

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.004

# 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析

丁力 杨丽 张东兴 崔涛 张凯良 钟翔君

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为保证气吸式排种器高速作业状态下投种均匀一致,对玉米籽粒中占据比例较高且长、宽、厚变化较大的大扁形种子进行研究;通过理论分析探明,种子的吸附姿态影响投种稳定性,振动加剧导致投种均匀性不一致;采用DEM-CFD耦合仿真的方法分析了影响投种性能的关键因素——种子吸附姿态,发现不同排种盘角速度下平躺姿态为主要吸附姿态,平躺种子比例越高,合格指数越高,侧躺种子和竖直种子共同影响重播指数和漏播指数;分析了影响投种性能的关键因素——投种时机,研究发现,提早投种状态下种子的主要姿态为竖直和侧躺,正常投种状态下平躺种子占绝大部分,延时投种状态下侧躺种子所占比例较高,合格指数与正常投种比例的变化趋势一致,增大种子平躺姿态的比例可有效提高播种质量。进行了风压和角速度匹配试验,结果表明,排种器在较优作业速度8~12 km/h范围内、风压在-4.5~-3 kPa区间内,合格指数不低于93.4%,漏播指数不高于4.5%,重播指数不大于3.1%,并通过高速摄像慢速回放得出,种子姿态变化情况与仿真结果一致,从而验证了仿真模拟的准确性。

**关键词:** 玉米;气吸式排种器;吸附姿态;投种性能

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0040-11

OSID:



## Effect of Seed Adsorption Posture of Corn Air-suction Metering Device on Seed Feeding Performance

DING Li YANG Li ZHANG Dongxing CUI Tao ZHANG Kailiang ZHONG Xiangjun  
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to ensure the uniformity of seed delivery under the condition of high-speed operation of the air-suction seed metering device, the big-flat seeds with high proportion and big change in length, width and thickness in corn seeds were studied. The influence of seed adsorption attitude on seed delivery stability was verified through theoretical analysis. Considering the vibration caused by the uneven road surface during the operation of the seeder, the uneven seed delivery caused by the increased vibration was verified as disagreement. Using the method of DEM-CFD coupling simulation, the key factors affecting the seeding performance were analyzed, and it was found that the main adsorption attitude was lying flat at different rotating speeds of seed tray; the higher the proportion of lying flat seeds was, the higher the qualified index was, and the side lying seeds and vertical seeds jointly affected the multiple index and the missing index. It was found that the flat seeds at different rotation speeds were the main adsorption attitude, and with the increase of rotation speed, the proportion of lying flat seeds was increased gradually in the range of 1.6~3.6 rad/s. The proportion of big-flat seeds in the side lying posture was increased slightly with the increase of rotation speed of seed plate, and then decreased rapidly to the lowest point of 5%, and then began to increase sharply, when the rotation speed was 4.1 rad/s, accounting for 18%. With the increase of rotation speed, the proportion of oblate seeds in vertical position was firstly decreased and then increased, the highest point was 10%. In the study of the influence of seed adsorption attitude on seed performance, it was found that the higher the proportion of flat seeds was, the higher the qualified index was, the higher the proportion of side seeds was, and the number of multiple index was also increased. The increase of vertical seed proportion would have an impact on missing seeding. It can be seen from the analysis of seeding area that increasing the proportion of normal seeding, reducing the

收稿日期: 2020-08-22 修回日期: 2020-09-20

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,主要从事农业装备设计与测控研究,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

proportion of early seeding and delayed seeding can effectively improve the qualified index, and the different adsorption attitude can affect the timing of seeding, thus affecting the quality of seeding. The best seeding effect was in the area with an angle of  $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$  with the horizontal position. Finally, wind pressure and rotation tests were carried out in the experiment of speed matching, the single factor tests of speed and wind pressure were carried out respectively, and the range of operation parameters was obtained. Then, the verification tests of speed and wind pressure were carried out. The results showed that increasing the proportion of seeds lying on the ground can effectively improve the seeding quality.

**Key words:** corn; air-suction metering device; adsorption attitude; seed feeding performance

## 0 引言

播种环节对玉米产量具有重要影响。运用先进的机械化手段,可将种子按照精确的数量、精确的播深和精准的粒距投放至土壤中,为种子生根、发芽和生长提供良好的生长环境,可有效减少人工投入和避免种子浪费,从而降低了生产成本<sup>[1-5]</sup>。

排种器是播种机的“心脏”,其工作是将成群堆积的种子单粒进行有效分离和精准可靠的投送,最终落入种床<sup>[6-7]</sup>。机械式排种器大多利用种子重力进行填充充种,受机械结构限制,很难保证不同形状和尺寸的种子定量充种,在规模化种植环境下速度较低,适应性较差<sup>[8]</sup>。气力式排种器采用气流辅助充种,避免了机械结构对种子的损伤,具有适应性强、可高速作业、精度高等优势,在实际生产中得到了广泛应用,气吸式排种器已成为精量播种技术的研究热点<sup>[9-11]</sup>。BARUT等<sup>[12]</sup>以玉米种子为例对排种器性能进行了试验,研究表明,排种器转速增加时充种率下降,但同时提高排种器的真空度可使充种率增加。YAZGI等<sup>[13]</sup>通过对气吸式排种器的充种过程进行试验研究,优化了播种均匀性性能。

为提高作业速度和降低风压,国内学者进行了大量提高充填性能方面的研究,相关研究主要集中在吸孔形状和辅助充种结构上<sup>[14-17]</sup>,很少涉及精准可靠投送的投种环节,对种子吸附投种机理的研究也较少。

计算机模拟技术为研究复杂系统运动过程提供了可能。气吸式排种器内部既存在流场变化,又存在颗粒运动变化,同时两者之间还有相互作用。采用离散元法研究种子的运动和种子之间的碰撞,采用计算流体力学研究气流的流动状态和轨迹,二者相结合能更好地模拟气流与种子、种子与种子之间的相互作用关系,分析其运动过程,最终获取需要的排种器作业参数<sup>[18-19]</sup>。

