

针刺式谷物含水率检测仪设计

Design of needle-typed moisture content detecting instrument of grains

汪 安 吴 扬 刘 权

WANG An WU Yang LIU Quan

(安徽农业大学工学院, 安徽 合肥 230031)

(Engineering College of Anhui Agriculture University, Hefei, Anhui 230031, China)

摘要:为了提高谷物含水率在线检测的精确度和速度,更好地满足烘干机械在线检测的要求,设计了一种直接刺入谷物籽粒的对称针形含水率检测传感器;并配合高精度检测电路与优化算法,设计了相应的系统检测装置。试验结果显示,该装置对稻谷含水率的测量误差不大于 1%,单次测量响应时间小于 2 s。通过简单的参数设定,该装置即可应用于不同种类谷物的水分检测。该检测方法的提出为谷物含水率在线测量提供了新的解决方案。

关键词:电阻式;传感器;含水率;谷物

Abstract: In order to enhance the speed and precision of grain moisture content measurement, and to satisfy the need of online detection of drying machinery, a new symmetric needle typed moisture content sensor which direct thrust into the grain was proposed, which was cooperated with high precision testing circuit and optimization algorithm, and the corresponding new equipment was designed. The trial results indicated that the error of paddy moisture content measurement was no more than 1% and the response time was less than 2 s. Through simple parameters setting, this equipment could be applied to measure moisture content of other grains. Through this new method, a new online measurement scheme was put forward.

Keywords: impedance; sensor; moisture content; grain

粮食含水率作为评价粮食品质的一项重要指标,其检测结果的准确性、快速性对粮食的安全存储、运输等有十分重要的影响^[1]。储藏粮食的水分含量过高,极易造成粮食变质,威胁储粮的安全性;反之,如果粮食的水分含量太低,则容易造成有机质的损坏,从而使粮食营养价值下降。目前,国内外粮食含水率检测方法中常用的主要有电阻法、电容法、中子法、红外法、微波法等方法^[2-3]。其中基于电阻法的粮食含水率测量方式由于结构相对简单、精确度较高,在粮

食含水率测量仪表中应用非常广泛;但现有的电阻式含水率检测法使用的大多是体积式测量,或挤压式测量。这些方法容易受到待测物料温度、容积密度或籽粒大小不均等因素的影响,造成测量误差较大,且难以实现在线测量^[4-5]。

针对传统电阻式测量方式存在的缺陷,设计了新型对称针刺式传感器,将敏感元件直接刺入粮食籽粒内部,有效地抑制谷物外壳(稻谷尤为明显)、容积密度和颗粒大小不均等因素对测量精度的影响。配合高灵敏度和精确度的测量电路与合理的统计算法,实现粮食含水率的精确测量。试验结果显示,此检测仪的测量误差小于 1%。此项设计非常适合应用到谷物烘干机械上,通过对谷物水分的实时测量,自动调节进风的温度和强度,提高谷物烘干机械的自动化程度与粮食烘干的品质;此项技术对稻谷含水率的有效测量范围为 10%~28%。

1 粮食含水率电阻法测量原理

含水率在正常范围内的各种粮食,其阻抗不能忽略^[6]。常温下,干燥谷物的电阻率一般大于 $3 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$,可以被认为是绝缘的;而含水率为 25% 的谷物的电阻率大约为 $2 \times 10^3 \Omega/\text{cm}$,由此可以看出高含水率谷物的电阻率比干燥谷物要低很多。试验^[7]研究表明,谷物水分与电阻之间存在显性函数关系。

谷物的电阻特性表现为^[8]:① 谷物湿基在正常含水率范围内,电阻值的对数与含水率呈线性关系;② 在上述含水率范围内,阻值变化范围很大,特别在低含水率下,其阻值急剧上升;③ 温度对阻值的影响非常明显,在 $-10 \sim +50^\circ\text{C}$ 条件下温升 1°C 对电阻的影响相当于其含水率增大 0.1%。由此看出,用电阻法测量水分要注重解决阻值大、温度影响显著这两个关键问题^[9]。因此实时的温度补偿及其数据融合处理是干燥过程中谷物水分测量的合理方案。

