

气吸滚筒式玉米植质钵盘精密播种装置优化设计与试验

张 昆¹ 衣淑娟¹ 刘海军² 孙 浩¹ 马永财¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163000; 2. 浙江农林大学暨阳学院, 诸暨 311800)

摘要: 为适应玉米植质钵育农艺对播种机的要求,设计了气吸滚筒式玉米植质钵盘精密播种装置。通过理论分析建立了种子吸种过程的动力学模型,得到影响吸种性能的主要因素为负压、前进速度、充种角。对吸种过程进行模拟仿真设计,进一步确定了影响种子吸附的主要因素。最后进行了播种装置性能试验,以合格指数、漏播指数、重播指数为分析指标,通过三因素四水平正交试验得出最优参数组合为:前进速度 0.22 m/s、负压 1 200 Pa、充种角 20°,在此条件下进行了验证试验,得出合格指数为 90.48%、漏播指数为 4.24%、重播指数为 5.28%,结果表明该播种装置满足播种机的播种要求。

关键词: 玉米; 气吸滚筒式; 植质钵盘排种器; 正交试验

中图分类号: S223 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0062-08 OSID: 

Optimization Design and Test of Suction Performace of Air Suction Cylinder Type Precise Seeding Device for Maize with Plant Material Bowl-tray

ZHANG Kun¹ YI Shujuan¹ LIU Haijun² SUN Hao¹ MA Yongcai¹
(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China
2. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, China)

Abstract: In order to meet the requirements of plant material bowl seeding agronomy on the seeder, a reasonable structure of air suction cylinder type precise seeding device for maize with plant material bowl tray has been designed. The structural parameters of key components are determined by theoretical analysis. The dynamic model of seed suction process is established. The main factors affecting the suction performance indicators are the negative pressure, the forward speed and the suction angle. The simulation design was carried out to determine the influencing factors further. Finally, the performance test of the seeding device was carried out. The orthogonal test of three factors and four levels was adopted taking the qualified rate, missing seeding rate and the repetition rate as the performance indexes. The results showed that the main factors affecting the qualified index were negative pressure, forward speed and seed suction angle. The primary and secondary factors affecting the missing seeding index were negative pressure, suction angle and forward speed; the primary and secondary factors affecting the replay index were ngative pressure, forward speed and seed suction angle. The optimal parameter combination is that the forward speed is 0.22 m/s, the negative pressure is 1 200 Pa and the suction angle is 20°. Under this condition, the qualified index is 90.48%, the missing sowing index is 4.24% and the replaying index is 5.28%, which meet the design requirements. The average performance index in this paper is different from the national standard. After many experiments, it is found that the population flow characteristics in the seed box have certain influence on the seed filling performance, and then affect the seeding performance of the device. The impact of liquidity needs to be further studied in the future.

Key words: maize; air suction cylinder type; plant material bowl-tray seed metering device; orthogonal test

收稿日期: 2020-07-27 修回日期: 2021-01-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700705)和粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心和黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划项目(TDJH201803)
作者简介: 张昆(1978—),男,助理研究员,博士,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全程机械化研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

0 引言

我国北方寒区土壤条件不佳、气候环境恶劣、无霜期较短,玉米品种生育期的选择受到限制,传统的种植方式为大田直播,且只能采用中、早熟品种^[1-6]。为了提高玉米品质和产量,在我国调减玉米种植面积的政策背景下,北方寒区开始采用育苗移栽的玉米种植方式,这可有效解决该地区玉米种植产量和质量问题^[7-9],但对植质钵盘播种提出了较高的要求。

近年来,随着精密播种技术的不断发展,精密播种机得到广泛应用。排种器是实现移栽秧盘精密播种的关键部件^[10-13]。目前,国内外先进的播种机普遍采用气吸式工作原理,排种器的吸种环节是决定播种精度的重要因素,因此国内外学者对种子在吸孔气流场中的受力和运动规律进行了研究^[14-20]。

目前与玉米育苗移栽机相配套的播种装置尚不完善^[21-22]。现有钵苗精密播种机都是针对水稻设计的,针对玉米的较少,尤其是考虑气固耦合的气吸滚筒式玉米钵苗精密播种的研究尚未见报道。

