

A New Design of Soil Moisture Sensor Based on Frequency Domain Reflectometry

HUANG Feilong*, HUANG Hongzhi, LI Xindi, LIN Jintian

(Guangdong Atmospheric Sounding Technology Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: A new design of soil moisture sensor using frequency domain reflectometry technology is introduced by derivation of equation of high frequency response of transmission line. With proper length of transmission line and appropriate resonance circuit, a simple comparator circuit connected in parallel to the resonance circuit with standing wave can determine the relationship between signal frequency and relative permittivity of soil. Thus soil moisture can be calculated in theory of permittivity and ingredient of soil. The structure of new sensor is presented and data measured is shown. Results show that data from the new sensor matches that from oven drying method, and the maximum error is less than 2%, which can meet the need of agrometeorological monitor.

Key words: soil moisture sensor; frequency domain reflectometry; transmission line; relative permittivity

EEACC: 7230; 7310

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.09.028

基于频域反射的土壤水分探测传感器设计

黄飞龙*, 黄宏智, 李昕娣, 林金田

(广东省大气探测技术中心, 广州 510080)

摘要: 通过详细介绍传输线的高频率响应原理及其推导方程, 以此为基础设计了基于频域反射的土壤水分探测传感器。传感器采用合适长度的传输线以及参数匹配的谐振电路, 利用驻波的原理, 使用简单的比较电路确定信号频率与土壤介电常数的关系, 再利用介电常数和土壤成分结构之间的关系计算土壤水分含量。设计了传感器结构模块及给出了部分的试验对比结果。结果显示传感器测量数据与烘干法测量数据相吻合, 最大误差不超过 2%, 满足农业气象探测的要求。

关键词: 土壤水分传感器; 频域反射; 传输线; 介电常数

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)09-1367-04

频域反射技术 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 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。

和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 and 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^[1], 光频域的 FDR 在传感器领域的研究也越来越多^[2]。

土壤水分的探测方法有多种, 其中烘干称重法是最传统的, 由于对设备的要求不高, 操作简单, 结果可靠, 不但被使用得最多而且在国际上也被作为对比的标准方法。但是烘干法也有缺点: 每次测量需要取土, 烘干, 称重, 计算等多个步骤, 工作量大, 时间长, 尤其是测量多层土壤水分含量的时候, 工作量成倍增加。张力计法也是应用广泛的一种方法, 它是一种低成本设备的直接测量方法, 缺点是反应时间太慢。射线法是利用各种射线进入土壤的衰减

来计算土壤含水率,唯一的缺点是设备维护成本高而且有辐射危险。传统方法还有电阻法,热扩散法等等^[3]。探针式电容测量法^[4]和 TDR 测量法则是出现得比较晚的新方法,都能实现实时快速测量工作,但探针电容需要加强弱信号处理环节,而且容易损坏,而 TDR 测量具有非线性缺陷^[5]。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,与其他测量方法相比,具有几个优点:频域反射技术分辨率高,线性度好;仪器主要是电路模块,维护简单;无污染,测量的时候不需要破坏土层,方便连续测量。

1 均匀传输线的高频特性

当波长和电路尺寸处于同一数量级时,信号的传输具有电磁波的性质,将会受到传输线多种参数的影响,出现延时,回波,散射等现象,称为传输效应^[6]。常用的传输线是平行双导线和同轴电缆,平行双导线由两条直径相同、彼此平行布置的导线组成;同轴电缆由两个同心圆柱导体组成。这样的传输线在一段长度内,可以认为其参数处处相同,故可称为均匀传输线。均匀传输线的原始参数是用每单位长度的电路参数来表示的,即单位长度线段上的电阻 R (包括来回线),单位长度线段上的电感 L ,单位长度线段的两导体间的电导 G ,单位长度线段两导体间的电容 C 。当工作波形为电场、磁场和传输方向三者互相垂直的电磁波在均匀传输线中传播时,其电阻、电感和电容在很宽的频率范围内是不变的,这种情况下传输线输入正弦信号时,传输线上各点的电压、电流都将按正弦规律变化。因此可认为:这种条件下的传输线上任一点的信号是距离 Z 的函数。

