doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.012

水稻小区育种播种机精量排种装置设计与试验

秦　伟[1,2]　李裕武[1,3]　钱　诚[1,3]　王在满[1,4]　臧　英[1,5]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083;
3.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642;
4.岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心,茂名 525000;
5.华南农业大学黄埔创新研究院,广州 510715)

摘要:针对机械化水稻小区育种作业需频繁换种、精准供种、精量播种和快速清种的技术难题,设计了一种基于 STM32 单片机控制的水稻小区育种播种机精量排种装置。首先,基于清种 + 排种 + 换种的工作流程,研究了以 STM32 单片机为控制核心,电机与舵机为执行元件,集成二维码识读定位系统的主动换种机构和自动清种机构,实现了相邻小区间不停机的清换种作业。随后,基于精量播种的作业目标,采用 Matlab 软件图像处理优化设计了与多品系水稻外缘轮廓特征相拟合的卧式浅盆型排种盘。集成排种装置,开展清换种性能试验,结果显示,换种机构的换种时间小于 2.05 s,卸种机构的净种率达到 100%。以 10 类稻种为试验对象,排种盘转速、工作负压为试验因素,漏播率、合格率和重播率为试验指标,进行排种性能台架试验和田间试验,结果表明:当机具作业速度为 0.72 m/s 时,排种装置播种性能最佳;室内台架试验各品种播种合格率均超过 90%,漏播率与重播率均低于 5%;田间试验结果显示,排种装置对各品类稻种的平均穴距合格率超过 90%,满足水稻小区育种精量播种的农艺需求。

关键词:水稻;小区育种;排种器;精量播种;自动清换种

中图分类号:S233.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0140-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Precision Seed Metering Device for Rice Plot Breeding Seeder

QIN Wei[1,2]　LI Yuwu[1,3]　QIAN Cheng[1,3]　WANG Zaiman[1,4]　ZANG Ying[1,5]

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
3. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, South China Agricultural University, Ministry of Education, Guangzhou* 510642, *China*
4. *Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming* 525000, *China*
5. *Huangpu Innovation Research Institute of SCAU*, 510715, *China*)

Abstract: Aiming to address the technical challenges of mechanized rice plot breeding operations—such as frequent seed switching, precise seed supply, precision seeding, and rapid seed clearing—a precision seed metering device for a rice plot breeding seeder was designed, based on control by an STM32 microcontroller. Based on the operational workflow of seed-clearing, seed metering, and seed-switching, a control system was designed with the STM32 as the core controller, motors and servos as actuators, and an integrated QR code recognition and positioning system. This enabled the implementation of uninterrupted seed-switching and seed-clearing operations between adjacent plots. To achieve the goal of precision seeding, a horizontally oriented, shallow-bowl-shaped seed metering disc with suction holes was reverse-designed to match the outer contour features of various rice seed types. This design was implemented by using Matlab image processing. Upon integrating the seed metering device, performance tests of the seed-clearing and seed-switching mechanisms were conducted. Results showed that the switching time of the seed-switching mechanism was less than 2.05 s, and the net seed clearing rate

收稿日期:2025-06-30　修回日期:2025-07-20

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-01)和广东省科技计划项目(2021B1212040009)

作者简介:秦伟(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事水稻精准种植关键技术研究,E-mail:qinweilxy@scau.edu.cn

通信作者:臧英(1973—),女,教授,博士,主要从事水稻精准种植技术与智能播种装备研究,E-mail:yingzang@scau.edu.cn

reached 100%. Using ten rice varieties as test objects, bench and field tests were conducted with the rotation speed of the seed metering plate and operating negative pressure as test factors, and the miss rate, qualified seeding rate, and multiple seeding rate as evaluation indices. The results indicated that the optimal seeding performance was achieved when the operating speed of the machine was 0.72 m/s. In bench tests, the qualified seeding rate for all varieties exceeded 90%, while the missing rate and multiple seeding rate were both below 5%. Field test results indicated that the average qualified hill spacing rate of the seed metering device exceeded 90% across all rice varieties, demonstrating that it met the agronomic requirements for precision seeding in rice plot breeding.

Key words: rice; plot breeding; seed metering device; precision seeding; automatic seed-switching and seed-clearing

0　引言

水稻是我国重要的粮食作物，其生产安全关系国家战略[1-2]。近年来，尽管水稻单产持续提升，但水稻年均种植面积缩减 0.6%[3-4]；按现有生产规模推算，到 2030 年，水稻总产预计 2.28×10^9 t，不及 2.4×10^9 t 的需求预期[5-6]。在耕地资源持续趋紧的背景下，提高单产成为提升总产的唯一选择，通过小区育种技术发掘高产品种成为突破水稻产量瓶颈的关键手段[7-10]。然而，我国水稻育种播种环节仍依赖人工，效率低下，严重影响育种试验的科学性。因此，研制一款适用于水稻育种场景的专用播种装置，成为当前亟需解决的技术问题。

当前，农业自动控制技术的快速发展使育种公司和科研单位对育种机械性能提出了更高的要求。在此基础上，Wintersteiger、Haldrup、Almaco、Baural 和 Zurn 等国外行业龙头企业研制了一系列集精量播种和自动清换种等功能于一体的先进机型[11-15]，在玉米、大豆和小麦等作物育种环节效果显著，极大地提高了育种试验规模和效率；但碍于国内外小区育种农艺差异，上述机型难以在国内推广。在国内，文献[16-18]分别设计了可快速实现清换种作业的大豆育种排种器，操作便捷，性能良好。郝建军等[19]设计了一款基于 STM32 控制，通过先充种后投种完成花生小区育种作业的勺夹式单粒精量播种单体，自动化程度高，播种质量好。谢建华等[20]设计了一种播种精度高的摩擦调节式小麦小区精密排种器，单粒效果良好。杨薇等[21]设计了一款作业时充种腔与清种腔相互独立的种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器，清种快捷，作业效率高。

综上可知，目前国内外具备快速清换种功能的小区育种排种装置主要应用于玉米、大豆、小麦和花生等粮食作物[22-26]，面向水稻的小区育种专用排种装置报道较少，能够完成换种、供种、排种和清种等串联环节育种作业的排种装置未见报道。为此，本研究结合水稻小区育种农艺要求，设计一种以 STM32 单片机为主控制器，以电机、舵机为驱动元件，可快速完成自动清换种和排种作业的气吸式水稻小区育种播种机精量排种装置，以期解决水稻小区育种作业过程需频繁换种、精准供种、精量播种和快速清种的技术难题，提高育种效率与质量。

1　总体结构与工作原理

1.1　水稻小区育种播种试验要求

水稻小区育种试验是一种在可控的小面积田间环境中培育、筛选优势品种的科学方法，在播种环节需要根据育种农艺和试验计划，在规定长度和宽度的小区种植单元内，按照规定的行距将同一品系的种子定量、均匀、连续地播入种沟。水稻小区长度一般为 5 m，小区间隔在 1 m[10]，小区育种播种作业流程如图 1 所示，因小区地块小、播量少、播种品种多，故而要求播种机播种精度高、清换种作业时间短，并且要保证 100% 自净率。