试验时,准备含水率不同的谷物样本,这样谷物电阻率都会不同,根据电阻和电阻率的对应关系,可以根据测得的不同电阻值来计算相应谷物的含水率。

作者简介:汪安(1991—),男,安徽农业大学在读硕士研究生。

E-mail: wangan@ahau.edu.cn

收稿日期:2016—06—13

1.1 针刺式传感器设计

此谷物含水率检测装置传感器部分结构示意图见图 1。该检测装置由对称的探针(即电阻传感器)、气动执行机构和信号线等部件组成。探针材料兼顾导电性、硬度、耐腐蚀、防锈等特性,选用 YG8 型钨钢,对称双针式结构。为了利于探针刺入谷物颗粒内部并确保两探头间距为 1 mm 的固定值,将探头固定在有由气动系统推动的一体化的活塞上,测量时由单片机控制电磁阀来驱动探针的收放。温度传感器选用 DS18B20。其测温范围为 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $-10\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。除探针外所有机械结构均做接地处理。

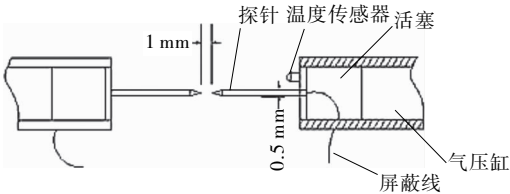
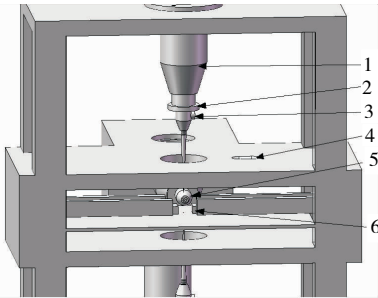


图 1 针式传感器示意图
Figure 1 Schematic diagram of needle-typed sensor

测量时,谷物籽粒从谷物入口处落入,由气压驱动的固定滑块推动谷物籽粒至对称探针的中心线处;此时开启电磁换向阀,活塞探针对称的刺入谷物籽粒;待测量完成,探针收起,固定滑块回归原位,再启动出风口的电磁阀,将谷物籽粒吹出,等待下一次测量。结构图见图 2。



1. 气压缸 2. 活塞 3. 接线端子 4. 谷物入口 5. 出风口 6. 谷物固定滑块
图 2 含水率检测仪局部结构图
Figure 2 Local structure diagram of moisture content detection instrument

1.2 电路系统设计

谷物含水率检测装置硬件电路的系统结构框图见图 3。该系统主要由阻抗测量及处理、温度检测、存储模块、人机接口、气压控制单元和 MCU(微控制器)组成。阻抗传感器与温度传感器模块分别完成对阻抗值和温度的采集和转换;人机界面的功能是含水率与各项运行状态的实时显示以及各项参数的设置;flash 模块是便于原始数据及运行状态的存储。主控芯片选用意法半导体公司的 STM32F215RGT7 型工业级微控制器。

1.3 阻抗检测方法

本研究采用 AD5934 作为谷物阻抗的测量芯片,其内部

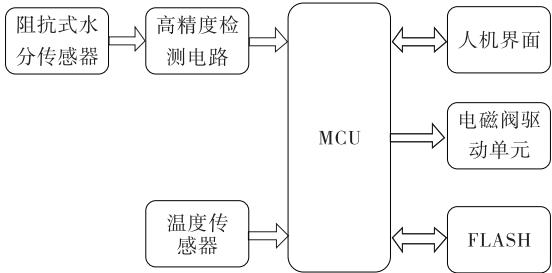


图 3 硬件电路系统框图
Figure 3 General frame of hardware system

集成了采样率为 250KSPS 的 12 位独立 AD 转换器。芯片内的频率发生器可以产生特定的频率来激励待测量的外部电阻,待测电阻上的响应信号经过 ADC 采样,并通过芯片上的 DSP 处理器,进行傅立叶变换,计算出谷物的阻抗值。作为一个芯片上系统其本身就具有抗外界噪声干扰和简化测量电路的优点,而且这款芯片从测量原理、解调原理、添加校准点等方面提高了测量精度^[10],芯片本身的设计符合谷物含水率测量系统的测量范围及精度等方面的基本要求。检测电路见图 4。

