

太阳能供电的土壤剖面水分动态原位自动监测系统的研制

向阳¹, 于淞¹, 徐 婧¹, 程相林¹, 朱玉帆¹,
劳彩莲¹, 颜小飞², 程 强^{1*}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 目前, 商业化的土壤水分传感器在野外观测土壤剖面含水率时仍然存在测量深度不可调节、多传感器探头之间的互换误差、野外长期监测供电困难、成本较高等问题。为此, 该研究设计并研制了一种太阳能供电的可实现野外长期工作的介电管式土壤剖面水分原位自动监测系统。该系统组成包括: 传感器模块、主控模块、太阳能供电模块和参数设置软件。测量时, 先将 PVC 管垂直安装至待测土壤中, 安装过程不扰动土壤结构, 主控与存储模块控制土壤含水率传感器在 PVC 管中上下移动测量土壤含水率, 并同步记录土壤深度。此外, 该系统可以根据实际需求通过 PC 机参数设置软件进行灵活设定测量参数 (传感器测量深度、测量深度间隔和测量周期)。针对该系统的性能与测量精度开展了相关测试与观测试验, 功耗测试结果表明该系统待机功率为 0.35 W, 工作功率为 1.4 W, 太阳能电池板最大输出功率为 5 W, 太阳能电池板和锂电池配合供电的情况下能实现长时间续航; 土壤含水率传感器在砂土和粉壤土中的标定试验表明: 该系统测量结果与实际土壤体积含水率高度吻合, 标定曲线决定系数 R^2 均大于 0.99; 经过校正后, 该系统探头深度定位的标准偏差在 0.2 cm 以内。在两种质地土壤的滴灌试验结果表明: 该系统分别在 6 和 15 mL/min 两种滴水速率下均能准确获取土壤剖面含水率的动态变化过程, 为观测作物生长状态和根区水分变化、制定合理的灌溉策略以及研究并检验土壤入渗水动态模型提供了可靠的技术支持和保障。

关键词: 土壤水分; 传感器; 土壤剖面; 低功耗; 太阳能供电; 原位自动监测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.018

中图分类号: TS210.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-07-0150-08

向阳, 于淞, 徐婧, 等. 太阳能供电的土壤剖面水分动态原位自动监测系统的研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 150-157. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.018 http://www.tcsae.org

Xiang Yang, Yu Song, Xu Qiang, et al. Development of a novel solar-powered system for in-situ automatic monitoring of soil water dynamics in a soil profile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 150-157. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.018 http://www.tcsae.org

0 引 言

土壤含水率是反映土壤墒情状况的一个重要参数, 不仅影响水分的入渗、再分布、表层水分蒸发和植物的蒸腾作用, 同时也对许多生物基本的生化过程有着重要的影响^[1-3]。土壤水分在空间和时间上都具有很强的变异性, 而土壤垂直方向的空间变异显著强于水平方向^[4]。由于土壤剖面水分分布不均匀, 植物根系的密度分布和吸水能力受到不同深度土壤含水率的影响^[5-6]。例如, 冬小麦的根系主要分布在 0~40 cm 土层中, 最深可达 100 cm; 苹果树的根系主要分布在 0~80 cm 中, 最深可达 200 cm^[7-10]。因此, 实时获取土壤剖面水分的变化无论对判断植物水分状态、预判最佳灌溉时间等科学研究还是对农业生产管理都有重要指导意义^[11]。

近几十年来各种不同的土壤含水率测定方法应运而

生^[1,12]。其中基于介电原理的测量方法以其操作便捷、测量精度较高等优点被广泛关注^[13-17]。为了快速获取准确的土壤水分信息, 学者们进行了大量相关研究^[11,18-23]。针对土壤垂直剖面的水分信息测量, Sun 等^[14]设计了一种停走式土壤水分-阻力复合式圆锥指数仪, 实现了不同深度土壤含水率的测量, 但是该设备是半自动化测量, 体积较大, 耗费人力, 且不能进行长期定点观测。Evet 等^[24]在垂直方向上按照一定间隔安装多个传感器测量土壤剖面水分信息, 但是使用多个探头安装不方便、传感器之间存在互换误差且只能定点测量。TRIME 公司生产的管式 TDR (T3 44-mm Tube Access Probe) 可实现不同深度的土壤含水率测量, 但是测量过程耗费人力, 探头昂贵, 市场售价在万元人民币以上, 测量成本很高。Sentek 公司以 Dean 等^[25]研制的土壤水分测量系统样机为基础, 生产了 Diviner 2000 和 EnviroSCAN 两款产品可实现不同深度的土壤含水率测量, 但是 Diviner 2000 和 EnviroSCAN 测量的最小深度间隔为 10 cm, Diviner 2000 的弊端与 TRIME 的管式 TDR 相同。而另一款 EnviroSCAN 使用多探头自动采集土壤剖面不同深度的水分数据, 虽然降低了人力成本, 但是探头之间会有互换误差, 长时间使用会出现探头精度漂移, 且价格较为昂贵, 市场售价在万

收稿日期: 2020-11-28 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31871527)

作者简介: 向阳, 主要研究方向为精细农业传感器与检测设备。Email: xiangyang_office@126.com

*通信作者: 程强, 副教授, 博士生导师。主要研究方向为精细农业先进传感技术与数据分析处理方法。Email: chengqiang@cau.edu.cn

元人民币以上;此外,EnviroSCAN 需要额外电源供电才能实现长期监测,显然不适合没有电源的野外环境。Gao 等^[26]设计的土壤剖面水分传感器利用在 20、30 和 50 cm 深度位置安装 3 个传感器探头采集土壤含水率数据,通过反演推算来实现 0~100 cm 深度土壤含水率的测量,虽然实现土壤剖面多深度土壤含水率的测量,但是测量深度最小间隔是 10 cm,且对不同土壤环境的适应性不是很理想。Ramadan 等^[27]设计的光伏土壤水分监测站通过在土壤水分传感器探头上安装四个探针来实现监测不同深度土壤水分含量,但是其探头间存在互换误差。

