

玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究

刘瑞^{1,2} 刘云强^{2,3} 刘忠军^{2,3} 刘立晶^{2,3}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
3. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 玉米播种机高速、精量作业时, 投种点高, 种子因剧烈碰撞, 而导致粒距均匀性差, 为此基于文丘里原理, 设计一种利用正压气流辅助输种的导种装置, 确定了导种装置的主要结构和关键参数。分析了气流辅助输种, 实现“零速投种”的机理。采用 DEM - CFD 耦合仿真方法模拟导种装置的工作过程, 通过对比分析气流场、种子的出射速度, 确定进气室收缩角为 70°、进气室收缩段长度为 8.2 mm。利用排种器性能测试平台进行速度匹配试验、弹跳试验、作业性能试验和对比试验, 结果表明: 作业速度为 8 ~ 16 km/h、粒距为 20 ~ 25 cm 时, 合格指数不小于 85.7%; 粒距变异系数不大于 15.8%。与重力式导种管相比, 作业速度越高, 正压气流辅助导种装置的优良作业性能越突出, 作业速度为 16 km/h 时, 粒距合格指数增加 13.6 个百分点, 粒距变异系数减少 7.4 个百分点, 满足高速条件下精量输种的要求, 有利于提升高速精量播种机整体作业性能。

关键词: 玉米播种机; 高速精量; 导种装置; 气流辅助; DEM - CFD

中图分类号: S985.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298 (2023) 07-0156-11

OSID:



Research on Positive Pressure Airflow Assisted Blowing and Seed Guiding Device of Corn High-speed Precision Planter

LIU Rui¹ LIU Yunqiang^{2,3} LIU Zhongjun^{2,3} LIU Lijing^{2,3}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
3. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that when the corn planter works at high speed and precision, the seed throwing point is high and the seed collides violently, which leads to the poor uniformity of grain spacing, a seed guiding device assisted by positive pressure air flow was designed based on Venturi principle. the main structure and key parameters of the seed guiding device were determined. The mechanism of air-assisted delivering seeds to realize “zero-speed seeding” was analyzed. The DEM - CFD coupling simulation method was used to simulate the working process of the seed guiding device. By comparing and analyzing the airflow field and the seed exit velocity, it was determined that the constriction angle of the intake chamber was 70°, and the length of the constriction section of the intake chamber was 8.2 mm. The speed matching test, bouncing test, operation performance test and comparison test were carried out on the performance test platform of the seed metering device. The results showed that when the operating speed was 8 ~ 16 km/h and the grain spacing was 20 ~ 25 cm, the qualified rate was not less than 85.7%; and the coefficient of variation of particle spacing was not more than 15.8%. Compared with the gravity type seed guide tube, the higher the operating speed was, the more outstanding the excellent operating performance of the positive pressure airflow assisted seed guide device was. When the operating speed was 16 km/h, the qualified rate of particle spacing was increased by 13.6 percentage points and the coefficient of variation of particle spacing was decreased by 7.4 percentage points, which met the requirements of precision seeding under high-speed conditions and was conducive to improving the overall performance of high-speed precision seeders.

Key words: corn seeder; high-speed precision; seed guide device; airflow assistance; DEM - CFD

收稿日期: 2022 - 07 - 01 修回日期: 2022 - 08 - 30

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项 (ZDZX2020 - 2)

作者简介: 刘瑞 (1990—), 男, 博士生, 主要从事农业机械装备设计及理论研究, E-mail: ruiliuqiusuo@163.com

通信作者: 刘立晶 (1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事种植机械装备研究, E-mail: xylilj@ sina.com

0 引言

精量播种作为玉米主流种植方式,是一项增产效果显著的工程技术,主要由精量排种技术和种子有序可控导种技术组成^[1-3]。排种器从种箱中捕获单粒种子,并将种子组合成均匀有序种子流投入导种装置;导种装置承接种子流,使其继续以有序单粒化的状态进入种沟。国内外学者对各类型的排种器进行了深入研究,能够满足在作业速度 8~16 km/h 下的精量排种要求^[4-10]。然而,随着作业速度的提高,种子因与导种装置碰撞而产生的无序运动加剧,导致粒距变异系数增大,无法满足精量播种的要求。

为了解决种子因碰撞而导致播种精度差的问题,瑞典 Vaderstad 公司设计一种由直线段和曲线段组成的圆形导种管,利用正压气流裹挟种子,实现快速精准投种^[11]。美国 Precision Planting 公司生产的 Speed Tube 输送带式导种装置,一对拨指将排种器排出的种子抛送到输送带的隔断上,种子随输送带运动到投种口并投送至种沟,输送带与播种机的前进速度匹配,可保证不同作业速度下粒距的均匀性^[12]。国内研究者针对上述问题,也开展了导种装置的研究,刘立晶等^[13]以约翰迪尔公司开发的导种管为对象,利用逆向工程设计软件 Geomagic Design 实现国外成熟导种管的国产化,在作业速度为 6.6 km/h 时,粒距合格指数为 95%。严荣俊^[14]以“零速投种”理论为基础,建立导种管曲线的数学模型,并利用 VC++ 编程对曲线的关键参数进行优化,当排种器转速为 14 r/min 时,种子基本不发生碰撞和弹跳。赵淑红等^[15]设计了一种 V 型凹槽与柔性拨种轮配合工作的导种部件,当机具前进速度、排种器转速分别为 7.69 km/h、29.47 r/min 时,导种均匀性和稳定性均较好。刘全威等^[16-17]为了解决高速作业时粒距均匀性差的问题,设计了一种拨指同步带式投送装置,当作业速度超过 13.1 km/h 时,无法满足精量播种的要求。陈学庚等^[18]针对免耕播种机投种点高,种子播入种沟中粒距变异系数大的问题,开发了一种传动与投种机构一体的带式导种装置。上述研究均致力于解决高位投种过程中种子的平稳运移,但一部分欠约束导种装置只适用于播种机低速作业,另一部分全约束导种装置不仅结构复杂,而且作业速度不宜超过 13 km/h,制约了高速精量播种机整体作业性能的提升。

针对玉米播种机高速、精量作业时,投种点高,种子因剧烈碰撞而无法以有序单粒化状态进入种沟的问题,基于文丘里原理,设计一种利用正压气流辅助吹送的导种装置。利用离散元法 (DEM) 和计算

