

气力辅助充种式花生精量排种器设计与试验

郭鹏¹ 郑效帅² 王东伟^{1,3} 侯加林¹ 赵壮¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 黄三角智能农机装备产业研究院, 东营 257300;

3. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对花生播种向精准、高速方向发展过程中高速作业状态下花生种子充种效果差的问题,设计了一种气力辅助充种式花生精量排种器,重点设计了排种器排种盘结构和气力辅助充种结构。针对颗粒尺寸大、质量大的花生种子,通过对花生种子在排种器中堆积现象与充种时间进行分析,得出花生高速排种充种过程需增强充种性能,从而提高充种效率。通过对花生种子进行充种原理分析,阐明花生种子充种过程中种子与排种器的运动关系与受力关系,分析充种过程影响因素。通过设计带有导种槽的排种盘和带有辅助吹种型孔的辅助充种结构,分析计算排种盘吸种孔、导种槽的关键结构参数以及辅助吹种型孔参数与排列方式。以充种合格率和充种漏充率为指标,进行三因素三水平组合试验,对试验结果进行多元回归分析,以最优目标进行优化,确定排种盘最佳参数组合为排种器吸种负压 5.156 kPa、花生高速播种机前进速度 8.007 km/h、扰动吹种正压 1.149 kPa,此时,花生充种合格率为 95.84%、漏充率为 4.06%,能够实现花生种子有效充种。

关键词: 花生; 气力式; 排种器; 导种槽

中图分类号: S222.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0064-11

OSID:



Design and Experiment of Precision Seed Metering Device with Pneumatic Assisted Seed-filling for Peanut

GUO Peng¹ ZHENG Xiaoshuai² WANG Dongwei^{1,3} HOU Jialin¹ ZHAO Zhuang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Yellow River Delta Intelligent Agricultural Machinery Equipment Industry Academy, Dongying 257300, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to solve the problem that peanut seed filling effect is poor under the condition of high speed operation in the process of peanut planting to precision and high speed, a kind of pneumatic assisted seed-filling precision seed metering device was designed, specially, the structures of planter plate and pneumatic assisted seed-filling device were mainly designed. For peanut seeds with large particle size and mass, by analyzing the phenomenon of peanut seed accumulation in the seed metering device and the filling time, it was concluded that the peanut high-speed seed discharging and filling process needed to enhance the filling performance, so as to improve the filling efficiency. Through analyzing the principle of peanut seed filling, the relationship between the movement and force of seeds and seed metering device in the seed filling process of peanut seeds was clarified, and the influencing factors of the seed-filling process were analyzed. The key structural parameters of the seed suction holes and seed guide slot of the seed metering device and the parameters and arrangement of the auxiliary seed blowing holes were analyzed and calculated by designing the seed metering device with seed guide slot and the auxiliary seed filling structure with auxiliary seed guide holes. Taking the qualified rate of seed filling and the leakage rate of seed filling as indexes, a three-factor and three-level combination test was carried out, and the test results were subjected to multivariate regression analysis to optimize with the optimal objective, and the

收稿日期: 2024-01-08 修回日期: 2024-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300101)、山东省重点研发计划(科技示范工程)项目(2022SFGC0203)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010813)、山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202314)和烟台市重大科技创新工程项目(2023ZDCX029)

作者简介: 郭鹏(1994—),男,博士生,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 1669753064@qq.com

通信作者: 王东伟(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: w88030661@163.com

optimal parameter combinations of seed planter plate were determined to be the negative pressure of seed suction in the seed metering device of 5.156 kPa, the forward speed of the high-speed planter for peanut was 8.007 km/h, and the positive pressure of disturbed blowing of seeds was 1.149 kPa. In this case, the qualified rate of peanut seed filling was 95.84%, and the leakage rate of peanut seed filling was 4.06%, which could realize the effective seed filling of peanut seeds.

Key words: peanut; pneumatic type; seed metering device; seed guide slot

0 引言

花生是中国最具国际竞争力的优质油料作物,是保障国家粮油安全的重要作物,种植面积和产量常年稳居世界第 2 位和第 1 位^[1]。近 10 年来,全球花生种植面积常年为 $2.53 \times 10^7 \sim 2.93 \times 10^7$ hm²,产量为 $4.087 \times 10^7 \sim 4.876 \times 10^7$ t。中国是世界第一花生生产大国^[2],近 10 年来种植面积为 $4.33 \times 10^6 \sim 4.73 \times 10^6$ hm²,产量为 $1.530 \times 10^7 \sim 1.799 \times 10^7$ t。花生机械化精量播种技术具有节本增效的优点,尤其是高速精密排种技术是提高花生生产效率的主要途径之一。

机械化精量播种的关键核心作业部件之一是精量排种器^[3-6],其排种性能对花生播种作业质量和效率产生直接影响^[7-9]。当前,按照工作原理可将花生精量排种装置分为机械式和气力式两大类^[10-13]。花生精量机械排种装置具有结构简单、制造成本低、低速播种效果好等优点,广泛用于低速作业条件下播种,其中花生机械式播种作业速度一般不超过 6 km/h。气力式排种器根据其气流吸种、携种的工作特点^[14-17],从以往研究可以看出这种排种方式的排种作业对种子的损伤较低,在高速播种作业环节优势更大。然而,种子在高速作业时易受到气力式排种器转速高、种群流动性差、气流不稳定等因素的影响^[18-19],导致出现充种合格率低、漏充严重的问题。

针对气力式排种器高速作业时充种性能差的问题,研究者对气力式排种装置进行了相关研究。丁力等^[20]分析了型孔凸台角度、型孔凸台高度与种层高度对排种性能的影响,从结构方面进行优化,满足玉米种子高速作业需求。孟华等^[21]设计了定扰动辅助充种排种器,分析扰种环、扰动片结构,提高了大豆排种器充种性能。刘瑞等^[22]设计了一种双重扰动辅助充种的玉米排种器,研究分析扰种台柱和型孔对充种效果的影响规律,对关键机构参数进行确定,进一步提高气吸式玉米排种盘的吸种性能。周仁义^[23]设计了气吸式大豆高速精密排种器,重点对环形气室进行分析设计,提高了大豆充种效果。韩丹丹等^[24]对种子的受力进行了分析,研究充种极限速度、充种时长对排种器充种性能的影响。贾洪

雷等^[25]设计了具有搅种槽、取种孔的气吸与机械复合式排种器,提高低负压吸种能力。史嵩等^[26]设计了排种盘导种槽,确定导种槽曲率系数、深度、斜面倾角等参数,进一步提高充种稳定性。

