

不同介电法仪器测量土壤水分技术原理研究

章树安¹, 何生荣², 章雨乾³

(1. 水利部水文水资源监测评价中心, 北京 100053; 2. 水利部水文仪器质检中心, 南京 210012; 3. 中国水权交易所, 北京 100053)

摘要: 土壤作为一种多相物质的混合物, 其介电性质极为复杂, 影响因素众多, 想要实现自动、准确地测量土壤含水量, 其难度很大, 就目前生产已应用产品而言, 绝大多数自动监测产品需要高频次率定与维护, 才能实现。本文通过较为系统的收集相关资料, 从电磁学理论的角度出发, 对目前市场上应用的主要几类不同介电法测量土壤水分仪器的原理及方法进行科学的分析, 揭示造成其技术缺陷的基本原因。通过本文的分析, 可以看到真正的 TDR 原理的测量仪器可以避免由于电导率引起的介电常数虚部的影响, 使得在一定范围内不经率定, 测量精度能够相对满足实际生产的需要。

关键词: 介电法; 测量仪器; 土壤水分; 原理; 研究

1. 引言

在自动测量土壤水分的诸多技术方案中, 利用土壤的介电特性测量土壤体积含水率的方法统称为介电法, 因其测定过程不破坏被测土壤对象环境, 易于实现在线自动化监测, 已成为目前我国普遍应用的土壤含水量自动监测仪器设备。近年来, 由于我国水利、气象及农业等领域土壤水分在线监测项目建设的需要, 大量介电法土壤水分测量仪器投入市场, 但大多数人对仪器的测量原理与实现方法缺乏了解, 对其应用场景和存在一定的缺陷认识不足, 使其应用受到一定限制。随着近十年土壤墒情自动在线监测系统建设的实践和时域反射 (Time Domain Reflectometry, TDR) 技术的国产化, 对于介电原理测量土壤水分的理论研究有了很大的提高。本文将从电磁学理论的角度出发, 对目前市场上应用的主要几类不同介电法测量土壤水分仪器的原理及方法进行科学的分析, 揭示造成其技术缺陷的基本原因, 并对应用到土壤墒情监测时出现的问题进行了探讨。

2. 土壤的介电特性

介电常数 ϵ^* ，也称为电容率，是定量描述物质的色散电磁特性的一个参数，介质为真空的介电常数 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米是一个实数，称作绝对介电常数。由于电容引起的电压对于电流的滞后效应，一般介质的介电常数 ϵ^* 是一个复数，同时由于电磁波激励造成介质的极化现象， ϵ^* 与所施加电场的频率有关，而相对介电常数 k^* 则是将 ϵ^* 与绝对介电常数 ϵ_0 进行归一化处理得到的与频率相关的一个无量纲复参数：

$$k^*(f) = \frac{\epsilon^*(f)}{\epsilon_0} = k'(f) - jk''(f) \quad (2.1)$$

通常将相对介电常数 $k^*(f)$ 简称为介电常数，其实部 $k'(f)$ 表示了介质在外加电磁场下的极化程度和能量存储程度，而 $k''(f)$ 则描述了介电材料在外加电磁场作用下的所有能量损耗。水的极化频谱效应见图 1。

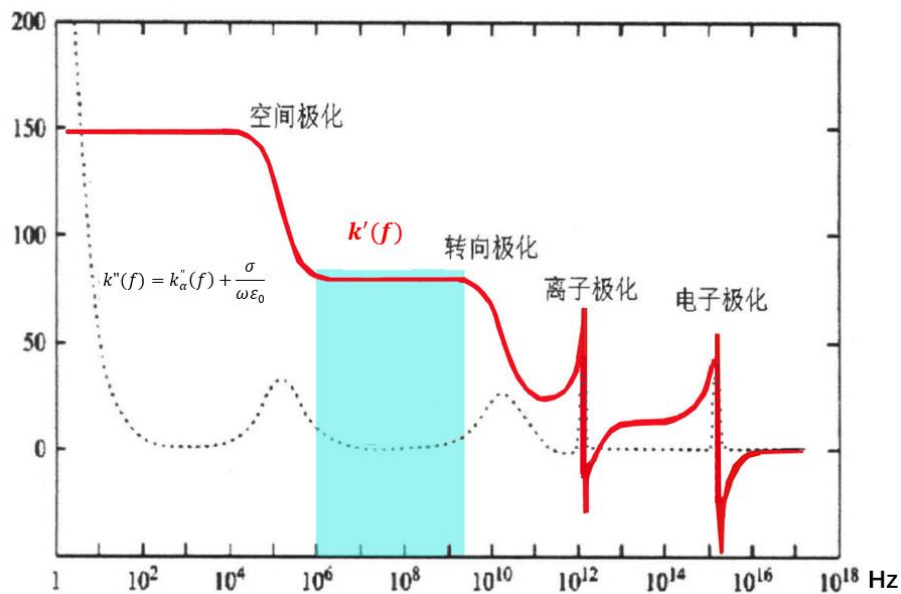


图 1 水的极化频谱效应^[1] (Santamarina,2001)

