

黄茶自动化闷黄装备设计与温湿度控制方法研究

杨波¹ 宋彦^{1,2} 卫聿铭³ 宁井铭³

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;

3. 安徽农业大学茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 闷黄是黄茶加工中的特有工艺,目前黄茶加工中缺乏专用的连续化、自动化闷黄加工装备。为此,本文设计一种用于黄茶闷黄的专用装备。根据连续化加工需求,设计了闷黄装备的机械结构,核算了装备所需的加热功率和蒸汽流量,并完成了相关部件的选型和样机构建,提出了一种基于区间二型模糊理论的温湿度控制算法。温湿度控制系统试验结果表明,在不同试验条件下,区间二型模糊控制算法能够精准控制温湿度参数,对比一型模糊控制算法,对扰动的抑制能力更强,控制误差更小。生产试验结果表明,温度和相对湿度的均方根误差最大值分别为0.439 1℃和1.226 2%,产品的感官评审结果表明,采用该装备加工的产品符合皖西黄茶的品质要求。

关键词: 茶叶加工装备; 黄茶; 闷黄; 温湿度控制; 区间二型模糊系统

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0376-09

OSID:



Design of Automated Yellowing Equipment for Yellow Tea and Investigation on Temperature and Humidity Control Methods

YANG Bo¹ SONG Yan^{1,2} WEI Yuming³ NING Jingming³

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Provincial Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery, Hefei 230036, China

3. State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Yellowing is a distinctive process in yellow tea production. Currently, there is a lack of special continuous and automatic equipment for yellowing in the yellow tea processing industry. To address these issues, a dedicated equipment designed specifically for the yellowing process of yellow tea was presented. Considering the requirements for continuous processing, the mechanical structure of the equipment for yellowing was meticulously designed. Furthermore, the required heating power and steam flow rate of the equipment were calculated, and the relevant components were carefully selected and integrated into the construction of a functional prototype. An innovative temperature and humidity control method based on interval type-2 fuzzy theory was proposed to overcome the challenges in temperature and humidity control. The test results of the temperature and humidity control system showed that the interval type-2 fuzzy control algorithm accurately controlled temperature and humidity parameters, with stronger disturbance suppression capability and smaller control error compared with the type-1 fuzzy control algorithm. Production test results demonstrated that the equipment achieved maximum root mean square error of 0.439 1℃ for temperature and 1.226 2% for humidity. Sensory evaluation confirmed that the products processed by this equipment met the quality requirements of western Anhui yellow tea.

Key words: tea processing equipment; yellow tea; yellowing process; temperature and humidity control; interval type-2 fuzzy system

0 引言

黄茶是我国六大茶类的一种,闷黄是黄茶加工

中促进茶叶黄变的工艺,闷黄时的温度、相对湿度、闷黄时间等参数对黄茶品质形成具有重要影响^[1-2],传统手工闷黄方式,既无法实现连续化加

收稿日期: 2023-09-27 修回日期: 2023-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1601102)

作者简介: 杨波(1996—),男,硕士生,主要从事茶叶加工装备与技术研究,E-mail: yangbo@stu.ahau.edu.cn

通信作者: 宋彦(1983—),男,副教授,博士,主要从事智能农业技术与装备研究,E-mail: songyan@ahau.edu.cn

工,也缺乏对温湿度的准确控制。因此,研制连续化、自动化闷黄装备对于黄茶加工具有重要意义。

学者对此问题进行了相关研究,伍洪春^[3]在闷黄柜中安装托盘,通过鼓风机和加热器将热风送进内部,但不具备连续化、自动化生产的功能。李忠文等^[4]设计一种桶式闷黄机,加热器和喷雾装置提供必要的温湿度。李伏桃等^[5]设计一种箱式闷黄机,多层输送带结构实现茶叶的自动翻堆,通过内外循环自动转换阀控制气体流向,使得设备具备一定的加温排湿功能。上述专利对闷黄装备的结构设计具有一定的参考价值,但均未对闷黄室内的温湿度实现精确的控制。温湿度控制存在非线性、多变量耦合、惯性大等特点^[6-8],如何精准控制箱体内温湿度是该装备研制的难题。近年来,不少学者针对恒温恒湿控制问题进行了研究,并取得了一定的成果^[9-13]。虽然传统模糊 PID 控制具有较好的控制效果,但是由于其隶属度是确定值,对抑制系统扰动的能力不强。区间二型模糊理论使用了具有上下界的隶属度函数,能解决建模分歧问题,并在电机速度和车辆运动控制方面成功应用^[14-15]。

本文根据黄茶闷黄的工艺要求,拟设计一种连续化、自动化闷黄装备。首先,根据连续化加工要求设计并搭建样机,分析闷黄装备的加热加湿方式,核算装备所需加热量和加湿量,完成关键零部件的选型,针对温湿度控制精度不足的问题,提出一种基于区间二型模糊理论的温湿度控制方法,以期提高温湿度控制精准性、适应性,最后通过试验验证装备的工作性能。

1 闷黄装备总体设计

黄茶闷黄装备需要为茶叶闷黄提供一定的空间和湿热的闷黄环境,在适宜的温湿度条件下,通过非酶促氧化作用,使叶绿素等物质氧化降解,促进黄茶品质形成,并实现闷黄工艺的连续化、自动化。根据笔者前期研究可知设计要求如下^[16-17]：
①能够实现连续化加工和自动化控制。
②根据皖西黄茶工艺要求,闷黄装备的温度调节范围为 30~45℃,相对湿度调节范围为 60%~80%。
③温度控制的均方根误差小于 1℃,相对湿度控制的均方根误差小于 2%。

1.1 结构设计

黄茶自动化闷黄装备主要由离心风机、电热炉、混合箱、蒸汽发生器、调风装置、闷黄箱体、提升机、出料输送机等组成,整体结构如图 1 所示,a、b、c、d、e 为温湿度传感器的安装点位。离心风机将新鲜空气送入电热炉中升温,被加热的空气与蒸汽发生器

