

土柱入渗性能自动检测装置研制与试验

贾维兵, 杨启良*, 李加念, 刘小刚, 杨具瑞

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要:为实现室内竖直土柱入渗性能的自动检测,研制了一种土柱入渗性能自动检测装置。该装置主要由传感器位置调节装置、土样盛放装置、供水装置、检测和控制模块、电源模块和上位机显示存储模块组成,采用压力应变式传感器检测入渗过程的累积入渗量,采用介电常数土壤水分传感器检测土壤含水率的变化,进而推断湿润锋的运移位置。基于这2种传感器,实现土柱入渗过程自动检测。采用水头为10 mm,容重为1.15、1.20和1.25 g/cm³的红壤土进行室内土柱入渗试验,检验该装置的性能。结果表明:1)9个试验和18个检测位置,土壤水分传感器进出土柱成功率为100%,表明该装置运行可靠;2)与烘干法相比,土壤水分传感器检测得到土壤含水率的最大相对误差为-4.4%,检测结果比较准确;3)与人工观测湿润锋位置相比,土壤水分传感器推算出的湿润锋位置最大相对误差为-12.9%,说明土壤水分传感器检测湿润锋的运移效果比较明显;4)压力应变式传感器检测累积入渗量与人工实测得到的数据对比,最大相对误差为2.27%。该装置可作为土柱入渗自动检测试验平台。

关键词:入渗;土壤;含水率;土柱;湿润锋;自动检测;装置研制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.012

中图分类号: S152.7⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0091-09

贾维兵, 杨启良, 李加念, 刘小刚, 杨具瑞. 土柱入渗性能自动检测装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 91-99. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.012 http://www.tcsae.org

Jia Weibing, Yang Qiliang, Li Jianian, Liu Xiaogang, Yang Jurui. Design and experiment of automatic detection device for soil column infiltration capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 91-99. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.012 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤入渗过程是田间土壤水分循环的重要组成部分^[1]。土壤入渗研究能为地表、地下水资源的综合评价,农田灌溉技术参数的合理确定提供科学依据^[2]。大量有关土壤入渗性能的研究表明,土壤入渗能力主要受土壤机械组成、容重及入渗水头等的影响^[3-5]。

累积入渗量、湿润锋运移和土壤水分变化量是土壤入渗性能的重要指标。通常,在进行土壤入渗性能试验时,供试土样装在圆柱型有机玻璃筒(箱)内,采用马氏瓶或量筒供水,人工观测马氏瓶或量筒的水位下降高度来计算累积入渗量,人工观测湿润锋的运移距离^[6-15]。试验持续时间长为60~500 min,甚至可达6 h之久,试验过程中需人工读取秒表记录时间,然后观测和记录数据,该过程时间长,工作量大,对试验人员是体力和耐心的极大考验。近年来,管瑶等^[16-18]将可控数码相机和图像识别技术应用于土壤入渗试验研究,提高了试验效率;图像识别技术可以直接获得湿润锋的位置计算湿润体的体积,但不能直接检测得到湿润体土壤的水分动态变化,后期的计算比较复杂。其中管瑶等^[16-18]采用蠕动泵和马氏瓶提供恒定流量,然后基于流速与时间人工计算累积入渗量;刘芳芳等^[19]采用电子秤读取马氏瓶质量的变化获得累积入渗量,这2种方法自动化程度低。吕华芳等^[20]设计了应用于教学试验装置,使用数量较多的土壤水分传感器,导致整个装置成本较高,累积入渗量也是人工观测。

基于此,本研究旨在研制能够实现土柱入渗过程自动检测的低成本装置,并通过试验验证其可靠性,以提高土柱入渗性能的试验效率。大多数电子秤使用压力应变式传感器称质量^[21]。介电常数型土壤水分传感器能够对土壤含水率进行连续测定^[22-24]。本文采用压力应变式传感器来检测入渗过程的累积入渗量,采用介电常数土壤水分传感器来检测土壤含水率的变化,进而推断湿润锋的运移位置。基于这2种传感器,实现土柱入渗过程自动检测。

1 土柱入渗性能自动检测装置总体设计

1.1 总体设计要求

室内土柱入渗性能自动检测装置试验应满足4点要求:1)装置能够自动检测土柱入渗过程中随时间变化的累积入渗量;2)装置能够在入渗过程中连续测量土壤含水率的变化;3)装置能够根据检测得到的数据判断湿润锋的运移位置,进行下一位置的土壤含水率检测;4)装置检测得到的累积入渗量和土壤含水率的数据能够动态显示和存储,方便试验人员查看和后期分析处理。

基于上述要求,提出该装置的原理框图如图1所示,

收稿日期: 2016-08-31 修订日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51379004、51009073); 云南省应用基础研究面上项目(2013FB024); 昆明理工大学学生课外学术科技创新基金课题项目(2015YB060)

作者简介: 贾维兵,男,甘肃天水人,主要从事农业智能化检测与控制技术研究。昆明 昆明理工大学现代农业工程学院, 650500。

Email: jwb1510843575@126.com

*通信作者: 杨启良,男,甘肃通渭人,博士,教授,主要从事高新技术在农业工程中的应用研究。昆明 昆明理工大学现代农业工程学院, 650500。

Email: yangqilianglovena@163.com

由传感器位置调节装置（土壤水分传感器、水平电机、竖直电机与行程开关构成）、土样盛放装置（土柱、步进电机和行程开关构成）、供水装置（马氏瓶和压力应变式传感器构成）、检测和控制模块（A/D 转换、电机驱动器和单片机开发板构成）、按键、数码管显示模块、电源模块和上位机显示存储软件组成。

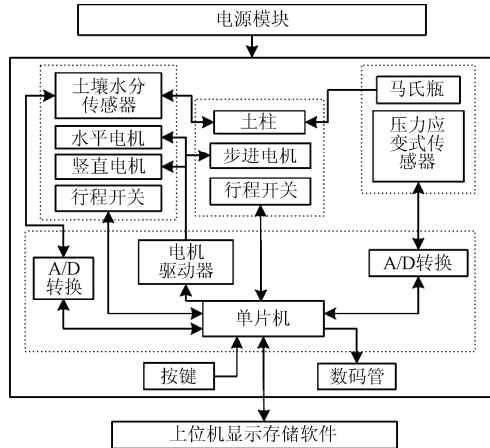


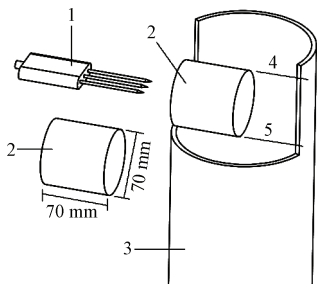
图 1 土柱入渗性能自动检测装置的原理框图

Fig.1 Functional block diagram of automatic detection device for soil column infiltration capacity