就目前的研究现状而言,前人提出的土壤剖面水分测量方法或系统普遍存在观测深度分辨率低、多传感器探头间存在互换误差、价格昂贵、野外供电困难的缺点。为克服上述弊端,本文以介电理论为基础,拟设计一种太阳能供电的能够在垂直剖面精细尺度上获取土壤含水率的低成本测量系统,并对系统性能进行测试与评估。

1 设备组成及原理

1.1 系统组成与功能

该系统由土壤含水率传感器模块(含 PVC 导管)、主控模块、太阳能供电模块和参数设置软件组成,系统组成如图 1 所示。传感器模块用来测量土壤剖面含水率,主控模块控制整个系统的正常运行,太阳能供电模块采用锂电池和太阳能电池板(安装于控制箱顶部)的配合为该系统提供电能,PC 机上的参数设置软件通过蓝牙和主控与存储模块通讯,可根据实际需要设置传感器测量深度、测量深度间隔和测量周期,该系统的总体内部结构图如图 2 所示。该系统使用的 PVC 管外径只有 25 mm,安装时用钻孔工具在土地上钻出对应安装孔即可,避免使用大型打钻设备,安装方便。

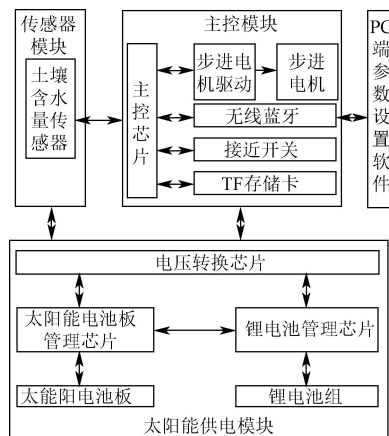


图 1 土壤剖面水分原位自动监测系统

Fig.1 In-situ and automatic system for monitoring moisture content of soil profile

测量时,先将 PVC 管垂直安装至待测土壤中(长度可以根据实际测量情况进行定制,最大长度为 2 m,根据观测对象根系分布确定试验的 PVC 导管长度),主控模块控制土壤含水率传感模块在 PVC 管中上下移动测量土壤含水率,并同步记录土壤深度信息。测量过程中,传

感器探头首先在自身重力的牵引下,通过步进电机缓慢转动绕线轮匀速释放多芯电缆实现其自身的匀速下降;然后步进电机反向匀速转动绕线轮匀速回收多芯电缆,在多芯电缆的牵引下实现传感器探头匀速上升,传感器探头在匀速上升的同时,每移动设定的间隔深度后进行土壤含水率的测量。

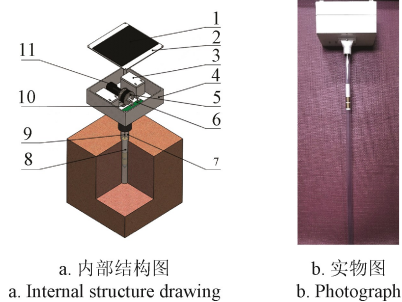


图 2 测量系统总体内部结构图和实物图
Fig.2 Internal structure drawing and photograph of measuring system

1.2 传感器模块设计

由于水的相对介电常数(20℃下为 81)远大于干土的相对介电常数(约为 3),因此可通过测量含水土壤的相对介电常数来间接测定土壤的体积含水率^[22]。该系统采用的是稳定性好、测量精度较高的频域土壤水分传感器作为测量装置^[28-29]。对于基于电容的测量,传感器探头内部的高频振荡器(100 MHz)通过探头外部的一对平行环形金属电极产生一个边缘场,该边缘场穿透 PVC 导管延伸到土壤中,基于土壤成分之间的介电差异来测量土壤的体积含水率,高频率下的测量结果对盐分不敏感。其测量原理如图 3 所示。当土壤含水率发生变化时,传感器周围介电常数的变化引起阻抗(Z_p)的变化:

$$Z_p(\varepsilon) = \frac{U_b}{U_a - U_b} Z_0 \quad (1)$$

式中 Z_p 为阻抗输出, Ω ; ε 为含水土壤的介电常数, Z_0 为内部平衡阻抗, Ω ; U_a 和 U_b 为检波电路的输出电压, V。利用运算放大器放大 U_a 和 U_b 之间的差值,最后得到传感器的输出值 U_0 , 其计算公式为

$$U_0 = A_f(U_a - U_b) \quad (2)$$

式中 A_f 为运算放大器的增益。将公式(2)带入公式(1)可以得到输出传感器电压 U_0 的最终表达式为

$$U_0 = A_f \frac{Z_0}{Z_p} U_b \quad (3)$$

传感器探头内部为空腔结构,用来放置土壤含水率传感器检测电路板。其目的是减少传感器检测电路与传感器电极之间的传输线距离,从而减少因传输线带来的干扰。该系统使用的 PVC 管外径为 25 mm,内径为 23 mm。为保证传感器探头能顺利地在地 PVC 管道中移动,

将传感器探头主体设计为圆柱体, 其外壁与 PVC 管内壁间预留些许间隙 ($<1\text{ mm}$)。其模型图如图 4 所示。传感器探头顶端有金属片, 用于被接近开关感知从而实现传感器位置校准。

