

油菜直播地表土壤物理机械特性参数测量装置研究

张青松^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 王泽天¹ 陈杰¹ 朱龙图¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油菜直播地表农田土壤物理机械特性参数室内测量费时费力、田间测量仪器功能单一等问题,设计了一种油菜直播地表土壤物理机械特性参数测量装置,实现集成测量土壤含水率、坚实度、粘聚力和内摩擦角4种土壤物理机械特性参数且测量结果可以通过手机APP实时储存显示。装置基于自走式移动平台实现行走控制,以STM32单片机为核心控制器,利用FDR传感器获取土壤含水率,通过圆锥贯入部件测量土壤坚实度和抗剪切强度参数(包括粘聚力和内摩擦角)。分析了装置的圆锥贯入部件和土壤含水率检测部件测量原理,设计了装置测量控制系统硬件电路及软件,开展了传感器标定试验,确定了柱式压力传感器、薄膜压力传感器和土壤水分传感器的输入输出响应关系。选取71个土壤样本,融合土壤含水率和基于圆锥受力平衡关系获取的摩擦因数,运用最小二乘法建立了土壤粘聚力和内摩擦角数学测量模型,模型决定系数 R^2 分别为0.932和0.956。开展了装置田间测量试验,对土壤含水率、坚实度、粘聚力和内摩擦角进行集成测量,结果表明:相较于AYD-2型土壤坚实度仪、干燥箱干燥法和ZJ-D型直剪仪测量结果,油菜直播地表土壤物理机械特性参数测量装置测量土壤坚实度、含水率、粘聚力和内摩擦角结果的平均相对误差分别为3.34%、5.06%、10.40%和8.20%。研究结果可为油菜直播地表土壤多个物理机械特性参数的快速、集成测量提供技术参考。

关键词: 油菜直播地; 土壤含水率; 土壤抗剪强度; 土壤坚实度; 测量装置

中图分类号: S152.9; S232.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0068-11

OSID:



Measuring Device for Soil Physical or Mechanical Properties of Rapeseed Direct Planting Field

ZHANG Qingsong^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} WANG Zetian¹ CHEN Jie¹ ZHU Longtu¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problem that the indoor measurement of soil physical or mechanical properties is time-consuming in laborious, and the function of instruments in the field measurement is single, a measuring device for farmland soil physical and mechanical characteristics was designed. The device can measure soil moisture content, firmness, cohesion and internal friction angle, and the measurement results can be displayed and stored in the mobile APP. It realized walking control based on self-propelled mobile platform. An STM32 single chip microcomputer was used as the core controller, an FDR sensor was used to obtain the soil moisture content, and the soil firmness and shear strength parameters, including cohesion and internal friction angle were measured through the cone penetration component. In addition, the measurement principles of the cone penetration component and the soil moisture content detection component of the device were analyzed, the hardware circuit and software of the device measurement control system were designed, and the input and output responses of cylindrical pressure sensor, thin film pressure sensor and soil moisture sensor were determined by sensor calibration test, respectively. Totally 71 soil samples were selected, and the mathematical measuring models of soil

收稿日期: 2022-11-16 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、国家自然科学基金项目(32001427)、财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)和中国博士后科学基金项目(2021M701341)

作者简介: 张青松(1987—),男,副教授,博士,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 朱龙图(1988—),男,博士后,主要从事农业自动化装备研究,E-mail: zhult2020@163.com

cohesion and internal friction angle were established by the least square method based on the sample moisture content and sample friction coefficient data obtained based on the conical force balance relationship. The model fitting coefficient R^2 was 0.932 and 0.956, respectively. Field measurement experiments were carried out to measure soil moisture content, firmness, cohesion and internal friction angle. The results showed that compared with AYD-2 type soil firmness meter, oven drying method and ZJ-D type direct shear instrument, the average relative errors of soil firmness, soil moisture content, cohesion and internal friction angle measured by the measuring device of farmland soil physical and mechanical properties were 3.34%, 5.06%, 10.40% and 8.20%, respectively. The research result can provide a reference for the development of a fast and integrated measurement device for multiple physical and mechanical properties of farmland soil.

Key words: rapeseed direct planting field; soil moisture content; soil shear strength; soil firmness; measuring device

0 引言

油菜直播作业时,土壤坚实度、含水率、抗剪切强度等土壤特性参数在很大程度上影响着油菜精量联合直播机等农机具触土部件作业效果^[1-5],魏国梁等^[2,6]在制备油菜直播机种床时,分别利用土壤坚实度仪、恒温箱干燥法测定了土壤坚实度和含水率。张青松^[7]开展油菜直播机开沟旋耕降附减阻机理研究时,利用直剪仪测量了土壤粘聚力和内摩擦角。油菜直播作业时相关土壤特性参数的测量费时费力,快速、准确测量土壤物理机械特性参数对节省土壤物理机械特性参数测试时间,优化油菜精量联合直播机开畦沟、旋耕、深施肥、开种沟圆盘等触土部件结构设计具有重要意义。

目前测量土壤坚实度、含水率和抗剪切强度等土壤物理机械特性参数的方法有很多^[8-13],主要分为室内测量和田间原位测量。土壤坚实度通常采用土壤坚实度仪进行田间测量,如张淑娟等^[14]利用 SC900 型数字土壤坚实度仪对农田土壤坚实度进行了相关测量。土壤含水率利用干燥箱进行干燥测量,仪器易于操作但测量结果需要等待一定时间后才能获得。土壤含水率主要通过土壤水分传感器进行测量,李鸿儒等^[15]利用频域反射(Frequency domain reflection, FDR)传感器对沈阳地区多个监测站点进行了测量。抗剪切强度参数由黏聚力和内摩擦角两个参数决定^[16-17],其测量方法主要为室内测量,包括直剪仪测量法和三轴压缩测量法^[18-19]。然而,土壤物理机械特性参数的室内测量装置费时、费力、效率较低,现有的田间测量装置功能单一,目前缺乏集多种土壤物理机械特性参数测量功能的装置。

针对油菜直播农田土壤物理机械特性参数室内测量费时费力、田间测量仪器功能单一等问题,本文设计一种油菜直播地表土壤物理机械特性参数测量装置,实现土壤含水率、坚实度、粘聚力和内摩擦角

4 种参数集成测量,开展装置整体结构及关键部件设计,基于最小二乘法并融合土壤含水率和圆锥贯入土壤摩擦因数,构建土壤粘聚力和内摩擦角测量模型,并开展田间测量试验研究,以期为油菜直播地表农田土壤多个物理机械特性参数的快速、集成测量装置研制提供参考。

