doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.030

棉花精量播种机播种监测系统设计与试验

史增录[1,2]　焦丙炎[1]　马　旭[1,3]　张学军[1,2]　张　燕[1,2]　王堆金[4]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052;
3.华南农业大学工程学院,广州 510642;4.新疆天诚农机具制造有限责任公司,铁门关 841007)

摘要:棉花田间播种过程中常有漏播情况发生,人工监测难以保证精度,且劳动量大,目前针对棉花精量穴播机播种监测研究较少,难以有效地监测穴播器取种状态。本文提出了一种基于光纤传感和电感传感耦合的多源数据获取精量播种参数的监测方法,相比传统监测方法具有更高的精度和安装灵活性。播种监测系统以光纤传感器和电感式传感器为信号捕获源,采用 LabVIEW 软件作为控制平台,工控机为监测控制终端,完成了播种监测系统硬件、软件等设计,开展了信号滤波、数据采集计算模块设计,实现对播种量、漏播量、成穴数、漏播率、作业速度等播种作业参数的实时监测。台架试验标定了光纤传感器光强度挡位和阈值,获得黑色取种齿盘背景下最优光强度挡位和阈值;检验了电感式传感器监测精度,成穴数台架试验监测精度大于 98.21%。田间试验结果表明,当播种机前进速度为 2.5~3.8 km/h 时,成穴数监测精度不小于 98.10%,播种量监测精度不小于 98.21%,漏播量监测精度不小于 95.00%,监测系统监测精度高,可用于实际播种作业。研究结果对提升棉花播种智能化程度,实现棉花产业提质增效具有重要意义。

关键词:棉花;精量播种机;播种监测

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0328-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Seeding Monitoring System for Cotton Precision Planters

SHI Zenglu[1,2]　JIAO Bingyan[1]　MA Xu[1,3]　ZHANG Xuejun[1,2]　ZHANG Yan[1,2]　WANG Duijin[4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*
3. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
4. *Xinjiang Tiancheng Agricultural Machinery Manufacturing Co.*, *Ltd.*, *Tiemenguan* 841007, *China*)

Abstract: During cotton field sowing, missed seeding frequently occurs, and manual monitoring struggles to ensure accuracy while imposing high labor demands. However, current research on seeding monitoring for cotton precision hill-drop planters remains limited, particularly in effectively tracking the seed pickup status of hill-drop planter. To address these challenges, a multi-source data monitoring method was proposed based on coupled fiber optic and inductive sensing, which offered superior accuracy and installation flexibility compared with traditional approaches. The developed monitoring system employed fiber optic sensors and inductive sensors as signal acquisition sources, with LabVIEW software as the control platform and an industrial computer as the monitoring terminal. The hardware and software designs of the system were completed, including signal filtering and data acquisition/calculation modules, enabling real-time monitoring of critical sowing parameters such as seeding quantity, missed seeding count, cavitation number, missed seeding rate, and operational speed. Bench tests calibrated the light intensity levels and thresholds of the fiber optic sensors, identifying optimal settings under black seed pickup disc conditions. The inductive sensors achieved a monitoring accuracy exceeding 98.21% for hill-drop counts in bench tests. Field trials demonstrated that the system maintained a hill-drop count

收稿日期:2025-03-06　修回日期:2025-03-28

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02003-3)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A176)和新疆维吾尔自治区财政扶持农机化发展项目(CF2025-05)

作者简介:史增录(1986—),男,正高级实验师,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail:shizlfd@qq.com

通信作者:马旭(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计理论与智能装备研究,E-mail:maxu1959@scau.edu.cn

accuracy no less than 98.10%, seeding quantity accuracy no less than 98.21%, and missed seeding accuracy no less than 95.00% at forward speeds of 2.5 km/h to 3.8 km/h. The high-precision monitoring system proved suitable for practical sowing operations, offering significant potential for enhancing cotton sowing intelligence and improving cotton industry efficiency.

Key words: cotton; precision planter; seeding monitoring

0　引言

精量播种对棉花规模化生产实现节本增效具有重要意义[1-3]。穴播器工作性能直接决定棉花精量播种作业质量,实时监测穴播器工作质量,有利于提高播种环节可视化和信息化[4],可降低播种过程中的漏播,减轻人工劳动强度[5-17]。研究一种适用于棉花精量播种机的播种监测系统,实现播种过程中播种质量监测,对提升棉花播种智能化程度,实现棉花产业提质增效具有重要的现实意义。

目前国外对于播种机配套监测系统研究较为完善,美国 Dickey-John 公司[18]基于光电传感器设计了探头检测装置,利用作物籽粒经过监测区时,传感器输出电压信号发生变化的原理,实现了播种过程精确监测。KARIMI 等[19-20]设计了一种红外种子传感器,将传感器安装在单独的种管上,监测种子流速和种子存在与否。BESHARATI 等[21]开发了一种由红外 LED 和光电二极管组成的红外传感器系统,通过微处理器接收分析传感器输出电压信号,对不同作物种子进行监测。OKOPNIK 等[22]采用红外传感器对玉米种子进行监测,监测精度大于 96.5%。近年来,国内播种监测技术研究取得了较大的进展,徐洛川等[23]基于一种互电容传感器,设计了一种气动双料机播种状态实时监测系统,通过棉籽质量、相应品种倍数及漏播阈值确定播种状态。丁幼春等[24-27]基于 PVDF 压电薄膜设计了一种适用于油菜精量排种器的种子流传感装置,通过分析种子与压电薄膜信号碰撞特征,设计了沉槽基板-压电薄膜感应结构,提高了装置时间分辨率,有效降低了振动对监测精度产生的影响,监测精度不低于 99.1%。孙国峻等[28]基于 PVDF 双压电薄膜,设计了一套油菜精量播种监测系统,利用单片机作为主控制器,对播种过程中的播种量、漏播率、重播率以及排种速度进行监测,该方法具有较高的监测精度,且抗干扰能力较强。赵郑斌等[29]利用 AVT 相机对穴播器进行播种监测,利用光电传感器控制相机的触发,通过 2 个相机同时逐行采集图像,上传到计算机进行图像分析处理,获得取种信息,可得系统重播率检测精度为 98.94%,漏播率检测精度为 99.33%,可满足播种质量监测要求,且精度较高。

