

烘干机内部谷物水分实时检测系统

Design of real-time detecting system for grain moisture in dryer

胡 勇 江永成

HU Yong JIANG Yong-cheng

(安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

(School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Hunan 230601, China)

摘要:目的:减少贮存时因水分含量高引起的谷物霉变。方法:通过在多地进行数据测量确定含水量与检测频率的函数模型,设计一套以 STM32 单片机为控制芯片的烘干机内部谷物水分实时监测系统。设计平行极板传感器来检测不同含水量谷物的电容变化值,经由硬件电路将电容值转换为频率值,经过单片机计算后可得到烘干机内部谷物实时水分含量,再利用 RS485 通讯协议传输至显示屏实时显示。结果:该系统在线监测误差在 0.5% 以内,上位机实时显示水分含量的延迟时间小于 0.1 s,完全满足工程应用要求。结论:通过实地安装测试,该系统工作效率高,不会对谷物造成二次伤害。

关键词:烘干机;谷物水分;实时检测;电容传感器

Abstract: **Objective:** To reduce grain mildew caused by high water content in storage. **Methods:** The function model of water content and detection frequency is determined by data measurement in multiple sites. A real-time monitoring system of grain moisture value in the dryer was designed based on STM32 microcontroller. Through the design of parallel plate sensor to detect the change value of capacitance of grain with different moisture content, through the hardware circuit to convert the capacitance value into frequency value. Through the single-chip microcomputer calculation can get the real-time moisture content of grain inside the dryer, and then through RS485 communication transmission to the display screen real-time display. **Results:** This on-line monitoring error of the set is within 0.5%, and the delay time of the real-time moisture value displayed by the upper computer is less than 0.1 s, which fully meets the requirements of engineering application. **Conclusion:** Through the field installation test, the system is efficient and will not cause a secondary injury to the grain.

基金项目:国家自然科学基金(编号:61973002);安徽省杰出青年科学基金(编号:2008085J32)

作者简介:胡勇,男,安徽大学在读硕士研究生。

通信作者:江永成(1970—),男,安徽大学副教授,硕士。

E-mail: jiang_hugo@ahu.edu.cn

收稿日期:2022-01-29 **改回日期:**2022-04-13

Keywords: dryer; grain moisture; real-time detection; capacitance sensor

粮食贮存时水分含量高是导致粮食发生霉变的最大因素,在此过程中,对粮食水分的实时监测是关键。国内外对谷物水分检测的研究方法主要集中于电阻法^[1]、电容法^[2]、核磁共振法^[3]、近红外法^[4]、蒸馏法^[5]等,然而现在的检测仪器存在一些问题:席前等^[6]基于电容法设计的藜麦水分快速检测仪,可以实现对藜麦水分的快速、连续检测,但该仪器操作需要从烘干机内部取出烘干样本再进行检测,操作繁琐;王聪等^[7]基于电阻法设计的在线电阻式谷物水分监测仪通过智能化操作可定期检测谷物水分含量和烘干机内部性能。但需要通过碾压轮碾碎谷物后才能进行测量,对谷物造成了二次破坏。在实地考察中发现许多粮厂已安装水分在线测量系统,但实际使用过程中存在谷物二次破坏、测量精度达不到要求等问题。

为解决上述问题,研究拟设计一种烘干机内部谷物水分实时检测系统,将平行极板型电容传感器直接安装于烘干机内部,不会对谷物造成二次破坏,以期为企业实现谷物水分快速检测的工业化应用提供技术支撑。

1 系统总体设计

系统设计以 STM32F103RBT6 单片机为处理芯片,将设计的平行极板电容传感器直接安装在烘干机内部,收集由谷物水分引起的电容变化^[8],电容变化经振荡器电路转变为频率变化,再经滤波处理后传输到单片机,单片机进行计算后通过 RS485 传输至上位机显示^[9]系统设计,总体框图如图 1 所示。

