

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.007

气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验

倪向东 徐国杰 王琦 彭晓睿 王剑 胡斌

(石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 针对气吸式棉花精密排种器输气管路结构复杂、能耗大以及排种单体只能实现单行播种等问题,采用阵列吸孔吸种、侧向气吹清种等方式,设计了一种气吸滚筒阵列式棉花精密排种器,确定了该排种器关键零部件的结构参数,建立了充种过程的力学模型。以棉花种子为播种对象,以滚筒转速、吸孔直径、气室负压为影响因子,以合格指数、漏播指数和重播指数为排种性能指标,进行二次旋转正交组合试验,建立各影响因子与排种性能指标之间的回归模型,分析了各因子对排种性能的影响规律。采用多目标优化方法,确定最佳参数组合:滚筒转速为 15.5 r/min,吸孔直径为 3.5 mm,气室负压为 4.2 kPa,此时排种器的合格指数为 93.5%、漏播指数为 2.0%、重播指数为 4.5%。经试验验证,试验结果与优化结果基本一致,满足棉花精密播种的要求。在此基础上进行了排种适应性试验,试验对象为几何特性存在一定差异的新陆早 48 号、新陆早 52 号、新陆早 60 号 3 种棉花种子,结果表明:合格指数均大于 92%,漏播指数均小于 3%,重播指数均小于 5%,说明该排种器对不同品种的棉花种子具有一定的排种适应性。

关键词: 棉花;排种器;气吸滚筒;阵列式

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0058-10

Design and Experiment of Pneumatic Cylinder Array Precision Seed-metering Device for Cotton

NI Xiangdong XU Guojie WANG Qi PENG Xiaorui WANG Jian HU Bin
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Xinjiang is the largest production base of quality cotton and commodity cotton in China. Sowing is one of the most important links which affects the development of cotton industry. In order to improve the precision and efficiency of seed-metering device for cotton, a pneumatic cylinder array precision metering device for cotton was designed, which combined the features of array suction and pneumatic clearing with side direction. The working principle and component of precision seeder were introduced, the key structure parameters were determined, and the mechanical model of single cotton seed during the air-suction filling process was established. In test, cotton seed Xinluzao 48 was selected as experimental material. Based on pre-experiments, the cylinder speed, hole diameter and vacuum pressure were taken as main impact factors, the quality of feed index, miss index and multiple index were taken as response indices, and the second orthogonal rotation combination test was executed, which used the Design-Expert software. The regression models were established, and effects of various factors on the performance indices were analyzed. The research gained the best combination of the parameters by using multi-objective optimization, which was as follows: the cylinder speed was 15.5 r/min, the hole diameter was 3.5 mm, and vacuum pressure was 4.2 kPa. Under the condition of the optimal combination parameters, the quality of feed index, miss index and multiple index were 93.5%, 2.0% and 4.5%, respectively. According to optimization parameter combination, the verification test was repeated five times, the results showed that the experimental results were basically consistent with the optimization results, and the sowing quality satisfied the requirements of precision sowing for cotton. The sowing adaptability experiment was carried out under the same conditions with three cotton seeds (Xinluzao 48, Xinluzao 52 and Xinluzao 60), whose overall dimension existed some differences from each other. All the

收稿日期: 2017-08-20 修回日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51265045)、石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZX201308)和新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJGR12016048)

作者简介: 倪向东(1974—),男,副教授,主要从事农业机械设计和机械系统动力学及传动研究,E-mail: nxd_mac@shzu.edu.cn

qualities of feed index were more than 92%, all the miss indices were less than 3%, and all the multiple indices were less than 5%, indicating that when planting different cotton seeds, the precision seeder had certain adaptability to different varieties of cotton seeds. The study provided a theoretical reference for the design of pneumatic cylinder precision seed-metering device for cotton.

Key words: cotton; seed-metering device; pneumatic cylinder; array

引言

在棉花生产过程中,播种是最重要的环节之一。精密播种不仅可以节省大量种子,减轻人员劳动强度,而且可以增产稳产,具有显著的经济效益和社会效益^[1-4]。

精密排种器作为播种机的核心部件,其性能的好坏直接影响着播种机的播种质量。气吸式排种器具有对种子形状尺寸要求不高、适应性好、伤种率低、作业速度较高等优点,在播种领域得到了广泛的研究与应用^[5-6]。在国外,SINGH等^[7-9]对气吸式排种器播种棉花、芥菜和花生等种子时的结构参数和工作参数进行了优化。KARAYEL等^[10]研究建立了气吸式排种器气室真空度与千粒质量、投影面积、球形度和密度等种子物理特性参数之间的回归方程。YAZGI等^[11]运用响应曲面法对影响气吸式排种器排种均匀性的吸孔直径、吸盘转速和气室压力等参数进行了优化。在国内,王朝辉^[12]研制了一种气吸滚筒式超级稻育秧播种器,并开展了滚筒转速、真空度、吸孔直径和种盘振动频率等因素对排种性能影响的试验研究。李耀明等^[13]利用振动技术改善了气吸滚筒式精密排种器的充种性能。张顺等^[14]研制了一种气吸滚筒式水稻直播精量排种器,开展了窝眼形状、滚筒转速、气室真空度和清种气流强度对排种性能影响的试验研究。高筱钧等^[15]研制了一种中草药三七气吸滚筒式精密排种器,并开展了负压、前进速度和吸种角度等因素对排种性能的试验研究。

针对气吸式棉花精密排种器配套输气管路结构复杂、能耗大以及排种单体只能实现单行播种等问题^[16],采用阵列吸孔吸种、侧向气吹清种等方式,设计一种气吸滚筒阵列式棉花精密排种器,开展滚筒转速、吸孔直径、气室负压对排种器排种性能影响的试验研究,寻求试验因素间的最佳参数组合,并进行排种适应性试验,为气吸滚筒式棉花精密排种器的设计提供参考。

