

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.034

EC-5 土壤水分传感器温度影响机理及补偿方法研究*

张荣标 刘 骏 张 磊 余功江

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 针对 EC-5 传感器温度实验中出现的两种截然不同现象,根据温度对土壤介电常数和电导率影响的机理分析,建立土壤水分传感器测试结果随温度变化的理论模型。通过对模型的仿真分析发现,EC-5 传感器测得的土壤水分含量随温度变化的趋势与土壤电导率密切相关。利用最小二乘支持向量机对传感器的温度实验数据建立补偿函数并提出相应补偿算法,有效地抵消了温度变化造成的传感器测试误差。

关键词: 土壤介电常数 土壤水分传感器 最小二乘支持向量机 温度补偿

中图分类号: TP212.6; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0168-05

Temperature Effect Mechanism and Compensation Method of EC-5 Soil Moisture Sensor

Zhang Rongbiao Liu Jun Zhang Lei Yu Gongjiang

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Aiming at the two distinct phenomena appeared in the EC-5 sensor temperature experiment, a theoretical model on variation of soil moisture content with temperature was established according to the influence of temperature on soil permittivity and electrical conductivity. The simulation based on the model shows that the variation tendency of soil moisture content with temperature measured by the EC-5 sensor is closely related to the soil electrical conductivity. Using least squares support vector machine, the sensor temperature compensation function was built and corresponding compensation algorithm was proposed. The results of the experiment indicate that the sensor measurement errors caused by temperature are effectively offset.

Key words Soil permittivity, Soil moisture sensor, Least squares support vector machine, Temperature compensation

引言

解决农田土壤水分信息的获取问题是提高水资源利用率的有效措施。农田土壤水分检测具有被测面积大、测点多、观测时间长等特点,利用无线传感网络进行土壤水分测试,可有效避免传统检测方法的布线麻烦。然而,无线传感网络节点一般采用电池供电,要求传感器工作电压低、能量消耗小,Decagon 公司成功研制了具有相应特点的 EC-5 土

壤水分传感器。国外一些学者对该新型传感器从不同的角度进行深入的研究^[1~4],其中文献[3~4]针对 EC-5 传感器的温度影响作了研究,但出现了两种截然不同的实验现象:文献[3]中 EC-5 传感器水分测试结果随温度升高呈现增加趋势,文献[4]中 EC-5 传感器水分测试结果随温度升高呈现减小趋势,这对该新型传感器温度实验结果是否正确的判断带来很大不确定性。为此,从温度对传感器影响机理分析出发,并考虑电导率对土壤介电常数

收稿日期:2009-09-16 修回日期:2009-11-03

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z258)

作者简介:张荣标,教授,博士生导师,主要从事无线传感网络与智能检测技术研究, E-mail: zrb@ujs.edu.cn

的作用,建立 EC-5 传感器土壤水分与温度的关系模型,解释了文献[3]和文献[4]的两种实验现象。在此基础上,进行 EC-5 土壤水分传感器温度实验,采用最小二乘支持向量机有效补偿温度对 EC-5 传感器土壤水分检测的影响。

1 EC-5 传感器土壤水分与温度关系模型

1.1 传感器工作原理

EC-5 土壤水分传感器是一种低电压、低功耗、高集成度的电容式变换器,其内部主要是由方波信号发生电路、RC 充放电电路、时间电压转换电路组成,如图 1 所示。其中传感部件电容 C 以耐腐蚀的 PCB 为极板、待测土壤为电介质,土壤介电常数 ϵ 随水分的变化表现为电容量的变化。当测试电极几何因数、电阻 R 、输入电压 V 为定值时,土壤介电常数 ϵ 可由充电时间 t 决定,再通过时间电压转换电路得到输出电压 U 。因此,输出电压 U 的变化,反应土壤水分的变化。

