

基于物联网的热泵式低温循环粮食烘干机监控系统研究

左毅¹ 刘浩鲁² 陈子轩² 张士航¹ 王守元¹ 陈坤杰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: 针对热泵式低温循环粮食烘干机监控手段落后、信息化程度低等问题, 设计了基于物联网的热泵式低温循环烘干机监控系统。系统采用感知层、传输层和应用层相结合的体系架构, 以可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC) 和 HMI 触摸屏为核心, 设计开发控制系统, 实现对烘干机和热泵的实时监测、图形化显示、安全保护和自动化控制; 采用 Linux 的 CentOS 系统开发服务端系统框架, 通过 EG8000mini 模块将采集的数据接入 AP 基站并存储至数据库, 使用户可以通过计算机端或手机 APP 对热泵式低温循环粮食烘干机进行远程实时监控。试验验证结果显示, 系统通信成功率高于 98%, 对环境温度、热风温度、热风相对湿度及热风风速实时检测平均绝对误差分别为 0.3℃、0.26℃、1.2% 和 0.47 m/s, 可满足热泵式低温循环烘干机远程监控需求。

关键词: 粮食烘干机; 监控系统; 物联网; 实时监控

中图分类号: S24; TP23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)09-0442-08

OSID:



Design of Monitoring System for Heat Pump Grain Low Temperature Circulating Dryer Based on Internet of Things

ZUO Yi¹ LIU Haolu² CHEN Zixuan² ZHANG Shihang¹ WANG Shouyuan¹ CHEN Kunjie¹

(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: Aiming at the problems of backward monitoring means and low information level of heat pump low-temperature circulating food dryer, a monitor and control system of heat pump low-temperature circulating food dryer based on the Internet of things was designed and developed. The architecture design of the system used perception layer, transmission layer and application layer, and the system took programmable logic controller (PLC) and HMI touch screen as the core to design and develop a control system to realize real-time monitoring, graphical display, safety protection and automatic control of dryers and heat pumps. The server system framework was developed by Linux CentOS system. The data connected by EG8000mini module was sent to AP base station and stored in database. Users can remotely monitor and control the heat pump low temperature circulating food dryer through computer or mobile APP. The experimental results showed that the communication success rate of the system was higher than 98%, and the average absolute error of real-time detection of ambient temperature, hot air temperature, hot air humidity and hot air wind speed was 0.3℃, 0.26℃, 1.2% and 0.47 m/s, respectively, which can meet the remote monitor and control requirements of heat pump type low temperature circulation dryer.

Key words: grain dryer; monitoring system; Internet of things; real-time monitoring

0 引言

近年来, 粮食烘干机在我国的应用越来越广

泛^[1], 烘干中心的建设也越来越普遍, 粮食烘干机机械化水平显著提高^[2-3]。随着环保和“双碳”政策的实行, 热泵^[4]、红外^[5]、地热能和微波^[6]等热源设

收稿日期: 2023-12-25 修回日期: 2024-03-01

基金项目: 南京市现代农机装备与技术创新示范项目 (NJ[2022]06) 和江苏省科技计划专项资金项目 (BE2021305)

作者简介: 左毅 (1997—), 男, 博士生, 主要从事农业装备智能控制方法和技术研究, E-mail: 2021212014@stu.njau.edu.cn

通信作者: 陈坤杰 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术及智能化装备研究, E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

备越来越多地应用于粮食烘干,其中以空气源热泵为热源的低温循环烘干机在江淮地区得到广泛应用^[7]。由于热泵低温循环烘干机远比燃煤或燃油烘干机复杂,因此对控制、操作和安全性的要求更高^[8],但目前对热泵式低温循环烘干机控制系统的相关研究很少,现有的热泵式低温循环烘干机控制,都是采用两个独立系统分别对烘干机和热泵进行控制。不仅操作难度高、工作强度大,而且由于二者之间缺乏通讯联系,无法完全满足烘干工艺要求。

目前,在粮食烘干监控方面,国内外已开展了多项研究。杜永文等^[9]以分散式传感器和模拟信号集结器 adam4117 为硬件基础,研究开发了一套粮食烘干线运行信息的实时采集系统;陈林等^[10]设计了基于组态王开发监控系统软件的玉米果穗烘干监控系统,并通过 Access 数据库实现数据存储;张立辉等^[11]针对粮食的循环干燥,研制开发出测控系统,实现对含水率、粮食温度和热风温度等参数的实时监测。近年来,随着物联网技术在农业领域的发展^[12-14],有学者尝试进行了基于互联网技术的粮食烘干机远程监测系统研究。杨进民等^[15]研究开发了一套基于 GPRS 技术的烘干机监控系统;孟庆祥等^[16]开发了基于 GRM200 数据传输终端的烘干机监控系统,并实现对烘干机的远程操作。但是,上述研究均是针对烘干机本体的监控,没有对燃煤或燃油热源设备的监控,对于新近出现的热泵式粮食烘干机的监控,目前还缺乏相关研究报道。

