

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.03.08

# 频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究

董翰川<sup>1,2</sup>, 庞丽丽<sup>1,2</sup>, 史云<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051;

2. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 河北保定 071051)

**摘要:** 对滑坡体土壤含水率进行长期和连续的监测, 有利于对滑坡体的变形分析和安全预警。为了提高频域反射分析法(FDR法)测量土壤含水率的精度, 通过室内标定和现场标定相结合的方式, 对使用FDR法测定野外现场滑坡土壤含水率进行了标定。通过对比分析FDR法和烘干法测得的土壤含水率数据, 探讨电压信号、含水率、绝对误差和相对误差之间的对应关系, 并建立函数模型。试验结果表明: FDR法测定的土壤含水率较烘干法偏高; 通过线性、多次曲线及指数形式对试验数据进行拟合和回归分析, 最终确定四次曲线作为标定方式, 标定后测得的土壤含水率精度明显提高, 平均绝对误差可控制在2%以内。该方法可用于类似条件下FDR法测定土壤含水率的标定。

**关键词:** 滑坡; 频域反射分析法; 土壤含水率; 标定试验; 土壤含水率监测仪; 戒台寺滑坡

中图分类号: P426.68; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)03-0055-07

## An experimental study of calibration of soil moisture content by using the frequency domain reflectometry

DONG Hanchuan<sup>1,2</sup>, PANG Lili<sup>1,2</sup>, SHI Yun<sup>1,2</sup>

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding, Hebei 071051, China;

2. Innovation Centre of Geological Environment Monitoring Engineering Technology, MNR, Baoding, Hebei 071051, China)

**Abstract:** Long-term and continuous monitoring of soil moisture content in a landslide body is important for the analysis and safety warning of landslides. Based on the frequency domain reflectometry (FDR), the principle of measuring soil moisture content is described in this paper. In order to improve the accuracy of soil water content measured by the FDR method, the soil moisture content of the landslides near the Jietai Temple is calibrated by the combination of indoor and field calibration methods, respectively. By comparing and analyzing the data of soil moisture measured by the FDR method and drying method, the corresponding relationship between the voltage signal, water content, absolute error and relative error is discussed, and a function model is established. The test results show that the soil moisture content measured by the FDR method is higher than that of the drying method. Through fitting and regression analyses of the test data with linear, multiple power curves and exponential forms, the four power curve is determined as the calibration method. The accuracy of soil moisture content measured after calibration is obviously improved, and the mean absolute error can be controlled within 2%. The calibration curve can be applied to the determination of soil moisture content with the FDR method in the landslide near the Jietai Temple and other similar areas.

**Keywords:** landslide; FDR; soil moisture content; calibration test; monitor for soil moisture content; Jietai Temple landslide

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2018-11-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505203)

第一作者: 董翰川(1985-), 男, 工程师, 硕士, 从事地质环境监测预警相关研究。E-mail: 359195391@qq.com

通讯作者: 史云(1962-), 女, 教授级高级工程师, 博士, 从事水工环地质仪器相关研究。E-mail: 1317732050@qq.com

我国每年发生数以万计不同规模的滑坡地质灾害,给自然环境、工程建设等造成巨大损失,甚至危及到人民生命财产安全<sup>[1-4]</sup>。土壤含水率是反应土壤水分状况的重要物理参数<sup>[5-7]</sup>,自然与人类工程活动常常会改变岩土体中水分的赋存状态,引起岩土体含水率的变化,如强降雨的聚集下渗、水库和人工湖水长期渗漏、地面输水沟道及地下输水管道渗漏等<sup>[8-10]</sup>。因降雨入渗或地下水抬升造成的滑坡体强度下降,致使下滑力大于抗滑力从而引发滑坡地质灾害<sup>[11-12]</sup>。因此,对滑坡体土壤含水率进行长期和连续监测,对滑坡体的变形分析和安全预警是非常必要的。

土壤含水率的测量方法已经发展了半个多世纪,越来越多原位测量技术的出现使得土壤含水率的监测日益完善,但也存在着质量参差不齐、标定方法不统一等问题。土壤水分测量的方法主要分为直接法和间接法:直接法主要是 105 ℃ 烘干法,是目前国际上唯一认可的测量土壤含水率的标准方法;间接法主要包括张力计法、电阻法、中子法、射线法、光学法和介电法等<sup>[13-14]</sup>。烘干法需要现场取样后在室内进行测试,操作较繁琐,无法实现快速监测。介电法因具有快速、较准确的优点而在土壤含水率测量仪开发方面得到了广泛应用<sup>[15]</sup>,其中,基于频域反射分析法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)原理<sup>[16]</sup>的土壤水分传感技术是近 20 多年来新发展起来的一种利用土壤介电特性快速测量土壤体积含水率的方法,在测定实时性和精度上都比其它测量方法更具优势,可适用于不同用途的土壤水分测量。但由于土壤的介电性质与土质、密度及温度有关,不同地区的土质存在差异,当需要较高测量精度时仪器内部原有的通用标定模型无法满足实际需求,需要专门针对待测土体开展标定试验使测量结果尽可能接近真实值<sup>[17]</sup>。因此,本文通过现场和室内试验,对我单位自主研发的 Z-FDRSL-1 型土壤含水率监测仪进行标定,同时将仪器测量结果与室内烘干法试验结果进行对比分析,选择线性、多次曲线、指数函数几种不同形式对试验数据进行拟合回归分析,最后得出最优标定曲线方程。

