

# 地下水位及电导率 TDR 测试探头研制与应用

陈仁朋, 许伟, 汤旅军, 陈云敏

(1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 介绍了一种自制的地下水位及电导率测试探头, 利用 TDR 原理实现了地下水位及其电导率的自动监测方法。在苏州七子山卫生填埋场滤液面高度的测试应用表明: 利用 TDR 测试探头能够很好地反应水位的变化, 与传统的水位仪测试相比, 具有快捷、经济、即时的优势, 而且在高腐蚀和高温环境中也能长时间正常工作, 有着较好的工程应用前景。  
**关键词:** 时域反射法 (TDR); 水位监测; 电导率

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)01-0077-06

**作者简介:** 陈仁朋(1972-), 男, 浙江衢州人, 博士, 教授, 主要从事软黏土工程学、基础工程及环境岩土工程教学和科研工作。E-mail: chenrp@zju.edu.cn。

## Development and application of TDR probes to monitor water level and electrical conductivity

CHEN Ren-peng, XU Wei, TANG Lu-jun, CHEN Yun-min

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Hangzhou 310027, China; 2. Geotechnical Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A specialized TDR probe for simultaneous measurement of water level and bulk electrical conductivity is developed, calibrated and field-tested. The probe can be used to continuously monitor water level and give the alarm. The obtained waveform is automatically analyzed by computers with the water level being a simple function of the wave velocity and travel time. The electrical conductivity of the sample is measured by the calibration procedure in the lab. The application of this TDR method is demonstrated in a field test on a municipal waste landfill. Water level measurements obtained with this TDR technique show close agreement with those obtained using the visual procedures. Moreover, it is also shown that the probe can be used in highly caustic and high temperature environment.

**Key words:** TDR; water level monitoring; conductivity

## 0 引言

地下水位的即时监测在岩土工程中有着重要意义, 工程上常通过水位监测来评估基坑或边坡的稳定性。卫生填埋场渗滤液面的高度往往是影响边坡稳定的一个重要参数, 而渗滤液的液面上方会产生大量气泡, 用水位仪很难准确测定其液面高度, 高温度和高腐蚀性的环境还会加快仪器的损耗, 难以实现长时间的自动化监测。地下水电导率也是反映地下水是否被污染的重要指标, 基于 TDR (Time domain reflectometry) 原理的地下水位及其电导率的测试将给地下水位的监测提供一种新的思路。利用本文的自制 TDR 探头能在高腐蚀和高温环境下对地下水位及其电导率同时进行监测。

TDR 是一种基于时域反射原理的远程遥感测试技术, 它最初被用来定位通讯电缆的缺陷<sup>[1]</sup>, 最近常用来测试土壤的介电常数、含水率<sup>[2-3]</sup>及山体的滑坡监测<sup>[4]</sup>。根据 TDR 测试技术的原理和长期实践, 相关学者发现

可利用 TDR 反射信号来确定液位面的位置<sup>[5-7]</sup>。Thomsen 等<sup>[8]</sup>设计了一种双针式探头, 它通过收集表面径流来测量土壤表面水位面, 但此种探头并不适于监测地下水位面。Moret 等<sup>[9]</sup>利用自制三针探头测试水库的水位面, 但需要利用 TDR 探头先测出空气与水的介电常数, 这对于现场多点监测并不适用, 因为两者的介电常数在长传输线情况下很难精确测定。本文中, 笔者利用室内标定的方法, 成功的消除了传输线电阻损耗对测试结果的影响, 能够精确的测定水位面的变化, 而且能够同时对水体的电导率进行同步监测。

## 1 理论背景

### 1.1 水位测试

TDR 测试技术的原理就如一个雷达, 与雷达中传

基金项目: 国家自然科学基金项目 (5042825, 50538080)

收稿日期: 2007-10-09

输的三维波不同的是, 电磁波在 TDR 系统中是被限制在波导中传播的。TDR 测试系统见图 1, 包括信号发生器、采样器、同轴电缆和测量波导(探头)。信号发生器发送一个电磁波脉冲沿着传输线传播, 采样器用来记录由于测量波导中阻抗不匹配处产生的反射信号。

