

温度对 FDR 土壤湿度传感器的影响研究

曹 美, 徐晓辉, 苏彦莽, 宋 涛, 周 萌, 贾 薇

(河北工业大学信息工程学院, 天津 300401)

摘 要: 在利用 FDR 土壤湿度传感器测量土壤湿度时, 土壤温度的变化会使测量结果产生较大的误差, 因此要对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿。为了研究温度对 FDR 土壤湿度传感器的影响规律, 利用不同湿度的土壤样本在不同温度下进行实验。根据实验结果采用二元回归分析法对 FDR 土壤湿度传感器和土壤温度传感器的输出进行数据融合, 消除温度对 FDR 土壤湿度传感器的影响。融合补偿后的数据结果比未补偿的数据受温度影响减小, 更加接近土壤真实湿度值, 大大减小了土壤温度对测量结果的影响。

关键词: FDR 土壤湿度传感器; 温度补偿; 二元回归分析

中图分类号: P426.68 **文献标识码:** A

Research on Temperature Effect on FDR Soil Moisture Sensor

CAO Mei, XU Xiao-hui, SU Yan-mang, SONG Tao, ZHOU Meng, JIA Wei

(Institute of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: When using FDR (Frequency Domain Reflectometry) soil moisture sensor to measure soil moisture, the soil temperature change will create large error of the measurement results. In this study, experiments are conducted at different temperatures by using soil samples with different moisture content to analyze the influence of temperature on FDR soil moisture sensor. Binary regression analysis method is applied to conduct data fusion processing of FDR soil moisture sensor and soil temperature sensor to eliminate the influence of temperature on FDR soil moisture sensor. Compared with the data before fusion, the data after fusion is less influenced by temperature and more close to the true soil moisture value, thus the influence of soil temperature on the measurement results is greatly reduced.

Key words: FDR soil moisture sensor; temperature compensation; binary regression analysis

0 引 言

随着现代化技术在农业领域的广泛应用, 利用传感器对土壤墒情的检测也越来越受到人们的重视。水是农作物赖以生长的重要保障之一, 利用土壤湿度传感器检测土壤湿度, 了解农作物的需水状况, 可以达到合理灌溉的目的。测量土壤湿度的方法多种多样, 利用土壤湿度传感器测量土壤湿度安全可靠、快速直读^[1]。其中 FDR(Frequency Domain Reflectometry)土壤湿度传感器因具有简便安全、快速准确、定点连续、自动化、宽量程、少标定等一系列优点, 被广泛应用在土壤湿度检测上^[2]。

从已有的研究和实际实验结果来看, FDR 土壤湿度传感器的测量结果易受土壤温度影响^[3-5]。在一些温差较大的环境中使用 FDR 土壤湿度传感器时, 传感器的输出会随着环境温度的变化而变化, 导致测量误差较大, 所以必须对传感器进行温度补偿。

传感器温度补偿一般有硬件补偿和软件补偿 2 种。硬件补偿主要采用以硬件电路的改进实现的补偿技术, 硬件补偿难以做到全额补偿, 且存在补偿电路硬件漂移等问题^[6]。软件补偿是将微处理器与传感器结合起来, 利用软件的丰富功能再加上一些补偿算法对传感器的测量结果实现补偿。软件方法的补偿精度比硬件算法的高, 且软件补偿方法成本低^[7]。

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(13210305D); 石家庄市科技支撑计划项目(131130322A)。

作者简介: 曹 美(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为信息传输系统与控制。E-mail: yanyishumei_cm@163.com。

FDR 土壤湿度传感器是利用电磁脉冲原理,根据电磁波在土壤中的传播频率来测量土壤的介电常数,从而间接得到土壤湿度^[8]。在温度为 20℃ 时,土壤颗粒的相对介电常数为 3~4,空气的相对介电常数约为 1,而水的介电常数为 80,远大于土壤颗粒和空气的介电常数^[9]。所以土壤介电常数大部分取决于水的介电常数,因此可以根据土壤介电常数推知土壤中水分含量的多少。而液体的介电常数是一个与温度有关的无量纲常量,当温度变化时,水的介电常数将发生变化,土壤的相对介电常数也将发生变化,从而导致在测量同一湿度的土壤样本时 FDR 土壤湿度传感器的测量结果会随温度变化而变化。

