

WSN 土壤湿度采集节点电压补偿方法研究*

张荣标 余功江 张磊 刘骏 张业成

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 针对适用于 WSN 土壤湿度采集节点的 EC-5 传感器对电源电压敏感的问题,从传感器工作原理入手分析电源电压引起检测误差的来源,且发现当传感器各项参数确定后,这种误差随着被测土壤湿度增大而增大。采用 CC2430 芯片作为 WSN 信息传输节点,建立具有多节点的上下位机 WSN 土壤湿度采集系统,以节点电压 u 和被测土壤实际湿度 θ 为对象,运用神经网络对采集节点中非线性土壤湿度传感器系统进行逆向建模,在上位机上实现由电源电压引起 EC-5 传感器检测误差的补偿,实验结果表明,该方法能有效地减少节点电池电压变化对 WSN 土壤湿度采集精度的影响。

关键词: 无线传感器网络 土壤湿度 神经网络 补偿

中图分类号: TP212.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0178-05

Voltage Compensation Method of WSN Soil Moisture Acquisition Nodes

Zhang Rongbiao Yu Gongjiang Zhang Lei Liu Jun Zhang Yecheng

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

Abstract

Aimed at the voltage-sensitive problem of EC-5 sensor which was suitable for WSN soil moisture acquisition nodes, the sources of detection error was analyzed according to the sensor working principle. It was found that the error would increase with the soil moisture when sensor parameters were determined. Using CC2430 platform as WSN information transmission node, WSN soil moisture acquisition system with multiple nodes based on controller and host computer was established. Taking node voltage u and the real soil moisture θ as parameters, the inverse modeling of nonlinear soil moisture sensor system was performed by neural network, and the compensation of EC-5 sensor detection error caused by supply voltage was implemented in host computer. Experimental results showed that this method could sharply reduce the influence caused by node voltage variation and improve the detection precision.

Key words Wireless sensor network, Soil moisture, Neural network, Compensation

引言

利用无线传感器网络(WSN)进行土壤湿度在线检测已经受到国内外越来越多专家学者的关注^[1-4]。美国 Decagon 公司成功研制了具有低电压低功耗特点的 EC-5 土壤湿度传感器,使 WSN 土壤湿度采集节点采用电池供电成为现实。但影响该传感器测试精度的因素较多,如土壤温度、电导率以及传感器本身的工作电压等^[5-6]。WSN 在工作过

程中,节点电池电压随能量消耗而不断下降。虽然 WSN 节点工作电压范围较宽,可从两节新电池的 3.2 V 到节点最低工作电压 2.1 V,然而,工作电压的下降将导致 EC-5 土壤湿度传感器检测的结果相对误差很大,这对 EC-5 土壤湿度传感器在 WSN 节点中的具体应用带来很大的麻烦。如果采用硬件稳压措施,虽然节点成本增加有限,但稳压电路的额外能耗会影响节点电池使用寿命。本文以 TI 公司推出的 CC2430 芯片为 WSN 信息传输节点,采用上

下位机的模式建立具有多节点 WSN 土壤湿度采集系统。通过对 EC-5 土壤湿度传感器原理分析,在上位机运用神经网络技术对土壤湿度采集节点中的传感器非线性系统进行逆向建模,使 EC-5 传感器实现由电源电压引起检测误差的补偿。

1 土壤湿度 WSN 采集节点

图 1 是土壤湿度 WSN 采集节点的结构示意图,节点是由 EC-5 土壤湿度传感器、处理单元与无线收发单元集成在一起的主芯片 CC2430 和电源单元(2 节 5 号电池)3 部分组成。EC-5 传感器内部主要由电子振荡器、RC 电路和时间电压转换部件组成,它的工作电压范围是 2 ~ 5 V,是一种适用于 WSN 低电压、低功耗土壤湿度传感器。CC2430 内部主要由增强工业标准的 8051MCU、内置 Zigbee 协议栈的无线收发单元、A/D 转换电路和电压检测部件组成,是一种较为理想的 WSN 信息传输节点^[7]。EC-5 传感器把土壤湿度转换成电压信号 U 经 CC2430 的 A/D 转换电路送至处理器,同时 CC2430 的电压检测部件采集电源单元的电压 u ,通过内部的无线收发单元将这 2 路信息一起发送给上位机。

