

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.006

基于 DEM - CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验

丁力^{1,2} 杨丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 崔涛^{1,2} 高筱钧^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对玉米气吸式排种器高速作业下种子运动十分复杂、难以进行准确分析计算的问题,采用 DEM(离散元)和 CFD(计算流体力学)耦合的方法,模拟了气吸式排种器工作过程,分析了种子受到的曳力和运动速度,得出不同种子充种能力大小依次为:小扁形、类圆形、大扁形。经过仿真分析,有针对性地选取不易吸附充种的大扁形种子,建立充种过程数学模型,优化种盘型孔凸台高度和型孔凸台角度参数。为了获得排种器的最佳性能参数,以型孔凸台角度、型孔凸台高度、种层高度为试验因素,以排种合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标进行三因素二次旋转正交组合试验,并应用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归分析和响应曲面分析,得到了各因素对指标影响关系。采用多目标优化方法,确定了最佳参数组合:型孔凸台角度为 35.76°,型孔凸台高度为 3.11 mm,种层高度为 55.61 mm,排种合格指数最高。此时,排种器性能指标为:合格指数 91.60%,漏播指数 3.90%,重播指数 4.50%。对优化结果进行验证试验,并与原排种器进行对比,验证结果与优化结果基本一致,且合格指数和漏播指数均优于原排种器,满足玉米精密播种的要求。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 离散元; 计算流体力学; 响应面法; 回归分析

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0050-11

Design and Experiment of Seed Plate of Corn Air Suction Seed Metering Device Based on DEM - CFD

DING Li^{1,2} YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} CUI Tao^{1,2} GAO Xiaojun^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: The seeds movement under the high-speed operation condition of corn air suction metering device is very complicate, and it is difficult to carry out accurate analysis and calculation. The discrete element (DEM) and computational fluid dynamics (CFD) coupling method was used to accurately simulate the working process of air suction metering device, the bonding model of Zhengdan 958 corn seed cohesive particles was established, the airway structured grid was divided, and the related parameters were set up. The coupling simulation of EDEM and CFD was realized. Through simulation, the working process of the air suction metering device was accurately simulated, and the drag force and movement speed of the seeds were accurately analyzed. It was concluded that the seed filling ability of different seeds from big to small was as follows: small flat shape, round shape and big flat shape. In order to improve the operation quality of seed metering device and ensure the adaptability of seed metering device to seeds, the optimum design of seed plate structure for big flat shape was studied. The mathematical model of filling process was established to optimize the height of the plate type hole embossment and the angle parameter of the type hole embossment. Because of the complex movement caused by the interaction between seed populations and the interaction between seed populations and metering devices when the metering plate was rotated, further analysis and determination of the optimum angle were needed. In order to obtain the best performance parameters of the seed metering device, the angle of the type hole embossment, the height of the type hole embossment and the height of the seed

收稿日期: 2018-11-07 修回日期: 2019-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)、国家自然科学基金项目(51575515)和国家玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介: 丁力(1989—),男,博士生,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: 604295294@qq.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

layer were taken as the test factors, and the three factors of the seeding qualified index, multiple index and missing index were used as test indicators. Performing a three-factor quadratic rotation orthogonal combination test, the Design-Expert 8.0.6 software was used to analyze the test data by multiple regression analysis and response surface analysis. The primary and secondary factors affecting the qualified index and multiple index were obtained as follows: the height of type hole embossment, the height of seed layer and the angle of type hole embossment. The primary and secondary factors that affecting the missing index were the height of type hole embossment, the angle of type hole embossment and the height of seed layer. Using multi-objective optimization method, the optimum combination of parameters was determined as follows: the angle of type hole embossment was 35.76° , the height of type hole embossment was 3.11 mm, the height of seed layer was 55.61 mm, and the qualified index of seed metering was the highest. Under this condition, the qualified index of seed metering device was 91.60%, the missing index was 3.90%, and the multiple index was 4.50%. The validation test of the optimization results was carried out. When the operating speed was 14 km/h and the wind pressure was -3 kPa, the qualified index was 91.90%, the missing index was 3.89%, and the multiple index was 4.21%. The validation results were basically consistent with the optimization results, compared with the first-generation seed metering device, the qualified index and missing index were better. It can ensure the precision seeding of corn.

Key words: corn; air suction seed metering device; discrete element; computational fluid dynamics; response surface method; regression analysis

0 引言

玉米作为我国第一大粮食作物,种植面积和产量逐年增加^[1-2]。目前,农村劳动力缺失,为满足发展现代农业需要,农村土地分散经营已向适度规模经营转变,高速精量播种技术是推动玉米产业可持续发展的重要途径之一^[3-4]。

玉米高速播种过程中,由于种盘高速回转,充种时间急剧下降,加上玉米种子形状大小差异较大,导致漏播指数显著上升。种盘作为充种的关键部件,众多学者对此做了大量研究^[5-8]。但未考虑不易充种的玉米种子形状,没作针对性分析,且因排种器实际工作中种子运动十分复杂,难以进行准确分析计算。

近些年,离散单元法与计算流体动力学的耦合方法已应用于气力输送、气流清选和流化床等方面的研究^[9-11]。目前,此方法主要应用在气吹式排种

器上^[12-13]。而离散单元法(DEM)与计算流体动力学(CFD)耦合的分析方法在气吸式排种器上应用则鲜有报道。本文采用离散元和计算流体动力学耦合的方法模拟气吸式排种器工作过程,分析玉米种子的运动受力情况,选取不易充种的种子形状颗粒,有针对性地优化设计种盘结构参数;通过二次旋转正交组合试验,求得所设计排种器在工作速度范围内的最佳参数匹配,并进行试验验证。

