

基于分段多区间的温室夏季温湿度智能控制策略

朱德兰^{1,2} 涂泓滨^{1,2} 王瑞心³ 刘孟阳^{1,2} 张锐^{1,2} 荆宇鹏^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 普渡大学工业工程学院, 西拉法叶 47906)

摘要: 温室环境调控能有效改善作物生产条件,为有效针对温室温度相对湿度进行精准调控,设计了一种基于物联网的温室智能监控系统,分别进行了降温、除湿、增湿和无设备运行4种处理下的试验,构建了温室无设备运行状态下温度和相对湿度变化的数学模型,通过对比同一条件下无设备运行状态的模拟值与设备调控后的实测值,定量分析出不同设备的调控能力。提出了根据作物需求分时间段、根据设备调控能力分温度区间的分段多区间温湿度调控方法,并进行了试验验证。结果表明:分段多区间控制策略可以有效地调控温度和相对湿度,全天59.46%时间内的温度处于适宜区间中,全天66.80%时间内的相对湿度处于适宜区间中;设备运行稳定且未造成设备频繁启闭。分时间段多温度区间控制策略结合智能控制系统可实现远程自动控制。

关键词: 物联网; 温室; 分段多区间控制策略; 降温增湿

中图分类号: S625.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0334-08 OSID:



Intelligent Control Strategy of Temperature and Humidity in Greenhouse in Summer Based on Subsection and Multi-interval

ZHU Delan^{1,2} TU Hongbin^{1,2} WANG Ruixin³ LIU Mengyang^{1,2} ZHANG Rui^{1,2} JING Yupeng^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Engineering, Purdue University, West Lafayette 47906, USA)

Abstract: Greenhouse environmental regulation can effectively improve crop production conditions. But due to the cost, acceptance and other reasons, most farmers use experience-based methods or simpler methods to control the greenhouse environment. In this situation, how to simply and effectively regulate greenhouse temperature and humidity accurately is a pressing issue in current greenhouse production. Firstly, a modern greenhouse intelligent monitoring system based on Internet of things was designed. The experiments of cooling, dehumidification, humidification and fully closed equipment were designed, and the mathematical models of temperature and humidity under closed greenhouse were constructed. By comparing the simulated values without equipment operation under the same conditions with the measured values after equipment regulation, a temperature and humidity control method was proposed according to the time period of crop growth demand and the size of equipment control capacity, and the experimental verification was carried out. The results showed that the subsection and multi-interval control strategy can effectively regulate the temperature and humidity. The temperature within 59.46% of the day was in the target range, and the humidity within 66.80% of the day was in the target range. The equipment operated stably without frequent opening and closing of the equipment. The subsection and multi-interval control strategy put forward an idea for greenhouse environmental control, combined with the typical IoT structure, remote automatic control can be realized, and the research results can be directly applied to practice.

Key words: Internet of things; greenhouse; subsection and multi-interval control strategy; cooling and humidification

收稿日期: 2021-11-04 修回日期: 2021-12-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0103000)、陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY01-01)和国家自然科学基金项目(52009111)

作者简介: 朱德兰(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事设施水肥与环境调控技术研究,E-mail: dlzhu@126.com

0 引言

我国设施农业起步较晚,但近年来快速发展^[1]。温室可以通过人工手段构建出适宜农作物生长的生产环境,实现农作物的全天候生长。温室环境监控是提高温室作物产量、减少劳动力成本的关键技术^[2]。温室夏季常出现高温低湿的现象,严重影响作物的正常生长。

温室环境调控的目的是使植物常年处于适宜的生长环境之中,以发挥其最大的生产潜力^[3]。目前温室环境调控措施主要分为两种^[4-5]:①基于给定设定值,设计合理的控制方法,使得温室环境尽可能跟踪设定值。张侃谕等^[6]利用 PLC 控制器实现温度、湿度等设定目标值的实时跟踪调控;王立舒等^[7]利用多目标进化算法进行温室温湿度双 PID 控制的参数在线整定;此外还包含预测控制^[8-10]等方法。②基于目标函数的优化调控^[11-14],如以温室生产能耗、经济效益等一项或多项为目标函数,给定系统模型及边界条件,获得调控规则。李康吉等^[15]构建温室建筑计算流体力学(CFD)模型结合带精英策略的非支配遗传算法,以作物区域温度场分布、控制温室风机能耗等为目标,实现温室环境因子的多目标、高效率优化。徐立鸿等^[16]建立了蓝莓光温耦合净光合速率模型与 Venlo 型温室夏季降温补光能耗模型,以净光合速率最大、温室降温能耗最小为优化目标寻优,结果表明维持光合速率不变情况下可降低耗;优先考虑种植效益的前提下,可同时满足降耗和提高光合速率。

