

# 基于准静态同轴探头模型的土壤复介电测量方法

许景辉<sup>1</sup> 邵明烨<sup>1</sup> 李晓斌<sup>2</sup> 林磊<sup>2</sup>

(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)

**摘要:** 末端开路同轴探头法测量土壤复介电值用于表征土壤含水率具有准确、快捷的优点。针对目前土壤介电同轴探头集总测量模型没有充分考虑探头的参数以及土壤体积对测量结果影响等问题, 基于电磁场理论, 对末端开路同轴探头建立了准静态数学模型, 适用于土壤的复介电常数准确测量。通过全波软件仿真和模型计算结果对比, 以无水乙醇介电实测值和理论值对比, 验证模型的准确性。采用本文介电测量模型对不同含水率的黄绵土进行测量计算, 复介电常数实部与实测土壤含水率二阶多项式拟合决定系数大于 0.965, 表明本文所提土壤介电测量方法适用于土壤复介电常数和含水率的测量。

**关键词:** 介电测量; 土壤含水率; 微波测量; 同轴探头模型

中图分类号: S24; P161.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0271-07

OSID:



## Dielectric Measurement Method of Soil Moisture Content Based on Quasi-static Coaxial Probe Model

XU Jinghui<sup>1</sup> SHAO Mingye<sup>1</sup> LI Xiaobin<sup>2</sup> LIN Lei<sup>2</sup>

(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)

**Abstract:** The determination of soil moisture content is of great significance for agricultural irrigation decision-making, crop yield improvement, effective management of water resources, and the study of soil mechanical properties. The open-ended coaxial probe method measuring the dielectric of soil was used to characterize the moisture content of soil, which is simple and accurate. Based on the open-end coaxial probe method, a quasi-static mathematical model was established for the measurement system with a short-circuit board. The appropriate thickness to be measured was selected to make the model suitable for the dielectric measurement of semi-infinite soil. Through the comparison of the full-wave simulation and model calculation results, the average absolute error of the real and imaginary parts were 0.001 and 0.022 respectively. Comparing the measured and theoretical values of the absolute ethanol dielectric, the average absolute errors of the real and imaginary parts were 0.375 and 0.279 respectively to verify the accuracy of the model. The model was used to measure and calculate loess soils with different moisture contents. The second-order polynomial fitting determination coefficient of real part of the obtained complex permittivity and the measured soil moisture content was greater than 0.965, indicating that the soil dielectric measurement model proposed was suitable for soil dielectric measurement of electrical value and moisture content.

**Key words:** dielectric measurement; soil moisture content; microwave measurement; coaxial probe model

## 0 引言

土壤含水率作为土壤最重要的物理参数之一, 直接影响着作物生长、农田小气候以及土壤的机械

性能, 是农业水土工程领域监测的重要指标<sup>[1-3]</sup>。农业生产中, 土壤含水率的准确测定对于水资源有效管理、灌溉措施、作物生长以及污染物监测等都非常重要; 而且土壤物理性质, 如结构性、塑性、压缩

收稿日期: 2020-11-30 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 陕西水利科技计划项目(2014slkj-18)和“一带一路”创新人才交流外国专家项目(DL20200027006)

作者简介: 许景辉(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业电气化与农业智能化检测研究, E-mail: x36936@163.com

性、粘着性、粘结性等,都与土壤水分状况密切相关<sup>[4-5]</sup>。因此,土壤含水率的精确测定有利于更好地认识农业管理措施对土壤-植物-大气连续体的影响。

