doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.005

气送式高速玉米精量排种器导流涡轮设计与试验

高筱钧[1,2]　徐　杨[1,2]　贺小伟[1,3]　张东兴[1,2]　杨　丽[1,2]　崔　涛[1,2]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室,北京 100083;
3.塔里木大学机械电气化工程学院,阿拉尔 843300)

摘要:为了提高气送式高速玉米精量排种器的工作性能,设计了 3 种结构类型的导流涡轮,通过计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)方法模拟仿真与理论分析得出,导流涡轮可有效提高排种器内部空气的流动性,增大外圈型孔处空气流速流量,增大压覆作用力,且具有较大迎风角和具备曲线结构的导流涡轮 C 具有较好的扰动性和导流性,效果最佳。为了获得安装有导流涡轮 C 排种器的最佳性能参数,以工作速度、种子喂入量和气送风压为试验因素,以合格指数、漏播指数和重播指数为试验指标进行三元二次回归正交旋转组合试验,并应用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归分析和响应曲面分析,得到了各因素对指标的影响关系。采用多目标优化方法,确定最佳参数组合为:工作速度为 9.8 km/h、种子喂入量为 1.8 kg/min、气送风压为 8 kPa。此时,排种器合格指数最高,其性能指标为合格指数 91.32%、漏播指数 2.83%、重播指数 5.85%。对优化结果进行对比验证试验,在相同条件下与未安装导流涡轮的排种器进行对比表明,安装导流涡轮可以有效提高排种器工作性能。

关键词:玉米;高速排种器;计算流体力学;导流涡轮

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)11-0042-11

Design and Experiment of Diversion Turbine of Air-assisted High Speed Maize Precision Seed Metering Device

GAO Xiaojun[1,2]　XU Yang[1,2]　HE Xiaowei[1,3]　ZHANG Dongxing[1,2]　YANG Li[1,2]　CUI Tao[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Tarim University*, *Alar* 843300, *China*)

Abstract: In order to make the flow field distributed orderly in the air-assisted high speed maize precision seed metering device, thereby improving the working performance of the seed metering device, three kinds of structure type diversion turbine were designed. Through the simulation and theoretical analysis of CFD method, the diversion turbine can effectively improve the air flow inside the seeding device and increase air speed where type hole in outer ring. At the air flow rate, the pressing force was increased, and the C diversion turbine with a large windward angle and a curved structure had better disturbance and guiding, and the effect was optimal. In order to obtain the best performance parameters of the C diversion turbine installed, the operation velocity, quantity of feeding and wind pressure were used as test factors, and the qualified index, the missing index and the multiple index were used as test indicators. A three-factor quadratic rotation orthogonal combination test was performed and the multiple regression analysis and response surface analysis of the test data were carried out by Design-Expert 8.0.6 software, and the influence of various factors on the indicators was obtained. The multi-objective optimization method was used to determine the optimal combination of parameters: the operation velocity was 9.8 km/h, the quantity of feeding was 1.8 kg/min, and wind pressure was 8 kPa and the qualified index of seed metering was the highest. At this time, the qualified index was 91.32%, the missing index was 2.83%, and the multiple index was 5.85%. The comparison verification test was carried out on the optimization results, and the comparison was made under the same conditions with the uninstalled diversion turbine

收稿日期:2019-04-22　修回日期:2019-05-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)、国家自然科学基金项目(51575515)和国家玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介:高筱钧(1990—),男,博士生,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail:gxj_1234@126.com

通信作者:崔涛(1985—),男,副教授,博士,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail:cuitao850919@163.com

seed metering device, and it was found that the installation of the diversion turbine can effectively improve the working performance of the seed metering device.

Key words: maize; high speed seed metering device; computational fluid dynamic; diversion turbine

0　引言

高速精量播种技术是推动玉米产业可持续发展的重要途径之一[1-2]。排种器在高速排种过程中，由于排种机构高速回转，充种时间急剧下降，加上玉米种子形状大小差异较大，导致漏播指数显著上升。为解决上述问题，国内外学者在现有重力充种的原理基础上开展了提高充种性能的研究[3-11]，这些研究均采用辅助手段改善充种性能，未从根本上解决因高速作业、种群堆积而造成的重力充种难问题，为此，崔涛等[12]提出一种气力送种、气流扰种、离心清种的高速排种方法，并设计了一种气送式高速玉米精量排种器。

由于排种器内部流场复杂且杂乱无章，探讨不同结构导流涡轮对排种器内部流场分布以及工作性能的影响很有必要。通过流场分析以及对比试验发现，导流涡轮可以将排种器中心空气引导至外圈，增加外圈流速流量，产生压覆作用力，有效提高了排种器工作性能。近年来，CFD 数值计算在农业机械领域的应用较为广泛。通过 CFD 技术，可利用计算机分析并显示气流场中的现象，使分析结果可视化、直观化，并能在较短时间内预测流场[13-18]。本文通过对比不同结构的导流涡轮，并采用 Fluent 软件数值模拟排种器内流场变化，确定导流涡轮结构，分析对排种过程各阶段的影响，通过对比试验验证安装导流涡轮的必要性。为获得在高速作业下排种器最佳工作性能，以工作速度、种子喂入量和气送风压为试验因素，开展二次回归正交旋转组合试验，以期得到排种器最佳参数组合。

1　工作原理

1.1　排种器组成与工作原理

气送式高速玉米精量排种器主要由后壳体、轴承、排种盘、型孔插件、轴、导流涡轮、护种板和前壳体组成，其整体结构如图 1a 所示。

气流从进风口吹入，将从喂入口进入的种子吹入文丘里管，形成均匀有序的种子流进入排种器[19]。排种器工作过程主要分为充种、携种、清种、投种和过渡 5 个阶段，逆时针转动，如图 1b 所示。轴转动带动排种盘转动，排种盘转动带动与之连接的 4 个型孔插件及导流涡轮转动，种子从前壳体进种口随气流进入排种器。在型孔插件以及护种板的夹持作用下，充入型孔插件的种子随之转动，途经充种区和携种区后转动到排种器正上方处，由于护种板在充种区和携种区的前端倾斜部与型孔插件贴合起到囊种作用，在清种区由于其前端倾斜部分变窄，此时型孔插件内仅能容纳单粒种子，多余的种子失去了护种板的支持力，做离心运动脱离型孔插件，甩到前壳体内壁面并顺着分隔板滑落回排种器底部，在气流作用下与刚进入排种器的种子汇合，进行再次的充种。型孔插件内留下的单粒种子继续随着型孔插件转动，直到投种区失去了护种板的包裹，种子缺少了支持力，在自身重力和气流作用下脱离型孔插件沿着落种口排出排种器，完成排种过程（图 2）。

