

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.015

基于模糊控制的南美白对虾冰—低温热泵干燥控制系统设计与试验

Design and experiment of *Penaeus vannamei* freezing point and low temperature heat pump drying control system based on fuzzy control

王国杰^{1,2} 母刚^{1,2,3} 霍锦^{1,2} 张倩^{1,2,3} 张国琛^{1,2,3}

WANG Guo-jie^{1,2} MU Gang^{1,2,3} HUO Jin^{1,2} ZHANG Qian^{1,2,3} ZHANG Guo-chen^{1,2,3}

(1. 大连海洋大学机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海洋大学中新合作学院, 辽宁 大连 116023; 3. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心, 辽宁 大连 116023)

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. College of China & New Zealand Collaboration, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China; 3. Marine Fishery Equipment Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province, Dalian, Liaoning 116023, China)

摘要:目的:满足南美白对虾冰—低温热泵干燥过程中对温度的精细化要求。方法:设计了基于西门子 S7-300 PLC 的热泵干燥控制系统。该系统采用模糊控制策略,利用 Matlab 模糊逻辑工具箱设计了“二维输入—一维输出”的模糊控制器。根据对虾干燥工艺设计了数据采集程序和执行程序控制干燥箱温度,并通过人机界面对于干燥过程进行监控与管理,实现温度的自动控制。结果:模糊控制下冰、低温干燥箱稳态后最大温差分别为 0.8, 1.1 °C。与常规 PID 控制相比,温度波动范围分别减小了 46.7%, 57.7%; 冰—低温联合干燥能够有效去除对虾内的水分,并较好地保留其色泽,且在收缩率与复水率上有一定优势。结论:该控制系统运行稳定,能够快速调节干燥箱温度,且控制精度高,具有良好的控制效果。

关键词:冰—低温热泵;模糊控制;PLC;人机界面;南美白对虾

Abstract: Objective: In order to meet the refined requirements of temperature during the drying process of *Penaeus vannamei* freezing point and low temperature heat pump. **Methods:** A heat pump drying control system based on Siemens S7-300 PLC was designed. The system adopted a fuzzy control strategy. And a

fuzzy controller with “two-dimensional input and one-dimensional output” was designed using the fuzzy logic toolbox of Matlab. According to the drying process of prawns, a data collection program and an execution program were designed to control the temperature of the drying oven. And the drying process was monitored and managed through the human-machine interface to realize automatic temperature control. **Results:** The temperature difference of freezing point temperature drying oven under fuzzy control was within 0.8 °C, and that of low temperature drying oven was within 1.1 °C. Compared with PID control, the temperature fluctuation range was reduced by 46.7% and 57.7% respectively. The dry test results of *Penaeus vannamei* showed that the freezing point and low temperature heat pump drying could effectively remove the moisture in the prawn, and better retain its color, which has certain advantages in shrinkage and rehydration. **Conclusion:** The control system operated stably and could quickly adjust the temperature of the drying oven. The control precision of the control system was high. And the control effect of this system was good.

Keywords: freezing point and low temperature heat pump; fuzzy control; PLC; human-machine interface; prawns (*Penaeus vannamei*)

基金项目:十三五“蓝色粮仓科技创新”国家重点研发计划项目(编号:2019YFD0901800);辽宁省教育厅科研项目(编号:DL201908);辽宁省博士启动基金项目(编号:2020-BS-214)

作者简介:王国杰,男,大连海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:张国琛(1965—),男,大连海洋大学教授,博士。

E-mail: zhangguochen@dlou.edu.cn

收稿日期:2021-03-24

据统计^[1],2019年中国水产养殖产量达 5.08×10^7 t,其中海水养殖产量为 2.07×10^7 t,占水产养殖的40.75%。生鲜水产品由于含水率高,增加了包装、贮藏和运输成本,此外过长的冷链也会降低品质,而干燥加工是一种有效的贮藏方法^[2-4]。与一般物料不同,水产品对温度十

分敏感,温度过高会影响干燥品质,温度过低又会延长干燥时间,增加干燥成本。为解决上述问题,有学者^[5]提出冰—低温联合干燥技术,即干燥过程中物料处于冰温和低温两个温度区间。该技术既可以快速去除被干燥物料中的水分,又可以抑制物料内有害微生物的活动及各种酶活性^[6-7],最大限度保留被干燥物料色泽、外形及营养成分^[8-10],适合于水产品的干燥加工。

