

空气源热泵芒果干燥系统变结构智能控制技术

Variable structure intelligent control for mango drying with air source heat pump

郭小璇^{1,2} 郭 敏^{1,2} 韩 帅^{1,2} 孙乐平^{1,2}

GUO Xiaoxuan^{1,2} GUO Min^{1,2} HAN Shuai^{1,2} SUN Leping^{1,2}

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023;

2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 广西 南宁 535023)

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530023, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment,
Nanning, Guangxi 535023, China)

摘要:目的:提高空气源热泵干燥系统干燥芒果的能效。

方法:对空气源热泵干燥系统干燥芒果的工艺进行细分,采用变结构控制实现干燥室湿度的智能化动态调节以提高能效,即将每个干燥工艺阶段细分为三部分:远离转换点、接近转换点和临近转换点,对前两部分采用受限的带外部输入的非线性自回归神经网络(NARX)对干燥室温度和湿度设定值进行智能调整来节约电能,而对第三部分则采用PI控制器对干燥工艺转换点除湿量进行精准控制,保证芒果干燥品质。**结果:**与常规的分段恒温恒湿干燥方法相比,研究提出的细分段变结构控制方法能保证芒果干燥品质,并能节约8.63%的电能。**结论:**研究提出的细分段变结构控制方法能明显提高热泵干燥系统能效,并获得与常规分段恒温恒湿方法接近的干燥品质。

关键词:空气源热泵;变结构控制;非线性自回归神经网络;温湿度解耦;干燥品质;节能

Abstract: Objective: To improve the energy efficiency of mango drying in the air source heat pump system so as to save energy.

Methods: The process of drying mangoes was subdivided, and a variable structure control was used to adjust the temperature and humidity of drying room intelligently and dynamically to improve energy efficiency. Each drying process stage was divided into three parts, namely far away from the conversion point, near the conversion point, and closing to the conversion point. For the

first two parts, a constrained nonlinear autoregressive neural network (NARX) with external inputs was used to intelligently adjust the temperature and humidity settings so as to save electricity, while for the third part, a PI controller was used to accurately control the dehumidification amount at the conversion point of the drying process so as to ensure the quality of mango drying. **Results:** Compared with conventional segmented constant temperature and humidity drying methods, the proposed control method could save 8.63% of electricity with a guaranteed quality of mango drying. **Conclusion:** The proposed subdivided variable structure control method can significantly improve the energy efficiency of heat pump drying systems, and achieve drying quality similar to conventional segmented constant temperature and humidity methods.

Keywords: air source heat pump; variable structure control; NARX; temperature and humidity decoupling; drying quality; energy saving

芒果的深加工不仅仅能带来较高的经济附加值,而且便于芒果长期贮存和运输。芒果干燥方式有热风干燥、真空膨胀干燥等方式。空气源热泵系统具有高效节能、干燥质量高、干燥时间短以及环境友好等特点得以推广应用,成为芒果干燥的重要发展趋势^[1-2]。目前,芒果的热泵干燥工艺研究主要集中在干燥温度和湿度的设置上^[3-4]。罗彩连等^[5]研究了不同热泵干燥温度(50, 55, 60 °C)及间歇时间(1, 2, 4 h)对芒果干燥特性的影响,发现热泵干燥温度越高,间歇时间越长,干燥速率越大。段宙位等^[6]考察了温度、铺料密度、风速对果肉干燥的影响,得到的芒果优化工艺参数为温度 59.6 °C、铺料密度 15.8 kg/m²、热风风速 0.31 m/s、干燥时间 16.2 h。李珊珊^[7]论证了热泵干燥温度和间歇时间对芒果干燥水分

基金项目:广西重点研发计划(编号:2021AB38037);广西电网公司科技项目(编号:GXXJXM20200428)

作者简介:郭小璇,女,广西电网有限责任公司电力科学研究院高级工程师,博士。

通信作者:郭敏(1984—),男,广西电网有限责任公司电力科学研究院高级工程师,硕士。E-mail: 329106373@qq.com

收稿日期:2023-03-13 **改回日期:**2023-07-07

比、干燥速率的促进作用。分段恒温恒湿干燥方法通过芒果干燥的原理和模型并结合干燥设备来设定热泵干燥系统的温湿度^[8-9],设定不同干燥工艺阶段的温湿度为恒定值,在此干燥阶段始终保持恒定的温度和湿度^[10]。这种分段式恒温恒湿方法简单方便,能耗较低,但由于空气源热泵干燥系统存在个体差异,而且热泵系统在干燥过程中的运行环境或工况也有所不同,简单的阶梯式温湿度设定与系统的最优化运行吻合度不高。因此,在保证干燥工艺基本要求的情况下,通过智能算法自动调节控制器参数,可以有效提高除湿效率,节约电能^[11-13],智能控制的难点是还需要精细控制干燥工艺转换点的除湿量以保证芒果干燥品质。