1 装置结构及工作原理

1.1 装置总体结构

装置主要由自走式移动平台、测量控制系统和执行部件组成,如图 1 所示。其中,自走式移动平台为四驱移动小车,通过手持无线遥控器实现行走控制,执行部件主要包括圆锥贯入部件、土壤含水率检测部件等,如图 2 所示。圆锥贯入部件和土壤含水率检测部件通过 L 形连接板固定在滚珠丝杆滑台上,在测量控制系统作用下,可随滑台上下移动,实现土壤坚实度、土壤含水率、土壤内摩擦角和粘聚力的集成快速测量。装置主要技术参数如表 1 所示。

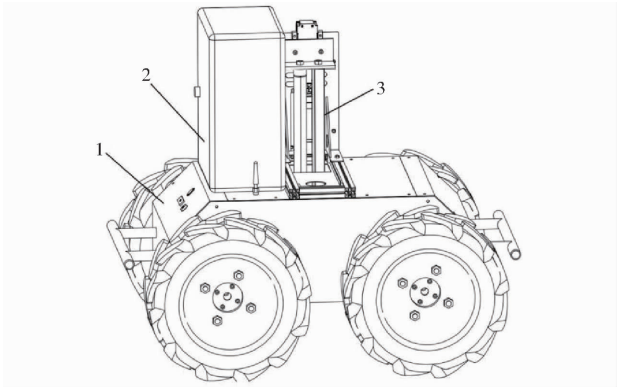


图 1 装置总体结构图

Fig.1 Overall structure of device

1. 自走式移动平台 2. 测量控制系统 3. 执行部件

1.2 装置工作原理

自走式移动平台基于四轮独立驱动,采用差速转向控制方式进行换向,由手持遥控器进行行驶控制。测量系统搭载在自走式移动平台上,包括执行

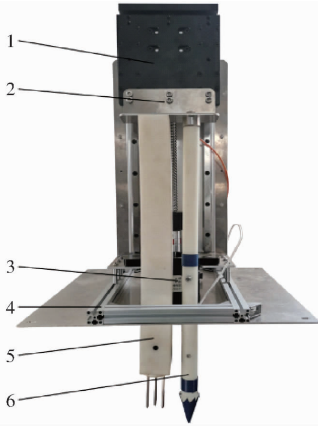


图 2 执行部件结构组成

Fig. 2 Actuator of measuring system

1. 滚珠丝杆滑台 2. L形连接板 3. 步进电机 4. 支架 5. 土壤含水率检测部件 6. 圆锥贯入部件

表 1 装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of device

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	900 × 500 × 900
遥控最远距离/m	200
装置移动最大速度/(m · s ⁻¹)	1.0
圆锥贯入土壤最大深度/mm	200

部件和测量控制系统两部分,工作原理如图 3 所示。测量控制系统以 STM32 单片机作为核心处理器,通过柱式压力传感器和薄膜压力传感器获取圆锥贯入土壤的竖直入土阻力和水平土壤挤压力,利用 FDR 传感器采集土壤含水率。作业时,首先由操作人员遥控移动平台行驶至田间待测土壤位点,之后 STM32 单片机接收到经手机发出的测量指令后,开始输出恒定的 PWM 脉冲作用于驱动器,进而驱使步进电机带动滚珠丝杆滑台匀速下移,使圆锥贯入部件和土壤含水率检测部件匀速插入待测土壤;与此同时,STM32 单片机实时获取经变换器和信号放大器处理后的柱式压力传感器和薄膜压力传感器采集的土壤竖直阻力和水平挤压力信号,通过 RS485 串口通信方式获取 FDR 传感器采集的土壤含水率信号。STM32 根据土壤竖直入土阻力,结合土壤坚实度测量原理,经计算可获取待测土壤坚实度;同

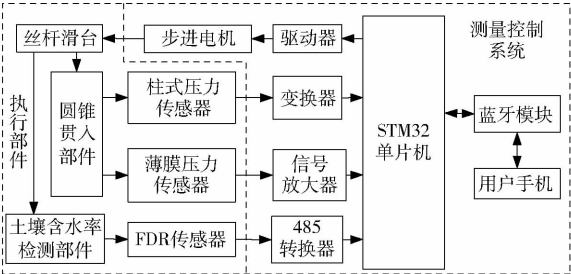


图 3 测量系统工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of measuring system

时,基于圆锥贯入土壤受力平衡关系计算出摩擦因数,结合土壤含水率,根据最小二乘法原理所确定的测量模型计算出土壤粘聚力和内摩擦角。最后,STM32 单片机通过蓝牙模块将相关数据信息传输至操作人员手机 APP 界面予以实时显示。

2 测量原理分析与系统设计

2.1 圆锥贯入部件设计

2.1.1 测量原理分析

土壤坚实度是指土粒排列的紧实程度,又称土壤硬度、土壤贯入阻力。计算式为

$$P_f = F_v / S \tag{1}$$

式中 P_f ——土壤坚实度,Pa

F_v ——圆锥竖直入土压力,N

S ——圆锥头底面积,m²

相关研究表明,土壤抗剪切强度参数与圆锥贯入土壤的摩擦因数存在显著相关性^[20-21]。本文对圆锥贯入土壤过程进行受力分析,如图 4 所示。取圆锥某一竖直截面 OAB 进行受力分析,如图 4b 所示,可得

$$\begin{cases} f_s = f_h \sin \frac{\theta}{2} - f_v \cos \frac{\theta}{2} \\ N_s = f_v \sin \frac{\theta}{2} + f_h \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \tag{2}$$

式中 f_s ——竖直截面 OAB 所受土壤摩擦力,N
 N_s ——竖直截面 OAB 所受土壤正压力,N
 f_v ——竖直截面 OAB 所受竖直压力,N
 f_h ——竖直截面 OAB 所受水平挤压力,N
 θ ——圆锥顶角,(°)

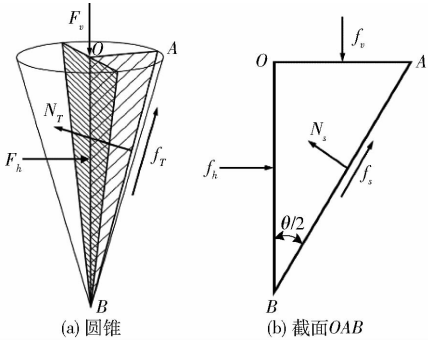


图 4 圆锥入土受力分析

Fig. 4 Force analysis diagrams of cone penetration

因此,对圆锥所有竖直截面 OAB 所受力进行积分,可得

$$\begin{cases} F_v = \int_0^{r/\tan(\theta/2)} 2\pi h \tan(\theta/2) f_v dh \\ F_h = \int_0^r \left(\int_0^{\pi/2} 2r \cos \theta d\theta \right) dr \end{cases} \tag{3}$$

