

智慧设施农业中控制系统的研究进展

徐 鹏,张冠智,李 洋,徐晓东,杨振超
(西北农林科技大学园艺学院,陕西咸阳 712100)

摘 要:随着科学技术的发展,农业的发展越来越趋于信息化、现代化,智慧农业是未来农业发展的必然趋势。温室控制系统是智慧设施农业的核心,是实现设施农业规模化发展、集约化生产的关键。本研究综述了温室控制相关研究进展,以期在今后的研究中起到一定的作用。温室控制系统自20世纪70年代发展至今越来越成熟,本研究对比了温室控制系统的控制算法、主控芯片、各种传感器,通过对近些年来包括控制系统在内的感知层、传输层和应用层等组成部分综述,并介绍了市面上比较主流的传感器、网络传输技术以及主控芯片,旨在为温室控制系统的设计提供一种可选择的方案,并对温室设施农业中存在的问题和未来的发展方向进行了分析和展望。

关键词:智慧农业;设施农业;控制系统;控制算法

中图分类号:S625.5+1

文献标志码:A

论文编号:casb2022-0136

Control System in Smart Facility Agriculture: Research Progress

XU Peng, ZHANG Guanzhi, LI Yang, XU Xiaodong, YANG Zhenchao
(College of Horticulture, Northwest A&F University, Xianyang, Shaanxi 712100)

Abstract: With the evolution of science and technology, the development of agriculture is of more informatization and modernization, and smart agriculture is the inevitable trend of agricultural development in the future. Greenhouse control system is the core of smart facility agriculture and the key to realize large-scale development and intensive production of facility agriculture. This paper reviewed the research progress of greenhouse control system, aiming to provide reference for future study on smart facility agriculture. The greenhouse control system has become more and more mature since the 1970s. This study compared the control algorithm, master control chip and various sensors of greenhouse control system, reviewed research in recent years on the components of the control system which included perception layer, transmission layer and application layer, and introduced the mainstream sensors, network transmission technology and master control chip in the market, in order to provide a scheme for the design of greenhouse control system. This study also analyzed problems existing in greenhouse facility agriculture and discussed its future development direction.

Keywords: smart agriculture; facility agriculture; control system; control algorithm

0 引言

智慧农业是农业与现代科技结合的产物,其发展的重要意义就是打破了以往完全“靠天吃饭靠地打粮”的模式,而是智慧化、自动化和无人化。随着中国现代化的不断发展,农业现代化已成为了一种必然趋势。在2018年第七期印发的关于《农业绿色发展技术导则(2018—2030)》的第17条中提出了智慧型农业技术模

式,包括开发与农业传感器、终端设备以及动植物生长模型的阈值设备和数据;基于农田环境检测以及智能分析决策控制等技术;以及与智慧设施农业相关的技术的开发与推广^[1]。智慧设施农业在国外发展的较早,在1949年,美国园艺学家WENT^[2]就建立了第一个人工温室大棚,并且实现了温度的采集和调控等功能。但中国在20世纪70年代末才开始向美国等国家

基金项目:陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-02);陕西省农业专项资金(NYKJ-2018-YL22);杨凌示范区科技助力脱贫攻坚项目(2020-KJFP-05)。

第一作者简介:徐鹏,男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向:设施农业环境工程及微生物降解秸秆相关研究。通信地址:712100 陕西省咸阳市杨陵区邠城路 西北农林科技大学园艺学院7楼707室,E-mail:x17171690228@163.com

通讯作者:杨振超,男,1976年出生,天津人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事设施农业环境工程研究。E-mail:yangzhenchao@nwfau.edu.cn。

收稿日期:2022-02-28,修回日期:2022-04-12。

学习现代化温室,在国外温室控制技术的基础上,中国的温室控制技术从1987年引进的FELIX-512系统,到计算机应用于温室环境控制,直到现在的温室智能控制技术^[3],在智慧农业上仍然有很大的发展空间。发展智慧农业不仅有利于提高农业生产效率,还有利于提高作物产量和减少成本消耗。

在设施农业中影响作物生长的因素除了植物内部自身因素外,外部的环境因素也起了重要作用。温室植物生长环境的调控历经了人为调节、自动调节到现在的智能调节。以往环境的调控基本上都是以人的经验为依据,这样既耗费了大量的人力,而且人工调控存在着不确定性和误差,往往导致作物生长不良。并且温室中的各种环境因子之间存在着耦合作用,单纯地只进行某一条件调节往往引起其他因素的波动,这就增加了对温室环境调控的难度。而现代温室调控主要靠温室控制系统进行调节,该系统主要由感知层、传输层和应用层组成^[4]。通过控制系统对设施环境信息进行采集,然后经处理器处理,驱动相应的调节设备进行调节,使周围环境符合植物生长的需求,以达到高产、稳产、节能的目的。

