

双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验^{*}

赵燕东 聂铭君

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 在两针平行式探针结构的阻抗模型的基础上,进一步理论推导了终端开路式和终端短路式两种类型土壤水分传感器探针长度与阻抗特性的关系。借助高频分析软件 HFSS 确定了两针平行式土壤水分传感器的最佳探针结构,并采用有机溶液模拟土壤体积含水率进行了试验,试验结果表明:终端开路式和终端短路式土壤水分传感器探针长度在 0~8.3 cm 时,其土壤体积含水率测量范围达到 0~100%。

关键词: 土壤水分 传感器 探针长度 阻抗特性

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0039-05

Optimal Analysis for Determining the Dual-pin Length of Soil Moisture Probe

Zhao Yandong Nie Mingjun

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

A detailed analysis was provided based on the port impedance theory. The relationship between probe length and impedance characteristics of soil moisture sensors as terminal open or terminal short was deduced. With the aim to verify the theoretical conclusion, the simulation method by using high frequency structure simulator software (HFSS) and the experiment associated with several organic solutions as references of known dielectric constants were conducted. After a number of experiments, the result showed that the measuring range of soil moisture sensors as terminal open or terminal short, when probe length was within 0~8.3 cm, could be up to 0~100%.

Key words Soil water content, Sensor, Length of probe, Impedance characteristic

引言

两针平行式水分传感器已广泛应用于频域法(FD)、时域反射仪法(TDR)和驻波率法(SWR)测定土壤水分的含量。探针的端口阻抗是设计这些土壤水分传感器的关键技术参数之一。

基于土壤介电特性来测定土壤含水率的仪器(例如:TDR、FD、SWR等),其水分传感器探头多为两针平行式结构,多针平行式探头属于一类非规则传输线^[1-4],Zegelin等在分析探针周围电位分布时指出,两针探头可视为平行结构的传输线^[5]。

以上各类传感器的探针都可看成终端开路式无耗传输线,而随着时域传输(time domain transmission,简称TDT)土壤水分传感器的问世,终端短路式探针模型也逐渐成为研究对象。本文对终端开路式和终端短路式探针进行仿真分析和试验。

1 两针平行式土壤水分探针长度理论分析

1.1 基础终端开路式两针平行结构探针阻抗模型

当传输线为无耗传输线时,两针探针阻抗计算公式为

收稿日期: 2011-01-19 修回日期: 2011-02-18

* 林业公益行业科研专项(200704040)、国家自然科学基金资助项目(30671715)和北京市教育委员会共建项目建设计划科学研究与科研基地建设项目(2008)

作者简介: 赵燕东,副教授,主要从事智能检测与信号处理研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

$$Z_L = Z'_c \frac{Z_p + jZ'_c \tan \frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon}}{c}}{Z'_c + jZ_p \tan \frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon}}{c}} \quad (1)$$

式中 Z'_c ——探针的特征阻抗 f ——测量频率
 ε ——被测介质的介电常数
 Z_p ——当探针视为一段传输线时终端外接的负载阻抗
 c ——电磁波在被测介质中的传播速度

两针平行式探针电磁特性的 Maxwell 方程边界条件难以描述,但是它的阻抗计算公式可通过平行传输线阻抗变换公式在终端负载开路的条件下估算^[6],则式(1)可以简化为

$$Z_L = Z'_c \frac{Z_p + jZ'_c \tan \frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon}}{c}}{Z'_c + jZ_p \tan \frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon}}{c}} \Bigg|_{Z_p \rightarrow \infty} = -jZ'_c \cot \frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon}}{c} \quad (2)$$

从式(2)可以得出,若计算 Z_L 必须先计算 Z'_c , 平行线(图1)的特征阻抗为

$$Z'_c = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{2R}{r} \quad (3)$$

式中 $2R$ ——两探针间距
 r ——探针半径

式(3)代入式(2),有探针阻抗

$$Z_L = -j \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{2R}{r} \cot \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c} \quad (4)$$

