

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006

基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验

丁力^{1,2} 杨丽^{1,2} 武德浩¹ 李东毅^{1,2} 张东兴^{1,2} 刘守荣¹
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对 DEM – CFD 计算量大的问题, 首先利用 Fluent 仿真, 通过设计进气口位置的三因素三水平正交试验, 以充种区型孔压强、自清种区型孔压强、清种区型孔压强、携种区型孔压强为评价指标, 进行极差和方差分析, 确定最佳进气口位置参数; 其次, 基于离散单元法理论建立玉米籽粒黏结颗粒 Bonding 模型, 对气道流场划分结构化网格, 并设置相关参数, 实现玉米气吸式排种器 DEM – CFD 气固耦合仿真; 提取排种盘吸附玉米种子时的型孔流场压强, 发现每个区域的压强都能稳定过渡, 且压强由大到小为充种区、自清种区、清种区、携种区、卸种区; 通过理论计算得出吸附压强最小值, 并与仿真结果进行对比, 结果表明仿真结果均大于理论计算吸附压强最小值; 采用第 1 代常规气室结构排种器和本文设计排种器进行风压测定对比试验分析, 验证了所选进气口位置参数的合理性; 最后, 以改变排种盘转速为例, 选取排种器常用作业速度 8、10、12、14 km/h, 以合格指数、重播指数、漏播指数为排种性能评价指标, 通过仿真考察其排种性能, 并与台架试验进行对比。结果表明, 在仿真模拟中, 当作业速度不大于 14 km/h、负压为 3 kPa 时, 合格指数均不小于 89.7%, 漏播指数不大于 7.8%, 重播指数不大于 2.5%; 台架试验中, 在相同的作业速度和负压下, 粒距合格指数均不小于 90.3%, 重播指数不大于 2.7%, 漏播指数不大于 7%; 仿真试验与台架试验结果较为接近, 验证了仿真模拟的可行性。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 离散元法; DEM – CFD

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0048-10

Simulation and Experiment of Corn Air Suction Seed Metering Device Based on DEM – CFD Coupling Method

DING Li^{1,2} YANG Li^{1,2} WU Dehao¹ LI Dongyi^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} LIU Shourong¹
(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Soil – Machine – Plant System Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of large amount of DEM – CFD calculation, the Fluent simulation was firstly used and three-factor three-level orthogonal test of the position of the air inlet was designed. The mean of pressure in seed filling area holes, mean of pressure in self cleared area holes, mean of pressure in clearing seed area and pressure of other holes were taken. The mean value was the evaluation index, the range and variance analysis were carried out to determine the optimum inlet location parameters. Secondly, the Bonding model of corn grain adhesive particles was established. The structure grid of the airways flow field was divided and the relevant parameters were set up to realize the DEM – CFD gas solid coupling simulation of corn gas suction seed metering device. The pressure of the plate holes was extracted from the flow field when the corn seeds adsorbed. It was concluded that the pressure changes in each region were stable, and the pressure ranges from large to small was filling area, self cleaning area, clear seed area, seed carrying area and seed unloading area. Through theoretical calculation, the minimum pressure of adsorption was obtained, which was compared with the results obtained by simulation. The results showed that the simulation results were higher than the theoretical calculation of the minimum adsorption pressure. The first generation of conventional chamber structure seed metering device and the designed seed metering device were used to test and analyze the air

收稿日期: 2018 – 07 – 15 修回日期: 2018 – 08 – 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, 主要从事农业机械装备设计与理论研究, E-mail: 604295294@qq.com
通信作者: 刘守荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事数字化设计与制造研究, E-mail: lsr@cau.edu.cn

pressure, which verified the rationality of the selected inlet position parameters. Finally, by changing the speed of the plate, the common operating speed of the seed metering device was 8 km/h, 10 km/h, 12 km/h and 14 km/h, and the qualified index, multiple index and missing index were used to evaluate the performance of seed metering performance under different conditions by simulation test, and the comparison was carried out through the bench test. The results showed that in the simulation test, when the operation speed was not more than 14 km/h and the negative pressure was 3 kPa, the qualified index was not less than 89.7%, the missing index was less than 7.8% and the multiple index was less than 2.5%. In the bench test, under the same operating speed and negative pressure value, the seed spacing qualified index can reach 90.3%, the multiple index was less than 2.7%, and the missing index was less than 7%. The simulation test was close to the bench test, which verified the feasibility of the simulation.

