

基于电容法的稻谷含水率检测\*

刘志壮 吕贵勇

(湖南科技学院电子研究所, 永州 425199)

**摘要:** 为快速准确测量稻谷含水率,设计了一种单一平面电容传感器探头,并应用电容数字转换芯片 AD7150 设计转换电路。传感器探头将稻谷含水率转换成电容,转换电路将电容模拟量转换成数字量,经单片机处理后获得稻谷含水率。对传感器进行了标定试验和温度特性试验,结果表明稻谷含水率在 8% ~ 23% 的范围里,含水率预测误差为  $\pm 0.8\%$ ; 温度在 12 ~ 33℃ 范围内,稻谷含水率为 12.86% 时,温度漂移量为 0.2% /℃。

**关键词:** 稻谷 电容法 含水率 单一平面电容 电容数字转换

**中图分类号:** S237      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0179-04

Moisture Content Detection of Paddy Rice Based on Capacitance Approach

Liu Zhizhuang Lü Guiyong

(Electronics Research Institute, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China)

**Abstract:** In order to quickly detect rice moisture content, a uniplanar capacitor probe was designed. A corresponding converting circuit was also designed for getting digital value of capacitance. The rice moisture content was converted into capacitance and digital value in turn by the capacitor probe and converting circuit. Finally, the rice moisture content was obtained by using single chip. After the calibration experiments and temperature characteristics experiments, the results showed that prediction error of moisture content was within  $\pm 0.8\%$  at the range of rice moisture content of 8% ~ 23%. With the temperature of 12 ~ 33℃ and rice moisture content of 12.86%, the temperature shift value was 0.2% /℃.

**Key words:** Paddy rice    Capacitance approach    Moisture content    Uniplanar capacitor    Capacitance digital converter

引言

稻谷含水率是稻谷储存和加工的重要保证,适当的稻谷含水率可以延长其储存期和提高加工质量。测量稻谷含水率则是确保稻谷处于最佳含水率的重要手段。资料显示,长期以来有许多相关学者对谷物含水率检测技术进行了研究,其中主要方法有微波法<sup>[1-8]</sup>、红外法<sup>[9-10]</sup>、电阻法<sup>[11]</sup>、中子法<sup>[12]</sup>、核磁共振法<sup>[13]</sup>、射频阻抗法<sup>[14-16]</sup>和电容法<sup>[17-21]</sup>。梁琨等基于静力学谷物平衡水分模型,利用无线传感器网络及嵌入式技术设计了仓储中稻谷含水率实时监测系统<sup>[22]</sup>。其中,电容法是根据不同含水率的

粮食介电常数不同的原理来检测粮食水分。电容法测量物料的含水率成本低,具有灵敏度高、结构简单及不需破碎物料等优点<sup>[13]</sup>,具有较大的发展空间。但是,电容法受到很多外界因素影响,有待于更多深入的研究。本文设计一种单一平面电容传感器,利用电容数字转换芯片 AD7150 制作检测系统,并对稻谷含水率检测进行试验研究。

1 传感器设计

依据单一平面电容原理<sup>[23-24]</sup>、针对电容数字转换芯片 AD7150 设计电容传感器探头。单一平面电容与平行板电容一样,电容与周围介质介电常数成

收稿日期: 2012-07-06    修回日期: 2012-08-05

\* 国家自然科学基金面上项目(30971698)和湖南科技学院“电路与系统”重点建设学科资助项目

作者简介: 刘志壮,教授,主要从事计算机检测与控制技术研究,E-mail: liuzz168@126.com

正比,只是灵敏度参数不同<sup>[23~24]</sup>。

## 1.1 电容传感器

考虑到传感器灵敏度和 AD7150 的量程,同时考虑到使用的方便性和稳定性,设计如图 1 所示的传感器探头。传感器探头由电极 1、电极 2 和音叉形绝缘骨架 3(前后 2 层)构成。电极 1 和电极 2 尺寸为 50 mm × 4 mm 的金属片,上部有接线端,电极 1、电极 2 置于同一平面并被前后 2 层音叉形绝缘骨架夹在中间,电极 1 和 2 分别位于音叉的 2 个支部,2 个分支相距 10 mm,2 个绝缘骨架各厚 1.5 mm。