国内外学者对播种监测方法进行了研究,但因农艺条件和排种装置差异,难以应用到新疆地区棉花精量穴播机上。且光电法相较于电容法、压电法和机器视觉法而言,受光照、灰尘、振动影响较小,有较强的环境适应性,但在播种监测精度、安装灵活性等方面还需进一步研究。因此,本文基于 LabVIEW 设计一套适用于新疆棉花精量播种机的播种监测系统,通过光纤传感器监测齿盘式穴播器取种状态,电感式传感器监测穴播器转动状态,信号采集模块捕获播种过程中的传感器电压信号,LabVIEW 上位机对捕获的信号进行处理,以实时显示播种量、漏播量、成穴数、漏播率及其他播种作业参数。通过台架试验标定光纤传感器的光强度挡位和阈值,获得黑色取种齿盘背景下最优光强度挡位和阈值,在现有基础上增强系统监测精度,提高其性能表现,以实现对棉花播种机播种过程实时精准监测。

1　系统总体设计

1.1　监测载体结构和工作原理

齿盘式穴播器是棉花精量播种机实现精量播种的关键部件。主要由导种管、定盘、压盘、取种齿盘、隔种圈、分种盒、鸭嘴及腰带总成、动盘等组成。其结构如图 1 所示。

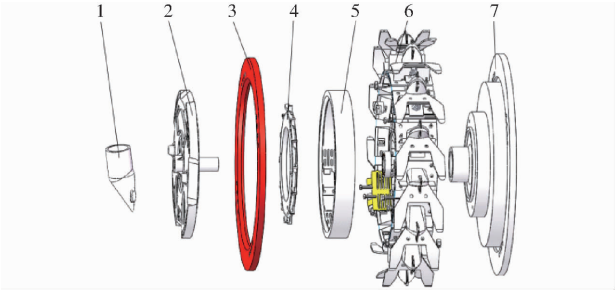

图 1　穴播器结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of hill-drop planter

1. 导种管　2. 定盘　3. 压盘　4. 取种齿盘　5. 隔种圈　6. 鸭嘴及腰带总成　7. 动盘

棉种经导种管进入穴播器后堆积于隔种圈底部,当穴播器动盘转动带动取种齿盘转动时,在取种齿盘与棉种、棉种与棉种相互作用下,少量棉种进入型孔。随着取种齿盘转至隔种圈上方,棉种脱离隔种圈掉入腰带总成分种腔,待鸭嘴开启时被投入鸭嘴掘出的穴中。

1.2 监测系统结构和监测原理

棉花精量播种机播种监测系统结构如图 2 所示。系统主要由播种监测模块、数据采集模块及监测终端组成。光纤传感器安装在齿盘式穴播器内的隔种圈上,通过传感器保持架固定,取种齿盘型孔内的棉种在经过光纤传感器时发出电压信号;电感式传感器通过自制支架安装于穴播器保持架上,对应穴播器鸭嘴嘴尖,穴播器鸭嘴经过电感式传感器时发出电压信号。选用数据采集模块采集电压信号,采用 MODBUS 通信协议“一对多”有线传输至上位机 LabVIEW,经 LabVIEW 上位机系统定时计数程序处理,获得棉种排种频率和排种总量,根据国家标准计算获得播种量、漏播量、成穴数、漏播率及作业速度等参数,显示在棉花播种监测终端装置上,并在漏播率超过设定阈值时发出报警,提醒驾驶员下车查看,拖拉机蓄电池为监测终端、传感器和数据采集模块工作供电。

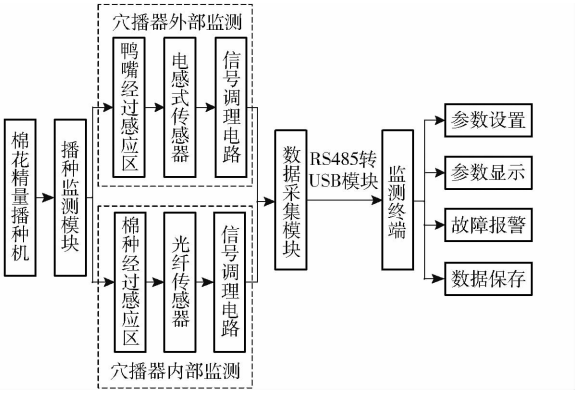

图 2 播种监测系统整体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of seed planting monitoring system

播种监测原理为:利用齿盘式穴播器输种特点,在其排种过程中,装置分为取种区、携种区和投种区,取种区位于装置底部棉种堆积处,携种区位于穴播器侧面,投种区位于穴播器上端,如图 3 所示。在携种过程中,棉种位置和状态相对于取种齿盘较为稳定,基于此特点,提出一种单侧脉冲计数监测方法,在携种区对棉种有无进行监测。脉冲计数值计算式为

$$I = I_0 + \sum_{i=1}^{j} \Delta I \tag{1}$$

式中 I——脉冲计数值

I_0——初始计数

j——计数触发事件数

ΔI——计数固定增加值

针对穴播器内部监测,选用的传感器为漫反射光纤传感器,根据颜色差异对取种齿盘和棉种进行区分。取种齿盘与棉种颜色差异明显,故反射脉冲信号变化不大时,取种齿盘经过;反射脉冲信号较大时,取种齿盘内携带棉种经过。通过漫反射光纤传感器标定,可得取种齿盘和棉种各自的反射光信号强度,选择合适阈值,将反射强度较高的脉冲信号筛选出,从而区分有无棉种经过,获得排种过程中的播种量。针对穴播器外部监测,选用的传感器为电感式传感器,通过监测穴播器鸭嘴嘴尖获得理论的成穴数。将光纤传感器和电感式传感器进行耦合,进而得出漏播量和漏播率等参数。

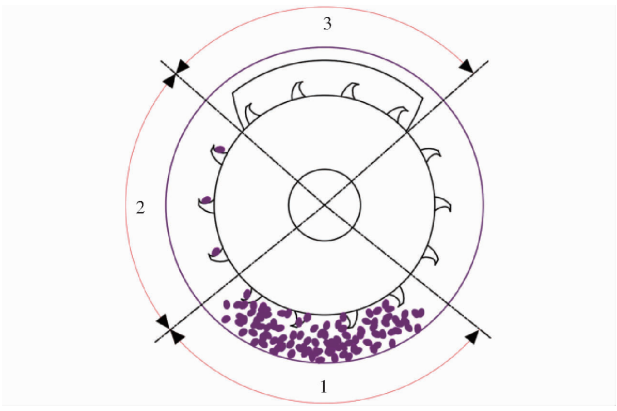

图 3 穴播器排种原理图

Fig. 3 Schematic of seed arrangement by hill-drop planter

1. 取种区 2. 携种区 3. 投种区

2 监测系统硬件设计

2.1 播种监测传感器

传感器作为播种监测的关键元件,其性能必须具有较高的可靠性。光纤传感器用于监测穴播器播种量,结合电感式传感器所监测的成穴数,可得出漏播量。电感式传感器还可对穴播器转速进行监测,经计算得机具前进速度,为驾驶员控制播种速度提供参考。