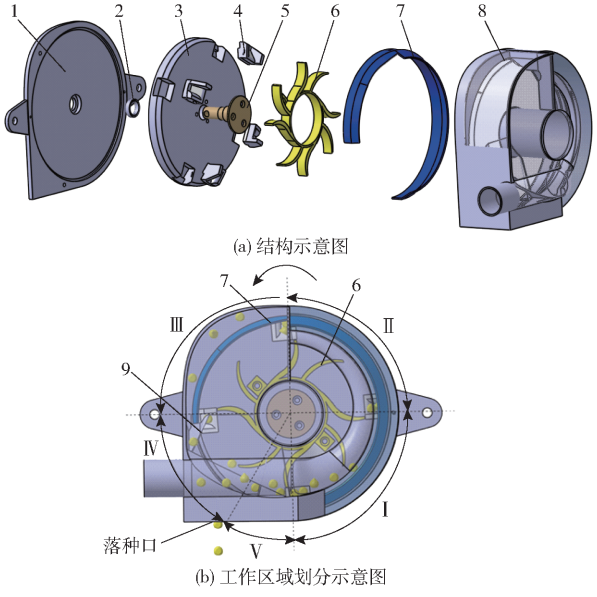


图 1　气送式高速玉米精量排种器结构示意图

Fig. 1　Structure schematic of high speed maize precision seed metering device with seed feeding in air-assisted

1. 后壳体　2. 轴承　3. 排种盘　4. 型孔插件　5. 轴　6. 导流涡轮　7. 护种板　8. 前壳体　9. 分隔板　Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 携种区　Ⅲ. 清种区　Ⅳ. 投种区　Ⅴ. 过渡区

1.2　导流涡轮工作原理

导流涡轮固定安装在排种盘上，随排种盘一起

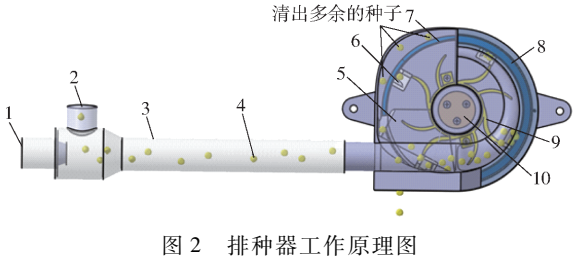


图 2　排种器工作原理图

Fig. 2　Schematic of metering device

1. 进风口　2. 喂入口　3. 文丘里管　4. 玉米种子　5. 分隔板　6. 型孔插件　7. 排种器　8. 护种板　9. 导流涡轮　10. 轴

转动。工作情况下,导流涡轮逆时针转动,在相同转速情况下排种盘内外圈角速度一致,但外圈线速度最大,公式为

$$v_l = \omega R \tag{1}$$

式中 v_l——线速度,m/s

ω——角速度,rad/s

R——半径,m

因此导流涡轮外圈将会产生较大的线速度,带动外圈气流流动,由简化的伯努利方程可以定性地知道,外圈气流流速快、压强小,将会产生较大压差,起到很好的压覆种子作用,公式为

$$p + \rho g h + \frac{1}{2}\rho v^2 = C \tag{2}$$

式中 p——压强,Pa

ρ——流体密度,kg/m^3

g——重力加速度,取 9.81 m/s^2

h——高度,m

v——流速,m/s C——常数

导流涡轮可以提高排种器内部流场的流动性,增大排种器外圈压差,从而增加对种子压覆作用,使得种子流动均匀有序,提高充种、携种、清种和投种性能。

2 导流涡轮结构设计

为了探讨不同导流涡轮结构对排种器内部流场以及工作性能的影响,设计了 3 种具有代表性的导流涡轮,如图 3 所示,3 种装置均为中心对称结构,采用未来 800 树脂材料 3D 打印加工制成。

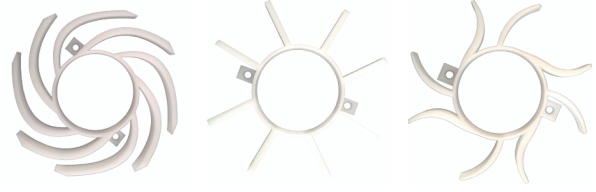


图 3 3 种结构导流涡轮示意图

Fig. 3 Schematic of diversion turbine structure

对 3 种结构的迎风角 α 分析,由图 4 可知,A 型结构迎风角为锐角,因此具有较好的导流作用,但其扰流作用不明显。B 型结构迎风角为直角,具有较好的扰流作用,但导流作用不显著。C 型结构结合上述 2 种结构的特点,将搅拌叶片设计为曲线形式,增加导流作用,同时 2 种叶片迎风角分别为锐角和直角,兼具导流性和扰流性。为了得出中心空气导流至外圈的运动轨迹,假设空气质点最佳绝对运动轨迹方程为 $|y| = vt$,其中 t 为运动时间。设 $t = 0$ 时刻空气质点初始位置坐标为 $(R', 0)$,排种盘逆时针转动,当运动一定时间,空气质点位置坐标为

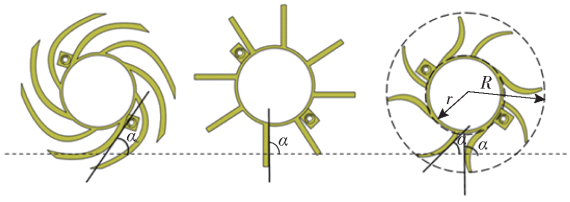


图 4 迎风角分析

Fig. 4 Upwindangle analysis

$$\begin{cases} x = R'\cos(\omega t) - |y|\sin(\omega t) \\ y = R'\sin(\omega t) + |y|\cos(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

