

基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化

刘月琴^{1,2} 赵满全¹ 刘飞¹ 杨铁军³ 张涛¹ 李凤丽¹

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古机电职业技术学院机电工程系, 呼和浩特 010070;
3. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010)

摘要: 为提高用于免耕播种机的气吸式排种器的吸种效果, 探寻最佳的排种器工作参数范围, 通过离散元法对排种器内种群的离散度、种子间的作用力和种子速度进行仿真分析, 得出吸种效果最佳的排种器工作参数范围: 搅种轮转速为 14.8 ~ 18.5 r/min, 振动频率低于 10 Hz, 振幅低于 5 mm, 容种量为 60% ~ 80%。排种试验表明: 搅种轮转速低于 18.5 r/min 比高于 18.5 r/min 的吸种率均值提高 7.1%。振幅 2 mm, 振动频率低于 10 Hz 比高于 10 Hz 的吸种率均值提高 8.9%。吸种率随容种量增大而增高, 容种量 60% ~ 80% 的吸种率均值为 97%, 比容种量低于 60% 的吸种率均值提高 12 个百分点。该结论证明了仿真优化的参数范围是可靠的。在这些参数范围内可使种箱内种子处于松散的吸种状态, 种子间的碰撞和拖带作用减小, 吸种性能得以提高。

关键词: 免耕播种机; 气吸式排种器; 离散元; 工作参数; 动力学特性; 排种性能

中图分类号: S157.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0065-08

Simulation and Optimization of Working Parameters of Air Suction Metering Device Based on Discrete Element

Liu Yueqin^{1,2} Zhao Manquan¹ Liu Fei¹ Yang Tiejun³ Zhang Tao¹ Li Fengli¹

(1. College of Mechanical-Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Huhhot 010070, China
3. Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China)

Abstract: In order to improve the seeding performance of the air-suction seed metering device of no-till planter, the optimal operating parameters of the seed metering device were found. With the discrete element method, the dispersion degree, the force among the seeds and seed velocity in seed metering device were simulated. The best suction metering parameter ranges are as follows: the stirring wheel speed is 14.8 ~ 18.5 r/min, the vibration frequency is less than 10 Hz, the amplitude selection is less than 5 mm, and the capacity of seeders selection is 60% ~ 80%. The results of metering test verification show that: the wheel speed is less than 18.5 r/min, the average absorption rate is 94.7%, which is 7.1% higher than absorption rate of the seed stirring wheel speed greater than 18.5 r/min. The vibration frequency is less than 10 Hz and the amplitude is 2 mm, the average absorption rate is 97.7%. Compared with the absorption rate of super 10 Hz, the average increase of the absorption rate is 8.9%. The absorption rate is increased with the increase of the capacity of seeders. When the capacity of seeders is less than 60%, the average rate of absorption seed is only 85%; while the capacity of seeders is higher than 60%, the average rate of the absorption is 97%. Compared with the capacity of less than 60%, the average absorption rate was increased by 12 percentage points. This conclusion proves that working

收稿日期: 2015-11-24 修回日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51365034)、中国博士后科学基金项目(2014M552532XB)和内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY327)

作者简介: 刘月琴(1977—),女,博士生,内蒙古机电职业技术学院讲师,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: liuyueqin103@126.com

通信作者: 赵满全(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事工程力学与农业机械研究,E-mail: nmgzhaomq@163.com

parameters of the simulation analysis and optimization are reliable. Therefore, the seeds of the air-suction seed metering device are in a loose absorption state in the ranges of those parameters, which could furthermore reduce collision and towing function of the seed, more conducive to the suction, and improve absorption performance.

Key words: no-till planter; air-suction of seed metering device; discrete element; working parameters; dynamic characteristics; seeding performance

引言

离散元法通过动态松弛法、牛顿第二定律、中心差分法和时步迭代法求解散粒物料颗粒的运动和位移的非线性问题,广泛应用于岩土力学^[1]和散粒体流动分析^[2-4]。这种方法为种子复杂动态行为的虚拟仿真提供了一种全新的思路^[5-8]。目前离散元法应用于机械式排种器内种子力学特性^[9-11]和排种时种子流动过程的研究较多^[12-15];应用于气吸式排种器的研究甚少,只限于气吸滚筒式排种器内水稻种子动力学特性的数值模拟^[16-19]。

气吸圆盘式排种器和气吸滚筒式排种器都属于气吸式排种器,但两者在结构和原理有很大差别^[20-21]。气吸圆盘式排种器排种时,种箱内种子的运动始终受到排种器结构参数和外界因素的影响。若这些参数选择不合适,会使种子间挤压、碰撞和拖带作用增大,使得吸附在吸孔的种子脱落,造成排种器漏播严重,排种性能下降。因此本文应用离散元分析方法,对一种气吸圆盘式排种器排种过程中种箱内种子的动力学特性进行仿真分析,以期获得利于吸种的最佳工作参数范围,进而提高排种性能。

