

基于双传感器数据融合的土壤湿度测量与建模

孙道宗, 王卫星*, 姜 晟

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为了克服 TDR-3 土壤湿度传感器所测量的土壤湿度数据受土壤硬度的影响, 得到客观的水分/土壤的质量百分比, 设计并制作基于 TDR-3 土壤湿度传感器和土壤硬度计的土壤湿度测量装置。装置标定时, 通过逆向烘干法精确计算水分与土壤的质量百分比, 进行土壤湿度 (c)、土壤硬度 (ψ) 和 TDR-3 传感器输出电压 (U) 三因素正交试验, 用 Matlab 软件进行二元曲线拟合, 构建三者间的数学关系。试验表明, 融合 TDR-3 传感器的输出电压和土壤硬度计的硬度数据后, 装置可直接测量出土壤水分的质量百分比, 与理论含水率的最大误差为 4.75%。相对于单纯使用 TDR-3 土壤湿度传感器测量土壤湿度, 装置的测量精度显著提高。对同一土样测量的最大重复性误差为 0.83%, 模型具有一定的可靠性与鲁棒性。该文可为开发更加精确的土壤湿度传感器提供参考。

关键词: 土壤湿度, 硬度, 传感器, 数据融合, TDR-3

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.010

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0060-05

孙道宗, 王卫星, 姜 晟. 基于双传感器数据融合的土壤湿度测量与建模[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 60-64.
Sun Daozong, Wang Weixing, Jiang Sheng. Measurement and modeling of soil moisture based on dual-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 60-64. (in Chinese with English abstract)

0 引言

精确测量土壤水分是精细农业中实现精量灌溉的前提条件。目前, 国内外常采用滴定法, 称质量法, 电容法, 电阻法, 微波法, 中子法, Karl Fischer 法, γ 射线法, 核磁共振法, 时域反射法 (time domain reflectometry, TDR), 石膏法, 红外遥感等方法测定土壤水分。其中, TDR 法由于理论性和实用性都很强, 且具有不破坏样本、快速和容易操作等优点, 被人们广泛接受, 是近年来使用较多、发展较快的一种测定土壤含水率的方法。国内外多个厂家基于 TDR 技术开发出相应的 TDR 土壤湿度传感器, TDR-3 便是其中较常用的一种。TDR 法测量土壤水分是基于土壤表观介电常数的测量, 土壤含水率不同, 其介电常数也不同, 进而可以建立土壤介电常数和土壤含水率间的关系。但现有的研究已经表明, 土壤的介电常数与土壤的硬度或紧实度、土壤的黏度等特性也存在关系^[1]。

基于 TDR 技术的传感器在测定精度要求较低时一般不需要标定, 但需要精确测量土壤湿度时, 需进行标定

或校正。国内外关于 TDR 传感器的标定方法较多, 文献 [2-8] 采用烘干法, 标定方法类似。其中, 文献 [5] 准备 20 个装在器皿中烘干后为 300 g 的土样, 分别向 20 个土样中加入 5、10、15、20 g 水, 计算每个土样的含水率, 然后通过 TDR 传感器测量其输出电压, 进行曲线拟合, 进而标定 TDR 传感器。此种标定方法简单、易行, 但仍需进一步改进, 以提高标定的精度。

本文基于 TDR-3 土壤湿度传感器和土壤硬度计, 采用逆向烘干的方法, 测定不同土壤湿度、不同土壤硬度时, TDR-3 土壤湿度传感器的输出电压, 进行三因素正交试验, 建立土壤湿度与土壤硬度和 TDR-3 土壤湿度传感器的输出电压间的数学关系, 克服土壤硬度对 TDR-3 土壤湿度传感器测量值的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土样及预处理

供试土壤为华南地区分布较广的第四纪红土发育的红壤, 质地属轻黏土。基本理化性状为 pH 值 5.7、土壤有机质 0.68%、全氮 0.045%、全磷 0.048%、全钾 1.33%、碱解氮 50 mg/kg、速效磷痕迹、速效钾 40 mg/kg。