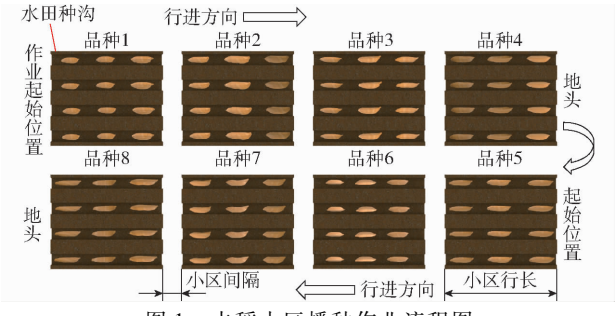


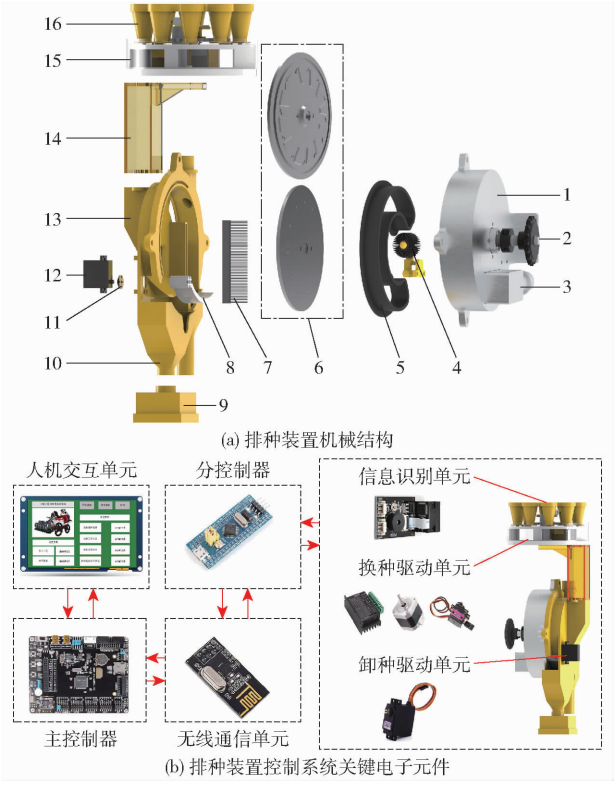
图 1　水稻小区播种作业流程图

Fig. 1　Flow diagram of rice plot seeding operation

1.2　总体结构

水稻小区育种精量排种装置总体结构如图 2 所示。由图 2a 可知，排种装置机械结构主要由负压气室壳体、清种辊、气室密封圈、卧式浅盆型排种盘、清种毛刷、卸种板、余种收集盒、清种通道、充种壳体、供种通道、水平轮转式换种机构和供种盒组成。由图 2b 可知，排种装置控制系统主要由人机交互单元、主控制器、分控制器、无线通信单元、换种驱动单元、信息识别单元、卸种驱动单元等模块组成；其中，人机交互单元采用 TJC8048X550_011C 串口屏；主

控制器采用 STM32F103ZET6 单片机[27-28]；无线通信单元采用 nRF24L01 无线传输模块[29]；分控制器采用 STM32F103C8T6 单片机[30]；信息识别单元采用 GM65 条码识读模块扫识信息，换种驱动单元采用 TB6600 步进电机驱动器、42 步进电机和舵机 MG90S；卸种驱动单元采用舵机 MG996R。



(a) 排种装置机械结构

(b) 排种装置控制系统关键电子元件

图 2 水稻小区育种精量排种装置

Fig. 2 Precision seed-metering device for rice plot breeding

1. 负压气室壳体 2. 排种轴 3. 负压排气口 4. 清种辊 5. 气室密封圈 6. 卧式浅盆型排种盘 7. 清种毛刷 8. 卸种板 9. 余种收集盒 10. 清种通道 11. 舵盘 12. 舵机 MG996R 13. 充种壳体 14. 供种通道 15. 水平轮转式换种机构 16. 供种盒

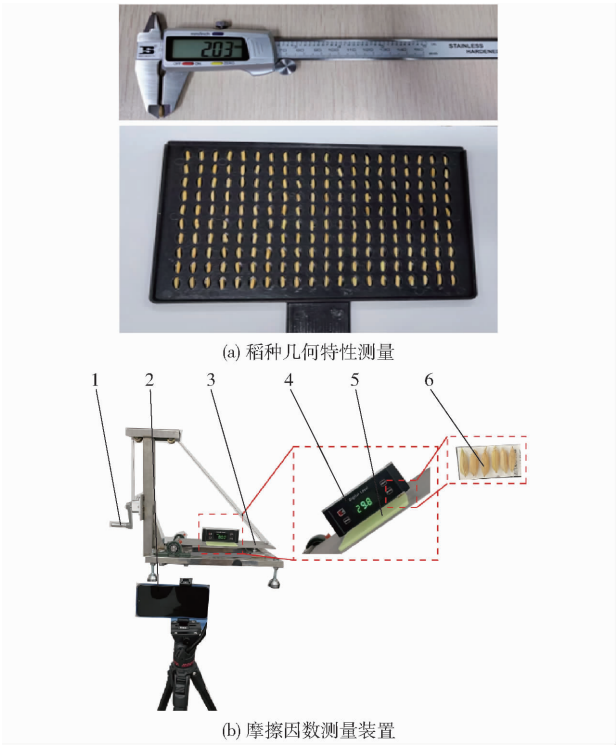
1.3 工作原理

作业时，排种器处于小区播段起始位置，在负压气源作用下，负压气室壳体、气室密封圈与排种盘间形成负压环境。随后，用户根据育种试验计划在人机交互单元输入指令，并经 USART 数据通信串口发送至主控制器；在主控制器解析指令后，通过 nRF24L01 无线通信模块将执行任务传递至各分控制器，由分控制器执行清换种作业流程。根据先识读、再校验、再指令的作业模式，换种驱动单元的 42 步进电机动作，将供种盒顺位旋转至 GM65 模块条码识读区，读取供种盒二维码信息后判断是否为应播稻种；若不是，42 步进电机继续动作，切换并识读下一种盒；若是，换种机构的舵机 MG90S 驱动，供种盒挡板打开，种盒内的种子经供种通道落入充种室。之后播种任务开始，稻种经负压吸附后随排种盘迁移至投种作业区，在清种辊的强制清理下，有序播入水田，一个品种播种完成后，机组停止运动，舵机 MG996R 动作，卸种板打开，充种室剩余种子经清种通道落入余种收集盒，待清种完成后，关闭卸种板，随后开始预备下一品种作业，直至换种盘上的所有品系稻种播种完毕。

2 关键结构设计

2.1 试验品种

水稻种子三轴尺寸、外形轮廓等几何特征直接决定了供种盒尺寸、排种盘吸孔尺寸和卸种板开合角度等结构参数的设计边界，其与排种器原材料的接触特性更是影响换种、清种效率的关键。本文以华南地区推广较多的 Y 两优 1378（YLY）、恒丰优 1179（HFY）、隆望两优 889（LWLY）、纳优 51（NY51）、纳优 6388（NY6388）、纳优 6618（NY6618）、软华优 1179（RHY）、深两优 1978（SLY）、五优 1179（WY）和增香优南香占（ZXYNZ）等 10 类稻种为试验对象，各品类随机挑选 200 粒饱满稻种，开展稻种基础物料特性系统性测量，如图 3 所示，测量结果如表 1 所示。



(a) 稻种几何特性测量

(b) 摩擦因数测量装置

图 3 稻种基础物料特性测量

Fig. 3 Measurement of basic physical properties of rice seeds

1. 手柄 2. 摄像装置 3. 变角度倾斜面 4. 电子量角器 5. ABS 板 6. 试验稻种

2.2 换种机构

水稻小区育种播种作业需精准换种、分量供种，为减少换种时间跨度、避免各品系稻种在换种作业

表 1　种子基础物料参数

Tab. 1　Basic physical parameters of seeds

参数		品种								
		YLY	HFY	LWLY	NY51	NY6388	NY6618	RHY	SLY	WY	ZXYNZ
三轴尺寸/mm	长	9.2	9.7	8.8	9.0	9.0	9.9	9.2	9.0	8.5	9.1
	宽	2.3	2.1	1.9	1.9	2.0	1.9	1.9	2.5	2.5	1.9
	高	1.6	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.3
千粒质量/g		20.6	21.3	21.3	18.7	18.8	18.7	18.1	22.7	24.3	18.9
稻种-不锈钢摩擦角/(°)	长轴	31.1	35.3	32.3	33.0	27.0	33.0	36.0	36.3	33.7	32.6
	宽轴	22.9	18.7	18.8	20.6	16.2	20.6	18.8	27.9	21.5	18.3
稻种- ABS 板摩擦角/(°)	长轴	26.1	29.1	28.4	27.8	26.7	27.7	27.5	27.4	25.5	30.7
	宽轴	20.5	17.2	19.0	17.7	16.2	17.6	19.7	21.7	21.1	18.6