土壤是由固相（矿物质颗粒）、液相（孔隙水）和气相（间隙空

气) 组成的一个三相混合物。其固相的介电常数实部为在 2~4 之间, 空气则为 1, 而图 1 给出了水在电磁场作用下的极化频谱效应, 可以看到, 随着频率 f 的增加, 介电常数的实部 $k'(f)$ 逐渐降低, 但在大约 1MHz 到 2GHz 之间, 其变化相对平缓, 可以视作一个常数, 在 20°C 的温度下, 其值为 81, 温度升高, 略有降低, 温度降低则略有升高, 变化范围在 75~85 之间, 远远大于固相和气相介电常数的实部, 因此土壤的介电常数实部主要由其所含水分决定, 这即是介电法测量土壤水分的根本理论所在, 其测量频率, 也大多选取在 1MHz~2GHz 这一频率区间内。

特别需要指出的是, 冰的介电常数实部在 3 左右, 与液体水完全不同, 因此介电法不适合于冻土的土壤含水量测量。

$k''(f)$ 在土壤中主要包括介电损失 $k''_{\alpha}(f)$ 和直流电导率 σ 引起的电导损失^[2]:

$$k''(f) = k''_{\alpha}(f) + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.2)$$

介电损失是指当外加电场频率和极化固有频率一致时, 极化分子的移动速度跟不上外加电磁场的变化, 引起相位滞后, 导致能量损失增大, 介电常数的虚部升高, 其主要受频率影响。电导损失是由于介电材料导电引起的, 包括固体颗粒表面电荷引起的表面电导损失和孔隙水中电解质引起的离子电导损失。

电导率是反映电荷在电场作用下活动能的一个物理量, 与介电常数一样, 土壤的电导率主要受到固体颗粒的电导率、土体的孔隙率、饱和度和孔隙液体的电导率影响, 除此之外固体颗粒的晶体结构也对

其有一定影响。由于影响因素众多，到目前为止仍然没有一个土壤电导率的理论计算模型能够同时考虑上述因素的影响。但由上面的分析可以看出，土壤的电导率是影响其介电常数虚部的最重要因素。

3. 时域法土壤水分测量仪器

时域法仪器是通过测量电磁波的传播时间而实现土壤水分的测量，从采集电磁波信号的传输路径上可以分为时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)和时域传输法(Time Domain Transmission, TDT)，而从电磁波传播时间的测量方法上则有无载频脉冲体制和频域频率步进体制以及所谓的相位法。由于TDT是通过采集电磁波的透射信号实现测量，需要分别在波导(探针)的首尾两端发射和接收信号，因此不太适合应用于插针式传感器。而时域法的技术关键在于对于电磁波传输时间的精确测量，因此本文将主要介绍时域反射法及上述三个不同的电磁波时间测量体制。

3.1 时域反射原理

时域反射技术产生于上世纪三十年代，最初被用来检测和定位通讯电缆的受损位置。当一个电磁脉冲信号沿传输线传输，传输线的中断、受损或周边物质的不连续性均会引起其阻抗的变化，这种阻抗的变化将会导致传输的信号在此不连续点处产生一个反射，通过精密的测量电磁波入射波和反射波的行程时间差，则可以准确的判定此不连续点的位置。

将TDR技术应用于土壤水分测量始于上世纪六十年代后期，1980年，加拿大学者G.C.Topp^[3]研究了电磁波在介质中传输的下列公式：

$$v = c / \left\{ k' \cdot \frac{1 + (1 + \tan^2 \delta)^{1/2}}{2} \right\}^{1/2} \quad (3.1)$$

式中 v 为电磁波在该介质中的传播速度， c 为光速，而 $\tan \delta = \{k'' + (\sigma_{DC}/\omega \epsilon_0)\}/k'$ 被称为损耗因子。G.C.TOPP 指出，土壤基本属于同向线性均匀媒质，其满足： $k'' \ll k'$ ，且当电磁波的频率足够高时，有 $\sigma_{DC}/\omega \epsilon_0 k' \ll 1$

