

农田耕后地表微地貌自走遥控测量装置设计与试验

张青松^{1,2} 齐 涛¹ 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: 针对油菜精量联合直播机作业后,田间作业厢面微地貌形状特征参数测量困难、传统测量方法存在测量效率和误差难以兼顾、现有测量装置操作便捷性不够的问题,设计了一种自走遥控地表微地貌测量装置。该装置主要由行走部件和微地貌测量系统组成,装置可以通过遥控操作到达指定测量区域并通过手机 APP 控制激光雷达扫描作业高度和扫描作业速度及实时显示测量装置测量状态信息,实现农田耕后地表微地貌特征高效测量。对装置行走部件悬挂避振机构和驱动机构行走驱动力进行了设计和分析,确定了弹簧避振器中圆柱螺旋压缩弹簧参数和驱动机构驱动电机参数;对微地貌测量系统控制单元硬件和软件进行了设计,确定了控制单元硬件电路和软件工作流程;对装置倾斜误差和系统误差进行了分析,消除了装置倾斜误差和系统误差。开展了装置田间测量试验,对地表厢面微地貌特征及畦沟沟型进行了测量,结果表明:相较于传统针板法测量方式,所开发的微地貌测量装置测量油菜直播机作业后的地表微地貌特征,获得的厢面平整度特征参数高度均方根、表面相关长度、畦沟平均沟宽、沟宽稳定性系数、平均沟深和沟深稳定性系数误差分别为 4.01%、4.81%、3.70%、1.34%、2.09% 和 2.89%。研究为油菜精量联合直播机等机具农田作业后厢面地表微地貌特征测量提供参考。

关键词: 油菜直播; 地表微地貌; 测量装置; 自走遥控; 激光雷达

中图分类号: S232.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0073-10 OSID: 

Design and Experiment of Farmland Surface Micro-landform Measuring Device after Rapeseed Planter Seeding

ZHANG Qingsong^{1,2} QI Tao¹ 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: Aiming at the problems that the characteristic parameters' measurement of the micro-landform shape of the working surface is difficult, the measuring efficiency and error by the traditional measurement method are difficult to balance, and the operation convenience of the existing measurement device is not enough after the operation of the rapeseed combined direct seeder, and a self-propelled remote control farmland surface micro-geomorphology measuring device was designed. The device was mainly composed of a moving unit and a micro-geomorphology measurement system. The device can reach the designated measurement area by remote control operation, control the laser radar to scan height and speed by the mobile phone APP, and display the measurement status information in real time to realize the efficient measurement of the shape characteristics of the farmland surface micro-geomorphology. The driving force of the suspension vibration avoidance mechanism and the driving mechanism of the moving unit of the device was designed and analyzed, and the parameters of the cylindrical spiral compression spring and the driving motor of the moving unit were determined. The hardware and software of the control unit of the micro-landform measurement system were designed, and the hardware circuit and software workflow of the control unit were determined. The tilt error and system error of the device were

收稿日期: 2022-11-09 修回日期: 2023-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901204)、国家自然科学基金项目(32001427)、财政部和农业农村部:国家现代农业(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,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

analyzed, and the correction method of eliminating tilt error and system error was determined. The field measurement test of the device was carried out to measure the micro-geomorphologic characteristics of the surface and the furrow type. The results showed that the developed farmland surface micro-geomorphologic measuring device measured the surface micro-geomorphologic shape characteristics after the operation of the rapeseed combined direct seeder and the rape micro-ridge direct seeding machine. The root mean square height, surface correlation length, average furrow width, furrow width stability coefficient, average furrow depth and furrow depth stability coefficient were 4.01%, 4.81%, 3.70%, 1.34%, 2.09% and 2.89%, respectively.

Key words: rapeseed planter; surface micro-topography; measuring device; self-propelled remote control; LiDAR

0 引言

微地貌或粗糙度反映田间土壤表面高度变化特性,通过测量和分析农田地表微地貌形状特征,可以评价农业机械触土部件作业质量^[1-4],如油菜精量联合直播机作业后,由于其作业厢面质量包括厢面平整度、碎土率和畦沟沟型等因素,均会对油菜出苗和后期生长造成一定影响^[5-8],快速准确获取机具作业后的厢面微地貌特征,对评价直播机作业厢面质量,改进优化直播机触土部件结构和运行参数具有重要意义。

目前测量农田耕作地表粗糙度、厢面形状、畦沟形状等几何特征的方法有接触式测量方法和非接触式测量方法。接触式测量方法主要包括针板法、链条法、剖面法等,所需设备结构简单,由于测量值通过尺度测量获得,测量过程中易破坏土壤表面原有微观结构,且该方法采样样本量不足,导致测量数据无法准确反映农田地表真实状况,测量精度难以保证^[9-13]。随着地表观测技术的发展,非接触式测量方法得到发展,包括声波传感、图像采集、高光谱仪、激光扫描测距法等,能够实现较高精度的地表高度测量且不会影响原有地表微地貌特征^[14-18]。其中激光测量由于不受光照强度和阴影环节影响,适用于尺度变化较小的地表高程测量场合,目前成为非接触式地表高程测量主流应用技术。刘立超等^[19-20]利用激光雷达开展了油菜直播机作业厢面地表粗糙度测量。刘洁等^[21]基于线结构激光传感器测量了土壤表面粗糙度。王韦韦等^[22]采用激光三角法测量了耕作土壤沟形。然而,运用激光雷达作为核心部件,能够自走遥控、使用便捷和操作交互地进行农田地表厢面及沟形测量的装置有待进一步研究。

本文针对油菜精量直播机作业后,田间作业厢面微地貌形状特征参数测量困难、传统测量方法存在测量效率和误差难以兼顾、现有测量装置操作便捷性不够的问题,设计一种自走遥控地表微地貌测

量装置。该装置主要由行走部件和微地貌测量系统组成,可以通过遥控操作到达指定测量区域并通过手机 APP 控制激光雷达扫描作业高度和扫描作业速度及实时显示测量装置测量状态信息,实现农田地表微地貌形状特征高效测量,以期为油菜精量联合直播机等机具农田作业后厢面质量快速评价提供方法。

1 装置结构及工作原理

1.1 总体结构

农田耕后地表微地貌测量装置主要由行走部件、微地貌测量系统组成,其中微地貌测量系统由测量系统执行部件和测量系统控制单元组成,如图 1 所示,行走部件采用四轮独立驱动,通过手持遥控操作,实现行走控制。行走部件主要由驱动机构、悬挂避振机构、连接载物平台等组成。测量系统执行部件主要由激光雷达、电动推杆和滚珠丝杆滑台等组成,搭载在行走部件连接载物平台上。农田耕后地表微地貌测量装置主要技术参数如表 1 所示。