时的交叉污染，本文设计了一种供种盒独立分区、二维码精准定位识别的水平轮转式换种机构，其总体结构如图 4 所示。该机构能够基于供种盒二维码和排种器作业状态，利用传感器信号反馈以及电机、舵机的联动快速完成品种切换与供应，提高育种效率。作业时，GM65 识别模块能够基于育种试验预先设定的品种播种顺序，扫识当前供种盒的二维码品种信息，若为待播品种，舵机 MG90S 动作，使得齿轮齿条在驱动齿轮Ⅰ的传动下打开种盒挡板，供种盒内种子落入排种器充种区；若非待播品种，换种盘继续旋转，直至识别到正确的待播品种为止。

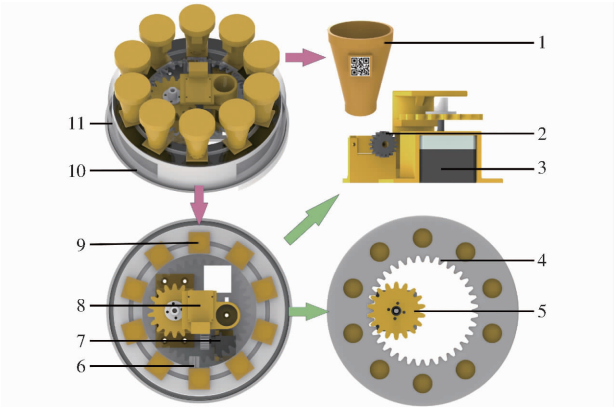


图 4　换种机构总体结构图

Fig. 4　Overall structure diagram of seed-switching mechanism

1. 供种盒　2. 驱动齿轮Ⅰ　3. 42 步进电机　4. 从动齿轮　5. 驱动齿轮Ⅱ　6. 齿轮齿条　7. 舵机 MG90S　8. GM65 识别模块　9. 种盒挡板　10. 换种底座　11. 换种盘

2.2.1　供种盒结构设计

针对小区育种频繁换种的需求，设计了一种适用于换种盘的圆台形供种盒，如图 5 所示。

为保证供种盒中稻种快速落入供种通道，结合表 1 稻种摩擦角，可得供种盒参数尺寸应满足公式

$$\theta = \arctan\frac{h}{R-r} > \min(\theta_1, \theta_2) \tag{1}$$

式中　θ——供种盒斜边角度，(°)

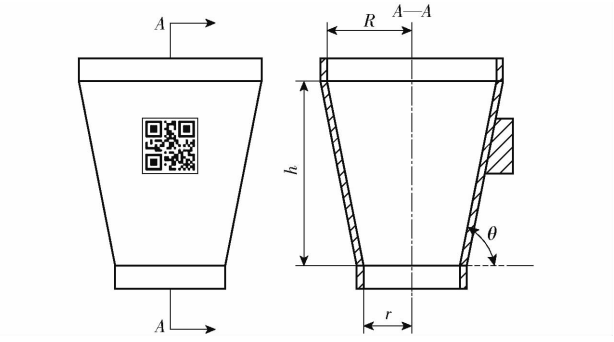


图 5　供种盒结构图

Fig. 5　Structural diagram of seed supply box

R——供种盒顶端半径，mm

r——供种盒底面半径，mm

h——供种盒高度，mm

θ_1——稻种长轴方向的摩擦角，(°)

θ_2——稻种宽轴方向的摩擦角，(°)

同时，为保证供种盒有足够的容种量并避免落种过程中的结拱现象，供种盒尺寸还应满足[10,31]

$$\begin{cases} n = \dfrac{V_x}{(1+p)V_z} \\ s = \dfrac{2\tau_0 l(1+\sin\varphi)}{l\rho g - 2\tau_0 l(1+\sin\varphi)} + w \end{cases} \tag{2}$$

式中　n——供种盒的容种量，粒

V_x——供种盒体积，mm^3

p——稻种的孔隙率

V_z——稻种的平均体积，mm^3

ρ——稻种容积密度，kg/m^3

g——稻种自由落体加速度，m/s^2

l——供种盒底面直径，mm

φ——稻种内摩擦角，(°)

τ_0——稻种初始剪切应力，Pa

s——稻种在供种盒底端的临界结拱间隙，mm

w——稻种几何尺寸最大值，mm

基于排种装置前期充种预试验，当排种装置充种区域稻种数量大于 500 粒时，排种盘对各品种的漏

充率小于 10%,由此确定供种盒 R 为 18.5 mm,r 为 12.5 mm,h 为 40 mm。

2.2.2 换种盘结构设计

基于水稻小区育种农艺需求,单次行程需要开展 10 个小区作业,为此,本文将换种盘上的独立供种盒数量设置为 10,如图 6 所示。为方便种盒更换,各供种盒间应保持一定间隙;因此,结合水稻种植行距,可得供种盘尺寸应满足

$$\begin{cases} r_1 = D_1 + \delta_1 \\ 2\pi(r_1 + R) < D < \delta \end{cases} \tag{3}$$

式中 r_1——换种盘从动齿轮齿根圆直径,mm

D_1——换种盘驱动齿轮齿顶圆直径,mm

δ_1——舵机、种盒挡板驱动齿轮及其余零件空间布置预留尺寸,mm

δ——水稻种植行距,mm

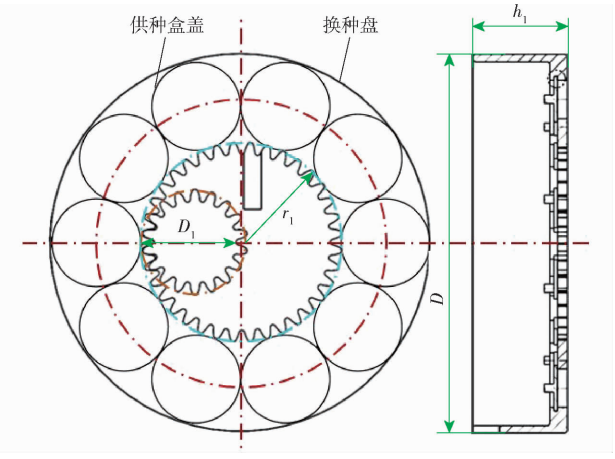


图 6 换种盘结构图

Fig. 6 Structural diagram of seed-switching disc

考虑相邻排种单体间距及电机、舵机和二维码识别模块等机构空间布局,换种盘直径不宜过大;因此,确定换种盘直径 D 为 205 mm,高 h_1 为 45 mm。

基于换种盘、供种盒结构参数,确定种盒挡板的动作距离 l_1 应大于种盒槽直径 r,小于种盒槽上边缘至内齿轮的距离 l_2,如图 7 所示,即

$$r < l_1 < l_2 \tag{4}$$

因此,本文将种盒挡板移动距离设置为 27 mm。

2.3 排种机构

本文以气吸式水稻穴播精量排种器为研究基础[32-33],以提高排种器品种兼容性和作业精度为设计目标,对排种盘关键结构参数进行优化设计。

2.3.1 吸孔参数优化设计

结合表 1 稻种尺寸,可得排种盘吸孔直径 d_p 为[21]

$$d_p = (0.64 \sim 0.66)W \tag{5}$$

结合排种盘对多粒型稻种的精量充填需求,最终确定 d_p 为 1.6 mm。基于水稻小区种植农艺,进一步可得排种盘吸孔数量 N 为

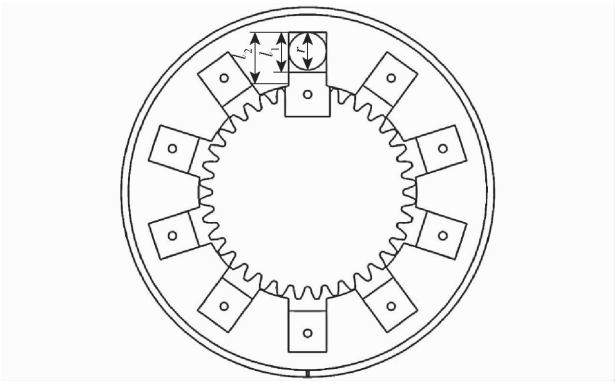


图 7 种盒挡板运动距离示意图

Fig. 7 Schematic of baffle movement distance in seed box

$$\begin{cases} N = \dfrac{60 v_m}{S n_p} \\ v_m = \dfrac{S}{\Delta t} \end{cases} \tag{6}$$

