

丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验

贾洪雷<sup>1,2</sup> 张胜伟<sup>1</sup> 陈天佑<sup>1</sup> 赵佳乐<sup>1,2</sup> 郭明卓<sup>1</sup> 袁洪方<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**摘要:** 为降低排种器倾斜状态对充种性能的影响,满足丘陵坡地精密播种作业的需求,设计了一种自吸式绿豆精密排种器。通过分析种子受力状态与计算吸附单粒种子的真空度,确定了勺式型孔与往复式吸气装置的主要结构参数。运用多体动力学软件 ADAMS 对往复式吸气装置进行了运动学仿真,得出活塞位移和速度随时间的变化曲线,证明了该装置设计的合理性。将充种层高度固定为 70 mm,转速分别固定为 115、125 r/min,排种器左右倾斜角(倾向种腔方向为负)分别选取 -12°、-6°、0°、6°、12°,对 3 种排种盘进行了对比试验,结果表明,本文所设计的勺式型孔有助于在左右倾斜状态下辅助充种;选取排种轴转速、充种层高度为试验因素,以漏播指数、重播指数、合格指数为试验指标,进行了两因素五水平旋转组合设计试验,并利用 Design-Expert 软件对试验数据进行了分析,结果表明:当排种轴转速为 138 r/min、充种层高度为 65 mm 时,漏播指数为 2.97%,重播指数为 3.43%,合格指数为 93.58%,各指标均符合国标要求。通过验证试验得到实测值与回归模型预测值的漏播指数相对误差为 4.4%,重播指数相对误差为 2.6%,合格指数相对误差为 0.2%,与寻优结果基本一致,证明了回归模型的合理性。

**关键词:** 绿豆;精密排种器;自吸;丘陵山区

中图分类号: S223.2<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0051-10

OSID:



Design and Experiment of Self-suction Mung Bean Precision Seed Metering Device

JIA Honglei<sup>1,2</sup> ZHANG Shengwei<sup>1</sup> CHEN Tianyou<sup>1</sup> ZHAO Jiale<sup>1,2</sup> GUO Mingzhuo<sup>1</sup> YUAN Hongfang<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Aiming to meet the requirement of precision seeding operations in hill sloping fields and decrease the impacts of rightward or leftward inclination of metering devices on seed-filling quality, a self-suction mung bean precision seed metering device was designed. The structural parameters of spoon-shaped holes were determined through analysis of seed forces. The structural parameters of reciprocating suction devices were determined through calculating the vacuum degree of adsorbed single seeds. Kinematic simulation of the reciprocating suction device on the multi-body dynamics software ADAMS uncovered the temporal curves of the piston displacement and velocity. Then the simulation results were validated to be reliable. The seed-filling layer height was fixed at 70 mm and the rotation speeds were fixed at 115 r/min and 125 r/min, while the right and left inclination angles were set at -12°, -6°, 0°, 6° or 12° (direction inclined to the seed chamber was negative). Comparison of three types of seed plates showed the spoon-shaped holes designed here facilitated the auxiliary seed filling under the left and right inclined status. Two-factor and five-level horizontal rotation combinations were designed and tested, involving factors of metering shaft rotation speed and filling layer height, and the indices of missing index, multiple index and qualified index. Then the test data were analyzed on Design-Expert. The missing index and qualified index were both more significantly affected by the metering shaft rotation speed than by the filling layer height. The multiple index was more considerably impacted by the filling layer height than by the metering shaft speed. At the metering shaft speed of 138 r/min and the filling layer height of 65 mm, the missing index, multiple index and qualified index were 2.97%, 3.43% and

收稿日期: 2019-11-07 修回日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0701102)、国家自然科学基金项目(51705191)和吉林省自然科学基金项目(20180101090JC)

作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: jiahl@vip.163.com

通信作者: 袁洪方(1984—),男,副教授,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: yhf1984828@163.com

93.58% respectively, which all met the national standards. The seed metering device can be referred during the design of precision seed metering devices in the future. Finally, the measured and predicted values of the regression model were obtained through the verification test. The relative error of the missing index was 4.4%, the relative error of the multiple index was 2.6%, and the relative error of the qualified index was 0.2%, which was basically consistent with the optimization result, proving the rationality of the regression model.

**Key words:** mung bean; precision seed metering device; self-suction; mountainous area

0 引言

精密排种器是播种机实现精量播种的核心部件。目前,常用的精密排种器分机械式与气力式两类<sup>[1-4]</sup>。根据相关研究分析可知,充种过程中,机械式排种器容易使种子挤压堵塞,造成缺苗断垄,清种过程一般采用硬毛刷式清种器,护种过程一般采用固定式护种板,种刷的摩擦和种子与护种板之间的相对运动和摩擦,不可避免地会对种子造成损伤,且作业速度较低,对种子的尺寸形状要求严格<sup>[5-11]</sup>。除指夹式排种器外,机械式排种器在丘陵坡地作业时,会随地势倾斜而倾斜,严重影响充种与排种质量。而指夹式排种器由于强制夹持种子,虽在丘陵等斜坡作业时具有较好的适应性,但在工作时摆动夹夹持种子在种盘上运动,种子易产生破损,指夹易发生磨损,且结构复杂,指夹弹簧使用寿命较短,限制了其推广和应用<sup>[12]</sup>。气力式排种器对密封性要求较高,播种效果较好,不易受丘陵坡地的倾斜角度影响,在丘陵坡地作业时,种子不易脱落,抗干扰能力强,适用于大型播种机具大面积高速播种作业<sup>[13-16]</sup>。

在丘陵等地形复杂的小地块播种杂粮时,利用小型拖拉机与机械式排种器配套仍然是主流形式,但机械式排种器在倾斜条件下作业会导致种子在型孔中充填性能下降,从而使重播与漏播现象加剧。为解决上述问题,本文设计自吸式绿豆精密排种器,该机具有气力式排种器坡地作业抗干扰能力强的优点,而又无需风机提供负压,可节省功耗,以期满足丘陵坡地等小地块精密播种作业的需求。

