

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.12.018

杨亚玲, 陈相, 王成浩, 等. 粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置设计与研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(12): 201-210.

粮麦豆类农产品多参数快速智能 检测装置设计与研究

杨亚玲¹, 陈相², 王成浩², 苗桐双², 贺攀毓²

1. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 针对现有粮麦豆类农产品含水率与质量密度检测装置适应品种较少、同类农产品不同品种检测误差较大、检测智能化程度较低等问题, 设计了一种粮麦豆类多品种农产品多参数快速智能检测装置, 能够快速无损检测农产品含水率、质量密度与温度。其中, 含水率通过开发的同轴电容传感器进行智能检测。试验结果表明: 采用不同的传感器信号源频率可以实现不同种类农产品含水率参数的高精度检测; 水稻、小麦、玉米、大豆、绿豆的最佳信号源频率分别为 10 kHz、90 kHz、70 kHz、90 kHz、30 kHz, 其检测误差均小于 5.0%。同时, 以 6 种不同水稻品种为检测对象, 研究了质量密度变化对含水率检测误差的影响, 并建立了水稻含水率检测修正模型, 从而提高不同水稻品种含水率的检测精度。此外, 设计的装置能够实现不同农产品含水率检测时信号源频率的自动选择, 并开发了数据存储和人机交互系统, 能够便捷地实现多种农产品含水率的快速智能检测。

关键词: 含水率; 质量密度; 多参数; 智能检测; 农产品

中图分类号: TP216 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)12-0201-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Research of Multi-Parameter Rapid Intelligent Detection Device for Cereal and Leguminous Agricultural Products

YANG Yaling¹, CHEN Xiang², WANG Chenghao²,
MIAO Tongshuang², HE Panyu²

1. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 农业农村部 gg 项目(NK202216010402); 西南大学实验技术研究重点项目(SYJ2023008)。

作者简介: 杨亚玲, 副教授, 主要从事智能检测与控制技术研究。

Abstract: To address the limitations that existing moisture and bulk density testing devices for cereal and legume crops are only suitable for few crop varieties, significant measurement errors across different varieties within the same category, and low levels of intelligent operation, a multi-parameter rapid intelligent testing device for diverse cereal and legume crops is designed. This device enables rapid, non-destructive detection of agricultural products' moisture content, bulk density and temperature. Moisture content is primarily detected through an intelligent coaxial capacitance sensor. Experimental results demonstrate that varying sensor signal frequencies achieved high-precision moisture measurements across different crops. The optimal signal source frequencies for rice, wheat, corn, soybean, and mung bean was 10 kHz, 90 kHz, 70 kHz, 90 kHz, and 30 kHz, respectively, with detection errors below 5.0%. Simultaneously, using six distinct rice varieties as test subjects, the study investigated the effect of variations in bulk density on moisture content detection errors. A correction model for rice moisture content detection was established to enhance measurement accuracy across different rice varieties. Furthermore, the designed apparatus can automatically select signal source frequencies for different agricultural products. A data storage and human-machine interaction system was developed, which can simply and conveniently achieve rapid and intelligent detection of moisture content in multiple agricultural products.

Key words: moisture content; bulk density; multi-parameter; intelligent detection; agriculture products

含水率与质量密度是评估粮麦豆类农产品品质的关键指标。其中,含水率不仅是衡量其储藏安全性的重要指标,也是影响其品质优劣的主要因素之一。水分过高会显著降低粮麦豆类农产品的品质,并威胁其储藏安全。粮麦豆类农产品的国标水分检测方法为烘干法,即在 105 °C 的恒温箱中将样品烘干至恒重,通过样品减少的质量计算出水分含量。该方法虽然准确,但耗时费力且测定参数单一,不适用于在线快速检测。目前,国内外粮麦豆类农产品水分快速检测技术与方法有光谱技术^[1-5]、机器视觉技术^[6-9]、电阻法^[10-12]、电容法^[13-19]、高频驻波法^[20-21]、磁共振技术^[22]、微波技术^[23]、中子技术^[24]等。光谱技术利用化学计量学方法建立算法模型,从而实现水分快速检测,但其仪器价格较贵,且需要大量样本的光谱数据,因此只适用于同一批次的样本,其模型的稳健性和传递性较差,对不同样本或不同产地的同一样品需进行模型更新训练。机器视觉技术依据不同含水率下粮麦豆类农产品外形、颜色特征的细微不同,利用图像处理算法进行回归建模得到含水率,其算法较为复杂,且含水率检测模型的准确性有待进一步提高。磁共振、微波、中子技术具有精度高、检测速度快、无损等优点,但其设备价格较贵,检测成本较高。电阻法、电容法、高频驻波法虽检测速度较快,但目前该类检测装置只适用于同类单一农产品的含水率检测,在检测同类农产品不同品种时误差较大,且对不同种类农产品进行检测时需重新对检测样本进行标定^[25]。一方面,同类农产品的品种或产地变化时,其物理性能将发生改变,因此标定模型不具有普适性,检测误差较大;另一方面,现有检测装备不能满足不同粮麦豆类农产品含水率和质量密度多参数同时检测的需要,且稳定性较差^[26],智能化程度较低。

