

基于热量平衡方程的温室冬季温度控制策略

涂泓滨^{1,2}, 朱德兰^{1,2*}, 刘孟阳^{1,2}, 柳昌新³, 王瑞心⁴, 荆宇鹏^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 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, 杨凌 712100; 3. 塔什干国立农业大学育种学系, 乌兹别克斯坦塔什干 100140; 4. 普渡大学工业工程学院, 美国印第安纳 47906)

摘 要: 为解决配备空气源热泵的温室在冬季加热时温度调控不稳定等问题, 该研究在对温室热传递原理进行分析的基础上, 通过实测数据分别计算了温室卷被闭合与揭开两种状态下的综合传热系数、空气源热泵系统工作性能参数和雾化喷淋工作性能参数。根据温室热量平衡方程, 建立了调控设备控制时间与温室环境参数间的数学关系, 并以此提出了温度控制策略, 系统运行时利用传感器实时采集环境数据作为输入, 输出设备所需工作时间, 并据此控制设备启停。经试验验证, 基于热量平衡方程的控制方法能有效控制温度在目标值附近, 且温度变化稳定、波动幅度小。在外部天气状况相近条件下, 该控制方法的单日耗电量比基于上下限阈值控制的方法节约 9.06 kW·h, 占其当日耗电量的 10.95%。在控制策略研究的基础上, 利用典型物联网结构设计并实现远程自动控制, 研究结果可直接应用于实践。

关键词: 温室; 热量平衡; 物联网; 空气源热泵; 温度控制策略

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.024

中图分类号: S625.5⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0200-08

涂泓滨, 朱德兰, 刘孟阳, 等. 基于热量平衡方程的温室冬季温度控制策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 200-207.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.024 <http://www.tcsae.org>

Tu Hongbin, Zhu Delan, Liu Mengyang, et al. Winter temperature control strategy of greenhouse based on heat balance equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 200-207. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.024 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

温室通过人工的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^[1]。北方地区冬季气候严寒, 温室仅依靠自身的蓄热保温能力, 无法满足作物生长的需求^[2]。为保障作物正常生长, 往往需要利用温室加温设备进行主动加温^[3]。温度是影响作物生长的关键因素之一, 作物处于适宜温度能够大幅度缩短生长周期^[4]。

现阶段主流的加热方法(热水加温、热风加温、火道加温)一般都是利用煤炭等不可再生能源, 加温后排放的尾气中含有大量有害气体, 对环境造成一定的污染^[5-6]。热泵加温技术则通过加热循环水, 环保无污染, 且能耗与成本较低, 作为一种新兴的环保加温技术而备受青睐。王建辉等^[7]利用地源热泵机组对薄膜温室供暖, 结果表明温度条件可以满足蔬菜生长且节能效果显著。辜松等^[8]连续三年监测空气源热泵机组冬季供暖数据, 分析表明温室温度可稳定在 20℃以上且单个冬季空气源热泵系统加热费用比同条件下燃煤费用低 50%。

针对温室温度的调控, 目前的研究主要分为两个方面: 1) 基于给定设定值的方法。如张侃谕等^[9]利用 PLC

控制器实现温度等设定目标值的实时跟踪调控; 王立舒等^[10]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; 此外还包括预测控制^[11-14]等方法。2) 基于目标函数的优化调控方法。如 Mostafavi 等^[15]以节约能耗为目的, 通过模型计算供暖成本对温室加温系统进行了优化调控; 朱丙坤等^[16]以控制精度和能耗作为控制目标, 提出多目标相容控制算法, 仿真结果表明新算法在节能降耗方面存在一定优势。

目前关于热泵的研究, 多集中在设备制热系数(Coefficient of Performance)、耗电量等方面; 先进的温室环境调控系统虽然技术相对成熟, 但引进成本高, 控制关系不明确, 不能适应中国温室种植以家庭为主现状, 普及难度较大^[17]。因此, 本文通过温室热量平衡基本方程, 建立设备控制时间与温室环境间的关系, 提出温室利用空气热泵加热的温度控制策略, 以期实现温度的精准调控, 达到指导实际生产的目的。

1 材料与方法

1.1 温室概况

试验温室位于西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院(东经 108°4'28", 北纬 34°16'56")。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。温室现场布置光照温湿度三合一传感器和太阳辐照度传感器, 距温室西南侧 1 m、高 1.2 m 处布置超声波一体式气象站和太阳辐照度传感器。温室配备卷被、风机-湿帘系

收稿日期: 2022-01-30 修订日期: 2022-03-29

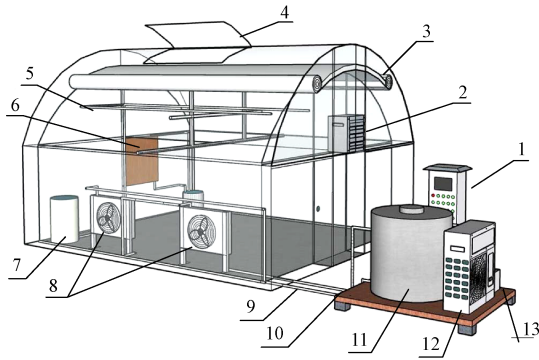
基金项目: 陕西省重点研发计划(2020ZDLNY01-01); 国家重点研发计划项目(2021YFE0103000); 国家外国专家局“111”计划项目(B12007)

