

高低频双频激励土壤含水率传感器设计与试验

盛庆元¹ 张西良² 杨越¹ 李萍萍³ 倪梦瑶²

(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含水率传感器对电导率敏感等问题,从电阻电容串联阶跃响应原理出发,采用峰值检测技术,设计高低频(100、50 MHz)激励下的数字型土壤含水率传感器,并提供一种融合高低频响应信号分析土壤等效相对介电常数的反函数模型。试验结果表明,传感器的高低频响应稳定时间在 338 ~ 464 ms,建议传感器高低频切换间隔大于 500 ms。在非导电液体介质中标定结果表明,高低工作频率下各自输出信号与液体相对介电常数符合指数模型,决定系数 R^2 大于 0.98。在 0 ~ 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内的溶液试剂中,基于反函数模型的高低频数据融合处理,电导率引起的测量相对介电常数的最大误差为 1.775,对应最大引用误差 2.16%。土壤实测表明,单频率传感器输出信号易受土壤电导率的影响,其引起的信号误差可大于 100 mV,对应的体积含水率误差大于 10%;而双频输出信号经反函数模型的数据融合处理后,结合 Topp 模型,电导率对传感器的影响最大误差为 3.2%。

关键词: 土壤含水率; 峰值检测; 双频激励; 传感器

中图分类号: TP212.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0228-07 OSID: 

Design and Experiment of Soil Moisture Sensor Based on Dual Frequency Excitation

SHENG Qingyuan¹ ZHANG Xiliang² YANG Yue¹ LI Pingping³ NI Mengyao²

(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: In agricultural production, capacitive soil moisture sensor (CSMS) has received considerable attention, for it is relatively inexpensive and easy to operate, and can meet the application requirements of wireless sensor network. But CSMS is vulnerable to the soil temperature and salinity in the measurement process. Therefore, a CSMS was designed based on the principle of resistance capacitance series step response. It had two frequency square wave excitation signals, adopted peak detection technology, and took digital signal as output. An inverse function model was proposed to analyze the soil equivalent relative permittivity by fusing high and low frequency response signals. The experimental results in air and distilled water showed that the high and low frequency response stability time of the sensor was within 338 ~ 464 ms, and it was suggested that the high and low frequency switching interval of the sensor was greater than 500 ms. The calibration results in non-conductive liquid medium showed that the exponential model can well fit the relationship between the output signal and the relative permittivity of liquid at high and low operating frequencies, and the coefficient of determination R^2 was greater than 0.98. In the range of 0 ~ 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, the maximum error of relative permittivity measurement caused by conductivity was 1.775 and the corresponding maximum quote error was 2.16%. The results of soil measurement showed that the output signals of high frequency and low frequency sensors were affected by soil conductivity respectively, and the change of output voltage signal can be greater than 100 mV, and the corresponding volumetric water content error was greater than 10%. After

收稿日期: 2021-04-19 修回日期: 2021-06-21

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以及农业资源利用研究,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研究,E-mail: 190337373@qq.com

the proposed data fusion processing of the high-frequency and low-frequency output signals, combined with the Topp model, the influence error of conductivity on the sensor was controlled within 3.2%.

Key words: soil moisture; peak detection; dual frequency excitation; sensor

0 引言

目前土壤水分检测方法有多种,市场上也出现了多款土壤水分传感器^[1]。其中,基于介电原理的传感器技术,如时域反射法(TDR)、时域传输法(TDT)、驻波比法(SWR)、电容法为目前应用最广泛的技术^[1-3]。TDR和TDT技术难度大,成本高,且在重盐碱地及高有机质土中需要特殊标定,其应用受到一定限制^[4-5]。SWR成本低,受土壤质地影响较小,但SWR型传感器互换性较差,实际应用也不多^[4]。电容法具有技术简单、成本低等优点,相关产品已应用于温室草莓、番茄栽培,室外柑橘园、丘陵苹果园等智能灌溉控制系统中^[6-9]。

