

基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制

张 伟, 杨 刚, 雷军波*, 刘成良, 陶建峰, 覃程锦

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对稻麦联合收割机在收获作业时难以对小麦、水稻等谷物的含水率进行准确在线测量的问题, 本文基于微波反射法研究了谷物含水率在线检测方法, 建立了稻麦含水率检测模型, 研发了一种稻麦联合收割机谷物含水率在线检测装置。该装置采用微波测量模块对稻麦含水率进行非接触式测量, 设计了电压转换电路将微波参数转换成电压信号, 采用滑动平均滤波算法进行信号滤波, 最后通过标定试验所建立的含水率检测模型进行稻麦含水率计算, 计算结果经 CAN 总线通讯在显示器上实时显示。基于上述理论研究、技术开发和结构设计对所研制的谷物含水率在线检测装置分别进行了室内静态试验和田间收割试验研究, 试验结果表明: 检测装置的对稻麦含水率的测量范围为 14%~38%, 在室内静态试验和田间收割试验中的性能标准差分别为 0.458 3 和 1.078 0, 相对误差分别在 2.5%和 5%左右, 具有良好的准确性与实用性。

关键词: 含水率; 农业机械; 微波; 滑动平均滤波; 试验研究

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.003

中图分类号: S225.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0021-08

张 伟, 杨 刚, 雷军波, 刘成良, 陶建峰, 覃程锦. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.003 http://www.tcsae.org

Zhang Wei, Yang Gang, Lei Junbo, Liu Chengliang, Tao Jianfeng, Qin Chengjin. Development of on-line detection device for grain moisture content using microwave reflection method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 21—28. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.003 http://www.tcsae.org

0 引 言

含水率是稻麦等粮食收获、交易、储存和加工中最重要的指标之一, 含水率过高不仅会导致粮食发霉变质、储存时间变短, 还会导致交易价格下降、加工成本上升等一系列问题^[1-3]。随着精细农业的发展, 对收获机械在收获作业时无损在线测量粮食含水率的需求越来越迫切, 准确检测粮食含水率不仅可为储存、加工提供参考数据, 而且还可对农作物生长状况进行准确评估, 进而对下一季的农作物种植提供指导性意见^[4]。

目前, 谷物含水率的测量方法可分为直接法和间接法两大类^[5-6]。直接法精度较高, 但程序繁琐耗时, 如烘干法、甲苯蒸馏法和卡尔·费休滴定法等属于破坏式测量, 主要用于实验室检测和标定, 其中烘干法是国际通用的谷物含水率检测标准方法^[7]; 间接法特别是电容法和微波法易于实现谷物含水率无损测量, 一直是国内外学者研究的热点^[8]。电容法结构简单、成本低, 但需要考虑边缘效应而且对谷物品种、密度、环境等因素敏感, 一定程度上限制了其检测精度^[9]。微波法具有非接触无损测

量、精度高、速度快等优点, 按原理可以分为微波透射法和微波反射法。基于微波透射法的含水率传感器已经成功应用于冬小麦、大豆、脱粒玉米、带壳花生、大体积原棉和颗粒状流动物质的含水率测量^[1-2,10-16], 精度较高, 但是接收和发射天线需要双边安装, 对安装角度和距离要求严格, 装置体积较大。基于微波反射法的含水率传感器采用喇叭天线或者微带天线单边安装, 降低了安装精度要求并有效节省空间。近年来由于微带天线技术的发展, 微波反射法已经开始应用于土壤、沙子、木屑和橡胶等材料的含水率检测^[17-20], 在农业领域的应用处于起步阶段^[21-22]。

在稻麦联合收割机含水率无损在线检测领域, 国外的企业已经对其进行了商业化推广, 但国内尚处于研究阶段^[23-25]。方建卿^[23]设计了一套联合收割机含水率监测系统, 测量范围为 10%~25%, 但含水率高于 25%时谷物的介电损耗较大, 无法准确测量。陈进等^[24]对平行电容极板结构进行了仿真和优化, 设计了高频电容式联合收割机谷物含水率在线监测装置, 测量范围为 10%~30%, 但没有考虑机械振动、电路元件等干扰, 直接对测量数据进行回归拟合, 导致误差较大^[25]。

基于上述研究背景, 本文针对稻麦联合收割机在收获作业时无法精准在线测量小麦、水稻籽粒含水率的问题, 采用微波反射法从理论上建立微波参数和谷物含水率的关系, 设计一种稻麦联合收割机谷物含水率在线检测装置, 并进行室内静态试验以及田间收割试验研究。

收稿日期: 2019-08-01 修订日期: 2019-11-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0702001); 国家重点研发计划(2016YFD0700105); 上海市科学技术委员会科研计划项目(16391903102)
作者简介: 张 伟, 博士生, 主要从事智能农业装备研究。

Email: zhang_wei@sjtu.edu.cn

*通信作者: 雷军波, 助理研究员, 主要从事智能农业装备研究。

Email: jblei@sjtu.edu.cn

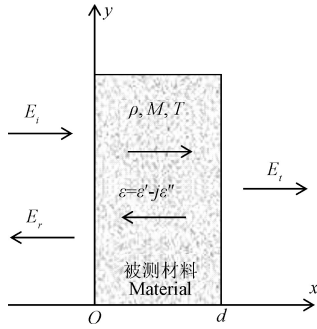
1 原理与方法

1.1 基于微波反射法的含水率检测原理

在微波电磁场中, 微波与介质的相互作用体现在复介电常数 ε 上

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

式中 ε 为材料的复介电常数, 其中实部 ε' 为相对介电常数, 反映材料的储存电场能量的能力; 虚部 ε'' 为介电损耗, 反映材料以热的形式耗散能量的能力; j 为虚数单位。



