

基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究

高原源^{1,2} 王 秀^{2,3} 杨 硕^{1,2} 翟长远² 赵学观² 赵春江^{1,3}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对已有播种深度检测技术测量精度有待提高、缺乏有效实时播种深度评价系统且通信方式不易扩展等问题,设计了一种基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统。系统主要由车载平板计算机、数据采集评价单元 (ECU) 和播深测量装置等组成,阐述了播种深度测量原理,设计了基于限深轮摆动角度的播深测量装置并建立相应测量模型,基于 ISO 11783 标准制订了智能化总线通信协议,开发了基于 LabVIEW 的实时监测评价上位机界面。为研究播种深度变化特性,以耕作方式和作业速度为试验因素,开展了二因素裂区试验。对数据进行了频谱分析,结果表明,播种深度变化主频幅值随车速增加呈减小趋势,且免耕地变化大于旋耕地,而振荡频率受耕作方式和车速变化影响较小,主要集中在 0.4 Hz 以下。田间监测评价试验结果表明,所得播种深度监测图可在一定程度上表征地块土壤信息,相比人工测量方式,系统监测的稳定一致性较好,在 6~10 km/h 车速下,其对平均播深、合格率、标准差和变异系数最大值分别为 50.01 mm、78.95%、8.95 mm 和 17.90%,相对误差分别处于 4.20%~9.74%、6.11%~17.92%、10.93%~16.32% 和 18.83%~19.79% 之间,满足实际播种深度监测评价需求。

关键词: 播种机; 播种深度; 监测; 评价; CAN 总线

中图分类号: S24; S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0023-10

Development of CAN-based Sowing Depth Monitoring and Evaluation System

GAO Yuanyuan^{1,2} WANG Xiu^{2,3} YANG Shuo^{1,2} ZHAI Changyuan² ZHAO Xueguan² ZHAO Chunjiang^{1,3}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China
3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Sowing depth is one of the important indicators for evaluating the quality of sowing, which is directly related to the seed germination and plant emergence. In order to achieve the optimum yield of agricultural crops, it is necessary to monitor the sowing depth in real time. Because of the inappropriate response of the machine dynamics to harsh soil conditions, such as the compacted soil undulations and the presence of the stubble, the existing measurement methods of sowing depth cannot meet the requirement of measuring accuracy, and the lack of an effective real-time sowing depth evaluation system affects the improvement of real-time operation quality. Moreover, the development of intelligent seeder puts forward higher demand for existing communication mode. To solve these problems, a sowing depth monitoring and evaluation system based on CAN-bus was proposed. The system was mainly composed of a tablet personal computer for real-time monitoring, an electronic control unit (ECU) for data acquisition and a sowing depth measuring device. The six-row seeder was taken as the research object. On the basis of expounding the working principle of sowing depth measurement, the sowing depth measuring device based on the swing angle of the gauge wheel was designed and the corresponding measuring models were established. In addition, an intelligent bus communication protocol based on ISO 11783 standard was made, and a real-time monitoring and evaluation upper computer interface based on LabVIEW was developed. In order to study the variation characteristics of sowing depth, two-factor split plot experiment

收稿日期: 2019-08-31 修回日期: 2019-10-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700502)
作者简介: 高原源(1989—),男,博士生,主要从事精密播种技术研究,E-mail: gaoyy0910@foxmail.com
通信作者: 赵春江(1964—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事农业信息技术与精准农业技术研究,E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

was carried out with tillage mode and working speed as experimental factors. Spectrum analysis of the data showed that the main frequency amplitude of the change of sowing depth was decreased with the increase of working speed, and the variation range of sowing depth under no-tillage was larger than that under rotary tillage, while the oscillation frequency was less affected by the change of tillage mode and working speed, which was mainly concentrated below 0.4 Hz could provide a reference for low-pass filtering of signals in subsequent sowing depth control. Further, a field test was conducted to test the system performance. The field test results of monitoring and evaluation showed that the obtained monitoring map of sowing depth could characterize the soil information of the plot, such as compactness, which was favorable for subsequent seeding decision-making. Compared with the manual measurement method, the stability and consistency of the system monitoring were better when the speed was 6 ~ 10 km/h. Within the industry standard error range of 10 mm, the maximum values of average sowing depth, qualified rate, standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) were 50.01 mm, 78.95%, 8.95 mm and 17.90%, respectively, the relative errors of average sowing depth, qualified rate, SD and CV were 4.20% ~ 9.74%, 6.11% ~ 17.92%, 10.93% ~ 16.32% and 18.83% ~ 19.79%, respectively, which met the needs of monitoring and evaluating of the actual sowing depth.

Key words: seeder; sowing depth; monitoring; evaluation; CAN-bus

0 引言

播种粒距、播种深度和播种下压力是评价机械化播种质量的重要指标,其中,适宜一致的播种深度可以提高种子出苗整齐度,发挥群体增产优势^[1-3]。为提高播种质量,有必要对播种深度进行实时监测评价,以实现作业过程中的动态控制和后续播种质量评估。

播种深度是开沟器开沟、土壤回流和覆土轮镇压共同作用的结果,人工不易测量,现有测量方法是在忽略种子落土弹跳的条件下,将播种单体开沟深度作为种子播种深度,测量方式主要分为接触式和非接触式。其中,非接触式主要采用超声波传感器或激光测距传感器来测量机具作业地面高度,进而算出开沟深度^[4-5],由于受田间残茬等复杂环境影响,少免耕作地块测量误差远大于传统耕整地块^[6]。考虑到播种深度测量的精度需求,为减小残茬、光照等因素的影响,现有研究多采用接触式测量方法,其主要通过测量机具上仿形部件偏转位移得到开沟深度。赵金辉等^[7]利用位移传感器检测开沟器和后置仿形轮位置,计算出理论开沟深度;任守华等^[8]通过编码器检测机架上仿形托板摆动幅度,判断开沟深浅;文献[9]采用超声波结合角度传感器测量小麦播种深度。分析发现,仿形部件相对开沟器的安装位置会导致播种机仿形提前或滞后现象^[10],影响测量精度。同位仿形方式因较优的仿形控制效果而获得更多应用,针对同位限深轮的测量可减小地形对播种深度测量精度的影响。文献[11-13]在设定限深轮摆臂上限位情况下,通过测量限位轴销受力或限深轮形变量反映播种深度的变化,但当地形或土壤变化而下压力控制响应不及时时,