从电容检测技术角度来看,电容法大多采用谐振法即频域反射法(FDR)和矢量电压技术分解土壤介电常数法。市售产品有美国的GS3、10HS、EC-5、Hydra Probe II型传感器,英国的SM300、ML2x、PR2型传感器等^[4,10]。尽管电容式传感器已实际应用,但也存在精度不高,易受电导率影响的不足。如文献^[11-14]对ECH2O EC-5、SM200、Theta Probe ML2x型传感器研究表明,传感器标定模型参数都与土壤质地、盐分有关。如何减小田间土壤质地、结构与含盐量对测量影响是进一步提高检测精度的关键问题。目前学者们专注于电容式探头结构设计和新的电容检测手段来满足不同土壤含水率检测场景^[15-19],提高传感器性价比;或研究现有传感器在不同土壤、栽培基质中的适用性及补偿模型^[20-21],而在提高传感器抗电导率性能方面仍采用提高激励频率的办法。

文献^[22]建议测试频率提高至50 MHz来减少介电松弛效应;而文献^[23]研究表明信号频率必须大于500 MHz才能获得可信的土壤复介电常数实部。现有电容检测技术的频率可达100 MHz,要进一步提高频率并保证较高的信噪比,技术难度大,成本昂贵。另一方面,从导电物质介质极化过程原理出发,在等效的集总参数模型内,单纯靠提高频率无法消除离子迁移极化行为。为此本文基于电阻电容串联阶跃响应原理设计电容检测技术,提出从双频响应信号中推演无离子迁移极化土壤相对介电常数方法,并对传感器性能进行测试,以研制抗电导率性能更优的土壤水分传感器。

1 传感器设计

1.1 测量原理

本传感器结构设计参考ECH2O EC-5,采用平面散射场电容,根据电化学原理,电极表面涂有绝缘层,以土壤为介质时,电容电极极化过程是一种非法拉第过程,可用理想电容来表示。电容的测量采用一阶RC串联电路稳态响应技术,测量原理电路模型如图1所示。在方波激励下,通过电阻器R给土壤等效电容器C充放电,电容两端响应电压随时间变化曲线如图2所示。电容充放电稳定后,电容端电压的波峰波谷电压关系为

U_T=U_0+(U_S-U_0)(1-e^{-T/(2RC)})\tag{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

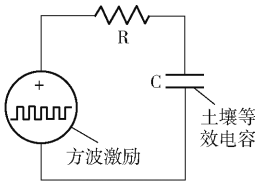


图1 测量原理电路模型

Fig. 1 Measurement principle circuit model

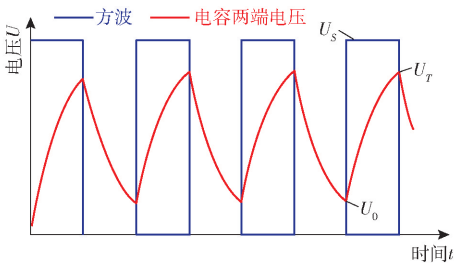


图2 电容两端响应电压随时间变化曲线

Fig. 2 Response voltage of capacitor terminal with time

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,计算式为

C_x=gε\tag{2}

式中 g——比例系数

式(1)可整理为

U_T=U_0+(U_S-U_0)(1-e^{-T/[2R(ΔC+gε)]})\tag{3}

因此,波峰电压包含土壤相对介电常数信息。记方波频率为F,由式(3)可将ε与U_T的关系用函

数表示为

$$U_T = f(\varepsilon) \mid F \quad (4)$$

式中 $f(\varepsilon)$ ——关于 ε 的函数

1.2 电路设计

如图 3 所示,土壤水分传感器电路包括:稳压电源电路、微控制器、方波信号源、精密电阻器 R、电容式探头 C、波峰检测电路和 A/D 转换器。微控制器选择方波信号源高低频率的激励信号,方波激励信号作用在精密电阻器 R 和电容式探头 C 上,对 RC 电容进行充放电,传感器以电容上信号的波峰电压值为响应值,此响应值经过 A/D 转换后,由微控制器的通信接口向外提供数字量土壤含水率信息。