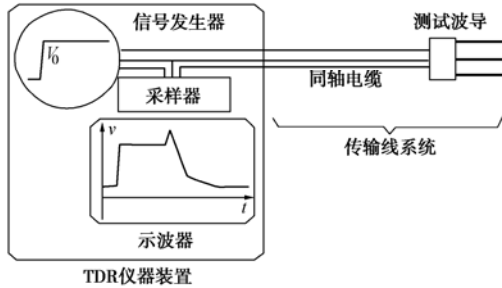


图 1 TDR 测试系统<sup>[10]</sup>

Fig. 1 TDR measurement system

TDR 测试仪器发射的电磁波在传输线中的传播符合麦克斯韦方程, 波动信号的相速率

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速 ( $2.998 \times 10^8$  m/s),  $\epsilon_r$  是绝缘材料的相对介电常数。波导的特征阻抗  $Z_p$  与导体截面的几何参数和导体间电介质的介电常数有关, 对于同轴电缆来说, 它的特征阻抗

$$Z_p = \frac{\ln(\frac{b}{a})}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中,  $a$  为内导体的外直径,  $b$  为外导体的内直径,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数 ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $\mu_0$  为真空中的磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)。如果沿着传输线阻抗发生改变, 一部分电磁波会发生反射并被 TDR 仪器所记录。定义阻抗不匹配处的电压反射系数

$$\rho = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (3)$$

式中,  $Z_t$  为截面右侧的阻抗,  $Z_0$  为截面左侧的阻抗。记截面处入射电压为  $V_i$ , 反射电压为  $V_r$ , 则

$$V_r = \rho V_i \quad (4)$$

如果阻抗匹配 ( $Z_t = Z_0$ ),  $\rho = 0$ , 则没有反射发生; 如果  $Z_t$  大于  $Z_0$ ,  $\rho > 0$ , 可以观察到正反射; 如果  $Z_t$  小于  $Z_0$ ,  $\rho < 0$ , 可以观察到负反射。阻抗不匹配的位置则可以由波的传播速率和返回时间  $T_r$  确定:

$$x = v \frac{T_r}{2} \quad (5)$$

电磁波沿着波导向测试介质传播, 当探头周围的介质发生改变时, 介质介电常数的变化引起了探头阻抗的变化, 电磁波脉冲在交界面处发生反射, 对反射波进行行程时间分析可以确定阻抗不匹配的位置。这些阻抗不匹配位置常常是介质的交界面, 根据这个原

理设计不同的探头可以测得地下水水位面(空气-水交界面)<sup>[5-6]</sup>, 土层冲刷深度(土壤-水交界面)<sup>[7]</sup>。当利用 TDR 探头测试地下水水位时, 沿着探头空气与水交界面处会发生明显的反射。通过式(5)确定反射面的位置, 从而监测地下水水位变化。

## 1.2 水体电导率测试

Topp 等<sup>[3]</sup>提出了 Giese-Tiemann (G-T) 法来计算测试液体的电导率:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 c Z_g}{d} \frac{1 - \rho_\infty}{Z_0 (1 + \rho_\infty)} \quad (6)$$

式中,  $Z_0$  为同轴电缆的特征阻抗 ( $50 \Omega$ ),  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $Z_g$  探头间介质为空气时的探头的特征阻抗,  $\rho_\infty$  是 TDR 波形中无穷远处的电压反射系数,  $d$  为探头浸入测试液体的长度。

由基本的电路理论可知, 传输线可以看作一个等效电路模型。特别是在零频率条件下, 探头测试段可以看作一个终端电阻:

$$R = \frac{\epsilon_0 c Z_g}{d} \frac{1}{\sigma} \quad (7)$$

Heimovaara 等<sup>[12]</sup>指出测试电导率的等效电路如图 2 所示, 其等效电路模型包括源头电压  $v_s$ 、内阻  $R_s$  (即等于源头阻抗  $Z_s$ , 本文中为  $50 \Omega$ )、传输线电阻  $R_{cable}$  (包括 TDR 发射器、同轴电缆, 探头环氧树脂段连接处、以及探头的电阻损耗)、试样电阻  $R$ 。

