

热泵式低温循环谷物干燥机控制系统设计与试验

陈坤杰¹ 左毅¹ 李和清¹ 戚超¹ 刘浩鲁² 贲宗友¹

(1.南京农业大学工学院,南京 210031; 2.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014)

摘要:针对以空气源热泵为热源系统的低温循环谷物干燥机存在的一体化控制程度不足问题,设计了一种热泵式低温循环谷物干燥机控制系统。为实现低温循环谷物干燥机和热泵系统的一体化控制,利用可编程逻辑控制器(PLC)技术进行硬件电路设计和软件设计,系统实现了谷物干燥过程的自动和手动等多模式控制,并支持干燥参数的人工调节和设置、谷物含水率及干燥温度的实时监控等功能。试验表明,干燥机在不同模式下均工作正常;所开发的逻辑控制系统具有自动化程度高、稳定性好、安全性高等优势。稻谷干燥试验表明,在不同环境温度下,热泵热风温度平均误差为0.95℃,标准差为0.93℃,系统具有较好的控制精度与稳定性,粮食温度稳定在33℃左右,满足低温循环式谷物干燥机的作业要求。

关键词:谷物干燥机;空气源热泵;温度控制系统;可编程逻辑控制器;触摸屏

中图分类号: S226.6; TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0316-08

OSID:



Design and Experiment of Heat Pump Low-temperature Circulating Grain Dryer Control System

CHEN Kunjie¹ ZUO Yi¹ LI Heqing¹ QI Chao¹ LIU Haolu² BEN Zongyou¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: A heat pump low-temperature circulating grain dryer control system was designed for the low-temperature circulating grain dryer using air source heat pump as the heat source. A multi-mode soft logic system was employed to control the low-temperature circulating grain dryer and heat pump system. In the hierarchical system, the PLC was used as the control core and touch screen as the man-machine interface, programming through the sequential function chart (SFC) and ladder diagram, which guaranteed the multi-mode operation of heat pump low-temperature circulation grain dryer and supported manual adjustment and setting of drying parameters, real-time monitoring of grain moisture content and drying temperature and other functions. The experiments validated the operation of the dryer in manual mode, automatic mode and timing mode. The designed logic control system had advantages of high degree of automation, good stability and high safety and so on. Additionally, experiment results on the control of the drying temperature showed that the mean error of the heat pump outlet temperature was 0.95℃ and the standard deviation was 0.93℃ at different ambient temperatures, which meant the control system had high accuracy and stability. The grain temperature was stable at about 33℃, which satisfied the operating requirements of the low-temperature circulating grain dryer.

Key words: grain dryer; air source heat pump; temperature control system; PLC; touch screen

0 引言

干燥是粮食生产过程的关键环节,也是许多农产品物料长期贮藏的一种经济有效的方法^[1-4]。如果新收获的粮食不能及时干燥至安全含水率,则会因

霉变和发芽等造成严重损失^[5-6]。因此,利用干燥机对粮食进行干燥是减少粮食损失、确保粮食安全的重要手段^[7]。

常见的谷物干燥机种类主要有顺流式^[8]、混流式^[9]和低温循环式^[5]等。其中,低温循环式谷物干

干燥机因干燥品质好、适合稻谷干燥等,在我国南方地区使用最为广泛^[10]。文献[11]研究了5HSZ-R-12型循环式粮食干燥机的传动系统,优化了系统的上螺旋输送机、下螺旋输送机与六叶轮结构;文献[12]对5HY-50型低温循环粮食干燥机进行了改进设计,使其适用于不同种类高、低含水率的粮食干燥;文献[13]设计了一种小型种子循环干燥机,使干燥效率提高了20%;文献[14]设计开发了一种内置远红外电热管循环式干燥机,并通过试验确定了工作参数。现有的低温循环式干燥机大多以煤炭、燃油等化石能源燃烧产生的热量作为热源^[15],这不符合节能减排的要求。采用热泵干燥技术对农产品、食品和木材进行干燥,不仅干燥品质好,而且对环境污染小,近年来越来越受到人们的关注^[16-18]。文献[19]利用热泵干燥机对稻谷进行干燥试验研究;文献[20]将空气源热泵应用于多段塔式玉米干燥系统中,试验发现,热泵干燥系统比燃煤干燥系统单位干燥成本降低22.4%,且节能减排效果明显。随着国内环保标准的提高,燃煤干燥已被逐步禁止,采用热泵系统替代燃煤热风炉已成为粮食干燥机的发展方向^[21]。

本文根据江淮地区的气候条件,围绕优质、高效、节能干燥要求,设计一款热泵式低温循环谷物干燥机一体化控制系统。

1 干燥机结构及工作原理

热泵式低温循环谷物干燥机主要由电气控制柜、谷物干燥机与热泵系统3部分组成,总体结构如图1所示。

电气控制柜包括触摸屏、PLC、控制按钮和报警灯等部件,实现温度监控、热泵组合调节和干燥机动作控制等功能。

谷物干燥机由提升电机、排风机、排粮轮和螺旋输送机等组成。其工作原理是通过各电机协同运转使粮食依次经过缓苏段、干燥段、冷却段和排粮段,完成一次干燥循环。谷物水分仪检测粮食达到目标