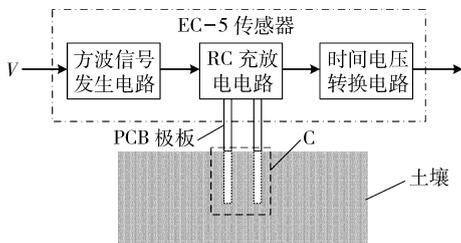


图 1 EC-5 传感器测试原理图

Fig. 1 Principle schematic of EC-5 sensor measurement

1.2 建立模型

土壤介电常数是土壤水分测量的关键,温度对传感器土壤水分影响的实质是土壤介电常数随温度变化。文献[3~6]只考虑温度对土壤介电常数的影响,其中 Seyfried 建立了土壤介电常数 ϵ 与温度 T 的模型^[6]为

$$\epsilon = (V_w \sqrt{\epsilon_w(T)} + V_s \sqrt{\epsilon_s} + V_a \sqrt{\epsilon_a})^2 \quad (1)$$

式中 V_w ——水分体积系数

$\epsilon_w(T)$ ——水分介电常数

V_s ——土壤颗粒体积系数

ϵ_s ——土壤颗粒介电常数

V_a ——空气体积系数

ϵ_a ——空气介电常数

其中,水分介电常数根据文献[7]可表示为

$$\epsilon_w(T) = 78.54[1 - 4.58 \times 10^{-3}(T - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(T - 25)^2 - 2.28 \times 10^{-8}(T - 25)^3] \quad (2)$$

由于水分介电常数 $\epsilon_w(T)$ 是随温度升高而减小的,根据式(1)所建立的关系,其土壤介电常数应随

温度升高呈现出减小的趋势。

在文献[8]中,土壤介电常数采用复数形式表示为

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \right) \quad (3)$$

式中 ϵ_r'' ——分子弛豫 σ ——土壤电导率
 f ——测试频率 ϵ_0 ——真空介电常数

由此可知,土壤电导率 σ 的变化会影响土壤介电常数,根据文献[3]对 EC-5 传感器的研究结果可得 σ 对土壤介电常数的影响函数为

$$\epsilon_\sigma = 0.4180\sigma^4 - 4.5804\sigma^3 + 18.335\sigma^2 - 23.393\sigma + 0.0516 \quad (4)$$

由于介质电导率与温度存在如下关系

$$\sigma(T) = \sigma^{\text{ref}}[1 + \alpha(T - 25)] \quad (5)$$

式中 σ^{ref} ——参考温度(25℃)时的电导率

α ——温度系数,取 0.02

通过对式(4)和式(5)分析可知,土壤温度的变化导致 σ 的改变而引起土壤介电常数的变化。

同时考虑温度和电导率对土壤介电常数的影响,土壤介电常数与土壤温度之间的关系模型表示为

$$\epsilon(T) = (V_w \sqrt{\epsilon_w(T)} + V_s \sqrt{\epsilon_s} + V_a \sqrt{\epsilon_a})^2 + \epsilon_\sigma(T) \quad (6)$$

根据 Topp 经验公式^[9],可得到土壤水分测试结果与温度的关系为

$$\theta(T) = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon(T) - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon(T)^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon(T)^3 \quad (7)$$

联立式(2)、(4)、(5)、(6)和式(7)可得土壤水分与温度之间的关系模型。

1.3 模型分析

针对式(6)中引入土壤电导率影响函数,分析不同土壤电导率的情况下土壤水分随温度变化的趋势。

为方便分析,设 $\epsilon_s = 3.9$, $\epsilon_a = 1$, $V_w = 20\%$, $V_s = 75\%$, $V_a = 5\%$,针对两种典型的土壤电导率,对 EC-5 传感器土壤水分测试结果随温度变化的趋势进行仿真。

如图 2 所示,土壤水分测试结果在不同电导率情况下随土壤温度的变化趋势不同。当电导率较小时($\sigma = 0.2 \text{ mS/cm}$), $\epsilon_\sigma(T)$ 随温度升高的增加量小于 $\epsilon_w(T)$ 随温度升高的减小量,土壤介电常数呈现随土壤温度升高减小的趋势,使传感器土壤水分测试结果随温度升高而减小;反之,当电导率较大时($\sigma = 1.5 \text{ mS/cm}$), $\epsilon_\sigma(T)$ 随温度升高的增加量大于 $\epsilon_w(T)$ 随温度升高的减小量,土壤介电常数呈现随土壤温度升高增加的趋势,传感器土壤水分测试结