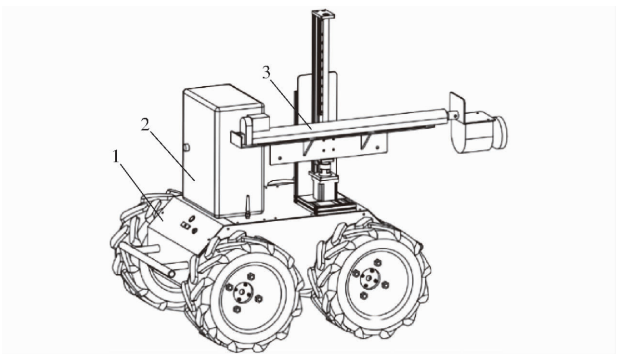


图 1 农田耕后地表微地貌测量装置结构示意图
Fig.1 Soil surface micro-topography measuring device structure diagram

1. 行走部件 2. 测量系统控制单元 3. 测量系统执行部件

1.2 工作原理

装置微地貌测量系统工作原理如图 2 所示,激光雷达通过连接户外路由与 PC 上位机进行通讯,通过 PC 端激光雷达配套软件可以对激光雷达进行扫描参数设置、指令下达以及数据保存等操作。通

表 1 装置主要技术参数

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 000×500×950
最大爬坡角度/(°)	30
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.5~1.0
扫描最大高度/mm	1 200
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	2~8

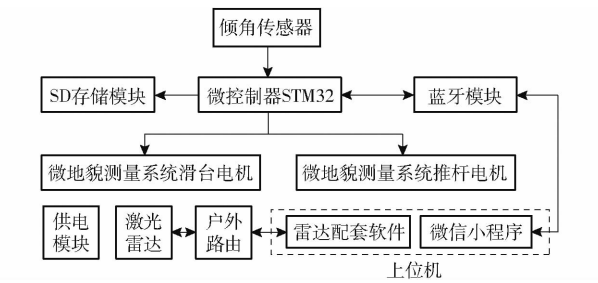


图 2 微地貌测量系统工作原理图

Fig.2 Measuring electronic control system structure block diagram

过倾角传感器自动获取装置测量作业时的倾斜角，同时将装置倾斜角、激光雷达扫描高度、扫描速度及扫描距离等信息，通过蓝牙模块发送到手机控制端。

农田耕后地表微地貌测量装置作业时，操作人员通过遥控器发送控制指令，控制指令通过 2.4 GHz 频道传输给 SBUS 接收器。根据 SBUS 协议，SBUS 接收器将指令传达给行走部件 STM32 单片机，单片机通过解析指令，控制行走部件驱动电机的转速及转向，对农田耕后地表微地貌测量装置运动方向加以控制，实现农田耕后地表微地貌测量装置前进、后退和转向功能。

待农田耕后地表微地貌测量装置到达田间指定测量区域时，操作人员通过手机 APP 与微地貌测量系统进行通讯连接。连接成功后，通过手机端操作控制测量系统执行部件滑台电机和推杆电机，设定激光雷达扫描作业高度和扫描作业速度。当激光雷达到达指定扫描高度后，电动推杆推动激光雷达以固定前进扫描速度，用线扫描方式，开始对待测地表进行扫描采样，激光雷达在扫描方向上每间隔一定距离，采集一帧地表截面地貌信息，直至电动推杆带动激光雷达移动至最大行程位置处，结束扫描采样。

2 关键部件设计

2.1 行走部件设计

行走部件作为农田耕后地表微地貌测量装置行走运动底盘，其行走的平稳性及动力充足性对农田耕后地表微地貌测量装置田间作业具有重要影响，需要对行走部件关键部件悬挂避振机构和驱动机构

行走驱动力进行设计和分析。

2.1.1 悬挂避振机构设计

农田耕后地表微地貌测量装置在农田地表移动时，由于受到农田地表起伏不平地形影响，行走部件产生不规则振动，影响农田耕后地表微地貌测量装置行驶稳定性及装置测量精度。农田耕后地表微地貌测量装置行走部件设置悬挂避振机构，能够显著提高轮式移动平台行驶的平顺性。结合农田耕后地表微地貌测量装置行走部件为四轮独立驱动-差速转向驱动转向方式，行走部件悬挂避振机构采用平行四边形悬挂避振机构，其可以将行走轮与车身进行柔性连接，实现行走减振。农田耕后地表微地貌测量装置通过起伏地表时，如图 3 所示，平行四边形悬挂避振机构带动行走轮，通过铰接点转动一定角度，右车轮抬高，弹簧避振器中圆柱螺旋压缩弹簧受压，减弱农田耕后地表微地貌测量装置作业时受到的冲击力与振动，装置振动减小，实现行走平稳。

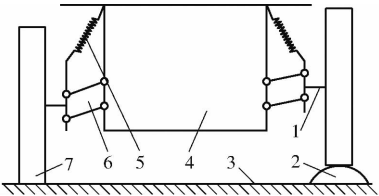


图 3 测量装置通过起伏地表示意图

Fig.3 Schematic of vibration avoidance principle

1. 车轮连接轴 2. 地表障碍物 3. 农田地表 4. 行走部件连接载物平台 5. 弹簧避振器 6. 平行四边形悬挂避振机构 7. 行走轮

弹簧避振器是悬挂避振机构重要组成部分，选取适宜的弹簧避振器能够使得行走部件既能降低振动频率，又能降低装置重心，提高行驶稳定性。由于弹簧避振器中最重要的参数为弹簧刚度，现对其进行设计分析。农田耕后地表微地貌测量装置行驶过程中，悬挂性能受到车身质量、车轮质量、车轮刚度、地表垂直方向位移等影响，为计算适宜的弹簧刚度，构建独立悬挂与地面的振动模型^[23]，如图 4 所示。

