

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.001

温室环境控制方法研究进展分析与展望

毛罕平¹ 晋春^{1,2} 陈勇^{1,3}

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏科技大学电子信息学院, 镇江 212003; 3. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 温室环境优化调控方法和技术能有效改善温室作物的生产条件, 提高光能资源的利用效率, 从而实现温室作物的高产、高效、优质生产。为了充分利用国内外的研究成果, 促进我国在该领域的研究与应用, 从基于设定值、智能算法、多目标优化、多因子耦合和基于作物生长信息的环境控制方法等5方面, 综述了温室环境控制方法的国内外研究进展。针对我国该领域的研究现状和存在的问题, 提出今后应解决光/温/营养耦合高效控制机理、植物表型高通量检测方法等重大科学问题, 突破信息感知、物联网、智慧管控等关键技术, 形成具有中国特色的温室智能化测控技术体系。

关键词: 温室; 环境控制; 智能算法; 多目标优化; 耦合; 智慧管控

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0001-13

Research Progress and Prospect on Control Methods of Greenhouse Environment

MAO Hanping¹ JIN Chun^{1,2} CHEN Yong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

3. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The optimal control methods and techniques of greenhouse environment can effectively improve the production conditions of greenhouse crops and utilization efficiency of light energy resources, so as to realize the production of high yield, high efficiency and high quality. In order to make full use of domestic and international research results in greenhouse environmental control, and promote Chinese development in greenhouse area, the recent research progress of greenhouse environment control methods was summarized from five aspects based on set point, intelligent algorithms, multi-objective optimization, multi-factors coupling and crop growth information. It was considered that the major scientific problems should be solved in the future, which involved efficient control mechanism of light/temperature/nutrition coupling, high-throughput detecting method of plant phenotype. In this way, the key technologies in greenhouse can be broken through, such as information perception, internet of things, wisdom management and control, etc. A technology system of intelligent measurement and control with Chinese characteristics in greenhouse would be formed.

Key words: greenhouse; environment control; intelligent algorithms; multi-objective optimization; coupling; wisdom management and control

0 引言

作物的生长过程本质是作物受环境、营养、水分等外部因子作用, 并对其进行转化的复杂的动力学

过程。设施内作物生长环境参数的空间分布性强、时空变异性大、多参数间相互影响, 加上不同种类作物之间的差异, 造成传统的栽培和环境调控方式很难适应不同种类、不同生育期的生长需要。而要获

收稿日期: 2017-12-10 修回日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61233006)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1033-02)和江苏省高校优势学科建设工程项目(苏财教(2014)37号)

作者简介: 毛罕平(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备和设施农业环境控制技术研究, E-mail: maohp@ujs.edu.cn

得高产优质的产品和高经济效益的回报,应具备先进适用的信息检测和环境控制手段。要为作物提供优化的生长环境,就必须从温室作物的生长状态、生长模型及其与环境的作用关系着手,将生物-环境-工程相结合,研究环境优化调控的生理机制,优化调控方法和控制系统,有效地改善温室作物的生产条件,提高光能资源的利用效率,从而实现设施作物的高产、高效、优质生产。

因此,先进适用的温室环境控制技术在现代设施农业生产中占重要的地位。自20世纪60年代欧洲学者^[1]开展温室生产及其环境控制研究以来,目前温室环境控制技术已经相当成熟,硬件上从分布式单机控制^[2]发展到当前的物联网控制^[3],控制因素从单一的温度发展到温、光、水、肥等多因素协同控制^[4],控制目标也转移到节能、节水、节肥等可持续性社会发展需求上^[5]。温室环境控制方法也多样化,不同的温室结构、设施装备、目标需求和地理位置都衍生出不同的控制方法^[6]。国外温室环境控制方法的发展,主要历经了单因子控制^[7]、综合

环境控制^[8]、基于模型的决策控制^[9-10]、经济最优控制^[11-12]、作物信息反馈的优化控制^[8,13-14]等阶段;国内的发展历程与国外相似,相关研究成果见文献^[15-21],虽然取得了长足进步,但是起步较晚,不论温室、作物的机理基础研究,还是温室应用技术手段,都与发达国家差距较大。

本文对国内外温室环境控制方法和技术的研究成果进行综述,并提出今后发展和研究工作的建议,以期为我国温室环境控制领域的研究工作提供参考。

1 基于设定值的温室环境控制方法

基于设定值的温室环境控制方法,是通过设定环境气候值或轨迹,再由控制软件(算法)决策出执行机构的动作时序,以使作物一直处于设定的生长环境中。图1是一种典型的二级设定值控制框图,产生和实现设定值(控制器设计)是其2个核心要素。不同的温室需求、控制要求将决定设定值的产生和实现方式。

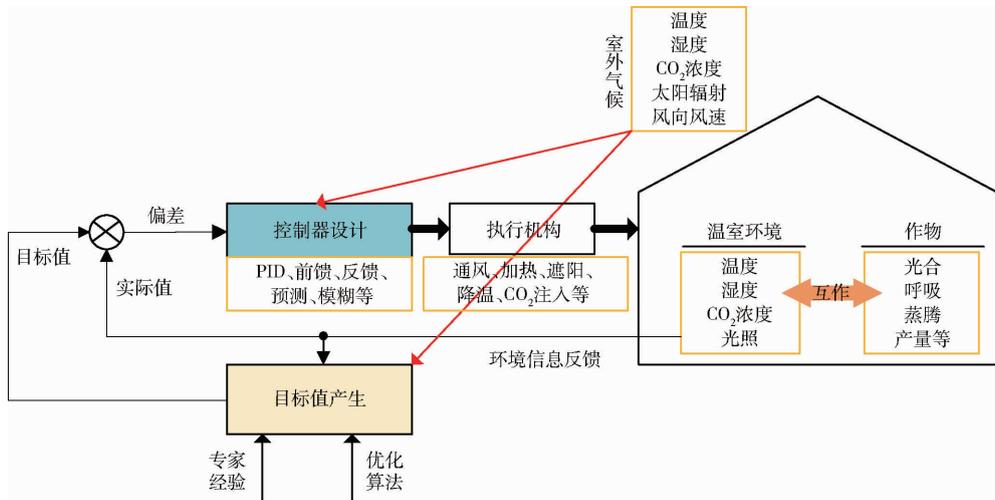


图1 典型的二级设定值控制原理图

Fig. 1 Framework of typical two-level set point control

1.1 基于经验的设定值控制

完全根据人为经验来设定室内温度、湿度、光照等环境值,控制器根据环境传感器检测的结果对比经验设定值(目标值)做出动作决策,以维持作物生长的较适宜室内环境。该方法简单便捷,随着自动化、计算机等技术逐步发展,被成熟应用于温室生产。如:UDINK TEN CATE等^[8]研究的计算机控制系统;毛罕平等^[16]研制的工厂化蔬菜生产成套装备;AASLYNG等^[22]以查表方式寻求自然光照下最优的温度和CO₂浓度目标值;张海辉等^[23]以CO₂浓度目标值与实时值之间的差值作为调控参数,实现CO₂动态调控。

基于积温的设定值控制是一种节能的方法。图2

是其控制示意图,在5d的控制周期内,5d的总积温相同则作物的生长量就相同。基于积温的设定值控制可以利用后期(第4天、第5天)的高温来弥补前期(第2天、第3天)的低温,从而使周期内平均积温达到预期目标值,在这5d内如果室内温度在作物的最高、最低温度范围内,既不用加温也不用降温;而常规的设定值控制需要加热(第4天、第5天)、降温(第2天、第3天)处理,导致能耗成本增加。

CHALABI等^[24]首先运用积温方法在线确定温度加热设置点,SIGRIMIS等^[25]、袁洪波等^[26]将全天24h均分成若干时间段,根据每日期望平均温度,实现各时间段的温度调控。而KÖRNER等^[27]提出了