因而此时：

$$k' \approx (c/v)^2 \quad (3.2)$$

据此，Topp 进一步引入了表观介电常数(K_a)的概念：

$$K_a = (c/v)^2 \quad (3.3)$$

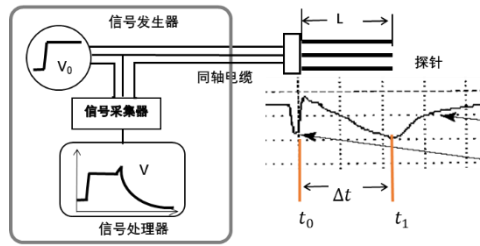


图 2 TDR 测量土壤水分原理图

一个测量土壤水分的 TDR 系统如图 2 所示，当一个电磁信号沿同轴电缆在时刻 t_0 达到探针的起始部时，由于阻抗的改变，产生反射，而其余信号沿探针继续前进，在时刻 t_1 到达探针底部时，又产生了第二次反射，考虑电磁波沿长度为 L 的探针的行程，易见：

$$v = \frac{2L}{\Delta t} \quad (3.4)$$

代入 (3) 得到：

$$K_a = \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2L} \right)^2 \quad (3.5)$$

由此可见,对于电磁波沿探针传输时间 Δt 的测量,可以直接得到介质的表征介电常数,当所施加的电磁信号频率足够高时,其近似等于所测介质介电常数的实部。这也是 TDR 技术测量土壤水分的最基本原理,以及其测量结果不受介电常数虚部 ϵ'' 的影响,而无需进行率定的根本原因。

进而,G.C.TOPP 通过大量的 TDR 系统测试与烘干法的实验结果,采用线性回归方法拟合得到了描述土壤体积含水率与表观介电常数关系的 TOPP 公式:

$$\theta_v = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \times K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (3.6)$$

土壤密度或孔隙度对湿润土壤的介电常数的影响较小, TOPP 等^[3]在试验中观察到,当土壤容重在 $1.00 \sim 1.78 \text{g/cm}^{-3}$ 范围内变化时,该公式有较好的适应性。我们进行了大量的实验室以及野外实测比对的实验,数据结果表明对于干容重为 $1.2 \sim 1.6 \text{g/cm}^{-3}$, 体积含水率在 $0\% \sim 40\%$ 的范围内的耕作土壤,该公式绝对误差低于 $\pm 2\%$ 。TOPP 公式至今仍是业界应用最广泛的通用公式。

TDR 技术的对于电磁波传输时间的精确测量有着极高的要求,其测量时间的级别在纳秒级 (10^{-9} 秒),而精度则更是要求达到皮秒级 (10^{-12} 秒)。目前主要基于三种体制:时域无载频脉冲体制、调频连续波体制和步进频率连续波体制,目前应用于土壤水分测量主要为前二者。

3.2 时域无载频脉冲体制

传统的 TDR 仪器一直采用的是时域无载频脉冲体制,其技术核

心是高速延迟线技术。

一个 TDR 系统由信号发生器、一个精度能够达到皮秒 (10^{-12} 秒, 也即千亿分之一秒) 级精确测量时间的时序系统以及信号采集处理器构成。测量开始时, TDR 系统启动一个长系列的时序循环, 每个循环开始, 时序系统控制信号发生器发射一个电压迅速上升的强激励阶跃脉冲信号 (通常带宽为 1GHz), 这个脉冲沿着同轴电缆和探针传输。每个时序循环开始之后, 精密的电子设备和软件将在时序系统控制的精准时刻测量传输线的有效电压。例如, 在第一个循环, 在循环开始时间之后的 10 皮秒对传输线的有效电压将有一次精确测量。这个有效电压值将被存储下来。在下一个循环, 测量有效电压的时刻将变成循环开始时间后的 20 皮秒。这个有效电压值将被存储下来。对每个

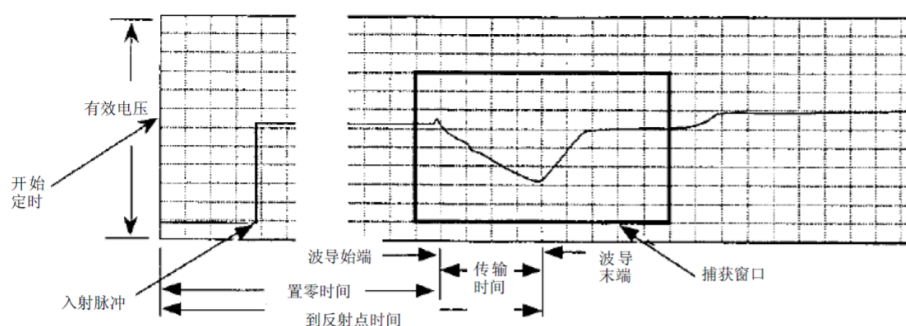


图 3 时域无载频脉冲体制原理图

相继的循环, 测量的时刻将设成比前一个循环的测量时刻晚 10 皮秒。每次的测量值都将被存储下来。测量过程一个循环接一个循环的重复, 直到所储存的有效电压值能够覆盖所需测量的时间范围, 将所有储存的有效电压值记录下来, 即可形成一条捕获窗口的 TDR 测量迹线^[4]。

