

棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验

张春艳 康建明 彭强吉 张宁宁 王小瑜 荐世春
(山东省农业机械科学研究院, 济南 250010)

摘要: 针对棉花气吸滚筒式穴播器因投种性能不稳定而造成排种质量下降的问题,在气吸滚筒式穴播器的取种盘和鸭嘴之间增设二次投种机构,通过重新规划种子运动路径,降低投种点高度,减少了漏播和重播现象,提高了气吸滚筒式穴播器的排种性能。在保证气吸滚筒式穴播器取种方式不变的前提下,依次对二次投种机构的安装位置、种道轮廓和出入口的结构参数进行设计和分析,并采用离散元法对种子运动轨迹、运动速度和排种性能进行了仿真,阐明了漏播和重播产生机理。以合格指数、漏播指数和重播指数为评价指标,进行了三因素二次旋转正交组合试验,分析了安装角、作业速度、内种道高度对排种性能的影响。结果表明:安装角对合格指数的影响最大,内种道高度对合格指数的影响最小;当安装角为 10.95°、作业速度为 3.29 km/h、内种道高度为 16.68 mm 时,排种性能最佳,此时合格指数为 98.40%,漏播指数为 0.85%,重播指数为 0.75%。田间试验表明:优化后二次投种机构的气吸滚筒式穴播器的合格指数为 98.06%,较普通穴播器提升 2.21 个百分点。

关键词: 棉花; 气吸滚筒式穴播器; 二次投种机构; 离散元法

中图分类号: S223.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0106-11 OSID: 

Design and Test of Secondary Seed Feeding Mechanism of Air-suction Roller Dibbler for Cotton

ZHANG Chunyan KANG Jianming PENG Qiangji ZHANG Ningning WANG Xiaoyu JIAN Shichun
(Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250010, China)

Abstract: In order to solve the problem of the seeding quality descend caused by the poor performance of the dibbler, a secondary seed feeding mechanism was added between the seed taking plate and the duck's beak. The purpose was to improve the seeding performance by planning the seed movement path, reducing the height of seed point, and reducing the phenomenon of missing and replaying. On the basis of the air suction roller type dibbler, the installation position, seed path contour, entrance and exit structural parameters of the secondary seed feeding mechanism were designed and analyzed. The trajectory, velocity and seeding performance of seeds were discussed by discrete element method. The causes of the phenomenon of missing and replaying were clarified. And the evaluation index of seeding performance of secondary seed feeding mechanism was determined as follows: qualified index, missing index and replaying index. Three factors quadratic rotation orthogonal combination test was carried out to study the influence of installation angle, operating speed and inner seed channel height on seeding performance. The results showed that the installation angle had a great influence on the seeding performance, the height of inner seeding channel had the least influence on the pass index. When the installation angle was 10.95°, the operating speed was 3.29 km/h, and the height of inner seed channel was 16.68 mm, the qualified index was 98.40%, the missing index was 0.85%, and the replaying index was 0.75%. Field experiments were carried out, the qualified index of the dibbler with the optimized secondary seed feeding mechanism was 98.06%, which was 2.21 percentage points higher than that of ordinary dibbler.

Key words: cotton; air-suction roller dibbler; secondary seed feeding mechanism; discrete element method

收稿日期: 2020-08-15 修回日期: 2021-02-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000902)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ002)、山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010702)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2018E18)
作者简介: 张春艳(1988—),女,助理工程师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: sdnjzyzy@163.com
通信作者: 康建明(1984—),男,副研究员,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: kjm531@sina.com

1. 外圈 2. 内种道出口 3. 内种道入口 4. 隔板 5. 挡籽板
6. 侧板 1 7. 侧板 2 8. 侧板 3 9. 内圈

于中间面对称,且由内缘至外缘方向逐渐远离,形成梯形圆环结构,内部均匀设置 B 个隔板,将内种道分割成 B 个相对封闭的空间区域,挡籽板和隔板交错分布,被分割后的外种道和内种道交叉布置。挡籽板和隔板数量应与鸭嘴数量 M 相等。由文献[9-12]得知,常用鸭嘴数量 $M=15$,因此,本文中 $A=B=15$ 。

2.1 二次投种机构安装位置

二次投种环节应在一次投种结束后,保证种子能够顺利从外壳开口进入二次投种机构中,并从种道出口顺利进入鸭嘴,具体位置如图3所示。

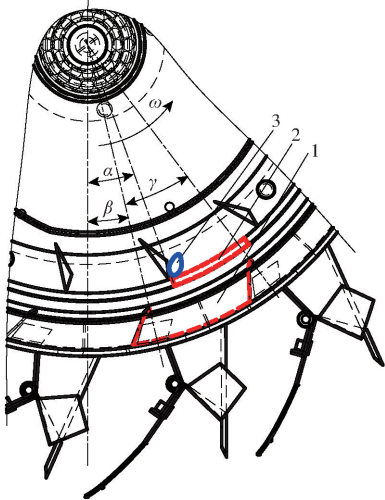


图3 二次投种机构安装位置示意图

Fig.3 Installation position diagram of secondary seed feeding mechanism

1. 二次投种机构 2. 外壳 3. 种子

气吸滚筒式穴播器逆时针转动,由图3可知,要保证种子顺利进入二次投种机构,需满足

$$\begin{cases} \beta < \alpha \\ \beta + \gamma > \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 α ——外壳开口下边缘和旋转中心连线与竖直方向的夹角, ($^{\circ}$)

β ——二次投种机构下挡籽板和旋转中心连线与竖直方向的夹角,即安装角, ($^{\circ}$)

γ ——二次投种机构上下挡籽板和旋转中心连线之间的夹角, ($^{\circ}$)