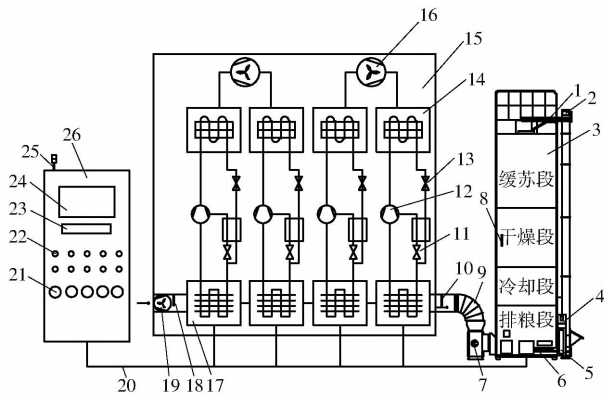


图1 热泵式低温循环谷物干燥机结构简图

Fig.1 Structure of heat pump low-temperature circulating grain dryer

- 1.上螺旋输送机 2.提升电机 3.谷物干燥机 4.水分仪 5.排粮轮 6.下螺旋输送机 7.排风机 8.粮食温度传感器 9.风道 10.热风温度传感器 11.膨胀阀 12.压缩机 13.喷气增焓阀 14.蒸发器 15.热泵系统 16.蒸发风机 17.冷凝器 18.环境温度传感器 19.进风机 20.总线 21.控制按钮 22.指示灯 23.PLC 24.触摸屏 25.报警灯 26.电气控制柜

含水率时,干燥机停止动作。

2 控制系统设计

2.1 控制系统总体框图

控制系统用于一体化控制热泵与低温循环谷物干燥机,实现谷物干燥过程的手动与自动等多模式控制。控制系统总体如图2所示。

控制系统可分为6大模块:主控模块完成信号采集、数据处理和系统监控等任务;A/D转换模块可以实现环境温度和热风温度等模拟量信号输入以及信号的A/D转换;数据通讯模块的作用是通过RS485通讯将谷物水分仪水分信号传输给主控模块;拓展模块将风压检测器、堵粮检测器等传感器信号通过紧急报警电路传给主控模块并通过报警灯显示报警状态;输出控制模块通过PLC输出端口对中间继电器施加有效控制信号,进而通过强电控制器控制热泵与谷物干燥机动作;人机交互与显示模块用于设置目标谷物含水率、谷物品种和定时时间等参数,显示温度、含水率和设备运

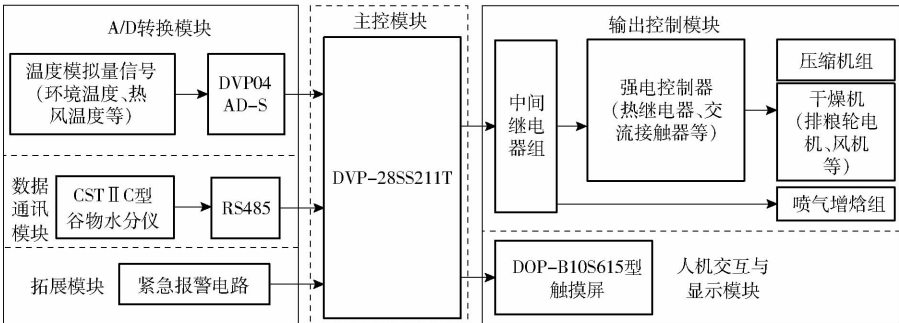


图2 控制系统总体框图

Fig.2 Total block diagram of control system

行状态等实时信息。

2.2 硬件电路设计

系统以 PLC 为主控制器,控制热泵与干燥机电机、采集传感器数据并与触摸屏实现人机交互等功能。根据系统结构,控制系统的输入量分布为 12 个数字量和 3 个模拟量,输出量为 18 个数字量,并从系统架构、I/O 点数、参考精度和经济性综合考

量^[22-25],选用具有 20 个数字量的台达 DVP-28SS211T 型 PLC,另外再配置支持 12 通道数字量的拓展模块 DVP-08SN11T。控制系统需采集环境温度、热风温度和粮食温度信息。结合江淮地区谷物干燥环境特点,选用检测温度范围为 -20~80℃ 的 JCJ100R 型温度传感器,通过 DVP04AD-S 型模拟量拓展模块采集温度。PLC 控制电路图如图 3 所示。