因而, 时域无载频脉冲体制的传统 TDR 实质上是一台宽带接收的高频示波器, 它应用于土壤水分测量, 对于大多数土壤不经率定即

可满足较高的测量精度要求，另外由于其测量曲线可反映所测土壤的电磁特性，近年来它也被应用于土壤电导率等方面的测量。但由于其所依赖的高速延迟线技术只为少数国家垄断，因此其价格昂贵，造成难以大范围推广应用。

另一方面由于土壤的成分、结构极为复杂，传统 TDR 的测量迹线也较为复杂，往往需要经过专业培训才能在图像上辨识正确的反射位置，而精确的反射时间点则需要通过对其测量迹线图像采用双切线的算法来确定（图 3）。这也降低了实现自动化在线监测的测量可靠性。

再者，由于高频电磁波的衰减较快，而时域无载频脉冲体制 TDR 仪器的体积较为庞大，无法安装在一些特殊场景应用的前端，也限制了 TDR 技术的应用范围。

3.3 步进频率连续波体制（SFCW-TDR）

1970 年后，随着计算机技术的发展与快速傅里叶变换（FFT）算法的出现，频域频率步进体制在探地雷达和电子测量领域中被广泛的应用于时间的精准测量。

2015 年，天津特利普尔科技有限公司在国际上率先将频域频率步进体制应用于 TDR 测量，研发成功了具有完全自主知识产权的 SFCW-TDR 技术^{[5]、[6]}，目前基于该技术包括便携式与自动化在线监测在内的土壤水分测量设备已形成系列化，广泛应用于水利、水文领域，受到普遍好评。

SFCW-TDR 技术是通过信号发生器依次产生的一系列步进、最高

可达到微波频段的点频连续波信号，每个单频信号沿着同轴电缆线传输到末端的探针，当遇着介质（土壤）时产生反射信号，通过定向耦合分离入射测试信号和反射响应信号，再经过 AD 采样后得到一系列数字化的入射波和反射波的复基带频域信号，进而通过离散逆傅里叶变换（IDFT）运算转换到时域，得到一个时域上多个强冲击脉冲函数——辛格函数：

$$sinc(t - \tau) = \begin{cases} \frac{\sin(t-\tau)}{t-\tau} & t \neq \tau \\ 1 & t = \tau \end{cases} \text{ 的组合, 其中 } \tau \text{ 为发生反射的时间点, 从而实现仪器的 TDR 测量。}$$