为此,在已研究的玉米植质钵育秧盘基础上,本文利用动力学分析、建模仿真、试验研究等方法,对气吸滚筒式玉米植质钵盘精密播种装置进行优化设计。通过试验明确影响因素及最优参数组合条件,为玉米植质钵盘精密播种装置设计提供参考。

1 结构和工作原理

1.1 播种装置结构

气吸滚筒式播种装置主要由种箱、滚筒、绝压辊、链轮、空心轴、气嘴等组成,如图1所示。

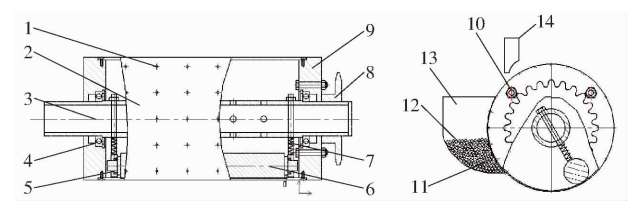


图1 气吸滚筒式播种装置结构示意图
Fig.1 Schematic structural diagram of air suction cylinder type seeding device

1.2 工作原理

播种装置内充好的种子随滚筒转动至播种区,进行投种。如图2所示,气吸滚筒式播种机中间位置为空心轴,与风机相连,通过风机的作用将滚筒内的空气抽走形成负压腔。绝压结构包括绝压辊、弹簧和螺杆结构,其中,螺杆结构上端安装在空心轴的

上下通孔内,下端安装弹簧和绝压辊,弹簧压紧绝压辊使其与滚筒内壁密合,起到隔绝负压的作用。

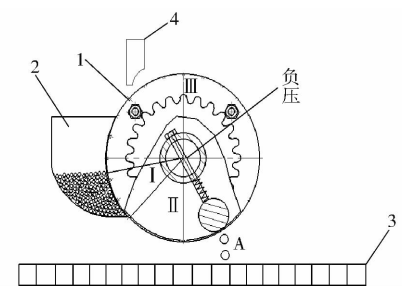


图2 播种装置工作原理图
Fig.2 Working principle diagram of seeding device
1. 滚筒 2. 种箱 3. 钵育秧盘 4. 气嘴

播种装置工作时,滚筒旋转,经过如图2所示的I、III、II区域。当吸种孔到达区域I时,滚筒内压强小于外界压强,由于大气压的作用,种子被吸附到吸种孔上,在滚筒的作用下离开种箱;经过气嘴清种后,保留1粒种子在吸种孔上,从区域I到区域III,种子一直被吸附在滚筒上,随着滚筒一起运动,当装置运转到A处时,绝压辊堵住滚筒上的吸种孔,使种子失去吸附力,这时种子由于自身的重力作用,做自由落体运动,落入玉米植质钵育秧盘,完成投种。

2 吸种过程动力学模型建立

播种装置的充种过程包括2个阶段:种子虽然受到气流场的吸附力,但并没有与滚筒接触;种子在气流场的吸附力作用下,与滚筒紧紧贴附在一起。吸附过程中种子的运动状态与受力分析简图如图3所示。

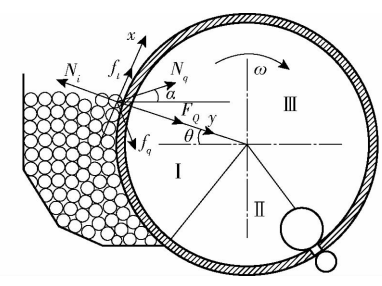


图3 吸附过程受力分析简图
Fig.3 Stress analysis in adsorption stage

对种子进行受力分析,种子质心为坐标原点,滚筒切向方向为x轴方向,法向方向为y轴方向。在充种的第1阶段,种子不受滚筒施加的摩擦力与支持力,x轴方向合力为0,y轴方向是加速靠近的过程,其受力分析如图3所示。