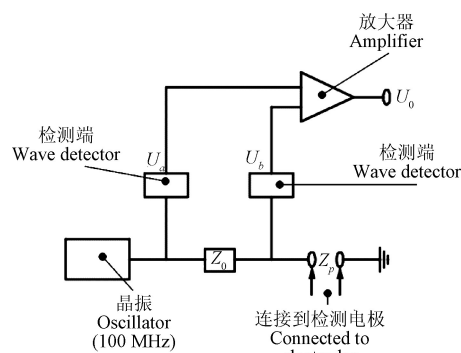


图 3 传感器测量电路原理

Fig.3 Schematic view of the measurement circuit

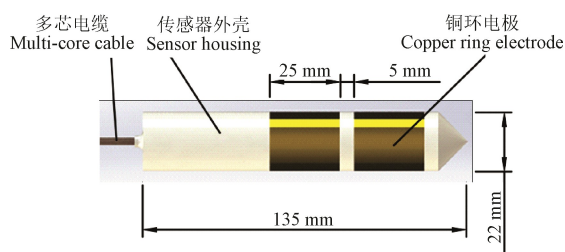


图 4 传感器探头设计图

Fig.4 Design drawing of sensor probe

1.3 主控模块设计

1.3.1 主控模块硬件设计

主控模块包括：微控制器（STM32F103RCT6）、步进电机驱动（AT2100）、步进电机、无线蓝牙（HC-06）、接近开关、TF 存储卡、绕线轮等。微控制器通过步进电机驱动芯片控制步进电机的正反转，从而实现传感器探头在 PVC 管道中上下移动。传感器输出端连接着微控制器内部的模数转换模块（ADC），通过模数转换将传感器输出模拟量电压值转化为数字量并和当前传感器深度值同时存储起来。微控制器芯片的片上外设 RTC（Real Time Clock）模块，可为该系统提供时间基准。系统基于该时间基准进行测量周期的控制。系统能在无人监管的情况下实现长时间的数据采集与存储。数据存储在 TF 存储卡中。主控模块通过无线蓝牙可与 PC 机上的参数设置软件进行通讯。

接近开关安装在传感器探头的起始位置（PVC 管最上端），在感知到传感器探头接近后，接近开关会向微控制器发出一个信号，微控制器控制步进电机停止转动，以保证每次测量时传感器探头的起始位置一致。传感器探头在测量时的实时位置通过步进电机的驱动脉冲计数确定。微控制器通过发给步进电机驱动芯片的脉冲个数来控制传感器探头在 PVC 导管内的移动距离，详见 1.3.3 节。此外，绕线轮内部为中空结构，在轴线上一端安装有导电滑环，多芯电缆通过导电滑环保证对传感器探头

的供电和通信不受绕线轮旋转所干扰。

1.3.2 主控模块软件设计

对于该系统而言，其各项功能是通过软件和硬件配合实现，相较于硬件而言，软件算法的设计是实现其复杂多样功能的关键。图 5 为该系统的软件流设计图。

系统开机后首先进行硬件和传感器位置初始化，然后等待上位机电脑设置配置参数和下达开始测量命令，如果在指定时间内未收到上位机的设置命令，就按照系统默认测量参数设置。每一轮测量周期开始后，系统控制步进电机使传感器探头开始匀速移动，完成测量后进入休眠状态以减少设备对电能的消耗，延长野外工作续航时间，等待下次测量开始时唤醒系统。

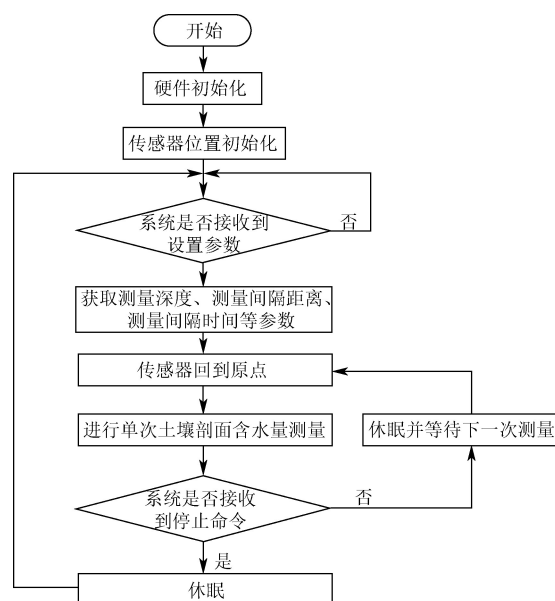


图 5 主控模块软件运行流程图

Fig.5 Software run flow chart of main control module

1.3.3 传感器探头深度控制方法

该系统中的步进电机为传感器探头的上下移动提供动力。步进电机通过减速器增加输出扭矩从而提高步进电机开始转动瞬间的可靠性。绕线轮上有均匀分布的螺旋沟槽，能使多芯电缆单层均匀分布于绕线轮外侧。该系统采用的步进电机规格为两相四线，其步距角度参数为 1.8° 。步进电机驱动芯片工作模式的脉冲细分（ n_c ）为 16 细分。减速器的减速比（ i_0 ）为 57/11，绕线轮的绕线部分外径（ d_0 ）为 5 cm。微控制器向步进电机驱动芯片发送脉冲，调节并控制传感器探头的移动距离。理论脉冲个数与传感器移动距离之间的关系为^[30]

$$N(l) = \frac{200i_0n_cl}{\pi d_0} \quad (4)$$

式中 i_0 为减速器的减速比， n_c 为步进电机驱动芯片工作模式的脉冲细分， d_0 为绕线轮绕线部分的直径，cm； l 为传感器探头单向实际移动距离，cm。