1 结构与工作原理

如图 1 所示,自吸式绿豆精密排种器主要由水箱、过滤塞、中间壳体、种盘、种层高度调节板、清种刷、泄种盖、种腔、气室、气缸总成(气缸壁、活塞等)、传动轴、驱动链轮、压盘、后壳体等组成。气室内设有双气道,吸种时,气体经型孔进入内圈气道,经左侧水箱中的过滤塞过滤掉种子杂质。由于种腔前后腔体经螺栓连接合成,种层高度调节板、清种刷均安装在种腔内部,可分别调节种层高度、清种力度,播种完后残余种子可打开泄种盖取出。

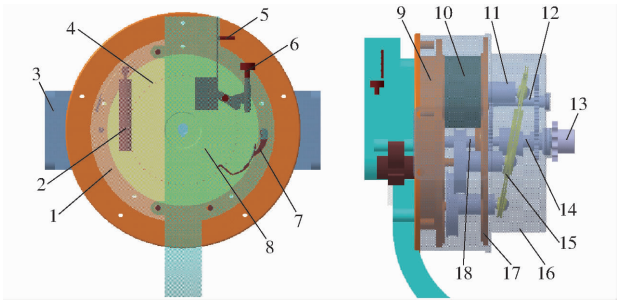


图 1 自吸式排种器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of self-suction seed metering device

1. 水箱 2. 过滤塞 3. 中间壳体 4. 种盘 5. 种层高度调节板  
6. 清种刷 7. 泄种盖 8. 种腔 9. 气室 10. 气缸壁 11. 活塞  
12. 中间轴 13. 驱动链轮 14. 排种轴 15. 压盘 16. 后壳体  
17. 气缸端盖 18. 被动轴

排种器工作时,外部动力带动驱动链轮转动,转动动力在排种器内分成两部分,一部分通过齿轮与中间轴将动力传递给被动轴,从而带动种盘转动;另一部分动力通过排种轴上的偏心支套与压盘带动活塞做往复运动,从而使气室内产生负压,完成充种、清种、投种过程。

2 关键部件设计

2.1 排种盘

排种盘作为与种子直接接触的部件,其结构参数对充种质量具有一定影响<sup>[17]</sup>。

2.1.1 种子受力分析

传统的气吸式排种器所采用的吸孔一般为平面吸孔,该吸孔对种子的适应性较强,但对真空度要求较高,若真空度较小,使漏播指数增加,若过大会导致重播,工作过程中往往采用增大真空度,同时采用清种器清除多余种子,这势必会增加风机功耗;为弥补传统排种盘采用平面吸孔的不足,国内学者越来越倾向于研究设计机械与气吸结合式排种盘,采用机械结构辅助充种,以达到降低风机功耗的目的<sup>[18-20]</sup>。在此基础上,本排种器将型孔设计成勺式型孔,不仅可以降低功耗,还可以在倾斜状态下辅助充种。

如图 2 所示,该排种器的种盘将工作区域划分为充种区Ⅰ、清种区Ⅱ、投种区Ⅲ,各区域对排种质量影响最大的为充种区Ⅰ<sup>[21]</sup>,种子只有在充种区被

吸附在型孔上,才能进行投种,如图 3 所示,在充种区型孔中的单粒种子受到自身重力  $G$ 、气流吸附力  $F$ 、种子旋转运动时离心力  $J$ 、型孔槽下壁面的支持力  $N_1$ 、型孔槽上壁面的支持力  $N_2$ 、种子与下壁面的摩擦力  $F_r$ 、种子运动过程中所受的内摩擦力  $F_f$ ,因种子充种多发生在即将离开种面时,因此不考虑种子所受的空气阻力与种群侧压力。