注: Oxy 为坐标系; E_i 为入射波, $V \cdot m^{-1}$; E_t 为透射波, $V \cdot m^{-1}$; E_r 为反射波, $V \cdot m^{-1}$; ρ 为测量材料的密度, $kg \cdot m^{-3}$; M 为测量材料的含水率, %; T 为温度, $^{\circ}C$; d 为测量材料的厚度, m 。

Note: Oxy is coordinate system; E_i is the incident wave, V/m ; E_t is the transmitted wave, $V \cdot m^{-1}$; E_r is the reflected wave, $V \cdot m^{-1}$; ρ is the density of the material, $kg \cdot m^{-3}$; M is the moisture content of the material, %; T is the temperature, $^{\circ}C$; d is the thickness of the material, m .

图 1 微波测量模型

Fig.1 Microwave measurement model

自由空间中, 当入射波 E_i 垂直射到厚度为 d 的测量材料表面时, 一部分被材料反射形成反射波 E_r , 另一部分透过材料形成透射波 E_t , 模型如图 1 所示。假设微波经材料反射后连续且没有进一步反射, 反射波和入射波相互叠加形成行驻波, 行驻波电场表达式为^[22]

$$E_c = E_{i0} \sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos 2kx} e^{j(\omega t - kx + \theta)} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \frac{\Gamma \sin 2kx}{1 + \Gamma \cos 2kx} \quad (3)$$

式中 E_c 为行驻波, V/m ; E_{i0} 为入射波的幅值, V/m ; Γ 为微波的反射系数; ω 为入射波的角频率, rad/s ; t 为时间, s ; x 为微波在横轴的坐标, m ; k 为行驻波的波数。

反射系数 Γ 依赖于材料的介电特性, 介电特性又与材料的含水率、密度、成分等内部特性有关^[10], 反射系数 Γ 计算如下

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} \quad (4)$$

行驻波 E_c 的最大值和最小值之比定义为行波电压比, 对于谷物等相对磁导率 $\mu = 1$ 的非磁性物质

$$S_c = \frac{\max |E_c|}{\min |E_c|} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \approx \sqrt{\varepsilon'} \quad (5)$$

式中 S_c 为行波电压比; $|\Gamma|$ 为反射系数 Γ 的模。

相对介电常数 ε' 计算如下

$$\varepsilon' = \left(1 + \frac{\Phi}{360d} \frac{c}{f} \right)^2 \quad (6)$$

式中 Φ 为反射波的相移, rad ; c 为光速, m/s ; f 为反射波频率, Hz 。

相关试验已证明 Φ 和谷物含水率 M 呈线性关系^[26-27], 可以设:

$$\Phi = aM + b \quad (7)$$

式中 a 为斜率, 与谷物密度有关; b 为系数, 通过标定得到。

将式 (6)、式 (7) 代入式 (5), 行波电压比 S_c 可表示为

$$S_c = \frac{ac}{360df} M + \frac{bc}{360df} + 1 \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 谷物含水率 M 与行波电压比 S_c 呈单值函数关系, 因此可以通过测量行波电压比 S_c 来计算谷物含水率 M 。

1.2 谷物含水率检测的实现方法

谷物含水率在线检测过程如图 2 所示, 微波测量模块基于微波反射法对谷物样品进行测量并输出行驻波 E_c , 电压转换电路检测和提取行驻波 E_c 的相关参数, 将行波电压比 S_c 转换成电压输出 V_o , 由于存在噪声干扰, 使用滑动平均滤波算法对 A/D 采样后的信号平滑化, 经含水率检测模型计算可得谷物含水率, 最后通过 CAN 总线通讯将含水率在联合收割机显示屏上在线显示。

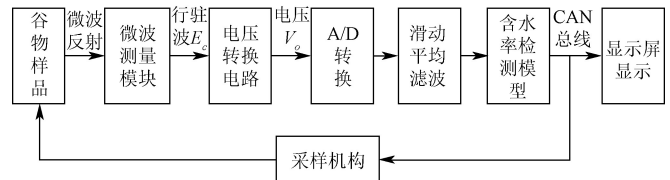


图 2 谷物含水率测量实现过程

Fig.2 Grain moisture measurement implementation process

1.2.1 滑动平均滤波

由于存在机械振动、粉尘杂质、电路元件等因素干扰, 实际采集到的输出信号是上下波动而且不稳定的, 本文采用滑动平均滤波算法进行数据处理。滑动平均滤波继承了算术平均滤波的优点, 可以有效跟踪变量的动态趋势, 抑制数据中的高频噪声和周期性干扰, 满足实时性的要求^[28]。假设原始信号 $x(t)$ 经过检测装置离散采样后采样信号 $x(i)$ 为

$$x(i) = x'(i) + n(i) \quad (9)$$

式中 $x'(i)$ 为采样信号中真实信号; $n(i)$ 为采样信号中干扰信号。

为减少干扰信号 $n(i)$ 的影响, 使采样信号 $x(i)$ 更接近于真实信号 $x'(i)$, 对采样信号 $x(i)$ 在固定长度为 N 的窗口内做局部平均, 用局部均值将窗口中的最后一个位置的数据替代, 通过逐一对长度为 L 的采样信号在窗口内不断进行滑动平均, 就可以得到一组新的滤波后的信号

$y(i)$, 滑动平均滤波的计算公式如下

$$y(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(i-k), i \geq N \quad (10)$$