针对我国农业发展实际面临的投入成本、接受程度等问题,广大农户多采用基于经验设定的调控方法。同时越来越多的降温措施在夏季温室环境调控中得到运用。在这种形势下,如何科学有效地决策温室多设备运行,实现温湿度的精准调控是亟待解决的问题。本文拟建立温室数学模型,通过明晰不同调控设备以及其组合方式的调控效果,提出一种基于分段多区间的温室夏季温、湿度调控方法,以期实现温室环境的精准调控,达到指导实际生产目的。

1 材料与方法

1.1 试验温室

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院自建温室中进行。温室为双拱双膜结构,外拱高 4.0 m,内拱高 3.5 m,外骨架长 6.0 m,内骨架长 5.6 m,外骨架宽 5.2 m,内骨架宽 4.8 m。温室中配备的环境调控设备有遮阳网、湿帘、风机、顶窗、东西

卷膜和雾化喷淋系统。温室结构如图 1 所示。

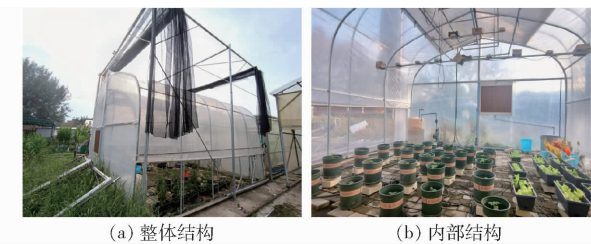


图 1 温室结构
Fig. 1 Greenhouse structure diagrams

系统以物联网云盒为核心并结合典型物联网结构设计,由现场监控子系统、远程监控子系统和物联网云盒 3 部分组成,总体框架如图 2 所示。现场监控子系统以可编程逻辑控制器(PLC,LK3U-64 型)为核心,分别连接温度传感器等采集模块和风机等设备功能模块,通过触摸屏人机交互界面实现对温室环境因子显示和设备控制;远程监控系统以云平台为核心,通过手机端、Web 端实现温室信息的获取、控制命令的下达;物联网云盒分别通过 RS-232 串口和 4G 网络连接现场监控子系统与远程监控系统,实现数据信息和控制信号的自由传输。

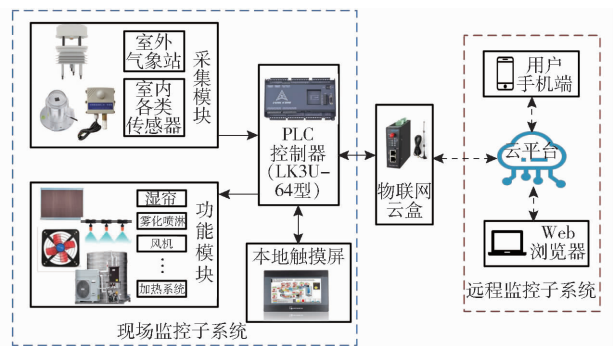


图 2 系统总体框架
Fig. 2 Structure diagram of system

1.2 试验设计

设备的调控能力可以通过控制过程中外界气候变化的影响以及控制后环境参数实测值的关系进行分析描述。通过温室无设备运行状态下的环境变化明晰外界气候变化对环境因子的影响,进一步结合实际操作选择设备进行温室环境调控,实测环境因子变化情况,分析设备调控能力。

结合温室夏季环境调控需求,试验分为 4 个处理:无设备运行、降温调控、除湿调控和增湿调控。降温、除湿和增湿调控处理进行多种调控设备组合研究,详细试验设计如表 1 所示。

1.3 测试指标及方法

在距温室西南侧 1 m、高 1.2 m 处布设超声波一体式气象站(RS-FSXCS-N01-1 型),每间隔 20 min 采集 1 次室外空气温度、相对湿度和光照强度。

表 1 试验设计
Tab. 1 Test design

试验处理	调控设备
T1	无
T2	顶窗
T3	东西卷膜
T4	顶窗 + 东西卷膜
T5	顶窗 + 东西卷膜 + 风机
T6	顶窗 + 东西卷膜 + 风机 + 雾化喷淋系统
T7	湿帘 + 风机
T8	顶窗 + 东西卷膜 + 风机 + 雾化喷淋系统 + 遮阳网
T9	湿帘 + 风机 + 雾化喷淋系统 + 遮阳网
T10	雾化喷淋系统
T11	雾化喷淋系统 + 湿帘 + 风机

假定设备调控后温室内部环境均匀分布,以温室中心点数据代表温室整体情况,利用光照温湿度三合一传感器(ST-GWS-6W型)每间隔20 min采集1次室内空气温度、相对湿度和光照强度。

2 结果与分析

2.1 无设备运行状态下温度和相对湿度变化及模型构建

温室在无设备运行状态下,典型晴天和典型阴天温度及相对湿度变化分别如图3、4所示。

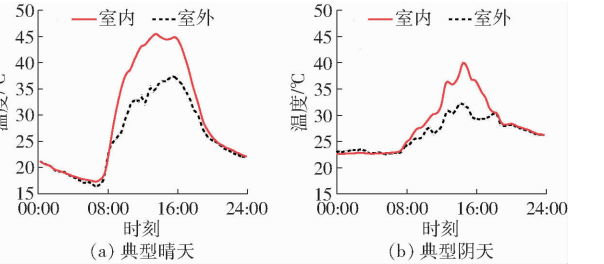


图 3 无设备运行状态下温室温度变化曲线
Fig. 3 Greenhouse temperature changing curves without equipment running