式中 r ——圆锥底部圆半径,m

h ——圆锥高度, m
 F_h ——圆锥入土水平挤压力, N

可得

$$\begin{cases} f_v = F_v / r^2 \\ f_h = F_h \tan(\theta/2) / (\pi r^2) \end{cases} \quad (4)$$

联立式(2)、(4), 可求得圆锥贯入土壤的摩擦因数 μ 为

$$\mu = \frac{f_s}{N_s} \quad (5)$$

2.1.2 结构组成

基于上述测量原理, 对圆锥贯入部件进行结构设计, 如图 5 所示, 设计圆锥底面半径为 12 mm, 锥顶角为 30°。同时将 DYMH-103 型柱式拉压力传感器安装于圆锥杆顶部, 用于测量圆锥贯入土壤过程中的竖直入土阻力, 将 Flexiforce A301 型薄膜压力传感器内置于两个对称分布的半圆锥体中间, 用于测量圆锥贯入土壤过程中的水平挤压力。

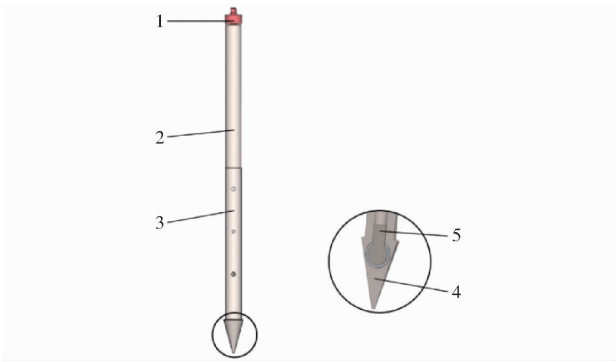


图 5 贯入圆锥结构及压力传感器安装位置示意图

Fig.5 Diagram of penetration cone structure and installation position of pressure sensor

1. 柱式压力传感器 2. 圆柱杆 3. 圆锥 4. 半圆锥体 5. 薄膜压力传感器

2.2 土壤含水率检测部件设计

2.2.1 测量原理分析

土壤含水率检测部件采用 CSF11 型传感器作为检测元件。该传感器基于 FDR 原理设计, 利用 LC 电路的电磁振荡波在不同土壤中的振荡频率变化来测定土壤相对介电常数, 依据介电常数对土壤含水率的响应关系实现含水率测量。FDR 传感器采用串联 LC 谐振电路^[15], 其等效电路如图 6 所示。

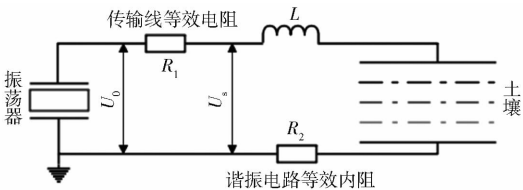


图 6 FDR 传感器等效测量电路

Fig.6 Equivalent measurement circuit of FDR sensor

当发生谐振时, 谐振电路固有频率为

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

式中 F ——固有频率, Hz
 L ——等效电路电感, H
 C ——土壤介质电容, F

通过电容与介电常数的关系可得土壤相对介电常数为

$$\varepsilon = C/C_0 \quad (7)$$

式中 ε ——土壤相对介电常数

C_0 ——空气介质电容, F

相关研究表明土壤相对介电常数与土壤含水率之间存在关系^[22-23]

$$\omega = m\sqrt{\varepsilon} + n \quad (8)$$

式中 m, n ——系数

ω ——土壤含水率, %

由于 CSF11 型传感器测量时的输出信号值反映了土壤相对介电常数 ε , 因此式(8)可转换为

$$\omega = aV_s + b \quad (9)$$

式中 V_s ——传感器输出信号值, V

a, b ——待标定系数

因此, 通过 CSF11 型传感器输出信号值和标定参数值, 即可得到土壤含水率。

2.2.2 结构组成

为便于 CSF11 型传感器在移动平台上的集成安装, 设计如图 7 所示的土壤含水率检测部件。该部件主要由传感器固定套(3D 打印塑料件)、CSF11 型传感器和顶丝组成, 其中, CSF11 型传感器选用北京星仪传感器产品, 该传感器自带温度补偿。作业时, CSF11 型传感器内置于传感器固定套中, 其金属探针露出固定套外以便测量, 传感器通过顶丝被安装在固定套上, 在滚珠丝杆滑台作用下可随固定套上下移动, 其传感信号由通过线槽的 RS485 总线传

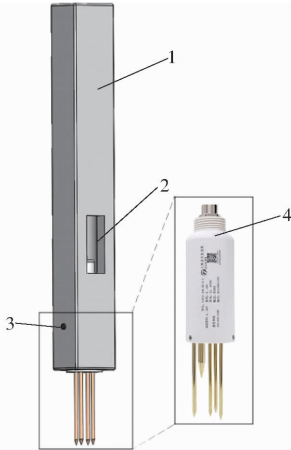


图 7 土壤含水率检测部件结构图

Fig.7 Structure diagram of soil moisture detection unit

1. 传感器固定套 2. 线槽 3. 顶丝 4. CSF11 型传感器

输至 STM32 单片机,在到达指定深度时完成土壤含水率的采集。

2.3 测量控制系统设计

2.3.1 系统硬件电路设计

测量控制系统主要硬件电路原理图如图 8 所示,采用 STM32F103C8T6 单片机作为核心处理器,其中,HBS86H 为步进电机驱动器,信号驱动端 PUL 与 STM32 单片机的 TIM1 比较输出通道相连,便于 STM32 单片机输出 PWM 信号予以控制,使能端 EN 和正反转控制端分别与 STM32 单片机的 I/O 口相连。为使 DYMH-103 型柱式压力传感器输出信号可被 STM32 单片机识别采集,采用配套

的 DY510 型变送器实现传感信号到电压信号的变换。由于 Flexiforce A301 型薄膜压力传感器输出信号较微弱,采用 MCP6004 型功率放大器对其进行放大处理。经处理后的 DYMH-103 型柱式压力传感信号和 Flexiforce A301 型薄膜压力传感信号分别被 STM32 单片机的 ADC 通道采集。图中 CSF11 为 FDR 土壤水分传感器,其检测信号通过 SP3485 芯片与 STM32 单片机的 USART1 串口相连完成数据采集。为实现 STM32 单片机与操作人员手机 APP 之间的通信,采用 TLS-02 型蓝牙模块作为通信模块,其与 STM32 单片机的 USART2 串口相连。