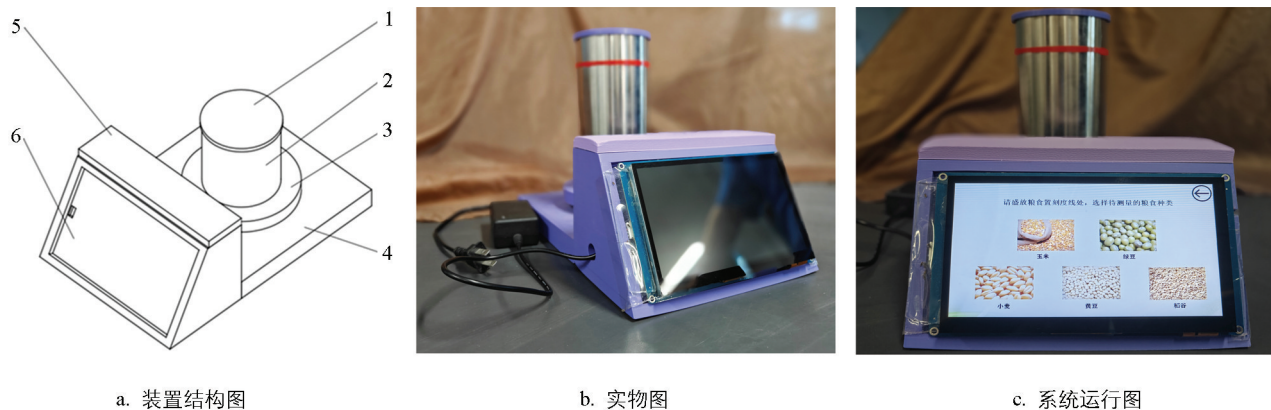
基于上述分析,本研究利用现代电子信息技术,开发了一种粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置,对水稻、小麦、玉米、大豆、绿豆等农产品的含水率、质量密度、环境温度等参数进行快速智能检测,同时还可根据实际需要测定其他粮麦豆类、固态颗粒以及粉粒农产品的含水率与质量密度等参数,以期实现多品种多参数的快速智能高精度检测。

1 系统结构与工作原理

1.1 系统结构

粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置如图 1 所示。装置外部结构主要包括顶盖、测量仓、圆

盘、底座、电路暗盒、触摸显示屏。装置内部电路系统由 304 不锈钢制成的同轴电容传感器(外径为 81 mm, 内径为 22 mm, 壁厚为 2 mm, 高度为 180 mm)、DHT11 型温度传感器(测量范围为 0~50 ℃, 测量精度为 ±2 ℃)、YX6655 型称重传感器(量程为 10 kg, 综合误差为 0.05%, 灵敏度为 1.0±0.1 mV/V)、高精度 AD5933 阻抗转换器(集成频率发生器与 12 位精度、1 MSPS 采样率的 ADC, 频率发生器的输出频率范围为 1~100 kHz, 分辨率为 0.1 Hz)、TJC8048X270-011C 型触摸显示屏、STM32F103C8T6 主控芯片、电源适配器等构成。



1. 顶盖; 2. 测量仓; 3. 圆盘; 4. 底座; 5. 电路暗盒; 6. 触摸显示屏。

图 1 粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置

1.2 工作原理

1.2.1 硬件系统工作原理

硬件系统通过复阻抗检测系统、称重传感器以及温度传感器检测待测农产品的物理特性参数, 并将检测信息传输给 STM32F103C8T6 主控芯片。主控芯片处理数据后, 通过串口通信技术在显示屏上实时显示信息, 操作者可通过触摸显示屏设置参数, 实现人机交互作业。整个系统采用 220 V 电源电压, 通过电源适配器和稳压电路将电源分别转化为 5 V 和 3.3 V 直流电压, 并给系统各模块供电。整个硬件系统的工作原理如图 2 所示。

