

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.035

基于 RC 峰值检测的土壤水分传感器设计与性能试验

盛庆元¹ 倪梦瑶² 张西良² 李萍萍³(1. 绍兴职业技术学院机电工程与交通学院, 绍兴 312000; 2. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013;
3. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 针对现有电容式土壤水分传感器精度低、功耗高、价格高、标定过程复杂等问题, 基于 RC 稳态响应峰值检测原理, 设计了一款土壤水分传感器, 并对传感器敏感区域、电学特性、标定模型、温度和电导率特性进行了测试。实验结果表明, 传感器测量体积含水率平均灵敏度为 12.187 mV, 敏感区域为 3.8 cm × 2.5 cm × 7.2 cm; 输出信号不受供电电压影响, 消耗电流仅为 3~4 mA; 通过在不同介电常数溶液中标定, 结合 TOPP 经验公式, 建立的指数标定模型的决定系数 R^2 均大于 0.96; 传感器温漂引起的测量误差约为 0.5%, 在 0~2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内电导率引起的最大测量误差小于 4.2%, 传感器最大实测误差为 2.17%。

关键词: 土壤; 含水率; 峰值检测; 传感器; 设计

中图分类号: TP212.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0324-07

OSID:



Design and Experiment of Soil Moisture Sensor Based on RC Peak Detection

SHENG Qingyuan¹ NI Mengyao² ZHANG Xiliang² LI Pingping³(1. School of Mechanical and Electrical Engineering and Transportation, Shaoxing Vocational and Technical College, Shaoxing 312000, China
2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: For the modern intelligent irrigation system, a moisture sensor with high measurement accuracy, low power consumption, low price, small structure and simple calibration process is urgently needed. A capacitive low-cost soil moisture sensor and its signal processing circuit was presented based on the principle of RC steady-state response peak detection. The characteristic of the sensor circuit was that a RC series circuit realized slow charge and fast discharge by adding a discharge diode. The influence of the sensor's sensitive area, electrical characteristics, calibration model, temperature drift and conductivity on the output signal was tested. Experimental data analysis showed that the average sensitivity of the sensor for measuring volumetric water content was 12.187 mV, and the sensitive area was 3.8 cm × 2.5 cm × 7.2 cm; the output signal of the sensor was not affected by the supply voltage, and the current consumption was only 3~4 mA; by calibrating in different dielectric constant solutions and combining TOPP's empirical formula, based on working principle the exponential calibration model of the sensor can be well fitted to the relationship between relative dielectric constant and soil volumetric moisture content, and the determination coefficient R^2 was greater than 0.96. In the range of 5~50°C, the measurement error caused by the temperature drift of the sensor was about 0.5%. In the range of 0~2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, the maximum measurement error of the sensor caused by conductivity was less than 4.2%. The measured data in Loess and cinnamon soil showed that the maximum error of the sensor was 2.17%. Compared with similar sensors, the test accuracy was comparable, and the cost-effective advantage was obvious. It was especially suitable for large-scale wireless soil moisture sensor detection systems.

Key words: soil; water content; peak detection; sensor; design

收稿日期: 2020-02-12 修回日期: 2020-03-13

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LGN18E090001)

作者简介: 盛庆元(1988—),男,讲师,主要从事农业生物环境信息检测和农业资源利用研究,E-mail: 604606112@qq.com

通信作者: 张西良(1964—),男,教授,博士,主要从事农业信息检测仪器与高效节能机械设计研究,E-mail: 190337373@qq.com

0 引言

土壤含水率的测量是精细农业中实施节水灌溉的基础,是实现农业灌溉自动化的关键环节^[1]。随着土壤水分分布式监测无线网络系统应用的成熟,急需一种测量精度高、功耗低、价格低、结构小巧、标定过程简单的土壤水分传感器^[2-4]。

