

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.044

便携式无土栽培基质多参数无线检测仪^{*}

徐坤¹ 张西良¹ 李萍萍² 陈书田¹ 盛庆元^{3,4} 车云飞¹

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037;
3. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 4. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 为实现无土栽培基质参数的快速准确测量, 基于自制的基质多参数复合传感器, 并结合 ZigBee 无线网络技术, 研制了便携式基质多参数无线检测仪。检测仪采用分体式设计, 由无线复合传感器和手持终端两部分组成。无线复合传感器采集基质参数信息, 并以无线的方式将信息发送到手持终端; 手持终端接收到的测量参数信息进行处理分析、显示、存储和查询等。检测仪性能试验表明, 含水率测量误差为 $-0.4\% \sim 3.1\%$, 相对误差为 $-3.2\% \sim 9.6\%$, 且对不同基质具有较好的适应性; 电导率测量误差为 $-0.015 \sim 0.179 \text{ mS/cm}$, 相对误差为 $-4.7\% \sim 10\%$, 且对不同基质具有较好的适应性; 温度测量误差为 $-0.63 \sim 0.69^\circ\text{C}$, 相对误差为 $-1.1\% \sim 3.3\%$ 。检测仪能够满足无土栽培基质参数检测的要求。

关键词: 无土栽培基质 无线检测仪 含水率 电导率 温度

中图分类号: TP216^{+.1}; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0302-08

Development of Portable Wireless Detector for Multi-parameter of Soilless Cultivation Substrates

Xu Kun¹ Zhang Xiliang¹ Li Pingping² Chen Shutian¹ Sheng Qingyuan^{3,4} Che Yunfei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

4. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: To measure the parameters of soilless substrates quickly and accurately, based on a self-made compound sensor for multi-parameter of soilless substrates, combined with ZigBee wireless network technology, a portable wireless detector for multi-parameter of soilless substrates was designed. Considering the practicality and convenient operation, the principle of separated design was employed. The detector included a handheld terminal and a wireless compound sensor. The wireless compound sensor, including a self-made compound sensor and a CC2430 wireless module, collected data of water content, electrical conductivity and temperature in soilless substrates, and sent the data to the handheld terminal by wireless. Then, the handheld terminal received the data through another CC2430 wireless module, and progressed with a MSP430F5438A single chip. The measure results can be displayed, recorded, queried and deleted with the help of a 12864 LCD displayer and a keyboard. The tests demonstrated that error range of water content measurement was $-0.4\% \sim 3.1\%$, and relative error range was $-3.2\% \sim 9.6\%$; error range of electrical conductivity measurement was $-0.015 \sim 0.179 \text{ mS/cm}$, relative error range was $-4.7\% \sim 10\%$; the error range of temperature measurement was

收稿日期: 2014-07-27 修回日期: 2014-09-03

^{*} 公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201203095)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD08B04)和江苏大学大学生科研立项资助项目(Y13B085)

作者简介: 徐坤, 博士生, 主要从事农业信息检测和智能仪器开发研究, E-mail: kuaileniwo89@126.com

通讯作者: 张西良, 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息检测与智能仪器研究, E-mail: 190337373@qq.com

-0.63 ~ 0.69℃, the relative error range was -1.1% ~ 3.3%. The measurement error of detector was small enough to match the detection precision of agricultural production, and the detector was suitable for different substrates.

Key words: Soilless substrate Wireless detector Moisture Electrical conductivity Temperature

引言

基质成本低,取材方便,而且具有良好的保持水分养分的能力,因此在温室大棚作物无土栽培管理中得到了广泛的应用^[1-2]。研究表明,基质的含水率、电导率等参数,能够有效地反映基质的有机含量、质地结构和孔隙率等性状^[3-5]。此外基质的温度对植物的生长发育影响也很大^[6-7]。因此,及时掌握基质含水率、电导率和温度,有利于更好地调控无土栽培过程中的水肥状况,对于提高农业生产效率、促进我国无土栽培的发展有着重要的意义^[8-9]。