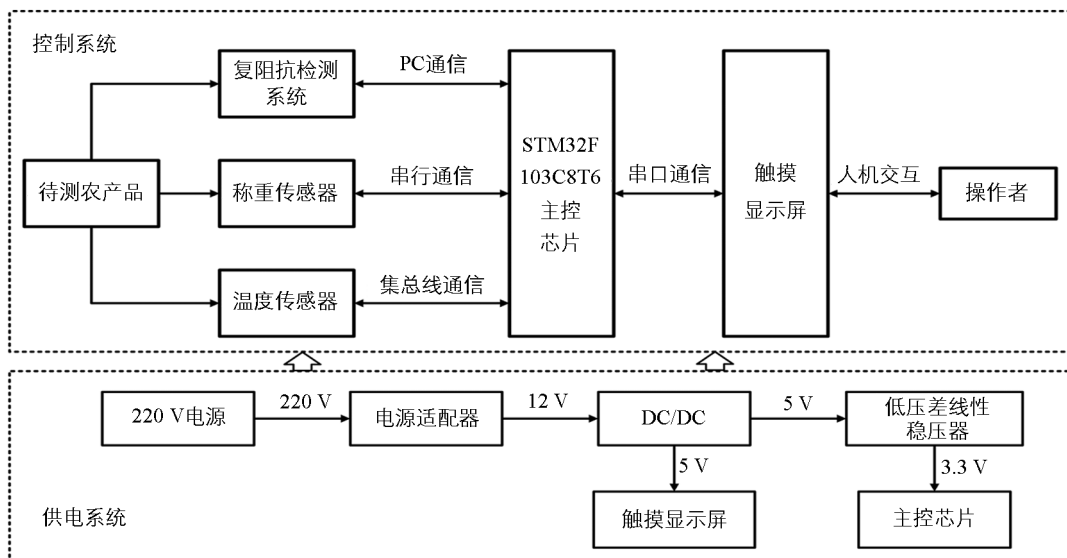


图 2 硬件系统工作原理

同轴电容传感器在整个控制系统中发挥了重要作用。系统将频率发生器产生的一定频率交流信号加到同轴电容传感器上, 其阻抗与电容相关, 则同轴电容传感器的电容计算公式如式(1)所示:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln(b/a)} \quad (1)$$

式中： C 为电容； ϵ 为待测介质介电常数； a 、 b 、 L 分别为同轴圆柱的内、外半径和高度。

当同轴电容传感器几何参数一定时，则电容由待测介质的介电常数决定。粮麦豆类农产品中自由水分的介电常数远大于其含有的纤维、淀粉和蛋白的介电常数，因此同轴电容传感器中加入的粮麦豆类农产品含水率发生变化时，其电容值也会发生变化。通过测量当前电容的阻抗值，建立含水率与电容的关系模型便能得到被测农产品的含水率。系统工作时，将待测量品种加至同轴电容传感器的规定刻度，在触屏上按下对应的农产品品种按钮，系统便自动选择最佳频率。同时，在一定体积下，通过称重传感器测出被测品种的质量，自动计算出农产品质量密度；通过温度传感器测量当前农产品的状态温度。

1.2.2 软件系统工作原理

测量不同农产品含水率的软件系统控制流程如图 3 所示。当电源打开后，系统首先进行初始化，然后从触摸显示屏接收指令并解析操作人员下达的指令是否有效。若解析指令无效，则返回继续进行初始化，等待有效指令发送；若解析指令有效，则通过指令得到相应农产品种类编码，并根据编码系统自动获得待测农产品的测量频率。待频率调整完毕后，通过不同功能传感器测量农产品当前温度、电容复阻抗以及质量信息，随后系统进行质量密度与含水率的自动计算。计算完成后，将数据发送至触摸显示屏以供操作人员参考。

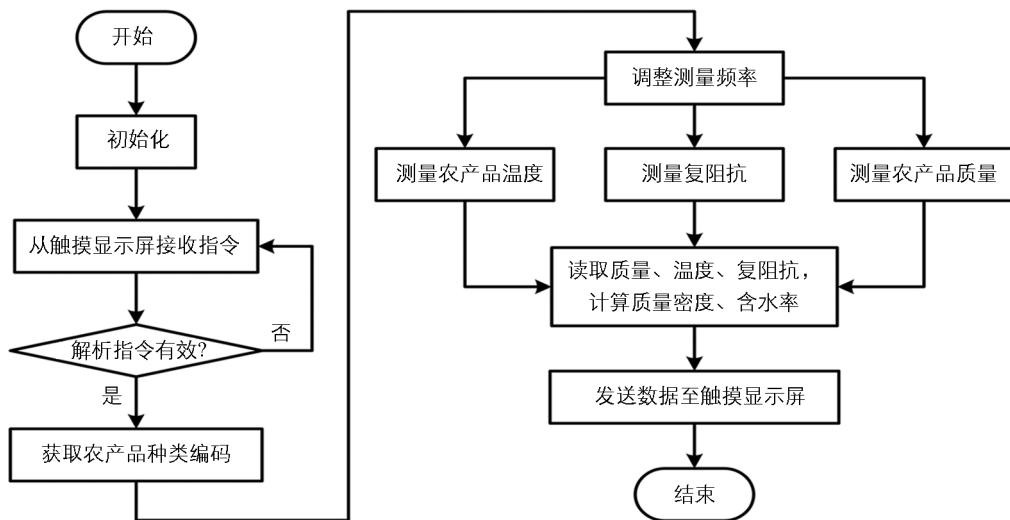


图 3 软件系统控制流程

在本研究中，以标定水稻品种川丰 6 号为例，则不同水稻品种含水率的检测流程如图 4 所示。开始测量时，系统首先进行初始化，从触摸显示屏接收指令并解析指令。然后选择水稻的最佳测量频率为 10 kHz，系统自动测量水稻质量、温度和复阻抗，计算水稻质量密度。若质量密度小于标定值，则使用修正后的含水率检测模型，否则使用未修正的含水率检测模型。最后系统通过自动读取水稻的质量密度、温度和复阻抗值来计算含水率，并输出最终检测结果。

2 试验方法

本研究分析不同信号源频率对粮麦豆类农产品含水率检测的影响，确定不同种类农产品的最佳检测频率，从而验证该智能检测装置在农产品物理参数检测方面的稳定性与准确性。同时以水稻品种为例，通过引入不同质量密度的水稻品种，验证该装置对含水率检测误差的影响情况，并建立不同水稻品种含水率检测的修正模型。

