

振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验

刘彩玲 王超 宋建农 都鑫 张福印

(中国农业大学农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为满足非圆种子低播量精密播种的种植要求,基于型孔轮式排种器提出了一种振动定向供种机构,分析了种子振动定向排序的机理,建立了种子在定向供种机构上的运动模型和充填型孔过程的动力学模型,完成了关键结构的参数设计。以V型槽安装倾角、振动方向角、振动频率、电压值(振幅)及排种轮转速为试验因素进行了二次回归旋转正交组合试验,并应用Design-Expert 8.0.6软件对试验数据进行多元回归分析和响应曲面分析,得到了因素与合格率间回归模型和因素对指标影响关系,确定了影响合格率的因素重要性次序为振动频率、振幅、振动方向角、安装倾角和排种轮转速。基于回归模型进行了参数优化并进行了试验验证,结果表明:当安装倾角 4.02° 、振动方向角 31.29° 、振动频率 35.9 Hz 、振幅 4.03 V 、转速 5.55 r/min 时,合格率为 97.64% ,漏充率为 2.36% ,试验中未出现多于3粒/穴的情况。采用二次回归旋转正交组合设计建立回归模型,试验结果与理论分析结论一致,满足了低播量精密播种的农艺要求,表明了振动供种组合型孔轮式排种器实现非圆种子精密排种的可行性。

关键词: 非圆种子; 精密播种; 定向供种; 振动式; 型孔轮

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0108-08

Design and Seed-filling Test of Cell-type Precision Seed-metering Device with Vibration Technology

LIU Cailing WANG Chao SONG Jiannong DU Xin ZHANG Fuyin

(Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A directional seed-feeding mechanism combined with cell-type seed-metering device was developed to meet the precision planting requirement for low sowing quantity for non-round seed. The working principle of directional seed-feeding mechanism was analyzed. The motion model of a seed in the directional seed-feeding mechanism and dynamic model of a seed filling into a cell was established and the parameter design of the key structure was completed. The quadratic regression rotational orthogonal experiments were carried out with the installation angle of V-groove, vibration direction angle, vibration frequency, voltage (amplitude) and the rotational speed of seeding wheel, and multiple regression analysis and response surface analysis of experimental data were carried out by using Design-Expert 8.0.6 software. The regression model between the factors and qualified rate was established and the influences of factors on indexes were analyzed. The influence relation of factors on the qualified rate was determined and the order of importance was vibration frequency, amplitude, vibration direction angle, installation angle and wheel speed in turn. Based on the regression model, the parameters were optimized and the experimental verification was worked out. Results showed that the optimal parameter combination of installation angle, vibration direction angle, vibration frequency, amplitude and wheel speed was 4.02° , 31.29° , 35.9 Hz , 4.03 V and 5.55 r/min , respectively, and the qualified rate and the leakage rate of experimental verification was 97.64% and 2.36% , respectively. There were no more than three grains per cell. The device can meet the requirements of precision seeding for low sowing quantity. It was feasible that cell-type seed-metering device combined with the directional seed-feeding mechanism realized precision seed-metering of non-round seed.

Key words: noncircular seed; precision seed-metering; directional seed-feeding; vibration-type; cell wheel

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200607)

作者简介: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: cailingliu@163.com

通信作者: 宋建农(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: songjn@cau.edu.cn

0 引言

精密播种具有省种、省工、省时、高产、经济等诸多优点,是一项效果显著的节本增效工程技术。因此,现代农业对精密播种要求越来越迫切^[1]。特别是近年来育种、种子加工处理、农艺栽培等技术不断发展与完善,大大提高了种子的发芽率和保苗率,使精密播种技术有了更可靠的保证,从而对精量播种提出了更高的要求^[2]。

目前,玉米已基本实现了单粒精密播种^[3-4]。水稻的精播强调少本稀植促进分蘖,可提高产量,节本增效,要求单苗栽插并适当降低密度,但考虑种子发芽率、机插秧漏插率、伤秧率、秧块盘结力等影响,将低播量的技术要求定为 1~2 粒/穴^[5-6]。小麦的精密播种高产栽培相对于传统的密集条播作业可减少基本苗,建立合理群体结构,培育壮苗,从而提高产量和经济效益,因此近年来出现了小麦单粒播种、宽苗带等种植新农艺,实现行内种子均匀分散分布,克服缺苗断垄或疙瘩苗现象^[7]。因此,从农艺上降低每穴种子粒数,实现准确株距、行距、播深是精密播种技术的发展趋势^[8-9]。

精密排种器是实现精密播种的关键部件,目前精密排种器主要分为机械式^[10-12]和气力式两种^[13-16]。气力式排种器成本高,吸孔或吸针堵塞问题仍未得到很好解决;以机械容腔方式囊种的机械式排种器应用较普遍,目前很好的应用在玉米、大豆、甜菜等圆形或近圆形外形规则种子的精密播种作业。对于小麦、水稻等非圆形种子,其充种过程极其复杂,提高每穴播种精度、降低空穴率、实现低播量精密播种仍是目前研究的难点。