1 感知层

在控制系统中感知层的传感器主要包括温湿度传

感器、光照传感器、CO₂传感器、以及EC和PH等,通过这些传感器完成对温室环境信息的采集。龙祖连^[5]设计了一款基于Zigbee的智慧农业控制系统,系统通过多种传感器实现对温室环境的检测及控制。张利民等^[6]以树莓派为主控系统,利用温湿度传感器、光照强度传感器以及CO₂传感器等设计了一款用于检测温室环境参数的自动控制系统。方培兵等^[7]为实现对大棚内环境的智能控制,采用DHT11温湿度传感器、TSL2561光照强度传感器设计了一套基于树莓派温湿度光控信息服务系统。宋志扬^[8]同样以树莓派作为主控系统,以DHT11作为温湿度传感器和GY30作为光照强度传感器实现对温室内环境的监测。李琳杰等^[9]在以树莓派作为主控系统的基础上,以DHT22为温湿度传感器,并且将采集的数据通过无线传输的方式发送至阿里云,从而减少成本支出,实现较高的经济效益。市面上有各种各样的温室传感器可供选择,可根据设计实验的需求、精细程度以及设备的稳定性进行选择。如表1~3所示。

2 网络层

在温室中,数据的传输方式分为有线和无线。有线传输虽然相对于无线具有较好的稳定性,但是在设施温室及田间环境中,由于空间有限和环境条件比较

表1 温湿度传感器

序号	型号	工作电压/V	湿度范围/% RH	温度范围/℃	湿度误差/% RH	温度误差/℃
1	DHT11	3.3~5	20~95	0~50	±5	±2
2	DHT12	3.3~5	0~100	-40~80	±2	±0.5
3	DHT22	3.3~5	0~100	-40~80	±2	±0.5
4	RS485	3.3~5	0~100	-20~60	±3	±0.3
5	DS18B20	3~5.5	-	-55~125	-	±1
6	SHT2X 系列	2.4~5.	0~100	-40~125	±3	±0.3
7	DHT21	3.3~5	10~99.9	-40~80	±3	±0.5
8	FG6010	12~36	10~99.9	0~50	±3	±0.5
9	FG6020	12~36	10~99.9	0~50	±3	±0.5
10	FG6485	12~36	10~99.9	-40~80	±3	±0.3
11	Si7021	1.9~3.6	0~99.9	-40~85	±3	±0.4

表2 CO₂传感器

序号	型号	供电电压/V	测量范围/lx	工作温度/℃	测量误差/%
1	GY-302	3~5	0~65535	-20~85	±5
2	TEMT6000	3.3~5	1~1000	-40~85	±5
3	BH1750	3.3~5	1~65535	-40~85	±20
4	OPT101	2.7~36	0~65535	-20~85	±5

表3 光照强度传感器

序号	型号	供电电压/V	工作温度/℃	测量范围/pm
1	SGP30	3.3~5	40~85	400~60000
2	NDIR	5	-10~60	0~5000
3	CCS811	1.8~3.6	-5~50	400~5000
4	JWO1-CO2-V2.2	5±0.2	-10~40	350~2000
5	CJMCU-811	1.8~3.6	-5~50	400~5000
6	RBV-CO2	1.8~3.6	20~50	0~10000
7	MG812	1.8~3.6	-20~50	0~10000
8	RS485	9~24	-20~80	0~5000

恶劣,有线传输存在较多的局限性,因此在温室中有线传输应用的较少。无线传输具有受环境条件影响较小、安装方便以及传输速度快等优点,无线传输包括蓝牙、WIFI、UWB、NFC、以及 ZigBee 和 LoRa 等。其中 WIFI、ZigBee 和 LoRa 是温室中比较常用的无线传输技术。林甄等^[10]在不同的环境条件下对 ZigBee、LoRaWAN 和 WIFI 等无线传输方式进行测试,结果表明:LoRaWAN 在以功耗为优的条件下表现的更为优秀。但是,在不同的温室中各种外界条件不尽相同。因此,需要研究者们灵活地应用各种无线传输技术,有的甚至要结合多种通信技术使用。熊永红^[11]通过研究无线传输技术在传输的过程中对其发送的数据包与丢包率的关系,发现在 LoRa 通信技术测试中两者的关系成正比,与传输距离的关系成反比,发现其能够适用于 2 km 的传输距离。孙瑞娟等^[12]以 LoRaWAN 和以太网进行无线传输,设计了温室微气候的检测系统。张涛等^[13]将 LoRa 与 5G 基站和各种传感器进行无线互联后,实现了传感器实时采集数据和对环境条件进行控制的目的。王杰华等^[14]的无线传输技术采用 ZigBee,将 STM32F10x 作为智能农业

