doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.008

嵌入旋转气腔式水稻穴直播排种器设计与试验

万　霖[1,2]　王洪超[1]　车　刚[1,2]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院，大庆 163319；2.黑龙江省农机智能装备重点实验室，大庆 163319)

摘要：针对气吸式排种器气压利用不充分、种盘旋转与橡胶垫存在摩擦、穴播均匀性差等问题，设计了一种嵌入旋转气腔式水稻穴直播排种器。基于 ANSYS 软件对腔体内部流场进行模拟仿真，以吸孔孔径和吸孔位置分布为影响因素、以气腔压力平均值和吸孔处的平均流速为评价指标进行数值模拟仿真研究。仿真结果表明：气腔流场分布比较稳定，可为吸种提供稳定的负压环境。应用 JPS－12 试验台进行试验验证，以气腔转速、负压和填种高度为影响因素，以播种合格率、漏播率和重播率为评价指标，进行三因素五水平二次正交旋转组合试验，运用 Design-Expert 8.0.6 对数据完成方差分析和显著性检验，得到回归方程和响应曲面图，通过分析各因素间的交互作用，确定了最佳参数组合：当气腔转速为 21.61 r/min、气腔负压为 4.4 kPa、填种高度为 15.7 cm 时，作业性能最好，此时播种合格率 93.6%，漏播率 3.47%，重播率 2.93%。试验结果与优化结果相符，满足粳稻穴直播要求。

关键词：水稻；旋转气腔；穴直播；排种器；设计；试验

中图分类号：S223.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2019)11-0074-11

Design and Test of Rice Hill-drop Seed Metering Device Embedded with Rotating Air Cavity

WAN Lin[1,2]　WANG Hongchao[1]　CHE Gang[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Machinery Intelligent Equipment*, *Daqing* 163319, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of inadequate use of air pressure for air suction type metering device, friction between seed plate rotation and rubber pad, and poor uniformity of hole sowing, airflow field of rice seed metering device embedded with rotating air chamber was designed by the absorption principle. The working principle of each stage of seed metering device was introduced, and the parameters and structure of the key components were designed. Based on the basic governing equation of fluid, the negative pressure cavity was simulated by ANSYS software. The numerical simulation was carried out with the influence factors of pore diameter and position distribution of suction hole. The average pressure of the cavity and the average velocity of the suction hole were the evaluation indexes. The simulation results showed that the distribution of flow field in air cavity was relatively stable, which provided a stable negative pressure environment for seed suction. The JPS－12 test-bed was applied to verify the simulation test. Taking the rotation velocity of air chamber, the negative pressure of air chamber and the height of seed filling as the influencing factors, and taking the qualified rate of rice sowing, the rate of missed sowing and the rate of re-sowing as the evaluation indexes, the experiment of quadratic rotation combination design at five levels of factors was carried out. Using Design-Expert 8.0.6 to complete variance analysis and significance test, the regression equation and the corresponding surface map were obtained, the interaction of various factors was analyzed, and the best parameters were determined. Number combination: when the rotating velocity of the air chamber was 21.61 r/min, the negative pressure of the air chamber was 4.4 kPa and the seed filling height was 15.7 cm, the performance of the operation was 93.6% for the qualified index, 3.47% for the missed broadcast index and 2.93% for the replay index. The experimental results of bench test were in good agreement with the optimized results, which met the requirement of direct seeding of japonica rice.

Key words: rice; rotating air cavity; hole direct seeding; seed metering device; design; test

收稿日期：2019－01－20　修回日期：2019－05－13

基金项目：国家科技支撑计划项目(2014BAD06B00)、2017 全国基层农技推广补助项目(JCTG17－03)和黑龙江八一农垦大学农业机械化工程重点实验室开放项目

作者简介：万霖(1971—)，女，教授，主要从事寒区大规模水稻生产全程机械化研究，E-mail：381995603@qq.com

0　引言

水稻直播技术是一种省时、省力、节水增效、抗倒伏的种植技术[1-4]。穴直播是根据农业需求，将水稻芽种按一定穴距、粒数、行距精确地播到田间。稻种催芽处理后含水率增大，芽种间摩擦力增大，流动性差，因此水稻穴直播研究的关键在于排种器[5-6]。

排种器作为直播的重要组成部件，主要分为机械式和气力式两大类[7-12]。气力式排种器综合性能较优，对作物摩擦作用小，几乎不伤种，但造价大，当前在玉米、大豆等圆形种子作物或者接近圆形的种子作物上有很好的适应性。对于水稻、小麦等不规则种子作物，充种过程中影响因素比较复杂，导致工作性能下降。为此，国内学者对水稻穴直播排种器进行了研究，如臧英等[13]设计一种水稻挡种装置，减少了飞种现象。李兆东等[14]设计一种槽齿式吸种盘，适合于高速播种作业。张国忠等[15]为实现粳稻与杂交稻配合水稻穴直播，设计一种双腔充种式排种器。李兰兰等[16]为提高排种精度，设计一种滑片型孔轮式穴直播排种器。邢赫等[17]为提高水稻在充种区的流动性，在种箱和排种器之间设计分层充种室。上述研究在一定程度上提高了工作性能，但种盘与壳体相对旋转仍然存在摩擦，造成气压损失，高速作业振动对播种仍有影响。

为消除摩擦、降低气压损失、提高装置的稳定性，本文将底盘嵌入到壳体，形成轴承种盘密封结构并同步旋转，设计一种嵌入旋转气腔式水稻排种器。利用 Fluent 对负压气腔流体仿真与数值模拟，分析不同情况对负压气腔流速和气压的影响规律，通过台架试验验证，确定工作性能最优的参数组合。

1　工作原理与参数设计

1.1　排种器结构

排种器主要由端盖、壳体、吸种盘、橡胶刷、轴承、链轮、负压气腔和风机接头构成，如图 1 所示。吸种盘由搅种齿和吸孔组成。搅种齿呈圆周焊接在种盘上，在种盘边缘均匀分布圆柱形吸孔。链轮嵌入壳体内，用螺栓与底盘固定。

1.2　工作原理

嵌入旋转气腔式水稻排种器安装在播种机种箱的底部，并通过储种室与播种机的种箱贯通。风机接头与负压风机连接，负压风机工作时在气腔室内产生负压。在吸种区、清种区和携种区阶段，依靠气腔内外的压力差，稻种被吸在种盘上。工作时，通过

