



张华希,闫一哲,李和清,等.空气源热泵粮食干燥机信息采集与自动控制系统的研制[J].江西农业大学学报,2022,44(1):205-211.

ZHANG H X,YAN Y Z,LI H Q,et al.Information collection of air source heat pump grain dryer and development of automatic control system[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(1):205-211.

空气源热泵粮食干燥机信息采集与 自动控制系统的研制

张华希,闫一哲,李和清,朱 伟,陈坤杰,刘德营*

(南京农业大学 工学院,江苏 南京 210031)

摘要:【目的】为优化热泵粮食干燥机的干燥工艺,实现对热泵粮食干燥机干燥过程的自动化控制,研制了空气源热泵粮食干燥机信息采集与自动控制系统。【方法】该系统以4级联合而成的空气源热泵作为热源,通过改变热泵机组的启停组合调节送风温度,以江苏天禹生产的型号为5HXG-120循环式谷物干燥机为机体,其内部自上而下分别为缓苏段、干燥段、冷却段和排粮段,由数据采集模块、控制模块和报警系统等组成,采集卡采集热风温湿度、环境温湿度、粮食温度等数据通过PCI总线传送到型号为IPC-610的工控机,以LabVIEW软件技术开发上位机,以西门子S7-200系列可编程逻辑控制器(PLC)作为下位机,进行系统硬件电路的搭建与软件的设计,从而实现对试验过程中各数据的实时监测和对空气源热泵以及粮食干燥机的控制。【结果】在环境温度为16.6℃时,以55℃为目标热风温度,当系统趋于稳定时,温度控制在53.9~57.2℃,符合GB/T 16714中控制温度在±2.5℃之内的控制要求。稻谷的含水率由22.9%降低至14.9%,干燥前期由于谷物中含水率较高,降水速率较明显,干燥后期谷物中自由水分减少,降水速率降低,整个干燥过程的平均降水速度为每小时0.69%,符合粮食干燥的规律。【结论】该系统能够对温度、湿度、水分值、电压、电流等试验数据进行显示与存储,实现空气源热泵粮食干燥机进料、循环、干燥和排粮4个工艺过程,干燥后的稻谷水分较均匀,品质良好,达到预期的干燥效果,与燃煤热风炉相比,能够大大节省成本,同时,该系统的研制为不同环境温度下控制策略的制定提供理论基础。

关键词:空气源热泵;粮食干燥机;数据采集;自动控制

中图分类号:S226.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2022)01-0205-07

Information Collection of Air Source Heat Pump Grain Dryer and Development of Automatic Control System

ZHANG Huaxi, YAN Yizhe, LI Heqing, ZHU Wei, CHEN Kunjie, LIU Deying*

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: [Objective] In order to optimize the drying process of the heat pump grain dryer and realize the automatic control of the drying process of the heat pump grain dryer, an information collection and automatic control system of air source heat pump grain dryers was developed. [Method] A 4-stage combined air source heat pump was used as the heat source, the air supply temperature was adjusted by changing the on-off combi-

收稿日期:2021-08-05 修回日期:2021-10-15

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2021305)和江苏省农业科技自主创新资金子项目(CX(17)1002-05)

Project supported by the Science and Technology Department of Jiangsu Province (BE2021305) and Sub-project of Jiangsu Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund (CX(17)1002-05)

作者简介:张华希, orcid.org/0000-0003-2900-1501, cczhanghuaxi@163.com; *通信作者:刘德营,副教授,博士,主要从事自动化控制研究, orcid.org/0000-0001-9842-9603, dyliu@njau.edu.cn.