本文针对热泵式低温循环粮食烘干机,设计开发一套基于物联网系统架构的远程监测与控制系统,使操作者能够通过网页端或手机 APP 端对多台热泵式低温循环烘干机进行远程实时监控,以降低粮食烘干操作的劳动强度、减少用工成本。

1 热泵式低温循环烘干机工作原理及监控系统方案设计

1.1 设备工作原理

热泵低温循环烘干机如图 1 所示,主要由烘干机本体、多级热泵系统及监控系统 3 部分构成。低温循环式烘干机为三久 CPR-165 型,其工作原理为:烘干仓内的粮食依次通过升降机谷斗、上螺旋输送机、排粮轮和下螺旋输送机作用,实现循环流动;热泵产生的热空气通过排风机输送至烘干仓,完成热质交换并带走粮食多余水分,最后经废气口排出^[17]。热泵系统由 5 组串联组成,每组都由压缩机、冷凝器、蒸发器和膨胀阀等部件组成^[18];低温空气依次穿过冷凝器实现逐级升温,启动不同组数热

泵系统可调节热空气源温度^[19-20]。

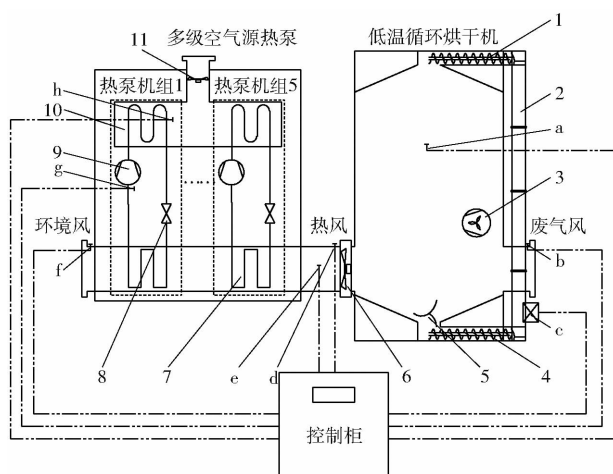


图 1 热泵低温循环烘干机示意图

Fig. 1 Schematic of heat pump low temperature circulation dryer

1. 上螺旋输送机 2. 提升电机 3. 除尘机 4. 下螺旋输送机
5. 排粮轮 6. 排风机 7. 冷凝器 8. 膨胀阀 9. 压缩机 10. 蒸发器 11. 蒸发风机
- a. 粮温测量装置 b. 废气温湿度测量装置
- c. 水分仪 d. 热风温湿度测量装置 e. 风速测量装置 f. 环境温度湿度测量装置
- g. 排气温度测量装置 h. 翅片温度测量装置

1.2 监控系统方案设计

影响粮食烘干的主要因素有热风温湿度、风速、粮温和粮食含水率。其中,热风温度是影响粮食烘干效率及烘干品质的最重要因素,需要精确控制;湿度虽然对烘干有一定的影响,但影响不显著;风速对烘干效率和降水速度有显著影响,会间接影响烘干品质;粮温会显著影响稻谷爆腰率,是影响稻谷烘干品质的一个重要指标;含水率不仅是粮食的重要指标,也是进行烘干控制的一个重要参数;废气温度与湿度对评价烘干能耗具有参考作用。因此,对这些参数进行监控,是监控系统必须具备的功能。

将热泵系统压缩机进出口管路的压力及出口管路排气温度控制在合理范围内,是压缩机安全运行的重要保障;蒸发器管路翅片温度会影响系统换热效果,进而影响多级空气源热泵的性能。因此,对上述参数进行实时监控很有必要。另外,还需要对监测信息进行汇总与分析,实现粮食烘干过程中各电机自动控制与安全保护以及多设备操作功能,以便操作人员通过现场触摸屏及计算机或手机 APP 端进行远程监控。

根据上述功能要求,设计开发基于可编程控制器与 4G 通信模块的热泵低温循环粮食烘干机一体化监控系统,如图 2 所示。系统由感知层、传输层和应用层组成,各个层之间通过广域的互联网相互连接,形成对热泵式低温循环烘干机系统信息的采集、传输、处理、计算,再到用户对信息的获取、控制的一

