

# 土壤多参数复合测试系统研究\*

赵燕东 李 宁 皮婷婷

(北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

**摘要:** 设计了一种同时采集土壤含水率、电导率及温度的多参数复合测试系统,对基于驻波率原理的土壤含水率测量方法、基于电流电压“四端法”的土壤电导率测量方法和基于“铂电阻”的土壤温度测量方法做了较为深入的研究。以北京地区土壤为测试样本,土壤含水率、温度及电导率传感器的输出与对应的测量值线性拟合相关性分别为0.998 3、0.999 8、0.999 1,动态响应时间依次为土壤含水率460 ms、温度13 s、电导率2.28 s,稳定性测试结果的标准差分别为土壤含水率0.011 5、温度0.001 4、电导率0.010 3,系统稳态及动态性能均满足土壤多参数的测量要求。对土壤多参数复合测试系统的抗干扰性能进行了分析与论证,得出在采用分时供电的前提下,多参数复合测试系统的干扰主要存在于土壤含水率与土壤温度之间,即土壤温度探针作为介质异物会造成土壤含水率测量值的升高,这是一个系统误差,可在数据处理中进行统一补偿。选用得到普遍认可的土壤含水率传感器、土壤温度传感器、土壤电导率传感器与本研究的土壤多参数复合测试系统进行性能对比研究表明:本系统满足土壤含水率、温度和电导率实时在线测量的要求,可以为精细农林业提供一种高精度的便携式土壤多参数检测工具。

**关键词:** 土壤 多参数 测试系统 含水率 温度 电导率

**中图分类号:** S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0289-10

## Multi-parameter Compounded Testing System for Soil

Zhao Yandong Li Ning Pi Tingting

(Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A multi-parameter compounded testing system was proposed, which could collect soil moisture, electrical conductivity and temperature at the same time. An intensive research was carried out on soil moisture using standing wave ratio method, on electrical conductivity using four-electrode method, and on temperature using platinum resistor method. The soil in Beijing area was selected as sample; the correlation coefficients between measured value and value output by sensor for soil moisture, temperature and electrical conductivity were 0.998 3, 0.999 8 and 0.999 1, respectively. The dynamic response times and standard deviation of stability for the above three parameters were 460 ms, 13 s, 2.28 s and 0.011 5, 0.001 4, 0.010 3, respectively. Both stability and dynamic performance can meet the measurement requirements. The anti-interference performance of the proposed system was analyzed. With time-sharing power supply, the system's interference mainly existed between soil moisture and temperature. The soil temperature probe, which was considered as an abnormal medium, will cause increasing of soil moisture. This error can be compensated in data processing. The generally recognized soil moisture sensor, soil temperature sensor and soil electrical conductivity sensor were selected to compare with the proposed multi-parameter compounded testing system. The results demonstrated that the system can meet the requirements of real-time online measurement, and provide a portable tool with high accuracy for measurement of soil parameters.

**Key words:** Soil Multil-parameter Testing system Moisture Temperature Electrical conductivity

收稿日期: 2015-01-14 修回日期: 2015-02-26

\* 国家自然科学基金资助项目(31371537)和北京市共建项目专项共同资助项目

作者简介: 赵燕东, 教授, 博士生导师, 主要从事生态信息智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

## 引言

土壤是进行农业生产的基础,快速、有效地采集和描述影响作物生长的田间信息,是开展精细农业实践的重要基础<sup>[1]</sup>。土壤含水率、温度和电导率(Electrical conductivity, EC)是土壤的3个重要参数,在作物的生长过程中起到重要作用<sup>[2-4]</sup>。

目前,土壤含水率、温度和电导率的测量方法国内外有很多种<sup>[5-6]</sup>。土壤含水率方面,如江朝晖等<sup>[7]</sup>设计了一种基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪,赵燕东等<sup>[8-10]</sup>研制出一种基于传输线阻抗变换理论的土壤水分测量仪,并开发了相应的系统,许景辉等<sup>[11]</sup>利用 TDR 方法测量土壤的含水率;温度测量方面,宋豫晓等<sup>[12]</sup>研发了多功能土壤温度测量仪,王福顺等<sup>[13]</sup>开发了高精度土壤温度原位测量系统;电导率测量方面,一般分为接触式和非接触式测量<sup>[14-15]</sup>,李民赞等<sup>[16-17]</sup>研制出基于“电流-电压四端法”的电导率实时分析仪以及便携式测量仪,杨卫中等<sup>[18]</sup>研制出基于相位检测原理的 TDR 土壤电导率测量系统。前人的测量方法一般都是进行土壤单个参数的测量,如王瑛瑛等<sup>[19]</sup>研制出的四端法土壤电导率测量系统,但其中的参数仅仅是电导率,无法检测出土壤的其他特性。此外,土壤的含水率、温度和电导率3个参数之间存在着很大的耦合作用,如在高盐分的土壤中利用传感器测量含水率就会有很大的偏差<sup>[20-21]</sup>。

本文研究一种土壤3参数复合传感器,设计一个可以实时采集土壤3参数的采集器,以期能够实时检测、显示、存储土壤的含水率、温度和电导率。

## 1 系统测量原理、组成及结构

### 1.1 测量原理

(1)测量土壤含水率采用驻波比(Standing wave ratio, SWR)法<sup>[22]</sup>,又称驻波率法,其工作原理是100 MHz 信号源<sup>[23]</sup>产生的电磁波信号在微带线与传感器探头的连接处由于阻抗不匹配发生信号反射,反射信号波与入射信号波在传输线上相遇叠加形成驻波,原理框图如图1所示。

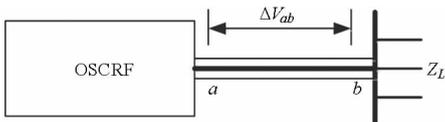


图1 含水率部分测量原理框图

Fig.1 Block diagram of soil moisture sensor

研究表明,当传输线物理长度约为电磁波波长的1/4的时候,传输线两端的电压差表达式<sup>[24]</sup>为

$$\Delta V_{ab} = 2A \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

式中  $\Delta V_{ab}$ ——传输线  $a, b$  两端间的电势差  
 $A$ ——信号源(OSCRf)输出激励信号的幅值  
 $Z_L$ ——传感器探针的阻抗  
 $Z_0$ ——传输线的特征阻抗