nation of the heat pump unit. The 5HXG-120 circulating grain dryer produced by Jiangsu Tianyu was used as the body, which is composed of a tempering section, a drying section, a cooling section and a grain discharge section from top to bottom. The system consists of a data acquisition module, a control module and an alarm system. The collection card collects the data of hot air temperature and humidity, ambient temperature and humidity and grain temperature, and transmits the data to the IPC-610 industrial computer through the PCI bus. The host computer was developed with LabVIEW software technology, and the Siemens S7-200 series programmable logic controller (PLC) was used as the slave computer to build the hardware circuit of the system and design the software, in order to realize the real-time data collection and controlling. [Result] The tests showed that when the ambient temperature was 16.6 °C, the target hot air temperature was 55 °C, the system was in a stable operation, and the temperature was controlled within 53.9 °C to 57.2 °C, which met the control requirements of GB/T 16714 to control the temperature within ± 2.5 °C, the moisture content of grain was reduced from 22.9% to 14.9%. In the early drying stage, since the moisture content in the grain was high, and the dehydration rate was fast. In the later stage of drying, the free moisture in the grain decreased and the dehydration rate decreased. The average dehydration rate during the entire drying process was 0.69% per hour, which was in line with the law of grain drying. [Conclusion] The system could display and store test data such as temperature, humidity, moisture value, voltage, and current, and realized the four processes of air source heat pump grain dryer, namely feeding, circulation, drying and grain discharge. After drying, the moisture of the grain was relatively uniform, the quality was favorable, and the expected drying effect was achieved. Compared with coal-fired hot blast stoves, it can significantly save the cost. As a result, the development of the system provides a theoretical basis for the formulation of control strategies under different ambient temperatures.

Keywords: air source heat pump; grain dryer; data collection; automatic control

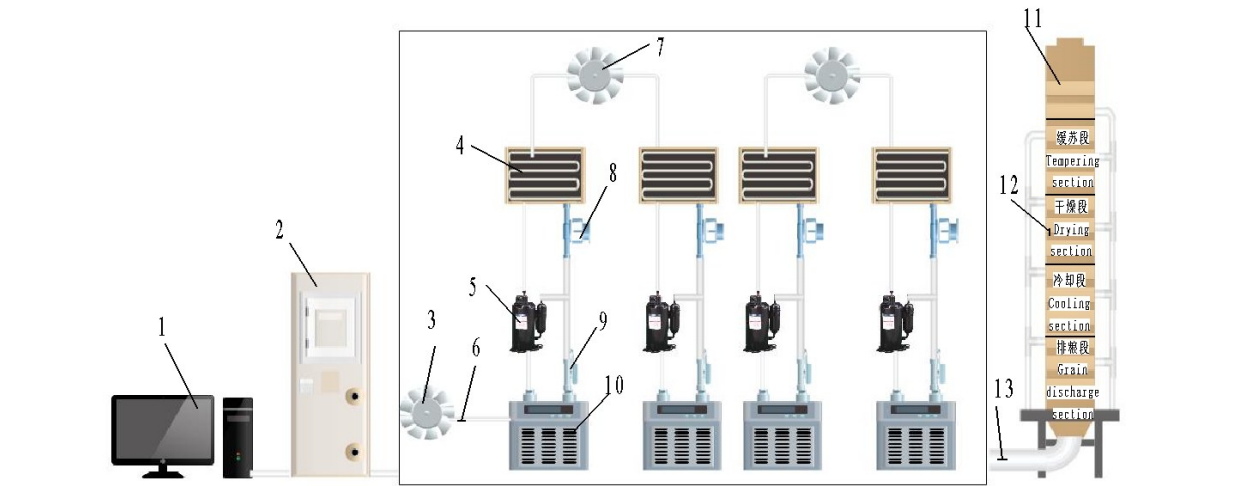
【研究意义】谷物农产品的生产和加工中不可或缺的一步是对其干燥,是保证其能长期安全储存的一个极其重要的条件^[1]。干燥是一个非线性、强耦合的复杂传热传质过程^[2-3]。随着我国国民经济的发展和人民生活水平的不断提升,对农产品的品质要求越来越高,干燥过程直接影响到产品的品质^[4-6]。与传统的燃煤蒸汽烘干^[7]及热风干燥^[8]、红外线干燥^[9-10]等方法相比,热泵干燥是一种具有能耗小、干燥效果好、适用范围广等特点的干燥方法。因此,热泵干燥被相关学者们广泛研究。【前人研究进展】白旭升等^[11]研究了香菇干燥时,不同风温、风速、装载量及放置方式对其干燥品质的影响,并建立了香菇热泵干燥动力学模型。赵丹丹等^[12]根据枸杞热风干燥失水规律,设计了满足干燥1 t枸杞鲜果的热泵干燥室,并对热泵干燥室进行应用试验,发现热泵干燥相对于燃煤干燥成本降低了19%。姬长英等^[13]研究热泵干燥技术对干制辣椒品质影响,在通过分阶段控制热风温度和改变铺料的厚度进行试验,改善工艺参数。单一热泵具有干燥时间长、效率低等缺点,组合干燥和联合干燥是解决单一热泵干燥的有效方法之一^[14-15]。程慧等^[16]将热泵干燥技术和真空干燥相结合,降低了能耗,并且得到质量好的干制蘑菇。李伟钊等^[17]研发了一种热管联合多级串联热泵玉米干燥系统,对废气中的余热进行回收和废气中的杂质进行清洁处理,有效降低污染物的排放。徐建国等^[18]在胡萝卜干燥时,采用先低温热泵干燥,后热风干燥的联合干燥技术进行干燥试验,在大幅度缩短干燥时间的同时,获得了高质量的干燥产品。Ayca等^[19]研究了热风干燥和微波-红外联合干燥对茄子干燥特性的影响,发现联合干燥的茄子比热风干燥的茄子具有更低的收缩率和更高的复水率,并且缩短了干燥时间。【本研究切入点】如何优化热泵的干燥与控制技术一直是研究的热点问题,但由于干燥过程的复杂性,目前关于研究各类影响因素的理论模型依旧较少。【拟解决的关键问题】本研究通过热泵式干燥机为载体,通过采集卡与工控机将反应干燥过程的各数据进行采集与储存,为后续干燥工艺的优化提供理论基础。

