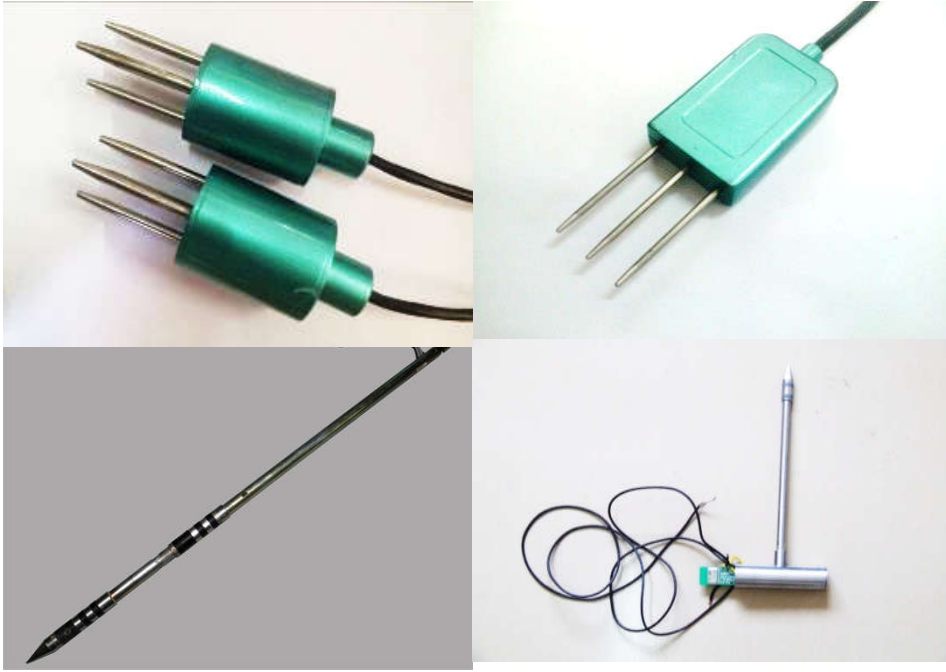


土壤水分实时在线检测方法研究及传感器研制

一、针式土壤水分传感器



1.意义

HYSWR-ARC 土壤湿度传感器可以广泛应用于气象、农业、园林等行业土壤体积含水率测量。本产品接口简单，具备电压信号、RS232 数字信号等多种输出方式，维护方便。每个传感器在出厂时都配有检验证书，提供了标定曲线和标定参数。用户可通过测量传感器输出电压换算出土壤体积含水率。

2.检测原理

土壤是典型的非饱和多孔介质，其体积含水率与表观介电常数之间存在单值关系，含水率越高，整体的介电常数越大，通过测量整体的介电常数即可计算出水的含量。

传感器测量原理如图 1 所示，它由信号源、传输线和探针三部分构成。其中信号源为 100MHz 的正弦波。

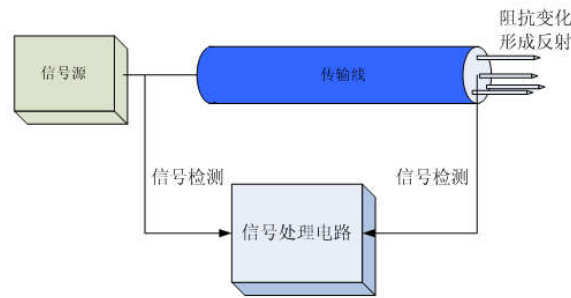


图1 土壤湿度传感器测量原理图

信号源发出的信号沿着传输线传输，由于探针与传输线的阻抗不同，因此会产生信号反射。反射的强度与阻抗的差异相关。在实际使用时，探针的阻抗与周围土壤的介电常数相关，即与土壤体积含水率相关，由此，在信号反射与土壤体积含水率之间建立关系，通过测量信号的反射情况即可得到土壤体积含水率。