易出现限深轮摆臂脱离限位销轴、限深轮接触但未压实土壤的情况,此时这种间接方式无法得到实时开沟深度。相比之下,测量开沟器与限深轮相对位置高度差(即开沟深度)的方式更直接,且适用范围更广。此外,已有研究多侧重于实时监测,而使用监测数据、并依据行业标准进一步对播种深度进行现场评价具有更大的实际应用价值。

在监测通信方式上,点对点的单一通信方式信号利用率低,多路通信时布线繁杂且不易扩展^[14]。为满足多源信息远程监控的需求,解决电子控制单元(Electronic control unit, ECU)之间信息传输和处理问题,基于ISO 11783协议标准的控制局域网(Controller area network, CAN)现场总线技术被提出,并在收获、施肥、植保、产量监控和播种等方面得到应用^[15-21]。在播种方面,主要侧重于面向特定功能的总线研究,如田辉辉等^[22]设计了针对大豆排种的故障报警总线监测系统,杨硕等^[23]则对排种器驱动总线控制进行了研究。随着播种机功能的扩展,有必要加强对播种机总线控制技术的研究。

本文以6行同位仿形播种机为研究对象,设计一种基于CAN总线的播种深度监测评价系统,设计基于限深轮角度的接触式播种深度测量装置,并基于ISO 11783标准,制订易于扩展的通信协议,开发播种深度实时监测评价软件,并对播种深度变化进行研究,以为后续精密播种作业奠定基础。

1 播深监测评价系统设计

1.1 系统构成

本研究在同位仿形方式下展开,选用河北中友机电设备有限公司生产的2BFQ-6型气力精密播种机作为试验平台,该播种机作业幅宽3.0~

4.2 m,配套功率 73.5 ~ 132.4 kW,其主要用于玉米或大豆的精密播种作业。

系统组成如图 1 所示,主要由播深测量装置、电子控制单元(ECU)、GPS 测速传感器、车载平板计算机(Panel personal computer, PC)和蓄电池等组成。其中播深测量装置安装在限深轮摆臂销轴上,内部的角度传感器实时测量限深轮摆臂相对机架摆动角度;ECU 采集播深测量装置输出信号,经过数据处理和模型换算后得到实时播种深度,并通过 CAN 总线方式实现与车载计算机通信,其中 PC 与 ECU 之间通过 USB/CAN 转换器连接;基于 LabVIEW 开发的车载计算机界面可显示播种机各单体行播种深度,以实现播种深度的实时监测和评价。

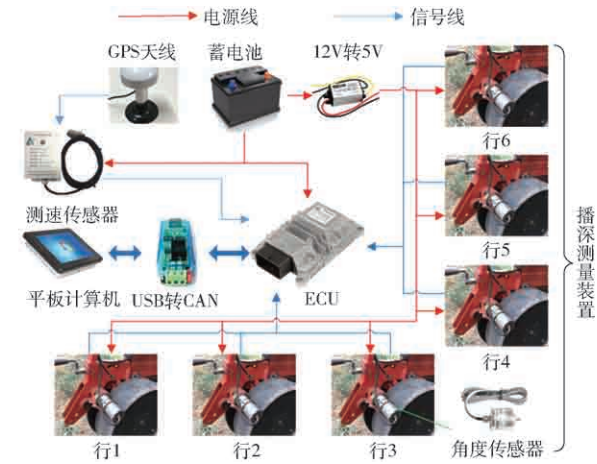


图 1 系统构成图

Fig. 1 System composition diagram

1.2 播深测量装置

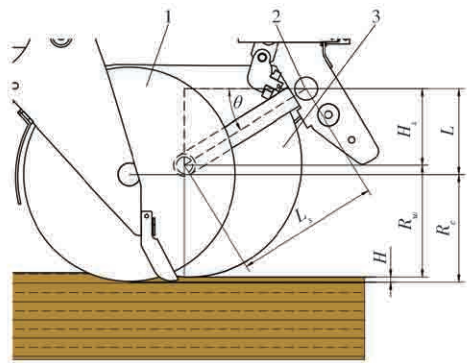
1.2.1 测量原理

根据同位仿形结构特点,装置采用接触式测量方式,通过测量限深轮作业过程中摆动角以获得实时播种深度,测量原理如图 2 所示。其中, L_s 表示限深轮摆臂长度,mm; H_s 表示限深轮圆心距铰接点高度,mm; L 表示开沟器转轴距摆臂铰接点高度,mm; θ 表示限深轮摆臂与单体架夹角, $(^\circ)$; R_w 表示限深轮半径,mm; R_c 表示开沟器半径,mm; H 表示播种深度,mm。