冰温干燥起步于日本,山根昭美等^[11]将鱼、面条等物料置于温度为 $-1.5\sim 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为40%的环境下干燥,并与传统的 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷风干燥进行对比,发现冰温干燥在保持鲜度上效果良好。另有相关研究^[12-14]表明,冰温干燥产品在口感、复水率等方面较其他干燥方式有显著优势。王丰^[15]研发了一套冰温微波真空干燥设备,通过真空环境中物料水分蒸发使温度降至冰温带内,而后利用微波辐射加热物料使其脱水。厉建国等^[16]在此基础上,改用电加热提供干燥所需热量,并将真空干燥箱置于冷库中,避免外界环境对干燥箱内温度的影响。但由于低压环境中物料温度变化加快,导致电加热启停频繁,控制精度较低。倪超等^[17]设计了以PC为上位机,PLC为下位机的全封闭热泵干燥装置监控系统,实现了温湿度控制。母刚等^[18]设计了基于LabVIEW的热泵干燥监测系统,能够自动采集温度、湿度和物料重量等参数。上述控制系统一定程度上提高了干燥效率与品质,但在响应速度、控制精度等方面仍存在不足。由于干燥过程是一个非线性、时变性、大惯性的复杂过程,难以建立其准确的数学模型,传统控制方式应用受限,而模糊控制对于解决多变量非线性系统具有显著优势^[19-20]。张建锋^[21]利用计算机控制技术和组态技术,设计了热泵干燥装置自动监控系统,运用模糊解耦控制算法进行推理,实现了对干燥过程的温湿度解耦控制。

文章拟在冰—低温热泵干燥系统基础上,重点开发

其控制系统,通过基于模糊控制策略的软硬件设计实现干燥过程中温度数据实时采集,并根据环境参数在线调整执行机构,精准控制冰、低温干燥箱温度。通过对虾干燥试验验证设备性能,以期为冰—低温热泵干燥系统的推广应用提供依据。

1 冰—低温热泵干燥系统结构

冰—低温热泵干燥系统结构图如图1所示。其中,冰、低温干燥室内腔尺寸为 $350\text{ mm}\times 450\text{ mm}\times 450\text{ mm}$,外层填充50 mm厚的岩棉作为保温层,内置4层物料托盘,门用密封条密封,两侧分别开有 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的风道;离心风机(上海应发YY71-4)额定功率为250 W、转速为 $1\ 450\text{ r/min}$;通风管道尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,采用1.5 mm厚的镀锌钢板,外层用50 mm厚的橡塑保温棉保温;整机尺寸为 $3\ 000\text{ mm}\times 1\ 300\text{ mm}\times 1\ 700\text{ mm}$ 。

该系统具有冰温干燥和低温干燥两种模式,且可同时运行,既能单独进行冰温或低温干燥,又能分阶段进行冰—低温联合干燥,提高了热泵利用率与干燥效率。冰—低温热泵干燥系统由工质循环系统、空气循环系统和控制系统3部分组成。

工质循环系统是干燥系统的重要组成部分,干燥箱温湿度调节所需的热量和冷量均由其提供。工质循环系统由压缩机、辅助冷凝器、冷凝器I、冷凝器II、节流阀、蒸发器I、蒸发器II和其他制冷配件组成。其中,冷凝器I和冷凝器II提供干燥所需的热量,多余热量则由辅助冷凝器排出,以调节干燥箱温度。系统采用两级蒸发进行降温除湿,可使温度快速达到物料冰温带内。工质循环系统中设有4个电磁阀,可以改变工质流向实现对工质循环系统的调控。不同工况下,电磁阀的开闭状态及工质流向关系如表1所示。

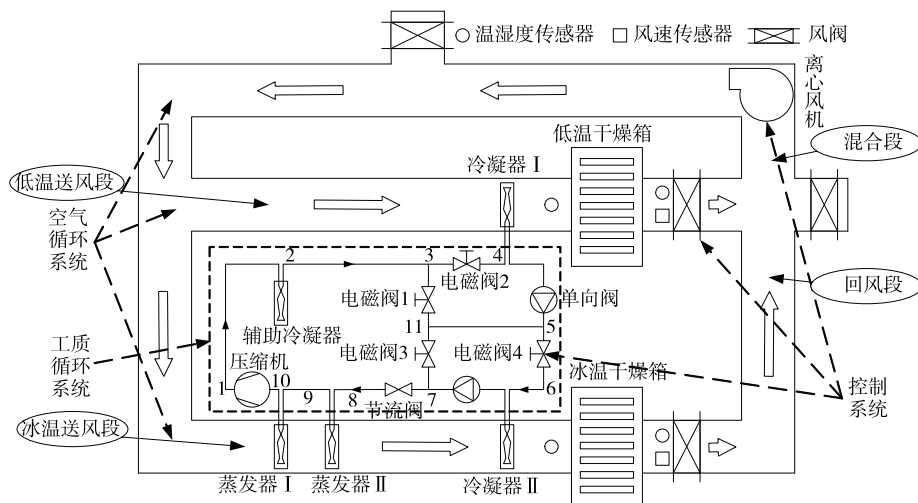


图1 冰—低温热泵干燥系统结构

Figure 1 Freezing point and low temperature heat pump drying system structure

表 1 不同工况下电磁阀状态与工质流向[†]

Table 1 Solenoid valve state and refrigerant flow direction under different working conditions