其中 $\omega = 2\pi f$

根据余切函数的周期性知:当土壤介电常数一定时(即 ε 不变),探针阻抗单调变化的条件是

$$0 < \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c} < \pi \quad (5)$$

式(5)可表示为 $0 < L < \frac{c\pi}{\omega\sqrt{\varepsilon}}$ (6)

当测量频率 f 为 100 MHz、 c 为常数 3×10^8 m/s 时,探针阻抗呈纯感性负载特性条件

$$\frac{\pi}{2} < \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c} < \pi \quad (7)$$

式(7)可表示为 $\frac{3}{4\sqrt{\varepsilon}} < L < \frac{3}{2\sqrt{\varepsilon}}$ (8)

探针阻抗呈纯容性负载特性条件

$$0 < \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c} < \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

式(9)可表示为 $0 < L < \frac{3}{4\sqrt{\varepsilon}}$ (10)

1.1.1 探针阻抗呈感性负载时探针长度及测量范围

若取土壤含水率测量范围为 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$, 对应的土壤介电常数 ε 的取值范围为 $\varepsilon_{\min} \sim \varepsilon_{\max}$ 。要使探针阻抗在含水率 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 范围内呈感性,则需要在闭区域

$$\left[\frac{3}{4\sqrt{\varepsilon_{\min}}} < L < \frac{3}{2\sqrt{\varepsilon_{\min}}} \right] \cap \left[\frac{3}{4\sqrt{\varepsilon_{\max}}} < L < \frac{3}{2\sqrt{\varepsilon_{\max}}} \right] \quad (11)$$

内有解。

若式(11)有解,则介电常数 ε 的取值范围为 $\frac{0.75}{\sqrt{\varepsilon_{\min}}} < \varepsilon < \frac{1.5}{\sqrt{\varepsilon_{\max}}}$, 即 $\varepsilon_{\max} \sim 4\varepsilon_{\min}$ 。即可测量的土壤最小介电常数的4倍要大于最大介电常数。

根据 Topp 公式,土壤含水率为零时,理论上土壤的介电常数约为 1.887。则最大介电常数约为 7.5228,对应的土壤含水率为 13.74%。由式(11)可得探针长度 $L = 0.5469$ m。

由此可知,探针阻抗呈感性特性时,其测量范围比较窄,仅为 0 ~ 13.74%, 不满足实际测量需要。

1.1.2 探针阻抗呈容性负载时探针长度及测量范围

要使探针阻抗在含水率 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 范围内呈容性,则需要在闭区域

$$\left[0 < L < \frac{3}{4\sqrt{\varepsilon_{\min}}} \right] \cap \left[0 < L < \frac{3}{4\sqrt{\varepsilon_{\max}}} \right] \quad (12)$$

内有解。

在 $\varepsilon > 0$ 的范围内,式(12)都是有解的。因此可简化为

$$0 < L < \frac{3}{4\sqrt{\varepsilon_{\max}}} \quad (13)$$

在土壤含水率为 0 ~ 100% 范围内,探针长度可选为 0 ~ 8.3 cm。

由以上分析可知:当探针长度为 0 ~ 8.3 cm 时呈容性,传感器的测量范围为 0 ~ 100%, 满足实际测量需要。由 Matlab 仿真^[7]进一步可以看出,在介电常数 $0 < \varepsilon < 80$ (即土壤含水率为 0 ~ 100%) 范围内,当探针长度 0 ~ 8.3 cm 时,探针阻抗与长度的单调性较好,如图2所示。

1.2 终端短路式两针平行结构探针阻抗模型

终端短路式两针平行结构探针阻抗计算公式为

$$Z_L = Z'_c \frac{Z_p + jZ'_c \tan \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c}}{Z'_c + jZ_p \tan \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c}} \Bigg|_{Z_p \rightarrow 0} = -j \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D}{d} \tan \frac{\omega L \sqrt{\varepsilon}}{c} \quad (14)$$