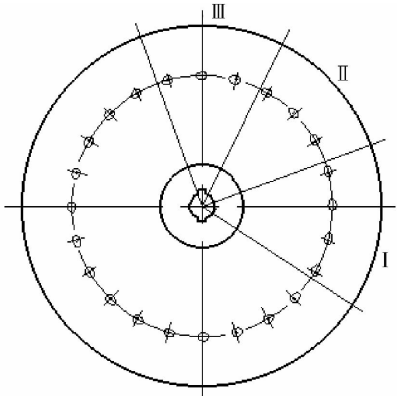


图 2 种盘工作区域划分示意图

Fig. 2 Working zone division of seed plate

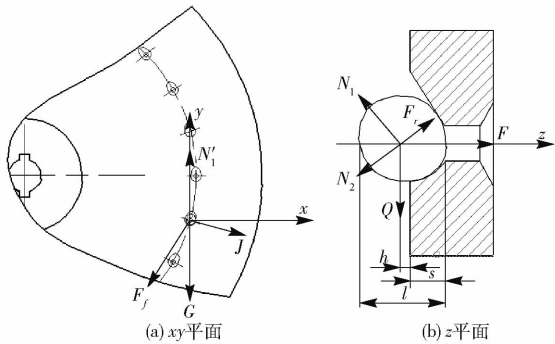


图 3 种子受力分析示意图

Fig. 3 Schematics of seed force analysis

如图 3 所示,正常充种时,种子被吸附在勺式型孔中达到受力平衡,不会掉落,需满足关系

$$F \frac{d}{2} = Qh \quad (1)$$

式中  $d$ ——中间孔径

$h$ ——种子重心至种盘侧壁间距

$Q$ —— $G$ 、 $J$ 、 $F_f$  的合力

设吸起单粒种子的真空度为  $H_0$ ,则

$$H_0 = \frac{F}{S} \quad (2)$$

其中

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

式中  $S$ ——吸孔截面面积

由式(1)~(3)可计算气室所需要的临界真空度

$$H_0 = \frac{8hQ}{\pi d^3} \quad (4)$$

负压为 0 时对种子进行受力分析,如图 4 所示,

以  $I$  点为支撑点,设种子恰好处于掉落临界状态达到受力平衡,则有

$$F_r c = Qh \quad (5)$$

$$N_1 \sin \sigma = F_r \cos \sigma \quad (6)$$

其中

$$\sin \sigma = \frac{h}{c}$$

式中  $c$ ——种子平均等效半径

$\sigma$ ——点  $I$  至种子重心的连线与该种子重心  
竖直向下方向之间夹角

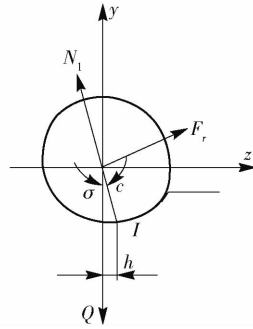


图 4 辅助托种受力分析示意图

Fig. 4 Analysis diagram of force on auxiliary supporting seed

又由图 3 知

$$h = \frac{l}{2} - s \quad (7)$$

式中  $l$ ——绿豆种子的某一尺寸

$s$ ——勺型孔槽深度

结合式(5)~(7),可得

$$N_1 = Q \sqrt{1 - \left( \frac{l-2s}{2c} \right)^2} \quad (8)$$

根据式(4)~(8),设  $Q$ 、 $d$ 、 $l$ 、 $c$  不变,增加勺型孔槽深度  $s$  将减小种子重心至种盘侧壁间距  $h$ ,使勺型孔槽下壁面的支持力  $N_1$  变大,从而起到辅助托持种子的作用,同时可达到减小真空度的目的。但勺型孔槽深度  $s$  过大易吸附多粒种子导致重播指数增加,所以勺型孔槽深度  $s$  需根据所测种子三维尺寸中的最小值 3.4 mm,将勺型孔槽深度  $s$  设为小于其最小值的一半,为 1.6 mm。

### 2.1.2 种盘参数的初步确定

排种盘的结构参数主要包括种盘直径、种盘厚度、型孔个数及型孔的各结构参数等。通过查阅文献可知,传统的气吸式排种盘直径一般选择 140 ~ 260 mm,考虑到该排种器内部结构的布局,将排种盘直径设计为 180 mm,厚度为 4 mm,吸孔与种盘的中心距为 65 mm,沿圆周方向均匀分布 24 个型孔。

由图 5 可知,勺式型孔的结构参数主要有勺型孔槽下壁面半径  $R$ 、孔槽上壁面倾角  $\varepsilon$ 、勺型孔槽深度  $s$ 、中间孔深  $t$ 、中间孔径  $d$ 、底孔直径  $H$  等。确定这些参数需考虑绿豆种子的三维尺寸,因此本文选

用 150 粒白绿 9 号绿豆测量其三维尺寸,测量结果如表 1 所示。

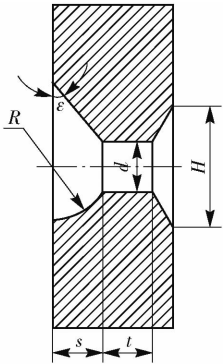


图 5 勺式型孔主要参数

Fig. 5 Main parameters of spoon-shaped holes

表 1 白绿 9 号绿豆种子物理性质测量结果

Tab. 1 Physical properties of Bailv9 mung bean seeds

| 参数  | 长度/<br>mm | 宽度/<br>mm | 厚度/<br>mm | 球形率/<br>% | 等效直径/<br>mm |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 平均值 | 5. 19     | 3. 89     | 3. 93     | 82. 8     | 4. 29       |

根据式(4)可知,中间孔径  $d$  越大,吸起单个种子的真空度  $H_0$  越低, $d$  越小,真空度  $H_0$  越高,根据农业机械设计手册,种子形状接近于球形的种子,其中间孔径  $d$  为

$$d = (0.64 \sim 0.66) W \tag{9}$$

式中  $W$  为种子平均宽度,根据表 1 可知绿豆种子平均宽度为 3.89 mm,通过式(9)计算中间孔径  $d$  的范围并取 2.4 mm,同时将中间孔深  $t$  设为 2 mm,为了更好地贴合吸室橡胶垫,将底孔直径  $H$  设为 5 mm。

勺型孔槽下壁面半径  $R$  需要根据种子等效直径来确定,理论上应大于等于等效直径的一半才能在充种时增加下壁面与绿豆表面的接触面积,从而起到托持辅助充种的作用,因此本文将勺型孔槽下壁面半径  $R$  设为 2.2 mm。

孔槽上壁面倾角  $\varepsilon$  的大小对排种质量尤为重要,为降低重播,勺型孔槽深度应满足

$$s < \frac{1}{2}l \tag{10}$$

其中  $l$  在此设为种子三维尺寸中的最小值,所以  $\varepsilon$  取任何值种子重心都会在种盘侧壁外侧,但如图 6a 所示,当  $\varepsilon$  过大充种时种子向外倾斜,重心向外偏移,不易充种,易造成漏播,为求得  $\varepsilon$  值,如图 6b 所示,设种子在重心与种盘侧壁面重合,在  $Rt\triangle OAC$  中, $l_{OA} = s = 1.6\text{ mm}$ , $l_{AC} = d/2 = 1.2\text{ mm}$ ,根据三角函数关系求得  $\alpha \approx 37^\circ$ , $l_{OC} = 2\text{ mm}$ ;在  $Rt\triangle OMC$  中, $l_{OM}$  取种子平均宽度的一半约为 1.9 mm,根据三角函数关系计算得  $\beta \approx 18^\circ$ ;通过计算得到  $\varepsilon = 55^\circ$ , $\varepsilon$  应该略大于  $55^\circ$ ,故本文定为  $57^\circ$ 。