式(1)中由于  $A$  与  $Z_0$  是已知的,故  $\Delta V_{ab}$  只与  $Z_L$  相关,而在传感器的设计中,探针的几何结构是固定不变的,因此传感器探针阻抗  $Z_L$  取决于其插入环境——土壤的介电常数,根据 Topp 方程<sup>[25]</sup>,土壤体积含水率  $\theta_v$  与土壤介电常数  $\epsilon_{ra}$  呈一元多次非线性关系<sup>[26-27]</sup>

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_{ra} - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_{ra}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_{ra}^3 \quad (2)$$

$$\theta_v = a_1 \sqrt{\epsilon_{ra}} + b_1 \quad (3)$$

式中  $a_1, b_1$ ——与土壤类型有关的常数

土壤主要由土、水和空气组成,其中,土的介电常数大约为4,空气的介电常数为1,而纯水的介电常数为80,是影响土壤体积含水率的主要因素<sup>[8]</sup>,因此,根据式(1)、(3)只需测量出  $\Delta V_{ab}$  便可以间接得到土壤体积含水率<sup>[28]</sup>。

(2)测量土壤温度采用改进型四线制铂电阻(PT100A),通过测量铂电阻的电阻得到温度<sup>[29-30]</sup>,本文通过设计一个小电流恒流源测铂电阻阻值。原理框图如图2所示。

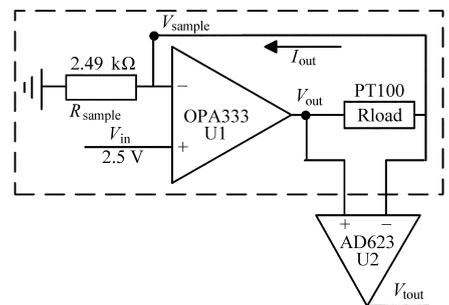


图2 温度部分测量原理框图

Fig.2 Block diagram of soil temperature sensor

虚线框部分是小电流恒流源,OPA333 同相端输入 2.5 V 基准电压,根据运算放大器的特性,有

$$V_{out} = A_{OPEN/DC} (V_{in} - V_{sample}) = A_{OPEN/DC} (V_{in} - I_{out} R_{sample}) \quad (4)$$

当  $A_{OPEN/DC} = \infty$  时

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R_{sample}} \quad (5)$$

$A_{U2}, V_{in}$  已知,根据式(4)、(5)得

$$V_{out} = A_{U2} R_{load} I_{out} = A_{U2} R_{load} \frac{V_{in}}{R_{sample}}$$

所以根据获得的电压  $V_{out}$ ,可求得铂电阻的阻

值  $R_{load}$ , 再通过查表法<sup>[31]</sup> 即可得到温度。

(3) 测量土壤电导率国内外一般采用“电流-电压四端法”<sup>[32]</sup>, 原理框图如图 3 所示。

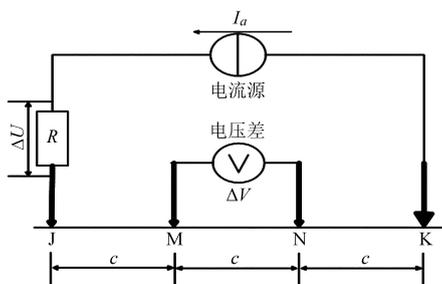


图 3 电导率部分测量原理框图

Fig. 3 Block diagram of EC sensor

图 3 中  $l_{JM} = l_{MN} = l_{NK} = c$ , 间距相等的 4 个电极依次排布组成 Wenner 组态<sup>[33]</sup>, 该组态下电导率的计算公式是

$$\sigma = \frac{1}{2\pi c} \frac{\Delta U}{R \Delta V} \quad (6)$$

式中  $c$ ——相邻 2 个电极之间的距离

$\Delta U$ ——精密电阻  $R$  两端电压

$\Delta V$ ——M、N 两电极间电压差

$R$ ——精密电阻的阻值

在已知电极间距  $c$  和电阻阻值  $R$  的前提下, 通过测量 M、N 电极之间电压差  $\Delta U$  和精密电阻  $R$  两端的电压  $\Delta V$ , 可测出土壤的电导率。

### 1.2 系统组成及结构

土壤多参数复合测试系统分为传感器和采集器两个部分, 其中传感器部分包括含水率、温度、电导率 3 个子模块以及对应的信号调理模块, 采集器包括 STM32 单片机模块、SD 卡存模块、时钟模块、OLED 显示模块、HLK-SW16 串口以太网模块, 电源控制模块。如图 4 所示。

#### 1.2.1 采集器组成

采集器的微处理器采用的是 ST(意法半导体)公司的 STM32F103RBT6 单片机。OLED 显示模块采用的是 0.96" 128 像素  $\times$  64 像素 OLED, 用于实时显示系统的状态以及每一个传感器的输出值等;

HLK-SW16 串口以太网模块用于与计算机通信进行系统配置和显示工作状态; SD 卡存储模块移植了 FATFS 文件系统, 可以直接将所采集到的数据存储为 TXT 或 CSV 格式, 便于后期数据分析和处理; 时钟模块用于实时输出系统的时间, 便于系统其他模块的调用; 电源控制模块用于对系统的 3 个传感器进行分时上电, 防止由于同时上电所产生的电磁干扰; 电源转换模块用于将输入的 5 V 电源转换为 3.3 V 电源, 供给需要的模块。

#### 1.2.2 复合传感器组成及结构

复合传感器为六探针结构, 其实物图如图 5 侧视图中黄色虚线框内所示。标号 N1 ~ N6 为传感器的 6 个探针, 其中 N1、N2、N3、N5、N6 为全固体探针, 直径 3 mm, 长度 50 mm, N4 探针为直径 4 mm, 长度 50 mm 的中空探针。N1 ~ N6 号探针每 2 个探针之间的间距是 25 mm, 探针的材质是 316L 不锈钢, N4 探针内部封装有德国贺利时公司的 PT-100 铂电阻, 精度为 A 级 0.1  $^{\circ}\text{C}$ , N1 ~ N6 探针插在传感器板子孔中, 探针顶部通过螺帽与传感器板固定, N1 ~ N4 探针组合作为电导率传感器的 4 个电极, N4 探针同时又作为温度传感器探针使用, N5、N6 号探针作为土壤含水率传感器的电极。传感器部分的信号调理电路为图 5a 黄色虚线内, 每一种传感器都有自己独立的信号调理电路, 可以直接输出对应的电压, 传送给采集器部分的 STM32 单片机。