1 热泵干燥机系统

1.1 结构与工作原理

热泵干燥机系统结构如图1所示。该系统主要由电器控制部分、空气源热泵机组和谷物干燥机等组

成。其中,为满足不同粮食的干燥温度,以4级联合而成的空气源热泵作为热源,主要包括压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器等器件。



1:工控机;2:电气控制柜;3:进风机;4:蒸发器;5:热泵;6:环境温湿度传感器;7:蒸发风机;8:膨胀阀;9:喷气增焓;10:冷凝器;11:干燥机机体;12:粮食温度传感器;13:热风温湿度传感器。

1: Industrial computer; 2: Electrical control cabinet; 3: Inlet fan; 4: Evaporator; 5: Heat pump; 6: Ambient temperature and humidity sensor; 7: Evaporating fan; 8: Expansion valve; 9: Jet enthalpy; 10: Condenser; 11: Dryer body; 12: Grain temperature sensor; 13: Hot air temperature and humidity sensor.

图 1 热泵干燥机系统结构

Fig.1 Structure diagram of heat pump dryer system

以 5HXG-120 型循环式谷物干燥机为机体,配合一台由 4 组功率不同的热泵机组构成的热泵系统作为热源,通过改变热泵机组的启停组合调节送风温度和制热量。干燥机内分可分为 4 段,自上而下分别为缓苏段、干燥段、冷却段和排粮段。粮食经入粮提升机提升至干燥机顶部,甩盘使粮食尽可能均匀地甩落分布在缓苏段;粮食经干燥段进行热风干燥并且下落至干燥机的底部,再由输送电机和提升机将其提升至干燥机顶部,进行循环干燥。当粮食水分仪检测到谷物含水率达到目标时,停止干燥,通过排粮轮将粮食排出。作业流程见图 2。