1.2 装置检测工作原理

基于 Green-Ampt^[25-26]的 4 个基本假设，土柱在入渗过程中，湿润锋面为水平面，湿润锋后湿润区土壤含水率为饱和含水率，导水率为饱和导水率。

土柱体积含水量采用频域反射（frequency domain reflectometry, FDR）土壤水分传感器检测（大连哲勤科技有限公司，检测精度为 $\pm 3\%$ ），如图 2 所示，测量区域为以中央探针为中心，直径为 70 mm、高为 70 mm 的圆柱体。



1.土壤水分传感器 2.传感器检测范围 3.圆柱筒体 4.传感器检测范围最高处 5.传感器检测范围最低处
1.Soil moisture sensor 2.Sensor detection range 3.Cylinder 4.Highest point in sensor detection range 5.Lowest point in sensor detection range

图 2 土壤水分传感器检测范围示意图

Fig.2 Range diagram of soil moisture sensor detection

根据土壤水分传感器的测量范围和 Green-Ampt 的 4 个基本假设，当土壤水分传感器水平插入土柱中，湿润锋运移到水分传感器所能测量的范围内时，土壤水分传感器能够检测得到体积含水量的动态变化，随着入渗的进行，传感器所能测的范围达到饱和含水量，传感器检测范围的体积含水量保持不变。由此可认为土壤水分传感器检测值开始逐渐增大时为湿润锋到达传感器所在高

度上 35 mm 处的时刻，土壤水分传感器检测值增长到一定值保持不变时，湿润锋运移到传感器所在高度下 35 mm 处。

郭文川等^[27]进行了土壤温度和容重对频域反射仪 FDR 土壤水分传感器测量精度的影响，得出计算含水率与实际含水率的绝对误差为 $-2.638\% \sim 2.812\%$ 。本文设定 FDR 土壤水分传感器检测得到的数值变化率 $\leq 5\%$ 时，湿润锋运移通过土壤水分传感器的测量范围，装置进行下一位置的土壤水分变化检测。

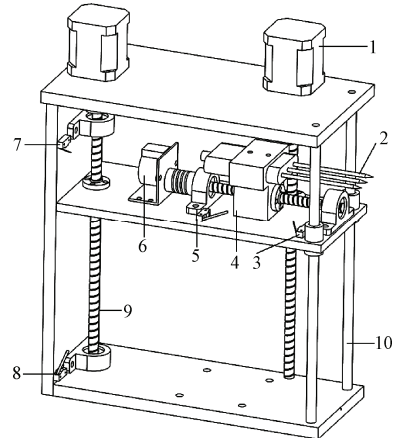
选用 CLZ-A 压力应变式传感器和 HX711 24 位高精度称质量传感器模块，组成电子秤连续测量马氏瓶的质量变化，进而获得累积入渗量。

检测得到的累积入渗量和土壤水分变化量通过数码管显示，并通过串口发送至上位机软件进行显示存储。进行下一位置土壤水分变化检测时，单片机向控制模块发送信号，使土壤水分传感器离开土柱，下降一定高度再次进入土柱进行检测，运动过程中使用行程开关限制运动极限位置。

2 土柱入渗性能自动检测装置硬件设计

2.1 传感器位置调节装置

传感器位置调节装置（图 3）用来调节土壤水分传感器在水平和竖直方向的位置，实现土柱不同高度的土壤体积分水的连续检测。



1.42BYGH47 步进电机 2.土壤水分传感器 3.右行程开关 4.传感器夹持机构 5.左行程开关 6.28BYJ-48 步进电机 7.上行程开关 8.下行程开关 9.螺杆 10.导杆
1.42BYGH47 stepper motor 2.Soil moisture sensor 3.Right limit switch 4.Clamping mechanism for sensor 5.Left limit switch 6.28BYJ-48 stepper motor 7.Upper limit switch 8.Lower limit switch 9.Screw 10.Rod

图 3 传感器位置调节装置结构示意图

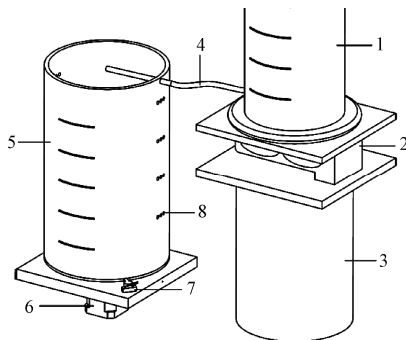
Fig.3 Structure diagram of sensor position adjustment device

如图 3 所示，土壤水分传感器安装在传感器夹持机构上，传感器夹持机构在水平方向和竖直方向均设有丝杆螺母。在水平方向上，根据土壤水分传感器进出土柱的阻力，选用 28BYJ-48 步进电机（相电压 5 V，步距角 5.6° ）驱动螺杆（螺距 2 mm），螺杆与水平方向丝杆螺母配合完成传感器水平进出土柱；在竖直方向上，根据传感器夹持机构在竖直方向运动的受力情况，选用 2 个

42BYGH47 步进电机 (相电压 12 V, 步距角 1.8°) 驱动螺杆 (螺距 2 mm), 螺杆与竖直方向丝杆螺母配合完成水分传感器在竖直方向高度调节。竖直方向设有 2 根光轴作为传感器竖直方向运动导杆。水分传感器两侧分别设有左右行程开关, 分别用来限制传感器进出土柱的极限位置。水分传感器夹持机构上下分别设有行程开关, 分别用来限制传感器在竖直方向运动的极限位置。上述行程开关均选用德力西 LXW5-11N1 行程开关。

