

移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统设计与试验

郭嘉明^{1,2} 蔡威¹ 林济诚¹ 林国鹏¹ 曾志雄^{1,2} 吕恩利^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要:为解决现有荔枝产地预冷装置预冷速度慢、能耗高等问题,设计了一种移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统,以保障荔枝采后预冷效果。该系统主要由 STM32 主控系统、水泵驱动系统、制冷系统和数据采集系统组成。基于 USART HMI 软件设计智能串口屏界面,智能串口屏通过 TTL 串口与 STM32 单片机进行串口通信,能够完成荔枝喷淋预冷工作参数设置和显示控制系统运行状态信息,实现对荔枝喷淋预冷装置的精确控制。搭建试验硬件平台,以水泵的喷淋流量和单次喷淋时荔枝载荷为试验因素,以荔枝的预冷时间和均匀度为试验指标对预冷效果进行评价。试验结果表明,在 1/2 预冷时间(HCT)之前,当喷淋流量超过 70 L/min 时,喷淋流量对冷却速度的影响不大;在 HCT 之后,与 70 L/min 相比,预冷时间分别减少 170 s (90 L/min)、260 s (110 L/min)、262 s (130 L/min),因此,当喷淋流量超过 110 L/min 时,增加喷淋流量对荔枝降温速率影响不大;对不同载荷荔枝进行试验发现,当荔枝载荷大于 50 kg 时,增加荔枝载荷对荔枝降温速率影响较大;当荔枝载荷为 50 kg 时,荔枝预冷完成后的均匀度会随着喷淋流量的增加先变大后减小;当喷淋流量为 90 L/min 时,荔枝预冷完成后的均匀度会随着荔枝载荷的增加先变大后趋于稳定。研究结果可为荔枝喷淋预冷装置控制系统优化,实现荔枝采后快速预冷,保障荔枝采后品质提供帮助。

关键词:荔枝;预冷时间;喷淋预冷;控制系统;STM32 单片机

中图分类号: S667.1; TP271.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)12-0367-09

OSID:



Design and Test of Control System of Mobile Lychee Storage and Spraying Precooling Device

GUO Jiaming^{1,2} CAI Wei¹ LIN Jicheng¹ LIN Guopeng¹ ZENG Zhixiong^{1,2} LÜ Enli^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow precooling speed and high energy consumption of existing lychee origin precooling devices, a mobile lychee storage and spray precooling device control system was designed to improve the guarantee of post-harvest precooling effect of lychee. The system mainly consisted of STM32 main control system, pump driving system, refrigeration system, data acquisition system and auxiliary control system. The intelligent serial screen interface was designed based on USART HMI software. The intelligent serial screen communicated with STM32 microcontroller through TTL serial port, which can complete the setting of lychee spray precooling parameters and display the operation status information of the control system to realize the accurate control of lychee spray precooling device. The test hardware platform was built to evaluate the precooling effect with the test factors of spray flow rate of water pump and load of lychee at single spraying, and the precooling time and uniformity of lychee as the test index. The test results showed that before 1/2 precooling time (HCT), when the spray

收稿日期: 2023-05-19 修回日期: 2023-06-16

基金项目: 国家荔枝龙眼产业体系项目(CARS-32-11)、广东省2019年省级农业科技创新及推广项目(2023KJ101)、农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队项目(2023KJ145)、国家自然科学基金项目(31971806)、茂名实验室自主科研项目(2021ZZ003)、广东省农业科研项目和农业技术推广项目(440000210000000086860)

作者简介: 郭嘉明(1987—),男,副教授,主要从事果蔬冷链物流技术与装备研究, E-mail: jming_guo@163.com

通信作者: 吕恩利(1979—),男,教授,主要从事智能畜牧、冷链物流和农业机器人研究, E-mail: enlily@scau.edu.cn

flow rate exceeded 70 L/min, the spray flow rate had little effect on the cooling rate; after HCT, the precooling time was reduced by 170 s (90 L/min), 260 s (110 L/min) and 262 s (130 L/min), respectively, compared with that under 70 L/min, so that when spraying flow rate was more than 110 L/min, the effect of increase of spraying flow rate on the lychee cooling rate was not significant; test on different loads of lychee found that when the lychee load was greater than 50 kg, increasing the lychee load has a significant effect on the lychee cooling rate; when the lychee load was 50 kg, the uniformity of the lychee precooling completed with the increase in spraying flow first become larger and then reduced; when the spraying flow was 90 L/min, the uniformity of lychee precooling increased and then trended to stabilize with the increase of lychee load. The research results can provide help for the optimization of the control system of lychee spraying precooling device to achieve rapid precooling of lychee after harvesting, so as to protect the lychee after harvesting.

Key words: lychee; precooling time; spray precooling; control system; STM32 microcontroller

0 引言

荔枝是典型的亚热带水果,具有较高的经济价值,其采收于高温多湿的季节,采后携带大量田间热^[1],荔枝果皮褐变之快,在其他水果之中极为罕见,常温下,荔枝采后 24 h 内开始褐变,因此,荔枝也是最难以保鲜贮藏的水果之一。移动式预冷设备可实现荔枝产地第一时间预冷,迅速去除田间热,缓解失水,降低呼吸热,可有效降低营养成分的消耗,保持荔枝的品质和口感,延长其储藏期和货架期^[2-6]。目前,荔枝预冷方式主要为冰水浸泡预冷与冷库预冷^[7]。冰水浸泡预冷速度快,但水质和水温难以维持;而冷库预冷速度较慢,且移动性较差,能耗较高^[8]。因此,有必要进行移动式荔枝快速预冷装置研究。