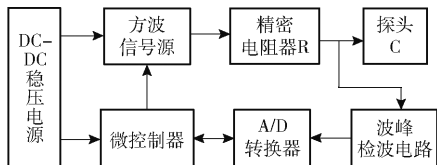


Fig. 3 Schematic of soil moisture sensor

详细的电路原理图见图4。微控制器U1采用STC15W401AS芯片,不需外部晶振和外部复位,利于传感器小型化;带有4个完全独立高速异步串行

通信端口,易与外部通信。U1 芯片的 11、12 引脚为通信接口。

方波信号源采用 SiT2002 有源晶振芯片,可提供 1 ~ 137 MHz 任意频率,自带使能引脚,频率精度可达 25 Hz。

检波二极管选用应满足工作频率高、反向电流小、正向电流足够大等条件。采用英飞凌 BAT15-03W 型射频肖特基二极管,它是 N 型低势垒硅器件,具有低正向电压(0.25 V)和低结电容(0.28 pF @ 1 MHz),动态电阻 5.8 Ω ,最高反向工作电压 4 V,非常适合在 12 GHz 高频下应用。

A/D 转换器采用 ADS1115 芯片,ADS1115 芯片是一个超小、低功率、16 位精度并带有内部参考电压的 A/D 转换器。

为获取土壤温度信息,此电路还增加温度传感器 DS18B20U 芯片。

1.3 标定与信号处理方法

最简单的信号标定方法是直接在土壤中对传感器进行标定,建立输出信号与土壤含水率的对应关系,而这种方法耗时,不利于产品推广使用。本文的传感器可以实现双频测量,充分利用信息融合处理

