

土壤剖面水分线性尺度测量方法

高志涛^{1,2} 田昊^{1,2} 赵燕东^{1,2}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

摘要: 针对现有土壤水分点尺度下测量的局限性,提出了一种线性尺度下的土壤剖面水分测量方法,并设计了一种基于驻波比法的土壤剖面水分信息测量传感系统。借助 HFSS 高频电磁场仿真软件与网络矢量分析仪对传感器环形探头的电场强度分布情况与阻抗特性进行了分析研究,确定了环形探头适应性与敏感区域。以 2 种不同质地的土壤作为试验样本,对土壤水分传感器的输出与对应的测量值进行了多项式拟合,决定系数均达到了 0.99 以上,传感器的稳态与动态性能均能满足土壤剖面水分的测量要求。通过多层水分土柱穿层试验与对比试验表明,该系统能够满足线性尺度下土壤剖面水分的实时测量需求,具有较高的测量精度与稳定性。设计的土壤剖面水分线性测量系统的各项指标均达到实际应用的需求,具有较高的应用推广价值。

关键词: 土壤水分; 线性尺度; 实时测量系统

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0257-08

Linear Scale Measurement Method for Soil Profile Moisture

GAO Zhitao^{1,2} TIAN Hao^{1,2} ZHAO Yandong^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Pointing at the main problems existing in the utilization of point scale in soil moisture measurement, a linear scale measurement method was put forward and a sensor system of soil profile moisture information measurement was designed based on standing wave ratio method. With the help of a high frequency electromagnetic field simulation software HFSS and vector network analyzer, electric field distribution and impedance characteristics of sensor ring probe were analyzed and studied to determine the adaptation and sensitive areas of the ring probe. Two kinds of soil in different textures were taken as experimental samples, the output and the corresponding measured value of soil moisture sensors were executed polynomial fitting, and the results showed that the determination coefficient was above 0.99 and the steady and dynamic performances of sensors could satisfy the requirement of soil profile moisture measurement. The experiments of multi-layer moisture through the soil column showed the system could meet the soil profile moisture real-time measurements demand in linear scale and it had high measurement precision and stability. Meanwhile, the system was satisfied with needs of practical application and it had high application promotion value.

Key words: soil moisture; linear scale; real-time measurement system

引言

土壤含水率对植物生长与农作物产量起到关键性作用^[1]。在水资源匮乏地区,实时检测植物根区水分的垂直分布状态,能为制定最优的灌溉策略提供基本的数据支持。

目前,常规的土壤剖面水分检测多采用介电型传感器分层埋设定点测量的方式^[2-3]。因埋入传感器的单点测量空间仅局限于立方分米数量级上^[4-7],所以在检测过程中,为获取土壤剖面水分的分布状况,往往需要埋设多个传感器。这种做法会增加测量系统成本且难以真实、有效地反映土壤剖

收稿日期: 2016-07-22 修回日期: 2016-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)、北京市科技计划项目(Z116100000916012)和北京市共建项目专项

作者简介: 高志涛(1989—),男,博士生,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: e228319@163.com

通信作者: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

面水分的分布状况。并且在传感器安装过程中对土壤环境的破坏与传感器发生故障后进行更换过程中引入的误差,对优化灌溉决策也是不能忽略的^[8-9]。

国内外相关学者基于频域反射法(FDR)设计了一种非接触式的土壤水分传感器^[10-12],比较典型的产品有澳大利亚 Sentek 公司的 Diviner 2000 型土壤水分廓线仪。因其采用非接触测量技术且测量过程中只使用一个检测探头,所以该系统在一定程度上减小了安装与更换引入误差。但是它在检测过程中需要手动测量,且采样间距过长(10 cm),所以它并不适合高精度的土壤剖面水分实时线性测量。

基于对常规土壤水分测量方法^[13-19]的比较,本文探讨采用驻波法(SWR)测量土壤剖面水分的可行性,通过对传感器探头结构的分析设计,降低传感器的采样步长,设计一种可在土壤内自动垂直移动扫描的土壤剖面水分测量系统。

1 系统简述

设计的测量系统总体结构如图 1 所示,主要由水分传感器探头、步进电动机、绕线导轮、导电滑环、拉线位移传感器、PVC 管与数据采集器等组成。

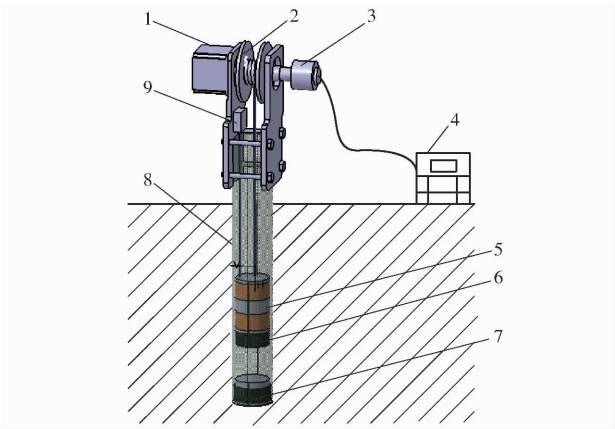


图 1 测量系统总体结构图

Fig. 1 Configuration of measurement system

- 1. 步进电动机 2. 绕线导轮 3. 导电滑环 4. 数据采集器
- 5. 水分传感器 6. 配重块 7. 防水堵头 8. PVC 套筒探头
- 9. 拉线位移传感器