#### 1.2.3 复合传感器结构合理性分析

##### (1) 土壤含水率传感器结构合理性分析

由于含水率传感器部分采用的是两针平行线探头, 为了避免探头的“集肤”效应, 探针的直径与两针间距之比应大于 0.1<sup>[34]</sup>。探针的直径、间距以及长度会对 2 个探针之间电场分布的均匀程度产生影响, 为了分析本传感器探针间电场分布的均匀情况, 利用 HFSS 软件对传感器结构建模, 分析电极附近的电场分布情况, 设置求解频率 100 MHz, 求解类型为激励求解, 边界条件为理想电场边界, 传感器周围

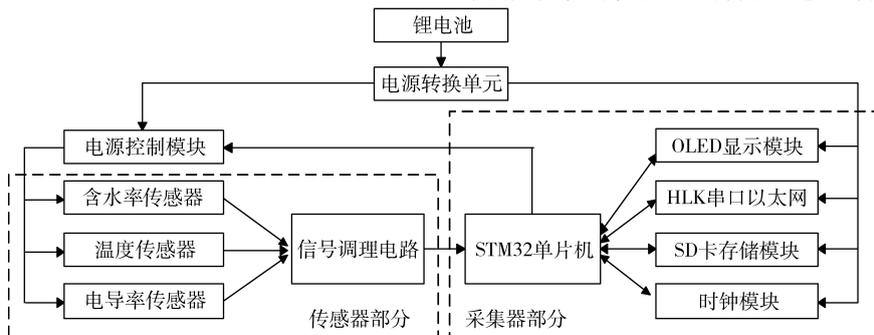


图 4 土壤多参数复合测试系统组成示意图

Fig. 4 Structure schematic of soil multi-parameter compounded testing system

介质为直径 100 mm、高度 100 mm 的圆柱体,所得结果如图 6 所示。

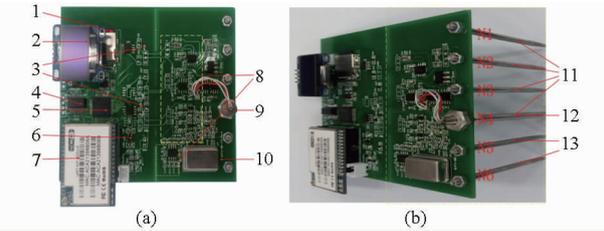


图5 土壤多参数复合测试系统实物图

Fig.5 Photos of soil multi-parameter compounded testing system

(a) 主视图 (b) 侧视图

1. SD 卡模块 2. OLED 模块 3. 电源控制模块 4. 时钟模块
5. STM32 最小系统 6. 电源转换模块 7. WIFI 模块 8. 信号调理模块
9. PT100 铂电阻 10. 100 MHz 晶振 11. 电导率探针
12. 温度探针 13. 含水率探针

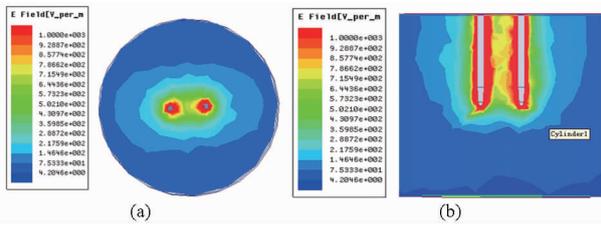


图6 含水率传感器电极电场分布图

Fig.6 Electric field distribution of moisture sensor electrode  
(a) 俯视图 (b) 侧视图

从图 6 可以看出 2 个探针之间电场分布密集,随着介质到探针距离的增加,电场强度逐渐减小,说明探针附近测量敏感度最强<sup>[9]</sup>,俯视图和侧视图淡蓝色区域电场强度为 2 175 V/M,俯视图图中淡蓝色区域纵向到达圆心的最小距离为 29 mm,横向到达圆心的最大距离为 43.5 mm,所以距离探针 31 mm 以外的范围再放置探针不会对测量结果产生影响。侧视图图中淡蓝色区域到顶部最小高度是 59 mm,说明传感器可以均匀检测直径为 58 mm,高度 59 mm 的圆柱形土柱的土壤含水率,满足测量要求,结构设计合理。

## (2) 土壤电导传感器结构合理性分析

从北京林业大学试验苗圃中(116°21'14"E、40°0'54"N)取土壤样本,放入干燥箱中干燥,过 40 目(孔径 0.4 mm)筛,取出 8 份土,每份 2 000 g,取 8 份去离子水,每份 100 g,向 8 份去离子水中依次加入 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、3.6、4.2、4.8、5.4 g KCl,搅拌至 KCl 溶解以后,将 KCl 溶液加入到土壤中,均匀搅拌,装到直径 150 mm、高度 100 mm 圆柱形容器中备用,制作成 8 个土样。在一块长 150 mm,宽 20 mm 的长方形 FR4 绝缘材料上,每隔 5 mm 打直径为 3 mm 的孔,通过改变传感器探针的安装位置可以调整探针间距。将传感器的探针间距调整为 6 个级

别,分别为 10、15、20、25、30、40 mm,将每一种间距的传感器插入到 10 种不同土样中测量,每一种土样测量 10 次求平均值,共得到 60 组数据,使用最小二乘法与盐分含量进行线性拟合,所得结果如图 7 所示。

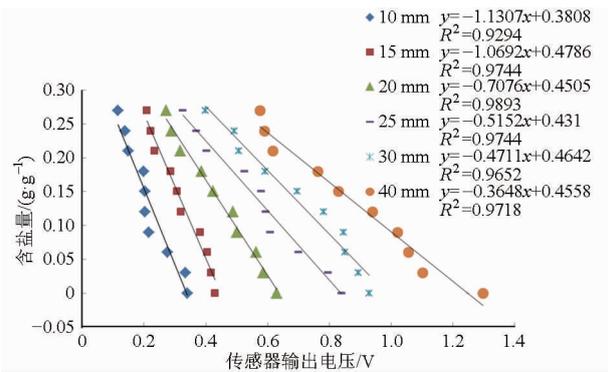


图7 Wenner 组态下不同探针间距时传感器输出电压与土壤含盐量之间关系

Fig.7 Relationship between voltage drop and soil saltiness in Wenner structure at different gaps

