doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.006

驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究

王东伟[1]　纪瑞琪[1]　何晓宁[1]　郭　鹏[2]　时延鑫[1]　张春晓[1]
(1.青岛农业大学机电工程学院,青岛 266109;2.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018)

摘要:针对现有气吸式排种器在进行花生高速播种作业时重播、漏播现象严重等问题,设计了一款驱导组合槽辅助附种气吸式高速精量排种器,在设计排种盘时将搅种凹槽、取种槽口、吸种型孔组合设计构成组合槽,实现扰种、驱种、辅助附种作用,保证高速作业时的排种性能。通过理论建模分析验证了排种盘结构设计的合理性并初步完成了关键参数的确定,借助离散元仿真软件对种群运移情况受关键参数的影响规律进行了分析,并进行了二因素五水平二次正交旋转组合试验,对结构参数进一步优化;得出搅种凹槽、取种槽口尺寸及作业速度均会对排种性能造成显著影响,并得出最优排种器参数组合:搅种凹槽深度 3 mm、基圆半径 70 mm;取种槽口左右端面上沿距离 24.0 mm、下沿距离 19.1 mm、深度 10.5 mm、排种盘外周到取种槽口后端面距离 24.0 mm。在该参数组合下,当风压为 -6 kPa、作业速度为 6 ~ 12 km/h 时,粒距合格指数不小于 93.33%,重播指数不大于 3.52%,漏播指数不大于 4.02%,破损指数不大于 0.32%,具有良好的作业性能。

关键词:花生气吸式排种器;高速精量;驱导组合槽
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)05-0059-12　　**OSID**:

Drive-guided Combination Slot-assisted Seed-attached Air-absorbing Peanut High-speed Precision Seed Meter

WANG Dongwei[1]　JI Ruiqi[1]　HE Xiaoning[1]　GUO Peng[2]　SHI Yanxin[1]　ZHANG Chunxiao[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian* 271018, *China*)

Abstract: In view of the technical problems of low sowing quality caused by re-sowing and serious leakage of seeds when the existing air-absorbing seed meter was used for high speed sowing operation, a combination of repellent and guide slot auxiliary seed attachment air-absorbing peanut high-speed precision seed meter was designed. The design of the seed discharge performance under high-speed operation was carried out. The theoretical modeling analysis verified the rationality of structure design of the seed discharge disc and initially completed the determination of key parameters. In order to further optimize the size of seed churning recess and seed pick-up slot, the influence of key parameters on seed transport was analyzed with the help of discrete element simulation software, and a two-factor, five-level quadratic orthogonal rotational combination test and regression analysis were conducted to further optimize the structural parameters. The optimal combination of the following parameters was obtained: the depth of the seed churning recess was 3 mm, the radius of base circle of churning recess was 70 mm, the distance between left and right edges of seed picking slot was 24.0 mm, the distance between lower edge of seed picking slot was 19.1 mm, the depth of seed picking slot was 10.5 mm, and the distance from outer circumference of seeding disc to rear end of seed picking slot was 24.0 mm. When the wind pressure was -6 kPa and the operating speed was in the range of 6 ~ 12 km/h, the particle spacing qualification index was no less than 93.33%, the reseeding index was no more than 3.52%, the omission index was no more than 4.02% and the breakage index was no more than 0.32%, which had good operating performance.

Key words: peanut air-absorbing seed meter; high-speed precision; drive-guided combination

收稿日期:2022-08-22　修回日期:2022-10-21
基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2021CXGC010813)和青岛农业大学研究生创新计划项目(QNYCX21072)
作者简介:王东伟(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事根茎类作物智能农机装备研究,E-mail:w88030661@163.com

0 引言

高速精量播种[1]是指在农艺要求的时间区间内,将种子按照精准的粒距、行距、播深种植于田间,使种子在生长发育过程中具备较好的通风透气条件,以促进光合作用,在提高作业效率的同时,可显著降低种子的浪费及间苗情况,最终起到节本增产的效果[2-3]。排种器作为实现播种作业的核心部件,播种质量与其性能息息相关,直接关系花生的整体产量[4]。

由于气吸式排种器具备不伤种、省种、对种子尺寸要求较低、易于实现单粒精播和作业效率高等优点,在高速播种中应用较为广泛[5-9]。但总体而言,目前高速精量排种器研究的对象大都针对大豆、玉米等种子,对于花生等大颗粒种子的高速精量化排种研究尚未开展。在花生排种器的研究中,因其种粒尺寸不均、精量化播种要求高、种皮易破损等因素,大幅增加了研究难度。本文以提高花生排种器作业速度,增强充种性能,保证播种质量为目的,将曲线型搅种凹槽与取种槽口的设计融入排种盘,结合理论分析、仿真手段、回归分析等方法进行研究,以期达到高效高质低损的播种目的。

1 排种器总体结构与工作原理

1.1 总体结构

设计的驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器如图 1 所示。主要由进种口、排种器前壳体、柔性隔种挡板、上清种弧形毛刷、下清种环形毛刷、排种盘、长形真空吸盘、密封垫圈、负压壳组件、排种器后壳体、进气口、柔性疏孔滚轮、转轴、滚动轴承、二次投种装置等部件组成。上、下清种装置采用柔性材质,分置于吸种型孔上下两侧;排种器后壳体开有马蹄形真空室,长形真空吸盘通过外螺纹空心管与吸种型孔配合连接,采用柔性橡胶材质制成,以在提高吸附效果的前提下进一步保护种子,减小损伤,从而保证播后发芽率。

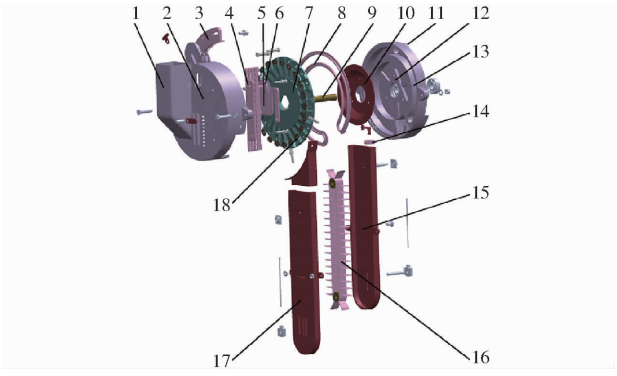


图 1 气吸式花生高速精量排种器爆炸图

Fig. 1 Exploded diagram of air-absorbing peanut high-speed precision seed discharger

1. 进种口 2. 排种器前壳体 3. 上清种弧形毛刷 4. 柔性隔种挡板 5. 进种口调节挡板 6. 下清种环形毛刷 7. 排种盘 8. 橡胶垫圈 9. 排种轴 10. 负压壳组件 11. 进气口 12. 排种器后壳体 13. 马蹄形真空室 14. 柔性疏孔滚轮 15. 二次投种装置后壳体 16. 同步带 17. 二次投种装置前壳体 18. 长形真空吸盘

