

基于电导率对相对介电常数补偿的土壤含水率 电容传感器标定方法

张西良¹ 谢飞洋¹ 盛庆元² 倪梦瑶¹ 张家祺¹ 徐云峰¹

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 绍兴职业技术学院机电工程与交通学院, 绍兴 312000)

摘要: 针对土壤含水率电容传感器检测精度低, 标定模型对盐渍土壤的适用性不高等问题, 提出基于电导率对相对介电常数补偿的含水率电容传感器标定法。在标准溶液中建立相对介电常数与传感器输出电压关系对数模型 ($R^2 = 0.983$), 进一步基于二元二次回归分析法, 建立标准溶液电导率对相对介电常数补偿的相对介电常数与传感器输出电压及电导率的回归标定模型 ($R^2 = 0.979$)。对传感器进行土壤含水率标定, 建立土壤体积含水率与相对介电常数关系的三阶多项式标定模型 ($R^2 = 0.996$)。对两步标定模型进行实测, 结果表明: 土壤电导率为 $0 \sim 2 \text{ dS/m}$ 时, 体积含水率检测最大误差从未电导率补偿时 $0.0383 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 降至电导率补偿后 $0.0127 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最大相对误差从 12.020% 降至 6.224% 。结果表明, 在不同电导率的同类土壤中, 使用基于电导率对相对介电常数补偿的含水率传感器标定法能明显提高土壤含水率检测精度和对不同电导率土壤(黄土)的适用性。

关键词: 土壤含水率; 含水率电容传感器; 传感器标定; 二元回归分析法; 电导率补偿

中图分类号: TP212.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0344-08

OSID:



Calibration Method of Soil Moisture Capacitance Sensor Based on Compensation of Electrical Conductivity to Relative Permittivity

ZHANG Xiliang¹ XIE Feiyang¹ SHENG Qingyuan² NI Mengyao¹ ZHANG Jiaqi¹ XU Yunfeng¹

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

2. School of Mechanical and Electrical Engineering and Transportation,
Shaoxing Vocational and Technical College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Soil moisture capacitive sensors exhibited issues with low detection accuracy and limited applicability of calibration models to saline soils. In order to solve these problems, a calibration method for moisture capacitive sensors based on conductivity compensation of the relative permittivity was proposed. Firstly, a logarithmic model between soil relative permittivity and sensor output was established in the standard solution, and the R^2 of the model was 0.983. Furthermore, a regression calibration model of dielectric constant compensation for standard solution conductivity was established through the binary quadratic regression analysis, and the R^2 of the model was 0.979. The calibration model was about relative permittivity, the output voltage and conductivity. Secondly, the third-order polynomial calibration model of the relationship between soil volume water content and relative permittivity was established according to the special calibration of soil sensor in soil sample, and the R^2 of the model was 0.996. Finally, the above two-step calibration equation was verified by soil measurement. When the soil conductivity ranged between 0 dS/m and 2 dS/m , the detection error range of soil volumetric moisture content was reduced from $0.0383 \text{ m}^3/\text{m}^3$ to $0.0127 \text{ m}^3/\text{m}^3$, and the maximum relative error was reduced from 12.020% to 6.224% . The results indicated that, in similar soils with different conductivities, using the calibration method for moisture sensors based on conductivity compensation of the relative permittivity can significantly improve the accuracy of soil moisture detection and the applicability to loess soils with different conductivities.

Key words: soil moisture; moisture capacitance sensor; sensor calibration; binary regression analysis; conductivity compensation

收稿日期: 2024-03-15 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071900)

作者简介: 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: zhangxl@ujs.edu.cn

通信作者: 徐云峰(1982—), 男, 博士后, 主要从事传感器技术和农业智能装备研究, E-mail: xuyunfeng@ujs.edu.cn

0 引言

土壤含水率检测技术,对实施农业精准灌溉、解决农业用水短缺问题具有重要意义^[1-3]。土壤含水率测定方法最常用方法为介电法,具有无损、快速等优点^[4-5]。其利用水(相对介电常数 $\varepsilon_w \approx 80$)与矿物土壤固体(相对介电常数 $\varepsilon_s \approx 2 \sim 9$)和空气(相对介电常数 $\varepsilon_a \approx 1$)之间具有较大的相对相对介电常数差异,间接实现对土壤含水率测量。介电法按测量原理,包括时域反射法(TDR)^[6]、频域反射法(FDR)^[7-8]、驻波率法(SWR)、电容法^[9-12]等。