的控制芯片。赵佰平^[15]通过 Mesh 宽带网络等技术将温室内的各种传感器通过无线的方式互联起来,实现了对温室内环境因素的监测和控制。王逸鹏等^[16]利用 Zig-Bee 技术组网,通过终端设备实现了对温室环境的监测和控制。

可见现有的研究中有多种无线传输技术供选择,LoRa 和 Zigbee 是在控制系统中比较常用的传输层,因此在温室控制系统设计过程中应灵活选择。范宇飞^[17]在蘑菇温室内设计了一款基于 ZigBee 的无线传输技术,将传感器采集的数据通过无线传输的技术,对温室内的环境参数进行实时的检测和控制。王能辉等^[18]利用 NB-IOT 对设施环境内土壤的温湿度、光照强度以及二氧化碳等参数进行检测,并且将采集的数据传输至服务器,实现了对环境参数的实时检测。物联网技术从简单的蓝牙技术、WIFI 技术、2.4G 无线技术,到现在的 ZigBee 无线组网技术、LoRa 技术等(表 4),体现了技术的进步。在实际的应用中应该根据不同的传输技术的传输特性,进行适当的选择。

3 应用层

应用层主要是对采集的信息进行处理以及反馈,

表4 无线传输技术

特性	蓝牙	WIFI	ZigBee	LoRa
使用频率/Hz	2.4~2.485 G	2.4 G	2.4 G	433 M
价格	便宜	贵	便宜	便宜
范围/m	10	100	10~100	10000
功耗	低	高	低	低
设备连接能力/个	7	50	50	200 左右,根据实际而定
安全性	高	低	高	低
优点	体积小,受众群体广	容易实现,受众范围大	可自组网	寿命长,且易于建设和部署
缺点	连接能力有限	功耗太大,体积太大	难兼容,其搭载的设备普及率极低	易受频谱干扰
传输速率/kbps	8192	6912	20~250	37.5

通过控制算法或者设置的阈值将温室的环境参数调节到最佳状态。由于在对温室环境数据采集和传输的过程中不可避免的会出现误差,首先对采集的信息进行预处理,可以增加数据的可靠性。然后经过模型控制系统进行控制,执行设备进行相应的调节动作。同时,温室控制系统中还有人机交换界面、手机APP以及网页端,用户可以实时的对温室中的参数进行查看和人工调控。

温室环境的控制方法是温室控制系统的关键,不同的控制方法有不同的优缺点,研究者们对各种温室控制方法进行不断的改进,以增进温室控制系统的稳定性和精确性。温室环境控制方法的优劣几乎是一个温室控制系统好坏的判断标准。

在温室控制系统的研究上,相对于国内,国外的研究起步较早。KORNER等^[19]在切花菊花能源的消耗上运用了温室气候和控制模型,以此构建了KASPRO模型,研究发现该模型能够实现温室环境的智能优化控制。HERRERO等^[20]在水培玫瑰温室中,利用多目标进化算法实现了对温室环境的良好控制。GURBAN^[21]采用遗传算法整定PID控制对温室内的温湿度进行调节,利用前馈与反馈的线性发方法对温室环境进行解耦,并提出拟合目标函数的遗传算法用于PID的整定。RODRIGUEZ等^[22]开发了基于PID控制、用于无土栽培管理的控制系统,以达到精准施水肥的目的,应用于番茄的田间实验,具有低成本和高经济效益的优势。王纪章^[23]以温室黄瓜为研究对象,通过基于模型和基于专家知识推理的结合,实现温室环境的预测与调控,推动温室智能化进程。汪小昂等^[24]借以BP神经网络得出能耗预测模型以及温室环境模型,并对其能耗量进行计算,总结出了温室环境的变化规律。卢佩等^[25]通过解耦参数实现了对温室内温湿度的解耦控制,使模糊控制的精度得到进一步的提高。王鸿磊等^[26]提出能够根据不同情形选择不同算法的基于模糊专家控制的PID控制算法,实验证明该控制方法能够明显提高番茄的产量。弓正等^[27]为达到控制不同温室的目的,在传统的模糊PID控制的基础上,加入了

多种基于模糊PID的控制器。王冠龙等^[28]以STC12C5A60S2为控制芯片,通过PID算法实现对温室环境的精确控制。赵亚威等^[29]通过BP神经网络构建作物生长模型,实现了根据温室的环境条件预测作物的生长。胡瑾等^[30]利用向量回归算法(SVR)建立了植物需水模型,为以后作物控制系统的构建奠定了基础。井翠清^[31]采用Windows中文图形作为操作界面,设计了一个以“1平台+多系统应用”模式的温室环境监测和控制系统平台,平台包括了环境监测、视频监控、预警报警、生产管理、专家在线诊断以及大数据功能。

温室控制方法主要有PID控制、模糊控制、模型预测控制^[32]、智能控制、解耦控制^[33]和神经网络控制。另外根据指标的不同,将控制方法分为了以环境控制为指标的控制方法和以经济控制为指标的控制方法^[34]。

