

小麦小区条播机电控排种系统设计与试验

俞传阳^{1,2} 陈 状¹ 陈黎卿¹

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 合肥 230601)

摘要: 针对小麦小区条播机排种系统智能化水平低的问题,本文基于差分定位原理设计了一套小麦小区条播机电控排种系统。该系统主要由北斗差分定位系统、STM32F4 主控系统、锥体格盘驱动系统、离心分种驱动系统和人机交互系统等组成,主控系统采集北斗差分定位信息计算锥体格盘匹配转速,控制格盘电机和分种电机运转,并显示作业信息。通过正交试验法优选了离心分种器结构参数,建立了播种机车速和锥体格盘转速控制模型。试验结果表明:各行排量一致性变异系数为 5.69%,均匀性变异系数为 20.77%,验证了本电控排种系统的可行性。

关键词: 小麦小区条播机; 电控系统; 离心分种; 差分定位

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0075-09 OSID: 

Design and Test of Electronic Control Seeding System for Wheat Plot Drill

YU Chuanyang^{1,2} CHEN Zhuang¹ CHEN Liqing¹

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

2. School of Mechanical and Eletrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the problem of low intelligent level of wheat plot seeding system, a wheat plot seeding system was developed based on the principle of differential positioning. The system mainly consisted of Beidou differential positioning system, main controlsystem based on STM32F4, cone grid disk drive system, centrifugal seed dispenser drive system and human-computer interaction system, etc. The main control system collected the Beidou differential positioning information to calculate the matching speed of the cone grid, then controled the grid motor and seed motor to run, and displayed the operation information. The centrifugal seed dispenser structure parameters were optimized by orthogonal test method, and the control model of plot drill speed and cone grid disk speed was established. The test results showed that the coefficient of variation of consistency of each row was 5.69% and the coefficient of variation of uniformity was 20.77%, which verified the feasibility of this electronically controlled seed dispersal system and provided reference for further design of precision plot seeders.

Key words: wheat plot drill seeder; electronic control system; centrifugal seeding device; RTK

0 引言

小麦作为我国种植面积最大的作物,其品种选育是关系品质的重要因素。小麦小区播种是品种选育的一个重要环节,田间育种试验是进行品种改良和繁育良种的小面积试验,实现育种试验机械化能够提高育种试验准确性、提高工作效率、减轻劳动强度^[1]。小区播种机作为田间育种试验的专用播种机械,能够将定量的种子按照农艺要求播入一定范

围的小区内^[2-4]。小区条播机作为小区播种机械主要机型之一,通过人工供种、锥体充种、格盘运种、排种口排种、离心分种器分种等完成一个小区的播种^[5]。离心式排种系统工作性能直接影响到小区播种机播种性能。为了提高排种性能,国内外者进行了大量研究^[6-11],WAEL^[12]以小麦、扁豆和亚麻为试验对象,研究了3种作物分别在对称式离心分种器和对称分隔式离心分种器下的播种效果,结果表明对称式离心分种器对于3种作物的分种效果均

收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-05-22
基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2020-011)和安徽省高校合作协同攻关项目(GXXT-2019-036)
作者简介: 俞传阳(1988—),男,博士生,安徽建筑大学讲师,主要从事农机智能化研究,E-mail: chuanyang524@163.com
通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

高于对称分隔式;程修沛等^[13]以离心分种器的转动速度、离心分种器的分种面夹角和离心分种器分种距离为试验因素进行分析,确定了各因素对分种均匀性的影响规律;龚丽农等^[14]为了提高小区播种机的工作精度和工作效率设计了小区播种机电控系统,并通过试验分析了播种不同种子时分配器的最佳转速;程修沛等^[15]为了提高小区播种机的自动化水平,基于 STM32 设计了小区播种机排种控制系统,采用 Android 终端进行人机交互,实现了小区排种作业的精准控制。以上成果为小区播种机性能提升奠定了一定基础,然而,现有小麦小区条播机电控排种系统结构不合理、车速与锥体格盘速度匹配不理想等对小麦播种均匀性一致性影响研究尚不足,制约了小麦小区条播机的进一步推广应用。

本文设计基于 ARM 的小麦小区播种机电控排种系统,采用串口屏作为人机交互,设计北斗导航设备定位信息解析、步进电机驱动锥体格盘、直流无刷电机驱动分种器的控制接口,形成提高小麦小区播种机排种性能的成套电控系统。

1 小区播种机电控排种系统工作原理

小麦小区条播机主要由底盘、发动机、开沟器、离心分种装置、锥体格盘、格盘电机、减速器、控制箱、人机交互屏、北斗差分定位系统等组成,整机构成如图 1 所示。

作业时,控制箱采集北斗差分定位信息,计算锥体格盘匹配转速,控制格盘电机和分种电机运转,小麦种子经种管落入开沟并被覆土。

小麦小区条播机控制系统如图 2 所示。整个控制系统主要分为信号采集系统、人机交互系统、执行机构 3 部分。信号采集系统主要包括北斗差分定位系统和 STM32F4 串口通信模块,其中北斗差分定位