基于时域反射法 TDR 和时域传输法 TDT 的土壤含水率传感器,由于采用吉赫兹级脉冲信号,技术难度大、成本极高(约 10^5 元/台)。基于频域反射法 FDR 的传感器检测精度相对较低,成本较高,约 10^4 元/台,性能基本能满足大多数的农业生产应用需求。基于驻波率法 SWR 的传感器,在成本上可降到每台几百元,但对农业生产应用,成本仍较高。电容法具有技术简单、成本低等优点,逐渐成为农业生产土壤含水率监控的最佳选择。市售产品有美国 GS3、10HS、EC-5、Hydra Probe II 型传感器^[13-14],英国 ML2x、PR2、SM300 型传感器^[15-16]。

由于土壤理化性质差异,使得厂家提供的标度变换模型适用性差,检测精度低。实际使用中往往需要针对不同土壤重新标定,此方法过程耗时长,没有统一标定模型,不利于产品推广使用^[16-17]。有学者对土壤含水率电容传感器标定方法进行研究,如 SAKAKI 等^[18]对 ECH2O 型传感器提出干土、饱和湿土的两点 α 标定模型;文献[19-20]提出了先标定输出电压与相对介电常数关系,后标定相对介电常数与含水率之间关系的两步标定法。这两种标定方法都获得了较好的效果,但仍存在饱和湿土难定量配制,操作不便,以及第 2 步采用 TOPP 通用方程时,对不同土壤的适用性不同,没有考虑土壤电导率对相对介电常数等影响。

刘志刚等^[21]对 EC-5 型土壤含水率传感器在检测基质水分中适应性进行测试,并根据主要影响因素建立修正模型,修正后 EC-5 型传感器可作为基质含水率快速检测设备。顾惠南等^[22]引入温度、电导率、电容等参数,将温度校准后的电导率对电容水分关系进行修正,建立含水率检测数学模型,显著改善了电容含水率传感器的检测精度。NEMALI 等^[23]通过分析基质类型、温度和电导率等因素对 ECH2O-10 型和 Theta probe ML2X 型传感器输出值的影响,建立了主因素标定模型,验证了两种传感器均能较好检测基质含水率。

针对土壤含水率电容传感器易受电导率影响的问题,本文提出基于电导率对相对介电常数补偿的土壤含水率电容传感器的两步标定法,增加电导率对相对介电常数补偿校正,配制土样对土壤含水率电容传感器标定,建立具有电导率对相对介电常数补偿的土壤含水率与相对介电常数关系的标定模型,以提高含水率电容传感器对不同电导率土壤的适用性。

1 测量原理

在低频率交变电场作用下,土壤电介质的相对介电常数是关于电场频率 f 的复函数^[24-25],可表示为

$$\varepsilon(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f) \tag{1}$$

其中
$$\varepsilon''(f) = \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f\varepsilon_0} \tag{2}$$

式中 j ——虚数 ε ——复相对介电常数
 ε' ——相对介电常数实部
 ε'' ——相对介电常数虚部
 σ_{dc} ——土壤体积电导率
 ε_0 ——真空相对介电常数

其中, ε' 主要受含水率影响; ε'' 受土壤含盐量、土壤质地、测量频率等影响。

由式(2)可知,相对介电常数虚部 ε'' 与土壤电导率、电场频率有关。实际应用中,通常将传感器工作频率提高至几十兆赫兹以上,以忽略虚部影响。所以在高频检测时,认为相对介电常数 $\varepsilon \approx \varepsilon'$ 。建立 ε 与土壤体积含水率 θ 的关系方程,或直接将相对介电常数代入 TOPP 方程^[26]等通用方程,即可得土壤体积含水率为

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \tag{3}$$

当工作频率较低时,土壤相对介电常数易受土壤电导率影响,当工作频率提高时,其受土壤电导率影响减小,当工作频率过高时,介电损耗造成的干扰影响逐渐增大。

2 实验

2.1 实验装置

实验设备有:85-1 型恒温磁力搅拌器(国华电器)、DDS-307A 型电导率仪、GHP-9-80 型电热鼓风干燥箱、27 cm³ 铝盒、量筒、烧杯、自制土壤含水率电容传感器;主要材料有:纯度 99.5% NaCl。

