

## 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器设计与试验

张学军<sup>1,2</sup>, 陈 勇<sup>1</sup>, 史增录<sup>1,2</sup>, 靳 伟<sup>1</sup>, 张海涛<sup>1</sup>, 付 浩<sup>1</sup>, 王堆金<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;  
3. 新疆天诚农机具制造有限公司, 铁门关 841007)

**摘 要:** 针对棉花竖直圆盘穴播排种器充种性能差、破损率高等问题, 结合棉花穴播农艺, 设计了一种双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器。介绍了穴播排种器结构组成及工作原理, 设计计算了取种盘结构参数, 对充种区和转运区临界状态棉种进行受力分析, 建立力学模型, 分析说明了窝孔安置角和取种盘转速对充种性能的影响, 得出棉种临界破损状态时, 取种盘和种子间隔圈的最小配合间隙为 1.47 mm。以取种盘转速、窝孔安置角、排种间隙为试验因素, 单粒率、破损率为响应指标, 利用穴播器试验台开展响应面试验, 并利用 Design-Expert8.0 进行多目标寻优。结果表明, 3 个因素对单粒率的影响大小顺序依次为窝孔安置角, 排种间隙, 取种盘转速。对破损率影响的大小顺序依次为取种盘转速, 排种间隙, 窝孔安置角。最优排种组合为取种盘转速 23.9 r/min, 窝孔安置角 31.7°, 排种间隙 2.08 mm。对最优排种组合进行田间验证试验, 分别将取种盘转速、窝孔安置角、排种间隙修定为 24 r/min、32°、2.0 mm, 得到单粒率为 94.3%, 破损率 0.09%, 试验指标满足国家标准, 该研究可为棉花双仓转盘式竖直圆盘穴播排种器的结构设计、优化提供参考。

**关键词:** 农业机械; 试验; 优化; 穴播排种器; 棉花; 精量穴播

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.004

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0027-10

张学军, 陈勇, 史增录, 等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 27-36.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.004 <http://www.tcsae.org>

Zhang Xuejun, Chen Yong, Shi Zenglu, et al. Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 27-36. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.004 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

棉花机械化精量穴播可省工、节种、提高作业效率, 是实现棉花机械化种植的重要途径<sup>[1]</sup>, 排种器作为精量播种的核心部件<sup>[2]</sup>, 其排种性能是影响精量化播种的关键<sup>[3-5]</sup>。竖直圆盘排种器具有结构紧凑, 维护方便等特点<sup>[6]</sup>, 在国内外精密排种器上广泛使用<sup>[7-8]</sup>, 但竖直圆盘排种器存在充种性能差、破损率高等问题<sup>[9]</sup>。为提高排种器充种性能, 降低破损率, 尚家杰<sup>[10]</sup>设计了一种立式浅盆形排种盘, 利用重力和离心力增加填充力, 配合容纳式护种板可有效地提高充种率, 降低破损率。张翔等<sup>[11]</sup>针对清种区种子卡滞造成磕种问题, 通过增设辅助充种块, 改用柔性橡胶护种板, 将破损率降低了 0.6%。Ryu 等<sup>[12]</sup>研究发现软毛刷清种可降低破损率。罗锡文等<sup>[13-14]</sup>针对固定护种板相对摩擦力大、易伤种问题, 设计了一种同步弹性护种装置, 将破损率稳定在 0.3%。王业成等<sup>[15]</sup>设计了一种利用内、外环摩擦力, 增加种子法向填充力的摩擦型立式圆盘精密排种器, 通

过控制压板阻力, 降低了种子破损率。周勇等<sup>[16]</sup>针对排种阶段出现剪切伤种问题, 建立了剪切伤种模型, 确定了剪切伤种区域, 通过约束型孔长度, 错开剪切区域, 将破损率控制在 0.17%。王冲等<sup>[17-18]</sup>通过对柔性同步皮带支撑力研究, 得出同步临界条件, 避免了相对运动, 将种子破损率降低 0.5%。周建来等<sup>[19]</sup>针对清种刀伤种问题改进了一款立式圆盘排种器, 在取种盘与清种刀配合清种一侧设计了环状容种凹槽, 并通过调整清种刀位置, 使种子破损率降到 2% 以下。上述研究表明, 竖直圆盘排种器碎种的主要原因是取种盘转动时产生的摩擦力与剪切力, 通过改进取种盘与护种板结构、添加柔性护种装置等减小摩擦力的方法, 对提高竖直圆盘排种器充种性能, 降低种子破损率均有促进作用, 但没有从结构设计上改变携种方式。

借鉴以上研究, 本文基于竖直圆盘排种器工作原理, 结合棉花精量穴播农艺要求, 设计了一种双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器, 采用双仓分离设计, 利用独立仓室携种代替摩擦携种, 减少作业过程中相对运动部件对棉种的损伤。依据单粒取种原则确定了取种方式, 设计计算取种盘结构参数。着重分析仓转阶段棉种受力情况, 通过建立力学模型, 得出理论最小排种间隙。根据理论设计试制了一台穴播排种器样机, 通过台架试验与田间验证试验, 以检验穴播排种器性能。

收稿日期: 2021-07-11 修订日期: 2021-09-24

基金项目: 自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)项目(2021E02055); 自治区“天山青年计划”项目(2020Q015); 国家自然科学基金(52105278; 52005425)

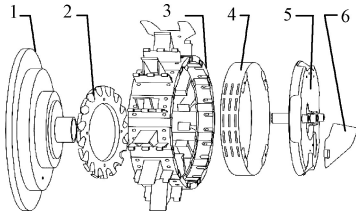
作者简介: 张学军, 博士, 教授, 研究方向为农业机械化装备研究。

Email: tucc@163.com

## 1 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器的结构与工作原理

### 1.1 穴播排种器结构

双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器主要由为动盘、取种盘、投种仓总成、种子间隔圈、芯盘、进种口等六大部分组成,其结构示意图如图1。

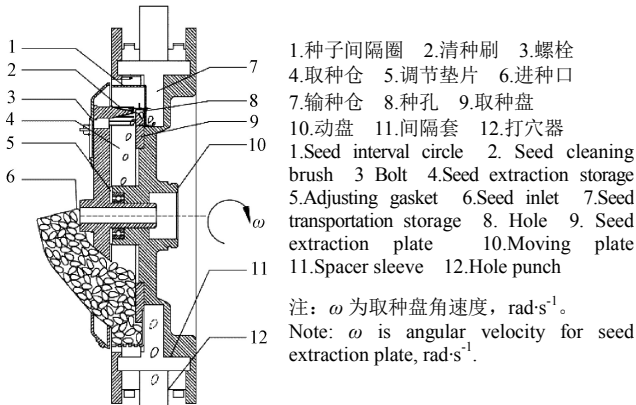


1.动盘 2.取种盘 3.投种仓总成 4.种子间隔圈 5.芯盘 6.进种口  
1.Moving plate 2. Seed extraction plate 3.Seed storage assembly 4.Seed interval circle 5.Core plate 6. Seed inlet

图1 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器结构图

Fig.1 Structure diagram of double-chamber rotary cotton vertical disc hole seeding and metering device

