doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.011

基于多孔陶瓷的土壤水分传感器设计与性能试验

高志涛[1,2]　贾凯清[1]　陈家樑[1]　饶栢霖[1]　王　伟[3]　闫粉粉[1,4]

(1.防灾科技学院信息与控制工程学院,廊坊 065201;2.北京防灾科技有限公司,北京 101149;
3.防灾科技学院防灾减灾工程学院,廊坊 065201;4.河北省地震灾害仪器与监测技术重点实验室,廊坊 065201)

摘要:针对传统介电式土壤水分传感器在复杂土壤环境中易受矿物质颗粒、植物根系和粗大孔隙干扰的问题,提出了一种基于多孔陶瓷的土壤水分传感器。该传感器区别于传统插入式测量方式,利用多孔陶瓷敏感元件在土壤中的水势平衡特性,设计了共面环形电极探头结构。通过 HFSS 电磁场仿真软件对 4 种不同探头电极结构的电场分布和灵敏度进行分析,最终确定探头电极最优结构为外环外径 20 mm、内径 15 mm,内圆直径 7 mm 的共面环形设计。借助矢量网络分析仪实测得传感器探头电容变化范围为 11.95 ~ 15.30 pF。选用 6 种不同电容值的高频瓷片与 102 nH 绕线电感进行并联谐振试验,试验结果表明检测电路测量精度与测量范围符合传感器设计需求。以河北省廊坊地区沙壤土为试验样本,壤土和黏土为对比样本,对传感器输出与实测土壤含水率进行多项式拟合,决定系数为 0.995,传感器的灵敏度、动态性能满足土壤水分检测要求。通过温度影响试验,将传感器输出与温度进行线性拟合,决定系数为 0.994。进一步测量传感器敏感区域,试验表明传感器的敏感区域主要位于多孔陶瓷内部,可有效避免复杂的土壤环境对传感器精度的影响。最后对比试验表明,所设计的土壤水分传感器与传统产品性能接近。本研究设计的基于多孔陶瓷的土壤水分传感器可为复杂土壤环境下的水分测量提供有效解决方案。

关键词:土壤水分传感器;多孔陶瓷;电容法

中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0122-11　　**OSID**:

Design and Performance Analysis of Soil Moisture Sensor Based on Porous Ceramics

Gao Zhitao[1,2]　Jia Kaiqing[1]　Chen Jialiang[1]　Rao Bailin[1]　Wang Wei[3]　Yan Fenfen[1,4]

(1. *College of Information and Control Engineering*, *Institute of Disaster Prevention*, *Langfang* 065201, *China*
2. *Beijing Disaster Prevention Technology Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 101149, *China*
3. *College of Disaster Prevention Science and Emergency Management*, *Institute of Disaster Prevention*, *Langfang* 065201, *China*
4. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Instrumentation and Monitoring Technology*, *Langfang* 065201, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that traditional dielectric soil moisture sensors are vulnerable to interference from mineral particles, plant roots and macropores in complex soil environments, it proposed a soil moisture sensor based on porous ceramics. Different from the traditional insertion-type measurement method, this sensor leveraged the water potential equilibrium characteristic of porous ceramic sensitive elements in soil and it was designed with a coplanar ring electrode probe structure. The electric field distribution and sensitivity of four different probe electrode structures were analyzed via the HFSS electromagnetic field simulation software, and the optimal structure of the probe electrode was finally determined as a coplanar ring design with an outer ring of 20 mm in outer diameter and 15 mm in inner diameter, and an inner circle of 7 mm in diameter. The capacitance variation range of the sensor probe, measured by a vector network analyzer, was found to be 11.95 ~ 15.30 pF. Parallel resonance experiments were conducted by using six types of high-frequency ceramic chips with different capacitance values and 102 nH wire-wound inductors. The experimental results demonstrated that the measurement accuracy and range of the detection circuit met the design requirements of the sensor. Taking sandy loam soil from Langfang, Hebei as the test sample, and loam soil and clay soil as the control samples,

收稿日期:2025-10-29　修回日期:2026-04-21

基金项目:研究生科技创新基金项目(ZY20260331)和中国地震局地震科技星火计划项目(XH23062A)

作者简介:高志涛(1989—),男,副教授,博士,主要从事自动化与检测技术研究,E-mail:e228319@163.com

通信作者:闫粉粉(1989—),女,讲师,主要从事自动化与检测技术相关算法研究,E-mail:337856275@qq.com

polynomial fitting was performed between the sensor output and the measured soil moisture values, yielding a coefficient of determination of 0.995. The sensitivity and dynamic performance of the sensor satisfied the requirements for soil moisture detection. Through the temperature influence test, linear fitting was carried out between the sensor output and temperature, with a coefficient of determination of 0.994. Furthermore, the measurement sensitive area of the sensor was measured, and the experiment indicated that the sensitive area of the sensor was mainly located inside the porous ceramics, which can effectively avoid the influence of complex soil environments on sensor accuracy. Finally, comparative tests showed that the performance of the designed soil moisture sensor was comparable to that of traditional products. The porous ceramic-based soil moisture sensor designed can provide an effective solution for moisture measurement in complex soil environments.

Key words: soil moisture sensor; porous ceramics; capacitive method

0　引言

土壤含水率的监测能够为农作物根系生长环境观测提供关键数据支持，对指导精准灌溉、旱涝灾害预警及水资源高效利用具有重要的科学意义与应用价值[1]。

目前，常见的土壤水分测量技术主要包括烘干称量法[2]、中子仪法[3]、介电法[4]及超声波法[5]等。其中，介电法利用电磁波在土壤中的传播特性，具有更高的可靠性和响应速度，成为近年来的主流测量方式[6-9]。尽管介电法技术已相对成熟，但近年的研究表明，如何克服复杂土壤环境下带来的测量误差仍是该领域的难点。目前的改进方向主要集中在信号处理与特定场景校准层面。例如，文献[10-11]致力于通过机器学习算法和特定土壤类型的二次校准模型，来修正低成本电容传感器的非线性误差。Sazzad 等[12]则尝试将传感器与 IoT 系统集成，通过云端数据补偿机制来提升监测精度。然而，上述改进策略多侧重于数据后端补偿，在一定程度上忽视了传感器与土壤的物理接触这一核心干扰源。最新的试验结果显示，在实际田间环境中，土壤中的矿物质颗粒会改变传感器周边介电常数分布，植物根系易干扰电极信号传输，不规则孔隙结构还会影响传感器与土壤介质的有效接触。这些由土壤复杂本质引起的干扰是介电法原理的固有局限，且现有校准模型难以完全适应，在实践中无法完全避免[13-14]。与此同时，基于多孔介质（如多孔陶瓷）的间接测量法虽然在水势测量领域有所应用，但将其作为敏感元件以隔离土壤物理干扰、实现含水率测量的研究在近年相对匮乏。因此，本研究根据多孔陶瓷的水势平衡特性，通过检测多孔陶瓷自身的含水率，实现对土壤含水率的间接测量。

