DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.036

基于相位检测原理的TDR土壤电导率测量研究*

杨卫中[1,2]　王一鸣[1]　李保国[2]　王克栋[3]

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094;
3. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048)

【摘要】 介绍了基于相位检测的时域反射(P-TDR)技术的工作原理。对8种不同盐分含量的砂壤土土样在5个含水量水平下进行实验,结果显示,信号的反射系数随电导率增加单调减小。分别采用线性和二次多项式对测量结果进行建模实验,并选择二次多项式为P-TDR电导率测量模型,模型的决定系数达0.812以上。土壤含水量对电导率测量有较大影响,在分析了土壤含水量与多项式系数关系的基础上,最终建立了以土壤含水量和反射系数为变量的土壤电导率预测模型。土壤质地等因素对P-TDR电导率测量的影响还需通过田间现场测量实验进行研究。

关键词: 土壤　电导率　盐分　时域反射　相位检测

中图分类号: S237; S153　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2010)11-0183-05

Research of Soil Conductivity Measuring Technique with TDR Based on Phase Detecting Principle

Yang Weizhong[1,2]　Wang Yiming[1]　Li Baoguo[2]　Wang Kedong[3]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Resources and Environmental Sciences*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100094, *China*
3. *College of Computer and Information Engineering*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract

P-TDR is a new time-domain reflectometry based on the phase detection principle. It measures the travel time of testing signal by detecting phase difference of the incident and reflected waves, and thereby calculates the soil moisture content. The P-TDR measurement accuracy of soil moisture content reaches the level of the traditional TDR. But if it is used to measure soil conductivity (σ) by detecting the testing signal reflectivity (ρ), verification is necessary. The measurement method of soil conductivity and the principle of P-TDR were introduced firstly. Then an experiment was arranged. The testing signal reflectivity of P-TDR was measured in 8 sandy loam soil samples, which had different salt contents under five levels of soil moisture content (θ). The relationship between ρ and σ was modeled respectively by using linear and quadratic polynomial model, and the quadratic polynomial was chose for P-TDR electrical conductivity measurement model, whose determination coefficient was above 0.812. The experiment results also showed that soil moisture content had greater influence on the electrical conductivity measurement. After the analysis of the relationship between soil moisture and the quadratic polynomial coefficients, the predictive model of soil electrical conductivity, which is the function of ρ and θ, was established. The experiments of in-situ measurements are needed to research the influence of factors such as soil texture on the P-TDR soil conductivity measurement.

Key words　Soil, Electrical conductivity, Salinity, Time-domain reflectometry, Phase detecting

收稿日期: 2009-09-22　修回日期: 2009-10-26

* 国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z264)

作者简介: 杨卫中,副教授,博士后,主要从事土壤水分测量和空间变异性研究, E-mail: yamantaka.yang@gmail.com

通讯作者: 王一鸣,教授,博士生导师,主要从事土壤水分测量和谷物品质检测技术研究, E-mail: ym_wang@263.net

引言

时域反射仪(time-domain reflectometry,简称TDR)的土壤水分测量技术不仅具有土体扰动小、能长期连续自动监测、灵敏度高、操作简单、无须频繁整定等优点,而且还能够同时测量土壤含水量和电导率,这一独特优点使其越来越受到重视。

应用于农业最初的 TDR 技术是针对土壤含水量的精确测量而提出的[1~2],1975 年 Giese 和 Tiemann 通过实验发现,将 TDR 探头浸入具有不同电导率的溶液中,电磁脉冲的形状会发生改变,由此可估计出溶液的电导率[3]。1984 年 Dalton 等通过研究 TDR 测量信号在土壤中传播的衰减规律,阐述了 TDR 土壤电导率测量方法[4]。目前实际应用的 TDR 土壤水分测量设备中有些即具有土壤电导率测量功能,如:Trase System I、TDR100 和 Easy Tast FOM/mts 等[5]。

由于传统 TDR 系统的研发技术难度大、系统成本高,阻碍了 TDR 在我国的推广应用。中国农业大学研发了基于相位检测原理的时域反射(P-TDR)技术。与传统 TDR 技术不同的是,P-TDR 使用单一频率的正弦电磁波作为测试信号,并通过相位检测的方式来测量电磁波传播时间,极大地降低了系统成本和开发难度。实验表明 P-TDR 系统在土壤含水量测量方面基本达到传统 TDR 系统的测量水平[6]。本文通过实验和理论分析对 P-TDR 系统的土壤电导率测量进行研究。