式中 x——渐开线横坐标值,mm

y——渐开线纵坐标值,mm

将空气质点绝对运动轨迹方程 $|y| = vt$ 代入式(3)中,得

$$\begin{cases} x = R'\cos(\omega t) - vt\sin(\omega t) \\ y = R'\sin(\omega t) + vt\cos(\omega t) \end{cases} \tag{4}$$

$v = R'\omega$,$\varphi = \omega t$,将其代入式(4)中,得出空气相对运动轨迹方程

$$\begin{cases} x = R'(\cos\varphi - \sin\varphi) \\ y = R'(\sin\varphi + \cos\varphi) \end{cases} \quad (\varphi \in (0, 2\pi)) \tag{5}$$

式中 φ——转动角度,rad

可见,空气相对运动轨迹方程即导流涡轮叶片曲线方程是基圆半径为 R'的渐开线,根据排种器整体结构尺寸要求,本设计取 R'为 38 mm。为了增大型孔处流速流量以及与型孔相对位置,锐角迎风角 α 取 40°,导流涡轮外圈与型孔插件上边缘相切,直角迎风角叶片顶端与型孔插件顶端相连接,相邻 2 种叶片包围一个型孔,由于种盘上有 4 个型孔,因此一共需要 8 个叶片,内圆半径 r 为 75 mm,导流涡轮半径 R 为 150 mm,这种结构增大了型孔处空气流速流量,起到了增大压覆力的作用。

2.1 充种过程

由于排种器工作原理的改变,将原本堆积于排种器腔体内的种子群依靠自身重力进行充种的方式改变为随气流均匀有序进入排种器内的种子流,避免了种子堆积带来的种间摩擦力大,出现结拱和架空等不利于充种现象。在充种过程中,种子之间相互碰撞,不止一颗种子被囊入型孔插件中,由于导流涡轮的加入,种子除了受到来自种群间的挤压力以及与护种板、型孔插件之间的接触力,还受到流场的压覆作用力,其中在型孔底端的种子受力如图 5 所示。图中 F_0为种群挤压力,N;F_1为种子受到护种板的支持力,N;F_2为种子受到型孔底部支持力,N;F_3为流场压覆力所产生的挤压力,N;f 为种子与几何体之间的静摩擦力,N。

高速工作状态下,种子所需向心力较大,同时护种板给予型孔底部种子的支持力以及种群对型孔底

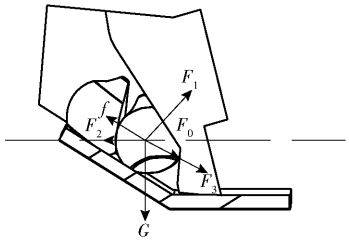


图 5　型孔底部种子受力图

Fig. 5　Force analysis of seed at bottom

部种子的挤压力均较大，再加之导流涡轮高速旋转在外圈形成较高的空气流速，产生较大压覆力，使得型孔底部的种子被牢牢压覆于型孔内，因此在高工作速度下不会出现漏充的现象。导流涡轮使得排种器在原工作条件的基础上增加了对种子的压覆作用，因此避免了传统排种器因种群堆积，排种盘在高速转动下漏充严重的问题。

2.2　清种过程

随着高速旋转的排种盘，型孔内的种子到达排种盘顶端清种区，由于排种盘高速旋转，种子所需向心力较大，且多来自护种板的支持力，当种子到达清种区由于护种板宽度骤减，型孔上部多余的种子瞬间失去了来自护种板的支持力，加之导流涡轮作用产生的压覆力，压覆力作用效果为推出多余种子做离心运动，更好地起到了清种效果，使得多余的种子做离心运动，脱离型孔，其受力情况如图 6 所示。

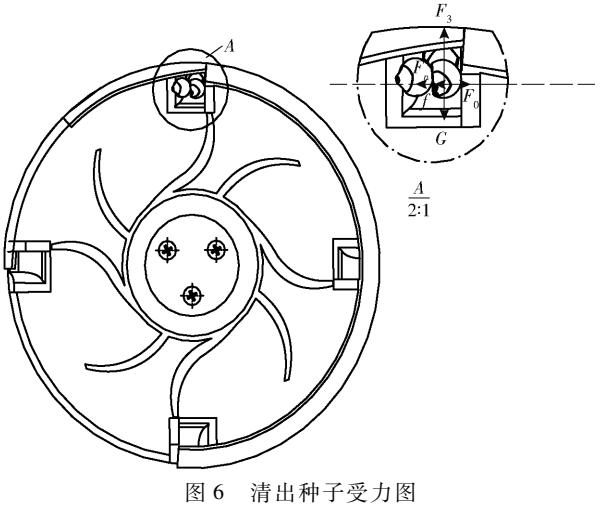


图 6　清出种子受力图

Fig. 6　Force analysis of redundant seed

在水平方向上，多余的种子受到型孔插件的支持力以及种子之间的挤压力，处于平衡状态，在向心方向上，由于缺少护种板的支持再加上导流涡轮所产出的压覆力，使得种子做离心运动，受力为

$$\begin{cases} F_y = F_3 - G \\ F_x = F_0 - F_n - f \\ F_r = mw^2 r \\ F_r \gg F_y \end{cases} \tag{6}$$

式中　F_y——排种盘向心方向的合力，N

F_x——排种盘切线方向的合力，N

F_n——种子受到的支持力，N

F_r——种子所需向心力，N

清除了多余种子，在型孔底部仅且只有一颗种子被牢牢压覆在型孔内，由于清种区护种板宽度盖过型孔底部种子的重心位置，因此可以提供其足够的向心力，不会脱离型孔，实现清除多余种子保证单粒率。

2.3　投种过程

在投种区，型孔内种子失去护种板的支持力，以及受到导流涡轮所产生的压覆力，种子做离心运动。在离心运动过程中种子第 1 阶段先脱离型孔，其受力运动情况如图 7 所示。