1 排种器结构与工作原理

1.1 总体结构

气吸滚筒阵列式棉花精密排种器结构如图 1 所

示,主要由滚筒、气吹装置、阵列吸孔、空心轴、链轮、种箱、隔压板及投种器等组成。

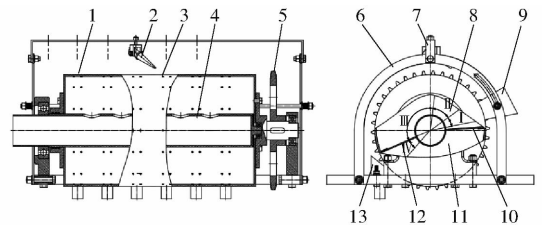


图 1 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of pneumatic cylinder array seed-metering device

1. 滚筒 2. 气吹风嘴 3. 阵列吸孔 4. 空心轴 5. 链轮 6. 角度调节板 7. 风嘴倾角调节装置 8. 负压室 9. 种箱 10. 第一隔压板 11. 隔压室 12. 第二隔压板 13. 投种器 I. 充种区 II. 清种区 III. 携种区 IV. 投种区

1.2 工作原理

当排种器工作时,风机通过空心轴上的通孔,不断地吸走滚筒内的空气,形成负压气室,使负压气室对应的滚筒吸孔两端产生负压差。滚筒在链轮带动下绕空心轴转动,当滚筒转入充种区时,种子在吸孔负压的作用下被吸附在滚筒吸孔上,并随滚筒一起转动,当滚筒转动到隔压室时,隔压板隔绝了滚筒内的负压,种子失去了负压对其的吸附作用力,在重力、离心力和投种器的作用下,落入投种孔,最后下落到种床,完成精密排种过程。

2 关键部件结构设计

2.1 滚筒结构设计

滚筒大小是排种器的重要参数之一,决定着排种器的尺寸、转速、吸孔数量、压力、动力消耗等参数。

排种器正常工作时,排种滚筒的排量 Q_m 与播种机速度 v_m 之间的关系为

$$Q_m = \frac{v_g}{d + \Delta l} = \frac{v_m}{l} \quad (1)$$

式中 Q_m ——滚筒排量,穴/s

v_m ——播种机前进速度,m/s

v_g ——滚筒线速度,m/s

l ——株距,m d ——吸孔直径,m

Δl ——吸孔间隔墙宽,m

由式(1)可得

$$\begin{cases} v_g = \frac{v_m(d + \Delta l)}{l} = \frac{\pi v_m D_g}{lZ} \\ D_g = \frac{60v_m(d + \Delta l)}{\pi nl} \\ Z = \frac{\pi D_g}{d + \Delta l} \end{cases} \quad (2)$$

式中 D_g ——滚筒直径, mm
 Z ——周向吸孔数量
 n ——滚筒转速, r/min

由式(2)可知,株距和播种机前进速度一定时,滚筒线速度 v_g 与滚筒直径 D_g 成正比,与吸孔数量 Z 成反比。在充种范围一定时,增大滚筒直径,可以增加吸孔数量,降低滚筒转速,提高充种概率,但滚筒直径增大,相应的负压气室空间将增大,所需风量增加,导致风机功率和能耗增加。在允许范围内尽可能选取适宜的直径,并尽可能增加吸孔数量。现有气吸滚筒式排种器的滚筒直径一般在 140 ~ 260 mm 之间,对于大粒径种子,滚筒直径相对较大。本文播种对象为棉花种子,综合考虑其播种性能要求及动力消耗,选择滚筒直径为 $D_g = 250$ mm。

2.1.1 棉花种子的几何特性

种子的形状和几何尺寸直接决定了排种器关键部件的结构参数。棉花种子经过脱绒、包衣处理后,表面光滑,形状不规则,近似为卵形,一头大,一头小,重心靠近大头。随机选取新陆早 48 号、新陆早 52 号、新陆早 60 号 3 种棉花种子各 200 粒,测量每粒种子的长、宽、厚三轴尺寸,对种子的三轴尺寸进行统计分析,确定种子几何尺寸分布,其几何尺寸如表 1 所示。

表 1 棉花种子几何尺寸

参数	新陆早 48 号	新陆早 52 号	新陆早 60 号
长度	8.94 ± 0.63	10.57 ± 0.78	8.47 ± 0.62
宽度	5.19 ± 0.19	5.39 ± 0.40	4.76 ± 0.34
厚度	4.82 ± 0.31	4.70 ± 0.37	3.92 ± 0.31

2.1.2 吸孔结构和位置设计

选择合理的孔径是保证排种器正常工作的必要条件。吸孔直径取决于种子几何尺寸等物料特性,一般来说,几何尺寸越大的种子,对应的吸孔直径越大。吸孔直径 d 选取参照经验公式^[17]

$$0.64b \leq d \leq 0.66b \quad (3)$$

式中 b ——种子平均宽度, mm

根据表 1,确定吸孔直径范围为 3.0 ~ 4.0 mm。

在滚筒直径一定的条件下,其周向吸孔数越多,滚筒线速度越低,充种性能越好,因此滚筒上的吸孔数量尽可能多,但滚筒周向相邻吸孔之间的弧长

Δl_1 不能小于两粒种子的最大尺寸,即

$$\Delta l_1 \geq 2l_{\max} \quad (4)$$

式中 Δl_1 ——滚筒周向两吸孔中心之间的弧长, mm
 l_{\max} ——种子最大尺寸, mm

试验种子最大长度均小于 12 mm,确定滚筒吸孔周向数目 $Z = 30$ 个,则 $\Delta l_1 = 26$ mm,满足式(4)。

为提高播种效率和降低能耗,设计滚筒轴向吸孔数量为 6 排的阵列式结构,即实现“一器六行”的播种作业。

如图 2 所示,为满足“单粒精播、双粒精播、单双粒交替(即单粒-双粒-单粒)”的不同农艺要求,设计阵列式吸孔结构,即在滚筒圆周方向上设计为单孔、双孔和单双孔交替 3 种排列方式,以满足不同的播种要求。其中同排两吸孔之间的距离 Δl_2 不能小于两粒种子的最大尺寸,即

$$\Delta l_2 \geq 2l_{\max} \quad (5)$$

式中 Δl_2 ——同排吸孔中心之间的距离, mm

综合考虑,确定滚筒长度为 700 mm。

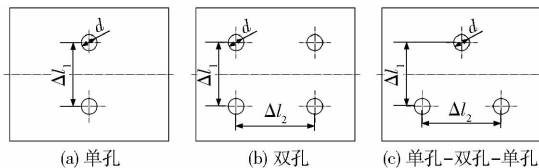


图 2 3 种阵列吸孔结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of three kinds of array pneumatic suction