## 1 FDR 土壤水分监测仪测定原理

在土壤的三相介质组成中,由于土壤颗粒的介电常数( $\epsilon_s = 3 \sim 4, 20\text{ }^\circ\text{C}$ )和空气的介电常数( $\epsilon_a = 1, 20\text{ }^\circ\text{C}$ )很低,而水的介电常数( $\epsilon_w = 80, 20\text{ }^\circ\text{C}$ )远大于土壤和空气的介电常数,处于主导地位。因此,土壤的介电常数主要依赖于水的含量,从而可根据土壤介电

常数间接获得土壤的含水率。FDR 土壤水分监测原理如图 1 所示,该监测设备利用 LC 电路的振荡,根据电磁波在不同介质中振荡频率的变化来测定介质的介电常数,进而通过一定的对应关系反演出土壤水分状况。LC 振荡电路的频率  $F$  表示为<sup>[18-19]</sup>:

$$F = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中: $L$ ——电感;

$C$ ——电容。

LC 振荡电路频率  $F$  主要受到电感与电容变化的影响,由于土壤水分监测仪器电感值是同定的,因此其振荡频率的变化只取决于电容的变化,而电容的改变则取决于土壤的影响。当土壤介电特性发生改变,LC 振荡电路中电容就发生变化,由式(1)可知,电容变化 LC 振荡电路的频率也相应改变。因而振荡频率和管套外部土壤含水量之间就建立了一定的联系,通过分析 LC 振荡电路的频率就可反演出土壤水分情况。

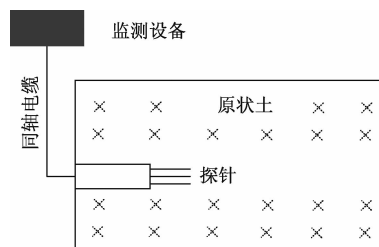


图 1 FDR 土壤水分监测仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the FDR soil moisture monitor

监测设备采用自主研发的 Z-FDRSL-1 型土壤含水率监测仪,选用输出电压型信号的国产 MP-406B 接触式探针传感器。水分测量电路被防水密封封装在一个圆柱状腔体内,腔体一端的四根不锈钢针组成感应元件,中心钢针为主感应端,周边三根钢针在腔体内部用一个金属圆环连接,组成公共地端。使用时将传感器钢针插入原状被测介质,其感应范围为由周边三根钢针所围的圆柱体。测量电路将土壤介电常数的变化转为模拟电压输出,通过建立模拟输出电压和土壤体积含水率的数学关系,实现对土壤含水率数据的测量。实验仪器的技术指标如表 1 所示。

表 1 监测仪器技术指标

| 工作电压  | 量程/%    | 精度/%        | 分辨率/%     | 输出电压/mV   | 工作温度/ $^\circ\text{C}$ |
|-------|---------|-------------|-----------|-----------|------------------------|
| 12VDC | 0 ~ 100 | $\pm 1$ 标定后 | $\pm 0.1$ | 0 ~ 1 200 | -30 ~ +50              |

2 试验概况

2.1 试验材料

现场试验及取样地点位于北京市门头沟区戒台寺滑坡,戒台寺位于近南北向短轴山梁上,其后山马鞍山为近东西向长轴山梁,出露前震旦系底层,戒台寺后山由奥陶系块状灰岩组成。所取土样以粉土、粉质黏土为主,采样深度分别为 60 cm 和 100 cm,土样的基本物理性质指标如表 2 所示。

表 2 土样材料基本物理性质指标

Table 2 Basic physical properties of soil samples

| 土样   | 含水率<br>$\omega/\%$ | 干密度 $\rho_d/$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 比重<br>$G_s$ | 孔隙比<br>$e_0$ | 塑性指<br>数 $I_p$ | 液性指<br>数 $I_L$ |
|------|--------------------|----------------------------------------------------|-------------|--------------|----------------|----------------|
| 粉土   | 10.8               | 1.33                                               | 2.71        | 1.043        | 8.1            | -0.52          |
| 粉质黏土 | 21.6               | 1.32                                               | 2.74        | 1.082        | 14.8           | 0.07           |