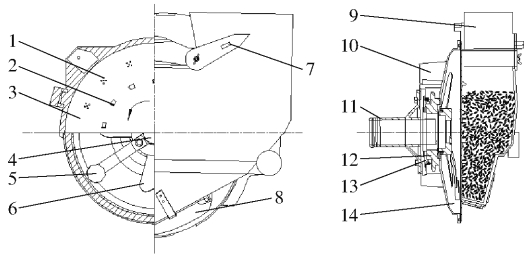


图 1　嵌入旋转气腔式排种器结构图

Fig. 1　Structure diagram of rice seeder embedded with rotary air cavity

1. 吸孔　2. 搅种装置　3. 吸种盘　4. 轴承　5. 橡胶刷　6. 扰流叶片　7. 清种调节装置　8. 出种装置　9. 端盖　10. 壳体　11. 风机接头　12. 链轮　13. 垫圈　14. 底盘

地轮驱动链轮。此时稻种已经从储种室落入型孔周边，吸种盘上搅种齿对种群有扰动作用，清种装置除去吸附多余的稻种。经过投种阶段时，橡胶刷堵住吸孔，吸孔与负压气腔隔离，稻种将不再受负压吸力，同时在卸种装置的作用下，种子靠自身重力下落，结束一个排种过程。吸种盘分为 4 个区域，如图 2 所示。

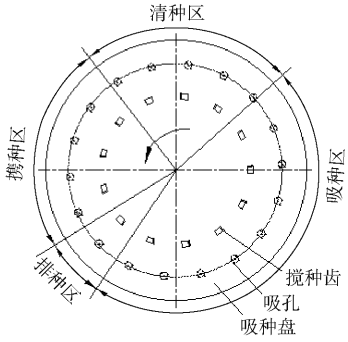


图 2　吸种盘结构与工作区域示意图

Fig. 2　Sketch of suction tray structure and working area

1.3　吸种盘关键参数

1.3.1　吸种盘转速

吸种盘是将种子从种群中分离出的重要部件，其参数对排种器结构设计至关重要[18-20]。种盘转速与充种时间对应关系为

$$T=\frac{C_r}{v_p}=\frac{\alpha\left(\frac{d_p}{2}-r_k\right)}{\frac{\pi n_p}{30}\left(\frac{d_p}{2}-r_k\right)}=\frac{30\alpha}{\pi n_p} \tag{1}$$

整理得

$$n_p=\frac{30\alpha}{\pi T}=\frac{30\omega}{\pi} \tag{2}$$

式中　T——吸孔在充种区经过的时间，s

C_r——充种区弧长，mm

v_p——吸种盘线速度，m/s

α——充种角，rad

d_p——种盘直径，mm

n_p——吸种盘转速，r/min

r_k——外侧群组吸孔中心与吸种盘边的径向距离,mm

ω——充种区角速度,取 1 ~ 5 rad/s

由式(2)表明,为确保充种性能良好,转速应控制在 10 ~ 50 r/min 范围内。

1.3.2 吸孔孔数

随着孔数增多,穴距不断减小,出现排种混乱。而孔数减小,穴距逐渐增大,出现漏播现象。根据手册知[21],按照农艺穴播水稻指标,保证每穴 3 ~ 6 粒,有

$$Z = \frac{\pi D(1+\delta)}{i_p S} \tag{3}$$

式中 Z——群组吸孔的组数

D——地轮直径,mm

δ——地轮滑移系数,一般取 0.05 ~ 0.12

i_p——传动比,取 1

S——穴距,mm

确定组数为 18,每组孔数为 5。

1.3.3 定向搅种齿

种子分离盘表面嵌入呈圆周分布的搅种齿,对稻种分离与输送。搅种齿高度 H 为 10 mm,宽度 E 为 15 mm。搅种齿对稻种的作用力通过其他种子传递到吸孔处,种子受到吸附力 P、吸种盘对种子的作用力 N、吸孔处摩擦力 F 以及合力 Q,由此建立种子吸附的等效模型,如图 3 所示。

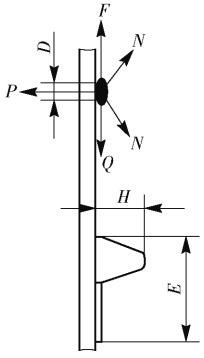


图 3 种子吸附等效模型

Fig. 3 Seed adsorption equivalent model

1.4 旋转气腔设计

1.4.1 旋转气腔结构

旋转气腔如图 4 所示,底盘最大面的直径为 250 mm,中间气室呈碗状结构,两个部件位于一条中心线。底盘进气口处安装直径为 63 mm、高 16 mm 的轴承,轴承与底盘形成封闭的密封结构,具有较好的稳定性和适应性,防止气体泄漏,降低气压损失。底盘底部通过螺栓与链轮相连,进而同步旋转。吸种盘与底盘的环形键槽相配合,转动中具有较好的封闭性。扰流叶片在气腔旋转过程中,增加气体的流动性,使气腔内平均压强和吸孔处的流速达到最佳的作业效果。

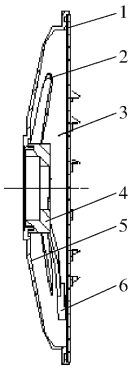


图 4 气腔结构示意图

Fig. 4 Schematic of air cavity structure

1. 吸种盘 2. 扰流叶片 3. 气室 4. 轴承 5. 底盘 6. 橡胶刷

1.4.2 扰流叶片理论设计

气室随链轮旋转运动,带动内部空气流动。扰流叶片在气室内部与气流接触,气体粘性使叶片表面形成压差,从而产生使叶片上升的力 L,垂直作用于叶片旋转平面上的阻力 D。工作受力如图 5 所示。