基于以上考虑，本文基于电容法，提出一种准确测量土壤水分的装置，以解决传统的介电式土壤水分传感器易受复杂土壤环境干扰的问题，实现对土壤中水分的准确检测。

1　水分传感器测量原理与结构

1.1　测量原理

传感器探头利用共面电容的边缘场效应来测量土壤含水率[15]，如图 1 所示。两极板之间将形成边缘电场，其电场线从正极指向负极，并穿过多孔陶瓷。通过应用反余弦变换法和高斯定理，可以近似计算出电容值，即

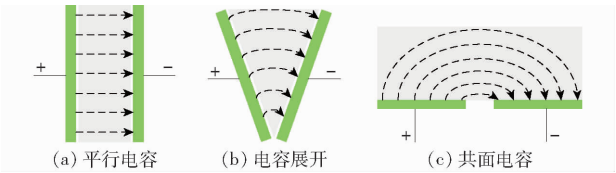
$$C = g\varepsilon_r\varepsilon_0 \tag{1}$$

式中　C——环形探头电容

ε_r——多孔陶瓷的相对介电常数

ε_0——真空介电常数

g——与形状尺寸有关的常数



(a) 平行电容　(b) 电容展开　(c) 共面电容

图 1　电容传感器极板形式示意图

Fig. 1　Schematics of capacitive sensor electrode layout

式(1)表明，在不改变电容极板尺寸的情况下，电容值和多孔陶瓷的介电常数呈正相关[16]，多孔陶瓷的介电常数 ε_r 在复数域内可表示为

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - \mathrm{j}\varepsilon'' \tag{2}$$

式中　ε'——介电常数实部

ε''——介电常数虚部

介电常数的虚部 ε'' 主要由介电弛豫损耗系数 ε_d'' 和离子电导率 σ 两部分组成，即

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0} \tag{3}$$

式中　f——谐振频率

则

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - \mathrm{j}\left(\varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0}\right) \tag{4}$$

对式(4)两边同时乘以 $g\varepsilon_0$，进一步得出

$$\mathrm{j}\omega C = \mathrm{j}\omega C^* + G \tag{5}$$

式中 C^*——探头电容实部

G——探头介电损耗

ω——角频率

由式(5)可知多孔陶瓷的电导率 σ 是影响介电损耗 G 的主要因素。结合前人的研究结果,当土壤浸出液电导率较低时,介电损耗 G 对探头整体阻抗变化的影响可以忽略[17]。本文所涉试验土壤的浸出液电导率低于 0.20 mS/cm,因此测量过程中不考虑介电损耗 G 对结果的影响[18]。

本文主要利用电容法进行测量,用电容法测量土壤含水率实际上是将传感器探头视为 LC 谐振电路中的电容元件,而传感器探头容值会受土壤介电常数的影响,因此当电感值固定的情况下,传感器探头的电容值会影响输出的谐振频率。根据谐振理论,有

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{6}$$

式中 L——并联谐振电感

通过检测谐振频率 f 变化来表征传感器探头电容值的变化[19-20]。检测原理如图 2 所示。

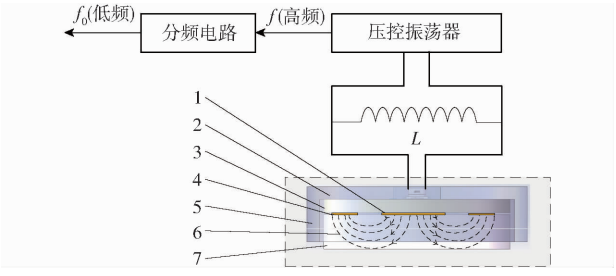


图 2 传感器检测原理图

Fig. 2 Schematic of sensor operating principle

1. 正极 2. 土壤 3. PCB 板 4. 负极 5. 外壳 6. 电场线 7. 多孔陶瓷

根据式(5)和式(6)进一步可以得出

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC^*}} \tag{7}$$

式中 f_0——传感器输出频率

由此可知,测量范围内土壤表征电容的改变会直接影响输出频率 ω,即通过计算输出频率 ω 就可以得出土壤体积含水率[21]。

多孔陶瓷基于毛细作用与土壤中的水分平衡,当陶瓷内部水势高于土壤水势时,土壤水分通过陶瓷表面孔隙被吸入,反之则水分从陶瓷渗出至土壤[22],示意图如图 3 所示。多孔陶瓷主要分为氧化物和非氧化物两大类。非氧化物陶瓷比如碳化硅 SiC、氮化硅 Si_3N_4,虽然耐高温性能优异[23],但其制备成本高昂且加工工艺复杂,不适合大面积推广的农业环境监测。而在氧化物陶瓷中,最具代表性的是氧化铝 Al_2O_3 和氧化锆 ZrO_2。尽管两者均具有优异的化学稳定性,但在应用于土壤水分传感器时,Al_2O_3 表现出更显著的综合优势。Al_2O_3 的介电常数($\varepsilon_r\approx9$)显著低于 ZrO_2($\varepsilon_r\approx25$)。作为介电式传感器的基体材料,较低的基体介电常数有利于在水分($\varepsilon_r\approx80$)进入孔隙时提供更高的信号对比度和灵敏度。相比于 ZrO_2,Al_2O_3 的多孔制备工艺更为成熟,更容易通过造孔剂法调控孔隙率和孔径分布,从而获得优异的连通性以增强毛细吸水速率。Al_2O_3 原料成本低且烧结工艺窗口宽,符合农业物联网传感器低成本、易量产的需求[24]。

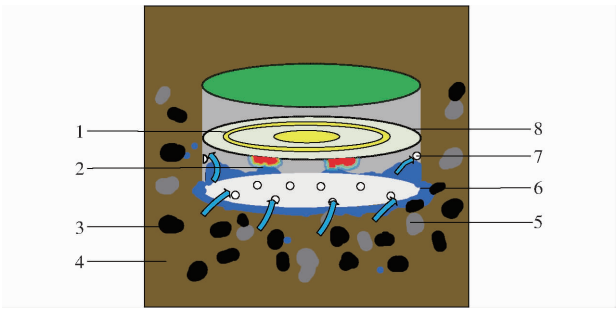


图 3 水分运移示意图

Fig. 3 Schematic of moisture movement

1、2. 环形电容 3. 其他矿物质 4. 土壤 5. 其他有机物质 6. 多孔陶瓷 7. 水分子 8. PCB 板

综上所述,综合考虑灵敏度潜力、毛细传输性能及制备成本,本研究最终选定 Al_2O_3 基多孔陶瓷作为传感敏感材料。

1.2 探头结构设计

本研究设计的电容由一个环形电极和一个圆形电极组成,将敏感元件多孔陶瓷和电容极板使用无影胶粘接在一起,并填充环氧树脂胶安装在探头外壳中,电容极板通过 IPEX 射频连接线连接电路板,将探头放置于土壤中,即可对土壤含水率进行测量。探头结构如图 4 所示。