工况	电磁阀 1	电磁阀 2	电磁阀 3	电磁阀 4	制冷剂流向
$t_i \leq t_{si}$ 且 $t_1 \leq t_{s1}$	闭	开	闭	开	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-1
$t_i \leq t_{si}$ 且 $t_1 > t_{s1}$	开	闭	闭	开	1-2-3-11-5-6-7-8-9-10-1
$t_i > t_{si}$ 且 $t_1 \leq t_{s1}$	闭	开	开	闭	1-2-3-4-5-11-7-8-9-10-1
$t_i > t_{si}$ 且 $t_1 > t_{s1}$	开	闭	开	闭	1-2-3-11-7-8-9-10-1

[†] t_i 为冰温干燥箱入口温度值, °C; t_{si} 为冰温干燥箱入口设定温度值, °C; t_1 为低温干燥箱入口温度值, °C; t_{s1} 为低温干燥箱入口设定温度值, °C; 1, 2, ..., 11 与图 1 中工质循环系统相对应。

空气循环系统由混合段、回风段、冰温送风段和低温送风段组成。在风道的混合段安装有离心风机, 为冰、低温干燥箱提供风量。两个干燥箱出口均安装风量调节阀, 通过改变其开度控制干燥箱出口空气的混合比。

2 控制系统设计

2.1 硬件设计

2.1.1 硬件系统结构 冰—低温热泵干燥控制系统由 PLC、触摸屏、数据采集系统、执行系统和电源模块组成。PLC 是控制系统的核心, 触摸屏是人与机器对话的窗口。数据采集系统由温湿度传感器、风速传感器和 DP-MODBUS 网关组成。执行系统由电磁阀、变频器和风机组成。电源模块为各元件提供其额定的工作电压。控制系统结构图如图 2 所示。

2.1.2 硬件选型 选用 CPU 型号为 313C-2DP 的西门子 PLC 作为控制器, 其内置 16 个 DI/DO 接口, 集成 2 个 PROFIBUS DP 通讯接口。触摸屏型号为西门子 Smart 700E, 集成以太网接口。由于该 CPU 未集成以太网接口, 故配合 ETH-MPI 以太网转换器 (大连德嘉国际电子公司) 使用。S7-300 PLC 通过 ETH-MPI 以太网转换器

转换为 PROFINET (TCP/IP) 以太网协议, 使用 RJ45 双绞线与计算机及触摸屏进行数据交换。触摸屏与计算机通过以太网连接, 方便安装与通讯。使用 DP-MODBUS 协议转换器 (大连德嘉国际电子公司) 对 RS-485 传感器进行数据采集, 并向变频器写入控制字。

变频器型号为 AS01-4W (韩国 AY 公司), 配备 RS-485 标准接口, 可由 PLC 程序控制, 可调节功率为 0.0~0.4 kW, 满足热泵系统中离心风机的功率要求; 电磁阀选用进出口直径为 10 mm 的齐星电磁阀; 温湿度传感器为 RS-WS-2 的 RS-485 型传感器 (建大仁科公司), 风速传感器选择 EE65 系列传感器 (奥地利 E+E 公司), 传感器参数见表 2。风速传感器输出信号为模拟量, 不能直接与数据采集模块进行数据传输, 需使用 4~20 mA 转 RS-485 模块 (建大仁科公司) 进行转换。

2.2 模糊控制策略

模糊控制是基于模糊集合理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理模拟人的思维方式, 对难以建立数学模型的控制对象实施的一种智能控制方法。模糊控制系统结构包括模糊化、知识库 (数据库和规则库)、模糊推理和解模糊化 4 部分。

南美白对虾干燥过程中, 温度是影响干燥效率及干品品质的关键因素。图 3 为冰温模糊控制系统结构图, 设冰温箱温度设定值为 $r(t)$, 传感器检测值为 $y(t)$ 。模糊控制器采用“二维输入—一维输出”结构, 如图 4 所示。输入量为设定值 $r(t)$ 与检测值 $y(t)$ 的偏差 e 及偏差变化率 ec 。输出量为风机变频器的工作频率 u , 通过 PLC 向变频器写入控制字以调节风机转速来控制冰温箱温度。

$$\begin{cases} e(t) = r(t) - y(t) \\ ec(t) = \frac{e(t+dt) - e(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

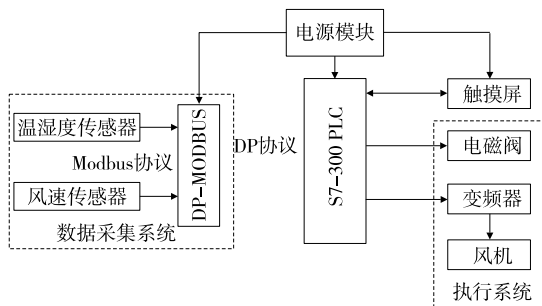


图 2 硬件系统结构

Figure 2 Hardware system structure

表 2 传感器技术参数

Table 2 Sensor technical parameters

传感器	供电电压	精度	工作范围	输出信号
温湿度传感器	10~30 V DC	±0.5 °C (25 °C) ±3% RH (5%~95% RH)	-20~60 °C 0%~100% RH	RS-485 (Modbus 协议)
风速传感器	24 V DC/AC (±20%)	±(0.2 m/s + 3% 所测值)	0~10 m/s	4~20 mA

