

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.030

土壤剖面水分传感器探头仿真与试验

闫 华^{1,2} 邢 振^{1,2} 薛绪掌^{1,2} 王利春^{1,2}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097)

摘要: 为准确掌握土壤墒情信息, 针对农田环境下不同作物根区土壤含水率变化难以实时观测的问题, 对土壤剖面水分传感器探头进行了仿真, 并通过试验验证, 给出了传感器探头设计尺寸的优选方案。在建立传感器探头微量平面电容二维模型的基础上, 分析了传感器探头结构变化对探头微量平面电容周围电场强度和电容变化的影响, 确定了探头结构尺寸的最优组合。当探头铜环电极外径 40 mm、内径 38.4 mm、轴向长度 20 mm、轴向间距 15 mm 时, 探头的灵敏性和探测范围最优。试验结果表明, 本文研究的土壤剖面水分传感器测量精度为 $\pm 1.42\%$, 具有很高的稳定性和一致性。所设计的传感器探头可以根据实际测量深度需要任意组合, 满足不同作物根区深度的土壤含水率测量需求。

关键词: 土壤; 水分传感器; 探头; 剖面; 仿真; 试验

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0245-07

Simulation and Experiment on Soil Moisture Profile Sensor Probe

YAN Hua^{1,2} XING Zhen^{1,2} XUE Xuzhang^{1,2} WANG Lichun^{1,2}

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to accurately grasp soil moisture content information, the problem of real-time observation of soil moisture change in different crop root areas under farmland environment is difficult to observe. The structure of probe was researched and analyzed in detail by modeling simulation analysis, and the optimal sensor structure was determined through experimental verification. Through establishing the trace amount planar capacitance probe two-dimensional model, the influence of change of sensor probe structure on the change of electric field intensity and the capacitance value around the trace amount planar capacitance probe was analyzed by using the finite element analysis, and then the probe structure was determined. The sensitivity and the detecting depth of the probe was optimal when the outer diameter of the probe copper ring electrode was 40 mm, the inner diameter was 38.4 mm, the axial length was 20 mm, and the axial spacing was 15 mm. The sensor probe can be applicable to various types of soil moisture measurement. The measurement accuracy reached $\pm 1.42\%$ with better stability and consistency. The results showed that the sensor probe can be designed according to the actual measurement depth and satisfy the soil moisture measurement requirements of the root zone of different crops.

Key words: soil; moisture sensor; probe; profile; simulation; experiment

引言

实时、准确地掌握农田土壤水分信息, 对研究土壤水分运动规律、作物生理水分胁迫规律、实施节水

灌溉、发展高效节水农业具有重要意义^[1-2]。测量土壤水分的方法有烘干法、张力计法、微波法、中子法、红外遥感法、电阻法^[3-4]以及介电法等多种方法。由于基于介电理论^[5-9]的测量方法具有测量精

收稿日期: 2017-06-04 修回日期: 2017-08-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0403102)、国家自然科学基金项目(51509005)和北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20170204)

作者简介: 闫华(1978—), 女, 副研究员, 主要从事农业高效用水及农业自动化研究, E-mail: yanh@nrcita.org.cn

通信作者: 邢振(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事信息采集与处理研究, E-mail: xingz@nrcita.org.cn

度高、实时性强、方便布设等优点,应用比较广泛。随着精细化农业的推广应用,如研究土壤中水分的迁移过程^[10-11],了解作物根系区域水分吸收规律^[12],实时监测不同深度土壤水分入渗的梯度变化等,都需要测量土壤剖面的水分变化。目前,应用最为广泛的土壤水分传感器以探针式为主,探针长度通常在 30 cm 以内,主要用于测量表层土壤水分或单个测量点。若要进行土壤剖面水分的测量,通常采用的方法是在一个剖面的不同深度插入传感器,这样做不仅费时费力、破坏土壤的质地结构,而且由于传感器的差异性还会带来测量精度的问题。针对土壤剖面水分测量问题^[13-14],国外已经做了大量的研究工作,而我国近几年虽然有相关研究,但大多数仍处于研究探讨阶段。

为此,本文在分析高频电磁边缘场效应原理^[15-17]的基础上,设计土壤剖面水分传感器探头,提出传感器探头结构的二维模型和设计参数,并采用有限元法分析传感器探头的电场强度和电场能量的分布规律,综合考虑实际情况和仿真结果,通过对传感器的精度、稳定性和一致性进行试验分析,给出传感器探头设计尺寸的优选方案。

1 材料与方法

1.1 测量原理

土壤是由固、液、气三态构成的多孔介质,水的相对介电常数为 81,固体土壤介电常数为 3~5,而空气相对介电常数为 1。因此,可以利用水的介电常数远大于土壤中其他物质的介电常数这一特性间接测量土壤含水率。