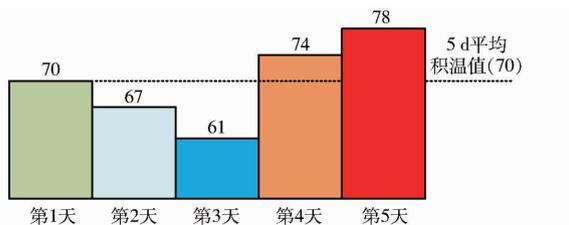


图2 基于积温的设定值控制示意图

Fig. 2 Diagram of set point control based on temperature integration

嵌套短期和长期两种动态积温的方法, 相比以上固定式积温方法, 年均节能提高9%。生产实践中, 积温控制策略常受到很多因素的限制, 如昼夜差温(昼夜平均温度之差)、作物所能承受的温度带宽和积分周期^[28], 特别是对湿度、CO₂浓度的控制措施, 常与积温控制效果相互干扰。

经验设定值控制方式, 主要关注维持室内适宜的环境值, 特别是温度、湿度值, 对作物生理特性、温室能耗和资源利用率等都不进行优化考虑。实际上, 作物生产是个周期长的复杂过程, 诸如室外气候、作物生理状况、市场价格等影响因素很多, 仅仅依赖于人工设置目标环境值, 已不能满足现代智能化温室的需求。

1.2 基于优化的设定值控制

鉴于人工设定方式存在诸多缺点, 考虑作物生长特性、能耗、经济效益等需求目标, 通过优化计算得到室内环境动态值(轨迹), 将是先进科学的方法。SEGINER等^[29]根据作物生长模型和性能指标函数, 采用庞德里亚金极小值原理(PMP)计算出不同温光水平下最优的温室白天温度设定值。戴剑锋等^[30]建立了基于能耗预测等模型的温室加热控制目标计算机优化系统, 可优化计算出温室白天和夜间的温度设置点。王定成等^[31]根据温室环境和作物生长模型采用遗传算法自动确定室内环境的设定值。季宇寒等^[32]通过建立SVM的光合速率预测模型, 以实现CO₂的按需增施。这些研究都是基于模型的最优化计算方法, 可以将温室结构和环境约束、作物特性、能耗需求以及其他约束条件融合一起, 理论上最适应当前智能化温室控制的需求。但是其控制精度很大程度上受限于模型的准确性、复杂性, 由于在作物生长模型、能耗预估模型等研究上的不足, 导致与温室实际生产要求还有一定的距离^[33]。

1.3 设定值控制的实现方法

设定值产生方式不同, 其实现方法和适宜场合也不尽相同。针对经验设定环境值的简易温室, 一般的单片机、PLC、DCS等这类控制器可以直接控制^[2]。如张侃谕等^[34]利用PLC控制器可实现温

度、湿度和光照等设定目标值的实时跟踪调控。其控制算法可依据各执行机构的技术效果^[35]进行简易推理实现。而为了提高控制系统的动态调控品质和控制精度, PID控制被广泛应用于设定值跟踪控制中^[36]。

传统的PID控制是应用最早、最广的控制算法, 可以消除目标值与实际值之间的误差而进行设定值跟踪控制^[37]。比例系数(K_p)、积分系数(K_i)、微分系数(K_d)3个参数的整定是影响PID控制品质的关键, 许多学者运用智能算法进行参数优化整定^[38-39], 或者通过改进的PID控制策略^[40-41], 以提高控制精度和系统的鲁棒性, 其中, 王立舒等^[42]利用多目标进化算法(NSGA-2)进行温室温湿度双PID控制的参数在线整定, 具有一定的先进性和代表性。

由于PID控制依赖于准确的被控对象模型, 而温室环境系统的复杂性、外部干扰气候的多变性导致适用于控制的模型精准性不高, 因此结合模糊规则、神经网络模型, 形成模糊PID^[43-44]、神经网络PID^[45-46]、模糊神经网络PID^[47]等方法, 是现代温室环境PID控制研究的主要内容。

2 温室环境智能控制算法

设定值等传统控制方法在温室环境控制领域中主要面临着模型精准性、强干扰(室外天气)、多变量控制等问题, 且对能耗、经济价值等生产性指标问题未作考虑。与现代智能算法相结合, 充分考虑多因子环境、多性能指标, 是其研究的发展思路。

2.1 模糊控制算法

针对温室环境系统难以建立精准模型问题, 引入模糊控制, 经模糊推理完成控制决策, 以克服传统控制方法的诸多问题^[48], 取得了诸多研究成果, 如LAFONT等^[49]对温室温湿度进行两种模糊控制方法研究, 对其优缺点进行了对比讨论。汪小昂等^[50]根据温室内温度的控制特点, 应用模糊控制理论对温室温度加热进行控制, 朱伟兴等^[51]也基于模糊控制技术实现温室加热器的温度控制。

当控制变量增多, 模糊控制规则将呈指数增长。余泳昌等^[52]以空气温度、相对湿度和光照度3个过程变量作为输入量, 3个执行机构的功率调整作为输出量, 采用三维模糊控制技术实现了温室环境参数控制的智能化。马明建等^[53]建立一个5输入4输出控制系统, 全部模糊控制规则达到196条。模糊控制规则增长, 将导致软件计算量大大增加, 不利于在线实时控制。

模糊控制的缺点也很明显, 其模糊控制规则完

全由操作者的经验和专家知识获取,并不能保证规则的最优或次最优。因此可以采用遗传算法优化模糊控制规则,马长华等^[54]研究结果表明其优化后的控制品质有较大的改善和提高。

2.2 神经网络控制与其他方法

神经网络具有自组织、自学习、自适应识别等特征,在温室环境的建模和参数优化、预测和控制等方面得到广泛运用^[55-57]。但是由于自身算法容易陷入局部极小值、收敛速度慢且执行速度低下,使其需与PID控制^[45]、模糊控制^[58-59]等方法相结合。

预测控制以其对模型形式要求宽松以及能够处理多变量、有约束问题的特征,也广泛应用于温室环境控制中^[60]。GHOUMARI等^[61]通过对一个温室环境机理模型运用改进的扩展线性预测控制器(MELPC),进行温度设定值的跟踪控制。沈敏等^[62]采用一种结构、计算简单的离散预测模型,能够简便、有效地在线对具有大分布时滞的温室测控系统实现开关设备组合优化预测控制和时延补偿。

此外,解耦控制^[63]、鲁棒控制^[64]、混杂控制^[65-66]等现代控制方法在温室环境控制应用中也取得了良好的效果。

3 多目标优化的温室环境控制方法

从结果上来看,温室作物生产主要关注于作物的产量、品质及其经济效益,资源(电能、水、肥等)作为社会可持续性发展的关键要素,也是生产目标之一。随着近年来现代智能化温室的目标需求不断延伸,温室环境控制已成为一个多目标优化控制问题,研究者开展了多方面有关温室环境的优化控制研究,按照最优目标的不同,分成以下几方面。

3.1 最大输出量或节约能耗为优化目标的控制方法

以往的研究者大多是专注于作物的产量最大化,不考虑成本。一般在整个生产期内设置一个环境值的“蓝图”,使作物按照预期成长轨迹进行预测计算和调控。GENT等^[67]通过作物光合、呼吸作用研究温度对作物生产的影响,以计算获得最大产量时的温度需求。TCHAMITCHIAN等^[68]研究了基于番茄生产的专家系统(SERRISTE),可以生成每日平均温度、昼/夜温度等各项气候控制目标。RODRÍGUEZ等^[69]研究了一种多级分层控制结构体系,可以在顶层上多目标优化计算出温室昼/夜温度目标值(轨迹),以此作为底层跟踪控制的目标。

但是由于作物生产是个长期的过程,产量容易受到许多干扰因素影响。另外随着能耗越来越受到重视,完全不计成本的方法,已不符合当前社会发展趋势。与专家系统结合,兼顾作物产量和能耗需求,

