

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.038

基于 Pyboard 的土壤水通量测量系统研究

许景辉^{1,2} 王一琛¹ 邵明焯¹ 林磊²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对目前没有成熟的土壤水通量测量设备的问题,通过技术分析,使用 Pyboard 控制单元、MicroPython 编程语言和 ADS1256 模数转换芯片,设计了一款土壤水通量传感器。使用 Python 软件,利用 Math 库中的 Matplotlib 函数设计了上位机软件,通过传感器功能测试,可实现土壤热扩散系数、容积热容量、热导率以及土壤水通量的测量。选用石英砂、壤质砂土、砂质壤土和砂质黏壤土 4 种土样进行试验,根据最大无量纲温度差 (MDTD) 法和比率 (T_d/T_u) 法得出计算值,并与实际水通量进行对比。结果表明,该系统测量精度高、运行稳定。两种方法的计算结果与实际值之间线性度良好,4 种土样的 MDTD 法决定系数分别为 0.967 7、0.979 8、0.978 0、0.964 7, T_d/T_u 法的决定系数分别为 0.984 5、0.998 5、0.998 9、0.998 6,说明系统具有较高的测量精度。通过适应性评价得出,4 种土样中 T_d/T_u 法计算值与实际值之间的相关性更好,误差更低,计算效果优于 MDTD 法。

关键词: 土壤水通量; 最大无量纲温度差; 传感器; 比率法; Pyboard

中图分类号: TP274⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2020)10-0338-07

OSID:



Investigation on Soil Water Flux Measurement System Based on Pyboard

XU Jinghui^{1,2} WANG Yichen¹ SHAO Mingye¹ LIN Lei²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil water flux measurement is very important in agriculture, but there is currently no mature measurement equipment. Through technical analysis, a soil water flux sensor was designed using Pyboard control unit, MicroPython programming language and ADS1256 analog-to-digital conversion chip. By using Python software and Matplotlib functions in the Math library, the host computer software was designed. Through sensor function tests, soil thermal diffusion coefficient, volumetric heat capacity, thermal conductivity, and soil water flow measurement can be achieved. Four kinds of soil samples were selected for testing, and the calculated values were obtained according to the maximum dimensionless temperature difference (MDTD) method and the ratio (T_d/T_u) method, which were compared with the actual water flow. The test results showed that the system had high measurement accuracy and stable operation. In the application of the method, the linearity between the calculation results of the two algorithms and the actual values was good. The determination coefficient R^2 of the MDTD method of the four soils were 0.967 7, 0.979 8, 0.978 0 and 0.964 7, and the determination coefficient R^2 of the T_d/T_u method were 0.984 5, 0.998 5, 0.998 9 and 0.998 6, indicating that the system had good measurement accuracy. Through adaptability evaluation, the correlation between the calculated values of T_d/T_u and actual values in the four soils was better, the error was lower, and the calculation results were better than the MDTD method, which provided guidance for the selection of system algorithms.

Key words: soil water flux; maximum dimensionless temperature difference; sensor; ratio method; Pyboard

收稿日期: 2020-02-23 修回日期: 2020-03-16

基金项目: 陕西水利科技计划项目(2014slkj-18)和国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)

作者简介: 许景辉(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业电气化与农业智能化检测研究,E-mail: x36936@163.com

0 引言

土壤水通量是研究灌溉与排水、土壤径流、土壤渗漏、土壤化学物质迁移过程及土壤理化性质的一项重要参数,土壤水通量测量在农业和土壤物理学中具有重要意义。研究者在水通量应用方面开展了大量研究:王幼奇等^[1]研究了不同生物炭施加比例下土壤水通量特征参数的变化;伍超等^[2]研究了负压水肥一体化灌溉下的红壤水分入渗特性;李成^[3]通过多种指标的变化特征,综合评价了不同水肥条件下土壤水肥盐运移规律;唐敏^[4]针对黄土丘陵区 4 种典型坡地建立了一维垂向土壤水热耦合运移数值模型,并研究了温度梯度和根系吸水对红枣林土壤水热耦合运移的影响;柴红阳^[5]、商艳玲^[6]对再生水灌溉条件下土壤水、盐运移规律及斥水性进行研究,对再生水的大面积灌溉有一定指导意义。