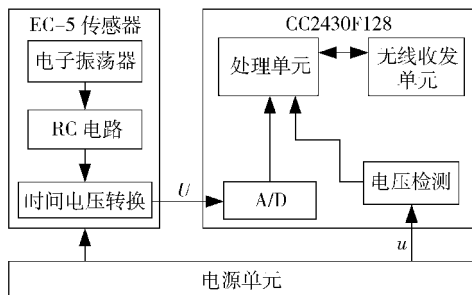


图 1 土壤湿度采集节点结构

Fig. 1 Structure of soil moisture acquisition nodes

2 EC-5 传感器工作原理及误差来源

2.1 EC-5 土壤湿度传感器工作原理

EC-5 土壤湿度传感器是一种高集成度的电容式变换器,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 随湿度的变化表现为电容量的变化。当测试电极几何因数 g 、电阻 R 、供电电压 V_f (充电电压) 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,传感器输出电压的变化可反映土壤介电常数 ε 的变化。在传感器内部有一个电子振荡器,产生周期 T 的方波信号对 RC 电路进行充放电,其充放电过程如图 2 所示,根据 RC 电路充放电公式,电容充电时间可表示为

$$t = Rg\varepsilon \ln \left(\frac{V_f - V_i}{V_f - V} \right) \quad (1)$$

式中 V_i ——电容初始电压

V ——电容充电后的电压

在充电电压 V_f 和初始电压 V_i 相同的条件下,设两种不同湿度土壤的介电常数分别为 ε_0 、 ε_1 ,等效电容充电至 V 所用时间分别为 t_0 、 t_1 ,则充电时间变化量为

$$\Delta t = t_1 - t_0 = k\varepsilon \quad (2)$$

其中 $k = Rg \ln \left(\frac{V_f - V_i}{V_f - V} \right)$

式中 ε ——相对 t_0 时刻土壤介电常数随土壤湿度 θ 的变化值

土壤湿度 θ 与 ε 之间的关系可由 Topp 经验公式^[8]表示为

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

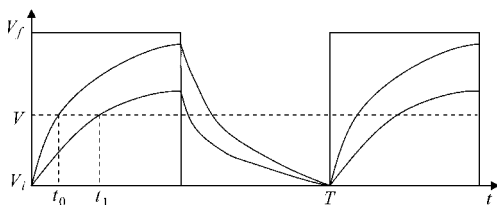


图 2 传感器电路充放电过程

Fig. 2 Charge and discharge process of sensor circuit

2.2 EC-5 测量误差来源

影响 EC-5 传感器测试精度的因素较多,如土壤温度、电导率以及传感器本身的工作电压等,其中供电电压对测量结果的影响相当明显,其主要原因是和 EC-5 传感器的充放电测量原理有关。设电容充到的电压为 αV_f ($0 < \alpha < 1$) 时,由式(1)可得

$$t = Rg\varepsilon \ln \left(\frac{V_f - V_i}{(1 - \alpha)V_f} \right) \quad (4)$$

式(4)两边对 V_f 求导得

$$\frac{dt}{dV_f} = Rg\varepsilon \frac{V_i}{V_f(V_f - V_i)} \quad (5)$$

由 EC-5 传感器的工作原理式可得到两点结论:

(1) 对某一被测土壤来说,其土壤介电常数 ε 为一定值,式(5)中 $Rg\varepsilon$ 为常数,且 $V_f > V_i > 0$,显然有 $\frac{dt}{dV_f} > 0$,即等效电容充电时间 t 是电容充电电压 V_f 的单调增函数,表明对某一被测土壤来说,EC-5 传感器的输出会随供电电压的增加而增加。