控制种子运动姿态、使种子定向有序排列是机械式排种器降低每穴种子充填粒数的有效途径,特别适合小麦、水稻、花生等椭球体种子的精密播种作业^[17-20]。为解决超级稻工厂化育秧低播量精密播种的难题,本文基于型孔轮式排种器提出一种振动定向供种机构,以天优 998 超级稻为研究对象,对振动供种机构工作机理进行理论分析,通过台架试验优化关键参数,以为整机设计提供参考。

1 结构与工作原理

精密排种器主要由种箱、电磁振动上料器、定向供种机构、排种轮、刷种轮、同步护种装置、压实轮、刮种装置等组成,整机结构如图 1 所示。

工作原理如下:种箱内的种子在重力及电磁振动上料器的振动作用下以均匀种子流进入定向供种机构的排序供种 V 型槽中,定向供种机构在电磁激

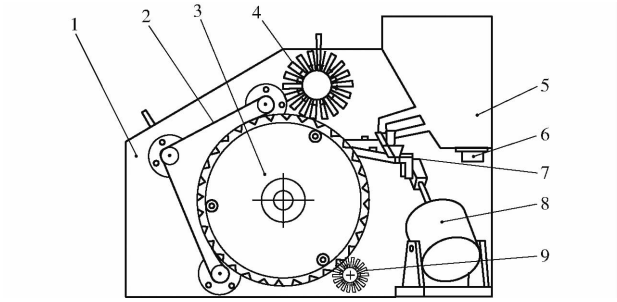


图 1 精密排种器结构示意图

Fig. 1 Sketch of precision seeder

1. 侧板 2. 同步护种装置 3. 排种轮 4. 刷种轮 5. 种箱 6. 电磁振动上料器 7. 定向供种机构 8. 电磁激励器 9. 刮种装置

振器作用下振动,排序供种 V 型槽内的种子在激振力作用下实现沿长轴方向首尾相连地均匀连续定向排序稳态输送。当种子运动至 V 型槽尾部时在尾部输出口作用下实现横向运动并横向充入排种轮型孔中,经刷种轮和同步护种装置到达投种位置后在重力与惯性力作用下下落,没有及时掉落的种子由刮种装置强制脱落。该播种装置通过控制种子运动姿态实现稻种沿长轴方向均匀连续定向排序的稳态输送和沿型孔轮轴向横向分布供种,为降低每穴种子粒数、提高单粒充填率提供了可能。

2 关键结构设计

2.1 定向供种机构设计与振动定向排序机理

定向供种机构是实现精密播种的关键。依据概率法以天优 998 超级稻种子(种子平均尺寸:长度 9.09 mm、宽度 2.92 mm、厚度 2.09 mm)为研究对象,计算得种子平躺、侧卧概率 88%,远大于竖立的概率,同时依据最小势能法,确定“平躺”状态为水稻种子最大可能的稳定状态,由此可知设计 V 型槽对椭球状水稻种子进行限位是适合的,结构如图 2 所示。

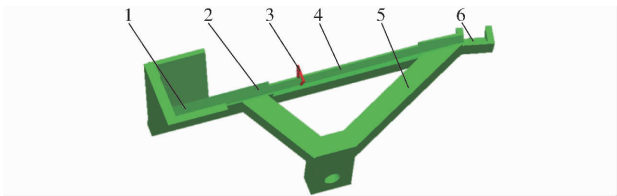


图 2 定向供种机构

Fig. 2 Directional seed-feeding mechanism

1. 供种箱 2. 高边 V 型槽 3. 梳种针 4. 低边 V 型槽 5. 支架 6. 输出口

电磁激励器作用于定向供种机构,在振动及 V 型槽限位作用下,稻种呈“轻微沸腾”状态,并微小跳动减小其内摩擦,V 型槽结构设计使种子以长轴方向平行于 V 型槽向“平躺”、“侧卧”状态不断调整、改变运动姿态,辅以倒梯形梳种针清除堆积的多

余稻种,确保单层种子均匀连续定向稳态供种,在V型槽尾部出口作用下稻种实现长轴平行于型孔轮轴向的充种作业,解决多层堆积问题,提高充种单粒率。

V型槽结构尺寸见图3b、3c,高边V型槽起过渡作用,其槽深5mm,比稻种厚度略大,可存贮2~3层种子确保稻种流连续不间断;低边V型槽起梳种、清种作用,其槽深3mm,存贮已均匀排序的单层种子,稻种排序供种效果如图3a所示;输出口开口宽度为种子长轴的1.2倍,底部向下倾斜,其宽度略小于短轴方向,限制种子姿态使长轴平行于型孔轮轴向方向。V型槽输出口与排种轮接触部分设计成圆弧形,以与排种轮圆周壁吻合利于种子姿态不改变,输出口与排种轮间隙确保种子不漏出。