2.2 负压腔设计

负压区域的大小直接影响着风机功率和能耗。在保证排种性能的前提下,尽可能设计较小的负压区域。负压区域设计与种子面的高度直接相关,研究表明:滚筒式排种器的种子面最佳高度为高于排种器轴线 2 ~ 3 层种子^[18]。如图 3 所示,种子面高度与排种器轴线距离为 H ,则

$$(2 \sim 3)c \leq H \leq (2 \sim 3)a \quad (6)$$

式中 a ——种子平均长度, mm

c ——种子平均厚度, mm

以新陆早 48 号种子为播种对象,根据表 1 计算可得, $9.64 \text{ mm} \leq H \leq 26.82 \text{ mm}$ 。滚筒半径为 $R_g = 125$ mm,根据几何关系,则吸种起始角 θ_0 为

$$\theta_0 = \arcsin \frac{H}{R_g} \quad (7)$$

计算得 $6^\circ \leq \theta_0 \leq 12^\circ$ 。第一隔压板与水平轴线的夹角 φ 应小于最小吸种起始角,取夹角 $\varphi = 5^\circ$ 。

在重力和离心力的作用下,种子在投种区弧段与水平面成 σ 角位置下落,如图 4 所示。为保证种子准确投种,当种子下落到投种孔竖直位置时,若此

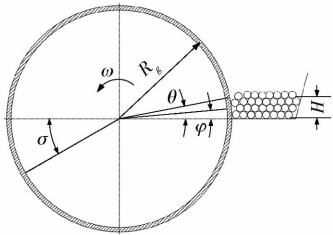


图 3 负压腔结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of vacuum cavity

时种子落到投种接受区域则能正常投种,若种子落到接受区域左侧则不能正常投种。以种子质心为原点,建立直角坐标系 Oxy ,研究质量为 m 的种子运动轨迹。

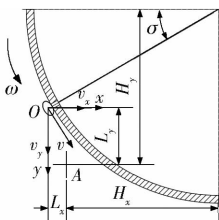


图 4 投种过程示意图

Fig. 4 Diagram of seed in dropping phase

投种过程种子运动轨迹为

$$m \ddot{x}_s = 0 \quad (8)$$

$$m \ddot{y}_s = mg \quad (9)$$

初始条件,当 $t = 0$ 时

$$\begin{cases} x_s(0) = 0 \\ y_s(0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_s(0) = v_0 \sin \sigma \\ \dot{y}_s(0) = v_0 \cos \sigma \end{cases} \quad (11)$$

对式(8)、(9)进行积分,结合初始条件可知

$$x_s = v_0 t \sin \sigma \quad (12)$$

$$y_s = v_0 t \cos \sigma + \frac{1}{2} g t^2 \quad (13)$$

式中 v_0 ——种子运动沿滚筒切向的初速度, m/s

x_s ——种子运动水平方向上的位移, mm

y_s ——种子运动竖直方向上的位移, mm

投种接受区域是以 A 为中心的矩形孔,根据安装要求, A 点与滚筒水平中心线和垂直中心线的距离分别为 $H_x = 100$ mm, $H_y = 100$ mm。为保证投种顺利,当种子落入投种架接受区域时, $y_s = L_y$, $x_s - (L_x - \Delta x/2) > 0$ 。由几何关系得: $L_x = R_g \cos \sigma - H_x$, $L_y = H_y - R_g \sin \sigma$, 投种矩形孔宽度 $\Delta x = 40$ mm。滚筒线速度 v_0 为 $0.2 \sim 0.3$ m/s, 取 $\sigma = 30^\circ$, 能够保证种子落入投种孔。

2.3 侧向气吹清种装置设计

通过前期试验研究发现,种子被吸附时主要存在“平躺”、“侧卧”和“竖立”3种姿态,其中“竖立”

状态的种子,是因为棉花种子受到吸力吸附时,运动阻力最小的尖部被吸孔吸附,种子尖部占据了吸孔绝大部分面积,阻碍其他种子被吸孔吸附,基本能保持单粒吸附状态。而绝大多数的“一孔多种”现象,以多粒种子“平躺”或“侧卧”簇聚状态出现,是因为吸孔吸附多粒种子时,存在“同时吸附”和“先后吸附”两种形式,进而多呈现出左右和前后簇聚吸附状态。在气流直吹的作用下,前粒种子对后粒种子产生耦合作用,容易导致多粒种子被同时清除,造成漏播。因此本文结合气力式清种的优点,设计了一种侧向气吹式清种装置,以较小的稳定气流侧向精确吹除吸附状态不稳定的种子,以获得良好的清种效果。

当滚筒转入清种区内,被吸附的多粒种子处于吸孔负压和清种气流共同作用的复杂气流场中,在侧向气吹气流的作用下,靠近吸孔中心的种子占据了吸孔的大部分面积,比周围种子受到更大的吸附力而牢固地吸附在吸孔上,其余吸附状态不稳定的种子被吹回种箱,吸孔处只保留 1 粒种子,清种过程如图 5 所示。

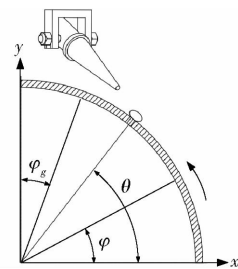


图 5 清种过程示意图

Fig. 5 Diagram of seed in clearing phase

清种在充种稳定后进行,为了保证被清除的种子顺利落回种箱,最大清种角度必须小于 $(90 - \varphi_g)$, φ_g 为种子与滚筒的摩擦角,一般 $18^\circ \leq \varphi_g \leq 25^\circ$, 取 $\theta \leq 65^\circ$ 。种子随滚筒做匀速圆周运动,根据达朗贝尔原理,将动力学问题转化为静力学问题求解。在清种区域,单粒种子被吸附的受力分析如图 6 所示,临界状态下平衡方程为

$$\begin{cases} N_g - F_Q - G \sin \theta + m \omega^2 R_g = 0 \\ f_g - G \cos \theta = 0 \\ F_Q = \frac{\pi}{4} k \Delta p d^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 F_Q ——种子所受的吸附力, N

f_g ——滚筒对种子的摩擦力, N

G ——种子的重力, N

N_g ——滚筒对种子的支持力, N

ω ——滚筒转动角速度, rad/s

k ——综合比例系数,棉花种子 k 取 $0.35 \sim 1.55$ [18]