力学平衡方程为^[23]

$$\begin{cases} N_q \sin(\alpha + \theta) - G \cos \theta - f_q \cos(\alpha + \theta) = 0 \\ F_q + G \sin \theta + f_q \sin(\alpha + \theta) + N_q \cos(\alpha + \theta) = ma \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_Q ——种子所受吸附力,N
 m ——种子质量,kg
 N_q ——种子受到的种群支持力,N
 f_q ——种子受到的种群摩擦力,N
 G ——种子自重,N
 α —— N_q 与水平方向之间夹角,(°)
 θ —— F_Q 与水平方向之间夹角,(°)
 a ——种子加速度,m/s²

第 2 阶段为种子吸附在滚筒上和滚筒一起转动,其力学平衡方程为

$$\begin{cases} N_q \sin(\alpha + \theta) + f_t - G \cos \theta - f_q \cos(\alpha + \theta) = 0 \\ F_Q + G \sin \theta + f_q \sin(\alpha + \theta) + N_q \cos(\alpha + \theta) - \\ N_t - m \omega^2 R = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} f_q = N_q \tan \varphi_q \\ f_t = N_t \tan \varphi_t \end{cases} \quad (3)$$

式中 f_t ——种子与滚筒之间摩擦力,N
 N_t ——滚筒对种子的支撑力,N
 ω ——滚筒旋转角速度,rad/s
 φ_q ——种子自然休止角,取 21°
 φ_t ——滚筒与种子之间滑动摩擦角,取 24°
 R ——滚筒半径,m

由式(2)和式(3)可得

$$F_{Q1} = ma - \frac{\cos(\alpha - \varphi_q)}{\sin(\alpha + \theta - \varphi_q)} mg \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_{Q2} &= m \omega^2 R - \\ &\frac{N_q \cos(\varphi_q + \varphi_t - \alpha - \theta) + mg \cos \varphi_q \sin(\theta - \varphi_t)}{\cos \varphi_q \cos \varphi_t} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 F_{Q1} ——第 1 阶段种子所受吸附力,N
 F_{Q2} ——第 2 阶段种子所受吸附力,N

种子受到的吸附力 F_Q 是由吸种孔内外压差形成的,其相应的方程可表示为

$$F_Q = \pi \Phi \Delta p_N R^2 \quad (6)$$

式中 Δp_N ——负压,Pa

Φ ——各因素对种子所受吸附力影响修正系数

根据上述分析可知,在取种过程中,内外压差形成的吸附力需要克服种子自重和种子与周围种群间的摩擦力做功,只有当吸附力要超过第 2 阶段的合力时,种子才能顺利的吸附在滚筒上,即

$$\begin{aligned} F_{Qmin} &= k \Delta p_N \pi R_k^2 = \\ m \omega^2 R - &\frac{N_q \cos(\varphi_q + \varphi_t - \alpha - \theta) + mg \cos \varphi_q \sin(\theta - \varphi_t)}{\cos \varphi_q \cos \varphi_t} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 k ——流场比例系数,取 0.65

R_k ——吸种口半径,m

当 $\alpha = 90^\circ$ 时,支持力与种子重力相等,此时方

程可以简化为

$$\Delta p_N = \frac{m \omega^2 R \cos \varphi_t - mg \tan \varphi_t \cos(\theta - \varphi_t)}{\pi \varphi \left(\frac{k}{2} \right)^2 \cos \varphi_t} \quad (8)$$

从式(8)中可以初步看出负压、滚筒角速度、充种角为影响种子吸附作用的主要因素。

3 吸种过程模拟仿真

为了进一步探究种箱上层种子受吸附的主要影响因素,进行吸种过程模拟仿真。

3.1 耦合理论

播种装置工作时,种箱内拖动层的种子会随滚筒转动而运动,种子运动会引起彼此之间的相互接触摩擦,产生接触力。根据接触方式的不同,可将接触模型分为软颗粒接触和硬颗粒接触两种情况,由于种子表面不存在粘附力作用,因此可选择 Hertz - Mindlin 软颗粒接触模型作为分析模型^[24]。在模型接触位置设置耦合器和滑动的弹簧振子,利用阻尼振动简化接触力,如图 4 所示。

