

6050X 1 型时域反射仪的测定原理与灵敏性*

张书函¹ 康绍忠^{1,2} 张富仓¹ 胡笑涛¹ 史世斌³

(1 西北农业大学农业水土工程研究所, 2 中科院, 水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

(3 内蒙古自治区水利所, 呼和浩特 010020)

摘 要 介绍了 6050X 1 型时域反射仪 (TDR) 的基本结构和测定土壤含水率的原理, 通过试验分析了它对导棒材料性质及导棒长度的灵敏性。结果表明, 用铜和不锈钢做波导棒效果基本一致, 导棒实际长度与输入长度的微小偏差对含水率的测量结果影响很小, 且导棒越长影响越小

关键词 时域反射仪, 波导棒, 土壤含水率, 灵敏性

中图分类号 S274.1

对于土壤水分测定技术的研究, 到目前为止已有半个多世纪了。常用的方法有: 烘干法、张力计法、电阻块法、中子法等。烘干法简单可靠但费时费力且破坏土壤; 张力计法测量范围较小; 电阻块法需要不断地标定; 中子法的缺陷在于它有放射性危害, 需要标定, 表层土壤水分测定不准。近几年开始使用的时域反射仪 (TDR) 法基本上克服了上述方法的各种缺陷。其中美国土壤水分仪器公司生产的便携式 6050X 1 型 TDR 带有内部电脑, 可直接显示容积含水率, 并能存储 6000 多个读数或 170 个图形, 具有体积小、重量轻、测定迅速、操作简单等优点。近年来我国一些科研院所和高校才开始引进这种仪器, 因此有必要对其测量性能进行分析研究

1 TDR 的结构与测量原理

TDR 法是高速测量技术的一项新发展, 最早是由 H. Fellner-Feldegg (1969) 开发的, 目的是用来测量液体介电常数与频率的关系^[1]。Topp (1976) 等人证明了利用该法测量土壤及其他多孔介质容积含水率的普遍适用性, 并将其用于土壤水分的试验研究^[1]。

1.1 基本结构

6050X 1 型 TDR 的基本结构如图 1。由主机、同轴电缆、波导连接器、波导棒四部分组成。主机中的 I/O 接口有与同轴电缆连接的 BNC 插孔, 与打印机、计算机连接的 RS-232 接口和与多路转换器连接的多路转换接口, 可以进行多点定位自动监测和数据的打印与微机处理

波导连接器主要由平衡不平衡转换器 (TP103) 和插头等机械部分组成。TP103 是一个安装在同轴电缆和平行波导棒之间的、具有较宽频带的阻抗匹配转换器, 它可以减少因阻抗不匹配而产生的信号反射, 使更多的信号进入土壤。波导棒是一对平行的金属棒, 为了防锈用不锈钢做成。6050X 1 型 TDR 允许的导棒长度为 15~70 cm, 间距为 5 cm, 测量

