

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.017

FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析^{*}

许景辉^{1,2} 马孝义² Sally D Logsdon³ Robert Horton⁴

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 美国农业部农业研究局国家农业与环境实验室, 埃姆斯 IA 50011 - 3120; 4. 爱荷华州立大学农学系, 埃姆斯 IA 50011)

摘要: 为了研究 FDR 探头结构中探针间距和探针长度对土壤介电谱测量的影响,通过矢量网络分析仪分别对 2 种土壤的 4 个不同体积含水率进行了介电谱测量,通过 28 mm 长度下 10 mm、14 mm 探针间距探头和 10 mm 间距下 28 mm、45 mm 长度探头所测介电谱对比发现,在 31.2 MHz 以上频段探针间距对土壤介电谱测量影响很小,而探针长度在不同频段对土壤介电实部或虚部均有不同影响。研究表明,探针间距不是土壤介电谱测量的影响因素,根据测量需要可对其进行一定范围的调整;探针长度影响土壤介电谱弛豫频率值,探针越短其弛豫频率越大,探针长度是影响土壤介电谱测量的关键因素之一。FDR 探头的探针应适当缩短以拓展介电谱平滑段的频率范围,这有利于 FDR 传感器测量精度和环境适应性的提高。

关键词: 土壤 频域介电 探头结构 介电谱

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0102-06

引言

FDR(Frequency domain reflectometry)土壤水分传感器是以土壤频域介电理论为基础的新型土壤含水率测量设备^[1]。FDR 传感器具有 TDR(Time domain reflectometry)的所有优点^[2],且价格便宜^[3],而且能根据特殊测量要求,进行传感器探头结构的不同设计^[4],故其应用越来越广泛。

由于 FDR 测量精度受土壤介电特性影响,因此围绕土壤介电特性的 FDR 精度和土壤适应性研究很多。文献[4~8]从土壤介电特性入手,通过土壤质地、温度、含盐量等对土壤介电特性的影响,分析了 FDR 测量精度的影响因素。文献[9~12]表明,不同测试系统下,土壤介电特性表现有一定的差异,部分研究中,土壤介电特性的差异还很大。究其原因,是探头结构变化带给测量比较上的不统一所造成的。Shang 在同轴腔进行土壤介电特性研究中发现,土壤介电的弥散频率与土壤样品长度有关,这表明探针长度将影响土壤介电特性的测量^[13]。Pettinelli 研究发现,传感器设计对土壤介电实部和虚部测量有很大影响^[14]。以此推论,FDR 探针间距和长度将影响土壤介电特性的测量。

为了研究探针间距和长度对土壤频域介电特性

的影响,本文采用不同间距相同探针长度、相同间距不同探针长度的 4 个探头,通过矢量网络分析仪测量,研究探头结构对土壤介电测量的影响。

1 材料和方法

1.1 土壤样品制备

为了研究不同探头结构对土壤介电特性的影响,试验选用了容重相同、粘粒含量不同的两种土壤。由于此试验主要为了验证同一测体在不同探针间距和不同探针长度探头测量下介电谱的差别,因此选用两种土壤即可。所用土壤物理特性见表 1。其中 Hanlon 土采集于美国 Iowa 州的 Mitchell 县,属于细砂土,此土颜色深灰色,不易结块,为中性土壤。Loess 土采集于美国 Iowa 州的 Dickinson 县,与我国黄土相似,此土由冰河期土壤侵蚀形成,颜色微黄,质地均一,多孔,为中性土壤。

表 1 试验用土的质地和密度
Tab. 1 Particle sizes and densities of the soils

土壤名	粘粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	填装密度 /g·cm ⁻³
Hanlon	9.76	16.29	73.942	1.36
Loess	27.15	69.79	3.062	1.30

收稿日期: 2013-09-19 修回日期: 2013-10-25
^{*} 国家自然科学基金资助项目(51309193)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)、陕西省农业攻关项目(2012K02-15)和西北农林科技大学科技创新专项资助项目(QN2011128)
作者简介: 许景辉,博士生,讲师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: xjhw@163.com
通讯作者: 马孝义,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: x36936@gmail.com

