

DOI: 10.11779/CJGE201907002

基于频率步进原理的 TDR 研制及在土体含水率测试中的应用

陈仁朋^{1,2,3}, 陈卓^{1,2,3}, 陆明⁴, 刘惠斌⁴, 王晨光⁴, 卢玉⁴

(1. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学国家级建筑安全与环境国际联合研究中心, 湖南 长沙 410082;
3. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 4. 天津特利普尔科技有限公司, 天津 300384)

摘要: 基于时域无载频脉冲原理的时域反射法 (TDR) 能够快速准确测试土体含水率, 在岩土工程领域有广泛用途。但是目前 TDR 测定仪器均为进口, 国外对中国实行技术封锁。介绍了一套基于频率步进原理的 TDR, 利用该原理信号源输出的频率分量能够精确获知, 接收信号中的噪声有效被抑制; 研制了探针转换器, 避免在常态测试区域出现测试盲点, 提高测试范围和精度。最后通过水、空气及土体 3 种介质中含水率测试对比试验, 验证了新型 TDR 测试设备的有效性。

关键词: 时域反射法; 频率步进原理; 体积含水率

中图分类号: TU415

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)07-1191-09

作者简介: 陈仁朋(1972—), 男, 浙江衢州人, 教授, 博士生导师, 主要从事土的基本特性及本构模型、交通岩土、盾构隧道等方面的教学与科研工作。E-mail: chenrp@hnu.edu.cn。

Development of TDR based on stepped-frequency principle and its application in measurement of volumetric water content of soils

CHEN Ren-peng^{1,2,3}, CHEN Zhuo^{1,2,3}, LU Ming⁴, LIU Hui-bin⁴, WANG Chen-guang⁴, LU Yu⁴

(1. MOE Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. National Joint Research Center for Building Safety and Environment, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Tianjin Telepro Science Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: The time-domain reflection method (TDR) based on the time-domain carrier-free pulse principle can test volumetric water content of soils timely and accurately and is widely applied in geotechnical engineering. But all the TDR testing instruments are imported at present, and some foreign countries implement blockade on the techniques. A set of TDR system based on the principle of stepped-frequency is recommended. The output frequency component of the signal source can be accurately known and the noise in the received signal can be effectively restrained. A reasonable probe converter is developed to avoid blind spots in normal testing area and to improve testing range and accuracy. Finally, the effectiveness of the new TDR testing equipment is verified by comparing the volumetric water contents of water, air and soil.

Key words: time-domain reflection method; stepped-frequency principle; volumetric water content

0 引言

时域反射原理 (time domain reflectometry, TDR) 产生于 20 世纪 30 年代, 最初被用来定位通讯电缆的受损位置^[1]。20 世纪 70 年代后, 随着 TOPP 等学者的开创性工作, TDR 技术得以应用于土壤水分测量^[2]。由于 TDR 测得的电磁波反射曲线能够反映土壤介电参数及电导率, 因而近年来, TDR 技术在岩土工程领域的含水率^[3-6]、干密度^[3]、电导率^[6]、地下水位的测定^[6]及边坡稳定性监测^[7]等方面得到较好应用。

虽然 TDR 技术有广泛应用前景, 但该仪器核心电

子部件被西方少数国家垄断。目前 TDR 主要有德国 IMKO 公司生产的 TRIME-TDR, 美国 SEC 公司生产的 6050X3 Minitrase TDR 和美国 Campbell Scientific 生产的 TDR100 土壤水分测定仪等。其中 TRIME-TDR 应用了相位检测原理, 电导率对其含水率测试产生显著影响, 而且需对所测土壤进行公式率定。Minitrase 和 TDR100 含水率测试误差可控制在 3% 以内, 但售

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目 (51608188); 长沙市科技计划项目 (kq1703051)

收稿日期: 2018-07-19

价均较高,难以大范围推广应用。TDR 仪器的国产化研发有着迫切需求。

TDR 技术关键在于传输线上电磁波传输时间的精确测量,其主要基于 3 种体制^[8]:时域无载频脉冲体制、调频连续波体制和频域频率步进体制。现有 TDR 仪器采用时域无载频体制,其核心在于高速延迟线技术。由于其在军事雷达上的应用,该技术对中国一直处于封锁状态。调频连续波体制多用于雷达测距,因其电磁波适用频率较低而不适合土壤水分测量。

频域频率步进体制是 20 世纪 70 年代后,随着快速傅里叶算法的提出和计算机计算速度的大幅提高而发展起来的技术,它基于傅里叶变换及其逆变换能够实现频域和时域信号之间相互转换的原理,实现时间的精准测量,在探地雷达^[9]和电子测量领域中广泛应用。

不同于现有 TDR 仪器,本文首次将频域频率步进体制和向量接收技术^[10]应用于土壤水分测量领域,开发出新一代基于时域反射原理的土壤水分测量仪器。本文将介绍频域频率步进体制的基本原理,同时对于 TDR 仪器所使用的探针,提出系统测量阻抗和测量盲点的概念,并据此给出一种优化探针结构。最后通过水、空气及土体 3 种介质中含水率测试对比试验,验证新型 TDR 测试设备的有效性。

1 基本原理

1.1 TDR 测试土体含水率的基本原理

土体介电常数是反映土体极化程度的参数,物质的色散电磁特性由相对介电常数来定量描述。Debye 等^[11]提出材料介电常数复数形式:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon^* / \varepsilon_0 = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

其实部反映介电材料在外加电磁场下的极化程度和能量存储,而虚部反映介电材料在外加电磁场下的能量损失。

土体是多相介质,包括空气、水和固体土颗粒等,故孔隙率及含水率对于介电常数的计算具有重要意义,并且土体介电常数主要由其含水率所决定。图 1 为水的极化频谱响应^[12]。可见,在大约 1 MHz 至 2 GHz 范围内,水的介电常数实部相对恒定。