冷水预冷被认为是较为有效的快速预冷技术之一,广泛应用于荔枝采后预冷中,冷水预冷是将冷水作为换热介质,使荔枝与冷水进行换热的一种冷却方法^[9],近年来,随着荔枝产量的持续增长,出现了许多关于冷水预冷的研究,其中主要集中在不同预冷方式对荔枝品质的影响方面。文献[10]研究了喷淋预冷工艺参数对荔枝降温特性的影响;文献[11]研究了浸泡预冷方式下,预冷延迟时间对荔枝贮藏品质的影响;文献[12]研究了喷淋和浸泡预冷 2 种方式下,甜玉米的不同摆放方式对预冷时间和贮藏品质的影响;文献[13]研究了冷库、压差和流态冰预冷对甜玉米储藏品质的影响,结果表明,流态冰预冷在储藏期间保鲜效果最佳;文献[14]研究了浸泡预冷方式下,不同形状大小的果蔬与冷却速率之间的关系;文献[15]对荔枝产地预冷装置进行了研究,搭建了以冰为冷源,采用空气-水换热器的预冷实验台;文献[16]研究了喷淋预冷方式下,不同尺寸和不同温度椰枣的冷却速率。

上述研究主要集中在冷水预冷工艺参数及冷水预冷后荔枝品质变化等方面,所涉及到的预冷装置

存在体积大、预冷时间长,或不能适应荔枝产地预冷等问题。目前,针对荔枝产地可移动式快速预冷装置设计方面的研究鲜有报道。本文对荔枝产地可移动式快速预冷装置进行研究,对装置整体结构以及控制系统进行设计,并试验验证装置的性能,以期荔枝产地喷淋预冷装置设计提供参考。

1 系统结构与工作原理

移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统主要由 STM32 主控系统、水泵驱动系统、制冷系统和数据采集系统组成,如图 1 所示。其中 STM32 主控系统由 STM32 单片机和智能串口屏^[17-18]组成;水泵驱动系统由直流电机驱动器和直流水泵组成;制冷系统由制冷机组和交流接触器组成,数据采集系统由液位传感器、浊度传感器、温度流量一体式传感器、温度传感器和 PT100 型温度变送器组成。

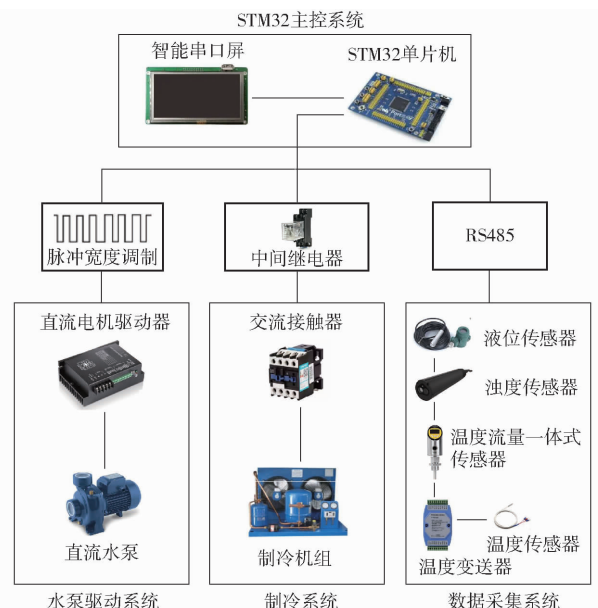


图 1 荔枝喷淋预冷装置控制系统示意图

Fig. 1 Lychee spray pre-cooling device control system diagram

移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统工作过

程主要包括蓄冷阶段和预冷阶段,采用夜间用电低谷进行蓄冷,白天进行预冷,能有效地节约能源使用。蓄冷阶段通过 STM32 主控系统控制交流接触器开启制冷机组,制冷机组开启后蒸发盘管内制冷剂蒸发吸热,蒸发盘管吸收的热量通过风冷式冷凝器排入大气中,蒸发盘管温度下降,蓄冷箱水温下降,当盘管周围水温达到水结冰相变温度后,继续降温则盘管周围水开始结冰,直接附着在盘管上,随着制冷进行制冷剂不断吸热,盘管周围冰层越来越厚,当到达设定的制冷时间后,主控系统控制制冷机组停止工作。预冷阶段通过 STM32 主控系统控制循环水泵启动,蓄冷箱的冷水经过循环管道进入预冷箱,经过预冷箱喷头均匀喷淋到荔枝上,冷水与荔枝进行热交换,通过底部开孔流回蓄冷箱。回流的热热水与蓄冷箱里的冷水进行热交换使热水温度降低,蓄冷箱的冰不断融化。蓄冷箱冷水不断通过水泵进入预冷箱与荔枝进行热交换,通过主控系统预测荔枝果温,当荔枝果温到达设定的预冷温度后,主控系统控制水泵停止工作并提示本次预冷已完成。

2 控制系统硬件设计

2.1 硬件系统总体设计

硬件控制系统主要由微控制器、中间继电器、制冷机组、电机驱动器、水泵、液位传感器、温度传感器、浊度传感器、温度流量一体式传感器和人机交互界面等组成。

2.2 硬件系统设计

2.2.1 STM32 主控系统

STM32 单片机作为 STM32 主控系统的核心模块,主要完成对智能串口屏指令信息的接收与反馈,采集并记录传感器的数据,控制水泵、制冷机组等功能。采用以 STM32F103C8T6 为主芯片的单片机, CortexM3 为系统内核,具有 64 KB 的 Flash 存储器和 20 KB 的 SRAM 以及 4 个通用 16 位定时器/计数器、2 个 PWM 定时器,主频为 72 MHz,共有 37 个 I/O 端口和 48 个引脚,具备足够的通用 I/O 端口^[19],满足系统开发需求。

