

基于时域反射法的土壤水分系统设计

苏 振^{1,2}, 胡锦涛², 姚学召², 王中金², 陈海波¹, 李 佳²

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003;

2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要:土壤水是植物生存和生长发育的基础物质之一, 土壤水分的测量对于农业生产具有重要的指导意义。基于时域反射技术测量土壤水分精度高、适应性好等优点, 设计了时域反射法测量原理的土壤水分系统。该系统采用 STM32F103RET6 作为控制器, 控制电平进行发射脉冲和采样脉冲的产生和采样, 通过对信号采样、处理得到探头在土壤中的传输时间, 根据传输时间变化计算出土壤的介电常数和土壤体积含水量。结合样机分别对 3 种不同质地的土壤进行水分性能实验测试, 系统测试的体积含水量与称重法测试的结果接近, 测试误差小于 2.5%。

关键词:时域反射; 土壤含水量; 介电常数

中图分类号: TP23

文章编号: 1000-0682(2024)05-0031-03

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.006

Soil moisture system design based on time domain reflectometry

SU Zhen^{1,2}, HU Jintao², YAO Xuezhao², WANG Zhongjin², CHEN Haibo¹, LI Jia²

(1. CMA · Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Henan Zhengzhou 450003, China;

2. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Henan Zhengzhou 450047, China)

Abstract: Soil water is one of the basic substances for plant survival and growth. Soil water measurement has important guiding significance for agricultural production. Based on the advantages of high precision and good adaptability of time domain reflectometry to measure soil water, a soil water system based on time domain reflectometry was designed. The system uses STM32F103RET6 as the controller to control the level to generate and sample the emission pulse and sampling pulse. The transmission time of the probe in the soil is obtained by sampling and processing the signal, and the dielectric constant of the soil and the volume water content of the soil are calculated according to the change of the transmission time. Combined with the prototype, the water properties of three kinds of soil with different textures were tested. The volume water content tested by the system was close to the test result of the weighing method, and the test error was less than 2.5%.

Keywords: time domain reflectometry; soil moisture content; dielectric constant

0 引言

土壤水分是土壤的一个重要物理参数, 也是反

映土壤品质和状态的一个重要指标, 它不仅影响到土壤的物理性质, 还是构成土壤肥力的一个重要因素, 更是一切植物赖以生存的基本条件, 在植被的蒸散发以及光合作用过程中起着重要作用。在现代农业生产中, 针对土壤水分进行测量, 更好地掌握作物对水的需要情况, 科学指导农业灌溉决策、管理等活动, 提高水土资源利用效率, 在农业防灾减灾、应对气候变化、增强粮食生产能力和保障国家粮食安全等方面都具有重大意义。

目前常用的土壤的测量方法主要有时域反射法

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金资助 (AMF202305)

第一作者: 苏振 (1989—), 男, 河南郑州人, 本科, 工程师, 研究方向为设备自动化。E-mail: 626422378@qq.com

通信作者: 陈海波 (1981—), 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为农业气象自动化观测。E-mail: 626422378@qq.com

(TDR)、频域反射法(FDR)、驻波率法(SWR)和电容法等^[1-2],其中时域反射法是最先进的土壤水分测量方法之一,具有快速、准确、可长期监测等优点,越来越多地被用于土壤水分的测量中。该文设计了一种基于 TDR 测量原理的土壤水分系统,可以进行土壤水分的测量,同时进行了相关实验测试。

1 系统原理

时域反射法(TDR)的基本原理是,通过测定高频电磁脉冲在土壤中传输和反射波的起始、终止时间来测量土壤的介电常数,通过经验公式计算出土壤水分。电磁波传播的速度依赖于土壤的介电特性,在一定的电磁波频率范围内(50 MHz ~ 10 GHz),矿物质、空气和水的介电特性为常数,因此土壤的介电常数主要依赖于土壤体积含水量(极微弱地依赖于土壤类型、密度、束缚水等)^[3-6]。高频电磁波在土壤中的传播速度 V 与土壤介电常数 k 存在下面的关系式:

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

式中: V 为电磁波在土壤介质中的传播速度; c 为电磁波在真空中的传播速度(3×10^8 m/s); k 为土壤介质的介电常数。

TDR 通过测量高频电磁脉冲在土壤中的传播速度求得土壤的介电常数。在实际测量中,由于系统探头传输线长度一定,可以发射电磁脉冲,测量它在传输线,即插入土壤中的金属导波棒中的传输时间 t ,而计算传输速度 V :

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

式中: L 为土壤中的金属导波棒长度; t 为电磁波在金属导波棒中的传输时间。

由式(1)和式(2)可知,电磁波在土壤中的传输时间与土壤介电常数具有相关性,系统通过测量传输时间来得出土壤介电常数。

从 20 世纪 80 年代开始,各国科学家投入了大量精力,研究体积含水量与土壤介电常数的标定公式,其中应用广泛的主要有经验公式和半经验半物理模型。很多研究结果表明:经验公式中 Topp 模型综合性能较好^[7],系统利用 Topp 公式作为土壤含水量和介电常数之间的关系模型,计算出土壤含水量 Q_v :

$$Q_v = a_1 + a_2 \cdot k + a_3 \cdot k^2 + a_4 \cdot k^3 \quad (3)$$

式中: $a_1 = -5.3 \times 10^{-2}$; $a_2 = 2.92 \times 10^{-2}$; $a_3 =$

-5.5×10^{-4} ; $a_4 = 4.3 \times 10^{-6}$ 。

2 硬件系统设计

该文设计的系统具有输出测量波形、数据采集、信号分析处理、计算、存储、输出等功能,系统总体框图如图 1 所示。该系统主要由控制模块、前端处理模块和探头组成。控制模块协调前端处理模块的工作,同时对获得的回波信号进行处理、分析、计算、存储和数据通信,前端处理模块对发生信号进行处理、整形、采样、保持等工作,探头置于土壤中,作为感应土壤水分变化的敏感元件。

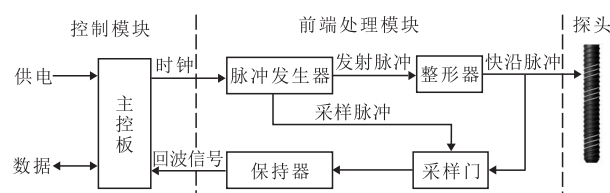


图 1 系统总体框图

2.1 控制模块设计

系统的核心是控制模块,由它完成整个采集控制过程,包括时钟脉冲产生、回波信号的数字量化,同时对该数字量化数据进行处理、分析、存储后,计算出土壤介电常数、土壤水分含量。控制模块以 STM32F103RET6 单片机作为主控芯片,该单片机为 Cortex - M3 内核,FLASH 为 512 KB,SRAM 为 64 KB,带有各种数字接口,可以满足系统的需求。

2.2 前端处理模块设计

前端处理模块由脉冲发生器、整形器、采样门和保持器组成。脉冲发生器对来自控制模块的时钟信号的低电平进行变换,形成线性度很高的脉冲,同时作为发射和采样的脉冲信号。整形器对发射脉冲的边沿进行加速,形成快沿脉冲,通过同轴电缆输出到探头。采样脉冲通过控制采样门的通断,对探头反射信号进行采样保持,得出的回波信号送到控制模块进行数字化。

2.3 探头设计

探头采用螺旋型管式结构,将探针镶嵌在螺管的螺旋凸起上作为感应土壤水分的元件,探头同时采用管式结构,可以进行剖面土壤水分测量,安装使用时可以减少土壤扰动,可以克服插针式剖面测量时破坏土壤的缺点。



图 2 螺旋管式结构设计

3 软件设计

该文设计的基于时域反射法的土壤水分系统的软件流程如图 3 所示。系统上电后首先进行各硬件模块的初始化设置,完成后进行系统自检,自检成功后进行数据的测量,主控板产生一路时钟信号进入脉冲发生器,经前端处理模块的处理后获得回波信号,通过 ADC 芯片完成数字化。同时利用算法运算对采集的波形进行分析处理,计算出脉冲信号在探针上的传输时间 t ,从而计算出土壤介电常数,利用 Topp 公式计算出土壤水分含量,并对数据进行存储、输出,完成整个测量过程。