2.1.1 光纤传感器

相比常用于播种监测的红外光电传感器,光纤传感器发射端和接收端在相同侧,且光纤传感器体型更小,易于安装,光纤传感器光斑直径小,不易误检。因此选用光纤传感器监测排种信息。

光纤传感器由光纤放大器、传输光纤和监测末端等组成,如图 4 所示。

漏播率为棉花精量播种机重要性能指标。常规情况下,新疆棉花播种每穴播种量为 1 粒。作业时,通过取种齿盘转动将棉种带入分种腔,实现排种。如图 5 所示,穴播器各个零部件中,在不影响穴播器工作性能前提下,隔种圈有足够的空间安装传感器,因此优选在隔种圈上打孔并设置传感器。经多次隔种圈打孔尝试,确定最佳安装角度为:传感器轴线与隔种圈切线最佳夹角为 40°,此时可保证透镜在与

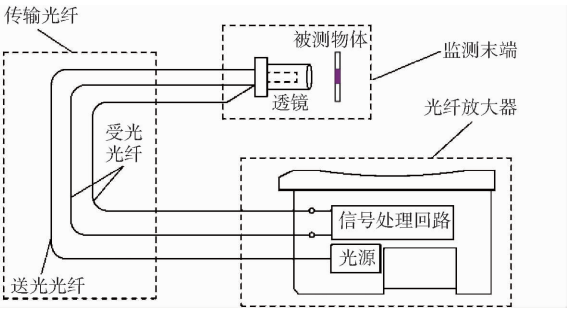

图 4　光纤传感器结构简图

Fig. 4　Fiber optic sensor structure schematic

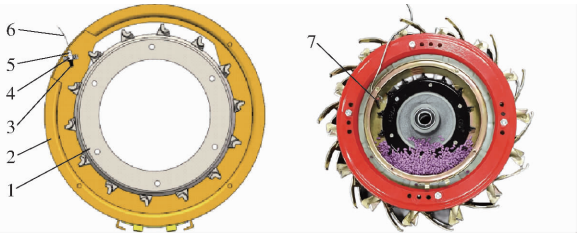

图 5　光纤传感器安装位置

Fig. 5　Schematic of installation position of fiber optic sensor

1. 取种齿盘　2. 隔种圈　3. 透镜　4. 传感器保持架　5. 激光头
6. 传输光纤　7. 光纤传感器

取种齿盘不发生干涉情况下，准确地将光束聚焦到棉种籽粒上。为保证传感器监测可靠性，隔种圈侧面对应位置打孔，将传输光纤穿入穴播器内部，光纤头通过 3D 打印的保持架支撑，前端通过带螺纹透镜紧固，同时使用螺栓将保持架固定在隔种圈上。

棉种籽粒随取种齿盘转动，经过光纤传感器监测区时引起反射光信号变化，通过传输光纤返回到光电探测器中，光电探测器输出电压信号。选择红色光纤传感器光源和黑色取种齿盘，提升了监测系统监测精度和抗干扰能力，降低了反射光和自然光影响。监测原理如图 6 所示。

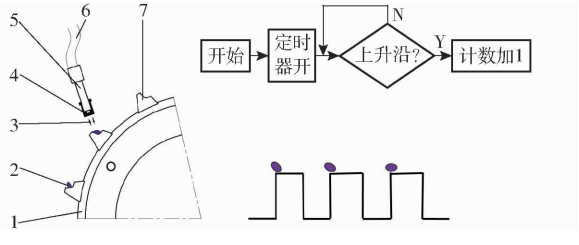

图 6　光纤传感器监测原理图

Fig. 6　Schematic of fiber optic sensor monitoring

1. 取种齿盘　2. 棉种籽粒　3. 光学信号　4. 透镜　5. 光纤探头
6. 传输光纤　7. 型孔

2.1.2　电感式传感器

穴播器工作时，鸭嘴及腰带总成跟随动盘一起转动。为准确地采集穴播器成穴数和转速，使用自制传感器安装支架，将电感式传感器固定在鸭嘴附近，紧贴鸭嘴嘴尖处，如图 7 所示。每当穴播器鸭嘴转动经过电感式传感器时，检测电极产生静电感应和极化现象，检测电路将其转换为开关量信号输出，由信号放大处理电路处理后，数据采集模块读取电压，鸭嘴经过感应区产生一次电压信号。

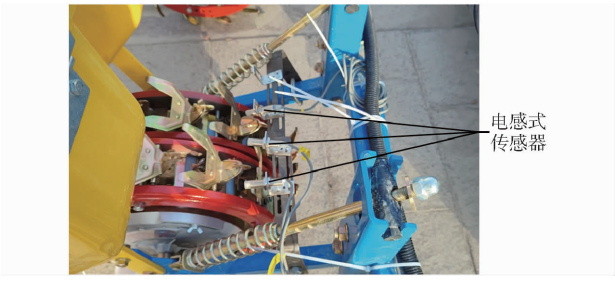

图 7　电感式传感器安装位置图

Fig. 7　Wiring diagram for inductive sensor installation

2.2　数据采集模块

传感器输出的电压信号由数据采集模块进行采集和信号转换，实现监测数据实时传输。该监测系统选用 HY12DIF 型开关量隔离输入隔离输出模块，可同时进行 12 路通道开关量信号采集，具有较高的精度和可靠性。其中 DI0 ~ DI7 可实现频率（速度）测量和同步计数，通过 RS485 通讯模块接口实现输入信号的实时采集，通过 MODBUS 规约同时获得测频值和计数值。实物简图如图 8 所示。