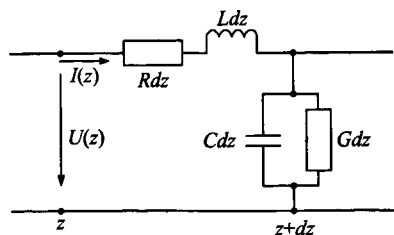


图1 单位传输线的等效电路图

假设单位长度的传输线为 dz ,当信号由 Z 端传送到 $Z+dz$ 端时,电压产生 du 的增量,电流产生 di 的增量,它们与原始参数之间的关系相量式可表示为:

$$(Rdz + j\omega Ldz) \dot{I} = -d\dot{U} \quad (1)$$

$$(Gdz + j\omega Cdz) \dot{U} = -d\dot{I} \quad (2)$$

联立上两式可解得:

$$\dot{U} = A_1 e^{-\nu z} + A_2 e^{\nu z} \quad (3)$$

其中 $\nu = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$,为传输线上波的传播常数, A_1, A_2 为复数常数,可通过边界条件确定。由于电路参数均为正实数,表明了传播常数 ν 的幅角在 $0 \sim 90^\circ$ 之间,所以电压的第一项:

$$\dot{U}_i = A_1 e^{-\nu z} \quad (4)$$

在传播的过程中,始终沿传输线由始端向终端方向行进和传播,称为入射波,也是正向行波。电压的第二项:

$$\dot{U}_r = A_2 e^{\nu z} \quad (5)$$

在传播的过程中,始终沿传输线由终端向始端方向行进和传播,称为反射波,也是反向行波。

高频情况下,均匀传输线上的电阻远小于感抗、电导远小于容纳,可视为无损耗传输线,此时传输线上的特性阻抗可认为是一个纯电阻。

$$Z_c = \sqrt{\frac{(\frac{R}{L} + j\omega)L}{(\frac{G}{C} + j\omega)C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

当传输线终端接入阻抗为 Z_L 的负载,如果 Z_L 不等于均匀传输线的阻抗,入射波将部分反射,入射波和反射波在传输线上叠加。为描述反射波和入射波之间的关系,定义传输线上任一点的反射波电压(或电流)与入射波电压(或电流)之比为反射系数 ρ ,即:

$$\rho = \frac{\dot{U}_r}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_r}{\dot{I}_i} = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (7)$$

可知 $0 \leq |\rho| \leq 1$ 。

2 频域反射与谐振电路

在传输线的输入端接入一个频率可调的振荡器,末端设计一个串联谐振电路,等效电路如图2。

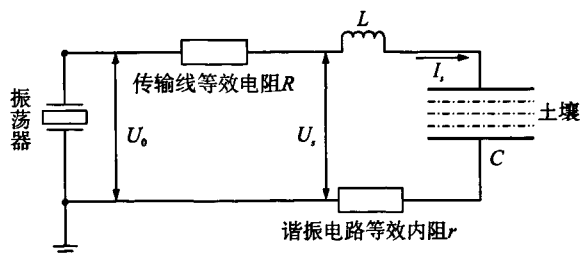


图2 高频下的谐振电路

记 RLC 等效阻抗为 $Z_L = r + j(\omega L - 1/\omega C)$ 。

使用高频振荡器在传输线开始端提供信号电压:

$$U = a \sin 2\pi f t \quad (11)$$

其中 a 是振幅, f 是振荡频率, t 是时间,则在开始端的叠加电压是

$$U_0 = a \sin 2\pi f t + a \rho \sin 2\pi f (t - \frac{2l}{v_p}) \quad (12)$$

其中 l 是传输线的长度, v_p 是信号在沿传输线的传播速度。如果传输线设计成 $v_p/4f$ 的长度,则变成

$$U_0 = a(1-\rho) \sin 2\pi f t \quad (13)$$

当电路的谐振条件 $\omega L = 1/\omega C$ 成立,传输线上出现频率相同而传播方向相反的两列相干波叠加,呈行驻波状态,此时, U_0 的最大值:

