

气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化

张 昆 衣淑娟

(黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 为了提高气吸滚筒式排种器充种性能,采用离散元分析的方法,对种层高度、振动频率、振动角度分别进行数值模拟,结果表明:在相同条件下提升种层高度,可以增长充种区弧长,增加充种时间,降低排种器的漏充率;振动频率增加,种子平均法向应力方差增大,即对种子的扰动性增强;合适的振动角度可以有效提高供种高度。减小内摩擦、增强种群扰动性、提高供种高度均可有效提高排种器充种性能。为寻找最佳参数组合,以郑单 958 玉米种子为播种对象,采用二次旋转正交组合试验方法,对排种器进行了排种性能试验,建立了种层高度、振动频率、振动角度 3 个主要因素与合格率、漏播率、重播率的数学模型,分析了各个因素及交互作用对合格率的影响规律,并进行了参数优化与验证试验。当最佳参数组合为振动角度 45°,振动频率 116 ~ 122 Hz,种层高度 96 ~ 117 mm 时,合格率大于 90%,漏播率小于 5%,重播率小于 5%。经试验验证,试验结果与分析结果基本一致。试验结果表明该气吸滚筒式精密排种器对于玉米种子具有很好的播种适应性。

关键词: 玉米;气吸滚筒式排种器;充种性能;数值模拟;正交试验

中图分类号: S223.2⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0078-09

Simulation and Experimental Optimization on Filling Seeds Performance of Seed Metering Device with Roller of Air-suction

ZHANG Kun YI Shujuan

(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the filling performance of seed metering device with roller of air-suction, the numerical simulation on the height of seeds layer, the vibration frequency and the angle of vibration were carried out with method of discrete element analysis. The results showed that the arc length in the area of filling seeds and the time of filling seeds can be increased through increasing the height of seeds layer. The leakage rate can also be reduced under the same conditions; the mean value of normal stress was increased with the increase of vibration frequency, which meant that the disturbance to the seeds can be enhanced; the proper vibration angle can increase the height of filling seeds effectively. The filling performance of the seeds metering device can be improved effectively by reducing the internal friction force, enhancing the disturbance of the populations and increasing the height of filling seeds. Maize seeds (Zhengdan 958) were taken as research materials in order to determine the optimal combination of parameters. The seeding performance of metering device was studied through the quadratic rotation-orthogonal combination experiment. The height of seeds layer, the vibration frequency and the vibration angle were taken as main factors. The qualified rate, leak seeding rate and the re-seeding rate were taken as indexes. The mathematical model between three factors and the indexes was built. The effect of each factor on the qualified rate was analyzed and optimized parameters were tested. The effect of factors on the qualified seeding rate in primary sequence was the negative pressure, forward speed and angle of seeds suction. The optimal parameters were obtained. The qualified rate was above 90%, the leak seeding rate was lower than 5% and the re-seeding rate was also lower than 5%, when the vibration angle was 45°, the vibration frequency was 116 ~ 122 Hz and the height of seeds layer was 96 ~ 117 mm. The results of the verified experiment were consistent with optimal results. Conclusions can be drawn that the seed metering device with roller of air-suction had good adaptability to maize seeds. References for the

收稿日期: 2017-01-20 修回日期: 2017-05-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04-03)

作者简介: 张昆(1978—),男,助理研究员,博士生,主要从事垦区旱作农业生产机械化研究,E-mail: zhangkun0814@163.com

通信作者: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事寒区大规模水稻生产全程机械化研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

design of the maize seeds metering device with roller of air-suction can be provided.

Key words: maize; roller seeder of air-suction; filling seeds performance; numerical simulation; orthogonal experiment

引言

玉米机械化精量播种可以节省种子,无需间苗作业,而且可使种子在田间分布均匀,播深一致,达到苗齐、苗壮,是玉米播种技术的发展方向。精量排种器作为播种机的核心部件,其排种性能成为玉米播种技术的关键^[1-3]。

目前,国内外先进的播种机普遍采用气吸式工作原理^[4-9],这主要是因为机械式排种器整体上存在作业速度不高、对种子形状和尺寸要求严格、播种单粒率有待改善等问题,而气吸式排种器借助气流作用充种、清种或携种,与机械式排种器相比,对种子形状和大小一致性要求不严格,更易于实现高速、精密播种。气吸式排种器,其充种环节尤为重要,基本决定了排种器的优劣^[10]。充种过程处理不当会造成重播或者漏播现象,严重影响排种器的工作性能,导致播种质量下降。目前采用种箱振动方式提高充种是通用的方法^[11-13]。王淑铭等^[14]对气动振动式精密排种器振盘及种子的运动理论进行了分析;陈进等^[15]采用离散元法对气吸式精密播种机振动种盘中水稻种群运动进行研究;种群的运动特性对于充种性能有较大的影响。李林^[16]对气吸式排种器工作过程进行了研究,提出了种群内摩擦力对种子充填和所需吸力有很大影响。陈进等^[17]、祁兵等^[18]利用电磁激振的方法扰动种群,使种群产生“沸腾”,提高了气吸滚筒排种器充种性能。为提高气吸滚筒式排种器的充种性能,结合上述学者的研究成果,本文采用振动供种的方式,研究种层高度、振动频率和振动角度对充种性能的影响。

