

利用同轴电缆电磁波反射技术测定非饱和土的含水率

梁志刚^{1, 2}, 陈云敏¹, 陈 赟^{1, 3}

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310001;

3. 浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 针对同轴电缆电磁波反射技术在量测非饱和土土体含水率方面的应用, 在理论上研究了该技术的基本原理, 从极化机理出发, 推导了电磁波与单相介质相互作用的模型。在该模型的基础上研究了电磁波与非饱和土介质的相互作用, 建立了非饱和土介质介电常数与体积含水量之间的关系模型。对不同的土样进行了一系列的室内试验, 试验表明, 模型能很好地描述非饱和土介质介电常数与体积含水量之间的关系。

关键词: 同轴电缆电磁波反射技术; 含水率; 孔隙比; 室内试验

中图分类号: TU413.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0191-05

作者简介: 梁志刚(1976-), 男, 博士生, 从事土的电磁特性及同轴电缆电磁波反射技术研究。

Measurement of water content of unsaturated soil by TDR technique

LIANG Zhi-gang^{1,2}, CHEN Yun-min¹, CHEN Yun^{1,3}

(1. Geotechnical Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Hangzhou Architectural Design Institute Co.,

Hangzhou 310001, China; 3. Geotechnical Engineering Branch of Architectural Design & Research Institute, Zhejiang University

Hangzhou 310012, China)

Abstract: For the applications of coaxial-cable electromagnetic wave reflection technique in measuring soil water content and pore ratio, the interaction model for EM wave and single media was deduced based upon polarization mechanism. Then the relationship between dielectric constant and volume water content or pore ratio of unsaturated soil was established. Different kinds of soil samples were tested. From the experimental results, it was found out that the relation curves of soil samples were almost consistent with each other and fitted the model well.

Key words: TDR technique; water content; pore ratio; laboratory experiment

0 引 言

目前工程中大多采用取样法测试土的含水率, 该方法会对土层产生扰动, 深层取样困难, 不能长期定点监测且测试有时间滞后性。与之相比, 现场测试方法, 具有取样法无法比拟的优势。同轴电缆电磁波反射法利用电磁波在土中的传播速度和土介质介电常数与土的物理性质指标的关系测定土的含水率。因此研究土的电磁特性, 进而获得电磁波在土中的传播速度和土介质介电常数与土的含水率之间的关系, 作为现场测试土的含水率的依据, 具有重要的意义。

为了探索这种关系, 国内外不少学者进行了研究。目前描述这种关系的模型分为3大类: 经验模型^[1]、扩散模型^[2,3]和体积混合模型^[4~10]。

扩散模型是根据分子极化和扩散理论提出来的,

强调的是扩散颗粒与其周围环境之间相互作用的细观效应。扩散模型认为混合介质由一种充当母相的介质和几种充当子相的介质组成, 假定各子相间没有相互作用, 子相介质均基于平面相聚合物在母相介质中进行扩散, 计算混合介质的平均电位移矢量和平均电场之商而得到混合介质介电常数的。

体积混合模型是对混合介质中各组分介电性质进行体积平均提出来的, 一般都可以写成 $\varepsilon^a = \sum_i v_i \varepsilon_i^a$

的形式, 其中 ε_i 为混合介质各组分的介电常数, v_i 为各组分的体积含量。不同的体积混合模型中进行加权平均的介电参数是不同的, 式中的参数 a 也各不相同。

对于工程上的应用, 公式的物理意义和参数的物

理意义十分重要。扩散模型的公式比较简洁而且各个参数物理意义比较明确,但该模型只将各种介质进行简单的混合,没有考虑介质的电学特性,在原理上存在缺陷,实验结果证明该式与实际情况符合较差,因而现在已经很少应用了;体积混合模型是在形式上表现为混合介质介电参数可用体积加权平均计算,其修正模型的参数 α 要通过拟合得到,使用也很不方便。