试验在美国农业部农业研究局国家农业与环境实验室进行。土样自然风干后,用 18 目筛子(孔径 1 mm)过筛,然后放入 105℃ 干燥箱干燥 24 h,干燥后的土样装入密封塑料袋中保存备用。根据 2 类土壤各自填充密度,计算并用去离子水配比 5%、10%、15%、20% 左右体积含水率的土样,其配比后实际含水率用干燥法测定。土样填入 PVC 管(管子高 80 mm,直径为 60 mm)中待测。

1.2 试验方法及步骤

试验通过矢量网络分析仪(VNA-Vector Network Analyzer, HP 8753ES)进行测量。矢量网络分析仪设定测试频率为 0.001~3 GHz,采样点数为 801 点,矢量网络分析仪采用端口 1 进行测量,使用 BNC 连接头将矢量网络分析仪延长线和 FDR 传感器相连,矢量网络分析仪开机 2 h 后用开路、短路和 50 Ω 负载校准件(Maury Microwave 85050B)校准。采用末端开路的反射法进行测量:首先由矢量网络分析仪测出 FDR 传感器的散射参数 S_{11} ,然后用 Logsdon 和 Laird 模型将其换算成介电常数的实部和虚部,通过介电常数实部和虚部再计算出土壤介电的表观介电常数^[15~16]。

首先,将 S_{11} 转换为复电导

$$\sigma^* = \frac{Z_p \epsilon_v c}{LZ^*} = \frac{Z_p \epsilon_v c}{LZ_0} \cdot \frac{1 - S_{11}^*}{1 + S_{11}^*} \tag{1}$$

式中 Z_p ——FDR 传感器的特性阻抗,由同轴电缆的特性阻抗公式计算求得^[17]

Z_0 ——电缆延长线的特性阻抗,取 50 Ω

ϵ_v ——真空介电常数,取 8.854×10^{-12} F/m

c ——真空中电磁波速度,取 3×10^8 m/s

L ——FDR 传感器的电测量长度

Z^* ——FDR 传感器探头及土的复阻抗

S_{11}^* ——矢量网络分析仪测得的复散射参数

然后将电导转换为复介电常数

$$\epsilon^*(f) = \frac{\sigma^*}{\pi f \epsilon_v \arctan(2\sigma'/\sigma'')} \tag{2}$$

式中 f ——矢网测量频率,Hz

σ' ——电导的实部

σ'' ——电导的虚部

根据 Logsdon 理论,复介电常数转为表观介电常数的公式为^[16,18]

$$\epsilon_a^{1/2} = \sqrt{(1 + \sqrt{1 + \tan^2(\epsilon''/\epsilon')})} \epsilon'/2 \tag{3}$$

式中 ϵ_a ——FDR 表观介电常数

ϵ' ——复介电常数实部

ϵ'' ——复介电常数虚部

以上计算步骤用 Matlab 进行编程,通过其强大的图形处理功能,可绘制土壤 0.001~3 GHz 频段的

介电谱,进而研究探头结构对土壤介电特性的影响规律。

试验时,对每个土样测量 3 次,取平均值进行介电常数计算,通过不同土样介电谱对比,了解土壤介电测量的影响因素。

1.3 FDR 探头结构设计

本次试验采用一种 7 探针结构,如图 1 所示,这种结构可近似为同轴器,易于土壤介电特性的精确测量^[19~20]。探针使用直径 1.2 mm 不锈钢针,由电路板固定成同轴结构。在探头间距对土壤介电特性影响的研究中,选用 10 mm 和 14 mm 两种不同间距探头(28 mm 长)进行相同土壤的介电谱测量。在探针长度影响土壤介电谱的研究中,选用 10 mm 探针间距下的 28 mm 和 45 mm 两种不同长度探头进行相同土壤的介电谱测量,通过介电谱对比,确定探针长度对土壤介电谱的影响。测量前,探针的电测量长度由已知介电常数的甲醇、水、乙醚进行标定。