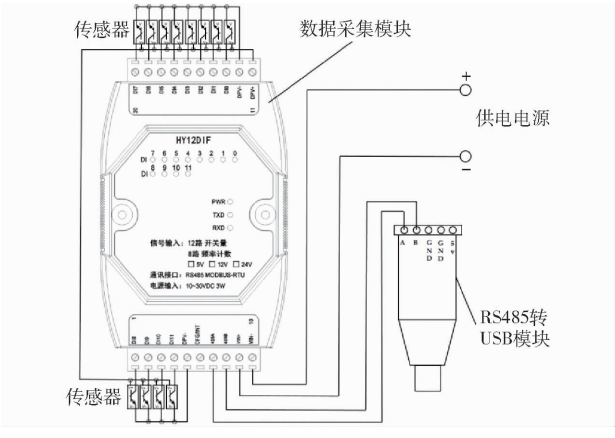

图 8　数据采集模块实物简图

Fig. 8　Data acquisition module physical sketch

采样频率是决定监测精度的关键参数。选用的数据采集模块中的 ADC 位数为 8 位，在采集电压 ±5 V 信号时，测量精度为 20 mV，即以 20 mV 为一个单位逐步增加，测量过弱的电压时信号会失真，不能有效反映。光纤传感器和电感式传感器输出信号属于带限信号，对于此类信号，使用奈奎斯特采样频率或者更高的采样频率，可对带限信号进行较为准确的重建，当 AD 采样频率高于奈奎斯特采样频率时，利用过采样方式，可对信号进行细分以减少量化误差。当传感器传输信号最大频率为 f_m，则此时奈奎斯特采样频率为

$$f_s = 2f_m \tag{2}$$

式中　f_s——传输信号所需的实际采样频率，Hz

由于穴播器取种齿盘齿数为 14,监测系统中传感器传输信号最大频率为

$$f_m = \frac{14n}{60} \tag{3}$$

式中 n——穴播器转速,r/min

ADC 采样频率高于实际所需的采样频率被称作过采样,过采样频率越高,则采集到的信号点越多,采样精度越高。若将 N 个量化位数 M 位的样本点进行累积相加平均,则可提升到量化位数为

$$W = \log_4 N + \frac{M}{2} \tag{4}$$

式中 W——新的量化位数

此时过采样频率为

$$f_o = 4^{W-M} f_s \tag{5}$$

式中 f_o——过采样频率,Hz

模拟信号经 ADC 采集后,一个有效点可通过多个采样点来进行采样计算,即

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{4^{(W-M)}} (x[i] + e[i])}{2^{W-M}} \tag{6}$$

式中 y——有效采样点

$x[i]$——AD 量化后第 i 个离散点

$e[i]$——第 i 个离散点噪声

实际播种作业过程中,穴播器最佳作业转速为 30 ~ 45 r/min,对应拖拉机最佳作业速度为 2.5 ~ 3.8 km/h;而穴播器极限作业转速为 80 r/min,对应拖拉机极限作业速度约为 7 km/h。为确保监测系统在播种机允许的所有作业速度工况下都能实现精准监测,选定穴播器极限作业转速 80 r/min 来设置采样频率,取种齿盘齿数为 14,根据式(2)、式(3)可计算出对应的奈奎斯特采样频率 f_s 为 37.33 Hz。该模块量化位数 M 为 8 位,为将新的量化位数 W 提升至 12 位,此时由式(5)可计算出过采样频率应为 $f_o = 16f_s$,即过采样频率为 597.28 Hz,设置信号处理模块采样频率为 600 Hz 即可满足采样需求。

2.3 播种监测终端

数据采集模块采集并输出数字信号,通过 RS485 转 USB 模块传输到监测系统终端,监测终端对其进行处理、计算和显示。

棉花播种监测终端选用带有 Windows 10 系统的 CX043I - NF + 15.6 英寸全贴合频一体机(广州市触讯电子科技),有多个 USB 及 COM 端口,安装上位机系统 LabVIEW 2023 Q1 和监测系统程序于工控机内。通过 RS485 转 USB 转换模块实现播种监测传感器信号的传输,从而使计算机对种子状态进行实时感知与监测。系统由拖拉机 24 V 蓄电池供电,用于数据采集模块、传感器以及监测终端供电。

3 监测系统软件设计

软件设计是数据采集处理和显示的关键部分。软件系统设计由主程序、信号滤波程序、播种数据采集与处理程序、故障报警与数据保存程序、人机交互界面设计等模块组成。

3.1 主程序设计

LabVIEW 编程具有多线程并行优势,主程序设计了 2 个并行线程,用于采集光纤传感器和电感式传感器接入数据采集模块端口电压,根据不同线程输入数据变化,分别启动各个模块程序。主程序流程如图 9 所示。

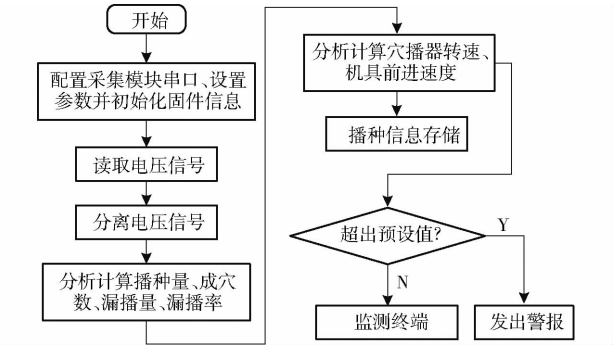

图 9 主程序流程图

Fig. 9 Main program flowchart

3.2 信号滤波模块设计

在实际作业过程中,传感器传输信号往往包含一定噪声,信号测量过程中可能会出现数据抖动和异常起伏,为了分离信号中的有效成分和干扰成分,需对采集到的数据信号进行处理,以得到数据变化规律。最常见噪声模型为热噪声,与白噪声类似,取值服从高斯分布,经过 AD 采集后的信号功率谱密度,在其带宽范围内仍为带限白噪声,此时需采用滤波算法来对信号进行滤波。常见的滤波算法有限值滤波、中值滤波、滑动平均滤波和一阶滤波,限值滤波无法抑制周期性干扰,平滑度差;中值滤波不适应快速变化的参数;一阶滤波相位滞后,灵敏度低;而滑动平均滤波对周期性干扰有良好的抑制作用,平滑度高,算法相对简单,适用于高频振荡系统中多次采样,可满足该系统信号滤波需求。

