

气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验

赖庆辉 马文鹏 刘素苏 微 张智泓

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为提高气吸圆盘式微型薯排种器充种性能,以云南丽薯6号微型薯为播种对象,基于离散元法,以种子平均法向应力方差为指标,对振动频率和振动幅度分别进行数值模拟,并对上述因素进行单因素试验,试验结果与仿真效果一致。结果表明:增加振动频率和振动幅度可以增大种子平均法向力方差,增强对种子的扰动性,从而提高充种性能。为寻求最佳工作参数组合,采用三因素五水平二次旋转正交组合试验方法,对排种器进行排种性能试验,并对试验结果进行优化与验证。结果表明:在作业速度为2.4 km/h,吸种负压为6 kPa,种层高度为70 mm,振动频率为6.5~6.9 Hz,振动幅度为20~21 mm时,合格指数大于95,重播指数和漏播指数小于2.5。

关键词: 微型薯; 气吸圆盘式排种器; 充种性能; 数值模拟; 试验

中图分类号: S223.2⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0044-10

Simulation and Experiment on Seed-filling Performance of Pneumatic Disc Seed-metering Device for Mini-tuber

LAI Qinghui MA Wenpeng LIU Su SU Wei ZHANG Zhihong

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to realize the mechanized planting of mini-tuber and solve the problem of large seed filling, a vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber was designed. The seed-metering device was composed of metering plate, air chamber, frame and vibrating seed feeding device. Seeding-filling performance was the key factor that influenced the properties of metering device. In order to improve the seed-filling performance of the pneumatic disc seed-metering device, Lishu No.6 mini-tuber was adopted as sowing object, the method of UDEC was used as research technique, meanwhile, variance yields of average normal stress was considered as the optimizing targets. Through single factor experiment, the vibration frequency and vibration amplitude were numerically simulated respectively. It can be found that the experimental phenomenon and effect were in consistent with the simulation ones. Results showed that vibration frequency and vibration amplitude increased variance yields of average normal stress of seeds, hence disturbance of seeds was enhanced. Based on the three-factor five-level quadratic orthogonal rotating combination test method, the influence of vibration frequency, vibration amplitude and layer height on sowing performance were explored. The regression equations of the three factors and five levels were fitted through the processing by Design-Expert 8.0.6 (experimental design expert) software. Based on the results of examination, it can be found that the fitting of the equation was good, and the best parameter combination was the operating speed of 2.4 km/h, negative pressure of 6 kPa, vibration frequency of 6.5~6.9 Hz, vibration amplitude of 20~21 mm and layer height of 70 mm. Under the optimal condition, the qualified index was greater than 95, and the multiple index as well as the missing index was less than 2.5. It showed that the vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device met the standard and requirements by comparing the results with the national standard. The research approach was suitable for the exploitation of mini-tuber seed-metering, and it provided a theoretical reference for the design of pneumatic disc seed-metering device.

Key words: mini-tuber; pneumatic seed-metering device; seed-filling performance; numerical simulation; experiment

收稿日期: 2017-02-21 修回日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305187)、云南省重点新产品开发计划项目(2014BC007)、云南省科技计划青年项目(2015FD011)、昆明理工大学自然科学基金项目(KKSY201323067、KKSY201323025、14118940)和云南省教育厅项目(2016ZZX048)

作者简介: 赖庆辉(1980—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

引言

目前国内外先进的排种器普遍采用了气力式原理^[1-6],这是因为气力式排种器具有对种子外形要求不严,不伤种,能适应较高速度播种作业等优点。对于气力式排种器,充种环节尤为重要,其充种性能直接影响播种质量。采用种箱振动的方式提高充种性能是最常见的方法^[7-9],即通过振动激励使振动种盘内种群产生“沸腾”运动,以便气力吸种部件完成吸种过程。周海波^[10]采用振动原理,研制了一种电磁振动种室和气动振盘相结合的振动式精密播种装置,减免伤种并实现均匀稳定播种;王朝晖等^[11]、杨明金等^[12]利用振动理论、高速摄影与振动分析仪,采用二次正交旋转组合试验方法,得出吸种性能与种层厚度、振动频率等因素间的回归模型;龚智强^[13]分析了变质量系统种层厚度与振动种盘振动参数的关系,建立了排种装置工作参数与吸种距离之间的数学模型;鹿芳媛等^[14]基于离散元法,模拟振动盘工作过程,探究振动参数对种子运动规律的影响,寻求最佳振动频率;赖庆辉等^[15]采用 DEM - CFD 耦合方法,研究振动参数对种间平均法向应力和供种高度的影响,得到最优工作参数组合;陈进等^[16]研究了气吸振动播种试验台内种子的运动机理,通过对试验台内种子运动过程的计算机动态模拟,得出了振动台内种子的运动规律。

微型薯属于大粒种子,为解决其不易充种的问题,设计了一种振动和气吸组合式精密排种器,并通过简易的正交试验得到了一组关于作业速度、吸种负压和振动频率的最优工作参数组合,排种合格指数可达到 90 以上^[17]。但在振动供种过程中,振动幅度和种层高度也会影响种群运动,进而影响充种性能。因此,需深入研究各项振动参数对充种性能的影响机理,并寻求最优振动参数组合,以进一步提高排种合格指数。由于种群与振动种盘的碰撞以及种子之间相互碰撞关系非常复杂,目前从理论上还无法建立排种装置吸种过程种群运动学模型,因此,本文以自行研制的气吸圆盘式排种器为研究对象,借助离散元仿真软件 EDEM 进行振动频率和振动幅度对种群扰动影响的仿真分析,得出振动过程中种群运动参数的变化规律,并进行台架验证试验。采用三因素五水平二次旋转正交组合试验方法,选取振动频率、振动幅度、种层高度为试验因素进行排种性能试验,寻求各参数的最佳区间组合,提高充种性能的同时增强排种器的适用性。