果随温度升高而增加。一般情况下,由于土壤中存在较高电导率,EC-5 土壤水分传感器的水分测试结果应随着土壤温度的升高呈现出增加的趋势。

根据模型分析结果,该模型能够解释文献[3]和文献[4]针对 EC-5 传感器温度实验出现两种不同现象的原因:文献[3]实验采用水与 2-异丙氧基乙醇(i-C3E1)混合液,电导率较大,导致传感器水分测试结果随温度的升高而增加;文献[4]实验采用纯水溶液,电导率较小,导致传感器水分测试结果随温度升高而减小。

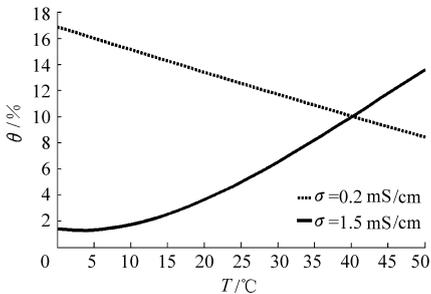


图2 不同电导率时土壤水分体积分数随温度变化趋势

Fig. 2 Soil moisture trend with temperature at different conductivity

2 温度补偿方法

2.1 温度补偿原理

在实际的土壤水分测试过程中,由于光照的缘故,不同时刻农田土壤的温度不同,使得传感器的测量结果会出现误差。为了能够减少温度对传感器的影响,提高土壤水分的测试精度,有必要对传感器进行温度补偿。

EC-5 土壤水分传感器进行温度补偿的原理如图3所示,经过补偿的土壤水分测试结果可表示为

$$\theta_c = f(T) + \Psi(T) \quad (8)$$

式中 $f(T)$ ——温度为 T 时 EC-5 传感器的测试结果

$\Psi(T)$ ——利用 LS-SVM 获得的补偿量

由于土壤温度的影响,EC-5 传感器的测试结果与土壤真实水分含量存在着一定的误差。根据式(8)所示,补偿效果的关键是利用最小二乘支持向量机(LS-SVM) 确定出合适的补偿函数 $\Psi(T)$, 使 θ_c 尽可能地等于土壤水分真实含量。由 Suykens 提出的 LS-SVM 方法^[10], 采用结构风险最小化原理, 同时使经验风险与置信范围最小化, 较好地解决了小样本、非线性、高维数及局部极小点等问题, 具有很强的泛化能力。同 BP 神经网络相比, LS-SVM 有更强的逼近能力和更快的收敛速度, 经过训练后的 LS-SVM 能够逼近任意的非线性函

数^[11-12]。

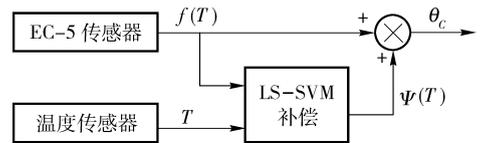


图3 温度补偿原理图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature compensation

2.2 补偿算法

在土壤水分测试过程中,利用待测农田土壤对 EC-5 传感器进行土壤温度实验,根据得到的实验数据建立出待测农田温度补偿函数 $\Psi(T)$, 具体算法表示如下:

- ① 建立训练样本集。将 EC-5 传感器和温度传感器测量得到的土壤样本水分信息和温度信息作为训练样本输入数据;将传感器测量水分与土壤样本真实水分的差值作为训练样本的输出数据。
- ② 选用径向基函数(RBF)为支持向量机的核函数。
- ③ 采用五折交叉验证的方法确定最佳参数 gam 和 $\text{sig}2$ 。其中 gam 为正规化参数,用于控制函数的拟合误差, gam 值越大,拟合误差越小,相应的训练时间也就越多,但数值过大会导致过拟合; $\text{sig}2$ 为 RBF 核函数的参数,代表着 RBF 的带宽,随着 $\text{sig}2$ 的变小,拟合误差会变小,相应的训练时间也就变长,但 $\text{sig}2$ 过小会导致过拟合。
- ④ 利用最佳参数对训练样本集进行训练获取支持向量机模型,即确定补偿函数 $\Psi(T)$ 。
- ⑤ 根据 EC-5 传感器水分测试结果 $f(T)$ 和土壤温度 T 利用支持向量机模型获取相应的补偿量,并利用补偿量补偿 $f(T)$ 输出水分测试结果 $\theta(T)$ 。