3.主要技术参数

测量参数：土壤体积含水率；

测量范围：0~100%；

精度：±2%；

动态响应：<2s；

输出信号：标准电压信号 DC0~2.5V；RS232 输出；

供电电压：DC 12V；

功 耗：0.72W

尺寸规格：长 170mm，直径 51mm；

线缆长度：10m

材质：外壳：PVC，探针：不锈钢

工作温度：-50℃~50℃

存储温度：-50℃~60℃

3.实验分析

(1) 标定试验

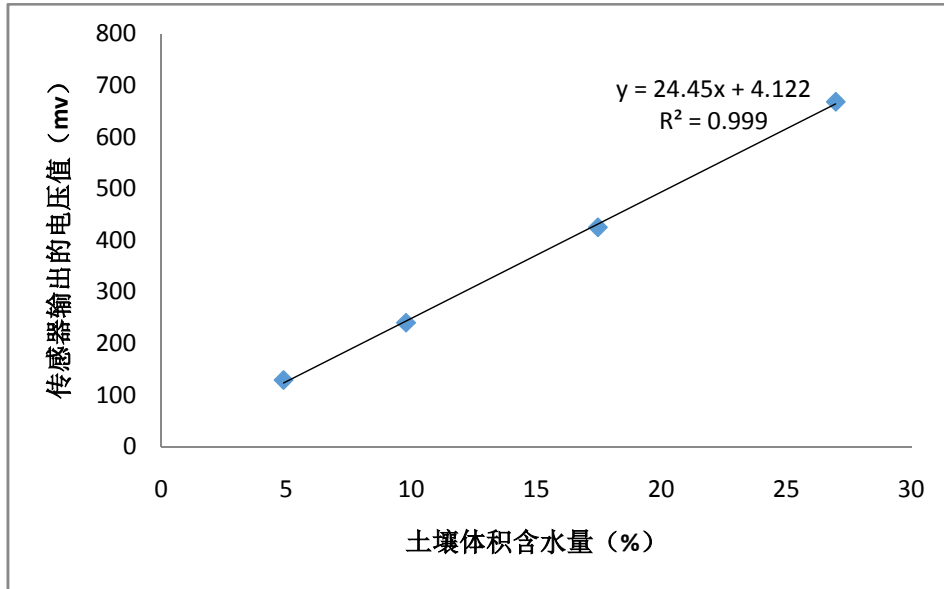


图 1 水分传感器的标定曲线

由传感器的标定结果可以看出，与拟合出的曲线的决定系数达到了 0.9994，水分的测量精度均能满足土壤水分检测的需求。

(2) 动态响应实验

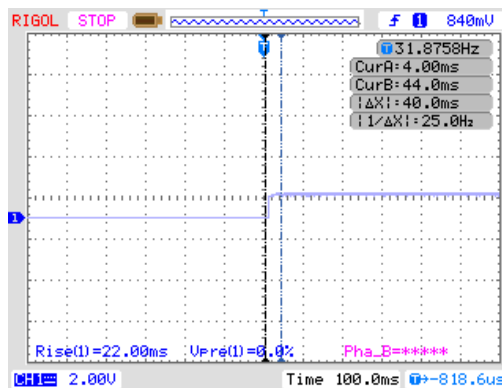


图 2 水分传感器的动态响应性能

土壤水分传感器的动态响应性能是指当土壤水分发生变化时，水分传感器的输出值随之变化达到稳定所需的时间。在标定试验的基础上，将土壤样本替换为自来水，使用示波器捕获从给传感器通电到传感器稳定输出的曲线，如图 12 所示，其中 CurA 和 CurB 分别是两个垂直光标测量的对应波形的时间值， ΔX 是两个光标间的时间差值，说明传感器的输出从 0 跳变到 100%土壤体积含水率需要用时 40ms，即为土壤水分传感器的动态响应时间。