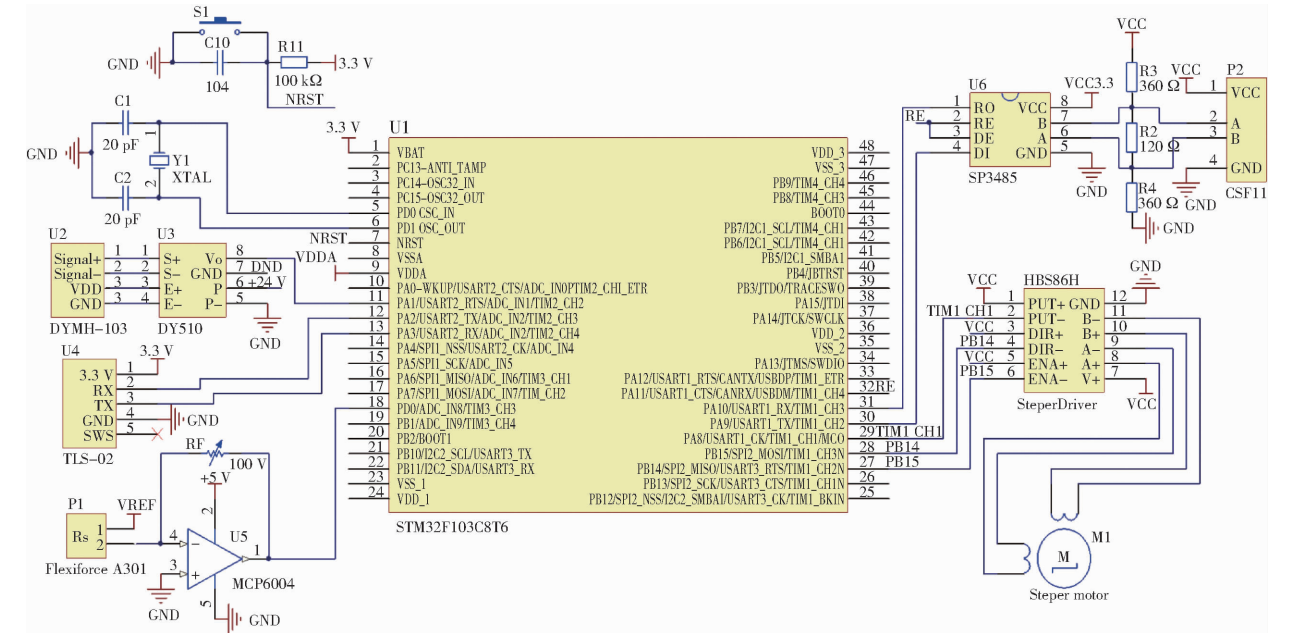


图 8 测量控制系统主要硬件电路图

Fig.8 Main hardware circuit of measuring and controlling system

根据硬件电路设计图制作电路板并安装相关电路元件,将其集成安装在 PVC 材质电控箱内,如图 9

所示。

2.3.2 系统软件设计

基于 C 语言和 UCOSⅢ操作系统开发系统软件,包括主程序任务和 3 个子程序任务,其中主程序任务实现测量控制系统初始化、PWM 控制信号输出、压力传感数据采集及数据传输等操作,子程序任务分别实现土壤坚实度、土壤含水率以及土壤粘聚力和内摩擦角的计算输出,系统软件工作流程图如图 10 所示。

系统工作时从主程序任务开始运行,首先进行 GPIO 口、ADC、定时器、串口及蓝牙等模块的初始化设置。初始化完成后,系统等待操作人员手机 APP 发送测量指令。当接收到测量指令时,STM32 单片机通过 TIM1_CH1 通道输出 PWM 控制信号,控制驱动器驱使步进电机匀速转动,进而使执行部件随滚珠丝杆滑台匀速下移贯入土壤中。与此同时,

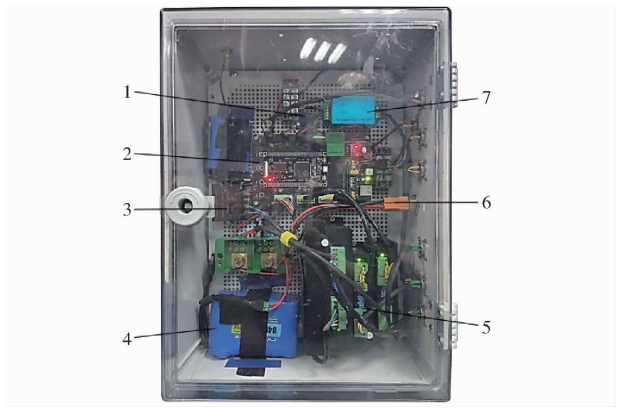


图 9 硬件电路集成实物图

Fig.9 Physical picture of hardware circuit integration

1. 薄膜压力传感器功率放大器
2. STM32 单片机最小系统
3. 电源转换模块
4. 供电电池
5. 步进电机驱动器
6. 按钮开关
7. DY510 型变送器