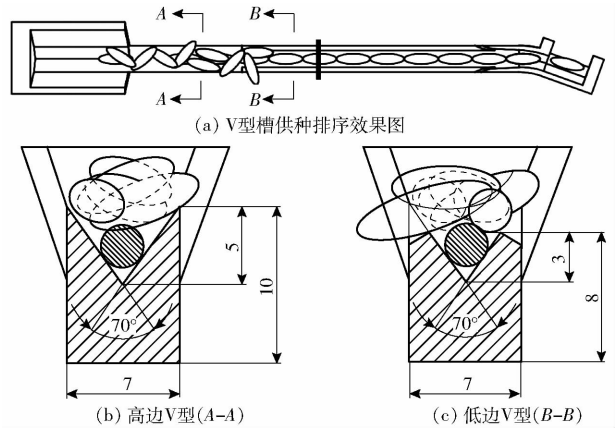


图 3 V 型槽断面尺寸示意图

Fig. 3 Diagrams of V-groove cross section

2.2 种子在定向供种机构上的运动分析和机构参数设计

2.2.1 V 型槽运动分析

V型槽运动分析^[21]见图4,以平行于工作面为x轴正方向,种子沿V型槽的相对运动以沿V型槽板上行为正,垂直于V型槽板上为y轴正向,则V型槽板的运动加速度为

$$a_x = -\lambda \omega^2 \sin(\omega t) \cos\beta \tag{1}$$

$$a_y = -\lambda \omega^2 \sin(\omega t) \sin\beta \tag{2}$$

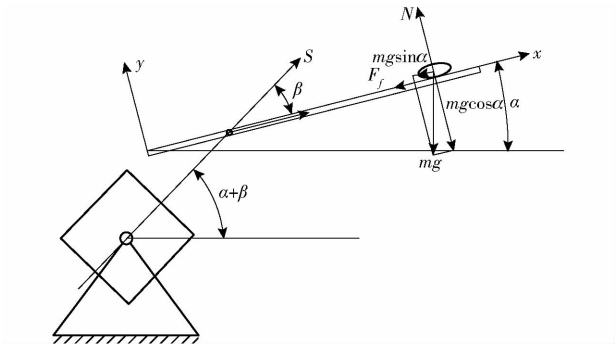


图 4 V 型槽运动规律及种子受力分析图

Fig. 4 Motion of V-groove and rice force diagram

式中 a_x ——x 方向加速度, m/s^2
 a_y ——y 方向加速度, m/s^2
 λ ——V 型槽振动方向单振幅, m
 ω ——振动圆频率, rad/s
 t ——时间, s
 β ——振动方向角, $(^\circ)$

2.2.2 种子滑行运动条件及滑行指数分析

种子沿V型槽x方向和y方向的相对位移为 Δx 、 Δy ;相对速度为 $\Delta \dot{x}$ 、 $\Delta \dot{y}$;相对加速度为 $\Delta \ddot{x}$ 、 $\Delta \ddot{y}$,则

$$mg \sin \alpha \pm F_f = m(a_x + \Delta \ddot{x}) \tag{3}$$

$$N - mg \cos \alpha = m(a_y + \Delta \ddot{y}) \tag{4}$$

$$F_f = \mu_e N = \tan \phi_e N \tag{5}$$

其中 $\mu_e = \mu / \sin \theta$ $\phi_e = \arctan(\tan \phi / \sin \theta)$

式中 m ——种子质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 α ——V 型槽安装倾角, $(^\circ)$
 N ——槽体对种子的支持力, N
 F_f ——槽体对种子的摩擦力, N
 μ ——种子与V型槽材料间静摩擦因数
 μ_e ——种子与V型槽材料间当量静摩擦因数
 ϕ_e ——当量静摩擦角
 ϕ ——静摩擦角
 θ ——V 型槽夹角的一半, $\theta = 35^\circ$

式(3)中“ $-$ ”号对应于正向滑动,“ $+$ ”对应于反向滑动。

滑动开始瞬时, $\Delta \dot{x} = 0$ 、 $\Delta \dot{y} = 0$,由式(1)~(5)得开始正向滑动相位角 φ_{k0} 和反向滑动相位角 φ_{q0}

$$\varphi_{k0} = \arcsin \frac{1}{D_k} \tag{6}$$

$$\varphi_{q0} = \arcsin \left(-\frac{1}{D_q} \right) \tag{7}$$

其中 $D_k = \frac{\omega^2 \lambda \cos(\phi_e - \beta)}{g \sin(\phi_e - \alpha)}$ $\tag{8}$

$$D_q = \frac{\omega^2 \lambda \cos(\phi_e + \beta)}{g \sin(\phi_e + \alpha)} \tag{9}$$

式中 D_k ——正向滑行指数

D_q ——反向滑行指数

正向滑行指数 $D_k < 1$, φ_{k0} 无解,故正向滑动条件为 $D_k \geq 1$,反向滑行条件为 $D_q \geq 1$ 。为提高种子输送效率,减小摩擦,希望稻种沿V型槽上滑,确定 D_k 为2~3、 $D_q = 1$ 。

物料开始出现抛掷运动瞬时,沿y方向相对加速度 $\Delta \ddot{y} = 0$, $N = 0$,由式(2)~(4)可得种子抛掷开始瞬时的相位角 φ_d 为

$$\varphi_d = \arcsin \frac{1}{D} \tag{10}$$

其中
$$D = \frac{\omega^2 \lambda \sin \beta}{g \cos \alpha} \tag{11}$$

当抛掷指数 $D > 1$, 式 (10) 有解, 物料可出现抛掷运动。当 $D < 1$, 物料不能出现抛掷运动, 为确保稻种在 V 型槽上稳定输送不跳动, 其参数设计应确保 $D \leq 1$ 。