目前,土壤水分的测定方法有干燥法、射线法、介电法、核磁共振法、近红外光谱分析法和遥感法等^[5-6]。其中,介电法通过测量土壤介电常数间接测量土壤含水率,具有快速、无损的优点,按其测量原理又可分为时域反射法(TDR)、频域反射法(FDR)、驻波率法(SWR)和电容法^[7-9]。电容法具有技术简单、成本低等优点,相关的商品化产品,特别是 Decagon Devics 生产的 ECH₂O 系列土壤水分传感器备受学者青睐。如樊志平等^[10]、GOUMOPOULOS 等^[11]、MAJONE 等^[12] 分别将 ECH₂O 传感器用于温室草莓滴灌和柑橘园、丘陵果园中,搭建土壤墒情无线监控系统;刘志刚等^[13]、方炜等^[14]、NEMALI 等^[15]将 ECH₂O 传感器用于栽培基质水分检测。但 ECH₂O 系列传感器还存在一些不足:成本较高,仅探头单价 60 美元左右,限制其应用推广;输出信号受供电电压影响^[16-17];输出信号受土壤盐分影响^[4,17];正、负极板区域敏感度不同^[18]。

由于土壤、基质理化性质的差异性,Decagon Devics 厂家提供的标度变换模型适用性较差。实际使用时,需要采用多点回归法对不同土壤、基质选择较优模型重新标定,此过程耗时长,没有统一标定模型,不利于推广使用^[19]。有学者对电容式土壤水分传感器标定方法进行了研究,如 SAKAKI 等^[20]提出对 ECH₂O 传感器干土、饱和湿土的两点 α 标定模型,获得了不错效果;高艳等^[21]、BOGENA 等^[22]提出了先标定输出电压与介电常数关系、后标定介电常数与含水率之间关系的两步标定法。这两种标定方法都存在不足:饱和湿土很难定量配制,操作不便;两步标定法的第二步标定建立的较优模型同样因土壤、基质的性质不同而不同,不具适应性。这些研究中的标定模型大多采用简单的线性或二次多项式进行拟合,而未从检测原理出发。

近年来,李加念等^[23]、穆永航等^[24]、SEGUNDO 等^[25]、YUKI 等^[26]基于不同技术改进了电容式土壤水分传感器。研究表明,传感器总体性能与 ECH₂O 系列传感器相当,还不能完全满足精准农业对土壤水分传感器性能要求。

本文对 ECH₂O 传感器探头结构进行改进,基于

RC 稳态响应峰值检测原理,采用慢充快放电方法设计土壤水分传感器及其信号处理电路,以期提高其性价比。

1 传感器设计

1.1 设计基本原理

传感器设计基于一阶 RC 串联电路稳态响应原理,如图 1a 所示。在方波激励下,电容充放电稳定后,电容端电压的波峰波谷电压关系式为

$$U_T = U_0 + (U_s - U_0)(1 - e^{-T/(RC)}) \quad (1)$$

式中 U_T ——电容上的波峰电压

U_0 ——电容上的波谷电压

U_s ——方波高电平电压

T ——方波周期

R ——电阻 C ——电容

式(1)中 U_T 对电容 C 求导,可得

$$dU_T = -\frac{T}{R} \ln e(U_s - U_0) \frac{1}{C^2} e^{-T/(RC)} dC \quad (2)$$

由式(2)可知,当电容上的波峰电压为传感器输出信号时,传感器灵敏度为负相关,且波谷电压越小,传感器灵敏度越高。因此,本文传感器信号处理电路设计时,在传统的一阶 RC 串联电路中增加了快放电回路,以减小 U_0 。在电阻 R 端并联二极管,利用二极管正向导通、反向截止特性实现 RC 电路的慢充快放电。其改进设计基本原理如图 1b 所示,设计时选择低导通压降、电阻的二极管 D 。