上述研究取得了一些研究成果,但并未对质量大、颗粒直径大、外形尺寸不规则、流动性较差的花生种子进行研究。本文针对花生种子固有的物料特性,以提高花生种子在排种器中的充种性能为目的,结合气力辅助充种方式,设计一种气力辅助充种式花生精量排种器。

1 排种装置结构与工作原理

1.1 排种装置结构

气力式花生精量高速排种器由电机、排种器左壳体、漏风挡圈、排种盘内衬瓦、驱动轴、排种盘、清种器、瓦盖、排种器右壳体种室、排种管过渡壳体、排种管等组成,排种器右壳体种室上侧留有进种口,外侧留有储种箱与留种板,排种盘上开有吸种孔和导种槽,如图 1 所示。

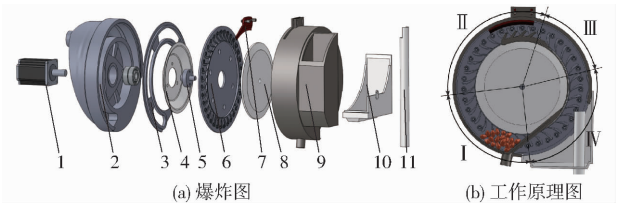


图 1 气力辅助充种气吸式排种器结构示意图
Fig.1 Schematics of structure of pneumatic assisted seed-filling air suction seed metering device

1. 电机 2. 排种器左壳体 3. 漏风挡圈 4. 排种盘内衬瓦 5. 驱动轴 6. 排种盘 7. 清种器 8. 瓦盖 9. 排种器右壳体种室 10. 排种管过渡壳体 11. 排种管 I. 充种区 II. 清种区 III. 携种区 IV. 投种区

1.2 工作原理

花生种子在充种箱体内部随风力与重力作用落入排种器右壳体种室充种区 I 范围内,此时花生种子进入箱体,在排种盘导种槽与气力辅助充种结构的作用下实现花生种子聚种、扰动、充种过程。排种盘在电机带动下匀速转动,利用风机产生风压使排种盘吸种孔吸附花生种子,实现花生种子充种过程。充种结束后,种子随排种盘作匀速圆周运动。花生种子在排种盘和气力吸附的作用下进入清种区 II,在上下刮种板的作用下刮掉多余种子,刮落的种子

在重力作用下再次返回底部,确保每个吸种孔保留单粒花生种子,种子继续随排种盘经过携种区Ⅲ运动到投种区Ⅳ。此时,投种区Ⅳ吸种孔被漏风挡圈覆盖住气流通道,种子失去吸力后在重力和惯性力作用下落入排种管,进一步掉入种沟。

2 花生种子在排种器中难以高效充种原因分析

2.1 堆积现象

花生种子相较于玉米、大豆等种子,不仅尺寸较大,而且种子质量也较大,吸种孔吸附种子时需要较大的吸附力,防止花生种子受自身重力挣脱吸附力,造成充种失败。从种子填充排种器右壳体种室模拟(图2)中可以看出,种子在进入排种器右壳体种室内后,呈现混乱、无序状态,堆积在种室内部,被吸种孔吸附住的种子受到上侧多余种子的挤压,同时受到侧面种子的挤压,种子随排种盘转动会存在较大的阻力。此外,排种盘快速转动情况下,已吸附住的种子在排种盘的带动下进入下一环节,但是花生种子颗粒尺寸大会造成种子支撑吸种孔处空间,产生局部无种子填充的现象。由此可见,在无外力介入下,多种因素会制约花生种子有效充种。

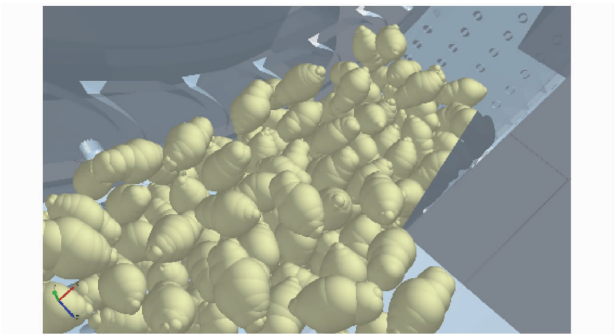


图2 种子填充排种器右壳体种室模拟
Fig.2 Simulated seed filling of right shell seed chamber of seed dispenser

2.2 充种时间

花生种子在排种器中充种时间主要是种子转过排种盘充种区的时间。如图3所示,种子在充种区被吸种孔吸附的最长时间就是排种器转过角度所用的时间。

种子充种时间为

$$t = \frac{s}{v} \tag{1}$$

其中

$$s = r_1 \theta \tag{2}$$

$$v = 2 \pi r_1 n \tag{3}$$

式中 s ——充种时间内转过弧长,mm
 v ——排种盘吸种孔处线速度,m/s
 t ——充种时间,s

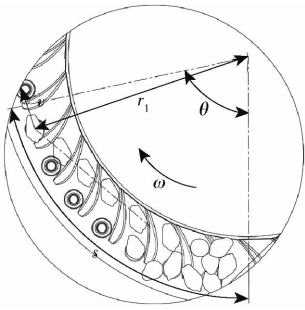


图3 充种时间分析

Fig.3 Analysis of seed filling time

r_1 ——吸种孔中心到排种盘中心距离,mm

θ ——排种器充种区角度,rad

n ——排种盘转速,r/min

由式(1)、(2)可得

$$t = \frac{r_1 \theta}{v} \tag{4}$$

将式(3)代入式(4)得

$$t = \frac{\theta}{2 \pi n} \tag{5}$$

通过式(5)可知,花生种子在排种盘上的充种时间与排种盘转速、排种器充种区角度有关。可以看出,随着排种盘转速增大,充种时间缩短。这说明高速排种作业相较于低速排种作业,其充种时间会缩短,因此需要在充种角度范围内增强充种性能,以解决因排种盘转速过高造成充种效果不足的问题。本文设计一种气力辅助+导种槽扰动充种结构来提高排种器充种区充种性能。

3 关键部件设计与参数确定

3.1 排种盘

排种盘是排种器的关键部件,如图4所示。根据花生种子尺寸对排种盘吸种孔与导种槽进行设计,吸种孔和导种槽均匀分布在排种盘上,每一个导种槽是倾斜、圆滑的,位于吸种孔的同一侧,其深度由内向外逐渐降低,趋于吸种孔同一面。导种槽配合气流为种子在排种器右壳体种室中提供聚种、扰动动力,使气固流进一步混合,确保花生大颗粒种子