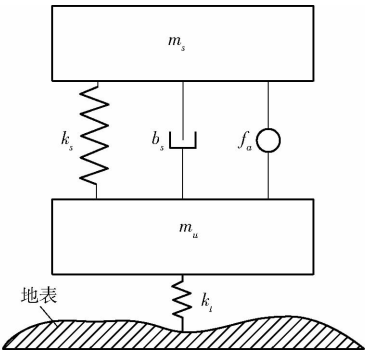


图 4 悬挂装置与地表振动模型

Fig.4 Suspension and ground vibration model

图中， m_s 为单个行走轮承受的装置质量，其值可

以近似等于 1/4 的整体装置质量, m_u 为车轮和车轴的等效质量, f_a 为主动悬挂作用力, b_s 为悬挂阻尼系数, k_s 为弹簧避振器弹簧刚度, k_t 为轮胎刚度。由于农田耕后地表微地貌测量装置行走部件悬架为被动悬架, 此处主动悬挂作用力 F_a 为 0, 忽略悬挂阻尼, 装置振动模型满足

$$\det(-4\pi^2 f^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) = 0 \tag{1}$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix}$$

式中 $\mathbf{M}$ ——模型等效质量, kg
 f ——测量装置系统自然频率, Hz
 $\mathbf{K}$ ——模型刚度矩阵

由于行走轮轮胎刚度比弹簧避振器的弹簧刚度大得多, 因此可得

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \tag{2}$$

对于作业工况为野外田间工况的行走部件, 自然频率一般取 1.5 ~ 3.0 Hz^[24], 该处自然频率 f 取 2.5 Hz。 m_s 为 1/4 装置质量, 由于整机质量 m 为 80 kg, 同时考虑测量装置在起伏不平地表作业时, 行走部件受瞬时冲击力, 安全系数取 3 倍, 代入式 (2) 可得弹簧刚度为 14.8 N/mm。根据农田耕后地表微地貌测量装置整机结构尺寸要求, 设计弹簧避振器中圆柱螺旋压缩弹簧自由长度为 125 mm, 压缩长度为 65 mm, 外径为 39.2 mm, 弹簧丝直径为 4.1 mm。

2.1.2 驱动机构行走轮驱动功率计算

行走部件驱动机构为四轮独立驱动-差速转向驱动转向方式, 该转向方式结构简单、转向方便, 其每个行走轮轮轴上安装有一个驱动电机, 便于灵活控制转向。为使农田耕后地表微地貌测量装置能在不同坡度及起伏地表行走时, 具有充足的行走动力和良好的操控性能, 对行走部件驱动机构驱动电机功率进行计算, 农田耕后地表微地貌测量装置在直线行走作业时, 行走部件受力分析如图 5 所示。

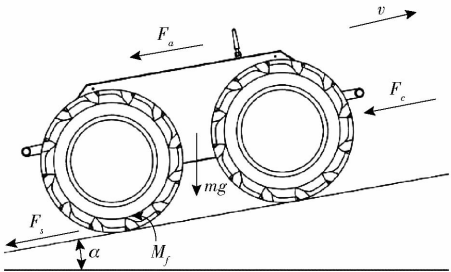


图 5 行走部件受力分析图

Fig. 5 Force analysis of mobile platform

根据图 5 可得行走部件行驶所需驱动力 F 为

$$F = F_s + F_g + F_a + F_c \tag{3}$$

其中 $F_s = M_f/r$ $F_g = mgsin\alpha$ $F_a = k_a ma$

$$F_c = CAv^2 \quad M_f = \delta mgcos\alpha$$

式中 F ——行走部件行驶总阻力, N
 F_g ——行走部件上坡阻力, N
 F_a ——行走部件加速阻力, N
 F_s ——行走部件滚动摩擦阻力, N
 F_c ——行走部件空气阻力, N
 r ——行走轮半径, 取 0.175 m
 M_f ——行走部件滚动摩擦力偶, N·m
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²
 k_a ——旋转质量换算系数, 取 1.05
 δ ——土壤滚动摩擦阻系数, 取 5
 A ——行走部件迎风横截面积, m²
 v ——行走部件行走速度, m/s
 α ——爬坡坡度, (°)
 a ——行走部件行走加速度, m/s²
 C ——空气阻力系数

农田耕后地表微地貌测量装置在行走作业过程中, 一般为匀速行走且行走速度较慢, 装置整体尺寸较小, 迎风横截面积小, 因此忽略行走部件加速阻力 F_a 和空气阻力 F_c 影响。由于装置为四轮驱动, 则每个轮子驱动电机所需功率为

$$P = \frac{1}{9.55} Tn \tag{4}$$

其中 $T = \frac{FSd}{2N\eta i}$ $n = \frac{60vi(1 + \gamma)}{\pi d}$

式中 P ——驱动电机功率, W
 T ——驱动电机转矩, N·m
 n ——驱动电机转速, r/min
 N ——行走轮个数
 d ——行走轮直径, m
 S ——过载安全系数, 取 1.1
 η ——驱动电机传动效率, 取 0.95
 i ——驱动电机传动速比, 取 1
 γ ——轮胎滑移率, 取 0.08

由于农田耕后地表微地貌测量装置设计最大爬坡坡度为 30°, 最大行驶速度为 1 m/s, 车轮直径为 0.35 m, 联立式 (3)、(4), 可得行走部件行驶所需驱动力为 219.97 N, 电机转速为 54.60 r/min, 电机转矩为 11.142 N·m, 行走部件驱动机构驱动电机功率为 68.27 W。

2.2 微地貌测量系统设计

2.2.1 执行部件结构

微地貌测量系统包括测量系统执行部件和测量系统控制单元, 其中微地貌测量执行部件主要由激

光雷达、电动推杆、滚珠丝杆滑台、推杆电机、滑台电机及相关支撑固定板组成,其中推杆电机和滑台电机类型为步进电机,如图 6 所示。

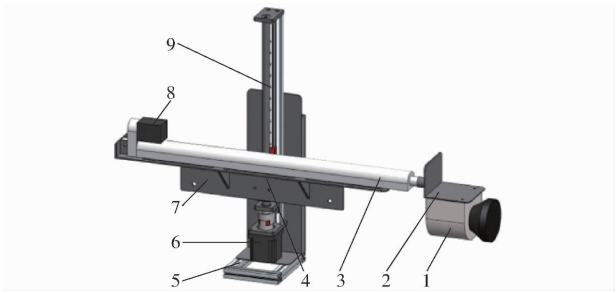


图 6 微地貌测量系统执行部件结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of measuring device execution unit
1. 激光雷达 2. 雷达连接板 3. 电动推杆 4. 倾角传感器 5. 滑台支撑板 6. 滑台电机 7. 推杆连接板 8. 推杆电机 9. 滚珠丝杆滑台