从图 7 中可以看出,拟合曲线决定系数( $R^2$ )按照间距从小到大依次为 0.929 4、0.974 4、0.989 3、0.974 4、0.965 2、0.971 8,均大于 0.9,当探针间距为 25 mm,土壤含盐量从 0 变化到 0.002 7 g/g 时,对应电导率传感器输出电压从 0.84 V 变化到 0.32 V,当探针间距为 20 mm 时,电压从 0.62 V 变化到 0.27 V,这两种探针间距相比,虽然间距为 20 mm 时  $R^2$  较大,但是探针间距为 25 mm 时,电压变化范围更大,对一个传感器来说,电压范围变化越大表明传感器对所测参数的辨识度越高,因此本文电导率传感器探针间距选择 25 mm。

## 2 系统抗干扰分析

为了避免土壤多参数复合测试系统的干扰问题,本文采用分时供电,即采用电源控制模块给每一部分分时供电,某一时刻只给一个传感器供电,采集一个参数,其他传感器模块不供电,这样可以将其他探针作为测量介质中的异物处理,逐一研究其对测量参数的影响。具体试验如下:

### 2.1 温度、电导率探针对土壤含水率测量结果的影响

#### (1) 温度探针对土壤含水率测量结果的影响

测量步骤如下:①配置体积含水率为 6.47%、11.35%、17.73%、25.20%、30.00% 的 5 个土样。②安装含水率传感器探针 N6 和 N5,不安装其他探针,将测试系统插入到每一个土样中测量含水率传感器输出的电压,用图表形式表达所得数据,如图 8b 中曲线 1 所示。图 8a 表示图 8b、8c、8d 中每一条曲线所包含的探针,探针 N1~N6,红色的标号

表示工作的探针,如当系统安装探针 N6 和 N5 时,所得数据用图形表达就是曲线 1。③增加探针 N4(温度探针),记录含水率传感器在每一个土样中输出的电压,得图 8b 中曲线 2。

(2) 电导探针对于土壤含水率测量结果的影响

重复 2.1 节中的步骤①、②后,不安装探针 N4,依次增加探针 N3、N2、N1(电导探针),每增加一个探针记录一次所有数据,用图形表达所得数据,得图 8d 中曲线 6、7、8。

(3) 温度与电导率探针对于土壤含水率测量结果的影响

重复 2.1 节中的步骤(1)、(2)后,依次增加探针 N4(温度探针),N3、N2、N1(电导探针),每增加一个探针,记录一次所有数据,得图 8c 中曲线 2、3、4、5。

从图 8 中可以看出,只有温度探针 N4 对含水率传感器的输出有影响,电导率探针 N3、N2、N1 对输出结果没有影响。根据 1.2.3 节中所述,探针 N5、N4 间距 25 mm 小于横向最大影响距离 31 mm 时,探针 N4 会对含水率传感器电场分布产生影响,对输出结果有影响;探针 N5、N3 间距为 50 mm,大于 31 mm,探针 N3 不会对含水率传感器电场分布产生影响,不会对输出产生影响。同理探针 N2 和 N1 也不会产生影响,这与土壤含水率传感器结构合理性仿真分析结果相吻合。

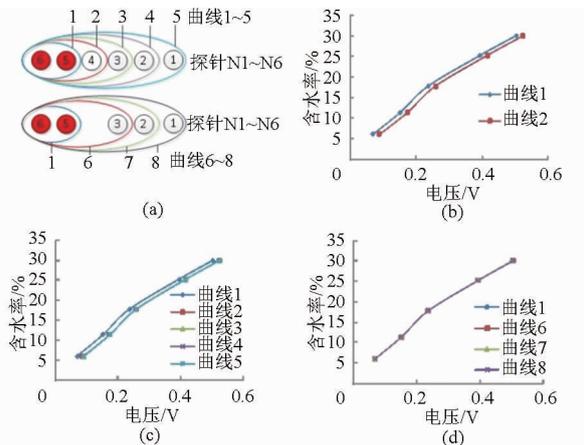


图 8 电导率探针对于土壤含水率测量的影响  
Fig. 8 Influence of electrical conductivity probe on moisture sensor

- (a) 曲线标号对应探针组合
- (b) 水分传感器增加温度探针
- (c) 水分传感器增加温度、电导率探针
- (d) 水分传感器增加电导率探针

2.2 含水率、温度探针对于土壤电导率测量结果的影响

(1) 含水率探针对于土壤电导率测量结果的影响

只安装电导率传感器的 4 个探针,图 9a 中的探针组合原理与图 8 中一致,测量电导率传感器在每一个土样中的输出值,用图表表示数据得曲线 1,然

后依次加入探针 N5 和 N6,每增加一个探针,记录一次电导率传感器在所有土样中的数据,得曲线 2 和 3,从图 9b 可知探针 N5 和 N6 对电导率的测量结果基本无影响。

(2) 温度探针对于土壤电导率测量结果的影响

只安装电导率传感器的 4 根探针,将探针 N4 换成内置温度传感器的中空探针(图 9a 中的橘黄色标号),同样记录电导率传感器在每一个土样中的数据,得图 9c 中的曲线 4,从图中可知温度探针对于电导率测量结果无影响。

(3) 含水率、温度探针对于土壤电导率测量结果的影响

在 2.2 节的基础上,依次增加探针 N5 和 N6,每增加一个探针,记录一次电导率传感器在每一个土样中的数据,得图 9d 中的曲线 5 和 6,从图中可看出含水率、温度探针对于电导率测量结果无影响。

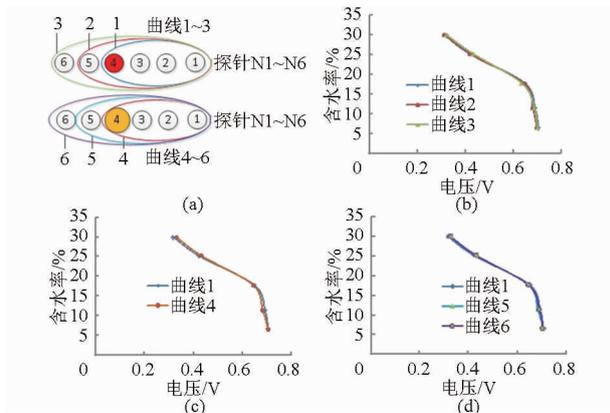


图 9 含水率、温度探针对于电导率测量的影响

Fig. 9 Influence of temperature and moisture probes on electrical conductivity sensor