无穷远处稳定电压由电路理论可知<sup>[13]</sup>:

$$v_\infty = \frac{R + R_{cable}}{R + R_{cable} + R_s} v_s \quad (8)$$

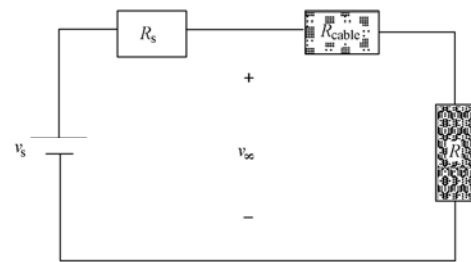


图 2 TDR 测试电导率等效直流电路图

Fig. 2 Electrical model for measuring EC

将式(7)代入式(8), 其中  $\rho_\infty = (v_\infty - v_0)/v_0$ ,  $v_0$  为阶跃电压,  $v_0 = 2v_s$ 。我们可以得到考虑电阻损耗及探头测试段长度变化的试样电导率:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\epsilon_0 c Z_g}{R_s} \frac{1}{d} \left( \frac{1 - \rho_\infty}{1 + \rho_\infty} \right) \left[ \frac{1}{1 - \left( \frac{R_{cable}}{R_s} \frac{1 - \rho_\infty}{1 + \rho_\infty} \right)} \right] \\ &= M \frac{1}{d} \left( \frac{1 - \rho_\infty}{1 + \rho_\infty} \right) k(R_{cable}, \rho_\infty) \quad (9) \end{aligned}$$

式中,  $M$  为探头常数 ( $= \epsilon_0 c Z_g / R_s$ ),  $k$  为传输线电阻修正系数。探头测试段长度  $d$  可以利用式 (5) 得到,  $R_{cable}$  为传输线电阻与传统的 G-T 法相比, 它考虑了传输线电阻损耗  $R_{cable}$  与探头测试段长度  $d$  变化的影响。 $M, R_{cable}$  由本文随后的室内标定实验得到, 那么我们可以利用式 (9) 测试电导率。

## 2 探头的设计和现场水位监测方法

自制地下水位的测试探头如图 3 所示。探头长 97 cm, 外导体采用钢管, 内直径为 3 cm; 内导体是高强度钢丝, 直径为 0.2 cm; 探头底部和顶部 10 cm 范围内分别有 4 个和 2 个直径为 1 cm 的小孔, 使测试液体能够顺利进入探头内部。探头顶部和同轴电缆相连处用环氧树脂浇注, 底部用有机玻璃和螺栓固定住高强度钢丝, 使它处于拉直状态。导体空气段和测试段的特征阻抗  $Z_p$  和  $Z_c$  分别由式 (2) 算得为 162  $\Omega$  和 18  $\Omega$ , 与探头连接的是 10 m 长的 RG-58 型号的同轴电缆, 特征阻抗  $Z_0=50 \Omega$ 。

图 3 中是现场水位测试示意图,  $L_0$  为洞口到探头顶端的高度, 可以通过同轴电缆上的刻度读出,  $d_k$  为探头空气段长度,  $\Delta L$  是指水位面的变化高度。水位高度  $L=L_0+d_k$ ,  $d_k$  则需要通过分析 TDR 波形求出。

当探头浸没在测试液体中时, TDR 仪器发射一个电磁波脉冲沿着波导传播时, 会在两个位置出现明显的阻抗不匹配现象引起反射。在同轴电缆和环氧树脂连接处也会发生阻抗不匹配现象, 但由于环氧树脂段很短, 电磁波在这里的反射并不明显, 本文后面将通过标定的方法消除这一段的影响, 且假定环氧树脂段特征阻抗与探头空气段特征阻抗相同, 都为  $Z_p$ 。在同轴电缆与探头顶部空气段交界面 (图 3, 4 中 A 点), 由于  $Z_p$  (环氧树脂中特征阻抗)  $> Z_0$  (同轴电缆特征

阻抗) 将出现正反射; 在探头间介质空气与水交界面处 (图 3, 4 中 B 点),  $Z_c > Z_p$ , 出现负反射。探头在水中的典型波形如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 当地下水位变化时, 探头的空气段长度发生变化, 在 TDR 波形中代表着 A、B 点的时间间隔变化, 而在水位变化时, A 点代表着同轴电缆和探头连接处基本上是不变的, 则 TDR 波形图中 B 点的变化  $\Delta T$  代表着水位的变化  $\Delta d_k$ 。而确定该时间间隔  $\Delta T$  的方法有参考线法和切线法等<sup>[10, 14-15]</sup>。