基于以上背景,笔者从极化机理出发,通过对介质细观电磁运动特性分析,建立了电磁波与单相介质相互作用模型,在此模型基础上,建立了电磁波与混合介质相互作用模型,将土介质应用于模型中,推导出非饱和土介质的介电常数的表达式。

1 电磁波与单相介质的相互作用

当电磁波作用在单相介质上时,在介质中会产生有效分子电场,介质在该电场作用下发生极化,从而表现出与极化前不同的电磁性质。我们从极化机理出发来推导电磁波与单相介质相互作用的模型。

在推导前作如下基本假定:①介质在宏观上表现为各向同性;②在低于光频的电磁波作用下,介质发生电子极化和其它形式极化,其它形式的极化在极化结果上可等效为一定量的电子极化;③磁导率等于真空中的磁导率 μ_0 ;④在电磁波传播过程中,介电常数 ε 和电导率 σ 保持不变;⑤由于电磁波的交变磁场强度相对于恒定磁场 B_0 要小得多,而且也远小于电场力的作用,故在计算总的受力时,忽略交变电磁场的作用。

由于电子极化所需时间极短,因此,即使电场以光频变化,电子极化也能及时跟上。此时,对应于电子极化的介电常数为介质光频介电常数 ε_∞ 。

$$\frac{\varepsilon_\infty - 1}{\varepsilon_\infty + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} N_a \alpha_e \quad (1)$$

式中, N_a 为电介质每单位体积的分子数, α_e 为电子极化率。

对于其它形式的极化,用相同极化效果的电子极化进行等效,但其极化速度并不如真实的电子极化那样快,因此通过对电子受力分析来研究。自然状态下的介质不可避免地处于空间电磁场的作用中,其中最典型的是地磁场。为了考虑这些因素,设考察的介质中存在一个与电磁波传播方向一致的外加恒定磁场 B_0 , B_0 和传播方向一致。介质中的电子不但受电场力的作用,而且还受磁场力的作用,同时,由于电子在电场的作用下发生位移极化后,将受到带反号电荷的粒子的回复力作用,因此电子总的受力为

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}_0) + k\vec{s} \quad (2)$$

式中, e 是电子的电量, v 是电子运动的平均速度, k

为回复力弹性系数, S 为电子的位移。电子在土中电子状态如图 1 所示。

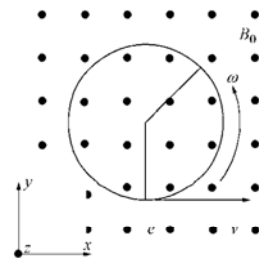


图 1 电磁场作用下土中电子状态

Fig. 1 Status of electrons of soil in electromagnetic field

若外加电场在空间传播,电子将在外加电场作用下运动,设在 x 方向上,电子离开正离子的位移为 x ,根据牛顿第二定律,有

$$\begin{aligned} \vec{F}_x &= m \frac{\partial^2 \vec{x}}{\partial t^2} = -e(\vec{E}_{xloc} + \vec{v}_y \times \vec{B}_0) + k\vec{x} \\ &= -e \left(\vec{E}_{xloc} + \frac{\partial \vec{y}}{\partial t} \times \vec{B}_0 \right) + k\vec{x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, m 是电子的质量, $\vec{E}_{xloc}$ 表示电子受到的 x 方向上的有效电场。同样可得到 y 方向上的关系式。由于电子在 z 方向上的速度与 B_0 方向一致,所以只与电场力有关,

$$m \frac{\partial^2 \vec{z}}{\partial t^2} = -e\vec{E}_{zloc} + k\vec{z} \quad (4)$$

因此式(3), (4)可改写成下列复数分量形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{e}{m} E_{xloc} - \omega_c \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{k}{m} x, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{e}{m} E_{yloc} - \omega_c \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{k}{m} y, \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -\frac{e}{m} E_{zloc} + \frac{k}{m} z, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\omega_c = \frac{e}{m} B_0$ 称为回旋角频率。