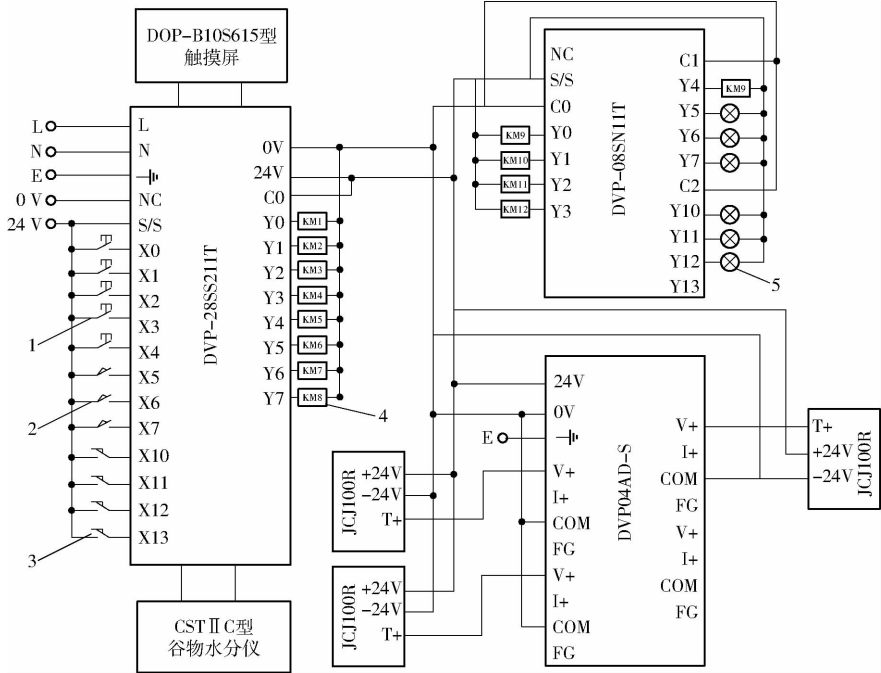


图 3 PLC 控制系统电路

Fig. 3 Control circuit diagram of PLC

1. 控制按钮 2. 检测器 3. 报警器 4. 中间继电器 5. 报警指示灯

本文将热泵与干燥机控制组件结合于一个控制电路内,可有效地对两设备进行一体化控制。同时,设计了紧急报警电路,当风压检测器、堵粮检测器或高低压报警器任一部分发生故障时,系统会立即同时切断热泵与干燥机的控制电路,以确保系统整体安全。

系统人机交互界面选用中达电通股份有限公司生产的 DOP-B10S615 型触摸屏,通过 MPI/PPI 型电缆与 PLC 建立通讯。该触摸屏具备强大的图像显示和数据处理功能^[26],满足现场数据的采集和存储、前段数据的处理与控制要求。

2.3 PLC 软件设计

PLC 控制流程如图 4 所示,网络程序包括:主程序、温度采集子程序、谷物水分仪通讯子程序、温度控制子程序和 SFC(顺序功能图)控制算法程序等。

模拟量采集模块具有 12 位精度数字量,所选取的温度传感器输出信号为电压型,数字量换算公式为

$$O_v = \frac{(O_{sh} - O_{sl})(I_v - I_{sl})}{I_{sh} - I_{sl}} + O_{sl} \quad (1)$$

式中 O_v ——温度数字值输出结果
 I_v ——温度电压值,V
 O_{sh} ——数字值输出上限
 O_{sl} ——数字值输出下限
 I_{sh} ——电压信号值上限,V
 I_{sl} ——电压信号值下限,V

温度传感器的输出满足

$$T_v = \frac{(T_{sh} - T_{sl})(I_v - I_{sl})}{I_{sh} - I_{sl}} + T_{sl} \quad (2)$$

