

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.022

基于相位检测的高盐碱与高有机土壤水分传感器研究*

赵燕东^{1,2} 高超^{1,2} 刘卫平^{1,2} 王勇志^{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: 为解决高盐碱土壤与高有机土壤水分实时检测难题, 研究了一种基于相位检测的时域传输(TDT)型土壤水分检测方法, 并对传感器的探头结构、测量频率进行了分析。通过试验分析可知: 当探针直径为 2 mm、两针间距为 10 mm、针长 120 mm、测量频率为 100 MHz 时, 在砂壤土、粘壤土、盐碱土、高有机土中的测量误差分别为 $\pm 0.87\%$ 、 $\pm 0.95\%$ 、 $\pm 2.20\%$ 、 $\pm 1.94\%$, 动态响应时间约为 4ms 左右, 测量性能较好, 满足实际测量需要。通过与国外设备 TRIME (TDR) 及国产设备 BD-III 型土壤水分传感器的对比研究, 得出测量频率 100 MHz 时的 TDT 型土壤水分传感器能够满足高盐碱土壤、高有机土壤水分实时检测的要求, 具有良好的动态性能和稳定性, 且技术难度较小、成本低, 有着很好的研究和应用前景。

关键词: 土壤水分 相位检测 传感器 时域传输 高盐碱土壤 高有机土壤

中图分类号: TP212; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0151-08

Study of Moisture Sensor for High Saline-alkali Soil and High Organic Soil Based on Phase Detection

Zhao Yandong^{1,2} Gao Chao^{1,2} Liu Weiping^{1,2} Wang Yongzhi^{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: To solve the problem of moisture real-time detection in high saline-alkali soil and high organic soil, this paper used time domain transmission (TDT) method to detect soil moisture based on phase detection. The probe of sensor structure and measuring frequency were analyzed in detail. The experiments showed that when the probes were 2 mm in diameter, 10 mm in interval, 120 mm in length and the frequency was 100 MHz, the measured performance was good to meet the demands of actual measurement. The measurement error of TDT soil moisture sensor in sandy loam, clay loam, saline-alkali soil and high organic soil were $\pm 0.87\%$, $\pm 0.95\%$, $\pm 2.20\%$ and $\pm 1.94\%$ respectively, and the dynamic response time of TDT soil moisture sensor was about 4 ms. The comparative analysis between foreign equipment TRIME (TDR) and domestic equipment BD-III type soil moisture sensor showed that TDT soil moisture sensor of 100 MHz could meet the requirements for detecting high saline-alkali soil and high organic soil moisture in real-time. In addition, this device has good dynamic performance and stability with less technical difficulty and low cost but for good research and application prospects.

Key words: Soil moisture Phase detection Sensor Time domain transmission High saline-alkali soil High organic soil

引言

土壤含水率既是研究农业及林业作物干旱的重

要指标,也是农林灌溉管理、区域水文条件研究和流域水分平衡计算的重要参量^[1-3]。土壤含水率的变化直接影响农林作物产量以及土壤发育演变^[4-8],

收稿日期: 2015-01-04 修回日期: 2015-01-30

* 国家自然科学基金资助项目(31371537)和北京市共建项目专项资助项目

作者简介: 赵燕东,教授,博士生导师,主要从事生态智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

高盐碱土壤(含盐量超过千分之六)和高有机土壤(含有机质20%以上)水分实时检测一直是一个难题。常用土壤水分测量方法分为烘干法、瓶桶法等直接法^[9-11]和电阻法、介电法、中子法、近红外法等间接法^[12-15]。其中介电法又分为时域反射法(TDR)、频域反射法(FDR)、驻波比法(SWR)等^[16-18]。席琳乔等^[9]以塔里木盆地盐碱地土壤为对象,使用TDR法测量土壤含水率和电导率。研究结果表明,使用TDR测定土壤水分,其值会受到土壤种类、电导率、密度等多种因素的制约。作为土壤盐分指标,土壤电导率反映了土壤中离子的含量,当土壤电导率较低时,TDR水分测定值的准确性较高;而当土壤的电导率较高时,由于诸多离子的存在,会削减反射的脉冲,影响脉冲反射时间,其所测土壤含水率的准确性较差。FDR法利用土壤的介电特性来测量土壤含水率,由于水的介电常数比一般物料的介电常数要大得多,所以当土壤水分增加时,其介电常数相应增大,测量时水分传感器给出的电容值也随之上升,根据传感器的电容值与土壤水分之间的对应关系,可测出土壤含水率。但是在低频工作时容易受土壤盐分、质地和容重的影响。如何减小田间土壤质地、结构与含盐量对测量的影响是研究的关键问题。李秀春等^[20]基于SWR原理研制出SMP-01型土壤水分传感器,通过测试该传感器在3种土壤质地(砂土、壤土、粘土)和不同土壤水分含水率下的输出,认为对于普通土壤(壤土、粘土)含水率测量范围最好在14%~50%,对于砂土监测范围最好在5%~23%,盐碱土监测范围最好在20%~35%,酸性土地区最好在25%~45%之间。由此表明SWR法测量盐碱土壤含水率的范围比较小。TDR法在土壤水分快速测量中具有实时、快速、准确的性能优势,但成本昂贵,且在某些土质中应用受限^[21-22]。SWR法在成本上较TDR法有了很大幅度的降低,但在测量精度上逊于TDR法,且在不同土壤中使用,SWR传感器需要重新标定^[23]。时域传输(Time domain transmission, TDT)原理,其工作过程是通过测量电磁波信号在嵌入土壤介质波导中的传播时间来测量土壤介质的介电常数。TDT技术是一种新兴的电磁技术,该方法近些年被引入介质水分测定研究领域^[24-28]。TDT法只需要测量电磁波信号在传感器探头中的单程传输延迟时间,技术难度远远低于TDR法,从而降低了产品成本^[29-32]。目前,不同设计特点的TDT仪器测定土壤含水率的性能已有研究^[33-37]。但是,TDT仪器在不同类型土壤上测定含水率情况尚无系统的研究,尤其是在TDR技术应用受限的高盐碱土、高有