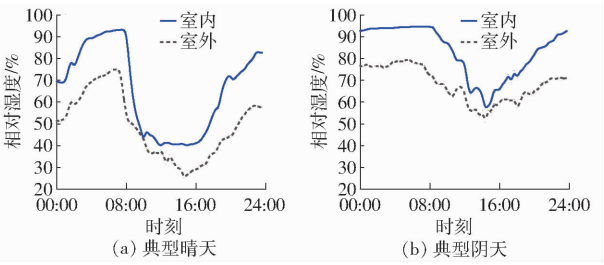


图 4 无设备运行状态下温室相对湿度变化曲线
Fig. 4 Greenhouse humidity changing curves without equipment running

温室的内、外温度变化趋势总体一致。典型晴天下,随着太阳辐射的逐渐增强,室内外温度迅速提高,温室表现出明显的升温作用,温室内部最高温度为45.7℃,室内外温差最大达到10.5℃。典型晴天

下由于太阳直射稳定,温度变化更加平滑;典型阴天下由于云层变化扰动,温室升温作用减弱,温室内部最高温度仍可达40.8℃,室内外温差最大为8.5℃,相较于晴天条件下温度变化更加曲折。由此可分析出温室内部温度变化受到外界光照强度和温度的影响较大,同时体现出温度调控的必要性。

温室的内、外相对湿度变化趋势总体一致。典型晴天下,日出后蒸发蒸腾量大,温室内相对湿度下降明显,在温度最高时刻对应出现。相对湿度最低值,夜间温室具有明显的保湿效果;典型阴天下由于云层作用,白天的室外相对湿度明显高于典型晴天下,相对湿度变化曲折,夜间,相对湿度较大且保持相对稳定。可以看出温度和相对湿度之间具有显著的负相关关系,温室内部相对湿度变化受到外界光照强度和相度湿度的影响较大,体现出湿度调控的必要性。

裴雪^[17]通过相关分析指出室内空气相对湿度、室内光辐射、室内二氧化碳浓度、室外空气温度和室外光辐射均与室内空气温度变化呈高度相关;顾寄南等^[18]建立温度模型时主要考虑室外温度、室外光照强度,建立相对湿度模型时主要考虑了室外湿度、室外光照强度。因此提出温室无设备运行状态下温度和相对湿度变化的数学模型为

$$T_t = T_{t_0} \left(1 + a_{TT} \frac{T'_t - T'_{t_0}}{T'_{t_0}} + a_{TL} \frac{L'_t - L'_{t_0}}{L'_{t_0}} \right) \quad (1)$$

$$H_t = H_{t_0} \left(1 + a_{HH} \frac{H'_t - H'_{t_0}}{H'_{t_0}} + a_{HL} \frac{L'_t - L'_{t_0}}{L'_{t_0}} \right) \quad (2)$$

- 式中 T_{t_0} 、 T_t ——起始时刻 t_0 、终止时刻 t 时的室内温度
 H_{t_0} 、 H_t ——起始时刻 t_0 、终止时刻 t 时的室内相对湿度
 T'_{t_0} 、 T'_t ——起始时刻 t_0 、终止时刻 t 时的室外温度
 H'_{t_0} 、 H'_t ——起始时刻 t_0 、终止时刻 t 时的室外相对湿度
 L'_{t_0} 、 L'_t ——起始时刻 t_0 、终止时刻 t 时的室外光照强度
 a_{TT} 、 a_{TL} ——外界温度、光照强度的变化对温室内温度影响权重,两者和为1
 a_{HH} 、 a_{HL} ——外界相对湿度、光照强度的变化对温室内相对湿度影响权重,两者和为1

2021年7月11—16日进行无设备运行试验,经数据处理后共得到138组试验数据。根据构建数学模型进行自定义函数非线性曲线拟合,得到 $a_{TT} = 0.957$, $a_{TL} = 0.043$, $a_{HH} = 0.974$, $a_{HL} = 0.026$ 。同时

利用实测数据对模拟值进行了检验,结果如图5所示。温度和相对湿度的模拟值与实测值间的决定系数 R^2 分别为0.971和0.966,表明拟合的预测模型可靠。

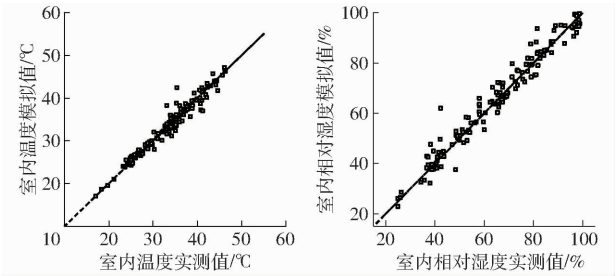


图5 拟合值与实测值比较

Fig.5 Comparison between fitted and measured values

将2021年7月17日的实测室内外环境数据输入上述拟合的模型,得到温室内部温度、相对湿度预测值。与室内实测值对比,结果如图6所示。室内温度、相对湿度模拟值与实测值总体变化趋势一致,