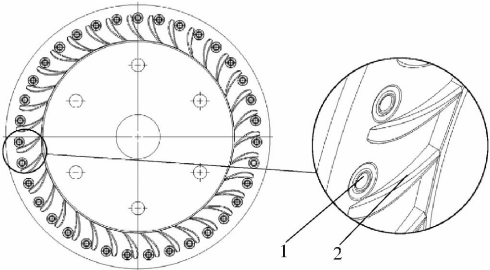


图4 排种盘结构示意图

Fig.4 Schematic of seed tray structure

1. 吸种孔 2. 导种槽

能够有效充种。

吸种孔呈圆环形均匀地分布在排种盘上, 吸附花生种子并带动种子匀速转动。

3.1.1 花生种子充种受力分析

花生排种稳定性和种子损伤程度受花生种子高速排种过程中吸附力的影响, 需探明种子充种受力特性。选择花生种植面积较多的白沙花生种子为研究对象, 为便于计算, 所选花生种子材质定义为均匀刚体。

导种槽具有随排种盘转动过程中扰动种群、带动种子运动的功能, 因此, 首先对导种槽中花生种子进行受力分析, 如图 5 所示, 图 5b 为图 5a 中箭头所指红线处的截面图。

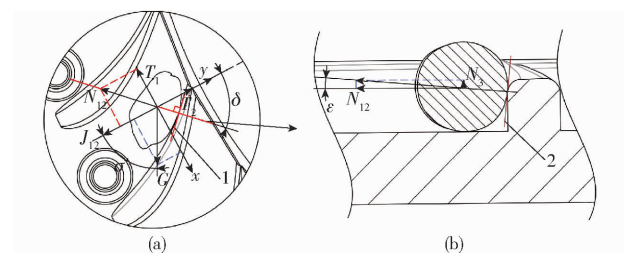


图 5 导种槽中未吸附种子受力分析

Fig. 5 Analysis of forces on unadsorbed seeds in seed guide slot

1. xy 平面种子所受支持力切面 2. z 平面种子所受支持力切面

此时, 花生种子相对于排种盘是一个运动状态, 自身受到重力、支持力、离心力以及与其它种子及排种盘之间的阻力、摩擦力的合力, 在 xy 平面进行 x 与 y 方向运动分析, 由图 5a 可知

$$\begin{cases} ma_1 = N_{12} \sin \delta + T_1 - G \sin \sigma \\ ma_2 = J_{12} + N_{12} \cos \delta + G \cos \sigma - T_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 m ——花生种子质量, kg

a_1 ——花生种子在 x 轴方向获得的加速度, m/s^2

a_2 ——花生种子在 y 轴方向获得的加速度, m/s^2

N_{12} ——花生种子受到的导种槽的支持力, N

T_1 ——花生种子受到的阻力与摩擦力在 x 轴方向分力, N

T_2 ——花生种子受到的阻力与摩擦力在 y 轴方向分力, N

G ——花生种子所受重力, N

J_{12} ——花生种子所受离心力, N

δ —— xy 平面中花生种子所受到的支持力方向与种子到排种盘中心连线之间的夹角, ($^\circ$)

σ —— xy 平面中花生种子所受到的重力方向与种子到排种盘中心连线之间的夹角, ($^\circ$)

从图 5 可以看出, xy 平面中花生种子所受到的支持力方向与种子到排种盘中心连线之间的夹角 δ 与导种槽安装角度有关, δ 越小种子在 y 轴方向所获得的加速度越大, 有往 y 轴负方向运动的趋势。

从图 5b 可以看出, 随着种子往 y 轴负方向运动, 沿 z 轴方向受到的力为

$$N_3 = N_{12} \tan \varepsilon \quad (7)$$

式中 N_3 ——花生种子在 z 轴方向受到的导种槽的支持力分力, N

ε —— z 平面中花生种子所受到的支持力方向与排种盘平面之间的夹角, ($^\circ$)

从 xy 受力分析面可知, 花生种子随着排种盘转动, 会向 y 轴负方向运动, 同时导种槽深度从内往外逐渐降低, 种子受到导种槽支持力的作用点发生变化, 会受到导种槽沿 z 轴的分力 N_3 , 可以看出随着夹角 ε 逐渐增大, N_3 逐渐变大, 确保多余花生种子在导种槽外端滑出导种槽。

花生种子在吸附到吸种孔过程中容易受到内部摩擦碰撞以及外部地面不平导致的振动影响, 引入吸种可靠性系数 K_1 (1.8 ~ 2.0) 与外界可靠性系数 K_2 (1.6 ~ 2.0) [27], 建立 xyz 三维坐标系, 对吸种孔吸附种子进行 xyz 平面受力分析。

种子所受自身重力 G 垂直向下, 在吸附力的作用下以角速度 ω 作匀速圆周运动, x 轴正向为种子受到阻力 F_f 的方向, y 轴正向指向排种盘中心, 是种子转动所受离心力 J 的反方向 [28]。同时, 对 z 平面进行受力分析, 种子在吸孔处受到吸孔的支持力 N 、吸附力 F , 同时受到离心力、重力、阻力的合力 F_1 , 如图 6 所示。

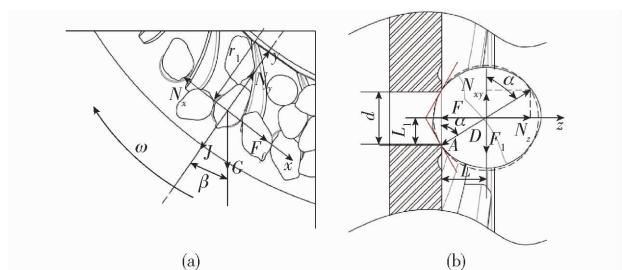


图 6 充种过程受力分析

Fig. 6 Force analysis of seed filling process

由图 6a 可知, 由于花生种子在吸附过程受力平衡, 种子所受 xyz 方向的合力为 0, 点 A 力矩为 0, 得

$$\begin{cases} N_x - F_f - G \sin \beta = 0 \\ N_y - J - G \cos \beta = 0 \\ N_z - F = 0 \\ FL_1 - F_1 L = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 J ——花生种子受到的离心力, N

F_f ——花生种子之间的阻力, N

N_z ——花生种子在 z 方向受到的支持力分力, N

L_1 ——种子重心到点 A 的竖直距离, mm

L ——种子重心到点 A 的水平距离, mm

β ——种子重心与排种盘中心的连线与竖直方向的夹角, ($^\circ$)

