

基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析

赵燕东, 王一鸣

(中国农业大学电气信息学院)

摘 要: 土壤水分测量方法中, 有效测量范围(即测量敏感区域)是一个重要问题。该文运用探针的静电场分布, 分析由基于驻波率(SWR)原理的快速土壤水分传感器的测量敏感度, 分析了 SWR 型土壤水分传感器的有效测量土体, 输出电压与土壤体积含水率之间的最大线形区域, 得出了 SWR 型土壤水分传感器的最佳结构。

关键词: 土壤水分传感器; 测量敏感度; 空间权函数; 近似权函数

中图分类号: TH79

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2002)02-0005-04

通过测量土壤的电特性来达到测量土壤含水率是一种行之有效的办法。土壤是由空气、固体和水组成的多孔介质, 其中水的介电常数约为 80, 固体的介电常数约为 4, 而空气的介电常数约为 1。可见, 含水土壤的介电常数主要应由水来决定, 通过测量土壤的介电常数即可达到测量土壤体积含水率的目的。基于驻波率(SWR)^[1]原理的土壤水分传感器就是根据这一原理设计而成的。这种传感器是由 100 MHz 信号源、一节同轴传输线和一个 4 针不锈钢探头组成。信号源产生无线电波, 此波沿着传输线传送到探头。由于探头的阻抗与传输线的阻抗不匹配, 一部分的信号将反射回来, 在传输线上, 入射波与反射波叠加形成驻波, 使传输线上各点的电压幅值存在变化, 传输线两端的电压差^[2]为

$$\Delta U = 2A\rho = 2A \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

式中 A ——信号的幅度; ρ ——反射系数; Z_L ——探头的阻抗, 它的值与含水土壤的介电常数有关; Z_0 ——传输线的特征阻抗。

而传输线上的驻波率可以表示如下^[3]

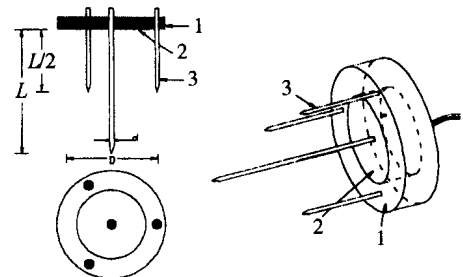
$$\Gamma = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|} \quad (2)$$

这样, 通过测量传输线上的驻波率可以达到测量土壤体积含水率的目的。

1 SWR 土壤水分探头的结构

由中国农业大学电气信息学院王一鸣教授带领的科技小组研制成功的 SWR 型土壤水分传感器的不锈钢探头有 3 种不同规格, 探针直径为 6 mm, 探

针间距为 4 cm, 周围探针长度为 4 cm, 中间探针长度分别为 10、15、20 cm 不等, 来适应测量不同深度的土体要求。SWR 土壤水分探头的结构如图 1 所示。



1. 塑料 2. 金属 3. 探针

图 1 SWR 土壤水分探头的结构

Fig 1 Configuration of SWR probe

由 SWR 土壤水分探头的结构可以看出: 其结构有两部分, 一部分是 4 针部分, 它可以看成是同轴传输线的特殊形式^[4]; 而另一部分是单针部分, 它可以被看成是一段高频电流元^[3]。将 SWR 土壤水分探头设计为此结构, 是因为它有着 4 针等长结构所没有的优势: 它的输出电压与土壤体积含水率之间的线形区间比起 4 针等长结构的线形区域要宽广的多。这不仅提高了其测量精度, 而且降低了与之配套的数据采集系统的软件工作量。

2 空间敏感度的定义

由于 SWR 土壤水分传感器结构的复杂性, 导致了其电磁场分布比较复杂, 如果直接用磁场密度的分布来定义“空间权函数”来达到分析其测量的敏感度就比较困难。因此, 本文通过电场强度间接定义“空间权函数”。空间权函数^[5]可通过下式给出

$$k_a(x) = \frac{k_s(x_1, x_2, x_3)w(x_1 - x_1, x_2 - x_2, x_3 - x_3)}{V} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (3)$$