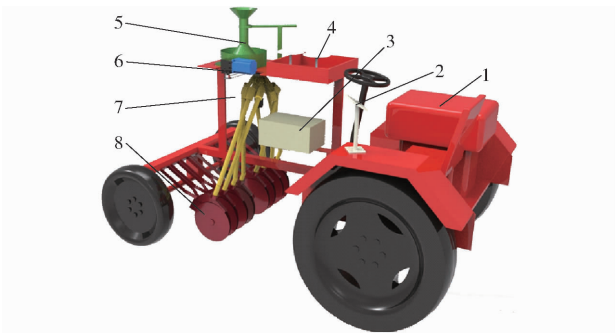


图 1 小区播种机整机效果图

Fig. 1 Render of whole plot planter

1. 发动机 2. 人机交互屏 3. 控制箱 4. 北斗天线 5. 锥体格盘 6. 格盘电机及减速器 7. 离心分种装置 8. 开沟器

系统由移动站和基站两部分组成,工作时,基站置于空旷无遮挡高处,移动站置于播种机中间位置随播种机运动,移动站将报文数据发送到控制器,解析得到小区播种机速度信息;人机交互系统主要设置小区长度和将离心分种器转速发送到控制器,同时实时显示小区播种机的作业信息;执行机构主要包括步进电机和永磁无刷直流电机(以下简称 BLDC),步进电机通过小区播种机速度信息控制锥体格盘转动,BLDC 通过控制器指令保持一定的转速控制离心分种器转动。

2 离心分种装置设计

2.1 工作原理

排种装置整体结构如图 3a 所示,主要由锥体格盘、格盘电机、减速器、链传动和离心分种装置组成。其中,离心分种装置由落种漏斗、离心分种器、八行分种管、联轴器、BLDC 组成,BLDC 轴与联轴器相连,联轴器另一端与离心分种器轴相连,由 BLDC 控制离心分种器的转速。工作时,预先设定 BLDC 转速,当锥体格盘转动时,种子从锥体格盘落种口落

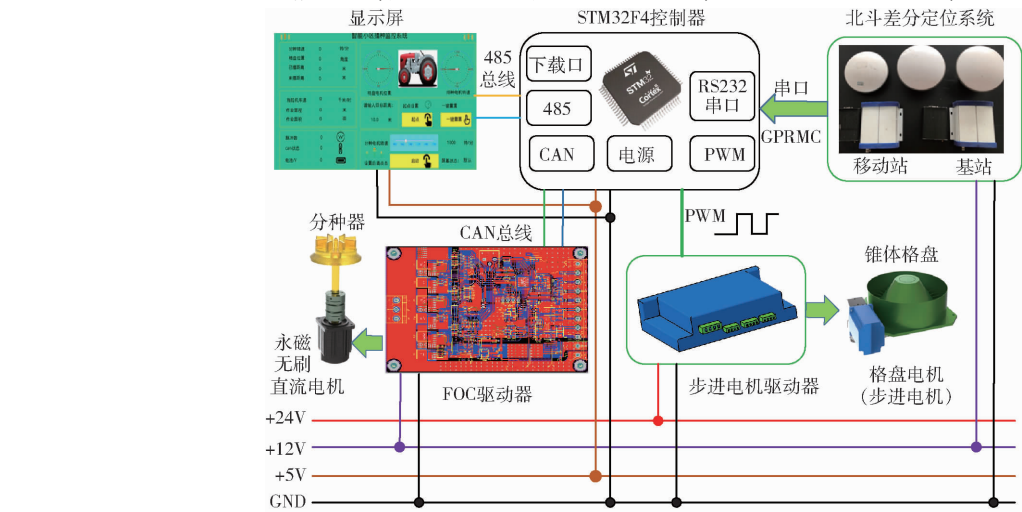


图 2 小区播种机控制系统框图

Fig. 2 Structure diagram of control system of plot planter

下,通过落种漏斗落到离心分种器表面,离心分种器高速旋转,种子在离心力作用下均匀分配为 8 行。分配头与导种管相连,完成排种工作。

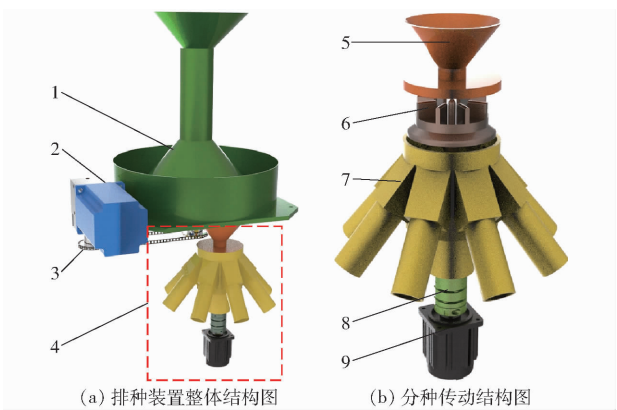


图 3 排种装置结构示意图

Fig.3 Diagrams of seed discharge device

1. 锥体格盘 2. 格盘电机及减速器 3. 链传动 4. 离心分种装置 5. 落料漏斗 6. 分种器 7. 分种管 8. 联轴器 9. BLDC

2.2 结构设计

小麦从落种漏斗落到离心分种器上,到小麦被离心力甩出离心分种器,可能会出现两种运动情况:还未与离心分种器凸台碰撞就已经甩出离心分种器;与离心分种器凸台产生碰撞之后弹出离心分种器。假设小麦未与离心分种器凸台碰撞就已经甩出,则小麦受力分析如图 4 所示。