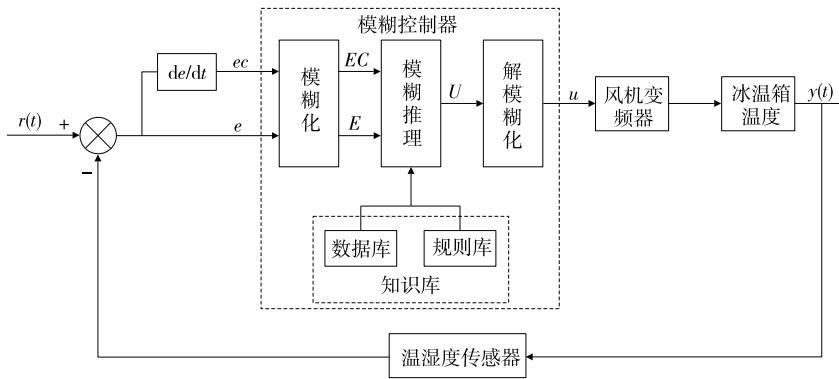


图3 冰温模糊控制系统结构

Figure 3 Freezing point temperature fuzzy control system structure

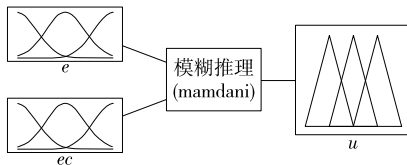


图4 模糊控制器结构

Figure 4 Fuzzy controller structure

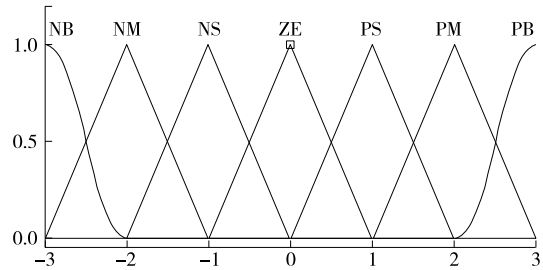


图5 隶属度函数

Figure 5 Membership function

式中:

$r(t)$ —— t 时刻冰温箱温度设定值,℃;

$y(t)$ —— t 时刻冰温箱温度检测值,℃;

$e(t)$ —— t 时刻温度偏差,℃;

$ec(t)$ —— t 时刻温度偏差变化率,℃/s。

根据前期冰—低热泵干燥南美白对虾试验经验,设定冰温箱温度偏差 e 与偏差变化率 ec 的基本论域分别为 $[-6, 6]$ 和 $[-3, 3]$, 风机工作频率 u 的基本论域为 $[-3, 3]$; 输入量模糊论域 E, EC 均为 $[-3, 3]$, 量化因子分别为 0.5 和 1.0, 输出量模糊论域 U 为 $[-3, 3]$, 比例因子为 1。输入量和输出量的模糊论域划分为 7 档, 即 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 其语言模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PN, PB\}$, 简记为 $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ 。

输入量和输出量的负大(NB)模糊子集采用 z 型隶属度函数(zmf), 正大(PB)模糊子集采用 s 型隶属度函数(smf), 其余模糊子集均采用三角形隶属度函数(trimf), 如图 5 所示。

模糊控制规则是总结有经验的操作者或专家的控制知识经验, 制定出的模糊条件语句的集合, 通常简写成一个表即模糊控制规则表。确定模糊控制规则的原则是使系统输出响应的动态特性达到最佳。当误差大或较大时, 选择控制量以尽快消除误差为主; 当误差较小时, 选择控制量要防止超调, 以系统的稳定性为主要出发点。通过 Mamdani 合成推理方法, 采用“if A and B then C”的结构模式, 根据上述原则并结合前期冰—低热泵性能及干燥工艺试验的手动控制经验, 得到 49 条模糊控制规

则, 如表 3 所示。

为了满足工程上的使用要求, 利用计算机技术在 Matlab 软件上对模糊控制器进行仿真, 得到如图 6 所示输出变量曲面。每个坐标表示一个模糊变量, 坐标轴范围即为模糊论域。当输入量偏差 E 和偏差变化率 EC 均为 -3 时, 输出量 U 为 -3, 与表 3 的结果一致。

根据表 3 的模糊控制规则进行模糊推理后得到的结果是一个模糊集合, 需要对其进行解模糊化处理才能驱动执行机构, 系统采用面积重心法(centroid)进行解模糊化处理。