N_x ——花生种子在 x 方向受到的支持力分力, N

N_y ——花生种子在 y 方向受到的支持力分力, N

由图 6a 对 xy 平面受力分析可知

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \quad (9)$$

式中 N_{xy} ——种子支持力在 xy 平面内合力, N

$$J = m\omega^2 r_1 \quad (10)$$

式中 ω ——排种盘角速度, rad/s

由图 6b 对 z 平面受力分析可知

$$F_1 = N_{xy} \quad (11)$$

$$\tan\alpha = \frac{L}{L_1} \quad (12)$$

式中 α ——排种盘吸孔倒角, ($^\circ$)

由式(8)~(12)可得

$$F = \frac{F_1 L}{L_1} = \frac{N_{xy} L}{L_1} = N_{xy} \tan\alpha \quad (13)$$

求得

$$F = \sqrt{F_f^2 + J^2 + G^2 + 2G(F_f \sin\beta + J \cos\beta)} \tan\alpha \quad (14)$$

种子在吸孔处所受吸附力 F 与此处气室负压 P 之间的关系为

$$P = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi L_1^2} \quad (15)$$

式中 S ——孔的截面积, mm^2

由式(13)~(15)可得

$$P = \frac{L}{\pi L_1^3} \sqrt{F_f^2 + J^2 + G^2 + 2G(F_f \sin\beta + J \cos\beta)} \quad (16)$$

引入 K_1 、 K_2 后 P 为

$$P = \frac{K_1 K_2 L}{\pi L_1^3} \sqrt{F_f^2 + J^2 + G^2 + 2G(F_f \sin\beta + J \cos\beta)} \quad (17)$$

因排种盘吸种孔直径较小, L_1 可以近似成吸种孔半径 $d/2$, 本文通过考虑型孔直径来优化排种盘吸种孔。

在综合分析种子充种过程受力的基础上可知, 种子运动过程中要保证种子有效运动而不掉落, 所需吸附花生种子的气室负压 P 与种子质量、种子之间阻力、排种盘转速、型孔直径、排种盘直

径等参数有关, 因此, 要充分考虑这些因素来设计合适的排种装置。

3.1.2 排种盘型孔设计

排种盘最主要的结构参数包括吸种孔直径 d 、吸种孔中心与排种盘中心之间的距离 r_1 、吸种孔数量 z_1 。

所设计的吸种孔吸附端带有弧形(图 7), 可以有效增加型孔对种子的吸附接触面, 提高吸种孔对花生种子的吸附效果, 进一步降低对种子的损伤。

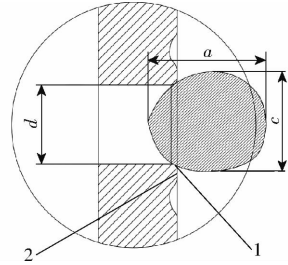


图 7 吸种孔结构图

Fig. 7 Structural diagram of seed suction pore

1. 吸种孔弧形型孔 2. 吸种孔型孔凸台

测量花生种子参数, 测定其三轴平均尺寸长度 a 、宽度 b 、厚度 c 为 15、10、8.5 mm。因此吸种孔直径应小于种子厚度 c (c 为种子较小直径), 同时要确保种子颗粒不进入吸种孔, 防止种子在吸附过程中堵塞吸种孔, 造成种子损伤。由于花生种子粒径大、质量大, 需要较大的吸附力, 吸附力与孔径有关, 因此吸种孔也要尽量大, 吸种孔直径 d 为 $0.64c \sim 0.66c$ [22]。为满足以上条件, 设计吸种孔直径 d 为 5.6 mm。

为避免排种盘转速太快, 给吸附的花生种子带来较大离心力 [29], 使花生种子在携种过程脱落, 造成漏种现象, 根据花生种子特性, 尽可能降低排种盘转速, 吸种孔数量需尽量多, 本文吸种孔数量 z_1 为 35。

已知气吸式排种盘吸种孔理论线速度 v 不大于 0.35/s, 机器前进速度与排种盘转速关系为

$$v_f = z_1 L_z n \quad (18)$$

式中 v_f ——机器前进速度, m/s

L_z ——播种株距, 取 200 mm

其中排种盘转速与吸种孔处线速度关系式为

$$n = \frac{v}{\pi D} \quad (19)$$

式中 D ——排种盘直径, mm

为适应花生高速排种作业环境, 机器前进速度取 12 km/h, 通过式(18)可以求得排种器转速为 0.476 r/min。代入排种盘转速式(19)可以求得排种盘吸种孔环形排列直径为 234 mm, 因此, 在排种

盘线速度小于 0.35 m/s 的条件下,吸种孔环形排列直径尽量取最大值,本文取 230 mm。

3.1.3 排种盘导种槽设计

因花生种子粒径大、质量大、流通性差,在充种过程往往会产生堆积现象,本文排种盘上设有弧面光滑导种槽,导种槽与吸种孔一一对应,均匀环形分布在吸种孔同一侧,如图 8 所示。

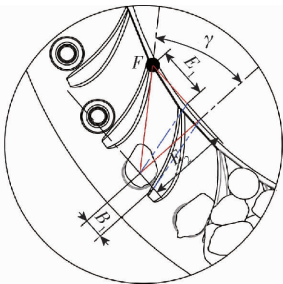


图 8 导种槽安装位置与角度

Fig. 8 Installation position and angle of seed guide slot

导种槽由内往外逐渐变浅,导种槽内侧深便于扰动种群、带动种子运动,外侧浅便于多余的种子顺着光滑斜面滑出,从而增加种子的流动性,导种槽光滑圆弧表面设计可以减少对种子的碰撞损伤。

排种盘导种槽排列角度如图 8 中点 F 位置所示,点 F 位于与吸种孔、排种盘中心连线呈角度 γ 的连线上。导种槽左侧端面的起始端与点 F 到吸种孔孔心连线相切,形成圆滑弧度,其中 γ 计算式为

$$\tan \gamma = \frac{E_1 + B_1}{E_2} \quad (20)$$

式中 E_1 ——点 F 与导种槽右端面之间的连线距离,mm

B_1 ——导种槽右端面与吸种孔孔心距离,mm

E_2 ——点 F 到吸种孔孔心距离在吸种孔孔心与排种盘中心连线上的投影,mm

为了实现导种槽刚好携带一粒种子,保证吸种孔有种子吸附,导种槽内侧长度不能过长、导种槽左右端面距离不易过大,同时,要充分考虑一粒种子在其中的通过性。通过式(20)可以看出,当 B_1 、 E_2 保持不变时,为了便于花生种子从导种槽内侧滑落到导种槽外侧,同时 E_1 要满足一粒种子宽的距离,依据经验 γ 取 40° 。