测量时，微控制器按照设定的测量深度和测量深度间隔根据公式（4）计算步进电机控制芯片所需的脉冲个数，从而实现对传感器探头位置的精确控制。

1.4 太阳能供电模块设计

太阳能供电模块包括: 太阳能电池板(额定电压为 18 V、额定电流为 278 mA、峰值功率为 5 W)、锂电池电池组(12 V 12 000 mA·h)、电压转换芯片(MP2359)、太阳能电池管理芯片(LTC4121)、锂电池管理芯片(LTC2944)。根据 LTC4121 官方数据手册给出其输入电压范围为 4.4~40 V, 输出电压可根据外围电路中调节电阻的阻值进行调节。该系统采用的锂电池组为三串两并锂电池组, 额定电压为 12.6 V。通过配置 LTC4121 外围调节电阻使其输出电压满足锂电池组充电需求。LTC2944 具有温度、电压和电流测量功能。微控制器通过 IIC 通信读取 LTC2944 测得的锂电池组的电压、电流值, 实现对锂电池工作状态的监视, 以延长锂电池的寿命。MP2359 将太阳能电池管理芯片输出的电压和锂电池组输出的电压转换为微控制器、传感器等可用的电压为整个系统提供电能。

1.5 参数设置软件设计

参数设置软件运行于 Windows 系统的个人电脑上, 通过无线蓝牙与主控模块进行通信, 可对该测量系统的相关参数进行设定。开发上位机软件的环境为 Microsoft Visual Studio Community 2019, 编程语言为 C#。具体开发流程本文不进行详细介绍。

2 试验方案

2.1 系统性能测试

2.1.1 供电极限测试

该系统在不同的测量参数(测量深度、测量深度间隔、测量周期)下系统消耗电能的功率也不同。该系统采用一块 3S 锂电池进行供电。在供电极限测试当中, 在无光照的情况下进行续航时间测试。系统的测量深度设定为 60 cm, 测量深度间隔为 1 cm, 测量周期为 5 min。此外, 在无光照的情况下系统进行不间断工作, 观测电池电压变化。

2.1.2 传感器定位精度测定与校正

由于多芯电缆绕在绕线轮上与绕线轮之间有间隙, 根据公式(4)理论计算得出的传感器探头移动距离与实际移动距离会产生偏差, 所以需要通过对理论脉冲个数进行校准。试验过程通过上位机下达指令, 使传感器探头移动到指定深度位置。设定下降深度分别为 10、30、50、70 cm, 并用米尺(量程 100 cm, 精度 0.1 cm)测量传感器探头实际下降深度, 每组试验重复 5 次并记录实际每个深度下 5 次传感器探头实际下降的深度, 然后带入公式(5)计算偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (l_i - l_0)^2}{5}} \quad (5)$$

式中 l_0 为设定的下降深度, cm; l_i 为每次实际到达的深度值, cm; σ 为标准偏差。

2.1.3 传感器标定与精度检验

从农田取回粉壤土(各部分质量分数: 砂粒含量 11%、粉粒含量 71%、黏粒含量 18%)和砂土(各部分

质量分数: 砂粒含量 91.9%、粉粒含量 8.1%、黏粒含量 0%)过 2 mm 孔径筛, 再将其置于干燥箱(105 °C, 24 h)干燥。水与干燥土样分别按照不同的体积含水率进行混合, 再将配水后土样按照干容重 1.2 g/cm³ 装入容器(直径 15 cm, 高 20 cm), 密封静置 48 h 使土壤中的水分达到均匀分布。标定过程在室温(25 °C)下进行。标定过程对每个土样采集 5 次, 取算术平均值, 最后测量的传感器电压值和配置的实际土壤体积含水率进行拟合。为了检验该系统含水率测量精度, 将水与干燥粉壤土分别按照体积含水率 5%、10%、15%进行混合, 分别装入 3 个容器(直径 25 cm, 高 15 cm)中, 每个容器中土样深度为 14 cm, 层与层之间有 1 cm 厚的隔水板。容器底部中心留有直径 25 mm 的孔, 用于安装 PVC 管。将 3 个容器从上到下按照体积含水率 5%、10%、15%堆叠放置, 最上层容器的顶部用盖板密封, 阻绝土壤与空气之间的水分交换。基于样本顺序, 用该系统进行测量(在每个土样中每隔 2 cm 测量一个点, 每层土样测量 8 个点)。

2.1.4 锂电池电压变化对传感器影响试验

本试验将系统传测量模式设置为单点测量、测量周期为 1 h; 传感器置于密封的土壤环境中, 系统同时获取传感器输出电压和锂电池电压, 观察锂电池在放电时电压变化对传感器输出值的影响。试验时长为 155 h, 共采集到 155 个试验数据。

2.1.5 锂电池充电测试

在试验当中关闭步进机电源用来模拟单点测量的工作状态。将该系统安置在实验室阳台利用太阳能电池板对系统供电, 系统自动检测并记录锂电池电压和电流状态。同时利用山东仁科测控技术有限公司生产的光照强度变送器采集实验室阳台一天的太阳光强度变化情况。由于实验室楼层遮挡的原因, 实验室阳台在中午 12:00 以后才能受到太阳光照射。

2.2 滴灌条件下土壤入渗试验

为检验该系统在实际测量过程中的动态响应性能, 分别用两种不同质地的土壤样本在不同的滴水速率下进行土壤入渗试验。

2.2.1 滴灌条件下粉壤土入渗试验

从农田取回粉壤土(质地与操作同 2.1.3), 再将其置于试验室内进行自然风干。取干燥后的粉壤土样装入一个直径为 15 cm、高度为 50 cm 的容器中, 将本测量系统的 PVC 管安装在土样中(图 6)。在土样最上方以 6 mL/min 的速率将水滴入土样中, 同时用该系统测量(测量深度为 45 cm, 测量深度间隔为 1 cm, 测量周期为 5 min)缓慢入渗过程土壤含水率的动态变化。试验时长为 2 775 min, 采集到 555 个试验数据。

