

腔道式水稻排种器漏播检测系统设计与试验

张 顺^{1,2} 王浩宇¹ 苑严伟^{3,4} 况福明¹ 熊 玮¹ 朱德泉¹

(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;

3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 4. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对腔道式杂交稻精少量穴直播排种器排种时易出现漏播空穴的问题, 基于腔道式排种原理, 采用组合脉冲方式, 设计了腔道光幕扫描式排种漏播检测方法及配套系统, 阐述了组合脉冲的构建方法, 建立了稻种在腔道检测区运动的动力学模型, 明确了腔道检测区的关键结构参数, 开展了排种器不同转速、变转速及不同振动工况下漏播检测系统的性能试验。转速适应性试验结果表明, 排种器不同转速及变转速下的检测误差不高于 0.80%; 振动适应性试验结果表明, 中高频振动工况对检测系统的检测性能基本无影响, 而振幅相对较大的低频振动工况下, 检测误差稍有增大, 但不高于 1.20%。田间试验结果表明, 检测系统对播种机不同作业速度的播种工况均具有较好的适应性, 检测误差均不高于 2.13%。

关键词: 超级杂交稻; 腔道式排种器; 漏播检测; 光电传感器; 光幕

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0051-12

OSID:



Design and Performance Test of Loss Sowing Detection System for Cavity-type Rice Seed-metering Device

ZHANG Shun^{1,2} WANG Haoyu¹ YUAN Yanwei^{3,4} KUANG Fuming¹ XIONG Wei¹ ZHU Dequan¹

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

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

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

4. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The precision seeding method of rice with cavity-type has the advantages of simplifying the seeding mechanism and reducing seed damage. Aiming at the problem of miss-seeding holes during the hill-drop direct seeding process of the cavity-type precision and small-amount seed-metering device of hybrid rice, combining with the method of combined pulse, a novel loss sowing detection method and its supporting system with cavity scanning of light curtain was designed based on cavity-type seeding principle. The construction method of combined pulse was expounded and the dynamic model of rice seed movement in the cavity detection zone was established to clarify the key structural parameters of the cavity. Subsequently, the performance tests of the loss sowing detection system at different rotational speeds, variable rotational speeds, and different vibration conditions of the seed-metering device were carried out successively. The results of the rotational speed adaptability test showed that all the detection errors at different rotational speeds and variable rotational speeds of the seed-metering device were not higher than 0.80%. The results of the vibration adaptability test showed that the performance of the detection system was not affected by the medium and high-frequency vibration conditions, while affected by the low-frequency vibration conditions characterized by relatively large amplitude with slightly larger detection error, but the error was not higher than 1.20%. The field test results showed that the detection system had good adaptability to different forward speeds of seeder, and the detection error was not higher than 2.13%. The research result can provide a theoretical reference for loss sowing detection method of

收稿日期: 2022-07-26 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805005)、安徽省重点研究与开发计划项目(202204c06020024)和安徽省高校自然科学基金项目(KJ2021ZD0012)

作者简介: 张顺(1988—),男,副教授,博士,主要从事大田作物生产机械化技术与装备研究,E-mail: shunzhang@ahau.edu.cn

通信作者: 朱德泉(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事大田作物生产机械化技术与装备研究,E-mail: dqzhu@sina.com

rice precision and small-amount seeding, and lay the foundation for the development of reseeding systems.

Key words: super hybrid rice; cavity-type seed-metering device; loss sowing detection; photoelectric sensor; light curtain

0 引言

水稻精量穴直播种植是我国水稻种植的主要模式之一,其具有的省工、节本、增效优势已通过大量生产实践证明,不仅在播量较大的常规稻品种种植中普遍应用,而且在用种量较低的杂交稻品种,甚至超级杂交稻品种种植中亦有大面积应用^[1-3]。

由于杂交稻分蘖能力强,精量穴直播作业时,每穴播量较少,如超级杂交稻每穴播种 1 ~ 3 粒为宜^[4-5],而现有水稻轻简型直播排种装置排种杂交稻时易出现漏播空穴,严重影响杂交稻直播种植产量,因此,杂交稻精少量穴直播更注重对排种装置漏播状态的监测,以及种床空穴现象的排除^[6-7]。

国内外学者针对排种器工作状态的检测已开展了广泛的研究^[8-10]。目前,多数检测系统通过在排种器的排种管内安装电容、压电或光电等传感器完成对管道内落种情况的检测,以反映排种器的工作状态^[11-15]。文献[16-18]基于种粒穿过电容极板产生电容变化的原理,采用微小电容检测芯片检测皮法级电容信号,并通过滤波去噪及寻峰处理获得有效的电容脉冲信号数据,并根据所获数据与排种量间的关系得到播种状态。电容检测法灵敏度较高,但易受检测环境温度变化和寄生电容的干扰,难以保证检测的准确性及稳定性。丁幼春等^[19]、王金武等^[20]采用 PVDF 压电薄膜传感器,对排种管中下落种粒碰撞压电薄膜的信号进行放大、整流、电压比较等处理,获得种子流序列信息的脉冲信号,并结合单片机定时计数采集,易实现对油菜、玉米等单粒点播作物的播种状态检测,较难应用于水稻等因种粒外形细长、个体间尺寸差异大,且需多粒成穴排种作物的播种状态检测。

KARIMI 等^[21]采用红外激光二极管阵列传感器监测排种管中小麦种子流状态,测算了导种管中的种子流量。丁幼春等^[22]通过在排种管中安装光纤传感器获得气力式油菜精量排种器的排种频率与时间间隔,并根据设定的漏播程度系数来表征排种器的漏播状态。可见光电检测方法对不同外形尺寸种子具有较好的适应性,且检测可靠性得到了大量试验验证,但将光电检测部件置于排种管中的检测手段适用于播种机上排种器安装位置较高,排种管较长的检测条件。水稻等需通过尽量降低排种器在播

种机上的安装位置,并取消排种管或采用较大空间的简易挡泥板,以减少稻种与排种管的接触碰撞,提高播种成穴性,在投种区配置光电传感器易受田间播种作业中泥土或尘土飞溅对检测结果的干扰。

因此,有学者将检测位置设于排种器的携种环节。李兆东等^[23]基于光束阻断原理,将对射式激光传感器同轴安装于气力式排种器的吸孔两侧排种器壳体相应开孔处,实现对小粒蔬菜种子排种时漏充状态的检测。贾洪雷等^[24]提出了一种气吸式排种器堵孔状态检测方法,通过对比光电传感器与编码器的脉冲信号序列得到排种盘每个吸孔的种粒吸附状态,实现排种状态与吸孔堵塞故障的同步监测。可见,在排种器携种环节检测排种状态的方法能有效避免尘土飞溅对检测结果的干扰。由于气力式排种器利用负压吸孔捕获种子,可为光电检测方法的实现提供便利,而当前水稻轻简型穴直播广泛采用机械式排种器,针对水稻穴直播排种器携种环节漏充状态的检测研究还鲜见报道。

针对现有水稻轻简型直播排种装置精少量穴直播排种时易出现漏播空穴的问题,在笔者前期研制的 U 型腔道式排种器基础上^[25],开发适用于杂交稻精少量穴直播排种的电控排种系统,拟通过缩小型孔宽度,实现精少量排种,其较难避免的漏播现象,通过漏播检测及补种系统排除,以改善仅通过单一的机械式排种器进行水稻精少量穴直播排种的高漏播问题。本文重点开展排种系统的漏播检测方法研究,结合光幕传感检测技术,提出一种腔道光幕“扫描”式漏播检测方法,以期实现水稻精少量穴直播排种漏播状态的实时精确检测,并为补种系统研制奠定基础。