机土以及红壤土中,TDT仪器的应用情况还不清楚^[38]。为此本文基于时域传输原理设计TDT土壤水分传感器,探究传感器用于砂壤土、粘壤土、盐碱土和有机土时的探针结构和测试频率,并测试传感器的静态性能、动态性能和稳定性。

1 测量原理

时域传输法其工作过程是通过测量电磁波信号在嵌入土壤介质波导中传播时间来测量土壤介质的介电常数^[39],不同于TDR传感器和SWR传感器,TDT传感器探头末端不是开路的,在电磁波的发射端和信号输出探头处各有一个电磁波信号采样点,传感器电路测量的是电磁波在嵌入土壤中波导探头上的单程传输时间。如图1所示。

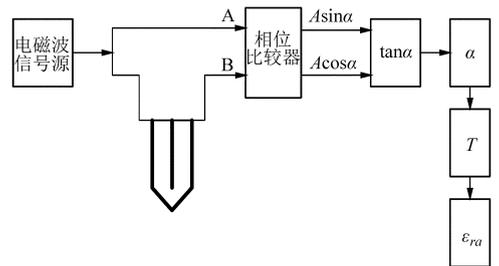


图1 TDT土壤水分传感器原理框图

Fig. 1 Block diagram of TDT soil moisture sensor

电磁波信号分成2路。一路通过传输线直接送到相位比较器的A端,作为稳定电磁波相位比较的基准。另一路信号通过传感器探头后输入相位比较器的B端,与从A端送来的正弦波相位基准信号进行相位比较。初始状态(即探针在空气中)时,2路信号经过的路径理想地视为近似相等,当探针插入土壤中时,B路电磁波信号到达相位比较器时会有一定时间的延迟,相位比较器输出一个反映B落后于A的相角 α ,即两路电磁波信号传输的时间差 T 。

传感器探头环形导体长度 L 已知,电磁波沿土壤中导体单程传播时间 T 可通过相位比较器测量得到,土壤表观介电常数表达式为

$$\varepsilon_{ra} = \left(\frac{c_0 T}{L} \right)^2 \quad (1)$$

式中 c_0 ——电磁波在真空中速度,取 3×10^8 m/s

在没有介质损耗的情况下,表观介电常数 ε_{ra} 可近似等于介电常数 ε_r ,即 $\varepsilon_{ra} \approx \varepsilon_r$,再根据Topp方程^[40]

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_{ra} - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_{ra}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_{ra}^3 \quad (2)$$

便可计算得到土壤体积含水率 θ_v 。从式(2)也可看出,土壤体积含水率是关于土壤介电常数 ε_{ra} 的一元三次函数。

由上述原理,可以设计基于时域传输原理(TDT)的土壤水分传感器组成框图,如图2所示。

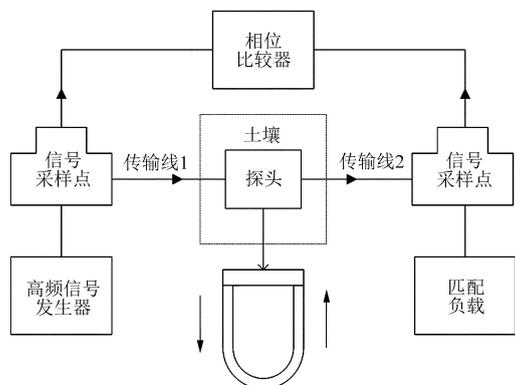


图2 TDT 土壤水分传感器组成框图

Fig. 2 Composition diagram of TDT soil moisture sensor

2 测量探头结构

本文设计的 TDT 探头是 U 形结构,如图3所示。

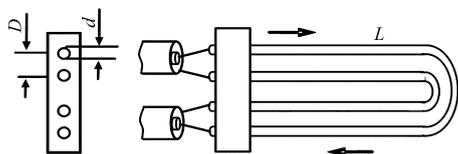


图3 TDT 的探头结构

Fig. 3 Configuration of TDT probe

TDT 土壤水分测试仪的 U 形探头可以看作一段传输线,其周围填充的是介电常数为 ϵ_r 的土壤介质,其等效电路模型为平行双导线传输线,双导线的特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1} \right) \approx \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2D}{d} \quad (3)$$