2.2 土样盛放装置和供水装置

土样盛放装置用来盛放试验土样, 供水装置向土柱提供一定水头的入渗水。如图 4 所示, 土样盛放装置主要由圆柱筒体和支撑座构成, 圆柱筒体为内径为 140 mm、外径为 150 mm、高为 200 mm 的亚克力筒体, 安装在下部的支撑座上。筒体上设有乳胶管安装孔, 同时径向开有若干与传感器探针相配合的传感器出入孔。



1. 马氏瓶 2. CLZ-A 压力应变式传感器 3. 传感器支座 4. 乳胶管 5. 圆柱筒体 6. 57BYG250B 步进电机 7. 行程开关 8. 传感器出入孔
1. Markov bottle 2. CLZ-A pressure-strain sensor 3. Support of sensor 4. Latex tube 5. Cylinder 6. 57BYG250B stepper motor 7. Limit switch 8. Hole for sensor in and out soil column

图4 土样盛放装置和供水装置结构示意图

Fig.4 Structure diagram of soil laying and water supply device

为了保证检测过程中, 土壤水分传感器探针能够顺利进出土柱, 在土样盛放装置支撑座底部设置 57BYG250B 步进电机 (相电压 24V, 步距角 1.8°), 该电机驱动圆柱筒体在水平面内旋转, 在支撑座上部设置了行程开关, 配合电机使传感器出入孔与传感器探针对齐, 行程开关仍选用德力西 LXW5-11N1 行程开关。

供水装置由马氏瓶、CZL-A 压力应变式传感器、乳胶管和传感器支座组成, CZL-A 压力应变式传感器安装在马氏瓶底部, 乳胶管的另一端安装在筒体上, 向土柱供水。试验过程中调节传感器支座的高度来调节入渗水头。

2.3 检测和控制模块

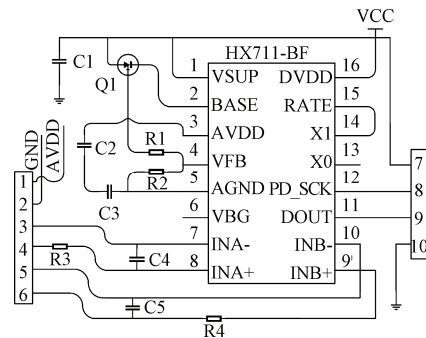
检测和控制模块由检测模块电路、控制模块电路和单片机组成, 检测模块电路是单片机与 FDR 土壤水分传感器和 CLZ-A 压力应变式传感器连接的电路, 以及单片机与数码管显示模块和上位机连接的电路; 控制模块电路是单片机与传感器位置调节装置上水平电机、竖直电机和行程开关, 以及土样盛放装置底部的步进电机和行程开关连接的电路, 也包括单片机与按键之间的电路。

因本装置检测模块电路、控制模块电路与单片机相连需要较多的 I/O 接口, 所以本文选用具有 54 路数字输

入/出口, 16 路模拟输入 Arduino mega 2560 开发板^[28]作为检测和控制核心板, 该开发板工作电压为 5 V 直流电。

2.3.1 检测模块电路

本文选用的 FDR 土壤水分传感器的工作电压为 5 V 直流电, 同时该传感器内部设有抗干扰的 A/D 转换模块, 输出信号为直流电压信号, 所以信号端直接连接在开发板的模拟输入接口上。CLZ-A 压力应变式传感器输出的信号较弱, 单片机接口不能直接识别, 需要经过 A/D 转换和放大, 本文选用 24 位高精度称质量传感器模块^[29] HX711 进行 A/D 转换, HX711 的电路图如图 5 所示。该模块的工作电压为 2.6~5.5 V。



注: VCC 为输入电压; AVDD 为模拟电源; GND 为地面; R1-R4 为电阻; C1-C5 为电容; 1~6 与 CLZ-A 电阻式应变传感器相连; 7~10 与 Arduino Mega 2560 相连; Q1 为三极管。

Note: VCC is input voltage; AVDD is analog voltage; GND is ground; R1-R4 is resistance; C1-C5 is capacitance; 1-6 is connected to CLZ-A sensor; 7-10 is connected to Arduino Mega 2560; Q1 is transistor.

图5 HX711 电路示意图

Fig.5 Schematic drawing of HX711 circuit

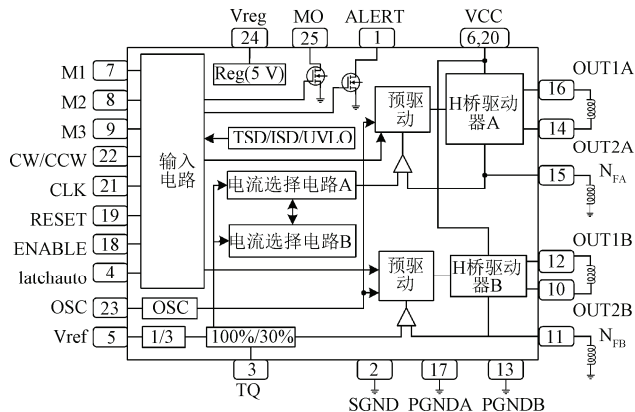
由于 CLZ-A 压力应变式传感器输入 HX711 的电压较小 (约 4 mV), 容易受到电磁对检测结果的干扰, 所以压力应变式传感器与 HX711 之间的电路越短越好。同理, HX711 与单片机之间的线路也不能太长。由于压力应变式传感器安装在马氏瓶底部, Arduino Mega 2560 单片机安装在传感器位置调节装置下部, 两个位置距离较远, 且 Arduino Mega 2560 上连接的电路较多, 所以为了避免电磁对检测结果的影响, 本文选用 Arduino Uno 单片机单独检测压力应变式传感器的值。

土壤水分传感器和压力应变式传感器检测得到的值通过数码管显示模块显示, 并通过串口发送至上位机软件进行显示存储。

2.3.2 控制模块电路

本文传感器位置调节装置水平电机选用 28BYJ-48 步进电机, 该电机的工作电压为 5 V, 由 ULN2003A 电机驱动器^[22]提供脉冲信号驱动, 驱动器的脉冲由 Arduino Mega 2560 单片机数字输入/输出接口提供。传感器位置调节装置竖直电机选用 42BYGH47 步进电机, 该电机工作电压为 12 V, 相电流为 1.5 A, 土样盛放装置底部的电机选用力矩较大的 57BYG250B 步进电机, 工作电压为 24 V, 相电流为 3.0 A。TB6600 电机驱动器 (最高工作电压 50 V) 上设有 M1、M2 和 M3 共 3 个细分来调整输出脉冲的电压和电流大小, 电路板接口如图 6 所示。虽然上述 2 种电机工作电压和相电流不同, 但通过调整驱