目前,主要采用垂直土柱和马氏瓶进行土壤水通量测量^[7-10],测量数据完全由人工记录。NOBORIO 等^[11]将热脉冲与 TDR (Time domain reflectometry) 技术结合,可测量土壤含水量和土壤热特性,从而推导出土壤水通量,但由于热敏感元件使用热电偶,其测量精度有待提高^[11-12]。REN 等^[13]在文献[11]研究的探针基础上,设计了一款 T-TDR (Thermo-Time domain reflectometry) 传感器,该传感器由 3 根不锈钢探针组成,通过中间加热丝加热产生热脉冲,并采集上、下游两根探针的温度,以此计算出土壤水通量。利用改进的 T-TDR 传感器,REN 等^[14]根据上、下游探针温度变化情况和土壤热特性间接计算水流通量,并得出土壤水通量一维热运移方程的解析解,由此推导出计算土壤水通量的最大无量纲温度差 (Maximum dimensionless temperature difference, MDTD) 法。WANG 等^[15]研究发现,当时间趋于无穷长时,土壤水通量与热源上、下游温度变化比率的数值成正比关系,并由此推导出计算土壤水通量的温度比率法;KLUITENBERG 等^[16]考虑到 T_d/T_u 对时间的依赖性,将文献[15]的比率法进行改进,得到形式上更为简单、计算精度更高的模型。

T-TDR 系统在实际应用时产生系统性误差,K 型热电偶本身测量精度较低,其允许误差范围为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$,埋入地下较深时需要较长补偿导线与数据采集器相连,这样不仅增加了成本,也降低了测量精度^[17-18]。目前 T-TDR 系统需要设备较多,其价格昂贵,数据采集器操作复杂,同时需要人工处理原始数据,给土壤水通量研究带来了困难。

本文使用负温度系数 (NTC) 热敏电阻,通过热

脉冲采集优化电路和 24 位高精度 A/D 转换芯片 (ADS1256 型) 实现高精度热脉冲信号采集,利用 Pyboard 最小系统作为主控单元,设计一款饱和土壤水通量传感器,通过 Python 语言和 PyQt5、Numpy、Math 库,对最大无量纲温度差 (MDTD) 法和比率法进行 GUI 上位机编程,以实现数据的自动采集和计算,提高水通量测量效率,降低系统成本。

1 传感器设计原理

热脉冲技术是一种利用热作为示踪源来测定水通量的方法。具体过程为:在某一时刻由线状热源发出一个短时热脉冲,由于水通量对热量传输的影响,造成热源周围温度场分布变化,测量热源周围温度场的变化,便可计算出土壤水通量。

由热传导定律可知,在无限大均匀多孔介质中,线性热源发出的热脉冲呈放射状向周围传导,故对于线性热源周围的土壤来说,其极坐标下的热传导方程可表达为^[19-20]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中 T ——温度, $^\circ\text{C}$ t ——时间, s

α ——热扩散系数, m^2/s

r ——测量点与线性热源的垂直距离, m

考虑到实际情况下热源无法实现瞬时热脉冲,故在热脉冲持续时间为 t_0 时,温度变化量为^[20-21]

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\alpha} \left(E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)} \right) - E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right) \right) \quad (2)$$

($t > t_0$)

其中 $Q = q/C$ (3)