Δp ——吸孔内外侧压差, Pa

θ ——种子的吸种夹角, ($^\circ$)

则吸孔吸附单粒种子不被吹落的条件为

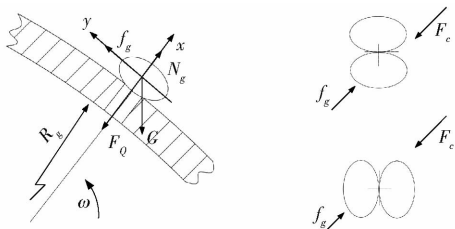
$$F_c \leq f_g = G \cos \theta \quad (15)$$

式中 F_c ——种子所受的气吹力, N

多粒种子被吸附时, 每粒种子只占据了吸孔面积的一部分, 占据面积越小的种子, 吸附力越小, 越容易被吹除。吸附状态不稳定种子被吹落的条件为

$$F_c \geq \left(\mu \frac{\pi}{4} k \Delta p d^2 + G \sin \theta - m \omega^2 R_g \right) \tan \varphi_g \quad (\mu < 1/2) \quad (16)$$

式中 μ ——被吸附种子所占据的吸孔面积与整个吸孔截面积的比值, 一般种子被吹除的条件为 $\mu < 1/2$



(a) 单粒种子在滚筒横截面上的受力分析 (b) 侧向清种示意图

图6 清种过程受力分析图

Fig. 6 Force analysis diagrams of seed in clearing phase

由式(16)可知, 负压越大, 滚筒转速越低, 吸孔直径越大, 所需气吹力越大。侧向气吹清种装置采用漏斗形风嘴, 据研究表明, 漏斗形风嘴的孔径 d_w 应小于种子平均长度^[18], 本文取 $d_w = 5 \text{ mm}$ 。结合相关研究, 通过预试验, 在气室负压为 $3.0 \sim 4.5 \text{ kPa}$, 滚筒转速为 $12 \sim 18 \text{ r/min}$, 吸孔直径为 $3.2 \sim 3.8 \text{ mm}$ 时, 清种气流强度为 11 m/s , 倾斜角度为 45° , 喷嘴与吸孔的间隙为 24 mm , 清种效果较佳。

3 排种器充种过程分析

3.1 种子在充种过程中的运动分析

充种过程是排种器工作的基础保证, 排种器工作性能直接受种子充种性能的影响。在充种过程中, 种子的运动过程主要分为2个阶段: 种子受到绕流阻力的作用, 从种子群中分离出来, 从静止加速到与滚筒相对静止的过程; 种子被吸附在滚筒吸孔上相对静止, 随滚筒一起转动的过程^[19-20]。

3.2 种子在第一阶段的力学分析

种子被吸附的过程时间较短, 且受力情况复杂, 时变性强, 为便于分析, 忽略影响吸附过程中的次要因素, 在建立力学模型前作如下假设: ①吸附过程时间极短, 作用在种子上的吸附力方向和大小不变。②在吸附过程中, 空气阻力相对自身重力、吸附力较

小, 忽略空气阻力对吸附过程的影响。假设种子处于从静止到加速运动的临界状态, 可根据静力学平衡条件联立方程进行求解。选择表层单粒种子为研究对象, 进行受力分析, 种子的受力分析如图7所示, 平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = N_g - F_{Q1} - N_q \cos(\alpha + \theta) - f_q \sin(\alpha + \theta) - G \sin \theta = 0 \\ \sum F_y = f_g + N_q \sin(\alpha + \theta) - f_q \cos(\alpha + \theta) - G \cos \theta = 0 \\ f_g = N_g \tan \varphi_g \\ f_q = N_q \tan \varphi_q \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\sum F_x$ ——种子在 X 方向上所受的合力, N

$\sum F_y$ ——种子在 Y 方向上所受的合力, N

N_q ——种群对种子的支持力, N

f_q ——种群对种子的摩擦力, N

F_{Q1} ——种子在第一阶段所受的吸附力, N

α ——种群对种子支持力与水平方向的夹角, ($^\circ$)

φ_q ——种子的自然休止角, ($^\circ$)

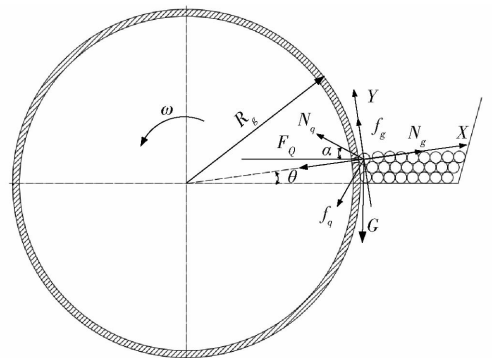


图7 种子在第一阶段的受力分析图

Fig. 7 Force analysis diagram of seed in the first phase

种子能被吸附的条件为

$$F_{Q1} \geq N_g - N_q \cos(\alpha + \theta) - f_q \sin(\alpha + \theta) - G \sin \theta \quad (18)$$

种子之间的相互作用力相对于吸附力、支持力和重力很小, 可以近似忽略, 式(18)简化为

$$F_{Q1} \geq \frac{G \cos \theta}{\tan \varphi_g} - G \sin \theta = \frac{G \cos(\theta + \varphi_g)}{\sin \varphi_g} \quad (19)$$