流体动力学 (CFD) 耦合仿真分析方法,分析种子的投送过程,并结合台架试验确定最佳的导种装置结构参数、作业速度与正压的匹配关系,实现精量“零速投种”。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

玉米精量排种与导种系统主要由气吸式排种器、正压气流辅助吹送导种装置和旋涡气泵组成,如图 1 所示。

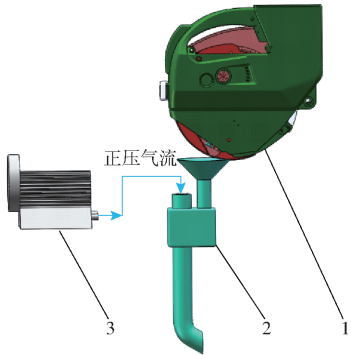


图 1 精量排种与导种系统结构示意图
Fig.1 Structure diagram of precision seed metering and seed guiding system
1. 气吸式排种器 2. 导种装置 3. 旋涡气泵

正压气流辅助吹送导种装置主要由进气室、进种室、混合室和导种室组成,如图 2 所示。

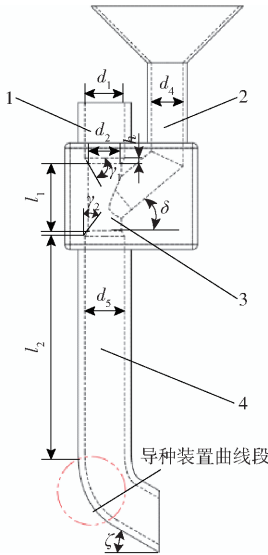


图 2 导种装置结构示意图
Fig.2 Structure schematic of seed guiding device
1. 进气室 2. 进种室 3. 混合室 4. 导种室

1.2 气流辅助送种工作原理

为了削弱种子在导种装置中的碰撞,使种子的运动轨迹可控,采用小口径的导种装置约束种子在水平方向上的运动,同时为了使种子以“零速”快速有序进入种沟,利用正压气流裹挟种子在导种装置

的竖直方向运动。当正压气流经进气室进入混合室时,由于管壁内径变小,气体的速度迅速增加,同时气流压力降低。高速气流在混合室内的部分区域会产生低于大气压的压力,种子经过进种室,在重力和负压的双重作用下,进入混合室。当气流裹挟种子由混合室进入导种室后,气固两相流的动能降低,压力升高,种子在输送气流作用下做加速运动。种子运动至导种装置曲线段后,速度方向改变,到达出口时具有水平方向的分速度,此速度与机具前进速度方向相反、大小近似相同,使种子以“零速投种”进入种沟。

2 导种装置关键参数设计

正压气流辅助吹送导种装置关键结构参数主要有进气室入口直径 d_1 、进气室出口直径 d_2 、混合室直径 d_3 、进种室直径 d_4 、导种室直径 d_6 、进气室收缩段长度 h 、混合室长度 l_1 、导种室长度 l_2 、进种室与混合室夹角 δ 、进气室收缩角 γ_1 、混合室张角 γ_2 和出射角 ξ ,如图 2 所示。

2.1 进种室

不同品种玉米种子的特征尺寸存在差异,为了确保导种装置具有广泛适用性,选取 5 种种种植面积广、尺寸差异大的玉米种子,以其尺寸作为进种室尺寸设计依据^[19-20],如表 1 所示。

表 1 玉米种子特征尺寸			
Tab.1 Maize seed characteristic size			mm
品种	长度 l_z	宽度 w_z	厚度 t_z
良玉 335	7.17 ~ 12.20	7.51 ~ 8.53	4.80 ~ 8.29
先玉 99	7.44 ~ 11.54	7.64 ~ 8.61	5.18 ~ 8.04
郑单 958	8.91 ~ 10.68	7.20 ~ 8.15	5.72 ~ 7.42
吉平 1	11.40 ~ 12.36	7.52 ~ 9.19	5.17 ~ 6.75
平安 11	11.46 ~ 12.29	8.30 ~ 9.00	5.25 ~ 6.74

玉米种子当量直径计算公式为

$$d_5 = \frac{2l_z w_z}{l_z + w_z} \tag{1}$$

为了降低种子进入导种装置时发生无序碰撞的频率,进种室直径应满足

$$d_4 \geq 1.4d_5 \tag{2}$$

由式(1)、(2)可得进种室直径应大于或等于 14 mm,为了确保各品种玉米种子在导种管中不会出现卡顿现象,确定 d_4 为 14 mm。

当进种室直径略大于种子当量直径时,种子在进种室中会贴合壁面运动,为了保证种子能够自由滑落下移,种子运动时重力沿斜面的分力应大于种子最大静摩擦力,即进种室倾角的正切值应大于静摩擦因数 μ ,由此可得

$$\delta > \arctan \mu \tag{3}$$

本文正压气流辅助精量播种机导种装置采用有机玻璃制作,种子与有机玻璃间的静摩擦因数为 0.459,结合式(3)可得进种室倾角应大于 24.6°,综合考虑导种装置的结构布置,确定 δ 为 45°。

2.2 进气室与混合室

由气流辅助送种工作原理可知,进气室入口直径、进气室出口直径和收缩角直接影响玉米种子能否顺利输送,入口直径计算公式为^[21]

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\dot{m}NT_j}{\pi p_j v_j}} \tag{4}$$

式中 $\dot{m}$ ——流经进气室的气体质量流量,kg/s
 N ——气体常数,kJ/(kmol·K)
 T_j ——入口处气体绝对温度,K
 p_j ——进气室入口处压力,Pa
 v_j ——进气室入口气流速度,m/s

由式(4)可知,进气室入口直径由气体速度、压力、温度和质量流量共同决定,本文设计导种装置的作业速度为 8~16 km/h,为了满足不同作业速度下“零速投种”的需求,需要提供不同的气流速度,当进气室的入口直径一定时,通过风机调节气体压力即可改变气体的流量,所以进气室入口直径依据风机出口直径确定,取 d_1 为 20 mm。

种子在压差和重力的作用下进入混合室,为了保证种子在混合室中能够顺利运动,应保证 $d_3 > 10$ mm,由于混合室同时与进种室相连,考虑到管道变径会产生压力损失,取 d_3 为 14 mm。根据结构布置可知混合室的直径与进气室的出口相同,故确定 d_2 为 14 mm。