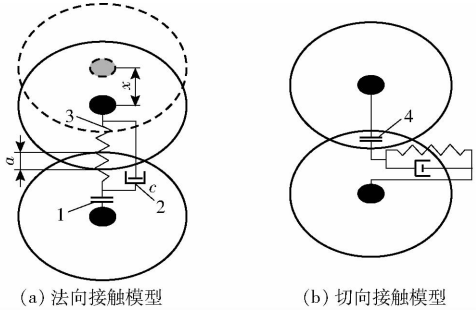


图 4 种间接触力简化模型
Fig. 4 Simplified model of contact force between seeds
1. 耦合器 2. 阻尼器 3. 弹簧 4. 滑动器

微分方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + \mu x = 0 \quad (9)$$

式中 c ——接触阻尼系数 μ ——弹簧弹性系数
颗粒体所受的力除了上述碰撞以及曳力、自身重力外,还包括浮力、升力、静电力等,但是由于颗粒体密度与流体密度相差较大,除了曳力与重力外其他力都很小,可以忽略不计。在 EDEM - Fluent 耦合模块中相间作用力模型包括曳力模型、升力模型、热传递模型,但是由于颗粒体主要受到曳力作用,所以其他模型无需选择。在曳力模型中,颗粒受到的曳力阻力系数 C_D ,取决于颗粒雷诺数^[25],计算式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_s} & (Re_s < 0.5) \\ \frac{24(1 + 0.25 Re_s^{0.0678})}{Re_s} & (0.5 \leq Re_s \leq 1\,000) \\ 0.44 & (Re_s > 1\,000) \end{cases} \quad (10)$$

其中
$$Re_s = \frac{\rho_f L |v_s - v_f|}{\eta} \quad (11)$$

式中 ρ_f ——流体密度, kg/m³
 L ——颗粒体直径, m
 Re_s ——流体雷诺数
 v_f ——流体速度, m/s
 v_s ——颗粒体速度, m/s
 η ——流体粘度系数, Pa·s
 a ——CFD 网格单元中的自由体积

耦合模块中的曳力模型有3种:自由流曳力模型、Ergun and Wen & Yu 曳力模型、Di Felice 曳力模型。自由流曳力模型是基于球形颗粒的自由流曳力进行计算的;Ergun and Wen & Yu 曳力模型是结合了 Ergun 模型和 Wen & Yu 模型,对标准的曳力方程进行了修改;Di Felice 曳力模型是在自由流曳力模型的基础上添加了孔隙率修正项,考虑了孔隙率对相邻颗粒之间的阻力影响。

上述曳力模型都是通过试验得出的经验公式。自由流曳力模型适用于颗粒数量较少、接触碰撞不多、速度梯度较小的情况;Ergun and Wen & Yu 曳力模型与 Di Felice 曳力模型均引入了体积分数项并对曳力模型进行了修正,考虑了颗粒之间相互的影响。由于 Ergun and Wen & Yu 曳力模型相对较为完整,因此仿真过程采用 Ergun and Wen & Yu 曳力模型。

3.2 模拟仿真分析

为分析吸种过程,对播种装置进行建模,并导入处理软件 Gambit 中,进行网格划分,定义材料属性,设定智能网格划分等级为 4,得到有限元网格划分如图 5 所示。

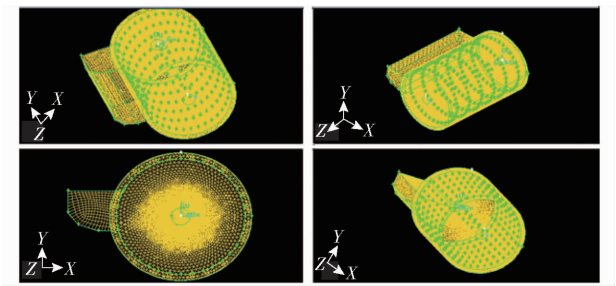


图 5 播种装置网格划分

Fig. 5 Grid division of seed metering device

对播种装置进行区域划分,即分割为种箱、空心轴、滚筒 3 个区域,分别对各区域进行结构化网格划分,并对空心轴局部进行网格加密。最后添加边界条件。将划分好网格的 .mesh 文件导入流体力学软件 Fluent 中进行流场模拟,将模拟好的流场数据导入离散元仿真软件 EDEM 中,得到播种装置外流场分布,如图 6 所示。