收稿日期: 2001-09-21 修订日期: 2001-11-20

基金项目: 国家“九五”攻关项目“土壤水分便携式快速测试仪”(96-A 23-02-010)

作者简介: 赵燕东, 博士生, 北京清华东路 中国农业大学电气信息学院, 100083

式中 $k_a(x)$ ——点 $x(x_1, x_2, x_3)$ 的表现介电常数;
 $w(x)$ ——空间权函数; $k_s(x)$ ——空间分布着的介电常数的真值。

对于 4 针部分可以借助于同轴传输线内的静电场分布来加以分析。

首先分析同轴传输线型的情况。设 x_3 的方向平行于探针方向, 如果忽略探头末端的“边缘效应”并假设在同轴传输线型探头上传播的 TEM 波没有衰减, 所以在 x_3 方向上介电常数的不均匀性不能引起传播速度变化, 即传播速度不依赖于 x_3 方向上距离的变化。在此只研究垂直于探针方向的 $x_1 \sim x_2$ 平面上介电常数 k_s 的变化敏感度。这样公式(3)变为

$$k_a(x) = \int_A k_s(x_1, x_2, x_3) w(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (4)$$

如果介电常数 k_s 的空间分布是均匀的, 权函数 $w(x_1, x_2)$ 将不受其影响, 但如果介电常数 k_s 的空间分布是不均匀的, 那么权函数 $w(x_1, x_2)$ 将随着它的变化而变化。对于介电常数 k_s 的微小变化, 将给出相应的权函数, 从而有效地定义 SWR 土壤水分传感器的有效测量敏感度。

根据 TEM 电磁波在传输线中传播的理论, 电磁波在传输线上的传播速度受到传输线的静电容量的影响, 它可以由带有一定边界条件的两维 Laplace 方程求得, 如果探头是由截面为 S_1 和截面

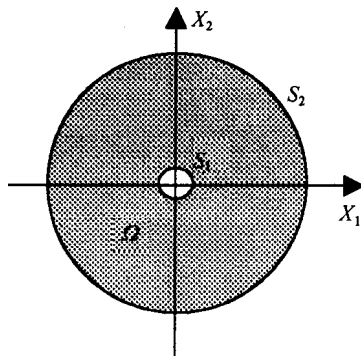


图 2 静电场分布

Fig 2 The distribution of electrostatic field

为 S_2 电位为零的两个导体组成, 则探头上电磁波的传播速度就由两导体 S_1, S_2 之间探针单位长度上的静电容量来决定。假设 $\Phi(x_1, x_2)$ 是两导体所决定的平面区域内的静电势分布, 见图 2。

如果沿着探针方向上每单元长度上的电量分别为 $\pm Q$, 每单位长度上的电容为 C , 则:

$$C = Q/V_1$$

每单位长度上的总电量为

$$W = \frac{1}{2} Q V_1 = \frac{1}{2} C V_1^2$$

又因为

$$Q = \oint_{S_1} k_s \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) dl$$

式中 ϵ_0 ——真空中的介电常数; dl ——沿着 S_1 的周边方向的单位长度; $\frac{\partial}{\partial n}$ ——从 S_1 的外法向量。

则沿探针方向单位长度上的电容可表示为

$$C = \frac{\epsilon_0}{V_1} \oint_{S_1} k_s \frac{\partial \Phi}{\partial n} dl \quad (5)$$