对于一个时间和空间离散的序列,滑动平均通过对局部数据加权平均来消除信号中短期扰动,凸显长期趋势和周期。高斯白噪声符合一般噪声特性,在任意不同时刻上的随机变量是统计独立且互不相关的,即

$$\begin{cases} n(t) = n_c(t)\cos(\omega_c t) - n_s(t)\sin(\omega_c t) \\ E[n(t)] = E[n_c(t)] = E[n_s(t)] = 0 \\ \sigma_n^2 = \sigma_c^2 = \sigma_s^2 \end{cases} \tag{7}$$

式中　$n(t)$——随机变量

$E[n(t)]$——$n(t)$期望

σ_n^2——方差

由式(7)可知，在足够大的样本空间内，该噪声信号均值约等于期望，方差为 0，此时平均算法可滤除噪声。

对于 AD 采样后信号电压序列 $x[n]$，由于采样频率远大于信号频率，可直接取点 δ 邻域附近的点进行加权平均，作为该点数据，则第 k 点数据 y_k 可表示为

$$y_k = \frac{\sum_{i=k-\delta}^{k+\delta}(x[i] + n[i])}{2\delta + 1} \tag{8}$$

根据式(7)可将式(8)化简为

$$y_k = \frac{\sum_{i=k-\delta}^{k+\delta} x[i]}{2\delta + 1} \tag{9}$$

此时，经过滑动平均后在$(k-\delta, k+\delta)$内的信号变化平稳，该点值不受噪声干扰。参照文献[30]，该系统实际作业过程信号传输频率不高，为保证信号滤波效果，同时不至于使信号过于平滑，导致信号特征丢失，考虑到农机作业环境中振动的窗口补偿，选取滑动窗口为 5，可对传输信号进行有效滤波。通过滑动平均滤波，消除了数据信号中因白噪声导致的数据抖动和随机起伏，滤波后数据变化趋势平滑。

3.3　播种数据采集与处理模块设计

经信号滤波模块处理后数据，传递至上位机进行计算分析，以获取监测系统所需的作业参数。监测系统采用以 Windows 系统为载体的 LabVIEW 软件，设计播种数据采集与处理模块。主要利用其定时输入捕获功能、多线程采集功能及串口通信功能。播种数据采集与处理模块由信号采集与读取程序、数据计算与处理程序组成。

3.3.1　信号采集与读取程序

信号采集模块默认地址为 01，模块中采集信号所需的输入寄存器功能码为 04 H，计数通道地址为“3010 ~ 3025”，即从 3009 后的地址为计数通道，依此计算出寄存器校验码，读取信号处理模块中的寄存器缓冲区信号代码，并转换为十六进制。读取出的十六进制信号代码，每段都有其传递的相应信息，通过截取不同位置的字符串，获得需要的传感器信号，实现各个通道的数据采集。

3.3.2　数据计算与处理程序

有棉种经过传感器时，传感器发出脉冲信号，由数据采集模块采集并读取，输入上位机 LabVIEW 端，经过程序截取不同字段信息，转换为双精度浮点数，得到播种量和成穴数等参数，再通过设定的程序计算出漏播量、漏播率等，计算式为

$$g = G - m \tag{10}$$

$$\theta = \frac{g}{G} \times 100\% \tag{11}$$

式中　g——漏播量　　G——成穴数

m——监测播种量

θ——漏播率，%

除计算漏播量和漏播率外，LabVIEW 程序还可通过穴播器检测穴播器鸭嘴嘴尖，监测其转速状态，进而得知机具前进速度，帮助驾驶员在合理的速度范围内进行播种作业，转速计算式为

$$n = \frac{60M_0}{CT_0} \tag{12}$$

式中　M_0——单位采样时间内采集到的脉冲数

C——鸭嘴数

T_0——单位采样时间，s

由穴播器转速可进一步得到机具前进速度为

$$V = \frac{l}{q}\pi d(1 - \sigma) \tag{13}$$

式中　V——机具前进速度，m/s

l——每秒脉冲数

q——鸭嘴嘴尖数

d——穴播器直径，m

σ——滑移率

上位机 LabVIEW 还设计了故障报警模块，当出现漏播状况时，报警模块显示对应部位故障信息并闪烁报警，避免因故障出现大面积作业质量问题。

3.4　故障报警与数据保存模块设计

在宽幅播种机作业过程中，故障报警功能显得尤为重要，可有效避免大面积播种质量故障。监测系统主要对漏播故障进行监测。

漏播率是衡量播种作业质量的关键指标。通过对比光纤传感器监测到的播种量，与电感式传感器监测到的成穴数耦合得出漏播量，计算出穴播器漏播率。将监测到的漏播率与设定的漏播率阈值 4% 进行对比[31]，若监测值大于阈值，则判定为发生漏播故障，监测系统发出报警。

数据保存模块将播种量、漏播量、成穴数、漏播率和作业速度等参数实时记录保存到工控机里，以时间日期为文件名生成 Excel 文件，并对漏播故障情况的时间节点进行记录，为后续数据分析处理和

系统改进提供生产资料。

故障报警和数据保存功能均通过 LabVIEW 软件设计的人机交互模块实现,人机交互界面对监测系统功能实现了高度集成。

3.5 人机交互模块

人机交互模块是参数设置和数据显示的终端。通过 LabVIEW 软件捆绑的界面设计功能,将相应控件进行排列美化,设计出一个功能完备的显示界面,如图 10 所示。显示界面包括工作参数设置、播种数据显示、数据保存及故障报警等功能。在使用软件前,需选择对应串口,设置报警阈值及保存路径。采集到的数据经程序分类计算处理后,将播种量、漏播量、成穴数、漏播率和作业速度实时显示在人机交互界面上。数据保存功能可通过路径选择,将播种数据实时保存到选择路径下自动生成的 Excel 表格中,方便后续查看。播种机正常工作时,软件参数显示正常,警示灯为绿色。当监测到的漏播率超过设定阈值时,软件警示灯变为红色,提醒拖拉机驾驶员下车查看,避免因大面积漏播和其余故障问题产生较大损失。软件更新频率为 10 Hz,可实时显示播种信息。



图 10 人机交互界面

Fig. 10 Human-computer interaction interface

4 系统验证

为验证棉花精量播种机播种监测系统作业性能,进行了台架试验和田间试验。在试验台架上进行光纤传感器标定试验,确定了传感器最优监测参数组合,同时对电感式传感器精度进行检验,保证田间试验能够更加准确、高效进行。在大田环境中对监测系统进行了精度试验,验证该系统精度和可靠性,以确定其是否可以满足播种监测实际作业需求。