六大部件通过配合又将双仓转盘式竖直圆盘穴播排种器分为双仓室结构,其结构示意图如图2所示,其中种子间隔圈和取种盘配合组成取种仓。动盘、间隔套和种子间隔圈组成输种仓,输种仓又由间隔套隔成独立投种仓。双仓由种子间隔圈隔开,取种盘窝孔与投种仓同步转动,一一对应。排种器工作流程根据仓室分为两个部分。在取种仓内有充种区、清种区;在输种仓内有输种区、投种区;双仓通过转运区完成递种。



注:  $\omega$  为取种盘角速度,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。  
Note:  $\omega$  is angular velocity for seed extraction plate,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

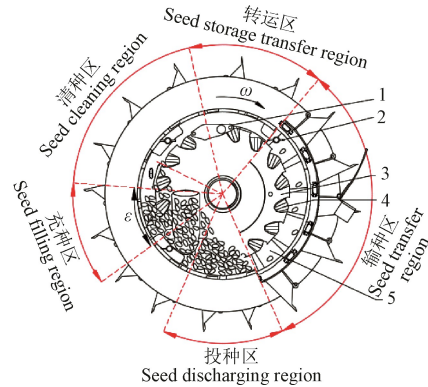
图2 排种器双仓结构示意图

Fig.2 Structure diagram of double storage of seed metering device

### 1.2 穴播排种器工作原理

穴播排种器工作原理如图3所示。排种器在工作前,种子通过种口进入取种仓,堆积形成静置种群。机具前进,取种盘随穴播排种器旋转至种群,导种槽在种群内形成新的空白空间,种子在重力、种间作用力以及离心力共同作用下迅速填补空间,棉种沿导种槽涌向窝孔,与此同时进入充种区的窝孔开始攫取棉种;当窝孔离开充种区后,未进入窝孔种子因重力掉落,等待下次充种,未掉落棉种在清种刷作用下滑落完成清种;窝孔进入转

运区后,窝孔内种子沿窝孔内壁滑入由取种盘和种子间隔圈组成的排种容腔内,棉种在种子间隔圈轴向支持力作用下保持静止,待轴向支持力消失后,排种容腔内棉种掉入对应投种仓;投种仓进入投种区后,仓内种子沿着间隔套滑入鸭嘴,待鸭嘴打开后,棉种掉入种穴完成排种。



1.清种刷 2.调节螺栓 3.取种盘 4.导种槽 5.输种仓  
1. Seed cleaning brush 2. Adjusting bolt 3. seed extraction plate 4. Seed guide slot 5. Seed transportation warehouse

注:  $\varepsilon$  为充种区的弧度,  $\text{rad}$ 。  
Note:  $\varepsilon$  is the arc of the seed filling region,  $\text{rad}$ .

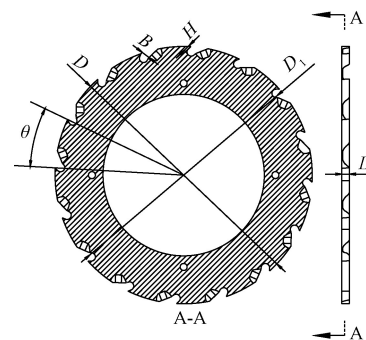
图3 排种器工作原理

Fig.3 The working principle of the seed metering device

## 2 取种盘结构参数设计

### 2.1 取种直径与取种窝孔数

取种盘结构示意图如图4所示,其中取种盘直径  $D$  是穴播排种器基础结构参数,其影响穴播排种器整体结构尺寸,影响充种性能。在穴播排种器线速度一定条件下,取种盘直径越大,取种窝孔划过种层时间越长,窝孔取种机会越多,取种率越高。但在窝孔数一定条件下,取种盘直径过大,穴播排种器无法满足密植农艺要求。



注:  $D$  为取种盘直径,  $\text{mm}$ ;  $D_1$  为窝孔中心直径,  $\text{mm}$ ;  $B$  为窝孔宽度,  $\text{mm}$ ;  $H$  为窝孔高度,  $\text{mm}$ ;  $L$  为窝孔长度,  $\text{mm}$ ;  $\theta$  为相邻取种孔中心对应角度,  $(^\circ)$ 。  
Note:  $D$  is diameter of seed extraction plate,  $\text{mm}$ ;  $D_1$  is the center diameter of the hole,  $\text{mm}$ ;  $B$  is the width of the hole,  $\text{mm}$ ;  $H$  is the height of the hole,  $\text{mm}$ ;  $L$  is the length of the hole,  $\text{mm}$ ;  $\theta$  is corresponding angles for the centers of two adjacent seed holes,  $(^\circ)$ .

图4 取种盘结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the seed extraction plate structure

为研究取种盘各参数对取种时间影响,本文选取单个窝孔建立取种时间  $t$  的方程。

$$t = \frac{\varepsilon}{\omega} \quad (1)$$

式中  $\omega$  为取种盘角速度, rad/s,  $\omega = \pi n / 30$ ,  $n$  为取种盘转速, r/min;  $\varepsilon$  为相邻取种孔中心对应弧度,  $\varepsilon = \theta \pi / 180$ , rad,  $\theta$  为相邻取种孔中心对应圆心角度, ( $^{\circ}$ )。

整理可得取种时间  $t$  为

$$t = \frac{\theta}{6n} \quad (2)$$

其中  $n = 60v_r / zs$ ,  $v_r$  穴播排种器前进速度, m/s;  $s$  相邻窝孔中心弧长, m;  $z$  窝孔数量。

带入式 (2) 整理可得

$$t = \frac{zs\theta}{360v_r} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 当相邻取种孔中心对应圆心角度  $\theta$  和穴播排种器前进速度  $v_r$  一定时, 取种时间  $t$  只和窝孔数  $z$  有关。相同窝孔数, 取种盘直径越大, 相邻窝孔中心对应弧长越大, 取种时间越长, 取种效果越好。但由图 3 可知, 取种盘直径增大时, 穴播器直径 (定嘴尖之间距离) 也随之增加, 考虑穴播器与播种机机架适配性, 穴播器直径不宜过大。测量市场上穴播器结构尺寸作为参考, 测得穴播器直径为 420 mm, 种圈内径为 280 mm, 因此取种盘直径应小于 280 mm。查阅相关文献可知型孔轮式取种盘直径一般在 80~260 mm<sup>[20]</sup>, 本文取种盘直径设计为 220 mm。

由式 (3) 可知, 相同直径的取种盘窝孔数目越少, 取种窝孔在充种区内取种时间越长, 效果越好。但取种孔数过少, 使单位面积株数小于密植农艺要求<sup>[21]</sup>, 无法保证产量。因此, 在取种盘直径确定条件下, 取种盘上窝孔数因满足每单位面积播种数大于最小收获单位面积株数要求。确定窝孔数量<sup>[22]</sup>为

$$z = \frac{\pi D_1 \cdot v_m}{x \cdot v_r \cdot (1-c)} \quad (4)$$

式中  $v_r = \pi D_1 n / 60$ ,  $v_m$  为拖拉机作业速度, m/s;  $c$  为穴播轮滑移系数;  $x$  为株距, mm。

