

FDR 型岩土多层含水量监测仪的研究

周 策, 罗光强, 吴 陶

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 岩土层含水量的变化是诱发滑坡、泥石流地质灾害最为重要的因素之一, 以往采用的张力计法、电阻法、中子法、电容式、 γ -射线法、光学测量法和 TDR 法等测量原理, 分别存在精度不高、对人体危害大或受天气影响大和电子线路造价昂贵等缺点。而 FDR 型滑坡体岩土层多层含水量自动监测仪采用电磁波频域反射(简称 FDR)管式含水量传感器进行监测, 通过含水量无线通讯采集监测仪进行远程数据采集并无线传输。滑坡体岩土层多层含水量自动监测仪具有体积小、测程大、响应速度快、灵敏度高、精度高、耐腐蚀和抗潮等特点, 推动了地质灾害预警监测技术的进步。

关键词: 含水率; 管式含水量传感器; 频域反射(FDR); 无线传输

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)06-0060-07

Research on FDR - type multilayer water content monitor

ZHOU Ce, LUO Guangqiang, WU Tao

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The change of water content in rock and soil layers is one of the most important factors inducing geological hazards of landslides and debris flows. In the past, the measuring principles, such as the tensiometer method, resistance method, neutron method, capacitance method, gamma-ray method, optical measurement method, TDR method, have been used to measure water content in rock and soil layers. Those methods have some disadvantages such as low accuracy, great personal harm, great influence by weather, expensive electronic parts. The FDR-type automatic monitoring instrument for multi-layer water content in rock and soil layers of the landslide body uses the electromagnetic frequency domain reflection (FDR) tubular water content sensor for measurement, and carries out remote water content data acquisition and wireless transmission with the wireless communication acquisition and monitoring instrument. The automatic multi-layer water content monitoring instrument for landslide rock and soil layers has the characteristics of compactness, large measurement range, quick response, high sensitivity, high precision, corrosion and moisture resistance, which has promoted the progress on early warning and monitoring technology for geological hazards.

Key words: water content; tubular water content sensor; Frequency Domain Reflection (FDR); wireless transmission

1 概述

岩土层含水量的变化是诱发滑坡、泥石流地质灾害最为重要的因素之一, 岩土层含水量检测装置所采用的方法主要有张力计法、电阻法、中子法、射线法、光学法和介电法。相比而言, 通过岩土层介电特性测量岩土层含水率的介电法是一种快速、简单、有效的测量方法。1976 年, Topp 和 Davis 首先将

时域反射法引入到土壤水分快速测量的研究中, 并于 1980 年应用统计数学中数值逼近理论中的理论分类法找出了岩土层含水率与介电常数间的多项式关系的经验方程, 并在不同成分、类型的岩土层条件下进行了试验, 证明具有较高的测量精度。以此为基础, 基于介电特性测量岩土层含水率的方法得到了广泛的探索和应用^[1-3]。

收稿日期: 2019-10-18; **修回日期:** 2020-04-28 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2020.06.011

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“怒江流域泸水—芒市段灾害地质调查”(编号: DD20190643)

作者简介: 周策, 男, 汉族, 1965 年生, 教授级高级工程师, 机电专业, 从事地质灾害监测仪器的研究开发工作, 四川省成都市郫县成都现代工业港北区港华路 139 号, 449730588@qq.com。

引用格式: 周策, 罗光强, 吴陶. FDR 型岩土多层含水量监测仪的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6): 60-66.

ZHOU Ce, LUO Guangqiang, WU Tao. Research on FDR - type multilayer water content monitor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 60-66.

目前,在国内市场上基于介电法研发的岩土层含水率传感器主要有时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)两种。其中时域反射法(TDR)是基于电磁波在不同介质中传播速度不同的原理,根据高频电磁波在岩土中发射波和反射波间的时间差来测定岩土含水率。由于电磁波传播速度很快,导致发射波与反射波的时间差极短,需要超高速延迟测量技术,因此,该技术的成本较高,较难应用于低成本的生产试验中。频域反射法(FDR)测量原理是将扫频信号输入到待测的传输线/天线,将其反射信号的测量数据经傅里叶逆变(IFFT)转换为时域信号,扫频信号根据岩土层表观介电常数随岩土含水率变化而变化的原理测量岩土层含水率。基于频域反射法(FDR)的岩土层含水率检测仪器一般在几十到几百兆赫兹范围内工作,可以将介电常数的变化用电压或其他形式表现。频域反射法(FDR)岩土含水率检测仪器的测量结果易受岩土层的质地、温度和容重的影响,导致测量精度不高。因此,有必要开发快速、低成本、操作简便、精度较高的岩土层含水量检测仪^[4]。

