

联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验

王金武 汤天永 唐 汉 徐常塑 周文琪 王 奇
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对联合收获机稻谷含水率实时检测过程中因样本含杂率高而导致精度和稳定性差的问题,搭建了兼具二次筛分除杂功能的稻谷实时采样台架,基于采样台架采用电容法设计了联合收获机稻谷含水率在线检测系统。设计了检测系统硬件电路,开发了上位机监控界面,实现了上位机和下位机之间的通信。分析了温度和含杂率变化对电容差值的影响规律,进行了采样台架性能试验,建立了电容差值、温度和稻谷含水率输出的关系模型,其二阶模型决定系数为 0.986 6,并对模型进行了验证。结果表明:采样台架筛分后的稻谷含杂率均小于 1.2%;室内试验时,检测系统最大误差为 0.42%,平均误差为 0.22%,检测装置平均相对误差不大于 1.25%;田间试验时,检测装置相对误差小于 3%,有效提高了在线检测精度。本研究可为稻谷含水率的在线获取提供参考。

关键词: 联合收获机; 稻谷含水率; 二次筛分除杂; 电容法; 在线检测

中图分类号: S225.4; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)03-0143-10 **OSID:** 

Design and Experiment of On-line Detection Device for Capacitive Paddy Rice Moisture Content of Combine Harvester

WANG Jinwu TANG Tianyong TANG Han XU Changsu ZHOU Wenqi WANG Qi
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the poor accuracy and low stability problems of the real-time measurement system of paddy rice moisture content in combine harvester, a real-time sampling platform for paddy rice was set up, based on which the real-time measurement system of paddy rice moisture content in combine harvester was designed by capacitance method. The hardware circuit of the detection system was designed and the monitor interface of the master computer was developed to realize the communication between the master computer and the slave computer. The master computer can display and store monitoring information in real time. The influence of temperature and impurity rate on capacitance difference was analyzed and the performance of the sampling platform was verified. The relation models of capacitance difference, temperature and paddy rice moisture content output were established. The coefficient of determination was 0.986 6, and the model was verified. The results showed that the impurity ratio of paddy rice was less than 1.2% after sieving by sampling platform. The maximum error of the detection system in laboratory testing was 0.42%, the average error was 0.22%, the average relative error of the detection device was no more than 1.25%. In the field validation test, the relative error of the detection device was less than 3%, which effectively improved the accuracy of on-line detection. The research result can provide a reference for on-line access of paddy rice moisture content.

Key words: combine harvester; paddy rice moisture content; secondary screening and impurity removal; capacitance method; on-line detection

0 引言

含水率是影响稻谷收获品质和储藏加工的重要

指标,含水率过高易导致稻谷腐烂变质^[1]。在收获过程中进行稻谷含水率在线检测,可以为稻谷后期的产量计算、交易价格和储存加工方式等提供数据

收稿日期: 2020-11-17 修回日期: 2020-12-21
基金项目: 国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)和黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目
作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com
通信作者: 王奇(1990—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作技术与智能农业装备研究,E-mail: wangqi_4034@163.com

参考^[2-4]。目前,国外 John Deere 公司生产的 C440 型联合收获机等均已安装稻谷含水率在线检测系统^[5],国内关于联合收获机稻谷含水率在线检测系统研究仍处于试验阶段,系统应用较少。因此,自主研发稻谷含水率在线检测系统对提高联合收获机信息化水平、保证稻谷储藏质量具有重要意义。

目前,稻谷含水率快速检测方法主要包括电阻法、电容法、微波法、红外法、核磁共振法、中子法和射频阻抗法等^[6-8]。其中,电容法具有适应性强、可靠性高、动态响应好和结构简单、易维护等优点^[9-11],国外联合收获机含水率在线检测系统普遍采用电容法进行检测^[12-13]。在谷物升运器侧面设计螺旋输送式采样机构,可循环检测所收获谷物的含水率,但检测样本直接取用收获谷物,并未考虑检测样本含杂率对检测精度的影响。文献[14]以 CAV424 芯片为核心,设计了一种谷物水分在线监测传感器,但传感器监测范围有限;文献[15]设计了平行板结构的联合收获机含水率在线检测装置,用于水稻和小麦含水率的在线检测,但检测周期较长,实时性较差;文献[16]设计了高频电容式谷物含水率在线监测装置,确定 10 MHz 的高频信号为监测装置的激励信号,同时对电容传感器极板的结构参数进行了仿真和优化,但并未考虑温度等环境因素对监测结果的干扰,且对监测结果数据直接进行拟合分析,导致误差较大。相关研究表明^[17-18],利用电容法检测作物品质时,杂质对检测结果产生的影响较大。采用电容法进行稻谷含水率检测的相关研究^[19-21],均直接取用收获的稻谷进行检测,并未考虑检测样本含杂率对检测精度的影响。

针对联合收获机稻谷含水率在线检测中因样本含杂率高而导致精度差的问题,本文搭建兼具二次筛分除杂功能的稻谷实时采样台架,基于采样台架采用电容法设计联合收获机稻谷含水率在线检测系统,并进行温度和含杂率影响试验、采样台架性能试验、室内标定与验证试验和田间验证试验,以期保证含水率在线检测装置的精度和稳定性。

1 检测装置整体设计

1.1 稻谷采样台架工作原理与结构设计

通过前期试验研究可知,利用电容法检测稻谷含水率时,样本含杂率高,对系统中电容传感器检测值影响大,导致数据拟合的结果无法反映真实含水率,基于检测样本应具有低含杂或无含杂以提高系统精度的思想,搭建了兼具二次筛分除杂功能的采样台架,以保证检测系统的精度。采样台架结构如图 1 所示,主要由入料斗、筛孔分离筒、聚集器上段、