激光雷达采用德国 SICK 公司 LMS111 - 10100 型 2D 单线激光雷达,扫描视野范围为 90°,扫描角度分辨率为 0.25°,扫描频率为 50 Hz。滚珠丝杆滑台行程为 500 mm,装置作业时,滚珠丝杆滑台带动电动推杆及激光雷达上下运动,当滑台处于最高位置时,激光雷达距地表 1 200 mm,此时扫描的最大地表宽度为 2 400 mm。

激光雷达到达设定扫描高度后开始扫描作业时,电动推杆推动激光雷达完成对待测地表扫描工作,电动推杆行程为 500 mm,激光雷达扫描覆盖最大范围为 2 400 mm × 500 mm,即 1.2 m² 区域范围。依据 Nyquist 采样定理,计算地表粗糙度参数

时需要满足采样间隔不超过 10 mm,为满足计算地表粗糙度要求和准确测量地表微地貌特征,根据扫描田间作业工况,设定激光雷达扫描方向上分辨率为 2 ~ 8 mm。

由于农田耕后地表微地貌测量装置田间测量作业时,行走部件会发生倾斜,为获取装置作业时的作业方向前后倾斜角,电动推杆连接板上安装有倾角传感器。倾角传感器选用维特智能科技有限公司 SINDT01 型单轴倾角传感器,测量角度范围为 -180° ~ 180°,测量精度为 0.1°。

2.2.2 控制单元硬件设计

微地貌测量系统控制单元包括控制单元硬件和控制单元软件,其中控制单元硬件集成测量系统执行部件滑台电机和推杆电机控制、倾角传感器角度参数获取、与手机 APP 信息交互、测量数据传输和保存等功能。控制单元硬件微控制器采用意法半导体 ST 公司 STM32F407ZGT6 型单片机,设计的控制单元主要硬件电路图如图 7 所示。图中,标号 U2 为滑台电机驱动器接口,标号 U3 为推杆电机驱动器接口,为实现双路电机的驱动控制,将两个电机驱动器对应的信号端分别通过 TIM3_CH3 和 TIM3_CH4 通道与 STM32 相连。标号 P1 为蓝牙模块,型号为 HC - 08,其通过串口 USART2 实现 STM32 与手机 APP 之间的通信联接;标号 P2 为倾角传感器,型号为 SINDT01,其数据回传速率为 200 Hz,测量精度为 0.1°,工作时使之通过串口 USART3 向 STM32 单片机发送测量数据。图中, D1、D2 为红、绿色指

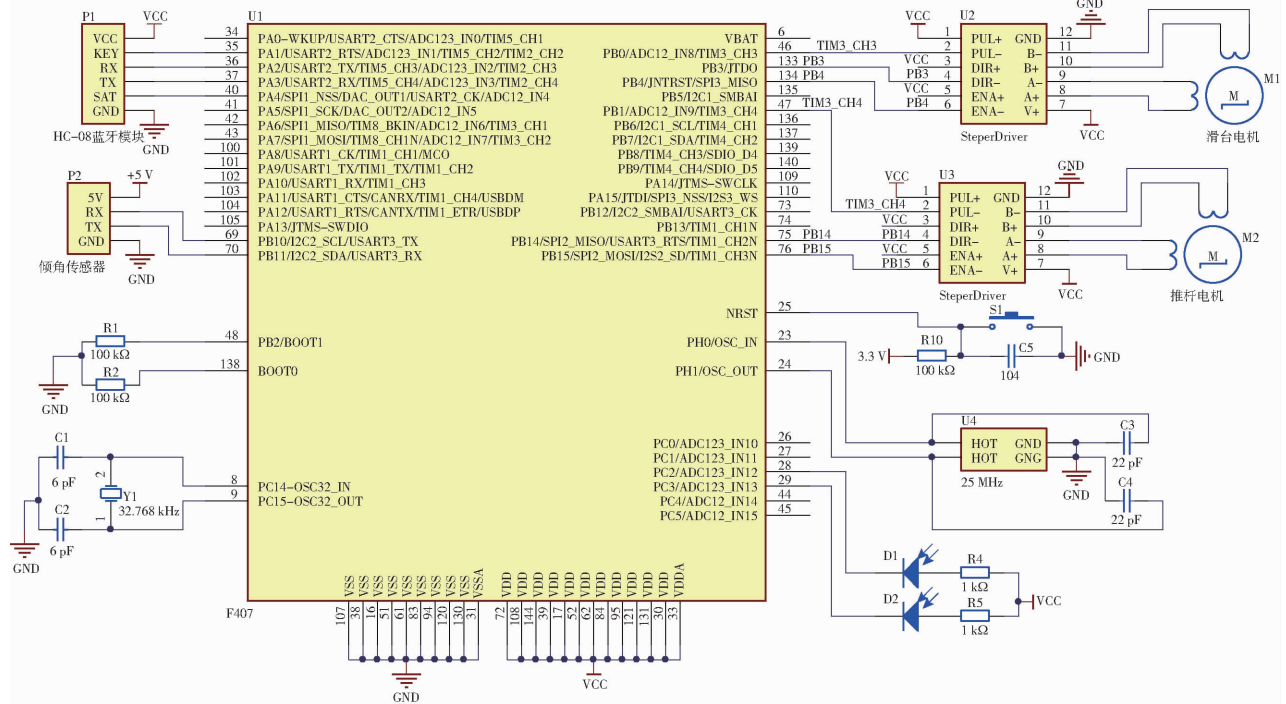


图 7 微地貌测量系统控制单元主要硬件电路图

Fig. 7 Hardware circuit diagram of control unit of microtopography measurement system

