

光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究

张甜^{1,2} 蒋乐¹ 李兆东^{1,2} 谢瑞¹ 王伟伟^{1,2} 陈永新^{1,2}

(1.安徽农业大学工学院,合肥230036;2.安徽省智能农机装备工程实验室,合肥230036)

摘要:针对油菜精量播种作业速度提高导致种子流检测精度下降的问题,设计了一种光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统,由光纤计数式传感器、核心控制模块、降压模块、无线通信模块和网页终端组成。阐述了光纤计数传感器的种子流检测原理,运用质点运动学理论构建了种子与导种管接触运动力学模型,明确了该传感器的响应时间。系统工作时,通过光纤传感器检测下落的种子流对光纤进行遮挡产生的电压信号,通过不同模块对信号进行降压、收集、传输并结合终端进行实时显示与储存。选用华油杂62油菜种子为试验材料,以六度空间振动台为试验平台搭载油菜精量排种器,以振动频率、种盘转速和工作负压为试验因素,各行排种量及各行排量一致性变异系数的相对偏差为评价指标,开展了传感器精度试验、检测系统性能试验及田间试验。试验结果表明:单、双粒检测试验结果相对偏差最大为3.67%;各行排种量的实际值与检测值的相对偏差不超过4.0%;各行排量一致性变异系数的相对偏差不超过1.0%。田间试验表明油菜种子的播种量检测相对偏差不超过8.0%,系统整体误差较小,可为进一步开展油菜精量播种作业质量评价系统研究提供参考。

关键词:油菜精量排种器;种子流检测;光纤计数

中图分类号:S223.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2023)01-0064-11

OSID:



Seed Flow Detection System of Optical Fiber Counting Rapeseed Precision Metering Device

ZHANG Tian^{1,2} JIANG Le¹ LI Zhaodong^{1,2} XIE Rui¹ WANG Weiwei^{1,2} CHEN Yongxin^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: A fiber counting type rapeseed precision seed metering device seed flow detection system was designed to solve the problem that the accuracy of seed flow detection was reduced as the speed of rapeseed precision seeding was increased. It consisted of an optical fiber counting sensor, a core control module, a step-down module, a wireless communication module, and a Web terminal. The seed flow detection mechanism of the optical fiber counting sensor was elucidated, as well as the particle kinematics theory was used to develop the contact kinematic model of the seed and seed tube, and the sensor's reaction time was also clarified. The voltage signal was created by blocking the optical fiber by sensing the falling seed flow via the optical fiber sensor while the system was operational. The signal was then depressurized, collected, transported through many modules, and integrated with the terminal for display and storage in real time. Huayouza 62 rapeseed seeds were chosen as the test material, and a six-degree space vibration table fitted with a pneumatic precision seed metering device served as the test platform. As test factors, vibration frequency, seed plate speed, and working negative pressure were used. The relative deviation of the coefficient of variation of the displacement consistency was used as the evaluation index, and sensor accuracy tests, detection system performance tests, and field tests were done. The results of the test indicated that the relative deviation of single and double-grain detection test results was no more than 3.67%; the relative deviation between the actual value of the seed quantity in each row and the detected value did not exceed 4.0%; and the relative deviation of the coefficient of variation of each row did not exceed 1.0%. The results of the field test indicated that the relative deviation of rapeseed

收稿日期:2022-08-10 修回日期:2022-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51805004)、国家重点研发计划项目(2022YFD2301402)和安徽省自然科学基金项目(2008085QE217)

作者简介:张甜(1988—),女,实验师,主要从事精准种植机械装备设计及测控研究,E-mail:xfzhangtianahau@163.com

通信作者:陈永新(1971—),男,教授,主要从事智能农机装备振动测试及可靠性研究,E-mail:cyx_zcz@sohu.com

detection did not exceed 8.0% . The overall error of the system was small, providing a technical basis for future research on the quality evaluation system of precision rapeseed seeding operations.

Key words: rapeseed precision seed meter; seed flow detection; fiber counting

0 引言

油菜精量直播技术是油菜机械化生产的重要一环^[1]。油菜种子粒径小,颜色与土壤接近,落入土壤不易发现,其机械化播种质量只能依靠观察种箱里种子的数量变化及后期出苗状况来判断^[2-4]。为清晰直观地掌握机械化直播油菜的播种量信息,研制一种油菜种子流检测系统具有重要意义。

排种器是播种机的核心工作部件,其排种性能差将直接影响播种质量,导致后期出苗率低、收益差^[5-7]。对此,国内外学者及相关机构通常采用在排种器的导种管及排种盘等关键部件上安装检测系统对排种性能进行检测,对于种子流检测相关研究,一般以下落种子通过传感器过程中产生的非电信号转换为可检测的脉冲信号。根据传感器类型不同主要可分为光电感应式、压电感应式、电容感应式和视觉式,其中:光电感应式传感器具有良好的响应速度,但工作时易受光照及灰尘干扰^[8];压电感应式传感器需放置于导种管内部,影响种子投送轨迹,以致排种精度不易保证^[9];电容感应式传感器易受温度和寄生电容干扰,其可靠性、稳定性等方面不易适应田间复杂环境^[10];视觉式传感器检测精度高、信息获取直观,但对检测环境要求严格,限制了在田间生产中的应用^[11]。上述传感器各有优势,但在小粒径种子流检测方面,光电感应式传感器工作稳定、响应时间短、分辨率高,可实现非接触检测,成本低廉,成为当前应用较为广泛的检测手段。

国外研究方面,KARIMI 等^[12]基于光敏二极管研制了红外传感系统,该系统可检测播种时种子通过导种管的质量流量;HADI 等^[13]基于种子流监测的红外激光二极管阵列传感器构建了田间播种监测装置和播种监测系统,实现了种子流量的测算;Precision Planting 公司基于 WaveVision 传感器在导种管内安装种子监控系统,可实时检测排种频率、排种量、漏播以及重播等信息^[14];上述国外播种检测相对于国内起步较早,播种检测技术比较成熟,但配套硬件产品价格昂贵,与国产化油菜播种机具兼容性不佳。

国内在排种器种子流检测方面进行了卓有成效的研究。TANG 等^[15]采用漫反射光电传感器和矩形光栅传感器设计了玉米播种质量监测系统;李兆东等^[16]设计了一种基于光束阻断式的漏充和堵孔

同步检测系统,用于检测油菜漏充率与堵塞率;贾洪雷等^[17]针对高速精密播种作业中气吸式排种器,设计了一种排种器吸种状态检测系统,通过对光电传感器的输出信号和光电编码器脉冲信号进行处理,得到排种盘每个吸孔的吸种情况,从而进一步获取整个排种器的工作状况;丁幼春等^[18-19]针对油菜播种作业过程中播量监测与漏播检测的问题,设计了一种油菜播种监测系统,通过改变连接种子流传感检测模块的数量,达到监测不同作业幅宽的目的;姜萌等^[20]针对化肥排施过程流量较大,化肥颗粒相互遮挡导致难以准确检测的问题,提出了基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法,该方法以颗粒流量与传感器响应电压间的相关性为基础建立检测模型。上述研究表明,相关专家学者或机构在监测排种器是否发生漏播、堵塞以及种子在排种过程中难以兼容检测的问题上研究较多,但对振动环境下小粒径油菜种子流快速检测方法仍有待研究。