前文已述, 由于 TDR 测量土壤水分是基于对土壤介电常数的测量, TDR 发射的电磁脉冲波, 经由同轴电缆传入探头内, 然后进入介质中, 通过测量电磁波沿导波探头在土壤介质中的传播并在其末端反射的时间, 求得理论上的介电常数。水的介电常数是 80 F/m, 而土壤固体介电常数为 2~5 F/m, 空气的介电常数为 1 F/m。水的介电常数比空气或土壤的介电常数大的多, 因此, 土壤的介电常数主要受土壤水分含量的影响。文献 [2-4] 所采

收稿日期: 2012-03-01 修订日期: 2012-07-11

基金项目: 2011 年广东省科技计划项目 (2011B020313019); 2010 年广东省科技计划项目 (2010B020315021)

作者简介: 孙道宗 (1979-), 男, 安徽怀远人, 主要从事农业电气化及自动化、农业信息化。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: sundaozong@scau.edu.cn

※通信作者: 王卫星 (1963-), 男, 河北宣化人, 博士, 博士生导师, 主要从事无线传感器网络、电子信息技术在农业上应用的研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: weixing@scau.edu.cn

农业工程学会会员 (E041200223S)

用的烘干法，由于试验需要，部分土样仅加入极少量水，难以保证水被土样中的土壤颗粒均匀吸收，进而不能保证电磁脉冲波所经过的路径中土壤颗粒湿度的一致性，其表现的介电常数存在很大的差异，导致测量值存在一定偏差。

本文所采用的逆向烘干法可有效改善这一缺陷。先将供试土样充分烘干并碾碎、过筛（1 mm）后，去除土样中的石块等杂质，称取足量供试土样倒入铝制器皿，再倒入适量水，充分浸泡 4 h 并过滤后，进行初步烘烤，以去除土样表面未被土壤颗粒吸收的水分，如此对土样进行预处理。先充分浸泡后再逐渐对土样烘干，可保证组成供试土样的土壤颗粒中水分分布的均匀性，以使 TDR 发射的电磁脉冲波所经过的途径中，水分分布尽可能一致，提高测量数据的准确性。

1.2 试验装置

试验装置主要由 TDR-3 土壤湿度传感器和型号为 TYD2 的土壤硬度计组成，此外还包含 ARM Cortex-M3 内核芯片 STM32F103、驱动土壤硬度计探头匀速插入供试土样的步进电机及驱动电路、液晶、连接土壤硬度计和步进电机的机械部件等。STM32F103 作为装置的微控制器，采集土壤湿度传感器和土壤硬度传感器的输出数据，并控制步进电机的转速及步数，进而驱动土壤硬度计探头匀速插入土样 20 cm，此后进电机反转，带动土壤硬度计探头垂直拔出土壤硬度计，微控制器采集此时的土壤硬度数据。试验装置结构图如图 1 所示。TDR-3 土壤湿度传感器的输出电压值输送至微控制器的 12 位 A/D 转换接口，土壤硬度值直接通过硬度计自带的串口输送至微控制器的串口。微控制器接收数据并处理后，通过装置的液晶分别显示 2 种传感器的电压和硬度。

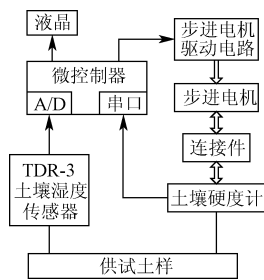


图 1 试验装置结构图
Fig.1 Test device structure diagram

1.3 试验方案

试验采用逆向烘干的方法。为便于将土壤碾碎，先将土壤经 8401-1(AX)型鼓风干燥箱充分烘干后再开始试验，此外考虑到 TDR-3 土壤湿度传感器探头和土壤硬度计探头的长度，试验选取内径 20 cm、高 30 cm、内侧带有刻度的铝制器皿，以便传感器能与土样充分接触，确保数据的正确性。

取少量预处理后的土样，设此时土样及铝制器皿的质量为 m ，将其烘烤 5 min，待冷却后称质量并纪录此时的质量为 m_1 ，铝制器皿的质量为 m_2 ，则可通过式（1）