- (a) 曲线标号对应探针组合
- (b) 电导率传感器增加水分探针
- (c) 温度探针替换电导率探针 4

2.3 含水率、电导率探针对于土壤温度测量结果的影响

(1) 土壤温度探针单独测量时

只安装温度探针,其他探针不安装,测量每一个土样的温度。

(2) 所有探针都存在时的土壤温度测量

在 2.3 节步骤(1)的基础上,依次增加探针 N6、N5、N3、N2、N1,每增加一个探针,记录温度传感器在每一个土样中的温度,经试验得,其他探针对于温度传感器温度的测量无影响。

由以上试验可以看出:在采用分时供电的前提下,土壤多参数复合测试系统的干扰主要存在于土壤含水率与土壤温度之间,即土壤温度探针作为介质异物会造成土壤含水率测量值的升高,这是一个系统误差,可在数据处理中进行统一补偿。

### 3 系统性能测试与结果分析

#### 3.1 传感器标定试验

##### (1) 含水率传感器的标定试验

同样从北京林业大学试验苗圃中取土壤样本,按照1.2.3节中的方法取出6份土,在6个土壤样本加入不同体积的水,分层均匀装入高30 cm、直径32 cm的6个圆柱型容器中,得6个不同土壤含水率土样,密封静置48 h,让土壤中的含水率运移均衡。将含水率传感器置于圆柱容器中,每一个容器中取4个点进行测量,每一个点连续测量20次,将所得数据取平均值,最后利用环刀在前面所述4个点处取土放于干燥箱中进行干燥,转换为体积含水率4.12%、10.38%、17.55%、25.92%、32.02%、36.43%。使用最小二乘法与土壤样本的体积含水率进行拟合,得到结果如图10所示。

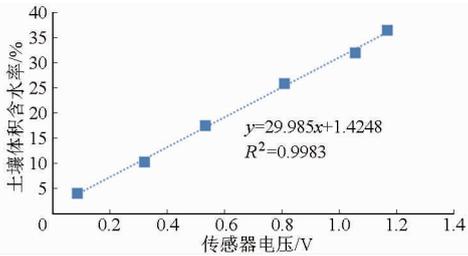


图10 含水率传感器标定曲线

Fig. 10 Soil moisture sensor calibration curve

从图10中可以得到拟合曲线为 $y = 29.985x + 1.4248$ ,拟合曲线的决定系数 $R^2$ 大于0.99,说明土壤含水率传感器输出电压与土壤体积含水率有显著的线性关系。

##### (2) 温度传感器的标定试验

0℃以上采用北京博宇宝威实验设备有限公司的SHP-450型试验箱(恒温范围0~60℃,精度0.1℃)进行标定,0℃以下采用青岛海尔集团DW-40W255型超低温保存箱(-40~0℃)标定。为了去除由于试验箱和低温箱的温度传感器所产生的误差,采用武强县精创仪器仪表厂生产的高精度水银温度计2个,精度为0.1℃,范围分别为0~50℃、-30~20℃,该水银温度计经过华北国家计量测试中心检测合格。高温部分标定试验时,每次将试验箱的设定温度上升2℃,低温部分试验时,每次将低温箱降低2℃,在每一个温度梯度恒温以后,温度传感器取值20次做平均值,并将所得的温度和水银温度计的值同时记录下来,从-25~51.1℃共取数据36组,使用最小二乘法与温度传感器的温度进行拟合,得到结果如图11所示。

从图11中可以得到拟合曲线为 $y = 0.9745x + 0.8616$ ,拟合曲线的决定系数 $R^2$ 大于0.99,说明温

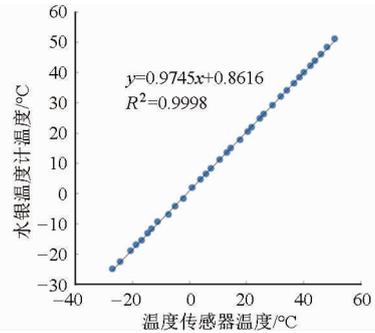


图11 温度传感器标定曲线

Fig. 11 Temperature sensor calibration curve

度传感器输出温度与水银温度计的温度有显著的线性关系。

##### (3) 电导率传感器的标定试验

从北京林业大学试验苗圃取土,过40目(孔径0.4 mm)筛,充分均匀搅拌,将土放在一个大塑料箱里密封静置48 h,让土壤中的含水率运移均衡。在箱子的4个角和中心利用环刀各取100 g土,并在105℃下干燥24 h,将所得5个质量含水率取平均值得到质量含水率为7.2%。研究表明当土壤质量含水率小于15%时,土壤含水率对电导率的影响并不显著<sup>[19,35]</sup>。

从大箱中取出8份土样,每一份2000 g,根据含水率7.2%,加入80 g去离子水(电导率1.7 μS/cm),质量含水率将会在11.2%左右,小于15%。将不同质量的KCl溶于80 g水中,将KCl溶液加入土样中,配置含盐量分别为0、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.40%、0.42%的8个土壤样本,均匀搅拌,将所得土样装入塑料桶,盖上盖密封24 h,让盐分和含水率移动均衡。在每一份土样中取出200 g,分成2份,每一份100 g,其中一份放入蒸发皿中,105℃干燥24 h,得到8个土样的质量含水率分别为11.33%、11.87%、11.17%、11.14%、10.98%、10.72%、11.20%、11.47%,均小于15%;另外一份放入1000 mL的烧杯中,密封,根据每一份土样的质量含水率,计算出100 g土样中干土质量,然后按照1份干土5份水的比例,向烧杯土样中加入去离子水,充分搅拌,沉淀,取出澄清液用于测量。

土壤溶液电导率测量使用河北科瑞达仪器科技有限公司生产的CCT-3320T型便携式电导率仪,配置1.0 cm<sup>-1</sup>电极,测量范围为0~2000 μS/cm,准确度为±1%,得到的结果如图12所示。

