

基于电容特性的植物叶片含水率无损检测仪^{*}

郭文川¹ 刘东雪¹ 周超超¹ 韩文霆^{2,3}

(1. 西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要:为实现植物叶片含水率的无损和准确检测,利用圆形平行板电容传感器检测植物叶片电容,利用直径为12.7 mm的圆形FSR402型压力传感器测量平行极板对植物叶片的压力,以MSP430型单片机为微控制器,设计了一种基于植物叶片电容检测其含水率的仪器。以玉米叶片为对象,研究了玉米叶片含水率和极板对叶片的压力对电容的影响规律,选取了极板对玉米叶片的最佳压力,建立了最佳压力下玉米叶片的电容与含水率之间的关系模型,并对模型的可靠性进行了检验。结果表明,玉米叶片的电容随含水率和极板对叶片压力的增大而增大,检测玉米叶片电容的最佳压力为4 N。玉米叶片湿基含水率为55%~80%时,所设计检测仪的含水率绝对测量误差为-1.2%~1.7%;在晶振频率为8 MHz下检测含水率的响应时间小于3 s。

关键词:植物叶片 含水率 压力 电容 检测仪

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0288-06

引言

水是植物生存的重要条件,植物的水分代谢一旦失去平衡,就会导致植物体生理活动的紊乱^[1]。植物叶片是植物体进行光合作用、呼吸作用以及蒸腾作用等生理过程的重要器官。叶片含水率能反映植物的含水率和旱情信息^[2-4]。实现植物叶片含水率的无损检测对于研究植物生理和指导抗旱具有重要意义。

目前植物叶片含水率检测方法主要包括图像处理法、微波法、介电法和干燥法等^[5-9]。其中介电法因其具有简单、快速和准确的特点,发展较为迅速^[10-16]。栾忠奇等^[17]发现干旱胁迫下冬小麦的叶片电容与其含水率呈极显著正相关,指出叶片电容能较灵敏地反映小麦叶片含水率的变化。魏永胜等^[18]研究了小麦叶片介电特性与外加电压和频率的关系,结果表明小麦幼苗叶片的电容不受测试信号频率的影响。现有研究为开发依据介电特性检测植物叶片含水率的仪器提供了理论依据。但是,植物叶片的电容除受含水率的影响外,极板对叶片的压力也是影响电容的主要因素^[19]。压力过大,会造成植物叶片组织的损伤;压力较小,测量的电容变化不明显,灵敏度较低。因此开发一种能够检测极板对植物叶片的压力,并在最佳压力下根据植物叶片

的电容检测含水率的仪器对于植物叶片含水率检测仪精度的提高具有重要的作用。

本文以玉米叶片为对象,通过试验研究玉米叶片含水率和极板对叶片的压力对电容的影响规律,选取最佳压力;并在最佳压力下,建立玉米叶片电容与含水率的关系模型;进而设计基于MSP430型单片机的便携式植物叶片含水率无损检测仪。

1 叶片含水率检测仪的设计

1.1 硬件系统总体设计方案

植物叶片含水率检测仪的硬件系统如图1所示。该系统主要包括微控制器、电容传感器、电容/频率(C/F)转换电路、压力传感器、压力检测电路、信号调理电路、键盘和液晶显示器等。电容传感器采集的电容信号,经C/F转换电路和信号调理电路后传至微控制器,微控制器根据采集信号的频率计算出被测样品的电容。压力传感器采集的压力信号经压力检测电路后转换成电压信号,经信号调理电路后送给微控制器,利用微控制器自带的A/D转换器完成模数转换,根据转换后的数字量计算出极板对叶片的压力。根据后续试验得到最佳压力下电容与含水率的关系计算该植物叶片的含水率,并通过液晶显示器显示测量结果。

收稿日期: 2013-11-27 修回日期: 2014-01-15
^{*}“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)
作者简介: 郭文川,教授,博士生导师,主要从事智能化检测技术与装备研究,E-mail: guowenchuan69@126.com
通讯作者: 韩文霆,研究员,博士生导师,主要从事智能控制精准灌溉技术与装备研究,E-mail: hanwt2000@126.com

