

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.032

# 浮地式粮食水分在线检测装置设计与试验\*

麦智炜 李长友 徐凤英 方壮东

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 基于非接触式平行极板浮地电容测量原理,设计了一种适用于恶劣环境的电容式粮食水分检测装置,结合静态批次测量法,以提高测量的重复精度;设计了定位充料器,消除了因堆积方式不同引起空隙率变化对测量造成的误差。采用无线通信技术,实现传感器与计算机客户端的实时数据传输,克服了干燥现场恶劣工况对数据信号传输的影响,适用于干燥机干燥过程中的粮食水分在线实时检测。在连续式干燥机上,在线检测玉米的试验结果显示,温度在15~50℃,相对湿度在80%~100%,玉米含水率范围在14%~21%动态变化的条件下,在线检测结果与国标规定的烘箱法测量相比,最大偏差小于±0.4%。采用定位充料,批次稳态测量,无线通讯保证了在线检测的精度和可靠性,为实现粮食干燥过程自适应控制提供了含水率在线检测技术手段。

**关键词:** 粮食 水分 在线检测 设计 试验

**中图分类号:** S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0207-07

## 引言

我国在粮食干燥模型解析理论及控制技术领域的研究,揭示了粮食水分结合能及干燥系统热能结构<sup>[1-3]</sup>,指明了利用客观干燥势实现高效节能的技术途径<sup>[4-6]</sup>,开发了粮食干燥自适应控制系统<sup>[7-8]</sup>,但可靠的水分在线检测仍是实现技术应用的难点之一。水分含量关系到粮食的物理与化学性质,是评价产品质量的一个重要指标,也是实现干燥过程调控,节能降耗工艺设计必不可少的关键参数之一,但目前仍然缺少准确度高、稳定性好的在线水分检测装置和技术。围绕微波法、红外法、电学法、压力法等开发在线检测仪已进行大量的尝试<sup>[9-12]</sup>。微波、红外和电容法共同的缺点是受粮食的形状、厚度、密度以及粒体内部的水分分布影响较大<sup>[13-18]</sup>,在高粉尘环境及谷物水分波动较大时的检测精度较低,中子法测量的最大的问题是氢的散射特性不稳,中子计数比与谷物容积含水率关系的变化规律因粮食的品种而异<sup>[19]</sup>,不同时期、不同品种的粮食也不相同。采用中子法测量粮食含水率时必须对每一批物料作相应的预处理工作,技术尚不成熟。基于电阻法开发了高精度的粮食含水率单粒在线检测仪<sup>[20]</sup>,但可靠的在线采样问题困扰着技术的应用。粮食干燥系统存在诸多不确定因素,高温、高湿、高粉尘、流态波

动、含杂率变动都给检测精度及可靠性造成很大困难。针对电容方式在线测量特定的技术问题,如建立定流量条件下传感器震荡频率<sup>[13]</sup>,探索介电损耗因数<sup>[21-22]</sup>,改进极板结构<sup>[23-28]</sup>,检测与控制进行了系统的研究<sup>[29-31]</sup>,至今作为可靠技术产品在线应用的范例极缺,检测精度及可靠性受粮食流态波动影响极大。为此,本文设计一种非接触平行极板浮地电容式粮食水分在线测量装置,采用定位充料,批次稳态测量,无线通讯确保在线检测精度及仪器检测的可靠性,并进行生产应用试验验证。

## 1 系统硬件构成

粮食电容式水分在线检测系统构成如图1所示。

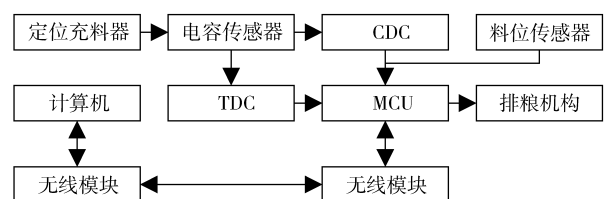


图1 系统构成

Fig.1 Composition of system

定位充料器安装在干燥机出粮口附近,出粮口的一部分粮食会落入并填满定位充料器,定位充料器的排料滚轮把粮食匀速稳定地送进电容传感器,

收稿日期: 2014-02-08 修回日期: 2014-05-17

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114404110021,20060564003)