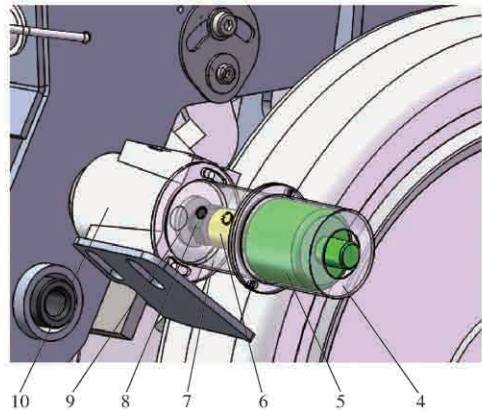
单体作业过程中限深轮胎面形变和种上覆土影响播种深度测量准确性,其中,种上覆土厚度可通过调节覆土轮对地压力来改变,对本装置试验发现,在设定相同覆土压力情况下,覆土厚度基本不变,而限深轮胎面因其自身材质及土壤相互作用,作业过程中形变较小。假设限深轮受力变形量和覆土厚度带来的播种深度补偿量为 Δh ,由图 2a 可知,单体播种深度为

$$H = L + R_c - H_s - R_w + \Delta h \quad (1)$$

对限深轮摆动高度 H_s 而言,可通过摆臂转动角



(a) 测量原理图



(b) 测量装置示意图

图 2 播深测量

Fig. 2 Principle diagrams of sowing depth measurement

1. 开沟器
2. 角度传感器
3. 限深轮
4. 传感器保护套
5. 角度传感器
6. 联轴器
7. 联轴器套
8. 连接螺栓
9. 摆臂销轴
10. 限深轮摆臂

计算得到,即

$$H_s = L_s \sin \theta \quad (2)$$

根据式(1)、(2)得此时播种深度

$$H = L + R_c - R_w - L_s \sin \theta + \Delta h \quad (3)$$

其中, L 、 R_w 、 R_c 、 L_s 可通过实测获得,而 Δh 与地块土壤特性有关,为保证测量准确性,可通过作业前进行田间取样标定来获得 Δh 。在上述变量已知情况下,测量限深轮摆臂转动角 θ 可求得播种深度 H 。基于此,设计图 2b 所示播深测量装置。装置采用基于角度传感器的测量方式,通过角度传感器直接测量限深轮摆臂角,进而获得相对开沟器位置信息和开沟深度,包括传感器保护套、角度传感器、联轴器、联轴器套和连接螺栓。其中,角度传感器转动轴通过联轴器和连接螺栓与摆臂销轴固定,传感器自身通过联轴器套与限深轮摆臂固定,摆臂销轴与机架固定,以此测量限深轮摆臂相对机架摆动角,计算得到播种深度。此外,联轴器套和传感器保护套可保护联轴器和角度传感器,起到防尘防磕碰的作用。

1.2.2 传感器选型与校正

角度传感器通过采集限深轮贴地运动时摆臂的

运动角度来检测地面起伏高度,其摆动范围受播深调节结构影响。本文选用深圳市米朗科技有限公司生产的 WOA-H-90-V1 型霍尔角度传感器,其采用高性能集成磁敏感元件,可实现绝对位置测量,量程为 90° , $0 \sim 5\text{ V}$ 模拟量输出,工作电压为 $5 \sim 10\text{ V(DC)}$ 。由于角度传感器安装过程中存在偏差,为提高播深测量装置的测量精度,未考虑实际播深补偿量情况下,进行了传感器室内标定试验。

单体处于提升状态时,限深轮摆臂在自身重力作用下处于最大角度位置,实际测量发现,相同规格单体限深臂下限位角度基本一致,通过角度尺测量得其角度为 40° ,此时根据传感器额定输出信号大小和测量角度范围,初步建立限深轮摆臂角度与角度传感器信号输出值之间关系。由于播深测量装置是通过测量角度以获得播种深度,相比之下,直接建立传感器信号输出值与实际播种深度关系模型的方式,不仅可以减小测量误差,还可以获得更加直观的播深数据。为简化模型,本试验优先建立播种深度和传感器信号输出值关系模型。

如图 3 所示,手动旋转播深调节机构控制限深臂摆动上限位,通过升降支架支撑开沟圆盘两侧限深轮至上限位,采集角度传感器输出信号值,并用游标卡尺测量开沟圆盘与限深轮底端距离。考虑到实际播种深度不小于 0,且单体结构限制下最大不超过 105 mm ,可知传感器输出信号在一定范围内。多次测量后建立各单体行播种深度测量模型,如表 1 所示。其中, x 表示角度传感器信号值, mV ; y 表示播种深度检测值, mm 。



图 3 角度传感器标定
Fig.3 Calibration of angle sensor

表 1 播种深度测量模型

Tab.1 Measurement models of sowing depth

单体序号	测量模型	x/mV	R^2
1	$y = -0.0675x + 316.71$	$3\,137 \sim 4\,692$	0.998 4
2	$y = -0.063x + 270.99$	$2\,635 \sim 4\,301$	0.994 6
3	$y = -0.0582x + 265.02$	$2\,750 \sim 4\,553$	0.985 6
4	$y = -0.0631x + 269.81$	$2\,612 \sim 4\,275$	0.999 5
5	$y = -0.0652x + 292.14$	$2\,871 \sim 4\,480$	0.996 9
6	$y = -0.067x + 303.08$	$2\,957 \sim 4\,523$	0.994 6

1.3 数据采集控制单元

采用 HY-TTC 32 集成控制器 (TTC32, TTControl GmbH) 以实现数据的采集控制,其配备了高性能的英飞凌 XC2267 微控制器,集成了 2 路标准 CAN 总线接口,可实现与上位机的总线通讯。搭载的 30 个可自由配置的 I/O 接口,常规输入端口为 14 路,通过软件设置最多可扩展至 30 路 $0 \sim 32\text{ V}$ 模拟电压测量,满足系统信号采集需求。同时,利用 CoDeSysV2.3 软件,使用支持 IEC61131-3 标准的 ST 语言可对播种深度监测系统程序进行编程。

上位机选用 USB/CAN 转换器(隔离型,北京乐电新南科技有限公司)对控制器发送报文进行转换,并由上位机获取解析。转换器与 ECU 通信波特率依照 ISO 11783-2:2012 规定设为 250 kb/s ,与 PC 通信波特率为 $115\,200\text{ b/s}$ 。考虑到后续使用便捷性,选用车载平板计算机作为系统交互设备,平板搭载 Windows 7 32 位操作系统,支持 $12 \sim 30\text{ V}$ 宽电压供电,可由拖拉机直接供电。

