

基于时域传输原理的土壤水分测试仪研究

冯磊 杨卫中 石庆兰 董乔雪 徐云 高红菊

(中国农业大学大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为利用时域测量技术实时、快速、准确地测量土壤水分,设计了一种低成本的基于时域传输(TDT)原理的土壤水分测试仪。仪器的探头采用末端封闭的回路结构,信号在探头上单程传输,通过测量电磁波在土壤介质中的传输时间测量出土壤的介电常数,再通过土壤标定方程得到土壤水分。时域传输仪由高频脉冲信号源、同轴传输线、U型回路结构探头、以TDC-GP2时间间隔测量芯片为核心的传输时间测量电路和以LPC2132 ARM微控制器为核心的控制电路组成。通过标准溶液测试和土壤测试试验,验证了双U型探头的测量结果好于单U型探头,仪器使用双U型探头测量传输时间的均方根误差为43.9 ps,测量介电常数的均方根误差为0.791,使用TOPP方程测量砂土土壤含水率的均方根误差为 $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,测量壤土土壤含水率的均方根误差为 $0.039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。结果表明设计的时域传输土壤水分测试仪可以准确地测量土壤介电常数和土壤体积含水率。

关键词: 土壤水分; 时域传输; 时间差测量; 介电常数

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0181-07

Soil Moisture Meter Based on Time Domain Transmission Principle

FENG Lei YANG Weizhong SHI Qinglan DONG Qiaoxue XU Yun GAO Hongju

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to measure the soil moisture in real time, quickly and accurately by using time domain measurement technique, a low cost soil moisture measuring meter was designed based on time domain transmission (TDT) principle. The probe of TDT meter adopted structure of closed loop, so that the signal was transmitted on the probe in one way. The permittivity of soil was measured by measuring the transmission time of electromagnetic wave in soil medium, and the soil moisture was obtained through soil calibration equation. TDT meter was composed of a high frequency pulse signal source, a coaxial transmission line, a probe in U-shaped loop structure, a transmission time measuring circuit using TDC-GP2 time interval measurement chip as the key component and a control circuit using LPC2132 ARM micro controller unit as key component. Through the standard solution test and soil test, it was proved that the measurement results of TDT meter with double U-shaped probe were better than those of single U-shaped probe. The root mean square error (RMSE) of transmission time measurements by using TDT meter with double U-shaped probe was 43.9 ps, and the RMSE of dielectric constant measurements was 0.791. Using TOPP equation, the RMSE of soil moisture measurements in sand soil determined by TDT meter was $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, and the RMSE of soil moisture measurements in loam soil determined by TDT meter was $0.039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. The results showed that the soil permittivity and soil moisture could be measured accurately by using TDT soil moisture measuring meter.

Key words: soil moisture; time domain transmission; time difference measurement; permittivity

引言

随着农业节水技术的推广和应用,在生产和科

研活动中越来越需要实时、快速、准确地监测土壤水分,以确保农作物适时、适量的灌溉,或者作为区域调水、配水和制定灌溉计划的参考依据。土壤水分

收稿日期: 2016-06-12 修回日期: 2016-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371531)

作者简介: 冯磊(1975—),男,副教授,博士,主要从事智能化检测与控制技术研究,E-mail: fenglei@cau.edu.cn

通信作者: 杨卫中(1963—),男,副教授,主要从事智能化检测与控制技术研究,E-mail: ywz@cau.edu.cn

测定方法多达几十种,传统的测量方法有干燥法和张力计法,利用仪器测量主要有射线法和介电法两大类。介电法是目前应用最为广泛的土壤水分测量方法。根据测量原理和实现途径的不同,介电法又可分为时域反射法(TDR)、时域传输法(TDT)、相域反射法(PDR)、频域反射法(FDR)、驻波率法(SWR)、探地雷达法(GPR)和微波吸收法等。其中,时域反射(Time domain reflectometry, TDR)法^[1-3],是根据电磁波在介质中传输速度与介质的介电特性有关的原理,通过测量电磁波在土壤介质中传播的时间来确定土壤介电常数。时域反射(TDR)技术是目前土壤水分测量中实时性、准确性、快速性最高的仪器。但其技术难度大、成本高,限制了在国内的发展和應用。