(3) 长期稳定运行实验

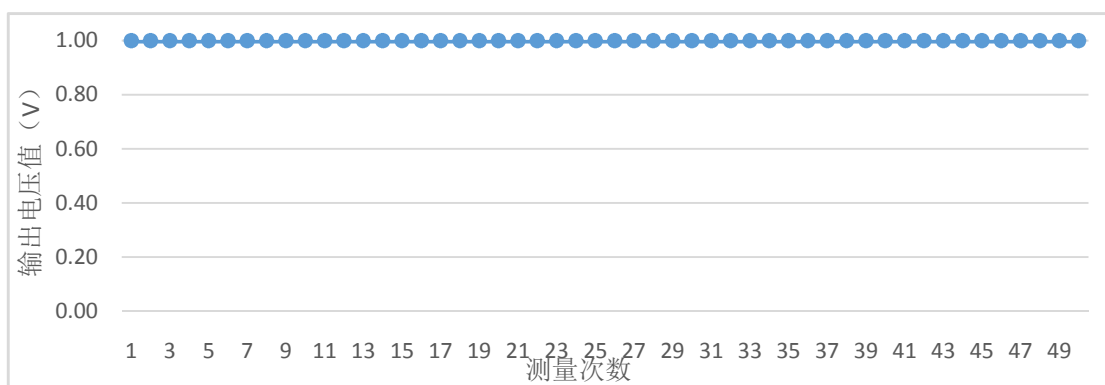


图 3 稳定性实验结果分布

从图中可以看出，试验周期内记录的 50 个实测值基本上集中分布在 900mV 附近，波动很小，最大绝对误差为 15mv，满足传感器精度要求。计算标准偏差如式 1 所示：

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} = 0.0043 \quad (1)$$

实验结果说明了在土壤含水量为 36% 的土壤里所测得的数值基本没有太大偏差，同时本研究还在不同含水量土壤中做了多次类似实验，均得到了比较好的结果，证明了本传感器稳定性较好。

4. 结论

研制的针式土壤水分传感器可实现对土壤水量的实时检测。该产品可为农田土壤墒情监测、林业环保生态监测、气象行业 4 层、8 层土壤湿度监测、温室大棚精准灌溉控制及道路交通维护提供一种实时有效的土壤水分检测方法及工具。

二、土壤剖面复合传感器



1.研究意义

土壤水分是影响园林绿植及农作物生长的关键因素之一。实时了解土壤中水分的垂直分布状态对于了解作物根系分布、土壤墒情变化、作物的需水规律具有十分重要的意义。目前，通常的做法是采用插针式传感器分层埋设，然而采用这种方法存在施工不方便、破坏本地土壤结构、传感器损坏更换困难等缺点。本文探讨了采用介电理论中的驻波比原理对多层剖面土壤含水量快速测定的可行性，设计了一款基于驻波比原理，能够实时测量多层土壤水份与温度的土壤剖面复合传感器。所设计的传感器将数据采集、处理与存储集于一体，大大的降低了设备成本，通讯接口采用标准的RS-485接口，使传感器具有更好的接口通用性。