为实现水分传感器探头在土壤中进行线性扫描测量,首先需要利用专用工具将一段 PVC 套管(管长 170 cm、外径 5.6 cm、壁厚 0.2 cm)插入土壤中,根据农作物的种类与根系特点,调整 PVC 套管长度决定插入深度。土壤水分传感器探头通过线缆牵引至 PVC 管体内,让其在步进电动机牵引下做垂直向上移动,移动的同时传感器根据采样步长检测探头周围土体的体积含水率。采集完成后,水分传感器探头在配重块的重力作用下配合步进电动机将传感器移动至 PVC 管底初始点。为保证对传感器探头

的供电与数据传输,绕线导轮内部采用中空结构与外部的导电滑环连接,导电滑环的引出线缆与采集器连接,进而对水分传感器探头进行控制而实现数据采集。为提高传感器的定位精度,传感器探头在 PVC 管中的实时位置通过拉线位移传感器进行测量。

2 传感器结构与测量原理

土壤由水、空气、土壤固体三态组成,属于典型的多孔介质^[20]。其中水的相对介电常数(81)远远大于空气(1)与土壤固体(3~5)的介电常数。所以当土壤含水率发生变化后,会导致土壤介电常数的变化。因此通过测量土壤介电常数就可间接测量出土壤含水率。

土壤水分传感器探头采用双铜环电极结构,其主要由铜环电极(外径 5 cm、厚 0.1 cm、高 1.5 cm)、PVC 壳体、配重块、防水堵头、连接线缆与检测电路组成,实物如图 2 所示。采样过程中高频信号发生器产生 100 MHz 的正弦信号经由 1/4 波长的同轴传输线传输至环形电极。环形电极释放的电磁波穿过 PVC 管体进入土壤,并在环形电极间形成一个曲面场,感应 PVC 管体周围土体含水率的变化。

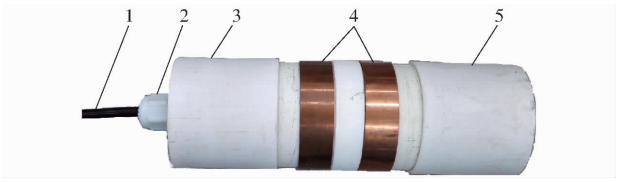


图 2 传感器实物图

Fig. 2 Soil moisture sensor

- 1. 牵引线缆 2. 防水端子 3. PVC 壳体 4. 环形电极 5. 配重块

可以认为水分传感器环形电极与周围填充介质组成一个电容器,2 个环形电极相当于电容器的 2 个极板,当曲面场区域内土壤含水率发生变化时(即电容填充介质的介电常数发生变化),会引起探头阻抗的变化。

环形探头的阻抗特性与探头间填充介质的介电常数有关,即

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_s} = \frac{1}{j\omega(g\varepsilon_r\varepsilon_0)}$$
 (1)

- 式中 Z_p ——探头的阻抗
- ω ——传感器的测试角频率
- C_s ——探头感应电容
- g ——与形状尺寸有关的常数
- ε_r ——探头周围填充介质的介电常数
- ε_0 ——真空中的介电常数

本文采用驻波比法^[21-22],利用水分变化导致传输线与探头阻抗不匹配产生的驻波,通过检测传输

线两端驻波引起的电压差来获取传感器探头阻抗,进一步计算土壤体积含水率的变化。

根据传输线理论^[23]可求得传感器探头阻抗,即

$$\Delta U = 2A \frac{Z_p - Z_l}{Z_p + Z_l} \quad (2)$$

式中 ΔU ——传输线两端电势差
 A ——高频信号发生器的振荡幅值
 Z_l ——传输线阻抗

因为土壤的介电常数 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ 是一个复合变量,根据目前的研究结果,当测试频率足够大(大于 30 MHz)、土壤浸出液电导率很低的情况下,可以忽略介电常数虚部 ϵ'' 对土壤介电常数的影响^[24]。

3 测量与控制单元

系统框图如图 3 所示,主要包括土壤水分检测单元与数据采集控制主板。土壤水分检测单元中,2 个检波芯片同时检测传输线两端电压并传输给差分运算放大器,差分运算放大器对输入信号进行减法操作,并将获得的电压信号进行放大。为保证数据传输的稳定性,电压电流转换单元将输入的电压信号转换成标准的 4~20 mA 电流信号进行传输。