图 4 为 SFCW-TDR 测量的实际迹线，图中 M1、M2 分别是探针的始端和末端，横坐标表示了该点发生反射的双程时间，而纵坐标则是该反射的反射系数。

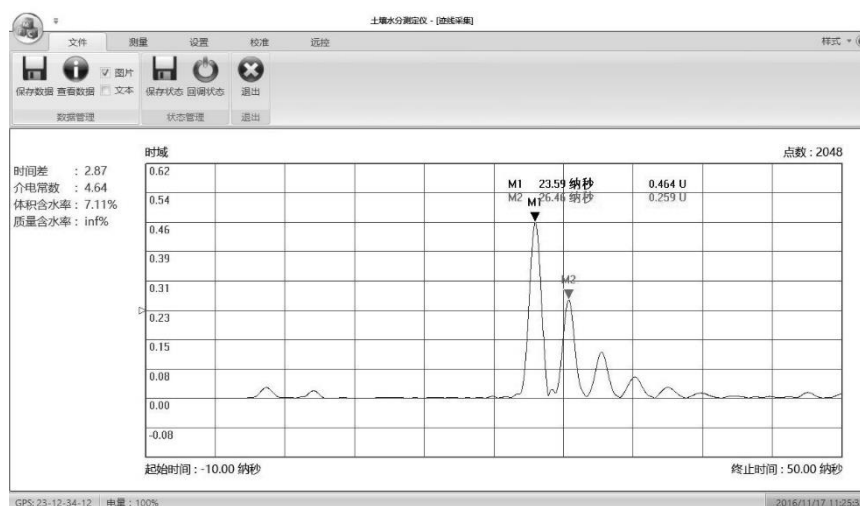


图 4 SFCW-TDR 的测量迹线（线性幅度模式）

与传统的时域无载频脉冲体制相比，SFCW-TDR 技术有着以下的主要优点：

- (1) 默认设置为 1MHz 至 1.8GHz 的 2048 个步进频率扫频范围，

处于水的相对介电常数实部稳定的频率范围 (见图 1), 同时采用完全数字化的窄带带通接收和数字处理技术, 使得适用土壤更为广泛, 测量精度更为精准。

(2) 与传统 TDR 的模拟显示图像不同, SFCW-TDR 的图像是一个数学计算结果的数字化表示, 其对于反射点的时域显示更加直观明了, 因此 SFCW-TDR 技术更适合于实现自动化的在线监测。

(3) SFCW-TDR 是一个使用数字数据和数学算法来进行数据分析的数字系统, 其采用的向量接收技术, 可进一步采集包括频域反射、相位、驻波比、阻抗以及相对介电常数的实部、虚部等大量的频域、时域信息, 为本仪器功能的进一步开发提供了有效的工具。

(4) 由于避免了复杂的高速延迟线技术, SFCW-TDR 将 TDR 的应用成本大幅度降低, 特别是基于目前国际上最新芯片技术以及最先进的 SIP (System In a Package, 系统级封装) 工艺小型集约化设计的 SOILTOP-300 系列, 其成本已接近目前的其它技术仪器, 考虑无需定时、定点率定的因素, 其综合造价更为经济。

(5) 国际领先的小型化设计使得该技术应用可以深入至测量目标的前端, 克服了以往 TDR 技术由于测量距离过长, 造成电磁波信号衰减过大的技术瓶颈, 增加了该项技术的应用场景。

3.4 相位法 (P-TDR)

应用了相位检测原理的所谓相位法时域反射仪器 (P-TDR), 其测量原理沿用了时域反射原理的基本物理公式(3.2), 但其发射的是一个固定频率的单频正弦波, 并通过采用相位计测定信号的相位变化而推

导得到电磁波沿探针传输的时间。

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

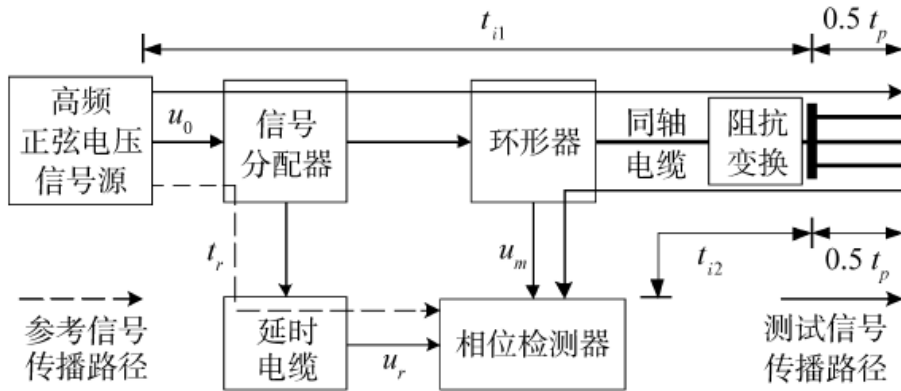


图 5 P-TDR 原理示意图

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^[7]。

如图 5 所示，假设任意时刻 t 信号源的输出电压为：

$$u_0 = A_0 \cos(\omega t + \phi_0) \quad (3.7)$$

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：

$$u_r = A_r \cos(\omega t + \phi_0 - \omega t_r) \quad (3.8)$$

$$u_m = A_m \cos(\omega t + \phi_0 - \omega t_m) \quad (3.9)$$

式中： u_0 、 u_r 、 u_m 为信号的瞬时电压， A_0 、 A_r 、 A_m 为信号的电

压幅值， ω 为信号的角频率，而 ϕ_0 为源信号的初相位。

因此相位检测器的两个输入信号的相位差为：

因此相位检测器的两个输入信号的相位差为：

$$\Delta\phi = \omega t_m - \omega t_r \quad (3.10)$$

从图 5 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(3.10)可改写为：

$$\Delta\phi = \omega t_p + \omega(t_i - t_r) \quad (3.11)$$

$$\text{从而：} \quad t_p = \frac{\Delta\phi}{\omega} - t_i + t_r \quad (3.12)$$

式(3.12)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，与所测量土壤无关，由此即可通过测量相位差 $\Delta\phi$ 而达到测量电磁波沿探针在土壤中的传输时间。