本文首先对投种过程进行动力学和运动学分析,探寻投种机理,然后采用 DEM - CFD 耦合的方式分析排种器实际投种过程,以期明确种子吸附姿态对投种性能的影响规律,并通过试验验证理论分

析的正确性。

## 1 结构与工作原理

排种器结构如图1所示。排种器工作时,进气口通入负压气流,同时种盘在排种轴的带动下顺时针转动,负压气流的吸附力使种子迅速朝吸孔运动,吸附在吸孔上的种子从种子堆中上升,随种盘一起转动;吸孔周边多余吸附的种子被清种机构清除,吸附占据优势的种子继续转动直至到达气室末端,负压气流消失,种子在重力、离心力的作用下开始掉落,同时,位于种盘后盘面的卸种机构将进一步阻断负压气流,保证均匀投种。

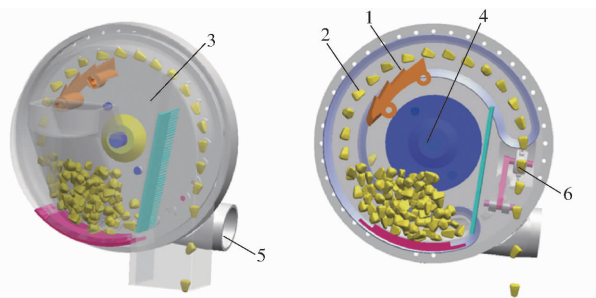


图1 排种器结构与工作示意图

Fig. 1 Structure diagram of metering device

1. 清种机构 2. 种子 3. 种盘 4. 排种轴 5. 进气口 6. 卸种机构

## 2 投种过程分析

投种过程是将种子单粒有序分离出排种器,高速投种情况下,种子运动速度较快,如何保证平稳连贯的投递是确保排种质量的关键<sup>[20]</sup>。因此,需针对投种过程进行动力学和运动学分析,探寻投种机理<sup>[21-24]</sup>。图2为投种区末端受力分析。

种子在携种区的受力情况如图2所示。为使种子不掉落,必须满足

$$P \frac{d}{2} \geq Qt' \quad (1)$$

其中

$$P = \frac{\pi d^2}{4} P_0 \quad (2)$$

式中  $Q$ ——离心力和种子之间产生的内摩擦阻力的合力, $N$

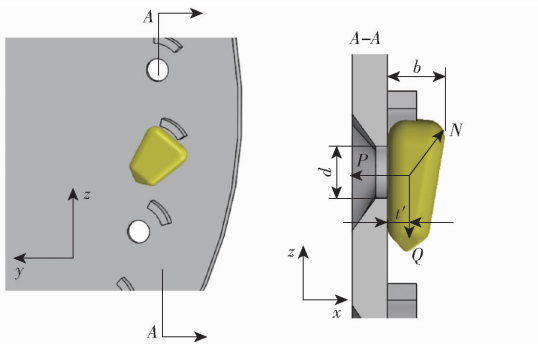


图2 投种区末端种子受力分析

Fig. 2 Stress analysis of end of seed feeding area

$P$ ——种子所受的吸附力,  $N$

$d$ ——吸孔直径,  $mm$

$t'$ —— $Q$ 到型孔距离,  $mm$

$P_0$ ——型孔两侧压差

由此可得种子被吸附需满足的基本条件

$$\frac{\pi d^3 P_0}{8Q} \geq t' \quad (3)$$

由式(3)可以看出,随着种子重心 $t'$ 的增大,也就是说种子吸附姿态的变化,使种子被可靠吸附需要的型孔两侧压差 $P_0$ 增大,种子重心距种盘越远,会导致种子越容易掉落。因此,种子的吸附姿态至关重要。

对投种过程进行分析,种子在种盘和播种机带动下的合运动如图3所示。

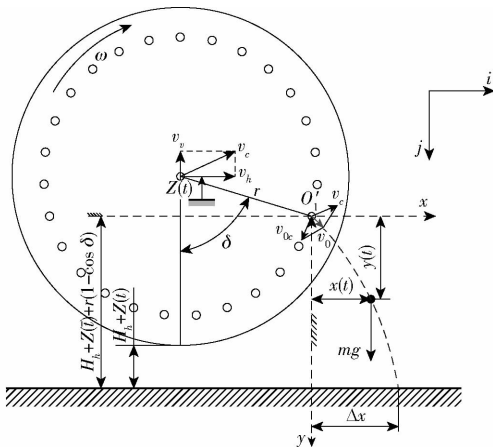


图3 种子投种运动学分析

Fig. 3 Combined movement of seeds driven by seed tray and seeder

假设种子在点 $O_1$ 位置脱离种盘,此时种子的速度为 $v_0$ ,速度 $v_0$ 在坐标轴上投影分别为 $v_{0x}i$ 、 $v_{0y}j$ ,则

$$v_0 = v_{0x}i + v_{0y}j \quad (4)$$

实际上,播种机工作时,地面的不平整带来的振动将直接传递到排种器上,且这种振动特性会随着速度的增加而变得剧烈。因此,有必要考虑因路面不平引起的振动响应对投种过程的影响<sup>[25]</sup>。定义 $Z(t)$ 为种盘中心因振动而发生的位移,即振幅,则

有

$$\begin{aligned} v_0 &= v_{0c} + v_c = v_{0c} + v_v + v_h = \\ &v_h + \dot{Z}(t) + v_{0c} = \\ v_h i - \dot{Z}j + (r\omega \sin \delta j - r\omega \cos \delta i) &= \\ (r\omega \sin \delta - \dot{Z})j + (v_h - r\omega \cos \delta) i & \end{aligned} \quad (5)$$