收稿日期: 1995-10-13

* 中科院“百人计划”及国家自然科学基金资助项目。

以导棒间距的一半处为轴心,直径为 7 cm 的圆柱体的平均含水率,圆柱体轴与导棒平行,长度与导棒长相等。

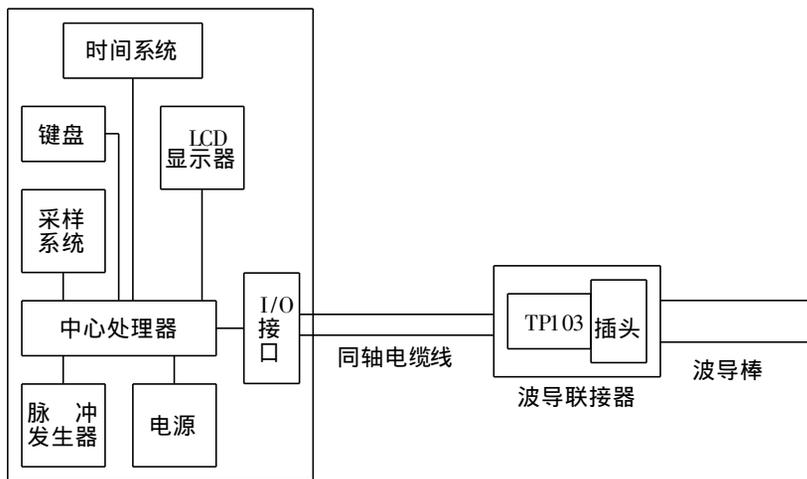


图 1 6050X 1型 TDR基本结构示意图

1.2 测量原理

TDR是根据高频电磁脉冲 (1~ 1000 MHz)沿传输线在土壤中传播的速度依赖于土壤的介电特性及土壤含水量设计的,它通过测定传播速度,来计算体积含水率。

土壤的介电特征决定于其组成物质水、空气、矿物质的含量和各自的介电常数,即:

$$K = [\theta_v K_w^T + (1 - Z) K_s^T + (Z - \theta_v) K_a^T]^{1/T} \quad (1)$$

式中, K 为土壤的介电常数; K_w 、 K_s 、 K_a 分别为水、土壤矿物质、空气的介电常数; θ_v 为容积含水率; Z 为土壤孔隙率; T 是土壤的衰减常数。Birchak 等 (1974), Alharhi 和 Lange (1987), Dobso (1985) 等认为 α 取值为 0.5~ 0.65^[2]。

物质的介电常数与频率有关,通过测定湿土的介电常数求土壤含水量的最敏感的电磁波频率为 50 MHz~ 10 GHz^[2]。在此频率范围内水、空气、矿物质的介电常数为 80.0~ 80.4, 10, 2~ 5,因而,土壤的介电常数 K 主要依赖于 θ_v 。Topp (1980) 等对各类不同粒级土壤的研究表明, K 极微弱地依赖于土壤类型、密度、温度和孔隙水传导率^[3]。因此土壤的容积含水率 θ_v 可以通过建立 θ_v 与 K 的经验方程来计算。6050X 1型 TDR 的 $K \sim \theta_v$ 关系曲线如图 2 所示,将其分段按直线拟合的方程见表 1。

表 1 土壤容积含水率 θ_v (%) 与介电常数 K 的经验方程

K 值范围	经验方程	K 值范围	经验方程
0~ 4.0	$\theta_v = 5K - 15$	12.8~ 17.4	$\theta_v = 1.087K + 11.087$
4.0~ 6.0	$\theta_v = 2.5K - 5$	17.4~ 21.3	$\theta_v = 1.282K + 7.693$
6.0~ 7.8	$\theta_v = 2.78K - 6.67$	21.3~ 26.4	$\theta_v = 0.98K + 14.118$
7.8~ 10.0	$\theta_v = 2.27K - 2.7$	26.4~ 28.0	$\theta_v = 3.125K - 42.5$
10.0~ 12.8	$\theta_v = 1.786K + 2.14$	28.0~ 32.0	$\theta_v = 1.19K + 11.667$

1.2.1 土壤介电常数 K 的测定

K 的测定是通过测定高频电磁脉冲的传播速度 v 求得

的。该传播速度依赖于传输线中介质的介电常数 K ,其关系为^[4]:

$$V = \frac{c}{K' \frac{1 + \tan^2 W}{2}} \quad (2)$$

$$\tan W = \frac{K'' + \frac{\epsilon_{dc}}{kX_0}}{K'} \quad (3)$$

式中, c 是电磁波在自由空间的传播速度 (3×10^8 m/s); K' 是介电常数的实部; K'' 是介电常数的虚部; ϵ_{dc} 是直流电导率; k 是角频率; X_0 是自由空间介电常数