课题组前期研制了一种具有槽齿盘的油菜气力式精量排种器,可满足 1~2 粒油菜种子精量排种农艺要求,但该排种器作业速度提高时存在排种频率高、序列差、不易快速检测导致检测精度下降的问题。本文采用反射式光电感应法设计一种光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统,实现种子流的实时计数,并利用微计算机自动数粒仪进行同步检测验证试验,旨在验证该系统的检测精度。

1 基于光纤计数的种子流检测原理

1.1 传感器检测原理

传感器主要采用 CRS-602 窗口型光纤传感器,自带的 20 mm×20 mm 正方形窗口为种子下落检测区域,窗口内侧分别装有光束信号发射端和接收端,且发射端和接收端位于同一侧。传感器通电工作时,发射端通过发光二极管发射光束经另一侧镜面反射回接收端的光敏元件上,此时内部电路导通,输出为高电平。当油菜种子穿越落料窗口的检测区域时,会短暂遮挡发光二极管发出的光束,导致光敏元件无法接收到镜面反射回来的光束,此时内部电路为断开状态,电势发生改变并输出为低电平,在此过程中,传感器内部电路由于电势的改变会产生一个脉冲信号,因此可通过检测脉冲信号的数量得到下落种子流的种子数量。油菜种子流持续通过检测区域时,光敏元件间歇性地接收发光二极管发

出的光而使电路间歇性地导通和断开,电路间歇性地输出高低电平,从而形成占空比不确定的脉冲信号波形,如图 1 所示。

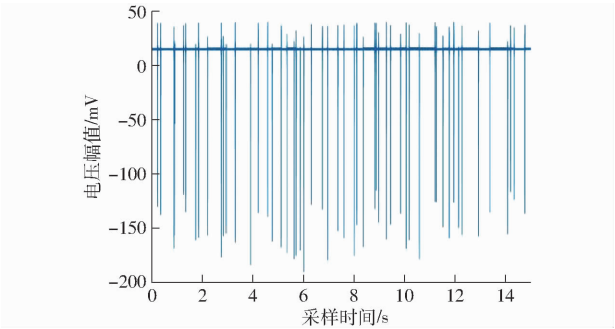


图 1 种子流采样信号
Fig. 1 Seed flow sampling signal

为保证传感器工作时不受光照及灰尘干扰,同时使得下落的种子流均能顺利落至传感器检测区域中,设计了如图 2 所示的传感器连接装置,连接装置上部接口与排种器落种管采用过盈配合相连,光纤传感器从侧部插入连接装置的卡槽内,传感器方形窗口检测区域正好对应上部的落种管中心,以便种子流能顺利落至检测区域内。传感器通过外部供电驱动落料窗口发射光纤,使通过传感装置中的种子流被发射的光纤所感知。

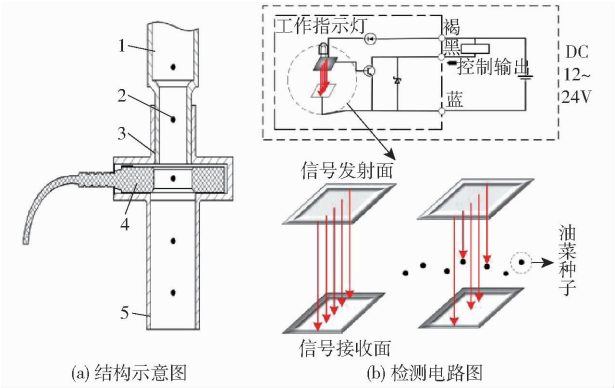


图 2 传感器装置示意图
Fig. 2 Schematics of sensing device

1. 入种口 2. 油菜种子 3. 连接装置 4. 传感器 5. 出种口

1.2 检测系统结构及工作过程

检测装置以 ZD/YH - XTP 型六度空间振动台为基础,同时搭载多行排种装置刚性台架,台架上方并排放置 4 个扰动气力式精量排种器,搭配永磁直流减速电机、驱动轴、HG - 1500 - C₂型漩涡式气泵及管道。种子流检测传感器安装于排种器投种口下方的导种管道上,检测模块整体放置在靠近导种管的一方,由 2 个 12 V 的锂电池提供稳定电压,网页终端模块实时显示在计算机屏幕上,整体结构如图 3 所示。

该系统工作时,传感器的检测窗口通过连接装

置固定在排种器投种口的正下方,此时传感器一直处于高电平;当油菜种子在穿过传感器落料口时,传感器输出电平立刻变为低电平,并输出一个脉冲信号;在经过 DST - 1R4C - N 型电平转换器降压后,STM32 单片机系统通过中断程序采集到输出脉冲信号,此时单片机检测的理论脉冲频率经 WiFi 模块发送到网页终端模块的显示屏上显示各行播量。

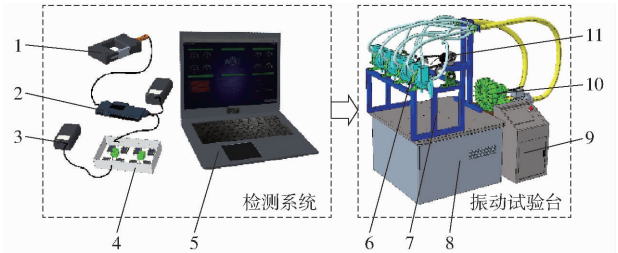


图 3 检测系统结构图
Fig. 3 Detection system structure diagram

1. 检测窗口 2. 计数器 3. 电源 4. 核心检测装置 5. 计算机终端 6. 精量排种器 7. 刚性台架 8. 六度空间振动台 9. 控制台 10. 风机 11. 电机

1.3 响应时间分析

为保证检测系统的精度,需使油菜种子在通过传感器时的信号被采集一次,因此传感器最短响应时间必须小于种子经过传感器时所需最短时间。种子通过传感器时被采样的约束条件为

$$\Delta t > t_s \tag{1}$$

式中 Δt ——种子经过传感器时所需时间,s
 t_s ——传感器最短响应时间,s

对种子在导种管内发生碰撞的过程进行运动学分析,设油菜种子在导种管内经过 A、D、E 多点碰撞,然后通过传感器。碰撞过程中,不仅油菜种子的速度损失较大且速度方向变化也较大,因此油菜种子到达传感器上表面的速度变小且经过传感器的路径变长,使得油菜种子经过传感器所需时间 Δt 变大,在此状况下不易确定传感器最短响应时间 t_s 。相比之下,若油菜种子刚好以抛物线运动形式穿过传感器,此时油菜种子与导种管内壁之间没有碰撞,油菜种子动能没有损失,以最大速度通过传感器,可得到极限时间 Δt 。此时 Δt 相比于所有油菜种子经过传感器的时间都要短,在此情况下油菜种子仍能被传感器识别,则该传感器符合检测系统的要求。