1 气吸式排种器结构与工作原理

气吸式排种器主要由清种器、种箱、搅种轮、吸种盘、真空室、排种轴及其传动部件组成。如图 1 所示,链轮带动排种轴并与排种轴连接的取种盘和搅种轮一起转动,同时利用吸种盘一侧真空室产生的负压吸附与其相连另一侧种箱内的种子,然后种子

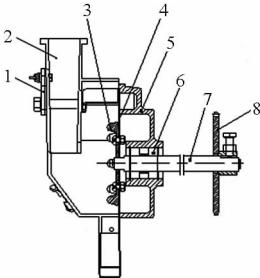


图 1 气吸式排种器结构简图

Fig. 1 Structure of air suction device

1. 清种器 2. 种箱 3. 搅种轮 4. 吸种盘 5. 真空室 6. 轴承
7. 排种轴 8. 链轮

随吸种盘旋转,在正压区靠自重下落,顺着导种管落到种床上。搅种轮主要调节种箱内种子的松散程度,使种子间彼此分离,实现顺利吸种。

2 离散元仿真模型与参数

2.1 接触力学模型

由于大豆种子类似于球形颗粒,且颗粒表面没有粘附力,故选取无滑动接触模型 Hertz-mindlin (no slip) built-in 作为颗粒与颗粒之间以及颗粒与几何体之间的接触模型。

2.2 排种器和种子几何模型

几何模型包括排种器模型和颗粒模型。排种器模型通过 SolidWorks 创建,然后导入离散元分析软件;种子颗粒模型根据大豆种子长(L)、宽(W)、厚(H)的平均尺寸(见表 1),利用软件自身所带的几何体创建为椭球体,大豆模型尺寸($L \times W \times H$)为 7.09 mm $\times$ 6.97 mm $\times$ 6.34 mm,如图 2 所示。

表 1 大豆种子的物理特性

Tab. 1 Physical characteristics of soybean seed

种子名称	千粒质量/ g	含水率/ %	种子尺寸平均值/mm		
			长	宽	厚
大豆	200.59	≤ 10	7.09	6.97	6.34

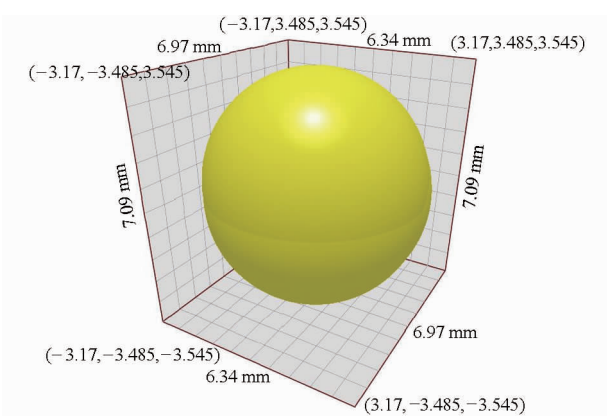


图 2 大豆颗粒模型

Fig. 2 Model of soybean particle

2.3 仿真参数

2.3.1 排种工作参数

在免耕播种过程中,由于机器的前进与地表不

平而产生振动,气吸式排种器的吸种性能受振动的影响不容忽视。所以排种工作参数有振动、搅种轮转速、种箱内种子容量(简称容种量)。振动频率和振幅由 2BM-5 型气吸式免耕播种机在免耕茬地测得,垂直振动出现峰值的频率为 14.20 Hz,最大振幅 15.80 mm;频谱为 3.46~20.00 Hz。因此仿真的振动频率选择 5、10、15、20 Hz;振幅选择 5、10、15、20 mm;在常规的排种试验研究中搅种轮转速选择大于 20 r/min^[21],在振动工况下根据免耕播种机前进速度和传动比的关系,搅种轮转速选择 11.1、14.8、18.5、22.2 r/min;经试验测得容种量达到 20%时,种子恰被吸附,容种量大于 80%,种箱内种子会飞溅出种箱。所以容种量选择 20%、40%、60%、80%。

2.3.2 排种器和种子的物理力学参数

种子的长、宽、厚和等效直径的尺寸呈正态分布,标准差分别为 0.048、0.046、0.019。因此选择种子颗粒尺寸按正态分布,标准差为 0.05。种子仿真物理力学参数如表 2 所示,其中材料密度 ρ 、 ρ_2 ,剪切模量 G 、 G_2 ,泊松比 ν 、 ν_2 ,恢复系数 e_1 、 e_2 、 e_3 ,以及摩擦因数 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{21} 、 μ_{22} 、 μ_{31} 、 μ_{32} 由试验测得^[7]。