机架、聚集器下段、信号检测腔、排粮轮、弃样电机、质量传感器、采样电机、螺旋输送器等部件构成。

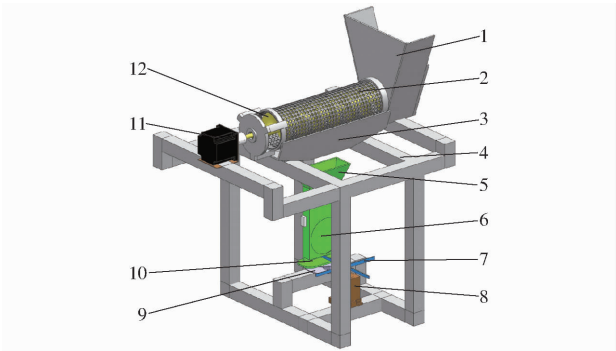


图 1 稻谷采样台架结构图

Fig. 1 Structure diagram of paddy rice sample platform
1. 入料斗 2. 筛孔分离筒 3. 聚集器上段 4. 机架 5. 聚集器下段 6. 信号检测腔 7. 排粮轮 8. 弃样电机 9. 质量传感器 10. 排样口 11. 采样电机 12. 螺旋输送机

采样台架工作流程分为粮箱进粮、采样台架取样、二次筛分除杂、信号检测腔存粮待测、排粮轮匀速排粮 5 个阶段,如图 2 所示。本研究在粮箱进粮阶段,完成采样台架安装位置确定,根据粮箱内尺寸结构完成采样台架总体设计,保证检测装置有效采样且样本具有低含杂率,避免因样本含杂率过高影响检测精度。

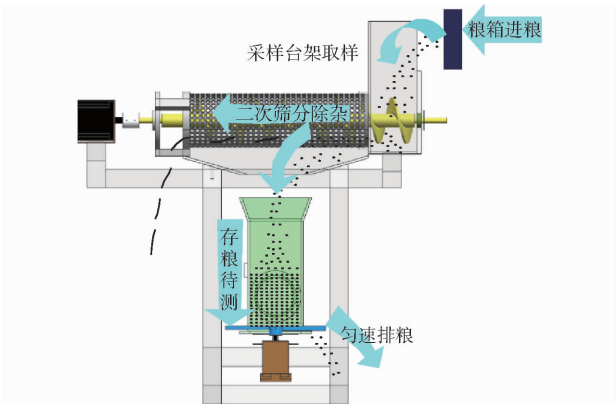


图 2 采样台架工作流程示意图

Fig. 2 Schematic of sampling platform workflow

采样台架的入料斗设计为二次料斗形式,以减小稻谷结拱现象出现^[22-24];采用螺旋输送机与筛孔分离筒配合的形式,进行样本的输送和二次筛分除杂;为了保证信号检测腔内稻谷快速充满且防止物料过多造成堵塞现象,在筛孔分离筒下方设计两段形式的物料聚集器,上段收集筛分的稻谷,下段与信号检测腔连接,信号检测腔侧面安装电容传感器,下方设有排样口,同时设计匀速排粮轮,以此更新信号检测腔内稻谷,保证检测数据的实时性和物料密度的稳定性。

采样台架程序控制流程如图 3 所示。采样台架开始工作时,质量传感器和采样电机工作,质量传感

器检测当前时刻 t 信号检测腔内稻谷样本质量 $m(t)$ ；当 $m(t) > M_1$ (M_1 为稻谷完全填充信号检测腔内电容传感器时的质量) 时, 弃样电机开始工作, 开始拟合分析含水率; 当 $m(t) > M_2$ (M_2 为稻谷充满信号检测腔时的质量) 时, 若检测到终止命令 ($i = 1$), 采样台架停止运行, 程序结束, 若未检测到终止命令, 采样电机停止工作, 直到 $m(t) < M_2$ 时, 采样电机再次工作, 完成采样台架的一个控制周期。

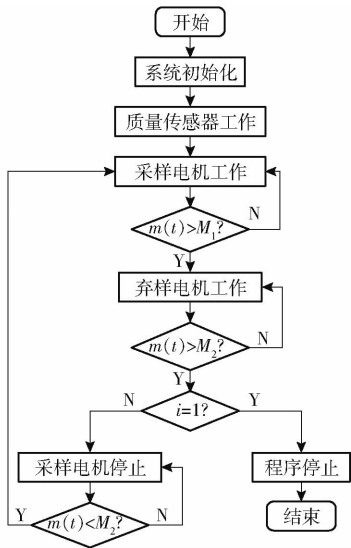


图 3 采样台架程序控制流程图

Fig. 3 Program control flowchart of sampling platform

1.2 稻谷含水率检测原理

电容法检测稻谷含水率是利用水和稻谷具有不同的介电特性, 当含水率不同的稻谷充满信号检测腔内电容传感器时, 传感器检测的电容不同。

当稻谷在信号检测腔中的质量达到开始拟合分析含水率的条件时, 传感器输出电容 C 为

$$C = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_r}{d} \tag{1}$$

式中 S ——极板相对面积, m^2
 ε_0 ——真空介质的介电常数, F/m
 ε_r ——极板间物料相对介电常数
 d ——极板间距, m

极板间的介质包括干燥的稻谷、水分和空气, 则总体积 V 和物料的相对介电常数可表示为

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \tag{2}$$

$$\varepsilon_r = \frac{V_1}{V}\varepsilon_1 + \frac{V_2}{V}\varepsilon_2 + \frac{V_3}{V}\varepsilon_3 \tag{3}$$