传感器的测量机理是基于高频电磁的边缘场效应,传感器探头的 2 个敏感电极之间被施加的高频电场能量足够高时,电极间电场的耦合强度与土壤含水率显著相关,此时,环状传感电极构成一个可变的等效电容器,周围土壤充当电介质,将这个可变电容器作为高频振荡器外接并联 LC 谐振回路的组成部分(图 1),当土壤含水率发生变化时,土壤所表征的相对介电常数发生变化,引起传感器探头感知的等效电容的变化,进而引起振荡电路频率的变化,因此,可通过测量高频振荡器的输出频率间接测得土壤含水率。

如图 1 所示,高频振荡电路的输出频率为

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_s + C_p + C_0)}} \tag{1}$$

式中 L_0 ——振荡电路的电感
 C_0 ——匹配电容 C_p ——电路的寄生电容
 C_s ——探头感知的土壤等效电容

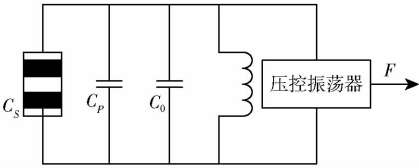


图 1 传感器探头测量原理图

Fig. 1 Measurement principle diagram of sensor probe

传感器探头感知的土壤等效电容的容量与探头周围的土壤及探头本身的寄生电容有关,关系为

$$C_s = k\varepsilon \tag{2}$$

式中 ε ——土壤相对介电常数
 k ——系数,与探头的结构(电极面积、电极间距)及辐射到土壤中的电磁场的形状及场强有关

根据式(1)和式(2),并令 $A = \frac{1}{4\pi^2 k L_0}$, $B =$

$$-\frac{C_p + C_0}{k}, \text{ 则}$$

$$\varepsilon = AF^{-2} + B \tag{3}$$

式中 $A、B$ ——与探头结构有关的参数

因此,确定了探头的尺寸,土壤的介电常数仅仅与传感器的输出频率有关。根据 TOPP 方程^[17] $\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3$ 便可以计算出土壤含水率。

1.2 传感器结构

基于高频电容测量原理的土壤剖面水分传感器的整体结构包括探头、探体和防护套 3 部分,如图 2 所示。探体可以根据实际的测量深度需求,通过探头组装而成。探头与探头之间的物理连接通过内外螺纹,电气连接通过触点。防护套材质为优质的 PVC,防护等级为 IP68。在需要测量土壤含水率时,预先把传感器防护套埋设在待测位置,然后把探体放置于防护套筒内部即可。

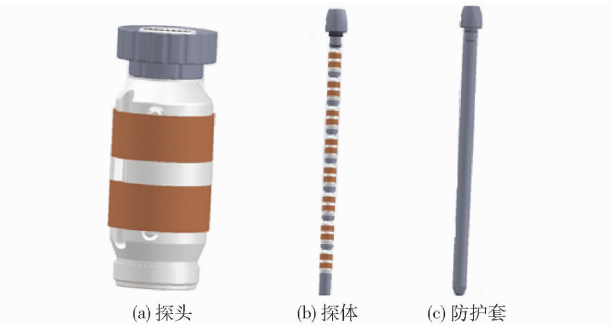


图 2 传感器整体结构

Fig. 2 Sensor structure

1.3 传感器硬件电路设计

本文设计的传感器硬件主要由若干传感器探头、数据采集及处理模块等组成,传感器硬件总体框图如图 3 所示。传感器探头将土壤含水率转换成频

率信号;数据采集及处理模块包括 MCU、信号调理电路、电源模块、通信模块。电源模块采用锂电池充放电电源管理芯片把外部锂电池电能转换成 5 V 和 3.3 V 电源,供传感器探头和采集电路使用。当到达用户设定的采集时间时,MCU 会被唤醒,其通过信号调理电路,顺序开、关传感器探头的供电电源,并同时采集、存储传感器探头输出的频率信号,通过分析处理,把频率信号转换成实际的土壤含水率。传感器提供 433 MHz 的无线模块和 GPRS 两种通信方式,最多可以连接 8 个传感器探头,测量土壤深度为 80 cm。