土壤中 $\tan W < 1, K' \approx K$ 则:

$$V \approx \frac{c}{K} \quad (4)$$

此即各种型号 TDR的基本关系式,对于所有的土壤,上式都近似满足^[4]。在 TDR实际测定中

$$V = \frac{L}{t} \quad (5)$$

式中, L 是插入土壤中的传输线(波导棒)长度(m); t 是测得的传播时间(s)。代入(4)式得:

$$K = \left(\frac{ct}{L}\right)^2 \quad (6)$$

对于其它 TDR仪器可能使用下式:

$$K = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \quad (7)$$

这是因为(6)式中 t 是入射脉冲单程传播时间,而(7)式中的 t 是入射脉冲往返时间

1.2.2 传播时间的测定 6050X 1型 TDR测定电磁波沿导棒在土壤中传播时间 t 的原理如图 3。每个脉冲的起始段称为“入射脉冲”,这就是 TDR计时的开始。从第一个脉冲产生开始间隔 10 Ps (10^{-12} s)测一次传输线的有效电压值,从第二个脉冲产生开始间隔 20 Ps测一个值,每个相继产生的脉冲测量时间都比前一个脉冲晚 10 Ps,这样重复下去直到所测定并存储的值填满所需要的整个时间域。如此重复几次得出每个时间点的平均值,即可得到图 3 曲线。TDR的电脑从这条曲线上分析出反射点,得出 t_1 ,再由测定前置零所得的 t_0 值由 $t = t_1 - t_0$ 求出 t 。

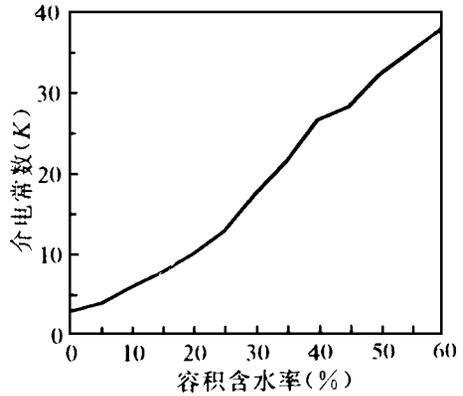


图 2 6050X1型 TDR的 $k \sim \theta_v$ 曲线

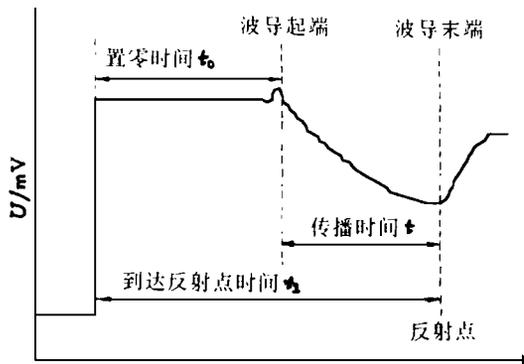


图 3 TDR测定电磁脉冲传播时间示意图

2 6050X 1型 TDR的灵敏性

仪器测量性能包括其测量的精确性和灵敏性 这里只对 6050X 1型 TDR的灵敏性作以研究,对精确性的分析另文阐述

2.1 对导棒材料灵敏性的测定

6050X 1型 TDR所携带的不锈钢波导棒是有限的,实际应用中常需大量的不同长度的导棒。不锈钢价高且难以购到,因此在试验研究中采用铜棒作为替代物,但必须对两者的测定结果进行灵敏性分析。

作者对 15, 30, 45, 60 cm 4种长度的不锈钢导棒与铜棒进行田间对比试验 选取 6个 20 cm× 20 cm的试区,在每一个试区中均匀布设了 3个测点,分别用不锈钢棒和铜棒测定土壤容积含水率 $\theta_{\text{铜}}$ 和 $\theta_{\text{铜}}$,每测点读 3次数,取平均值作为该测点的含水率,3个测点的平均值作为该试区的含水率值 以 $\theta_{\text{铜}}$ 为自变量, $\theta_{\text{铜}}$ 为因变量进行回归分析,结果见表 2 可见用铜棒代替不锈钢棒不会对测定结果产生明显影响