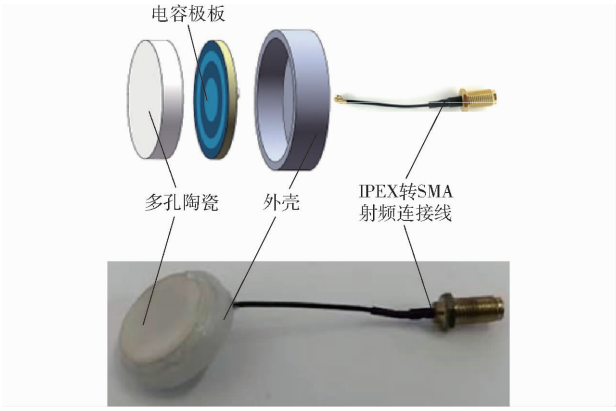


图 4 共面环形电容探头爆炸图与实物图

Fig. 4 Exploded view and physical prototype of coplanar annular capacitive probe

为确定共面电容探头的电场分布对多孔陶瓷的

影响，设计 4 种不同类型的电容极板，通过分析电场分布情况确定最终结构。利用 HFSS 电磁场仿真软件建立仿真模型，如图 5 所示，设定求解频率为 100 MHz，集总端口激励，多孔陶瓷直径固定为 22 mm，厚度为 4 mm。设定 PCB 板厚度为 1.6 mm，介电常数设为 4，电极厚度为 35 μm，介电常数为 1；电容极板上方填充无影胶厚度为 0.1 mm，介电常数为 3.5，多孔陶瓷厚度为 4 mm，介电常数为 9.8；电极外壳介电常数为 4。同时设置多孔陶瓷周围环境为含水率 30% 的土壤，介电常数为 18，背面环境设置为空气，介电常数为 1。设定金属电极为理想电场边界，选取棱长 20 cm 的正方体为辐射边界条件。

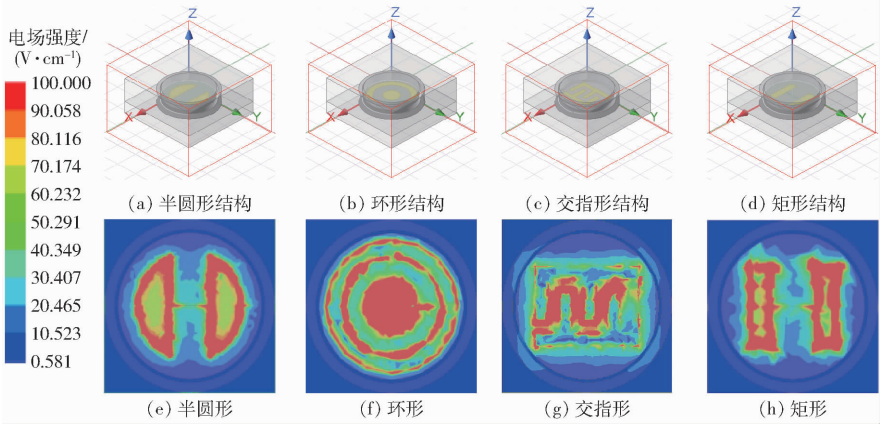


图 5　仿真模型与电场分布图

Fig. 5　Simulation model and electric field distribution

由图 5 可以看出 4 种不同结构探头的电场分布情况。其中图 5f 环形电极的曲率半径一致且平滑，电场沿圆周均匀发散，避免了局部场强过高的问题；电场强度在空间上变化较小，同时由于没有尖锐棱角，电场在边缘处不会突增，可以降低边缘场效应的影响；电场分布呈现良好的旋转对称性，在多孔陶瓷内部形成均匀的穿透性电场。其余 3 种均出现电场分布不均匀的问题。如图 5e 中出现了局部场强过高的问题，电场高度集中于小面积区域，形成“热点”，造成电场分布不均匀。这种局部集中降低了对整体介质变化的感知能力，同时可能引入测量误差。图 5g 中出现了边缘场强突出的问题，由于电极几何形状的非连续性（如直角或直线边界）破坏了电场对称性，使电荷在边缘积累，会增强外部环境对探头的干扰。图 5h 电场分布只能集中在中间部分，在多孔陶瓷内部呈现显著的不均匀性。这种不均匀分布限制了有效探测体积，降低了对被测介质整体特性的代表性。由上述现象可以得出，环形结构更适用于作为传感器的检测探头。

为进一步验证电场分布的结论，采用介电常数参数扫描法对 4 种结构进行灵敏度定量评估。灵敏度定义为电容值相对于介电常数的变化率

$$S = \frac{\Delta C}{\varepsilon_r} \tag{8}$$

式中　S——灵敏度，pF

ΔC——电容变化值，pF

在 HFSS 仿真中，将多孔陶瓷的相对介电常数 ε_r 设置为变量，扫描范围为 1（完全干燥）至 40（高含水），步长为 2。对于每个 ε_r 值，通过 Y 参数提取电容

$$C = \frac{\mathrm{Im}(Y_{11})}{2\pi f} \tag{9}$$

式中　Im——虚部

Y_{11}——单端口导纳参数

其中 f = 100 MHz。图 6 展示了 4 种电极结构的 C - ε_r 响应曲线，定量对比结果见表 1。

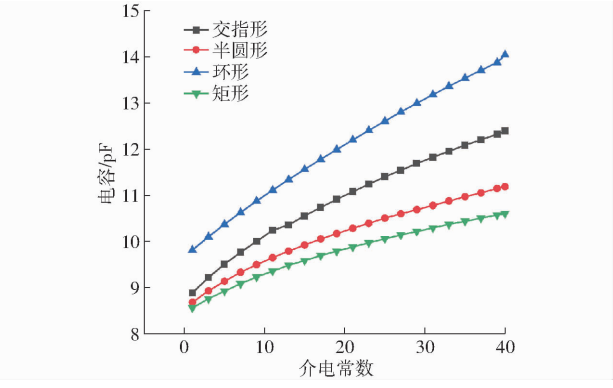


图 6　电容与介电常数的响应曲线

Fig. 6　Capacitance-permittivity response curves

基于灵敏度这一核心性能指标的定量分析，环形电极结构在 4 种候选方案中表现最优。实际仿真数据表明，环形结构的灵敏度较其他结构提升 23.1% ~108.8%，意味着在相同介电常数变化条件下，环形结构产生的电容响应信号最强，具有最高的检测分辨率。同时保持最大的测量动态范围（ΔC = 4.232 pF），能够覆盖更宽的土壤水分测量区间。

表 1 4 种结构的对比结果

Tab. 1 Comparison results of four structures

电极结构	灵敏度 S/pF	初始电容 C/pF	电容变化值 ΔC/pF	灵敏度相对提升/%
环形结构	0.213	9.810	4.232	
交指形结构	0.173	8.880	3.513	-18.8
半圆形结构	0.126	8.675	2.510	-40.8
矩形结构	0.102	8.556	2.045	-52.1

因此,本研究选择环形结构作为共面电容探头的设计方案,为多孔陶瓷介电特性的检测提供了可靠的硬件基础。应用中通过对横向与纵向检测区域的综合考虑选取适当宽度的环形电极。本文选取外环外径为 20 mm、内径为 15 mm,内圆直径为 7 mm 作为传感器电极尺寸。由于探头外壳对电场强度有一定的衰减作用,考虑外界环境对探头侧面的电场分布的影响,本设计对探头进行了金属外壳屏蔽。

为了测量共面环形探头电容的变化范围,采用分阶段递增法测定传感电容。通过一台高频矢量网络分析仪(是德科技 E5063A 型,美国,50 Ω,扫描频率 100 kHz ~ 1.5 GHz)对探头的电容变化进行分析。其中测试频率范围选取为 100 MHz,试验环境温度为 25℃。