导种槽右侧面在排种盘转过花生种群区域过程中,起到扰动种子的作用,同时给被吸附住的花生种子提供部分支撑力,因此,导种槽右侧面到吸种孔孔心的距离为

$$\frac{b}{2} \leq B_1 \leq b \quad (21)$$

根据测得的花生种子三轴尺寸可知,导种槽右

端面与吸种孔孔心距离取值范围为 5 ~ 10 mm,本文取 7 mm。

在设计过程中,要充分考虑花生种子三轴尺寸的差异化以及形状不规则程度,设计排种盘导种槽如图 9 所示。

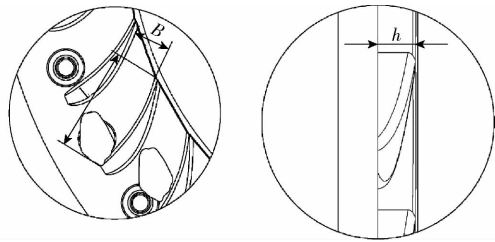


图 9 导种槽装置尺寸示意图

Fig. 9 Schematic of seed guide slot device size diagram

为防止花生种子卡在导种槽中,满足单粒花生种子顺利通过导种槽,需满足关系式

$$a \leq B \leq 2c \quad (22)$$

式中 B ——导种槽左右端面距离,mm

根据测得的花生种子三轴尺寸可知,导种槽左右端面距离取值范围为 15 ~ 17 mm,本文取 16 mm。

经过反复试验发现,花生种子在导种槽的作用下,随着导种槽运动过程中,花生种子多数是平躺状态,即花生种子水平横在导种槽中或者倾斜横在导种槽中。因此,要考虑种子被吸附时种子厚度、宽度与排种盘导种槽接触情况,尽可能减少导种槽中种子与花生种群之间的接触面积,同时要确保花生种子能够随导种槽运动,因此需满足关系式

$$0.5b < h < 1.1c \quad (23)$$

式中 h ——导种槽内侧厚度,mm

根据花生种子三轴尺寸可知,导种槽内侧厚度 h 取值范围为 5 ~ 9.35 mm,考虑到防止多余种子在导种槽中产生碰撞现象,因此 h 取 6 mm。

排种盘转动过程中,不仅要确保种子在导种槽里能够顺利从导种槽出口滑出,还要提高导种槽充种能力。因此,导种槽内侧长度 l 要大于 2 倍种子长度,需满足关系式

$$l > 2a \quad (24)$$

本文 l 取 35 mm。

3.2 气力辅助充种装置

气力辅助充种装置也就是排种器右壳体种室底侧吹种孔装置,是保证花生高速排种充种的关键部件。如图 10 所示,花生种子从种子入料口进入种子入料口下滑道落到排种器右壳体种室内。气流通过辅助吹种进气口进气,强压气流经过气流管道从辅助吹种孔出风口处作用在花生种群底部,对花生种子产生扰动,从而使花生种子运动,便于排种盘导种槽带动花生种子运动,有助于排

种盘吸种孔吸附种子。

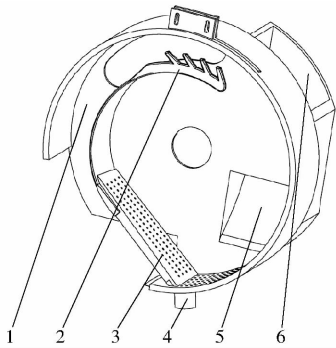


图 10 排种器右壳体种室结构示意图
Fig. 10 Structural diagram of right shell seed chamber of seed metering device

1. 壳体 2. 下侧清种器 3. 辅助吹种孔 4. 辅助吹种进气口
5. 种子入料口下滑道 6. 种子入料口

3.2.1 扰动气孔排列

为提高排种盘种子充种效果,设计气力辅助充种结构,采用花生排种器右壳体内侧底部均匀分布吹气孔的方式,利用气流扰动原理吹动花生种子群,提高种群的流动性。

排种盘转动方向如图 11 中 ω 方向所示,此时,花生种子在壳体内侧底部需往此方向运动,这就要求花生种子群要有往右上方扰动的趋势。根据种群需往右上方运动的要求,本设计在壳体内侧底部,沿着壳体种室圆形壁面开有均匀分布、开口垂直向上的吹气孔,如图 11 中开口方向与 y 轴同向的型孔 2。另外一侧是种室挡种斜侧面,挡种斜侧面与水平夹角为 η ,开有均匀分布、开口垂直于挡种斜侧面的吹种孔,如图 11 中的型孔 1。

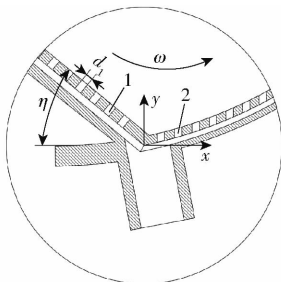


图 11 壳体种室剖面图
Fig. 11 Cutaway view of shell seed chamber
1. 型孔 1 2. 型孔 2

在设计过程中,为防止花生种子群拥堵、不动,需给种群一个较小的扰动力,因此,需满足关系式

$$F_z = \frac{1}{4} \pi d_1^2 P_z \tag{25}$$

式中 F_z ——辅助吹种单个型孔能够施加的力,N
 P_z ——辅助吹种型孔处压强,Pa
 d_1 ——辅助吹种型孔直径,mm
同时吹种型孔直径需远小于花生种子厚度,满

足关系式

$$d_1 < c \tag{26}$$

由式(25)可以看出,同一压强下,型孔截面越大,作用力越大,根据前期测得花生种子平均厚度为 8.5 mm,由式(26)可知,辅助吹种型孔直径需较小尺寸, d_1 取 2 mm。

辅助吹种型孔排列方式如图 12 所示,辅助吹种型孔分布在右侧壳体种室圆形壁面上呈 6 行均匀分布,每一行开有 20 个型孔,如图 12b 所示。辅助吹种型孔分布在种室挡种斜侧面上呈 4 行均匀分布,每一行开有 23 个型孔,如图 12a 所示。