2.2.2 滴灌条件下砂土入渗试验

按照图 6 试验装置将试验土样换成砂土(质地与操作同 2.1.3), 滴水速率设置为 15 mL/min。用该系统测量(测量深度为 44 cm, 测量深度间隔为 1 cm, 测量周期为 2 min)快速入渗过程土壤含水率的动态变化。试验时长为 66 min, 采集到 33 个试验数据。

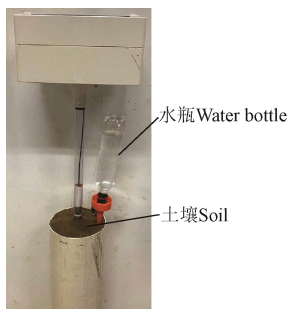


图6 滴水条件下土壤入渗试验

Fig.6 Soil infiltration experiment under the condition of dripping water

2.3 大田观测试验

为检验本文开发的测量系统在大田环境中的实际测量效果,于2021年3月26日起在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地(试验区地理位置为116°26'39"E,40°10'43"N)进行了田间试验(以3月26日至4月2日的测量数据为例)。在基地的冬小麦示范田中,根据测量系统中PVC导管的尺寸在土壤中开孔并将PVC导管埋入,安装测量系统。在参数设置软件中将测量深度、测量间隔深度和测量周期分别设置为80 cm、5 cm和1 h。

3 结果和讨论

3.1 系统测试

3.1.1 供电极限结果与分析

系统的测量深度设置为60 cm,测量点间隔距离设置为1 cm,测量周期设置为5 min,在无光照的情况下,系统电池的续航时间测试中共续航3 510 min,采集到的数据为1 404个。功耗测试结果表明工作功率为1.4 W,待机功率为0.35 W。根据二者的大小关系,在无光照情况下,当测量周期为1 h、测量深度为60 cm、测量点间隔距离为1 cm时,系统能续航13 d左右。图7为系统在不间断测量状态下(无待机状态下的极限测试)电池电压的变化情况。从图中可以看出电池放电均匀,能够连续稳定工作约4 d。

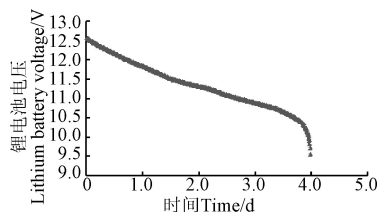


图7 系统在不间断工作时电池电压的变化

Fig.7 Variations of battery voltage during unintermittent operation

3.1.2 传感器定位精度测定与校正

通过公式(4)可以计算出传感器探头每移动1 cm需要的脉冲个数为1 056个。根据公式(5)计算标准偏差分析后结果如图8所示。从图中看出随着深度的增加,传感器实际移动深度与设定深度的偏差在不断增大,累计误差系数为0.03 cm/cm,测量深度范围的平均标准偏

差约为1 cm。出现这种结果的原因是多芯电缆的直径比绕线轮上沟槽直径小,致使缠绕在绕线轮上多芯电缆所在的环形区域直径比理论值小,从而导致在理论脉冲下传感器探头移动的距离小于设定值。通过实际观测,最终传感器探头每移动1 cm需要的脉冲个数校正为1 088个。经过校准后提升了系统的定位精度,累计误差系数为0,测量深度范围的平均标准偏差小于0.2 cm。在实际测量中,该系统能按照设定要求控制传感器探头到达土层的指定深度,为精确获取每一个深度土层的土壤水分信息提供了有力保证。

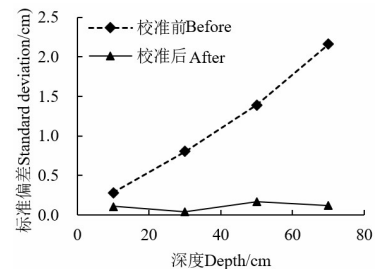
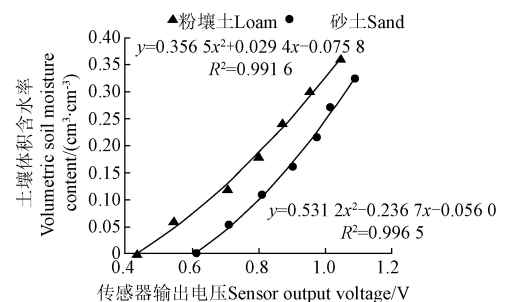


图8 位置校准试验结果

Fig.8 Experimental results of position correction

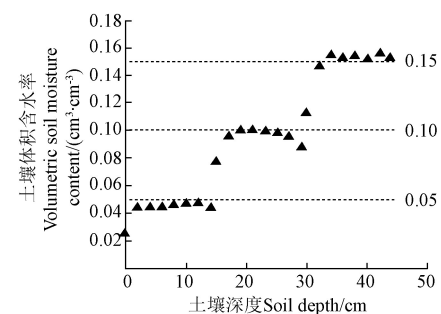
3.1.3 传感器标定与精度检验结果

在传感器标定试验中,如图9所示为传感器的标定曲线。



a. 土壤水分传感器标定曲线

a. Calibration curves of soil moisture sensor



b. 分层土壤含水率

b. Soil moisture content measurement at layered soils

图9 两种质地土壤水分传感器标定曲线及分层土壤含水率测量结果

Fig.9 Calibration curves of soil moisture sensor with two soil textures and result of soil moisture content measurement at layered soils