表 2 仿真所用物理力学参数
Tab.2 Simulation parameters

参数	数值
大豆密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 290
大豆剪切模量 G/MPa	63
大豆泊松比 ν	0.23
Q235 钢密度 $\rho_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800
Q235 钢剪切模量 G_1/MPa	70 000
Q235 钢泊松比 ν_1	0.30
有机玻璃密度 $\rho_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 180
有机玻璃剪切模量 G_2/MPa	35
有机玻璃泊松比 ν_2	0.50
大豆与大豆之间的静摩擦因数 μ_{11}	0.39
大豆与大豆之间的动摩擦因数 μ_{12}	0.17
大豆与 Q235 钢之间的静摩擦因数 μ_{21}	0.15
大豆与 Q235 钢之间的动摩擦因数 μ_{22}	0.09
大豆与有机玻璃之间的静摩擦因数 μ_{31}	0.16
大豆与有机玻璃之间的动摩擦因数 μ_{32}	0.10
大豆与大豆的碰撞恢复系数 e_1	0.30
大豆与 Q235 钢的碰撞恢复系数 e_2	0.52
大豆与有机玻璃的碰撞恢复系数 e_3	0.45

3 仿真分析

仿真结果输出取平均值。不考虑排种器壳体与种子之间的作用力,只关注种箱内种子之间作用力的平均值。种箱内种子的运动情况和种子之间的作用力都会影响种子的吸附性能;种子速度和种子间

作用力较大,则种子间碰撞和“拖带”作用力较大,致使漏播严重,吸种效果下降。种箱内种群处于合适的松散状态,可提高种子的吸附性能;判断种箱种群松散程度的原理是把排种器充种区分成 n 个区域, x_i 为第 i 个区域的种群个体数 ($i=1,2,\cdots,n$), m 为 n 个区域的种群个体平均数,则种群的离散度 μ 表达式为

$$\mu = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n - 1}}}{m}$$

(1)

根据式(1)可知,离散度越小,种群松散程度越大。如图 3 所示将种箱内种群分成 64 个区域,在有效排种区域选择多个区域进行离散度的求解。

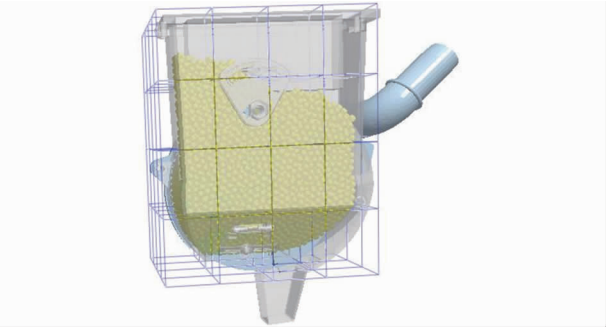


图 3 种箱内种群的分组

Fig.3 Grouping of species in a seeder box

3.1 搅种轮转速对种群动力学特性的影响

搅种轮转速不同时种子间的作用力如图 4 所示,搅种轮转速对种子间作用力的影响在 0.10~0.50 N 之间波动。在 100 s 之后,种子的流动趋于稳定,搅种轮转速为 14.8 r/min,种子间的作用力最低,稳定在 0.15~0.30 N 之间。转速大于 14.8 r/min 种子间的作用力明显增大,在 0.35~0.50 N 之间波动。

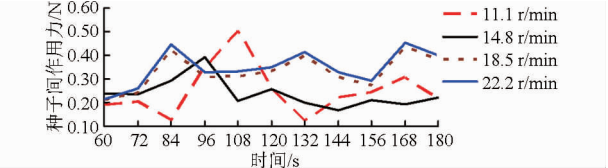


图 4 不同搅种轮转速时种子间的作用力

Fig.4 Seed force with different speeds of the wheel stir

搅种轮转速不同时种群的离散度在 5~10 之间变化,如图 5 所示。搅种轮转速小于 14.8 r/min 时,离散度随搅种轮转速增大而略增大;搅种轮转速大于 14.8 r/min 时,离散度随搅种轮转速增大而减小,即种群的松散程度增大,使种子处于更利于吸种的状态。

搅种轮转速不同时种子速度的变化在 0.50~1.00 m/s 之间波动。如图 6 所示,转速为 14.8 r/min

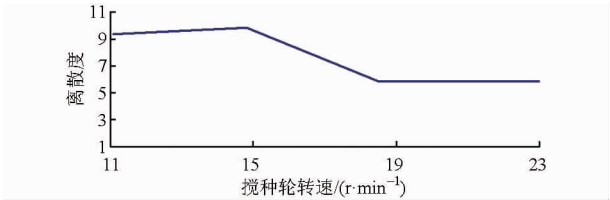


图 5 不同搅种轮转速时种群的离散度
Fig. 5 Discrete degree of seed group with different speeds of wheel stir