土壤含水率的测量方法有烘干法、张力计法、遥感法和介电法等<sup>[6-8]</sup>。其中,烘干法测量精度最高,但实现过程复杂,不便于实时测量;张力计法结构简单,系统造价低,但测量速度慢,测量误差受土质影响较大;遥感法可以迅速大面积地获取土壤含水率信息,但测量精度还有待提高。基于介电理论的介电法操作简单,测量精度高,适合在野外进行实时测量,在土壤含水率的测量中有较多应用。国内外学者建立了许多介电测量模型。文献[9-10]将待测介质等效为电容建立了电容模型,BRANDY等<sup>[11]</sup>将探头视为一个辐射源建立了辐射模型。GHANNOUCHI等<sup>[12]</sup>将待测的介质等效为一段传输线建立了虚拟线模型。ANDERSON等<sup>[13]</sup>用短量法计算同轴探头的导纳,建立了有理函数模型。这些介电测量模型在土壤中也应用,孙宇瑞等<sup>[14]</sup>基于传输线理论,提出土壤含水率的测量方案;ESTEVEZ等<sup>[15]</sup>建立了双线性介电测量模型,并对粉土的介电进行测量,验证了模型的有效性。许景辉等<sup>[16-17]</sup>基于双线性理论建立了黏质土介电与含水率的关系,具有较高的精度。

通过对已有成果分析可知,使用网络分析仪的末端开路同轴探头法具有较高的介电测量精度,但目前土壤介电测量模型多为集总模型,存在两方面问题:①测量时把同轴探头和土壤当作一个整体,没有充分考虑探头的参数对模型结果的影响。②默认待测土壤样品体积无限大,没有考虑土壤体积对介电结果的影响。本文构建基于短路板情况下的准静态同轴探头测量模型,对待测土壤厚度进行合理选取,使模型适用于不同测量范围的土壤介电测量;通过全波仿真和无水乙醇介电测量,验证模型的有效性;并通过对不同含水率黄绵土的介电测量计算,验证本文介电测量模型对土壤介电测量的有效性。

## 1 理论模型

带短路板末端开口同轴探头测量模型的剖面图如图1所示<sup>[18]</sup>。探头的内导体外半径为 $a$ ,外导体内半径为 $b$ ,内外导体之间是复介电常数为 $\epsilon_1$ 的填充介质。待测土壤介质厚度为 $d$ ,复介电常数为 $\epsilon_2$ 。

同轴探头可以传播没有色散的TEM电磁波,同时也可以传播TE波和TM波,其中TEM模式是主模,TE和TM模式是高次模。研究和试验表明,在

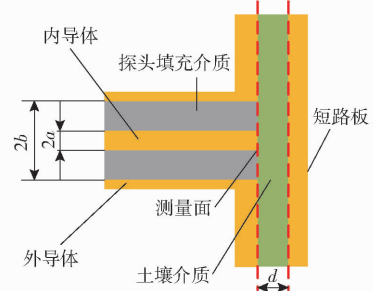


图1 带短路板测量模型剖面图

Fig. 1 Sectional view of measuring model with short circuit board

同轴探头中忽略高次模对最后模型精度的影响较小<sup>[19-20]</sup>。本文假设同轴探头仅传输TEM主模,对边界带有短路板的情况建立准静态模型。

假设同轴探头传输TEM主模,则同轴探头中的复合电场 $E_{r1}$ 和复合磁场 $H_{\varphi 1}$ 可以表示为<sup>[21]</sup>

$$E_{r1} = \frac{A}{r} (e^{-k_c z} + \Gamma e^{k_c z}) \quad (1)$$

$$H_{\varphi 1} = \frac{A}{\eta_c r} (e^{-k_c z} - \Gamma e^{k_c z}) \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad k_c = 2j\pi f \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{c}} \quad (3)$$

$$j^2 = -1 \quad (4)$$

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_1}{\epsilon_0 \epsilon_1}} \quad (5)$$

式中  $r, \varphi, z$ ——圆柱坐标系的坐标轴变量

$A$ ——探头终端端面正向波电场的振幅

$\epsilon_0$ ——真空介电常数

$\mu_0$ ——真空磁导率

$\mu_1$ ——探头填充介质的磁导率

$f$ ——频率

$c$ ——真空下的光速

$\Gamma$ ——反射系数

被测介质中的电场 $E_r$ 和磁场 $H_{\varphi}$ 可以表示为谱域中所有平面波的积分<sup>[22]</sup>,即

$$E_r = \int_0^{\infty} B(x) (e^{-k_s z} - e^{k_s z - 2k_s d}) J_1(rx) x dx \quad (6)$$

$$H_{\varphi} = \frac{2j\pi\epsilon_0\epsilon_2}{k_s} \int_0^{\infty} B(x) (e^{-k_s z} + e^{k_s z - 2k_s d}) J_1(rx) x dx \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad k_s = \sqrt{x^2 - \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \epsilon_2 \mu_2} \quad (8)$$