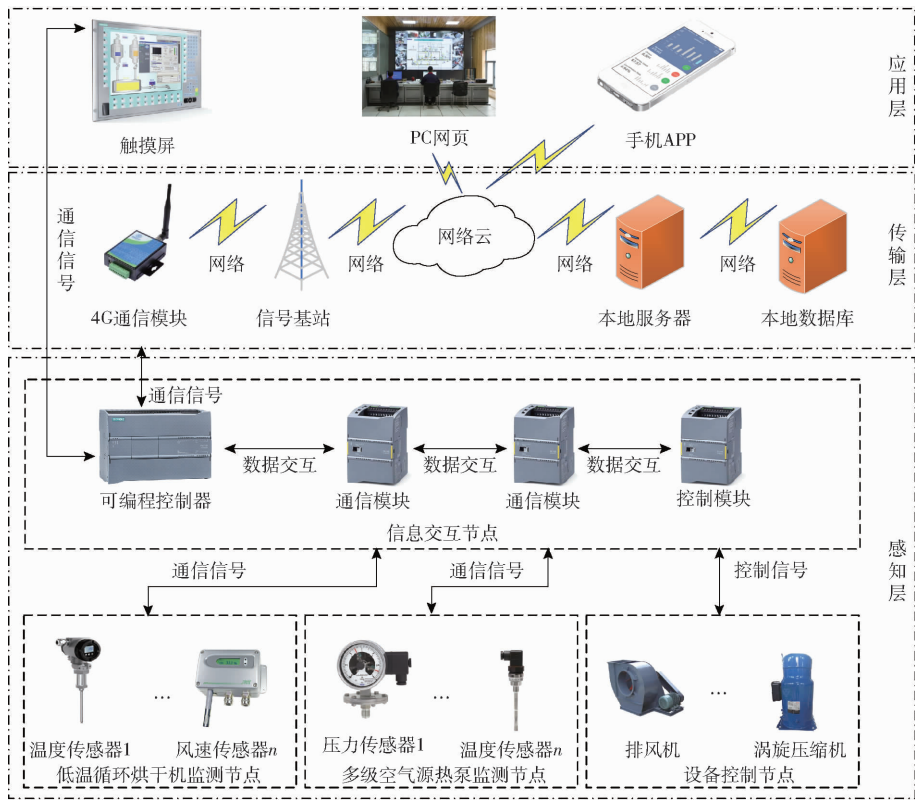


图2 基于物联网的监控系统整体架构

Fig. 2 Overall architecture of monitoring system based on Internet of things

站式服务^[21]。

(1)感知层主要包括低温循环烘干机监测节点、多级空气源热泵监测节点、设备控制节点和信息交互节点。各节点的传感器数据传输至通信模块,电机控制信号传输至控制模块,可编程控制器将信息整合打包发送至4G通信模块,然后数据通过网络发送至传输层基站。

(2)传输层主要由4G通信模块、信号基站、网络云和本地服务器组成,目的是将感知层所获得的数据通过网络传输至云端服务器,并下载至本地服务器存储。

(3)应用层主要是实现现场触摸屏对监控设备进行图形化显示、报警、控制命令下发等功能。计算机网页和手机APP通过云端服务器的接口获取数据,为下属用户提供远程监控服务。

2 硬件设计

2.1 硬件设备选型

鉴于粮食烘干机抖动和场地扬尘较大^[22],相关硬件设备需具备一定耐用性和防尘性,因此以PLC为核心控制器、触摸屏为人机界面、4G通信模块为信号传输器。控制量包括21个开关量、24个模拟量、3个RS485通信变量,PLC选用西门子S7-1200 CPU1217C控制器^[23],搭配3个通信模块CM1241、4个模拟量输入模块SM1231和1个数字量输出模

块SM1222;通信模块选用EG8000mini型4G模块,该模块与PLC有较好的兼容性;触摸屏选用精简KTP700 Basic PN型,通过PC/PPI电缆与PLC通信口连接实现对系统的监控^[24-25]。

温湿度传感器选用三河星仪CWS-21-X-A1-G0型,分别安装于进风口、热风入口和废气出风口。粮温传感器选用三河星仪CWDZ11-01-DZ-44型,布置于烘干仓中轴线上,从上至下等分式安装7个传感器,排气温度传感器和翅片温度传感器与粮温传感器同型号,分别位于压缩机出口管路和蒸发器翅片管路上;风速传感器选用北京中仪联控JY-GD680型,置于热风管路中间位置,以避免风口漩涡干扰,保证数据准确性。压力保护器选用曼洪威YK-01H型,安装于各压缩机进出气口。水分仪选用日本静冈CET II C型,安装于烘干仓底部出粮位置。

2.2 硬件电路设计

2.2.1 低温循环烘干机监测节点电路

在低温循环烘干机监测节点中,传感器采用24V直流供电,两线制传感器采用差分方式传输信号,24V+端连接开关电源V+,OUT信号端连接SM1231模块AI+端;四线制传感器供电端连接开关电源,输出端M1+与M2+分别连接至SM1231模块AI+端;SM1231模块的AI-端口并联接入开关电源V-端口。在线水分仪采用220V交流供电,

通信端口 RS485 +、RS485 -通过两芯屏蔽线连接至 CM1241 模块的 Rx/A、Tx/B 端口,屏蔽层 SG 接地以降低电磁干扰。

2.2.2 多级空气源热泵监测节点电路

在多级空气源热泵监测节点中,传感器采用上文接线方式。压力保护器两端分别接开关电源 V + 端口与 PLC 的 X 端口。电能传感器接线如图 3 所示,CT1 连接 A401、A402 端口并穿过动力线 L1,检测 L1 相电流,L2 与 L3 相采用同样接线方式,A1、B2、C3 端口与压缩机动力线并联,通过该方式检测压缩机总能耗,RS - 485 通讯端口连接 CM1241。图中 KMR、FRR 和 M 分别表示交流接触器、热保护继电器和压缩机。