式中 $x(i)$ 为采样信号; N 为窗口长度。

但在采样初始阶段采样数据数量未能达到窗口值 N , 可以根据精度要求, 取小窗口长度, 对滑动平均滤波算法进行一次或者多次嵌套使用, 取窗口 N_0 , 其中 $N_0 < N$, 对于前 $i < N$ 个数据:

$$y(i) = \frac{1}{N_0} \sum_{k=0}^{N_0-1} x(i-k), N_0 \leq i < N \quad (11)$$

本文采用均方根误差 (root mean square error, R_{RMSE})、信噪比 (signal noise ratio, S_{SNR}) 作为滑动平均滤波方法滤波效果的评价指标^[29], 如式 (12)、(13) 所示, 信噪比越高、均方根误差越小, 滤波效果越好。

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (y(i) - x(i))^2}{L}} \quad (12)$$

$$S_{\text{SNR}} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^L y(i)^2}{\sum_{i=1}^L (y(i) - x(i))^2} \quad (13)$$

对不同含水率的稻麦样品采样到的信号滤波, 经过调试计算, 在 $N=25$ 、 $N_0=5$ 时信噪比较高, 均方根误差较小, 滤波效果较好。例如含水率为 32.24% 小麦样品采样信号的滤波效果如图 3 所示, 计算可得 $R_{\text{RMSE}}=0.0014$, $S_{\text{SNR}}=61.6256$, 滑动平均滤波算法有效抑制了采样信号中的高频随机噪声, 保留了原始信息, 信号基本在 1.6893 V 附近轻微波动。

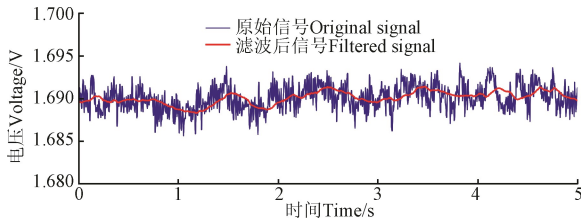


图 3 小麦样品的滑动平均滤波效果图 (含水率 32.24%)
Fig.3 Sliding average filtering result of wheat sample with moisture content of 32.24%

1.2.2 谷物含水率检测模型

经过滤波后的信号基本为稳定的电压值, 随含水率的变化而变化, 为建立谷物含水率检测模型, 取滤波结果的电压均值作为该含水率下对应的电压输出, 例如图 8 所示的含水率 32.24% 的小麦样品的电压输出均值为 1.6893 V。由式 (8) 可知, 在测量厚度和密度一定的前提下, 谷物含水率与输出电压成线性函数关系, 因此对不同含水率的谷物样品进行输出电压-含水率标定即可建立含水率检测模型。本文采用最小二乘法进行数据拟合, 最终得到的谷物含水率检测模型的形式为

$$M=AU+B \quad (14)$$

式中 U 为滤波后的电压均值, V; A 、 B 为系数, 由标定得到。

2 谷物含水率检测装置系统设计

2.1 检测装置结构设计

谷物含水率在线检测装置主要由硬件电路和采样机构两部分组成, 硬件电路主要包括微波测量模块、电压转换电路和信号处理电路等, 采样机构主要包括传感器外壳、舵机和十字形叶片等。检测装置安装在联合收割机粮仓内的升运器绞龙出粮口下方, 如图 4 所示, 装置左侧内部为硬件电路和舵机, 右侧为采样机构, 二者之间为 140 mm×55 mm×62 mm 采样容腔, 用于谷物样品采集和微波测量。由于采样容腔体积固定, 每次采集谷物的体积也基本一致, 样品厚度即为采样容腔宽度。

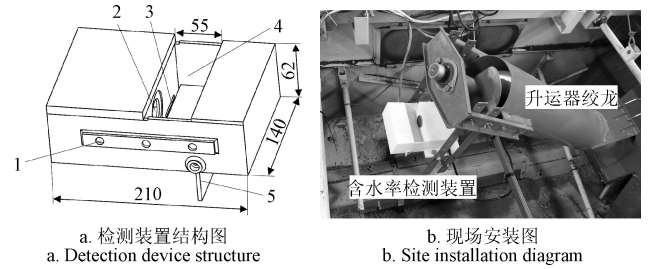


图 4 检测装置结构图和现场安装图
Fig.4 Measuring device structure diagram and site installation diagram

联合收割机进行收获作业时, 谷物从检测装置的上方持续流入采样容腔中, 保证了谷物样品的实时性和连续性。采样容腔底部是一个可以绕轴旋转的十字形叶片, 舵机臂的伸出和缩回可对十字形叶片阻挡和释放, 进而控制采样容腔采样和弃样。舵机由脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号来控制: 采样状态下, PWM 信号占空比为 7.5%, 舵机臂旋转至 90° 位置, 舵机臂从舵机臂挡孔伸出, 十字形叶片被舵机臂阻挡, 无法转动, 采样容腔开始采集谷物样品, 经采样时间 t_1 装满容腔; 测量状态下, PWM 信号占空比为 7.5%, 舵机臂位置不变, 微带天线开始对样品进行静止测量, 测量时间 t_2 ; 弃样状态下, PWM 信号占空比为 2.5%, 舵机臂旋转至 0° 位置, 从舵机臂挡孔缩回, 十字形叶片可以绕轴自由转动, 谷物由于重力作用从采样容腔流出, 弃样时间为 t_3 。重复上述动作, 保证检测装置周期性采样、测量和弃样。