式中 D ——两导线之间的中心距

d ——导线直径

2.1 探针结构分析

为了确定合适的传感器测量探头,首先采用 HFSS 仿真软件进行结构仿真。设置求解频率为 100 MHz,求解类型为激励求解,周围介质的直径为 100 mm,高度为 500 mm,介电常数为 21,边界条件为理想边界。利用正交试验法,对针直径分别为 2.0、2.5、3.0 mm,两针间距分别为 3、5、7、10、12 mm,针长为 120 mm 的不锈钢波导探头,通过 HFSS 仿真可得到探针结构变化时水平剖面上的电场分布情况,如图4所示。

当针直径为 2.0 mm、两针间距为 10 mm 时,仿真测量敏感区最大,且电磁场分布均匀,因此,以下工作,均采用针直径为 2.0 mm、两针间距为 10 mm、

长度为 120 mm 式探针结构。

2.2 传感器测试频率分析

当探头结构为针直径 2.0 mm、两针间距 10 mm、针长 120 mm 时,采用网络分析仪(型号:NA7300A,频率范围:0.3 ~ 3 000 MHz,频率稳定度: $\leq \pm 5 \times 10^{-6}$,频率分辨率:1 Hz)作为可调信号源,用北京普源生产的 DS1302CA 型示波器(其测量的最大频率为 300 MHz,采样率范围为 1Sa/s ~ 2G Sa/s)获取探头 A、B 两路电磁波信号的波形。试验设备连接如图5所示。测试步骤为:

(1) 将网络分析仪的信号输出端接在 TDT 探头的一端,同时将示波器的通道 1 信号输入端并联在接口处。TDT 探头的另一端连接示波器通道 2,同时信号输出端短接一只 47 Ω 的无感电阻,用来吸收传导过来的信号,以免发生反射,影响示波器的信号观测。

(2) 打开各仪器,将网络分析仪的输出信号频率调成 20 MHz,此时缓慢地将 TDT 探头伸入水桶中,观察波形变化,并记录。

(3) 增加信号源频率,观察波形变化并记录。

通过试验,观察并记录示波器中 2 路正弦电磁波信号的相对相位移动情况,得到如表 1 所示结果。

为了保证测量结果的单调性,要求相位差不超过 180°,由表 1 得出,可采用 100 MHz 作为信号源。信号源采用 5 V 供电的有源晶振,其输出信号为幅值 5 V、频率 100 MHz 的正弦信号。

选用河北省廊坊市固安县的粘壤土作为试验土样,充分晒干后,用孔径为 2 mm 的筛子筛掉土壤中的碎石等杂质。4 份等量土样装入小水桶中,依次加入适量蒸馏水,均匀混合,使用德国 IMKO 公司生产的 TRIME-PICO 32 型 TDR 传感器辅助测量,配制成含水率约为 5%、11.5%、18%、23.3%、31.1%、35%、42% 左右的土壤样本。A、B 两路信号的相位差与土壤含水率之间关系如图 6 所示。

3 传感器性能试验

为探究 TDT 传感器在不同类型土壤中的测量性能,选取 4 种典型土壤分别进行试验:砂壤土、粘壤土、盐碱土、有机土。本试验采用 4 种方法(烘干法、TDR 法、SWR 法、TDT 法)测量 4 种土壤 4 个梯度(5%、15%、25%、35% 左右)含水率的土样数据,以烘干法为基准,分析 TDT 法在不同类型土壤中测量的静态性能与动态性能,并对自制 TDT 传感器进行稳定性与重复性试验,得出相关结论。