式中 V_1 ——干燥稻谷在极板间的体积, m^3
 V_2 ——水分在极板间的体积, m^3
 V_3 ——空气在极板间的体积, m^3
 ε_1 ——干燥稻谷的相对介电常数
 ε_2 ——水分的相对介电常数
 ε_3 ——空气的相对介电常数

将式(3)代入式(1), 则

$$C = \frac{S\varepsilon_0}{d} \left(\frac{V_1}{V}\varepsilon_1 + \frac{V_2}{V}\varepsilon_2 + \frac{V_3}{V}\varepsilon_3 \right) \tag{4}$$
$$e = V_3/V$$

式中 e ——极板间稻谷孔隙比

根据含水率的定义可知, 稻谷含水率 ω 为

$$\omega = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \times 100\% \tag{5}$$

式中 ρ_1 ——干燥稻谷密度, kg/m^3

ρ_2 ——水分密度, kg/m^3

电容传感器设计完成后, S 、 e 、 d 均为定值, 同时 ρ_1 、 ρ_2 、 ε_0 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为已知值, 因此令

$$K_1 = \frac{S\varepsilon_0\rho_2(1-e)(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{d\rho_1} \tag{6}$$

$$K_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \tag{7}$$

$$K_3 = \frac{S\varepsilon_0}{d}(1-e)\varepsilon_2 \tag{8}$$

$$K_4 = \frac{S\varepsilon_0}{d}e\varepsilon_3 \tag{9}$$

根据式(4)~(9)可得

$$C = K_1 \left(\frac{\omega}{1-\omega} + K_2 \right) + K_3 + K_4 \tag{10}$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 ——传感器结构常数

由式(10)可知, 根据电容 C 可计算稻谷含水率 ω , 但在电容传感器工作时, 相对介电常数 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 易受温度的影响。因此, 本研究以电容传感器检测稻谷电容为主, 温度传感器检测温度进行数据偏差校核, 由 2 种传感器检测值共同完成稻谷含水率在线拟合分析。

1.3 检测装置总体方案设计

检测装置包括采样台架和检测系统两部分。其中采样台架内含采样电机(86 步进电机)、弃样电机(57 步进电机)、2 台 HB860 型步进电机驱动器和 HX711 型质量传感器以及相关控制电路; 检测系统主要包括 STM32 开发板(内含 STM32F103C8T6 微控制器)、电容传感器、AD7746 电容数字转换芯片、AD8515 运算放大器、DHT22 型温湿度传感器、24 V 直流电源、LM2596S 型可调直流降压稳压器、I/O 传感器扩展板、上位机 CP2102 通信芯片 TTL 转 USB 模块、64GB USB 闪存驱动器和上位机监控界面以及相关控制电路, 检测装置结构框图如图 4 所示。

检测装置开始工作时, 收获稻谷经联合收获机粮箱进粮口, 部分落入入料斗, 通过采样电机带动螺旋输送机进行采样, 稻谷经筛孔分离筒, 进行二次筛分除杂, 筛分后的稻谷经聚集器, 自由下落至信号检

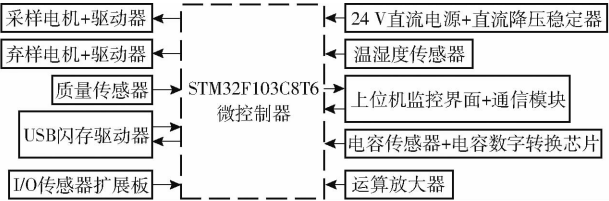


图 4 检测装置结构框图

Fig. 4 Block diagram of detection device

测腔内电容传感器极板间,电容传感器、质量传感器

和温湿度传感器检测到信号检测腔内稻谷数据信息后,数据信息经 STM32 开发板传输至上位机,上位机根据传感器检测的电容和温度拟合分析出检测样本的含水率示值,进行数据显示、储存,以便后续分析。同时可通过上位机操控装置各工作部件,检测后的稻谷堆积在排样口,弃样电机驱动排粮轮匀速转动,逐渐排出稻谷至粮箱,完成一个工作周期。其工作原理如图 5 所示。

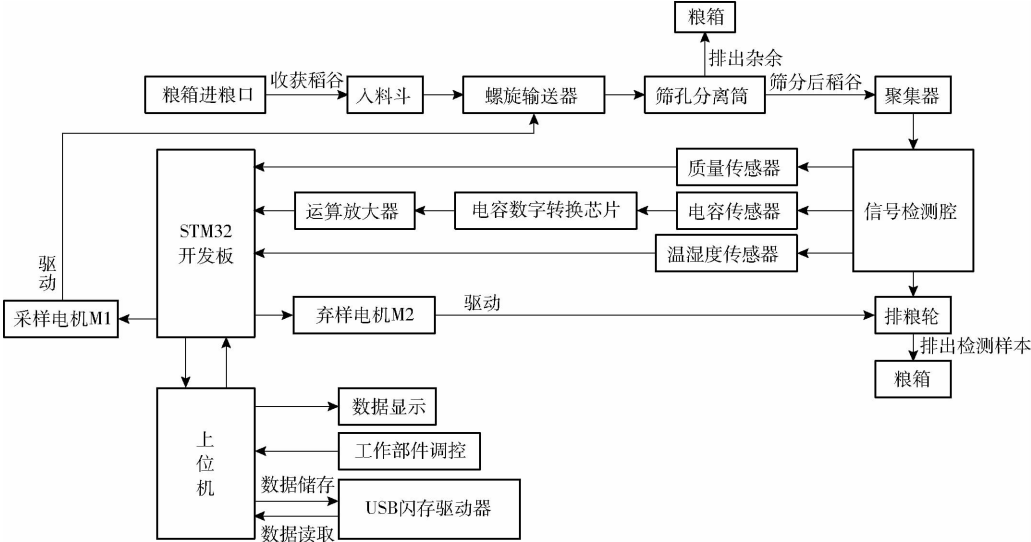


图 5 检测装置工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of detection device