式中 ΔT ——温度变化值, $^\circ\text{C}$

$E_i(\cdot)$ ——指数积分函数

Q ——热源强度, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{s}$

q ——单位时间内单位长度加热丝释放的热量, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{s})$

C ——容积热容量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

对式(2)求关于 t 的偏微分,使结果等于 0,并代入测量所得温度升到最高所对应的时间 t_m ,可以得到 α 的表达式^[21-22],即

$$\alpha = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_m - t_0} - \frac{1}{t_m} \right) \frac{t_m}{\ln \frac{t_m}{t_m - t_0}} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2),得到 C 的表达式为

$$C = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left(E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m - t_0)} \right) - E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right) \quad (5)$$

热导率 λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、容积热容量 C 和热扩散系数 α 三者之间的关系为

$$\lambda = \alpha C \quad (6)$$

目前基于热脉冲技术计算土壤水通量的模型主要有^[23]：最大无量纲温度差法 (MDTD)^[14] 和上下游温度上升比率法 (T_d/T_u)^[15-16]。

REN 等^[14] 提出无量纲温度差 (Dimensionless temperature difference, DTD) 与水通量 J 之间的关系, 并且给出了 DTD 的表达式为

$$DTD = \frac{4\pi\lambda(T_d - T_u)}{q} \quad (7)$$

式中 T_d ——下游温度升高值, $^{\circ}\text{C}$

T_u ——上游温度升高值, $^{\circ}\text{C}$

假设上下游探针与中间加热针的距离相等, 在测定时, DTD 随时间变化规律应为: 加热前, DTD 等于 0, 随着加热开始, DTD 不断升高, 达到最大值后随水流冷却, 逐渐下降为 0。在测定过程中, DTD 的最大值 ($t = t_m$ 时) 即为最大无量纲温度差 (MDTD), 表示为

$$MDTD = \int_{t_{\text{mdtd}}-t_0}^{t_{\text{mdtd}}} s^{-1} \left(\exp\left(-\frac{(x_d - Vs)^2}{4\alpha s}\right) - \exp\left(-\frac{(x_u + Vs)^2}{4\alpha s}\right) \right) ds \quad (8)$$

式中 x_u ——上游探针与中间探针的距离, m

x_d ——下游探针与中间探针的距离, m

t_{mdtd} ——DTD 达到最大值的时刻, s

s ——热源在 t' 时刻对另一位置在 t 时刻造成温度变化的时间差, s

V ——对流热脉冲速率, m/s

REN 等^[14] 试验结果表明, 水通量 J 和 MDTD 之间近似为线性关系, 可表示为

$$J = BMDTD = B \frac{4\pi\lambda}{q} (T_d - T_u) \quad (9)$$

式中 B ——探针结构修正参数

WANG 等^[15] 根据加热针周围温度场分布规律发现, 当时间趋于无限长时, T_d/T_u 接近一个常数, 由此得到 $\ln(T_d/T_u)$ 与对流热脉冲速率 V 之间的关系式为

$$\ln\left(\frac{T_d}{T_u}\right) = \frac{(x_d + x_u)V}{2\alpha} \quad (t \rightarrow \infty) \quad (10)$$

由式(10)进一步推出水通量 J 和 $\ln(T_d/T_u)$ 线性相关, 提出上、下游温度上升比率法 (T_d/T_u), 并给出了关系式

$$J = \frac{2\lambda}{(x_d + x_u)C_w} \ln\left(\frac{T_d}{T_u}\right) \quad (t \rightarrow \infty) \quad (11)$$

式中 C_w ——水的容积热容量, $J/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

2 系统组成及结构

土壤水通量测量系统包括两部分: 土壤水通量传感器和上位机软件。其中传感器用于热脉冲的精准控制和温度测量; 上位机软件接收到传感器数据后, 实时绘制热脉冲曲线, 自动计算水通量, 并将测量原始数据和计算得到的水通量数据进行存储。

传感器硬件电路基于 Pyboard 控制板实现。Pyboard 是 MicroPython 项目的官方专用开发板, 以 Cortex M4 架构的 STM32F405RGT6 单片机作为主控芯片, 其体积小, 价格低, 开发周期短。MicroPython 是 Python3 语言的精简实现, 是经过优化后可在微控制器和受限环境中运行的 Python 编译器和实时运行系统。