作者简介: 涂泓滨, 研究方向为温室自动化控制。

Email: tuhongbin98@163.com

*通信作者: 朱德兰, 教授, 博士生导师, 研究方向为设施水肥与环境调控技术。Email: dlzhu@126.com

统、空气源热泵系统、雾化喷淋系统等调控设备。温室结构如图 1 所示。



1.集成控制柜 2.风机 3.卷被 4.顶部通风 5.雾化喷淋系统管道 6.湿帘 7.水箱 8.散热暖风一体机 9.回水管道 10.进水管 11.蓄热水箱 12.热泵主机 13.热泵电控箱
1.Integrated control cabinet 2.Fan 3.Quilt 4.Top ventilation 5.Atomizing sprinkler system pipeline 6.Wet curtain 7.Water tank 8.Heat dissipation and heating all-in-one machine 9.Water return pipe 10.Water inlet pipe 11.Hot water storage tank 12.Heat pump host 13.Heat pump system electric control box
图 1 温室结构图

Fig.1 Greenhouse structure diagram

温室控制系统以物联网云盒为核心，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（型号为 LK3U-64）为核心，分别连接温度传感器等采集模块、加热系统等设备控制模块和触摸屏，通过触摸屏人机交互界面可实现温室环境监测及设备控制；远程监控系统以云平台为核心，通过手机端、Web 端组态界面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子系统，实现数据信息和控制信号的自由传输。

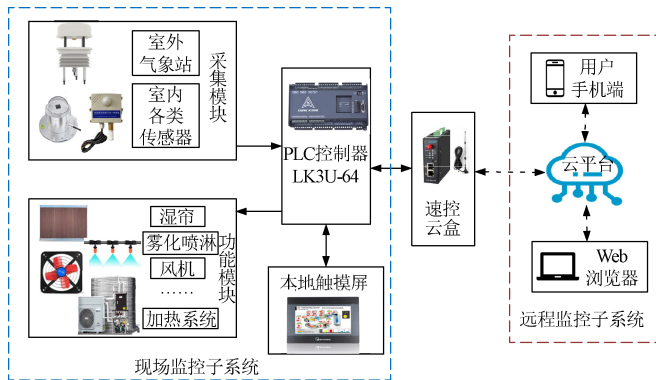


图 2 系统总体框架图

Fig.2 Structure diagram of system

1.2 调控设备及其运行方式

温室在调控过程中维持适宜温度状态，午后常出现短暂的温度超高且冬季温室内外温差较大，开窗通风的方式往往会“矫枉过正”，难以精准控制。因此，除空气源热泵加热系统和卷被外，采用雾化喷淋系统参与温室环境的调控。

本试验采用空气源热泵系统配合水暖风机进行供

热。热风采暖是利用管道或风机把加热后的空气送入温室以提高温度的一种方式。该方式便于实现自动控制和调节，没有热水的损耗，较为节约成本^[18]。加热系统由空气源热泵、蓄热水箱、热水管道和散热暖风一体机 4 部分组成。空气源热泵机组型号为 KJR-51/BMK-A，水温设定范围为 15~55℃，自动加热温差±2℃；蓄热水箱体积 1.36 m³，由镀锌锌板制成，内置优质聚氨酯发泡保温材料具有较好的保温性能；热水管道为 PVC 材质，外层包裹保温棉管防止温度散失；散热暖风一体机由翅片管散热器和风机组成。

加热系统利用空气源热泵机组维持水箱内的水温，试验设定蓄热水箱温度为 (45±2)℃。蓄热水箱、水泵与散热暖风一体机之间利用管道串联连接，水泵驱动热水循环流动。热水经翅片管散热器时加热附近的空气，风机使热空气在温室内部流动以提高温度。系统通过控制水泵及风机的启停切换加热状态。设定雾化喷淋系统变频水泵工作压力 35 m，通过电磁阀开关控制温室对角两个雾化喷头状态，单个喷头流量约为 0.034 m³/h。卷被通过电机正/反转实现揭开与闭合动作。

1.3 基于热量平衡的温度控制原理

根据热力学和传热学基本原理，加热后积蓄于温室内部的热量等于进入温室的热量减去传出的热量。当进入温室的热量大于传出的热量时，温室蓄热而升温，直至热量蓄散平衡^[19]。假定温室获得热量的途径为太阳辐射的热量和加热系统的供热量，温室热量的损失途径为雾化喷淋系统散失的热量和经过屋顶、地面、门窗等围护结构传导和辐射放出的热量。在一定时间内热量变化导致温室内温度的变化，温室系统中温度变化的热量 ΔQ 等于输入热量减去散失热量，即：

$$\Delta Q = (Q_1 + Q_2) - (U_1 + U_2) \quad (1)$$

式中 ΔQ 为温室温度变化所引起的热量变化，W； Q_1 为太阳辐射热量，W； Q_2 为空气源热泵供热量，W； U_1 为雾化喷淋系统散失的热量，W； U_2 为温室传导散失的热量，W。