整理得

$$z = \frac{60 \cdot v_m}{x \cdot n \cdot (1-c)} \quad (5)$$

根据窝孔中心对应的直径  $D_1$  为 208 mm; 拖拉机行进速度在 0.5~1.5 m/s<sup>[16]</sup>, 此处取  $v_m$  为 0.8 m/s; 株距  $x_1$  取 0.09 m (穴播株距在 0.05~0.11 m 之间变化); 台架试验阶段穴播器滑移系数  $c$  取 0%, 取种轮转速取 33 r/min; 得到窝孔数 16。

## 2.2 窝孔结构参数确定

取种是精量播种的第一步, 对于取种窝孔设计是精量取种盘设计关键环节。取种窝孔形状取决于种子形状、种子尺寸、穴粒数要求等<sup>[23]</sup>。本次设计选用新疆地区广泛种植“新陆早 68”号, 随机选取 1 000 粒棉种测量三轴尺寸, 测得平均长  $l_0$ 、宽  $b_0$ 、厚  $h_0$  尺寸为 9.05 mm×4.86 mm×4.69 mm。以此作为窝孔设计依据。由文献可知单粒穴播取种方式有侧卧式和平置式两种<sup>[24]</sup>。

平置式取种, 棉种完全平躺进窝孔内, 窝孔直径大, 易充种。但棉种宽度数值波动大, 第二粒种子容易借助宽度方向向间隙侧躺进去, 造成多粒取种。侧卧式厚度数值波动小, 单粒取种准确性较高, 故本文选用侧卧式取种。设取种窝孔长度为  $L$ 、窝孔宽度为  $B$ 、窝孔高为  $H$ , 如图 4 所示。

根据精量取种要求, 窝孔结构尺寸应满足

$$\begin{cases} L = l_0 + \Delta l \\ b_{\min} \leq B = h_0 + \Delta b \leq 2h_{\min} \\ \frac{1}{3}l_{\max} \leq H \leq b_0 - \Delta h \end{cases} \quad (6)$$

式中  $b_{\min}$  为测量棉花种子最小厚度, 4.75 mm;  $h_{\min}$  为测量棉花种子最小宽度, 4.62 mm;  $l_{\max}$  为测量棉花种子最大长度, 9.13 mm;  $\Delta l$  为窝孔长度间隙, mm;  $\Delta b$  为窝孔宽度间隙, mm;  $\Delta h$  为窝孔深度间隙, mm;

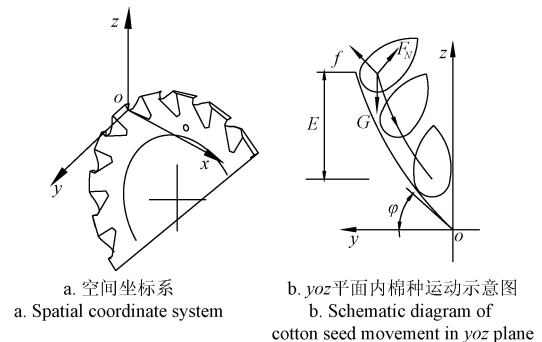
由式 (6) 可知, 窝孔的宽度即棉种平均厚度  $h_0$  与宽度间隙  $\Delta b$  之和应大于棉种最小宽度  $h_{\min}$ , 同时小于棉种最小厚度的二倍, 避免第二粒种子借助宽度方向进入。对于窝孔高度  $H$ , 应满足棉种重心能够完全进入窝孔, 查阅资料<sup>[25]</sup>可知棉花种子质心位于大径底端向上三分之一处, 因此窝孔高度  $H$  应大于测量棉种最大长度  $h_{\max}$  的三分之一, 同时小于测量棉种最小厚度的二倍, 保证棉种单粒直立进入, 避免双粒平躺进入。

结合棉种三轴平均尺寸带入公式后最终确定窝孔尺寸长  $L$ 、宽  $B$ 、高  $H$  为 9.2、5.1、4.7 mm。

## 2.3 窝孔排种角设计

取种盘旋转到转运区时, 窝孔内种子沿排种内壁滑入由取种盘和种子间隔圈组成的排种容腔内, 为确保种子能够快速滑入排种容腔, 防止棉种破损, 需对窝孔内壁排种角  $\varphi$  进行设计计算。

选取容腔内棉种作为研究对象, 建立如图 5a 所示的空间坐标系  $xyz$ 。分析棉种在  $yo$  平面内滑落轨迹, 建立如图 5b 所示棉种滑落示意图, 运用最速降线原理<sup>[26]</sup>, 求解窝孔内壁排种角。假设种子开始下滑速度为  $v_1$ , 种子脱离窝孔前速度为  $v_2$ , 下落高度为  $E$ , 下落过程摩擦力始终存在, 将下落轨迹简化为  $z = ay^2$  抛物线, 如图 5b 所示。



注:  $E$  为棉种下落高度, mm;  $F_N$  为排种内壁对棉种支持力, N;  $\varphi$  为排种内壁角, ( $^{\circ}$ );  $G$  为棉种重力, N;  $f$  为种子与内壁间摩擦力, N。  
Note:  $E$  is the drop height of the cotton seed, mm;  $F_N$  Supporting power of the inner wall of the seeding to the cotton seed, N;  $\varphi$  is the inner angle of the seeding, ( $^{\circ}$ );  $G$  is the gravity of cotton seed, N;  $f$  is the friction between the seed and the inner wall, N.

图 5 棉种滑落示意图  
Fig.5 Schematic diagram of cotton seed slipping

对  $yoz$  平面内棉种滑落状态进行分析, 则有

$$\begin{cases} mg \cos \phi = F_N \\ f = F_N \tan \rho \end{cases} \quad (7)$$

式中  $f$  为棉种与取种盘间摩擦力,  $N$ ;  $F_N$  为排种内壁对棉种支持力,  $N$ ;  $\rho$  为种子与内壁摩擦角, ( $^\circ$ );  $m$  为棉种质量,  $g$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

假设种子滑落过程中摩擦力做功为  $w$ , 则  $z' = \tan \phi$  水平

位移为  $\sqrt{\frac{E}{a}}$ , 则摩擦力做功可表示为

$$w = \int_0^{\sqrt{\frac{E}{a}}} mg \tan \rho dy = mg \tan \rho \sqrt{\frac{E}{a}} \quad (8)$$

根据能量守恒定理可得

$$\frac{1}{2} mv_1^2 + mgE = \int f ds + \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (9)$$

整理 (8)、(9) 式得

$$v_1^2 + 2gE = 2g \tan \rho \sqrt{\frac{E}{a}} + v_2^2 \quad (10)$$

整理 (10) 式后将  $z = ay^2$  代入可得

$$z = E \left( \frac{2g \tan \rho}{v_2^2 - v_1^2 + 2gE} \right)^2 y^2$$

将  $z' = \tan \phi$  代入上式可得

$$\phi = \arctan \left( \left( 2E \left( \frac{2g \tan \rho}{v_2^2 - v_1^2 + 2gE} \right)^2 \right) y \right) \quad (11)$$