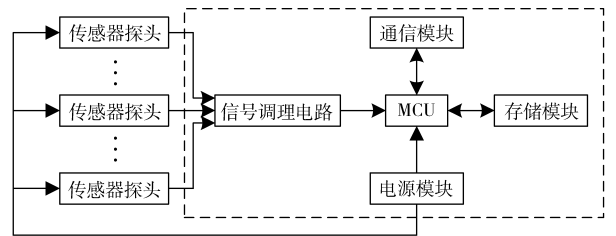


图 3 传感器硬件总体框图

Fig. 3 Block diagram of sensor hardware

传感器探头硬件电路主要由铜环电极、高频振荡电路、分频/整形电路、信号放大电路组成,如图 4 所示。铜环电极充当高频振荡电路的外接并联谐振电路的可变电容器,当土壤含水率发生变化时,所表征的介电常数发生变化(以下建模分析中,由土壤的介电常数变化表示土壤含水率变化),随即探头所感知的等效电容发生变化,继而高频振荡电路的谐振频率发生变化,由其产生的高频正弦频率信号经分频/整形电路将正弦信号转换为方波信号并大大降低了信号频率,然后经过小信号放大电路把微弱方波信号转换成易于采集的大幅度频率信号输出。



图 4 传感器探头硬件电路组成框图

Fig. 4 Block diagram of sensor probe hardware

1.4 传感器探头建模

传感器探头由上下 2 个圆环、PVC 支架和电路板组成,电路板固定在 PVC 支架内部,圆环套在 PVC 支架上(如图 2),圆环的内半径 r 为 19.2 mm,外半径 R 为 20 mm,轴向长度为 a ,两环之间的轴向距离为 b 。由于传感器探头基于边缘场效应感知土壤水分容抗,与平面电容传感器的工作原理相似,为了分析探头周围电磁场的分布与探头结构之间的关系,优化探头结构,确定 a 、 b 尺寸,如图 5 所示,以 1 mm 为宽度,把传感器探头沿着圆周分割成 126 份,各取上下圆环所对应的纵向截面(图 5 阴影部

分)即构成一个微量化平面电容,而整个探头感知土壤含水率所表征的总容抗可等效为 126 个微量电容的并联。

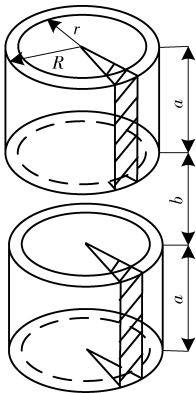


图 5 传感器探头的物理模型

Fig. 5 Physical model of sensor probe

由于高频电磁边缘电场分布的边界条件相对复杂,很难直接计算边缘场电容,而采用有限元数值算法^[18],可以对传感器探头的电场分布及其感知土壤的等效电容进行微量近似分析,在工程电磁有限元分析中,电容通常从电场的能量角度来定义,即

$$C = \frac{2W_e}{U^2} = \frac{\int_{\Omega} D E d\Omega}{U^2}$$

(4)

- 式中
- U ——构成电容介质的两端电势差

W_e ——电场总储能

D ——电位移量

E ——电场强度

Ω ——有效电场区域的体积

探头微量化平面电容二维模型采用 Ansoft 公司有限元分析软件^[19] Maxwell V10 进行建模,对微量化平面电容周围电场强度的变化趋势与能量分布规律进行分析,建立的探头微量化平面电容的二维模型如图 6 所示。驱动电极和感应电极的长度设为 a ,两者之间的距离为 b ,电极上方为理想土壤,高度 H 为 60 mm,长度 L 为 $2a + b + 10$ mm,电极的下方设有基板,基板的厚度为两电极的中心距离,即 $a + b$,并

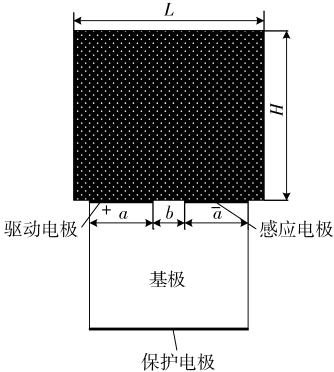


图 6 探头微量化平面电容二维模型

Fig. 6 Two-dimensional model of micro-scale planar capacitor

在其下面设有保护电极^[20]。加载激励源时保护电极和感应电极等电位,用于减少寄生电容的影响^[21]。

2 结果与讨论

2.1 传感器探头结构仿真与分析

二维模型建立后,在驱动电极上加载 5 V、100 MHz 的正弦波电压,感应电极和保护电极接地,电极的材质设定为铜,基极材质设为介电常数为 3.2 的 PVC,模型之外为真空,设定边界条件为 ballon。设定求解器为电场,求解参数为电场和电容,求解器余量误差控制在 10^{-5} 以内,采用自适应控制,两次迭代误差设定为 0.02%。通过改变铜环的尺寸 a 、 b 和土壤的介电常数 ε ,求得微量化平面电容周围电场分布情况,分析结果如下:

(1)保持土壤的介电常数($\varepsilon = 3.2$)恒定,通过改变铜环的尺寸 a ,求得微量化平面电容周围电场分布情况如图 7 所示。由图 7 可看出, a 从 5 mm 增大到 30 mm,对应的最大电场强度依次为 3.3695×10^3 、 2.5043×10^3 、 2.3626×10^3 、 2.2935×10^3 、 2.3126×10^3 、 2.3650×10^3 V/m。可见当 a 小于 20 mm 时,随着 a 增加,最大电场强度随着减小; $a = 20$ mm 时,最大电场强度最小;当 a 大于 20 mm 时,随着 a 继续增大,最大电场强度逐渐减小。由于相同电场能量情况下,电场强度的平方与相应电场所占面积成反比关系,所以在 $a = 20$ mm 时,最大电场强度最小,其对应的面积最大。从图 7 上也可直观看出,图 7d 中的电场分布区域最大,也就是探测范围最大。

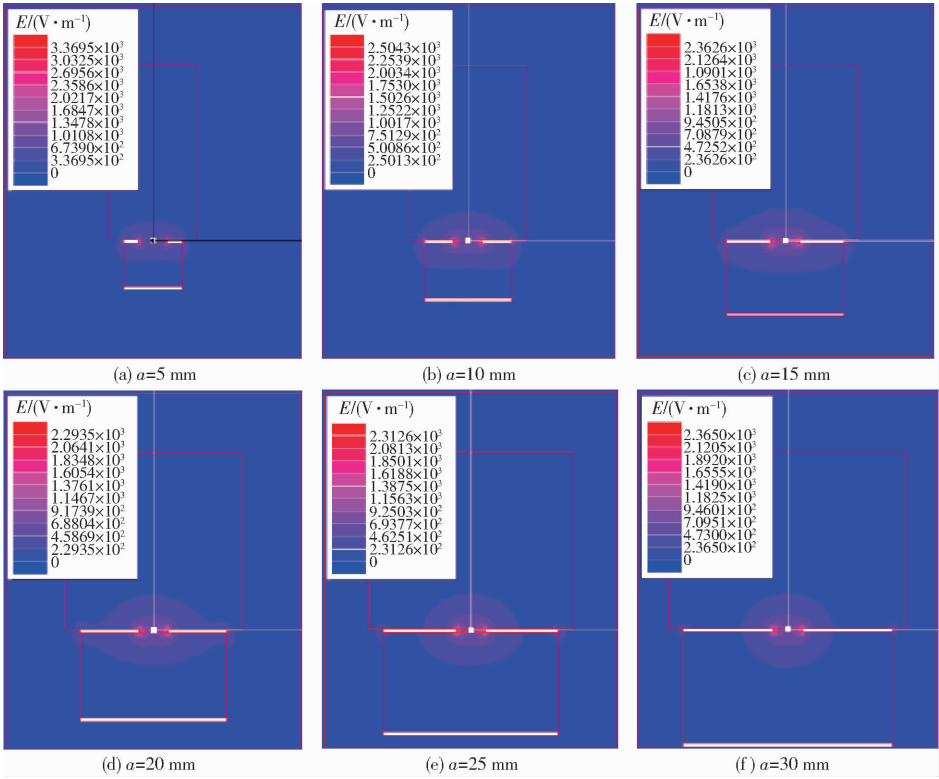


图 7 $b = 10$ mm 时探头微量化平面电容周围电场分布情况

Fig. 7 Electric field distributions around micro-scale planar capacitance with $b = 10$ mm

(2)保持土壤的介电常数($\varepsilon = 3.2$)恒定,通过改变铜环的尺寸 b ,求得微量化平面电容周围电场分布情况如图 8 所示。从图 8 中可以看出,当 b 小于 15 mm 时,随着 b 增加,最大电场强度减小;当 b 大于 15 mm 时,随着 b 继续增大,最大电场强度逐渐增大。同时,在 $b = 15$ mm 时,最大电场强度最小,其对应的面积最大。由图 8 也可以看出,图 8c 中的电场分布区域最大,也就是探测范围最大。

(3)保证铜环的尺寸不变,通过改变土壤的介电常数(相当于改变土壤含水率或土壤质地),求得微量化平面电容周围最大电场强度 E_m 和相应的探

测半径 R_t (探测半径为以 2 个铜环中点为中心,微量化平面电容周围电场最大范围处的值)的关系如图 9 所示。可以看出,在 a 与 b 固定的情况下,改变土壤介电常数,相应的最大电场强度 E_m 和相应的探测半径 R_t 变化较小,变化幅度均在 3% 以内,研究结果表明,探头的探测范围与土壤含水率及土壤质地无关,仅与探头结构有关。