1 测量原理和方法

1.1 P-TDR 系统原理

传统 TDR 测量土壤含水量和电导率的原理是由信号发生器产生一个具有极陡上升沿的阶跃电压信号,该信号以电磁波的形式沿同轴电缆和埋入土壤中的探针传播,并在探针末端产生反射,超高速采样示波器将入射与反射信号的叠加信号记录下来,系统根据所记录的波形计算信号沿探针传播的时间,并据此计算出土壤含水量[7]。同时,系统根据所记录的波形幅度变化信息计算出土壤表观电导率[3~4,8~11],然后根据事先建立的模型估计出土壤溶液电导率[12~14]。

P-TDR 在原理上没有使用传统 TDR 所采用的快速阶跃信号发生器、超高速 A/D 转换器和采样示波器等部件,使其在技术难度和成本上都低于传统 TDR,易于在国内推广应用。

P-TDR 系统原理如图 1 所示。高频正弦信号发生器输出测试信号 v_t 和参考信号 v_r,v_t 和 v_r 的频率、幅度和初相位完全一致。v_t 经环行器、同轴电缆和阻抗变换电路进入探针并在探针末端产生反射,环行器将反射信号分离出来送入相位检测器和检波器。同时,v_r 经延迟线后也输入相位检测器和检波器。延迟线的作用是使 v_r 的传输产生时间延迟,延迟时间应正好等于 v_t 在环行器、同轴电缆和阻抗变换电路上的传输时间。相位检测器将这两路正弦信号的相位差转换为与之成比例的直流电压信号后送入微处理器,微处理器根据相位差计算出电磁波在探针上的传播时间,再根据事先设置的标定公式计算出土壤含水量;检波器对 v_r 和 v_t 进行整流,得到 v_r 和 v_t 的电压幅值 V_r 和 V_t,这两个电压幅值经 A/D 变换后送入微处理器计算信号的反射系数 $\rho(V_t/V_r)$。由于环行器、电缆和阻抗匹配电路对信号的衰减很小,可忽略不计,则反射系数 ρ 反映了测试信号在沿传感器探针传播时由土壤的介质损耗和传导电流引起的信号衰减,因此 ρ 与土壤电导率满足一定的函数关系,该函数关系可通过标定实验事先确定,微处理器根据反射系数 ρ 和标定公式即可计算出土壤电导率。

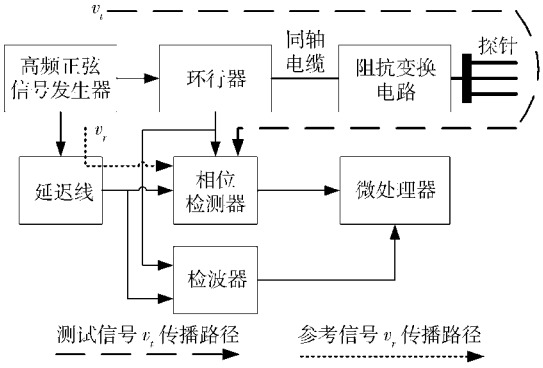

图 1 P-TDR 系统原理图

Fig. 1 Principle sketch of P-TDR system

1.2 土壤电导率测量原理与方法

农作物的产量与土壤的理化特性关系密切,土壤电导率是反映土壤理化特性的重要指标之一,精确测量农田土壤电导率为建立土壤特性空间分布提供基础数据,对精细农业十分重要[15~16]。

电导率是衡量物质导电能力的指标。土壤导电能力与土壤中盐离子浓度有很大关系。Rhoades 等曾经指出,土体中的导电通路主要有液相、液相固相混合和固相,这 3 条通路的电导率组成了土壤表观电导率[17]。由于土壤溶液中的盐离子对植物生长产生较大影响,如渗透胁迫主要与土壤溶液的盐离子浓度有关,因此农业生产中更加关心的是土壤溶液电导率,诸多情况下所说的土壤电导率就是指土壤溶液电导率。测量土壤溶液电导率的标准方法是

土壤浸提液电导测量法，该方法首先需制备土壤浸提液，然后利用电极法测量土壤浸提液的电导率[18]。根据土水比的不同土壤浸提液主要有饱和土壤浸提液以及土水比为 1∶1、1∶2和 1∶5的土壤浸提液。因为土水比为 1∶5的土壤浸提液制备相对容易，在国内较为常见[19]。土壤浸提液电导率测量方法具有较高的精度，虽然这种方法费时费力、实时性差，但作为一种标准测量方法是农业生产中评价土壤电导率的基准[20]。