1.4 通信协议设计

ISO 11783 是国际标准化组织 (ISO) 为农林拖拉机和机械制订的基于 CAN 2.0B 协议的串行控制和通信数据网络总线标准。CAN 2.0B 根据消息帧标识符的位数规定了标准帧 (11 位) 和扩展帧 (29 位) 两种格式,而 ISO 11783 只针对扩展帧格式定义了完整的通信策略,并采用协议数据单元 (Protocol data unit, PDU) 来规范信息帧格式,如图 4 所示。主要由优先级 (P)、扩展数据页 (EDP)、数据页 (DP)、PDU 格式 (PF)、特定 PDU (PS)、源地址 (SA) 和数据场 (DATA) 组成。其中,P、EDP、DP、PF 和 PS 构成报文的参数组编号 (Parameter group numbers, PGN),用以标志 PDU 的内容和种类。根据 ISO 11783-3:2014 规定,所有控制报文的缺省优先级为 3,消息报文的缺省优先级为 6,ISO 11783 消息传输时 EDP 为 0。根据 PF 取值不同可将 PDU 分为 PDU1 和 PDU2,当 PF 小于 240 时为 PDU1,此时 PS 为目标地址 (DA),消息发送到特定地址,其中 $DA = 255$ 为全局目的地址,要求所有控制器进行消息侦听和响应;当 PF 处于 $240 \sim 255$ 之间时为 PDU2,此时 PS 为组扩展 (GE)。总计适于分配的参数组为 8 672 个,对 CAN 总线通信协议的制订就是为不同报文分配特有的参数组编号。

对单体而言,由于单个数据帧最多包含 8 字节数据,考虑到后续单体多源信息扩展的传输需求,根据 ISO 11783-3:2014 规定,本协议采用多包消息的方式,将相同 PGN 的单体信息,包含播种深度、播种下压力、播种速率、施肥速率、播种施肥堵塞等数

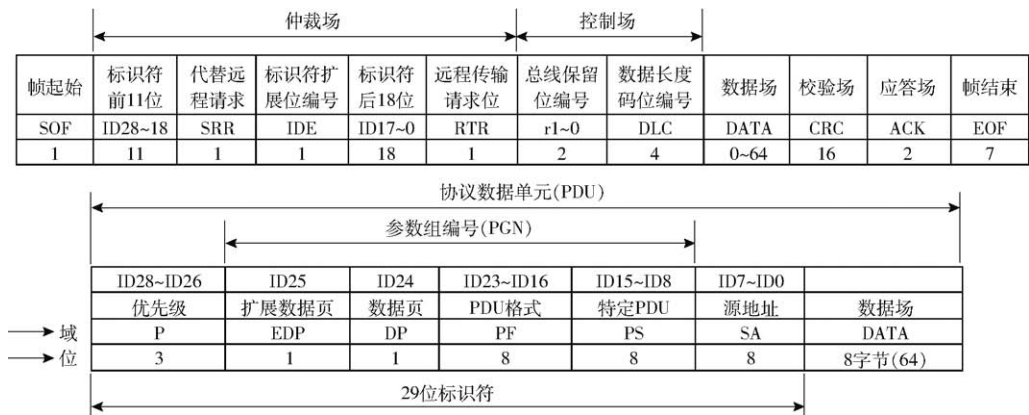


图 4 数据帧报文格式

Fig. 4 Message format of data frame

据分包发送。其中,将每个包数据域首字节定义为数据包序列号,并按递增顺序发送。由于最多可分配 255 个序列号,完全满足单体行信息扩展需求。对本系统而言,每行单体分配一个 PGN,数据域首字节均定义为 1,第 2、3 字节表示播种深度,分辨率为 0.01 mm,测量范围为 0 ~ 642.55 mm,未使用字节全部设置为 FF₁₆。

参照标准 ISO 11783-7:2015 对机具消息应用层的规定,制订了表 2 所示播种机相关参数的报文,如定义播种机行驶状态的 PGN 为 00FE49,更新周期为 100 ms,字节长度为 8 字节(bytes)。其中,字节 1、2 表示测量的对地行驶速度,分辨率为 0.001 (m/s)/bit,测量范围为 0 ~ 64.255 m/s;字节 3 ~ 6 表示行驶距离,分辨率为 0.001 m/b,测量范围为 0 ~ 4 211 081.215 m;字节 8 的前两位表示行驶方向,00 表示倒退,01 表示前进,10 为错误指示,11 不可用;其余未定义位保留。

表 2 参数组编号定义

Tab.2 PGN definition of CAN system

名称	P	EDP	DP	PF	PS	PGN
车速	6	0	0	FE	49	00FE49 ₁₆ /65097
行 1	6	0	0	F5	01	00F501 ₁₆ /62721
行 2	6	0	0	F5	02	00F502 ₁₆ /62722
行 3	6	0	0	F5	03	00F503 ₁₆ /62723
行 4	6	0	0	F5	04	00F504 ₁₆ /62724
行 5	6	0	0	F5	05	00F505 ₁₆ /62725
行 6	6	0	0	F5	06	00F506 ₁₆ /62726
PC	3	0	0	F5	FE	00F5FE ₁₆ /62974

1.5 评价方法与软件开发

为实现对播种深度的实时监测和评价,本系统开发了基于 LabVIEW 的上位机界面,如图 5 所示。在设定的采样间隔时间下,ECU 采集限深臂角度传感器信号并传输给上位机,上位机解析传感器信号,利用试验所建模型实时显示播种深度。而播种深度