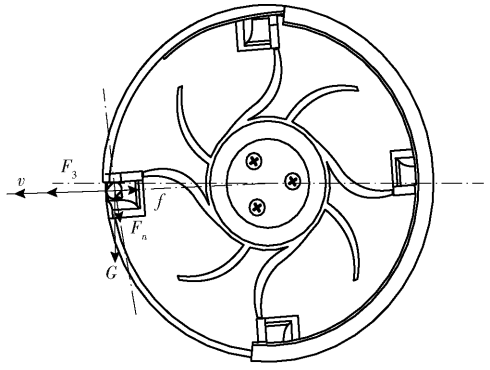


图 7　种子脱离受力分析图

Fig. 7　Force and motion analysis of seed departure

第 2 阶段中，种子脱离型孔的束缚，在惯性的作用下继续保持沿着排种盘切线方向运动。因为导流涡轮在排种器内外圈产生较大空气流速，且在投种区种子与气流均从落种口排出，所以种子除了受到自身重力、流场压覆力，还受到流场中曳力的作用，曳力表达式为

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 Q \tag{7}$$

式中　F_D——曳力，N

C_D——绕流阻力系数

Q——物体在流动方向上的投影面积，m^2

导流涡轮的加入使得种子在投种阶段减小了水平方向的速度，并且在竖直方向做加速下落运动，增加了投种的流畅性，降低漏播风险，实现单粒播种，如图 8 所示。

在整个投种过程中，种子除了受到自身重力以及与几何体之间的摩擦力之外，主要受到导流涡轮所产生的压覆力和排种器内投种区流场中曳力的作用，压覆力作用效果为推出型孔内种子，做离心运动。其中压覆力远远大于摩擦力，起到了较好的推种作用。种子自身的重力以及流场中的曳力有效起

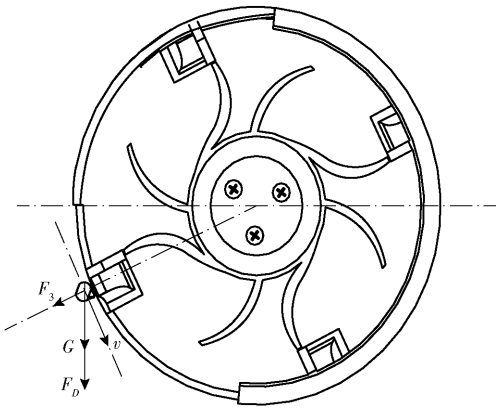


图 8 种子下落受力图

Fig. 8 Force analysis of seed dropping

到快速投种的作用。

3 流场仿真与分析

为了探讨不同结构导流涡轮对排种器内流场影响情况,采用计算流体力学(CFD)的方法进行模拟仿真,通过流场变化分析得出较好导流涡轮结构。

3.1 流场数学模型

气体密度随着压强或温度的变化而变化的性质,叫做气体的压缩性,它是气体的重要属性,通常用马赫数来判别流动气体是否可压缩[20-22]。马赫数是流场中任意一点的速度 v 与该点处声速 U 的比值,用 Ma 表示,表达式为

$$Ma = \frac{v}{U} = \frac{v}{\sqrt{\gamma MT}} \tag{8}$$

式中 γ——比热容

M——气体常数,J/(kg·K)

T——热力学温度,K

当 $Ma \leqslant 0.3$ 时,认为流体为低速流动,密度变化忽略不计,流体为不可压缩流体;当 $Ma > 0.3$ 时,认为流体为高速流动,密度变化不可忽略,考虑流体可压缩性的影响。高速流动也可分为 3 种情况:当 $0.3 < Ma \leqslant 0.8$ 时,为亚声速流动,在 $0.8 < Ma \leqslant 1.2$ 之间时为跨声速流动,在 $1.2 < Ma \leqslant 5$ 之间时为超声速流动,当 $Ma > 5$ 时,为超高声速流动。

在本次模拟仿真中,通过试验测量风速最大不超过 80 m/s,常温下气体比热容为 1.4,气体常数为 287 J/(kg·K),绝对温度为 293 K,通过计算马赫数小于 0.3,因此气体看作不可压缩流体。

根据雷诺数 Re 来判断流场类型,通常情况下:当 $Re < 2\,300$ 时,一般为层流;当 $Re > 4\,000$ 时,一般为湍流;当 $2\,300 \leqslant Re \leqslant 4\,000$ 可能是层流,也可能是湍流,与流动环境有关。对于内流问题,当 $Re > 2\,300$ 时,应用湍流模型进行分析。雷诺数为

$$Re = \frac{\rho v D}{a} \tag{9}$$

式中 a——粘性系数,Pa·s

D——水力直径,m

标准大气压下,空气密度为 1.2 kg/m^3,粘性系数为 1.8×10^{-5} Pa·s,通过计算排种器内流场的雷诺数远大于 2 300,因此确定流场为湍流。

流体流动遵循质量守恒、动量守恒以及能量守恒,分别对应计算流体力学中的连续性方程、N-S 方程和能量守恒方程,湍流流动还需满足湍流输运方程。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{10}$$

N-S 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'}\right) + S_i \tag{11}$$

湍流输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{13}$$

式中 k——湍动能

ε——湍动耗散率

μ——湍流粘度

G_k——平均速度梯度引起的湍动能产生项

G_b——浮力影响产生的湍动能产生项

Y_M——可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率系数

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$——经验常数

σ_k、σ_ε——湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数

S_i、S_k、S_ε——源项

由于本文不涉及传质传热相关内容,因此无需考虑能量守恒方程。

3.2 仿真方法

对排种器内部流场区域进行网格划分。采用 ANASYS 软件下的 MESHING 模块对排种器进行网格划分,划分得网格总数为 129 797,最大网格体积为 9.49×10^{-8} mm^3,最小体积为 9.75×10^{-13} mm^3。根据排种器工作原理,选择排种器进种口为压力入口,落种口为压力出口,如图 9 所示。

数值模拟选择非耦合隐式求解器进行求解,采用 $k-\varepsilon$ 模型,工作参考压力点选择在进种口中心位置,绝对压力为 101 325 Pa。设置导流涡轮为