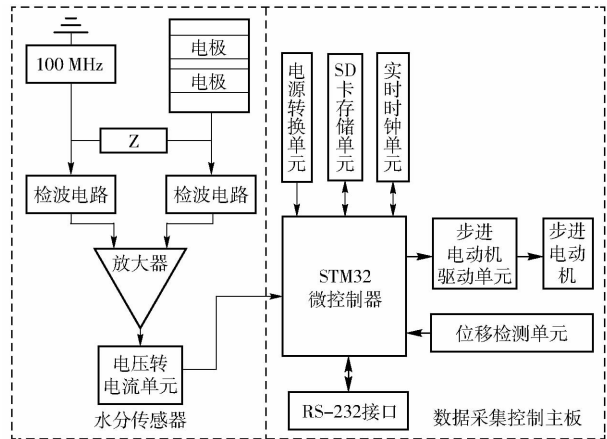


图 3 系统原理框图

数据采集控制主板由主控制器、电压转电流单元、电源转换单元、SD 卡存储单元、实时时钟单元、步进电动机驱动单元与 RS-232 接口等部分组成。系统以意法半导体公司生产的 STM32F103RBT6 型单片机作为主控制器,实时时钟单元根据设定的时间定时唤醒单片机进行土壤水分采集工作。步进电动机驱动单元在单片机 PWM 脉冲的控制下驱动步进电动机拖动传感器移动测量。系统运行过程中,传感器探头以 5 cm 步长行进,步间停 200 ms,此时单片机对传感器输出的信号进行连续 10 次的 AD 采样,将采集到的数据取平均值后存入 SD 卡存储单元中,同时存入的信息还包括传感器的位置信息

与时间信息,其中时间信息通过读取实时时钟单元获得,位置信息通过线性位移传感器获得。

4 高频激励下土壤水分传感器环形探头的性能分析

4.1 环形探头工作环境下的电场强度分布状况

传感器探头周围环境的电场强度分布情况反映的是传感器敏感区域的分布状况,是传感器空间测量范围的一个重要依据。本文利用 HFSS 高频电磁场仿真软件建立传感器探头的物理模型,按照真实情况模拟传感器的工作环境对传感器工作时的电场强度分布状况进行仿真分析。模型采用集总端口的激励方式,激励频率为 100 MHz,PVC 管体与 PVC 壳体的介电常数为 4,铜环电极材质设置成黄铜,PVC 管体内的填充介质为空气,其介电常数为 1,设定直径为 12 cm、高 13 cm 的圆柱形测试土体包围 PVC 管体,其介电常数设置为 21(对应土壤体积含水率为 36%)。仿真结果如图 4 所示。

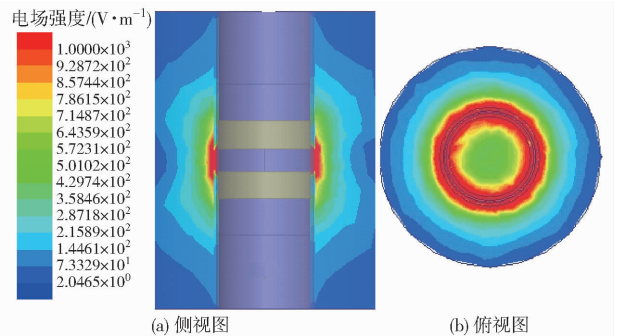


图 4 环形探头电场分布侧视图与俯视图

Fig. 4 Lateral view and plan view of electrical field distribution of a ring probe

由图 4 可以看出,铜环电极在高频激励下产生的电场能够穿过 PVC 管体,并在土壤中形成一个曲面场,并且电场在环形电极两端分布均匀,并没有出现分离现象。所以该探头能够满足土壤水分测量的要求。值得注意的是由于 PVC 管体对电场强度的衰减作用,探头内的电场强度要高于土壤中的电场强度。为减小电磁干扰对管内电路的影响,本文对传感器内部的检测电路进行金属外壳屏蔽。

4.2 土壤体积含水率对探头阻抗特性的影响

为分析本文所设计的环形探头在实际土壤测量中的阻抗特性,利用网络矢量分析仪(天津德力电子仪器公司 NA7300 型、50 Ω、扫描频率 300 kHz~3 000 MHz、频率分辨率为 10 Hz)分别获取环形探头在 100 MHz 频率下的阻抗。测量方法采用反射法,试验环境温度为 20℃。试验土样为 2 种不同质地的土壤:粘壤土与砂土,其成分构成如表 1 所示。土壤从田间取回后首先自然风干过筛(孔径 0.4 mm),

然后利用干燥箱(105℃、24 h)干燥。计算不同梯度含水率土壤所需水分,按照 1.6 g/cm³的土壤容重均匀装入 7 个高 20 cm、直径 30 cm,中心固定有高 20 cm、直径 5.6 cm 的 PVC 管的 PVC 测试桶中。使用保鲜膜密封静置 48 h,使水分充分运移。利用体积为 100 cm³的环刀取土,每个测试桶取 4 个土样,干燥后取平均值,最后测得粘壤土 7 个梯度的含水率分别为 2.1%、9.5%、14.2%、21.5%、26.0%、31.0%与 39.5%(饱和)。砂土 7 个梯度的含水率分别为 2.0%、8.2%、14.3%、18.6%、22.5%、26.3%与 30.0%(饱和)。测试环境如图 5 所示。