测试土壤介电常数的影响因素众多,其中影响较大的为频率和温度^[13]。介电常数实部对于体积分含水率测定起关键作用。在低频率(10~100) MHz 范围,土壤的介电常数实部受温度影响较大,TDR 系统需要标定。在高频率 100 MHz~4.5 GHz 范围,土壤在高频率段的极化降低,可忽略温度改变带来的介电常数实部的细微变化。

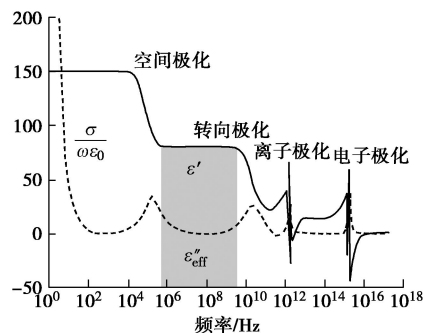


图 1 水的极化频谱响应^[12]

Fig. 1 Polarized spectral response of water^[12]

1980 年, Topp 等^[14]指出电磁波在介质中传输的速度为

$$v = \frac{c}{\left[\varepsilon' \cdot \frac{1 + (1 + \tan^2 \delta)^{1/2}}{2} \right]^{1/2}} \quad (2)$$

其中, $\tan \delta = [\varepsilon'' + (\sigma_{DC} / w\varepsilon_0)] / \varepsilon'$ 为损耗因子。土壤可近似看作同向线性均匀媒质,其满足: $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$, 当电磁波的频率足够高时,有 $\sigma_{DC} / (w\varepsilon_0 \varepsilon') \ll 1$ 。故在高频条件下,介电常数 $\varepsilon' \approx (c/v)^2$ 。

据此, Topp 等^[15]进一步引入表观介电常数 K_a 的概念:

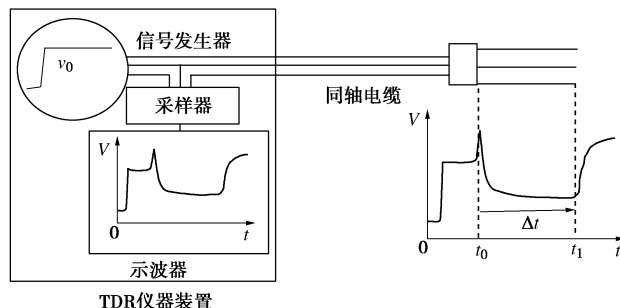
$$K_a = (c/v)^2 \quad (3)$$

现有 TDR 测量土壤水分原理图如图 2 所示。当激励信号沿同轴电缆在时刻 t_0 达到探针的起始端时,由于阻抗的改变产生反射,其余信号沿探针继续前进,在时刻 t_1 到达探针底部时,产生第二次反射^[16]。考虑电磁波沿长度为 L 的探针的行程,

$$v = \frac{2L}{\Delta t} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得到

$$K_a = \left(\frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (5)$$



TDR 仪器装置

图 2 现有 TDR 测量土壤水分原理图

Fig. 2 Schematic diagram of existing TDR measuring soil moisture

根据 TOPP 等关于土壤体积分含水率与表征介电常数的经验公式^[17]:

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (6)$$

易见 TDR 技术的关键在于对电磁波传输时间的精确测试。

1.2 频域频率步进体制基本原理

频率步进探测是一种激励信号的频率以阶梯方式均匀步进上升的频域测试方案。

一个扫描周期内, 发射机信号频率 f_L 以频率间隔 Δf 均匀步进上升到终止频率 f_H 。工作带宽 $B=f_H-f_L$ 。频率步进间隔 $\Delta f=B/(n-1)$, n 为频率步进的点数, 每个频点的持续时间为 T_d :

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n-1} \cos(f_L + k\Delta f) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_d}{2} - kT_d}{T_d}\right), \quad (7)$$

其中,

$$\text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_d}{2} - kT_d}{T_d}\right) = \begin{cases} 1 & (kT_d \leq t \leq (k+1)T_d) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

假设地下存在不同介质反射层, 其反射系数为

$$\Gamma = |\Gamma| e^{i\varphi}, \quad (9)$$

点目标的双程传输延迟为 τ (在一定频率范围内, 不同介质反射层的介电常数不随频率改变而改变, 可认为 Γ 和 τ 是常数), 则接收信号 $y(t)$:

$$y(t) = |\Gamma| e^{i\varphi} \sum_{k=0}^{n-1} \cos[(f_L + k\Delta f)(t - \tau)] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - kT_d - \frac{T_d}{2} - \tau}{T_d}\right). \quad (10)$$

假设 $T_d \geq \tau$, 接收信号通过混频和低通滤波之后下变频到复基带信号。复基带信号经过 A/D 采样得到复数数组:

$$C[k] = |\Gamma| e^{i\varphi} e^{-i2\pi(f_L + k\Delta f)\tau} \quad (k=0,1,2,3,\dots,n-1). \quad (11)$$

复数组 $C[k]$ 中的每一个元素对应每一个发射频点复基带频域采样信号。则复数数组 $C[k]$ 可进一步表示为频率域数组:

$$C[f] = |\Gamma| e^{i\varphi} e^{-i2\pi(f_L + f)\tau} \quad (f=0,\Delta f,2\Delta f,\dots,(n-1)\Delta f). \quad (12)$$

将 $n \times 1$ 维数组 $C[f]$ 进行插值补零变成 $N \times 1$ 维数组 $D[f]$ ($N > n$, 为 2 的整数幂)。插值方法为将频率 f 对应数组 $C[k]$ 元素放到数组 $D[f]$ 的第 $(f-f_L)/\Delta f + 1$ 个元素中, 依次类推直至终止频率 f_H , 数据步长为 Δf 。进行完此操作后, 数组 $D[f]$ 的其余元素全部补零。则 $N \times 1$ 维数组 $D[f]$ 可表示为带通频域信号:

$$D[f] = |\Gamma| e^{i\varphi} e^{-i2\pi f\tau} \text{rect}\left[\frac{f - f_c}{B}\right]. \quad (13)$$

