

基于交流阻抗法的小麦秸秆含水率检测仪设计

郭文川, 杨 军, 刘 驰, 朱新华

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

摘 要: 为了给秸秆含水率的检测提供廉价、便捷的检测仪, 该文基于交流阻抗法设计了以单片机为控制器, 能够检测阻抗、温度和压力的小麦秸秆含水率检测仪。建立了阻抗与小麦秸秆的湿基含水率 (10.4%~19.7%)、温度 (5~40℃) 和容积密度 (75.3~101.3 kg/m³) 的三元三次关系模型, 分析了各因素对模型影响的显著性, 指出容积密度对模型影响不显著。进而建立了阻抗与湿基含水率和温度的二元三次模型; 验证了模型的可靠性以及基于阻抗和温度预测秸秆含水率的精度。与烘干法相比, 该文所设计的小麦秸秆含水率检测仪对于含水率 10%~20%, 温度在 5~40℃ 的小麦秸秆含水率的绝对测量误差为 -2.0%~0.9%, 当单片机的晶振频率为 11.0592 MHz 时, 检测响应时间小于 1.5 s。该研究为小麦秸秆含水率的快速、现场检测提供了一种装置。

关键词: 秸秆, 水分, 温度, 单片机, 阻抗, 容积密度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.007

中图分类号: S126; S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0046-07

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.

Guo Wenchuan, Yang Jun, Liu Chi, et al. Wheat straw moisture meter based on alterative current impedance method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 46-52. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

小麦秸秆是中国的主要秸秆资源之一, 其 2005 年的总产量为 1.07 亿 t, 占全国秸秆总产量的 12.73%^[1-2]。由于小麦秸秆含有丰富的纤维, 因此常用于造纸和生产不同密度的人造板^[3-4]。此外, 将小麦秸秆的热能转化成电能也是秸秆的主要用途之一^[5]。由于秸秆的收购是基于重量的, 且高含水率的秸秆在贮藏中容易腐烂。不合适的含水率会影响秸秆产品质量, 含水率高会导致电能转换效率低。因此, 在小麦秸秆的收购、储存和加工应用中, 含水率的检测非常重要。传统的秸秆含水率测定方法主要采用烘干法^[6-7]。该方法虽具有测量结果稳定、精度高的优点, 但不适合于现场快速测量。市场上现有的便携式稻麦草含水率检测仪主要是引进国外的产品, 与便携式的粮食水分检测仪相比, 其价格相对较高。因此, 开发低成本、便于携带、测量快速、准确的小麦秸秆含水率检测仪是非常必要的。

电容法和电阻法是测量农业物料含水率的 2 种

主要方法^[8-11]。由于电阻法具有测量快速、准确、成本低的特点, 因此在含水率检测仪开发中倍受青睐。常用的电阻法有双量程直流电阻法、脉冲电阻法、阻抗分离法和交流阻抗法等^[12-17]。在电阻法测量中, 输出电阻或阻抗值除了受物料含水率的影响外, 物料的温度和容积密度也是影响电阻或阻抗值大小的主要因素^[18-20]。考虑这些主要因素的影响, 设计相应的补偿电路以减小测量误差是提高物料含水率检测仪精度的主要方法^[21]。文献[21]基于电容法设计的小麦秸秆含水率检测仪为秸秆含水率的现场检测提供了一种方法。为了进一步提高含水率的检测精度和速度, 本文以 8 位单片机为控制器, 以交流阻抗法为工作原理, 设计一种具有温度和容积密度补偿功能的小麦秸秆含水率检测仪, 并通过试验验证检测仪的含水率检测精度, 并同文献[21]设计的秸秆含水率检测仪进行比较。

1 小麦秸秆含水率检测仪硬件设计

1.1 小麦秸秆含水率检测装置的设计

本文设计的小麦秸秆含水率检测装置如图 1 所示。该检测装置由电极 (即阻抗传感器)、温度传感器、压力传感器、支撑架、手柄和电缆组成。电极材料选用 304 不锈钢, 双针式结构。电极尺寸见图 1。为了利于电极插入秸秆中, 其端部设计成圆锥形。温度传感器选用单总线型数字式温度传感器