2 稻谷含水率检测系统设计

2.1 硬件设计

2.1.1 降压稳压电源模块

本系统采用 24 V 直流锂电池为系统供电,系统各模块需要的工作电压不同,因此需将电源电压进行调节,选用 LM2596S 型降压稳压电源模块,将输入电压 24 V 降至 5 V 为控制器供电,以满足系统要求,电路如图 6 所示。

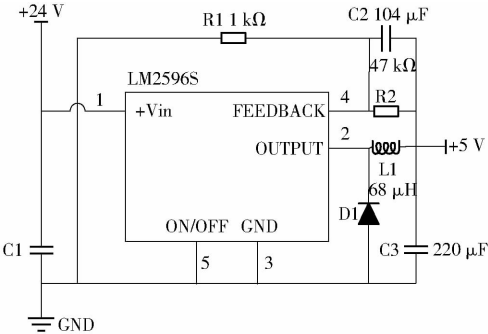


图 6 降压稳压电源电路图

Fig. 6 Circuit diagram of step-down regulated power supply

2.1.2 电容传感器模块

电容传感器采用双圆形平行板结构。极板材料选用密度小的铝箔,以减小传感器的质量;同时为了

减小电容传感器的边缘效应,在电容传感器极板 I 外,设计保护极板,其具体结构如图 7 所示。由于电容传感器极板间距越小、极板厚度越薄、极板相对面积越大,电容传感器的边缘效应减小得越显著^[25-27],同时考虑到稻谷流通性、传感器强度和体积等问题,最终电容传感器极板间距设计为 20 mm,极板厚度设计为 0.5 mm,极板 I 直径设计为 80 mm,极板 II 直径设计为 110 mm,保护极板内径设计为 90 mm,外径设计为 110 mm,极板 I、极板 II 和保护极板均采用屏蔽线连接电路。



图 7 传感器结构图

Fig. 7 Structure diagram of sensor

1. 保护极板 2. 极板 I 3. 极板 II

电容传感器是检测系统的核心部件,在对稻谷电容检测时,需要响应速度快、准确率高、稳定性强的电路,最终确定 AD7746 作为本系统的电容数字转换芯片进行电路连接。在电容转换期间,电容传感器 Cx 连接在激励源和 $\Sigma - \Delta$ 调制器之间,由激励

源对 C_x 发送方波激励信号, $\Sigma - \Delta$ 调制器连续采集流过 C_x 的电荷且由数字滤波器处理, 输出的数据经校核调整后, 即可通过串行接口读取最终结果数据, 数据采集原理简化框图如图 8 所示。

为扩大含水率检测范围, 将电容数字转换芯片 AD7746 在原有量程 ($\pm 4 \text{ pF}$) 基础上扩大 25 倍, 以增加其检测范围, 电路如图 9 所示。

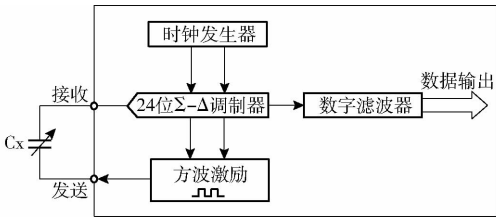


图 8 数据采集原理简化框图

Fig. 8 Simplified block diagram of data acquisition principle

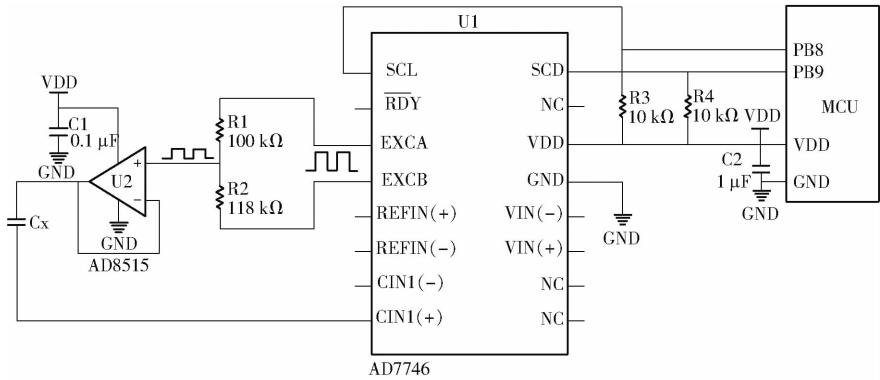


图 9 电容传感器电路图

Fig. 9 Circuit diagram of capacitance sensor

2.1.3 温度传感器模块

检测系统的温度由温湿度传感器进行检测, 采用 DHT22 型数字温湿度传感器, 其具有响应速度快、抗干扰能力强等优点, 为单线制串行接口, 电路如图 10 所示。