本滑坡体岩土层温度多层含水量自动监测仪采用电磁波频域反射(FDR)含水量传感器进行监测,利用岩土层温度、盐度实测值运算标定,通过含水量无线通讯采集监测仪进行远程数据采集并无线传输。滑坡体岩土层多层含水量自动监测仪具有体积小、量程大、响应速度快、灵敏度高、精度高、耐腐蚀和抗潮等特点。

2 管式电磁波频域反射含水量传感器原理

2.1 频域反射技术

频域反射技术(Frequency Domain Reflectometry, FDR)原为军用测试技术,通过发送特定频带的扫频测试信号,在导体阻抗不匹配处会产生较强的和发射信号同样频率但不同时间段的反射信号,通过傅立叶转换方式分析这些信号,并且通过量测反射信号峰值的频率换算出到线路障碍点的距离。目前FDR技术开始替代TDR时域反射技术,应用到商用通信测试领域。与传统的时域反射技术TDR(Time Domain Reflectometry)比较,FDR技术主要有2点优势:首先是通过事件点插入损耗和频率的正确计算,FDR不但能判断开路和碰线点,还能够判断更多的线路障碍类型如接触不良、桥接抽头

等。其次,FDR在线路承载业务相匹配的频带内进行测试,而TDR是一种DC直流测量方式,所以FDR更适合宽带线路测试。目前FDR技术在大型网络的故障监测,例如电力电缆线路网络中已经得到应用,光频域的FDR在传感器领域的研究应用也越来越多^[1,5-9]。

本设计所介绍的频域反射技术是近年才兴起的一种土壤水分测量方法^[10],与其他测量方法相比,具有以下几个优点:(1)频域反射技术分辨率高,线性度好;(2)仪器主要是电路模块,维护简单;(3)无污染,测量的时候不需要破坏岩土层,方便连续测量。岩土层水分含量与谐振频率有关,由于谐振发生的条件成立:

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

式中: F ——谐振频率; L ——电感量; C ——电容。

通过电容 C 、介质为空气时的电容 C_0 。与相对介电常数 ϵ 的关系 $\epsilon = C/C_0$ 可以求得土壤的相对介电常数。许多研究证实土壤相对介电常数 ϵ 与土壤水分含量 ω 之间具有线性关系:

$$\omega = a\sqrt{\epsilon} + b$$

其中 a 、 b 是两个常数,由岩土层的类型决定,查询文献^[3]获取典型测量值。因此,选择合适参数的传输天线以及设计相匹配的谐振电路,使用频率扫描的办法,可以找出使电路达到谐振条件的信号电源频率,进一步计算谐振电路的电容阻抗值,从而计算土壤电介质容量的变化和土壤水分含量的变化。

本设计确定选用带温度测定的FDR管式含水量传感器及配套设备。

2.2 FDR管式岩土层含水量测试基本原理

模拟鉴相频域反射法方案见图1,采用单片机控制射频本振(RFPLL)宽带扫频,一路本振信号经过发射机与岩土耦合形成入射信号,通过发射信号接收机接收;另一路本振信号经过鉴相参考,与发射信号接收机接收到的模拟信号在混频器混频,经鉴相电压信号处理后,通过A/D模数转换后形成数字化延时信号,再利用公式和保存的校准数据,计算被测岩土层的含水量的变化值^[4,9,11-13]。