动器上的细分就可以满足,这2种电机均由TB6600驱动器控制,其控制信号由Arduino Mega 2560单片机数字输入/输出接口提供。



注: M1~M3 为细分选择端; OUT1A 和 OUT2A 为 A 相功率桥输出端 1 和 2; OUT1B 和 OUT2B 为 B 相功率桥输出端 1 和 2; RESET 为上电复位端; VCC 为电机驱动电源; CLK 为脉冲输入端; CW/CCW 为电机正反转控制端。Note: M1-M3 is subdivision selection terminal; OUT1A and OUT2A are A-phase power bridge outputs 1 and 2; OUT1B and OUT2B are B-phase power bridge outputs 1 and 2; RESET is power-on reset terminal; VCC is motor drive power; CLK is pulse input; CW/CCW is positive and negative motor control side.

图 6 TB6600 驱动板接口示意图

Fig.6 Diagram of TB6600 board interface

该装置共有 5 个同型号的行程开关,工作电压为 5 V,故行程开关电源由 Arduino Mega 2560 开发板提供,开关开闭信号直接输入到数字输入/输出接口。

2.4 装置供电分配

本装置 Arduino Mega 2560 开发板、Arduino Uno 开发板、FDR 土壤水分传感器、CLZ-A 压力应变式传感器、LXW5-11N1 行程开关、28BYJ-48 步进电机、ULN2003A 电机驱动器的工作电压均为 5 V 直流电,且 Arduino Mega 2560 开发板上有若干 5 V 电源接口,所以将 220 V 的交流电通过变压器转换为 5 V 的直流电,提供给 Arduino Mega 2560 开发板,可以保证上述部件的正常运行。42BYGH47 步进电机的工作电压为 12 V,57BYG250B 步进电机的工作电压为 24 V,所以分别选用 220 V 交流转 12 V 直流变压器和 220 V 交流转 24 V 直流变压器保证这 2 种电机的正常运行。装置的供电分配图如图 7 所示。

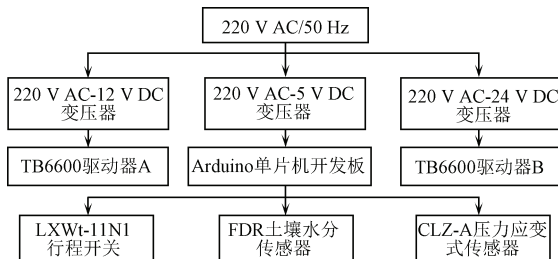


图 7 装置供电分配图

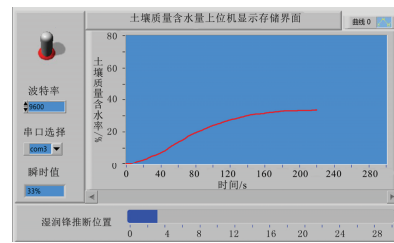
Fig.7 Diagram of device power supply distribution

3 土柱入渗性能自动检测装置软件设计

3.1 上位机软件设计

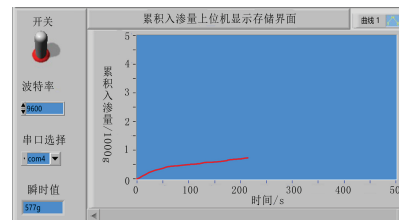
本文利用 LabVIEW 软件开发了上位机数据实时显示存储界面,该界面如图 8 所示,界面的主要功能有:实时显示和存储入渗时间、串口接收到的累积入渗量和土

壤含水率的数值,并通过接收到的土壤含水率变化,推算湿润锋运移至土壤水分传感器检测范围最低和最高处的时刻,试验结束后,可用这 2 个时间计算土柱入渗的入渗率。



a. 土壤含水率上位机显示存储界面

a. Display and storage interface of upper computer for soil moisture



b. 累积入渗量上位机显示存储界面

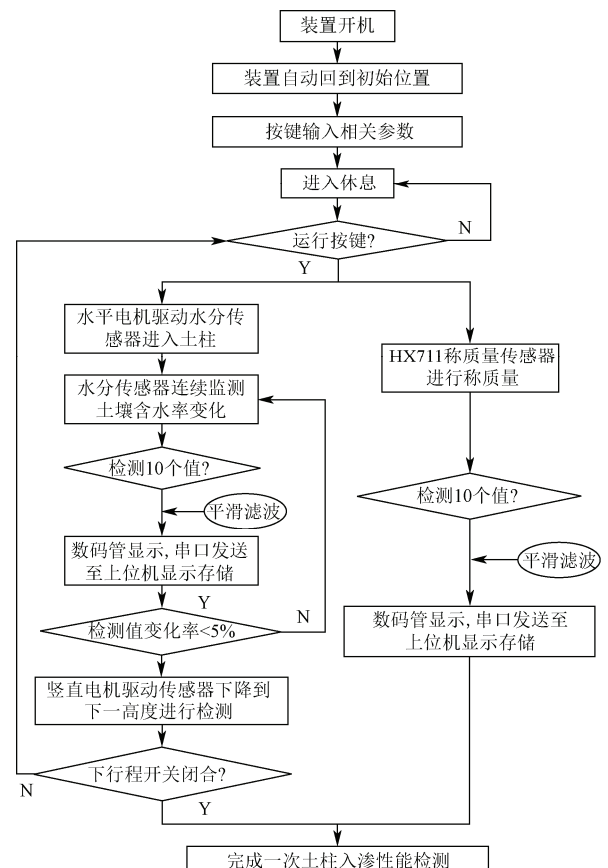
b. Display and storage interface of upper computer for cumulative infiltration

图 8 上位机主界面

Fig.8 Main interface of upper computer

3.2 底层软件设计

系统控制程序在 Arduino 1.0.5 软件中用 C 语言开发,编译后下载到 Arduino Uno 和 Arduino Mega 2560 单片机自带的 flash 中,程序流程如图 9 所示。