时种子速度平稳保持在 0.60 ~ 0.80 m/s 之间;转速 11.1 r/min 时种子速度波动较大;转速为 18.5 r/min 和 22.2 r/min 时,160 s 以后种子速度明显增大,即种子间碰撞作用力增大,致使种子漏吸的可能性也明显增大。所以搅种轮转速应选择 14.8 r/min 或大于 14.8 r/min 且不超过 18.5 r/min,这样可实现种子在空间的相互分离,使种群处于比较理想的吸种状态。

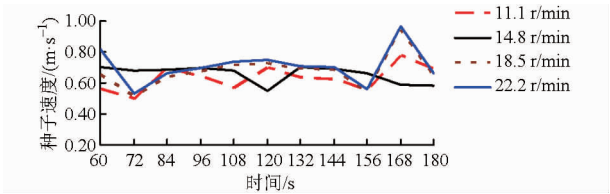


图 6 不同搅种轮转速时种子的速度
Fig. 6 Seed speed with different speeds of wheel stir

3.2 振动频率对种群动力学特性的影响

排种器的振动会影响其排种性能,而且振动对种群动力学特性的影响也不容忽视。振动频率不同时种子间的作用力变化明显,在 0.02 ~ 0.21 N 之间波动。由图 7 所示,频率大于 5 Hz 时种子间的作用力明显增大,频率为 20 Hz 时种子间作用力波动较大,频率为 10、15 Hz 时种子间作用力稳定在 0.10 ~ 0.20 N 之间。频率为 5 Hz 种子间作用力最小,即种子间拖带作用小,种子易被吸附。

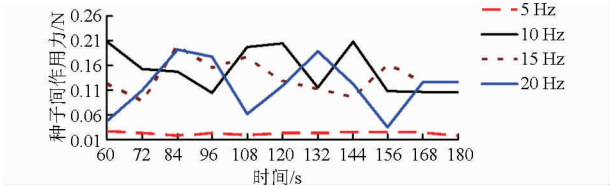


图 7 不同振动频率时种子间的作用力
Fig. 7 Seed force between different vibration frequencies

振动频率不同时种群离散度在 2.0 ~ 5.2 之间波动。如图 8 所示,虽然频率大于 15 Hz 时,离散度随频率增大而略减小,但是频率为 10 Hz 较 20 Hz 的离散度小,而且频率小于 15 Hz 时,离散度随振动频率减小而减小,即种群的松散程度随振动频率减小而增大,种子处于利于吸种的状态。

振动频率不同时种子速度在 0.30 ~ 0.60 m/s

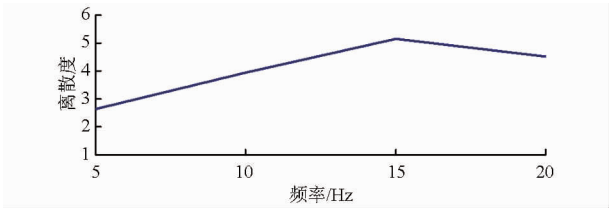


图 8 不同振动频率时种群的离散度
Fig. 8 Discrete degree of seed group between different vibration frequencies

之间波动。如图 9 所示,频率为 5 Hz 时种子速度最小,种子碰撞作用最小,利于吸种;频率为 10 Hz 时种子速度最大,种子碰撞作用最大,不利于吸种。频率为 15 Hz 和 20 Hz 时种子速度介于最大和最小之间,稳定在 0.30 ~ 0.50 m/s 之间。

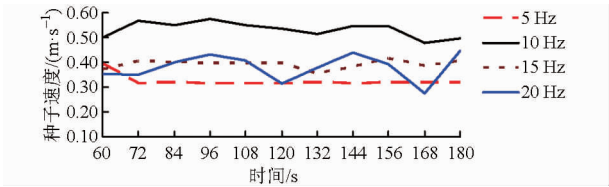


图 9 不同振动频率时种子速度
Fig. 9 Seed velocities among different vibration frequencies

总之振动频率不同时,种群动力学特性较为复杂。虽然振动频率增大可使种子处于利于吸种的“沸腾”状态,但是种子间的拖带和碰撞作用也会明显增大,致使种子的吸附性能明显降低。因此频率应选择小于 10 Hz,以保证种子间的拖带和碰撞作用较小,种群的松散程度较大,利于种子被吸附。

3.3 振幅对种群动力学特性的影响

图 10 所示种子间的作用力在 0.03 ~ 0.36 N 之间波动。振幅为 5 mm 时种子间作用力最小,稳定在 0.03 ~ 0.10 N 之间;在 110 s 以后种子流动稳定,随着振幅的增大,种子间的作用力也随之增大,种子被拖带致使漏吸的可能性增大,则其吸附性能下降。