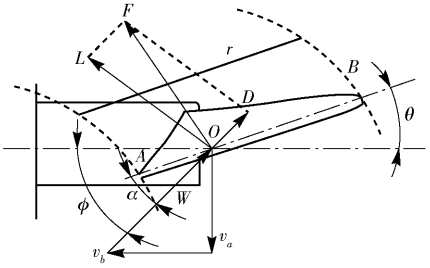


图 5 扰流叶片受力示意图

Fig. 5 Force analysis diagram of spoiler blade

升力和阻力简化公式为

$$L = \frac{1}{2}\rho W^2 C_L C \mathrm{d}r \tag{4}$$

$$D = \frac{1}{2}\rho W^2 C_D C \mathrm{d}r \tag{5}$$

考虑叶片的数量 K,叶片旋转区域半径 r 处的轴向推力为

$$\mathrm{d}F_a = K(L\cos\phi + D\sin\phi) = \frac{1}{2}\rho W^2 (C_L\cos\phi + C_D\sin\phi) NC\mathrm{d}r \tag{6}$$

转矩为

$$\mathrm{d}Q = K(L\sin\phi - D\cos\phi) = \frac{1}{2}\rho W^2 r(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi) KC\mathrm{d}r \tag{7}$$

式中 C_L——升力系数

C_D——阻力系数

ϕ——入流角

C——AB 长度,mm

ρ——气流密度，kg/m^3

W——相对速度，m/s

叶片转动过程中，气流从高压向低压流动中形成涡流[22-23]，造成能量的损失，基于 Schmitz 理论，对扰流叶片进行设计，AB 的长度 C 和安装角 θ 分别为

$$C=\frac{16\pi r}{C_L K}\sin^2\left(\frac{\operatorname{arccot}\left(\frac{r}{R}\lambda\right)}{3}\right) \tag{8}$$

$$\theta=\frac{2\operatorname{arccot}\left(\frac{r}{R}\lambda\right)}{3}-\alpha \tag{9}$$

式中　R——叶片展向长度，mm

α——迎角，为叶片 AB 与合速度夹角

λ——叶片尖速比

经计算，扰流叶片安装角为 19°，AB 的长度为 51 mm。

2　旋转气室数值优化

2.1　种子在气流场中的受力

水稻在重力场、气流场和颗粒场的共同作用下，受到阻力、Basset 力、Magnus 力和其他力的作用[24]。

假设吸孔周边的气流是均匀的，探究单粒水稻的受力情况。绕流阻力 F_d 为

$$F_d=C_d S\frac{\rho v_0^2}{2} \tag{10}$$

式中　C_d——阻尼力系数

S——种子垂直于运动方向上投影面积，m^2

v_0——吸孔周围的气流平均速度，m/s

稻种在负压气腔作用下有 3 种状态：平躺、竖直、横躺，如图 6 所示。稻种的形状类似椭圆，3 种稻种状态的投影面积分别为 S_t、S_w、S_l，有

$$\begin{cases} S_t=\dfrac{\pi lw}{4} \\ S_w=\dfrac{\pi tl}{4} \\ S_l=\dfrac{\pi wt}{4} \end{cases} \tag{11}$$

式中　l——种子平均长度，mm

w——种子平均宽度，mm

t——种子平均厚度，mm

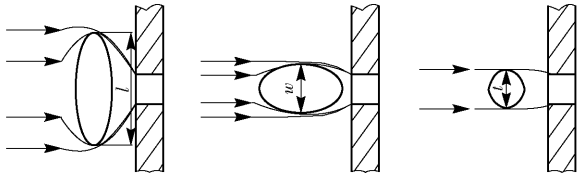


图 6　稻种吸附姿态示意图

Fig. 6　Schematics of adsorption posture of rice seeds

不同状态的稻种所受绕流阻力是不相同的，计算可知平躺状态下所受的绕流阻力最大，其次为竖直和横躺。

2.2　流体的基本控制方程

利用流体力学的基本控制方程，根据排种器的实际工作情况，流体粘度和流体密度接近为常数。$k-\varepsilon$模型被广大学者应用到 CFD 模拟仿真中，此流体模型能够真实模拟复杂的流体运动[25-26]。连续性方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{12}$$

动量方程（Navier－Stokes 方程）为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)= -\frac{\partial\rho}{\partial x_i}+\frac{\rho}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \tag{13}$$

湍流输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{u_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+ G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{14}$$

式中　u_i、u_j——流体速度

ε——湍动耗散率

G_k——平均速度梯度引起的湍动能产生项

G_b——浮力引起的湍动能产生项

Y_M——可压湍流中脉动扩张的贡献

σ_k——湍动能对应的普朗特数，默认为 1.0

S_k、S_i——源项

2.3　网格划分与边界条件设置

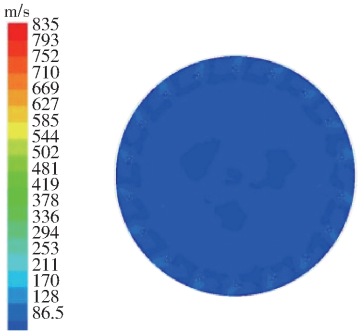
在 ANSYS Workbench 中将建立完成的模型简化，网格类型为非结构化四面体网格。旋转气室内部的流体雷诺数 Re 超过 4 000，判断为湍流。流体域设置为标准大气压，壁面设置为标准函数。流体域的气压入口为 0 kPa，气压出口根据实际所需的负压大小设置。

2.3.1　嵌入旋转气腔结构对吸种性能的影响

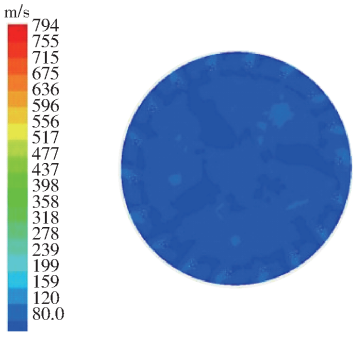
为验证嵌入旋转气腔结构对气腔吸种性能的影响，在仿真中，将嵌入旋转气腔结构与无扰流叶片、轴承等结构的气腔对比试验，速度云图如图 7 所示。验证嵌入旋转气腔结构具有较好的稳定性和适应性，能有效降低气压损失，提高气压利用率。由仿真结果可知，嵌入旋转气腔结构压力分布（图 7a）较均匀，气腔平均压强与吸孔处的流速均有所提高。气压利用率提高约 0.69%，增强了充种性能。