1 排种器工作原理与振动理论

1.1 排种器结构及工作原理

振动供种气吸圆盘式微型薯排种器结构如图 1 所示,主要由振动供种机构、气力排种机构和机架等组成。

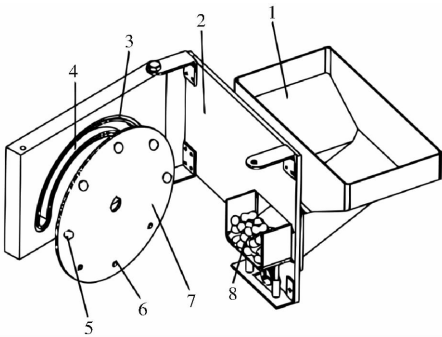


图 1 振动供种气吸圆盘式排种器结构示意图
Fig.1 Structure diagram of vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device

1. 种箱 2. 机架 3. 密封槽 4. 气室 5. 微型薯 6. 吸孔
7. 排种盘 8. 振动板

气室外围设有密封槽,排种盘与密封条紧密贴合,机架上安装有种箱和振动供种机构。微型薯从种箱进入振动板,在振动作用下种群处于“沸腾”状态,接通风机使气室内部形成负压区,播种机地轮带动排种盘转动,微型薯在吸孔内外压差的作用下被吸附在吸孔上,并随着排种盘一起运动。当微型薯运动到气室末端时,随着吸孔移出气室,负压消失,微型薯在自身重力作用下从吸孔脱落掉入种沟,实现排种过程。

振动激励装置按照工作原理可分为电液式、电动式和机械式。其中偏心式机械振动机构与其他振动激励方式相比,结构简单,振动幅度和振动频率相互独立可分别进行调节,有利于研究振动频率、振动幅度对种群运动的影响关系。图 2 为振动供种机构

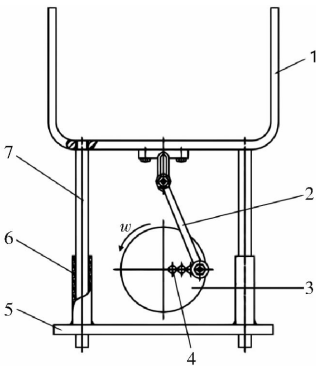


图 2 振动供种机构结构示意图
Fig.2 Structure diagram of vibration mechanism

1. 振动板 2. 连杆 3. 曲柄盘 4. 调节孔 5. 支架 6. 直线轴承 7. 直线轴

结构示意图,振动板在连杆的带动和直线轴的限位作用下,实现上下振动。其中,曲柄盘的转速由步进电动机控制,振动板振动频率可调节范围为 0 ~ 10 Hz;曲柄盘上设有调节孔,可通过改变曲柄长度来调节振动幅度,调节范围为 10 ~ 50 mm。

1.2 振动板运动分析

将振动供种机构简化为曲柄连杆机构,机构简图如图 3 所示,取振动板的上止点为振动板运动坐标原点 O' ,则由图中几何关系可得^[18]

$$x = R + L - R\cos\alpha - L\cos\beta \tag{1}$$

式中 x —— O' 点位移

R ——曲柄长度 L ——连杆长度

α ——曲柄与竖直方向夹角

β ——连杆与竖直方向夹角

记 $\lambda = R/L$,为曲柄半径与连杆长度之比,当 $\lambda \ll 1$ 时,式(1)可近似简化为

$$x = R \left(1 + \frac{\lambda}{4} - \cos(\omega t) - \frac{\lambda}{4} \cos(2\omega t) \right) \tag{2}$$

其中 $\omega = 2\pi f$ (3)

$$R = \frac{1}{2}A \tag{4}$$

式中 A ——振动幅度 ω ——振动圆频率

f ——振动频率 t ——时间

于是可求得振动板加速度表达式为

$$\ddot{x} = 2A\pi^2 f^2 (\cos(2\pi ft) + \lambda \cos(2\pi ft)) \tag{5}$$

若使种群处于“沸腾”状态,需满足

$$\max \{ 2A\pi^2 f^2 (\cos(2\pi ft) + \lambda \cos(2\pi ft)) \} > g \tag{6}$$

式中 g ——重力加速度

由式(6)可知,振动幅度和振动频率将对种子在振动盘上的运动产生较大影响,且参数选择范围较广,为最佳工作参数的选取造成较大干扰。因此本文采用离散元法,利用 EDEM (Engineering discrete element method) 软件探究振动供种过程中种子的运动规律及参数对其运动规律的影响,为确定最佳振动参数,提高振动播种装置的播种性能提供参考。

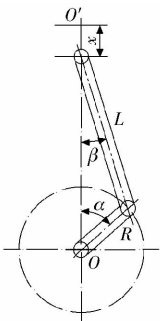


图 3 曲柄滑块振动机构
Fig. 3 Slider-crank mechanism

1.3 种群运动分析

定义排种器振动部件振动强度 K 为振动板竖直方向上加速度的最大值与重力加速度的比值^[12],设种群总层数为 p ,且最下层种子为第 p 层,最上层种子为第 1 层。