作者简介: 麦智炜, 博士生, 主要从事农产品物性检测研究, E-mail: m060401819@163.com

通讯作者: 李长友, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备技术研究, E-mail: lichyx@scau.edu.cn

保证传感器内粮食在同一含水率下的空隙率保持一致。电容传感器顶部有电容式接近开关,当粮食装满传感器后,接近开关向单片机(MCU)输出信号,此时MCU通过电容数字转换电路(CDC)和温度数字转换电路(TDC)记录被测粮食的电容值和温度值并计算出对应的含水率。测量结束后MCU启动排粮电磁铁,打开排粮侧板,把已测粮食排出传感器,系统进入下一次测量。测量过程中传感器测量结果通过无线模块实时发送至计算机,实现用户远程监控。

## 2 水分在线检测装置设计

### 2.1 电容传感器结构

在电场形式确定后,影响测量电容的主要因素是被测粮食的介电常数,介电常数是被测粮食分子在电场中发生极化现象的宏观表现。假设电容的测量容腔内均匀装满粮食,容腔内电场线均匀分布,则可以把电容测量容腔内的粮食视为干空气、水、碳水化合物3种物质的混合物。空气和碳水化合物为低损耗介质,其介电常数随温度变化很小,在50 kHz频率下分别约为1和3~5;水为高损耗介质,其介电常数随温度变化而变化,在50 kHz频率下,0~100℃的水介电常数为55.88~78.9。因水的介电常数远大于其他2种物质,因此被测粮食的介电常数与其含水率直接相关,含水率越高,介电常数越大。

为了获得均匀稳定的测量电场并减少边缘效应,本文采用薄板结构的非接触式平行极板浮地电容测量法,测量过程粮食与极板不接触,可避免电极受电化学腐蚀,同时也提高了高水分下粮食电容的测量精度。测量区域周围包裹屏蔽层隔绝外界电磁场干扰。

图2所示为电容式粮食在线检测传感器结构。电容极板为1.6 mm厚双面覆铜板,两块极板面积和形状相同,极板内侧面为电容测量电极,反面接地。传感器外保护板和测量容腔材料均为亚克力板。两电容极板安装在测量容腔外表面,容腔内被测粮食与电容极板绝缘,如图2a所示。电容极板接地面粘贴一层双面导电铝箔以隔绝外部电磁场的干扰,屏蔽层的面积略大于极板面积,多出的部分具有等位环,减少了边缘效应,如图2b所示。传感器测量容腔外安装外保护板,保护电容极板和屏蔽层,实现防水防尘功能。

料位传感器装于传感器顶部,用于检测粮食是否装满传感器容腔。传感器下侧装有数字温度传感器,用于测量粮食温度,修正温度对电容测量的影响。

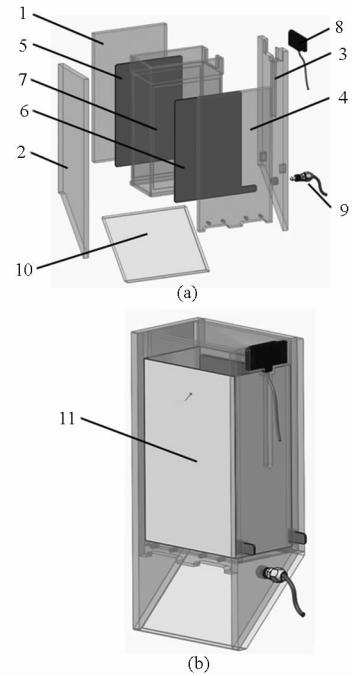


图2 电容粮食在线检测传感器结构

Fig. 2 Structure of capacitive sensor

1,2,3,4. 传感器外保护板 5,6 电容极板 7. 测量容腔 8. 料位传感器 9. 数字温度传感器 10. 底板 11. 屏蔽层

### 2.2 定位充料

粮食电容除受温度和含水率影响外,其堆积的空隙率也显著影响测量电容。相同含水率的粮食以不同方式落入测量容腔时,容腔内粮食的空隙率亦会改变,从而影响测量结果。因松散物料的空隙率难以在线测量<sup>[32]</sup>,因此需要探讨不同落入方式对其堆积空隙率的影响及其重复性。试验设定3类具有代表性的粮食在线落入方式,第1类为定点洒落,第2类为线型洒落,第3类为整个截面均匀洒落,其中定点洒落方式设计了3个洒落位置,分别是1~3;线型洒落方式设计了4个洒落位置,分别是4~7;均匀洒落方式标记为8,如图3所示。每种洒落方式分3种洒落速度,其中定