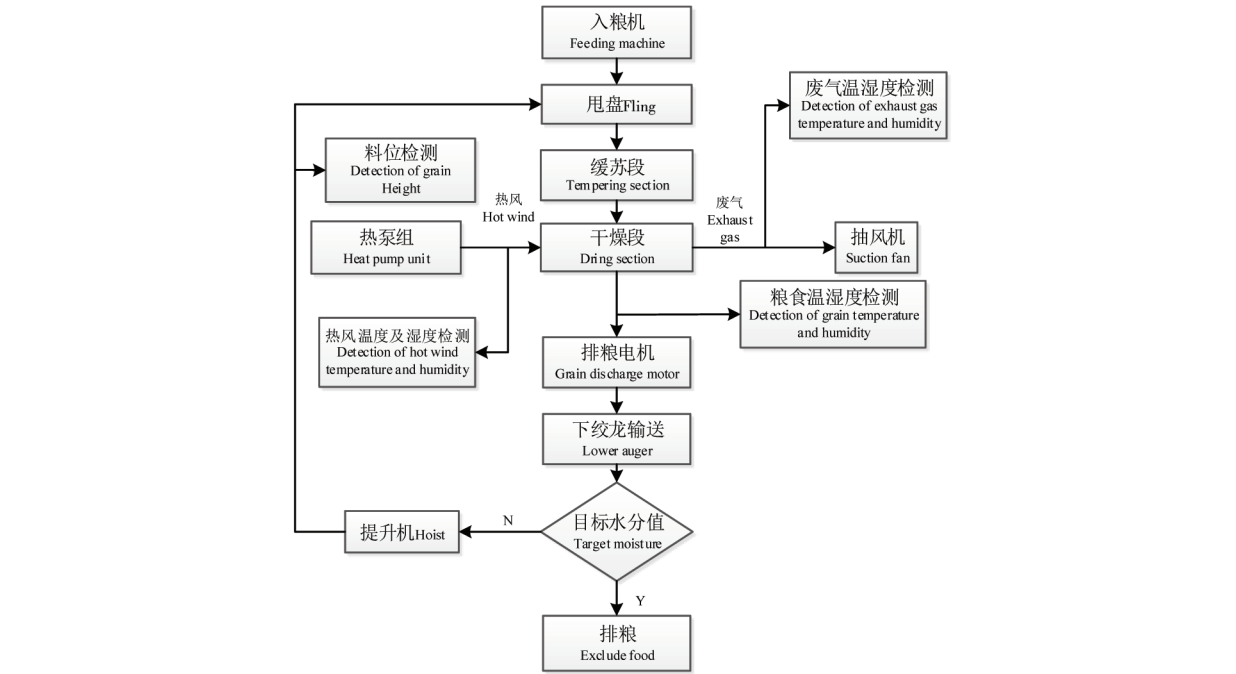


图 2 循环式谷物干燥机作业流程

Fig.2 Operation flow chart of circulating grain dryer

1.2 主要硬件设计

测控系统的硬件包括:工控机、数据采集卡、PLC、温度传感器、温湿度传感器、水分仪以及相应的仪表等组成,执行部分主要包括可编程控制器(PLC)及其他硬件外围电路等,硬件框图见图 3。

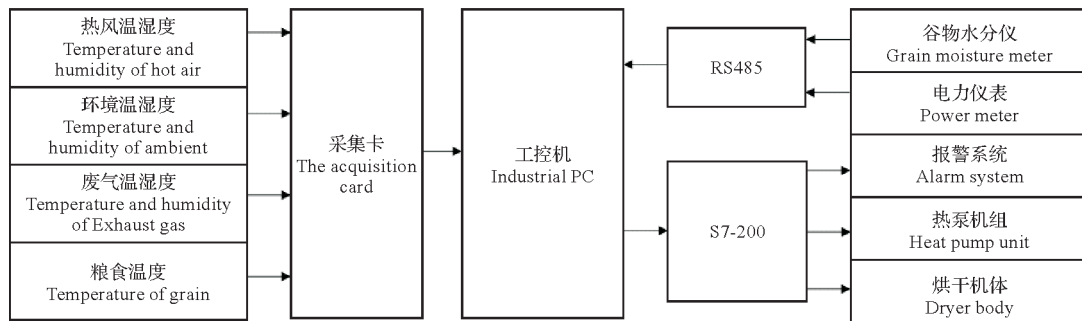


图 3 系统硬件设计

Fig.3 System hardware block diagram

模拟量采集卡选用美国 NI 公司生产的 PCI1716,其 A/D 转换器转换速度为 250 ks/s,主要实现对热风温湿度、环境温湿度、废气温湿度、粮食温度传感器数据的实时采集,并将采集到的数据通过 PCI 总线传输至工控机,通过 RS-485 串口通讯将水分测量仪检测的水分值以及多功能电表测量的电流、电压和功率值数据传输至工控机。

