

FDS 土壤水分传感器的两步标定法

高艳 孙宇瑞 马道坤 林剑辉

(中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要 在有机溶液、砂土和基质(泥炭、蛭石、珍珠岩质量比 4.5:4.5:1.0)中对基于频域(FD)原理的 FDS 系列水分传感器进行了测试,并根据实验结果对其阻抗特性、一致性和测量精度进行了分析。传感器的标定工作分 2 步进行,首先利用有机溶液建立传感器输出电压信号 V 与介电常数 ϵ 的关系,然后通过 Topp 公式间接得出传感器输出信号与土壤含水率之间的关系。在砂土和基质中的实验结果表明,采用两步标定法标定后, FDS 系列传感器测量得到的砂土和基质含水率与烘干法得到的含水率的相关系数分别为 0.90 和 0.95,其输出电压与 ML2 型传感器输出电压的相关系数 > 0.99 ,表明该标定方法能够满足测量精度要求。

关键词 频域(FD); 土壤水分传感器; 标定

中图分类号 TM 938.862

文章编号 1007-4333(2006)02-0078-04

文献标识码 A

Two-step calibration of the FDS soil water content sensor

Gao Yan, Sun Yurui, Ma Daokun, Lin Jianhui

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

Abstract The FD (Frequency Domain) technique, is used to measure soil water content (WC) based on the dielectric theory. The objective of this paper is to evaluate a two-step calibration procedure for a prototype FD sensor named FDS. The testing media include organic liquid, soil and substrate. The output voltage of the sensor is related to soil permittivity, and soil water content is then obtained from Topp equation that reflects the general relationship between permittivity and soil water content. The experimental results demonstrated that the data from the two-stage calibration agreed reasonably well with the results from the oven-dry method and the ML2 soil water content sensor.

Key words frequency domain(FD); soil water content sensor; calibration

TDR(time domain reflectometry)是 20 世纪 60 年代末出现的一种确定介电材料介电行为的方法,它利用电磁波在介质中的传播速度随介质介电常数而改变的原理测量物质的介电特性。20 世纪 80 年代以来,基于介电原理的土壤水分测量方法逐步引起人们的重视。Topp 等在揭示土壤体积含水率与土壤复介电常数的实部呈单值函数的同时指出, TDR 方法的优点之一是不受土壤盐分的影响^[1]; Hilhorst 提出基于频域(frequency domain, FD)的测量方法,认为在某一理想测试频率下可以对土壤介电常数进行分解,利用其实部确定土壤水分,虚部确定土壤电导率^[2]。从本质上说,FD 测量方法是对 TDR 的一个 Fourier 变换^[3]。Sun Yurui 等研制的

基于 FD 测量方法的 FDS 系列水分传感器^[4],采用 100 MHz 测试频率,降低了土壤复介电常数虚部的影响,提高了测量精度。该系列水分传感器能够测量土壤、基质等多孔介质的含水率,并可用于系统集成,实时监测土壤水分。

传感器研制后的标定工作直接影响传感器的测量精度。传统的标定方法对于特定的土壤具有准确、方便的优点,但应用于多种土壤时,标定工作量很大。为此笔者提出一种依据 TOPP 公式原理的两步标定法,只需在有机溶液中对传感器进行标定,避免了在土壤中直接标定时土壤孔隙中有机质和空气等对测量精度的影响,田间使用时不需再针对不同土壤类型进行多次标定。

收稿日期: 2005-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270775)

作者简介: 高艳,硕士研究生;孙宇瑞,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事支持精细农业的传感器及控制技术研究, E-mail: Yurui828@yahoo.com

1 测量原理

土壤是介于极性与离子性电介质之间的电介质。材料的介电物理模型通常与 RC 并联电路等效^[5]，因此，土壤的等效导纳 Y 由电导 G 和电容 C 两部分构成，即

$$Y = G + j \omega C \tag{1}$$

式中： ω 为信号源角频率。将 $C = \epsilon_0 \epsilon_r k$ 代入式 (1)，可得

$$Y = j \omega \epsilon_0 k \left(\epsilon_r - j \frac{G}{\omega k} \right) \tag{2}$$

