

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.018

# 土壤理化特性对土壤剖面水分传感器性能的影响\*

王新忠 刘飞 韩旭

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 针对土壤理化特性变异影响土壤剖面多点水分传感器测量误差的问题,面向土壤剖面水分测量,设计了一种高频电容式水分传感器,通过试验分析了土壤温度、电导率、容重等土壤理化特性变异对传感器输出电压的影响,采用统计回归处理方法,建立了基于温度影响下的土壤水分修正模型,并对传感器的性能进行了检验。试验结果表明:在5~45℃范围内,传感器输出电压随土壤温度升高而线性递增;电导率大于2 mS/cm时,传感器输出电压随电导率增大而逐渐减小;容重增加使得传感器输出电压呈减小趋势;在常温下此水分传感器测量值与传统干燥法测量值对比,两者决定系数 $R^2=0.9679$ ,最大测量绝对误差4.70%,均方根误差为0.02524。

**关键词:** 土壤水分传感器 剖面 土壤理化特性

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0097-05

## Influence of Soil Physical and Chemical Properties on Performance of Soil Profile Moisture Sensor

Wang Xinzhong Liu Fei Han Xu

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

Aimed to the problem of measurement error influence of soil profile moisture sensor caused by variation of soil physical and chemical properties, the soil profile moisture sensor was firstly designed based on high frequency capacitor. And then the analysis was made through the experiments of sensor output voltage influenced by variation of soil physical and chemical properties such as soil temperature, electrical conductivity and bulk density. Thirdly, the soil moisture correction model based on the influence of temperature was established through statistics regression processing method. The performance of sensor was tested at last. The experiment results showed that the sensor output voltage linearly increased with soil temperature changes ranged from 5℃ to 45℃, and it decreased with electrical conductivity increasing when the electrical conductivity was greater than 2 mS/cm. Moreover, the sensor output voltage showed a decreasing trend with bulk density increasing. The largest measuring absolute error was 4.70%, root-mean-square error was 0.02524 and correlation coefficient  $R^2$  was 0.9679 through comparing the measuring value between sensor and traditional drying method at normal temperature.

**Key words** Soil moisture sensor, Profile, Soil physical and chemical properties

### 引言

对土壤剖面不同深度的水分进行实时、连续动

态监测,可以为作物最佳灌溉时机和阈值的选择提供策略,有利于减小作物根系受水分胁迫等不利因素的影响,实现节水灌溉<sup>[1]</sup>。另一方面也是研究降

收稿日期: 2012-02-23 修回日期: 2012-03-30

\* 江苏省高校自然科学研究资助项目(09KJD210003)、江苏省农机三项工程资助项目(NJ2011-46)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011346)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教[2011]8号)

作者简介: 王新忠,副教授,主要从事农业装备系统监测与控制研究, E-mail: wangxinzhong@gmail.com

水在农田环境下运移过程的需要<sup>[2]</sup>,可帮助研究人员深入了解田间土壤剖面中农用化学物质的迁移特征<sup>[3]</sup>。因此,对土壤剖面多点水分传感器的研究具有重要的实用价值。现有土壤水分测量常见方法有干燥法、射线法、电阻法、电容法、TDR法、FDR法、SWR法和遥感法等<sup>[4]</sup>,每种测量方法都有各自优势与不足,综合考虑技术难度、成本、精度和实时性等因素,当前以基于电容原理的介电测量方法应用较为普遍<sup>[5]</sup>,在此方法的基础上,国内外学者相继开始土壤剖面水分传感器的研究<sup>[6-8]</sup>。但是电容式传感器易受土壤理化特性的影响<sup>[9-10]</sup>,从而导致传感器测量精度不高。Baumhardt等<sup>[11]</sup>比较分析了土壤温度、盐分等对TDR和电容式传感器的性能影响。Dean等<sup>[12]</sup>提出电容式传感器的测量频率较低会增加因温度变异所致传感器电路零点漂移的影响,导致土壤水分测量误差。胡建东<sup>[13-14]</sup>等通过参数调制技术,采用附加电阻和高温测量的方法,消除了土壤电导率对电容式传感器的影响。张荣标等<sup>[15]</sup>提出最小二乘支持向量机补偿算法,减小了温度变化对高频电容式传感器EC-5所造成的测量误差。目前这些研究多数是针对探针式或平行板式结构的电容式传感器,仅适于土壤表层单点水分测量。针对土壤剖面不同深度多点水分测量的电容式传感器设计及相关研究鲜有报道。

