

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.007

大豆集排带式排种器设计与试验

王业成 孙 浩 李宝权 韩 星 陈海涛

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为简化播种单体结构,适应大豆窄行密植农艺对播种机的要求,设计了一种大豆集排带式排种器。阐述了该排种器的基本结构和工作原理,并通过理论分析确定了关键部件结构参数。应用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法进行了参数优化试验,建立了以气压、作业速度、清种振动频率为试验因素,以合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标的数学模型,分析了各因素对合格指数、重播指数、漏播指数的影响规律。确定最佳参数组合为:气压 4.4 kPa、作业速度 10.5 km/h、清种振动频率 44.6 Hz,此时排种器性能指标为:合格指数 90.65%、重播指数 1.97%、漏播指数 7.38%。表明该排种器满足播种机的技术要求。

关键词: 大豆;集排带式;排种器;设计;试验

中图分类号: S223.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0074-10

Design and Experiment of Centralized Belt Type Soybean Seed-metering Device

WANG Yecheng SUN Hao LI Baoquan HAN Xing CHEN Haitao

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to simplify the structure of seeding monomer, improve the quality of planting, and meet the agricultural requirements of narrow row of soy closely planting on planter, a centralized belt type soybean seed-metering device was designed. The method of circulating flow seed filling and vibrating seed cleaning of the seed-metering device was described. The key structural parameters, such as supporting wheel, vibration bench for clearing seed, seed conveyor belt, position of air inlet and sealing device were determined through theoretical analysis and simulation analysis. The mechanical model of seed filling process and seed cleaning process was established, and the basic structure and working principle of the seed-metering device were introduced. The experiment was employed through the method of quadratic orthogonal rotating center combination of three factors and five levels according to national standard (GB 6973—2005). In test, soybean seed Heinong 38 was selected as experimental material. Combining with extensive pre-experiment and theoretical analysis, the air pressure, working speed and clear vibration frequency were taken as the main influencing factors, and seed qualified index, multiple index and missing index were taken as the response index, the experimental research was carried out. The optimal combination of parameters were clear vibration frequency of 44.6 Hz, air pressure value of 4.4 kPa and working speed of 10.5 km/h, and under the optimal combinations, the qualified index was 90.65%, the multiple index was 1.97%, and the missing index was 7.38%, the verification test was repeated five times, the results indicated that the actual test results were in agreement with the optimization results. This seed-metering device could meet the seeding requirements well. The research results provided a reference for the research of centralized precision seed-meter device.

Key words: soybean; centralized belt type; seed-metering device; design; experiment

0 引言

排种器是影响播种机性能的关键部件^[1-5],集

排式排种器使用 1 个排种部件进行多行播种,简化了播种单体结构,降低了播种成本,极大提高了播种效率,成为排种器的发展趋势^[6-10]。

收稿日期: 2018-11-23 修回日期: 2019-01-14
基金项目: 东北农业大学“学术骨干”项目(15XG10)、中国博士后科学基金项目(2016M601407)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS-04)
作者简介: 王业成(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 6wyec@163.com

气力式排种器对种子尺寸要求不高,作业时不伤种,可完成高速精量播种作业。为了提高排种器种子吸附效率,减小单粒种子分离阻力,一般采用机械搅种装置,通过机械振动、气力扰动方式改善充种性能。

为清除吸附到型孔上的多余种子,通常采用机械式刮种片进行清种作业^[11-15]。刮种片与各型孔之间需要有足够高的安装、调整精度,并且需参照种子品种、大小的不同,通过调整刮种元件的位置来提高排种性能,该装置增加了排种器结构的复杂性^[16-18]。

为此,本文设计一种大豆集排带式排种器,其结构为开放式半圆筒结构,种子在气压力和离心力的作用下吸附到型孔上,半圆筒结构底部的种子在摩擦力的作用下随着排种带向上运动,减小种子与型孔之间的相对速度,改善充种性能;清种振动装置通过柔性排种带使型孔振动,扰动多余吸附的种子,降低单粒种子从种子群内分离的阻力,完成清种过程,改善充种性能,提高播种质量。通过探究气压、作业速度、清种振动频率对排种性能的影响规

律,寻求最优工作参数组合,为集排式排种器的设计提供参考。

1 排种器结构与工作原理

1.1 结构

设计的集排带式排种器如图 1 所示,主要由种箱、排种带、种带支架、送种管、支撑轮、壳体、主动滚筒、从动滚筒、清种振动装置等组成。

主动滚筒与从动滚筒相互平行安置在种带支架上,其外周套有排种带,种带支架上端通过铰链,下端通过螺栓连接在主机架上,方便排种带的更换。排种带外周面半包在支撑轮上,受到支撑轮和气压的作用,柔性的排种带形成开放式半圆筒结构。在壳体与两支撑轮、排种带之间安装有浮动的密封装置,形成密闭的气室结构。排种器采用双进气口结构,来降低各型孔之间的气压差异,提高充种性能。

清种振动装置与排种带半圆筒结构的外侧接触,位于已吸附种子与壳体内种子分离处,激振力通过种带的变形,实现种子的振动,来清除多余吸附的种子。

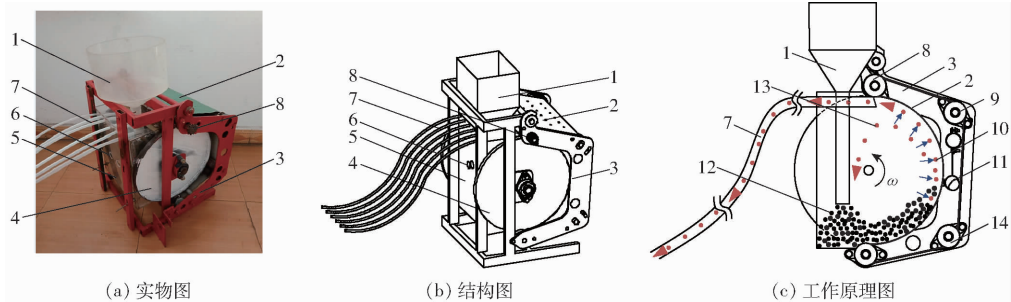


图 1 排种器结构图

Fig. 1 Structure diagrams of seed-metering device

1. 种箱 2. 排种带 3. 种带支架 4. 支撑轮 5. 壳体 6. 进气口 7. 送种管 8. 主动滚筒 9、14. 从动滚筒 10. 已吸附的种子 11. 清种振动装置 12. 种子堆积区 13. 下落种子