智能串口屏与 STM32 单片机进行串口通信,智能串口屏的 TX 端和 RX 端分别连接 STM32 单片机串口的 RX 和 TX 的 I/O 端口,两者波特率应一致。本文选用 TJC8048X570_011CS_Y 型智能串口屏。

2.2.2 水泵驱动系统

水泵作为主要的执行器件,通过水泵的转动使蓄冷区的冷水经过花洒喷头喷出,对荔枝进行预冷后,回流至蓄冷区,完成对水资源的循环利用。选用的水泵为直流无刷水泵,输入电压为 48 ~ 60 V,额

定功率 1 100 W,额定转速 3 000 r/min。

STM32 单片机不能直接驱动水泵,因此 STM32 单片机与水泵之间通过直流电机驱动器连接。直流电机驱动器采用深圳市森控智能科技有限公司生产的 MC-FBLD-6630 型直流无刷电机驱动器,输入电压为 12 ~ 66 V,额定驱动电流 30 A。STM32 单片机通过向直流电机驱动器发送 PWM 脉冲信号,控制 PWM 脉冲信号的占空比改变水泵的转速;通过驱动器的 EN 使能端控制水泵的启动和停止。

2.2.3 制冷系统

制冷系统的作用是对蓄冷箱中的水进行快速降温,为预冷时提供冷源。制冷系统主要由压缩机、冷凝器、膨胀阀,蒸发器和控制系统等组成。压缩机输入电压为 220 V,输入功率为 3 980 W,冷凝器冷凝温度为 40℃,蒸发器蒸发温度为 -10℃,由说明书可知此制冷机组功率为 7.85 kW。

蒸发器盘管单层布置尺寸如图 2 所示,盘管一共有 6 层,每层盘管距离为 50 mm,当蓄冷箱完成蓄冷时,假定结冰厚度为 25 mm,则结冰体积计算公式为

$$V_l = \pi(r^2 - r_c^2)L_{cl} \quad (1)$$

式中 V_l ——蓄冷完成后结冰体积, m^3

r ——盘管和冰层形成圆柱体半径, m

r_c ——盘管半径, m

L_{cl} ——蓄冷箱中盘管总长度, m

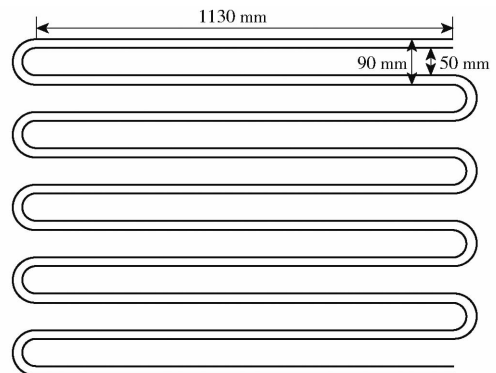


图 2 蒸发器盘管单层尺寸

Fig. 2 Evaporator coil single layer size

蓄冷箱尺寸为 1 360 mm × 810 mm × 680 mm,假设初始水温为 30℃,蓄冷完成时,水需要释放的总热量记为 Q ,制冷机组功率记为 W ,则完成蓄冷所需时间为

$$t_1 = \frac{Q}{W} = \frac{Q_1 + Q_2}{W} \quad (2)$$

式中 t_1 ——完成蓄冷所需时间, h

Q_1 ——蓄冷完成水降温释放的热量, kJ

Q_2 ——蓄冷完成水结冰释放的热量, kJ

代入数值计算可知,完成蓄冷所需时间为 5.8 h,符合装置夜间蓄冷的需求。

假设蓄冷箱水位为 600 mm,完成蓄冷后总蓄冷量为 1.75×10^5 kJ,假设水温升至 8℃时,停止预冷工作,可用于预冷的总冷量为 1.03×10^5 kJ,以荔枝作为试验对象,荔枝初温为 30℃,预冷温度为 8℃,单次蓄冷可预冷荔枝质量约为 1 311 kg,满足装置设计需求。

2.2.4 数据采集系统

数据采集系统的传感器参数如表 1 所示,该系统由液位传感器、浊度传感器、温度流量一体式传感器和温度采集模块组成,均采用 RS485 通讯方式。各传感器单独作为一个节点接入 RS485 总线,微处理器利用 Modbus - RTU 通讯协议定时采集数据,数据经过微处理器解析后发送至人机交互界面。

表 1 传感器参数

Tab.1 Sensors parameters

名称	参数
液位传感器	供电:DC15 ~ 36 V
	精度: ± 0.4 m
	量程:0.02 ~ 200 m
	型号:QDY30A-2mH20-V1
	通讯方式:RS485
浊度传感器	供电:DC12 ~ 24 V
	精度: ± 2 NUT
	量程:0 ~ 1 000 NUT
	型号:JXSZ-1001
	通讯方式:RS485
温度流量一体式传感器	供电:DC24 V
	精度: ± 0.01 ℃ 和 ± 0.1 m/s
	量程:0 ~ 100℃ 和 0.03 ~ 2 m/s
	型号:TH600NXC
	通讯方式:RS485
温度采集模块	供电:DC9 ~ 36 V
	精度: ± 0.002 ℃
	量程: -5 ~ 200℃
	型号:HY885-AIR6
	通讯方式:RS485

温度传感器采用 PT100 型热电阻,STM32 单片机不能直接读取 PT100 型热电阻的数据,因此 STM32 单片机与 PT100 型热电阻之间通过热电阻温度采集模块连接。热电阻温度采集模块可连接 6 路 PT100 型热电阻,通过 RS485 接口与单片机相连,带断线和短路检测功能。