如图 3 所示,气体在文丘里管内流动时,进气室入口直径 d_1 、出口直径 d_2 、进气室收缩段长度 h 、进气室收缩角 γ_1 的几何关系为

$$\tan \gamma_1 = \frac{2h}{d_1 - d_2} \tag{5}$$

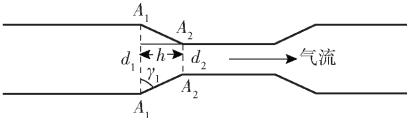


图 3 理想流体在文丘里管流动示意图
Fig.3 Schematic of ideal fluid flows in Venturi tube

由于进气室为变径,气体与管壁摩擦会产生压力损失,为了保证种子运动具有最大的动能,需要使压损最小,理想流体在文丘里管内流动产生压降 Δp 的公式为^[22]

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{m}}{A_2} \right)^2 \frac{1 - k^4}{2\rho} \tag{6}$$

其中 $k = \sqrt{A_2/A_1}$

式中 k ——节流比

ρ ——空气密度,取 1.293 kg/m^3

A_1, A_2 ——进气室进口、出口截面积, mm^2

联立式(5)、(6)可得

$$\Delta p = \frac{8\dot{m}^3 \tan^4 \gamma_1}{\rho \pi^2 (d_1 \tan \gamma_1 - 2h)^4} - \frac{8\dot{m}^2}{\rho \pi^2 d_1^4} \quad (7)$$

根据式(7)可知,进气室的压损与气体质量流量 $\dot{m}$ 、进气室入口直径 d_1 、进气室收缩段长度 h 、进气室收缩角 γ_1 有关,当 $\dot{m}$ 、 d_1 、 γ_1 为已知值时,式(7)两边对 h 求导可得

$$\Delta p' = \frac{64h \dot{m}^2 \tan^4 \gamma_1}{\rho \pi^2 (d_1 \tan \gamma_1 - 2h)^5} \quad (8)$$

由式(8)可知,当 $h \in (0, d_1 \tan \gamma_1 / 2)$ 时, $\Delta p'$ 恒大于零,即进气室的压损随着进气室收缩段长度的增加而递增,当 h 趋近于 $d_1 \tan \gamma_1$ 的一半,即 d_2 趋近于零时,进气室的压损最大。

由式(6)可得

$$\Delta p = \frac{8\dot{m}^2}{\rho \pi^2 d_2^4} - \frac{8\dot{m}^2}{\rho \pi^2 d_1^4} \quad (9)$$

当 $\dot{m}$ 、 d_1 、 h 为已知值时,进气室出口直径 d_2 随着 γ_1 增大而增大,结合式(9)可知,进气室的压损随着 γ_1 增大而减小。为了获取最佳的进气室结构,选取 γ_1 为 60° 、 65° 、 70° 、 75° 、 80° , h 为 5.2 、 6.4 、 8.2 、 11.2 、 17 mm 5 种组合进行试验。

为了得到较高料气比,保证输送效率,混合室长度计算公式为^[23]

$$6d_3 \leq l_1 \leq 10d_3 \quad (10)$$

由式(10)可得混合室的长度取值范围为 $84 \sim 140\text{ mm}$,由于存在管道摩擦力,压损增加,为了有利于种子稳定向下输送,确定 l_1 为 84 mm 。

根据文献[22],混合室扩散角为 $2^\circ \sim 10^\circ$ 时,气固两相流的静压损失小,结合导种装置的工作条件,确定 γ_2 为 10° 。

2.3 导种室

当株距为 $20 \sim 25\text{ cm}$,播种机的前进速度为 $8 \sim 16\text{ km/h}$,导种室内单位时间输送的种子质量为 $2.7 \sim 6.7\text{ g/s}$,导种室直径计算公式为^[24]

$$d_6 = \sqrt{\frac{4\dot{m}_z}{\pi e \rho v_D}} \quad (11)$$

式中 $\dot{m}_z$ ——导种室中单位时间种子输送质量, g/s

v_D ——导种室内气流速度, m/s

e ——导种室内种子与气流的质量比

气流裹挟种子在导种室内的气固两相流为稀相流, e 的取值范围为 $0.1 \sim 1$,本文取 0.4 ^[25],导种室内气流速度为 $10 \sim 25\text{ m/s}$,由式(11)可得导种室直径应大于 25.6 mm ,为了便于加工,确定 d_6 为

26 mm 。

气流在导种室中流动时会受到阻力,依据达西-魏斯巴赫公式可得气流受到的沿程阻力为

$$h_f = \lambda \frac{l_2}{d_6} \frac{v_D^2}{2g} \quad (12)$$

式中 λ ——沿程阻力系数

l_2 ——导种室长度, mm

由式(12)可知,气流在导种室中受到的阻力与导种室长度、气流在导种室的平均速度成正比,与导种室的直径成反比。当 d_6 、 v_D 为已知值时, l_2 取适宜值时,有利于减小气流受到的阻力,保证气流以理想的速度裹挟种子完成“零速投种”。为了满足高位投种需求^[11],现有导种管长度一般设计为 450 mm ,综合考虑设计导种装置各部分长度,取 l_2 为 200 mm 。

2.4 导种装置曲线

常温下空气属于黏性流体,空气经过弯管时,流体流动速度的大小和方向发生改变,流体在边界层脱离管壁时,在压差作用力和粘性阻力的作用下,形成涡流,造成大量的能量耗散。李衍军等^[26]为了解决气送式排种系统分配器产生涡流、紊流的问题,设计了仿鲫鱼曲线型分配器,提高了种子分布均匀性。为了减少气体在导种装置弯管处的能量和压力损失,本文基于仿生学设计导种装置曲线。

经过自然进化,鸢目鸟能够做到高效飞行,动作敏捷,低速飞行时,消耗的能量远小于其他鸟类^[27-28]。领角鸢 10% 半翼展截面处气体的流动阻力较小,故本文选取 10% 半翼展上表面曲线为仿生原型,设计导种装置曲线,曲线拟合方程为^[29]

$$y = -1.09 \times 10^{-6} x^4 + 3.24 \times 10^{-4} x^3 - 0.04 x^2 + 1.76 x + 1.26 \quad (13)$$