2.2.3 定向供种机构参数选择与计算

(1) 槽体安装倾角 α 及振动方向角 β

振动输送要求倾斜向上输送时最大升角不超过 15° 。本文选择倾斜向上安装倾角 4° 。V 型槽板材料为工程塑料, 测定稻种与其摩擦因数为 0.47, V 型槽夹角 $2\theta = 70^\circ$, 计算当量摩擦因数 $\mu_e = 0.82$, 当量摩擦角 $\phi_e = \arctan \mu_e = 39.33^\circ$ 。由式 (8)、(9) 计算可得

$$\beta = \arctan \frac{D_k \sin(\phi_e - \alpha) - D_q \sin(\phi_e + \alpha)}{\mu_e (D_k \sin(\phi_e - \alpha) + D_q \sin(\phi_e + \alpha))} \tag{12}$$

D_k 为 2 ~ 3, $D_q = 1$, 由式 (12) 计算振动方向角为 $26.5^\circ \sim 34.5^\circ$, 设计振动方向角 $\beta = 31^\circ$ 。

(2) 振幅 λ 及振动频率 f

电磁振动机械常采用高频率小振幅, 本设计输出口置于 V 型槽尾部且与型孔对行, 过大的 V 型槽振幅会导致输出口与型孔对行准确性偏差过大影响种子准确充填, 根据型孔、输出口和种子的长度尺寸, 2λ 应小于 1 mm, 本文取 $\lambda = 0.35$ mm, 由式 (8) 计算得到振动频率为

$$f = \sqrt{\frac{D_k g \sin(\phi_e - \alpha)}{4\pi^2 \lambda \cos(\phi_e - \beta)}} \tag{13}$$

D_k 为 2 ~ 3, 由式 (13) 计算振动频率为 32.8 ~ 37.8 Hz, 设计振动频率 $f = 35$ Hz。

(3) 种子滑行平均速度分析

将设计参数 V 型槽夹角 70° , 安装倾角 $\alpha = 4^\circ$, 振动方向角 $\beta = 31^\circ$, 振幅 $\lambda = 0.35$ mm, 振动频率 $f = 35$ Hz 代入式 (8) ~ (10), 精确计算抛掷指数 $D = 0.892$, 正向滑行指数 $D_k = 2.49$, 反向滑行指数 $D_q = 1$, 能够满足种子在 V 型槽上向上稳定输送不下滑且不会出现抛起弹跳运动, 为均匀连续定向排序稳态输送和稻种长轴沿型孔轮轴向方向的横向分布供种、提高单粒充填率提供了可能。此时计算正向滑动相位角 $\varphi_{k0} = 23.7^\circ$, 反向滑动相位角 $\varphi_{q0} = 264.3^\circ$, 由文献 [21] 查得速度系数 $P_{km} = 1.90$, $P_{qe} = 0.01$, 计算正向滑行平均速度 v_k 、反向滑行平均速度 v_q 和平均速度 v_{kp} 为

$$v_k = 2\pi f \lambda \cos \beta (1 + \tan \phi_e \tan \beta) \frac{P_{km}}{2\pi} = 0.0289 \text{ m/s} \tag{14}$$

$$v_q = -2\pi f \lambda \cos \beta (1 - \tan \phi_e \tan \beta) \frac{P_{qe}}{2\pi} = -5.09 \times 10^{-5} \text{ m/s} \tag{15}$$

$$v_{kp} = v_k + v_q = 0.029 \text{ m/s} \tag{16}$$

考虑单料层厚度确定影响系数 $c_h = 1$, 实际平均速度 v_s 为

$$v_s = c_h v_{kp} = 0.029 \text{ m/s}$$

种子长度 $l = 9.09$ mm, 则理论供种频率 f_{gz} 为

$$f_{gz} = \frac{v_s}{l} = 3.2 \text{ Hz}$$

2.3 排种轮设计与充种分析

2.3.1 排种轮设计

合理的型孔形状是保证顺利充种的关键。为了有利于种子充入型孔和刮种时减小损伤, 型孔前端倾斜。定向供种对型孔尺寸要求降低, 根据最大稻种尺寸确定, 设计型孔长度 11 mm, 宽度 6.75 mm, 型孔轮截面、型孔形状及尺寸见图 5。排种轮直径影响种子充填性能, 综合考虑结构和生产率确定直径为 220 mm。

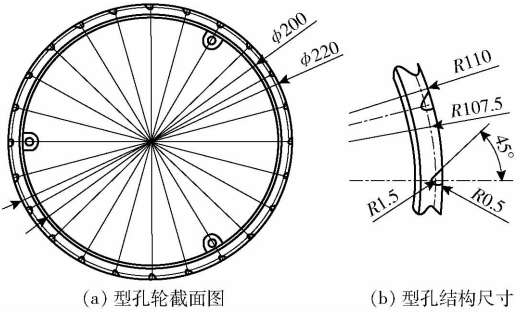


图 5 型孔轮截面与型孔结构

Fig. 5 Section of wheel with cell and cell structure

2.3.2 充种条件分析

排种轮转动, V 型槽输出口内种子在种间摩擦力、压力、种子与型孔表面摩擦力、重力的共同作用下充入型孔 [22] (图 6)。

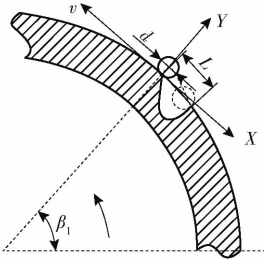


图 6 种子充入型孔时的运动学分析

Fig. 6 Kinematics analysis of filling in a cell

稻种进入型孔内的条件为

$$v \leq \left(L \sin \beta_1 - \frac{d}{2} \right) \sqrt{\frac{g}{d}} \tag{17}$$