2.1 传感器结构

传感器由探针和主板两部分组成, 图 1 为土壤水通量传感器原理框图。

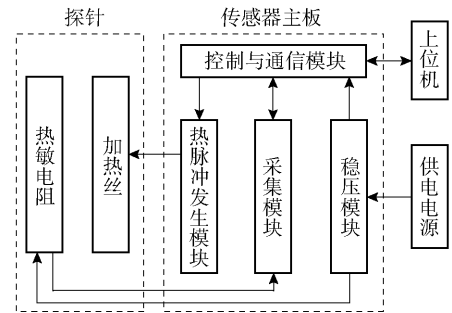


图1 传感器原理框图

Fig. 1 Block diagram of sensor

传感器探针为外径 1.4 mm、内径 1 mm 的不锈钢毛管, 内部在距离探针末端 20 mm 的地方嵌入一个 NTC 热敏电阻, 中间针中设置一根 U 型加热丝 (38 AWG Nichrome) 作为热源。不锈钢毛管中填充高导热胶, 用来固定加热丝和热敏电阻。

传感器主板用来控制传感器工作及数据采集, 包括控制与通信模块、稳压模块、采集模块和热脉冲控制模块 4 部分。其中控制与通信模块采用 Pyboard 最小系统, 用于控制各模块工作并与上位机通信; 稳压模块分为 3 部分: 第 1 部分由外置电源的 12 V 稳压至 5 V, 给采集模块提供 5 V 电源, 第 2 部分稳压至 3.3 V 用于给 STM32F405RGT6 单片机和 A/D 转换芯片供电, 第 3 部分稳压至精准 2.5 V 用于 A/D 转换芯片参考电压; 采集模块由置于空心探针中的热敏电阻、桥式测量电路以及 ADS1256 型 A/D 转换芯片组成, 用于实现热脉冲温度信号的精确测量; 热脉冲控制模块由一个微型固态继电器 (SDD-5HB 型) 组成, 通过主控模块控制 12 V 电源与加热丝之间的通断, 并且可精确控制加热时间。

图 2 为土壤水通量传感器实物。



图 2 土壤水通量传感器实物

Fig. 2 Soil moisture transfer sensor

2.2 传感器控制软件设计

传感器以 100 s 为一个测量周期, 在每个测量周期中, 传感器 3 根探针以 2 次/s 的频率测量温度, 在第 22 秒时, 通过给中间探针的加热丝通电, 使其发出一个持续 8 s 的热脉冲, 3 根探针保持温度测量直至周期结束, 图 3 为程序流程图。