式中  $J_1(rx)$ ——一阶第一类 Bessel 方程

$\mu_2$ ——土壤待测介质的磁导率

$B(x)$ ——谱域表示的场幅度

根据 $z=0$ 平面电场和磁场横向分量连续的边界条件分别可得

$$\int_0^{\infty} B(x) (1 - e^{-2k_s d}) J_1(rx) x dx = \begin{cases} \frac{A(1+\Gamma)}{r} & (a < r < b) \\ 0 & (r \leq a, r \geq b) \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{2j\pi\epsilon_0\epsilon_2}{k_s} \int_0^{\infty} B(x) (1 + e^{-2k_s d}) J_1(rx) x dx = \frac{A(1-\Gamma)}{\eta_c r} \quad (a \leq r \leq b) \quad (10)$$

为表示  $B(x)$ , 需对式 (10) 进行处理, 根据 Fourier - Bessel 积分公式

$$f(x') = \int_0^{\infty} r J_n(x'r) \left( \int_0^{\infty} f(xr) J_n(xr) x dx \right) dr \quad (11)$$

式中  $J_n(x)$  ——  $n$  阶第一类 Bessel 方程  
对式 (11) 两边乘以  $r J_1(x'r)$  后进行积分, 再根据 Bessel 方程的正交性以及脉冲函数的筛选性可得<sup>[23]</sup>

$$B(x') = \frac{\int_0^{\infty} A(1+\Gamma) J_1(x'r) dr}{1 - e^{-2d} \sqrt{x'^2 - \left(\frac{2\pi d}{c}\right)^2} e^{2\mu_2}} \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (10) 并根据短路板上电场横向分量为零可得<sup>[24]</sup>

$$\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} = \frac{\eta_c}{\ln \frac{b}{a}} \int_0^{\infty} \frac{2j\pi f \epsilon_0 \epsilon_2}{k_s} \coth(k_s d) \cdot \frac{(J_0(ax) - J_0(bx))^2}{x} dx \quad (13)$$

式中  $J_0(x)$  —— 零阶第一类 Bessel 方程  
 $\coth(\cdot)$  —— 双曲余切函数

本文将电磁场空域的三维问题转化为在谱域中的一维问题, 建立介质中电场与磁场的方程组, 根据同轴探头内外电磁场连续性边界条件, 消去电场与磁场参量。最后经过化简得到反射系数与电磁参数的函数关系式。

上述模型要求土壤厚度为一定值, 实际测量应用中土壤可从有限范围到半无限大, 如图 2 所示。考虑

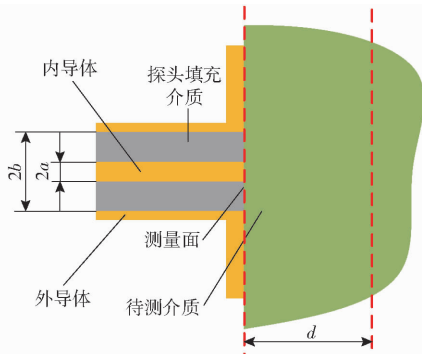


图 2 半无限大测量模型剖面图

Fig. 2 Sectional view of semi-infinite measurement model

式 (13) 土壤厚度  $d$  仅出现在双曲余切函数中, 而双曲余切函数值单调递减有下界, 因此应考虑  $d$  的改变对于反射系数  $\Gamma$  的影响。图 3 为土壤的复介电实部取值为 20, 虚部为 15, 在常见土壤观测同频率下反射系数与土壤厚度的关系<sup>[25]</sup>, 当厚度大于 2 cm 反射系数基本不再随厚度的增加而改变, 考虑其他因素的影响, 为保证测量的准确性, 本文选取厚度为 5 cm 以上时, 模型等效为半无限大情况。