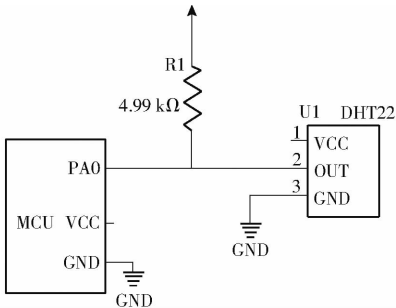


图 10 温度传感器电路图

Fig. 10 Circuit diagram of temperature sensor

2.1.4 质量传感器模块

检测装置的质量是通过质量传感器检测, 质量传感器选用应变式电阻传感器 (量程为 5 kg, 精度为 $\pm 1 \text{ g}$)。其具有响应速度快, 精准度高的优点, 为防止外界环境干扰, 应变式电阻传感器通过 HX711 芯片将模拟信号扩大一倍后, 再转换成数字信号被控制器接收, 这样传输数据可防止产生过大的误差, 电路如图 11 所示。

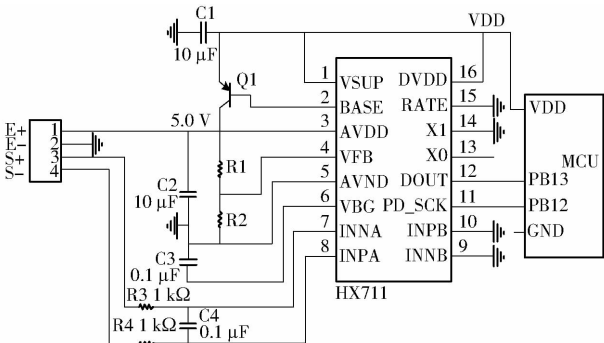


图 11 质量传感器电路图

Fig. 11 Circuit diagram of quality sensor

24 V 直流电源供电, 通过控制使能信号、方向信号和脉冲信号的方式, 改变步进电机的工作状态, 电路如图 12 所示。

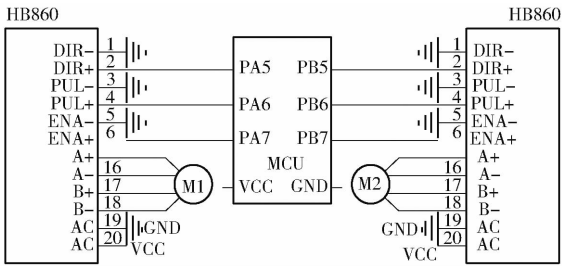


图 12 步进电机电路图

Fig. 12 Circuit diagram of stepper motor

2.1.5 步进电机模块

检测装置采样和弃样分别通过步进电机控制螺旋输送器和排粮轮实现; 采样和弃样均使用 HB860 型驱动器对步进电机进行驱动, 其中采样电机选用 86 步进电机, 弃样电机选用 57 步进电机, 模块采用

2.1.6 上位机通信模块

为了将各模块检测到的数据信息传至上位机且能通过上位机控制各个模块, 故需将控制器与上位机建立通信, 选用 CP2102 芯片构成的 TTL 转 USB 模块, 以满足控制器与上位机通信, 电路如图 13

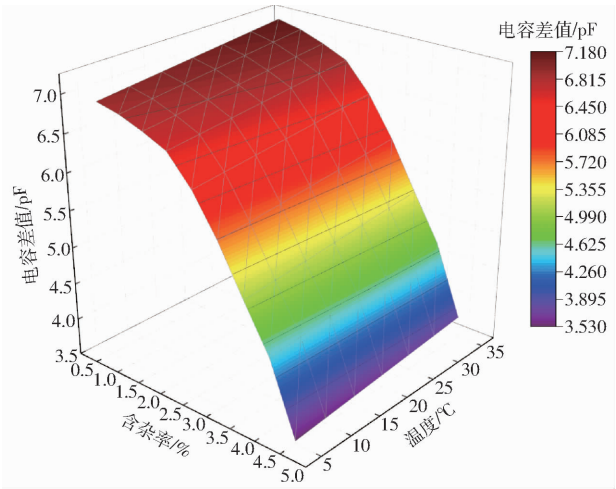


图 16 温度和含杂率对电容差值影响的变化曲面

Fig. 16 Influence of temperature and impurity rate on capacitance difference

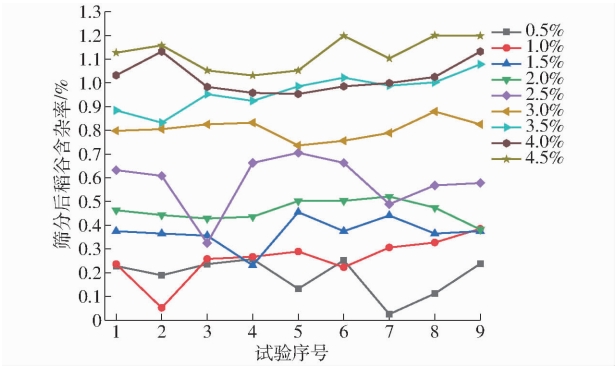


图 17 采样台架筛分效果

Fig. 17 Screening effect of sampling platform

除杂功能且能有效减小因检测样本含杂率过高而引起的检测误差,满足传感器精度要求和检测质量需求。

3.3 室内标定与验证试验

3.3.1 含水率模型建立

使用电子分析天平(精度 0.01 g)称取一定质量的黑梗 8 号稻谷样品装于塑料袋中,通过向稻谷中少量多次添加蒸馏水的方式配制含水率为 8% ~ 35% 的待测样品^[32]。试验时选取一份待测样品进行检测,用塑料膜密封信号检测腔口,放入 5℃ 的恒温恒湿箱中,将温度传感器插入同样装满待测样品的备用信号检测腔中,温度达到 5℃ 时,记录数据;依次切换 10、15、20、25、30、35℃ 温度值,每个含水率和温度下均重复 3 次,取平均值作为检测结果;检测完的水稻样本迅速称取 3 份,放入电热鼓风干燥机在 105℃ 干燥直至质量恒定,以 3 份稻谷含水率的平均值为试验样本的实际含水率。试验中稻谷样本的实际含水率为 8.71%、12.53%、19.71%、22.17%、26.14%、29.16% 和 32.50%,试验结果如表 1 所示。