由图9a可以看出两种质地土样的体积含水率

(Volumetric soil moisture content) 与传感器输出电压均呈二次曲线关系, R^2 分别为 0.991 6 和 0.996 5。传感器精度检验试验结果如图 9b 所示, 系统测得的 3 层土样的剖面水分, 呈阶梯状变化。通过传感器测定的每一层土样的含水率平均值 (第一层: $0.050 \pm 0.002 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 第二层: $0.100 \pm 0.006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 第三层: $0.150 \pm 0.001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 表明该系统测量结果与实际土壤体积含水率高度吻合。传感器在每一层土样中测量的第一个点和最后一个点由于受 1 cm 隔水板的影响, 其测量值低于实际土壤体积含水率。在整个试验结果中可以看出, 该系统通过利用脉冲计数与接近开关的配合能很好的控制传感器探头在实际测量中的位置, 精确地测量出不同深度的土壤剖面水分信息。

3.1.4 锂电池电压变化对传感器的影响

根据获取到的 155 个试验数据绘制锂电池电压和传感器输出电压随时间变化曲线, 如图 10 所示。由图可知, 锂电池放电过程电压变化均匀, 当锂电池电压低于 10.2 V 时, 电池电压迅速下降, 这是由于锂电池电压接近放电截止电压所致。该系统配置的锂电池内部有防止锂电池组过充电和过放电保护板。由于锂电池内部有防止过充电和过放电保护电路, 当锂电池电压低于 9.225 V 时, 锂电池内部保护电路断开, 系统停止工作。从试验数据中可以看出在整个试验过程中电池电压变化了约 3.2 V, 传感器输出电压仅有 5 mV 波动变化, 可见, 锂电池正常供电的情况下电池电压变化对传感器的输出电压几乎无影响, 这也表明该系统传感器的稳定性高, 不受锂电池变电压变化的影响。

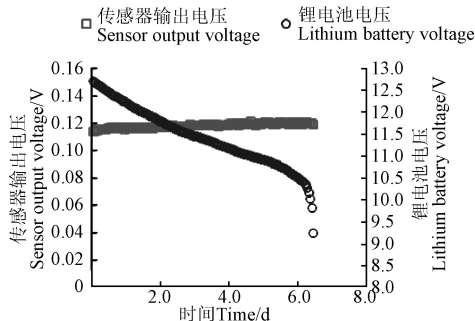


图 10 电池放电过程电池电压变化和传感器输出电压变化
Fig.10 Variations of battery voltage and sensor output voltage during battery discharge

3.1.5 锂电池充电测试结果与分析

锂电池充电测试结果如图 11 所示。由图可知, 在中午 12:00 之前由于光照强度较弱, 太阳能电池管理芯片并不能将其转化为锂电池充电所需要的电压。此时整个系统正常运行所消耗的电能来自于锂电池, 电流约为 -0.027 A (放电状态)。在中午 12:00 以后, 由于太阳能电池板接收到充足的太阳光的照射, 太阳能电池管理芯片将太阳能电池板输出的电压转换为锂电池充电所需要的稳定电压, 锂电池电压发生跳变, 从而把锂电池输出端电压拉高。在中午 12:00 之后到 15:30 之前, 太阳能电池板所接收的太阳光照强度大于 $2\,200 \text{ lx}$, 可使太阳能电池板稳定输出电能。此时锂电池电流约为 0.125 A (充电状态), 太阳能电池板转化出的电能可在维持系统正常工作的同时

还能为锂电池充电。从本试验结果可以看出, 该系统若安装在阳光充足的大田, 系统中安装的太阳能电池板能为系统长期监测土壤含水率提供了必要条件。

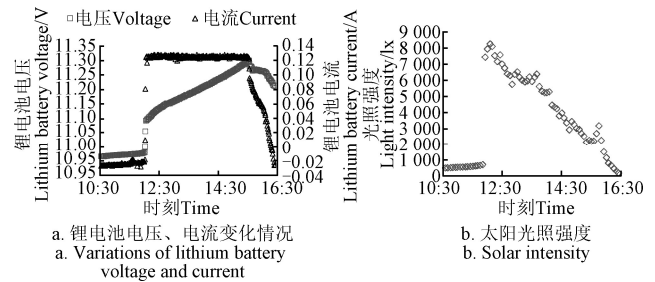


图 11 锂电池充电测试

Fig.11 Lithium battery charging test

3.2 滴灌条件下土壤入渗试验结果与分析

图 12 给出了 1、5、10、15、20、25、30、35 cm 深度下粉壤土和砂土的体积含水率随时间的变化规律。从图中可以看出, 浅层土壤体积含水率变化先于深层土壤, 每层土壤含水率都是先上升, 最后达到饱和, 数值基本保持不变, 与土壤水分入渗规律相符。在此过程中, 该系统能够捕捉到两种质地土壤表层 (1 cm 深度) 由于干到饱和的整个过程, 特别是在滴水速率较快的砂土中也能很好的捕捉到这一过程, 这表明该系统及其所搭载的土壤含水率传感器在测量过程中动态响应迅速。此外, 由于两次试验中滴水速率不同, 从图 12 的试验观测结果中也可以看出: 该系统响应迅速, 能观测到不同滴水速率下土壤体积含水率的动态变化过程。根据图中曲线, 在 10 cm 深度位置, 粉壤土含水率上升阶段曲线的拟合直线斜率为 $0.0008 \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$, 砂土含水率上升阶段曲线的拟合直线斜率为 $0.0213 \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$, 很显然粉壤土水分入渗速率远小于砂土, 这符合试验参数设定值。