目前,国内外对于基质特性的研究有很多^[10-12],但是对于基质参数检测技术的研究还局限于土壤参数检测研究上。如江朝晖等^[13]设计了一种基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪,但是检测参数单一,且使用的 GSM 模块成本较高;冯炜等^[14]研究了一种能同时测量含水率和电导率的 TDR 系统原理和电路实现方法;吴涛^[15]研究了一种基于数字图像处理的土壤表层含水率在线检测方法;李民赞等^[16-17]设计了四端法土壤电导率传感器和具有无线通信功能的电导率测试系统及便携式土壤电导率测试仪。以上研究电路设计较复杂,设备体积较大,成本较高,在生产环境下使用不便。此外,由于基质的理化特性与土壤特性之间存在较大的差异,以上研究并不能直接应用于基质参数的检测。针对基质参数检测的仪器,张俊宁等^[2]基于四端法建立了适宜温室栽培基质测量的电导率方法,并制作设计了电导率测试仪,但是检测参数只涉及到电导率,不能检测基质的其他理化特性。同时,基质的含水率、电导率、温度等参数之间存在一定耦合关系^[18-21]。本文基于自制的基质多参数复合传感器,应用 ZigBee 无线网络技术,通过设计各因素之间相互耦合的校正补偿处理软件,研制一种便携式的基质多参数检测仪。

1 无线检测仪总体设计

1.1 检测仪设计要求

基质参数的检测环境往往是温室大棚内或是室外,特殊的检测环境对便携式仪器的设计开发提出了特殊的要求。目前市面上的土壤参数检测设备普遍体积过大,不易安装和使用,且功耗大。首先,在

保证系统功能和性能的基础上,要尽可能减小体积,便于携带。其次,基质参数检测多为无源环境,采用电池供电是最好的选择,所以设计时应考虑电池的使用寿命,最大限度降低仪器的功耗,延长电池的使用寿命。最后,为了在生产实践中便于推广应用,应充分地考虑成本,在满足系统性能要求的前提下,尽量地降低成本,提高产品的市场竞争力。

1.2 总体方案设计

传统检测仪器为有线系统,通过有线传输将传感器与主控机相连。这样必然导致系统布线复杂、使用不便、成本高,系统可扩展性差、移动性差等。

ZigBee 技术作为一种无线通信技术,是一种应用于短距离、低传输速率下的无线通信技术,具有距离短、复杂度低、功耗低、成本低和自组网等特点,适用于自动控制领域传感器、执行机构等设备的无线联网^[22]。

综合考虑仪器的便携性,在体积、功耗和成本等方面限制因素,结合 ZigBee 无线网络技术,采用分体式设计检测传感器和操作显示器,以无线方式通信,不但能有效地避免有线系统存在的问题,降低安装成本,还能有效减轻生产人员的工作量,节省大量人力物力,提高工作效率。检测仪整体结构如图 1 所示,主要包括手持终端和无线复合传感器两部分。其中手持终端包括电源电路、微控制器、键盘、LCD 显示器及无线模块;无线复合传感器包括基质检测处理电路、无线模块及电源转换电路,实现参数检测及无线传输等功能。

检测仪在工作时,通过无线复合传感器检测基质参数,经过信号检测电路将各参数信号转换为直流电压信号,通过无线模块进行 A/D 转换,并将转换结果以无线的方式发送出去,由手持终端里的无线模块接收数据,并通过串口将数据传输给微控制器,进行处理、显示、存储、查询等。

2 无线检测仪硬件设计

2.1 无线复合传感器硬件设计

无线复合传感器由无线模块和自制的复合传感器 2 部分连接而成。复合传感器输出反映水分、电导率和温度的电压信号,经 A/D 转换后以无线方式发送给手持终端。

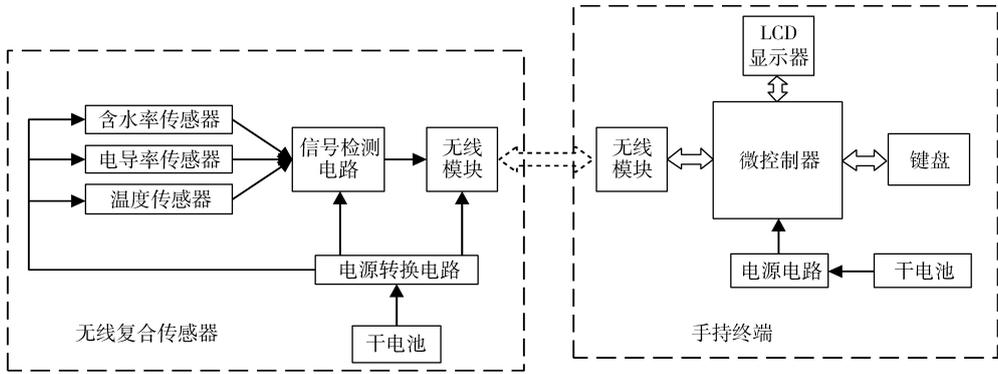


图1 检测仪组成结构框图

Fig. 1 Structure diagram of detector

2.1.1 基质多参数复合传感器检测原理

为了方便使用,便于携带,缩小整体尺寸,同时考虑传感器对基质的穿刺能力,采用结构复合的方法,将基质含水率传感器、电导率传感器和温度传感器集成在一块 $37\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的 PCB 板上,自制的基质多参数复合传感器如图 2 所示。