2.2 试验方法和过程

试验采用室内标定和现场标定两种方式,试验时将 FDR 探针分别插入室内制备好的重塑土样和现场原状土中,每组进行 3 个平行试验。试验过程中土样的湿密度  $\rho$  和质量含水率  $\omega$  可直接测得。烘干法体积含水率  $\theta_w$  可由下式计算得到<sup>[20-21]</sup>:

$$\theta_w = \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{\omega}{1 + \omega} = \frac{\omega \rho_d}{\rho_w} \quad (2)$$

式中: $\rho$ ——湿密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ ;

$\rho_w$ ——水密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ ;

$\rho_d$ ——土壤干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ ;

$\omega$ ——土壤质量含水率/%。

2.2.1 室内标定

将现场采集的扰动土样在实验室内去除杂草、根系和碎石等杂物,自然风干后磨碎过 2 mm 筛,测定土样含水率。根据干密度和含水率控制要求,配置和设计 8 种不同试验所需含水率均匀土样材料,土样含水率设计从 0 开始,以  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  作为公差值,组成 0, 0.05, 1.00, ...,  $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  等差数列,装入固定体积的圆柱形 PVC 制样筒中,称重土样质量,计算土样湿密度。为使土样容重相对均匀,在计算好加水量后,用注射器对柱状制样分层加水填装压实。待水分渗透均匀后,将 FDR 传感器插入制样的中心部位并测得电压输出信号,每次测量 3 次,分别取得测量电压。在 FDR 测量位置处附近用环刀(容积  $100 \text{ cm}^3$ )均匀采集 3 个土样(总计 24 个样),放入铝盒中编号记录并称重(包含铝盒重量,铝盒重量为固定值)计算质量含水

率。将称好湿重的土样采用烘干法放入烘箱内,设置温度为  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ ,时间设定 24 h,烘干后再次称重干土样(含铝盒),做好记录。

2.2.2 现场标定

野外现场标定试验布置方案如下:野外标定工作区域位于戒台寺后花园南侧,该处土壤含水率监测设备的传感器采用分层埋设方式,同一个基坑内分别在地面下 30 cm、60 cm 和 100 cm 处水平方向埋设 3 个传感器。传感器安装完毕后且基坑填埋前,在每层位传感器附近垂直于监测面用环刀进行 3 次取样,分别进行烘干测得土样质量含水率,计算得出体积含水率,同时记录 3 次监测设备测得的初始土壤含水率。之后向基坑内注水并使土体趋于饱和状态后开始记录试验数据,基坑内水分自然晾晒下渗和蒸发过程中,期初基坑土内壤含水率变化较快,试验设定监测设备每隔 2 h 采集一次含水率数据,并在传感器附近用环刀取样,采用烘干法测得质量含水率换算成体积含水率。随着土壤含水率变化变得缓慢,适当延长采集时间和取样时间,直至土壤含水率趋于稳定后结束现场试验。

具体试验过程如下:在监测点现场传感器附近垂直监测面用容积为  $100 \text{ cm}^3$  环刀取样 3 次,后采用烘干法测得土样质量含水率,计算出 3 次环刀采样的体积含水率,同时记录监测设备测得的初始土壤体积含水率。注水之前采用上述方法先测得一组现场原始状态土样数据,然后向采样基坑处注水并使土体趋于饱和状态,让基坑水分自然晾晒下渗和蒸发。试验当日 10 时开始到当日 20 时每隔 2 h 用环刀采集一次样本,次日 8 时、12 时、16 时、20 时每隔 4 h 采集一次样本,采集样本的同时记录监测设备测得的数据,取每次取样烘干后的平均值作为最终含水率测量结果,最终取得试验数据 33 组。

3 试验结果与分析

诸多学者在研究 FDR 监测设备标定方式时,主要选择线性、多次曲线及指数形式对 FDR 监测设备和烘干法的测量值进行拟合和回归分析。本试验首先用这 3 种不同关系对实验数据进行拟合及回归分析,确定标定方式,多次曲线从二次、三次、四次依次进行分析。为了检验不同回归方式拟合程度的优良,用决定系数  $R^2$  作为曲线拟合效果的评价指标,表达式为<sup>[15]</sup>:

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中:  $S_R$ ——回归平方和;

$S_T$ ——总离差平方和。

$R^2$  取值范围为 0 ~ 1,  $R^2$  越接近 1, 说明二者的拟合程度越好。FDR 传感器和烘干法的不同拟合方式的决定系数对比如表 3 所示。

表 3 FDR 监测设备不同拟合方式对比表

Table 3 Comparison of  $R^2$  with different monitoring methods for the FDR monitoring equipment

| 决定系数  | 线性    | 二次曲线  | 三次曲线  | 四次曲线  | 指数曲线  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R^2$ | 0.847 | 0.921 | 0.934 | 0.966 | 0.958 |