计算出此时土壤含水率的理论值 c 。

$$c = (1 - \frac{m_1 - m_2}{m - m_2}) \times 100\% \quad (1)$$

使用土壤硬度计测量此时土壤硬度值 ψ 并保持土壤的硬度不变，将 TDR-3 土壤湿度传感器插入土样中，纪录传感器的输出电压值 v 。此后每烘烤 5 min，再次测量土样质量 m 和 TDR-3 土壤湿度传感器的输出电压值 U ，并通过式（1）重新计算此时相应的土壤含水率理论值 c 。重复多次该过程，直至土样已接近完全干燥，完成一组试验。

第二组试验过程与第一组类似，在第一次烘烤计算含水率理论值后，先将土样适当压实，增加土壤的硬度，测量此时的土壤硬度计数值 ψ 并纪录，此后直至第二组试验结束均保持土样硬度不变。

如此重复多组试验，逐渐增加土样的硬度值，重复纪录土壤含水率理论值 c 、土样硬度值 ψ 及 TDR-3 传感器的输出电压值 U 。随着土样的逐渐压实，每次所需的烘干时间可逐渐适当延长，以使每组试验的样本数量接近，便于横向相互比较。

试验时，直接从装置的液晶上读取 TDR-3 土壤湿度传感器的输出电压值及土壤硬度计的土壤硬度值。

2 试验结果与分析

2.1 土壤硬度对 TDR-3 传感器输出电压的影响

为确立土壤硬度对 TDR-3 传感器输出电压的影响，在土样烘干过程中，随机选择某时刻的土样，计算此时土样的理论含水率为 26.45%，保持该含水率不变，一边压实土样，通过土壤硬度计测量硬度，一边测量 TDR-3 传感器的输出电压，对所测量的数据进行一元二次曲线拟合，两者间的关系如图 2 所示。

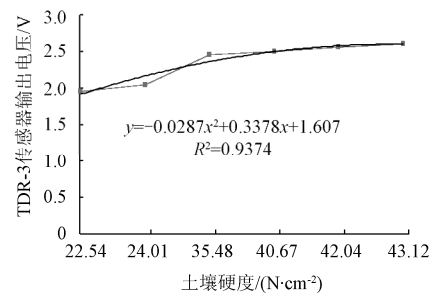


图 2 土壤硬度与 TDR-3 传感器输出电压间的关系
Fig.2 Relationship between soil hardness and TDR-3 sensor output voltage

由图 2 可知，在保持土壤湿度 26.45% 不变的情况下，土壤硬度与 TDR-3 传感器输出电压值之间非常相关，其 $R^2=0.9374$ 。该试验还随机选取了土壤湿度理论值为 11.25%、20.3% 和 39.71%，其 R^2 值分别为 0.9421、0.9270 和 0.9366，进一步验证了土壤硬度对 TDR-3 传感器测量精度的影响。

2.2 土壤湿度对 TDR-3 传感器输出电压的影响

保持土样硬度不变,对预处理后的土样进行烘干,每隔 5 min 称质量并计算土壤含水率的理论值,测量所对应的 TDR-3 传感器的输出电压,对测量数据进行一元二次曲线拟合,结果如图 3 所示。

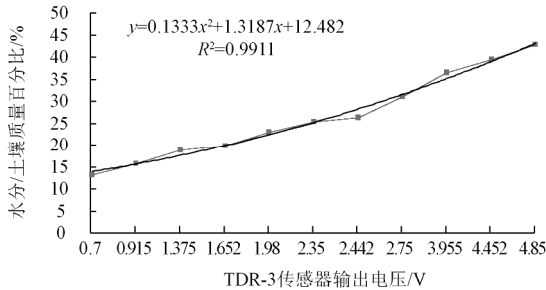


图 3 土壤湿度与 TDR-3 传感器输出电压间的关系

Fig.3 Relationship between soil moisture and TDR-3 sensor output voltage

由图 3 可知, R^2 为 0.9911, 表明 TDR-3 传感器的输出电压与土壤湿度间存在密切相关的关系, 并且可以通过一元二次曲线进行拟合。

2.3 土壤湿度与土壤硬度、TDR-3 传感器输出电压的数学关系

综合考虑土壤硬度、土壤湿度对 TDR-3 传感器输出电压的影响,利用 Matlab 软件绘制土壤湿度与土壤硬度、TDR-3 传感器输出电压三维图,如图 4 所示。