控制模块主要实现对空气源热泵压缩机组及干燥机机体的控制,主要由开关电源、PLC、中间继电器等组成。选用德国西门子 S7-200 CPU224 PLC,其拥有较强的可靠性、稳定性且适用于长时间的干燥机工作环境与工作时间。工控机通过串口通讯向 PLC 发出指令,控制热泵空气源压缩机组及干燥机机体内部电机的启停状态,进而控制热泵向干燥机机体输送热风的温度以及干燥机机体内部电机的工作状态,实现系统对干燥机的监测和控制。

为便于系统的实现,本系统采用型号为 IPC-610 的工控计算机,其具有多个应用接口,系统稳定且兼容性强。水分仪选用的是日本静冈 CETHC 型水分仪,其拥有水分数据显示功能,方便读取水分值,且精度较高。

1.3 系统软件设计

系统软件采用 LabVIEW 图形化编辑语言来完成数据采集与控制的设计。为了实现系统的数据采集与自动控制功能,软件采用模块化的设计,包括数据采集、数据存储、数据显示、热风温度控制以及目标水分控制等。数据采集与显示模块不断地实时采集各温湿度传感器、水分仪以及电子仪表数据,将数据保存在 XLS 工作表格中,并且直观地在地人机界面上显示曲线图。系统能够根据各个时刻的数据值,按照控制算法进行实时的自动控制,保证在整个过程中的烘干质量。LabVIEW 系统界面见图 4。

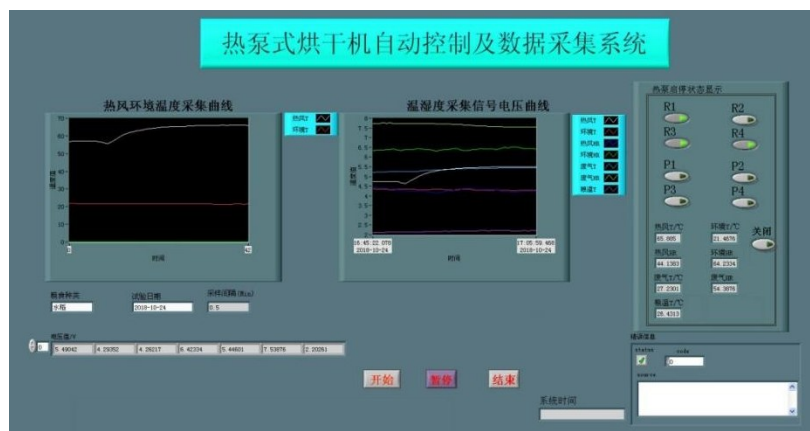


图 4 系统界面

Fig.4 System interface

2 系统试验验证

2.1 试验装置与方法

采用江苏天禹农业机械有限公司生产的型号为 5HXG-120 的干燥机进行现场试验,热源为空气源热泵。图 5 为干燥试验现场图。在试验过程中,系统自动记录干燥过程中的环境温湿度、热风温湿度、粮食温度、实时谷物水分含量、电能损耗等参数。控制系统参照 GB/T 6970—2007《粮食干燥机试验方法》。



图 5 干燥试验
Fig.5 Field diagram of drying test

2.2 试验条件

干燥试验的对象为稻谷,试验初始条件见表 1。

表 1 试验初始条件
Tab.1 Test initial conditions

参数 Parameter	数值 Numerical value
稻谷初始水分含量/% Initial water content of grain	22.9
稻谷初始温度/℃ Initial temperature of grain	16.2
空气相对湿度/% Humidity of the air	61.2
环境温度/℃ The ambient temperature	16.6

2.3 试验结果与分析

在目标温度为 55℃ 的控制策略下,热风温度与粮温变化图 6,表 2 为现场测试数据。

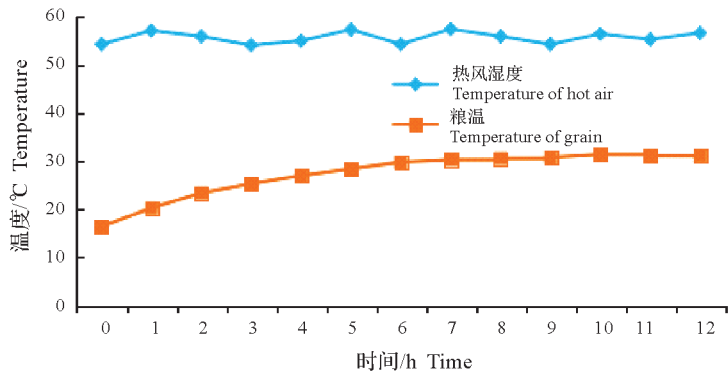


图 6 粮温与热风温度变化曲线
Fig.6 Variation curve of grain temperature and hot air temperature