1.2 系统硬件设计

1.2.1 设计原理 平行极板式电容传感器由三块绝缘材质制成的极板平行安装而成,可以很好地提高灵敏度并降低非线性^[10]。平行极板安装于烘干机内部,与粮食流通方向平行,平行板中间区域为粮食通过区域,粮食在烘干的同时填充平行极板,由于不同水分含量的谷物相对介电常数(ϵ_r)不同(取值区间 $[2, 80]$)^[11],可以实时得到

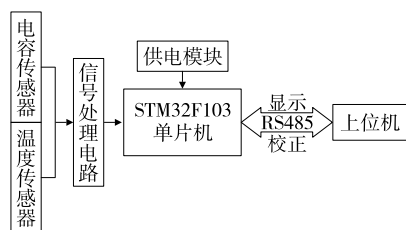


图 1 系统设计总体框图

Figure 1 System design president block diagram

极板间变化的电容值,其 3D 模型如图 2 所示。

按式(1)计算极板间变化的电容值^[12]:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{D - A + A/\epsilon_r}, \quad (1)$$

式中:

C ——极板间电容值;

ϵ_0 ——真空介电常数;

ϵ_r ——板间相对介电常数;

D ——平行极板的间距, m;

A ——粮食流通极板的宽度($A \approx D$), m;

S ——极板的面积, m^2 。

1.2.2 信号采集及处理 信号采集及处理电路见图 3。

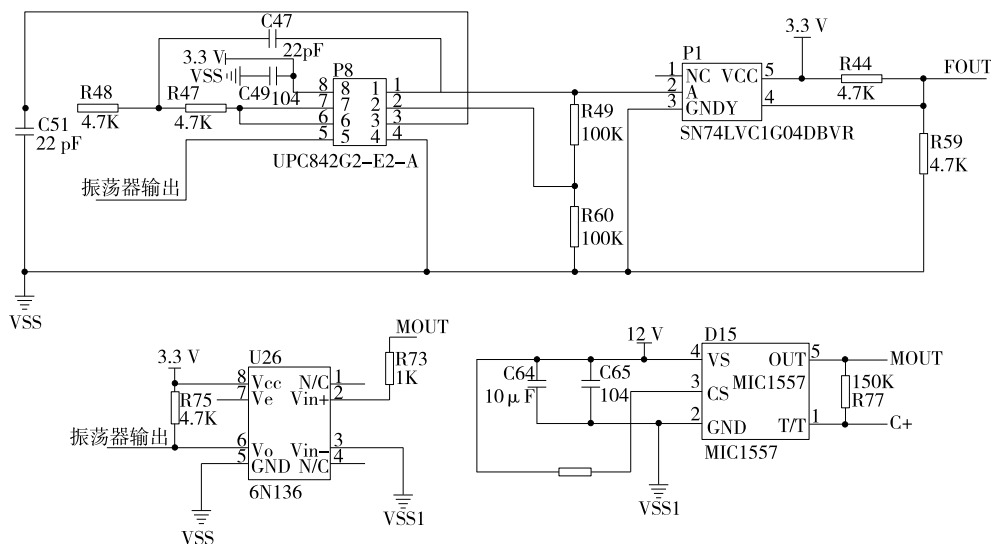


图 3 信号采集及处理电路

Figure 3 Signal acquisition and processing circuit

经过测试,电容转换电路输出为低频小信号方波,需滤除高频信号干扰。滤除过程由集成放大器芯片构成的低通滤波器(UPC842G2-E2-A)以及反相器(SN74LVC1G04DBVR)为主体构成的电路完成,输出信号由 STM32 单片机进行计算,处理后的方波如图 4 所示。

1.2.3 通讯电路 传感器直接安装在烘干机内部(垂直距离约为 5 m),而电路板与传感器需就近安装,上位机为方便操作安装在 1.5 m 左右的位置。为实现上位机与单片机之间远距离快速精准通讯,采用 RS485 总线通讯,该