1.2 工作原理

如图 1b 所示,排种器工作时,排种带在主动滚筒摩擦力的作用下带动支撑轮、从动滚筒开始运动;风机产生的正压气流由进气口进入壳体,排种器内的种子堆积在充种区域处,底层种子在排种带摩擦力的作用下随排种带向上运动,而表层种子在重力的作用下沿堆积斜面向下滑落,实现充种区内的种子翻滚、循环流动。在排种带型孔内外压差和离心力的作用下种子吸附在型孔上,实现充种过程。

振动装置的激振力,通过排种带传递给排种带另一侧的种子。在振动的作用下,已经被型孔吸附的种子由稳定的静摩擦平衡状态转变为不稳定的动摩擦状态,利用种子间吸附力的差异,吸力较大的种子将挤掉其它吸力较弱的种子,形成型孔单粒吸附,

实现清种过程。同时充种区的种子受到激振力的作用,种子的流动性被提高,进一步降低种子的分离阻力,改善充种性能。

当已吸附的种子随排种带运动到其半圆筒结构的顶端时,排种带覆盖在主动滚筒上,使型孔两侧的气压差消失,种子在其自身重力及送种管入口流场的作用下,进入到送种管中,排入种沟内,完成排种过程。

2 关键部件设计与分析

2.1 充种过程分析

充种时,型孔经过种子堆积区,种子在气压力、重力、离心力作用下吸附在型孔上,其受力分析如图 2 所示。

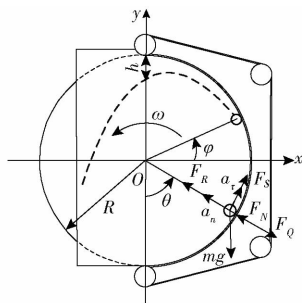


图2 充种过程受力分析

Fig. 2 Force analysis of absorbing stage

沿半圆筒的法向建立其动力学方程

$$ma_n = F_R + F_N - F_Q - mg \cos \theta \quad (1)$$

其中

$$a_n = \omega^2 R$$

式中

m ——单粒种子质量, g

a_n ——种子的法向加速度, m/s^2

F_N ——型孔对种子的支持力, N

F_Q ——气体对种子的压力, N

F_R ——种子被吸附时所受的阻力, N

ω ——排种带角速度, rad/s

R ——支撑轮半径, mm

θ ——种子被吸附时, 与水平方向夹角, $(^\circ)$

当种子被型孔吸附并随着排种带向上运动时, 型孔对种子的支持力 $F_N \geq 0$, 由式(1)可知

$$F_Q \geq F_R - m(\omega^2 R + g \cos \theta) \quad (2)$$

其中

$$F_Q = \Phi \Delta p \frac{\pi d^2}{4}$$

式中

Δp ——型孔处气压差, kPa

d ——型孔直径, mm

Φ ——各种因素对种子所受吸附力影响的修正系数

由式(1)、(2)可知排种器所需的型孔处气压差 Δp 主要与型孔直径 d 、种子被吸附时所受的阻力 F_R 、排种带角速度 ω 、支撑轮半径 R 、充种位置、种子物料特性(Φ 、 m)等有关。在充种区域种子受到重力、离心力的作用, 有利于型孔吸附种子。

排种带半径的减小可降低型孔吸附种子所需的压力。

型孔处较大的气压差 Δp 可以使种子被型孔可靠地吸附, 但过大的气压差会增大排种器重播指数, 增加能耗。本文通过排种器性能试验, 确定气压取值范围为 3 ~ 5 kPa。

2.2 清种过程分析

清种装置的激振力通过排种带传递给排种带另一侧的种子, 使种子与排种带、种子与种子之间产生微小的错动, 当型孔气压场内的种子由稳定的静摩擦平衡状态转变为不稳定的动摩擦运动状态时, 利

用种子间吸附力的差异, 吸力较大的种子将挤掉其它吸力较弱的种子, 形成型孔单粒吸附, 实现清种过程。同时充种区的种子受到激振力的作用, 提高种子流动性, 将进一步降低单粒种子从种子群中分离的阻力, 利于型孔吸附种子。

在清种区域, 当 $\omega^2 R = g$ 时, 多余吸附的种子将不能主动脱离排种带; 当 $\omega^2 R < g$ 时, 多余吸附种子在自身重力的作用下脱离型孔, 开始以排种带线速度为初始速度, 以抛物线运动轨迹下落到种子堆积区, 准备再次充种, 其运动轨迹应避免进入投种管入口吸场内, 引起重播, 要求种子在到达夹角 φ 时, 型孔多余吸附种子应脱离型孔, 进行自由落体运动, 其脱离排种带后的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t = R \cos \varphi - vt \sin \varphi \\ y = y_0 + v_y t = R \sin \varphi + vt \cos \varphi - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中

x ——种子在坐标系中的水平坐标值

y ——种子在坐标系中的竖直坐标值

v ——排种带线速度, m/s

x_0 ——种子脱离的初始水平坐标值

y_0 ——种子脱离的初始竖直坐标值

φ ——种子脱离排种带时, 其脱离位置与水平方向夹角, $(^\circ)$

v_x ——种子在水平方向上的速度, m/s

v_y ——种子在竖直方向上的速度, m/s

t ——种子运动时间, s

当 $x = 0$ 时, 下落种子与投种管入口竖直距离 h 为

$$h = R - y = R(1 - \sin \varphi - \cos \varphi \cot \varphi) + \frac{g R^2 \cot^2 \varphi}{2 v^2} \quad (4)$$