其中,自制土壤含水率电容传感器参考 ECH2O 型和 EC-5 型平面极板结构,采用印刷电路板技术制成,传感器探头与传感器信号处理电路为一体,基

于 RC 串联稳态响应幅值检测法检测土壤等效电容,传感器信息参照文献[27]。

2.2 标定方法与实验方案

基于电导率对相对介电常数补偿的含水率电容传感器两步标定法为:①通过标准溶液建立基于电导率对相对介电常数补偿的土壤相对介电常数 ε 与传感器输出电压 U 、电导率 σ 的关系方程。②通过配制土样建立土壤体积含水率 θ 与经过补偿后的相对介电常数 ε 的关系方程。最后,对标定后传感器进行实测验证。

2.2.1 $\varepsilon-U$ 关系标定方案

为了获得土壤相对介电常数与传感器输出电压关系,通过在标准相对介电常数溶液介质中表征传感器输出,以减少土壤空隙、接触不良等^[28]引起的测量误差,如表 1 所示。其中两种标准溶液混合的相对介电常数,参照文献[29-30]提出的介电混合模型计算得出。

标定在温度 20℃ 下进行,根据传感器输出数据的变化趋势,采用指数函数,对传感器输出电压 U 与相对介电常数 ε 的关系进行回归分析,即

$$y = A + B e^{\frac{C}{x+D}} \tag{4}$$

式中 y ——相对介电常数 ε
 x ——输出电压 U
 $A、B、C、D$ ——模型待定参数

据式(4)可推导得相对介电常数 ε 与输出电压 U 模型关系为

$$y = A + \frac{B}{\ln(x + C) + D} \tag{5}$$

2.2.2 $\varepsilon-U$ 关系电导率补偿校正方案

理想情况下,土壤含水率传感器是一个单输入-

表 1 标准溶液相对介电常数计算

Tab.1 Calculation of relative permittivity of standard solution

介质	体积分数 $\varphi/\%$		相对介电常数 ε
	Dioxane/ <i>i</i> -C ₃ E ₁	纯水	
Dioxane	100	0	2.2
Dioxane	98	2	3.1
Dioxane	95	5	4.1
Dioxane	90	10	6.4
Dioxane	85	15	9.2
<i>i</i> -C ₃ E ₁	100	0	10.8
Dioxane	78	22	13.8
<i>i</i> -C ₃ E ₁	92	8	16.8
<i>i</i> -C ₃ E ₁	85.5	14.5	21.6
<i>i</i> -C ₃ E ₁	80	20	25.6
<i>i</i> -C ₃ E ₁	76	24	28.5
<i>i</i> -C ₃ E ₁	72.7	27.3	30.9
<i>i</i> -C ₃ E ₁	68	32	34.3
<i>i</i> -C ₃ E ₁	58	42	41.3

单输出的系统。实际情况下,即使在同类型土壤、甚至相同土壤含水率的检测过程中,传感器输出电压也会因土壤电导率不同而不同,因此传感器是一个多输入-单输出系统。考虑土壤电导率对相对介电常数及传感器输出电压的影响,假设传感器是一个两输入单输出的系统,选用二元二次回归分析法,对相对介电常数、传感器输出电压和土壤电导率 3 个参数交叉敏感关系进行标定。

电导率标准溶液配制方法为:准备 5 种相对介电常数的混合溶液各 6 份,然后向每份溶液中加入不等量 NaCl,用磁力搅拌器搅拌均匀,获得电导率 σ 为 0~2 dS/m 6 种水平的溶液,共计 30 个样本,如表 2 所示。

表 2 不同电导率标准溶液制备

Tab.2 Standard solutions with different conductivities

介质	体积分数 $\varphi/\%$		相对介电常数 ε	电导率 $\sigma/(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})$					
	Dioxane/ <i>i</i> -C ₃ E ₁	纯水		水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	水平 6
<i>i</i> -C ₃ E ₁	58	42	41.30	0.50	0.80	1.10	1.49	1.75	1.95
Dioxane	53	47	33.62	0.38	0.55	0.85	1.25	1.48	1.80
Dioxane	59	41	28.87	0.27	0.58	0.83	1.10	1.30	1.65
<i>i</i> -C ₃ E ₁	80	20	25.60	0.47	0.65	0.93	1.25	1.48	1.55
Dioxane	74	26	17.81	0.36	0.55	0.70	0.95	1.10	1.38