本文设计一种土壤剖面高频电容式水分测量传感器,通过试验分析土壤温度、电导率、容重等特性变异对水分传感器输出值的影响,采用统计回归处理方法,建立基于温度影响下的土壤水分修正模型,进一步通过试验对研制的水分传感器性能进行检验。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤剖面多点水分传感器设计

土壤剖面水分传感器的测量原理是,基于高频电磁边缘场效应,敏感电极充当高频振荡器并联LC谐振回路的可变电容元件,周围土壤为其电介质。当土壤含水率发生变化造成土壤表征的介电常数发生变化时<sup>[10]</sup>,敏感电极感知的等效电容则发生变化,继而高频振荡器的输出频率也发生变化,信号调理后传感器输出的直流电压信号也发生了改变,通过测量所得电压信号即可反演出土壤含水率。

传感器主要由若干传感器节点、数据采集及处理模块组成。传感器节点将土壤含水率转换成直流电压信号,由敏感电极、高频振荡电路、小信号放大电路、整形/分频电路等组成。使用两个外径25 mm的紫铜圆环上下正对构成敏感电极,圆环长度20 mm,轴向间距10 mm。采用MC1648P芯片外接

并联LC谐振回路构成高频振荡电路,经综合分析<sup>[14,16-17]</sup>,设定起振频率为115 MHz。振荡电路产生的高频正弦小信号经2SC3355幅值放大后,送由MB504与SN74HC393N整形/分频为低频方波信号,最后经LM331N转换成等效直流电压。数据采集及处理模块包括单片机、多路开关、存储模块、接口电路等,其负责触发传感器节点进行土壤水分测量,将测量数据进行分析处理、存储。单片机选用Atmega128L,多路开关选用CD4051,AT24C64作为扩展EEPROM,接口采用MAX3232芯片实现PC和单片机的串行通信。根据土壤剖面不同深度水分的实际测量要求,以10 cm倍数长度作为节点间距,将传感器节点卡嵌于PVC绝缘棒上,组合装配成单杆多节竹形结构,如图1所示。

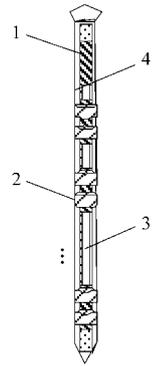


图1 土壤剖面多点水分传感器结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of soil profile moisture sensor

1. 数据采集及处理模块  
2. 传感器节点 3. PVC绝缘棒  
4. PVC绝缘管

### 1.2 试验土样

试验土样采用江苏省镇江市丘陵地区土壤,土壤类型为黄棕壤,取田间10~15 cm耕作层土壤放置于实验室通风处摊铺自然晾干,敲碎后用2 mm滤筛过筛,然后装入塑料桶中密封,以待配置土样。

### 1.3 试验装置

试验装置主要包括:水分传感器、烧杯、铝盒、ACS-30型电子秤、DZF-6050型干燥箱、DSO1022A型200MHz/2G Sa/s示波器、5-TE型土壤水分/温度/电导率传感器等。

### 1.4 试验方案设置

由于所设计传感器节点之间一致性和相关性较好,本文以土壤剖面水分传感器中某个传感器节点的试验过程和结果进行说明。

#### 1.4.1 水分传感器标定试验

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<sup>[7]</sup>。实验室环境下,取土壤容重 $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,配制8种不同含水率的土样:0、0.04、0.08、0.13、0.18、0.23、0.28、0.33,使用保鲜膜密封放置阴凉处48 h待水分运动充分。常温下,使用传感器测量土样:首先将单个传感器节点装配于PVC绝缘棒(长15 cm)顶端,然后将PVC绝缘棒放入事先埋到土样中的PVC套管(长10 cm)正中央,待电压输出稳定,每种土样采集10次数据,取均