时域传输(Time domain transmissometry, TDT)法^[4-10]工作原理与TDR相似,同属于时域测量技术,同样是通过测量电磁波在土壤介质中传播的时间来测量土壤介电常数,不同的是TDR探头末端是开路的,在信号的发射端有一个采样点,测量的是电磁波在土壤探头上双程的传播时间,而TDT的探头是封闭的回路结构,在探头的两端各有一个信号采样点,测量的是单程传播时间。目前典型的TDT仪器主要有:加拿大E. S. I公司研制的Terra. Point水分测试仪^[11]和Gro. Point TDT水分传感器^[12],美国Acclima公司开发生产的数字TDT湿度传感器^[13],以及新西兰生产的AquaFlex TDT带状水分测定仪^[14]。国内尚无此类产品。

TDT的优点是时间测量电路相对简单,设备成本低,测量精度和技术性能与TDR相当。缺点是由于工作原理的要求,探头无法制成末端开路的针式结构,因此使用时必须埋入土壤中,做固定监测使用,而且埋入时对土壤扰动较大,破坏原状土壤结构。但其仍有很高的应用和研究价值,本文设计基于时域传输原理的土壤水分测试仪样机,分析TDT的测量原理和电路实现方法,并对技术性能进行试验研究。

1 测量原理

从电磁角度看,在常温常压下自由水的介电常数约为80,土壤固体颗粒为3~7,空气为1。许多试验表明,无论土壤的构成成分与质地有何差异,土壤介电常数与容积含水率总是呈非线性单值函数关系,这个函数关系一般通过土壤标定方程 $\theta_v = f(\epsilon_r)$ 来表示。因此,土壤水分可以通过测定土壤介电常数来间接确定。目前最通用的 $\theta_v - \epsilon_r$ 模型是由TOPP等^[15]通过试验测定多种土壤得到的经验公式,称为

TOPP方程

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (1)$$

式中 θ_v ——土壤体积含水率

ϵ_r ——土壤表观介电常数

TDT土壤水分测试仪由阶跃信号发生器、传输线、探头、时间差测量电路和信号处理与控制电路等组成,其组成结构如图1所示。

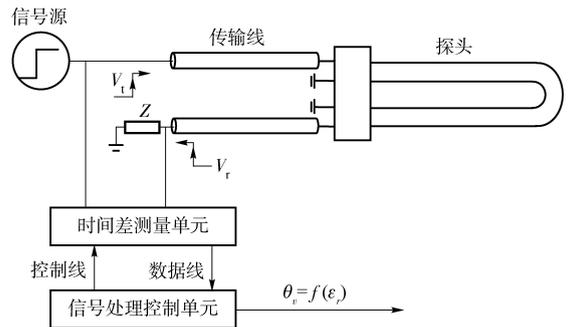


图1 TDT土壤水分测试仪系统原理框图

Fig. 1 System schematic of TDT soil moisture meter

系统工作原理是:由脉冲信号发生器(信号源)产生快速沿方波信号,该信号沿传输线和传感器探头进行传输,当到达探头末端时,信号沿U型探头和传输线返回接收端。由时间差测量单元来测量发射波与回波的时间差,即信号沿传感器探头传输的时间 Δt 。

由于土壤的表观介电常数 ϵ_r 可以确定为

$$\epsilon_r = \left(\frac{\Delta t c_0}{L} \right)^2 \quad (2)$$

式中 c_0 ——电磁波在真空中的传播速度

L ——U型探头的长度

因此信号处理控制单元可以根据式(2)计算出土壤的表观介电常数 ϵ_r ,再由土壤标定方程求出土壤水分 θ_v 。

对于TDT测量方法而言,测量的是信号沿着传输网络单程传输的时间,信号的上升沿受反射信号干扰较小,波形本身的分辨率较高,无需通过取样示波器记录波形,也不需要经过特别的算法处理,可以用较为简单的时间测量电路来实现信号传输时间的测量,因此大大降低了对时间测量电路的技术要求和硬件成本。