式中 B 为发射带宽; f_c 为发射带宽的中心频率; 对 $D[f]$ 作离散傅里叶逆变换。将频率域信号变成时域信号 $d[t]$:

$$d[t] = |\Gamma| \cdot e^{i\varphi} \cdot B \cdot \text{sinc}[B(t - \tau)] e^{-i2\pi f_c(t - \tau)}, \quad (14)$$

其中,

$$|d[t]| = |\Gamma| \cdot B \cdot \text{sinc}[B(t - \tau)]. \quad (15)$$

由此可见, 仅当 $t=\tau$, 也即在信号的反射处达到了极值, 其图形表示为一个典型的辛格函数脉冲, 如图 3 所示。

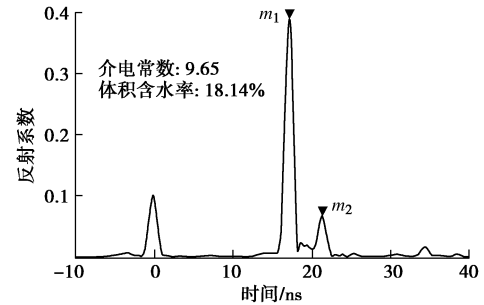


图 3 新型 TDR 线性幅度格式测试曲线

Fig. 3 Measured linear amplitude format curves of new TDR

新型 TDR 水分测量仪基于以上基本测量原理, 分时依次步进产生一系列点频连续波信号, 扫频范围可在 1 MHz~4 GHz 自选。高频条件下温度对新型 TDR 测试土壤体积含水率的影响可忽略不计^[13]。新型 TDR 测试原理如图 4 所示, 每个单频信号通过耦合产生激励入射信号的代表信号, 直通信号沿着同轴电缆线传输到末端的探针, 遇到不同介质便产生信号反射, 再通过定向耦合实现测试信号和反射响应信号分离, 形成反射接收信号。入射代表信号和反射接收信号分别由各自接收机接收, 并将接收的数据存储起来, 当一次 1024 点频率或 2048 点频率扫描结束后, 所得系列入射代表信号接收数据和反射接收信号接收数据通过离散傅里叶逆变换得到入射脉冲和反射脉冲。

图 3 是新型 TDR 实测的线性幅度格式曲线, 它是基于式 (14) 的图像表示。在此格式下, 横坐标代表时间, 而纵坐标表示经过归一化处理, 在整个测量频率范围内不连续性产生的反射系数的平均值。图 4 中, 脉冲 m_1 和 m_2 分别表示测试信号进入探针和到达探针底部的双程时间, 由其间隔即可根据式 (5) 得到土体的表观介电常数, 由式 (6) 可得土壤的体积含水率。

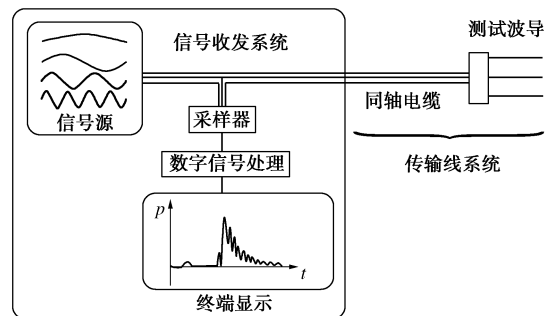


图 4 新型 TDR 技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of new TDR technology

1.3 新型 TDR 与现有 TDR 的比较

现有 TDR 仪器发射的是由一系列谐波叠加构成的阶跃波脉冲, 然后由宽带示波器接收显示, 其本质是一个模拟系统。它对时间的测量是通过对图像的波形采用双切线的方法找到反射点, 衰减损耗的信号以及测量中产生的干扰噪音都会对测量结果带来不确定的影响。

采用频域频率步进体制的新型 TDR 从根本上是一个使用数字数据和数学算法来进行数据分析的数字系统, 其过程是扫频响应测量, 然后通过离散傅里叶逆变换将窄带接收的频域数字化信号转换为强烈冲激效应的时域信号。与现有 TDR 比较, 它有以下显著特点: ①避免了技术含量高的高速延迟线技术。硬件设计简单、成本低, 数字化强冲激的时域信号更容易实现自动化在线监测功能。②新型 TDR 的扫频范围可在 1 MHz~4 GHz 间自选。且新型 TDR 的工作频率范围默认为 1 MHz~1.8 GHz, 在此频率范围内水的介电常数实部相对稳定, 因此新型 TDR 相比现有 TDR 测量精度及分辨率更高。③新型 TDR 采用了向量接收技术。其所采集的信息除时域信息外, 还包括大量的频域信息, 仪器提供阻抗测量模式, 可反映测量行程中各点的阻抗变化情况, 为仪器功能进一步开发提供有效工具。

2 探针的设计

探针作为土壤体积含水率测试的传感器, 其结构内部的阻抗匹配设计具有重要的意义。

2.1 同轴多针式传感器结构

应用于土壤检测领域的 TDR 探针是对同轴电缆的模拟。中心针体与同轴电缆内导铜芯相连, 外部与同轴电缆的外导屏蔽层连接。从结构上, TDR 传感器又分为同轴式和多针式。由于同轴式传感器阻断了外导体内外土壤的水分交换, 同时为了避免在土壤中插拔引起对原状土的扰动, 因此多采用模拟同轴电缆结构的同轴多针式传感器。实际应用中更多以三针式结构为主。

陈赞等^[18]研究了多针式传感器的几何构造, 指出在传感器探针长度大于 20 cm 时, 可以将仪器的测试误差控制在 1% 以下。而当探针长度大于 35 cm 时, 由于沿探针传输的电磁波信号能量的衰减, 造成探针末端反射趋于平缓而不易判别, 测试误差随之加大。