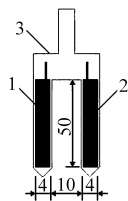


图 1 传感器探头外形

Fig. 1 Profile of sensor probe

1、2. 电极 3. 绝缘骨架

经试验测试,传感器探头周围全为空气时,初始电容为 0.7 pF。当探头周围充满潮湿稻谷时,电容可达到 5 pF 以上。

## 1.2 转换电路

传感器探头电容为 0.7 ~ 5 pF 之间,其特征是容量小、变化量大,故采用芯片 AD7150(美国模拟器件公司)测量较为理想。该芯片具有 2 个电容模拟量输入通道,电容量程为 0 ~ 14 pF,最小分辨率为 0.8 fF,响应时间为 10 ms,通过 I<sup>2</sup>C 接口与单片机进行数据传输;其功能主要是完成电容模拟量到数字量的转换过程。电容转换电路如图 2。

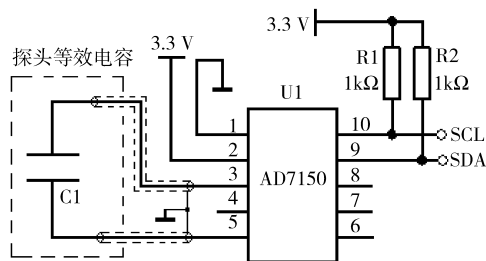


图 2 电容转换电路

Fig. 2 Capacitance converting circuit

图 2 中,传感器探头等效为一个电容 C1,AD7150 的引脚 3、5 连接电容 C1;AD7150 的引脚 9 (SDA)、10 (SCL) 连接单片机。为确保通讯正常,AD7150 的引脚 9 (SDA)、10 (SCL) 各连接一个阻值为 1 kΩ 的上拉电阻。为提高传感器稳定性,减小周围环境干扰,探头连接线采用单芯屏蔽线,并将屏蔽线进行有效接地。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料准备

试验采用的主要仪器有 TR-8102D 型电子天

平(美国丹佛仪器公司,810 g/0.01 g)、Model 438F 型恒温干燥箱(Fisher Scientific 公司)、水银温度计(精度 0.5℃)、铝制干燥盒、圆形塑料杯和待标定的传感器。所用材料主要是稻谷(美国俄克拉荷马州)1 100 g,将稻谷分成 3 份,质量分别为 100、500 和 500 g,标为样品 1、样品 2 和样品 3。样品 1 用于标定样品初始含水率,样品 2 和样品 3 用于传感器标定试验和预测试验。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 标准含水率样品的制取

将样品 1 放入恒温干燥箱中,在温度为 103℃ 条件下加热干燥 8 h 以上获得稻谷干质量 87.22 g,即可由算式得出样品初始含水率为 12.78%<sup>[25]</sup>。

同一批样品可视为相同的含水率,即可利用初始含水率计算出样品 2 和 3 的干质量,当测出样品实时质量,即可算出样品实时含水率,即

$$M_c = \frac{W - W_0}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $W$ ——样品实时质量

$W_0$ ——样品干质量

将样品 2 和样品 3 均匀掺入适量的水使其含水率达到 22% 以上,然后放入恒温干燥箱干燥(50℃),每隔一定时间取出冷却至室温(22℃),然后称量并计算含水率。

#### 2.2.2 试验过程

##### (1) 操作方法

将样品放入内径为 11 cm、高为 10.5 cm 的塑料杯中,传感器探头插入样品中。为保证试验的稳定性,减少周围物体对传感器探头的影响,须保证塑料杯周围 10 cm 以内保持空旷;另外,试验场所确保无强电磁场干扰。在样品不同含水率时用传感器测量出电容,确定稻谷含水率与电容的关系曲线。试验过程中,由于无法保证每次测量稻谷的松紧程度(或压实程度)完全一致,为保证试验的重复性,每次测量都取出传感器探头并重新插入,同一含水率重复插入测量 7 次,去掉 2 个最大值和 2 个最小值,余下 3 个值取平均值获得有效结果。

##### (2) 温度特性试验

研究表明谷物的介电常数受温度影响,且介电常数与温度呈线性关系<sup>[17]</sup>,但对不同的传感器影响程度不同,所以必须进行温度特性测试。正常情况下,稻谷长期储存含水率为 12% ~ 13%,因此,为满足稻谷收购的需要,将含水率 12.86% 的样品进行温度修正。将样品放在密封的塑料杯中加热或冷却,保证温度改变时含水率不变,在不同温度时测量传感器探头的电容量,重复 7 次,中间 3 个值的平均