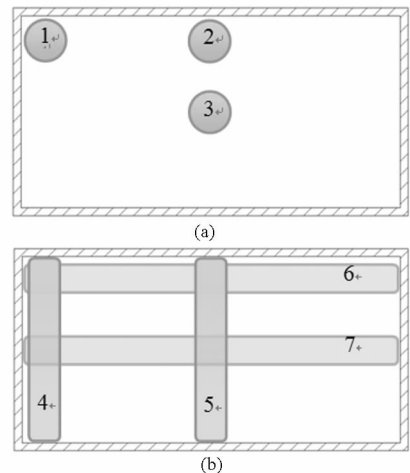


图3 玉米洒落方式俯视图

Fig. 3 Top view of grain scatter forms

点洒落方式的落入速度分别为 5、10 和 20 g/s; 线型洒落方式的落入速度分别为 10、20 和 30 g/s; 均匀洒落方式的洒落速度分别为 25、35 和 50 g/s。玉米样品含水

率分别为 13.3%、15.1% 和 17.6%, 每次试验重复 20 次。表 1 所示为玉米在这 8 种洒落方式下装满测量容腔后的测量电容。

表 1 不同洒落形式下玉米的测量电容  
Tab. 1 Capacitance of different grain scatter forms

含水率/%	洒落方式								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
13.3	速度 1	8.8 ± 0.2	8.8 ± 0.1	8.6 ± 0.3	10.0 ± 0.4	9.8 ± 0.3	11.9 ± 0	12.1 ± 0.2	13.2 ± 0.5
	速度 2	8.8 ± 0.1	9.0 ± 0	8.9 ± 0.2	10.0 ± 0.2	9.9 ± 0.1	12.0 ± 0.1	12.2 ± 0	13.5 ± 0.3
	速度 3	8.9 ± 0.2	8.8 ± 0.1	8.8 ± 0.2	10.0 ± 0.3	9.8 ± 0.2	12.0 ± 0	12.1 ± 0.1	13.1 ± 0.4
15.1	速度 1	10.1 ± 0.2	10.2 ± 0.1	10.0 ± 0.1	12.0 ± 0.1	12.0 ± 0.3	14.2 ± 0.2	14.3 ± 0.1	15.4 ± 0.3
	速度 2	10.0 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.0 ± 0.2	11.9 ± 0.3	12.0 ± 0.3	14.2 ± 0.2	14.1 ± 0.3	15.5 ± 0.2
	速度 3	10.1 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.0 ± 0.1	11.9 ± 0.1	11.8 ± 0.2	14.1 ± 0.2	14.2 ± 0.2	15.3 ± 0.4
17.6	速度 1	12.3 ± 0.1	12.5 ± 0.2	12.4 ± 0.1	14.8 ± 0.2	14.9 ± 0.1	16.9 ± 0	16.9 ± 0.2	18.8 ± 0.3
	速度 2	12.2 ± 0.2	12.5 ± 0.1	12.6 ± 0.2	15.0 ± 0	14.7 ± 0.2	16.9 ± 0.1	17.0 ± 0.2	18.8 ± 0.3
	速度 3	12.2 ± 0.1	12.5 ± 0.2	12.3 ± 0.2	14.8 ± 0.2	14.7 ± 0.2	17.2 ± 0.1	17.1 ± 0.4	19.0 ± 0.4

从表 1 可看出, 含水率为 13.3% 的玉米在 8 种洒落方式下, 其测量电容从 8.8 pF 变化到 13.2 pF, 洒落面积越大, 测量电容越高。含水率为 15.1% 和 17.6% 的玉米也具有相同的特性, 而且洒落面积越大, 玉米含水率变化对测量电容的影响也越明显。因此, 洒落方式对测量电容有显著影响。对比相同洒落方式下不同洒落速度最终测得的玉米电容可看出, 在试验设定的洒落速度范围内, 洒落速度变化对测量电容影响不大。通过分析相同洒落方式下不同洒落位置最终测得的玉米电容可得, 洒落位置变化对测量电容的影响不明显。由此可知, 洒落方式显著影响测量电容, 而洒落位置和洒落速度的变化对其测量电容的影响不大。因此, 合理控制粮食进入测量容腔时的洒落方式, 能避免在线检测过程中谷物随机洒落对测量精度的影响, 为此设计线型洒落定位充料器。图 4 所示为定位充料器, 该装置安装在传感器容腔上方, 电动机带动排料滚轮旋转把集料斗中的谷物以线状方式均匀洒落, 以谷物干燥在线检测玉米为例, 其洒落平均速度约为 15 g/s。

