

# 基于 FDR 技术的土壤水分传感器设计

张 宪, 姜 晶, 王劲松

(中国电子科技集团公司第 49 研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 本文以土壤的介电理论为基础, 通过测量土壤的介电常数随土壤水分变化的规律得知土壤的体积含水量, 并利用土壤水分频域反射法实现土壤水分的测量。此方法可以连续检测土壤含水量的变化, 较好的反映土壤水分的变化趋势。本文所设计的土壤水分传感器因具有多个测量分探头, 因此可测量较深的土壤。因采用 RS485 总线通信, 使传感器具有实时测量、响应速度快等特点, 且在 1% 到 35% 的测量范围内精度小于 2%, 具有较高的使用价值。

**关键词:** 频域反射法; 土壤含水量; 介电常数; 归一化频率

中图分类号: TH765.5 文献标识码: B 文章编号: 1003-7241(2011)011-0061-05

## The Design of the Soil Moisture Sensor Based on FDR

ZHANG Xian, JIANG Jing, WANG Jin-song

(The 49th Research Institute, Chinese Electron Science and Technology Conglomerate, Harbin 150001 China)

**Abstract:** This Paper is based on dielectric theory. The volume water content in soil can be determined through the measurements of dielectric constant, which changes with volume moisture of soil. The soil moisture can be measured by using the Frequency Domain Reflectometry(FDR). This method can detect the change of soil moisture continuously and can better reflect its trends. The designed soil moisture probe sensor has multiple measure points, so it can be measured in deep underground features. The sensor has the features of real-time and fast response etc. by using RS485 communication bus. The sensor has the measurement accuracy less than 2% within the range of (1-35)%, so it has higher useful value.

**Key words:** Frequency Domain Reflectometry; water content in soil; dielectric constant; scaled frequency

### 1 引言

水不仅是作物赖以生长的重要因素之一, 而且是肥料能否被作物有效利用的重要前提, 目前由于过量灌溉或雨量过多使肥料渗漏到地下水中已成为地下水污染的主要原因, 这不但造成肥料和水资源的浪费, 而且也破坏了地下水资源。由于土壤结构及土壤水分的空间变异性造成了同一地块中土壤含水量的不同, 这就需要提倡墒情监测和变量灌溉技术。虽然已有数十种土壤水分快速测量方法, 但现有的土壤水分快速测量方法都存在着这样或那样的缺陷, 所以寻求一种精度高、可靠性强、快速性好、适合实时测量的土壤水分传感技术的工作就迫在眉睫<sup>[1]</sup>。

### 2 两种介电测量方法的对比

土壤水分测量基于介电法测量的原理有时域 TDR

(Time Domain Reflectometry) 测量法、频域 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 测量法。TDR 法可对土壤样品快速、连续、准确地测量, 一般不需标定, 操作简便, 可做成手持式在生产中由工作人员即时测量, 也可通过导线远距离多点自动监测。TDR 法最大的缺点是电路复杂, 导致设备昂贵。FDR 法测量土壤含水量的原理与 TDR 类似, 传感器主要由一对电极(平行排列的金属棒或圆形金属环)组成一个电容, 其间的土壤充当电介质, 电容与振荡器组成一个调谐电路, 振荡器工作频率  $f$  随土壤电容的增加而降低, 电容  $C$  随土壤含水量的增加而增加, 由此可知振荡器频率与土壤含水量呈非线性反比关系。FDR 法几乎具有 TDR 法的所有优点, 与 TDR 法相比, 在电极的几何形状设计和工作频率的选取上有更大的自由度。大多数情况下, FDR 法在低频 (100MHz) 工作, 能够测定被土壤细颗粒束缚的水, 这些水不能被工作频率超过 250MHz 的 TDR 法有效地测

收稿日期: 2011-07-26

定。FDR法校准比TDR法更少、更省电、电缆长度限制少,可连续原位测定及无辐射等优点,在水分测定方法方面表现出更独特的优势,也不需要太多的专业知识去分析波形。而且FDR法的探头可与传统的数据采集器相连,从而实现自动连续监测。因此采用FDR法测量原理的土壤水分传感器更适合于实际生产的需求。