产生的高湿气体在混合箱内均匀混合,调风装置将混合后的高温高湿气体送至闷黄箱体内部,提升机将茶叶送入闷黄箱体内部,茶叶在恒温恒湿的闷黄箱体内部黄变,出料输送机将闷黄后的茶叶送至下一加工环节。沿气体流动方向,布置 5 个传感器,e 点位的传感器采集电炉出口温度,b 和 c 点位的传感器采集箱体内温湿度,a 和 d 点位的传感器观测进出料及外界环境对箱体内温湿度波动的影响。湿热气流在系统中行程较长,温度惯性大,若仅用箱体内温度作为反馈信号,则造成超调量大、动态响应差等问题,因此通过布置在 e 点位的传感器采集电炉出口温度,避免系统震荡。

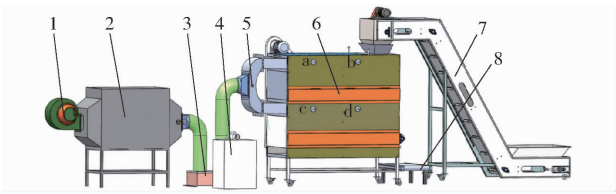


图 1 黄茶自动化闷黄装备结构图
Fig.1 Structure diagram of automated equipment for yellowing

1. 离心风机 2. 电热炉 3. 混合箱 4. 蒸汽发生器 5. 调风装置 6. 闷黄箱体 7. 提升机 8. 出料输送机

1.2 闷黄箱体设计

闷黄箱体主要由挡茶板、调节座、均叶板、链板、机架、侧挡茶板、传动链、链轮、传动电机等构成,其结构如图 2 所示。整体采用两层链板式结构,物料从上层链板落至下层链板时自动翻堆。均叶板高度决定了茶叶堆积厚度,传动电机是整个传动系统的动力源,必要时可以停机闷黄。设计方案中,箱体的尺寸为 1 750 mm×826 mm×1 791 mm,茶叶堆积厚度的调节范围为 200~400 mm。

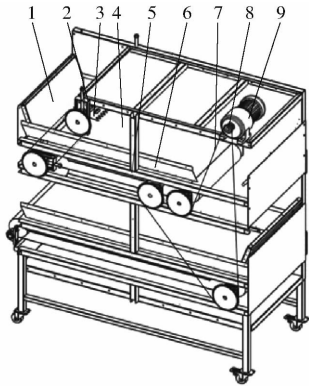


图 2 闷黄箱体结构图
Fig.2 Structure diagram of box for yellowing

1. 挡茶板 2. 调节座 3. 均叶板 4. 链板 5. 机架 6. 侧挡茶板 7. 传动链 8. 链轮 9. 传动电机

1.3 加热装置设计

加热装置由离心风机与电热炉组成,离心风机

将新鲜空气送入电热炉中,加热后的空气被送入闷黄箱体中,保证闷黄所需要的热量。加热量主要分为基本加热量和附加加热损失。其中附加加热损失包括风机热风量损耗、电热炉热量损失、热风传输通道散热等,一般附加加热损失无需单独计算,基本加热量乘以热量损失率系数即可^[18-19],总加热量核算的经验公式为

$$Q=\frac{\alpha MC_p(t_h-t_l)}{3\,600}\tag{1}$$

其中

$$M=V\rho_1\frac{273.15}{273.15+t_l}\tag{2}$$

式中 Q ——加热功率,kW
 α ——热量损失率系数,取 1.5
 C_p ——空气定压比热容,取 1.01 kJ/(kg·K)
 t_h ——加热后气体温度,℃
 t_l ——加热前空气温度,℃
 M ——进风质量流量,kg/h
 V ——进风风量,m³/h
 ρ_1 ——标准空气密度,取 1.293 kg/m³

选用功率为 1.5 kW、额定风量为 1 131 m³/h 的离心式通风机。加热前空气温度 t_l 取黄茶生产时的一般气温 25℃,加热后气体温度 t_h 需高于装备能够调节的最高温度 45℃,取 50℃,计算可得所需加热功率为 14.1 kW。加热装置选用上洋 DRL-60 型电热炉,经改装后其功率为 30 kW。

1.4 加湿装置设计

在调节温度的同时,蒸汽发生器持续产生蒸汽,通过调节风机转速改变和蒸汽混合的空气进风量,保证闷黄所需的湿度。按照加湿原理可以分为等温加湿和等焓加湿两种加湿方式,等温加湿过程中温度基本不变,可以降低温湿度耦合带来的影响,因此本文选择等温加湿方式。蒸汽流量核算公式为^[20]

$$W=\frac{n_1}{n_r}M(d_h-d_l)\tag{3}$$

式中 W ——蒸汽流量,kg/h
 n_r ——离心风机额定转速,取 3 000 r/min
 d_h ——加湿后空气的含水率,g/kg
 d_l ——加湿前空气的含水率,g/kg
 n_1 ——离心风机核算工作转速,r/min

根据实际情况,选择离心风机转速为 800 r/min 核算所需蒸汽流量,黄茶生产时一般气温为 25℃,相对湿度为 55%,以此状态下空气的含水率作为加湿前空气的含水率 d_l 。闷黄装备能够调节的最高温度为 45℃,相对湿度为 80%,以此状态下的空气含水率作为加湿后空气的含水率 d_h ,根据式(3)计算可以得出装备运行所需的蒸汽流量至少为

14.3 kg/h,选用额定蒸汽流量为 15 kg/h 的亚飞磁能 DZF-380V-9KW 型电加热蒸汽发生器。

1.5 控制系统硬件设计

控制系统主要由 PLC 控制器、接触器、变频器、蒸汽发生器、电热炉、离心风机、传动电机等组成,其硬件构成如图 3 所示。控制器选择 SIMATIC S7-200 系列小型 PLC,上位机选用个人计算机, S7-200 PLC 与上位机通信时采用 USB/PPI 电缆,上位机软件由 LabVIEW 编程开发。变频器型号为台达 VFD-015EL23A,温湿度传感器型号为山东仁科 RS-WS-N01-9L,温度分辨率为 0.1℃,相对湿度分辨率为 0.1%,采集周期设置为 1 s。