针对芒果的干燥工艺,研究拟提出一种细分段变结构芒果干燥智能控制方法,将每个干燥工艺段细分为3部分,前2部分采用受限的能效智能提升控制方法提高芒果干燥能效,第3部分采用PI控制器控制每个干燥工艺段的转换点除湿量与手动干燥方法一致。由于烘干是个复杂的过程,其除湿效率随烘干箱的温度、湿度、压力等物理量的变化而不断变化,并且这些物理量之间又相互耦合与影响,为此提出利用非线性自回归神经网络(NARX)的解耦特性对干燥室温度和湿度进行解耦控制的能效智能提升控制方法,在保证芒果干燥品质的基础上节约电能。

1 芒果的空气源热泵干燥智能控制新方法

芒果的空气源热泵干燥智能控制的关键在于在保证芒果的干燥品质的基础上采用符合空气源热泵干燥特性的智能控制方法。芒果干燥品质指标主要包括芒果干燥后的硬度、脆度、色泽、膨化度、水分含量等。芒果干燥工艺对干燥品质的影响主要在于干燥工艺阶段之间的转换点除湿量控制上^[14-15],如果能控制转换时刻的除湿量与分段恒温恒湿方法一致,可以保证干燥品质接近于常规的分段恒温恒湿方法。

1.1 细分段变结构智能控制方法

将每个干燥工艺阶段又细分为远离转换点、接近转换点和临近转换点三部分,分别采用不同的控制方案。如图1所示,芒果干燥分为6个工艺阶段,除第4段外其他工艺阶段又分为3部分,分别对应 t_1 、 t_2 和 t_3 。

(1) 远离转换点 t_1 :刚开始启动转换点对应的干燥阶段不久,距离转换点较远,因此对于干燥速率的控制可以较宽松,只需要控制干燥速率与分段恒温恒湿方法的干燥速率相差不是很大即可。为了保障芒果干燥质量,控制干燥速率在常规CTCH方法的干燥速率附近的一定范围内,令

$$v_{\max}(t) = v_{\text{CTCH}}(t) + \Delta v_{\max}, \quad (1)$$

$$v_{\min}(t) = v_{\text{CTCH}}(t) - \Delta v_{\min}, \quad (2)$$

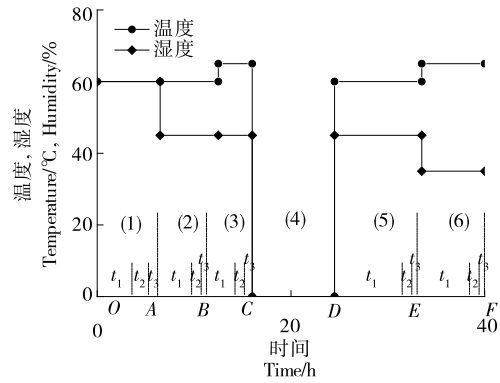


图1 芒果干燥工艺阶段

Figure 1 Process sections for mango drying

式中:

t ——时间, h;

$v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ ——干燥速率的上限和下限, kg/h;

v_{CTCH} ——根据分段恒温恒湿工艺的干燥速率确定的干燥速率标准, kg/h;

$\Delta v_{\max}$ 、 $\Delta v_{\min}$ ——干燥速率的上下容许偏差, kg/h。

当实际的干燥速率高于 $v_{\max}$ 时,降低温度设定值,提高湿度设定值以降低干燥速率。当实际干燥速率低于 $v_{\min}$ 时,提高温度设定值,降低湿度设定值以降低干燥速率。

$$T^* = \begin{cases} T_1^* - \Delta T_2 & v > v_{\max}(t) \\ T_1^* & v_{\min}(t) < v < v_{\max}(t) \\ T_1^* + \Delta T_2 & v < v_{\min}(t) \end{cases}, \quad (3)$$

$$H^* = \begin{cases} H_1^* + \Delta H_2 & v > v_{\max}(t) \\ H_1^* & v_{\min}(t) < v < v_{\max}(t) \\ H_1^* - \Delta H_2 & v < v_{\min}(t) \end{cases}, \quad (4)$$