### 3 基本工作原理

FDR法是近年应用到土壤科学的,它相比于其它方法更简单,测量更方便。但在过去,通常人们很难得到准确的介电常数测量值。可靠的土壤水分含量必须对每一个应用通过后续的标定来得到。但随着电子技术和元器件的发展,测量介电常数的水分传感器已研制成功,由于FDR法采用了相对较低的工作频率,在测量电路上易于实现,造价较低,因此本传感器的基本工作原理就是利用FDR法来实现土壤水分的快速测量。即由一对圆形金属环组成一个电容,利用土壤充当电介质,电容与振荡器组成一个调谐电路,传感器电容量与两级间被测介质的介电常数成正比关系。由于水的介电常数比一般介质的介电常数要大得多,所以当土壤中的水分增加时,其介电常数相应增大,测量时传感器给出的电容值也随之上升,相应的,传感器的测量频率也会发生变化,由此测得土壤的含水量。

### 4 数学模型

FDR法是通过测量土壤介电常数变化而引起频率变化来测量土壤的含水量,将这些变化转变为与土壤含水量对应的频率信号。利用土壤水分传感器在不同土壤含水量中的归一化频率SF如公式(1),变化来测量土壤体积含水量(V%)如公式(2):

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (1)$$

其中,  $F_s$  土壤中所测得的频率;  $F_a$  放置于空气中所测得的频率;  $F_w$  放置于水中所测得的频率。

体积含水量V%是土壤水分占有的体积( $V_w$ )与土壤体积( $V_e$ )之比,

$$V\% = \frac{V_w}{V_e} \quad (2)$$

输出频率与体积含水量的关系可以用公式  $SF = a \times V^b + c$  表示,其中a,b是由所在地土壤样本确定

的系数,即通过已知样本的输出频率和体积含水量,经过回归分析来确定的回归系数;c为常数项(强制项),由c这个常数项可以确定相关系数r。相关系数是测量值之间相关程度的定量表示,它是绝对值小于或等于1的无量纲统计量。当 $|r| = 1$ 时,表示两个测量值之间有密切关系;反之,当 $|r| = 0$ 时,表示两个测量值之间毫无关系。在同一质地、同一含水量的土壤用两个不同的传感器来测量,比较两个传感器的测量值,计算其相关系数,从而来分析这两个传感器的一致性。基于本传感器相关系数的理论模型为:假设x、y是两个随机变量。 $X_i, y_i$  是他们的各次取值,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。  $\bar{x}, \bar{y}$  是它们的几何平均值。定义变量x、y的相关系数为:

$$r = \frac{s_{xy}}{(s_x^2 \cdot s_y^2)^{1/2}} \quad (3)$$

其中: $s_{xy}$  - x和y的协方差; $s_x^2$  - x的方差; $s_y^2$  - y的协方差。

对上式进行简化,可以得到如下计算形式:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

其中:n - 测量次数;  $\bar{x}$  - x的均值;  $\bar{y}$  - y的均值。

### 5 总体设计

本设计是由硬件和软件两部分组成。硬件设计包括电容式传感器、探测器、数据采集器;软件设计包括单片机编程和上位机界面编程,进行频率信号和土壤水分转换计算、数据入库和浏览,以实现多个探测器对土壤水分的实时采集。采集设备与终端计算机间进行数据传输,终端计算机可对传感器的参数进行设定、指令传送、数据读取等操作,通过终端计算机实时监测、显示和存储各探测器工作状态及主要数据指标,并实现了对历史数据进行调用、分析等功能。

#### 5.1 传感器敏感元件的设计

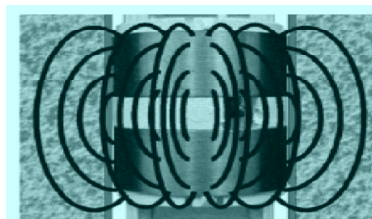


图1 电磁场的边缘分布效应

本传感器是以一种圆环电容式结构,面向测量土壤含水纵向分布的介电式传感器。其传感原理借助于两个带状电极间电磁场的边缘分布效应(fringe effect)。如图1所示。

传感器套管纵向埋在土壤中。套管由PVC塑料制成,外壁上镶嵌有两个金属环状电极,形成圆环电容式结构,如图2所示:

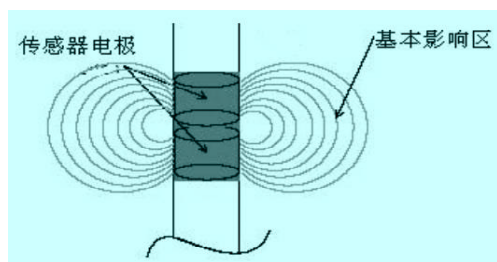


图2 圆环电容式结构

电极间的电场耦合强度与电极周围材料的介电特性密切相关,只要两电极间的电场能量足以穿透套管,电极间电场耦合强度则与套管外的土壤含水量有关。在电场作用下,两个电极构成一个电抗元件,其电特性既可能呈容性,也可能呈感性。如果电抗元件的数值能够随着套管外土壤含水率的变化而改变,它就满足了作为土壤水分敏感元件的基本条件。传感器的阻抗在1~280MHz范围内呈现容抗特性,其后随着测量频率的升高转化为感抗传感器,本传感器的振荡频率在280MHz范围内,因此呈现较好的容抗特性。

## 5.2 硬件电路的设计

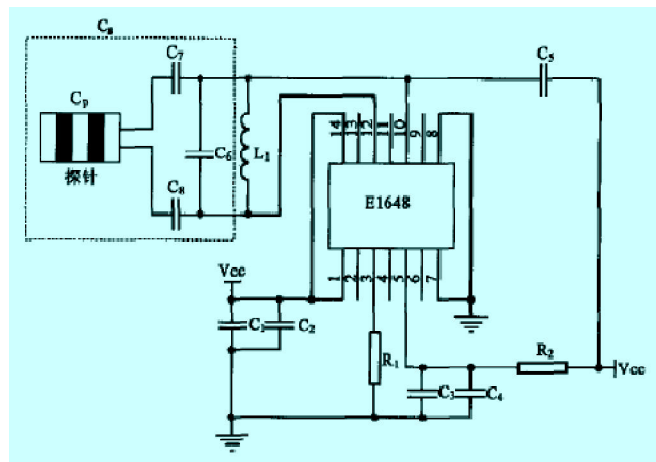


图3 传感器的检测电路原理

本传感器的检测电路原理如图3所示,采用单片机和计算机通讯技术,传感器将LC振荡器的振荡频率信

号输出至探测器,探测器根据建立的SF数学模型,分别计算出土壤的各层水分数据值,把这些数据值在发送给采集器,采集器通过RS232与探测器通讯,即时采集当前水分RS485传至计算机上的监控软件进行数据的接收处理。

根据圆环电容传感器测量原理,土壤含水量的不同,引起圆环电容的介质变化,于是电容值就会改变,从而引起LC的振荡频率变化,将所产生的频率信号通过分频器转换成单片机可识别的频率信号后进行数据处理。该传感器电路核心部件选用频率振荡器集成芯片MC1648D,该芯片工作上限频率225 MHz,工作电源5~7 V。由LC振荡电路产生频率信号通过分频器,检波电路,隔直放大和整流滤波电路等后获取最终的频率信号。其振荡频率实为并联LC谐振频率,即:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_s}} \quad (5)$$

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_7} + \frac{1}{C_8}} + C_6 \quad (6)$$

令:  $C_7 = C_8 = 2C$ , 代入上式后:

$$C_s = \frac{C C_p}{C + C_p} + C_6 \quad (7)$$

其中,  $L_1$  为电感;  $C_6$ 、 $C_7$ 、 $C_8$  为电容;  $C_p$  为土壤水分传感器头的电容值;  $C_s$  为由  $C_6$ 、 $C_7$ 、 $C_8$  及  $C_p$  组合成的电容值;  $f$  为传感器的输出频率。

由此可见含水电介质相对介电常数随着含水率的增加而单调增加,即式(7)中  $C_p$  的增加,式(5)中的  $f$  下降。显然通过测量  $f$  的相对偏移变化,可以间接的测量出土壤水分的变化<sup>[2]</sup>。

## 5.3 软件的设计

由图4给出了系统的软件流程图。

探测器接收采集器采集数据命令,在规定的时间内轮询每个要测量的传感器,测量频率信号,并根据建立的SF数学模型,计算出土壤所含的体积水分值,然后通过RS-485总线,把水分数据发送给采集器。同时,探测器也接收终端计算机通过采集器发送的参数配置数据命令,对计算参数进行重新配置并存储这些参数,其计算机的运行界面如图5所示。