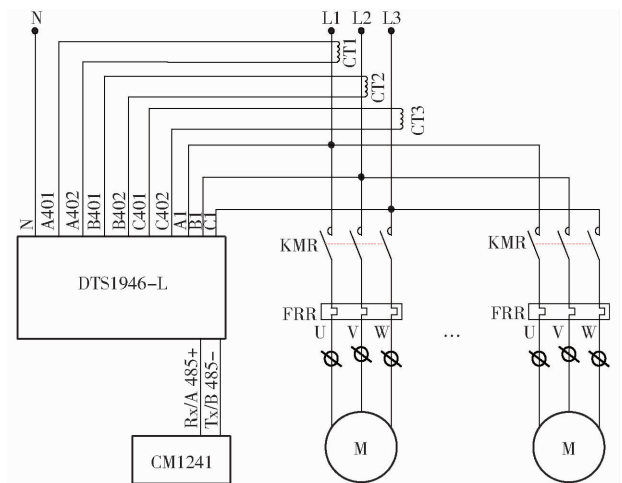


图3 电能传感器接线图

Fig.3 Electrical energy sensor wiring diagram

2.2.3 设备控制节点电路

设备控制节点采用有线连接方式,PLC 输出端口通过正泰 JZX - 22F(D)/2Z 型中间继电器与 CJX2 - 3210 型交流接触器传递控制信号,交流接触器与用电设备间连接正泰 NR2 - 36/Z 型热保护继电器,用于防止大功率设备过载,连接方式如图 4 所示。

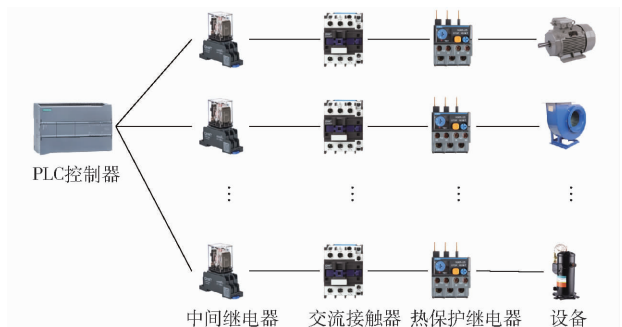


图4 设备控制节点接线

Fig.4 Equipment control node connection

2.2.4 信息交互节点电路

所有 SM1231 模块、SM1222 模块与 CM1241 模块通过背板总线与 PLC 连接,采用交互式通讯传输

数据。PLC 的 LAN1、LAN2 端口分别与 EG8000mini、KTP700 Basic PN 型触摸屏连接,数据传输采用 Profinet 协议。

3 软件系统设计

3.1 PLC 采集与控制程序

3.1.1 采集程序

(1) 电能采集程序

通过 TIA Portal 15 软件设置通信参数,包括操作模式为半双工(RS - 485)、通信地址设置为 1、波特率为 9 600 kb/s、奇偶校验为 0、数据位为 8 个字符和等待时间 1 000 ms。程序采用 Modbus - RTU 报文格式即“地址码-功能码-起始寄存器地址-寄存器个数-CRC 校验码”,数据传输方式为主机发送请求命令、从机响应请求并返回指定命令。

(2) 水分轮询采集程序

在线水分仪数据报文采用自定义报文格式:STX - MAC - FUNC - DATA - ETX - BCC。水分检测需分多个步骤进行,不同步骤有多种输出结果,且不同品种粮食检测时间不一样,采用常规编程易导致通信通道堵塞或步骤执行混乱,因此设计水分轮询算法,流程图如图 5 所示。

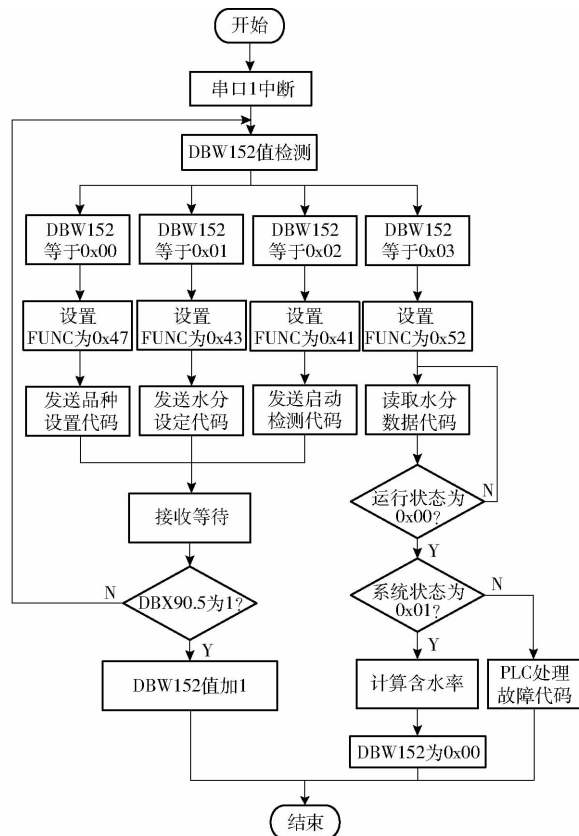


图5 水分仪轮询算法流程图

Fig.5 Flowchart of moisture polling communication

算法步骤如下:

(1)检测轮询地址 DBW152 为 0x00,将 FUNC

功能码设置为 0x47, 执行品种设置功能, 例如品种为粳稻, 发送命令码流 02 31 47 31 31 31 03 76, 发送完成进入接收等待状态, DBX90.5 为 1 表示通信成功, 将 DBW152 数值加 1, 若 DBX90.5 为 0 重新发送命令码流。

(2) 检测轮询地址 DBW152 为 0x01, 将 FUNC 功能码设置为 0x43, 发送水分设定命令, 例如设定含水率为 14.5%, 发送命令码流 02 31 43 31 34 35 03 73。

(3) 检测轮询地址 DBW152 为 0x02, 将 FUNC 功能码设置为 0x41, 通过命令码流 02 31 41 53 54 41 03 07 启动含水率检测。

(4) 检测轮询地址 DBW152 为 0x03, 将 FUNC 功能码设置为 0x52, 通过命令码流 02 31 52 45 41 44 03 22 读取含水率, 返回数据中运行状态位为 0x01 表示含水率检测已完成, 若为 0x00 表示正在检测, 重新读取数据; 当系统状态为 0x01 表示当前检测数据有效, 若为 0x00 表示系统故障, 根据系统状态分别执行不同后续命令。

3.1.2 模拟量采集程序

PLC 接收到电流信号后需通过换算得到真实数值。PLC 将处理后传感器数据放入连续的系统存储区中, 便于远程服务器集中调用, 传感器数据存储地址如表 1 所示。

表 1 传感器数据存储地址

Tab.1 Sensor data storage address

变量名称	PLC 地址	变量含意
环境温度	VD0	多级空气源热泵进口温度
环境相对湿度	VD4	多级空气源热泵进口相对湿度
热风温度	VD8	烘干段风温
热风风速	VD12	热风管路中风速
⋮	⋮	⋮
翅片温度 4	VD104	4 号蒸发风机翅片温度
翅片温度 5	VD108	5 号蒸发风机翅片温度

3.1.3 自动控制程序

系统具有 4 种自动化工作模式: 进粮、循环降温、干燥和排粮, 采用 SFC 算法编程^[26]; 操作人员根据需求设置相应参数、选择工作模式并启动设备, PLC 根据实时采集的信息, 自动调整工作状态, 完成任务后自动停机。

3.1.4 安全保护程序

通过不同层面的保护程序监测热泵式低温循环烘干机运行状态, 取代传统的人工监测干燥过程。系统设有以下保护程序: ①热保护程序: 系统接收到热保护继电器信号, 立即停止所有设备运转, 发送故障信息。②风量保护程序: 系统根据风速计算单位

时间风量 Q , 若 $7\ 200\ \text{m}^3/\text{h} < Q < 12\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, 发送风量不足信息, 若 $Q \leq 7\ 200\ \text{m}^3/\text{h}$, 立即停止所有设备运转, 发送故障信息。③压缩机高低压保护程序: 当高压或者低压触发时, 关闭对应压缩机, 压力恢复正常延时 3 min 再次启动压缩机, 若压缩机多次停机, 停止该压缩机运转, 并发送压缩机故障信息。④结霜保护程序: 当翅片温度小于 0°C , 关闭低温循环烘干机与蒸发风机, 四通阀启动, 待翅片温度恢复至 15°C , 关闭四通阀, 重新开始干燥^[27]。⑤排气保护程序: 当排气温度大于 120°C , 启动喷液阀直至排气温度低于 110°C ^[28]。

3.2 触摸屏组态程序

触摸屏主要功能包括: 控制设备启停、显示监测信息和显示报警画面等。在 PC 端 TIA Portal 15 软件进行组态开发, 首先建立与 PLC 的数据连接, 在“设备和网络”窗口建立 PLC 与触摸屏的以太网连接, 设置触摸屏端口 IP 地址: 192.168.0.1, PLC 端口 IP 地址: 192.168.0.1; 接着建立触摸屏变量并构建与相应 PLC 变量的映射关系^[29]; 然后设计各功能动画界面, 将变量添加至显示界面, 系统设有控制、监测和报警等界面。

3.3 服务端系统框架

服务器采用 Linux 的 CentOS 系统, 开发工具为 IntelliJ IDEA 和 Android studio, 整体架构如图 6 所示。后台服务中心主要有:

(1) 监测设备接入 API 程序: 主要用于获取和控制各种传感器、电机等监控设备上传的信息并将其存入 MySQL 数据库中。采用 Netty 高并发框架, 利用 maven 构建 Jar 包, 部署在 CentOS 服务器上^[30]。