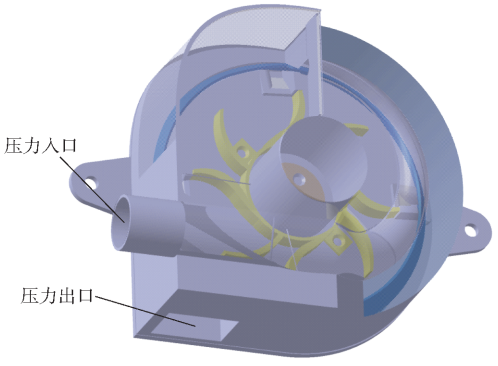


图 9　边界条件

Fig. 9　Boundary conditions

Moving wall 边界条件，转速设为 300 r/min，其他壁面采用无滑移边界条件，流场压力入口边界条件为 6 kPa 压力入口。为了减少数值扩散，计算中选取二阶迎风格式，并采用 SIMPLEC 算法进行求解计算。

3.3　结果分析

为了研究不同结构导流涡轮对排种器内部流场的影响情况，对 3 种不同结构的导流涡轮以及不加导流涡轮的排种器内部流场进行数值模拟仿真，探寻影响机理以及最佳结构。

图 10 中，D 型为不增加导流涡轮的排种器，从图中可以看出，空气流速较小，总压强较低，与添加导流涡轮的相比，更加明显。可见，导流涡轮可以有效增加排种器内部空气的流动，大幅增加外圈型孔处空气流速流量以及落种口空气的流速，增大压覆作用力，在排种过程中有助于压覆充种、高效清种、加速投种。A 型有效提高了排种器内部流场的流动性，具有较好的导流性，将中心空气导向外圈，增大了外圈型种孔处空气流速流量，增大压覆力，与 B 型和 C 型相比，由于迎风角度较小，扰流性不强，外圈空气流速增大有限。B 型有效提高了排种器内部流场的流动性，具有较好的扰流性，增大了外圈型种孔处空气流速，增大压覆力，与 A 型和 C 型相比，由于不具备曲线结构，导流性不强，流场中心空气向外围流动效果不明显。C 型有效提高了排种器内部流场的流动性，由于结构兼具较大迎风角以及曲线结构，因此具有较好的扰流性和导流性，增大了外圈型种孔处空气流量与流速，增大了压覆力。3 种结构中，C 型具有较好的适用性。模拟仿真结果与上述理论分析一致。

为了定量地分析不同导流涡轮结构对排种器内部流场产生的影响，分别选取充种区、携种区、清种区以及投种区型孔处动压为评价指标，如图 11 所示。

从图 11 可以看出，3 种导流涡轮在排种过程的各个阶段均产生动压变化，即产生压覆作用力，并且变化趋势一致。相同工作条件下，其中导流涡轮 C 在充种、携种、清种和投种环节所产出的压覆作用力均大于其他 2 个。由此可见，导流涡轮 C 结构最佳。

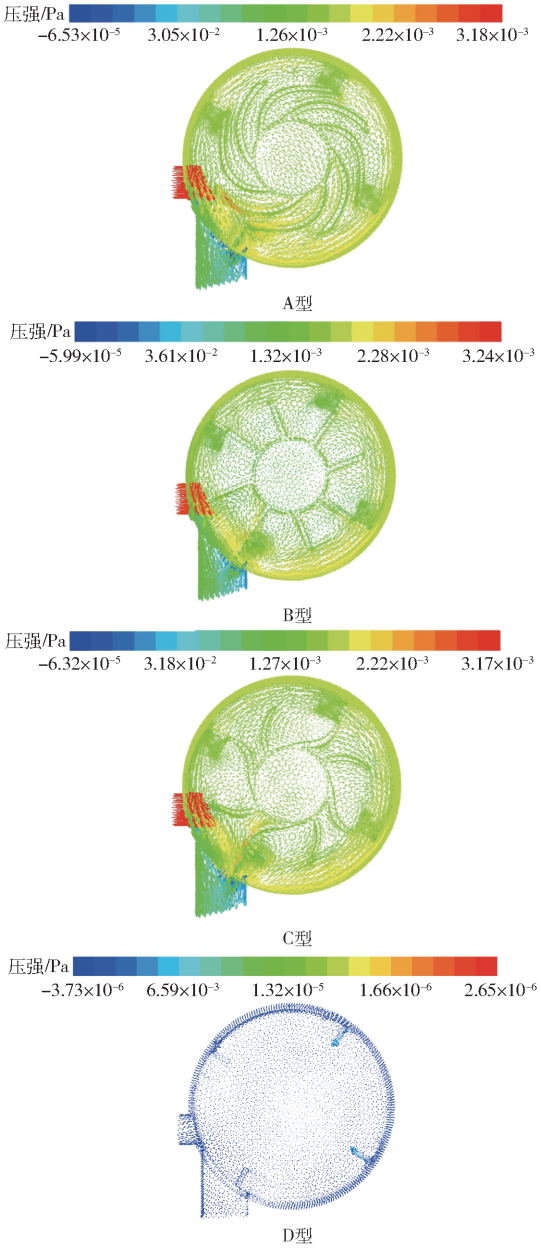


图 10　腔体内部流场速度矢量图

Fig. 10　Velocity vector diagrams of flow field inside cavity

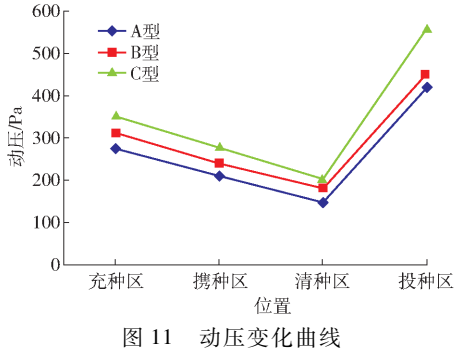


图 11　动压变化曲线

Fig. 11　Changing curves of dynamic pressure

4 试验

4.1 试验条件

试验所用排种器为自主研发的气送式高速玉米精量排种器,所用检测装置为中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪,如图 12 所示。试验时,检测仪风机为排种器提供风压,将定量排种装置排出的种子经由供料管吹入气送式高速玉米精量排种器,导种管安装于排种器投种口下方,用于检测排种器性能的传感器安装在导种管中间。作业时,当种子经过导种管时,触发传感器,检测仪通过记录相邻种子间的时间间隔并同时将其转换为实际株距的方法,计算和判断排种情况,并将计算的重播指数、漏播指数和合格指数直接输出到显示器上。该检测仪的检测结果与美国 Precision Planting 研发的 MeterMax 检测仪相比合格指数误差不超过 0.7%[23-24]。