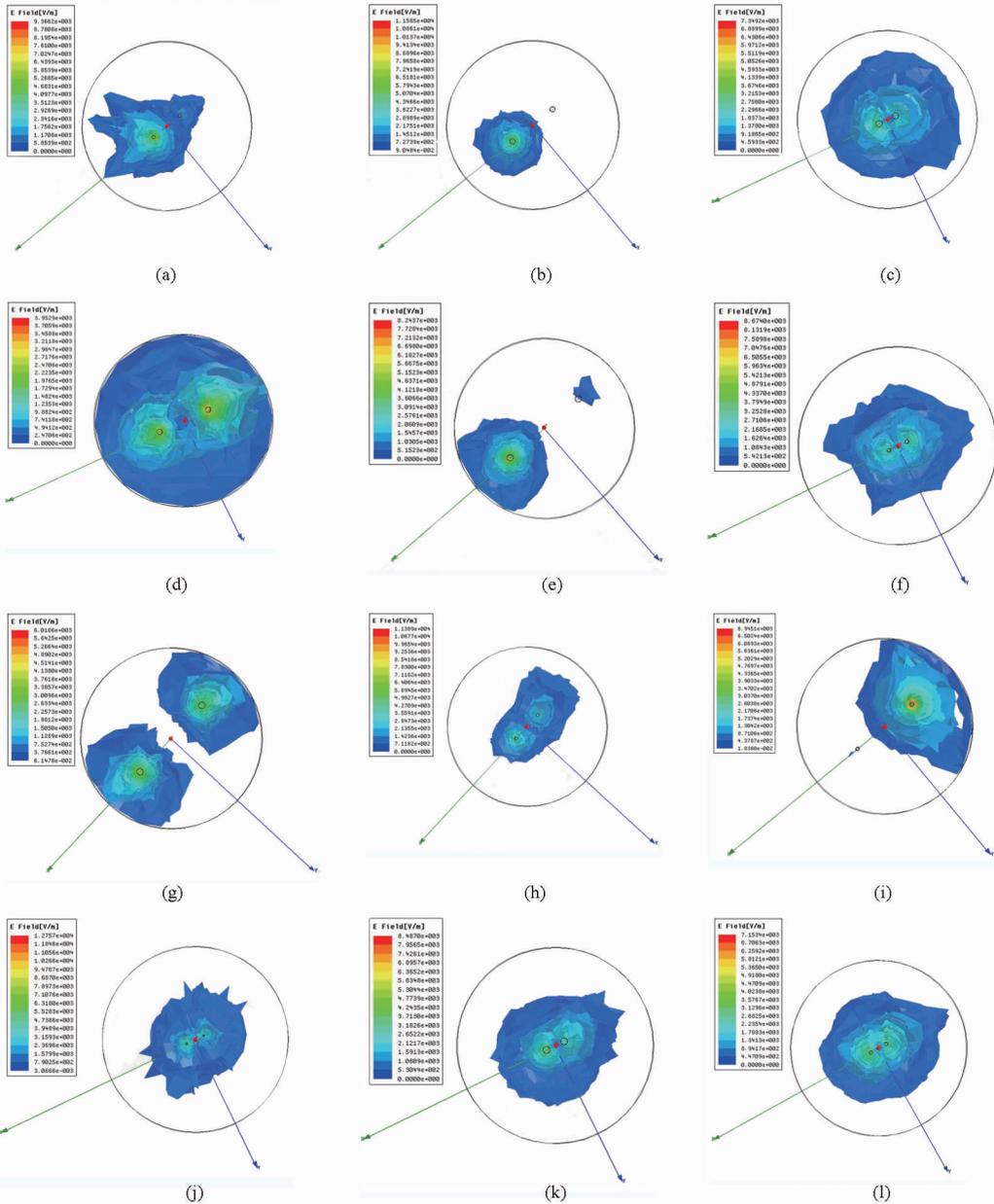


图4 探头直径和两线间距变化时波导探头周围的电磁场分布

Fig. 4 Electric field distribution around sensor probe

- (a) 针直径 2.0 mm, 两针间距 3 mm (b) 针直径 2.0 mm, 两针间距 5 mm (c) 针直径 2.0 mm, 两针间距 7 mm
- (d) 针直径 2.0 mm, 两针间距 10 mm (e) 针直径 2.5 mm, 两针间距 5 mm (f) 针直径 2.5 mm, 两针间距 7 mm
- (g) 针直径 2.5 mm, 两针间距 10 mm (h) 针直径 2.5 mm, 两针间距 12 mm (i) 针直径 3.0 mm, 两针间距 5 mm
- (j) 针直径 3.0 mm, 两针间距 7 mm (k) 针直径 3.0 mm, 两针间距 10 mm (l) 针直径 3.0 mm, 两针间距 12 mm

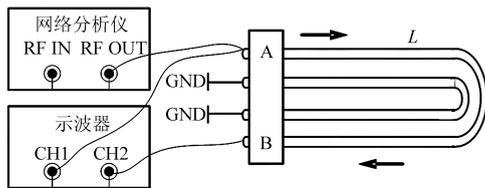


图5 试验设备连接图

Fig. 5 Connection diagram of experimental equipment

3.1 试验前准备工作

试验设备包括:电热恒温干燥箱(型号:202 - 0EBS,电源电压:220 V,电热功率:1.6 kW,温度范围:室温 ~ 250℃),万用表(型号:VC9807A +),环

表1 信号源选择试验结果

Tab. 1 Results of source selecting experiments

频率/MHz	A、B 相位差/(°)	通道 2 波形畸变情况
20	0	无畸变
50	约 30	无畸变
100	约 180	无畸变
120	约 230	略微畸变
200	约 450	较严重畸变
300	无法观测	严重畸变