探针的针体直径 d 及间隔距离 R , 也是影响探针测试敏感性和精确度的重要因素。如图 5, 陈赞等^[18]指出, 当 $d/R > 0.1$ 时, 可避免电磁能量较多集中在中心针体附近, 具有较好效果。

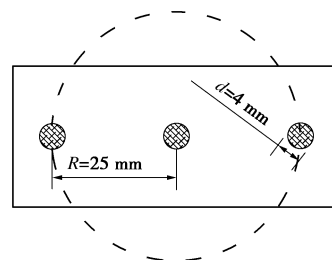


图 5 同轴三针传感器截面图

Fig. 5 Cross-section of coaxial three-probe sensor

以下讨论, 基于探针的长度 $L=20$ cm, 针体间隔 $R=2.5$ cm, 针体直径为 $d=4$ mm。

2.2 系统测试阻抗和测试盲点

Kraus 等^[19]提出同轴电缆的特征阻抗计算公式:

$$Z = \frac{60 \ln(D/d)}{\sqrt{K_a}}, \quad (16)$$

式中, D 为同轴电缆外导体直径, d 为内导体铜芯的直径, K_a 为内外导体间绝缘层的相对介电常数。对于模拟同轴电缆的同轴多针式传感器。Zegelin 等^[20]给出计算其特征阻抗的公式:

$$Z = \frac{n}{n-1} \frac{60 \ln(D/d)}{\sqrt{K_a}}, \quad (17)$$

式中, n 为针体的数目, 此处 $n=3$, 如图 5。

由式 (17) 可见, 当 $n=2$ 时, 即为传输线理论中双平行线的阻抗计算公式, 而当 $n \rightarrow \infty$ 时, 则与式 (16) 一致, 为同轴电缆阻抗计算公式。对于试验选用的三针探针, 由 (17) 得

$$Z = \frac{90 \ln(2R/d)}{\sqrt{K_a}}. \quad (18)$$

当土体的体积含水率变化, 引起其介电常数变化时, 式 (17), (18) 中得到的阻抗随之变化, 定义其为系统测试阻抗。

定义探针前端的阻抗 Z_0 为输入阻抗, 结合电磁学中关于反射系数的公式, 由图 4 可得到

$$m_1 = \frac{|z - z_0|}{z + z_0}. \quad (19)$$

通常采用的连接传感器的同轴电缆阻抗为 50Ω , 由式 (18) 可计算得到: 当 $K_a=20.67$ 时, $Z \approx 50 \Omega$, 即输入阻抗与系统测试阻抗相等。因而 $m_1=0$, 意味着这一点反射消失, 导致测试失败。代入式 (6), 得到此时对应土体的体积含水率 $\theta=35.44\%$, 称此为系统测试盲点。

考虑到 K_a 与 ε' 的差异, 该值有一定的误差。图 6 为输入阻抗为 50Ω 的探针测试 33.74% 体积含水率砂土的测试曲线, 可以看到由于反射系数降低, 干扰噪音相对加大, 造成测试结果难以准确获得。由此可见, 在测试盲点附近的一定含水率区域内, 测试精度都会受到影响。

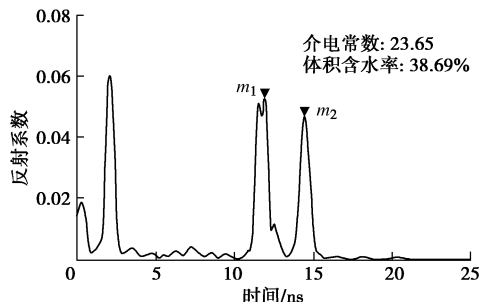


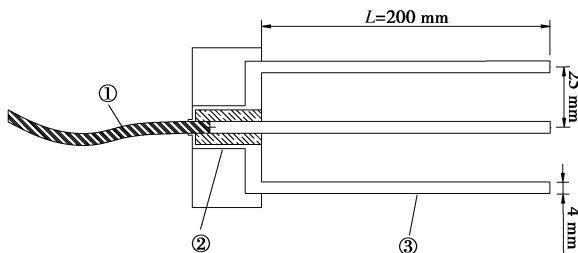
图 6 33.74% 体积含水率的砂土测试曲线

Fig. 6 Curve of sand with volumetric water content of 33.74%

2.3 阻抗转换器的设计

由图 6 可以看到, 当输入阻抗 50Ω 时, 测试盲点应在土体体积含水率 35.44% 左右, 而这一区域处在土壤水分的常态测试区域。为避免测试盲点在常态测试区域出现, 需要在同轴电缆与探针的连接处设计阻抗转换器。

阻抗转换器为模拟同轴电缆结构的容性阻抗转换器。图 7 中 1 为 50Ω 同轴电缆, 2 为聚四氟乙烯阻抗转换器, 3 为不锈钢探针。中心针体通过材质为聚四氟乙烯的阻抗转换器与同轴电缆内导体铜芯连接, 外导针体经阻抗转换器与上述同轴电缆的外屏蔽导体连接。通过调节阻抗转换器的外径及长度, 实现传感器测试阻抗的更好匹配。



①-50 Ω 同轴电缆 ②-聚四氟乙烯阻抗转换器 ③-不锈钢探针

图 7 阻抗转换器示意图

Fig. 7 Configuration of impedance converter

考虑设计盲点的介电常数值大于 50, 则由式 (6) 可知, 此时土体体积含水率应大于 58.2%, 超过绝大部分工程应用中的含水率。由式 (18) 可得

$$Z = \frac{90 \ln(2R/d)}{\sqrt{K_a}} = \frac{90 \ln(50/4)}{\sqrt{K_a}} < \frac{90 \ln(50/4)}{\sqrt{50}} \approx 31.25 \Omega, \quad (20)$$