3.1 PID控制

PID控制是在20世纪30年代末提出的,其应用范围在不断地扩大,从人们日常生活的各种电器到精密的军事武器都可以看到PID控制的身影。随着PID控制的不断地发展,其以往的不足也在不断完善,比如可以通过建立数学模型以达到最优参数的问题。随着PID控制的发展,为了不断地弥补其缺点,PID控制与其他的控制算法相结合,逐渐发展成为现今趋于智能化的PID控制,例如基于BP神经网络的PID控制^[35]、基于专家系统的PID控制^[36]、基于遗传算法的PID控制^[37]等。PID控制就是比例积分微分控制,是有较长的历史且应用最为广泛的控制方法^[38],其在工业应用较多。

3.1.1 常见的PID控制原理

输入:控制偏差 $e(t)=r(t)-y(t)$

输出:偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)的线性组合

PID控制特点:(1)控制原理简单,在控制的使用中相对简单。(2)其具有较好的适应性。(3)鲁棒性强。(4)对模型的依赖少等优点(图1)。

PID控制系统的主要组成是控制器以及被控对象,

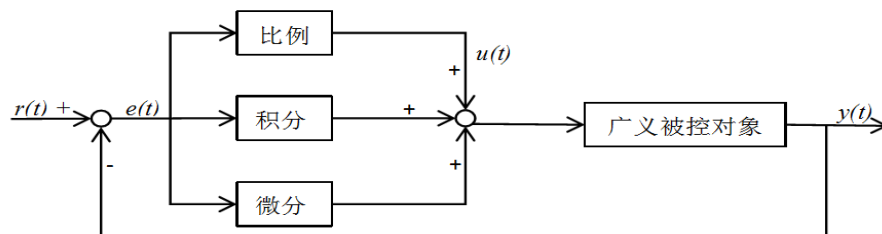


图1 PID控制原理

而控制系统的控制偏差 $e(t)$ 是根据理论值与实际输出值的差值得到的, 继而将差值以线性组合的方式组成控制量, 实现对目标对象的控制^[39], 见式(1)。

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \dots\dots\dots (1)$$

式中: $e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。

3.1.2 PID 参数整定

在 PID 参数的整定在实际的应用种, 更多的是以拼凑尝试的方法确定最佳的 PID 参数。PID 控制中, 适当的增加比例系数 P 在一定程度上有利于系统响应速度的加快, 但是当 P 过大时, 就会导致系统的稳定性变差, 表现为产生较大的超调和震荡。而积分时间 I 能够降低 P 产生的超调和震荡, 从而使系统的稳定性增加, 缺点就是使系统静差消除的时间变长。最后积分时间 D 具有与 P 相同的作用, 一定程度上能够加快系统的响应速度, 使系统的稳定性增加, 但是不利于系统抗扰动的能力^[40]。

PID 系统参数的整定是通过凑试的方式进行的, 其整定的顺序为先比例, 再积分, 最后进行微分的顺序进行凑试。在进行比例部分的整定时, 比例的参数逐渐增加, 在进行调整的同时观察系统响应, 以获得理想的曲线。如果在进行比例的调节后, 系统的静差就达到了理想状态, 则不需要进行其他操作。反之, 需要进行积分时间 I 的调节。加入积分环节后, 在整定时需要将积分时间设定为一个较大的值, 然后再将其逐渐的缩小, 在保证系统动态性能的情况下, 从而将静差消除。经过 P 和 I 的调节后, 仍旧不能得到满意的结果时, 就需要加入微分环节的调节。调节时将 D 设为最小后逐渐的增加, 同时对 P 和 I 进行相应的微调, 以获得满意的结果^[41]。

PID 控制系统中积分 I 主要影响相应速度, 而微分 D 是为了解决控制系统在响应速度上的问题。控制参数的指定是 PID 控制的核心, 控制参数的方法包括理论计算整定法和工程整定法^[42]。PID 就是比例、积分和微分的简称, 其核心就是对各种参数的整定。通过

实验的方法对系统的相关参数进行微调来对控制器参数、系统动态性能以及稳态性能之间的关系^[43], 以实现系统的稳定性。

PID 系统中的 I 会使整个系统的响应速度受到影响, D 就是为了解决系统的响应速度, 其完整的计算公式见式(2)。

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \sum e(t) + K_d [e(t) - e(t-1)] + u_0 \dots\dots (2)$$

在 PID 控制的调试过程中, 应注意以下步骤^[44]:

- (1) 首先, 将 I 和 D 设为 0, 同时加大 P , 使其产生震荡;
- (2) 通过减小 P , 找到系统的临界震荡点;
- (3) P 确定后保持不变, 加大 I 以达到目标值;
- (4) 重新上电对各条件进行检测是否符合要求;
- (5) 调整后对仍旧超频和震荡进行适当增加微分项。

