doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.028

SWR 土壤湿度传感器温漂特性与补偿研究

赵燕东1,2 陈 壮1,2 高志涛3 张 鑫4 于福满4

(1. 北京林业大学工学院,北京 100083; 2. 林业装备与自动化国家林业局重点实验室,北京 100083; 3. 防灾科技学院综合减灾研究所,三河 065201; 4. 天津创世生态景观建设股份有限公司,天津 300110)

摘要:针对基于驻波率(SWR)原理的土壤湿度传感器在长期工作中受温度影响的问题,提出基于二元回归分析法的温度补偿模型,利用最小二乘原理确定补偿模型的待定参数,对传感器进行温度补偿。从硬件电路和测量原理对SWR土壤湿度传感器的温漂特性进行研究。使用高低温交变湿热实验箱,在设定温度5~45℃范围内进行实验,测试结果表明,在温度补偿前该传感器测量土壤体积含水率的最大绝对误差范围为-2.65%~2.22%,其最大相对误差为29.76%,最大均方误差为2.2119%。将SWR土壤湿度传感器输出值与PT100型温度传感器输出值进行数据融合,基于最小二乘优化计算的二元回归分析法得到温度补偿模型,其拟合的决定系数为0.998。取不同温度下的实验数据进行补偿模型的验证,结果表明,SWR土壤湿度传感器进行温度补偿后,其测量结果的最大绝对误差范围为-0.26%~0.69%,最大相对误差不超过5.23%,均方误差较补偿之前减小一个数量级,且最大均方误差为0.157%。表明采用该温度补偿模型可以有效减小温度对SWR土壤湿度传感器的影响,提高其测量结果的精度和可靠性。

关键词: SWR 土壤湿度传感器; 土壤体积含水率; 最小二乘法; 温度补偿 中图分类号: S24; S152.7⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)08-0257-07

Temperature Drift Characteristics and Compensation of SWR Soil Moisture Sensor

ZHAO Yandong^{1,2} CHEN Zhuang^{1,2} GAO Zhitao³ ZHANG Xin⁴ YU Fuman⁴

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of State Forestry Administration for Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China

3. Comprehensive Disaster Mitigation Centre, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China 4. Tianjin Chuangshi Ecology and Landscape Construction Co., Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: In order to solve the problem that soil moisture sensor based on standing-wave ratio (SWR) principle is affected by temperature in long-term operation, a temperature compensation model based on binary regression analysis was presented. Based on the least square principle, the parameters of the compensation model were determined and the sensor was compensated. The temperature drift characteristics of SWR soil moisture sensor were analyzed from two aspects of hardware circuit and the measuring principle of soil water content. The experiment using high and low temperature alternating humid heat test box set temperature in the range of 5 °C to 45 °C, the test results showed that the absolute deviation of the sensor to measure soil moisture content volume was between -2.65% and 2.22%, the maximum relative error was 29.76%, and the maximum mean square error was 2.2119%. By fusing the SWR soil moisture sensor output value with the PT100 temperature sensor output value, the temperature compensation model was obtained by binary regression analysis based on the least squares optimization calculation, and the fitting determination coefficient was 0.998. The verification of the temperature compensation model depended on the sensor experimental data at different temperatures. The results showed that the absolute deviation distribution of the measurement results of SWR soil moisture sensor after temperature compensation was ranged from -0.26% to 0.69%, and the maximum relative error

收稿日期: 2018-12-28 修回日期: 2019-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018317)和天津市科委互联网跨界融合 重大专项(16ZXHLNC00060)

作者简介:赵燕东(1965—),女,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

did not exceed 5.23%. The mean square error was decreased by an order of magnitude and the maximum was 0.157%. The temperature compensation model established can effectively reduce the influence of temperature on SWR soil moisture sensor and improve the accuracy and reliability of its measurement results.