此外 FDR 土壤湿度传感器采用的大都是分立元件,温度系数较大,当温度变化时存在元器件参数的温度漂移。所以温度对 FDR 土壤湿度传感器测量结果的影响是由多种因素引起的,只用硬件方法进行温度补偿无法达到理想的效果。

因此本文选择了软件方法对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿。软件方法中的二元回归分析法^[10]的计算比较方便,补偿的精度也能够满足实际应用的需要。本文根据实际需求,采用二元回归分析法对 FDR 土壤湿度传感器的温度进行补偿。

1 FDR 土壤湿度传感器温度补偿方法

1.1 FDR 土壤湿度传感器温度补偿模型

理想的 FDR 土壤湿度传感器应该是一个单输入单输出的系统,存在温度影响的 FDR 土壤湿度传感器并不是一个单输入单输出系统,而是一个多输入单输出系统,所以需要采用二元回归方程来表征存在温度影响的 FDR 土壤湿度传感器的多输入单输出特性。

本文中为了消除温度对 FDR 土壤湿度传感器测量目标的影响,设置了一个监测温度变化的土壤温度传感器,建立二传感器数据融合系统。二传感器数据融合系统如图 1 所示。

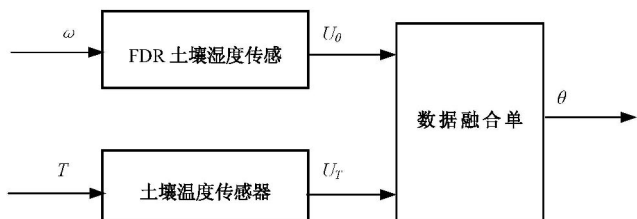


图 1 二传感器数据融合系统框图

二传感器数据融合系统的输入信号来自 2 个传感器:其中 ω 是被测土壤样本的真实湿度值; T 是被测土壤样本的温度值。已知 FDR 土壤湿度传感器在测量温度为 T 的土壤样本的输出电压是 U_θ ,土壤温度传感器在测量温度为 T 的土壤样本时输出电压是 U_T ,则被测的土壤样本融合后的湿度参量 θ 可以用 U_θ 和的 U_T 二元函数表示,即:

$$\theta = f(U_\theta, U_T) \quad (1)$$

由第 i 个土壤样本的输出坐标 $(U_{\theta i}, U_{T i})$ 决定的 θ_i 在一个平面上,所以可以利用二元回归方程描述:

$$\theta = \alpha_0 + \alpha_1 U_\theta + \alpha_2 U_T + \alpha_3 U_\theta^2 + \alpha_4 U_\theta U_T + \alpha_5 U_T^2 + \epsilon \quad (2)$$

式中: $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 为常数; ϵ 为高阶无穷小。

求出 5 个常数后,该式就是消除温度影响的 FDR 土壤

湿度传感器的二元回归方程。求 5 个常数时要先进行实验标定,然后依据最小二乘法原理^[11]确定 5 个常数。

1.2 最小二乘法求解回归方程系数原理

设第 i 个土壤样本真实湿度值 ω_i 与利用式(2)计算得到的值 $\theta(U_{\theta i}, U_{T i})$ 之间有误差 e_i ,方差 e_i^2 :

$$e_i = |\theta(U_{\theta i}, U_{T i}) - \omega_i| \quad (3)$$

$$e_i^2 = [\theta(U_{\theta i}, U_{T i}) - \omega_i]^2 = \sum_{k=0}^t [\alpha_k h_{ik} - \omega_{ik}]^2 \quad (4)$$

式中: $t=5$ 为二元方程式的项数; $h_{i0}=1, h_{i1}=U_{\theta i}, h_{i2}=U_{T i}, h_{i3}=U_{\theta i}^2, h_{i4}=U_{\theta i} \cdot U_{T i}, h_{i5}=U_{T i}^2$ 。

使土壤真实湿度值 ω 与计算值 θ 拟合的最好时,二者的均方差应该取最小,二者均方差为:

$$E = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^{s=m \cdot n} e_i^2 = E(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) \quad (5)$$