刀取土样设备,带盖小桶 5 只,塑料方盒,5 V 稳压电源,精度为 0.1 g 电子天平,德国 IMKO 公司 TDR (TRIME)水分测试仪(测量范围:0% ~ 100%,测量

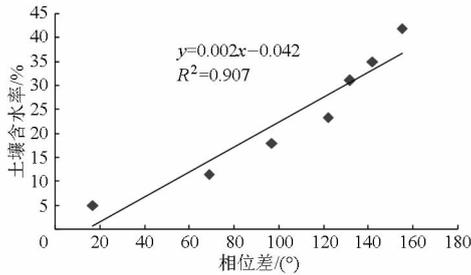


图6 相位差与土壤含水率之间的关系
Fig. 6 Relationship between phase difference and soil moisture content

精度: 0% ~ 40%, ± 1%; 40% ~ 70%, ± 2%), BD-Ⅲ型 SWR 水分传感器(北京林业大学自主研制, 测量范围: 0% ~ 100%, 测量精度: ± 2%), 4 个相同长度和间距的 TDT 探头, 2 块 TDT 传感器测量电路板。采用 TDT 传感器探头与测量电路板交叉组合的方式分别在空气及水中进行试验, 选出性能相近的 4 只传感器探头以及测量电路板 2 块。

分别取 4 种土样的 4 份等量土壤装入小桶中, 再依次将小桶中的土壤倒入配土土壤所用的塑料盒内, 分别加入适量蒸馏水, 均匀混合, 使用 TDR 传感器辅助测量, 配制成含水率约为 5%、15%、25%、35% 左右的土壤样本。为了保证 4 种测量方法在每个土样中测量数据的可靠性, 除了在配制土样及埋设 TDT 探头时保持桶内土样均匀铺置并搁置 48 h 让土壤水分充分均匀分布外, 测量时, 采样点的选择也需要考虑到其位置是否能充分反映土样整体含水率情况。为此, 本文设计了如图 7 所示的采样点位置。

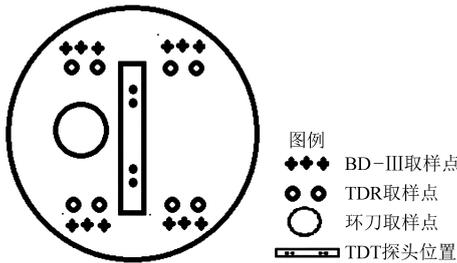


图7 土壤样品桶俯视图
Fig. 7 Top view of soil samples barrel

3.2 传感器静态性能试验

3.2.1 试验步骤

在土样配制完成后, 在室内搁置 48 h 使土壤水分运动均匀后, 对 4 种土样按以下试验步骤测量并记录数据。

(1) TDT 传感器测量: 使用本文研制的 TDT 传感器测量电路板连接已经埋设好的 TDT 探头, 并将电路板输出端接到万用表上, 拨到 2 V 测电压挡, 分别记录输出电压。

(2) 环刀法取土样: 使用取土环刀从每个土样

桶中取出保持原样的土样一份, 编号, 加上下盖, 称量记录数据, 然后放入恒温干燥箱中。

(3) 烘干土样: 关闭恒温干燥箱的隔热门, 将温度设定在 110℃, 6 h 后关掉恒温箱电源, 取出土样盒依次称量, 记录数据。然后再放回恒温箱中, 打开电源, 此后, 每隔 1 h 后取出土样, 直至每个土样盒称量数据不再变化为止。

3.2.2 试验数据处理

一次土样试验中使用的土样盒体积为 100 cm³, 1 g 水的体积约为 1 cm³, 因此将土样盒烘干前的质量减去烘干后的质量, 就可以得到土样中含水质量, 而体积已知, 为 100 cm³, 从而可计算得到土样体积含水率。

以砂壤土为例, 将记录的 2 次(1 个取样点, 2 块测量电路板) TDT 测量数据求平均值, 记录数据。以烘干法所得的数据作为 TDT 法测量数据是否准确的评判依据。均方差又称均方根误差, 或称标准误差, 它是观测值与真值偏差的平方和与观测次数 *n* 比值的平方根。本试验中, TDT 传感器测量值为观测值, 烘干法得到的含水率为真值, 观测次数为 4。为计算方便, 本试验将观测值与真值均去掉百分号后进行计算, 得到的均方差越小, 说明测量误差越小, 精度越高。