2.检测原理

(1) 土壤水分传感器检测原理

利用驻波比法测量土壤含水率实际上反应的是土壤环境中探头的特性阻抗

的变化。当高频电磁波沿传输线传送到探头时，由于探头阻抗与传输线的特性阻抗的不匹配，会在传输线上产生驻波，从而引起传输线两端电压幅值的变化。

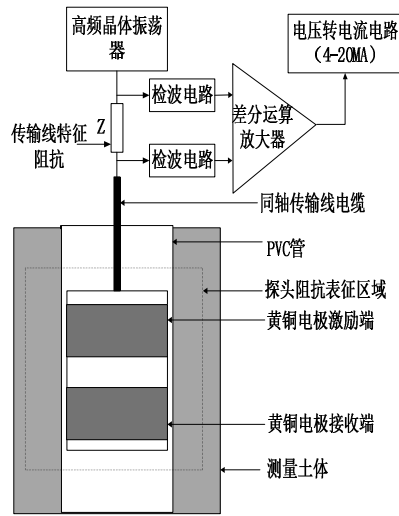


图 1 传感器测试环境与原理

(2) 温度传感器检测原理

温度采用铂电阻测温原理，通过铂电阻阻值的变化检测环境温度的变化。铂电阻阻值检测原理如图 2 所示。

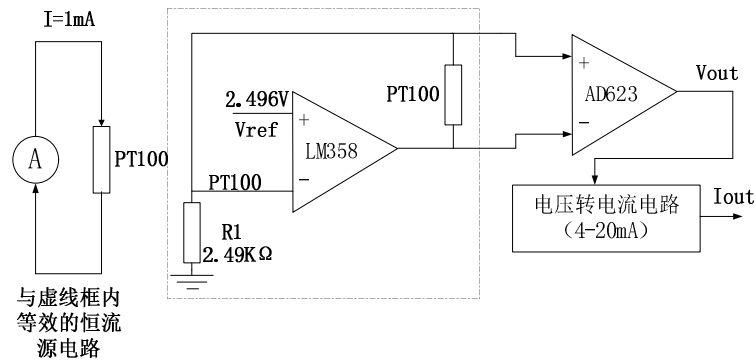


图 2 温度部分测量原理框图

3. 设备介绍

土壤剖面复合传感器由采集主板、水分传感器、温度传感器、连接线缆、PVC 支架、PVC 套筒等组成，如图 4 所示。铜制检测探头分层（常规间隔 10cm，可调整）套接在 PVC 支架上，呈圆柱形结构，内含水分检测电路，外部嵌有两个黄铜电极用于接收发送电磁波。水分探头可根据实际需要确定个数和位置（最多可安装 8 个传感器探头），温度传感器主板与水分传感器电路通过连接件连接，插接在连接线缆上。传感器采集主板通过连接线缆对每层的传感器进行控制与数据采集。为了降低传感器整体功率，避免水分传感器间的电磁干扰，传感器采集

主板对水分传感器与温度采集板采用分时供电的方式。

在使用传感器之前，需要使用指定的工具将 PVC 管埋设在测试点。测试时，根据实际测量需要，调整水分探头的位置与个数，将传感器插入 PVC 管体中，接上电源与数据线，扣紧密封盖，即可实施不同深度土壤水分与温度的在线实时测量。

主要技术参数如下所示：

测量参数：土壤体积含水率；

测量范围：0~100%；-50℃~50℃

精度：水分：±2%；温度：±0.5℃

动态响应：<2s；

输出信号：本地 SD 卡存储与 RS-485 信号输出

供电电压：DC 12V；

功耗：0.72W

工作温度：-50℃~50℃

存储温度：-50℃~60℃

4.实验分析

(1) 测试频率、探头结构与土壤的介电特性对传感器阻抗的影响

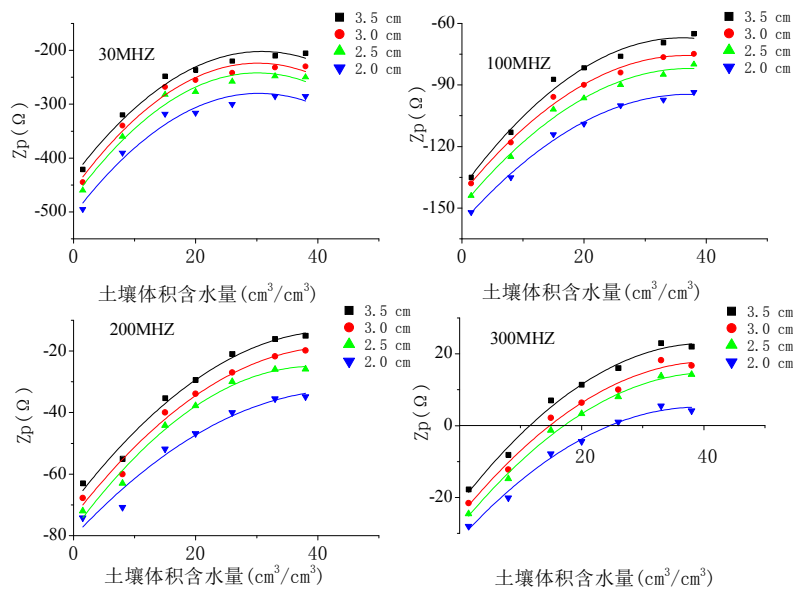


图 3 4 种宽度环形探头在不同测试频率下的阻抗曲线

从图表中可以看出，在环形电极结构固定时，环形电极的阻抗值随着频率的增加而增加。而在工作频率固定时，其阻抗值也与铜环电极的宽度成正相关关系。在工作频率为 100MHZ 时，环形探头每增宽 0.5cm 其阻抗值大约增高 $8\ \Omega$ 。从拟合曲线结果表明，其相关系数(R^2)均大于 0.95。但频率为 30MHZ 时，拟合曲线不单调，表明土壤含水量与探头阻抗不是单值关系，将无法通过探头阻抗直接获取土壤含水量。而频率达到 300MHZ 时，环形探头阻抗出现了容性与感性的相互转化，这一特点也将导致无法通过探头阻抗直接获取土壤含水量，进一步考虑到土壤在低频时受土壤电导率影响比较大与高频电子电路实现困难等因素，最终选 100MHZ 作为传感器的测试频率。