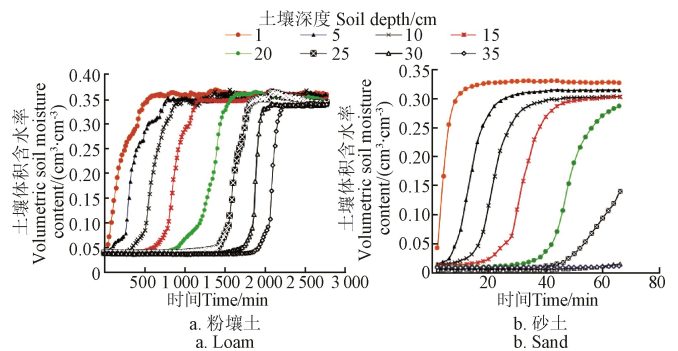


图 12 不同深度土壤的含水率变化

Fig.12 Variations of soil moisture content at different depths

3.3 大田观测试验结果分析

系统测量的小麦根区土壤剖面水分动态变化过程如图 13 所示 (3 月 26 日至 4 月 2 日)。由图可知, 0~60 cm 的土壤含水率逐天降低, 而 60 cm 以下的土壤含水率无明显变化。此外, 土壤含水率随时间的变化率随着土壤深度的增加而逐渐减小, 这是由于返青期冬小麦根区分布主要集中在 0~70 cm 土壤范围内, 但是对根区土壤水

分的消耗主要集中在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层^[10]。综上所述, 大田观测试验结果表明: 本研究开发的测量系统不仅能够准确、完整地表现出返青期冬小麦根区土壤剖面含水率的动态变化, 能够实现土壤剖面水分的自动原位自动监测, 具有较高的实用价值。

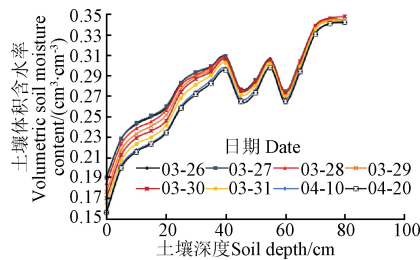


图 13 小麦根区土壤剖面水分动态变化数据

Fig.13 Soil moisture dynamics at a soil profile in wheat root zone

4 结 论

本文研制了一种太阳能供电的土壤剖面水分动态原位自动监测系统。该系统采用单一传感器探头测量土壤剖面水分, 标定曲线的决定系数 R^2 均大于 0.99, 不存在多探头互换误差, 较传统多探头测量方法精度高; 探头深度定位绝对误差小于 0.2 cm, 深度定位精确; 装有大容量锂电池, 在非测量阶段进入休眠状态, 其工作时功率为 1.4 W 和待机时消耗功率为 0.35 W, 太阳能电池板的峰值输出功率为 5 W 大于该系统的消耗功率, 可为该系统提供较长的续航时间, 实现在野外的长期连续监测, 也可用直流电源直接进行供电, 在可提供市电的设施农业环境中也能够实现连续监测; 可根据实际测量情况通过 PC 机参数设置软件对测量周期、测量深度、测量深度间隔等相关测量参数进行修改, 测量方式更为灵活。系统安装过程中, 只需用小孔径钻头 (25 mm) 在土壤中钻孔安装 PVC 管即可, 避免使用大型打钻设备, 安装方便。该系统实现了水分入渗过程中土壤剖面不同深度水分的变化规律的原位自动监测和大田环境植物生长过程中根区土壤剖面含水率原位自动监测。

[参 考 文 献]

- [1] Bittelli M. Measuring soil water content: A review[J]. HortTechnology, 2011, 21(3): 293-300.
- [2] Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management[J]. Journal of Hydrology, 2012, 458-459: 110-117.
- [3] Corradini C. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 1-5.
- [4] Gravalos I, Georgiadis A, Kateris D, et al. An experimental simulation of moisture distribution and its uniformity within the soil profile under laboratory conditions[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(1): 19-36.
- [5] Smucker A J M, Aiken R M. Dynamic root responses to water deficits[J]. Soil Science, 1992, 154(4): 281-289.
- [6] Abrisqueta J M, Mounzer O, Álvarez S, et al. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(8): 959-967.
- [7] Wang B, Zheng L J, Ma J J, et al. Effective root depth and water uptake ability of winter wheat by using water stable isotopes in the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(6): 27-35.
- [8] 郝仲勇, 杨培岭, 刘洪禄, 等. 苹果树根系分布特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1998(6): 3-5.
Hao Zhongyong, Yang Peiling, Liu Honglu, et al. Experimental investigation on root system distribution of apple Tree[J]. Journal of China Agricultural University, 1998(6): 3-5. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘继龙, 张振华, 谢恒星. 苹果园表层与深层土壤水分的转换关系研究[J]. 农业现代化研究, 2006, 27(4): 304-306.
Liu Jilong, Zhang Zhenhua, Xie Hengxing. On conversion relation between surface and deep soil water of apple orchard[J]. Research of Agricultural Modernization, 2006, 27(4): 304-306. (in Chinese with English abstract)
- [10] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(8): 18-21.
Xiao Junfu, Liu Zhandong, Duan Aiwang, et al. Root distribution and water consumption characteristics of winter wheat under different soil moisture[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(8): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [11] Sun Y R, Li L, Lammers P S, et al. A solar-powered wireless cell for dynamically monitoring soil water content[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 19-23.
- [12] 邵长亮, 吴东丽. 土壤水分测量方法适用性综述[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 1-9.
Shao Zhangliang, Wu Dongli. Review of applicability of soil moisture measurement techniques[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [13] Casanova J J, Evett S R, Schwartz R C. Design of access-tube TDR sensor for soil water content: Theory[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1979-1986.
- [14] Sun Y R, Lammers P S, Ma D K. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 745-751.
- [15] Gaskin G J, Miller J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. Journal of agricultural engineering research, 1996, 63(2): 153-159.
- [16] 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): 21-26.
Ma Xiaoyi, Xiong Yunzhang, Zhu Fengshu, et al. The potential analysis on soil moisture measurement by dielectric method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(2): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙宇瑞, 汪懋华, 赵燕东. 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 3-5.
Sun Yurui, Wang Maohua, Zhao Yandong. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 3-5. (in Chinese with English abstract)
- [18] Sun Y R, Sheng W Y, Lin J H, et al. Wireless sensor network for monitoring soil water content on field scale[J]. Landtechnik, 2010, 65(6): 442-445.
- [19] Sheng W Y, Sun Y R, Lammers P S, et al. Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1/2): 555-560.
- [20] Kafarski M, Majcher J, Wilczek A, et al. Penetration depth of a soil moisture profile probe working in time-domain transmission mode[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5485.
- [21] 贡玉良, 盛文溢, 孙宇瑞. 三深度土壤水分传感器的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 64-71.