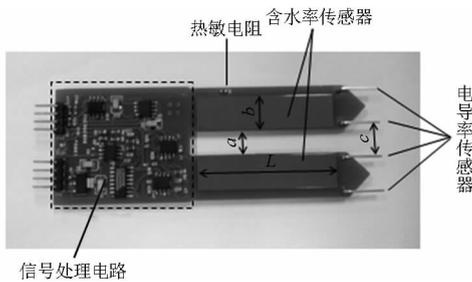


图2 基质多参数复合传感器实物图

Fig. 2 Physical picture of compound multi-parameter sensor

图 2 中,在 2 片 PCB 长条板表面绝缘层下嵌入极薄的铜片作为平板电容式含水率传感器极板,极板底端等间距的布置 4 根相同长度的不锈钢金属探针,作为电导率传感器探针,热敏电阻在 PCB 板的边缘,检测电路与极板集成在同一块 PCB 板上。

基质中固体颗粒、空气与水 3 种物质的相对介电常数存在一定的差异性(水的介电常数约为 80,空气为 1,基质颗粒为 3~5)^[23],基于介电理论,采用平板电容式传感器检测基质含水率^[24-25]。对于平板电容式传感器,忽略极板厚度和边缘效应,电容为

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / a \quad (1)$$

式中 ε_0 ——真空介电常数

ε_r ——介质的相对介电常数

S ——极板面积 a ——极板间距

设 L 为极板长度, b 为极板宽度,在极板宽度增量 Δx 微小范围,面积增量 ΔF 为 $L\Delta x$,对应的电容增量为

$$\Delta C \approx \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta F}{\pi \left(x + \frac{a}{2}\right)} = \frac{4L\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi(2x + a)} \Delta x \quad (2)$$

采用单元积分法计算得到极板总电容为^[26]

$$C \approx \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}+b} \frac{4L\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi(2x + a)} dx = 2\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{L}{\pi} \ln \left(1 + \frac{b}{a}\right) \quad (3)$$

在极板确定的情况下,板间电容由基质的相对介电常数决定,而基质含水率决定了基质的相对介电常数。通过测量电容的变化,达到间接测量基质含水率的目的。

在借鉴国内外土壤电导率研究经验的基础上^[16],本文采用一种改进的电流电压“四端法”测量基质的电导率。测量原理如图 3 所示,图中 $d_{AB} = d_{BC} = d_{CD} = c$ 为相邻两根探针的间距, U_R 为精密电阻两端电压, ΔU 为 B、C 两端点之间的电压差。

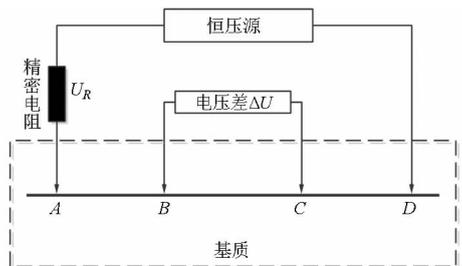


图3 改进的四端法测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of improved four-electrode measurement

经过分析推导得到四端法测量土壤基质电导率的公式为^[27]

$$\sigma = \frac{\frac{1}{d_{AB}} - \frac{1}{d_{AC}} - \left(\frac{1}{d_{DB}} - \frac{1}{d_{DC}}\right) I}{2\pi} \frac{I}{\Delta U} \quad (4)$$

由于 $d_{AB} = d_{BC} = d_{CD} = c$,则化简为

$$\sigma = \frac{1}{2\pi c} \frac{I}{\Delta U} \quad (5)$$

根据安培定律,式(5)演变为

$$\sigma = \frac{1}{2\pi c} \frac{U_R}{R\Delta U} \quad (6)$$

式中 R ——精密电阻的阻值

在已知间距 c 和精密电阻阻值 R 的前提下,通过测量电压差和精密电阻两端的电压,即可得到基

质的电导率。

本文选用热敏电阻 PTR-10 为敏感元件,测量基质的温度参数。热敏电阻具有体积小、响应快、灵敏度高、稳定性好等特点,被广泛应用于温度测量。

2.1.2 无线模块选用

无线模块选用基于 ZigBee 协议的 CC2430 无线单片机,实物图如图 4 所示。CC2430 无线单片机作为通信单元,包括了一个高性能 2.4 GHz DSSS 射频收发器和一颗工业级高效的 8051MCU,具有体积小、低功耗、成本低的特点,适合用于便携式仪器开发。