收稿日期: 2013-09-03 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (ZD2012017), 国家自然科学基金资助项目 (31171720)。

作者简介: 郭文川 (1969—), 女, 陕西临潼人, 教授, 博士, 主要从事智能化检测技术研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。Email: guowenchuan69@126.com

DS18B20。其测温范围为 $-55\sim 125^{\circ}\text{C}$ ，在 $-10\sim 85^{\circ}\text{C}$ 时，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ^[22]。压力传感器用于感知秸秆的容积密度，采用薄膜型 Flexiforce 压力传感器 A201-25。其测量范围为 $0\sim 112.5\text{ N}$ 。支撑架和手柄的材料为聚甲醛树脂，电缆为屏蔽双绞线。

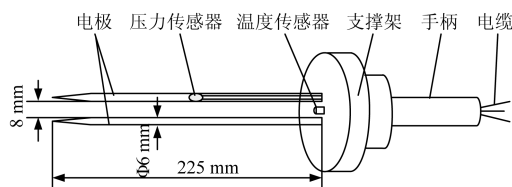


图 1 小麦秸秆含水率检测装置

Fig.1 Detection device of wheat straw moisture content meter

1.2 硬件电路设计

硬件电路系统的整体结构框图如图 2 所示。该系统主要由阻抗检测及处理、压力检测及处理、温度检测、A/D 转换、输入输出等模块和单片机组成。前 3 个模块分别完成对阻抗、压力和温度的采集和转换；A/D 转换模块的功能是将采集得到的模拟电压信号转换为数字信号，便于单片机处理；输入输出模块用于实现数据的输入以及结果的显示。

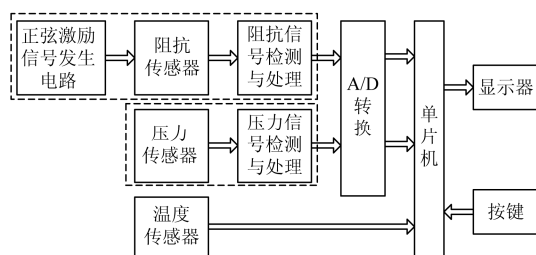


图 2 检测仪硬件电路系统总体框图

Fig.2 General frame of moisture meter's hardware system

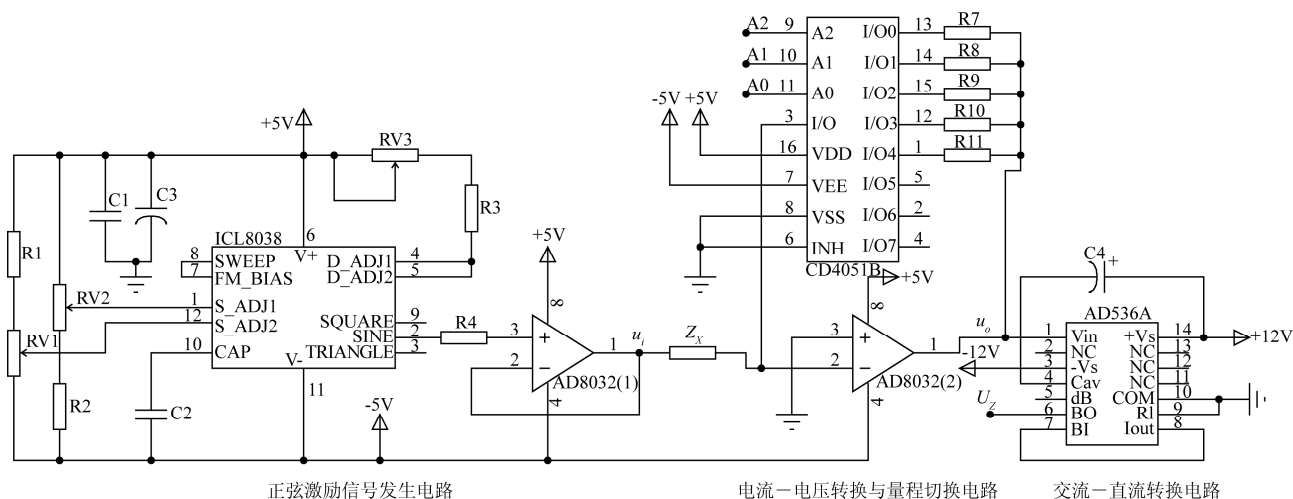


图 4 阻抗检测及处理电路

Fig.4 Detection and processing circuit on impedance

3) 电流-电压转换及量程切换电路

电流-电压转换电路由运算放大器 AD8032(2)