式中 Δt——两次播种的时间间隔,s

S——水稻播种穴距,取 0.1 ~ 0.2 m

v_m——机具前进速度,取 0 ~ 1.3 m/s

n_p——排种盘转速,取 30 ~ 60 r/min

由公式(6)最终确定排种盘吸孔数量 N 为 12。

2.3.2 吸孔结构优化设计

为提高排种盘对多品种水稻的作业兼容性,本文基于稻种外缘轮廓特征,开发了一种可提取稻种轮廓坐标点的 Matlab App designer 人机交互界面,如图 8 所示,通过在每类稻种外缘随机提取 50 个实际尺寸坐标点,建立可表达每类稻种外形轮廓的数据特征;等比例迭代各类稻种外缘轮廓数据,选取公共坐标点,拟合后得到了有利于多品系稻种沿长宽轴方向精量填充的 6 阶多项式方程

$$Y = 0.16X^6 - 2.03X^5 + 10.19X^4 - 25.25X^3 + 32.0X^2 - 19.75X + 5.16 \quad (R^2 = 0.924\,2) \tag{7}$$

在此基础上,结合表 1 数据和公式

$$\begin{cases} L_{\max} < L < 2L_{\min} \\ H_{\max} < H < 2H_{\min} \\ W_{\max} < W < 2W_{\min} \end{cases} \tag{8}$$

式中 $L_{\max}$——稻种在长轴方向最大值,mm

$W_{\max}$——稻种在宽轴方向最大值,mm

$H_{\max}$——稻种在高轴方向最大值,mm

$L_{\min}$——稻种在长轴方向最小值,mm

$W_{\min}$——稻种在宽轴方向最小值,mm

$H_{\min}$——稻种在高轴方向最小值,mm

得到了卧式浅盆型吸孔的基本几何特征,并确定了卧式浅盆型吸孔在 L、W、H 方向的设计参数分别为 12、4、2 mm,如图 9 所示。



图 8　稻种外缘轮廓关键坐标点提取

Fig. 8　Extraction of key coordinate points of rice seed outer contour

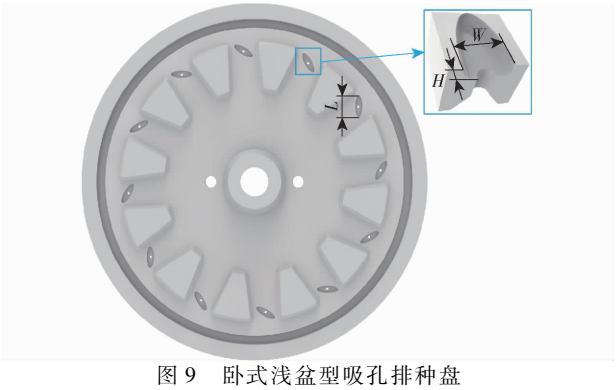


图 9　卧式浅盆型吸孔排种盘

Fig. 9　Horizontally shallow bowl-type seed-metering disc

2.4　清种机构

清种机构总体结构如图 10 所示。

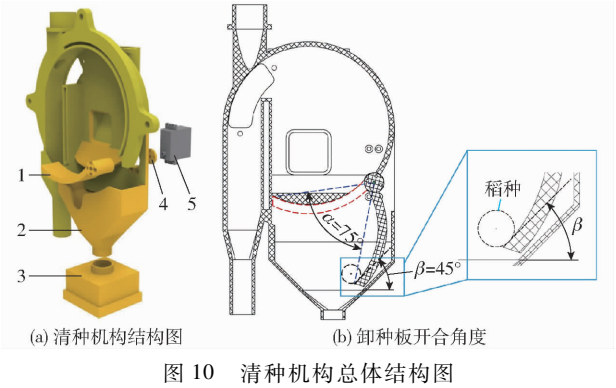


图 10　清种机构总体结构图

Fig. 10　Overall structure diagram of seed-clearing mechanism

1. 卸种板　2. 清种通道　3. 余种收集盒　4. 舵盘　5. 舵机 MG996R

完成小区播种后，舵机 MG996R 驱动卸种板开启，充种室内残留稻种在重力作用下落入余种收集盒。由表 1 数据可知，稻种与试验材料的最大静摩擦角度为 36.3°。基于此，清种板开启角 α 设计为 75°，此时稻种与卸种板间的最小夹角 β 为 45°，可确保种子完全脱落。

3　控制系统设计

3.1　控制系统硬件设计

水稻小区育种单粒精量排种器控制系统硬件实物连接图及其工作流程分别如图 11 所示。

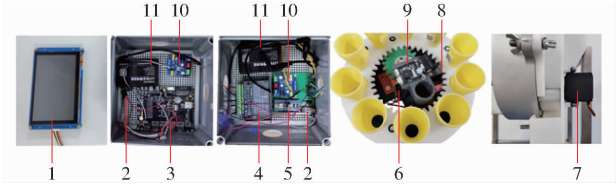


图 11　控制系统实物图

Fig. 11　Control system hardware diagram

1. HMI 显示屏　2. nRF24L01 无线通信模块　3. 主控制器 STM32103ZET6　4. TB6600 步进电机驱动器　5. 分控制器 STM32103C8T6　6. 42 步进电机　7. 舵机 MG996R　8. 舵机 MG90S　9. GM65 识别模块　10. DC－DC 电压转换模块　11. 12 V 锂电池组

3.1.1　控制模块设计

控制模块采用主从控制器架构。其中，主控制器负责系统协调、数据交互及作业监控。本文选用基于 ARM Cortex－M3 内核的高性能微控制器，其最高工作频率为 72 MHz，内置 512 KB 闪存和 64 KB SRAM。

分控制器负责播种装置的局部控制，功能包括驱动步进电机、舵机，通过无线通信模块与主控制器通信，驱动识读模块识别种盒二维码信息等。本文选用基于 ARM 32 位 Cortex－M3 内核的高性能微控制器，其主频最高可达 72 MHz，内置 64 KB 闪存和 20 KB SRAM，拥有多个 USART、DMA、TIM 等接口，适用于嵌入式控制系统。

3.1.2　人机交互与通信模块设计

人机交互单元采用淘晶驰 TJC8048X550_011C

串口屏(800 像素 × 480 像素,工作温度 - 20 ~ 70℃),支持参数设置与状态显示。无线通信采用 nRF24L01 模块(2.4 GHz 频段,SPI 接口配置),实现主从控制器间的稳定数据传输。

3.1.3 清换种控制模块设计

清换种控制模块主要由信息识别单元、换种驱动单元和清种驱动单元组成。信息识别单元主要负责对供种盒内种子信息进行快速识别与传递;本文采用 GM65 条码识读模块(0.1 s 响应,环境适应性强),该模块能在光照不足时发出主动光源,也能在温差及潮湿雾气大的环境下保持一致的识别性能。

换种驱动单元负责根据控制模块的指令,驱动换种盘、种盒挡板等部件精准完成换种动作,确保种子顺利、精准地自供种盒输送到充种区。基于前文供种盒数量,选用 42BYGH34 步进电机(1.8°步距角)和 MG90S 舵机,实现精准换种。

清种驱动单元负责清理充种室中的剩余稻种,避免育种过程出现品种的交叉污染;选用舵机 MG996R(工作温度 - 30 ~ 60℃)完成卸种板的快速驱动,工作时,只需操作人员在 HMI 屏幕上点击清种按钮,主控制器接收到 HMI 屏幕传输的信号,通过 nRF24L01 无线通信模块转发分控制器,而后分控制器驱动舵机 MG996R 开始动作,打开清种板,实现清种功能。