表 2 用不锈钢棒和铜棒测定土壤含水率结果

$\text{cm}^3 / \text{cm}^3$

导棒长度 (cm)	导棒材料 及差值 θ_v	各试区土壤含水率						回归方程	相关系数 R
		1	2	3	4	5	6		
15	不锈钢	0.0457	0.1117	0.2085	0.2593	0.3187	0.3670	$\theta_{\text{铜}} = 0.978\theta_{\text{铜}} + 0.0056$	0.9991
	铜	0.0445	0.1203	0.2110	0.2587	0.3223	0.3585		
	θ_v	- 0.0012	0.0086	0.0025	- 0.0006	0.0036	- 0.0085		
30	不锈钢	0.0492	0.1218	0.2177	0.2755	0.3258	0.3555	$\theta_{\text{铜}} = 1.007\theta_{\text{铜}} - 0.0022$	0.9997
	铜	0.0506	0.1177	0.2107	0.2712	0.3280	0.3577		
	θ_v	0.0014	- 0.0041	- 0.0070	- 0.0043	0.0022	- 0.0022		
45	不锈钢	0.0967	0.1643	0.2246	0.2855	0.3167	0.3475	$\theta_{\text{铜}} = 0.993\theta_{\text{铜}} + 0.0002$	0.9989
	铜	0.0935	0.1687	0.2243	0.2787	0.3206	0.3417		
	θ_v	- 0.0032	0.0044	- 0.0003	- 0.0068	0.0039	- 0.0042		
60	不锈钢	-	0.1886	0.2455	0.2873	0.3217	0.3555	$\theta_{\text{铜}} = 0.95\theta_{\text{铜}} + 0.0133$	0.9988
	铜	-	0.1923	0.2433	0.2911	0.3247	0.3487		
	θ_v	-	0.0037	- 0.0022	0.0038	0.0030	- 0.0068		

2.2 对导棒长度的灵敏性

使用 6050X 1型 TDR时要输入波导棒的长度,而导棒长度在加工中难以控制得十分精确,实际测量时为了加快速度也不可能一一量取其准确值,因此必须对测量带来的误差进行分析。

前文对 6050X 1型 TDR的 $K \sim \theta_v$ 关系分段拟合公式可表达为:

$$\theta_v = AK + B \quad (8)$$

结合 (6) 式,推导可得:

$$\Delta\theta_v = - \frac{2AK\Delta l}{l} \quad (9)$$

此即 6050X 1型 TDR对波导棒长度的灵敏性的误差估计式。式中, l 为输入的波导棒

长度; Δl 表示导棒的实际长度 $l_{实}$ 与输入值 $l_{输}$ 的偏差, $\Delta l = l_{实} - l_{输}$; $\Delta\theta_v$ 为实际含水量 $\theta_{实}$ 与测定值 $\theta_{测}$ 之差, $\Delta\theta_v = \theta_{实} - \theta_{测}$ 。可见,当 $\Delta l > 0$ 时, $\Delta\theta_v < 0$,即测量值大于真实值,反之则测量值小于真实值。(9)式还表明,在 A 相同的情况下,导棒越长由偏差所导致的测量误差较小。

根据表 1的 $K \sim \theta_v$ 拟合方程由(9)式求得 Δl 为 0.5 cm时测量的最大误差(表 3)。可以看出,随着导棒长度的增加,由长度偏差所引起的测量误差减小。即使在导棒最短(15 cm), Δl 为 0.5 cm的情况下,最大测量误差只有 0.0583,40%含水率以下的最大误差不超过 0.019,50%含水率以内的平均误差也不超过 0.020。