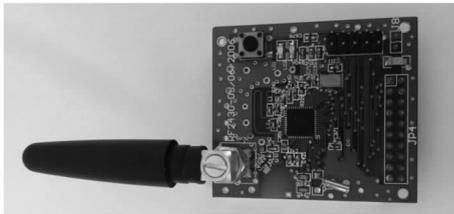


图 4 CC2430 无线单片机模块实物图

Fig. 4 Photo of CC2430 model

2.1.3 无线复合传感器设计

无线复合传感器由 CC2430 无线单片机模块和复合传感器组成,硬件连接如图 5 所示。从复合传感器上输出的 5 V 电压经电压转换模块,得到 3.3 V 电压为无线单片机供电。复合传感器输出模拟电压信号分别连接到无线单片机的 4 路 I/O 口,进行 A/D 转换。对复合传感器电磁干扰仿真分析可知,电导率传感器和含水率传感器电路同时工作时相互干扰较大,因此无线单片机通过 P1.1 控制复合传感器的工作模式,高电平时含水率传感器工作,低电平时电导率和温度传感器工作。

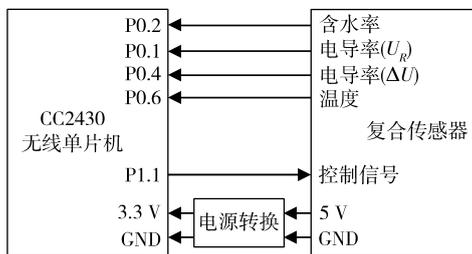


图 5 无线传感器硬件连接框图

Fig. 5 Concatenate diagram of wireless compound sensor

2.2 手持终端硬件设计

手持终端主要由微控制器、显示屏、无线模块和按键 4 部分组成。其中,微控制器选用 TI 公司的 MSP430F5438A 单片机作为主控芯片,它是 16 位超低功耗单片机,其内部集成了 5 个低功耗模块,能够最大程度的延长电池的寿命,非常适合便携式测量应用。而且其自带 Flash 足够大,需要记录的数据量较小,因此不需外接存储卡。无线模块同样采用

CC2430 无线单片机模块。手持终端硬件连接如图 6 所示。

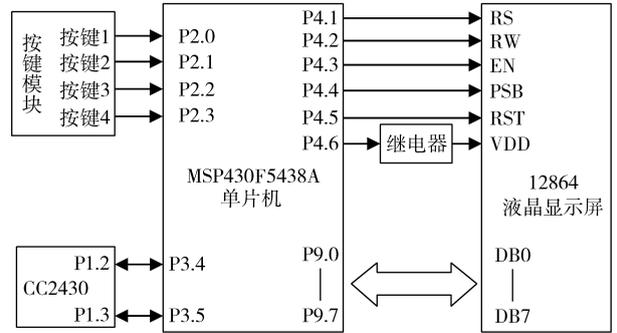


图 6 手持终端硬件连接框图

Fig. 6 Concatenate diagram of handheld terminal

图 6 中,按键的 4 个端口分别为单片机 P2.0、P2.1、P2.2 和 P2.3,按键按下时端口为低电平。CC2430 无线模块与 MSP430F5438A 单片机通过串口进行数据交换,将无线模块接收到的数据传给 MSP430F5438A 单片机进行处理,P3.4 和 P3.5 分别与 CC2430 单片机的 P1.2、P1.3 相连。LCD 的数据段 DB0~DB7 与单片机 I/O 口 P9.0~P9.7 相连,其他控制位分别连接 P4.1~P4.6。MSP430F5438A 单片机为各个模块的连接提供了丰富的 I/O 口资源。

3 软件设计

系统软件分为无线复合传感器软件和手持终端软件两部分,无线复合传感器以 CC2430 单片机为主,实现传感器信号的采集和无线传输功能;手持终端以 MSP430F5438A 单片机为主,辅以 CC2430 无线单片机,实现数据的无线接收、计算、显示、存储、查询、清除等功能。