### 2.3 排粮机构

在线测试过程中, 为获得稳定、准确及高重复性电容, 测量容腔内的粮食以批次稳态方式采集并测量, 传感器每次测量承装约 800 g 粮食, 一次测量总用时约为 1.5 min, 与 6~7 h 的粮食干燥过程相比, 可以看作实时测量, 不存在测量滞后性, 测量结束后, 迅速排清已测粮食, 以保证每次新测量粮食与已测粮食不会相互混合, 因此, 需合理设计排粮机构, 使得机构能高效、稳定、可靠运行。

运用相似理论, 测量容腔可以类比成深仓, 从

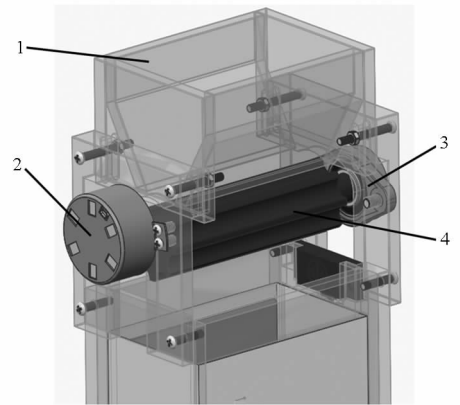


图 4 定位充料器结构图

Fig. 4 Structure of feed controller

1. 集料斗 2. 排料电动机 3. 轴承 4. 排料滚轮

Janssen 提出的粮仓效应理论可知粮仓底部所受的正压和侧压不会随着填充高度线性增加, 而是随高度的增加而幅度逐步放缓, 粮食高度到达一定以后, 粮仓底部压力会趋于一个饱和值, 整个过程中, 侧压力都远小于正压力<sup>[33]</sup>。

基于上述原理, 为确保排粮机构动作灵活, 必须减少测量过程中粮食对排粮机构的压力, 因此排粮机构设计成侧向打开。在静止状态下, 弹簧有一定的预拉力, 保证排料门不会被粮食的侧向作用力推开, 如图 5a 所示。排粮时, 电磁铁通电, 推动转臂克服弹簧拉力打开排料门, 如图 5b 所示。4 s 后粮食排清, 电磁铁自动断电, 排料门在弹簧的回弹下复位。

### 2.4 水分在线检测装置电路设计

#### 2.4.1 微电容测量电路

测量容腔空载时的电容为 0.2 pF, 当容腔装满粮食时电容为 5~35 pF, 为了得到较高精度的含水

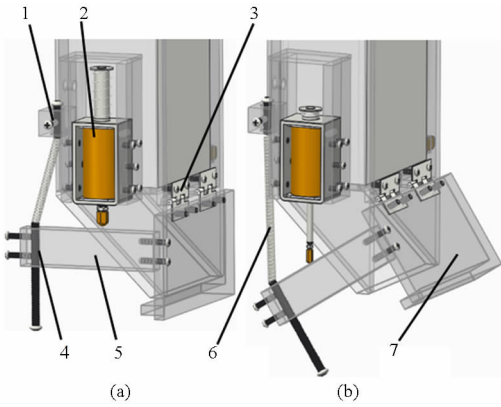


图5 谷物排粮机构结构图

Fig.5 Structure of grain discharge

- 1. 弹簧固定端 2. 直动式电磁铁 3. 旋转合页 4. 弹簧调整端
- 5. 转臂 6. 弹簧 7. 排料门

率数据,测量电路分辨率需小于 0.1 pF,该精度采用传统的阻抗法和谐振法均难实现。AD7745 电容数字转换芯片作为一种微电容检测元件正逐步得到广泛应用。AD7745 的电容测量范围为 0 ~ 21 pF,采用电容比例法,可把电容检测范围扩大至 0 ~ 120 pF。本文采用 AD7745 及其扩展电路与单片机共同搭建粮食电容式在线检测微小电容测量电路,其硬件原理如图 6 所示。测量电路控制器采用增强型 51 单片机 STC12C5620AD,外部晶振为 22.114 8 MHz,具有较高的运算速度和稳定性,单片机与 AD7745 之间通过 IIC 接口通信。