本文将以土水比为 1∶5的土壤浸提液电导率 σ 作为土壤电导率标准，对 P-TDR 的反射系数与电导率关系进行标定。

2　P-TDR 土壤电导率测量实验

2.1　实验设计

Rhoades 通过实验证明，土壤固相电导率与土壤中的粘粒含量线性相关，对于砂土由于缺乏固体粘粒，且不能滞留孔隙中的水分，所以固相表观电导率很小，可忽略不计[12~13]。本研究选择砂壤土为实验对象，这样既可以减小土壤质地的影响又能够使土壤含水量有一定的梯度范围。

用分析纯的 KCl 和去离子水以 0.3 dS/m 的间隔配制 8 种不同电导率的土样，土样电导率（dS/m）的设计值为：0、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1，由于土壤本身具有微弱的电导率，所以加入 KCl 后土样的实际电导率与设计值会有微小差别，因此，实验后用 PET2000 型电导率仪测量每个土样的 1∶5土壤浸提液电导率 σ 作为土样电导率的标准。对上述 8 个土样以 0.05 m^3/m^3 的土壤含水量增量依次加入去离子水直至饱和，用 P-TDR 技术测量各个含水量水平下土壤的反射系数。通过分析反射系数的变化规律，研究 P-TDR 测量土壤电导率的有效性，并且对测量结果进行标定。实验过程中环境温度控制在 20℃左右。实验中采用平行三棒式探头，不锈钢探针直径为 4 mm、长为 30 mm、棒间距离为 20 mm。

2.2　实验准备

将实验用土风干后用最大孔径 2 mm 的筛子过筛，然后放到烘箱中以 105℃的温度烘干 24 h，在干燥的环境下冷却到室温备用。用于装填土样的 PVC 桶内径为 15 cm、深为 25 cm，本实验设定需装填的土壤体积 $V_s = 800$ mL，并在桶内相应高度处作标记，以便每次装填时使土样体积保持不变。根据事先确定的土壤干密度 $\rho_b = 1.7$ g/cm^3 计算出所需干土的质量 $m_s = \rho_b V_s = 1\,360$ g，用 TC10KB 型电子天平称取该质量的干土 8 份。TC10KB 型电子天平的最大称量为 10 kg、灵敏度为 0.1 g。根据实验设计的土壤电导率 σ（dS/m）计算每个土样需掺入 KCl 的量值。计算方法是：若要使土样土水比为 1∶5 的土壤浸提液的电导率为 σ，已知浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液电导率在 25℃时为 128.8 dS/m，KCl 分子量为 74.5 g/mol，水的密度为 1 000 g/L，土样的土壤质量为 m_s，则所需 KCl 质量 m_{KCl} 为

$$m_{KCl} = \frac{\sigma/128.8 \times 74.5 \times 5 m_s}{1\,000} \tag{1}$$

2.3　实验步骤

（1）首先配制体积含水量 $\theta = 0.05$ m^3/m^3 土样。取 $0.05V_s$ 去离子水，用 LA164 型电子分析天平（量程：160 g，最小分度值：0.1 mg）称取按实验设计的土壤电导率所需 KCl 量值，将其溶于该 $0.05V_s$ 水中。将干土和 KCl 溶液倒入金属盆进行充分搅拌混合均匀，用分层装填法装入 PVC 桶中。按上述步骤装填好 8 个土样后，密封静置 24 h，然后用P-TDR分别测量并记录 8 个土样的信号反射系数 ρ。

（2）再次称取 $0.05V_s$ 去离子水，将其与每个土样的土壤重新充分搅拌混合均匀后装入 PVC 桶中静置 24 h，得到 8 个溶质含量不变但体积含水量增加到 0.10 m^3/m^3 的土样，再次测量并记录 8 个土样的信号反射系数 ρ。

（3）以 0.05 m^3/m^3 的土壤含水量增量重复上述步骤至土壤体积含水量达 0.25 m^3/m^3 时，静置 24 h 后土样表面有少量水分渗出，说明土壤已达饱和状态，测量各土样的信号反射系数后，进入下一步骤。

（4）从每个土样中取少量的土，按土水质量比为 1∶5的比例计算并称取去离子水，计算过程中应考虑实验中已加入的去离子水的量，均匀混合静置 24 h后取澄清液，使用 PET2000 型电导率仪测量澄清液的电导率。该值即为每个土样的电导率标准值。