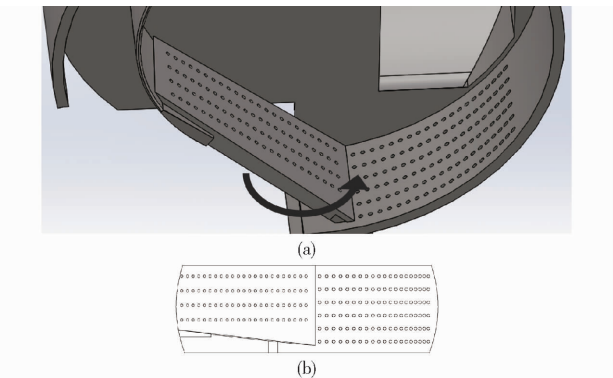


图 12 辅助吹种型孔排列示意图
Fig. 12 Schematics of arrangement of auxiliary seed blowing holes

3.2.2 吹种孔处种子受力分析

种子在排种器右壳体种室内,呈现堆积状态,此时,从辅助吹种进气口吹入带有压力的气流,通过壳体内部辅助吹种孔作用到种群上,如图 13 所示,稳定的气流(图 13 中箭头方向)会给种子一个向上的推力,确保种子处于运动状态。

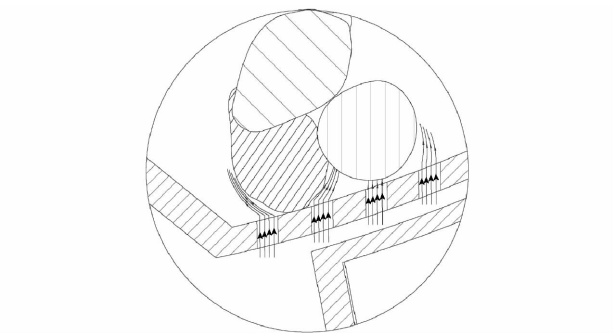


图 13 种子在壳体种室内被吹附姿态示意图
Fig. 13 Schematic of posture of seeds being blown in seed chamber of shell

4 台架试验

4.1 试验条件

为进一步验证气力辅助充种装置能否有效提高花生高速排种充种性能,进行台架试验,采用大面积种植的白沙花生种子,种子物理性质如表 1 所示。

表 1 花生种子物理参数

Tab.1 Physical parameters of peanut seeds	
参数	数值
三轴平均尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm)	15×10×8.5
千粒质量/g	472.65
密度/(kg·m ⁻³)	1 049
含水率/%	12.87

排种检测装置选用自主研发的排种器性能检测仪,选取风速风压仪测定风压,试验装置如图 14 所示。



图 14 试验装置
Fig.14 Test equipment

4.2 试验方法

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[30],为了统计数据合理性,每组试验采集 251 粒种子情况,每组重复 3 次,取 3 次试验平均值作为结果进行分析。由充种阶段力学分析可知,气孔的吸附力与种子在种室内的运动取决于气体的吸附作用与吹动作用,播种机前进速度越快也会降低充种时间,对花生种子充种过程充种合格率和漏充率产生极大影响。因此,选取排种器吸种负压(kPa)、花生高速播种机前进速度(km/h)、扰动吹种正压(kPa)作为试验因素进行花生排种器充种性能台架试验。设置排种器吸种负压为 4~6 kPa、花生高速播种前进速度为 8~12 km/h、扰动吹种正压为 0.9~1.3 kPa,进行三因素组合试验。试验因素编码如表 2 所示。分别对充种合格率 Y_1 、漏充率 Y_2 进行统计分析,其中,充种合格率为吸种孔吸附单粒种子数与试验种子总数比值,漏充率为吸种孔漏吸种子数与试验种子总数比值,试验设计及结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

4.3 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件,采用方差分析法对花生高速排种充种试验结果进行分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知,合格率与漏充率模型的拟合度极显著,其 p 值远小于 0.01,而且合格率与漏充率的失拟项 p 值分别为 0.2495、0.2930,回归方

表 2 试验因素编码

Tab.2 Experimental factors and codes			
编码	因素		
	排种器吸种负压 x_1 /kPa	花生高速播种机前进速度 x_2 /(km·h ⁻¹)	扰动吹种正压 x_3 /kPa
-1	4	8	0.9
0	5	10	1.1
1	6	12	1.3

表 3 试验设计与结果

Tab.3 Experimental design and results					
试验序号	因素			Y_1 /%	Y_2 /%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	1	-1	90.19	5.38
2	0	0	0	93.78	4.17
3	0	1	1	89.72	8.87
4	0	0	0	92.76	4.18
5	-1	-1	0	93.59	5.29
6	1	0	1	91.96	6.11
7	0	0	0	93.95	4.09
8	0	0	0	93.81	5.27
9	0	-1	1	94.97	4.69
10	-1	0	-1	89.64	7.24
11	0	0	0	93.15	4.23
12	0	-1	-1	92.06	4.73
13	-1	0	1	90.54	5.43
14	1	0	-1	90.58	3.75
15	1	1	0	92.52	5.39
16	-1	1	0	88.93	8.48
17	1	-1	0	95.84	4.26

表 4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance								
方差来源	合格率				漏充率			
	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p
模型	62.54	9	18.31	0.000 5	34.22	9	11.67	0.001 9
X_1	8.41	1	22.15	0.002 2	6.00	1	18.42	0.003 6
X_2	28.50	1	75.11	<0.000 1	10.47	1	32.12	0.000 8
X_3	2.78	1	7.34	0.030 2	2.00	1	6.14	0.042 4
X_1X_2	0.45	1	1.18	0.312 8	1.06	1	3.26	0.114 1
X_1X_3	0.058	1	0.15	0.704 0	4.35	1	13.34	0.008 1
X_2X_3	2.86	1	7.53	0.028 8	3.12	1	9.56	0.017 5
X_1^2	3.51	1	9.24	0.018 9	1.47	1	4.51	0.071 2
X_2^2	0.085	1	0.23	0.649 5	3.23	1	9.92	0.016 2
X_3^2	15.16	1	39.95	0.000 4	1.80	1	5.52	0.051 1
残差	2.66	7			2.28	7		
失拟	1.61	3	2.05	0.249 5	1.30	3	1.76	0.293 0
误差	1.05	4			0.98	4		
总和	65.20	16			36.51	16		