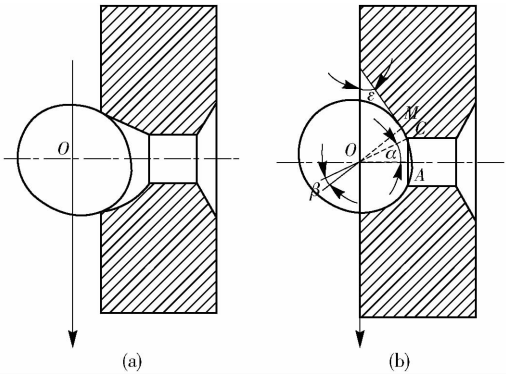


图 6 充种状态分析示意图

Fig. 6 Schematics of seed filling state analysis

2.2 往复式吸气装置

本文所设计的排种器利用机械结构产生负压进行吸种,从而替代风机,改变了传统的气吸式排种器真空度产生方式,有利于节能降耗。

2.2.1 工作原理

如图 7 所示,工作时活塞 I 在回程过程中,气缸无杆腔体积增大,形成负压,将阀 3 打开,外部大气压将种子压附于位于充种区的种盘型孔内,空气通过型孔、气室通道进入气管 2,经活塞 I 内部进气腔进入无杆腔;同时,气缸有杆腔体积减小,将阀 5 顶开,气体经活塞 I 内部的排气腔排除。活塞 II 在推程过程中,与此原理相同。

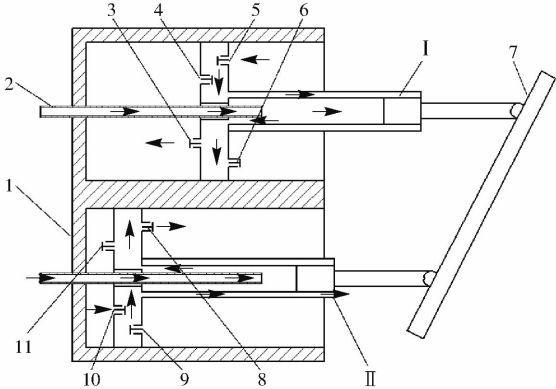


图 7 往复式吸气装置工作原理图

Fig. 7 Operational principle diagram of reciprocating suction device

1. 气缸壁 2. 气管 3~6、8~11. 阀门 7. 压盘 I、II. 活塞

2.2.2 真空度的确定

往复式吸气装置工作时所产生的真空度应大于气室吸起单粒种子所需要的真空度。首先计算气室吸起单粒种子所需要的真空度

$$H_0 = \frac{80K_1K_2mgh}{\pi d^3} \left( 1 + \frac{v^2}{gr} + \lambda \right) \tag{11}$$

$$\lambda = (6 \sim 10) \tan \tau \tag{12}$$

其中  $m$ ——单粒种子质量, g  
 $v$ ——种盘吸孔中心处的线速度, m/s

- $r$ ——种盘吸孔处转动半径, m
- $g$ ——重力加速度, 取  $9.8\text{ m/s}^2$
- $\lambda$ ——种子综合摩擦因数, 取 6
- $\tau$ ——种子自然休止角, ( $^\circ$ )
- $K_1$ ——吸种可靠系数, 取  $1.8 \sim 2.0$
- $K_2$ ——工作可靠性系数, 取  $1.6 \sim 2.0$

为保证充种效果,需增大充种压力,所以取绿豆种子三维尺寸中的最大值  $5.8\text{ mm}$  时,根据式(7), $h$  取  $0.13\text{ cm}$ ;单粒绿豆种子质量取  $0.06\text{ g}$ ;种子的自然休止角取  $23.8^\circ$ ;  $K_1$  取  $1.9$ ,  $K_2$  取  $1.8$ ;假设机器前进速度为  $4 \sim 10\text{ km/h}$ ,通过式(11)计算得  $H_0$  为  $1.77 \sim 1.81\text{ kPa}$ 。

### 2.2.3 参数确定

本文所设计的往复式吸气装置类似斜盘式柱塞吸气泵,由于往复式机械的结构与工作特点,产生流量与压力脉动较大,为减小脉动,采用轴向多缸往复式形式,气缸个数选择 5 个,其主要参数为压盘最大倾角  $\theta$ 、气缸分布圆半径  $R_i$ 、缸径  $D_i$ 、活塞杆直径  $d_i$  等。

根据气室内部弧形气道的半径,气缸分布圆半径  $R_i$  设为  $80\text{ mm}$ ,参照斜盘式柱塞泵斜盘的最大倾角范围  $15^\circ \sim 20^\circ$ ,将压盘最大倾角  $\theta$  设为  $20^\circ$ ,传统气缸设计通常给定气缸所受的轴向负载力等参数来确定缸径等参数,而往复式吸气装置承受多变流体负载力,难以确定,后续通过运动学仿真加工实物进行多次试验,初步确定活塞杆直径  $d_i$  为  $25\text{ mm}$ ,缸径  $D_i$  为  $85\text{ mm}$ ,当排种轴转速达到  $90\text{ r/min}$  以上时,利用真空压力计测得气室内压强并转换成真空度,大于  $1.81\text{ kPa}$ ,证明所设计的参数合理。

## 3 往复式吸气装置运动学仿真

由于该排种器的往复式吸气装置相对复杂,为确保所设计的往复式吸气装置各零部件安装后运动无干涉,减少返工加工次数,本文运用多体动力学软件 ADAMS 对排种器往复式吸气装置进行运动学仿真。

### 3.1 仿真建模

首先,运用三维建模软件 CATIA 建立排种器三维模型,将建立好的模型保存为 STP 格式导入 ADAMS 软件,导入后的模型经简化如图 8 所示。

对模型中的所有零部件根据各零部件间运动关系添加接触约束,设定排种轴转速为  $120\text{ r/min}$ ,仿真时长为  $1\text{ s}$ ,步长为  $0.001$ 。