设传感器输出电压为 U ,土壤电导率为 σ ,根据 2.2.1 节得到的土壤等效相对介电常数为 ε ,则 ε 可由电压 U 和电导率 σ 二元函数组成,即

$$\varepsilon = f(U, \sigma) \tag{6}$$

在实验参数范围内确定 n 个 ε 校准点, m 个 σ 校准点,假设第 i 个电导率补偿后计算出的相对介电常数为 $\varepsilon'_i(U_i, \sigma_i)$,采用二元二次拟合方程为

$$\varepsilon'_i = \alpha_0 U_i^2 + \alpha_1 \sigma_i^2 + \alpha_2 U_i \sigma_i + \alpha_3 U_i + \alpha_4 \sigma_i + \alpha_5 \tag{7}$$
其中, $i = 1, 2, \dots, n \times m$,根据最小二乘原理,总共有 $n \times m$ 个校准点。第 i 个样本实际土壤相对介电常数 ε_i 与计算值 $\varepsilon'_i(U_i, \sigma_i)$ 之间,其均方误差 R_0 应该最小,即

$$R_0 = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} (\alpha_0 U_i^2 + \alpha_1 \sigma_i^2 + \alpha_2 U_i \sigma_i + \alpha_3 U_i + \alpha_4 \sigma_i + \alpha_5 - \varepsilon_i)^2 \tag{8}$$

根据多元电导率极值条件求取常数最优解,分别计算式(8)中 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 偏导数,并令偏导数为 0,可得

$$\sum_{i=1}^{nm} \sum_{t=0}^5 \alpha_i \beta_{it} \omega_{it} = \sum_{i=1}^{nm} \varepsilon_i \omega_{it} \quad (9)$$

其中 $\beta_{i0} = 1, \beta_{i1} = U_i^2, \beta_{i2} = \sigma_i^2, \beta_{i3} = U_i, \beta_{i4} = \sigma_i, \beta_{i5} = 1, \omega_{i1} \sim \omega_{i5}$ 分别对应等于 $\beta_{i0} \sim \beta_{i5}$ 。

2.2.3 $\theta - \varepsilon$ 关系标定方案

为了获得土壤含水率与相对介电常数关系,同时考虑通用方程精度低等问题,采用土壤标定。

土样采于江苏大学,土壤类型为黄土(成分:沙粒质量分数为 3.04%、粉粒质量分数为 69.80%、粘粒质量分数为 27.16%)。剔除石块的土样先经清水浸洗 3 遍,再用去离子水浸洗 1 遍,干燥后用孔径 3 mm 土壤筛过筛 1 遍,然后再用孔径 1 mm 土壤筛过筛 1 遍。最后在 105℃ 干燥箱中干燥 24 h 待用。干燥后土样用去离子水配制成体积含水率分别为 0.1、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 m^3/m^3 的土样各 1 份。按照取土点容重,填装于 1 000 cm^3 烧杯中,保鲜膜密封静置 24 h。然后,将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。土样真实体积含水率通过干燥法计算得出。

选择与 TOPP 方程类似的三阶多项式模型对 θ 与 ε 关系进行特殊标定。

2.2.4 传感器实测方案

为了更好地衡量特殊标定与 TOPP 方程标定精度,按照 2.2.3 节步骤,配制同类型土样,进行处理、干燥待用。将处理后土壤配置成 6 种含水率土样,再次以干燥法得到土壤真实体积含水率,利用检测误差、RMSE 评价特殊标定与 TOPP 方程实测性能效果。

为了验证标定模型在同类土壤中(黄土)检测效果,取一定量去离子水、不等量 NaCl,搅拌均匀后配制成 0 ~ 2 dS/m 范围内,5 种不同电导率溶液。加入上述处理后的干土配制成两种体积含水率、不同电导率土样,共计 10 份。静置 24 h,待水分充分分散后,使用传感器测量并记录对应电压。其中土样电导率测定,采用土水质量比为 1:5 的土壤浸提液法得出。

为了分析标定模型在不同土质中的适用性,按照上述步骤,配置 3 种体积含水率的黄土、红土、黑土、沙土,共计 12 份,保鲜膜密封静置后,用传感器测量记录相应的电压,以检测误差分析标定模型在不同类型土壤中的检测效果。

3 实验结果与分析

3.1 $\varepsilon - U$ 关系标定

对土壤相对介电常数与传感器输出电压的关系

进行回归分析,如图 1 所示。并根据决定系数 R^2 和均方差^[31]来评价对数回归分析模型。

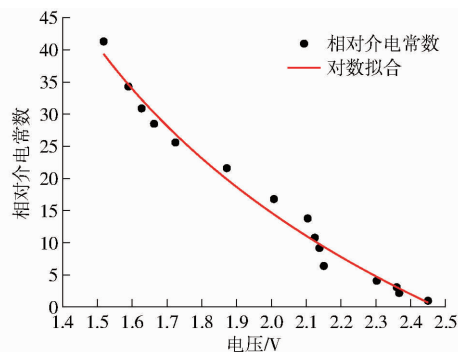


图 1 传感器标定数据

Fig. 1 Data diagram of sensor calibration

对数回归模型 R^2 为 0.983,拟合方程为

$$\varepsilon = \frac{212.7669}{\ln((U + 1.10111)/0.7915)} - 144.1615 \quad (10)$$