1.2 工作原理

如图 2 所示,气吸式排种器在工作过程中主要分为 5 个区域:充种区域Ⅰ、自清种区域Ⅱ、强制清种区域Ⅲ、携种区域Ⅳ、投种区域Ⅴ。

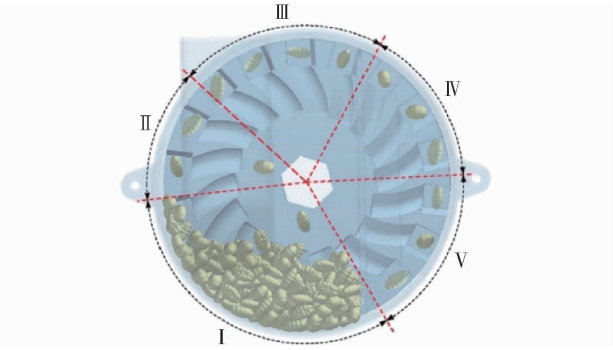


图 2 排种盘区域划分示意图

Fig. 2 Schematic of seeding tray area division

排种器在进行高速作业时,风机通过软管与排种器进气口连接,工作负压由进气口进入真空室,驱动电机带动排种轴转动,种子由充种口进入充种区域Ⅰ,形成种群堆积,需调节进种量时,通过滑动进种口调节挡板进行控制。排种盘在排种轴带动下同步转动,种群在搅种凹槽扰动下,沿凹槽曲线向取种槽口处流动,落入取种槽口后花生种子在负压气流作用下被吸附于吸种型孔上,随排种盘一起顺时针转动,转至自清种区域Ⅱ时,未吸牢的花生种子在重力作用下,自行掉落至充种区域Ⅰ,仍未掉落的多余种子到达强制清种区域Ⅲ时,在上清种弧形毛刷和下清种环形毛刷的双级作用下清落[10],清落种子由柔性隔种板阻断,以防止掉入投种区,产生重播现象。当种子随排种盘旋转至投种区域Ⅴ时,随着负压气流的阻断,在自身重力及柔性疏孔滚轮的作用下经排种口固定架落入二次投种装置内的同步带类勺状拨指中,落入的种子在拨指输送腔的托持作用下随同步带向播种作业方向的反方向运动直至种子落入种床,最终完成高速精量排种作业。

2 关键部件设计与相关参数分析

2.1 排种盘总体结构

排种盘作为排种作业过程中实现种群分离且将种子顺利运至投种区的重要部件[11],所设计排种盘

结构如图 3 所示。在排种盘上设计有搅种凹槽、取种槽口及吸种型孔，三者组合设计构成组合槽，以加强充种过程中种子的流动性，达到提高充种效果的目的，搅种凹槽截面为半弧状半倾斜式设计，以对不同运动形态下的花生种子实现有效驱导[12]，取种槽口下端面略低于搅种凹槽进行设计，以利用其阶梯状错层在运种过程中对花生种子起到支持作用，减小负压需求，左端面倾斜设计，从而利于种子的排出。

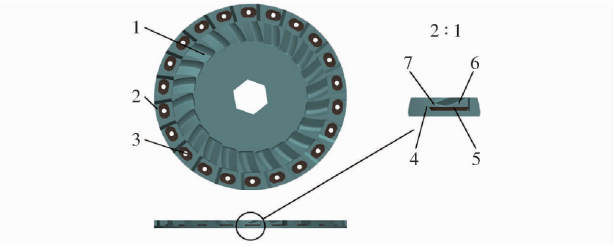


图 3　排种盘结构示意图

Fig. 3　Schematic of structure of seed discharge tray

1. 搅种凹槽　2. 取种槽口　3. 吸种型孔　4. 取种槽口左端面
5. 长形真空吸盘　6. 搅种凹槽倾斜截面　7. 搅种凹槽弧形截面

2.2　花生种子受力分析

传统排种器在进行充种作业时，种子会受到来自种群较大的摩擦力 F_m，如图 4 所示，排种盘搅种凹槽对进入槽内的种子产生推力 F_c，驱导种子沿凹槽曲线向种盘外沿流动。

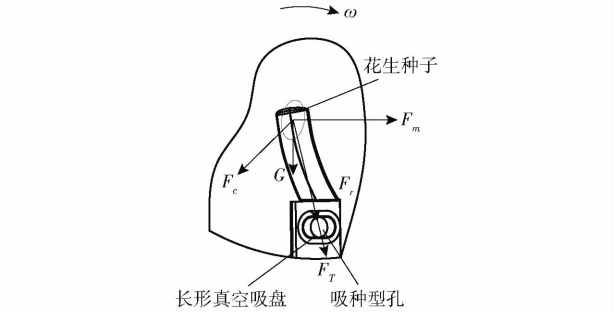


图 4　搅种凹槽内种子充种受力示意图

Fig. 4　Schematic of seed filling force in seed stirring recess

种子在充种过程中，克服种群间摩擦力 F_m，在自身重力 G、吸种型孔吸附力 F_r 以及搅种凹槽对种子的推力 F_c 作用下沿搅种凹槽曲线自排种盘内侧向外沿取种槽口方向流动，种子此时所受合力 F_T 为

$$\boldsymbol{F}_T = \boldsymbol{F}_r + \boldsymbol{F}_m + \boldsymbol{F}_c + \boldsymbol{G} \tag{1}$$

由式(1)可知，花生种子充种过程中，排种盘搅种凹槽的设计可实现对种子驱导，减小种群间摩擦力的作用，且其在此过程所受合力方向指向吸种型孔，对提高花生种子在吸种型孔方向上的吸附加速度，缩短充种时间，提高充种性能具有实质效果，更能满足高速播种需求。

种子进入取种槽口后，在负压作用下被吸附于长形真空吸盘上。相对于传统排种器而言，排种盘搅种凹槽与取种槽口的结构设计，减小了花生种子与种群的接触面积，可有效降低所受种群摩擦情况。其有效取种区域近似于理想取种区域，较传统垂直圆盘式排种器，降低了种子滑落的几率。此时种子受力情况包括种子自身重力 G、旋转惯性离心力 J、吸种型孔吸附力 F_r、吸种型孔处种子摩擦力 f 以及空气阻力。由于充种区域内花生种子较多，因此在此区域不易形成外部气流，可忽略不计所受空气阻力，花生种子经长形真空吸盘吸附后受力情况如图 5 所示。

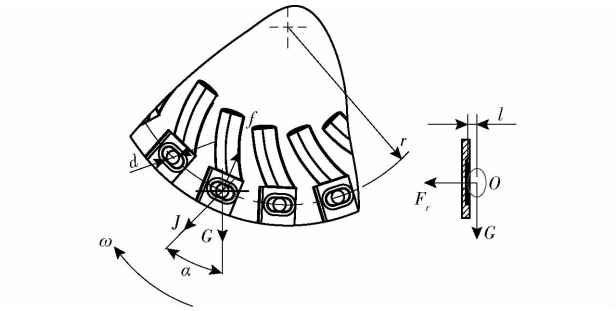


图 5　取种槽口内种子充种受力示意图

Fig. 5　Schematic of force of seed filling in opening of seed extraction slot

为防止花生种子由长形真空吸盘滑落，种子所受摩擦力应满足[13]

$$f > T \tag{2}$$

其中

$$T = \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\alpha}$$

$$J = m\omega^2 r \qquad G = mg$$

$$f = \mu F_r \qquad F_r = \frac{\pi d^2 g\rho}{4}$$

式中　T——种子重力 G 及离心力 J 的合力，N

α——种子重力与离心力间的夹角，rad

m——单个花生种子质量，kg

ω——排种盘角速度，rad/s

r——吸种型孔圆周半径，mm

g——重力加速度，m/s^2

μ——摩擦因数

d——吸种型孔直径，mm

ρ——气流密度，kg/m^3

式(2)表明当排种盘转动的角速度保持不变时，种子的离心力 J 不会发生变化。同时重力 G 仅与物料本身有关，其大小及方向不变。重力 G 与离心力 J 之间的夹角 α 随着排种盘的转动发生变化，从排种盘底端开始，合力 T 变化趋势为：先减小后增大。且吸种型孔处摩擦力越大，种子越不易掉落。即在一定范围内适当加大种子与吸种型孔间摩擦因数，可有效达到提高吸附性能的效果。

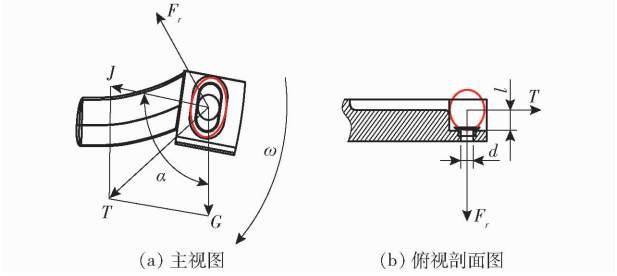
本文中长形真空吸盘采用橡胶材质制成，由文献[14]得知橡胶材质相较于钢材、树脂材质，与花生种子具有较大的摩擦因数，表明本文所采用的长形真空吸盘可实现增加取种槽口内种子摩擦力，达到提高充种性能的效果，同时其柔性材质可起到减小种子损伤的作用。