3 控制系统软件设计

3.1 软件系统设计

控制系统控制程序设计分为主程序模块、定时中断模块、串口通信模块和数据采集模块。

3.1.1 主程序模块

主程序模块中,系统进行初始化,调用子函数模块,初始化串口通讯、RS485 通讯、定时器中断和继电器以及水泵控制 I/O 端口高低电平。通过延时函数和循环函数实时向人机交互界面发送传感器采集数据。

3.1.2 串口通信模块

初始化 USART1 后,接收中断开启,当人机交互界面发送十六进制数据时,STM32 单片机的串口接收寄存器内即为非空,触发接收中断。为确认 USART1 是否发生接收中断,调用读取串口中断状态标志位函数 USART_GetITStatus,如果确实产生接收中断事件,执行 if 内的语句,通过 USART_ReceiveData 将串口接收到的数据保存在 Res 变量里,USART_RX_STA 为接收数据的状态标记位,前两位为帧头判断位,后两位为帧尾判断位,中间的 12 位记录接收数据的位数。串口屏发送每一帧数据的帧头为 0X0c0b,当识 0X0c0b 时,USART_RX_STA 往下计数将这一帧数据保存在数组 USART_RX_BUF 中,在帧尾处当识 0X0d0a 时,表示此次数据接受完成。如果识别数据帧头不是 0X0c0b 以及帧尾不是 0X0d0a,USART_RX_STA 重新计数识别数据帧头。在人机交互界面上点击不同的按钮时,通过串口向 STM32 单片机发送不同的十六进制数,当 STM32 单片机识别不同的按钮下发的指令时,将做出不同的动作。串口屏发送程序流程图如图 3 所示。

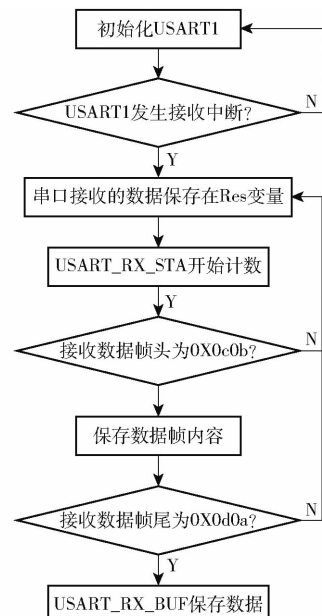


图 3 智能串口屏发送程序流程图

Fig.3 Program flowchart of intelligent serial screen sending

定义数值发送函数 HMI_SendNum,在函数参数里设置选择串口输出、数值代码、数值代码长度、串

口输出显示数值和显示数值位数。根据不同数值代码长度和数值位数在 for 循环里通过 USART_SendData 函数向串口屏发送数据。等待数据发送结束,向串口屏发送 0Xff,表示发送结束。主程序模块中引用数值发送函数 HMI_SendNum,通过 STM32 单片机向串口屏发送数值,串口屏上显示 STM32 单片机采集的数据。比如显示设备的水位和水温。串口屏接收流程图如图 4 所示。

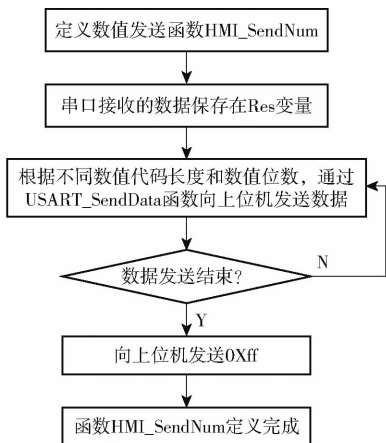


图 4 智能串口屏接收程序流程图

Fig. 4 Program flowchart of intelligent serial screen receiving

3.1.3 数据采集模块

传感器均采用 RS485 通讯,使用的是 STM32 单片机 USART2。初始化 RS485 通讯后,接收中打开启,当传感器发送十六进制数据时,STM32F1 的串口接收寄存器内即为非空,触发接收中断。为确认 USART2 是否发生接收中断,调用读取串口中断状态标志位函数 USART_GetITStatus,如果确实产生接收中断事件,执行 if 内的语句,将串口接收到的数据保存在 Res 变量中,RS485_RX_CNT 为接收每一帧数据的字节数。将传感器通讯设备地址分别配置为 1、2、3 和 4,当中断接收数据完成后,通过通讯设备地址以及 CRC16 校验完成传感器数据接收并将其保存在对应的变量中。STM32 单片机接收传感器数据流程图如图 5 所示。

定义发送传感器采集数据命令函数 Sensor_SendCommand,在函数中通过 RS485_Send_Data 分别向液位、浊度、温度和流量温度一体式传感器发送数据采集命令。定时中断中引用传感器采集数据命令函数 Sensor_SendCommand,通过 STM32 单片机向传感器发送数据采集命令,传感器采集数据后将数据发送回单片机完成数据采集。