Key words: corn; air suction seed metering device; discrete element method; DEM - CFD

0 引言

玉米是重要的粮食作物,随着种植面积不断扩大和产量的逐年提高,玉米机械化精密播种显得尤为重要^[1]。排种器作为精密播种的核心部件,其工作性能直接影响播种质量^[2-3]。目前,气吸式排种器因具有对种子外形要求不严、不需要精选分级、不损伤种子、能适应较高速度播种作业等优点,而被广泛应用^[4-7]。气吸式排种器依靠真空气室内的真空度经吸孔将种子吸附,要求气室内具有一定的真空度且压力分布均匀^[8],因此,国内外学者对吸气室的形状、位置和气源真空度做了大量研究^[9-14]。但是,气吸式排种器在实际工作过程中,种子的运动会对流场产生较大影响^[15],仅用 Fluent 模拟仿真,与实际情况相差较大。

近些年,DEM - CFD 气固两相流耦合在工业、农业领域得到广泛应用^[16-20],解决了很多生产实际问题。在国外 DEM - CFD 气固耦合主要应用于工程领域,如水力旋流器、吸尘器等;国内主要应用在玉米气吹式排种器上,很少应用于玉米气吸式排种器。本文针对 DEM - CFD 计算量大的问题,首先利用 Fluent 软件选取玉米气吸式排种器气道最佳进气口位置参数;然后建立玉米种子 Bonding 模型,通过 DEM - CFD 耦合的方式分析排种器实际工作过程中型孔压强的变化规律,对型孔压强关键参数提取分析,验证所选进气口参数的合理性;对常用作业速度条件下排种器工作状况进行模拟仿真,选取合格指数、重播指数、漏播指数 3 个作业指标,进行试验对比分析。

1 排种器结构与工作原理

排种器的结构如图 1 所示,首先将排种器分为充种区、自清种区、清种区、携种区、卸种区 5 个区域^[21]。玉米种子从进种口下落至排种器底部,进气口通入负压,种盘在传动轴的带动下顺时针转动,玉

米种子在种盘另一侧负压的作用下吸附在型孔上,随着种盘一起转动,多余的种子被清种锯齿和清种毛刷清除,吸附力具有优势的种子继续转动到达卸种机构上部,位于种盘后盘面的卸种轮随着型孔的转动也随之转动,将型孔吸附的种子顶出,同时空气腔室的负压也被阻断,种子在重力、离心力和卸种轮顶出力的共同作用下掉入投种口,完成排种作业。

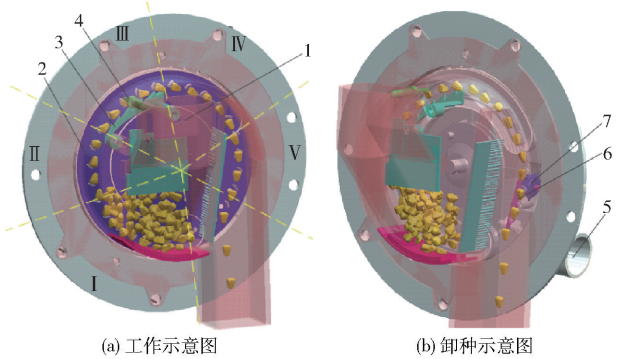


图 1 排种器结构模型

Fig. 1 Structure model of seed metering device

1. 进种口 2. 种盘 3. 清种锯齿 4. 清种毛刷 5. 进气口
6. 卸种机构 7. 卸种轮 I. 充种区 II. 自清种区 III. 清种区
IV. 携种区 V. 卸种区

2 排种器气室进气口设计

气吸式排种器是靠负压形成的压差将种子吸附于种盘上,且气室流场压力越稳定,越有利于提高排种器排种的均匀性,降低漏播率^[22-24]。因此,负压气室的形状和进气口位置参数将对整个气室流场压力的均匀度产生直接影响,由于负压气室的形状受排种器整体结构限制,形状相对固定,而进气口位置参数将直接影响排种器工作区域的流场压力分布,进而影响排种质量。

2.1 流场因素水平的确定

增加充种区型孔两端压差可有效提高排种器充种性能,在自清种区、清种区压差不易过大,能稳定过渡并减小,否则会影响清种效果,在携种区压强应

稳定过渡,防止压差骤降,影响落种稳定性,在卸种区应需阻断负压,保证顺利排种。

依据以上分析,同时依据文献[24–25,29]的气吸式排种器流场分析结果,选取气室接口位置、进气口垂直角和进气口水平角3个因素,设置不同水平,进行仿真分析,试验因素水平如图2所示。

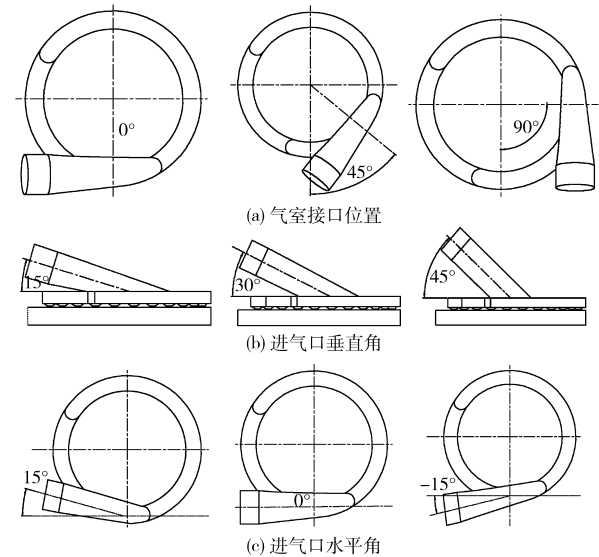


图2 进气口位置参数各因素水平示意图

Fig.2 Factors level sketch of air inlet position parameters

2.2 负压区流场仿真分析

2.2.1 几何建模及前处理

仿真模型利用 SolidWorks 进行几何建模,如图3a所示。为了控制变量,选用相同的进气口直径,然后导入 ICEM – CFD 中进行六面体非结构化网格划分,定义空气入口和出口,将所有型孔处接触面定义为 INTERFACE,其余边界定义为 WALL,生