2 系统设计

2.1 系统组成

本文设计的TDT土壤水分测试仪由脉冲发生器、传输网络、探头、时间差测量电路和控制电路组成,组成结构如图2所示。

脉冲发生器是TDT系统的信号源,它产生TDT

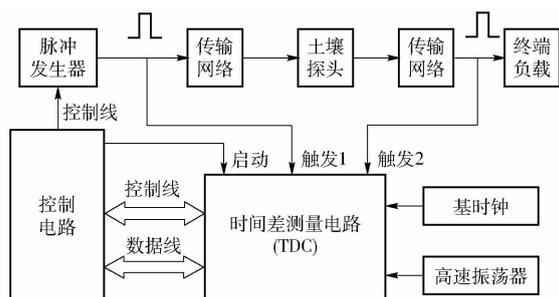


图 2 TDT 典型电路组成框图

Fig. 2 Typical circuit schematic of TDT

系统的测试信号;传输网络是同轴传输线,将探头与信号源及时间差测量电路(TDC)连接起来;TDC 通过 2 个触发信号端分别接收通过探头前后的测试信号,进行时间差测量;控制电路负责协调系统各部分的工作时序、进行数据处理以及控制系统外设。

2.2 信号源

信号源产生的 TDT 系统测试信号为高频脉冲信号。从频域分析的角度看,测试信号是由各种频率成分叠加而成的,其最低频率分量 f_{\min} 由脉冲信号的宽度(周期)决定,而最高频率分量 f_{\max} 是由脉冲的上升时间 t_r 决定的。 t_r 是指信号的幅度由稳态值的 10% 上升到 90% 所经历的时间,最高频率 f_{\max} 的计算式为^[16]

$$f_{\max} = \frac{\ln(0.9/0.1)}{2\pi t_r} \quad (3)$$

或可近似地简化为

$$f_{\max} \approx \frac{1}{\pi t_r} \quad (4)$$

由于当电磁波频率在 100 MHz ~ 1 GHz 时,土壤中水分的影响占主导地位,受电导率的影响较小^[15],同时在这个频段频率越高土壤类型影响越小,因此选择带宽 f_{\max} 为 1 GHz 的脉冲信号。根据式(4)可以得出带宽为 1 GHz 的脉冲信号上升时间约为 350 ps。因此根据系统要求,信号源由脉冲发生器、放大器和以阶跃恢复二极管为核心的快速沿整形电路组成,如图 3 所示。经驱动和整形后的脉冲信号上升时间(10% ~ 90%)实测为 324.7 ps。

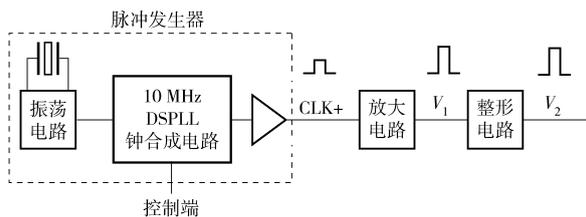


图 3 信号源的组成结构图

Fig. 3 Schematic of signal source

TDT 土壤水分测试仪的高速脉冲信号是从信号源经传输网络传输到土壤探头,再经土壤探头传输后,返回到接收端,故在传输路径上除土壤探头两端

以外的各连接点阻抗应做到匹配,使信号的反射减少到最低程度,从而得到分辨率高的传输波形,以便满足时间差测量电路的测量要求。

2.3 探头

根据 TDT 土壤水分测试仪的工作原理,TDT 的探头实际上是信号传输网络上一段不规则的传输线,其周围的介质是土壤。不同于末端开路的 TDR 探头,在 TDT 探头上信号沿着探头单程传播,用于传输 TEM 波的传输线是双导体结构的传输线,这类传输线主要有平行双导线、同轴线、带状线和微带线等。根据探头的要求和工作特点,选择平行双导线结构,设计出如图 4 所示的 2 种探头,它们都可看作在空间上不规则的双线传输线结构。P-U35 型探头和 P-U30 型探头结构类似,都是 U 型结构。P-U35 型探头如图 4a 所示,是双 U 型结构,导体材料为不锈钢,直径 d 为 4 mm,内圈与外圈的间距 D 为 15 mm,外圈导体长度 L 为 350 mm,外圈与同轴传输线的内导体连接,内圈接同轴传输线的外导体(即屏蔽层),与信号地连接,信号沿着如图所示的方向传输。P-U30 型探头如图 4b 所示,是单 U 型结构,与 P-U35 型探头不同的是中间接地的波导是一根直棒,因此信号在传输过程中发射信号和返回信号共地,波导材料为不锈钢,直径 d 为 4 mm,外圈导体与中间导体的间距 D 为 20 mm,外圈导体长度 L 为 300 mm。探头的固定支座是 PVC 材料。