电路测量原理采用浮地法,以减少传感器极板对地的寄生电容以及对地的漏电。两电容极板引线使用 SYV-75-2-1 同轴电缆,电缆的屏蔽层和传感器屏蔽层相连并接地,以进一步消除寄生电容及引线间的耦合电容。

测量电路性能检测参考 GB/T 13978—2008 标准,结合空变电容和同惠 TH2821B LCR 数字电桥,对电路进行标定,标定结果显示该电路的分辨率为 0.01 pF,精度为 ±0.1 pF,可测量范围为 0 ~ 85 pF,满足测量要求。

### 2.4.2 无线通信网络

为保证水分在线装置与电脑间通信实时、准确、稳定,避免干燥现场恶劣环境对数据通信的影响,降低设备安装周期和成本,本文设计了适合水分在线装置的无线通信网络。传感器端采用 JZ873 无线数传模块,该模块采用透明传输方式通过串口与单片机实现数据收发;电脑端采用 JZ874 USB 无线数传模块。两模块间的传输频率为 433 MHz,波特率为 9 600 bps,采用 3.5 db 吸盘天线,无线传输距离不少于 2 000 m,满足粮食干燥数据传输距离要求。

粮食水分在线检测装置与电脑无线通信采用 Modbus ASCII 通信协议。该协议包括地址码,功能代码,数据区间和 LRC 校验,能够实现多设备间的通信。

### 2.4.3 防护设计

粮食干燥设备运行过程中会排出大量的水蒸气。干燥过程中粮食间相互摩擦,在风机和提升机的作用下产生大量的粉尘。因此参照 GB 4028—2008 对传感器的电源、控制电路和执行机构作防水防尘处理,达到 IP64CM 级别。传感器在检测过程中不断地受到粮食冲刷,在没有防护的情况下,传感器短时间内就会被严重磨损,因此必须在粮食水分在线检测装置外表面和电容测量腔内壁粘贴厚度为 1 mm 的玻璃。图 7 所示为传感器的最