程失拟不显著,说明试验情况拟合较好^[31]。

对于合格率回归方程,回归项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2^2 的

p 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著;对于漏充率回归方程,回归项 X_1X_2 、 X_1^2 的 p 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著。剔除不显著的回归项,确保回归方程模型显著,对合格率、漏充率的回归方程重新拟合,分别为

$$Y_1 = 93.49 + 1.03X_1 - 1.89X_2 + 0.59X_3 - 0.84X_2X_3 - 0.91X_1^2 - 1.90X_3^2 \quad (27)$$

$$Y_2 = 4.39 - 0.87X_1 + 1.14X_2 + 0.50X_3 + 1.04X_1X_3 + 0.88X_2X_3 + 0.88X_2^2 + 0.65X_3^2 \quad (28)$$

分析上述回归系数可知,影响花生充种合格率

的主要因素为花生高速播种机前进速度、排种盘吸种负压、扰动吹种正压;影响花生漏充率的主要因素为花生高速播种机前进速度、排种盘吸种负压、扰动吹种正压。

4.4 各因素对花生充种合格率、漏充率的影响

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行处理,分析排种器吸种负压、花生高速播种机前进速度、扰动吹种正压因素的交互作用对花生充种性能的影响,重点对影响显著的交互项进行响应面分析,如图 15 所示。

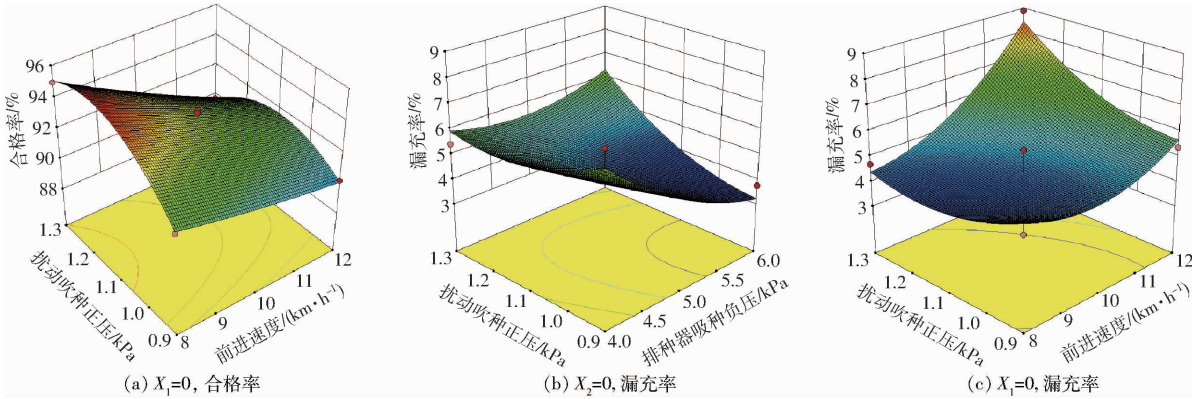


图 15 因素交互作用对花生种子充种合格率与漏充率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface plots of interaction effects on peanut seed filling pass rate and leakage rate

图 15a 为排种器吸种负压为 5 kPa 时,花生高速播种机前进速度与扰动吹种正压交互作用影响花生种子充种合格率的响应曲面。从图 15a 可以看出,充种合格率随着前进速度的增大逐渐降低,随着扰动吹种正压的增大呈现先升高后降低趋势,在扰动吹种正压为 1.1 ~ 1.2 kPa 附近有较好的合格率。图 15b 为花生高速播种机前进速度为 10 km/h 时,排种器吸种负压与扰动吹种正压交互作用影响种子充种漏充率的响应曲面。其中,充种漏充率随着吸种负压的增大呈现逐渐降低的趋势,随着扰动吹种正压的增大呈现先降低后升高的趋势,在扰动吹种正压为 1.0 kPa 附近有较低的漏充率。图 15c 为排种器吸种负压为 5 kPa 时,花生高速播种机前进速度与扰动吹种正压交互作用影响花生种子充种漏充率的响应曲面。从图 15c 可以看出,充种漏充率随着前进速度的增大逐渐升高,随着扰动吹种正压的增大呈逐渐升高的趋势。

综上可知,因素之间的交互作用对排种器充种性能影响较大,尤其是对充种合格率产生较大影响。为了获得最好的排种作业参数,需要优化排种器吸种负压、花生高速播种机前进速度与扰动吹种正压各参数之间的合理匹配度,从而达到充种合格率最优。

以充种合格率为优化目标,根据 JB/T 10293—

2001《单粒(精密)播种机技术条件》中的要求,确定合格率大于等于 80.0%,漏充率(漏播率)小于等于 8.0%。根据所选因素的边界条件,建立参数优化数学模型,进行优化求解,目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} Y_1 = \max F(x_1, x_2, x_3) \\ Y_2 = \min F(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} Y_1 \geq 80.0\% \\ Y_2 \leq 8.0\% \\ 4 \text{ kPa} \leq x_1 \leq 6 \text{ kPa} \\ 8 \text{ km/h} \leq x_2 \leq 12 \text{ km/h} \\ 0.9 \text{ kPa} \leq x_3 \leq 1.3 \text{ kPa} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

采用 Design-Expert 8.0.6 软件优化模块,对目标进行优化求解,得到最优参数:排种器吸种负压为 5.156 kPa,花生高速播种机前进速度为 8.007 km/h、扰动吹种正压为 1.149 kPa,此时花生种子充种合格率为 95.84%、漏充率为 4.06%,能够实现花生种子有效充种。

4.5 对比试验

为了验证上述气力辅助充种装置的充种效果,采用相同排种器结构气力辅助充种装置工作和不工作状态(扰动吹种与非扰动吹种),在作业速度 8、10、12 km/h 下进行对比试验。试验时选用白沙花生种子,选取排种器吸种负压 5.2 kPa,以充种合格

率和充种漏充率为指标,每组试验采集 251 粒种子充种情况,每组重复 3 次,取 3 次试验平均值作为结果进行分析,试验结果如表 5 所示。

表 5 对比试验结果
Tab.5 Results of comparative test

充种方式	作业速度/ (km·h ⁻¹)	充种合格 率/%	漏充率/ %
导种槽扰动式 + 气力辅助充种式	8	95.83	4.06
	10	94.68	4.67
	12	92.52	5.39
导种槽扰动式	8	86.62	12.31
	10	81.67	16.94
	12	78.48	19.91

由表 5 可以看出,采用气力辅助充种式排种器在各高速播种条件下花生高速排种器的充种性能均大幅提高,效果较明显。能够提高花生充种过程中的充种性能。在高速排种过程中,作业速度越大,性能提升效果越明显,在作业速度 12 km/h 下,气力辅助充种装置充种合格率提升 14.04 个百分点。