(2) 后台管理信息 API 程序: 为 PC 端浏览器访问提供接口。采用 SpringMVC 框架。使用 Mybatis 框架实现对数据库表的操作^[31]。

(3) PC 端访问页面程序: 主要使用 html、css、js 开发, 用户可通过 PC 端页面全面监控设备, 包括监测设备运行状态、设备操作、查看传感器历史数据和

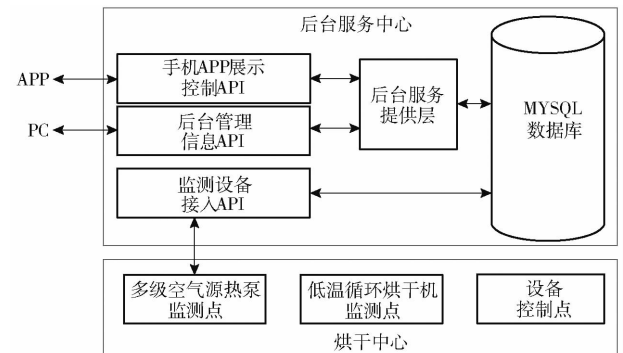


图 6 服务器总体框架图

Fig.6 Server's overall framework

历史报警信息等。

(4)手机 APP 程序:通过 Gradle 工具构建基于 Android 系统的 APP 软件;使用 HTTP 协议与服务器建立连接,数据格式为 Json^[32],用户通过 APP 可随时随地监控干燥过程,为用户提供更好的便利性。

(5)整个平台的数据库使用 MYSQL 数据库,该数据库记录每次粮食干燥设备运行状态、传感器监测数据,为设备维护提供数据支撑。

4 试验与结果分析

2022 年 10 月 10 日于江苏省南京市高淳区东坝镇禾田农机服务专业合作社,进行系统的试验验证,考察系统通信稳定性、数据准确性和远程监控效能。

4.1 通信稳定性

设 4G 通信模块每隔 1 min 向服务器上报告一次数据,对 2022 年 10 月 15 日—11 月 15 日期间的 5 次稻谷干燥试验进行数据采集,在总计 80 h 干燥时间内,多级空气源热泵监测点应向服务器上报告数据 115 200 条,低温循环烘干机应上报数据 72 000 条,设备控制节点应上报 52 800 条。读取 MYSQL 数据库的日志并分析,结果如表 2 所示。结果表明,系统通信平均数据丢失率约 1.76%,成功率达到 98.24%,表明系统稳定性较好。

表 2 数据丢失率分布

Tab. 2 Distribution of data loss rate

数据源	数据量/条	数据丢失率/%
热泵监测点	112 965	1.94
烘干机监测点	70 502	2.08
设备控制节点	52 140	1.25
平均值		1.76

4.2 数据准确性

以手持式温湿度检测仪和 tsi9535-A 型热线风速仪每隔 30 min 测量的数据为参考,进行环境温度、热风温度、热风相对湿度和热风风速 4 个参数检测的误差试验,结果如图 7 所示。系统检测的环境温度平均绝对误差为 0.3℃,热风温度误差为 0.26℃,热风相对湿度误差为 1.2%,热风风速误差为 0.47 m/s,各项误差都很小,完全满足粮食干燥监测的使用需求。

4.3 远程监控测试

网页端和安卓手机 APP 端监控界面如图 8 所示,主要功能包括:传感器实时监测、参数设置、设备状态监控、故障报警提醒和天气监测,用户可查看设

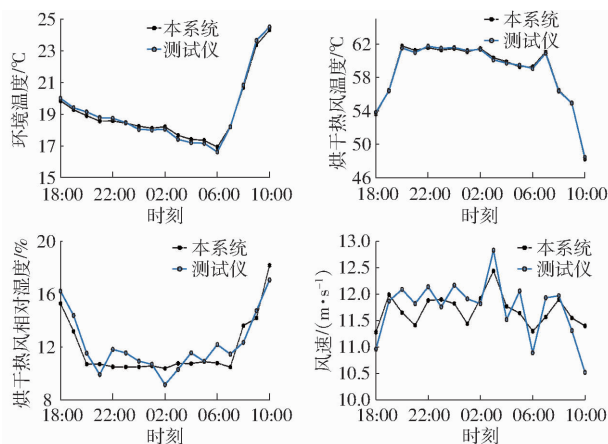
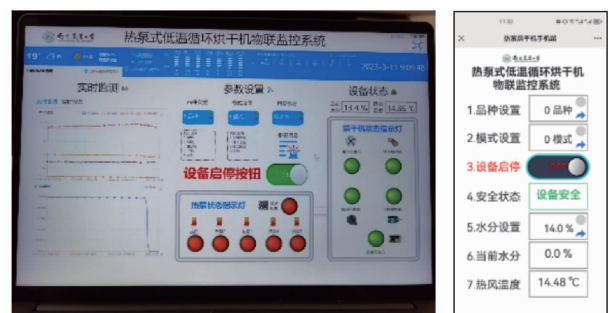