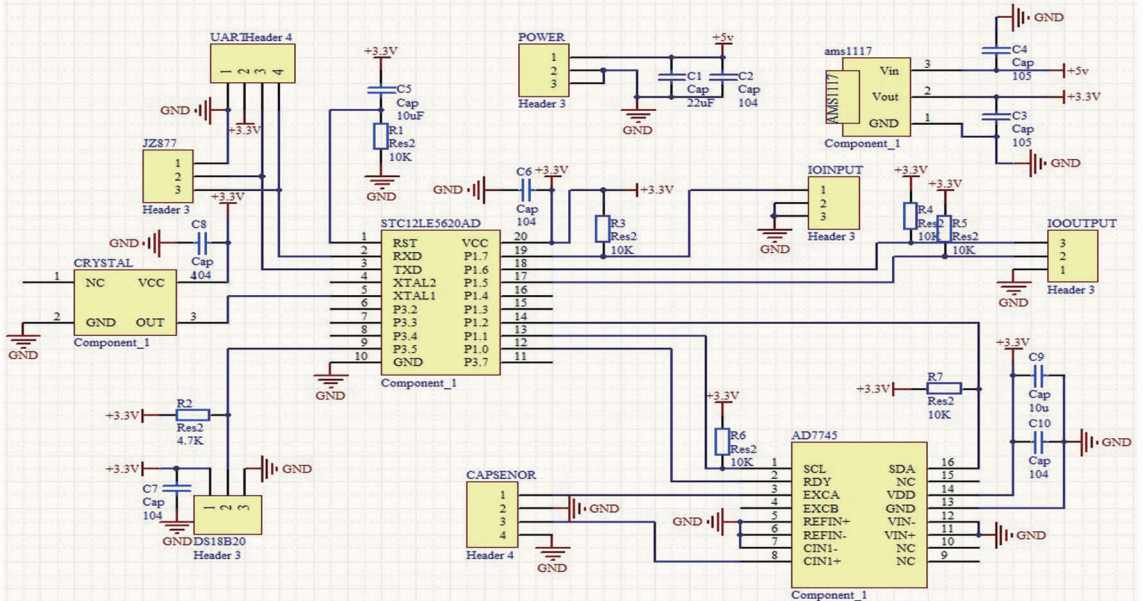


图6 微电容测量电路硬件原理

Fig.6 Hardware principle diagram of micro-capacitance gauging circuit

终实物图。

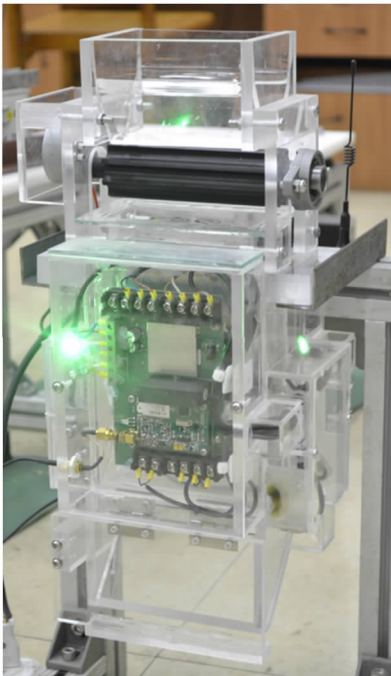


图 7 粮食水分在线检测传感器实物图

Fig. 7 Picture of grain moisture online measuring sensor

### 3 试验

#### 3.1 试验标定

2013 年 10 月在新疆昌吉州奇台县老奇台镇牛王公村玉米产地干燥场进行了玉米的电容、温度和含水率关系标定试验。电容传感器安装在 200 t 连续式玉米干燥机排粮轮下方,如图 8 所示。干燥原料为“新玉 10 号”,玉米初始含水率约为 20%,含杂率为 5%,干燥目标含水率为 12.5%。标定试验共干燥 3 塔玉米。为获得不同温度下玉米水分与其电容之间的对应关系,干燥机以循环方式干燥。第 1 塔干燥机的热风温度为  $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,第 2 塔干燥机的热风温度为  $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,第 3 塔干燥机的热风温度为  $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。粮食干燥过程中,每 30 min 在传感器底部取样,依照 GB/T 5497—1985 标准,对样品进行粉碎,经  $(130 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、40 min 的定时定温烘箱法测量其含水率,测量结果跟电容式粮食水分在线检测装置测得的玉米电容进行对比,获得不同温度下玉米含水率与其电容之间的对应关系。

对实时在线检测数据的多元非线性回归,得到

$$M = a_0 + a_1 x_c + a_2 x_T + a_3 x_c x_T + a_4 x_c^2 + a_5 x_T^2 \quad (1)$$

式中  $x_c$ ——测量电容  $x_T$ ——粮温

$M$ ——粮食含水率

决定系数  $R^2 = 0.984$ ,其中: $a_0 = 11.1941$ , $a_1 = 2.1397$ , $a_2 = -0.7196$ , $a_3 = 0.0367$ , $a_4 = -0.0879$ , $a_5 = 0$ 。



图 8 设备现场安装图

Fig. 8 Equipment installation diagram

#### 3.2 试验验证

把式(1)给出的玉米电容与含水率、温度间的关系编写入计算机人机界面中,计算机根据水分在线检测装置测得的温度和电容计算粮食含水率。试验过程电容式水分在线检测装置安装位置的空气温度波动范围  $15 \sim 50^\circ\text{C}$ ,环境相对湿度为  $80\% \sim 100\%$ 。在线实时计算玉米含水率,在传感器底部取样,并用烘箱法测量玉米样品的实际含水率。将在线装置的测量值与烘箱法测量值进行比较如图 9 所示。

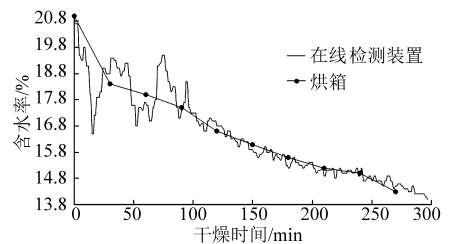


图 9 装置测量值与标准烘箱法实测值比较

Fig. 9 Comparison of moisture contents measured by self-designed grain moisture online measuring device and standard oven drying method

由图 9 可以看出,测量含水率与实际含水率的差距不大。相对于实际含水率,测量含水率的绝对误差在  $-0.4\% \sim 0.4\%$  之间,平均绝对误差为  $0.23\%$ 。