将是个可行的方法^[70]。邓璐娟等^[20]以24h为周期确定环境动态气候温度目标值,进行最适合的温度和CO₂浓度控制,实现了植物生长最优,同时又节省了能源。

3.2 经济效益最优为目标的控制方法

温室环境控制的目标不是仅仅追求产量、也不是节能,经济效益最大化才是应追求的目标。综合考虑作物和能耗市场价格等,可将温室环境的经济最优控制问题归纳为

$$\begin{cases} \max_{u^*(t)} J(u) = \int_{t_0}^{t_f} \{ \phi(X_s(t)) - [L(X, u, V, t) + \\ P_T(X_T, u, t) + P_h(X_h, u, t) + P_c(X_c, u, t)] \} dt \\ \text{s. t.} \begin{cases} \dot{X} = f(X, u, V, t) & (X(t_0) = x_0) \\ X_{i_{\min}}(t) \leq X_i(t) \leq X_{i_{\max}}(t) & (i \subset I_Q) \\ u_{i_{\min}}(t) \leq u_i(t) \leq u_{i_{\max}}(t) & (i \subset R) \end{cases} \end{cases}$$

式中 t ——时间

t_0 ——作物开始定植日期

t_f ——作物收获日期

$f(X, u, V, t)$ ——温室-作物系统的状态方程

X ——状态变量 X_T ——温度变量

X_h ——湿度变量 X_c ——CO₂浓度变量

x_0 ——状态变量初值

u ——控制输入量

V ——室外气候变量

i ——编号,各状态变量(X_i)存在约束范围 $[X_{i_{\min}}, X_{i_{\max}}]$,各控制输入量(u_i)也存在约束范围 $[u_{i_{\min}}, u_{i_{\max}}]$

$J(u)$ ——作物生产的经济效益,即用经济收入函数($\phi(X_s(t))$)减去能耗成本($L(X, u, V, t)$)与惩罚函数之和

$u^*(t)$ ——最优控制量

I_Q ——状态变量数

R ——控制输入参数

P_T ——温度惩罚函数

P_h ——湿度惩罚函数

P_c ——CO₂浓度惩罚函数

那么,经济效益最优的控制方法,就是在给定初始状态值条件下,满足一定的状态量和控制量的约束条件,寻求最优控制输入量,以使性能指标 $J(u)$ 最大化。

早期SEGNER^[71]使用简单的作物生长函数和温室气候模型,引入PMP原理,以求解作物经济收益和加热成本的最优问题。基于类似的原理,VAN HENTEN^[72]运用一个低阶的温室-作物动态模型和双时标分解的控制结构,对生菜生长收益与能耗成

本作最优化计算, 仿真结果表明比传统方法经济效益提高 15%。在此基础上, TAP^[73] 对番茄果实收益与能耗成本作最优化计算, 并进一步引入滚动时域优化控制方法 (RHOC), 实现了番茄生产的长期优化控制与试验, 结果表明可提高能源效率 8.5%。该类经济效益最优的环境控制方法, 主要以荷兰 Wageningen 大学诸多研究成果最有代表性^[74-75], 这些研究主要考虑作物经济效益与温室执行机构的操作成本 (加热燃料费、CO₂ 施肥费等)。

3.3 多目标优化控制方法

实际上, 上述优化还是属于单目标优化控制问题。温室环境控制的目标不仅仅在于作物的经济效益 (经济收入减去能耗成本), 还可以对一些其他主要目标作综合考虑。如 VANTHOOR 等^[76] 在进行温室优化设计时不仅考虑到作物产量收益, 以及水、CO₂、化肥、燃料等资源消耗成本, 还将劳动力成本、投资成本 (含贷款利息) 等纳入优化目标中; RAMÍREZ-ARIAS 等^[77] 将作物经济利润、果实品质和水利用率作为温室环境分层控制的优化目标。多目标优化控制问题中, 由于控制目标、控制变量增多, 一般传统的梯度类方法将难以实现目标问题的求解, 只能求助于智能优化算法^[78]。VANTHOOR 等^[79] 运用可控随机搜索算法 (CRS) 以实现 8 个温室设计元素的最佳选取, 以达到年度经济效益最大化。朱丙坤等^[80] 运用遗传算法 (GA) 对加热、喷雾和通风等的相容控制问题进行了求解。这些研究结果反映出智能算法求解温室环境最优控制问题的有效性。

多目标优化控制问题中, 品质、市场价格的不可预测性给多目标优化带来了不确定性; 另外, 优化算法计算时间一般较长, 实时性较差, 因此, 研究满足温室实时要求的多目标全局优化控制尤为重要。

4 多因子耦合环境控制方法

温室控制对象包括环境变量、水肥变量和作物参数。由于温室是一个相对封闭的结构, 温度、光照、湿度、CO₂ 浓度、土壤含水率、施肥量等变量之间存在着显著的耦合和约束关系, 如图 3 所示。气候环境因子之间相互耦合表现在: 温度、湿度是一对互为影响的变量, 保温与 CO₂ 浓度也是相互矛盾; 作物与环境之间的耦合表现在: 由于温室效应, 作物生长过程进行光合作用、呼吸作用和蒸腾作用对温室内的气候条件有很大的影响, 同时气候条件的变化对作物的生长又有影响; 地上气候环境与地下水肥环境的耦合表现为: 土壤蒸发和作物蒸腾的水分一部分因冷凝又回到地面, 形成一个土壤 (基质) 水

分——蒸腾和蒸发——回落到土中的水分小循环。温室内温度、湿度、光照等气候因子变化影响水肥需求量, 水肥的多少也直接影响作物的生长和蒸腾。

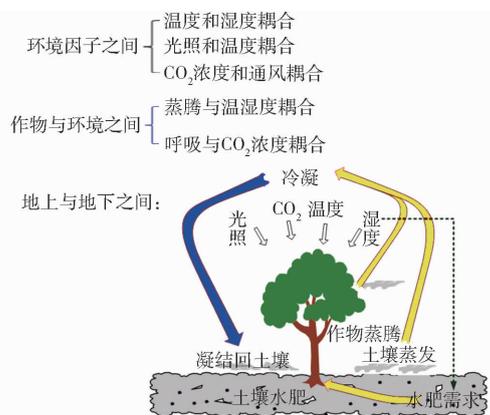


图 3 温室环境多因子耦合关系示意图

Fig. 3 Diagram of multi-factors coupling relationship in greenhouse

上述众多因子之间的强耦合使得作物和环境的建模、多因子协调控制变得非常复杂, 影响系统的稳定性、鲁棒性, 传统控制方法往往采取回避策略, 导致调控结果无法达到理想设定值。目前研究主要针对温度和湿度的耦合关系以及水肥之间的耦合关系等。

4.1 环境因子耦合控制方法

温室系统是个多输入多输出、强耦合的复杂系统, 像温度、湿度、光照等环境因子之间的互作关系一直是影响控制精度的难点, 精确调控时应考虑如何解除环境变量之间的耦合关系, 并充分考虑约束作用。解耦控制也是一种行之有效的方法^[81]。目前有模糊解耦控制^[82]、前馈补偿^[83]、反馈线性化^[84]等解耦方法应用在温室环境控制中。

温湿度耦合是环境耦合中最强烈的, 诸多学者尝试利用前馈控制、模糊控制、神经网络进行解耦控制, 控制结果的精度逐步提高。宫亦坤等^[58] 利用系统辨识建立温室温湿度调控模型, 将模糊控制器 2 个输入、7 个输出转换为 14 个单变量模糊控制器的相交组合, 从而解除了温湿度耦合关系, 实现了对温湿度的分别调控。程文锋等^[84] 对温室温湿度运用前馈控制, 解除温湿度强耦合关系, 将环境控制系统改造为多个线性单变量控制系统。张荣标等^[85] 利用前馈控制对温湿度进行解耦, 并利用自适应算法改进了传统的动态矩阵控制 (DMC) 方法, 提高了对模型的适应性。

引入解耦方法, 对多因子变量进行解耦, 形成单变量控制, 是一种常用的方法。但是增加变量因子, 对其数学模型与解耦方法要求较高, 控制难度大大增加。因此, 目前主要关注于温湿度的解耦控制, 且