事实上，上述推导存在一个致命的错误，对于公式 (3.9)，其测量信号的相位只考虑了电磁波传播时间带来的变化 ωt_m ，而实际上测量信号在探针的起始和终端均会产生反射，根据电磁波的反射理论，反射系数 $\Gamma = |\Gamma|e^{j\varphi}$ 是一个复数，其对于反射信号，不仅是电压幅值的改变 $|\Gamma|$ ，而 $e^{j\varphi}$ 也会造成测量信号相位的改变^[8]。上述推导过程完全未考虑到这一因素的影响。而这种相位的偏移是由所测量土壤的损耗因子等诸多与电导率相关的电磁特性所决定的，这即是这类仪器为何仍需根据不同土壤进行率定的根本原因。

一个简单的实验可以证实我们的结论。由于我们的需求是测量土

壤水分，而改变水体电导率的最简洁方法就是加入不同比例的食盐（氯化钠）。为此我们选择美国 SEC 公司生产的 6050X3 MINITRASE TDR 土壤水分测试仪，德国 IMKO 公司生产的 TRIME-TDR 以及天津特利普尔科技有限公司生产的 SOILTOP-200 土壤水分测定仪，分别对纯净水以及加入不同比例氯化钠的水溶液进行了测试，同时使用上海雷磁公司生产的 DDS-307A 电导率仪对溶液的电导率进行了同步测量，实验结果如表 1 所示。

表 1 不同监测仪器在不同盐份状态下比测结果统计表

待测液	测量温度/°C	介电常数	电导率仪	SOILTOP-200	Minitrase	TRIME
			电导率 ms/cm	Ka	Ka	TDR 值
纯水	26.5	77.70	0.06	76.28	78.4	84.2
0.3‰	25.8	77.95	6.03	76.28	78.9	74.4
0.5‰	25.8	77.95	9.90	76.28	79.0	59.1
0.8‰	25.6	78.02	15.61	76.28	78.5	53.9
1.0‰	25.4	78.09	19.25	76.28	78.7	48.1
1.3‰	25.2	78.16	25.00	76.28	78.5	44.1
1.5‰	25.0	78.24	28.30	76.28	78.8	45.5
1.8‰	24.9	78.27	33.70	76.28	78.6	42.4
2.0‰	24.7	78.35	36.90	76.60	78.5	45.8
2.3‰	24.6	78.38	41.80	76.28	79.4	41.5
2.5‰	24.4	78.46	44.60	74.38	74.2	42.4
2.8‰	24.2	78.53	50.10	77.89	--	41.3
3.0‰	24.1	78.56	53.40	75.64	--	41.2

由实验结果可知，采用无载频脉冲体制和 SFCW-TDR 技术的仪器，尽管随着盐浓度的增加，电导率随之增高，电磁波衰减速度加快，前者在食盐浓度达到 2.8‰时测量失败，而 SOILTOP-200 的测量范围

可达到 3‰，但其测量结果基本不受盐水浓度的影响，而采用 P-TDR 技术的 TRIME 仪器，则受到电导率的影响很大。因此，P-TDR 并非真正意义上的时域反射法仪器。

4 频域法土壤水分测量仪器

由于 TDR 产品的技术门槛和高昂售价，人们一直在试图研发一种相对廉价易实现的替代 TDR 技术的产品，其大多通过频域的方法测定土壤的介电常数，从而实现对土壤体积含水率的测量。从其原理上，频域法仪器大致分为以下几类。

4.1 频域反射法 (FDR):

频域反射法 (Frequency Domain Reflectometry, FDR) 的基本构造是由一对电极 (平行的金属棒或圆型金属环) 构成的一个电容器，电极之间的土壤充当电介质，电容器与振荡器连接组成一个调谐电路。当土壤的水分含量发生变化时其相对介电常数随之改变，引起电容量 C 的相应变化，而振荡器的工作频率 f 则随着土壤电容的增加而降低，通过测量频率的变化进而得到土壤的体积含水率。^[8]

土壤的体积含水率 θ_V 是通过以下的公式得到的：

$$\theta_V = a \cdot S_F^b \quad (4.1)$$

S_F 为归一频率：

$$S_F = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (4.2)$$

这里 F_a 为仪器放置于空气中所测得的频率， F_w 为仪器放置在水中所测得的频率， F_s 则为仪器安装于土壤中所测量得到的频率，而 a 、 b 为参数，需要采集样本通过非线性回归方法率定。