值作为传感器输出电压。待传感器测量完毕,从配置的土样中取样放入铝盒,分别称量铝盒、铝盒与土样的质量,将土样置于干燥箱,恒温 105℃ 干燥 24 h 至土样恒质量,再次称量铝盒与土样的质量,最后计算得到土样实际含水率。

#### 1.4.2 温度对传感器输出的影响试验

首先,取容重  $1.35 \text{ g/cm}^3$  的土壤,使用烧杯配置好 5 种不同含水率的土样(事先在土样中都已埋入 10 cm 长的 PVC 套管),选择某一土样,将本文研制传感器放入 PVC 套管中,同时将 5-TE 型土壤水分传感器埋入同深度土样中以便对比测量。然后在烧杯口用保鲜膜密封,土样与保鲜膜之间不留空隙避免水分蒸发损失。将烧杯置于恒温干燥箱中,调节干燥箱以 5℃ 的间隔在 5 ~ 45℃ 范围内改变温度,使用 5-TE 型土壤水分传感器测量土壤温度,当所测量的土壤温度与干燥箱设定温度相同并且保持稳定时,记录下此刻传感器的输出电压,多次测量后取平均值。对于其他 4 种不同含水率土样重复上述试验。

#### 1.4.3 电导率对传感器输出的影响试验

常温下,取一定量的蒸馏水、不等量的 NaCl(0、1、2、4、6、8 g),混合配制成 6 种不同浓度的盐溶液,搅拌均匀后加入干土配成相同含水率的土样(5 种不同含水率,每种含水率 6 个土样,共 30 个土样)。待水分充分运动后,使用传感器测量土样记录相应输出电压,与此同时使用 5-TE 型土壤水分传感器测量相应土样的电导率,多次测量后取均值。

#### 1.4.4 容重对传感器输出的影响试验

常温下,首先取容重  $\rho_b$  为  $1 \text{ g/cm}^3$  的土壤配成含水率为 0.08、0.18、0.23、0.28 的 4 种土样(记为土样 I、II、III、IV)。再根据  $\rho_b = M_s/V_o$ ,固定干土质量  $M_s$ ,改变含水土样体积  $V_o$ ,对每一种土样均处理得到容重为 1、1.254、1.5  $\text{g/cm}^3$  的 3 类土样,共计 12 个试验样本。对 12 个试验样本均使用本文设计传感器对土样水分进行多次测量,取电压均值,再由标定模型计算出相应土样含水率,同步取样后用干燥法测得实际含水率。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分传感器的标定

从图 2 中可以看出,传感器的输出电压随着土壤含水率的增加而减小。通过二次曲线最小二乘拟合,得到传感器输出电压  $V$  与土壤含水率  $\theta_v$  之间的关系,表示为拟合多项式  $V = 1.226 9\theta_v^2 - 0.883 2\theta_v + 3.098 9$ ,其决定系数  $R^2 = 0.974 4$ 。

### 2.2 土壤温度对传感器输出值的影响

温度对传感器输出值影响的试验结果如图 3 所

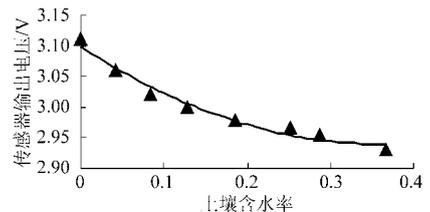


图 2 土壤水分传感器标定试验结果

Fig. 2 Calibration test result of soil moisture sensor

示,从图中可以看到,传感器的输出电压随着土样温度的升高而基本呈线性增加,不同含水率土样的增加趋势几乎一致,这表明温度变异对传感器的测量输出带来偏差,精确测量时需要进行补偿修正。在上述试验基础上,进一步采用 SPSS 软件对试验数据进行线性回归分析,得到土样含水率( $\theta_v$ )、传感器输出电压( $V$ )、温度( $T$ )之间的关系模型为  $V = 0.002T - 0.309\theta_v + 2.993$ ,  $R^2 = 0.940$ 。