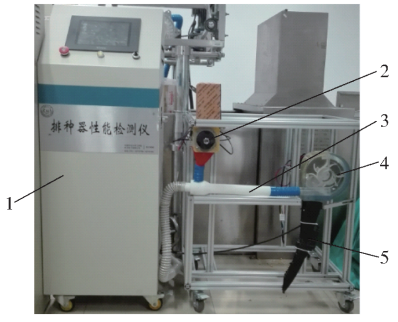


图 12 试验装置实物图

Fig. 12 Experiment equipment

1. 排种器性能检测仪 2. 定量排种装置 3. 供料管 4. 排种器 5. 导种管

4.2 试验方法

试验种子为河南省农科院种业有限公司生产的秋乐牌郑单 958 玉米杂交种,籽粒黄色,半马齿型,千粒质量 351 g,含水率 12.5%,未分级[25]。根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》的规定,试验指标包括合格指数 $Y_1 = n_1/N' \times 100\%$;重播指数 $Y_2 = n_2/N' \times 100\%$;漏播指数 $Y_3 = n_3/N' \times 100\%$。其中 n_1 为单粒排种数,n_2 是 2 粒以上排种数,n_3 为漏排种数,N' 是理论排种数。根据前期试验研究,结合相关学者的研究成果[26-29],以影响排种性能的主要参数工作速度 X_1、种子喂入量 X_2 以及气送风压 X_3 为主要试验因素。其中种子喂入量为试验开始阶段前 5 s 的种子喂入速度,随后喂入量与当前工作速度下排种量保持一致,排种量与工作速度关系式为

$$Q = \frac{Z}{S}m \tag{14}$$

式中 Q——排种量,g/s S——理论株距,m

Z——排种器工作速度,m/s

连续记录 200 粒种子的试验结果,每次试验重复 3 次取平均值。

4.3 二次旋转正交组合试验

通过上述理论分析以及仿真分析可以看出,在高速作业下导流涡轮将会产生压覆作用力,结合前期单因素试验选取工作速度取值范围在 8.3 ~ 15.8 km/h,种子喂入量取值范围在 1 ~ 2 kg/min,气送风压范围在 6.5 ~ 8.5 kPa。为了找到这 3 个因素的最佳参数,使得此排种器排种性能最佳,选择试验次数少,计算方便,可以避免回归系数间相关性的二次旋转正交组合试验方法[30],试验因素和水平如表 1 所示。再根据三因素二次旋转正交组合试验表进行试验,每组试验重复 3 次取平均值。试验方案与试验结果见表 2,x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Factors and codes of test

编码	试验因素		
	工作速度 X_1/(km·h^{-1})	种子喂入量 X_2/(kg·min^{-1})	气送风压 X_3/kPa
-1.682	8.30	1.0	6.50
-1	9.82	1.2	6.91
0	12.05	1.5	7.50
1	14.28	1.8	8.09
1.682	15.80	2.0	8.50

表 2 试验设计方案与结果

Tab. 2 Experiment design and response values

试验序号	因素			响应值		
	x_1	x_2	x_3	合格指数 Y_1/%	重播指数 Y_2/%	漏播指数 Y_3/%
1	-1	-1	-1	91.36	5.20	3.44
2	1	-1	-1	91.92	7.36	0.72
3	-1	1	-1	89.38	10.62	0
4	1	1	-1	79.89	20.11	0
5	-1	-1	1	90.40	3.10	6.50
6	1	-1	1	92.83	3.62	3.55
7	-1	1	1	92.18	7.82	0
8	1	1	1	83.35	16.65	0
9	-1.682	0	0	89.51	8.72	1.77
10	1.682	0	0	81.79	18.21	0
11	0	-1.682	0	85.41	0.77	13.82
12	0	1.682	0	84.78	15.22	0
13	0	0	-1.682	86.00	14.00	0
14	0	0	1.682	88.50	2.77	8.73
15	0	0	0	88.72	11.28	0
16	0	0	0	85.12	14.16	0.72
17	0	0	0	91.17	8.60	0.23
18	0	0	0	91.77	8.23	0
19	0	0	0	90.22	9.66	0.12
20	0	0	0	89.97	9.22	0.81
21	0	0	0	90.63	9.15	0.22
22	0	0	0	88.60	11.07	0.33
23	0	0	0	92.77	7.23	0

采用回归方程方差分析法进一步分析,结果如表 3 所示。

表 3　回归方程方差分析

Tab.3　Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	196.59	9	3.04	0.034 1 *	215.58	9	6.18	0.001 8 **	504.85	9	15.57	<0.000 1 **
X_1	58.70	1	8.164	0.013 5 *	5.478	1	1.41	0.256 1	100.03	1	27.76	0.000 2 **
X_2	37.96	1	5.284	0.038 8 *	102.71	1	26.48	0.000 2 **	265.56	1	73.71	<0.000 1 **
X_3	7.94	1	1.104	0.312 4	30.99	1	7.99	0.014 3 *	70.31	1	19.51	0.000 7 **
X_1X_2	56.76	1	7.90	0.014 7 *	4.02	1	1.04	0.327 3	30.58	1	8.49	0.012 1 *
X_1X_3	0.80	1	0.11	0.744 0	0.01	1	0.002	0.967 7	0.66	1	0.18	0.675 4
X_2X_3	4.98	1	0.69	0.420 4	4.34	1	1.12	0.309 6	0.02	1	0.01	0.938 8
X_1^2	11.32	1	1.57	0.231 6	1.45	1	0.37	0.551 2	20.88	1	5.80	0.031 6 *
X_2^2	17.20	1	2.39	0.146 0	53.09	1	13.69	0.002 7 *	9.86	1	2.74	0.122 1
X_3^2	1.23	1	0.17	0.685 7	13.69	1	3.53	0.082 9	6.71	1	1.86	0.195 6
残差	93.46	13			50.42	13			46.84	13		
失拟	53.55	5	2.15	0.161 0	49.68	5	106.98	<0.000 1	12.75	5	0.60	0.703 5
误差	39.92	8			0.74	8			34.08	8		
总和	290.05	22			266	22			551.68	22		