本文以自行研制的气吸式滚筒排种器为研究对象,借助离散元仿真软件 EDEM 进行种层高度、振动频率、振动角度对种群扰动及供种高度影响的仿真分析,并通过台架试验验证,探寻种群扰动和供种高度对充种性能的影响。利用二次旋转正交组合试验方法,对上述因素进行排种性能试验,以寻找最佳参数组合来提高排种性能。

1 排种器结构与工作原理

气吸滚筒式精密排种器主要由种箱、滚筒、空心轴、绝压辊、调节螺杆及传动链轮组成,其整体结构如图 1 所示。

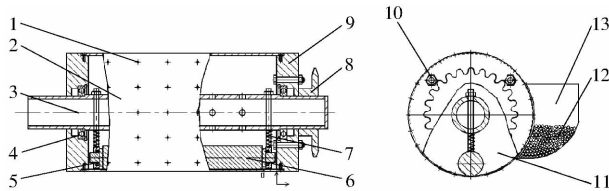


图 1 气吸滚筒排种器结构图

Fig. 1 Structure diagram of pneumatic cylinder seed-metering device

1. 吸种孔(型孔) 2. 滚筒 3. 空心轴 4. 轴承 I 5. 轴承 II
6. 绝压辊 7. 调节螺杆 8. 链轮 9. 端盖 10. 螺母 11. 负压填充区 12. 种子 13. 种箱

空心轴两端,一端与风机连接,另一端封闭,并与滚筒内部负压填充区相连通。空心轴上下开孔插入可调节的螺杆结构,受到弹簧的压力作用使得绝压辊与滚筒内壁紧密接触,从而起到隔绝负压的作用。排种器在工作状态下,滚筒会围绕空心轴进行逆时针运动,在风机的作用下,此时的种子受到自身重力、吸孔负压吸力的作用充入型孔当中,并随滚筒转动。当种子转动到绝压辊下方时,种子失去负压吸力,依靠自身重力落入种床带上,完成种子的精密排种。

1.1 滚筒直径

目前国内外气吸滚筒式排种器的滚筒直径多为 140 ~ 260 mm,大直径滚筒可以增加吸种孔的数量从而降低滚筒转速,增加合格率,但是相应也增大了负压腔的空间,需要风机提供的空气流量也相应增加,能耗必然增加,也易出现漏气现象;综合考虑滚筒直径选取 200 mm,材料选取厚度为 1 mm 的不锈钢铁皮。

1.2 吸种孔位置尺寸

设计滚筒上吸种孔周向孔数时,既要考虑到增加吸种孔数量有利于充种,又要考虑到两孔之间的弧长 Δl 不小于两粒种子的最大尺寸 $l_{\max}$ ^[19]。

$$\Delta l \geq 2l_{\max} \tag{1}$$

通过测量 500 粒种子得出所用玉米种子平均长度 9.3 mm、宽度 6.8 mm、厚度 4.6 mm,其中最大尺寸不超过 12.2 mm,综上两点考虑以及加工方便,选取滚筒周向吸种孔的数量为 8 个。

吸种孔直径 k (mm) 参照经验公式^[20]

$$k = (0.6 \sim 0.7) D \tag{2}$$

式中 D ——滚筒直径,mm

通过大量测量得出种子平均直径为 8.32 mm,形状近似球体,由式(2)中可以得到吸种孔直径范

围,即 4.99 ~ 5.82 mm。为了便于实际加工,选择吸种孔直径为 5.5 mm。

1.3 投种装置结构设计

投种装置的主要部分是绝压辊。绝压辊随着滚筒的转动而转动,绝压辊与滚筒内壁的摩擦形式由传统的滑动摩擦改为滚动摩擦^[21],大大降低了因摩擦而损失的能耗,延长了机构的使用寿命。同时,为了更好地保证绝压辊与滚筒内壁的紧密接触,在绝压辊周围套上一层壁厚为 2 mm 的橡胶套,以橡胶套的微量形变使其与滚筒内壁的接触力加大,同时为了保证摩擦辊与滚筒内壁的过盈配合,除了在绝压辊外部套上橡胶套之外,还在其两侧焊接上弹簧调节机构,既保证滚筒与中心轴之间的固定,又避免了长时间的摩擦使之与滚筒内壁接触不紧密。两端螺母则起到了调节距离的作用,如图 2 所示。

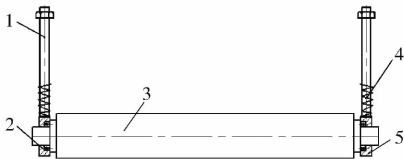


图 2 摩擦辊与弹簧调节机构

Fig.2 Friction roller and spring adjustment mechanism
1. 螺杆 2. 轴承 3. 摩擦辊 4. 弹簧 5. 轴承套