1 排种器结构模型

排种器的结构如图1所示,种盘是核心工作部件,由型孔凸台、吸孔和种盘本体构成,型孔凸台均匀分布于吸孔周边,整个种盘分为充种区 I、携种区 II、投种区 III 和过渡区 IV 4 个区域。

工作时,种子在重力的作用下落入排种器腔室底部,转动的种盘上的型孔凸台扰动充种区内的种子,并托持种子形成一定的初速度;同时,吸孔在气

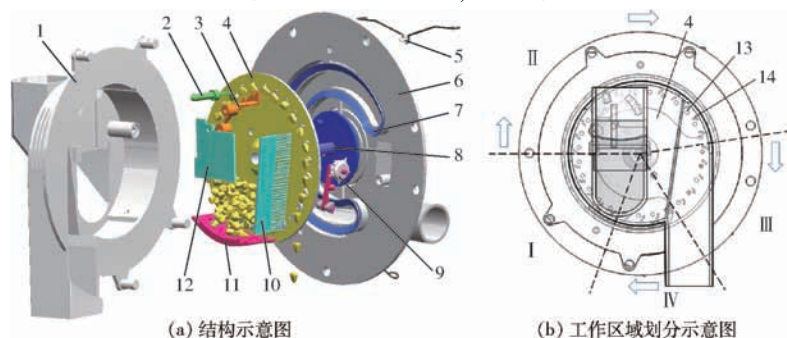


图1 排种器结构图

Fig.1 Structure diagrams of metering device

1. 前外壳体 2. 清种毛刷 3. 清种刀 4. 种盘 5. 快拆机构 6. 后外壳体 7. 密封垫 8. 排种轴 9. 卸种机构 10. 挡种刷 11. 卸种挡板 12. 种层高度调节板 13. 吸孔 14. 型孔凸台 I. 充种区 II. 携种区 III. 投种区 IV. 过渡区

室负压的作用下吸附种子,吸附于吸孔上的种子在负压吸附力和型孔凸台托持力的作用下随种盘一起转动,转过携种区到达卸种区时,在卸种机构的外力作用下快速进入导种管并落入已开好的种沟中,完成播种作业。

2 仿真建模与分析

气吸式排种器工作过程中,种子处在气流场、颗粒场和重力场并存的复杂环境中^[14],传统的 CFD 模拟和 EDEM 模拟受其方法所限,无法准确模拟排种器内复杂受力情况下种子颗粒的运动情况,从而难以准确模拟其工作过程。因此,采用 DEM - CFD 气固耦合的方式,通过仿真分析种子颗粒的实际位置和运动情况,从而得到更加丰富的模拟结果^[15-16]。

2.1 模型建立

以应用较为广泛的郑单 958 种子为模型,按照文献^[17]玉米种子分级方式,将玉米种子分为大扁形、小扁形和类圆形 3 类。为解决气固双向耦合过程中要求仿真颗粒体积小于流场网格最小体积这一问题^[18],采用 Bonding 黏结模型填充玉米籽粒,即利用多个体积小于流场网格的圆球型颗粒对 SolidWorks 建立好的玉米模型填充,并将所有填充的小球利用 Bonding 力黏结在一起,将黏结在一起的模型作为玉米籽粒的仿真模型^[17]。利用 Bonding 力粘的小颗粒填充的模型如图 2 所示。图中从左至右依次为种子的实物图、三维模型图和颗粒黏结

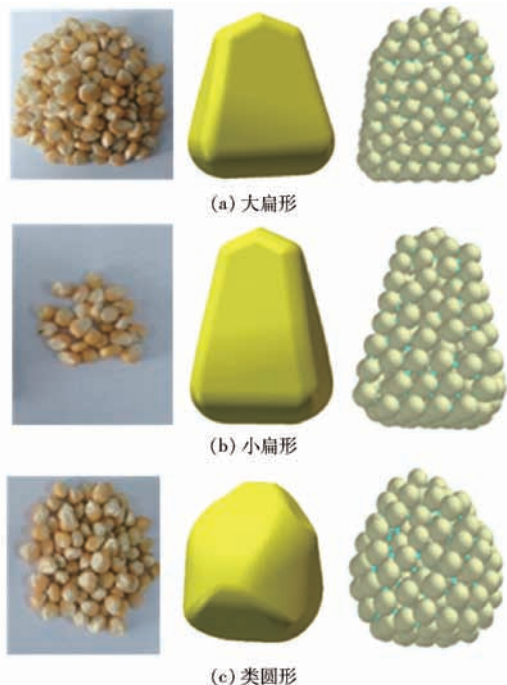


图 2 玉米种子仿真模型

Fig. 2 Simulation models of maize grains

模型图。

在 SolidWorks 中建立排种器简化模型,保存为 step 格式导入 EDEM 中,并开始颗粒生成,模型中各部分如图 3 所示。流体域通过 ICEM - CFD 划分结构化网格,并定义流体入口、出口,吸孔接触面都设置为 interface,将划分好的网格保存成网格文件,导入 Fluent 软件,设置滑移网格,其中:吸孔部分为动区域,其他区域为静区域,网格划分及相关设置如图 4 所示。