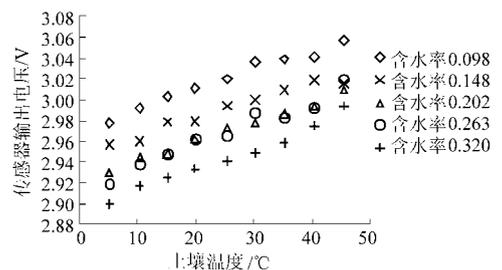


图 3 传感器输出电压与土壤温度之间的关系

Fig. 3 Relationship between sensor output voltage and soil temperature

### 2.3 土壤电导率对传感器输出值的影响

图 4 是电导率对传感器输出值的影响试验结果,当电导率小于  $2 \text{ mS/cm}$  时,电导率对传感器的影响较小,输出电压基本保持不变。当电导率大于  $2 \text{ mS/cm}$  时,传感器的输出电压随电导率增大而逐渐减小,最大绝对误差为 18.16%,出现在土样含水率为 0.178 的样本,含水率为 0.285 土样的绝对误差最小,为  $-0.02\%$ 。说明在土壤含盐量较高时需要重新标定。含水率为 0.123 的土壤在电导率大于  $1.3 \text{ mS/cm}$  之后,输出电压就开始迅速减小,绝对误差由 0.98% 增加到 12.98%,这可能是由

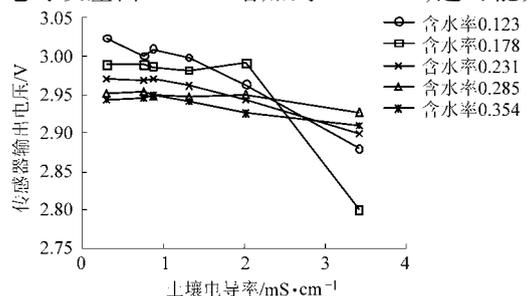


图 4 传感器输出电压与土壤电导率之间的关系

Fig. 4 Relationship between sensor output voltage and soil electrical conductivity

于水分在土壤中没有运动充分造成实际含水率的差异,导致盐分分布不均衡,此误差系试验土样处理中人为因素造成,可通过土样的充分搅拌密封放置48 h待水分运动充分来减小。

## 2.4 土壤容重对传感器输出值的影响

如图5所示,4种土样随着体积变化,土壤容重从 $1\text{ g/cm}^3$ 增大到 $1.5\text{ g/cm}^3$ ,传感器输出电压基本呈现出下降趋势。进一步对传感器的标定值与实际值进行统计分析,在含水率 $0\sim 0.35$ 内,均方根误差为 $0.022\ 69$ ,最大绝对误差为 $4.20\%$ 。其中土样IV(起始含水率为 $0.28$ )在容重 $1.5\text{ g/cm}^3$ 时,传感器的输出电压急剧增大,分析为因同一土样随土壤容重增加使得土样含水率趋于饱和,造成传感器分辨率下降而产生输出电压畸变。综合上述试验可知,容重变异会造成传感器的输出电压改变,但标定值与实际值误差较小,在水分测量综合模型中可不考虑容重因素的影响。