4.1 光纤传感器标定试验

光纤传感器可根据实际需求,调整发射光强度和信号强度阈值,当反射光强度超过阈值时,光纤传感器放大器发出一次电压信号。

为提高系统抗干扰性能和精度,在播种试验台架上进行光纤传感器标定试验,如图 11 所示。将光纤传感器安装于试验台架穴播器内部,选取紫色包衣鲜艳棉种,3 种颜色各异的取种齿盘,3 个挡位光强度,通过标定试验获取最优组合,进行光纤传感器标定。选取红、绿、黑 3 种颜色取种齿盘,在光强度挡位调为 P100、P200、P300 时分别进行一轮测试(穴播器转动 1 圈),即 14 次,对试验数据进行平均并取整。人工转动穴播器,通过光纤传感器放大器显示数值,观察取种齿盘在经过棉种或取种齿盘时,反射光强度差异以及反射光强度,推断出合适的取种齿盘颜色、光强度阈值和光强度挡位。

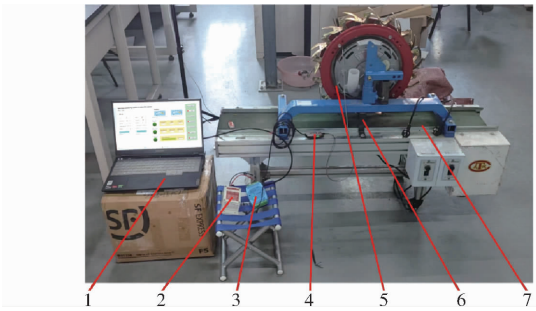

图 11 台架试验

Fig. 11 Bench test

1. 便携式计算机 2. 移动电源 3. 数据采集模块 4. 光纤传感器 5. 穴播器 6. 电感式传感器 7. 试验台架

如表 1 所示,黑色取种齿盘与棉种反射光强度差异较大,可显著提高传感器对的抗干扰能力;在选择黑色取种齿盘试验时,P100 挡位棉种与取种齿盘的发射光强度差异较小,难以有效对光信号进行区分,而 P300 时棉种反射光强度有时会达到显示上限,因此选用 P200 挡位,可有效提高系统监测精度。黑色取种齿盘反射光强度为 100 ~ 300,棉种反射光强度为 2 500 ~ 3 500,因此选定传感器阈值为 1 200 ~ 1 600,可精确对经过的棉种籽粒进行计数。因此选定的最优组合为黑色取种齿盘、光强度挡位 P200、阈值 1 200 ~ 1 600,经台架试验验证,该组合在穴播器推荐最低作业转速 30 r/min 下监测精度可达 100%。

表 1 光纤传感器标定试验结果

Tab. 1 Calibration test results of fiber optic sensor

取种齿盘颜色	光强度挡位	棉种平均反射值	取种齿盘平均反射值
红	P100	650	600
	P200	2 800	2 900
	P300	8 950	9 400
绿	P100	600	350
	P200	2 760	1 980
	P300	9 190	6 540
黑	P100	610	100
	P200	2 950	550
	P300	8 350	2 100

4.2　电感式传感器监测精度台架试验

为初步检验电感式传感器监测精度，对监测系统的成穴数监测进行台架试验（图 11）。选用 14 穴棉花齿盘式穴播器作为试验穴播器，利用电感式传感器检测穴播器鸭嘴，以获得监测成穴数。

实际作业过程中，穴播器转速对成穴数监测精度影响最大。选择转速 30、35、40、45 r/min 进行试验，在各个转速下，选取 280 个鸭嘴进行统计（即穴播器旋转 20 圈），重复 3 次。将实际成穴数与监测系统监测到的成穴数进行对比，得出监测精度，取 3 次平均值作为试验结果（表 2）。

由表 2 可知，随着穴播器转速增加，成穴数监测精度有所下降，但监测精度总体在 98.21% 以上，电感式传感器监测精度可满足田间试验需求。

表 2　成穴数监测台架试验结果

Tab.2　Cavitation number monitoring bench test results

穴播器转速/（r·min^{-1}）	实际成穴数	监测成穴数	成穴数监测精度/%
30	280	279	99.64
35	280	278	99.28
40	280	276	98.57
45	280	275	98.21

4.3　田间验证试验

穴播器作业质量是衡量棉花播种作业质量的重要因素。播种作业开始前，设置监测系统数据传输串口和播种信息保存路径，测试监测系统与下位机数据传输稳定性后，开始进行田间作业质量试验，如图 12 所示。

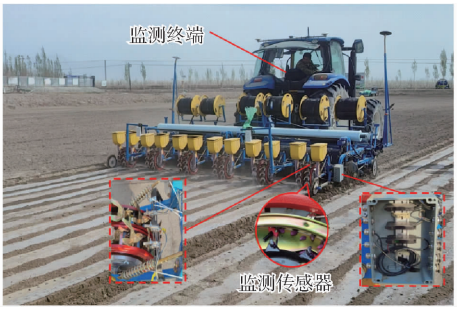

图 12　田间验证试验

Fig.12　Field validation test

选用新疆天诚农机具有限公司研制的 14 穴尖嘴棉花齿盘式穴播器为排种监测载体，棉种选用新疆阿克苏地区培育的塔河 2 号棉种，经过包衣处理，包衣颜色为紫色，该棉种颗粒较大，包衣颜色鲜艳，便于光纤传感器监测。将拖拉机前进速度控制在 2.5、3、3.5、3.8 km/h，对应穴播器转速分别约为 30、35、40、45 r/min，将传感器装于一侧最外端穴播器，不同速度重复试验 6 次。根据文献[32－33]设定试验地长度 140 m，每次试验前，预留两端试验预备区 20 m，稳定试验区 100 m 作为数据采集区。以幅宽内 10 m 为一个采集单元，每行试验区随机设定 3 个采集单元进行统计，取平均值。采用人工挖种的方式将实际成穴数、实际播种量和实际漏播量进行统计，并与监测成穴数、监测播种量和监测漏播量进行对比，统计监测精度。

