

一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法^{*}

孙宇瑞 汪懋华 赵燕东

(中国农业大学精细农业研究中心)

摘 要 土壤介电常数是影响土壤含水率快速、准确和可靠测量的关键参数。通过检测土壤介电常数换算出土壤含水率的测量方法已成功地应用在基于 TDR 原理的现代先进测量仪器中。文中依据传输线理论探讨了基于驻波比原理的土壤介电常数测量方法, 解决多针探头特征阻抗的计算, 实验结果证实了理论分析的正确。

关键词 介电常数 驻波比 传输线 特征阻抗 土壤含水率

土壤含水率的实时测量是当今农业节水灌溉, 科学利用水资源和精细农作技术体系研究实践中亟待解决的关键问题之一。中子水分测试仪(Neutron Probe)由于在测量过程中易对操作者的身体健康构成危害, 已逐渐被发达国家所弃用。1980年Davis与Topp等提出了基于时域反射原理(Time Domain Reflectometry)的土壤水分测量方法并由此推出了实用化的产品, TDR土壤水分测试仪虽然能够得到较高精度的测量结果, 但因其昂贵的造价目前只局限应用在实验室中。本文基于无线电工程中的传输线理论探讨了一种测量土壤介电常数的新方法, 按照这种测量原理设计的土壤水分测试仪, 不仅可以使仪器结构简单, 测量速度快, 可靠性高, 且可大幅度地降低其仪器制造成本, 当土壤含水率变化在3%~50%的范围内测量误差小于±5%。

1 测量原理

1.1 传输线作用机理分析

整个测量装置如图1所示, 它由信号源、传输线和探针三部分构成。其中信号源为100 MHz正弦波振荡器, 传输线系不锈钢材料制成的同轴电缆, 探针分布呈圆心四爪结构。

根据无线电工程的传输线理论^[1], 可将整个测量装置等效成如图2所示电路。

在图2中, E_s ——信号源电动势; R_s ——信号源的内阻; Z_1 ——传输线的阻抗; Y_1 ——传输线的导纳; Z_L ——探针的阻抗, 此处即为负载阻抗。 R_k 、 G_1 和 C_1 分别表示传输线上的分布电阻、电导与电容。在 Z 轴任意点 z 取微元 dz , 即可得到该点的电压与电流的微分表达式

$$\begin{cases} dU_z = -I_z Z_1 dz \\ dI_z = U_z Y_1 dz \end{cases} \quad (1)$$

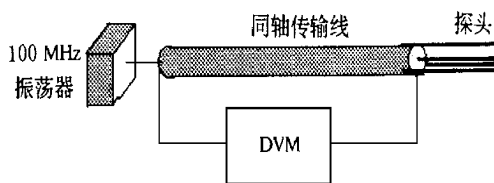


图1 测量装置示意图

Fig. 1 The configuration of measuring system

收稿日期: 1998-11-30

^{*} “九五”国家重点科技攻关子项目(95-019-02-02-090)

孙宇瑞, 副教授, 北京市清华东路17号 中国农业大学(东校区)精细农业研究中心63信箱, 100083

其中 U_z 与 I_z 分别表示传输线任意点 z 处的电压与电流。对上式做二次微分, 可得传输线的电报方程

$$\begin{cases} \frac{d^2 U_z}{dz^2} - Z_1 Y_1 U_z = 0 \\ \frac{d^2 I_z}{dz^2} - Z_1 Y_1 I_z = 0 \end{cases}$$

令 $\gamma^2 = Z_1 Y_1$, 则

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

式中 γ ——传输线的传播系数; α ——衰减常数;

β ——相移常数。电报方程属二阶奇次常微分方程, 其通解形式为

$$\begin{cases} U_z = A e^{\gamma z} + B e^{-\gamma z} \\ I_z = C e^{\gamma z} + D e^{-\gamma z} \end{cases} \quad (4)$$

上式 A 、 B 、 C 、 D 为通解中的四个待定常数。进一步定义传输线的特征阻抗

$$Z_0 = \frac{Z_1}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 又有

$$\begin{cases} U_z = A e^{\gamma z} + B e^{-\gamma z} \\ I_z = \frac{1}{Z_0} (A e^{\gamma z} - B e^{-\gamma z}) \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式中 A 与 B 需要根据传输线的两个端点条件来确定。注意到在 $z=0$ 处有 $U_z = U_L$, 这里 U_L 为探针负载两端的电压。将 U_L 代入式(6)后

$$A = \frac{1}{2} (U_L + Z_0 I_L) \quad B = \frac{1}{2} (U_L - Z_0 I_L)$$

$$\frac{B}{A} = \frac{U_L - Z_0 I_L}{U_L + Z_0 I_L} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \rho$$