由式(4)可知, 距离 h 主要与支撑轮半径 R 、脱离夹角 φ 和排种带线速度 v 有关。

取播种机作业速度为 6 ~ 14 km/h, 大豆种植株距为 100 mm, 排种带线速度 v 为 0.28 ~ 0.64 m/s, 当排种带最大线速度 $v = 0.7$ m/s 时, 下落种子与排种带最高点距离 h 变化曲线如图 3 所示。在支撑轮半径 R 相同条件下, 距离 h 随种子脱离位置 φ 的增加而减小。在脱离位置 φ 相同条件下, 距离 h 随支撑轮半径 R 的增加而增加, 当脱离位置 $\varphi > 55^\circ$ 时, 距离 h 增加较快, 当脱离位置 $\varphi < 55^\circ$ 时, 距离 h 增加缓慢。

取下落种子脱离位置 $\varphi = 55^\circ$, 下落种子与排种带最高点距离 h 变化曲线如图 4 所示。在支撑轮半径 R 相同条件下, 距离 h 随排种带线速度 v 的增加而减小。排种带线速度 v 相同的条件下, 距离 h 随

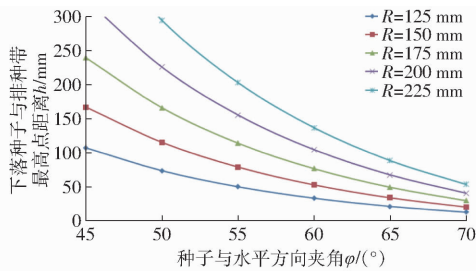


图 3 下落种子与排种带最高点距离随种子与水平方向夹角变化曲线

Fig. 3 Changing curves of seed distance from the highest point of seed row

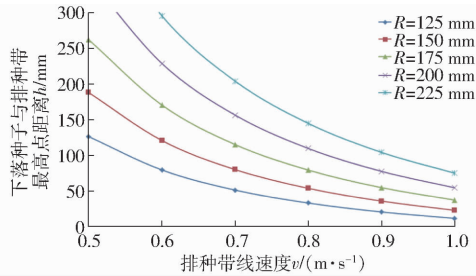


图 4 下落种子与排种带最高点距离随排种带线速度变化曲线

Fig. 4 Changing curves of seed distance from the highest point of seed row

着支撑轮半径 R 的增大而减小。

为避免下落种子进入投种管入口吸场内,取距离 $h > 50$ mm,当排种带线速度 $v = 0.7$ m/s、支撑轮半径 $R = 200$ mm、种子脱离位置 $\varphi = 55^\circ$ 时,满足要求。

2.3 清种振动装置设计

清种振动装置结构如图 5 所示。清种振动装置通过偏心块匀速转动,使排种带、种子振动,扰动已吸附的多余种子,实现清种过程。

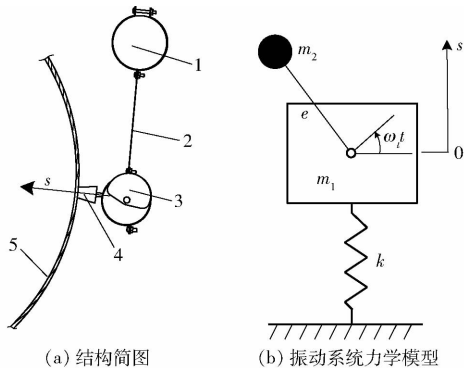


图 5 清种振动装置结构简图

Fig. 5 Structure diagram of clear seed vibrating device

1. 机架 2. 板簧 3. 振动电机 4. 探头 5. 排种带

振动装置的力学模型如图 5b 所示,其动力学微分方程为

$$(m_1 + m_2) \ddot{s} + ks = m_2 e \omega_t^2 \sin(\omega_t t_r) \quad (5)$$

式中 m_1 ——电机及配件等效质量, g

m_2 ——偏心块质量, g

s ——探头运动位移, mm

k ——板簧刚度, N/mm

e ——偏心块的偏心距, mm

ω_t ——激振圆频率(电机角速度), rad/s

t_r ——电机转动时间, s

微分方程(5)的稳态响应为

$$s = \frac{m_2 e \omega_t^2}{(m_1 + m_2)(\omega_n^2 - \omega_t^2)} \sin(\omega_t t_r) \quad (6)$$

$$\text{其中 } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_1 + m_2}} \quad k = \frac{3EI}{L_1^3} \quad I = \frac{Bc^3}{12}$$

式中 ω_n ——系统固有频率, rad/s

E ——弹性模量, GPa

I ——惯性矩, mm⁴

L_1 ——板簧长度, mm

c ——板簧厚度, mm

B ——板簧宽度, mm

由式(6)可知,清种振动装置可以通过调节振动电机的转速来改变激振频率;当电机角速度 $\omega_t < \omega_n$ 时,探头运动位移 s 的振幅随着电机角速度 ω_t 的增大而增大,当电机角速度 $\omega_t > \omega_n$ 时,振幅随着电机角速度 ω_t 的增大而减小,当激振圆频率 ω_t 远大于

系统固有圆频率 ω_n 时,振幅趋近于定值 $\frac{m_2 e}{m_1 + m_2}$ 。取

板簧弹性模量 $E = 200$ GPa, 长度 $L_1 = 125$ mm, 厚度 $c = 0.6$ mm, 宽度 $B = 45$ mm, 电机及配件等效质量 $m_1 = 420$ g, 偏心块质量 $m_2 = 90$ g, 即清种振动装置的系统固有圆频率 $\omega_n = 22$ rad/s (3.5 Hz), 偏心块的偏心距 $e = 5$ mm, 探头运动位移 s 的振幅 $\frac{m_2 e}{m_1 + m_2} =$