式中:

T^* ——温度参考值, °C;

H^* ——湿度参考值, %;

T_1^* ——NARX神经网络的输出温度参考值, °C;

H_1^* ——NARX神经网络的输出湿度参考值, %;

ΔT_2 ——温度调整量, °C;

ΔH_2 ——湿度调整量, %。

(2) 接近转换点 t_2 :此部分为其他两部分(t_1 和 t_3)之间的过渡,见图1,此时需要考虑逐步逼近转换点的除湿量,但仍然需要给能效提升留调节空间,因此,这一阶段的除湿速率控制在以转换点除湿量为目标的一定范围内波动,即:

$$v_{\max}(t) = [w(t) - w_0] / (t - t_0) + \Delta v_{\max 2}, \quad (5)$$

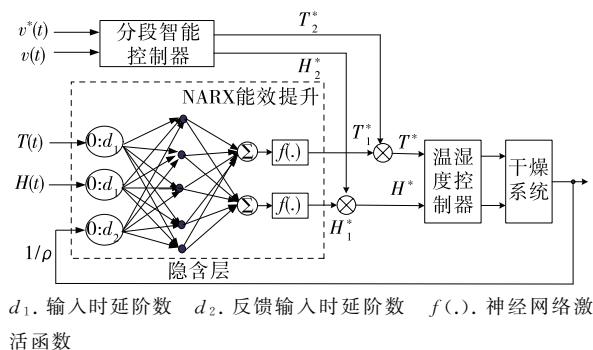
$$v_{\min}(t) = [w(t) - w_0] / (t - t_0) - \Delta v_{\min 2}, \quad (6)$$

式中:

$w(t)$ ——检测到的芒果质量, kg;

w_0 ——转换点时刻的芒果质量, kg;

t_0 ——转换点对应时刻, h;

图 2 t_1 和 t_2 智能控制框图Figure 2 Intelligent control block diagram during t_1 and t_2

$\Delta v_{\max 2}$ 、 $\Delta v_{\min 2}$ ——干燥速率的上下容许偏差, kg/h。

其控制框图与温湿度参考值的计算方法与远离转换点时相同。

(3) 临近转换点 t_3 : 这时已非常接近于转换点, 见图 1, 需要对干燥速率进行严格控制, 使其目标时刻的除湿量逼近转换点的除湿量。这一段的控制采用比例积分 (PI) 控制器, 如图 3 所示。

$$v^*(t) = [w(t) - w_0] / (t_0 - t), t < t_0, \quad (7)$$

式中:

$v^*(t)$ ——干燥速率的设定值, kg/h。

通过 PI 控制, 转换点时刻的芒果质量将逐步逼近于 w_0 。温湿度分配器将按 NARX 对应的最小能耗分配温度和湿度, 即

$$T^*(t) = T_2^*(t) = G(t) \Delta T(t) / [\Delta H(t) T(t) / H(t) + \Delta T(t)], \quad (8)$$

$$H^*(t) = H_2^*(t) = G(t) \Delta H(t) / [\Delta H(t) + \Delta T(t) H(t) / T(t)], \quad (9)$$

式中:

$G(t)$ ——PI 控制器的输出;

$\Delta T(t)$ —— t 时刻温度的变化量, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta H(t)$ —— t 时刻湿度的变化量, %。

细分段变结构智能控制方法的参数设计主要是确定 t_1 、 t_2 和 t_3 的时间长度及干燥速率的上下限。远离转换点 t_1 选取过短则不能充分发挥 NARX 能效, 影响能效提升; 而 t_1 选取过长, 则难以保证后面两段时间能够足够干燥到转换点的湿度。上下限的选取主要是限制干燥速率不要偏差太远。接近转换点 t_2 这一段主要完成从远离转换

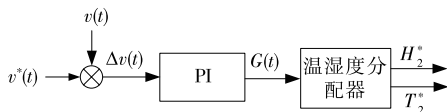


图 3 临近转换点干燥速率控制图

Figure 3 Control chart of drying rate near the conversion point

点到临近转换点的过渡, 因此, 考虑一定程度地节约电能并加速接近临近转换点区域; t_3 的选取主要考虑前两段时间除湿量可能出现的偏差, 在这段时间内能快速地回复, 最终在转换点时刻达到指定除湿量。时间长度的选取可以根据芒果干燥进展自动进行调整, 也可以依据常规芒果干燥数据来确定, 自动调节参数的方法能更多地节约电能, 但控制逻辑复杂, 实现比较困难。