3.2 控制系统软件设计

控制系统软件主要由主控端程序、无线通信程序、分控制端程序和人机交互程序组成,其电路原理如图 12 所示。其中,主控端程序、无线通信程序和分控制端程序基于 Keil μVision5 环境开发,采用 C 语言编程;人机交互程序基于 USART HMI 软件开发,由屏幕硬件与人机交互界面组成。

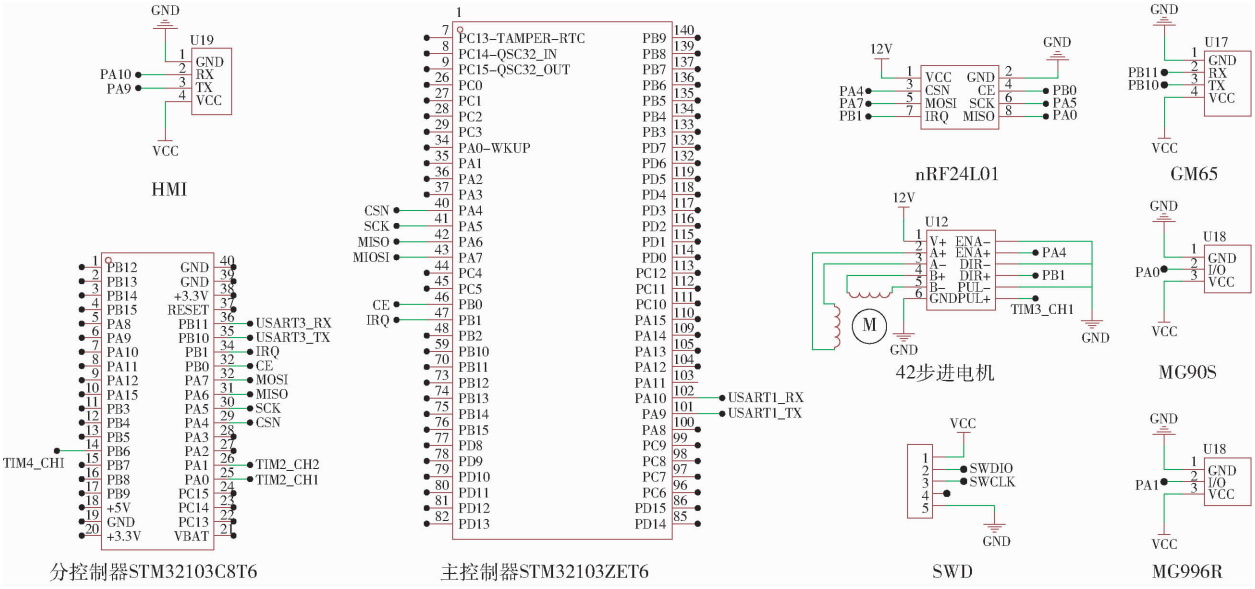


图 12 控制系统电路图

Fig. 12 Control system circuit diagram

3.2.1 主控端程序设计

主控端程序负责整个系统的协调与调度,包括初始化外设(SPI、GPIO、USART)、解析 HMI 指令、通过 nRF24L01 模块与分控端通信,并实时更新作业状态。用户通过 HMI 设置参数后,主控制器发送控制信号至分控端,并接收反馈数据,实现运行监测。

3.2.2 人机交互程序与无线通信程序设计

HMI 屏幕利用 USART 协议与主控制器进行数据交互,以确保作业参数的实时更新。

nRF24L01 模块通过 SPI 接口与 STM32 单片机建立通信,系统启动后,无线通信程序进行模块初始化,将 CSN 置为低电平,并将数据写入 Tx_FIFO 缓存区,通过配置 CE、PWR_UP 和 PRIM_RX 参数,使 nRF24L01 模块在发送模式和接收模式之间切换。

3.2.3 分控制端程序设计

分控制端程序主要负责换种、卸种等动作的执行与监控。系统启动时,TIM4、TIM2 为定时器模式,TIM4 通道 CH1 用于输出 PWM 脉冲至 TB6600 驱动器的 PUL + 信号端口,并通过 TB6600 驱动器控制电机转速;其中,PB4、PB5 分别为驱动器的 ENA -使能信号端口、DIR -方向信号端口。TIM2 通道 CH2 用于输出 PWM 脉冲至舵机 MG90S 与舵机 MG996R,控制舵机完成落种、卸种等动作;USART3 的 RX 和 TX 端口用于与 GM65 模块连接,利用串口通信方式与 GM65 条码识读模块通信。

3.2.4 换种电机、舵机驱动程序设计

换种电机驱动程序负责控制换种盘的旋转,在

分控制器程序中定义 int 变量 b，当接收到动作指令时，令 $b=1$，进入换种电机驱动动作；当换种电机驱动动作结束时，令 $b=0$。在本系统中，换种盘单次搭载 10 个供种盒，单次换种过程中，换种盘需转动 36°；由于 42 步进电机采用驱动器 TB6600 进行步进电机驱动，因此可通过设置步进电机驱动器的细分数以及单片机输出的 PWM 脉冲数，来实现精准的换种盘角度控制；本文设置细分数为 4，表示驱动器每接收 800 个脉冲步进电机即转动一圈；同时，在单片机程序中，通过定时器中断来记录脉冲个数，当脉冲数达到对应值时，关闭定时器输出通道，则步进电机停止运动。

换种舵机 MG90S 旋转角度通过脉宽调制(PWM)信号精确控制，如图 13 所示，当输入的脉冲宽度小于 1.5 ms 时，舵机会持续顺时针旋转；当脉冲宽度大于 1.5 ms 时，舵机会持续逆时针旋转；当脉冲宽度等于 1.5 ms 时，舵机会停止转动，保持静止。因此，在单片机程序中定义 int 变量 a，并赋值为 0，当 GM65 识读模块识别到种子信息与录入信息一致时，令 $a=1$，进入换种舵机驱动动作，当换种舵机驱动动作结束时，令 $a=0$，设计延时等待时间为 1 s，能确保供种盒中种子落完。

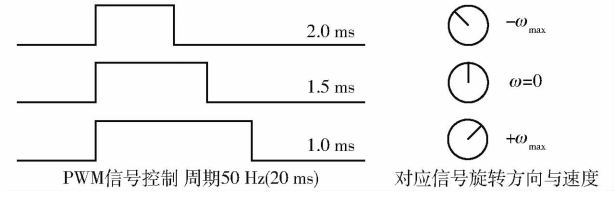


图 13　360°舵机脉冲宽度与旋转方向、速度之间的映射关系

Fig. 13　Relationship between PWM signal pulse width and bidirectional speed control in continuous rotation (360°) servos

3.2.5　清种舵机驱动程序设计

舵机 MG996R 的旋转范围为 180°，其脉冲宽度与角度之间的映射关系如图 14 所示，由图 14 可知，1.5 ms 的脉冲宽度对应于舵机的 0°位置；0.5 ms 的脉冲宽度对应于舵机 90°；2.5 ms 的脉冲宽度对应于舵机 −90°。因此，在单片机程序中定义 int 变量 c，并赋值为 0，当接收到清种动作指令时，令 $c=1$，进入清种舵机驱动动作，当清种舵机驱动动作结束时，令 $c=0$。

4　试验

4.1　试验设计

为验证集成换种机构、排种机构和清种机构于一体的水稻小区育种精量排种装置作业性能，分别在华南农业大学农业工程楼农机装备实验室与大吉沙岛水稻种植基地开展了排种装置台架及田间工作性能验证试验。以 Y 两优 1378、恒丰优 1179、隆望两优 889、纳优 51、纳优 6388、纳优 6618、软华优 1179、深两优 1978、五优 1179 和增香优南香占共 10 类稻种为试验对象，基于试验台架和机具分别进行换种性能试验、排种性能试验、清种精度试验和田间播种试验。