在种子被抛掷的过程中,种群内部运动可以看成种子之间的相互碰撞,则位于 $\varphi (1 \leq \varphi \leq p)$ 层的种子经过 $p - \varphi$ 次碰撞后的振幅 A_φ 与振动盘振幅 A 关系满足^[19]

$$A_\varphi = \frac{(1+r)^{p-\varphi}}{2^{p-\varphi}}A \tag{7}$$

式中 r ——颗粒间恢复系数, $r < 1$

则第 1 层种子抛掷强度需满足

$$K_{s1} = \frac{(1+r)^{p-1}}{2^{p-1}}K > 1 \tag{8}$$

因此排种器振动板振动强度需满足

$$K > \frac{2^{p-1}}{(1+r)^{p-1}} \tag{9}$$

由于 $r < 1$,由式(9)可知,种层厚度对振动盘内种子的运动具有较大影响。种层厚度越大,即 p 值越大,所需振动板的振动强度越大。因此,需寻求振动频率、振动幅度以及种层高度之间的最佳参数组合,以提高充种性能。

2 数值模拟

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的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。常用的软颗粒接触模型包括:摩擦电荷接触模型、线弹性接触模型、运动表面接触模型、线性黏附接触模型、Hertz - Mindlin 黏结接触模型以及 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型。其中 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型为 EDEM 软件中默认接触模型,又考虑到微型薯颗粒之间粘附力较小,故本文选取 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型^[20-24]。软颗粒接触使用的是软球模型,如图 4 所示,软球模型在颗粒 i 和颗粒 j 间设定了弹簧、阻尼器、滑动器和耦合器,引入了刚度 k 和阻尼系数 c 来量化弹簧、阻尼器、滑动器的作用。

耦合器是用来确定发生接触的颗粒配对关系,不引入任何力。在切向上,如果切向力超过屈服值,

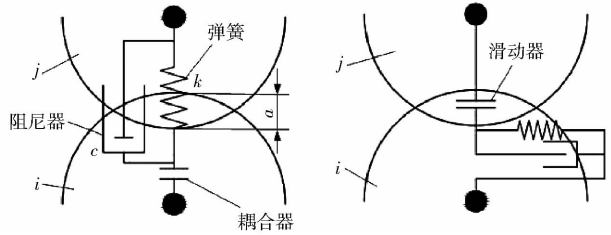


图 4 软球模型对颗粒间接触力的简化模型
Fig. 4 Simplified model of particles contact force from soft-sphere model

两颗粒在法向力和摩擦力作用下滑动,由滑动器实现这一目的^[25-27]。

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。对于三维球形颗粒,根据 Hertz 接触理论, F_{nij} 表示为

$$F_{nij} = -k_n a^{\frac{3}{2}} - c_n v_{ij} \mathbf{n}$$
 (10)

式中 k_n ——法向刚度
 c_n ——法向阻尼系数 a ——法向重叠量
 v_{ij} ——颗粒 i 相对于颗粒 j 的速度, m/s
 $\mathbf{n}$ ——从颗粒 i 球心到颗粒 j 球心的单位矢量

切向力 F_{tij} 表示为

$$F_{tij} = -k_t \delta - c_t v_{ct}$$
 (11)

式中 k_t ——切向刚度
 c_t ——切向阻尼系数
 v_{ct} ——接触点的滑移速度, m/s
 δ ——接触点的切向位移

如果 $|F_{tij}| > \mu_s |F_{nij}|$ (12)
则颗粒 i 发生滑移,切向力为

$$F_{tij} = -\mu_s |F_{nij}| \frac{v_{ct}}{|v_{ct}|}$$
 (13)

式中 μ_s ——静摩擦因数
式(13)为库仑摩擦定律,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^[28]。从公式中可以看出,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,因此本文采用法向力 F_{nij} 来衡量种子之间的内摩擦力^[29-30]。

2.3 振动供种过程仿真

在 Pro/E 软件中建立振动板几何模型并导入 EDEM,种子颗粒通过多球面组合填充的方式在 EDEM 中生成(图 5a)并添加经测量所得的力学特性(表 1),种子由振动板模型内部的颗粒工厂生成,生成的种子在自身重力作用下分布在振动板底部,如图 5b 所示。对振动板添加振频和振幅,在此作用下,种群出现“沸腾”状态,种间出现相对运动与碰撞,EDEM 软件获取实时颗粒体的位置与接触信息,离散元仿真过程输出每个时间步长的接触平均法向力、接触总数、种子总数。由于从种群生成完毕到种群运动达到稳定状态需要 1 s 左右的时间,因此每组仿真数据从 2.0 s 时开始输出,6.0 s 时结束。 i 时刻每个种子受到的平均法向力为

$$f_{ni} = F_{ni} \frac{N_i}{N_{ci}}$$
 (14)