(2) 土壤的介电特性对探头阻抗的影响

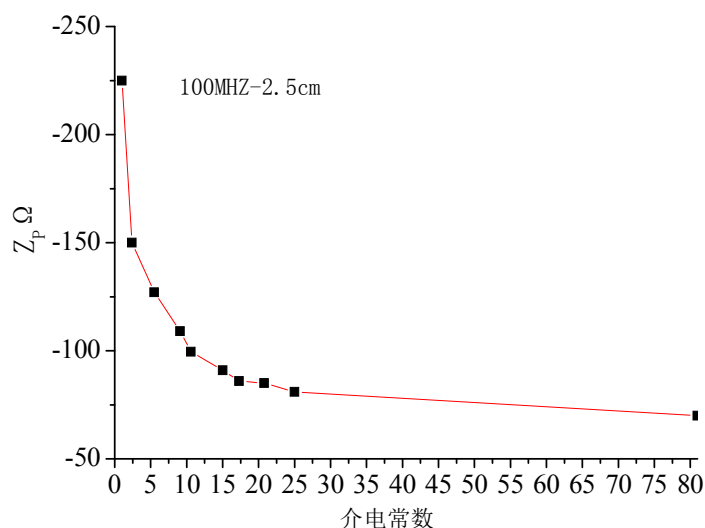


图 4 2.5cm 环形探头在 100MHZ 频率下随介电常数变化的阻抗曲线

由图 4 的变化趋势可以看出，环形探头的端口阻抗 Z_p 与介电常数的变化呈严重的非线性关系。例如介电常数在 1 至 10 的区间内，曲线急剧下降，而后曲线变换明显减缓。测试土壤的饱和含水量对应的土壤的介电常数为 25.1。体积含水量约 2% 的干土的介电常数约 2.4。在介电常数在 2.4 至 25.1 间，探头的阻抗值变换明显，因此该传感器探头能够满足粘壤性土质土壤体积含水量检测的需求。

(3) 环形探头电场分布状况

利用 HFSS 电磁场仿真软件建立环形探头的模型，设定求解频率为 100MHZ，

集总端口激励方式，探头直径统一为 2.5cm，宽度分别为 2.0cm，2.5cm，3.0cm 与 3.5cm。设定周围填充介质的介电常数为 21（对应土壤体积含水量为 36%），PVC 安装管与铜环支架的介电常数为 4，管内介质设置为空气，介电常数为 1，设定铜环电极为理想电场边界，选取直径为 12cm，高度为 13cm 的圆柱体作为辐射边界条件。