由此可得

$$\begin{cases} v_{0x} = v_h - r\bar{\omega} \cos \delta \\ v_{0y} = r\bar{\omega} \sin \delta - \dot{Z}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\omega$ ——角速度  $r$ ——种盘半径

$v_h$ ——播种机前进速度

$\bar{\omega}$ ——种盘在转动到 $\bar{t}$ 时刻点的角速度

$\bar{t}$ ——即将离开种盘,初始掉落时刻

$\delta$ ——投种与竖直方向夹角

对于零速投种,即种子下落时有较大的水平分速度,可以抵消播种机前进速度,使其投种时能够减少多余弹跳和不均匀现象。当采用零度投种时,即 $v_{0x} = 0$ ,此时, $r\bar{\omega} \cos \delta = v_h$ ,说明零速投种与播种机前进速度、种盘半径、角速度和投种点有关。

定义种子脱离瞬间的初始条件为

$$\begin{cases} x(\bar{t}) = 0 \\ y(\bar{t}) = 0 \\ \dot{x}(\bar{t}) = v_{0x} = v_h - r\bar{\omega} \cos \delta \\ \dot{y}(\bar{t}) = v_{0y} = r\bar{\omega} \sin \delta - \dot{Z}(\bar{t}) \end{cases} \quad (7)$$

当种子脱离种盘自由下落时,种子的运动由牛顿第二定律可知 $ma = mg$ ,在 $xy$ 坐标轴上的投影为

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = g \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)积分两次,可得

$$\begin{cases} x(t) = v_{0x}(t - \bar{t}) \\ y(t) = \frac{1}{2}g(t - \bar{t})^2 + v_{0y}(t - \bar{t}) \end{cases} \quad (9)$$

联立式(6)~(8),消去时间 $t$ ,可得

$$y(x) = \frac{1}{2}g \left( \frac{x}{v_{0x}} \right)^2 + v_{0y} \frac{x}{v_{0x}} \quad (10)$$

当投种高度为 $H_h + Z(\bar{t}) + r(1 - \cos \delta)$ 时,种子掉落在地面前进的距离 $\Delta x$ 关系式为

$$\begin{cases} H_h + Z(\bar{t}) + r(1 - \cos \delta) = v_{0y}t + \frac{1}{2}gt^2 \\ \Delta x = v_{0x}t \end{cases} \quad (11)$$

式中  $H_h$ ——种盘底端与地面距离,  $m$

联立式(11),求方程通解可得

$$\Delta x = \frac{v_{0x}}{g} \left[ -v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2gH_h + 2gZ(\bar{t}) + 2gr(1 - \cos \delta)} \right] \quad (12)$$

将式(6)代入式(12),可得

$$\Delta x = \frac{v_h - r\bar{\omega}\cos\delta}{g} \left[ -r\bar{\omega}\sin\delta + \dot{Z}(\bar{t}) + \sqrt{(r\bar{\omega}\sin\delta - \dot{Z}(\bar{t}))^2 + 2gH_h + 2gZ(\bar{t}) + 2gr(1 - \cos\delta)} \right] \quad (13)$$

当下落的种子接触到地面,投种过程结束,联立式(12),可得种子下落的时间间隔为

$$\Delta t = \frac{1}{g} \left[ -r\bar{\omega}\sin\delta + \dot{Z}(\bar{t}) + \sqrt{(r\bar{\omega}\sin\delta - \dot{Z}(\bar{t}))^2 + 2gH_h + 2gZ(\bar{t}) + 2gr(1 - \cos\delta)} \right] \quad (14)$$

播种机工作时因路面不平引起振动,会改变  $y$  方向的速度和位移,进而影响投种间距和间隔时间,随着振动幅度的加大,这种影响会进一步加剧。由文献[26-27]田间试验振动测量可知,播种机在 6~12 km/h 定速作业工况下激振频率为 3~10 Hz,最大幅值为 0.68  $g^2/\text{Hz}$ ,田间作业幅值为 12 mm,振动速度 0.24 m/s。

取排种器最高作业速度 14 km/h,相关参数代入式(13)中,考虑振动条件下种子下落水平距离的参数方程为

$$\Delta x = -0.002 + 0.38 \sqrt{1.28 + 20H_h} \quad (15)$$

由以上各式可知,投种在水平方向上的距离与种盘半径、转速、振动幅度和频率、投种高度、角度有关。因此,为保障平稳有序地投种,应合理设计投种位置来提高投种环节质量。

## 3 投种性能仿真

### 3.1 仿真模型建立

气吸式排种器工作时,种子依靠型孔内部的负压将种子吸附,然后在种盘的旋转运动下,种子被带动,进而完成充种、投种等一系列运动过程。在这个过程中,种盘是运动部件,其余部件均静止,传统的 Fluent 在计算两个区域有相对运动时,简单的参考坐标系转换方法不能完全适用,需采用滑移网格 (Sliding mesh) 计算方法<sup>[28]</sup>。其中滑移网格需要设定界面 (interface) 连接动区域和静区域,当两区域旋转运动时,界面总有一部分相连接,相对位置发生变化时,Fluent 会重新计算相应的区域,这样就可以解决排种器种盘转动带来的动、静两区域流场数据交换问题。

#### 3.1.1 EDEM 仿真模型

为简化计算过程,减少不必要的计算量,将排种器简化为前壳体、后壳体、种盘、清种锯齿 4 部分,在 SolidWorks 中建立模型保存为 step 格式导入 EDEM