当电磁波随时间在 xy 平面按正弦变化时, $\frac{\partial}{\partial t}$ 的运算等效于乘 $j\omega$, j 为-1的平方根,代入求解,得

$$\begin{cases} x = \frac{e}{m} \frac{(\omega + k/(m\omega)) \cdot E_{xloc} - j\omega_c E_{yloc}}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2}, \\ y = \frac{e}{m} \frac{(\omega + k/(m\omega)) \cdot E_{yloc} - j\omega_c E_{xloc}}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2}, \\ z = \frac{e E_{zloc}}{(\omega^2 + k) m}. \end{cases} \quad (6)$$

根据偶极矩密度定义, $\vec{P} = Ne\vec{x}$ (其中 N 为单位体积内偶极子数目(包括等效偶极子), x 为正电荷与负电荷之间的距离, P 的方向由负电荷指向正电荷),对于该等离子体,考虑到 $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$,用矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 E_x + P_x \\ \varepsilon_0 E_y + P_y \\ \varepsilon_0 E_z + P_z \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 E_x + \frac{Ne^2}{m} \cdot \frac{(\omega + k/(m\omega))}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{xloc} - j \frac{Ne^2}{m} \cdot \frac{\omega_c}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{yloc} \\ -j \frac{Ne^2}{m} \cdot \frac{\omega_c}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{xloc} + \varepsilon_0 E_y + \frac{Ne^2}{m} \cdot \frac{(\omega + k/(m\omega))}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{yloc} \\ \varepsilon_0 E_z + \frac{Ne^2}{m} \cdot \frac{1}{\omega^2 + k} E_{zloc} \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{rx} E_x \\ \varepsilon_{ry} E_y \\ \varepsilon_{rz} E_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果外加磁场消失, 即 $B_0 = 0$, 则由 $\omega_c = \frac{e}{m} B_0$, 得出 $\omega_c = 0$, 于是

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 E_x + \frac{Ne^2}{(m\omega^2 + k)} E_{xloc} \\ \varepsilon_0 E_y + \frac{Ne^2}{(m\omega^2 + k)} E_{yloc} \\ \varepsilon_0 E_z + \frac{Ne^2}{(m\omega^2 + k)} E_{zloc} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

因为介质宏观上表现为各向同性, 所以 $\varepsilon_r = \varepsilon_{rx} = \varepsilon_{ry} = \varepsilon_{rz}$ 。求解 ε_r 的问题转化为求 E_{loc} 的问题。

对于单相介质, 有效分子电场为^[11]

$$E_{loc} = \frac{\varepsilon_r + 2}{3} E \quad (9)$$

综合考虑电子极化和等效电子极化效果, 有

$$D_x = \varepsilon_0 E_x + \frac{N_i e^2}{m\omega^2 + k} \frac{\varepsilon_r + 2}{3} E_x + 3\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 2} \frac{\varepsilon_r + 2}{3} E_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x, \quad (10)$$

将式(10)变形约分, 得

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \frac{Ne^2}{m\omega^2 + k} + \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 2}, \quad (11)$$

式中, ε_{∞} 为该介质的光频介电常数, k 为回复力弹性系数。

2 电磁波与非饱和土的相互作用

非饱和土是由土颗粒、水和空气组成的混合介质。我们在电磁波与单相介质相互作用模型的基础上通过考虑非饱和土中各相之间的相互作用来研究电磁波与非饱和土相互作用的模型。

如果考虑非饱和土中各相的相互作用以及各相分子间的相互作用, 有效分子电场

$$E_{loc} = \frac{\varepsilon_{ri} + 2}{3} \cdot \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_{ri} + 2\varepsilon_r} E = \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_{ri} + 2)}{\varepsilon_{ri} + 2\varepsilon_r} E \quad (12)$$