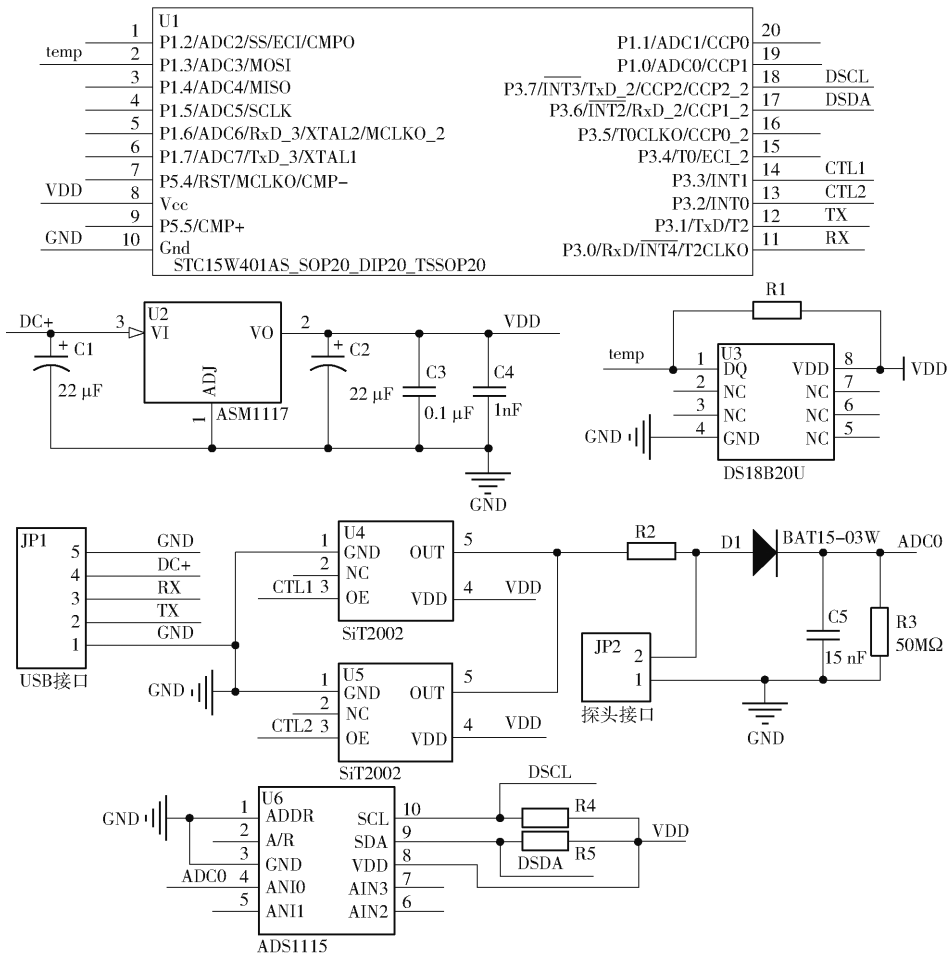


图4 土壤水分传感器电路原理图

Fig. 4 Schematic of soil moisture sensor circuit

技术,提出的标定与信号处理方法步骤如下:

(1)在一系列已知相对介电常数溶液中,激励方波频率 F 为 f_1 、 f_2 时, U_T 分别记为 U_{f_1} 、 U_{f_2} ,建立 U_T 与 ε 的标定数学模型。频率 f_1 、 f_2 下, U_1 、 U_2 与 ε 的关系表示为

$$U_{f_1}=f(\varepsilon)\mid f_1 \tag{5}$$

$$U_{f_2}=f(\varepsilon)\mid f_2 \tag{6}$$

(2)实测时,由频率 f_1 、 f_2 方波激励下输出信号 U_{f_1} 、 U_{f_2} 依据标定模型式(5)、(6)分别计算出对应相对介电常数 ε_{f_1} 、 ε_{f_2} 。显然作为导电的土壤介质, ε_{f_1} 、 ε_{f_2} 中含有离子迁移极化信息,直接用于换算土壤体积含水率会有较大误差。

(3)选取合适的土壤相对介电常数 ε 与测试频率 f 的模型。参照文献[23]中土壤介电常数随频率的变化特性,以及反比例函数的数学特性,采用模型为

$$\varepsilon(f)=a/f+b \tag{7}$$

式中, a 、 b 为待定系数。由 (f_1,ε_{f_1}) 、 (f_2,ε_{f_2}) 可求得 a 、 b 。式(7)具有当 f 趋向于无穷大时, $\varepsilon(f)$ 趋于稳定值 b 的特性,将 b 记为 ε_{eff} ,用于换算土壤含水率的土壤相对介电常数。

(4)参照文献[24]Topp 模型,计算 ε_{eff} 对应的土壤体积含水率 θ 。

$$\theta=-5.3\times10^{-2}+2.92\times10^{-2}\varepsilon_{eff}-5.5\times10^{-4}\varepsilon_{eff}^2+4.3\times10^{-6}\varepsilon_{eff}^3 \tag{8}$$

2 试验

频率 f_1 选为 100 MHz,对应的 2 分频作为频率 f_2 。依据工作频率 f_2 在空气中输出信号约为工作电压 3.3 V 的 85% 来调试选定图 4 中精密电阻器电阻 R_2 , R_2 取 249 Ω 。

传感器标定试验在液体中进行,可以避免因传感器与土壤质地、容重以及接触不好等因素引起的测量误差,参照文献[10]使用的溶液,并从液体毒性、价格等因素考虑,挑选出试验用溶液介质见表 1。

2.1 响应时间试验

动态响应性能是传感器在实际应用中的重要指标,表现为当传感器周围检测区域的土壤含水率发生变化时,传感器输出从变化到稳定所需要的时间。另外,本传感器需要频率切换,切换间隔设计也依据传感器响应时间。传感器高低频信号分别在空气和蒸馏水中进行。使用示波器扫描功能,获得传感器从通电至输出稳定信号所需时间。

2.2 标定试验

室温条件下,传感器在表 1 介质中试验,记录工作频率 f_1 、 f_2 下每种介质对应的输出信号。依据

表 1 试验用介质相对介电常数(20℃)