计算也较复杂,对其他复杂环境很少涉及。

4.2 水肥耦合控制方法

粗放式的“粪大水勤”逐渐被“以肥调水”的精细灌溉模式取代。水与肥、不同营养元素之间的相互耦合关系会影响水和营养元素的吸收。目前对水肥耦合的研究主要针对如何获取最优水肥浇灌比例和浇灌量,以及水肥和不同营养元素耦合关系对作物产量、品质、水肥利用率以及水土保持等诸多方面的影响,结论通常基于产量、水肥吸收率等给出单因素的最优水肥推荐值。如王鹏勃等^[86]、邢英英等^[87]、杨丹妮等^[88]研究了不同水肥条件下,产量、品质、水肥利用率、经济等因素分别最大化的条件以及综合因素最优的水肥组合。TIPIS^[89]建立了以光照、饱和蒸汽压亏缺和叶面积指数为变量的腾发量方程,用作灌溉决策。ZHANG等^[90]研究了根据腾发量不同百分比进行灌溉对番茄产量、品质和水利用率的作用,发现适度水分胁迫的综合效果最佳。

由于建模和解耦的复杂性,目前缺乏通适的随环境和作物变化的水、营养元素与作物生长关系模型,未有综合环境和水肥解耦控制方面的报道。

5 基于作物生长信息的温室环境控制方法

作物生长实质是对所处的气候和水肥环境的动态响应,这种响应被称为“Speaking Plants”^[8,91],即会说话的植物。以作物长势信息为自变量,环境水肥因子为因变量,建立两者之间的定量模型,实现按作物实际需求进行环境和水肥供给,将极大提高温室调控水平。图4为该方法的控制框图。作物生长是个长期过程,可以从整个生产期(上市期已定)、

各生育期、每日等不同生产管理时间尺度上进行控制决策,以满足作物不同生长阶段的目标需求。构建包括作物氮素、水分,以及冠层面积、特定叶长、茎粗、植株和果实生长速率等生长信息的低成本检测系统,并按照光照、温度、湿度、CO₂浓度等因子状态变量和环境目标值,进行动态反馈来控制光、温、湿、肥、气执行机构。

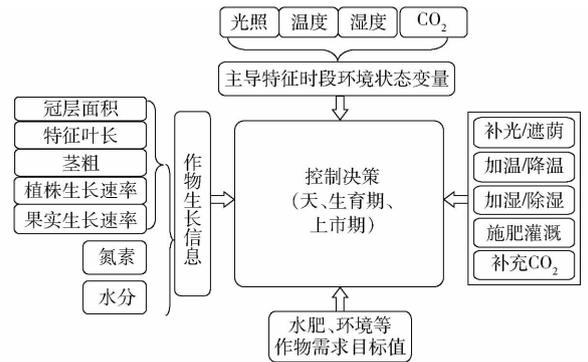


图4 基于作物生长信息的温室环境控制框图

Fig. 4 Framework of greenhouse environmental control based on crop growth information

5.1 作物生长信息获取与解析

作物生长信息包括:形态信息,如株高、茎粗、果实直径、冠幅投影面积等;生理信息,如光合速率、蒸腾速率、叶温、营养水平等;电特性信息,如阻抗、电容、电位等。作物信息获取手段丰富,但适用于温室控制的信息采集方法应是无损的、实时的。表1列举了当前国内温室获取作物信息的主要技术手段及其关联性研究成果。形态特征采集技术一般采用非接触式实时在线测量,图像处理、机器视觉、激光与视觉结合等技术是常用的方法,而阴影、遮挡、重叠

表1 温室作物生长信息获取技术

Tab. 1 Information acquisition technology of greenhouse crops

技术手段	分析对象	关联性研究内容	文献序号
计算机视觉	番茄主茎图像	番茄主茎识别	[92]
	瓜果果实图像	黄瓜果实识别 番茄绿果识别	[93] [94]
	植物群冠层图像	植物群生长参数在线无损检测	[95]
	生菜俯视及侧视序列图像	生菜长势监测	[96]
	激光视觉	作物三维图像	作物叶片与茎秆识别
番茄重叠果实图像		番茄果实识别	[98]
光谱与高光谱图像技术	黄瓜近红外光谱数据	黄瓜植株氮、镁元素亏缺诊断	[99]
	生菜高光谱图像	氮素含量预测	[100]
	叶片偏振-高光谱图像	营养元素诊断	[101]
	番茄叶片反射光谱图像	番茄氮磷钾营养水平快速诊断	[102]
微电极技术	黄瓜叶片膜电位信号	氮胁迫早期诊断	[103]
叶阻抗谱技术	番茄叶片阻抗电信号	含水率监测	[104]

等外界干扰情况是其中需要解决的关键问题^[105]。作物生理信息获取中,对光合、蒸腾速率等建模方法

研究较多,如:张大龙等^[106]研究温室环境对甜瓜蒸腾的驱动和调控机理。而对营养水平的诊断主要借

助于光谱、计算机视觉、微电极等技术,特别是高光谱图像技术集光谱和图像信息于一体,为热点研究方法。不过,还需要借助于主成分分析、最小二乘回归等方法建立关联模型,普适性、准确率还有待提高;此外生理信息的采集往往要通过现场手工测量,测量设备需进一步智能化才能适用于自动控制。电特性信息中,阻抗、电容信息需通过接触测量获得,LI等^[107]利用叶阻抗谱技术对K营养水平进行评价,用细胞组织的等效电路模型分析了测量的阻抗数据,提取了K营养水平的灵敏的阻抗谱特征;胡静等^[103]用微电极技术测量黄瓜叶片的膜电位、膜电容和膜电位对光激励的响应,实现氮胁迫的早期诊断。电特性的信息采集也要通过现场手工实现,且其长期连续自动检测会影响作物生长。

针对将采集到的信息转化为作物对气候因子和水肥的实际需求,学者们进行了多方面的研究。如高洪燕等^[108]通过光谱、冠层温度及温湿度信息,建立水分胁迫指数模型;王晓森等^[109]根据番茄茎粗及其日最大收缩量计算作物及土壤含水率;ZUO等^[110]通过茎直径预测番茄不同环境条件下的生长响应。

5.2 基于作物信息的反馈控制

根据作物信息对作物需求进行评判,因评判对象不同,难易程度相差较大。相对来说,对水肥需求的判断较为方便、可靠,因此根据作物生长信息反馈控制的研究多针对水肥灌溉^[111]。

AHMAD等^[112]对番茄水肥灌溉量分水平处理,建立基于作物株高、叶展宽度的需肥量模型,利用摄像头记录番茄株高和叶展宽度,计算番茄施肥量,利用计算结果控制施肥泵运行状态。袁洪波等^[113]研究了在封闭栽培模式下,以光照、温度、湿度、叶面积指数、作物种类、生长阶段为变量构建作物蒸腾量模型,并利用神经网络算法实现自适应灌溉控制,提高了控制精度。韩丽娜^[114]以温室环境值作为输入量,利用Penman-Monteith蒸腾模型,设计出一套温室智能滴灌控制系统。

温室中,环境和水肥变量以及作物是一个完整系统,各变量相互依赖,相互影响。相对于控制需求来说,目前对作物和环境、水肥控制的相关研究还不够完善。主要表现在:缺少集环境变量、水肥变量、作物生长信息为一体的综合温室调控模型;生长、灌溉、施肥模型往往不是面向控制,难以直接应用;模型中某些参数尚未实现在线测量,甚至必须在实验室严格的试验条件下才能获得,在线测量手段的缺乏阻碍了温室控制技术的发展;现有的模型要么过于复杂,变量太多,控制系统难以实现,要么过于简单,忽略了环境、水肥、作物各变量间的相互作用。