其中 $s=m \cdot n$ 是参加实验的样本总数,本文中选取了 6 种不同湿度的土壤样本,在 6 个温度状态下进行了实验。所以 $m=6, n=6, s=m \cdot n=36$ 。

根据多元函数求极值条件可知,若要使(5)式取得最小值,则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial \alpha_0} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i0} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \alpha_1} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i1} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \alpha_2} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i2} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \alpha_3} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i3} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \alpha_4} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i4} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \alpha_5} = 2 \sum_{i=1}^{36} [\sum_{k=0}^5 \alpha_k h_{ik} - \omega_i] \cdot h_{i5} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据线性代数知识,式(6)可以写成:

$$A \cdot H \cdot H^T = O \cdot H^T \quad (7)$$

式中: $A \cdot H = \sum_{k=0}^5 \alpha_k \cdot h_{ik}, O \cdot H^T = \sum_{i=1}^{36} \omega_i \cdot h_{ik}$ 。

所以,二元回归方程式(2)的待定常系数的最小二乘最优解的解析式为:

$$A = O \cdot H^T \cdot (H \cdot H^T)^{-1} \quad (8)$$

因为 Matlab 具有强大的数值计算功能,所以二元回归方程系数可以利用 Matlab 求出。

2 实验数据及结果分析

在用二元回归分析法对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿时,要先进行实验来获取数据。本文选取的土壤样本湿度为 10.30%、15.20%、17.80%、19.40%、23.10% 和 35.20%,分别在 20、25、30、35、40 和 45℃ 的温度下进行了实验。得到的实验数据如表 1 所示。

表 1 中 U_θ 为 FDR 土壤湿度传感器输出的电压值; U_T 为土壤温度传感器输出的电压值;真实湿度是利用烘干法得到的土壤体积含水量。

由表 1 可以看出,对同一个土壤样本在不同温度进行实验

表 1 FDR 土壤湿度传感器在不同温度下的实验数据

土壤样本湿度/%		10.30	15.20	17.80	19.40	23.10	35.20
20℃	U_{θ} (V)	0.388	0.568	0.608	0.688	0.848	1.204
	U_T (V)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
25℃	U_{θ} (V)	0.416	0.604	0.668	0.732	0.9160	1.292
	U_T (V)	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
30℃	U_{θ} (V)	0.460	0.652	0.708	0.784	0.9720	1.384
	U_T (V)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
35℃	U_{θ} (V)	0.492	0.700	0.736	0.820	1.036	1.436
	U_T (V)	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300
40℃	U_{θ} (V)	0.548	0.748	0.804	0.888	1.060	1.460
	U_T (V)	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
45℃	U_{θ} (V)	0.568	0.812	0.876	0.948	1.132	1.484
	U_T (V)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500

时,FDR 土壤湿度传感器的输出电压随着土壤温度的变化而变化,受温度影响显著。

获取实验数据以后,根据最小二乘法原理得出的二元回归方程的系数为: $\alpha_0 = 16.90, \alpha_1 = 31.39, \alpha_2 = -21.16, \alpha_3 = 2.970, \alpha_4 = -7.720, \alpha_5 = 5.700$ 。

所以用于温度补偿的二元回归方程为:

$$\theta = 16.90 + 31.39U_{\theta} - 21.16U_T + 2.970U_{\theta}^2 - 7.720U_{\theta}U_T + 5.700U_T^2 \tag{9}$$

为了更加直观地观察对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿的效果,选取了 15.20%、19.40%、35.20% 三种不同真实湿度值的土壤样本,利用 Matlab 绘制了对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿前后的曲线,分别如图 2、图 3 和图 4 所示。图中的横坐标是土壤温度,纵坐标是土壤湿度。