1 基本组成与工作原理

1.1 基本组成

电控排种系统主要由排种机构和漏播检测系统组成。排种机构为前期研制的 U 型腔道式排种器本体,主要由腔道盘、左右壳体等组成,其结构如图 1 所示。漏播检测系统包括以 STM32F103 微控制器为核心的控制单元、对射式光纤传感器、反射式激光传感器及传感器支架。

为在排种器携种区域的腔道内构建适宜矩形光幕传感器全覆盖的检测条件,对原先的腔道盘进行

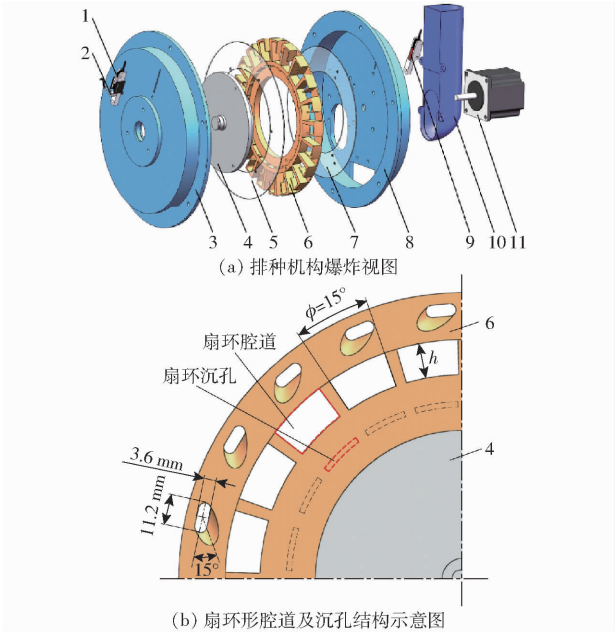


图 1 排种机构结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of seed-metering device

1. 光纤传感器接收端 2. 激光传感器 3. 左壳体 4. 腔道盘座 5. 左玻璃盖板 6. 腔道盘 7. 右玻璃盖板 8. 右壳体 9. 光纤传感器发射端 10. 进种管 11. 步进电机

改进设计,腔道盘两侧设置透明钢化玻璃板,对排种效果不产生影响的腔道圆弧段改设为以腔道盘为圆心的扇环形。在每个扇环形腔道下方各增设扇环形沉孔,用于反射式激光传感器产生与扇环形腔道检测区域对照的脉冲信号,如图 1b 所示。光幕传感器接收端和反射式激光传感器沿腔道盘同径向线安装于传感器支架上,两侧传感器支架分别外置于左右壳体上,并使光幕传感器发射端与接收端正对。排种器左右壳体上对应开设传感器检测长条孔。

1.2 工作原理

排种系统工作时,矩形光幕传感器产生的光幕覆盖整个扇环形腔道处的横截面,形成一个腔道光幕检测面对转过的腔道进行逐个“扫描”检测,反射式激光传感器感应各腔道对应的扇环形沉孔,为各腔道“扫描”检测提供实时检测时域。电机驱动腔道盘逆时针转动后,稻种由充种区充入型孔,待型孔转离充种区,并由稻种自重清种后进入携种区的漏播检测位置时,稻种因自重作用将在腔道的扇环形检测区域内汇集,若检测区域内正常充种,光幕传感器的光幕将被种粒遮挡,则在对应检测时域内出现电平变化响应,由此判定当前腔道正常充种。当型孔漏充时,检测区域内无种粒,由于检测光幕始终没有被种粒遮挡,则对应检测时域内的电平信号未改变,由此判定该腔道漏充,导致该穴发生漏播,腔道扫描检测及漏播检测原理分别如图 2 和图 3 所示。图 3 中各腔道与沉孔的组合脉冲分别与图 2 中腔道

a、b、c 的充种情况一一对应,两传感器分别被腔道和沉孔的间隔遮挡时皆输出高电平信号,当感应空腔道和沉孔时,两传感器始终输出低电平信号;若腔道内有稻种,将对应输出一段持续的高电平信号。腔道 a 为腔道漏充状态,腔道 b 为稻种贴腔道前壁面的正常充种状态,腔道 c 为两粒间断稻种的正常充种状态。

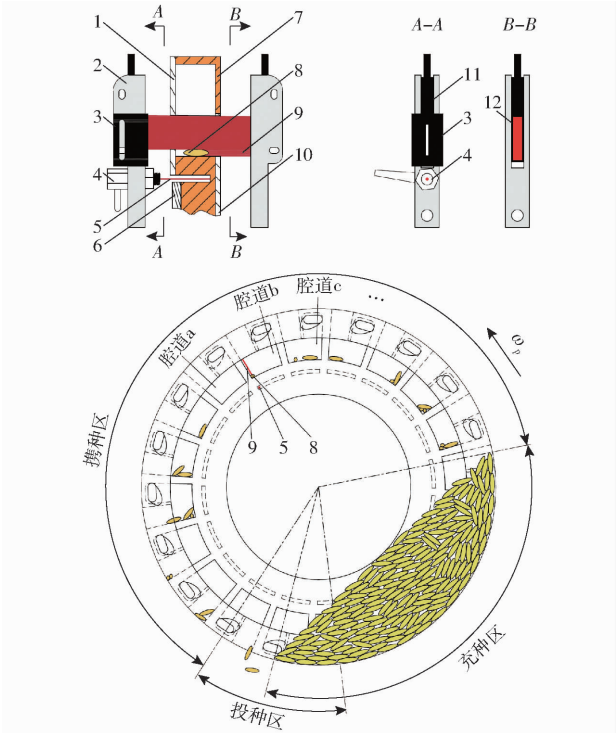


图 2 腔道扫描检测示意图

Fig. 2 Schematic of cavity scanning detection

1. 左玻璃盖板 2. 传感器支架 3. 狭缝盖板 4. 激光传感器 5. 激光 6. 腔道盘座 7. 腔道盘 8. 稻种 9. 光幕 10. 右玻璃盖板 11. 光纤传感器接收端 12. 光纤传感器发射端

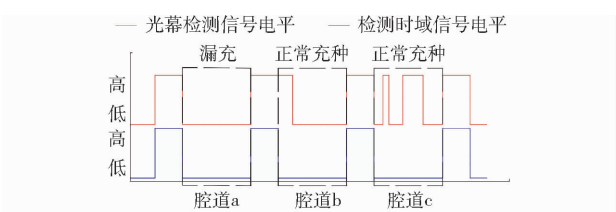


图 3 组合脉冲漏播检测原理图

Fig. 3 Principle diagram of loss sowing detection based on combined pulse

2 传感器及其灵敏度分析

为克服光纤传感器存在聚焦性的不足,增强其对腔道前后壁面的感应灵敏度,采用内置聚焦镜片的对射式光纤传感器 (PT-E11JP 型,博亿精科),并在传感器接收端检测面配置宽为 0.50 mm,长与扇环形腔道径深一致的狭缝盖板,以“削薄”检测光幕厚度,适应稻种较小的厚度。