表 1 试验土壤的成分构成

Tab.1 Textural composition of soil samples %

土壤类型	成分构成		
	砂粒	粉粒	粘粒
粘壤土	11	71	18
砂土	92	3	5

试验土壤制备完成后,使用 SMA 连接头将矢量网络分析仪测试电缆与环形探头相连,矢量网络分



图 5 环形探头阻抗测试图

Fig.5 Diagram of ring probe impedance test

1. PVC 测试管 2. 环形探头 3. PVC 测试桶 4. 网络矢量分析仪 5. 同轴线缆

析仪开机 1 h 后利用开路、短路与 50 Ω 负载校准件进行校准,然后将环形探头置于 PVC 测试管中进行阻抗的测量,针对 2 种类型的试验土壤,本文在 100 MHz 测试频率下检测环形探头的阻抗特性随土壤含水率的变化情况。最终获取 14 组数据,对试验结果进行多项式拟合,结果如图 6 所示。

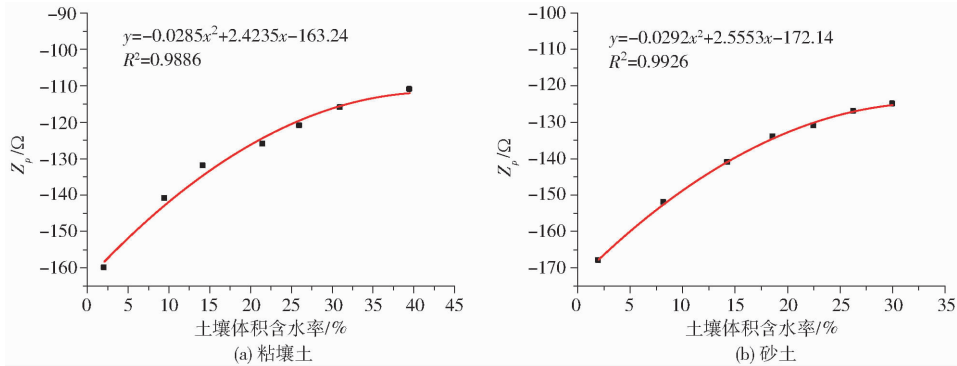


图 6 土壤含水率对环形探头阻抗的影响

Fig.6 Influence of soil moisture content on ring probe impedance

由图 6 可以看出,在砂土与粘壤土 2 种土质中,水分传感器探头的阻抗均随着土壤体积含水率的增加而单调增加,并没有出现容性与感性的相互转换。从多项式拟合结果可以看出,在粘壤土与砂土中其决定系数(R^2)均大于 0.98,因此该传感器探头能够满足对粘壤土与砂土含水率测量要求。

4.3 环形探头敏感区域分析研究

高频激励下的探头敏感特性能够直接表征传感器在实际工作土壤中的测量范围,是线性测量中所关注的重要指标,同时也是决定传感器移动过程中采样步长的重要依据。本文借助 1 台网络矢量分析仪,以 4.2 节配置的试验土壤为对象,由低到高选取 3 个梯度含水率的试验土壤,选取的粘壤土含水率为 9.5%、14.2%、21.5%,选取的砂土含水率为 8.2%、14.3%、18.6%。依次测量传感器探头在不同质地与含水率情况下的敏感特性,试验方法如下:

将本文设计的土壤水分探头连接在网络分析仪上,并置于 PVC 管体中,探头中心区域距离土体上表面 10 cm,以 1 cm 为步长将传感器探头向上拖动,记录 100 MHz 激励下每个步长对应的阻抗。在 2 种土壤中的试验结果如图 7、8 所示。

由图 7、8 可以看出,传感器在粘壤土与砂土 2 种土壤中,其探头的阻抗在 -2.5 ~ 2.5 cm 范围内随着距离的增加单调减小,传感器的测量范围为 0 ~ 5 cm,所以传感器在线性移动测量过程中,其采样步长应设置为 5 cm,以实现土壤剖面的线性扫描测量。

5 试验

5.1 土壤水分传感器性能分析试验

5.1.1 土壤水分传感器灵敏性试验及标定方法

传感器灵敏性表征的是当检测区域土壤水分发

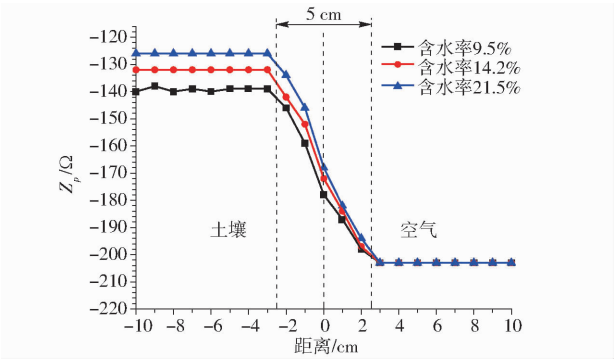


图 7 传感器在粘壤土中敏感区域的试验结果
Fig. 7 Experimental results of sensor located in sensitive area of clay loam

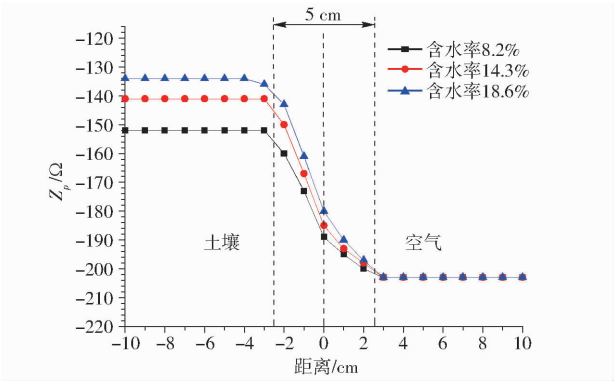


图 8 传感器在砂土中敏感区域的试验结果
Fig. 8 Experimental results of sensor located in sensitive area of sandy soil