由上式可知内壁  $\phi$  角与初始速度成反比; 与内壁摩擦角  $\rho$  成正比, 代入参数  $E$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $y$  可确定  $\phi$  角。在实际排种过程中棉种滑落至排种容腔时为静止状态, 因此  $v_1=0$ , 摩擦角取棉种在尼龙塑料上自流角。拖拉机前进速度为  $0.5 \sim 1.5$  m/s, 转换为穴播排种器转速为  $18 \sim 50$  r/min, 转换为窝孔中心线速度为  $0.063\pi \sim 0.174\pi$  m/s。参考已有研究可知圆盘上一点的初速度近似等于  $1/4$  线速度<sup>[27]</sup>,  $v_2$  取最小值  $0.063\pi$  m/s、 $E$  取  $7$  mm、 $y$  取  $4$  代入 (11) 式得  $\phi$  最小值为  $29.2^\circ$ , 当初速度取最小值, 内壁摩擦角取值大于棉种在尼龙盘上滑动摩擦角最大值时,  $\phi$  值大于  $48.7^\circ$ 。为确保棉种及时滑落, 内壁角取大值较好, 本文取内壁角  $\phi$  为  $48^\circ$ 。

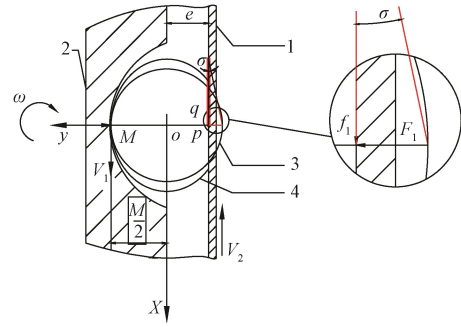
#### 2.4 排种间隙确定

棉种在向下运动过程中回转半径逐渐变小, 摩擦力变大, 棉种在摩擦力和挤压力共同作用下容易发生碎裂。为探究取种盘和种子间隔圈之间的排种间隙与棉种破损的关系, 在  $xoy$  平面内对棉种进行受力分析, 转运区棉种受力示意图, 如图 6 所示。

由于种子间隔圈的挤压, 滑落棉种会产生一定变形, 依据胡克定律, 棉种变形压力为

$$F = EA \frac{\Delta q}{q} \quad (12)$$

式中  $\Delta q$  为棉种形变后径向伸长量, mm;  $F$  为棉种变形压力, N;  $E$  为棉种弹性模量, MPa;  $A$  为棉种横截面积,  $mm^2$ 。



1. 种子间隔圈 2. 取种盘 3. 棉种未受压状态 4. 棉种受压状态

1. Seed interval circle 2. Seed extraction plate 3. Uncompressed state of cotton seed 4. Compressed state of cotton seed

注:  $F_1$  为间隔圈对种子施加压力, N;  $f_1$  为种子间隔圈与棉种间摩擦力, N;  $q$  为棉种和种子间隔圈接触点到  $x$  轴负方向棉种顶点处水平距离, mm;  $p$  为棉种受力后径向压缩量, mm;  $M$  为棉种直径, mm;  $e$  为取种盘和种子间隔圈之间的间隙, mm;  $\sigma$  为棉种受力前后与隔种圈接触点夹角, ( $^\circ$ );  $V_1$  为取种盘运动方向;  $V_2$  为种子间隔圈运动方向。

Note:  $F_1$  put pressure on the seed for the seed interval circle, N;  $f_1$  is the friction between the seed interval circle and the cotton seed, N;  $q$  is the horizontal distance between the contact point of the cotton seed and the seed interval circle to the apex of the cotton seed in the negative direction of the  $x$ -axis, mm;  $p$  is the radial compression of the cotton seed after being stressed, mm;  $M$  is the diameter of cotton seed, mm;  $e$  is the gap between the seed extraction plate and the seed interval circle, mm;  $\sigma$  is the angle between the cotton seed and the contact point of the seed interval circle before and after the force is applied, ( $^\circ$ );  $V_1$  is the direction of movement of the seed extraction plate;  $V_2$  is the movement direction of the seed interval circle.

图 6 棉花种子转运区受力分析图

Fig.6 The force analysis diagram of the cotton seed storage and transfer area

由图 6 可知, 影响棉种径向变形参数为

$$\begin{cases} \Delta q = \frac{p}{\tan \sigma} - \frac{M}{2} \\ q = \frac{p}{\tan \sigma} \\ p = \frac{M}{2} - e \end{cases} \quad (13)$$

竖直方向上, 忽略重力作用, 种子间隔圈和取种盘坡壁对棉种压力  $F_1$  和摩擦力  $f$  为

$$\begin{cases} F_1 = 2F \sin \sigma \\ f_1 = \mu F_1 \end{cases} \quad (14)$$

为保证种子间隔圈不碾伤棉种, 种子间隔圈对棉种正压力应满足

$$\begin{cases} F_1 \leq F_{1\max} \\ f_1 \geq F_{\tau\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $F_{1\max}$  为棉种径向破损压力, N;  $F_{\tau\max}$  为棉种破坏剪切力, N。

整理式 (14)、(15) 可得

$$e \geq \frac{M}{2} - \frac{2pqEA\mu \sin \sigma - pqF_{\tau\max}}{M\mu EA \sin \sigma} \quad (16)$$

取棉种直径  $M$  为  $4.52$  mm, 查阅文献<sup>[27]</sup>可得弹性模量  $E$  为  $9.15$  MPa; 挤压破坏力  $F_1$  取值范围  $46.52 \sim 48.51$  N; 剪切破坏力为  $F_\tau$  取值范围为  $36.6 \sim 37.68$  N; 带入式 (16) 后得间隙  $e$  为  $1.47$  mm。考虑间隙过大使窝孔长度增加, 导致第二粒种子质心进入窝孔, 给后续清种带来麻烦, 因此间隙  $e$  取值小于  $3$  mm。结合间隙实际调控方法最终排种间隙调整范围为  $1.5 \sim 2.5$  mm。



## 2.5 窝孔安置角与极限充种转速

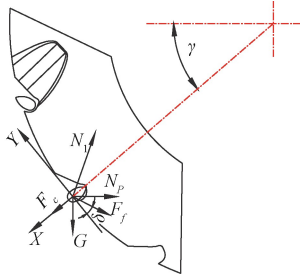
### 2.5.1 窝孔安置角设计

窝孔从种群中攫取种子是一个复杂过程<sup>[28-29]</sup>，因此研究窝孔充种过程，分析填充机理对于提高充种性能尤为重要。由于窝孔随取种盘转动，窝孔时刻处于运动状态，孔口棉种受重力、摩擦力、惯性力的合力作用，故选取孔口棉种进行受力分析。将棉种视为材质均匀刚体，以几何质心为中心建立平面直角坐标系，以取种盘中心指向棉种质心方向为  $x$  轴，过中心垂直  $x$  轴建立  $y$  轴，辅助坐标系如图 7 所示。

对孔口棉种受力分析， $y$  轴方向棉种受力应满足受力平衡，如下式所示：

$$N_1 \sin \delta = N_p \sin \gamma + F_f \cos \delta + G \cos \gamma \quad (17)$$

式中  $N_1$  为孔口内壁对棉种支持力，N； $N_p$  为孔口棉种对质心侧压力，N； $F_f$  为孔口侧壁与棉种间摩擦力，N； $\delta$  为窝孔安置角，(°)； $\gamma$  为起始充种角，(°)。



注： $F_c$  为种子所受离心力，N； $N_1$  为孔口内壁对棉种支持力，N； $N_p$  为孔口棉种对质心侧压力，N； $F_f$  为孔口侧壁与棉种间摩擦力，N； $\delta$  为窝孔安置角，(°)； $\gamma$  为起始充种角，(°)。

Note:  $F_c$  is the centrifugal force of the seed, N;  $N_1$  is the support force of the inner wall of the orifice to the cotton seed, N;  $N_p$  is the side pressure of the orifice cotton seed on the center of mass, N;  $F_f$  is the frictional force between the side wall of the orifice and the cotton seed, N;  $\delta$  is the Fossa hole placement angle, (°);  $\gamma$  is the initial filling angle, (°).