1.2 NARX 能效提升方法

为了提高除湿能效, 利用智能控制方法智能化地动态调整温湿度。芒果干燥的温湿度控制是通过压缩机和风机的控制来实现的, 无论是压缩机还是风机的状态改变都会同时影响到干燥室的温度和湿度^[12-14]。另一方面, 干燥室温度的升高和降低会引起湿度的变化, 而湿度的变化同样也会影响温度的升降。可见干燥室温湿度之间具有较强的互耦特性, 而神经网络控制有很好的解耦控制特性, 它在输入层和输出层之间插入隐含层, 通过调整输入层与隐含层、隐含层与输出层的权值来实现输入变量与各输出变量之间的函数关系, 从而实现解耦。考虑到控制系统通常带有一定的延时, 可以引入带外部输入的非线性自回归 (NARX) 神经网络, 它通过一系列的输入数据来预测神经网络输入的变化趋势从而调整神经网络的输出, 因此能较好地适应时延较大的控制系统^[16-18]。

设系统控制的目标函数为:

$$F = \min(1/\rho), \quad (10)$$

式中:

F ——目标函数;

ρ ——单位能耗除湿量 (SMER), $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

受干燥工艺的影响, 干燥室温度和湿度受如下限制:

$$T_{\min}(t) < T(t) < T_{\max}(t), \quad (11)$$

$$H_{\min}(t) < H(t) < H_{\max}(t), \quad (12)$$

式中:

$T(t)$ ——干燥温度, $^{\circ}\text{C}$;

$H(t)$ ——干燥湿度, %;

$T_{\min}(t)$ 、 $T_{\max}(t)$ ——干燥最低温度和最高温度, $^{\circ}\text{C}$;

$H_{\min}(t)$ 、 $H_{\max}(t)$ ——干燥最低湿度和最高湿度, %。

NARX 控制能保证干燥过程温湿度保持在干燥工艺容许范围内, 同时也受到干燥系统温湿度控制范围的限制。

神经网络控制一般是用来缩小控制误差, 通过误差与权值之间的负梯度速降来使得误差最小化, 使得控制器的输出逼近期望值^[19-21], 常用来实现预测或精准的跟踪控制。由于空气源热泵干燥系统的控制目标是提高单位能耗除湿量 ρ , 因此改进的 NARX 控制系统误差函数选为 $e = 1/\rho$, 而不再是常规神经网络的控制误差。其结构如图 2。通过输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的

权值来使得 $1/\rho$ 达到最小,从而最大化获得单位能耗除湿量 ρ 。

NARX 神经网络的输入 $X=[T_0, T_1, \cdots, T_{d1}, H_0, H_1, \cdots, H_{d1}, e_1, e_2, \cdots, e_{d2}]$,以 T_1^* 和 H_1^* 为 NARX 神经网络的输出,NARX 控制方法参考文献[16—18],鉴于篇幅有限,文中不做赘述。

2 试验与分析

试验测试用的空气源热泵芒果干燥系统包括一个宽 2 m、深 3 m、高 2.8 m 的干燥室,2 台 ZL-3 热泵机组,单台功率为 2.25 kW,3 台 MSW-4/0.55 kW 循环风机,排风量为 12 000 m³/h,以及一台 DL-5 电辅加热设备,其功率为 5 kW。系统最高加热温度 90 ℃。热泵干燥系统自带温湿度控制器,通过对热泵系统和风机的启停控制来调节干燥室的温湿度。

测试芒果采购自广西百色经切片清洗、腌制后冷链

运输(历时 3 d),随后进行铺装烘干。芒果糖渍果片配料包括食用糖粉、麦芽糖浆、食用盐 and 食品添加剂(焦亚硫酸钠,甘油)等。参照文献[7—9]的模型和参数,结合空气源热泵系统的实际情况设置芒果干燥工艺流程见表 1,芒果在干燥室共计 40.0 h,其中芒果在干燥室内自然冷却软化 8.5 h,空气源热泵工作时间为 31.5 h。在空气源热泵工作期间通过自动监测装置每隔 3 min 自动记录干燥室温湿度以及芒果质量、能耗等数据。两份芒果质量同为 142.325 kg 的芒果分别采用分段恒温恒湿方法和细分段变结构温湿度智能调节方法进行干燥,参考分段恒温恒湿方法的试验测试数据,并结合经验设置细分段式变结构智能控制器的主要参数见表 2。综合考虑算法实现难度及控制精度而设计的 NARX 控制参数见表 3,其中阶段 6 因为除湿量小、除湿速率小,仍然采用常规的恒温恒湿方法,而未使用智能控制。