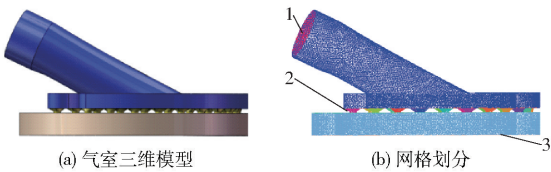


图3 仿真模型及网格划分

Fig.3 Simulation model and mesh generation

1. 入口 2. 型孔 3. 出口

成网格文件,如图3b所示。

将生成的网格文件导入 Fluent 软件,在 Fluent 中设置气吸式排种器压强为 3 kPa^[26],湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,并设定相关参数,采用一阶迎风差格式,利用 simple 算法求解,定义最大运算步数 1 000,收敛条件为 0.000 1,采用混合初始化后进行运算^[27]。

2.2.2 仿真及结果分析

为了减少仿真次数,采用正交试验方法,试验因素水平如表1所示。利用 Fluent 后处理 report 功能生成在不同区域得到每组试验型孔与种子作用面负压平均值,结果如表2所示,表中 A、B、C 表示气室接口位置、进气口垂直角和进气口水平角的水平值。

表1 试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of test

水平	因素		
	气室接口位置/(°)	进气口垂直角/(°)	进气口水平角/(°)
1	0	15	15
2	45	30	0
3	90	45	-15

表2 三因素试验结果

Tab.2 Results of three-factor test

试验号	因素			充种区型孔	自清种区型孔	清种区型孔	携种区型孔
	A	B	C	压强/kPa	压强/kPa	压强/kPa	压强/kPa
1	1	1	1	2 365	1 523	741	461
2	1	2	2	2 851	2 237	1 101	740
3	1	3	3	2 557	1 554	766	520
4	2	1	2	1 797	2 092	1 362	939
5	2	2	3	2 196	2 418	1 638	1 132
6	2	3	1	2 001	2 295	1 416	953
7	3	1	3	1 507	1 640	1 616	1 112
8	3	2	1	1 450	1 645	1 527	1 050
9	3	3	2	1 803	2 162	1 934	1 366

注:压强都为负压。

采用极差分析法进一步分析,结果如表3所示。通过极差分析,3个因素影响程度不相同,对于充种区型孔压强、自清种区型孔压强、清种区型孔压强、携种区型孔压强这4个指标而言,极差最大的均为因素A;对于充种区型孔压强和自清种区型孔压强,

因素B的影响大于因素C,且影响由大到小为A、B、C。对于清种区型孔压强和携种区型孔压强,因素C的影响大于因素B,且影响由大到小为A、C、B,为了避免漏播现象,应使型孔处压差尽可能大,得出压差最大的因素水平最优组合,结果如表4所示。

表 3 仿真试验结果极差分析

Tab.3 Range analysis of simulation test result

指标	因素	水平			极差	优水平
		1	2	3		
充种区型孔压强	A	2 604. 33	2 034. 67	1 600. 00	1 004. 33	1
	B	1 889. 67	2 165. 67	2 120. 33	276. 00	2
	C	1 975. 33	2 163. 67	2 100. 00	188. 34	2
自清种区型孔压强	A	1 771. 33	2 268. 33	1 815. 67	497. 00	2
	B	1 751. 67	2 100. 00	2 003. 67	348. 33	2
	C	1 821. 00	2 163. 67	1 870. 67	342. 67	2
清种区型孔压强	A	869. 33	1 472. 00	1 692. 33	623. 00	3
	B	1 239. 67	1 422. 00	1 372. 00	182. 33	2
	C	1 228. 00	1 465. 67	1 340. 00	237. 67	2
携种区型孔压强	A	573. 67	1 008. 00	1 176. 00	602. 33	3
	B	837. 33	974. 00	946. 33	136. 67	2
	C	821. 33	1 015. 00	921. 33	193. 67	2

表 4 因素水平最优组合

Tab.4 The best combination of factors level

指标	最优参数组合
充种区型孔压强	$A_1B_2C_2$
自清种区型孔压强	$A_2B_2C_2$
清种区型孔压强	$A_3B_2C_2$
携种区型孔压强	$A_3B_2C_2$

由表 4 可知,对于各指标,进气口垂直角因素的最优水平是 B_2 ,进气口水平角因素的最优水平为 C_2 ,而对于气室接口位置因素水平,4 个指标都不相同;由文献[24,28]可知,采用气力充种的排种器,其充种环节尤为重要,它基本决定了排种性能。再由表 4 充种区型孔压强极差分析可知, $A_1B_2C_2$ 为最优组合。