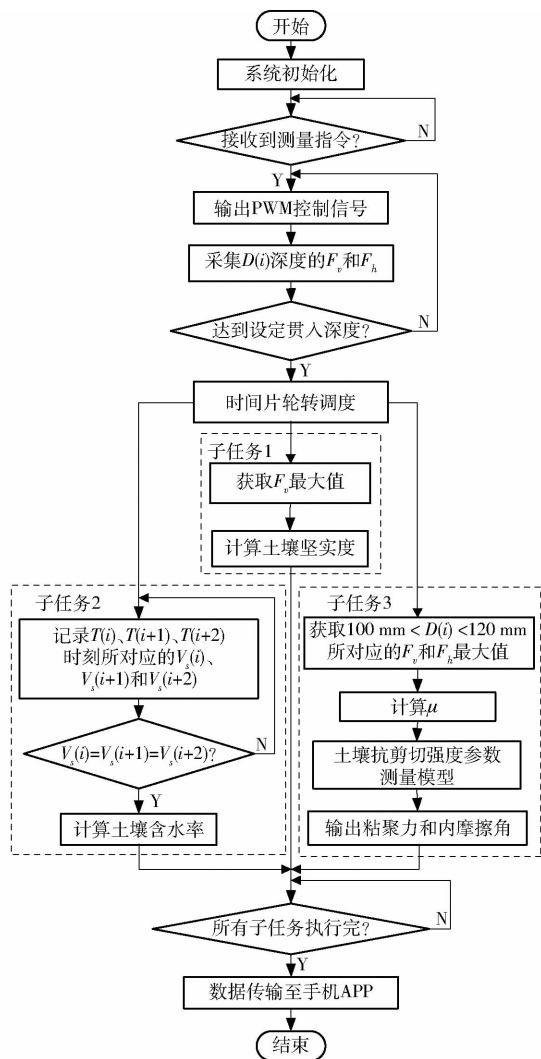


图 10 系统软件工作流程图

Fig. 10 Flowchart of system software

STM32 单片机实时采集不同贯入深度所对应的柱式压力传感器输出值和薄膜压力传感器输出值。当执行部件达到设定贯入深度时,主程序任务被挂起,系统采用时间片轮转调度方式运行各子任务程序。在子任务 1 中获取 DYM H-103 型柱式压力传感器测量数据最大值,并根据式(1)计算出贯入深度范围内的土壤坚实度。考虑到土壤水分传感器的静态测量需求,执行部件匀速贯入土壤时,系统并未实时采集 CSF11 型土壤水分传感器的输出值,而是等执行部件达到设定贯入深度且稳定时,利用子任务 2 对 CSF11 型传感器输出值进行采集。在子任务 2 中,通过比对 3 次连续测得的 CSF11 型传感器输出值 $V_s(i)$ 、 $V_s(i+1)$ 和 $V_s(i+2)$ 是否相等来判断该传感器的稳定状态,当 $V_s(i) = V_s(i+1) = V_s(i+2)$ 时认为 CSF11 传感器的输出已趋于稳定,此时根据式(9)可计算出土壤含水率。子任务 3 获取离地面深度为 100 ~ 120 mm 内柱式压力传感器最大输出值和薄膜压力传感器最大输出值,并根据式(5)计

算对应的摩擦因数,结合子任务 2 确定的土壤含水率,根据后文所确定的土壤抗剪切强度参数测量模型计算出土壤粘聚力和内摩擦角。当 3 个子任务全部运行完后,被挂起的主程序任务恢复运行,其将计算获得的土壤坚实度、含水率、粘聚力和内摩擦角等数据通过蓝牙传输至操作人员手机 APP 予以显示。手机 APP 采用微信开发者工具进行开发,实现蓝牙连接、指令发送、数据上传存储显示等功能。

2.4 传感器标定试验

2.4.1 试验目的与方法

采用 3D 技术制作与圆锥相匹配的测试夹具,基于万能试验机,开展安装于圆锥贯入部件的柱式压力传感器和薄膜压力传感器输出数值标定试验,如图 11 所示。选取 8 个不同的外压力(50、100、150、200、250、300、350、400 N),先后从竖直方向和水平方向施加到圆锥贯入部件上,记录 DYM H-103 型柱式压力传感器和 Flexiforce A301 型薄膜压力传感器的输出值。通过对各压力传感器的输出数据进行线性拟合获取标定结果。

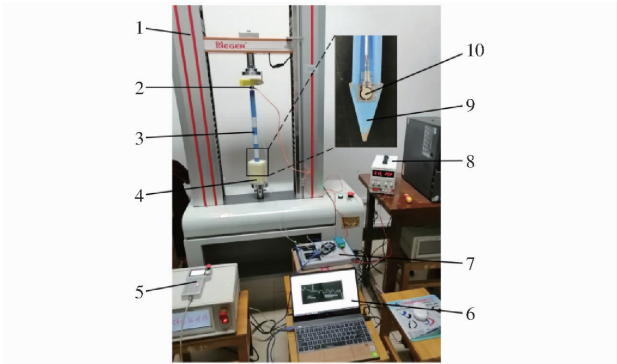


图 11 传感器标定测试

Fig. 11 Sensor calibration test

1. 万能试验机 2. 柱式压力传感器 3. 圆锥杆 4. 测试夹具
5. 万能试验机控制器 6. 便携式计算机 7. 数据采集卡 8. 供电电源 9. 半圆锥体 10. Flexiforce A301 型薄膜压力传感器

采集不同土壤含水率样本,利用 CSF11 型传感器对土样进行测量,记录 CSF11 型传感器输出值,每组重复 3 次,取平均值;同时,用环刀采集取样点原状土样,并转至铝盒,通过干燥法测定相应的土样含水率。对 CSF11 型传感器的输出值和干燥法测得的含水率进行线性回归拟合,可得到式(9)中系数 a 、 b 。

2.4.2 标定结果

DYM H-103 型柱式压力传感器和 Flexiforce A301 型薄膜压力传感器的标定结果如图 12 所示。采用一次线性关系对标定结果进行拟合,得到圆锥贯入部件垂直施加外压力与柱式压力传感器输出信

号值决定系数为 0.997 4(图 12a),圆锥贯入部件水平施加外压力与薄膜压力传感器输出信号值决定系数为 0.986 7(图 12b),柱式压力传感器和薄膜压力传感器输出信号与压力的拟合关系为

$$\begin{cases} F_v = 727.27V_{lc} - 40.45 \\ F_h = 410.3V_{fs} - 88.88 \end{cases} \quad (10)$$

式中 V_{lc} ——柱式压力传感器输出信号值, V
 V_{fs} ——薄膜压力传感器输出信号值, V

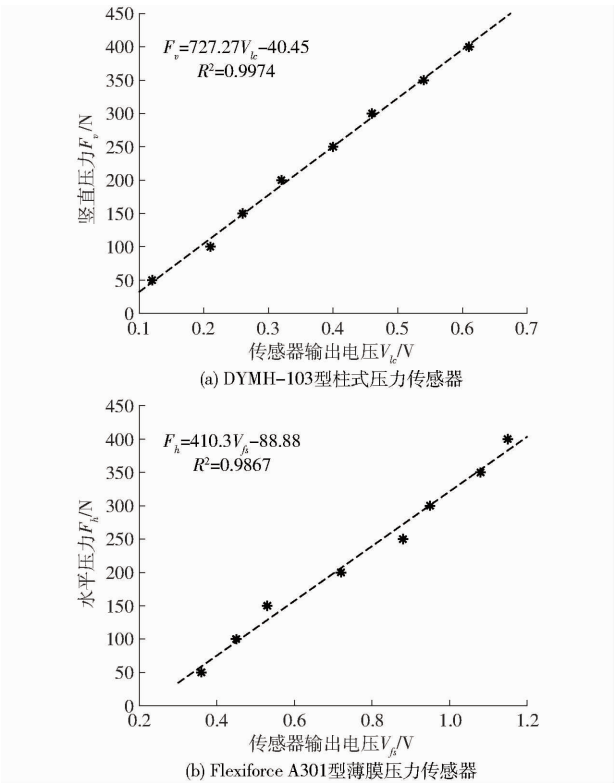


图 12 压力传感器标定结果

Fig. 12 Calibration results of pressure sensors

CSF11 型土壤水分传感器标定结果如图 13 所示,土壤含水率与土壤水分传感器输出信号值决定系数为 0.945,可得土壤含水率与土壤水分传感器输出信号拟合关系为