- Yun Yuliang, Sheng Wenyi, Sun Yurui. Design and experiment of soil water sensor monitoring soil moisture at three depths[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 64-71. (in Chinese with English abstract)
- [22] 付磊, 孙宇瑞. 土壤水分剖面测量系统设计与应用性能检验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 42-46.
Fu Lei, Sun Yurui. Design and applicable evaluation of instrument for determining soil moisture profile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [23] 蔡甲冰, 刘钰, 白亮亮, 等. 低功耗经济型区域墒情实时监测系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 88-94.
Cai Jiabing, Liu Yu, Bai Liangliang, et al. Low-cost and low-power dissipation system to monitor soil water status in real time for areal irrigation management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 88-94. (in Chinese with English abstract)
- [24] Evett S R, Tolk J A, Howell T A. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(3): 894-907.
- [25] Dean T J, Bell J P, Baty A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance[J]. Journal of Hydrology, 1987, 93(1/2): 67-78.
- [26] Gao Z R, Zhu Y, Liu C, et al. Design and test of a soil profile moisture sensor based on sensitive soil layers[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1648.
- [27] Ramadan K M, Oates M J, Molina-Martinez J M, et al. Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 148-159.
- [28] Sun Y R, Zhou H Y, Qin Y L, et al. Horizontal monitoring of soil water content using a novel automated and mobile electromagnetic access-tube sensor[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 50-55.
- [29] Shan G L, Sun Y R, Cheng Q, et al. Monitoring tomato root zone water content variation and partitioning evapotranspiration with a novel horizontally-oriented mobile dielectric sensor[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 228: 85-94.
- [30] 古志坚. 基于单片机的步进电机控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Gu Zhijian. Research of the Stepping Motor Control System Based on the SCM[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

Development of a novel solar-powered system for in-situ automatic monitoring of soil water dynamics in a soil profile

Xiang Yang¹, Yu Song¹, Xu Qiang¹, Cheng Xianglin¹, Zhu Yufan¹,
Lao Cailian¹, Yan Xiaofei², Cheng Qiang^{1*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Commercial sensors of soil moisture normally cannot specifically observe the customized water content of soil profile, with emphasis on unadjustable measurement depth, interchange errors among multi-sensor probes, high cost, and difficulty in power supply for long-term monitoring in the field. In this study, a novel solar-powered system was developed to in-situ and long-term monitor the water content of soil profile in the field using dielectric tube sensors. Three parts included the power supply, measurement, and storage subsystem. The power supply subsystem was composed of the solar and lithium battery for long-term monitoring of the water content of soil profile in the field. A control panel was also utilized in a measurement subsystem to control the vertical movement of a dielectric tube sensor and simultaneously measure the soil water content and depths of the soil profile. The communicated system was installed with the upper computer software through Bluetooth. The operational parameters were set flexibly in the actual requirements, including the depths, spacing distance, and measuring periods. A storage subsystem was then used to record real-time measurements of the water content of the soil profile. A series of experiments were conducted to validate the performance of the developed system. The maximum output power of the solar panel was 5 W, greater than the working power (1.4 W) and the standby power of the system (0.35 W), which can make it possible for the system to achieve long-term endurance in the sunny outdoor. The solar-powered supply test showed that the novel system satisfied the high requirements of long-term running with the combination of solar and lithium batteries. The system lasted about 13 d without light, whereas worked sustainably under sufficient light. In addition, the voltage of the lithium battery changed by 3.2 V during the whole discharge, while the output voltage of the sensor only changed by 5 mV, indicating that the output voltage of the sensor was fully independent of the voltage of the lithium battery. A drip irrigation experiment was performed on two soil samples (sand and silt loam soil) with different drip irrigation rates, further to test the position accuracy of a system. High accuracy was achieved in the measurements of soil water content with a high consistent relationship ($R^2 > 0.99$) between actual volumetric water contents and converted one via the calibration curves of the sensors. The novel system accurately positioned the depth of the sensor probe in the soil profile with a positioning error of less than 0.2 cm. Furthermore, the infiltration experiments in two drip irrigation showed that the developed system accurately and completely characterized the dynamic of water content in soil profiles during infiltration with different drip irrigation rates. The finding can provide reliable technical support to in-situ monitoring the crop growth state and moisture change of root zone for reasonable irrigation strategy.

Keywords: soil water content; sensor; soil profile; low power consumption; solar-powered; in-situ automatic monitoring