从图 6 与表 2 可以看出,热风温度在 53.9~57.2℃,表明系统能够实现自动控制。整个干燥过程的平均降水速度为每小时 0.69%,在干燥前期,由于谷物水分含量较高,因此粮温升高时,降水速度较明显,在干燥后期,由于谷物失水较多,谷物内自由水分较少,因此干燥速率降低。整个干燥过程中,谷物水分值的变化符合粮食干燥的规律,达到了干燥的目的。

表2 现场测试数据
Tab.2 Field test data

时间/h Time	热风温度/℃ Hot air temperature	含水率/% Moisture content	粮温/℃ Grain temperature	降水率/% Precipitation rate	废气温度/℃ Exhaust gas temperature
0	54.1	22.9	16.2	—	21.3
1	56.9	21.7	20.1	1.2	22.3
2	55.7	20.6	23.2	1.1	23.2
3	53.9	19.8	25.1	0.8	23.4
4	54.8	19.2	26.8	0.6	23.8
5	57.1	18.7	28.2	0.5	23.3
6	54.1	18.0	29.6	0.7	22.9
7	57.2	17.4	30.1	0.6	22.9
8	55.7	16.9	30.4	0.5	22.9
9	54.1	16.4	30.6	0.5	22.6
10	56.2	15.8	31.2	0.6	22.8
11	55.1	15.3	30.9	0.5	23.2
12	56.4	14.9	31.0	0.4	23.5

3 结 论

(1)设计了空气源热泵粮食干燥机数据采集与控制系统,在干燥过程中,对环境温度、热风温度、粮食温度、电力仪表等进行数据采集与储存,并在人机交互界面上显示,在发生故障时,能够自动检测并报警。

(2)根据实时检测的数据,通过自动控制程序,系统可以对干燥机及热泵机组进行控制,实现空气源热泵粮食干燥机进料、循环、干燥和排粮4个工艺过程。

(3)干燥后的谷物水分均匀,品质较好。整个干燥过程共耗电472度,按照用电价格为0.8元/度计算,热泵干燥成本为378元/次。与燃煤热风炉相比,能够大大节省成本。该系统为研究不同环境温度下,热泵式低温循环谷物干燥机的温度控制策略提供理论基础。

参考文献 References:

- [1] 吴青荣,王高敏,曾恩,等.农产品热泵组合干燥研究进展[J].食品科技,2016,41(11):88-92.
WU Q R, WANG G M, ZENG E, et al. Advances on heat pump combined drying of agricultural products[J]. Food science and technology, 2016, 41(11): 88-92.
- [2] 刘斌,尹晓峰,丁珠玉,等.模糊PID在油菜籽热风干燥控制系统研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2016,41(4):109-114.
LIU B, YIN X F, DING Z Y, et al. On fuzzy PID to control system of rapeseed hot air drying[J]. Journal of southwest China normal university(natural science edition), 2016, 41(4): 109-114.
- [3] 赵勇,王士军,刘敦宁,等.基于自适应逆控制技术的连续流粮食干燥系统研究[J].中国农机化学报,2015,36(2):107-110.
ZHAO Y, WANG S J, LIU D N, et al. Research on continuous flow grain drying system based on the adaptive inverse control technology[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2015, 36(2): 107-110.
- [4] 郭婷,白向丽,陈益能,等.干燥方式对大果山楂粉干燥速率及品质的影响[J].食品与机械,2019,35(10):122-125.
ZHENG T, BAI X L, CHEN Y N, et al. Effect of drying treatment methods on the drying rate and quality characteristics of big fruit hawthorn[J]. Food and machinery, 2019, 35(10): 122-125.
- [5] 叶飞,高士伟,龚自明,等.干燥工艺对宜红茶品质及抗氧化能力的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(6):678-682.
YE F, GAO S W, GONG Z M, et al. Effect of two drying methods on Yihong tea quality and its antioxidant capacity[J]. Journal of Hunan agricultural university(natural sciences), 2018, 44(6): 678-682.
- [6] 王传耀,杨文斌.银耳热风换向干燥技术研究[J].江西农业大学学报,2007,29(1):158-163.