2.3.2　吸孔直径对吸种性能的影响

孔径对吸种性能具有较大影响[27]。当吸孔直



(a) 嵌入旋转气腔结构



(b) 无扰流叶片、轴承等结构

图 7 不同气腔结构的速度云图

Fig. 7 Velocity cloud diagrams of different air cavity structures

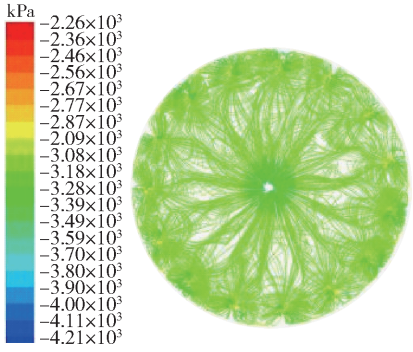
径超过一定值,会发生漏气现象,导致气压损失,工作性能降低。吸孔直径小在工作状态下所需的气室真空度就越小,漏播率增加。为考察不同孔径处的气流速度与压力,选择 1.2、1.4、1.6、1.8 mm 的孔径为研究对象,盘转速设置为 25 r/min,气腔负压设置为 3 500 kPa。在 Fluent 中设置相应参数,残差参数设置成 1×10^{-4},迭代计算设置成 2 000 次,收敛后如图 8 所示。

由仿真模拟结果可知,孔径对气腔的压力分布产生一定的影响。不同孔径仿真时流场都很稳定,吸孔的压力比周围的小。由图 9 可知,孔径为 1.6 mm 时的平均气腔压力和出口平均流速较好。当直径从 1.2 mm 增大到 1.8 mm 过程中,压力先上升后下降,吸孔流速从 72.446 m/s 增到 77.965 m/s,之后呈下降趋势。在其他条件不变的情况下,增加吸孔直径会使种子吸附能力增强,但过大会导致重播率增加,过小会发生卡种的现象。当吸孔直径为 1.6 mm 时,气流场的压力和速度吸种效果最好,有助于提高工作性能。

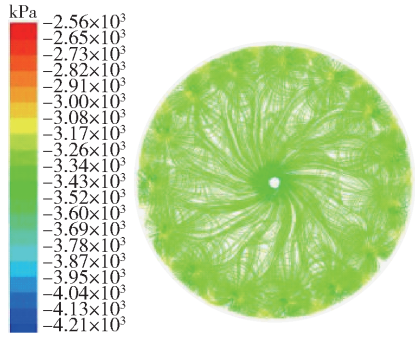
2.3.3 吸孔分布对吸种性能的影响

由于水稻籽粒体积小,吸孔分布形式决定着稻种吸附密集程度。在保证正常工作的基础上,采用 5 个吸孔,基于前面的仿真与试验结果,孔径确定为 1.6 mm。各孔径之间的距离要适中。为研究吸种效果是否与吸孔分布情况有关,进行了 3 种吸孔分布方式的试验,分别为 A 型、B 型、C 型。气腔转速设置为 30 r/min,气腔负压设置为 4 000 kPa。在其他影响因素不变的情况下,分析在各因素作用下的压力流场变化,如图 10 所示。

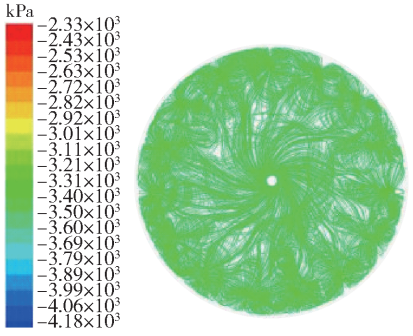
仿真模拟结果和对比数据如图 11,不同吸孔分布类型平均压力和流速变化不大,流场区域分布均匀且稳定。从 Fluent 软件中导出收敛后的仿真数据,可以看出 B 型吸孔分布各项指标较高,流体负



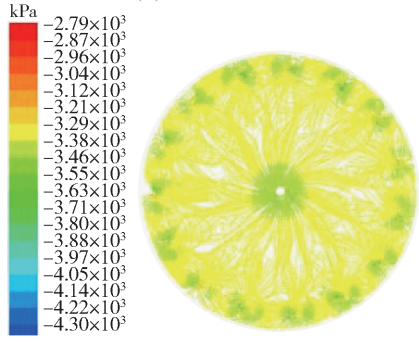
(a) 1.2 mm



(b) 1.4 mm



(c) 1.6 mm



(d) 1.8 mm

图 8 不同孔径的压力流线图

Fig. 8 Pressure flow diagrams for different orifice sizes

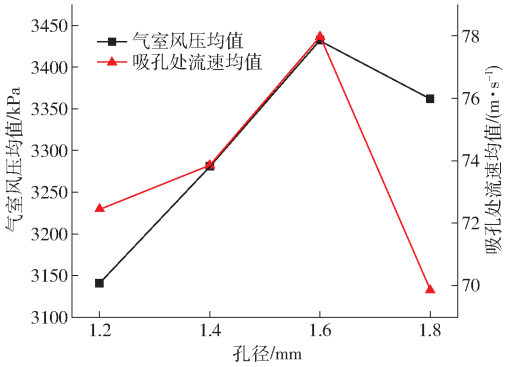


图 9　不同孔径的性能曲线

Fig. 9　Simulation plots with different apertures

压气腔平均压力为 3 747.35 kPa，吸孔的流速均值为 77.64 m/s，满足水稻穴播种的需求。

3　性能试验

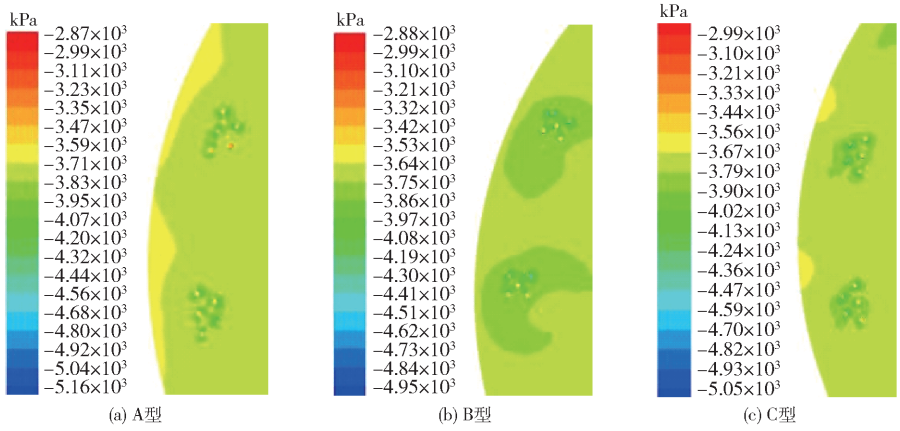
为测试嵌入旋转气腔式水稻排种器的工作性能，在黑龙江八一农垦大学西土槽试验室进行台架性能试验，如图 12 所示。调频电机控制传送运动，在落种区域涂上一定厚度的油层，由 Seeder Test 软件采集试验数据，观察每穴粒数。