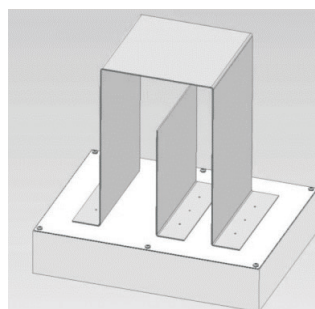


图 2 电容传感器实物图

Figure 2 Physical picture of capacitance sensor

电容测量采用 RC 震荡法。振荡电路以 MIC1557 芯片为核心,将传输进来的电容值转换成稳定的方波输出,输出的频率为 20~130 kHz,经滤波、放大等一系列处理后传输至单片机。按式(2)计算频率^[13]。

$$f \approx 1.43/RC, \quad (2)$$

式中:

f ——MIC557 芯片频率, Hz;

R ——MIC557 芯片输入端串接电阻值, Ω ;

C ——MIC557 芯片输入端接入串接的电容值, F。

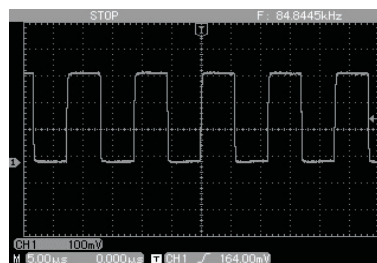


图 4 处理后的输出波形

Figure 4 Output waveform after processing

电路设计以 SP485EN 芯片为核心,通过光耦器件对电路进行隔离,有效避免了总线通讯对主控系统的影响。

2 系统软件设计

系统软件设计包括频率采样、计算和上位机控制。软件设计以 Keil MDK 为开发环境,用 C 语言编写程序。设置中断分组,初始化 SPI、IIC、UART 和 EXTI 后,设置延时 20 s 控制继电器吸合,为电容充电;外部中断函数初始化,开始进行频率采样,将采集的频率值存放于 Reg[1] 寄存器中,设置延时 10 s,进行 4 次取值并求平均后进行平滑滤波处理,将处理值存放在 Reg[2] 寄存器,让 Reg[2] 乘以一个数值,进行处理得到真正的频率值,再进行加减运算得到修正后的值,经过 3.1 中建立的数学模型式(3)计算出对应的含水量,收到上位机的读命令后将数值通过 UART 通信回传给上位机,完成一次处理。系统运行流程如图 5 所示。

系统初始化后,通过上位机操作选择谷物种类系统开始采集频率,上位机操作界面如图 6 所示,此时单片机由控制板上设计的 5.5 V 超级电容进行供电,最大化隔开无关信号的干扰,单片机将采集到的频率值通过程序中建立的数学模型计算出水分含量后通过 RS485 通讯至上

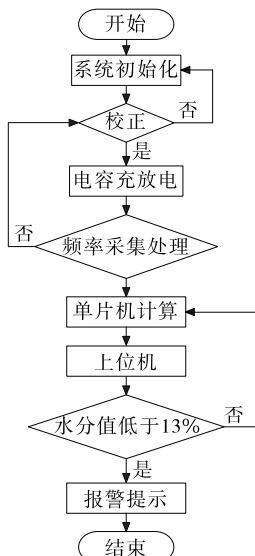


图 5 系统流程图

Figure 5 System flow chart



图 6 上位机主界面

Figure 6 Main interface of upper computer

位机输出显示,完成一次循环工作。

3 模型建立与试验

3.1 模型建立

为了确立频率与水分含量对应的关系,课题组前往江西(湖口县)、安徽(金寨县、肥东县、肥西县)等地,在当地某粮厂的烘干机内部安装传感器,在烘干机烘干水稻时记录下频率数据,同时通过便携式量杯进行手动水分测量并记录水分含量。以频率值为 X 轴,水分含量为 Y 轴绘制各地实测数据曲线,见图 7。