3.1 无线复合传感器软件设计

无线复合传感器主程序流程如图 7 所示,主要包括初始化程序、加入网络程序、数据采集程序和发送程序。其中,初始化程序包括时钟初始化、I/O 端口初始化、定时器初始化、中断初始化、寄存器初始化以及初始化协议栈等。无线复合传感器加入网络之后,会自动分配唯一的网络地址。程序中预留有若干无线网络地址,多个无线传感器可同时加入网络,可以实现多点的测量。

加入网络成功后,控制信号端 P1.1 输出高电平,采集含水率电压并进行 A/D 转换,再将 P1.1 拉低输出低电平,采集电导率和温度电压,并进行 A/D 转换,完成数据采集。经过转换的参数信息,再以无线的方式发送出去。

3.2 手持终端软件设计

手持终端软件包括 CC2430 无线单片机程序和

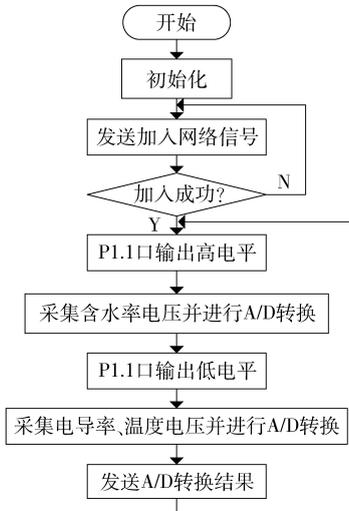


图7 无线复合传感器程序流程图

Fig. 7 Program flow chart of wireless compound sensor

MSP430F5438A 单片机程序两部分。

其中,CC2430 无线单片机接收无线复合传感器发送来的数据,并通过串口 UART 与手持终端 MSP430F5438A 单片机进行通信,其流程如图 8 所示。无线模块首先进入初始化,建立一个新网络,等待无线节点加入网络,并接收无线传感器采集到的数据。当接收到 MSP430F5438A 单片机发送的指令 1 时将采集到的数据通过串口发送给 MSP430F5438A 单片机;当接收到指令 0 时,停止数据发送。

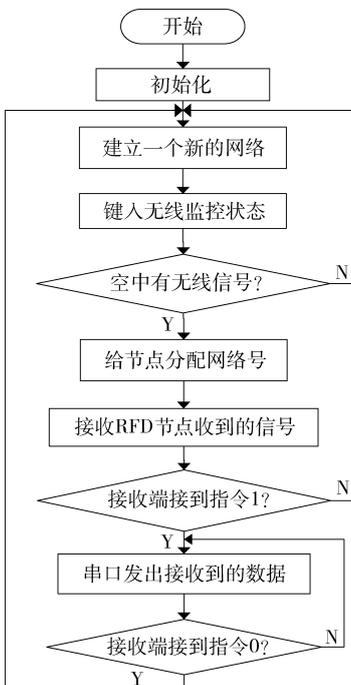


图8 手持终端无线单片机程序流程图

Fig. 8 Program flow chart of wireless single chip in handheld terminal

心,主要实现测量参数、查看数据、清空记录 3 个功能,主程序流程如图 9 所示。测量参数时,MSP430F5438A 单片机向 CC2430 无线单片机发送指令 1,CC2430 开始通过 UART 串口传输数据至 MSP430F5438A 单片机,进行计算处理和显示驱动等。

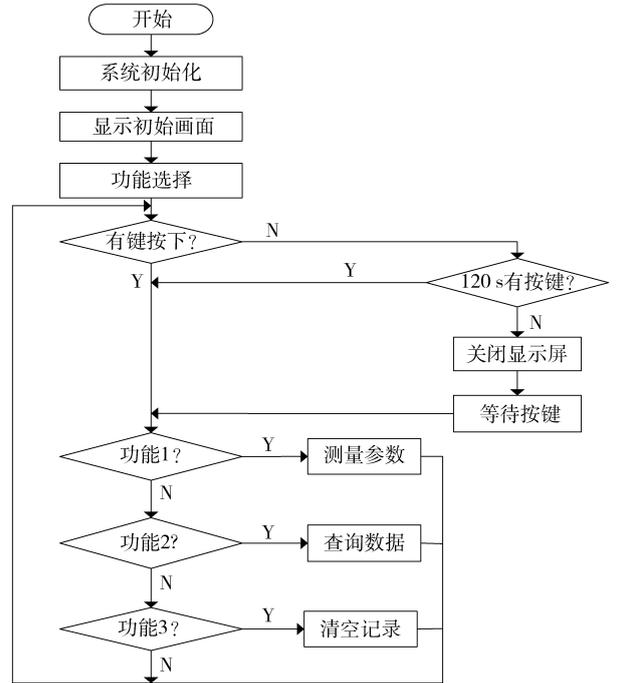


图9 手持终端主程序流程图

Fig. 9 Main program flow chart of handheld terminal

MSP430F5438A 单片机接收到的数据为传感器电压数字信号,包括 1 个含水率输出电压、2 个电导率输出电压和 1 个温度输出电压。通过传感器标定试验和各因素正交试验的研究,可以得出温度和电导率对含水率的校正补偿公式以及温度和含水率对电导率的校正补偿公式。通过设计补偿处理程序将传感器的各输出电压分别进行校正补偿处理,得到含水率和电导率,并进行显示输出。