FDR管式岩土层含水量测试仪测量基本原理是采用高频电磁波发射源发射频率带宽为1GHz高频电磁波至所测的岩土层中,在仪器管式探头末

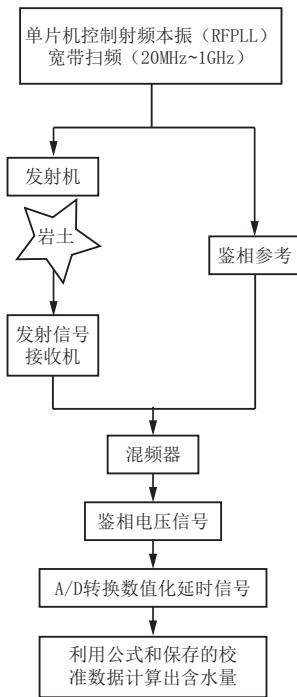


图1 FDR含水量监测原理

Fig.1 FDR water content monitoring principle

端反射回的高频电磁波电压信号与被测岩土层的介电常数的方根呈线性关系,通常空气和干燥土壤的介电常数 ϵ 基本为一定值,但在岩土层含水后,则不为定值,把被测岩土层介电常数变化转换成直流电压变化,直流电压在广泛的工作范围内取决于被测岩土层的含水量的变化情况^[9,14-18]。

FDR管式岩土层含水量测试仪的探头内装置有高频电磁波发射电路,通过探片(管状)把高频电磁波发射到所测的岩土层中,岩土层反射回来的高频电磁波经管式探头内的转换电路转换直流电压变化,其大小反映岩土层含水量的大小。由于在信号传输过程存在温度漂移,经试验测试高频电磁波还受被测土壤或岩土层中除水分外的阳离子(钠、钾盐度)影响,因此需要据经验公式、取样实测修正的办法及利用岩土层温度、盐度实测值运算校正,最终测定的岩土层含水量为绝对含水量。未经公式和取样实测修正的含水量为相对含水量。通过无线(GSM模块入网)传输,把采集到的数据传送到接受台^[2]。

岩土含水量测量范围:0~100%;

岩土含水量测量精度:±3%。

在测盐度单元研制方面,确定选择采用盐度传感器,利用其对不同盐度的岩土层含水量测量值进行二次校正,提高其精度和满足不同岩土测量的实

用性。

3 FDR型岩土多层含水量监测仪构成及性能指标

3.1 系统构成

系统主要由地下探管和地面组件组成,地下探管包含FDR管式温度含水量传感器4组、转换电路、嵌入式芯片及其外围电路等;地面组件包含智能手机或笔记本电脑、GSM/GPRS传输模块、野外供电模块、电源控制模块等。

岩土多层含水量自动监测仪的系统组成如图2所示。

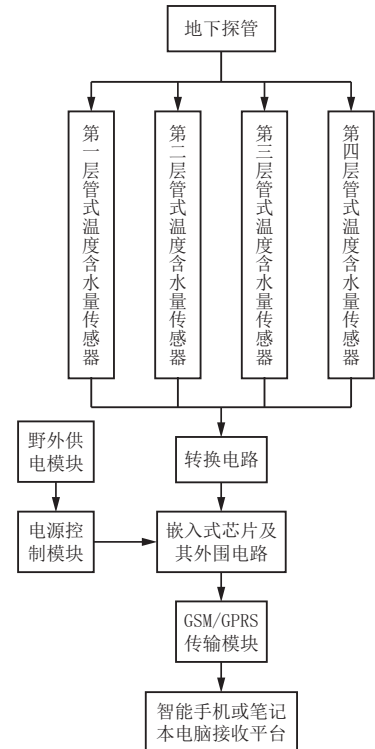


图2 FDR型岩土多层含水量自动监测仪系统组成

Fig.2 Composition of FDR automatic water content monitoring system for rock and soil

本系统的工作为自报或应答召测,自动无人值守,实时数据采集,无线遥测遥控。

3.2 现场采集

图3为嵌入式芯片及其外围电路A/D转换板原理,采用嵌入式单片机LPC2103内部自带的10位8路A/D转换芯片对传感器电压信号进行A/D转换。本仪器将LPC2103的8路A/D端口按照传感器序号依次连接到含水量传感器,然后启动A/D转换采集程序,通过RS-232接口将数据发送到笔记本电脑上,保存记录数据。

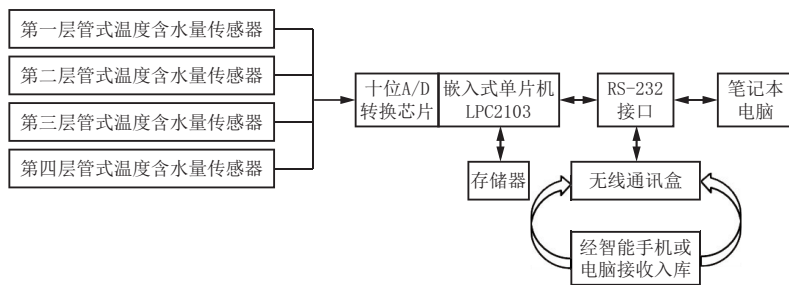


图 3 嵌入式芯片及其外围电路 A/D 转换板原理

Fig.3 Schematic diagram of the embedded chip and the A/D converter board for its peripheral circuit