从图12中可以得到拟合曲线为 $y = -2.283x + 1.615$ ,拟合曲线的决定系数 $R^2$ 大于0.99,说明电导率传感器输出电压与土壤溶液电导率有显著的线性关系,从图12中看出当土壤溶液电导率大于1120 μS/cm(对应土壤盐分质量分数是0.3%)时,

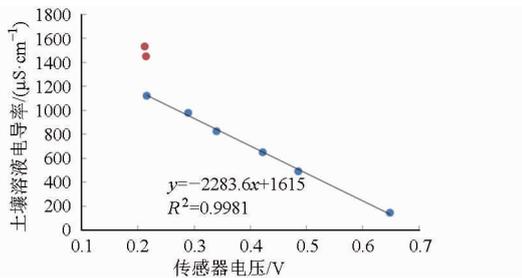


图 12 电导率传感器标定曲线

Fig. 12 Electrical conductivity sensor calibration curve

传感器输出结果不再减小,即土壤含盐量饱和,这与文献[36]相符。

### 3.2 传感器动态响应性能试验

土壤含水率传感器的动态响应性能是指当土壤含水率发生变化时,含水率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,先给传感器通电,待含水率传感器输出稳定后,迅速将含水率传感器插入到水中,使用示波器捕获从空气中插入到水中整个过程中传感器的输出曲线,如图 13 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,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 460 ms,即为土壤含水率传感器的动态响应时间。电导率传感器试验原理和上述类似结果如图 14 所示,对应上升时间为 2.28 s。

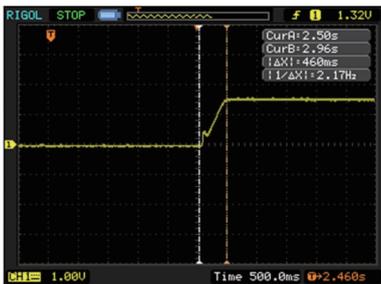


图 13 含水率传感器动态响应

Fig. 13 Dynamic response of soil moisture sensor

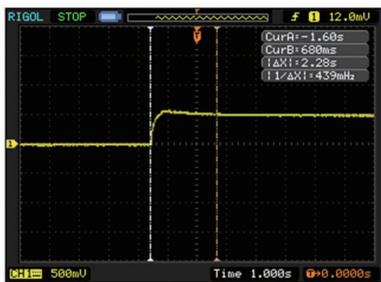


图 14 电导率传感器动态响应

Fig. 14 Dynamic response of electrical conductivity sensor

温度传感器动态响应性能试验,首先将温度传感器放到 22℃ 水中,待输出稳定以后,迅速将传感器放入到 60℃ 水中,经过测量得到动态响应时间 13 s,

这是由于温度传感器是不锈钢铠装,钢管尺寸、导热胶等都会对温度的热传导产生影响。

从传感器的动态响应实验可知,传感器的动态响应时间均小于 13 s,说明土壤多参数复合测试系统可以用于快速获取土壤含水率、温度、电导率 3 个参数的信息。

### 3.3 稳定性试验

将土壤多参数复合测试系统置于饱和土壤中密封,并放在 SHP-450 型试验箱中恒温,温度设置为 19℃,饱和土壤体积含水率为 53.1%,设置每隔 1 h 采集一次,从 2014 年 11 月 2 日—2014 年 11 月 4 日连续运行 48 h,共采集到 3 组数据,所得数据如图 15 所示。

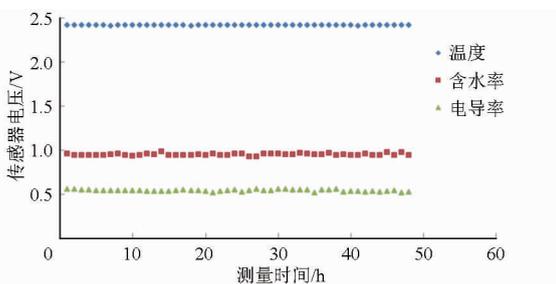


图 15 稳定性试验结果

Fig. 15 Result of stability test

分别计算每组数据的标准差,依次为温度 0.001 4、含水率 0.011 5、电导率 0.010 3,组内数据间差距很小,表明土壤多参数复合测试系统 3 个参数都具有较好的稳定性。

## 4 对比试验与结果分析

### 4.1 含水率传感器的对比试验

采用北京林业大学试验苗圃的土样,按照 3.1 节步骤配置体积含水率为 5.1%、13.7%、20.8%、28.3%、33.6%、40.9% 6 个土样,利用土壤多参数复合测试系统测量含水率,并同时使用北京林业大学自主研发的基于 SWR 原理的 BD-III 型土壤含水率传感器<sup>[37-38]</sup>,测量范围为 0~100% 体积含水率,精度为 ±2%,已通过国家分析仪器质量监督检验中心检验。对每一个土样取 5 个点,每一个点测量 10 次,每一个土样所有数据求取平均值,土壤多参数复合测试系统和 BD-III 型传感器得到数据如表 1 所示。

从表 1 可以知,体积含水率的绝对误差为 -1.354 3%~1.262 4%,相对误差为 -3.3%~8.3%,绝对误差小于 1.5%,表明传感器测量精度相当于 BD-III 传感器。

### 4.2 温度传感器的对比试验

温度传感器采用室外测温对比的方式,对比的

表1 含水率传感器和BD-III传感器的对比

Tab.1 Results of moisture sensor and BD-III sensor

编号	1	2	3	4	5	6	%
BD-III	5.295 1	14.112 8	21.032 8	28.221 9	33.013 1	39.991 3	
复合传感器	5.142 7	12.938 9	19.770 4	29.368 9	34.125 8	41.345 6	
绝对误差	0.152 4	1.173 9	1.262 4	-1.147	-1.112 7	-1.354 3	
相对误差	2.9	8.3	6.0	-4.1	-3.3	-3.3	