对充种区型孔压强指标采用方差分析,通过判断显著性水平作出进一步判断,结果如表 5 所示。

表 5 方差分析(充种区型孔压强)

Tab.5 Variance analysis

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
A	1 530 000	2	764 800. 00	22. 14	0. 043 2 *
B	131 400	2	65 719. 11	1. 90	0. 344 5
C	70 760. 22	2	35 380. 11	1. 02	0. 494 0
误差	69 072. 22	2	34 536. 11		
总和	1 801 000	8			

注：* 表示差异显著(0.01 < P < 0.05)。

由方差分析可知,对于充种区型孔压强指标,气室接口位置对其有显著性影响,再根据前文所述,充种环节是排种最为重要环节,因此,选取 $A_1B_2C_2$ 为最终流场结构。

3 排种器工作过程耦合仿真分析

排种器在工作过程中种子吸附于型孔会使流场

发生变化,且种子处在气流场、颗粒场和重力场并存的复杂环境中,各参数变化极其复杂^[29]。因此,采用 DEM - CFD 气固耦合的方式,通过仿真分析排种器实际工作中流场的变化规律。

3.1 仿真模型建立与方法

3.1.1 玉米种子 Bonding 模型建立

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^[29],为解决这一问题,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小球形颗粒对玉米模型填充,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。

以应用较为广泛的郑单 958 种子为模型,将玉米种子分为大扁形、小扁形和类圆形 3 类,利用 Bonding 力黏结的小颗粒填充的模型如图 4 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模型图。

3.1.2 几何模型建立

几何模型是颗粒体所接触的实体,为了加快计算速度,本文将模型简化为前壳体、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,如图 5 所示。

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 6 所示。

在 EDEM 中设置种盘转速,并设置转动开始时间和结束时间,同时在 Fluent 中设置配合流体区域的型孔转动,转速设为相同,其余部件设置为固定件,创建颗粒工厂。仿真时,由于仿真过程较为耗时,采用与实际试验相同的玉米种子数量显然是不

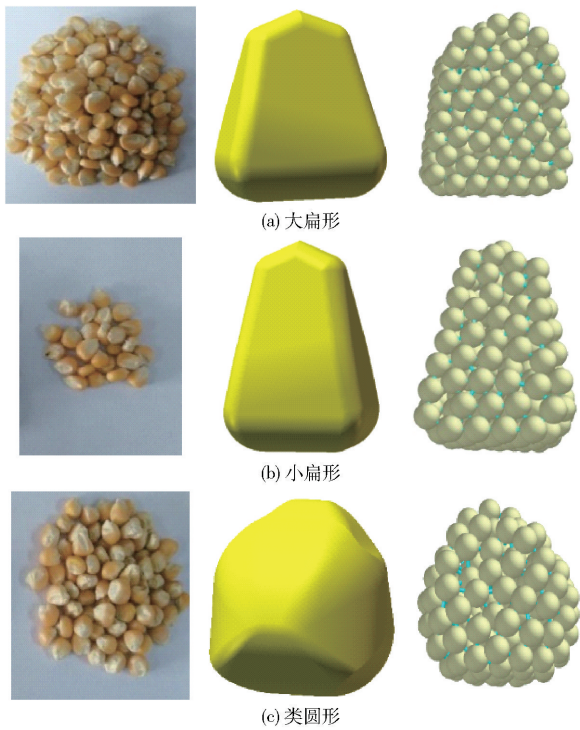


图4 玉米种子仿真模型

Fig.4 Simulation models of maize grains

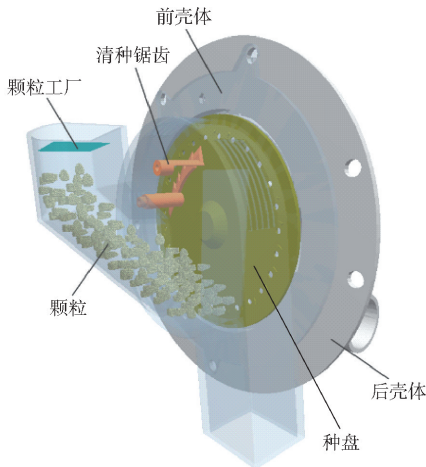


图5 EDEM 简化模型

Fig.5 Simplified EDEM model

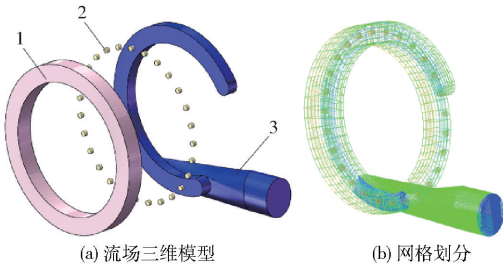


图6 流场三维模型及网格划分

Fig.6 Three-dimensional model and mesh generation of flow field

1. 种子腔室(静区域) 2. 型孔(动区域) 3. 气室(静区域)

