/Z/Z
NS	PM/Z/NB	PM/NS/NM	PM/NM/NS	PS/NM/NS	Z/NS/Z	NS/NS/NS	NS/Z/PS
Z	PM/Z/NM	PM/NS/NM	PS/NS/NS	Z/NS/Z	NS/NS/PS	NM/NS/PM	NM/Z/PM
PS	PS/Z/NM	PS/Z/NS	Z/Z/Z	NS/Z/PS	NS/Z/PS	NM/Z/PM	NM/Z/PB
PM	PS/PB/Z	Z/PS/Z	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PS/PM	NB/PS/PB	NB/PB/PB
PB	Z/PB/Z	Z/PM/Z	NM/PM/PS	NM/PM/PM	NM/PS/PM	NB/PS/PB	NB/PB/PB

确值,得到 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的精确值后由式(4)计算 PID 3 个参数的最终值,ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 跟随 E 和 EC 的变化情况如图 7 所示。其中 K_p^{*}、K_i^{*}、K_d^{*} 为 PID 参数的初始值。

$$\begin{cases} K_p = K_p^* + \Delta K_p \\ K_i = K_i^* + \Delta K_i \\ K_d = K_d^* + \Delta K_d \end{cases} \quad (4)$$

确定了参数后由增量式 PID 算法(式(5))计算输出终端设备的功率。

$$U_k = K_p(E_k - E_{k-1}) + K_i E_k + K_d(E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2}) + U_{k-1} \quad (5)$$

模糊控制器的输入为当前环境测量值与设定值的偏差 E 及偏差的变化率 EC,输出为 PID 3 个参数的修正量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d。为简化模型,输入输出的论域均为[-3,3],模糊子集为[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB],隶属度函数为三角函数,如图 6 所示。

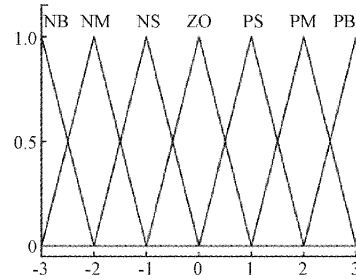


图 6 输入和输出变量的隶属度函数曲线

根据相关经验制定模糊控制规则,1)当误差较大时,应取较大的 K_p 和较小的 K_d,使系统能快速响应,同时取较小的 K_i 值,避免出现过大的超调。2)当误差为中等大小时,此阶段主要防止超调,应减小 K_d,K_i 取中等大小;若误差有减小的趋势,则应取较大的 K_d 防止超调,若误差有增大的趋势,则取较小的 K_d 防止误差继续增大。3)当误差较小时,取较大的 K_p 和 K_i,使系统保持稳定^[20]。控制规则如表 7 所示。

对应模糊规则设置了 49 条条件语句,形式为“if E and EC then K_p K_i K_d”。本文经过 Mamdani 推理法进行模糊推理得到模糊子集,再用重心法解模糊,将输出转化为精

3 仿真与实验分析

3.1 仿真分析

以温度控制为例,通过 simulink 对 Fuzzy-PID 控制模型进行仿真,并与传统的 PID 控制方式对比。大棚内环境相对稳定,参数变化较为缓慢,根据农业大棚的特点,被控对象可简化为一阶惯性环节加纯滞后环节。取模型参数 K=1, T=140, τ=30,则被控对象的数学模型为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{1}{140s + 1} e^{-30s} \quad (6)$$