3.2 模糊控制

模糊控制简而言之就是一种模仿人类的思维方式的控制方法, 利用一种非线性的控制, 以满足各种需求。早在 1965 年 L.A.Zadeh 就首次提出了模糊集理论, 1974 年模糊控制被 E.H.Mamdani 首次应用于自动控制中, 逐渐模糊控制成为了一种应用十分广泛的控制技术^[45]。模糊控制的基本原理如图 2^[46]。

模糊控制作为智能控制中一种非线性控制经过不断的发展逐渐发展到了自适应控制、专家模糊控制和基于神经网络的自学习模糊控制^[47]。由于外界因素的复杂性, 就会导致在实际的应用中难以建立较为精准的数学模型, 但是模糊控制最大优势就是不需要提前知道精确的数学模型。

模糊控制系统实现其模糊控制算法的基本过程可以总结如下: 控制器首先得到控制量, 与给定值比较后得到误差值 E , 将 E 作为模糊控制器的输入, 对误差值进行模糊处理, 最后得到模糊控制语言集的一个子集^[48]。然后通过模糊决策, 得到模糊控量 u , 即 $u = e \times R$ ^[49]。其基本思想就是, 首先根据人们的操作经验, 得到一个比较可靠的控制规则, 然后再根据控制规则在系统的实际应用中的运行状态, 经过一系列的算法实现对对象的控制。

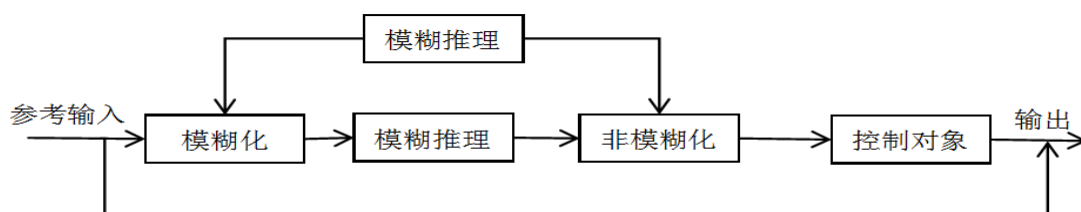


图2 模糊控制系统原理框图

3.3 模型预测控制

在20世纪60年代初期模型预测控制作为一种现代控制理论得到了发展,并且不断地趋于完善。依赖其较好地性能指标和精确的理论设计方法,在工业实践中发展起来的控制方法。利用之前与当前之间的偏差值,经过优化使控制对象与期望值的偏差达到最小^[50],模型预测控制的基本原理如图3^[51]。

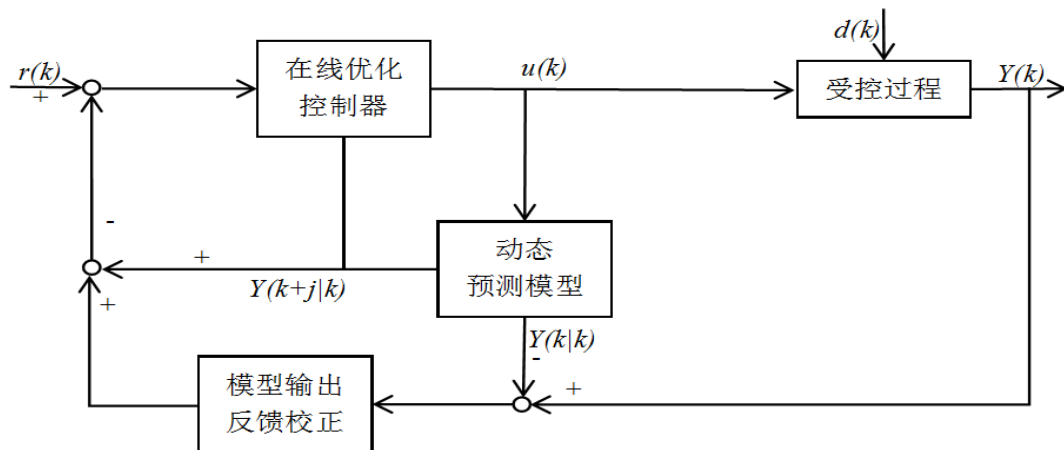


图3 模型预测控制图

和 nonlinear 预测工程软件包上的应用。与传统的预测控制模型相比,预测模型更多的与其他的控制算法及策略相结合,优缺点互补,在工业的应用上更加成熟。

3.4 智能控制

智能控制的思想是美国普渡大学 K.S.Fu 教授首次提出,并且将其应用于学习控制系统的一种控制思想。次年,美国门德尔首次将智能控制应用于飞船控制系统的设计^[53]。从20世纪80年代开始,各种基于AI的技术及各种控制系统得到了迅速的发展。到20世纪80年代中期,一种新型的控制方法应运而生,这种方法具有非线性逼近、自学习以及较好的容错特性^[54]。随着智能控制的不断发展,其被广泛地应用于各种专业领域,如一些工业制造的控制系统、交通信号的控制系统等。因此,在未来的控制领域中智能控制具有得天独厚的优势^[55]。