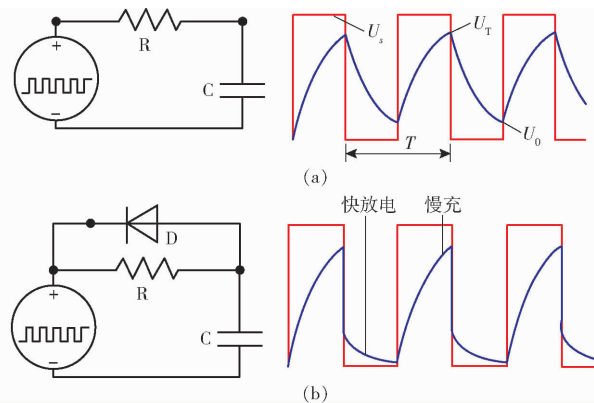


图1 传感器设计原理图

Fig. 1 Sensor design principle diagram

按照电介质极化理论,土壤作为介质时,土壤中存在导电离子是引起电容测量偏大的主要原因。在 RC 串联电路稳态响应中,电容式探头 C 不断充放电稳定后,探头上存在一直流电压分量,即波谷电压 U_0 。波谷电压 U_0 越小,由离子极化现象形成的电容越小。因此,改进设计中增加的快放电回路另一优点是有助于减小土壤电导率对土壤水分测量的影响。

1.2 硬件电路设计

1.2.1 电路总体结构

如图2所示,基于慢充快放电RC电路的峰值检测土壤水分传感器电路包括:稳压源电路、方波信号源、精密电阻R、放电肖特基二极管D、电容式探头C、波峰检测单元等。其中,DC-DC稳压电源主要为方波激励信号单元提供稳定的工作电源,以便方波信号电平 U_T 保持稳定;方波信号作用在精密电阻和探头形成的电容上,对RC电容进行充放电,传感器以电容端的波峰电压为输出信号。

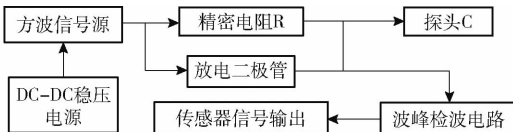


图2 土壤水分传感器原理框图

Fig.2 Functional block diagram of soil moisture sensor

传感器电容式探头采用印刷电路板制成,与传感器信号处理电路(头部)集成一体,如图3a所示,其尺寸形状与ECH₂O传感器探头基本一致。但此电路板采用4层板制成,探头两极板由第2层、第3层上敷铜形成,且探头两极板之间不开槽,保证探头

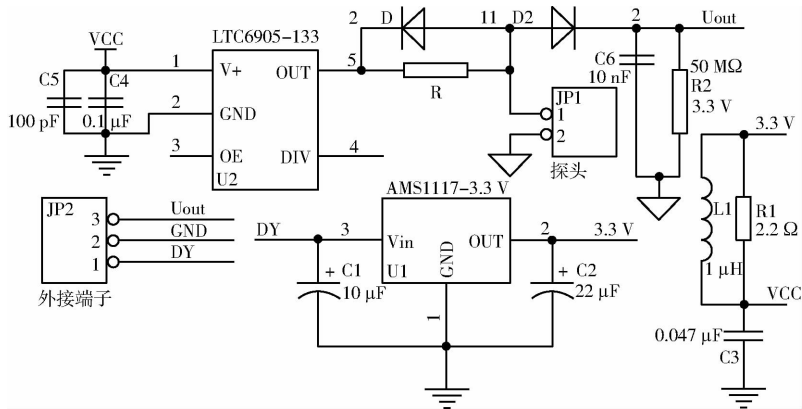


图4 土壤水分传感器电路原理图

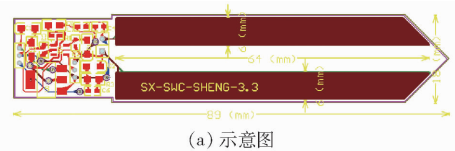
Fig.4 Circuit diagram of soil moisture sensor

方波信号源由LTC6905-133型芯片实现,它是精准的固定频率硅振荡器,此芯片采用2.7~5.5V单电源工作,可提供一个轨至轨、频率为133MHz、50%占空比的方波输出。

精密电阻选用精度等级为0.1%、温漂为 2.5×10^{-5} 的贴片电阻。为保证传感器在全量程范围内有良好的灵敏度,依据传感器在空气中输出信号电压为DC-DC AMS1117-3.3V型稳压芯片稳压的85%左右确定电阻。