表 1 不同含水率和温度下信号检测腔内极板间
稻谷电容差值

Tab.1 Capacitance difference of paddy rice between plates in signal detection cavity under different moisture contents and temperatures

含水率/ %	温度/℃							pF
	5	10	15	20	25	30	35	
8.71	3.62	3.67	3.68	3.77	3.79	3.81	3.87	
12.53	6.47	6.49	6.59	6.59	6.64	6.71	6.73	
19.71	8.63	8.71	8.74	8.77	8.85	8.91	8.97	
22.17	10.51	10.53	10.65	10.75	10.77	10.82	10.89	
26.14	12.54	12.57	12.67	12.74	12.81	12.87	12.93	
29.16	14.05	14.17	14.19	14.28	14.33	14.45	14.47	
32.50	14.85	14.97	15.00	15.02	15.15	15.25	15.30	

由表 1 可知,极板间电容差值随含水率和温度变化有明显的变化规律。利用 Design-Expert 10.0 软件对试验数据进行多元回归拟合,得到关于稻谷含水率与电容差值和温度之间一阶模型、二因素交互模型、二阶模型和三阶模型,各模型决定系数如表 2 所示。

表 2 各模型决定系数

Tab.2 Coefficient of determination of each model

模型类型	决定系数 R ²
一阶模型 Linear	0.986 5
二因素交互模型 2FI	0.986 3
二阶模型 Quadratic	0.986 6
三阶模型 Cubic	0.985 3

由表 2 可知,在各模型中二阶模型决定系数最大。所以采用二阶模型作为稻谷含水率多元回归拟合方程,该方程为

$$\omega = 1.930\,31 - 9.322\,94 \times 10^{-3} T + 1.739\,37 \Delta C + 3.103\,54 \times 10^{-5} T^2 + 1.888\,3 \times 10^{-2} \Delta C^2 - 1.681\,4 \times 10^{-3} T \Delta C \quad (11)$$

式中 T ——温度,℃

ΔC ——稻谷电容差值,pF

3.3.2 含水率模型的验证

为验证模型的可靠性,随机配备 20 份含水率 8% ~ 34% 之间的稻谷,使稻谷自由下落填充检测腔内电容传感器,检测系统进行检测,结果与干燥法测量值进行对比,每组试验检测 10 次,取平均值作为试验结果,结果如图 18 所示。

由图 18 可知,干燥法测量值与检测系统检测值之间呈线性相关,其决定系数为 0.998 94,其中检测系统最大误差为 0.42%,平均误差为 0.22%,检测结果较稳定,试验结果表明多元回归拟合方程能够描述稻谷含水率与电容差值和温度之间的关系。

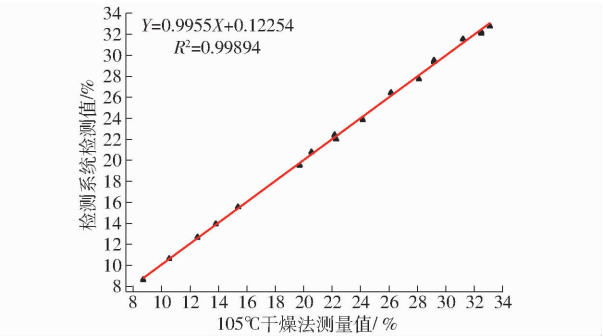


图 18 干燥法测量值与检测系统检测值对比
Fig. 18 Comparison of measured value of drying method and that of detection system

3.3.3 在线检测性能测试

为验证装置稻谷含水率在线检测性能,选用当日收获的黑粳 8 号稻谷样本,不做任何处理进行试验,稻谷含杂率在 0.3% ~ 4.7% 之间,检测装置安装如图 19 所示。每组试验检测 10 次,取平均值作为试验结果,与干燥法进行对比,结果如表 3 所示。

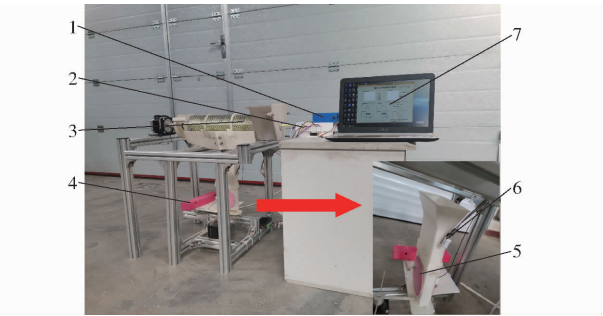


图 19 在线检测性能测试
Fig. 19 Performance test of on-line measurement
1. 电源 2. 控制盒 3. 采样台架 4. 屏蔽盒 5. 电容传感器 6. 温湿度传感器 7. 计算机

由表 3 可知,检测装置二次筛分除杂后的稻谷样本含杂率不大于 0.35%,平均相对误差不大于 1.25%,检测结果较为稳定;试验结果表明检测装置能够较好地进行稻谷含水率在线检测。