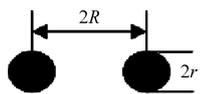


图1 平行线的几何剖面图
 Fig.1 Geometric section of parallel line

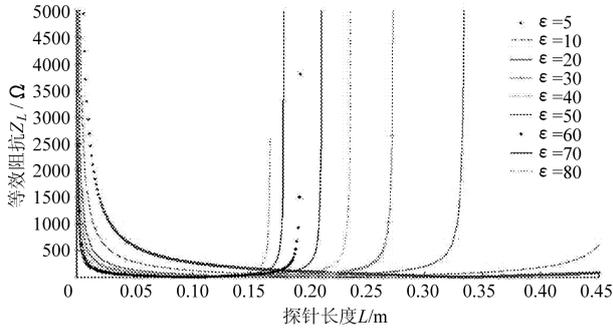


图 2 终端开路状态时探针长度与阻抗的对应关系

Fig. 2 Relationship between the probe length and impedance as terminal open state

由以上分析可知:

(1) 探针阻抗呈感性负载时, 当探针长度为 0 ~ 8.3 cm, 传感器的土壤含水率测量范围为 0 ~ 100%, 如图 3 所示。

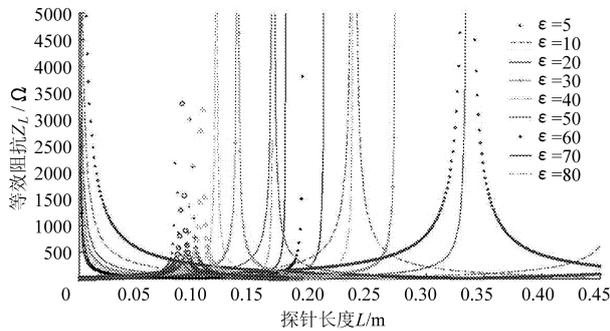


图 3 终端短路时探针长度与阻抗的对应关系

Fig. 3 Relationship between the probe length and impedance as terminal short state

(2) 探针阻抗呈容性负载时, 取不到合适的探针长度。

因此, 终端短路式两针平行结构探针只能工作在感性负载特性下。

2 探针结构仿真

2.1 HFSS 仿真基础

Ansoft HFSS (high frequency structure simulator) 是基于有限元的分析方法, 可分析仿真任意三维无源结构的高频电磁场, 能得到特征阻抗、 S 参数及电磁场、传播常数、天线方向图、辐射场等结果。采用自适应网格剖分、切向元、ALPS (advanced linear programming system) 快速扫频等专利技术, 不需要用户建立数值模型, 只需根据用户提交的基于研究对象的物理模型来分析其电磁特性, 包括: 近远场辐射问题、基本电磁场数值解和开边界问题、 S 参数和相应端口阻抗的归一化 S 参数、端口特征阻抗和传输常数、结构的本征模或谐振解等^[8]。

作为通用模拟三维电磁场的软件, HFSS 基于 Maxwell 方程组

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (15)$$

式中 \mathbf{E} ——一个波动的电磁场强

k_0 ——自由空间的波数

ε ——复相对介电常数

μ_r ——复相对导磁系数

∇ ——拉普拉斯算子

几何模型被自动分为许多四面体元, 四面体元的集合被称为有限元网。对体积积分, 得

$$\int_V \left[\mathbf{W}_n \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon \mathbf{W}_n \mathbf{E} \right] dV = 0 \quad (16)$$

其中偏差函数 \mathbf{W}_n 定义了 2 个差值算法, 实现在总的四面体有限元网节点之间差值。首先, 顺序切线元偏差函数, 在磁场值中插入顶点节点值和棱节点值, 每个四面体元有 20 个 (顶点 8 个、棱 12 个); 然后, 0 阶切线元偏差函数只使用顶点的节点值, 每个四面体 6 个。下标 n 表示对成千上万个方程重复积分 ($n = 1, 2, \dots, N$), 目的是得到 N 个方程和 N 个未知数。