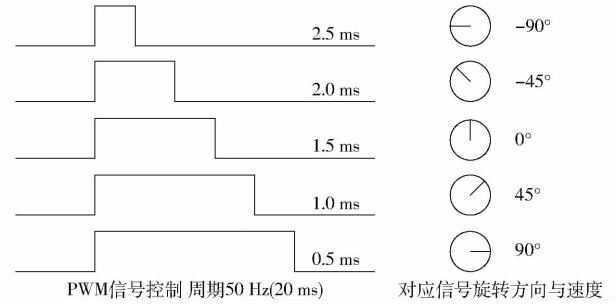


图 14　180°舵机脉冲宽度与角度之间的映射关系

Fig. 14　Relationship between PWM signal width and output angle in 180° servos

4.1.1　换种性能试验设计

为验证换种机构工作性能，开展换种盘换种试验。试验台架如图 15 所示，为精确捕捉换种盘单次、累计转动角度，采用摄像装备对换种盘 10 个种盒槽的实际转动角度进行记录，同时同步记录每类稻种自信息识别至供种盒下所需时间，评估单次换种速度。

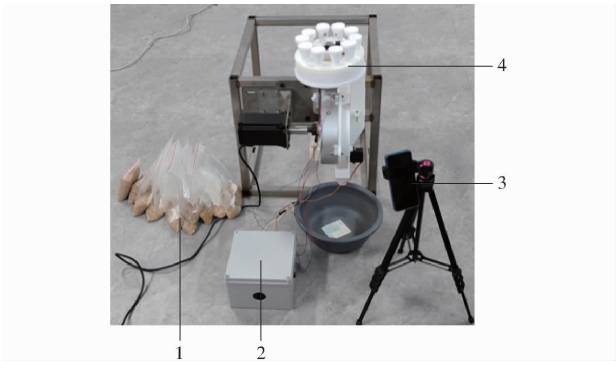


图 15　换种性能试验台架

Fig. 15　Seed-switching performance test bench

1. 试验稻种　2. 控制箱　3. 摄像装备　4. 换种机构

4.1.2　排种性能试验设计

排种装置试验台架如图 16 所示，基于前期充种性能试验结果，确定排种器吸种负压为 3 200 Pa，排种盘转速为 20 r/min，排种器充种性能最佳。为此，本试验参照 NY/T 1300—2022《农作物品种试验与信息化技术规程 水稻》和 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》，以排种器上述工作参数为基础，以排种装置前进速度为试验因素，以漏播率、合格率和重播率为试验指标，开展排种性能试验。其中，将种子传送带运行速度分别设置为

0.56、0.72、0.88 m/s(对应理论穴距 140、180、220 mm),以对应排种器在不同水稻品种、不同前进速度下的排种性能。每组试验结束后,记录其 50 穴情况,并以其漏播率、合格率(1 粒或 2 粒)、重播率作为试验评价指标,对排种试验情况进行评定。



图 16 排种性能试验台架

Fig. 16 Seed metering performance test bench

1. 排种装置 2. 种子传送带 3. 种子传送带控制器

4.1.3 清种性能试验设计

为验证清种机构清种效果,以各品类稻种为研究对象,以充种区域剩余稻种数量为试验因素,余种量设置为 300、400、500,以卸种时间、净种率为试验指标,开展卸种性能单因素试验,清种试验装置如图 10 所示。

4.1.4 田间播种性能试验设计

为研究水稻小区育种精量排种装置田间播种情况,本文开展了田间播种性能试验。试验于华南农业大学大吉沙岛水稻种植试验基地开展,将本文设计的水稻小区精量排种装置替代试验基地原有气吸式播种机挂载排种器,如图 17 所示。

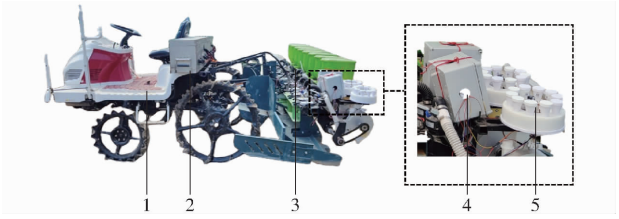


图 17 气吸式水稻小区育种精量播种机实物图

Fig. 17 Figure of air-suction precision seed metering machine for rice plot breeding

1. 动力底盘 2. 风机电源 3. 风机 4. 控制箱 5. 排种装置

试验前设置风机负压为 3 200 Pa,保持播种机速度稳定在 0.72 m/s 左右,穴距固定在 180 mm,以验证排种装置对不同水稻品种的作业适应性,每组试验结束后,记录其 30 穴排情况,以其漏播率、合格率、重播率作为试验评价指标,对机具田间工作性能进行评定。

4.2 试验结果

4.2.1 换种性能试验结果

换种性能试验结果如表 2 所示,由表可知,换种盘单次换种时间不超过 2.05 s,满足水稻小区育种快速换种的农艺需求和频繁换种的作业需要。

表 2 换种性能试验结果

Tab. 2 Seed-switching performance test results

s

换种工序时间	品种									
	YLY	HFY	LWLY	NY51	NY6388	NY6618	RHY	SLY	WY	ZXYNZ
换种盘动作时间	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4
二维码识读时间	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
落种时间	0.2	0.2	0.25	0.25	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.25

4.2.2 排种性能试验结果

排种机构排种性能试验情况如图 18 所示,排种试验结果如表 3 所示,由表 3 可知,当种子传送带速度即机具前进速度为 0.72 m/s、穴距为 180 mm 时,排种器排种作业性能最优,此时所有试验稻种合格率均高于 90%,漏播率低于 6%,重播率低于 4%,满足水稻小区育种精量播种的农艺需求。

4.2.3 清种性能试验结果

清种机构清种性能试验结果如表 4 所示,由表 4 可知,当排种器充种区域的种子余种量分别为 300、400、500 粒时,清种机构清种时间均不超过 0.9、0.9、1.0 s,净种率均为 100%,满足水稻小区育种快速清种的农艺需求。

4.2.4 田间播种性能试验结果

田间播种性能试验如图 19 所示,试验结果如表 5 所示,由表 5 可知,在机具前进速度为 0.72 m/s、排种器吸种负压为 3 200 Pa、排种盘转速为 20 r/min 的条件下,排种装置对各品类稻种的平均播种合格率大于 90%;其中稻种 Y 两优 1378 的播种性能最佳,其播种合格率为 96.7%,漏播率为 3.3%,重播率为 0,满足水稻小区育种精量播种的试验需求。

对比室内台架试验结果可知,在田间作业条件下,除 RHY 外,其余各品系稻种均表现出漏播率不同程度的上升趋势,同时播种合格率和重播率略有波动。具体而言,LWLY 和 ZXYNZ 两类稻种在田间作业条件下的播种合格率和重播率较室内试验下降幅度明显,漏播率上升较为显著,而 YLY 稻种的合格率、重播率下降以及漏播率上升幅度则相对较小,表明不同稻种在复杂作业环境中对播种性能的响应存在明显差异。结合表 1 所示的各品类稻种基础物

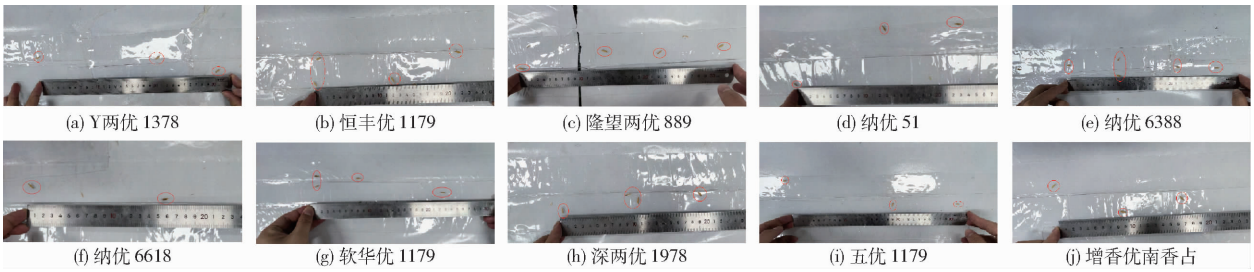


图 18　各品系稻种台架试验落种情况

Fig. 18　Bench test results of seedmetering performance for different rice varieties