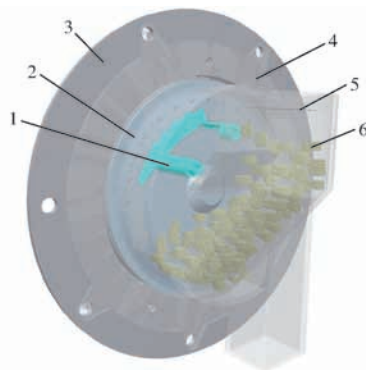


图 3 仿真简化模型示意图

Fig. 3 Simplified model diagram of simulation

1. 清种刀
2. 种盘
3. 后外壳体
4. 前外壳体
5. 颗粒工厂
6. 颗粒

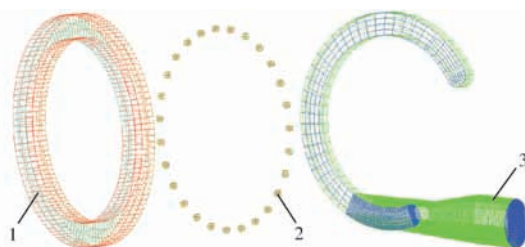


图 4 网格划分及相关设置示意图

Fig. 4 Diagram of grid partition and related settings

1. 出口(静区域)
2. 吸孔(动区域)
3. 入口(静区域)

2.2 接触模型

离散元法描述的是颗粒之间碰撞的过程,即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。考虑到玉米种子表面无粘附力,本文选取 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。

2.3 仿真参数确定

DEM - CFD 气固耦合仿真需保证在 EDEM 中设置的种盘转速和 Fluent 中设置配合流体区域的型孔转速相同,考虑到所设计排种器为高速排种器,作业速度高达 14 km/h,换算成种盘转速,设置种盘角

速度为 3.62 rad/s, 在进种口设置颗粒工厂。为保证仿真真实性, 同时节约仿真时间, 经过多次尝试, 选取 160 粒种子作为颗粒工厂生成的颗粒数, 其中大扁形 85 粒、小扁形 35 粒、类圆形 40 粒。

排种器整体采用有机玻璃 3D 打印而成, 根据所用材料确定相关参数如表 1 所示^[19]。在 EDEM 中设置时间步长为 1×10^{-5} s, Fluent 中时间步长应为 EDEM 时间步长的 50~100 倍, 选取 0.000 5 s 作为 Fluent 中时间步长; 设置 Fluent 步数为 6 000 步, 即仿真时间为 3 s, 设置 Max Iterations/Time Step 为 80, 即每个时间步最多迭代 80 次; 每 0.01 s 保存一次数据。

表 1 模拟所需物理和力学特性参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters required for simulation

项目	参数	数值
玉米属性	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.37×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.197×10^3
种盘材料属性	泊松比	0.5
	剪切模量/Pa	1.77×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.18×10^3
碰撞恢复系数	种子-种子	0.182
	种子-种盘	0.621
	种子-种子	0.431
静摩擦因数	种子-种子	0.459
	种子-种盘	0.459
动摩擦因数	种子-种子	0.078 2
	种子-种盘	0.093 1
其他参数	重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.81

2.4 仿真结果分析

通过仿真观察, 标记吸附效果较好的 3 种类型种子 Bonding 模型, 分析其受力状况和运动速度, 如图 5 所示。提取每个 Bonding 模型小颗粒所受到的曳力总合, 即整个种子所受到的曳力, 如图 5a 所示。为了进一步观察种子的运动情况, 提取标记 Bonding 模型每个颗粒的速度均值作为种子的整体速度, 如图 5b 所示。

从图 5a 中可以看出, 种子受到的曳力先急剧增大, 然后缓慢减小, 这是由于种子在吸孔周边受到气流的作用, 离吸孔越近, 所受到的曳力越大, 被吸附于吸孔上时曳力达到最大值; 随后, 随着种盘的转动, 吸附种子的吸孔离进气口越来越远, 从而导致风压降低, 因此, 曳力不断减小, 当吸附种子的吸孔转过气室范围, 曳力消失。从图 5a 中也可明显看出 3 种种子由于颗粒迎风面积的影响, 所受到的曳力大小顺序为大扁形、小扁形、类圆形, 即种子越大在相同的气流场受到的力也越大, 曳力最大值分别为

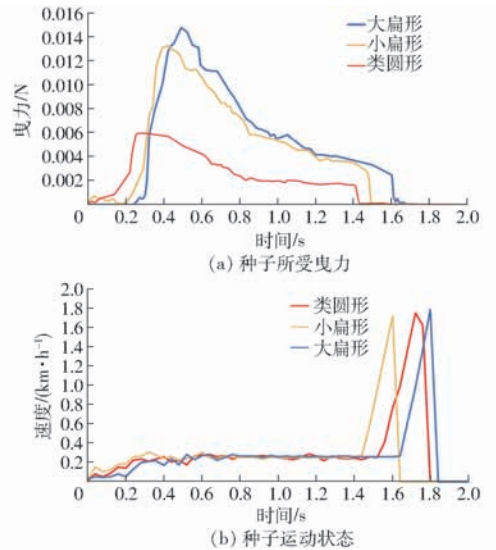


图 5 种子受力情况及运动状态

Fig. 5 Stress and movement state of seeds

0.015、0.013、0.006 N。

从图 5b 中可知, 种子的速度先增加, 然后趋于稳定, 这是由于种子在气流的作用下迅速朝吸孔运动, 当吸附稳定后随种盘一起转动, 速度为种盘吸孔的线速度; 当吸孔转过气室后, 吸孔气流消失, 种子在自身重力的作用下自由落体, 直至掉落在模型外, 无法检测到。进一步分析曲线变化可知, 3 种种子的速度增加快慢顺序为小扁形、类圆形、大扁形。对种子进一步分析有

$$F_D = ma_a \quad (1)$$

$$v_t = v_1 + a_a t \quad (2)$$

式中 F_D ——曳力, N m ——种子质量, kg
 a_a ——加速度, m/s^2
 v_t ——吸附型孔速度, m/s
 v_1 ——种子初速度, m/s
 t ——时间, s