本文所涉及的试验样机为雷沃重工股份有限公司研制的 GK120 稻麦联合收割机, 在正常的稻麦收获作业时, 前进速度为 1.5 m/s, 升运器绞龙的转速为 500 r/min, 谷物流量较大, 现场试验表明 2~3 s 可装满检测装置的采样容腔, 故将采样时间设置为 3 s, 2 s 可以满足谷物的弃样, 弃样时间设置为 2 s, 根据项目要求含水率数据 10 s 在显示屏上刷新一次, 所以本文将测量时间设定为 5 s。

2.2 硬件设计

谷物含水率在线检测装置的硬件电路设计包括微波测量模块、电压转换电路和信号处理电路三部分, 如图 5

所示。微波测量模块由微波源、隔离器、功率分配器、微带天线和混频器等组成,其主要功能是产生高频微波信号完成对谷物含水率的微波测量。电压转换电路可以实现微波参数到电压参数的转换,设计放大电路解决了电压信号微弱和负载效应明显的问题。信号处理电路以 STM32F103RCT6 微控制单元为核心实现数据采集、算法处理、采样机构控制和数据通讯等功能,使用上位机对检测装置进行程序调试,使用显示屏进行含水率实时显示,这部分主要为程序和应用软件设计。

2.2.1 微波测量模块

微波源选用压控微波振荡器,输出功率为 5 dBm,可产生 450 MHz 的导行电磁波,微波源连接隔离度为 18 dB 的同轴隔离器,防止负载反射信号对微波源产生干扰。功率分配器将导行电磁波分成 2 路功率相等的信号,一路作为参考信号发送到混频器的 LO 端口,另一路经馈线发送到收发复用微带天线,以空间电磁波的形式垂直射入采样容腔内的样品中。由于受到样品反射作用,一部分反射波被微带天线接收并将其发送至混频器的 RF 端口,反射波和入射波经混频器形成行驻波 E_c 。

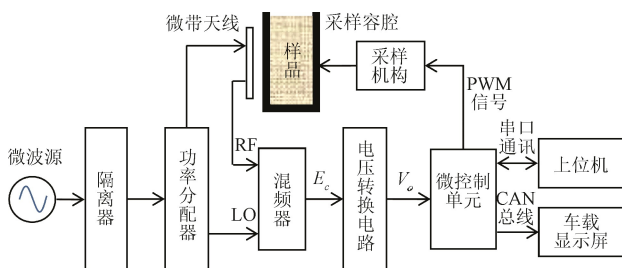


图 5 谷物含水率在线检测装置结构组成

Fig.5 Structure of on-line measuring device for grain moisture content

2.2.2 电压转换电路设计

电压转换电路主要原理图如图 6 所示,行驻波作为输入信号输入至电压转换电路 INPUT 端口,电压转换电路将行驻波信号的最大值和最小值进行检测和计算,将行波电压比 S_c 转换成电压形式输出。经示波器测量,输出电压微弱,分辨率很低,含水率为 14%~38% 的谷物样品对应的输出电压仅有 10~30 mV,而且对负载电路很敏感,无法直接对其进行信号采集和数据处理。

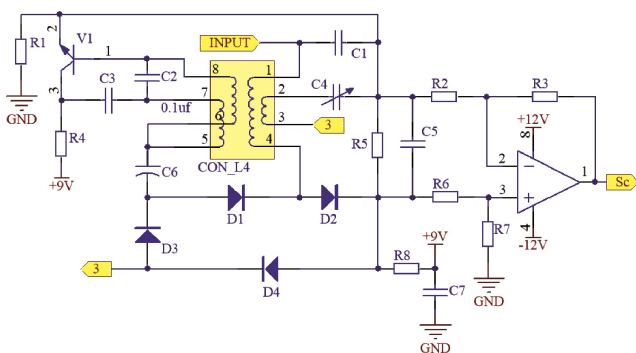


图 6 电压转换电路原理图

Fig.6 Schematic diagram of voltage conversion circuit

针对输出电压很微弱、抗干扰能力差的问题,本文采用高阻抗、高精度的 AD620 芯片,输入阻抗 10 G Ω ,最大输入失调电压 50 μ V,增益范围为 1~10 000,可以有效减少后续负载电路对输出电压产生的影响,同时对电压信号进行精确放大。由于 STM32 的 ADC 外设采样电压范围为 0~3.3 V,所以调节 AD620 的放大增益为 100 即可满足要求,计算公式如下

$$G = \frac{49.4}{R_G} + 1 \quad (15)$$

式中 G 为放大增益; R_G 为外部调节电阻, k Ω 。

所设计的电路图如图 7 所示,采用 IN+和 IN-差分输入,二者之差为上述电压转换电路的输出电压,图中的外部调节电阻 $R_9=499 \Omega$, C8 和 C12 为去耦电容,降低电源噪声防止电源抖动, C9、C10 和 C11 为输入信号滤波电容,可以提高信号稳定性, OUTPUT 为最终的输出信号 V_o 。