FDR 类仪器的最大优点是传感器结构的多样性，目前市场较为流行的管状探针产品即是采用这类技术。但其根本原理是依据测量土壤的相对介电常数，而土壤的电导率对于其相对介电常数的影响非常大，因此这类仪器的使用必须根据所测土壤对公式进行率定。

由于率定的工作量较大，现场操作实现较为困难，因此近年来流行着一种所谓“调参”的操作方法，即将公式 (4.1) 的右端加上了一个常数项 c ：

$$\theta_V = a \cdot S_F^b + c \quad (4.3)$$

通过人工采集一点土壤的体积含水率进行比对，而确定参数 c ，实际上这种“调参”法是完全没有科学依据的，它只能暂时保持在“调参”含水率相近的范围内误差较小，而在所测含水率与所选“调参”的含水率相差较大时，必然误差较大，而且随着土壤耕作及气候变化引起土壤电导率发生变化后，其测量误差也会加大。因此不能解决 FDR 仪器的根本缺陷。

4.2 频域分解法 (FD)

荷兰 Wageningen 农业大学学者 Hilhorst(1992)通过大量的研究，提出了频域分解法(Frequency Domain Decomposition, FD)。该方法利用矢量电压测量技术，在某一理想测试频率下将土壤的介电常数进行实部和虚部的分解，通过分解出的介电常数虚部可得到土壤的电导率，由分解出的介电常数实部换算出土壤含水率。Hilhorst(1993)等人并由此设计开发出了一种用于 FD 土壤水分传感器的专门芯片 ASIC。该方法理想的测试频率为 20~30MHz 之间，但在这个频段，土壤的

介电常数受土质的影响又非常敏感，因此，土质对测量结果的影响也较大，这是该方法不可避免的缺陷。^[9]

另一方面，频域分解法需要准确的计算探针的特征阻抗，而实际的探针制作工艺使得其并非可用简单的平行传输线理论完全描述，特征阻抗的计算需通过建立复杂的 Maxwell 方程来实现，因此目前大多采用率定的方法来确定探针在不同介质中的特征阻抗，而实验表明，由于制作探针的结构及工艺的限制，其特征阻抗在不同介质中并非简单的线性关系，因此也限制了这类仪器的测量准确度。

4.3 驻波比法 (SWR)

1995 年，Gaskin 和 Miller^{[10] [11]} 提出了基于微波理论中驻波比 (Standing-Wave Ratio, SWR) 原理的土壤水分测量方法，与 TDR 方法不同的是这种测量方法不再测量反射波的时间差，而是测量它的驻波比。

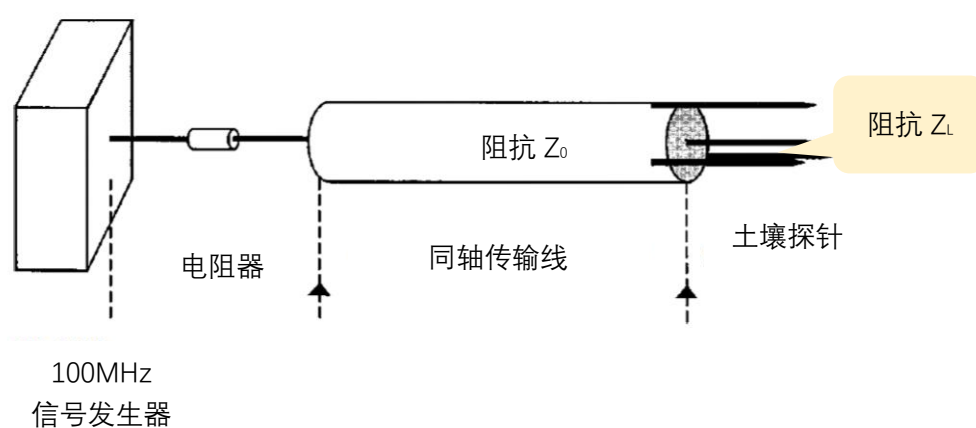


图 6 驻波法仪器结构示意图

图 6 是驻波法仪器的结构示意图，由信号发生器发射的一个频率为 $f = 100\text{MHz}$ 的正弦电磁激励信号，沿同轴传输线传播至土壤探针，在传输线与探针结合处，由于探针阻抗随土壤的介电常数变化，形成

的阻抗差将导致信号产生反射, 入射信号与反射信号相叠加形成驻波, 通过电位计测量驻波高低峰值 \hat{v}_0 、 \hat{v}_j 的差异, 从而得到信号在上述结合点的反射系数 ρ :

$$\rho = (\hat{V}_0 - \hat{V}_j)/2a \quad (4.4)$$

其中 a 为激励信号的电压幅值。他们的试验表明土壤介电常数的改变能够引起传输线上驻波比的显著变化, 因而通过率定得到有关体积含水率 θ_V 与 $\hat{V}_0 - \hat{V}_j$ 之间的三次多项式拟合公式。