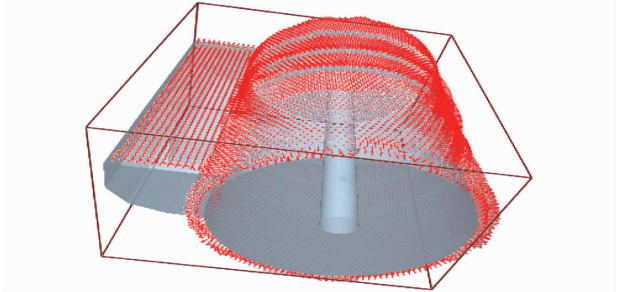


图 6 播种装置外流场

Fig. 6 Outflow field of seed metering device

在 EDEM 软件中分别设置播种装置、种子材料信息以及接触条件,根据实际设置玉米种子的泊松比 0.4,剪切模量 1.77×10^8 Pa,密度 1.18 g/cm^3 ;排种盘的泊松比 0.5,剪切模量 1.37×10^8 Pa,密度 1.20 g/cm^3 。设置玉米种子和玉米种子碰撞的弹性恢复系数为 0.182,滑动摩擦因数为 0.431,滚动摩擦因数为 0.078;玉米种子和排种盘碰撞的弹性恢复系数为 0.621,滑动摩擦因数为 0.482,滚动摩擦因数为 0.093。由于滚筒对称性结构,同时为提高仿真效率,采用带有周期性边界条件的单排吸孔,播种装置充种过程模拟如图 7 所示。

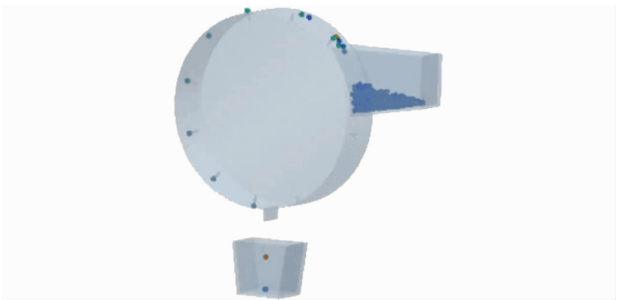


图 7 播种装置充种过程模拟

Fig. 7 Simulation of seed metering device filling process

对模拟结果进行分析,选取种层最上层靠近滚筒壁位置处,对同条件下种子速度变化进行比较。在其他条件相同的情况下改变滚筒转速,如图 8 所示,在转速 10 r/min 的情况下,充种时间较长,种子有充分的时间被吸附,因此速度变化较快,在 1.8 s 左右速度到达 10 m/s,很快与滚筒速度一致,并保持不变。随着滚筒转速增加到 15 r/min,种子充种时间缩短,其速度变化较慢,在 2.2 s 左右速度到达 18 m/s,与滚筒同步所需时间加长。当滚筒转速过快,即 50 r/min,种子来不及充种,被吸起的种子又重新落回种箱,回落过程中种子速度方向变化导致图中出现负值。

在其他条件相同的情况下改变负压,如图 9 所示,在负压 800 Pa 的情况下,种子受到的吸附力较小,种子速度持续增加,其速度变化较慢,在 2.4 s 左右速度达到 20 m/s,与滚筒同步所需时间较长。

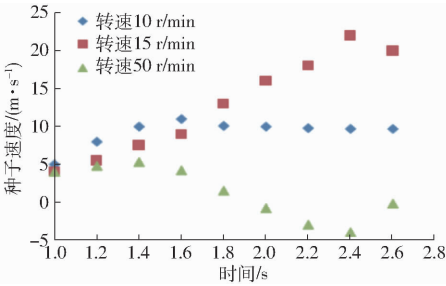


图 8 种子速度随转速变化散点图

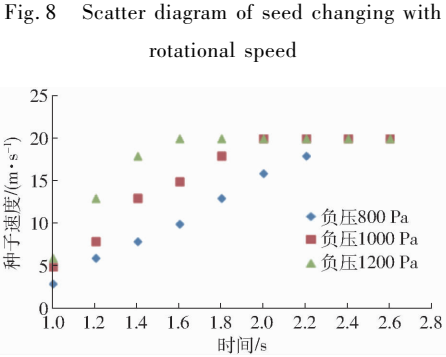


图 9 种子速度随负压变化散点图

随着负压增加到 1 000 Pa,种子受到的吸附力增大,种子速度变化率提高,与滚筒同步所需时间逐渐缩短,在 2 s 左右速度达到 20 m/s。当负压达到 1 200 Pa,种子受到的吸附力进一步增大,种子速度变化率提高更多,与滚筒同步所需时间更短,在 1.6 s 左右速度达到 20 m/s。负压变化对种子速度变化影响很大。