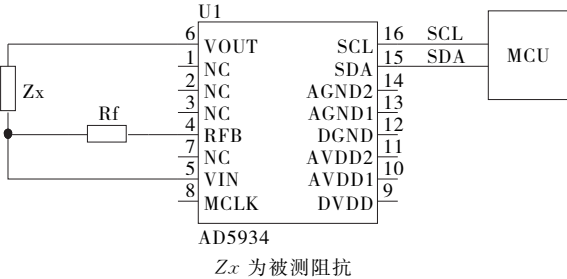


图 4 基于 AD5934 的阻抗检测电路
Figure 4 Impedance detection circuit based on AD5934

MCU 通过 I²C 总线控制 AD5934 的工作模式设置,测量流程以及读取测量数据。

2 谷物含水率数学模型的建立

2.1 试验材料

本试验所用的材料为安徽合肥地区秋季收获后的“两优 6188”水稻种子。从新收获的水稻中随机选取试验样品。

2.2 试验方法

将选取的试验样品平均分成 10 份,每份含量 100 g;将其中的 9 份放在 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中,每隔 10 min 取出 1 份样品,得到分别烘干时间为 $0\sim 90\text{ min}$ 的 10 份样品,放置在密封塑料袋中,分别编号 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J。分别从 10 份样品中取出 15 g 左右的原始稻谷样品 3 份,放在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热风干燥箱中,直到质量恒定^[11]。计算出 3 份样品的含水率,并将其平均值作为这对应稻谷的当前含水率。测量结果显示,所选取 10 份稻谷样品的初始含水率为 25.5%,23.5%,22.1%,20.9%,18.5%,16.7%,15.4%,14.0%,13.1%,12.3%。

分别从每份样品中去 20 粒稻谷籽粒放在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境下 3 min 后,用本设计的粮食含水率检测仪随机测量其中

的 10 粒,获取其电阻值;去掉 10 个数据中的最大值与最小值,将剩下 8 个阻抗值的算术平均值作为最终的测量值,按式(1) 计算:

$$R_x = (\sum_{i=1}^{10} R_i - R_{\max} - R_{\min}) \div 8,$$
 (1)

式中:

R_x ——测量值,k Ω ;

R_i ——传感器测得电阻平均值,k Ω ;

$R_{\max}$ ——10 次测量最大电阻值,k Ω ;

$R_{\min}$ ——10 次量最小电阻值,k Ω 。

在 10~70 $^{\circ}\text{C}$ 的温度环境下重复上述试验,得到不同含水率的稻谷在不同温度下测量所得的电阻值见表 1。

表 1 不同含水率、温度下水稻样品籽粒的阻抗值
Table 1 Obtained impedance values of grain samples at different moisture contents, temperatures k Ω

含水率/%	温度/ $^{\circ}\text{C}$							
	0	10	20	30	40	50	60	70
12.3	9 190	9 121	9 049	8 953	8 841	8 733	8 634	8 526
13.1	8 894	8 841	8 784	8 697	8 600	8 522	8 439	8 350
14.0	8 657	8 622	8 576	8 523	8 475	8 430	8 383	8 285
15.4	8 208	8 152	8 107	8 062	8 000	7 904	7 841	7 802
16.7	7 836	7 711	7 663	7 622	7 583	7 471	7 378	7 251
18.5	7 013	6 953	6 906	6 930	6 882	6 811	6 748	6 682
20.9	5 924	5 905	5 746	5 707	5 748	5 704	5 632	5 631
22.1	4 673	4 632	4 571	4 523	4 453	4 381	4 309	4 236
23.5	3 068	3 025	2 980	2 937	2 961	2 907	2 811	2 860
25.5	1 919	1 985	1 918	1 867	1 813	1 855	1 798	1 754

利用 MATLAB R2009b 软件对以上试验所测得的数据进行多元回归拟合。建立的描述稻谷含水率、其电阻值和对温度值的三元四次方程,见式(2),多项式拟合曲面见图 5。

$$W=35.76-8.78\times10^{-3}\times Z-6.119\times10^{-3}\times T+2.29\times10^{-6}\times Z^2-1.897\times10^{-7}\times Z\times T-1.018\times10^{-4}\times T^2-2.689\times10^{-10}\times Z^3+4.018\times10^{-10}\times Z^2\times T+5.572\times10^{-8}\times Z\times T^2+1.015\times10^{-14}\times Z^4-5.855\times^{-14}\times Z^3\times T-7.41\times10^{-12}\times Z^2\times T^2,$$
 (2)

式中:

W ——含水率,%;

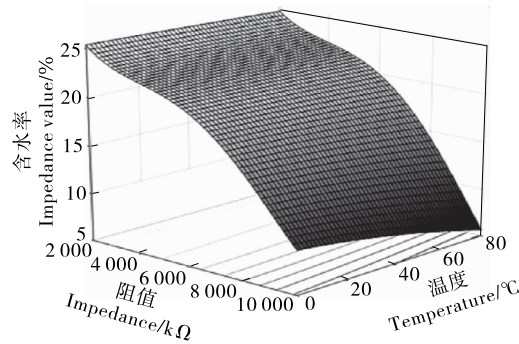


图 5 多项式拟合曲面

Figure 5 Surface of Polynomial fitting

R ——电容,k Ω ;