3.1　试验仪器设备和材料

霍尔转速记录仪（量程范围：5 ~ 200 r/min，分度值：0.1 r/min），JJ 系列高精度电子天平（量程：420 g，精度：0.001 g），游标卡尺（精度：0.02 mm）。

JPS－12 排种试验台，转速为 15 ~ 120 r/min，输送带速度为 1.5 ~ 12 km/h。

水稻采用黑龙江优质常规稻龙粳 31，用清水浸泡后采用干燥箱催芽，直至破裂露出白芽，其湿基含水率为 21.65% ~23.73% 后装入自封袋中，保持其水分含量，参数如表 1 所示。



(a) A型　(b) B型　(c) C型

图 10　不同吸孔分布的压力云图

Fig. 10　Pressure nephograms with different distributions of suction holes

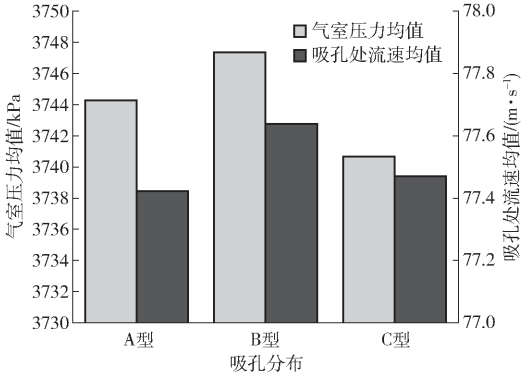


图 11　不同吸孔分布的性能曲线

Fig. 11　Performance curve diagram of different suction hole distributions

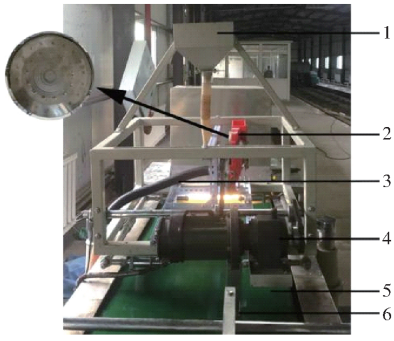


图 12　计算机视觉排种器试验台

Fig. 12　Computer vision seeder test bench

1. 种箱　2. 排种器　3. 负压气管　4. 电机　5. 胶带　6. 油刷

表 1　水稻芽种物料特性参数

Tab. 1　Characteristic parameters of rice sprout material

参数	数值
含水率（湿基）/%	21.45
千粒质量/g	23.98
滑动摩擦角/(°)	35.24
自然休止角/(°)	40.56
平均外形尺寸（长×宽×厚）/(mm×mm×mm)	7.25×3.26×2.11

3.2　试验评价指标

农艺要求水稻穴径不大于 50 mm，通常粳稻的播量为穴粒数 3 ~ 6 粒。在不同条件下，采用不同的评价标准来判断工作效果。每组试验做 3 次并采集 250 穴数据，每次取全部装置平稳运行状态下的数

值。漏播率、重播率和合格率作为判断装置性能的评价标准。稻种穴径与穴距示意图如图 13 所示，S 为穴距，D 为穴径。

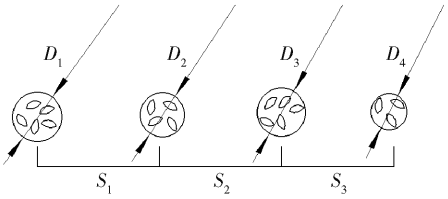


图 13 稻种穴径与穴距示意图

Fig. 13 Schematic of diameter and spacing of rice seeds

合格率为

$$M = \frac{B}{I} \times 100\% \tag{15}$$

漏播率为

$$J = \frac{F}{I} \times 100\% \tag{16}$$

重播率为

$$A = \frac{E}{I} \times 100\% \tag{17}$$

式中 B——每穴中含有 3 ~ 6 粒稻种穴数

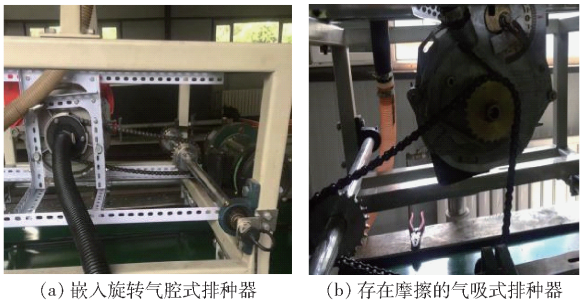
F——每穴中含有 0 ~ 2 粒稻种穴数

E——每穴中含有大于 6 粒稻种穴数

I——全部穴数

3.3 对比试验

为验证嵌入旋转气腔式排种器能够消除摩擦，降低气压损失，提高气压利用率，从而改善播种性能，将嵌入旋转气腔式排种器（图 14a）与存在摩擦的气吸式排种器（图 14b）进行对比试验。本试验选用孔径为 1.6 mm，吸孔分布和搅种齿都相同的种盘，转速设置为 20 r/min，气腔负压设置为 4 kPa，3 次试验为一组并计算平均值。



(a) 嵌入旋转气腔式排种器 (b) 存在摩擦的气吸式排种器

图 14 排种器对比试验

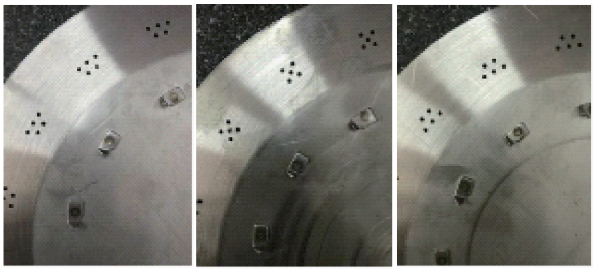
Fig. 14 Seed meter comparison test

嵌入旋转气腔式排种器的合格率、漏播率、重播率为 93.85%、3.94%、2.21%，存在摩擦的气吸式排种器合格率、漏播率、重播率为 92.56%、4.86%、2.58%。可知所设计排种器的合格率、漏播率、重播率均优于传统排种器，证明所设计排种器能降低气压损失，有利于气压的充分利用，排种器的综合性能得到改善。