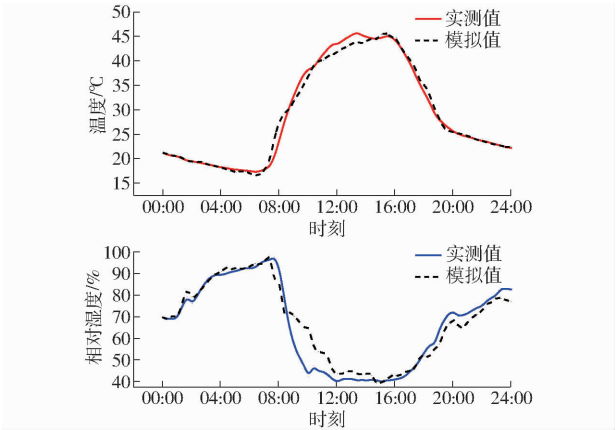


图6 温室内部环境模拟值与实测值对比

Fig.6 Comparison of simulated and measured values of indoor environment in greenhouse

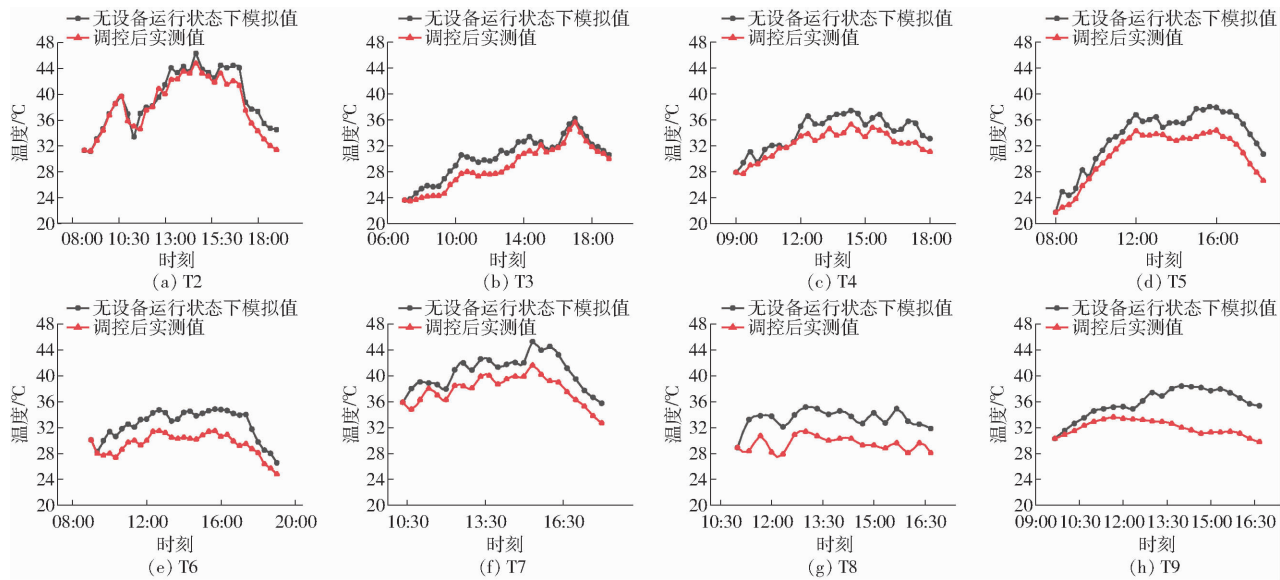


图7 降温调控结果

Fig.7 Cooling control results

温度预测平均绝对误差为 0.73°C ,相对湿度预测平均绝对误差为 3.7% 。从图6可看出,误差较大主要发生在日出、日落两个外界环境变化剧烈的时间段内,误差源于采样时间间隔较大,参数值产生较大的波动。总体而言,上述误差在可接受范围内,进一步验证了预测模型的准确性,模拟值可以代表温室一天中温度和相对湿度的变化情况。

2.2 不同设备对温度和相对湿度调控能力

根据试验方案进行不同设备运行状态调控试验,对比相同外界条件下无设备运行状态时的模拟值与设备调控后的实测值,可分析不同设备对温室温度和相对湿度的调控能力。

于2021年7月20日—8月11日进行T2~T9处理的降温调控试验,每个处理重复3d。实测调控过程中温室内温度及室外温度和光照强度,将室外环境信息输入前述模型中(式(1)),可模拟得到当天环境情况下温室无设备运行状态时的温度值。8种不同处理下实测温度变化和模拟无设备运行状态下温度变化的对比如图7所示。模拟无设备运行状态下温室内温度变化与设备实际调控后温度的变化趋势一致,两曲线的间距就是该调控方法的降温效果。从图7中可以看出,8种不同运行状态都有明显的降温效果,图7a~7h两曲线之间的距离越来越大,降温的效果越来越强,符合实际调控情况。