### 4 结论

(1) 采用非接触式平行浮地电容法测量粮食电容,粮食按批次进行测量,测量过程粮食处于稳态,因此电容具有较高的稳定性。

(2) 定位充料器保证了粮食定位充填的均匀性,提高了传感器测量的准确性与重复性。

(3) 采用无线通信,实现了在线检测装置与控制器间通信,避免了线损等不确定因素对检测可靠性的影响。

(4) 采用定位充料,批次稳态测量,无线通讯保

证了在线检测的精度和可靠性,在温度 15 ~ 50℃, 21% 动态变化的条件下,在线检测的最大偏差小于相对湿度在 80% ~ 100%,玉米含水率范围在 14% ~ ±0.4%。

### 参 考 文 献

- 李长友, 麦智炜, 方壮东. 粮食水分结合能与热风干燥动力学解析法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 236 - 242.  
Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong. Analytical study of grain moisture binding energy and hot air drying dynamics [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 236 - 242. (in Chinese)
- 李长友, 马兴灶, 方壮东, 等. 粮食热风干燥热能结构与解析法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 220 - 228.  
Li Changyou, Ma Xingzao, Fang Zhuangdong, et al. Thermal energy structure of grain drying by analytical method [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 220 - 228. (in Chinese)
- 李长友. 粮食热风干燥系统评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 1 - 6.  
Li Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 1 - 6. (in Chinese)
- 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 experimental study of dryer for high moisture grain storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 231 - 235. (in Chinese)
- 李长友, 方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 210 - 215.  
Li Changyou, Fang Zhuangdong. Analytical model of high moisture content paddy in multistage countercurrent drying and tempering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 210 - 215. (in Chinese)
- 李长友, 麦智炜, 方壮东, 等. 种子循环干燥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 242 - 248.  
Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong, et al. Design and test of seed circulation drying system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 242 - 248. (in Chinese)
- Li Changyou, Ban Hua, Shen Wenhao. Self-adaptive control system of grain drying device [J]. Drying Technology, 2008, 26(11): 1351 - 1354.
- 李长友, 班华. 基于深层干燥解析理论的粮食干燥自适应控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 142 - 146.  
Li Changyou, Ban Hua. Self-adaptive control system of grain drying device based on deep-bed analytical ventilating drying theory [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 142 - 146. (in Chinese)
- 赵保军, 曲春波, 李扬. QB475 红外水分仪的改进[J]. 电子测量与仪器学报, 1999, 13(1): 67 - 70.
- 付海东. 压力式粮食水分在线检测系统的设计与研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.  
Fu Haidong. The design and research on grain moisture content on-line measuring system based on pressure [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 张茜. 微波水分计的设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.  
Zhang Xi. Design of microwave moisture content instrument [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 董怡为. 基于非均匀电场的谷物水分在线检测方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.  
Dong Yiwei. On the online determining method of water content of grain based on non-uniform electric field [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- Mai Zhiwei, Li Changyou, Zhang Ye, et al. Application of wireless data transmission technique in drying equipment [J]. Advanced Materials Research, 2012, 422: 262 - 267.
- 麦智炜. 粮食水分在线检测系统[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.  
Mai Zhiwei. Online moisture testing system for grain [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 邱禹. 基于平板结构的便携电容式粮食水分检测仪的设计[D]. 广州: 华南农业大学, 2013.  
Qiu Yu. Design of portable capacitance grain moisture detector based on flat-panel structure [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 杨康, 郭海峰, 徐彦凯. 电容传感器优化设计中轴向边缘效应的解决[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 115 - 116.  
Yang Kang, Guo Haifeng, Xu Yankai. Solving the axial edge effect in designing capacitance sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(3): 115 - 116. (in Chinese)
- 张淑珍, 巴卫国, 徐宝江, 等. 散粒物料孔隙率测定装置的研制[J]. 农业工程学报, 1996, 12(1): 187 - 191.
- 杨柳, 杨明皓, 董兰兰. 主动屏蔽式平面探头水分在线传感器研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 71 - 80.  
Yang Liu, Yang Haoming, Dong Lanlan. Development of a coplanar electrode capacitance moisture sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 71 - 80. (in Chinese)
- 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.  
Yang Yueqian, Wang Jianping, Wang Chengzhi. Study on-line measurement of grain moisture content by neutron gauge [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(5): 99 - 101. (in Chinese)
- 李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 56 - 59.  
Li Changyou. Design and experiment of online moisture metering device for paddy drying process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56 - 59. (in Chinese)
- 程卫东, 柏雪源, 王相友, 等. 干燥过程中谷物水分在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 53 - 55.