3.4 单因素试验

3.4.1 型孔分布对排种性能的影响

选用孔径为 1.6 mm 的种盘，气腔转速设置为 25 r/min，气腔负压设置为 3.5 kPa。加工制作 3 种吸孔分布形式，A 型外侧 3 个吸孔，内侧 2 个吸孔。B 型最内侧和最外侧圆周上有 2 个吸孔，中间分布 1 个吸孔。C 型外侧 2 个吸孔，内侧 3 个吸孔。如图 15 所示。除了吸孔分布有变化，其他条件固定不变，3 次试验为一组并计算平均值。



(a) A型 (b) B型 (c) C型

图 15 吸孔分布类型实物图

Fig. 15 Physical drawings of distribution type of suction hole

由表 2 可知，B 型分布的播种效果要优于 A 型和 C 型。试验结果与仿真结果相符。因此，在后续的试验研究中，应用 B 型吸孔。

表 2 不同吸孔分布类型试验结果

Tab. 2 Different suction hole distribution type data

%

类型	评价指标		
	合格率	漏播率	重播率
A	81.46	14.87	3.67
B	82.51	15.08	2.41
C	80.94	14.65	4.41

3.4.2 孔径对排种性能的影响

选用孔径 1.2、1.4、1.6、1.8 mm 为研究对象，气腔转速设置为 20 r/min，气腔负压为 4 kPa。在其他条件不变的基础上，实时采集试验数据。3 次重复试验求平均值。

由表 3 可知，孔径对装置工作性能有显著的影响。随孔径不断的增大，合格率先不断上升，然后呈下降趋势，漏播率明显减小。小于 1.6 mm 时，重播率较小，1.8 mm 时重播率明显增加。当孔径为 1.6 mm，

表 3 不同孔径试验结果

Tab. 3 Different aperture data %

吸孔直径/mm	评价指标		
	合格率	漏播率	重播率
1.2	90.67	5.76	3.57
1.4	92.56	5.57	1.87
1.6	93.46	4.32	2.22
1.8	92.45	3.41	4.14

效果最佳。

3.5　二次回归正交旋转组合试验

在单因素试验基础上，选取较优的龙粳 31 水稻种子为试验对象，进行三因素五水平二次正交旋转组合设计试验，对影响因素进行显著性分析，从而得到最佳的工作参数组合[28]。在试验过程中，由于部分数值是通过传感器检测，存在一定的误差，但最高误差不超过 1.4%，在可接受的范围内。确定气腔负压的范围为 2.6 ~ 5.4 kPa，气腔转速范围为 12 ~ 28 r/min，填种高度为 5 ~ 25 cm。因素编码如表 4 所示，试验方案设计与结果如表 5 所示，表中 x_1、x_2、x_3 为气腔转速、气腔负压和填种高度编码值，y_1、y_2、y_3 为漏播率、合格率和重播率。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Test factors and codes

编码	因素		
	气腔转速 X_1/(r·min^{-1})	气腔负压 X_2/kPa	填种高度 X_3/cm
1.682	28.0	5.4	25.0
1	24.8	4.8	20.9
0	20.0	4.0	15.0
−1	15.2	3.2	9.1
−1.682	12.0	2.6	5.0

表 5　试验设计与结果

Tab. 5　Experimental design and results

序号	x_1	x_2	x_3	y_1/%	y_2/%	y_3/%
1	1	1	1	7.63	89.56	2.81
2	1	1	−1	1.49	95.55	2.96
3	1	−1	1	16.08	80.5	3.42
4	1	−1	−1	17.54	79.69	2.77
5	−1	1	1	5.05	81.63	13.32
6	−1	1	−1	8.90	78.85	12.25
7	−1	−1	1	11.73	84.12	4.15
8	−1	−1	−1	20.69	75.54	3.77
9	1.682	0	0	15.02	82.45	2.53
10	−1.682	0	0	4.71	78.45	16.84
11	0	1.682	0	5.17	90.75	4.08
12	0	−1.682	0	23.33	73.83	2.84
13	0	0	1.682	6.00	84.67	9.33
14	0	0	−1.682	7.66	79.13	13.21
15	0	0	0	7.75	90.45	1.80
16	0	0	0	5.57	93.25	1.18
17	0	0	0	3.36	94.81	1.83
18	0	0	0	4.92	93.96	1.12
19	0	0	0	3.89	94.42	1.69
20	0	0	0	3.22	95.56	1.22
21	0	0	0	2.08	90.57	7.35
22	0	0	0	2.17	92.63	5.20
23	0	0	0	8.97	85.18	5.85

3.6　试验结果分析

运用 Design-Expert 8.0.6 软件进行多元回归拟合后，得出各因素对合格率、漏播率和重播率的回归方程。方差分析与显著性结果如表 6 所示，3 组回归方程均极显著（$P < 0.01$）。并且失拟 P 值不显著，表明方程的拟合程度较好。合格率的方差分析结果中，失拟 P 值为 0.81，说明无其他因素影响合格率。漏播率的方差分析结果中，失拟 P 值为 0.23，表明无其他因素影响合格率。重播率的方差分析中，失拟 P 值为 0.54，表明无其他因素影响合格率。在确保模型都显著和失拟项不显著情况下，除去不显著因素，建立因素编码值回归方程