现实的。在满足可以仿真的前提下,种子数量越少,仿真计算时长越短。经过多次尝试,发现玉米种子

数量为 160 粒时,种子在排种器中的堆积高度便可以达到仿真要求,为了加快仿真速度,在颗粒工厂内按混合种子比例共生成 160 粒,其中大扁形 85 粒、小扁形 35 粒、类圆形 40 粒。

3.1.3 仿真参数确定

排种器采用有机玻璃 3D 打印而成,根据所用材料确定相关参数如表 6、7 所示^[30]。在 EDEM 中设置时间步长为 1×10^{-5} s, Fluent 中时间步长设置为 EDEM 的 50 ~ 100 倍,选取 5×10^{-4} s 作为 EDEM 中时间步长;设置 Fluent 步数为 6 000 步,即仿真时间为 3 s,设置每个时间步最多迭代 80 次;为了加快仿真速度,减少存储空间,在 EDEM 和 Fluent 内,每 0.01 s 保存一次数据。

表6 玉米和排种盘物理特性

Tab.6 Physical characteristics of maize and seed metering plate

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(g·cm ⁻³)
玉米	0.4	1.37×10^8	1.197
排种盘	0.5	1.77×10^8	1.180

表7 玉米和排种盘碰撞参数

Tab.7 Collision parameters between maize and seed metering plate

项目	弹性恢复系数	滑动摩擦因数	滚动摩擦因数
玉米与玉米	0.182	0.431	0.078 2
玉米与排种盘	0.621	0.482	0.093 1

3.2 型孔流场仿真分析

为了节约仿真时间,前文仅用 Fluent 得到了不同型孔表面压强变化,而排种器实际工作过程中玉米种子吸附于型孔时,会使得型孔大部分区域被玉米种子所阻挡,从而使真空室中的流场出现变化^[31]。为了研究玉米种子对流场的变化情况,首先标记型孔流场,如图 7 所示。选取排种器工作稳定后的时间段,以 3.47 s 时的流场结构为例,将型孔按如图 7 所示顺时针编号,依次截取通过型孔中心的法向面,观察型孔压强变化,如图 8 所示。

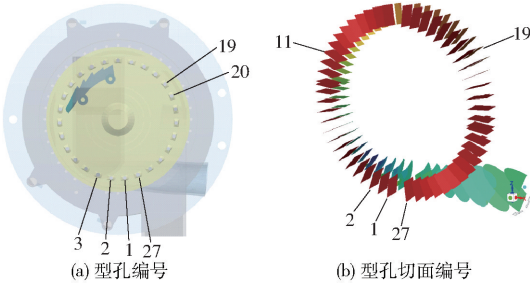


图7 排种器型孔编号

Fig.7 Type hole number of metering device

从图 8 可以明显看出,充种区的型孔部分压强

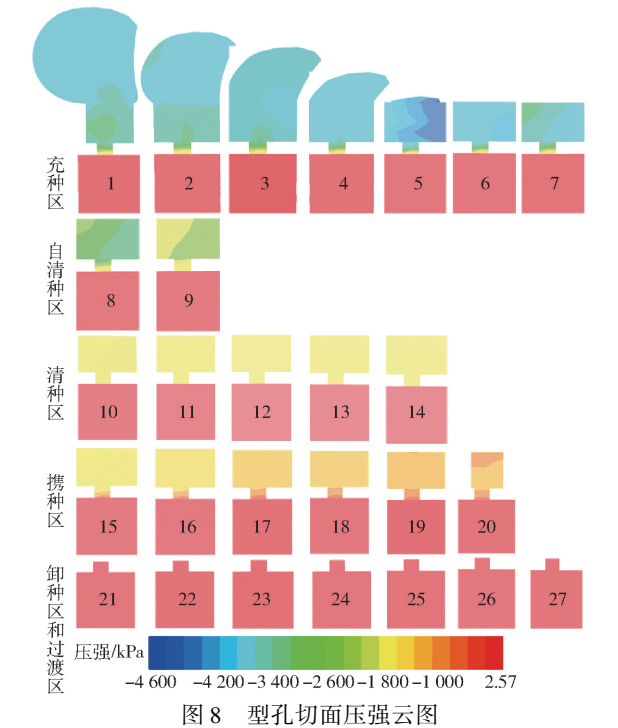


图 8 型孔切面压强云图

Fig. 8 Pressure nephogram of type hole section

明显大于其他区域的压强,每个区域的压强都能稳定过渡,除充种区外,其他区域的型孔压强都随着编号的增大而减小,在编号 21 到 27 的型孔,由于没有和气道接触,因此压强为 0。且压强由大到小为充种区、自清种区、清种区、携种区、卸种区。在充种区中,编号为 5 和 6 的型孔压强最大,这也是种子吸附于型孔,突破种群阻力的关键部分,较大的压强可以使种子牢牢吸附于型孔上,减少漏充的可能。气吸式排种器吸附压强计算式为

$$H_{\text{CMAX}} = \frac{80K_1K_2mgC}{\pi d^3} \left(1 + \frac{v^2}{gr} + \lambda \right) \tag{1}$$