3.2 $\varepsilon - U$ 关系电导率补偿

不同电导率下,按照式(10)得到的土壤相对介电常数检测误差如图 2 所示。

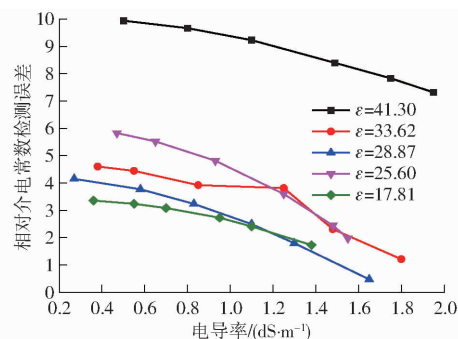


图 2 土壤相对介电常数检测误差与电导率关系曲线

Fig. 2 Relationship between measurement error of $\Delta\varepsilon$ and electrical conductivity

电导率补偿前 5 种相对介电常数水平样本的相对介电常数最大检测误差分别为 9.939、4.603、4.153、4.809、5.828、3.360,且随着电导率增大,相对介电常数检测误差减小。电导率补偿后 5 种样本相对介电常数最大检测分别为 4.507、4.747、4.024、3.712、1.409,补偿前 ε 最大相对误差为 24.07%,补偿后 ε 最大相对误差为 14.50%。

以表 3 中的数据作为样本数据,依据二元二次回归分析法原理,通过 Matlab 计算得到基于电导率对相对介电常数补偿的土壤相对介电常数与土壤电导率、传感器输出电压之间的标定方程为

$$\varepsilon = 55.0248U^2 + 0.4627\sigma^2 + 1.7167U\sigma - 248.1572U - 3.6193\sigma + 290.2888 \quad (11)$$

其中回归模型决定系数 $R^2 = 0.979$ ($n = 5, m = 6$),最大 RMSE 为 0.003,模型可靠性高。

表 3 补偿前后不同电导率标准溶液中测量相对介电常数

Tab.3 Relative permittivity in standard solutions with different conductivities before and after compensation								
样本	检测电压 U/V	电导率 $\sigma/$ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	补偿前			补偿后		
			检测 ε	检测误差 $\Delta\varepsilon_1$	ε 检测最大相对 误差 $\eta_1/\%$	检测 ε	检测误差 $\Delta\varepsilon_2$	ε 检测最大相对 误差 $\eta_2/\%$
样本 1($\varepsilon=41.30$)	1.559	0.50	31.361	9.939	24.07	36.793	4.507	10.91
	1.554	0.80	31.634	9.666	23.41	37.068	4.232	10.25
	1.546	1.10	32.073	9.227	22.34	37.652	3.649	8.83
	1.531	1.49	32.907	8.394	20.32	38.887	2.413	5.84
	1.521	1.75	33.469	7.831	18.96	39.791	1.509	3.65
	1.512	1.95	33.981	7.319	17.72	40.633	0.667	1.62
样本 2($\varepsilon=33.62$)	1.603	0.38	29.017	4.603	13.69	33.622	-0.002	-0.00
	1.600	0.55	29.174	4.446	13.23	33.761	-0.141	-0.42
	1.590	0.85	29.699	3.921	11.66	34.405	-0.785	-2.34
	1.588	1.25	29.805	3.815	11.35	34.580	-0.960	-2.86
	1.559	1.48	31.307	2.313	6.88	36.766	-3.146	-9.36
	1.540	1.80	32.405	1.215	3.61	38.367	-4.747	-14.12
样本 3($\varepsilon=28.87$)	1.688	0.27	24.717	4.153	14.39	28.023	0.847	2.93
	1.681	0.58	25.099	3.771	13.06	28.354	0.516	1.79
	1.670	0.83	25.635	3.236	11.21	29.019	-0.149	-0.52
	1.655	1.10	26.373	2.497	8.65	30.007	-1.137	-3.94
	1.641	1.30	27.072	1.798	6.23	30.977	-2.107	-7.30
	1.615	1.65	28.395	0.475	1.65	32.894	-4.024	-13.94
样本 4($\varepsilon=25.60$)	1.797	0.47	19.772	5.828	22.77	21.888	3.712	14.50
	1.790	0.65	20.078	5.522	21.57	22.233	3.367	13.15
	1.774	0.93	20.785	4.815	18.81	23.092	2.508	9.80
	1.747	1.25	22.000	3.600	14.06	24.642	0.958	3.74
	1.722	1.48	23.152	2.448	9.56	26.158	-0.558	-2.18
	1.712	1.55	23.620	1.980	7.73	26.775	-1.175	-4.59
样本 5($\varepsilon=17.81$)	1.926	0.36	14.450	3.360	18.87	16.401	1.409	7.91
	1.923	0.55	14.567	3.240	18.21	16.525	1.285	7.21
	1.919	0.70	14.724	3.086	17.33	16.707	1.103	6.20
	1.910	0.95	15.079	2.731	15.33	17.139	0.671	3.77
	1.902	1.10	15.397	2.413	13.55	17.522	0.288	1.62
	1.885	1.38	16.079	1.731	9.72	18.380	-0.570	-3.20