由式(1)、(2)可以看出, 种子速度的增加不仅与种子的曳力相关, 还与种子自身质量相关。在充种区, 速度能迅速提升到种盘线速度的种子容易被吸附^[20]。因此, 3 种种子充种能力大小顺序为小扁形、类圆形、大扁形。为提高排种器作业质量, 确保排种器对种子的适应性, 需针对大扁形不易吸附的问题, 优化设计种盘结构。

3 种盘优化设计

种盘作为与种子直接接触的部件, 对充种性能起着至关重要的作用, 优化种盘结构参数, 可有效提高排种器作业质量^[21-25]。

3.1 种子在流场中的受力

充种过程中, 玉米种子处在气流场、颗粒场和重

力场并存的复杂环境中,其中在气流场中,种子颗粒会同时受到来自气流场的曳力、浮力、压力梯度力、Basset力、Magnus力和Saffman力等多个力的作用^[18]。由于实际工作中,种子通常处于低速运动状态,因此根据各力的定义,可以忽略其他力,重点考虑曳力对种子的作用。曳力的表达式为

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (3)$$

式中 A ——物体在流动方向上的投影面积, m^2

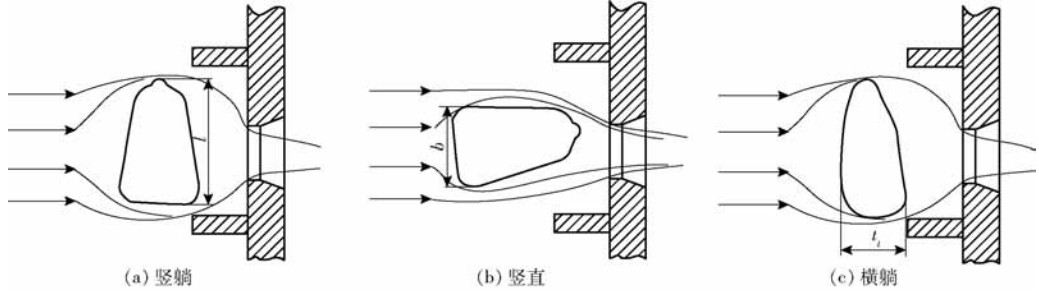


图6 种子被吸附姿态示意图

Fig. 6 Schematics of seed adsorbed posture

积为 $A = lb$, 其中 b 为宽度; 对于竖直吸附的大扁形种子, 其特征面积 $A = bt_l$, 并分别计算迎风面的长边与短边均值之比 \bar{b}_1/\bar{h}_1 , 其中 \bar{b}_1 为长边均值, \bar{h}_1 为短边均值。为了直观表示吸附力大小, 相关参数如表2所示。

表2 大扁形种子不同吸附姿态参数

Tab. 2 Different adsorption attitude parameter values of big flat seed

参数	大扁形种子		
	竖躺	横躺	竖直
C_D	1.10	1.05	1.05
\bar{A}/m^2	6.08×10^{-5}	9.92×10^{-5}	4.66×10^{-5}
\bar{b}_1/\bar{h}_1	3.13	1.30	1.63
F_D/N	1.45×10^{-2}	2.26×10^{-2}	1.06×10^{-2}

从表2中理论计算数据可以得出, 大扁形种子不同吸附姿态受到的曳力均值为0.0159 N, 与气固耦合仿真数据较为接近, 证明了仿真模拟的真实性。

3.2 型孔凸台高度设计

型孔凸台作为种盘上的关键结构, 能够扰动种群、托持种子, 起到辅助充种作用。为了计算型孔凸台高度, 选取排种器设计的最高速度14 km/h, 种盘型孔线速度为0.25 m/s进行计算。如果其间距满足充种要求, 则低于14 km/h时都能满足。

为了便于分析, 将大扁形种子受力简化, 如图7所示。种子在吸孔周边将受到曳力的作用, 如图7a所示, 曳力对种子产生的加速度为 a_1 , 种子自身的加速度为 g , 如图7b所示。由牛顿第二定律公式有

C_D ——绕流阻力系数

ρ ——流体密度, g/cm^3

U ——来流速度, m/s

大扁形种子被吸附的姿态有3种可能性: 竖躺、竖直和横躺, 如图6所示。

绕流阻力系数的计算可将其视为一个矩形薄平板的三维钝体^[26]。对于竖躺于型孔周围的大扁形种子, 其迎风面积为 $A = lt_l$, 其中 l 为长度, t_l 为厚度, 对于横躺吸附在型孔周边的大扁形种子, 其迎风面

$$F_D = ma_1 \quad (4)$$

式中大扁形种子质量 m 利用精确到0.1 g的电子秤称量, 每个重复放置100粒种子, 重复3次, 得出种子质量均值为 $m = 0.42$ g, F_D 取最小值 (1.06×10^{-2} N) 进行计算, 如果其能满足, 则任何姿态都能满足。求得 $a_1 = 25.2$ m/s^2 。