此外,为方便使用,设计了历史数据查看和清空等功能程序,具体程序及流程图略。

4 无线检测仪检测试验

为了检验基质多参数无线检测仪的适应性和可靠性,获得所设计的检测仪的检测性能,通过试验确定不同工作环境、状态下仪器的检测误差。

4.1 试验器材

试验材料:以椰糠基质和江苏大学温室土槽中的混合基质(椰糠、醋糟、珍珠岩体积比为 2:2:1)为试验对象进行性能试验。

试验装置与仪器:自制基质多参数检测仪 1 套,如图 10 所示。电子秤 1 台,精度 0.1 g,量程



图 10 便携式基质多参数无线检测仪

Fig. 10 Portable wireless detector for multi-parameter of substrates

3 000 g;恒温烘箱 1 台;土壤电导率检测仪(HANNA 公司 HI98331 型),精度 $\pm 0.01 \text{ mS/cm}$;CX - WDJ200JK 型高精度数字温度计,测量范围 $-35 \sim 120^\circ\text{C}$,精度 0.1°C 。

试验器具:1 000 mL 烧杯;内径 13 cm、深 25 cm 的 PVC 桶;NaCl(分析纯);滤纸;玻璃棒等。

4.2 试验步骤

将基质烘干之后,分成 8 等份,向基质中加入不同质量、不同含盐量的蒸馏水并搅拌均匀,记录水的质量和干基质的质量之后,取一定质量的混合基质装入烧杯中,将体积压至 900 mL,将无线传感器探头完全插入基质中,待显示稳定后,分别记录测量结果,取出探头,重复多次测量并取平均值。

将 HI98331 型土壤电导率检测仪插入基质样品中,测量值作为电导率的参考值;通过烘干法计算得出的含水率作为参考值。

此外,在配比不同含水率和电导率的基质时,温度多水平控制较难,考虑基质温度差别不大,对温度传感器的性能试验参考意义不大。因此对于温度检测性能试验通过在不同温度的蒸馏水中进行,并以 CX - WDJ200JK 型高精度数字温度计测量值作为参考。

4.3 试验结果分析

试验结果如表 1~3 所示。

表 1 含水率测量结果

Tab.1 Measuring data of moisture

%

参数	椰糠编号								混合基质编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
参考值	4.7	8.6	12.4	16.5	20.0	24.8	30.1	35.0	4.7	9.5	11.3	16.7	22.3	26.7	33.3	46.7
测量平均值	5.1	8.8	12.0	16.7	20.7	24.5	31.0	35.5	4.8	9.8	12.1	18.3	22.0	27.5	36.4	49.1
绝对误差	0.4	0.2	-0.4	0.2	0.7	-0.3	0.9	0.5	0.1	0.3	0.8	1.6	-0.3	0.8	3.1	2.4
相对误差	8.5	2.3	-3.2	1.2	3.5	-1.2	2.9	1.4	2.1	3.1	7.1	9.6	-1.3	3.0	9.3	5.1

表 2 电导率测量结果

Tab.2 Measuring data of electrical conductivity

参数	椰糠编号								混合基质编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
参考值/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	0.320	0.990	1.330	1.900	2.560	3.010	3.670	4.550	0.450	0.600	0.670	1.010	1.780	2.310	2.440	2.870
测量平均值/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	0.305	1.011	1.408	2.025	2.602	3.101	3.700	4.606	0.495	0.643	0.713	1.079	1.788	2.489	2.552	3.015
绝对误差/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	-0.015	0.021	0.078	0.125	0.042	0.091	0.030	0.056	0.045	0.043	0.043	0.069	0.008	0.179	0.112	0.145
相对误差/%	-4.7	2.1	5.9	6.6	1.6	3.0	0.8	1.2	10	7.2	6.4	6.8	0.4	7.7	4.5	5.1