值为有效结果。

3 试验结果与分析

3.1 传感器标定试验

在室温下完成传感器标定试验,将样品含水率控制在 8% ~ 23% 的范围内,将含水率与该含水率下所测得电容绘成曲线,如图 3 所示。当含水率在 8% ~ 23% 的范围内时曲线近似呈线性。将曲线进行线性回归得到电容与含水率的关系式为

$C = 0.0847M_c + 0.5856$  (2)

$M_c = 11.682C - 6.672$  (3)

式中  $C$ ——电容

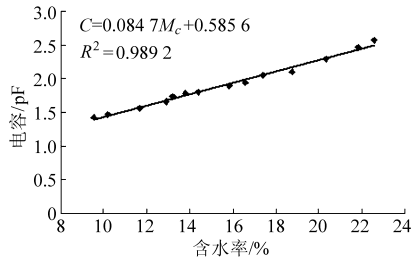


图 3 电容与含水率关系曲线

Fig.3 Relationship between capacitance and moisture content

3.2 稻谷温度特性试验

将样品温度控制在 12 ~ 33℃、含水率在 15.84%、12.86% 和 9.55% 时完成温度特性测试,电容与温度的关系如图 4 所示。由曲线可知,含水率为 15.84% 时温度对电容影响较大,含水率为 9.55% 时温度对电容影响较小,含水率为 12.86% 时,电容与温度关系式为

$C = 0.0193t + 1.399$  (4)

式中  $t$ ——温度

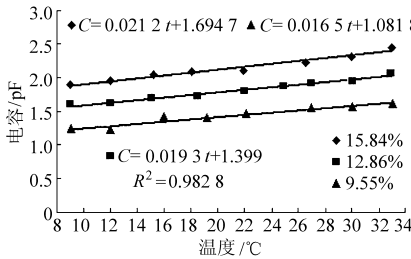


图 4 温度特性曲线

Fig.4 Temperature characteristic curves

由等式可知,电容与温度呈线性,且随温度增加而增加,为补偿温度变化带来的误差,需对电容进行修正。所以,在稻谷储存含水率(12.86%)时,以 22℃ 为参考温度,其修正方程为

$\Delta C = 0.0193(t - 22) = 0.0193\Delta t$  (5)

将式(3)修正为

$M_c = 11.682(C - \Delta C) - 6.672 = 11.682C - 0.2\Delta t - 6.672$  (6)

由式(6)可见,当含水率在 12% ~ 13% 之间时,温度每改变 1℃ 含水率偏移 0.2%,即漂移量为 0.2%/℃。

3.3 稻谷含水率预测比较试验

将样品 3 均匀掺水,使其含水率在 22% 以上,样品干燥过程中,温度为 22℃ 时,利用传感器检测样品电容,再利用式(6)计算预测结果,如表 1 所示。

表 1 含水率预测结果与参考值比较

Tab.1 Comparison between predicting value and reference value

| 参考值   | 预测值   | 误差    |
|-------|-------|-------|
| 22.57 | 23.29 | 0.72  |
| 21.80 | 21.98 | 0.18  |
| 20.32 | 20.04 | -0.28 |
| 18.73 | 18.10 | -0.63 |
| 16.58 | 16.08 | -0.50 |
| 14.38 | 14.34 | -0.04 |
| 13.21 | 13.52 | 0.31  |
| 12.89 | 12.67 | -0.22 |
| 11.67 | 11.54 | -0.13 |
| 10.18 | 10.51 | 0.33  |
| 9.55  | 9.91  | 0.36  |

由试验结果可知,该传感器测量稻谷含水率的误差在 ± 0.8% 以内。含水率在 12% ~ 13% 之间时,误差在 ± 0.4% 以内。

4 结论

(1) 为快速检测稻谷含水率,设计了单一平面电容传感器探头,采用 AD7150 芯片设计了电容数字转换电路和处理电路。

(2) 在室温为 22℃,含水率为 8% ~ 23% 条件下,完成了传感器检测稻谷的标定试验和预测试验,预测误差为 ± 0.8%。

(3) 在温度为 12 ~ 33℃,含水率为 15.84%、12.86% 和 9.55% 时,完成了温度特性试验。由试验结果可知,含水率大时温度影响较大。在稻谷储存含水率(12.86%)时,以 22℃ 为参考温度进行修正,温度漂移量为 0.2%/℃。

参 考 文 献

1 Abegaonkar M P, Karekar R, Aiyrer R C. A microwave microstrip ring resonator as a moisture sensor for biomaterials: application to wheat grains[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(10): 195 ~ 200.