Key words: SWR soil moisture sensor; soil volumetric water content; least squares method; temperature compensation

0 引言

土壤含水率是土壤重要物理参数之一,植物生 长需要吸收充足的土壤水分。土壤体积含水率的实 时检测对于获取土壤信息具有重要的意义。不同体 积含水率的土壤中,其介电常数也有较大区别。电 磁传感器通过测量土壤的介电常数,从而推断出土 壤体积含水率。这些传感器使用的主要技术可分为 时域反射法(Time domain reflectometry, TDR)、驻波 率法 (Standing-wave ratio, SWR)、频域反射法 (Frequency domain reflectometry, FDR)和电容法 等^[1]。基于上述技术制成的传感器中,TDR 型传感 器对土壤性质和外界温度变化的敏感性较低,在实 际测量中最准确,但成本昂贵,不适于大范围推广。 相比之下,非 TDR 型传感器成本较低,但对土壤性 质和温度具有较高敏感性。近年来,国内外学者在 FDR 土壤湿度传感器的温度补偿方面已经进行了 大量研究^[2-4],但缺乏 SWR 土壤湿度传感器温度敏 感性的研究。SWR 土壤湿度传感器可快速、准确、 自动测量,动态响应快,适用于多种类型土壤的体积 含水率测量^[5]。并且由于其成本低、易用和低功耗 而广泛用于土壤湿度网络的长期监测过程。前人对 FDR 土壤湿度传感器的研究表明,土壤温度在 10~ 50℃范围内,当传感器信号源频率小于 40 MHz 时, 测得土壤的复介电常数随温度升高而增加:当信号 源频率大于152 MHz 时,测得土壤的复介电常数随 温度升高而减小^[6]。为了提高土壤湿度传感器的 精确度和可靠性,减小测量误差,针对 SWR 土壤湿 度传感器进行温度补偿研究显得尤为重要。

为了尽量消除温度的非线性影响,使补偿后的 结果符合误差要求,可采用硬件电路补偿和软件补 偿对 SWR 土壤湿度传感器的输出信号进行处 理^[7]。硬件电路补偿的电路较为复杂,补偿后的电 路中还会存在新加入电子元器件的温度漂移等影 响,补偿方法复杂且整体性差。软件补偿方法主要 有多传感器数据融合的二元回归分析法、最小二乘 支持向量机法、BP 神经网络等^[8-10]。本文采用二 元回归分析法,以各种土壤温度和土壤体积含水率 时的 SWR 土壤湿度传感器输出值与 PT100 型温度 传感器测量值为自变量,以土壤实际体积含水率为 因变量,进行曲线拟合,建立二元回归方程,使用最 小二乘法优化计算模型的待定参数,补偿温度对传 感器测量结果的误差,以提高 SWR 土壤湿度传感器 的测量准确性与可靠性。

1 数据获取方法

1.1 传感器测量原理

基于驻波率原理的土壤湿度传感器由 100 MHz 信号源、同轴传输线(特征阻抗 50 Ω 的同轴线缆)、 检波电路、差分放大电路和四针等长型探针组成,如 图 1 所示。



SWR 土壤湿度传感器的 100 MHz 信号源产生 高频电磁波,沿着同轴传输线传送到探头位置,由于 探头和传输线的阻抗不匹配,部分信号被反射回信 号源。在传输线上,高频入射波与反射信号波叠加 形成驻波,由此各点的电压幅值存在变化。根据驻 波率测量原理^[11],传输线*A*,*B*两点的电压差为

$$U_{AB} = 2A_p \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \tag{1}$$

式中 A_p----信号幅值, V

 Z_L ——探针阻抗, Ω

 Z_c ——传输线特征阻抗, Ω

信号幅值 A_p和传输线特征阻抗 Z_c都是恒定不 变且已知的,因此电压差 U_{AB}只与探针阻抗 Z_L相关。 传感器探针的材料和几何结构固定不变,其探针阻 抗 Z_L也只与土壤介电常数 ε 有关。在被测物为电 介质土壤时,SWR 土壤湿度传感器探针阻抗的变化 直接反映土壤介电常数随土壤含水率的变化。传输 线电压差 U_{AB}通过检波电路和差分放大电路后,得 到输出电压 U₀即可间接得到土壤体积含水率。

本实验采用三线制接法的铂电阻 PT100 型传

感器,利用金属铂的电阻随温度变化而变化的物理 特性制成的温度传感器。PT100型传感器在 0~ 100℃的非线性误差仅为 0.1%,本实验所需温度测 量范围在5~50℃,因此可以按线性处理^[12]。而三线 制接法能有效抵消导线电阻和自然效应的影响,进一 步减小随机误差对温度传感器测量精度的影响[13]。