- Cheng Weidong, Bo Xueyuan, Wang Xiangyou, et al. An on-line measurement and monitoring system of grain moisture during drying process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 53 - 55. (in Chinese)
- 22 李业德. 基于介质损耗因数的粮食水分测量方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 14 - 17.  
Li Yede. Method for measuring grain moisture content based on dielectric loss tangent [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 14 - 17. (in Chinese)
- 23 滕召胜. 基于自适应加权数据融合的粮食水分快速测定仪[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 64 - 67.  
Teng Zhaosheng. An intelligent instrument for quick measurement of cereal moisture content based on self-adaptive fusion of weighted data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6): 64 - 67. (in Chinese)
- 24 李再贵, 殷丽君, 高振江, 等. 粮食水分分布对高频电感的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 149 - 152.  
Li Zaigui, Yin Lijun, Gao Zhenjiang, et al. Effects of moisture conditions of grain on inductance of high frequency coil [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 149 - 152. (in Chinese)
- 25 杨柳, 毛志怀, 董兰兰. 电容式谷物水分传感器平面探头的研制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 185 - 189.  
Yang Liu, Mao Zhihui, Dong Lanlan. Development of plane polar probe of capacitive grain moisture sensor [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 185 - 189. (in Chinese)
- 26 马超. 电容式谷物水分检测方法及装置的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008.  
Ma Chao. Research on capacitance detecting method and the detecting device for grain moisture [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 27 王旭东. 基于 ARM- $\mu$ Clinux 的粮食干燥数据采集系统的应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008.  
Wang Xudong. The research and design for ARM- $\mu$ Clinux data collection system of grain drying [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 28 滕召胜, 唐瑞明, 齐朝富. 低功耗插杆式智能粮食温度水分传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(3): 49 - 53.
- 29 班华. 稻谷水分在线检测与集中干燥专家系统[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.  
Ban Hua. Grain moisture on-line measurement and expert system of concentrate drying [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 30 滕召胜, 宁乐炜, 张海霞, 等. 粮食干燥机水分在线检测系统研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 130 - 133.  
Teng Zhaosheng, Ning Lewei, Zhang Haixia, et al. On-line measurement system of grain dryer for monitoring moisture content [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 130 - 133. (in Chinese)
- 31 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 91 - 96.  
Cui Qingliang, Guo Yuming, Zheng Decong. Design and test of on-line measurement system for the moisture content of the freeze-drying materials [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 91 - 96. (in Chinese)
- 32 张淑珍, 巴卫国, 徐宝江, 等. 散粒物料孔隙率测定装置的研制[J]. 农业工程学报, 1996, 12(1): 187 - 191.
- 33 张家康, 黄文萃. 筒仓贮料压力计算理论与方法[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 24 - 28.  
Zhang Jiakang, Huang Wencui. A new method for pressure calculation in silos [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 24 - 28. (in Chinese)

## Design and Test of Grain Moisture Online Measuring System Based on Floating Ground Capacitance

Mai Zhiwei Li Changyou Xu Fengying Fang Zhuangdong

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** A new type of capacitive grain moisture on-line measuring device was designed based on the measuring principle of non-contact parallel plate floating capacitor, which was suitable to continuous dryer under severe environment. The static batching measurement was used to improve the repeated accuracy of the measurement. Positioned filling device was designed to eliminate the measuring error caused by the variation of porosity and different way of filling. Wireless communication technology was adopted to achieve real-time data transmission from client sensors to computer and overcome the poor drying conditions, which could affect data transmission. The relationship among moisture, temperature, and capacitance of corn was calibrated and the system was tested on a continuous dryer. The results showed that the correlation coefficient between results of oven method and results of online measuring system was 0.992, and the absolute error of measurement was less than  $\pm 0.4\%$ , while the working temperature was  $15 \sim 50^\circ\text{C}$ , relative humidity was  $80\% \sim 100\%$ , drying temperature was  $70^\circ\text{C}$ , and the corn moisture content range was  $14\% \sim 21\%$ . It proved that the online measuring system meet the design requirement of poor drying conditions.

**Key words:** Grain Moisture Online measuring Design Test