式中 v ——排种轮边缘线速度, m/s

L ——型孔宽度, m

d ——稻种短轴当量直径, $d=0.0242\text{ m}$
 β_1 ——充种位置角, ($^{\circ}$)
根据输出口位置确定充种位置角为 32.27° , 计算 $v_{\max}=0.151\text{ m/s}$ 。
排种轮半径 $R=110\text{ mm}$, 排种轮极限转速为

$$n_{\max}=\frac{60v_{\max}}{2\pi R}=13.1\text{ r/min}\tag{18}$$

3 性能试验与多目标参数优化

为探索排种器工作性能, 优化设计参数, 基于上述设计参数研制了基于振动技术的型孔轮式精密排种器并进行排种试验, 试验地点为中国农业大学工学院排种实验室。

3.1 试验条件

选用天优 998 超级稻种子, 三维尺寸如前所述, 精选去芒, 堆积角试验测得休止角 31.67° , DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱测得平均湿基含水率为 10.10% 。试验装置包括 GZV 电磁振动上料器及其控制器、定向供种机构、WD-28-JZQ 型电磁激振器及信号发生器和功率放大器(激振系统)、型孔轮式排种装置、高速摄像系统等(图 7)。

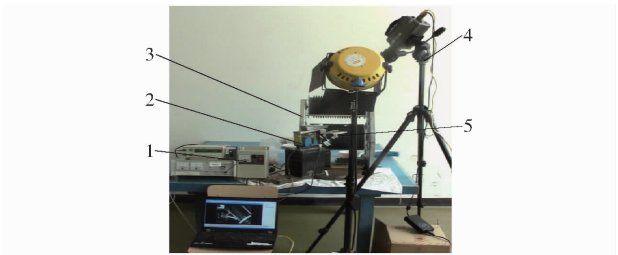


图 7 精密排种器试验台

Fig. 7 Precision seeder test bed

1. 激振系统 2. 上料器 3. 型孔轮式排种装置 4. 高速摄像系统 5. 定向供种机构

3.2 试验指标与试验因素水平

为满足超级稻低播量精量种植要求, 统计型孔内每穴(2 ± 1)粒和 0 粒种子的型孔穴数与型孔总数的百分比, 分别计为合格率 Y_1 、漏充率 Y_2 , 作为试验指标。

根据上述参数设计分析结果, 选取 V 型槽安装倾角 α 、振动方向角 β 、振动频率 f 、电压 V_p (振幅)及排种轮转速 n 五因素安排二次回归旋转正交组合试验, 星号臂为 2, 因子区域中心的试验点个数为 10, 共需进行 36 组试验, 各因素编码见表 1。

3.3 试验结果与分析

试验充种效果较好, 统计发现没有出现一穴多于 3 粒的情况, 试验统计结果如表 2, 应用 Design-Expert 8.0.6 进行多元回归拟合方差检验及因素间交互作用响应曲面分析。

表 1 因素编码

Tab. 1 Coding of factors

编码	因素				
	安装倾角 $\alpha/(^{\circ})$	振动方向角 $\beta/(^{\circ})$	振动频率 f/Hz	电压(振 幅) V_p/V	转速 $n/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
-2	2	27	31	3.6	4
-1	3	29	33	3.8	5
0	4	31	35	4.0	6
1	5	33	37	4.2	7
2	6	35	39	4.4	8

表 2 二次回归正交旋转组合试验设计及结果

Tab. 2 Experiment design and response values

编号	试验因素					试验指标	
	$\alpha/$ ($^{\circ}$)	$\beta/$ ($^{\circ}$)	$f/$ Hz	$V_p/$ V	$n/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	$Y_1/$ %	$Y_2/$ %
1	5	33	37	4.2	7	94.17	5.83
2	5	33	37	3.8	5	95.83	4.17
3	5	33	33	4.2	5	96.67	3.33
4	5	33	33	3.8	7	80.0	20.00
5	5	29	37	4.2	5	87.50	12.50
6	5	29	37	3.8	7	78.34	21.66
7	5	29	33	4.2	7	81.67	18.33
8	5	29	33	3.8	5	83.33	16.67
9	3	33	37	4.2	5	95.84	4.16
10	3	33	37	3.8	7	94.16	5.84
11	3	33	33	4.2	7	85.00	15.00
12	3	33	33	3.8	5	45.83	54.17
13	3	29	37	4.2	7	95.83	4.17
14	3	29	37	3.8	5	93.34	6.66
15	3	29	33	4.2	5	92.50	7.50
16	3	29	33	3.8	7	90.00	10.00
17	6	31	35	4.0	6	95.84	4.16
18	2	31	35	4.0	6	94.17	5.83
19	4	35	35	4.0	6	96.67	3.33
20	4	27	35	4.0	6	90.00	10.00
21	4	31	39	4.0	6	95.00	5.00
22	4	31	31	4.0	6	63.33	36.67
23	4	31	35	4.4	6	96.67	3.33
24	4	31	35	3.6	6	85.00	15.00
25	4	31	35	4.0	8	89.17	10.83
26	4	31	35	4.0	4	92.50	7.50
27	4	31	35	4.0	6	93.33	6.67
28	4	31	35	4.0	6	95.00	5.00
29	4	31	35	4.0	6	95.00	5.00
30	4	31	35	4.0	6	95.00	5.00
31	4	31	35	4.0	6	95.83	4.17
32	4	31	35	4.0	6	95.00	5.00
33	4	31	35	4.0	6	92.50	7.50
34	4	31	35	4.0	6	95.83	4.17
35	4	31	35	4.0	6	91.67	8.33
36	4	31	35	4.0	6	97.50	2.50