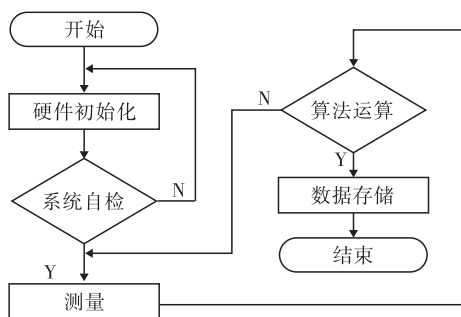


图3 软件测量流程图

4 系统测试及结果分析

为了更好地验证该系统对土壤水分测量的准确性,分别对沙土、壤土和黏土这 3 种土壤进行测试并与烘干称重法测量的结果进行对比测试^[8-10]。在田间取回土风干后,磨细、去杂,然后经过 2 mm 的筛子进行过筛,并且充分均匀混合。将土样按一定重量称重 6 份,分别添加不同重量比例的去离子水,充分混合均匀后,静置 24 h,然后分别按一定容重填充于 6 个直径为 24 cm、高度为 35 cm 的容器中,配置成不同含水量的样品。

其预制水分梯度(体积含水量)分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 含水量的土壤样本,用于测试该系统。用该系统测定其土壤的体积含水量,反复测量 10 次,取平均值。同时用烘干称重法^[11]对制作的含水量不同的样本进行取样,烘干测得土壤样本的体积含水量。

表 1 给出了该系统与烘干称重法的测试结果,试验结果表明:系统测试的体积含水量与称重法测得的结果具有良好的相关性,测试误差均小于 2.5%,能够精确测试土壤体积含水量。

表 1 不同含水量测试表

样本	沙土		壤土		黏土	
	TDR	称重法	TDR	称重法	TDR	称重法
1	5.4	6.0	6.1	5.7	6.5	5.8
2	10.3	11.2	10.1	11.7	11.0	12.0
3	15.2	16.8	15.1	17.0	16.2	15.7
4	20.1	21.9	21.1	22.6	22.7	23.6
5	28.7	27.2	27.0	28.1	28.6	27.9
6	35.1	33.3	32.6	33.5	33.5	32.6

5 结论

该文设计了一种基于时域反射技术原理的土壤水分测量系统,该系统可以测量分析信号的波形,测量电磁信号在探头上的传输时间,可以有效测量、反演土壤的介电常数和土壤体积含水量。

对系统样机进行 3 种质地的土壤对比实验,结果表明,该系统的测量结果较为精确,体积含水量测量误差小于 2.5%,同时对不同土壤质地具备较好的适应性。可以有效地检测土壤的墒情变化,对指导作物生长发育有着重要的实用价值和重大的现实意义。

参考文献:

- [1] 谢鹏宇,刘泽鑫.土壤水分测量原理与技术方法研究[J].现代农业科技,2020(23):166-168.
- [2] 张华鑫.土壤水分监测系统的研究[D].长春:长春理工大学,2021.
- [3] 张颖.基于介电常数的土壤水分测量系统设计[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [4] 嵇海洋,胡春杰,杨溯,等.基于土壤介电常数推算土壤墒情的仪器测量技术研究[C]//中国水利学会.2022 中国水利学术大会论文集(第五分册).黄河水利出版社,2022:5.
- [5] 胡建东,李林泽,ABDULRAHEEM MukhtarIderawumi,等.介电特性土壤水分测定方法研究进展[J].河南农业大学学报,2021,55(04):603-611+638.
- [6] 张想奎.基于介电常数与电导率的土壤盐分检测系统设计[D].兰州:西北师范大学,2023.
- [7] 徐玲玲,高彩虹,王佳铭,等.时域反射仪(TDR)测定土壤含水量标定曲线评价与方案推荐[J].冰川冻土,2020,42(01):265-275.
- [8] 李晓斌.基于时域反射技术的土壤剖面分布式含水量测量研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2023.
- [9] 邓超,舒扬,姚俊,等.TDR 土壤墒情传感器在贵州铜仁地区的应用初探[J].安徽农学通报,2020,26(22):123-124+197.
- [10] 曹子聪,徐海峰.TDR 土壤水分在线监测仪器在南京地区应用研究[J].农业与技术,2022,42(20):29-31.
- [11] 郑涵,王海峰.土壤水分计量技术的研究进展[J].计量科学与技术,2022,66(11):31-36+40.