图 5 播种深度监测界面

Fig. 5 Sowing depth real-time monitoring interface

质量评价规则参照农业行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》,当设定播种深度大于等于 3 cm 时,播种深度合格误差为 ±1.0 cm,当小于 3 cm 时,播种深度合格误差为 ±0.5 cm。相关的各播种深度监测评价参数计算公式为

$$\eta = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{N} \quad (5)$$

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{N}} \quad (6)$$

$$V_h = \frac{S_h}{\bar{h}} \times 100\% \quad (7)$$

式中 η ——播种深度合格率, %

n ——播种深度合格数

N ——播种深度测量点数

$\bar{h}$ ——播种深度平均值, mm

h_i ——播种深度测量值, mm

S_h ——播种深度标准差, mm

V_h ——播种深度变异系数, %

机具作业时, ECU 以 20 Hz 采样频率采集各单

体播深数据并通过总线传输给上位机,上位机实时存储数据,并以设定的读取间隔时间(默认 0.5 s)显示在界面上。同时,设定播深补偿值输入框,便于对实时检测数据进行修正。当输入播种深度设定值时,ECU 获取参数并进行质量评价。由于播种机由多个单体组成,为评价整体效果,系统选取各行平均播种深度作为质量评价参数,通过连续计算获取 100 个播种深度,参照标准计算得到播种机实时播深合格率、平均播深、播深标准差和变异系数,方便作业时实时调整和后期质量评价。

2 试验与结果分析

2.1 播种深度变化特性试验

为解析传统机械式被动仿形播种单体播深动态变化的频率构成,获取其不同试验条件下播深主频率波段,实现后续信号滤波以及播深动态主动控制,选择图 6 所示装置中左侧机械式仿形单体作为试验对象,于 2019 年 4 月在河北省石家庄市赵县姚家庄村进行了播种深度变化特性试验。试验田长 180 m,宽 20 m,采用二因素裂区试验设计方法,研究不同处理地块(免耕地和旋耕地)和作业速度(4、6、8、10 km/h)对播种深度测量的影响。将地块耕作方式作为主区,分为免耕地(A1)和旋耕地(A2),作业速度作为副区,设置 B1、B2、B3、B4 共 4 个水平,分别对应 4、6、8、10 km/h 作业速度。

根据播深测量角度传感器硬件参数,设置 ECU 对传感器采样频率为 200 Hz,试验时采用 USBCAN 分析仪(USBCAN-E-U 型,广州致远电子有限公司)连接 ECU,利用自带的 ZLGCANTest 软件实时采集 ECU 发送的传感器数据报文,并对不同试验条件



图 6 播种深度变化特性测试试验

Fig. 6 Variation characteristic test of sowing depth

传感器原始数据进行存储。为便于后续数据分析,每种处理采样时间为 40 s,即获取数据 8 000 个,并通过 Matlab 对其进行离散傅里叶变换(DFT),处理公式^[24]为

$$X(f[k]) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{8}$$

其中 $f[k] = kf_s/N$ ($k=0,1,\cdots,N$)
式中 f_s ——采样频率,Hz
 $f[k]$ ——数据 x 的离散频率组成
 $x[n]$ ——长度为 N 的有限长序列
 $X(f[k])$ ——DFT 变换后数据

去除传感器直流分量,得到动态变化结果如图 7、8 所示。从整体看,较大幅值振荡分布区间主要处于低频区间,即播种深度变化主要频率在 1 Hz 以内。从地块耕作方式来看,免耕地播深传感器变化最高幅值处于 111 ~ 201 mV 区间内,而旋耕地最高幅值变化范围为 34 ~ 117 mV,显然免耕地传感器振荡幅值更高,原因在于免耕地土壤坚实度较大,区间分布不均匀,造成播种机开沟过程中限深轮起伏波动较大,而旋耕地由于土壤均匀,播深变化相对较