3.1.4 定时中断模块

定义定时中断初始化函数,进入定时器中断服务程序来判断中断是否发生,当中断产生时,清除中

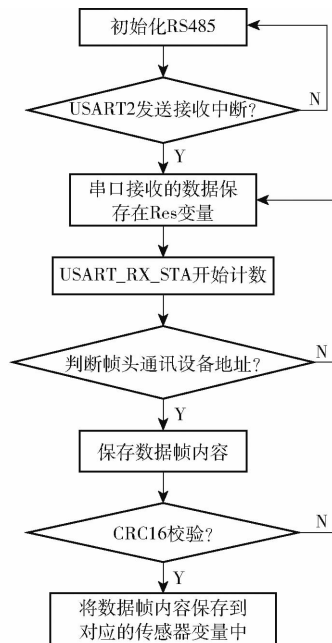


图 5 接收传感器数据流程图

Fig. 5 Flowchart of receiving sensor data

断标志,调用 Sensor_SendCommand 函数向传感器发送数据采集命令,当 RS485 接收到传感器数据后,向串口屏发送数据,并做出相应的动作。

3.2 人机交互界面

人机交互界面设计采用 USART HMI 软件进行,基于 C 语言编译代码配置波特率和屏幕亮度。本次界面设计有 5 个页面,分别为开机页面、系统状态显示页面、系统操作页面、系统设置页面和使用说明页面。系统状态页面中,实时显示蓄冷箱水温和水质,显示制冷机组和水泵实时状态信息,方便实时观察装置运行状态。系统操作页面中,控制制冷机组和水泵,实现手动模式控制荔枝喷淋预冷设备。系统设置页面中,设置水泵的喷淋预冷流量,使荔枝喷淋预冷装置在较优的参数情况下运行。使用说明页面给予用户一个使用说明文档。系统状态页面如图 6 所示。



图 6 系统状态页面

Fig. 6 System status page

4 试验

4.1 试验装置与试验材料

为了验证装置的稳定性和可靠性,同时对硬件

部分的参数进行优化,基于移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置设计控制系统,装置外型尺寸为1 500 mm × 1 000 mm × 1 800 mm,装置外观与装置结构简图如图7所示。本次试验的地点在广州市从化荔枝果园,试验荔枝品种为“井岗红糯”,果实成熟度约为90%,果农从果园采摘后运回加工中心预冷。无纸记录仪采用杭州联测自动化技术有限公司生产的SIN-R6000C型无纸记录仪,共有18路接口。温度传感器采用泰州万阳自动化设备有限公司生产的PT100型热电阻,测温范围为-50~200℃,精度为±0.2℃。

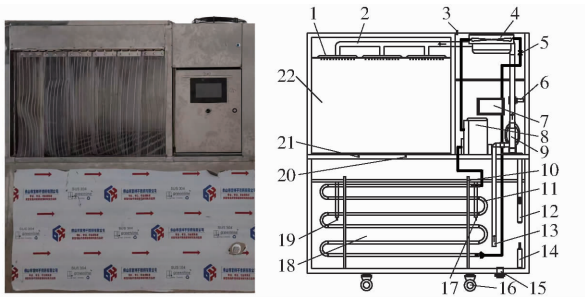


图7 装置外观与装置结构简图

Fig.7 Device appearance and device structure sketch

1. 花洒喷头 2. 水管 3. 环境温度传感器 4. 冷凝风机 5. 节流装置 6. 温度流量一体式传感器 7. 人机交互界面 8. 压缩机 9. 水泵 10. 盘管支架 11. 蒸发盘管 12. 浊度传感器 13. 水泵进水口 14. 液位传感器 15. 排水口 16. 万向轮 17、19. 水温传感器 18. 蓄冷箱 20、21. 喷淋排水口水温传感器 22. 货物预冷区

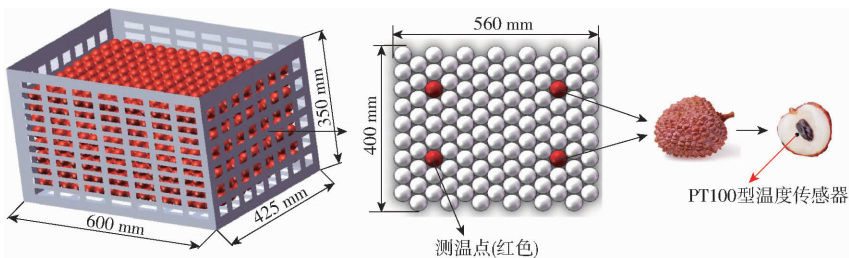


图8 荔枝果实温度监测点

Fig.8 Lychee fruit temperature monitoring sites

式中 Z ——预冷时间,无量纲,取1/2和1/5
 t ——任意时刻荔枝果实温度,℃
 t_0 ——荔枝果实初始温度,℃
 t_∞ ——喷淋水温,℃

4.3.2 均匀性

预冷均匀性指预冷过程中不同位置果实温度的差异性,预冷均匀性差,易导致荔枝出现冷害或预冷不完全,它是预冷效果的重要评价指标^[24]。采用均匀度评价,其计算式为^[25]

$$\sigma = \frac{1}{t_p} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - t_p)^2} \quad (4)$$

式中 σ ——均匀度

4.2 试验方法

在喷淋预冷试验平台上,改变喷淋流量和荔枝载荷,用预冷时间和均匀性来评价其对荔枝预冷降温过程的影响。喷淋流量试验水平选取为70、90、110、130 L/min,荔枝载荷试验水平选取为30、40、50、60 kg。

将荔枝放置于荔枝果园统一的采摘筐中,将温度传感器插入荔枝果肉中间,测温点分布与传感器位置如图8所示,其中深色位置为测温荔枝,测温荔枝的高度位于每筐的中间,每次同时预冷两筐,以各点平均温度表征荔枝果实温度。在荔枝预冷的过程中,开启制冷机组维持统一的喷淋温度,通过串口屏调节喷淋流量。