综合考虑电子极化和等效电子极化效果, 对于非饱和土介质, 有

$$D_x = \varepsilon_0 E_x + \frac{Ne^2}{m\omega^2 + k} \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_r + 2)}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_r} E_x + 3\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 2} \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_r + 2)}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_r} E_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x \quad (13)$$

对于土中某一相, 有

$$D_x = \varepsilon_0 E_x + \frac{N_i e^2}{m\omega^2 + k} \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_{ri} + 2)}{\varepsilon_{ri} + 2\varepsilon_r} E_x + 3\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 2} \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_{ri} + 2)}{\varepsilon_{ri} + 2\varepsilon_r} E_x = \varepsilon_0 \varepsilon_{ri} E_x \quad (14)$$

考虑到土介质中参与极化的电子(包括等效后增加的极化电子数)来源于土中各相, 可按自由电子的体积比例得到

$$N = \sum_i v_i N_i \quad (15)$$

联合式(13)、(14)、(15), 可得

$$\left(2\sum_i A_i - 3\right)\varepsilon_r^2 + \left(\sum_i A_i \varepsilon_{ri} + 4\sum_i A_i + 3\right)\varepsilon_r + 2\sum_i A_i \varepsilon_{ri} = 0, \quad (16)$$

式中, $A_i = \frac{\varepsilon_{ri} - 1}{\varepsilon_{ri} + 2} v_i$ 。对于非饱和粘性土介质, ε_{ri} 分

别为土颗粒介电常数 ε_s , 自由水介电常数 ε_{fw} , 结合水介电常数 ε_{bw} 和空气介电常数 ε_a ; 对于非饱和无粘性土介质, ε_{ri} 分别为土颗粒介电常数 ε_s , 自由水介电常数 ε_{fw} 和空气介电常数 ε_a 。由式(16)根据一元二次方程求根公式即可求得非饱和土介电常数 ε_r 。

结合水的介电常数与自由水的介电常数是不同的。在一定的频率范围内, 自由水的介电常数是一定的, 结合水的介电常数是随着结合水含量的增加而增加。因此, 非饱和和粘性土的介电常数随含水率变化而变化的曲线将由于结合水介电常数变化而出现拐点。

3 室内试验

3.1 干土试验

试验设备除采用 Campbell Scientific 公司的 TDR 测试系统外, 选取了 2000 mL 的量筒作为试样筒, 可方便读出每次测试时土样的体积。试验选用的土样包括标准砂、中砂、细砂和粘土。土样的比重分别为 2.63、2.70、2.71、2.71。级配曲线如图 2 所示。

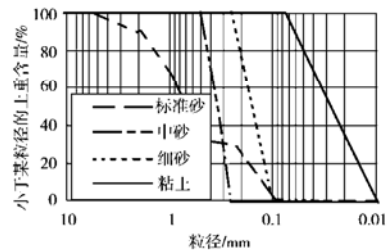


图2 级配曲线

Fig. 2 The grain size composition

试验具体步骤为: ①称取烘干土样 4000 g, 利用松砂器分层填入 2000 mL 量筒中, 抚平, 测读砂样体积, 计算砂样的孔隙比; ②将探头全部插入试样中, 测读并记录反射波形; ③测读完后将砂样逐次击实, 在不同孔隙比下重复①和②。试验结束后, 可根据反射波形获得干土介电常数与孔隙比的关系曲线。