式中 T_v ——温度实际值,℃
 T_{sh} ——温度量程上限,℃
 T_{sl} ——温度量程下限,℃

根据式(1)、(2)计算可得温度实际值与温度数字值输出对应关系为

$$T_v = \frac{O_v}{80} + 20 \quad (3)$$

控制系统程序采用 SFC 控制算法设计,可实现对热泵系统与谷物干燥机的一体化控制,如图 5 所示。该算法可避免系统运行时的误动作,提高系统运行的稳定性。

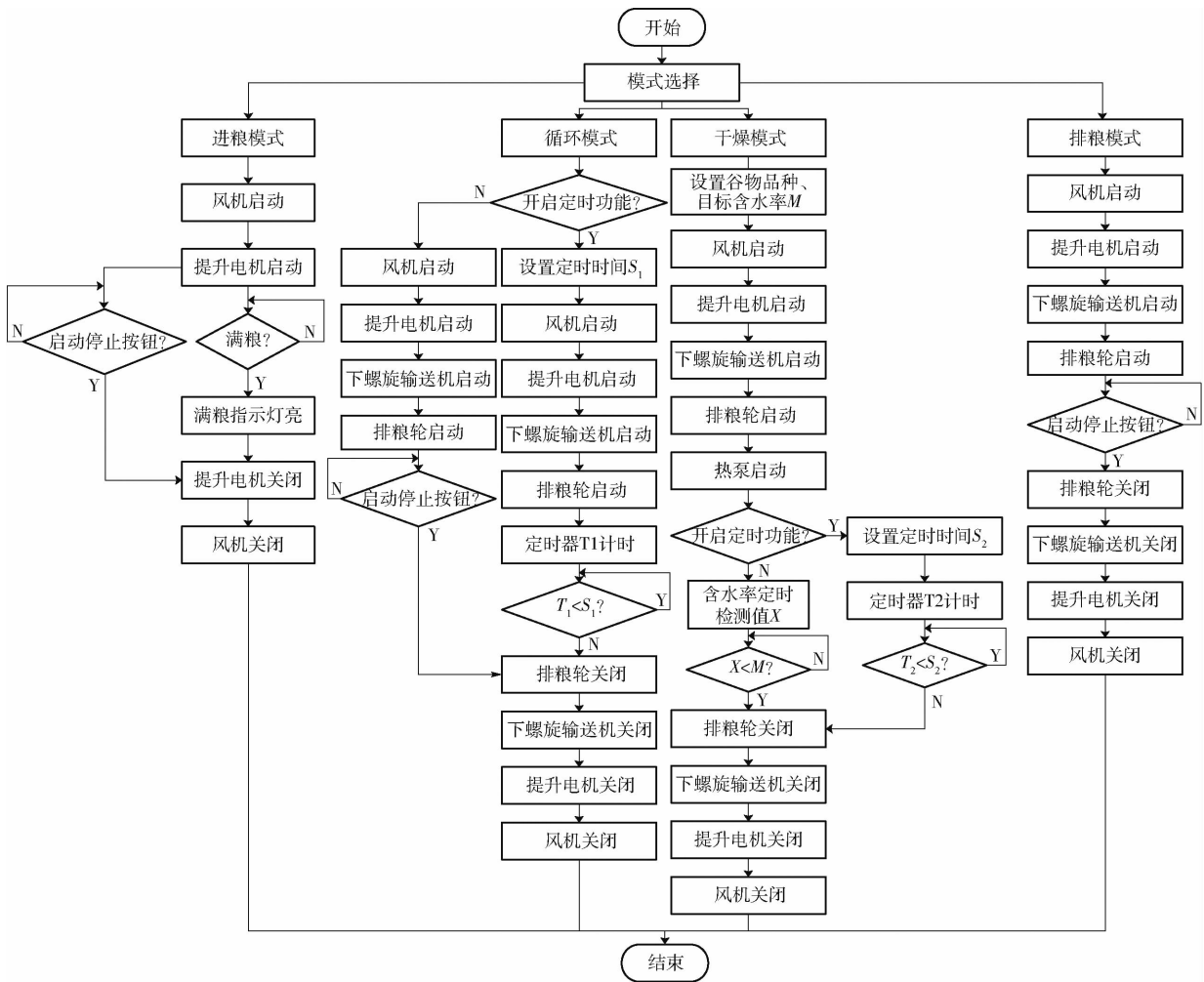


图 4 控制系统程序流程图

Fig. 4 Flowchart of controlling system program

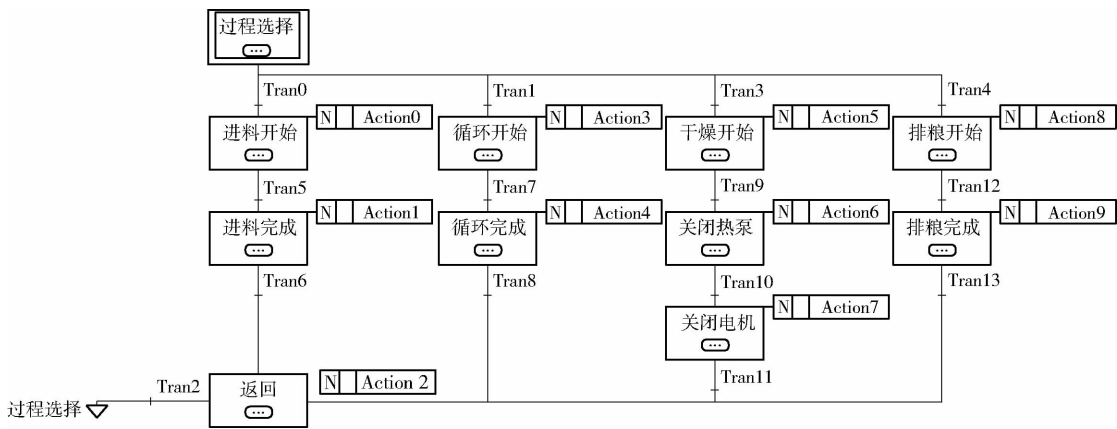


图 5 SFC 控制算法

Fig. 5 SFC control algorithm

2.4 触摸屏软件设计

系统采用 DOPSoft 组态软件进行触摸屏程序设计,包括用户登录界面和功能界面,触摸屏软件设计界面如图 6 所示。根据生产要求,功能界面主要由设备监控界面、参数设置界面、设备调试界面、温度采集界面和实时报警界面组成,可实现工作模式选择以及含水率、温度和设备运行状态实时监测等功