表 6　回归方程方差分析

Tab. 6　Regression equation analysis of variance

方差来源	合格率				漏播率				重播率			
	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	980.02	9	13.48	<0.000 1**	736.40	9	10.93	<0.000 1**	386.08	9	7.75	<0.000 1**
x_1	74.72	1	9.25	0.009**	13.55	1	1.81	0.20	151.92	1	27.45	0.000 2**
x_2	216.89	1	26.85	0.000 2**	395.58	1	52.83	<0.000 1**	26.64	1	4.82	0.04*
x_3	4.07	1	0.50	0.49	4.51	1	0.60	0.45	0.01	1	0.002	0.96
x_1x_2	72.60	1	8.99	0.01*	4.55	1	0.60	0.44	40.82	1	7.38	0.01*
x_1x_3	34.20	1	4.23	0.06	38.24	1	5.11	0.04*	0.11	1	0.02	0.89
x_2x_3	19.84	1	2.46	0.14	20.19	1	2.70	0.12	0.001	1	0.000 3	0.99
x_1^2	281.50	1	34.85	<0.000 1**	72.50	1	9.68	0.008**	68.28	1	12.34	0.003**
x_2^2	194.47	1	24.08	0.000 3**	202.73	1	27.07	0.000 2**	0.09	1	0.01	0.90
x_3^2	64.87	1	8.03	0.01*	0.51	1	0.06	0.79	53.93	1	9.75	0.008**
残差	105.00	13			97.35	13			71.94	13		
失拟	22.70	5	0.44	0.81	51.11	5	1.77	0.23	25.52	5	0.88	0.54
误差	82.30	8			46.23	8			46.42	8		
总和	1 085.02	22			833.75	22			458.02	22		

注：* 表示影响显著（$P < 0.05$），** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

$$y_1 = 4.73 - 9.26x_2 + 6.18x_1x_3 + 6.12x_1^2 + 10.41x_2^2 \tag{18}$$

$$y_2 = 92.33 + 3.91x_1 + 6.86x_2 + 8.79x_1x_2 - 12.05x_1^2 - 10.19x_2^2 - 3.9x_3^2 \tag{19}$$

$$y_3 = 2.94 - 5.58x_1 + 2.4x_2 - 6.59x_1x_2 + 5.94x_1^2 + 3.56x_3^2 \tag{20}$$

对回归方程系数检验后，得出填种高度、气腔负压、气腔转速对合格率的影响逐渐增加，得出填种高度、气腔转速、气腔负压对漏播率的影响逐渐增加，得出填种高度、气腔负压、气腔转速对重播率的影响逐渐增加。

3.7 各因素对合格率的影响

合格率是评判排种器性能的重要指标，因此本文重点分析各因素交互作用对合格率的影响，响应曲面如图 16 所示。

3.7.1 气腔转速和气腔负压的交互作用

图 16a 为当填种高度为 15 cm 时，气腔转速和气腔负压交互作用对合格率的影响。从图可看出，

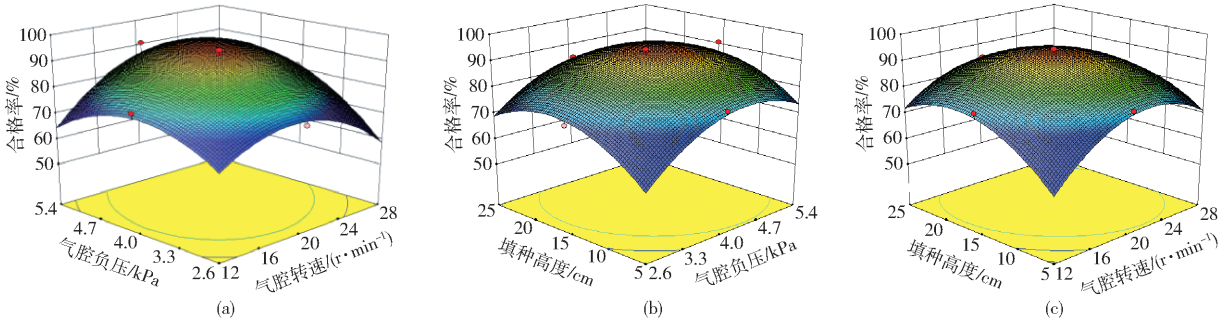


图 16 交互因素对合格率的影响

Fig. 16 Influences of interactive factors on eligibility index

气腔转速固定不变，气腔负压逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。气腔负压固定不变时，气腔转速逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。在气腔负压为 3.8 ~ 4.2 kPa，气腔转速为 18 ~ 22 r/min 时，作业合格率最高。

3.7.2 气腔负压和填种高度的交互作用

图 16b 为当气腔转速为 20 r/min 时，填种高度和气腔负压交互作用对合格率的影响。从图可看出，填种高度固定不变，气腔负压逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。气腔负压固定不变，填种高度逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。在气腔负压为 3.8 ~ 4.2 kPa，填种高度为 14 ~ 18 cm 时，作业合格率最高。

3.7.3 气腔转速和填种高度的交互作用

图 16c 为当气腔负压为 4 kPa 时，填种高度和气腔转速交互作用对合格率的影响。从图可看出，填种高度固定不变，气腔转速逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。气腔转速固定不变，填种高度逐渐增大时，作业合格率先缓慢增加，到达最高点后，缓慢下降。在气腔转速为 18 ~ 22 r/min，填种高度为 14 ~ 18 cm 时，作业合格率最高。

3.8 优化与验证

运用软件优化最佳参数组合需设定边界条件，并建立数学模型。分析得到数学模型为

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \max y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 12\ \text{r/min} \leqslant X_1 \leqslant 28\ \text{r/min} \\ 2.6\ \text{kPa} \leqslant X_2 \leqslant 5.4\ \text{kPa} \\ 5\ \text{cm} \leqslant X_3 \leqslant 25\ \text{cm} \\ 0 \leqslant y_1(x_1, x_2, x_3) \leqslant 1 \\ 0 \leqslant y_2(x_1, x_2, x_3) \leqslant 1 \\ 0 \leqslant y_3(x_1, x_2, x_3) \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{21}$$

在 Design-Expert 8.0.6 软件中优化模块完成各参数优化，当气腔转速为 21.61 r/min，气腔负压为 4.4 kPa，填种高度为 15.7 cm 时，作业性能最好。按照优化后的参数进行 3 组重复试验，结果如表 7 所示。可以看出，实际评价指标与优化评价指标相差不大，可以完成精量播种。