首先,将矢量网络分析仪开机 1 h 后利用电子校准器(是德科技 N7552A 型,美国,2 端口,频率覆盖 DC - 9GHz)对 SMA 同轴传输线进行校准,校准完毕后将 CIC 探头与 SMA 同轴传输线相连接。试验使用 PVC 塑料片制成无盖无底圆柱体将电容探头远离实验台,此操作是为了避免周围环境对电容探头的干扰。试验过程中,首先将多孔陶瓷进行烘干处理,烘干后的质量为 3 g。使用经校准的微量移液器以 0.05 g(约等效于 1.67% 的质量含水率增量)为梯度单位向探头表面施加去离子水,待水分被多孔陶瓷完全吸收后,观察史密斯图的变化,并导出数据。此操作为了精准捕获电容变化的“转折点”并降低动态测量误差,试验严格控制单次加水量,避免了水分瞬间堆积,使微孔均匀吸附水分并建立微观水势平衡,确保实测电容真实反映稳态水势分布。之后当含水率达到临界阈值 30% 时完成试验。试验中,采用测试 5 次取平均值的方式来降低操作误差。试验环境如图 7 所示。

从图 8 曲线可以看出,探头电容值与多孔陶瓷的含水率呈现线性关系。在确定频率为 100 MHz 时,电容值在质量含水率 0% ~ 21.67% 区间内,由于毛细现象主导着水分由高湿度区向低湿度区的输运,导致电容缓慢变化,此时电容变化为 11.95 ~ 13.36 pF。在含水率 23.33% ~ 30% 区间内,水分主要受重力作用而向下渗透,更接近电容极板,导致曲线变化迅速上升,到达临界条件,此时电容变化为 13.62 ~ 15.30 pF。在含水率 0% ~ 30% 区间内,确定传感器探头的电容值在 11.95 ~ 15.30 pF 范围内变化。

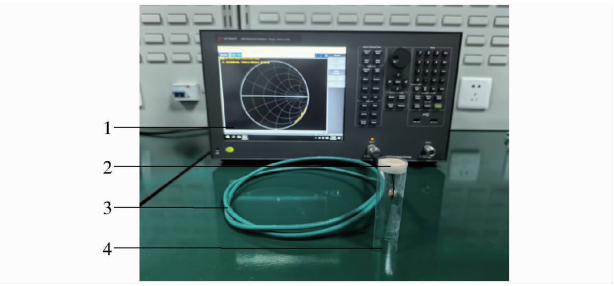


图 7 试验环境

Fig. 7 Experimental environment

1. 矢量网络分析仪 2. 多孔陶瓷 3. SMA 同轴传输线 4. PVC 塑料片

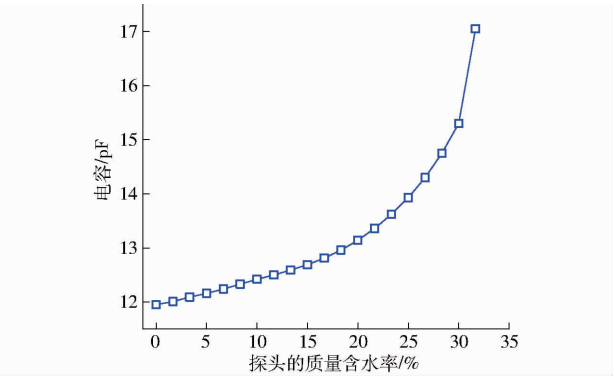


图 8 电容的变化范围

Fig. 8 Capacitance variation range

1.3 硬件电路与结构设计

本文所设计的土壤水分传感器由检测电路和控制电路两部分组成,系统框图如图 9 所示。检测电路基于电容 - 频率转换原理,由压控振荡器 MC1648、整形单元及动态分频单元构成。电容探头作为 LC 谐振回路的变容元件直接接入 MC1648 的 Tank 引脚,土壤含水率变化引起探头介电常数改变,驱动 MC1648 生成 127.4 ~ 144.1 MHz 的高频信号。该信号经高速施密特触发器整形转换为方波后,输入动态可编程分频器。控制电路基于 STM32 微控制器单元设计,STM32 微控制器实时计算分频比 N(范围 36 025 ~ 127 400),通过 SPI 动态配置 AD9517 将高频信号精准分频至 1 ~ 4 kHz 低频信号,最终利用定时器输入捕获模式测量频率。微控制器根据输出频率与体积含水率的归一化拟合模型,配合温度检测单元(DS18B20)获得的温度数据进行补偿后,通过数模转换模块(DAC7571)将水分检测电路的频率输出转换成 0 ~ 2 500 mV 的电压输出。

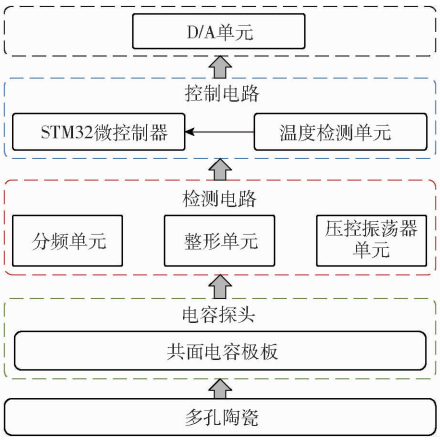


图 9　传感器系统框图

Fig. 9　Block diagram of sensor system

压控振荡器是本文设计中的关键部件之一，该电路为输出频率与输入控制电压有对应关系的振荡电路(VCO)。如图 10 所示，通过调节电容探头的电容值就可以影响输出频率，而对于本文设计的土壤水分测量装置，其电容探头的容值是未知的，故得到输出频率就可以反推出探头的电容值。

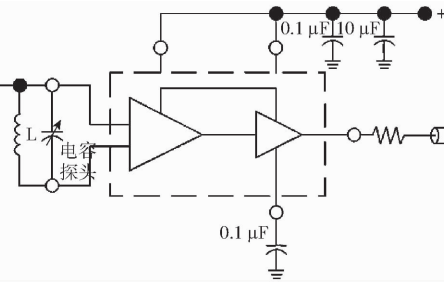


图 10　MC1648 检测电路

Fig. 10　Detection circuit based on the MC1648

传感器采用并联谐振的原理检测土壤体积含水率的变化。传感器环形探头相当于电容器，谐振电感决定着土壤测试频率。考虑到传感器探头电容变化范围与测试频率受电导率等因素的影响，最终选取 102 nH 的高频绕线电感作为谐振电感。试验过程中选取 6 种高频瓷片电容模拟传感器探头接入检测电路中，测得的输出频率与电容如表 2、图 11 所示。

表 2　电容与谐振频率对应关系

Tab. 2　Correspondence between capacitance and resonant frequency

电容/pF	5	8.2	10	12	15	18
谐振频率/MHz	222.426	171.121	150.346	137.345	128.124	114.873

由图 11 可以看出，测量电路测出结果与式(7)得出的仿真曲线决定系数达到 0.98，说明测试电路能够准确测量感应电容。谐振频率随着电容的增大单调递减。传感器探头在 11.95 ~ 15.30 pF 变化范围内，谐振频率变化范围为 127.4 ~ 144.1 MHz。根据前人的研究，在这个频率范围内可有效降低土壤盐度对测量结果的影响[25]。