携种阶段，花生种子随排种盘转至最顶端前，因搅种凹槽与取种槽口的错层式设计，取种槽口右端面及后端面可起到对种子的托持作用，在此情况下仅需要较低的负压即可保持种子不会脱落。当种子转过最高点后，取种槽口前端面开始呈向下倾斜趋势，取种槽口对种子的托持效果开始逐渐减小，直至消失，无法保持对种子的托持作用。

如图 6 所示，此时花生种子仅靠吸种型孔处的吸力保持吸附状态，不考虑空气阻力及长形真空吸盘摩擦力对种子的影响情况下，吸种型孔吸附力 F_r 为

$$F_r \frac{d}{2} = Tl \tag{3}$$

式中 l——种子重心与排种盘之间的距离，mm



(a) 主视图 (b) 俯视剖面图

图 6 携种过程受力示意图

Fig. 6 Schematics of force during seed carrying

吸种型孔吸附力 F_r 与真空度 H_c 的关系为

$$H_c = \frac{F_r}{S_1} \tag{4}$$

式中 S_1——取种槽口处横截面积，mm^2

由式(3)、(4)可求得负压室临界真空度

$$H_{ce} = \frac{8Tl}{\pi d^3} \tag{5}$$

将合力 T 关系式代入式(5)可得

$$H_{ce} = \frac{8l}{\pi d^3}\sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\alpha} \tag{6}$$

传统气吸垂直圆盘式排种器，因在充种过程中受到来自种群的较大摩擦力 F_m，在此阶段对负压需求最大，其临界真空度 H'_{ce} 为

$$H'_{ce} = \frac{8l}{\pi d^3}\sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\alpha + F_m^2 + 2TF_m\cos\delta} \tag{7}$$

式中 δ——内摩擦力与合力 T 之间的夹角

通过比较可发现，本文所设计排种器明显小于同类型传统气吸式排种器对负压的需求。

投种阶段，种子随排种盘旋转离开负压真空室作用范围，不再受到吸附力，仅受重力 G 及离心力 J，排种盘转动中产生的平面速度分解为水平速度 v_x、竖直速度 v_y[15-16]，具体受力情况如图 7 所示。

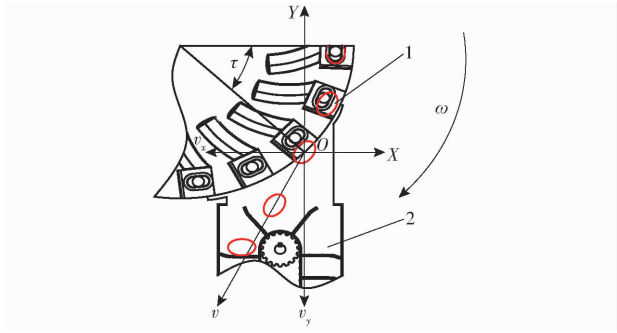


图 7 投种过程受力示意图

Fig. 7 Schematic of force of seeding process

1. 花生种子 2. 二次投种装置

在排种盘转动平面以花生种子重心作为坐标系原点建立直角坐标系 XOY，可求得花生种子运动轨迹[17]

$$\begin{cases} X = v_x t_1 \\ Y = v_y t_1 + \dfrac{g t_1^2}{2} \end{cases} \tag{8}$$

其中 $v_x = v\sin\tau \qquad v_y = v\cos\tau \qquad v = \dfrac{n_p \pi r}{30}$

式中 X——花生种子水平方向位移，mm

Y——花生种子竖直方向位移，mm

n_p——排种盘转速，r/min

t_1——投种时间，s

τ——投种角度，rad

v——投种速度，m/s

整理式(8)可求得 XOY 平面内花生种子运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = \dfrac{n_p \pi r \sin\tau}{30} t_1 \\ Y = \dfrac{n_p \pi r \cos\tau}{30} t_1 + \dfrac{g t_1^2}{2} \end{cases} \tag{9}$$

为避免花生种子在脱离吸种型孔后与邻近吸种型孔内种子发生碰撞而影响投种效果，需满足条件

$$\frac{n_p \pi r \cos\tau}{30} t'_1 + \frac{g t'^2_1}{2} > r(1 - \cos\beta) \tag{10}$$

其中 $\beta = \dfrac{n_p \pi t'_1}{30}$

式中 t'_1——花生种子脱离吸种型孔时间，s

β——种子离开吸种型孔期间排种盘转角，rad

通过投种过程种子的运动分析可知，当排种盘

结构参数保持不变时，花生种子的运动轨迹变化与排种盘转速 n_p 相关。将相关数据代入式(10)可求得花生种子脱离型孔的时间，可有效满足高速投种作业需求。经对各阶段的力学特性分析确定排种盘设计的合理性后，对排种盘各关键参数进行分析与计算。

2.3　排种盘直径及厚度确定

花生种子作为作业直接接触对象，对其物料特性的研究尤为必要，从而为排种器关键参数的确定及主要结构参数的确定提供理论依据。在本研究中，选用北方花生主产区较为典型的品种鲁花 11 作为试验用种，对各组种子三轴尺寸进行测量。三轴尺寸包括种子的长度 L、宽度 W 以及厚度 H，随机从鲁花 11 品种中取 3 组种子，每组为 50 粒，记录测量数据并计算平均值、变异系数，测量结果如表 1 所示。

表 1　花生种子几何尺寸统计结果

Tab. 1　Statistics of peanut seed geometries　mm

参数	长度 L	宽度 W	厚度 H
最大值	21.57	11.91	9.60
最小值	16.31	7.97	7.50
平均值	19.16	9.83	8.61

排种盘直径直接影响排种器总体尺寸、作业过程中离心力以及排种盘线速度等参数，因此需根据实际情况对排种盘直径开展设计，建立排种盘直径对充种影响的方程组[18]

$$\begin{cases} t = \dfrac{l_c}{v_p} \\ l_c = \delta_c \dfrac{D - \Delta d}{2} \\ v_p = \pi n_p \dfrac{D - \Delta d}{60} \end{cases} \tag{11}$$

式中　t——排种盘在充种区域的停留时间，s

l_c——充种区域弧长，mm

v_p——排种盘线速度，m/s

δ_c——充种区域弧度，rad

D——排种盘直径，mm

Δd——排种盘直径与吸种型孔圆周直径差值，mm

由式(11)整理得

$$t = \frac{30\delta_c}{\pi n_p} \tag{12}$$

由式(12)可发现排种盘停留在充种区域的时间 t 仅与充种区域弧度 δ_c 以及排种盘转速 n_p 有关，与排种盘直径并无关联。

组合槽数量 Z 与排种盘直径 D 关系为

$$Z = \frac{\pi(D - \Delta d)}{\Delta l_c} \tag{13}$$

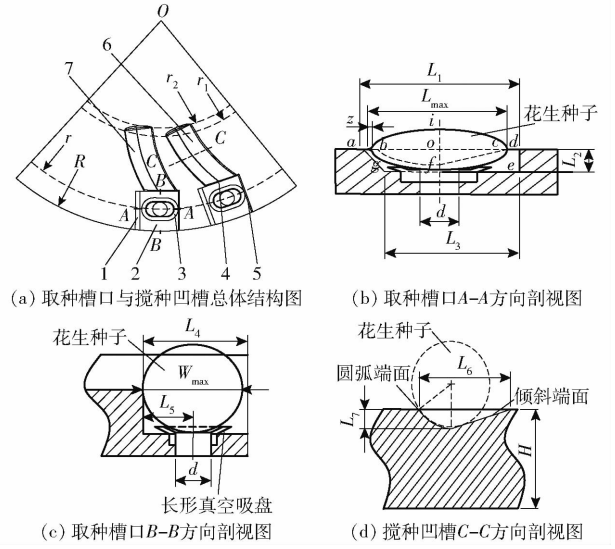
式中　Δl_c——相邻吸种型孔间的弧长，mm

通过式(13)可发现，排种盘直径 D 与组合槽数量呈正比关系。表明当拖拉机行进速度及播种粒距确定时，在一定范围内增大排种盘直径及组合槽数量可有效降低排种盘转速。

目前，国内外的排种盘直径范围大多选择 140 ~ 260 mm，适当加大直径，对离心力及排种盘线速度的提高具有明显效果[19]。因此在综合考虑种子物料特性、实验室所具备条件及须满足的作业要求等因素情况下，确定排种盘直径为 240 mm，排种盘厚度为 15 mm，通过 3D 打印技术进行加工，由光敏树脂材料制成。