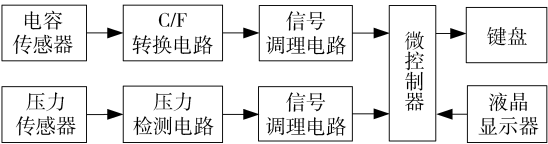


图 1 硬件系统框图

Fig. 1 Diagram of hardware system

1.2 植物叶片夹持结构的设计

所设计的植物叶片夹持结构由电容传感器、压力传感器、传动模块(螺母和螺杆)、支撑架和垫片组成,如图 2 所示。

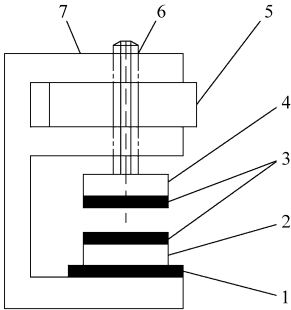


图 2 检测仪结构图

Fig. 2 Structure of leaf moisture content detector

1. 压力传感器 2、4. 垫片 3. 电容传感器 5. 螺母 6. 螺杆
7. 支撑架

为减小电容传感器的寄生电容,电容传感器采用圆形平行极板结构,其中极板直径为 11 mm,厚度为 1 mm,材料为黄铜。压力传感器采用压阻式传感器 FSR402,该传感器的有效检测区域为直径 12.7 mm 的圆,测力范围为 0 ~ 100 N。其输出电阻随作用于传感器表面压力的增大而增大,从而将极板对叶片的压力转化为电阻。与其他半导体材料相比,该压敏电阻材料在 - 30 ~ 70℃ 的工作温度下,无温度漂移现象,且具有分辨率高、响应速度快的特点。

传动模块包括螺母和螺杆。螺母为圆形,其规格为 M4 × 0.5。螺杆的有效行程为 6 mm,可满足不同厚度植物叶片的测量要求。电容传感器的上极板经垫片与螺杆连接在一起,下极板经垫片粘贴于压力传感器正中央,并固定于支撑架上。测量时将植物叶片放入上、下极板间,通过旋转螺母可实现螺杆的轴向运动。螺杆带动上极板使其上、下运动,达到调节上极板与下极板的间距以及改变上极板对植物叶片压力的目的。由压力传感器感知该压力,由电容传感器测量此压力下植物叶片的电容。

图 2 中垫片和支撑架的材料为有机玻璃。采用单芯屏蔽线作为传感器与检测电路的连接线。

1.3 硬件电路设计

1.3.1 微控制器

选用超低功耗单片机 MSP430 为微控制器,其

内部有 2 个 16 位定时器,1 个高速 12 位 A/D 转换器,48 个 I/O 口。MSP430 的供电电压为 3.3 V,晶振频率为 8 MHz,定时器的时钟频率为 32.768 kHz。前期研究表明,两个频率皆能满足系统的测量要求。本设计中单片机主要实现电容信号和压力信号的采集与运算,并控制输入输出设备实现人机交互的功能。

1.3.2 电容检测电路

电容检测电路由 C/F 转换电路和施密特触发器组成,如图 3 所示。

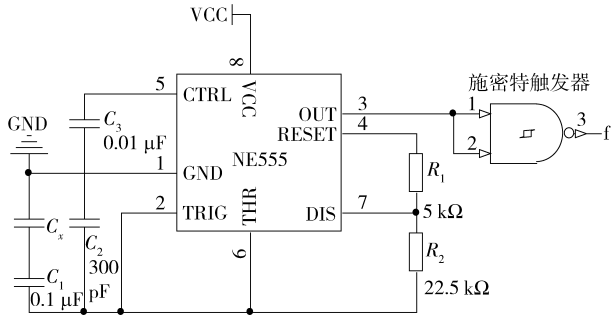


图 3 电容检测电路

Fig. 3 Capacitance detection circuit

C/F 转换电路以 NE555 为核心,将平行板电容传感器作为外接电容 C_x 接入电路,构成多谐振荡器,完成植物叶片电容的采集和电容到频率的转换。利用施密特触发器对此信号进行鉴幅、整形。