根据球体绕流阻力理论, 吸附力为

$$F_{Q1} = C_d A \frac{\rho v^2}{2} \quad (20)$$

式中 C_d ——阻尼力因数

A ——种子在垂直于气流速度方向上的投影面积, m^2

ρ ——空气密度, kg/m^3

v ——气流速度, m/s

为提高计算精度,将棉花种子简化为椭球体,种子在种箱内的姿态是随机的,所以种子在气流方向上的投影面积在一定范围内,其最大值与最小值分别为

$$A_{\max} = \frac{\pi L_1 L_2}{4} \quad (21)$$

$$A_{\min} = \frac{\pi L_2^2}{4} \quad (22)$$

式中 A_{\max} 、 A_{\min} ——种子在气流方向上的最大和最小投影面积, mm^2

L_1 、 L_2 ——种子投影面椭圆长轴和短轴长度, mm

为了保证可靠吸种,取其最小值 A_{\min} 作为投影面积,则式(20)可以写为

$$F_{Q1} = \frac{1}{8} C_d \pi L_2^2 \rho v^2 \quad (23)$$

研究表明,吸孔气流场的分布是放射状的圆锥体。以锥顶为中心的球面上,气流速度大小相同。设锥角为 2γ ,距锥顶中心为 x 处的锥面面积为: $A = 2\pi x^2 (1 - \cos\gamma)$ [21],则 x 处的气流平均速度为

$$v = \frac{Q}{2\pi x^2 (1 - \cos\gamma)} \quad (24)$$

式中 Q ——距锥顶 x 处锥面的气流量, m^3/s
 x ——与锥顶的距离, mm

则吸附力可以表示为

$$F_{Q1} = \frac{C_d L_2^2 \rho Q^2}{32\pi x^4 (1 - \cos\gamma)^2} \quad (25)$$

吸附条件为

$$\frac{C_d L_2^2 \rho Q^2}{32\pi x^4 (1 - \cos\gamma)^2} \geq \frac{G \cos(\theta + \varphi_g)}{\sin\varphi_g} \quad (26)$$

由式(26)可知,影响种子吸附过程的主要因素有:种子物料特性(C_d 、 L_2 、 G)、与锥顶的距离(x)、种子与滚筒的摩擦角(φ_g)、气流参数(ρ 、 Q)、吸孔结构(γ)等。种子吸附力 F_{Q1} 的大小与 Q 平方成正比,与锥顶的距离 x 四次方成反比。即气流量越大,种子与锥顶的距离越小,则吸附力越大。吸附力过大,利于吸种,但易造成重播。

3.3 种子在第二阶段的力学分析

在种子被吸住后,种子与滚筒相对静止,随滚筒一起转动,受力情况发生了两方面的变化:种子所受的吸附力由绕流阻力变为吸孔负压差产生的吸附力;种子随滚筒一起转动产生了离心惯性力。由于种子随滚筒做匀速圆周运动,可根据力学平衡条件建立方程进行求解。种子的受力分析如图 8 所示,平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = N_g - F_{Q2} - G \sin\beta + m\omega^2 R_g = 0 \\ \sum F_y = f_g - G \cos\beta = 0 \\ f_g = N_g \tan\varphi_g \end{cases} \quad (27)$$

式中 F_{Q2} ——吸孔负压差产生的吸附力, N
 β ——吸附力与水平方向的夹角, ($^\circ$)

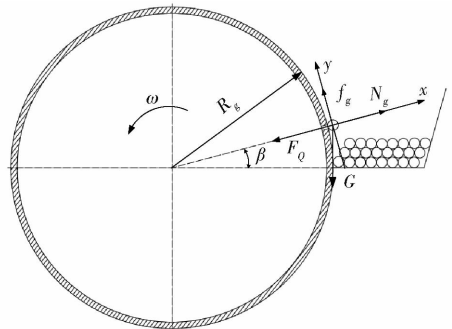


图 8 种子在第二阶段的受力分析图

Fig. 8 Force analysis diagram of seed in the second phase

种子能被吸孔吸附随滚筒一起转动的条件为

$$F_{Q2} \geq \frac{G \cos\beta}{\tan\varphi_g} + m\omega^2 R_g - G \sin\beta \quad (28)$$

在第二阶段,种子所受的吸附力为吸孔负压差产生的吸附力,计算公式为

$$F_{Q2} = \frac{\pi}{4} k \Delta p d^2 \quad (29)$$

种子能被吸孔吸附带出的条件为

$$F_{Q2} = \frac{\pi}{4} k \Delta p d^2 \geq \frac{G \cos(\beta + \varphi_g)}{\sin\varphi_g} + m\omega^2 R_g \quad (30)$$

由式(30)可知,种子能否随滚筒一起转动,与负压差 Δp 、吸孔直径 d 、种子物料特性(k 、 m)、滚筒角速度 ω 、滚筒半径 R_g 等因素有关。种子所受吸附力 F_{Q2} 与负压差 Δp 、吸孔直径 d 平方成正比。负压差和吸孔直径越大,产生的吸附力越大。转速越大,质量越大,所需吸附力越大。

4 排种器性能试验

4.1 试验准备

试验材料为新陆早 48 号、新陆早 52 号、新陆早 60 号,均经过脱绒、包衣处理,经过人工精选,无破碎,含杂率小于 0.1%,均干燥,含水率均小于 5.6%。随机选取 3 种棉花种子进行物料特性测定,每组试验测定 10 次,取平均值。棉花种子的物料特性如表 2 所示。

试验地点为石河子大学排种器性能检测实验室,在 JPS-12 型排种器性能检测试验台上进行试验,微型压力表测量负压,试验台如图 9 所示。

表2 棉花种子的物料特性

Tab.2 Physical characteristics of cotton seed

品种	千粒质量/ g	容重/ (g·L ⁻¹)	自然休止 角/(°)	滑动摩擦 角/(°)
新陆早48号	95.0	664.64	37.0	20.5
新陆早52号	109.9	607.88	39.0	19.8
新陆早60号	87.3	636.21	37.5	17.8



图9 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器试验台

Fig.9 Experiment table of pneumatic cylinder array seed-metering device

1. 气吸滚筒阵列式精密排种器
2. 微型压力表
3. 风机
4. JPS-12型排种器性能检测试验台

4.2 试验方法

4.2.1 试验因素的选取

根据理论分析和预试验,确定影响气吸滚筒阵列式精密排种器工作性能的主要影响因素及水平范围为:滚筒转速,12~20 r/min;吸孔直径,3.0~4.0 mm;负压,3.0~5.0 kPa。