传感器为瑞士 SENSIRION 公司的 SHT15 型传感器,测量范围  $-40 \sim 123.8^{\circ}\text{C}$ ,精度为  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ,2 种传感器都是不锈钢铠装,可以防水,为了减小由于工艺不同所导致的热传导快慢误差对测量结果所产生的影响,将温度传感器和 SHT15 型传感器同时放入到一个装满水的 1 000 mL 烧杯中,将烧杯置于室外,对比的时间是 2014 年 12 月 22 日 00:00 到 2014 年 12 月 25 日 00:00 点,每隔 5 min 采一次数据,得到 2 组数据,每组 864 个数据,将数据绘制曲线图如图 16 所示。

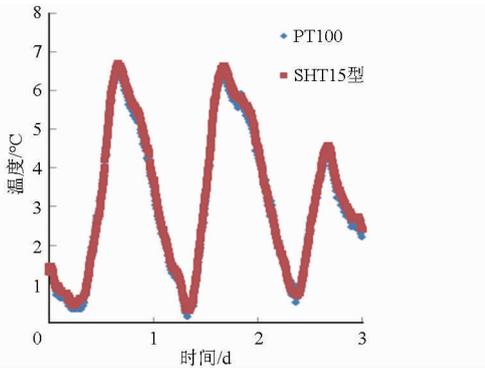


图 16 温度传感器和 SHT15 型传感器对比试验结果

Fig. 16 Results of temperature sensor and SHT15 sensor

从图 16 中可以看出,温度传感器与 SHT15 型的温度变化趋势一致。将这两个传感器的输出的温度的差值绝对值作为性能对比参考依据,使用 SPSS 统计分析软件进行统计直方图的绘制,如图 17 所示,从图 17 中可以看出温度差值在  $0.3^{\circ}\text{C}$  以内的概率是 98.9%,而 SHT15 的温度的精度是  $0.3^{\circ}\text{C}$ ,表明两者性能相当。

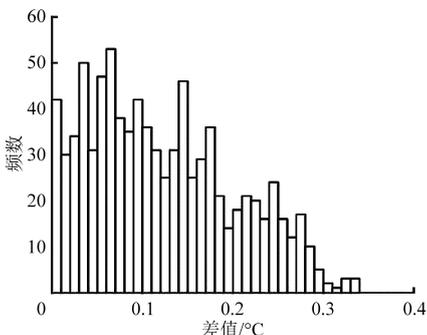


图 17 温度变化直方图

Fig. 17 Histogram of temperature changes

进一步使用 SPSS 软件对这两组数据进行单因素方差分析,结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,

组间平方和为 3.54,  $F$  值为 0.938,组内平方和为 6 512.628,显著性为 0.333,大于显著水平 0.05,可以认为两组数据之间没有显著差异,进一步验证了精度相当的结论。

表 2 温度传感器和 SHT15 型传感器测量的温度对比

Tab.2 Results of temperature sensor and SHT15 sensor

项目	平方和	自由度	均方	$F$	显著性
组间	3.54	1	3.54	0.938	0.333
组内	6 512.628	1 726	3.773		
总数	6 516.167	1 727			

#### 4.3 电导率传感器的对比试验

采用北京林业大学试验苗圃的粘壤土,按照 3.1 节中的步骤配置含盐量分别为 0、0.08%、0.13%、0.18%、0.23%、0.28% 6 个含盐量均小于 0.3% 的土壤样本,对每一个土样取 5 个点,利用电导率传感器对每个点进行 10 次测量,将每一份土样的所有数据求取平均值,再将土样配置成电导率溶液,使用 CCT-3320T 型电导率测试仪测量,测得数据如表 3 所示。

表 3 电导率传感器和 CCT-3320T 对比

Tab.3 Results of EC sensor and CCT-3320T

编号	1	2	3	4	5	6
CCT-3320T/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	145.2	410.5	593.7	759	889.2	1 044.8
传感器/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	156.8	418.3	580.1	737	916.8	1 080.6
绝对误差/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	11.6	7.8	-13.6	-22.0	27.6	35.8
相对误差/%	8.0	1.9	-2.3	-2.9	3.1	3.4

从表 4 可知,与 CCT-3320T 型电导率仪相比,电导率传感器绝对误差为  $-22.0 \sim 35.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,相对误差为  $-2.9\% \sim 8.0\%$ 。

## 5 结论

(1)设计了一种土壤多参数复合测试系统,系统分为采集器部分和传感器部分,采集器部分和传感器部分相互配合可同时测量土壤的含水率、温度、电导率,为实时测量土壤的 3 个参数奠定了基础。

(2)在采用分时供电的前提下,土壤多参数复

合测试系统的干扰主要存在于土壤含水率与土壤温度测量之间,即土壤温度探针作为介质异物会造成土壤含水率测量值的升高,这是一个系统误差,可在数据处理中进行统一补偿。

(3)设计了传感器的标定实验,对土壤含水率、温度、电导率分别进行标定,并对结果进行了线性拟合,得到 $R^2$ 分别为0.998 3、0.999 8、0.999 1,说明被测量参数与传感器输出值具有很大的相关性,验证了方案的可行性与兼容性。同时,验证了当土壤含盐量大于0.3%时土壤电导率不再变化的结论。

(4)设计了传感器动态响应检测试验,验证了自制的土壤多参数复合测试系统的动态响应性能(动态响应时间土壤含水率、温度、电导率时间分别

为460 ms、13 s、2.28 s)、稳定性(稳定性测试结果的标准差依次为土壤含水率0.011 5、温度0.001 4、电导率0.010 3),能够满足土壤多参数实时检测的要求。

(5)设计了传感器测量结果的对比试验,含水率传感器与BD-III型含水率传感器对比试验,所得数据绝对误差均小于2%,说明含水率传感器测量精度可以满足测量要求。温度传感器与瑞士SENSIRION公司的SHT15型传感器对比试验,所得数据经过单因素方差分析得到的结果为显著性0.333,大于显著水平0.05,最大绝对误差0.3℃,精度与SHT15相当。电导率传感器与CCT-3320T型电导率测试仪对比试验,数据绝对误差为-22.0~35.8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,相对误差为-2.9%~8.0%。