示灯,分别用于提示系统工作情况和蓝牙通信联接状态。根据硬件电路设计图制作电路板并安装相关硬件元件,考虑到田间作业灰尘影响,将之集成安装在 PVC 材质电控箱里。

2.2.3 控制单元软件设计

微地貌测量系统控制单元软件使用 Keil MDK v5 平台进行开发,开发语言为 C 语言,软件工作流程图如图 8 所示。

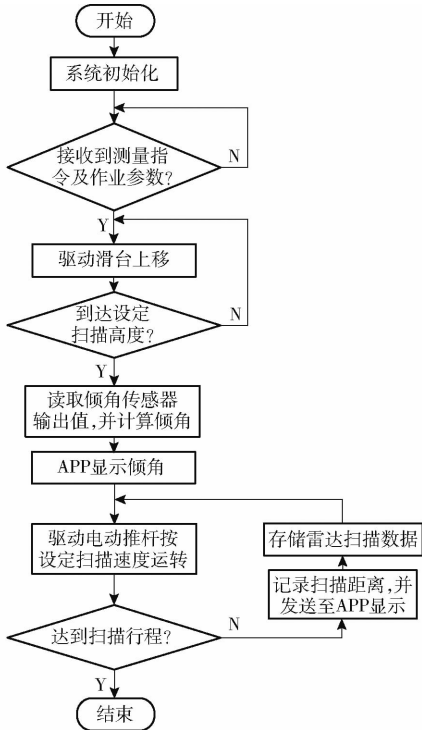


图 8 测量系统软件流程图

Fig. 8 Laser radar scanning function procedures

系统工作时,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 发送作业参数及测量指令。其中作业参数包括激光雷达扫描高度和扫描速度。当接收到测量指令时,STM32 单片机通过 TIM3_CH3 通道输出脉冲频率信号驱动滚珠丝杆滑台步进电机运转,带动激光雷达上移使之达到设定扫描高度。之后,STM32 单片机对倾角传感器发送串口指令,读取返回角度数据并通过对应解算方法得到当前移动平台前后倾角,同时通过蓝牙模块将其传输至手机 APP 予以显示。接着,STM32 单片机通过 TIM3_CH4 通道输出脉冲频率信号,控制推杆电机按照设定扫描速度推动激光雷达向前运动,同时实时记录激光雷达的扫描距离并将之发送至手机 APP 予以实时显示,与之对应的激光雷达扫描数据则通过户外路由以无线网的方式上传至 PC 上位机雷达配套软件予以存储显示,直到地表微地貌系统完成整个测量区域的扫描工作。

为实现中央核心控制板与上位机之间的指令发送以及参数上传等功能,选用微信小程序作为上位机软件,利用微信开发者工具对其进行开发,实现蓝牙连接,激光雷达扫描高度调节、扫描速度调和复位等指令发送及数据交互上传显示等功能。

3 装置误差分析与修正

3.1 装置倾斜误差分析与修正

农田耕后地表微地貌测量装置在田间作业时,因地表起伏不平,测量装置无法保证其当前测量姿态完全处于水平。由于连接激光雷达的推杆轴与推杆之间沿轴向可以自由转动,农田耕后地表微地貌测量装置田间作业发生左右倾斜时,激光雷达受重力作用可以自行调正,消除装置左右倾斜对测量精度的影响,但无法消除装置前后倾斜对测量精度的影响。

为研究农田耕后地表微地貌测量装置前后倾斜对测量结果的影响,假设农田耕后地表微地貌测量装置在田间作业存在向前倾斜角 θ ,激光雷达测量作业状态如图 9 所示。开展试验研究,分别设置农田耕后地表微地貌测量装置处于向前倾斜 5° 、 10° 、 15° 时,激光雷达扫描行程方向分辨率设置为 2 mm ,对同一水平面进行扫描,获得的高度扫描结果如图 10 所示。

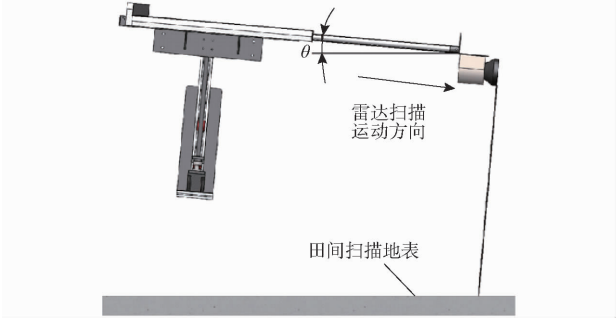


图 9 测量装置向前倾斜作业状态示意图

Fig. 9 Mobile platform tilt diagram

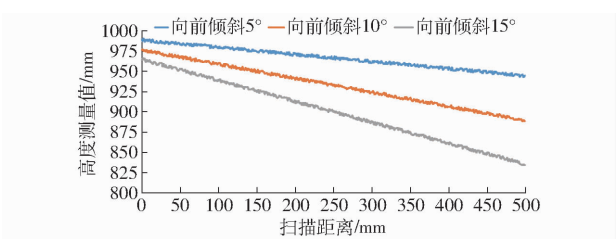


图 10 倾斜状态时装置高度测量结果

Fig. 10 Measurement results of device height in inclined state

由图 10 可知,由于每次试验开始时,激光雷达相对滚珠丝杆滑台高度位置已经固定,当农田耕后地表微地貌测量装置作业存在倾斜时,所获得的高度测量值不同。通过分析对同一水平面不同倾斜度

激光雷达扫描获得的高度位置数据,可以得出农田耕后地表微地貌测量装置在田间作业时,装置发生前后方向倾斜会对测量结果准确性产生影响。因此,为保证农田耕后地表微地貌测量装置在田间作业时测量结果的准确性,需要对装置倾斜作业状态时测量误差进行分析和修正。

对农田耕后地表微地貌测量装置倾斜作业状态下误差进行分析,以激光雷达扫描方向上某一截面构建倾斜误差分析模型,如图 11 所示。

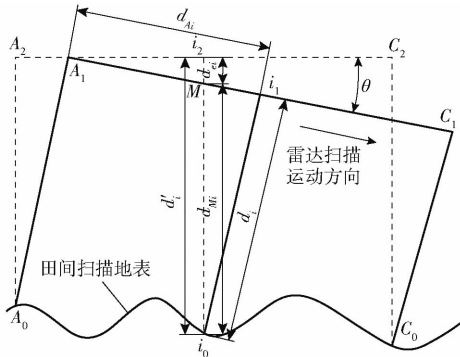


图 11 装置倾斜作业状态测量误差分析

Fig. 11 Measurement error analysis of device tilt operation

当农田耕后地表微地貌测量装置在田间作业存在向前倾斜 θ 时,假设在电动推杆带动下,激光雷达从点 A_1 开始向前下方运动,激光雷达运行到位置点 i_1 时,由图 11 可知,激光雷达此时运动行程为 d_{Ai} ,实际测量到的地表点 i_0 ,测量的距离为 d_i ,实际点 i_0 到水平线距离为 d'_i ,由图 11 可知

$$\begin{cases} d'_i = d_{ei} + d_{Mi} \\ d_{ei} = (d_{Ai} - d_i \tan \theta) \sin \theta \\ d_{Mi} = \frac{d_i}{\cos \theta} \\ d_{Ai} = i\delta \end{cases} \quad (5)$$