2.1 不同种类农产品外加检测信号源最佳频率的确定

为研究不同信号源输出频率对待测农产品含水率检测误差的影响, 通过 AD5933 芯片上集成的频率发生器产生的不同频率信号来激励外部复阻抗, 外部复阻抗的响应信号由片上 ADC 进行采样, 然后由片上 DSP 进行 DFT 处理, 最后计算得到电容传感器的复阻抗。经过处理后由 I2C 通信发送至 MCU, 同时, DHT11 温度传感器和 YX6655 称重传感器分别将农产品温度、质量数据通过单总线通信和双总线通信发送至 MCU。待所有数据收集完毕, MCU 将数据通过串口通信发送至触摸显示屏。利用试验测试收集的数据建立同轴电容传感器阻抗与含水率模型, 分析被测量农产品在一定含水率下, 其误差最小、相关系数最大对应的信号源频率, 作为该待测农产品测量含水率时系统

自动选择的最佳频率, 并存储在系统中。系统工作时, 将待测品种加至同轴电容传感器规定刻度, 在触屏上按下对应的粮食品种按钮, 系统自动选择最佳频率。

2.2 粮麦豆类农产品含水率数学模型的建立

利用 2.1 节中的方法确定待测农产品含水率检测所需的最佳频率信号, 在待测品种加至同轴电容传感器规定刻度后, 测量出不同含水率下该农产品的质量密度与电容值, 建立含水率与电容阻抗关系的数学模型, 并存储在系统中供系统检测时自动调用。

2.3 系统检测误差与稳定性测试

为检验系统对不同种类农产品的检测效果, 分别选用大豆、绿豆、玉米、小麦、水稻等粮麦豆类农产品, 在不同水分状态下, 分别使用烘干法和研发的粮麦豆类多参数快速智能检测装置测量其含水率, 并使用天平(精度为 0.001 g)测量质量。随后, 在保持含水率不变的情况下, 重复 15 次试验以检验系统的检测误差与稳定性。

2.4 系统对不同质量密度的同类农产品含水率检测误差的影响

为研究同类农产品不同品种质量密度变化对含水率检测误差的影响, 取 6 种不同水稻品种, 利用 2.1 节得出的水稻含水率最佳信号源频率进行检测, 研究不同水稻品种质量密度变化时系统检测出的含水率变

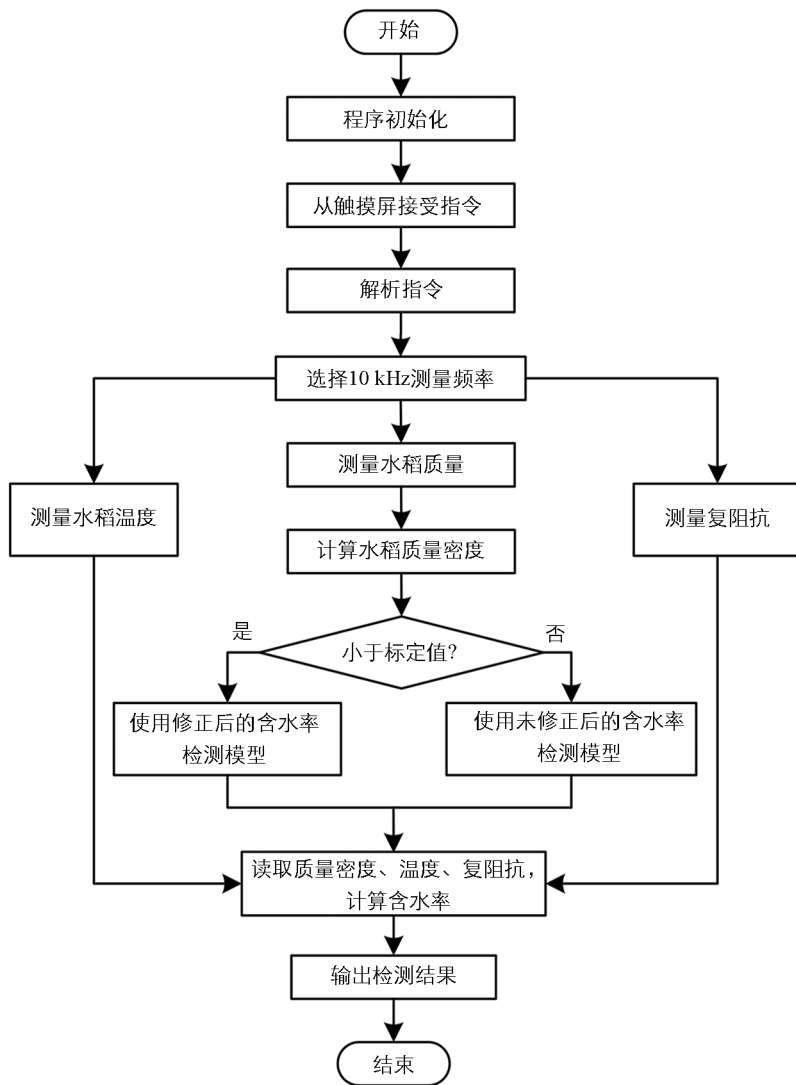


图 4 不同水稻品种含水率的检测流程

化情况,分析检测误差,建立水稻品种质量密度变化时利用电容法检测其含水率的误差修正数学模型,提升检测系统的准确性。

3 结果与分析

3.1 不同品种农产品含水率检测误差与信号源频率的关系

利用同轴电容传感器检测大豆、绿豆、水稻、小麦、玉米 5 种农产品的含水率。对同类农产品检测时,当外加信号源频率发生变化,即使其含水率保持不变,检测误差也会发生变化。以信号源频率为横坐标,含水率检测误差(均方根误差) E_{RMSE} 和相关系数 R^2 为纵坐标,研究检测误差随信号源频率变化的规律,如图 5 所示。