经前期试验研究可知, $\alpha=20^{\circ}$ 时, 投种效果最好, 本文中 α 取 20° 。二次投种机构种道数量与鸭嘴数量相同, 可知 $\gamma=2\pi/M=24^{\circ}$, 因此, 二次投种机构安装位置应满足 $\gamma-\alpha<\beta<\alpha$, 即 $4^{\circ}<\beta<20^{\circ}$ 。

2.2 种道轮廓设计

种道轮廓决定了种道的结构参数, 如图4所示, 种道轮廓由3个侧板组成, 为保证投种效果, 逐一设定侧板倾斜角 φ 、侧板圆弧半径 R 及内种道高度 h 等参数。

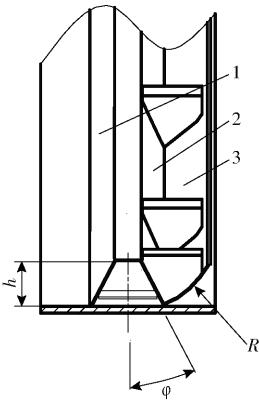


图4 种道轮廓

Fig.4 Sketch of seed path outline

1. 侧板1 2. 侧板2 3. 侧板3

2.2.1 侧板倾斜角

为保证种子能顺利进入内种道, 种子由外壳开口进入外种道后, 需在侧板2上滚动, 则侧板2倾斜角 φ 需满足

$$\varphi > \varphi_m \quad (2)$$

式中 φ_m ——种子与钢板平面间的滚动稳定角, ($^{\circ}$)

由文献[24]得知, 种子滚动稳定角的取值范围为 $12.6^{\circ} \sim 21.3^{\circ}$, 另外, 包衣后种子的滚动稳定角将增大 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 由此可知 $\varphi > 24.3^{\circ}$, 本文中 φ 取 28° 。

2.2.2 侧板圆弧半径

气吸滚筒式穴播器在工作过程中如遇地面不平或种床有硬物等情况, 气吸滚筒式穴播器会颠簸振动, 造成种子脱离侧板2, 落在侧板3上, 为保证种子完好, 并能顺利进入内种道, 外侧板设计成圆弧结构, 如图4所示。半径 R 需大于种子最大曲率半径 $\rho_{\max}$, 即

$$R > \rho_{\max} \quad (3)$$

种子最大曲率半径取值参考椭圆最大曲率半径, 其计算公式为

$$\rho = \frac{L'^2}{W'} \quad (4)$$

式中 ρ ——椭圆最大曲率半径

L' ——种子长度, mm

W' ——种子宽度, mm

由于种子最大曲率半径比椭圆最大曲率半径小, 引入修正系数 k (k 为 $0.8 \sim 0.9$)。由文献[24]知, 种子的长度 L' 介于 $4.31 \sim 13.21$ mm 之间, 宽度 W' 介于 $3.57 \sim 6.33$ mm 之间。为保证数据可靠, L' 、 W' 、 k 取最大值, 则

$$R > \rho_{\max} = k \frac{L'^2_{\max}}{W'_{\max}} \quad (5)$$

得 $R > 24.8$ mm, 结合前期试验结果, 本文中 R 取

26 mm。

2.2.3 内种道高度

种子可能以不同的姿态进入内种道,进而产生不同的运动状态,经分析,种子的主要运动状态有纵向、横向和斜向3种滚动方式,如图5所示,其中 H' 为种子的高度。

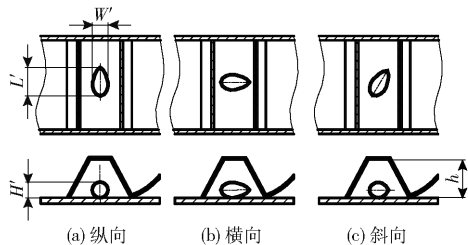


图5 种子运动状态

Fig.5 Seed movement schematics

横向和斜向是种子运动的主要姿态,纵向则大多出现在种子纵向进入并在内种道内初始滚动时,通过自身调整后变为横向或斜向。因此,要保证种子顺利从内种道出口排出,内种道轮廓尺寸需满足种子在内种道内能够无障碍运动。当种子纵向滚动时,种子长度决定了内种道高度 h ;而当横向和斜向滚动时,种子的宽度和厚度尺寸决定了内种道高度 h ,综合考虑,内种道高度 h 需大于等于种子几何尺寸的最大值,同时,内种道高度直接影响气吸滚筒式穴播器整体尺寸,不能过高,因此,内种道高度 h 需满足

$$L'_{\max} < h < 1.5L'_{\max} \quad (6)$$

将 $L'_{\max} = 13.21 \text{ mm}$ 代入公式(6),得 $13.21 \text{ mm} < h < 19.82 \text{ mm}$,具体取值还需进一步试验确定。

2.3 内种道出入口设计

2.3.1 内种道入口设计

气吸滚筒式穴播器逆时针转动,内种道入口设置于外种道后方,靠近后侧挡籽板,如图6所示,内种道入口采用类似平行四边形结构,前、后边分别与挡籽板平行,长度为 L_1 ,后边与挡籽板间距为后边距 e_1 ,另外两条边为圆弧,两圆弧的圆心分别与外圈圆心重合,两条圆弧的径向间距为 L_2 ,外圆弧与外圈的边距为外边距 e_2 。

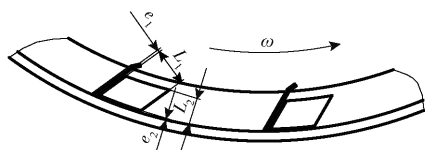


图6 内种道入口结构示意图

Fig.6 Entrance structure diagram of internal seed channel

为保证种子能以任意姿态顺利进入内种道,并防止种子在内种道滚动过程中从入口处掉落,内种道入口需满足

$$\begin{cases} L'_{\max} \leq L_1 \leq \frac{\pi R_1}{M} \\ L'_{\max} \leq L_2 \leq \frac{h}{\cos \varphi} - \frac{1}{2} \max(W'_{\max}, H'_{\max}) \\ 0 < e_1 \leq \frac{1}{2} \min(W'_{\max}, H'_{\max}) \\ 0 < e_2 \leq \frac{1}{2} \min(W'_{\max}, H'_{\max}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 R_1 ——气吸滚筒式穴播器外壳外径,mm