2.5 零速投种分析

玉米播种机高速作业时,为了保证粒距的均匀性,需要保证种子从导种装置末端出射时,水平方向速度与机具前进速度两者之和为零。如图 4 所示,以水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,建立直角坐标系,因为种子随排种盘做匀速圆周运动时,相对排种盘的速度为零,所以种子在投种口脱离排种盘的瞬间速度为

$$\begin{cases} v_k = \omega r \\ \omega = 2\pi n \\ n = \frac{1 \times 10^4 v_B}{6LZ} \end{cases} \quad (14)$$

式中 n ——排种盘转速, r/min

v_B ——播种机前进速度, km/h

L ——理论粒距, cm

Z ——排种盘吸种孔个数

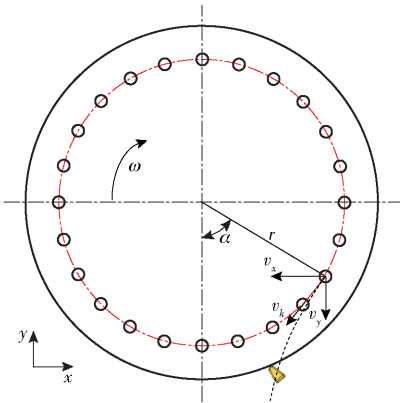


图 4 种子脱离排种盘运动分析

Fig.4 Motion analysis of seeds detached from seeddisk

- ω ——排种盘角速度,rad/s
 r ——吸种孔中心所在圆半径,m
 v_k ——种子脱离排种盘的瞬间速度,m/s

根据式(14)可知,种子会以一定的初速度进入导种装置的进种室,与进种室壁面发生碰撞,产生弹跳。播种机的作业速度越大,碰撞越剧烈,不利于种子以有序的单粒状态进入导种装置,进而影响种子的有序输送。鉴于 PPA_m-SA(聚丙酰胺-海藻酸钠)双网络水凝胶具有粘弹性,受外力时,DN 水凝胶会通过裂纹尖端的第一刚性网络的断裂和第二柔性网络的高效能量传输,实现了能量的耗散。当外力消失后,水凝胶具有一定的形状恢复性。所以在进种室的内壁铺设一层水凝胶,当种子撞击到壁面时,速度减小,进而避免了种子的弹跳。

如图 5 所示,对种子的出射运动进行分析,根据动量定理可得

$$mv - mv_0 = \int_0^t (F_p + mg) dt - \int_0^{t_1} F_f dt \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} F_p = \psi \rho S v_D^2 \\ F_f = F_N \mu \\ F_N = mg \cos \zeta \end{cases} \quad (16)$$

- 式中 F_p ——气流对种子的曳力,N
 m ——种子质量,kg
 F_f ——种子在导种装置末端受的摩擦力,N

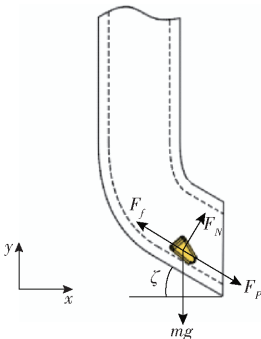


图 5 种子出射运动受力分析

Fig.5 Force analysis of grain ejection movement

- t ——正压气流对种子作用时间,s
 t_1 ——种子与导种装置末端接触时间,s
 ψ ——曳力系数
 S ——种子迎风受力面积,m²
 μ ——摩擦因数
 v_0 ——种子初速度,m/s
 v ——种子出射速度,m/s

联立式(14)、(15)可求得种子在导种装置末端的出射速度为

$$v = \frac{(\psi \rho S v_D^2 + mg) t - mg \cos \xi t - mg \cos \xi t_1}{m} + v_0 \quad (17)$$

种子水平方向的出射速度为

$$v_x = \frac{(\psi \rho S v_D^2 + mg) \cos \xi t - mg \cos^2 \xi t - mg \cos^2 \xi t_1}{m} + v_0 \cos \xi \quad (18)$$

投种时,种子在水平方向的速度应满足

$$v_B - v_x = 0 \quad (19)$$

由式(18)可知,种子水平方向的速度值与出射角 ξ 值相关,结合文献[13]中导种部件末端倾角,综合考虑导种装置的结构布置,本文取 ξ 为 30°。本文设计与播种机配套作业的导种装置作业速度为 8~16 km/h,结合式(18)、(19)可知,为了适应不同作业速度下“零速投种”的需求,需要匹配不同的风速。

3 仿真试验

DEM-CFD 耦合仿真试验能够清晰再现颗粒运动轨迹、气流场速度、压力分布等工况,其仿真结果可作为农业机械部件设计的依据^[23,26]。设置 5 组不同的结构参数(表 2),利用 DEM-CFD 耦合仿真分析不同结构参数下导种装置内的流场和颗粒场,从而获取最佳的导种装置结构。

表 2 仿真试验方案

Tab.2 Simulation test scheme

组别	$\gamma_1 / (^\circ)$	h / mm
A	60	5.2
B	65	6.4
C	70	8.2
D	75	11.2
E	80	17.0

3.1 仿真模型与边界条件

本研究先利用 SCDM-CFD 建立气吸式排种器的流体域模型,然后利用 ICEM-CFD 对流体域划分非结构化网格。进气室的入口设置为气流速度入口,速度为 15 m/s,导种装置的末端出口设置为压力

出口。种子由设置在进种室上端的颗粒工厂生成，供种速度为 2.7 g/s。耦合仿真试验中，两个软件时间步长设置必须满足 Fluent 中时间步长是 EDEM 中时间步长的整数倍，两个软件才能实现数据的双向传递、反馈。EDEM 中的时间步长设置为 2×10^{-6} ，Fluent 中的时间步长设置为 1×10^{-4} ，总的仿真时间为 2 s。

3.2 仿真参数

导种装置的加工材料为有机玻璃，玉米种子、有机玻璃物理特性参数和相关力学特性参数如表 3 所示^[30-31]。

表 3 仿真参数
Tab.3 Simulation parameters

参数	材料	
	玉米种子	导种装置
泊松比	0.4	0.5
剪切模量/Pa	1.37×10^8	1.77×10^8
密度/(g·cm ⁻³)	1.197	1.180
碰撞恢复系数(与种子)	0.182	0.621
静摩擦因数(与种子)	0.431	0.459
动摩擦因数(与种子)	0.078 2	0.093 1