即输入阻抗应小于 32.15Ω 。

由于在同轴电缆与阻抗转换器连接处增加新的阻抗失配点, 产生新的反射。与现有 TDR 相同, 当若干个阻抗失配点存在时, 前端产生的反射对所看到的后端反射系数存在遮蔽现象^[21-22]。如图 8, 从仪器读到的反射系数 m_1 事实上是视反射系数, 与实际的反射系数 m'_1 的关系为

$$m_1 = (1 - m_0^2) m'_1. \quad (21)$$

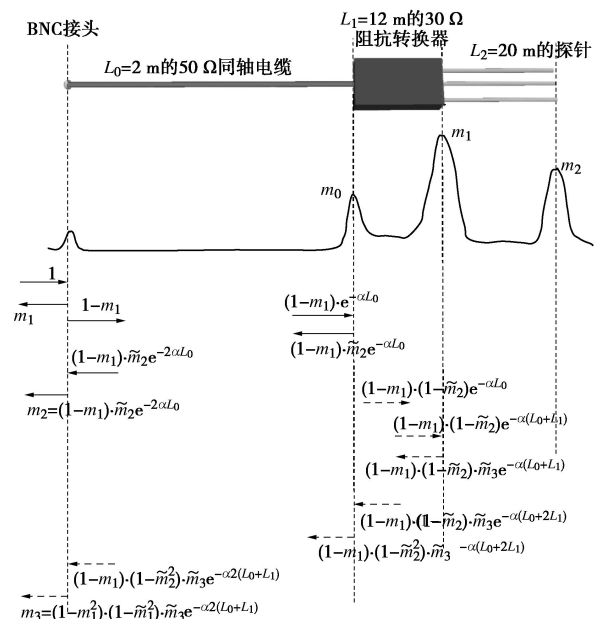


图 8 电磁波行程图

Fig. 8 Propagation analysis of electromagnetic waves

从微波理论角度来说, 当 m_0 绝对值越大, 其到达后端的能量损失也越大。由式 (19) 易见, 当 Z 越接近于 50Ω 时, m_0 绝对值越小, 也即阻抗转换器的设计应尽量接近于 50Ω 。

结合上述讨论, 新型 TDR 系统设计的阻抗转换器转换阻抗为 30Ω 。

3 测试系统的试验验证

3.1 试验仪器及材料

为验证本传感器在工程中的应用效果, 设置若干组对照试验。本文使用的设备是课题组与天津特利普尔公司共同研发的 Soiltop-200 土壤含水率测定仪, 测量量程为 $0 \sim 100\%$, 操作温度范围为 $-10^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$, 测量时间 $5 \sim 15 \text{ s}$, 采用 $12 \sim 18 \text{ V}$ 电源适配器供电, 支持 10, 20, 40 cm 等探针类型, 如图 9 所示。另外试验准备了国外的 TDR100、TRIME-TDR 和 Minitrase 土壤含水率测定仪, 制的未经阻抗优化的探针, 以及 20Ω , 30Ω 阻抗转换器的探针, 自然风干的砂土、红壤土和东北黑土, 常温去离子水, 氯化钠等材料。

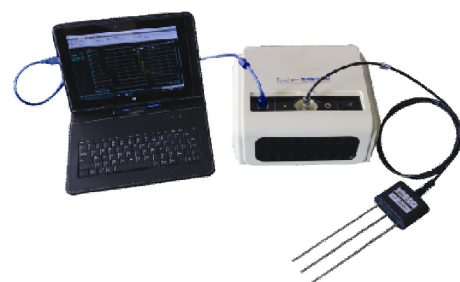


图 9 Soiltop-200 实物图

Fig. 9 Picture of Soiltop-200

3.2 试验方法

试验内容主要分为 5 个部分:

(1) 利用不同阻抗转换器测试空气的体积含水率: 将未经阻抗优化的探针, 以及 $20\ \Omega$, $30\ \Omega$ 阻抗转换器的探针连接向量网络分析仪, 探针周围无障碍物, 直接测量。为取得充分的样本数据, 相同的阻抗测试过程进行 3 次。

(2) 利用 $30\ \Omega$ 阻抗转换器的探针测试常温去离子水的体积含水率。

(3) 利用 $30\ \Omega$ 阻抗转换器的探针测试配置的体积含水率分别为 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% 的砂土、红壤土和黑土。本文设计的试验平台为圆柱体试验桶, 其半径 10 cm, 高度为 30 cm, 土样填充高度 25 cm, 土样体积为 7850 mL。分别将砂土、红壤土和黑土风干, 根据各组土壤干密度, 计算需称量的风干土壤和去离子水的质量。将去离子水分 4 组均匀喷撒在土壤表面, 拌匀, 密封搁置 24 h。每组试验将土体均匀分成 5 层 (每层 5 cm) 击实, 将探针垂直插入试验桶, 阻抗转换器末端与土体水平接触。为避免烘干法的误差, 首先按照 ASTM D4959(2000)^[23] 标准操作。为避免人为误差, 取平行样进行试验, 即在一个试验桶土柱中, 取 3 个环刀, 进行烘干。如果 3 个环刀的计算得到的体积含水率相差超过 2%, 省略异常数据。如果相差均在 2% 之内, 取 3 个数的平均值作为最终的结果。

(4) 设置 8 组不同温度的去离子水加热试验, 分别为 31.1°C , 41.2°C , 54.2°C , 60.1°C , 66.4°C , 73°C , 81°C , 92.5°C 。每个温度组中用 TDR100 和 Soiltop-200 进行测试, 两组传感器相同规格, 均为 $30\ \Omega$ 阻抗转换器和 20 cm 探针。获得各温度下的介电常数实测值, 并根据

$$K_w = 84.740 - 0.4008T + 9.398 \times 10^{-4}T^2 - 1.410 \times 10^{-6}T^3 \quad (22)$$

计算不同温度下的去离子水的介电常数值^[24]。

(5) 用常温去离子水配置 13 组不同质量分数的氯化钠溶液, 分别用 Soiltop-200、TRIME-TDR、Minitrase 测试溶液介电常数, 并根据 (22) 计算常温介电常数值。