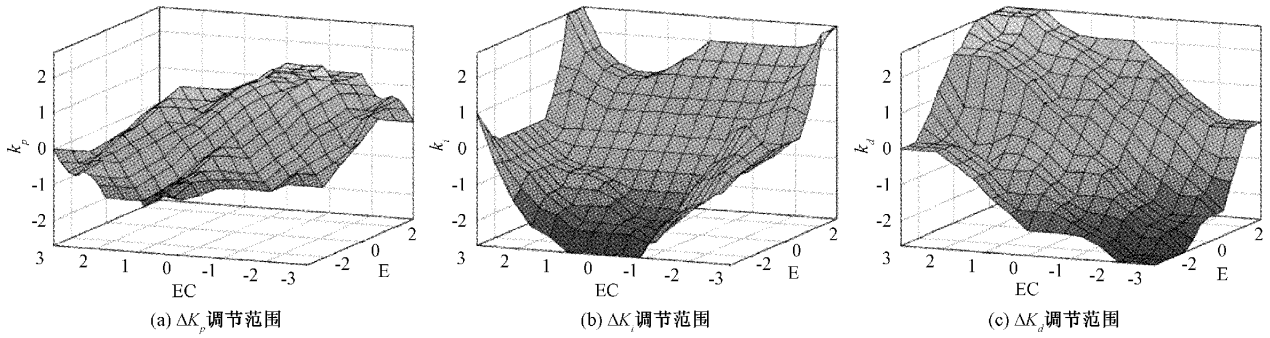


图 7 Fuzzy-PID 参数随 E 和 EC 的变化情况

通过 Z-N 整定法得到 PID 参数的初始值分别为 2.5、0.015、2.0,建立起传统 PID 和 Fuzzy-PID 仿真模型如图 8 所示。

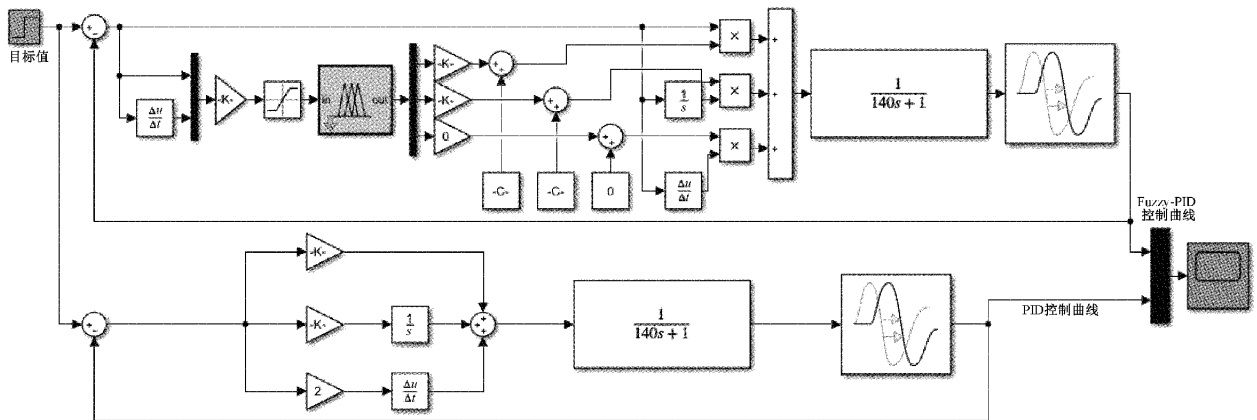


图 8 仿真模型

通过一段时间的仿真,得到如图 9 所示的仿真结果。由 simulink 仿真结果可知,PID 控制超调量超 20%,在第 260 s 后阶跃函数的超调量小于 1%,463 s 后超调量维持在 0.05% 以下;Fuzzy-PID 控制超调量为 4.7%,在第 203 s 后阶跃函数的超调量小于 1%,在第 360 s 后超调量维持在 0.05% 以下。相对于传统的 PID 控制,Fuzzy-PID 在大棚温度控制系统阶跃响应中超调量小得多,到达稳定状态的速度更快,稳态误差的控制效果比较稳定。

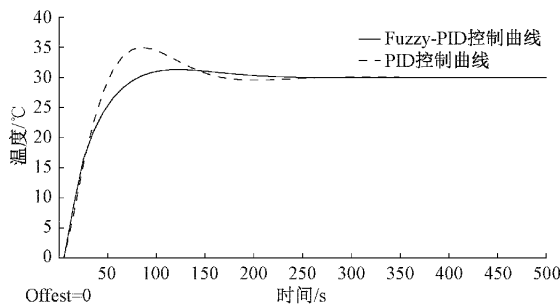


图 9 温度仿真曲线

农业大棚在实际的生产环境下容易收到外界的影响,在农业大棚环境控制仿真模型中加入干扰,分析模型的抗干扰能力。在第 500 s 时加入 20% 的干扰信号,仿真结果如图 10 所示。受到干扰后,传统 PID 控制的最大超调量