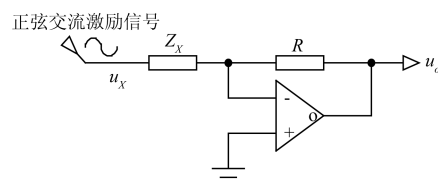
1.2.1 阻抗检测及处理电路

1) 阻抗检测方法

采用测量范围宽、精度较高的自动平衡电桥法检测阻抗。其测量原理如图 3 所示。由图 3 可得

$$Z_X = R \dot{U}_X / \dot{U}_O \quad (1)$$

式中， Z_X 为被测阻抗， $\text{k}\Omega$ ； \dot{U}_X 为电路的交流激励信号， V ； \dot{U}_O 为运算放大器的输出电压， V ； R 为反馈电阻， $\text{k}\Omega$ 。



注： Z_X 为被测阻抗； R 为反馈电阻； u_x 为交流激励信号； u_o 为输出电压。
Note: Z_X is impedance to be measured; R is feedback resistance; u_x is excited AC signal, and u_o is output voltage.

图 3 自动平衡电桥法

Fig.3 Auto-balancing bridge method

在已知反馈电阻 R 和正弦交流激励信号 \dot{U}_X 的情况下，通过测量运算放大器的输出电压 \dot{U}_O ，即可得到被测阻抗 Z_X 的值。

2) 正弦激励信号发生电路

选用集成函数信号发生器 ICL8038 设计正弦激励信号发生电路，设计电路如图 4 所示。正弦激励信号由 ICL8038 的引脚 2 (SINE) 输出，其幅值为电源电压幅值的 0.22 倍。为了提高后续电路带负载的能力，再经由 AD8032(1) 组成的一级跟随器，最后输出幅值约 1.1 V，频率为 104 kHz 的正弦交流激励信号 u_i 。

拟开关 CD4051B 和反馈电阻 (R7~R11) 组成, 且构成量程切换电路 (图 4)。考虑到被测阻抗的范围, 设置了 5 个测量量程, 分别为 0.16~0.8、0.8~4、4~20、20~100 和 100~300 k Ω 。

4) 交流-直流转换电路

AD8032(2)输出的是交流电压信号 u_o , 为便于后续处理, 需要将交流电压信号转换为直流电压信号。本设计中由 AD536A 完成交流至直流的转换 (图 4)。经 AD536A 后输出反映阻抗 Z_X 变化的直流电压 U_Z 。

1.2.2 压力检测及处理电路

本文采用感知压力的方法检测秸秆的容积密度。压力检测及处理电路如图 5 所示。

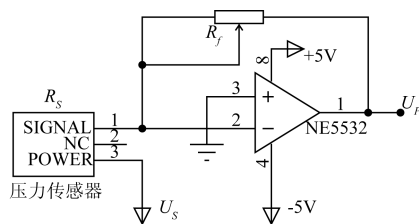


图 5 压力检测及处理电路

Fig.5 Detection and processing circuit of pressure

由图 5 可得

$$U_p = -U_s R_f / R_s \quad (2)$$

式中, R_s 为压力传感器的输出电阻, k Ω ; R_f 为反馈电阻, k Ω ; U_s 为供给压力传感器的电源电压, V; U_p 为运算放大器的输出电压, V。

由式 (2) 可知, 当 U_s 和反馈电阻 R_f 已知时, 输出电压 U_p 与压力传感器的阻抗值 R_s 存在一一对应关系, 而压力传感器的阻抗值又与其所承受的压力存在一定的关系。因此, 通过测量输出电压 U_p 就可以间接地反映压力传感器所承受的压力, 进而检测秸秆的容积密度。