式中 d_{ei} ——点 i_2 到点 M 垂直距离, mm
 d_{Mi} ——点 i_0 到点 M 垂直距离, mm
 i ——激光雷达扫描采样序号
 δ ——激光雷达扫描行程方向分辨率

由式(5)可得,农田耕后地表微地貌测量装置向前倾斜作业状态下的测量数据修正公式为

$$d'_i = d_i \cos \theta + i\delta \sin \theta \quad (6)$$

同理,当农田耕后地表微地貌测量装置向后倾斜作业时,其测量距离修正公式为

$$d'_i = d_i \cos \theta - i\delta \sin \theta \quad (7)$$

运用式(6)对农田耕后地表微地貌测量装置处于向前倾斜 5° 、 10° 、 15° 时的测量结果进行修正,修正后的测量高度结果如图 12 所示,结果表明,农田耕后地表微地貌测量装置在一定倾斜角度状态作业时,通过数据修正补偿倾斜误差后,同一水平面高度

测量值得到改善,消除了农田耕后地表微地貌测量装置由于发生前后方向倾斜对测量结果的影响。

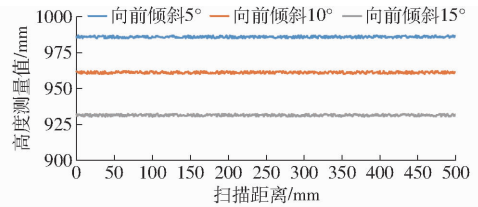


图 12 倾斜误差补偿后装置高度测量结果

Fig. 12 Measurement results of device height after tilt error compensation

3.2 装置系统误差分析与修正

由于激光雷达在测量距离 $0 \sim 10$ m 内存在 $-25 \sim 25$ mm 系统误差,直接用于农田微地貌测量无法满足测量精度,需对测量装置获得的测量数据进行去噪,消除随机误差及进行系统误差修正。测试试验如图 13 所示,以铝型材作为基准水平面,推杆电机不运动,控制滑台电机,使激光雷达测量中心与该基准面距离为 960 mm,分别设定均值滤波次数为单次采样、20 次均值滤波采样和 100 次均值滤波采样。将 3 组所测数据经倾斜误差修正后,所得曲线如图 14 所示,可得采样点高度曲线随着均值滤波次数增加,其上下波动幅度减小,采样位置高度在不同次数均值滤波下变化趋势一致。由于均值滤波处理会增加单帧数据采用时间,为兼顾采集测量精度和效率,确定 20 次均值滤波为测量部件田间工作时的滤波次数。

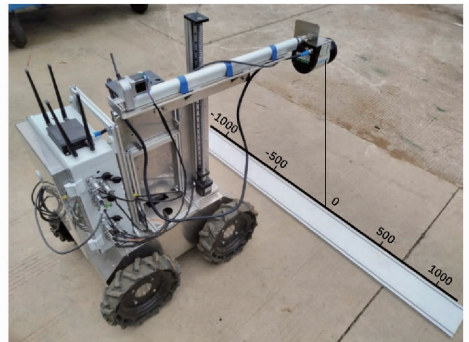


图 13 装置系统误差测试试验

Fig. 13 System error test

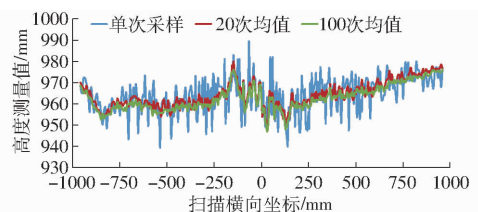


图 14 不同均值滤波次数下的高度采样曲线

Fig. 14 Sampling curves at different mean filtering times

由于农田耕后地表微地貌测量装置田间作业时,测量对象包括厢面、垄面、畦沟等地表,测量对象

高度方向起伏较大,需要研究激光雷达在不同测量高度下系统误差变化情况。采用 20 次均值滤波,通过控制滚珠丝杆滑台高度,在分别距离基准面 800、840、880、920、960、1 000、1 040、1 080、1 120、1 160、1 200 mm 高度下进行测量试验。测量数据经倾斜误差修正后,获得不同测量高度下测量数据变化曲线如图 15 所示,由图 15 可得出,同一测量高度下,激光雷达存在系统误差且不同高度下相对应的采样点具有统一的变化趋势。

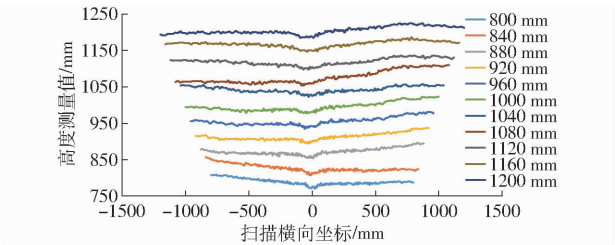


图 15 不同测量高度下测量结果

Fig. 15 Measurement results at different measuring heights

根据以上分析,对系统测量误差采用文献[19]方法进行修正。修正后得到高度测量数据曲线如图 16 所示,对比图 15 可以得出,农田耕后地表微地貌测量装置高度测量数据通过系统误差修正后,雷达扫描横向测量的同一水平高度位置测量值曲线得到改善,不同高度下曲线近似水平,消除了农田耕后地表微地貌测量装置系统误差对测量结果的影响。

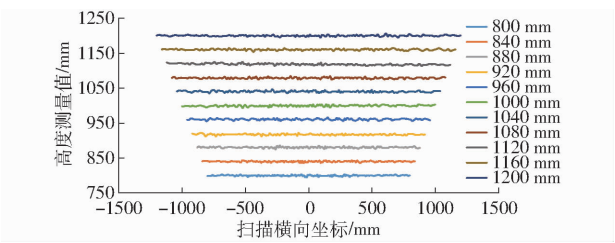


图 16 系统误差修正后装置高度测量结果

Fig. 16 Sampling curves at different mean filtering times after error compensation

4 田间测试试验

4.1 试验条件

为验证所设计地表微地貌测量装置的测量性能,在华中农业大学现代农业科学试验基地开展田间测量试验。测量地表为油菜精量联合直播机旋耕及开畦沟作业后的厢面(地表 1,图 17a)和油菜微垄直播机起微垄和开畦沟作业后厢面(地表 2,图 17b)。

4.2 试验方法

分别在油菜精量联合直播机和油菜微垄直播机作业后地表,操作人员遥控农田耕后地表微地貌测量装置到达待测量区域后,通过手机 APP 设置相关参数并发送测量指令,开始测量相关厢面、畦沟及微