为 5.3%,第 586 s 超调降至 1%,第 650 s 后超调稳定至 0.5% 以内,整个调控时间为 150 s;Fuzzy-PID 控制的最大超调量为 5%,第 614 s 超调降至 1%,第 630 s 后超调稳定至 0.5% 以内,整个调控时间为 130 s。

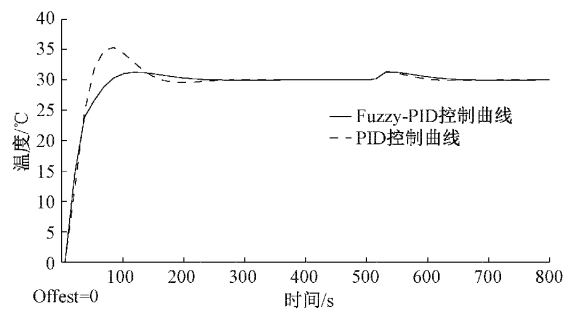


图 10 加入扰动后的仿真曲线

根据仿真图 9~10 得到传统 PID 控制算法和 Fuzzy-PID 控制算法阶跃响应的数据对比,如表 8。对比可知 Fuzzy-PID 控制算法能使大棚内环境参数保持稳定,控制波动小,到达稳态的速度更快,避免了传统 PID 控制超调量过大的问题,受到干扰也能迅速恢复稳定。

3.2 实测数据分析

实验于 4 月上旬在某大棚内展开,棚外温度 23 °C~25 °C。对传统 PID 控制算法和 Fuzzy-PID 控制算法进行实测,另

表 8 两种控制算法阶跃响应比较

控制算法	最大超调量/ %	调控时间 ($<1\%$)/s	调控时间 ($<0.05\%$)/s	扰动后最 大超调量/%	扰动后调控时间 ($<1\%$)/s	扰动后调控时间 ($<0.05\%$)/s
传统 PID	20	260	463	5.3	86	150
Fuzzy-PID	4.7	203	360	5	114	130

外加入只通过设定值控制的方式,温度低于设定值即开始加热,温度高于设定值即开始降温。通过检测对比不同控制方式下的棚内温度,验证 Fuzzy-PID 算法在农业大棚环境调控中的性能。通过采集的数据绘制曲线,得到图 11 所示的温度变化曲线。

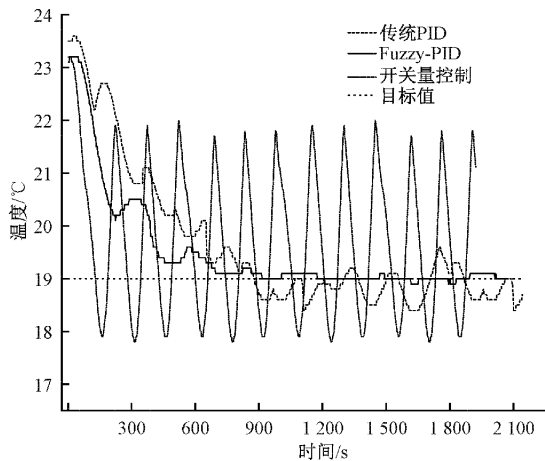


图 11 温度控制变化曲线

在设定值控制的方式下,棚内温度降至 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始回升,至 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时又开始下降,温度一直在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动,温差达 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在传统 PID 控制方式下,棚内温度在第 900 s 左右第一次到达目标值,随后在目标值上下范围内波动,在达到稳定状态后棚内温度最高 $19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低 $18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 Fuzzy-PID 控制下,棚内温度在 900 s 左右达到目标值,随即保持稳定,在稳定状态下,棚内温度最高 $19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低 $18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实测数据显示,在大棚环境调控方面,Fuzzy-PID 控制相对于传统 PID 控制更加稳定,控制精度更高。