2.3 软件设计

2.3.1 控制流程 通过冰—低热泵干燥控制系统对温

表 3 模糊控制规则表

Table 3 Fuzzy control rule table

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

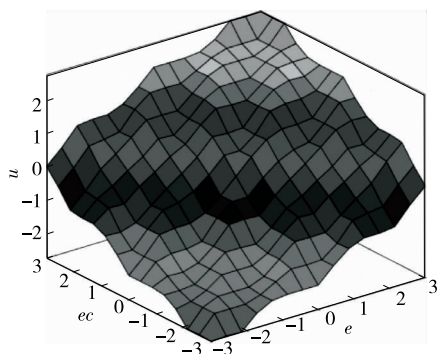


图 6 输出变量曲面

Figure 6 Output variable surface

度进行调节,使物料在适宜的环境中进行干燥,保证水产品干品品质。图 7 为冰—低温热泵干燥系统控制流程图,开机运行后系统进行初始化,包括 Modbus 协议初始化,外设 I/O 区刷新和中间继电器清零等;通过人机界面设定干燥物料所需的环境参数;利用传感器采集干燥箱内部温度和湿度数据,并传输给 S7-300 PLC;经模糊控制程序运算得相应的控制信号,控制电磁阀、变频器等部件执行相应动作,调节冰、低温干燥箱的温度参数,为干燥物料提供适宜的干燥环境。

2.3.2 数据通讯 系统使用的协议为 Modbus-RTU 通讯协议,用到的功能码主要为 03H 和 06H,其中 03H 用来读取温湿度传感器的数值,06H 用来写入变频器的频率。配置 DP-MODBUS 协议转换器作为 Profibus 从站,同时作为 Modbus 主站。为确保与各传感器之间正常通讯,需设定其波特率和校验码与 Modbus 从站设备一致。根据传感器出厂默认参数,设置系统通讯参数为 8N1,即 8 位数据位,无奇偶校验,1 位停止位,波特率为 9 600 bit/s。

2.3.3 人机界面 人机界面包括欢迎界面、监测界面、设置界面和报警界面。图 8 为部分界面图。使用 WinCC Flexible 软件对 Smart700IE 触摸屏进行界面设计。监测界面显示冰、低温干燥箱温湿度和风速的实时数据,并设

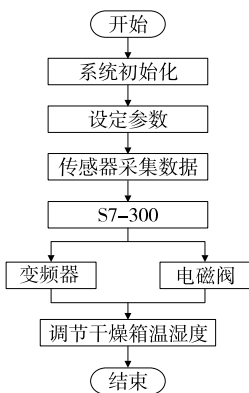


图 7 控制流程图

Figure 7 Control flow chart

置有跳转按钮实现与各个子界面切换。设置界面包括温湿度数值的实时曲线显示、温度设定和频率设定。风机频率有手动和自动两种控制方式,手动控制是在调试过程中可通过加减按钮调节风机工作频率;自动控制则是通过程序自动设定风机的工作频率。

3 试验与分析

3.1 试验材料与仪器

3.1.1 材料及主要仪器

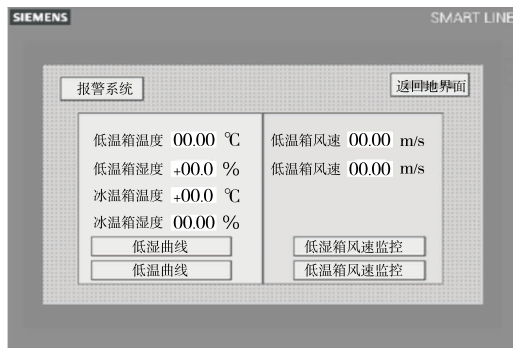
- 南美白对虾:市售;
- 冰—低温热泵干燥装置:自研;
- 真空干燥箱:DZF 型,上海跃进医疗器械有限公司;
- 电子天平:JA3003 型,上海精科天平仪器厂;
- 便携式测色仪:4500S 型,美国 Hunter Lab 公司;
- 电子数显卡尺:SF2000 型,桂林广陆数字测控有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,国华电器有限公司。

3.1.2 对虾预处理 参照王伟华等^[22]的方法。预处理后对虾质量为(6.04±0.24) g/尾,并按(90±3) g/袋将其保存于自封袋中备用。

3.2 试验方法

3.2.1 空载试验 分别使用 PID 控制和模糊控制两种方式调节冰温干燥箱和低温干燥箱温度至-2,20℃。温湿度采集点位于冰、低温干燥箱入口处,采样周期为 1 min。



(a) 主界面



(b) 设置界面

图 8 人机界面

Figure 8 Human machine interface

3.2.2 干燥试验 设定冰温干燥箱温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温干燥箱温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将预处理后的南美白对虾分为5组,每组用量1袋,分别进行冰温干燥、低温干燥、联合干燥1(冰温干燥至含水率60%转为低温干燥)、联合干燥2(冰温干燥至含水率50%转为低温干燥)和联合干燥3(冰温干燥至含水率40%转为低温干燥)。

3.2.3 含水率测定 根据GB/T 5009.3—2016将南美白对虾干燥至恒重。按式(2)计算对虾含水率^[23]。

$$W_t = \frac{m_t - m_0(1 - W_0)}{m_t} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

W_t —— t 时刻物料含水率,%;

m_t —— t 时刻物料质量,g;

m_0 ——干燥前物料质量,g;