本程序还编写了开关机和调节相邻传感器出入孔间距的程序, 通过按键控制装置运行与否, 也可以通过按键来调节相邻 2 个传感器检测位置的间距, 提高装置的适用性。

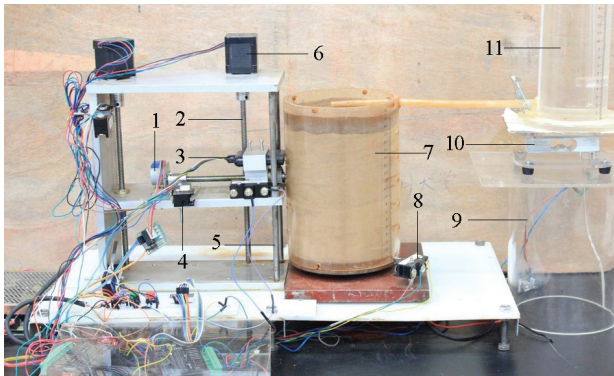
4 土柱入渗性能自动检测装置性能测试

4.1 供试材料

试验土样选用耕作过的昆明呈贡宝珠梨生产基地表层 (0~200 mm 深) 土壤, 其质地为粉壤土, 有机质质量分数为 0.68%~1.15%, 共取 30 kg 土样, 经风干、粉碎、过筛 (孔径 1 mm)、混匀, 备用。采用烘干法在 105 °C 下烘 12 h, 测定土样的平均初始含水率为 3.4%。

4.2 试验装置

分别以容重为 1.15、1.20 和 1.25 g/cm³ 分层 (10 mm) 装填圆柱筒体土柱, 装土过程中用镇压装置进行镇压和平整, 保证装入土样容重均匀一致。为了减小试验误差, 每个容重水平重复 3 次。调节马氏瓶的高度, 使马氏瓶供水头高度相对于土柱表层的高度为 10 mm, 马氏瓶通过乳胶管向土柱提供恒压入渗水。试验开始前, 用止水夹夹持乳胶管。试验装置如图 10 所示。



1.28BYJ-48 步进电机 2.螺杆 3.土壤水分传感器 4.左行程开关 5.导杆
6.42BYGH47 步进电机 7.土柱 8.行程开关 9.传感器支座 10.CLZ-A 压力应变式传感器 11.马氏瓶
1.28BYJ-48 stepper motor 2.Screw 3.Soil moisture sensor 4.Left limit switch 5.Rod 6.42BYGH47 stepper motor 7.Soil column 8.Limit switch 9.Support of sensor 10.CLZ-A pressure-strain sensor 11.Markov bottle

图 10 试验装置图

Fig.10 Photo of detection device

土柱高度为 190 mm, 土壤水分传感器检测的范围为圆柱体 (高和底的直径均为 70 mm), 每个入渗试验, 检测区域不重复, 土壤水分传感器可以检测 2 个位置 (本文设定为距土柱表面 35 mm 的位置 1、距土柱表面 120 mm 的位置 2)。

4.3 试验方法

装置的性能通过以下 4 个方面进行测试和验证: 1) 装置的运行性能测试, 通过人工观测入渗过程中 FDR 土壤水分传感器和盛土圆柱筒体能否回到初始位置, 同时观测土壤水分传感器能否顺利进出土柱的 2 个检测位置来验证; 2) 土壤水分检测准确性试验; 3) 验证检测出湿润锋位置准确性; 4) 累积入渗量检测准确性试验。

4.3.1 装置运行试验

土壤水分传感器和盛土圆柱筒体回到初始位置的成功率

$$F_c = P/Q \times 100\% \quad (1)$$

式中 F_c 为 FDR 土壤水分传感器和盛土圆柱筒体回到初始位置的成功率, %; P 为 FDR 土壤水分传感器和盛土圆柱筒体回到初始位置的成功次数; Q 为土柱入渗试验的总次数。

土壤水分传感器进出土柱的成功率

$$F_h = N/M \times 100\% \quad (2)$$

式中 F_h 为土壤水分传感器进出土柱的成功率, %; N 为土壤水分传感器进出土柱的成功次数; M 为土壤水分传感器进出土柱的总次数。

4.3.2 土壤水分检测准确性试验

根据 Green-Ampt 4 个基本假设, 土柱入渗过程中, 湿润锋运移通过土壤水分传感器的检测范围时, 认为此范围的土壤水分达到饱和, 土壤水分传感器开始下一位置检测。通过数码管或上位机软件查看该时刻传感器检测值, 同时在传感器所在高度, 人工采集土样, 采用烘干法进行测定其含水率, 将土壤水分传感器检测得到的体积含水量转换为含水率后进行对比分析, 获得土壤水分含量检测的准确度。

4.3.3 湿润锋位置准确性检测

由装置原理部分可知, 试验过程中, 湿润锋自上向下运移, 依次经过检测位置 1 和位置 2。土壤水分传感器检测范围的最高处和最低处的高度分别记为 H_0 和 H_1 。试验过程中, 湿润锋运移经过这 2 个位置, 土壤水分传感器检测得到的值开始增加和保持不变 (变化率 $\leq 5\%$), 所以根据土壤水分检测结果推断湿润锋运移至位置 H_0 和 H_1 的时刻, 人工观测湿润锋运移的真实位置, 并将这个位置与高度 H_0 和 H_1 与进行比较分析, 验证装置检测出湿润锋位置的准确性。

4.3.4 累积入渗量检测准确性试验

常规的入渗试验累积入渗量的检测没有标准的方法, 试验进行过程中, 打开供水开关, 人工观测马氏瓶水位的变化, 记录时间来计算累积入渗量, 与装置检测得到的值进行对比, 得出装置累积入渗量检测的准确度。供水开始时, 土柱表面与供水乳胶管中心的高度差为 10 mm, 马氏瓶中的入渗水流入土柱表面速率较快, 随着土柱表面的入渗水头逐渐增大到 10 mm 时, 马氏瓶中的入渗水流速降低, 入渗过程开始的 1 min 内, 每 5 s 观测马氏瓶水位, 1 min 后每 10 s 观测马氏瓶水位。