依据本文选取的气吸滚筒式穴播器和种子特征,将 $M = 15$ 、 $L'_{\max} = 13.21 \text{ mm}$ 、 $W'_{\max} = 6.33 \text{ mm}$ 、 $H'_{\max} = 5.52 \text{ mm}$ 、 $\varphi = 28^\circ$ 代入公式(7)得

$$\begin{cases} 13.21 \text{ mm} \leq L_1 \leq \frac{\pi R_1}{15} \\ 13.21 \text{ mm} \leq L_2 \leq \frac{h}{\cos 28^\circ} - 3.165 \\ 0 < e_1 \leq 2.76 \text{ mm} \\ 0 < e_2 \leq 2.76 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

参数 e_1 、 e_2 的取值与其余参数无关,结合前期试验结果,本文中 e_1 、 e_2 取 1.5 mm , L_1 和 L_2 的取值与 R_1 和 h 有直接关系, R_1 与 h 的取值又相互制约,因此, L_1 、 L_2 和 R_1 的取值由 h 确定。

2.3.2 内种道出口设计

内种道出口设置于内种道前方,靠近前侧隔板,与鸭嘴端部对应,如图7所示,内种道出口采用矩形结构,为保证种子以任意姿态顺利经过内种道出口,且避开内种道入口,内种道出口结构参数应满足

$$\begin{cases} L'_{\max} \leq L \leq \frac{\pi R_2}{M} - L_1 \\ 0 < e \leq \frac{1}{2} \min(W'_{\max}, H'_{\max}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 L ——出口长度,mm

e ——出口边距,mm

R_2 ——腰带外圈半径,mm

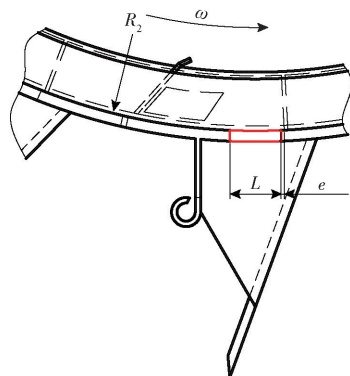


图7 内种道出口示意图

Fig.7 Exit structure diagram of internal seed channel

依据本文选取的气吸滚筒式穴播器和种子特征,将 $M = 15$ 、 $L'_{\max} = 13.21 \text{ mm}$ 、 $W'_{\max} = 6.33 \text{ mm}$ 、

$H'_{\max}=5.52\text{ mm}$ 代入公式(9)得

$$\begin{cases} 13.21\text{ mm}\leq L\leq \frac{\pi R_2}{15}-L_1 \\ 0<e\leq 2.76\text{ mm} \end{cases}\quad (10)$$

参数 e 的取值与其余参数无关,结合前述 e_1 、 e_2 的取值,本文中 e 取 1.5 mm , L 的取值范围由 R_2 和 L_1 决定,而 R_2 和 L_1 的取值受 h 影响, L 的取值由 h 确定。

综上所述,安装角对种子能否进入二次投种机构影响较大,二次投种机构的结构参数 L 、 L_1 、 L_2 取值都和内种道高度 h 有关,另外,经前期研究,气吸滚筒式穴播器作业速度对排种性能影响较大^[8-9],因此,安装角、内种道高度和作业速度作为二次投种机构优化的目标参数。

3 二次投种机构仿真与排种过程分析

由于种子在气吸滚筒式穴播器二次投种机构中的运动较为复杂,采用 EDEM 虚拟仿真方法可以准确分析二次投种机构中种子颗粒的速度,模拟和记录任一种子颗粒在任意位置的运动轨迹和参数,即能够精确地模拟排种过程,并分析二次投种机构的排种性能。

3.1 模型建立

根据对二次投种机构的设计结果,在 SolidWorks 中建立二次投种机构三维模型,连同气吸滚筒式穴播器简化模型一起导入 EDEM 中, EDEM 中的简化模型如图 8 所示,模拟所需相关参数如表 1 所示^[13,25]。为减少取种、清种和一次投种对排种性能的影响,对模型进行简化,特将颗粒工厂设置在取种盘投种孔处,并按固定时间间隔产生颗粒,保证单粒种子颗粒进入分种盘内,并在气吸滚筒式穴播器下方设置 $600\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的长

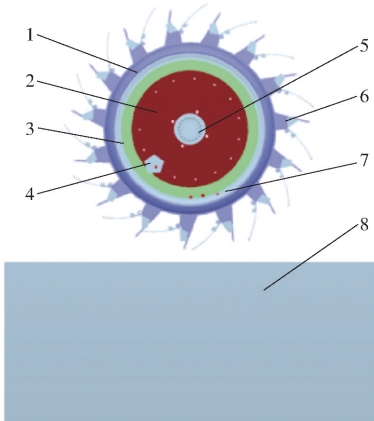


图 8 EDEM 简化模型

Fig. 8 EDEM simplified model

1. 二次投种机构 2. 取种盘 3. 分种盘 4. 颗粒工厂 5. 轴
6. 鸭嘴 7. 种子颗粒 8. 接种箱

方形接种箱,上方开口,可存储鸭嘴释放的种子颗粒。

表 1 模拟所需物理和力学特性参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters required for simulation

参数	棉花颗粒	二次投种机构
泊松比	0.25	0.28
剪切模量/Pa	1×10^6	8.2×10^{10}
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	640	7 890
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.30	0.52
静摩擦因数(与颗粒)	0.56	0.50
动摩擦因数(与颗粒)	0.15	0.10