实时采集无线自动监测系统通过本项目组自主开发的通讯盒完成。首先,通过通讯盒设定自动监测的周期,然后设定每天仪器开启的时间及该检测孔序号和仪器编号。到了设定时间,通讯盒给传感器打开电源,然后启动 A/D 转换采集程序,通过仪器内设 RS-232 串口把采集的数据发送到通讯盒的存储器中,然后通过短消息发送到中心站,经智能手机或笔记本电脑接收进入数据库进行保存。为使仪器长期连续稳定工作,采用了充电电池和太阳能电池组合工作。为防雨防雷损坏仪器,专修了防雷雨监测箱和无线避雷针,保证了系统安全正常工作。

3.3 性能指标

岩土层含水量测量范围:0~100%(容积含水量),精度±3%;

岩土层含水量测量深度:1~20 m,精度±10 mm;

工作温度:-10~80 ℃;

工作电压:4.75~5.25 V;

数据采集:10 位 A/D 转换器;

数据速率:9600 bps;

电源:DC12V/TAH 免维护电池及 30 W 太阳能电池板;

响应时间:10 ms;

输出阻抗:70 Ω;

输出方式:短消息(SMS)格式。

4 监测系统的室内测试

(1)测试方法及设备:采用烘干法。规约测试平台、恒温恒湿试验机、数字万用表、电子天平、留点温度计、直流稳压电源、绝缘电阻表、IP 防护试验装置、电热恒温干燥箱、土样盒、环刀、土样容器、标准土样筛、电动振动系统、外壳防护等。

(2)土壤类型:潮土。

(3)传感器:FDR 管式传感器。在样品 10、20、40 cm 处各有一环型探头,对环型探头进行检测。

(4)测试结果见表 1。

表 1 岩土质量含水量测量值和标准台值对比
Table 1 Comparison between the measured values and standard values of water content in rock and soil %

传感器标号	序号	标准台值	实际测量值	误差
1	1	6	5.90	-0.1
	2	12.49	12.80	0.31
	3	21.73	22.10	0.37
	4	31	30.50	-0.5
	5	38.77	37.50	-1.27
2	1	6	5.90	-0.1
	2	12.49	12.80	0.31
	3	21.73	22.30	0.57
	4	31	30.50	-0.5
	5	38.77	37.70	-1.25
3	1	6	6.00	0
	2	12.49	12.80	0.31
	3	21.73	22.30	0.57
	4	31	30.80	-0.2
	5	38.77	37.40	-1.28

结果分析:3 组检测误差最大绝对值 1.28%,准确度误差小于 2%。

5 监测施工技术方法

5.1 选择监测面

据监测区地形地貌特点和地质灾害监测要求,在滑坡前缘、中部、后缘布置监测面,在每个代表性滑层面布置传感器。测试试验点为云南腾冲市清水乡黄瓜箐滑坡。

5.2 打监测钻孔

据监测区布点情况,按布点采用轻型便携钻机钻孔。

(1)钻孔:将取土钻竖直于地面,双手紧握手柄顺时针下压慢速转动。不要太用力,务必慢速多转

几圈,防止钻头跑偏至孔洞打歪。将取土钻从孔洞中取出,放到盆子里,用工具把钻出的土收集到盆子里用来和泥浆(第一钻土因为杂质过多,不做收集)反复持续上述打孔、取土,并在此过程中尝试性地将传感器轻放入孔洞中(请勿将设备用力触底),以测试孔洞的深度是否合适。若有卡顿,则使用取土钻修正,保证传感器放入、取出都比较顺畅;直到孔深与传感器所标识的安装位置齐平,打孔完成。

(2)和泥浆:挑出盆中土壤杂质,石子、根、不易溶解的土块等。将土壤搓细,以便和泥浆。倒入适量水,充分搅拌至粘稠状壤土泥浆(一般不能稠于“芝麻酱”状),和泥浆完成。灌浆安装:将泥浆慢慢倒入孔洞,大概到孔洞1/2的位置可根据实际情况酌情增减。将传感器慢慢放入孔洞中,向一个方向慢慢转动并下压,速度过快可能会导致气泡不能被