能;参数设置界面可设定定时循环时间、定时干燥时间、目标含水率和干燥谷物品种等;温度采集界面实现传感器实时信号采集与曲线绘制等功能。

3 控制系统测试试验

3.1 试验条件与方法

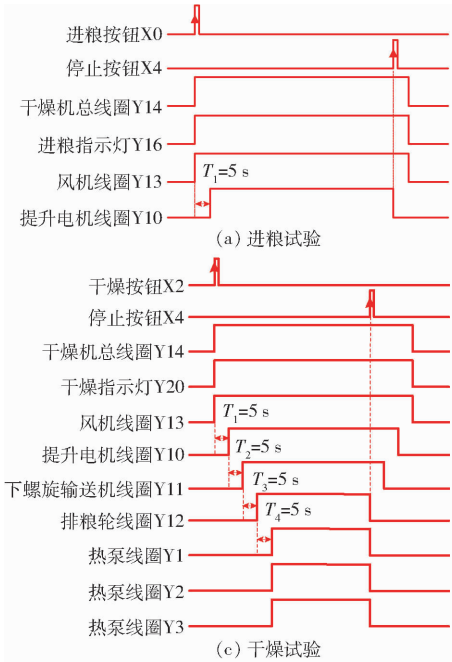
2018 年 10—12 月在江苏省泰州市姜堰区腾飞



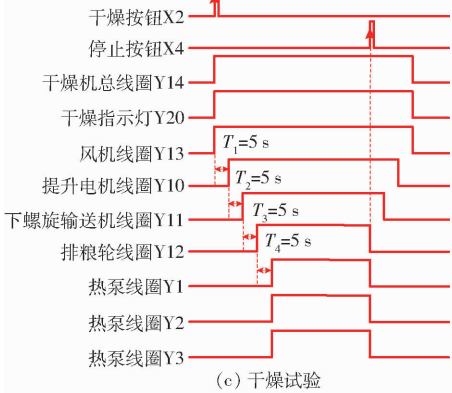
图 6 触摸屏软件设计界面

Fig.6 Touch screen of HMI

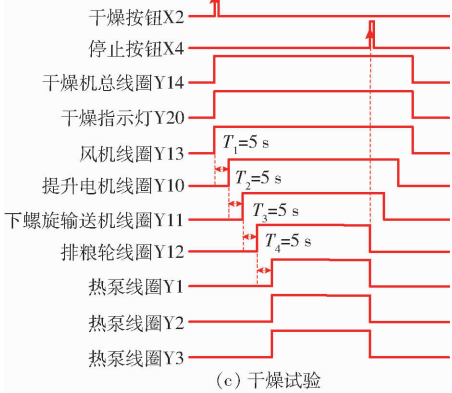
种植家庭农场利用本文设计的控制系统进行试验测试。谷物干燥机为 5HXG-120 型低温循环谷物干燥机,选用初始含水率约为 24% 的淮稻 5 号稻谷为干燥对象,控制系统测试试验严格参照 GB/T 6970 2007《粮食干燥机试验方法》与 JB/T 10268 2001《批式循环谷物干燥机操作要求》。通过 PLC 的时序图功能记录控制系统实时运行状态。试验现场如图 7



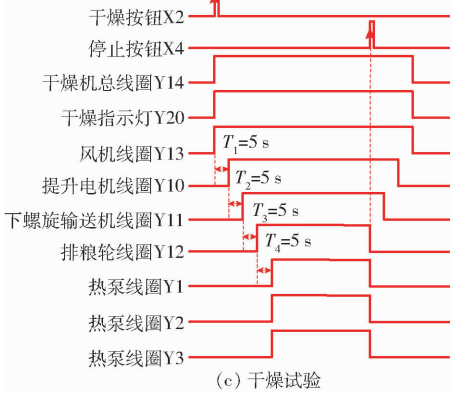
(a) 进粮试验



(b) 循环试验



(c) 干燥试验



(d) 排粮试验

图 8 手动模式时序图

Fig.8 Timing diagrams of manual mode

控制系统为自动工作模式时,由于稻谷干燥时间较长,为方便时序图显示,本文截取控制状态改变时图像,如图 9 所示。当检测到满粮信号时,系统由进粮流程自动切换到干燥流程,系统根据环境温度自动控制热泵的输出热风温度,当水分仪检测稻谷达到目标含水率后关闭热泵系统,进入循环流程将稻谷冷却降温,最后通过排粮流程将稻谷排出。

为测试控制系统的定时模式,在定时控制功能下,设置定时时间为 60 s,按下定时计时按钮,定时计数器 M2 置高电平,计时开始,当计时结束时,排粮轮、下螺旋输送机、提升电机与风机依次顺序停

所示。



图 7 热泵式低温循环谷物干燥机试验现场

Fig.7 Heat pump low-temperature circulating grain dryer

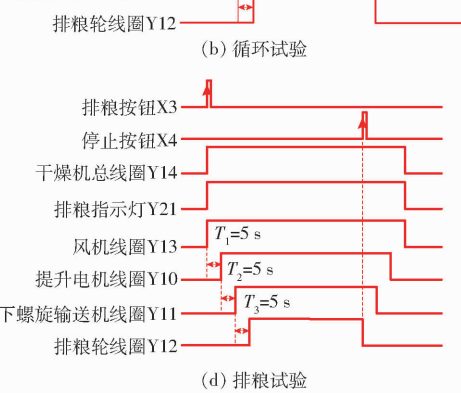
1. 谷物干燥机 2. 热泵系统 3. 电气控制柜

3.2 试验结果

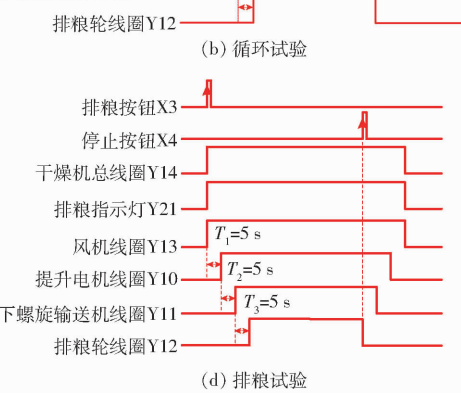
控制系统为手动工作模式时,干燥机的进粮试验、循环试验、干燥试验和排粮试验的时序如图 8 所示。试验结果表明,控制系统达到该状态下各干燥流程的控制要求。



(b) 循环试验



(c) 干燥试验



(d) 排粮试验

(d) 排粮试验

止,定时循环结束。工作时序图如图 10 所示。试验结果表明控制系统能够满足定时功能需求。

为了测试系统的紧急报警功能,当风压检测器检测到风压不足时,线圈 Y14 立即变为低电平,干燥机控制电路断开,同时线圈 Y15 置高电平,报警灯提示报警信息,故障保护功能时序图如图 11 所示,满足系统设计的要求。