即得到 $B = A \rho$, 此处 ρ 定义为传输线的发射系数。另一方面, 取出式(4)的实部则为电压 U_z 的瞬态表达式, 将 B 用 $A \rho$ 置换再平移坐标

$$U(z, t) = A e^{\omega t} \cos \omega x + A \rho e^{-\omega t} \cos(\omega x - 2\beta z) \quad (7)$$

由于本文中所用的同轴电缆可视为无耗传输线^[2], 即满足 $\alpha=0$, 从而得到

$$U(z, t) = A \cos \omega x + A \rho \cos(\omega x - 2\beta z) \quad (8)$$

上式表明常数 A 实际为振荡器的振幅。显然, 当 $z=0$ 时, 该点的峰值电压为

$$U_0 = A (1 + \rho) \quad (9)$$

同理, 令式(7)中 $2\beta z = \pi$, 即

$$z = \frac{\pi}{2\beta} = \frac{\lambda}{4} \quad (10)$$

这里 λ 为高频振荡器的波长。将式(10)代入式(8), 得到传输线上另一点的峰值电压

$$U_j = A (1 - \rho) \quad (11)$$

式(9)、(10)和(11)表明当传输线的长度等于 $1/4$ 波长时, 驻波的波峰与波腹恰在同轴电

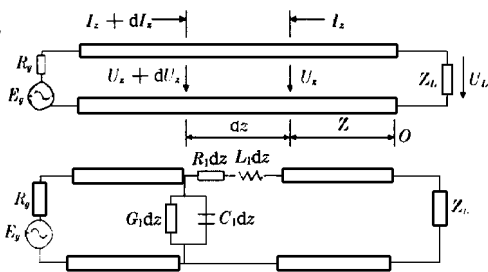


图 2 测量装置等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of measuring system

缆的两个端点。取传输线两端电压差作传输线的输出信号

$$\Delta U_{0j} = \hat{U}_0 - \hat{U}_j = 2A \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = 2A \rho \quad (12)$$

在振幅 A 恒定的情况下, 传输线两端的电位差正比于反射系数 ρ 。而在传输线理论中 ρ 又可用驻波比表示成

$$\Gamma = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|} \quad (13)$$

当土壤含水率改变时, 探针阻抗 Z_L 发生变化进而引起驻波比 Γ 的变化, 由此即证明了本文给出的土壤水分测量方法是基于驻波比原理的。

1.2 多针探头特征阻抗的计算

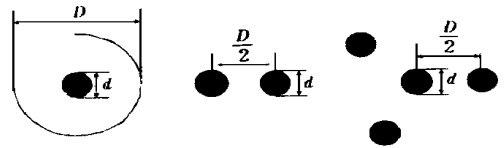
若要进一步找出土壤介电常数 ϵ 与电位差 ΔU_{0j} 的定量关系, 关键要解决公式(12)中四针探头特征阻抗 Z_L 的计算问题。多针探头属于非规则形状传输线, 目前公开发表的文献中尚未见到关于其特征阻抗的计算公式。对于图1所示的测量装置, 只有找出四针探头特征阻抗 Z_L 的计算方法, 才能从理论上证明其测量方案的可行性。同轴传输线、双轴线和四针探头的剖面图如图3所示。

对于同轴电缆, 特征阻抗的计算公式为

$$Z_T = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (14)$$

式中 D —— 外导体的直径; d —— 内导体的直径; ϵ_r —— 传输线内绝缘物质的相对介电常数。对于平行线电缆, 它的特征阻抗为

$$Z_S = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (15)$$



a 同轴传输线 b 平行线 c 四针探头

图3 三种传输线几何形状剖面图

Fig. 3 The profiles of transmission line with three different geometric structures

又因探针为圆心四爪结构, 由几何形状分析其特征阻抗应满足不等式 $Z_S > Z_L > Z_T$ 。令

$$Z_L = \frac{k \cdot 60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (16)$$

由式(14)、(15)的夹逼关系知这里有 $2 > k > 1$ 。将式(14)中 Z_T 替代式(12)中的 Z_0 , 用式(16)削去式(12)中的 Z_L , 即得到

$$\Delta U_{0j} = \hat{U}_0 - \hat{U}_j = 2A \frac{k \sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{k \sqrt{\epsilon_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (17)$$

式中 ϵ_r 为土壤类多孔介质的相对介电常数, 换句话说它是固—气—液混合物的介电常数。特殊地当传输线中的绝缘介质为空气时, $\epsilon_r = 1$ 。所以上式简化为

$$\Delta U_{0j} = 2A \frac{k \sqrt{\epsilon_r} - 1}{k \sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (18)$$

需要指出的是这里 ϵ_r 是一个复数, 但在粘稠性介质中, 当施以高频电压时其相对介电常数可视为一实数。这是因为

$$\epsilon_r = \frac{G}{j\omega\epsilon_0 Y} + \epsilon_r' = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (19)$$