TDT 传感器的测量值为电压, 因此需要以烘干法的测量数据为 *y* 轴, TDT 传感器输出电压为 *x* 轴, 进行线性拟合, 得到结果如图 8 所示。

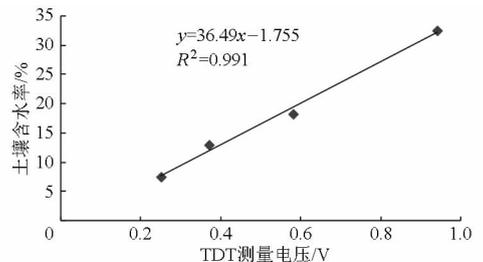


图8 砂壤土中电压与土壤含水率的关系
Fig. 8 Relationship between voltage and soil moisture content in sandy loam

经图 8 中线性 *k*、*b* 系数校正后, 计算得到 TDT 传感器测量的土壤体积含水率, 同时可计算得到 TDT 传感器测量结果的均方差, 结果如表 2 所示。

表2 砂壤土体积含水率测量结果

Tab. 2 Test result of sandy loam					%
测量方法	土样桶1	土样桶2	土样桶3	土样桶4	均方根误差
烘干法	7.43	12.92	18.23	32.57	
TDT	7.73	11.75	19.41	32.18	0.87

采用上述方法, 可依次得到粘壤土、盐碱土、有

机土下 TDT 传感器的线性拟合结果,如图 9~11 所示。由线性 k 、 b 值校正后,分别计算得到结果如表 3~5 所示。

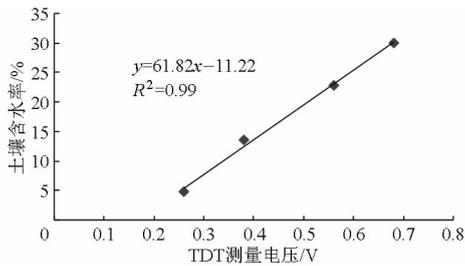


图 9 粘壤土中电压与土壤含水率的关系

Fig. 9 Relationship between voltage and soil moisture content in clay loam

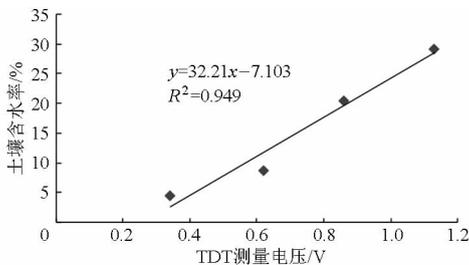


图 10 盐碱土中电压与土壤含水率的关系

Fig. 10 Relationship between voltage and soil moisture content in saline-alkali soil

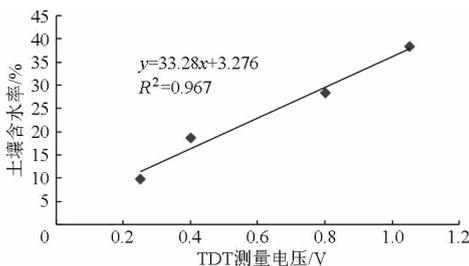


图 11 有机土中电压与土壤含水率的关系

Fig. 11 Relationship between voltage and soil moisture content in organic soil

表 3 粘壤土体积含水率测量结果

Tab. 3 Test result of clay loam %

测量方法	土样桶 1	土样桶 2	土样桶 3	土样桶 4	均方根误差
烘干法	4.72	13.53	22.81	30.04	
TDT	5.78	11.96	23.09	30.20	0.95

表 4 盐碱土体积含水率测量结果

Tab. 4 Test result of saline-alkali soil %

测量方法	土样桶 1	土样桶 2	土样桶 3	土样桶 4	均方根误差
烘干法	4.41	8.66	20.46	29.21	
TDT	2.40	12.38	19.63	28.33	2.20

从以上分析可以看出:

(1) 本文研究的基于相位检测的 TDT 型土壤水分传感器校正后在砂壤土、粘壤土、盐碱土、有机

土中的测量误差分别为 $\pm 0.87\%$ 、 $\pm 0.95\%$ 、 $\pm 2.20\%$ 、 $\pm 1.94\%$ 。

表 5 有机土体积含水率测量结果

Tab. 5 Test result of organic soil %

测量方法	土样桶 1	土样桶 2	土样桶 3	土样桶 4	均方根误差
烘干法	9.82	18.71	28.42	38.41	
TDT	11.61	15.92	30.23	37.55	1.94

(2) 通过分析砂壤土与粘壤土中的测量结果,本文研究的 TDT 传感器经系数校正后,测量误差在 $\pm 1\%$ 左右。TDT 传感器在不同质地的土壤中均可以较精确地测量土壤水分。