Tab.1 Relative permittivity of test medium (20℃)		
序号	介质	相对介电常数
M1	空气	1.00
M2	双乙二醇二甲基醚	5.80
M3	2-异丙氧基乙醇	10.80
M4	异戊醇	15.19
M5	丙醇	20.45
M6	2-异丙氧基乙醇、水混合 (体积比 8:2)	26.26
M7	二甘醇	31.69
M8	乙二醇	37.70
M9	去离子水	81.10

式(3)和 1.3 节的步骤(1)中 U_T 与 ε ,选用指数模型

$$y=A+Be^{D/(x+E)} \tag{9}$$

另一种选用二次多项式模型

$$y=A+Bx+Dx^2 \tag{10}$$

式中 A 、 B 、 D 、 E ——模型待定系数

数据采用最小二乘法回归分析,根据决定系数 R^2 和均方根误差(RMSE)评价模型。

2.3 抗电导率性能试验

抗电导率试验在 1,4-二氧六环与蒸馏水按体积比 1:0.35 和 1:0.5 混合溶液中进行,溶液介质中加入 NaCl,在 0 ~ 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内配置成 4 水平不同电导率(5、356、700、950 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 溶液,记录传感器高低频工作下各自的输出信号,按 1.3 节的步骤(3)进行信号分析。

2.4 土壤实测试验

土壤土样采自江苏大学周围的农田。剔除石块的土样先经自来水浸洗 3 遍,再用桶装纯净水浸洗一遍,晾干后用孔径 3 mm 的土壤筛过筛 1 遍,然后再用孔径 1 mm 的土壤筛过筛 1 遍。最后在 105℃ 的干燥箱中干燥 24 h 待用。

用去蒸馏水和电导率为 700、1 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的 NaCl 水溶液各自配制成体积含水率为 0.10、0.16、0.22、0.28、0.34 cm^3/cm^3 左右的土壤样本,合计 15 个样本。土样与水溶液搅拌均匀后,装入直径为 15 cm、高 20 cm 的圆柱容器内,压至固定容重后,密封静置 24 h。

测量时传感器插入土样不同位置 3 次,取读数平均值作为测试结果。用直径 16 cm、长 27 cm 取土器取土,干燥得到准确的土壤含水率作为真值。

试验用设备有:W2S 型恒温水浴锅、GHP-9-80 型电热鼓风干燥箱、DDS-307A 型电导率仪、精度为 0.1 g 电子天平和 SDS1020 型示波器。

另外为读取传感器输出信息,开发了配套的便

携式数据记录仪,记录仪和传感器如图 5 所示,试验记录的输出信号都指图 4 中网络标号 ADC0 点输出电压。

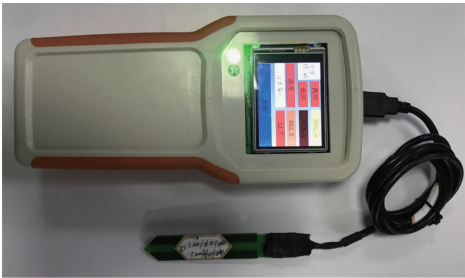


图 5 记录仪和传感器
Fig.5 Recorder and sensor

3 试验结果分析

3.1 响应时间结果分析

传感器工作在高频(100 MHz),在空气中输出信号从上电到稳定的过程如图 6 所示。由图 6 可知,此条件下的响应时间为 468 ms。高低频激励(100、50 MHz)分别在空气和蒸馏水中的响应时间为 464、348 ms 和 416、348 ms。因此,此款传感器高低频切换间隔应大于 500 ms。依图 4 电阻器 R3、电容器 C5 选取的数值计算峰值检波电路响应稳定所需时间应大于 300 ms,这与传感器稳定所需时间吻合。想要进一步提高响应速度,可通过减小 R3 电阻、C5 电容实现。另一方面,文献[13]提供的 TDR (TRIME)测量设备响应时间为 5.5 s 左右,本传感器在响应时间上优势明显。