0.9 mm。

2.4 排种带设计

在气压作用下排种带半圆筒结构受力如图 6 所示。

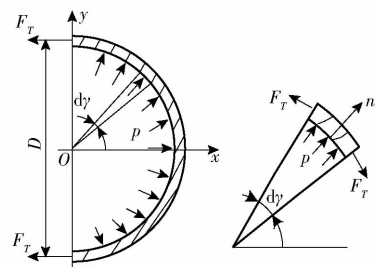


图 6 排种带受力示意图

Fig. 6 Sketch of force analysis for seed conveyor belt

取排种带微段为研究对象,沿 n 向建立平衡方程

$$-2F_T \sin \frac{d\gamma}{2} + pl \frac{D}{2} d\gamma = 0 \quad (7)$$

式中 F_T ——排种带截面所受拉力, N

p ——排种带承受的内压, kPa

l ——排种带宽度,mm
 $d\gamma$ ——排种带微段夹角,rad
 D ——支撑轮直径,mm
由式(7)可得排种带所受拉力为

$$F_T = pl \frac{D}{2} \tag{8}$$

由式(8)可知排种带各截面所受拉力 F_T 相同,在气压作用下排种带可保持稳定的开放式半圆筒形状,确保了排种器密封和工作性能的稳定。排种带各截面所受拉力 F_T 与排种带承受的内压 p 、排种带宽度 l 、支撑轮直径 D 成正比。

排种器选用厚度为 1 mm 的单层聚酯纤维布的聚氯乙烯输送带作为排种带,能够满足强度要求。

大豆平均宽度为 5.1 ~ 7.3 mm^[19],型孔直径 d 计算采用经验公式^[20]

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

式中 b ——种子宽度,mm

可得型孔直径 d 为 3.26 ~ 4.82 mm,取型孔直径为 4 mm。根据作物株距和行距要求,考虑播种机作业速度及排种器性能等因素,取排种带周向型孔数为 100 个,即两孔之间弧长为 16.5 mm,排种带轴向型孔数为 6 个且间距为 50 mm。

2.5 进气口设计

为了降低各型孔之间气压差异,运用有限单元法,对不同进气口位置进行仿真分析。取进气口相同截面,其位置 I 为单进气口装置,位于壳体中部,位置 II、位置 III 分别为双进气口装置,对称地布置于壳体第 2、4 型孔处和壳体第 1、6 型孔处。取入口边界气流速度 57 m/s、静压力 2 kPa,对型孔中心流速和型孔中心上方 5 mm 处的压力进行监测。各型孔流速、压力如表 1 所示,进气口在位置 II 时各型孔之间流速的差异、压力的差异小于进气口位置 I 和 III。

表 1 不同位置处的流速和压力

Tab.1 Velocity and pressure at different positions

位置	流速	流速	流速	压力	压力	压力
	范围/ (m·s ⁻¹)	均值/ (m·s ⁻¹)	变异系 数/%	范围/ kPa	均值/ kPa	变异系 数/%
I	1.06 ~ 1.17	1.11	3.62	3.78 ~ 4.85	4.15	11.64
II	1.10 ~ 1.19	1.15	2.88	4.63 ~ 4.79	4.70	1.34
III	1.09 ~ 1.30	1.16	6.23	4.34 ~ 4.78	4.62	3.99

进气口在位置 II 时,气室压力云图如图 7 所示,排种器的内部压力分布较为均匀,各型孔中心上方 5 mm 处的压力为 4.63 ~ 4.79 kPa,变异系数为 1.34%,最小压力为 4.63 kPa,满足充种要求。

2.6 密封装置设计

排种器密封结构决定着排种器工作的性能和可

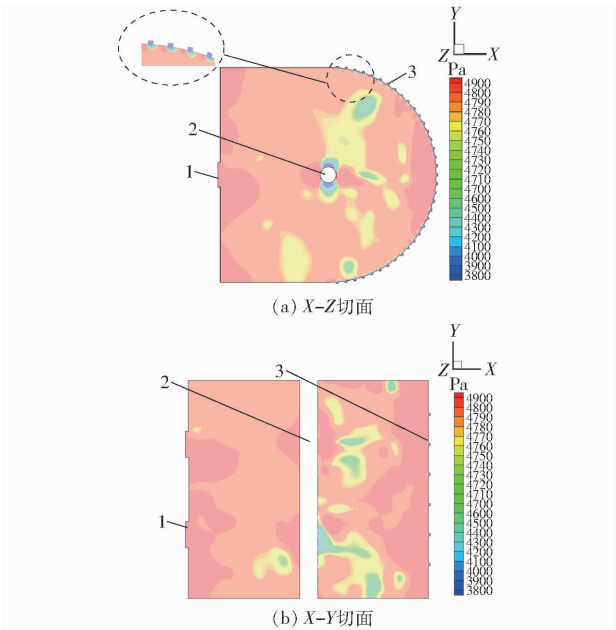


图 7 排种器气室压力分布云图
Fig.7 Gas chamber pressure distribution cloud diagram of seed-metering device

1. 进气口 2. 带轮轴 3. 型孔

靠性,密封装置的结构简图如图 8 所示。

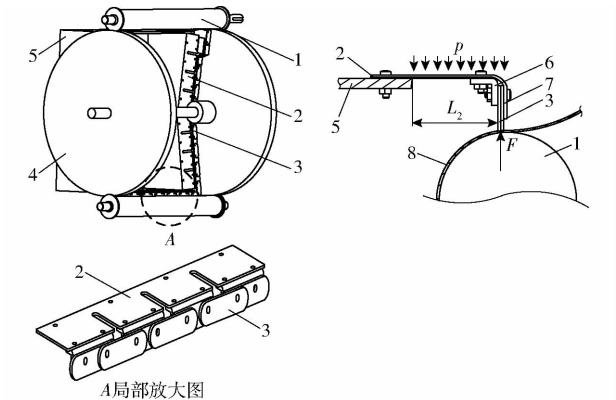


图 8 密封装置简图

Fig.8 Structure diagram of sealing device

1. 滚筒 2. 板簧 3. 密封块 4. 支撑轮 5. 壳体 6. 钢板 7. 薄橡胶板 8. 排种带

壳体四周与板簧的一端连接,每个板簧的另一端分别固装一个密封块,密封块与密封块之间铰链连接,从而形成浮动的链式结构。在板簧弹性力及气压的作用下,各个密封块随着其接触面的起伏而运动,使密封块与支撑轮、排种带紧密贴合,减少壳体与支撑轮、排种带之间的气体泄漏;板簧上覆盖安装有薄橡胶板,实现各个板簧之间的密封。密封块采用聚四氟乙烯材料制作,来减小摩擦力,确保排种器运行平稳。