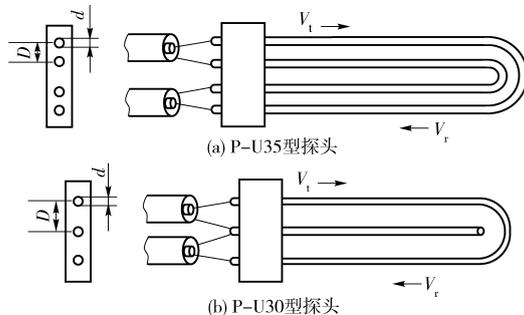


图 4 P-U35 型和 P-U30 型探头结构图

Fig. 4 Structures of P-U35 and P-U30 probes

TDT 土壤水分测试仪的 U 型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,P-U30 型和 P-U35 型 2 种探头虽然空间的几何结构不同,但其本质上都是平行双导线结构,其等效电路模型为平行双导线传输线,其特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2D}{d} \quad (5)$$

U 型探头确保了信号可以返回接收端,从而大大降低了信号传输时间的测量难度,但由于结构的限制无法直接插入土壤中,只能埋入土壤中做固定监测用。

2.4 时间测量

对于长度为 30 cm 的 U 型土壤探头,在空气和纯水中 2 个极端情况下,传输时间分别为 1 ns 和 9 ns,而普通数字电路的响应时间都是纳秒级的,因此常规的方法根本无法实现仅几纳秒的超短时间测量。本系统中时间差测量的核心部件采用的是德国 ACAM 公司继 TDC - GP1 之后新推出的高精度时间间隔测量芯片 TDC - GP2^[17],可以实现对纳秒级时间间隔的测量,分辨率可达 50 ps。

由控制电路初始化 TDC,对其工作方式、测量范围、参考时钟、校准方式、触发方式和次数等进行配置,对 TDC 进行复位等待接收触发信号,微控制器产生 Start 起始信号,同时控制信号源产生高速脉冲,信号源发出的脉冲作为 Stop1 信号,脉冲在发送传输网络、探头和返回传输网络上传输最终达到负载端,负载端接收到的脉冲作为 Stop2 信号,由 TDC 测量 Stop2 信号和 Stop1 信号之间的时间差,并由 TDC 进行校准和数据处理,最终由控制电路读取测量结果。

2.5 控制电路

控制电路以 NXP 公司的 LPC2132 ARM 微控制器^[18]为核心构成嵌入式系统,包括微控制器、复位电路、振荡电路、USB 通信接口、E²PROM 存储器、状态指示电路、键盘控制电路、LCD 显示模块、电源控制电路、NiMH 电池以及充电电路等模块,其组成结构如图 5 所示。

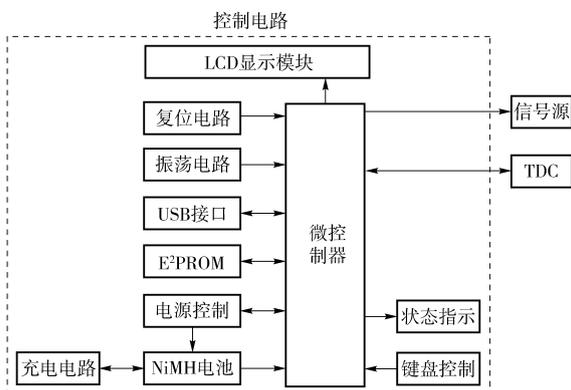


图 5 TDT 土壤水分测试仪控制电路结构图

Fig. 5 Control circuit schematic of TDT soil moisture meter

控制电路控制信号源产生高速脉冲,控制时间差测量电路并读取信息,实现土壤介电常数和容积含水量的计算、显示和存储,通过 USB 通信接口与 PC 机进行数据通信,充电电路可对内置充电电池进行电量检测和智能快速充电。