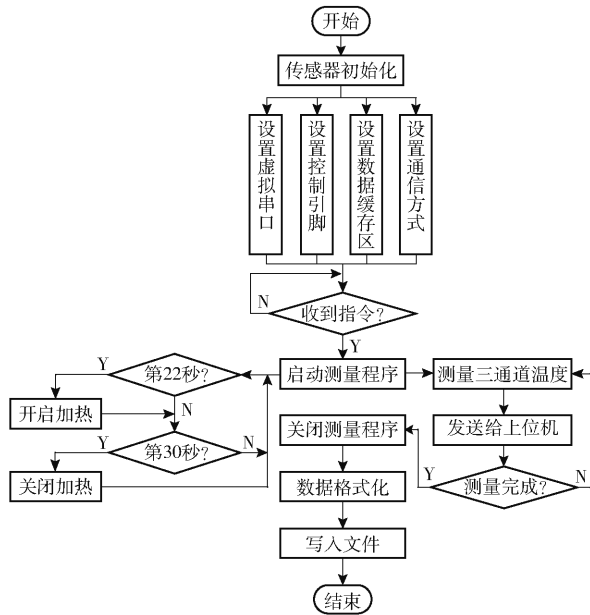


图 3 传感器控制程序软件流程图

Fig. 3 Flowchart of controlling program for sensor

由于 Pyboard 使用的 STM32F405RGT6 单片机自带 USB - OTG 功能, 可虚拟串口与上位机通信, 这减小了传感器主板体积。上电后, 自动运行初始化程序以设置 USB - OTG 工作在虚拟串口 (Virtual COM port, VCP) 方式, 在内存中申请 9 个 Buffarray 缓冲区以接收来自 A/D 转换芯片的数据, 设置单片机定时器 4 的工作频率用来计时, 设置 ADS1256 芯片的状态寄存器 (STATU)、输入复用器控制寄存器 (MUX)、A/D 控制寄存器 (ADCON)、A/D 数据速率寄存器 (DRATE) 和通用数字 I/O 口寄存器 (I/O), 以及定义各功能的工作引脚等, 结束后进入主程序。

主程序中, 循环检测串口缓冲区, 若接收到指令, 则开始一个测量周期。传感器通过定时中断以实现固定测量周期的测量。在转换过程中, 由于 A/D 转换以及传输过程需要时间, 所以设计程序时, 为最大程度提高测量效率, 在每一路通道测量结束后, 需先将下一路通道地址发送给 A/D 芯片, 然后向其发送

开始转换指令, 最后读出本次测量结果。测量结果由虚拟串口实时发送给上位机软件。测量结束后将本次测量数据以文件形式保存在内部存储中, 以备传输故障导致数据丢失后, 上位机重新调用测量数据。

2.3 上位机软件设计

上位机软件使用 Python 语言编程, 实现了数据通信、运算、存储、可视化以及导入历史数据 5 个功能。其中, 通信模块使用 Pyserial 库在计算机中创建一个串口, 用于向传感器发送开始测量指令以及接收来自传感器的原始数据; 数据运算及存储模块使用 Numpy 库设计, 对接收到的原始数据进行转换、格式化及存储操作, 并且根据模型计算土壤水通量; 数据可视化功能使用 Math 库中的 Matplotlib 函数, 实时绘制原始数据的曲线图, 并且在水通量计算完成后实时显示; 历史数据计算功能可对历史数据重新绘图, 并计算该次测量得到的土壤水通量。图 4 为上位机 GUI 设计界面。

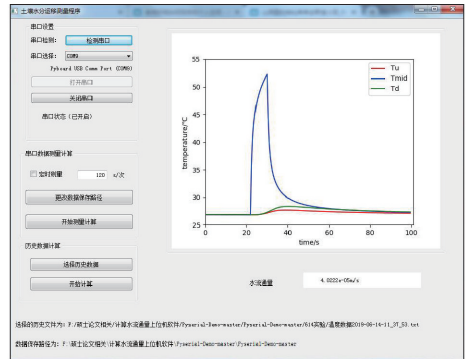


图 4 上位机软件界面

Fig. 4 GUI of upper computer software

3 结果与分析

不同土壤类型有不同粒径比例和质地, 这会造成土壤中的不同水流通道构造, 为了测试水通量测量系统的精度和适应性, 在系统软硬件功能测试稳定的情况下, 选用石英砂、壤质砂土、砂质壤土和砂质黏壤土 4 种配土进行试验, 土样参数如表 1 所示。

表 1 土样质地及装填密度

Tab. 1 Soil sample texture and filling density

土壤质地	粘粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	装填密度/ (g·cm ⁻³)
石英砂	0	2.37	97.63	1.612 1
壤质砂土	7.62	12.57	79.81	1.444 3
砂质壤土	15.46	6.13	78.41	1.675 1
砂质黏壤土	31.25	20.39	48.36	1.599 2

传感器温度测量精度采用 FLUKE52 - II 型测温仪校准。采用郜建英^[12]所述方法进行探针间距标

定,标定结果为:石英砂中, x_u 为6.026 mm, x_d 为6.017 mm;壤质砂土, x_u 为6.015 mm, x_d 为6.008 mm;砂质壤土中, x_u 为5.994 mm, x_d 为5.983 mm;砂质黏壤土中, x_u 为5.891 mm, x_d 为5.862 mm。