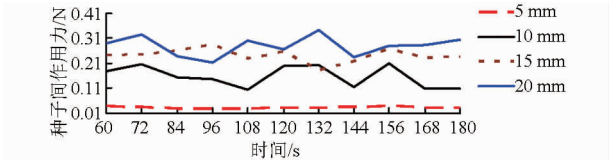


图 10 不同振幅时种子间的作用力
Fig. 10 Seed forces among different amplitudes

振幅不同时种群的离散度在 1.3 ~ 6.0 之间波动。如图 11 所示,振幅大于 15 mm 时,离散度随振幅增大而略减小。振幅小于 15 mm 时,离散度随振幅减小而减小,即种群的松散程度随振幅减小而增大。振幅 5 mm 时离散度最小,即种群的松散程度最大,种子处于利于吸种的状态。

振幅不同时种子速度在 0.20 ~ 0.80 m/s 之间波动。如图 12 所示,振幅为 20 mm 时种子速度最

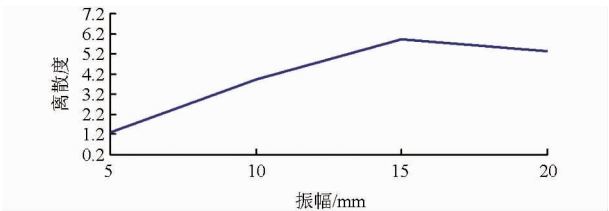


图 11 不同振幅时种群的离散度

Fig. 11 Discrete degree of seed group with different amplitudes

高,在 0.60 ~0.80 m/s 之间波动;振幅为 10 mm 和 15 mm 时种子速度稳定在 0.40 ~0.60 m/s 之间;振幅为 5 mm 时种子速度最低,在 0.30 m/s 左右波动,即种子碰撞作用较小,利于吸种。

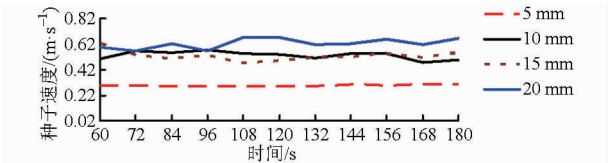


图 12 不同振幅时种子速度

Fig. 12 Seed speed with different amplitudes

总之种子间作用力和种子速度随振幅的增大而增大,种子间的拖带和碰撞作用增大,种子的吸附性能下降;振幅越小,种群松散程度越大,越利于吸种。因此振幅应选择小于 5 mm,此时,种子间拖带和碰撞作用力较小,种群处于较为理想的吸种工作状态。

3.4 种箱容种量对种群动力学特性的影响

由图 13 可知,不同容种量时种子间的作用力在 0.07 ~0.26 N 之间波动。72 s 前是种子生成、下落和搅种轮启动运转使种子向吸种区域流动的过程,种子间平均作用力呈现随容种量增大而增大的趋势。种子流动稳定后,随着容种量的增大,种子间平均作用力逐渐减小。容种量为 20% 和 40% 时,种子间作用力波动较大;容种量为 60% 时,种子间的作用力趋于稳定,在 0.15 N 左右波动;容种量为 80% 时,种子间的作用力最小,种子的拖带作用最小,利于种子吸附。

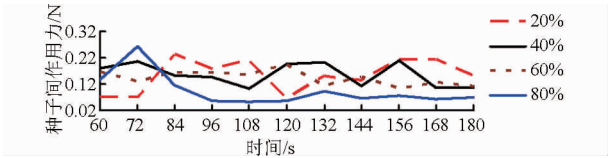


图 13 不同容种量时种子间的作用力

Fig. 13 Seed force with different seed volume capacities

由图 14 可知不同容种量时的种群离散度在 3.0 ~6.5 之间波动。容种量小于 60% 时,离散度随容种量增大而增大,即种群的松散程度随容种量增大而减小,处于不利于吸种的状态;容种量大于 60% 时,离散度增大缓慢,即种群的松散程度减小变缓。这说明容种量在 60% ~80% 之间,种群松散状态较为稳定。

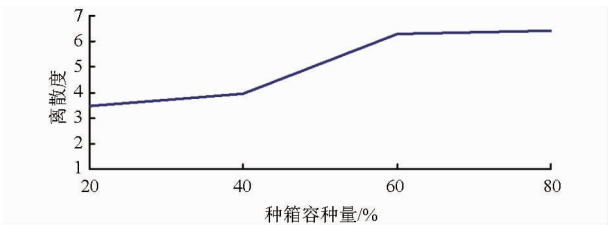


图 14 不同容种量时种群的离散度

Fig. 14 Discrete degree of seed group with different seed volume capacities

图 15 表明,不同容种量时种子速度在 0.39 ~0.68 m/s 之间波动。80 s 以后容种量为 20% 和 40% 的种子速度介于 0.40 ~0.60 m/s 之间;容种量 60% 时种子速度最低,在 0.40 ~0.50 m/s 之间,种子间的碰撞作用力最小,利于吸种;容种量 80% 时种子速度最高,在 0.65 ~0.70 m/s 之间,种子间的碰撞作用力最大,种子漏吸的可能性较大,致使吸种性能下降。