式中： ϵ_0 为真空介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ ，F/m； ϵ_r 为电容 C 的相对介电常数； k 为几何系数，取决于测量传感器的几何形状。令

$$\epsilon_r = G / (\omega k) \tag{3}$$

则有

$$Y = j \omega k \epsilon_0 (\epsilon_r - j) = j \omega k \epsilon_0 \epsilon_r \tag{4}$$

其中

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \tag{5}$$

式中： ϵ_r' 为土壤相对介电常数，其实部和虚部分别取决于等效电容 C 和等效电导 G 。 ϵ_r'' 是测试电场频率的函数，即

$$\epsilon_r''(\omega) = \epsilon_r''(\omega) - j \epsilon_r''(\omega) \tag{6}$$

当测量频率足够大时，实部的影响可以忽略。根据 ϵ_r'' 与土壤含水率的关系，可采用 Topp 公式^[2]计算土壤体积含水率

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r'^3 - 5.5 \times 10^{-3} \epsilon_r'^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r' - 5.3 \times 10^{-2} \tag{7}$$

2 材料与方 法

2.1 实验材料

实验材料包括 10 种已知介电常数的有机溶液、1 种土壤和 1 种自制基质。有机溶液的介电常数见表 1^[6]。

表 1 有机溶液的介电常数

Table 1 Dielectric constants of 10 different kinds of organic liquids

| 有机溶液 | 介电常数 | 有机溶液 | 介电常数 |
|------|-------|------|-------|
| 环己烷 | 1.96 | 正-丁醇 | 17.64 |
| 苯 | 2.25 | 异-丙醇 | 20.25 |
| 乙酸乙酯 | 6.25 | 乙醇 | 25.00 |
| 正-辛醇 | 24.00 | 乙醇 | 43.56 |
| 异-丁醇 | 1.00 | 乙醇 | 53.29 |

注：体积分数 99.7%；醇水体积比 2:1；醇水体积比

1:1。

所用土壤为砂土，基质样品为蛭石、珍珠岩。将砂土在 105℃ 下烘干 24 h，冷却后配置不同容积含水率的土壤样品，按容重 1.4 g/cm³ 均匀装入高 14.5 cm、直径 12 cm 的柱形 PVC 容器。蛭石、珍珠岩、砂土以质量比 4.5:4.5:1.0 配置，其容积含水率见表 2，容重 0.55 g/cm³。

表 2 砂土和基质样品的含水率

Table 2 Water content in sand and substrate

| | | m ³ /m ³ | |
|-------|-------|--------------------------------|-------|
| 砂土 | 基质 | 砂土 | 基质 |
| 0.071 | 0 | 0.233 | 0.279 |
| 0.090 | 0.035 | 0.241 | 0.316 |
| 0.124 | 0.070 | 0.269 | 0.351 |
| 0.135 | 0.104 | 0.284 | 0.386 |
| 0.174 | 0.141 | 0.297 | 0.421 |
| 0.201 | 0.177 | 0.306 | 0.452 |
| 0.218 | 0.211 | 0.346 | 0.494 |
| 0.227 | 0.246 | 0.362 | 0.532 |

2.2 实验方法

实验采用 FDS 系列传感器。为验证本文中测量原理，标定前在不同有机溶液中对该系列传感器探针阻抗进行测定。探针阻抗测定使用 Agilent 公司(美国)的 E5071B 型网络分析仪，所用频率 300 kHz ~ 8.5 GHz。

传感器的标定分 2 步完成：1) 分别在上述已知介电常数的 10 种有机溶液中进行标定。将传感器的探针正好没入溶液中，传感器输出电压 V 由数据采集系统测出，由此得到 $\epsilon_r'' - V$ 的函数关系式。2) 将 $\epsilon_r'' - V$ 函数关系式代入式 (7)，得到 θ 与 V 的函数关系式。由于 Topp 公式对于一般土壤的适用性，传感器在有机溶液中标定后，田间使用时，不需针对不同土壤类型进行多次标定。