表 3 装置在线检测试验结果

Tab. 3 On-line detection experiment results of device

组号	干燥法检测值/%	检测装置检测均值/%	样本含杂率均值/%	平均相对误差/%
1	19.56	19.36	0.19	1.02
2	19.33	19.55	0.33	1.13
3	19.58	19.40	0.21	0.92
4	19.35	19.52	0.31	0.85
5	19.63	19.88	0.27	1.25
6	18.87	19.03	0.25	0.82
7	18.95	19.11	0.35	0.86
8	19.63	19.45	0.31	0.91
9	18.76	18.92	0.12	0.87
10	18.72	18.52	0.03	1.05

4 田间验证试验

为验证在线检测装置的实用性与可靠性,2020 年 10 月 5 日在黑龙江省庆安县水稻试验田进行水稻收获田间试验,如图 20 所示,水稻品种为黑粳 8 号,其自然属性如下:植株高度 88 cm,千粒质量 37.88 g,搭载机型选择 CF805N 型全喂入联合收获机,割幅宽度为 2 m,留茬高度 15 cm,收获水稻含杂率在 0.3% ~ 4.7% 之间。将本研究的稻谷含水率在线检测装置安装在粮箱内。为便于装置检测到含水率后及时与试验真值数据比较,防止中间过程人为因素导致误差过大,以 PM-8188-A 型水分测量仪 3 次测量平均值作为真值数据,试验前对水分测量仪进行标定,保证其测量绝对误差小于等于 0.5%,重复测量误差小于等于 0.2%,试验时 5 m 停机一次,记录此次样本含水率,取出样本并与水分测量仪测量值进行比较,结果如表 4 所示。



图 20 田间试验
Fig. 20 Field experiment

表 4 田间验证试验结果

Tab. 4 Field verification experiment results %

组号	水分仪测量值	检测装置检测值	相对误差
1	19.5	19.21	1.49
2	20.4	20.81	2.01
3	20.4	20.89	2.40
4	20.1	20.63	2.64
5	20.3	20.68	1.87

由表 4 可知,本研究的检测装置在田间作业时,检测装置相对误差小于 3%,满足预设要求,田间试验结果表明,本研究的稻谷含水率在线检测装置,可适用于田间作业。但与室内试验相比,田间试验相对误差较大,其原因是田间试验时的田间地表不平整、机械振动较大和检测系统集成度低以及水分测量仪自身存在误差等,可通过优化装置减振性能和

提高系统集成化等方法改善含水率检测精度。

5 结论

(1)搭建了兼具二次筛分除杂功能的稻谷实时采样台架,基于采样台架采用电容法设计了联合收获机稻谷含水率在线检测系统,阐明了采样台架与检测系统的结构与工作原理。

(2)设计了检测系统整体电路及外围电路,编写C语言控制程序,开发了检测装置上位机监控界面,实现了检测过程中数据信号的监视、储存和调控。

(3)研究了稻谷含杂率、温度和电容差值之间

的关系,进行了采样台架的性能试验、室内标定与验证试验和田间验证试验。结果表明:含杂率升高时,电容差值单调递减,且在含杂率大于1.5%时,稻谷的电容差值变化更加显著;温度升高时,电容差值单调递增,且电容差值随温度升高变化更加显著。采样台架筛分后的稻谷含杂率均小于1.2%。建立了稻谷含水率与电容差值、温度的拟合模型,其决定系数为0.9866,经验证该模型能够较好地描述稻谷含水率与电容差值、温度之间关系,检测系统最大误差为0.42%,平均误差为0.22%,检测装置平均相对误差不大于1.25%。田间验证试验时检测装置的相对误差小于3%。

参 考 文 献

- [1] 李泽华,马旭,李秀昊,等.水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
- [2] MOURA E E, BERBERT P A, BERBERT-MOLINA M A, et al. Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum[J]. Powder Technology, 2013, 246: 369-378.
- [3] TRABELSI S, LEWIS M A, NELSON S O. Microwave moisture meter for in-shell peanut kernels[J]. Food Control, 2016, 66(6): 283-290.
- [4] 胡万里,李长友,徐凤英.稻谷薄层快速干燥工艺的试验[J].农业机械学报,2007,38(4):103-106,126.
HU Wanli, LI Changyou, XU Fengying. Experiment on rapid drying technology of rice thin layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 103-106, 126. (in Chinese)
- [5] Data Management | John Deere HarvestLab™ 3000 and Constituent Sensing | John Deere US[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/data-management/harvest-lab-constituent-sensing/>.
- [6] AMOODEH M T, KHOSHAGHAZA M H, MINAEI S. Acoustic on-line grain moisture meter[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2006, 52(1): 71-78.
- [7] YOU K Y, KIT M H, YOU L L, et al. A small and slim coaxial probe for single rice grain moisture sensing[J]. Sensors, 2013, 13(3): 3652-3663.
- [8] 张伟,杨刚,雷军波,等.基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J].农业工程学报,2019,35(23):21-28.
ZHANG Wei, YANG Gang, LEI Junbo, et al. Development of an online detection device for grain moisture content based on microwave reflection method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 21-28. (in Chinese)
- [9] 李晋阳,毛罕平.基于阻抗和电容的番茄叶片含水率实时监测[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):295-299.
LI Jinyang, MAO Hanping. Monitoring of tomato leaf moisture content based on electrical impedance and capacitance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 295-299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160540&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.040. (in Chinese)
- [10] 郭文川,刘东雪,周超超,等.基于电容特性的植物叶片含水率无损检测仪[J/OL].农业机械学报,2014,45(10):288-293.
GUO Wenchuan, LIU Dongxue, ZHOU Chaochao, et al. Non-destructive moisture detector for plant leaves based on capacitance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 288-293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141045&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.045. (in Chinese)
- [11] 罗锡文,臧英,周志艳.精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J].农业工程学报,2006,22(1):167-173.
LUO Xiwen, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan. Research progress of agricultural information collection technology in precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167-173. (in Chinese)
- [12] 刘成良,林洪振,李彦明,等.农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J/OL].农业机械学报,2020,51(1):1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200101&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [13] ANNA D, BIENIEK J, FABRYKOWSKI E, et al. Exploitation assessment of New Holland CX780 combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2016, 20(2): 43-51.
- [14] 方建卿.联合收割机谷物含水率在线测量技术研究[D].北京:中国农业大学,2005.
FANG Jianqing. Research on on-line measurement technology of grain moisture content of combine harvester[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