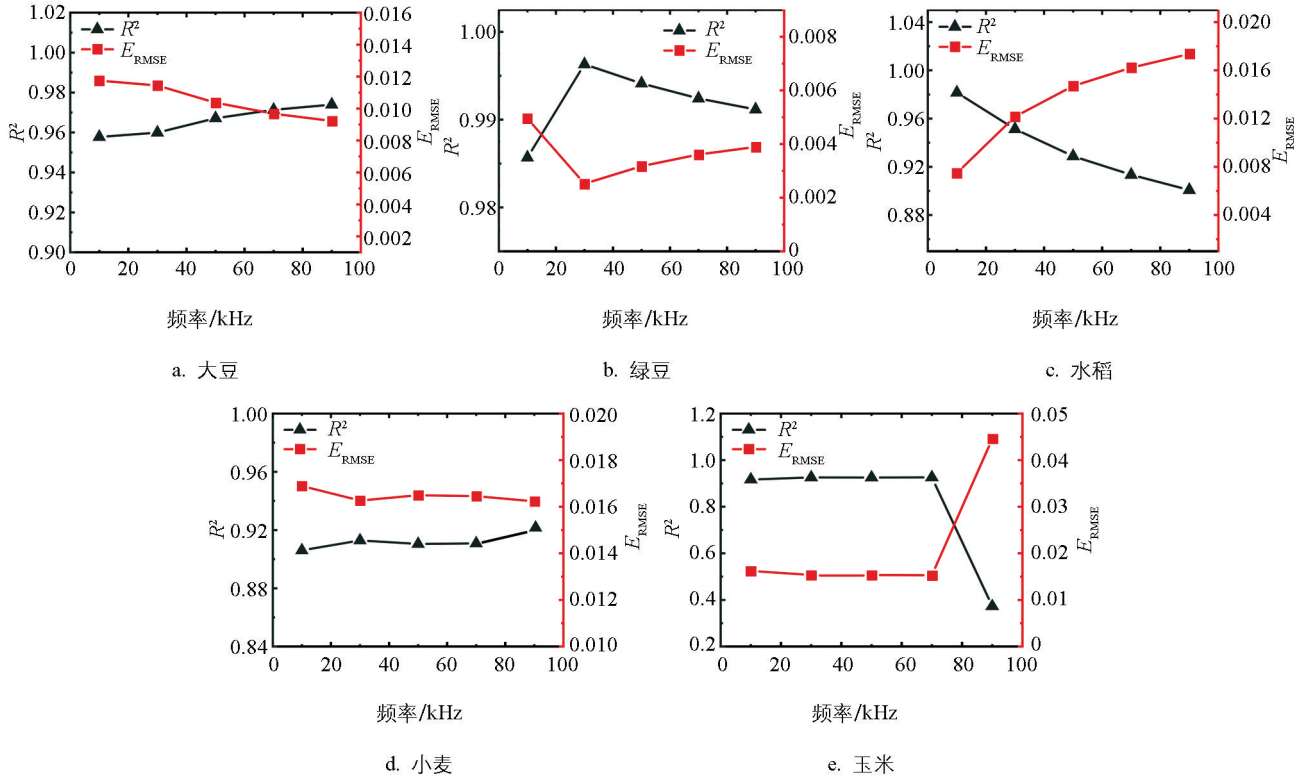


图 5 粮麦豆类农产品含水率检测误差与信号源频率的关系

由图 5 可知,利用同轴电容传感器检测粮麦豆类农产品的含水率,其检测误差与同轴电容传感器的信号源频率有关,即不同粮麦豆类农产品含水率检测误差最小时,对应的最佳信号源频率不同。由于含水率检测的最小误差对应的信号源频率随农产品种类的不同而发生变化,因此适用于常见电容法含水率检测装置的种类较少。当大豆含水率检测误差最小时,其相关系数最大(R^2 为 0.974 0),最佳信号源频率为 90 kHz;绿豆含水率检测误差最小时,其相关系数最大(R^2 为 0.997 0),最佳信号源频率为 30 kHz;水稻含水率检测误差最小时,其相关系数最大(R^2 为 0.981 5),最佳信号源频率为 10 kHz;小麦含水率检测误差最小时,其相关系数最大(R^2 为 0.926 2),最佳信号源频率为 90 kHz;玉米含水率检测误差最小时,其相关系数最大(R^2 为 0.911 5),最佳信号源频率为 70 kHz。

3.2 最佳信号源频率下含水率与传感器电容的数学模型

在同品种不同含水率条件下,分别给水稻加频率为 10 kHz 的信号源,小麦加频率为 90 kHz 的信号源,玉米加频率为 70 kHz 的信号源,大豆加频率为 90 kHz 的信号源,绿豆加频率为 30 kHz 的信号源,研究介电电容随被测量农产品含水率变化而变化的情况。对电容 C 取对数处理后,以 $\ln C$ 为横坐标、含