W_0 ——物料初始含水率。

3.2.4 色度差测定 取南美白对虾样品5只,用色度仪测定并记录其干燥前后的 L^* , a^* , b^* ,并按式(3)计算南美白对虾的色度差。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

ΔE^* ——干燥前后的色度差;

ΔL^* ——干燥前后的黑白色度差;

Δa^* ——干燥前后的红绿色度差;

Δb^* ——干燥前后的黄蓝色度差。

3.2.5 收缩率与复水率测定 取南美白对虾样品5只,用电子数显卡尺测量其干燥前后虾头后部最厚部位尺寸。取干燥后南美白对虾样品5只,称重,将其置于600 mL沸水中10 min,于筛网上沥干水分,称重。分别按式(4)和式(5)计算收缩率、复水率。

$$r = \frac{v - v_0}{v} \times 100\%, \quad (4)$$

$$R_f = \frac{m_f - m_g}{m_f} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

r ——对虾收缩率,%;

v ——干燥前虾头后部尺寸,mm;

v_0 ——干燥后虾头后部尺寸,mm;

R_f ——对虾复水率,%;

m_f ——对虾复水后质量,g;

m_g ——对虾复水前质量,g。

3.3 结果与分析

3.3.1 温湿度控制效果 由图9可知,空载试验中冰、低温干燥箱初始温度为 $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,模糊控制下冰温干燥箱温度达到目标值时用时约20 min,低温干燥箱温度达到目标值时用时约17 min。由表4可知,稳态后模糊控制下冰温干燥箱温度为 $-2.5\sim-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,与PID控制下最大温差 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比,波动范围缩小了46.7%;模糊控制下低温干燥箱温度为 $20.3\sim 21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,较PID控制下最大温差 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 缩小了57.7%。综上,与PID控制相比,模糊控制缩小了冰、低温干燥箱稳态下温度波动范围,稳态性能和控制效果得到改善。稳态后冰温箱湿度范围为 $52.7\%\sim 55.9\%$,低温箱湿度范围为 $14.2\%\sim 15.9\%$ 。

3.3.2 对虾干燥效果 由图10(a)可知,冰温干燥、低温干燥和联合干燥均能有效降低南美白对虾含水率。其中,低温干燥对虾至目标含水率用时最短为22 h,是因为低温干燥组在5组试验中平均温度最高($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)。冰温干燥用时最长,干燥76 h后含水率仍为23.46%,并且很难下降,是由于冰温干燥箱环境湿度过高($52.7\%\sim 55.9\%$)导致对虾吸湿和解吸平衡,因此有必要进行冰—低温联合干燥进一步降低其含水率。冰—低温联合干燥中,冰温干燥至含水率为60%,50%,40%分别用时10,20,36 h,由冰温干燥转换为低温干燥后干燥速率明显提高,同样物料中水分由内向外迁移受温度影响。温度越高,物料内外温差越大,越有利于水分的扩散^[24]。此外,

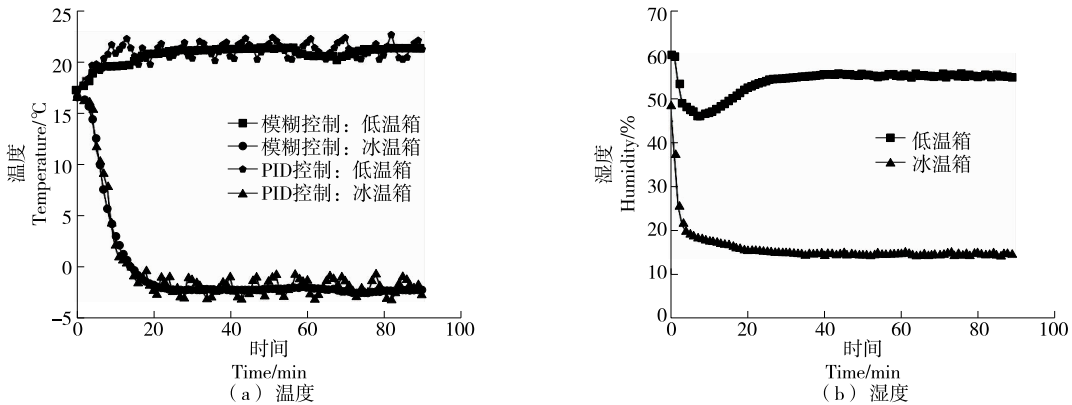


图9 温湿度变化曲线

Figure 9 Temperature and humidity change curve

表 4 不同控制方式下干燥箱温度

Table 4 The temperature of the drying oven under different control methods

控制方式	干燥箱	稳态温度变化范围/℃	最大温差/℃	平均温度/℃
PID 控制	冰温干燥箱	-3.2~-0.7	1.5	-2.0
	低温干燥箱	20.1~22.7	2.6	21.2
模糊控制	冰温干燥箱	-2.5~-1.7	0.8	-2.2
	低温干燥箱	20.3~21.4	1.1	21.2