因此,目前的通常做法仅仅依据检测温室的温、光、湿、气等环境因子进行设定值控制。无法感知植物是否需求这样的控制,控制效果好不好。没有按照植物真实的动态需求信息进行反馈控制,导致作物产量潜力没有被充分挖掘,不仅不能高产,而且会增加生产成本、能耗,造成资源的浪费。与植物对话式的智能控制方式,是今后迫切需要解决的科学难题。

另外,受我国劳动力前期红利较大的影响,温室智能化技术一直是薄弱环节,只能对精准生产形成监控和指导,无法通过智能环境调控设备、智能生产作业设备全面提高生产效率,特别是劳动生产率。然而,荷兰、以色列等发达国家的温室管理智能化已成为技术创新与产业化开发的主要方向,可实现温室作物全天候、周年性的高效生产。

6 展望

针对上述现状和存在的问题,笔者认为我国温室环境控制方法和技术的研究应紧紧围绕设施农业工程的国家需求,以大幅度提高资源利用效率、单位土地产出率和设施种植产业可持续发展为目标,跟踪发达国家的研究前沿,解决光-温-营养耦合高效控制机理、植物表型高通量检测方法等重大科学问题,突破信息感知、物联网、智慧管控等关键技术,形成具有中国特色的温室智能化测控技术体系。今后应重点开展以下应用基础和关键技术研究。

6.1 应用基础研究

(1)光-温-营养耦合互作规律与环境高效控制机理

针对温室密闭/半封闭环境条件下,植物主要生理过程与环境因子之间及各环境因子之间的强耦合关系,开展作物与环境的交互作用机制研究,建立作物-环境的动力学耦合模型;提出光-温-营养耦合的环境高效控制方法,充分挖掘作物的生物学潜力,成倍提高产量。

(2)温室植物表型高通量检测方法

研究高通量多生境植物表型采集方法、植物表型大数据建模与基因-环境-表型互作规律与挖掘方法,高产、高效、抗逆智能化表型组分析评价方法,研制高通量多生境植物表型采集和分析系统,为温室环境精确控制和高效栽培提供依据。

6.2 关键技术研究

(1)温室作物生理和生境信息感知技术

研究温室植物生命信息的内部生化电反应、外部特性表征及其感知方法,探索作物体内生命体征、果实成熟度和品质、作物长势变化等信息的快速无损检测技术,突破多自然因素耦合干扰下植物生命

体征信息动态感知的难题,研发系列个体/群体植物生长信息传感器。

(2) 基于生长信息的温室环境智能调控技术

建立基于作物生长信息的长势动态预测模型,研究以实时获取的作物生长信息作为反馈控制量,开发出能够根据植物生长信息进行温室环境因子精确控制的智能装备,突破机器与植物对话、按照作物生长真实需要进行反馈控制的技术难题。

(3) 基于云计算与大数据的温室物联网智慧管理技术

研究集成物联网和云计算基础设施,引入大数

据分析技术,构建温室大数据应用综合服务云平台,以 NB-IOT 和 Lora 为代表的无线通信技术与温室测控设备无缝结合,推动温室物联网的发展,研发适合现代农业发展水平的温室设施监测系统。

(4) 设施园艺水肥耦合与封闭管理智能化技术

研究营养液浓度、配比、pH 值的精确调控技术,以及营养液回收液收集、消毒、检测、混合技术,开发水肥耦合与封闭管理智能装备,突破不能实时进行营养液的配比调整,难以做到精确水肥耦合管理和闭环灌溉的瓶颈,减轻作物连作障碍,降低环境污染。

参 考 文 献

- BUSINGER J A. The glasshouse climate physics of plant environment [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963: 277 - 318.
- 杜尚丰,李迎霞,马承伟,等. 中国温室环境控制硬件系统研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(1): 7 - 12.
DU Shangfeng, LI Yingxia, MA Chengwei, et al. Current situation on greenhouse environment control system modes in China [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 7 - 12. (in Chinese)
- 李萍萍,王纪章. 温室环境信息智能化管理研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4): 236 - 243. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140438&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.038.
LI Pingping, WANG Jizhang. Research progress of intelligent management for greenhouse environment information [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 236 - 243. (in Chinese)
- 李婷,季宇寒,张漫,等. CO₂ 与土壤水分交互作用的番茄光合速率预测模型[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(增刊): 208 - 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S034&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.034.
LI Ting, JI Yuhuan, ZHANG Man, et al. Tomato photosynthetic rate prediction models under interaction of CO₂ enrichments and soil moistures [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 208 - 214. (in Chinese)
- RODRÍGUEZ F, BERENGUEL M, GUZMÁN J L, et al. Modeling and control of greenhouse crop growth [M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
- 李迎霞,杜尚丰. 中国温室环境智能控制算法研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(2): 267 - 272.
LI Yingxia, DU Shangfeng. Advances of intelligent control algorithm of greenhouse environment in China [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 267 - 272. (in Chinese)
- WALKER J N. Predicting temperatures in ventilated greenhouses [J]. Transactions of ASAE, 1965, 8: 445 - 448.
- UDINK TEN CATE A J, BOT G P J, DIXHOORN J J. Computer control of greenhouse climates [J]. Acta Horticulturae, 1978, 87: 265 - 272.
- BOT G P A. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1983.
- JONES J W, DAYAN E, ALLEN L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO) [J]. Transactions of ASAE, 1991, 34(2): 663 - 672.
- SEGINER I. Optimizing greenhouse operations for best aerial environment [J]. Acta Hort, 1980, 106: 169 - 178.
- VAN HENTEN E J. Greenhouse climate management: an optimal control approach [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1994.
- HASHIMOTO Y. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept [J]. Acta Hort, 1989, 260: 115 - 121.
- TAKAYAMA K, NISHINA H, MIZUTANI K, et al. Chlorophyll fluorescence imaging for health condition monitoring of tomato plants in greenhouse [J]. Acta Hort, 2011, 893: 333 - 339.
- WANG Shaojin, CUI Shaorong, DELTOUR J, et al. Simulation of the application of different control methods to the greenhouse heating system [J]. Acta Agriculturae Universitatis Zhejiangensis, 1992, 18(4): 97 - 102.
- 毛罕平,李萍萍. 工厂化蔬菜生产成套装备及自动控制系统的研究[J]. 农业机械学报,1996,27(增刊): 111 - 114.
MAO Hanping, LI Pingping. The research on complete set of equipments for vegetable factory and automatic control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(Supp.): 111 - 114. (in Chinese)
- 李元哲,吴德让,于竹. 日光温室微气候的模拟与实验研究[J]. 农业工程学报,1994,10(1): 130 - 136.
LI Yuanzhe, WU Derang, YU Zhu. Simulation and test research of micrometeorology environment in a sun-light greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 130 - 136. (in Chinese)
- 倪纪恒,罗卫红,李永秀,等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. 中国农业科学,2005,38(8): 1629 - 1635.