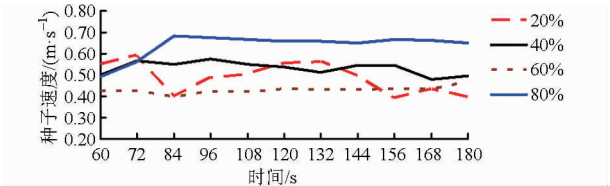


图 15 不同容种量时种子速度

Fig. 15 Seed velocity with different seed volume capacities

总之不同容种量时,种子间的作用力和种群的松散程度随容种量的增大而减小;种子速度随容种量的变化无规律。但容种量 80% 时种子作用力最低,种子间拖带作用最小;容种量 60% 时种子速度最低,种子间碰撞作用最小。所以容种量应选择 60% ~80%,种子漏吸的可能性较小,有利于提高种子的吸附性能。

3.5 工作参数对种子间作用力的交互影响

为了减少仿真试验次数,更迅速精准地分析各工作参数的交互作用,根据以上单因素仿真进行综合分析,剔除了不利于吸种的因素水平:搅种轮转速 22.2 r/min、振动频率 20 Hz、振幅 20 mm、容种量 20%。以种子间平均作用力为目标函数,反映种群内彼此的“拖带”作用。工作参数对种子间作用力的交互影响如图 16 所示,种子间作用力随振动频率和搅种轮转速增大而增大(图 16a)。在振幅和搅种轮转速的作用下,种子间作用力呈现先增大后减小的趋势(图 16b)。容种量和搅种轮转速的交互作用下随容种量的增加,种子间的作用力减小(图 16c)。种子间作用力随振动频率和振幅增大而增大,在频率 5 Hz 和振幅 5 mm 时出现最小值(图 16d)。种子作用力随振动频率和容种量增大而增大(图 16e)。种子间作用力随容种量和振幅的作用呈现先增大后