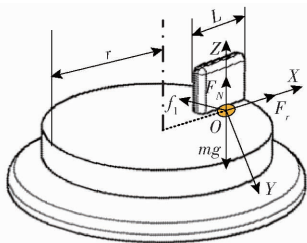


图 4 小麦未碰撞时运动分析

Fig.4 Motion analysis of wheat without collision

其中,小麦主要受力有离心力 $F_r(N)$ 、离心分种器水平面支持力 $F_N(N)$ 、自身重力 $mg(N)$ 、小麦滑动时水平面摩擦力 $f_1(N)$ 、凸台长度为 $L(m)$ 。在离心力 X 方向上,受力方程为

$$F_x = F_r - f_1 \cos \theta = m \frac{v^2}{r} - \mu mg \cos \theta = m \omega^2 r - \mu mg \cos \theta \quad (1)$$

式中 m ——小麦质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 v ——离心分种器线速度, m/s
 ω ——角速度, rad/s
 μ ——离心分种器水平面摩擦因数
 θ ——小麦滑动时水平面摩擦力 f_1 与 X 轴负方向夹角

r ——离心分种器半径,m

则
$$r = \frac{1}{2}(\omega^2 r - \mu g \cos \theta) t^2 \quad (2)$$

可得
$$t = \sqrt{\frac{2r}{\omega^2 r - \mu g \cos \theta}} \quad (3)$$

经分析可得

$$\sqrt{\frac{2}{\omega^2}} < t < \sqrt{\frac{2r}{\omega^2 r - \mu g}} \quad (4)$$

离心分种器旋转一圈所需时间

$$t_1 = \frac{60}{n} \quad (5)$$

式中 n ——离心分种器转速, r/min

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (6)$$

联立可得

$$t_1 > \sqrt{\frac{2}{\omega^2}} \quad (7)$$

所以存在小麦未与离心分种器凸台碰撞就直接甩出离心分种器的情况。假设有 k 个凸台,那么当离心分种器旋转时,相邻的两个凸台经过同一点的时间间隔为

$$t_2 = \frac{60}{kn} \quad (8)$$

而凸台长度 L 必须满足

$$L < r \quad (9)$$

因为小麦种子从离心分种器中心的正上方落下,如果凸台长度过大,小麦种子将会直接落到凸台上方,影响分种效果。在满足凸台长度 L 小于半径 r 的条件下,当离心分种器转速和凸台个数不变时,凸台长度越大,离心分种器凸台与小麦种子产生碰撞的几率就越大。

由此,得出离心分种器转速、凸台个数和凸台长度对分种效果存在一定影响,通过离散元进一步分析。

3 电控排种驱动控制系统设计

3.1 控制器

控制系统硬件主要由 STM32F405RG 最小核心模块、电源模块、按键模块、LED 状态指示模块、串口屏模块、步进电机驱动模块、CAN 总线模块和北斗差分定位系统串口通信模块等组成。控制器采集北斗差分定位系统输出的 GPRMC 报文进行解析,得到小区播种机的速度及位置信息,进而匹配锥体格盘转速。人机交互系统能够完成小区播种实时运行状态参数显示,如当前小区播种机前进速度、锥体格盘转过角度、小区播种机前进距离等参数,并且可以在小区播种机作业前设置小区长度、离心分种器的转速,向控制器发送开始指令。

3.2 锥体格盘与离心分种控制系统设计

锥体格盘驱动系统硬件主要由锥体格盘部件、步进电机、步进电机驱动器以及控制器接口电路等组成。选用 86HBM80H 型闭环步进电机,支持 DC/AC 24 ~ 75V,配有广州雷赛公司的 HBS86H 数字式混合伺服驱动器,细分选项达 16 种组合,最大为 51 200 p/r。控制器电平为 3.3 V,步进电机驱动器标准控制信号为 5 ~ 24 V,控制器 PWM 脉冲控制引脚(PA5)与驱动器间增设高速电平转换模块 TXS0108E,形成 5 V 可调频率 PWM 驱动信号。由电机频率转速关系可得

$$n_0 = \frac{60f}{Ni} \tag{10}$$

式中 n_0 ——锥体格盘转速, r/min
 f ——PWM 频率, Hz
 N ——步进电机驱动器一圈脉冲数
 i ——与格盘电机连接的减速器减速比
由 STM32F405RG 中 PWM 频率设置关系可得

$$f = \frac{N_T}{(N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)} \tag{11}$$