表 1 分段式芒果干燥温湿度设置表

Table 1 Temperature and humidity setting table for mango drying

阶段	温度/℃	湿度/%	时间/h	工艺说明
1	60.0	60	6.5	前期升温、预热、果肉表层水分蒸发阶段
2	60.0	45	6.0	产品定形、果肉干燥阶段
3	65.0	45	3.5	果肉干燥阶段
4	干燥室内自然冷却软化		8.5	软化阶段,有利于果肉水分从芯层向表层移动,提高口感
5	60.0	45	9.0	深度干燥阶段
6	65.0	35	6.5	深度干燥阶段

表 2 细分段式智能控制器参数

Table 2 Main parameters of subdivided intelligent controller

阶段	阶段末质 量目标/kg	远离转换 点时间/h	$\Delta v_{\max}/$ (kg·h ⁻¹)	$\Delta v_{\min}/$ (kg·h ⁻¹)	$\Delta T/$ ℃	$\Delta H/$ %	接近转换 点时间/h	$\Delta v_{\max2}/$ (kg·h ⁻¹)	$\Delta v_{\min2}/$ (kg·h ⁻¹)	$\Delta T_2/$ ℃	$\Delta H_2/$ %	临近转换 点时间/h	K_p	K_i
1	109	3.9	1.00	1.00	2	3	1.95	0.50	0.50	1	2	0.65	3.5	0.02
2	84	3.6	0.50	0.50	2	3	1.80	0.25	0.25	1	2	0.60	1.8	0.01
3	74	2.1	0.50	0.50	2	3	1.05	0.25	0.25	1	2	0.35	1.8	0.01
5	60	5.4	0.25	0.25	2	3	2.70	0.12	0.12	1	2	0.90	0.9	0.01

采用分段恒温恒湿热泵干燥后的芒果质量为 57.482 kg,总能耗 128.0 kW·h。采用细分段变结构智能温湿度调节方法干燥的芒果质量为 57.662 kg,总能耗为 116.95 kW·h。采用分段恒温恒湿和智能温湿度调节方法各干燥阶段的参数对比如表 4 所示,各工艺阶段末的芒果质量都比较接近,除湿速率控制器达到了较好的控制效果。两者的单位能耗除湿量分别为 0.663,

0.724 kg/(kW·h),采用细分段变结构智能温湿度调节方法节约电能 11.05 kW·h,节电率为 8.63%。通过对采用分段恒温恒湿工艺和细分段变结构智能温湿度调节工艺干燥的芒果对比,两种工艺得到的芒果干无论是色泽、脆度,还是口感等都很接近。

3 结论

采用温湿度智能调节方法可以有效提高干燥芒果的能效,节约电能,通过转换点除湿量控制来保证智能控制下的芒果干燥品质。研究提出将芒果干燥工艺阶段细分为三部分的芒果干燥能效提升方法,在远离转换点和接近转换点时利用非线性自回归神经网络来提高干燥能

表 3 NARX 控制器主要参数

Table 3 Main parameters of the NARX controller

隐含层数	隐含层节点数	学习率	d_1	d_2
1	5	0.02	3	2

表 4 各干燥阶段对比表

Table 4 Comparison table of each drying stage

阶段	阶段末质量/kg		除湿量/kg		能耗/(kW·h)	
	分段恒温恒湿	细分段变结构	分段恒温恒湿	细分段变结构	分段恒温恒湿	细分段变结构
1	109.040	110.543	33.285	31.971	29.20	26.37
2	83.820	84.468	25.220	25.886	26.40	22.37
3	74.070	74.502	9.750	9.966	16.00	15.81
4	73.120	73.652	0.950	0.850	0.20	0.21
5	60.120	60.143	13.000	13.509	33.60	30.30
6	57.482	57.662	2.640	2.481	22.60	21.89
总计			84.845	84.663	128.00	116.95

效,在临近转换点时采用比例积分控制器控制转换点的除湿量,从而保障芒果干燥品质。试验证明,这种方法能明显提高热泵干燥系统的能效,节约电能,并能获得与分段恒温恒湿方法接近的干燥品质。

参考文献

[1] 戚玉欣, 陶志国. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 资源节约与环保, 2016(5): 69.