智能控制适用于解决以下情形^[56]:(1)对于一些难以获得精确的书写模型的系统,并且具有非线性、不确定性等特征的情形。(2)当需要对当前的环境进行快速地感知并做出相应的反应时。(3)对于普通的控制方法需要遵循线性化假设时。

智能控制作为一门由多种学科相互交叉形成的一种新学科^[56],随着智能控制的不断发展各种与智能控制相关的理论与技术得到不断的发展与涌现。依赖其

MPC 主要由预测模型、反馈校正、滚动优化以及参考轨迹组成,其主要优点为^[52]:(1)对于模型的精确度要求不高,有利于建模。(2)系统具有鲁棒性好和稳定性较好。(3)采用滚动优化策略,能够及时弥补模型问题引起的不确定性,使系统的动态性能较好。

模型预测控制的应用前景:模型预测控制模型在许多工业的发展上得到了应用,其中包括了一些线性

具有学习功能、习惯功能和组织功能的特点被应用于各种场合。

3.5 解耦控制

控制系统模块间的传递不但有数据的传递,还包括了各种控制信息,这就使得各个模块间存在着一定的耦合作用。但是在实际中各个模块之间需要保持一定的独立性,这就需要进行解耦控制。即为通过寻找某种结构来消除各个控制回路之间的相互耦合作用,达到每个输入只对相对应的输出进行控制^[57]。

解耦理论为:基于Morgan问题的解耦控制;基于特征结构配置的解耦控制以及基于H-∞解耦控制理论^[58]。耦合即为在控制系统中一个变量的变化会对其他变量的变化起到影响作用^[59]。为解决温室设施中各环境因素之间的耦合作用,就必须进行耦合控制,常用的解耦控制方法有前馈补偿法、对角矩阵法以及单位矩阵法。

3.5.1 前馈解耦控制方框图 前馈补偿法、对角矩阵法以及单位矩阵法的解耦控制方框图见图4。

3.5.2 角矩阵法 与单位矩阵法基本相似,最大的不同之处就是在于传递函数矩阵的不同,见式(3)。

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Mc_1(s) \\ Mc_2(s) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

同样可以求得解耦器见式(4)。

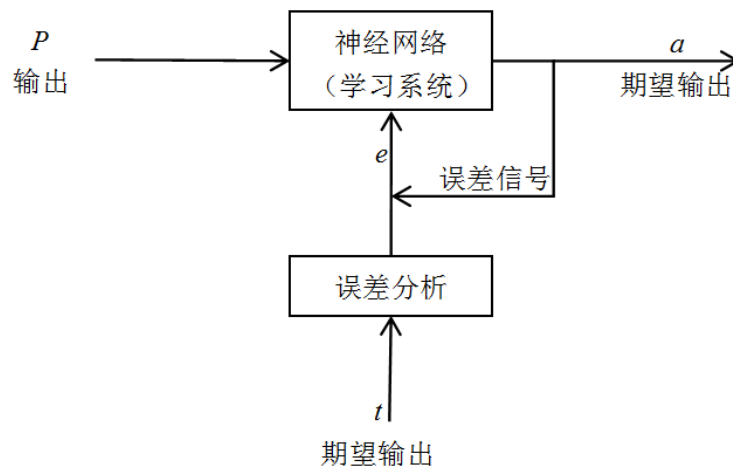


图5 神经网络基本算法

影响,存在着耦合作用,不能够单纯地对某一环境因子的调节。即使是将各种现代的控制算法应用于温室中,也很难得到理想的效果,因为温室内的环境复杂多变,存在着各种不确定的因素。导致控制算法在实际中的应用难以发挥真正的作用,控制系统中模型控制预测的与实际不吻合,使得对温室的控制效果不明显。(2)忽视系统的可靠性:现有研究的控制理论技术大都是在理想的条件下能够达到预期的目标。但是实际的应用中存在着各种不可靠性,比如用于数据采集的传感器都不可避免的存在误差以及各种延迟,以及很少对采集的数据在传输的过程中存在的丢包现象进行考虑,甚至是没有考虑。(3)实际应用中的成本:建立一整个较为完整的温室控制系统,在实际中成本较高,成本回收周期长,而且还需要对温室控制系统进行相关的维护,因此在实际的推广中,认可群体并不大。(4)温室设施资源的利用率:目前在温室设施内实现的作物高产是以牺牲巨大的资源为前提的,这样既造成了资源的巨大浪费和经济效益低下,又造成了环境的污染。