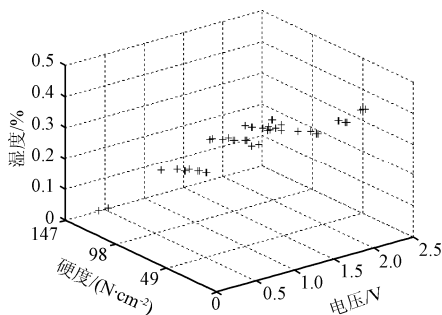


图 4 土壤湿度与土壤硬度、TDR-3 传感器输出电压三维图

Fig.4 Three-dimensional map of soil moisture and soil hardness,TDR-3 sensor output voltage

进行二元二次曲线拟合,得到式(2)

$$c = 0.0043\psi^2 + 0.1883U^2 - 0.1695\psi - 0.9725U + 0.0567\psi U + 1.3948 \quad (2)$$

式中, c 为土壤湿度, %; ψ 为土壤硬度, N/cm^2 ; U 为 TDR-3 传感器输出电压, V。

由拟合分析结果 $R^2=0.9697$, $F=286.5830$, $p=0<0.05$, 可知回归模型成立。

为验证该模型的可靠性,以此模型为基础,仍采用逆向烘干法,随机选取 5 组土样,计算各土样的理论含水率,记录不同组合下装置的实测含水率和未考虑土壤硬度时 TDR-3 传感器的测量值,进一步计算装置的测量误差和 TDR-3 的测量误差,验证数学模型的试验数据如表 1 所示。

表 1 验证数学模型的试验数据

硬度/ ($N \cdot cm^{-2}$)	电压/V	理论含水 率/%	装置实测 含水率/%	TDR-3 含水 率/%	装置测量 误差/%	TDR-3 测量 误差/%
13.5	0.98	9.286	9.4	10.5	-1.22	-12.7
12	1.5	19.76	20.4	21.5	-3.23	-8.6
4.1	2.43	31.84	31.7	31.7	0.43	0.5
2	2.2	32.7	31.9	31.4	1.52	4.1
9.8	2.17	36.18	37.9	38.5	-4.75	-6.5

由表 1 可知,考虑土壤硬度因素,采用该数学模型的装置的测量结果,与单纯使用 TDR-3 传感器的测量结果相比,测量精度均有显著提高。与计算所得的理论含水率相比,测量数据误差绝对值小于 4.75%,模型具有一定的可靠性与鲁棒性。

利用该土壤湿度测量装置对随机选取的 5 种含水率的土样分别进行 5 次重复性试验,分别得到相对应的 5 次实测值 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 和 c_5 ,并计算重复性误差,试验结果如表 2 所示。

表 2 重复性误差试验数据

Table 2 Repeatability error of test data

理论含 水率 c	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	平均值	重复性 误差 %
9.287	9.4	9.3	9.3	9.4	9.4	9.36	0.64
19.76	20.4	20.3	20.3	20.4	20.4	20.36	0.29
31.84	31.7	31.8	31.8	31.7	31.8	31.76	0.2
32.7	31.9	31.8	31.9	31.6	31.9	31.82	0.83
36.18	37.9	37.9	38	38	37.6	37.88	0.739

由表 2 可知,土壤湿度测量装置的最大重复性误差为 0.83%,说明装置的重复性较好。

3 结论与讨论

1)设计并制作了基于 TDR-3 土壤湿度传感器和土壤硬度计的土壤湿度测量装置,并对进行装置的标定试验。试验数据表明,考虑土壤硬度因素后,TDR-3 传感器的输出电压与土壤湿度间的关系与未考虑土壤硬度因素相比有较大的差异。