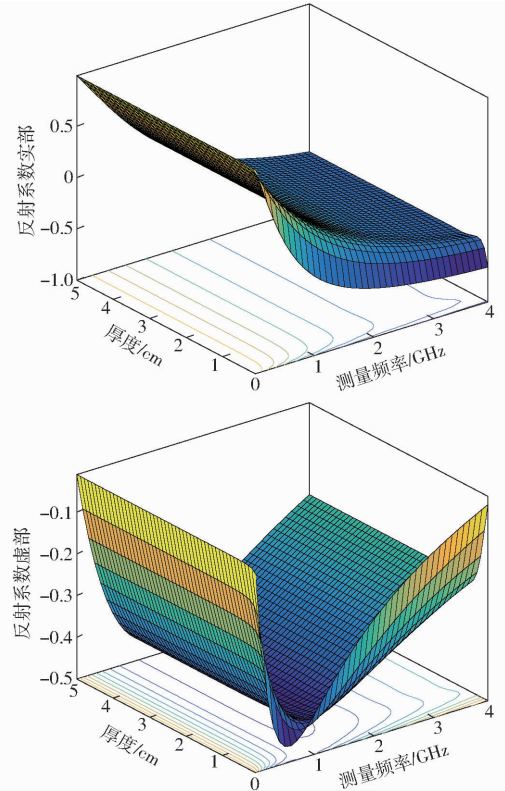


图 3 土壤反射系数与土壤厚度的关系

Fig. 3 Relationship between soil reflection coefficient and soil thickness

## 2 模型验证

### 2.1 全波仿真验证

为了验证上述所建立的模型, 通过全波仿真软件 HFSS (High frequency structure simulator) 建立测量模型进行对比。按照图 2 所示的剖面图以及表 1 (表中  $l$  为探头长度) 所示的参数在 HFSS 中绘制出 3D 模型, 如图 4 所示。设置求解模式为 Driven Modal, 在探头的首段设置好波端口面, 但此时获得的反射系数为探头首端面上的反射系数。为了得到探头末端面上的反射系数, 通过 De-embedding 技术将端口面移至探头与土壤待测介质的分界面上。

设置仿真的带宽为 0.01 ~ 4 GHz, HFSS 仿真结果与本文所建立模型 (式 (13)) 的计算对比结果如图 5 所示。结果表明在各频点下仿真结果和计算结果的实部与虚部都有很好的一致性。

表1 探头测量模型参数

Tab.1 Probe measurement model parameters

参数	数值	参数	数值
$a/\text{mm}$	1.48	$\varepsilon_1$	$2.01 - 0.01j$
$b/\text{mm}$	4.98	$\mu_1$	1
$l/\text{mm}$	22	$\varepsilon_2$	$1.50 - 0.01j$
$d/\text{cm}$	5	$\mu_2$	1

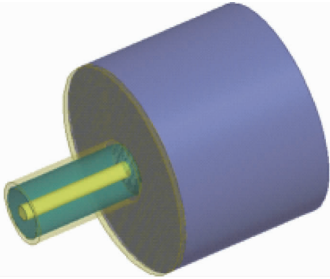


图4 HFSS建立的半无限大测量模型

Fig.4 Semi-infinite measurement model established by HFSS

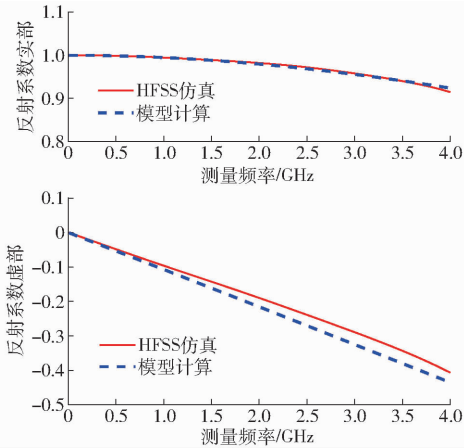


图5 仿真与计算反射系数结果对比

Fig.5 Comparison of simulated and calculated reflection coefficient results

采用平均绝对值误差(MAE)为误差评价指标,两个结果的实部MAE为0.001,虚部MAE为0.022,表明本文所建立模型的准确性。

## 2.2 实际测量验证

测量系统实物如图6所示,矢量网络分析仪型号为Anritsu ms2028b,通过同轴电缆延伸。由于存在系统误差,在同轴电缆的末端通过Keysight 85052D校准套件进行校准,校准完成后同轴电缆的末端连接自制末端开路同轴探头,探头的参数如表1所示。