4.4 传感器标定

试验前先对 FDR 水分传感器和 CLZ-A 压力应变式传感器进行标定, 并将标定后的修订值输入到装置检测程序中。

根据《JJG 1036-2008 电子天平检定规程》的检定要求^[30], 对 CLZ-A 压力应变式传感器进行标定, 并对传感器的重复性和示值误差进行试验测试, 得到最大绝对误差为 1.3 g, 满足试验的精度要求。

对 FDR 传感器进行标定时, 不考虑温度和容重对土

壤水分传感器测量精度的影响,将水和试验土样配置成土壤含水率为 5%、10%、20%、30%、40%、50%和 60% 的样品,均匀搅拌后静置 12 h 以上,将 FDR 土壤水分传感器插入样品中进行测量,每个样品重复测量 5 次,然后取平均值,采用数值分析中的拉格朗日插值算法计算得到关系式

$$Y=-4.273+68.6529x-91.6892x^2+101.6954x^3-29.2691x^4+3.6529x^5$$

(2)

式中 Y 为土壤含水率,%; x 为传感器检测输出的电压, V。

参考滑动均值滤波法^[21]分别对 2 种传感器检测得到的值进行平滑滤波,分别在检测程序中输入传感器标定和平滑滤波相关公式校正检测值。

4.5 结果与分析

4.5.1 装置运行结果

装置运行结果如表 1 所示。3 个容重水平,3 个重复试验共 9 个试验过程中,FDR 土壤水分传感器和盛土圆柱筒体回到初始位置的成功率 F_c 为 100%。9 个试验共 18 个检测位置中,土壤水分传感器进出土柱的成功率为 100%,说明该装置运行可靠,能作为土柱入渗性能自动检测装置。

表 1 土柱入渗性能自动检测装置运行成功率

容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	土壤水分传感器回到 初始位置测试			盛土圆柱筒体回到 初始位置测试		
	Test if soil moisture sensor returns to initial location			Test if cylinder returns to initial location		
	运行次数	成功次数	成功率	运行次数	成功次数	成功率
	Running count	Success count	Success rate/%	Running count	Success count	Success rate/%
1.15	3	3	100	3	3	100
1.20	3	3	100	3	3	100
1.25	3	3	100	3	3	100

表 2 土壤水分传感器及土柱入渗性能自动检测装置湿润锋测量精度

Table 2 Accuracy of soil moisture sensor and wetting position measurements by automatic device for soil column infiltration capacity											
容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	传感器埋深 Sensor depth/mm	含水率 Soil moisture			距检测范围最高处距离 Distance to highest point of detection area			距检测范围最低处距离 Distance to lowest point of detection area			相对误差 Relative error/%
		烘干法 Oven-drying method/%	传感器法 Sensor method/%	相对误差 Relative error/%	人工观测 Artificial observation/mm	自动检测 Automatic detection/mm	相对误差 Relative error/%	人工观测 Artificial observation/mm	自动检测 Automatic detection/mm	相对误差 Relative error/%	
1.15	35	37.6	38.2	1.6	3	0	-4.2	75	70	-7.1	
	120	34.3	33.1	-3.4	94	85	-12.8	163	155	-11.4	
1.20	35	38.4	36.7	-4.4	7	0	-10.0	79	70	-12.9	
	120	35.7	34.3	-3.9	93	85	-11.4	160	155	-7.1	
1.25	35	38.4	37.8	-1.5	4	0	-5.7	78	70	-11.4	
	120	33.8	32.4	-4.1	90	85	-7.1	164	155	-12.8	

4.5.4 累积入渗量检测准确性试验结果

压力应变式传感器检测得到的累积入渗量如图 11 a 所示。由图 11 可知,3 个容重水平,3 个重复入渗试验中,在 0~120 s 时间段内,3 个容重水平的累积入渗量的增长速率基本相等,在 120 s 以后,累积入渗量的增长速率随着容重增大而降低。如图 11 b 所示,将检测得到的

4.5.2 土壤水分传感器检测结果准确性

土壤水分传感器检测值转换为质量含水率后与烘干法测得的含水率比较见表 2,由表可知,相对误差最大为 -4.4%,最小为 -1.5%,满足上述设定的土壤水分传感器检测值变化率≤5%的设定条件。从表中可以看出,除了容重为 1.15 g/cm³ 的试验,其余试验传感器检测得到的值均小于采用烘干法测得值,这可能是由于土壤水分传感器插入土柱过程中,由于盛土圆柱筒体有一定的厚度,导致传感器探针没有完全插入到土壤中,导致传感器检测得到的数值小于标准值。

4.5.3 湿润锋位置准确性测试结果

试验 18 个检测位置中,装置推算出的湿润锋运移至传感器检测范围最高处 H0 和最低处 H1 时距离土柱表面的距离,与同一时刻人工观测湿润锋运移位置距离土柱表面距离的比较如表 2 所示,表中以传感器的检测范围直径 70 mm 作为人工观测的湿润锋与装置自动检测湿润锋距离土柱表面距离的相对误差的基准,分别计算了检测位置 1 和 2 处 3 次重复试验相对误差的平均值,表中相对误差的正负分别表示人工观测位置位于装置自动检测位置的上方和下方。由表 2 可知,装置检测得到的湿润锋位置与人工实测的位置之间的高度相对误差最大为 -12.9%,最小为 -4.2%,即 2 种测定方法测定的最大的高度差为 9 mm,最小为 3 mm,说明该土壤水分传感器能够很好地根据水分含量的变化来推断湿润锋的运移位置。同时由表可知,人工观测得到的湿润锋位置均位于装置自动检测得到的位置下方,这主要是由于设定土壤传感器检测值变化率≤5%为达到饱和含水率的时刻,造成传感器判断湿润锋位置有一定的滞后性。

累积入渗量与人工方法观测到的数值进行逐一对比,得到 3 个容重水平容重从小到大的最大相对误差分别为 2.05%、2.27%和 1.76%,3 个容重水平(容重从小到大)的均方根误差分别为 0.62、0.65 和 0.59 g,最大为 0.65 g。与人工方法相比,自动检测省去了记录时间和计算累积入渗量的过程,提高了试验效率。