为更加直观地描述其降温效果,通过计算控制时间段内调控前后温度变化平均值可定量地描述其降温能力,T2~T9处理分别为 0.97 、 1.84 、 2.32 、 2.36 、 3.18 、 3.32 、 3.54 、 6.32°C 。

T2~T5处理调控温度的同时能降低室内湿度,

通过输入实测室外湿度和光照强度模拟无设备运行时相对湿度变化情况。4 种不同处理下实测相对湿度变化和模拟无设备运行状态下相对湿度变化的对比如图 8 所示。模拟无设备运行状态相对湿度变化与设备实际调控后相对湿度的变化趋势一致,两曲线的间距就是对应运行状态下的除湿效果。从图 8 中可以看出,4 种不同运行状态都有明显的除湿效果,图 8a~8d 两曲线之间的距离逐渐变大,除湿效果逐渐增强。

从图 8 中可以看出,两条曲线的间距基本维持不变,没有产生较大的突变和波动,说明相对湿度变化稳定。同样地,计算控制时间段内调控前后相对湿度变化平均值来定量地描述其除湿能力,T2~T4 处理结果分别为 4.25%、8.08%、8.81%、16.38%。

于 2021 年 8 月 12—17 日进行 T7、T10 和 T11 增湿调控试验,每个处理重复 3 d。增湿试验中雾化喷淋系统的单喷头流量为 0.034 m³/h,湿帘耗水量

为 0.041 m³/h。实测调控过程中温室内相对湿度及室外相对湿度和光照强度,将室外环境信息输入前述模型中(式(2)),可模拟当天室外环境情况下温室无设备运行状态时的相对湿度。3 种不同处理下实测相对湿度和无设备运行状态下相对湿度模拟值变化的对比如图 9 所示。模拟无设备运行状态下相对湿度变化与设备调控后相对湿度实测值的变化趋势一致,两曲线的间距就是该调控方法的增湿效果。T7 处理增湿效果最差(图 9a),湿帘主要利用水气的蒸发降低温度,增湿作用微小。T11 处理增湿效果最明显(图 9c),在雾化喷淋系统与湿帘组合运行下,温室湿度呈现极显著提升。