由于连接同轴探头后,反射面延伸至探头末端与被测物接触的表面,因此需要采用去嵌入技术去除探头对测量反射系数的影响<sup>[26]</sup>。矢量网络分析仪测量的反射系数 $\Gamma_M$ 与探头终端的反射系数 $\Gamma_{DUT}$ 存在关系

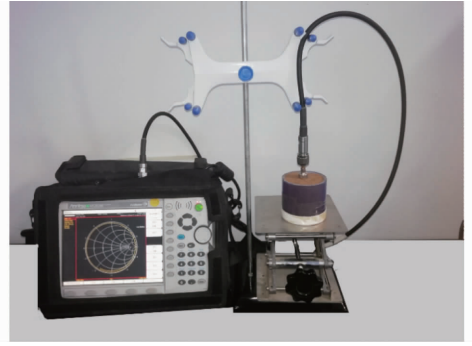


图6 测量系统实物

Fig.6 Real measurement system

$$\Gamma_M = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_{DUT}}{1 - S_{22}\Gamma_{DUT}} \quad (14)$$

式中 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{22}$ ——同轴探头的4个散射参数式(14)中有4个未知数,但 $S_{12}$ 和 $S_{21}$ 乘积在一起,可以当作一个独立的参数,因此需要3种已知介电的材料获取探头的相关参数,本文采用空气、去离子水和异丙酮3种材料通过式(13)的理论计算和实际测量,计算得到探头的散射参数。

为验证上述的介电测量模型,矢量网络分析仪开机预热2h后,在25℃条件下测得无水乙醇的反射系数,保证无水乙醇在烧杯中的高度大于5cm,而在计算中高度取5cm。测得反射系数后,首先通过式(14)去嵌入计算得到探头终端的反射系数,然后将探头终端的反射系数代入式(13),通过反演计算得到无水乙醇的计算复介电常数,计算结果与Cole-Cole公式计算结果<sup>[27]</sup>对比如图7所示,其中复介电常数实部MAE为0.375,虚部MAE为0.279,表明本文所提测量模型的准确性。

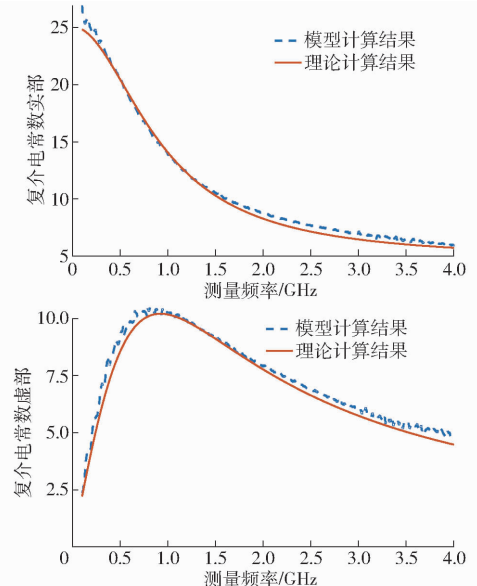


图7 计算与理论复介电常数结果对比

Fig.7 Comparison of calculated and theoretical complex permittivity results



### 3 试验与结果分析

#### 3.1 试验材料

试验土壤为黄绵土,采集于陕西省榆林市,取土深度为 40 ~ 50 cm。自然风干后剔除石子、砂砾等杂质,再经研磨,过 18 目筛(孔径 2 mm),在 DGG-9070A 型干燥箱内 105℃ 干燥 24 h。采用去离子水配比含水率为 5%、10%、15%、20%、25% 的土样,配制好的土壤样品密封放置在 25℃ HZ-2019 型恒温箱中 24 h,期间摇晃 2 次,保证水分充分均匀。