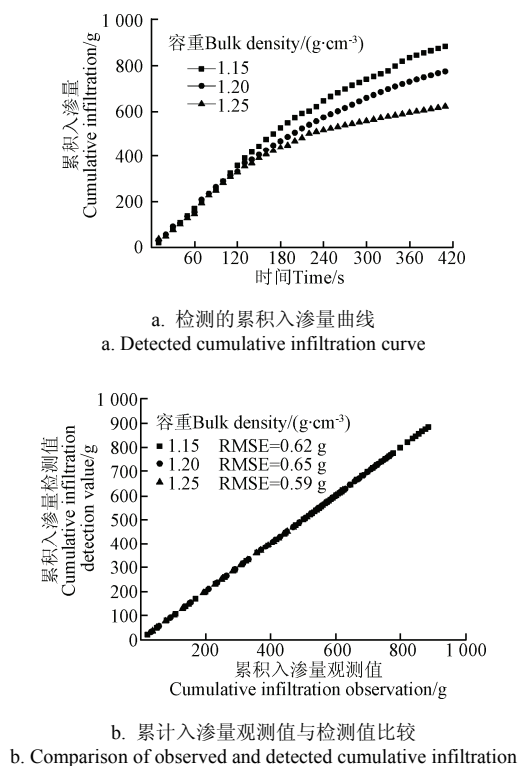


图 11 累积入渗量测定结果

Fig.11 Results of cumulative infiltration measurements

5 结 论

本文以 Atmega2560 单片机为核心器件, 基于 FDR 土壤水分传感器和 CLZ-A 压力应变式传感器, 研制了土柱入渗性能自动检测装置。该装置能够检测土柱入渗过程中土壤含水率的动态变化和累积入渗量, 并根据土壤含水率变化推断湿润锋的运移位置, 检测得到的数据能够通过上位机软件实时显示和存储。

运行试验结果表明, 3 个容重水平, 3 个重复试验中, 共 18 个检测位置, 该装置运行稳定, 土壤水分传感器进出土柱的成功率为 100%, 土壤水分传感器检测土壤含水率与标准值的最大相对误差为 -4.4%, 压力应变式传感器检测累积入渗量与实测值的最大相对误差为 2.27%, 最大均方根误差为 0.65 g, 装置推算湿润锋位置与实测位置的最大相对误差为 -12.8%, 装置检测精度较高, 可用作土柱入渗试验的平台。

该装置提高了试验的效率, 降低了试验人员的劳动强度, 对于不同类型土壤的效果和不同指标还有待继续研究和开发, 以满足不同的试验要求。

[参 考 文 献]

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [2] 岑睿, 屈忠义, 于健, 等. 保水剂对半干旱区砂壤土水分运动的影响试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 122—127.
Cen Rui, Qu Zhongyi, Yu Jian, et al. Experimental research on sandy soil infiltration and evaporation effects of adding super absorbent polymers in semi-arid region[J]. Journal of

- Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 122—127. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 214—221.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer functions[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 214—221. (in Chinese with English abstract)
- [4] Mao L L, Bralts V F, Pan Y H, et al. Methods for measuring soil infiltration: State of the art[J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2008, 1(1): 22—30.
- [5] Hillel D. Environment Soil Physical[M]. New York: Academic Press, 1998.
- [6] 吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 183—188.
Ji Hengying, Shao Ming'an, Jia Xiaoxu. Effects of water quality on infiltration of layered soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 183—188. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40—45.
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [8] 雪静, 王全九, 毕远杰. 微咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 14—19.
Xue Jing, Wang Quanjiu, Bi Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [9] Mao Lili, Li Yuzhong, Hao Weiping, et al. An approximate point source method for soil infiltration process measurement[J]. Geoderma, 2016, 264: 10—16.
- [10] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特性特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24—30.
Zeng Chen, Wang Quanjiu, Fan Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 24—30. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李雪转, 樊贵盛. 非充分供水与充分供水入渗模拟参数间关系试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 44—49.
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Experiment on relations of infiltration model parameter in non-sufficient and sufficient water supplies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 方圆, 冯浩, 操信春, 等. 活性炭对土壤入渗、蒸发特性及养分淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 23—26.
Fang Yuan, Feng Hao, Cao Xinchun, et al. Influence of active