1.2 实验方案

土壤材料取自北京市海淀区西北部苏家坨镇的 北京林业大学教学实验林场,该基地土质为黏壤土, 干燥箱(202型,北京市光明医疗仪器厂)温度设置 为105℃,将土壤材料放入其中,干燥24h。干燥后 的土壤过40目(孔径0.4 mm)筛后作为实验样本, 使用精密电子天平(精度为0.01g)称出干净铝盒的 质量 $m_{\rm s}(g)$.用分层装入法将土样装入有机玻璃桶 中,再称出干土与桶的总质量 $m_{i}(g)$,并算出土样体 积和土体干密度。用量程为1000 mL的烧杯量取 纯净水,二者混合均匀后配置成一定含水率的土壤 样本,静置48h,待土壤水分运移达到平衡^[14]。环 刀取样装入铝盒,用电子天平称出湿土与铝盒的 总质量 m_e(g)。使用烘干法得到干燥后土壤和铝 盒的总质量 $m_{d}(g)$,即可计算出土壤质量含水率 $\theta_m(g/g)$ 。根据体积含水率、质量含水率及土壤容重 的关系[15],计算出土壤体积含水率作为标准值。相 关计算式为

$$\theta_v = \frac{\theta_m \rho_m}{\rho_w} \tag{2}$$

其中

式中

 θ_{a} ——土壤体积含水率, cm³/cm³

 $\theta_m = \frac{m_c - m_d}{m_d - m_a} \times 100\%$



$$\rho_m$$
——土体干密度,g/cm³

 ρ_w ——水的密度,g/cm³

实验时,将土壤样本、SWR 土壤湿度传感器和 PT100 型温度传感器装入圆柱型有机玻璃桶中,待 土壤样本填满整个圆桶后盖好桶盖,利用塑料薄膜 进行密封处理,防止水分散失。采用北京林业大学 工学院自主研发的 ZRDL1001 型数据采集器自动存 储传感器数据,该采集器使用16位有效分辨率的 AD7792 进行电压采样且每分钟连续采集 10 次,取 均值减小随机误差。SWR土壤湿度传感器的输出 电压范围为0~2500mV,则该数据采集器的电压采 样精度为 0.038 mV。PROVA 100 型回路校准器(台 湾泰仪电子公司)具有1μA分辨率,0~24 V直流 电压输出,直流电压精度0.05%。调节校准器的输 出电压在0~2500 mV 范围内变化,使用该数据采 集器进行电压采样并且同时用万用表记录数据,采 样结果的绝对误差为1~5mV,相对误差为0.202%~ 0.456%,说明 ZRDL1001 型数据采集器采样精度高 日准确性好,满足实验要求。

将装有传感器的实验样本放入高低温交变湿热 实验箱(北京切克试验设备有限公司),设置初始温 度为5℃,初始空气湿度为30%,数据采集器不放入 实验箱中,避免加入新电子元器件的温漂干扰。待 土壤温度保持稳定不变后,调节实验箱温度升高 1℃,连续测量,直至土壤温度升高到45℃。配置不 同土壤体积含水率的样本重复进行以上实验,即可 得到 SWR 土壤湿度传感器在土壤样本含水率一定, 土壤温度变化时的测量数据。实验环境及示意图如 图2所示。



(3)



选取8个土壤样本湿度进行实验,从土壤干旱 状态逐渐加水到土壤饱和状态。8个土壤湿度样本 在控制温度变量环境下由数据采集器获取的土壤温 湿度采样电压如表1所示。U。为SWR 土壤湿度传 感器输出的电压, U, 为 PT100 型温度传感器输出的 电压。

土壤温度 5~45℃、土壤体积含水率 7.46%~

26.33%区间内,SWR 土壤湿度传感器输出的电压 随土壤温度升高而升高,且影响显著。当土壤体积 含水率分别为 28.34% 和 30.30% 时,利用平均绝对 误差(Mean absolute error, MAE)和均方误差(Mean square error, MSE)这两项评价指标进行 SWR 土壤 湿度传感器输出电压转换后得到的体积含水率的误 差分析,如图3所示。

v

	表 1	SWR 土壤湿	度传感器在小问	可温度下的	头验数据	
Tab. 1	Experimen	ntal data of SV	VR soil moistur	e sensor at	different	temperatures