式中 F_{ni} —— i 时刻接触法向力的平均值, N
 N_i —— i 时刻种子总数
 N_{ci} —— i 时刻接触总数

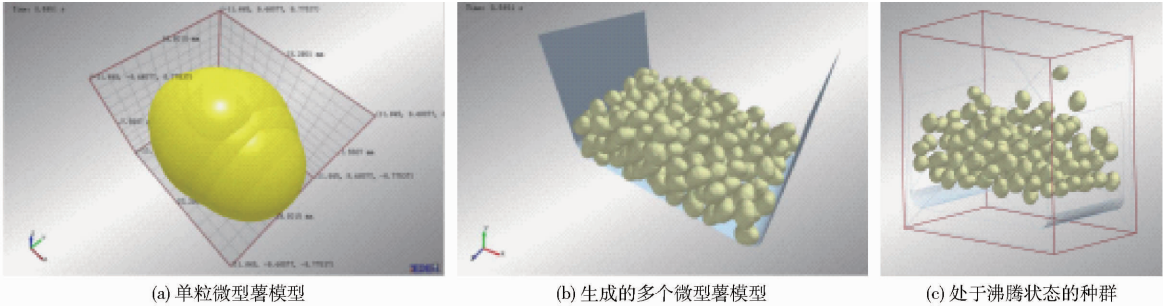


图 5 振动供种数值模拟结果
Fig. 5 Simulation results of seed-filling

表 1 模拟所需参数	
Tab. 1 Material parameters used in simulation	
参数	数值
颗粒体泊松比	0.325
颗粒体剪切模量/Pa	3.43×10^7
颗粒体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1059.89
颗粒间恢复因数	0.48
颗粒间静摩擦因数	0.32
颗粒间滚动摩擦因数	0.085

2.3.1 振动频率

为了能够反映振动频率对充种性能的影响,在前期试验中选取能够凸显这一影响的 3 个水平进行模拟仿真,根据振动试验实际情况,选取振幅为 20 mm 时,模拟振动频率分别为 4、6、8 Hz,获取种子随时间变化的平均法向力,如图 6 所示。从图 6 中可以看出种子平均法向力随时间出现无规律波动,并随着振频的提高,波动幅度增大且落差也随着增

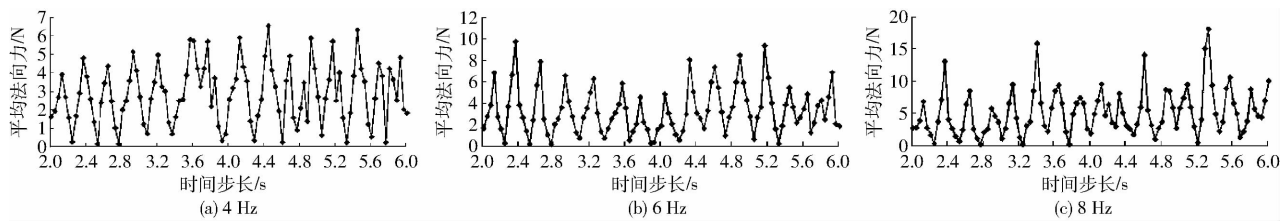


图6 不同频率下平均法向力变化曲线

Fig.6 Changing curves of average normal stress under different frequencies

大。为了定量描述这种波动,引入方差公式

$$D=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^5(f_{ni}-z)^2\tag{15}$$

其中

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

式中 D ——方差 N ——输出数据总数, $N=100$
 z ——种子平均法向力总和, N

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 4 Hz 时,方差为 102.54 N²;振动频率为 6 Hz 时,方差为 113.48 N²;振动频率为 8 Hz 时,方差为 130.62 N²。较大的振动频率可以使得种群波动性增强,从而提高种子充填的概率。因此提高振动频率可以在一定

程度上提高充种性能,为正交优化试验因素及因素水平范围的选取提供参考。

2.3.2 振动幅度

为了能够反映振动幅度对充种性能的影响,选取振动频率为 6 Hz,在振动幅度分别为 10、20、30 mm 时,获取种间随时间变化的平均法向力,如图 7 所示。从图 7 中可以看出随着振幅的提高,种子平均法向力也随着增大。通过计算得出振动幅度为 10 mm 时,平均法向力方差为 86.35 N²;振动幅度为 20 mm 时,平均法向力方差为 113.48 N²;振动幅度为 30 mm 时,平均法向力方差为 140.78 N²。因此适当地增加振动幅度可以提高充种性能,为正交优化试验因素及因素水平范围的选取提供参考。

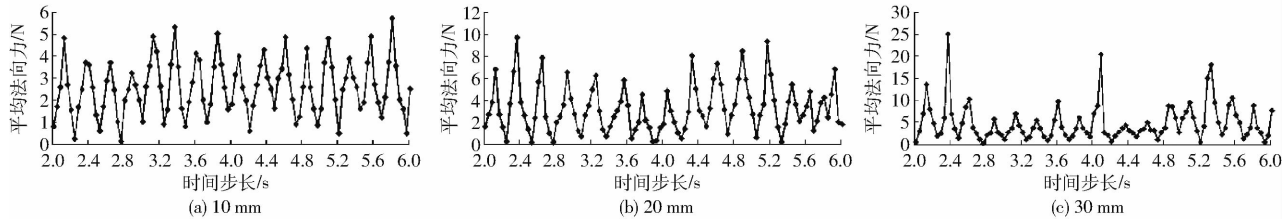


图7 不同振幅下平均法向力变化曲线

Fig.7 Changing curves of average normal stress under different amplitudes

3 排种性能试验

3.1 试验条件

研制振动供种气吸圆盘式排种器样机,选取“丽薯 6 号”微型薯作为排种对象,在 JPS-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台上进行试验,如图 8 所示。该试验台以种床带为种床,排种器在试验时保持固定状态,种床相对于排种器进行运动,微型薯排落在涂有油层的种床带上,图像采集处理系统对种床带上的微型薯进行实时检测,检测完毕后,系统根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》对检测数据进行处理保存,输出粒距合格指数、漏播指数和重播指数。利用 AZ8000 型手持非接触式红外线转速表测定曲柄转速,转换为振动频率,并通过控制步进电动机转速对频率进行调节;在曲柄盘径向上开有数个调节孔,连杆一端通过调节孔与曲柄铰接,不同的调节孔对应不同曲柄长度,进而调节振动板的振动幅度(2 倍曲柄长度);在种