在其他条件相同的情况下改变充种角,如图 10 所示,在充种角 0°情况下,种子所需吸附力较大,因此速度持续变化且变化很慢,与滚筒同步所需时间较长,在 2.4 s 左右速度达到 20 m/s。随着充种角增加到 30°,种子所需吸附力减小,种子速度变化率提高,与滚筒同步所需时间逐渐缩短,在 2 s 左右速度达到 20 m/s。当充种角达到 45°时,种子受到的吸附力进一步减小,种子速度变化率提高更多,与滚筒同步所需时间更短,在 1.4 s 左右速度达到 20 m/s。充种角变化对种子速度变化影响很大。

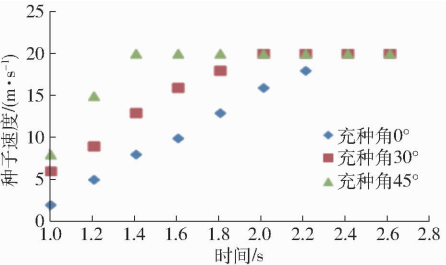


图 10 种子速度随充种角变化散点图

Fig. 10 Scatter diagram of seeds changing with filling angle

通过对充种过程模拟仿真发现,负压、前进速

度、充种角的改变对播种装置充种情况影响很大,确定为影响种子吸附的主因素。

4 试验

4.1 材料与方法

本试验选用玉米种子为河南省农业科学院粮食作物研究所生产的秋乐牌郑单 958 玉米杂交种。籽粒纯度不低于 97%,净度不低于 99%,出芽率不低于 93%,含水率不高于 20%,千粒质量 307 g,籽粒形状为马齿形(扁平呈长方形),适宜在黑龙江省种植。试验在黑龙江八一农垦大学排种器实验室进行。如图 11 所示,试验装置主要由种床、玉米植质播种装置、集成操作系统、综合数据采集台等组成。

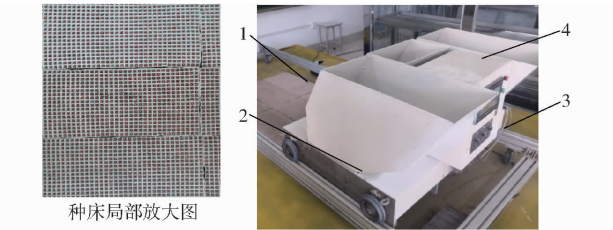


图 11 试验装置

Fig. 11 Experimental device

1. 种床 2. 玉米植质播种装置 3. 集成操作系统 4. 综合数据采集台

选择合格指数、重播指数和漏播指数作为目标函数,反映气吸滚筒式播种装置工作性能。根据理论分析及前期大量试验并结合相关学者研究成果,最终选择播种装置负压 X_1 、前进速度 X_2 以及充种角 X_3 作为影响气吸滚筒式播种装置工作性能的主要参数。本试验在自行研制的试验台上开展。通过控制试验风压,采用 U 型测压管对滚筒上吸种孔处风压进行测量,直至达到试验需求。运用变频调速原理调节前进速度,在速度稳定的情况下进行播种性能测定试验。试验后对合格指数、重播指数、漏播指数进行测量统计,每组试验重复 5 次取平均值。

4.2 试验设计

为了验证播种装置的播种性能,得到较优的工作参数组合,根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选用正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行正交试验并分析^[26-27]。

在播种装置性能检测试验台上进行播种性能测试试验。通过图像采集处理系统对钵育秧盘上的种子进行实时检测,并对得到的数据进行处理,每次试验测量 200 粒种子,并重复 5 次取平均值。根据前期试验,选取前进速度为 0.20 ~ 0.26 m/s,负压为 1 000 ~ 1 300 Pa,充种角为 10° ~ 40°,试验因素水平如表 1 所示,试验安排及结果如表 2 所示,其中 A、B、C 为因素水平值。