放电二极管D和检波用二极管D2选用英飞凌射频频肖特基BAT15-03W型二极管,它是N型低势垒硅器件,具有片上集成保护环。BAT15-03W型

电极良好的绝缘性,增强探头强度,避免探头插入土壤时、由于开槽形成空隙,影响测量结果。传感器实物如图3b所示,传感器头部采用RTV704型防水硅橡胶均匀涂盖,达到防水和对外绝缘功能。



(a) 示意图



(b) 实物图

图3 传感器

Fig.3 Sensor

1.2.2 信号处理电路

传感器信号处理电路原理如图4所示,供电电源经过DC-DC AMS1117-3.3V型稳压芯片实现稳压。电源滤波电路是由电感L1、电阻R1和电容C3组成的RLC滤波电路,目的是抑制电磁噪声。

二极管具有较低势垒高度、低正向电压(0.25V)和低结电容(0.28pF@1MHz),动态电阻 5.8Ω ,最高反向工作电压4V,适合用在频率高达12GHz的应用中,用于实现混频器和检测器功能。

本传感器的信号处理电路和电路板制作在研制过程中成本仅为20元/个,较之售价60美元1个的ECH₂O系列传感器,成本优势明显。

2 实验方法

2.1 敏感区域

确定传感器敏感区域是正确使用传感器的前提。按照图5a所示配置,实验确定敏感区域。在桶

内气-水界面上方水平(区域1和区域2)或垂直(区域3)分别设置传感器。

从距离界面足够远的地方开始,距离 X 以很小的增量变化,如图5b所示。向下移动传感器,每一步都记录传感器读数。一直进行到传感器完全浸入水中,且进一步观察到传感器输出没有变化为止。

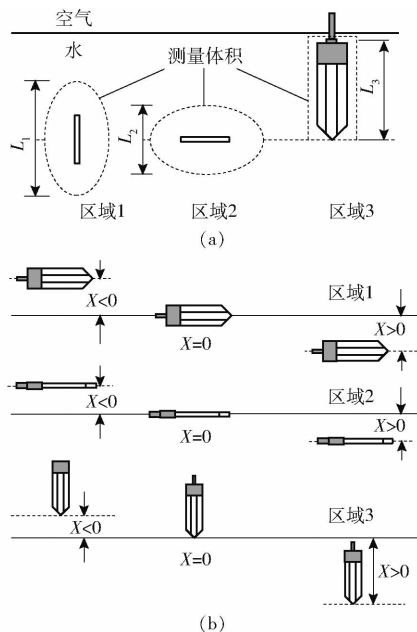


图5 测试敏感区域配置与测量实验步骤

Fig.5 Test sensitive area configuration and measurement steps

2.2 电学特性测试

有学者研究表明, ECH_2O 式传感器的输出信号受供电电压的影响,从而影响检测精度^[4,17]。本传感器电学特性测试分别在空气和蒸馏水中进行。在这两种介质中通过改变传感器供电电源电压(从9V降至3.3V),测得传感器输出电压范围和工作电流(传感器消耗电流)范围。

2.3 标定实验

一般通过配置不同含水率的土壤进行土壤水分传感器标定,此方法难以保证土样的均匀性和一致性,且在传感器探头插入土样中时,存在接触不良等现象,引起测量误差。本实验参考BOGENA等^[4]、YE等^[17]溶液中标定的方法——通过配置介电常数已知的溶液,并利用TOPP经验公式^[28],计算已知介电常数等效的体积含水率,间接建立体积含水率与传感器输出电压之间关系的标定模型,溶液配置参照文献^[17]。

2.4 温度与电导率实验

现有文献对土壤介电常数与温度相关性研究出现两种不同的实验现象,既有土壤介电常数与温度存在正相关,也有负相关。本文温度特性实验只研究传感器本身受温度的影响。在恒温箱中研究传感