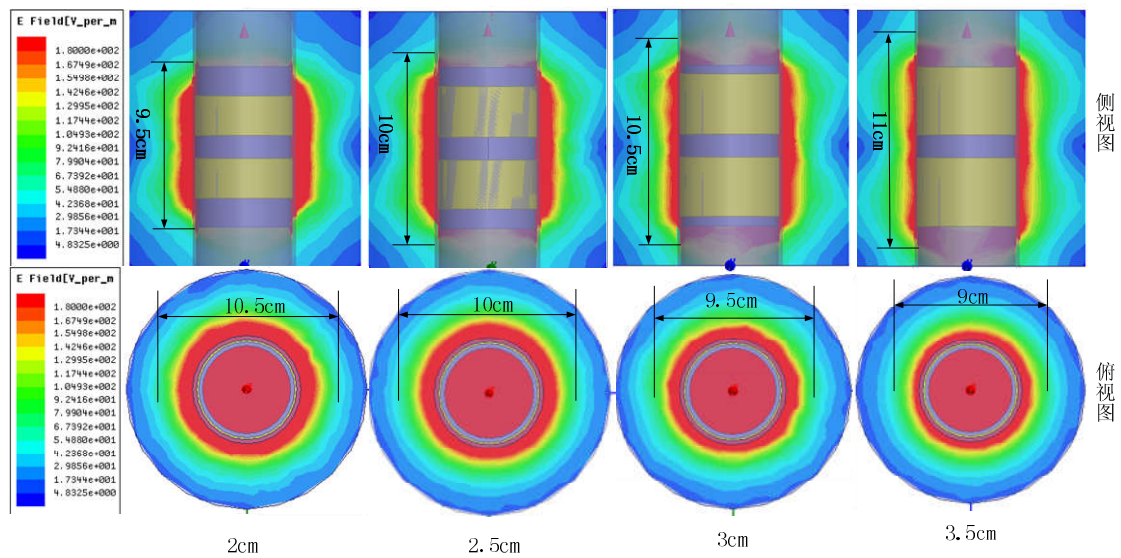


图 5 环形探头电场分布侧视图

由图 8 可以看出 4 种结构的探头含水量检测区域主要在探头之间均匀分布，周围电场紧凑，没有出现分离现象。不同宽度的环形探头主要影响土壤监测区域电场分布的纵向范围与横向范围，图中淡绿色区域的电场强度为 104.9V/m，其探头电场纵向达到淡绿色区域的场强强度的作用范围随着铜环宽度的增大而增大，依次为 9.5cm，10cm，10.5cm 与 11cm。相反其探头电场横向达到淡绿色区域的场强强度的作用范围随着铜环宽度的增大而减少，依次为 10.5cm，10cm，9.5cm 与 9cm。由上述现象可以得出，4 种宽度的环形电极都适用于作为传感器的检测探头，应用中可以通过对横向与纵向检测区域的综合考虑选取适当宽度的环形电极。考虑到农业检测中常规分层间隔为 10cm，本文选取宽度为 2.5cm 的铜环作为传感器电极。

由于 PVC 管对电场强度有一定的衰减作用，铜环内部的电场强度要高于 PVC 管外土壤中的电场强度，考虑到铜环内部水分测试主板对电场分布的影响，本设计对水分测试主板进行了金属外壳屏蔽。

由上可以看出：土壤水分传感器的阻抗与其结构、测量频率及土壤介电特性有关系，但完成系统结构设计后，这两个参数将不再变化，土壤水分传感器的阻抗只受土壤介电特性的影响。

(4) 传感器的标定

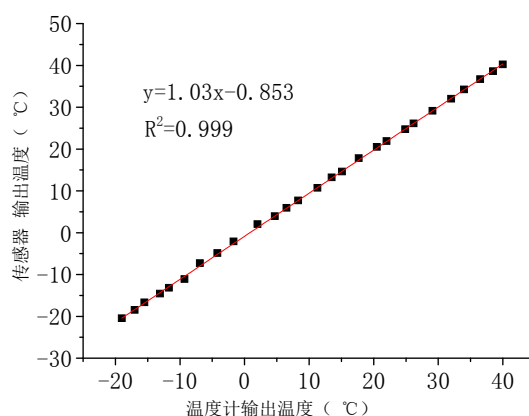


图 6 温度传感器的标定曲线

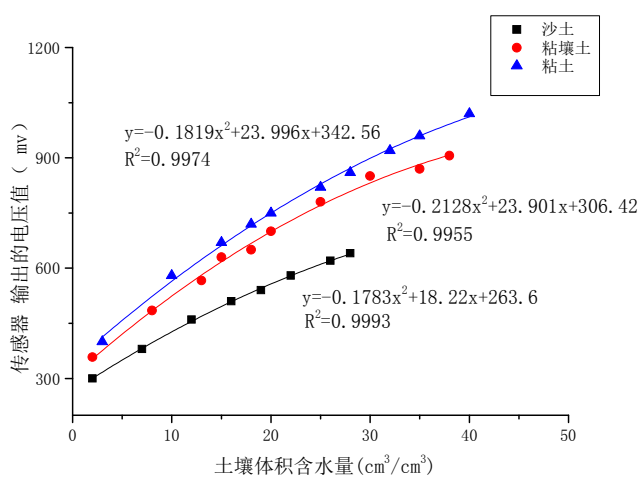


图 7 水分传感器标定结果

由传感器的标定结果可以看出，温度与水分的测量精度均能满足土壤剖面复合参数检测的需求。

4. 结论

研制的土壤剖面复合传感器可实现对土壤剖面多层温度与含水量的实时检测，对于植物根区土壤含水量与温度的检测及研究土壤水分、温度的运移都具有较大的意义。该产品可为精细农业、智慧林业等领域提供了一种土壤剖面复合检测方法。