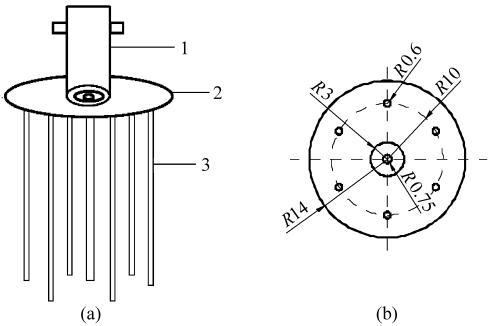


图 1 FDR 传感器探针结构示意图

Fig.1 Schematic views of FDR probe

(a) 立视图 (b) 俯视图

1. BNC 接头 2. 电路板 3. 不锈钢探针

2 结果与分析

2.1 探针间距对土壤介电测量的影响

图 2 是不同间距探针下的土壤介电频谱图。图中虚线为 14 mm 间距探针测量值,实线为 10 mm 间距探针测量值。每种土壤的体积含水率用百分率进行了标注。从测试结果来看,土壤介电特性主要受土壤含水率决定。在不同土壤含水率情况下,土壤介电值随土壤含水率变化而变化,这一现象在文献[21]中已有较多叙述。在对同一种土样进行测试时发现,相同探针长度而间距不同的探头所测土壤介电谱几乎相同。

从图 2 可知,Hanlon 土的含水率分别为 18.1%、13.2%、8.8% 和 5.2%,从介电实部图(图 2a)来看,实线和虚线在每一种体积含水率下几乎重合,在排除一定测量误差影响因素下,其测量值可认为是一致的。介电虚部随探头间距变化有一定的误差,其