2.4　排种盘取种槽口与吸种型孔设计

如图 8a 所示，取种槽口由左端面、右端面、后端面、槽底面组成，为避免各端面相交棱角对花生种子造成损伤，皆进行圆角处理。



(a) 取种槽口与搅种凹槽总体结构图　(b) 取种槽口*A*–*A*方向剖视图

(c) 取种槽口*B*–*B*方向剖视图　(d) 搅种凹槽*C*–*C*方向剖视图

图 8　取种槽口与搅种凹槽结构示意图

Fig. 8　Schematics of structure of seed taking slot and seed stirring recess

1. 取种槽口左端面　2. 取种槽口底面　3. 长形真空吸盘　4. 取种槽口后端面　5. 取种槽口右端面　6. 搅种凹槽倾斜端面　7. 搅种凹槽弧形端面

长形真空吸盘安装于取种槽口内，在负压作用下对种子形成包覆，同时起到减少种子损伤的作用效果。

在设计过程中，取种槽口与吸种型孔均匀设计于排种盘外沿，以便在负压吸种的同时，重力辅助充种，开放性外圈面及取种槽口左端面倾斜设计使种子可顺利脱离取种槽口，避免发生难以投种的现象。其他取种槽口端面皆垂直于槽口底面，槽口底面与排种盘表面相平行，取种槽口结构如图 8b、8c 所示。

由于花生种子形状不规则,在设计过程中为保证种子顺利进入取种槽口的前提下不发生一孔多吸现象,如图 8b 使取种槽口左右端面上沿距离仅能满足单粒最大长度的花生种子顺利进入槽口,在此假设花生种子被吸附于吸种型孔,则有关系式

$$L_{\max} \leqslant L_1 < 2L_{\min} \tag{14}$$

式中 $L_{\max}$——花生种子最大长度,mm

L_1——取种槽口左右端面上沿距离,mm

$L_{\min}$——花生种子最小长度,mm

由表 1 可知,所选品种种子最大长度 $L_{\max}$ = 21.57 mm,可确定 L_1 尺寸范围,同时为避免因尺寸过长造成结构干涉,经 SolidWorks 软件验证各尺寸,取 22.59、23.00、24.00、25.00、25.41 mm 以在后续研究中进一步确定最优参数。

经反复试验证实花生种子在搅种凹槽的导流作用下,进入取种槽口时种子大都为平躺状态,即长边被吸附,但因种子在被吸附时厚度、宽度方向与种盘表面平行均有可能,为尽可能地减小取种槽口内的种子与种群的接触面积,从而保证取种槽口内种子不会因种群摩擦作用脱落而造成漏播现象,以尺寸较大的宽度方向尺寸作为参考,取种槽口深度 L_2 需满足

$$0.75W_{\max} \leqslant L_2 \leqslant 1.5W_{\min} \tag{15}$$

式中 $W_{\max}$——花生种子最大宽度,mm

$W_{\min}$——花生种子最小宽度,mm

可确定 L_2 尺寸范围为 8.93 ~ 11.96 mm,对应 L_1 取 22.59、23.00、24.00、25.00、25.41 mm,L_2 分别取 9.09、9.50、10.50、11.50、11.91 mm。

如图 8b,由几何关系可推出求取其余各部分尺寸的公式为

$$\begin{cases} l_{gf} = \sqrt{l_{og}^2 - l_{of}^2} = \sqrt{l_{og}^2 - L_2^2} \\ l_{ao} = l_{ad} - l_{od} \\ l_{ag} = \dfrac{l_{de}}{\sin\gamma} \\ L_3 = l_{ge} = l_{ad} - \dfrac{l_{de}}{\tan\gamma} \end{cases} \tag{16}$$

式中 γ——边 ad 与 ag 夹角,取 65°

L_3——取种槽口左右端面下沿距离,mm

经式(16)几何关系推导,可求得取种槽口左右端面下沿距离,L_3 取 18.35、18.57、19.10、19.64、19.86 mm。

如图 8c,由于花生种子进入取种槽口的形态仍存在一定不确定性,为保证取种槽口能够有效托持种子,排种盘外周到取种槽口后端面距离也应满足关系

$$L_{\max} \leqslant L_4 \leqslant 2L_{\min} \tag{17}$$

式中 L_4——排种盘外周到取种槽口后端面距离,mm

即 L_4 取与 L_1 相同的数值,L_4 分别取 22.59、23.00、24.00、25.00、25.41 mm。

排种器负压需求与吸种型孔直径关系为

$$P = \frac{\pi d^2}{4}(p_0 - p_1) \tag{18}$$

式中 P——吸种型孔处吸附力,N

p_0——大气压强,kPa

p_1——负压气室真空度,kPa

由式(18)可知,当大气压强及负压气室真空度不变时,吸附力与吸种型孔直径呈正比关系,随着孔径的增大,吸附力显著提高;但当孔径超出种子平均尺寸时,会令气压损失增加,使吸种性能降低。而型孔直径越小,对气室真空度要求越大,则需配备更大功率的风机,因此确定合适的吸种型孔直径很重要。

通过《农业机械设计手册》中的吸种型孔直径经验公式,确定范围为

$$0.64b \leqslant d \leqslant 0.66b \tag{19}$$

式中 b——花生种子平均宽度,mm

由表 1 所测鲁花 11 种子三轴尺寸数据可知平均宽度为 9.83 mm,宽度范围为 7.97 ~ 11.91 mm,代入式(19)得吸种型孔的直径范围为 5.10 ~ 7.86 mm,初步选定 6 mm 作为吸种型孔直径。

2.5 搅种凹槽设计

排种器在作业时,合理的搅种设计不仅可加强对种子扰动效果,对种子的引流作用也具有较好的成效。如图 9 所示,本文所设计的搅种凹槽,通过凹槽曲线的引流导向作用,促使花生种子呈运动状态有序向取种槽口靠近,进而被吸附于真空吸盘,保证充种效果。

为确保作业过程中,搅种凹槽有效驱导种子沿曲线轨迹自种盘内侧向外沿运动,须令种子绝对运动轨迹沿搅种凹槽起始点所在基圆的切线方向进行直线运动。以排种盘圆心 O 为原点建立直角坐标系 XOY,种盘上点 A 经时间 t_3 后转过 λ 运动至点 B,点 A 种子经时间 t_3 后运动至点 C,当种子运动至负压气流控制区时,为确保具有相同吸种型孔的切线速度,应使种子绝对运动轨迹保持为直线,同时令种子在切向方向运动的速度分量等于位置点的切线速度。因此花生种子在坐标系 XOY 中的绝对运动为变加速直线运动。

点 A 经时间 t_3 后旋转至点 C 的速度为

$$v_1 = v_2/\cos\varphi \tag{20}$$

其中

$$\begin{cases} v_2 = r_2\omega \\ \varphi = k\omega t_2 \\ r_2 = r_1/\cos\varphi \end{cases} \tag{21}$$