参考线法是作一条水平的直线在阻抗不匹配点附近与波形相交与两点, 这两点之间的时间间隔为  $\Delta T$ , 切线法则是通过 TDR 波形中峰值点的变化来确定时间间隔, 如图 4 (a) 所示。切线法对于信号噪音很敏感, 特别考虑到现场可能存在的电磁干扰和长距离导线带来的信号的弥散性, 在数值分析时很难找到精确的反射点。Lin<sup>[13]</sup>认为对于地下水位监测, 参考线法相比切线法有更好的精确度和数值稳定性, 但是对于不同长度的导线, 很难固定参考线的位置来保证测试结果的精度, 而且根据现场测试结果, 当测试液体温度较高的时, 所作的参考线可能和波形没有交点。

考虑到以上两种方法的局限性。本文将按照 Svitzky 等<sup>[16]</sup>的方法对波形求一次导数再按切线法进行分析, 如图 4 (b) 所示。

求导之后的波形曲线在探头测试区域有两个明显的峰值点, 第一个向上峰值点可以代表第一个阻抗不匹配的位置 (图 3, 4 中的 A 点), 即同轴电缆与探头交接处; 第二个向下峰值点代表第二个阻抗不匹配位置 (图 3, 4 中的 B 点), 这样就可以得到所求的间隔时间  $T_{AB}$ , 为电磁波在环氧树脂和空气段传播的时间, 那么空气段传播时间

$$\Delta t_k = T_{AB} - \Delta t_h, \quad (10)$$

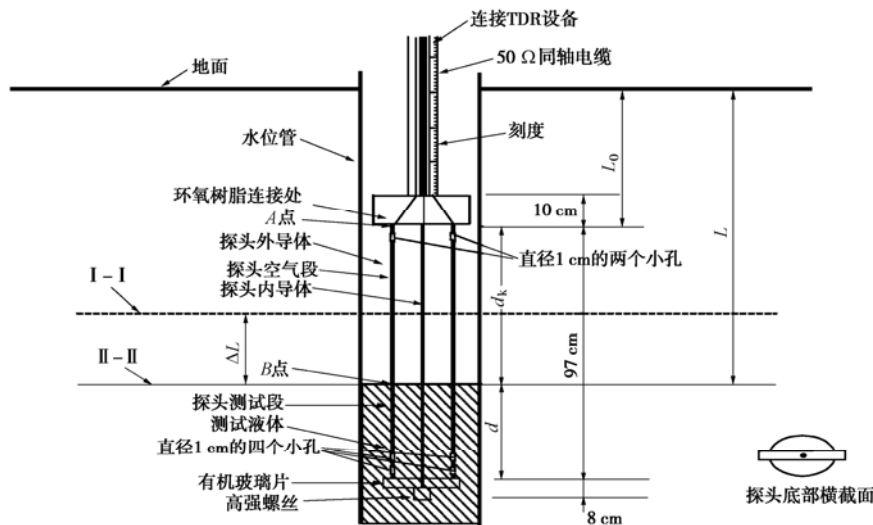


图 3 自制 TDR 水位监测探头以及现场测试地下水位示意图

Fig. 3 Sketch of probe for water level measurement and field tests

探头在环氧树脂段传播时间可以由标定得出, 对于本文中 TDR 探头,  $\Delta t_h = 1.238 \text{ ns}$ 。

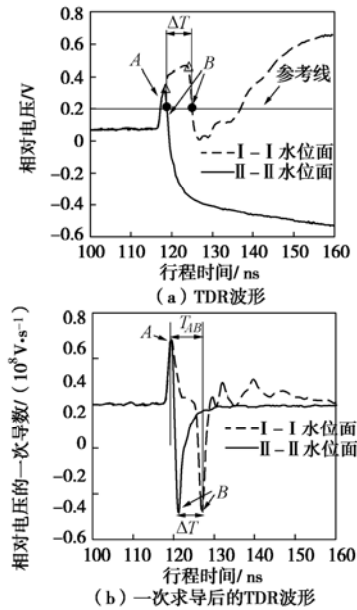


图 4 当探头空气段长度变化时在水中的典型波形

Fig. 4 Typical TDR waveforms when length of air section in probe is changed

将式 (10) 代入式 (5) 中得

$$d_k = \frac{c}{2} \Delta t_k = s(T_{AB} - \Delta t_h) \quad (11)$$

式中,  $s = c/2$  是变换系数,  $c$  为电磁波在真空中的传播速度。

### 3 室内标定试验和波形分析

#### 3.1 水位测试标定试验

本文使用的试验设备是美国 Campbell Scientific 公司生产的 TDR100, 它的最小采样时间为  $\Delta t = 12.2 \times 10^{-12} \text{ s}$ , 同轴电缆的长度为 10 m, 其特征阻抗为  $Z_0 = 50 \Omega$ ; 采用自制的地下水位监测探头, 长 97 cm。