图 4 为种子与导种管碰撞时的运动分析图,油菜种子在管径长度 x_1 横向位移中,只能到达点 P,然后沿着抛物线运动到达点 A,但无法直接到达点 E。若不考虑管壁的阻碍作用,油菜种子在到达点 A 后继续以抛物线运动,最终经过传感器的上表面 B 和下表面 C,此时油菜种子所获得速度最大,经过传感器为最短时间 Δt 。

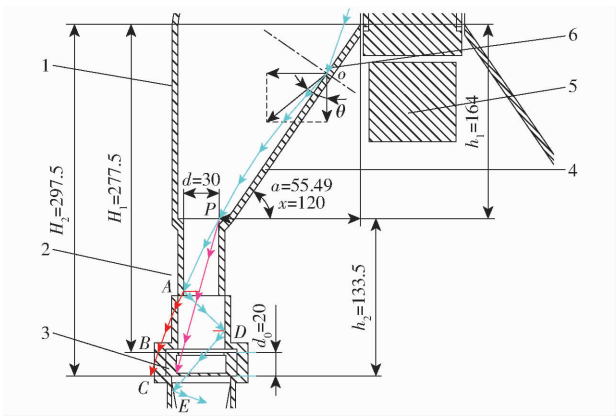


图 4 种子与导种管接触运动分析

Fig.4 Contact motion analysis of seed towards seed guide tube

1.侧挡板 2.导种管 3.监测窗口 4.斜面板 5.卸种塞 6.种子碰撞点

$$\begin{cases} v_x = v_0 \sin \theta & (0 < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ v_y = v_0 \cos \theta \\ x = v_x t \\ h_1 = v_y t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_0 ——种子下落至斜面板顶端的初速度, m/s
 θ ——种子下落方向与竖直方向的夹角, ($^\circ$)
 x ——斜面板顶端至底端的水平距离, mm
 t ——种子从斜面板顶端下落至底端所用的时间, s
 h_1 ——种子从投种口到进管口距离, mm
 v_x ——种子碰撞到斜面后横向分速度, m/s
 v_y ——种子碰撞到斜面后纵向分速度, m/s
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

解得

$$h_1 = \frac{x \cos \theta}{\sin \theta} + \frac{g x^2}{2 v_0^2 \sin^2 \theta} \quad (3)$$

将已知参数代入式(3)可得

$$0.164 = \frac{0.12 \cos \theta}{\sin \theta} + \frac{0.07056}{77.3 \sin^2 \theta} \quad (4)$$

由式(4)可得

$$Y_1 = \frac{x \cos \theta}{\sin \theta} + \frac{g x^2}{2 v_0^2 \sin^2 \theta} - h_1 \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{0.12 \cos \theta}{\sin \theta} + \frac{0.07056}{77.3 \sin^2 \theta} - 0.164 \\ Y_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由于该方程较为复杂, 不易采用传统方式求解, 采用 Matlab 数形结合的方法对式(6)进行求解, 结果如图 5 所示。得出 Y_0 与 Y_1 交点的横坐标, 在 x 范围内解得交点横坐标为

$$\theta = 36.264^\circ = 0.6326 \text{ rad}$$

为减少种子与导种管壁接触碰撞能量损失, 投

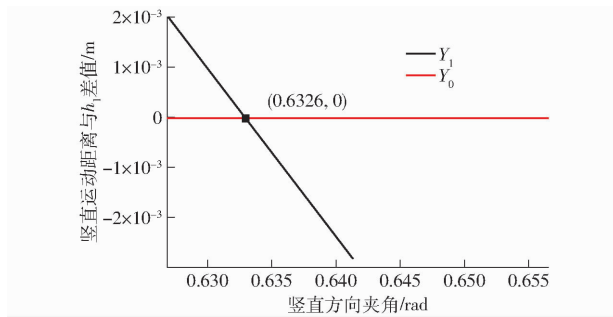


图 5 函数曲线

Fig.5 Function curve

送种子与管壁在点 O 碰撞并经过点 P 、 A 、 B 、 C 后离开监测窗口, 可得

$$\begin{cases} H_1 = v_y T_1 + \frac{1}{2} g T_1^2 \\ H_2 = v_y T_2 + \frac{1}{2} g T_2^2 \\ v_y = \frac{\pi r n}{30} \cos \beta \\ \Delta T = T_2 - T_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 n ——种盘转速, r/min

r ——种盘半径, mm β ——投种角, ($^\circ$)

H_1 ——种子从投种口到传感器进口距离, mm

H_2 ——种子从投种口到传感器出口距离, mm

T_1 ——种子从投种口到传感器进口时间, s

T_2 ——种子从投种口到传感器出口时间, s

ΔT ——种子通过传感器极限时间, s

由式(7)可解得

$$T(n) = \frac{-\pi r n \cos \beta + 30 \sqrt{\frac{(\pi r n \cos \beta)^2}{30} + \frac{4 \pi r n \cos \beta}{30}}}{300} \quad (8)$$

$$\Delta T = T_2(n) - T_1(n) \quad (9)$$

根据前期预试验, 可得种盘转速 n 与响应精度 P 对应关系, 采用 Matlab 多项式离散点拟合可得

$$n = kP + b \quad (10)$$

根据 95% 置信区间 $k \in [-0.02, 0.108]$, 取中值 $k = 0.04375$; 根据 95% 置信区间 $b \in [-1.46, 4.087]$, 取中值 $b = 1.313$ 。

联立式(9)、(10)可得响应时间与检测精度之间的数值关系规律为

$$\Delta T = T_2(0.04375P + 1.313) - T_1(0.04375P + 1.313) \quad (11)$$

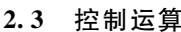
由式(8)、(10)分析可得, 式(11)为单调递减函数, 即传感器响应时间越快, 精度越高。

所设计的油菜气力式精量排种器工作转速 $n \in [20 \text{ r/min}, 60 \text{ r/min}]$ 可满足实际田间播种需要^[21], 将其代入式(8)、(11), 可得油菜种子穿越响应时间

流的检测分别对应一个核心控制模块,对外部中断入口 PE2 进行监听,可实现每路数据单独接收与发送。避免因排种速度的增大导致核心控制模块响应时间较长、检测精度下降进而造成数据在接收与发送过程中延迟和丢失。同时针对江淮地区迟收糯稻茬田下油菜精量直播机多采用八行进行直播的问题,采用“多合一”并联模式将每一路核心控制模块的数据集成显示在网页监测终端,各电路示意图如图 7 所示。