太阳辐射的热量可以依据辐照度传感器数值进行计算；温室散失的热量主要由于室内外空气的温度差从室内传向室外的热量，可根据稳定传热理论进行计算，其基本公式如下：

$$U_2 = K \cdot F \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

假定不考虑作物蒸腾作用，温室内温度变化所引起的热量可依据比热容公式计算，计算公式如下：

$$\Delta Q = c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V \cdot \Delta T_{in} \quad (3)$$

式中 K 为温室围护综合传热系数，W/(m²·℃)； F 为温室总的传热面积，为 110.69 m²； T_{in} 为温室室内温度，℃； T_{out} 为温室室外温度，℃； c_{air} 为空气比热，取 1 003 J/(kg·℃)； ρ_{air} 为空气密度，取 1.293 kg/m³； V 为温室体积，为 80.76 m³； ΔT_{in} 为温室室内温度的变化差值，℃。

假定加热系统和雾化喷淋系统的工作性能参数分别

为 P_1 和 P_2 ，结合作物生长需要设定适宜目标温度 T_{best} ，依据热量平衡可构建出调控设备控制时间与温室环境参数间的关系方程。即在一定周期内，加热系统所需提供的热量等于温室系统散热量减去太阳辐射的热量和室内当前温度与目标温度偏差所含的热量。

$$t_{hot} = \frac{K \cdot F \cdot (T_{best} - T_{out}) \cdot t - I_{in} \cdot a \cdot t - (T_{in} - T_{best}) \cdot c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V}{P_1} \quad (4)$$

当加热时间计算结果小于 0 时，表明温室系统处于升温阶段不需要加热系统提供额外热量，而需要雾化喷淋系统辅助降温。雾化喷淋系统需散失的热量等于太阳辐射能量加上室内当前温度与目标温度偏差所含热量减去温室散失的热量，即：

$$t_{cool} = \frac{I_{in} \cdot a \cdot t + (T_{in} - T_{best}) \cdot c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V - K_i \cdot F \cdot (T_{best} - T_{out}) \cdot t}{P_2} \quad (5)$$

式中 t_{hot} 为加热系统工作时间，min； t_{cool} 为雾化喷淋系统工作时间，min； P_1 为空气源热泵工作性能参数，W； P_2 为雾化喷淋系统工作性能参数，W； T_{best} 为设定的适宜温度，℃； I_{in} 为室内太阳辐射度实测值，W/m²； a 为太阳照射面积，m²； t 为调控周期，s。

为构建调控关系方程式 (4) 和式 (5)，需计算温室综合传热系数、加热系统加热性能参数和雾化喷淋性能参数。卷被具有良好的保温性能，根据式 (2)，其状态决定了温室传导散失的热量 U_2 ，因此需分别计算卷被揭开、闭合状态下的综合传热系数。

根据式 (1)，当温室无设备调控时，温室系统在一定时间内通过围护结构散失的热量 U_2 等于太阳辐射的热量 Q_i 减去该段时间内室内温度变化所产生的热量 ΔQ ，综合传热系数 K 计算公式为：

$$|K_i| = \frac{I_{in} \cdot a \cdot t - c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V \cdot \Delta T_{in}}{F \cdot (T_{in} - T_{out}) \cdot t} \quad (i=1,2) \quad (6)$$

式中 K_1 为卷被闭合时的综合传热系数，W/(m²·℃)； K_2 为卷被揭开时的综合传热系数，W/(m²·℃)。

温室实际运行中，加热系统和雾化喷淋系统不同时工作，即计算一方的性能参数值时另一方的值取 0。当得到温室卷被在揭开与闭合时的综合传热系数后，结合式 (1)，可分别计算出加热系统和雾化喷淋系统的工作性能参数。计算公式如下：

$$P_i = \frac{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V \cdot \Delta T_{in} + K_i \cdot F \cdot (T_{in} - T_{out}) \cdot t - I_{in} \cdot a \cdot t}{t_{work}} \quad (i=1,2) \quad (7)$$

式中 t_{work} 为设备运行时间，s。

1.4 试验方法及测试指标

试验基于上下限阈值的控制方法进行温度调控，调控分为昼间 (8:00-18:00) 和夜间 (18:00 至次日 8:00) 两种控制状态。在 8:00 打开加热系统至温室温度达 26.5℃，而后利用设定上下限阈值将昼间温度控制在 25~28℃

间，若温度超过 28℃ 则打开雾化喷淋系统；18:00 进入夜间调控，温室自然降温至 15℃ 后利用设定上下限阈值将夜间温度控制在 15~18℃ 间；卷被 9:00 揭开、17:00 闭合。