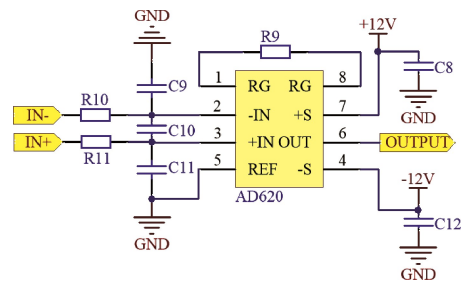


图 7 放大电路原理图

Fig.7 Schematic diagram of amplifier circuit

为尽量降低并抑制电路干扰、提高电路的稳定性,本文将电压转换电路和信号处理电路集成在同一块电路板上,并在布线方面规范化,如图 8 所示。

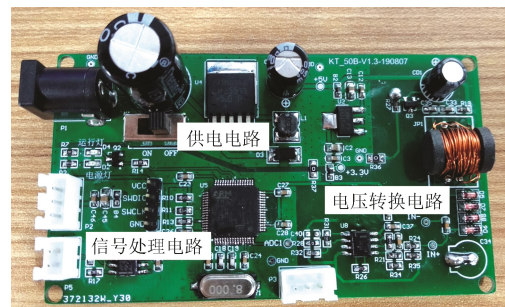


图 8 试验所设计的电路板

Fig.8 Circuit board used in the experiment

2.3 软件设计

信号处理电路以 STM32F103RCT6 微控制单元为核心实现信号 A/D 转换、采样机构控制、滑动平均滤波、谷物含水率计算和 CAN 总线通讯等功能。微控制器的 ADC1 的 PA1 口对输出信号 V_o 进行采样,采样频率为 100 Hz,通用定时器的通道 2 产生 PWM 信号实现采样机构控制。

谷物含水率在线检测装置的信号处理程序采用模块化的程序设计方法,按照单片机外设执行功能的不同划

分为相应程序模块, 用 C 语言编写, 由 Keil uVision5 编译并烧录, 信号处理程序流程图如图 9 所示。

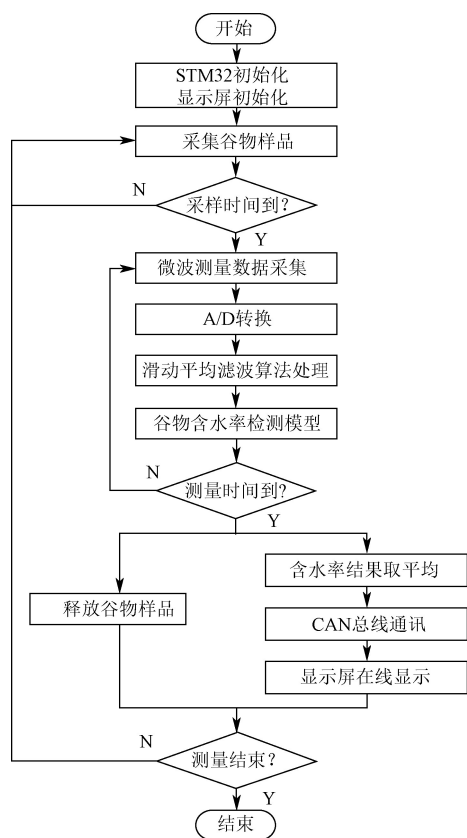


图 9 信号处理程序流程图

Fig.9 Flow chart of signal processing program

本文基于 Linux3.2.0 使用 QT 开发框架开发了联合收割机参数显示应用程序。应用程序包含用户登录退出、CAN 数据包解析、检测参数图标显示及数值显示、数据存储和异常报警等功能^[30]。通过 CAN 总线通讯, 联合收割机上安装的多种传感器采集到的数据, 如拨禾轮转速、行进速度、谷物流量、破损率和含水率等, 可在联合收割机驾驶室的车载显示屏上实时显示。图 10 是使用 16% 的含水率数据对显示屏应用程序进行通讯调试, 试验表明 CAN 总线通讯正常, 显示屏数据显示正常。

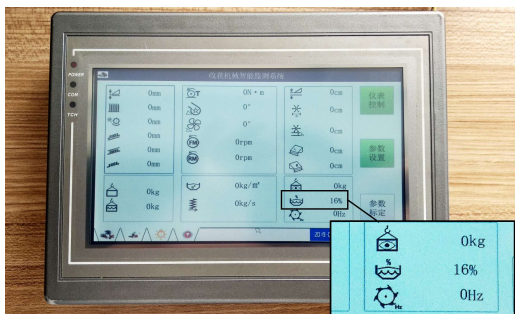


图 10 显示屏参数应用程序调试

Fig.10 Parameter application debugging of monitor

3 试验与结果分析

本文开展了室内静态试验和田间收割试验。室内静态试验制备水稻和小麦样品各 30 组, 完成了含水率-电压

的标定试验, 分别建立了水稻、小麦的含水率检测模型并对试验结果进行分析。田间收割试验以水稻为对象验证了谷物含水率在线检测装置的实用性与可靠性。

3.1 室内静态试验

3.1.1 样品制备与数据采集

将 30 份等量水稻样品放入 30 个一次性试验盒中, 分别加入不同体积的水, 然后将样品放入 4℃ 的恒温箱保存 3 天, 每天搅拌 3~4 次, 使水分被充分吸收并均匀分布。使用同样的方法制备 30 份不同含水率的小麦样品。在实验之前, 将上述稻麦样品移至 24℃ 的恒温箱保存 24 小时^[31]。

从已制备完成的稻麦样品中取出适量样品, 采用低温烘干法^[32]确定每份样品的标准含水率, 所使用烘箱为上海一恒科学仪器有限公司的 DHG-9240A 型电热鼓风干燥箱, 标准含水率计算如下

$$M = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100\% \quad (16)$$

式中 m_w 为样品中水分的质量, g; m_d 为样品中干物质的质量, g。

在室内使用本文所设计的谷物含水率在线检测装置分别对 30 组小麦样品和 30 组水稻样品进行测量, 环境温度为 20℃, 空气相对湿度为 73%。试验时将样品装满采样容腔, 每组样品静止测量 5 s, 通过串口通讯将装置采集到的数据实时传输至计算机并进行打印和存储。