箱与振动板接合处,安装一块挡板,可通过调整挡板位置来控制种层高度。

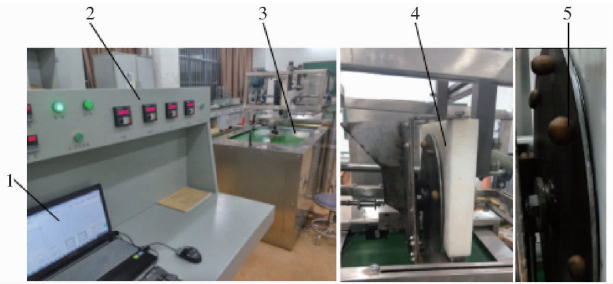


图8 排种性能试验台

Fig.8 Seed-metering performance test

1. 数据处理单元 2. 控制柜 3. 排种试验台 4. 气吸圆盘式排种器 5. 微型薯

3.2 单因素试验

为验证数值模拟试验结果的准确性,进行单因素试验。分别以振动频率和振动幅度作为试验因素,以合格指数、重播指数及漏播指数作为评价指标,连续记录吸附 200 粒种子的排种试验结果,每次

试验重复 5 次取平均值。

3.2.1 振动频率对排种性能的影响

设定振动幅度为 20 mm,吸种负压为 6 kPa,作业速度为 2.4 km/h,分别在振动频率为 3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5 Hz 的条件下进行排种试验,得到振动频率对试验指标的影响,结果如图 9 所示。

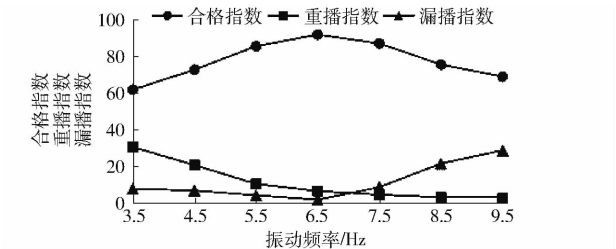


图 9 不同振动频率时排种性能试验曲线

Fig. 9 Seeding performance test curves under different vibration frequencies

由图 9 可知,随着振动频率的增加,排种合格指数呈先上升后下降的趋势,重播指数逐渐下降,漏播指数逐渐下降后上升。振动频率在 5.5 ~ 7.5 Hz 的范围内,排种合格指数大于 80,在振动频率为 6.5 Hz 时,排种合格指数达到最大值 94.1。振动频率过小时,振动对于种群的作用较小,种子之间的内摩擦力较大,不利于种群“沸腾”,随着振动频率的提高,振动板对种群的扰动性增强,漏播指数逐渐下降,有效地提高了充种效果;但随着振动频率进一步提高,种子出现了较强的波动,使得原本被吸附的种子被波动较强的种子撞击掉落,导致漏播指数上升。

3.2.2 振动幅度对排种性能的影响

设定振动频率为 6.5 Hz,吸种负压为 6 kPa,作业速度为 2.4 km/h,分别在振动幅度为 5、10、15、20、25、30、35 mm 的条件下进行排种试验,得到振动幅度对试验指标的影响,结果如图 10 所示。

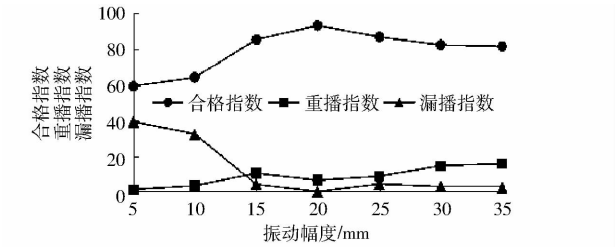


图 10 不同振动幅度时排种性能试验曲线

Fig. 10 Seeding performance test curves under different amplitudes

由图 10 可知,随着振动幅度的增加,排种合格指数呈现先上升后下降的趋势,重播指数逐渐上升,漏播指数逐渐下降。在振动幅度大于 15 mm 时,排种合格指数均大于 80,在振动幅度为 20 mm 时,排种合格指数达到最大值 95.4。振动幅度过小时,种群会随着振动板一起上下运动,影响充种效果;振动

幅度过大,会缩短种子处于“沸腾”状态的时间,致使种群不能规则地随振动板一起振动。

3.3 二次回归旋转正交试验

3.3.1 试验方案

为寻求最佳参数组合,进行三因素二次旋转正交组合试验。选取振动频率、振动幅度和种层高度作为试验因素,合格指数、重播指数和漏播指数作为试验指标。设定排种器作业速度为 2.4 km/h,吸种负压为 6 kPa,试验因素和编码见表 2,试验方案与结果见表 3(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值),每组试验重复 5 次取平均值。

表 2 试验因素和编码

编码	因素		
	振动频率 x_1 /Hz	振动幅度 x_2 /mm	种层高度 x_3 /mm
-1.682	4.0	10	40
-1	5.0	14	52
0	6.5	20	70
1	8.0	26	88
1.682	9.0	30	100