水率为纵坐标作图, 再将已知含水率数据和 $\ln C$ 数据在 MATLAB 软件中进行拟合, 得出含水率与电容关系数学模型, 如图 6 所示。研究表明, 在粮麦豆类农产品各自含水率检测的最佳试验频率下, 含水率与 $\ln C$ 满足二次多项式关系。

大豆含水率的最佳信号源频率为 90 kHz, $R^2=0.974 0$, 其拟合曲线公式为:

$$\omega_1 = -0.004\ 207x^2 + 0.137x - 0.349\ 1 \quad (2)$$

绿豆含水率的最佳信号源频率为 30 kHz, $R^2=0.997\ 0$, 其拟合曲线公式为:

$$\omega_2 = -0.001\ 835x^2 + 0.068\ 7x - 0.207 \quad (3)$$

水稻含水率的最佳信号源频率为 10 kHz, $R^2=0.981\ 5$, 其拟合曲线公式为:

$$\omega_3 = -0.021\ 73x^2 + 0.274\ 4x - 0.650\ 8 \quad (4)$$

小麦含水率的最佳信号源频率为 90 kHz, $R^2=0.926\ 2$, 其拟合曲线公式为:

$$\omega_4 = -0.015\ 04x^2 + 0.206\ 3x - 0.505\ 3 \quad (5)$$

玉米含水率的最佳信号源频率为 70 kHz, $R^2=0.911\ 5$, 其拟合曲线公式为:

$$\omega_5 = -0.021\ 68x^2 + 0.258\ 8x - 0.560\ 8 \quad (6)$$

其中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 分别为待测大豆、绿豆、水稻、小麦、玉米的含水率(%); $x = \ln C$ 为传感器电容 C 的对数。

