

基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术*

王克栋¹ 王一鸣² 冯磊² 杨卫中²

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

【摘要】 针对土壤水分测量的特点,提出了用高频正弦波代替脉冲信号作为测试信号,利用相位检测原理测量信号传播时间,从而测量土壤含水量的方法。设计了由高频信号发生器、相位检测器、微处理器和土壤水分探头等组成的 P-TDR 原理样机。试验表明,该样机测量信号传播时间的精度可达到 10 ps,在砂土、壤土和粘壤土中的土壤含水量测量结果与称重法对比差值不超过 0.03。

关键词: 土壤含水量 介电常数 时域反射 相位检测

中图分类号: S126; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0072-05

Measurement of Soil Moisture Based on Phase Detecting Principle

Wang Kedong¹ Wang Yiming² Feng Lei² Yang Weizhong²

(1. College of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

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

Abstract

The basic principle of time domain reflectometry used for soil moisture measurement is introduced, and the disadvantages of currently available TDR instruments are discussed as well as their advantages. A new TDR system, called P-TDR, composed of a high-frequency signal generator, a phase detector, a microprocessor and a soil moisture probe is developed. Single-frequency sinusoidal voltage signal is adopted as test signal, and the travel time of the test signal along with probe embedded in moist soil is measured by a phase detector instead of high-speed sampling oscilloscope, from which the soil water content will be estimated. It has high accuracy and resolution in travel time measurement. Calibration experiments are conducted in sand, loam soil and clayey loam soil samples with the volumetric water contents varied from zero to saturation. The experimental results show that the measuring deviation is less than 0.03 between P-TDR and gravimetric sampling method.

Key words Soil moisture, Dielectric constant, TDR, Phase detecting

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、快速和准确地监测土壤水分,以确保对农作物适时、适量的灌溉,或者结合气象预报对未来土壤水分状况进行预测,作为区域调水、配水和制定灌溉计划的参考依据。

时域反射仪(time domain reflectometry, 简称

TDR)是最先进的土壤水分测量仪器之一。与干燥法(称重法)、张力计、中子仪等相比,TDR具有快速、准确、对土壤破坏性小、无辐射污染、可长期在线监测等优点^[1]。自20世纪80年代以来,TDR土壤水分测试仪在农业、林业、建筑业、矿业和储藏业等领域均得到了广泛应用。

我国使用的TDR土壤水分测试系统主要从美国和加拿大等国进口,价格昂贵,维修不便,严重阻

碍了 TDR 在我国生产实践中的推广使用。本文研制基于相位检测原理的 TDR 土壤水分测试仪, 并对其进行试验研究。

1 测量原理和方法

TDR 早期主要是作为同轴电缆和电路板故障检测的工具。电磁波沿电缆或线路传播时, 在阻抗不连续处会发生反射, 通过记录和分析反射回波的波形, 可以判断故障点的位置和故障的性质。在实际应用中发现, 电磁波沿电缆传播的速度与其周围介质的相对介电常数的平方根成反比, 即

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (1)$$

式中 v ——电磁波在介质中传播的速度, m/s

c ——电磁波在真空中传播的速度, m/s

K_a ——介质的相对介电常数

因为水的相对介电常数(室温下约为 80)远大于干土(3~5)和空气(1), 所以含水土壤的混合介电常数很大程度上取决于其中水的体积分数。使用 TDR 仪测量出土壤的介电常数, 就可以根据标定公式计算出其体积含水量^[3]。

1.1 传统的 TDR 土壤水分测量方法

信号发生器产生一个具有陡峭上升沿的阶跃电压信号, 以电磁波的形式沿同轴电缆和埋入土壤中的探针(长度为 L)传播。由于同轴电缆和探针的阻抗不同, 部分电磁波在同轴电缆与探针的连接处(即探针首端)发生反射并沿同轴电缆传回; 剩下的电磁波继续沿探针传播, 在探针末端被全部反射并传回。这两部分反射信号均被高速采样示波器记录下来, 使用双切线法可以确定信号传播的时间^[1], 如图 1 所示。其中 t_1 是在探针首端反射的信号被示波器捕获的时间, t_2 是在探针末端反射的信号被示波器捕获的时间, θ_v 为土壤体积含水量。

考虑到电磁波在探针上来回传播的距离为 $2L$, 传播的时间为 $t_2 - t_1$, 则由式(1)可得土壤介电常数计算公式为

$$K_a = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left[\frac{c(t_2 - t_1)}{2L}\right]^2 \quad (2)$$