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

4.4　试验结果回归分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归拟合，对试验结果进行回归分析，可以得到合格指数 Y_1、重播指数 Y_2 和漏播指数 Y_3 的回归方程。

4.4.1　合格指数

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对排种合格指数 Y_1 影响的回归模型

$$Y_1=3.51+7.40X_1+44.66X_2+3.53X_3-4.02X_1X_2+0.24X_1X_3+4.46X_2X_3-0.17X_1^2-11.77X_2^2-0.79X_3^2 \tag{15}$$

回归方程的显著性检验如表 3 所示。根据表 3 可知，模型的拟合度显著（$P<0.05$）。但气送风压 X_3、工作速度和气送风压的交互项 X_1X_3、种子喂入量和气送风压的交互项 X_2X_3、工作速度二次项 X_1^2、种子喂入量二次项 X_2^2 以及气送风压二次项 X_3^2 的 P 值均大于 0.1，说明其对排种合格指数的影响不显著，其他各项的 F 检验均显著，说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。失拟项 $P=0.161$，不显著，说明不存在其他影响指标的主要因素存在。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1=35.52+5.10X_1+42.81X_2-4.02X_1X_2 \tag{16}$$

通过对式（16）回归系数的检验得出，影响排种合格指数的因素主次顺序为种子喂入量、工作速度和气送风压。

4.4.2　重播指数

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对重播指数 Y_2 影响的回归模型

$$Y_2=-57.96-7.14X_1+8.25X_2+26.81X_3+2.95X_1X_2-0.22X_1X_3-0.30X_2X_3+0.23X_1^2-8.91X_2^2-1.84X_3^2 \tag{17}$$

回归方程的显著性检验如表 3 所示。根据表 3 可知，该模型的拟合度极显著（$P<0.01$）。但工作速度和气送风压的交互项 X_1X_3、种子喂入量和气送风压的交互项 X_2X_3、种子喂入量二次项 X_2^2 以及气送风压的二次方项 X_3^2 的 P 值均大于 0.1，说明其对重播指数的影响不显著，其他各项的 F 检验均极显著或显著，说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P=0.7$，不显著，说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2=87.82-8.81X_1-20.70X_2-3.82X_3+2.95X_1X_2+0.23X_1^2 \tag{18}$$

通过对式（18）回归系数的检验得出，影响重播指数的因素主次顺序为种子喂入量、工作速度和气送风压。

4.4.3　漏播指数

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对漏播指数 Y_3 影响的回归模型

$$Y_3=154.44-0.26X_1-52.91X_2-30.33X_3+1.07X_1X_2-0.02X_1X_3-4.16X_2X_3-0.06X_1^2+20.68X_2^2+2.62X_3^2 \tag{19}$$

回归方程的显著性检验如表 3 所示。根据表 3 可知，模型的拟合度极显著（$P<0.01$）。但工作速度 X_1、工作速度和种子喂入量的交互项 X_1X_2、工作速度和气送风压的交互项 X_1X_3、种子喂入量和气送风压的交互项 X_2X_3 以及工作速度二次项 X_1^2

的 P 值大于 0.1,说明其对漏播指数的影响不显著,其他各项的 F 检验均极显著或显著,说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项显著,说明存在其他影响指标的主要因素,需进一步进行试验研究。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 41.39 - 71.12X_2 + 2.53X_3 + 20.63X_2^2 \quad (20)$$

通过对式(20)回归系数的检验得出,影响漏播指数的因素主次顺序为种子喂入量、气送风压和工作速度。

4.5 各因素对排种合格指数的影响

由图 13 可知:排种合格指数随着工作速度的提高先上升后下降并保持稳定,在 10.8 ~ 13.7 km/h 有最大值;随着种子喂入量的增大先增后降,在 1.2 ~ 1.5 kg/min有最大值;随着气送风压的增大先增后降,在 7.5 ~ 8 kPa 有最大值。

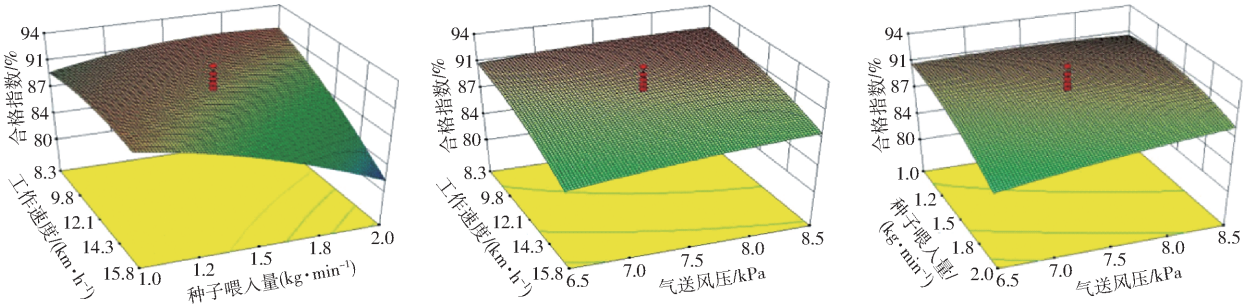


图 13 因素交互作用对合格指数的影响

Fig. 13 Impact of interaction on qualified index

由上述内容可知,各因素以及各因素之间的交互作用对排种器工作性能影响较大,为了获得最佳排种作业参数,优化工作参数,实现因素间参数的合理匹配是提高合格指数的关键[31-33]。

以合格指数为最终优化目标,根据 JB/T 10293—2001《单粒(精密)播种机技术条件》中的要求,播种合格指数大于等于 80.0%,重播指数小于等于 15.0%,漏播指数小于等于 8.0%。结合各因素边界条件,建立参数化数学模型,进行优化求解,其目标函数和约束条件为

$$F_{max} = Y_1 - Y_2 - Y_3 \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} Y_1 \geqslant 80.0\% \\ Y_2 \leqslant 15.0\% \\ Y_3 \leqslant 8.0\% \\ 8.3\ \text{km/h} \leqslant X_1 \leqslant 15.8\ \text{km/h} \\ 1\ \text{kg/min} \leqslant X_2 \leqslant 2\ \text{kg/min} \\ 6.5\ \text{kPa} \leqslant X_3 \leqslant 8.5\ \text{kPa} \end{cases} \quad (22)$$