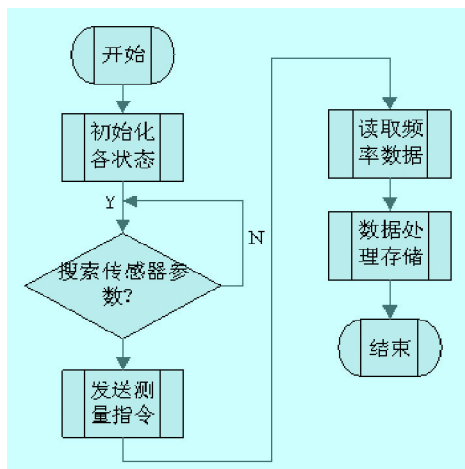


图4 系统的软件流程图



图5 运行界面

## 6 实验过程与结果分析

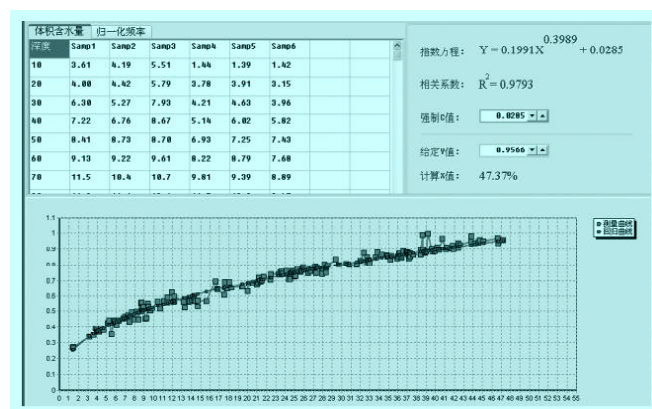


图6 归一化曲线

土壤水分传感器的实验室标定是设计传感器过程中非常重要的一个环节。对本文研制的这种基于边缘场效应原理的土壤水分传感器,在输入-输出关系上无法找到解析解的情况下,只有通过实验室条件下的标定

试验与回归分析,才能定量刻画出传感器振荡频率与被测材料介电常数间的相互关系。目前国际上在研究土壤水分传感器的标定过程中,通常有两种技术,即理想化土样标定与标准介电常数液体标定。理想化土样标定的优点是它用专门配置的不同含水率土样作为标定介质材料,所以标定条件与田间真实情况更加接近。因此在对本传感器的标定过程中采用了此方法,但值得注意的是在标定过程中尽量保持没有空气介入,否则也会引起较大的测量误差。

在本次标定是由标准土壤水分传感器分别测量土壤深度为 10cm、20cm、30cm、40cm、50cm、60cm 以及 70cm 处的土壤体积含水量,以这六个样本数的作为当地土壤样本的初始值来确定 a、b、c 的值,从而确定 SF 曲线。如图 6 所示,可见相关系数接近于 1,是十分理想的。

将待实验的传感器与标准介质柱进行对比标定,即土壤体积含水量为原土、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35% 的标准介质柱,通过 SF 计算,得到的实际体积含水量实验数据如表 1 所示。

表1 实验数据

测试样本	希望体积含水量 (%)	实际体积含水量 (%)
标准介质柱 1	5	5.925
标准介质柱 2	10	10.1
标准介质柱 3	15	14.95
标准介质柱 4	20	20.35
标准介质柱 5	25	25.125
标准介质柱 6	30	30.325
标准介质柱 7	35	35.425
原介质柱	3	3.275

从实际测试的数据及实际体积含水量与希望体积含水量之间的比对结果来看,其误差均在 2% 以内,具有良好的精度和线性度,满足实际使用的需要。

## 7 结束语

本文给出了利用 FDR 法设计土壤水分传感器的基本方法,它以使产量最大化、品质最优化,降低了灌溉成本,优化了植物的水分利用效率,在评价和控制灌溉进度,跟踪土壤中水分流动的升降,同时可进行多个土壤剖面的水分测量<sup>[3]</sup>起到了不可小视的作用。此类传感器可以广泛应用于灌溉规划、农业、园艺、景观管

理、土壤学、植物学、环境科学、水科学等领域的研究,并且具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 赵燕东.土壤水分快速测量方法及其应用技术[D].中国农业大学.博士学位论文.2002,5.
- [2] 孙宇瑞,马道坤,何权,赵燕东.土壤水分剖面实时测量

传感器试验研究[J].北京林业大学学报,2006,28(1).