生变化时传感器输出值的变化范围,是传感器性能的重要指标。选取砂土与粘壤土 2 种不同质地的土壤作为试验土壤,依据 4.2 节的方法对 2 种土壤进行处理,依次配置成水分梯度从风干到饱和和含水率的测试土壤。粘壤土 10 个梯度含水率分别为 2.1%、8.5%、13.2%、15.8%、19.5%、24.5%、28.5%、32.0%、35.6% 与 40.5% (饱和)。砂土的 10 个梯度含水率分别为 2.5%、7.2%、12.3%、14.3%、18.9%、20.3%、23.5%、25.3%、27.5% 与 29.0% (饱和)。用采集器将传感器输出的电流信号转换成电压信号,每种土样测量 3 次,对测量结果取平均值,采用十折交叉验证的方法依次选取 1 个梯度的水分作为验证集,其余 9 个梯度作为校正集对数据进行多项式回归,结果如表 2 所示。

对粘壤土与砂土拟合模型系数进行均值处理得出粘壤土的多项式拟合模型为 $y = -0.280\ 87x^2 + 32.130\ 1x + 141.623$,砂土的多项式拟合模型为 $y = -0.284\ 09x^2 + 27.685\ 4x + 106.637\ 2$ 。将实际测量的数据与模型进行相关性分析,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,传感器的输出电压均随着土壤体积含水率的增加而单调增加,传感器在砂土与粘壤土 2 种土壤中都具有良好的相关性,其决定系数 R^2 分别达到 0.997 4 (粘壤土)与 0.991 7 (砂土),均方根误差 RMSE 分别达到 12.257 mV (粘壤土)与

表 2 十折交叉验证

Tab. 2 10-fold cross-validation				
验证集	土壤类型	回归模型 (粘壤土)	绝对误差/mV	模型决定系数 R^2
第 1 梯度	粘壤土	$y = -0.271\ 1x^2 + 31.585x + 147.39$	-7.522 95	0.995 4
	砂土	$y = -0.123\ 5x^2 + 20.698x + 162.96$	-63.933 10	0.991 6
第 2 梯度	粘壤土	$y = -0.280\ 5x^2 + 32.041x + 143.09$	-6.172 37	0.996 9
	砂土	$y = -0.307\ 7x^2 + 28.453x + 87.095$	23.994 57	0.992 5
第 3 梯度	粘壤土	$y = -0.279\ 8x^2 + 32.102x + 140.21$	4.795 95	0.997 3
	砂土	$y = -0.274\ 8x^2 + 27.179x + 97.497$	19.775 79	0.993 0
第 4 梯度	粘壤土	$y = -0.280\ 5x^2 + 32.112x + 140.75$	1.904 42	0.997 3
	砂土	$y = -0.302\ 3x^2 + 27.913x + 97.09$	0.571 42	0.991 8
第 5 梯度	粘壤土	$y = -0.262\ 5x^2 + 32.561x + 138.52$	-138.520 00	0.998 2
	砂土	$y = -0.338\ 2x^2 + 29.098x + 92.1$	-143.600 00	0.993 4
第 6 梯度	粘壤土	$y = -0.290\ 7x^2 + 31.585x + 147.39$	3.270 17	0.997 4
	砂土	$y = -0.298\ 6x^2 + 27.776x + 97.774$	3.423 27	0.991 9
第 7 梯度	粘壤土	$y = -0.287\ 1x^2 + 32.431x + 138.96$	-10.046 50	0.997 4
	砂土	$y = -0.319\ 1x^2 + 28.691x + 92.827$	-30.842 50	0.995 2
第 8 梯度	粘壤土	$y = -0.286\ 1x^2 + 32.531x + 137.77$	-25.795 60	0.998 2
	砂土	$y = -0.306x^2 + 27.902x + 97.57$	12.376 94	0.991 7
第 9 梯度	粘壤土	$y = -0.291\ 7x^2 + 32.300x + 140.86$	28.948 91	0.998 2
	砂土	$y = -0.310\ 81x^2 + 28.109x + 96.407$	5.645 56	0.990 9
第 10 梯度	粘壤土	$y = -0.278\ 7x^2 + 32.053x + 141.29$	-2.298 82	0.996 8
	砂土	$y = -0.335\ 6x^2 + 28.763x + 93.552$	14.560 60	0.991 0