完全排出(注意:在转动下压的过程中不可以上拔传感器,防止气体再次吸入孔中)。当传感器安装到正确的深度后,设备周围会溢出一些泥浆,灌浆完成;此时传感器安装深度与洞口齐平(注意:将传感器周围3 m以外多余的泥浆清除,防止结块影响水分下渗)。

(3)支架安装:将太阳能板上面的固定架穿入三角支架的顶部,侧面用配套螺丝拧紧。撑开三角支架,利用配套的L型组件和螺杆将三角支架固定到地面上。将太阳能板上GSM/GPRS传输模块、野外供电模块、电源控制模块中引出的信号线、电源线穿过固定架管与地下探管内安装的FDR管式温度含水量传感器(4组)、转换电路、嵌入式芯片及其外围电路的信号线、电源线对应相连接。

图4为监测仪工作现场示意图。

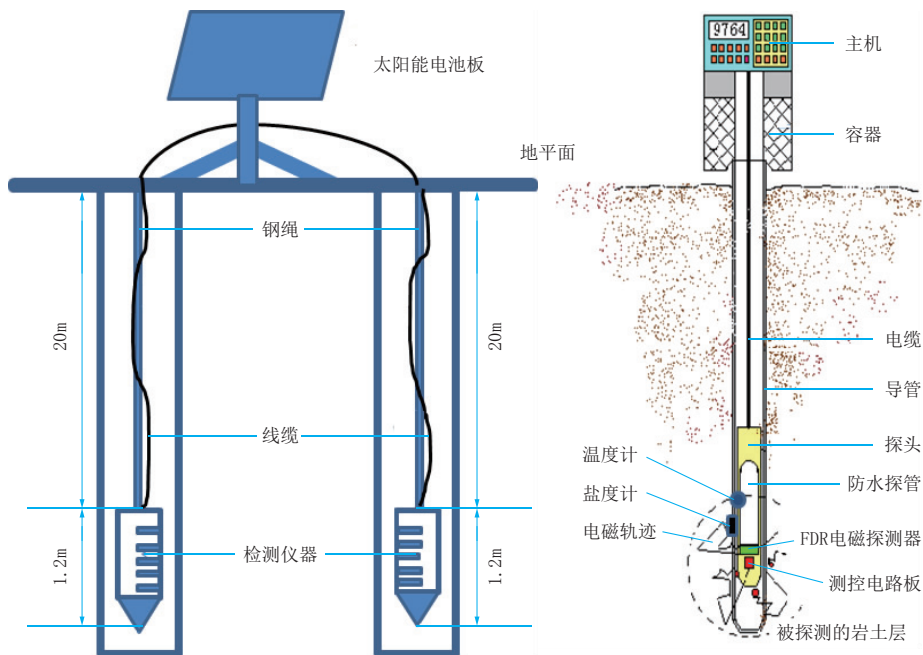


图4 监测仪工作现场示意

Fig.4 Schematic diagram of the monitor work site

5.3 分层埋设地下探管和含水量传感器

分层钻孔完成后,将装载传感器的地下探管分层埋设,探头前面的探针直插所测岩土层位,固定好地下探管,孔口要封堵作防雨处理,防止雨水流入孔内,在地下探管未下入之前,钻孔中非测量段要做好堵漏防渗处理。图5为埋设现场。