式中 N_T ——定时器时钟频率, Hz
 N_{psc} ——预分频系数
 N_{arr} ——寄存器自动重装载值

可得锥体格盘转速和 PWM 控制频率关系为

$$n_0 = \frac{60N_T}{Ni(N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)} \tag{12}$$

试验中,采用 STM32F405RG 的 TIM8 定时器,时钟源 N_T 为 168 MHz,自动重装载值 N_{arr} 为 336,与格盘电机连接的减速器速比 i 为 40,步进电机驱动器一圈脉冲数 N 设置为 10 000。联立式(10) ~ (12)可得

$$n_0 = \frac{75}{N_{psc} + 1} \tag{13}$$

STM32F405RG 芯片定时器时钟经 8 分频后,预分频系数 N_{psc} 取值范围为 0 ~ 65 535,则锥体格盘转速 n_0 取值范围为 0 ~ 75 r/min。经上述理论分析可得出目标转速 n_0 和定时器预分频系数 N_{psc} 关系,但不能直接用于被控对象,其回归特性多采用实测方法得到。以 0.50 r/min 为等间距、以 0.50 r/min 为起始目标转速进行 12 组试验,通过编码器测量锥体格盘实际转速,编码器安装图如图 5 所示。

考虑单片机实际工作性能,目标转速和实际转速关系不宜采用高阶多项式拟合,因此本文采用一阶拟合曲线得到目标转速 n_0 和实际转速 n 的函数关系

$$n = 1.79n_0 - 0.36 \tag{14}$$



图 5 编码器安装图

Fig.5 Encoder installation drawing

由小区条播机的作业要求可知,小区条播机在规定长度区域行走所需时间应与锥体格盘转动一圈时间一致,即满足

$$t = \frac{L}{v_t} = \frac{60}{n} = \frac{L}{0.51v_d} \tag{15}$$

式中 v_t ——小区条播机行走速度, m/s
 v_d ——北斗移动站输出含速度信息的 GPRMC 报文解析以节为单位的小区条播机行走速度, kn

本文采用北斗星通高精度差分定位技术模块 UB480 和 UB482,分别作为基站和移动站,可以实现相对精度达 2 cm 左右的定位准度,通过实测 5 m 和 10 m,分别试验 3 组,平均解析值为 498.63 cm 和 997.98 cm,误差都在 2 cm 左右,定位精度满足系统要求。由于北斗移动站存在静态下定位漂移的现象,采用 Mean-Shift 聚类算法分析静态下 340 个速度样本数据,得到聚类中心数为 22 个,速度漂移范围在 0.006 ~ 0.28 km/h 之间,对聚类中心的速度取均值 0.06 km/h,因此在实际控制中需减去静态速度误差均值,如图 6 所示。

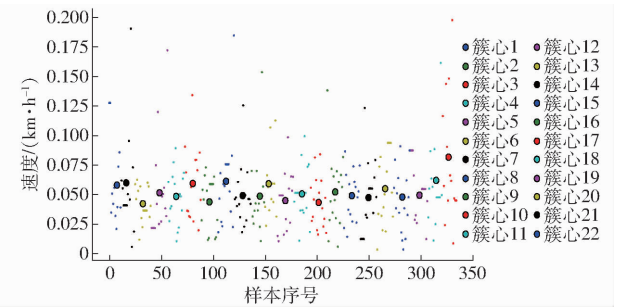


图 6 移动站漂移数据

Fig.6 Mobile station drift data

得出目标预分频系数 N_{psc} 和小区条播机行走速度之间的函数关系

$$N_{psc} = \frac{134.15L}{30.87v_d + 0.36L - 0.51} - 1 \tag{16}$$

BLDC 采用 57BL75S10-230TF9 型永磁无刷直流电机,DC 12 V 供电,额定功率 100 W;匹配自制矢量控制器,实现 500 ~ 2 000 r/min 无级调速,与控制

器通过 CAN 总线通信,波特率为 500 kbit/s。CAN 通信协议如表 1 所示。

表 1 CAN 通信协议

Tab. 1 Statistics of CAN communication protocol				
功能	帧 ID	D0	D1	D2
电机启停	0x2000	0:停止	转速	低字节
		1:启动	高字节	
转速调节	0x2001	高字节	低字节	
转速回传	0x2002	高字节	低字节	

离心分种转速调控对小麦播种性能有一定影响,文献[15]采用占空比控制 BLDC 驱动器,得出占空比和分种转速拟合函数关系。本文在此基础上,采用带有矢量控制算法(简称“FOC”)的 BLDC 驱动器对分种目标转速分别为 1 000、1 200 r/min 进行测试。如图 7 所示,采用 FOC 驱动器控制电机转速波动均小于 4 r/min,以此保证分种转速稳定性。