土壤温度/	电压	土壤体积含水率/%							
°C		7.46	11.51	18.25	20.86	22. 52	26.33	28.34	30.30
5	U_0	0.138	0. 228	0.390	0.470	0. 532	0. 587	0.706	0. 769
	U_t	1.140	1.140	1.140	1.140	1.140	1.140	1.140	1.140
10	U_0	0. 148	0. 241	0.409	0. 485	0. 541	0. 628	0. 705	0. 768
10	U_t	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
15	U_0	0. 163	0.255	0.420	0. 495	0. 548	0.635	0. 703	0.763
15	U_t	1.184	1.184	1.184	1.184	1.184	1.184	1.184	1.184
20	U_0	0. 180	0.271	0.436	0. 505	0. 553	0. 641	0.700	0.758
20	U_t	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205
25	U_0	0. 193	0. 283	0.453	0.515	0. 558	0. 648	0.700	0. 755
25	U_t	1.227	1.227	1.227	1.227	1.227	1.227	1.227	1.227
20	U_0	0. 205	0. 298	0.465	0. 524	0. 563	0.653	0. 699	0.755
30	U_t	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248
25	U_0	0. 218	0.308	0.478	0. 533	0. 568	0.660	0.695	0.750
35	U_t	1.269	1.269	1.269	1.269	1.269	1.269	1.269	1.269
40	U_0	0. 230	0.321	0. 493	0. 539	0. 573	0.665	0. 694	0.750
40	U_t	1. 291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291
45	U_0	0. 242	0.330	0. 503	0. 548	0. 578	0.675	0. 693	0. 738
45	U_t	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313	1.313



Fig. 3 Error analysis of test value

土壤体积含水率在 28.34% ~ 30.30% 范围内, SWR 土壤湿度传感器测量结果的平均绝对误差小 于 0.3622% 且均方误差小于 0.1629%,表明该传感 器此时能够稳定准确地工作。由于实验所选取黏壤 土样本的土壤体积含水率为 30.30% 时已经达到饱 和状态,因此本文对此种土壤更高的土壤体积含水 率不作研究。人工配置土壤样本的土壤体积含水率 很难控制在 0.5% 范围内变化,因此本文对土壤体 积含水率在 26.33% ~ 28.34% 范围内暂不予考虑。 本文着重在温度 5 ~ 45℃、土壤体积含水率 7.46% ~ 26.33% 范围内对 SWR 土壤湿度传感器的输出值进 行温度补偿研究。

2 结果与分析

2.1 含水率测量与温度相关性分析

2.1.1 硬件电路温度漂移分析

SWR 土壤湿度传感器的检波电路和差分放大电路中均使用三极管放大器搭建信号调理电路。在三极管放大电路中,双极结型三极管(BJT)的静态工作点 Q 是交流输入信号为零时,BJT 各电极直流

电流及各电极间直流电压的数值在 BJT 特性曲线上 一个确定的点^[16]。放大电路 Q 点的稳定性会受电 源电压波动、元件老化及环境温度变化的影响,从而 引起放大电路出现非线性失真,导致其不能正常工 作。温度上升时,BJT 的反向电流及电流放大系数 都会增大,而发射结正向压降会减小,引起放大电路 中的集电极静态电流随温度升高而增加,从而使 Q 点随温度变化^[17]。由于静态工作点易受温度影响, 因此进行 SWR 土壤湿度传感器硬件电路温度漂移 对输出的影响分析显得尤为必要。

为了仅研究温度对传感器硬件电路的影响,应 尽可能保证其他因素不变以减小对实验结果的干 扰。模拟传感器在土壤中的工作环境,使其保持连 续工作状态,进行干土实验。取3kg 黏壤土,在干 燥箱105℃环境下,干燥24h后制得干土样本。待 干土样本温度自然冷却至室温(25℃)后装入有机 玻璃桶中,为保证SWR土壤湿度传感器与土壤充分 接触,利用半径52mm、高540mm的圆柱形尼龙棒每间 隔10cm 压实一次,再将SWR土壤湿度传感器埋入。 用塑料薄膜密封好实验容器后放入高低温交变湿热实 验箱中,箱内温度稳定到5℃后开始记录数据,直到温 度变为50℃。得到的部分实验数据如图4所示。