器输出信号随空气温度变化。实验温度变化范围5~50℃,间隔5℃,升温降温循环一次。

已有研究表明,土壤电导率对电容式传感器输出特性有显著影响,传感器抗电导率是评价土壤水分传感器性能的重要指标。本文在恒温条件下,参照文献^[4]选取体积浓度为80%的 $i-C_3E_1$ 溶液,通过加入NaCl配置或5个水平的电导率溶液进行实验。为验证本设计中的二极管D对传感器性能的影响,取下放电二极管D再实验一次。

2.5 传感器性能实验

2019年12月23日于江苏大学农业装备工程学院实验菜地褐土和山上黄土中开挖剖面进行实验。剖面每隔20cm深度插入传感器,记录传感器输出电压,并在同一水平面处采用直径16cm、长27cm的取土器取土,记录取土质量,干燥换算后获得土壤实际体积含水率。

黄土土样成分:砂粒含量3.04%、粉粒含量69.80%、粘粒含量27.16%;褐土土样成分:砂粒含量50.03%、粉粒含量39.27%、粘粒含量10.70%。

实验设备:YB1732A 5A型直流稳压电源、PZ158B型直流数字电压电流表、VICTOR VC9804A+型万用表、W2S型恒温水浴锅、GHP-9-80型电热鼓风干燥箱和DDS-307A型电导率仪。

3 实验结果与分析

3.1 敏感区域结果分析

传感器的敏感区域实验结果如图6所示。其在空气和水中输出信号电压分别为2.449V、1.231V,其对应测量体积含水率的平均灵敏度为12.187mV,相比于EC-5在2.5V供电工作下的平均灵敏度10mV,灵敏度提高了21.87%。以三位半电压表测量精度和灵敏度为依据,规定输出信号变化10mV作为分析传感器敏感区域1、区域2、区域3标准。设计的传感器敏感区域1、区域2、区域3的敏感范围为3.8、2.5、7.2cm;对比 ECH_2O 传感器,本文传感器的敏感范围在区域1方向提高了1.8cm,

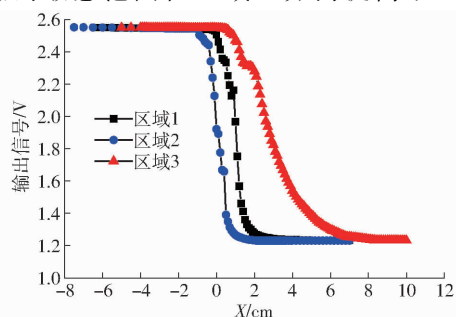


图6 敏感区域实验结果

Fig.6 Experimental results of sensitive area

在区域2方向提高1.5 cm,其敏感范围扩大的原因可能是本文传感器探头上的波峰电压比EC-5探头上的波峰电压大,其探头电场分布更广。由区域3曲线可知,传感器头部即X范围内6.4~9.8 cm,输出信号还有46 mV的变化,表明此传感器使用时头部应完全插入土壤中,此与EC-5研究结果一致。

3.2 电学特性结果分析

传感器电学特性如图7所示。传感器输出信号不受供电电压的影响,这与设计中设有DC-DC稳压电源有关。由于EC-5传感器输出信号和电源有关,本传感器用于电池供电的无线土壤墒情传感器网络可不进行电压补偿。由于采用了ASM1117-3.3V型稳压芯片,当供电电源低于4.75 V或高于12 V时,此芯片无法正常工作,故此传感器的供电电压 U 区间为[4.75 V, 12 V]。传感器在空气和纯水中消耗的电流分别为3、4 mA,远低于EC-5传感器的工作电流10 mA,比文献[23]类似EC-5的土壤水分传感器工作电流15~55 mA小,更好地满足了无线传感器网络实际应用对传感器能耗的要求。