- NI Jiheng, LUO Weihong, LI Yongxiu, et al. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1629 - 1635. (in Chinese)
- 19 伍德林, 毛罕平, 李萍萍. 基于经济最优目标的温室环境控制策略[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(2): 115 - 119.
WU Delin, MAO Hanping, LI Pingping. Environmental regulation techniques based on economic optimization in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(2): 115 - 119. (in Chinese)
- 20 邓璐娟, 张侃瑜, 龚幼民, 等. 温室环境多级控制系统及优化目标值设定的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 119 - 122.
DENG Lujuan, ZHANG Kanyu, GONG Youmin, et al. Preliminary study on hierarchical greenhouse environment control system and setting of the optimized target values [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5): 119 - 122. (in Chinese)
- 21 王纪章, 李萍萍, 毛罕平. 基于作物生长和控制成本的温室气候控制决策支持系统[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 168 - 171.
WANG Jizhang, LI Pingping, MAO Hanping. Decision support system for greenhouse environment management based on crop growth and control cost [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9): 168 - 171. (in Chinese)
- 22 AASLYNG J M, LUND J B, EHLER N, et al. IntelliGrow: a greenhouse component-based climate control system [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, 18(7): 657 - 666.
- 23 张海辉, 邵志成, 张佐经, 等. 基于无线传感网的设施环境二氧化碳精准调控系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 325 - 331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170341&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.041.
ZHANG Haihui, SHAO Zhicheng, ZHANG Zuoqing, et al. Regulation system of CO₂ in facilities based on wireless sensor network [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 325 - 331. (in Chinese)
- 24 CHALABI Z S, BAILEY B J, WILKINSON D J. A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 1996, 15(1): 1 - 13.
- 25 SIGRIMIS N, ANASTASIOU A, RERRAS N. Energy saving in greenhouses using temperature integration: a simulation survey [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2000, 26(3): 321 - 341.
- 26 袁洪波, 李莉, 王俊衡, 等. 基于温度积分算法的温室环境控制方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 221 - 227.
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Junheng, et al. Control method for greenhouse climate based on temperature integration [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(11): 221 - 227. (in Chinese)
- 27 KÖRNER O, BAKKER M J, HEUVELINK E. Daily temperature integration: a simulation study to quantify energy consumption [J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(3): 333 - 343.
- 28 陈晴, 孙忠富. 基于作物积温理论的温室节能控制策略探讨[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 158 - 161.
CHEN Qing, SUN Zhongfu. Energy-saving control strategy for greenhouse production based on crop temperature integration [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(3): 158 - 161. (in Chinese)
- 29 SEGNER I, SHINA G, ALBRIGHT L D, et al. Optimal temperature set points for greenhouse lettuce [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1991, 49(3): 209 - 226.
- 30 戴剑锋, 罗卫红, 乔晓军, 等. 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 187 - 191.
DAI Jianfeng, LUO Weihong, QIAO Xiaojun, et al. Model-based decision support system for greenhouse heating temperature set point optimization [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11): 187 - 191. (in Chinese)
- 31 王定成, 乔晓军, 汪春秀, 等. 基于作物响应的温室环境 SVMR 控制仿真[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊2): 290 - 293.
WANG Dingcheng, QIAO Xiaojun, WANG Chunxiu, et al. Simulation of greenhouse environment SVMR control based on plant response [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Supp. 2): 290 - 293. (in Chinese)
- 32 季宇寒, 李婷, 张漫, 等. 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 201 - 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S033&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033.
JI Yuhuan, LI Ting, ZHANG Man, et al. Design of CO₂ fertilizer optimizing control system on WSN [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 201 - 207. (in Chinese)
- 33 徐立鸿, 苏远平, 梁毓明. 面向控制的温室系统小气候环境模型要求与现状[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 1 - 15.
XU Lihong, SU Yuanping, LIANG Yuming. Requirement and current situation of control-oriented microclimate environmental model in greenhouse system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 1 - 15. (in Chinese)
- 34 张侃瑜, 余玲文. 基于 S7-224 的自动化温室控制系统设计[J]. *自动化仪表*, 2009, 30(2): 36 - 38.
ZHANG Kanyu, YU Lingwen. Design of automation greenhouse control system based on S7-224 [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2009, 30(2): 36 - 38. (in Chinese)
- 35 李萍萍, 毛罕平, 王多辉, 等. 智能温室综合环境因子控制的技术效果及合理的环境参数研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(3): 197 - 201.
LI Pingping, MAO Hanping, WANG Duohui, et al. Study on technique effect of greenhouse environment factors controlling and reasonable environment parameters [J]. *Transactions of the CSAE*, 1998, 14(3): 197 - 201. (in Chinese)
- 36 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.
ZHANG Xuehua, ZHANG Wu, YANG Xu, et al. Survey of research methods on agricultural greenhouse environment control [J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(1): 8 - 15. (in Chinese)

- 37 UDINK TEN CATEA J. Modelling and (adaptive) control of greenhouse climates [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1984.
- 38 牛芎洁,王玉洁,唐剑. 基于遗传算法的PID控制器参数优化研究[J]. 计算机仿真, 2010(11):180-182.
NIU Xiangjie, WANG Yujie, TANG Jian. Optimization parameters of PID controller parameters based on genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2010(11):180-182. (in Chinese)
- 39 HU H, XU L, GOODMAN E D, et al. NSGA-II-based nonlinear PID controller tuning of greenhouse climate for reducing costs and improving performances [J]. Neural Computing & Applications, 2014, 24(3-4):927-936.
- 40 SETIAWAN A, ALBRIGHT L D, PHELAN R M. Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 26(3):283-302.
- 41 ALBRIGHT L D, GATES R S, ARVANITIES K G, et al. Environmental control for plants on Earth and in space [J]. Control Systems IEEE, 2001, 21(5):28-47.
- 42 王立舒,侯涛,姜森. 基于改进多目标进化算法的温室环境优化控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):131-137.
WANG Lishu, HOU Tao, JIANG Miao. Improved multi-objective evolutionary algorithm for optimization control in greenhouse environment [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):131-137. (in Chinese)
- 43 王风云,赵一民,张晓艳,等. 基于分段控制策略的温室智能测控系统设[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5):178-181.
WANG Fengyun, ZHAO Yimin, ZHANG Xiaoyan, et al. Intelligent measure-control system design based on sectional-control strategy in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):178-181. (in Chinese)
- 44 王嘉宁,牛新涛,徐子明,等. 基于无线传感器网络的温室CO₂浓度监控系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7):280-285, 367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170735&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.035.
WANG Jianing, NIU Xintao, XU Ziming, et al. Monitoring system for CO₂ concentration in greenhouse based on wireless sensor network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):280-285, 367. (in Chinese)
- 45 屈毅,宁铎,赖展翅,等. 温室温度控制系统的神经网络PID控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):307-311.
QU Yi, NING Duo, LAI Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):307-311. (in Chinese)
- 46 HU H G, XU L H, WEI R H. Nonlinear adaptive Neuro-PID controller design for greenhouse environment based on RBF network [C]//Proceedings of the 2010 International Joint Conference on Neural Networks. Barcelona, Spain, 2010:1-7.
- 47 蒋景旺,吴云洁,吴梦晨. 神经网络模糊PID控制在高低温环境模拟系统的应用[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8):1922-1926.
JIANG Jingwang, WU Yunjie, WU Mengchen. Application of fuzzy PID control based on neural network on high/low temperature environmental simulation system [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8):1922-1926. (in Chinese)
- 48 赵斌,王克奇,匡丽红,等. 我国温室环境的模糊控制技术现状[J]. 自动化仪表, 2008, 29(5):1-4.
ZHAO Bin, WANG Keqi, KUANG Lihong, et al. Current situation of fuzzy control technique applied in greenhouse environment in China [J]. Process Automation Instrumentation, 2008, 29(5):1-4. (in Chinese)
- 49 LAFONT F, BALMAT J F. Optimized fuzzy control of a greenhouse [J]. Fuzzy Sets & Systems, 2002, 128(1):47-59.
- 50 汪小岳,丁为民. 温室内温度的模糊控制[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(3):110-113.
WANG Xiaochan, DING Weimin. Fuzzy control of temperature in greenhouse [J]. Journal of Nanjing Agric. Univ., 2000, 23(3):110-113. (in Chinese)
- 51 朱伟兴,毛罕平,李萍萍,等. 遗传优化模糊控制器在温室控制系统中的应用[J]. 农业机械学报, 2002, 33(3):76-79.
ZHU Weixing, MAO Hanping, LI Pingping, et al. A fuzzy controller based on genetic optimization and its application to a distributed control system of greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3):76-79. (in Chinese)
- 52 余泳昌,胡建东,毛鹏军. 现代化温室环境参数的模糊控制[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2):72-75.
YU Yongchang, HU Jiandong, MAO Pengjun. Fuzzy control for environment parameters in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2):72-75. (in Chinese)
- 53 马明建,李宝光,宋越东,等. 基于直接推理的温室环境多变量模糊解耦控制[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6):116-119.
MA Mingjian, LI Baoguang, SONG Yuedong, et al. Multivariable fuzzy decoupling control of a greenhouse environment based on direct inference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6):116-119. (in Chinese)
- 54 马长华,于世海,朱伟兴. 基于遗传算法的模糊控制规则优化的研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2003, 24(4):69-73.
MA Changhua, YU Shihai, ZHU Weixing. Research on optimization of fuzzy control rules based on genetic algorithms [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003, 24(4):69-73. (in Chinese)
- 55 LUAN X L, SHI P, LIU F. Robust adaptive control for greenhouse climate using neural networks [J]. Int. J. Robust Nonlinear Control, 2011, 21(7):815-826.
- 56 张漫,李婷,季宇寒,等. 基于BP神经网络算法的温室番茄CO₂增施策略优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8):239-245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150833&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.033.
ZHANG Man, LI Ting, JI Yuhuan, et al. Optimization of CO₂ enrichment strategy based on BPNN for tomato plants in greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):239-245. (in Chinese)
- 57 陈昕,唐湘璐,李想,等. 二次聚类与神经网络结合的日光温室温度二步预测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增