其中电势 Φ 满足

$$\nabla \cdot (k_s E) = - \nabla \cdot (k_s \nabla \Phi) = 0$$

E 为电场强度, $E = - \nabla \Phi$

将 Gauss 原理代入(5), 得

$$2W = C V_1^2 = \epsilon_0 \iint_A k_s |E|^2 dA \quad (6)$$

在特殊情况下, 介电常数 k_s 为均匀值 k_a , 对应地有 $E = E_0, \Phi = \Phi_0$, 使得

$$E_0 = - \nabla \Phi_0, \nabla^2 \Phi_0 = 0$$

和

$$C V_1^2 = \epsilon_0 k_a \iint_A |E_0|^2 dA \quad (7)$$

比较等式(6)和(7)可以得出表现均匀介电常数 k_a 与实际介电常数 k_s 的关系

$$k_a = \frac{\iint_A k_s |E|^2 dA}{\iint_A |E_0|^2 dA} \quad (8)$$

比较等式(4)与(8)可以得出两维的权函数 $w(x_1, x_2)$ 为

$$w(x_1, x_2) = |E(x_1, x_2)|^2 / \left[\iint_A |E_0|^2 dA \right] \quad (9)$$

其中在静电场中, 两维近似权函数可用下式计算

$$w_0(x_1, x_2) = |E_0(x_1, x_2)|^2 / \left[\iint_A |E_0|^2 dA \right] \quad (10)$$

3 4 针等长式探头的测量敏感度

由上分析可知: 4 针式探头中的标准能量分布与同轴传输线的标准能量分布是一致的, 因此, 本文用同轴传输线的标准能量分布来近似分析 4 针式探头的标准能量分布。假设一同轴传输线的内导体半径为 r_1 , 外导体半径为 r_2 , 内导体电位为 1 个单元, 外导体电位为零, 没有能量损耗的情况下, 取圆柱坐标系, 则电位 Φ 将仅随 r 坐标而变化。这时, 拉普拉斯方程简化为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Phi}{dr} \right) = 0$$

应用给定的边界条件

$$r = r_1, \Phi = 0; \quad r = r_2, \Phi = 1_0$$

得到电位

$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{r}{r_1} \right)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

因为 $E = -\nabla \Phi$

所以 $E_0 = -\nabla \Phi_0 = -\frac{1}{r \ln(r_2/r_1)} r^0$

则

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} |E_0|^2 dA &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2 [\ln(r_2/r_1)]^2} r dr d\varphi \\ &= 2\pi \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{[\ln(r_2/r_1)]^2} = \frac{2\pi}{\ln(r_2/r_1)} \\ w_0(r, \varphi) &= \frac{|E_0|^2}{\iint_{\Omega} |E_0|^2 dA} = \frac{1}{2\pi r^2 [\ln(r_2/r_1)]} \end{aligned} \quad (11)$$

这就是标准化的权函数, 它满足

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} w_0(r, \varphi) r dr d\varphi = 1$$

可以看出, 式(11)中的原点是一个奇点, 这意味着: 如果 $r_1/r_2 \ll 1$, 大多数能量(也就是大多数测量敏感区域)将集中在内电极周围的一个小圆柱体内, 这就是所谓的“集肤”效应。实际上, 如果在 r_1 和 r_m 之间有一半的能量, 则半径 r_m 必满足

$$\begin{aligned} \ln(r_m/r_1) &= \frac{1}{2} \ln(r_2/r_1) \\ r_m/r_2 &= (r_1/r_2)^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

即: 当 $r_1/r_2 \rightarrow 0$ 时, $r_m/r_2 \rightarrow 0$

例如: 如果 $r_2/r_1 = 100$, 则 $r_2/r_m = 10$, 大约一半的总能量集中在内圆柱体区域, 而这块圆柱体的体积只是总体积的百分之一。