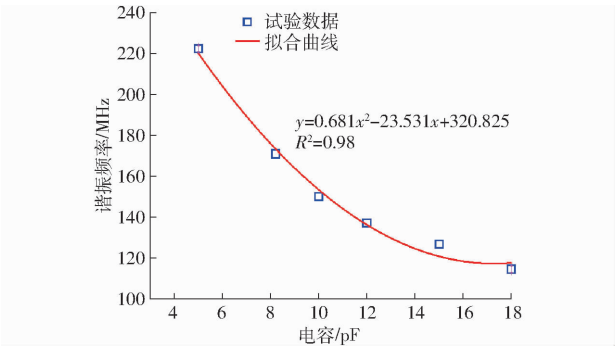


图 11　不同电容对应的谐振频率测试与运算结果

Fig. 11　Measured vs. calculated resonant frequencies for different capacitances

图 12 为土壤水分测量装置结构模型，外壳使用树脂材料 3D 打印而成，能够耐受土壤的压力和各种潜在的腐蚀因素，同时内部也使用环氧树脂灌封胶，保护内部的电子组件不受到湿气和土壤中微生物活动的影响。将 STM32 微控制器、温度检测模块、D/A 模块、整形电路等都集成在一块电路板上，并通过 SMA 转 IPEX 线和电容探头连接。



图 12　土壤水分测量装置整体结构图

Fig. 12　Overall structure diagram of soil moisture measuring device

1. 顶盖　2. 电路板　3. STM32 微控制器　4. 外壳　5. IPEX 接口　6. 电容探头　7. 多孔陶瓷

2　传感器性能分析

2.1　传感器标定试验

在传感器设计过程中，标定是不可或缺的环节。首先需要对含水率检测电路输出的频率信号进行归一化处理。具体的处理方法为

$$V_O = V_c \frac{f_a - f_m}{f_a - f_w} \tag{10}$$

式中 V_O——传感器输出电压

f_a——探头在空气中输出的频率

f_w——探头多孔陶瓷水分饱和输出的频率

f_m——探头在实测土壤中输出的频率

V_c——2 500 mV 的参考电压

经过归一化处理后将传感器输出的频率信号转换成 0 ~ 2 500 mV 电压信号。

为了确定电容探头输出的电压与土壤含水率的对应关系,采用烘干法进行体积含水率标定。通过配置多组不同含水率的试验样本,并用烘干法计算每组样本的体积含水率,将其与传感器输出的相应水分校正值进行拟合,得到了标定曲线。选用沙壤土为试验土壤,经过自然风干过筛(孔径 0.4 mm)和干燥箱(105℃,24 h)处理。为了达到预设的目标体积含水率θ_v,精确计算出 6 种梯度所需添加水的质量m_w,计算式为

$$m_w = \theta_v \rho_w V_s \tag{11}$$

式中 θ_v——目标体积含水率

ρ_w——常温下水的密度(近似取 1.0 g/cm^3)

V_s——单组土壤样本的总体积(直径 30 cm,高度 5 cm)

充分搅拌均匀后按照 1.6 g/cm^{3}的土壤容重放入高 20 cm、直径 30 cm 的 PVC 测试桶中,保持土壤高度约为 5 cm。静置 48 h 后利用烘干法计算 6 组土壤样本的体积含水率分别为 5.32%、10.46%、15.67%、20.44%、25.23%、31.11%。试验环境温度为 25℃。标定环境如图 13 所示。输出结果如图 14 所示,该电容探头能够有效地表征土壤含水率的变化,因为其输出电压与土壤体积含水率之间存在良好的相关性,拟合方程的决定系数 R^2 达到了 0.995,这进一步验证了其可靠性和准确性。

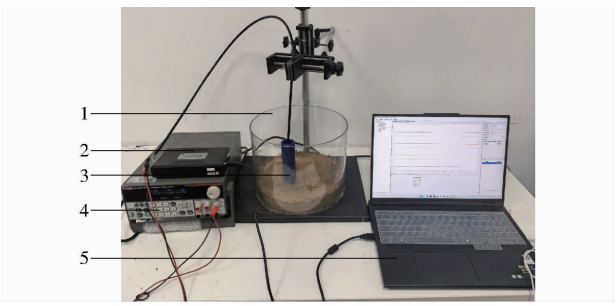


图 13 传感器标定环境

Fig. 13 Experimental environment for sensor calibration

1. PVC 测试桶 2. USB 数据采集器 3. 土壤水分传感器 4. 直流电源 5. 便携式计算机

同时为对比不同质地土壤对传感器的影响,按照以上方法配置体积含水率分别为 12.08%、17.23%、23.45%、28%、32.45%、38.11% 的壤土和体积含水率为 15.81%、20.16%、25.33%、32.31%、38%、42.27% 的黏土。输出结果如图 14 所示,与传统介电传感器直接检测土壤水分不同,本传感器基于多孔陶瓷与土壤的水势平衡机制工作,其输出直接取决于多孔陶瓷内部的平衡含水率[26]。试验表明,在相同土壤体积含水率下,土壤基质势随质地变细而急剧增加,导致多孔陶瓷从土壤中吸取水分的能力受限。这种强烈的水势竞争效应使得传感器输出电压呈现沙壤土大于壤土,大于黏土的显著阶梯状差异。值得注意的是,多孔陶瓷探头的敏感性并非全量程覆盖,而是存在明确的“死区”。多孔陶瓷传感器的测量“死区”源于土壤介质与传感探头间的水势竞争机制,即当土壤基质吸力超过多孔陶瓷的毛细吸力时,水分被牢固束缚于土壤孔隙中而无法向探头迁移。黏土因其颗粒极细、比表面积巨大且微孔隙致密,对水分具有极强的物理吸附与毛细束缚能力,使得探头内部的介电常数变化滞后于土壤实际水分的变化,即使在较高含水率(15% ~ 20%)下仍维持极高的基质吸力,导致多孔陶瓷难以夺取水分,从而形成较宽的测量“死区”。相比之下,壤土的颗粒级配与孔隙结构较为均衡,对水分的束缚能级相对较低,多孔陶瓷往往在较低含水率(8% ~ 12%)下即可克服土壤吸力建立水力连接,“死区”范围显著小于黏土。