19.024 mV (砂土)。由此可以说明粘壤土与砂土的多项式拟合模型与传感器的输出特性能够满足测量要求,但是需要注意的是,土壤质地对传感器的输出

具有一定影响,所以在实际应用中需要用实际测量土壤依照以上标定方法对传感器进行标定后再进行测量。

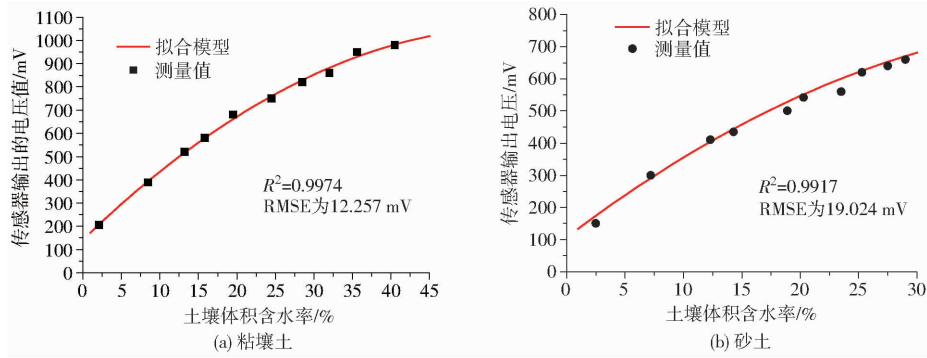


图9 模型验证结果

Fig.9 Results of model validation

5.1.2 传感器精度标定试验结果分析

选取粘壤性土壤样本 6 份,依据 4.2 节方法对土壤样本进行处理,配置成 6 个含水率梯度。通过干燥法测量 6 个梯度含水率分别为 6.5%、12.4%、16.8%、21.6%、26.8% 与 35.6%。将本文设计的传感器插入土壤样本中进行测量,每种样本测量 3 次,取平均值作为此次传感器的测量结果。传感器的测量结果与干燥法所得的实际含水率对比如图 10 所示。

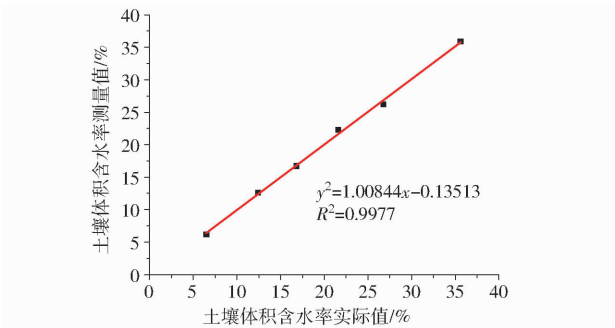


图10 传感器的测量结果与实际体积含水率比较

Fig.10 Comparison of volumetric soil water content between sensor results and actual values

由图 10 可以看出,传感器所测量的含水率与干燥法测量结果基本吻合,其决定系数 R^2 达到 0.997 7,均方根误差 RMSE 为 0.224 2 cm^3/cm^3 ,说明传感器具有较高的测量精度。

5.1.3 传感器动态响应性能试验

作为传感器线性移动测量所关注的重要指标,动态响应性能主要表现为当传感器检测区域土壤水分发生变化时,传感器完全响应所需要的时间,其决定了传感器测量停留时间。试验设备为中间固定 PVC 管的测试筒。将传感器置于 PVC 管体中,测试筒中加满水,使用示波器捕获传感器从通电到输出稳定及输出电压恒定不变所需要的时间为 53 ms,试验结果如图 11 所示。传感器在进行移动测量时其在每个测试点应至少停留 53 ms,才能保证数据的真实性。

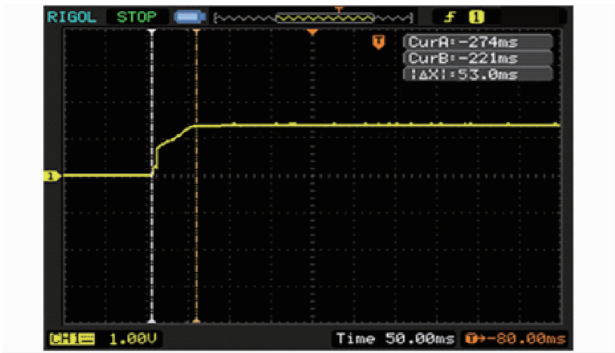


图11 传感器动态响应性能试验结果

Fig.11 Dynamic response result of moisture sensor

5.2 多层水分土壤穿层试验分析

5.2.1 对比试验与结果分析

为分析本文设计的土壤剖面水分实时检测系统与国外同类土壤水分线性测量产品性能的差距,本文设计了性能对比试验。对比产品为澳大利亚 Sentenk 公司的 Diviner 2000 型便携式土壤水分速测仪,其土壤层间测量间隔为 10 cm,测量精度为 $\pm 1\%$ 。

试验土壤为粘壤土,按照 4.2 节的试验步骤配置成体积含水率为 5.5%、15.5% 与 30.4% 3 个梯度的土壤样品。将配置好的 3 种土壤样品依次装入高 35 cm、直径 30 cm,中心固定有高 60 cm、直径 5.6 cm PVC 管的 PVC 测试桶中,分层等体积压实,层间用 1.5 mm 厚的 PVC 圆板隔断,以防止层间水分交互,静置 48 h。装入的每层土壤高度为 10 cm,最终试验土柱由 3 个水分层构成。分别利用 Diviner 2000 型便携式土壤水分速测仪与本文设计的土壤剖面水分实时检测系统对 3 层土壤样本进行扫描测量,其中采样间隔为 30 min,采样步长为 10 cm。以土体上表面作为参考原点,最终获得 12 h 的测量结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出,对比的 2 种设备均能精确地测量 3 层土壤中的含水率,与干燥后的含水率比较,自制系统的体积含水率的绝对误差为 $-0.4\% \sim$