表 3　排种性能试验结果

Tab. 3　Seed-metering performance test results　%

种子传送带速度/($m \cdot s^{-1}$)	指标	品种									
		YLY	HFY	LWLY	NY51	NY6388	NY6618	RHY	SLY	WY	ZXYNZ
0.56	漏播率	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0
	合格率	84	96	98	94	96	96	88	96	92	100
	重播率	12	4	2	4	4	2	12	4	8	0
0.72	漏播率	0	0	2	4	2	6	6	6	0	0
	合格率	98	96	98	94	94	94	92	90	96	96
	重播率	2	4	0	2	4	0	2	4	4	4
0.88	漏播率	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
	合格率	96	98	98	88	92	92	94	96	100	92
	重播率	4	2	2	12	8	8	6	2	0	8

表 4　清种性能试验结果

Tab. 4　Seed-clearing performance test results

参数	品种									
	YLY	HFY	LWLY	NY51	NY6388	NY6618	RHY	SLY	WY	ZXYNZ
300 粒清种时间/s	0.7	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8
300 粒净种率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
400 粒清种时间/s	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
400 粒净种率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
500 粒清种时间/s	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0
500 粒净种率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100


(a) 田间播种试验过程　(b) 数据统计

图 19　田间播种试验

Fig. 19　Field seeding trial

料参数，以及图 9 所示的各品类稻种轮廓形态，可以进一步阐明不同品类稻种出现播种性能差异的成因。从稻种轮廓特征看，绝大多数稻种在几何形态上均存在长轴与宽轴方向的明显差异，且沿长轴方向的摩擦角显著高于宽轴，这表明排种过程中，稻种更倾向于沿长轴方向稳定吸附于排种盘的充种孔内，从而形成较稳定的充填姿态。然而，在水田环境下作业时，机具与水田土壤接触频繁，极易产生连续的机械振动[34]，这种振动干扰了种子与负压吸孔之间的吸附与携种状态，进而影响了播种装置整体的运行稳定性。进一步分析可知，LWLY 和 ZXYNZ 两类稻种的粒型呈现出明显的细长特征，即长宽比相

表 5　田间播种性能试验结果

Tab. 5　Performance evaluation in field seeding trials　%

指标	品种									
	YLY	HFY	LWLY	NY51	NY6388	NY6618	RHY	SLY	WY	ZXYNZ
漏播率	3.3	6.7	13.3	10	3.3	10	0	10	10	10
合格率	96.7	93.3	86.7	90	96.7	90	93.3	90	90	80
重播率	0	0	0	0	0	0	6.7	0	0	10

对较高,其长轴与负压吸孔之间的有效接触面积在水田振动环境下更难维持稳定状态;使得充种、携种过程中,细长粒型的种子与排种盘负压吸孔的有效接触面积低于其余品类稻种,更易因接触面积减小引发充种不充分、携种不稳定等问题,最终出现播种合格率与重播率下降、漏播率升高等情况。另一方面,YLY 与 RHY 稻种的轮廓形态呈现出“月牙状”特征,在充种时更易与吸孔边界沿长轴方向形成嵌合为“机械锁定”的稳定姿态,在负压吸附力的共同作用下,不易自排种盘吸孔脱落,种子的充填稳定性与携种可靠性增加;尤其是在水田振动扰动的作业工况下,此类“机械锁定”有助于抑制因振动引起的吸孔内种子滑移和携种失败状态,因而这两类稻种的播种质量在田间与室内对比中变动幅度较小。

此外,其余稻种虽然在粒型上未表现出明显的细长或月牙状特征,但也受到其自身几何参数、表面摩擦特性以及振动环境影响的共同作用,导致在田间作业条件下出现播种合格率与重播率略微下降、漏播率略有上升的情况,但整体变化幅度较低。以上结果充分表明,稻种几何特性、排种盘结构与田间作业环境之间存在复杂的相互作用关系,稻种的粒型、摩擦特性、负压吸孔结构的匹配程度以及机械振动水平均会显著影响排种系统的充种质量与播种稳定性。因此,下一步研究将围绕水稻粒型差异与田间振动环境的耦合影响,对排种装置整体结构进行进一步优化,为提升水稻小区育种精量排种装置的田间作业适应性提供理论依据与设计指导。

5 结论

(1)结合水稻小区育种作业需频繁换种、精准供种、精量播种和快速清种的技术要求,设计了一种水稻小区育种播种机精量排种装置;该装置可实现“清种 + 排种 + 换种”全流程不停机作业。

(2)提出了供种盒独立分区、二维码信息精准定位的换种策略,研制了以 STM32 单片机为控制核心,电机与舵机为执行元件,集成 GM65 识读模块精准定位的主动换种机构和自动清种机构;清换种试验结果表明,换种机构单次换种作业最大耗时 2.05 s,清种机构单次作业最大耗时 1.0 s,清种效率达 100%,满足水稻小区育种快速清换种和防止混种的作业需求。

(3)基于 Matlab 图像处理功能,优化了一种与稻种外观轮廓高度贴合的卧式浅盆型排种盘,以 10 类稻种为试验对象,排种盘转速、工作负压为试验因素,漏播率、合格率和重播率为试验指标,进行排种性能台架试验和田间试验,结果表明:当机具作业速度为 0.72 m/s 时,排种装置播种性能最佳;室内台架试验各品种播种合格率均超过 90%,漏播率与重播率均低于 5%;田间试验结果显示,排种装置对各品类稻种的平均穴距合格率超过 90%,满足水稻小区育种精量播种的农艺需求。

参 考 文 献

[1] 严如玉, 甘国渝, 赵希梅, 等. 我国水稻优势产区生产格局及施肥现状研究[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 1 - 8.
YAN Ruyu, GAN Guoyu, ZHAO Ximei, et al. Study on the production pattern and fertilization status of rice dominant production areas in China[J]. China Rice, 2023, 29(3): 1 - 8. (in Chinese)

[2] 林明明, 刘小玲, 林杏. 我国水稻生产现状及发展趋势[J]. 农业科学, 2023, 13(6): 562 - 567.
LIN Mingming, LIU Xiaoling, LIN Xing. Status and development trend of rice production in China[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2023, 13(6): 562 - 567. (in Chinese)

[3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[4] FAO. World Food and Agriculture-Statistical Yearbook 2023[EB/OL]. [2025 - 06 - 20]. https://doi.org/10.4060/cc8166en.

[5] 刘秀丽, 相鑫, 秦明慧, 等. 中长期粮食需求预测研究综述与展望[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(6): 1490 - 1502.
LIU Xiuli, XIANG Xin, QIN Minghui, et al. A review and prospect on the medium and long-term forecasting of grain demand [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2022, 42(6): 1490 - 1502. (in Chinese)

[6] 辛良杰, 王佳月, 王立新. 基于居民膳食结构演变的中国粮食需求量研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1347 - 1356.
XIN Liangjie, WANG Jiayue, WANG Lixin. Prospect of per capita grain demand driven by dietary structure change in China [J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1347 - 1356. (in Chinese)

[7] 杨薇, 王飞, 赫志飞, 等. 小区育种机械发展现状及展望[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 7 - 9, 56.
YANG Wei, WANG Fei, HE Zhifei, et al. Development present situation and prospect of plot breeding machinery[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(6): 7 - 9, 56. (in Chinese)

[8] 尚书旗, 吴秀丰, 杨然兵, 等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 1 - 20.
SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 1 - 20. (in Chinese)

[9] YUAN Longping. Progress in super-hybrid rice breeding[J]. The Crop Journal, 2017, 5(2): 100 - 102.