表 3 温度测量结果

Tab.3 Measuring data of temperature

参数	1	2	3	4	5	6	7	8
参考值/ $^\circ\text{C}$	8.20	22.40	30.30	38.40	45.90	51.70	58.00	66.50
测量值/ $^\circ\text{C}$	8.47	22.72	30.89	38.86	45.99	51.15	57.68	65.87
绝对误差/ $^\circ\text{C}$	0.27	0.032	0.69	0.46	0.09	-0.55	-0.32	-0.63
相对误差/%	3.3	1.4	2.3	1.2	0.2	-1.1	-0.6	-0.9

由表 1 可知,对于椰糠基质,含水率测量的绝对误差为 $-0.4\% \sim 0.9\%$,相对误差为 $-3.2\% \sim 8.5\%$;对于混合基质,含水率测量的绝对误差为 $-0.3\% \sim 3.1\%$,相对误差为 $-1.3\% \sim 9.6\%$ 。可见,检测仪对单一基质和混合基质的测量误差基本

接近,相对误差都小于 10%,对不同基质具有较好的适应性。

由表 2 可知,对于椰糠基质,电导率测量结果绝对误差为 $-0.015 \sim 0.125 \text{ mS/cm}$,相对误差为 $-4.7\% \sim 6.6\%$;对于混合基质,电导率测量结果绝

对误差为 0.008 ~ 0.179 mS/cm, 相对误差为 0.4% ~ 10%。可见, 检测仪对于单一基质的测量误差是双极的, 正负偏差基本接近, 混合基质测量误差主要是正偏差, 且相对误差都在 10% 以内。

由表 3 可知, 温度测量绝对误差为 -0.63 ~ 0.69℃, 相对误差为 -1.1% ~ 3.3%。

5 结论

(1) 基于自制的基质多参数复合传感器, 并结合 ZigBee 无线网络技术和各因素之间的相互耦合校正补偿处理, 设计了一种低功耗、低成本的无线便携式基质多参数检测仪。检测仪采用分体式设计, 包括无线复合传感器和手持终端两部分组成。无线

复合传感器采集基质含水率、电导率、温度等参数, 经 A/D 转换, 以无线方式将数据传递给手持终端; 手持终端对数据进行分析处理, 实现数据显示、存储和查询等功能。

(2) 基质多参数无线检测仪性能测试结果显示, 含水率测量值与烘干法得到的参考值的误差在 -0.4% ~ 3.1% 之间, 相对误差为 -3.2% ~ 9.6%, 且对不同基质具有较好的适应性; 电导率测量误差为 -0.015 ~ 0.179 mS/cm, 相对误差为 -4.7% ~ 10%, 且对不同基质具有较好的适应性; 温度测量误差为 -0.63 ~ 0.69℃, 相对误差为 -1.1% ~ 3.3%。检测仪测量误差较小, 能够满足农业生产实际应用需要。

参 考 文 献

- Bogena H R, Herbst M, Huisman J A, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 1002 - 1013.
- 张俊宁, 李民赞, 孔德秀, 等. 基于“电流-电压四端法”的温室栽培基质电导率测量[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2007, 37(2): 484 - 488.
Zhang Junning, Li Minzan, Kong Dexiu, et al. Measurement of substrate electrical conductivity in greenhouse based on electrical current-voltage four-electrode method[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2007, 37(2): 484 - 488. (in Chinese)
- 李静, 赵秀兰, 魏世强, 等. 无公害蔬菜无土栽培基质理化特性研究[J]. *西南农业大学学报*, 2000, 22(2): 112 - 115.
Li Jing, Zhao Xiulan, Wei Shiqiang, et al. Study on the physic-chemical properties of soilless cultural substrates of pollution-free vegetable[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2000, 22(2): 112 - 115. (in Chinese)
- 蒲胜海, 冯广平, 李磐, 等. 无土栽培基质理化性状测定方法及其应用研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(2): 267 - 272.
Pu Shenghai, Feng Guangping, Li Pan, et al. Studies on determination of the physical and chemical characteristics of soilless cultivation substrates and their application[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(2): 267 - 272. (in Chinese)
- Krishna S N, Francesco M, Sue K D, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112(2): 227 - 234.
- 宋豫晓, 王建, 乔晓军, 等. 多功能土壤温度测量仪的研发[J]. *农机化研究*, 2010, 32(9): 80 - 84.
Song Yuxiao, Wang Jian, Qiao Xiaojun, et al. Development of multi-functional soil temperature measuring instrument[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(9): 80 - 84. (in Chinese)
- Arnold S L, Doran J W, Schepers J, et al. Portable probes to measure electrical conductivity and soil quality in the field[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(15 - 16): 2271 - 2287.
- Viscarra Rossel R A, Walvoort D J J, McBratney A B, et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties[J]. *Geoderma*, 2006, 131(1): 59 - 75.
- 张健, 刘小英, 王敏. 土壤参数监测系统的设计与实现[J]. *农机化研究*, 2009, 31(7): 159 - 161.
Zhang Jian, Liu Xiaoying, Wang Min. Design and implementation of soil parameters monitoring system[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(7): 159 - 161. (in Chinese)
- 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊2): 1 - 4.
Guo Shirong. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.2): 1 - 4. (in Chinese)
- 王吉庆, 赵月平, 刘超杰. 水浸泡玉米秸基质对番茄育苗效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 276 - 281.
Wang Jiqing, Zhao Yueping, Liu Chaojie. Effects of water-soaked corn stalk substrate on tomato seedling culture [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 276 - 281. (in Chinese)
- 张晔, 余宏军, 杨学勇, 等. 棉秆作为无土栽培基质的适宜发酵条件[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 210 - 217.
Zhang Ye, Yu Hongjun, Yang Xueyong, et al. Favorable conditions of cotton straw composting using as soilless culture substrate [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(12): 210 - 217. (in Chinese)
- 江朝晖, 檀春节, 支孝勤, 等. 基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪研制[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(1): 79 - 82.
Jiang Zhaohui, Tan Chunjie, Zhi Xiaojin, et al. Development of portable soil moisture detector based on principle of frequency domain reflectometry[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(1): 79 - 82. (in Chinese)