3.3 仿真结果分析

3.3.1 进气室结构对气流场的影响

由图 6 可知，A、B、C、D 组试验中，气流经进气室后，负压都是均匀分布于进种室、进种室与混合室相连通部分，E 组试验中负压未均匀分布于上述区域，且负压最小，不利于种子快速进入混合室。当种子顺利进入混合室后，各组试验中混合室下

部的负压大于混合室中部的负压时，在压差的作用下，种子加速运动。A、B、D 组试验中，混合室下部与导种室上部的压差均较大，阻碍种子进一步加速向下运动，A、C 两组试验中导种室的压力基本相同，压力均大于 B、D、E 组试验。由上述分析可知，C 组试验中导种装置的气体压力分布较优。

由图 7 可知，5 组试验中混合室内气体流速变化规律基本相同。导种室的气流作为稳定为种子加速的动力源，其速度的大小直接决定种子的出射速度，进而决定种子能否实现“零速投种”，C 组试验与 B 组试验中导种室内气流速度近似相同，且均大于 A、D、E 组试验中导种室内的气流速度，有利于种子获得最大的出射速度。

3.3.2 进气室结构对种子运动速度的影响

由图 8 可知，5 组试验中初始阶段种子的平均速度变化规律相同，均呈线性增加。在减速运动阶段，A、B、D 组试验中种子保持低速的时间段大于 C、E 组，不利于种子速度值的累积。C 组试验中种子的出射速度最大，亦佐证了对气流场的分析结果。综合上述分析，确定进气室的收缩角 γ_1 为 70°、进气室收缩段长度 h 为 8.2 mm。

3.3.3 种子运动轨迹分析

为了进一步探究导种装置输送种子的能力，如图 9 所示，提取 C 组试验中不同时刻种子的运动轨迹，每粒种子均能保持直线运动，种子与导种室壁无碰撞，有效减少了种子在导种装置中的无序运动，种子能沿着导种装置末端斜线方向出射，基本实现种子运动全过程的柔性控制。