由加速度合成定理, 种子的加速度为

$$a = \sqrt{a_1^2 + g^2} \quad (5)$$

式中 g ——重力加速度, 取9.81 m/s^2
求得 $a = 27.1$ m/s^2 。

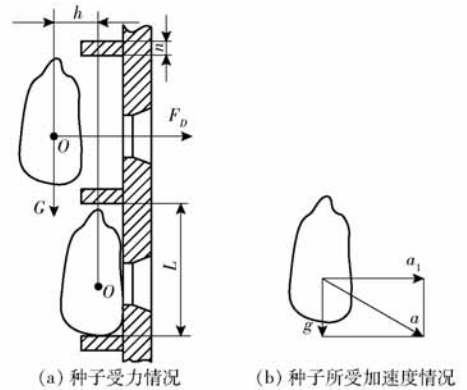


图7 大扁形种子受力和加速度分析

Fig. 7 Force and acceleration analyses of big flat seed

种子如果没有被吸附发生掉落, 将从上一型孔凸台边缘掉落至下一吸孔区域, 则需满足

$$L + n = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (6)$$

$$h \leq \frac{1}{2} a_1 t^2 \quad (7)$$

式中 L ——玉米最大尺寸(14 mm)

n ——型孔凸台厚度

v_0 ——种盘吸孔处线速度

n 取 1.5 mm, 即 $L + n = 15.5$ mm, $a = 27.1$ m/s², $a_1 = 25.2$ m/s²。 v_0 取 0.25 m/s, 求得 $t = 0.025$ s, $h \leq 0.00787$ mm。

型孔凸台越高, 对种子的托持作用越大, 但会造成清种越困难, 导致重播严重。因此, 型孔凸台高度不易过高。由文献[27]玉米总体尺寸可知, 大扁形种子厚度均值 5.34 mm, 选取 1~5 mm 高度区间, 具体参数还需进一步试验分析。

3.3 型孔凸台角度设计

种盘型孔凸台的目的是能够托持种子, 使种子具有一定的初速度, 起到更容易被吸孔吸附的作用, 因此, 型孔凸台的角度也将影响对种子的托持效果。

对于种盘上吸孔附近的种子, 设其质心在 O' 点, 首先分析充种起始位置, 即种子质心 O' 与种盘圆心 O 连线与 0° 位置, 其夹角为 $\alpha = 30^\circ$ 。种子从上部充入吸孔时, 所受到的力为: 重力 $G = mg$ 、随种盘转动产生的离心力 $J = m\omega^2$ (r 为种子质心所在处半径, 取 70 mm)、沿型孔斜面的摩擦力 $f = \mu F_N$ 、斜面对种子的支持力 F_N , 如图 8 所示。

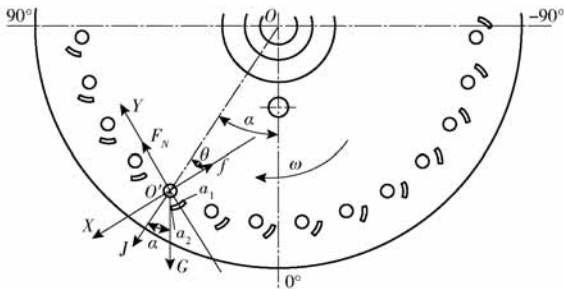


图 8 充种区种子受力分析

Fig. 8 Stress analysis of seed filling area

坐标系 $O'XY$ 如图 8 所示, X 方向沿着型孔凸台倾斜角的方向。为了使型孔凸台能够更好地托持种子, 只要 X 方向上的加速度 a_x 和 Y 方向上的加速度 a_y 都为零, 型孔凸台就能对种子起到托持作用。将各力投影到坐标系 $O'XY$ 上, 得到 $\alpha = 30^\circ$ 受力平衡方程

$$mg\cos(\alpha + \theta) + m\omega^2 r = \mu F_N \quad (8)$$

$$mg\sin(\alpha + \theta) + m\omega^2 r = F_N \quad (9)$$

联立式(8)、(9)得

$$g\cos(30^\circ + \theta) + \omega^2 r - \mu(g\sin(30^\circ + \theta) + \omega^2 r) = 0 \quad (10)$$

式中 θ ——型孔凸台边缘 a_1 和 a_2 两点间连线与种子离心力 J 反方向夹角, 即型孔凸台角度, ($^\circ$)

μ ——滑动摩擦因数, 玉米种子与 3D 打印材

料型孔间的滑动摩擦因数在 0.135 ~ 0.287 之间, 取中间值 0.21^[19]

α ——充种开始角度, $\alpha = 30^\circ$

θ 的取值还由种盘角速度 ω 决定, 因此需先求得排种盘角速度的变化范围, 选取高速作业速度 14 km/h 时种盘转速作为计算所用角速度, $\omega = 3.62$ rad/s。以上各式在 Matlab 中进行计算, 代入各值, 求得 $\theta = 50^\circ$ 。

为保证在充种区内, 不同充种角度下型孔凸台角度都能满足对种子的托持作用, 选取充种区另一角度 $\alpha = 60^\circ$ 进行分析, 采用相同的分析方法, 得到 $\alpha = 60^\circ$ 受力平衡方程

$$mg\cos(\theta - 30^\circ) + m\omega^2 r \sin\theta = F_N \quad (11)$$

$$mg\sin(\theta - 30^\circ) - m\omega^2 r \cos\theta = \mu F_N \quad (12)$$

联立式(11)、(12)得

$$r\omega^2 \cos\theta - g\sin(\theta - 30^\circ) + \mu(g\cos(\theta - 30^\circ) + r\omega^2 \sin\theta) = 0 \quad (13)$$

代入上面数据, 求得 $\theta = 45^\circ$ 。

最后, 选取最大充种角度 $\alpha = 90^\circ$ 进行分析, 得到受力平衡方程

$$mg\sin\theta - m\omega^2 r \cos\theta = \mu F_N \quad (14)$$

$$mg\cos\theta + m\omega^2 r \sin\theta = F_N \quad (15)$$

联立式(14)、(15)得

$$\mu(g\cos\theta + r\omega^2 \sin\theta) + r\omega^2 \cos\theta - g\sin\theta = 0 \quad (16)$$