设置气吸滚筒式穴播器作业速度为 3.46 km/h ,内种道高度为 16.5 mm ,仿真步长为 0.01 s ,仿真总时长 10 s 。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 种子运动轨迹分析

为分析种子运动轨迹,在 EDEM 后处理模块添加 Manual selection 01,选取 1 号种子颗粒,并选用 Stream 格式显示,即可得到 1 号种子颗粒从投种到入土的轨迹曲线,如图 9 所示。

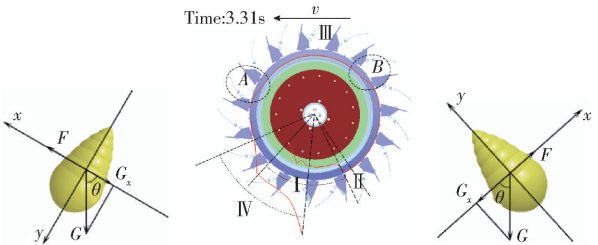


图 9 种子运动轨迹曲线

Fig. 9 Seed motion trajectory curve

该曲线共分为 4 个阶段:一次投种区 I、种子徘徊区 II、种子跟随区 III、二次投种区 IV,除第 I 阶段曲线有波动外,其余阶段轨迹曲线较顺滑。其中第 I 阶段轨迹曲线存在波动是因为气吸滚筒式穴播器的取种盘与外壳间距较大,种子靠自重下落与外壳发生碰撞被弹起,经过 2~3 次碰撞后接近稳定状态,然后经分种盘拨动至外壳出口处,落入外种道;第 II 阶段轨迹曲线存在重叠,种子滚动到外种道底部时进入对应的内种道中,由前述分析可知,内、外种道部分重合,内种道位于外种道后侧,因此,种子进入内种道后,先落入内种道底部,随后再跟随气吸滚筒式穴播器转动,造成轨迹曲线部分重叠的现象;种子在第 III 阶段整体处于内种道中,随着气吸滚筒式穴播器转动,种子重力 G 与 x 轴方向的夹角 θ 先减小后增大,造成重力 G 在 x 轴的分量 G_x 先增大后减小,种子进入内种道时, $G_x<F$,径向力指向外侧,此时种子紧靠外壁运动,随着气吸滚筒式穴播器转

动, θ 逐渐减小, G_x 逐渐增大, 当种子运动至区域 B 时, $G_x > F$, 径向力指向内侧, 至此种子由外壁向内壁运动, 随后贴近内壁转动, 当种子运动到最高点时, θ 减小为 0, 而后 θ 开始增大, G_x 开始减小, 直至运动到区域 A 时, $G_x < F$, 径向力指向外侧, 促使种子由内壁向外壁运动; 当种子运动至内种道出口时, 开始第 IV 阶段, 种子进入鸭嘴中, 此时鸭嘴处于关闭中, 当运动至下方, 动鸭嘴打开, 动定鸭嘴切割土壤形成种穴, 种子进入种穴中, 完成二次投种。

3.2.2 种子运动速度分析

为保证种子在二次投种机构中运动速度分析的有效性, 选取上述 1 号种子颗粒, 将 Selection 设置为 Manual selection 01, x 轴时间设置为 0 ~ 5.0 s, y 轴主属性选取速度, 生成 1 号种子速度曲线, 如图 10 所示。

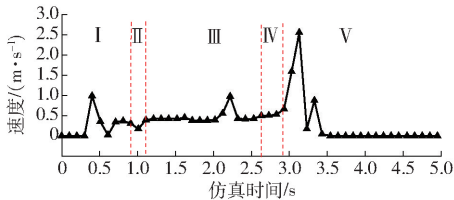


图 10 1 号种子速度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of seed No. 1 velocity

图中前 4 个阶段与种子运动轨迹相对应, 0.3 s 时种子颗粒产生, 0.3 ~ 0.9 s 种子处于一次投种区 I, 速度呈先增大后减小, 后续波动状态, 由图 9 可知, 这一现象是由于种子脱离取种盘后仅受重力作用, 做自由落体运动, 速度迅速升高, 当与外壳或分种盘接触时速度迅速减小, 发生碰撞后种子被弹起, 速度出现小幅升高后回落, 与种子运动轨迹曲线相吻合; 0.9 ~ 1.1 s 时处于种子徘徊区 II, 种子速度先减小后增大, 该阶段的速度波动是因为种子随气吸滚筒式穴播器运动速度与种子进入内种道速度相抵消, 出现速度减小的情况, 当落至内种道底部后速度开始增大, 直到与气吸滚筒式穴播器的线速度相同; 1.1 ~ 2.6 s 时进入种子跟随区 III, 种子速度整体平稳, 在 2.25 s 时出现速度峰值, 是因为种子到达区域 A (图 9) 时, 受重力影响, 种子从内种道底部运动到顶部, 出现一个加速过程, 到达顶部后回落到与气吸滚筒式穴播器同步; 2.6 ~ 2.9 s 进入二次投种区 IV, 此时速度较跟随区有所增大, 是因为种子从二次投种机构进入鸭嘴中, 种子所处的半径增大, 速度随之增加; 2.9 s 后进入自由落体区 V, 该阶段速度出现 2 个峰值, 原因在于气吸滚筒式穴播器下方设置接种箱, 如图 8 所示, 种子从鸭嘴处排出后落入接种箱, 出现第 1 个峰值, 发生碰撞后弹起, 出现第 2 个峰值。正常播种时种子从鸭嘴排出直接进种穴, 不