水通量传感器精度测量通过水通量试验台完成。试验台包含恒流泵(BT600-2J型,保定兰格恒流泵有限公司)、电子天平(LT3002T型,常熟市天量仪器有限责任公司)、土柱以及该土壤水通量测量传感器系统。将传感器从容器侧壁插入土样中,用于测量水通量。恒流泵出水口连接至容器顶端,容器下方出水口用一根橡胶管将出流液导入放置于电子天平上的烧杯中,实时称量流水质量。装置如图5所示,由于电子天平测量渗流量精度高,只要将本传感器测量出的土柱渗流流速与电子天

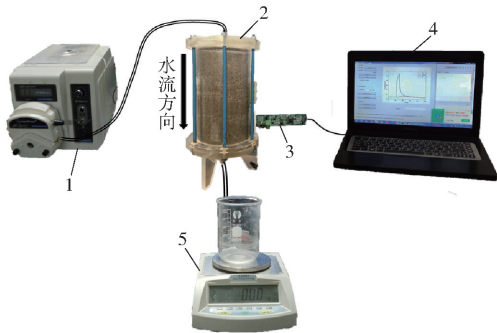


图5 试验设备

Fig. 5 Experiment equipment

1. 恒流泵 2. 土柱 3. 传感器 4. 上位机 5. 电子天平

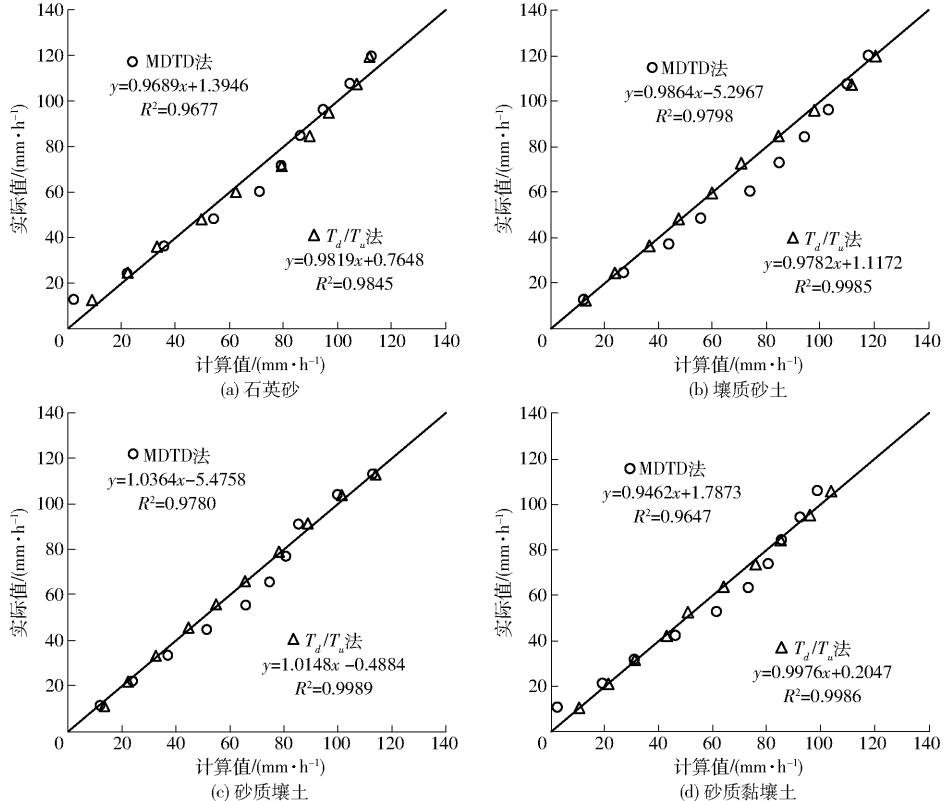


图6 2种算法下4种土样水通量的计算值与实际值对比结果

Fig. 6 Comparison results of calculated and actual values of water flux in four soil samples by two algorithms