图 7 孔口棉种受力分析图

Fig.7 Force analysis diagram of orifice cotton seed

$x$  轴方向，棉种若不被甩出，应满足下式

$$F_c + G \sin \gamma \leq F_f \sin \delta + N_p \cos \gamma + N_1 \cos \delta \quad (18)$$

式中  $F_c = m\omega^2 R$ ， $R$  为取种孔中心半径，mm； $\omega = \pi n / 30$ ；

$F_f = \mu_1 N_1$ ， $\mu_1$  棉种与窝孔间摩擦因数； $G = mg$ 。

根据式 (17)、式 (18) 整理得出

$$\gamma \geq \arccos \frac{\omega^2 R a}{g \sqrt{1 + \mu_1^2}} - \arctan \frac{a}{b} \quad (19)$$

式中  $a = \sin \delta - \mu_1 \cos \delta$   $b = \mu_1 \sin \delta + \cos \delta$

由公式 (19) 得知，充种角  $\gamma$  与窝孔安置角  $\delta$ 、取种盘角速度  $\omega$ 、取种盘直径  $D$  等有关。当角速度  $\omega$  一定时，起始充种角  $\gamma$  与窝孔安置角  $\delta$  呈负相关。为确保取种仓剩少量种子时也能充入窝孔，起始充种角  $\gamma$  应小于棉种在尼龙塑料上自流角  $35^\circ$ ，结合取种盘转速，得窝孔安置角  $\delta \leq 42.8^\circ$ 。

### 2.5.2 取种盘极限转速确定

根据台架试验观察发现，当取种盘工作转速过高，窝孔进入清种区后存在“飞种”现象。为保证取种稳定性，对即将抛出窝孔的棉种进行受力分析，以几何质心为中心研究临界状态棉种受力情况，建立受力方程。

$$\begin{cases} G \sin \gamma_{\max} = F_c \\ F_{c \max} = m \omega_{\max}^2 R \\ \omega_{\max} = \frac{\pi n_{\max}}{30} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $\gamma_{\max}$  为最大充填角，(°)； $\omega_{\max}$  为取种盘最大角速度，rad/s； $F_{c \max}$  为最大惯性力，N； $n_{\max}$  为取种盘最大转速，r/min。

整理后得

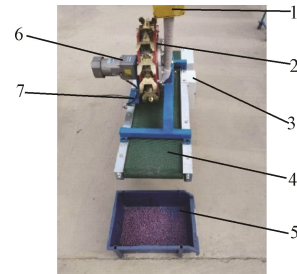
$$n_{\max} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin \gamma_{\max}}{R}} \quad (21)$$

由式 (21) 可知，取种盘临界转速  $n_{\max}$  与取种盘直径、充种角有关。由资料可知取种盘实际达到转速为理论临界转速的 70%~80%<sup>[30]</sup>，即取种盘转速达 48.86~55.84 r/min 时，存在“飞种”现象，因此取种盘转速因小于 48 r/min。

## 3 台架试验

### 3.1 试验条件

试制了一台双仓转盘式竖直圆盘穴播排种器，并开展台架验证试验。试验选用新疆地区普遍种植品种“新陆早 68 号”为试验材料，其千粒质量为 97 g，含水率为 6.5%。试验在穴播器试验台上进行，如图 8 所示。



1.种箱 2.排种器 3.控制台 4.传送带 5.收种箱 6.电机 7.拨杆  
1.Seed box 2. Seed metering device 3.Controller 4.Conveyor belt 5.Seed box 6.Electric motor 7.Toggle lever

图 8 排种器试验台

Fig.8 Seed metering device test bench

### 3.2 评价标准

根据棉花精量穴播农艺要求，每穴一粒即为合格。因此，试验评价标准参照行业标准 NY/Y1143-2006<sup>[31]</sup>和国家标准 GB/T6973-2005<sup>[32]</sup>，选取单粒率  $S_1$  和破损率  $Z$  作为评价指标。计算公式如下：

$$S_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \quad (22)$$

$$Z = \frac{w_p}{w_y} \times 100\% \quad (23)$$

式中  $n_1$  为单粒穴数； $N$  为总共检测穴数； $w_p$  为集种箱中破损样本质量，g； $w_y$  为集种箱中样本质量，g。

试验前对脱绒棉种进行种衣剂漂染, 漂染后棉种呈现紫红色。对出现塌陷、露白、断裂的棉种均统计为破损。台架试验模拟机具前进 50 m, 检出穴播器与集种箱中破损种子称量统计。

3.3 试验因素的确定及控制方法

根据取种盘结构设计, 结合前期实地试验, 选取取种盘转速  $X_1$ 、窝孔安置角  $X_2$ 、排种间隙  $X_3$  为试验因素, 每个因素预设 3 个考察水平, 如表 1 所示。

表 1 试验因素和水平 Table 1 Factors and levels of test			
水平 Levels	取种盘转速 Rotating speed of seed extraction plate $X_1$ /(r·min <sup>-1</sup> )	窝孔安置角 Fossa hole placement angle $X_2$ (°)	排种间隙 Seed discharge gap $X_3$ /mm
-1	20	25	1.5
0	25	30	2.0
1	30	35	2.5

1) 取种盘转速

取种盘通过螺栓紧固在穴播排种器动盘上, 取种盘

转速随机具前进速度变化而变化。此次试验以约翰迪尔 804 快一档小油门速度 (约 2 km/h) 作为基础转速, 转化为穴播器转速约为 25 r/min, 通过调节电机控制转度, 转速分别为 20、25、30 r/min。

2) 窝孔安置角

双仓转盘式竖直圆盘穴播器为一侧取种, 异侧排种。为避免窝孔内棉种提前进入排种容腔, 窝孔安置角与排种内壁保持一定角度, 试验使用取种盘在 3D 打印时, 按等角度预设 25°、30°、35° 三种不同偏置角的取种盘。

3) 排种间隙

由上文可知排种间隙为配合间隙, 排种间隙小, 排种容腔回转半径小, 破损率高。排种间隙大, 不满足精量播种要求。在排种间隙圆整取 1.5 mm 基础上, 通过在芯盘和动盘间添加厚度为 0.5 mm 垫片对间隙进行调控, 间隙分别为 1.5、2.0、2.5 mm。