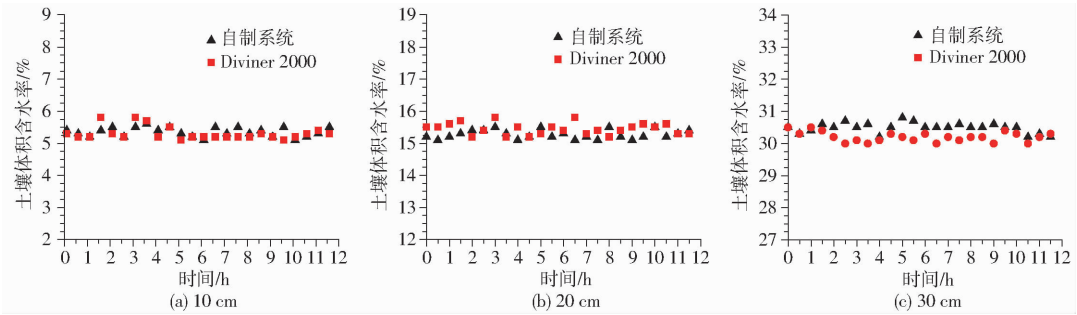


图 12 传感器对比试验结果
Fig. 12 Contrast results of moisture sensor

0.4% ,Diviner 2000 型便携式土壤水分速测仪的绝对误差范围为 $-0.3\% \sim 0.5\%$ 。2 种被测设备的绝对误差小于 1% 。试验结果表明,2 种传感器在此测试条件下性能相当。

5.2.2 系统稳定性与敏感性试验分析

为进一步验证土壤剖面水分线性测量系统在实际应用中的运行稳定性与敏感性。本文模拟系统在野外工作环境设计了 5 cm 分辨尺度下的多层水分土柱穿层试验。试验现场环境如图 13 所示。试验土壤为粘壤土,依据 4.2 节所示方法配置成体积含水率为 3.5%、6.0%、10.3%、17.9%、25.2% 与 30.5% 6 个梯度的土壤样本。依据 5.2.1 节方法将配置成的土样装入容器中,装入的每层土壤高度为 5 cm,最终试验土柱由 6 个水分层构成。将本文设计的线性测量系统安装到 PVC 测试管上,通过串口设置水分传感器的检测范围,使传感器能够在 6 层土壤样本中扫描测量,设定设备采样间隔为 30 min,采样步长为 5 cm。以土体上表面作为参考原点,最终获得 12 h 试验结果如图 14 所示。

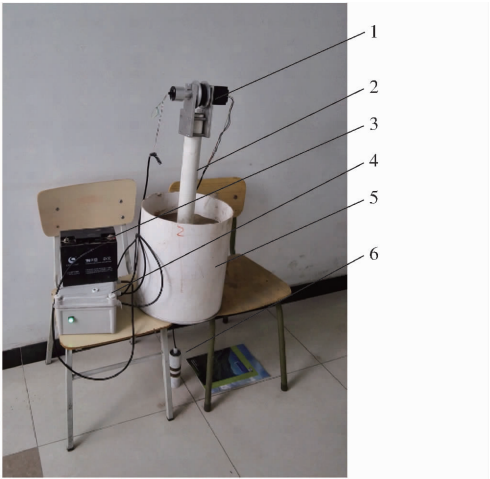


图 13 多层水分土柱穿层试验现场
Fig. 13 Experiment site of multi-layer moisture through soil column

1. 线性剖面传感器机械传动结构 2. PVC 测试管 3. 12 V 铅酸
电池 4. 采集器 5. 装有土壤样本的 PVC 筒 6. 土壤水分传感器

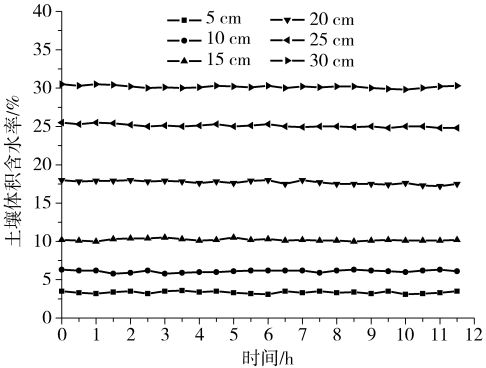


图 14 多层水分土柱穿层试验结果
Fig. 14 Experiment result of multi-layer moisture through soil column

由图 14 可以看出,该系统能够精确测量 0 ~ 5 cm 范围内的层间土壤水分的阶梯变化,其绝对误差范围为 $-0.5\% \sim 0.7\%$ 。且长时间的稳定运行并没有出现测量水分数值的较大偏移,此结果说明传感器在移动测量过程中不存在位移测量的累计误差。因此说明传感器能够有效检测传感器中心纵向区域内 0 ~ 5 cm 范围内的土壤水分变化,该现象也进一步验证了 4.3 节的试验结果。因此该系统能够满足线性尺度下土壤剖面水分的实时测量需求,且具有较高的测量精度与稳定性。