假定设备调控后温室内部环境分布均匀，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 (型号为 ST-GWS-6W、温度精度：±0.5℃) 每分钟采集一次室内空气温度。室外超声波一体式气象站 (型号为 RS-FSXCS-N01-1、温度精度：±0.5℃) 每分钟采集一次室外空气温度。温室内、外部太阳辐射传感器 (型号为 PR-300AL-RA-N01、精度：1 W/m²) 每分钟采集一次太阳辐射度。通过程序实时更新设备状态信息，记录运行过程中空气源热泵和雾化喷淋系统开启时间和持续运行时间。利用电子式电能表 (型号为 DTSU5886、精度 0.1 kW·h) 记录加热系统的运行能耗。温室现场布置如图 3 所示。

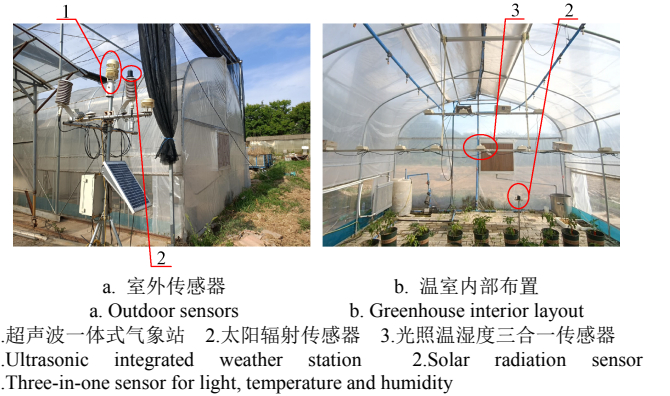


图 3 温室现场布置

Fig.3 Greenhouse site layout

试验时间为 2021 年 12 月 5 日至 12 月 20 日，根据相关参数的计算要求，按照设备运行情况将试验期间采集的数据归为 4 类。类型一：卷被处于闭合状态、无其他调控设备工作；类型二：卷被处于揭开状态、无其他调控设备工作；类型三：卷被处于闭合状态、加热系统工作与卷被处于揭开状态、加热系统工作；类型四：卷被处于揭开状态、雾化喷淋系统工作。

2 结果与分析

2.1 温室综合传热系数

夜间无太阳辐射提供热量时，温室散热量等于温室温度变化所产生的热量。利用类型一中的 196 组试验数据可计算卷被闭合时的综合传热系数 K_1 ，将实测数据代入式 (6)，并对单个计算综合传热系数结果取均值，得到卷被闭合时温室综合传热系数 K_1 为 0.266 W/(m²·℃)。昼间卷被揭开需考虑太阳辐射热量，利用类型二中的 185 组试验数据代入式 (6) 进行计算并取均值，得到卷被揭开时温室综合传热系数 K_2 为 0.562 W/(m²·℃)。计算过程中室内太阳辐射度实测值 I_{in} 和室内外温差 $(T_{in} - T_{out})$ 取调控周期内的平均值，综合传热系数计算如表 1 所示。

表 1 综合传热系数计算
Table 1 Calculation of the integrated heat transfer coefficient

数据类型 Data classification	组数 No.	日期 Date	时间段 Time period	起始温度 Starting temperature/℃	终止温度 Termination temperature/℃	$T_{in}-T_{out}$ /℃	I_{in} /(W·m ⁻²)	综合传热系数 Heat transfer coefficient /(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	综合传热系数平均值 Average heat transfer coefficient /(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)
类型一 Type one	1	2021-12-06	18:59—19:22	19.1	15.2	9.7	0	0.276	0.266
	2	2021-12-06	19:34—19:56	19.0	15.1	10.5	0	0.267	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	195	2021-12-12	05:48—06:07	18.6	15.1	11.1	0	0.262	
	196	2021-12-12	06:19—06:39	18.7	15.1	11.6	0	0.245	
类型二 Type two	1	2021-12-05	12:00—12:20	25.9	26.8	11.9	65.4	0.605	0.562
	2	2021-12-05	12:21—12:41	26.9	28.8	12.0	67.9	0.563	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	184	2021-12-19	15:26—15:41	27.4	26.6	12.2	48.1	0.546	
	185	2021-12-19	15:42—15:58	26.6	23.9	12.3	31.5	0.527	

注：($T_{in}-T_{out}$)为平均内外温差； I_{in} 为平均室内辐照度。下同。
Note: ($T_{in}-T_{out}$) is the average temperature difference between inside and outside; I_{in} is the average irradiance. The same as below.