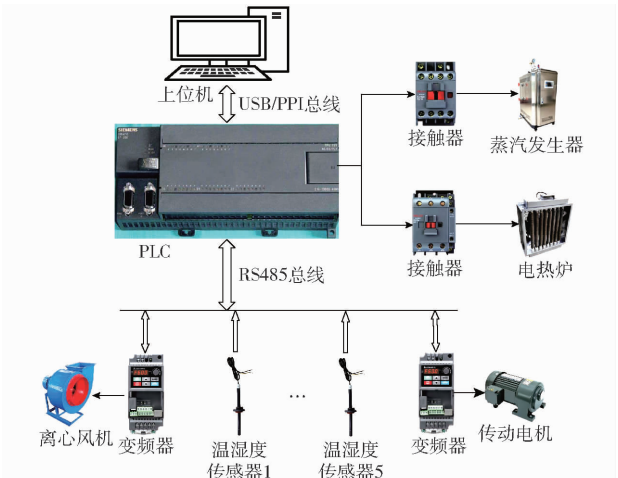


图 3 控制系统构成图

Fig. 3 Diagram of control system configuration

2 基于区间二型模糊理论的温湿度控制

温湿度是存在耦合关系的两个物理量,由于本文采用不基于模型的模糊控制方法,将温湿度参数独立调控,为了降低两个物理量的互相影响,在控制过程中,首先执行温度控制程序,将温度值稳定在目标值附近,再开启湿度控制程序,实现温湿度同步控制。

2.1 区间二型模糊温度控制器结构设计

温度控制器结构如图 4 所示。定义箱体温度与目标温度的差值作为箱体温度差值,记作 e_{tb} ;定义电炉出口温度与目标温度的差值作为电炉出口温度差值,记作 e_{tf} 。以 e_{tb} 和 e_{tf} 作为温度控制的输入,输出控制量 u_1 为连接电热炉的接触器在一个控制周期的开关占空比,通过该方式控制电热炉的加热量,实现闷黄箱体温度控制。

根据闷黄装备闷黄的实践经验,归纳总结出箱体温度差值的模糊论域为 $[-3,3]$,电炉出口温度差值的模糊论域为 $[-6,6]$,其中每个输入分为 7 个集合,即:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零

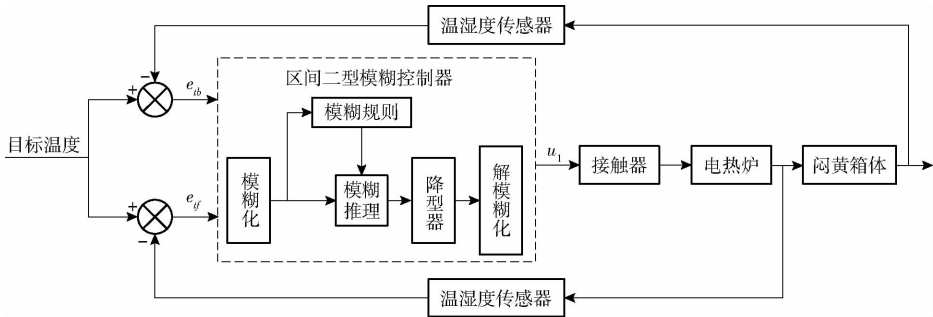


图 4 温度区间二型模糊控制器结构图

Fig. 4 Structure diagram of temperature interval type 2 fuzzy controller

(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。本文选择区间二型高斯隶属度函数,输入变量隶属度函数如图 5 所示,其中 UpperMF 为上隶属度函数,LowerMF 为下隶属度函数,FOU 为不确定域。为了简化模糊控制规则,提高运算速度,将输出变量值定义为单值参数 { ES = 0, VS = 0. 1, S = 0. 3, M = 0. 5, B = 0. 7, VB = 0. 9, EB = 1 }, 输出仍分为 7 个集合,即:极小(ES)、非常小(VS)、小(S)、中(M)、大(B)、非常大(VB)、极大(EB)。

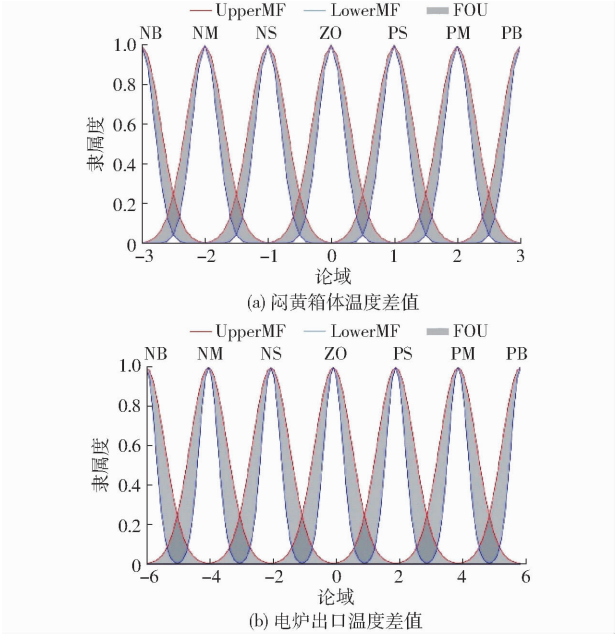


图 5 温度输入变量隶属度函数

Fig. 5 Temperature input variable membership functions

在区间二型模糊温度控制中,规则形式可以表示为 R^n : If e_{ib} is $\tilde{X}_1^n$ & e_{if} is $\tilde{X}_2^n$ then u_1 is $\tilde{U}_1^n$ ($n = 1, 2, \dots, N$)。 $\tilde{X}_1^n, \tilde{X}_2^n$ 为区间二型模糊集合, $\tilde{U}_1^n$ 为规则后件, N 为规则总数。

根据闷黄温度实际控制经验,建立的温度模糊控制规则如表 1 所示。

计算 e_{ib} 和 e_{if} 在 $\tilde{X}_1^n$ 和 $\tilde{X}_2^n$ 上的隶属度区间: $[\underline{\mu}_{X_1^n}(e_{ib}), \bar{\mu}_{X_1^n}(e_{if})], [\underline{\mu}_{X_2^n}(x_{ib}), \bar{\mu}_{X_2^n}(x_{if})]$ 。