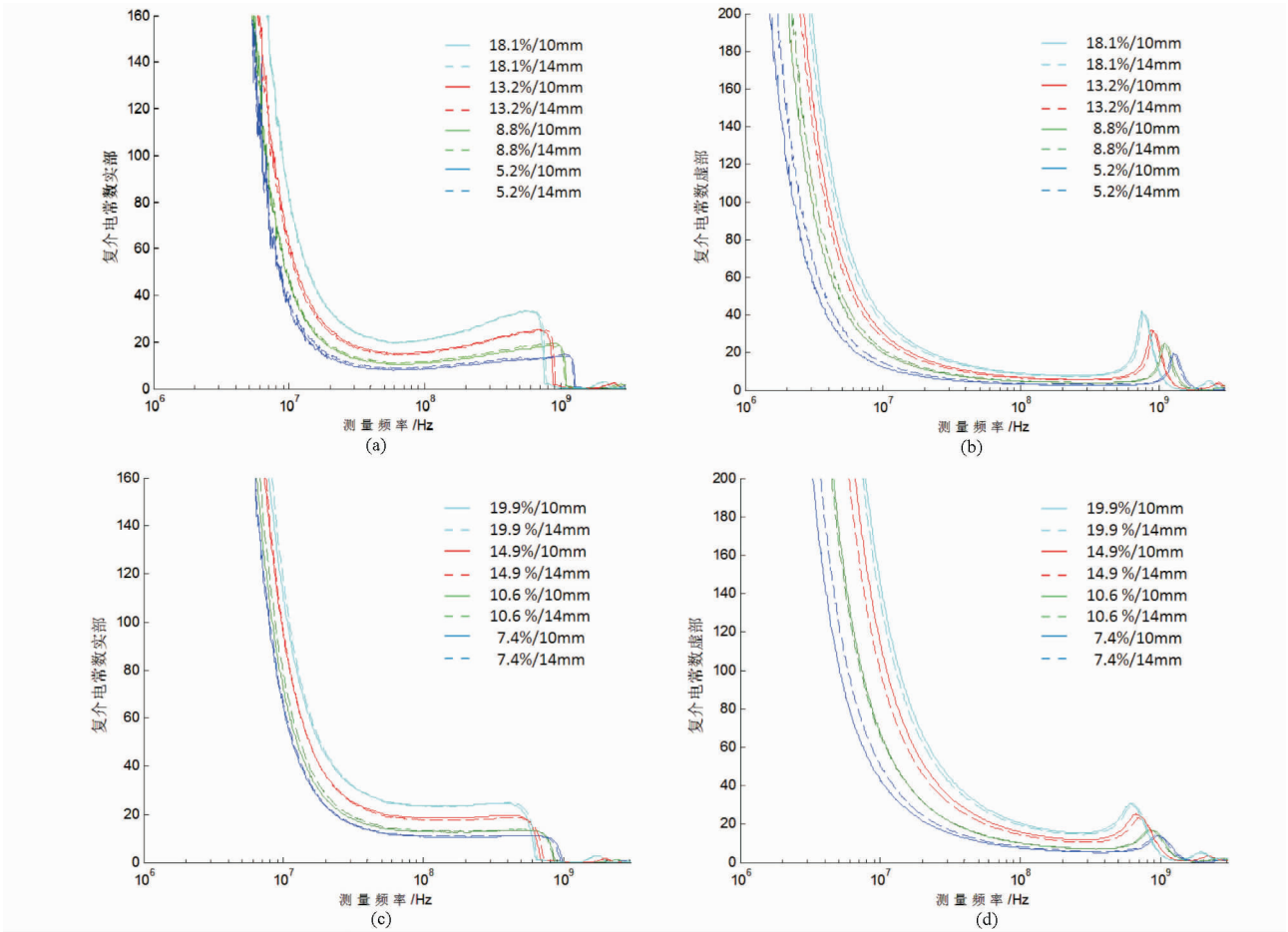


图 2 不同间距探针的土壤介电谱测量图

Fig.2 Apparent permittivity spectrum of two soils

(a) Hanlon 土,介电实部 ϵ' (b) Hanlon 土,介电虚部 ϵ'' (c) Loess 土,介电实部 ϵ' (d) Loess 土,介电虚部 ϵ''

原因是探头间距的变化带给探头间传导电流损耗的变化。在含水率较低时,探头间距大,其传导电阻大,所以其介电损耗就高,而随着含水率变大,土壤电阻减小,其介电损耗大小将主要和传导电流大小有关,探针间距小,其传导电流大,故其介电损耗就大,所以在介电虚部图中可以看到,低含水率时大间距探针介电损耗大,而在高含水率时,小间距探针介电损耗大。但 31.2 MHz 以后,其介电虚部几乎重合。

以此可推断,当测量频率高于 31.2 MHz 后,探头间距对土壤复介电常数的测量没有影响,探头间距不是影响土壤测量值的关键因素。以此可知,在进行 FDR 传感器探头开发时,可根据测量需要进行探针间距的适当调整。传感器探头间距越大,测量土壤体积就越大,其土壤含水率的精确度越好,但过大的测量体积也会造成土壤水分的不均匀,引起测量误差。探针间距过小,容易测量概念上点的土壤含水率,而过小的间距会造成插入土壤阻力增大,探针拔出时也会带出很多土壤,造成测点的物理破坏,这种现象在粘性土壤中尤其明显。因此可根据需要

进行探头间距的调整,以适应不同传感器测量的需要。

2.2 探针长度对土壤介电特性的影响

在探针长度影响土壤介电谱的研究中,选用 10 mm 探针间距下的 28 mm 和 45 mm 两种不同长度探头进行相同土壤的介电谱测量,通过介电谱对比,确定探针长度对土壤介电谱的影响规律。

图 3 给出了 Hanlon 和 Loess 土在 4 种不同含水率下由相同间距不同长度探头测量的介电谱数据,其中实线是 28 mm 测得的介电谱,虚线是 45 mm 测得的介电谱。从图中可以看到,0.001 ~ 3 GHz 介电谱中,探针长度在很大程度上影响了土壤介电谱的测量,随着探针长度的缩短,土壤介电的弛豫频率值不断增加,土壤介电值的平滑段(土壤介电值随频率变化而相对稳定的频域段)不断延伸,其弛豫频率段前的介电值有一定幅度的增加。以 Hanlon 土介电实部图中 20% 含水率介电实部为例,探针长度为 45 mm 时,其介电弛豫频率为 356 MHz,介电实部值为 30.6;而探针长度为 28 mm 时,其弛豫频率为 692 MHz,其介电实部值为 38.5,相比 45 mm 时,介