单位长度密封块与排种带之间的密封压力为

$$F = F_0 + \frac{pL_2}{2} \tag{10}$$

其中 $F_0 = \frac{3EI}{L_2^3}\delta$ $I = \frac{c^3}{12}$

式中 F ——密封块与支撑轮、排种带之间压力, N
 F_0 ——板簧形变所引起的预压力, N
 δ ——板簧变形量, mm
 L_2 ——板簧及密封块承受气压部分长度, mm

由式(10)可知,密封块与支撑轮、排种带之间的压力 F 由板簧形变所引起的预压力 F_0 和作用在板簧上的气压 p 构成。当密封块随着支撑轮、排种带起伏运动时,降低板簧的刚度,即增大长度 L_2 、减小其厚度 c ,可以减小预压力 F_0 的变化。当气压 p 增大时,密封压力 F 增大,可以减小排种器在高气压时的气体泄漏量。在板簧对密封块实现定位功能的条件下,可以适当增加其长度 L_2 ,来降低预压力 F_0 的变化,增大气压 p 对压力 F 的影响。

根据排种器工作情况取板簧弹性模量 $E = 200\text{ GPa}$,厚度 $c = 0.2\text{ mm}$,随支撑轮、排种带起伏运动的变形量 δ 为 $4 \sim 6\text{ mm}$,长度 $L_2 = 30\text{ mm}$,此时预压力 F_0 为 $60 \sim 90\text{ N}$ 。当排种器内气压 p 为 $3 \sim 5\text{ kPa}$ 时,气压 p 引起的密封压力 $\frac{pL_2}{2}$ 为 $45 \sim 75\text{ N}$,此时密封块与支撑轮、排种带之间的压力 F 为 $105 \sim 165\text{ N}$,满足密封要求。

3 排种器参数优化试验

3.1 试验材料与设备

试验材料选用“黑农 38”大豆种子。试验在东北农业大学排种器实验室实施。

试验装置主要由大豆集排带式排种器、JPS-12 型排种器性能试验台、U 型风压测量仪和高速摄像机 (PhantomV5.1-4G, Vision Rsesarch Inc., 美国) 等组成,如图 9 所示。

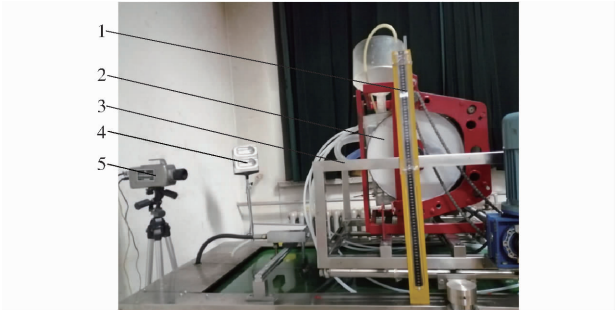


图 9 试验装置

Fig.9 Experimental device

1. U 型风压测量仪 2. 集排带式排种器 3. JPS-12 型排种器性能试验台 4. 光源 5. 高速摄像机

3.2 试验方法

排种器工作时振动装置通过对种子的往复激振

力实现清种过程,同时增加充种区种子流动性,降低种子分离阻力改善充种性能。通过预试验发现当振动装置位于已吸附种子与壳体内种子分离的位置时,可获得较好的充种、清种性能,其位置如图 1b 所示,选取其振动频率范围为 $20 \sim 80\text{ Hz}$ 。

根据大豆垄上双行种植模式的株距要求,选取大豆种植株距为 100 mm 。采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法^[21],参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选取气压、作业速度、清种振动频率为试验因素,以合格指数 y_1 、重播指数 y_2 、漏播指数 y_3 为试验指标,试验因素编码如表 2 所示,每组试验均重复 3 次,取 3 次数据均值作为试验结果。应用 Design-Expert 软件进行数据处理和统计分析。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Factors and coding of test

编码	因素		
	气压	作业速度	清种振动频率
	X_1/kPa	$X_2/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	X_3/Hz
1. 682	5.0	14.0	80.0
1	4.6	12.4	67.8
0	4.0	10.0	50.0
-1	3.4	7.6	32.2
-1. 682	3.0	6.0	20.0

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

试验结果如表 3 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为试验因素编码值。应用 Design-Expert 软件对 y_1 、 y_2 、 y_3 进行回归模型方差分析,如表 4 所示,分别得到 y_1 、 y_2 、 y_3 回归方程为

$$y_1 = 93.51 + 1.20x_1 - 1.34x_2 + 0.32x_3 - 1.91x_1^2 - 0.95x_2^2 - 1.38x_3^2 - 0.56x_1x_2 - 0.86x_2x_3 \quad (11)$$

$$y_2 = 1.57 + 0.59x_1 - 0.5x_2 - 0.7x_3 + 0.65x_1^2 + 0.76x_2^2 + 0.64x_2x_3 \quad (12)$$

$$y_3 = 4.90 - 1.79x_1 + 1.85x_2 + 0.39x_3 + 1.26x_1^2 + 0.99x_2^2 + 0.62x_3^2 + 0.63x_1x_3 \quad (13)$$

据表 4 可得,回归方程(11)~(13)的 $P < 0.01$,表明极显著;失拟项 $P > 0.05$,失拟项不显著,表明方程(11)~(13)能正确反映 y_1 、 y_2 、 y_3 与 x_1 、 x_2 、 x_3 之间的关系。根据方程各因素回归系数的大小,可得到影响合格指数 y_1 的主次顺序为: x_2 、 x_1 、 x_3 ,影响重播指数 y_2 的主次顺序为: x_3 、 x_1 、 x_2 ,影响漏播指数 y_3 的主次顺序为: x_2 、 x_1 、 x_3 。