其中 $\lambda = (6 \sim 10) \tan \gamma$ (2)

式中 H_{CMAX} ——真空度最大值, kPa

C ——种子重心离排种盘距离, cm

m ——单粒种子质量, kg

d ——型孔直径, cm

v ——排种盘吸孔中心处的线速度, m/s

r ——种盘吸孔处转动半径, m

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

λ ——种子综合摩擦因数

γ ——种子自然休止角

K_1 ——吸种可靠系数, 取 1.8 ~ 2.0

K_2 ——工作可靠性系数, 取 1.6 ~ 2.0

在充种区需考虑 K_1 、 K_2 , 在卸种区可以忽略^[32]。为使种子能牢固地被吸附在型孔上, 吸室里的实际真空度必须大于 H_{CMAX} 。根据文献^[33], 取 $\tan \gamma$ 为 0.265, K_1 为 1.9, K_2 为 1.8, 求得排种器在

8 ~ 14 km/h 作业速度下所需真空度的最小值如表 8 所示。

表 8 真空度最小值
Tab. 8 Minimum of vacuum degree

速度/(km·h ⁻¹)	负压/kPa	
	充种区	携种区
8	1 855	539
10	1 875	545
12	1 908	555
14	1 940	566

提取每个型孔与种子作用面压强,发现充种区负压压强最小值为 2 401 kPa,携种区负压压强最小值为 605 kPa,均大于理论计算所需压强最小值,因此,所有型孔压强都能满足吸附要求。

3.3 排种器工作过程模拟

为了验证仿真条件下所建立的 Bonding 颗粒的正确性和仿真参数的合理性,本文以改变排种盘转速为例,同时依据文献^[30]中作业速度,选取排种器常用作业速度 8、10、12、14 km/h。研究不同条件下排种器仿真试验的排种性能,并通过台架试验进行对比。

3.3.1 仿真过程

由于仿真过程的可视性,可以直接采用观测的方式统计出每个型孔中的玉米种子数量,进而计算出仿真的合格指数、重播指数和漏播指数,并与台架试验进行对比。

由于 DEM - CFD 仿真过程计算量巨大,十分耗时,因此,选取 80 个型孔中的玉米籽粒进行统计,其仿真过程和统计过程分别如图 9 和表 9 所示。

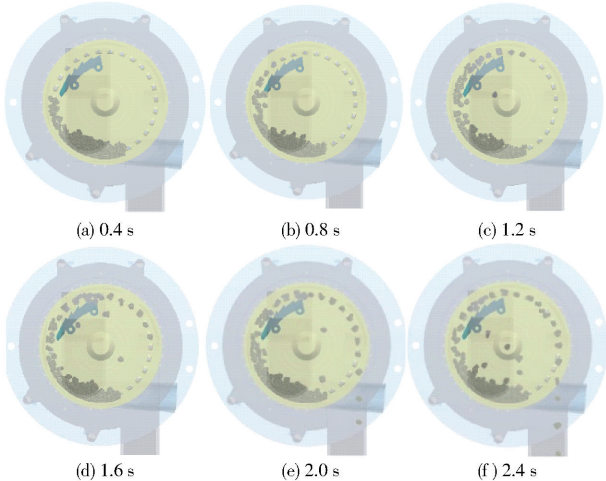


图 9 DEM - CFD 仿真过程

Fig. 9 Simulation process of DEM - CFD

3.3.2 仿真结果分析

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,由每组仿真试验统计的数据计算合格指数、重播指数和漏播指数,如表 10 所示。

表 9 仿真统计过程

Tab.9 Process of simulation statistics粒		
型孔序号	型孔吸附的玉米粒数	种子累积数量
1	1	1
2	1	2
3	0	2
4	1	3
5	1	4
6	1	5
⋮	⋮	⋮
79	2	80
80	1	81

表 10 仿真结果

Tab.10 Results of simulation test			
速度/(km·h ⁻¹)	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
8	95.0	0	5.0
10	93.8	0.8	6.2
12	92.5	1.2	6.3
14	89.7	2.5	7.8

由表 10 仿真结果可知,在作业速度不大于 14 km/h,负压 3 kPa 时,合格指数均不小于 89.7%,漏播指数不大于 7.8%,重播指数不大于 2.5%,各项指标优于国标要求,能有效实现有效播种。