为了考察不同探头的对量测的影响, 采用了三针式探头和六针式探头进行试验。两种探头的长度和形状如图 3 所示。

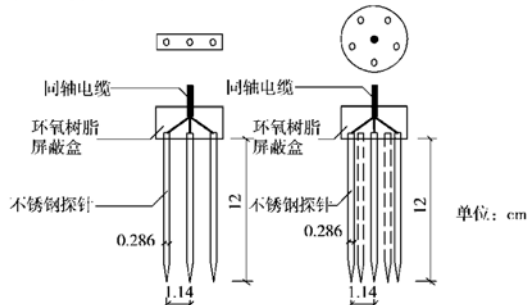


图 3 三针式探头和六针式探头示意图

Fig. 3 3-rod probe and 6-rod probe

各土样在不同孔隙比下的介电常数, 绘于图 4 中, 并与本文模型、俄罗斯模型、Dobson 模型和 Maxwell-Garnett 模型进行比较。由图 4 中发现, 介电常数随孔隙比变化很小, 说明孔隙比对介电常数的影响很小, 不能用测定土样介电常数的方法来确定孔隙比。干土介电常数随着孔隙比的增加微弱降低, 下降速率随着孔隙比的增加越来越小。相比而言, 本文模型和 Dobson 模型与实测结果更为符合。

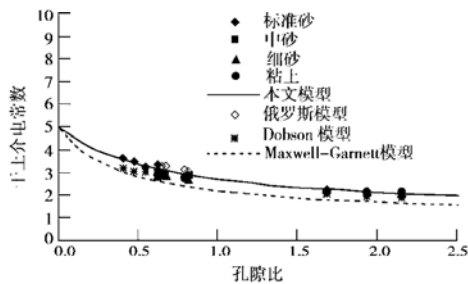


图 4 不同孔隙比的干土的介电常数

Fig. 4 Dielectric constant of dry soil with various porosity

三针式探头和六针式探头的测量结果是相当接近的, 探头形式对测量结果影响不大。

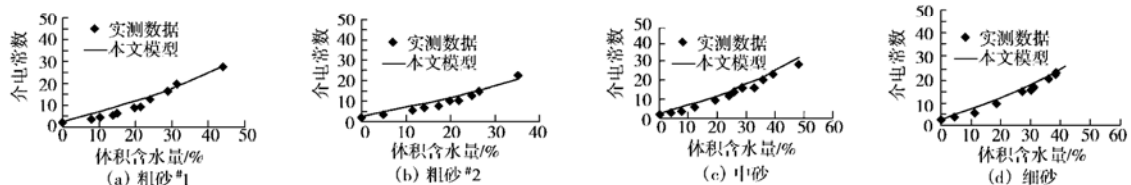


图 6 介电常数与体积含水量关系图

Fig. 6 Relationship between dielectric constant and volumetric water constant

3.2 非饱和和无粘性土试验

试验选用土样级配如图 5 所示。

试验具体步骤为: ①用天平称大约 4000 g 的试样, 分层均匀地平铺于托盘中, 用喷水器均匀地喷洒称量好的一定量的水, 铺一层喷一层, 然后用塑料膜铺盖在试样上, 防止水分蒸发。静置 24 h, 保证试样含水率均匀; ②将静置过的试样稍微搅拌后装入 2000 mL 的量筒中, 每装入一部分试样就振动几次保证量筒中各位置试样密实度大致相同。试样全部装入量筒后, 振实达到一定的孔隙比; ③准备好试样后, 立即将探头插入试样进行测量, 记录 3 个位置的波形和数据; ④最后测定试样的含水率, 就可得到该试样在一定的孔隙比下体积含水量 θ_v 与介电常数 ϵ 的关系。

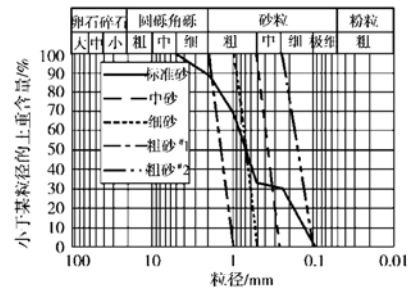


图 5 级配曲线

Fig. 5 The grain composition

测试一定孔隙比、不同体积含水量下的不同级配砂样的介电常数, 将本文表达式曲线和实测结果绘于图 6 中。可以看到, 本文模型与实测数据比较符合。

3.3 非饱和和粘性土试验

试验选用杭州地区的粉质粘土和粘土以及临平粘土。试验方法同非饱和和无粘性土试验方法。

试验结果和考虑结合水影响的本文模型、Birchak 模型曲线绘于图 7 中。由图 7 中可以看出, 由于结合水的影响, 在体积含水量较低时测得的介电常数比较小, 曲线呈下凹状; 随着体积含水量的增加, 结合水的影响程度越来越低, 介电常数增长速率提高。当体积含水量比较高时, 测得的介电常有上扬趋势, 可能的原因是电导率对测试的影响。两条模型曲线同样是比较接近的, 与实测数据符合得比较好。