4 试验结果与分析

4.1 不同阻抗转换器测试空气结果及分析

分别利用未经阻抗优化的探针, 以及 $20\ \Omega$, $30\ \Omega$ 阻抗转换器的探针测试空气, 结果如图 10~12。易见通过阻抗匹配优化, 电磁波沿探针传输的反射次数增多, 衰减幅度减少, 测试信号质量得到很大提高。

4.2 $30\ \Omega$ 阻抗转换器测试土样结果及分析

不同含水率的砂土、红壤土、黑土的体积含水率试验结果如图 13~15 所示。可见, 新型 TDR 测得的体积含水率与烘干法结果非常接近, 测试绝对误差控

制在 2% 以内, 验证了本文传感器的测试精度。

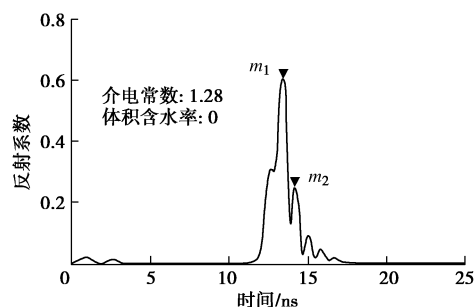


图 10 未经阻抗转换优化的探针测试空气结果

Fig. 10 Results of measuring air by probe without impedance conversion optimization

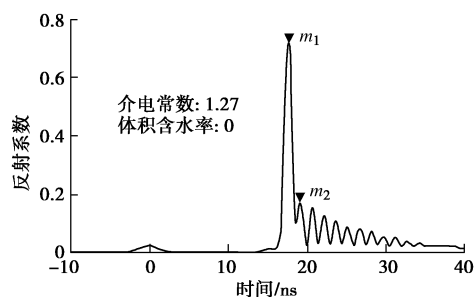


图 11 $20\ \Omega$ 阻抗转换器探针测试空气结果

Fig. 11 Results of measuring air by probe with $20\ \Omega$ impedance conversion optimization

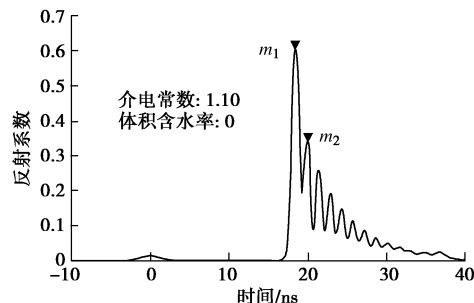


图 12 $30\ \Omega$ 阻抗转换器探针测试空气结果

Fig. 12 Results of measuring air by probe with $30\ \Omega$ impedance conversion optimization

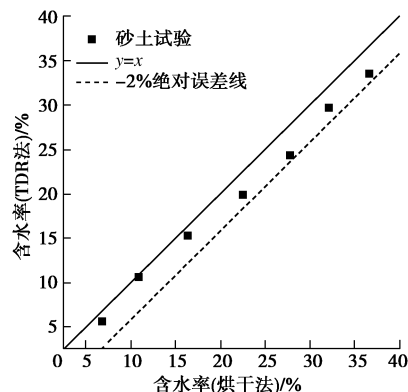


图 13 烘干法与新型 TDR 法测试砂土体积含水率误差

Fig. 13 Errors of testing results of volumetric water content of

sand by oven drying method vs. TDR method

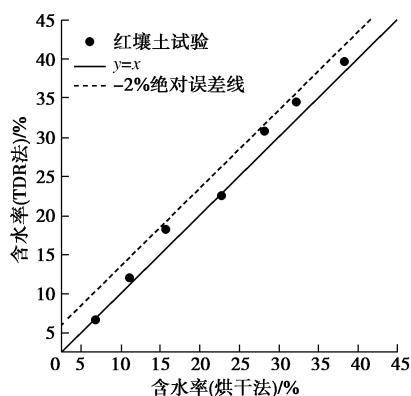


图 14 烘干法与新型 TDR 法测试红壤土体积含水率误差

Fig. 14 Errors of testing results of volume water content of red soil

by oven drying method vs. TDR method

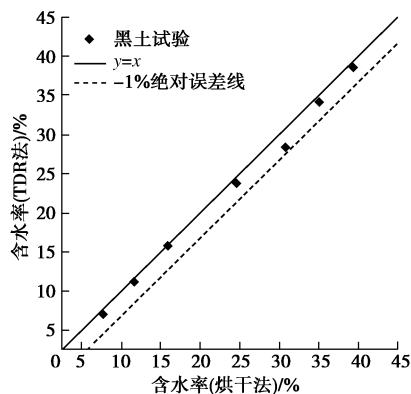


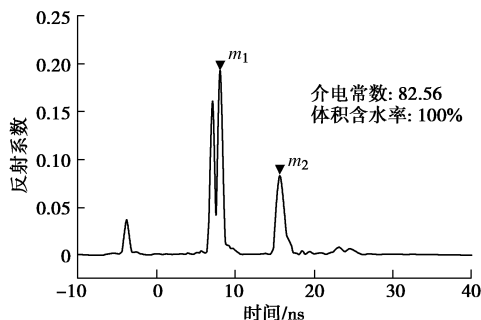
图 15 烘干法与新型 TDR 法测试黑土体积含水率误差

Fig. 15 Errors of testing results of volume water content of black

soil by oven drying method vs. TDR method

4.3 30 Ω 阻抗转换器测试水结果及分析

在去离子水中用 30 Ω 阻抗转换器进行测试, 结果如图 16 所示。测得水的介电常数为 81.56, 接近理论值 80, 误差也低于 2%, 测得体积含水率为 100%, 与实际完全相同。由图可见, 电磁波在水中传播时间即 m_1 至 m_2 时间明显增大, 同时 m_1 的波峰分开。这是由于自然界中水的介电常数很大, 根据式 (2) 电磁波的传播速度受介质的介电常数影响, 故而水中电磁波的传播速度相比其他介质较低, 相同长度探针传播时间