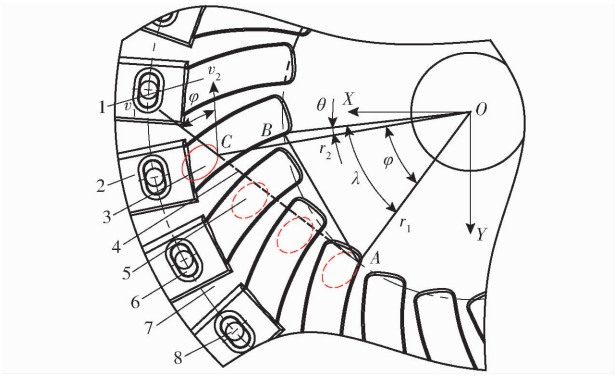


图 9　排种盘搅种凹槽曲线方程推导示意图

Fig. 9　Derivation of curve equation of seed stirring recess of seed discharge tray

1. 搅种凹槽　2. 取种槽口　3. 目标花生种子　4. 花生种子绝对运动轨迹　5. 运动过程中的种子　6. 长形真空吸盘　7. 排种盘　8. 吸种型孔

整理得

$$v_1 = r_1\omega/\cos^2(k\omega t_2) \tag{22}$$

式中　v_2——种子于点 C 切线方向的速度分量，m/s

φ——线段 OC 与 OA 之间的夹角，rad

r_1——搅种凹槽曲线基圆半径，mm

r_2——点 C 所处圆周半径，mm

k——花生转角速率系数，取 0.1 ~ 0.9

t_2——花生种子运动时长，s

随排种盘运动时间 t_3 后花生种子绝对运动位移为

$$l_{AC} = \int_0^{t_3} \frac{r_1\omega}{\cos^2(k\omega t_2)}\mathrm{d}t_2 = r_1\tan(k\lambda)/k \tag{23}$$

式中　t_3——花生种子实际运动时长，s

花生种子在随排种盘转动时，呈变加速直线运动。在排种盘动坐标系中具有一定的运动轨迹，为确保搅种凹槽可有效驱导种群，起到引种、搅种作用，须令种子的相对运动轨迹同搅种凹槽曲线方程保持一致，搅种凹槽的曲线参数表达式为

$$\begin{cases} x_c = r_1\cos\theta \\ y_c = r_1\sin\theta \end{cases} \tag{24}$$

其中

$$\theta = \lambda - \varphi \tag{25}$$

$$r_1 = r_2\cos\varphi \tag{26}$$

将式(24) ~ (26)联立得

$$\begin{cases} x_c = r_1(\cos\lambda + \tan\varphi\sin\lambda) \\ y_c = r_1(\sin\lambda - \tan\varphi\cos\lambda) \end{cases} \tag{27}$$

其中

$$\tan\varphi = l_{AC}/r_1 \tag{28}$$

化简得

$$\begin{cases} x_c = r_1\left(\cos\lambda + \dfrac{\tan(k\lambda)\sin\lambda}{k}\right) \\ y_c = r_1\left(\sin\lambda - \dfrac{\tan(k\lambda)\cos\lambda}{k}\right) \end{cases} \quad (\lambda \in (0,\xi)) \tag{29}$$

式中　x_c——点 C 于绝对坐标系中 X 轴坐标，mm

y_c——点 C 于绝对坐标系中 Y 轴坐标，mm

θ——线段 OC 与 OB 之间夹角，rad

ξ——值域上限，rad

可得 r_2 表达式为

$$r_2 = r_1\sqrt{1 + (\tan(k\lambda)/k)^2} \tag{30}$$

排种盘上基圆半径为 r_1 的渐开线(式(29))为花生种子的相对运动轨迹，考虑吸种型孔所在圆周半径应大于 r_2，故 λ 取值上限为 $37.09° < \xi < 42.07°$。

适宜的搅种凹槽深度可避免因深度过大，从而造成搅种凹槽曲线方向的导种作用小于凹槽切向的推种作用的情况，防止产生剧烈运动，影响整体搅种导种效果。因此搅种凹槽深度 L_7 应小于 $0.5H_{\min}$，L_7 取 0.75、1.5、2.25、3、3.75 mm。

如图 8d 所示，圆弧端面半径取 $0.5L_{\max}$，搅种凹槽宽度计算式为

$$L_6 = 2\sqrt{(0.5L_{\max})^2 - (0.5L_{\max} - L_7)^2} \tag{31}$$

式中　L_6——搅种凹槽宽度，mm

由式(31)求得 L_6 范围为 7.90 ~ 16.35 mm。

排种器设计中，吸种型孔数量直接关系着排种器整体的作业效率与作业质量[20]，即组合槽数量。因此需将取种槽口及搅种凹槽间隔列入考虑范围，经多次试验后确定取种槽口间隔为 4 mm 时，各部分均不会产生干涉现象，组合槽数量 Z 计算式为

$$Z = \frac{2\pi r}{L_1 + 4} \tag{32}$$

作业过程中，其他参数不变的情况下，组合槽数量与排种盘的转速反比关系，随着组合槽数量的增加，排种盘转速降低，线速度亦随之减小，从而更易对花生种子形成吸附，提高充种效果，避免漏播现象的发生。通过式(32)可求得组合槽数量 Z 为 22。

3　组合槽仿真优化设计

3.1　仿真参数设计

借助离散元仿真分析软件 EDEM 通过分析组合槽对种群的运移情况，对各参数进一步展开优化，以风压 −6 kPa 展开试验研究。

选用 Hertz − Mindlin 无滑动接触模型，为减小计算量，提高运算速度，本文使用简化后的气吸式排种器作为仿真模型，包括排种器前壳体、排种盘、排种器后壳体 3 部分。在本文所设计高速精量排种器与种子产生接触部件中，各部分均采用光敏树脂制成。表 2 为所设置仿真参数[21-22]。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

项目	参数	数值
花生种子	密度/(kg·m^{-3})	837
	剪切模量/MPa	5.72
	泊松比	0.30
排种盘和排种器前壳体(光敏树脂)	密度/(kg·m^{-3})	1 454.80
	剪切模量/MPa	120
	泊松比	0.35
花生-花生	静摩擦因数	0.50
	滚动摩擦因数	0.04
	碰撞恢复系数	0.23
花生-光敏树脂	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.04
	碰撞恢复系数	0.35

种子颗粒数量设置为 300 粒,仿真瑞利时间步长百分比设置为 5%,输出时间步长为 0.01 s,仿真总时间为 7 s,开展仿真试验,如图 10 所示,种群在排种盘带动下同步运动。根据种群的运动状态将其划分为上升、塌落、回流、相对静止 4 个区域,其中取种槽口仅与上升区域内的种子发生直接接触。

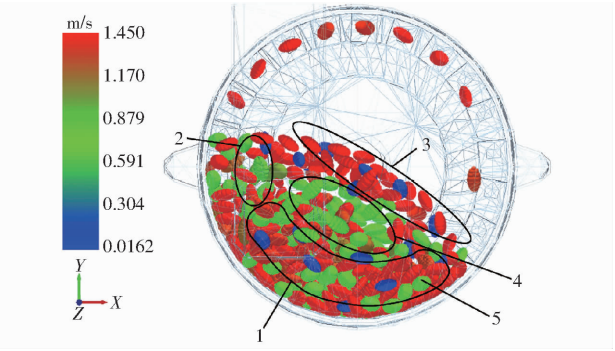


图 10 EDEM 仿真试验充种效果图

Fig. 10 EDEM simulation test seeding effect

1. 上升区域 2. 塌落区域 3. 回流区域 4. 相对静止区域 5. 采集数据区域

在高速作业过程中搅种凹槽主要起到在充种过程中实现种群导流,加强种群离散程度,提高上升区域种子速度及充种性能的作用[23]。因此在本仿真过程中为检验搅种凹槽性能,选用上升区域种群离散性程度以及运动速度作为性能评价指标。