表 1 温度模糊控制规则

Tab. 1 Temperature fuzzy control rules

e_{ib}	e_{if}						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	EB	EB	VB	VB	B	M	M
NM	EB	EB	VB	B	B	M	M
NS	EB	VB	B	B	M	S	S
ZO	VB	VB	B	M	S	VS	VS
PS	B	B	M	S	S	VS	ES
PM	M	M	S	S	VS	ES	ES
PB	M	M	S	VS	VS	ES	ES

采用乘积推理的方式计算第 n 条规则的激活区间的下限 $\underline{f}^n$ 和上限 $\bar{f}^n$

$$F^n(e_{ib}, e_{if}) = (\underline{f}^n, \bar{f}^n) = (\underline{\mu}_{X_1^n}(e_{ib})\underline{\mu}_{X_2^n}(e_{if}), \bar{\mu}_{X_1^n}(e_{ib})\bar{\mu}_{X_2^n}(e_{if})) \tag{4}$$

本文使用中心法降型^[21],直接得到解模糊后的结果为

$$u_1 = \frac{\sum_{n=1}^N (\underline{f}^n + \bar{f}^n) u_1^n}{\sum_{n=1}^N (\underline{f}^n + \bar{f}^n)} \tag{5}$$

解模糊后的结果作为接触器下一个控制周期的开关占空比。

2.2 区间二型模糊湿度控制器结构设计

湿度控制器结构如图 6 所示。定义箱体湿度与目标湿度的差值作为箱体湿度偏差,记作 e_h ,其变化率记作 e_{ch} ;以 e_h 和 e_{ch} 作为湿度控制的输入,输出控制量 u_2 为变频器频率的增量值,通过更新变频器频率控制离心风机转速,从而实现闷黄箱体湿度控制。

根据闷黄装备闷黄的实践经验,归纳总结出箱体相对湿度偏差的模糊论域为 $[-6, 6]$,其变化率的模糊论域为 $[-9, 9]$,输入隶属度函数如图 7 所示。将输出变量仍定义为单值参数 { NB = - 1, NM = - 0. 7, NS = - 0. 3, ZO = 0, PS = 0. 3, PM = 0. 7, PB = 1 }。根据闷黄相对湿度实际控制经验,建立的相对湿度模糊控制规则如表 2 所示。

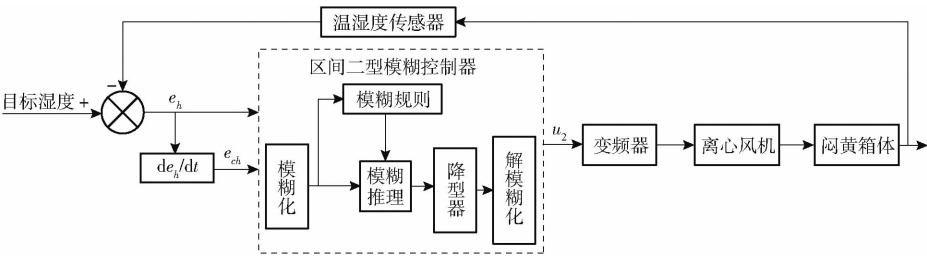


图6 湿度区间二型模糊控制器结构图

Fig.6 Structure diagram of humidity interval type 2 fuzzy controller

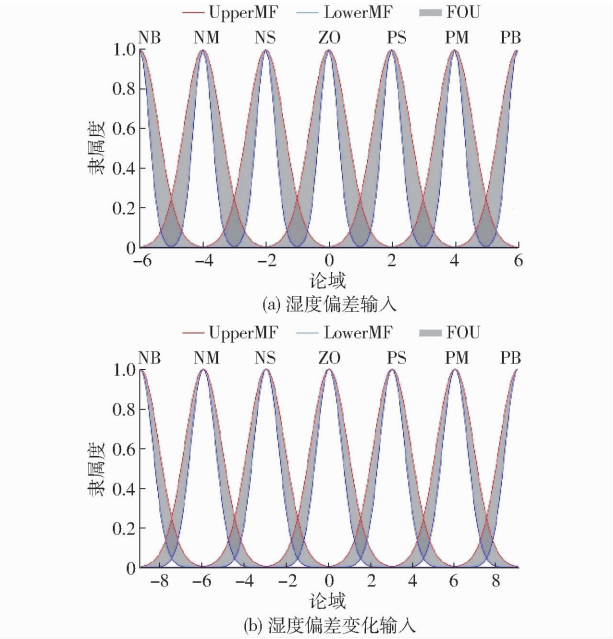


图7 湿度输入变量隶属度函数

Fig.7 Humidity input variable membership function

表2 相对湿度模糊控制规则

Tab.2 Humidity fuzzy control rules

e_h	e_{ch}						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PS
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

湿度控制的解模糊化方法仍使用中心法降型^[21],解模糊后的结果作为变频器下一个控制周期频率的增量值。

3 温湿度控制系统试验

试制的茶叶闷黄装备样机实物如图8所示。为了检验样机的工作性能,开展温湿度控制系统试验,首先测试温湿度控制系统的精度,再分析闷黄箱体内部温湿度分布的均匀性。

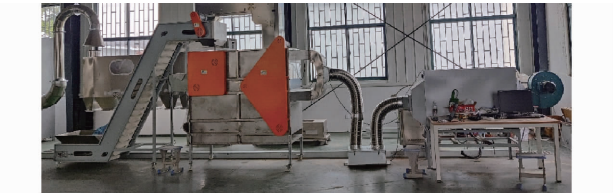


图8 闷黄装备实物图

Fig.8 Physical diagram of equipment for yellowing

3.1 温湿度控制系统精度分析

设定目标温度分别为30、38、45℃,目标相对湿度分别为60%、70%、80%,共9种温湿度参数组合,采用区间二型模糊控制算法测试控制系统精度,选择一型模糊控制算法作为对照组,测量装备稳定运行后实际温湿度,计算温湿度控制的误差均值和均方根误差,一型模糊控制算法的建立参照文献[16]。