$$\hat{U}_0 = a(1-\rho) \quad (14)$$

相似地在传输线和传感器结合部的峰值电压:

$$\hat{U}_s = a(1+\rho) \quad (15)$$

两个峰值电压的差值:

$$\Delta U = \hat{U}_s - \hat{U}_0 = 2a\rho \quad (16)$$

则由于谐振电路中电容的电介质为土壤,土壤的水分变化反映在电容 C 的变化值上。使用频率扫描的办法,不断调整信号电源的频率,使得上述电路的谐振条件成立,测得的电压差最大,此时的信号频率即为谐振电路的固有频率。

3 土壤水分含量与谐振频率

由于谐振发生的条件成立

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (17)$$

通过电容与介电常数的关系

$$\varepsilon = C/C_0 \quad (18)$$

可以求得土壤的相对介电常数,其中 C_0 是介质为空气时候的电容。

许多文章研究证实土壤介电常数 ε 与土壤水分含量 ω 之间具有线性关系^[7-9]:

$$\omega = a\sqrt{\varepsilon} + b \quad (19)$$

其中 a, b 是两个常数,由土壤的类型决定,可以通过查询相关的文献获取典型测量值^[10-11]。

因此,选择合适参数的传输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。

4 传感器的结构以及试验结果

如图 3 所示,传感器主要分为六大部分。设计中采用 100 MHz 晶体振荡器作为信号源并产生扫描频率,信号电压经过传输线与谐振电路,并在两者的结合部产生反射形成驻波,电压比较电路比较传输线起始两端的叠加电压,产生电压差并且送到单片机,单片机记录与最大电压差值相对应的高频信

号频率,进一步计算土壤介电常数和土壤水分含量。

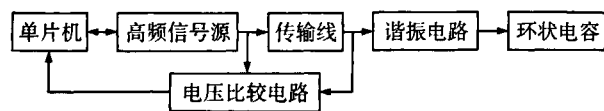


图 3 土壤水分探测传感器结构图

试验中,采用传统的烘干法测量红色粘土的土壤含水量与本传感器的实际测量值做对比,得到对比数据如表 1 所示。

表 1 烘干法与 FDR 测量土壤水分含量数据

序号	烘干法/%	FDR/%	序号	烘干法/%	FDR/%
1	0.02	0	16	14.24	14.3
2	0.20	0.1	17	15.21	16.1
3	0.48	0.3	18	18.43	20.0
4	0.58	0.5	19	27.80	28.2
5	0.65	0.6	20	30.00	28.9
6	0.73	0.6	21	32.16	32.5
7	0.83	0.7	22	44.60	45.6
8	0.89	0.9	23	48.36	48.2
9	1.37	1.0	24	49.00	49.4
10	1.48	1.3	25	51.38	51.3
11	1.82	2.0	26	52.75	52.7
12	2.48	2.0	27	53.16	53.2
13	4.42	4.0	28	53.31	52.1
14	5.10	4.1	29	53.97	53.9
15	7.85	9.4			

试验的红壤在其土壤体积含水量达到 53% 的时候基本饱和。传感器测量值根据农业气象测量数据的数据传输规范,只保留一位小数。在土壤水分含量小于 1% 以及大于 53% 的情况下做了多次测量以测试传感器在这两种极端情况下的准确度。