4 试验验证与分析

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,分别进行气室结构对比试验和排种性能仿真验证试验。

4.1 气室结构对比试验

选取实验室研发的第 1 代常规气室结构气吸式排种器,使用风压计对气室覆盖型孔风压进行测定,并与本文的气吸式排种器进行对比试验,试验过程如图 10 所示。

选取前文仿真中排种器常用作业负压 3 kPa,使

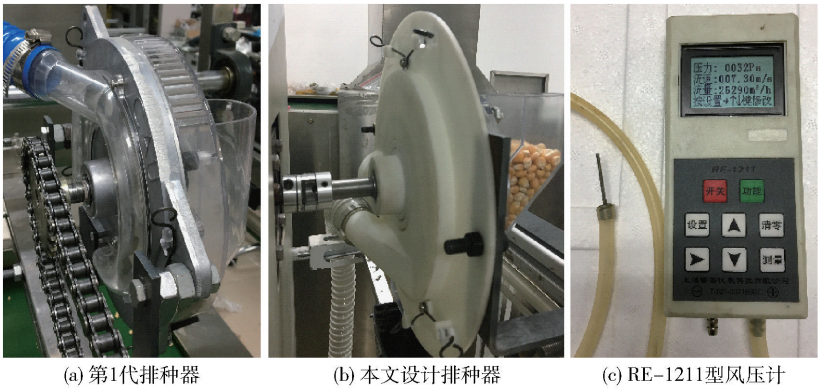


图 10 试验过程

Fig.10 Test process

用风压计测量型孔中心位置风压,待数值稳定后记录,选取 3 次测量取平均值,测量结果如表 11 所示。

表 11 排种器风压对比结果

Tab.11 Wind pressure comparison results of metering device		
参数	负压/kPa	
	第 1 代排种器	本文设计排种器
充种区型孔压强	2 166	2 782
自清种区型孔压强	2 267	2 219
清种区型孔压强	1 396	1 088
携种区型孔压强	915	732

由表 11 可以看出,本文设计的排种器在充种区型孔的负压远高于常规气室结构的第 1 代排种器,极大地增强了充种效果;在自清种区型孔压强差别不大;在清种区和携种区型孔压强中,第 1 代排种器大于本文设计排种器,但此时对于气吸式排种器,种子已经吸附稳定,掉落可能性小,因此影响不大。由

此可知,本文所设计的进气口位置参数极大地增加了充种区风压,有利于提高排种质量。

4.2 仿真与台架试验对比分析

为了验证 DEM - CFD 仿真模拟的有效性,使用自主研发的排种检测仪进行试验数据统计,试验过程如图 11 所示,试验结果如表 12 所示。

为了直观地体现出仿真与台架试验的排种性能对比,将仿真与试验的合格指数、重播指数和漏播指数进行对比,如图 12 所示。

从图 12 可以明显看出,仿真和台架试验的各项指标趋势基本相同,随着作业速度的增加,合格指数不断下降,重播指数和漏播指数不断增加。仿真与台架试验有着相同的规律。但是从图 12 中也发现,其数值均存在着一定的误差,仿真的合格指数和漏播指数小于台架试验,这是由于仿真没有任何振动,在充种区型孔吸附的种子较多,多余玉米种子经过自清种区仅通过自身重力不能完全掉落,当到达清

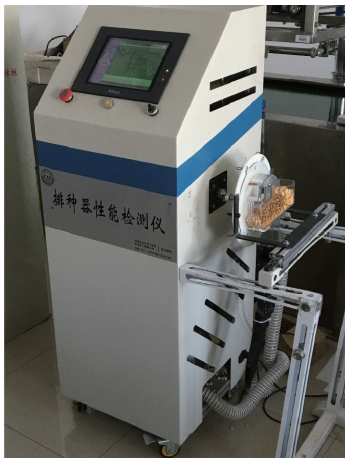


图 11 排种试验过程

Fig. 11 Process of seed metering test

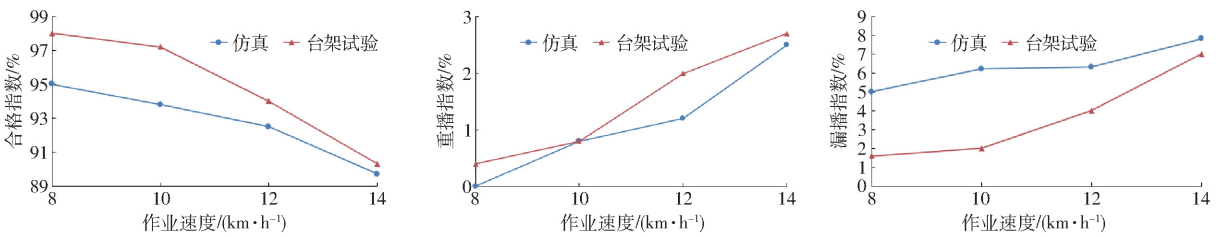


图 12 台架试验与仿真排种性能对比

Fig. 12 Comparison of metering performance between bench test and simulation test

仿真与台架试验结果较为接近,可以用来仿真分析排种器的工作过程。

5 结论

(1)为了保证气吸式排种器气室流场压力稳定,提高排种的均匀性和节约仿真时间,通过设计三因素正交试验,利用 Fluent 软件仿真分析了气吸式玉米排种器进气口位置参数。以充种区型孔压强、自清种区型孔压强、清种区型孔压强、携种区型孔压强为评价指标,通过极差和方差分析,确定了最佳进气口位置参数。