3.3.2 各因素对各性能指标的影响与分析

通过 Design-Expert 软件对试验数据处理绘制

表 3 试验结果

Tab.3 Test design and results

试验 序号	因素			指标/%		
	气压 x_1	作业 速度	清种振 动频率	合格 指数	重播 指数	漏播 指数
		x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	-1	-1	-1	87.0	3.6	9.4
2	1	-1	-1	91.5	5.8	2.7
3	-1	1	-1	87.3	1.8	10.9
4	1	1	-1	89.1	3.2	7.7
5	-1	-1	1	90.6	1.9	7.5
6	1	-1	1	93.1	2.0	4.9
7	-1	1	1	87.0	1.5	11.5
8	1	1	1	87.7	3.1	9.2
9	-1.682	0	0	86.2	2.8	11.0
10	1.682	0	0	90.3	4.4	5.3
11	0	-1.682	0	93.1	2.6	4.3
12	0	1.682	0	88.8	0.7	10.5
13	0	0	-1.682	89.5	5.0	5.5
14	0	0	1.682	90.0	2.8	7.2
15	0	0	0	92.9	2.7	4.4
16	0	0	0	93.6	0.7	5.7
17	0	0	0	94.3	0.7	5.0
18	0	0	0	93.4	1.1	5.5
19	0	0	0	94.3	1.1	4.6
20	0	0	0	93.7	0.9	5.4
21	0	0	0	92.9	3.4	3.7
22	0	0	0	93.7	1.5	4.8
23	0	0	0	92.7	2.2	5.1

出各因素对各性能指标作用响应曲面图,如图 10 ~ 12 所示。

如图 10a 所示,当清种振动频率 x_3 位于中心水平(50 Hz)时,随着作业速度的增加合格指数逐渐减小,随着气压的增加合格指数先增大后减小。如图 10b 所示,当作业速度 x_2 位于中心水平(10 km/h)时,随着清种振动频率的增加,合格指数先增大后减小,随着气压的增加,合格指数先增大后减小。如图 10c 所示,当气压 x_1 位于中心水平(4 kPa)时,随着作业速度的增加合格指数减小,随着清种振动频率的增加合格指数先增大后减小。

如图 11a 所示,当清种振动频率 x_3 位于中心水平(50 Hz)时,随着作业速度的增加重播指数减小,随着气压的增加重播指数增加。如图 11b 所示,当作业速度 x_2 位于中心水平(10 km/h)时,随着气压的增加重播指数增加,随着清种振动频率的增加重播指数先减小后增大。如图 11c 所示,当气压 x_1 位于中心水平(4 kPa)时,随着作业速度的增加重播指数减小,随着清种振动频率的增加重播指数先减小后增大。

表 4 方差分析结果

Tab.4 Results of variance analysis

评价 指标	方差 来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
合格 指数	模型	156.66	9	17.41	67.22	<0.000 1	**
	x_1	19.68	1	19.68	76.01	<0.000 1	**
	x_2	24.61	1	24.61	95.02	<0.000 1	**
	x_3	1.38	1	1.38	5.33	0.038 1	*
	x_1^2	57.89	1	57.89	223.56	<0.000 1	**
	x_2^2	14.47	1	14.47	55.87	<0.000 1	**
	x_3^2	30.19	1	30.19	116.59	<0.000 1	**
	$x_1 x_2$	2.53	1	2.53	9.77	0.008 0	**
	$x_1 x_3$	1.20	1	1.20	4.64	0.050 6	
	$x_2 x_3$	5.95	1	5.95	22.98	0.000 4	**
	残差	3.37	13	0.26			
	失拟	0.63	5	0.13	0.37	0.858 5	
	误差	2.74	8	0.34			
	总和	160.03	22				
重播 指数	模型	34.56	9	3.84	5.87	0.002 3	**
	x_1	4.68	1	4.68	7.14	0.019 2	*
	x_2	3.48	1	3.48	5.32	0.038 2	*
	x_3	6.75	1	6.75	10.31	0.006 8	**
	x_1^2	6.79	1	6.79	10.38	0.006 7	**
	x_2^2	0.020	1	0.020	0.031	0.863 3	
	x_3^2	9.17	1	9.17	14.02	0.002 5	**
	$x_1 x_2$	0.061	1	0.061	0.094	0.764 5	
	$x_1 x_3$	0.45	1	0.45	0.69	0.421 3	
	$x_2 x_3$	3.25	1	3.25	4.97	0.044 1	*
	残差	8.51	13	0.65			
	失拟	1.08	5	0.22	0.23	0.937 7	
	误差	7.43	8	0.93			
	总和	43.07	22				
漏播 指数	模型	143.61	9	15.96	37.81	<0.000 1	**
	x_1	43.54	1	43.54	103.17	<0.000 1	**
	x_2	46.60	1	46.60	110.41	<0.000 1	**
	x_3	2.03	1	2.03	4.80	0.047 3	*
	x_1^2	25.03	1	25.03	59.30	<0.000 1	**
	x_2^2	15.57	1	15.57	36.89	<0.000 1	**
	x_3^2	6.08	1	6.08	14.41	0.002 2	**
	$x_1 x_2$	1.81	1	1.81	4.28	0.059 1	
	$x_1 x_3$	3.12	1	3.12	7.40	0.017 5	*
	$x_2 x_3$	0.40	1	0.40	0.96	0.345 2	
	残差	5.49	13	0.42			
	失拟	2.40	5	0.48	1.24	0.373 1	
	误差	3.09	8	0.39			
	总和	149.10	22				

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

如图 12a 所示,当清种振动频率 x_3 位于中心水平(50 Hz)时,随着作业速度的增加漏播指数增大,随着气压的增加漏播指数减小。如图 12b 所示,当作业速度 x_2 位于中心水平(10 km/h)时,随着气压的增加漏播指数减小,随着清种振动频率的增加漏播指数增大。如图 12c 所示,当气压 x_1 位于中心水平(4 kPa)时,随着作业速度的增加漏播指数增大,随着清种振动频率的增加漏播指数增大。