4 结 论

本文设计了一种用于农业大棚的动态环境测控系统,对土壤温度、电导率、空气温湿度、 CO_2 浓度等影响作物生长的关键因素进行测控,使其保持在最适合作物生长的状态。检测土壤数据的节点埋在土壤中定点采集,巡检车在预设轨道上移动采集空气参数并收集节点数据,在一定程度上减少了节点数量;对传感器采集数据融合处理,采用莱以特准则过滤粗大误差,再对剩余数据取均值,数据表明处理后能有效避免测量误差,提高了采集精度,同时能降低数据发射功耗;系统由摄像头判断生长阶段,匹配当前最适宜的环境参数,再通过 Fuzzy-PID 算法对各项数

据进行调控。仿真和实测结果表明,与传统 PID 控制相比,超调量降低 15.3% ,调节时间降低 21% ,系统控制曲线平稳,未出现大幅超调,能有效保持大棚内环境的稳定状态,控制精度较传统 PID 方式有明显提升。

应用农业大棚环境测控系统,操作人员可远程实时查看系统的工作状态,便捷、科学的管理农业生产活动。下一步工作将通过摄像头对农作物病害进行识别,使当前系统更加完善,提高系统智能化程度。

参考文献

- [1] 薛超. 基于嵌入式的温室大棚远程监测系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [2] 张雪花, 张武, 杨旭, 等. 农业温室环境控制方法研究综述[J]. 控制工程, 2017, 24(1): 8-15.
- [3] 毛罕平, 晋春, 陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 1-13.
- [4] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 233-243.
- [5] 赵荣阳, 王斌, 姜重然, 等. 基于物联网的农业大棚生产环境监控系统设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(11): 131-137.
- [6] 严朝阳, 方飞, 曹侯, 等. 基于 LoRa 的物联网数据传输系统研究与设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(3): 354-363.
- [7] 过琦芳, 王永星. 基于 LoRa 的温室大棚监控系统云平台应用实现[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 219-222.
- [8] 段科俊, 李明. 基于混合隶属度的模糊 PID 温室控制[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(11): 32-37.
- [9] 郝文彬, 冯天玉, 黄世明, 等. 基于模糊 PID 控制的烘干房温度控制设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 101-106.
- [10] 王嘉宁, 牛新涛, 徐子明, 等. 基于无线传感器网络的温室 CO_2 浓度监控系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 280-285, 367.
- [11] 冯江, 林升峰, 王鹏宇, 等. 基于自适应模糊 PID 控制的猪舍温湿度控制系统研究[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(2): 73-86.
- [12] 张铮, 曹守启, 朱建平, 等. 面向大面积渔业环境监测的长距离低功耗 LoRa 传感器网络[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 164-171.
- [13] 赵全, 徐光, 郝龙, 等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测节点设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 119-122.

- [14] 吕顺远,张国平,胡江为,等. 基于 ZigBee 的实时水虻养殖环境监测器的设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15):100-104.
- [15] 李硕,王国涛,李超然,等. 多传感器数据融合的航天装置多余物检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11):124-131.
- [16] 范德辉,李晓林. 归一化加权平均算法在温度采集系统中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2012(3):115-116,118.
- [17] 王健. 番茄生长发育模型研究及其专家系统设计[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [18] 陈立,詹跃东. 基于变论域模糊 PID 的 PEMFC 温度控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7):1-5.
- [19] WANG ZH G, HE M. Temperature control based on fuzzy logic two-degree-of-freedom smith internal model [J]. Instrumentation, 2020, 7(2):1-8.
- [20] 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):111-116.

作者简介

任壮, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与网络。

E-mail: renzhuang_99@163.com

汪军(通信作者), 教授, 主要研究方向为机器视觉与智能控制、嵌入式系统与网络。

E-mail: wangjunahpu@163.com

孔超, 副教授, 主要研究方向为 Web 数据管理、海量数据挖掘和社会网络分析。

E-mail: kongchao@ahpu.edu.cn

李文睿, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与网络、数字图像处理。

E-mail: 1027544693@qq.com