2.1 硬件选型及设计

Fig. 7 Row circuit diagram



检测系统初始化后,种子流通过光纤传感器检测窗口并产生脉冲信号,同时调用外部定时中断资源采集来自光耦隔离器降压处理后的每行种子流的排种频率,进而实现各行种子流的同步检测;网页监测模块通过八行的排种量计算得出各行排量一致性变异系数,并最终在终端上实时显示。检测系统程序流程如图 8 所示。

Fig. 6 Seed flow detection system frame diagram

```

graph TD
    A[PE2外部中断入口  
通过GPIO的外部  
中断功能对种子流  
脉冲信号进行监测] --> B[PA6外部中断入  
口: 上升沿触发  
寄存器]
    B --> C[• 检测系统初始化  
• 外部中断初始化  
• 转速监测初始化  
• 光纤传感初始化  
• 无线WiFi初始化  
• 网页监测初始化]
    C --> D{光纤传感器检  
测到种子流?}
    D -- N --> A
    D -- Y --> E[DST-1R4C-N光耦隔离器对脉  
冲信号进行平滑、降压处理]
    E --> F[STM32单片机通过ESP8266无线  
WiFi实时传输种子流信号]
    F --> G[网页监测模块:将种子流检测信息  
集成至网页界面并将数据进行储存]
    G -- 循环计数 --> D
    G -- 通信协议 --> H[应用一种MQTT通信  
协议, 其优点在于既  
能以极少的语言和  
有限的带宽, 为连接  
远端设备提供实时  
可靠的消息服务, 又  
能够接收已经订阅  
的数据]
    H --> C

```

Fig. 8 Flow chart of detection system program

2.2 电路设计

假设检测系统在一个检测周期内光纤感应的次数为 X , 核心控制器通过降压模块采集到脉冲信号

次数,并计算出每行种子流排种粒数 x_i 和各行排量一致性变异系数。

3 试验验证

3.1 传感器精度试验

为验证该检测系统对小粒径油菜种子的检测精度,选用华油杂 62 油菜以单、双粒形式通过传感器进行试验验证。试验方法如下:通过 SLY-C 型微计算机自动数粒仪带动小型数粒盘转动,此时手动将种子采用一粒或双粒形式放入数粒盘中,通过调节微计算机自动数粒仪不同的档位模拟不同下落速度下种子检测情况。数粒盘的转动带动油菜种子以一定的时间间隔依次通过光纤传感器,在传感器下方放置油菜种子接收盒。光纤传感器将采集的信号传给上位机,上位机对采样的数据进行分析处理,得到理论油菜籽粒数,人工统计接收盒里面的油菜种子得到实际籽粒数,每次试验 3 min 并重复 3 次取平均值,通过理论籽粒数和实际籽粒数计算出该检测系统的检测精度。

由图 9 可知,当单粒油菜种子以不同下落速度通过光纤传感器时,其检测系统具有较高的检测精度,且随着下落速度的提高检测相对偏差缓慢增加,相对偏差最大为 2.21%;当双粒油菜种子以不同下落速度通过光纤传感器时,随着下落速度的提高相对偏差也随之缓慢增加,且相对偏差最大为

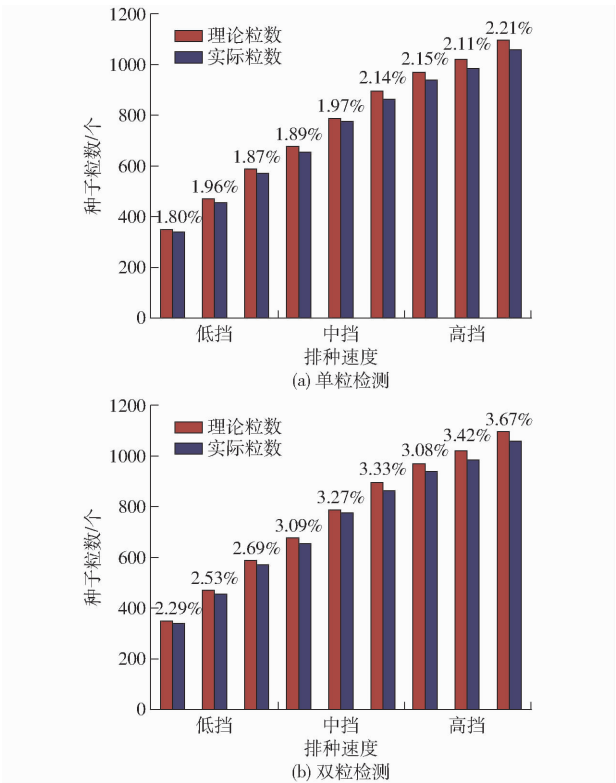


图 9 传感器精度试验结果

Fig. 9 Sensor accuracy test results

3.67%。分析其原因可知,随着种子下落速度不断增大,种子通过检测系统的时间不断减小以致于出现漏检的情况,从而导致相对偏差不断增大;而在两粒种子通过检测系统的同时,不仅有下落速度对检测误差的影响,且多粒种子产生的信号易发生混叠漏计,导致相对偏差呈上升趋势。双粒检测试验结果相对偏差大于单粒试验结果相对偏差,但总体偏差仍相对较小,表明传感器的精度能满足本文试验要求。

3.2 检测系统性能试验

3.2.1 试验设备与材料

以湖北国科高新技术有限公司生产的华油杂 62 油菜种子为试验材料,其材料特性^[22]如下:千粒质量为 4.4 g,含水率为 7.6%,球形度为 91.5%。

台架试验设备主要有:气力式精量排种器、ZD/YH-XTP 型六度空间振动台、YVF2-802-4 型三相异步变频电机(日本三菱电机股份有限公司)、VC6236P 型转速表、SG-312 型风量风压计、计时器、接种杯、SLY-C 型微计算机自动数粒仪(浙江托普仪器有限公司)、种子流检测系统,如图 10 所示。

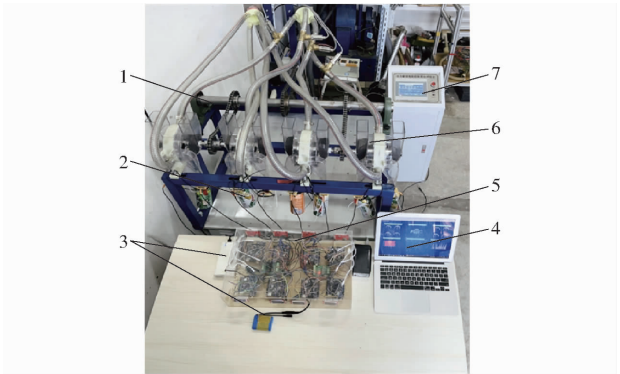


图 10 多行振动检测试验装置

Fig. 10 Multi-row vibration detection test device

1. 驱动轴 2. 接种杯 3. 移动电源 4. 网页终端模块 5. 核心控制模块 6. 气力式精量排种器 7. 振动控制台

3.2.2 试验设计与方法

实际田间工况主要参数:土壤类型为黄棕壤,土壤坚实度为 544.53 ~ 848.44 kPa,水稻留茬高度为 300 ~ 350 mm,稻茬覆盖量为 0.82 ~ 1.24 kg/m²,土壤含水率为 24.67% ~ 30.12%。