3.3 $\theta-\varepsilon$ 关系标定结果分析

取土干燥得到土壤体积含水率真值分别为 0.103 7、0.181 5、0.192 6、0.303 7、0.366 7、0.440 7 m^3/m^3 。考虑土样配置前冲洗 3 遍,假设其电导率为 0 dS/m 。将传感器输出值代入式(11),换算出 ε 得到土壤真实体积含水率与相对介电常数 ε 关系,如图 3 所示。

参考 TOPP 方程采用三阶多项式进行特殊标定,得到土壤体积含水率与相对介电常数关系模型 R^2 为 0.996,拟合方程为

$$\theta = -0.298\,3 + 6.461 \times 10^{-2} \varepsilon - 2.16 \times 10^{-3} \varepsilon^2 + 2.624 \times 10^{-5} \varepsilon^3$$

(12)

3.4 传感器实测结果

6 种不同土壤体积含水率样本,分别采用式(12)特殊标定与 TOPP 方程模型进行标定,对

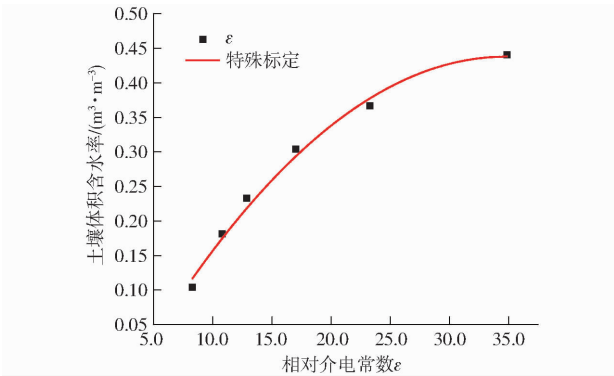


图 3 土壤体积含水率与相对介电常数关系曲线

Fig.3 Relationship between soil volumetric water content and relative permittivity

比结果如表 4 所示,结果为:特殊标定后方程检测精度更高,土壤体积含水率最大检测误差为 -0.014 m^3/m^3 , RMSE 为 -0.01 m^3/m^3 , TOPP 方

表 4 两种模型实测性能数据对比

Tab.4 Performance comparison of two models

模型	土壤体积分含水率真实值/(m ³ ·m ⁻³)						m ³ /m ³
	0.096	0.173	0.218	0.264	0.357	0.432	RMSE
TOPP 方程误差	0.058	0.019	0.002	-0.001	0.033	0.047	0.034
特殊标定误差	0.008	-0.009	-0.014	-0.005	0.013	-0.009	0.010

程土壤体积分含水率最大检测误差为 0.058 m³/m³, RMSE 为 0.034 m³/m³,因此采用式(12)做特殊标定。

为了验证特殊标定方程检测效果,需要在土壤中进行实验验证^[32-33]。取上述同类型土壤(黄土),配制不同电导率土样,记录传感器输出变化。将土样中传感器输出 U 与实测电导率 σ 代入式(11),计算出对应相对介电常数 ε ,将 ε 代入式(12)即得传感器土壤体积分含水率实测值 θ 。