先在玻璃容器中装满自来水高 1.2 m, 采用电导率测试仪测得其电导率为 21 ms/m。然后将探头垂直于液面, 改变探头测试段长度每隔 5 cm 慢慢浸入水中, 分别记录下对应的波形。

图 5 是对自制探头测试段每改变 5 cm 进行标定后得到的曲线以及求导一次后的曲线, 设置采样时间  $\Delta t = 1.3 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。

从图 5 中可以看到, 求导一次后的曲线有明显的峰值点, 图中的 B 点即为空气-水交界面。B 点的变化即代表水位面的变化, 由式 (7) 我们可以得到探头空气段长度  $d_k$ 。

由于实际监测地下水的复杂性 (温度、浓度的变化) 导致地下水的电导率会有变化, 所以分别在自来

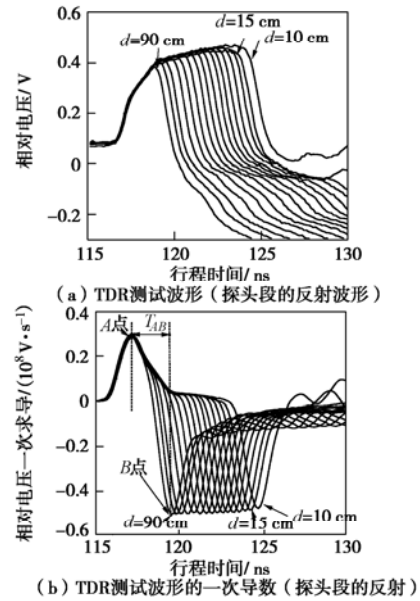


图 5 室内标定实测不同空气段长度 TDR 波形和求导一次后的波形

Fig. 5 Calibration waveforms for leachate level measurement

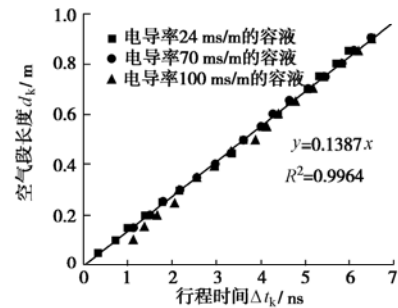


图 6 TDR 探头分别在不同电导率溶液中的标定曲线图

Fig. 6 Calibration of TDR probe in solutions with EC of 24, 70, 100 ms/m

水 (电导率 24 ms/m) 0.01 molCuSO<sub>4</sub> 溶液 (电导率 71 ms/m) 和 0.02 molCuSO<sub>4</sub> (电导率 100 ms/m) 溶液作室内标定试验, 在图 6 中可以看到  $\Delta t_k$  与  $d_k$  仍然有着良好的线性关系, 而且斜率  $s$  变化很小, 为 0.1387 m/ns, 与  $c/2$  很接近。在式 (11) 中也可以看到, 斜率  $s$  只与探头在空气中传播的速度  $c$  有关, 与电导率和温度无关。那么在高温和高腐蚀环境下仍能通过此标定曲线测试水位高度。实际测量中, 那么我们可以根据电磁波在空气段的传播时间  $\Delta t_k$  确定空气段长度。那么可以通过 TDR 波形上  $T_{AB}$  变化来得知地下水水位高度的变化,

$$L = L_0 + d_k = L_0 + s(T_{AB} - \Delta t_h) \quad (12)$$

式中  $L_0$  为地下水位面到地面高度;  $L_1$  为探头顶部到地面的高度;  $s$  为变换系数,  $T_{AB}$  为实测波形与参照波形空气-水交界面处在 TDR 波形图上的相隔时间;  $\Delta t_h$  为电磁波在环氧树脂段传播时间。其中  $s$ ,  $\Delta t_h$  都是室内标定得到的, 对于本文中探头分别取 0.1387

m/ns 和 1.258 ns。那么就可以利用式 (12) 求得地下水位面高度。

### 3.2 电导率测试标定试验

Reece<sup>[17]</sup>建议可以通过一个已知的试样电阻  $R$  来标定传输线电阻  $R_{\text{cable}}$ ，特别的当利用一根导线将探头短路时，试样电阻  $R = 0$ ，由式 (8) 可知传输线电阻：

$$R_{\text{cable}} = \frac{R_s}{\left( \frac{1 - \rho_{\infty, \text{sc}}}{1 + \rho_{\infty, \text{sc}}} \right)}, \quad (13)$$