5 结论

- (1)针对花生高速排种作业时,气吸式排种器种子充种效果差、漏充严重的问题,设计了一种气力辅助充种式花生精量排种器,提高颗粒尺寸大、质量大种子的充种效果。
- (2)根据花生种子物料特性,对排种器导种槽、气力辅助充种装置等关键结构参数进行了计算,确定吸种孔直径为 5.6 mm、吸种孔数量为 35、吸种孔环形排列直径为 230 mm、辅助吹种型孔直径为 2 mm。
- (3)以排种器吸种负压、花生高速播种机前进速度、扰动吹种正压为试验因素,以充种合格率、漏充率为试验评价指标,进行三因素三水平组合试验,得到花生高速排种充种最佳工作性能组合参数:排种器吸种负压为 5.156 kPa、花生高速播种机前进速度为 8.007 km/h、扰动吹种正压为 1.149 kPa,此时,花生充种合格率为 95.84%、漏充率为 4.06%,充种效果较好。

参 考 文 献

[1] 李冰冰. 浅析气吸式花生精密播种机[J]. 南方农机, 2022,53(22):59-62.

[2] 王东伟,纪瑞琪,何晓宁,等. 驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(5):59-70,149.

WANG Dongwei,JI Ruiqi,HE Xiaoning,et al. Drive-guided combination slot-assisted seed-attached air-absorbing peanut high-speed precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):59-70,149. (in Chinese)

[3] 章鑫鹏,郑乐,张富贵. 国内气力式精密排种器研究综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2022,60(9):93-97,113.

ZHANG Xinpeng,ZHENG Le,ZHANG Fugui. Review of domestic pneumatic precision seed disperser research[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2022,60(9):93-97,113. (in Chinese)

[4] 苏微,赵庆辉,赖庆辉,等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(7):144-155.

SU Wei,ZHAO Qinghui,LAI Qinghui,et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):144-155. (in Chinese)

[5] 刘荣荣,刘飞,张涛,等. 气吸式藜麦穴播精量排种器设计及试验性能[J]. 农机化研究, 2023,45(7):143-149.

LIU Rongrong,LIU Fei,ZHANG Tao,et al. Design and test performance of pneumatic precision seed metering device for quinoa hill-drop sowing[J]. Journal of Agricultural Mechanisation Research,2023,45(7):143-149. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(8):73-85.

HU Mengjie,XIA Junfang,ZHENG Kan,et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):73-85. (in Chinese)

[8] 吕金庆,朱明芳,竹筱歆,等. 气吸式马铃薯播种机一体式风机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(3):80-90.

LÜ Jinqing,ZHU Mingfang,ZHU Xiaoxin,et al. Optimal design and experiment of integrated fan of air suction potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):80-90. (in Chinese)

[9] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(2):47-57.

XIE Dongbo,ZHANG Chunling,WU Xiaoping,et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):47-57. (in Chinese)

[10] JIAN X, SHUNLI S, ZHAOKAI H,et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM-CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023,230:277-300.

[11] HAN T, CHANGSU X, FANGYU G,et al. Analysis and experiment on the seed metering mechanism of multi-grain cluster air suction type rice (*Oryza sativa* L.) hill direct seed metering device[J]. Agriculture, 2022,12(8):1094.

[12] DAVUT K, ORHAN G, EGIDIJUS Š. Estimation of optimum vacuum pressure of air-suction seed-metering device of precision

- seeders using artificial neural network models[J]. *Agronomy*, 2022,12(7):1600.
- [13] SHOUHUA R, SHUJUAN Y. Control mechanism and experimental study on electric drive seed metering device of air suction seeder[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2022,29(4):1254 – 1261.
- [14] HUIPING S, CHUNYUAN Z, KAIYAN L, et al. Theoretical and experimental studies on air-suction roller-type precision seed-metering device[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021,2087(1):1 – 14.
- [15] JUNHONG L, QINGHUI L, HUI Z, et al. Suction force on high-sphericity seeds in an air-suction seed-metering device[J]. *Biosystems Engineering*, 2021,211:125 – 140.
- [16] KAIXING Z, LAN Z, YANG D, et al. Design and test of air-suction pepper seed metering device based on air supply and quantitative seed supply[J]. *Inmateh-Agricultural Engineering*, 2021,64(2):345 – 354.
- [17] HAN D, ZHANG D, JING H, et al. DEM – CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018,150(5):426 – 438.
- [18] 纪海春. 基于 DEM – CFD 耦合的气吸式排种器工作过程仿真分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
JI Haichun. Simulation and analysis of working process of air suction seed-metering device based on DEM – CFD coupling method[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology,2020. (in Chinese)
- [19] 张开兴,李金凤,宋正河,等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019,50(6):52 – 63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(6):52 – 63. (in Chinese)
- [20] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2021,52(7):40 – 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(7):40 – 50. (in Chinese)
- [21] 孟华,王茜,李晓红,等. 定扰动辅助充种大豆排种器设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2023,44(6):18 – 25.
MENG Hua, WANG Xi, LI Xiaohong, et al. Design and experiment of soybean seed metering device with constant disturbance aided filling soybean[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*,2023,44(6):18 – 25. (in Chinese)
- [22] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022,53(9):50 – 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2022,53(9):50 – 59. (in Chinese)
- [23] 周仁义. 气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[D]. 长春:吉林大学, 2022.
ZHOU Renyi. Design and experiment of air suction soybean high speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
- [24] 韩丹丹,何彬,周毅,等. 气吸式密植精量排种器的设计与试验[J]. *华中农业大学学报*, 2023,42(1):237 – 247.
HAN Dandan, HE Bin, ZHOU Yi, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2023,42(1):237 – 247. (in Chinese)
- [25] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2018,49(4):75 – 86,139. (in Chinese)
- [26] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(5):54 – 66. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019,50(7):61 – 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(7):61 – 73. (in Chinese)
- [29] 吴小伟,武文娟,钟志堂,等. 油菜精量播种机排种器驱动系统设计与试验[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2014,27(1):40 – 45.
WU Xiaowei, WU Wenjuan, ZHONG Zhitang, et al. Design and experiments of precision metering device drive system for rapeseed[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*,2014,27(1):40 – 45. (in Chinese)
- [30] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(9):47 – 56. (in Chinese)
- [31] 杨文彩,阚成龙,张效伟,等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021,52(6):95 – 105.
YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(6):95 – 105. (in Chinese)