3.1.2 稻麦含水率检测模型的建立

实验中同一组样品采集到的信号经过滑动平均滤波处理后基本为稳定的电压值, 并与含水率是单值对应关系, 随含水率的变化而变化。鉴于同一含水率下输出电压波动较小, 为减少误差并充分利用数据, 取滤波后的电压均值作为该含水率所对应的输出电压。实验完成后, 将 30 组水稻样品和 30 组小麦样品的电压-含水率数据绘制散点图, 并对线性区的数据进行最小二乘法线性回归拟合, 如图 11 所示。

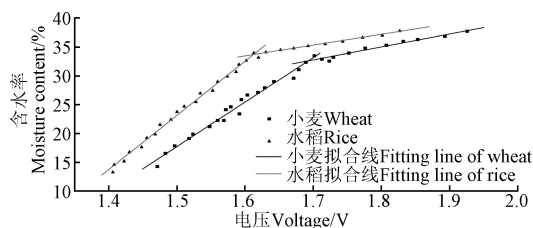


图 11 水稻、小麦含水率与其输出电压的关系

Fig.11 Relationships between wheat and rice moisture contents and their output voltages

由图 11 可以看出, 当稻麦含水率在 14%~38% 范围内, 输出电压和含水率的关系基本上分段线性函数, 根据拟合结果得到水稻和小麦的含水率检测方程如下

$$M_r = \begin{cases} 93.48U - 117.20, & U \leq 1.61 \\ 18.65U + 3.49, & U > 1.61 \end{cases} \quad (17)$$

$$M_w = \begin{cases} 73.93U - 93.09, & U \leq 1.70 \\ 22.36U - 5.37, & U > 1.70 \end{cases} \quad (18)$$

式中 M_r 为水稻含水率, %; M_w 为小麦含水率, %; U 为检测装置输出的电压值, V。

根据测量对象的不同, 将式 (17) 或式 (18) 写入 STM32 信号处理程序的谷物含水率检测模型, 检测装置即可根据测得的电压值对水稻或小麦的含水率进行计算。

3.1.3 试验结果分析

测量精度是表示谷物含水率在线检测装置性能的重要特征参数之一, 仪器的测量精度一般使用性能标准差 (standard error of performance, S_{SEP}) 来评估^[1,13], S_{SEP} 越小则表示测量精度越高。

$$S_{SEP} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta e_i - \bar{e})^2}$$
 (19)

式中 n 为样本数量; Δe_i 为装置测量值和标准方法测量值之差; \bar{e} 为 Δe_i 平均值。

为确定检测装置的测量精度, 在上述试验环境中另外制备了 8 组小麦测试样品和 8 组水稻测试样品, 使用谷物含水率检测装置对样品进行测量, 每组样品重复测量 10 次, 结果取均值, 如表 1 所示。

表 1 稻麦样品含水率检测结果

Table 1 Measurement results of moisture contents of rice and wheat samples

样品类型 Sample type	组号 Group No.	烘干法测量值 Value measured by drying method/%	装置测量均值 Mean value of device measurement/%	平均相对误差 Average relative error/%
水稻 Rice	1	14.46	14.15	2.1
	2	16.22	16.61	2.4
	3	20.14	19.79	1.7
	4	23.78	23.33	1.9
	5	26.43	27.06	2.4
	6	29.22	28.86	1.2
	7	31.49	32.10	1.9
	8	34.25	34.75	1.5
小麦 Wheat	1	14.19	14.47	2.0
	2	17.43	17.81	2.2
	3	20.34	19.89	2.2
	4	24.66	25.02	1.4
	5	25.27	25.76	1.9
	6	26.84	27.34	1.8
	7	30.05	30.52	1.5
	8	33.28	32.63	2.0

对于含水率在 14%~34% 之间的稻麦样品, 谷物含水率检测装置的性能标准差 S_{SEP} 为 0.458 3, 平均相对误差在 2.5% 左右, 测量结果较稳定。在现场收割作业中, 14% 的含水率基本为稻麦含水率下限, 而大于 34% 的稻麦含水率检测的实际应用意义不大, 因此本文所设计的检测装置对稻麦的含水率测量范围为 14%~34%。

3.2 田间收割试验

为验证谷物含水率在线检测装置的实用性与可靠性, 2018 年 10 月 28 日在江苏省海门市三和镇进行了水稻收获试验, 如图 12a。水稻品种为南粳 9108, 自然属性

为: 自然高度 86 cm, 容重 502 g/L, 千粒质量 31.1 g, 草谷比 1.69, 亩产 949 kg。联合收割机为雷沃重工股份有限公司 GK120 试验样机, 割幅宽度为 4.25 m, 留茬高度为 10 cm, 作业前进速度为 1.5 m/s。收获作业时, 检测装置安装在联合收割机粮仓内升运器绞龙出粮口下方, 如图 4b 所示, 在联合收割机前进方向每隔 20 m 选取一个 4.25 m×2 m 的样本区域, 共选取 5 个, 假设每个样本区域内含水率一致并采样适量籽粒样品。由于田间温度较高, 水分蒸发很快, 所以选择对样品含水率进行现场测量而非试验室低温烘干, 以减少水分损耗, 所使用的测量仪器型号为 LDS-1G 电脑水分测定仪, 测量绝对误差≤0.5%, 重复误差≤0.2%。当联合收割机进入样本区域时, 记录显示屏上检测装置测得的含水率, 如图 12b 所示, 并与水分测定仪测量的含水率进行比较, 结果如表 2 所示。