4 热泵热风温度控制结果与分析

4.1 热风温度采集与分析

谷物干燥时需维持在较为恒定的温度条件下,

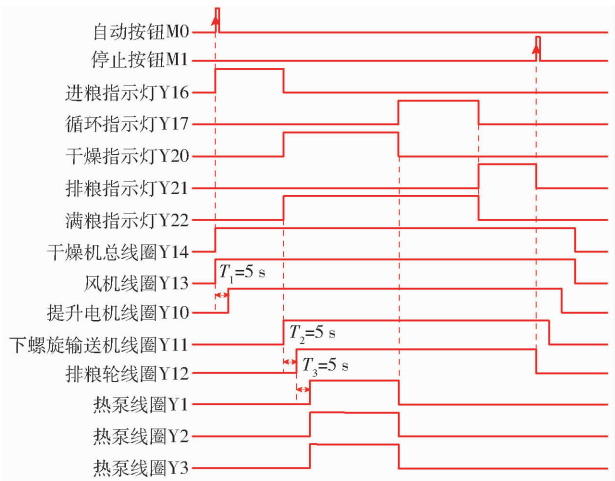


图9 自动模式时序图

Fig. 9 Timing diagram of automatic mode

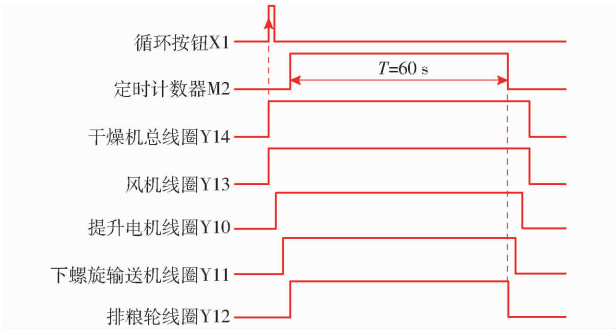


图10 定时模式时序图

Fig. 10 Timing diagram of timing mode



图11 紧急报警功能时序图

Fig. 11 Timing diagram of fault protection

本文采用带有喷气增焓的4级热泵,通过调节不同组合热泵级数控制输出热风温度。2018年10—12月和2019年9—12月期间,在不同环境温度条件下,采集与记录不同热泵级数组合的热风温度数据,结果如表1所示。

试验结果显示,当环境温度大于15℃时,可实现输出热风目标温度(50~60℃)的不同热泵级数组合较多;当环境温度于10~15℃时,开启3级或以上热泵组合的热风温度可达目标温度,但可选组合较少;当环境温度低于10℃时,热风温度整体偏低,3级或以上的热泵组合难以满足目标温度,2级或单级的热泵组合热风温度远低于目标温度。因此,环境温度低于15℃时,增加喷气增焓试验,得出开启喷气增焓时不同级数热泵组合条件下热风温度,试验结果如表2所示。

根据文献[27]开启喷气增焓和多个热泵时会

表1 不同环境温度各热泵组合热风温度试验结果
Tab. 1 Hot air temperature test results of various heat pump combinations at different ambient temperatures
℃

热泵级数 组合	环境温度/℃					
	5	10	15	20	25	30
1-2-3-4	50.2	57.1	62.2	70.2	75.7	
1-2-3	41.6	50.3	57.4	65.1	67.7	73.1
1-2-4	39.8	48.9	56.1	64.0	66.6	72.0
2-3-4	37.2	47.2	55.3	62.6	65.2	70.4
1-3-4	37.3	46.6	54.2	61.3	63.9	68.3
1-2	31.0	38.1	50.0	55.1	58.5	62.6
1-3	29.2	36.5	49.8	54.0	57.1	61.1
1-4	27.1	35.1	47.9	53.1	55.7	59.8
2-3	27.9	34.5	49.1	54.7	57.3	60.7
2-4	26.4	32.7	48.3	52.4	56.0	58.9
3-4	24.2	31.8	45.3	51.1	54.6	56.7
1	18.1	23.6	31.2	39.0	42.1	49.3
2	18.1	23.6	30.0	38.2	42.0	49.2
3	15.5	20.9	29.1	36.5	41.3	47.8
4	13.7	19.1	28.7	35.6	40.5	47.1

表2 开启喷气增焓各热泵组合热风温度试验结果
Tab. 2 Hot air temperature test results of various heat pump combinations with enhanced vapor injection
℃

热泵级数 组合	环境温度/℃				
	5	8	10	13	15
1-2-3-4	56.7	59.7	62.1	64.3	65.9
1-2-3	46.1	53.2	55.4	58.1	60.2
1-2-4	45.3	52.5	54.2	57.0	59.1
2-3-4	42.2	51.2	53.6	55.7	57.6
1-3-4	42.1	50.1	51.6	54.5	56.8

较大增加能耗,结合实际测得的热风温度制定热泵控制策略,通过PLC编程实现热泵组合自动控制。

4.2 稻谷干燥温度试验结果

以55℃为目标热风温度进行稻谷干燥试验,得出不同环境温度下,热风温度与粮食温度试验结果如图12所示。试验结果误差分析如表3所示。

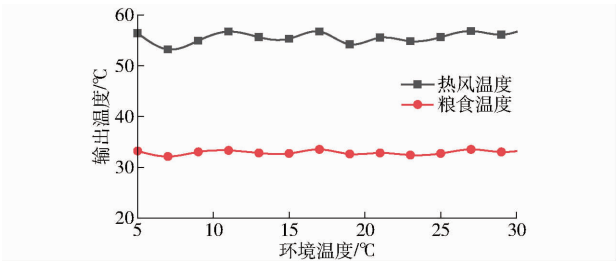


图12 不同环境温度下稻谷干燥温度试验结果

Fig. 12 Test results of rice drying temperatures at different ambient temperatures