T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

对式(2)进行方差和显著性分析, $Z\times T$ 、 $Z^2\times T$ 、 $Z\times T^2$ 、 $Z^3\times T$ 和 $Z^2\times T^2$ 这五项对模型的影响显著性不高。为了简化模型,忽略此五项,得到简化的含水率与阻抗和温度的数学模型:

$$W=35.76-8.78\times10^{-3}\times Z-6.119\times10^{-3}\times T+2.29\times10^{-6}\times Z^2-1.018\times10^{-4}\times T^2-2.689\times10^{-10}\times Z^3+1.015\times10^{-14}\times Z^4,$$
 (3)

其 SSE(误差平方和)为 1.792、 R -square(复相关系数)为 0.998 8、RMSE(均方根误差)为 0.162 3。

2.3 模型的验证

为验证简化后的数学模型的准确性,随机从的不同干燥程度的稻谷样品中选出 5 份水分含量在 10%~28% 的样品,分别检测不同温度下(0~70 $^{\circ}\text{C}$)的电阻值。将温度值和含水率代入式(3)计算出阻抗值,作为计算值,以本设计的测量仪测得的阻抗值作为测量值,结果见图 6。由图 6 可知,通过简化模型所计算出的电阻值相对于实际测量的电阻值的点较为均匀,并且紧密地分布函数 $y=x$ 的两侧,其 R -square 为 0.980 5, RMSE 为 1.29,这说明通过式(3)所计算得出的电阻值能较好地反映实际测量电阻值。

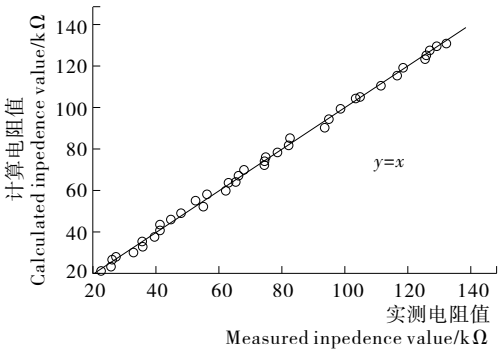


图 6 计算所得阻抗值与实际测量阻抗的比较

Figure 6 Calculated of measured impedance value with comparison one

3 试验验证

3.1 试验条件与测试方法

根据式(3),编写对应的谷物含水率的计算程序。仍以新收获稻谷为试验对象,用取样烘干称重法(同 2.2)测得每份样品的实际含水率,选取含水率在 10.0%~28.0% 的样品 5 份(分别为 13.4%,16.1%,17.7%,19.9%,23.7%)。将某一含水率下的样品密封放置在恒温干燥箱内,将温度设置在 0~70 $^{\circ}\text{C}$ 的任一温度下,放置 5 min,待稻谷籽粒温度恒定后,用自制的含水率检测仪测量其中的 10 颗籽粒,从显示屏上读取并记录当前的测量结果。对于每份的样品,均匀地选取 0~70 $^{\circ}\text{C}$ 下的 5 个温度点。用本设计的测量仪测得的含水率与烘干法得到的含水率对比,分析其测量误差与可靠性。并对 50 $^{\circ}\text{C}$ 下,稻谷含水率在 10.0%~28.0%,含水率间隔分别为 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5% 的样品进行测量,

分析仪表的灵敏度。

3.2 测试结果分析

采用本设计的含水率测量装置测得稻谷的含水率和采用烘干法测得稻谷的实际含水率的对比结果见图 7。采用自制设备测量的含水率相对于谷物实测含水率的坐标点比较均匀地分散在直线 $y=x$ 的两侧,拟合度为 0.988 4,说明设备测量的含水率准确度较高。绝对误差平均值为 0.96%,响应时间不大于 2 s。试验结果表明,本文所设计的谷物含水率测量装置能满足谷物干燥过程中对含水率测量的要求。

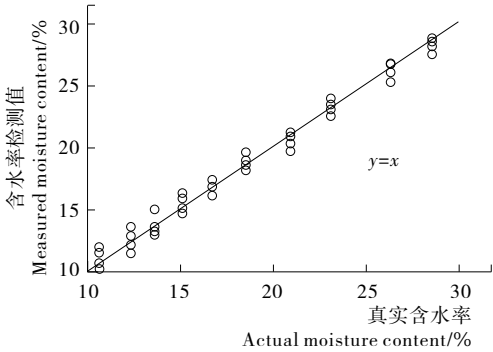


图 7 稻谷含水率测量值与实际值的比较

Figure 7 Comparison of measured moisture content with actual value

4 结论

(1) 本研究基于谷物含水率与阻抗的相关性设计了以 STM32F215 为控制器,具有温度补偿机制的针刺式谷物含水率在线检测仪。以水稻“两优 6188”籽粒为试验对象,研究了含水率(12.3%~25.5%)和温度(0~70 ℃)对水稻籽粒阻抗的影响,建立了以阻抗值和温度值为自变量,以谷物的含水率为因变量的三元四次方程,并验证了其准确性、合理性以及依据电阻值和温度值计算得出稻谷含水率的精确度。