试验时,2BQFX-8 型油菜精量联合播种机由东方红 LY-1204D 型轮式拖拉机提供动力。采用单因素试验方法,测定机组前进速度分别为慢 I 挡(2.6 km/h)、慢 II 挡(3.3 km/h)、慢 III 挡(4.5 km/h)作业时的振动特性。试验前,将播种机调整至正常工作状态,播种深度 0 ~ 30 mm。为获取油菜田间播种时排种系统的振动特性,根据已有研究^[23-24],排

种系统受到竖直方向振动为主。本研究使用 PCB356A32 型三轴加速度传感器对排种装置竖直方向进行振动信号采集,试验前将传感器固定在排种装置上,采用 NI-9234 采集卡采集加速度时域信号并通过 LabVIEW 显示与储存,在 LabVIEW 软件

前面板设置连续采样频率为 2 500 Hz,采集振动信号 15 s,将采集时频数据导入 Matlab 中进行傅里叶频域转换,得到振动频率与振动加速度间对应关系的频域信号如图 11 所示,左边为振动时域图,右边为振动频域图。

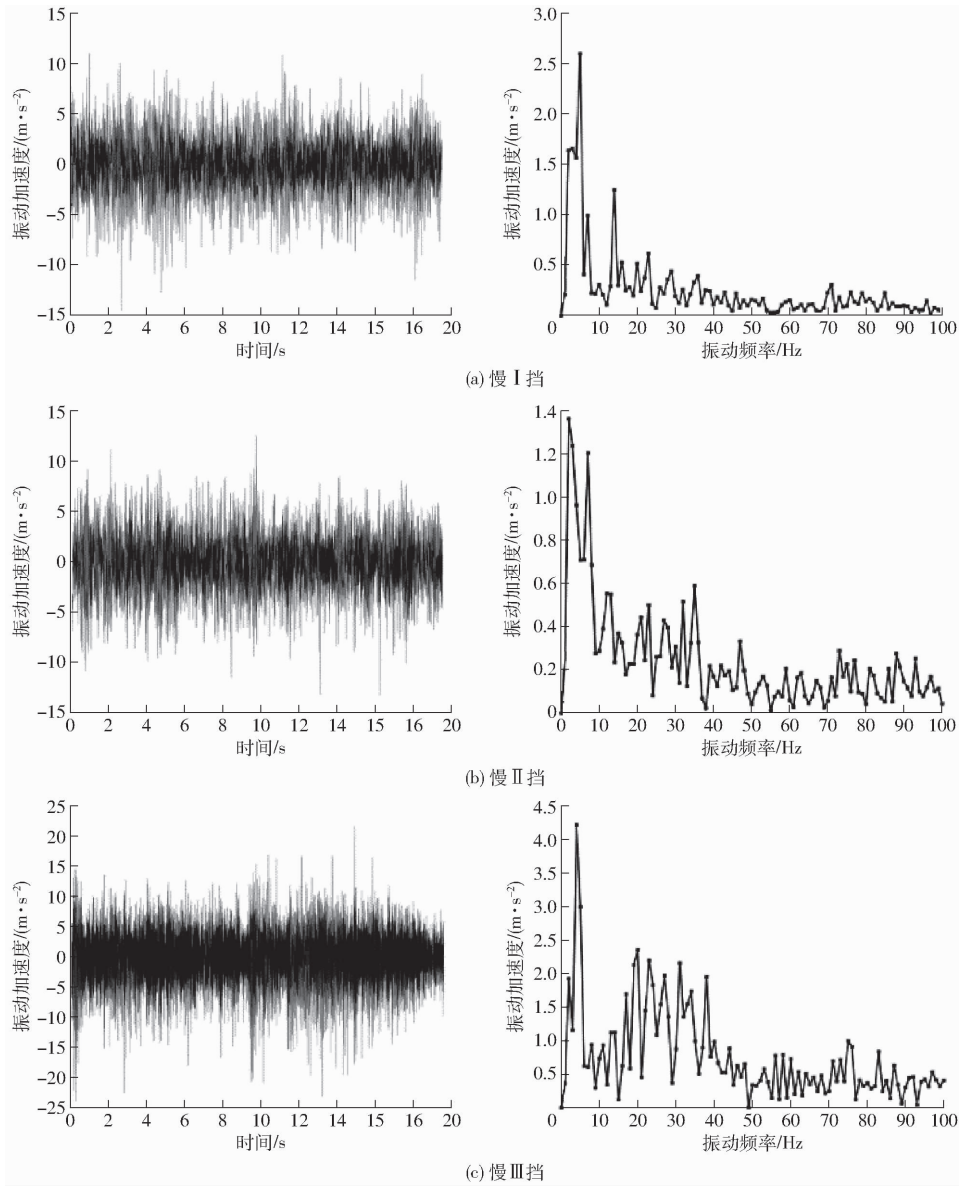


图 11 机组振动加速度曲线

Fig. 11 Vibration acceleration analysis of unit

由频域图可知,播种机振动能量的频率分布主要集中在低频段的 3 ~ 10 Hz。前进速度越大,振动越剧烈,但不影响振动能量的频率分布。为对比静态环境与振动环境下播量检测性能,台架性能试验设定振动频率为 0 ~ 10 Hz,取 0、5、10 Hz 3 个梯度,振动控制台参数设置如图 12 所示。

播种机组实际作业过程中并非匀速前行,风压难以保持恒定且很难找出其变化规律,台架试验不易还原田间实时工作风压。根据前期研究^[25],种盘静止(待转动)状态下的工作负压 1 500 ~ 2 500 Pa

可满足油菜多路排种时对种子精量吸附的实际需要。试验中利用电动阀门控制风泵出口的工作负压,试验前开展静态工作负压与阀门开度匹配试验,静态工作负压波动较小,以 SG-312 型风量风压计测量数据作为实测值,通过更改电动阀门的输入电压来控制阀门开度,输入电压从 0 V 到 10 V,每次增加 0.5 V,记录电动阀门实际开度和静态工作负压,其负压取 3 min 内的均值,试验重复 3 次,结果如图 13 所示。