由于温室环境的复杂性,单纯利用一种控制算法难以对温室环境进行有效且精确的控制,首先就需要在传统的控制方法的基础上综合现代的控制方法,进行合理地优缺点互补,一个好的控制算法理论上能够对于一些不可避免的误差进行良好的处理,例如误差数据的剔除,充分提高温室控制决策的稳定性以及可靠性。其次就是要对于温室设施中应用的各种传感器、传输技术的升级,以减少系统的误差,增加系统的可靠性。再就是在保证系统稳定性和可靠性的前提下要尽可能的减少温室控制系统在温室设施中建设的成

本,例如避免控制系统性能的冗余等措施。最后,由于全球经济的快速发展,资源消耗在不断增加,未来的温室设施农业也要朝着节能的方向发展,例如将设施农业与光伏产业相结合等方面,农业的节能发展既有利于提高经济效益,又能够保护环境。

参考文献

- [1] 农业农村部关于印发《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5350058.htm.2018-07-02.
- [2] HANNA N. The information technology revolution and economic development [M]. World bank,1991.
- [3] 毕玉革,麻硕士.我国现代温室环境硬件控制系统的应用现状及发展趋势研究[C]//农业生物环境与能源工程国际论坛论文集,2008:124-127.
- [4] 李伟,张黎.铁道牵引单相电力电子变压器及控制[J].铁道学报,2013,35(4):37-42.
- [5] 龙祖连.基于 ZigBee 智慧农业控制系统的设计[J].物联网技术,2021,11(5):3.
- [6] 张利民,邹益民.一种基于树莓派及 Yeelink 的温室控制实验装置[J].工业仪表与自动化装置,2017(6):108-111,123.
- [7] 方培兵,龚艺,胡大春.大棚温室智能控制系统[J].农业与技术,2015,35(24):47.
- [8] 宋志扬.基于树莓派的温室大棚监控系统设计[J].电脑知识与技术,2019,15(6):211-212.
- [9] 李琳杰,赵伟博,齐锴亮,等.基于阿里云的智能大棚远程监控系统研究[J].自动化与仪表,36(1):4.
- [10] 林甄,谢金治,田硕,等.基于农业物联网的无线通信技术实验研究[J].农机化研究,2022,44(6):188-193.
- [11] 熊永红.基于 LoRa 无线传感网络的温室控制系统构建[D].南昌:东华理工大学,2019.
- [12] 孙瑞娟,党晓圆,杨佳义.基于物联网技术的温室微气候监控系统设计[J].农业与技术,2021,41(12):4.