2 仿真模型建立

2.1 接触模型

离散元法描述的是颗粒之间碰撞的过程,也就是接触的产生和发生作用的过程。离散元中根据接触方式的不同可分为硬颗粒接触和软颗粒接触,软颗粒接触方式允许颗粒之间接触点间出现重叠部分,并根据接触颗粒的物理属性和法向重叠量、切向位移计算出接触力,而颗粒间内摩擦力即切向力与法向力有着密切的联系,因此本文采用软颗粒接触模型。考虑到种子表面无粘附力,故本文选取 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型^[22-25]。

2.2 接触力计算

法向力 F_{nij} 是弹簧和法向阻尼器作用在颗粒 i 上的弹性力和阻尼力的合力,同时颗粒 i 发生滑移,通过推导发现切向力 F_{tij} 与法向力 F_{nij} 关系为^[26-28]

$$F_{tij} = -\mu_s |F_{nij}| \frac{v_{ct}}{|v_{ct}|}$$
 (3)

式中 μ_s ——静摩擦因数

v_{ct} ——接触点的滑移速度, m/s

从式中可知,种子间切向力即为内摩擦力,而内摩擦力是阻碍种子间相对运动或者有相对运动趋势的主要因素^[29]。从式(3)中可以看出,影响内摩擦

力的因素有静摩擦因数和法向力,而静摩擦因数又由种子本身物理属性决定,因此采用法向力 F_{nij} 来衡量种子之间的内摩擦力^[30-31]。

2.3 颗粒模型

采用郑单 958 玉米种子进行仿真试验,由文献[32-33]得到种子的几何尺寸与力学特征参数,如表 1 所示。

表 1 种子特征参数
Tab.1 Seeds characteristic parameters

参数	数值
种子尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm)	6.17×5.51×5.18
泊松比	0.4
种子剪切模量/MPa	1.3×10 ⁸
种子密度/(kg·m ⁻³)	1 197
种间恢复系数	0.182
种间静摩擦因数	0.231
种间滚动摩擦因数	0.078

对郑单 958 种子进行建模,将 1 000 粒种子分为大扁、小扁、大圆、小圆 4 类,依次按其长、宽、高尺寸的正态分布均值进行三维模型建立,并在 EDEM 软件中通过多球面组合的填充方式,完成一个与种子模型外轮廓较为吻合的表面组作为一个颗粒,模拟颗粒如图 3 所示^[34],仿真过程中随机生成 4 种形状的种子。

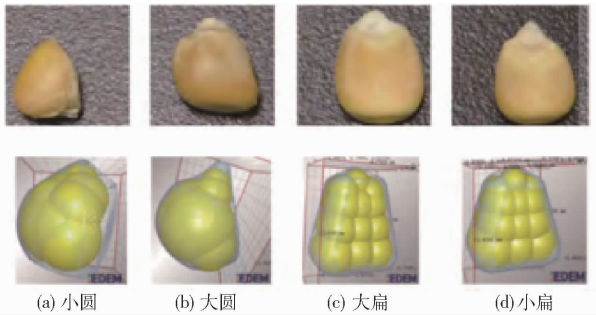


图 3 种子仿真结果

Fig.3 Simulation results of seed

2.4 排种器供种过程仿真

种子由种箱模型内部的颗粒工厂生成,生成的种子在自身重力的作用下分布在种箱底部。在对种箱添加激振作用下,种箱内的种群出现“沸腾”状态,种间出现了相对的运动与碰撞。

为了研究气吸滚筒式排种器充种性能,本文对种层高度、振动频率和振动角度进行考察。通过 EDEM 模拟不同种层高度条件下,充种区弧长对充种效果的影响。通过 EDEM 模拟振动频率条件下,种间法向力的变化对供种效果的影响。通过 EDEM 模拟不同振动角度条件下,供种高度对充种效果的影响。

3 仿真结果分析

3.1 种层高度

根据试验实际情况,模拟种箱内种层高度分别为 50、100、150 mm。

通过模拟发现,随着种层高度的提升,排种器漏充情况明显减少。出现这样现象的主要原因是由于提升种层高度,充种区弧长增长,使得滚筒在相同转速的情况下,充种时间增长,一定程度上降低了排种器的漏充率。建立各因素对于充种影响的方程组

$$\begin{cases} t = \frac{l_c}{s} \\ l_c = \delta \frac{d}{2} \\ s = \frac{2\pi n}{60} \frac{d}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 t ——滚筒转过充种区的时间,s
 l_c ——充种区弧长, m
 s ——滚筒线速度,m/s
 d ——滚筒直径, m
 n ——滚筒转速,r/min
 δ ——充种区弧度,rad

由式(4)整理得出

$$t = \frac{30\delta}{\pi n} \quad (5)$$

式(5)表明,滚筒转过充种区的时间 t 仅与滚筒转速和充种区弧度有关,验证了上述的分析。

通过模拟 3 种不同种层高度,得出排种器漏充率变化规律如图 4 所示,由图可知,随着种层高度增大,漏充率下降。

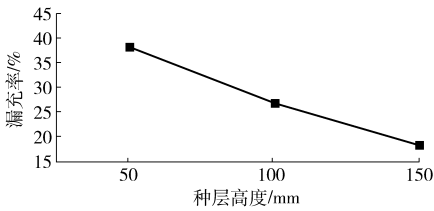


图 4 种层高度与漏充率关系曲线
Fig. 4 Relationship curve of height of seeds layer and miss rate of seed-filling