表 3 试验设计方案与结果

Tab. 3 Experimental design and results						
试验序号	振动频率 X_1	振动幅度 X_2	种层高度 X_3	合格指数 Y_1	重播指数 Y_2	漏播指数 Y_3
1	-1	-1	-1	55.3	18.1	26.6
2	1	-1	-1	65.7	13.5	20.8
3	-1	1	-1	53.9	22.2	23.9
4	1	1	-1	64.3	17.2	18.5
5	-1	-1	1	54.6	19.9	25.5
6	1	-1	1	65.1	14.2	20.7
7	-1	1	1	54.6	23.2	22.2
8	1	1	1	65.8	18.8	15.4
9	-1.682	0	0	36.4	11.4	52.2
10	1.682	0	0	54.3	5.7	40.0
11	0	-1.682	0	68.6	11.3	20.1
12	0	1.682	0	83.3	16.5	0.2
13	0	0	-1.682	65.1	15.4	19.5
14	0	0	1.682	62.4	32.5	5.1
15	0	0	0	95.4	2.3	2.3
16	0	0	0	96.3	3.2	0.5
17	0	0	0	95.5	2.2	2.3
18	0	0	0	97.3	2.3	0.4
19	0	0	0	95.4	0.4	4.2
20	0	0	0	98.7	0.5	0.8
21	0	0	0	95.3	2.4	2.3
22	0	0	0	90.0	0.3	9.7
23	0	0	0	90.5	8.2	1.3

3.3.2 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

合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 和漏播指数 Y_3 的回归方程。

(1)合格指数 Y_1 回归模型建立与显著性检验
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指数 Y_1 影响的回归模型为

$$Y_1 = 94.91 + 5.29X_1 + 1.64X_2 - 0.26X_3 + 0.086X_1X_2 + 0.11X_1X_3 + 0.43X_2X_3 - 17.34X_1^2 - 6.53X_2^2 - 10.84X_3^2 \quad (16)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知,该模型的拟合度极显著 ($P < 0.01$)。但振动幅度、供种高度、振动频率和振动幅度的交互项 (X_1X_2) 的 P 值、振动频率和种层高度的交互项 (X_1X_3) 的 P 值以及振动幅度和种层高度的交互项 (X_2X_3) 的 P 值均大于 0.05,说明以上各项对排种合格指数的影响不显著,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 $P = 0.2094$,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

$$Y_1 = 94.91 + 5.29X_1 - 17.34X_1^2 - 6.53X_2^2 - 10.84X_3^2 \quad (17)$$

通过对式(17)回归系数的检验得出,影响排种合格指数的因素主次顺序为振动频率、振动幅度和

种层高度。

(2)重播指数回归模型的建立与显著性检验
通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合,得到各因素对重播指数 Y_2 影响的回归模型为

$$Y_2 = 2.37 - 2.13X_1 + 1.78X_2 + 2.46X_3 + 0.11X_1X_2 - 0.061X_1X_3 + 0.012X_2X_3 + 2.56X_1^2 + 4.45X_2^2 + 8.00X_3^2 \quad (18)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知,该模型的拟合度极显著 ($P < 0.01$)。但振动幅度、振动频率和振动幅度交互项 (X_1X_2) 的 P 值、振动频率和种层高度交互项 (X_1X_3) 的 P 值以及振动幅度和种层高度交互项 (X_2X_3) 的 P 值均大于 0.05,说明以上各项对重播指数的影响不显著,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 $P = 0.0975$,不显著,说明不存在其他影响指标的主要因素存在。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 2.37 - 2.13X_1 + 2.46X_3 + 2.56X_1^2 + 4.45X_2^2 + 8.00X_3^2 \quad (19)$$

通过对式(19)回归系数的检验得出,影响重播指数的因素主次顺序为种层高度、振动频率和振动幅度。

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

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	7 813.91	9	78.68	<0.000 1 **	1 638.85	9	18.74	<0.000 1 **	4 067.35	9	30.01	<0.000 1 **
X_1	385.98	1	34.98	<0.000 1 **	62.90	1	6.47	0.024 4 *	137.25	1	9.11	0.009 9 **
X_2	37.02	1	3.35	0.09	43.80	1	4.51	0.053 5	161.34	1	10.72	0.0060 **
X_3	0.96	1	0.087	0.773 1	83.28	1	8.57	0.011 8 *	66.39	1	4.41	0.055 8
X_1X_2	0.06	1	5.551×10^{-3}	0.941 7	0.10	1	0.01	0.920 2	0.32	1	0.021	0.886 3
X_1X_3	0.10	1	9.175×10^{-3}	0.925 1	0.03	1	3.217×10^{-3}	0.955 6	0.02	1	1.328×10^{-3}	0.971 5
X_2X_3	1.53	1	0.14	0.715 5	1.25×10^{-3}	1	1.287×10^{-4}	0.991 1	1.62	1	0.11	0.748 1
X_1^2	4 816.85	1	436.51	<0.000 1 **	104.78	1	10.79	0.005 9 **	3 500.78	1	232.49	<0.000 1 **
X_2^2	681.92	1	61.80	<0.000 1 **	317.01	1	32.63	<0.000 1 **	69.04	1	4.58	0.051 8
X_3^2	1 881.21	1	170.48	<0.000 1 **	1 025.44	1	105.56	<0.000 1 **	128.83	1	8.56	0.011 8 *
残差	143.45	13			126.29	13			195.75	13		
失拟	76.91	5	1.85	0.209 4	79.93	5	2.76	0.097 5	128.35	5	3.05	0.078 4
误差	66.54	8			46.36	8			67.40	8		
总和	7 957.36	22			1765.14	22			4263.10	22		