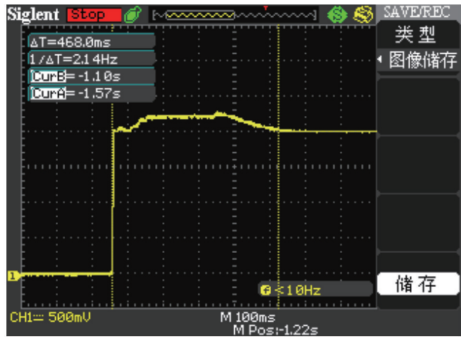


图 6 传感器动态响应性能曲线
Fig.6 Dynamic response performance curve of sensor

3.2 标定结果分析

标定在 20℃ 温度下进行,在表 1 介质中标定的数据如图 7 所示。从图 7 可以看出,同一工作频率下,输出电压与相对介电常数的拟合曲线的斜率随相对介电常数变大而变小,即传感器灵敏度变弱。

采用式(9)、(10)模型的回归拟合分析结果见表 2,同一工作频率下,2 种模型回归分析效果都较好,决定系数都大于 0.98,指数模型优于二次多项式模型。

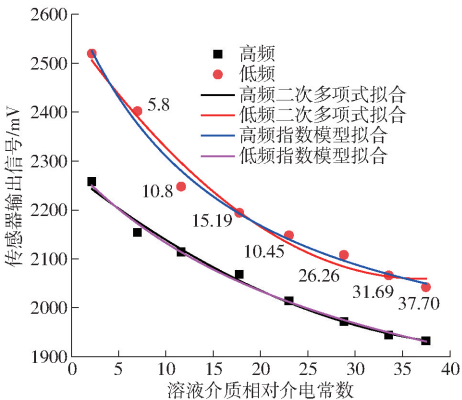


图 7 传感器标定曲线
Fig.7 Sensor calibration data diagram

表 2 标定模型系数
Tab.2 Calibration model parameters

工作频率/MHz	模型	系数				R^2
		A	B	D	E	
100	指数	-3 805.35	5 429.91	3.90	33.65	0.992 68
	二次多项式	2 275.45	-15.25	0.16		0.989 53
50	指数	1 679.71	152.61	64.75	35.62	0.989 94
	二次多项式	2 563.95	-27.21	0.367		0.980 52

3.3 抗电导率性能分析

在加有 NaCl 的不同电导率溶液中,传感器高低频试验结果见图 8。相同含水率下,传感器高低频响应输出信号,随电导率增大呈下降趋势,这与电导率影响电容式传感器原理一致。按表 2 指数模型拟合系数确定高低频响应输出信号 U_{H} 、 U_{L} 与 ε 指数函数;计算图 8 各个点高低频输出电压信号对应相对介电常数 ε_{H} 、 ε_{L} ,再按 1.3 节步骤(3)计算 ε_{eff} 。将 ε_{eff} 与理论未加 NaCl 溶液(表 3 中电导率为 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$)相对介电参数的误差,用来评价双频激励响应信号信息融合处理抗电导率性能,结果如表 3 所示。相对介电常数变化的最大误差为 1.775,以去离子水相对介电常数 81.10 为最大量程,计算得到的最大引用误差为 2.16%,相比文献[25]中 EC-5 型传感器在 0 ~ 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 内,相对介电常数变化 8 左右,抗电导率性能明显改善。