在室温((23 ± 2)℃)条件下,从恒温箱中取出各种含水率的土样各 3 份装入高 65 mm、直径 66 mm 的 PVC 管中。设置矢量网络分析仪的测量频段为 0.01 ~ 4 GHz,采样点为 400 点,校准并连接同轴探头后,测量每份土样 3 次,每种含水率的 9 次测量反射系数结果取平均值作为后续计算的数值。测量结束后,取每份土壤样品 5 ~ 6 g,在 105℃ 干燥箱内干燥 24 h,根据干燥前后土样质量的变化计算得到实际土壤含水率,分别为 5.8%、10.5%、15.8%、20.2%、25.2%。

#### 3.2 结果与分析

将土壤样品测得的反射系数经上述的复介电常数计算方法,计算得到不同含水率土壤样品的复介电常数,其结果如图 8 所示。不同含水率土壤样品的复介电常数实部都随着频率的增大而减小,并且频率在 1 GHz 后数值基本不再变化,复介电常数虚部先随着频率的增大而减小,当频率大于 2 GHz 以后,复介电常数的虚部又有上升的趋势。

复介电常数实部表示介质存储电荷的能力和物质极化的难易程度,主要是介质中偶极子的极化作用。去离子水的复介电常数实部相对于土壤的复介电常数实部较高,水分子的极化性高,因此土壤中的水分子对复介电常数实部的改变起主导作用,不同含水率的土壤具有明显不同的复介电常数实部。复介电常数虚部表示电束密度或极化强度对电磁场响应的滞后部分,主要是由介质中介电损耗引起,不同含水率土壤样品中水分子的介电损耗导致复介电常数虚部变化。不同含水率土壤样品的复介电常数随着含水率的增加而增加,复介电常数实部比虚部具有更显著的区别性。

图 8 所示的复介电常数实部具有显著的区别性,为进一步分析复介电常数实部与土壤含水率的相关性,在测量频段 0.01 ~ 4 GHz 内等间隔选取 100 个频点。通过二阶多项式拟合,各频点决定系数( $R^2$ )与均方根误差(RMSE)如图 9 所示。

在各频点下,复介电常数实部与土壤含水率实

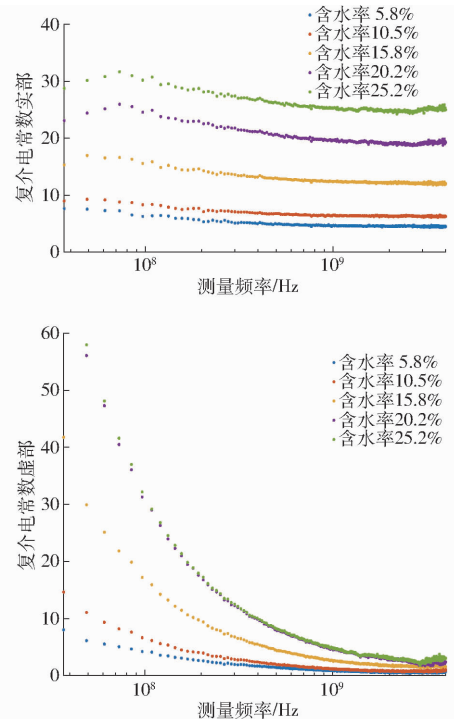


图 8 不同含水率土壤样品的复介电常数变化曲线  
Fig. 8 Variation curves of complex permittivity of soil samples with different moisture contents

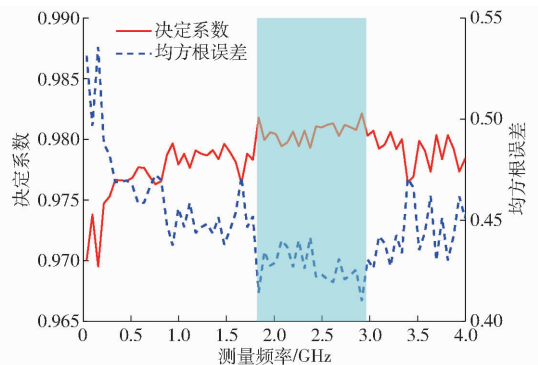


图 9 决定系数和均方根误差变化曲线  
Fig. 9 Changing curves of determination coefficient and root mean square error