利用 Origin 软件对图 13 结果进行多项式拟合,

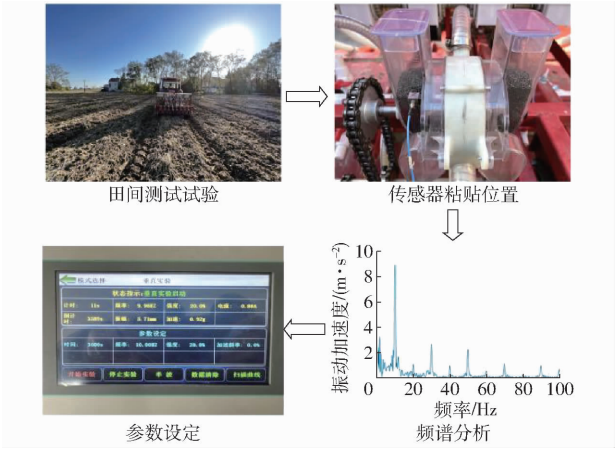


图 12 振动分析图

Fig. 12 Vibration analysis diagram

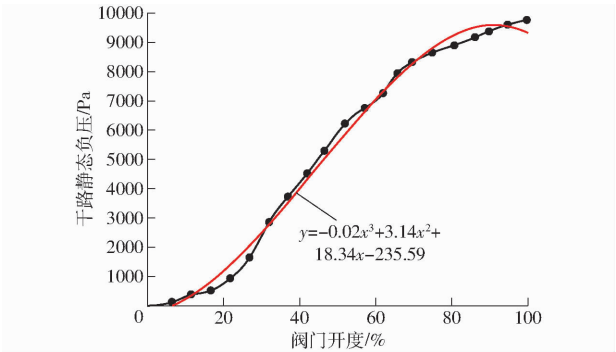


图 13 阀门特性曲线与拟合方程

Fig. 13 Valve characteristic curves and fitting equation

得到曲线方程为： $y = -0.02x^3 + 3.14x^2 + 18.34x - 235.59$ ，其模型决定系数 R^2 为 0.993 9，表明拟合模型显著。根据拟合曲线方程计算静态工作负压为 1 500 ~ 2 500 Pa 时的阀门开度。

检测系统初始化,启动 ZD/YH - XTP 型六度空间振动台电源,通过更改电动阀门的输入电压来控制阀门开度改变工作负压,启动 YVF2 - 802 - 4 型三相异步变频电机,利用 VC6236P 型转速表测定所需种盘转速。当振动排种系统稳定工作后,利用研制的检测系统同步测定排种系统每一个导种口排出的种子数量并在上位机上实时显示各行的排种数量和各行排量一致性变异系数,同时在每一个检测的导种口处都放置一个接种杯,再利用 SLY - C 型微计算机自动数粒仪测定出对应的每一个导种口排出的种子数量和各行排量一致性变异系数,检测时间设定 30 s,每组试验重复 3 次^[26]。根据表 1 中的因素水平依次更换振动频率、种盘转速及工作负压,重复以上步骤直至完成试验并计算出检测值与实际值的相对偏差。

通过检测系统得到实际值与各行排量一致性变异系数并结合 SLY - C 型微计算机自动数粒仪记录下每行实际值以及相对的各行排量一致性变异系

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Test factors level

水平	因素		
	振动频率	种盘转速	工作负压
	A/Hz	B/(r·min ⁻¹)	C/Pa
1	0	20	1 500
2	5	40	2 000
3	10	60	2 500

数。相关试验评价指标计算公式^[27-28]为

$$E_c = \frac{|G_c - C_c|}{C_c} \times 100\%$$

(12)

式中 E_c ——相对偏差, %

G_c ——检测到的种子数量, 个

C_c ——经过数粒仪检测后得出种子数量, 个

3.2.3 结果与分析

采取 Box - Behnken 响应面分析法进行三因素三水平正交试验,重复以上步骤直至完成试验并计算出检测值与实际值的相对偏差。试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果

Tab. 2 Test results

编号	振动频率/ Hz	种盘转速/ (r·min ⁻¹)	工作负压/ Pa	相对偏差/ %
1	5	40	2 000	3.07
2	0	40	2 500	3.14
3	5	40	2 000	2.95
4	5	20	2 500	2.57
5	5	40	2 000	3.18
6	5	60	2 500	3.88
7	5	20	1 500	2.13
8	10	40	2 500	2.83
9	10	20	2 000	2.00
10	10	60	2 000	3.98
11	5	60	1 500	3.31
12	0	20	2 000	1.81
13	0	60	2 000	2.79
14	5	40	2 000	2.88
15	0	40	1 500	1.08
16	10	40	1 500	2.81
17	5	40	2 000	2.79

对实际值与检测值之间的相对偏差进行方差分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,振动频率、种盘转速和工作负压 3 个单因素对各行排种量的相对偏差均是极显著影响,振动频率、种盘转速、振动频率与工作负压两两交互对各行排种量的相对偏差的影响均显著,但工作负压与种盘转速间的交互对各行排种量相对偏差的影响为不显著。分析其原因在于振动频率打破了种子流有序的投送状态,种盘转速

的增大则是在单位时间内增加了种子数量,工作负压的变化则是使得排种器在吸种过程中增大了重吸或漏吸的概率。

表 3 方差分析
Tab.3 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	7.99	9	0.88	23.37	0.000 2 **
<i>A</i>	0.98	1	0.98	25.80	0.001 4 **
<i>B</i>	3.71	1	3.71	97.76	<0.000 1 **
<i>C</i>	1.19	1	1.19	31.43	0.000 8 **
<i>AB</i>	0.25	1	0.25	6.58	0.037 2 *
<i>AC</i>	1.04	1	1.04	27.39	0.001 2 **
<i>BC</i>	0.004 2	1	0.004 2	0.11	0.748 5
<i>A</i> ²	0.736 6	1	0.736 6	19.39	0.003 1 **
<i>B</i> ²	0.033 5	1	0.033 5	0.883 1	0.378 6
<i>C</i> ²	0.034 7	1	0.034 7	0.913 1	0.371 1
残差	0.265 8	7	0.038		
失拟	0.170 9	3	0.057	2.4	0.208 3
误差	0.094 9	4	0.023 7		
总和	8.25	16			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 \leq P \leq 0.05$)。

对于相对偏差,振动频率与种盘转速的交互作用响应曲面如图 14a 所示。当振动频率一定时,相对偏差随着种盘转速的增加呈现增大趋势,原因是随着转速的增大,相同时间内通过传感器检测窗口的种子流数量增大,从而提升各行排种量的相对偏差;当种盘转速一定时,相对偏差随着振动频率的增大而增大,但变化趋势没有种盘转速显著。在振动频率与种盘转速的交互作用中,主要影响相对偏差的因素是种盘转速。振动频率与工作负压的交互作用响应曲面如图 14b 所示。当工作负压一定时,相对偏差随着振动频率的增加呈现增大趋势,原因是随着频率的增大,对排种过程中种子的排种序列产生一定影响,打破了静态环境排种下种子流有序投送状态,当振动频率一定时,工作负压对相对偏差产生的影响趋势平缓,影响效果相对不显著。