2.2 加热系统及雾化喷淋系统工作性能参数

加热系统在昼间和夜间均参与工作，根据采集时间内卷被实际状态分别代入 K_1 或 K_2 计算。利用类型三中的 157 组试验数据计算加热系统工作性能参数 P_1 ，并对单次

计算结果取平均值，得到温室加热系统的工作性能参数 P_1 为 921.38 W。同样地，利用类型四中的 98 组试验数据代入计算并取平均值，得到雾化喷淋系统工作性能参数 P_2 为 310.09 W。调控设备工作性能参数计算如表 2 所示。

表 2 工作性能参数计算
Table 2 Calculation of working performance parameters

数据类型 Data classification	组数 No.	日期 Date	时间段 Time Period	起始温度 Starting temperature /℃	终止温度 Termination temperature /℃	$T_{in}-T_{out}$ /℃	I_{in} /(W·m ⁻²)	卷被开关 状态 Volume switch status	设备运行时间 Run time/s	性能参数 Performance parameters/W	性能参数平均值 Average performance parameters/W
类型三 Type three	1	2021-12-08	21:32—21:47	14.9	18.2	13.9	0	0	780	916.80	921.38
	2	2021-12-08	22:00—22:15	15.0	18.2	14.3	0	0	780	917.69	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	156	2021-12-18	11:02—11:17	24.9	26.3	18.6	56.0	1	600	939.88	
	157	2021-12-18	11:42—11:57	22.9	27.7	15.2	54.5	1	900	878.38	
类型四 Type four	1	2021-12-05	15:01—15:06	29.3	29	12.6	63.8	1	180	295.16	310.09
	2	2021-12-05	15:21—15:26	28.8	28.5	11.3	57.6	1	180	295.22	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	97	2021-12-14	14:00—14:05	31.1	30.8	14.2	71.6	1	180	310.20	
	98	2021-12-14	14:20—14:25	31	31	13.5	76.8	1	180	320.56	

注：卷被开关状态中 1 为揭开状态，0 为闭合状态。
Note: 1 is the open state, 0 is the closed state in the volume switch state.

2.3 控制策略设计

2.3.1 温室内外辐照度关系的构建

卷被直接影响温室的光环境，仅依靠人工经验控制揭、盖卷操作，未能充分考虑作物生长的光需求，且无法充分利用太阳辐射能^[20]。揭被动作发生前室内光辐照度受卷被的影响，传感器数值不能准确反应真实值。对于已建成温室而言，室内光辐射完全依赖于室外光辐射，因此可利用室外辐照度修正室内辐照度，分析经滤波处理后的 508 组室内-外辐照度数据如图 4 所示。

建立二者之间关系用以修正室内辐照度，拟合后的室内-外光辐射关系如式 8 所示。

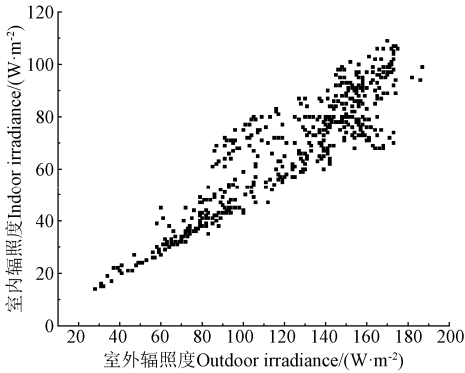


图 4 室内外辐照度关系
Fig.4 Indoor and outdoor irradiance relationship

$$I'_{in} = 0.547 I_{out} + 0.221 \quad (8)$$

式中 I'_{in} 为修正的室内辐照度, W/m^2 ; I_{out} 为室外辐照度实测值, W/m^2 。拟合公式决定系数 R^2 为 0.87。

2.3.2 控制策略设计

为保证作物生长需求的光环境, 首先依据作物光补偿点与辐照度间的关系对温室卷被进行调控, 通过传感器采集室外辐照实测值代入式 (8) 进行计算室内辐照度修正值, 室内辐照度修正值大于作物光补偿点时卷被揭开, 室内辐照度实测值小于作物光补偿点时卷被闭合。卷被的控制昼间前只段判断是否揭开、昼间后段只判断是否闭合, 且动作指令仅下达一次, 防止实际运行中因辐照度波动导致设备频繁启闭。根据试验数据分析, 卷被发生揭开与闭合动作的时间, 位于卷被定时控制 (9:00-17:00) 区间内, 不产生因过早揭被影响加温控制等现象。

众多学者在温室种植中提出“变温管理”^[21-22]的措施以满足作物生长需求。通常将一天分为两个阶段进行调控, 08:00—18:00 为昼间模式调控; 18:00—次日 08:00 为夜间模式调控, 不同阶段的设定不同的适宜温度。昼间温度变化相对稳定, 为保证稳定的调控效果和防止设备超调, 设定调控周期 t_1 等于 20 min; 夜间温度变化速度较快, 为保证稳定的调控, 设定调控周期 t_2 等于 15 min。

通过 2.1 计算得到的温室卷被不同情况下的综合传热系数、加热系统工作参数和雾化喷淋系统工作参数, 代入构建的调控设备与环境参数间的关系方程式 (4) 和式 (5)。设定作物生长适宜目标温度, 控制程序根据时间条件进行判断。08:00 后, 温室控制系统进入昼间调控模式, 为保证作物昼间生长, 加热系统持续工作, 将温室夜间较低温度状态提升至昼间目标温度, 而后按照调控周期 t_1 内传感器实时采集室内空气温度、室外空气温度和室内辐照度数据作为输入, 代入式 (4) 中计算加热系统的工作时间, 并对计算结果进行判断。当其值大于 0 时按照计算加热时间控制加热系统工作; 当其值小于 0 时加热系统不工作, 需要依据式 (5) 计算雾化喷淋系统工作时间并控制其工作。太阳辐射是温室主要热源之一, 同时作物正常生长需要良好的光环境, 卷被在昼间出现揭开与闭合不同情况, 系统依据卷被状态自动选择对应的综合传热系数。18:00 后, 温室控制系统进入夜间调控模式。温度从昼间较高温度状态自然降温至夜间目标温度, 而后按照调控周期 t_2 采集环境数据计算并进行设备调控。具体的控制流程图如图 5 所示。