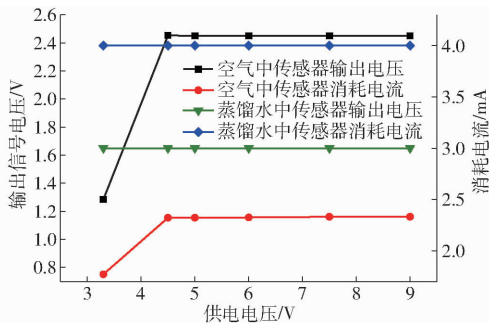


图7 传感器电学特性

Fig. 7 Electrical characteristic diagram of sensor

3.3 标定结果分析

在温度20.8℃下进行标定,结果如图8所示。

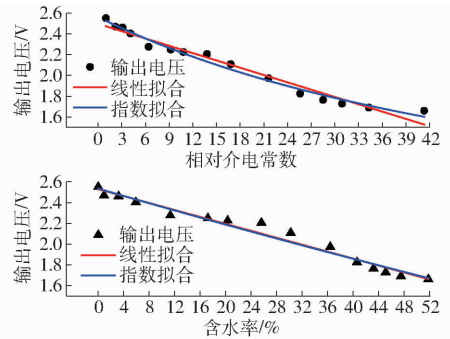


图8 传感器标定数据

Fig. 8 Sensor calibration chart

从图8可以看出,相对介电常数、体积含水率较大时,输出电压变化减缓,即传感器灵敏度变小。式(1)中的电容 C 含杂散电容 ΔC 和土壤含水率变化引起的电容 C_x ,其中 C_x 与土壤等效相对介电常数 ε 成正比,即

$$C_x = g\varepsilon \quad (3)$$

式中 g ——比例系数

式(1)可整理为

$$U_T = U_0 + (U_s - U_0) e^{-T/[R(\Delta C + g\varepsilon)]} \quad (4)$$

依据式(4)采用指数函数和线性函数对数据回归分析,计算式为

$$y = A + Be^{C/(x+D)} \quad (5)$$

$$y = Ax + B \quad (6)$$

分析结果见表1。由表1可知,两种模型回归分析效果都较好,决定系数都大于0.96;相对介电常数与输出电压之间指数模型优于线性模型,而依据TOPP经验公式换算得到的土壤体积含水率与输出电压之间线性模型却优于指数模型。

表1 标定模型参数

Tab. 1 Parameters of calibration model

模型	参数				R^2
	A	B	C	D	
相对介电常数-电压	线性	-0.023 41	2.494 50		0.963 83
	指数	0.614 46	0.016 88	1 182.606 46	249.144 18
含水率-电压	线性	-0.016 00	2.527 00		0.970 80
	指数	-19.027 50	8.481 61	1 057.811 53	1 133.846 00

因此,此传感器实际应用中,需进行实测土壤标定,以保证更好的测试精度。另外,从线性回归模型的斜率看,体积含水率在30%~52%范围内,其平均灵敏度高达16 mV,且未出现灵敏度显著下降现象。