通过对 SWR 仪器工作原理的分析, 可以发现:

(1) 它的工作原理最终在于利用同轴传输线与探针连接点的产生反射的反射系数 ρ , 而由电磁学理论可知:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4.5)$$

其中 Z_0 为同轴传输线自身的特征阻抗, 而 Z_L 是探针插入测量媒质形成的阻抗, 其主要由探针模拟的电解电容结构的容抗决定, Zeglin^[12]等给出了这种多针结构探针阻抗的计算公式:

$$Z_L = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{60 \ln \frac{D}{d}}{\sqrt{|\epsilon_r|}} \quad (4.6)$$

这里 n 为探针外部模拟同轴电缆直径为 D 的外导体的针体的数目, d 为针体的直径, 而 ϵ_r 则是测量媒质的相对介电常数。由公式(4.5)可见, ρ 主要由 ϵ_r 所决定, 因此可见驻波法仪器测量的是土体的相对介电常数, 不同于 TDR 仪器测量的表征介电常数, 这也是这类仪器需要率定的根本原因。

(2) 分析图 6 中驻波法测量仪器的结构, 不难发现在发射一个激励信号后, 除了在同轴电缆和探针连接处产生反射外, 其透射的信

号沿探针继续传播至探针顶点，形成一个信号的开路，又会产生一个全反射，其对所测量的驻波差也会有很大影响，但在仪器测量过程中被忽略了。

(3) 尽管由上述公式 (4.2) ~ (4.6) 可以给出 ϵ_r 的完美理论计算，但实际上由于探针实际制作工艺上的限制，公式 (4.6) 需要加上一些复杂的边界条件，而目前还没有一个很好的计算方法，因此只能通过率定的方法来消除这些系统测量偏差。

综合上述讨论，驻波法测量土壤水分的仪器严重的依赖于公式的率定。

5 结语

土壤作为一种多相物质的混合物，其介电性质极为复杂，影响它的因素众多，至今没有一个很好的理论模型可以完全描述，因而目前建立的诸种土壤含水率和介电常数之间的联系公式都是经验性的，因此可以说需要率定是绝对的。而通过本文的分析，可以看到真正的 TDR 原理的测量仪器可以避免由于电导率引起的介电常数虚部的变化，使得在一定范围内，不经率定测量精度能够相对满足实际生产的需要。可作为长期土壤水分自动监测系统建设选择的仪器设备，也可作为以频域法自动监测仪器设备为主的土壤水分监测系统，作为标定站进行建设，以减少经常率定和维护成本。

参考文献:

- [1] Santamarina J C, Klein A, Fam M A. Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring[J]. Journal of Soils & Sediments, 2001, 1(2):130-130.

- [2] Debye, P.(1929). Polar Molecules. Chemical Catalog Company, New York.
- [3] Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmissionlines, Water Resour. Res., 16, 574-582, 1980.
- [4] SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. , 6050X3K1B - MiniTrase Kit OPERATING INSTRUCTIONS
- [5] 陆明, 刘惠斌, 王晨光, 卢玉,等. 新型 TDR 土壤水分测定仪 SOILTOP-200 的开发及应用[J]. 水利信息化, 2017(02): 31-37.
- [6] 陈仁朋, 陈卓, 陆明, 刘惠斌, ,王晨光, 卢玉等, 基于频率步进原理的 TDR 研制及在土体含水量测试中的应用[J]. 2019(07): 1191-1199.
- [7] 王克栋, 王一鸣, 冯 磊, 杨卫中等, 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. 2010(01): 72-77
- [8] 陈海波, 冶林茂, 范玉兰, 汪迪等, 基于 FDR 原理的土壤水分测量技术[C]. 中国气象学会 2008 年年会干旱与减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集
- [9] Hilhorst M A,Breugel K VAN,Plumgraaff D J M H,et al. Dielectric Sensors Used in Environmental and Construction Engineering, Mat . Res . Sue . Symp . Proc, 1996, 41 1: 401—406
- [10] Gaskin G J, Miller J D . Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring . Agric . Engng Res ., 1996, 63: 153-160
- [11] 孙宇瑞 . 汪懋华, 赵燕东 . 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法 . 农业工程学报, 1999, 15(2): 22-30
- [12] Zegelin S J, White I, Jenkins D R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1989, 25(11): 2367–2376.