为提升各腔道检测时域范围的准确性与稳定

性,采用高光束聚焦性的反射式光纤点射传感器(LTD-04NO-TZ型,机眸),光斑直径为0.50 mm,供其感应的扇环形沉孔设置于腔道盘左端面,借助左壳体,构建激光反射的相对封闭空间,避免受到充种区一侧种群内灰尘及田间飞溅尘土的干扰。

为明确两类传感器的灵敏度,指导腔道盘关键结构参数设计,采用相同圆心角的扇环形腔道及沉孔组合,在常规排种转速下,测定两类传感器的响应

脉冲特性,并随机选择100粒稻种,使其长轴与腔道盘轴向一致,稻种宽度与腔道盘径向一致,粘贴于扇环形腔道底面,每个腔道各粘一粒稻种,测试最不易检测姿态的单粒稻种因遮挡检测光幕产生的脉冲信号宽度是否能被有效识别,以明确基于组合脉冲的腔道光幕“扫描”式漏播检测方法的可行性。

试验稻种为超级杂交稻品种皖稻153,其基本物料特性如表1所示。

表 1 稻种物料特性参数
Tab.1 Material characteristics of rice seed

参数	含水率/%	长度范围/mm	宽度范围/mm	厚度范围/mm	平均值(长×宽×厚)/ (mm×mm×mm)	千粒质量/g	滑动摩擦角/(°)
数值	12.63	8.24~10.44	2.06~3.42	1.63~2.53	9.70×2.70×1.97	24.59	33.50

直播机田间作业时,直播机前进速度 v 与腔道盘转速 n 存在关系式

$$n = \frac{60v}{kL_s} \tag{1}$$

式中 k ——腔道数,为20
 L_s ——播种穴距,m

根据水稻精量穴直播机常规作业0.6~1.4 m/s的速度范围,以及皖稻153播种穴距0.17 m的种植农艺要求^[26-27],设置5个腔道盘转速,分别为10.59、14.12、17.65、21.18、24.71 r/min(对应作业速度0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s),试验统计稳定工作2个周期的脉冲信号数据。

图4为腔道盘转速14.12 r/min时,光纤与激光传感器的部分组合脉冲信号图,可见,同等圆心角间隔下,激光传感器的响应速度慢于光纤传感器的响应速度,使得腔道前后壁面的检测光纤信号与沉孔前后壁面的检测时域激光信号均存在响应时差 Δt_1 和 Δt_2 , Δt_3 为稻种遮挡光纤信号持续时长,因稻种厚度存在差异,故不同稻种对应的 Δt_3 亦有差别。

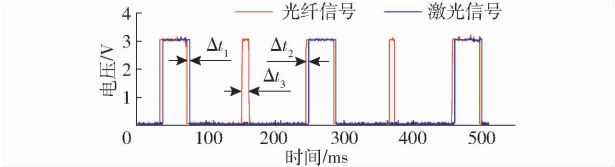


图 4 部分组合脉冲信号图
Fig.4 Partial signal diagram of combined pulse

为在同一尺度下直观分析各常规转速下脉冲信号宽度变化规律,分别将各转速下测得的脉冲信号宽度与腔道对应理论脉冲宽度相比,并定义为信宽比 β ,计算式为

$$\beta_i = \frac{6n\Delta t_i}{\phi} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3) \tag{2}$$

式中 ϕ ——扇环形腔道对应的圆心角,(°)

Δt_i ——电平信号宽度,s; $i = 1$ 表示前壁面处, $i = 2$ 表示后壁面处, $i = 3$ 表示稻种

腔道与沉孔的前后壁面处两传感器响应时差 Δt_1 、 Δt_2 及稻种遮挡光幕时长 Δt_3 的信宽比如图5所示。由图5可知,随着腔道盘转速的增大, β_1 、 β_2 均逐渐增大,而 β_3 基本稳定,其原因为:各腔道的检测光幕扫描时间因腔道盘转速增大而减小,其产生的脉冲信号宽度亦随之减小,而传感器的响应延时是其固有特性,并不因腔道盘转速增大而改变,但存在一定波动,故两传感器响应时差信宽比 β_1 、 β_2 随转速的增大而增大,并存在一定误差;而稻种遮挡光幕时长 Δt_3 与光幕扫描腔道类似,均与腔道盘转速存在比例关系,故稻种遮挡光幕时长信宽比 β_3 基本稳定,其相比于 β_1 、 β_2 ,存在较大误差的主要原因是各稻种的厚度存在差异。虽然两传感器同时转入空腔的响应时差信宽比 β_1 与转出空腔的响应时差信宽比 β_2 存在一定差异,但两者均小于稻种最短轴的遮挡光幕时长信宽比 β_3 ,这为单粒稻种贴于腔道前后壁面的成功检测提供基础条件,表明组合脉冲的腔道光幕“扫描”式漏播检测方法具有可行性。但组合脉冲信号因扇环形腔道与沉孔的同圆心角排布,

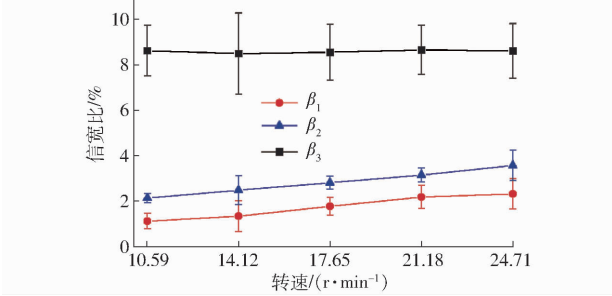


图 5 传感器响应时差及稻种遮挡光幕时长信宽比
Fig.5 Signal-to-width ratio of sensor response
time difference and rice seeds light-blocking duration

使得激光传感器的信号脉冲均位于光纤传感器的信号脉冲右侧,不利于对贴于腔道后壁面稻种的检测,应对腔道与沉孔的相对位置加以修正。

3 关键结构参数设计

3.1 腔道与沉孔的相对位置

依据两传感器的响应灵敏度分析可知,由于光纤与激光传感器分别对腔道与沉孔前后壁面的响应时间存在波动,则组合脉冲信号前后边沿均重合的理想波形无法准确获取并维持,为此,采用脉冲信号偏置的思路,即通过设计适宜的腔道与沉孔的相对位置,使得激光传感器的脉冲信号前后边沿均落入光纤传感器脉冲信号前后边沿之内,并满足

$$\begin{cases} \Delta\beta_1 + \beta_{1\min} > 0 \\ \Delta\beta_2 + \beta_{2\max} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta\beta_1 + \beta_{1\max} < \beta_{3\min} \\ |\Delta\beta_2 + \beta_{2\min}| < \beta_{3\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ ——激光脉冲信号前、后边沿偏置信宽比

式(3)确保激光传感器的检测时域脉冲信号前后边沿均位于光纤传感器的漏播检测脉冲信号前后边沿之内,使得系统对检测时域脉冲信号内存在光纤高电平信号即可判定为正常充种状态。式(4)则确保贴于腔道前后壁面的稻种遮挡检测光幕的电平信号足以跨入检测时域脉冲信号内,即满足检测系统对正常充种状态的判定条件,从而实现对稻种贴于前后壁面的充种腔道的准确检测。