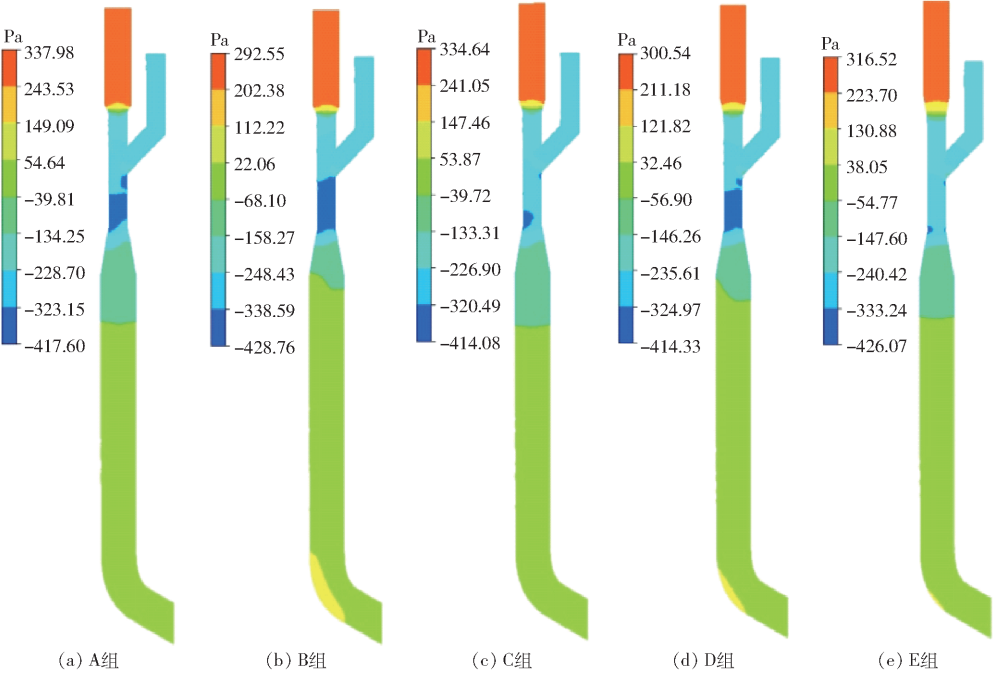


图 6 导种装置内气压分布图

Fig.6 Air pressure distribution diagrams in seed guiding device

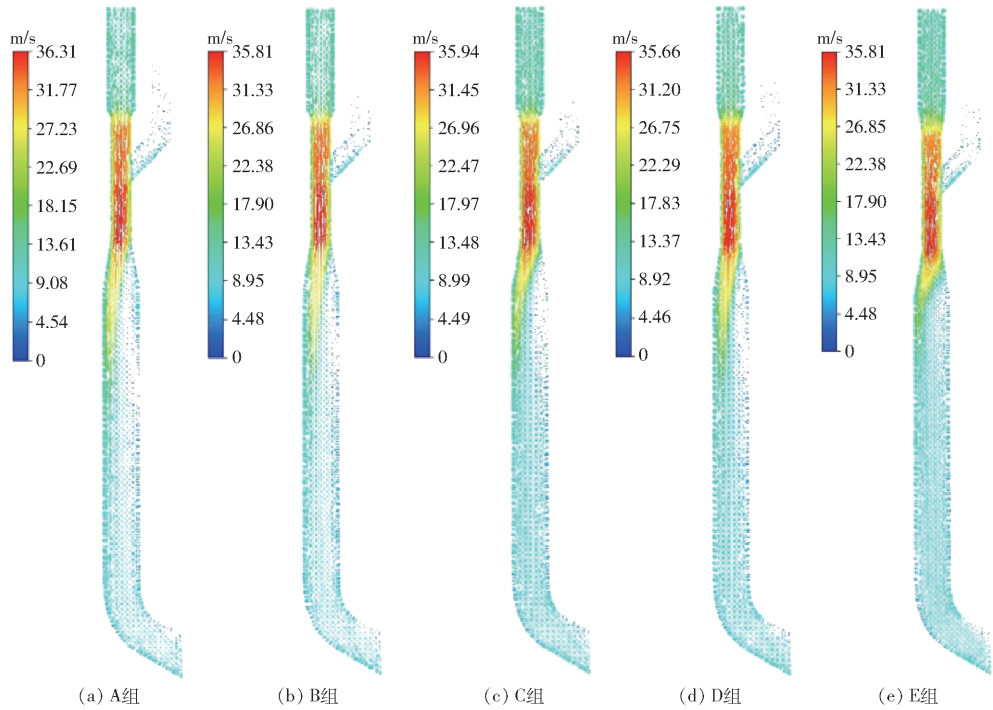


图 7 导种装置内气流速度分布图

Fig. 7 Air velocity distribution diagram in seed guiding device

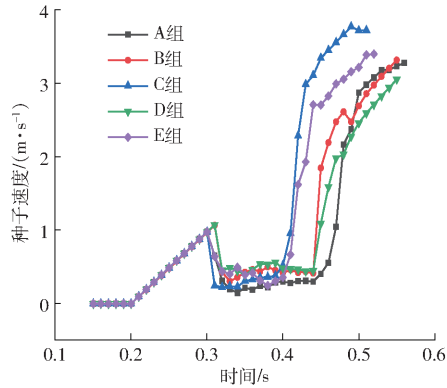


图 8 不同结构中种子平均运动速度曲线

Fig. 8 Curves of grain movement speed in different structures

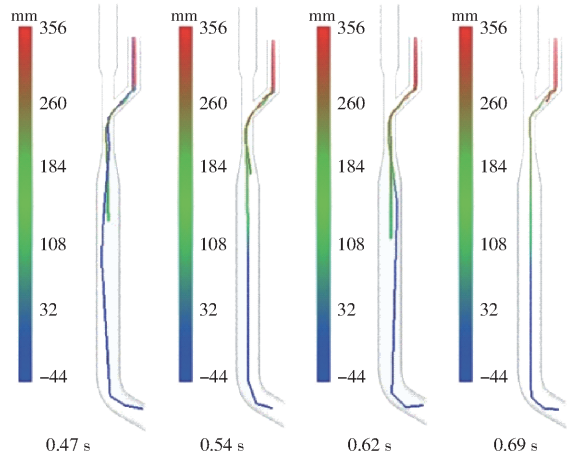


图 9 C 组试验中不同时刻种子运动轨迹

Fig. 9 Movement trajectory of grains at different times in experiment of group C

4 台架试验

4.1 试验材料

为了验证利用 DEM - CFD 耦合方法设计导种装置的合理性,并探究导种装置输送种子性能。采用 3D 打印技术制作导种装置,试验材料选用郑单 958 玉米种子,其含水率为 13%,千粒质量 375 g,在中国农业机械化科学研究院集团有限公司的 2PST 型排种器性能测试平台上进行试验,试验设备主要包括气吸式排种器、导种装置、高速摄像机(瑞士 AOS Technologies AG 公司,试验时帧速为 500 f/s,图像后处理软件为 TEMA Classic),如图 10 所示。试验时,种床带模拟播种机工作状态,向前运动,种床带运动的同时,喷油泵将粘性油喷射到种床带上,种子从导种末端射出后落到种床带。

根据 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》中的要求,以粒距合格指数 η 和合格粒距变异系数 C 为试验指标。

4.2 速度匹配试验

本文设计的导种装置依靠正压风吹送种子,不同的作业速度需要匹配不同的风速,才能实现“零速投种”,进而保证粒距均匀性。以满足机具前进速度为 8 ~ 16 km/h 时,实现“零速投种”为目的,进行风速匹配试验。每组试验选取 20 粒种子计算其平均射出速度,每组试验重复 5 次。每次试验利用高速摄像机记录种子的射出运动过程,将视频保存为 .raw4 格式,并导入运动分析软件 TEMA Classic。

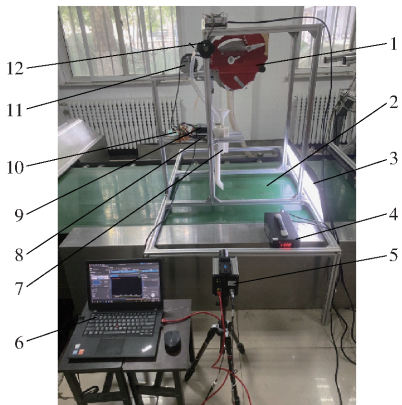


图 10 台架试验装置

Fig. 10 Bench test device

1. 排种器 2. 种床带 3. 光源 4. 光源控制器 5. 高速摄像机
6. 计算机 7. 导种装置 8. 电源 9. 驱动器 10. 控制器
11. 驱动电机 12. 鼓风机

第 1 步选择标记跟踪点并对该点进行算法选择和参数设置(图 11a),第 2 步选取种子运动区段进行跟踪点的识别和判读(图 11b),第 3 步对种子运动区

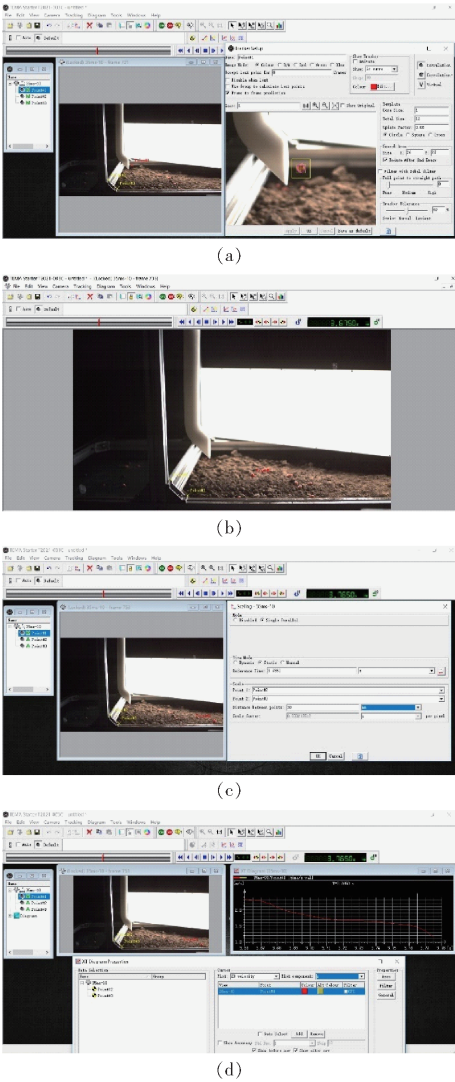


图 11 TEAM Classic 分析步骤

Fig. 11 TEAM Classic analysis steps

段进行二维标定(图 11c),第 4 步显示跟踪数据,获取图像序列中标记玉米种子的二维像素坐标,然后利用 TEAM Classic 软件计算出种子的出射速度(图 11d)。当种子的水平出射速度与作业速度近似相等,理论上种子能够实现“零速投种”,即认为此时的风速与作业速度匹配,试验结果如表 4 所示。