3.4 试验方案及结果

利用排种器试验台, 开展响应面 (Box-Behenken design) 台架试验, 每次进行 17 组, 每组取 250 穴, 重复 5 次取均值, 根据式 (22)、(23) 计算穴粒数单粒率、破损率。试验结果见表 2。

表 2 试验方案及结果 Table 2 Test design and result					
序号 No.	取种盘转速 Rotating speed of seed extraction plate $x_1$	窝孔安置角 Fossa hole placement angle $x_2$	排种间隙 Seed discharge gap $x_3$	单粒率 Single seed rate $S_1$ /%	破损率 Breakage rate $Z$ /%
1	-1	-1	0	88.47	0.33
2	1	-1	0	88.45	0.42
3	-1	1	0	92.65	0.25
4	1	1	0	91.00	0.40
5	-1	0	-1	92.00	0.33
6	1	0	-1	92.23	0.49
7	-1	0	1	92.00	0.27
8	1	0	1	86.45	0.38
9	0	-1	-1	91.56	0.25
10	0	1	-1	94.65	0.45
11	0	-1	1	88.47	0.38
12	0	1	1	96.16	0.25
13	0	0	0	95.58	0.10
14	0	0	0	95.88	0.15
15	0	0	0	95.41	0.18
16	0	0	0	96.94	0.14
17	0	0	0	95.78	0.15

注:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的水平值。  
Note:  $x_1$ ,  $x_2$  and  $x_3$  are the level values of  $X_1$ ,  $X_2$  and  $X_3$ , respectively.

4 结果分析

4.1 回归模型建立及检验

由表 2 可知各组试验中单粒合格率均大于 85%、破损率均小于 5%, 双仓转盘式竖直圆盘穴播排种器性能满足行业标准 NY/Y1143-2006 中对穴播作物的要求。利用 Design-expert8.0 软件对表 2 数据进行分析, 得出单粒率、破损率与取种盘转速、窝孔安置角和排种间隙的回归模型, 对回归模型进行方差分析, 结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 单粒率  $S_1$  的回归模型模型显著。其中  $X_2$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$  对单粒率  $S_1$  极显著,  $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_3^2$  对单粒率  $S_1$  影响显著; 破损率  $Z$  的回归模型显著, 其中  $X_1$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  对破损率  $Z$  影响极显著,  $X_3$  对破损率

$Z$  影响显著。单粒率与破损率的回归模型均为显著, 失拟均为不显著, 模型与实际排种情况拟合真实。对方差结果进行分析, 挑选显著项, 并依据编码公式回代, 继而得到转速、偏置角和排种间隙对单粒率  $S_1$ 、破损率  $Z$  的回归方程为

$$S_1 = 95.92 - 0.87x_1 + 2.19x_2 - 0.92x_3 - 0.41x_1x_2 - 1.45x_1x_3 + 1.15x_2x_3 - 3.91x_1^2 - 1.87x_2^2 - 1.34x_3^2 \quad (24)$$

$$Z = 0.14 + 0.064x_1 - 0.00375x_2 - 0.03x_3 + 0.015x_1x_2 - 0.083x_2x_3 + 0.12x_1^2 + 0.085x_2^2 + 0.1x_3^2 \quad (25)$$

4.2 各因素对响应指标影响分析

为直观反映各交互因素对单粒率和破损率的影响, 运用 Design-Expert8.0 软件绘制各交互因素对单粒率、破损率的响应曲面图, 如图 9 所示。

表 3 多因素试验结果和方差分析  
Table 3 Multi-factor test result and analysis of variance

来源 Source	单粒率 Single seed rate				破损率 Breakage rate			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	159.64	9	17.74	0.000 6	0.22	9	20.58	0.000 3
$x_1$	6.11	1	5.81	0.046 7	0.033	1	26.92	0.001 3
$x_2$	38.33	1	36.46	0.000 5	0.000 12	1	0.093	0.769 1
$x_3$	6.77	1	6.44	0.038 8	0.007 2	1	5.96	0.044 7
$x_1x_2$	0.66	1	0.63	0.452 8	0.000 9	1	0.75	0.416 6
$x_1x_3$	8.35	1	7.95	0.025 8	0.000 6	1	0.52	0.495 2
$x_2x_3$	5.29	1	5.03	0.059 8	0.027	1	22.54	0.002 1
$x_1^2$	64.30	1	61.17	0.000 1	0.062	1	51.46	0.000 2
$x_2^2$	14.69	1	13.97	0.007 3	0.032	1	26.08	0.001 4
$x_3^2$	7.56	1	7.20	0.031 4	0.046	1	37.70	0.000 5
残差 Residual	7.36	7	1.05		0.008	7		
失拟项 Lack of fit	5.92	3	5.49	0.066 7	0.004 9	3	1.91	0.27
总和 Total	167.00	16			0.23	16		

注：P<0.01（极显著，\*\*）；P<0.05（显著，\*）。  
Note: P<0.01 (highly significant, \*\*); P<0.05 (significant, \*).

图 9a 为窝孔偏置设置角度为中心水平（30°）时，排种盘转速和排种间隙对单粒率交互作用的响应面图。由图 9a 可知，当窝孔安置角设置在 30°，排种盘转速在低水平（20 r/min）时，排种间隙由 1.5 mm 增加到 2.0 mm，单粒率缓慢增加，但当排种间隙继续增加时，单粒率迅速降低。这是由于排种间隙大于 2 mm 以后，窝孔长度增加，棉种更容易从长度方向进入，棉种质心进入窝孔后，清种装置无法有效清除多余棉种，从而影响单粒率；当排种间隙取低水平（1.5 mm）时，单粒率随排种盘转速增加而增加，但当排种盘转速大于 25 r/min 后，单粒率急剧降低。这主要是由于排种盘转速增加后，棉种与窝孔相对速度变大，单位窝孔在充种区取种时间减少影响窝孔攫取棉种，最终导致单粒率急剧降低。

图 9b 反映当取种盘转速取中间水平（25 r/min）时，排种间隙与窝孔安置角对破损率交互作用的响应图。由图 9b 可知，当取种盘转速取中间水平，窝孔安置角取高水平（35°），排种间隙由 1.5 mm 增加到 2.0 mm，破损率逐渐降低，但当排种间隙继续增加时，破损率开始缓慢增加。这是由于开始排种间隙小，棉种在排种容腔内回转半径小，摩擦力增大，棉种受种子间隔圈挤压力大，棉种易碎，从而破损率高。当排种间隙增大后，回转半径大，摩擦力小，棉种破损率降低，但排种间隙大于 2.0 mm，造成排种容腔体积变大，回转半径过大，棉种在容腔内不受摩擦力约束，运动不规律，破损率开始上升，同时容腔体积开始影响取种精确性，由图 9a 也可得到佐证，并大致确定排种间隙在 2.0 mm 时，总体性能最好。