3　实验结果与分析

3.1　实验结果

上述实验在 5 个土壤含水量情况下对 8 个不同电导率的土样分别测量信号的反射系数，共得到 5 组 40 个反射系数 ρ，测量结果如表 1 所示。

3.2　分析与建模

绘制以土壤含水量为参数的土壤电导率与反射系数关系的散点图，如图 2 所示，可看出反射系数 ρ 与土壤电导率和土壤含水量有关，但由含水量不同引起的变化要远小于由土壤电导率不同所引起变化。在某一含水量水平下，反射系数随土壤电导率增加单调减小，说明电导率越高信号衰减越大。因

此 P-TDR 系统通过测量信号反射系数和土壤含水量就可以达到测量土壤电导率的目的。进一步观察发现,在土壤含水量取值较小时反射系数与电导率近似呈线性反比关系,当土壤含水量增加至接近或达到饱和时,反射系数随土壤电导率增加其减小趋势逐渐趋缓,偏离了线性关系。

表 1 P-TDR 在砂壤土中的信号反射系数 ρ

Tab. 1 Signal reflection coefficient ρ of P-TDR in sandy loam

体积含水量 θ/m^3·m^{-3}	电导率 σ/dS·m^{-1}							
	0.06	0.34	0.62	0.92	1.20	1.64	1.82	2.07
0.05	0.992	0.942	0.906	0.887	0.860	0.837	0.809	0.772
0.10	0.986	0.925	0.884	0.856	0.827	0.788	0.762	0.734
0.15	0.977	0.917	0.870	0.845	0.800	0.764	0.742	0.705
0.20	0.969	0.908	0.862	0.831	0.789	0.758	0.750	0.730
0.25	0.962	0.906	0.860	0.838	0.797	0.774	0.767	0.765

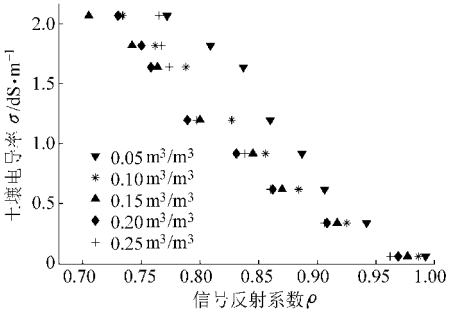

图 2 特定体积含水量下土壤电导率与信号反射系数的关系

Fig. 2 Relationship of σ and ρ under the certain θ

分别采用线性模型和二次多项式模型进行拟合实验。考虑到当反射系数 $\rho=1$ 时表示没有信号衰减,对应电导率应为零,并且电导率随反射系数增加应单调减小,因此模型表达式分别为

线性模型

$$\sigma = A(\rho - 1) \tag{2}$$

二次多项式模型

$$\sigma = A(\rho - 1)^2 \tag{3}$$

模型的拟合结果如表 2 所示。对表中决定系数 R^2 的分析发现,线性模型在低含水量情况下拟合效果较好,而二次多项式模型则正好相反,考虑到实际应用情况,选择二次多项式作为 P-TDR 的电导率测量模型。这时,在各个含水量情况下 R^2 值均大于 0.812,均方根误差 *RMSE* 则小于 0.294 dS/m。

表 2 回归模型的决定系数和均方根误差

Tab. 2 Determination coefficients and *RMSE* of models

含水量 θ / m^3·m^{-3}	R^2		*RMSE*/dS · m^{-1}	
	二次	线性	二次	线性
0.05	0.812	0.963	0.294	0.131
0.10	0.912	0.960	0.201	0.137
0.15	0.919	0.954	0.193	0.145
0.20	0.989	0.901	0.071	0.214
0.25	0.975	0.841	0.107	0.271

各含水量水平下标定公式的系数 A 如图 3 所示。可见,标定方程系数 A 是土壤含水量的函数,采用二次多项式对 A 与 θ 的关系 $A(\theta)$ 进行拟合,结果为

$$A(\theta) = 1\,468\theta^2 - 531.76\theta + 75.474 \tag{4}$$

图 3 绘出了拟合曲线,决定系数 $R^2 = 0.99$。

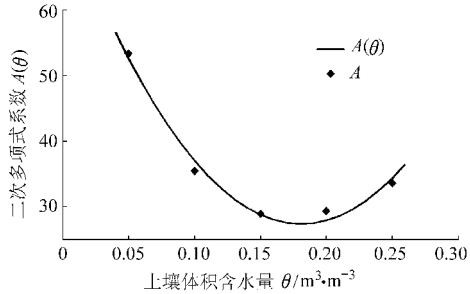

图 3 二次多项式模型系数与土壤体积含水量的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the coefficient of quadratic polynomial model and volumetric moisture content θ