中。创建颗粒工厂时应确保颗粒生成尽可能散开,避免堆积在一起,以防止替换时因为颗粒间的重叠造成坐标计算不准确,整个过程如图 4 所示。

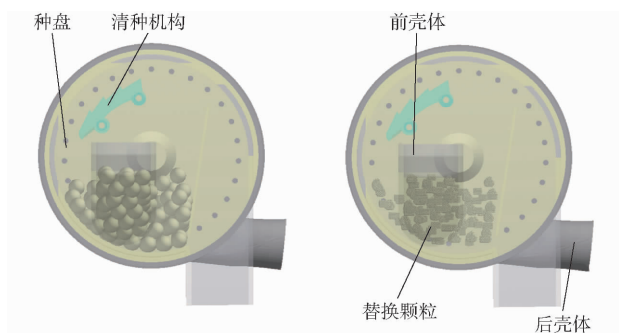


图 4 模型中颗粒替换过程

Fig. 4 Particle replacement process in model

#### 3.1.2 CFD 仿真模型

流体区域网格划分采用滑移网格法,通过该方法将型孔结构划分为动区域和静区域两个区域,在 SolidWorks 中建立流场三维模型,保存成 step 格式导入 ICEM-CFD 中划分结构化网格,如图 5 所示。



图 5 流场三维模型及网格划分

Fig. 5 Three dimensional models of flow field and mesh generation

1. 气室 (静区域) 2. 型孔 (动区域) 3. 种子室 (静区域)

在 ICEM-CFD 中利用 Edit Mesh 的 Display Mesh Quality 检查网格质量,得出网格总数为 181 296 个,在 Histogram of Quality values 中显示出网格均大于 0.3 范围,其中与颗粒相接触的型孔处和种子腔室网格尺寸均大于气室部位网格,满足耦合仿真要求。

#### 3.2 EDEM-CFD 耦合仿真流程

启动 Fluent,导入 mesh 网格文件,设置单位为毫米,连接界面 (interface),采用非定常求解,选取  $k-\epsilon$  湍流模型、standard 模型,设置速度、方向和区域,定义边界条件,设置风压和壁面,进行保存。

打开 EDEM 界面,颗粒替换完成后先保存成 0 s input 文件,然后打开保存的 input 文件,设置相关参数如表 1 所示。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。在 EDEM 中设置时间步长为  $1 \times 10^{-5}$  s,

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	$1.37 \times 10^8$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$1.197 \times 10^3$
种盘材料属性	泊松比	0.5
	剪切模量/Pa	$1.77 \times 10^8$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$1.18 \times 10^3$
碰撞恢复系数	种子-种子	0.182
	种子-种盘	0.621
静摩擦因数	种子-种子	0.431
	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

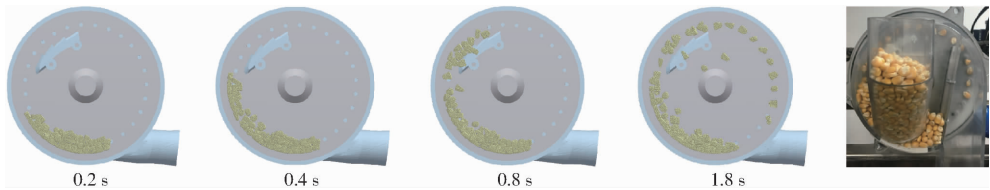


图6 仿真与试验对比图

Fig. 6 Comparison between simulation and test

米粘结颗粒,它是由众多小颗粒堆积而成,每个颗粒都是一个计算单元,这样庞大的颗粒群在每个时间步长下都在进行数据交换,计算量巨大,因此仿真颗粒数量小于真实试验情况。从颗粒的运动情况可以看出,仿真模拟与真实试验情形较为接近,在充种区都有较多种子被吸附,清种区能够清除大多多余吸附种子,到达携种区时,每个型孔基本都具有单粒吸附性,种群的流动状况和吸附状态都与真实情况一致,证明了仿真模拟的真实性。

### 3.3 投种性能仿真分析

通过上述分析可知,为保证排种均匀性,气吸式排种器投种时应保证负压气流在同一位置和同一时刻被完全阻断,在这个阶段,前后两粒种子掉落的时间间隔和位置直接影响播种均匀性。玉米籽粒中大扁形种子所占比例较高,其次为类圆形和小扁形,类圆形形态近似圆形,吸附最为容易,小扁形在玉米种子中所占比例较少。所占比例较高的大扁形种子因为形状尺寸相对不规则,长宽厚变化较大,更容易受到吸附姿态的影响,应观察吸附姿态和气流阻断情况。

#### 3.3.1 工作参数对种子吸附姿态的影响

在投种性能仿真中,因为玉米籽粒中大扁形种子所占比例较高,并且大扁形种子的长宽厚变化较大,更容易受到吸附姿态的影响。对大扁形种子被

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 10 000 步,即仿真时间为 5 s,设置最大迭代次数为 80,每 0.01 s 保存一次数据。

点击 EDEM 中 Coupling Server 按钮,使 EDEM 处于待耦合状态,接下来在 Fluent 用户自定义的函数 (Functions) 中选择 Manage 并导入 UDF, Model 栏会增加 EDEM Coupling (Not Connected), 点选后,选择 Connect, 括号中内容会变成 Conneted, 此时 Fluent 与 EDEM 耦合已经建立,单击 Calculate 开始计算,整体计算过程大概需要 3 d。仿真过程与真实试验过程对比如图 6 所示。

初次仿真试验,采用角速度 3.1 rad/s, 风压 -3 kPa。从图中可以看出,仿真颗粒在充种区的堆积量小于真实试验情况。这是由于仿真采用的是玉

吸附的姿态定义为 3 种:侧躺、竖直和平躺,仿真时,提取并标记已被稳定吸附的大扁形种子 3 种姿态,分别统计不同姿态的数量,仿真过程如图 7 所示。

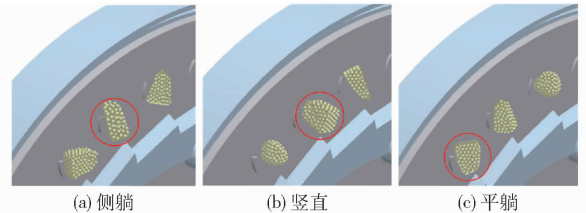


图7 大扁形种子吸附姿态

Fig. 7 Adsorption attitude of big-flat seed

选取影响播种质量的主要因素:排种盘角速度和风压,分析不同参数对吸附姿态的影响。试验因素水平如表 2 所示。不同角速度和风压对种子吸附姿态的影响曲线如图 8 所示。