由表3可知,热风温度控制于53.20~57.80℃之间,热风温度平均误差为0.95℃,标准差

表 3 误差分析结果

Tab. 3 Test results of error analysis					℃
名称	最大值	最小值	最大误差	平均误差	标准差
热风温度	57. 80	53. 20	2. 80	0. 95	0. 93
粮食温度	33. 60	32. 10			0. 43

为 0. 93℃,控制系统具有较好的控制精度与稳定性。粮食温度在 33℃ 上下波动,标准差为 0. 43℃,粮食温度波动较小,符合低温循环式谷物干燥机作业要求^[28]。

5 结论

(1)根据实际生产需要,设计了将热泵系统与

低温循环谷物干燥机相结合的一体化控制系统,采用 SFC 控制算法与梯形图实现对粮食干燥过程的进粮、循环、干燥与排粮 4 个流程的控制。针对易发生故障的风机与排粮轮,设计了故障检测与报警系统。

(2)通过研究不同环境温度下、不同热泵启停组合的实际运行状况,设计了热泵式低温循环谷物干燥机的温度控制策略。稻谷干燥温度试验表明,在环境温度发生变化时,热风温度平均误差为 0. 95℃,标准差为 0. 93℃,系统具有较好的控制精度与稳定性。粮食温度稳定在 33℃ 左右,满足低温循环谷物干燥机的作业要求。

参 考 文 献

[1] 李长友,麦智炜,方壮东,等. 高湿稻谷节能干燥工艺系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10):1-9.
LI Changyou, MAI Zhiwei, FANG Zhuangdong, et al. Design and test on energy-saving drying system for paddy with high moisture content[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10):1-9. (in Chinese)

[2] 李保国,刘相东,曹崇文. 脉动燃烧干燥及传热特性研究[J]. 农业工程学报,2000, 16(6):11-14.
LI Baoguo, LIU Xiangdong, CAO Chongwen. Research on pulse combustion drying and its characteristics of heat transfer[J]. Transactions of the CSAE,2000, 16(6):11-14. (in Chinese)

[3] 杨德勇,谢翔燕,刘相东. 料液脉动燃烧尾气雾化试验[J]. 农业机械学报, 2009,40(3):90-92.
YANG Deyong, XIE Xiangyan, LIU Xiangdong. Atomization test of pulsating combustion exhaust gas of feed liquid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):90-92. (in Chinese)

[4] 陈升斌. 低温循环谷物干燥机性能与使用成本分析[J]. 福建农机,2007,28(3):27-29.
CHEN Shengbin. Analysis of performance and use cost of low-temperature circulating grain dryer[J]. Fujian Agricultural Machinery,2007,28(3):27-29. (in Chinese)

[5] 吴苏喜,刘瑞兴,杨文凤,等. 低温循环式干燥机对南方高水分稻谷干燥的实践[J]. 食品与机械,2011,27(6):192-194.
WU Suxi, LIU Ruixing, YANG Wenfeng, et al. The practice of low temperature circulating dryer for drying high moisture rice in the south[J]. Food and Machinery,2011,27(6):192-194. (in Chinese)

[6] 邸坤. 连续式与循环式稻谷干燥机技术经济性能探讨[J]. 粮食流通技术,2012,19(2):19-23.
DI Kun. Discussion on the technical and economic performance of continuous and circulating rice dryers[J]. Food Circulation Technology,2012,19(2):19-23. (in Chinese)

[7] 赵学工,郑刚,董殿文,等. 粮食干燥机过程控制系统的应用研究[J]. 粮食加工,2007(5):50-53.
ZHAO Xuegong, ZHENG Gang, DONG Dianwen, et al. Application research on process control system of grain dryer[J]. Grain Processing,2007(5):50-53. (in Chinese)

[8] 李业德,李业刚. 顺流式谷物干燥机的模糊控制系统[J]. 农业工程学报,2002,18(1):162-164.
LI Yede, LI Yegang. Fuzzy control system for grain dryer[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(1):162-164. (in Chinese)

[9] 师建芳,刘清,谢奇珍,等. 新型混流式粮食干燥机的应用[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊2):15-19.
SHI Jianfang, LIU Qing, XIE Qizhen, et al. Application of new mixed-flow grain dryer[J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(Supp. 2):15-19. (in Chinese)

[10] 陈怡群,常春,胡志超,等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析[J]. 农业工程学报,2009,25(7):255-259.
CHEN Yiqun, CHANG Chun, HU Zhichao, et al. Simulation and analysis of drying process for recirculating grain dryer[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(7):255-259. (in Chinese)

[11] 张幸彪. 5HSZ-R-12 型循环式粮食干燥机传动系统研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
ZHANG Xingbiao. Study on the transmission system of 5HSZ-R-12 circulating grain dryer[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University,2017. (in Chinese)

[12] 史德才,孙艳辉,史乾军,等. 5HY-50 型低温循环粮食干燥机设计[J]. 农产品加工,2018,17(8):60-62.
SHI Decai, SUN Yanhui, SHI Qianjun, et al. Design of 5HY-50 low temperature circulating grain dryer[J]. Agricultural Products Processing, 2018, 17(8):60-62. (in Chinese)