将式(4)代入式(3),得 P-TDR 测量土壤电导率的标定公式为

$$\sigma = (1\,468\theta^2 - 531.76\theta + 75.474)(\rho - 1)^2 \tag{5}$$

由表 2 两种模型的 R^2 值发现,对于线性模型,当土壤含水量增加时,拟合精度持续下降,而对于二次模型,土壤含水量较大时($\theta = 0.20$ m^3/m^3)拟合精度最高。因此如果希望在所有含水量情况下均保持较高的测量精度,可考虑将土壤含水量分为高、低两个区间,分别采用线性和二次模型建模。

上述结果是在实验室砂壤土情况下获得的,对自然条件下不同质地土壤的情形还需要进一步研究。

4 结论

(1) P-TDR 系统的信号反射系数与土壤电导率和土壤含水量有关,但土壤电导率的影响更显著,因此 P-TDR 系统可以用于土壤电导率测量。

(2) P-TDR 系统土壤电导率预测模型可采用形

式为 $\sigma = A(\theta)(\rho - 1)^2$ 的二次多项式预测模型，该模型的 R^2 在 0.812 以上，*RMSE* 则小于 0.294 dS/m。

（3）土壤含水量对 P-TDR 电导率测量的影响较大，如果希望获得更高的测量精度可以将土壤含水量分为高、低两个区间，分别采用线性和二次模型建模。

参 考 文 献

1 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574 ~ 582.

2 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: Ⅰ. applications to wetting fronts and steep gradients[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46(4):672 ~ 678.

3 Giese K, Tiemann R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: improved analysis of the step response waveform[J]. Adv. Mol. Relax. Process, 1975, 7(1):45 ~ 59.

4 Dalton F N, Herkelrath W N, Rawlins D S, et al. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe[J]. Science, 1984, 224:989 ~ 990.

5 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.

6 王克栋, 王一鸣, 冯磊, 等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):72 ~ 76.
Wang Kedong, Wang Yiming, Feng Lei, et al. Research of soil moisture measuring technique based on phase detecting principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):72 ~ 76. (in Chinese)

7 Quinones H, Ruelle P, Nemeth I H. Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors[J]. Irrigation and Drainage, 2003, 52(3):203 ~ 217.

8 Topp G C, Yanuka M, Zebchuk W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resour. Res., 1988, 24(7):945 ~ 952.

9 Yanuka M, Topp G C, Zegelin S, et al. Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses, theoretical considerations for applications to soil and water[J]. Water Resour. Res., 1988, 24(7):939 ~ 944.

10 Zegelin S, White I, Jenkins D R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resour. Res., 1989, 25(11):2 367 ~ 2 376.

11 Nadler A, Dasberg S, Lapid I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55(4):938 ~ 943.

12 孙玉龙, 郝振纯, 陈启慧, 等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6):69 ~ 73.
Sun Yulong, Hao Zhenchun, Chen Qihui, et al. Relationship among ionic strength and electrical conductivity of soil solution and soil bulk conductivity[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(6): 69 ~ 73. (in Chinese)

13 Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(2): 433 ~ 439.

14 Vogeler I, Clothier B E, Green S R, et al. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60(1): 5 ~ 12.

15 Bullock D S, Bullock D G. Economic optimality of input application rates in precision farming[J]. Precision Agriculture, 2000, 2(1):71 ~ 101.

16 Corwin D L, Lesch S M, Shouse P J, et al. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2): 352 ~ 364.

17 Rhoades J D, Corwin D L, Lesch S M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation[M]//Corwin D L, Loague K, Ellsworth T R. Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone. Geophysical Monograph 108. Washington, DC: American Geophysical Union, 1999: 197 ~ 215.

18 左月明, 卫勇, 王海昌, 等. 一种智能型电导率仪的设计与研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2):161 ~ 164.

19 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(增刊1): 85 ~ 87.
Liu Guangming, Yang Jinsong. Study on the correlation of soil content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(Supp. 1): 85 ~ 87. (in Chinese)

20 李民赞, 王琦, 汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51 ~ 55.