由表 3 可看出, 对于 FDR 监测设备, 5 种不同标定方式均达到了良好的拟合优度, 综合比较来看选用四次曲线拟合得到的决定系数 0.966 最大, 拟合效果最好, 适宜作为 FDR 监测设备的标定方式。

### 3.1 室内标定结果

烘干法实验结果准确可靠, 通常将烘干法结果作为基础进行校准和标定<sup>[22-23]</sup>, 我们做如下定义<sup>[1,2,10]</sup>:

$$\text{绝对误差: } \delta = |\theta_{\text{FDR}} - \theta_w| \text{ (单位 \%)} \quad (4)$$

$$\text{相对误差: } \delta_1 = \frac{|\theta_{\text{FDR}} - \theta_w|}{\theta_w} \cdot 100 \text{ (单位 \%)} \quad (5)$$

其中,  $\theta_{\text{FDR}}$  和  $\theta_w$  分别为 FDR 监测设备测得的土壤体积含水率和烘干法测得的体积含水率。两者的室内标定对比情况见表 4。由表中数据可知, 在设定的 8 组含水率设计值对比试验中, FDR 设备测得的含水率数据普遍高于烘干法测得的数据, 试验数据得出的绝对误差  $\delta$  范围为 0.33% ~ 6.78%, 平均为 4.17%; 相对误差  $\delta_1$  范围为 16.11% ~ 68.57%, 平均为 35.42%。在没有进行标定的情况下, FDR 监测设备测定的土壤体积含水率误差较大, 因此对监测设备的标定工作显得尤为重要。

利用室内标定取得的 24 组试验数据, 建立 FDR 测量/烘干法标定曲线, 得到室内标定的  $\theta_v$  和  $\theta_w$  关系曲线, 如图 2 所示。在含水率设定值呈等差数列增加过程中, FDR 测量值和烘干法测量值都有一致的增加趋势, 两者相关性较高, 基本呈线性关系, 用一元一次方程  $y = ax + b$  进行校正后得出  $a = 0.87, b = -1.82$ , 即  $y = 0.87x - 1.82 (R^2 = 0.966)$ 。其中,  $y$  为烘干法测得的含水率  $\theta_w$ ,  $x$  为 FDR 监测设备测得的含水率  $\theta_{\text{FDR}}$ , 该标定曲线在较低土壤体积含水率情况下, 可能

会低估含水率数值, 因此还存在一定误差。

表 4 FDR 法与烘干法室内标定结果对比

Table 4 Comparison of the indoor calibration results between the FDR method and drying method

| 编号 | 含水率设计值<br>$\omega/\%$ | 电压信号<br>$u/\text{mV}$ | FDR 含水率<br>$\theta_{\text{FDR}}/\%$ | 烘干法含水率<br>$\theta_w/\%$ | 绝对误差<br>$\delta/\%$ | 相对误差<br>$\delta_1/\%$ |
|----|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| A1 | 0                     | 98                    | 1.10                                | 0.77                    | 0.33                | 42.95                 |
|    |                       | 97                    | 1.08                                | 0.75                    | 0.33                | 43.41                 |
|    |                       | 98                    | 1.10                                | 0.76                    | 0.34                | 44.83                 |
| A2 | 5                     | 244                   | 6.69                                | 4.58                    | 2.11                | 46.17                 |
|    |                       | 247                   | 6.84                                | 4.55                    | 2.29                | 50.27                 |
|    |                       | 243                   | 6.65                                | 4.61                    | 2.04                | 44.19                 |
| A3 | 10                    | 386                   | 13.84                               | 8.25                    | 5.59                | 67.74                 |
|    |                       | 388                   | 13.94                               | 8.27                    | 5.67                | 68.57                 |
|    |                       | 385                   | 13.79                               | 8.24                    | 5.55                | 67.32                 |
| A4 | 15                    | 521                   | 20.54                               | 13.96                   | 6.58                | 47.12                 |
|    |                       | 522                   | 20.59                               | 13.95                   | 6.64                | 47.57                 |
|    |                       | 522                   | 20.59                               | 13.96                   | 6.63                | 47.46                 |
| A5 | 20                    | 598                   | 24.14                               | 18.84                   | 5.30                | 28.11                 |
|    |                       | 596                   | 24.04                               | 18.74                   | 5.30                | 28.30                 |
|    |                       | 597                   | 24.09                               | 18.88                   | 5.21                | 27.59                 |
| A6 | 25                    | 701                   | 28.89                               | 24.22                   | 4.67                | 19.29                 |
|    |                       | 702                   | 28.94                               | 24.12                   | 4.82                | 19.98                 |
|    |                       | 699                   | 28.80                               | 24.19                   | 4.61                | 19.04                 |
| A7 | 30                    | 815                   | 34.78                               | 28.13                   | 6.65                | 23.64                 |
|    |                       | 819                   | 35.01                               | 28.23                   | 6.78                | 24.03                 |
|    |                       | 814                   | 34.72                               | 27.47                   | 7.25                | 26.40                 |
| A8 | 35                    | 876                   | 38.64                               | 33.28                   | 5.36                | 16.11                 |
|    |                       | 874                   | 38.50                               | 32.78                   | 5.72                | 17.46                 |
|    |                       | 875                   | 38.57                               | 32.85                   | 5.72                | 17.42                 |