图 16 30 Ω 阻抗转换器探针测试水的结果Fig. 16 Results of measuring air by probe with 30 Ω impedance

conversion optimization

增加。同时, 由于传播速度降低, 阻抗转换器前后端的峰可以分离, 此时电磁波信号在阻抗转换器内发生多次反射。试验结果很好地反映介电常数对电磁波传输的影响, 验证了本文传感器在工程应用中的准确性与可靠性。

4.4 不同温度去离子水介电常数测试结果及分析

在 8 组不同温度的去离子水中进行加热试验, 用 Soiltop-200 和 TDR100 测试结果以及根据标定公式计算所得结果如图 17, 18 所示。

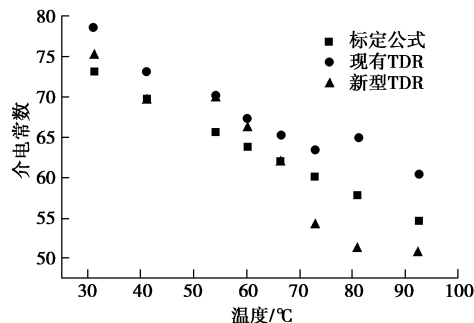


图 17 去离子水的介电常数与温度的关系图

Fig. 17 Relation between temperature and dielectric constant of

deionized water

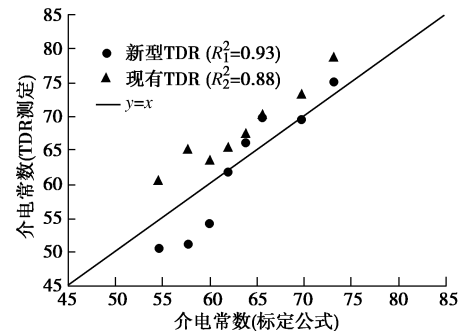


图 18 TDR 测定与标定公式计算所得介电常数关系图

Fig. 18 Relation between dielectric constants obtained by TDR measurement and calibration formula

由图 17 可见, 在 30°C~65°C 范围内, 现有 TDR 和新型 TDR 测得结果与标定公式所得介电常数具有一致性, 去离子水的介电常数的温度系数为负, 故随着温度升高, 介电常数降低, 但 65°C~95°C 范围内仪器的测试值与理论值出现偏差, 是由于高温下去离子水的分子获得较大能量, 水分子在高频交流电磁场中依靠部分热能发生转向极化形成偶极子, 故无法较为真实地获得高温下去离子水的介电常数。由图 18, 新型 TDR 测得的介电常数与理论值的相关系数 $R_1^2=0.93$, 现有 TDR 测得的介电常数与理论值的相关系数 $R_2^2=0.88$, 可见新型 TDR 测试介质的介电常数精确度更高, 与理论值更吻合。

4.5 不同质量分数的氯化钠溶液介电常数测试分析

在 13 组不同浓度氯化钠溶液中, 分别用测定仪

Soiltop-200、TRIME-TDR、Minitrase 测得溶液介电常数结果以及根据标定公式计算所得结果如图 19 所示。利用 Soiltop-200 测定 3.5‰ 氯化钠溶液的结果如图 20、21 所示。

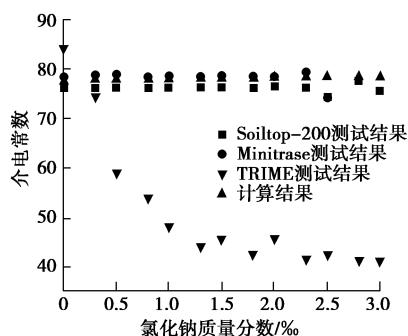


图 19 TDR 测定不同浓度氯化钠溶液介电常数结果

Fig. 19 Results of dielectric constant of sodium chloride solution at different concentrations by TDR

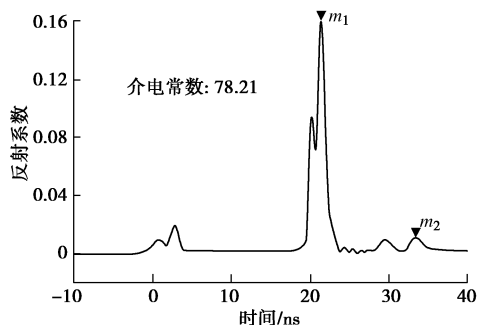


图 20 新型 TDR 测定 3‰ 氯化钠溶液介电常数的结果

Fig. 20 Results of dielectric constant of 3‰ sodium chloride solution by new TDR

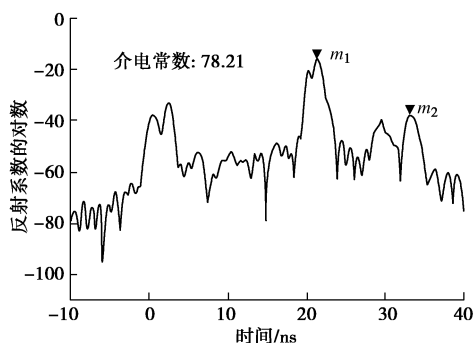


图 21 新型 TDR 测定 3‰ 氯化钠溶液介电常数的对数结果

Fig. 21 Logarithmic results of dielectric constant of 3‰ sodium chloride solution by new TDR

由图 19 可见 TRIME-TDR 测试结果与理论值相差较大, 随着氯化钠含量的增加而急剧下跌, 溶液的电导率对其测量结果影响较大。氯化钠质量分数在 0~2.3‰ 时, Soiltop-200、Minitrase 测得介电常数与计算结果吻合, 稳定为 78 左右。当氯化钠质量分数大于 2.3‰ 时, Minitrase 测试结果出现衰减, 甚至失效, 而 Soiltop-200 在较高浓度的氯化钠溶液中仍与计算的理