由图4可知,在5~45℃时,硬件电路的温漂最 大变化量为0.002 V。土壤温度从5℃逐渐升高到 50℃时,SWR土壤湿度传感器的输出电压由于温度 影响导致的最大误差为0.004 V,可以用来表征该



Fig. 4 Temperature drift characteristics of hardware circuits

传感器硬件电路的零位温度漂移。

2.1.2 温度影响机理

文献[18]利用时域反射法对砂壤土、黏壤土和 重黏土等多种土壤类型进行实验,提出土壤体积含 水率 θ。与土壤介电常数 ε 存在三次多项式拟合关 系,得到经验公式为

$$\theta_{v} = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^{2} + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^{3}$$
(4)

湿土的复合介电常数与土壤介电特性有关,如 土壤颗粒、空气和水的体积分数,土壤孔隙度等,其 关系模型^[19]为

$$\varepsilon = \sqrt{V_w \sqrt{\varepsilon_w(T)} + (\mu - V_w) \sqrt{\varepsilon_a} + (1 - \mu) \sqrt{\varepsilon_m}}$$
(5)

式十

$$v_w$$
 水分体(水数)
 $\varepsilon_w(T)$ 小分介电常数
 μ 土壤孔隙度
 ε_a 一空气介电常数
 ε_m 土壤颗粒介电常数
 T 土壤温度, C
泪度 サル 公会电常数的影响

式由 V____水分休和 系数

温度对水分介电常数的影响,具有严格的数学 关系。在 50 Pa 的大气压力下,水分介电常数受温 度影响的函数关系^[20]为

$$\varepsilon_w(T) = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(T - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(T - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(T - 25)^3]$$
(6)

关系式(6)的平均偏差为±0.03%,当温度从 5℃升高到45℃时,水分介电常数从86.13 减小到 71.70。由于水分介电常数随温度升高而减小,联立 式(5)、(6)可推出土壤介电常数随温度升高而减 小。土壤温度的升高,会使土壤中的部分结合水变 为自由水,并且也会对土壤中水溶液电导率产生影 响,土壤电导率受土壤温度影响的关系模型^[21]为

σ_w——25℃时的土壤电导率,mS/cm SWR 土壤湿度传感器在盐渍土壤、黏壤土和有 机土壤等电介质土壤的测量中,反射信号波会出现显著衰减效应。土壤电导率越大,其导电性越好,当存在外加电场作用时,由于传导电流的存在,会产生能量损耗,即引起复介电常数虚部的改变^[22]。土壤电导率对土壤介电常数影响部分 *ε*_c(*T*)的初步校正模型^[23]为

 $\varepsilon_{c}(T) = -0.418\sigma^{4}(T) + 4.5804\sigma^{3}(T) -$

 $18.335\sigma^{2}(T) + 23.393\sigma(T) - 0.0516 \quad (8)$

对式(7)、(8)进行分析可得,土壤温度会通过 影响土壤电导率进而引起土壤介电常数的变化。同 时考虑温度和电导率的影响,联立式(5)~(8)可 得,土壤介电常数和土壤温度的关系模型为

 $\varepsilon(T) = \varepsilon + \varepsilon_{a}(T)$

 $\varepsilon(T) =$

即

$$\sqrt{V_w \sqrt{\varepsilon_w(T)} + (\mu - V_w) \sqrt{\varepsilon_a} + (1 - \mu) \sqrt{\varepsilon_m}} - 0.418\sigma^4(T) + 4.5804\sigma^3(T) - 18.335\sigma^2(T) + 0.418\sigma^4(T) + 0.5804\sigma^3(T) - 0.418\sigma^4(T) + 0.5804\sigma^3(T) - 0.5805\sigma^2(T) + 0.5805\sigma^2(T)$$

$$23.\,393\sigma(T) - 0.\,051\,6\tag{9}$$

式(9)中的 *ε*(*T*) 是经过数学推导而得的关系 模型,在温度和电导率数据量充足的情况下,可以用 于说明 SWR 土壤湿度传感器测量值随温度变化的 情况。从 SWR 土壤湿度传感器的测量原理角度考 虑,SWR 土壤湿度传感器的测量受到温度的影响, 是因为土壤介电常数 *ε* 会随土壤温度 *T* 变化而变化。