表 1 试验因素和水平

Tab.1 Factors and levels of test

水平	因素		
	前进速度/(m·s ⁻¹)	负压/Pa	充种角/(°)
1	0.20	1 000	10
2	0.22	1 100	20
3	0.24	1 200	30
4	0.26	1 300	40

表 2 试验设计方案及结果

Tab.2 Experiment design and values

试验序号	因素			指标		
	A	B	C	合格指数/%	漏播指数/%	重播指数/%
1	1	1	1	57.23	37.03	5.74
2	1	2	2	76.49	18.52	4.99
3	1	3	3	87.91	3.42	8.67
4	1	4	4	68.63	12.16	19.21
5	2	1	2	79.37	13.56	7.07
6	2	2	1	79.43	14.74	5.83
7	2	3	4	89.34	4.24	6.42
8	2	4	3	82.52	3.53	13.95
9	3	1	3	66.71	28.16	5.13
10	3	2	4	70.45	27.32	2.23
11	3	3	1	76.37	7.95	15.68
12	3	4	2	69.72	3.34	26.94
13	4	1	4	49.67	36.83	13.50
14	4	2	3	67.52	23.95	8.53
15	4	3	2	79.47	3.39	17.14
16	4	4	1	55.45	8.12	36.43
合格指数	k_1	72.565	63.245	67.120		
	k_2	82.665	73.472	76.263		
	k_3	70.813	83.273	76.165		
	k_4	63.028	69.080	69.523		
	R	19.637	20.028	9.143		
漏播指数	k_1	17.782	28.895	16.960		
	k_2	9.018	21.133	9.703		
	k_3	16.693	4.750	14.765		
	k_4	18.073	6.787	20.137		
	R	9.055	24.145	10.434		
重播指数	k_1	9.652	7.860	15.920		
	k_2	8.317	5.395	14.035		
	k_3	12.495	11.977	9.070		
	k_4	18.900	24.133	10.340		
	R	10.583	18.738	6.850		

4.3 结果分析

由表 2 可得,影响合格指数的因素主次顺序为 B、A、C,较优的因素组合为 B₃A₂C₂;影响漏播指数的因素主次顺序为 B、C、A,较优的因素组合为 B₃C₂A₂;影响重播指数的因素主次顺序为 B、A、C,较优的因

素组合为 B₂A₂C₃。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析,进一步分析因素对试验指标影响的显著性。如表 3 所示,可知前进速度、负压和充种角对各项播种性能指标都有显著影响。前进速度较小时,型孔通过充种区的时间较长,种子充入型孔的机会增大,前进速度的增大会使充种时间变短,漏播指数增大;负压较低时,所提供的吸附力不足以克服种群摩擦力,会造成漏播指数增大。负压较大时,所提供的吸附力远大于单粒种子所需,种子可以轻松脱离种群,但容易吸附一颗以上的种子,造成重播指数增大;充种角较小时,种子需要克服自身重力、种群摩擦力,使漏播指数增大;充种角较大时,在其他条件不变的情况下,受到滚筒支持力,使漏播指数减小。结合试验结果,以及上述理论分析和仿真模拟,可知理论及试验结果一致。综上,为了保证播种装置良好的播种性能,需要对 3 个因素选取合适的参数组合。

表 3 方差分析

Tab.3 Variance analysis for seeding quality

项目	方差来源	离差平方和	自由度	F	显著性
合格指数	A	782.765	3	61.151	**
	B	856.511	3	66.912	**
	C	260.729	3	20.369	**
	残差	25.60	6		
漏播指数	A	220.900	3	5.959	*
	B	1 610.296	3	43.437	**
	C	230.968	3	6.230	*
	残差	74.14	6		
重播指数	A	265.843	3	11.454	**
	B	829.992	3	35.762	**
	C	121.529	3	5.236	*
	残差	46.42	6		