实验结果如表 5 所示,负号表示被低估。在电导率 0~2 dS/m 范围内,土样 1 中传感器最大土壤体积分

含水率检测误差在电导率补偿前 $\Delta\theta_1$ 为 0.018 8 m³/m³,补偿后 $\Delta\theta_2$ 为 0.012 7 m³/m³,最大相对误差在电导率补偿前 λ_1 为 9.253 0%,补偿后为 λ_2 为 6.224 1%;土样 2 中最大土壤体积分含水率检测误差在电导率补偿前 $\Delta\theta_1$ 为 0.038 3 m³/m³,补偿后 $\Delta\theta_2$ 为 0.012 1 m³/m³,最大相对误差在电导率补偿前 λ_1 为 12.020 0%,补偿后 λ_2 为 3.802 9%。补偿后整体误差可以控制在 ± 0.013 m³/m³ 以内,最大相对误差控制在 $\pm 6.23\%$,土壤含水率检测精度有明显提升,能够满足农业生产应用需求。

表 5 不同土样电导率补偿前后含水率检测误差

Tab.5 Detection error of water content before and after compensation of different soil conductivity samples

土样类型	电导率 $\sigma/(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})$	补偿前		补偿后	
		VWC 最大检测误差	VWC 检测最大	VWC 最大检测误差	VWC 检测最大
		$\Delta\theta_1/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	相对误差 $\lambda_1/\%$	$\Delta\theta_2/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	相对误差 $\lambda_2/\%$
土样 1(土壤体积分含水率为 0.203 7 m ³ /m ³)	0.206	0.001 8	0.882 0	-0.007 4	-3.613 7
	0.576	0.004 0	1.958 1	0.009 0	4.438 7
	0.897	0.007 8	3.837 0	0.011 7	5.746 1
	1.250	0.014 1	6.916 9	0.012 7	6.224 1
	1.460	0.018 8	9.253 0	-0.009 4	-4.596 8
土样 2(土壤体积分含水率为 0.318 5 m ³ /m ³)	0.342	0.002 6	0.818 8	-0.011 5	-3.610 7
	0.735	0.006 3	1.971 2	-0.010 9	-3.425 4
	1.240	0.015 5	4.877 5	0.008 8	2.752 2
	1.687	0.028 0	8.787 5	0.012 1	3.802 9
	1.979	0.038 3	12.020 0	-0.008 1	-2.553 3

不同类型土壤中检测结果如表 6 所示。其中,传感器在黄土中检测误差整体最小,在其它类型土壤中最大检测相对误差为 31.86%,说明提出的对土壤含水率电容传感器两步标定法,只在不同体积

电导率的同类型土壤(黄土)中适用,检测其它类型土壤中需重新标定。

4 结论

(1)采用两步标定法,对土壤体积分含水率与含水率电容传感器输出电压关系进行标定。建立具有电导率对相对介电常数补偿的标准溶液介质相对介电常数与传感器输出电压及电导率关系模型($R^2=0.979$)。对土壤体积分含水率与补偿后相对介电常数关系进行标定($R^2=0.996$)。

(2)对标定后的传感器进行土壤实测评价:特殊标定后方程检测精度比 TOPP 方程更高;在不同类型土壤中,传感器检测误差较大,需重新标定。

(3)在不同电导率的黄土中,经过电导率对相对介电常数补偿后的标定模型,土壤体积分含水率最大检测误差从 0.038 3 m³/m³降至 0.012 7 m³/m³,最

表 6 不同类型土壤体积分含水率检测误差

Tab.6 Detection error of VWC in different soil types

类型	土壤体积分含水率/(m ³ ·m ⁻³)	相对误差/%
黄土	0.145 6	5.01
	0.194 1	3.74
	0.258 3	2.38
红土	0.163 8	-15.46
	0.202 9	-19.90
	0.245 4	-23.20
黑土	0.168 7	31.86
	0.214 5	27.55
	0.259 1	16.06
沙土	0.150 2	-9.53
	0.197 6	-17.04
	0.254 8	-7.87

大相对误差从 12.020 0% 降至 6.224 1% ,土壤含水率检测精度得到明显提升,能够满足农业生产应用要求,提高了电容式土壤含水率传感器在不同电导率的同类土壤(黄土)中的适用性。

参 考 文 献

[1] KELLY T D, FOSTER T, SCHULTZ D M, et al. The effect of soil-moisture uncertainty on irrigation water use and farm profits [J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 154: 103982.