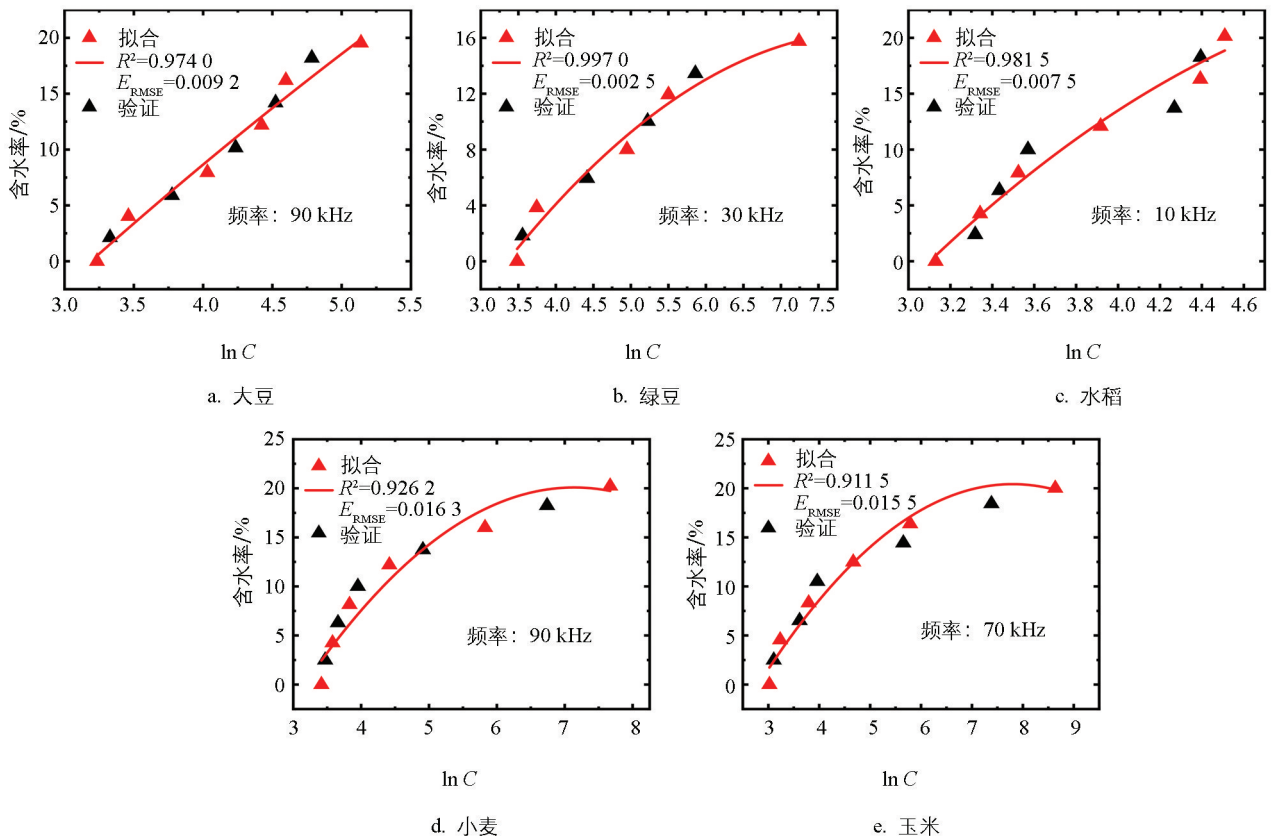


图 6 粮麦豆类农产品含水率与电容关系

由图 6 可知, 5 种农产品含水率与传感器电容的对数 $\ln C$ 都呈二次多项式关系, 相关系数 R^2 经 t 检验后均显著相关 ($\alpha=0.05$), 但系数不同。更为重要的是检测误差 E_{RMSE} 最小时, 对应的最佳信号源频率不同。因此, 通过电容法测量农产品含水率时, 为得到不同种类农产品的含水率检测误差最小, 需设置不同的检测信号源频率。用相同频率信号源检测不同农产品含水率时, 误差会增加, 同一数学模型也不能准确表达不同种类农产品的含水率与电容传感器所加农产品介电特性之间的关系。

3.3 系统检测误差及稳定性

利用研制的粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置,在保持含水率和质量不变的情况下,重复测量含水率和质量各 15 次,其检测数据如表 1 所示。由表 1 数据可知,不同种类农产品的含水率检测误差均小于 5.0%,15 组含水率检测数据与均值偏离程度小,每组检测误差绝对值均小于 2 倍标准差。质量检测误差最大为 1.64%,15 组数据与均值偏离程度小,每组检测误差绝对值均小于 2 倍标准差。因此,研制的检测装置性能稳定,能够实现快速检测,检测结果误差小。当每次装样到达规定容积刻度时,系统将检测获得的质量除以容积 683 cm^3 后,自动计算被测量的粮麦豆类农产品质量密度,并将含水率、质量密度、温度数值显示在触摸显示屏上。

表 1 系统检测误差与稳定性

品名	烘干法测量 含水率/%	天平测量 质量/g	自制装置检测		含水率 误差/%	含水率 标准偏差/%	质量 误差/%	质量 标准差/g	
			次数	含水率					质量
				平均值/%					平均值/g
水稻	17.5	720.53	15	17.9	713.79	2.29	2.31	0.94	1.79
小麦	16.5	505.45	15	15.7	500.62	4.85	2.95	0.95	1.36
玉米	14.7	445.66	15	15.3	438.36	4.08	3.16	1.64	2.14
大豆	14.6	840.23	15	15.3	835.89	4.79	4.58	0.52	0.98
绿豆	15.3	540.89	15	14.9	548.21	2.61	1.36	1.35	1.57

3.4 同类农产品不同品种质量密度变化及其含水率检测误差

利用电容法检测不同水稻品种的含水率及其误差,如表 2 所示。由表 2 数据可知,不同水稻品种的质量密度存在差异时,电容法检测结果与传统烘干法相比,其含水率相对误差变化较大。若以川丰 6 号水稻为标定样,外加 10 kHz 最佳信号源频率,建立的拟合计算公式为式(4),测得川丰 6 号水稻的含水率相对误差仅为 2.14%。然而利用式(4)计算其他水稻品种含水率时,得到陵优 6019 的含水率检测相对误差高达 20.78%,宜香优润丝的含水率检测相对误差为 14.46%,品香优姜珍的含水率检测相对误差为 11.57%。与川丰 6 号相比,陵优 6019 的质量密度最低,其次是品香优姜珍和宜香优润丝。可以看出与标定样川丰 6 号相比,质量密度越低,含水率检测相对误差越大,其原因是品种的质量密度越低,同轴电容传感器介质中空气体积占比增加。由于等效电容由水稻电容和空气电容构成,利用同种水稻品种标定的含水率检测模型,并不能满足不同质量密度水稻品种含水率的高精度检测需要。

表 2 不同水稻品种质量密度变化与含水率检测误差

水稻品种	陵优 6019	川丰 6 号	品香优姜珍	宜香优润丝	风优 916	渝香 203
质量密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.51	0.54	0.52	0.52	0.55	0.55
烘干法平均含水率/%	8.67	8.67	6.32	8.56	8.81	6.74
电容法平均含水率/%	6.87	8.48	5.50	7.33	8.60	6.55
含水率相对误差/%	20.78	2.14	11.57	14.46	2.44	2.76
修正后电容法平均含水率/%	8.73	—	6.64	8.29	—	—
修正后含水率相对误差/%	0.69	—	5.06	3.15	—	—

为了提高不同水稻品种含水率的检测精度,针对不同的水稻品种需构建不同的拟合公式。然而这不仅需要大量收集不同品种样本,同时还将大幅增加工作量。从表 2 可以看出,以标定用的川丰 6 号质量密度为基准,低于该质量密度的差值越大,含水率检测相对误差越大,因此以此模型为基础进行修正,则水稻

品种含水率修正模型为:

$$w = -0.02173x^2 + 0.2744x - 0.6508 + 0.6A \quad (7)$$

式中: $x = \ln C$ 为传感器电容 C 的对数; A 为低于标定水稻品种的待检测品种与标定品种之间的质量密度差值, 系统默认标定品种为川丰 6 号, 其质量密度为 0.536 g/cm^3 。