会出现第 V 阶段的两次速度变化, 本文中之所以出现第 V 阶段, 是为后续仿真试验做准备工作。

3.2.3 排种性能分析

漏播和重播现象是造成排种质量下降的主要因素, 观察气吸滚筒式穴播器工作过程中种子的分布位置, 可以看出是否有漏播和重播现象的发生, 如图 11 所示。

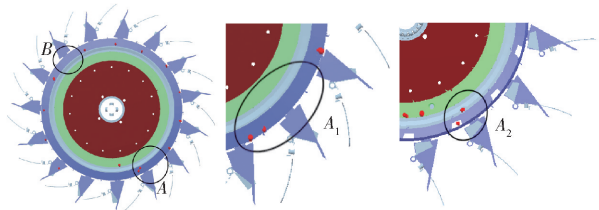


图 11 $t = 6.02$ s 时种子分布图及漏播和重播现象

Fig. 11 Seed distribution map and phenomenon of missing and replanting when $t = 6.02$ s

从图 11 中可以看出, 种子所在位置与上述种子运动轨迹相吻合, 除 A 和 B 处外, 其余每穴满足单粒播种要求。由图 11 可知, 该时刻 A 处存在重播和漏播现象, B 处存在漏播现象, 究其原因, 主要是二次投种机构安装角问题, 安装角较大或较小, 种子将会掉入前或后的外种道中, 造成漏播和重播, 当安装角较大时, 由于外壳开口与前外种道挡籽板距离较近, 较易造成前种穴重播, 相反, 安装角较小时, 外壳开口距离后外种道挡籽板较近, 易造成后种穴重播, 如 A_1 所示。另外, 当气吸滚筒式穴播器作业速度较大时, 分种盘拨动种子的冲击力较大, 造成种子飞进前外种道中, 造成该种穴漏播, 前种穴重播, 如 A_2 所示。

基于仿真结果对气吸滚筒式穴播器的排种性能进行分析, 在气吸滚筒式穴播器下方设置与接种箱大小相同的 Grid Bin Group, 记录任意时刻排出的颗粒数量并导出数据, 绘制成如图 12 所示的折线图来分析重播和漏播数量。从图 12 中可以看出, 整体呈线性上升趋势, 分析 7.4 ~ 8.0 s (框选区域) 的局部放大图可知, 折线存在上升突变和水平现象, 分析数据可知, 折线突变上升是由于该穴种子超过 1 粒, 确定为重播, 而折线水平则表示该穴无种子, 为漏播。另外图中 3.95、5.45、6.25 s 时出现漏播, 在 4.45 s

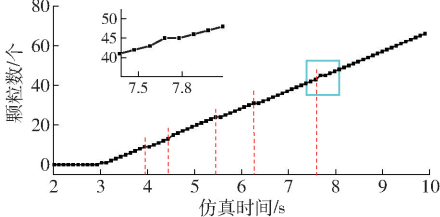


图 12 排种性能分析曲线

Fig. 12 Seed metering performance analysis curve

时出现重播。基于此,可对仿真周期进行排种性能分析,得到漏播指数 Y_1 、重播指数 Y_2 、合格指数 Y_0 。

4 仿真试验

4.1 试验方案

为了对二次投种机构结构参数进行优化,利用离散元仿真方法对不同参数的气吸滚筒式穴播器进行三因素二次旋转正交组合试验,以安装角、作业速度、内种道高度为试验因素,以合格指数、漏播指数、重播指数为评价指标。以理论分析和仿真分析结果为依据,设定各因素零水平值,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Codes of testing factors

编码	因素		
	安装角	作业速度	内种道高度
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	x_3/mm
-1.682	4.00	2.17	13.5
-1	7.24	2.69	14.7
0	12.00	3.46	16.5
1	16.76	4.23	18.3
1.682	20.00	4.75	19.5

通过 Design-Expert 数据处理软件进行三因素二次旋转正交组合试验设计,如表 3 所示。按照每个试验序号的参数要求,调整安装角、作业速度和内种道高度,在 SolidWorks 中完成二次投种机构的建模,在 EDEM 中设定作业速度,并设定种子颗粒产生总数为 200 个,仿真总时间 10 s。每组试验分别提取颗粒数量数据,绘制图 12 所示的排种性能分析曲线,计算漏播指数、重播指数和合格指数,并记入试验结果,如表 3 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值)。

4.2 试验结果分析

通过 Design-Expert 软件对仿真试验结果进行二次回归分析,确定了各因素对试验指标的影响规律,分别建立合格指数 Y_0 、漏播指数 Y_1 、重播指数 Y_2 的回归方程为

$$Y_0=98.37-0.12X_1-0.08X_2+0.07X_3+0.02X_1X_2+0.11X_1X_3+5\times10^{-3}X_2X_3-0.26X_1^2-0.18X_2^2-0.20X_3^2$$

(11)

$$Y_1=0.87+0.06X_1+0.04X_2-0.03X_3-0.04X_1X_2-0.04X_1X_3+0.02X_2X_3+0.12X_1^2+0.05X_2^2+0.08X_3^2$$

(12)

$$Y_2=0.75+0.06X_1+0.03X_2-0.04X_3+0.01X_1X_2-0.07X_1X_3-0.03X_2X_3+0.14X_1^2+0.13X_2^2+0.11X_3^2$$

(13)