### 参 考 文 献

- 1 王凤花,张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 112-121.  
Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 112-121. (in Chinese)
- 2 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 161-165, 176.  
Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Spatial variability of soil water retention curve under fertilization practices in arid-highland of the loess plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 161-165, 176. (in Chinese)
- 3 Hood R C. The effect of soil temperature and moisture on organic matter decomposition and plant growth [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2001, 37(1): 25-41.
- 4 Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for clay pan soils [J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(4): 607-617.
- 5 赵春江,王成,侯瑞锋,等. 土壤三参数测量方法研究[J]. 现代科学仪器, 2007(5): 101-104.  
Zhao Chunjiang, Wang Cheng, Hou Ruifeng, et al. Preliminary study of the three soil parameters measurements methods [J]. Modern Scientific Instruments, 2007(5): 101-104. (in Chinese)
- 6 盛文溢,曾庆猛,林剑辉,等. 大田尺度下车载式土壤多参数测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 188-192.  
Sheng Wenyi, Zeng Qingmeng, Lin Jianhui, et al. On-the-go measuring method of soil parameters in field-scale [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 188-192. (in Chinese)
- 7 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.  
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. (in Chinese)
- 8 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 109-111.  
Zhao Yandong, Wang Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 109-111. (in Chinese)
- 9 赵燕东. 土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.  
Zhao Yandong. Study on fast-measurement of soil water content and application technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 10 孙宇瑞,赵燕东,王一鸣. 一种基于传输线阻抗变换理论的土壤水分测量仪[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(4): 22-24.  
Sun Yurui, Zhao Yandong, Wang Yiming. An instrument based on impedance mapping of transmission line for determination of soil water content [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(4): 22-24. (in Chinese)
- 11 许景辉,马孝义, Sally D Logsdon. 基于低频滤波法 T-TDR 含水率测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 172-176.  
Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon. Measurement of soil moisture with T-TDR probe based on LFF method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 172-176. (in Chinese)
- 12 宋豫晓,王建,乔晓军,等. 多功能土壤温度测量仪的研发[J]. 农机化研究, 2010, 32(9): 80-84.  
Song Yuxiao, Wang Jian, Qiao Xiaojun, et al. Development of multi-functional soil temperature measuring instrument [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(9): 80-84. (in Chinese)
- 13 王福顺,刘永福,孙小华,等. 高精度土壤温度原位测量系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 102-106.  
Wang Fushun, Liu Yongfu, Sun Xiaohua, et al. High-accuracy soil temperatures in situ measurement system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 102-106. (in Chinese)
- 14 Kitchen N, Sudduth K, Drummond S. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for clay pan soils [J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(4): 607-617.

- 15 Sudduth K, Kitchen N, Bollero G, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(3): 472-482.
- 16 李民赞,王琦,汪懋华.一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 51-55.
- 17 李民赞,孔德秀,张俊宁,等.基于蓝牙与PDA的便携式土壤电导率测试仪开发[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2008, 29(2): 93-96.  
Li Minzan, Kong Dexiu, Zhang Junning, et al. Development of portable soil EC meter with Bluetooth and PDA[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2008, 29(2): 93-96. (in Chinese)
- 18 杨卫中,王一鸣,李保国,等.基于相位检测原理的TDR土壤电导率测量研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 183-187.  
Yang Weizhong, Wang Yiming, Li Baoguo, et al. Research of soil conductivity measuring technique with TDR based on phase detecting principle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 183-187. (in Chinese)
- 19 王瑛瑛,宋良图.土壤电导率测量系统开发[J]. *仪表技术*, 2013(12): 21-24.  
Wang Yingying, Song Liangtu. Measurement system development of soil electrical conductivity[J]. *Instrumentation Technology*, 2013(12): 21-24. (in Chinese)
- 20 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4): 39-41.  
Sun Yurui. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4): 39-41. (in Chinese)
- 21 胡克林,陈德立.农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 460-466.  
Hu Kelin, Chen Deli. Spatial variability of soil water and salt in field and their estimations by the CoKriging[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4): 460-466. (in Chinese)
- 22 Wang Yiming, Zhao Yandong. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [C] // *Proceedings of International Conference on Agriculture Engineering*, 1999: 21-24.
- 23 孙宇瑞,汪懋华.一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(2): 37-41.  
Sun Yurui, Wang Maohua. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio[J]. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(2): 37-41. (in Chinese)
- 24 索姆洛 P I, 亨特 G J. 微波阻抗测量[M]. 北京:人民邮电出版社, 1990.
- 25 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- 26 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(5): 533-541.
- 27 Cosenza P, Tabbagh A. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1): 21-36.
- 28 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 5-8.  
Zhao Yandong, Wang Yiming. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 5-8. (in Chinese)
- 29 何书森,黄木梨.微机在田间土层深度测试中的应用[J]. *农业机械学报*, 1998, 29(1): 130-135.  
He Shusen, Huang Muli. The application of micro-computer in the testing of field water depth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1998, 29(1): 130-135. (in Chinese)
- 30 张道辉,赵红军,周广芳,等.农产品贮藏设施温控仪表温度漂移控制方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 108-112.  
Zhang Daohui, Zhao Hongjun, Zhou Guangfang, et al. Drift of the temperature-controlled instrument for the farm products storage [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 108-112. (in Chinese)
- 31 王晓宁,史俊富.查表法校正铂电阻的非线性误差[J]. *医疗卫生装备*, 2004(11): 59-60.
- 32 孙宇瑞,汪懋华.一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 20-23.  
Sun Yurui, Wang Maohua. A mathematical model and its experimental study for a kind of measurement method of soil electric conductivity[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(2): 20-23. (in Chinese)
- 33 Li Minzan, Wang Maohua, Wang Qi. Development and performance test of a portable soil EC detector[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, 22(2): 301-307.
- 34 王海兰.乔木体水分的测试技术及其监测系统的研究[D].北京:北京林业大学, 2011.  
Wang Hailan. Research on measurement and monitor of stem water content[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 35 刘广明,杨劲松.土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(增刊1): 85-87.  
Liu Guangming, Yang Jingsong. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(Supp. 1): 85-87. (in Chinese)
- 36 陈玲,李民赞,赵勇.便携式土壤电导率测试仪改进设计及实验[J]. *农机化研究*, 2009, 31(7): 175-177.
- 37 赵燕东,聂铭君.双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 39-43.  
Zhao Yandong, Nie Mingjun. Optimal analysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 39-43. (in Chinese)
- 38 彭曾榆,赵燕东.基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的土壤水分实时监测系统[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(6): 114-119.  
Peng Zengyu, Zhao Yandong. A monitoring system of real-time soil water content based on  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  operating system[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(6): 114-119. (in Chinese)