3.2 振动频率

根据试验实际情况,选取振幅为 1 mm,种层高度为 100 mm,振动角度与水平夹角为 45°时,模拟种箱振动频率分别为 65、85、105 Hz,获取随时间变化种子的平均法向应力,如图 5 所示。从图中可以看出,种子平均法向应力随着时间的推移出现无规律波动,并随着振频的提高,波动幅度增大且落差也随

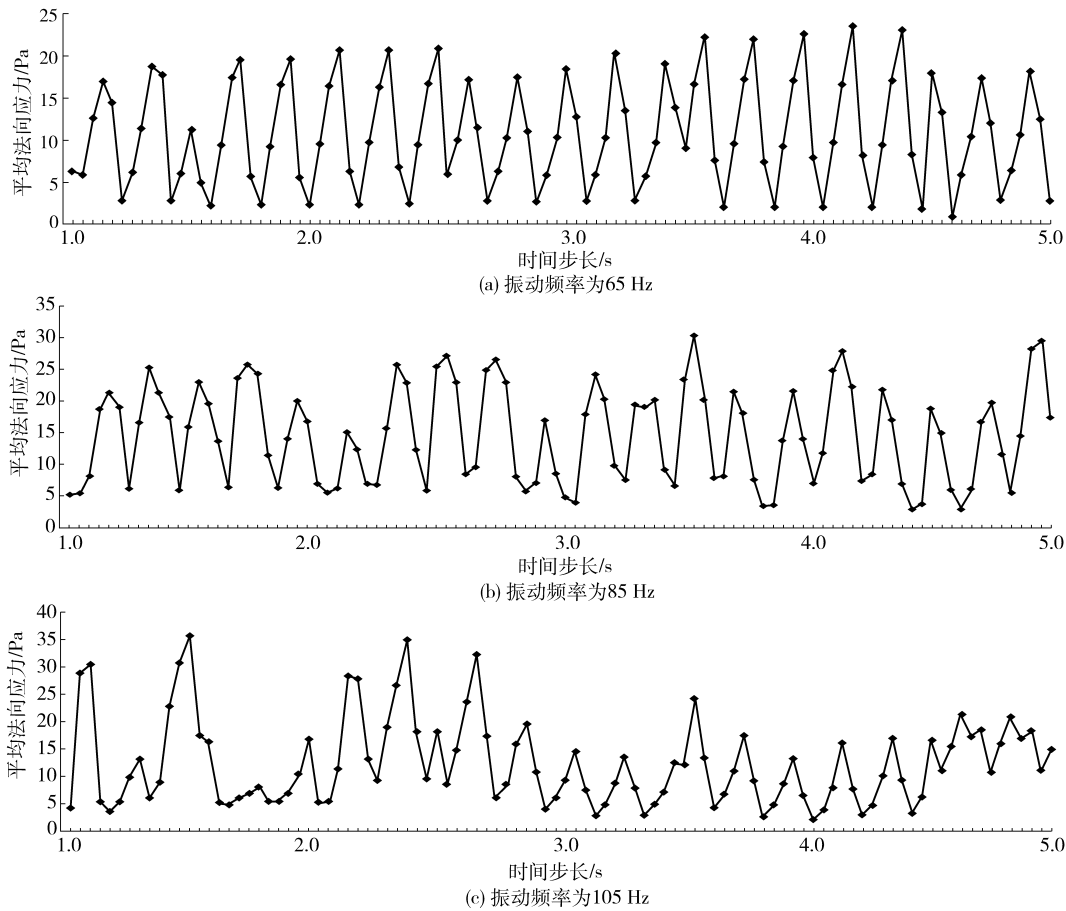


图 5 不同振动频率下平均法向应力随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of average normal stress with time under different vibration frequencies

着增大。为了定量描述这种波动,引入方差公式

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 (f_{ni} - \mu)^2 \tag{6}$$

其中

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 f_{ni}$$

式中 D ——方差, Pa^2
 N ——输出数据总数, $N = 100$
 μ ——种子平均法向应力总和, Pa
 f_{ni} —— i 时刻每个种子受到的平均法向应力, Pa
方差较大的其波动离散程度大,也就是对种子的扰动性较大。通过计算得出振动频率为 65 Hz 时,方差为 39.65 Pa^2 。振动频率为 85 Hz 时,方差为 58.62 Pa^2 。振动频率为 105 Hz 时,方差为 61.77 Pa^2 。因此提高振动频率可以一定程度提高种群扰动性,利于充种^[33]。

通过模拟 3 种不同振动频率,得出排种器漏充率变化规律如图 6 所示,从图中可见,随振动频率的提高,种群扰动性增强,漏充率下降。

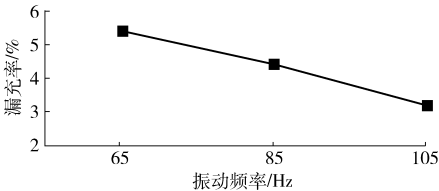


图 6 振动频率与漏充率关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of vibration frequency and miss rate of seed-filling