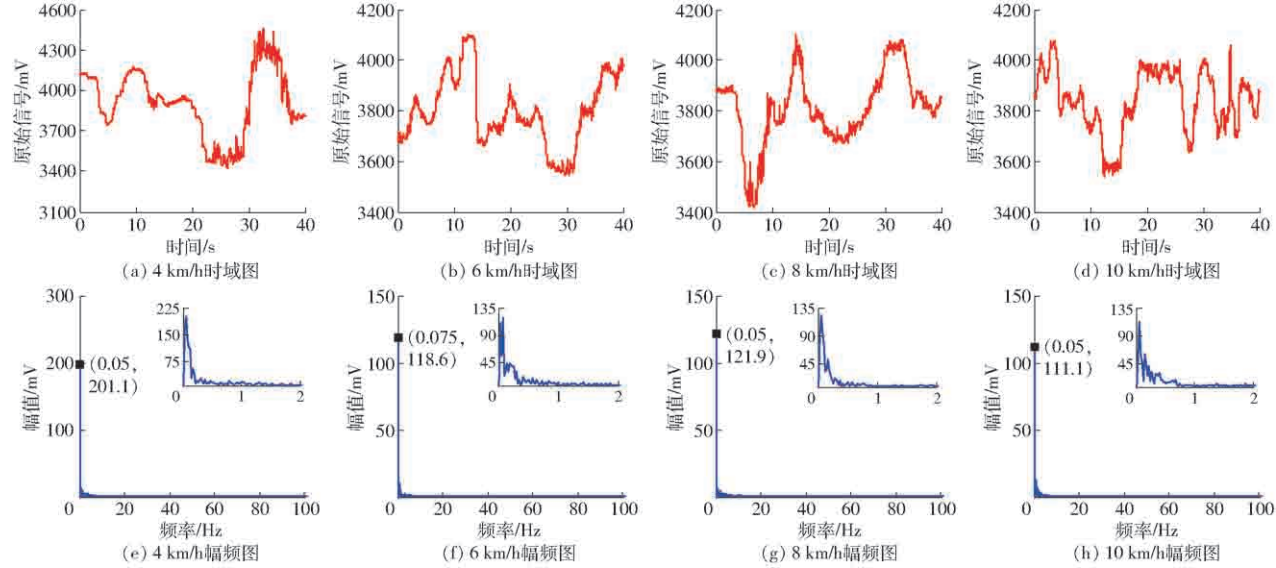


图 7 免耕地播种深度动态变化

Fig. 7 Dynamic change of sowing depth under no-tillage

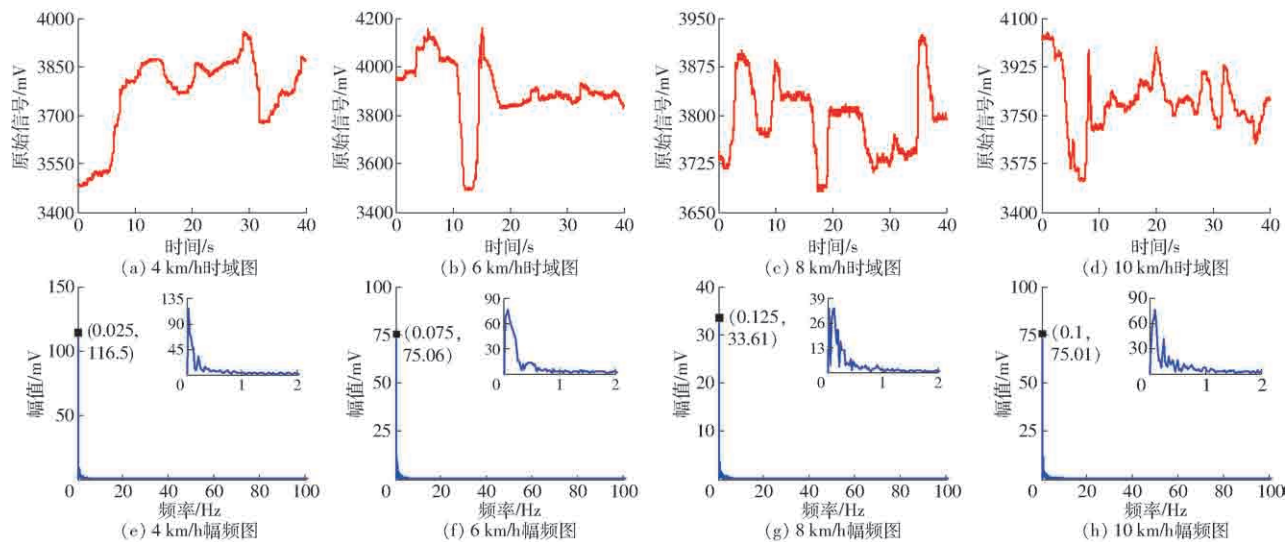


图 8 旋耕地播种深度动态变化

Fig. 8 Dynamic changes of sowing depth under rotary tillage

小。另外,免耕地播深变化主频主要为 0.05 Hz,且未随车速变化而变化,主频幅值随车速增加呈减小趋势;旋耕地下,除 10 km/h 以外,播深变化主频随车速增加而增大,最高为 0.125 Hz,主频幅值则随车速增加而减小。

进一步,计算每种处理下的功率谱密度,公式^[25]为

$$P(f[k]) = |X(f[k])|^2 \tag{9}$$

为便于比较不同处理下播种深度变化功率谱密度,提取各功率谱密度函数在 0 ~ 1 Hz 频率范围内峰值,得到如图 9 所示峰值散点图。从图中可看出,播种深度功率峰值变化主频区间主要集中在 0 ~ 0.4 Hz 内,且与车速变化关系不明显,这也与文献[26]中所得条播机开沟深度功率峰值振荡主频在 0.5 Hz 以下的结论相符,进一步验证了试验结论准确性,为后续播种深度控制中信号的低通滤波处理提供了参考。

播种深度实际测量,试验地块选用免耕地,长、宽为 220 m 和 4 m。为测试不同速度下各单体行播种深度监测评价效果,沿拖拉机前进方向分 4 段递增车速,并分别采集每段下播种深度数据,考虑剔除地块头尾部分,每段长度为 50 m。实际作业中,根据上位机车速检测值,控制各段地块拖拉机速度分别为 4、6、8、10 km/h。为简化试验,取掉单体覆土轮,以开沟深度等效评价播种深度,设定播深补偿值 $\Delta h = 0$,并在试验前旋转播深调节机构,保持调节播深一致,并设定评价系统播深设定值为 50 mm。



图 10 田间试验

Fig. 10 Field experiment

对采样数据进行处理,绘制得到图 11 所示不同速度下单体播种深度测量值热力图^[27]。图中,红色表示播种深度大于设定播深,蓝色表示播种深度低于设定播深,其它颜色表示合格播种深度。从整体看,对地下压力相同情况下,播种机右侧单体播种深度大于左侧,表明该地块右侧土壤坚实度较小,开沟器可以获得较大开沟深度,由文献[28 - 29]所述,土壤质地与电导率之间存在显著正相关性,即电导率越高,土壤坚实度越大,开沟深度越小,因此该图也可一定程度上表征地块不同区间土壤质地区别。

从各单体行播深监测看,4 km/h 速度下行序号 5、8 km/h 速度下行序号 4、6,以及 10 km/h 速度下的行序号 6 等均出现了连续较高的播深数据,最高