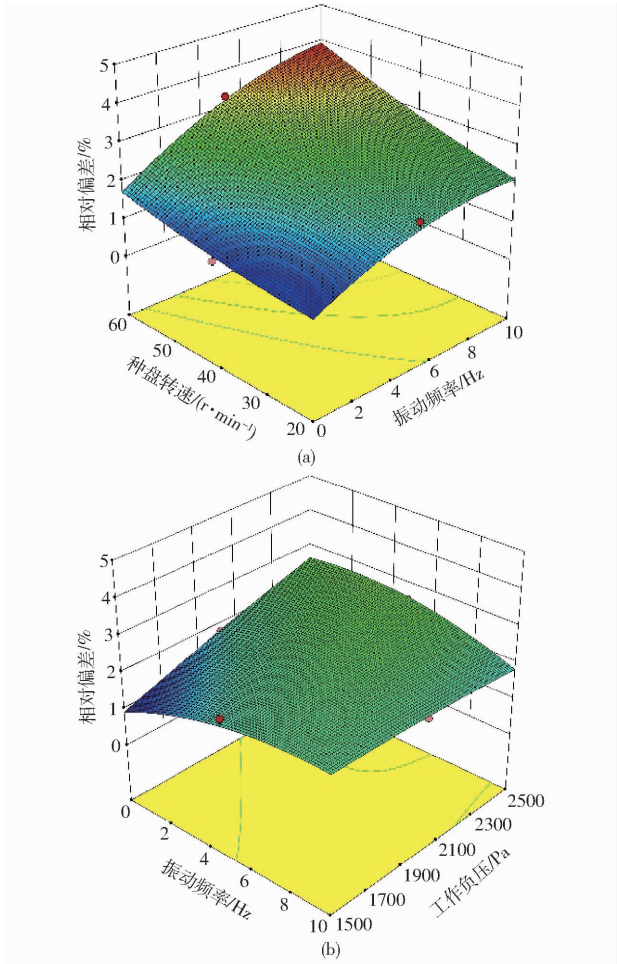


图 14 不同工况下各行排种量的相对偏差
Fig. 14 Relative deviation of seed quantity of each row under different working conditions

各行排量一致性变异系数检测试验结果如图 15 所示。试验结果表明,在不同的振动环境下,随着种盘转速和工作负压的提高,各行排量一致性变异系数的检测值与实际值相对偏差均不超过 1.0%。其原因为对于振动环境下油菜气力式精量排种器的各行排量一致性变异系数较低,检测系统测得其各行排量一致性变异系数也较低,因此其相对偏差小。由此验证了该检测系统可用于振动环境

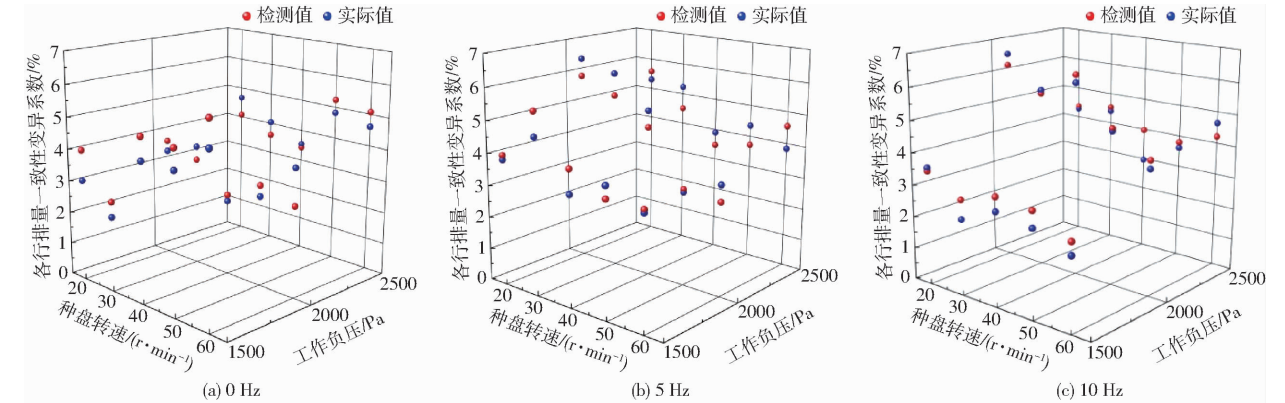


图 15 不同工况下各行排量一致性变异系数的相对偏差

Fig. 15 Relative deviation of coefficient of variation of displacement consistency of each row under different working conditions

下油菜气力式排种器种子流的实时检测。

4 田间试验

4.1 试验设备与方法

田间播种作业因拖拉机动力、旋耕刀辊与土壤秸秆耦合作用等激励产生振动,种子流检测精度受振动频率和幅度影响,且振动幅度对其影响较大。台架试验中使用全功能微计算机控制振动试验台,其工作要求为:振频小于 50 Hz,振幅不得超过5 mm,无法复制田间实际振动幅度,需通过田间试验进一步验证其检测系统的可行性,于 2021 年 11 月 10 日在安徽省安庆市怀宁县石牌镇开展田间试验。

试验设备为湖北桦磊农机制造有限公司生产的 2BQFX-8 型油菜精量播种机(搭载扰动气力式精量排种器)、东方红 LY-1204D 型轮式拖拉机、种子流检测装置、接种袋等。

为进一步检验该检测装置在田间振动下的检测效果,试验过程中给检测装置及终端进行稳定供电并将装置初始化,设置拖拉机 3 个前进速度分别为 2.6 km/h(慢Ⅰ挡)、3.3 km/h(慢Ⅱ挡)、4.5 km/h(慢Ⅲ挡),对应种盘转速分别为 22、30、41 r/min,均为适宜江淮区域油菜直播作业挡位^[29]。设定机具行驶距离为 40 m,并用接种袋收集从导种口排出的油菜种子流,再利用 SLY-C 型微计算机自动数粒仪测定出对应的每一个导种口排出的种子数量和各行排量一致性变异系数,每组试验重复 3 次。试验现场如图 16 所示。



图 16 田间排种试验

Fig. 16 Field seeding test

1. 东方红 LY-1204D 型轮式拖拉机 2. 2BQFX-8 型油菜精量播种机 3. 接种袋 4. 气力式精量排种器 5. 种子流检测系统 6. 网页显示终端

4.2 试验结果分析

由表 4 可以看出,实际排种量比检测播种量整体偏大,二者相对偏差小于 8.0%,但该结果略高于台架试验结果。主要原因为:拖拉机田间工作时,振动幅度较大,多粒种子同时下落时被检测系统计为一个脉冲数据,导致了排种检测值整体偏小。在符合农艺要求的油菜播量下,结合机具前进速度,在播