表2 单因素水平

Tab.2 Single factor level of seed plate speed and wind pressure

水平	因素	
	排种盘角速度/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	风压/kPa
1	1.6	-2.5
2	2.1	-3.0
3	2.6	-3.5
4	3.1	-4.0
5	3.6	-4.5
6	4.1	-5.0

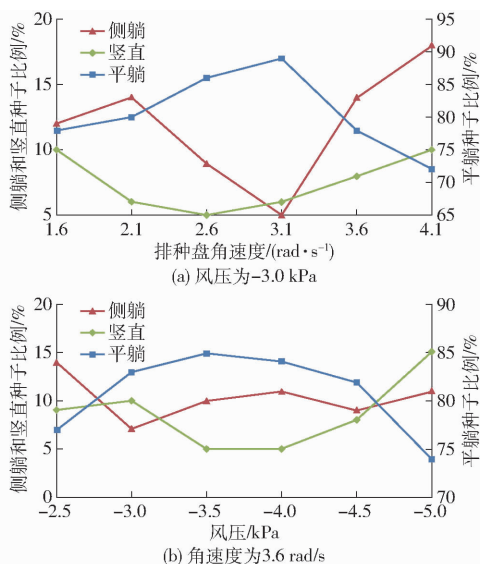


图 8 排种盘角速度和风压对种子吸附姿态的影响曲线

Fig. 8 Influence of rotation speed and wind pressure of seed metering tray on seed adsorption posture

从图 8 可以看出,随着排种盘角速度的增加,不同姿态的大扁形种子呈现出不同的变化趋势,其中平躺姿态为主要吸附姿态,不同角速度下其比例的平均值为 80.5%,其次为侧躺姿态,比例为 12%,竖直姿态在各个转速下所占比例较低,平均值为 7.5%;平躺姿态下大扁形种子的比例在一定转速范围内随排种盘角速度的增加而升高,当排种盘角速度为 3.1 rad/s 时,所占比例最高,为 89%;当超过 3.1 rad/s 时,平躺种子的比例开始降低,到 4.1 rad/s 时所占比例最低,为 72%。侧躺姿态下的大扁形种子所占的比例随着排种盘角速度的升高有小幅上升,然后迅速下降到达最低 5%,随后又开始急剧升高,当角速度为 4.1 rad/s 时,所占比例为 18%。竖直姿态的大扁形种子所占比例随着角速度的升高先降低后升高,最高为 10%。在 6 种不同风压下,平躺姿态为大扁形种子主要的吸附姿态,所占比例均值为 81.8%,其次为侧躺姿态,其均值为 10%,竖直姿态所占比例最低,为 8.2%。平躺姿态的种子随着负压的增大,比例先增加后降低,在风压为 -3.5 kPa 时,所占比例最高,达到 85%,风压为 -5 kPa 时,所占比例最低,为 74%;侧躺姿态的种子比例变化不明显,竖直姿态的种子在风压为 -3.5 kPa 时比例最低,为 5%,随后随着负压的增大,比例迅速上升,在 -5 kPa 时比例最高,为 15%。

### 3.3.2 种子吸附姿态对排种性能的影响

吸附姿态会影响投种一致性,理想的吸附姿态为平躺姿态,这样种子可以按照既定的路径有序地下落。但实际工作中,种子受外界因素的干扰很难保证平躺状态下被吸附,为更好地优化设计排种器,探究

不同吸附姿态种子对排种性能的影响显得尤为重要。

综合考虑排种盘角速度、真空度及种子吸附姿态对排种性能的影响,选取排种盘角速度 3.6 rad/s、风压 -3.5 kPa 和大扁形种子进行仿真试验。由于仿真试验可以采用直接观测的方式进行统计,进而计算出合格指数、重播指数和漏播指数,统计数据过程如表 3 所示。由于 DEM - CFD 仿真过程计算量巨大,十分耗时,因此,选取 100 个型孔中的大扁形玉米籽粒进行统计,仿真试验重复 5 次。其仿真过程如图 9 所示,仿真结果如表 4 所示。

表 3 携种区仿真统计过程

Tab. 3 Statistical process of seed carrying area simulation

型孔/个	型孔吸附的玉米粒数/粒	种子累积数量/粒
1	1	1
2	1	2
3	0	2
4	1	3
5	1	4
6	1	5
⋮	⋮	⋮
79	2	80
⋮	⋮	⋮
100	1	101

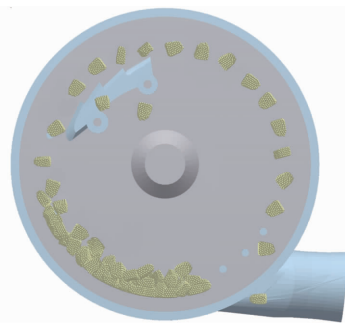


图 9 仿真过程

Fig. 9 Simulation process

表 4 3 种吸附姿态种子比例及排种性能

Tab. 4 Seed proportion and seed performance index of three adsorption postures %

序号	平躺种子比例	侧躺种子比例	竖直种子比例	合格指数	重播指数	漏播指数
1	82	12	6	90	4	6
2	85	8	7	91	3	6
3	87	7	6	93	4	3
4	84	10	6	91	5	4
5	83	12	5	92	5	3