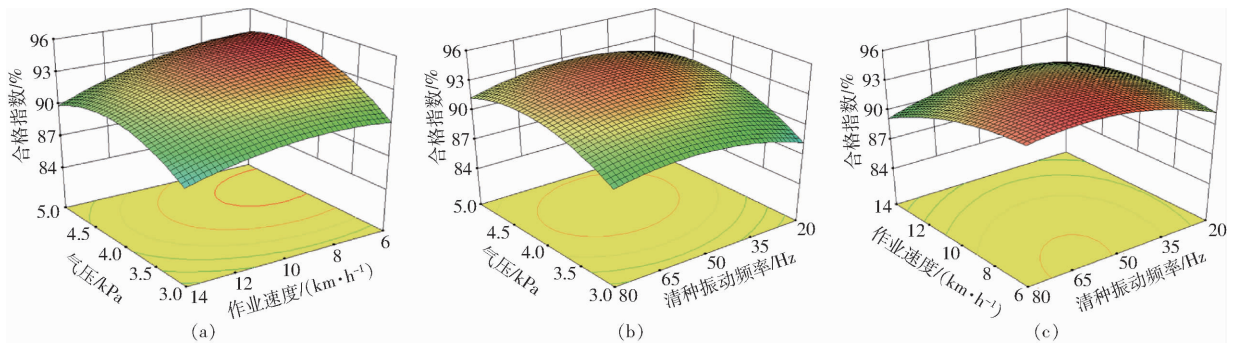


图 10 各因素对排种器合格指数的影响

Fig. 10 Effects of all factors on qualified index of seed-metering device

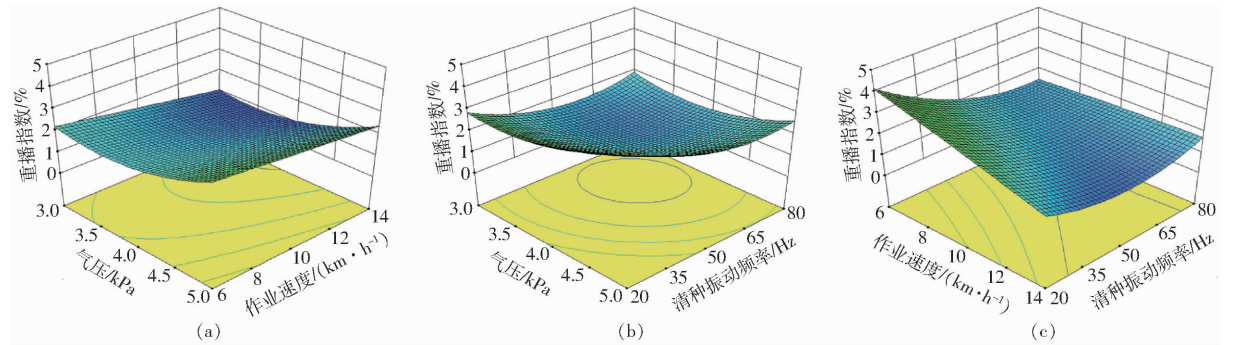


图 11 各因素对排种器重播指数的影响

Fig. 11 Effects of all factors on multiple index of seed-metering device

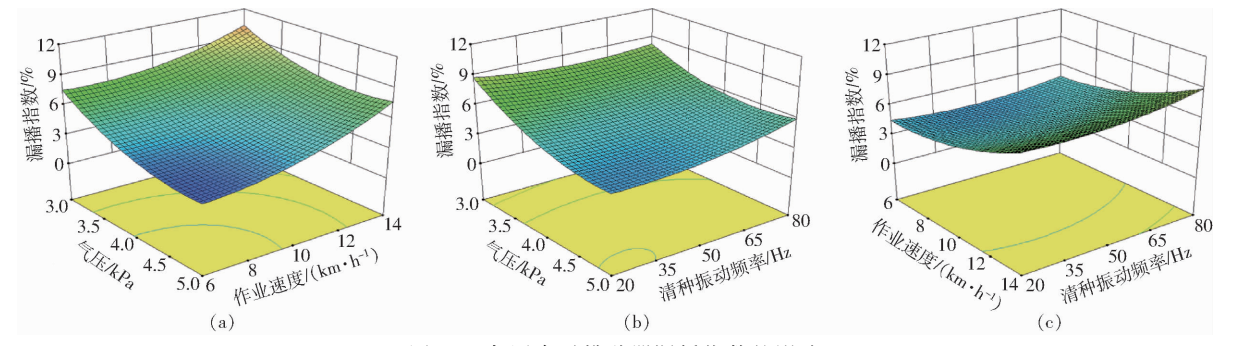


图 12 各因素对排种器漏播指数的影响

Fig. 12 Effects of all factors on missing index of seed-metering device

当作业速度增加时,型孔经过充种区域时间减少,充种成功率低,导致合格指数和重播指数减小,漏播指数增加。当气压增加时,型孔处压差变大,种子易被吸附,当气压过大时易出现型孔吸附多粒种子的情况,导致合格指数先增大后减小,重播指数增大,漏播指数减小。排种带与振动装置接触并发生振动,当清种振动频率增加时,种子流动性增强,导致合格指数先增大,当清种振动频率继续增加时,排种带受到的碰撞次数增加,型孔吸附的种子减少,导致合格指数先增大后减小,漏播指数增大。当清种振动频率过大时,排种带与振动装置之间存在微小的抖动间隙,致使排种带振幅减小,导致重播指数先减小后增大。