### 3.2 仿真结果分析与验证

仿真结束后,通过后处理模块得到 5 个活塞沿其轴向运动的位移与速度曲线,如图 9、10 所示。

由图 9 与图 10 可知,活塞沿着其轴向有规律的往复移动,最大位移为  $29\text{ mm}$ ,最大速度为  $0.182\text{ m/s}$ ,

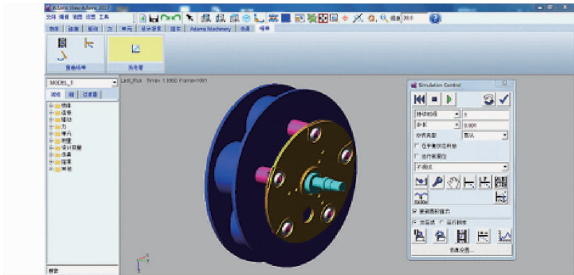


图 8 往复式吸气装置仿真模型

Fig. 8 Simulation model of reciprocating suction device

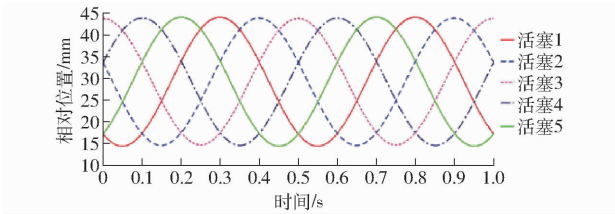


图 9 活塞位移曲线

Fig. 9 Piston displacement curves

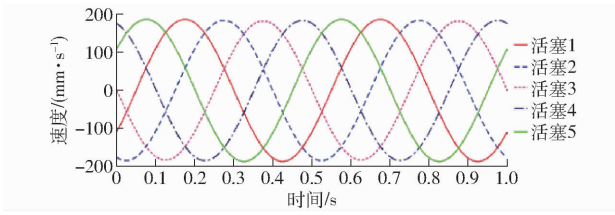


图 10 活塞速度曲线

Fig. 10 Piston speed curves

5 个活塞运动轨迹一致,且相互之间无干扰,活塞在推程与回程交界处运动平缓,无明显冲击振动,说明该装置设计合理。

## 4 性能试验

### 4.1 试验材料与方法

#### 4.1.1 试验材料

试验选取吉林省白城市所产的白绿 9 号绿豆种子为材料,当地种植株距一般为  $12 \sim 18\text{ cm}$ ,本文试验中理论粒距选取当地常用的  $15\text{ cm}$ ,其物理性质测定如表 1 所示,试验装置选择吉林大学农机实验室的 JPS-12 型排种器试验台(图 11)。

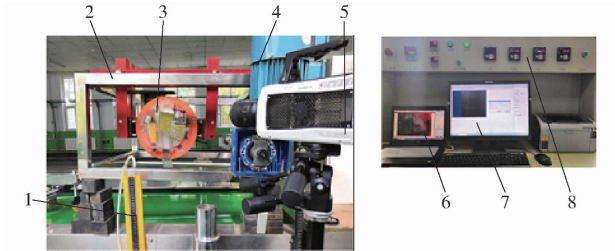


图 11 排种器试验台

Fig. 11 Test bed of seed metering device

- 1. 真空计 2. 台架 3. 自吸式排种器 4. 驱动电机 5. 高速摄像机 6. 摄像机控制系统 7. 试验台数据采集显示器 8. 试验控制台



4.1.2 试验设计

(1)为证明本文所设计的种盘有助于在左右不同倾斜状态下辅助充种,利用 CATIA 软件设计另外两种常用且具有不同型孔形状的排种盘,并利用 3D 打印技术加工制作成型,3 种排种盘分别命名为 A 盘、B 盘、C 盘,如图 12 所示,将其分别安装在排种器上,以充填率为评价指标,进行 5 种不同倾斜角的台架对比试验,通过试验结果分析选取充填率最优的种盘。

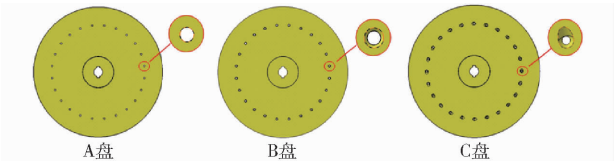


图 12 试验用排种盘类型

Fig. 12 Seed metering plate used in tests

(2)将上述充填率最优排种盘安装在所设计的排种器上,以排种轴转速、充种层高度为因素进行两因素五水平旋转组合设计试验,以漏播指数、重播指数、合格指数为评价指标,并利用 Design-Expert 软件对试验数据进行回归分析,利用响应面法寻找该排种器工作时的最佳参数组合。

(3)以漏播指数、重播指数、合格指数为评价指标,对得出的上述最佳参数组合进行 5 次重复验证试验,证明试验 2 回归模型的合理性。

4.1.3 试验因素与水平

试验 1 进行试验时通过控制种层高度调节板将充种层高度固定为 70 mm,转速分别固定为 115、125 r/min,排种器左右倾斜角(倾向种腔方向为负)分别选取  $-12^{\circ}$ 、 $-6^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $12^{\circ}$ 。

本文所设计的排种器是利用机械传动产生负压的,有别于传统的气力式排种器利用风机控制负压大小,由于该排种器排种轴转速将直接影响负压,故试验 2 只选取排种轴转速、充种层高度为因素,其编码如表 2 所示。

表 2 试验因素与编码

Tab. 2 Test factors and level codes

| 编码      | 试验因素                          |          |
|---------|-------------------------------|----------|
|         | 排种轴转速/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 充种层高度/mm |
| 1. 414  | 146                           | 96       |
| 1       | 140                           | 90       |
| 0       | 125                           | 75       |
| -1      | 110                           | 60       |
| -1. 414 | 104                           | 54       |

所选取的排种轴转速在 104 ~ 146 r/min 之间,由于排种器内部设有齿轮减速装置,减速装置总传动比为 3. 24,故被动轴排种盘转速在 32 ~ 46 r/min