- 14 冯炜, 纪奕才, 沈绍祥, 等. 测试土壤含水率和电导率的时域反射仪系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 59-63.
Feng Wei, Ji Yicai, Shen Shaoxiang, et al. Design of time domain reflectometry for application of soil moisture and bulk electrical conductivity measurements [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 59-63. (in Chinese)
- 15 吴涛. 基于数字图像处理的土壤表层含水量在线检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
Wu Tao. Research on methods for measuring soil water content on-line based on digital image processing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)
- 16 李民赞, 王琦, 汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51-55.
Li Minzan, Wang Qi, Wang Maohua. Testing and modeling of soil EC sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51-55. (in Chinese)
- 17 李民赞, 孔德秀, 张俊宁, 等. 基于蓝牙与 PDA 的便携式土壤电导率测试仪开发[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 93-96.
Li Minzan, Kong Dexiu, Zhang Junning, et al. Development of portable soil EC meter with bluetooth and PDA[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2): 93-96. (in Chinese)
- 18 林义成, 丁能飞, 傅庆林, 等. 土壤溶液电导率的测定及其相关因素的分析[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 83-86.
Lin Yicheng, Ding Nengfei, Fu Qinglin, et al. The measurement of electric conductivity in soil solution and analysis of its correlative factors[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(2): 83-86. (in Chinese)
- 19 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(增刊): 85-87.
Liu Guangming, Yang Jinsong. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(Supp.): 85-87. (in Chinese)
- 20 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39-41.
Sun Yurui. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39-41. (in Chinese)
- 21 Scoggins H L, Marc W I. In situ probes for measurement of electrical conductivity of soilless substrates: effects of temperature and substrate moisture content[J]. Hortscience, 2006, 41(1): 210-214.
- 22 盛平, 郭洋洋, 李萍萍. 基于 ZigBee 和 3G 技术的设施农业智能测控系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 229-233.
Sheng Ping, Guo Yangyang, Li Pingping. Intelligent measurement and control system of facility agriculture based on ZigBee and 3G[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 229-233. (in Chinese)
- 23 Hu Xiaohui, Yang Wuqiang. Planar capacitive sensors-designs and applications[J]. Sensor Review, 2010, 30(1): 24-39.
- 24 Kizio F, Campbell C S, Campbell G S, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(34): 367-378.
- 25 刘志刚, 李萍萍, 胡永光, 等. 电介质型水分传感器测定栽培基质含水率的标定模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 199-202.
Liu Zhigang, Li Pingping, Hu Yongguang, et al. Calibration method for detection of matrix water content with dielectric-type moisture sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 199-202. (in Chinese)
- 26 Kudryashov E A, Kruchinin M L. Experimental study on a planar capacitive displacement sensor [J]. Measurement Techniques, 1995, 38(3): 312-314.
- 27 Kim J H, Yoon H K, Cho S H, et al. Four electrode resistivity probe for porosity evaluation[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6): 668-675.