表 3 $\Delta l = 0.5$ cm时不同导棒长度的测量最大误差 cm^3/cm^3

θ_v	导棒长度 (cm)			
	15	30	45	60
~ 0.05	0.0133	0.0067	0.0045	0.0033
0.05~ 0.10	0.0100	0.0050	0.0034	0.0025
0.10~ 0.15	0.014	0.0072	0.0048	0.0036
0.15~ 0.20	0.0151	0.0076	0.0051	0.0038
0.20~ 0.25	0.0152	0.0076	0.0051	0.0038
0.25~ 0.30	0.0126	0.0063	0.0042	0.0032
0.30~ 0.35	0.0182	0.0091	0.0061	0.0046
0.35~ 0.40	0.0172	0.0086	0.0057	0.0043
0.40~ 0.45	0.0583	0.0292	0.0194	0.0146
0.45~ 0.50	0.0255	0.0128	0.0085	0.0064

为了验证分析结果的正确性,作者用 30 cm的标准不锈钢导棒插入土壤中,输入不同的长度值,测量不同的含水率值,求其相对于真值(输入为 30 cm时的测量值)的误差,并与用(9)式计算的理论值相比较(表 4)。可见实测误差与理论计算的误差极为接近,表明分析结果正确。

表 4 输入不同导棒长度产生的测量误差与理论值的比较 cm^3/cm^3

输入长度 (cm)	测得含水率值	相对于真实值的误差	由(9)式计算的误差
30.7	0.0716	- 0.0059	- 0.0058
30.5	0.0730	- 0.0045	- 0.0042
30.3	0.0748	- 0.0027	- 0.0025
30.1	0.0765	- 0.0010	- 0.0008
30.0	0.0775	0	0
29.9	0.0777	0.0002	0.0009
29.8	0.0794	0.0019	0.0017
29.7	0.0803	0.0028	0.0026
29.5	0.0810	0.0035	0.0043
29.3	0.0830	0.0055	0.0061
28.5	0.0913	0.0138	0.0134
28.3	0.0926	0.0151	0.0153
28.0	0.0956	0.0181	0.0182

3 结 语

时域反射仪(TDR)是一种安全可靠的土壤水分测定仪。6050X1型 TDR对导棒材料

性质的要求不高,用铜棒代替不锈钢棒不影响测量结果。导棒长度的微小偏差对含水率的测量结果影响甚小。

参 考 文 献

- 1 Dalton E N, Herkelrath W N 著;郭群善译.时域反射仪——单探头土壤含水量及电导率测试仪.国外农学 灌溉排水,1987(1): 48~ 49
- 2 Roth K, Schulin R, Fli hler H, et al. Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research, 1990(10): 2267~ 2274
- 3 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 1980(2): 574~ 583
- 4 Topp G C, Davis J L. Time-Domain Reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. Advance in Irrigation, 1985(3): 101~ 127
- 5 Topp G C, Davis J L. Measurement of soil water content using Time-Domain Reflectometry (TDR): A field evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J, 1985(11): 19~ 24

The Measuring Principle and the Sensitivity of 6050X1 Time Domain Reflectometry

Zhang Shuhan¹ Kang Shaozhong^{1,2} Zhang Fucang¹ Hu Xiaotao¹ Shi Shibin³

(1 Institute of Agrosoil-water Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

(2 Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Yangling, Shaanxi, 712100)

(3 Hydraulic Research Institute of Inner Mongolian Autonomous Region, Huhehot, Inner Mongolia, 010020)

Abstract This paper introduced a principle for measuring soil and water content with 6050X1 Time Domain Reflectometry and its constitution. Based on field experiments and theoretical analysis, the sensitivity of TDR to the nature of wave guide materials and to the length of wave guide was studied. The results showed that to measure the soil and water content with copper wave guides had the same effect as with wave guides made from stainless steel, that the small difference between real wave guide length and inputted length exercised slight influence on soil and water content measurement and that the longer the wave guide the slighter the influence was.

Key words time domain reflectometry, wave guide, soil and water content, sensitivity