1.2.3 温度检测电路

温度显著影响电阻法的测量结果, 且表现为输出电阻值随温度的升高而减小。采用 DS18B20 设计的温度检测电路如图 6 所示。

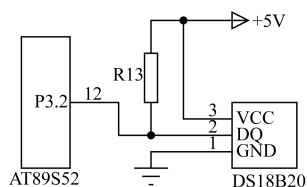


图 6 温度检测电路

Fig.6 Temperature detection circuit

1.2.4 A/D 转换电路

A/D 转换芯片采用美国 TI 公司生产的 12 位开

关电容型逐次逼近式模数转换器 TLC2543。A/D 转换电路如图 7 所示。图中, 模拟电压输入端 ANI0、ANI1 分别接入阻抗检测和压力检测得到的直流电压信号 U_Z 和 U_p , 其范围为 0~+5 V。

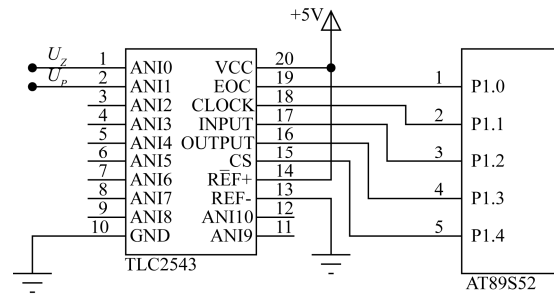


图 7 A/D 转换电路

Fig.7 A/D conversion circuit

1.2.5 其他芯片及电路

单片机选用美国 ATMEL 公司生产的 8 位微控制器 AT89S52, 晶振频率为 11.0592 MHz。输入电路由 2 个按键组成, 分别是开/关键和含水率测量键; 输出采用液晶显示器 LCD12864。

图 8 是本文设计的小麦秸秆含水率检测仪硬件电路实物及测量示意图。

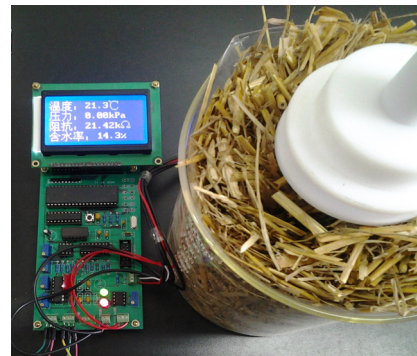


图 8 设计的小麦秸秆含水率检测仪硬件电路实物及测量示意图

Fig.8 Diagram of developed wheat straw moisture meter's hardware system and measurement

2 检测仪软件系统的设计

检测仪软件系统的设计采用模块化的设计方法。软件系统主要包括主程序、量程切换子程序、A/D 转换子程序、温度采集子程序、液晶显示子程序、按键识别子程序以及含水率计算子程序等。

主程序主要完成系统的初始化及对各子程序的调用。首先调用液晶初始化子程序, 完成对液晶显示器 LCD12864 的初始化。然后进行按键扫描, 若有功能键按下, 则转向按键识别子程序, 执行特定的功能; 若没有, 则执行量程切换子程序, 完成对阻抗信号的采集。之后, 通过 A/D 转换子程序实现阻抗信号和压力信号的 A/D 转换。

同时，调用温度采集子程序，实现温度信号的采集。最后，将得到的阻抗值、压力值和温度值，通过含水率计算子程序计算出含水率值。调用液晶显示子程序，将阻抗值、压力值、温度值和含水率值显示于 LCD 上。