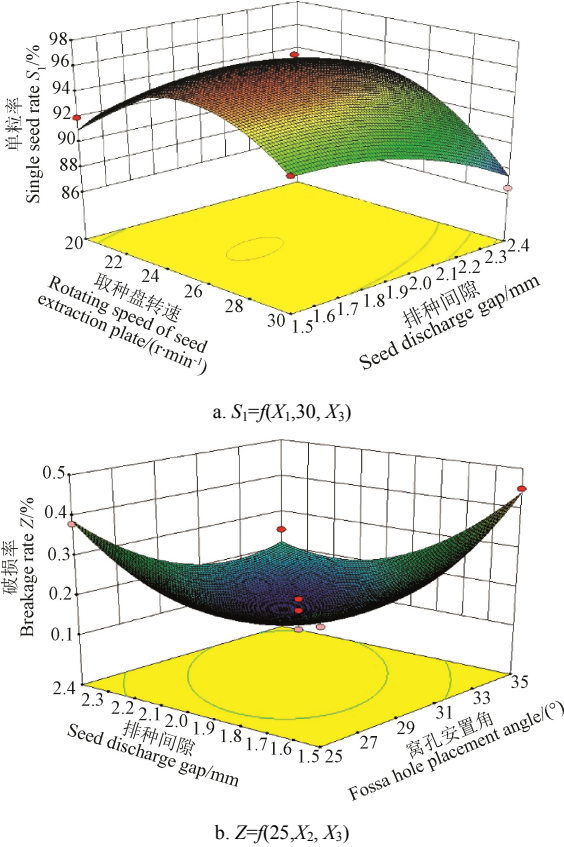


图 9 试验因素对单粒率、破损率的交互影响  
Fig.9 The interactive influence of test factors on single grain rate and breakage rate

4.3 排种参数寻优及田间验证

为得到竖直圆盘穴播排种器最佳参数组合，以提高单粒率、降低破损率为目标，结合试验因素的边界条件，利用软件 Design-Expert8.0 进行多目标寻优求解<sup>[33]</sup>。得到优化模型为

$$\begin{cases} \max S_1 \\ \min Z \\ \text{s.t} \begin{cases} 20 \text{ r/min} \leq X_1 \leq 30 \text{ r/min} \\ 25^\circ \leq X_2 \leq 35^\circ \\ 1.5 \text{ mm} \leq X_3 \leq 2.5 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

优化排种参数时，将单粒率和破损率的权重均设置为 0.5，以同等加权值评价响应指标。对单粒率函数值设置为越大越好，对破损率越小越好。利用软件 Design-Expert8.0 进行多目标寻优求解。得出排种性能最优参数组合为：取种盘转速 23.9 r/min，窝孔安置角 31.7°，排种间隙 2.08 mm，此时单粒率为 96%，破损率为 0.13%。考虑到拖拉机速度的控制、窝孔机加工精度限制以及间隙调节片规格约束，将理论最优参数组合调整为：取种盘转速 24 r/min，窝孔安置角 32°，排种间隙 2.0 mm

为检验双仓转盘式竖直圆盘穴播排种器的田间作业效果，于 2021 年 4 月 18 日在新疆铁门关市开展验证试验，如图 10 所示。试验前测量得到土地坚实度为 466 kPa，含水率 9.8%，将土地平整，平整后耕地上实下虚适合棉

花穴播作业。试验以本课题组研发项目特宽膜铺膜播种机为试验平台, 该机型作业幅宽 4.4 m, 铺设一膜穴播 12 行, 重 1 300 kg, 搭载穴播排种器。拖拉机行进速度约为 2.0 km/h, 速度平稳后, 连续统计 250 穴。将穴内棉种粒数与碎裂棉种分别统计, 重复 5 次取均值, 可得单粒率为 94.3%, 破损率为 0.09%, 均达到了行业国家标准要求。



图 10 田间试验

Fig.10 Field test

## 5 结 论

1) 设计了双仓转盘式竖直圆盘穴播精量排种器, 选择侧卧式取种, 通过理论计算确定了窝孔的尺寸参数, 建立了充种时间的方程, 探究充种时间与取种盘直径关系, 确定取种盘直径为 220 mm、取种窝孔数 16。

2) 设计了一种立式取种盘, 运用最速降线原理, 对窝孔内壁角进行设计计算, 确定取值范围  $29.2^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 。建立力学方程, 分析了棉种在排种容腔内受力情况, 以减小棉种碎裂为目标, 确定了间隙取值范围 1.5~2.5 mm。为提高取种性能对孔口棉种运动状态进行分析, 得到了窝孔安置角不大于  $42.82^{\circ}$ 。

3) 通过双仓转盘式竖直圆盘穴播精量排种器台架试验可知, 棉种破损率最高为 0.49% 低于国家标准; 通过多因素试验确定了最优排种参数组合: 取种盘转速 23.9 r/min, 窝孔安置角为  $31.7^{\circ}$ , 排种间隙为 2.08 mm。对最优排种组合进行田间试验验证, 穴播器转速控制在 24 r/min, 窝孔安置角为  $32^{\circ}$ , 排种间隙为 2 mm, 得到单粒率为 94.3%, 破损率为 0.09%, 满足棉花精量播种农艺要求。

### [参 考 文 献]

[1] 康施为, 倪向东, 齐庆征, 等. 气吸滚筒式棉花精密排种器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 136-141.  
Kang Shiwei, Ni Xiangdong, Qi Qingzheng, et al. Design and experiment of a suction drum type cotton precision seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 136-141. (in Chinese with English abstract)

[2] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9-17.  
Li Zhaodong, Lei Xiaolong, Cao Xiuying, et al. Design and experiment of precision air pressure collector for rape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 9-17.

(in Chinese with English abstract)

[3] 廖庆喜. 油菜生产机械化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[4] 李宝阔. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.

[5] 丛锦玲, 廖庆喜, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 30-39.  
Cong Jinling, Liao Qingxi, Cao Xiuying, et al. Seed filling performance of seed metering device for dual purpose seed metering tray for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 30-39. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘宏新, 王福林, 杨广林, 等. 新型立式复合圆盘大豆精密排种器研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 112-116.  
Liu Hongxin, Wang Fulin, Yang Guanglin, et al. Study on a new type vertical composite disc soybean precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(10): 112-116. (in Chinese with English abstract)

[7] Liu H X, Guo L F, Fu L L, et al. Study on multi size seed metering device for vertical plate soybean precision planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(1): 1-8.

[8] Ess D. R, Hawkins S. E, Young J. C, et al. Evaluation of the performance of abelt metering system for soybeans planted with a grain drill[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(6): 965-969.