3 结果与分析

3.1 探针阻抗测量结果

图 1 示出不同有机溶液中探针阻抗与溶液介电常数之间的关系，显然，与其虚部相比，阻抗实部对测量结果的影响可以忽略，此结果验证了本文第 1 节的理论分析。

3.2 两步标定法测量结果

选取传感器 FDS001、FDS002 和 FDS003 在上

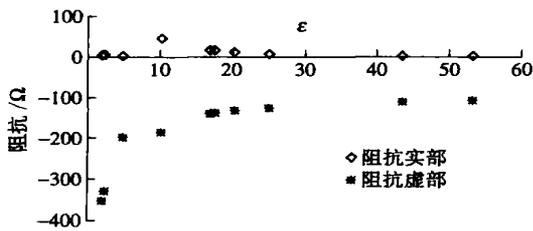


图1 不同介电常数溶液中探针阻抗的输出
(测量频率 100 MHz)

Fig. 1 Probe impedance in liquid of different dielectric constants

述 10 种有机溶液中进行了测量,归一化处理后的测量结果见图 2。方差分析结果表明,这 3 个传感器测量结果的最大方差为 0.007,可见该系列传感器有较好的一致性;但当传感器输出电压大于 0.80 V 时,FDS001 的测定值与 FDS002 和 FDS003 的测定值存在着一定偏差。

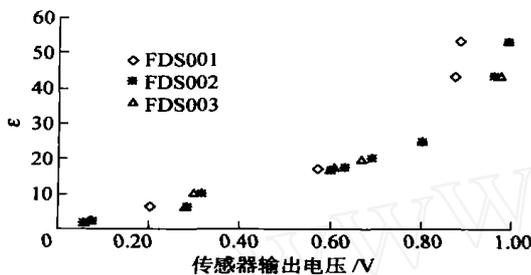


图2 10种介电常数溶液中传感器的测量结果

Fig. 2 Sensor outputs in liquid of different dielectric constants

标准介电溶液得到的传感器输出电压与溶液介电常数的关系,对于特定形状的传感器是唯一的。根据实验结果,对于本研究,传感器输出电压 V 与溶液介电常数 ϵ 间的关系为:

$$\begin{aligned} &= 5.9 \times 10^2 V^4 - 1.0 \times 10^3 V^3 + \\ &5.1 \times 10^2 V^2 - 83.9 V + 5.0 \end{aligned} \quad (8)$$

利用式(7)和(8),即可根据传感器输出电压计算出土壤含水率。图 3 示出采用两步标定法(使用 FDS 002 传感器)和烘干法得到的体积含水率,显然,其结果具有较好的一致性,在砂土和基质中的相关系数分别为 0.90 和 0.95,均方根差为 0.06 和 0.02 m^3/m^3 。

3.3 传感器测量精度分析

为衡量传感器的测量精度,进行了另一组测量实验。将 FDS001、FDS002 和 FDS003 在基质中的测量结果与烘干法得到的含水率,以及 ML2 传感器(Delta 公司)测量的电压值进行了比较,结果见图 4。可以看出,FDS 系列传感器的输出电压和含水

率测定值与 ML2 传感器的测量值以及烘干法的结

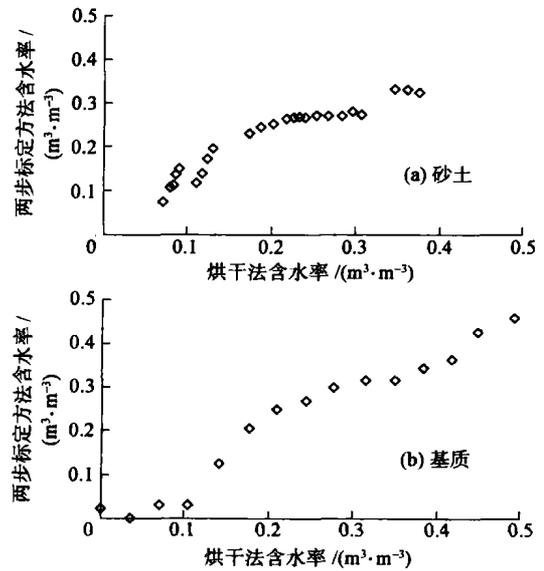


图3 两步标定法和烘干法对砂土和基质中含水率的测量结果

Fig. 3 Comparison of measured results between two-stage calibration and oven-dry method in (a) sand and (b) substrate