式(11)所表示的标准化权函数应用于 $r_1 = r$, r_2 , 而且它的值依赖于 r_1/r_2 的比值。为便于比较, 用另一个与式(11)成比例关系的标准化函数来定义相对敏感度函数 $F(R, \varphi)$, 但它依赖的是无量纲半径 $R = r/r_1$ 。可以通过下式来确定敏感度函数

$$F(R, \varphi) = R^{-2} \quad (13)$$

当 $R = 1$ 时, $F(R, \varphi) = 1$

对于同轴传输线式探头来说, 相对敏感函数同式(13)由式(13)可以看出同轴传输线式探头的相对测量敏感度函数在平面上是一组同心圆, 即 4 针式探头的相对敏感度函数在平面上是一组同心圆。

4 SW R 型探头中的测量敏感度

假设 SW R 探头的中间探针上带有 + Q 的电量, 周围 3 根探针上分别带有 $-(1/3)Q$ 的电量, 可得出 SW R 型探头中的电场结构如图 3 所示

箭头表示电场强度的方向, 梳密表示电场强度的大小。可以看出在同样大的横截面内 4 针部分的电场强度要大于单针部分的电场强度。根据标准化权函数的定义式可推知: 在同样大的横截面内 4 针部分的标准权函数要比单针部分的标准权函数大,

即单针部分的测量敏感有效区域要比 4 针部分的测量有效区域小。如果将等长的 4 针探头看成与同轴传输线式探头有着近似的测量有效区间, 则其测量有效区间将是一个近似的以探针长度为准, 以中间探针为中心的同心圆柱体, 如图 4a 所示; 而 SW R 型探针的敏感区间将是一个以探针长度为准, 以中间探针为中心, 4 针部分近似为圆柱体, 单针部分近似为尖体的圆锥体, 如图 4b 所示。

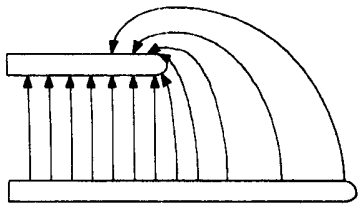


图 3 SW R 型探头中电场的轴向分布
Fig 3 Distribution of electric field of SW R probe on axis

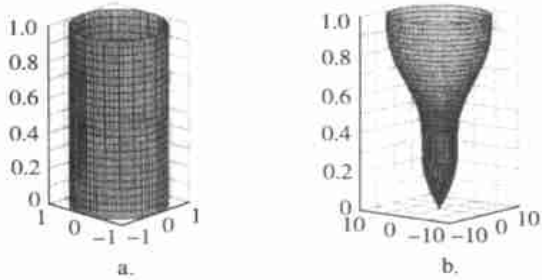


图 4 同轴传输线式及 SW R 型探头的测量有效区域
Fig 4 Effective volume measured by coaxial and SW R probes

5 实验方案及其分析

为了和 TDR 型传感器具有可比性, 本实验采用的 SW R 型土壤水分探头中间探针的长度采用与 TDR 型传感器探针相同的长度, 即 15 cm; 周围的短探针长度分别是: 4、6、8、10、12 及 15 cm; 土质选用我国北方典型的砂壤土。

为了得到均匀含水率的土样, 在 6 个塑料大桶中加入等量的土, 不等量的水, 充分搅拌后, 密封放置 48 h 以上, 让水分充分运动达到平衡, 从而得到含水率分别为 8.0%、13.3%、16.9%、19.7%、21.1%、26.6%、32.0% 及 39.8% 的均匀土样。

在塑料桶底部放入 20 cm 的不同含水率的均匀土样, 上覆 5 cm 的干土, 从而也得到含水率分别为 8.0%、13.3%、16.9%、19.7%、21.1%、26.6%、32.0% 及 39.8% 的不均匀土样。分别在均匀和不均匀每种土样中调整短探针的长度, 测量传感器的输出电压值, 所得结果如图 5 所示。