在作业过程中排种性能还会受取种槽口结构参数及转速、负压等因素的影响,因此无法直接通过重播指数、漏播指数、合格指数来判断搅种凹槽性能,因此以漏充指数[24]作为对搅种凹槽的另一性能评价指标,取种槽口脱离种群时,内部无种子存在记为漏充,则

$$M = z_1 / Z' \times 100\% \tag{33}$$

式中 M——漏充指数,%

z_1——漏充种子的取种槽口数量

Z'——所记录取种槽口总数

3.2 搅种凹槽深度

为探究不同搅种凹槽深度对种群运动情况的影响,以搅种凹槽深度开展单因素离散元仿真试验,为有效控制变量,取种槽口尺寸保持不变,取种槽口左右端面上沿距离 L_1 取 24 mm,下沿距离 L_3 取 20 mm,排种盘外周至后端面距离 L_4 取 22 mm,深度 L_2 取 7 mm。

在搅种凹槽深度 L_7 分别取 0.75、1.50、2.25、3.00、3.75 mm 时,由式(31)求得搅种凹槽宽度 L_6 分别为 7.90、10.97、13.19、14.93、16.35 mm。

搅种凹槽的设计目的包括:提升上升区域内种群的运动速度。因此其作用范围应控制于上升区域附近,经仿真结果获知上升区域的厚度在 30 mm 左右,为确保搅种凹槽可有效作用于整个上升区域,同时保证各搅种凹槽不会相互干涉,经试验验证搅种凹槽基圆半径范围应控制在 50 ~ 70 mm 之间,在此搅种凹槽曲线基圆半径 r_1 取 70 mm。

排种盘转速 n_p 为

$$n_p = 60 \frac{V}{ZS} \tag{34}$$

式中 V——播种机作业速度,km/h

S——花生理论粒距,取 180 mm

由式(34)求得,作业速度为 12 km/h 时,排种盘转速为 50.51 r/min。

通过 EDEM 软件自有的数据采集能力得到上升区域内种群作业速度以及数量信息,并对漏充指数进行统计,结果如图 11 所示,图中平均值后小写英文字母不同表示在 0.05 水平下数据差异显著(下同)。搅种凹槽深度为 0 mm 时代表未进行设计。

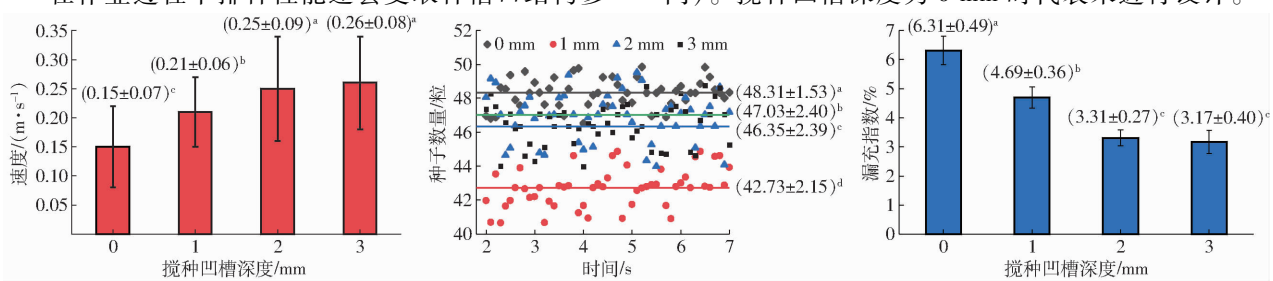


图 11 不同搅种凹槽深度对种群的影响

Fig. 11 Effect of different depths of churning grooves on population

由试验结果可知，搅种凹槽深度会对种群运动速度产生显著影响，同不添加搅种凹槽时相比，添加凹槽设计的种群速度明显提高，证实搅种凹槽具有促进种群运动速度的效果。种群速度在无搅种凹槽时最低，为 0.15 m/s；种群速度在搅种凹槽深度为 3 mm 时最高，为 0.26 m/s，搅种凹槽深度为 2 mm 时种群速度略小于深度为 3 mm 时的种群速度，差异性并不显著。

搅种凹槽深度会对上升区域种子数量造成显著影响，同不添加时相比，添加凹槽设计后上升区域内种子数量明显降低。未添加搅种凹槽时数量最多，为 48.31 粒；深度为 1 mm 时数量最少，为 42.73 粒；深度为 2 mm 时数量为 46.35 粒，1 mm 及 2 mm 深度时其上升区域内的种子皆显著低于 3 mm 时的数量。通过对仿真过程进行分析，发现当深度为 3 mm 时主要因搅种凹槽内的种子未能及时脱离而导致周围种子数量加大。

搅种凹槽深度会对漏充指数造成显著影响，同不添加时相比，添加凹槽设计后漏充指数显著减小。且漏充指数与搅种凹槽深度之间呈反比关系。未添加搅种凹槽时漏充指数最高，为 6.31%；深度为3 mm 时漏充指数最低，为 3.17%；深度为 2 mm 时漏播指数略低于深度为 3 mm 时，无显著差异。

考虑不同搅种凹槽深度对种群速度、种子数量以及漏充指数的影响，搅种凹槽在 3 mm 时，漏充指数最低。虽在该深度时上升区域内种子数量显著多于 2 mm 时的数量，但考虑本排种器双级柔性清种毛刷的加装，故本文在后续试验中取搅种凹槽深度 3 mm 进行研究。

3.3　搅种凹槽基圆半径

在进行搅种凹槽基圆半径对种群运动特性的影响研究时，仅改变搅种凹槽的基圆半径，其余参数保持不变，搅种凹槽深度取 3 mm，搅种凹槽基圆半径分别取 50、60、70 mm，借助仿真试验分析研究。仿真结果如图 12 所示。

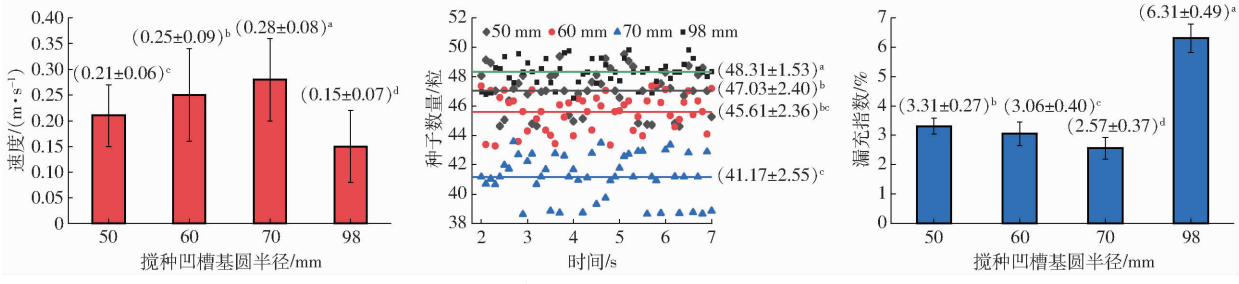


图 12　不同搅种凹槽基圆半径对种群的影响

Fig. 12　Effect of basal circle radius of different stirring grooves on population

由图 12 可知，搅种凹槽基圆半径会对种群运动速度产生显著影响，不添加搅种凹槽时种群速度最慢，为 0.15 m/s；搅种凹槽基圆半径 r_1 = 70 mm 时，种群速度最快，为 0.28 m/s。r_1 = 50 mm 时，种群速度为 0.21 m/s；r_1 = 60 m/s 时，种群速度为0.25 m/s；二者皆显著低于 r_1 = 70 mm 时的种群速度。

搅种凹槽基圆半径会对周围种子数量造成显著影响，基圆半径 r_1 = 70 mm 时，种子数量最少，为 41.17 粒；r_1 = 60 mm 时，种子数量为 45.61 粒，同基圆半径为 70 mm 时相比并不显著；r_1 = 50 mm 时，种子数量为 47.03 粒，同基圆半径为 60 mm 时相比并不显著；不添加搅种凹槽时种子数量最多。