试验表明,在 0~70 ℃下,对于含水率在 10%~28% 的稻谷,其绝对误差为 0.96%,小于 1%,灵敏度为 0.3%,响应时间小于 2 s;证明了此谷物含水率检测装置的准确性和可靠性。

(2) 本试验以水稻为试验样本,但是此项技术同样也可方便地应用于其它种类谷物的含水率测量,如大豆、玉米等。

(3) 接下来将通过更为合理结构设计,以提高谷物含水率检测的速度和自动化程度,以期更好地实现实时在线检测。

参考文献

[1] 郭伟,乔丽娟,刘海,等. 基于 CAV424 的粮食含水率检测仪表设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(9): 111-114.

[2] 魏忠彩,孙传祝,张丽丽,等. 红外干燥技术在果蔬和粮食加工中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 217-220.

[3] 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.

[4] 胡平欣. 电容式粮食水分在线检测系统的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 1-5.

[5] 李洪莉. 基于容重的玉米水分在线检测装置的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 2-6.

[6] 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.

[7] 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: 7-10.

[8] 杨兆选,鹿凯宁,刘承玺. 智能粮食湿度测试仪设计[J]. 电子测量与仪器学报, 1996, 10(3): 64-67.

[9] 张永林. 基于电阻原理的油料含水率在线测量技术[J]. 中国油脂, 2004, 29(8): 38-40.

[10] 崔传金,郭志强,赵楠,等. 用 AD5933 实现电导率测量的研究[J]. 机电工程技术, 2008, 37(4): 44-47.

[11] 郭文川,杨军,刘驰,等. 基于交流阻抗法的小麦秸秆含水率检测仪设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 46-52.

(上接第 33 页)

参考文献

[1] 毛晶晶,余锐萍,曹杰,等. 某规模化奶牛场 STEC 和创伤弧菌流行情况调查[J]. 中国奶牛, 2013, 3(1): 1-3.

[2] BISHARAT N, COHEN D I, HARDING R M, et al. Hybrid *Vibrio vulnificus* [J]. Emerging Infectious Diseases, 2005, 11(1): 30-35.

[3] 潘军航,梅玲玲,朱敏,等. 舟山市售牡蛎中创伤弧菌污染的定量分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(12): 2 760-2 761.

[4] 李萌立,李忠海,李节,等. 量子点荧光探针技术在食源性致病菌检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 241-244.

[5] 姜英辉,房保海,雷质文,等. 细菌活的非可培养状态的分子生物学检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 308-311.

[6] 杨文鸽,孙翠玲,潘云娣,等. 水产品中致病微生物的快速检测方法[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 402-406.

[7] 徐义刚,李苏龙,杨君宏,等. 水产品中创伤弧菌 DNA 环介导恒温扩增快速检测方法的建立及初步应用[J]. 中国生物工程杂

志, 2010, 30(6): 96-102.

[8] 吴增辉. 基于 vvhA 基因 TaqMan 实时荧光定量 PCR 快速检测创伤弧菌的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[9] 张慧,郑晓东,蒋侃,等. 实时荧光 PCR 法快速检测耐热霉菌费氏新萨托菌[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 79-82.

[10] CHUNG P H, CHUSNG S K, TSANG T, et al. Cutaneous injury and *Vibrio vulnificus* infection [J]. Emerg Infect Dis, 2006, 12(8): 1 302-1 303.

[11] PANICKER G, BEJ A K. Real-time PCR detection of *Vibrio vulnificus* in oysters: comparison of oligonucleotide primers and probes targeting *vvhA* [J]. Appl Environ Microbiol, 2005, 71(10): 5 702-5 709.

[12] 金玉娟,甘莉萍,杨慧,等. 双重实时荧光 PCR 检测副溶血性弧菌和创伤弧菌方法的建立[J]. 热带医学杂志, 2014, 14(10): 1 296-1 302.

[13] 张晶,周勇,陶霞,等. 创伤弧菌 PMA RTi-PCR 检测技术的建立[J]. 中国人兽共患病学报, 2013, 29(1): 54-58.