4.2.2 试验指标的选取

试验依据文献[22],连续记录油带上由排种器稳定工作时排出的250穴种子中每穴的粒数和穴距,重复3次。选用合格指数、漏播指数和重播指数作为试验指标。各试验指标的计算公式分别为:

$$\text{合格指数 } Q = \frac{n_1}{250} \times 100\% \quad (31)$$

$$\text{漏播指数 } C = \frac{n_2}{250} \times 100\% \quad (32)$$

$$\text{重播指数 } M = \frac{n_3}{250} \times 100\% \quad (33)$$

对于单粒精播: n_1 为1穴0粒种子的穴数; n_2 为1穴1粒种子的穴数; n_3 为1穴2粒及以上的穴数。对于双粒精播: n_1 为1穴小于2粒种子的穴数; n_2 为1穴2粒种子的穴数; n_3 为1穴3粒及以上的穴数。对于单双粒交替: n_1 为1穴小于相应粒数种子的穴数; n_2 为1穴相应粒数种子的穴数; n_3 为1穴大于相应粒数的穴数。目前新疆地区棉花“单粒精播”种植农艺最为广泛,故本文根据“单粒精播”技术要求进行试验研究。

4.2.3 试验设计

采用二次旋转正交组合设计试验方案,完成多

目标参数优化,以滚筒转速、吸孔直径、负压3个影响因素作为试验因子,以合格指数、漏播指数、重播指数为响应指标,按三因素五水平安排试验,因子编码见表3。根据因素编码表,制定二次旋转正交组合设计试验方案,实施试验,每组试验重复3次,取平均值。试验方案及结果见表4, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表3 因子编码

Tab.3 Coding of factor level

编码	滚筒转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	吸孔直径 x_2/mm	负压 x_3/kPa
下星号臂(-1.682)	12.64	3.0	3.16
下水平(-1)	14	3.2	3.5
零水平(0)	16	3.5	4.0
上水平(1)	18	3.8	4.5
上星号臂(1.682)	19.36	4.0	4.84

表4 二次旋转正交组合试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and result of experiment of quadratic rotation-orthogonal combination

试验 序号	影响因素			响应指标		
	滚筒 转速 X_1	吸孔 直径 X_2	负压 X_3	合格 指数 $Q/\%$	漏播 指数 $C/\%$	重播 指数 $M/\%$
1	-1	-1	-1	86.8	6.8	6.4
2	1	-1	-1	82.2	9.0	6.8
3	-1	1	-1	88.2	4.0	7.8
4	1	1	-1	84.5	8.8	6.7
5	-1	-1	1	89.2	2.6	8.2
6	1	-1	1	85.5	7.2	7.3
7	-1	1	1	89.0	1.5	9.5
8	1	1	1	86.7	4.7	8.6
9	-1.682	0	0	86.0	3.0	11.0
10	1.682	0	0	82.8	11.1	4.1
11	0	-1.682	0	84.8	7.5	5.7
12	0	1.682	0	90.0	2.0	8.0
13	0	0	-1.682	83.1	12.3	4.6
14	0	0	1.682	90.8	1.4	7.8
15	0	0	0	94.3	3.2	2.5
16	0	0	0	93.4	2.7	3.9
17	0	0	0	92.2	2.5	5.3
18	0	0	0	91.9	3.2	5.9
19	0	0	0	92.8	3.1	4.1
20	0	0	0	92.6	3.8	3.6

4.3 试验结果分析

4.3.1 回归模型方程与显著性检验

运用数据处理软件 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行多元回归拟合,建立合格指数、漏播指数、重播指数与滚筒转速、吸孔直径、负压之间的二次多项式回归模型,回归方程为

$$Q = 92.85 - 1.44X_1 + 0.98X_2 + 1.59X_3 + 0.29X_1X_2 + 0.29X_1X_3 - 0.34X_2X_3 - 2.85X_1^2 - 1.79X_2^2 - 1.95X_3^2 \quad (34)$$

$$C = 2.94 + 2.08X_1 - 1.16X_2 - 2.26X_3 + 0.15X_1X_2 + 0.10X_1X_3 - 0.075X_2X_3 + 1.28X_1^2 + 0.47X_2^2 + 1.21X_3^2 \quad (35)$$

$$M = 4.36 - 1.03X_1 + 0.57X_2 + 0.83X_3 - 0.19X_1X_2 - 0.14X_1X_3 + 0.16X_2X_3 + 1.26X_1^2 + 1.01X_2^2 + 0.78X_3^2 \quad (36)$$

对试验结果及回归方程进行方差分析,结果见表 5。排种器合格指数、漏播指数和重播指数的回归模型拟合度均是极显著的($P < 0.01$),且回归方程失拟不显著,与实际情况拟合较好。对于合格指数回归方程,回归项 X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.1229$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。对于漏播指数回归方程,回归项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 和 X_2^2 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.1001$,说明不存在其它影响响应指标的主要

因素。对于重播指数回归方程,回归项 X_2 、 X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响均不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.2375$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。剔除不显著的回归项,保留显著的回归项,在保证回归模型显著、失拟项不显著的前提下,对合格指数、漏播指数和重播指数的回归方程进行重新拟合,回归方程为

$$Q = 92.85 - 1.44X_1 + 0.98X_2 + 1.59X_3 - 2.85X_1^2 - 1.79X_2^2 - 1.95X_3^2 \quad (37)$$

$$C = 2.94 + 2.08X_1 - 1.16X_2 - 2.26X_3 + 1.28X_1^2 + 1.21X_3^2 \quad (38)$$

$$M = 4.36 - 1.03X_1 + 0.57X_2 + 0.83X_3 + 1.26X_1^2 + 1.01X_2^2 + 0.78X_3^2 \quad (39)$$