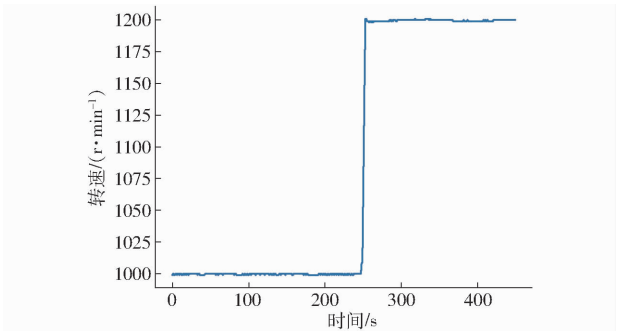


图 7 电机转速响应曲线

Fig. 7 Motor speed response curve

3.3 软件设计

控制系统软件以 MDK5 作为开发平台,采用 C 语言进行编程,控制流程如图 8 所示。

控制系统软件核心在于解析北斗移动站报文对锥体格盘转角实时控制。移动站输出报文带有经纬度和速度信息的字符串,遵循 NMEA - 0183 协议标准。北斗移动站每秒输出近 1 KB ASC II 字符数据到控制器串口,采用 DMA 方式绕过 CPU 而将数据直接由串口寄存器搬运到内存数组,降低了 CPU 占有率;利用环形数组对北斗数据进行缓存,并周期性调用解析函数,保证了数据不丢帧;对环形缓冲区数据采用有限状态机法解析出一帧完整 GPRMC 数据帧,基于 NMEA - 0183 的 C 开源库实现解析 GPRMC 帧,得到时速信息。

4 排种系统性能仿真

4.1 仿真模型建立

通过 CATIA 软件建立离心分种机构三维模型,将三维模型保存为 igs 格式,三维模型导入 EDEM 离散元仿真软件中,在落种漏斗正上方建立颗粒工

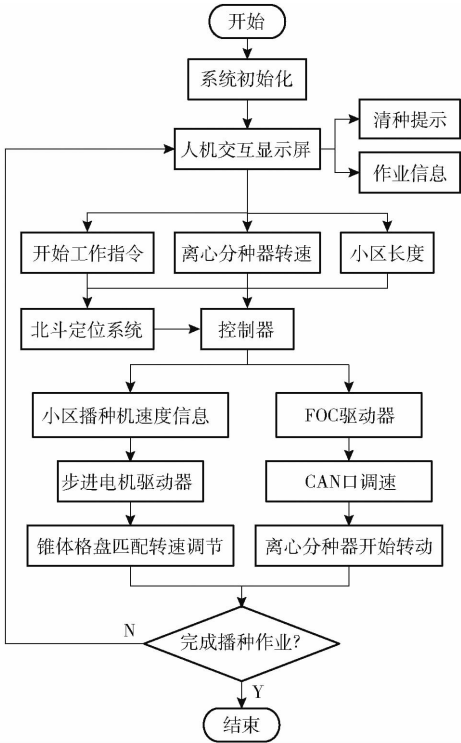


图 8 控制系统流程图

Fig. 8 Flow chart of control system

厂,模拟锥体格盘机构的落种过程。

试验选用小麦品种为济麦 22,在小麦种子中随机选取 1 000 粒测量其质量,再随机选取 100 粒小麦种子测量其长、宽、高,分别测试 3 组,结果如表 2 所示。

表 2 小麦种子千粒质量和外形尺寸统计

Tab. 2 Wheat seed 1 000 grain weight and size statistics

组别	千粒质量/	平均长度/	平均宽度/	平均厚度/
	g	mm	mm	mm
1	45. 2	6. 29	3. 41	3. 12
2	43. 8	6. 39	3. 38	3. 16
3	44. 8	6. 37	3. 32	3. 08
平均值	44. 6	6. 35	3. 37	3. 12
标准差	0. 72	0. 05	0. 05	0. 04

根据 3 组平均值对济麦 22 种子进行 CATIA 三维建模,保存为 igs 格式,将小麦颗粒模型导入 EDEM 离散元仿真软件中,进行颗粒填充,填充后的小麦颗粒模型如图 9 所示。

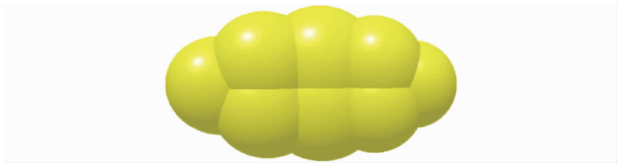


图 9 小麦颗粒离散元模型

Fig. 9 Discrete element model of wheat grain

离心分种器的材质为树脂,相关参数如表 3 所示^[16-19]。

表 3 仿真参数
Tab.3 Simulation parameters

参数	数值
小麦泊松比	0.29
小麦剪切模量/Pa	5.01×10^8
小麦密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 350.00
树脂泊松比	0.39
树脂剪切模量/Pa	7.19×10^8
树脂密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 240
小麦-小麦恢复系数	0.50
小麦-小麦静摩擦因数	0.58
小麦-小麦动摩擦因数	0.08
小麦-树脂恢复系数	0.60
小麦-树脂静摩擦因数	0.50
小麦-树脂动摩擦因数	0.01