由介质物理中的 Cole-Cole 公式

$$\epsilon' = \epsilon + \frac{\epsilon - \epsilon}{1 + (\omega\tau)^2} \quad \epsilon'' = \frac{(\epsilon - \epsilon)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \tag{20}$$

其中 ϵ 与 ϵ 分别表示介质在低频与甚高频下的复介电常数的实部。 τ 为介质稳态极化所需要的时间, 称为弛豫时间。 在常温下对于水, $\tau = 0.25 \times 10^{-10}$ s; 对粘稠性大偶极子来说 $\tau = 10^{-4}$ s。 而土壤水分的测量无疑属于粘稠性介质的介电常数测量问题, 所以, 当 $f = 100$ MHz 时, $(\omega\tau)^2 \gg 1$, 即有 $\epsilon = \epsilon'$ 。

2 理论分析的实验验证

公式(18)虽然定量地描述了土壤介电常数与输出电压之间的变换关系, 但实际应用前还需通过实验进一步确定 k 的数值。 将该式稍作变换

$$k = \frac{1 + \Delta U_{0j}/2A}{\sqrt{\epsilon(1 - \Delta U_{0j}/2A)}} \tag{21}$$

当探针从土壤中拔出时, ϵ 在空气中变为 1。 此时测得 $\Delta U_{0j} = 1.2$ V, 振荡器的振幅 $A = 2$ V, 由此推算出 $k = 1.86$, 从而进一步证实了它的确实满足上面分析的 $2 > k > 1$ 。 图 4 显示了实际测量值与理论计算值之间的相关性。

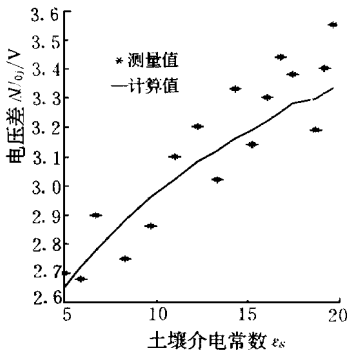


图 4 压差 ΔU_{0j} 与土壤介电常数 ϵ_s 关系曲线

Fig. 4 The relationship between ΔU_{0j} and ϵ_s

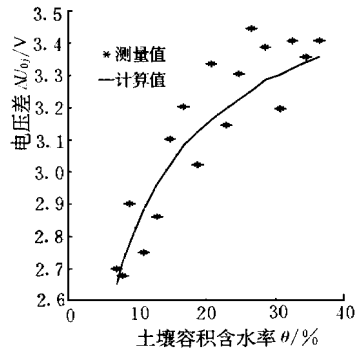


图 5 电压差 ΔU_{0j} 与土壤容积含水率 θ 关系曲线

Fig. 5 The relationship between ΔU_{0j} and θ

关于土壤含水率 θ 与土壤相对介电常数 ϵ 之间的定量关系^[4], TDR 测量方法的研究中已有结论(Topp 1980), 其回归方程为

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \tag{22}$$

式(22)与式(17)相结合进一步证明了基于传输线驻波比原理可以直接测定土壤含水率。 图 5 表明了电压差 ΔU_{0j} 与土壤容积含水率 θ 之间的理论计算值与实验值的相关性。

3 结 论

本文对基于驻波比原理的土壤介电常数测量方法做了深入的定量分析, 导出了非规则传输线——四针探头特征阻抗的估算公式。 土壤含水率可通过一多项式回归方程确定。 实验结果不仅证明了理论分析的正确性, 同时表明这种测量方法具有很好的实用前景, 尤其适于节水灌溉自动控制和精细农作的土壤水分空间分布实时采集系统中。

参 考 文 献

- 1 闫自卿等. 微波技术基础(第 2 版). 北京: 北京理工大学出版社, 1997. 7~ 50
- 2 G J Gaskin and J D Miller. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. Silsoe Research Institute, 1996. 153~ 159
- 3 罗秉铎等. 微波测湿实用技术. 北京: 电子工业出版社, 1990. 9~ 13
- 4 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574~ 582

A Kind of Determinations of Soil Dielectric Constant Using the Principle of Standing-Wave Ratio

Sun Yurui Wang Maohua Zhao Yandong

(Precision Agriculture Research Center, China Agricultural University, Beijing, 100083)

Abstract The measurement of soil dielectric constant is critical to determine soil water content. In order to get a both practical and economical measuring instrument, a new device based on the principle of standing-wave ratio was designed and a series of theoretical treatments were developed. Especially, a theoretical problem about determining the characteristic impedance of four-wire probe was satisfactorily solved. The calculated soil dielectric constant is coincided with the results from test.

Key words dielectric constant, standing-wave ratio, transmission line, characteristic impedance, soil water content