Topp 等使用该方法测量了土壤的介电常数, 得出的计算土壤体积含水量的纯经验公式为^[3]

$$\theta_v = (-530 + 292K_a - 5.5K_a^2 + 0.043K_a^3) \times 10^{-4} \quad (3)$$

上述标定公式已被证明广泛适用于各种矿物质土壤。但在实际应用中, 由于土壤容重、有机质含量、电导率以及质地等因素都会影响 TDR 测量的结果^[4], 为了得到较高的测量精度, 仍需要对不同的

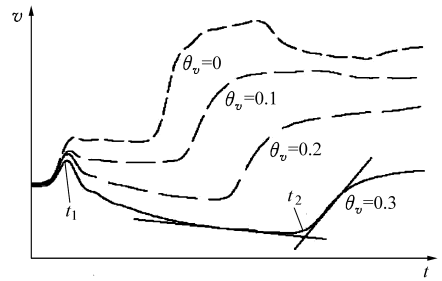


图1 传统的 TDR 测量信号传播时间的方法

Fig. 1 Travel time measuring method in conventional TDR systems

土壤进行单独的标定。

土壤含水量变化引起的信号传播时间变化量很小, 以通常使用的 15 cm 长探针为例, 当探针置于空气中和水中时, 信号传播的时间分别约为 1 ns 和 9 ns, 而当探头插入土壤中时, 信号传播的时间介于这二者之间。因此设计和制造传统的 TDR 土壤水分测试仪面临诸多难点^[5]: ①测试信号要求具有很陡峭的上升沿, 通常上升时间小于 0.2 ns, 这对信号发生器的要求很高。②捕获和记录 TDR 波形需要超高速的采样保持和模数转换芯片, 并且需要高精度的时钟源为其提供时间基准。③为了从 TDR 波形上分析得到高精度的时间测量值, 需要使用复杂的算法。

1.2 基于相位检测原理的 TDR 土壤水分测量方法

TDR 的基本原理是通过测量介电常数来确定土壤含水量, 探针长度一定时就转化为对信号传播时间的测量, 在不影响时间测量的情况下不必考虑反射信号的具体波形。因此本文提出了使用单一频率的正弦电压作为测试信号, 并采用相位检测器测量信号传播时间的 TDR 土壤水分测量方法(简称 P-TDR), 总体设计方案如图 2 所示。

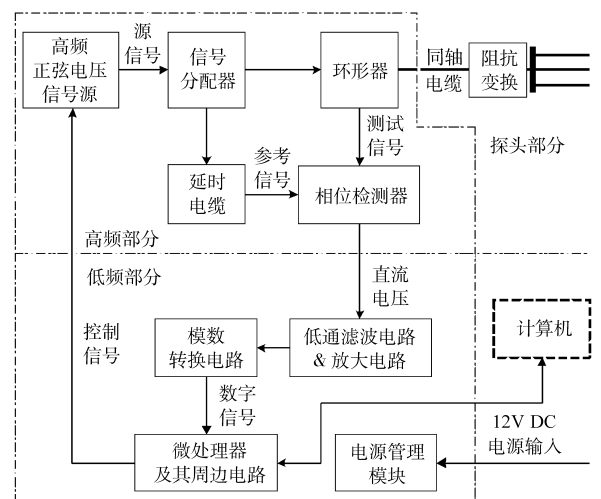


图2 P-TDR 系统总体设计方案

Fig. 2 Structure of P-TDR system

P-TDR 土壤水分测试仪主要由高频电路、低频电路和土壤水分探头 3 个部分组成。高频电路中的信号源用来产生正弦波测试信号, 环形器将由探针末端反射回来的信号与入射信号分离, 相位检测器将反射信号与参考信号的相位差转换为与之成比例的直流电压信号。低频部分的模数转换器将相位检测器的输出电压数字化并送入微处理器, 微处理器根据相位差计算出信号传播的时间, 再根据事先设置的标定公式计算出土壤含水量。土壤水分探头由 3 根直径为 4 mm、长 150 mm、间距 20 mm 的平行不锈钢棒构成, 通过特征阻抗为 50 Ω 的同轴电缆与 P-TDR 主机连接。