$$\omega = 20.1103V_s - 6.5166 \quad (11)$$

式(9)中系数 a 和 b 分别为 20.110 3 和 -6.516 6。

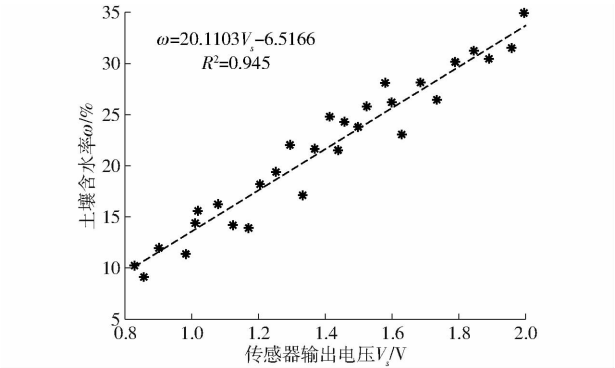


图 13 CSF11 型传感器标定结果

Fig. 13 Calibration results of CSF11 sensor

3 土壤抗剪切强度参数测量模型构建

3.1 数据采集

土壤抗剪切强度参数测量模型的构建是测量装置快速计算土壤粘聚力和内摩擦角的关键。为获取建模数据,选取 71 处土壤测量位点进行试验,土壤类型为砂性偏粘。测量过程中,圆锥贯入土壤的速度为 1 mm/s,入土深度为 150 mm,记录柱式压力传感器和薄膜压力传感器的实时输出值,利用 CSF11 型传感器测量土壤含水率。采用环刀(直径 61.8 mm × 高 20 mm)获取各测量位点离表土深度 10 cm 的原状土壤,按照文献[24]方法,利用 ZJ-D 型直剪仪测量土壤粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。

对柱式压力传感器和薄膜压力传感器采集数值采用 20 阶中值滤波方法进行去噪处理,并利用式(2)~(5)计算摩擦因数。71 组土壤样品测量结果的统计描述如表 2 所示。由表 2 可知,土壤含水率、摩擦因数、粘聚力和内摩擦角范围分别为 10.41%~25.48%、0.22~0.48、3.77~38.95 kPa 及 14.00°~32.24°,均值为 17.15%、0.37、14.28 kPa 及 24.13°,对应的变异系数分别为 28.32%、20.84%、65.66% 和 21.43%,表明样本数据呈现较大的空间变异性。

表 2 土壤样品测量结果

Tab. 2 Measurement results of soil samples				
项目	含水率/ %	摩擦因数	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
最小值	10.41	0.22	3.77	14.00
最大值	25.48	0.48	38.95	32.24
平均值	17.15	0.37	14.28	24.13
标准差	4.96	0.08	9.38	5.17
变异系数/%	28.32	20.84	65.66	21.43

3.2 测量模型构建

通过融合土壤含水率与摩擦因数 2 个参量数据,采用二元二阶多项式构建测量模型,则粘聚力和内摩擦角测量模型 f_1 和 f_2 可分别表示为

$$\begin{cases} f_1 = k_{10} + k_{11}\mu_j + k_{12}\omega_j + k_{13}\mu_j\omega_j + k_{14}\mu_j^2 + k_{15}\omega_j^2 + \varepsilon_1 \\ f_2 = k_{20} + k_{21}\mu_j + k_{22}\omega_j + k_{23}\mu_j\omega_j + k_{24}\mu_j^2 + k_{25}\omega_j^2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 μ_j ——第 j 个样本摩擦因数

ω_j ——第 j 个样本含水率, %

j ——土壤样本序号

$k_{10} \sim k_{15}$ ——粘聚力模型待定系数

$k_{20} \sim k_{25}$ ——内摩擦角模型待定系数

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——高阶无穷小的数

基于最小二乘法原理,通过求取土壤样本物理

机械特性参数实际测定值与模型输出值之间均方差 M 的最小值来确定测量模型的待定系数项^[25]。 M 的计算式为

$$M(k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5}) = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s (f_{ij} - y_{ij})^2 = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \sum_{p=0}^5 (k_{ip} h_{ijp} - y_{ij})^2 \tag{13}$$

式中 f_{ij} ——因变量 i 的第 j 个土壤样本计算值
 y_{ij} ——因变量 i 的第 j 个土壤样本实际值
 s ——试验样本总数
 i ——因变量,当 i 为 1 时表示粘聚力, i 为 2 时表示内摩擦角
 h_{ijp} —— k_{ip} 的系数项,当 p 为 0~5 时, $h_{ij0} \sim h_{ij5}$ 分别为 $1, \mu_j, \omega_j, \omega_j \mu_j, \mu_j^2, \omega_j^2$
为求取 M 的最小值,令式(13)偏导数为 0,有

$$\frac{\partial M(k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5})}{\partial k_{ip}} = 0 \tag{14}$$
$$\sum_{j=1}^s \left(\sum_{p=0}^5 k_{ip} h_{ijp} \right) h_{ijp} = \sum_{j=1}^s y_{ij} h_{ijp} \tag{15}$$

将获取的 71 组样本数据代入式(15),可得 $k_{10} = 152.86$ 、 $k_{11} = -49.23$ 、 $k_{12} = -13.57$ 、 $k_{13} = 5.34$ 、 $k_{14} = -48.98$ 、 $k_{15} = 0.27$ 、 $k_{20} = 25.95$ 、 $k_{21} = 72.85$ 、 $k_{22} = -2.04$ 、 $k_{23} = 0.36$ 、 $k_{24} = -58.07$ 、 $k_{25} = 0.04$ 。因此,土壤粘聚力和内摩擦角的测量模型为

$$\begin{cases} f_1 = 152.86 - 49.23\mu_j - 13.57\omega_j + 5.34\mu_j\omega_j - 48.98\mu_j^2 + 0.27\omega_j^2 \\ f_2 = 25.95 + 72.85\mu_j - 2.04\omega_j + 0.36\mu_j\omega_j - 58.07\mu_j^2 + 0.04\omega_j^2 \end{cases} \tag{16}$$

根据确定的测量模型分别计算土壤粘聚力和内摩擦角,并与实际测定值进行比较,结果如图 14 所示。由图 14 可知,粘聚力和内摩擦角决定系数 R^2 分别为 0.932 和 0.956,表明这两个模型的输出值与实际测定值之间具有良好的一致性。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证土壤物理机械特性参数测量装置测量效果,在华中农业大学现代农业科学试验基地进行装置田间试验,地表有一定杂草,土壤类型为砂性偏粘,如图 15 所示。