由图5可知, $\beta_{1\min}$ 、 $\beta_{1\max}$ 、 $\beta_{2\min}$ 、 $\beta_{2\max}$ 、 $\beta_{3\min}$ 分别为0.45%、3.36%、1.81%、4.15%、6.21%,代入式(3)和式(4)可得 $-0.45\% < \Delta\beta_1 < 2.85\%$ 、 $-8.02\% < \Delta\beta_2 < -4.15\%$,综合考虑两传感器的响应速度波动及稻种的最短轴向尺寸,将激光脉冲信号前后边沿偏置信宽比 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 分别选择各自取值范围内的平均值,即 $\Delta\beta_1$ 取1.20%, $\Delta\beta_2$ 取-6.09%,则可确定腔道与沉孔的相对位置

$$\zeta_i = \phi \Delta\beta_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

式中 ζ_i ——沉孔前后壁面分别相对于腔道前后壁面的偏移量

将 $\Delta\beta_1 = 1.20\%$ 、 $\Delta\beta_2 = -6.09\%$ 分别代入式(5)可得沉孔前壁面沿转动方向向后偏移量 $\zeta_1 = 0.18^\circ$,后壁面沿转动方向向前偏移量 $\zeta_2 = 0.91^\circ$ 。腔道与沉孔的相对位置修正后的两传感器组合脉冲信号图与各信号信宽比分别如图6和图7所示。

图6为改进后腔道盘转速为14.12 r/min时,两传感器的部分组合脉冲信号图,可见,沉孔前后壁面的激光脉冲信号均已位于腔道前后壁面的光纤脉冲

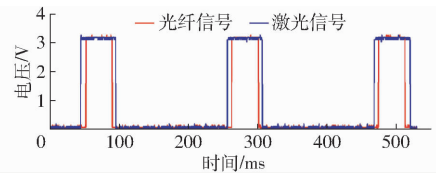


图6 腔道与沉孔相对位置修正后部分组合脉冲信号图

Fig. 6 Partial signal diagram of combined pulse under corrected relative position of cavity and counterbore hole

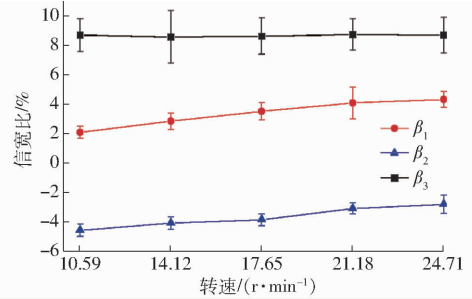


图7 腔道与沉孔相对位置修正后传感器响应时差及稻种遮挡光幕时长信宽比

Fig. 7 Signal-to-width ratio of sensor response time difference and rice seed occlusion curtain duration under corrected relative position of cavity and counterbore hole

信号之内,且前后壁面处两传感器的响应时差 Δt_1 与 Δt_2 的信宽比仍小于单粒稻种最短轴的遮挡光幕时长 Δt_3 的信宽比(图7),表明修正后的组合脉冲能够满足腔道光幕“扫描”式漏播检测方法对漏充腔道的检测要求。

3.2 检测位置

依据组合脉冲的检测方法,结合扇环形腔道的结构特性,可知在稻种不与腔道前后壁面接触时检测排种机构的漏播状态有利于提升检测系统的准确性,为此,开展稻种在扇环形腔道内的运动规律分析,明确适宜的漏播检测位置。

因播种区腔道内稻种数量基本在3粒以内,故忽略腔道内稻种间的随机碰撞,以单粒任意姿态稻种为研究对象,稻种未脱离腔道后壁面时的受力如图8所示。

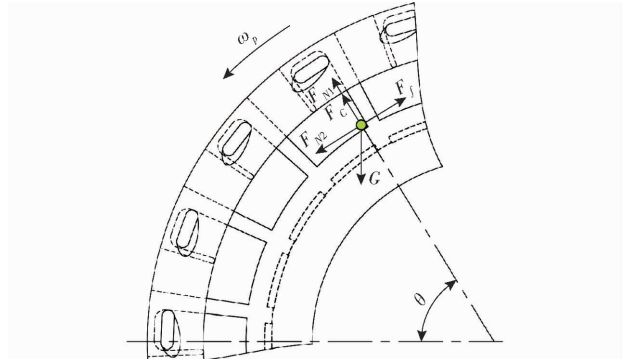


图8 稻种未脱离腔道后壁面时受力示意图

Fig. 8 Force diagram on rice seed attaching to cavity back wall

其受力平衡方程式为

$$\begin{cases} G\sin\theta = F_{N1} + F_c \\ G\cos\theta + F_{N2} = F_f \\ F_c = m\omega_p^2(R+r) \\ F_f = \mu F_{N1} \\ G = mg \end{cases} \quad (6)$$

式中 G ——稻种重力, N

θ ——稻种质心径向线与水平面夹角, ($^\circ$)

F_{N1} ——稻种所受腔道底面的支持力, N

F_{N2} ——稻种所受腔道后壁面的支持力, N

F_c ——稻种所受离心惯性力, N

F_f ——稻种所受腔道底面摩擦力, N

m ——稻种质量, kg

ω_p ——腔道盘角速度, rad/s

R ——扇环形腔道底面至圆心的径向距离, m

r ——稻种质心距腔道底面的径向高度, m

μ ——稻种与工程塑料 ABS 的摩擦因数

g ——重力加速度, m/s²

因纺锤体稻种在腔道内的运动姿态是随机的, 为便于分析, 将稻种外形尺寸按其等体积当量球简化, 可得

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (7)$$

其中 $V = 0.523abc$ (8)

式中 V ——稻种体积, m³

a 、 b 、 c ——稻种长、宽、厚的平均值^[28]

稻种在腔道内开始沿腔道底面运动时, 其与腔道后壁面脱离, 此时, 腔道后壁面对稻种的支持力 F_{N2} 为零。

联立式(6)~(8), 可得稻种运动起始角为

$$\theta_0 = \arcsin\left(-\frac{\mu\omega_p^2(R+r)}{g\sqrt{1+\mu^2}}\right) + \arctan\frac{1}{\mu} \quad (9)$$

设稻种沿腔道底面开始运动时为起始时刻, 运动至腔道前壁面时为 T 时刻, 则任意 t 时刻, 令稻种质心角加速度为 α , 稻种质心所在径向线与水平面夹角为 θ_t , 稻种质心沿腔道底面运动的总弧度为 δ ,

$$\theta_T = \theta_0 - \frac{180^\circ}{\pi}\omega_p\sqrt{\frac{2(\theta_0 - \theta_T)\frac{\pi}{180^\circ}}{\frac{g\sqrt{1+\mu^2}}{R+r}\sin\left((\theta_0 - \theta_T)\frac{\pi}{180^\circ} - \arcsin\frac{\mu\omega_p^2(R+r)}{g\sqrt{1+\mu^2}}\right) + \mu\omega_p^2}} - \left(\phi - 2\arcsin\frac{r}{R+r}\right) \quad (16)$$

将稻种与腔道材料 ABS 工程塑料的摩擦因数 $\mu = 0.66$, 扇环形腔道圆心角 15° 等已知数据代入式(9)、(15), 并借助软件 Matlab 绘制稻种沿腔道底

则

$$\theta_t = \theta_0 - \frac{180^\circ}{\pi}\delta = \theta_0 - \frac{180^\circ}{\pi}\iint\alpha dt^2 \quad (t \in (0, T]) \quad (10)$$