4.3 评价指标

4.3.1 预冷时间

在预冷过程中物体与周围流体的温差逐渐缩小,对流换热逐渐减缓;物体要达到周围流体的温度需要无限长的时间^[16],因此,农产品预冷常用1/2预冷时间、3/4预冷时间、4/5预冷时间、5/6预冷时间、7/8预冷时间来衡量冷却效果和速率,以避免流体温度影响^[20-21]。本文预冷时间均指1/2预冷时间(HCT)和4/5预冷时间(FFCT),计算式^[22-23]为

$$Z = \frac{t - t_\infty}{t_0 - t_\infty} \quad (3)$$

t_p ——荔枝果实各点平均温度,℃

t_i ——第*i*个荔枝果实温度,℃

n ——测温点个数

σ 值能有效反映果品温度的不均匀性,其值越小,表明荔枝果实中心温度离散程度越小,温度分布越均匀。

4.4 试验结果与分析

4.4.1 喷淋流量

当荔枝载荷为50 kg时,喷淋流量分别为70、90、110、130 L/min的条件下,对荔枝果实进行预冷,荔枝果实初始温度分别为28.6、28.3、29.6、28.4℃,记录荔枝果实温度变化。

由图 9 可知,喷淋流量越大,荔枝果实温度下降越快,荔枝果实终温越低。HCT 之前的预冷时间比 HCT 之后的预冷时间短。所有预冷曲线在 HCT 前都比较陡峭,这表明荔枝果实的温度在这个阶段变化很快。当喷淋流量超过 70 L/min 时,荔枝果实的预冷时间在 HCT 前不同的喷淋流量下显示出轻微的差异。这在一定程度上表明,在 HCT 之前,喷淋流量对冷却速度的影响不大,可能是因为这个阶段,荔枝果实和冷水之间有很大的温差,即使在低喷淋流量下也会产生大量的对流传热。这也说明在 HCT 之前,适当的低喷淋流量可以满足现阶段产品冷却的需求,同时也会节约能源。在 HCT 之后,与 70 L/min 相比,预冷时间分别减少了 170 s (90 L/min)、260 s (110 L/min)、262 s (130 L/min)。由此可知,在 HCT 之后,当喷淋流量超过 110 L/min 时,增加喷淋流量对荔枝降温速率影响不大。

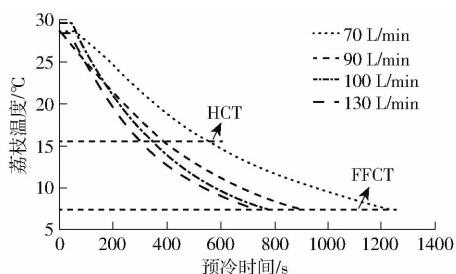


图 9 不同喷淋流量下荔枝果温变化曲线

Fig. 9 Variation curves of lychee fruit temperature under different spraying flow rates

4.4.2 载荷

当喷淋流量为 90 L/min 时,荔枝载荷分别为 30、40、50、60 kg 条件下,对荔枝果实进行预冷,荔枝果实初始温度分别为 27.9、28.8、28.2、27.8℃,记录荔枝果实温度变化。

由图 10 可知,预冷至 900 s 时,荔枝载荷为 30、40、50、60 kg 对应的荔枝果实温度依次为 6.08、6.62、7.52、9.73℃,荔枝载荷越小,荔枝果实温度下降越快,荔枝果实终温越低。HCT 之前和 HCT 之后,与 30 kg 相比,预冷时间增加 26 s 和 32 s (40 kg);与 40 kg 相比,预冷时间增加 60 s 和

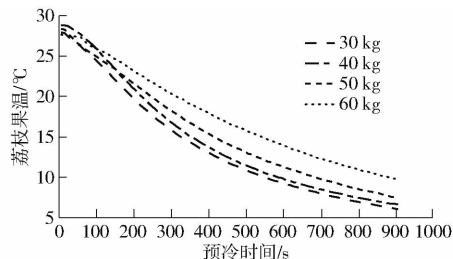


图 10 不同载荷下荔枝果温变化曲线

Fig. 10 Variation curves of lychee fruit temperature under different loads

50 s (50 kg);与 50 kg 相比,预冷时间增加 118 s 和 118 s (60 kg)。当荔枝载荷为 60 kg 时,预冷时间大大增加,可能是因为荔枝层数增大,冷水流到底层的时间增长且水温增大,导致预冷时间大大增加。由此可知,在整个预冷过程中,当荔枝载荷大于 50 kg 时,增加荔枝载荷对荔枝降温速率影响较大。

4.4.3 不同喷淋流量和荔枝载荷对均匀性的影响

当荔枝载荷为 50 kg、喷淋流量分别为 70、90、110、130 L/min 时,荔枝预冷完成后的均匀度如图 11 所示。由图 11 可知,均匀度随着喷淋流量的增加先变大后减小,可能是因为随着喷淋流量的增加,水流的冲击力越来越大,导致水流在荔枝上分别很不均匀,但是当达到一定的喷淋流量时,水流在荔枝上覆盖率慢慢增加,所以均匀度会减小。

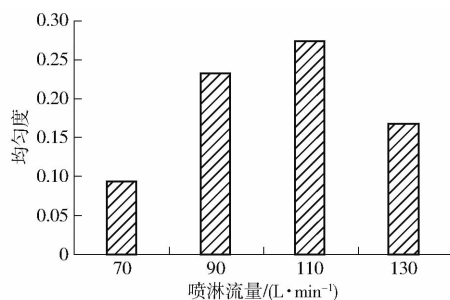


图 11 不同喷淋流量下荔枝果温均匀性

Fig. 11 Uniformity of lychee fruit temperature under different spraying flow rates

当喷淋流量为 90 L/min、荔枝载荷分别为 30、40、50、60 kg 时,荔枝预冷完成后的均匀度如图 12 所示。由图 12 可知,均匀度随着荔枝载荷的增加先变大后稳定,可能是因为随着荔枝载荷的增加,荔枝的层数慢慢变大,水流到测温点的时间差异变大,但是这个差异不会一直增大,所以均匀度会随着荔枝载荷的增加先变大后趋于稳定。