通过分析 3 种运行状态增湿效果,T7、T10 和 T11 处理调控前后相对湿度差值分别为 4.45%、12.48% 和 16.72%。

2.3 分段多区间控制策略

因方法简单且可靠,基于设定值的控制在实际

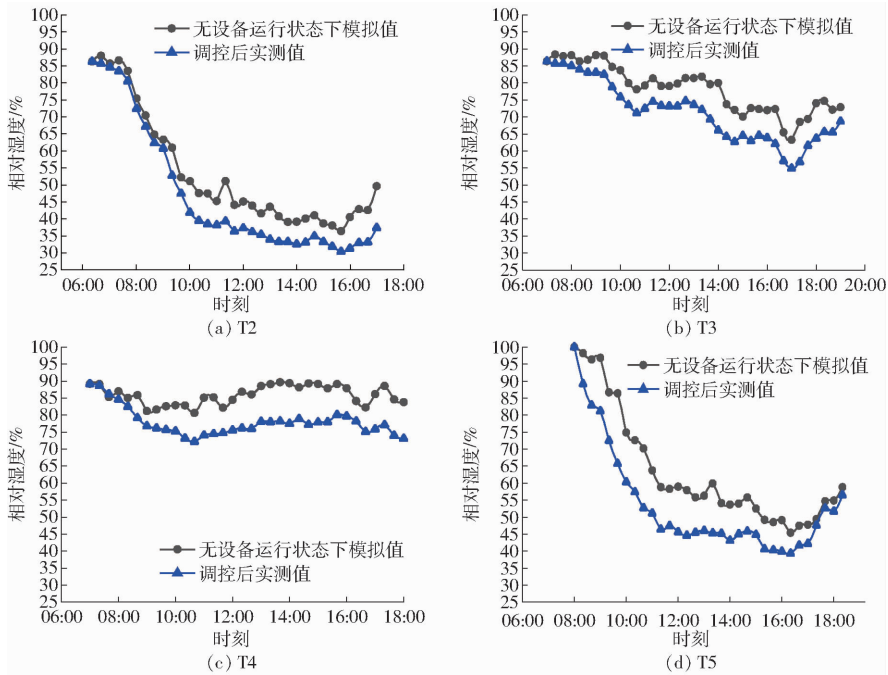


图 8 除湿调控结果
Fig. 8 Dehumidification control results

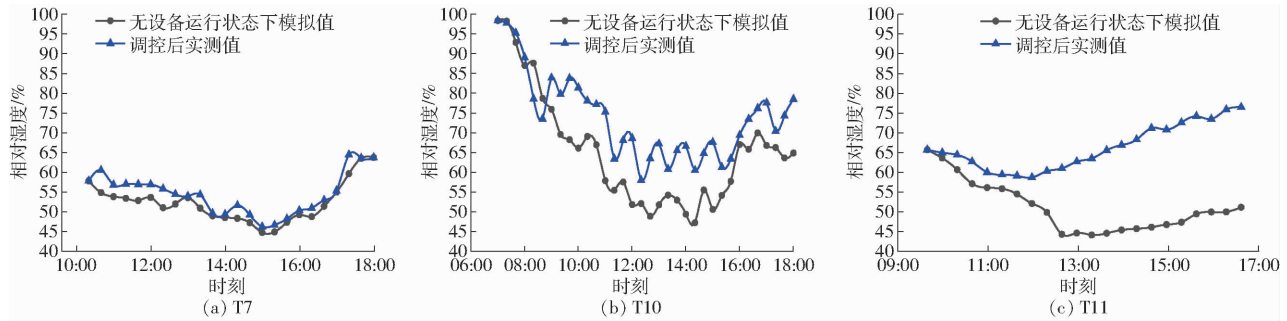


图 9 增湿调控结果
Fig. 9 Humidification control results

生产中广泛运用。但其仅关注环境调控目的,不考虑执行设备状况、作物需求。通过对不同设备运行状况下环境变化的研究,明晰其调控能力,根据实际需求选择不同设备;结合大量学者在温室种植中提出“变温管理”^[19-20]措施以满足作物的生长需求。本文依据设定值控制原理进行改进,提出分段多区间控制的策略。

以黄瓜生长期为例,设置一日3段变温控制:第1阶段为07:00—12:00,适宜温度区间为 $[26^{\circ}\text{C}, 28^{\circ}\text{C}]$,最优温度为 27°C ;第2阶段为12:00—19:00,适宜温度区间为 $[30^{\circ}\text{C}, 32^{\circ}\text{C}]$,最优温度为 31°C ;第3阶段为19:00至次日07:00,适宜温度区间为 $[16^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}]$,最优温度为 18°C 。相对湿度适宜范围在70%~80%。控制流程如图10所示。温室温度、湿度有极显著的负相关性^[21],可以通过设备的选择来综合调控温度和湿度。温度是环境控制最重要的参数之一,因此本文将温度设为温室内控制判断的参数。第1阶段湿度大,初始温度不高但呈逐渐上升趋势,主选通风类调控,除湿的同时降低温度上升的速度;第2阶段温度较高而湿度低,主选喷淋类调控,通过水气降温加湿;第3阶段湿度逐渐升高,温度逐渐下降但仍处于较高水平,主选通风类调控方法,降温降湿。在每个阶段以最优目标为中心,依据设备调控的能力计算各个阶段的区间边界值并选择不同运行设备,如表2所示。

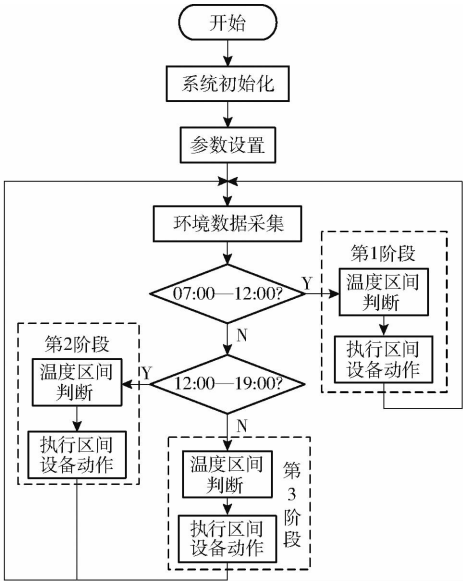


图 10 控制流程图

Fig. 10 Control flow chart

系统初始化后对各个阶段目标参数进行设置,通过各类传感器对环境信息进行感知采集并输入PLC。首先进行时间段判断,进入对应的阶段,再根据环境实时温度进行区间判断,进入不同区间后产生不同的控制指令,使设备动作。

表 2 分段多区间控制策略

Tab.2 Subsection and multi-interval control strategy

阶段	温度 区间/ $^{\circ}\text{C}$	控制状态	调控动作选择 (对应于试验处理)
第 1 阶段	$[26, 26.5)$	M1	T2
	$[26.5, 27)$	M2	T4
	$[27, 27.9)$	M3	T5
	≥ 27.9	M4	T6
第 2 阶段	≥ 31	M6	T9
	$[29.2, 31)$	M5	T8
	$[28, 29.2)$	M3	T5
	< 28	M2	T4
第 3 阶段	≥ 21.8	M3	T5
	$[18.2, 21.8)$	M2	T4
	$[17.5, 18.2)$	M1	T2
	≤ 17.5	M0	T1