前期研究中发现,平行板电容传感器中有无植物叶片,传感器的输出电容为 50 ~ 700 pF。NE555 芯片的振荡频率为 0 ~ 500 kHz,为使 NE555 的工作性能最佳,取电阻 $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 22.5 \text{ k}\Omega$ ^[20]。为了消除直流漂移并保证振荡频率的稳定,电容传感器输出电容 C_x 串联 0.1 μF 的隔直电容 C_1 ,然后并联 300 pF 的电容 C_2 。由于 C_1 的值远远大于 C_x ,二者串联结果近似为 C_2 ,接入 TRIG 引脚的电容近似为 $C_2 + C_x$ 。故电容传感器的输出信号 C_x 经该转换电路后输出信号的频率 f 为^[21]

$$f = \frac{1.43}{(R_1 + 2R_2)(C_2 + C_x)} \tag{1}$$

在已知 f 、 R_1 、 R_2 和 C_2 的条件下,根据式(1)可求出 C_x 。

1.3.3 压力检测电路与标定

(1) 压力检测电路

采用压力传感器检测待测极板对叶片的压力,检测电路如图 4 所示。由于 MSP430 型单片机处理的电压信号为 0 ~ 3.3 V,因此图 4 中采用 ME7660 电压反转芯片将 3.3 V 的电压转化为 -3.3 V,作为压力测量电路的参考电压 U_{ref} 。

压阻式压力传感器 FSR402 的电源端接参考电

(Motic SMZ-140 型, 深圳市听雁仪器, 中国) 观察不同压力下玉米叶片组织。发现当压力大于 6 N 时, 叶片组织有较明显的损伤。因此, 后续试验在控制压力为 1、2、3、4、5 和 6 N 下, 分别测量电容传感器的输出值。每个叶片测量 3 个位置, 以 3 次测量的平均值作为该叶片的检测结果。

前期研究已经发现, 当玉米叶片温度在 20 ~ 40℃ 时, 测量的电容变化较小; 当环境相对湿度在 45% ~ 65% 时, 湿度对植物叶片介电参数测量结果的影响很小。为此, 未考虑环境温度和湿度对结果的影响。本研究测试期间的环境温度为 23 ~ 25℃, 相对湿度为 49% ~ 55%。

2.2.2 叶片含水率的测量

用 FA2104N 型电子天平 (精度 0.000 1 g, 上海精密科学仪器公司, 中国) 测量干燥前玉米叶片的质量, 随后置于直径 60 mm 的铝盒中于 110℃ 的电热恒温鼓风干燥箱 (101-1AB 型, 天津市泰斯特仪器, 中国) 中杀青 30 min 后, 再于 80℃ 下, 干燥至恒定质量, 然后称其干燥后质量, 根据干燥前、后玉米叶片的质量计算叶片的湿基含水率 W 。

3 测试结果与分析

3.1 叶片含水率和压力对电容的影响

利用干燥法测得本研究所用玉米叶片的湿基含水率为 55% ~ 80%。根据含水率的分布情况, 从中均匀的筛选出 25 个不同含水率下的数据进行分析。图 7 所示是不同压力下玉米叶片含水率与测得电容的关系曲线。

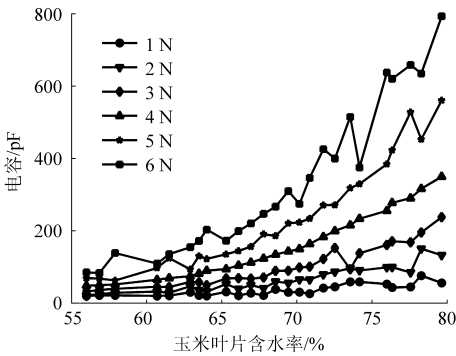


图 7 不同压力下玉米叶片含水率与电容的关系曲线
Fig. 7 Capacitance value of maize leaves at different moisture contents and pressures

由图 7 可见, 当压力不变时, 电容随含水率的增大而增大, 且高含水率下增加明显。室温下水的静态相对介电常数为 78, 植物叶片中纤维素等组织的静态介电常数为 $3.9^{[1]}$, 水的相对介电常数远远大于植物组织的介电常数, 因此, 测量的电容随玉米叶片含水率的增大而增大。

同一含水率下, 测量的电容随压力的增大而增大, 且含水率越高, 增大越明显。压力增大, 导致极板与玉米叶片的接触更紧密, 从而减少了极板与玉米叶片之间的空气含量。由于植物叶片的相对介电常数远大于空气的值, 因而使得测量的电容随压力的增大而增大。