论结果保持一致。可以看出, 在含盐量较高的介质中, Soiltop-200 测试的介电常数仍可保持稳定, 从而根据式 (6) 即可获得精准的体积含水率。

和其他土壤水分测定仪相似的是, 高电导率下 Soiltop-200 的线性幅度格式的探针末端峰值无法显示。不同的是, 如图 20 所示, 调低 Soiltop-200 扫频范围至 1 MHz~1.5 GHz, 可找到初略时间点, 再调高扫频范围, 即 1 MHz~1.8 GHz, 用对数模式即可精准找出探针末端反射点, 如图 21 所示。

5 结 论

本文介绍了基于频率步进原理和向量接收技术研制的新型 TDR 技术, 并通过试验对测试技术进行了验证。通过本文研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 新型 TDR 技术相比现有 TDR, 采用频域频率步进体制, 避免了高速延迟线技术, 实现国产。其自选频率范围内水的介电常数实部相对稳定, 并采用线性幅度格式放大微弱信号, 且使得新型 TDR 技术测量精度及分辨率更高。

(2) 本文开发了一种优化阻抗转换器, 经过阻抗理论分析, 确定输入阻抗为 30 Ω 的阻抗转换器在保证绝大部分能量可传输至探针的基础上, 避免了工程实际应用中出现的测试盲点。

(3) 在空气、水试验组中, 新型 TDR 的介电常数与体积含水率测试结果与理论值基本吻合。去离子水加热实验中, 新型 TDR 相比 TDR100 在不同温度下测得去离子水的介电常数更接近理论值, 精度更高。不同浓度氯化钠溶液介电常数测试结果显示, 新型 TDR 相比 TRIME-TDR 和 Minitrase, 在高电导率介质中测试介电常数更加稳定, 更接近理论值。土壤试验中与烘干法对比结果显示, 新型 TDR 误差控制在 2% 内。

参考文献:

- [1] ROHRIG J. Location of faulty places by measuring with cathode ray oscillographs[J]. Elektrotech Z, 1931, 8(2): 241 - 242.
- [2] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: application of TDR to field measurements[C]// Planetary Water, Proceedings of the third Colloquium. New York, 1980.
- [3] TOPP G C, DAVIS J L. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574 - 582.
- [4] TOPP G C, DAVIS J L. Electromagnetic determination of soil

- water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. *Water Resources Research*, 1980, **16**: 574 – 582.
- [5] HEIMOVAARA T J. Comments on time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 1657 – 1658.
- [6] 陈仁朋, 许 伟, 汤旅军, 等. 地下水位及电导率 TDR 测试探头研制与应用[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(1): 77 – 82. (CHEN Ren-peng, XU Wei, TANG Lü-jun, et al. Development and application of TDR probes to monitor water level and electrical conductivity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(1): 77 – 82. (in Chinese))
- [7] 谭捍华, 傅鹤林. TDR 技术在公路边坡监测中的应用试验 [J]. *岩土力学*, 2010, **31**(4): 1331 – 1336. (TAN Han-hua, FU He-lin. Testing study of application of time domain reflectometry to highway slope monitoring[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(4): 1331 – 1336. (in Chinese))
- [8] 王 华. 步进频率连续波探地雷达信号源设计与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. (WANG Hua. Design and implementation of a frequency synthesizer for SFCW ground penetrating radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese))
- [9] 方广有, 佐藤源之. 频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用[J]. *电子学报*, 2005, **33**(3): 436 – 439. (FANG Guang-you, SATO M. Stepped-frequency ground penetrating radar and its application for landmine detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(3): 436 – 439. (in Chinese))
- [10] 陆 明, 刘惠斌, 王晨光, 等. 新型 TDR 土壤水分测定仪 SOILTOP-200 的开发及应用[J]. *水利信息化*, 2017(2): 31 – 37. (LU Ming, LIU Hui-bin, WANG Chen-guang, et al. Development and application of the new TDR soil moisture meter soiltop-200. *Water Resources Informatization*, 2017(2): 31 – 37. (in Chinese))
- [11] DEBYE P. *Polar molecules*[M]. New York: Chemical Catalog Company, 1929.
- [12] SANTAMARINA J C, KLEIN A, FAM M A. Soils and waves: particulate materials behavior, characterization and process monitoring[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2001, **1**(2): 130 – 130.
- [13] 张 鹏. 主要因素对土壤介电特性的影响分析研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2013. (ZHANG Peng. Analysis to effects of main factors on dielectric properties of soils[D]. Xi'an: Northwest Agricultural and Forestry University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] TOPP G C, YANUKA M, ZEBCHUK W D. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. *Water Resources Research*, 1988, **24**(7): 945 – 952.
- [15] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, **16**(3): 574 – 582.
- [16] CHEN Y, WANG H, CHEN R, et al. A newly designed TDR probe for soils with high electrical conductivities[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, **37**(1): 20120227.
- [17] WANG H, CHEN R, QI S, et al. Long-term performance of pile-supported ballastless track-bed at various water levels[J]. *Geotech Geoenviron Eng*, 2018, **144**(6): 04018035.
- [18] 陈 赞, 陈 伟, 陈仁朋, 等. TDR 联合监测土体含水率和干密度的传感器的设计及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(2): 418 – 426. (CHEN Yun, CHEN Wei, CHEN Ren-peng, et al. Design of TDR sensor for joint measurement of soil water content and dry density and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(2): 418 – 426. (in Chinese))
- [19] KRAUS D K. *Electromagnetics*[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1984.
- [20] 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): 2367 – 2376.
- [21] YANUKA M G, TOPP C C, ZEGELIN S, et al. Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: theoretical considerations for applications to soil and water[J]. *Water Resour Res*, 1988, **24**: 939 – 944.
- [22] 许 伟. TDR 表面反射法土体含水率测试理论及技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (XU Wei. Theory and technology for measurement soil water content by time domain reflectometry surface reflection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [23] ASTM D4959. Standard test method for determination of water content of soil by direct heating[S]. 2000.
- [24] 王进学. 离子污染饱和和无黏性土电导率特性及 TDR 测试技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (WANG Jin-xue. Electrical conductivities of ionic contaminated saturated sandy soils and TDR measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))