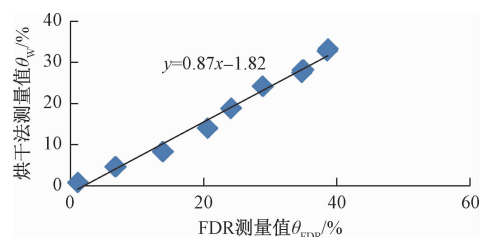


图 2 室内标定 FDR 测量值-烘干法测量值关系曲线

Fig. 2 Relationship between the FDR measured value and indoors calibration with the the drying method

### 3.2 现场标定结果

现场标定开始时, 取得一组试验数据 B1, 该数据是该监测点自然数据, FDR 设备测量含水率数据分别为 19.58%、19.68%、19.72%, 取样烘干后得出含水率分别为 15.25%、14.54%、15.43%。鉴于篇幅限制, 现场标定取 100 cm 处传感器取样数据进行分析。之后向基坑内注水, 自然渗透蒸发后分别测得 10 组数

据,之后数据未发生明显变化,现场标定的 FDR 法和烘干法试验数据如表 5 所示。与室内标定试验类似,FDR 法测定的含水率  $\theta_{\text{FDR}}$  普遍高于烘干法测得的  $\theta_{\text{w}}$ ,这与现场环刀取样过程有关,现场取样拿到实验室进行烘干的过程中存在极少量水分蒸发的可能性,导致测得数据较 FDR 法偏低。由表 5 试验数据可看出:现场标定绝对误差  $\delta$  范围为 0.36% ~ 5.69%,平均为 2.37%;相对误差  $\delta_1$  范围为 1.04% ~ 35.32%,平均为 10.89%。现场标定条件下的绝对误差和相对误差要优于室内标定情况。

| 表 5 FDR 法与烘干法现场标定结果对比                                                                            |                       |                                     |                                   |                     |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Table 5 Comparison of the field calibration results between the FDR method and the drying method |                       |                                     |                                   |                     |                       |
| 试验<br>编号                                                                                         | 电压信号<br>$u/\text{mV}$ | FDR 含水率<br>$\theta_{\text{FDR}}/\%$ | 烘干法含<br>水率 $\theta_{\text{w}}/\%$ | 绝对误差<br>$\delta/\%$ | 相对误差<br>$\delta_1/\%$ |
| B1                                                                                               | 501                   | 19.58                               | 15.25                             | 4.33                | 28.38                 |
|                                                                                                  | 503                   | 19.68                               | 14.54                             | 5.14                | 35.32                 |
|                                                                                                  | 504                   | 19.72                               | 15.43                             | 4.29                | 27.82                 |
|                                                                                                  | 977                   | 47.03                               | 41.54                             | 5.49                | 13.22                 |
| B2                                                                                               | 979                   | 47.23                               | 41.54                             | 5.69                | 13.71                 |
|                                                                                                  | 969                   | 46.25                               | 41.54                             | 4.71                | 11.34                 |
|                                                                                                  | 892                   | 39.78                               | 38.21                             | 1.57                | 4.11                  |
| B3                                                                                               | 885                   | 39.27                               | 37.13                             | 2.14                | 5.78                  |
|                                                                                                  | 884                   | 39.20                               | 37.21                             | 1.99                | 5.36                  |
|                                                                                                  | 811                   | 34.55                               | 33.51                             | 1.04                | 3.10                  |
| B4                                                                                               | 804                   | 34.15                               | 34.51                             | 0.36                | 1.04                  |
|                                                                                                  | 801                   | 33.98                               | 31.51                             | 2.47                | 7.85                  |
|                                                                                                  | 612                   | 24.78                               | 26.41                             | 1.63                | 6.18                  |
| B5                                                                                               | 621                   | 25.19                               | 26.88                             | 2.69                | 9.65                  |
|                                                                                                  | 615                   | 24.92                               | 26.79                             | 1.87                | 7.00                  |
|                                                                                                  | 564                   | 22.56                               | 23.55                             | 1.99                | 8.09                  |
| B6                                                                                               | 560                   | 22.38                               | 23.67                             | 1.29                | 5.46                  |
|                                                                                                  | 569                   | 22.80                               | 24.22                             | 1.42                | 5.88                  |
|                                                                                                  | 551                   | 21.96                               | 20.88                             | 1.08                | 5.15                  |
| B7                                                                                               | 556                   | 22.19                               | 21.45                             | 0.74                | 3.45                  |
|                                                                                                  | 549                   | 21.86                               | 22.34                             | 0.48                | 2.14                  |
|                                                                                                  | 522                   | 20.59                               | 19.55                             | 1.04                | 5.30                  |
| B8                                                                                               | 527                   | 20.82                               | 19.67                             | 1.15                | 5.87                  |
|                                                                                                  | 520                   | 20.49                               | 19.21                             | 1.28                | 6.67                  |
|                                                                                                  | 511                   | 20.06                               | 17.78                             | 2.28                | 12.82                 |
| B9                                                                                               | 513                   | 20.16                               | 18.02                             | 2.14                | 11.85                 |
|                                                                                                  | 517                   | 20.35                               | 17.92                             | 2.43                | 13.55                 |
|                                                                                                  | 496                   | 19.34                               | 16.52                             | 2.82                | 17.05                 |
| B10                                                                                              | 497                   | 19.39                               | 16.76                             | 2.63                | 15.66                 |
|                                                                                                  | 495                   | 19.29                               | 16.43                             | 2.86                | 17.40                 |
|                                                                                                  | 488                   | 18.95                               | 16.22                             | 2.73                | 16.82                 |
| B11                                                                                              | 489                   | 19.00                               | 17.12                             | 1.88                | 10.96                 |
|                                                                                                  | 492                   | 19.14                               | 16.56                             | 2.58                | 15.60                 |