之间,又已知种盘型孔数与理论粒距,通过计算,满足 JPS-12 型排种器试验台传动带速度及电机传动轴转速要求;实际作业时,只需合理配置增速装置,也可使排种轴达到 146 r/min。故选取的排种轴转速区间合理。

4.1.4 试验指标

试验 1 以种子在型孔中的充填率为指标,即设定种子离开种层时至种子离开充种区为观测区,利用高速摄像机记录并观测 250 个型孔上的种子是否充填,在观测区中种子充填在型孔上说明充填成功,其计算公式为

$$P = \frac{n_1}{N_m} \times 100\%$$
 (13)

式中  $n_1$ ——充填成功型孔的个数  
 $N_m$ ——所观测型孔总个数

试验 2 根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》进行 13 组试验,每组试验采集 250 粒种子进行统计,试验重复 5 次,以漏播指数  $M$ 、重播指数  $D$ 、合格指数  $A$  为排种性能评价指标,其计算公式为

$$M = \frac{n_2}{N} \times 100\%$$
 (14)

$$D = \frac{n_3}{N} \times 100\%$$
 (15)

$$A = (1 - M - D) \times 100\%$$
 (16)

式中  $n_2$ ——相邻种子粒距大于 1.5 倍理论粒距的种子数  
 $n_3$ ——相邻种子粒距小于等于 0.5 倍理论粒距的种子数  
 $N$ ——统计时的种子总数

试验 3 也以漏播指数、重播指数、合格指数为排种性能评价指标,对试验 2 得出的最佳工作参数进行 5 次重复试验,验证其回归模型合理性。

4.2 试验结果及分析

4.2.1 种盘对比试验

按照试验 1 设计选取因素编码值进行单因素试验,试验重复 5 次,试验结果取平均值,其结果如图 13 所示。

由图 13 可知,当排种轴转速为 115 r/min 时,随着倾斜角的增加,3 个种盘的充填率均出现不同程度的提高,在  $-12^{\circ} \sim -6^{\circ}$  之间,充填率相差不明显; $-6^{\circ} \sim 0^{\circ}$  之间 C 盘的充填率提高速率明显高于 A 盘、B 盘,在  $0^{\circ}$  时 C 盘的充填率高于 80%,A 盘、B 盘均低于 75%; $12^{\circ}$  时 C 盘的充填率高于 90%,A 盘、B 盘的充填率均低于 85%。当排种轴转速为 125 r/min 时,在  $-12^{\circ} \sim 0^{\circ}$  之间随角度增加,C 盘的充填率较 A 盘、B 盘提高较快,A 盘、B 盘的充填率

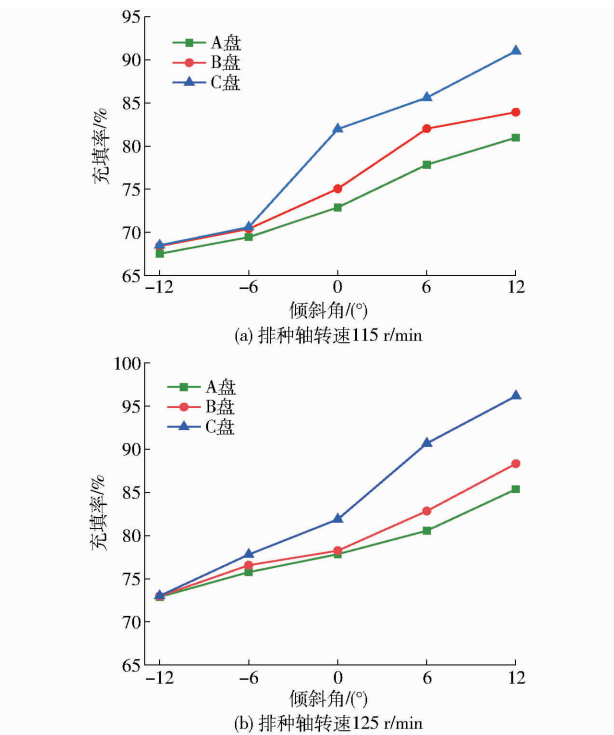


图 13 不同种盘的充填率随倾斜角度的变化曲线  
Fig. 13 Curves of different seed plate filling rates changing with inclination angle

相差不大,在 12°时 C 盘的充填率达到 95%,而 A 盘、B 盘均在 90% 以下。总体可以看出,随转速提升,3 种种盘的充填率均有所提高,同一倾斜角下,图 13 中 C 盘的充填率都高于 A 盘、B 盘,在倾斜

状态下,C 盘更有利于充种,因此选用 C 盘进行后续试验。

4.2.2 旋转组合设计试验

根据表 2,试验采用两因素五水平旋转组合设计试验,其试验方案及其结果如表 3 所示( $X_1$  为排种轴转速编码值, $X_2$  为充种层高度编码值),根据上述试验结果,利用 Design-Expert 软件对其进行回归分析,两个因素及其交互作用对三指标的影响结果如表 4 所示。

表 3 试验方案与试验结果

| Tab.3 Test schemes and results |        |        |            |            | %          |
|--------------------------------|--------|--------|------------|------------|------------|
| 试验                             | 因素     |        | 指标         |            |            |
| 编号                             | $X_1$  | $X_2$  | 漏播指数 $Y_1$ | 重播指数 $Y_2$ | 合格指数 $Y_3$ |
| 1                              | 1      | 1      | 0.78       | 14.26      | 84.95      |
| 2                              | 1      | -1     | 4.91       | 1.90       | 93.19      |
| 3                              | -1     | -1     | 23.88      | 1.35       | 74.77      |
| 4                              | -1     | 1      | 12.54      | 3.81       | 83.65      |
| 5                              | 1.414  | 0      | 1.02       | 9.39       | 89.59      |
| 6                              | -1.414 | 0      | 24.94      | 1.18       | 73.87      |
| 7                              | 0      | 1.414  | 1.72       | 11.23      | 87.04      |
| 8                              | 0      | -1.414 | 11.56      | 1.02       | 87.41      |
| 9                              | 0      | 0      | 6.16       | 3.52       | 90.31      |
| 10                             | 0      | 0      | 5.86       | 2.97       | 91.16      |
| 11                             | 0      | 0      | 5.31       | 3.09       | 91.60      |
| 12                             | 0      | 0      | 5.44       | 3.42       | 91.13      |
| 13                             | 0      | 0      | 5.07       | 3.21       | 91.72      |