2.4 控制结果分析

于2021年8月20—25日进行分段多区间控制策略实际控制效果验证试验,温室温度控制结果如图11a所示。从图11a可以看出室内、外温度变化趋势一致。试验期间室外最高温度为 40.9°C ,分段多区间控制策略有效地降低昼间温室内部温度,室内最高温度为 32.4°C ;同时保证后半夜至日出时温度始终处于可控范围内。室内温度变化出现“波峰-台阶”式变化,体现了多区间的控制效果以及符合基于设定值控制的变化特点。根据执行设备调控能力、目标环境参数设置多区间调节,能在一定程度上符合温室动态变化的规律。同时,根据作物一天内的需求不同,设置分段自动调节;根据作物实际生长状态,手动设置不同生育期的环境目标参数,实现温室内作物栽培的环境参数控制要求。第1阶段

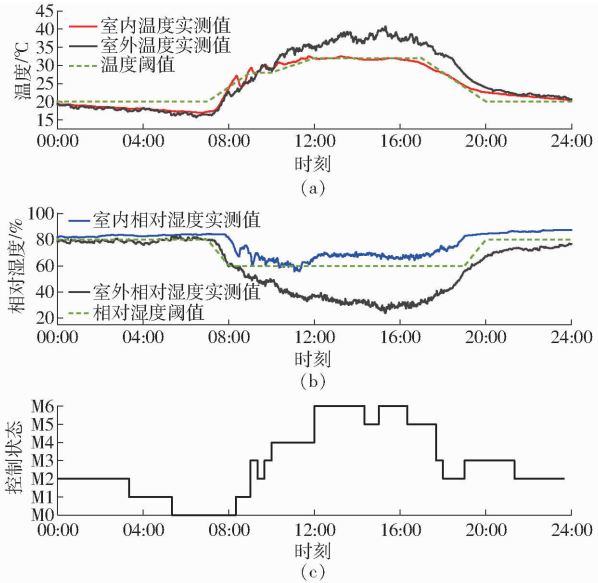


图 11 控制结果

Fig. 11 Results of control

初,太阳辐射使温室温度迅速升高,除去快速升温时间,多区间调控使 63.75% 时间上的温度在目标区间内。第 2 阶段,多区间调控使 58.57% 时间上的温度在目标区间内。温度最大值为 32.4℃,且主要在 31.8℃ 附近波动,主要是午后外界温度高以及温室配备的硬件设施能力不足造成的,只有在外界温度出现下降趋势时室内温度才有所下降。第 3 阶段,多区间调控使 58.33% 时间上的温度在目标区间内。综上,全天 59.46% 时间内的温度处于适宜区间。日落后,室外温度逐渐下降,而室内外湿度逐渐升高,主要通过通风措施保证温度,从图 11a 可以看出,室内温度逐渐趋近于室外温度,因此降温速率较慢,时间占比略低,但仍能满足要求。室内温度总体没有呈现明显的三段阶梯形变化,但存在强烈的变化趋势。

温室相对湿度控制结果如图 11b 所示。从图 11b 可以看出室内、外相对湿度变化趋势一致,试验期间室外最低相对湿度为 23.7%,分段多区间控制策略有效提高了第 1 和第 2 阶段的湿度,相对湿度最小值为 55.5%,保证了湿度环境尽最大程度满足需求。日出后,温度快速升高的同时湿度也在急剧下降,多区间调控使 66.80% 时间上的湿度在目标区间内波动。湿度在午后出现了突增变化,主要是因为该时间段温度较高,采用湿帘、喷淋等降温措施造成温室内部湿度升高。夜间温室相对湿度大

于目标 5% 左右,造成该现象的原因主要有:①外界湿度增大造成的自然变化。②温室雾化喷头雾化程度不足造成地面部分积水以及温室内部存在桶装水源,导致夜间湿度较大。

温室控制状态如图 11c 所示,日出后室内温度逐渐上升,设备状态随着温度变化在向高调控能力状态切换;日落后随着温度下降向低调控能力状态切换。温室控制相对平稳,设备能稳定运行一定时间,未造成设备的频繁启闭。

3 结论

(1)结合现代温室的管理需求,基于典型物联网结构设计并实现了由现场监控子系统、物联网云盒、远程监控子系统组成的温室智能监控系统。

(2)通过试验构建了温室无设备运行状态下温度和相对湿度变化的数学模型,对比了无设备运行状态下的模拟值与设备实际调控后的实测值,定量分析了不同设备及组合的调控能力。结合设备调控能力、作物生长需求以及温室温湿度耦合的特性,提出了以温度为边界条件的分段多区间控制策略。

(3)经试验验证,该控制策略能有效地调节温室温度和相对湿度;温度控制在适宜区间内的时间占全天的 59.46%,相对湿度控制在适宜区间内的时间占全天的 66.80%,设备运行稳定且未造成设备频繁启闭。