F_{max} 为最终优化的目标,即合格指数;运用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化模块,对约束目标优化求解,得到工作速度为 9.8 km/h,种子喂入量为 1.8 kg/min,气送风压为 8 kPa 时,排种合格指数最高。

根据优化得到的最优参数,进行 5 次重复对比台架试验,对比结果如表 4 所示。对比试验结果表明,通过安装导流涡轮可以大幅度提高合格指数,降低漏播指数和重播指数。试验时发现,在当前工作条件下,装有导流涡轮一组在充种、携种过程中种子压覆效果明显,清种效果明显优于未安装导流涡轮一组,投种过程中种子掉落速度明显增加。因此通过安装导流涡轮可以提高排种器的排种性能。

表 4 对比试验结果

Tab. 4 Result of contrast test %

类型	合格指数 Y_1	重播指数 Y_2	漏播指数 Y_3
安装导流涡轮	91.32	5.85	2.83
未安装导流涡轮	83.7	11.5	4.8

5 结论

(1)为了使气送式高速玉米精量排种器内流场分布有序,从而提高排种器工作性能,设计了 3 种结构类型的导流涡轮,通过理论分析得出,具有较大迎风角、且具备曲线结构的导流涡轮具有较好的扰动性和导流性。

(2)采用 CFD 方法模拟分析不同结构导流涡轮对排种器内部流场的影响情况,得出 3 种结构均可有效提高排种器内部空气的流动性,增大外圈型孔处空气流速,增大压覆作用力。通过对比分析排种过程中各个环节动压的变化,得出 C 型结构效果最佳。

(3)在排种器内添加 C 型导流涡轮,并采用三元二次回归正交旋转组合试验方法进行台架试验,建立排种性能指标(合格指数、漏播指数、重播指数)与工作速度、种子喂入量、气送风压 3 个试验因素间的回归数学模型,得出了影响各指标的因素主次顺序,并运用响应面法分析了试验因素对响应指标的影响。采用多目标优化方法,确定了排种器最佳工作参数组合为工作速度为 9.8 km/h、种子喂入

量为 1.8 kg/min、气送风压为 8 kPa，此时排种合格指数最高，其性能指标为：合格指数 91.32%、漏播指数 2.83%、重播指数 5.85%。对优化结果进行对比验证试验，在相同条件下与未安装导流涡轮排种器进行对比表明，安装导流涡轮可以有效提高排种器工作性能。

参 考 文 献

[1] 颜丙新. 盘式同步气吸式精量排种器设计研究[D]. 北京：中国农业大学，2018.
YAN Bingxin. Design and research of vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating plate and chamber [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[2] 韩丹丹. 基于 EDEM－CFD 耦合的内充气吹式排种器仿真优化与试验研究[D]. 北京：中国农业大学，2018.
HAN Dandan. Optimization simulation and experimental research of inside-filling air-blowing seed-metering device based on EDEM－CFD [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[3] ANANTACHARA M, PRASANNA KUMARB G V, GURUSWAMY T. Development of artificial neural network models for the performance prediction of an inclined plate seed metering device[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3753－3763.

[4] KARAYEL D, WIESEHOFF M, OZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89－96.

[5] 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)

[6] 赖庆辉，高筱钧，张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(5)：27－37.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneunatic cylinder seed metering device for *Panax notoginseng*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27－37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160505&flag=1. DOL:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005. (in Chinese)

[7] 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 room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42－48. (in Chinese)

[8] 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008. (in Chinese)

[9] 丛锦玲，廖庆喜，曹秀英，等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报，2014，30(8)：30－39.
CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30－39. (in Chinese)

[10] 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 experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1－8. (in Chinese)

[11] 张国忠，臧英，罗锡文，等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报，2014，30(17)：1－9.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 1－9. (in Chinese)

[12] 崔涛，高筱钧，徐杨，等. 一种气送式高速玉米排种器：201810684692.4[P]. 2018－11－09.

[13] 李鹏飞，徐敏义，王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战：FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. 北京：人民邮电出版社，2011.

[14] 王朝辉，袁月明，董润坚，等. 超级稻育秧精密播种器内部流场的数值模拟[J]. 吉林农业大学学报，2009，31(6)：781－784.
WANG Zhaohui, YUAN Yueming, DONG Runjian, et al. Numerical simulation for air field of air suction cylinder seeder [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(6): 781－784. (in Chinese)

[15] LI Hongchang, LI Yaoming, GAO Fang, et al. CFD－DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88: 111－119.

[16] 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 for the sucking nozzle air field of air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59－62. (in Chinese)

[17] 李中华，王德成，刘贵林，等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报，2009，40(3)：64－68.
LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. CFD simulation and improvement of air-stream distributive metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 64－68. (in Chinese)

[18] 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. 农业机械学报,2009,40(7):78 - 82.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Simulation analysis on air current field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 78 - 82. (in Chinese)

[19] 高筱钧,徐杨,杨丽,等. 基于 DEM - CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):92 - 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM - CFD coupling[J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):92 - 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s013&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.013. (in Chinese)

[20] 林兆福. 气体动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,1988.

[21] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社,2010.

[22] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社,2006.

[23] 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):19 - 27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19 - 27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161003&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)

[24] HAO Y, CUI T, BORA G, et al. Development of an instrument to measure planter seed meter performance[J]. Applied Engineering Agriculture, 2017, 33(1): 31 - 40.

[25] 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 pneumatic combined maize precision seed metering 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)

[26] LI Ming, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Analysis on seeding process of pneumatic cylinder-type centralized rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 17 - 27.

[27] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat and rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[28] 李宣秋. 磁吸滚筒精密播种器的设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2006.
LI Xuanqiu. Design experimental study on precision magnetic drum-seeder[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)

[29] 刘剑锋. 气吸滚筒式烟草包衣种子排种器设计与研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2012.
LIU Jianfeng. Design and research on suction roller-type meter device for coated tobacco seed[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[30] 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)

[31] 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 54 - 58, 89.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):54 - 58, 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s11&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.011. (in Chinese)

[32] 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7):65 - 72.
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(7):65 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160710&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010. (in Chinese)

[33] 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):1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of pneumatic maize seed-metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)