2.2 播种深度监测评价试验

如图 10 所示,于 2019 年 7 月在河北省石家庄市栾城区北留营村进行田间试验。为方便后续进行

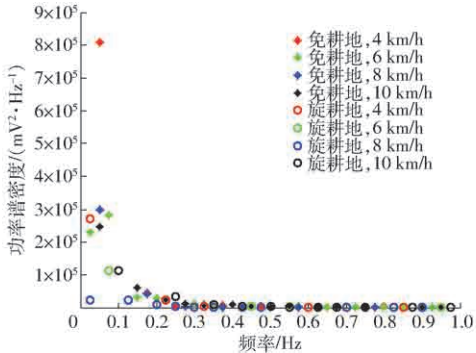


图 9 功率谱密度峰值散点图

Fig. 9 Peak map of PSD

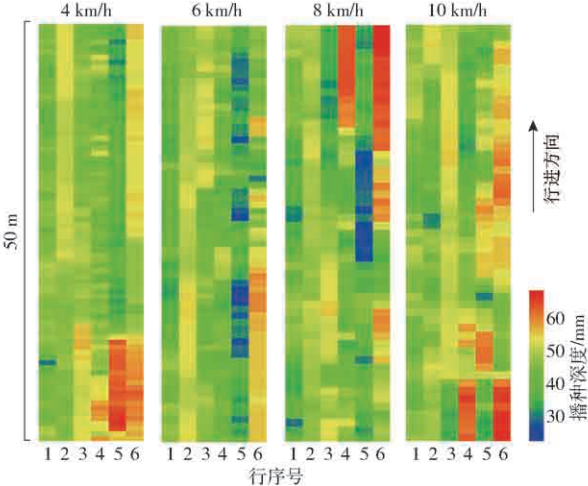


图 11 不同车速下单体播种深度热力图
Fig. 11 Heat map of sowing depth at different speeds

甚至达到 69.72 mm,超出播深调节机构上位,因为开沟器两侧限深轮所处地形或土壤坚实度不同,导致限深轮摆动角度不一致,单侧出现较深播种深度的现象;同理,由于播种深度调节机构“限深不限浅”,当土壤坚实度变大或地表凹陷时,会造成限深轮相对开沟器位置下降,播种深度降低,最小为 23.19 mm。其中,行 5 出现较多的浅播状况,分析发现这是因为行 5 与拖拉机右侧轮胎轨迹重合,开沟深度由于轮胎压实土壤而变浅,这也与文献[30]所述一致,即轮胎压实后的地块造成播种机开沟深度变小。

为测试系统播种深度监测评价效果,随机选取不同车速下某个单体行开沟深度进行实际测量,即在 4 km/h 下第 3 行单体、6 km/h 下第 6 行单体、8 km/h 下第 1 行单体和 10 km/h 下第 5 行单体作业长度中间选取 30 m,间隔 25 cm 进行取样,结合图 11 选取等距离数据并绘制如图 12 所示播种深度箱形图。从图中可以看出,相比播种深度监测值,实际测量获得数值波动较大,整体布局较为分散,可能与种沟完整程度以及地表残茬厚度带来的人为测量不稳定性有关。此外,观察数据中位数发现,不同方式下得到结果相近,差值最大为 9.02 mm,最小为 0.02 mm。

对播种深度检测值和实际值数据的统计处理结果如表 3 所示。在 4 ~ 8 km/h 车速范围内,两种方式下的播种深度合格率均随车速增大而减小,即播种深度一致性变差,而 10 km/h 下合格率有增大趋势,原因可能是较高车速增加了开沟器在坚实土壤下的切土能力,提高了播种深度一致性。此外,除 8 km/h 外,两种方式下的播种深度标准差和变异系数随车速增大而增大,这也说明车速增大会造成播种深度稳定性变差,而 8 km/h 下稳定性增加可能由于作业行土壤质地均匀,开沟较为稳定。

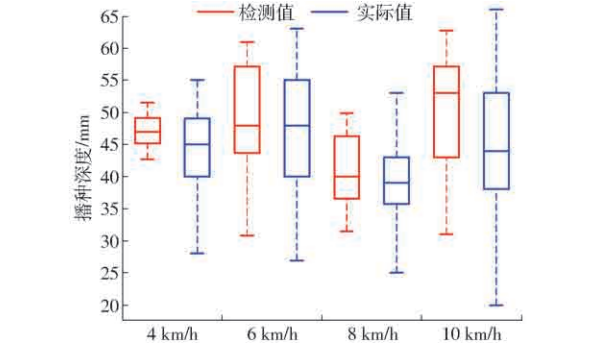


图 12 不同车速下单体播种深度箱形图
Fig. 12 Sowing depth boxplot of row units at different speeds

对比两种方式,4 km/h 车速下,系统检测的播种深度合格率、标准差和变异系数相对田间测量误差显著大于其它速度下相对误差,原因可能是实际人工测量的不稳定性带来播种深度参照值的波动,造成测量值出现较大误差,无法表现系统监测评价性能。对比取样的各单体行可以看出,6 ~ 10 km/h 车速下,系统检测方式下平均播深、合格率、标准差和变异系数最大值分别为 50.01 mm、78.95%、8.95 mm和 17.90%,说明 10 km/h 下第 5 行单体平均播深和数值差异性最大,6 km/h 下第 6 行单体播种深度合格率最大;相比田间实际测量方式,误差分别处于 4.20% ~ 9.74%、6.11% ~ 17.92%、10.93% ~ 16.32%和 18.83% ~ 19.79% 之间。此外,随着车速增加,平均播深相对误差增大,标准差相对误差降低,而变异系数相对误差较为稳定,说明较大车速会降低系统平均播深评价准确性。考虑到地块区间差异和人工测量误差,系统实现了对播种深度的监测评价功能。

表 3 田间试验测试结果
Tab.3 Field experiment results

播种深度 评价参数	评价方式	作业速度/(km·h ⁻¹)			
		4	6	8	10
平均值	系统检测/mm	47.25	49.22	40.87	50.01
	田间测量/mm	45.00	47.24	38.82	45.57
	相对误差/%	5.00	4.20	5.28	9.74
合格率	系统检测/%	100	78.95	50.00	65.63
	田间测量/%	80.00	74.40	42.40	61.60
	相对误差/%	25.00	6.11	17.92	6.53
标准差	系统检测/mm	2.37	7.84	5.15	8.95
	田间测量/mm	5.68	9.37	6.10	10.05
	相对误差/%	58.30	16.32	15.55	10.93
变异系数	系统检测/%	5.01	15.93	12.60	17.90
	田间测量/%	12.61	19.84	15.71	22.05
	相对误差/%	60.28	19.69	19.79	18.83