从表 4 中可知,平躺种子比例越高,合格指数越高,说明提高合格指数需增加平躺种子比例;侧躺种子比例的增多会对重播产生影响,随着侧躺种子比

例的增加,重播指数也在增大,这是因为种子厚度较小,侧躺种子不足以完全覆盖种盘型孔,会导致裸露的型孔再次吸附种子,引发重吸现象;竖直种子比例的增大会对漏播产生影响,增加了漏播的可能,这是因为种子被竖直吸附,种子的重心离种盘较远,增大了力臂,造成吸种不稳定,容易发生掉落,并且种子竖直吸附,迎流面积较小,受到的吸附力也较小,在其他种子的碰撞冲击和流场压强不稳状态下增加了掉落的可能性。综上分析,合格指数与平躺种子数量的变化趋势相同,而重播指数、漏播指数与平躺种子数量的变化相反,侧躺、竖直姿态种子的数量共同影响重播指数、漏播指数。

为进一步分析原因,通过观察仿真回放视频,将种子投种时机分为3种:提早投种、正常投种和延时投种。提早投种是指吸附的种子还未达到设计的投种区域,真空气室负压还未完全阻断,提前脱离型孔,角度范围为与水平位置夹角 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ;正常投种是指种子达到投种点,负压被阻断后及时脱离型孔,角度范围为与水平位置夹角 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ;延时投种是指种子达到投种指定区域,负压已被阻断,但是种子未立即投种,角度范围为与水平位置夹角 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。具体区域划分如图10所示。

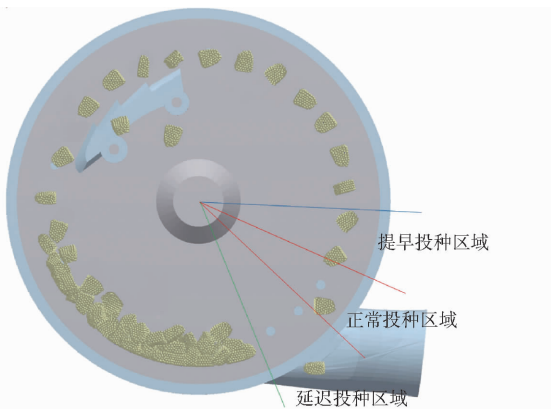


图10 投种区域划分

Fig. 10 Division of seed area

统计3种吸附姿态下各种投种方式出现的次数,种子吸附姿态比例与投种方式关系见图11。

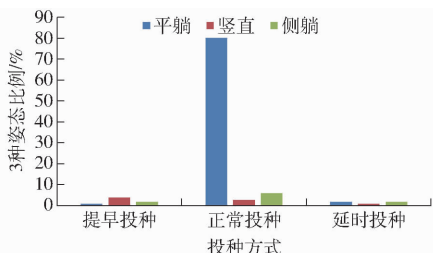


图11 不同投种方式下3种吸附姿态种子比例

Fig. 11 Seed proportion of three adsorption posture under different seeding modes

由图11可直观地分析出:提早投种状态下种子

的主要姿态为竖直和侧躺,其中竖直姿态所占比例最高,平躺姿态种子所占比例最低;正常投种状态下,平躺种子比例占据绝对优势,比例高达83%,其次为侧躺和竖直姿态种子,其中竖直姿态种子比例最低;延时投种状态下,侧躺种子所占比例较高,竖直姿态种子比例较低。上述观察统计与种子吸附力动力学分析结果相一致,平躺种子吸附最为稳定,基本保证正常投种,实际工作中,路面不平、机器振动、风机转速不恒定等因素会导致提前投种。竖直姿态种子吸附不稳定,有一定比例的提前投种。侧躺的种子易与型孔凸台产生碰撞,被吸附后投种困难。由图11可知,投种方式以正常投种为主,提早投种次之,延时投种最少。

为分析不同投种方式对排种性能的影响,记录3次试验中提早投种、正常投种、延时投种的次数。漏吸记作正常投种;吸附 $n$ 粒种子时,按最后掉落种子的投种方式。投种方式比例及排种性能见表5。

表5 投种方式比例及排种性能

Tab. 5 Proportion of seed feeding mode and performance index of seed metering %

序号	提早投种比例	正常投种比例	延时投种比例	合格指数	重播指数	漏播指数
1	9	85	6	91	5	4
2	6	89	5	94	4	2
3	10	83	7	89	7	4

由表5可直观地分析出:合格指数与正常投种比例变化的趋势相一致,与提早投种、延时投种的变化趋势相反。重播指数、漏播指数与正常投种的变化趋势相反,与提早投种、延时投种变化趋势相同。由此可得,增加正常投种种子所占的比例,减少提早投种和延时投种比例可有效提高合格指数,吸附姿态的不同影响投种时机,进而影响排种质量。

综合以上分析可知,风压和排种盘角速度的变化会影响种子的吸附姿态,而种子的吸附姿态将直接影响投种均匀性,进而影响播种质量。为确保投种稳定均匀,应通过具体试验,寻找风压与排种盘角速度合理的匹配关系,增大大扁形种子平躺姿态的比例,以达到提高播种质量的目的。

## 4 台架试验

台架试验主要利用实验室设备模拟排种器的工作,得到相关参数指导田间试验。本研究的室内台架试验应用中国农业大学自主研发的排种性能检测仪<sup>[29-30]</sup>。该检测仪采用可视化屏幕操作,采用光电传感器检测下落的种子,实时得出排种性能指标,操作简单、方便快捷。本研究采用该排种性能检测仪采集数据,风压测量选用RE-1211型风压计,检测

仪器如图 12 所示。



图 12 试验设备及仪器

Fig. 12 Test equipment and instruments

1. 排种性能检测仪 2. 操作面板 3. RE-1211 型风压计

基于此,本试验主体为辅助充种气吸式排种器,排种器后壳体采用铝合金 6061,公差为 100 μm 或 0.1%。通过五轴机床加工而成。为了便于观察,采用透明光敏树脂 3D 打印而成,其余部件采用 8000 树脂材质打印。试验所用排种器如图 13 所示。