表 4 各参数对排种指标的显著性分析

| 来源        | 漏播指数     |              | 重播指数     |              | 合格指数                   |              |
|-----------|----------|--------------|----------|--------------|------------------------|--------------|
|           | $F$      | $P$          | $F$      | $P$          | $F$                    | $P$          |
| 模型        | 317.93   | <0.000 1 *** | 537.61   | <0.000 1 *** | 272.05                 | <0.000 1 *** |
| $X_1$     | 1 108.57 | <0.000 1 *** | 809.94   | <0.000 1 *** | 638.2                  | <0.000 1 *** |
| $X_2$     | 229.52   | <0.000 1 *** | 1 356.57 | <0.000 1 *** | $4.685 \times 10^{-3}$ | 0.947 3      |
| $X_1 X_2$ | 27.68    | 0.001 2 **   | 310.48   | <0.000 1 *** | 212.43                 | <0.000 1 *** |
| $X_1^2$   | 223.21   | <0.000 1 *** | 75.99    | <0.000 1 *** | 467.29                 | <0.000 1 *** |
| $X_2^2$   | 7.57     | 0.028 5 *    | 160.29   | <0.000 1 *** | 85.93                  | <0.000 1 *** |
| 失拟        | 4.33     | 0.095 3      | 2.18     | 0.233 4      | 1.29                   | 0.392 5      |

注: \* 表示在 0.05 水平下显著, \*\* 表示在 0.01 水平下显著, \*\*\* 表示在 0.001 水平下显著。

去除对指标影响不显著项后,通过 Design-Expert 软件得漏播指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、合格指数  $Y_3$  拟合回归方程

$$Y_1 = 5.57 - 8.07X_1 - 3.67X_2 + 1.8X_1X_2 + 3.88X_1^2 + 0.72X_2^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 3.24 + 2.83X_1 + 3.66X_2 + 2.48X_1X_2 + 0.93X_1^2 + 1.35X_2^2 \quad (18)$$

$$Y_3 = 91.19 + 5.24X_1 - 4.28X_1X_2 - 4.81X_1^2 - 2.06X_2^2 \quad (19)$$

由表 4 可知,3 个指标的回归模型极显著,且模

型的失拟项均不显著,说明拟合的回归方程具有高度可靠性,能够准确反映排种轴转速  $X_1$ 、充种层高度  $X_2$  与漏播指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、合格指数  $Y_3$  之间的关系。

通过 Design-Expert 软件得到两因素交互作用对漏播指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、合格指数  $Y_3$  影响的响应曲面,如图 14 所示。

由图 14 知,当充种层高度一定时,随着排种轴转速提高,漏播指数快速降低,重播指数缓慢上升,合格指数急速上升至平缓,其原因分析如下:排种轴

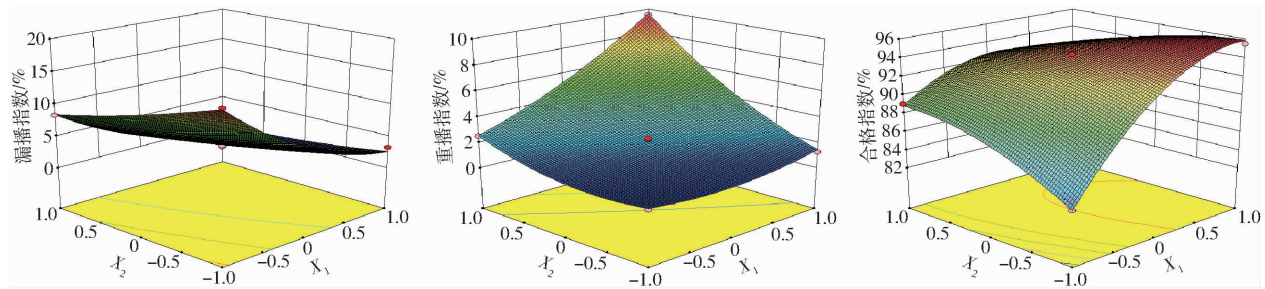


图 14 两因素交互作用对各指标的影响

Fig. 14 Effects of two factors and their interaction on different indices

转速较低时,往复式吸气装置往复频率较慢,产生的真空度较低,吸种压力不足,造成漏播指数较大,随着转速提高,气室真空度提升,型孔可吸起多粒种子,造成重播指数上升。当排种轴转速一定时,随着充种层高度增加,漏播指数缓慢下降,重播指数与合格指数均缓慢上升,其原因分析如下:种层高度越高,型孔成功充填多粒种子的几率越大,由于该排种器无携种区,充种区距离投种区较近,充种至投种过程中不易清种,造成重播指数上升,漏播指数下降。对于漏播指数与合格指数,排种轴转速比充种层高度影响显著;对于重播指数,充种层高度比排种轴转速影响显著。

根据上述试验结果及回归方程,以漏播指数最小、重播指数最小、合格指数最大寻找两个因素最佳参数组合,设定目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2) \\ \min Y_2(X_1, X_2) \\ \max Y_3(X_1, X_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.414 \leq X_1 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_2 \leq 1.414 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

通过查阅文献可知,大田生产对于漏播指数要求较为严格,因此寻优时漏播指数、重播指数、合格指数权重分别设为 5、1、4,参数设置完毕进行寻优,当排种轴转速为 138 r/min、充种层高度为 65 mm 时,漏播指数为 2.97%,重播指数为 3.43%,合格指数为 93.58%,各指标均符合国标要求。