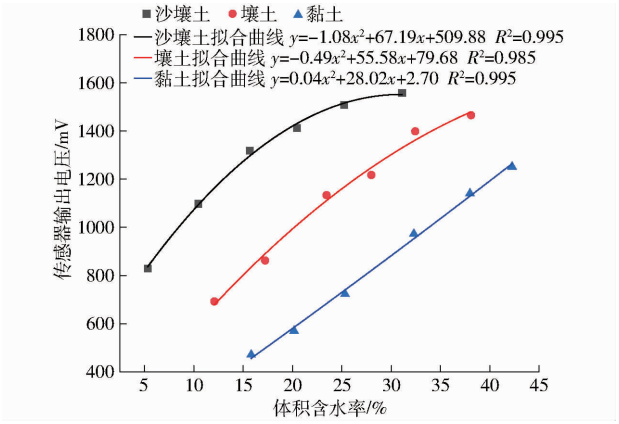


图 14 土壤水分传感器标定结果

Fig. 14 Soil moisture sensor calibration results

基于上述分析,本研究得出,基于多孔陶瓷介电法的土壤水分传感器不具备“土质无关性”。为了实现高精度的通用测量,需要对特定的土壤进行标定。

2.2 温度补偿试验

为了进行传感器的温度标定并解决温度变化影响传感器输出的问题,设计了一套温度检测和补偿试验装置。首先,将设计的土壤水分传感器放入温度箱(型号:MQ - TH1000F - 2N)中,并加入测温探头(型号:FLUKE - 961C),通过导线连接到箱外的显示仪表上,从而实现不开门即可实时、连续、准确

地监测温度。通过调节高低温箱的温度，在 10℃至 40℃的范围内以 5℃为间隔进行温度变化。使用测温仪检测测试环境的温度，当监测到的温度与高低温箱设置的温度一致时，记录传感器输出的电压值。标定环境如图 15 所示。

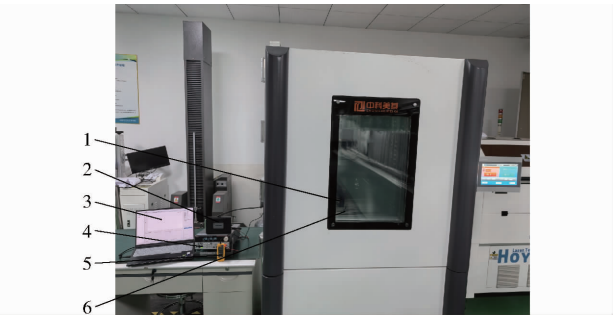


图 15　温度标定环境

Fig. 15　Experimental environment for temperature calibration

1. 传感器　2. USB 数据采集卡　3. 便携式计算机　4. 直流电源　5. 测温仪　6. 测温探头

温度标定试验结果如图 16 所示，观察到传感器输出的电压与温度之间呈现出良好的线性关系，拟合方程的决定系数 R^2 达到了 0.994。每升高 1℃，传感器输出的电压增幅约为 2.659 mV。这种输出电压的变化主要由温度引起电子元器件电气特性的变化以及探头周围介质和多孔陶瓷的介电常数受温度变化影响。

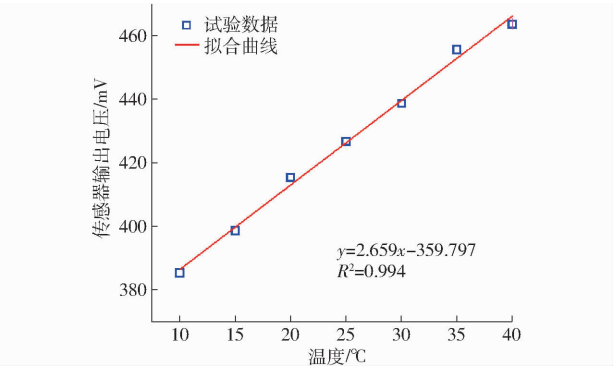


图 16　温度标定试验结果

Fig. 16　Temperature calibration test results

为了解决温度对传感器输出的影响，本研究在传感器系统中引入了温度检测单元，实时监测环境温度并进行传感器输出电压的温度补偿。实际应用中，水分和温度是同时变化的。为了构建适用于变温环境的通用模型，以 25℃为基准温度，将温度引起的线性漂移叠加至水分响应模型中。此时，传感器的总输出电压 V_o 可视为关于含水率 θ 和温度 T 的二元函数，即

$$V_o = -1.083\theta^2 + 67.193\theta + 2.659T + 443.41 \tag{12}$$

2.3　动态响应性能试验

传感器的动态响应性能是实际应用中的一个关键指标，用于衡量传感器在检测区域的土壤含水率发生变化时，输出从变化到稳定所需的时间。本试验主要用于评估土壤水分传感器的动态响应特性，重点考察传感器的响应时间。使用 2.1 节的方法配置 5 组沙壤土样本的体积含水率分别为 10.46%、15.67%、20.44%、25.23%、31.11%。将传感器从干燥环境快速转移至目标体积含水率的土壤样本中，每次转移目标体积含水率的土壤之前，需要对多孔陶瓷表面进行烘干处理，每 30 s 读取 1 次数据，记录传感器输出电压值达到稳定值 90% 所需的时间，建立输出电压与时间的关系图。

图 17 展示了传感器在阶跃水分激励下的动态响应过程，整体呈现“快速吸附—缓慢平衡”的双阶段特征。其中 0 ~ 10 min 为输出电压快速上升阶段，响应斜率较大，10 ~ 30 min 为渐进趋稳阶段，曲线逐步进入平稳区。试验结果表明，高含水率样本的初始响应速率高于低含水率样本，且达到稳态所需时间更短，相反，低含水率条件下曲线初期斜率更缓，趋稳过程更长。在高含水率条件下，土壤水分连通性增强、等效导水率较高，水分能够更快速地向多孔陶瓷传递并完成吸附/充填过程，从而表现为更陡的上升段与更短的整定时间。而在低含水率条件下，水膜不连续导致导水能力下降，传质受限使得陶瓷内部孔隙的充填与水势平衡建立更为缓慢，进而拉长了响应建立与稳定所需时间。整体而言，传感器的动态响应规律与多孔陶瓷在不同水势梯度与供水能力条件下的吸水动力学过程一致。为保证测试准确性，确保传感器在各含水率条件下均能建立完整的吸水动力学平衡过程，本文取 30 min 作为最大响应时间。

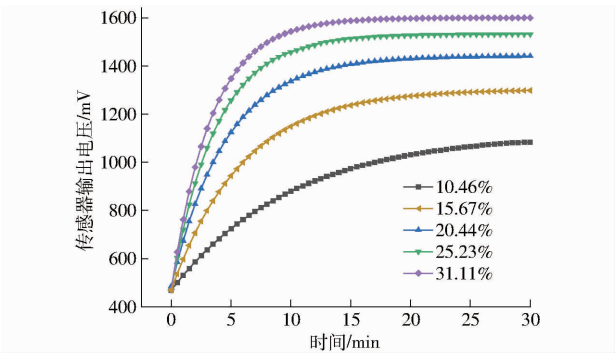


图 17　动态响应性能试验结果

Fig. 17　Experimental results of dynamic characteristics

2.4　影响范围试验

传感器的敏感区域是指其可以有效测量的空间范围，这是表征传感器性能的一个关键参数。按照

2.1 节描述的方法，分别准备了体积含水率为 17.81%、22.35%、28.08% 的沙壤土。将这些土壤装入 PVC 测试桶中，密封并静置 64 h 后进行试验。

试验使用 PVC 塑料片制成的无盖无底圆柱形容器，将准备的试验土壤填充进圆柱形容器中。随后，圆柱形容器中的土壤被置于传感器之上，土壤逐渐被推升并移除多余部分，同时记录每一梯度所对应的传感器输出电压值，试验过程展示如图 18 所示。