表 3 试验方案与试验结果
Tab.3 Plans and results of test

试验 编号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	合格	漏播	重播
				指数 $Y_0/\%$	指数 $Y_1/\%$	指数 $Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	97.94	1.04	1.02
2	1	-1	-1	97.51	1.22	1.27
3	-1	1	-1	97.77	1.07	1.16
4	1	1	-1	97.44	1.25	1.31
5	-1	-1	1	97.83	0.96	1.21
6	1	-1	1	97.85	1.11	1.04
7	-1	1	1	97.69	1.21	1.10
8	1	1	1	97.79	1.08	1.13
9	-1.682	0	0	97.94	1.07	0.99
10	1.682	0	0	97.32	1.40	1.28
11	0	-1.682	0	98.02	0.96	1.02
12	0	1.682	0	97.69	1.11	1.20
13	0	0	-1.682	97.69	1.19	1.12
14	0	0	1.682	97.93	1.07	1.00
15	0	0	0	98.28	0.92	0.80
16	0	0	0	98.35	0.88	0.77
17	0	0	0	98.47	0.81	0.72
18	0	0	0	98.36	0.90	0.74
19	0	0	0	98.38	0.83	0.79
20	0	0	0	98.40	0.89	0.71
21	0	0	0	98.44	0.88	0.68
22	0	0	0	98.30	0.92	0.78
23	0	0	0	98.37	0.83	0.80

回归方程方差和显著性分析结果如表 4 所示。由方差和显著性分析结果可知,合格指数、漏播指数和重播指数模型的拟合度极显著($P<0.01$),安装角、作业速度和内种道高度对 3 个指标的影响显著,且部分因素存在两两交互作用,3 个指标的回归方程失拟不显著($P>0.05$),与试验数据拟合良好。影响合格指数和漏播指数的主次顺序为安装角、作业速度、内种道高度,影响重播指数的主次顺序为安装角、内种道高度、作业速度。

通过 Design-Expert 软件对数据进行处理,得到安装角、作业速度和内种道高度之间的显著和极显著交互作用对 3 个指标影响的响应曲面,如图 13 所示。

由图 13a 可知,当安装角一定时,合格指数随内种道高度增加呈先升高后降低的趋势,是因为内种道高度过小容易造成种子卡在 内种道,不能翻滚进入鸭嘴中,造成漏播指数增大,而内种道高度过大则会增大气吸滚筒式穴播器整体尺寸,种子的活动区域增大,不能保证种子按照预定轨迹运动,造成合格指数降低。内种道高度一定时,随着安装角的增大,合格指数同样呈先升高后降低的趋势,且安装角较

表 4 回归方程显著性分析

Tab. 4 Significance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	2.67	9	53.59	<0.000 1**	0.48	9	21.59	<0.000 1**	0.91	9	30.15	<0.000 1**
X ₁	0.21	1	37.49	<0.000 1**	0.054	1	21.78	0.000 4**	0.041	1	12.35	0.003 8**
X ₂	0.072	1	13.11	0.003 1**	0.019	1	7.70	0.015 7*	0.016	1	4.73	0.048 7*
X ₃	0.060	1	10.81	0.005 9**	0.012	1	4.74	0.048 5*	0.017	1	5.13	0.041 3*
X ₁ X ₂	4.05 × 10 ⁻³	1	0.73	0.407 6	0.013	1	5.13	0.041 3*	1.25 × 10 ⁻³	1	0.38	0.549 7
X ₁ X ₃	0.097	1	17.50	0.001 1**	0.011	1	4.51	0.053 4	0.036	1	11.00	0.005 6**
X ₂ X ₃	2 × 10 ⁻⁴	1	0.036	0.852 1	4.05 × 10 ⁻³	1	1.62	0.224 9	5 × 10 ⁻³	1	1.51	0.241 1
X ₁ ²	1.10	1	198.06	<0.000 1**	0.22	1	88.70	<0.000 1**	0.32	1	95.64	<0.000 1**
X ₂ ²	0.53	1	96.23	<0.000 1**	0.041	1	16.45	0.001 4**	0.28	1	84.04	<0.000 1**
X ₃ ²	0.63	1	113.68	<0.000 1**	0.11	1	45.39	<0.000 1**	0.21	1	63.10	<0.000 1**
残差	0.072	13			0.032	13			0.043	13		
失拟	0.043	5	2.32	0.139 1	0.019	5	2.33	0.137 8	0.028	5	2.93	0.085 6
误差	0.029	8			0.013	8			0.015	8		
总和	2.74	22			0.52	22			0.95	22		

注：* 表示差异显著(0.01 < P < 0.05)，** 表示差异极显著(P < 0.01)。

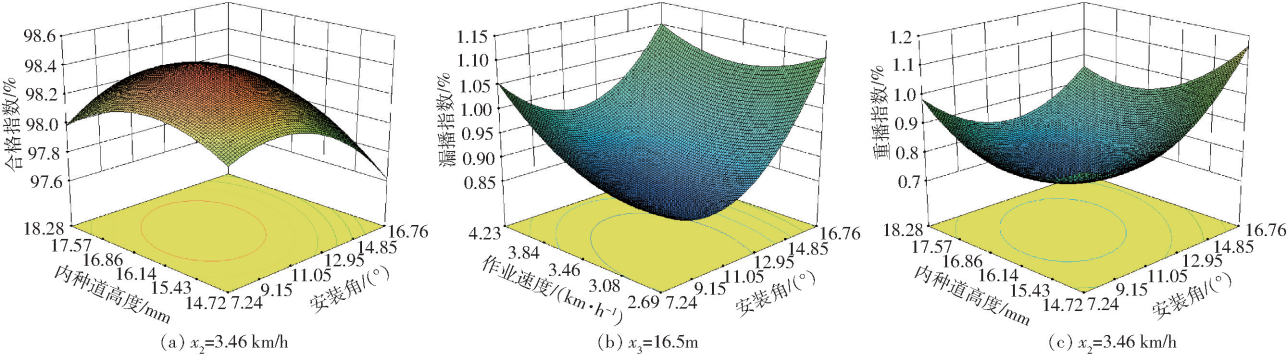


图 13 试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 13 Impacts of test factors on indicators