借助如图 3 所示的信号传播路径示意图来分析 P-TDR 的工作原理。

假设任意时刻 t 信号源的输出电压为

$$u_0 = A_0 \cos(\omega t + \phi_0) \quad (4)$$

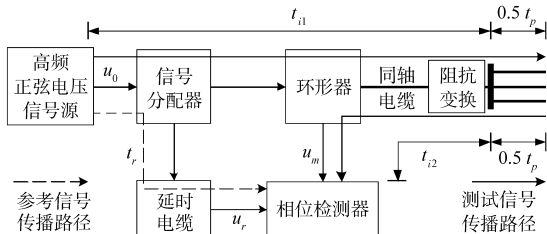


图 3 信号传播路径示意图

Fig. 3 Spread route of test signal in P-TDR system

沿不同路径传播到相位检测器的参考信号 u_r 和测试信号 u_m , 它们传播的时间分别为 t_r 和 t_m , 其相位比源信号分别落后 ωt_r 和 ωt_m , 则在 t 时刻它们的瞬时电压分别为

$$u_r = A_r \cos(\omega t + \phi_0 - \omega t_r) \quad (5)$$

$$u_m = A_m \cos(\omega t + \phi_0 - \omega t_m) \quad (6)$$

式中 u_0, u_r, u_m ——信号的瞬时电压, V
 A_0, A_r, A_m ——信号的电压幅值, V
 ω ——信号的角频率, rad/s
 ϕ_0 ——源信号的初相位, rad

因此相位检测器的两个输入信号的相位差为

$$\Delta\phi = \omega t_m - \omega t_r \quad (7)$$

从图 3 可以看出, 测试信号传播的时间 t_m 在逻辑上可分为两部分: 信号在探针上传播的时间 t_p 和信号在同轴电缆及仪器内部电路板上传播的时间 t_i 。前者是主要关注的时间, 它与探针周围土壤含水量有关, 而后者则仅与仪器本身有关。式(7)可改写为

$$\Delta\phi = \omega t_p + \omega(t_i - t_r) \quad (8)$$

则 $t_p = \frac{\Delta\phi}{\omega} - (t_i - t_r)$

式(7)和式(8)中 t_i 和 t_r 都仅取决于 P-TDR

仪器本身的结构和电路参数, 而与探针及探针周围的土壤无关。将土壤水分探头从 P-TDR 仪器上移除 (t_p 为零), 通过测量相位差并根据式(8)可确定 $t_i - t_r$ 的值。再将探头与 P-TDR 仪器相连并插入土壤中测量, 根据式(8)就可以计算出信号沿探针传播的时间 t_p 。

P-TDR 与传统的 TDR 系统相比, 不仅省掉了捕捉 TDR 波形所需的高速采样示波器, 而且省掉了窄上升沿阶跃信号发生器和高精度时间基准, 取而代之的是锁相环正弦信号发生器、环形器、相位检测器和低频模数转换器, 软件算法也变得相对简单, 所以降低了实现的难度和总成本。

传统的 TDR 土壤水分测试仪要求信号在探头与同轴电缆的连接处发生部分反射, 以便确定信号进入探针的时间。而 P-TDR 则要求避免信号在探头首端产生反射, 因为该反射会影响信号传播时间 t_p 的测量结果, 从而影响土壤含水量的测量结果。因此在同轴电缆与探针的连接处增加了一个阻抗变换电路, 并参考文献[6]中所提到的方法在探针上覆盖了厚度为 1 mm 的 PVC 绝缘涂层, 以减少信号在探针首端的反射, 提高土壤含水量测量精度。

2 试验结果及分析

2.1 信号传播时间测量试验

TDR 土壤水分测试仪本质上是测量信号在探针上传播的时间, 其时间测量的精度决定了土壤含水量测量的精度。为了验证 P-TDR 系统测量时间的性能, 在同轴电缆中进行了测试。取一段长度约为 1.2 m 的同轴电缆 (相对介电常数为 2.04), 一端通过 BNC 接头连接到 P-TDR 的信号输出接头, 另一端开路。P-TDR 的测试信号沿该同轴电缆传播, 在其末端被反射回来, 相位检测器和微处理器测量出信号沿电缆传播的时间。将被测电缆逐渐剪短, 用游标卡尺测量并记录被剪下的长度, 信号在该电缆中传播时间的理论值计算公式为

$$t_c = \frac{2L'}{c \sqrt{K_c}}$$

式中 t_c ——信号在电缆中传播的时间, s

L' ——被测同轴电缆的长度, m

K_c ——同轴电缆相对介电常数

P-TDR 测量的时间、理论计算的时间与同轴电缆长度的关系如图 4 所示。

试验数据分析表明, P-TDR 具有很高的时间测量精度, 在 0 ~ 12 ns 的范围内其测量结果与理论计算值的平均误差小于 10 ps, 测量分辨率可达到 1 ps, 与传统的 TDR 时间测量精度 (约 200 ps) 相比