注: * 显著 ($P < 0.05$); **极显著 ($P < 0.01$)。

(3)漏播指数 Y_3 回归模型建立与显著性检验
通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合,得到各因素对漏播指数 Y_3 影响的回归模型为

$$Y_3 = 2.72 - 3.15X_1 - 3.42X_2 - 2.19X_3 - 0.20X_1X_2 - 0.049X_1X_3 - 0.44X_2X_3 + 14.79X_1^2 + 2.08X_2^2 + 2.84X_3^2 \quad (20)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知,该模型的拟合度极显著 ($P < 0.01$)。但振动频率和振动幅度交互项 (X_1X_2) 的 P 值、振动频率和种层高度交互项 (X_1X_3) 的 P 值以及振动幅度和种层高度交互项 (X_2X_3) 的 P 值均大于 0.05,说明各因素交互项对漏播指数的影响不显著,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 $P = 0.078\ 4$,不显著,说明不存在其他影响指标的主要因素存在。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 2.72 - 3.15X_1 - 3.42X_2 + 14.79X_1^2 + 2.84X_2^2$$

(21)

通过对式(21)回归系数的检验得出,影响漏播指

数的因素主次顺序为振动幅度、振动频率和种层高度。

3.4 各因素对排种合格指数的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 对数据进行处理,可得到振动频率、振动幅度和供种高度对合格指数的影响,其响应曲面如图 11 所示。任意固定某个因素的水平,根据响应曲面图,分析其余 2 个因素间的交互作用对排种合格指数的影响。

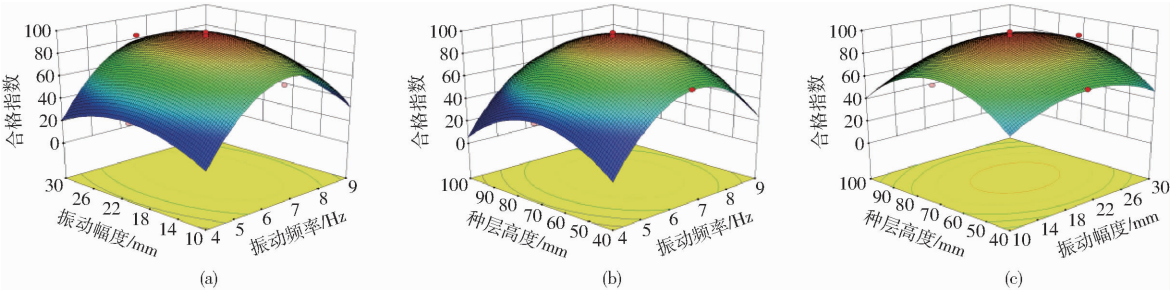


图 11 交互因素对合格指数的影响
Fig. 11 Effects of interactive factors on eligible rate

3.4.1 振动频率和振动幅度的交互作用

图 11a 为种层高度为 70 mm 时,振动频率和振动幅度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图 11a 可知,在振动频率为 6.5 ~ 7.0 Hz,振动幅度为 20 ~ 21 mm 时,排种合格指数较高。振动频率一定时,随着振动幅度的增大,排种合格指数先上升后下降。振动幅度一定时,随着振动频率的增大,排种合格指数同样先上升后下降。振动频率为 6.8 Hz,振动幅度为 20 mm 时,排种合格指数最高。

3.4.2 振动频率和种层高度的交互作用

图 11b 是振动幅度为 20 mm 时,振动频率和种层高度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图 11b 可知,在振动频率为 6.5 ~ 7.0 Hz,种层高度为 67 ~ 73 mm 时,排种合格指数较高。振动频率一定时,随着种层高度的增大,排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时,随着振动频率的增大,排种合格指数同样先上升后下降。振动频率为 6.8 Hz,种层高度为 70 mm 时,排种合格指数最高。

3.4.3 振动幅度和种层高度的交互作用

图 11c 为振动频率为 6.8 Hz 时,振动幅度和种层高度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图 11c 可知,在振动幅度为 20 ~ 21 mm,种层高度为 67 ~ 73 mm 时,排种合格指数较高。振动幅度一定时,随着种层高度的增大,排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时,随着振动幅度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。振动幅度为 20 mm,种层高度为 70 mm 时,排种合格指数最高。

3.5 最佳参数优化

设定合格指数大于 95,重播指数小于 2.5,漏播

指数小于 2.5,优化得最佳参数范围如图 12 所示 ($x_3 = 70\text{ mm}$)。

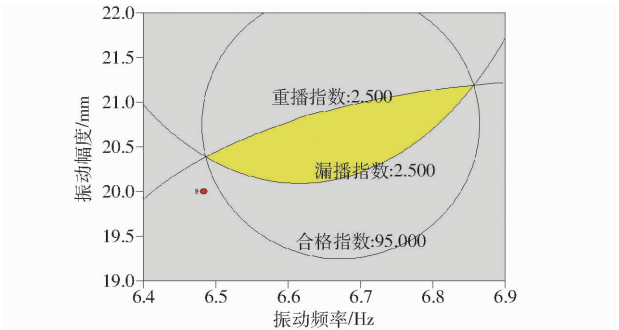


图 12 参数优化分析图
Fig. 12 Diagram of parameters optimization and analysis

由图 12 可知,在种层高度为 70 mm 时,黄色区域为参数优化区域,即振动频率为 6.5 ~ 6.9 Hz,振动幅度为 20 ~ 21 mm 时,可获得合格指数大于 95,漏播指数小于 2.5,重播指数小于 2.5。