同样,利用现场标定取得的 33 个试验数据,建立 FDR 测量/烘干法标定曲线,得到现场标定  $\theta_{\text{FDR}}$  和  $\theta_{\text{w}}$  关系曲线(图 3)。FDR 测量值和烘干法测量值的关系

为  $y = 0.93x - 0.35 (R^2 = 0.966)$ 。其中,  $y$  为烘干法测得的含水率  $\theta_{\text{w}}$ ,  $x$  为 FDR 监测设备测得的含水率  $\theta_{\text{FDR}}$ ,该标定曲线在较低土壤体积含水率情况下,可能会高估含水率数值。

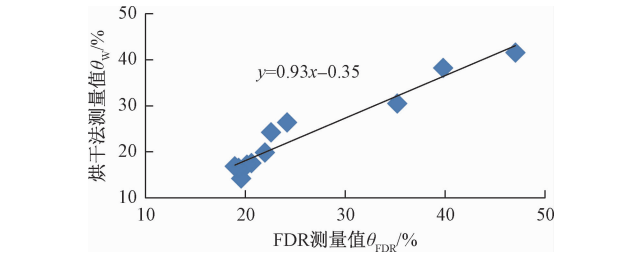


图 3 现场标定 FDR 测量值-烘干法测量值关系曲线  
Fig. 3 Relationship between the FDR measured value and the field calibration with the drying method

3.3 最终标定公式的确定及检验

利用上述室内和现场两种标定曲线对 FDR 测量值和烘干法测量值进行标定,结果表明标定后土壤体积含水率精度明显提高,但最终标定的目的是得到采集的电压信号和标定后的土壤体积含水率之间的关系,所以还需确定最终的标定公式。许多学者(如杨静等)研究指出,室内含水率的标定仍存在一定的偏差,宜采用现场标定方式来研究标定曲线。因此,针对现场标定过程所取得的数据,得出监测设备 FDR 传感器电压采集信号  $u$  和烘干法测量的含水率曲线(图 4),对现场标定数据进行拟合,得到回归方程为  $\theta_{\text{w}} = -608.89u^4 + 2151.2u^3 - 2779.2u^2 + 1598.6u - 318.7$ 。下面对该回归方程进行方程的线性显著性检验( $F$  检验)和系数的显著性检验( $t$  检验),显著性水平  $\alpha$  取 0.05。

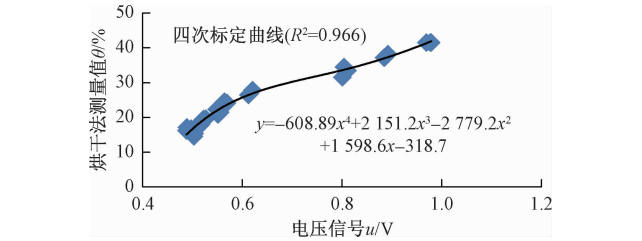


图 4 电压采集信号  $u$  - 烘干法测量值  $\theta$  关系标定曲线  
Fig. 4 Relationship between the voltage acquisition signal and the measurement value with the drying method