3.3 振动角度

根据试验实际情况,选取振幅为 1 mm,种层高度为 100 mm,振频为 105 Hz,模拟种箱振动角度 θ 分别为 30° 、 45° 、 60° ,如图 7 所示,获取不同振动角度情况下种箱供种高度。

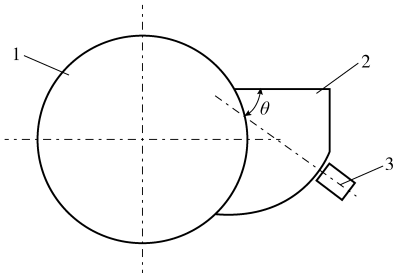


图 7 振动角度示意图

Fig. 7 Sketch of vertical oscillation angle
1. 滚筒 2. 种箱 3. 激振器

通过模拟发现,在振动角度为 30° 、 45° 时供种高度均有提升,而在振动角度为 60° 时,种子出现了后移的现象,使得供种高度出现了下降的情况。通过测量得出振动角度为 30° 、 45° 、 60° ,对应供种高度为 105、112、90 mm。振动角度的不同影响种子水平和竖直方向的位移。振动角度为 30° ,其水平向前

振动位移较大,但竖直方向位移量较小,制约其进一步提高供种高度;振动角度为 60° ,其竖直方向振动位移较大,但水平向前位移较小,导致种子后移,使得供种高度不但没有提高反而下降。振动角度为 45° ,既有足够的水平向前位移又有足够的竖直位移,使其供种高度在三者中最佳。因此比较合适的振动角度有利于提高供种高度从而提高充种性能,但是从模拟结果来看,相互之间的差距不大。

通过模拟 3 种不同振动角度,得出排种器漏充率变化规律如图 8 所示,从图中可见,随着振动角度增加,即对应供种高度先增大后减小,漏充率先下降后上升,同样可以说明适当的振动角度可以提高供种高度的同时降低漏充率。

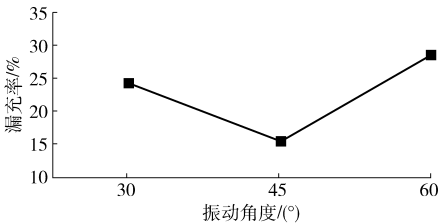


图 8 振动角度与漏充率关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of vertical oscillation angle and miss rate of seed-filling

4 试验

4.1 试验条件

试验在 JPS-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台上进行,所用排种器为自行设计的气吸滚筒式排种器,激振源为 FP-12 型气动活塞振动器,振频检测设备采用 VC63B 型测振仪,如图 9 所示。

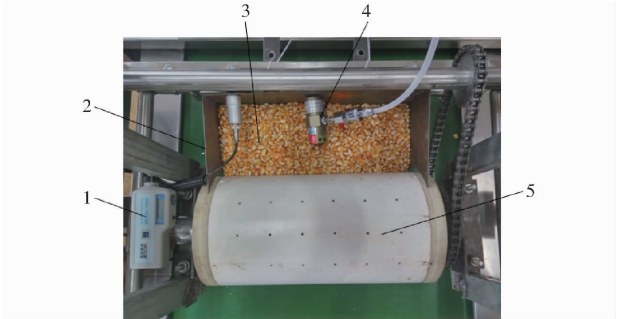


图 9 试验装置图

Fig. 9 Picture of test unit

1. 测振仪 2. 种箱 3. 种子 4. 激振器 5. 气吸滚筒排种器

试验参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,连续检测 200 粒种子,选取合格率、漏播率、重播率为指标。每次试验重复 5 次取平均值。试验过程中设定播种机前进速度为 3 km/h,给定株距为 300 mm,其他条件不变。根据

$$n_p = \frac{60 \times 10^3 v_m}{3.6SZ} \tag{7}$$

式中 v_m ——播种机前进速度, km/h
 S ——株距, mm
 Z ——周向吸孔数, $Z=8$

计算出相应播种机前进速度为 3 km/h 时, 滚筒转速 n_p 为 20.8 r/min。

4.2 二次旋转正交组合试验

通过前期大量的单因素试验确定了种层高度的取值范围在 50 ~ 150 mm, 振动频率取值范围在 65 ~ 145 Hz, 振动角度范围在 0° ~ 90°。为了找到这 3 个因素的最佳参数, 使得此排种器排种性能最佳, 本文选择了试验次数少, 计算方便, 可以避免回归系数间相关性的二次旋转正交组合试验方法, 试验因素编码如表 2 所示。再根据三因素二次旋转正交组合试验表进行试验, 每组试验重复 3 次取平均值。试验方案与试验结果见表 3。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Factors and levels of test

编码	因素		
	种层高度 x_1 /mm	振动频率 x_2 /Hz	振动角度 x_3 /(°)
-1.682	50	65	0
-1	70	81	18
0	100	105	45
1	130	129	72
1.682	150	145	90