2.2 温度补偿方法

2.2.1 补偿模型建立

在林间土壤水分的长期监测过程中,由于光照 因素和季节更替导致土壤温度产生的变化,会使 SWR 土壤湿度传感器的测量结果出现误差。为消 除温度对 SWR 土壤湿度传感器测量的影响,本文提 出基于最小二乘的曲线拟合方法建立温度补偿模 型。最小二乘法通过最小化误差的平方和来确定一 组数据的最佳预设函数匹配^[24]。最小二乘法不仅 能快速求得未知的数据,还能使这些数据与实际数 据之间误差的平方和最小。SWR 土壤湿度传感器 建立温度补偿模型的样本数据来自表1中土壤体积 含水率为 7.46%、11.51%、18.25%、20.57%、 22.52%和26.33%,温度为5~45℃,样本数量 s 为 54 个。将 U_0 与 U_i 进行数据融合处理后得到的土壤 体积含水率参量 V_{swc} 可表示为

$$V_{\text{SWC}} = f(U_0, U_t) \tag{10}$$

预设二元回归方程计算第 i 个土壤样本时其体积含 水率参量,即为

$$V_{\rm SWC} = p_0 + p_1 U_0 + p_2 U_t + p_3 U_0^2 + p_4 U_0 U_t + p_5 U_t^2 + \varepsilon_0$$
(11)

式中
$$p_0 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$$
——常系数

ε.——高阶无穷小

采用最小二乘逼近求拟合曲线,确定常系数,应 使其误差平方和 ||δ||2 最小,表示为

$$\|\delta\|_{2}^{2} = \sum_{i=0}^{s} \delta_{i}^{2} = \sum_{i=0}^{s} \omega(x_{i}) (V_{SWC}(x_{i}) - \theta_{i})^{2}$$
(12)

 $\omega(x_i)$ 是权函数,表示不同点 $(x_i, V_{SWC}(x_i))$ 处 的数据比重不同。由于本文所设计的实验中不同时 刻温度不同,观测数据具有唯一性,可令 $\omega(x_i) = 1_{\circ}$ 洗取均方误差作为二元回归方程计算值与土壤体积 含水率标准值拟合效果的评价指标,则二者的均方 差应取最小,均方差可表示为

$$I = \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s} (V_{SWC} (U_{0i} - U_{ii}) - \theta_i)^2 = \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s} \sum_{j=0}^{5} (p_j \phi_{ij} - \theta_i)^2$$
(13)

其中

 $\phi_{i0} = 1$ $\phi_{i1} = U_{0i}$ $\phi_{i2} = U_{ii}$ $\phi_{i3} = U_{0i}^2$ $\phi_{i4} = U_{0i}U_{ii}$ $\phi_{i5} = U_{ii}^2$

要使式(13)取得最小,可将其转换为求多元函数的 极小点问题。由求多元函数极值的必要条件,有

$$\frac{\partial I}{\partial p_j} = 2 \sum_{i=1}^{54} \sum_{j=0}^{5} \left(p_j \phi_{ij} - \theta_i \right) \phi_{ij} = 0 \qquad (14)$$

由乘法分配律,将式(14)右边变形为

$$\sum_{i=1}^{54} \sum_{j=0}^{5} p_j \phi_{ij} \phi_{ij} - \sum_{i=1}^{54} \theta_i \phi_{ij} = 0$$
(15)

在 Matlab 环境下进行编程,导入样本数据,即 可求得二元回归方程的全部系数,随即确定拟合曲 线。运行程序后,结果为

 $V_{\text{SWC}} = -0.047 \ 3U_0^2 + 0.426 \ 6U_t^2 + 0.730 \ 6U_0U_t +$

$$0.\ 173\ 2U_0 - 1.\ 873\ 7U_t + 1.\ 639\ 9 \tag{16}$$

拟合曲线的决定系数 R^2 为 0.998, 一致性良 好。误差方差的估计为 5.822×10⁻⁵,显著性水平 α 为0.05,说明曲线拟合得到的二元回归方程可靠性强。