大时,合格指数快速降低,是由于此时外壳开口与前外种道挡籽板距离较近,较易造成漏播指数和重播指数增大。由图 13b 可知,当安装角一定时,随着作业速度的增大,漏播指数先缓慢降低后迅速升高,反之亦然,安装角和作业速度对漏播指数的影响基本一致,在安装角和作业速度都偏小时出现漏播指数最小值。由图 13c 可知,当安装角一定时,随着内种道高度的增大,重播指数先降低后升高,反之亦然,从图中可看出安装角对重播指数的影响较内种道高度大,安装角和内种道高度取中间值时出现漏播指数最小值。

4.3 参数优化

各因素以及因素间的交互作用对气吸滚筒式穴播器排种性能影响较大,为了获得最佳排种性能,以较低的漏播指数、重播指数和较高的合格指数为优化目标,对气吸滚筒式穴播器作业速度、二次投种机构安装角和内种道高度进行多目标优化分析,其目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_0(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 4^{\circ} \leq x_1 \leq 20^{\circ} \\ 2.17 \text{ km/h} \leq x_2 \leq 4.75 \text{ km/h} \\ 13.5 \text{ mm} \leq x_3 \leq 19.5 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

通过计算得到最优结果为:安装角 10.95°、作业速度 3.29 km/h、内种道高度 16.68 mm,此时合格指数为 98.40%,漏播指数为 0.85%,重播指数为 0.75%。

5 田间试验

为验证仿真试验优化后参数的准确性,同时考察二次投种机构的工作性能,在山东省农业科学院济阳试验基地进行田间试验,如图 14 所示。根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以作业速度、安装角、内种道高度为试验因素,以合格指数、重播指数、漏播指数为排种性能评价指标,

设置5组重复试验,如表5所示。其中A、B、C、D组为对照样本,A组为普通穴播器;B组的主要参数接近表2的零水平,C组和D组的参数选择表2中各因素的 ± 1.682 水平,E组为装有优化后二次投种机构的气吸滚筒式穴播器。



图14 田间作业和试验效果

Fig. 14 Field work and experimental results

表5 田间试验参数设置

Tab.5 Field test parameters

参数	A组	B组	C组	D组	E组
安装角/(°)		12.00	20.00	4.00	10.95
作业速度/(km·h ⁻¹)	3.29	3.46	4.75	2.17	3.29
内种道高度/mm		16.50	19.50	13.50	16.68

为减小不同种子对试验的影响,所有试验均采用新陆早42号,吸种负压为 -3 kPa ,试验效果如图14所示。每次试验选取播种行的4个测量段进行数据采集,每段测量20个种子,每两段相距30 m,并重复试验3次,记录3次测量平均值,计算出合格指数、漏播指数和重播指数,如图15所示。

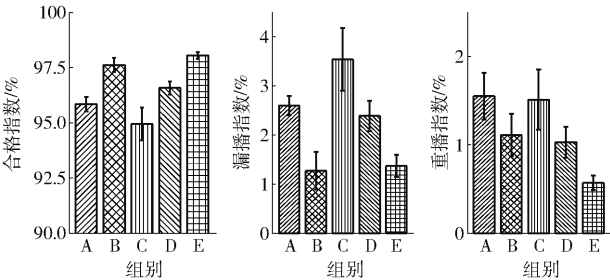


图15 田间试验结果

Fig. 15 Result of field experiment

图15中均为各组试验指标的均值,并统计了标准偏差。从试验结果可以看出,E组合格指数最高,

与B组较为接近,C组合格指数最低,漏播指数和重播指数最高,同时标准偏差较大,排种性能不稳定。D组重播指数与B组相近,但漏播指数较高,造成合格指数较低。E组合格指数为98.06%,但也小于仿真分析的最优结果98.40%,是因为气吸滚筒式穴播器工作过程中受振动及取种、清种过程影响,使合格指数有所下降。

由图15可知,装有优化后二次投种机构的气吸滚筒式穴播器的合格指数98.06%,较普通穴播器合格指数95.85%提升了2.21个百分点,同时还可以看出,C、D、E组的3个指标相差较大,说明二次投种机构的结构参数对气吸滚筒式穴播器的排种性能影响较大。

6 结论

(1)设计了气吸滚筒式穴播器的二次投种机构,通过分析影响二次投种机构投种性能的主要因素,确定了二次投种机构优化目标参数为安装角、内种道高度和作业速度。二次投种机构如同一个纽带,将取种盘与鸭嘴连接起来,赋予了种子一定的运动轨迹,从而确保种子落入对应的种穴内,在降低投种点高度的同时延长了投种时间,提高了穴粒数的准确度。

(2)通过EDEM分析了二次投种机构的排种过程和重播、漏播的产生原因,得到种子在二次投种机构中的运动轨迹和速度变化曲线。以合格指数、漏播指数和重播指数为评价指标,进行了三因素二次旋转正交组合仿真试验和多目标优化分析,确定了影响评价指标的主要因素,并得到二次投种机构最优的结构参数和工作参数为:安装角 10.95° 、作业速度 3.29 km/h 、内种道高度 16.68 mm 。

(3)进行了气吸滚筒式穴播器田间对比试验,结果表明,二次投种机构的结构参数对排种性能影响较大,优化后的穴播器合格指数为98.06%,比普通穴播器提升了2.21个百分点。

参 考 文 献

[1] 卢合全,代建龙,李振怀,等. 出苗期遇雨对不同播种方式棉花出苗及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 60-70.
LU Hequan, DAI Jianlong, LI Zhenhuai, et al. Effects of rainfall at emergence on stand establishment and yield of cotton under different seeding patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(1): 60-70. (in Chinese)

[2] 康施为. 分置式棉花膜上精密播种装置的设计与试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2020.
KANG Shiwei. Design and experimental study of precision seeding device on split cotton membrane[D]. Shihezi: Shihezi University,2020. (in Chinese)

[3] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1): 37-46.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.004.