4.2 试验方案设计

选取凸台数、离心分种器转速、凸台长度为试验因素,采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,以变异系数为评价指标。参考小麦条播机排量^[20],拟定小麦播种量为 150 kg/hm^2 ,设计播种量为 2 000 粒,生成速度为 200 粒/s,进行正交试验。根据前期单因素试验的结果,选择离心分种器转速范围为 1 000 ~ 1 400 r/min,凸台长度范围为 10 ~ 22 mm,凸台数范围为 2 ~ 10 个。试验因素编码如表 4 所示。

表 4 正交试验因素编码
Tab.4 Orthogonal test factors and codes

编码	因素		
	凸台数 n /	离心分种器转速	凸台长度 L /
	个	$k/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	mm
1.682	10	1 400	22
1	8	1 319	20
0	6	1 200	16
-1	4	1 081	12
-1.682	2	1 000	10

因为凸台数为整数,且为了方便进行试验,对各因素进行取整。当仿真模拟播种过程完成后,进入 Analyst Tree 界面,为统计经过各个分配头的小麦籽粒数量,在八行分配头的各个分配口处生成 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的栅格组,如图 10 所示,以

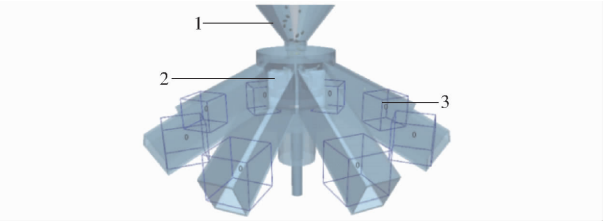


图 10 小麦籽粒统计仿真

Fig.10 Statistical simulation of wheat grain

1. 小麦籽粒 2. 离心分种器 3. 栅格组

此来统计各个分配头排出的小麦籽粒数量。

4.3 仿真结果分析

每一组仿真试验结束后,统计各个分配头的小麦种子数,计算变异系数,结果如表 5 所示。

表 5 正交试验结果
Tab.5 Statistics of coefficient of variation of orthogonal test

编号	因素			变异系数/%
	凸台数/ 个	离心分种器转 速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	凸台长 度/mm	
1	4	1 081	12	6.62
2	8	1 081	12	5.99
3	4	1 319	12	6.79
4	8	1 319	12	3.69
5	4	1 081	20	6.24
6	8	1 081	20	5.83
7	4	1 319	20	5.20
8	8	1 319	20	3.56
9	2	1 200	16	7.22
10	10	1 200	16	6.44
11	6	1 000	16	6.23
12	6	1 400	16	5.10
13	6	1 200	10	5.66
14	6	1 200	22	3.77
15	6	1 200	16	2.85
16	6	1 200	16	4.42
17	6	1 200	16	3.82
18	6	1 200	16	3.59
19	6	1 200	16	3.03
20	6	1 200	16	4.17
21	6	1 200	16	3.62
22	6	1 200	16	3.24
23	6	1 200	16	4.02

方差分析如表 6 所示,变异系数回归模型 F 高度显著($P<0.01$),检验水平 $P=0.2859>0.05$,回

表 6 变异系数方差分析
Tab.6 Analysis of variance coefficient of variation

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	37.22	9	4.14	12.41	<0.001
n	3.37	1	3.37	10.10	0.0073
k	3.95	1	3.95	11.84	0.0044
L	2.08	1	2.08	6.23	0.0268
nk	1.71	1	1.71	5.13	0.0412
nL	0.35	1	0.35	1.06	0.3223
kL	0.17	1	0.17	0.52	0.4827
n^2	17.59	1	17.59	52.76	<0.001
k^2	7.46	1	7.46	22.37	0.0004
L^2	2.11	1	2.11	6.34	0.0257
残差	4.33	13	0.33		
失拟	2.11	5	0.42	1.52	0.2859
误差	2.23	8	0.28		
总和	41.55	22			

归方程不失拟。由表 6 可得,各试验因素对变异系数的影响从大到小分别为离心分种器转速、凸台数、凸台长度。变异系数 Y_1 回归响应面方程为

$$Y_1 = 3.64 - 0.92A - 0.90B - 0.61C - 1.55AB + 0.63AC - 0.37BC + 3.13A^2 + 1.94B^2 + 0.97C^2$$

(17)

式中 $A、B、C$ ——凸台数、离心分种器转速、凸台长度编码值

根据分析结果,利用 Design-Expert 8.0 软件绘制各因素交互效应响应曲面图,图 11a 为凸台数与离心分种器转速对变异系数影响的响应曲面,当凸台数不变时,随着离心分种器转速的增大,变异系数

先减小后增大,当离心分种器转速不变时,随着凸台数的增加,变异系数先减小后增大;图 11b 为凸台数和凸台长度对变异系数影响的响应曲面,当凸台数不变时,随着凸台长度的增加,变异系数先减小后增加,当凸台长度不变时,随着凸台数的增加,变异系数先减小后增加;图 11c 为离心分种器转速与凸台长度对变异系数影响的响应曲面,当凸台长度不变时,当离心分种器转速逐渐增大时,变异系数先减小后增大,当离心分种器转速不变时,随着凸台长度的不断增大,变异系数先减小后增大。综合分析可得,较优的参数组合为:凸台数为 6、离心分种器转速为 1 200 r/min、凸台长度为 16 mm。