3 实验及结果分析

3.1 土壤温度实验

利用水或者配比的溶液对 EC-5 传感器进行温度实验存在一定局限性,不能完全反映传感器在土壤中的测试效果。为了解传感器实际测试中的性能,直接采用土壤进行温度实验。

实验方法:实验所用土壤取自长江中下游的农田,其土质以黄褐土为主。取一定质量的样本土壤装满烧杯,分别将 Decagon 公司 EC-5 土壤水分传感器和 RH/T 温湿度传感器同时埋入烧杯里的土壤中。为保证实验过程中烧杯中土壤的水分含量保持不变,在烧杯口处密封一层塑料薄膜以防止水分挥发。将烧杯置于恒温箱中,利用 EM50 数据采集器采集传感器的数据,当温度传感器所采集到的土壤温度信息与恒温箱设定的温度相同时记录下 EC-5 传感器土壤水分测试数据,调节恒温箱的温度,记录

下 EC-5 传感器在土壤温度为 5~45℃ 范围内的测试数据。采用不同水分含量的样本土壤重复上述实

验,得到不同土壤样本下 EC-5 传感器不同土壤温度的数据,部分实验数据如表 1 所示。

表 1 不同土壤温度时 EC-5 土壤水分传感器的测试数据
Tab.1 Test data of EC-5 soil moisture sensor at different soil temperatures %

测试土壤	EC-5 输出土壤体积含水量								
	5℃	10℃	15℃	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃
样本 1	31.6	32.1	32.6	33.1	33.8	35.1	36.5	37.6	39.7
样本 2	28.9	30.2	30.4	30.7	31.0	31.5	32.1	32.5	34.2
样本 3	22.5	23.1	23.7	24.5	25.0	25.9	26.7	27.5	28.4
样本 4	19.7	20.4	21.2	22.1	23.0	23.7	24.8	25.9	27.0
样本 5	19.2	20.3	21.1	21.8	22.5	23.4	25.1	24.2	26.2
样本 6	17.7	18.2	18.8	19.7	20.1	21.2	22.2	23.5	24.7
样本 7	16.8	17.6	18.0	19.0	19.7	20.7	21.6	22.6	23.8
样本 8	15.0	15.9	16.8	17.6	18.5	19.6	20.6	21.5	22.7

实验数据表明,在实际的土壤水分测试过程中 EC-5 传感器土壤水分测试结果随着温度的升高呈现增加的趋势,实验结果与温度模型分析的结果相一致。

3.2 温度补偿效果

根据上述温度实验中的部分实验数据利用 LS-SVM 建立补偿函数,对 EC-5 传感器在 3 种不同湿度土壤样本下的水分测试数据进行温度补偿,补偿效果如图 4 所示。

图 4 中,理想曲线为烘干法测量得到的土壤样本真实水分含量,图 4a、4b 和图 4c 中土壤样本真实水分含量 θ^* 分别为 33%、23.6% 和 15.8%;未补偿

曲线为 EC-5 传感器土壤水分测试结果随温度的变化曲线。在土壤含水率较大时(图 4a),传感器的测试结果低于土壤样本的真实水分含量;在土壤含水率较小时(图 4c),传感器的测试结果高于土壤样本的真实水分含量。上述现象的主要原因是:随着土壤样本水分含量的增加,土壤中水分体积系数 V_w 增加,导致水分介电常数 $\epsilon_w(T)$ 对土壤介电常数的影响程度加深。根据图中所示,未补偿时,传感器的土壤水分测试结果随土壤温度的变化趋势较大;LS-SVM 补偿后,传感器的土壤水分测试结果随温度的变化趋势较小并且与土壤样本真实水分含量相近。