稻种未运动至腔道前壁面的受力如图 9 所示。

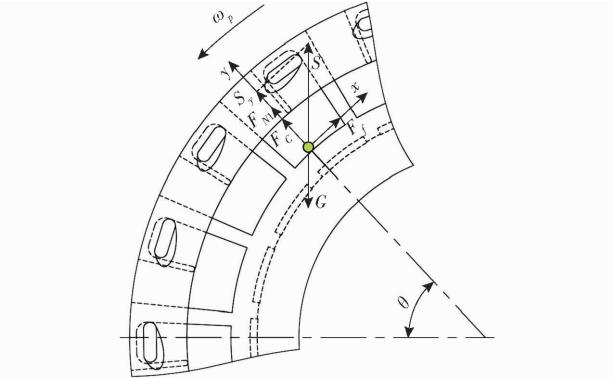


图 9 稻种未运动至腔道前壁面的受力示意图

Fig.9 Force diagram on rice seed non-arrival cavity front wall

故稻种质心沿腔道底面的切向加速度 a_τ 为

$$a_\tau = g\cos\theta_t - \frac{F_f}{m} \quad (11)$$

$$a_\tau = \alpha(R+r) \quad (12)$$

联立式(6)、(10)~(12)可得

$$\alpha = \frac{g\sqrt{1+\mu^2}}{R+r}\sin\left(\iint\alpha dt^2 - \arcsin\frac{\mu\omega_p^2(R+r)}{g\sqrt{1+\mu^2}}\right) + \mu\omega_p^2 \quad (13)$$

式(13)等号两边对时间 t 进行二次积分, 可得

$$t = \sqrt{\frac{2\delta}{\frac{g\sqrt{1+\mu^2}}{R+r}\sin\left(\delta - \arcsin\frac{\mu\omega_p^2(R+r)}{g\sqrt{1+\mu^2}}\right) + \mu\omega_p^2}} \quad (14)$$

则稻种从腔道后壁面运动至前壁面所对应的相对弧度 $\Delta\delta$ 为

$$\Delta\delta = \delta - \omega_p t = \frac{\pi}{180^\circ}\left(\phi - 2\arcsin\frac{r}{R+r}\right) \quad (t \in (0, T]) \quad (15)$$

联立式(9)、(10)、(14)、(15), 可得稻种沿腔道底面运动终止角 θ_T 的方程为

面运动起始角 θ_0 和终止角 θ_T 与试验转速的关系曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着腔道盘转速的增大, 腔道内

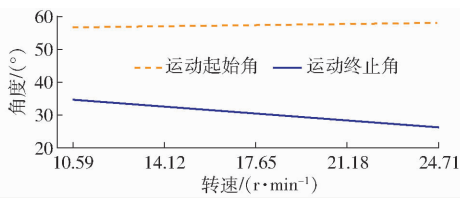


图10 不同转速下腔道内稻种运动起始角和终止角

Fig. 10 Starting and ending angles of motion of rice seed in cavity at different rotational speeds

稻种的运动起始角 θ_0 略有增大,而运动终止角 θ_7 逐渐降低,在较低腔道盘转速下,稻种的运动起始角 θ_0 和终止角 θ_7 较为接近。为使检测位置适应于不同的腔道盘转速,检测位置应介于 $\theta_{0\min}$ 和 $\theta_{7\max}$ 之间,依据图10可知 $\theta_{0\min} = 34.57^\circ$ 、 $\theta_{7\max} = 56.69^\circ$,取上述两角度平均值并取整为 47° 。

3.3 扇环形腔道径深

由于播种机田间作业时存在无规律的振动现象,导致稻种在腔道内发生跳动,因此,明确检测位置稻种的跳动范围,以指导扇环形腔道径深 h 设计及配套矩形光幕传感器选择。由文献[29-30]可知,播种机田间作业时,其上排种装置主要受到铅垂方向的振动作用,一般将排种装置因播种机振动等引起的振动方程简化为

$$\begin{cases} S = \lambda \sin(\omega t_z) \\ \omega t_z = \varphi_z \end{cases} \quad (17)$$

式中 S ——位移, m

λ ——排种装置沿振动方向的振幅, m

ω ——排种装置振动角频率, rad/s

t_z ——振动时间, s

φ_z ——振动相位角, rad

将振动位移 S 沿腔道圆弧底面法线 y 轴方向分解,如图9中 S_y 所示,可得腔道内稻种质心处 y 轴上的加速度为

$$a_y = -\lambda \omega^2 \sin\theta \sin(\omega t_z) \quad (18)$$

当稻种对腔道底面无接触时,稻种开始跳动,即

$$F_N = G \sin\theta - m a_y - m F_c = 0 \quad (19)$$

联立式(18)、(19),可得

$$\sin\varphi_d = \frac{g \sin\theta - \omega_p^2 (R + r)}{\lambda \omega^2 \sin\theta} = b_d = \frac{1}{D} \quad (20)$$

式中 φ_d ——物料开始跳动的最小相位角, rad

b_d ——物料跳动指数

D ——抛掷指数

由式(20)可知,当跳动指数 b_d 小于1或抛掷指数 D 大于1时,可得最小跳动相位角 φ_d 与最大跳动相位角 $\pi - \varphi_d$,即当振动相位 $\varphi_z \in (\varphi_d, \pi - \varphi_d)$ 时,稻种将在腔道底面产生径向跳动位移,此时,径向上稻种质心的平衡力表达式为

$$m \frac{d^2 \Delta S_y}{dt_z^2} = -G \sin\theta - m a_y \quad (21)$$

式中 ΔS_y ——稻种相对腔道底面的径向位移, m

则在任意时刻 t_z 有

$$\Delta S_y = -\frac{g \sin\theta (\varphi_z - \varphi_d)^2}{2\omega^2} + \lambda \sin\theta (\sin\varphi_d - \sin\varphi_z) + \lambda (\varphi_z - \varphi_d) \sin\theta \cos\varphi_d \quad (22)$$

由文献[29]可知,本文排种系统装载的播种机铅垂方向上的振动频率主要分布在 $0 \sim 150$ Hz,且低频振动 ($0 \sim 30$ Hz) 的振动加速度低于 4 m/s^2 ,中频振动 ($40 \sim 90$ Hz) 的振动加速度低于 12 m/s^2 ,高频振动 ($100 \sim 150$ Hz) 的振动加速度低于 25 m/s^2 。且

$$a_{\max} = 0.002 \lambda f^2 g \quad (23)$$

式中 $a_{\max}$ ——播种机铅垂方向上的最大振动加速度, m/s^2

f ——播种机铅垂方向上的振动频率, Hz

因此,本文将排种系统所受的振动分为低、中、高3个频段,且频段对应的最大加速度依次为 4 、 12 、 25 m/s^2 。将各振频及最大加速度代入式(23)、(20)可知,低频段的振动最大加速度不足以使稻种产生径向跳动,故本文借助软件 Matlab 绘制中、高频段稻种径向跳动位移与振动相位角 φ_z 及振频 f 的关系曲面,如图11所示。