3.3.1 方程的显著性检验( $F$  检验)

假设  $H_0: b_1 = 0, b_2 = 0, \dots, b_p = 0$ ,对于样本数据而言,  $p = 4, n = 33$ 。

当  $H_0$  假设成立时,  $F$  服从自由度为  $n-p-1$  的  $F$  分布,即  $F \sim F(4, 28)$ ,对于  $\alpha = 0.05$ ,查  $F$  分布表,得到

临界值  $\lambda = 2.71$ 。

根据现场标定样本数据,计算总偏差平方和  $S_{\text{总}}$ 、回归平方和  $S_R$ 、残差平方和  $S_E$ ,得到  $F = 3.95 > \lambda$ ,拒绝原假设,说明回归方程显著。

### 3.3.2 系数的显著性检验( $t$ 检验)

假设  $H_{0j}: b_j = 0, j = 0, 1, 2, \dots, p$ , 对于样本数据,  $p = 4, n = 33$ 。

当  $H_0$  假设成立时,  $t_j$  服从自由度为  $n-p-1$  的  $t$  分布,即  $t_j \sim t(4, 28)$ , 对于  $\alpha = 0.05$ , 查  $t$  分布表,得到临界值  $\lambda = 2.048$ 。

根据现场标定样本数据,计算各个  $t$  统计量的绝对值分别为 2.14, 2.21, 2.17, 2.33, 均大于  $\lambda$ , 拒绝原假设  $H_{0j}$ , 说明回归方程显著。

因此, 方程  $\theta_w = -608.89u^4 + 2151.2u^3 - 2779.2u^2 + 1598.6u - 318.7$  可作为标定曲线, 用于表征标定后的土壤含水率监测数据, 其中,  $\theta_w$  为烘干法测得的土壤体积含水率,  $u$  为 FDR 监测设备采集的电压信号。

## 4 结论

(1) FDR 监测设备测得的土壤含水率值较高于烘干法测量值, 其出厂内置的含水率标定公式不能直接用于每个场合, 为得到更准确的测量值, 需进行标定后方可使用。

(2) 采用四次多项式作为标定曲线方程, 其效果最优, 该标定方法可用于类似条件的 FDR 法测定土壤含水率的标定研究。

(3) 标定后的土壤含水率测定值精度明显得到提高, 平均绝对误差可控制在 2% 以内。

## 参考文献:

- [1] Kun XU, Qingyuan SHENG, Xiliang ZHANG, *et al.* Design and calibration of the unilateral sensitive soil moisture sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(8): 4587–4594.
- [2] GASCH, BROWN, CHAHAL, *et al.* A field—scale sensor network data set for monitoring and modeling the spatial and temporal variation of soil water content in a dryland agricultural field[J]. Water Resources Research, 2017, 53(12): 10878–10887.
- [3] WANG Liming, ZHANG Xuefen, ZHOU Xuhui, *et al.* Correction method of undisturbed soil moisture measurements from FDR soil moisture sensors[J]. Water Resources Research, 2016, 44(3): 347–353.
- [4] GUO Jia, WANG Zhen-ying, ZHENG Yu-suo, *et al.* Research and application of new FDR soil water and salt integrated sensor calibration[J]. Soil and fertilizer in China, 2016, 12(6): 156–161.
- [5] 曹鼎峰, 施斌, 顾凯, 等. 土的含水率 AHFO 法测量中分段函数模型建立[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 41–47. [CAO D F, SHI B, GU K, *et al.* Establishment of piecewise function model for measuring soil moisture content by AHFO method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 41–47. (in Chinese)]
- [6] 沙琳川, 王桂尧, 张永杰, 等. 含水率与加筋率对加筋土抗剪强度的影响规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 51–58. [SHA L C, WANG G Y, ZHANG Y J, *et al.* The study of influence of water content and reinforcement ratio on shear strength of reinforced soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 51–58. (in Chinese)]
- [7] 张虎元, 王少一, 赵天宇, 等. 利用高密度电阻率法进行盐渍土含水率的测定[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 95–101. [ZHANG H Y, WANG S Y, ZHAO T Y, *et al.* Determination of moisture content in saline soil by high density resistivity method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 95–101. (in Chinese)]
- [8] 魏雄, 王仁波, 李跃忠, 等. 基于 GPS/GPRS 的滑坡监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2456–2450. [WEI X, WANG R B, LI Y Z, *et al.* Landslide monitoring system based on GPS/GPRS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2456–2450. (in Chinese)]
- [9] 刘亚军, 祝连庆, 杨德斌, 等. 基于空气湿度的土壤含水量估计模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2582–2587. [LIU Y J, ZHU L Q, YANG D B, *et al.* The Study of estimation model of soil moisture based on air humidity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2582–2587. (in Chinese)]
- [10] 于永堂, 张继文, 郑建国, 等. 驻波比法测定黄土含水量的标定试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1462–1469. [YU Y T, ZHANG J W, ZHENG J G, *et al.* Experimental study on calibration of water content in Loess by Bobbi method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1462–1469. (in Chinese)]
- [11] 许强, 魏勇, 彭大雷, 等. 泾阳南塬蒋刘 4# 滑坡特征