2.4 控制效果验证分析

以温室黄瓜种植为例进行实际控制效果分析, 相关研究表明在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 20 种不同品种的黄瓜光补偿点最大值为 $19.92\text{ W}/\text{m}^2$ ^[23], 故验证试验设定黄瓜光补偿点为 $20\text{ W}/\text{m}^2$; 黄瓜昼间适宜温度区间为 $25\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夜间适宜温度区间为 $15\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 验证试验设定昼间最适温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夜间最适温度为 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在控制系统人机交互界面完成相应参数设置, 启动控制开关, 温室系统进入

基于热量平衡方法的自动控制状态。人机交互界面如图 6 所示。

基于热量平衡控制方法的结果如图 7a 所示, 试验时间为 2022 年 1 月 18 至 19 日, 外部温度为 $-3\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图中可以看出, 昼间温度总体在设定值 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近波动, 午后出现短暂高温, 最高温为 $28.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在雾化喷淋系统的作用下迅速控制温度至适宜区间, 昼间温度变化相对稳定, 温度最大波动幅度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 夜间室外温度较低, 室内温度变化较为剧烈, 出现密集的波峰波谷变化情况, 但总体在设定值 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近波动, 温度最大波动幅度为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

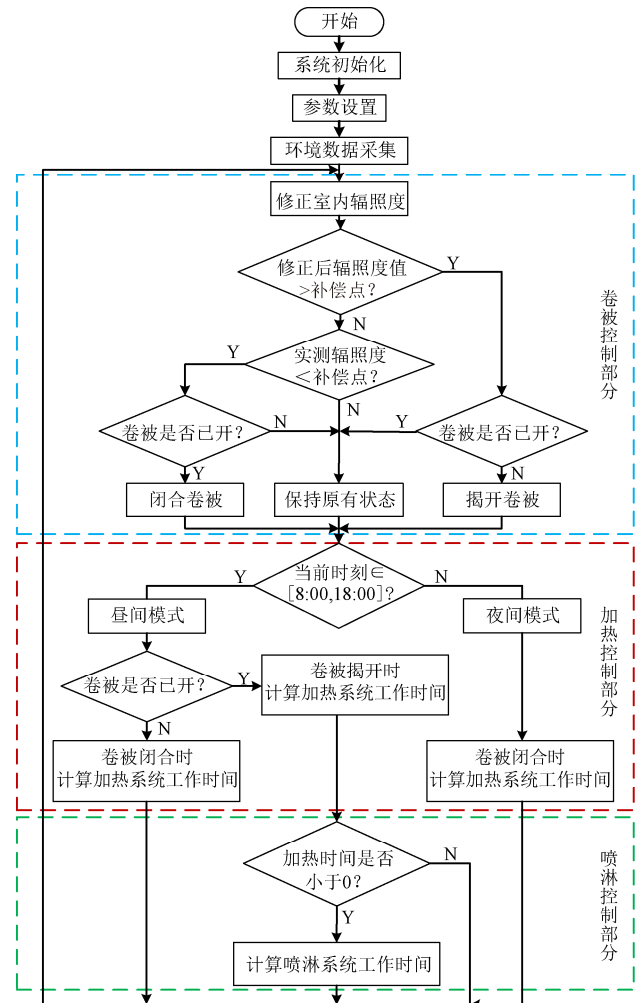


图 5 PLC 控制流程图

Fig.5 PLC control flow diagram

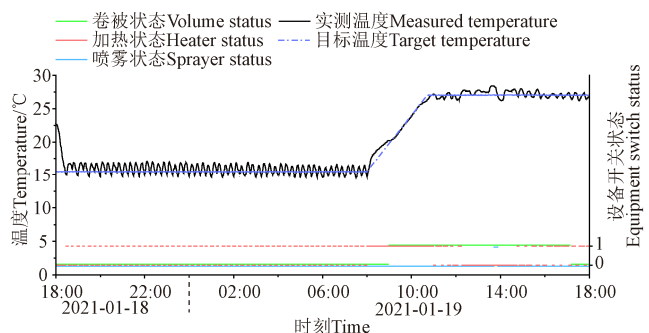


图 6 控制系统人机交互界面

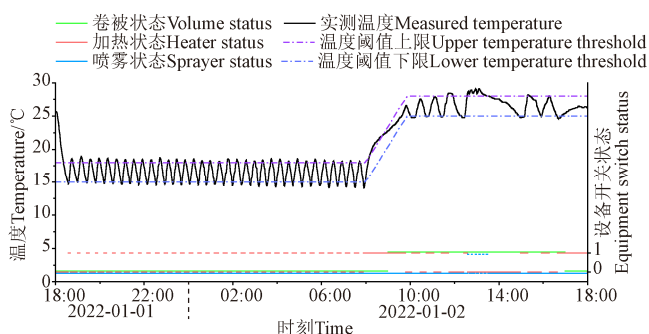
Fig.6 Control system human-machine interface