电实部值增加了 25.8%。介电平滑段的延展有利于 FDR 电路的制作及 FDR 测量精度的提高,因为电路温漂造成的频率变化不会影响土壤介电值的测量。因此与 TDR 相反,FDR 传感器探针应适当缩短,这样既利于探针的坚固性,不易于在插入土壤中弯曲,也利于介电平滑段的延展以及 FDR 测量精度

和环境适应性的提高。在介电实部图中,32.4 ~ 302 MHz 频段是各探针所测介电谱的重叠段。考虑测量误差的影响,可认为介电实部值差别不大,这说明在重叠频率段,其介电测量值是有效的。在低于 32.4 MHz 频段内,其介电实部相差较大,说明探针长度对其测量有较大影响。

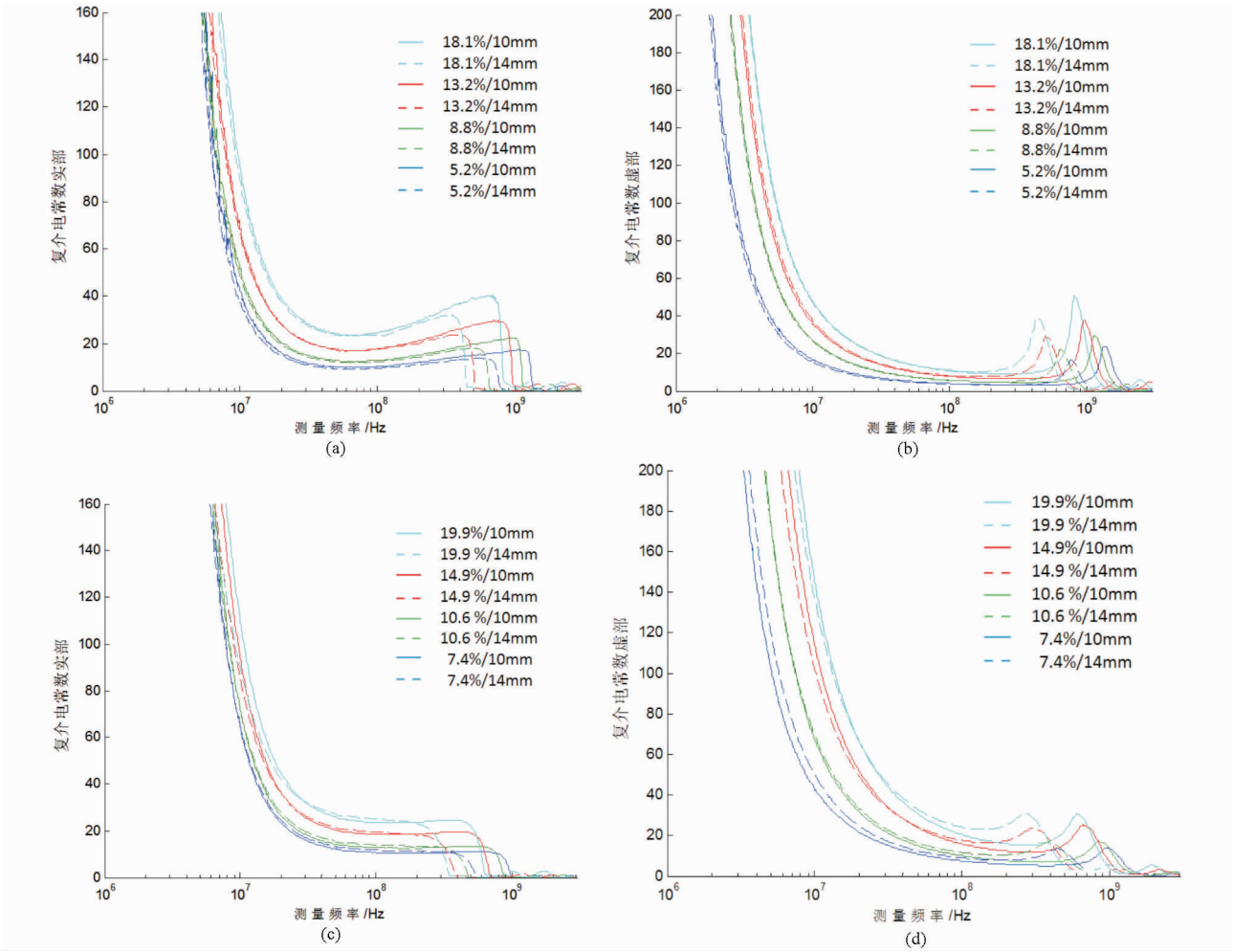


图 3 不同长度探针的土壤介电谱测量图

Fig. 3 Soil dielectric spectrum of the different length needle

(a) Hanlon 土,介电实部 ε' (b) Hanlon 土,介电虚部 ε'' (c) Loess 土,介电实部 ε' (d) Loess 土,介电虚部 ε''

结合式(1)中的 L 参数,可以从理论上验证,探头长度是影响土壤介电特性测量的一个重要参数,土壤探针越长,测试的土壤样品越长,电磁波在沿传播方向上的介电损耗就越大,介电实部就容易在较低频率内达到介电损耗最大值。

从图 3 的介电虚部频谱图中可以看到,探针长度不同,其介电损耗值不同,介电损耗随探针长度变化而变化。由此可推断,目前广为采用表观介电常数进行土壤频域测量的传感器,探针长度将是影响土壤含水率测量的重要因素。

3 结论

(1)通过矢量网络分析仪进行的探头结构对土

壤介电谱测量影响试验可知,当测试频率高于 31.2 MHz 时,探针间距对土壤复介电常数测量影响很小,而探针长度是影响土壤介电特性的重要因素。

(2)随探针长度减小,土壤介电频谱的弛豫频率增大,FDR 测量理想频率变宽,这有利于 FDR 传感器测量精度的提高。但由于介电损耗随探针变化而变化,利用表观介电常数进行测量的 FDR 传感器需进一步研究其理想频段范围。

(3)在土壤介电特性研究中,对土壤介电特性的描述需说明所用探头的几何尺寸,脱离探头结构的土壤介电特性分析有失比较性。

参 考 文 献

- 1 王克栋,陈岩. 土壤水分测量技术与墒情监测系统研究[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- 2 Lukanu G, Savage M. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil[J]. Water SA, 2006,32(1):37~42.
- 3 Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review[J]. Vadose Zone Journal,2008,7(2):358~389.
- 4 Skierucha W, Wilczek A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10~500 MHz frequency range[J]. Sensors,2010,10(4):3 314~3 329.
- 5 Blonquist J M, Jones S B, Robinson D. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: part 2. evaluation of seven sensing systems [J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1 059~1 069.
- 6 Lasne Y, Ph. Paillou, Ruffié G, et al. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: Implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(6): 1 674~1 688.
- 7 高磊,施斌,唐朝生,等. 温度对 FDR 测量土壤体积分含水量的影响[J]. 冰川冻土,2010,32(5):964~969.
Gao Lei, Shi Bin, Tang Chaosheng, et al. Experimental study of temperature effect on FDR measured soil volumetric water content [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(5):964~969. (in Chinese)
- 8 Kizito F, Campbell C, Campbell G, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3): 367~378.
- 9 Blackham D V, Pollard R D. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(5): 1 093~1 099.