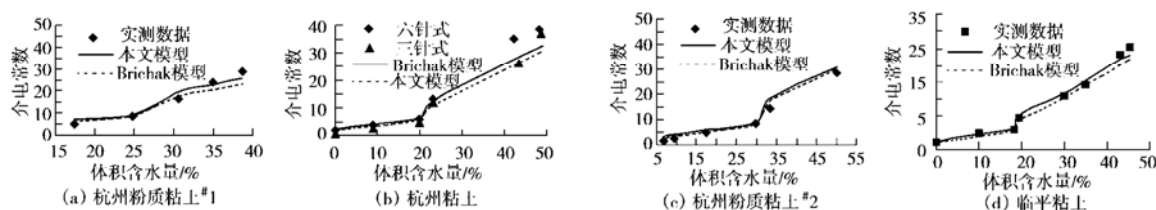


图7 介电常数与体积含水量关系图

Fig. 7 Relationship between dielectric constant and volumetric water constant

三针式探头和六针式探头的测量结果是相当接近的,但从反射曲线上可以看出,六针式探头的反射曲线比三针式探头更为稳定可靠。

4 结 论

针对同轴电缆电磁波反射技术在测试非饱和土的体积含水量方面的应用,笔者从极化机理出发,对电介质微粒在电磁场作用下的受力性状进行分析,推导了电磁波与单相介质相互作用的模型。在该模型的基础上研究了电磁波与非饱和土的相互作用,建立了非饱和土介电常数与体积含水量之间的关系模型。对不同的土样进行了一系列的室内试验,研究了本文模型的正确性,试验表明,本文模型能很好地描述非饱和土介质介电常数与体积含水量之间的关系。研究了探头对测试结果的影响,结果表明,三针式探头与六针式探头的测试结果是比较接近的,探头对量测结果影响不大,相比而言,六针式探头比较稳定。

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 Resour Res, 1980, **16**(3): 574 - 582.
- [2] SIHVOLA A. Electromagnetic mixing formulas and applications [M]. London: Institution of Electrical Engineers, 1999. 161 - 172.
- [3] DE LOR G P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water[J]. J Microwave Power, 1968, **3**(2): 67 - 73.
- [4] BIRCHAK J R, GARDNER C G, HIPPEL J E. High dielectric

constant microwave probes for sensing soil moisture[J]. Proc IEEE, 1974, **62**(1): 93 - 98.

- [5] KRASZEWSKI A, KULINSKI S, MATUSZEWSKI W. Dielectric properties and a model of biphasic water suspension at 9.4 GHz[J]. Journal of Applied Physics, 1976, **47**(4): 1275 - 1277.
- [6] WOBSCHELL D. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: The semidisperse model[J]. IEEE Trans on Geoscience Electronics, 1977, **GE15**(1): 49 - 58.
- [7] WANG J R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies[J]. Radio Science, 1980, **15**(5): 977 - 985.
- [8] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T. Microwave dielectric behaviour of wet soil part II: dielectric mixing models[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1985, **GE-23**(1): 35 - 46.
- [9] WHALLEY W R. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content[J]. J Soil Sci, 1993, **44**(1): 1 - 9.
- [10] HEIMOVAARA T J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils[J]. Water Resour Res, 1994, **30**(2): 189 - 199.
- [11] 李翰如. 电介质物理导论[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990. (LI Han-ru. Introduction to dielectric physics[M]. Chengdu: Publishing House of University of Science and Technology of Chengdu, 1990.)