4.2.3 验证试验

根据试验 3,在图 11 所示的排种器试验台上进行验证试验,设定排种轴转速为 138 r/min,充种层高度为 65 mm,待试验台及排种器运转稳定后,对 250 粒种子进行检测统计,试验效果如图 15 所示,试验结果如表 5 所示。

根据表 5 可知,验证试验实测值与回归模型预测值的漏播指数相对误差为 4.4%,重播指数相对误差为 2.6%,合格指数相对误差为 0.2%,与理论寻优结果基本一致,说明试验 2 得出的回归模

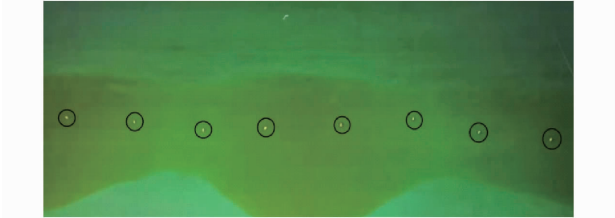


图 15 验证试验排种效果

Fig. 15 Seed metering effect drawing of verification test

表 5 验证试验结果

| 参数   | 评价指标       |             |              | % |
|------|------------|-------------|--------------|---|
|      | 漏播指数       | 重播指数        | 合格指数         |   |
| 预测值  | 2.97       | 3.43        | 93.58        |   |
| 实测值  | 3.1 ± 0.22 | 3.52 ± 0.17 | 93.38 ± 0.38 |   |
| 相对误差 | 4.4        | 2.6         | 0.2          |   |

型合理。

5 结论

(1) 针对机械式排种器在倾斜颠簸条件下作业会导致种子在型孔中充填性能下降,造成重播与漏播的问题,设计了一种自吸式精密排种器,阐述了其结构与工作原理,确定了其关键部件的主要结构参数。

(2) 对关键部件往复式吸气装置进行了运动学仿真,设定排种轴转速 120 r/min,得到活塞位移与速度曲线,分析得出,最大位移为 29 mm,最大速度为 0.182 m/s,且相互之间无干扰,在推程与回程交界处运动平缓,无明显冲击振动,证明了该部件设计的合理性。

(3) 进行了种盘对比试验,结果表明,所设计的勺式型孔种盘有助于在倾斜状态下辅助充种。通过旋转组合设计试验可知:对于漏播指数与合格指数,排种轴转速比充种层高度影响显著;对于重播指数,充种层高度比排种轴转速影响显著。利用响应面法对两个因素进行寻优,得出:当排种轴转速为 138 r/min、充种层高度为 65 mm 时,漏播指数为 2.97%,重播指数为 3.43%,合格指数为 93.58%,各指标均符合国标要求。



(4)通过验证试验得到实测值与回归模型预测值的漏播指数相对误差为 4.4% ,重播指数相对误差为 2.6% ,合格指数相对误差为 0.2% ,与寻优结果基本一致,证明了回归模型合理性。

参 考 文 献

[1] 贾洪雷,赵佳乐,郭明卓,等. 双凹面摇杆式排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1):60-65. JIA Honglei, ZHAO Jiale, GUO Mingzhuo, et al. Design and performance experiment on double-concave surface rocker type seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):60-65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150109&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150109&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.009. (in Chinese)

[2] YANG Li, YAN Bingxin, CUI Tao, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2016, 9(1):9-26.

[3] 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 vertical plate precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):22-26. (in Chinese)

[4] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1):46-52. CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):46-52. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140108&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140108&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008. (in Chinese)

[5] 曹文,丁俊华,李再臣,等. 机械式精密排种器的研究与设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(7):142-145. CAO Wen, DING Junhua, LI Zaichen, et al. Research and design of mechanical precision metering[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7):142-145. (in Chinese)

[6] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊):40-46. CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):40-46. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2014s107&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s107&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.007. (in Chinese)

[7] 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 inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):59-67. (in Chinese)

[8] 李玉环,杨丽,韩英,等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):115-123. LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):115-123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s015&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s015&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.015. (in Chinese)

[9] 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12):48-57. WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):48-57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171206&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171206&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.006. (in Chinese)

[10] 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 CSAE, 2009,25(10):107-111. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5):38-45. GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):38-45. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160506&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160506&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.006. (in Chinese)

[13] 陈立东,何堤,谢宇峰,等. 倾斜角度对气吸式排种器排种质量影响的试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2006(10):42-43.

- CHEN Lidong, HE Di, XIE Yufeng, et al. Experimental study on the impacts of inclination to the quality of seed meter[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2006(10):42-43. (in Chinese)
- [14] 靳晓燕,孙士明,张海滨,等. 2BJZ-2 型指夹式玉米单粒精量播种机设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(3):51-57.  
JIN Xiaoyan, SUN Shiming, ZHANG Haibin, et al. Design and research of 2BJZ-2 type corn single grain precision seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3):51-57. (in Chinese)
- [15] 杨善东,张东兴,高振强,等. 侧正压玉米排种器流场模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊):35-39.  
YANG Shandong, ZHANG Dongxing, GAO Zhenqiang, et al. Flow field simulation and working parameters analysis of side positive pressure maize seeding device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):35-39. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2014s106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.006. (in Chinese)
- [16] 丁力,杨丽,武德浩,等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):55-64.  
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):55-64. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)
- [17] 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):9-19.  
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22):9-19. (in Chinese)
- [18] 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23):15-23.  
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23):15-23. (in Chinese)
- [19] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):75-86.  
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):75-86. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180409&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [20] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):61-70.  
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):61-70. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190507&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190507&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.007. (in Chinese)
- [21] 杨善东,张东兴,刁培松,等. 侧正压玉米排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊):8-13.  
YANG Shandong, ZHANG Dongxing, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of side positive pressure seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.):8-13. (in Chinese)