(4)通过改变 a/b 和土壤介电常数 ε ,采用有限元计算方法得到圆环探头微量化平面电容的容值 C 如表 1 所示,可以看出,相同的 a/b 情况下,随着土壤介电常数 ε 的增加(土壤体积含水率的增加),微

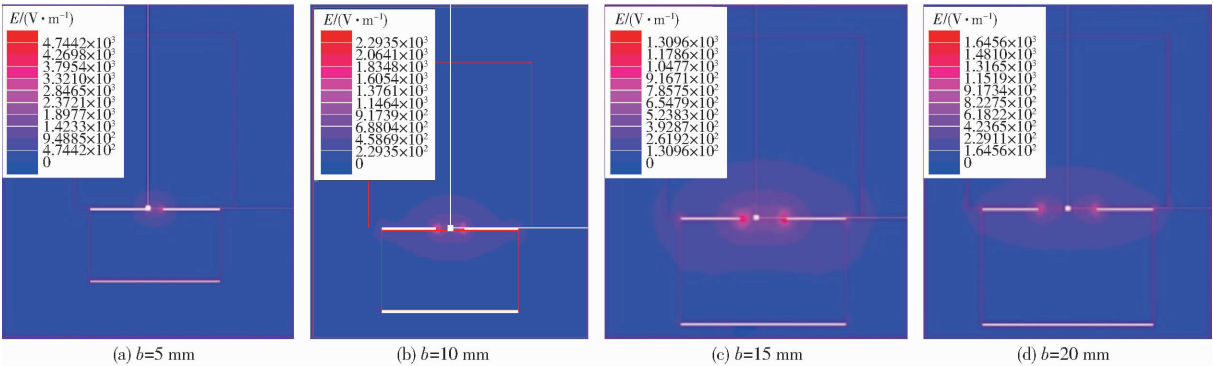


图 8 $a = 20\text{ mm}$ 时探头微量化平面电容周围电场分布情况

Fig. 8 Electric field distributions around micro-scale planar capacitance with $a = 20\text{ mm}$

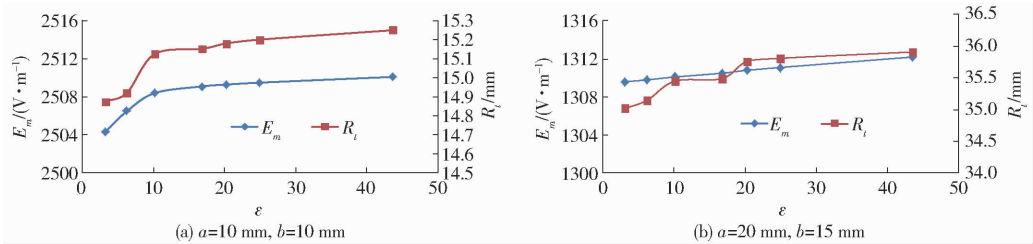


图 9 不同介电常数时的最大电场强度和探测半径

Fig. 9 Maximum electric field strength and radius of detection for different dielectric constants

量化平面电容的容值也逐渐增加;土壤介电常数 ε 不变,随着 a/b 增加,微量化平面电容的容值均呈增加趋势。

表 1 不同 a/b 和 ε 情况下探头微量化平面电容的容值

Tab.1 Capacity values of micro-scale planar capacitance of probe for different values of a/b and ε pF

a/b	ε						
	3.2	6.3	10.2	16.8	20.3	25	43.6
0.5	74.3	107.1	149.0	220.5	258.6	309.8	513.0
1.0	90.0	129.7	180.2	266.3	312.0	373.6	617.7
1.5	99.8	143.6	199.2	293.8	344.2	411.9	680.3
2.0	107.9	154.9	214.5	315.8	369.7	442.2	729.2
2.5	116.2	165.2	227.6	333.5	389.9	465.7	766.3
3.0	118.5	169.6	234.2	343.9	402.1	480.5	790.9

不同 a/b 情况下,对于相邻介电常数的土壤,探头所感知微量化平面电容的电容差 ΔC 如表 2 所示。随着 a/b 增大,相同的 a/b 情况下探头所感知的这 2 种土壤的微量化平面电容的电容差增大,也就是在土壤体积含水率不同的情况下,探头所感知的电容差将随 a/b 的增大而增大。由于传感器的灵敏度为输出的变化量与输入变化量之比,对于本文所设计的传感器探头,在感知不同含水率的土壤时,所表征的电容差越大,就表明该传感器的灵敏度越高。因而随着 a/b 的增大,传感器的灵敏度越高。