3 试验

3.1 标准溶液测试

TDT 土壤水分测试仪直接测量的参数是电磁波

在埋于土壤中的探头上传输的时间 Δt ,传输时间与土壤介电常数 ϵ_r 有式(1)所表示的确定关系,因此如果时间测量得准确,即可准确地得到土壤的介电常数值。土壤体积含水率 θ_v 再由土壤标定方程计算得到。

因此土壤水分的测量精度与土壤介电常数 ϵ_r 的测量精度及土壤的标定模型有关,而土壤是一种非常复杂的介质,土壤水分与介电常数之间的关系受到土壤类型、容重、电导率等多个因素的影响,在测量时又会因试验方案、操作方法、土壤变异性各种因素的影响而带来随机误差。因此首先设计标准溶液试验,测试 TDT 土壤水分测试仪测量传输时间和介电常数的准确性。即用 TDT 土壤水分测试仪对一组介电常数已知的化学有机溶液进行测试,将其测量结果与标准值进行比较^[19]。

3.1.1 试验材料和设备

试验材料有空气、去离子水和 9 种有机溶液,如表 1 所示,表中列出的是 20℃ 时介质介电常数的理论值,其中乙醇-水混合溶液分别按 2:1、1:1 和 1:3 的比例混合而成,其介电常数根据 2 种液体配比的权重按线性关系计算得到。

表 1 空气、水、有机溶液的介电常数(20℃)

Tab.1 Permittivities of air, water and organic solution(20℃)

序号	介质	介电常数
1	空气	1
2	苯	2.27
3	乙酸乙酯	6.02
4	正辛醇	10.24
5	异丁醇	16.81
6	异丙醇	20.25
7	乙醇	24.50
8	乙醇-水(2:1)	43.03
9	乙醇-水(1:1)	52.30
10	乙醇-水(1:3)	66.20
11	去离子水	80.10

试验设备有 TDT 土壤水分测试仪、Agilent 公司的 Infiniium54853A 型高频采样数字示波器(带宽 1.5 GHz)和 10 个容积为 2 000 mL 的量筒。

3.1.2 试验方法

标准有机溶液测试的试验装置如图 6 所示。用 2 000 mL 的量筒分别量取 1 200 mL 表 1 中所列的溶液,用 TDT 土壤水分测试仪分别连接 P - U30 型和 P - U35 型探头对每种介质进行测量,测量信号在探头的传输时间并计算出介质的介电常数。表 1 中给出的有机溶剂的介电常数值为参考值,信号在探头的传输时间由高频数字示波器测量,测量结果作为传输时间的标准值。



图 6 标准溶液测试的试验装置和所用的仪表与探头

Fig. 6 Experiment device for organic solution testing and TDT meter with probe

3.1.3 试验结果与分析

图 7a、7b 是 TDT 土壤水分测试仪分别对 P-U30 型探头和 P-U35 型探头在有机溶液中信号传输时间的测量结果,从图中可以看到,TDT 土壤水分测试仪测量的传输时间与示波器观测到的时间偏差非常小,使用 P-U30 型探头和 P-U35 型探头时测量的均方根误差(RSME)仅为 53.8 ps 和 43.9 ps。

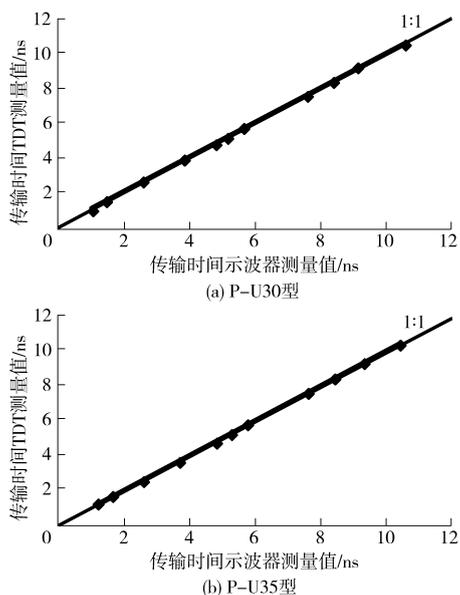


图 7 TDT 土壤水分测试仪对有机溶液中信号传输时间的测试结果

Fig. 7 Measurement results of signal transmission time along probe in organic solution by TDT soil moisture meter