2)以土壤湿度 c 为因变量,土壤硬度 ψ 、TDR-3 传感器的输出电压 U 为自变量,利用 Matlab 软件进行二元二次曲线拟合,建立三者间的数学关系。随机选取几种土样,装置的测量含水率与理论含水率的误差绝对值小于 4.75%,对同一土样测量的最大重复性误差为 0.83%。

3)装置仅考虑了土壤硬度与土壤湿度对 TDR-3 传感器输出电压的影响,未考虑土壤的温度、黏度等因素,也未做有关土壤黏度的相关性分析。后续研究可进行土壤黏度、硬度、湿度等土壤特性与 TDR-3 传感器输出电压的相关性分析,将各相关的因素体现在数学模型中,进一步提高土壤湿度测量的精度。

[参 考 文 献]

- [1] И.Г.Гринго, 方至. 现代土壤湿度的测量方法问题: 见解[J]. 土壤学进展, 1989(5): 47-49.
И.Г.Гринго, Fang Zhi. Measurement methods for Modern soil moisture: Insights[J]. Soil Science Progress, 1989(5): 47-49. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003(1): 59-64.
Zhou Lingyun, Chen Zhixiong, Li Weimin. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry(TDR)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003(1): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张宪, 姜晶, 王劲松. 基于 FDR 技术的土壤水分传感器设计[J]. 自动化技术与应用, 2011(11): 61-65.
Zhang Xian, Jiang Jing, Wang Jinsong. The design of the soil moisture sensor based on FDR[J]. Techniques of Automation and Applications, 2011(11): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈赟, 陈伟, 陈仁朋, 等. TDR 联合监测土体含水量和干密度的传感器的设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(2): 418-426.
Chen Yun, Chen Wei, Chen Renpeng, et al. Design of TDR sensor for joint measurement of soil water content and dry density and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(2): 418-426. (in Chinese with English abstract)
- [5] 卢启福, 吴慕春, 胡月明, 等. 基于 TDR-3 的土壤水分传感器标定模型研究[J]. 传感技术学报, 2009(7): 1066-1070.
Lu Qifu, Wu Muchun, Hu Yueying, et al. Calibration model of a TDR-Based probe for monitoring soil water content[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009(7): 1066-1070. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王吉星, 孙永远. 土壤水分监测传感器的分类与应用[J]. 水利信息化, 2010(5): 37-41.
Wang Jixing, Sun Yongyuan. Classification and application of sensor for soil moisture monitoring[J]. Water Resources Informatization, 2010(5): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yang Jingfeng, Li Ting, Lu Qifu, et al. Calibration method based on RBF neural networks for soil moisture content sensor[J]. Agricultural Science and Technology, 2010(2): 140-142.
- [8] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 土壤水分时域反射仪(TDR)自制探头的校正与应用[J]. 山西农业科学, 2007, 35(2): 52-54.
Zhang Dongmei, Chi Baoliang, Huang Xuefang, et al. Calibration and application of self-made TDR probe[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2007, 35(2): 52-54. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李树华, 郭改枝, 雷雪梅, 等. 温湿度监测系统及非线性软件校正[J]. 传感器技术, 2003(12): 70-72.
Li Shuhua, Guo Gaizhi, Lei Xuemei, et al. Temperature and humidity monitoring system and nonlinear correction by software[J]. Journal of Transducer Technology, 2003(12): 70-72. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周胜海. 传感器非线性的硬件校正方法[J]. 传感器技术, 2002(5): 1-4.
Zhou Shenghai. Correction methods of sensor characteristic nonlinearity by hardwares[J]. Journal of Transducer Technology, 2002(5): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [11] 黄飞龙, 黄宏智, 李昕娣, 等. 基于频域反射的土壤水分探测传感器设计[J]. 传感技术学报, 2011(9): 1367-1370.
Huang Feilong, Huang Hongzhi, Li Xindi. A new design of soil moisture sensor based on frequency domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011(9): 1367-1370. (in Chinese with English abstract)
- [12] 石庆兰, 王一鸣, 王克栋, 等. 基于时域反射法土壤探头的性能研究[J]. 农机化研究, 2011(3): 159-161, 165.
Shi Qinglan, Wang Yiming, Wang Kedong, et al. Performance study on the soil probe of sensor based on time-domain reflectometry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(3): 159-161, 165. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李炎, 王丹. 不同土壤水分测定方法的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9110-9112.
Li Yan, Wang Dan. Comparative study on different determination methods of soil moisture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(17): 9110-9112. (in Chinese with English abstract)
- [14] 缪嘉敏, 肖德琴, 冯健昭, 等. 基于无线传感器网络的土壤水分监测基站系统设计[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 82-85.
Miao Jiamin, Xiao Deqin, Feng Jianzhao, et al. Design of base station system for soil moisture monitoring based on wireless sensor networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 82-85. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高磊, 施斌, 唐朝生, 等. 温度对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J]. 冰川冻土, 2010(5): 964-969.
Gao Lei, Shi Bin, Tang Chaosheng, et al. Experimental study of temperature effect on FDR measured soil volumetric water content[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010(5): 964-969. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周勤, 赵发章, 张洪亮. 压实度和含水量对于压实黄土力学特性的影响[J]. 公路, 2006(1): 67-70.
Zhou Qin, Zhao Fazhang, Zhang Hongliang. Influence of compactness and water content on mechanical properties of compacted loess[J]. Highway, 2006(1): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ph Cosenza, A Tabbagh. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity[J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/2/3/4): 21-36.
- [18] 王二虎, 全文伟, 霍继超, 等. 暴雨过程对不同深度土壤含水量的影响分析[J]. 河南科学, 2011, 29(1): 40-43.
Wang Erhu, Tong Wenwei, Huo Jichao, et al. The rain-storm process contains the influence analysis of amount of water on different depth soil[J]. Henan Science, 2011, 29(1): 40-43. (in Chinese with English abstract)