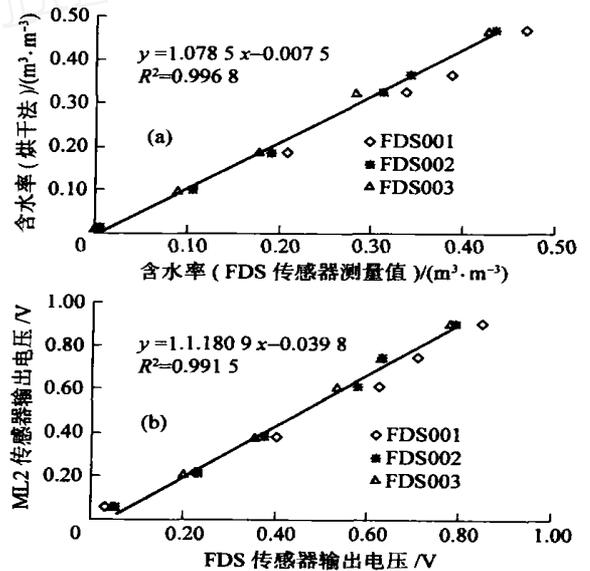


图4 两步标定后 FDS 系列传感器与烘干法(a)、ML2 传感器(b)对基质中含水率的测量结果

Fig. 4 Comparison of measured results in substrate between 2-stage calibration and oven-dry method(a) and FDS sensor and ML2 sensor (b)

果具有很好的线性关系,相关系数均大于 0.99,说明两步标定法能够保证 FDS 系列传感器的测量精度。另外,在含水率较高时,FDS001 得到的含水率和电压均大于 FDS002 和 FDS003,这与图 2 中输出电压大于 0.80 V 时 FDS001 误差较大的结果是一

致的。

4 结 论

在砂土和基质中的实验结果表明,采用两步标定法对 FDS 系列传感器标定后测量得到的砂土和基质含水率与烘干法得到的含水率的相关系数为 0.90 和 0.95,其输出电压与 ML2 型传感器测量结果的相关系数 > 0.99 ,表明该标定方法能够满足测量精度要求。与常规标定方法相比,两步标定法具有以下优点:

1) 物理概念更加清晰,便于分析问题。由于传感器的特性已在第一步标定中确定,探头与土壤的接触问题、土壤介电特性空间变异问题以及土壤容重的影响都可以忽略。

2) 探头与土壤的接触问题、土壤介电特性不均匀问题、土壤容重与土壤类型的影响等在第二步标定中解决。

3) 从生产与应用的角度考虑,第一步标定针对传感器本身,由研制者和生产厂家给出标准的传感器输出电压与介电常数的关系,在此基础上,用户根据经验公式或使用两点法对所用土壤进行标定,土

壤类型、容重和空间变异性的影响都可以考虑在内。

参 考 文 献

- [1] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resource Research*, 1980, 16(3): 574-582
- [2] Hilhorst M A. Dielectric characterisation of soil [D]. Wageningen (Netherlands): Wageningen Agricultural Univ, 1998
- [3] 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2000
- [4] Sun Yurui, Ma Daokun, Lin Jianhui, et al. An improved FD-technique for determining soil water content [EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/scholar/download.jsp?file=sunyurui-10>, 2004
- [5] 金维芳. 电介质物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 63-64
- [6] Topp G C, Lapen D R, Edwards M J, et al. Laboratory calibration, in-field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content [J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(4): 633-641