表 3 试验设计方案与结果
Tab.3 Experiment design and results

试验 序号	因素			响应值		
	种层 高度 X_1	振动 频率 X_2	振动 角度 X_3	合格率 Y_1 /%	漏播率 Y_2 /%	重播率 Y_3 /%
1	-1	-1	-1	75.3	14.6	10.1
2	1	-1	-1	80.6	0.3	19.1
3	-1	1	-1	80.6	18.4	1.0
4	1	1	-1	84.7	13.3	2.0
5	-1	-1	1	72.0	24.3	3.7
6	1	-1	1	85.0	1.2	13.8
7	-1	1	1	83.0	14.9	2.1
8	1	1	1	85.0	8.6	6.4
9	-1.682	0	0	66.3	23.3	8.4
10	1.682	0	0	88.7	0.3	11
11	0	-1.682	0	76.4	3.6	20
12	0	1.682	0	86.7	13.3	1.0
13	0	0	-1.682	82.9	9.0	8.1
14	0	0	1.682	88.6	2.1	9.3
15	0	0	0	89.7	2.5	7.8
16	0	0	0	88.7	1.9	9.4
17	0	0	0	95.5	0.5	4.0
18	0	0	0	92.0	1.2	8.8
19	0	0	0	84.0	7.8	8.2
20	0	0	0	90.2	2.9	6.9
21	0	0	0	90.9	2.4	6.7
22	0	0	0	92.5	1.7	5.8
23	0	0	0	93.5	1.3	5.2

4.3 回归数学模型的建立与显著性检验

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归拟合, 对试验结果进行回归分析, 可以得到合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 的回归方程。

(1) 合格率 Y_1

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合, 得到各因素对排种合格率 Y_1 影响的回归模型

$$Y_1 = -79.14 + 1.41x_1 + 1.55x_2 + 0.15x_3 - 2.16 \times 10^{-3}x_1x_2 + 8.80 \times 10^{-4}x_1x_3 + 3.14 \times 10^{-4}x_2x_3 - 5.37 \times 10^{-3}x_1^2 - 5.87 \times 10^{-3}x_2^2 - 2.56 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (8)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。

根据表 4 可知, 这个模型的拟合度是极显著的 ($P<0.01$)。但种层高度和振动频率交互项 (X_1X_2) 的 P 值、种层高度和振动角度交互项 (X_1X_3) 的 P 值以及振动频率和振动角度交互项 (X_2X_3) 的 P 值均大于 0.1, 说明种层高度和振动频率的交互项、种层高度和振动角度的交互项以及振动频率和振动角度的交互项对排种合格率的影响不显著, 其他各项的 F 检验均极显著或显著, 说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P=0.413$, 不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型

$$Y_1 = -61.94 + 1.23x_1 + 1.35x_2 + 0.27x_3 - 5.37 \times 10^{-3}x_1^2 - 5.87 \times 10^{-3}x_2^2 - 2.56 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (9)$$

通过对式 (9) 回归系数的检验得出, 影响排种合格率的 因素由大到小为种层高度、振动频率和振动角度。

(2) 漏播率 Y_2

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合, 得到各因素对漏播率 Y_2 影响的回归模型

$$Y_2 = 141.18 - 1.51x_1 - 1.21x_2 + 0.31x_3 + 4.60 \times 10^{-3}x_1x_2 - 1.57 \times 10^{-3}x_1x_3 - 3.69 \times 10^{-3}x_2x_3 + 4.43 \times 10^{-3}x_1^2 + 4.83 \times 10^{-3}x_2^2 + 2.39 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (10)$$

根据表 4 可知, 这个模型的拟合度是极显著的 ($P<0.01$)。但种层高度和振动角度交互项 (X_1X_3) 的 P 值大于 0.1, 说明种层高度和振动角度的交互项对漏播率的影响不显著, 其他各项的 F 检验均极显著或显著, 说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P=0.1101$, 不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

表 4 回归方程方差分析
Tab. 4 Variance analysis of regression equation

方差来源	合格率				漏播率				重播率			
	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值
模型	1 002. 53	9	9. 84	0. 000 2 **	1 182. 70	9	17. 87	<0. 000 1 **	466. 73	9	9. 32	0. 000 2 **
X_1	282. 13	1	24. 93	0. 000 2 **	560. 38	1	76. 19	<0. 000 1 **	60. 62	1	10. 894	0. 005 7 **
X_2	104. 20	1	9. 21	0. 009 6 **	70. 88	1	9. 64	0. 008 4 **	330. 21	1	59. 343	<0. 000 1 **
X_3	13. 12	1	1. 16	0. 030 1 *	6. 20	1	0. 84	0. 375	1. 28	1	0. 23	0. 639
X_1X_2	18. 61	1	1. 64	0. 222	84. 50	1	11. 49	0. 004 8 **	23. 80	1	4. 278	0. 059
X_1X_3	3. 92	1	0. 35	0. 566	12. 50	1	1. 70	0. 215	2. 42	1	0. 435	0. 521
X_2X_3	0. 32	1	0. 028	0. 869	44. 18	1	6. 01	0. 029 *	36. 98	1	6. 646	0. 023 *
X_1^2	358. 51	1	31. 67	<0. 000 1 **	243. 83	1	33. 15	<0. 000 1 **	3. 08	1	0. 553	0. 471
X_2^2	174. 94	1	15. 46	0. 002 **	118. 68	1	16. 14	0. 001 5 **	8. 30	1	1. 492	0. 244
X_3^2	53. 40	1	4. 72	0. 049 *	46. 33	1	6. 30	0. 026 *	0. 12	1	0. 021	0. 886
残差	147. 14	13			95. 61	13			72. 34	13		
失拟	61. 21	5	1. 14	0. 413	59. 23	5	2. 60	0. 110 1	47. 48	5	3. 056	0. 078
误差	85. 94	8			36. 38	8			24. 86	8		
总和	1 149. 67	22			1 278. 31	22			539. 06	22		