[13] 李长友,麦智炜,方壮东,等. 种子循环干燥系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):242-248.
LI Changyou, MAI Zhiwei, FANG Zhuangdong, et al. Development of seed circulation drying system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):242-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140637&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.037. (in Chinese)

[14] 张仲欣,刘志军. 内置远红外电热管循环式干燥机工作参数的试验确定[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2004,25(1):1-4.
ZHANG Zhongxin, LIU Zhijun. Experimental determination of operating parameters of a circulating dryer with built-in far-infrared electric heat pipe[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2004,25(1):1-4. (in Chinese)

[15] 肖培军,任金山. 低温循环式干燥机的常热源探讨[J]. 粮食与食品工业,2019,26(2):50-52.
XIAO Peijun, REN Jinshan. Discussion on the ordinary heat source of low temperature circulation dryer[J]. Food and Food Industry,2019,26(2):50-52. (in Chinese)

[16] MINEA V. Drying heat pumps—Part II : agro-food, biological and wood products[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3):659–673.

[17] MOHAMMADI I, TABATABAEKOLOOR R, MOTEVALI A. Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices[J]. Energy, 2018,170(9):149–158.

[18] WANG D C, ZHANG G, HAN Y P, et al. Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 51(8):2919–2924.

[19] 陈明,龚丽,赵锡和,等. 热泵干燥机干燥稻谷的试验研究[J]. 现代农业装备,2004,25(4):62–64.
CHEN Ming, GONG Li, ZHAO Xihe, et al. Experimental research on drying rice with heat pump dryer[J]. Modern Agricultural Equipment,2004,25(4):62–64. (in Chinese)

[20] 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 Weizhao, SHENG Wei, ZHANG Zhentao, et al. Experiment on performance of corn drying system with combination of heat pipe and multi-stage series[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(4):278–284. (in Chinese)

[21] 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 Juanling, DING Weimin, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of enclosed cycles[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(10):134–139. (in Chinese)

[22] 陈浩,刘振全,王汉芝,等. 台达 PLC 编程技术及应用案例[M]. 北京:化学工业出版社,2014.

[23] 李世超,曹如月,季宇寒,等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):40–49.
LI Shichao, CAO Ruyue, JI Yuhan, et al. Performance analysis and comparison of different types of steering wheel turning control motors in automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):40–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)

[24] 欧阳玉平,孙晗,洪添胜,等. 果园运输机钢丝绳损伤试验平台设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):118–128.
OUYANG Yuping, SUN Han, HONG Tiansheng, et al. Design and test of wire rope damage test platform for orchard transporter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):118–128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200714&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.014. (in Chinese)

[25] 张刚,胡洋洋,韩祥兰,等. 淡水珍珠蚌循环水养殖模式下分布式水质监控系统设计[J]. 农业工程学报,2020,36(7):239–247.
ZHANG Gang, HU Yangyang, HAN Xianglan, et al. Design of distributed water quality monitoring system under circulating water aquaculture mode of freshwater pearl mussels[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(7):239–247. (in Chinese)

[26] 章祥炜. 触摸屏应用技术从入门到精通[M]. 北京:化学工业出版社,2017.

[27] 於海明,刘浩鲁,张正伟,等. 基于喷气增焓技术的谷物干燥机热泵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):363–369.
YU Haiming, LIU Haolu, ZHANG Zhengwei, et al. Design and test of grain dryer heat pump based on vapor injection technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):363–369. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200540&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.040. (in Chinese)

[28] GB/T 16714—2007 连续式粮食干燥机[S].2007.

(上接第 357 页)

[21] LI X, WEI X, WANG H, et al. Relationship between protein denaturation and water holding capacity of pork during postmortem ageing[J]. Food Biophysics, 2018, 13(1):18–24.

[22] 马莹,杨菊梅,王松磊,等. 基于 LF-NMR 及成像技术分析牛肉贮藏水分含量变化[J]. 食品工业科技,2018,39(2):278–284.
MA Ying, YANG Jumei, WANG Songlei, et al. Analysis of water content in beef storage by LF-NMR and imaging technique[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(2):278–284. (in Chinese)

[23] BERTRAM H C, SCHAFER A, ROSENVOLD K, et al. Physical changes of significance for early post mortem water distribution in porcine *M. longissimus* [J]. Meat Science, 2004, 66(4):915–924.

[24] KRISTENSEN L, PURSLOW P P. The effect of ageing on the water-holding capacity of pork; role of cytoskeletal proteins [J]. Meat Science, 2001, 58(1):17–23.

[25] FAROUK M M, MUSTAFA N M, WU G, et al. The “sponge effect” hypothesis: an alternative explanation of the improvement in the waterholding capacity of meat with ageing [J]. Meat Science, 2012, 90(3):670–677.

[26] WARNER R D, GREENWOOD P L, PETHICK D W, et al. Genetic and environmental effects on meat quality [J]. Meat Science, 2010, 86(1):171–183.

[27] WARNER R D. The eating quality of meat—IV water-holding capacity and juiciness[M] // TOLDRÁ F. Lawrie’s meat science. 8th edition. Sawston: Woodhead Publishing, 2017:419–459.

[28] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness [J]. Meat Science, 2014, 98(3):520–532.