(2) 当充电电压和初始电压不变时,由式(5)可知,当土壤介电常数 ε 增大(土壤湿度增大)时,由供电电压 V_f 引起 EC-5 传感器的输出误差更大。

3 基于神经网络的电压补偿

3.1 补偿原理

在无线传感器网络土壤湿度采集节点中,设节

点电池供电电压为 u , 被测土壤实际湿度为 θ , 则传感器节点采集到的土壤湿度可以理想地表示为^[9-11]

$$y = f(\theta, u) \quad (6)$$

式中 $f(\cdot)$ ——某一未知非线性函数

为消除 u 造成的非线性误差, 采用一个补偿模块, 将节点采集的土壤湿度 y 和节点电池电压 u 作为补偿模块的输入, 补偿模块是 EC-5 传感器输出特性的反函数, 即

$$z = f^{-1}(y, u) \quad (7)$$

式中 $f^{-1}(\cdot)$ ——某一待求非线性函数

则补偿模块输出与输入之间函数关系可以表示为

$$z = f^{-1}(y, u) = f^{-1}[f(\theta, u), u] = \theta$$

显然补偿后的输出值 z 与 u 无关。

3.2 BP 神经网络补偿实现

3.2.1 建立传感器非线性补偿模型

$f^{-1}(y, u)$ 是一个十分复杂的非线性函数, 很难用准确的数学公式求出, 而神经网络具有很强的逼近任意连续非线性函数的能力, 环境适应能力、学习能力、容错能力和并行处理能力强, 可以用一个 3 层的 BP 神经网络 (back-propagation neural network) 构造该反函数发生器, 通过少量样本的学习, 让神经网络逼近 $f^{-1}(y, u)$, 3 层 BP 神经网络的拓扑结构图如图 3 所示^[12]。网络输入层是由节点采集的土壤湿度 y 和节点电池电压 u 所组成的输入向量 P , 隐含层的输出为 a , 补偿模块的输出为 z , 即土壤实际湿度 θ 。

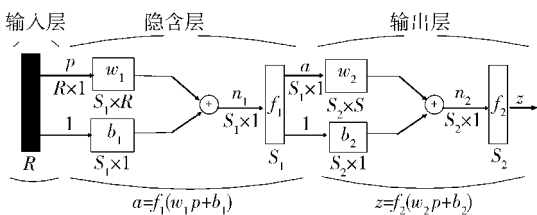


图3 BP神经网络的拓扑结构图

Fig. 3 Topology configuration of BP neural network

取 n 组具有代表性的样本 $S(\theta_i, u_i, y_i)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 土壤实际湿度 θ 采用烘干法 (获取土壤湿度信息的国际标准方法, 其值为重量含水率转换为体积含水率) 获取, 节点电池电压 u 和节点采集的土壤湿度 y 由 CC2430 芯片直接测量获得。以 θ 为训练目标, n 组土壤湿度信息和节点电池电压信息为训练样本数据。神经网络采用 $2 - m - 1$ 层网络结构 (输入层节点数为 2, 输出层节点数为 1, 隐含层节点数为 m), 神经网络隐含层中激活函数为双曲正切 S 型传递函数, 输出层激活函数为线性传递函数, 网络训练性能函数为均方误差函数 MSE, 训

练样本误差小于 0.000 001。

3.2.2 WSN 数据采集与土壤湿度补偿

图 4 是 WSN 数据采集与土壤湿度补偿的结构图, 下位各个 WSN 节点采集土壤湿度 y_n 和节点电池电压 u_n , n 为节点编号, $n = 1, 2, 3, \dots$, 通过节点内无线收发芯片发送到上位数据采集接口实现数据采集。由于无线传感器网络节点硬件资源有限, 计算能力不强, 神经网络补偿算法由上位计算机实现, 即采集到的数据经过预处理, 输入传感器非线性补偿模块, 实现由电源电压引起 EC-5 传感器检测误差的补偿。

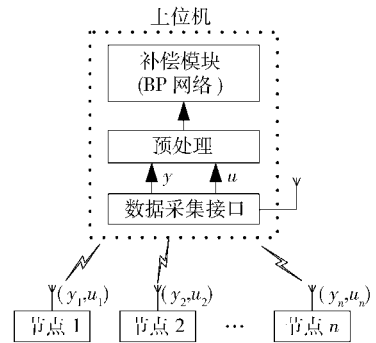


图4 土壤湿度采集与补偿实现

Fig. 4 Implementation of soil moisture acquisition and compensation

4 实验与结果分析

4.1 样本获取与补偿模型建立

取样本数 n 为 200, $0 < \theta < 50\%$ (体积含水率), θ 取自 20 种湿度不同的土壤样本, 对每一种土壤样本, 分别用 10 种不同的节点工作电压 u 供电 ($2.1 \text{ V} < u < 3.2 \text{ V}$), 用 200 组样本数据对上面所建立的 EC-5 土壤湿度传感器神经网络补偿模型进行训练, 建立传感器非线性补偿模型。经过训练, 隐含层节点数 m 取 32。