对优化后的理论结果进行试验验证。在相同的试验条件下选取振动频率为 6.5 ~ 6.9 Hz,振动幅度为 20 ~ 21 mm,种层高度为 70 mm,进行 3 次重复验证试验,得到排种器合格指数平均值为 96.6,且均大于 95;漏播指数平均值为 2.1,且均小于 2.5;重播指数平均值为 2.3,且均小于 2.5;试验结果与优化结果基本相符。

将本文最终的优化结果与之前正交试验的优化结果^[17]进行对比,排种合格指数有所提高,且得到了各工作参数的最优区间,增强了排种器的实际操作性。

4 结论

(1) 基于离散元法,利用 EDEM 软件,分别对振

动频率和振动幅度进行数值模拟,并以种子平均法向力方差为指标,对结果进行分析,得出增大振动频率和振动幅度可以有效提高排种器充种性能的结论。

(2)以合格指数、重播指数和漏播指数为试验指标,分别对振动频率和振动幅度进行单因素试验,试验现象及效果与仿真分析结果一致。验证了所建仿真模型的正确性以及采用离散元法模拟仿真振动供种的可行性。

(3)为寻找最佳工作参数组合,以振动频率、振

动幅度和种层高度为试验因素,以合格指数、重播指数和漏播指数作为试验指标,进行三因素五水平二次旋转正交组合试验,并对结果进行分析和优化:影响排种合格指数的因素主次顺序为振动频率、振动幅度和种层高度。在吸种负压为 6 kPa,作业速度为 2.4 km/h,种层高度为 70 mm,振动频率为 6.5 ~ 6.9 Hz,振动幅度为 20 ~ 21 mm 时,可获得合格指数大于 95,重播指数小于 2.5,漏播指数小于 2.5。对优化结果进行验证试验,得到的验证结果与优化结果基本一致。

参 考 文 献

- 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):78-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130814&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.014.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, JIANG Xinming, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78-83. (in Chinese)
- 王延耀,李建东,王东伟,等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):54-58,89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s11&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.011.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54-58, 89. (in Chinese)
- 左彦军,马旭,玉大略,等. 水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):58-62.
ZUO Yanjun, MA Xu, YU Dalu, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket slot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 58-62. (in Chinese)
- 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):43-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43-47. (in Chinese)
- 赵晓顺,于华丽,张晋国,等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):48-51,74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 48-51, 74. (in Chinese)
- 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.
- 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?flag=1&file_no=2012s10&journal_id=jcsam. 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)
- 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)
- 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)
- 周海波. 水稻秧盘育秧精密播种机的关键技术研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2009.
ZHOU Haibo. Research and application on key technologies of precision seeder for tray nursing seedlings of rice[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 王朝晖,马旭,贾瑞昌. 工作参数对超级稻育秧播种部件吸种性能的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(8):88-92.
WANG Zhaohui, MA Xu, JIA Ruichang. The working parameters of suction effect on the performance of super rice seedling planting parts[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 88-92. (in Chinese)

- 12 杨明金,邱兵,杨玲,等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报,2010,26(9):139–143.
YANG Mingjin, QIU Bing, YANG Ling, et al. Metering performance of the vibration vacuum precision tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 139–143. (in Chinese)
- 13 龚智强. 气吸振动盘式精密排种装置理论与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2013.
GONG Zhiqiang. Theoretical and experimental study on vacuum-vibration tray precision seeding device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 14 鹿芳媛,马旭,齐龙,等. 基于离散元法的杂交水稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(10):17–24.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17–24. (in Chinese)
- 15 赖庆辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):27–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27–37. (in Chinese)
- 16 陈进,李耀明. 气吸振动式播种试验台内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)
- 17 赖庆辉,马文鹏,苏微. 气吸圆盘式微型薯排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):30–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.005.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, SU Wei. Design and experiment of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 30–37. (in Chinese)
- 18 李耀明,邱白晶. 气吸振动式水稻播种试验台的振动分析[J]. 农业机械学报,1998,29(3):43–47.
LI Yaoming, QIU Baijing. Vibration analysis of rice seeding test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 43–47. (in Chinese)
- 19 GUARELLA P, PELLERANO A, PASCUIZZI S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(1): 29–36.
- 20 VAN LIEDEKERKE P, TIJSKEN E, DINTWA E, et al. DEM simulation of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348–360.
- 21 YOUSHIYUKI S, CUNDALL P A. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9): 864–872.
- 22 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?flag=1&file_no=20140810&journal_id=jcsam. 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 for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 61–65. (in Chinese)
- 23 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,2014,33(6):71–73.
LI Shuai, LI Ye, MA Lüao, et al. Simulation analysis of cylindrical chute based on EDEM [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 33(6): 71–73. (in Chinese)
- 24 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):79–83,100.
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, 100. (in Chinese)
- 25 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)
- 26 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.
- 27 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.
- 28 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.
- 29 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)
- 30 孔维姝,胡林,杜学能,等. 用探测棒研究颗粒堆中最大静摩擦力[J]. 物理学报,2007,56(4):2318–2322.
KONG Weishu, HU Lin, DU Xueneng, et al. A simulation static friction force in granular pile with probing rod [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2318–2322. (in Chinese)