2.2.2 补偿模型验证

在土壤温度 5~45℃、土壤体积含水率 7.46%~ 26.33%区间内进行实验,分析表1数据可知,SWR 土壤湿度传感器的测量结果随温度升高而变大,利 用二元回归分析法建立温度补偿模型。将温度补偿 前后 SWR 土壤湿度传感器输出的电压转换为对应 的土壤体积含水率测量值,与土壤体积含水率标准 值对比进行误差分析,如表2所示。

表 2 温度补偿效果评价

	Tab. 2	e compensation	tion %						
-14	2 注	土壤体积含水率/%							
打巨 你小		7.46	11.51	18.25	20.86	22. 52	26.33		
	最大绝对误差	2. 22	-2.39	- 2. 65	- 2.06	-1.24	-1.21		
温度补偿前	相对误差	29.76	20.76	14.52	9.88	5.51	4.60		
	均方误差	1.9161	1.8733	2.2119	1.0930	0. 381 3	0. 443 0		
	最大绝对误差	0.39	-0.26	0.67	0.14	0.69	0.20		
温度补偿后	相对误差	5.23	2.26	3.67	0.67	3.06	0.76		
	均方误差	0.0225	0.0274	0. 154 4	0.0028	0. 157 0	0.0164		

SWR 土壤湿度传感器在进行温度补偿之前,测 量结果的最大绝对误差分布在 - 2.65% ~ 2.22% 之 间,其最大相对误差为 29.76%。经基于最小二乘 的曲线拟合模型补偿后,测量结果的最大绝对误差 分布在-0.26%~0.69%之间,最大相对误差缩小 为5.23%,均方误差较补偿之前减小一个数量级, 表明利用二元回归分析法对 SWR 土壤湿度传感器 进行温度补偿可以极大地减小测量误差,提高测量准 确性。

3 结论

(1)从硬件电路和测量原理两个方面分析 SWR 土壤湿度传感器的温度影响机理。通过干土 实验可得,在土壤温度5~45℃范围内,SWR 土壤 湿度传感器硬件电路的温漂电压最大变化量为 0.002 V;分析得出,温度变化直接影响土壤介电 常数,也会引起土壤电导率变化,从而间接影响土 壤介电常数。

(2) 配置土壤样本进行实验,利用烘干法得到 的含水率作为标准值。在土壤体积含水率为 7.46%~26.33%时,温度补偿前SWR土壤湿度传 感器测量最大绝对误差为 - 2.65% ~ 2.22% 。利用 基于最小二乘的二元回归分析法建立模型,其拟合 决定系数为0.998,补偿后测量结果的最大相对误 差不超过5.23%,均方误差较补偿之前减小一个数 量级。

(3)建立的温度补偿模型可以有效地降低 SWR 土壤湿度传感器因受温度影响而导致的误差,使用 此模型补偿后传感器测量最大绝对误差为-0.26%~ 0.69%,提高了测量的精确度与可靠性。

参考文献

- MITTELBACH H, LEHNER I, SENEVIRATNE S. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland [J]. Journal of Hydrology, 2012, 430 - 431:39 - 49.
- [2] 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): 367 378.
- [3] 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)
- [4] 曹美, 徐晓辉, 苏彦莽, 等. 温度对 FDR 土壤湿度传感器的影响研究[J]. 节水灌溉, 2015(1): 17-19, 23.
 CAO Mei, XU Xiaohui, SU Yanmang, et al. Research on temperature effect on FDR soil moisture sensor[J]. Water Saving Irrigation, 2015(1): 17-19, 23. (in Chinese)
- [5] 赵燕东,白陈祥,匡秋明,等. 土壤水分传感器实用性能对比研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(3):158-160.
 ZHAO Yandong, BAI Chenxiang, KUANG Qiuming, et al. Performance of three types of soil moisture sensors: SWR, TDR and FD[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006,28(3): 158-160. (in Chinese)
- [6] XU J, LOGSDON S D, MA X, et al. Measurement of soil water content with dielectric dispersion frequency [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5):1500 - 1506.
- WANG X D, YE M Y. Hysteresis and nonlinearity compensation of relative humidity sensor using support vector machines [J]. Sensors & Actuators: B. Chemical, 2008, 129(1): 274 - 284.
- [8] 高大惟,刘建玲. 湿度传感器的 SVM 温度补偿研究及软件设计[J]. 仪表技术与传感器,2014(12):7-9,12.
 GAO Dawei, LIU Jianling. Software design and study of humidity sensor SVM temperature compensation [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(12):7-9, 12. (in Chinese)
- [9] 彭基伟, 吕文华, 行鸿彦, 等. 基于改进 GA BP 神经网络的湿度传感器的温度补偿[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 153-160.

