

气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验

李玉环^{1,2} 杨 丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 崔 涛^{1,2} 和贤桃^{1,2} 胡 恒^{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)

摘要: 为解决气吸式玉米精量排种器清种装置设计不合理而造成漏清、过清, 导致排种性能下降的问题, 提出采用双侧清种装置进行清种作业的方法, 并设计了双侧清种装置。对该装置清种过程进行分析, 明确了造成重吸的原因, 阐明了清种过程的运动机理, 建立了清种过程数学模型, 确定了上下侧清种机构关键参数的设计方法。选取第1级清种弧线顶部半径、第2级清种弧线顶部半径和工作转速为主要因素进行了全因素试验, 对试验结果进行显著性分析, 建立了因素与指标的回归方程, 以漏清率和过清率最小为寻优条件, 获得较优清种强度下的最佳参数组合为: 第1级清种弧线顶部半径 80.70 mm、第2级清种弧线顶部半径 81.42 mm, 并在最佳参数组合下进行了验证试验。试验表明, 在较优清种强度参数组合下, 当工作转速为 26.67 ~ 37.33 r/min 时, 漏清率均不大于 1.10%, 过清率均不大于 1.03%, 与理论优化结果基本一致。对比试验表明, 工作转速为 26.67 r/min 时, 采用双侧清种装置漏清率降低 6.70 个百分点, 过清率基本不变, 排种器合格率提高 7.04 个百分点; 工作转速为 32.00 r/min 时, 采用双侧清种装置漏清率降低 4.63 个百分点, 过清率基本不变, 排种器合格率提高 5.07 个百分点; 工作转速为 37.33 r/min 时, 采用双侧清种装置漏清率降低 7.41 个百分点, 过清率降低 0.24 个百分点, 排种器合格率提高 7.26 个百分点。采用双侧清种装置有效降低了漏清率, 在高速情况下对过清率也有所改善。

关键词: 玉米; 精量排种; 气吸式排种器; 双侧清种装置

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0029-11

OSID:



Design and Test of Double-side Cleaning Mechanism for Air-suction Maize Seed-metering Device

LI Yuhuan^{1,2} YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} CUI Tao^{1,2} HE Xiantao^{1,2} HU Heng^{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)

Abstract: In order to solve the problem that the unreasonable design of the clearing mechanism of the air-suction maize seed-metering device, which causes the missing-clearing and over-clearing and reduces the performance of the air-suction maize seed-metering device. A method of using a double-sided seed cleaning mechanism for seed cleaning was presented and a double-sided seed cleaning mechanism was designed. By analyzing the process of seed clearing, the reason of reabsorption was clarified, the movement mechanism of the process of seed clearing was clarified, and the mathematical model of the upper side of the process of seed clearing was established. The shape parameters of the upper seed cleaning mechanism, the interval angle of the upper and lower seed cleaning devices and the lower seed cleaning intensity were determined. The whole factor test was carried out with the first level clear arc top radius, the second level clear arc top radius and the working speed as the main factors. In addition, significant analysis on the test results was performed to determine the regression equation of factors and indicators. Meanwhile, missing-clearing rate and over-clearing rate were used as test indexes. The results showed that the better clearing intensity was determined as the first level clear arc top radius was 80.70 mm, and the second level clear arc top radius was 81.42 mm. The verification test results showed that under the combination of better cleaning intensity, when the rotational speed was 26.67 ~ 37.33 r/min, the

收稿日期: 2020-09-12 修回日期: 2020-10-10

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

作者简介: 李玉环(1991—),男,博士生,主要从事农业装备研究,E-mail: 18612897966@163.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

missing-clearing rate was less than or equal to 1.10% , and the over-cleaning rate was less than or equal to 1.03% , which were consistent with the theoretical optimization results. The comparison test showed that the missing-clearing rate improved at all test working speed. When the rotational speed was 26.67 r/min , compared with single-side seed cleaning mechanism , the missing-clearing rate was reduced by 6.70 percentage points , the over-cleaning rate was basically unchanged ,the qualified rate was increased by 7.04 percentage points. When the rotational speed was 32.00 r/min , compared with single-side seed cleaning mechanism , the missing-clearing rate was reduced by 4.63 percentage points , the over-cleaning rate was basically unchanged ,the qualified rate was increased by 5.07 percentage points. When the rotational speed was 37.33 r/min , compared with single-side seed cleaning mechanism , the missing-clearing rate was reduced by 7.41 percentage points , the over-cleaning rate was increased by 0.24 percentage points ,and the qualified rate was increased by 7.26 percentage points. The double-sided seed cleaning mechanism can effectively reduce the missing-clearing rate and improve the over-cleaning rate at high speed.

Key words: maize; precision seeding; air-suction seed-metering device; seed cleaning mechanism

0 引言

气吸式精量排种器具有播种精度高、对种子尺寸要求不高、适应能力强以及作业速度高等优点^[1-6],在高速精量播种上应用最为广泛^[7-9]。清种是将吸孔处多余的种子清除,从而确保单孔单粒,过清或漏清均会导致排种器排种性能降低^[9-12],因此合适的清种装置对于保证排种器作业质量至关重要。

国内外众多学者对气吸式排种器进行了大量研究,但大部分是针对充种功能的实现,关于清种的研究相对较少。祁兵等^[13]设计了一种适用于滚筒式排种器的周向清种装置,降低了低速作业重播率;刘云强等^[14]设计了一种清种装置,并通过仿真模拟优化了清种装置结构参数,降低了非球类种子吸附的重播率。邢赫等^[15]设计了一种适用于水稻气力式排种器的清种装置,有效地提高了气力式排种器的排种精度。丁力等^[16]对气吸式排种器的清种机构进行优化设计,建立了清种过程数学模型,分析了清种过程的运动机理,有效地提高了清种合格率。气吸式精量排种器多采用单侧清种机构,对气吸式精量排种器双侧清种研究鲜见报道。