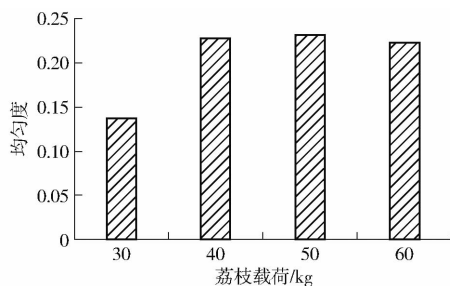


图 12 不同载荷下荔枝果温均匀性

Fig. 12 Uniformity of lychee fruit temperature under different loads

5 结论

(1) 设计了荔枝喷淋预冷控制系统,以 STM32 单片机为控制核心,搭建试验硬件平台,采用串口屏

进行人机交互具有良好的操作性,能够完成荔枝喷淋预冷参数设置和显示控制系统运行状态信息,实现了对荔枝喷淋预冷装置的精确控制。

(2) 试验分析得出,荔枝预冷过程中,1/2 预冷时间(HCT)之前,当喷淋流量超过 70 L/min 时,增大喷淋流量对荔枝冷却速度的影响不大;HCT 之后,当喷淋流量超过 110 L/min 时,增加喷淋流量对

荔枝降温速率影响不大;设备在预冷过程中,当荔枝载荷大于 50 kg 时,增加荔枝载荷对荔枝降温速率影响较大。

(3) 当荔枝载荷为 50 kg 时,荔枝预冷完成后的均匀度会随着喷淋流量的增加先变大后减小;当喷淋流量为 90 L/min 时,荔枝预冷完成后的均匀度会随着荔枝载荷的增加先变大后稳定。

参 考 文 献

- [1] 吕恩利,陆华忠,杨松夏,等. 气调运输包装方式对荔枝保鲜品质的影响[J]. 现代食品科技,2016,32(4):156-160,93. LÜ Enli, LU Huazhong, YANG Songxia, et al. Effects of packaging methods on fresh-keeping quality of lychee during controlled atmosphere transport[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4):156-160, 93. (in Chinese)
- [2] AZAM M M, EISSA A H A, HASSAN A H. Monitoring of change in cantaloupe fruit quality under pre-cooling and storage treatments[J]. Journal of Food Processing and Technology, 2015, 6(12): 527.
- [3] 王娟,谭金翠,王相友. 风速对双孢蘑菇预冷过程的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 203-208. WANG Juan, TAN Jincui, WANG Xiangyou. Effect of air velocity on pre-cooling process of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 203-208. (in Chinese)
- [4] HAN Qiang, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Precooling and ozone treatments affects postharvest quality of black mulberry (*Morus nigra*) fruits[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1947-1953.
- [5] 宋晓燕,刘宝林. 真空冷却中的上海青表面温度变化规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 266-269. SONG Xiaoyan, LIU Baolin. Temperature variation on Shanghaiqing surface during vacuum cooling process[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 266-269. (in Chinese)
- [6] 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280-289. HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 280-289. (in Chinese)
- [7] 吕盛坪,吕恩利,陆华忠,等. 果蔬预冷技术研究现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2013, 40(8): 101-104. LÜ Shengping, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Research status and development trends of precooling techniques for fruits and vegetables[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(8): 101-104. (in Chinese)
- [8] 贾连文,吕平,王达. 果蔬预冷技术现状及发展趋势[J]. 中国果菜, 2018, 38(3): 1-5. JIA Lianwen, LÜ Ping, WANG Da. Present station and development trend of fruit and vegetable precooling technology[J]. China Fruit and Vegetable, 2018, 38(3): 1-5. (in Chinese)
- [9] 阮文疏,刘宝林,宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 352-353, 362. RUAN Wenliu, LIN Baolin, SONG Xiaoyan. Comparison of cooling method for lychee fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 352-353, 362. (in Chinese)
- [10] 吕恩利,陈明林,刘妍华,等. 喷淋预冷工艺参数对荔枝降温特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 292-298. LÜ Enli, CHEN Minglin, LIU Yanhua, et al. Effects of different spray precooling parameters on cooling characteristics of lychee[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 292-298. (in Chinese)
- [11] LIANG Y S, WONGMETHA O, WU P S, et al. Influence of hydrocooling on browning and quality of litchi cultivar Feizixiao during storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1173-1179.
- [12] CLEMENT V, BERNARD G, YVAN G, et al. Effect of ear orientations on hydrocooling performance and quality of sweet corn[J]. Postharvest Biology & Technology, 2007, 43(3): 351-357.
- [13] 时文林,赵雅琦,闫志成,等. 不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 218-226. SHI Wenlin, ZHAO Yaqi, YAN Zhicheng, et al. Effects of different precooling methods on storage quality of sweet corn[J]. Food Science, 2022, 43(15): 218-226. (in Chinese)
- [14] BARBARA T, THEO K, LUIS C. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydrocooling system[J]. Scientia Agricola, 2004, 61(6): 655-658.
- [15] 王倩,戴绍碧,徐妮,等. 荔枝产地预冷装置的开发研究与实验[J]. 农机化研究, 2012, 34(7): 100-104. WANG Qian, DAI Shaobi, XU Wei, et al. Design and experimental study on pre-cooling equipment of lychee fruits[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(7): 100-104. (in Chinese)
- [16] ELANSARI A M. Hydrocooling rates of Barhee dates at the Khalal stage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(3): 402-407.
- [17] 李梁京,张雪芹,刘华波. 基于 USART-HMI 智能串口屏的节能恒温控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2022, 44(6): 113-115. LI Liangjing, ZHANG Xueqin, LIU Huabo. Design of energy saving and constant temperature control system based on USART-HMI intelligent serial port screen[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(6): 113-115. (in Chinese)
- [18] 刘寺杰,徐敏,张晨宇,等. 基于 HMI 智能串口屏显示的温湿度测量系统[J]. 科教导刊(下旬), 2018(24): 59-60, 84. LIU Sijie, XU Min, ZHANG Chenyu, et al. Temperature and humidity measurement system based on HMI intelligent serial display[J]. The Guide of Science & Education, 2018(24): 59-60, 84. (in Chinese)