图 7 温度、湿度对比测试

Fig. 7 Comparison test charts of temperature and humidity



(a) 网页端界面

(b) 手机端界面

图 8 远程应用测试界面

Fig. 8 Remote application test interfaces

备当前状态,也能通过云端服务器查看设备历史运行状态,用户可以随时随地了解设备状态并对烘干系统进行远程控制。

5 结论

(1)所设计开发的基于物联网热泵式粮食低温循环烘干机监控系统,可使用户通过网页端和手机 APP 端实现对多级空气源热泵参数(压力、翅片温度、排气温度、环境温度、环境湿度、有功功率和能耗)、低温循环烘干机参数(热风温度、热风风速、粮食温度、废气温度、废气湿度和含水率)实时监控。整个系统以 PLC 为控制核心,实现了对热泵式低温循环烘干机的自动控制和安全生产。

(2)试验结果表明,该系统的通信成功率高于 98%,对环境温度、热风温度、热风相对湿度及热风风速实时检测的平均绝对误差分别为 0.3℃、0.26℃、1.2% 和 0.47 m/s,可满足粮食干燥监控需求。

(3)实际生产显示,系统运行稳定、自动化程度高、安全保护功能全面,可实现远程集中控制,节约人力、降低设备安全隐患,具备较好的实用性与可操作性。

参 考 文 献

- [1] 车刚,王洪超,万霖,等.水稻干燥变温混配装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(2):386-392,411.
CHE Gang, WANG Hongchao, WAN Lin, et al. Design and test of varying temperature mixing device on paddy rice drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2):386-392,411. (in Chinese)
- [2] 李长友,张焯,麦智炜.高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(4):231-235.
LI Changyou, ZHANG Ye, MAI Zhiwei. Design and experiment of dryer for high moisture grain storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):231-235. (in Chinese)
- [3] 陈坤杰,王硕,颜建春,等.石墨烯低温远红外辐射干燥稻谷干燥特性与品质研究[J].农业机械学报,2024,55(4):346-351,384.
CHEN Kunjie, WANG Shuo, YAN Jianchun, et al. Drying characteristics and quality of paddy under low temperatures and far-infrared drying conditions of graphene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4):346-351,384. (in Chinese)
- [4] LIU H L, YOUSAF K, YU Z, et al. Drying process optimization of garlic slices in closed-loop heat pump drying system by Box-Behnken design[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16190.
- [5] ZHOU X, LIU L, FU P, et al. Effects of infrared radiation drying and heat pump drying combined with tempering on the quality of long-grain paddy rice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(11): 2448-2456.
- [6] 于海明,祁联星,胡玉辉,等.多层盘式秧盘热风辅助微波干燥机优化设计与性能试验[J].农业机械学报,2023,54(11):397-411.
YU Haiming, QI Lianxing, HU Yuhui, et al. Optimization design and performance test of multi-layer tray straw tray hot air assisted microwave drying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):397-411. (in Chinese)
- [7] 张华光.政策赋能 粮食烘干机市场走出低谷[J].江苏农机化,2022(4):46-49.
- [8] 於海明,刘浩鲁,张正伟,等.基于喷气增焐技术的谷物干燥机热泵装置设计与试验[J].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):363-369. (in Chinese)
- [9] 杜永文,刘伟,朱晓阳.基于Labview的种子烘干线信息采集监控系统[J].自动化与仪器仪表,2014(2):120-122.
- [10] 陈林,王广万,赵武云.基于组态王的玉米果穗烘干监控系统的设计[J].中国农机化学报,2015,36(1):160-164.
CHEN Lin, WANG Guangwan, ZHAO Wuyun. Design of monitoring system for corn ear drying based on Kingview[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1): 160-164. (in Chinese)
- [11] 张立辉,魏立明,李春良.循环谷物干燥机测控系统的设计[J].江苏农业科学,2017,45(1):211-213.
- [12] 赵继政,庄蒲宁,石富磊,等.基于物联网技术的奶牛瘤胃pH值和温度监测系统研究[J].农业机械学报,2022,53(2):291-298,308.
ZHAO Jizheng, ZHUANG Puning, SHI Fulei, et al. Design and experiment of rumen pH value and temperature monitoring system for dairy cows based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2):291-298,308. (in Chinese)
- [13] 高鹏,杨明欣,周平,等.基于物联网和Deep-LSTM的茶树净光合速率动态预测模型[J].农业工程学报,2022,38(4):159-168.
GAO Peng, YANG Mingxin, ZHOU Ping, et al. Dynamic prediction model for the net photosynthetic rate of tea plants based on Internet of Things and Deep-LSTM[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 159-168. (in Chinese)
- [14] 左轩夷,张海瑜,葛蔚,等.基于4G网络的气调保鲜配气远程监控系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):416-424,458.
ZUO Xuanyi, ZHANG Haiyu, GE Wei, et al. Design and experiment of gases distribution and remote monitoring system for modified atmosphere packaging based on 4G network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):416-424,458. (in Chinese)
- [15] 杨进民,方雨昊.带有人机交互与远程监控的粮食烘干机控制系统设计[J].轻工科技,2021,37(12):88-89.
- [16] 孟庆祥,朱世伟,王岩,等.基于物联网大型烘干机远程监控系统关键技术研究[J].自动化与仪表,2019,34(5):60-63,100.
MENG Qingxiang, ZHU Shiwei, WANG Yan, et al. Research on key technologies of remote monitoring system for large dryer based on internet of things[J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(5):60-63,100. (in Chinese)
- [17] 钟嘉豪,李长友,黄嘉禧,等.基于BP神经网络的5HNH-15干燥机出粮水分研究[J].农机化研究,2023,45(4):1-7,14.
ZHONG Jiahao, LI Changyou, HUANG Jiayi, et al. Research on grain moisture of 5HNH-15 dryer based on BP neural network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(4):1-7,14. (in Chinese)
- [18] 李振博,武卫东,孔德军,等.辅助冷凝器冷却水进水温度对闭式热泵干燥系统性能的影响[J].制冷技术,2020,