在 Matlab 中代入各值, 得出 $\theta = 17^\circ$ 。

通过对不同充种角度下型孔凸台角度的分析, 得出种子在充种区范围内型孔凸台角度最佳范围为 $17^\circ \sim 50^\circ$ 。但由于在排种盘转动的情况下, 种群间的相互作用和种群与排种器之间的相互作用所造成的复杂的运动情况, 还需通过试验进一步分析确定最佳角度。

4 试验

4.1 试验条件

选用仿真模型所用的郑单 958 未分级的种子, 自制 9 种不同规格的种盘, 通过更换不同的种盘实现排种器结构参数的改变; 排种检测装置选用中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪, 风压测定选取 RE-1211 型风压计, 试验装置如图 9 所示。

4.2 试验方法

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》, 每组试验采集 251 粒种子进行统计, 每组重复 3 次, 取平均值作为试验结果记录分析, 以重播指数、漏播指数、合格指数为排种性能评价指标, 设置理论株距为 25 cm, 设定排种器作业速度为 14 km/h, 吸种负压为 -3 kPa, 选取影响气吸式排种



图9 排种试验装置

Fig. 9 Seed metering test device

器充种关键因素种层高度^[28-29],结合前文分析的型孔凸台角度、型孔凸台高度因素,设置型孔凸台角度为 $17^\circ \sim 50^\circ$,型孔凸台高度 $1 \sim 5 \text{ mm}$,种层高度 $36 \sim 72 \text{ mm}$,进行三因素二次旋转正交组合试验。试验因素编码如表3所示。试验结果如表4所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。采用方差分析法进一步分析,结果如表5所示。

表3 试验因素编码

Tab. 3 Factors and codes of test

编码	试验因素		
	型孔凸台	型孔凸台高度	种层高度
	角度 $x_1/(^\circ)$	x_2/mm	x_3/mm
-1.682	17.0	1.00	36
-1	23.5	1.81	43
0	33.5	3.00	54
1	43.5	4.19	65
1.682	50.0	5.00	72

表4 试验设计及结果

Tab. 4 Experiment design and result

试验序号	因素			性能参数		
	X_1	X_2	X_3	合格指数	漏播指数	重播指数
				$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	70.3	18.8	10.9
2	1	-1	-1	71.5	18.8	9.7
3	-1	1	-1	65.9	8.6	25.5
4	1	1	-1	80.2	6.1	13.9
5	-1	-1	1	72.3	17.5	10.2
6	1	-1	1	70.5	16.4	13.1
7	-1	1	1	81.3	7.9	10.8
8	1	1	1	83.7	5.4	10.9
9	-1.682	0	0	80.4	9.9	9.7
10	1.682	0	0	84.6	8.5	6.9
11	0	-1.682	0	70.9	26.0	3.1
12	0	1.682	0	81.3	3.8	14.9
13	0	0	-1.682	70.2	15.3	14.5
14	0	0	1.682	78.5	13.7	7.8
15	0	0	0	88.7	4.2	7.1
16	0	0	0	90.0	6.1	3.9
17	0	0	0	90.5	2.0	7.5
18	0	0	0	93.3	5.1	1.6
19	0	0	0	91.1	4.0	4.9
20	0	0	0	86.5	8.3	4.2
21	0	0	0	95.8	2.4	1.8
22	0	0	0	89.1	6.2	4.7
23	0	0	0	92.6	1.7	5.7

4.3 试验结果分析

根据表4数据,运用数据处理软件 Design-

表5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	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	1 695.62	9	26.83	<0.000 1**	895.46	9	27.52	<0.000 1**	555.66	9	9.66	<0.000 2**
X_1	39.29	1	5.59	0.034 2*	5.23	1	1.45	0.250 4	15.41	1	2.41	0.144 5
X_2	141.70	1	20.18	0.000 6**	478.47	1	132.34	<0.000 1**	100.49	1	15.72	0.001 6**
X_3	83.94	1	11.95	0.004 2**	4.44	1	1.23	0.287 6	50.52	1	7.90	0.014 7*
X_1X_2	37.41	1	5.33	0.038 1*	1.90	1	0.53	0.481 2	21.78	1	3.41	0.087 8
X_1X_3	27.75	1	3.95	0.068 3	0.15	1	0.042	0.841 1	31.21	1	4.88	0.045 7*
X_2X_3	40.05	1	5.70	0.032 8*	0.66	1	0.18	0.675 9	52.02	1	8.14	0.013 6*
X_1^2	188.60	1	26.86	0.000 2**	35.11	1	9.71	0.008 2**	63.67	1	9.96	0.007 6**
X_2^2	517.68	1	73.72	<0.000 1**	194.83	1	53.89	<0.000 1**	80.39	1	12.57	0.003 6**
X_3^2	636.00	1	90.57	<0.000 1**	179.41	1	49.62	<0.000 1**	143.91	1	22.51	0.000 4**
残差	91.29	13			47.00	13			83.12	13		
失拟	30.21	5	0.79	0.584 5	7.94	5	0.33	0.884 3	49.66	5	2.37	0.132 7
误差	61.08	8			39.06	8			33.46	8		
总和	1 786.91	22			942.46	22			638.77	22		