此外由 Green's and Divergence Theorems (格林定理和散度) 定理

$$\int_V \left[(\nabla \times \mathbf{W}_n) \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon \mathbf{W}_n \mathbf{E} \right] dV = \int_S (\text{边界项}) dS \quad (17)$$

将场强 \mathbf{E} 写作未知数 \mathbf{x}_m 的和的形式, 乘以与产生方程最初序列相同的偏差函数 \mathbf{W}_m , 得

$$\mathbf{E} = \sum_{m=1}^N \mathbf{x}_m \mathbf{W}_m \quad (18)$$

归纳式(17)和(18), 得

$$\sum_{m=1}^N \mathbf{x}_m \int_V \left[(\nabla \times \mathbf{W}_n) \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon \mathbf{W}_n \mathbf{W}_m \right] dV = \int_S (\text{边界项}) dS \quad (19)$$

式(19)可化为基本矩阵形式

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{B}$$

式中 \mathbf{A} ——偏差函数和场方程 $N \times N$ 阶已知矩阵

\mathbf{x} ——待求量 \mathbf{B} ——边界项

这样, HFSS 可以把 Maxwell 方程变成用传统数学方法可以解决的矩阵形式。由式(19)可以解出未知量 \mathbf{x}_m , 从而得到场强 \mathbf{E} 。

2.2 试验设计

针对终端开路式和终端短路式两种平行结构的探针, 首先应用 HFSS 软件, 改变探针长度、直径和间距, 仿真各种情况下的电磁场分布, 选取电磁场分布最均匀的形式, 确定最优结构。然后选用 1-辛

醇、乳酸乙脂、2-丁醇、1-丁醇、1-丙醇、乙醇(无水乙醇)、乙醇溶液(质量分数 66.7%)共 7 种不同介电常数的有机溶液模拟不同体积含水率的被测土壤^[9-11],如表 1 所示。

表 1 有机溶液的介电常数及对应的体积含水率

Tab.1 Dielectrics of different organic liquids and soil water content

有机溶液	介电常数 ϵ	对应体积含水率 $\theta/\%$
1-辛醇	10.3	17.67
乳酸乙脂	13.1	27.49
2-丁醇	15.2	35.29
1-丁醇	17.4	41.06
1-丙醇	20.81	50.50
无水乙醇	25	60.59
乙醇溶液	43	84.12