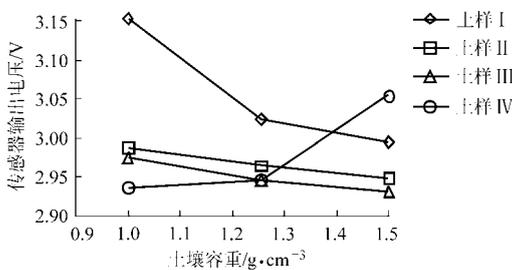


图5 传感器输出电压与土壤容重之间的关系

Fig. 5 Relationship between sensor output voltage and soil bulk density

## 2.5 基于温度变化的水分测量模型检验

为检验传感器数学标定模型和基于温度影响下的土壤水分修正模型的适用性,另外配制5种不同含水率土样(土壤电导率 $0.04\text{ mS/cm}$ , $\rho_b = 1.35\text{ g/cm}^3$ ),在 $5\sim 45^\circ\text{C}$ 范围内改变土壤温度,使用研制的水分传感器对土样进行测量,多次测量取平均电压值,结合标定模型和修正模型分别计算得到土样水分测量值、修正值,然后采用传统干燥法测量土样的实际含水率。如图6所示,给出了土壤含水率为 $0.098$ 、 $0.202$ 、 $0.32$ 试验结果,修正前传感器的测量值随土壤温度增加呈减小趋势,修正后传感器的测量结果随温度增加而变化较小,并且与土壤实际含水率相逼近。在温度变化过程中,修正前传感器测量值最大绝对误差为 $-17.63\%$ ,最小绝对误差为 $0.29\%$ ;修正后传感器测量值最大绝对误差为 $3.91\%$ ,最小绝对误差为 $0.02\%$ 。由此可见,经修正后的传感器测量误差显著减小。

## 2.6 水分传感器性能验证

为进一步验证传感器性能,常温下按土壤电导

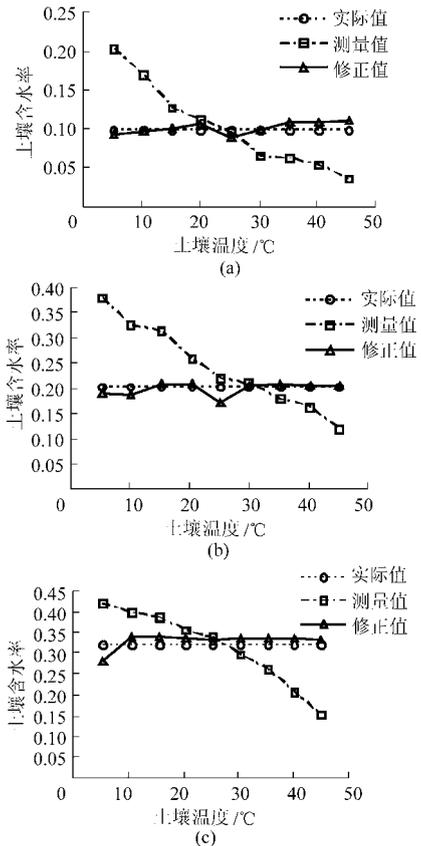


图6 基于温度变化的水分测量模型检验结果

Fig. 6 Test result of moisture measurement model based on temperature changes

(a)  $\theta_v = 0.098$  (b)  $\theta_v = 0.202$  (c)  $\theta_v = 0.320$

率 $0.04\text{ mS/cm}$ , $\rho_b = 1.35\text{ g/cm}^3$ 配制一系列不同含水率的土样,使用水分传感器和传统干燥法分别进行测量,结果如图7所示。对比分析实际值与测量值,决定系数达到了 $R^2 = 0.967\ 9$ ,最大绝对误差为 $4.70\%$ ,均方根误差为 $0.025\ 24$ 。其中最大绝对误差出现在土壤含水率比较大( $0.365$ )的情况下,这可能是由于土壤趋于饱和使得水分对于土壤综合介电常数的影响变化率减小以至传感器的分辨率下降而造成的。由此可见,传感器测量性能较好。

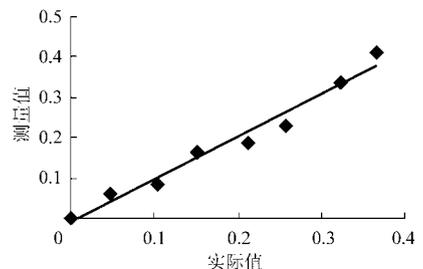


图7 传感器性能验证试验结果

Fig. 7 Test result of sensor performance verification

## 3 结束语

基于高频电容原理,研制了一种土壤剖面多点水分传感器,通过试验分析了土壤理化特性变异对

水分传感器的影响, 试验结果表明: 土壤温度、电导率和容重三者中温度变异对传感器的输出影响最大, 电导率大于  $2 \text{ mS/cm}$  时需要水分传感器重新标定; 建立了基于温度变化的土壤水分测量修正模型, 对所研制的水分传感器的测量值进行修正, 修正