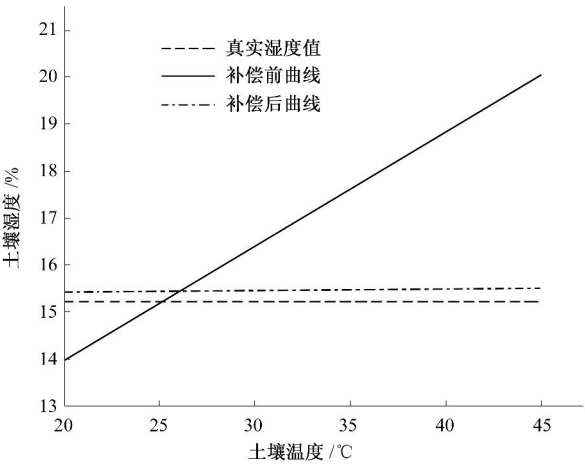


图 2 温度补偿效果(理论湿度 15.20%)

由这 3 个曲线图可以看出,FDR 土壤湿度传感器在未进行温度补偿时,测量结果受温度影响较大,测量结果偏离土壤真实湿度值较大。采用二元回归分析法对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿以后,补偿结果受温度影响减小,且比较接近土壤真实湿度值。

3 结 语

从实验结果可以看出,FDR 土壤湿度传感器的测量结果受

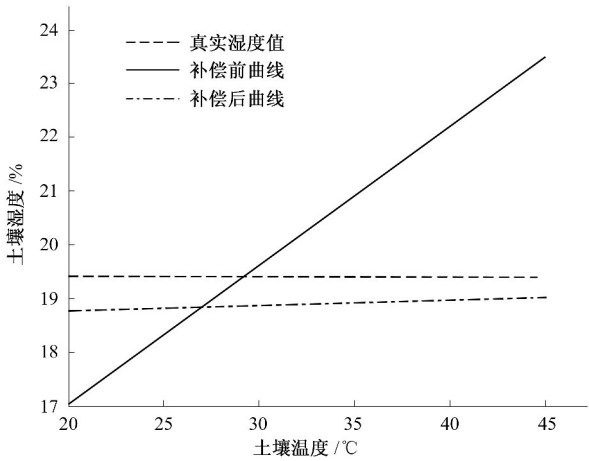


图 3 温度补偿效果(理论湿度 19.40%)

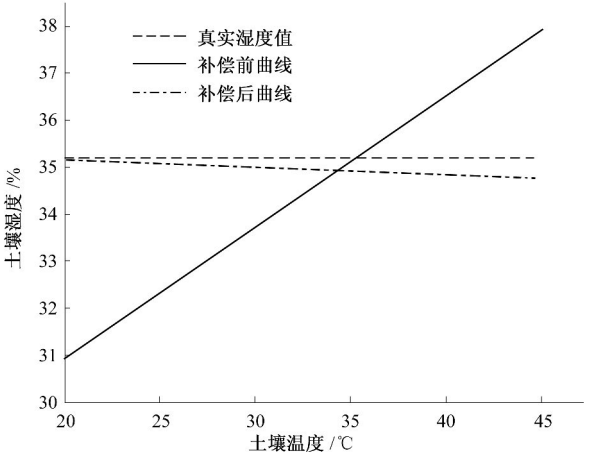


图 4 温度补偿效果(理论湿度 35.20%)

温度影响存在误差,温度的变化产生较大的变化,与用烘干法得到的土壤真实湿度值有较大差距。利用二元回归法对 FDR 土壤湿度传感器进行温度补偿以后,可以大大减小温度对 FDR 土壤湿度传感器的影响,补偿结果更加接近土壤真实湿度值。

用二元回归分析法得到的回归方程可以存储在单片机内存中,将土壤温度传感器固化在 FDR 土壤湿度传感器中,随时监测 FDR 土壤湿度传感器的工作温度,根据温度变化对 FDR 湿度传感器的输出电压利用存储在单片机中的二元回归方程加以修正,实现对 FDR 土壤湿度传感器的温度进行实时补偿。

参考文献:

[1] 时新玲,王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电,2003,(10):84—86.

[2] 徐晓辉,闫焕娜,苏彦莽,等. FDR 土壤水分传感器的快速校准与验证[J]. 节水灌溉,2014,(3):66—68.

[3] 高 磊,施 斌. 温度对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J]. 冰川冻土,2010,32(5):965—969.

[4] 郭文川,宋克鑫,张 鹏,等. 土壤温度和容重对频率反射土壤水分传感器测量精度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):136—143.