平测量转换值进行对比,就可测试出本系统的测量精度。

实际水通量可通过一个试验周期内出流液质量变化量计算得出,即

$$J_R = W / (\rho \pi r_c^2 t_e) \quad (12)$$

式中 J_R ——实际水通量, mm/h

ρ ——水密度, g/cm³

W ——出流液质量, g

r_c ——土柱内半径, mm

t_e ——测量时间, s

由于非饱和土的水通量非常复杂,不能评价传感器的测量精度,因此传感器测试需在饱和土渗流中进行。使用恒流泵控制不同的渗流流速。试验开始,打开恒流泵先等待土柱内土样饱和,调整恒流泵的流量,60 min 容器内水流稳定后开始测量,每种土样试验 10 个流量。4 种土样使用 2 种算法的计算值与实际值对比如图 6 所示。

表 2 为 4 种土样根据 2 种方法的计算值与实际值之间决定系数 R^2 和均方根误差 (RMSE) 的对比。

由图 6 与表 2 可知,设计的传感器在 4 种土样试验中所得水通量测量值与实际值之间相关性好,说明该系统可精确测量土壤水通量,同时也说明该系统使用 T_d/T_u 法计算土壤水通量与实际值之间相关性优于 MDTD 法,使用 T_d/T_u 法计算结果的误差也更低。

表 2 MDTD 法和 T_d/T_u 法计算结果与实际值之间的 R^2 和 RMSE

Tab.2 R^2 and RMSE between MDTD method and T_d/T_u method

土壤质地	MDTD 法		T_d/T_u 法	
	R^2	RMSE/ (mm·h ⁻¹)	R^2	RMSE/ (mm·h ⁻¹)
石英砂	0.967 7	6.289 7	0.984 5	4.323 9
壤质砂土	0.979 8	7.955 7	0.998 5	1.559 4
砂质壤土	0.978 0	5.891 4	0.998 9	1.279 5
砂质黏壤土	0.964 7	6.081 1	0.998 6	1.148 6

分析计算结果可以得出,在不同土壤质地条件下, T_d/T_u 法优于 MDTD 法,所以利用该系统测量水通量时,使用 T_d/T_u 法计算水通量的适应性要优于 MDTD 法,深入开展对 T_d/T_u 法的研究可进一步提高该传感器的测量精度,为上位机程序优化提供方向指导。同时,还可在软件中设置系统的土壤种类和流量测量范围,实现软件系统的自适应计算功能,以提高系统测量准确性。

4 结论

(1) 基于 Pyboard 设计了一款热脉冲土壤水通量测量传感器,采用高精度 A/D 转换芯片 ADS1256,将 Pyboard 控制板进行资源优化和裁剪,在提升测量精度的同时,将感知元件和控制电路集成于一体,缩小了传感器体积,提高了系统测量精度。

(2) 采用 Python 设计了该传感器的上位机 GUI 计算软件,用以控制传感器工作状态和自动处理来自传感器的数据。软件可实时绘制热脉冲曲线,自动保存每次测量数据,并且根据测量数据自动计算水通量。该软件无需人工分拣数据,自动保存、自动计算、实时绘制曲线等特性提高了水通量测量的效率。

(3) 通过试验验证,该系统具有较高的测量精度,使用 MDTD 法和 T_d/T_u 法均能准确地测定土壤水通量。4 种土样中, T_d/T_u 法计算值与实际值之间的相关性更好,误差更低,计算效果优于 MDTD 法。在综合考虑土壤质地因素的情况下, T_d/T_u 法具有更好的适应性。