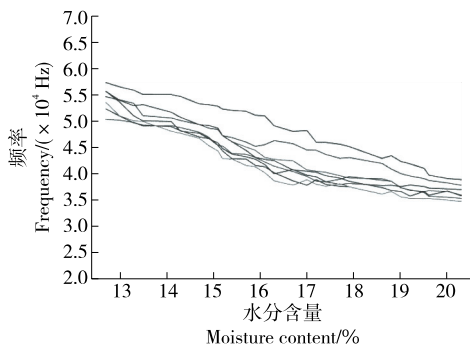


图 7 水分含量与频率值对应函数图像

Figure 7 Corresponding function image of moisture content and frequency value

由图 7 可知,水分含量与频率值对应的函数曲线为单调曲线,故函数模型为一元多次函数。为建立正确的模型,选择在安徽省肥西县获取的数据通过 MATLAB 软件的 Curve Fitting 工具箱进行线性拟合(图 8)。当函数模型为一元二次函数时,误差已满足 0.5% 的要求,为了不增加单片机多余的计算量,最终确定函数模型为:

$$y = a(x/1\,000)^2 + b\left(\frac{x}{1\,000}\right) + c, \quad (3)$$

其中 $a=0.012\,37$, $b=-1.445$, $c=55.21$ 。

以水稻为基础建立模型,将式(3)设置为系统初始算法,由于各品种谷物介电常数不同,因此需要建立校正模型,根据多次试验得到校正模型为: $y' = ky + d$, 其中

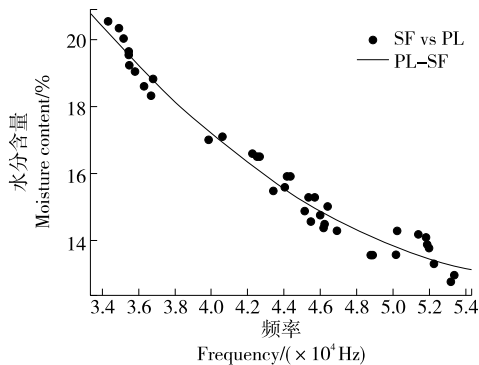


图 8 二次函数拟合模型

Figure 8 Quadratic function fitting model

k 、 d 均为校正参数,当样品为粳稻时对应参数 $k=1$, $d=0$ 。其他品种对应的参数也均通过 Keil 软件编写入主函数中,通过上位机选择不同品种即可改变对应的参数值。

3.2 模型测试

为验证系统的可行性,在合肥市肥西县某米厂对收回的粳稻进行水分检测(同时手工测量)。待一轮粮食干燥后,比对系统在线监测湿度值与手工测量记录值。由图 9 可知,系统在线监测值与人工测量值变化趋势基本一致,且误差范围在 0.5% 以内,完全满足水分监测要求。

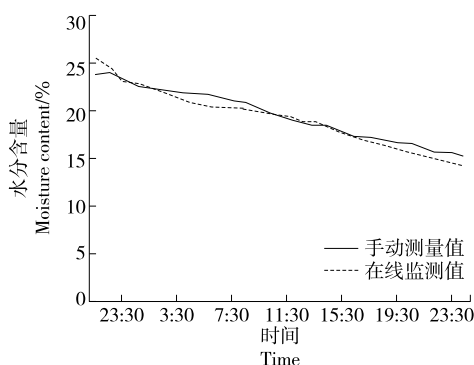


图 9 实测数据对比图

Figure 9 Comparison of measured data

4 结论

建立了谷物水分与电容的函数模型,并以此为依据设计了烘干机内部谷物水分实时监测系统。试验结果表明:检测值与实际测量值的相对误差在 0.5% 以内,显示延迟不超过 0.1 s,且未对烘干机内部谷物造成二次破坏。因此,设计的系统可以直接用于烘干过程中的谷物水分实时监测,所设计的系统不会对谷物造成二次破坏,还能大大减轻工作人员劳动量,提高工作效率和安全性。为了进一步提高仪器的检测精度,后续应增加一些屏蔽装置以增强仪器检测抗干扰能力,进一步完善系统。