QI Y X, TAO Z G. Research status and development prospects of air source heat pump drying technology [J]. Resources Economization and Environmental Protection, 2016(5): 69.

[2] 蔡志敏, 李凡, 李春来. 空气源热泵烘干机组研究现状及发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(21): 77-80.

CAI Z M, LI F, LI C L. Research status and development trend of air source heat pump drying unit[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(21): 77-80.

[3] KIVEVELE T, HUAN Z J. Experimental comparative study of an open and completely closed air source heat pump for drying sub-tropical fruits[C]// 12th International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE 2015). [S. l.]: IEEE Computer Society, 2015: 232-238.

[4] 黄燕婷, 罗朝丹, 黎新荣, 等. 浅析芒果干生产中干燥技术及装备[J]. 农业研究与应用, 2022(2): 48-53.

HUANG Y T, LUO Z D, LI X R, et al. Analysis on drying technology and equipment in dried mango production [J]. Agricultural Research and Application, 2022(2): 48-53.

[5] 罗彩连, 林羨, 吴继军, 等. 芒果高温热泵间歇干燥特性的研究[J]. 热带作物学报, 2015(12): 2 295-2 299.

LUO C L, LIN X, WU J J, et al. Study on intermittent drying characteristics of mango with high temperature heat pump [J]. Journal of Tropical Crops, 2015(12): 2 295-2 299.

[6] 段宙位, 窦志浩, 谢辉, 等. 芒果果肉太阳能—热泵干燥工艺优化[C]// 中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集. 杭州: 中国食品科学技术学会, 2014: 217.

DUAN Z W, DOU Z H, XIE H, et al. Optimization of solar-heat pump drying process for mango pulp[C]// Abstract Collection of Papers from the 11th Annual Meeting of Chinese Institute of Food

Science and Technology. Hangzhou: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014: 217.

[7] 李珊珊. 中等水分芒果果脯的研制与保藏研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 65.

LI S S. Study on preparation and preservation of preserved mango with medium moisture content [D]. Wuxi: Southern Yangtze University, 2020: 65.

[8] 段宙位, 窦志浩, 谢辉, 等. 太阳能—热泵干燥过程中芒果果肉的品质变化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(20): 125-127, 132.

DUAN Z W, DOU Z H, XIE H, et al. Quality changes of mango pulp during solar-heat pump drying [J]. Science and Technology Food Industry, 2014, 35(20): 125-127, 132.

[9] MUDALIAR R K, SHAH S B. Mathematical modelling of dried mango (Khatai) [C]// 2017 4th Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE). [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2017: 1-7.

[10] GRECIA K J, ALBERT LUCE A, BUENAVENTURA M A, et al. Design and evaluation of a mango solar dryer with thermal energy storage and recirculated air [C]// 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM). [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019: 1-5.

[11] TOMA T, BASU K, RODRIGUES W, et al. A deep learning based method for heat pump dryer user classification[C]// IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2018: 3 455-3 460.

[12] 李昌宝, 孙健, 辛明, 等. 番木瓜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 轻工科技, 2018, 34(2): 1-4.

LI C B, SUN J, XIN M, et al. Study on drying characteristics and mathematical model of papaya by heat pump[J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(2): 1-4.

[13] 韩明, 贾英新. 空气源热泵烘干大枣系统的研究[J]. 河北省科学院学报, 2017, 34(2): 42-46.

HAN M, JIA Y X. Study on air source heat pump drying jujube system [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2017, 34(2): 42-46.