3 含水率检测模型的建立与检验

3.1 试验材料

试验材料为杨凌地区夏季收获后的小麦“西农 979”秸秆。将无腐烂、无虫害的小麦秸秆剪成长 (30±3)mm 的枝杆，作为试验样品。

3.2 试验方法

在 105℃ 的热风干燥箱中烘干 10~15 g 的原始秸秆样品 3 份，直至质量恒定^[6]。3 份样品含水率的平均值作为秸秆的初始含水率。结果说明，所用秸秆的初始湿基含水率为 10.4%。使用 MP31001 型电子分析天平（精度 0.1 g，上海舜宇恒平科学仪器有限公司）称取一定量的秸秆样品装于塑料袋中，通过向秸秆中少量多次添加去离子水的方式配制湿基含水率在 10%~20% 的秸秆样品。在添加去离子水的过程中不停地搅拌，以使水分均匀分布。随后将样品双层密封后置于 2℃ 的冷藏室中 2~4 d，以使水分缓慢被秸秆样品吸收。为了保证水分分布均匀，每天摇动样品 3~5 次。试验前，采用烘干法测量样品的实际含水率。试验中样品的实际湿基含水率为 10.4%、12.5%、15.2%、17.6% 和 19.6%。将每个含水率下的样品分为 3 份，以用于获得 3 个不同的容积密度。

测量时选取某一含水率下的一份秸秆作为试验样品，倒入容积一定的干燥烧杯中，记录装入烧杯中秸秆样品的质量，根据秸秆质量和烧杯的体积计算样品的容积密度。然后，用保鲜膜封住容器口，放入 2℃ 的冷藏室中。当样品温度冷却至 2℃ 左右时，取出样品，迅速将其置于 YHG-400BS 型远红外恒温干燥箱（上海跃进医疗器械厂）中，并将开发的含水率检测装置垂直、完全地插入秸秆样品的中心，保证电极、压力传感器和温度传感器与被测样品完全接触。设定干燥箱的温度为 5℃，当样品温度恒定在 5℃ 约 3 min 时，测量该温度下样品的阻抗值。然后，依次设定干燥箱的温度为 10、15、20、25、30、35 和 40℃。当温度低于 15℃ 时，从一个温度升温到下一个设定温度需要 7~9 min，而当温度大于 15℃ 时，需要 12~15 min。当样品的温度升高到设定值后，延长 3~5 min 以保证样品温度均匀和恒定，然后记录阻抗值。每个含水率和每个温度下重复 3 次，3 次测量的平均值作为测量结果。

表 1 为本文设计的检测仪测量得到的小麦秸秆在不同含水率、容积密度和温度下的阻抗值。

表 1 不同含水率、容积密度和温度下小麦秸秆的阻抗值
Table 1 Obtained impedance values of wheat straw samples at different moisture contents, temperatures and bulk densities kΩ

含水率 Moisture content /%	容积 密度 Bulk density /(kg·m ⁻³)	温度 Temperature/℃							
		5	10	15	20	25	30	35	40
10.4	75.3	59.4	59.1	58.9	58.1	56.8	52.7	46.5	38.2
	80.6	59.3	59.0	58.8	57.9	57.1	54.9	48.2	40.2
	85.2	57.5	56.3	54.6	52.8	51.1	48.1	42.9	34.4
12.5	76.2	53.3	53.1	52.7	52.5	50.2	43.8	38.0	26.7
	83.0	55.2	54.9	54.6	53.0	50.9	47.4	37.4	21.7
	87.3	55.8	55.5	55.3	54.5	51.3	42.2	35.4	25.2
15.2	78.1	42.7	42.5	42.2	38.3	29.9	20.9	11.2	6.0
	85.0	41.4	40.8	40.6	38.9	36.7	31.2	20.3	9.5
	90.8	40.3	39.9	39.8	36.4	31.6	22.9	10.1	6.3
17.6	85.1	32.8	32.4	32.3	30.1	25.1	14.2	11.1	7.3
	90.7	31.0	30.3	28.3	22.4	12.0	7.1	4.0	2.5
	95.8	24.1	23.7	23.5	21.9	14.0	9.4	5.8	4.0
19.7	90.2	17.9	17.5	16.8	11.7	8.0	5.0	2.9	1.8
	94.9	16.9	16.6	16.1	12.1	6.8	4.4	2.4	1.5
	101.3	10.1	9.9	9.5	6.9	5.3	4.3	2.3	1.7