- 2 Okabe T, Huang M, Okamura S. A new method for the measurement of grain moisture content by the use of microwaves[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1973, 18(1): 59 ~ 66.
- 3 Trabelsi S, Nelson S. Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 1999 ~ 2008.
- 4 Trabelsi S, Nelson S. Microwave moisture sensor for grain and seed[J]. Biological Engineering, 2008, 1(2): 195 ~ 202.
- 5 Trabelsi S, Nelson S O. Unified microwave moisture sensing technique for grain and seed[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(4): 997 ~ 1003.
- 6 Powell S, McLendon B, Nelson S O, et al. Use of a density independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(6): 1875 ~ 1881.
- 7 Kim K B, Kim J H, Seung S L, 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.
- 8 Abegaonkar M P, Karekar R, Aiyer R C. Miniaturized nondestructive microwave sensor for chickpea moisture measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(7): 3145 ~ 3149.
- 9 Nelson S O. Factors affecting the dielectric properties of grain[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(4): 1045 ~ 1049.
- 10 Mouazen A M, Baerdemaeker J D, Herman R. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1 ~ 2): 171 ~ 183.
- 11 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 on-line moisture content metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56 ~ 59. (in Chinese)
- 12 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 on-line measurement of grain moisture content by neutron gauge[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(5): 99 ~ 101. (in Chinese)
- 13 郝晓莉, 张本华, 王建忠. 种子含水率快速检测方法比较分析[J]. 中国种业, 2006(1): 11 ~ 12.  
Hao Xiaoli, Zhang Benhua, Wang Jianzhong. Comparative analysis of quick detection method for seed moisture content[J]. China Seed Industry, 2006(1): 11 ~ 12. (in Chinese)
- 14 Lawrence K, Windham W, Nelson S O. Wheat moisture determination by 1-to 110 MHz swept-frequency admittance measurements[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 135 ~ 142.
- 15 Kim K, Lee J, Lee S S, et al. On-line measurement of grain moisture content using RF impedance[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(3): 861 ~ 868.
- 16 Gough M. Evaluation of a remote moisture sensor for bulk grain[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1980, 25(4): 339 ~ 344.
- 17 Zoerb G, Moore G, Burrow R R. Continuous measurement of grain moisture content during harvest[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(1): 5 ~ 9.
- 18 Kandala C V K, Butts C L, Nelson S O. Capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content in nuts and grain[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1809 ~ 1813.
- 19 McIntosh R B, Casada M E. Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities[J]. Sensors Journal, 2008, 8(3): 240 ~ 247.
- 20 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, Bai Xueyuan, Wang Xiangyou, et al. 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)
- 21 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 113 ~ 117.  
Guo Wenchuan, Wang Jing, Liu Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113 ~ 117. (in Chinese)
- 22 梁琨, 沈明霞, 路顺涛, 等. 基于平衡水分模型的稻谷含水率实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 125 ~ 130.  
Liang Kun, Shen Mingxia, Lu Shuntao, et al. Real-time monitoring system for grain moisture content based on equilibrium moisture model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 125 ~ 130. (in Chinese)
- 23 刘少刚, 安进华, 罗跃生, 等. 单一平面电容传感器数学模型及有限元解法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1): 79 ~ 84.  
Liu Shaogang, An Jinhua, Luo Yuesheng, et al. Research on the mathematical model of a unipolar capacitance sensor and its finite element solution[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(1): 79 ~ 84. (in Chinese)
- 24 解锦秋, 朱益清. 非平行板电容器的电场和电容的计算[J]. 物理与工程, 1999, 9(1): 2 ~ 3.  
Xie Jinqiu, Zhu Yiqing. The calculation of capacitance and electric field for non-parallel plate capacitor[J]. Physics and Engineering, 1999, 9(1): 2 ~ 3. (in Chinese)
- 25 李淑娴, 吴雷, 李运红, 等. 低恒温烘干法测定种子含水率条件的研究[J]. 种子, 2011, 30(5): 72 ~ 74.  
Li Shuxian, Wu Lei, Li Yunhong, et al. Study on water content in seed by low constant temperature oven method[J]. Seed, 2011, 30(5): 72 ~ 74. (in Chinese)