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

Expert 8.0.6 对试验数据进行多元回归拟合,建立合格指数、漏播指数、重播指数与三因素的二次多项式回归模型,回归方程为

$$Y_1 = 90.90 + 1.70X_1 + 3.22X_2 + 2.48X_3 + 2.16X_1X_2 - 1.86X_1X_3 + 2.24X_2X_3 - 3.45X_1^2 - 5.71X_2^2 - 6.33X_3^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 4.46 - 0.62X_1 - 5.92X_2 - 0.57X_3 - 0.49X_1X_2 - 0.14X_1X_3 + 0.29X_2X_3 + 1.49X_1^2 + 3.50X_2^2 + 3.36X_3^2 \quad (18)$$

$$Y_3 = 4.53 - 1.06X_1 + 2.71X_2 - 1.92X_3 - 1.65X_1X_2 + 1.98X_1X_3 - 2.55X_2X_3 + 2.00X_1^2 + 2.25X_2^2 + 3.01X_3^2 \quad (19)$$

回归模型方差分析和显著性检验结果如表5所示。由表5可知,合格指数、漏播指数、重播指数模型的拟合度极显著($P < 0.01$)。且回归方程失拟不显著,与实际情况拟合较好。

对于合格指数回归方程,回归项 X_1X_3 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.5845$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。对于漏播指数回归方程,回归项 X_1 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其他各项的影响都是极显著。失拟项 $P = 0.8843$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。对于重播指数回归方程,回归项 X_1 和 X_1X_2 的 P 值大于 0.05,影响均不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.1327$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。剔除不显著的回归项,

在保证回归模型显著、失拟项不显著的前提下,对合格指数、漏播指数和重播指数的回归方程进行重新拟合,回归方程为

$$Y_1 = 90.90 + 1.70X_1 + 3.22X_2 + 2.48X_3 + 2.16X_1X_2 + 2.24X_2X_3 - 3.45X_1^2 - 5.71X_2^2 - 6.33X_3^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 4.46 - 5.92X_2 + 1.49X_1^2 + 3.50X_2^2 + 3.36X_3^2 \quad (21)$$

$$Y_3 = 4.53 + 2.71X_2 - 1.92X_3 + 1.98X_1X_3 - 2.55X_2X_3 + 2.00X_1^2 + 2.25X_2^2 + 3.01X_3^2 \quad (22)$$

通过对式(20)~(22)回归系数的检验得出,影响合格指数和重播指数的主次因素为:型孔凸台高度、种层高度、型孔凸台角度。影响漏播指数的主次因素为:型孔凸台高度、型孔凸台角度、种层高度。

4.4 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,可得到型孔凸台角度、型孔凸台高度和种层高度对合格指数的影响,其响应曲面如图10所示。分别固定种层高度、型孔凸台高度和型孔凸台角度因素为零水平,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。

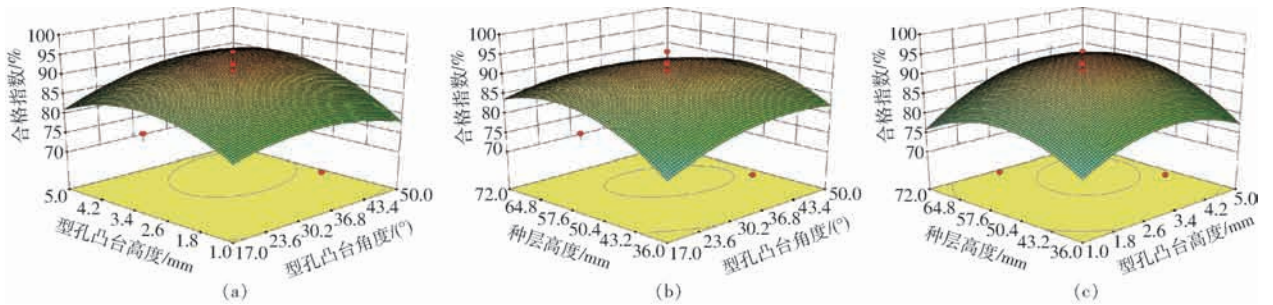


图10 因素交互作用对合格指数的影响

Fig. 10 Impacts of interaction on qualified index

图10a为种层高度54 mm时,型孔凸台高度和型孔凸台角度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图10a可知,型孔凸台高度一定时,随着型孔凸台角度的增大,排种合格指数先上升后下降。型孔凸台角度一定时,随着型孔凸台高度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。型孔凸台高度为3.3 mm,型孔凸台角度为36°时,排种合格指数最高。

图10b是型孔凸台高度为3 mm时,型孔凸台角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10b可知,在型孔凸台角度为30°~40°,种层高度为50~60 mm时,排种合格指数较高。型孔凸台角度一定时,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,随着型孔凸台角度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。

图10c为型孔凸台角度为33.5°时,型孔凸台高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10c可知,在型孔凸台高度为2.6~3.4 mm,种层高度为50~60 mm时,排种合格指数较高。型孔凸台高度一定时,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,随着型孔凸台高度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。

由上述内容可知,各因素以及各因素之间的交互作用对排种器工作性能影响较大,为了获得最佳排种作业参数,优化型孔凸台高度、型孔凸台角度和种层高度,实现因素间参数的合理匹配是提高合格指数的关键^[30-31]。

以合格指数为最终优化目标,根据 JB/T 10293—2001《单粒(精密)播种机技术条件》中的要

求,播种合格指数大于等于 80.0%,重播指数小于等于 15.0%,漏播指数小于等于 8.0%。结合各因素边界条件,建立参数化数学模型,进行优化求解,其目标函数和约束条件为

$$F_{\max} = Y_1 - Y_2 - Y_3 \quad (23)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} Y_1 \geq 80.0\% \\ Y_2 \leq 8.0\% \\ Y_3 \leq 15.0\% \\ 17^\circ \leq x_1 \leq 50^\circ \\ 1 \text{ mm} \leq x_2 \leq 5 \text{ mm} \\ 36 \text{ mm} \leq x_3 \leq 72 \text{ mm} \end{cases} \quad (24)$$