3.3 试验结果与分析

3.3.1 检测模型的建立

以阻抗为因变量，含水率、容积密度和温度为自变量，利用 Design Expert 7.0 软件对试验数据进行拟合和分析。拟合结果如式 (3) 所示。

$$\begin{aligned}
 Z = & -2893.21 - 62.02W + 110.28\rho + \\
 & 12.02T - 4.15W^2 - 1.50\rho^2 - 0.31T^2 + \\
 & 2.96W\rho - 0.96WT - 0.06\rho T + 0.07W^3 + \\
 & 6.71 \times 10^{-3}\rho^3 + 2.43 \times 10^{-4}T^3 + \\
 & 8.63 \times 10^{-3}W^2\rho + 0.2W^2T - 0.02W\rho^2 + \\
 & 2.16 \times 10^{-3}WT^2 - 1.91 \times 10^{-4}\rho^2T + \\
 & 6.45 \times 10^{-4}\rho T^2 + 4.65 \times 10^{-3}W\rho T
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中， Z 为阻抗，kΩ； W 为含水率，%； $10.4\% \leq W \leq 19.7\%$ ； ρ 为容积密度，kg/m³； T 为温度，℃， $5 \leq T \leq 40$ 。

对式 (3) 进行方差和显著性分析，结果说明该回归模型在 0.001 水平上显著。除常数项外，回归方程 19 项中的 W 、 ρ 、 T 、 T^2 、 W^3 、 ρ^3 、 W^2T 以及 WT^2 共 8 项在 0.05 水平上显著，而其余 11 项对模型的影响不显著。这 11 项，其中有 8 项是与 ρ 有关。说明 ρ 虽对回归方程有一定影响，但总体影响的显著性较差。为了简化模型，在不考虑容积密度的情况下，对阻抗与含水率和温度的关系进行了

拟合。拟合结果见式(4)。此模型在 0.001 的水平上显著。

$$Z = -190.44 + 47.66W + 7.66T - 2.91W^2 - 0.09T^2 - 0.83WT + 0.05W^3 + 2.43 \times 10^{-4}T^3 + 0.02W^2T + 3.20 \times 10^{-3}WT^2 \quad (4)$$

3.3.2 回归模型可靠性的检验

在湿基含水率为 10.4%~19.7%、容积密度为 75.3~101.3 kg/m³ 之间, 随机配制 5 份含水率不同的秸秆样品, 在每个含水率下分别测量 5~40℃ 间任意 8 个温度下的阻抗值。以式(4)计算的阻抗值为计算值, 以检测仪测量得到的阻抗值为实测值进行分析, 结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 计算阻抗值与实测阻抗值的点比较均匀且紧密地分布在 45° 线的两侧, 说明计算阻抗值能很好地反映实测阻抗值, 可用式(4)描述小麦秸秆的阻抗与其含水率和温度之间的关系。式(4)可作为小麦秸秆含水率的预测模型。

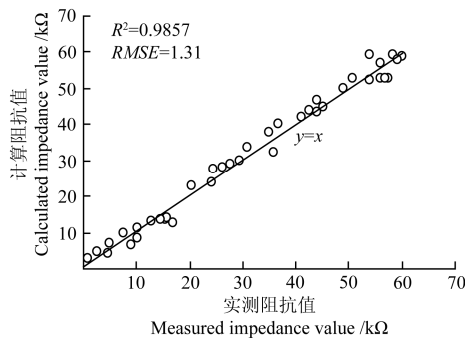


图 9 实测阻抗与计算阻抗值的比较

Fig.9 Comparison of measured impedance with calculated one

4 含水率检测性能的检验

根据式(4), 在已知秸秆温度和阻抗的条件下, 采用牛顿迭代法编写计算秸秆含水率的程序。

仍然以小麦秸秆为试验对象, 试验方法同 3.2。通过添加去离子水的方法配制 7 份湿基含水率在 10.0%~20.0% 的秸秆样品, 使用本检测仪对每份秸秆样品在 5~40℃ 间任意 5~7 个温度下进行含水率检测。每个温度下重复 3 次, 3 次测量的平均值作为测量结果。将利用开发的检测仪测量得到的含水率与烘干法得到的实际含水率进行比较, 结果如图 10 所示。结果说明, 在湿基含水率为 10.0%~20.0%、容积密度为 75.3~101.3 kg/m³、温度为 5~40℃ 的范围内, 本检测仪的含水率绝对测量误差为 -2.0%~0.9%, 在晶振频率为 11.0592 MHz 下, 响应时间小于 1.5 s。在含水率与容积密度基本相同, 温度在 5~35℃ 内, 文献[21]设计的电容式小麦秸秆含水率检测仪的含水率绝对测量误差为 -0.9%~2.2%, 同本