图 8a、8b 分别是 TDT 土壤水分测试仪用 P-U30 型探头和 P-U35 型探头测量的结果和有机溶液介电常数标准值的对比。从对比结果可以看出,测量值与 1:1 线非常接近,使用 P-U30 型探头测量的 RSME 为 1.624,使用 P-U35 型探头测量的 RSME 为 0.791,说明使用 2 种 U 型探头可以准确地直接测量出探头周围介质的介电常数。

3.2 土壤水分准确度测试

准确度是表征测量仪器品质和特性的最主要的性能指标。土壤的理化性质非常复杂,很多因素都会影响测量的结果,在田间实际测量时,土壤的空间变异性也会带来许多不确定因素,因此准确度试验

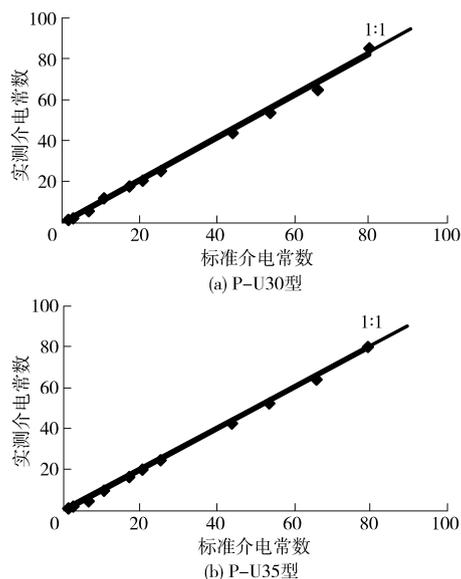


图 8 TDT 土壤水分测试仪对有机溶液介电常数的测量结果

Fig. 8 Measurement results of organic solution permittivity by TDT soil moisture meter

是在实验室条件下进行的,测试的对象是制备好的土壤标准试样,制备方法采用的是渗水法^[20]。

3.2.1 试验材料与设备

砂土:砂粒含量为 99.33%,粉粒含量为 0.67%,粘粒含量为 0,电导率为 0.06 dS/m;壤土:砂粒含量为 51.4%,粉粒含量为 42%,粘粒含量为 6.6%,电导率为 0.15 dS/m。

试验设备有 TDT 土壤水分测试仪、孔径为 3 mm 和 1 mm 的土壤筛、规格为 $\Phi 90$ mm \times 250 mm 的有机玻璃圆桶(有效容积为 1 500 mL)、不锈钢托盘、100 mL 的量筒、TC10KB 型电子秤(量程 10 kg,精度 0.1 g)以及恒温干燥箱。

3.2.2 试验方法

首先将采集到的土壤预处理,在阴凉通风处风干,用孔径 3 mm 的土壤筛过筛 1 遍,然后再用孔径 1 mm 的土壤筛过筛 1 遍。将筛好的土壤平铺于不锈钢托盘上在 105℃ 的干燥箱中干燥 24 h 后,冷却至室温(20℃)。将干燥后的土样装入有机玻璃圆桶中,同时将 TDT 传感器探头埋入土柱中并压实,确保土柱的体积 V_0 为 1 500 mL,用电子秤称量装入有机玻璃土柱中的干土质量为 W_s 。然后用量筒量取 50 mL 的水加入土柱中,放置 30 min 左右,待土柱表面无自由水,充分渗入土壤后,用电子秤称量土柱中湿土质量 W ,同时用 TDT 土壤水分测试仪进行测量,记录测量结果。测量装置如图 9 所示。重复以上步骤逐次加水至土柱中,直到土壤饱和为止。