通过对式(37)~(39)回归系数的检验得出,影响合格指数和漏播指数的主次因素为:负压、滚筒转速、吸孔直径。影响重播指数的主次因素为:滚筒转速、负压、吸孔直径。

表 5 试验结果及回归方程方差分析

Tab. 5 Variance analysis of test results and regression equations

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	263.09	9	19.01	<0.0001**	189.69	9	9.81	0.0007**	67.87	9	4.20	0.0176*
X_1	28.36	1	18.44	0.0016**	59.15	1	27.52	0.0004**	14.57	1	8.11	0.0173*
X_2	13.24	1	8.61	0.0149*	18.40	1	8.56	0.0152*	4.42	1	2.46	0.1478
X_3	34.32	1	22.32	0.0008**	70.06	1	32.60	0.0002**	9.32	1	5.19	0.0459*
X_1X_2	0.66	1	0.43	0.5268	0.18	1	0.084	0.7782	0.28	1	0.16	0.7006
X_1X_3	0.66	1	0.43	0.5268	0.080	1	0.037	0.8509	0.15	1	0.084	0.7776
X_2X_3	0.91	1	0.59	0.4592	0.045	1	0.021	0.8878	0.21	1	0.12	0.7387
X_1^2	117.33	1	76.92	<0.0001**	23.75	1	11.05	0.0077**	22.72	1	12.65	0.0052**
X_2^2	46.31	1	30.12	0.0003**	3.19	1	1.48	0.2510	14.65	1	8.16	0.0171*
X_3^2	54.90	1	35.70	0.0001**	21.20	1	9.87	0.0105*	8.73	1	4.86	0.0420
残差	15.38	10			21.49	10			17.96	10		
失拟	11.59	5	3.05	0.1229	16.66	5	3.45	0.1001	11.91	5	1.97	0.2375
误差	3.79	5			4.83	5			6.05	5		
总和	278.47	19			211.18	19			85.83	19		

注: * 表示显著($P < 0.05$), ** 表示极显著($P < 0.01$)。

4.3.2 试验因素影响效应分析

评价排种性能的性能指标中,合格指数与漏播指数是影响精密播种技术应用的 2 个关键指标。根据建立的排种器合格指数和漏播指数回归模型,将其中一个试验因素置于零水平,绘制响应曲面和等值线图,如图 10、11 所示。

如图 10a、11a 所示,当气室负压 X_3 位于中心水平(4.0 kPa)时,随着滚筒转速和吸孔直径的增大,排种器合格指数先增大后减小。随着滚筒转速增大,漏播指数增大,随着吸孔直径的增大,排种器漏播指数减小。滚筒转速较小时(小于 16 r/min),滚筒转速对合格指数和漏播指数的影响较小。滚筒转速较大时(大于 16 r/min),滚筒转速对合格指数和漏播指数的影响较大。

如图 10b、11b 所示,当吸孔直径 X_2 位于中心水平(3.5 mm)时,随着滚筒转速和负压的增大,排种器合格指数先增大后减小,漏播指数持续减小。负压较小时(小于 4.0 kPa),负压对合格指数和漏播指数的影响较大。负压较大时(大于 4.0 kPa),负压对合格指数和漏播指数的影响较小。

如图 10c、11c 所示,当滚筒转速 X_1 位于中心水平(16 r/min)时,随着负压和吸孔直径的增大,排种器合格指数先增大后减小,漏播指数持续减小。负压较小时(小于 4.0 kPa),负压对合格指数和漏播指数的影响较大。负压较大时(大于 4.0 kPa),负压对合格指数和漏播指数的影响较小。

4.4 参数优化

当滚筒转速为 14~18 r/min,气室负压为 3.50~

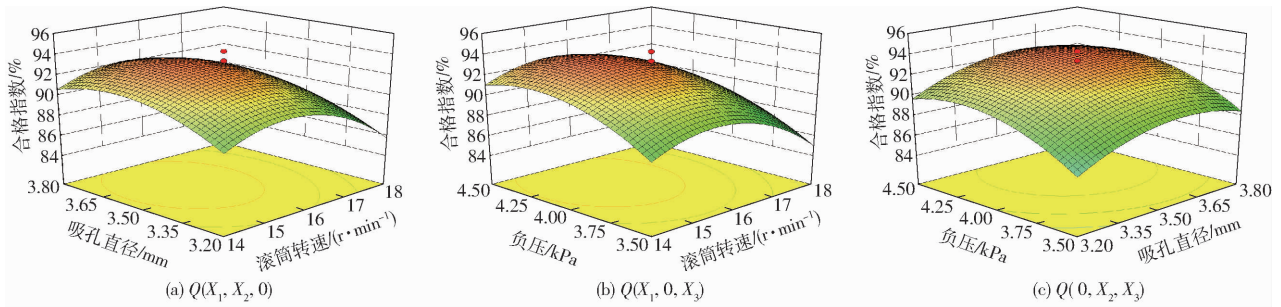


图 10 各因素对排种器合格指数的影响

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

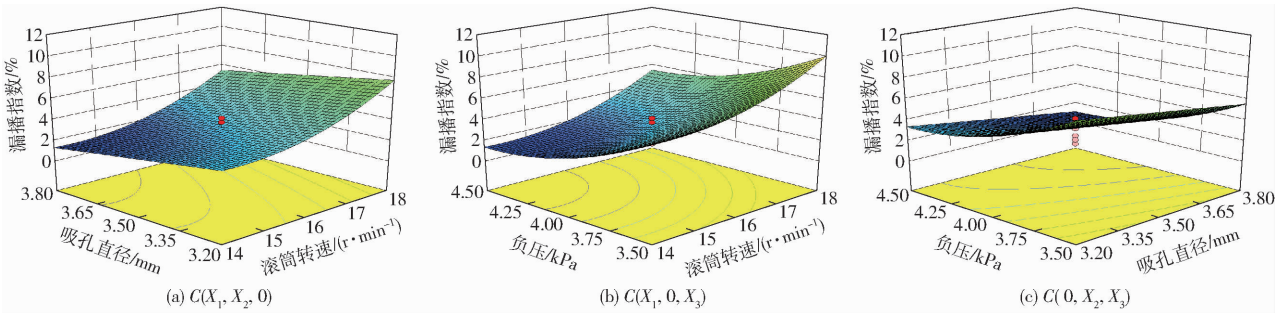


图 11 各因素对排种器漏播指数的影响

Fig. 11 Effects of all factors on miss-seeding rate of seed-metering device

4.50 kPa, 吸孔直径为 3.20 ~ 3.80 mm 时, 采用多重响应方法中的主目标函数法对影响因素滚筒转速、吸孔直径和负压进行优化, 以合格指数、漏播指数和重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

$$\begin{cases} \max Q \\ C < 3\% \\ M < 6\% \\ \text{s. t.} \begin{cases} 12.64 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 19.36 \text{ r/min} \\ 3 \text{ mm} \leq x_2 \leq 4 \text{ mm} \\ 3.16 \text{ kPa} \leq x_3 \leq 4.84 \text{ kPa} \end{cases} \end{cases} \quad (40)$$