(下转第 145 页)

- similarity evaluation combined with local regression method [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2010, 29(12): 1 173-1 177.
- [5] MIRJALILI S. Dragonfly algorithm: A new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems [J]. Neural Computing & Applications, 2016, 27(4): 1 053-1 073.
- [6] ABDEL-ZAHER A M, ELDEIB A M. Breast cancer classification using deep belief networks[J]. Expert Systems with Applications, 2016(46): 139-144.
- [7] HUANG Y, TIAN K, WU A Q, et al. Feature fusion methods research based on deep belief networks for speech emotion recognition under noise condition [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(5): 1 787-1 798.
- [8] 毛娟, 万鹏, 梁国平, 等. 基于区域适栽品种筛选的苹果品质综合评价模型的建立[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 60-66.
- MAO J, WAN P, LIANG G P, et al. Establishment of comprehensive evaluation model of apple quality for regional suitable varieties selection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 60-66.
- [9] 李速专, 童何馨, 袁雷明, 等. 间隔连续投影算法应用于近红外光谱苹果糖度模型的优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(14): 4 608-4 612.
- LI S Z, TONG H X, YUAN L M, et al. Optimization of near infrared spectroscopy model for sugar content in apple by intervals successive projection algorithm [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(14): 4 608-4 612.
- [10] 赵娟, 全朋坤, 张猛胜, 等. 基于特征 LED 光源的苹果多品质参数无损检测装置研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 326-332.
- ZHAO J, QUAN P K, ZHANG M S, et al. Design of apple quality integrated non-destructive testing device based on multi-band LED light source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 326-332.
- [11] ESWARAMOORTHY S, SIVAKUMARAN N, SEKARAN S. Grey wolf optimization based parameter selection for support vector machines[J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2016, 35(5): 1 513-1 523.
- [12] 方明明, 刘静. 基于回归卷积神经网络的近红外光谱苹果脆片品质评价方法研究[J]. 食品科技, 2020, 45(7): 303-308.
- FANG M M, LIU J. Evaluation method of apple chips quality by near infrared spectroscopy based on regressive convolutional neural network[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(7): 303-308.
- [13] 刘燕德, 周延睿. 基于 GA-LSSVM 的苹果糖度近红外光谱检测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 229-234.
- LIU Y D, ZHOU Y R. GA-LSSVM based near infrared spectroscopy detection of apple sugar content [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(7): 229-234.
- [14] 王浩云, 李晓凡, 李亦白, 等. 基于高光谱图像和 3D-CNN 的苹果多品质参数无损检测[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(1): 178-185.
- WANG H Y, LI X F, LI Y B, et al. Research on non-destructive detection of apple multi-quality parameters based on hyperspectral imaging technology and 3D-CNN [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(1): 178-185.
-
- (上接第 104 页)
- [14] 何冠成, 黄兴钊, 郭庆盛. 干燥用空气源热泵机组开式运行除湿能效的分析[J]. 日用电器, 2019(11): 69-73.
- HE G C, HUANG X Z, GUO Q S. Analysis of dehumidification energy efficiency of air source heat pump unit for drying in open operation[J]. Electrical Appliances, 2019(11): 69-73.
- [15] 沈伟, 张培兰, 牛俊乐, 等. 不同干燥方式对芒果果皮理化特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 87-92.
- SHEN W, ZHANG P L, NIU J L, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of mango peel[J]. Storage and Process, 2021, 21(9): 87-92.
- [16] 朱想, 丁云龙, 郭力, 等. 基于改进 NARX 神经网络算法的光伏发电功率短期预测[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(5): 505-511.
- ZHU X, DING Y L, GUO L, et al. Short-term prediction of photovoltaic power based on improved NARX neural network algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2020, 66(5): 505-511.
- [17] 付青, 单英浩, 朱昌亚. 基于 NARX 神经网络的光伏发电功率预测研究[J]. 电气传动, 2016, 46(4): 42-45.
- FU Q, SHAN Y H, ZHU C Y. Research on photovoltaic power prediction based on NARX neural network[J]. Electric Drive, 2016, 46(4): 42-45.
- [18] 冯胜, 刘明远, 冯旭. 基于 NARX 神经网络的工业水质智能处理[J]. 工业水处理, 2018, 38(3): 69-72.
- FENG S, LIU M Y, FENG X. Intelligent treatment of industrial water quality based on NARX neural network[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(3): 69-72.
- [19] LIU J W, LI T Y, ZHANG Z Y, et al. NARX prediction-based parameters online tuning method of intelligent PID system[J]. Journals and Magazines (IEEE Access), 2020, 8: 130922-130936.
- [20] WU W H, LI L B, YIN J C, et al. A modular tide level prediction method based on a NARX neural network [J]. Journals and Magazines (IEEE Access), 2021, 9: 147416-147429.
- [21] LI C, ZHANG W J, ZHOU T X, et al. Prediction of ship rolling motion based on NARX neural network[C]// 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2021: 4 664-4 668.