如图 4 所示,传感器测量数据总体比较接近传统的烘干法测量数据,在小水分含量以及接近饱和的情况下两条曲线也基本重叠,显示出数据的吻合

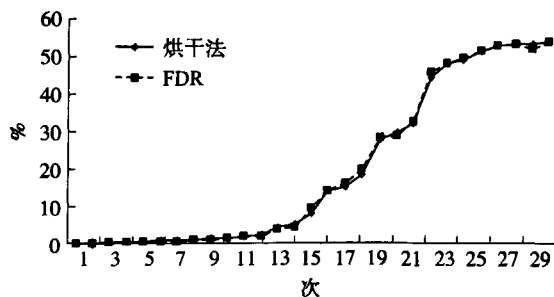


图 4 两种测量数据的轨迹

程度很高。测量数据的误差如图5所示,在土壤水分含量小于1%的情况下,传感器的相对误差比较大;随着土壤水分含量逐渐增大,传感器测量的相对误差也逐渐减小。造成这种情况主要有两个原因:一是测量环境的微小变化也会影响传感器中电容的介电常数,二是烘干法本身虽然作为公认的对比方法,但其本身也具有测量误差,在测量数据很小的情况下这两个方面的影响容易被放大。而图5的绝对误差曲线显示,绝对误差均小于2%,最大值为1.57%。根据中国气象局监测网络司2008年4月《自动土壤水分观测仪功能需求书》,要求传感器测量误差范围是 $\pm 5\%$,因此FDR传感器符合农业气象观测的要求。

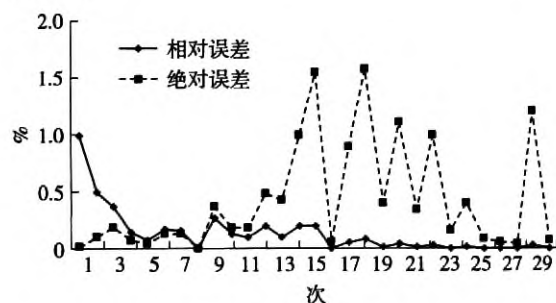


图5 FDR测量偏差

5 结论

本文在均匀传输线理论和驻波原理的基础上设计了FDR土壤水分探测传感器,模块化的电路结构使得传感器能够快速测量和便于维护。试验结果表

明,在红壤含水量从0到饱和(53%)的范围内,传感器与传统烘干法两者的测量数据曲线高度吻合。传感器最大测量误差小于2%,符合农业气象观测规范要求,具有推广的价值。

参考文献:

- [1] 罗俊华,周作春,李华春,等. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术,2007,(1):169-172.
- [2] 吴飞,蔡璐璐,李志全. 分布式光纤应变传感器的研究[J]. 仪器仪表学报,2005,S8:159-161.
- [3] 陈家宙,陈明亮,何圆球. 各具特色的当代土壤水分测量技术[J]. 湖北农业科学,2001,(3):25-28.
- [4] 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器技术研究[J]. 传感技术学报,2007,20(5):1057-1060.
- [5] 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.
- [6] 黄振兴. 微波传输及其电路[M]. 成都:电子科技大学出版社,2010:120-150.
- [7] Cosenza Ph, Tabbagh A. Electromagnetic Determination of Clay Water Content: Role of the Microporosity [J]. Applied Clay Science,2004,26:21-36.
- [8] 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.
- [9] Miller J D, Gaskin G J, Anderson H A. From Drought To Flood: Catchment Responses Revealed Using Novel Soil Water Probes [J]. Hydrological Processes,1997,11:533-541.
- [10] 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.
- [11] 冶林茂,吴志刚,牛素军,等. GStar-I 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.



黄飞龙(1980-),男,广东郁南人,工学硕士,毕业于华南理工大学自动化专业,工程师,现工作于广东省大气探测技术中心,从事环境探测传感器研发与数据采集系统开发工作,chasellong@126.com;



黄宏智(1982-),男,广东湛江人,工学硕士,毕业于暨南大学通信与信息系统专业,工程师,现工作于广东省大气探测技术中心,从事雷达探测系统与大气电场设备的研究工作,645763188@qq.com。