图 13 辅助充种气吸式排种器

Fig. 13 Auxiliary seed filling air-suction seed metering device

#### 4.1 速度单因素试验

在作业速度 6 ~ 14 km/h 范围内均匀选取 5 个水平进行测试,作业风压设定为 -4 kPa。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,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。

单因素试验结果如表 6 所示。通过观察,排种器在作业速度 6 ~ 14 km/h 范围内,合格指数均不低

表 6 速度单因素试验结果

Tab. 6 Speed single factor test results %

作业速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	合格指数	漏播指数	重播指数
6	94.4	0.3	5.3
8	97.2	0.4	2.4
10	97.8	0.6	1.6
12	96.9	1.3	1.8
14	95.7	2.3	2.0

于 94.4%,漏播指数均不高于 2.3%,重播指数均不高于 5.3%。

随着作业速度的增加,合格指数先迅速升高,到达最高点后急剧下降,其中作业速度 6 km/h 时,合格指数最低,为 94.4%,10 km/h 时,合格指数升至最高为 97.8%;随着作业速度的提高,漏播指数逐渐升高,速度为 6 km/h 时,漏播指数最低,为 0.3%,14 km/h 时,漏播指数达到 2.3%的最高点;重播指数整体随着速度的增加呈下降趋势后缓慢上升。合格指数是评判排种性能最为重要的指标,从表 6 可以明显看出,在作业速度 8 ~ 12 km/h 时,排种器合格指数都能稳定在一个较高的水平上,说明排种器在 -4 kPa 风压下有一个较为宽阔的作业速度区间,最优作业速度范围为 8 ~ 12 km/h。

对单因素试验指标进行方差分析,结果如表 7 所示。在风压为 -4 kPa 时,作业速度对合格指数、漏播指数的影响高度显著,说明速度对排种性能的影响较大。

表 7 作业速度单因素试验方差分析

Tab. 7 Variance of single factor test

性能指标	差异源	平方和	自由度	均方	F	P
合格指数	组间	237.529 3	4	59.382 33	18.049 34	0.000 1
	组内	32.9	10	3.29		
	总数	270.429 3	14			
漏播指数	组间	183.310 67	4	45.827 67	54.643 48	<0.000 1
	组内	8.386 67	10	0.838 67		
	总数	191.697 33	14			
重播指数	组间	5.204	4	1.301	0.912 77	0.493 03
	组内	14.253 33	10	1.425 33		
	总数	19.457 33	14			

注:当  $P \leq 0.01$  时,视为高度显著;当  $0.01 < P \leq 0.05$  时视为显著,当  $P > 0.05$  时视为不显著。下同。

#### 4.2 风压单因素试验

为确定排种器工作风压范围,控制排种器作业速度为 12 km/h,风压在 -4.5 ~ -2.5 kPa 间平均取 5 个梯度进行试验,风压计连接至进气口,可实时读取风压数据。每次试验测量 251 粒种子,重复 4 次进行统计。试验结果如表 8 所示。

表 8 风压单因素试验结果

Tab. 8 Wind pressure single factor test results %

风压/kPa	合格指数	漏播指数	重播指数
-2.5	84.7	13.1	2.2
-3.0	93.4	4.5	2.1
-3.5	96.0	1.6	1.4
-4.0	96.9	1.3	1.8
-4.5	96.1	0.8	3.1

从表 8 中可以看出,除风压 -2.5 kPa 时,漏播



指数低于国标,其余风压下合格指数均不低于93.4%,漏播指数均不高于4.5%,重播指数均不大于3.1%。

随着风压的增大,合格指数上升,风压到-3.5 kPa时,合格指数上升趋势趋于平缓,随后在风压为-4.5 kPa时,合格指数有小幅下降,其中合格指数最高为96.9%;随着负压的不断增大,漏播指数逐渐降低,风压-4.5~-3.5 kPa区间,漏播指数可以维持在一个较为稳定较优水平区间;重播指数随着风压的变化不断波动,其中在风压-2.5、-4.5 kPa时,重播指数较高,这是因为种子在投种区投种时,由于风压较低,不同种子的投种位置差异较大,种子有的提早有的延后下落,会造成在投种管中种子之间的碰撞,导致一个投种点有多粒种子的情形,而风压较高时,型孔可吸附多粒种子,造成重播。

对风压单因素试验进行方差分析,如表9所示,得出在工作速度12 km/h下,风压对合格指数和漏播指数有显著影响,对重播指数影响不显著。

选取大扁形种子,采用高速摄像慢速回放,如图14所示。统计大扁形种子各种姿态所占比例,输出试验结果如图15所示。

表9 风压单因素试验方差分析

Tab.9 Results of single factor ANOVA of wind pressure

性能指标	差异源	平方和	自由度	均方	F	P
合格指数	组间	76.802	4	19.2005	4.13863	0.01866
	组内	69.59	15	4.63933		
	总数	146.392	19			
漏播指数	组间	14.215	4	3.55375	13.86378	<0.001
	组内	3.845	15	0.25633		
	总数	18.06	19			
重播指数	组间	48.317	4	12.07925	2.40447	0.095656
	组内	75.355	15	5.02367		
	总数	123.672	19			

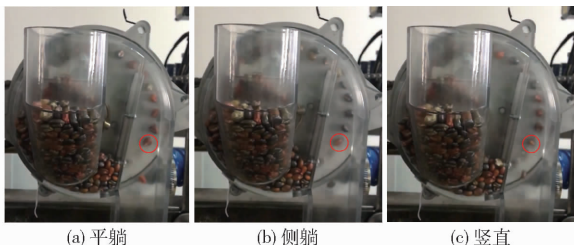


图14 高速摄像慢速回放

Fig.14 High speed camera slow playback

通过与仿真试验结果相对比,考虑到仿真是理想状态,没有工作时振动干扰,数据结果较接近,证明了仿真的真实性。由图15得出,角速度3.1 rad/s、风压-3 kPa和角速度3.6 rad/s、风压-3.5 kPa的