5.4 防护措施

安装免仪器因雷雨损坏而专修的防雷雨监测

罩和无线避雷针。地面系统测试设备必须放置于保护罩内,并设有太阳能电池和防雷装置。

5.5 试机

连接电缆和笔记本电脑,联机试验,如数据正常方可进行下面的工作,否则要及时检查排除故障。

5.6 开机测试

按设计要求进行监测系统实时采集自动记录和无线发送,图6为温度-质量含水量曲线。



图 5 埋设现场

Fig.5 Installation site

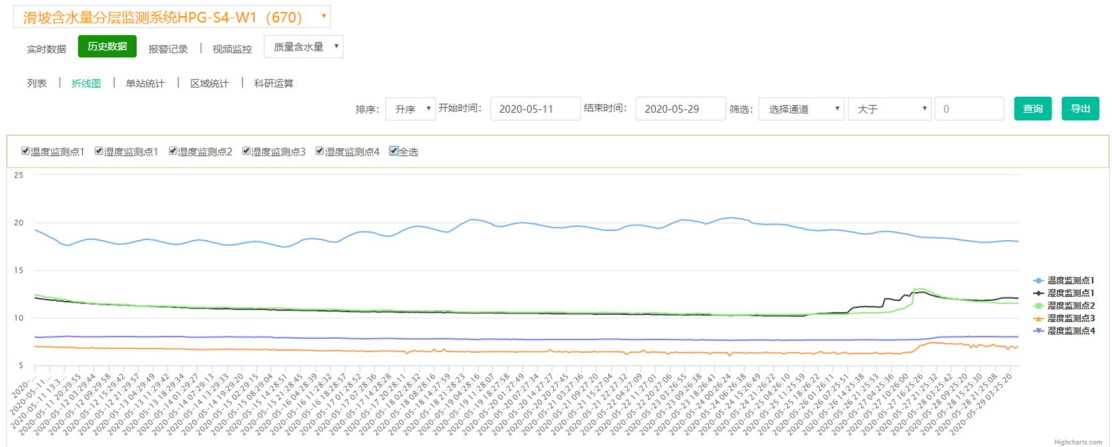


图 6 温度-质量含水量曲线 (%)

Fig.6 Temperature - mass water content curve

参考文献 (References):

[1] 胡建东,赵向阳,李振峰,等.参数调制探针式电容土壤水分传感技术研究[J].传感技术学报,2007,20(5):1057-1060.
HU Jiandong, ZHAO Xiangyang, LI Zhenfeng, et al. Technique considerations on the use of a probe capacitance sensor with parameter modulation for measuring soil moisture content [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(5): 1057-1060.

[2] 李笑吟,毕华兴,刁锐民,等.TRIME-TDR 土壤水分测定系统的原理及其在黄土高原土壤水分监测中的应用[J].中国水土保持科学,2005,3(1):112-115.
LI Xiaoyin, BI Huaxing, DIAO Ruimin, et al. The measurement principles of TRIME-TDR system and its application in Caijiachuan watershed of loess plateau, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(1):112-115.

[3] 朱安宁,吉丽青,张佳宝,等.不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究[J].土壤学报,2011,48(2):263-268.
ZHU Anning, JI Liqing, ZHANG Jiabao, et al. Empirical relationship between soil dielectric constant and volumetric water content in various soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48 (2):263-268.

[4] 江朝晖,檀春节,支孝勤,等.基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪研制[J].传感器与微系统,2013,32(1):79-82.

6 结论

通过试验所测含水量数据检测证明:FDR 型岩土多层含水量监测仪能测定岩土层温度、含水量,埋设安装施工工艺合理快捷,完成了岩土层剖面含水量多点分层测试,仪器采集的数据可进行无线通讯遥测和存储。FDR 型岩土多层含水量监测仪运行性能稳定,所测的数据可靠,是一种理想的岩土层多层含水量测试仪器,是滑坡、泥石流地质灾害预警监测理想的选择。

JIANG Zhaohui, TAN Chunjie, ZHI Xiaoqin, et al. Development of portable soil moisture detector based on principle of frequency domain reflectometry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013,32(1):79-82.

[5] 张建斌.锁相与频率合成[M].北京:科学出版社,2011.
ZHANG Jianbin. Phase lock and frequency synthesis[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[6] 王伟旭.用相位推算算法实现瞬时测频[D].成都:电子科技大学,2007.
WANG Weixu. Realization of instantaneous frequency measurement by phase calculation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.

[7] Reinhold Ludwig, Gene Bogdanov.射频电路设计——理论与应用(第二版)[M].王子宇,王心悦,等译.北京:电子工业出版社,2013.
Reinhold Ludwig, Gene Bogdanov. RF circuit design—theory and application, second edition [M]. Translated by WANG Ziyu, WANG Xinyue, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.

[8] 张玉兴.射频模拟电路[M].北京:电子工业出版社,2000.
ZHANG Yuxing. RF analog circuit[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.