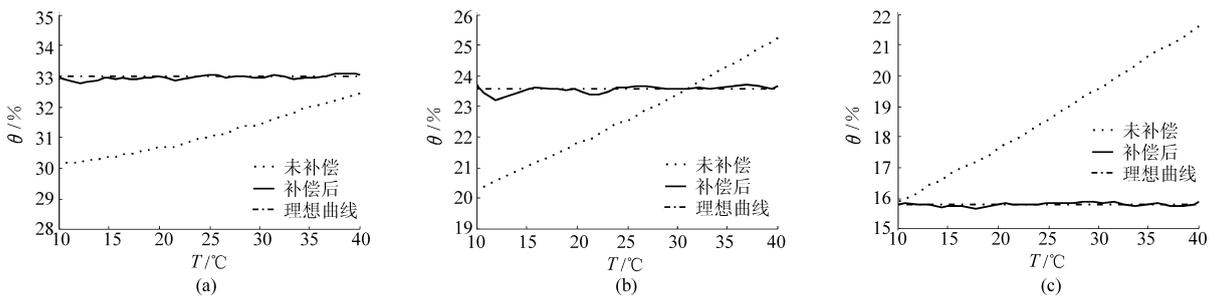


图 4 EC-5 传感器温度补偿效果

Fig.4 Temperature compensation effect of EC-5 sensor

(a) $\theta^* = 33.0\%$ (b) $\theta^* = 23.6\%$ (c) $\theta^* = 15.8\%$

表 2 传感器土壤水分测试误差对比

Tab.2 Comparison of soil moisture sensor test errors

土壤样本水分含量 /%	测试均方误差 (MSE)	
	未补偿	补偿后
33.0	2.046 9	0.084 2
26.6	1.904 7	0.068 0
23.6	1.780 5	0.142 6
17.6	2.804 5	0.229 7
15.8	3.283 8	0.066 4

在不同水分含量的土壤样本下,土壤温度由 10℃ 渐变到 40℃ 过程中温度补偿前后的 EC-5 传感器土壤水分测试均方误差对比如表 2 所示。显然,经过 LS-SVM 补偿后 EC-5 土壤水分传感器的土壤水分测试误差显著减小。

4 结论

(1) 同时考虑温度和电导率对土壤介电常数的

影响,建立土壤介电常数与温度之间关系模型,得出在不同电导率情况下 EC-5 传感器测试结果随温度变化呈现上升和下降趋势,为判断 EC-5 传感器在土壤温度实验中测试结果随温度变化趋势的正确

性提供依据。

(2) 采用 LS-SVM 建立 EC-5 传感器温度补偿函数,大大提高了传感器土壤水分测试精度,同时为类似传感器的温度补偿提供了借鉴。

参 考 文 献

- 1 Bandaranayake W M, Parsons L R, Borhan M S, et al. Performance of a capacitance-type soil water probe in a well-drained sandy soil[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2007, 71(3): 993 ~ 1002.
- 2 Saito Tadaomi, Fujimaki Haruyuki, Inoue Mitsuhiro. Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes[J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, 4(6): 683 ~ 692.
- 3 Bogena H R, Huisman J A, Oberdorster C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(1~2): 32 ~ 42.
- 4 Kizito F, Campbell C S, Campbell G S, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3~4): 367 ~ 378.
- 5 Roth K, Schulin R, Fluehler H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2267 ~ 2273.
- 6 Seyfried M S, Murdock M D. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content and temperature[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65(1): 28 ~ 34.
- 7 Weast R C. *Handbook of physics and chemistry*[M]. 67th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1986.
- 8 Robinson D B, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(4): 444 ~ 475.
- 9 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.
- 10 Suykens J A K, Moor B E, Vandewalle J, et al. Least squares support vector machines classifiers [J]. *Neural Processing Letters*, 1999, 9(3): 293 ~ 300.
- 11 梁伟锋, 汪晓东, 梁萍儿. 基于最小二乘支持向量机的压力传感器温度补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(12): 2235 ~ 2238.
Liang Weifeng, Wang Xiaodong, Liang Pinger. Pressure sensor temperature compensation based on least squares support vector machine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(12): 2235 ~ 2238. (in Chinese)
- 12 何丽红, 刘金刚, 周云山. 基于支持向量机的 CVT 压力传感器误差补偿[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(6): 43 ~ 46.
He Lihong, Liu Jin'gang, Zhou Yunshan. Error compensation of CVT pressure sensor based on support vector machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 43 ~ 46. (in Chinese)