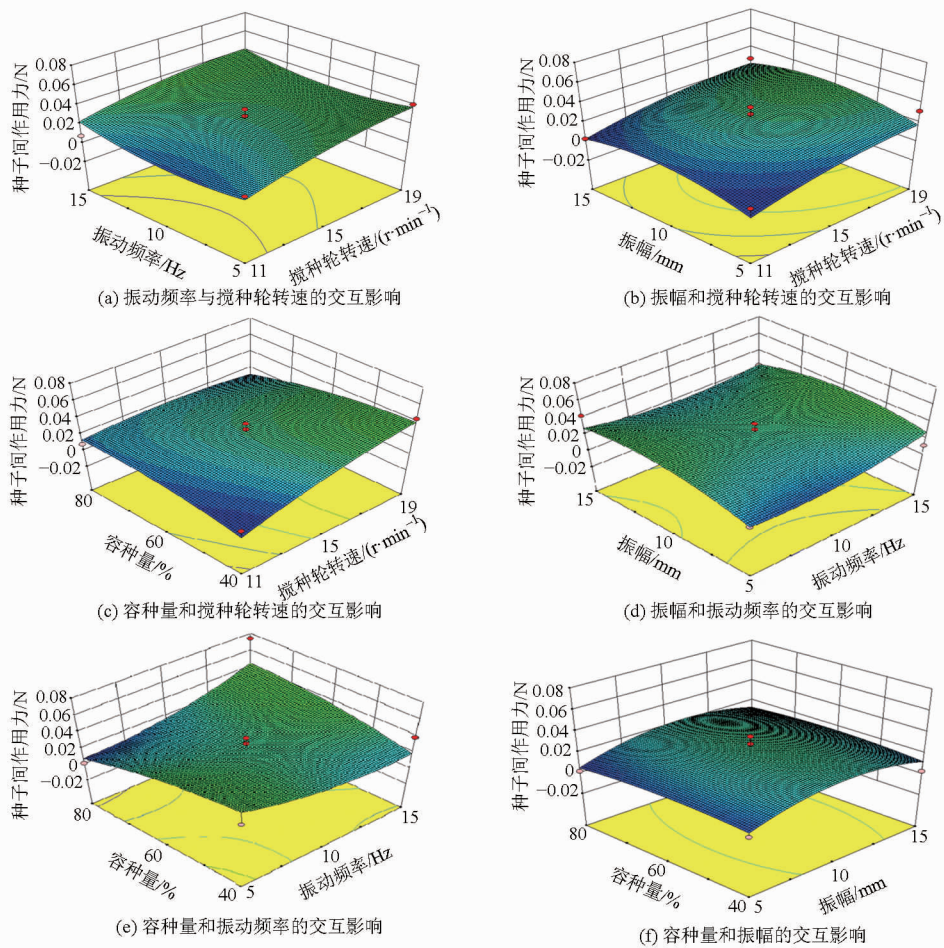


图 16 工作参数对种子间作用力的交互影响

Fig. 16 Interaction effects of working parameters on acting force of seeds

减小的趋势(图 16f)。这说明容种量越低,振动和搅种轮的搅动对种子间作用力的影响越明显,致使种子间作用力越大;容种量增大,振动和搅种轮的搅动对种子间作用力的影响减弱。该结论也进一步证明上述单因素分析结果是正确的。

4 排种性能试验

根据分析结果以大豆种子为试验对象,在室内排种振动试验台上进行排种性能试验。根据文献[22],以吸种率为评价指标,精密排种时吸种率大于 92% 为合格。取搅种轮转速为 11.10 ~ 22.20 r/min、振动频率为 3 ~ 10 Hz、容种量为 20% ~ 80% 分别进行排种试验。排种器吸种率如图 17 所示,由于振幅和频率同时出现,振幅选择 2 mm,只对比不同频率的吸种效果。

图 17a 中吸种率随搅种轮转速增大而降低,转速大于 18.5 r/min 时吸种率从 93% 锐减到 88%,搅种轮转速小于 18.5 r/min 吸种率的均值是 94.7%,比搅种轮转速大于 18.5 r/min 的吸种率提高 7.1%。图 17b 中,频率大于 10 Hz 时,吸种率从 97% 降低到 89%,振动频率选择小于 10 Hz,吸种率

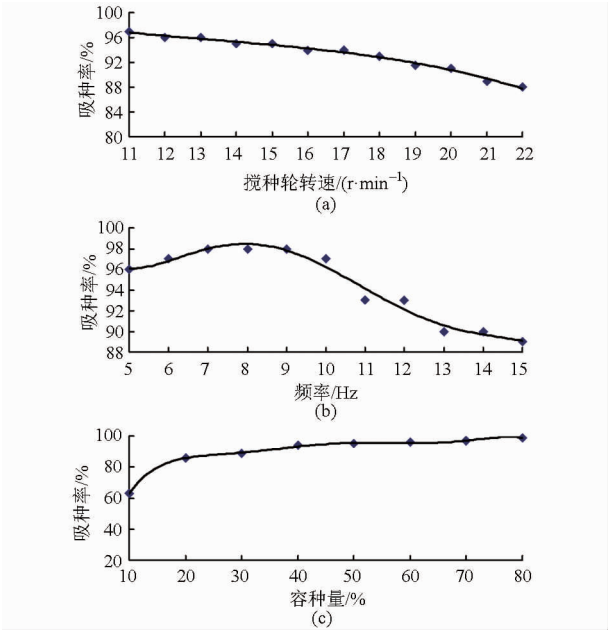


图 17 不同参数与吸种率的关系曲线

Fig. 17 Relationship between different parameters and absorption rates

的均值是 97.7%,比振动频率大于 10 Hz 的吸种率提高 8.9%。图 17c 中,吸种率随容种量增大而增大,容种量为 80% 时吸种率达到 99.4%,容种量

60% 的吸种率达到 96%, 容种量 20% 的吸种率为 86%。容种量低于 60% 的吸种率均值为 85%, 容种量高于 60% 的吸种率均值为 97%, 比容种量低于 60% 的吸种率均值提高 12 个百分点。说明当搅种轮转速小于 18.5 r/min、频率小于 10 Hz、振幅小于 5 mm、容种量越大吸种效果越好。该结论证明仿真分析的参数选择范围与实际基本吻合。

5 结论

(1) 为使种箱内种子处于利于吸种的松散状态, 减小吸种时种子间的拖带和碰撞作用, 提高种子吸附性能, 通过离散元软件仿真分析不同工作参数时种群的动力学特性, 工作参数仿真优化的范围: 搅种轮转速应选择 14.8 ~ 18.5 r/min; 频率应选择小于 10 Hz; 振幅应选择小于 5 mm; 容种量应选择