- 及成因机制[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 123 - 130. [XU Q, WEI Y, PENG D L, *et al.* Landslide characteristics and genetic mechanism of the Jiang Liu 4# landslide in southern Jingyang Plateau [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 123 - 130. (in Chinese)]
- [12] 崔光耀, 左奎现, 张军徽, 等. 万梁高速某滑坡降雨入渗稳定性及处治技术研究[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 117 - 121. [CUI G Y, ZUO K X, ZHANG J H, *et al.* The study on rainfall infiltration stability and treatment technology of a landslide at Wanliang Expressway[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 117 - 121. (in Chinese)]
- [13] 胡建东, 段铁城, 石建华, 等. 土样含水量快速测定传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2): 142 - 145. [HU J D, DUAN T C, SHI J H, *et al.* The Study on sensing technology for rapid determination of water content in soil samples[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2): 142 - 145. (in Chinese)]
- [14] 罗迪汉, 宇宙, 王勇, 等. FDR-土壤水分测定仪标定方法初探[J]. 内蒙古林业科技, 2015, 41(1): 31 - 35. [LUO D H, YU Z, WANG Y, *et al.* Preliminary study on calibration method of FDR-soil moisture meter[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2015, 41(1): 31 - 35. (in Chinese)]
- [15] 刘志刚, 李萍萍. 电介质型水分传感器测定栽培基质含水率的标定模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 199 - 202. [LIU Z G, LI P P. Calibration model for measuring moisture content of culture media by dielectric moisture sensor[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 199 - 202. (in Chinese)]
- [16] 周旭辉, 王黎明, 王建波, 等. FDR 自动土壤水分数据标定问题及解决方法[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 535 - 541. [ZHOU X H, WANG L M, WANG J B, *et al.* FDR automatic soil moisture data calibration problems and Solutions[J]. Meteorological science and technology, 2016, 44(4): 535 - 541. (in Chinese)]
- [17] 杨静, 陈洪松, 王升, 等. TDR 测定喀斯特地区石灰土含水量的标定研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 76 - 80. [YANG J, CHEN H S, WANG S, *et al.* Determination of moisture content of lime soil in Karst area by TDR[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 76 - 80. (in Chinese)]
- [18] 陈海波, 冶林茂, 李树岩, 等. FDR 土壤水分自动监测仪的标定与检验[J]. 传感器与仪器仪表, 2009, 25(11): 104 - 106. [CHEN H B, YE L M, LI S Y, *et al.* Calibration and inspection of FDR soil moisture automatic monitor [J]. Sensors and Instruments, 2009, 25(11): 104 - 106. (in Chinese)]
- [19] 王波. FDR 土壤含水量传感器应用于路面结构的标定研究[J]. 北方交通, 2013, 3(6): 3 - 8. [WANG B. Calibration Research of application of FDR soil moisture sensor in pavement structure[J]. Northern traffic, 2013, 3(6): 3 - 8. (in Chinese)]
- [20] 吕海波, 赵艳林. 时域反射法测量膨胀土含水量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2568 - 2574. [LV H B, ZHAO Y L. Experimental study on measuring water content of expansive soil by time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2568 - 2574. (in Chinese)]
- [21] 李东南. 土壤含水量和电导率的多功能传感器的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. [LI D N. Development of multifunctional sensor for soil water content and electrical conductivity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [22] 刘敏, 王亮亮, 蔡秋鹏. FDR 和 TDR 测定几种典型土壤含水量的对比分析[J]. 水利信息化, 2016, 6(6): 32 - 36. [LIU M, WANG L L, CAI Q P, *et al.* Comparative analysis of FDR and TDR for determination of water content in several typical soils [J]. Water resources informatization, 2016, 6(6): 32 - 36. (in Chinese)]
- [23] 郑茹梅, 李子忠. 基于相位差的时域反射仪测定土壤含水量的标定和田间验证[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 100 - 104. [ZHENG R M, LI Z Z. Calibration and field validation of time domain reflectometry for measuring soil water content based on phase difference [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 100 - 104. (in Chinese)]

编辑: 汪美华