(3) 本文研究的 TDT 传感器在不同质地的土壤以及盐碱土、有机土中,其线性拟合的系数差别很大,在具体使用时需要根据使用的场合重新进行标定。

3.3 传感器动态性能试验

传感器的动态性能是指传感器的输出随着时间变化,在不同输入量情况下的响应特性。所谓响应,是指输入信号发生变化时响应输出信号随之变化的情况。分别在 4 种类型土壤(砂壤土、粘壤土、盐碱土、有机土)下,对 3 种传感器(TDR、SWR、TDT)进行动态性能测试,得到其稳定时间 T_s 作为传感器动态性能对比依据。其中,TDR 测量设备测量值通过屏幕数显直接读取,其 T_s 时间用秒表记录从按下测量键到出现测量数值的时间差,并记录(平均响应时间为 5.5 s)。SWR 与 TDT 传感器采用示波器观察并记录给传感器上电到传感器稳定输出的阶跃响应曲线,观测并记录 T_s 值(表 6)。

表 6 4 种土壤中传感器稳定时间

Tab. 6 Sensor stable time on four types of soil ms

传感器	砂壤土	粘壤土	盐碱土	有机土	平均时间
SWR	2.30	2.48	2.58	3.38	2.69
TDT	3.25	3.60	4.48	5.25	4.15

可以得出以下结论:

(1) 在 4 种测量土壤中,本文研究的 TDT 土壤水分传感器动态响应时间约为 4 ms 左右,远远优于 TDR(TRIME)测量设备 5.5 s 左右的响应时间,稍逊于 SWR(BD-III)传感器 3 ms 左右响应时间。

(2) SWR(BD-III)传感器的稳定时间略低于同等测量条件下的 TDT 传感器,且随测量土壤含水率的升高,稳定时间呈现一定的增大趋势。

3.4 TDT 土壤水分测试仪稳定性试验

稳定性是测量仪器保持其测量结果随时间恒定的能力,用测量示值经过规定的时间所发生的变化

量来进行定量表示,是衡量测量仪器的重要性能参数之一。配制约为5%、15%、25%、35%左右含水率的粘壤土土样,将传感器探头埋入土样中,将土样放置48 h让土壤中水分充分均匀后,打开土样盖,每间隔2 min将TDT探头连接到土壤水分测试仪对土样容积含水率进行测量,为避免随机误差的影响,每个土样测量6次,去掉最小值与最大值后求平均值,连续测量30 min,记录测量结果。图12为稳定性试验结果,另从测量数据可以看出,最大偏移量分别为0.13%、0.20%、0.17%和0.21%,因此本文研究的TDT土壤水分测试仪具有良好的稳定性。

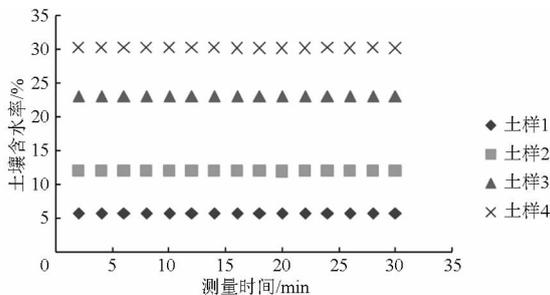


图12 稳定性试验结果

Fig. 12 Test results of stability

4 结论

(1) 从时域传输原理入手,设计制作了功能完整的基于时域传输原理的土壤水分测试仪。对TDT

传感器探头结构、信号源频率选择等问题做了比较系统的理论研究和试验分析。通过试验,较为系统地对比了TDR法、SWR法、TDT法在不同类型土壤中的性能。

(2) 依据TDT传感器探头周围土壤介质介电常数表达式 $\epsilon_{ra} = \left(\frac{c_0 T}{L}\right)^2$,并保证在整个测量范围内,测量相位差呈单调变化,以此确定探头长度L的可选择范围。

(3) 通过试验,本文研究的TDT土壤水分传感器校正后在砂壤土、粘壤土、盐碱土、有机土中的测量误差分别为 $\pm 0.87\%$ 、 $\pm 0.95\%$ 、 $\pm 2.20\%$ 、 $\pm 1.94\%$ 。性能与SWR(BD-III)传感器相当。

(4) 试验表明,TDT水分传感器在盐碱土和有机土中的测量误差小于2.5%,有较好的测量性能,而TDR法、SWR法、TDT法在盐碱土和有机土的水分测量中均有一定的局限性,或是测量误差偏大,或是测量范围偏小。

(5) 4种土壤中的测试表明,本文研究的TDT土壤水分传感器动态响应时间约为4 ms左右,远远优于TDR(TRIME)测量设备的5.5 s响应时间,稍逊于SWR(BD-III)传感器的3 ms响应时间。