平躺姿态种子最多。

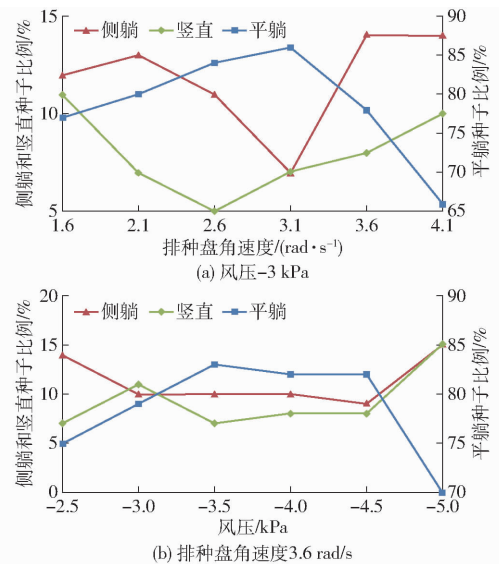


图15 台架试验结果

Fig.15 Statistics of test results

## 5 结论

(1)通过对携种区末端进行受力分析得出,种子吸附姿态的变化会直接影响吸附稳定性;分析了投种过程,构建了投种过程数学模型,发现投种在水平方向上的距离与种盘半径、转速、振动幅度和频率、投种高度、角度有关。

(2)分析了影响投种性能的关键因素——种子吸附姿态,发现不同排种盘角速度下大扁形种子平躺姿态为主要吸附姿态,且随着转速升高,平躺姿态比例在1.6~3.6 rad/s范围内逐渐升高。研究了种子吸附姿态对排种性能的影响,结果表明,平躺种子比例越高,合格指数越高;侧躺种子比例增加,重播指数增大;竖直种子比例增大会对漏播产生影响。通过对投种区域的分析可知,增加正常投种种子所占的比例、减少提早投种和延时投种比例可有效提高合格指数,吸附姿态不同影响投种时机,进而影响排种质量,与水平位置夹角15°~30°区域投种效果最好。

(3)速度单因素试验表明,作业速度变化对排种合格指数、漏播指数的影响均高度显著,排种器作业速度在6~14 km/h范围内,合格指数均不低于94.4%,漏播指数均不高于2.3%,重播指数均不高于5.3%。风压单因素试验表明,风压对合格指数和漏播指数有显著性影响,对重播指数影响不显著,风压在-4.5~-3 kPa区间内,合格指数不低于93.4%,漏播指数不高于4.5%,重播指数不大于3.1%。通过高速摄像慢速回放,得到种子姿态变化情况与仿真结果相一致,验证了仿真模拟的准确性。

## 参 考 文 献

- [1] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.  
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [2] YANG Li, HE Xiantao, CUI Tao, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1-9.
- [3] 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 air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [4] 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](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)
- [5] 王业成,高云鹏,台文硕,等. 夹持式玉米精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):40-46.  
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and experiment of clamping maize precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 40-46. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190905&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190905&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.005. (in Chinese)
- [6] 廖彦涛,廖庆喜,王磊,等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报,2018,34(24):10-17.  
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10-17. (in Chinese)
- [7] 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 seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- [8] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(5):10-18.  
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10-18. (in Chinese)
- [9] 崔涛,韩丹丹,殷小伟,等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(1):8-16.  
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8-16. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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 Agricultural Machinery, 2004, 28(6): 435-441.
- [13] YAZGI A, DEGIRMENCIÖGLU 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.
- [14] 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报,1979,10(3):56-63.  
LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56-63. (in Chinese)
- [15] 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(9):59-62.  
CHEN Jin, LI Yaoming, WANG Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59-62. (in Chinese)
- [16] 袁月明,马旭,金汉学,等. 气吸式水稻芽种排种器气室流场研究[J]. 农业机械学报,2005,36(6):42-45.  
YUAN Yueming, MA Xu, JIN Hanxue, et al. Study on vacuum chamber fluid field of air suction seed-metering device for rice bud-sowing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 42-45. (in Chinese)
- [17] 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助助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](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)
- [18] 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](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)
- [19] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM - CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 23 - 31.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM - CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23 - 31. (in Chinese)
- [20] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 26 - 35.
- LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26 - 35. (in Chinese)
- [21] ZAHRA A, ABDANAN M S. Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 187 - 198.
- [22] KOSTIC M, RAKIC D, RADOMIROVIC D, et al. Corn seeding process fault cause analysis based on a theoretical and experimental approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 207 - 218.
- [23] 邢赫, 臧英, 曹晓曼, 等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 23 - 30.
- XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23 - 30. (in Chinese)
- [24] 余佳佳, 丁幼春, 廖宜涛, 等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 103 - 108.
- YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 103 - 108. (in Chinese)
- [25] 袁昊, 刘彩玲, 宋建农. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动供种装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 31 - 40.
- YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 31 - 40. (in Chinese)
- [26] 刘虎, 周纪磊, 方会敏, 等. 基于模态的玉米高速精密排种器振动特性分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 47 - 51, 56.
- LIU Hu, ZHOU Jilei, FANG Huimin, et al. Vibration analysis of high speed corn seeding machine based on modal analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 47 - 51, 56. (in Chinese)
- [27] 刘月琴. 气吸式免耕播种机振动特性及其对排种性能的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- LIU Yueqin. Study on vibration characteristics of air suction no-tillage planter and its effect on seed metering performance[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [28] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM - CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48 - 57.
- DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 - 57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181106&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181106&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)
- [29] HAO Y, CUI T, BORA G, et al. Development of an instrument to measure planter seed meter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 31 - 40.
- [30] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19 - 27.
- HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experimental of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19 - 27. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161003&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)