- WANG C Y, YANG W B. A study on the technique of reversible hot air drying for *Tremella fuciformis* [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29(1): 158-163.
- [7] 王德华, 高树成, 刘国辉, 等. 粮食干燥系统替代燃煤的热源比较与分析[J]. *粮食加工*, 2020, 45(1): 71-72.
- WANG D H, GAO S C, LIU G H, et al. Comparison and analysis of the heat source of substituting coal for the grain drying system [J]. *Grain processing*, 2020, 45(1): 71-72.
- [8] 李长友, 马兴灶, 方壮东, 等. 粮食热风干燥热能结构与解析法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 220-228.
- LI C Y, MA X Z, FANG Z D, et al. Thermal energy structure of grain hot air drying and analytical method [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2014, 30(9): 220-228.
- [9] DOROTA N, PIOTR P L. Infrared drying of apple slices [J]. *Innovative food science and emerging technologies*, 2004, 5(3): 353-360.
- [10] ZHANG P F, ZHOU L Y, BI J F, et al. Drying kinetics and quality attributes of peach cylinders as affected by osmotic pre-treatments and infrared radiation drying [J]. *International journal of food engineering*, 2017, 13(5): 12-21.
- [11] 白旭升, 李保国. 香菇热泵干燥特性及数学模型研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 42-48.
- BAI X S, LI B G. Study on drying characteristics and mathematical model for heat pump drying of mushroom [J]. *Journal of refrigeration*, 2018, 39(4): 42-48.
- [12] 赵丹丹, 彭郁, 李莱, 等. 枸杞热泵干燥室系统设计与应用[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(S1): 359-365.
- ZHAO D D, PENG Y, LI M, et al. Design and application of wolfberry heat pump drying system [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2016, 47(S1): 359-365.
- [13] 姬长英, 蒋思杰, 张波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 296-302.
- JI C Y, JIANG S J, ZHANG B, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2017, 33(13): 296-302.
- [14] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 脱水蔬菜热泵-热风组合干燥试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 226-229.
- ZHANG X K, LI H D, XU G, et al. Combined heat-pump and hot-air drying of dehydrated vegetables [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2008, 24(12): 226-229.
- [15] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 中红外-热风组合干燥牛肉干降低能耗提高品质[J]. *农业工程学报*, 2013(23): 217-226.
- XIE X L, LI X, ZHANG C H, et al. Combined mid-infrared and hot air drying reduces energy-consumption and improves quality of jerky [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2013(23): 217-226.
- [16] 程慧, 姬长英, 张波, 等. 香菇热泵-真空联合干燥工艺优化[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(1): 125-132.
- CHENG H, JI C Y, ZHANG B, et al. Optimization of drying process for *Lentinus edodes* by combining heat pump with vacuum [J]. *Journal of south China agricultural university*, 2019, 40(1): 125-132.
- [17] 李伟钊, 盛伟, 张振涛, 等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 278-284.
- LI W Z, SHENG W, ZHANG Z T, et al. Experiment on performance of corn drying system with combination of heat pipe and multi-stage series heat pump equipment [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2018, 34(4): 278-284.
- [18] 徐建国, 徐刚, 张森旺, 等. 热泵-热风分段式联合干燥胡萝卜片研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(12): 230-235.
- XU J G, XU G, ZHANG S W, et al. Heat pump and hot air combined drying of carrot slices [J]. *Science and technology of food industry*, 2014, 35(12): 230-235.
- [19] AYCA A, GULUM S, SERPIL S. Effects of microwave-infrared combination drying on quality of eggplants [J]. *Food and bio-process technology*, 2015, 8(6): 1198-1210.