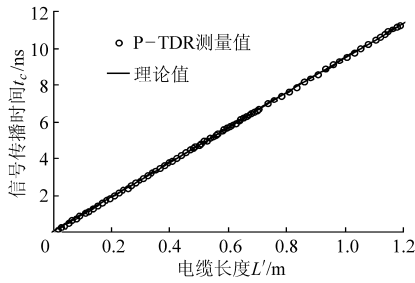


图 4 信号传播时间与同轴电缆长度关系曲线
Fig. 4 Relationship of the travel time of test signal and the length of coaxial cable

有很大提高。

2.2 土壤含水量测量试验

传统的 TDR 土壤水分测试仪通过体积含水量 θ_v 与土壤介电常数 K_a 之间的标定公式来计算土壤含水量^[1], 通常采用的标定公式有 Topp 等给出的纯经验的 $\theta_v - K_a$ 三次方程^[3], 以及基于介电混合模型的 $\theta_v - K_a^{0.5}$ 一次方程^[1-2]。

P-TDR 土壤水分测试仪通过相位差检测方法来测量信号在土壤水分探头上传播的时间, 但由于探针上覆盖了 PVC 绝缘涂层, 所以其测得的时间不能直接反映土壤的混合介电常数, 而是反映了探针周围所有介质的等效介电常数。探针周围的介质包括土壤固体颗粒、水、空气和 PVC 绝缘材料, 其等效介电常数是土壤混合介电常数、PVC 的介电常数以及它们的相对空间分布关系的函数。所以, P-TDR 土壤水分测试仪无法根据 $\theta_v - K_a$ 的关系来计算土壤含水量, 而是应该通过试验对体积含水量 θ_v 与信号传播时间 t_p 的关系进行标定, 再根据 $\theta_v - t_p$ 标定公式计算体积含水量。通常, 可以采用三次多项式对 $\theta_v - t_p$ 的关系进行拟合^[6]。

以我国农业土壤中常见的砂土、壤土和粘壤土为试验土样, 参照文献[7]中所描述的试验方案对 P-TDR 进行了标定试验。试验步骤如下:

(1) 将砂土风干后用最大孔径 2 mm 的筛子过筛, 然后放到干燥箱中在 105℃ 的温度下干燥 24 h, 在干燥的环境下冷却到室温备用。

(2) 取一个内径 15 cm、深 25 cm 的 PVC 桶, 用精密电子天平称出空桶的质量 m_0 , 确定要装填土壤的体积 V 并在桶内相应高度处做上标记。

(3) 根据事先确定的土样体积含水量 θ_v 计算所需水的体积 V_w 和质量 m_w (水密度为 1 g/cm³), 根据事先确定的土壤容积密度 ρ_b 计算出所需干土的质量 m_s 。

(4) 按照步骤(3)中计算的结果取干土和水混合均匀, 用分层填装法将其装入 PVC 桶中并将其压实至步骤(2)中所做标记处使其体积为 V 。土样的

准确容积密度和体积含水量分别为

$$\rho_b = \frac{m_s}{V} \quad \theta_v = \frac{V_w}{V}$$

(5) 将土壤水分探针插入所制作的土样中, 用 P-TDR 测量信号在探针中传播的时间 t_p , 测量 3 次取平均值。

(6) 重复步骤(2)~(5)制作各种不同含水量的土样, 计算其体积含水量并测量信号沿探针传播的时间, 直到土壤含水饱和。

(7) 使用壤土和粘壤土作为试验对象, 重复步骤(1)~(6)。

由于砂土、壤土和粘壤土的饱和含水量差异较大(分别约为 0.35、0.4、0.5), 且配制土样的难易程度不同, 经过取舍, 用这 3 种土壤分别配制了 14、13 和 12 种不同含水量的土样进行了测试。试验得到的数据及使用最小二乘法拟合得到的标定方程如图 5 所示。