(6) 试验证明本文研究的TDT土壤水分测试仪具有良好的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Ayers P D, Perumpral J V. Moisture and density effect on cone index[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(5): 1169 - 1172.
- 2 Baver L D, Gardner W H, Gardner W R. Soil physics[M]. 4th ed. New York: John Wiley, 1972: 1 - 12.
- 3 Busscher W J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 519 - 524.
- 4 Chesness J L, Ruiz E E, Cobb Jr C. Quantitative description of soil compaction in peach orchards utilizing a portable penetrometer[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(2): 217 - 219.
- 5 Droogers P, Fermont A, Bouma J. Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the Netherlands[J]. Geoderma, 1996, 73(4): 131 - 145.
- 6 Deans J D, Milne R. An electrical recording soil moisture tensiometer[J]. Plant and Soil, 1978, 50(2): 509 - 513.
- 7 Elbanna E B, Witney B D. Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight[J]. Journal of Terramechanics, 1987, 24(1): 41 - 56.
- 8 Bowman G E, Hooper A W, Hartshorn L. A prototype infrared reflectance moisture meter[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, 31(1): 67 - 79.
- 9 Gardner W, Kirkham D. Determination of soil moisture by neutron scattering[J]. Soil Science, 1952, 73(5): 391 - 401.
- 10 Heimovaara T J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveform: I. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils[J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 189 - 199.
- 11 Ley G J, Mullins C E, Lal R. The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 33(2): 133 - 142.
- 12 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 12 - 35.
- 13 戴晴, 黄纪军, 莫锦军. 现代微波与天线测量技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 7 - 33.
- 14 董树义. 微波测量技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991: 11 - 18.
- 15 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.
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. (in Chinese)

- 16 赵燕东. 基于驻波率原理的土壤水分测量方法与传感器的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999: 1-43.
- 17 许景辉, 马孝义, Sally D Logsdon. 基于低频滤波法的 T-TDR 含水率测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 172-176.
Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon. Measurement of soil moisture with T-TDR probe based on LFF method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 172-176. (in Chinese)
- 18 许景辉, 马孝义, Sally D Logsdon, 等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 102-107.
Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon, et al. FDR probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 102-107. (in Chinese)
- 19 席琳乔, 余建勇, 张利莉. TDR 技术测定盐碱地土壤盐分及水分及标定研究[J]. 塔里木大学学报, 2007, 19(3): 6-10.
Xi Linqiao, Yu Jianyong, Zhang Lili. Calibration on measurement of soil salinity and water using time domain reflectometry (TDR)[J]. Journal of Tarim University, 2007, 19(3): 6-10. (in Chinese)
- 20 李秀春, 刘洪禄, 杨培岭. SMP-01 土壤水分传感器研制[J]. 中国农村水利水电, 2002, 19(1): 38-39.
- 21 赵燕东. 土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002: 1-48.
- 22 冯磊. 基于时域传输原理的土壤水分测量技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011: 1-29.
- 23 何小艇. 高速脉冲技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990: 22-29.
- 24 江浩浩, 董希斌, 王海飙. 边坡土壤含水率对不同植被土壤抗剪强度的影响[J]. 森林工程, 2009, 25(3): 77-80.
Jiang Haohao, Dong Xibin, Wang Haibiao. Effects of slope soil water content on soil shear strength of different vegetation[J]. Forest Engineering, 2009, 25(3): 77-80. (in Chinese)
- 25 匡秋明, 赵燕东, 白陈祥. 节水灌溉自动控制系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 136-139.
Kuang Qiuming, Zhao Yandong, Bai Chenxiang. Automatic monitor and control system of water saving irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 136-139. (in Chinese)
- 26 李翰如. 电介质物理导论[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990: 15-31.
- 27 罗锡文. 利用微波反射效应测定土壤强度的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 46-51.
Luo Xiwen. Study on soil strength with microwave reflection loss [J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(1): 46-51. (in Chinese)
- 28 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000: 12-28.
- 29 王伟, 齐长永. 土壤水分传感器的研制[J]. 传感器技术, 1991, 1(2): 21-24.
Wang Wei, Qi Changyong. Soil-moisture sensors[J]. Journal of Transducer Technology, 1991, 1(2): 21-24. (in Chinese)
- 30 王增和, 丁卫平, 李平辉. 电磁波与电磁场[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 15-18.
- 31 王月清, 华光. 电磁场与电磁波导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 22-31.
- 32 王新稳, 李萍. 微波技术与天线[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 11-17.
- 33 王贵彦, 史秀捧, 张建恒, 等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 23-26.
Wang Guiyan, Shi Xiupeng, Zhang Jianheng, et al. A study on the comparison of measuring soil water content with TDR, neutron probe and oren dry[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(3): 23-26. (in Chinese)
- 34 席承藩. 土壤分类学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 258-341.
- 35 殷之文. 电介质物理[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003: 14-25.
- 36 王一平, 郭宏福. 电磁波——传输·辐射·传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 17-35.
- 37 赵克玉, 许福永. 微波原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 12-17.
- 38 张立彬. 匀密度土样制备装置的研究[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(1): 38-40.
Zhang Libin. A new device for preparation of soil sample[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19(1): 38-40. (in Chinese)
- 39 郑茹梅, 李子忠, 龚元石. 运用时域传输技术测定不同类型土壤的含水率[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 8-13.
Zheng Rumei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Measurement of soil water content for different soil types by using time domain transmission technology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 8-13. (in Chinese)
- 40 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.