注：* 表示在 $P < 0. 05$ 水平上显著，** 表示在 $P < 0. 01$ 水平上极显著。

$$Y_2 = 148. 25 - 1. 58x_1 - 1. 21x_2 + 0. 15x_3 +$$
$$4. 60 \times 10^{-3}x_1x_2 - 3. 69 \times 10^{-3}x_2x_3 +$$
$$4. 43 \times 10^{-3}x_1^2 + 4. 83 \times 10^{-3}x_2^2 +$$
$$2. 39 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (11)$$

通过对式(11)回归系数的检验得出,影响漏播率的因素由大到小为种层高度、振动频率和振动角度。

(3)重播率 Y_3

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合,得到各因素对重播率 Y_3 影响的回归模型

$$Y_3 = 34. 94 + 0. 20x_1 - 0. 38x_2 - 0. 45x_3 -$$
$$2. 44 \times 10^{-3}x_1x_2 + 6. 91 \times 10^{-4}x_1x_3 +$$
$$3. 38 \times 10^{-3}x_2x_3 + 4. 98 \times 10^{-4}x_1^2 +$$
$$1. 28 \times 10^{-3}x_2^2 + 1. 21 \times 10^{-4}x_3^2 \quad (12)$$

根据表 4 可知,这个模型的拟合度是极显著的 ($P < 0. 01$)。但种层高度和振动角度交互项(X_1X_3)的 P 值、种层高度和振动频率(X_1X_2)的 P 值、种层高度的二次方项(X_1^2)的 P 值、振动频率的二次方项(X_2^2)的 P 值以及振动角度的二次方项(X_3^2)的 P 值均大于 0. 1,说明种层高度和振动角度的交互项、种层高度的二次方项、振动频率的二次方项以及振动角度的二次方项对重播率的影响不显著,其他各项的 F 检验均极显著或显著,说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P = 0. 078$,不显著,说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 38. 87 + 0. 07x_1 - 0. 39x_2 - 0. 37x_3 +$$
$$3. 38 \times 10^{-3}x_2x_3 \quad (13)$$

通过对式(13)回归系数的检验得出,影响重播率的因素由大到小为振动频率、种层高度和振动角度。

4. 4 最佳参数组合

设定合格率大于 90%,漏播率小于 5%,重播率小于 5%,振动角度为 45°,最佳参数范围如图 10 所示。

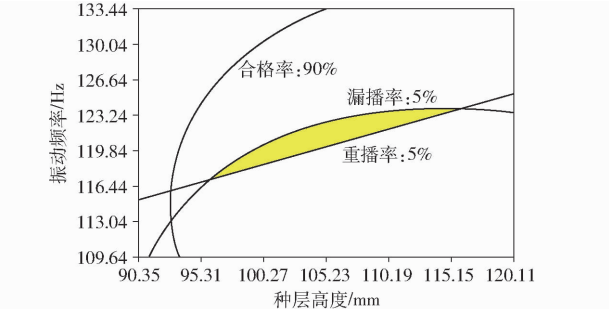


图 10 参数分析图

Fig. 10 Diagram of parameters analysis

由图 10 可知,在振动角度为 45°时,种层高度与振动频率都处于最佳值的区域图,其中灰色区域为最佳组合区域,即振动频率在 116 ~ 122 Hz,种层高度在 96 ~ 117 mm 时,可获得合格率大于 90%,漏播率小于 5%,重播率小于 5%。

对理论结果进行试验验证。在相同的试验条件下选取振动角度为 45°,振动频率为 120 Hz,种层高度为 100 mm 进行 3 次重复验证试验,得到排种器合格率平均值为 92. 36%,且均大于 90%。漏播率平均值为 3. 52%,且均小于 5%。重播率平均值为 4. 21%,且均小于 5%,试验结果与最佳组合区域结果基本相符。

5 结论

- (1)为探寻种层高度、种群扰动和供种高度对排种器充种性能的影响,采用离散元分析方法,利用 EDEM 软件,分别对种层高度、振动频率以及振动角度进行数值模拟,得出增长充种区弧长、增大种群扰动强度和 提高供种高度可以有效提高排种器充种性能。
- (2)采用三因素五水平二次正交旋转组合试验

方法进行试验,并对试验结果进行方差分析,得出影响排种合格率的因素主次顺序为种层高度、振动频率和振动角度。

(3)利用 Design-Expert 8.0.6 进行数据处理,以排种合格率、漏播率、重播率为评价指标,得出在振动角度为 45°,振动频率在 116 ~ 122 Hz,种层高度在 96 ~ 117 mm 时,合格率可大于 90%,漏播率小于 5%,重播率小于 5%,经试验验证,与分析结果基本一致。