搅种凹槽基圆半径会对漏充指数造成显著影响，未添加搅种凹槽时，漏充指数最大；搅种凹槽基圆半径 r_1 = 70 mm 时，漏充指数最小，为 2.57%。且显著小于基圆半径为 60 mm 及 70 mm 时的漏充指数。

综合考虑不同搅种凹槽基圆半径对种群速度、种子数量以及漏充指数的影响，搅种凹槽基圆半径 r_1 = 70 mm 时，种群速度最高，数量最小，漏充指数最低，故本文以基圆半径为 70 mm 进行后续研究。

4　试验

4.1　试验材料与设备

为进一步确定取种槽口尺寸数据，在本试验中以取种槽口尺寸、作业速度为因素开展二因素五水平正交旋转试验，采用鲁花 11 作为试验用种，研究各性能指标受不同因素的影响规律，并通过回归分析确定最佳参数组合。如图 13 所示，台架试验通过 JPS－12 型计算机视觉排种试验台进行，排种器各

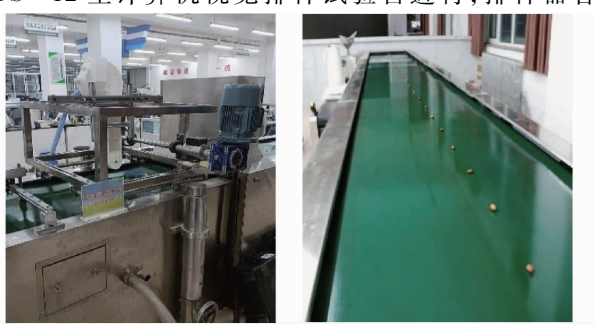


图 13　排种器性能试验装置

Fig. 13　Seed discharger performance test rig

部分及不同排种盘通过 3D 打印技术加工获得，添加二次投种装置开展试验，为有效控制变量，确保试验结果的有效性，在各组试验中二次投种装置参数保持一致。

4.2 试验方法

按 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》规定及参考文献[25]，以取种槽口尺寸、作业速度为试验因素，以粒距合格指数、重播指数、漏播指数、破损指数为评判性能指标[26]，试验因素及编码如表 3 所示。

表 3 因素编码

Tab. 3 Factors and coding

编码	因素	
	取种槽口尺寸/mm	作业速度/(km·h^{-1})
-1.414	22.59	4.34
-1	23.00	6.00
0	24.00	10.00
1	25.00	14.00
1.414	25.41	15.66

由式(14)~(16)以及 L_1、L_2、L_3、L_4增量及对应关系可知，在完成 L_1选定后即可实现对剩余参数的确定，因此以取种槽口左右端面上沿距离 L_1表示取种槽口整组尺寸，对应的各取种槽口尺寸如表 4 所示。

表 4 取种槽口尺寸

Tab. 4 Seed extraction slot size mm

L_1	L_2	L_3	L_4
22.59	9.09	18.35	22.59
23.00	9.50	18.57	23.00
24.00	10.50	19.10	24.00
25.00	11.50	19.64	25.00
25.41	11.91	19.86	25.41

在 5 种作业速度 4.34、6.00、10.00、14.00、15.66 km/h 时，由式(34)求得对应排种盘转速分别为 18.27、25.25、42.09、58.92、65.91 r/min，均在风压 -6 kPa 下开展试验。

4.3 试验结果与分析

试验结果如表 5 所示。表中 X_1、X_2 为编码值。为更有效地对试验结果进行分析，利用 Design-Expert 13.0 软件获得各性能指标受取种槽口尺寸及作业速度影响的响应曲面，如图 14 所示。

表 5 回归正交旋转试验设计与结果

Tab. 5 Regression orthogonal test results

序号	因素		合格指数	重播指数	漏播指数	破损指数
	取种槽口尺寸 X_1	作业速度 X_2	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/%
1	-1.414	0	90.7	2.4	6.9	0.35
2	-1	-1	93.0	2.8	4.2	0.24
3	-1	1	87.6	2.7	9.7	0.49
4	0	-1.414	95.4	3.6	1.0	0.05
5	0	0	94.5	2.5	3.0	0.23
6	0	0	94.6	2.8	2.6	0.18
7	0	0	93.4	3.2	3.4	0.24
8	0	0	94.8	2.5	2.7	0.21
9	0	0	93.7	3.3	3.0	0.23
10	0	1.414	90.5	2.5	7.0	0.63
11	1	-1	94.3	5.4	0.3	0.06
12	1	1	95.5	3.0	1.5	0.40
13	1.414	0	94.8	4.5	0.7	0.05

对表 5 的试验结果展开方差分析，得出粒距合格指数、重播指数、漏播指数以及破损指数的二次回归模型为

$$\begin{cases} Y_1 = -0.79X_1^2 - 0.69X_2^2 + 1.65X_1X_2 + 1.87X_1 - 1.39X_2 + 94.20 \\ Y_2 = 0.35X_1^2 + 0.15X_2^2 - 0.58X_1X_2 + 0.73X_1 - 0.51X_2 + 2.86 \\ Y_3 = 0.44X_1^2 + 0.54X_2^2 - 1.07X_1X_2 - 2.61X_1 + 1.90X_2 + 2.94 \\ Y_4 = -0.002X_1^2 + 0.07X_2^2 + 0.02X_1X_2 - 0.09X_1 + 0.18X_2 + 0.22 \end{cases} \tag{35}$$

对试验结果展开显著性分析，方差分析如表 6 所示。由表 6 可知，各回归模型均显著，所拟合回归方程同实际都相符合，可准确体现取种槽口尺寸及作业速度同各性能指标间的关系，回归模型均能有效实现试验结果的预测。

通过 Design-Expert 13.0 软件，在作业速度为 12 km/h 时，以最大粒距合格指数为条件做寻优处理，得到取种槽口尺寸 L_1为 25.71 mm，粒距合格指

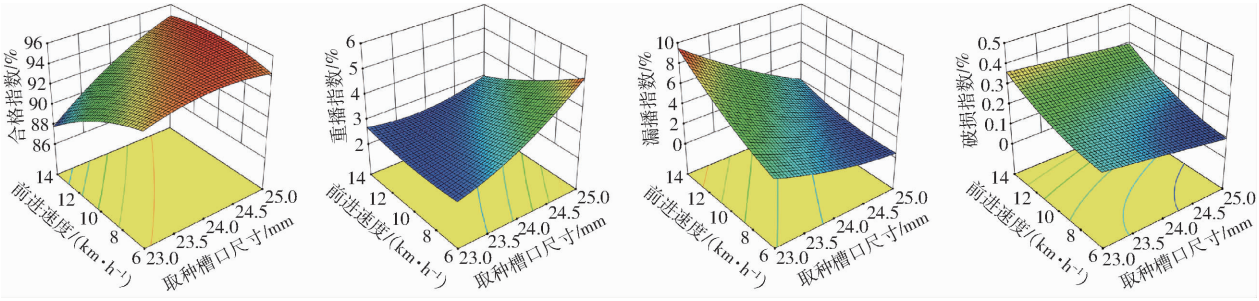


图 14 响应曲面

Fig. 14 Response surface

表 6　方差分析

Tab. 6　Analysis of variance

变异来源	Y_1		Y_2		Y_3		Y_4	
	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	21.41	0.000 4	15.37	0.001 2	58.35	<0.000 1	35.93	<0.000 1
X_1	49.17	0.000 2	38.39	0.000 4	174.84	<0.000 1	31.49	0.000 8
X_2	27.08	0.001 2	18.33	0.003 7	92.58	<0.000 1	129.93	<0.000 1
X_1X_2	19.04	0.003 3	11.79	0.010 9	14.85	0.006 3	1.06	0.337 8
X_1^2	7.54	0.028 6	7.65	0.027 9	4.25	0.078 1	0.016 4	0.901 6
X_2^2	5.75	0.047 6	1.42	0.272 5	6.43	0.039 0	16.75	0.004 6
失拟	2.22	0.227 7	0.497 3	0.703 7	6.08	0.056 9	6.50	0.051 1