式中， $\rho_{\infty, \text{sc}}$  为将探头短路后无穷远处相对电压。传输线电阻  $R_{\text{cable}}$  知道后，由式 (9) 可知我们可以通过电导率  $\sigma$  已知的溶液来标定探头常数  $M$ 。由于电导率和水位高度是在不断变化的，所以我们要对不同电导率不同水位高度的情况都进行标定，标定方法如下：保持室温为 25℃，设置采样时间  $\Delta t = 3.2 \times 10^{-10}$  s，先将探头末端内外导体用细铜丝连接，用 TDR 测试其短路时波形；在玻璃容器中配置一定浓度的  $\text{CaCl}_2$  溶液，将探头垂直侵入测试液体中，改变探头测试段长度  $d$ ，使其每次增加 5 cm 用 TDR 仪器测得波形。然后利用电导率测试仪测得  $\text{CaCl}_2$  溶液的电导率  $\sigma_{\text{true}}$ 。对于某一电导率溶液，当  $d$  变化时，测试波形如图 7 所示，然后改变溶液电导率，重复上述步骤。

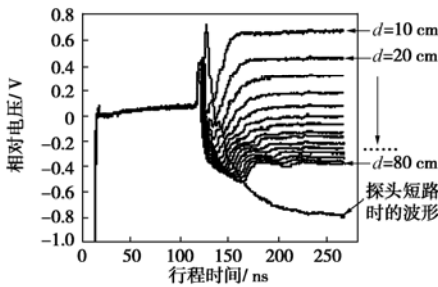


图 7 探头测试段长度变化时 TDR 波形图

Fig. 7 Waveforms when length of test section is changed

标定试验得到  $R_{\text{cable}} = 5.65 \Omega$ ， $M = 6.4165$  ms。利用这两个参数我们用 TDR 方法测得电导率与电导率测试仪测试结果比较如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，利用标定得到的  $R_{\text{cable}}$ ， $M$  值测得的电导率与真实值很接近，误差在 5% 以内，用地下水探头测试电导率具有很好的精度。

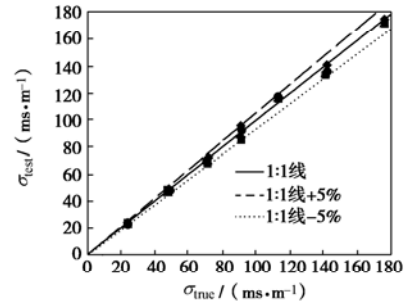


图 8 TDR 测试电导率与真实电导率比较图

Fig. 8 Comparison between EC measured by TDR and true values

## 4 填埋场滤液面现场测试

七子山位于苏州市木渎镇，苏州市政府在七子山的山坳里建有大型的卫生填埋场。填埋场在运营中需要对它的填埋边坡稳定、垃圾滤液渗漏等情况进行监测。TDR 在滤液的监测方面具有独特的优势，可以实现滤液面的长时间、动态的监测。填埋场滤液面监测的过程如图 3 所示。为了增加测试的精度，采样时间设为  $\Delta t = 1.95 \times 10^{-11}$  s。水位高度计算过程见表 1。

从图 9 中可以看出，现场测试时用 TDR 探头测试水位，测试结果的水位高度比水位计测试的水位高度略高，这是渗滤液上方有大量可以导电的气泡，使得接电式水位仪测试结果偏大，利用 TDR 探头监测水位能够很好的反映水位的变化，两种方法测试水位相对高度变化值基本相等。

表 1 水位高度计算表

Table 1 Measured and computed water levels

测试点	电磁波在空气段传播时间 $\Delta t_i$ /ns	探头空气段长度 $d_k$ /m	探头顶部到地面距离 $L_i$ /m	水位高度 $L_0$ /m	
监测孔 1	1	5.800	0.63	8.0	8.63
	2	5.367	0.57	8.0	8.57
	3	5.079	0.53	8.0	8.53
	4	6.160	0.68	7.5	8.18
	5	5.944	0.65	7.5	8.15
	6	5.583	0.60	7.5	8.10
	7	5.295	0.56	7.5	8.04
监测孔 2	1	3.709	0.34	5.5	5.84
	2	4.358	0.43	5.5	5.93
	3	3.997	0.38	5.5	5.88
	4	6.881	0.75	5.0	5.78
	5	6.593	0.74	5.0	5.74
	6	5.151	0.54	5.0	5.54
	7	4.862	0.50	5.0	5.50