参 考 文 献

- 1 许剑平,谢宇峰,陈宝昌. 国外气力式精密播种机技术现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2008,30(12):203-206.
XU Jianping, XIE Yufeng, CHEN Baochang. The present technique status and developing tendency of abroad pneumatic precision drill [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(12):203-206. (in Chinese)
- 2 李国林,宋炜,毛俐,等. 国内外几种主要排种器的特点[J]. 农业科技与装备,2011(8):70-71,73.
LI Guolin, SONG Wei, MAO Li, et al. Features of some main seed-metering devices at home and abroad[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2011(8): 70-71, 73. (in Chinese)
- 3 张泽平,马成林,左春桢. 精播排种器及排种理论研究进展[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(4):112-117.
ZHANG Zeping, MA Chenglin, ZUO Chunzheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995,25(4): 112-117. (in Chinese)
- 4 YAZGI A, Degirmencioglu A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.
- 5 BEREKET B Z. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agricultural Machinery, 2004,28(6): 435-441.
- 6 GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering,2008, 99(3): 322-329.
- 7 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2008,24(4):301-305.
ZHOU Haibo, MA Xu, YAO Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 301-305. (in Chinese)
- 8 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报,2009,40(8):44-48.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 44-48. (in Chinese)
- 9 张晓慧,宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(3):69-71.
ZHANG Xiaohui, SONG Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 69-71. (in Chinese)
- 10 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(增刊): 48-53.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s10&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48-53. (in Chinese)
- 11 胡建平,郑赛男,刘文东. 磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):60-63.
HU Jianping, ZHENG Sainan, LIU Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 60-63. (in Chinese)
- 12 赵湛,李耀明,陈进,等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报,2011, 27(7): 112-116.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Dynamic analysis of seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 112-116. (in Chinese)
- 13 张石平,夏静,陈进. 气吸振动式蔬菜穴盘育苗精密播种装置的研究[J]. 农机化研究,2007,29(8):80-83.
ZHANG Shiping, XIA Jing, CHEN Jin. Study on equipment of vibration air-suction vegetable tray precise seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(8): 80-83. (in Chinese)
- 14 王淑铭,魏天路,周海波. 气动振动式精密排种器工作参数的分析与仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊):56-60.
WANG Shuming, WEI Tianlu, ZHOU Haibo. Theoretical research and simulation analysis on operating parameters of pneumatic vibration precision seed-metering[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.): 56-60. (in Chinese)
- 15 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011, 42(10): 79-83.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79–83. (in Chinese)
- 16 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报, 1979, 10(3): 56–63.
LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56–63. (in Chinese)
- 17 陈进, 李耀明. 气吸振动式播种试验台中种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 47–50.
CHEN Jin, LI Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 47–50. (in Chinese)
- 18 祁兵, 张东兴, 崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 8–15.
QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8–15. (in Chinese)
- 19 张顺, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 11–19.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11–19. (in Chinese)
- 20 张国忠, 罗锡文, 臧英, 等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 13–20.
ZHANG Guozhong, LUO Xiwen, ZANG Ying, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 13–20. (in Chinese)
- 21 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20–28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20–28. (in Chinese)
- 22 VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348–360.
- 23 YOSHIYUKI S, CUNDALL P A. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9): 864–872.
- 24 胡建平, 郭坤, 周春健, 等. 磁吸滚筒式排种器种箱振动供种仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 61–65.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140810&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.010.
- HU Jianping, GUO Kun, ZHOU Chunjian, et al. Experiment of supplying seeds in box of magnetic precision cylinder-seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 61–65. (in Chinese)
- 25 李帅, 李晔, 马履翱, 等. 基于 EDEM 对圆形导料溜槽的仿真分析[J]. 煤矿机械, 2012, 33(6): 71–73.
LI Shuai, LI Ye, MA Lüao, et al. Simulation analysis of cylindrical chute based on EDEM[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(6): 71–73. (in Chinese)
- 26 于建群, 申燕芳, 牛序堂, 等. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 105–109.
YU Jianqun, SHEN Yanfang, NIU Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 105–109. (in Chinese)
- 27 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- 28 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- 29 吴爱祥, 孙业志, 刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- 30 滕云楠, 曾庆辉, 姚红良, 等. 振动摩擦机理及其非线性动力学特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 197–202.
TENG Yunnan, ZENG Qinghui, YAO Hongliang, et al. Mechanism of vibration friction and its non-linear dynamic characteristics[J]. Tribology, 2010, 30(2): 197–202. (in Chinese)
- 31 孔维姝, 胡林, 杜学能, 等. 用探测棒研究颗粒堆中的最大静摩擦力[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2318–2322.
KONG Weishu, HU Lin, DU Xueneng, et al. Studies of maximum static friction force in granular pile with probing rod[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2318–2322. (in Chinese)
- 32 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34–41.
CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34–41. (in Chinese)
- 33 刘佳. 机械气力组合式精量排种器设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- 34 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62–69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62–69. (in Chinese)