注: * 表示差异显著 (P < 0.05), ** 表示差异极显著 (P < 0.01)。

综合以上分析,在保证合格指数最大、漏播指数和重播指数较小原则下,确定较优组合为 A₂B₃C₂,即前进速度为 0.22 m/s、负压为 1 200 Pa、充种角为 20°。

4.4 验证试验

在上述试验环境条件下进行验证试验,每次试验测量 200 粒种子,并重复 5 次取平均值。按照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》在前进速度为 0.22 m/s、负压为 1 200 Pa、充种角为 20°的条件下进行试验,试验结果见表 4。从表 4 可以看出,综合性能较优的结果为合格指数 90.48%、漏播指数 4.24%、重播指数 5.28%。

表 4 验证试验结果
Tab.4 Result of verifying test %

试验序号	合格指数	漏播指数	重播指数
1	90.48	4.24	5.28
2	89.34	4.24	6.42
3	87.91	3.42	8.67
4	88.47	5.72	5.81
5	88.64	6.23	5.13

5 结论

(1)对充种区吸种压差和吸种过程种子的受力进行了分析,建立种子受力方程和吸附力方程,得出负压、滚筒转速、充种角是影响种子吸附的主要因

素。利用 EDEM 软件进行仿真,得到了滚筒转速、负压、充种角对吸种性能的影响规律。

(2)通过三因素四水平正交试验,分析确定了负压、前进速度、充种角对播种装置性能影响的主次顺序;影响合格指数的因素主次顺序为负压、前进速度、充种角,影响漏播指数的因素主次顺序为负压、充种角、前进速度,影响重播指数的因素主次顺序为负压、前进速度、充种角。

(3)获得较优参数组合为前进速度 0.22 m/s、负压 1 200 Pa、充种角 20°,通过 5 次验证试验得到最优参数组合下的合格指数为 90.48%、漏播指数为 4.24%、重播指数为 5.28%。

参 考 文 献

[1] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2): 48-51,95. LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48-51,95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.010. (in Chinese)

[2] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1): 136-141. CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):136-141. (in Chinese)

[3] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 1-16. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170901&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 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. ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170710&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010. (in Chinese)

[6] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等. 集排式大豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6): 112-118. WANG Yecheng, JIN Yadong, LUO Sibo, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):112-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180613&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.013. (in Chinese)

[7] 秦军伟,张晓辉,姜忠爱,等. 探讨集中式排种器的排种机理及其发展[J]. 农业装备技术,2004(4): 22-23. QIN Junwei, ZHANG Xiaohui, JIANG Zhongai, et al. Research of seeding principles of centralized type seed meters and its development[J]. Agricultural Science Technology and Equipment, 2004(4): 22-23. (in Chinese)

[8] 马洪亮,高焕文,魏淑艳. 驱动缺口圆盘玉米秸秆根茬切断装置的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(5): 86-89. MA Hongliang, GAO Huanwen, WEI Shuyan. Driven gap disc cutting mechanism for treating corn stalk and rootstalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 86-89. (in Chinese)

[9] 张晓辉,王永振,仇利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3): 59-67. ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)

[10] KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.

[11] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.

[12] 张开兴,李金凤,宋正河,等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6): 52-63. ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction

- precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52–63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190606&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.006. (in Chinese)
- [13] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 37–46. DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37–46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.004. (in Chinese)
- [14] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.007. (in Chinese)
- [15] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54–66. SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54–66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)
- [16] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47–56. DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47–56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.006. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] RAPER R L, REEVES D W, SHAW J N, et al. Benefits of site specific subsoiling for cotton production in coastal plain soils[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 174–181.
- [23] 陈玉龙, 贾洪雷, 王佳旭, 等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 95–104. CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95–104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170810&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.010. (in Chinese)
- [24] 李国林, 宋伟, 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 Technology and Equipment, 2011(8): 70–71, 73. (in Chinese)
- [25] 刘其潼, 张晋国, 杨娜, 等. 玉米免耕深松全层施肥精量播种机播前碎土镇压轮的研制[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 127–130.
- [26] 廖庆喜, 张猛, 余佳佳, 等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 30–34. LIAO Qingxi, ZHANG Meng, YU Jiajia, et al. Pneumatic centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 30–34. (in Chinese)
- [27] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1–19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1–19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)