[9] 刘宏新, 徐晓萌, 郭丽峰, 等. 具有复合充填力的立式浅盆型排种器充种机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 9-16.  
Liu Hongxin, Xu Xiaomeng, Guo Lifeng, et al. Research on seed~filling mechanism of vertical shallow basin type seed~metering device with composite filling force[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 9-16. (in Chinese with English abstract)

[10] 尚家杰. 可利用重力与离心力充种的立式圆盘排种器研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.  
Shang Jiajie. Study on Vertical Disk Seed-metering Device of Using Gravity and Centrifugal Force to Fill Seeds[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)

[11] 张翔, 杨然兵, 尚书旗. 内侧充种圆盘排种器防伤种装置的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(10): 75-78, 83.  
Zhang Xiang, Yang Ranbing, Shang Shuqi. Design on inside filling disk metering device for peanut seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(10): 75-78, 83. (in Chinese with English abstract)

[12] Ryu I H, Kim K U. Design of roller type metering for



- precision planting[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1988, 41(4): 923-930.
- [13] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108-112.
- Luo Xiwen, Liu Tao, Jiang Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 108-112. (in Chinese with English abstract)
- [14] 罗锡文, 王在满, 蒋恩臣, 等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 60-63.
- Luo Xiwen, Wang Zaiman, Jiang Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 60-63. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王业成, 邱立春, 张文娇, 等. 摩擦型立式圆盘精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 22-26.
- Wang Yecheng, Qiu Lichun, Zhang Wenjiao, et al. Design and experiment of friction type vertical disc precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周勇, 胡梦杰, 夏俊芳, 等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 59-67.
- Zhou Yong, Hu Mengjie, Xia Junfang, et al. Design and experiment of cotton precision metering device with combined hole type seeding rate and adjustable inner filling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王冲, 宋建农, 王继承, 等. 机械式排种器同步柔性皮带护种器的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 107-111.
- Wang Chong, Song Jiannong, Wang Jicheng, et al. Design of synchronization flexible belt protecting device for metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 107-111. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋建农. 同步柔性皮带护种器: 中国专利, CN201142838[P]. 2008-11-05.
- [19] 周建来, 荣彦波, 金艳. 组合立式圆盘排种器的研究[J]. 农机化研究, 2000(1): 58-59.
- Zhou Jianlai, Rong Yanbo, Jin Yan. Research on the combined vertical disc seed metering device[J]. Agricultural Mechanization Research, 2000(1): 58-59. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [21] 韩焕勇, 王方永, 余渝, 等. 新疆早熟机采棉膜下滴灌等行距密植栽培技术[J]. 中国棉花, 2016, 43(10): 39-40.
- Han Huanyong, Wang Fangyong, Yu Yu, et al. Drip irrigation under mulch for early-maturing machine-picked cotton in Xinjiang[J]. China Cotton, 2016, 43(10): 39-40. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张德文. 精密播种机械[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [23] 谭斌. 浅谈精量播种技术在棉花高产栽培技术中的应用[A]. 中国农业机械学会, 2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集[C]//北京: 中国农业机械学会, 2012: 3.
- [24] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [25] 胡梦杰, 周勇, 汤智超, 等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 175-180.
- Hu Mengjie, Zhou Yong, Tang Zhichao, et al. Mechanical properties of cotton seeds with velvet coating[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(1): 175-180. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 test of Vgroove dial type seed Chinese Society of Agricultural Machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 146-158. (in Chinese with English abstract)
- [27] 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助勾轮式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66-72.
- Cao Chengmao, Qin Kuan, Wang Anmin, et al. Design and experiment of the air blowing auxiliary scoop wheel seed metering device for rice direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66-72 (in Chinese with English abstract)
- [28] 雷小龙, 杨文浩, 刘礼阳, 等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58-67.
- Lei Xiaolong, Yang Wenhao, Liu Liyang, et al. Design and experiment of the cavitation and seed supply device of hybrid rice air feeding collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [29] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68-76.
- Geng Duanyang, Zhang Mingyuan, He Ke, et al. The design and experiment of the oblique double ring hole disc type corn metering device[J]. Journal for Agricultural Machinery, 2018,

- 49(1): 68-76. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张青松, 余琦, 王磊, 等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 47-54, 64.  
Zhang Qingsong, Yu Qi, Wang Lei, et al. Design and experiment of a spoon type precision hole seeding and metering device for rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 47-54, 64. (in Chinese with English abstract)
- [31] 中华人民共和国农业部, 播种机质量评价技术规范: NY/Y1143-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005:
- [32] 中国国家标准化管理委员会, 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [33] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

## Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device

Zhang Xuejun<sup>1,2</sup>, Chen Yong<sup>1</sup>, Shi Zenglu<sup>1,2</sup>, Jin Wei<sup>1</sup>, Zhang Haitao<sup>1</sup>, Fu Hao<sup>1</sup>, Wang Duijin<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China;

3. Xinjiang Tiancheng Agricultural Machinery Manufacturing Limited Company, Tiemenguan 841007, China)

**Abstract:** Current vertical disc hole seed-metering device has been limited to the low seed picking performance and high damage rate in recent years. In this study, a double-chamber turntable and vertical disc-hole seed-metering device was designed to combine the cotton precision hole sowing. First of all, the silo structure of seed picking and seeding was introduced to clarify the different work processes in the double warehouse, namely the completion of seed filling and clearing in the seed taking warehouse, then passing the cotton seed to the seeding warehouse through the warehouse transfer area, finally realizing the whole workflow of seeding in the seeding area. A double-bin separated structure was also designed for seed-carrying to reduce the damage of cotton seed. Secondly, a new equation was established for the time in a single seeding unit, thereby determining the way to take the side lying during precision hole-sowing. Specifically, the diameter of the seed disk was 220 mm, the length, width, and height of the seed hole was 9.2 mm×5.2 mm×4.7 mm, as well as the number of seed holes was 16. The seed tray was adopted the working mode of seeding from one side and different sides, in order to ensure that the seeding chamber was not interfering with the precision of seeding during the seed extraction stage. As such, the placement angles of the seed metering cavity and seed holes were staggered by a certain angle during design. Correspondingly, the cotton seeds were slid into the seeding chamber in time during the warehouse transfer stage, where the damage rate of cotton seeds was reduced significantly. Specifically, the steepest drop line was selected to calculate the falling angle of seeds, where the falling angle was determined to be 48°. Further, a mechanical model for the injury to the seed was established to analyze the force and movement state of cotton seeds in the warehouse transfer area, where the minimum seeding gap was 1.47 mm. As such, the optimal matching parameters of relevant components were determined to reduce the damage rate in the warehouse transfer stage. A mechanical model was also established to clarify the effect of seed hole offset angle and disc rotation speed on the seed picking performance in the seed collection area. Finally, Design Expert 8.0 software was used for the Box Benhnken design, where the rotating speed of the seed disk, the offset angle of the socket hole, and the seeding gap were the influencing factors. Subsequently, a three-factor three-level quadratic regression orthogonal test was carried out to optimize the single grain rate and the broken rate. Experiments show that the primary and secondary influencing factors of single-grain rate in the process of seeding were the offset angle of seed hole, the seeding gap, and the speed of seed disk. The better seeding performance was achieved in the combination of the seed disk rotation speed 23.9 r/min, seed hole offset angle of 31.7°, seed metering gap of 2.08 mm. At this time, the single-grain rate was 96%, and the damage rate was 0.13%. Field experiments were also performed to verify the optimal combination. Correspondingly, the single-grain rate was 94.3% and the breakage rate was 0.09%, fully meeting the agronomic requirement of cotton precision sowing. This finding can provide a strong reference for the structural design of vertical disc hole seeding and metering device for cotton.

**Keywords:** agricultural machinery; experiment; optimization; hole seeding device; cotton; precision hole seeding