4.2 补偿结果与分析

用土壤湿度 (体积含水率) 分别为 9.11%、19.28%、28.86%、37.55% 4 种土壤样本对 EC-5 传感器非线性电压补偿模型进行实验, 当节点工作电压从 2.1 V 变到 3.2 V 时, 结果如图 5 所示, 虚线为用烘干法测量所得到的土壤湿度真实值, 实线为经过补偿后湿度值, 点划线为未补偿湿度值。

由图 5 可以看出, 对同一种土壤样本, 节点采集到的土壤湿度值随着节点电池电压的下降而下降, 实验结果与 EC-5 测量误差来源的理论分析是一致的。以湿度 (体积含水率) 为 9.11% 的土壤样本为例, 节点电压从 3.15 V 变化至 2.15 V 时, 节点采集的湿度从 17.31% 变化至 1.65%, 最大相对误差

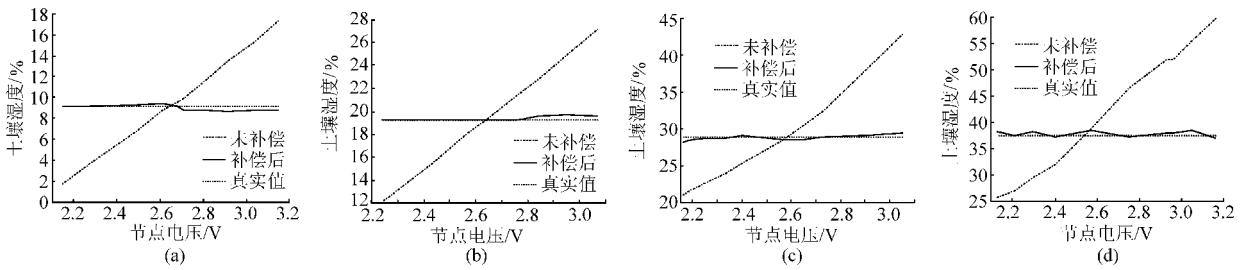


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

(a) $\theta = 9.11\%$ (b) $\theta = 19.28\%$ (c) $\theta = 28.86\%$ (d) $\theta = 37.55\%$

为 15.66%, 均方误差为 2.17%。经补偿后, 最大相对误差为 0.45%, 均方误差为 0.29%, 取得了很好的补偿效果。4 种土壤样本电压补偿前后的湿度测试误差对比见表 1, 可以看出未补偿的节点采集土壤湿度误差是随着被检测土壤湿度含量增加而增加, 实验结果与 EC-5 测量误差来源的理论分析也是一致的。显然, 上述补偿方法能够在很大程度上消除节点采集的土壤湿度信息受节点供电电压的影响。

表 1 土壤湿度测试误差对比

Tab. 1 Comparison of soil moisture test error %

| 土壤湿度(体积 含水率)真实值 | 均方误差(MSE) | |
|--------------------|-----------|------|
| | 未补偿 | 补偿后 |
| 9.11 | 2.17 | 0.29 |
| 19.28 | 4.63 | 0.19 |
| 28.86 | 6.86 | 0.36 |
| 37.55 | 12.88 | 0.55 |

5 结论

(1) 从 EC-5 传感器对电源电压敏感的问题出发, 分析了电源电压引起传感器土壤湿度检测误差的来源, 并得到误差是随被测土壤湿度增大而增大的规律, 而且通过对不同土壤湿度的样本实验, 证实了这一结论。

(2) 提出了实现 EC-5 传感器由电源电压引起检测误差的补偿方法, 经实验分析表明, 从未补偿 WSN 节点采集湿度值均方误差为 13% 左右下降到补偿后的均方误差为 0.55% 以下, 有效地减少了节点电压变化对 WSN 土壤湿度采集精度的影响。

(3) 针对 WSN 节点硬件资源有限, 计算能力差的特点, 采用在上位机对节点采集的土壤湿度信息进行电压补偿的设计思路, 解决了 EC-5 传感器检测误差补偿方法的实现问题。