测出在不同参数组合下传感器在这些溶液中的

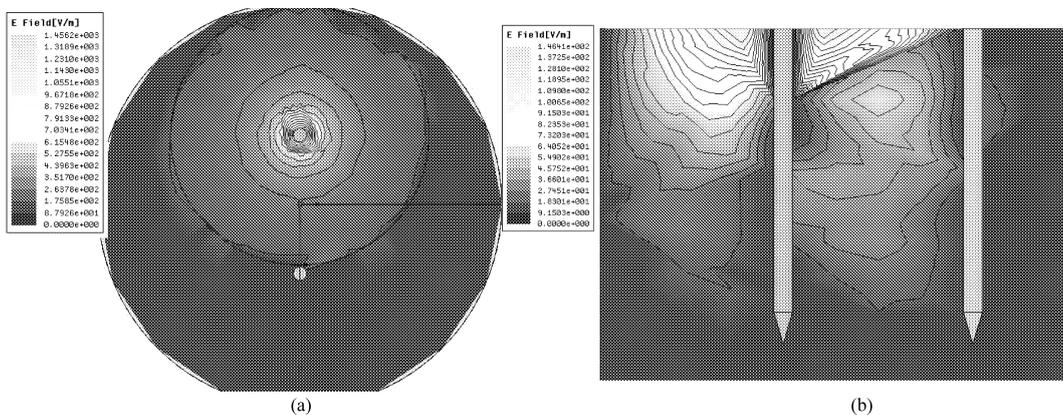


图 4 终端开路式 HFSS 仿真效果图

Fig.4 Simulation of electrical field distribution as terminal open state

(a) 垂直场 (b) 水平场

传感器系统由 100 MHz 信号源、50 Ω 的同轴传输线和探针组成。其中探针采用最佳探针结构(针长 50 mm,探针直径 3.0 mm,两针间距 30 mm)。探针一次插入以上 7 种不同介电常数的有机溶液(模拟土壤体积含水率 0 ~ 100%),测量同轴传输线两端的电压差,依次达到含水率测量的目的。结果如图 5 所示。

2.4 终端短路式两针平行结构探针阻抗模型验证

采用相同的 HFSS 仿真方法,根据电磁场分布状况,得终端短路式两针平行式探针的最佳结构:U 形管长度 61.4 mm、U 型管间距为 20 mm、探针直径为 3 mm。仿真效果如图 6 所示。确定好探针结构后,采用上述 7 种有机溶液仿真得传感器输出电压与土壤体积之间的关系如图 7 所示。由此可见,当 U 型管为该结构时,土壤含水率和输出电压呈较好的线性关系,并且测量范围也较高。

输出电压值,从而根据得出的含水率与电压值之间的关系,验证由 HFSS 仿真确定的最优探针结构能否满足实际测量需要。

2.3 终端开路式两针平行结构探针阻抗模型验证

设置求解频率为 100 MHz,求解类型为激励求解,周围介质的直径为 100 mm,高度为 100 mm,介电常数为 21,边界条件为理想边界。利用正交试验法,探针直径分别取 1.0、2.0、2.5、3.0、3.5 mm,针长分别为 20、30、40、50、60 mm,两针间距分别为 10、20、30、40、50 mm。通过 HFSS 仿真得到了探针结构变化时水平剖面上的电场分布情况,如图 4 所示。多次试验后,初步得出:在探针直径 3.0 mm、两针间距 30 mm、针长 50 mm 的物理结构时,两探针之间的电场强度最强、分布最均匀,并布满了整个介质空间,结构较为理想。

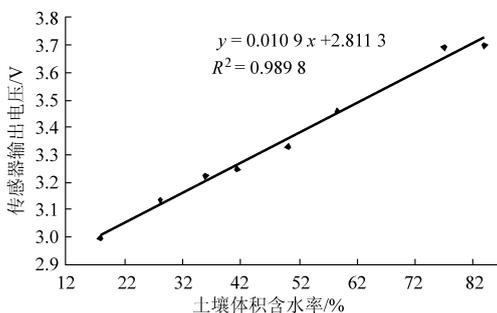


图 5 终端开路式传感器输出电压与土壤体积含水率的关系

Fig.5 Relationship between sensor output voltage and soil water content as terminal open state