- [19] Kizito F, Campbell C S, Campbell G S. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3/4): 367—378.
- [20] Wojciech S. Temperature dependence of time domain reflectometry-measured soil dielectric permittivity[J]. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 2009, 172(2): 186—193.
- [21] Inoue M, Ahmed O A B, Saito T. Comparison of twelve dielectric moisture probes for water measurement under saline condition[J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008(4): 367—372.
- [22] 龚元石, 曹巧红, 黄满湘. 土壤容重和温度对时域反射仪测定土壤水分的影响[J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 145—153.
- Gong Yuanshi, Cao Qiaohong, Huang Manxiang. A Laboratory experiment of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and temperature[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 145—153. (in Chinese with English abstract)

Measurement and modeling of soil moisture based on dual-sensor data fusion

Sun Daozong, Wang Weixing^{*}, Jiang Sheng

(*Key Laboratory of Key Technology for South Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*)

Abstract: In order to overcome soil hardness influence on the measured soil moisture data using TDR-3 soil humidity sensor, and to obtain an objective soil moisture, a soil humidity measurement device was designed and developed based on the TDR-3 soil humidity sensor and a soil hardness tester. The device was calibrated by three-factor orthogonal test with factors as the soil moisture, soil hardness and TDR-3 sensor output voltage was carried out through the reverse drying precise calculation of water and soil mass percentage. The mathematical relationship among the three factors was constructed with Matlab software by dualistic curve fitting. Experimental results indicated that the developed device can directly measure mass percentage of soil moisture after fusing output voltage from the TDR-3 sensor with the hardness data from the soil hardness tester. Test result indicated that, after fusing the TDR-sensor output voltage with the soil hardness data, the soil moisture can be measured directly by the device. The error between measured and theoretical values was less than 4.75% and the measurement accuracy could be significantly improved comparing to that only using the TDR-3 sensor. The maximum repeatability error for the same soil was 0.83%, indicating that the model has a certain reliability and robustness. The research can provide a reference for the development of accurate soil moisture sensors.

Key words: soil moisture, hardness, sensors, data fusion, TDR-3