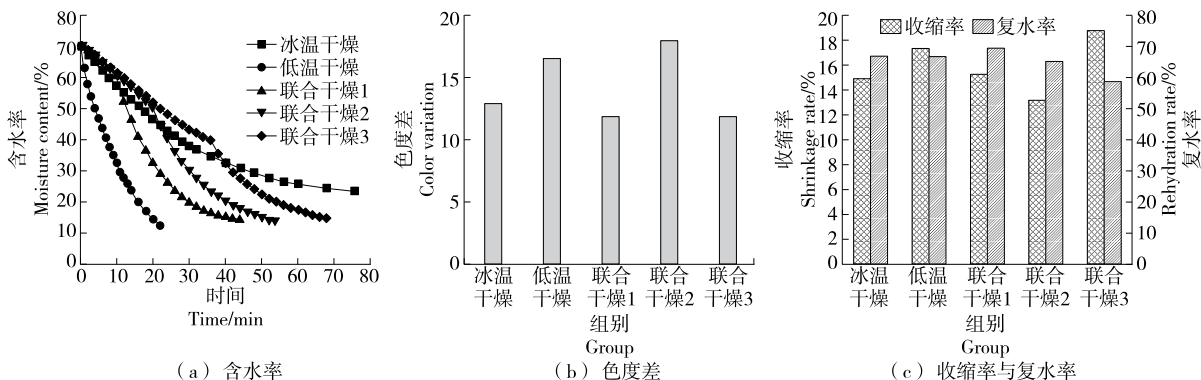


图 10 干燥效果

Figure 10 Drying effect

不同干燥模式下干燥速率均为初期快而后逐渐下降,这是因为干燥速率受空气相对湿度与物料含水率差值的影响。干燥初始阶段,空气相对湿度与物料含水量差值较大,有利于物料内水分的扩散。随着干燥的进行,物料含水率降低,二者之间差值变小,减缓了水分扩散的速度^[25]。

由图 10(b)可知,联合干燥 1 和联合干燥 3 干燥前后对虾的色度差最小,较大程度地保存了对虾的色泽,可能是由于各种酶的活性和微生物活动减小,避免了对虾中不饱和脂肪酸氧化和表面发黄。影响收缩率的主要因素是干燥过程中肌纤维的收缩使得物料组织结构塌陷,由图 10(c)可知,联合干燥 2 的对虾组织结构变化最小;而影响复水率的主要因素是干燥产品的内部孔隙度,孔隙度越大复水率越高,联合干燥 1 的复水率最高。

4 结论

针对冰—低温热泵干燥南美白对虾过程中非线性、大惯性和时滞性等问题,设计了基于模糊控制的控制系统。该系统结构简单,运行稳定,具备冰温干燥、低温干燥和冰—低温联合干燥 3 种运行模式,以满足不同干燥需求。试验表明,基于模糊算法的控制系统可使干燥箱温度快速达到冰、低温干燥所需温度,稳态后温度波动小,控制精度高。冰—低温联合干燥既能快速有效地去除对虾中的水分,又能保留对虾的色泽,且在收缩率与复水率方面有一定优势,适合南美白对虾的冰—低温自动化干燥加工。由于试验中的干燥品质评价指标较少,后续可从质构、感官、微观结构等方面综合评价对虾干燥品

质,为进一步的应用与推广提供更为充分的数据支撑。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 2020 版. 北京: 中国农业出版社, 2020: 22-23. Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook[M]. 2020 edition. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 22-23.
- [2] 岑琦琼, 张燕平, 戴志远, 等. 水产品加工干燥技术的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 156-160. CEN Qi-qiong, ZHANG Yan-ping, DAI Zhi-yuan, et al. The researches and advances of aquatic products drying technology[J]. Food Research and Development, 2011, 32(11): 156-160.
- [3] 沈嘉森, 陈晓婷, 苏永昌, 等. 干燥过程对水产干制品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8 186-8 193. SHEN Jia-sen, CHEN Xiao-ting, SU Yong-chang, et al. Effects of drying process on the quality of dried aquatic products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(22): 8 186-8 193.
- [4] ZHANG Min, CHEN Hui-zhi, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(6): 1 239-1 255.
- [5] 于鹏. 基于海珍品的双阶段冰—低温热泵干燥系统的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015: 8-9. YU Peng. Study on two-stage controlled freezing point and low temperature heat pump drying system based on marine delicacy[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015: 8-9.
- [6] 施建兵, 谢晶. 冰温保鲜技术在水产品中的应用[J]. 广东农业