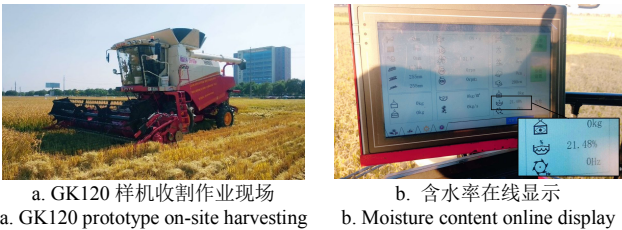


图 12 田间收割试验

Fig.12 Field harvesting experiment

表 2 田间收割试验结果

Table 2 Results of field harvesting experiment

组号 Group No.	含水率 Moisture content /%		绝对误差 Absolute error/%	相对误差 Relative error /%
	水分仪测量值 Measured by LDS-1G	装置测量值 Measured by device		
1	20.2	19.18	-1.02	5.1
2	20.7	21.64	0.94	4.5
3	21.5	22.55	1.05	4.9
4	20.9	20.08	-0.82	3.9
5	21.3	22.43	1.13	5.3

由表 2 的试验数据计算得 $S_{SEP}=1.078 0$, 绝对误差在 ±1.5% 以内, 相对误差在 5% 左右, 基本符合项目 5% 的测量误差要求, 有较高的实际应用价值。但田间试验精度比试验室稍差, 其原因可能是: 电脑水分测定仪自身存在 0.5% 的测量误差、田间试验环境恶劣、谷物含杂率较高和机械振动较大等, 可以通过优化检测装置结构、改进含水率检测模型等方法来提高含水率测量精度。

4 结 论

1) 本文基于微波反射法设计了一种稻麦联合收割机谷物含水率在线检测装置, 搭建了微波测量模块对稻麦进行无损在线测量, 设计了电压转换电路将微波参数转换成电压参数, 设计的信号处理电路以 STM32F103RCT6 微控制器为核心实现采样机构控制、信号 A/D 转换、滑动平均滤波、谷物含水率计算和 CAN 总线通讯等功能, 最后将含水率在车载显示器上实时显示。

2) 为减小信号中的干扰, 采用了滑动平均滤波算法, 有效还原了真实信号; 开展了水稻和小麦的电压-含水率

标定试验, 建立了稻麦含水率分段线性检测方程; 所设计的检测装置对稻麦含水率的测量范围为 14%~34%。

3) 对谷物含水率在线检测装置进行了室内静态试验以及田间收割试验, 室内静态试验中其性能标准差为 0.458 3, 平均相对误差在 2.5% 左右, 田间收割试验中其性能标准差为 1.078 0, 相对误差在 5% 左右。

本文所设计的稻麦联合收割机的谷物含水率在线检测装置结构紧凑、实用性较高, 适用于联合收割机狭小空间安装和稻麦含水率无损在线测量, 对于农作物收获参数在线测量、提升农业装备智能化水平和实现中国精准农业战略具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Trabelsi S, Lewis M A, Nelson S O. Microwave moisture meter for in-shell peanut kernels[J]. Food Control, 2016, 66: 283—290.
- [2] Nelson S O, Trabelsi S. Measurement of grain and seed microwave permittivity for moisture and density determination[C]//Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Concord, NC, 2010: 463—466.
- [3] 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.
- [4] 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 in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(1): 167—173. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨彬, 车刚, 万霖, 等. 谷物在线水分传感器的研究[J]. 农机化研究, 2017(4): 256—262.
Yang Bin, Che Gang, Wan Lin, et al. The study of online detecting measurement on grain moisture content[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017(4): 256—262. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邹治军. 农产品水分测量技术综述[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(17): 352—356.
Zou Zhijun. Overview of technology for determination of moisture content in agricultural products[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2015, 43(17): 352—356. (in Chinese with English abstract)
- [7] Nelson S O, Trabelsi S. Measurement of grain and seed moisture and density through permittivity relationships[C]//2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings, Austin, TX, 2010: 964—969.
- [8] Divyank, Prabhu R. Non-destructive methods for the measurement of moisture contents-a review[J]. Sensor Review, 2017, 37(1): 71—77.
- [9] 罗承铭. 基于电容法的谷物水分检测系统研究与设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Luo Chengming. Research and Design of A Grain Moisture Detecting System Based on Capacitance Method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [10] Trabelsi S, Kraszewski A W, Nelson S O. Nondestructive microwave characterization for determining the bulk density and moisture content of shelled corn[J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(9): 1548—1556.
- [11] Nelson S O, Trabelsi S, Lewis M A. Microwave sensing of moisture content and bulk density in flowing grain and seed[J]. Transactions of the ASABE, 59(2): 429—433.
- [12] Kim K B, Kim J H, Lee S S, et al. Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 72—77.
- [13] Trabelsi S, Nelson S O. Unified microwave moisture sensing technique for grain and seed[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(4): 997—1003.
- [14] Mathew G P, Joseph A V. Low-cost electronic microwave calibration for rapid on-line moisture sensing of seedcotton[J]. Sensors (Basel), 2010, 10(12): 11088—11099.
- [15] 李陈孝. 微波空间波技术材料含水率检测方法 & 装置的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Li Chenxiao. Study of Moisture Content Detection Methods and Devices Using Microwave Free-Space Technology[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [16] Nelson S O, Trabelsi S, Lewis M A. Microwave sensing of moisture content and bulk density in flowing grain and seed[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 429—433.
- [17] Cataldo A, Monti G, De Benedetto E, Cannazza G, et al. A noninvasive resonance-based method for moisture content evaluation through microstrip antennas[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1420—1426.
- [18] Rajesh Mohan R, Paul B, Mridula S, et al. Measurement of soil moisture content at microwave frequencies[C]//International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT 2014), Elsevier Procedia Computer Science, 2015, 46: 1238—1245.
- [19] Yahaya N, Abbas Z, Ismail M, et al. Determination of moisture content of hevea rubber latex using a microstrip patch antenna[C]//in Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012: 1290—1293.
- [20] Jain S, Mishra P K, Thakare V V, et al. Microstrip moisture sensor based on microstrip patch antenna[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2018, 76: 177—185.
- [21] 廉飞宇. 大型平房仓储粮水分分布的电磁波检测理论与方法研究[D]. 上海: 上海大学, 2012.
Lian Feiyu. The Research of an Electromagnetic Wave Detection Theory and Method to Moisture of Grain Pile[D]. Shanghai: Shanghai University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [22] Li Chenxiao, Han Bing, Zhang Tao. Free-space reflection method for measuring moisture content and bulk density of particulate materials at microwave frequency[J]. Review of Scientific Instrument, 2015, 86(3).
- [23] 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 Real Time Measurement Technology for Grain Moisture Content on Combine Harvester[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈进, 王月红, 练毅, 等. 高频电容式联合收割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 on-line monitoring device of grain moisture content in combine harvester with high frequency capacitance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 36—45. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王月红. 基于高频电容的联合收割机谷物含水率在线监测装置研制[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
Wang Yuehong. On-line Monitoring Device of Grain Moisture Content in Combine Harvester in Using High Frequency Capacitance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese with English abstract)