3.4 温度特性和电导率特性结果分析

3.4.1 温度特性

传感器温度特性如图9所示。空气升温、降温

过程传感器输出信号无明显的变化趋势,输出信号最大温漂为8.2 mV,取线性拟合灵敏度为16 mV,传感器温漂引起的体积含水率测量误差约为0.5%。

3.4.2 电导率特性

电导率实验数据及分析结果如图10所示。由图10可知,输出电压随电导率增大而下降,这是由于离子极化,导致极板之间的等效电容增大所致。

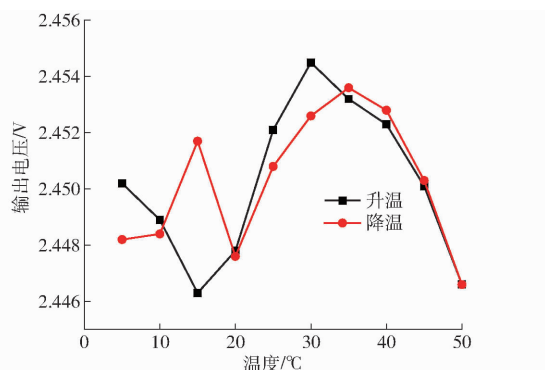


图 9 传感器温度特性

Fig. 9 Sensor temperature characteristics

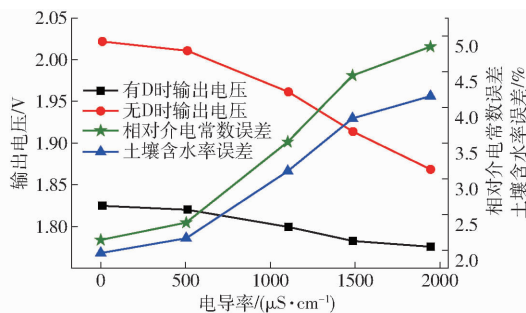


图 10 电导率实验数据分析

Fig. 10 Analysis of conductivity experiment data

其中,无放电二极管 D 时,输出电压更大,这与原理分析一致。另外,相比无 D 时,有 D 输出电压随电导率增大电压下降幅度减小,表明本设计增加二极管 D 可有效降低电导率的影响。

依据本文的指数模型将输出电压换算成对应的相对介电常数,再由 TOPP 公式计算出对应的含水率,分析电导率对相对介电常数和含水率的测量影响。在等效 40.6% 体积含水率溶液中测试结果表明,在电导率 0 ~ 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 情况下,电导率引起的含水率最大测量误差不大于 4.2%, 相比文献[4]中 EC-5 实验数据的最大误差 5.4%, 本文传感器抗电导率性能提高了 27.8%。

3.5 实测性能结果分析

实测性能结果如表 2 所示。由输出电压按指数模型换算出对应相对介电常数,再由 TOPP 公式计

算得到含水率。分析表明此传感器的最大误差为 2.17%。

表 2 实测性能结果

Tab. 2 Analysis of actual measurement performance data

类型	输出电压/ V	含水率/%		误差/%
		测量值	真实值	
黄土	2.265 8	16.78	18.15	-1.37
	2.027 6	31.96	30.37	1.59
	1.839 8	41.90	44.07	-2.17
褐土	2.392 9	6.73	6.40	0.33
	2.100 8	27.64	28.89	-1.25
	1.944 6	36.63	36.30	0.33

4 结论

(1) 传感器平均灵敏度为 12.187 mV, 相比 EC-5 在 2.5 V 供电工作的平均灵敏度 10 mV, 灵敏度提高了 21.87%。传感器的敏感区域范围比 EC-5 在区域 1 方向提高了 1.8 cm, 在区域 2 方向提高 1.5 cm。

(2) 在确保 ASM1117-3.3V 型稳压芯片正常工作的情况下,传感器输出信号不受供电电压的影响,消耗电流仅为 3 ~ 4 mA, 均比同类传感器低,满足低功耗要求。

(3) 在不同介电常数溶液中进行标定,以及依据 TOPP 经验公式,建立的指数标定模型可很好地拟合相对介电常数和土壤体积含水率关系,决定系数 R^2 大于 0.96。

(4) 传感器本身温漂为 8.2 mV, 温漂导致的传感器测量误差约为 0.5%; 设有二极管 D 的传感器可提高传感器抗电导率的影响,在电导率 0 ~ 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,其引起传感器的最大测量误差不大于 4.2%。

(5) 传感器的最大实测误差为 2.17%, 与同类传感器(价格百元及以上)相比,测试精度相当,但制作简单,成本 20 元/个,性价比优势明显。

参 考 文 献

[1] 李鸿儒,于唯楚,王振营. 基于迁移学习的 FDR 土壤水分传感器自动标定模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 213 - 220.
LI Hongru, YU Weichu, WANG Zhenying. Automatic calibration model of FDR soil moisture based on transfer learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 213 - 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002023&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.023. (in Chinese)

[2] 孟德伦,孟繁佳,段晓菲,等. 基于频域法的便携式无线土壤水分测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 114 - 119.
MENG Delun, MENG Fanjia, DUAN Xiaofei, et al. Design and experiment of portable wireless soil moisture measuring device based on frequency-domain method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 114 - 119. (in Chinese)

[3] JIANG M, LÜ M, DENG Z, et al. A wireless soil moisture sensor powered by solar energy[J]. PLoS ONE, 2017, 12(9):

e0184125.