40(4):55-61.

- LI Zhenbo, WU Weidong, KONG Dejun, et al. Effect of cooling water inlet temperature of auxiliary condenser on performance of closed heat pump drying system[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4):55-61. (in Chinese)
- [19] YOUSAF K, LIU H L, GAO X, et al. Influence of environmental conditions on drying efficiency and heat pump performance in closed and open loop drying of paddy[J]. Drying Technology, 2020, 38(16):2217-2230.
- [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 heat pump equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):278-284. (in Chinese)
- [21] 史兵, 赵德安, 刘星桥, 等. 基于无线传感网络的规模化水产养殖智能监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):136-140.
SHI Bing, ZHAO Dean, LIU Xingqiao, et al. Intelligent monitoring system for industrialized aquaculture based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):136-140. (in Chinese)
- [22] 郭善辉, 茅慧莲. 大中型粮食烘干设施的选址和工艺设计[J]. 现代食品, 2018(16):174-177.
- [23] 季仲致, 王文洪, 吴文峰, 等. 基于 PLC 的新能源汽车线束端子生产平台控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7):137-140, 156.
JI Zhongzhi, WANG Wenhong, WU Wenfeng, et al. Research on control system of new energy vehicle harness terminal production platform based on PLC technology[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(7):137-140, 156. (in Chinese)
- [24] 苏志远, 方壮东, 李长友. 基于 PLC 的循环式粮食干燥机控制系统设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(9):64-69.
SU Zhiyuan, FANG Zhuangdong, LI Changyou. Design of control system for circulating grain dryer based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(9):64-69. (in Chinese)
- [25] 魏佳, 张政, 赵芳芳, 等. 鲜食葡萄 SO₂ 气体精准熏蒸保鲜控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):260-268.
WEI Jia, ZHANG Zheng, ZHAO Fangfang, et al. Design of sulfur dioxide automatic control fumigation system for table grape preservation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1):260-268. (in Chinese)
- [26] 陈坤杰, 左毅, 李和清, 等. 热泵式低温循环谷物干燥机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5):316-323.
CHEN Kunjie, ZUO Yi, LI Heqing, et al. Design and experiment of heat pump low-temperature circulating grain dryer control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):316-323. (in Chinese)
- [27] 牛建会, 步秋军. 空气源热泵自然冷源过冷制热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(6):45-50.
NIU Jianhui, BU QiuJun. Experimental study on heating performance of air-source heat pump with natural cold source subcooling[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6):45-50. (in Chinese)
- [28] 石含, 郑文科, 姜益强, 等. 制冷剂充注量对补气增焓热泵系统的影响[J]. 制冷学报, 2022, 43(6):114-120.
SHI Han, ZHENG Wenke, JIANG Yiqiang, et al. Effect of refrigerant charge on air-source heat pump system with vapor injection[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(6):114-120. (in Chinese)
- [29] 陈玉仑, 孙晨阳, 卢中山, 等. 基于可编程控制器的猪胴体喷淋冷却作业控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):273-278.
CHEN Yulun, SUN Chenyang, LU Zhongshan, et al. Design of control system for spray chilling operation of pig carcass based on PLC[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3):273-278. (in Chinese)
- [30] 赵华飞, 徐践, 张娜. 基于 Netty 的农业物联网服务器系统设计[J]. 现代农业科技, 2019(9):254-255.
ZHAO Huafei, XU Jian, ZHANG Na. Design of agricultural internet of things server system based on Netty[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(9):254-255. (in Chinese)
- [31] 曹守启, 葛照瑞, 张铮. 基于物联网的浮标水质监测系统与溶解氧浓度预测模型[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11):210-218.
CAO Shouqi, GE Zhaorui, ZHANG Zheng. Buoy water quality monitoring system and prediction model based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11):210-218. (in Chinese)
- [32] 周建华, 刘佳文, 蔡文静, 等. 基于 Android 及 JSON 的“友农”APP 设计与实现[J]. 计算机时代, 2020(3):40-43.
ZHOU Jianhua, LIU Jiawen, CAI Wenjing, et al. Design and implementation of “You Nong” APP based on Android and JSON [J]. Computer Era, 2020(3):40-43. (in Chinese)