PENG Jiwei, LÜ Wenhua, XING Hongyan, et al. Temperature compensation for humidity sensor based on improved GA – BP neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 153 – 160. (in Chinese)

- [10] 陈瑶,薛月菊,陈联诚,等. pH 传感器温度补偿模型研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1034 1038.
 CHEN Yao, XUE Yueju, CHEN Liancheng, et al. Research on pH sensor temperature compensation model[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(8): 1034 1038. (in Chinese)
- [11] 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,2002,33(4):109-111,121.
 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, 2002, 33(4): 109-111, 121. (in Chinese)
- [12] 郝桂青,李健飞. 铂电阻温度传感器实现线性测温方案的研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(11): 84-86.
 HAO Guiqing, LI Jianfei. Study on implementing linear temperature measurement with platinum resistance temperature sensor
 [J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(11): 84-86. (in Chinese)
- [13] 刘少强,张靖,庄哲民. 三线制铂电阻高精度测温方法[J]. 自动化仪表, 2002, 23(11): 22-26.
 LIU Shaoqiang, ZHANG Jing, ZHUANG Zhemin. The high precise temperature measurement with 3-wire platinum resistor
 [J]. Process Automation Instrumentation, 2002, 23(11): 22-26. (in Chinese)
- [14] 赵燕东,李宁,皮婷婷. 土壤多参数复合测试系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 289-298.
 ZHAO Yandong, LI Ning, PI Tingting. Multi-parameter compounded testing system for soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 289-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150840&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.040. (in Chinese)
- [15] 张瑞国,罗强,蒋良潍,等. 土体含水率 TDR 测试技术的影响因素分析[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 16-19, 24. ZHANG Ruiguo, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Analysis on influencing factors of testing technology of TDR on water content of soil[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(5): 16-19, 24. (in Chinese)
- [16] 代素梅,刘照红,钟宁. 单管放大电路静态工作点仿真分析[J]. 测控技术, 2014, 33(12): 143-146.
 DAI Sumei, LIU Zhaohong, ZHONG Ning. Simulation analysis on quiescent point of single-tube amplification circuit[J].
 Measurement & Control Technology, 2014, 33(12): 143-146. (in Chinese)
- [17] 康华光,陈大钦,张林. 模拟电子技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006:133-134.
- [18] 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.
- [19] PEPIN S, LIVINGSTON N J, HOOK W R. Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water[J]. Soil Science Society of America, 1995, 59(1):38-43.
- [20] WEAST R C, ASTLE M J, BEYER W H. CRC handbook of physics and chemistry [M]. 67th ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1986:49-54.
- [21] WRAITH J M, OR D. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: experimental evidence and hypothesis development[J]. Water Resources Research, 1999, 35(2):361-369.
- [22] 曹巧红, 龚元石. 土壤电导率对时域反射仪测定土壤水分的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 483-490.

CAO Qiaohong, GONG Yuanshi. Effect of soil conductivity on soil moisture measurement by time domain reflectometry[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 483 – 490. (in Chinese)

- [23] BOGENA H R, HUISMAN J A, OBERDORATER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. Journal of Hydrology, 2007,344(1): 32-42.
- [24] 田垅, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合[J]. 计算机科学, 2012, 39(增刊1): 482-484.
 - TIAN Long, LIU Zongtian. Least squares method piecewise linear fitting[J]. Computer Science, 2012,39(Supp. 1): 482 484. (in Chinese)