参 考 文 献

- 1 乔晓军, 张馨, 王成, 等. 无线传感器网络在农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 232 ~ 234.
Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.): 232 ~ 234. (in Chinese)
- 2 Kim K, Evans R G, Iversen W M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(7): 1 379 ~ 1 387.
- 3 Vellidis G, Tucker M, Perry C, et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(1): 44 ~ 50.
- 4 Kim Y, Evans R G. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(2): 159 ~ 165.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 瞿雷, 刘盛德, 胡咸斌. ZigBee 技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 374 ~ 475.
- 8 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.
- 9 田社平, 赵阳, 韦红雨, 等. 基于 BP 神经网络的传感器非线性补偿[J]. 测试技术学报, 2007, 21(1): 84 ~ 89.
Tian Sheping, Zhao Yang, Wei Hongyu, et al. Nonlinear compensation of sensors based on BP neural network[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(1): 84 ~ 89. (in Chinese)
- 10 张耀锋, 孙以材, 邢晓辉. 基于人工神经网络的压力传感器的温度补偿[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 358 ~ 361.

- Zhang Yaofeng, Sun Yicai, Xing Xiaohui. The temperature compensation for pressure sensor based on artificial neural network[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2):358~361. (in Chinese)
- 11 严洁,赵研,张俊利. 基于BP神经网络的称重传感器静态非线性误差补偿研究[J]. 传感技术学报,2008,21(6):1 025~1 028.
Yan Jie, Zhao Yan, Zhang Junli. Study on static nolinear error compensating for weighing sensor based on BP neural network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6):1 025~1 028. (in Chinese)
- 12 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与Matlab 7实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- 13 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)

(上接第177页)

- 7 邓玲黎,李百军,毛罕平. 长江中下游地区温室内温湿度预测模型的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):263~266.
Deng Lingli, Li Baijun, Mao Hanping. Forecasting model of inter temperature and humidity for intelligent greenhouses in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(1):263~266. (in Chinese)
- 8 佟国红,李保明,David M Christopher,等. 用CFD方法模拟日光温室温度环境初探[J]. 农业工程学报,2007,23(7):178~185.
Tong Guohong, Li Baoming, David M Christopher, et al. Preliminary study on temperature pattern in China solar greenhouse using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7):178~185. (in Chinese)
- 9 陈教科,胥芳,张立彬,等. 基于CFD技术的玻璃温室加热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(8):114~118.
Chen Jiaoliao, Xu Fang, Zhang Libin, et al. CFD-based simulation of the temperature distribution in glass greenhouse with forced-air heater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(8):114~118. (in Chinese)
- 10 Peter J Brockwell, Richard A Davis. Time series: theory and methods[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- 11 潘迪特 S M,吴宪民. 时间序列及系统分析与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- 12 Box G E P. 时间序列分析:预测与控制[M]. 顾岚,译. 北京:中国统计出版社,1997.

本刊副主编袁寿其教授 荣获“2010年度何梁何利基金科学与技术创新奖”

何梁何利基金2010年度颁奖大会于10月20日在北京钓鱼台国宾馆隆重举行,《农业机械学报》副主编、江苏大学校长袁寿其教授荣获“何梁何利基金2010年度科学与技术创新奖(产业创新奖)”。

何梁何利基金是香港爱国金融家何善衡、梁銶琚、何添、利国伟先生于1994年3月30日捐款成立的社会公益性慈善基金;旨在促进中国科学与技术发展,奖励取得杰出成就和重大创新的科学技术工作者。何梁何利基金奖励范围涵盖当代科学技术进步与创新的广阔领域,设有“科学与技术成就奖”、“科学与技术进步奖”、“科学与技术创新奖”三个奖项。其中,“科学与技术创新奖”主要授予具有高水平科技成就,通过技术创新和管理创新,创造重大经济效益和社会效益的优秀科技工作者。自1994年成立以来,基金坚持“公平、公开、公正”的评选原则,共奖励九百多名科学家。鼓励了一批又一批科技工作者勇攀科学技术高峰,同时以其科学性、权威性和公信力的评选成果,得到了各界的肯定和好评,国际影响力与日俱增。

据《科技日报》报道,2010年度何梁何利基金获奖人员共有51人,其中“科学与技术成就奖”1名,“科学与技术进步奖”33名,“科学与技术创新奖”17名。