- 刊):353 - 358. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s054&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.054.
- CHEN Xin,TANG Xianglu,LI Xiang,et al. A two-steps prediction method of temperature in solar greenhouse based on twice cluster analysis and neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):353 - 358. (in Chinese)
- 58 宫赤坤,毛罕平. 温室夏季温湿度遗传模糊神经网络控制[J]. 农业工程学报,2000,16(4):106 - 109.
GONG Chikun,MAO Hanping. Summer temperature humid fuzzy neural network control in greenhouse by using genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE,2000,16(4):106 - 109. (in Chinese)
- 59 EDDINE C,MANSOURI K,MOURAD M,et al. Adaptive neuro-fuzzy inference systems for modeling greenhouse climate [J]. International Journal of Advanced Computer Science & Applications,2016,7(1):96 - 100.
- 60 BLASCO X,MARTINEZ M,HERRERO J M,et al. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2007,55(1):49 - 70.
- 61 GHOUMARI M Y E,TANTAU H J,SERRANO J. Non-linear constrained MPC: real-time implementation of greenhouse air temperature control [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2005,49(3):345 - 356.
- 62 沈敏,张荣标,盛碧琦,等. 温室测控系统开关设备优化组合预测控制方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):186 - 189.
SHEN Min,ZHANG Rongbiao,SHENG Biqi,et al. Predictive control method for greenhouse measurement and control system based on switch devices optimization combination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):186 - 189. (in Chinese)
- 63 马万征,毛罕平,李忠芳,等. 温室环境多变量控制系统解耦现状及发展趋势[J]. 江苏农业科学,2012,40(2):313 - 314,331.
MA Wanzheng,MAO Hanping,LI Zhongfang,et al. The current situation and trend of multi-variable control system decoupling in greenhouse environment [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2012,40(2):313 - 314,331. (in Chinese)
- 64 BENNIS N,DUPLAIX J,HALOUA M,et al. Greenhouse climate modelling and robust control [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2008,61(2):96 - 107.
- 65 MONTOYA A P,GUZMÁN J L,RODRÍGUEZ F,et al. A hybrid-controlled approach for maintaining nocturnal greenhouse temperature:simulation study [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2016,123(C):116 - 124.
- 66 储著东,秦琳琳,陆林箭,等. 实验温室温度系统混杂控制器设计与分析[J]. 中国科学技术大学学报,2015,45(4):268 - 274.
CHU Zhudong,QIN Linlin,LU Linjian,et al. Hybrid controller design and analysis for experimental greenhouse temperature system [J]. Journal of University of Science and Technology of China,2015,45(4):268 - 274. (in Chinese)
- 67 GENT M P N,ENOCH H Z. Temperature dependence of vegetative growth and dark respiration;a mathematical model [J]. Plant Physiol,1983,71:562 - 567.
- 68 TCHAMITCHIAN M,MARTIN R SERRISTE. A daily set point determination software for glasshouse tomato production [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2006,50(1):25 - 47.
- 69 RODRÍGUEZ F,GUZMÁN J L,BERENGUEL M,et al. Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production [J]. International Journal of Adaptive Control & Signal Processing,2008,22(2):180 - 197.
- 70 KÖRNER O,STRATEN G V. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2008,60(1):18 - 30.
- 71 SEGNER I. Optimal greenhouse production under economic constraints [J]. Agricultural Systems,1989,29(1):67 - 80.
- 72 VAN HENTEN E J. Greenhouse climate management: an optimal control approach [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University,1994.
- 73 TAP R F. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University,2000.
- 74 STRATEN G V,CHALLA H,BUWALDA F,et al. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2000,26(3):221 - 238.
- 75 STRATEN G V,HENTEN E J V,WILLIGENBURG L G V,et al. Optimal control of greenhouse cultivation [M]. Boca Raton: CRC Press,2011.
- 76 VANTHOOR B H E,GÁZQUEZ J C,MAGÁN J J,et al. A methodology for model-based greenhouse design: Part 4, economic evaluation of different greenhouse designs: a Spanish case [J]. Biosystems Engineering,2012,111(4):336 - 349.
- 77 RAMÍREZ-ARIAS A,RODRÍGUEZ F,GUZMÁN J L,et al. Multiobjective hierarchical control architecture for greenhouse crop growth [J]. Automatica,2012,48(3):490 - 498.
- 78 LOPEZ Cruz I L,VAN WILLIGENBURG L G,VAN STRATEN G V. Efficient differential evolution algorithms formultimodal optimal control problems [J]. Applied Soft Computing,2003,3(2):97 - 122.
- 79 VANTHOOR B H E,STIGTER J D,VAN HENTEN E J,et al. A methodology for model-based greenhouse design: Part 5, greenhouse design optimization for southern-Spanish and Dutch conditions [J]. Biosystems Engineering,2012,111(4):350 - 368.
- 80 朱丙坤,徐立鸿,胡海根,等. 基于节能偏好的冲突多目标相容温室环境控制[J]. 系统仿真学报,2011,23(1):95 - 99.
ZHU Bingkun,XU Lihong,HU Haigen,et al. Conflict multi-objective compatible control of greenhouse climate based on energy-saving preference [J]. Journal of System Simulation,2011,23(1):95 - 99. (in Chinese)
- 81 马明建,李宝光,宋越东,等. 基于直接推理的温室环境多变量模糊解耦控制[J]. 农业机械学报,2003,34(6):116 - 119.