F_{\max} 为最终优化的目标;运用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化模块,对约束目标优化求解,得到型孔凸台角度为 35.76° ,型孔凸台高度为 3.11 mm,种层高度为 55.61 mm 时,排种合格指数最高。

根据优化得到的最优参数,进行 5 次重复台架试验,并选取文献[27]设计的排种器作对比,试验结果平均值见表 6。可见在最优参数作用下,实际结果与理论结果近似,合格指数和漏播指数均优于原排种器,可以实现有效播种。

表 6 试验验证结果
Tab.6 Test verification result %

项目	评价指标		
	合格指数	漏播指数	重播指数
优化结果	91.60	3.90	4.50
试验结果	91.90	3.89	4.21
原排种器	91.30	5.10	3.60

5 结论

(1) 针对气吸式排种器充种过程中种子运动十分复杂,难以进行准确分析计算的问题,通过建立玉米种子 Bonding 模型和划分流场网格,实现了 DEM-CFD 气固耦合仿真,并通过提取仿真过程中种子所受曳力和吸附速度运动参数,分析得出 3 种种子充种能力大小依次为小扁形、类圆形、大扁形。

(2) 采用理论计算的方式分析了不同姿态大扁形种子在流场中的受力,验证了气固耦合仿真的真实性,建立了大扁形种子吸附充种过程数学模型,得到种盘型孔凸台高度和型孔凸台角度最佳参数范围。

(3) 选取型孔凸台角度、型孔凸台高度和种层高度为试验因素,结合理论计算的各因素的取值变化范围,以排种合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标,采用二次旋转正交组合试验方法进行台架试验,通过建立排种性能指标与各影响因素之间的回归模型,得出了影响各指标的因素主次顺序,并运用响应面法分析了试验因素对响应指标的影响。采用多目标优化方法,确定了排种器最佳参数组合:型孔凸台角度为 35.76° ,型孔凸台高度为 3.11 mm,种层高度为 55.61 mm,排种合格指数最高。此时,排种器性能指标为:合格指数 91.60%,漏播指数 3.90%,重播指数 4.50%。对优化结果进行验证试验,并与原排种器进行对比,验证结果与优化结果基本一致,且合格指数和漏播指数均优于原排种器。

参 考 文 献

- [1] 张东兴. 玉米全程机械化生产技术与装备[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2001-2017.
- [3] 颜丙新. 盘式同步气吸式精量排种器设计研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
YAN Bingxin. Design and research of vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating plate and chamber [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [4] 韩丹丹. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器仿真优化与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
HAN Dandan. Optimization simulation and experimental research of inside-filling air-blowing seed-metering device based on EDEM-CFD [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [5] BARUT Z B, ÖZMERZI A. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry, 2004, 28(6): 435-441.
- [6] KARAYEL D, BARUT Z B, ÖZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- [7] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [8] 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2017,33(23): 15-23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15-23. (in Chinese)

- [9] SAKAI M, KOSHIZUKA S. Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(3):533 - 539.
- [10] TONG Z B, ZHENG B, YANG R Y, et al. CFD - DEM investigation of the dispersion mechanisms in commercial dry powder inhalers[J]. Powder Technology, 2013, 240(5):19 - 24.
- [11] SALIKOV V, ANTONYUK S, HEINRICH S, et al. Characterization and CFD - DEM modelling of a prismatic spouted bed [J]. Powder Technology, 2015, 270:622 - 636.
- [12] 冯占荣. 基于 CAD - DEM - CFD 耦合的气吹式排种器数字化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
FENG Zhanrong. Research on digital design method of air blowing seed metering device based on CAD - DEM - CFD coupling [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [13] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)
- [14] 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. 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)
- [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.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 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. (in Chinese)
- [16] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18):26 - 34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26 - 34. (in Chinese)
- [17] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22):36 - 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 - 42. (in Chinese)
- [18] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
SHI Song. Design and experimental research of the tic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 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.
LIU Jia. Design and research of the mechanical pneumatic combined precision seed metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [20] 郭辉, 韩长杰, 杨宛章. 提高气吸式垂直圆盘排种器性能的研究[J]. 农机化研究, 2008, 30(10):34 - 36.
GUO Hui, HAN Changjie, YANG Wanzhang. Study on improving the performance of vertical plate precision metering[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(10): 34 - 36. (in Chinese)
- [21] 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):37 - 46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37 - 46. (in Chinese)
- [22] 王芳, 吕冰, 王洪明, 等. 气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):30 - 36.
WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering device for millet[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 30 - 36. (in Chinese)
- [23] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):75 - 86, 139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):75 - 86, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [24] 陈美舟, 刁培松, 张银平, 等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21):8 - 16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8 - 16. (in Chinese)

- [25] 王在满,黄逸春,王宝龙,等. 播量无级调节水稻精量排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):9-16.
WANG Zaiman, HUANG Yichun, WANG Baolong, et al. Design and experiment of rice precision metering device with sowing amountstepless adjusting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11):9-16. (in Chinese)
- [26] 丁祖荣. 工程流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [27] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(22):1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of pneumatic maize seed-metering device with assistant seed filling plate [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22):1-11. (in Chinese)
- [28] 赖庆辉,马文鹏,苏微,等. 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.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, SU Wei, et al. 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. 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. (in Chinese)
- [29] 张明华,王在满,罗锡文,等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(12):8-15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12):8-15. (in Chinese)
- [30] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [31] 刘月琴,赵满全,刘飞,等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):65-72.
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):65-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010. (in Chinese)