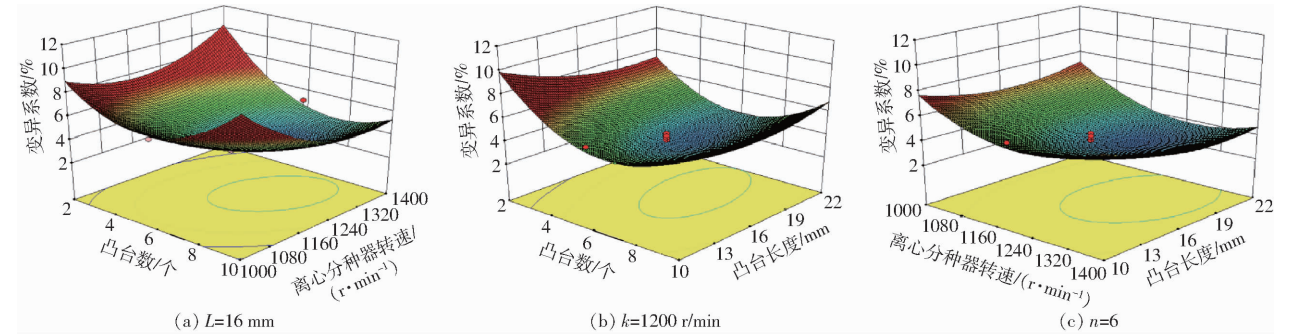


图 11 各因素交互作用对变异系数影响的响应曲面

Fig. 11 Influence of interaction of various factors on response surface of coefficient of variation

5 性能试验

5.1 分种台架试验

台架试验在安徽农业大学智能农机装备工程实验室进行,台架选用 JPS-12 型排种器性能试验台,台架试验选用的小麦品种为济麦 22,为保持和仿真一致,将锥体格盘转速设置为 6 r/min,每次试验加入 2 000 粒小麦种子,通过存种袋收集各个分配头排出的小麦数量。台架试验共进行 9 组,试验后计算变异系数和种子破碎率。

台架试验结果如表 7 所示。通过测得的数据计算得:台架试验变异系数平均值为 4.02%,台架试

验结果与仿真试验结果基本一致。小麦种子破损率的平均值为 0.22%,符合国家标准^[20]要求。

5.2 清种试验

为避免播种混种,设计了小区条播机清种功能,通过点击人机交互系统一键重置按钮,锥体格盘便会自转两圈实现清种。

5.2.1 试验方案设计

锥体格盘共有 45 个小槽格,分别编号 1~45,每次随机选取 5 个槽格,每个槽格加入 10 粒小麦种子,如图 12 所示,设置锥体格盘以转速 6 r/min 自转 2 圈,记录槽格内小麦种子数量,如图 12 所示。



图 12 自净试验

Fig. 12 Self-purification test

5.2.2 试验结果与分析

测得清种试验数据如表 8 所示,由数据可得,锥

表 7 台架试验结果

Tab. 7 Bench test results

编号	变异系数	种子破碎率
1	3.77	0.25
2	4.28	0.15
3	3.66	0.20
4	5.13	0.35
5	4.58	0.15
6	3.16	0.30
7	3.89	0.25
8	4.14	0.10
9	3.61	0.20

体格盘自转 2 圈可以将锥体格盘中剩余的小麦种子全部排出,不会造成和下一小区种子混种。

表 8 清种试验结果
Tab.8 Seed clearing test data

组号	放置种子槽格编号					剩余种子数
	1	2	3	4	5	
1	9	11	12	17	23	0
2	1	13	19	33	39	0
3	8	10	22	25	29	0
4	11	15	31	38	42	0
5	6	8	21	26	33	0
6	3	20	28	31	35	0
7	5	8	15	19	26	0
8	11	20	22	24	28	0
9	16	25	30	34	38	0
10	2	7	11	13	17	0

5.3 田间试验

5.3.1 试验方案

田间试验在安徽农业大学农萃园试验基地进行,田间试验现场如图 13 所示,试验样机如图 13a 所示。田间试验主要测量小区播种机各行总排量一致性。试验共进行 3 组,第 1 组播种小区长度为 3 m,第 2 组播种小区长度为 4 m,第 3 组播种小区长度为 5 m。

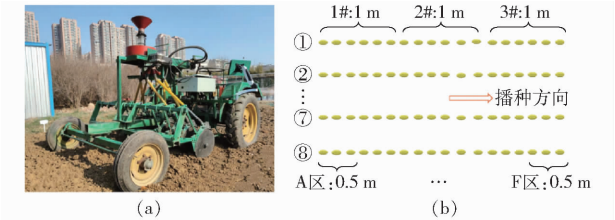


图 13 田间试验现场
Fig.13 Diagrams of field test site

以 3 m 小区长度为例,各行排量一致性变异系数测量方法:以 1 m 等长连续取 3 段(1#~3#),分别统计各段玉米种子数量,同样方式再统计 2~8 行小麦种子数量;均匀性测量方法:以 0.5 m 等长连续取 6 段(A 区~F 区),分别统计各段玉米种子数量,采样示意如图 13b 所示。