表3为温湿度控制精度试验统计结果,图9为各组试验温湿度误差棒图。结果表明,在装备温湿

表3 温湿度控制精度试验统计结果

Tab.3 Statistical results of temperature and humidity control accuracy test

控制方法	组别	温度	相对湿	实际温度		实际相对湿度	
		设定值/℃	度设定值/%	误差均值/℃	均方根误差/℃	误差均值/%	均方根误差/%
一型模糊控制算法	1	30	60	1.428 5	1.686 7	1.964 3	2.546 6
	2	30	70	1.589 3	1.827 7	1.603 3	1.970 2
	3	30	80	1.008 5	1.241 0	1.697 4	2.222 4
	4	38	60	1.533 7	1.731 7	1.969 8	2.673 9
	5	38	70	1.118 5	1.342 8	2.168 3	2.557 6
	6	38	80	0.752 5	0.952 1	2.889 1	3.412 5
	7	45	60	1.450 7	1.691 9	1.822 9	2.147 6
	8	45	70	1.051 0	1.256 3	2.460 2	3.058 2
	9	45	80	0.981 7	1.212 6	2.541 7	3.151 3
区间二型模糊控制算法	1	30	60	0.276 7	0.311 6	0.994 0	1.174 0
	2	30	70	0.381 2	0.436 9	1.266 3	1.537 0
	3	30	80	0.461 2	0.601 9	1.020 3	1.321 1
	4	38	60	0.605 1	0.711 8	1.154 7	1.435 5
	5	38	70	0.458 2	0.638 9	1.360 7	1.918 1
	6	38	80	0.289 9	0.406 2	0.847 2	1.037 6
	7	45	60	0.720 5	0.844 3	1.016 0	1.263 7
	8	45	70	0.561 0	0.660 1	1.395 2	1.947 6
	9	45	80	0.647 8	0.799 5	0.925 7	1.114 3

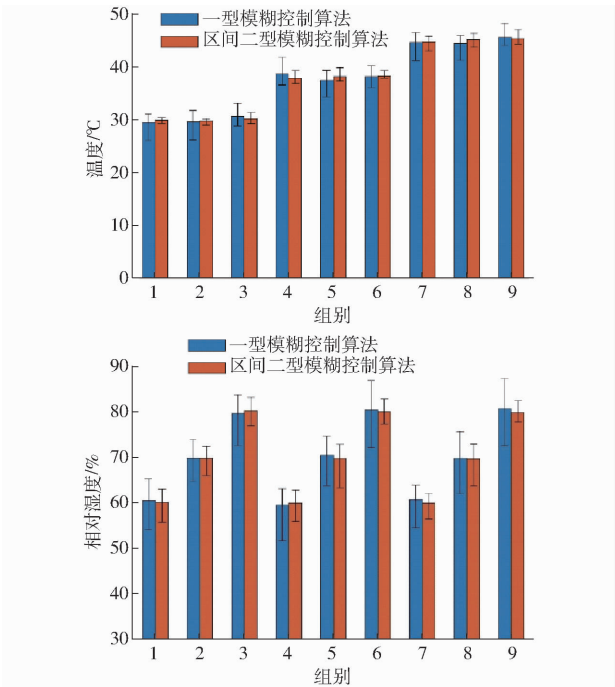


图 9 各组试验温湿度误差棒图

Fig. 9 Temperature and humidity error bar diagrams for each group of tests

度的调节范围(30~45℃,60%~80%)内,对比一型模糊控制算法,区间二型模糊控制算法的误差区间较小。一型模糊控制算法控制的温度均方根误差最小值为0.9521℃,相对湿度均方根误差最小值为1.9702%,而区间二型模糊控制算法控制的温度均方根误差最大值仅0.8443℃,相对湿度均方根误差最大值仅1.9476%,区间二型模糊控制算法控制的温湿度均方根误差最大值小于一型模糊控制算法控制的温湿度均方根误差最小值。说明区间二型模糊控制算法的适应性更强,精度更高。

以第1组试验为例分析温湿度控制系统精度,图10为第1组试验温湿度曲线。由图10可知,两种控制算法下,温湿度均呈现周期性波动。温度波动频率较低,造成温度周期性波动的主要原因是热惯性;湿度波动频率较高,并且是近似直线下落的情况,造成湿度周期性波动的主要原因是蒸汽发生器自动补水导致水温下降,蒸汽量降低。相较于一型模糊控制算法,其温度波动的最大误差由3.4℃缩小为0.6℃;相对湿度的波动最大误差由7.7%缩小为4.4%。说明区间二型模糊控制系统的响应特性更快速,对周期性扰动的抑制能力更强。

为了对区间二型模糊控制算法控制的稳定性进行分析,将第1组试验的工作过程划分为6个时间段,并以变异系数^[22]作为温湿度控制稳定性的评价指标。

由表4可知,在6个时间段中,一型模糊控制算

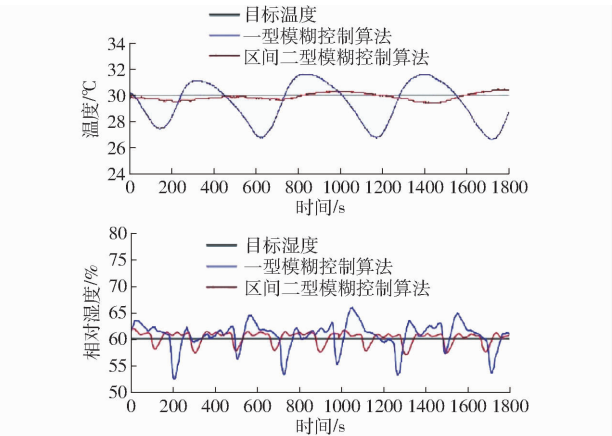


图 10 第 1 组试验温湿度变化曲线

Fig. 10 The first set of test temperature and humidity change curves

法的温度和相对湿度控制变异系数分布范围分别为0.0446~0.0718和0.0342~0.0486,区间二型模糊控制算法的温度和相对湿度控制变异系数分布范围分别为0.0071~0.0143和0.0181~0.0207。可见,在区间二型模糊控制算法下,变异系数更集中,分布更稳定。