参 考 文 献

- [1] 骆飞,徐海斌,左志宇,等. 我国设施农业发展现状、存在不足及对策[J]. 江苏农业科学,2020,48(10):57-62.
LUO Fei, XU Haibin, ZUO Zhiyu, et al. Current situation, deficiency and countermeasures of China's facility agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(10): 57-62. (in Chinese)
- [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.
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)
- [3] 秦琳琳,陆林箭,石春,等. 基于物联网的温室智能监控系统设计[J]. 农业机械学报,2015,46(3):261-267.
QIN Linlin, LU Linjian, SHI Chun, et al. Implementation of IOT-based greenhouse intelligent monitoring system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 261-267. (in Chinese)
- [4] 杜尚丰,董乔雪,徐云,等. 温室生产系统环境控制算法综述[J]. 农业工程,2021,11(2):21-25.
DU Shangfeng, DONG Qiaoxue, XU Yun, et al. Review of control algorithms for environment of greenhouse production system[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(2): 21-25. (in Chinese)
- [5] 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.
MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Research progress and prospect on control methods of greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 1-13. (in Chinese)
- [6] 张侃谕,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)
- [7] 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)
- [8] JUNG D H, KIM H J, KIM J Y, et al. Model predictive control via output feedback neural network for improved multi-window greenhouse ventilation control[J]. Sensors, 2020, 20(6): 1-16.

[9] LIN D, ZHANG L, XIA X. Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264:121513.

[10] CHEN Weihai, YOU Fengqi. Efficient greenhouse temperature control with data-driven robust model predictive[C] // Proceedings of the American Control Conference, 2020.

[11] 邓璐娟,张侃渝,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)

[12] 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 CASE, 2006, 22(11): 187-191. (in Chinese)

[13] XU Dan, DU Shangfeng, WILLIGENBURG G V. Double closed-loop optimal control of greenhouse cultivation[J]. Control Engineering Practice, 2019, 85: 90-99.

[14] XU Dan, DU Shangfeng, WILLIGENBURG G V. Optimal control of Chinese solar greenhouse cultivation[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171(1):205-219.

[15] 李康吉,张世通,孟凡跃,等. 考虑时空变异特性的温室多环境因子优化策略[J]. 农业机械学报,2021,52(11):343-350.

LI Kangji, ZHANG Shitong, MENG Fanyue, et al. Optimization strategy of greenhouse multiple environmental factors considering temporal and spatiotemporal variability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 343-350. (in Chinese)

[16] 徐立鸿,徐赫,蔚瑞华. 温室蓝莓光温协调优化模型与控制策略研究[J]. 农业机械学报,2022,53(1):360-369.

XU Lihong, XU He, WEI Ruihua. Optimal model of blueberry greenhouse light and temperature coordination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 360-369. (in Chinese)

[17] 裴雪. 日光温室温度预测模型与卷帘智能控制方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.

PEI Xue. Temperature prediction model of greenhouse and the design of intelligent control method of rolling quilt[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[18] 顾寄南,毛罕平,李萍萍. 温室系统综合动态模型的研究[J]. 农业工程学报,2001,17(4):79-82.

GU Ji'nan, MAO Hanping, LI Pingping. Comprehensive dynamic models of greenhouse system[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 79-82. (in Chinese)

[19] 孙润峰. 北方地区冬季日光温室黄瓜栽培生产技术[J]. 吉林蔬菜,2017(9):10-11.

SUN Runfeng. Cultivation and production techniques of cucumber in solar greenhouse in winter in northern China[J]. Jilin Vegetable, 2017(9): 10-11. (in Chinese)

[20] 王康丽,刘湘伟. 智能连栋玻璃温室番茄高效生产管理技术[J]. 农业工程技术,2020,40(34):12-14.

WANG Kangli, LIU Xiangwei. Efficient production management technology of tomato in intelligent multi span glass greenhouse[J]. Agriculture Engineering Technology, 2020, 40(34): 12-14. (in Chinese)

[21] 顾小小,朱春燕. 水培蔬菜连栋温室温湿度变化特征的研究[J]. 农业工程技术,2019,39(7):56-60.

GU Xiaoxiao, ZHU Chunyan. Study on temperature and humidity variation characteristics of hydroponic vegetable multi span greenhouse[J]. Agriculture Engineering Technology, 2019, 39(7): 56-60. (in Chinese)

(上接第260页)

[26] WU H, ZHANG J, HUANG K, et al. FastFCN: rethinking dilated convolution in the backbone for semantic segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1903.11816,2019.

[27] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoping, et al. Deep residual learning for image recognition[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770-778.

[28] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1505.04597,2015.

[29] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015,39(4):640-651.

[30] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv preprint arXiv: 1409.1556,2014.

[31] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017,39(12):2481-2495.

[32] CHEN L C, PAPANDREOU G, SCHROFF F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1706.05587,2017.