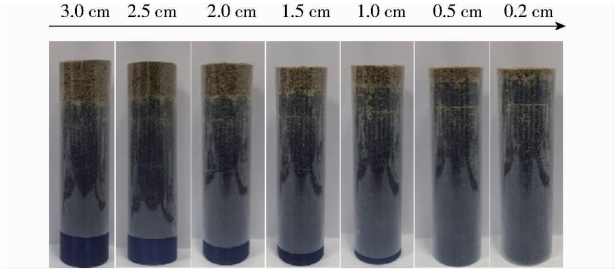


图 18 传感器纵向影响范围的试验过程

Fig. 18 Test process for measuring sensor's longitudinal sensitive area

为了更加直观地表现传感器的纵向影响范围，对原始电压数据进行了归一化处理。归一化值的计算公式为

$$V_e = \frac{V_n - V_{air}}{V_{soil} - V_{air}} \tag{13}$$

式中 V_e——归一化电压

V_{soil}——传感器在 3.5 cm 厚度土壤下的电压

V_{air}——传感器在空气中的电压

V_n——传感器测量的实时输出电压

处理后，归一化值的取值范围为 0 ~ 1，其中 0 代表无土壤影响时的背景信号，1 代表传感器响应达到饱和时的最大信号。如图 19 所示，传感器归一化输出电压值在 1.00 上下波动，表明传感器已达到了饱和状态。其极差最大值为 0.013 7，最小值为 0.006 7；标准差最高为 0.004 0，最低为 0.002 4。以上数据表明归一化输出电压值波动幅度非常小，土壤厚度对传感器无显著影响。从电磁场分布的角度看，传感器产生的电场能量主要集中在多孔陶瓷内部及其表面附近。电场强度随距离呈指数衰减。0.2 cm 的临界厚度反映了该电场有效作用范围的边界。在此边界内，土壤的介电常数是决定传感器输出电压的主要因素；超出此边界，电场能量已衰减至不足以灵敏地探测介质变化，因此输出不再增加。这表明传感器的纵向影响范围被有效限制在多孔陶瓷内部，外部土壤对传感器的影响在误差允许范围内可忽略不计。

参照纵向敏感区域的测量方法，探究传感器探头在侧向（径向）的检测范围，以验证金属外壳屏蔽

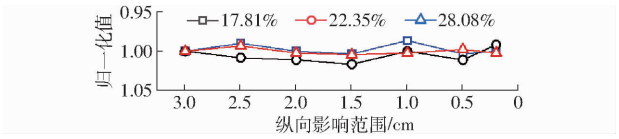


图 19 纵向影响范围的试验结果

Fig. 19 Experimental results of longitudinal sensitive area

对侧向土壤干扰的隔离效果，确定传感器的有效横向敏感边界。将本文所设计土壤水分传感器置于 PVC 测试桶中，以 0.5 cm 为梯度利用土刀环周削薄测试筒中土壤的厚度（传感器外壳的管壁至土壤边缘的距离），并记录传感器输出的电压。试验过程如图 20 所示。

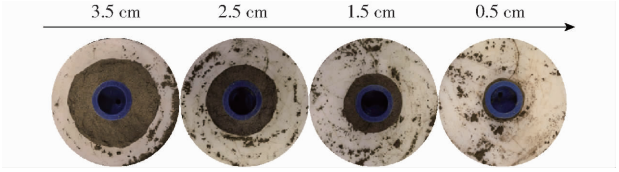


图 20 传感器横向影响范围的试验过程

Fig. 20 Test procedure for lateral sensing range of sensor

由图 21 可以看出，随着探头侧壁周围土壤径向厚度的增加，传感器的输出电压变化幅度很小，这表明探头外部的土壤对传感器的电容变化几乎没有贡献。由于传感器探头外部采用了金属外壳屏蔽设计（如 1.2 节所述），有效的边缘电场被束缚在金属外壳内部的多孔陶瓷区域，无法穿透金属屏蔽层进入侧向土壤。因此，电场线主要分布在内部多孔陶瓷介质中，外部土壤介电常数的变化不会改变探头极板间的电容。

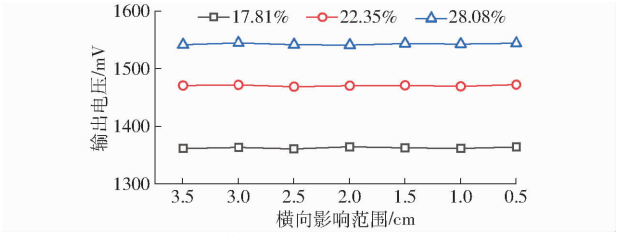


图 21 横向影响范围的试验结果

Fig. 21 Test results for lateral influence zone

3 对比试验与结果分析

为了分析本文设计的土壤水分传感器与传统产品的性能差距，设计了传感器对比试验。对比的传感器为北京林业大学的 BD－Ⅲ型土壤水分传感器，其测量范围为 0% ~100%，精度为 ±2%。

按照 2.1 节的试验步骤配置体积含水率为 10.46%、15.67%、20.44%、25.23%、31.11% 的 5 种土样，利用 2 种传感器进行分别测量，测试环境如图 22 所示。基于多孔陶瓷的土壤水分传感器与 BD－Ⅲ 型土壤水分传感器测得的数据结果如表 3 所示。

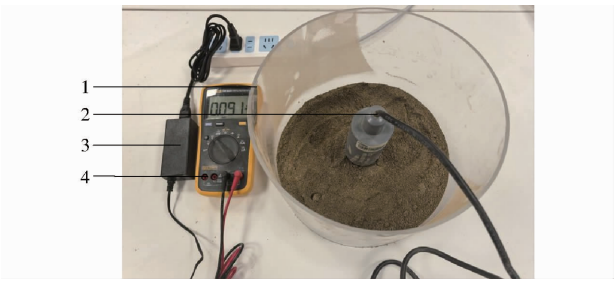


图 22　试验环境

Fig. 22　Experimental environment

1. PVC 测试桶　2. 土壤水分传感器　3. 12 V 电源　4. 万用表

表 3　性能对比结果

Tab. 3　Performance comparison results　%

参数	编号				
	1	2	3	4	5
BD－Ⅲ型传感器测量值	10.49	15.70	20.41	25.20	31.14
自制传感器测量值	9.35	16.64	17.91	28.34	32.85
绝对误差	－1.14	0.94	－2.50	3.14	1.71
相对误差	－10.87	5.99	－12.25	12.46	5.49

从表 3 可以看出，土壤体积含水率的绝对误差为 －2.50% ～3.14%，相对误差为 －12.25% ～12.46%。尽管部分测点误差相对较大，但自制传感器与 BD－Ⅲ传感器的测量结果变化趋势一致，整体数值水平接近，表明 2 种传感器在体积含水率测量方面具有较为接近的性能。分析其误差产生的原因，主要受以下因素综合影响：一是多孔陶瓷材料的水势平衡滞后性，传感器达到动力学平衡约需 30 min，若在土壤水分动态波动或未达到平衡状态时进行读数，受多孔陶瓷微孔结构毛细阻力的影响，其内部水分迁移的滞后可能导致含水率无法实时、精准地反映外部土壤的真实动态；二是土壤容重均匀性与接触界面的影响，人工填装难以保证土壤微观分布的绝对一致，多孔陶瓷敏感元件与土壤间若存在微小空气隙或局部容重差异，会显著改变感应区域内的电场分布，从而引起测量偏差。