- 科学, 2012, 39(17): 96-99.
- SHI Jian-bing, XIE Jing. Application of controlled freezing-point technology on aquatic products [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(17): 96-99.
- [7] 庞文燕, 王金庆, 姚志勇, 等. 不同真空压力对冰温干燥罗非鱼片品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 5-9.
- PANG Wen-yan, WAN Jin-qing, YAO Zhi-yong, et al. Effect of vacuum pressure on quality of tilapia fillets during freeze drying[J]. Food Science, 2013, 34(21): 5-9.
- [8] 赵海波, 彭鑫, 吴坤, 等. 真空冷冻干燥在线测试系统设计与测试[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 116-120.
- ZHAO Hai-bo, PENG Xin, WU Kun, et al. Design and test of an on-line measuring system for vacuum freezing dryer[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 116-120.
- [9] 吴燕燕, 石慧, 李来好, 等. 水产品真空冷冻干燥技术的研究现状与展望[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 197-205.
- WU Yan-yan, SHI Hui, LI Lai-hao, et al. Research status and prospects of vacuum freeze-drying technology for aquatic products[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 197-205.
- [10] 刘志鸣, 王金庆, 王建民. 日本冰温技术发展史略[J]. 制冷与空调(四川), 2005, 21(3): 70-74.
- LIU Zhi-ming, WAN Jin-qing, WANG Jian-min. History of Japanese controlled freezing point technique[J]. Refrigeration & Air Conditioning(Sichuan), 2005, 21(3): 70-74.
- [11] 山根昭美, 郭海元. 冰温干燥食品[J]. 制冷, 1987, 6(4): 64-67.
- YAMANE A, GUO Hai-yuan. Ice temperature dry food[J]. Refrigeration, 1987, 6(4): 64-67.
- [12] 张哲, 张秋月, 王怀文, 等. 冰温贮藏对采后葡萄果实品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 156-159.
- ZHANG Zhe, ZHANG Qiu-yue, WANG Huai-wen, et al. Effect of ice temperature storage on postharvest grape fruit quality[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 156-159.
- [13] 陈青云, 施文正, 王金庆, 等. 三种干燥方式对罗非鱼片风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 323-327, 333.
- CHEN Qing-yun, SHI Wen-zheng, WAN Jin-qing, et al. Effect of three kinds of drying methods on the flavor substances of tilapia fillet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 323-327, 333.
- [14] 王丰, 李保国, 申江, 等. 胡萝卜冰温干燥实验研究[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(1): 101-104.
- WANG Feng, LI Bao-guo, SHEN Jiang, et al. Study on controlled freezing-point dried processing of carrot [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(1): 101-104.
- [15] 王丰. 胡萝卜冰温微波真空干燥研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2012: 10-15.
- WANG Feng. Study on microwave-vacuum drying at controlled freezing-point of carrot[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2012: 10-15.
- [16] 厉建国, 王金庆, 赵彦峰. 冰温真空干燥系统的设计与实现[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 89-91, 156.
- LI Jian-guo, WAN Jin-qing, ZHAO Yan-feng. Design and application of an ice-temperature vacuum drying system[J]. Food & Machinery, 2017, 33(11): 89-91, 156.
- [17] 倪超, 李娟玲, 丁为民, 等. 全封闭热泵干燥装置监控系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 134-139.
- NI Chao, LI Juan-ling, DING Wei-min, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of enclosed cycles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 134-139.
- [18] 母刚, 张国琛. 基于 LabVIEW 的水产品热泵干燥测试系统设计[J]. 渔业现代化, 2010, 37(2): 47-50.
- MU Gang, ZHANG Guo-chen. Design of heat pump drying measurement system for aquatic product based on LabVIEW[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(2): 47-50.
- [19] 陈岩, 杜晓明. 模糊 PID 控制在温室环境中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 173-177.
- CHEN Yan, DU Xiao-ming. Application fuzzy PID control in the greenhouse environment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 173-177.
- [20] 刘江平, 金心怡. 基于模糊控制的岩茶做青系统设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 93-97, 122.
- LIU Jiang-ping, JIN Xin-yi. Design of rock tea manipulation system based on fuzzy control[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 93-97, 122.
- [21] 张建锋. 热泵干燥装置监控系统的设计与研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 34-35.
- ZHANG Jian-feng. Design and research of monitoring system for heat pump drying device[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 34-35.
- [22] 王伟华, 王海, 何思鲁, 等. 南美白对虾太阳能干燥能耗参数优化及中试[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 271-278.
- WANG Wei-hua, WANG Hai, HE Si-lu, et al. Parameter optimization for energy consumption of solar drying of Penaeus vannamei and pilot scale rest[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 271-278.
- [23] 母刚, 张国琛, 邵亮. 热泵干燥海参的初步研究[J]. 渔业现代化, 2007, 34(5): 47-50.
- MU Gang, ZHANG Guo-chen, SHAO Liang. Preliminary study on heat pump drying of sea cucumber [J]. Fishery Modernization, 2007, 34(5): 47-50.
- [24] 邱澄宇. 水产品加工新技术与营销[M]. 北京: 金盾出版社, 2011: 93-94.
- QIU Cheng-yu. New technology and marketing of aquatic product processing[M]. Beijing: Jindun Press, 2011: 93-94.
- [25] 李玉环. 水产品加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 92-97.
- LI Yu-huan. Processing technology of aquatic products [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010: 92-97.