对比外部环境相近时采用基于上下限阈值控制方法的控制结果(2022 年 1 月 1 至 2 日外部温度 $-4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$),如图 7b 所示。对比图中两种控制方法下温度波动范围可以看出,基于热量平衡的控制有效缩小了温度波动幅度,但其加热系统启停切换次数较多。主要原因是加热系统工作提供热量后因室内无储热介质,且冬季夜间温度低,导致温度较快发生变化,控制温度在较小的范围内波动必然导致设备启停切换频率高。基于设定值控制方法和基于热量平衡控制方法单日的耗电量分别为 91.82 和 82.76 kW·h。基于热量平衡控制方法节约 9.06 kW·h 电能,占其当日耗电量的 10.95%。

综合考虑耗电量与实际调控效果,基于热量平衡的控制方法具有一定优势。



a. 基于热量平衡方法控制结果
a. Control results based on heat balance method



b. 基于设定值方法控制结果
b. Control results based on setpoint method

注:设备开关状态包括卷被、加热系统和雾化喷淋系统运行情况,其中 1 表示设备开启(卷被揭开),0 表示设备关闭(卷被闭合)。
Note: The switch status of the equipment includes the operation of the quilt, the heating system and the atomizing spray system, where 1 means the equipment is turned on (volume uncovered), and 0 means the equipment is turned off (volume covered).

图 7 温度调控结果

Fig.7 Temperature control results

3 结 论

本文结合现代温室的管理需求,基于典型物联网结构设计,建立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。针对温室冬季温度调控问题进行研究,主要得到以下结论:

1) 通过试验计算出温室卷被闭合时温室综合传热系数为 $0.266\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 、卷被揭开时温室综合传热系数为 $0.562\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 、空气源热泵加热系统性能参数为 921.38 W 为和雾化喷淋系统性能参数为 310.09 W,结合温室系统热量平衡,构建了调控设备控制时间与温室环

境参数间的关系方程,并以此设计了温室冬季加温智能控制方法。

2) 以温室黄瓜种植为例,对基于热量平衡的控制方法进行验证。结果表明,该方法能有效控制温度在目标值附近且变化相对稳定,昼间温度最大波动幅度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间温度最大波动幅度为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比了外部天气情况相近条件下基于设定值控制方法与基于热量平衡控制方法单日耗电量情况,基于热量平衡控制方法单日节约耗电量 9.06 kW·h,约占其试验当天耗电量的 10.95%。综合考虑实际调控效果及耗电量,基于热量平衡的控制方法具有一定优势。

【参 考 文 献】

- [1] 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 with English abstract)
- [2] 李胜,王国强,刘娜,等. 基于日光温室加温技术的热风水暖一体加温系统研制[J]. 农业工程, 2020, 10(10): 16-18.
Li Sheng, Wang Guoqiang, Liu Na, et al. Development of integrated heating system of hot blast and water heating based on heating technology of solar greenhouse[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(10): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨禹尧. 连栋薄膜温室空气源热泵加温试验及热环境分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
Yang Yuyao. Heating Test of Air Source Heat Pump in Multi Span Film Greenhouse and Thermal Environment Analysis[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract)
- [4] 高立婷,戴思慧,李明,等. 基于作物与能耗的温室加温调控方法[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 49-54.
Gao Liting, Dai Sihui, Li Ming, et al. Control methods of heating in greenhouse based on crop and energy consumption[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 49-54. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吴翠南,杨禹尧,吴宜文,等. 空气源热泵系统加温效果及温室热环境分析[J]. 农业工程技术, 2021, 41(19): 28-35.
Wu Cuinan, Yang Yuyao, Wu Yiwen, et al. Heating effect of air source heat pump system and analysis of greenhouse thermal environment[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(19): 28-35. (in Chinese with English abstract)
- [6] 盛国成. 日光温室增温方式与供热设备[J]. 农业工程技术, 2007(2): 21.
Sheng Guocheng. Solar greenhouse heating method and heating equipment[J]. Agricultural Engineering Technology, 2007(2): 21. (in Chinese with English abstract)