测值的二阶多项式拟合模型  $R^2$  均在 0.965 以上, RMSE 均小于 0.55。表明土壤复介电常数实部与土壤含水率实测值有较好的相关性。进一步对选取的频点分析,相对于其他频段,在频段 1.78 ~ 2.917 GHz 具有较大的  $R^2$  和较小的 RMSE,模型拟合效果优于其他频段。并且在 1.837 GHz 频点的  $R^2$  最大且 RMSE 最小,其中  $R^2$  为 0.982, RMSE 为 0.414。在此频点下建立的二阶多项式模型为

$$\theta = -0.018\varepsilon'^2 + 1.396\varepsilon' - 1.117 \quad (15)$$

式中  $\varepsilon'$ ——土壤复介电常数实部

$\theta$ ——土壤含水率

### 4 结论

(1)通过对带有短路板的末端开路同轴探头土

壤测量模型分析,当土壤厚度大于5 cm,在常见土壤观测频率下,反射系数基本不再随厚度的增加而改变,模型等效为半无限大情况,适用于实际情况下土壤介电的测量。

(2)在全波仿真分析软件 HFSS 中建立半无限大末端开路同轴探头测量模型,在各频点下,仿真得到的反射系数和本文模型计算得到的结果具有很好的一致性,表明本文模型的准确性。

(3)在室温下,用实际测量无水乙醇的反射系

数,再经去嵌入和模型反演计算得到实际测量无水乙醇的复介电常数,与 Cole - Cole 公式计算出的无水乙醇理论复介电常数比较,两者具有较好的一致性,进一步表明了本文模型的可行性。

(4)用本文的计算模型对不同含水率的黄绵土进行测量计算,得到的复介电常数实部具有显著的区别性,通过二阶多项式拟合的决定系数大于0.965,表明本文所提土壤介电测量方法适用于表征土壤的含水率。

### 参 考 文 献

- [1] 周静,崔键,梁家妮. 土壤水分对柑橘叶片生长及多胺代谢的影响[J]. 土壤,2009,41(5):796-800.  
ZHOU Jing, CUI Jian, LIANG Jian. Effects of soil water content on growth and polyamines' content for citrus leaves[J]. Soils, 2009,41(5):796-800. (in Chinese)
- [2] 袁鸿猷,樊军,金沐,等. 黄土高原淤地坝土壤水分和浅层地下水时空分布特征解析[J]. 灌溉排水学报,2020,39(10):50-56.  
YUAN Hongyou, FAN Jun, JIN Mu, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of soil moisture and shallow groundwater in warping dams on the Loess Plateau[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(10):50-56. (in Chinese)
- [3] SAVELEV Y A, DOBRYNIN Y M, ISHKIN P A. Theoretical study of soil water balance and process of soil moisture evaporation [J]. Agricultural Machinery and Technologies, 2017,1(1):23-28.
- [4] 焦永亮,李韧,赵林,等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. 冰川冻土,2014,36(2):237-247.  
JIAO Yongliang, LI Ren, ZHAO Lin, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(2):237-247. (in Chinese)
- [5] 易小波,邵明安,赵春雷,等. 黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):198-205.  
YI Xiaobo, SHAO Ming'an, ZHAO Chunlei, et al. Variation analysis and simulation of soil bulk density within different soil depths along south to north transect of Loess Plateau[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4):198-205. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170426&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170426&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.026. (in Chinese)
- [6] SCIPAL K, HOLMES T, DE JEU R, et al. A possible solution for the problem of estimating the error structure of global soil moisture data sets[J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(24):L24403.
- [7] TOPP G C, YANUKA M, ZEBCHUK W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resources Research, 1988,24(7):945-952.
- [8] 张智韬,周永财,杨帅,等. 剔除土壤背景的冬小麦根域土壤含水率遥感反演方法[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(4):197-207.  
ZHANG Zhitao, ZHOU Yongcai, YANG Shuai, et al. Method for soil water content in winter wheat root zone with eliminating effect of soil background[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):197-207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210421&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210421&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.021. (in Chinese)
- [9] STUCHLY M A, ATHEY T W, SAMARAS G M, et al. Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part II—experimental results[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982,30(1):87-92.
- [10] STUCHLY S S, SIBBALD C L, ANDERSON J M. A new aperture admittance model for open-ended waveguides[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994,42(2):192-198.
- [11] BRANDY M M, SYMONS S A, STUCHLY S S. Dielectric behavior of selected animal tissues in vitro at frequencies from 2 to 4 GHz[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1981,28(3):305-307.
- [12] GHANNOUCHI F M, BOSISIO R G. Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1989,38(2):505-508.
- [13] ANDERSON J M, SIBBALD C L, STUCHLY S S. Dielectric measurements using a rational function model[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1994,42(2):199-204.
- [14] 孙宇瑞,赵燕东,王一鸣. 一种基于传输线阻抗变换理论的土壤水分测量仪[J]. 中国农业大学学报,1999,4(6):22-24.  
SUN Yurui, ZHAO Yandong, WANG Yiming. An instrument based on impedance mapping of transmission line for determination of soil water content[J]. Journal of China Agricultural University, 1999,4(6):22-24. (in Chinese)