表 4 速度匹配试验结果

Tab.4 Speed matching test results

作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	种子水平射出 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	种子竖直射出 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
8	5	2.42	1.40
10	10	2.94	1.70
12	17	3.37	1.95
14	24	3.86	2.23
16	30	4.55	2.63

4.3 弹跳试验

根据速度匹配试验可知,种子的射出速度与作业速度同步增加,才能实现“零速投种”。需要特别注意此时种子竖直方向的分速度同步增加,当种子进入种沟时会引起弹跳,而台架试验中种子落到附有粘性土的传送带上,无法观测弹跳对粒距均匀性的影响。如图 12a 所示,在传送带上铺设厚度为 5 cm、长度为 100 cm、含水率为 14.7% 的砂壤土;传送带处于静止状态,在风速 Q 为 5 ~ 30 m/s,投种高度 H_1 为 50 ~ 200 mm 的工作参数下,开展种子的弹跳试验。如图 12b 所示,利用高速摄像机记录种子与土壤接触后的运动过程,将种子第一次弹跳到达最高点的位置作为标定高度 H_2 。每个试验水平选取 20 粒种子计算平均高度,试验结果如图 13 所示。

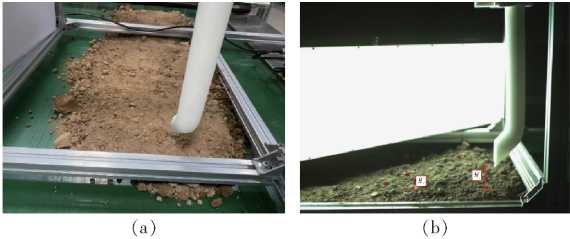


图 12 种子弹跳高度标定

Fig. 12 Calibration of seed bounce height

由图 13a 可知,当投种高度 H_1 为一定值时,弹跳高度随着气流速度的增加而增加,气流速度较低时,弹跳高度较小;气流速度较大时,对种子的弹跳高度影响较大。

由图 13b 可知,当气流速度为 30 m/s 时,随投种高度的增加,弹跳高度先减小,后小幅增加。结合导种装置作业速度在 8 ~ 16 km/h 区间内,所需风速最大为 30 m/s,确定最适宜的投种高度为 150 mm。

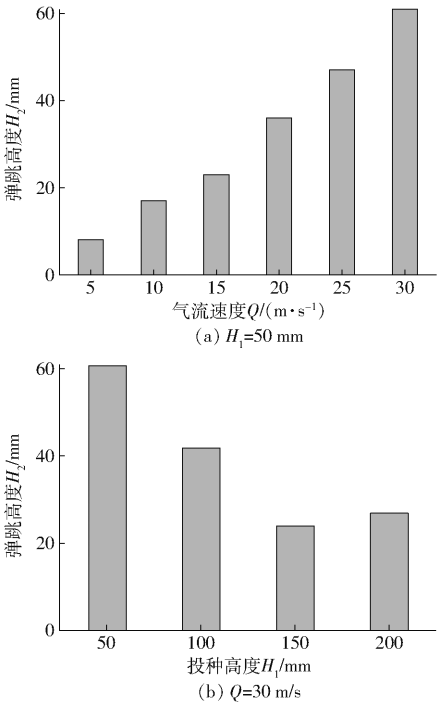


图 13 弹跳试验结果
Fig. 13 Bounce test results

4.4 性能验证试验

为了验证导种装置的作业性能,在粒距分别为 20、25 cm,投种高度为 150 mm 的条件下,设置作业速度为 8 ~ 16 km/h,研究导种装置的作业性能,试验结果如表 5 所示。

表 5 导种装置输种性能试验结果
Tab. 5 Test results of seed transporting performance

粒距/cm	作业速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	合格指数/ %	粒距变异 系数/%
20	8	92.8	9.7
	10	90.5	10.6
	12	88.6	12.7
	14	86.9	14.1
	16	85.7	15.8
25	8	95.7	7.4
	10	93.9	8.9
	12	92.1	10.8
	14	89.8	12.1
	16	87.5	13.9

同时选取目前普遍使用的重力式导种管进行对比试验,当粒距为 20 cm 时,试验结果如图 14 所示。

由表 5 可知,作业速度为 8 ~ 16 km/h、粒距为 20 cm 时,合格指数不小于 85.7%;粒距变异系数不大于 15.8%;粒距为 25 cm 时,合格指数不小于 87.5%,粒距变异系数不大于 13.9%。

由图 14 可知,作业速度为 8 ~ 16 km/h 时,正压气流辅助导种装置的合格率均大于重力式导种管,粒距变异系数均小于重力式导种管。作业速度越

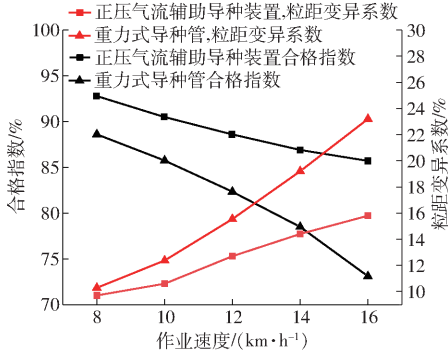


图 14 对比试验结果
Fig. 14 Comparative test results

高,正压气流辅助导种装置的优良作业性能越突出,其中作业速度为 16 km/h 时,与重力式导种管相比,合格指数增加 13.6 个百分点,粒距变异系数减少 7.4 个百分点。

4.5 田间试验

为了进一步验证正压气流辅助导种装置工作性能,2022 年在中国农业机械化科学研究院集团有限公司北京农机试验站进行田间试验,试验配套动力为约翰迪尔 1654 型拖拉机,试验装置为 6 行气吸式播种机,排种器的风机由液压马达驱动,导种装置的微型鼓风机由 24 V 电池驱动,试验地土壤类型为沙壤土。田间试验现场如图 15 所示。