试验采用的穴播器为齿盘式 14 穴穴播器，播种株距为 10.5 cm，可知每个采集单元内理论具有 1 051 穴，试验结果如表 3 所示。

4.4　田间验证试验结果与分析

由表 3 和图 13 可知，当拖拉机前进速度为 2.5～3.8 km/h 时，随着前进速度增加，成穴数、播种量和漏播量监测精度总体呈下降趋势，当前进速度为 3.8 km/h 时，监测精度达到最低，但整体监测精度仍保持在 95% 以上。试验结果表明：①随着拖拉机前进速度增加，穴播器转速提高，穴播器内棉种与取种齿盘产生较为剧烈的碰撞，导致少部分棉种包衣破损或脱落，影响监测精度。②随穴播器转速继续增加，部分棉种经剧烈碰撞后破碎后溅起，导致传感器误检，漏播量监测值低于实际值。

由图 13 可知，系统监测值与人工实测值不存在显著差异，监测精度较高。说明在符合播种要求的穴播器转速下，播种监测系统田间作业效果稳定可靠，可用于实际播种监测。

5　结论

（1）提出了一种基于齿盘式穴播器的监测方法，利用齿盘式穴播器取种特性，确定了隔种圈携种区顶部为光纤式传感器监测点位置，鸭嘴嘴尖外侧为电感式传感器监测点位置，可有效监测穴播器排种过程，实现棉花播种过程中播种量和成穴数监测。

（2）设计了棉花精量播种机播种监测系统硬件与软件流程，明确了监测模块监测原理以及软硬件设计。利用光纤传感器和电感式传感器对播种过程进行监测，数据采集模块将播种参数采集，并调制传感器脉冲信号，通过 RS485 模块将信号传递至上位机 LabVIEW，LabVIEW 对脉冲信号进行滑动平均滤波，经软件数据处理与计算后，将播种量、漏播量、成穴数、漏播率、穴播器转速和作业速度等参数实时显示到监测终端上。并在漏播率超过设定的阈值时发出报警，避免了棉花播种作业过程中的大面积漏播问题。

（3）台架标定试验结果表明，选定黑色取种齿盘，选定光强度挡位 P200，光强度阈值 1 200～1 600 为监测精度最优组合，台架标定试验在现有基础

表 3 监测系统田间试验结果

Tab. 3 Monitoring system field test results

前进速度/(km·h^{-1})	试验编号	理论成穴数	实际成穴数	实际播种量	实际漏播量	监测成穴数	监测播种量	监测漏播量	成穴数监测精度/%	播种量监测精度/%	漏播量监测精度/%
2.5	1	1 051	1 049	1 022	27	1 047	1 021	26	99.81	99.90	96.30
	2	1 051	1 050	1 014	36	1 047	1 012	35	99.71	99.80	97.22
	3	1 051	1 050	1 013	37	1 046	1 010	36	99.62	99.70	97.30
	4	1 051	1 051	1 015	36	1 048	1 011	37	99.71	99.61	97.22
	5	1 051	1 049	1 019	30	1 049	1 019	30	100	100	100
	6	1 051	1 051	1 015	36	1 047	1 012	35	99.62	99.70	97.22
3.0	1	1 051	1 050	1 012	38	1 042	1 005	37	99.24	99.31	97.37
	2	1 051	1 050	1 011	39	1 042	1 002	40	99.24	99.11	97.44
	3	1 051	1 052	1 013	39	1 039	1 001	38	98.76	98.82	97.44
	4	1 051	1 049	1 008	41	1 040	1 001	39	99.14	99.31	95.12
	5	1 051	1 050	1 014	36	1 040	1 005	35	99.05	99.11	97.22
	6	1 051	1 051	1 014	37	1 040	1 003	37	98.95	98.92	100
3.5	1	1 051	1 049	1 006	43	1 036	995	41	98.76	98.91	95.35
	2	1 051	1 050	1 009	41	1 035	993	42	98.57	98.41	97.56
	3	1 051	1 050	1 006	44	1 038	996	42	98.86	99.01	95.45
	4	1 051	1 049	1 009	40	1 033	995	38	98.47	98.61	95.00
	5	1 051	1 051	1 008	43	1 038	993	45	98.76	98.51	95.35
	6	1 051	1 051	1 012	39	1 035	997	38	98.48	98.52	97.44
3.8	1	1 051	1 050	1 006	44	1 031	989	42	98.19	98.31	95.45
	2	1 051	1 051	1 004	47	1 037	992	45	98.67	98.80	95.74
	3	1 051	1 051	1 009	42	1 035	995	40	98.48	98.61	95.24
	4	1 051	1 052	1 006	46	1 032	988	44	98.10	98.21	95.65
	5	1 051	1 049	1 003	46	1 036	989	47	98.76	98.60	97.83
	6	1 051	1 050	1 003	47	1 035	990	45	98.57	98.70	95.74

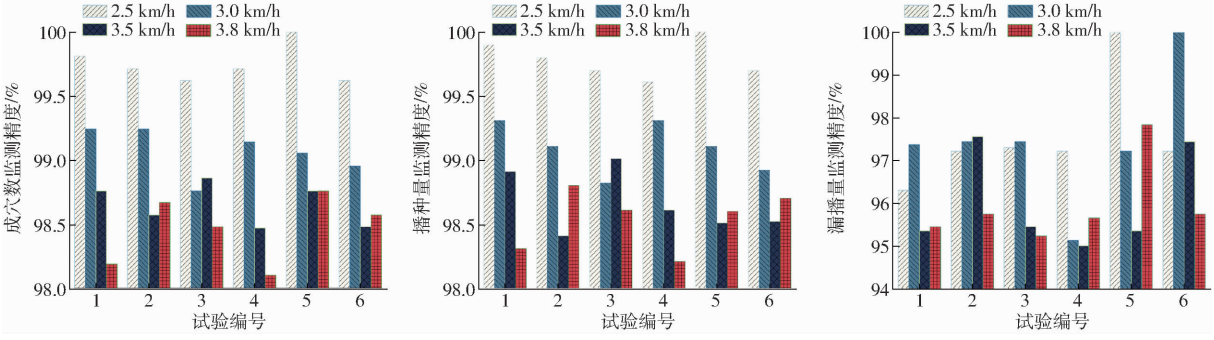

图 13 监测系统趋势图

Fig. 13 Monitoring system trend charts

上进一步增强了系统监测精度,提高了监测系统性能。

(4)电感式传感器监测精度台架试验结果表明,当穴播器转速为 30 ~ 45 r/min 时,成穴数监测精度总体在 98.21% 以上,电感式传感器的监测精度可满足田间试验需求。

(5)田间试验结果表明,光纤传感器和电感式传感器可在田间复杂的工作环境中正常使用,且精度较高。当播种机前进速度为 2.5 ~ 3.8 km/h 时,成穴数监测精度不小于 98.10%,播种量监测精度不小于 98.21%,漏播量监测精度不小于 95.00%,监测系统精度合理,可用于实际播种作业。

参 考 文 献

[1] 卢秀茹,贾肖月,牛佳慧. 中国棉花产业发展现状及展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 26 - 36.
LU Xiuru, JIA Xiaoyue, NIU Jiahui. The present situation and prospects of cotton industry development in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(1): 26 - 36. (in Chinese)

[2] 丁幼春,王凯阳,刘晓东,等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30 - 41.

DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and smallsize seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30 – 41. (in Chinese)

[3] 武建设,陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5 – 10.
WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang production and construction corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5 – 10. (in Chinese)

[4] 张学军,张海涛,史增录,等. 棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 9 – 19.
ZHANG Xuejun, ZHANG Haitao, SHI Zenglu, et al. Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 9 – 19. (in Chinese)

[5] 姜鑫铭. 玉米免耕播种机精确播种关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
JIANG Xinming. Study on key technologies of precision seeding for maize no-tillage planter[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[6] 车宇,伟利国,刘婷韬,等. 免耕播种机播种质量红外监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 11 – 16.
CHE Yu, WEI Liguo, LIU Xingtao, et al. Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1): 11 – 16. (in Chinese)

[7] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 23 – 32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23 – 32. (in Chinese)

[8] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 51 – 58.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 51 – 58. (in Chinese)

[9] 王在满,裴娟,何杰,等. 水稻精量穴直播机播量监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 9 – 16.
WANG Zaiman, PEI Juan, HE Jie, et al. Development of the sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 9 – 16. (in Chinese)

[10] 裴娟. 水稻精量穴直播机播种量监测系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
PEI Juan. Study on sowing quantity monitoring system for precision rice hill-drop drill machine[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[11] 杨硕,王秀,高原源,等. 玉米精密播种粒距在线监测与漏播预警系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 17 – 24,35.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design of on-line seed spacing monitoring and miss seeding warning system for maize precision planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 17 – 24,35. (in Chinese)

[12] 解春季,杨丽,张东兴,等. 基于激光传感器的播种参数监测方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 140 – 146.
XIE Chunji, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Seeding parameter monitoring method based on laser sensors [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 140 – 146. (in Chinese)

[13] 周利明,马明,苑严伟,等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44 – 51.
ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(24): 44 – 51. (in Chinese)

[14] 赵立新,张增辉,王成义,等. 基于变距光电传感器的小麦精播施肥一体机监测系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 27 – 34.
ZHAO Lixin, ZHANG Zenghui, WANG Chengyi, et al. Design of monitoring system for wheat precision seeding-fertilizing machine based on variable distance photoelectric sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 27 – 34. (in Chinese)

[15] 王淞,衣淑娟,赵斌,等. 高速精量播种机带式高速导种装置导种性能红外监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 160 – 168.
WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Infrared performance monitoring system of belt-type high-speed seed guide device for high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 160 – 168. (in Chinese)

[16] 邱兆美,张巍朋,赵博,等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 77 – 83.
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 77 – 83. (in Chinese)

[17] 刘阳春,李明辉,王吉中,等. 玉米籽粒直收机夹带损失检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 140 – 149.
LIU Yangchun, LI Minghui, WANG Jizhong, et al. Design and test of entrainment loss detection system for corn kernel direct harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 140 – 149. (in Chinese)

[18] WROBEL V. Microcomputer-controlled seeder[J]. Computer Design, 1977, 16(6): 184 – 186.

[19] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 165 – 172.

[20] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 543 - 551.
[21] BESHARATI B, NAVID H, KARIMI H, et al. Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 874 - 881.
[22] OKOPNIK D L, FALATE R. Usage of the DFRobot RB - DFR - 49 infrared sensor to detect maize seed passage on a conveyor belt[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 102: 106 - 111.
[23] 徐洛川,胡斌,罗昕,等. 叉指电容式棉花穴播取种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 50 - 60.
XU Luochuan, HU Bin, LUO Xin, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 50 - 60. (in Chinese)
[24] 丁幼春,陈礼源,王登辉,等. 油菜播种质量监测系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 43 - 51.
DING Youchun, CHEN Liyuan, WANG Denghui, et al. Design and test of monitoring system for rapeseed sowing quality[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 43 - 51. (in Chinese)
[25] 丁幼春,陈礼源,董万静,等. 油菜宽幅播种作业监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 38 - 45.
DING Youchun, CHEN Liyuan, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of the sowing monitoring system for a wide-width rapeseed planter[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 38 - 45. (in Chinese)
[26] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 29 - 36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29 - 36. (in Chinese)
[27] DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of performance testing system of multi-channel seed-metering device based on time intervals[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 11 - 18.
[28] 孙国峻,张金然,徐勇,等. 基于 PVDF 双压电薄膜的油菜播种监测系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 601 - 607.
SUN Guojun, ZHANG Jinran, XU Yong, et al. Design and experiment of rapeseed sowing monitoring system based on PVDF bi-piexoelectric film[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2022, 48(5): 601 - 607. (in Chinese)
[29] 赵郑斌,刘昱程,刘忠军,等. 基于机器视觉的穴盘精密播种性能检测系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 24 - 28.
ZHAO Zhengbin, LIU Yucheng, LIU Zhongjun, et al. Performance detection system of tray precision seeder based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 24 - 28. (in Chinese)
[30] 乔玉丽. 基于属性距离加权平均的汽轮机油酸值伏安信号滤波算法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
QIAO Yuli. Research on the filtering algorithm of turbine oil acidity' voltammetry signals based on attribute distance weighted average[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024. (in Chinese)
[31] 中华人民共和国工业和信息化部. 铺膜播种机:JB/T 7732—2023[S]. 北京:中国农业出版社,2023.
[32] 中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法:GB/T 6973—2005[S]. 北京:中国农业出版社,2005.
[33] 中国国家标准化管理委员会. 播种监测系统:GB/T 35383—2017[S]. 北京:中国农业出版社,2017.