- MA Mingjian, LI Baoguang, SONG Yuedong, et al. Multivariable fuzzy decoupling control of a greenhouse environment based on direct Inference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 116 - 119. (in Chinese)
- 82 AZAZA M, ECHAIEB K, TADEO F, et al. Fuzzy decoupling control of greenhouse climate [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2015, 40(9): 2805 - 2812.
- 83 GAO Y, SONG X, LIU C, et al. Feedback feed-forward linearization and decoupling for greenhouse environment control [C] // International Conference on Mechatronics and Control. IEEE, 2015: 179 - 183.
- 84 程文锋, 杨祥龙, 王立人. 温室温湿度的反馈前馈线性化解耦控制 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(增刊 1): 5 - 10. CHENG Wenfeng, YANG Xianglong, WANG Liren. Feedback feedforward linear decoupling control of temperature and humidity in greenhouse [J]. Journal of Southeast University: Natural Science [Edition], 2012, 42(Supp. 1): 5 - 10. (in Chinese)
- 85 张荣标, 褚夫环, 黄贤林, 等. WSN 节点温室环境试验系统的预测解耦控制 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 192 - 196. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120134&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.034.
- ZHANG Rongbiao, CHU Fuhuan, HUANG Xianlin, et al. Predictive decoupled control of WSN nodes greenhouse environment simulation experimental system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 192 - 196. (in Chinese)
- 86 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314 - 323. WANG Pengbo, LI Jianming, DING Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2015, 48(2): 314 - 323. (in Chinese)
- 87 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713 - 726. XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2015, 48(4): 713 - 726. (in Chinese)
- 88 杨丹妮, 常丽英, 沈海斌, 等. 基于水肥耦合模型的上海地区设施番茄水肥方案研究 [J]. 上海农业学报, 2017, 33(4): 82 - 89. YANG Danni, CHANG Liying, SHEN Haibin, et al. Water-fertilizer scheme of greenhouse tomato production in Shanghai based on the water-fertilizer coupling model [J]. Acta Agricultural Shanghai, 2017, 33(4): 82 - 89. (in Chinese)
- 89 TIPIS Ole Mpusia P. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation [D]. ENSCHEDE: International Institute for GEO-Information Science and Earth Observation, 2006.
- 90 ZHANG H, XIONG Y, HUANG G, et al. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District [J]. Agricultural Water Management, 2016, 179: 205 - 214.
- 91 NISHINA H. Development of speaking plant approach technique for intelligent greenhouse [J]. Agriculture & Agricultural Science Procedia, 2015, 3: 9 - 13.
- 92 WANG Xinzhong, HAN Xu, MAO Hanping. Vision-based detection of tomato main stem in greenhouse with red rope [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 135 - 141.
- 93 王海青, 姬长英, 顾宝兴, 等. 基于机器视觉和支持向量机的温室黄瓜识别 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 163 - 167. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120330&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.030.
- WANG Haiqing, JI Changying, GU Baoxing, et al. In-greenhouse cucumber recognition based on machine vision and least squares support vector machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 163 - 167. (in Chinese)
- 94 李寒, 张漫, 高宇, 等. 温室绿熟番茄机器视觉检测方法 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 328 - 334. LI Han, ZHANG Man, GAO Yu, et al. Green ripe tomato detection method based on machine vision in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 328 - 334. (in Chinese)
- 95 孙国祥, 汪小昆, 闫婷婷, 等. 基于机器视觉的植物群体生长参数反演方法 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 187 - 195. SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, YAN Tingting, et al. Inversion method of flora growth parameters based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 187 - 195. (in Chinese)
- 96 LI Xiaobin, WANG Yushun, FU Lihong. Monitoring lettuce growth using K-means color image segmentation and principal component analysis method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 179 - 186.
- 97 张瑜, 汪小昆, 孙国祥, 等. 基于激光视觉的温室作物茎叶量测方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 254 - 259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140941&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.041.
- ZHANG Yu, WANG Xiaochan, SUN Guoxiang, et al. Leaves and stems measurement of plants based on laser vision in greenhouses [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 254 - 259. (in Chinese)
- 98 冯青春, 程伟, 杨庆华, 等. 基于线结构光视觉的番茄重叠果实识别定位方法研究 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 100 - 106. FENG Qingchun, CHENG Wei, YANG Qinghua, et al. Identification and localization of overlapping tomatoes based on linear structured light vision system [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4): 100 - 106. (in Chinese)
- 99 石吉勇, 邹小波, 赵杰文, 等. 近红外光谱技术快速无损诊断黄瓜植株氮、镁元素缺乏 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):

283 - 287.

- SHI Jiyong,ZOU Xiaobo,ZHAO Jiewen, et al. Rapid and non-destructive diagnostics of nitrogen and magnesium deficiencies in cucumber plants by near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(8):283 - 287. (in Chinese)
- 100 孙俊,金夏明,毛罕平,等. 基于高光谱图像的生菜叶片氮素含量预测模型研究[J]. 分析化学,2014,5(5):672 - 677.
SUN Jun,JIN Xiaming,MAO Hanping,et al. A model for predicting nitrogen of lettuce leaves based on hyperspectral imaging [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry,2014,5(5):672 - 677. (in Chinese)
- 101 朱文静,毛罕平,李青林,等. 偏振-高光谱多维光信息的番茄叶片营养诊断[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(9):2500 - 2505.
ZHU Wenjing,MAO Hanping,LI Qinglin,et al. Study on the polarized reflectance-hyperspectral information fusion technology of tomato leaves nutrient diagnoses [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(9):2500 - 2505. (in Chinese)
- 102 刘红玉,毛罕平,朱文静,等. 基于高光谱的番茄氮磷钾营养水平快速诊断[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1):212 - 220.
LIU Hongyu,MAO Hanping,ZHU Wenjing,et al. Rapid diagnosis of tomato N - P - K nutrition level based on hyperspectral technology [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(Supp.1):212 - 220. (in Chinese)
- 103 胡静,毛罕平,左志宇,等. 基于微电极技术的温室黄瓜氮胁迫早期诊断技术[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):302 - 307. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150944&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.044.
HU Jing,MAO Hanping,ZUO Zhiyu,et al. Early diagnosis of cucumber nitrogen stress based on microelectrode technique[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):302 - 307. (in Chinese)
- 104 李晋阳,毛罕平. 基于阻抗和电容的番茄叶片含水率实时监测[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):295 - 299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160540&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.040.
LI Jinyang,MAO Hanping. Monitoring of tomato leaf moisture content based on electrical impedance and capacitance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):295 - 299. (in Chinese)
- 105 孙红,孙明,王一鸣. 植物生长机器视觉无损测量研究综述[J]. 农业机械学报,2006,37(10):181 - 185.
SUN Hong,SUN Ming,WANG Yiming. Status and trend of research on non-destructive measurement of plant growth based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(10):181 - 185. (in Chinese)
- 106 张大龙,张中典,李建明. 环境因子对温室甜瓜蒸腾的驱动和调控效应研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(11):137 - 144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.019.
ZHANG Dalong,ZHANG Zhongdian,LI Jianming. Co-ordination of environmental factors in driving and regulating transpiration rate of greenhouse grown muskmelon[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(11):137 - 144. (in Chinese)
- 107 LI J Y,LI M Q,MAO H P,et al. Diagnosis of potassium nutrition level in *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance [J]. Biosystems Engineering,2016,147:130 - 138.
- 108 高洪燕,毛罕平,张晓东,等. 基于多信息融合的番茄冠层水分诊断[J]. 农业工程学报,2012,28(16):140 - 144.
GAO Hongyan,MAO Hanping,ZHANG Xiaodong,et al. Water moisture diagnosis of tomato canopy based on multi-information fusion [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(16):140 - 144. (in Chinese)
- 109 王晓森,孟兆江,段爱旺,等. 基于茎直径变化监测番茄水分状况的机理与方法[J]. 农业工程学报,2010,26(12):107 - 113.
WANG Xiaosen,MENG Zhaojiang,DUAN Aiwang,et al. Mechanism and methodology for monitoring tomato water content based on stem diameter variation [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(12):107 - 113. (in Chinese)
- 110 ZUO Z Y,TAN J,MAO H P,et al. Modelling of tomato stem diameter growth rate based on physiological responses [J]. Pakistan Journal of Botany,2017,49(4):1429 - 1434.
- 111 孙国祥,李永博,汪小岳,等. 基于作物生理信息的夏季温室黄瓜节水灌溉模型研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(2):1 - 5.
SUN Guoxiang,LI Yongbo,WANG Xiaochan,et al. Water-saving irrigation model based on the information of crop physiological for the summer greenhouse cucumber [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(2):1 - 5. (in Chinese)
- 112 AHMAD U,SUBRATA D M,ARIF C. Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse [C] // International Journal of Signal Processing,Image Processing & P,2011,4(3):94 - 106.
- 113 袁洪波,李莉,王海华,等. 温室封闭式栽培自适应灌溉方法[J]. 农业工程学报,2015,31(22):222 - 228.
YUAN Hongbo,LI Li,WANG Haihua,et al. Adaptive irrigation method for closed cultivation in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(22):222 - 228. (in Chinese)
- 114 韩丽娜. 基于 Penman - Monteith 方程的温室智能滴灌控制系统研制[D]. 南京:南京农业大学,2013.
HAN Lina. Intelligent drip irrigation control system for greenhouse based on Penman - Monteith equation [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2013. (in Chinese)