(a) 地表1 (b) 地表2

图 17 装置田间试验测量作业

Fig. 17 Measurement condition and measurement site

垄地表信息,手机 APP 显示信息如图 18 所示。待农田耕后地表微地貌测量装置测量完后,在装置测量区域,用传统针板法测量方法对畦沟沟型、厢面平整度及微垄垄型进行测量,5 次取平均值,其中,测量装置测量结果作为试验组,传统针板法测量结果作为对照组。



图 18 微信小程序开发界面

Fig. 18 WeChat applets development interface

4.3 评价指标

油菜播种机作业后,农田微地貌信息主要包括厢面地表平整度、畦沟沟型等参数,其中厢面平整度描述土壤高地分布特性,主要用高度均方根和表面相关长度来表征,畦沟沟型主要用沟宽、沟深及对应稳定性系数来评价。

高度均方根 s_{rms} 可以表征垂直方向上各随机点的高度特征信息,对于一维地表截面厢面平整度,其高度均方根计算式为

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

式中 z_i ——第 i 个采样点高度
 $\bar{z}$ ——总采样点高度平均值
 n ——采样点个数

对于整个测量区域厢面平整度,其高度均方根表达式为

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{RC} \sum_{r=1}^{R-1} \sum_{c=1}^{C-1} (z(x_r, y_c) - \bar{z})^2} \quad (9)$$

式中 R ——测量区域行数
 C ——测量区域列数
 c ——列序号 r ——行序号
 $z(x_r, y_c)$ —— (x_r, y_c) 测量点位高度

表面相关长度 L 是估计地表两点间统计独立性的参数,反映各采样点在不同位置之间的联系。如果两点间的距离大于该值,则认为这两点的高度在统计学中相互独立。为求解 L ,需求解一组数据的归一化自相关函数 $\rho(\xi)$,计算式为

$$\rho(\xi) = \frac{\sum_{i=1}^{n-m+1} z_i z_{i+m-1}}{\sum_{i=1}^n z_i^2}$$

(10)

其中 $\xi = (m - 1) \Delta x$

式中 Δx ——相邻采样点间距
 m ——大于等于 1 的整数

当 $\rho(\xi) = e^{-1}$ 时,对应的 ξ 的位置为土壤表面粗糙度的相关长度。

4.4 结果与分析

4.4.1 作业厢面形状

对运用农田耕后地表微地貌测量装置测量厢面获得的数据和运用传统针板法测量厢面获得的数据分别进行处理,计算厢面平整度特征参数表面相关长度和高度均方根,结果如表 2 所示。相较于传统针板法测量方法,用所开发的农田耕后地表微地貌测量装置测量油菜精量直播机和油菜微垄直播机作业后的地表厢面,获得的厢面平整度特征参数高度均方根平均相对误差分别为 3.12%、4.90%,厢面平整度特征参数表面相关长度平均相对误差分别为 5.21%、4.41%。

对运用农田耕后地表微地貌测量装置测量获得的油菜精量联合直播机旋耕作业地表厢面和油菜微

表 2 厢面平整度特征参数测量结果

Tab.2 Measurement results of surface planeness characteristic parameters

地表	高度均方根			表面相关长度		
	对照组/	试验组/	误差/	对照组/	试验组/	误差/
	mm	mm	%	mm	mm	%
1	15.19	14.73	3.12	56.96	54.14	5.21
2	27.82	26.52	4.90	68.20	71.35	4.41
平均值			4.01			4.81

垄直播机起微垄作业地表厢面数据,进行倾斜误差和系统误差修正后,进行三维数字化建模,结果如图 19 所示,其中标尺中不同颜色对应着不同微地貌高度。由表 2 和图 19 可知,农田耕后地表微地貌测量装置按照所设定的采样参数进行扫描测量和后续数据修正,可以三维重建机具作业厢面微地貌形状特征。

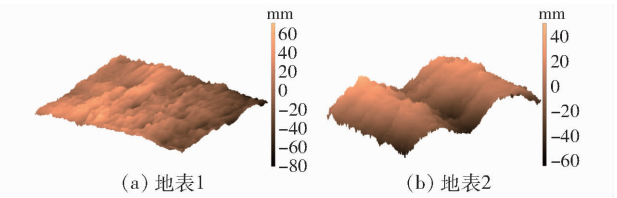


图 19 作业地表厢面三维数字化建模
Fig. 19 Three-dimensional digital models of ditching surface

4.4.2 作业畦沟沟型

对运用农田耕后地表微地貌测量装置测量畦沟获得的数据和运用传统针板法测量畦沟获得的数据分别进行处理,计算畦沟沟宽、畦沟沟深及对应稳定性系数,结果如表 3 所示。相较于传统针板法测量方法,用所开发的农田耕后地表微地貌测量装置测量油菜精量直播机和油菜微垄直播机作业后的畦沟,获得的平均沟宽、沟宽稳定性系数、平均沟深和沟深稳定性系数误差分别为 3.70%、1.34%、2.09% 和 2.89%。

表 3 畦沟特征参数测量结果

Tab.3 Measurement results of furrow characteristic parameters

地表	平均沟宽			沟宽稳定性系数			平均沟深			沟深稳定性系数		
	对照组/	试验组/	误差/	对照组/	试验组/	误差/	对照组/	试验组/	误差/	对照组/	试验组/	误差/
	mm	mm	%	%	%	%	mm	mm	%	%	%	%
1	386.74	377.48	2.45	92.68	94.12	1.53	144.02	147.35	2.26	93.78	90.76	3.33
2	367.50	386.59	4.94	94.29	95.39	1.15	127.02	124.63	1.91	91.35	93.63	2.44
平均值			3.70			1.34			2.09			2.89

对运用农田耕后地表微地貌测量装置测量获得的油菜精量联合直播机旋耕作业的畦沟和油菜微垄直播机起微垄作业的畦沟数据,进行倾斜误差和系统误差修正后,进行三维数字化建模,得到结果如图 20 所示,其中标尺中不同颜色对应着不同微地貌高度。由表 3 和图 20 可知,农田耕后地表微地貌测