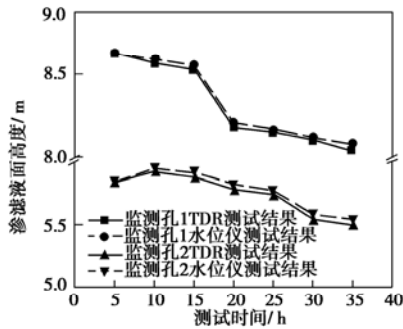


图9 TDR 与水位计测试结果对比图

Fig. 9 Comparison of leachate levels tested by TDR and water gauge

## 5 结 语

TDR 因其快捷、方便、实时的优点常常被用作现场监测地下水位、土体含水率及电导率、滑坡变形等。本文开发了一种 TDR 探头来监测地下水位及电导率。利用行程时间分析得到探头空气段长度,从而得到水位高度。水位测试室内标定实验结果表明,标定曲线的斜率只与电磁波在探头空气段传播的速度有关,与传输线长度,探头长度,以及测试液体的电导率、温度等都没有关系。那么可以利用室内标定曲线得到现场的水位高度。地下水位探头还能同时对水体的电导率进行监测。本文对传统电导率测试方法作了改进,考虑了传输线电阻损耗和水位变化引起探头测试段长度  $d$  变化的影响,利用探头常数  $M$  和  $R_{cable}$  得到的电导率 TDR 测试值与真实值很接近,误差在  $\pm 5\%$  以内。苏州七子山的渗滤液水位监测结果也表明了利用 TDR 水位探头能够准确的反映液面变化情况。

### 参考文献:

[1] BRIGGS L J. Electrical instruments for determining the moisture, temperature, and soluble salts content of soils[M]. USDA Div. Soils Bull. 10, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 1899.

[2] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1980, **16**: 574 - 582.

[3] TOPP G C, ZASOVENKO V, ZEGELIN S J. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resources Research, 1988, **24**: 945 - 952.

[4] DOWDING C H, SU M B, O'CONNOR K M. Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation[J]. International Journal of Rock

Mechanics and Mining Science, 1988, **25**: 287 - 297.

- [5] ROSS G F. Apparatus and method for measuring the level of contained liquid[M]. U.S. Patent No. 3,832,900. 1974.
- [6] DOWDING C H, HUANG F H, MCCOMB P S. Water pressure measurement with time domain reflectometry[J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, **19**: 58 - 64.
- [7] YANKIELUN N E, ZABILANSKY L. Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, **125**: 1279 - 1283.
- [8] THOMSEN A, HANSEN B, SCHELDE K. Application of TDR to water level measurement[J]. Journal of Hydrology, 2000, **236**: 252 - 258.
- [9] MORET D, LOPEZ M V, ARRUE J L. TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrimeters[J]. Journal of Hydrology, 2004, **297**: 229 - 235.
- [10] LIN P C, TANG S H. Development and calibration of a tdr extensometer for geotechnical monitoring[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(5): 2188.
- [11] 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.
- [12] HEIMOVAARA T J, FOCKE A G, BOUTEN W, VERSTRATEN J M. Assessing temporal variation in soil water composition with time domain reflectometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, **59**: 689 - 698.
- [13] LIN P C. Analysis of non-uniform and dispersive time domain reflectometry measurement systems with application to dielectric spectroscopy of soils[J]. Water Resources Research, 2003, **39**(1): 1012.
- [14] TIMLIN D J, PACHEPSKY Y A. Comparison of three methods to obtain the apparent dielectric constant from time domain reflectometry wave traces[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**: 970 - 977.
- [15] KLEMUNES J A, MATHEW W W, LOPEZ A. Analysis of methods used in time domain reflectometry response[J]. Transportation Research Record, 1997(1548): 89 - 96.
- [16] SVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, **36**(8): 1627 - 1639.
- [17] REECE C F. Simple method for determining cable length resistance in time domain reflectometry systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**: 314 - 317.