3.3.1 回归模型的建立与方程显著性检验

对试验数据进行四次多项式逐步回归拟合, 依据系数间不存在线性相关性, 剔除不显著因素并对编码因素进行线性代换, 得合格率 Y_1 回归响应面方

程为

$$\begin{aligned} Y_1 = & 3\,142.113 - 731.755\alpha - 180.192\beta - 6.455f + \\ & 130.342V_p - 328.376n + 13.103\alpha\beta + 10.081\alpha f - \\ & 4.171\alpha n + 3.214\beta f + 6.761\beta V_p + 13.747\beta n - \\ & 7.017fV_p + 10.466fn - 12.534V_p n + 77.838\alpha^2 + \\ & 0.069\beta^2 - 1.04f^2 - 0.366\beta fn - 0.435\alpha^2\beta - \\ & 1.462\alpha^2f - 0.014\alpha^2\beta^2 \end{aligned} \quad (19)$$

回归方程方差分析见表 3,合格率回归模型 F 检验高度显著 ($P < 0.01$),失拟项 $P = 0.139\,4 > 0.05$ 不显著,回归方程不失拟。试验中没有出现多于 3 粒的充种情况,故漏充率回归模型检验、因素影

响规律与合格率分析结论一致,因此试验结果只分析各因素对合格率的影响。

依据表 3 中 F 值确定影响合格率的因素重要性次序为振动频率、振幅、振动方向角、安装倾角和排种轮转速,其中振动频率和振幅高度显著,特别是振动频率 F 值最大,表明其对稻种的输送极其敏感,与式(8)正向滑行指数与振动频率平方成正比、与振幅成正比的分析结论相吻合,试验结果验证了理论分析结果;安装倾角、振动方向角、振动频率及排种轮转速间交互作用高度显著,因素交互作用影响不可忽视。

表 3 合格率与漏充率的方差分析
Tab.3 Variance analysis of qualified rate and cavity rate

方差来源	合格率				漏充率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	3 606.5163 5	21	34.266 214 58	<0.000 1 **	3 607.453 142	21	34.366 96	<0.000 1 **
α	2.968 066 667	1	0.592 203 774	0.455 3	2.898 15	1	0.579 803	0.460 0
β	22.244 45	1	4.438 325 931	0.055 1	22.244 45	1	4.450 219	0.054 9
f	501.494 45	1	100.060 726 2	<0.000 1 **	501.494 45	1	100.328 9	<0.000 1 **
V_p	350.982 0167	1	70.029 719 13	<0.000 1 **	350.217 6	1	70.064 45	<0.000 1 **
n	0.132 016 667	1	0.026 340 638	0.873 6	0.117 6	1	0.023 527	0.880 4
$\alpha\beta$	468.289 6	1	93.435 525 48	<0.000 1 **	469.372 225	1	93.902 49	<0.000 1 **
αf	166.152 1	1	33.151 513 02	<0.000 1 **	166.797 225	1	33.369 41	<0.000 1 **
αn	278.222 4	1	55.512 349 93	<0.000 1 **	277.389 025	1	55.494 38	<0.000 1 **
βf	264.875 625	1	52.849 333 42	<0.000 1 **	264.062 5	1	52.828 28	<0.000 1 **
βV_p	116.964 225	1	23.337 297 74	0.000 3 *	117.505 6	1	23.508 14	0.000 3 *
βn	55.875 625	1	11.148 589 21	0.005 3	56.25	1	11.253 36	0.005 2
fV_p	126.000 625	1	25.140 286 28	0.000 2 *	126.562 5	1	25.320 06	0.000 2 *
fn	49.914 225	1	9.959 140 331	0.0076 *	50.268 1	1	10.056 62	0.007 4 *
$V_p n$	100.500 625	1	20.052 396 44	0.000 6 *	100	1	20.005 97	0.000 6 *
α^2	12.789 6	1	2.551 846 116	0.134 2	12.789 6	1	2.558 684	0.133 7
β^2	2.343 75	1	0.467 636 934	0.506 1	2.343 75	1	0.468 89	0.505 5
f^2	250.389 6	1	49.959 007 95	<0.000 1 **	250.389 6	1	50.092 88	<0.000 1 **
βfn	34.339 6	1	6.851 611 846	0.021 3 *	34.047 225	1	6.811 479	0.021 6 *
$\alpha^2\beta$	36.053 333 33	1	7.193 544 647	0.018 8 *	36.226 875	1	7.247 54	0.018 5 *
α^2f	45.552 033 33	1	9.088 773 638	0.010 0 *	45.357 408 33	1	9.074 192	0.010 0 *
$\alpha^2\beta^2$	84.525 066 67	1	16.864 871 7	0.001 2 *	84.337 504 17	1	16.872 54	0.001 2 *
残差	65.154 712 5	13			64.980 587 5	13		
失拟	38.531 075	5	2.315 600 939	0.139 4	38.356 95	5	2.305 137	0.140 7
误差	26.623 637 5	8			26.623 637 5	8		
总和	3 682.289 431	35			3 682.975 431	35		