按照以上方法分别用 P-U30 型和 P-U35 型探头进行试验,记录试验结果。以上试验土壤的干



图9 渗水称量法土壤测试试验装置

Fig.9 Experiment device for soil testing by percolation gravimetric method

容重为

$$\rho_b = \frac{W_s}{V_0} \quad (6)$$

TDT 土壤水分测试仪的测量敏感区主要集中在沿探头方向 $\Phi 90 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆柱体积范围内,测量的是土壤平均体积含水率,水分分布不均匀对测量结果影响不大。因此加水后土壤实际体积含水率可表示为

$$\theta_v = \frac{W_w}{V_0} = \frac{W - W_s}{V_0} \quad (7)$$

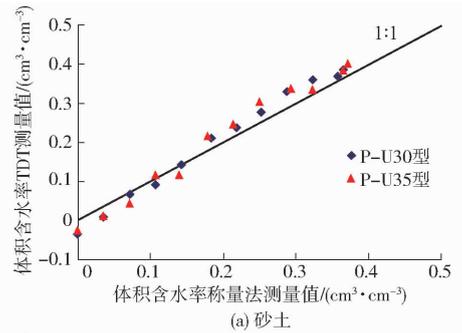
由式(7)计算出土壤体积含水率作为标准值,TDT 土壤水分测试仪测量的结果与标准值进行比较。

3.2.3 试验结果分析

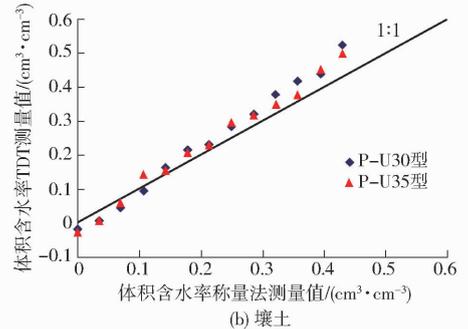
图 10a、10b 分别是使用 P-U30 型和 P-U35 型探头对砂土和壤土测试结果与称量法测量结果的对比。TDT 土壤水分测试仪测量的读数均是在未对壤土进行特殊标定情况下,用式(1)所示的 TOPP 方程测量出的结果。

从图 10 可以看出对 2 种类型的土壤进行测量时,测量较干的土壤结果偏低,在水分接近饱和时测量结果偏高,2 种探头测量结果趋势相同。

表 2 是使用 2 种探头在 2 种不同类型的土壤中测量时,最大误差和均方根误差的比较。从表中可以看出 TDT 土壤水分测试仪对砂土的测量准确度较高,对壤土测量的偏差较大;使用 P-U35 型探头的测量准确度高于 P-U30 型探头。使用 P-U35 型探头测量砂土的均方根误差仅为 $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 有较高的测量精度。



(a) 砂土



(b) 壤土

图 10 TDT 土壤水分测试仪对砂土和壤土的测量结果

Fig.10 Measurements of sand and loam by TDT soil moisture meter

表 2 TDT 土壤水分测试仪土壤测试试验结果

Tab.2 Measurement results of soil testing by TDT

土壤类型	误差极限		均方根误差	
	P-U30 型	P-U35 型	P-U30 型	P-U35 型
砂土	0.054	0.044	0.034	0.029
壤土	0.095	0.070	0.046	0.039

4 结论

(1)设计的基于时域传输原理的 TDT 土壤水分测试仪,能够通过测量高频电磁波在土壤中单程的传输速度,实现对土壤水分的测量。

(2)通过对有机溶液的测试,验证了 TDT 土壤水分测试仪能够准确测量信号在探头波导上传播的时间,从而准确地测量介质的介电常数。

(3)对砂土和粘壤土的测试试验表明,TDT 土壤水分测试仪在不进行特殊标定的情况下,使用 TOPP 方程可以准确测量砂土和壤土的土壤含水率。使用 P-U35 型探头测量的结果优于 P-U30 型探头。

参 考 文 献

- 1 TOPP G C, DAVIS J I, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. applications of wetting fronts and steep gradients[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 672-678.
- 2 TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(1): 19-24.
- 3 TOPP G C, REYNOLDS D W. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 47(1-2): 125-132.
- 4 BLONQUIST J M Jr, JONES S B, ROBINSON D A. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics[J].