- 10 Marsland T, Evans S. Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe; proceedings of the IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation), F, 1987[C]//IET, 134(4): 341~349.
- 11 Filali B, Boone F, Rhazi J, et al. Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(10): 2 322~2 328.
- 12 Buck N L. Calibration of dielectric constant probes using salt solutions of unknown conductivity [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 84~88.
- 13 Shang J Q, Rowe R K, Umana J A, et al. A complex permittivity measurement system for undisturbed/compacted soils[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2): 165~174.
- 14 Pettinelli E, Cereti A, Galli A, et al. Time domain reflectometry: calibration techniques for accurate measurement of the dielectric properties of various materials [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(10): 3 553~3 562.
- 15 Logsdon S, Laird D. Dielectric spectra of bound water in hydrated Ca-smectite [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2002, 305(1): 243~246.
- 16 Logsdon S D. Soil dielectric spectra from vector network analyzer data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(11):983~989.
- 17 冯慈章,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 18 Logsdon S D. Electrical spectra of undisturbed soil from a crop rotation study[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2):11~15.
- 19 Campbell J E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(2): 332~341.
- 20 Xu J, Ma X, Logsdon S D, et al. Short. multi-needle FDR sensor suitable for measuring soil water content[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(12): 1 929~1 937.
- 21 许景辉,马孝义,Sally D Logsdon,等. 基于土壤 LF-UHF 频段介电特性的 FDR 测量频率研究[J]. 农业机械学报,2013, 44(7):67~72.
Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon, et al. Frequency measurement of FDR based on soil dielectric spectrum in LF-UHF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):67~72. (in Chinese)
- 22 韩文霆,乔军,许景辉. T-TDR 传感器土壤热场模拟与测温结点位置研究[J]. 农业机械学报,2013,44(8):106~111.
Han Wenting, Qiao Jun, Xu Jinghui. Soil thermal field simulation and temperature node positions research of T-TDR sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(8):106~111. (in Chinese)