4　结论

（1）设计了一种以多孔陶瓷为基础的土壤水分传感器，采用共面环形电容与多孔陶瓷相结合的形式作为探头，代替传统的测量方式，解决传统的介电式土壤水分传感器易受复杂土壤环境干扰的问题，实现对土壤中水分的准确检测需求。

（2）对传感器环形探头的电容特性与电路的性能进行了研究，借助矢量网络分析仪，对环形探头的电容特性进行了分析，确定了环形探头电容变化范围为 11.95 ～15.30 pF。通过与 6 种容值高频瓷片电容的并联谐振试验，证明传感器的电路精度能够满足传感器设计的要求。

（3）从试验标定与相关试验结果可以看出，传感器的精度、灵敏度与动态响应性能均能满足传感器的设计要求。

（4）通过试验分析，基于归一化后的输出电压可知，传感器的有效测量区域集中于多孔陶瓷基体内部。

（5）传感器的对比试验表明，本文所设计的土壤水分传感器与传统产品性能接近。

参　考　文　献

[1] Pereira, Luis S, López-Urrea R, et al. Editorial to the special issue on "Contributions to update the FAO56 guidelines for computing crop water requirements"[J]. Irrigation Science, 2024, 42(6): 1013－1017.

[2] 韩建新，路玉彬. 水利部农村水利司司长冯广志谈西部地区节水灌溉[J]. 农业机械，2000(9)：4－5.
Han Jianxin, Lu Yubin. Feng Guangzhi, Director of the Department of Rural Water Conservancy, Ministry of Water Resources, talks about water-saving irrigation in the western region[J]. Farm Machinery, 2000(9): 4－5. (in Chinese)

[3] 杨德志，李琳琳，杨武，等. 中子法测定土壤含水量分析[J]. 节水灌溉，2014(3)：14－15，19.
Yang Dezhi, Li Linlin, Yang Wu, et al. Analysis of soil moisture content determined by neutron method[J]. Water Saving Irrigation, 2014(3): 14－15, 19. (in Chinese)

[4] Jones S B, Sheng W, Xu J, et al. Electromagnetic sensors for water content: the need for international testing standards[C]// 2018 12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA). IEEE, 2018: 1－9.

[5] 李君，徐岩，姜锐，等. 超声波土壤含水量检测装置的模型建立与验证[J]. 农业工程学报，2017，33(13)：127－133.
Li Jun, Xu Yan, Jiang Rui, et al. Model establishment and verification of ultrasonic soil water content detection device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 127－133. (in Chinese)

[6] Shi W, Zhang S, Wang M, et al. Design and performance analysis of soil temperature and humidity sensor[C]//6th IFAC Conference on Bio-Robotics: BIOROBOTICS, 2018: 586－590.

[7] Deng X, Gu H, Yang L, et al. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance[J]. Measurement, 2020, 150: 107052.

[8] Naderi-Boldaji M, Tekeste M Z, Nordstorm R A, et al. A mechanical-dielectric-high frequency acoustic sensor fusion for soil

physical characterization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 10 - 23.
[9] 陈栋,温宗周. 基于频域反射法的土壤水分传感器设计[J]. 电子测量技术,2016,39(3):106 - 109.
Chen Dong, Wen Zongzhou. Design of soil moisture sensor based on frequency domain reflection method[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3): 106 - 109. (in Chinese)
[10] Hidayat M N, Hazarika H, Kanaya H. Calibration and performance evaluation of cost-effective capacitive moisture sensor in slope model experiments[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8156.
[11] Adla S, Bruckmaier F, Arias-Rodriguez L F, et al. Impact of calibrating a low-cost capacitance-based soil moisture sensor on Aqua Crop model performance[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 353: 120248.
[12] Sazzad M M, Ahmed T, Kibria G, et al. IoT based soil moisture measurement and type prediction using advanced regression and machine learning models[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 35730.
[13] 吴勇,钟永红,杜森,等. FDR 土壤水分传感器田间性能测试分析[J]. 节水灌溉,2021(2):41 - 46.
Wu Yong, Zhong Yonghong, Du Sen, et al. Field performance test and analysis of FDR soil moisture sensor[J]. Water Saving Irrigation, 2021(2): 41 - 46. (in Chinese)
[14] 张华鑫. 土壤水分监测系统的研究[D]. 长春:长春理工大学,2020.
Zhang Huaxin. Research on soil moisture monitoring system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
[15] 赵燕东,李博,刘卫平,等. 土壤剖面水分传感器的边缘电磁场分析[J]. 农业工程学报,2021,37(24):177 - 188.
Zhao Yandong, Li Bo, Liu Weiping, et al. Analysis of fringe electric field for soil profile moisture sensor[J]. Transactions of the CASE, 2021, 37(24): 177 - 188. (in Chinese)
[16] 牛智有,刘芳宏,刘鸣,等. 平行极板电容传感器介电式颗粒饲料水分检测仪设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(18):37 - 44.
Niu Zhiyou, Liu Fanghong, Liu Ming, et al. Design and test of dielectric moisture detector for pellet feed using parallel plate capacitance sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 37 - 44. (in Chinese)
[17] Daokun M, Yurui S, Maohua W. Three-dimensional numerical modeling of a four-pin probe for soil water content[J]. Australian Journal of Soil Research, 2006, 44(2): 183 - 189.
[18] 高志涛. 土壤水分检测方法及在冻融循环中的应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2017.
Gao Zhitao. Research on soil moisture detection method and its application in freeze-thaw cycles[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
[19] 杨浩明,王永智,王辉. 复阻抗法土壤密度及含水率测试的标定试验研究[J]. 人民黄河,2023,45(12): 135 - 140.
Yang Haoming, Wang Yongzhi, Wang Hui. Calibration experimental study on soil density and moisture content measurement by complex impedance method[J]. Yellow River, 2023, 45(12): 135 - 140. (in Chinese)
[20] Bogena H R, Huisman J A, Oberdorster 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.
[21] 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)
[22] 潘振皓,孟庆林,李琼. 多孔烧结陶片在盐溶液中的吸水特性[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(6):117 - 122.
Pan Zhenhao, Meng Qinglin, Li Qiong. Water absorption characteristics of porous sintered ceramic tiles in salt solutions[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(6): 117 - 122. (in Chinese)
[23] 唐钰栋,张久美,赵世凯,等. 多孔陶瓷的制备工艺及研究现状[J]. 山东化工,2025,54(24):73 - 77,81.
Tang Yudong, Zhang Jiumei, Zhao Shikai, et al. Preparation technology and research status of porous ceramics[J]. Shandong Chemical Industry, 2025, 54(24):73 - 77,81. (in Chinese)
[24] Cosentino I, Muccillo E, Muccillo R. Development of Zirconia-Titania porous ceramics for humidity sensors[J]. Sensors & Actuators: B. Chemical, 2003, 96(3): 677 - 683.
[25] Or D, Wraith J M. A new soil metric potential sensor based on time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1999, 35(11): 3399 - 3407.
[26] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1569 - 1578.