综合考虑微量化平面电容周围电场分布情况,在探头结构尺寸 a 为 20 mm 和 b 为 15 mm 时,传感

表 2 不同 a/b 情况下探头所感知微量化平面电容的电容差

Tab.2 Adjacent capacity differences of micro-scale planar capacitance of probe pF

a/b	$C_2 - C_1$	$C_3 - C_2$	$C_4 - C_3$	$C_5 - C_4$	$C_6 - C_5$	$C_7 - C_6$
0.5	32.8	41.9	71.5	38.1	51.2	32.8
1.0	39.7	50.5	86.1	45.7	61.6	39.7
1.5	43.8	55.6	94.6	50.4	67.7	43.8
2.0	47.0	59.6	101.3	53.9	72.5	47.0
2.5	49.0	62.4	105.9	56.4	75.8	49.0
3.0	51.1	64.6	109.7	58.2	78.4	51.1

器探头的探测范围最大,灵敏度最高,探头结构最佳,探头测量精度显著提高。

2.2 传感器性能试验

2.2.1 传感器的标定

标定是传感器设计过程中一个必要环节。为了克服寄生电容和振荡电路元器件参数的差异,传感器采用的定标方式不是采用传感器输出的绝对频率,而是采用振荡电路的相对频移指数 $\eta = \frac{F_A - F_S}{F_A - F_W}$,其中, F_A 、 F_W 、 F_S 分别为传感器探头在空气、水以及土壤中的输出频率。实验室环境下,采用小汤山国家精准农业示范基地农田标准土壤,通过过筛、干燥,按容重 1.35 g/cm^3 配制 8 种不同体积含水率的土样,然后均匀装入预先安装有传感器防护套的容器中,密封放置 48 h,直至水分充分平衡,试验装置如图 10 所示。标定时对每个土样测量 5 次,去除最大、最小值,然后取平均,对测量数据进行二

次曲线拟合。拟合方程如图 11 所示,决定系数 R^2 为 0.967。



图 10 传感器试验装置
Fig. 10 Sensor testing device

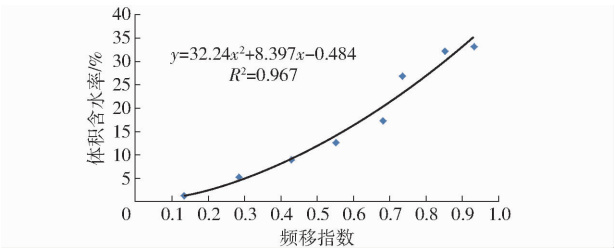


图 11 土壤剖面水分传感器标定结果
Fig. 11 Calibration results of sensor

2.2.2 传感器稳定性

在实验室,取容重为 1.35 g/cm^3 的土样,使用预先安装了传感器防护套的容器配制 4 种不同体积含水率的土壤样品,密封放置 48 h 待水分运动充分后,采用烘干法测量得出土样的实际含水率。然后随机抽取 1 个传感器探头,连续测量 10 h,并记录结果。在传感器测量过程中,土壤样品处于密封状态。图 12 为传感器探头稳定性试验结果,从试验数据可知,传感器的最大偏移量为 0.28%。试验说明传感器探头具有很高的稳定性。

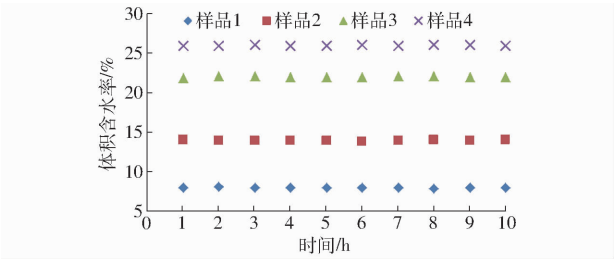


图 12 传感器探头稳定性试验结果

Fig. 12 Test results of sensor probe stability

2.2.3 传感器一致性

一致性是传感器的重要性能指标,良好的一致性 是土壤水分传感器标准化生产和可互换的前提。由于本文研究的传感器是由多个传感器探头组合而成,一致性就显得尤为重要。采用稳定性试验所用

的土壤样品,随机抽取 3 个传感器探头,对每个土壤样品测量 5 次,去除最大、最小值,然后取平均。表 3 为传感器探头一致性试验结果,从试验数据可知,传感器的最大偏移量为 1.57%,说明传感器探头具有良好的 一致性。

表 3 传感器探头土壤含水率试验结果
Tab.3 Test results of sensor probe consistency %

土壤样品序号	探头序号		
	1	2	3
1	8.05	7.76	8.28
2	14.03	13.58	13.07
3	21.96	21.18	22.16
4	26.80	25.23	25.76

2.2.4 传感器精度测试

在小汤山国家精准农业示范基地标准农田中,选取一块 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的地块,然后按照 $1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的面积进行分割,块与块之间没有水分交换,如图 13 所示。