注：* 表示显著；**表示极显著。

3.3.2 因素间交互作用的响应曲面分析

因素交互作用对合格率影响见图 8,由图 8a 可知,振动频率一定,低频区合格率随振动方向角增大而减小,高频区影响规律相反;振动方向角一定,振动频率越大合格率越高,二者交互作用中振动频率对合格率影响更显著。

由图 8b 可知,安装倾角一定,低安装倾角区域

合格率随转速增大而增大,高安装倾角区影响规律相反,高安装倾角区域降低供种频率,转速增大使供种频率降低导致空穴率增大。

由图 8c 可知,低安装倾角区合格率随振动方向角增大而增加,高安装倾角区呈先增大后减小趋势;低振动方向角区合格率随安装倾角增大而增加,高振动方向角区影响规律相反,二者共同制约供种频

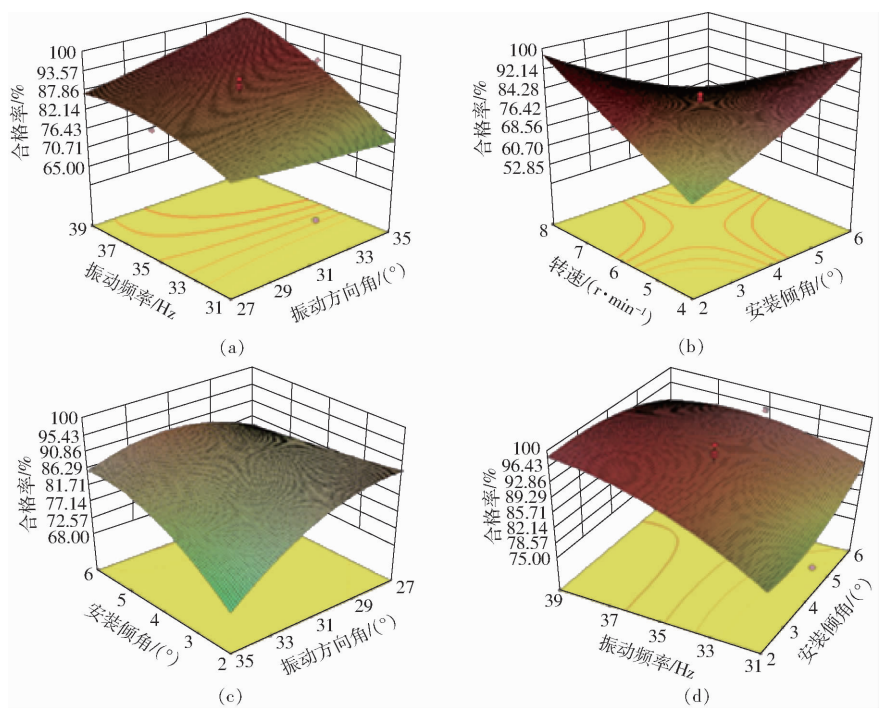


图 8 因素间交互作用对合格率的影响

Fig. 8 Influence of interaction factors on qualified rate

率,过大过小均影响种子的均匀有序输送;由图 8d 可知,低频区合格率随振动方向角增大而增加,高频区影响规律相反;低安装倾角利于增大正向滑行指数,因此随着振动频率的增加提高供种能力,从而降低了漏充率,使合格率呈明显上升趋势。

综合分析,因素及因素间交互作用对试验结果的影响不可忽略,各参数影响种子在 V 型槽上的正向滑行指数从而影响供种频率和输送效果,在确保均匀连续稳态供种的条件下,优化供种频率与型孔轮转速实现二者的合理匹配是确保合格率的关键。

3.4 试验结果目标优化与试验验证

为寻求约束条件范围内各影响因素最优组合,将合格率 Y_1 作为评价指标,结合因素边界条件建立数学模型,对充种性能指标回归模型优化求解,目标函数和约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max Y_1(\alpha, \beta, f, V_p, n) \\ \text{s. t. } 2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ \\ \quad 27^\circ \leq \beta \leq 35^\circ \\ \quad 31 \text{ Hz} \leq f \leq 39 \text{ Hz} \\ \quad 3.6 \text{ V} \leq V_p \leq 4.4 \text{ V} \\ \quad 4 \text{ r/min} \leq n \leq 8 \text{ r/min} \end{array} \right. \quad (20)$$

应用 Design-Expert 8.0.6 通过响应面法在试验因素水平范围内对其参数优化求解,得最优参数组合为安装倾角 4.02° ,振动方向角 31.29° ,振动频率 35.9 Hz ,振幅 4.03 V ,转速 5.55 r/min ;预测合格率为 96.86% ,漏充率为 3.14% 。优化结果与表 2 中