4.2 试验方法

利用土壤物理机械特性参数测量装置测量土壤坚实度、土壤含水率、土壤粘聚力和内摩擦角参数值,同时作为对比,利用现有仪器对相关参数进行

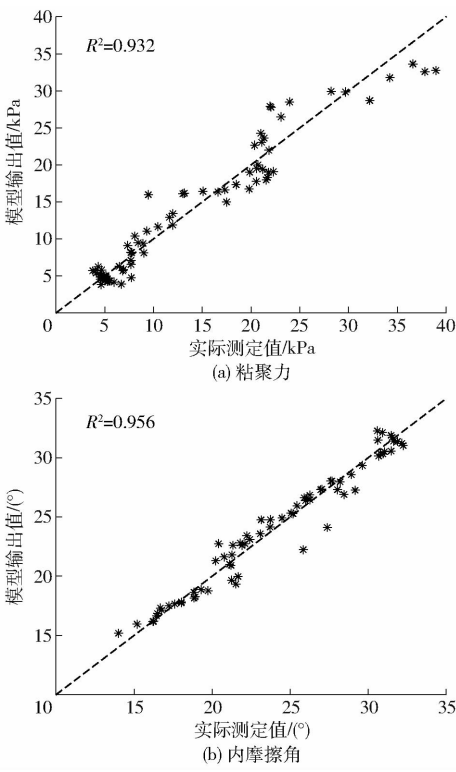


图 14 模型输出值与实际测定值对比
Fig. 14 Comparisons between models output values and actual measured values



图 15 田间试验
Fig. 15 Field test

测量。利用土壤物理机械特性参数测量装置对土壤相关物理机械特性参数进行测量时,在试验田随机选取 4 处测量点,利用本文所设计的测量装置对地表土壤坚实度、土壤含水率、土壤抗剪切强度参数粘聚力和内摩擦角进行测量,每次测量结果可以通过手机 APP 显示和记录,如某次测量结果手机 APP 显示如图 16 所示,每个点测量重复 5 次并取平均值。同时在每一测量点四周 10 cm 范围内,应用 AYD-2 型土壤坚实度测量仪测量土壤坚实度值,重复 5 次并取平均值;应用取土器采集土样 5 个,用于后续用干燥箱干燥法测量土壤含水率 and 用 ZJ-D 型直剪仪测量土壤粘聚力和内摩擦角,测量结果取平均值。



图 16 手机 APP 控制和测量数据显示界面

Fig.16 APP control and measurement data display interface in mobile phone

4.3 结果与分析

4.3.1 土壤坚实度

土壤物理机械特性参数测量装置和 AYD-2 型土壤坚实度测量仪两个装置测量的不同深度土壤坚实度如表 3 所示。以 AYD-2 型土壤坚实度测量仪测量结果为对照组,以本文所设计装置测量结果为试验组,计算可得土壤物理机械特性参数测量装置测量结果平均相对误差为 3.34%。

表 3 土壤坚实度测量结果

Tab.3 Results of soil firmness test

样本序号	土壤坚实度/kPa		相对误差/%
	对照组	试验组	
1	463.05	477.36	3.09
2	698.17	672.92	3.62
3	547.65	532.59	2.75
4	640.08	664.92	3.88
平均值			3.34

4.3.2 土壤含水率

土壤物理机械特性参数测量装置测量和运用干燥箱干燥法测量的结果如表 4 所示。以运用干燥箱干燥法测量的土壤含水率为对照组,以本文设计装置测量结果为试验组,计算可得土壤物理机械特性参数测量装置测量结果平均相对误差为 5.06%。

表 4 土壤含水率测量结果

Tab.4 Results of soil moisture content test

样本序号	土壤含水率/%		相对误差/%
	对照组	试验组	
1	22.45	23.42	4.29
2	27.69	25.63	7.42
3	20.93	22.16	5.87
4	28.26	29.01	2.66
平均值			5.06

4.3.3 土壤剪切强度参数

土壤物理机械特性参数测量装置测量和 ZJ-D

型直剪仪测量的结果如表 5 所示。以 ZJ-D 型直剪仪测量的土壤抗剪切强度参数粘聚力和内摩擦角为对照组,以本文所设计装置测量结果为试验组,计算可得,对于土壤粘聚力,土壤物理机械特性参数测量装置测量结果平均相对误差为 10.40%,对于土壤内摩擦角,土壤物理机械特性参数测量装置测量结果平均相对误差为 8.20%。

表 5 土壤剪切强度参数测量结果

Tab.5 Results of soil shear strength parameters test

样本序号	粘聚力/kPa		粘聚力相对误差/%	内摩擦角/(°)		内摩擦角相对误差/%
	对照组	试验组		对照组	试验组	
1	51.25	58.23	11.99	24.17	26.27	7.99
2	57.90	65.05	10.99	24.93	23.34	6.81
3	42.82	39.42	8.63	22.14	24.60	10.00
4	41.15	45.22	9.00	26.53	28.84	8.01
均值			10.40			8.20

试验结果表明,本文测量装置满足田间土壤坚实度、含水率、粘聚力和内摩擦角测量需求,能够为油菜直播地表土壤多个物理机械特性参数的快速、集成测量提供技术参考。

5 结论

(1)设计了一种油菜直播地表土壤物理机械特性参数测量装置,可实现土壤含水率、土壤坚实度、土壤粘聚力和内摩擦角 4 种参数集成测量。装置由自走式移动平台、测量控制系统和执行部件组成,可通过遥控操作进行行走和工作,测量结果可通过蓝牙模块传输至操作人员手机 APP 界面予以实时显示。

(2)设计了装置执行部件的圆锥贯入部件、土壤含水率检测部件及测量控制系统硬件和软件,开展了标定试验,确定了测量系统压力传感器和土壤水分传感器输入输出响应关系,结果表明 3 种传感器输入输出响应关系决定系数分别为 0.997 4、0.986 7 和 0.945;通过融合土壤含水率和基于圆锥受力平衡关系获取的摩擦因数数据,运用最小二乘法原理建立了土壤粘聚力和内摩擦角数学测量模型,土壤粘聚力和内摩擦角数学测量模型 R^2 分别为 0.932 和 0.956。

(3)开展了装置田间测试试验,对土壤含水率、坚实度、粘聚力和内摩擦角进行集成测量,相较于 AYD-2 型土壤坚实度测量仪、干燥箱干燥法和 ZJ-D 型直剪仪测量结果,土壤物理机械特性参数测量装置测量坚实度、土壤含水率、粘聚力和内摩擦角结果的平均相对误差分别为 3.34%、5.06%、10.40% 和 8.20%,满足田间测量需求。