文相比, 文献[21]的含水率测量值普遍比实测值大, 而本文的测量值普遍比实测值小。测量误差的绝对值相比, 本文略小于文献[21], 且测量温度范围较宽。在相同的晶振频率下, 本设计的响应时间 1.5 s 优于文献[21]的 2 s。此外, 本设计的硬件电路比文献[21]简单。因此, 阻抗式小麦秸秆含水率检测仪具有良好的应用前景。

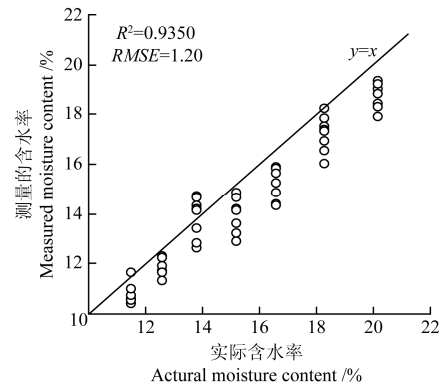


图 10 小麦秸秆测量含水率与实际含水率的比较

Fig.10 Comparison of measured moisture content by self-made wheat straw moisture meter with actual value

5 总结

本文基于交流阻抗法设计了以 8 位单片机为控制器, 具有温度和容积密度补偿功能的小麦秸秆含水率测量仪。以“西农 979”秸秆为对象, 研究了含水率 (10.4%~19.7%)、温度 (5~40℃) 和容积密度 (75.3~101.3 kg/m³) 对阻抗的影响, 建立了描述阻抗与主要影响因素 (含水率、温度和容积密度) 的三元三次和二元三次方程, 验证了二元三次方程的可靠性以及基于阻抗和温度预测小麦秸秆含水率的精度。结果说明, 在 5~40℃ 间, 本文设计的测量仪对含水率 10%~20% 小麦秸秆的含水率绝对测量误差为 -2.0%~0.9%, 响应时间小于 3 s。

[参 考 文 献]

- [1] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211—217.
Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 211—217. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu. The assessment and utilization of straw resources in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(12): 1807—1815.
- [3] Wang D, Sun X S. Low density particleboard from wheat straw and corn pith[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15(1): 43—50.

- [4] Mo Xiaoqun, Cheng Enzhi, Wang Donghai, et al. Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesives[J]. *Industrial Crops and Products*, 2003, 18(1): 47—53.
- [5] Yang Y B, Newman R, Sharifi V, et al. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions[J]. *Fuel*, 2007, 86(1/2): 129—142.
- [6] NY/T1701-2009. 中华人名共和国农业行业标准-农作物秸秆资源调查与评价技术规范[S].
- [7] 霍丽丽, 田宜水, 赵立欣. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. *可再生能源*, 2011, 29(6): 86—92.
Huo Lili, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Research on physical property of crop straw and test methods[J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(6): 86—92. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 metering device properties for paddy drying process[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2008, 39(3): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(2): 185—189. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张利凤, 郭文川, 付鹤翔, 等. 数字式蜂蜜含水率检测仪设计[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 139—143, 147.
Zhang Lifeng, Guo Wenchuan, Fu Hexiang et al. Design of digital honey water content meter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 139—143, 147. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 with English abstract)
- [12] 郑颖航, 丁天怀, 李勇. 基于电阻测量原理的新型棉花水分在线自动测量仪[J]. *仪表技术与传感器*, 2002(7): 21—22, 28.
Zheng Yinghang, Ding Tianhuai, Li Yong. A novel on-line automatic apparatus for moisture content of cotton based on resistance[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2002(7): 21—22, 28. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(5): 130—133. (in Chinese with English abstract)
- [14] 裘揆, 陈乐生, 赵春宇, 等. 种子含水率在线测量系统[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(9): 119—122, 127.
Qiu Kui, Chen Lesheng, Zhao Chunyu, et al. On-line measuring system of seed moisture content[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2006, 37(9): 119—122, 127. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡鸿豪, 蔡志端, 李世红, 等. 基于 LabVIEW 的陶瓷物料水分检测的复阻抗分离法[J]. *中国陶瓷*, 2007, 43(5): 55—57.
Hu Honghao, Cai Zhiduan, Li Shihong, et al. The research of complex impedance separation method of ceramic material moisture measuring based on LabVIEW[J]. *China Ceramic*, 2007, 43(5): 55—57. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张永林, 王旺平, 郑长征, 等. 谷物干燥实时在线智能水分测量系统[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 137—140.
Zhang Yonglin, Wang Wangping, Zheng Changzheng, et al. Intelligent real-time on-line measuring system for moisture content during grain drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(9): 137—140. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑长征. 电阻式粮食水分测定仪的设计[J]. *现代电子技术*, 2009, 32(19): 143—145.
Zheng Changzheng. Design of grain moisture test apparatus based on resistance test[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, 32(19): 143—145. (in Chinese with English abstract)
- [18] 丁强, 王忠义, 黄岚, 等. 便携式猪肉阻抗谱检测系统研制[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 138—144.
Ding Qiang, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Development of portable bio-impedance spectroscopy system for measuring porcine meat quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(12): 138—144. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王海兰, 白陈祥, 赵燕东. 乔木茎体水分传感器探针结构实验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 176—179.
Wang Hailan, Bai Chenxiang, Zhao Yandong. Experiment on the probe configuration of stem water content measuring sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2009, 40(1): 176—179. (in Chinese with English abstract)