- [4] BOGENA R H, HUISMAN A J, OBERDORSTER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(1): 32–42.
- [5] GONZÁLEZ-TERUEL J, TORRES-SÁNCHEZ R, BLAYA-ROS P, et al. Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 491–507.
- [6] 张杰, 刘刚, 李保国, 等. ^3He 管中子土壤水分测量装置提高测量精度[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 90–97.
ZHANG Jie, LIU Gang, LI Baoguo, et al. ^3He tube neutron moisture measurement device improving measuring accuracy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(2): 90–97. (in Chinese)
- [7] OATES M J, RAMADAN K, MOLINA-MARTÍNEZ J M, et al. Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 183: 41–48.
- [8] 高志涛, 田昊, 赵燕东. 土壤剖面水分线性尺度测量方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 257–264.
GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong. Linear scale measurement method for soil profile moisture[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 257–264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170433&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.033. (in Chinese)
- [9] HOUTZ D A, GU D, WALKER D K. An improved two-port transmission line permittivity and permeability determination method with shorted sample[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(11): 3820–3827.
- [10] 樊志平, 洪添胜, 刘志壮, 等. 柑橘园土壤墒情远程监控系统设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 205–210.
FAN Zhiping, HONG Tiansheng, LIU Zhizhuang, et al. Design and realization of remote monitoring system for soil moisture in citrus orchards[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 205–210. (in Chinese)
- [11] GOUMOPOULOS C, O'FLYNN B, KAMEAS A. Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 105: 20–33.
- [12] MAJONE B, BELLIN A, MASSA A, et al. Wireless sensor network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 19(6): 426–435.
- [13] 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)
- [14] 方炜, 雷华德. 蝴蝶兰栽培介质含水率测量信号转换公式之建立[C]//台湾: 生机学会论文发表会, 2006.
- [15] NEMALI K, MONTESANO F F, DOVE S K. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates; ECH_2O and Theta probes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112: 227–234.
- [16] 张荣标, 余功江, 张磊, 等. WSN土壤湿度采集节点电压补偿方法研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 178–182.
ZHANG Rongbiao, YU Gongjiang, ZHANG Lei, et al. Voltage compensation method of WSN soil moisture acquisition nodes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 178–182. (in Chinese)
- [17] YE Zhijie, HONG Tiansheng, CHILESHE J M, et al. Multi-factor evaluation and modeling correction of EC-5 and 5TE soil moisture content sensors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(Supp. 2): 157–166.
- [18] LIMSUWAT A, SAKAKI T, TISSA H, et al. Experimental quantification of bulk sampling volume of ECH_2O soil moisture sensors[C]//Proceedings of the 29th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, 2009: 39–45.
- [19] KODEŠOVÁ R, KODEŠ V, MRÁZ A. Comparison of two sensors ECH_2O EC-5 and SM200 for measuring soil water content[J]. *Soil and Water Research*, 2011, 6(2): 102–110.
- [20] SAKAKI T, LIMSUWAT A, KATNLEEN M S, et al. Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH_2O EC-5 soil moisture sensor in sands[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W00D08.
- [21] 高艳, 孙宇瑞, 马道坤, 等. FDS土壤水分传感器的两步标定法[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(2): 78–81.
GAO Yan, SUN Yurui, MA Daokun, et al. Two-step calibration of the FDS soil water content sensor[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(2): 78–81. (in Chinese)
- [22] BOGENA R H, HERBST M, HUISMA A J, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 1002–1013.
- [23] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 216–221.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 216–221. (in Chinese)
- [24] 穆永航, 李莉, 王俊衡, 等. 基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊): 341–346.
MU Yonghang, LI Li, WANG Junheng, et al. Performance evaluation of substrate moisture detection based on frequency domain sensor[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 341–346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s052&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.052. (in Chinese)
- [25] SEGUNDO A, MARTINS J, MONTEIRO P, et al. A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils[J]. *Sensors*, 2015, 15: 25546–25563.
- [26] YUKI K, RYO S, NAOYA M, et al. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1292–1304.
- [27] KELLEENERS T J, SOPPE R W O, ROBINSON D A, et al. Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 430–439.
- [28] TOPP G C, ANNAN J L, DAVIS A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16: 574–582.