(2)建立了玉米种子 Bonding 模型,对流场网格进行划分,实现了气吸式玉米排种器 DEM - CFD 气固耦合仿真。通过对耦合流场的提取分析,发现压

种区时,众多玉米种子会在清种锯齿的碰撞下继续碰撞已经被吸附的种子,使原本吸附力占据优势的种子发生掉落,造成漏播问题;同时,仿真采用简化模型,原本的清种毛刷被简化,进一步造成众多种子被吸附而无法清除,导致每粒种子都不能完全被吸附,在种盘转至携种区时发生掉落。但是总体而言,

强由大到小为充种区、自清种区、清种区、携种区、卸种区,且压力稳定过渡,没有涡流损失,与理论计算结果进行对比,表明仿真结果均大于理论计算吸附压强最小值。

(3)选取第 1 代常规气室结构排种器和本文设计排种器进行了风压对比测定,验证了所选进气口位置参数的合理性。通过 DEM - CFD 气固耦合仿真得出,当作业速度不大于 14 km/h、负压为 3 kPa 时,合格指数均不小于 89.7%,漏播指数不大于 7.8%,重播指数不大于 2.5%;在台架试验中,在相同的作业速度和负压下,粒距合格指数均不小于 90.3%,重播指数不大于 2.7%,漏播指数不大于 7%。通过对比分析得出,仿真试验与台架试验结果较为接近,验证了仿真模拟的可行性。

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 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161106&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.

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. (in Chinese)

3 YANG L, YAN B X, YU Y M, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1): 9-26.

4 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 of the airflow field in the suction hole of the suction-type metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59-62. (in Chinese)

5 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?file_no=20121106&flag=1.

- 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)
- 6 杨志刚. 气吹式玉米排种器仿真与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- YANG Zhigang. Simulation and experimental research on air-blowing seed metering device in maize[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- 7 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. 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.
- 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. (in Chinese)
- 8 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. Research 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)
- 9 KARAYEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- 10 SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- 11 BEREKET B Z. 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.
- 12 刘彩玲,宋建农,王继承,等. 吸盘式精密播种装置气力吸种部件流场仿真分析[J]. 中国农业大学学报,2010,15(1):116-120.
- LIU Cailing, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Analysis of flow field simulation on vacuum seed-metering components of precision metering device with sucker[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(1):116-120. (in Chinese)
- 13 杨善东,张东兴,高振强,等. 侧正压玉米排种器流场模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):35-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2014s106&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.006
- YANG Shandong, ZHANG Dongxing, GAO Zhenqiang, et al. Flow field simulation and working parameters analysis of side positive pressure maize seeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):35-39. (in Chinese)
- 14 张芙嫻. 基于 CFD 的 2BM-4 型气吸式播种机排种盘吸孔选型与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
- ZHANG Fuxian. Selection and experiment research on suction hole of seed plate of 2BM-4 air suction seeder based on CFD[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 15 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013.
- XIN Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-FLUENT[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 16 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, 240:19-24.
- 17 FERNÁNDEZ X R, NIRSCHL H. Simulation of particles and sediment behavior in centrifugal field by coupling CFD and DEM[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 94: 7-19.
- 18 REN Bing, ZHONG Wenqi, CHEN Yu, et al. CFD-DEM simulation of spouting of corn-shaped particles[J]. Particuology, 2012, 10: 562-572.
- 19 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)
- 20 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)
- 21 陈立东,何堤,谢宇峰,等. 新型高速气吸式双条精密排种器设计研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2006,18(4):35-38.
- CHEN Lidong, HE Di, XIE Yufeng, et al. Design and research of a new high speed air suction dual precision metering device[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2006,18(4): 35-38. (in Chinese)
- 22 廖庆喜,杨波,李旭,等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):51-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120411&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.011.

- LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 51 - 54. (in Chinese)
- 23 夏红梅,李志伟,甄文斌,等. 气力板式蔬菜排种器气室真空流场仿真分析[J]. 华南农业大学学报,2014,35(6):99 - 103.
- XIA Hongmei, LI Zhiwei, ZHEN Wenbin, et al. Simulation and analysis of vacuum flow field in air chamber of pneumatic plate type vegetable metering device [J]. Journal of South China Agricultural University, 2014, 35(6): 99 - 103. (in Chinese)
- 24 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.005.
- 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. (in Chinese)
- 25 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. 农业机械学报,2009,40(7):78 - 82.
- LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Simulation analysis on air current field of pneumatic precision metering device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 78 - 82. (in Chinese)
- 26 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?file_no=2012s10&flag=1. 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 of Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48 - 53. (in Chinese)
- 27 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(3):62 - 69.
- SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 - 69. (in Chinese)
- 28 张昆,衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):78 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170710&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010.
- ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experiment optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78 - 86. (in Chinese)
- 29 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)
- 30 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)
- 31 孙舒畅. 基于 DEM - CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2016.
- SUN Shuchang. Simulation analysis of working process of air suction corn precision seed-metering device based on DEM - CFD coupling method [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- 32 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)
- 33 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[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)