- [3] 郭卫华,李波,张新时,王仁卿.FDR 系统在土壤水分连续动态检测中的应用.干旱区研究,2003,12(20),4.

作者简介:张宪(1971-),男,研究方向:温度传感器。

(上接第60页)

DB0~DB7为8位双向数据线,与单片机STC89C52的P2口相连;使能端E接P0.2;读写信号R/W接P0.1;寄存器选择端RS,高电平时选择数据寄存器、低电平时选择指令寄存器;Vee为对比电压调整端,使用时通过一个10K的电位器接地,可调节液晶屏的亮度。LCD显示内容包括倒车距离和车外温度两部分,分两行显示:第一行显示倒车距离,第二行显示车外温度。

## 2.6 语音报警电路

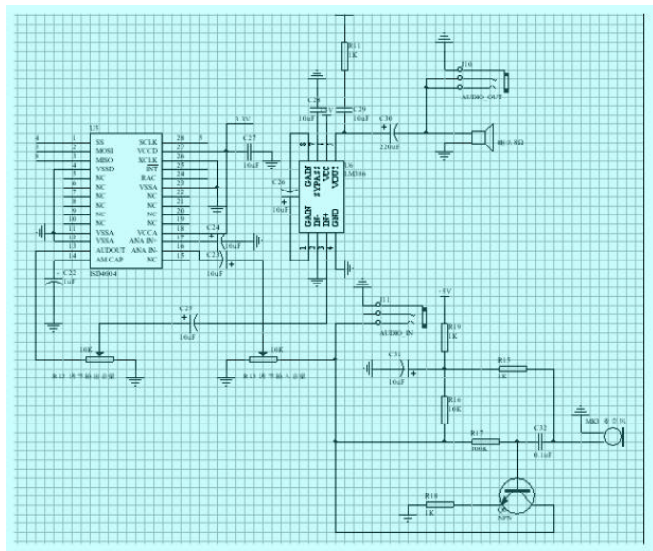


图6 语音报警电路

本设计的语音报警电路采用ISD4004语音芯片。ISD4004与单片机STC89C52单片机接口电路如图6所示。从图中可以看出,ISD4004和单片机之间的连接较少。单片机的P1.3接ISD4004的片选引脚SS,控制ISD4004是否选通;P1.2接ISD4004的串行输入引脚MOSI,从该引脚读入放音的地址;P1.7接ISD4004的串行输出引脚MISO;P1.4接ISD4004的串行时钟引脚SCLK。ISD4004芯片音频信号输出引脚AUD OUT,该引脚通过一个滤波电容,经功率放大电路LM386后与扬

声器连接;麦克风MK3接入ISD4004的录音信号输入端(ANA IN-、ANA IN+);AMCAP为自动静音端,使用时通过一电容接地。

当倒车距离大于3m时,语音提示为“倒车安全”;当倒车距离在2-3m之间时,语音提示为“倒车”;当倒车距离在1-2m之间时,语音提示为“倒车小心”;当倒车距离在0.5-1m之间时,语音提示为“倒车危险”;当倒车距离小于0.5m时,语音提示为“非常危险,紧急停车”。[6]

## 3 结束语

本文对单片机控制的超声波测距仪汽车倒车系统的设计进行了硬件电路图设计,硬件的综合调试。是一款比较完美、实用的倒车雷达。

## 参考文献:

- [1] 吴琼,封维忠,马文杰.汽车倒车雷达系统的设计与实现.现代电子技术[D].南京:南京林业大学 信息科学技术学院.2009,9:198-201.
- [2] 朱利娜.基于单片机的超声测距倒车雷达的研究[J].微计算机信息,2007,(23):110-111
- [3] 韩博奇.车载倒车雷达系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [4] 宋永东,周美丽,白宗文.高精度超声波测距系统设计[J].现代电子技术,2008,(31),15:144-146.
- [5] 孟立凡等.超声测距换能器及收发电路的研究[J].华北工学院学报,2001,22(2):87-89
- [6] 裴有斌,张国忠,陈丰伟,等.基于ISD4004的家庭语音报警系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2008,(4):47-50.

作者简介:高美霞(1961-),女,副高,从事自动控制和PLC控制系统等的教学基础实验研究工作。