参 考 文 献

- [1] 廖庆喜,卜祥利,孙文成,等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 74–84.
LIAO Qingxi, BU Xiangli, SUN Wencheng, et al. Development of driven plow-rotary combined tillage machine for construction of rational tillage in rape seedbeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 74–84. (in Chinese)
- [2] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 38–46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38–46. (in Chinese)
- [3] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 63–73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63–73. (in Chinese)
- [4] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 53–59.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53–59. (in Chinese)
- [5] 廖庆喜,吴崇,张青松,等. 油菜精量联合直播机随速播种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 49–58, 159.
LIAO Qingxi, WU Chong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of speed-dependent seeding control system of rapeseed precision combined seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 49–58, 159. (in Chinese)
- [6] 魏国梁. 油菜直播机犁旋组合式扣垡工作机理及种床制备技术[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
WEI Guoliang. Mechanism and seed bed preparation technology of plowing and rotary combined[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [7] 张青松. 油菜直播机开沟旋耕降阻减阻机理与仿真分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
ZHANG Qingsong. Study on reducing adhesion and resistance and simulation analysis about ditching and rotary soil engaged tools for rape planter[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [8] 冯磊,杨卫中,石庆兰,等. 基于时域传输原理的土壤水分测试仪研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 181–187.
FENG Lei, YANG Weizhong, SHI Qinglan, et al. Soil moisture meter based on time domain transmission principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 181–187. (in Chinese)
- [9] 盛庆元,张西良,杨越,等. 高低频双频激励土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 228–234.
SHENG Qingyuan, ZHANG Xiliang, YANG Yue, et al. Design and experiment of soil moisture sensor based on dual frequency excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 228–234. (in Chinese)
- [10] 张健乐,史东梅,刘义,等. 土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 162–174.
ZHANG Jianle, SHI Dongmei, LIU Yi, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 162–174. (in Chinese)
- [11] 张增林,韩萌,韩文霆,等. 农田土壤无线地下传感器网络节点设计与通信试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 203–212.
ZHANG Zenglin, HAN Meng, HAN Wenting, et al. Design and test of wireless underground sensor network nodes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 203–212. (in Chinese)
- [12] KHABOUSHAN E A, EMAMI H, MOSADDEGHI M R, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 118–127.
- [13] STEFANOW D, DUDZINSKI P A. Soil shear strength determination methods—state of the art[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208: 104881.
- [14] 张淑娟,裘正军,王凤花,等. 农田土壤含水率和坚实度采集仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 75–79.
ZHANG Shujuan, QIU Zhengjun, WANG Fenghua, et al. Test on the field soil moisture and compaction acquisition instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 75–79. (in Chinese)
- [15] 李鸿儒,于唯楚,王振营. 基于迁移学习的 FDR 土壤水分传感器自动标定模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 213–220.
LI Hongru, YU Weichu, WANG Zhenying. Automatic calibration model of FDR soil moisture based on transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 213–220. (in Chinese)
- [16] JIANG Q, CAN M, WANG Y, et al. Estimation of soil shear strength indicators using soil physical properties of paddy soils in the plastic state[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 5609.
- [17] MOAYEDI H, BUI D T, DOUNIS A. Novel nature-inspired hybrids of neural computing for estimating soil shear strength[J].

Applied Sciences, 2019, 9: 4643.

- [18] 翟军亮. 非饱和土抗剪强度试验与土水特征曲线反演初探[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHAI Junliang. Shear strength test and preliminary study on retrieving soil-water curve for unsaturated soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] KHALILI N, GEISER F, BLIGHT G E. Effective stress in unsaturated soils: review with new evidence[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4: 115 – 126.
- [20] BOL E, ONALP A, OZOC AK A, et al. Estimation of the undrained shear strength of adapazari fine grained soils by cone penetration test[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105277.
- [21] MOTAGHEDI H, ARMAGHANI D J. New method for estimation of soil shear strength parameters using results of piezocone [J]. Measurement 2016, 77: 132 – 142.
- [22] 黄飞龙, 李昕娣, 黄宏智, 等. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用[J]. 气象, 2012, 38(6): 764 – 768.
HUANG Feilong, LI Xindi, HUANG Hongzhi, et al. Soil moisture detection system based on FDR and its application[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(6): 764 – 768. (in Chinese)
- [23] COSENZA A T. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity[J]. Applied Clay Science, 2004, 26: 21 – 36.
- [24] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [25] 张健, 谢守勇, 刘军, 等. FDR 土壤湿度传感器的温度补偿模型研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 177 – 182.
ZHANG Jian, XIE Shouyong, LIU Jun, et al. Research on the temperature compensation model of the FDR soil moisture sensor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 177 – 182. (in Chinese)

(上接第 31 页)

- [18] ZHOU T, ZHU Q, DU J. Intuitive robot teleoperation for civil engineering operations with virtual reality and deep learning scene reconstruction[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 46: 101170.
- [19] CHEN Y, ZHANG B, ZHOU J, et al. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105579.
- [20] RAMALINGAM B, MANUEL V H, ELARA M R, et al. Visual inspection of the aircraft surface using a teleoperated reconfigurable climbing robot and enhanced deep learning technique[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019.
- [21] KAMEZAKI M, YANG J, SATO R, et al. A situational understanding enhancer based on augmented visual prompts for teleoperation using a multi-monitor system[J]. Automation in Construction, 2021, 131: 103893.
- [22] 薛金林, 卫瑶瑶, 闫嘉, 等. 基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 395 – 402.
XUE Jinlin, WEI Yaoyao, YAN Jia, et al. Design of wireless network for tractors based on teleoperation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 395 – 402. (in Chinese)
- [23] LI T, ZHENG K, XU K, et al. Revisiting acknowledgment mechanism for transport control: modeling, analysis, and implementation[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 29(6): 2678 – 2692.
- [24] 郑立华, 王露寒, 王敏娟, 等. 基于 Kinect 相机的油麦菜自动化三维点云重建[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 159 – 168.
ZHENG Lihua, WANG Luhan, WANG Minjuan, et al. Automated 3D reconstruction of leaf lettuce based on Kinect camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 159 – 168. (in Chinese)
- [25] 马保建, 鄢金山, 王乐, 等. 基于骨架点的矮化密植枣树三维点云自动配准[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 24 – 32.
MA Baojian, YAN Jinshan, WANG Le, et al. Three-dimensional point cloud automatic registration for dwarf and dense planted jujube tree based on skeleton points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 24 – 32. (in Chinese)
- [26] VÁZQUEZ-ARELLANO M, PARAFOROS D S, REISER D, et al. Determination of stem position and height of reconstructed maize plants using a time-of-flight camera[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 276 – 288.
- [27] 张伟洁, 刘刚, 郭彩玲, 等. 基于三维点云的苹果树叶片三维重建研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 103 – 109.
ZHANG Weijie, LIU Gang, GUO Cailing, et al. Apple tree leaf three-dimensional reconstruction based on point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 103 – 109. (in Chinese)
- [28] EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK D, SEIDEL R. On the shape of a set of points in the plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 551 – 559.
- [29] LEE D T, SCHACHTER B J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1980, 9(3): 219 – 242.
- [30] ŽALIK B. An efficient sweep-line Delaunay triangulation algorithm[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(10): 1027 – 1038.