3 结论

(1)设计了一种基于 CAN 总线的播种深度实

时监测系统。采用基于限深轮摆动角度的播深测量装置,通过接触式测量方式,提高了复杂作业环境下的播种深度检测精度;以 ISO 11783 标准为基础,制订了播种深度实时监测总线通信协议,有利于后续播种作业参数的标准化传输和扩展。

(2) 基于 LabVIEW 的播种深度监测评价系统通过对通讯协议的解析,实时显示各播种单体行播种深度值,得到的播种深度图可在一定程度上表征地块质地信息,同时系统以行业标准为基础,可根据设定播种深度实现对作业地块播种深度信息,如平均播深、播深变异系数等的评价,为后续播种决策提供参考。

(3) 播种深度变化特性试验表明,播种深度变化主频幅值随车速增加呈减小趋势,且免耕地条件下幅值变化大于旋耕地,而功率谱密度振荡主频受地块耕作方式和机具作业速度影响较小,主要在 0.4 Hz 以下,可为后续播深控制信号处理提供参考。系统田间试验结果表明,在 6 ~ 10 km/h 车速下,相比实际人工测量方式,系统监测平均播深、合格率、标准差和变异系数最大值分别为 50.01 mm、78.95%、8.95 mm 和 17.90%,相对误差分别处于 4.20% ~ 9.74%、6.11% ~ 17.92%、10.93% ~ 16.32% 和 18.83% ~ 19.79% 之间,满足设计需求,实现了对播种深度的监测评价功能。

参 考 文 献

- [1] 曹慧英,王丁波,史建国,等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2397-2404. CAO Huiying, WANG Dingbo, SHI Jianguo, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2397-2404. (in Chinese)
- [2] 曹慧英,史建国,朱昆仑,等. 播种深度对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 102-109. CAO Huiying, SHI Jianguo, ZHU Kunlun, et al. Effects of sowing depth on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(1): 102-109. (in Chinese)
- [3] MOLATUDI R L, MARIGA I K. The effect of maize seed size and depth of planting on seedling emergence and seedling vigour [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2009, 5(12): 2234-2237.
- [4] 蔡国华,李慧,李洪文,等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 11-16. CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 11-16. (in Chinese)
- [5] WEN L, FAN X, LIU Z, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system[J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 53-58.
- [6] MOUAZEN A M, ANTHONIS J, SAEYS W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 1: sensor design for measurement of frame height variation from soil surface[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 139-150.
- [7] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 35-41. ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35-41. (in Chinese)
- [8] 任守华,赵斌,李玉清,等. 玉米播种机播深检测装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 12-15. REN Shouhua, ZHAO Bin, LI Yuqing, et al. Design and experimental study of deep detection device of corn seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 12-15. (in Chinese)
- [9] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30-35.
- [10] 张瑞. 一年两熟地区麦茬地玉米免耕播种播深控制机构的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. ZHANG Rui. Study on precision depth-control mechanism of corn no-till planter in double-cropping area[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [11] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 68-77. FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)
- [12] 闫荆,朱龙图,于婷婷,等. 免耕播种机播种深度实时监测系统[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 214-218. YAN Jing, ZHU Longtu, YU Tingting, et al. Seeding depth real-time monitoring system for a no-till planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 214-218. (in Chinese)
- [13] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 1-8. HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1-8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.

- 1000-1298. 2015. 04. 001. (in Chinese)
- [14] 蒋建东,孙远方,金骁,等. 联合收获机 CAN 总线架构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 93-99. JIANG Jiandong, SUN Yuanfang, JIN Xiao, et al. CAN bus architecture design and test of combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190610&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.010. (in Chinese)
- [15] PARAFOROS D S, SHARIPOV G M, GRIEPENTROG H W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104863.
- [16] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 275-281. ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 275-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.036. (in Chinese)
- [17] 张艳超,陈杨,李艺健,等. 基于 CAN 总线的旋翼无人机喷洒模拟系统[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 108-115. ZHANG Yanchao, CHEN Yang, LI Yijian, et al. Development of CAN-based aerial spraying simulation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 108-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.013. (in Chinese)
- [18] 车守全,卢剑锋,张富贵,等. 基于 CAN 总线和 PWM 控制方式的起垄施肥系统研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(12): 222-227. CHE Shouquan, LU Jianfeng, ZHANG Fugui, et al. Study on ridge forming and fertilizer applicator base on CAN bus and PWM control methods [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 222-227. (in Chinese)
- [19] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 CAN 总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 35-42. LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 35-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.006. (in Chinese)
- [20] 安晓飞,孟志军,武广伟,等. 基于 CAN 总线的谷物产量快速计量系统研发[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 262-266. AN Xiaofei, MENG Zhijun, WU Guangwei, et al. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 262-266. (in Chinese)
- [21] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 306-317.
- [22] 田辉辉,王熙,林二东. CAN 总线在大豆精播机播种监测系统中的应用[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 223-227. TIAN Huihui, WANG Xi, LIN Erdong. Application of CAN bus in the seeder monitoring system of soybean precision seeding machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 223-227. (in Chinese)
- [23] 杨硕,王秀,高原源,等. 电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 57-67. YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of motor driving bus control system for corn vacuum seed meter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 57-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)
- [24] MARCHANT B P. Time-frequency analysis for biosystems engineering[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(3): 261-281.
- [25] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. Discrete-time signal processing[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1989.
- [26] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 207-214.
- [27] DENG W K, WANG Y B, LIU Z X, et al. HemI: a toolkit for illustrating heatmaps[J]. Plos One, 2014, 9(11): e111988.
- [28] BADUA S A, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Real-time gauge wheel load variability of a row-crop planter during field operation[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(5): 1517-1527.
- [29] WIATRAC P, KHALILIAN A, MUELLER J, et al. Applications of soil electrical conductivity in production agriculture[J]. Better Crops with Plant Food, 2009, 93(2): 16-17.
- [30] 高原源,王秀,杨硕,等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 19-29, 83. GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 19-29, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190702&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.002. (in Chinese)