从以上实验可以看出: 对于同一土壤体积含水率来说, 短探针越短, 传感器在不均匀土样中的输出电压较均匀土样的输出电压就低得越多, 这说明被

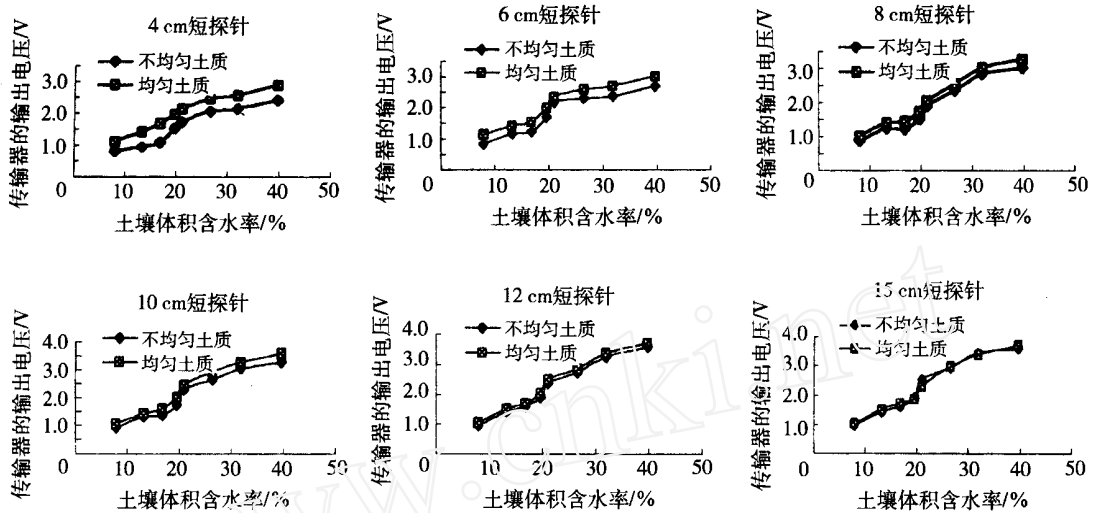


图 5 均匀土样和不均匀土样中的测量结果

Fig 5 Measured results in uniformity and nonuniformity soil

测土体的平均含水率就越低。对于不均匀土样, 低含水率的上部土样在被测土体中占的比重就逐渐加大。由此说明本文对 SW R 型土壤水分探头有效测量区域呈圆锥体的定性分析是正确的。

6 结 论

本文对基于驻波率原理(SW R)的土壤水分传感器的测量敏感度做了定性分析, 通过实验证明了分析的正确性, 定性地说明了 SW R 型土壤水分传感器的有效测量土体为: 以中间探针为中心, 半径小于内外探针间距, 深度为中间探针长度的圆锥形土体。同时考虑既要减小探针的“集肤”效应, 又要不破坏土壤结构的目的, 建议探针之间的距离与探针直径之比一般不大于 10。通过采用中间探针长于四周探针式的 SW R 探头, 来获得传感器的输出电压与土壤体积含水率最大线形区域。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Yining, Zhao Yandong Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [C]. Proceeding of International Conference on Agriculture Engineering December 14- 17, 1999 Beijing
- [2] P I 索姆洛, G J 亨特 微波阻抗测量[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990
- [3] 冯慈璋 电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- [4] 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 Resour Res, 1989, 25: 2367 - 2376
- [5] Knight J H. Sensitivity of time reflectometry measurements to lateral variations in soil water content[J]. American Geophysical Union, 1992

Analysis of Sensitivity of Soil Moisture Measurement Based on Standing-Wave Ratio

Zhao Yandong, Wang Yining

(College of Electronics and Information, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract With the development of study on measurement of soil moisture, sensitivity of measurement becomes more and more important. In this paper, the theory of electrostatic field was applied to analyze the sensitivity of soil moisture measurement by using its sensor based on standing-wave ratio, which was manufactured by Electrical Information College of China Agricultural University. The effective measurement of soil volume and the best structure of sensor's probe were presented, and the linear range between voltage and soil moisture was obtained.

Key words: soil moisture sensor; sensitivity of measurement; space weight function; approximate weight function