- (in Chinese)
- [4] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):47-54,64. ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):47-54,64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200605&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.005. (in Chinese)
- [5] 张恒,康建明,张国海,等. 基于改进 FMECA 方法气吸鸭嘴滚筒式排种器的可靠性分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2019,37(5):543-548. ZHANG Heng, KANG Jianming, ZHANG Guohai, et al. Reliability analysis of air suction duckbill type seed metering device based on improved FMECA method[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2019, 37(5):543-548. (in Chinese)
- [6] 倪向东,徐国杰,王琦,等. 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):58-67. NI Xiangdong, XU Guojie, WANG Qi, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder array precision seed-metering device for cotton[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):58-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.007. (in Chinese)
- [7] 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 pneumatic cylinder precision seed-metering device for cotton[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6):136-141. (in Chinese)
- [8] SINGHR C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4):429-438.
- [9] 陈学庚,卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):35-38. CHEN Xuegeng, LU Yongtao. Performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8):35-38. (in Chinese)
- [10] 陈学庚,王敏. 气吸鸭嘴滚筒式精密穴播器关键因素的研究[J]. 农机化研究,2011,33(3):130-133,137. CHEN Xuegeng, WANG Min. Study on key factors of the duckbill punch roller-type pneumatic metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3):130-133,137. (in Chinese)
- [11] 李猛,王卫兵,杜晟,等. 气吸式棉花穴播器吸附精度试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(7):10-13. LI Meng, WANG Weibing, DU Sheng, et al. Experiment study on adsorption accuracy of air-suction cotton dibbler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7):10-13. (in Chinese)
- [12] 王磊. 气吸式棉花精密穴播器的主要参数优化及仿真设计[D]. 石河子:石河子大学,2006. WANG Lei. Optimum parameter & simulation design of cotton precision seedling metering device using air suction[D]. Shihezi:Shihezi University, 2006. (in Chinese)
- [13] 王珏,杨欣,王建合,等. 基于离散元法的棉花勺式排种器排种性能模拟[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(6):873-878. WANG Jue, YANG Xin, WANG Jianhe, et al. Simulation for performance to seed cotton with scoop-type based on discrete element method[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(6):873-878. (in Chinese)
- [14] 刘月琴,赵满全,刘飞,等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):65-73. LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):65-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010. (in Chinese)
- [15] SU J, GU Z, XU X. Discrete element simulation of particle flow in arbitrarily complex geometries[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(23):6069-6088.
- [16] 王龙,贺小伟,胡灿,等. 基于离散元法的棉花窝眼式穴播器排种性能模拟与试验[J]. 农机化研究,2021,43(1):151-156. WANG Long, HE Xiaowei, HU Can, et al. Simulation and experiment for seeding performance of socket cotton dibbler based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1):151-156. (in Chinese)
- [17] 滕悦江,张爱民,杨自栋,等. 棉花精量免耕穴播机设计及关键部件运动仿真[J]. 农机化研究,2016,38(11):177-180,185. TENG Yuejiang, ZHANG Aimin, YANG Zidong, et al. Design and motion simulation of a precision no-tillage hill-planter for cotton[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):177-180,185. (in Chinese)
- [18] 王吉奎,郭康权,吕新民,等. 改进型夹持式棉花穴播轮排种过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报,2011,42(10):74-78. WANG Jikui, GUO Kangquan, LÜ Xinmin, et al. High-speed photography analysis on operating process of improved clamping dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):74-78. (in Chinese)
- [19] 王吉奎,郭康权,吕新民,等. 夹持式棉花精密穴播轮改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(4):43-47. WANG Jikui, GUO Kangquan, LÜ Xinmin, et al. Experiment and improvement on clamping cotton precision seeding dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):43-47. (in Chinese)
- [20] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder

- using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347–356.
- [21] 雷小龙, 杨文浩, 杨龙君, 等. 油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 54–64. LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 54–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002007&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007. (in Chinese)
- [22] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54–66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)
- [23] 陈玉龙. 基于有序充种方式的滚筒鸭嘴穴播器的设计研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015. CHEN Yulong. Design and research of the duckbill pattern roller dibbler based on characteristics of ordered system[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [24] 王吉奎, 付威. 脱绒棉种的物料学特性研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(1): 169–172. WANG Jikui, FU Wei. The study of delinted cottonseed physical characteristics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1): 169–172. (in Chinese)
- [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 the delinted and coated cottonseed[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(1): 175–180. (in Chinese)

(上接第 82 页)

- [25] 杨硕, 王秀, 高原源, 等. 玉米精密播种粒距在线监测与漏播预警系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 17–24, 35. YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design of on-line seed spacing monitoring and miss seeding warning system for maize precision planting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 17–24, 35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210302&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.002. (in Chinese)
- [26] 丁幼春, 杨军强, 朱凯, 等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 29–36. DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29–36. (in Chinese)
- [27] 丁幼春, 朱凯, 王凯阳, 等. 薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 12–20. DING Youchun, ZHU Kai, WANG Kaiyang, et al. Development of monitoring device for medium and small size seed flow based on thin surface laser-silicon photocell[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 12–20. (in Chinese)
- [28] 丁幼春, 王凯阳, 杜超群, 等. 高通量小粒径种子流检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 20–28. DING Youchun, WANG Kaiyang, DU Chaoqun, et al. Design and experiment of high-flux small-size seed flow detection device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 20–28. (in Chinese)
- [29] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11–21. DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 11–21. (in Chinese)
- [30] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜, 等. 油菜籽漏播螺旋式补种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 16–24. DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on spiral-tube reseeding device for loss sowing of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 16–24. (in Chinese)
- [31] 丁幼春, 杨军强, 张莉莉, 等. 油菜精量排种器变量补种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 27–36. DING Youchun, YANG Junqiang, ZHANG Lili, et al. Design and experiment on variable reseeding system for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 27–36. (in Chinese)
- [32] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 10–17. LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum simulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10–17. (in Chinese)