[10] 王绪国, 何思禹, 秦伟, 等. 水稻小区育种气吸式精量排种器研制[J]. 农机化研究, 2025, 47(6): 72 - 77.

WANG Xuguo, HE Siyu, QIN Wei, et al. Development of air-suction precision seed metering device for rice community breeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(6): 72 - 77. (in Chinese)

[11] Wintersteiger. Precision spaced planters by WINTERSTEIGER for your planting[EB/OL]. (2024 - 04 - 05) [2025 - 06 - 20]. https://www.wintersteiger.com/seedmech/en/products/sowing-machines-tool-carriers/precision-spaced-planters.

[12] Haldrup. Haldrup SR - 30[EB/OL]. (2025 - 01 - 07) [2025 - 06 - 20]. https://en.haldrup.net/haldrup-products/haldrup-seeders/haldrup-sr-30/.

[13] Almaco. Power Plant Automated Planting System[EB/OL]. (2023 - 10 - 25) [2025 - 06 - 20]. https://www.almaco.com/equipment/planting- systems/row-crop-planting-systems/powerplant-automated-planting-system/.

[14] Baural. High-tech machines for agronomic research and seed production[EB/OL]. (2025 - 03 - 21) [2025 - 06 - 20]. https://baural.fr/en/ produit/micro-plot- precision-seed-drills-on-pneumatic-kuhn-base/.

[15] Zurn. ZÜRN D96[EB/OL]. (2025 - 06 - 20) [2025 - 07 - 05]. https://zuern-harvesting.de/feldversuchstechnik/zuern-d96/.

[16] 陈海涛, 王洪飞, 王业成, 等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 75 - 85.
CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 75 - 85. (in Chinese)

[17] 顿国强, 毛宁, 刘文辉, 等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 70 - 78.
DUN Guoqiang, MAO Ning, LIU Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for soybean plot breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 70 - 78. (in Chinese)

[18] 顿国强, 刘文辉, 毛宁, 等. 交替换岗式大豆小区育种排种器优化设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(1): 285 - 296.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, MAO Ning, et al. Optimization design and experiment of alternate post changing seed metering device for soybean plot breeding[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 285 - 296. (in Chinese)

[19] 郝建军, 秦家辉, 杨淑华, 等. 勺夹式花生小区单粒精量播种单体设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 33 - 41.
HAO Jianjun, QIN Jiahui, YANG Shuhua, et al. Design and experiments of a precision sowing unit with the spoon clip for single peanut seed planting in plot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(3): 33 - 41. (in Chinese)

[20] 谢建华, 张洪梁, 冯浩, 等. 摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 164 - 173.
XIE Jianhua, ZHANG Hongliang, FENG Hao, et al. Design and experiment of friction adjustable precision seed feeder device for wheat experimental sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 164 - 173. (in Chinese)

[21] 杨薇, 方宪法, 李建东, 等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 64 - 73.
YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64 - 73. (in Chinese)

[22] ROBERTO E T, ROSSANA M C A, ERWIN P Q, et al. Development of a single-row push type plot seeder with mechatronic seed feeding device for corn (*Zea mays* L.) field breeding experiment[C]// The 5th International Conference on Agriculture, Environment, and Food Security, Jember, Indonesia, 2022.

[23] DENG Shidong, FENG Yamei, CHENG Xiupei, et al. Disturbance analysis and seeding performance evaluation of a pneumatic-seed spoon interactive precision maize seed-metering device for plot planting[J]. Biosystems Engineering, 2024, 247: 221 - 240.

[24] 常学良, 尚书旗, 何晓宁, 等. 花生小区育种精密播种机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 121 - 126.
CHANG Xueliang, SHANG Shuqi, HE Xiaoning, et al. Design and test of precision planter for peanut community breeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(7): 121 - 126. (in Chinese)

[25] MA Xinchun, GONG Qixiang, WANG Qingjie, et al. Design of anair suction wheel-hole single seed drill for a wheat plot dibbler[J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(10): 1735

[26] LIU Dequan, MA Junwei, QIAO Xindan, et al. The design of and experiments with a double-row seed-metering device for buckwheat breeding in an experimental area[J]. Agronomy-Basel, 2023, 13(2): 2857.

[27] 廖庆喜, 罗湛程, 杨恒, 等. 基于 RTK 测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 65 - 74.
LIAO Qingxi, LUO Zhancheng, YANG Heng, et al. Variable-rate seeding control system based on RTK speed measurement for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 65 - 74. (in Chinese)

[28] DING Youqiang, YANG Li, HE Xiantao, et al. Development and performance evaluation of an automatic section control

system for corn precision planters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107670.
[29] 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)
[30] WANG Haoyu, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Comparative investigation and evaluation of electric-drive seed-metering systems across diverse speed ranges for enhanced high-precision seeding applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 108976.
[31] 邓伟健, 李志伟, 邱秀丽, 等. 基于交叉导流式种箱的稻种流动性及结拱研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 145 - 149, 154.
DENG Weijian, LI Zhiwei, QIU Xiuli, et al. The research of rice liquidity and arching based on crossed diversion seed-box [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 145 - 149, 154. (in Chinese)
[32] QIAN Cheng, QIN Wei, JIANG Youcong, et al. Parameter optimization and experiment of the vacuum seed meter with double holes for direct seeding of rice[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(2): 89 - 99.
[33] QIAN Cheng, FAN Zhuorong, YAN Daoqing, et al. Numerical simulation of dry and wet rice seeds in an air-suction seed metering device[J]. Agronomy-Basel, 2025, 15: 1145.
[34] 苏森. 水田轻型动力底盘行走轮与土壤力学测试装置研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021.
SU Miao. Research on walking wheel and soil mechanics testing device of light power chassis in paddy field[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. (in Chinese)

(上接第 61 页)

[18] 杨程. 稻田气力式追肥机变量施肥控制系统的研究[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
YANG Cheng, Study on variable rate fertilization control system of pneumatic[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[19] 张季琴,刘刚,胡号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 38 - 45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38 - 45. (in Chinese)
[20] ZHANG Yaohui, ZHANG Kailiang, YU Yang, et al. Design of maize variable fertilization condition and fault warning system [Z]. St. Joseph, MI: ASABE, 20191.
[21] Fendt. Leaders Drive Fendt[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.agcocorp.com/int/en/home/brands-and-solutions/fendt/.
[22] Fendt. Machine control with FendtONE[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.fendt.com/int/smart-farming/machine-control.
[23] Precision Planting. 20|20 Display Monitors[EB/OL]. [2025 - 06 - 27]. https://www.precisionplanting.com/products/planters/2020.
[24] 杨帆. 变量施肥肥量检测与调控系统研究与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2024.
YANG Fan. Research and experiment on detection and control system of variable fertilization[D]. Beijing: China Agricultural University,2024. (in Chinese)
[25] LI Xiukui, QI Yunchi. Multi-antenna and geometry-based differential GNSS positioning for vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 3389 - 3401.
[26] XIAO Liang, HUANG Zhigang, QIN Honglei. Differential positioning based on the orthogonal transformation algorithm with GNSS multi-system[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 89.
[27] JIANG Xudong. Ierative truncated arithmetic mean filter and its properties[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1537 - 1547.
[28] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters—Part I: design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 318 - 327.
[29] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters—Part II: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 309 - 317.
[30] 刘刚,胡号,黄家运,等. 变量施肥滞后时间检测与位置修正方法研究[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):74 - 80.
LIU Gang, HU Hao, HUANG Jiayun, et al. Lag time detection and position correction method of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):74 - 80. (in Chinese)
[31] 兰红,杨玮,李民赞,等. 基于 ArcGIS Engine 的土壤氮肥空间分布成图系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 221 - 227.
LAN Hong, YANG Wei, LI Minzan, et al. Soil nitrogen spatial distribution mapping system based on arcgis engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):221 - 227. (in Chinese)
[32] 丁友强,刘彦伟,杨丽,等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 33 - 41, 62.
DING Youqiang, LIU Yanwei, YANG Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on android and CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):33 - 41,62. (in Chinese)