表 4 油菜种子流检测系统田间试验结果

Tab.4 Field test results of rapeseed seed flow detection system

挡位	转速/ (r·min ⁻¹)	行号	种子数量/个		相对偏差/%
			检测值	实际值	
慢Ⅰ挡	22	1	1 986	2 133	6.89
		2	2 055	2 188	6.05
		3	2 037	2 161	5.74
		4	2 010	2 144	6.25
		5	2 033	2 151	5.46
		6	2 144	2 204	2.74
		7	2 006	2 123	5.51
		8	2 039	2 146	5.00
慢Ⅱ挡	30	1	1 397	1 499	6.80
		2	1 374	1 468	6.36
		3	1 485	1 584	6.27
		4	1 471	1 571	6.39
		5	1 477	1 587	6.93
		6	1 405	1 494	5.96
		7	1 445	1 520	4.96
		8	1 377	1 455	5.36
慢Ⅲ挡	41	1	1 190	1 275	6.69
		2	1 097	1 147	4.42
		3	1 164	1 249	6.75
		4	1 083	1 174	7.75
		5	1 084	1 158	6.36
		6	1 070	1 150	6.96
		7	1 097	1 183	7.30
		8	1 101	1 187	7.27

种机正常工作的速度区间范围内,种子流检测系统在田间工作稳定、试验可靠。种子流传感系统和网页显示端处于密封状态,田间的泥土和粉尘等并不会对种子流检测系统造成影响。

5 结论

(1)基于反射式光电感应法设计一种光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统,由光纤计数式传感器、核心控制模块、降压模块、无线通信模块和网页终端组成,检测系统在 Android 软件的基础上实现了多行种子流信息的实时传输与显示。

(2)通过搭建的振动试验台测得,振动频率、种盘转速、工作负压对检测精度均有显著影响,试验因素对种子流检测性能影响的主次顺序为种盘转速、工作负压、振动频率;各行排种量实际值与检测值的相对偏差不超过 4.0%,各行排量一致性变异系数的检测值与实际值的相对偏差不超过 1.0%。

(3)田间试验得出,受机组振动、颠簸等综合因素作用下,实际各行播种量与检测播种量的相对偏差小于 8.0%,满足油菜精量播种检测需求。

参考文献

- [1] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 48–85.
- [2] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1–16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. (in Chinese)
- [3] LIU Dejiang, YAN Gong, XIAO Chen, et al. Design and experiment on atomizer parameter of impinging low-speed centrifugal atomization sprayer[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(6): 118–124.
- [4] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于GPS测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42–49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42–49. (in Chinese)
- [5] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84–92.
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84–92. (in Chinese)
- [6] GENG Aijun, LI Xiaoyu, HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic garlic seed directing device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(6): 85–93.
- [7] XU Lizhang, WEI Chuncai, LIANG Zhenwei, et al. Development of rapeseed cleaning loss monitoring system an experiments in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178: 118–130.
- [8] 宋鹏, 张俊雄, 李伟, 等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 71–74, 79.
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71–74, 79. (in Chinese)
- [9] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1–8. (in Chinese)
- [10] 王金武, 汤天水, 唐汉, 等. 联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 143–152.
WANG Jinwu, TANG Tianyong, TANG Han, et al. Design and experiment of on-line detection device for capacitive paddy rice moisture content of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 143–152. (in Chinese)
- [11] 纪超, 陈学庚, 陈金成, 等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 1–6.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1–6. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] HADI K, HOSSEIN N, BAHRAM 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.
- [14] Precision Planting. WaveVision[EB/OL]. (2014–07–15) [2019–11–08]. <https://www.precisionplanting.com/Products/product/wavevision>.
- [15] TANG Han, XU Changsu, WANG Ziming, et al. Optimized design, monitoring system development and experiment for a long-belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 814747.
- [16] 李兆东, 孙誉宁, 杨文超, 等. 光束阻断式小粒蔬菜种子漏充与堵孔同步检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 119–126.
LI Zhaodong, SUN Yuning, YANG Wenchao, et al. Design of synchronous detection system of missing filling seeds and suction hole blocking based on beam blocking for small vegetable grains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 119–126. (in Chinese)
- [17] 贾洪雷, 路云, 齐江涛, 等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 28–39.
JIA Honglei, LU Yun, QI Jiangtao, et al. Detecting seed suction performance of air suction feeder by photoelectric sensor combined with rotary encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 28–39. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 丁幼春, 王凯阳, 杜超群, 等. 高通量小粒径种子流检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 20–28.
DING Youchun, WANG Kaiyang, DU Chaoqun, et al. Design and experiment of high-flux small-size seed flow detection device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 20–28. (in Chinese)
- [20] 姜萌, 刘彩玲, 都鑫, 等. 基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 91–99.
JIANG Meng, LIU Cailing, DU Xin, et al. Detection mechanism of granular fertilizer based on light blocking principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl. 2): 91–99. (in Chinese)

- XIN Jie. Experimental study on physical and mechanical properties of garlic and design of key device of harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 邹亮亮,刘雪美,李金光,等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):72-79.
- ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):72-79. (in Chinese)
- [19] OKUKA A S, ZORICA D, HERMAN R, et al. Fractional Burgers models in creep and stress relaxation tests[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77(2):1894-1935.
- [20] JI W, ZHANG J W, XU B, et al. Grasping mode analysis and adaptive impedance control for apple harvesting robotic grippers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186:1-13.
- [21] XIE F X, ZHANG D J, ZHOU A, et al. On the viscoelastic parameters of gussasphalt mixture based on modified burgers model: deviation and experimental verification[J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4324765>.
- [22] 周俊,张娜,孟一猛,等. 番茄粘弹性参数机器人抓取在线估计[J]. 农业机械学报,2017,48(8):26-32.
- ZHOU Jun, ZHANG Na, MENG Yimeng, et al. Estimation of tomato viscoelastic parameters during robot grasping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):26-32. (in Chinese)
- [23] 马瑞峻,萧金庆,郑普峰,等. 穴盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J]. 农业工程学报,2018,34(13):43-53.
- MA Ruijun, XIAO Jinqing, ZHENG Pufeng, et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13):43-53. (in Chinese)
- [24] SCHEFFLER O C, COETZEE C J, OPARA U L, et al. A discrete element model (DEM) for predicting apple damage during handling[J]. Biosystems Engineering, 2018, 172:29-48.

(上接第 74 页)

- [21] 李兆东,何顺,钟继宇,等. 油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(17):1-11.
- LI Zhaodong, HE Shun, ZHONG Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17):1-11. (in Chinese)
- [22] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):141-148.
- YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):141-148. (in Chinese)
- [23] 蒋亚军,廖宜涛,秦川,等. 4SY-2.9 型油菜割晒机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报,2017,33(9):53-60.
- JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY-2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9):53-60. (in Chinese)
- [24] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(9):9-18.
- WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9):9-18. (in Chinese)
- [25] 谢瑞. 油菜扰动气力式排种器负压配气机构优化设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
- XIE Rui. Optimized design and experiment of negative pressure airflow distribution device of the perturbation pneumatic seed-metering device for rapeseed[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):66-74.
- CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat planter seeding quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):66-74. (in Chinese)
- [27] 张春岭,吴荣,陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):51-59.
- ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):51-59. (in Chinese)
- [28] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7):97-103.
- SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):97-103. (in Chinese)
- [29] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报,2019,35(1):12-22.
- LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1):12-22. (in Chinese)