由图 7 可明显地看到, 当压力为 5 N 和 6 N 时, 电容与含水率的关系曲线有一定的波动, 这可能是由于极板对玉米叶片的接触压力过大、叶片内部组织有一定程度的损伤造成。但压力过小 (如 1 N) 时, 叶片与极板接触不紧密, 使得电容的变化量较小, 影响测量精度的提高。图 7 中, 当压力为 4 N 时, 电容随含水率的增大稳定增大, 且此时二者的相关性最高。为此本文选择 4 N 为极板对玉米叶片的最佳压力。4 N 下, 测量的电容 C_x 与玉米叶片湿基含水率 W 的关系为

$$C_x = 0.5188W^2 - 57.90W + 1666 \quad (R^2 = 0.9769) \tag{4}$$

据式 (4), 编写压力 4 N 下根据电容传感器检测到的电容 C_x 计算玉米叶片含水率的程序, 并下载到 MSP430 单片机中。

3.2 含水率检测性能的验证

试验对象仍为“咸科 858”玉米叶片, 试验方法同 2.2 节。采用自制的植物叶片含水率检测仪测量压力为 4 N 时不同含水率玉米叶片的含水率, 并与干燥法所得的测量结果进行比较, 结果如图 8 所示。

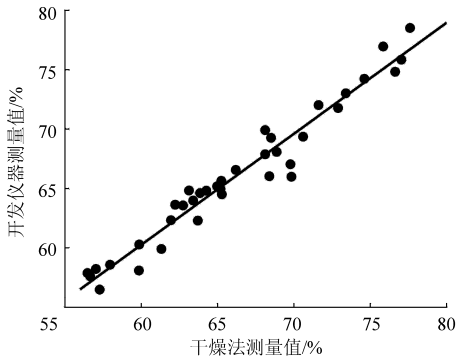


图 8 含水率干燥法实测值与开发仪器测量值的比较
Fig. 8 Comparison of moisture contents measured by standard oven drying method and self-designed meter

由图 8 可知, 采用本文设计的含水率检测仪得到的玉米叶片的含水率与干燥法得到含水率之间的相关系数 $R = 0.9757$, 绝对测量误差范围为 $-1.2\% \sim 1.7\%$, 在 8 MHz 的晶振频率下, 测量含水率的响应时间小于 3 s。结果说明, 该植物叶片含水率检测仪能够较好地满足准确和无损检测植物叶片含水率的要求。

4 结 论

- (1) 利用圆形平行板电容传感器和压力传感器设计了以 MSP430 型单片机为控制器的便携式植物叶片含水率检测仪。
- (2) 玉米叶片的含水率和极板对叶片的压力影响玉米叶片的电容,且电容随叶片含水率和极板对叶片压力的增大而增大,最佳压力为 4 N。当玉米

叶片的湿基含水率为 55% ~ 80% 时,压力 4 N 下玉米叶片的电容与其含水率可用一元二次方程表示,建立模型的决定系数 R^2 为 0.976 9。

(3) 自制检测仪的含水率检测性能结果说明,对于玉米叶片,该检测仪的湿基含水率绝对测量误差为 -1.2% ~ 1.7%。当晶振频率为 8 MHz,响应时间小于 3 s。

参 考 文 献

1 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 39 - 40.

2 金树德, 张世芳, 郑荣良. 从玉米生理电特性诊断旱情[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 91 - 95.
Jin Shude, Zhang Shifang, Zheng Rongliang. Diagnosis of drought from maize physiological electrical characteristics [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 91 - 95. (in Chinese)

3 鲍一丹, 沈兆辉. 基于叶片电特性和叶水势的植物缺水度研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(3): 341 - 345.
Bao Yidan, Shen Jiehui. Study of plant water lack message based on electric property and water potential of leaf[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2005, 31(3): 341 - 345. (in Chinese)

4 郭文川, 伍凌, 魏永胜. 失水对植物生理特性和电特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 185 - 188.
Guo Wenchuan, Wu Ling, Wei Yongsheng. Influence of water loss on physiological and electrical properties of plants[J]. Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition, 2007, 35(4): 185 - 188. (in Chinese)

5 赵杰文, 周晓兵. 基于近红外图像纹理分析检测作物叶片含水率的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 39 - 43.
Zhao Jiewen, Zhao Xiaobing. Fundamental study on determination of leaves' moisture content based on near infrared image texture analysis[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 39 - 43. (in Chinese)

6 Mizukami Y, Sawai Y, Yamaguchi Y. Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 293 - 299.

7 冯锐, 刘九庆. 利用微波法测量植物叶片含水量[J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(12): 47 - 48.
Feng Rui, Liu Jiuqing. Measurement of leaf water content using microwave[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(12): 47 - 48. (in Chinese)

8 冯晓旺, 宣奇丹, 张文杰. 毛白杨叶片含水量无损检测系统的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8213 - 8215.
Feng Xiaowang, Xuan Qidan, Zhang Wenjie. Study on non-destructive inspection system for populus tomentosa carr leaf water content[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(15): 8213 - 8215. (in Chinese)

9 Nelson S O, Trabelsi S. Models for the microwave dielectric properties of grain and seed[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 549 - 553.