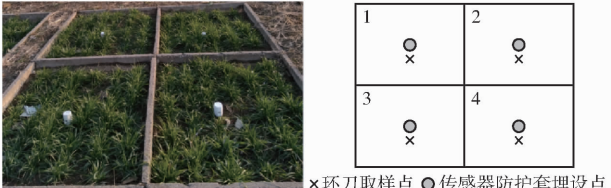


图 13 传感器埋设及取样点分布图

Fig. 13 Locations of sensors embedded and sampling points

在每块土壤的正中心埋设土壤剖面水分传感器防护套,保证防护套的外径与土壤充分接触,然后往每块地块中注入不等量的水,并用薄膜覆盖,防止水分快速蒸发,72 h 后进行试验。首先用环刀在距离防护套周围 5 cm、土层深度分别为 20 cm 和 40 cm 的地方取土样,然后用烘干法计算土壤体积含水率,然后,把土壤水分传感器探头放入防护套中测量土壤层深为 20 cm 和 40 cm 土壤含水率。以烘干法测得的土壤体积含水率为真值,传感器测得值为观测值,测量 5 次取平均值,均方差为 1.42%,计算结果见表 4。

3 结论

(1)在分析高频电磁边缘场效应原理的基础上,对传感器测量机理做了比较系统的推理分析,确定了传感器测量土壤水分的关键因素;通过传感器功能电路分析,设计了传感器探头硬件电路。

(2)为了提高传感器探头的灵敏性和探测范围,采用有限元分析方法,建立了探头微量化平面电容二维模型,通过分析探头微量化电容周围电场强度和电容的变化情况,综合考虑实际土壤水分测量

表 4 土壤剖面水分传感器与烘干法测量土壤体积含水率结果对比

Tab.4 Comparison of moisture results obtained by standard drying method and soil moisture profile sensor %									
测量方法	区域 1 土样/cm		区域 2 土样/cm		区域 3 土样/cm		区域 4 土样/cm		均方差
	20	40	20	40	20	40	20	40	
烘干法	7.56	8.69	15.68	17.32	23.72	25.48	28.26	29.38	
传感器	6.53	7.65	13.89	15.53	24.68	25.96	30.14	31.08	1.42

间距的需求,确定了探头设计尺寸的最优方案:探头铜环电极外径为 40 mm,内径为 38.4 mm,轴向长度为 20 mm,轴向间距为 15 mm 时,探头的灵敏性和探测范围最优。

(3)试验结果表明,本文研究的土壤剖面水分传感器测量精度为 ±1.42%,具有很高的稳定性和一致性。传感器探头可根据实际测量深度需要任意组合,满足不同作物根区深度的土壤水分测量需求。

参 考 文 献

1 罗锡文,臧英,周志艳.精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J].农业工程学报,2006,22(1):167-173.
LUO Xiwen,ZANG Ying,ZHOU Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167-173. (in Chinese)

2 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器研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):181-187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170323&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.023.
FENG Lei, YANG Weizhong, SHI Qinglan, et al. Soil moisture meter based on time domain transmission principle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):181-187. (in Chinese)

3 王晓雷,胡建东,江敏,等.附加电阻法快速测定土壤含水率的试验[J].农业工程学报,2009,25(10):76-81.
WANG Xiaolei, HU Jiandong, JIANG Min, et al. Experiment on fast-measurement of soil moisture based on additional resistance method[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(10):76-81. (in Chinese)

4 GASKIN G J, MILLER J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J].J. Agric. Engng Res. , 1996, 63(1):153-160.

5 RIAL W S, HAN Y J. Assessing soil water content using complex permittivity[J].Transactions of the ASAE, 2000, 43(6):1979-1985.

6 SUN Yurui,MA Daokun, LIN Jianhui,et al. An improved frequency domain technique for determining soil water content[J]. Pedosphere, 2005, 15(6):805-812.

7 DEAN T J, BELL J P, BATY A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part II: field techniques, evaluation and calibration [J]. Hydrology, 1987, 93(1):79-90.

8 SUN Yurui, MA Daokun, HE Quan, et al. Experimental study of sensor for real-time measurement of soil moisture profile[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(1):55-59.

9 FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Development about methods of soil hydraulic conductivity determination in fields[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2):114-119.