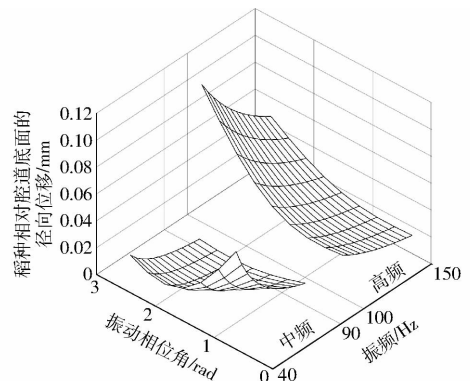


图11 不同振动条件下稻种相对腔道底面的径向位移曲面

Fig. 11 Radial displacement of rice seed relative to cavity bottom surface under different vibration conditions

由图11可知,不同播种机振动工况下,稻种在腔道内产生的径向跳动位移较小,均不大于 0.12 mm ,这与闻邦椿^[31]的试验结果相吻合。本文综合考虑稻种在腔道内的径向跳动位移及稻种的外形长度,设计扇环形腔道的径向深度 h 为 11 mm 。

4 检测系统设计

4.1 系统硬件组成

腔道式水稻排种器漏播检测系统硬件组成如图12所示,除了前述的光纤传感器、激光传感器和

微控制器,主要还包括 24 V 直流电源、降压模块(LM2596S)、电压转换模块(DST-1R4C-N)、TFTLCD 电容屏、步进电机驱动器(DM542)、步进电机(5718HB2)、声光报警器等。

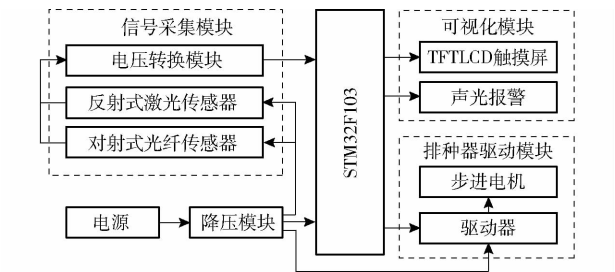


图 12 漏播检测系统构成图

Fig. 12 Composition diagram of loss sowing detection system

开启电源后,微控制器完成系统初始化,并驱动排种系统的步进电机进行排种作业,两传感器采集腔道的充种信息,电压转换模块将传感器输出电压转化为与微控制器端口相适应的 TTL 电平,并将携有充种信息的脉冲信号接入微控制器的相应 GPIO 口,微控制器通过已设定的漏播检测程序从输入脉冲提取充种信息,将播种总穴数、漏播率等检测信息显示在触摸屏上,并在漏播时触发声光报警。

4.2 系统检测流程

漏播检测系统工作流程如图 13 所示,系统启动后,首先进行初始化,包括对系统变量、数组以及 I/O 端口等的初始化。排种器开始作业时,系统持续采集两传感器的脉冲信号,并根据检测时域脉冲内光纤检测脉冲电平是否跳变判断腔道是否充种,若未发生电平跳变则腔道漏充,反之则判断腔道正常充种。

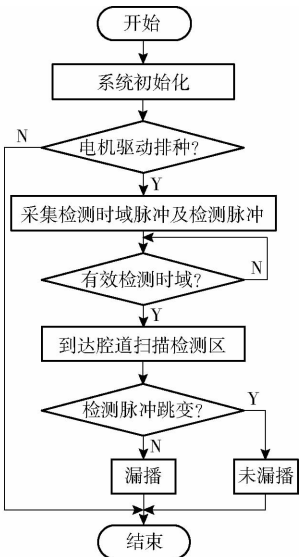


图 13 检测系统工作流程图

Fig. 13 Flow chart of detection system

5 漏播检测性能台架试验与田间试验

5.1 试验设备及方法

试验设备主要有电控腔道式排种系统、全功能微电脑控制振动试验台(上海一华仪器设备有限公司)、i-SPEED 3 型高速摄像机(OLYMPUS,日本)、STO1000 示波器(深圳麦科信仪器有限公司)。试验装置如图 14 所示。试验排种机构腔道盘的型孔结构参数如图 1b 所示。

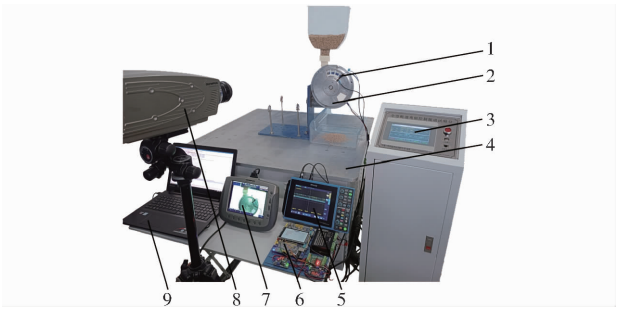


图 14 漏播检测性能试验装置

Fig. 14 Test bench of loss sowing detection

1. 传感器 2. 腔道式排种机构 3. 振动试验台控制器 4. 全功能微电脑控制振动试验台 5. 数字示波器 6. 控制板 7. 高速摄像显示器 8. 高速摄像机 9. 上位机

为便于观测腔道的充种情况及检测位置稻种的姿态与分布位置,在排种器壳体上开设观察口。试验时,借助高速摄像机拍摄排种系统排种时腔道充种状态的连续图像,一组试验连续统计稳定排种时 250 个腔道的充种情况,并对比对应时刻漏播检测系统的统计结果。数字示波器记录漏播检测系统工作时的组合脉冲,用于分析检测系统的异常结果,每组试验重复 3 次。

5.2 评价指标

因本文侧重超级杂交稻腔道排种方式的漏播检测方法研究,故取漏播检测误差为评价指标,其漏播率统计方法参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》。

5.3 试验设计

5.3.1 转速适应性试验

为考察漏播检测系统在腔道盘不同转速及变转速下的检测准确性与稳定性,以适应直播机田间作业时不同的前进速度及其加减速时产生的速度波动。根据直播机常规作业速度范围,分别设置 5 个腔道盘转速 10.59、14.12、17.65、21.18、24.71 r/min 及 3 个腔道盘角加速度 1.2、2.4、3.6 rad/s²,3 种变腔道盘转速的变化设置如图 15 所示。

5.3.2 振动适应性试验

为探究漏播检测系统对存在振动工况的田间播

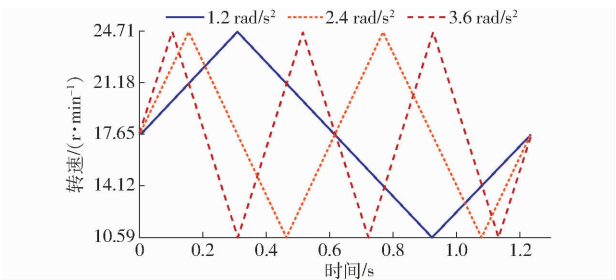


图 15 腔道盘转速变化设置曲线

表 2 不同腔道盘转速的漏播检测试验结果

Tab.2 Test results of loss sowing detection at different rotational speeds of cavity plate %

排种器转速/ (r·min ⁻¹)	试验序号	漏播率		误差
		检测值	实际值	
10.59	1	13.20	12.80	0.40
	2	11.60	11.60	0
	3	12.80	12.40	0.40
14.12	1	13.60	13.60	0
	2	12.40	12.80	0.40
	3	12.40	12.40	0
17.65	1	13.20	13.20	0
	2	11.20	11.20	0
	3	12.80	12.80	0
21.18	1	13.60	13.20	0.40
	2	12.40	12.40	0
	3	11.60	11.60	0
24.71	1	14.00	14.00	0
	2	13.60	13.60	0
	3	11.60	11.60	0