- [15] 李泽峰,金诚谦,刘政,等.谷物联合收获机水分在线检测装置设计与标定[J].中国农机化学报,2019,40(6):145-151.
LI Zefeng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Design and calibration of on-line moisture detection device for grain combine harvester[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2019, 40(6):145-151. (in Chinese)
- [16] 陈进,王月红,练毅,等.高频电容式联合收获机谷物含水量在线监测装置研制[J].农业工程学报,2018,34(10):36-45.
CHEN Jin, WANG Yuehong, LIAN Yi, et al. Development of online monitoring device for grain moisture content of high-frequency capacitive combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):36-45. (in Chinese)
- [17] 尹青剑.基于介电特性三七粉品质检测与建模[D].昆明:昆明理工大学,2016.
YIN Qingjian. Quality detection and modeling of panax notoginseng powder based on dielectric properties[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 秦文.蔬菜物料的介电特性及其应用研究[D].重庆:西南大学,2006.
QIN Wen. Research on the dielectric properties and application of vegetable materials[D]. Chongqing: Southwest University, 2006. (in Chinese)
- [19] 张本华,钱长钱,焦晋康,等.基于介电特性与SPA-SVR算法的水稻含水率检测方法[J].农业工程学报,2019,35(18):237-244.
ZHANG Benhua, QIAN Changqian, JIAO Jinkang, et al. Rice moisture content detection method based on dielectric properties and SPA-SVR algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18):237-244. (in Chinese)
- [20] 罗承铭,帅士兵.电容法粮食物料含水率与介电常数关系研究[J].农机化研究,2011,33(4):149-151.
LUO Chengming, SHI Shuaibing. Study on the relationship between the moisture content and the dielectric constant of grain materials by the capacitance method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4):149-151. (in Chinese)
- [21] 刘志壮,吕贵勇.基于电容法的稻谷含水率检测[J/OL].农业机械学报,2013,44(7):179-182.
LIU Zhizhuang, LÜ Guiyong. Detection of rice moisture content based on capacitance method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):179-182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130731&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.031. (in Chinese)
- [22] 徐雪萌,李飞翔,李永祥,等.定量变距螺旋结构设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(12):89-97.
XU Xueming, LI Feixiang, LI Yongxiang, et al. Design and experiment of quantitative variable pitch screw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):89-97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.010. (in Chinese)
- [23] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等.两级螺旋排肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):10-16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and test of two-stage spiral fertilizer device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):10-16. (in Chinese)
- [24] 罗胜,张西良,许俊,等.螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J].农业工程学报,2013,29(3):250-257.
LUO Sheng, ZHANG Xiliang, XU Jun, et al. Screw discontinuous feeding device structure optimization and performance simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3):250-257. (in Chinese)
- [25] 王黎明,李宗,孟晓波,等.一种交流电场无线取能电源的优化设计[J].高压电器,2020,56(5):121-127.
WANG Liming, LI Zong, MENG Xiaobo, et al. Optimized design of an AC electric field wireless power source[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):121-127. (in Chinese)
- [26] 闵希凯,李新娥,张红艳,等.基于容栅传感器的微小位移测试系统[J].探测与控制学报,2018,40(6):89-93.
MIN Xikai, LI Xin'e, ZHANG Hongyan, et al. Small displacement measurement system based on capacitive grid sensor[J]. Journal of Detection and Control, 2018, 40(6):89-93. (in Chinese)
- [27] 吴哲琼,范锦彪,王雪姣.电容式电子测压器的边缘效应分析[J].中国测试,2018,44(5):142-146.
WU Zheqiong, FAN Jinbiao, WANG Xuejiao. Edge effect analysis of capacitive electronic manometer[J]. China Test, 2018, 44(5):142-146. (in Chinese)
- [28] 徐立章,李洋,李耀明,等.谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):1-16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191001&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [29] 赵湛,李耀明,陈义,等.水稻籽粒碰撞力学特性研究[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):88-92.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):88-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130617&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.017. (in Chinese)
- [30] WANG S, MONZON M, GAZIT Y, et al. Temperature-dependent dielectric properties of selected subtropical and tropical fruits and associated insect pests[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5):1873-1881.
- [31] HART F X, COLE W H. Dielectric properties of apples in the range 0.1~100 kHz[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(3):621-631.
- [32] 郭交,段凯文,郭文川.基于微波自由空间测量的小麦含水率检测方法[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):338-343,378.
GUO Jiao, DUAN Kaiwen, GUO Wenchuan. Detection method of moisture content of wheat with microwave free-space measurement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):338-343, 378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190639&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.039. (in Chinese)