10 徐力刚,杨劲松,徐南军,等.农田土壤中水盐运移理论与模型的研究发展[J].干旱区研究,2004,21(3):254-258.
XU Ligang,YANG Jinsong,XU Nanjun, et al. Progress of the study on theories and models of water-salt transport in cultivated soil [J]. Arid Zone Research,2004,21(3):254-258. (in Chinese)

11 邓建才,蒋新,胡维平,等.田间土壤剖面中阿特拉津的迁移试验[J].农业工程学报,2008,24(3):77-81.
DENG Jiancai, JIANG Xin, HU Weiping, et al. Experimental investigation of atrazine transport in field soil profile [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3):77-81. (in Chinese)

12 高阳,段爱旺,刘战东,等.玉米/大豆间作条件下的作物根系生长及水分吸收[J].应用生态学报,2009,20(2):307-313.
GAO Yang, DUAN Aiwang, LIU Zhandong, et al. Crop root growth and water up take inmaize/soybean strip inter cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(2):307-313. (in Chinese)

13 胡建东,赵向阳,李振峰,等.参数调制探针式电容土壤水分传感技术研究[J].传感技术学报,2007,20(5):1057-1060.
HU Jiandong, ZHAO Xiangyang, LI Zhenfeng, et al. Technique considerations on the use of a probe capacitance sensor with parameter modulation for measuring soil moisture content[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2007,20(5):1057-1060. (in Chinese)

14 许景辉,马孝义, SALLY D L,等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):102-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.017.
XU Jinghui, MA Xiaoyi, SALLY D L, et al. Probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1):102-107. (in Chinese)

15 贺庆之,贺静.极板放在同一平面上的电容敏感器件的研制[J].仪器技术与传感器,2001(5):9-11.
HE Qingzhi,HE Jing. Development of capacitive sensor of the plates put on same plane[J]. Instrument Technique and Sensor, 2001(5):9-11. (in Chinese)

- www.j-csam.org/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no = 20120113&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.013.
- CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 63–67. (in Chinese)
- 26 井大伟,王明友,张红,等. 蚯蚓粪配施尿素对豇豆根系特征与根际土壤腐殖质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(1): 212–219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170128&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.028.
- JING Dawei, WANG Mingyou, ZHANG Hong, et al. Effects of vermicompost coapplied with urea on root characteristics and humus in rhizosphere soil of cowpea [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1): 212–219. (in Chinese)
- 27 徐丹,刘昌华,蔡太义,等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(12): 157–163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151222&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.022.
- XU Dan, LIU Changhua, CAI Taiyi, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 157–163. (in Chinese)
- 28 陈俊英,吴普特,张智韬,等. 土壤斥水性与有机质质量分数的变化关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2012,31(3): 96–98.
- CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. The relationship between WDPT and soil organic matter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012,31(3): 96–98. (in Chinese)
- 29 戴万宏,黄耀,武丽,等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):851–860.
- DAI Wanhong, HUANG Yao, WU Li, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in top-soil of zonal soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5):851–860. (in Chinese)
- 30 龚恩磊,王辉,胡传旺,等. 酸性溶液对红壤水分入渗特征影响及其模拟研究[J]. 水土保持学报, 2015,29(1): 48–51.
- GONG Enlei, WANG Hui, HU Chuanwang, et al. Simulation and influence of acid solutions on the hydraulic characteristics of red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 48–51. (in Chinese)
- 31 李自刚,岳晓禹,李长滨,等. 基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(2):300–304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170240&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.040.
- LI Zigang, YUE Xiaoyu, LI Changbin, et al. Near infrared spectral modeling analysis based on variable selection of compost hemic acid content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 300–304. (in Chinese)
- 32 曾宪勤,刘和平,路炳军,等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008,26(1): 65–70.
- ZENG Xianqin, LIU Heping, LU Bingjun, et al. Fractal dimension of soil particle size distribution characteristic in the Beijing mountains [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 65–70. (in Chinese)
- 33 DIEHL D. Cheminform abstract: soil water repellency: dynamics of heterogeneous surfaces [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2013, 432(38): 8–18.

(上接第 251 页)

- 16 贺庆之,贺静. 单一平面电容传感器原理与应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2001(5): 62–63,58.
- HE Qingzhi, HE Jing. The principle and application of a single planar capacitance sensor[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2001(5): 62–63,58. (in Chinese)
- 17 李建青,马争争,田旭. 非平行板电容器电容和电场的两种计算方法之讨论[J]. 大学物理,2008,27(8):21–23.
- LI Jianqing, MA Zhengzheng, TIAN Xu. Discussion on methods of two kinds for calculating capacitance and electric field of an unparallel-plate capacitor[J]. College Physics, 2008,27(8):21–23. (in Chinese)
- 18 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. 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.
- 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. (in Chinese)
- 19 刘国强,赵凌志,蒋继姬. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- 20 王海田. 电容器电场有限元方法研究[J]. 东方电气评论,2004,18(4):194–196.
- WANG Haitian. Research electric field of the capacitor with finite element method[J]. Dongfang Electric Review,2004, 18(4): 194–196. (in Chinese)
- 21 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.