参 考 文 献

- [1] 王幼奇,包维斌,白一茹,等. 生物炭对黑垆土土壤水分运移特征参数影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020,38(3):292-297. WANG Youqi, BAO Weibin, BAI Yiru, et al. Effects of biochar on soil water transport characteristics of Heilu soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020,38(3):292-297. (in Chinese)
- [2] 伍超,邹鑫,王辉,等. 负压灌溉下土壤水分运移特性及氮素分布规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(6):44-49. WU Chao, ZOU Xin, WANG Hui, et al. Water flow and nitrogen distribution in soil under negative-pressure irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(6):44-49. (in Chinese)
- [3] 李成. 灌水量和施肥量对河套灌区垄膜沟灌土壤水肥盐运移的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019. LI Cheng. Effects of irrigation and fertilization on soil water, fertilizer and salt under ridge with plastic mulch-furrow irrigation in the Hetao irrigation district[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [4] 唐敏. 黄土丘陵区坡地土壤水热特征及其耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019. TANG Min. Characteristics of soil moisture and temperature and their coupling effects on sloping land in loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [5] 柴红阳. 再生水灌溉条件下土壤水分运移规律研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019. CHAI Hongyang. Soil water movement characteristics under treated wastewater irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [6] 商艳玲. 再生水灌溉对土壤水盐运移及斥水性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013. SHANG Yanling. Effect on water and salt transport and water repellency of soil under reclaimed water irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [7] 陈琳,费良军,傅渝亮,等. 地下水浅埋下层状土壤波涌畦灌间歇入渗模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 314-324. CHEN Lin, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. Intermittent infiltration model of surge border irrigation in layered soil under groundwater[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 314-324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181237&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.037. (in Chinese)
- [8] 王全九,解江博,张继红,等. 磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2):292-298. WANG Quanjiu, XIE Jiangbo, ZHANG Jihong, et al. Effects of magnetic field strength on magnetized water infiltration and soil water and salt movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 292-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.032. (in Chinese)

- [9] 吴忠东,王全九. 不同初始含水率条件下的微咸水入渗试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 53-58.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Saline water infiltration with different initial moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 53-58. (in Chinese)
- [10] 吴忠东,王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64-69. (in Chinese)
- [11] NOBORIO K, MCINNES K J, HEILMAN J L. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe[J]. Soil Science, 1996, 161(1): 22-28.
- [12] 邵建英. 利用热脉冲-TDR技术确定饱和土壤中水流通量及其与热弥散和溶质弥散的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
GAO Jianying. Application of the thermo-TDR technique for determining water flux density and its relationship with thermal dispersion and solute dispersion in saturated soils[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [13] REN T, NOBORIO K, HORTON R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 450-457.
- [14] REN T, KLUITENBERG G J, HORTON R. Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 552-560.
- [15] WANG Q, OCHSNER T E, HORTON R. Mathematical analysis of heat pulse signals for soil water flux determination[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 21-27.
- [16] KLUITENBERG G J, OCHSNER T E, HORTON R. Improved analysis of heat pulse signals for soil water flux determination[J]. Soil Science Society of America, 2007, 71(1): 53-55.
- [17] 任图生, 邵明安, 巨兆强. 利用热脉冲时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 II. 应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 523-529.
REN Tusheng, SHAO Ming'an, JU Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry II. Application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 523-529. (in Chinese)
- [18] 任图生, 邵明安, 巨兆强, 等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I. 原理[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 225-229.
REN Tusheng, SHAO Ming'an, JU Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. Theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 225-229. (in Chinese)
- [19] CAMPBELL G S, CALISENDORFF C, WILLIAMS J H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method[J]. Soil Science Society of America, 1991, 55(1): 291-293.
- [20] DE VRIES D A. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ[J]. Soil Science, 1952, 73(2): 83-90.
- [21] KLUITENBERG G J, HAM J M, BRISTOW K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1444-1451.
- [22] BRISTOW K L. Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1288-1294.
- [23] 鲁新蕊, 龚元石. 热脉冲技术估算土壤水流通量评价[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 947-956.
LU Xinrui, GONG Yuanshi. Estimation of soil water flux with heat pulse technique[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 947-956. (in Chinese)