运用 Design-Expert 8.0.6 数据处理软件进行优化求解, 得出影响因素的最佳参数组合: 滚筒转速为 15.5 r/min, 气室负压为 4.2 kPa, 吸孔直径为 3.5 mm, 目标函数的预测值为: 合格指数为 93.48%, 漏播指数为 1.47%, 重播指数为 5.85%。

4.5 试验验证

根据优化结果, 进行试验验证, 在上述最优参数组合试验条件下, 进行 5 次重复试验验证, 试验结果为合格指数平均值为 93.5%, 且均大于 92.0%, 漏播指数平均值为 2.0%, 且均小于 3%, 重播指数平均值为 4.5%, 且均小于 5%。可见, 试验结果与优化结果基本一致, 满足棉花播种农艺要求。

4.6 排种适应性试验

在二次旋转正交组合试验的基础上, 为研究排种器对不同品种棉花种子的适应情况, 进行排种适

应性试验。选取新陆早 48 号、新陆早 52 号、新陆早 60 号为播种对象, 其几何特性和物料特性见表 1、2。在滚筒转速为 15.5 r/min、负压为 4.2 kPa、吸孔直径为 3.5 mm 的工作条件下进行 5 次重复试验, 进行数据处理取平均值, 试验结果如表 6 所示。

表 6 排种适应性试验结果

Tab. 6 Result of suitability tests

品种	合格指数	漏播指数	重播指数
新陆早 48 号	94.2	2.1	3.7
新陆早 52 号	92.5	2.8	4.7
新陆早 60 号	93.6	1.5	4.9

由表 6 可知, 在相同条件下, 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器对几何特性和物料特性存在差异的 3 种棉花种子具有一定适应性, 结果表明: 合格指数均大于 92%, 漏播指数均小于 3%, 重播指数均小于 5%, 满足棉花种子的精密播种要求。其中新陆早 52 号几何尺寸差异较大, 流动性最差, 因此排种性能指标最差; 新陆早 48 号和新陆早 60 号种子, 几何尺寸差异较小, 球形度较大, 流动性较好, 排种性能较好。

5 结论

(1) 根据棉花种植农艺要求和棉花种子的物料特性, 采用阵列吸孔吸种、侧向气吹清种等方式, 设计了一种气吸滚筒阵列式精密排种器, 确定了排种器关键零部件的参数, 对充种过程进行了力学分析, 确定了影响排种器排种性能的关键因素为: 滚筒转速、吸孔直径和负压。

(2)采用二次旋转正交组合设计试验方法进行试验,建立排种器性能指标与各影响因素之间的回归模型,通过响应面分析试验因素对响应指标的影响。采用多目标优化方法,确定排种器最佳工作参数组合:滚筒转速 15.5 r/min,气室负压 4.2 kPa,吸

孔直径为 3.5 mm,此时,排种器性能指标为:合格指数 93.5%,漏播指数 2.0%,重播指数 4.5%。

(3)排种适应性试验结果表明:排种器对不同品种的棉花种子具有良好的适应性,满足棉花种子的播种农艺要求。

参 考 文 献

- 张泽平,马成林,左春桢. 精播排种器及排种理论研究进展[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(4):112-117.
ZHANG Zeping, MA Chenglin, ZUO Chuncheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995, 25(4): 112-117. (in Chinese)
- 王磊,陈永成,王维新. 棉花播种机排种器的现状和发展趋势[J]. 中国农机化,2005(3):80-82.
- 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)
- 陈学庚,赵岩. 棉花双膜覆盖精量播种机的研制[J]. 农业工程学报,2010,26(4):106-112.
CHEN Xuegeng, ZHAO Yan. Development of double-film mulch precision planter for cotton seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 106-112. (in Chinese)
- 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- 许剑平,谢宇峰,陈宝昌. 国外气力式精密播种机技术现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2008,30(12):203-206.
XU Jianping, XIE Yufeng, CHEN Baochang. The present technic status and developing tendency of abroad pneumatic precision drill [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12): 203-206. (in Chinese)
- SINGH R 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.
- SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting mustard seeds[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2006, 15(2): 31-41.
- SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting of groundnut (*Arachis hypogaea*) seeds[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2007, 77(1): 40-42.
- KARAYEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- YAZGI A, DEGIRMENCIOLU 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.
- 王朝辉. 气吸滚筒式超级稻育秧播种器的基本理论及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
WANG Zhaohui. Research of theory and experiment on air suction cylinder device for tray nursing seeding of super-rice [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报,2009,40(3):56-59,76.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 56-59, 76. (in Chinese)
- 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)
- 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(2):20-28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for panax notoginseng [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20-28. (in Chinese)
- 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. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35-38. (in Chinese)
- 中国农业机械科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:357-358.
- 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 夏红梅,李志伟,牛菊菊,等. 气力滚筒式蔬菜穴盘播种机吸排种动力学模型的研究[J]. 农业工程学报,2008,24(1):141-146.
XIA Hongmei, LI Zhiwei, NIU Jujun, et al. Dynamic model for metering process for pneumatic roller-type vegetable seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 141-146. (in Chinese)
- 赵湛,李耀明,陈进,等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):112-116.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Dynamic analysis of seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 112-116. (in Chinese)
- FALLAK S S, SVERKER P E P. Vacuum nozzle design for seed metering [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3):688-696.
- GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.