60% ~ 80%。工作参数对种子间作用力的交互作用分析结果佐证了单因素分析的正确性。

(2) 对不同工作参数进行排种试验得出: 吸种率随搅种轮转速增大而降低, 转速大于 18.5 r/min 时吸种率锐减, 且不符合精密排种国标要求。频率小于 10 Hz 时, 吸种率较高; 频率大于 10 Hz 时, 吸种率较低, 不符合精密排种国标要求。搅种轮转速小于 18.5 r/min 比搅种轮转速大于 18.5 r/min 的吸种率提高 7.1%。振幅选择 2 mm, 振动频率小于 10 Hz 比振动频率大于 10 Hz 的吸种率提高 8.9%。吸种率随容种量的增大而增大, 容种量低于 60% 的吸种率均值仅为 85%, 不符合精密排种国标要求; 容种量高于 60% 比低于 60% 的吸种率均值提高 12 个百分点。该结论证明仿真分析优化的参数范围是可靠且符合实际的。

参 考 文 献

- 1 杨洋, 唐寿高. 颗粒流的离散元法模拟及其进展[J]. 中国粉体技术, 2006, 12(5): 38-43.
YANG Yang, TANG Shouga. Discrete element method simulation of granular flow and its advances[J]. China Powder Science and Technology, 2006, 12(5): 38-43. (in Chinese)
- 2 WALTON O R. Particle dynamics modeling of geological material[R]. Lawrence Livermore National Lab. Report UCRL-52915, 1980.
- 3 CAMPBELL C S, BRENNEN C E. Computer simulation of granular shear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 151: 167-188.
- 4 CAMPBELL C S, BRENNEN C E. Chute flows of granular materials: some computer simulations[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(1): 172-178.
- 5 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.
SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40-48. (in Chinese)
- 6 张列南. 基于离散元法的大豆精密排种器的数字化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
ZHANG Lienan. Digital design method of soybean precision seed-metering device based on DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 7 杨明芳. 基于离散元法的玉米排种器的数字化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
YANG Mingfang. Study on digital design method of corn seed-metering device based on DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 8 胡建平, 周春健, 侯冲, 等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 94-98.
HU Jianping, ZHOU Chunjian, HOU Chong, et al. Simulation analysis of seed-filling performance of magnetic plate seed-metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94-98. (in Chinese)
- 9 申燕芳. 基于离散元法的精密排种器设计与工作过程的仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
SHEN Yanfang. The design for precision seed-metering devices and simulation analysis of working process based on the DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- 10 孙裕晶, 马成林, 牛序堂, 等. 基于离散元的大豆精密排种过程分析与动态模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 45-48.
SUN Yujing, MA Chenglin, NIU Xutang, et al. Discrete element analysis and animation of soybean precision seeding process based on CAD boundary model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 45-48. (in Chinese)
- 11 许志宝. 基于离散元法的大豆碰撞过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
XU Zhibao. Simulation analysis of collision process of soybean based on the DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 12 VU-QUOC L, ZHANG X, WALTON O R. A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 187: 483-528.
- 13 LU Z, NEGI S C, JOFRIET J C. A numerical model for flow of granular materials in silos. Part I: model development[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68: 223-229.
- 14 WANG C Y, LIANG V C. Packing generation scheme for the granular assemblies with planar elliptical particles[J]. International

- Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(5): 347 – 358.
- 15 王福林, 尚家杰, 刘宏新, 等. EDEM 颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 110 – 114.
WANG Fulin, SHANG Jiajie, LIU Hongxin, et al. Application of EDEM particles simulation technology on seed-metering device research[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2): 110 – 114. (in Chinese)
- 16 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 56 – 59.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 56 – 59. (in Chinese)
- 17 ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 344 – 351.
- 18 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)
- 19 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109 – 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109 – 114. (in Chinese)
- 20 赵湛, 李耀明, 陈义, 等. 水稻籽粒碰撞力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 88 – 92.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 88 – 92. (in Chinese)
- 21 刘文忠, 赵满全, 王文明, 等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 133 – 138.
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. The oretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133 – 138. (in Chinese)
- 22 NY/T 1768—2009 免耕播种机质量评价技术规范[S]. 2009.
-

(上接第 64 页)

- 16 邵诚, 董希文, 王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(5): 536 – 541.
SHAO Cheng, DONG Xiwen, WANG Xiaofang. Selection method of the contraction-expansion factor of variable universe fuzzy controller[J]. Information and Control, 2010, 39(5): 536 – 541. (in Chinese)
- 17 牛寅, 张侃谕. 轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程的变论域模糊控制[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 45 – 52.
NIU Yin, ZHANG Kanyu. Variable universe fuzzy control of water-fertilizer mixing process in fertigation system under the rotational irrigation situation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 45 – 52. (in Chinese)
- 18 黄景春, 肖建. 基于小波神经网络的云模型[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 53 – 57.
HUANG Jingchun, XIAO Jian. Cloud model based on wavelet neural networks[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(1): 53 – 57. (in Chinese)
- 19 NIU Yin, ZHANG Kanyu. Development of fertigation control system base on embedded platform and self-adaptive control strategy [C]//2nd International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics, 2015: 1594 – 1600.
- 20 陈宗海. 过程系统建模与仿真[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.