- Journal of Hydrology, 2005, 314(1-4): 235-245.
- 5 ANDREWS J R. Time domain reflectometry (TDR) and time domain transmission (TDT) measurement fundamentals [J]. Application Note AN-15, Picosecond Pulse Labs, Boulder, CO, 2004.
 - 6 MASBRUCH K, FERRET P A. A time domain transmission method for determining the dependence of the dielectric permittivity on volumetric water content; an application to municipal landfills [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(2): 186-192.
 - 7 HARLOWR C, BURKE E J, FERRE P A. Measuring water content in saline sands using impulse time domain transmission techniques [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(2): 433-439.
 - 8 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)
 - 9 付光杰, 熊春宇. 时域传输技术(TDT)在原油含水率监测仪中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(6): 53-55.
 - 10 WILL B, GERDING M. A time domain transmission method for the characterization of inhomogeneous dielectric materials [J]. Asia Pacific Microwave Conference, 2009: 409-412.
 - 11 YOUNG G D, ADAMS B A, TOPP G C. A portable data collection system for simultaneous cone penetrometer force and volumetric soil water content measurements [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(1): 23-31.
 - 12 BURKE E J, HARLOW R C, FERRE T P A. Measuring the dielectric permittivity of a plant canopy and its response to changes in plant water status: an application of impulse time domain transmission [J]. Plant and Soil, 2005, 268(1): 123-133.
 - 13 VARBLE J L, CHÁVEZ J L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado [J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1): 93-106.
 - 14 POLTORADNEV M, INGWERSEN J, STRECK T. Calibration and application of aquaflex TDT soil water probes to measure the soil water dynamics of agricultural topsoil in southwest Germany [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2015, 141(6). DOI:10.1061/(ASCE)/R.1943-4774.0000838.
 - 15 TOPP G C. Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.
 - 16 ROBINSON D A, SCHAAP M G, OR D, et al. On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials [J]. Water Resources Research, 2005, 41(2): 199-207.
 - 17 章坚武, 张数明. TDC-GP2 在激光测距传感器中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2009(8): 74-76.
 - 18 周立功, 张华. 深入浅出 ARM7-LPC213x/214x(上册) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
 - 19 TOPP G C, LAPEN D R, EDWARDS M J, et al. Laboratory calibration, in-field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 633-641.
 - 20 QUINONES H, RUELLE P, NEMETH I. Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors [J]. Irrigation and Drainage, 2003, 52(3): 203-217.

~~~~~

(上接第 180 页)

- 20 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 288-292.  
PENG Li, WANG Dingyong. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing municipality [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 288-292. (in Chinese)
- 21 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 规模化养殖畜禽粪便量估算及环境影响研究 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 733-737.  
YAN Bojie, ZHAO Chunjiang, PAN Yuchun, et al. Estimation of the amount of livestock manure and its environmental influence of large-scaled culture based on spatial information [J]. China Environmental Science, 2009, 29(7): 733-737. (in Chinese)
- 22 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1-11.  
YANG Fei, YANG Shiqi, ZHU Yunqiang, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 1-11. (in Chinese)
- 23 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.  
ZHU Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6. (in Chinese)
- 24 刘彦随, 李裕瑞. 中国县域耕地与农业劳动力变化的时空耦合关系 [J]. 地理学报, 2010, 65(12): 1602-1612.  
LIU Yansui, LI Yurui. Spatio-temporal coupling relationship between farmland and agricultural labor changes at county level in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(12): 1602-1612. (in Chinese)
- 25 马礼, 唐毅, 牛东宇. 北方农牧交错带耕地面积变化驱动力研究——以涪源县近 15 年为例 [J]. 人文地理, 2008(5): 17-21.  
MA Li, TANG Yi, NIU Dongyu. Driving forces of cultivated land change in transitional area between pastoral and agricultural—a case of cultivated land change of Guyuan County in the last 15 years [J]. Human Geography, 2008(5): 17-21. (in Chinese)
- 26 田玉军, 李秀彬, 马国霞. 耕地和劳动力禀赋对农村劳动力外出务工影响的实证分析——以宁夏南部山区为例 [J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2160-2164.  
TIAN Yujun, LI Xiubin, MA Guoxia. Impacts of household labor and land endowment on rural-to-urban labor migration; a case study on mountainous areas of southern Ningxia [J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2160-2164. (in Chinese)