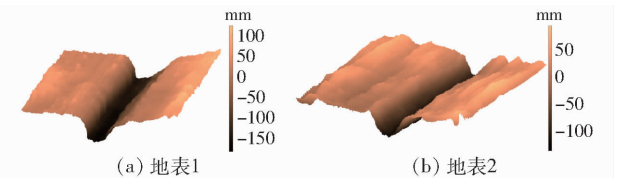


图 20 作业地表畦沟三维数字化建模
Fig. 20 Three-dimensional digital models of ditching surface

量装置按照所设定的采样参数进行扫描测量和后续数据修正,可以三维重建机具作业厢面微地貌形状特征。

5 结论

(1)设计了一种农田耕后地表微地貌测量装置,该装置主要由行走部件和微地貌测量系统组成,装置可以通过遥控操作到达指定测量区域并通过手机 APP 控制激光雷达扫描作业高度和扫描作业速度及实时显示测量装置测量状态信息,实现农田耕后地表微地貌形状特征高效测量。

(2)对装置行走部件悬挂避振机构和驱动机构行走驱动力进行了设计和分析,确定了弹簧避振器中圆柱螺旋压缩弹簧参数和驱动机构驱动电机参

数;对微地貌测量系统控制单元硬件和软件进行了设计,确定了控制单元硬件电路和软件工作流程;对装置倾斜误差和系统误差进行了分析并确定了消除倾斜误差和系统误差修正方法。

(3)开展了装置田间测量试验,分别对油菜精量联合直播机和油菜微垄直播机作业后的地表厢面形状及畦沟沟型进行了测量,结果表明,相较于传统针板法测量方法,用所开发的农田耕后地表微地貌测量装置测量油菜精量直播机和油菜微垄直播机作业后的地表微地貌形状特征,获得的厢面平整度特征参数高度均方根、表面相关长度、畦沟平均沟宽、沟宽稳定性系数、平均沟深和沟深稳定性系数误差分别为 4.01%、4.81%、3.70%、1.34%、2.09% 和 2.89%。

参 考 文 献

- [1] VIDAL VAZQUEZ E, VIVAS MIRANDA J G, PAZ GONZALEZ A. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 182(3): 337–353.
- [2] TACONET O, CIARLETTI V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 93(1): 64–76.
- [3] GARCIA MORENO R, DIAZ ÁLVAREZ M C, TARQUIS ALONSO A, et al. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 98(1): 35–44.
- [4] GARCIA MORENO R, DIAZ ALVAREZ M C, SAA REQUEJO A, et al. Multiscaling analysis of soil roughness variability[J]. *Geoderma*, 2010, 160(1): 22–30.
- [5] 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)
- [6] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 65–75. LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 65–75. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 130–135. ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 130–135. (in Chinese)
- [9] BOGEL T, OSINENKO P, HERLITZIUS T. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 159: 73–82.
- [10] THOMSEN L M, BAARTMAN J E M, BARNEVELD R J, et al. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 1(1): 339–410.
- [11] ZHENG Xingming, ZHAO Kai, LI Xiaojie, et al. Improvements in farmland surface roughness measurement by employing a new laser scanner[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 137–144.
- [12] 郑兴明,赵凯,李晓洁. 农田表面粗糙度参数的测量与精度分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 752–760. ZHENG Xingming, ZHAO Kai, LI Xiaojie. Measurement and precision analysis of farmland surface roughness parameters[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 752–760. (in Chinese)
- [13] MARTINEZ-AGIRRE A, ÁLVAREZ-MOZOS J, GIMENEZ R. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 161: 19–30.
- [14] SNAOIR B, HOBBS S, WAINE T W. Roughness measurements over an agricultural soil surface with structure from motion[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 96: 210–223.
- [15] MORENO R G, REQUEJO A S, ALONSO A M T, et al. Shadow analysis: a method for measuring soil surface roughness[J]. *Geoderma*, 2008, 146(2): 201–208.
- [16] HAUBROCK S N, KUHNERT M, CHABRILLAT S, et al. Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning[J]. *Catena*, 2009, 79(2): 128–139.

Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(5): 743–751.

[13] YILDRIM Y, KARA M. Effect of different vane combinations on fertilizer distribution uniformity with various flow rates in spinning disc broadcasters[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 18(1): 54–62.

[14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册. 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[15] 刘宏新, 王晨, 王佳兴, 等. 车载便携式农家肥捡拾装置设计与试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(9): 59–71, 96. LIU Hongxin, WANG Chen, WANG Jiaxing, et al. Design and experiment study on portable in-vehicle device of farmyard manure collecting[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(9): 59–71, 96. (in Chinese)

[16] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85. WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)

[17] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115–122, 142. WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)

[18] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21–27. YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21–27. (in Chinese)

[19] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93–98. WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93–98. (in Chinese)

[20] 顿国强, 于春玲, 郭艳玲, 等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 87–96. DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87–96. (in Chinese)

[21] HOU Q, DONG K, YU A. DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder[J]. Powder Technology, 2014, 256: 529–539.

[22] KRETZ D, CALLAU-MONJE S, HITSCHLER M, et al. Discrete element method (DEM) simulation and validation of a screw feeder system[J]. Powder Technology, 2016, 287: 131–138.

[23] 全国农业机械标准化技术委员会. 农业机械施肥撒施机环保要求和试验方法: GB/T 25401—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[24] 全国农业技术推广服务中心. 肥料合理使用准则通则: NY/T 496—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

(上接第 82 页)

[17] OELZE M L, SABATIER J M, RASPET R. Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 241–250.

[18] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292–303. JIANG Chongya, FANG Hongliang, WEI Shanshan. A review of research on parameterization of surface roughness[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292–303. (in Chinese)

[19] 刘立超, 魏国梁, 张青松, 等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 84–92. LIU Lichao, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of microtopography measuring device for agricultural cultivation based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 84–92. (in Chinese)

[20] 刘立超, 张青松, 肖文立, 等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 38–47. LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 38–47. (in Chinese)

[21] 刘洁, 杨晓菊, 廖宜涛, 等. 基于线结构激光传感器的土壤表面粗糙度测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 134–140. LIU Jie, YANG Xiaojie, LIAO Yitao, et al. Study on soil surface roughness measuring method based on line structured light sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 134–140. (in Chinese)

[22] 王伟伟, 李俊, 王晴晴, 等. 耕作土壤沟形测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 93–99. WANG Weiwei, LI Jun, WANG Qingqing, et al. Design and experiment for tillage soil groove measurement system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 93–99. (in Chinese)

[23] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. Berlin: Springer Verlag, 2005.

[24] SHRINI K U. Advances in soil dynamics[M]. Michigan: the American Society of Agricultural Engineers, 2009.