- [13] 张涛,樊振兴,宋青存,等.一种基于LoRa+5G的低成本智慧农业物联网系统[J].物联网技术,11(7):4.
- [14] 王杰华,洪丽芳,许锦丽,等.基于物联网的智慧农业管理系统设计[J].湖北农业科学,60(10):4.
- [15] 赵佰平.基于物联网技术的智慧农业大棚设计与应用[J].农业与技术,2021,41(13):69-71.
- [16] 王逸鹏,张激.基于ZigBee的互联网+智慧农业系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2021,21(1):76-79.
- [17] 范宇飞.蘑菇栽培温室无线监控系统设计[D].保定:河北大学,2016.
- [18] 王能辉,胡国强.基于NB-IoT的农田远程监测系统的设计[J].陕西农业科学,2017,63(12):82-85.
- [19] KORNER O, BAKKER MJ, HEUVELINK E. Daily temperature integration: a simulation study to quantify energy consumption [J]. Biosystems engineering,2004,87(3):333-343.
- [20] HERRERO J M, BLASCO X, M. MARTÍNEZ, et al. Non-linear robust identification of a greenhouse model using multi-objective evolutionary algorithms[J]. Biosystems engineering,2007,98(3):335-346.
- [21] GURBAN E H, DRAGOMIR T L, ANDREESCU G D. Greenhouse climate control enhancement by using genetic algorithms [J]. Control engineering & applied informatics,2014,16(3):35-45.
- [22] D RODRÍGUEZ, RECA J, J MARTÍNEZ, et al. Automatic irrigation control system for soilless culture based on feedback from drainage hydrograph [J]. Applied engineering in agriculture,2017,33(4):531-542.
- [23] 王纪章.基于模型的温室环境调控专家系统研究[D].镇江:江苏大学,2005.
- [24] 汪小昆,丁为民,罗卫红,等.南方现代化温室能耗预测模型的建立与分析[J].南京农业大学学报,2006(1):116-120.
- [25] 卢佩,刘效勇.温室大棚温湿度模糊解耦控制系统设计与仿真[J].农机化研究,2010,32(1):44-47.
- [26] 王鸿磊,李晓东,徐平平.模糊专家与PID混合控制的温室高效增温算法研究[J].现代电子技术,2017,40(8):14-18.
- [27] 弓正,张昊,胡欣宇.基于模糊PID控制的温室环境控制系统研究[J].物联网技术,2018,8(8):98-100.
- [28] 王冠龙,崔靛,朱学军.基于数字PID算法的温度控制系统设计[J].传感器与微系统,2019,38(1):86-88,96.
- [29] 赵亚威,于洋,殷菲鹤,等.温室环境与叶类蔬菜生态势模型研究[J].北方园艺,2020,464(17):143-150.
- [30] 胡瑾,隆星月,邓一飞,等.基于水分利用率与光合速率的温室作物需水模型研究[J].农业机械学报,2020,51(10):369-377.
- [31] 井翠清.武威市智慧农业温室大棚环境监控系统平台建设探究[J].农业与技术,2021,41(11):4.
- [32] 石岩,周新宇,王迎飞.温室环境控制方法研究综述[J].信息通信,2020(3):61-62.
- [33] 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(01):8-15.
- [34] 石岩,周新宇,王迎飞.温室环境控制方法研究综述[J].信息通信,2020(3):61-62.
- [35] 孙宏虎,朱宇,刘凡,等.基于BP神经网络PID微生物培养箱温控装置及其温控方法[P].中国专利:110333653A,2019-10-15.
- [36] 何海兴,白金磊,杜凯冰,等.基于货运机车ATO运行场景的专家系统PID控制算法应用研究[J].机车电传动,2021(4):112-118.
- [37] 孔硕,刘璐璐,史雨薇,等.基于改进遗传算法的脱硫浆液pH值PID控制[J].电工技术,2021(16):1-3.
- [38] 张宏,常明,王铁峰.智能控制及其应用展望[C]//创新驱动,加快战略性新兴产业发展——吉林省第七届科学技术学术年会论文集(上).吉林省科协,2012.
- [39] 常世杰,杜云明,田思庆.基于Matlab GUI的PID参数整定平台开发[J].中国科技信息,2021(16):2.
- [40] 何东健,刘忠超,范灵燕.基于MATLAB的PID控制器参数整定及仿真[J].西安科技大学学报,2006,26(4):5.
- [41] 洪诗益,吴伟,刘斌.基于AMESim与Simulink的液压牵引器驱动机构联合仿真[J].机电工程技术,2021,50(1):67-70.
- [42] 唐昊,刘海刚,刘群,等.电磁智能小车控制算法设计[J].实验室科学,2014,17(4):67-71.
- [43] 方书起,贺李萍,张龙龙,等.质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展[J].郑州大学学报:工学版,2015(6):5.
- [44] 马爱国,邹广坤,陈玲,等.浅析PID控制的调试方法[J].河南建材,2015(2):2.
- [45] 周垚.基于模糊综合评判的陆军中型合成旅运行物资集装化品类筛选[J].现代商贸工业,2020,41(18):2.
- [46] 董亚非.浅谈智能控制[J].淮南职业技术学院学报,2002,2(1):5.
- [47] 左文涛.基于嵌入式平台的数控铣削加工递阶智能控制器研究[D].上海:同济大学,2007.
- [48] 吴赛男.约束车辆队列系统参数化模型预测控制[D].杭州:浙江工业大学,2018.
- [49] 张伟伟,曹谢东,张斌,等.基于模糊控制的水温控制系统设计与实现[J].微型机与应用,2014,33(17):88-91.
- [50] 邱志成.智能结构及其在振动主动控制中的应用[J].航天控制,2002,20(4):8.
- [51] 杨文浩,苟斌,雷渝,等.基于模型预测控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[J].电工电能新技术,2020,39(8):11.
- [52] 刘钺诚,钟鸣,曾平良,朱良管,黄林海.一种基于液态空气储能枢纽站的分布式压缩空气储能系统模型预测控制方法[J].电测与仪表,2020,57(20):121-128.
- [53] 程爱军.洗衣机门体安全控制方法[P].中国专利:CN111254632A,2020-01-21.
- [54] 陈芊蕙.智能控制在学校和家庭教育中的应用简介[J].科技传播,2019,11(15):2.
- [55] 柴福林.浅析凝汽抽汽式汽轮机组转速与抽汽解耦控制原理及其应用[J].化工自动化及仪表,2016(8):5.
- [56] 孙勇.智能控制理论及应用[J].中国科技博览,2011(29):1.
- [57] 王朝霞.多变量解耦控制方法的研究[J].电子世界,2018(24):2.
- [58] 韦晓慧.多温区测控系统的解耦分析[D].长沙:中南大学,2007.
- [59] 秦一,贺春林.浅谈人工神经网络控制[J].信息通信,2014(11):2.
- [60] 郑昱,陶倩楠.神经网络在未来深空探测中的应用[J].太空探索,2017(8):4.
- [61] 马维军.基于无线传输的温室数据采集与控制系统研究与设计[D].青岛:青岛科技大学,2020.