表 4 温湿度控制稳定性试验统计结果
Tab. 4 Statistical results of temperature and humidity control stability test

时间/ min	温度变异系数		相对湿度变异系数	
	一型模糊 控制算法	区间二型模 糊控制算法	一型模糊 控制算法	区间二型模 糊控制算法
5	0.0516	0.0120	0.0342	0.0193
10	0.0446	0.0071	0.0378	0.0207
15	0.0640	0.0083	0.0390	0.0196
20	0.0626	0.0074	0.0486	0.0190
25	0.0472	0.0143	0.0439	0.0196
30	0.0718	0.0098	0.0452	0.0181

3.2 温湿度分布均匀性分析

为进一步测试闷黄箱体内部温湿度分布均匀性,设定目标温度为32℃,目标相对湿度为70%,试验条件同3.1节,待装备稳定运行10min后,记录点位a、b、c、d温湿度数据,引入不均匀系数 $J^{[23-24]}$ 作为评价指标。

$$J = \sum_{k=1}^K |(x_k - \bar{x})/\bar{x}|$$

(6)

闷黄箱体内部温湿度分布测试结果如图11所示。由图11可知,温度分布特点为靠近箱体进风口的b点位和c点位基本保持一致,a点位略低于b、c点位温度,d点位温度最低,这是因为a、d点位距离进风口较远,靠近闷黄箱体的进、出料口,易受到外界的影响,且热空气具有自然上升的趋势,导致d点位较其他点位温度偏低。受温湿度耦合效应的影响

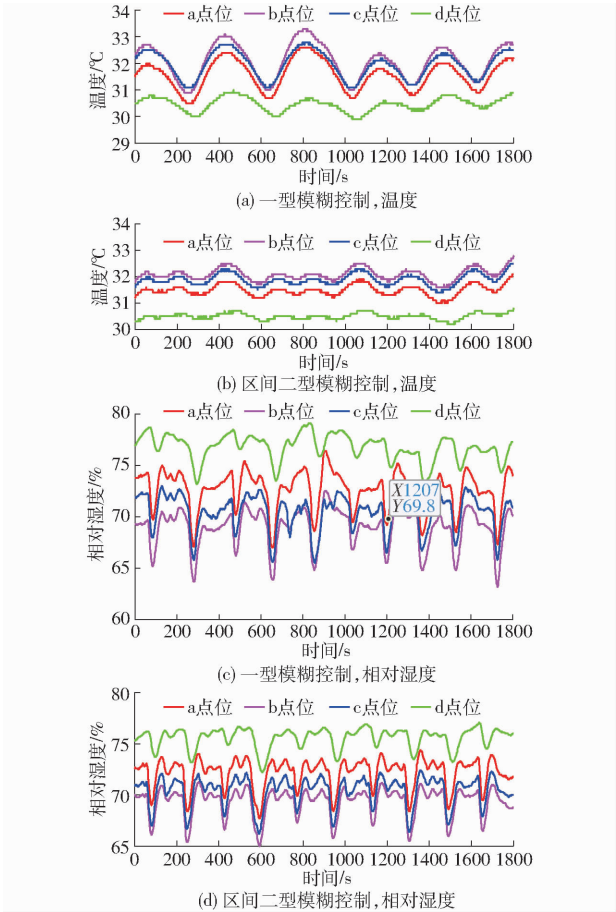


图 11 温湿度分布测试结果

Fig. 11 Temperature and humidity distribution test results

响,湿度在各点位的分布呈相反的特点。

温湿度不均匀系数变化曲线如图 12 所示。在区间二型模糊控制算法下,温度不均匀系数最大值和平均值分别为 0.081 3 和 0.064 1,相对湿度不均匀系数最大值和平均值分别为 0.198 1 和 0.113 1,相较于一型模糊控制算法,其温湿度不均匀系数的最大值、平均值、波动幅度更小。

综上所述,由于受到结构的影响,a、d 点位的温湿度控制精度与箱体内部存在一定差异,这是不可避免的,考虑到无论是初闷还是复闷,都需要在箱体静置一段时间,故可以通过传送机构,将茶叶运送到箱体内合适的位置,或是在出入料口处加装隔热帘等减小温湿度分布的不均匀性。同时可以看出,采用区间二型模糊控制算法的不均匀系数优于一型模糊控制算法,说明优化控制策略也能够改善温湿度分布的不均匀性。

4 生产试验

为验证本文设计的闷黄装备的实际生产效果,于 2023 年 5 月 9 日在安徽省合肥市安徽农业大学国家高新技术农业园内开展黄茶生产试验。本次试验原料于 2023 年 5 月 8 日采摘于舒城县河棚镇泉

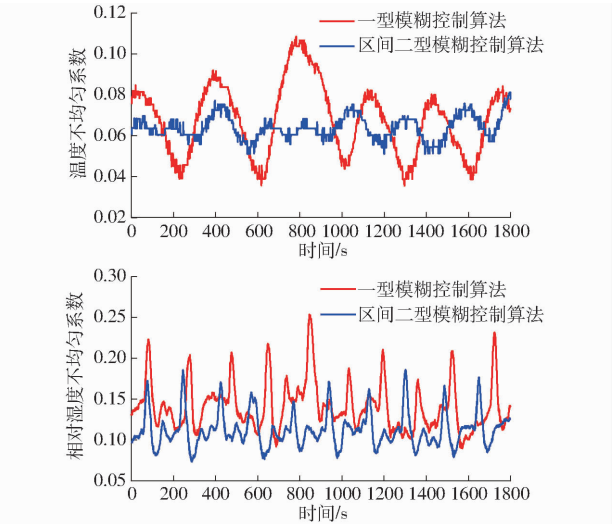


图 12 温湿度不均匀系数变化曲线

Fig. 12 Temperature and humidity unevenness coefficient change curves

石村,约 50 kg 茶鲜叶。关于黄茶加工工艺参数的选取,课题组前期开展了充分研究^[25],闷黄时的温湿度和时间等工艺参数都会影响试验的最终结果,本次试验工艺参数是在既有研究基础上制定,具体工艺参数如表 5 所示。生产厂房环境温度 19.9℃,相对湿度 43.5%,初闷和复闷工艺由自主研发的闷黄装备完成,并由评审员参照《茶叶感官评审方法》^[26]对加工后的毛茶感官评审,判断是否符合黄茶品质要求。