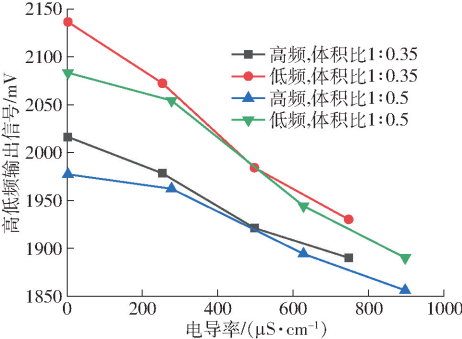


图 8 抗电导率性能试验曲线
Fig.8 Experimental data of electrical conductivity resistance

表 3 抗电导率性能参数试验结果

Tab.3 Data analysis of electrical conductivity resistance

体积比	参数	溶液电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)			
		5	356	700	950
1:0.35	ε_{f1}	17.860	23.049	34.354	43.495
	ε_{f2}	17.950	24.412	39.646	56.725
	ε_{eff}	17.905	19.680	19.060	19.260
	误差		1.775	1.155	1.355
	引用误差/%		2.16	1.42	1.70
体积比	参数	溶液电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)			
		5	380	830	1300
1:0.5	ε_{f1}	23.10	25.61	28.13	33.92
	ε_{f2}	23.52	26.82	31.19	45.13
	ε_{eff}	23.31	24.41	25.07	22.72
	误差		1.10	1.76	-0.59
	引用误差/%		1.36	2.2	-0.70

3.4 土壤实测结果分析

实测数据结果如图 9 所示,表明各自频率下的输出信号受土壤电导率变化影响明显,高含水率时,电导率引起的输出信号变化可达 100 mV 以上,误差

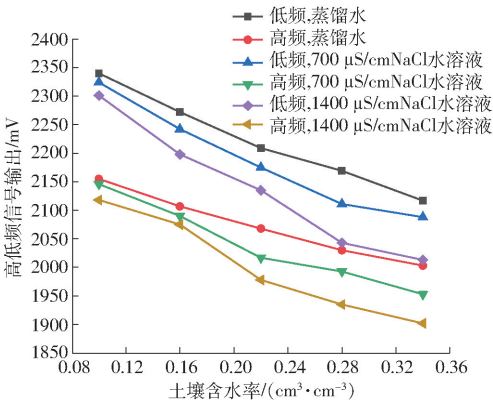


图 9 土壤实测数据

Fig. 9 Soil measured data

可达 10% 以上。
按表 2 指数模型拟合参数确定高低频响应输出信号 U_{f1} 、 U_{f2} 与 ε 指数函数;计算图 9 各个点输出电压信号对应相对介电常数 ε_{f1} 、 ε_{f2} ,再按 1.3 节步骤(3)计算 ε_{eff} 。计算得到的 ε_{eff} 代入式(8)Topp 公式计算得到体积含水率 θ_v ,分析数据见表 4,数据表明经双频信号融合处理后,电导率对传感器的影响

表 4 实测性能数据

Tab.4 Analysis of measured performance data

参数	土样实际含水率 θ_a /%														
	10			16			22			28			34		
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3
ε_{f1}	6.45	7.01	7.98	9.18	10.70	11.27	12.55	14.71	17.92	15.19	20.08	26.42	19.52	22.57	31.47
ε_{f2}	6.45	6.93	8.70	9.50	11.78	13.98	12.55	17.76	22.97	16.23	25.80	36.07	19.52	26.30	43.57
ε_{eff}	6.45	7.09	7.26	8.85	9.62	8.55	12.54	11.66	12.86	14.15	14.36	16.77	19.52	18.83	19.38
θ_v /%	11.4	12.8	13.2	16.5	18.1	15.9	23.5	22.0	24.1	26.2	26.2	30.2	33.9	33.1	33.8
$(\theta_v - \theta_a)/\%$	1.4	2.8	3.2	0.5	2.1	-0.1	1.5	0	2.1	-1.8	-1.8	2.2	-0.1	-0.9	-0.2

注:EC1、EC2、EC3 分别指蒸馏水和电导率为 700、1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的 NaCl 水溶液。

误差控制在 3.2% 内。

4 结论

- (1)传感器高低频响应稳定时间为 338 ~ 464 ms,建议传感器高低频切换测量间隔大于 500 ms。
- (2)高低工作频率下各自输出信号与液体相对介电常数符合指数模型,决定系数 R^2 大于 0.98,拟合效果比二次多项式更优。
- (3)在 1,4-二氧六环与蒸馏水按体积比 1:0.35 和 1:0.5 两种混合溶液中加入 NaCl,在 0 ~