后的输出值最大绝对误差为  $3.91\%$ , 最小绝对误差为  $0.02\%$ , 误差显著减小; 常温下将研制的水分传感器测量值与干燥法测量值对比,  $R^2 = 0.9679$ , 最大绝对误差为  $4.70\%$ , 均方根误差为  $0.02524$ , 表明所研制的水分传感器性能达到使用要求。

### 参 考 文 献

- 1 Fares A, Alva A K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile[J]. Irrigation Science, 2000, 19(2): 57 ~ 64.
- 2 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 114 ~ 119.  
Fan Jun, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Development about methods of soil hydraulic conductivity determination in fields[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 114 ~ 119. (in Chinese)
- 3 邓建才, 蒋新, 胡维平, 等. 田间土壤剖面中阿特拉津的迁移试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 77 ~ 81.  
Deng Jiancai, Jiang Xin, Hu Weiping, et al. Experimental investigation of atrazine transport in field soil profile [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 77 ~ 81. (in Chinese)
- 4 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 ~ 119.  
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 ~ 119. (in Chinese)
- 5 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 216 ~ 221.  
Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 216 ~ 221. (in Chinese)
- 6 Bell J P, Dean T J, Hodnett M G. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II: field techniques, evaluation and calibration[J]. Journal of Hydrology, 1987, 93(1 ~ 2): 79 ~ 90.
- 7 孙宇瑞, 马道坤, 何权, 等. 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): 55 ~ 59.  
Sun Yurui, Ma Daokun, He Quan, et al. Experimental study of a sensor for real-time measurement of soil moisture profile [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(1): 55 ~ 59. (in Chinese)
- 8 付磊, 孙宇瑞. 土壤水分剖面测量系统设计与应用性能检验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 42 ~ 46.  
Fu Lei, Sun Yurui. Design and applicable evaluation of instrument for determining soil moisture profile[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 42 ~ 46. (in Chinese)
- 9 Fares A, Polyakov V. Advances in crop water management using capacitive water sensors[J]. Advances in Agronomy, 2006, 90: 43 ~ 77.
- 10 Paltineanu I C, Starr J L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61(6): 1576 ~ 1585.
- 11 Baumhardt R L, Lascano R J, Evett S R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(6): 1940 ~ 1946.
- 12 Dean T J, Bell J P, Baty A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part I: sensor design and performance[J]. J. Hydrology, 1987, 93(1 ~ 2): 67 ~ 78.
- 13 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技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 1057 ~ 1060.  
Hu Jiandong, Zhao Xiangyang, Li Zhenfeng, et al. Technique considerations on the use of a probe capacitance sensor with parameter modulation for measuring soil moisture content[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(5): 1057 ~ 1060. (in Chinese)
- 14 王晓雷, 胡建东, 江敏, 等. 附加电阻法快速测定土壤含水率的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 76 ~ 81.  
Wang Xiaolei, Hu Jiandong, Jiang Min, et al. Experiment on fast-measurement of soil moisture based on additional resistance method[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 76 ~ 81. (in Chinese)
- 15 张荣标, 刘骏, 张磊, 等. EC-5 土壤水分传感器温度影响机理及补偿方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 168 ~ 172.  
Zhang Rongbiao, Liu Jun, Zhang Lei, et al. Temperature effect mechanism and compensation method of EC-5 soil moisture sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 168 ~ 172. (in Chinese)
- 16 刘贺, 赵燕东. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 140 ~ 144.  
Liu He, Zhao Yandong. Wheat stem moisture sensor using short probes based on SWR principle[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 140 ~ 144. (in Chinese)
- 17 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)