表 5 工艺参数		
Tab.5 Process parameters		
工艺名称	时间/min	参数
杀青	3	300℃
初闷	60	32℃, 70%
揉捻	30	轻-重-轻,各 10 min
初烘	15	80℃
复闷	330	40℃, 70%
干燥	60	80℃

装备采用二型模糊控制算法调控温湿度,生产试验温湿度控制性能指标统计结果如表 6 所示。满足闷黄温度均方根误差小于 1℃,闷黄相对湿度均方根误差小于 2% 的设计要求。

表 6 生产试验温湿度误差结果						
Tab.6 Production test temperature and humidity error results						
工艺	温度			相对湿度		
	误差均	均方根	变异	误差均	均方根	变异
	值/℃	误差/℃	系数	值/%	误差/%	系数
初闷	0.223 7	0.272 0	0.085 0	0.831 9	1.212 9	0.017 3
复闷	0.387 8	0.439 1	0.011 0	0.910 4	1.226 2	0.017 5

本次生产黄茶的感官评审结果如表 7 所示,各项感官评审指标均高于 80 分,总分为 87.25 分,采用该装备加工的产品符合皖西黄茶的品质要求。

表 7 感官评审结果
Tab.7 Sensory review results

项目	权重/%	评语	评分	总分
外形	25	条索较紧细,色泽绿黄	84	87.25
汤色	10	绿黄明亮	85	
香气	25	清香带甜香,幽长	91	
滋味	30	鲜醇,有回甘	88	
叶底	10	绿黄较亮,较柔软,匀净	86	

5 结论

(1)设计了一套用于黄茶加工的专用闷黄装备,具备连续化加工和温湿度精准控制功能。设计了基于区间二型模糊算法,通过多组不同试验参数对比发现,温湿度的误差均值和均方根都低于一型模糊控制算法,说明区间二型模糊算法控制误差更小,控制精度更高,对周期性扰动抑制能力更强。

(2)生产试验结果表明,初闷和复闷时,温度和相对湿度均方根误差最大值分别为 0.439 1℃和 1.226 2%,满足设计要求,生产试验产品的感官评审结果表明,采用该装备加工的产品符合皖西黄茶的品质要求。

参 考 文 献

[1] WEI Y M, YIN X C, ZHAO M J, et al. Metabolomics analysis reveals the mechanism underlying the improvement in the color and taste of yellow tea after optimized yellowing[J]. Food Chemistry,2023,428: 136785.

[2] FAN F Y,ZHOU S J,QIAN H, et al. Effect of yellowing duration on the chemical profile of yellow tea and the associations with sensory traits[J]. Molecules,2023,27(3):940.

[3] 伍洪春. 一种黄茶闷黄装置:CN202220102684.6[P]. 2022-08-23.

[4] 李忠文,吴勋龙,陈正时,等. 一种黄茶加工用的闷黄机:CN202110087915.0[P]. 2021-05-28.

[5] 李伏桃,许超,陈细兵,等. 一种箱式茶叶闷黄机:CN202220941946.8[P]. 2022-11-11.

[6] 贺刚,蔡晓华,白阳,等. 基于模糊 PID 的犍牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):266-276. HE Gang, CAI Xiaohua, BAI Yang, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):266-276. (in Chinese)

[7] 吴敏,段豪,王振文,等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):483-492. WU Min, DUAN Hao, WANG Zhenwen, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 483 - 492. (in Chinese)

[8] 李斌,沈昊,郭嘉明,等. 无源蓄冷控温运输箱设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):358-365. LI Bin, SHEN Hao, GUO Jiaming, et al. Design and test of passive cold storage temperature control box[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):358-365. (in Chinese)

[9] MATAMORSO M, GÓMEZ-BLANCO J C, SÁNCHEZ Á J, et al. Temperature and humidity PID controller for a bioprinter atmospheric enclosure system[J]. Micromachines,2020,11(11):999.

[10] ZHANG Y, YAN T, XU X H, et al. Room temperature and humidity decoupling control of common variable air volume air-conditioning system based on bilinear characteristics[J]. Energy and Built Environment,2023,4(3):354-367.

[11] 秦晋栋,徐婷婷. 二型模糊决策理论与方法研究综述[J]. 控制与决策,2023,38(6):1510-1523. QIN Jindong, XU Tingting. Type-2 fuzzy decision-making theories and methodologies: a systematic review[J]. Control and Decision,2023,38(6):1510-1523. (in Chinese)

[12] 伍冬睿,曾志刚,莫红,等. 区间二型模糊集和模糊系统:综述与展望[J]. 自动化学报,2020,46(8):1539-1556. WU Dongrui, ZENG Zhigang, MO Hong, et al. Interval type-2 fuzzy sets and systems: overview and outlook[J]. Acta Automatica Sinica,2020,46(8):1539-1556. (in Chinese)

[13] 郭萍,潘琦,岳琼,等. 基于 2 型模糊集的多目标农业-生态水土资源优化配置[J]. 农业机械学报,2022,53(12):353-365. GUO Ping, PAN Qi, YUE Qiong, et al. Multi-objective modelling for optimal allocation of agricultural-ecological water and land resources based on type-2 fuzzy sets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):353-365. (in Chinese)

[14] YOUSIF H A, THIAB A H, JALEEL A H. Type 1 versus type 2 fuzzy logic speed controllers for brushless dc motors[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering,2020,10(1):265-274.

[15] ALI S M, GUO Y L, RIZVI S T H, et al. Interval type 2 fuzzy adaptive motion drive algorithm design[J]. Electronics,2023,12(13):2946.