- 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内,基于反函数模型的数据融合处理,电导率引起的测量相对介电常数的最大误差为 1.775,对应最大引用误差 2.16%。
- (4)土壤实测表明,单频率传感器输出信号易受土壤电导率的影响,其引起的信号误差可大于 100 mV,对应的含水率误差可大于 10%;而双频输出信号经基于反函数模型的数据融合处理后,结合 Topp 模型,电导率对传感器的影响最大误差为 3.2%。与同类传感器相比本传感器抗电导率性能更优,测试精度更高。

参 考 文 献

[1] 冯磊,杨卫中,石庆兰,等. 基于时域传输原理的土壤水分测试仪研究[J]. 农业机械学报,2017,48(3): 181-187.
FENG Lei, YANG Weizhong, SHI Qinglan, et al. Soil moisture meter based on time domain transmission principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):181-187. (in Chinese)

[2] 王凤姣,王振华,李文昊. 水分传感器位置和灌水阈值对棉花生理及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10): 958-962.
WANG Fengjiao, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effect of water sensor location and irrigation threshold on physiology and yield

- of cotton[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(10): 958–962. (in Chinese)
- [3] JABRO J D, STEVENS W B, IVERSEN W M. Field performance of three real-time moisture sensors in sandy loam and clay loam soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(7): 930–938.
- [4] 贾志峰, 朱红艳, 王建莹, 等. 基于介电法原理的传感器技术在土壤水分监测领域应用探究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(32): 255–261.
- JIA Zhifeng, ZHU Hongyan, WANG Jianying, et al. Application of sensor technology in soil moisture monitoring based on dielectrometry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(32): 255–261. (in Chinese)
- [5] 卢响军, 周益民, 盛建东, 等. 时域反射仪和时域传输仪在盐渍化土壤中的适用性分析[J]. *土壤通报*, 2013, 44(4): 64–67.
- LU Xiangjun, ZHOU Yimin, SHENG Jiandong, et al. Time domain reflectometry and time domain transmission apparatus insaline soil suitability analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4): 64–67. (in Chinese)
- [6] NAVARRO-HELLÍN H, TORRES-SÁNCHEZ R, SOTO-VALLES F, et al. A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 151: 64–74.
- [7] 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.
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] THAKUR D, KUMAR Y, KUMAR A, et al. Applicability of wireless sensor networks in precision agriculture: a review[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 107(1): 471–512.
- [11] DOMINGUEZ-NINO J M, BOGENA H R, HUISMAN J A, et al. On the accuracy of factory-calibrated low-cost soil water content sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3101–3119.
- [12] PARVIN N, DEGRE A. Soil-specific calibration of capacitance sensors considering clay content and bulk density[J]. *Soil Research*, 2016, 54(1): 111–119.
- [13] OJO E R, BULLOCK P R, FITZMAURICE J. Field performance of five soil moisture instruments in heavy clay soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 20–29.
- [14] CHOW L, XING Z, REES H W, et al. Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in new brunswick, maritime region, Canada[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2009, 9(11): 9398–9413.
- [15] 高志涛, 刘卫平, 赵燕东. 基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 185–191.
- GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 185–191. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] ALAN R S, JOSÉ M, PAULO M, et al. A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils[J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 25546–25563.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] GASCH C K, BROWN D J, BROOKS E S, et al. A pragmatic, automated approach for retroactive calibration of soil moisture sensors using a two-step, soil-specific correction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 137: 29–40.
- [21] NEMALI K S, MONTESANO F, DOVO S K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes[J]. *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, 2007, 112(2): 227–234.
- [22] QU W, BOGENA H R, HUISMAN J A, et al. Calibration of a novel low-cost soil water content sensor based on a ring oscillator[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(2): 1–10.
- [23] 马孝义, 马建仓. 土壤水分介电测量的频率上限分析[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 82–86.
- MA Xiaoyi, MA Jiancang. The maximum electromagnetic frequency of soil moisture dielectric measurement method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 82–86. (in Chinese)
- [24] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574–582.
- [25] ROSENBAUM U, HUISMAN J A, VRBA J, et al. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with echo sensors[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(2): 582–593.