种环境的适应性,在腔道盘变转速试验的基础上,依据文献[29]中播种机的低、中、高频振动参数,设置全功能微电脑控制振动试验台的振动工况,以模拟田间实际播种的工作环境。

5.4 试验结果分析

5.4.1 不同腔道盘转速

不同腔道盘转速的排种漏播检测试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,在不同腔道盘转速下,漏播检测系统检测值与实际统计值间存在较小误差,且误差具有随机性,漏播率的检测值大于实际值的主要原因是:稻种群体中存在的非饱满扁平型籽粒在腔道内以最短轴平行于腔道旋转切线方向的姿态通

过光幕检测位置(如图 16 所示),因其遮光量过小而未能达到光纤脉冲信号跳变量,故系统产生充种腔道漏充误判。

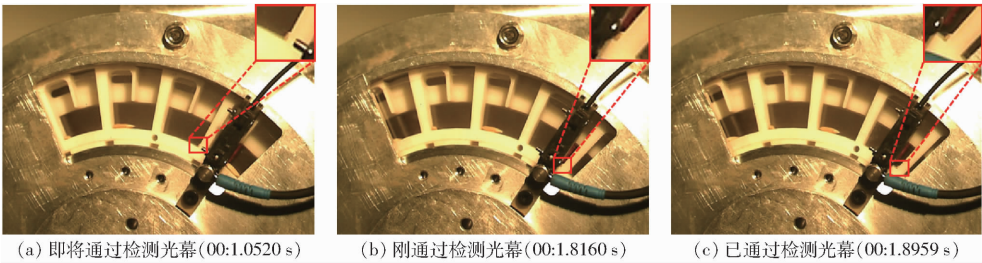


图 16 扁平型稻种以侧躺腔道前壁面姿态通过检测光幕图像

而漏播率的检测值小于实际值的主要原因是:光纤与激光传感器的响应时间出现灵敏度分析试验样本范围外极少的响应时间过长或过短现象,导致未充种腔道的检测脉冲信号跨入检测时域的前后脉冲信号内,造成漏充腔道正常充种的误判。但在常规播种速度下,漏播检测系统的检测误差均不高于 0.40%,表明漏播检测系统检测准确率较高,检测稳定性较好,对不同的腔道盘转速具有较好的适应性。

5.4.2 变腔道盘转速

变腔道盘转速下漏播检测性能试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,在试验设定的变腔道盘转速下,漏播检测系统的检测误差与不同腔道盘转速下的检测结果一致,同样存在随机性,且误差均不高于 0.80%,表明变腔道盘转速的作业工况对漏播检测系统的准确性与稳定性基本无影响。

表 3 变腔道盘转速的漏播检测试验结果

Tab.3 Test results of loss sowing detection at different cavity plate variable rotational speeds %

腔道盘角加速 度/(rad·s ⁻²)	试验序号	漏播率		误差
		检测值	实际值	
1.2	1	13.60	13.20	0.40
	2	14.00	13.60	0.40
	3	13.20	13.20	0
2.4	1	14.40	14.40	0
	2	13.60	13.20	0.40
	3	14.40	13.60	0.80
3.6	1	12.80	12.40	0.40
	2	13.20	13.20	0
	3	14.80	14.40	0.40

5.4.3 不同振动工况

不同振动工况下漏播检测性能试验结果如表 4 所示,由表可知,中高频振动工况下漏播检测系统的检测误差与转速适应性试验结果一致,表明中高频

振动工况对漏播检测系统的检测性能基本无影响。而在低频振动工况下,漏播检测系统的检测误差稍有增大,其主要原因可能为:激振频率较低时,排种机构的振动幅值相对较大,使得盘形转子的腔道盘旋转轴线易发生偏斜,降低了壳体上光幕夹缝与转动腔道壁面的平行度,严重时引发腔道壁面处光纤传感器的脉冲信号越界激光脉冲信号,若该腔道漏充稻种,则造成漏充腔道误判,使得漏播率检测值稍低于实际值。

表 4 不同振动工况的漏播检测试验结果

Tab.4 Test results of loss sowing detection under different vibration conditions %

振频	试验序号	漏播率		误差
		检测值	实际值	
低	1	12.40	13.60	1.20
	2	12.00	12.40	0.40
	3	11.20	12.40	1.20
中	1	14.00	14.80	0.80
	2	12.40	12.80	0.40
	3	13.20	13.20	0
高	1	12.80	12.80	0
	2	13.20	14.00	0.80
	3	14.40	14.40	0

虽然在低频振动工况下,漏播检测系统的检测误差稍有增大,但误差不高于 1.20%,表明漏播检测系统对不同振动工况具有较好的适应性。

5.5 田间试验

为进一步检验腔道式水稻排种器漏播检测方法的可行性及其检测系统工作的可靠性,于 2022 年 6 月 6 日在安徽省肥西县粉坊村开展漏播检测系统的田间性能试验。

将腔道式电控排种系统及附属漏播检测设备安装于 2BDXZ-2300 型水稻精量播种机上,机组动力为东方红 LY1204d 型拖拉机。试验田块长为 95 m,宽为 23 m,前茬作物为小麦,土壤湿基含水率为 15.19%,坚实度为 360.64 kPa。为检测系统对不同粒型稻种的适应性,试验选择细长的皖稻 153、中等长度的Ⅱ优 346(长×宽×厚平均值:7.79 mm×2.69 mm×1.91 mm)和短圆的冈优 3551(长×宽×厚平均值:7.34 mm×3.35 mm×2.31 mm)。

为检验系统对田间光照的抗干扰能力,选择晴朗天气,并在早、中、晚 3 种不同光照条件下,令播种机组处于静止状态,排种器种箱内不放稻种,使排种器正常转动,打开检测系统检测漏播情况。试验结果表明,在田间不同光照条件下,检测系统测得的漏播率均为 100%,检测误差均为 0,表明田间不同光照条件对系统的检测性能无影响。

漏播检测系统检测性能试验时,播种机前进速度设置为低、中、高 3 个水平,分别为 2.16、3.60、5.04 km/h,依据式(1),腔道盘转速分别为 10.59、17.65、24.71 r/min。每组试验前,先清空排种器及各腔道内的稻种,再往种箱中加入试验稻种。以人工数种的方式连续统计播于地表的每穴稻种,并以腔道盘转动初期的连续空腔道状态对应检测系统初始检测的连串漏播数据方式,使人工统计数据与系统检测数据匹配。试验样本选取播种机稳定作业的 250 穴稻种,每组试验重复 3 次。试验现场及结果如图 17 和表 5 所示。



图 17 田间试验

Fig.17 Field test

1. 种箱 2. 传感器 3. 步进电机 4. 腔道式排种机构

表 5 漏播检测系统田间试验结果

Tab.5 Field test results of loss sowing detection system %

品种	机具前进速度/(km·h ⁻¹)	漏播率		误差
		检测值	实际值	
皖稻 153	2.16	11.87	14.00	2.13
	3.60	12.53	14.53	2.00
	5.04	12.80	14.53	1.73
Ⅱ优 346	2.16	4.80	5.33	0.53
	3.60	3.87	4.80	0.93
	5.04	4.93	5.73	0.80
冈优 3551	2.16	6.80	7.60	0.80
	3.60	6.40	7.07	0.67
	5.04	6.93	8.00	1.07