[16] 汪抗. 黄茶闷黄设备开发及温湿度控制方法研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2022. WANG Kang. Development of yellow tea yellowing equipment and study on temperature and humidity control method[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[17] 中华全国供销合作总社. 黄茶加工技术规程:GB/T 39592—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[18] FU H L, SHI J, YUAN J Q, et al. Heat recovery scheme design and thermodynamic analysis of closed-cycle heat pump drying system[J]. Energy Conversion and Management,2023,286:117034.

[19] MANDAL G, KUMAR A, SHARMA C D, et al. Comparative analysis of different air density equations[J]. MAPAN,2013,

28(1):51-62.

[20] YE J Y, LIU X Y, XU L F, et al. Experimental study on the heating and humidifying performance of fan coil units with humidification modules in severe cold regions[J]. *Energy & Buildings*,2022,276:112500.

[21] YUSUF K, ALI Y, İSMAIL S. Investigation of type 1 and type 2 fuzzy logic controllers performance: application of speed control of BLDC motor[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*,2022,43(5):6357-6370.

[22] 王红英,范佳宇,王粮局,等.基于PID的饲料制粒调质温度控制系统设计与试验[J].*农业工程学报*,2023,39(1):1-8.
WANG Hongying, FAN Jiayu, WANG Liangju, et al. Design and test of the temperature control system for the feed pelleting and conditioning based on PID[J]. *Transactions of the CSAE*,2023, 39(1):1-8. (in Chinese)

[23] 龚中良,王鹏凯,李大鹏,等.多温区网带式干燥机热流场分析与结构优化[J].*农业工程学报*,2021,37(18):40-47.
GONG Zhongliang, WANG Pengkai, LI Dapeng,et al. Design and test of the temperature control system for the feed pelleting and conditioning based on PID[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021,37(18):40-47. (in Chinese)

[24] 刘广海,吴俊章,FOSTER A,等.多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J].*农业机械学报*,2019,50(4):309-316.
LIU Guanghai, WU Junzhang, FOSTER A, et al. Design of multi-temperature cold storage vehicle and analysis on temperature field in vehicle[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(4):309-316. (in Chinese)

[25] 卫聿铭. 霍山黄芽闷黄工艺研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
WEI Yuming. Research on yellowing process for huoshan bud yellow tea[D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2021. (in Chinese)

[26] 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法:GB/T 23776—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

(上接第 351 页)

[10] 姜春慧,张倩,杨娜,等.桔梗切片远红外干燥特性及动力学研究[J].*中国农机化学报*,2021,42(2):92-100.
JIANG Chunhui, ZHANG Qian, YANG Na, et al. Study on far infrared drying characteristics and kinetics of *Platycodon grandiflorum* slices[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021,42(2):92-100. (in Chinese)

[11] 尚建伟,张倩,王同勋,等.远红外干燥对甘草切片干燥特性及品质的影响[J].*核农学报*,2023,37(8):1609-1617.
SHANG Jianwei, ZHANG Qian, WANG Tongxun, et al. Effect of far-infrared drying on drying characteristics and quality of glycyrrhiza slices[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2023,37(8):1609-1617. (in Chinese)

[12] ZHANG D Y, HUANG D, ZHANG Y X, et al. Ultrasonic assisted far infrared drying characteristics and energy consumption of ginger slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*,2023,92:106287.

[13] RATSEWO J, WARREN F J, MEESO N, et al. Effects of far-infrared radiation drying on starch digestibility and the content of bioactive compounds in differently pigmented rice varieties[J]. *Foods*,2022,11(24):4079.

[14] SAKARE P, PRASAD N, THOMBARE N, et al. Infrared drying of food materials: recent advances[J]. *Food Engineering Reviews*,2020,12(3):381-398.

[15] 汪喜波,胡琼,肖波,等.稻谷红外辐射与对流联合干燥过程的模型模拟[J].*农业机械学报*,2013,44(9):145-151.
WANG Xiibo, HU Qiong, XIAO Bo, et al. Modeling simulation of combined convective and infrared radiation in rice drying process[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013,44(9):145-151. (in Chinese)

[16] DU Y J, YAN J C, WEI H, et al. Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*,2023, 43:102780.

[17] 王波. 基于石墨烯等离激元的 hBN 和 VO₂ 薄膜结构的近场辐射换热研究[D]. 烟台:烟台大学,2021.
WANG Bo. Research on near-field thermal radiation of hBN and VO₂ thin films structure based on graphene plasmons[D]. Yantai:Yantai University,2021. (in Chinese)

[18] JAIBOON P, PRACHAYAWARAKORN S, DEVA-HASTIN S, et al. Effect of high-temperature fluidized-bed drying on cooking, textural and digestive properties of waxy rice[J]. *Journal of Food Engineering*,2011,105(1):89-97.

[19] UTARI F D, YASINTASIA C, RATRIDEWI M, et al. Evaluation of paddy drying with vertical screw conveyor dryer (VSCD) at different air velocities and temperatures[J]. *Chemical Engineering and Processing*,2022,174:108881.

[20] HUNDAL J, TAKHAR P S. Experimental study on the effect of glass transition on moisture profiles and stress-crack formation during continuous and time-varying drying of maize kernels[J]. *Biosystems Engineering*,2010,106(2):156-165.

[21] MAHMOOD N, LIU Y H, MUNIR Z, et al. Effects of hot air assisted radio frequency drying on heating uniformity, drying characteristics and quality of paddy[J]. *LWT*,2022,158:113131.

[22] 刘启觉. 高水分稻谷干燥工艺试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(2):135-139.
LIU Qijue. Experimental research on drying technology for high moisture content paddy[J]. *Transactions of the CSAE*,2005, 21(2):135-139. (in Chinese)

[23] 郑先哲,刘辉,沈柳杨,等.基于玻璃化转变的稻谷变温热风干燥工艺研究[J].*农业机械学报*,2020,51(1):331-340.
ZHENG Xianzhe, LIU Hui, SHEN Liuyang, et al. Hot-air drying technology of changing temperature for paddy rice based on glass transition theory[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1):331-340. (in Chinese)