[9] 黄振兴.微波传输线及其电路[M].成都:电子科技大学出版社,2010.
HUANG Zhenxing. Microwave transmission line and its circuit

- [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2010.
- [10] Gaskin G J, Miller J D. Measurement of Soil Water Content Using a Simplified Impedance Measuring Technique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63: 153-160.
- [11] 张俊涛, 李媛, 陈晓莉. 基于无线传感网络的果树精准灌溉系统[J]. 农机化研究, 2014(2): 183-186.
ZHANG Juntao, LI Yuan, CHEN Xiaoli. Precision irrigation system based on wireless sensor networks for fruit trees[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(2): 183-186.
- [12] Sedra A S, Smith K C. Microelectronic Circuits[M]. London: Oxford University Press, 1998.
- [13] Millman J, Grabel A. Microelectronics[M]. New York City: McGraw-Hill Inc, 1988.
- [14] 李秀春, 刘洪禄, 杨培岭. SMP-01 土壤水分传感器研制[J]. 中国农村水利水电, 2002(1): 38-39.
LI Xiuchun, LIU Honglu, YANG Peiling. Development of soil moisture sensor SMP-01[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(1): 38-39.
- [15] 唐玉邦, 何志刚, 虞利俊, 等. 土壤水分传感器(FDR)在作物精准灌溉中的标定与应用[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 343-344.
TANG Yubang, HE Zhigang, YU Lijun, et al. Calibration and application of soil moisture sensor (FDR) in crop precision irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(4): 343-344.
- [16] 鲍芳荻. 基于 TDR 技术的无线土壤水分测量系统研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.
BAO Fangdi. Research on wireless soil moisture measurement system based on TDR Technology[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2013.
- [17] 冶林茂, 吴志刚, 牛素军, 等. GStar-1 型电容式土壤水分检测仪设计与应用[J]. 气象与环境科学, 2008(3): 82-85.
YE Linmao, WU Zhigang, NIU Sujun, et al. Design and application of GStar-I capacitive soil moisture sensor[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2008(3): 82-85.
- [18] 卢启福, 吴慕春, 胡月明, 等. 基于 TDR-3 的土壤水分传感器标定模型研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(7): 1066-1070.
LU Qifu, WU Muchun, HU Yueming, et al. Calibration model of a TDR-based probe for monitoring soil water content[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(7): 1066-1070.
- [19] Weiss A. J., Friedlander B. Simultaneous Signals in IFM receivers. Radar, Sonar and Navigation[J]. IEE Proceedings, 1997, 144(4): 181-185.
- [20] High Dynamic Range Receiver Parameters tech-note[M], 2001.
- [21] Allen P E, Holberg D R. CMOS Analog Circuit Design[M]. London: Oxford University Press, 2002.
- [22] Soclof S. Design and Application of Analog Integrated Circuits [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1992.

(编辑 王建华)

(上接第 25 页)

- [14] 谢小荣. 水上钻探的若干技术问题[J]. 广州建筑, 2009, 37(5): 42-43.
XIE Xiaorong. Some problem of the water drilling technology [J]. Guangzhou Architecture, 2009, 37(5): 42-43.
- [15] 李尚华. 浅谈水上钻探[J]. 甘肃水利水电技术, 2002, 38(2): 134-136.
LI Shanghua. On water drilling[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2002, 38(2): 134-136.
- [16] 郭培国. 工程勘察的水上钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S1): 80-82.
GUO Peigu. Water drilling technology of engineering survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(S1): 80-82.
- [17] 和志明. 西部原油管道定向穿越黄河工程水上钻探技术[J]. 甘肃水利水电技术, 2006, 42(3): 282-283.
HE Zhiming. Overwater directional drilling technology for the western crude oil pipeline crossing of the Yellow River [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2006, 42(3): 282-283.
- [18] 杨国安. 巫山龙潭沟大桥水上钻探技术分析[J]. 中华民居, 2011(12): 92-93.
YANG Guoan. Analysis of overwater drilling techniques for Wushan Longtangou Bridge[J]. China Homes, 2011(12): 92-93.
- [19] 王建伟, 霍玉兵, 李晶. 秦皇岛七里海潟湖水上钻探取样及勘察成果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 73-77.
WANG Jianwei, HUO Yubing, LI Jing. Analysis on drilling sampling and survey results in Qinhuangdao Qilihai Lagoon [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4): 73-77.
- [20] 蔡家品, 贾美玲, 沈立娜, 等. 难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 67-73, 91.
CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 67-73, 91.

(编辑 韩丽丽)