FDR Probe Structure Influence on the Soil Dielectric Spectrum Measurement

Xu Jinghui^{1,2} Ma Xiaoyi² Sally D Logsdon³ Robert Horton⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. National Laboratory for Agriculture and the Environment, USDA-ARS, Ames IA 50011-3120, U. S. A.

4. Department of Agronomy, Iowa State University, Ames IA 50011, U. S. A.)

Abstract: The soil dielectric spectrum are related to the soil physical properties, and those are affected by the structure of the probe too. In order to determine how the probe structure influence the soil dielectric spectrum measurement, the two kinds of soils were measured at four water content level by 10 mm and 14 mm spacing needle at 28 mm probe length, 28 mm and 45 mm length needle at 10 mm spacing. It has been confirmed that the probe spacing has no effect on the soil dielectric spectrum measurement above 31.2 MHz by comparing the dielectric spectrums, and the length of the probe can affect the real or imaginary part of the soil dielectric spectrum in the range of 0.001 ~ 3 GHz. The research shows that the spacing of needle is not the key factor to the soil dielectric property measurement within a certain spacing, and the length of the probe has a greater influence on the soil dielectric property measurement. The smaller of the probe length, the larger of the dielectric relaxation frequency. Therefore, the probe length is the important factor that affect soil dielectric measurements. The FDR probe should be shorter, it is good to improve the measurement accuracy and environmental adaptation.

Key words: Soil FDR Probe structure Dielectric spectrum

(上接第 101 页)

Research Progress of Pressure Compensating Emitters in Micro-irrigation Systems in China

Wei Zhengying Yuan Weijing Zhou Xing Zhao Guangxi

(State Key Lab for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With superior hydraulic performance, the pressure compensating emitter (PCE) has extensive application in mountain and hill regions where the hydraulic pressure in irrigation systems often changes greatly. Because of the complicate structure, PCE design mechanism is still not clear. There's a big difficulty in developing new types of PCE products even with high cost, which also makes it almost impossible to popularize PCE in China. The application and research status of PCE in both China and foreign countries was overviewed in order to supply a clear understanding to the readers. An improved development route for PCE was proposed on the base of combining several advanced techniques including numerical simulation, rapid prototyping (RP) and visualization experiment. Then the key problems involved in this route were discussed. And problems proposed in some early papers were solved. For the compensating mechanism is the key problem in PCE design and development, through part work of our team, it was pointed out that numerical simulation with fluid-structure interaction method, which provides us with pressure and velocity distribution, was an effective way to solve this problem.

Key words: Pressure compensating emitter Irrigation system Development route Fluid-structure interaction