[2] 丰尔蔓,李援农,胡战峰,等. 基于水量平衡下的灌区用水计划编制方法综述[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(3): 294 – 301.
FENG Erman,LI Yuannong,HU Zhanfeng,et al. Review on methods for water use planning in irrigation districts based on water balance[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*,2022,40(3): 294 – 301. (in Chinese)

[3] 刘俊萍,朱兴业,袁寿其,等. 中国农业节水喷微灌装备研究进展及发展趋势[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(1): 87 – 96.
LIU Junping,ZHU Xingye,YUAN Shouqi,et al. Research and development trend of agricultural water-saving sprinkler and micro-irrigation equipment in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*,2022,40(1): 87 – 96. (in Chinese)

[4] BOGENA H R, HUISMAN J A, OBERDÖRSTER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,344(1 – 2): 32 – 42.

[5] 高向上,杨卫东,沈二波. 一种基于 ESP32 – CSI 的粮食水分检测方法[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(4): 426 – 433.
GAO Xiangshang, YANG Weidong, SHEN Erbo. A grain moisture detection method based on ESP32 – CSI[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(4): 426 – 433. (in Chinese)

[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] 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.

[8] BIRCHAK J R, GARDNER C G, HIPPIE J E, et al. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(1): 93 – 98.

[9] OATES M, RAMADAN K, MOLINA-MARTÍNEZ J, et al. Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 183: 41 – 48.

[10] XIAO Lei, JI Tianjian, ZHANG Qingsong. Calibration method of capacitive soil moisture sensor[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 37(Supp.): 109 – 114.

[11] 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):144 – 119. (in Chinese)

[12] 高志涛,田昊,赵燕东. 土壤剖面水分线性尺度测量方法[J]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 257 – 264. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 李明平,吴德华,王爱军,等. 基于物联网的作物智能化精准灌溉技术研究与应用[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 117 – 120.
LI Mingping,WU Dehua,WANG Aijun,et al. Study and application of the intelligent and accurate crop’s irrigating technology based on IoT[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(1):117 – 120. (in Chinese)

[15] 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): 246 – 252.
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):246 – 252. (in Chinese)

[16] 李清河,徐军,高婷婷,等. 干旱荒漠区 EC – 5 土壤水分传感器的校准和应用[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(1): 54 – 58.
LI Qinghe,XU Jun,GAO Tingting,et al. Calibration of EC – 5 soil moisture sensors and its application in arid desertified

- area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1):54–58. (in Chinese)
- [17] KODEŠOVÁ R, KODEŠ V, MRAZ A. Comparison of two sensors ECH2O EC-5 and SM200 for measuring soil water content[J]. Soil and Water Research, 2011, 6(2): 102–110.
- [18] SAKAKI T, LIMSUWAT A, SMITS K M, et al. Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensor in sands[J]. Water Resources Research, 2010, 46(4): 1–8.
- [19] 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 Jiahui, 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)
- [20] BOGENA H, HERBST M, HUISMAN J, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(4): 1002–1013.
- [21] 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)
- [22] 顾惠南, 杨雷, 邓霄, 等. 电容式土壤水分检测多参数校正方法的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(4): 117–123.
- [23] NEMALI K S, MONTESANO F, DOVE S K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2): 227–234.
- [24] 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.
- [25] 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)
- [26] TOPP G, DAVIS J, ANNAN A. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574–582.
- [27] 盛庆元, 倪梦瑶, 张西良, 等. 基于 RC 峰值检测的土壤水分传感器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 324–330.
SHENG Qingyuan, NI Mengyao, ZHANG Xiliang, et al. Design and experiment of soil moisture sensor based on RC peak detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):324–330. (in Chinese)
- [28] ARCHER N, RAWLINS B, MACHANT B, et al. Approaches to calibrate in-situ capacitance soil moisture sensors and some of their implications[J]. Soil Discussions, 2016, 2016: 1–29.
- [29] BOGENA H R, HUISMAN J A, SCHILLING B, et al. Effective calibration of low-cost soil water content sensors[J]. Sensors, 2017, 17(1): 208.
- [30] 盛庆元, 张西良, 杨越, 等. 高低频双频激励土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 228–234.
SHENG Qingyuan, ZHANG Xiliang, YANG Yue, et al. Design and experiment of soil moisture sensor based on dual frequency excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4):228–234. (in Chinese)
- [31] Decagon Devices, Inc., 5TE water content EC and temperature sensor[EB/OL]. http://manuals.decagon.com/Retired%20and%20D%20is%20continued/Manuals/13509_5TE_Web.pdf.
- [32] DOMÍNGUEZ-NIÑO 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.
- [33] KANSO T, GROMAIRE M C, RAMIER D, et al. An investigation of the accuracy of EC5 and 5TE capacitance sensors for soil moisture monitoring in urban soils-laboratory and field calibration[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6510.