6 结论

(1)提出了一种线性尺度下的土壤剖面水分测量方法,并设计了一种基于驻波比法的土壤剖面水分实时检测系统,为实时获取土壤剖面水分垂直分布,指导精准农业灌溉奠定了基础。

(2)针对传感器的环形探头的电场强度分布与阻抗特性进行了深入研究,利用 HFSS 高频电磁场仿真软件对环形探头的仿真分析得出,本文设计的环形探头的电场强度分布均匀,能够满足传感器的设计要求。进一步借助网络矢量分析仪,在砂土与粘壤土 2 种土壤中对环形探头的阻抗特性与敏感区域进行了分析,确定了该系统的采样步长为 5 cm。

(3)设计了传感器的性能分析试验,从试验结果

可以看出土壤水分传感器的敏感度与动态响应性能均能够满足线性尺度下土壤剖面含水率测量的要求。

所设计的土壤剖面水分实时检测系统能够满足线性尺度下的土壤剖面水分的实时测量需求,具有较高的测量精度与稳定性。

(4)系统的多层水分土柱穿层试验表明,本文

参 考 文 献

- 1 李连骏,孙宇瑞,林剑辉.一种太阳能供电的土壤水分无线传感器[J].江苏大学学报:自然科学版,2009,30(6):541-544.
LI Lianjun, SUN Yurui, LIN Jianhui. A wireless-sensor for soil water content powered by solar energy[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(6): 541-544. (in Chinese)
- 2 赵燕东,马扬飞,王勇志.绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析[J/OL].农业机械学报,2012,43(3):46-50.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120309&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.009.
ZHAO Yandong, MA Yangfei, WANG Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation amount[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):46-50. (in Chinese)
- 3 赵燕东,王一鸣.智能化土壤水分分布速测系统[J].农业机械学报,2005,36(2):76-78.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Intelligent system of measuring the spatial distributions of soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(2):76-78. (in Chinese)
- 4 GAO Xiaodong, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Estimating the spatial means and variability of root-zone soil moisture in gullies using measurements from nearby uplands[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476(1): 28-41.
- 5 FERNÁNDEZ-GÁLVEZ J, SIMMONDS L P. Monitoring and modeling the three-dimensional flow of water under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(3): 197-208.
- 6 STEVEN R, ROBERT C, JOAQUIN J, et al. Soil water sensing for water balance, ET and WUE[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2):1-9.
- 7 ORTUANI B, BENEDETTO A, GIUDICI M, et al. A Non-invasive approach to monitor variability of soil water content with electromagnetic methods[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 7(19): 446-455.
- 8 吴涛,张荣标,冯友兵.土壤水分含量测定方法研究[J].农机化研究,2007,29(12):213-217.
WU Tao, ZHANG Rongbiao, FENG Youbing. Research in measuring method of soil water content[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12):213-217. (in Chinese)
- 9 JESUS F G. Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(3):197-208.
- 10 高志涛,刘卫平,赵燕东,等.多层土壤剖面复合传感器设计与性能分析[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):108-117.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160115&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.015.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong, et al. Design and performance analysis of a multilayer composite sensor for soil profile[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):108-117. (in Chinese)
- 11 DEAN T J, BELL J P, BATY A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. sensor design and performance[J]. Journal of Hydrology, 1987, 93(1-2): 67-78.
- 12 PALTINEANU I C, STARR J L. Real-time soil water dynamics using multi sensor capacitance probes: laboratory calibration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(6):1576-1585.
- 13 KANG S, ZHANG J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2437-2446.
- 14 HUTTON R J, LOVEYS B R. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus—effects on water use efficiency and fruit characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10):1485-1496.
- 15 HEDLEY C B, YULE I J. A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(12): 1737-1745.
- 16 THOMPSON R B, GALLARDO M, VALDEZ L C, et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88(1-3):147-158.
- 17 赵燕东,聂铭君.双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J].农业机械学报,2011,42(11):39-43.
ZHAO Yandong, NIE Mingjun. Optimal analysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):39-43. (in Chinese)
- 18 张学礼,胡振琪,初士立.土壤含水量测定方法研究进展[J].土壤通报,2005,36(1):118-121.
ZHANG Xueli, HU Zhenqi, CHU Shili. Methods for measuring soil water content: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 118-121. (in Chinese)
- 19 蔡坤,岳学军,洪添胜,等.基于RC网络相频特性的土壤含水率传感器设计[J].农业工程学报,2013,29(7):36-43.
CAI Kun, YUE Xuejun, HONG Tiansheng, et al. Design of soil water content sensor based on phase-frequency characteristics of RC networks[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 36-43. (in Chinese)
- 20 HILHORST M A. Dielectric characterization of soil[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1998.
- 21 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J].农业机械学报,2002,33(4):109-111,121.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4):109-111,121. (in Chinese)
- 22 TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resource Research, 1980, 16(3): 574-582.
- 23 范寿康,卢春兰,李平辉.微波技术与微波电路[M].北京:机械工业出版社,2003.
- 24 MA Daokun, SUN Yurui, WANG Maohua, et al. Three-dimensional numerical modeling of a four-pin probe for soil water content[J]. Australian Journal of Soil Research, 2006, 44(2):183-189.