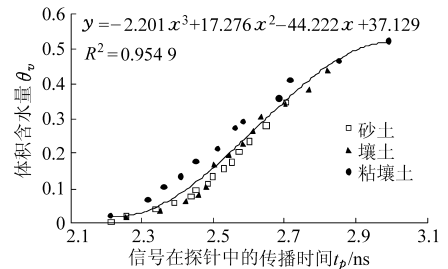


图 5 土壤含水量与信号在探针中的传播时间关系曲线
Fig. 5 Calibrated curve for P-TDR system

从图 5 可以看到, 在这 3 种不同质地的土壤中测量的结果有很好的 consistency, 将所有测量数据组合在一起, 使用三次方程进行拟合, 相关系数可达到 0.9549。

将上述试验中 P-TDR 测得的信号传播时间按图 5 中的标定方程换算为体积含水量, 与称重法得到的体积含水量比较, 结果如表 1 所示。

由表 1 数据分析可知, 在含水量从零到饱和的范围内, 使用 P-TDR 在砂土、壤土和粘壤土中测得的体积含水量与称重法相比, 均方根误差为 0.019, 最大误差不超过 0.03, 满足大多数应用的要求。

传统的 TDR 在含水量小于 0.5 的矿物质土壤中测量时, 可使用式(3)所示的三次方程计算体积含水量, 其测量结果与称重法相比均方根误差约为 0.013, 对于含水量大于 0.5 的土壤及粘粒含量较大的土壤则需要单独标定^[1]。P-TDR 土壤水分测试仪达到了与之相当的测量性能。

3 结束语

探讨了时域反射仪测量土壤含水量的基本原

表1 P-TDR与称重法对土壤含水量测量结果对比

Tab.1 Soil moisture measurement results of P-TDR and gravimetric sampling method

砂土($\rho_b = 1.576 \text{ g/cm}^3$)			壤土($\rho_b = 1.421 \text{ g/cm}^3$)			粘壤土($\rho_b = 1.277 \text{ g/cm}^3$)		
称重法	P-TDR	误差	称重法	P-TDR	误差	称重法	P-TDR	误差
0.005	0.019	0.014	0.015	0.019	0.004	0.022	0.019	-0.003
0.022	0.019	-0.003	0.037	0.050	0.013	0.067	0.039	-0.028
0.041	0.043	0.002	0.063	0.085	0.022	0.106	0.084	-0.022
0.058	0.071	0.013	0.081	0.105	0.024	0.135	0.109	-0.026
0.078	0.106	0.028	0.107	0.120	0.013	0.179	0.151	-0.028
0.097	0.115	0.018	0.166	0.159	-0.007	0.217	0.189	-0.028
0.114	0.143	0.029	0.194	0.197	0.003	0.275	0.245	-0.030
0.135	0.155	0.020	0.229	0.236	0.007	0.361	0.331	-0.030
0.158	0.183	0.025	0.264	0.265	0.001	0.293	0.265	-0.028
0.175	0.204	0.029	0.304	0.286	-0.018	0.412	0.387	-0.025
0.205	0.226	0.021	0.342	0.351	0.009	0.470	0.470	0.000
0.237	0.252	0.015	0.386	0.410	0.024	0.526	0.520	-0.006
0.282	0.299	0.017	0.438	0.449	0.011			
0.349	0.354	0.005						

理,在此基础上提出了一种使用单一频率的正弦电压作为测试信号,并利用相位检测原理来测量信号传播时间的TDR实现方法,研制了P-TDR土壤水分测试仪样机及与之配套使用的探头。在同轴电缆

中的试验表明,P-TDR在信号传播时间测量方面具有很高的精度;在砂土、壤土和粘壤土中的试验表明,P-TDR在土壤水分测量方面的性能与传统TDR相当。

参 考 文 献

- 1 Jones S B, Wraith J M, Or D. Time domain reflectometry measurement principles and applications [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(1): 141 ~ 153.
- 2 Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 444 ~ 475.
- 3 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574 ~ 582.
- 4 Roth K, Schulin R, Fluhler H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach[J]. Water Resources Research, 1990, 26(10): 2 267 ~ 2 273.
- 5 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.
- 6 Mojid M A, Wyseure G, Rose D A. The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils[J]. Irrigation Science, 1998, 18(2): 55 ~ 61.
- 7 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)
- 8 冯炜, 纪奕才, 沈绍祥, 等. 测试土壤含水率和电导率的时域反射仪系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 59 ~ 63.
Feng Wei, Ji Yicai, Shen Shaoxiang, et al. Design of time domain reflectometry for application of soil moisture and bulk electrical conductivity measurements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 59 ~ 63. (in Chinese)