- [26] Trabelsi S, Nelson S O. Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials[J]. *Trans. ASAE*, 2004, 47: 1999–2008.
- [27] Nelson S O, Trabelsi S, Kraszewski A W. RF sensing of grain and seed moisture content[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(2): 119–126.
- [28] 刘华, 楼光海, 黄微. 结合双树复小波变换和滑动平均滤波的心电信号去噪方法[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(19): 112–117.
Liu Jian, Lou Guanghai, Huang Wei. ECG signal denoising with combination of dual-tree complex wavelet transform and moving average filter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(19): 112–117. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王芳, 季忠, 彭承琳. 基于双树复小波变换的心电信号去噪研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1160–1166.
Wang Fang, Ji Zhong, Peng Chenglin. Research on ECG signal denoising based on dual-tree complex wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1160–1166. (in Chinese with English abstract)
- [30] 熊思华, 李彦明, 焦中元, 等. 稻麦联合收割机械总线化监控系统研究[J]. *农机化研究*, 2019, 41(4): 190–193.
Xiong Sihua, Li Yanming, Jiao Zhongyuan, et al. Research on can-bus monitoring system of rice and wheat combine harvester[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(4): 190–193. (in Chinese with English abstract)
- [31] Trabelsi S, Nelson S O, Lewis M. Microwave moisture sensor for grain and seed[J]. *Biological Engineering*, 2008, 1(2): 195–202.
- [32] 国家技术监督局. 农作物种子检验规程水分测定, GB/T 3543.6-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

Development of on-line detection device for grain moisture content using microwave reflection method

Zhang Wei, Yang Gang, Lei Junbo^{*}, Liu Chengliang, Tao Jianfeng, Qin Chengjin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Moisture content is one of the important indicators in grain harvesting, trading, storage and processing. High moisture content will lead to a series of problems of grain such as mildew, deterioration, shortened storage time, lower transaction price and higher processing cost. With the development of precision agriculture, accurate detection of grain moisture content can also accurately assess the growing situation of crops, and then provide guidance for the next season's crop planting. Compared with the drying method, the capacitance method and the electric resistance method, the microwave method is easy to realize the non-destructive measurement of the grain moisture content, which is an important direction of moisture content detection. In the field of on-line detection of moisture content of rice and wheat in combine harvesters, foreign related research started earlier, and enterprises have commercialized, but this technology is still in the research stage in China. Aiming at the problem that the rice-wheat combine harvester is difficult to accurately measure the moisture content of wheat and rice during harvesting operation, this paper studied a non-destructive on-line detection method of grain moisture content based on microwave reflection method, established the grain moisture content measurement model, designed a non-destructive on-line detection device for grain moisture content used on rice-wheat combine harvesters. The device used a 450 MHz microwave measurement module to measure the moisture content of rice and wheat non-destructively. The voltage conversion circuit was designed to convert microwave parameters into voltage signals, and the average filtering algorithm was used for signal filtering to reduce the impact of interference factors. Finally, the moisture content detection model of rice and wheat, which was established by the calibration experiment, was used to calculate the moisture content. The calculation result was displayed on the display in real time via CAN bus communication. Due to the insufficient installation space in rice-wheat combine harvester, the structure of the detecting device was designed and optimized, and the circuit portion and the sampling mechanism were integrated in a compact structure. Based on the above theoretical research, technology development and structural design, this paper carried out laboratory static experiments and field harvesting experiments. The laboratory static experiment used rice and wheat to illustrate the establishment process of the grain moisture content detection model: 30 groups of rice and 30 groups of wheat samples were prepared, moisture contents and voltages calibration experiment was completed, the rice and wheat moisture content detection models was established and the experimental results were analyzed. The field harvesting experiment was verified the practicability and reliability of the grain moisture content detecting device with rice as the test object. The experiment results show that the performance standard deviations of the laboratory static experiment and the field harvest experiment are 0.458 3 and 1.078 0, respectively, and the relative error are around 2.5% and 5%, respectively. Moisture content measuring range of the detection device for rice and wheat is 14%-34%, which meets the project requirements.

Keywords: moisture content; agricultural machinery; microwave; the sliding average filtering; experimental study