10 Trabelsi S, Nelson S O. Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements[J]. Food Control, 2006, 17(4): 304 - 311.

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 Afzal A, Mousavi S, Khademi M. Estimation of leaf moisture content by measuring the capacitance[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2010, 12(3): 339 - 346.

13 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)

14 Nelson S O, Trabelsi S. A century of grain and seed moisture measurement by sensing electrical properties[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(2): 629 - 636.

15 郭文川, 赵志翔, 杨沉陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 188 - 193.
Guo Wenchuan, Zhao Zhixiang, Yang Chenchen. Moisture meter for coarse cereals based on dielectric properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 188 - 193. (in Chinese)

16 郭文川, 刘驰, 杨军. 小麦秸秆含水率测量仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 33 - 40.
Guo Wenchuan, Liu Chi, Yang Jun. Design and experiment on wheat straw moisture content meter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 33 - 40. (in Chinese)

17 栾忠奇, 刘晓红, 王国栋. 水分胁迫下小麦叶片的电容与水分含量关系[J]. 西北植物学报, 2007, 27(11): 2323 – 2327. Luan Zhongqi, Liu Xiaohong, Wang Guodong. Relationship between wheat leaf capacitance and water content under water stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(11): 2323 – 2327. (in Chinese)

18 魏永胜, 李得孝, 牟长灵, 等. 小麦叶片电特性与外加电压和频率的关系研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 166 – 169. Wei Yongsheng, Li Dexiao, Mu Changling, et al. Relationship between the wheat seedling leaf electric property and test frequency and voltage[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 166 – 169. (in Chinese)

19 伍凌, 卢博友, 郭文川, 等. 植物生理电特性在农业研究中的应用[J]. 中国农机化, 2004(6): 53 – 55. Wu Ling, Lu Boyou, Guo Wenchuan, et al. Application of physiological dielectric characteristic of vegetation in study of agriculture[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2004(6): 53 – 55. (in Chinese)

20 高宁宁. 基于 555 多谐振荡器的测量研究[J]. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2009, 18(2): 79 – 82. Gao Ningning. Measuring research on the oscillator based 555 circuitry[J]. Journal of the CUN: Natural Sciences Edition, 2009, 18(2): 79 – 82. (in Chinese)

21 阎石, 王红. 数字电子技术基础第四版教师手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 494 – 496.

22 邓翔, 佃松宜, 翁桃. 基于 FSR 的可穿戴式足底压力检测系统[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(2): 81 – 83. Deng Xiang, Dian Songyi, Weng Tao. Wearable plantar pressure detecting system based on FSR [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(2): 81 – 83. (in Chinese)

Non-destructive Moisture Detector for Plant Leaves Based on Capacitance

Guo Wenchuan¹ Liu Dongxue¹ Zhou Chaochao¹ Han Wenting^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To realize precise and non-destructive determination on moisture content of plant leaves, a moisture detector based on leaf capacitance was designed. Circular parallel plate capacitor was used to detect capacitance values of plant leaves, FSR402 pressure sensor was used to detect pressure on plant leaves given by circular parallel plates, and MSP430 single-chip microcomputer was used as micro-controller. Maize leaves were used as samples to study the influence of moisture content and pressure on obtained capacitance values, and the best pressure for maize leaves’ capacitance determination was obtained. The model describing the relationship between capacitance and moisture content of maize leaves at the best pressure was established and verified. The results showed that the capacitance values of maize leaves increased with moisture content and pressure. The best pressure for obtaining capacitance values of maize leaves was 4 N. The running test indicated that the absolute measurement error of the designed detector for moisture content of maize leaves was $-1.2\% \sim 1.7\%$ in wet basis when the moisture content was between 55% and 80% , and the response time was within 3 s at oscillation frequency of 8 MHz.

Key words: Plant leaf Moisture content Pressure Capacitance Detector