3.4 参数优化与验证试验

选取编码值 -1 ~ 1 为因素范围,即当气压 3.4 ~

4.6 kPa,作业速度 7.6 ~ 12.4 km/h,清种振动频率 32.2 ~ 67.8 Hz 时,采用多重响应法中的目标函数对影响因素气压、作业速度和清种振动频率进行优化,以合格指数、重播指和漏播指数为性能指标函数进行优化求解,其目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ y_2 \leq 3\% \\ y_3 \leq 10\% \\ \text{s. t.} \begin{cases} 3.4 \text{ kPa} \leq X_1 \leq 4.6 \text{ kPa} \\ 7.6 \text{ km/h} \leq X_2 \leq 12.4 \text{ km/h} \\ 32.2 \text{ Hz} \leq X_3 \leq 67.8 \text{ Hz} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

运用 Design-Expert 软件对其进行优化求解,得出最佳优化参数:气压为 4.4 kPa、作业速度为 10.5 km/h、清种振动频率为 44.6 Hz 时,合格指数 90.65%、重播指数 1.97%、漏播指数 7.38%。

为了验证优化分析结果正确性,在上述最优参数组合试验条件下,以“黑农 38”大豆种子为试验材料进行 5 次验证试验,得到合格指数平均值为 90.65%,重播指数平均值为 1.97%,漏播指数平均值为 7.38%。验证试验结果表明,优化结果可信。

4 结论

(1) 设计了一种开放式半圆结构的大豆集排带式排种器,其利用排种带摩擦力对种子群进行扰动,通过清种振动装置对种子的影响改善充种、清种性

能,其结构简单,种子适应性好,可满足大豆精量播种的作业要求。

(2) 分析了充种、清种工作过程及种子脱离排种带后的运动规律,设计了支撑轮、清种振动装置、排种带、进气口位置、密封装置等关键部件。

(3) 通过三因素五水平二次正交旋转中心组合试验,分析了各因素对合格指数、重播指数、漏播指数的影响规律,确定大豆集排带式排种器最佳工作参数组合:气压 4.4 kPa、作业速度 10.5 km/h、清种振动频率 44.6 Hz,此时排种器性能指标为:合格指数 90.65%、重播指数 1.97%、漏播指数 7.38%。

参 考 文 献

- [1] 张秀花,夏玲,马洪亮,等. 精密播种机的可靠性研究[J]. 农业机械学报,2004,35(2): 62-64.
ZHANG Xiuhua, XIA Ling, MA Hongliang, et al. Reliability improvement of a precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 62-64. (in Chinese)
- [2] 张昆,衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7): 78-86.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010. (in Chinese)
- [3] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等. 集排式大豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6): 112-118.
WANG Yecheng, JIN Yadong, LUO Sibao, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 112-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180613&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.013. (in Chinese)
- [4] 陈玉龙,贾洪雷,王佳旭,等. 大豆高速精密播种机凸勾排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8): 95-104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170810&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.010. (in Chinese)
- [5] 李国林,宋炜,毛俐,等. 国内外几种主要排种器的特点[J]. 农业科技与装备,2011(8): 70-71,73.
LI Guolin, SONG Wei, MAO Li, et al. Features of some main seed-metering devices at home and abroad[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(8): 70-71,73. (in Chinese)
- [6] 廖庆喜,张猛,余佳佳,等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报,2011,42(8): 30-34.
LIAO Qingxi, ZHANG Meng, YU Jiajia, et al. Pneumatic centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 30-34. (in Chinese)
- [7] 秦军伟,张晓辉,姜忠爱,等. 探讨集中式排种器的排种机理及其发展[J]. 农业装备技术,2004,30(4): 22-23.
QIN Junwei, ZHANG Xiaohui, JIANG Zhongai, et al. Research of seeding principles of centralized type seed meters and its development[J]. Agricultural Equipment and Technology, 2004, 30(4): 22-23. (in Chinese)
- [8] 张晓辉,王永振,仇利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3): 59-67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [9] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2): 48-51,95.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48-51,95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.010. (in Chinese)
- [10] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1): 136-141.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- [11] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [12] 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1): 11–19. ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1):11–19. (in Chinese)
- [13] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8–15. QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18):8–15. (in Chinese)
- [14] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6): 11–19. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(6): 11–19. (in Chinese)
- [15] KUMAR V J F, DIVAKER C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2000,75(1):81–95.
- [16] PRASANNA KUMAR G V, SRIVASTAVA BRIJESH, NAGESH D S, et al. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009,65(1): 26–35.
- [17] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(5): 10–18. SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10–18. (in Chinese)
- [18] 尹海燕. 国内外气力式排种器发展研究[J]. 农业科技与装备,2013(8): 19–20. YIN Haiyan. Research on the development of domestic and foreign pneumatic seed sowing device [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2013(8): 19–20. (in Chinese)
- [19] 王业成. 摩擦式精密排种器的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学,2012. WANG Yecheng. Design and experiment of friction precision seed-metering device [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [20] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社,1982.
- [21] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社,2012.

(上接第 29 页)

- [19] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统 [J/OL]. 农业机械学报,2015, 46(4): 1–8. HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1–8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001. (in Chinese)
- [20] 闫荆,朱龙图,于婷婷,等. 免耕播种机播种深度实时监测系统 [J]. 农机化研究,2016, 38(9): 214–218. YAN Jing, ZHU Longtu, YU Tingting, et al. Seeding depth real-time monitoring system for a no-till planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 214–218. (in Chinese)
- [21] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(6): 68–77. FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68–77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180608&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)
- [22] Precision Planting Inc. DeltaForce operators guide-gen3 [EB/OL]. (2018–03–01) [2018–10–28]. <https://cloud.precisionplanting.com/pubs/?view=1xA3Q9ceKbJjmJBKNJVinwQaeXw3Q3Fbn>.
- [23] PONCET A M, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Effect of heterogeneous field conditions on corn seeding depth accuracy and uniformity [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(5): 819–830.
- [24] 付卫强,董建军,丛岳,等. 基于玉米播深控制的农田地形模拟系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(增刊): 58–65. FU Weiqiang, DONG Jianjun, CONG Yue, et al. Design and test of farmland-terrain simulation system for corn sowing depth control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 58–65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s010&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.010. (in Chinese)