5.3.2 试验结果与分析

试验测得各行排量一致性变异系数如表 9 所示。由表 9 可得,各行排量一致性变异系数第 1 组

表 9 各行排量一致性变异系数
Tab.9 Coefficient of variation of consistency of seed metering quantity in each row

分组	编号	变异系数/%
1	1	7.63
	2	4.06
	3	5.91
	均值	5.87
2	1	5.14
	2	6.58
	3	6.31
	4	6.23
3	均值	6.07
	1	5.55
	2	4.22
	3	4.82
	4	5.32
	5	5.67
	均值	5.12

均值为 5.87%、第 2 组均值为 6.07%、第 3 组均值为 5.12%,均值为 5.69%;播种均匀性变异系数均值第 1 组为 20.10%、第 2 组为 20.89%、第 3 组为 21.32%,均值为 20.77%。因田间作业会受到播种机振动、地表不平等因素的影响,变异系数相对仿真试验和台架试验会有所增加。

6 结论

(1)针对小麦小区条播机,设计了一种电控排种系统,建立锥体格盘转速控制模型,该系统通过北斗导航设备确定播种机行驶状态参数,完成对锥体格盘和离心分种装置转速匹配控制,离心分种装置采用自制电机矢量驱动器保证了分种转速的稳定性,设计人机交互系统,完成对作业参数的设定和作业信息的实时反馈,实现了一键清种功能。

(2)通过排种系统性能仿真,确定了各因素对分种均匀性的影响主次顺序为离心分种器转速、凸台数、凸台长度,并得到最优参数组合为凸台长度 16 mm、凸台 6 个、离心分种器转速 1 200 r/min,通过台架试验和田间试验表明,本文设计的电控排种系统排量一致性变异系数为 5.69%,均匀性变异系数为 20.77%,满足作业要求。

参 考 文 献

[1] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报,2019,35(1):1-11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1-11. (in Chinese)
[2] 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)
- [3] 尚书旗,杨然兵,殷元元,等. 国际田间试验机械的发展现状及展望[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):5–8. SHANG Shuqi, YANG Ranbing, YIN Yuanyuan, et al. Current situation and development trend of mechanization of field experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1):5–8. (in Chinese)
- [4] CHENG X P, LU C Y, LI H W, et al. Research progress and development trend of plot seeding mechanization[J]. International Agricultural Engineering Journal,2018,27(4):136–144.
- [5] JIN Minfeng, DING Yongqian, YU Hongfeng, et al. Optimal structure design and performance tests of seed metering device with fluted rollers for precision wheat seeding machine[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018,51(17):509–514.
- [6] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for their-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018,166:1–12.
- [7] KIRKEGAARD N S, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth controlsystem for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,144:174–180.
- [8] DING Youqiang, HE Xiantao, YANG Li, et al. Low-cost turn compensation control system for conserving seeds and increasing yields from maize precision planters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199:107118.
- [9] WANG Guanping, SUN Wei, ZHANG Hua, et al. Research on a kind of seeding-monitoring and compensating control system for potato planter without additional seed-metering channel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,177: 105681.
- [10] 隋铭明,沈飞,徐爱国,等. 基于北斗卫星导航的秸秆机械化还田作业管理系统[J]. 农业机械学报,2016,47(1):23–28. SUI Mingming, SHEN Fei, XU Aiguo, et al. Management system for mechanized straw returning based on BDS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):23–28. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] WAEL M F. Development and performance evaluation of a plot seeder to suit some different certified seed production[D]. Tanta: Tanta University, 2017.
- [13] 程修沛,李洪文,卢彩云,等. 小麦小区条播机离心分种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(20):1–9. CHENG Xiupei, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Parameter optimization and experiment of centrifugal seed dispenser in wheat plot drill[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(20):1–9. (in Chinese)
- [14] 龚丽农,员玉良,尚书旗,等. 小区播种机电控系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(5):122–126. GONG Linong, YUAN Yuliang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment on electronic control system for plot seeder[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(5):122–126. (in Chinese)
- [15] 程修沛,李洪文,王庆杰,等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):30–38. CHENG Xiupei, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):30–38. (in Chinese)
- [16] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):116–124. LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):116–124. (in Chinese)
- [17] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报,2016,32(12):247–253. LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- [18] 刁怀龙,张银平,刁培松,等. 基于 EDEM 的小麦宽苗带深松免耕播种机设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(1):58–62. DIAO Huailong, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of a no-tillage and wide band wheat planter with subsoilers based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 58–62. (in Chinese)
- [19] 张恒榜,赵健,胡广锐,等. 窝眼轮式小麦排种器参数优化试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(9):139–144. ZHANG Hengbang, ZHAO Jian, HU Guangrui, et al. Experimental study on parameter optimization hole wheel wheat seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(9):139–144. (in Chinese)
- [20] GB/T 9478—2005 谷物条播机试验方法[S]. 2005.