检测时该装置自动测量水稻品种的质量密度, 若低于 0.536 g/cm^3 时, 系统程序自动计算质量密度差值 A , 并利用嵌入系统的修正模型自动测出含水率。经过修正后系统检测出不同品种水稻含水率的误差最大仅为 5.06% , 达到对不同水稻品种含水率自动检测的目的。

4 结论

1) 研制了一种粮麦豆类农产品多参数快速智能检测装置, 可通过人机交互界面快速测量不同农产品的含水率和质量密度参数。试验结果表明, 该装置含水率检测误差小于 5.0% , 质量密度检测误差小于 2.0% 。

2) 设计了 STM32F103C8T6 主控芯片, 采用同轴电容传感器、称重传感器、温度传感器、阻抗转换器构成信号检测系统, 用户可结合触摸显示屏的实时输入和显示, 实现粮麦豆类农产品的多参数快速智能检测。

3) 优化了不同农产品最佳信号源频率, 水稻、小麦、玉米、大豆、绿豆的最佳检测信号源频率分别为 10 kHz 、 90 kHz 、 70 kHz 、 90 kHz 、 30 kHz 。同时, 建立了水稻不同品种的含水率检测自动修正模型, 修正后不同水稻品种的含水率检测误差仅为 5.06% 。

此外, 该装置预留了外接接口, 在未来的研究中, 可进一步建立更多种类农产品含水率参数测量的修正模型和自动控制程序, 使检测装置的性能得到进一步提升。

参考文献:

- [1] 何锦漪, 林颢, 齐雅静, 等. 复杂环境下基于近红外光谱的挂面生产过程水分快速检测方法研究 [J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 205-212.
- [2] 汪东升. 在线近红外检测系统的研发及在油菜籽含油率检测中的应用 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [3] LIU H W, CHEN F N, ZHANG L L, et al. Improvement Method for Tea Leaf Moisture Content Prediction Using VIS-NIR Spectrum Based on Transfer Learning [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 343: 126571.
- [4] 郭旭. 基于散射介质气体吸收光谱的面粉水分检测传感器 [D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [5] 朱文静, 冯展康, 吴抒航, 等. 机载非接触式近红外土壤墒情检测系统研制 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 73-80.
- [6] 张晋宁, 尹君, 田一骏, 等. 基于图像处理技术的小麦水分检测方法研究 [J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 211-215.
- [7] WEI Y Z, HE Y, LI X L. Tea Moisture Content Detection with Multispectral and Depth Images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183: 106082.
- [8] 张冬妍, 马苗源, 黄莹, 等. 基于高光谱图像特征融合的榛子水分含量测定 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 274-281.
- [9] 谢实梦, 汤永辉, 黄林. 基于微波热声成像的植物叶片水分含量分布无损检测技术研究 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2024, 51(8): 1963-1970.
- [10] 刘仁利, 蒋路成, 靳文杰, 等. 移动电阻式粮堆水分在线监测系统的应用研究 [J]. 现代食品, 2023, 29(8): 188-191.
- [11] 孟敏刚, 张雪峰, 李成杰, 等. 稻谷落入姿势对电阻式水分仪检测精度的影响 [J]. 农机化研究, 2024, 46(9): 192-197.

- [12] 姜重然, 李丽, 白金泉, 等. 粮食水分快速检测智能节点的研究与设计——基于现场总线 [J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 191-193, 197.
- [13] 汤天永. 联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [14] 牛智有, 刘芳宏, 刘鸣, 等. 平行极板电容传感器介电式颗粒饲料水分检测仪设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 36-43.
- [15] 杜章辉, 刘珏, 张永林. COMSOL 谷物水分检测棒体仿真与优化 [J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(3): 112-119.
- [16] BAHRAM B, AREZOU L, HOSSEIN G, et al. Development of a Model to Estimate Moisture Contents Based on Physical Properties and Capacitance of Seeds [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112513.
- [17] 邓安, 徐永阳, 邱伟强, 等. 基于电学参数的稻谷含水率和出糙率机器学习预测模型 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(15): 245-252.
- [18] 安晓飞, 代均益, 罗长海, 等. 基于介电特性的联合收获机小麦含水率检测装置研究 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 185-190.
- [19] 王丹阳, 王洁, 张本华, 等. 基于介电特性的稻谷干燥含水率检测模型构建与验证 [J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(6): 752-758.
- [20] 赵燕东, 黄红伦, 赵玥, 等. 活立木茎干水分状况实时检测传感器研究 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 282-289, 359.
- [21] 刘贺, 赵燕东. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 140-144.
- [22] 叶宇凌. 便携式 Halbach 型磁共振传感器研究及其在黄豆水分检测中的应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [23] ZHANG J Y, WU C Y, SHAO W Q, et al. Thickness-Independent Measurement of Grain Moisture Content by Attenuation and Corrected Phase Shift of Microwave Signals at Multiple Optimized Frequencies [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11785-11795.
- [24] 杨悦乾, 王剑平, 王成芝. 谷物含水率中子法在线测量的可行性研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 99-101.
- [25] 应玲红, 吴艺影, 陈舒萍, 等. 粮食水分含量三种测定方法的对比分析 [J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(6): 81-82.
- [26] 高向上, 杨卫东, 沈二波, 等. 一种基于 ESP32-CSI 的粮食水分检测方法 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 426-433.

责任编辑 柳剑