表 7 优化与试验结果对比

Tab. 7 Comparison of optimization and test results

%

项目	评价指标		
	合格率	漏播率	重播率
优化结果	93.9	3.60	2.50
实际结果	93.6	3.47	2.93
偏差	0.3	0.13	0.43

4 结论

(1)针对排种盘与壳体之间存在摩擦、穴播量

不稳定、机车速度对播种性能影响的问题，采用底盘嵌入到壳体，形成轴承种盘密封结构并同步旋转，设计一种嵌入旋转气腔式水稻排种器。

（2）应用 Fluent 软件对腔体内部进行模拟仿真，结合单因素试验，以吸孔孔径和吸孔位置分布为影响因素、以气腔压力平均值和吸孔处的平均流速为评价指标进行数值模拟仿真研究。仿真结果表明：气腔流场分布比较稳定，可为吸种提供稳定的负压环境。当孔径为 1.6 mm 时，吸种效果较优。气腔平均负压为 3 432.45 kPa，吸孔处的平均流速为 77.96 m/s。B 型吸孔分布各项指标略高于其他类型，气腔平均负压为 3 747.35 kPa，吸孔处的流速均值为 77.64 m/s。

（3）以气腔转速、气腔负压和填种高度为影响因素，选取各因素的数值变化范围。通过对各因素方差分析得到回归方程，结合响应曲面法得出指标随因素的变化趋势。应用优化模块，得出最佳参数组合为：当气腔转速为 21.61 r/min、气腔负压为 4.4 kPa、填种高度为 15.7 cm 时，作业性能最好。台架试验得合格率为 93.6%，漏播率 3.47%，重播率 2.93%。优化值与实际值误差较小，结果准确可靠。

参　考　文　献

[1] 曾山，汤海涛，罗锡文，等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报，2012，28(20)：12－19.
ZENG Shan, TANG Haitao, LUO Xiwen, et al. Design and test of simultaneous furrow ridging and fertilization of rice precision hole direct seeding machine [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12－19. (in Chinese)

[2] 张国忠，臧英，罗锡文，等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报，2013，29(12)：1－8.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and test of rice pneumatic seed puller oriented seed stirring device [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1－8. (in Chinese)

[3] 王在满，罗锡文，唐湘如，等. 基于农机与农艺相结合的水稻精量穴直播技术及机具[J]. 华南农业大学学报，2010，31(1)：91－95.
WANG Zaiman, LUO Xiwen, TANG Xiangru, et al. Rice precision hole direct seeding technology and tools based on the combination of agricultural machinery and agronomy [J]. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(1): 91－95. (in Chinese)

[4] 臧英，罗锡文，周志艳，等. 南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J]. 农业机械学报，2008，39(1)：60－63.
ZANG Ying, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Development strategy of rice planting and harvesting mechanization in south China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 60－63. (in Chinese)

[5] 罗锡文，刘涛，蒋恩臣，等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报，2007，23(3)：108－112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of seed row wheel for direct seeding of rice jingliang hole [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108－112. (in Chinese)

[6] 张欣悦，李连豪，汪春，等. 2BS－420 型水稻植质钵育秧盘精量播种机[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(6)：56－61.
ZHANG Xinyue, LI Lianhao, WANG Chun, et al. Precision planter of 2BS－420 rice seedling tray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 56－61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130611&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.011. (in Chinese)

[7] 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 of precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 62－64. (in Chinese)

[8] 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 of seed filling performance of air-suction drum type corn seeder [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)

[9] 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 Sibo, et al. Design and test of concentrated row type soybean seed distributor [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)

[10] 陈玉龙，贾洪雷，王佳旭，等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(8)：95－104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and test of high speed precision soybean planter with protruding spoon [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)

[11] 韩豹，杨亚楠，孟繁超，等. 气吸滚筒式自动清堵粳稻排种器的改进设计与性能试验[J]. 农业工程学报，2016，32(19)：

18 – 25.
HAN Bao, YANG Yanan, MENG Fanchao, et al. Improved design and performance test of air-sucking drum type automatic plugging japonica rice seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 18 – 25. (in Chinese)

[12] 刘艳芬,林静,李宝筏,等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37 – 46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of horizontal disc seeder for maize planter [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37 – 46. (in Chinese)

[13] 臧英,邢赫,王在满,等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 33 – 38.
ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and test of rice pneumatic seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 33 – 38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150506&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.006. (in Chinese)

[14] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 12 – 22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and adsorption performance test of rapeseed high speed precision seed planter with slot tooth combined seed tray[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12 – 22. (in Chinese)

[15] 张国忠,张沙沙,杨文平,等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 9 – 17.
ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and test of precision acupoint seeding and seeding device for double-chamber side-filled rice [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9 – 17. (in Chinese)

[16] 李兰兰,朱德泉,张顺,等. 滑片型孔轮式水稻精量穴直播排种器设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(12): 2153 – 2160.
LI Lanlan, ZHU Dequan, ZHANG Shun, et al. Design and test of a verticoid hole direct seeding seed distributor for precision rice [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008, 30(12): 2153 – 2160. (in Chinese)

[17] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 42 – 48.
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed filling chamber for pneumatic rice seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42 – 48. (in Chinese)

[18] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 43 – 47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical and pneumatic combined precise maize seedmetering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43 – 47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120209&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009. (in Chinese)

[19] 王芳,吕冰,王洪明,等. 气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 30 – 36.
WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed hole of air-sucking millet seeding device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 30 – 36. (in Chinese)

[20] 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68 – 73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic drum type rapeseed precision concentrator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68 – 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131212&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012. (in Chinese)

[21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册. 上册[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971.

[22] 李连波, 陈涛, 王凡, 等. 基于 Schmitz 理论的风叶气动设计研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2): 225 – 228, 245.
LI Lianbo, CHEN Tao, WANG Fan, et al. The aerodynamic design for the blades based on Schmitz theory [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(2): 225 – 228, 245. (in Chinese)

[23] 刘方圆. 基于生物翼型的小型水平轴风力机叶片仿生设计及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIU Fangyuan. Bionic design and experimental study of small horizontal axis wind turbine blades based on biological airfoil [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[24] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
SHI Song. Design and experimental study of pneumatic combination hole type precise seed metering device for maize [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[25] 李国威,王岩,吕秀丽,等. 偏置短叶片离心泵内三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 151 – 155.
LI Guowei, WANG Yan, LÜ Xiuli, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow field in a biased short-blade centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 151 – 155. (in Chinese)

[26] 张惠 康士廷. FLUENT 14 流场分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

[27] 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 59 – 62.
CHEN Jin, LI Yaoming, WANG Xiqiang, et al. Finite element analysis of the airflow field in the suction hole of air suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59 – 62. (in Chinese)

[28] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.