- [15] ESTEVEZ R, JONES S B. Frequency domain soil moisture determination using bilinear analysis with an open-ended dielectric probe[C]//Proceedings of the 2009 Reno, Nevada, 2009.
- [16] 许景辉, 赵钟声, 王一琛, 等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 322-331. XU Jinghui, ZHAO Zhongsheng, WANG Yichen, et al. Soil dielectric measurement based on bilinear theory [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 322-331. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191237&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191237&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.037. (in Chinese)
- [17] 赵钟声, 许景辉, 王一琛, 等. 基于双线性理论的黏质土介电谱与含水量频域测量研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 685-693. ZHAO Zhongsheng, XU Jinghui, WANG Yichen, et al. Measurement of dielectric spectra and water content frequency domain of clay soil based on bilinear theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 685-693. (in Chinese)
- [18] CHEN L F, ONG C K, NEO C P, et al. Microwave electronics: measurement and materials characterization[M]. John Wiley, 2004.
- [19] LI C L, CHEN K M. Determination of electromagnetic properties of materials using flanged open-ended coaxial probe-full-wave analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1995, 44(1): 19-27.
- [20] JENKINS S, PREECE A W, HODGETTS T E, et al. Comparison of three numerical treatments for the open-ended coaxial line sensor[J]. Electronics Letters, 1990, 26(4): 234-236.
- [21] NEVELS R D, BUTLER C M, YABLON W. The annular slot antenna in a lossy biological medium (short papers) [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(4): 314-319.
- [22] GALEJS J, WAIT J R. Antennas in inhomogeneous media[J]. American Journal of Physics, 1969, 37(11): 1164.
- [23] VAN BLADEL J G. Electromagnetic fields[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [24] WU M, YAO X, ZHANG L. An improved coaxial probe technique for measuring microwave permittivity of thin dielectric materials[J]. Meas Technol, 2000, 11(11): 1617-1622.
- [25] 马红章, 柳钦火, 王合顺, 等. 基于微波干涉技术的土壤介电特性测量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 159-163. MA Hongzhang, LIU Qinhuo, WANG Heshun, et al. Soil dielectric characteristic determination based on microwave interferometry theory[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 159-163. (in Chinese)
- [26] HADJILOUCAS S, WALKER G C, BOWEN J W. One-port de-embedding technique for the quasi-optical characterization of integrated components[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 111-123.
- [27] BELHADJ-TAHAR N E, DUBRUNFAUT O, FOURRIER-LAMER A. Broad-band microwave characterization of a tri-layer structure using a coaxial discontinuity with applications for magnetic liquids and films[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1998, 46(12): 2109-2116.