第 36 号试验基本吻合,确实是较优方案。对优化结果进行台架试验验证,选用前述同批天优 998 超级稻种,重复验证试验 10 次, (2 ± 1) 粒/穴合格率 97.64% ,没有出现多于 3 粒/穴的情况,漏充率 2.36% ,与优化结果基本符合。

4 结论

(1) 基于超级稻工厂化育秧低播量精密播种的种植需求,设计了一种基于振动技术的型孔轮式精密排种器,完成关键结构参数设计,对振动排序实现定量连续定向供种机理进行了研究,确定影响稻种在 V 型槽运动规律的设计参数为 V 型槽安装倾角、振动方向角、振幅和振动频率。

(2) 采用二次回归旋转正交组合设计建立因素与合格率间回归模型,确定影响合格率的因素重要性次序依次为振动频率、振幅、振动方向角、安装倾角和排种轮转速,因素间交互作用不可忽略。优化影响供种频率参数实现与充种频率合理匹配是确保合格指数的关键,试验分析结果与理论分析结论一致。

(3) 试验结果目标优化和试验验证表明,在安装倾角 4.02° ,振动方向角 31.29° ,振动频率 35.9 Hz ,振幅 4.03 V ,转速 5.55 r/min 时合格率为 97.64% ,漏充率 2.36% ,没有出现多于 3 粒/穴的情况,满足了低播量精密播种的农艺要求,表明振动供种组合型孔轮式排种器实现非圆种子精密播种的可行性。

参 考 文 献

- 1 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- 2 CRISTIAN I, OCTAVIAN P. A new concept for seed precision planting[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015(6): 38-43.
- 3 KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.
- 4 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78-86. (in Chinese)
- 5 李庆荣, 夏红梅, 杨丹彤, 等. 气力式水稻单粒精密播种机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2009, 31(2): 97-100.
LI Qingrong, XIA Hongmei, YANG Dantong, et al. Design and experimental study on a pneumatic rice precision seeder for single seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(2): 97-100. (in Chinese)
- 6 李泽华, 马旭, 谢俊锋, 等. 双季稻区杂交稻机插秧低播量精密育秧试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 17-27.
LI Zehua, MA Xu, XIE Junfeng, et al. Experiment on precision seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice under low sowing rate in double cropping area[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 17-27. (in Chinese)
- 7 彭强吉, 荐世春, 何青海, 等. 小麦单粒精密播种机的研制[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 71-75.
PENG Qiangji, JIAN Shichun, HE Qinghai, et al. Development of a single grain of wheat precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 71-75. (in Chinese)
- 8 DYLAN S J, DIANNE C H, ANDREW L G. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(2): 171-183.
- 9 AN Xue, WANG Sheng, DUAN Hongyan, et al. Test on effect of the operating speed of maize-soybean interplanting seeders on performance of seeder-metering devices[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 353-359.
- 10 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37-46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37-46. (in Chinese)
- 11 廖庆喜, 高焕文, 臧英, 等. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 109-113.
LIAO Qingxi, GAO Huanwen, ZANG Ying, et al. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 109-113. (in Chinese)
- 12 AN J W, TANG H, WANG J F, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2017, 10(1): 61-71.
- 13 SU Wei, WANG Fulin, CHEN Haitao, et al. Vacuum and air flow for 2QXP-1 vacuum precision seed metering[J]. Journal of Northeast Agricultural University: English Edition, 2013, 20(2): 61-64.
- 14 SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and perational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- 15 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160710&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010.
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65-72. (in Chinese)
- 16 韩豹, 杨亚楠, 孟繁超, 等. 气吸滚筒式自动清堵排种器的改进设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 18-25.
HAN Bao, YANG Ya'nan, MENG Fanchao, et al. Improved design and performance experiment on air-suction drum-type seed metering device with auto-cleaning block[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 18-25. (in Chinese)
- 17 韩豹, 孟繁超, 梁雨娜, 等. 粳稻定向精量播种装置排种性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 8-15.
HAN Bao, MENG Fanchao, LIANG Li'na, et al. Performance experiment of directional precision seeding device for japonica rice [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 8-15. (in Chinese)
- 18 俞亚新, 赵匀, 张斌, 等. 基于稻种胚胎定向排列的排种器及参数优化[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(3): 194-197.
YU Yaxin, ZHAO Yun, ZHANG Bin, et al. Seed metering device based on orienting ordered arrangement in embryo and parameter optimization[J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29(3): 194-197. (in Chinese)
- 19 张斌, 俞亚新, 赵匀. 超级稻种定向播种的原理研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(4): 454-456.
ZHANG Bin, YU Yaxin, ZHAO Yun. Study on principle of the rice seeds' embryo oriented seeding[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(4): 454-456. (in Chinese)
- 20 杨艳丽, 辜松, 李恺, 等. 大粒种子定向精量播种装置参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 15-22.
YANG Yanli, GU Song, LI Kai, et al. Parameters optimization of directing precision seeder for large cucurbitaceous seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 15-22. (in Chinese)
- 21 闻邦椿, 刘树英, 何劭. 振动机械的理论及动态设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- 22 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.