- [7] 王建辉, 刘自强, 刘伟, 等. 地源热泵在育种/育苗温室中的应用实验研究[J]. 河北省科学报, 2014, 31(3): 47-54.
Wang Jianhui, Liu Ziqiang, Liu Wei, et al. Experimental study on application of ground-source heat pump in seedlings greenhouse[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2014, 31(3): 47-54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 辜松, 初麒, 杨艳丽, 等. 温室空气源热泵加温系统的应用[J]. 农业工程技术, 2017, 37(22): 26-30.
Gu Song, Chu Qi, Yang Yanli, et al. Application of greenhouse air source heat pump heating system[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(22): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 with English abstract)
- [10] 王立舒, 侯涛, 姜淼. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 131-137. (in Chinese with English abstract)
- [11] Jung Dae-Hyun, Kim Hak-Jin, Kim Joon Yong, et al. Model predictive control via output feedback neural network for improved multi-window greenhouse ventilation control[J]. Sensors, 2020, 20(6): 1-16.
- [12] 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.
- [13] Chen Weihai, You Fengqi. Efficient greenhouse temperature control with data-driven robust model predictive[C]. //Philadelphia: Proceedings of the American Control Conference, 2019.
- [14] 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 with English abstract)
- [15] Mostafavi S A, Rezaei A. Energy consumption in greenhouses and selection of an optimized heating system with minimum energy consumption[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2019, 48(7): 3257-3277.
- [16] 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 with English abstract)
- [17] 刘洋, 许燕, 彭炫, 等. 物联网温室群双模糊控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 185-190.
Liu Yang, Xu Yan, Peng Xuan, et al. Design of double fuzzy control system for IoT greenhouse group[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10): 185-190. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈冰. 温室空气源热泵供热系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
Chen Bing. Research on Greenhouse Air Source Heat Pump Heating System[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [19] 富建鲁, 周长吉, 王柳. 连栋玻璃温室采暖热负荷计算方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 235-242.
Fu Jianlu, Zhou Changji, Wang Liu. Methods for calculation of heating load in gutter-connected glasshouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 235-242. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 with English abstract)
- [21] 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(297): 10-11.
Sun Runfeng. Cultivation and production techniques of cucumber in solar greenhouse in winter in northern China[J]. Jilin Vegetable, 2017, 9(297): 10-11. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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]. Applied Engineering Technology, 2020, 40(34): 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王永健, 姜亦巍, 吴国胜, 等. 黄瓜光补偿点与低温弱光耐受性关系初探[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 96-97.
Wang Yongjian, Jiang Yiwei, Wu Guosheng, et al. Study on the relationship between light compensation point and low temperature and weak light tolerance in cucumber[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998, 25(2): 96-97. (in Chinese with English abstract)

Winter temperature control strategy of greenhouse based on heat balance equation

Tu Hongbin^{1,2}, Zhu Delan^{1,2*}, Liu Mengyang^{1,2}, Liu Changxin³, Wang Ruixin⁴, Jing Yupeng^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering of the Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Breeding and Seed Production of Agricultural Crops of Tashkent State Agrarian University, Tashkent 100140, Uzbekistan; 4. College of Engineering, Purdue University, Indiana 47906, America)

Abstract: An active heating system is often necessary for the normal growth of crops in a greenhouse, particularly with the severe winter weather in northern China. Among them, an air-source heat pump system can be favored for the low energy consumption, cost saving, and less pollution. Much effort was mostly on the working performance of heat pumps. Specifically, an advanced control systems of greenhouse environment with a high level of automation cannot better fit the current situation of family-oriented greenhouse cultivation, particularly at a high cost. It is highly urgent to combine the temperature control systems for the regulation of the greenhouse with the air source heat pump in a reasonable and simple way. In this study, an intelligent monitoring system was established to combine the management needs of modern greenhouse using the typical IoT structure. The system also consisted of on-site monitoring subsystem, IoT cloud box, and remote monitoring subsystem. The integrated heat transfer coefficient was then calculated under the rolled/unrolled greenhouse, according to the basic principles of heat transfer. The measured data was utilized to determine the performance parameters of the air source heat pump heating system and fogging spray. The heat balance equation was selected to establish the relationship equation between the control time of regulating equipment and environmental parameters of greenhouse. As such, the temperature control strategy was designed to collect the environmental data in real time by sensors. The obtained data was set as the input in the process, while the output was required the working time of equipment to control the equipment start and stop, according to the time to regulate the greenhouse temperature. At the same time, the crop light compensation point was used to control the action of the rolled quilt, in order to fully meet the light environment that required for the crop growth. An outdoor light irradiance was also used to correct the indoor light irradiance, because the sensor value cannot accurately reflect the real value, due to the rolled quilt before the unrolling action. Once the indoor irradiance correction value was greater than the crop light compensation point, the volume was opened, otherwise, the volume was closed. A series of experiments were also carried out with the greenhouse cucumber cultivation. There were the stable changes and small fluctuations of temperature around the target value in the improved model under the heat balance equation. The single-day power consumption of the control system saved 9.06 kW·h under similar external weather conditions, compared with the set value-based control system, accounting for 10.95% of the power consumption on the test day. Consequently, the control system under the heat balance equation can be easily implemented to regulate via the different temperature target values, according to the crop demand. The finding can provide a strong reference for the application and promotion of temperature control strategy for the greenhouse in winter.

Keywords: greenhouse; heat balance; internet of things; air source heat pump; temperature control strategy