参考文献

- [1] 宋琦. 基于电阻抗谱分析的稻谷水分传感器设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 23.
SONG Q. Design of a grain moisture sensor based on electrical impedance spectroscopy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 23.
- [2] 姚启龙, 周攀, 江永成. 基于 STM32 的谷物水分在线监测系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6): 104-106.
YAO Q L, ZHOU P, JIANG Y C. Design of on-line monitoring system for grain moisture based on STM32 [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(6): 104-106.
- [3] 吴嘉敏, 贺玉成, 徐征, 等. 用于土壤水分测量的磁共振射频线圈宽频匹配方法[J]. 波谱学杂志, 2021, 38(3): 414-423.
WU J M, HE Y C, XU Z, et al. A wide-band matching method for radio frequency coils used in soil moisture measurement[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2021, 38(3): 414-423.

- [4] 李朋成, 刘含, 赵龙莲, 等. 基于高光谱数据研究应用近红外相机加装滤光片实现玉米叶片水分测量的关键参数[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3 184-3 188.
LI P C, LIU H, ZHAO L L, et al. Key parameters for maize leaf moisture measurement using NIR camera with filters based on hyperspectral data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10): 3 184-3 188.
- [5] 董川. 枸杞水分测定中减压干燥法与蒸馏法的比较[J]. 食品安全导刊, 2017(30): 99.
DONG C. Comparison between vacuum drying method and distillation method in water determination of Lycium barbarum [J]. China Food Safety Magazine, 2017(30): 99.
- [6] 席前, 张志勇, 袁凯, 等. 基于电容法的藜麦水分快速检测仪设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 43-48.
XI Q, ZHANG Z Y, YUAN K, et al. Based on capacitance method, quinoa water fast detector design[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 43-48.
- [7] 王聪, 李小化. 在线电阻式谷物水分监测仪及其控制方法[J]. 食品安全导刊, 2017(12): 97-98.
WANG C, LI X H. On-line resistance grain moisture monitor and its control method[J]. China Food Safety Magazine, 2017(12): 97-98.
- [8] DAI L Q, WU L, DONG Q S, et al. Genome-wide association study of field grain drying rate after physiological maturity based on a resequencing approach in elite maize germplasm [J]. Euphytica, 2017, 213(8): 182.
- [9] 张越, 赵进, 赵丽清, 等. 基于介电特性谷物水分在线测量仪的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 105-110.
ZHANG Y, ZHAO J, ZHAO L Q, et al. Design and experiment of on-line measuring instrument for grain moisture based on dielectric properties[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 105-110.
- [10] 郭红亮, 常海霞, 刘永忠, 等. 快测法测量玉米籽粒含水率的误差分析[J]. 种子, 2019, 38(8): 131-133.
GUO H L, CHANG H X, LIU Y Z, et al. Error analysis of measuring moisture content of corn seeds by quick measurement method[J]. Seed, 2019, 38(8): 131-133.
- [11] 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.
NIU Z Y, LIU F H, LIU M, et al. Design of dielectric pellet feed moisture detector based on parallel plate capacitance sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 36-43.
- [12] 陈舒. 基于混流式烘干机的谷物含水率在线检测系统研究与设计[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 15-50.
CHEN S. Research and design of online measurement system of grain moist content based on friction dryer [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021: 15-50.
- [13] 周攀. 基于 ARM 的电容式物联网谷物水分检测系统[D]. 合肥: 安徽大学, 2021: 20-25.
ZHOU P. Capacitive IoT grain moisture detection system based on ARM[D]. Hefei: Anhui University, 2021: 20-25.