- carbon on soil infiltration and evaporation characteristics and nutrient leaching loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 23–26. (in Chinese with English abstract)
- [13] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2281–2288.
- Qi Ruipeng, Zhang Lei, Yan Yonghao, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2281–2288. (in Chinese with English abstract)
- [14] Chen Xi, Pan Yinghua, He Chunhong, et al. Effect of salt solution on characteristics of soil infiltration[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 32(8): 357–360.
- [15] 陈心想, 和绪生, 张雯, 等. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 110–139.
- Chen Xinxiang, He Xusheng, Zhang Wen, et al. Effects of quantity of biochar on nitrogen leaching in simulated soil columns and soil moisture parameters in field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 110–139. (in Chinese with English abstract)
- [16] 管瑶, 雷延武, 刘芳芳, 等. 土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 1–7.
- Guan Yao, Lei Tingwu, Liu Fangfang, et al. Measurement of wetting process of soil under dripper with automatic system for point source infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(14): 1–7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙蓓, 毛丽丽, 赵军, 等. 应用自动测量系统研究流量对土壤入渗性能测定的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 14–18.
- Sun Bei, Mao Lili, Zhao Jun, et al. Effects of flow rate on soil infiltrability measurement with the automatic system[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(2): 14–18. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张雅楠, 黄兴法, 毛丽丽, 等. 土壤入渗性能自动测量系统原理与应用研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 99–104.
- Zhang Yanan, Huang Xingfa, Mao Lili, et al. Principle of the automatic system for measuring soil infiltrability and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(4): 99–104. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘芳芳, 王伟, 雷延武, 等. 点源入流测量条件下水质对盐碱土入渗性能的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(2): 179–184.
- Liu Fangfang, Wang Wei, Lei Tingwu, et al. A point source method for determining the effect of water quality on soil infiltration capability[J]. *Journal of China Agriculture University*, 2015, 20(2): 179–184. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕华芳, 丛振涛. 土壤入渗测定教学实验装置设计[J]. *实验技术与管理*, 2012, 29(9): 75–78.
- Lü Huafang, Cong Zhentao. Teaching experiment device of soil infiltration[J]. *Experimental Technology and Management*, 2012, 29(9): 75–78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 韦康康, 趣力扬, 秦会斌. 电子天平的研究与设计[J]. *机电工程*, 2011, 28(3): 317–319.
- Wei Kangkang, Qu Liyang, Qin Huibin. Research and design of electronic balance[J]. *Mechanical & Electrical Engineer Magazine*, 2011, 28(3): 317–319. (in Chinese with English abstract)
- [22] 康学远, 林琳, 刘义佳, 等. 土壤介电常数-含水量关系模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(8): 8–12.
- Kang Xueyuan, Lin Lin, Liu Yijia, et al. Soil moisture content detection with ground-penetrating-radar and its calibration models of soil moisture content vs. dielectric constant and its measurement accuracy[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(8): 8–12. (in Chinese with English abstract)
- [23] Wu Shengli. Simulation of A Combined Passive/active Microwave Remote Sensing Approach for Soil moisture Retrieval[C]// *Proceedings of International Symposium on Future Intelligent Earth Observing Satellites (FIEOS'06)*. China: Beijing, 2006.
- [24] Sonia I Seneviratne, Thierry Corti, Edouard L Davin, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3): 125–161.
- [25] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 129–132.
- [26] 马英, 冯绍元, 刘晓东, 等. 夹考虑禁锢空气影响的层状土壤 Green-Ampt 入渗模型及试验验证[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1034–1043.
- Ma Ying, Feng Shaoyuan, Liu Xiaodong, et al. A modified Green-Ampt model for water infiltration in layered soils with air entrapment and its experimental validation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1034–1043. (in Chinese with English abstract)
- [27] 郭文川, 张鹏, 宋克鑫, 等. 壤土介电特性与水分检测频率及温度影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(8): 713–718.
- Guo Wenchuan, Zhang Peng, Song Kexin, et al. Dielectric properties of loess soil and moisture content detection affected by frequency and temperature[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(8): 713–718. (in Chinese with English abstract)
- [28] 修金鹏. Arduino 与 LabVIEW 互动设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [29] 樊毅, 秦会斌. 基于 STM32 的高精度电子天平[J]. *机电工程*, 2013, 30(1): 51–54.
- Fan Yi, Qin Huibin. High precision electronic balance based on STM32[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(1): 51–54. (in Chinese with English abstract)
- [30] 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家计量检定规程: JJG 1036-2008[S/OL]. (2008-02-20) [2016-01-10]. <https://wenku.baidu.com/view/1bf38f2102de2bd960588e9.html>

Design and experiment of automatic detection device for soil column infiltration capacity

Jia Weibing, Yang Qiliang^{*}, Li Jianian, Liu Xiaogang, Yang Jurui

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In this research, a new automatic device was designed for the indoor soil column infiltration detection, which was mainly composed of a sensor position adjusting device, a soil sample laying device, a water supply device, a frequency domain reflectometry (FDR) soil moisture sensor, a CLZ-A pressure-strain type sensor, an Arduino mega 2560 development board, an Arduino UNO development board, a TB6600 byte rotor driver and upper desk software. The sensor position adjusting device was composed of the FDR soil moisture sensor, a 28BYJ-48 byte rotor, two 42BYGH47 byte rotors and four limit switches. The FDR soil moisture sensor was driven by 28BYJ-48 byte rotor in the horizontal direction. The FDR soil moisture sensor was driven by 42BYGH47 byte rotor in the vertical direction. Two limit switches were fixed on both sides of the FDR soil moisture sensor in the horizontal direction. The other limit switch was fixed on both sides of the FDR soil moisture sensor in the vertical direction. The soil sample laying device was a cylinder with holes made of acrylic materials. The probe of FDR soil water moisture sensor could go in or out of the holes. The cylinder was driven by a 57BYG250B byte rotor until the soil moisture sensor probe could go in or go out from the holes in the cylinder. The water supply device was composed of a Markov bottle, a CLZ-A pressure-strain type sensors and a support board. The CLZ-A pressure-strain type sensor was placed in the bottom of Markov bottle. The signal of the CLZ-A pressure-strain type sensor was transformed into digital signal by HX711 24 bit A/D transfer, and then the digital signal was inputted into Arduino UNO interface. FDR soil moisture sensors could give digital signal, which was inputted into Arduino mega 2560 interface. The 28BYJ-48 byte rotor was controlled by the ULN2003 byte rotor driver, and the 42BYGH 47 byte rotor and 57BYG250B byte rotor were controlled by the TB6600 byte rotor driver. Both ULN2003 byte rotor driver and TB6600 byte rotor driver received control signal that came from Arduino mega 2560 single-chip. The area of FDR soil water moisture sensor was on the surface of a cylinder. When the FDR soil moisture was driven into the soil column in the horizontal direction, there was a one-to-one correspondence between response of FDR soil moisture sensor and water content of the soil column. For this reason, with the infiltration continued, the wetting front moved downward and the detection device obtained the change of soil moisture. According to the 4 basic assumptions of Green-Ampt, when the wetting front had arrived the highest position of area that soil moisture sensor detected, the value of sensor would become bigger until the wetting front had reached the lowest position. When the value change was less than or equaled to 5%, the sensor position adjusting device would adjust the FDR soil moisture sensor position and the next position would be detected. Main interface of upper desk had been designed using the LabVIEW software. To evaluate the device's measuring accuracy, the FDR soil moisture sensor had detected a series of soil samples with different bulk densities (1.15, 1.20, and 1.25 g/cm³). Each soil sample was tested 3 times and the infiltration water head was 10 mm. The response of FDR soil moisture sensor was measured by the device. The results showed that the sensor position adjusting device and soil sample container all could return to the initial position successfully. The success rate of the sensor returning to the initial position and in or out of the soil column was 100%, indicating the reliability of the device for automatic detection. Compared with the soil moisture determined by the oven-drying method, the sensor measurement results had the maximum relative error of -4.4%, suggesting the reliability of soil moisture detection by the sensor. Compared with the wetting front obtained by the labor method, the maximum and the minimum relative distance measurement error of the wetting front position were -12.9% and -4.2%. The maximum relative error for the artificially measured and automatically detected cumulative infiltration was only 2.27% and the maximum root mean square error was 0.65 g. Those results demonstrated that the device developed could be used as the reliable soil column infiltration automatic test platform.

Keywords: infiltration; soils; water content; soil column; wetting front; automatic detection; device design