图 15 田间试验
Fig. 15 Field test

试验时设定理论粒距为 20 cm,试验区长度设置为 100 m,取中间 20 m 作为数据采集区。试验为单因素试验,每个速度水平重复 3 次,取平均值,试验结果如表 6 所示。

表 6 田间试验结果
Tab. 6 Field test results

作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	合格指数/%	粒距变异系数/%
9.21	89.7	11.7
11.34	87.2	12.6
13.07	84.5	14.7
15.48	81.1	17.8

综合上述试验结果可知,正压气流辅助导种装置可以满足高速条件下精量输种的要求,各速度水平下,粒距合格指数稳定在 81.1% 以上,粒距变异系数稳定在 17.8% 以下,有益于高速精量播种机整体作业性能的提升。

5 结论

(1) 基于文丘里原理,设计了一种正压气流辅助导种装置,确定导种装置的进种室、混合室、导种室的关键结构参数和导种装置曲线。

(2) 采用 DEM – CFD 耦合仿真方法模拟导种装置的工作过程,通过对比分析气流场、种子的出射速度,确定进气室的收缩角为 70°、进气室收缩段长度为 8.2 mm。通过分析种子的运动轨迹,发现种子在导种装置内基本能保持直线运动,有效减少了种子在导种装置中的无序运动。

(3) 以实现“零速投种”为目标,通过速度匹配试验确定作业速度与风速的匹配关系。进行弹跳试验、作业性能试验和对比试验,结果表明:作业速度为 8 ~ 16 km/h、粒距为 20 cm 时,合格指数不小于 85.7%;粒距变异系数不大于 15.8%;粒距为 25 cm 时,合格指数不小于 87.5%,粒距变异系数不大于 13.9%。作业速度为 16 km/h 时,与重力式导种管相比,合格指数增加 13.6 个百分点,粒距变异系数减少 7.4 个百分点。田间试验表明播种机作业速度为 15.48 km/h 时,粒距合格指数为 81.1%,粒距变异系数为 17.8%。

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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):38 – 48. (in Chinese)

[2] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(9):1 – 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):1 – 18. (in Chinese)

[3] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1 – 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):1 – 14. (in Chinese)

[4] EMRAH K. Evaluation of some operational parameters of a vacuum single-seed planter in maize sowing[J]. Journal of Agricultural Sciences,2021,27(3):327 – 334.

[5] HAN D D, ZHANG D X, YANG L, et al. DEM – CFD coupling simulation and optimization of the inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,150:426 – 438.

[6] ARZU Y, ADNAN D. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering,2007,97:347 – 356.

[7] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充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 CASE, 2018,34(22):1 – 11. (in Chinese)

[8] 张昆,衣淑娟,刘海军,等. 气吸滚筒式玉米植钵盘精密播种装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):62 – 69.
ZHANG Kun, YI Shujuan, LIU Haijun, et al. Optimization design and test of suction performance of air suction cylinder type precise seeding device for maize with plant material bowl-tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):62 – 69. (in Chinese)

[9] YAZGI A, DEĞIRMENCIOĞLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement,2014,56:128 – 135.

[10] KARAYEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering,2004,87(4):437 – 444.

[11] 瑞典 Väderstad 公司产品介绍[EB/OL]. [2022 – 08 – 01]. <http://www.vaderstad.com/en/Planting/tempo-planter/tempor-12-18/#zone-4777>.

[12] 美国 Precision planting 公司产品介绍[EB/OL]. [2022 – 08 – 01]. <http://www.precisionplanting.com/products/product/speedtube>.

[13] 刘立晶,杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报,2015,31(11):40 – 45.
LIU Lijing, YANG Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CASE, 2015,31(11):40 – 45. (in Chinese)

[14] 严荣俊. 精密播种机导种管结构设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2012.
YAN Rongjun. The structural design and test on delivery tube of corn precision planter[D]. Beijing: China Agricultural University,2012. (in Chinese)

[15] 赵淑红,陈君执,王加一,等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):146 – 158.
ZHAO Shuhong, CHEN Junzhi, WANG Jiayi, et al. Design and experiment on V-groove dialing round type guiding-seed device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):146 – 158. (in Chinese)

[16] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.

- LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism for high-speed planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [17] LIU Q W, HE X T, YANG L, et al. Effect of travel speed on seed spacing uniformity of corn seed meter [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 99 – 106.
- [18] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8 – 15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device [J]. Transactions of the CASE, 2012, 28(22): 8 – 15. (in Chinese)
- [19] ZHOU L, YU J Q, WANG Y, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method [J]. Powder Technology, 2020, 374: 353 – 376.
- [20] 周文秀. 玉米种子的物理力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
ZHOU Wenxiu. The physical and mechanical properties research of corn grain [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [21] 胡克吉. 气力输送系统文丘里供料器的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
HU Keji. The research on Venturi feeder in pneumatic conveying system [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 李鹏. 文丘里管在煤粉密相输送系统中应用研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
LI Peng. Application of Venturi in pulverized coal dense phase conveying system [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [23] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68 – 79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68 – 79, 97. (in Chinese)
- [24] 吴健伟. 粉煤灰气力输送喷射器的设计及应用 [J]. 应用能源技术, 2010(10): 40 – 42.
- [25] 邢金龙. 基于 CFD – DEM 耦合的气流一阶集排式排种系统仿真与试验 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
XING Jinlong. Simulation and test of one-step centralized pneumatize seeding system based on CFD – DEM coupling method [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] 李衍军, 赵金辉, 赵佳乐, 等. 基于鲫鱼流线的气送式排种系统分配器仿生设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 80 – 87.
LI Yanjun, ZHAO Jinhui, ZHAO Jiale, et al. Biomimetic design and experiment of distributor of pneumatic seeding system based on crucian curve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 80 – 87. (in Chinese)
- [27] CHEN K, LIU Q P, REN L Q, et al. Morphological characteristics of the wing feather of the owls for silent flight [C] // The 3rd International Conference of Bionic Engineering, 2010.
- [28] 廖庚华. 长耳鸮翅膀气动与声学特性及其仿生应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LIAO Genghua. Aerodynamic acoustic characteristics of long-eared owl wing and its bionic application [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [29] 陈坤. 三种鸮形态学、飞行运动学特征规律及其仿生研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
CHEN Kun. Morphology flight kinematics and bionics of silent flight owl [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [30] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄影的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34 – 41.
CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34 – 41. (in Chinese)
- [31] 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)