由表 5 可知,在相同的腔道盘型孔结构尺寸条件下,由于Ⅱ优 346 稻种的平均宽度和厚度与皖稻 153 相似,而长度明显小于皖稻 153,故Ⅱ优 346 稻种更易充入型孔,其漏播率明显降低;而冈优 3551 稻种,虽其长度略短于Ⅱ优 346,但其宽度和厚度均较大,使其充种性能有所降低,漏播率略高于Ⅱ优 346。

由表 5 中皖稻 153 的试验数据可知,各播种机前进速度下,漏播检测系统的检测误差均比室内台架试验各排种工况的检测误差稍大,检测系统的检测值均低于排种实际值,其原因可能为:水稻精量播种机田间播种作业时,因旋耕刀辊切屑土壤、地表不

平整以及拖拉机本身等原因,机组受到复杂的随机振动作用,这与室内台架单一工况的振动试验存在一定差异。因播种机田间的随机振动相对较为剧烈,使得以悬臂方式挂接于播种机支架上的排种机构振动幅值较大,加剧了腔道盘旋转轴线的偏斜,导致因光幕夹缝与腔道壁面的平行度下降引发的光纤脉冲信号越界造成的漏播误判发生概率增大,使得漏播检测系统的漏检率增大,系统检测值偏低于实际值。上述现象是在漏充腔道的基础上产生的,故由其产生的漏播误判会随着排种器漏播率的降低而得到改善,如Ⅱ优346和冈优3551的试验数据所示,系统检测误差相比皖稻153的检测误差有明显降低。可见,与室内台架单一振动工况相比,田间播种作业机组的随机振动会增大系统约1%的检测误差,且该影响会随着排种器本身漏播率的降低而降低。

各组播种机前进速度下,播种不同品种稻种的系统检测误差不高于2.13%,表明漏播检测系统对播种机不同前进速度的实际作业工况均具有较高的检测精度。同时,较低的检测误差,亦可说明腔道光幕扫描式的封闭漏播检测环境及硬件配置具有较好

的抗尘性。

6 结论

(1)依据腔道式排种方法及其结构特征,综合应用光幕与激光传感检测技术,设计了一种基于组合脉冲的腔道光幕“扫描”式漏播检测方法,可实现排种系统排种超级杂交稻的漏播检测。

(2)漏播检测系统性能试验结果表明,扇环形腔道径深为11 mm,检测光幕位于左壳体的第二象限内,并与水平面夹角为47°时,可获得较高的漏播检测精度,在腔道盘10.59~24.71 r/min的不同转速和变转速,以及振动频率不高于150 Hz(加速度不高于25 m/s²)的单一振动工况下,漏播检测误差不高于1.20%;在田间播种机作业速度为2.16~5.04 km/h时,漏播检测误差不高于2.13%,能适应播种机不同的前进速度及其随机振动环境。

(3)所提出的组合脉冲漏播判定方法可适用于响应速度较为稳定的不同种类及型号的光纤与激光传感器组合,可为精少量穴播排种作物播种装置的漏播监测提供方法参考。

参 考 文 献

- [1] XING H, WANG Z, LUO X, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178(2):105697.
- [2] 臧英,何思禹,王在满,等. 气力式包衣杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1):10-18.
- [3] ZANG Ying, HE Siyu, WANG Zaiman, et al. Design of pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1):10-18. (in Chinese)
- [4] WANG B, NA Y, LIU J, et al. Design and evaluation of vacuum central drum seed metering device[J]. Appl. Sci., 2022, 12: 2159.
- [5] 王宝龙,王在满,罗锡文,等. 杂交稻气力滚筒集排式排种器楔形搅种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23):1-8.
- [6] WANG Baolong, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of wedge churning device for pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23):1-8. (in Chinese)
- [7] 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9):29-36.
- [8] ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):29-36. (in Chinese)
- [9] 周海波,李晨铭,张钊,等. 水稻钵体育秧智能补种决策方法与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):123-129.
- [10] ZHOU Haibo, LI Chenming, ZHANG Bin, et al. Decision and experiment on intelligent reseeding system of rice bowl nursing seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):123-129. (in Chinese)
- [11] 吴南. 玉米免耕播种机漏播补偿方法对比研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2):41-47.
- [12] WU Nan. Comparative research on miss-seeding reseed method in no-tillage corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):41-47. (in Chinese)
- [13] 赵博,樊学谦,周利明,等. 气流输送播种机压电式流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8):55-61.
- [14] ZHAO Bo, FAN Xueqian, ZHOU Liming, et al. Design and test of piezoelectric flow sensor for pneumatic seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):55-61. (in Chinese)
- [15] 姜萌,刘彩玲,都鑫,等. 小麦精少量播种播量检测系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5):50-58.
- [16] JIANG Meng, LIU Cailing, DU Xin, et al. Development of seeding rate detection system for precision and small amount sowing of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5):50-58. (in Chinese)
- [17] RAJEEV K, HIFJUR R. Detection of flow of seeds in the seed delivery tube and choking of boot of a seed drill[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 266-277.
- [18] 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.
- [19] 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)
- [20] 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.
- [21] 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)

- [13] 黄东岩, 贾洪雷, 祁悦, 等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 15–22.
HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 15–22. (in Chinese)
- [14] 任德良. 电容式排种性能检测传感器试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
REN Deliang. Experimental research of capacitance-type sensor for seeding performance detection[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 周利明, 李树君, 张小超, 等. 基于电容法的棉管籽棉质量流量检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 47–52.
ZHOU Liming, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 47–52. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 朱亮, 王关平, 孙伟, 等. 基于空间电容传感器的马铃薯排种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 34–43.
ZHU Liang, WANG Guanping, SUN Wei, et al. Development of potato seed-metering state monitoring system based on space capacitance sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 34–43. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 王金武, 张翌, 王菲, 等. 基于压电冲击法的水稻穴直播监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 74–84.
WANG Jinwu, ZHANG Zhao, WANG Fei, et al. Design and experiment of monitoring system for rice hill-direct-seeding based on piezoelectric impact method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 74–84. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11–21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 11–21. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 张顺, 李勇, 王浩宇, 等. U型腔道式水稻精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 98–108.
ZHANG Shun, LI Yong, WANG Haoyu, et al. Design and experiment of U-shaped cavity type precision hill-drop seed-metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 98–108. (in Chinese)
- [26] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 8–15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 8–15. (in Chinese)
- [27] 曾山, 汤海涛, 罗锡文, 等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 12–19.
ZENG Shan, TANG Haitao, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12–19. (in Chinese)
- [28] 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [29] 廖宜涛, 齐天翔, 廖庆喜, 等. 气力式油菜精量联合直播机振动特性及对排种性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1184–1196.
LIAO Yitao, QI Tianxiang, LIAO Qingxi, et al. Vibration characteristics of pneumatic combined precision rapeseed seeder and its effect on seeding performance[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1184–1196. (in Chinese)
- [30] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于DEM–CFD的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54–66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM–CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54–66. (in Chinese)
- [31] 闻邦椿. 直线振动机物料运动的基本特征及运动学参数的选择与计算[J]. 起重运输机械, 1974(4): 35–52.