注：$0.01 < P < 0.05$ 表示差异显著，$0.001 < P < 0.01$ 表示差异非常显著，$P < 0.001$ 表示差异极显著。

数为 95.6%。在作业速度为 10 km/h 时，以最大粒距合格指数为条件做寻优处理，得到取种槽口尺寸 L_1 为 25.19 mm，粒距合格指数为 95.32%。在作业速度为 8 km/h 时，以最大粒距合格指数为条件做寻优处理，得到取种槽口尺寸 L_1 为 24.67 mm，粒距合格指数为 95.07%。在作业速度为 6 km/h 时，以最大粒距合格指数为条件做寻优处理，得到取种槽口尺寸为 24.14 mm，粒距合格指数为 94.92%。因作业速度为 14 km/h 时，破损指数高于 0.5%，已不符合国家标准中精密播种机播种粒距为 100 ~ 200 mm 时的播种要求，因此该速度不予分析。

由式(14)可知，L_1 应小于 25.41 mm，且其数值越大，高速作业性能越佳，同时为便于对 L_2、L_2、L_3 取值，L_1 最终取 24.00 mm。此时求得速度 6、8、10、12 km/h 各性能指标如表 7 所示。

表 7　不同速度条件下性能指标

Tab. 7　Performance indicators under various speed conditions　%

速度/(km·h^{-1})	合格指数	重播指数	漏播指数	破损指数
6	94.90	3.52	1.58	0.11
8	94.72	3.15	2.13	0.15
10	94.20	2.86	2.94	0.22
12	93.33	2.64	4.02	0.32

由表 7 可知，当取种槽口尺寸 L_1 = 24.0 mm，作业速度在 6 ~ 12 km/h 区间时，粒距合格指数不小于 93.33%，重播指数不大于 3.52%，漏播指数不大于 4.02%，破损指数不大于 0.32%，均具备良好的作业性能，L_1 取 24.00 mm 时，对应的 L_2 为 10.50 mm，L_3 为 19.10 mm，L_4 为 24.00 mm。

5　结论

(1)设计了驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器，通过理论分析验证了结构的合理性，根据种子物料特性对排种盘中各关键参数进行了初步确定。

(2)以种群运动速度、种子数量及漏充指数作为指标，通过离散元仿真分析软件 EDEM 对搅种凹槽尺寸参数进行了优化，结果表明：种群在搅种凹槽深度 3 mm、基圆半径 70 mm 时，运动速度最大，数量最少，且漏充指数最低，搅种凹槽的导种以及扰种性能最佳。

(3)通过台架试验以取种槽口尺寸和作业速度进行了二因素五水平试验，并构建了各性能指标与取种槽口尺寸及作业速度的回归方程，试验结果表明各性能指标均受二者显著影响，当取种槽口左右端面上沿距离为 24.00 mm、取种槽口深度为 10.50 mm、取种槽口左右端面下沿距离为 19.10 mm、排种盘外周到取种槽口后端面距离为 24.0 mm、作业速度为 6 ~ 12 km/h、负压为 -6 kPa 时，粒距合格指数不小于 93.33%，重播指数不大于 3.52%，漏播指数不大于 4.02%，破损指数不大于 0.32%。

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]　STEFFEN R，WOLFF R，ILTIS R，et al. Effect of two seed treatment coatings on corn planter seeding rate and monitor accuracy [J]. Applied Engineering in Agriculture，1999，15(6)：605 - 608.

[3]　ESS D R，HAWKINS S E，YOUNG J C，et al. Evaluation of the performance of a belt metering system for soybeans planted with a grain drill[J]. Applied Engineering in Agriculture，2005，21(6)：965 - 969.

[4]　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 gas-suction high-speed precision seeder for corn with auxiliary filling plate

[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)
[5] YANG Li, YAN Bingxin, CUI Tao, 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.
[6] 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)
[7] 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(5):44 - 53.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44 - 53. (in Chinese)
[8] 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]. 农业机械学报,2012,43(增刊):54 - 58,89.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54 - 58, 89. (in Chinese)
[9] 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]. 农业机械学报,2017,48(7):78 - 86.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78 - 86. (in Chinese)
[10] 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 Xiaoqing, 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)
[11] 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)
[12] 李玉环,魏亚男,杨丽,等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):43 - 53.
LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 43 - 53. (in Chinese)
[13] 耿端阳. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
[14] 陆永光,吴努,林德志,等. 花生籽粒恢复系数及摩擦系数研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):386 - 390.
LU Yongguang, WU Nu, LIN Dezhi, et al. Study on recovery coefficient and friction coefficient of peanut seeds[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2016, 44(9): 386 - 390. (in Chinese)
[15] 郭丽峰,刘宏新,李彦龙,等. 定量容腔可变的立式圆盘排种器机理研究与结构设计[J]. 农机化研究,2016,38(9):141 - 146.
GUO Lifeng, LIU Hongxin, LI Yanlong, et al. Mechanistic research and structural design of vertical disc seed rower with variable fixed volume cavity[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 141 - 146. (in Chinese)
[16] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):29 - 37,46.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29 - 37, 46. (in Chinese)
[17] 侯守印,邹震,魏志鹏,等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):77 - 86,108.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77 - 86, 108. (in Chinese)
[18] 高筱钧,徐杨,贺小伟,等. 气送式高速玉米精量排种器导流涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(11):42 - 52.
GAO Xiaojun, XU Yang, HE Xiaowei, et al. Design and experiment of diversion turbine of air-assisted high speed maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 42 - 52. (in Chinese)
[19] 赵立军,颜珊珊,王宇杰,等. 气吸式单、双排精密通用排种器的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):136 - 141.
ZHAO Lijun, YAN Shanshan, WANG Yujie, et al. Design and experiment of air-priming single and double-row precision universal seed disperser[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 136 - 141. (in Chinese)
[20] 李秀. 胡萝卜精密播种机的设计与试验[D]. 青岛:青岛农业大学, 2017.
LI Xiu. Design and experiment of precision seeder for carrot[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[21] 刘兵. 花生育种小区排种器的设计与试验研究[D]. 青岛:青岛农业大学, 2021.
LIU Bing. Design and experimental research on the breeding plot seed metering device of peanut[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2021. (in Chinese)

(下转第 149 页)

LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 18 – 26. (in Chinese)

[21] 张恬,赵德安. 图像处理技术在联合收获机夹带损失检测中的应用[J]. 农机化研究,2009,31(4):70 – 72.
ZHANG Tian, ZHAO Dean. Application of image processing technology in entrainment loss detection in combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 70 – 72. (in Chinese)

[22] 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(6):167 – 171.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167 – 171. (in Chinese)

[23] 王卓,车东,白晓平,等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):100 – 108.
WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 100 – 108. (in Chinese)

[24] 刘新怡,陈进,张西良. 基于 STM32 的联合收获机清选损失监测装置的研制[J]. 农机化研究,2020,42(10):200 – 204,210.
LIU Xinyi, CHEN Jin, ZHANG Xiliang. Development of STM32-based combine harvester cleaning loss monitoring device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 200 – 204, 210. (in Chinese)

[25] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报,2019,50(10):1 – 16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1 – 16. (in Chinese)

[26] 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 基于模态分析的联合收获机籽粒损失监测传感器结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(4):22 – 29.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Structure optimization and performance experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester in using modal analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 22 – 29. (in Chinese)

(上接第 70 页)

[22] 朱彤. 气力与机械充种复合式花生精量排种器的研究[D]. 石河子:石河子大学,2021.
ZHU Tong. Research on pneumatic and mechanical seed filling composite peanut precision seed discharger[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. (in Chinese)

[23] 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 pneumatic combination hole type corn precision seed discharger[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[24] 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 combination hole seeder based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)

[25] 廖庆喜,高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报,2003,34(4):57 – 59.
LIAO Qingxi, GAO Huanwen. Experimental study on corn seed damaging in a horizontal plate precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 57 – 59. (in Chinese)

[26] 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)