3 结论

(1)从两针平行式结构土壤水分传感器阻抗模型入手,深入分析了终端开路式和终端短路式探针结构的土壤水分传感器阻抗模型,得出:对于终端开

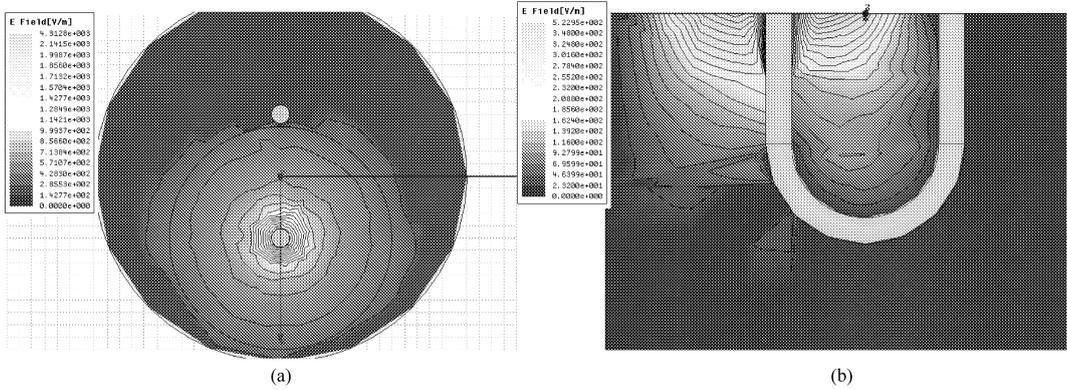


图 6 终端短路式 HFSS 仿真效果图

Fig. 6 Simulation of electrical field distribution as terminal short state

(a) 垂直场 (b) 水平场

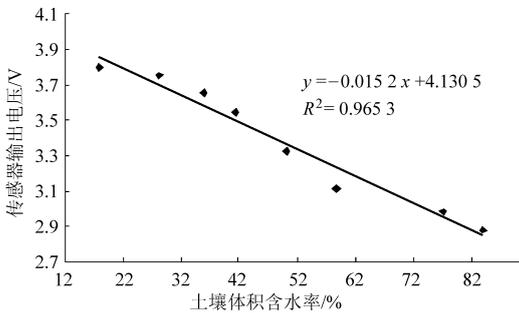


图 7 终端短路式传感器输出电压与土壤体积含水率的关系

Fig. 7 Relationship between sensor output voltage and soil water content as terminal short state

路式和终端短路式两针平行土壤水分传感器,当其特征阻抗分别呈容性和感性时,探针长度在 0 ~ 8.3 cm 范围内,其土壤体积含水率测量范围达到

0 ~ 100%,测量效果满足实际测量需要。

(2)采用高频仿真软件 HFSS,进一步仿真了不同的终端开路式和终端短路式探针结构的电磁场分布,得出了终端开路式最佳探针结构为针长 50 mm,探针直径 3 mm,两针间距 30 mm;终端短路式最佳探针结构为 U 形管长度 61.4 mm、U 型管间距为 20 mm、探针直径为 3 mm。

(3)采用不同介电常数的有机溶液仿真土壤体积分含水率(0 ~ 100%),对以上最佳探针结构进行了验证,得出终端开路式和终端短路式土壤水分传感器的输出电压与土壤含水率呈很好的线性关系,其相关系数分别达到了 0.989 8 和 0.965 3。可以看出终端开路式和终端短路式两针平行土壤水分传感器都能很好地通过测量探针阻抗达到测量土壤含水率的目的。

参 考 文 献

- 1 Bolvin H, Chambarel A, Chanzy A. Three-dimensional numerical modeling of a capacitance probe[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68(2): 440 ~ 446.
- 2 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.
- 3 Dean T J, Bell J P, Baty A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique; part I . sensor design and performance [J]. Journal of Hydrology, 1987,93(1 ~ 2): 67 ~ 78.
- 4 Gaskin G C, Miller J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996,63(2):153 ~ 160.
- 5 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): 2 367 ~ 2 376.
- 6 孙宇瑞. 土壤探针阻抗计算方法的理论分析与实验研究 [J]. 土壤学报,2002,39(1):120 ~ 126.
Sun Yurui. Theoretical and experimental approach to calculation of the impedance of soil probe[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(1):120 ~ 126. (in Chinese)
- 7 范影乐. Matlab 仿真应用详解 [M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
- 8 Ansoft Corporation. Ansoft HFSS v9.0[CP]. Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation, 2003.
- 9 Malicki M A, Plagge R, Roth C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil [J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(3): 357 ~ 366.
- 10 Paltineanu I C, Starr J L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(6): 1 576 ~ 1 585.
- 11 Robinson D A, Gardner C M K, Evans J, et al. The dielectric calibration of capacitance probes for soil hydrology using an oscillation frequency response model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 1998,2(1): 111 ~ 120.