[5] Kizito F, Campbell C S, Campbell G S, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soilmoisture sensor[J]. Journal of Hydrology, 2008,352(3—4):367—378.

(下转第 23 页)

均匀度就改善越明显;在低压工况下,工作压力是影响组合均匀度的最主要因素,但是随着压力的增加,其对组合均匀度的影响逐渐降低。

4 结 语

通过研究分水针结构尺寸和工作压力对草坪喷头水力性能的影响,可以获得以下结论。

(1)分水针可提高喷头低压工况下喷灌均匀度。对喷嘴当量直径为2.5 mm的S800草坪喷头,使用分水针可将喷头的正常工作压力由200 kPa降低至150 kPa。分水针插入主射流的深度是影响喷灌均匀度的显著性因素,分水针直径对喷灌均匀度的影响不显著。

(2)工作压力一定时,分水针插入主射流的深度增加,喷头的射程显著减小;分水针插入深度一定时,工作压力提高,喷头射程显著增加。若采用射程损失系数来评价射程变化,仅分水针插入主射流的深度是显著性影响指标,工作压力对射程损失系数影响很小,该现象是否具有普遍适用性还需进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 徐 敏,李 红,陈 超,等. 提高喷灌均匀性的喷头结构改善措施[J]. 节水灌溉,2013,(2):44—47.
- [2] Solomon K H, Kissinger J A, Farrens G P. Performance and Wa-

ter Conservation Potential of Multi-stream Rotating Sprinkler for Landscape Irrigation[J]. American Society of Agriculture and Biological Engineers, 2007,23(2):1—11.

- [3] 蒋定生. 一种旋转喷头[P]. 中国:CN2401024Y,2000-10-18.
- [4] Lemme C D. Rotary irrigation sprinkler nozzle with improved distribution[P]. US Patent No. 5598977.
- [5] Li Jiusheng. Sprinkler Irrigation[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press,2000:8—39.
- [6] 陈 超,袁寿其,李 红,等. 异形喷嘴对变量喷头水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(12): 111—115.
- [7] Kreitzberg J P. Flow control nozzle[P]. US Patent No. 4492339.
- [8] 李 红,王 超,蔡 彬,等. 压力补偿变截面异型喷头[P]. 中国:CN101530833A,2009-09-16.
- [9] 范兴科,吴普特,朱 琳,等. 雾化度可调节的低仰角喷头[P]. 中国:CN2649185Y,2004-10-20.
- [10] Hunter E J. Sprinkler unit with alternating stream interrupter[P]. US Patent No. 4836450
- [11] 汤 跃,袁寿其,李 红. 基于分布式总线的喷头水量分布的自动测试[J]. 农业工程学报,2006,22(4):112—115.
- [12] 干浙民,杨生华. 旋转式喷头射程的试验研究及计算公式[J]. 农业机械学报,1998,29(4):145—149.
- [13] 韩文霆,吴普特,杨 青,等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(9):172—177.
- [14] GB/T 50085-2007,喷灌工程技术规范[S].

(上接第19页)

- [6] 杨红霞,曹新亮. 湿度传感器温度补偿法的研究[J]. 传感器与微系统,2007,26(5):18—20.
- [7] 何金田,刘晓旻. 智能传感器原理、设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [8] 韩晨燕,封维忠,施山菁,等. 基于FDR原理的土壤湿度实时监控灌溉系统[J]. 节水灌溉,2012,(2):75—77.

- [9] 马孝义,熊运章,朱凤书,等. 土壤水分介电测量方法的潜力分析[J]. 农业工程学报,1995,11(2):22—26.
- [10] 高 敏,卢文科,孙仁涛. 基于二维回归分析法的霍尔电流传感器温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(2):100—104.
- [11] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1993.

· 信 息 ·

喷灌喷泉百家合作专业市场



诚邀全国厂、商加入本市场合作团体

专业产品、相关器材集中亮相之处

展示单位及个人风采、服务项目的平台

网址: www.haocanmou.net 地址: 郑州1301信箱 邮编: 450004
电话: 0371-66320879 66320785 66320794/兼传真