- [20] 刘贺, 赵燕东. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 140—144.
Liu He, Zhao Yandong. Wheat stem moisture sensor using short probes based on SWR principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 140—144. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 33—40. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周鹏. 基于 STC89C52 单片机的温度检测系统设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(22): 10—13.
Zhou Peng. Design of temperature detection system based on MUC STC89C52 [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(22): 10—13. (in Chinese with English abstract)

Wheat straw moisture meter based on alterative current impedance method

Guo Wenchuan, Yang Jun, Liu Chi, Zhu Xinhua

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Wheat straw is a main kind of straws in China. Since it contains a large amount of fiber, wheat straw is used to make paper and produce particleboards in different densities. Moreover, high energy content in wheat straw provides an opportunity to convert straw's heat energy to electric power. Since the unit price of wheat straw is based on weight and straw decays when kept in a high moisture state, moisture content is listed as a main criterion in wheat straw consuming market. It is also an important factor in straw's application. Therefore, moisture content detection is very important during wheat straw marketing, storing and processing. Since the traditional oven drying method has the major disadvantages for long time measurement and unsuitable for on-site detection in collection fields, developing the new kinds of wheat straw moisture meters with advantages of convenience, rapid measurement and high precision is needed in wheat straw industry. In this study, based on alterative current (AC) impedance method, a straw moisture meter, which can detect impedance, temperature and pressure, was designed with an 8-bit single-chip microcomputer as controller. Experiment was conducted at five moisture content levels from 10.4% to 19.7% at wet basis, temperature range from 5 to 40°C at 5°C interval, and three bulk density levels (75.3~101.3 kg/m³) at each moisture content to study the effect of moisture content, temperature and bulk density on impedance. A cubic equation on impedance as functions of moisture content, temperature and bulk density was established. The significance effect of each variable on the regressed equation was analyzed. The results indicate that bulk density has no significant effect on the equation at the significance level of 0.05. Therefore, a cubic equation of impedance with two variables of moisture content and temperature was regressed. The test results showed that the regressed cubic model with two variables can describe the relationship between impedance and moisture content and temperature exactly. Based on the obtained impedance and temperature, Newton iteration algorithm was used to calculate the moisture content of wheat straw. The experiment indicated that the absolute error between calculated moisture content with the developed straw moisture meter and actual value obtained by drying method was within -2.0%-0.9%, and the response time for predicting moisture content was within 3 s. The study can provide a reference for developing convenient and rapid moisture meters of wheat straw.

Key words: straw, moisture, temperature, single-chip microcomputer, impedance, bulk density

(责任编辑: 刘丽英)