- [19] 程修沛,李洪文,王庆杰,等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):30-38.
CHENG Xiupei,LI Hongwen,WANG Qingjie,et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):30-38. (in Chinese)
- [20] 谭晶莹,杨昭. 苹果强制通风预冷试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):95-98.
TAN Jingying,YANG Zhao. Experimental study on forced-air precooling of apples in bulk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(7):95-98. (in Chinese)
- [21] 刘美玉,崔建云,任发政,等. 鸡蛋强制通风预冷工艺研究[J]. 农业机械学报,2010,41(8):135-139.
LIU Meiyu,CUI Jianyun,REN Fazhang,et al. Forced-air precooling conditions of eggs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):135-139. (in Chinese)
- [22] TERUEL B,CORTEZ L,LEAL P,et al. Forced-air cooling of banana[J]. Revista Brasileira de Fruticultura, 2002, 24(1): 142-146.
- [23] 王强,刘凤珍,连添达. 葡萄差压通风预冷影响参数的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):212-215.
WANG Qiang,LIU Fengzhen,LIAN Tianda. Experimental study on parameters affecting grape pressure pre-cooling[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(4):212-215. (in Chinese)
- [24] HAN J W,ZHAO C J,YANG X T, et al. Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 883-893.
- [25] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证[J]. 农业机械学报,2016,47(5):218-224.
GUO Jiaming,LÜ Enli,LU Huazhong,et al. Numerical analysis and verification on characteristics of temperature decreasing of lychee fruits with packages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):218-224. (in Chinese)

(上接第 307 页)

- [14] 卢伟,邵昱宁,王玲,等. 利用径向生长修复算法检测玉米根系表型[J]. 农业工程学报,2021,37(18):195-202.
LU Wei,SHAO Yuning,WANG Ling, et al. Radial growth repair algorithm for maize root phenotype detection[J]. Transactions of the CASE, 2021,37(18):195-202. (in Chinese)
- [15] 徐小龙,蒋焕煜,杭月兰. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报,2012,28(5):145-149.
XU Xiaolong,JIANG Huanyu,HANG Yuelan. Study on detection of tomato mosaic disease at early stage based on infrared thermamaging[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(5):145-149. (in Chinese)
- [16] CHAERLE L,HAGENBEEK D,DE BRUYNE E, et al. Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage[J]. Plant Cell Physiol, 2004,45(7):887-896.
- [17] OERKE E C,STEINER U,DEHNE H W, et al. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions[J]. J. Exp. Bot., 2006,57(9):2121-2132.
- [18] 李小龙,王库,马占鸿,等. 基于热红外成像技术的小麦病害早期检测[J]. 农业工程学报,2014,30(18):183-189.
LI Xiaolong,WANG Ku,MA Zhanhong, et al. Early detection of wheat disease based on thermal infrared imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18):183-189. (in Chinese)
- [19] ZHANG Dongyan,LUO Hansen,WANG Daoyong, et al. Assessment of the levels of damage caused by Fusarium head blight in wheat using an improved Yolo v5 method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,198:107086.
- [20] MA Jie,LU Ange,CHEN Chen, et al. YOLO v5-lotus an efficient object detection method for lotus seedpod in a natural environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,206:107635.
- [21] 汪成龙,陈广财,陈国壮. 基于 OpenCV 的畸形马铃薯识别方法[J]. 湖南农业科学,2018(4):85-87.
WANG Chenglong,CHEN Guangcai,CHEN Guozhuang. Identification method of abnormal potato based on OpenCV[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(4):85-87. (in Chinese)
- [22] 杨秋妹,陈森彬,黄一桂,等. 基于改进 YOLO v5n 的猪只盘点算法[J]. 农业机械学报,2023,54(1):251-262.
YANG Qiumei,CHEN Miaobin,HUANG Yigui, et al. Pig counting algorithm based on improved YOLO v5n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):251-262. (in Chinese)
- [23] 张万枝,曾祥,刘树峰,等. 基于改进 YOLO v5s 的马铃薯种薯芽眼检测方法[J]. 农业机械学报,2023,54(9):260-269.
ZHANG Wanzhi,ZENG Xiang,LIU Shufeng, et al. Detection method of potato seed bud eye based on improved YOLO v5s[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):260-269. (in Chinese)
- [24] 林景栋,吴欣怡,柴毅,等. 卷积神经网络结构优化综述[J]. 自动化学报,2020,46(1):24-37.
LIN Jingdong,WU Xinyi,CHAI Yi, et al. Structure optimization of convolutional neural networks: a survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2020,46(1):24-37. (in Chinese)
- [25] 郑玉龙,赵明. 基于深度学习的自然环境下花朵识别[J]. 计算技术与自动化,2019,38(2):114-118.
ZHENG Yulong,ZHAO Ming. Deep learning for flower identification in natural environment[J]. Computing Technology and Automation, 2019,38(2):114-118. (in Chinese)
- [26] 孙雁飞,王子牛,孙莹,等. 面向内存受限设备的新型卷积计算方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2022,42(5):54-61.
SUN Yanfei,WANG Ziniu,SUN Ying, et al. A novel convolution calculation algorithm on memory-limited devices[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2022,42(5):54-61. (in Chinese)