为解决气吸式玉米精量排种器清种装置因设计不合理而造成漏清、过清,导致排种性能下降的问题,结合所研制的气吸式玉米精量排种器特点,提出采用双侧清种装置进行清种作业的方法,设计一种简单、易调节、适应性强、清种效果好的双侧清种装置,以期改善清种作业效果、提高排种器的排种性能。

1 排种器结构和工作原理

气吸式玉米精量排种器结构如图 1 所示,主要由卸种口、前壳体、种盘、上清种机构、下清种刀、推

种装置、后壳体、传动轴、气道等组成。工作时,气道通入负压气流,吸孔处形成负压状态,传动轴带动种盘转动,种子在负压作用下吸附在型孔上,经过清种装置将多余的种子清除,保留单孔单粒种子进入投种区,吸孔处种子在直线推种装置和种盘吸孔的共同作用下沿着直线推种装置竖直向下运动,到达投种位置,气流阻断,种子落入导种管,完成精量排种作业。

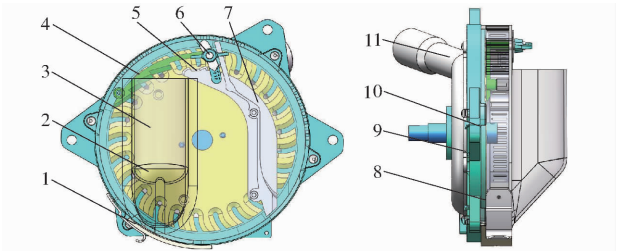


图 1 气吸式玉米精量排种器结构图
Fig. 1 Pneumatic precision seed-metering device structure
1. 卸种口 2. 前壳体 3. 种盘 4. 锯齿形清种刀 5. 双弧形清种刀 6. 清种调节装置 7. 直线推种装置 8. 快卸装置 9. 后壳体 10. 传动轴 11. 气道

清种装置是气吸式精量排种器中降低重播、实现单粒精播的关键部件,结合排种器结构和工作原理设计了双侧清种装置,如图 2 所示,主要包括锯齿形清种刀、双弧形清种刀、调整刻度盘、调整螺栓、调整螺母、密封条

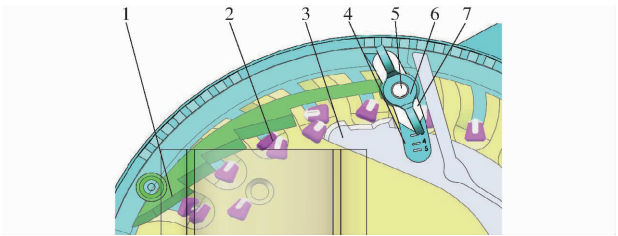


图 2 双侧清种装置结构图
Fig. 2 Bilateral multi-position seed clearing device
1. 锯齿形清种刀 2. 玉米种子 3. 双弧形清种刀 4. 调整刻度盘 5. 调整螺栓 6. 调整螺母 7. 密封条

整螺母、密封条等,清种主要分为上侧清种和下侧清种两个阶段,为实现吸孔处种子的初步清除,并将未清除的多余种子向吸孔下侧挤压以保证下侧清种效果,上侧清种采用锯齿形清种刀结构,一端固定在前壳体定位孔上,另一端安装在前壳体滑槽中,可根据不同种子外形尺寸调节清种刀位置,使种子与锯齿形清种刀多次碰撞,将吸孔处多余的种子清除;为保证吸孔处种子顺滑经过清种装置,清除重吸种子,同时避免碰撞造成漏播现象,下侧采用双弧清种刀结构,与直线推种装置设计为一体结构,安装在前壳体上,对吸孔处的种子进行两次顺滑碰撞,将吸孔处多余的种子进一步清除,以保证单粒率。

2 清种过程分析

2.1 种盘性能分析

为保证良好的扰种、充种以及携种效果,排种器种盘采用凹型组合型孔拨指种盘^[17-19],该种盘吸孔采用拨指条孔,通过拨指条孔与后壳体配合形成不规则形状吸孔,且对拨指条孔进行倒角处理,如图 3 所示,图中不规则吸孔由直径为 d 的半圆和不规则四边形 $ABCD$ 组成,组合吸孔的面积 $S_{ABCD} + S_d/2$ 大于单独圆形吸孔面积 S_d ,在相同负压条件下,较圆形吸孔吸附压力更大,吸附效果更好。并且吸孔边缘开有倒角 φ ,扩大了种子与组合吸孔的接触面积,同时对种子具有一定的托持作用,进一步提高了种子充种和携种的良好性能,但对清种造成了困难。

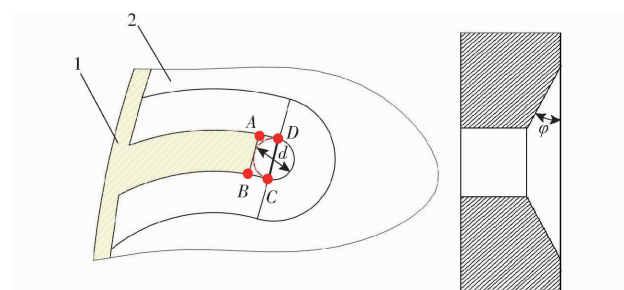


图 3 种盘吸孔结构示意图

Fig. 3 Schematic of seed plate holes

1. 后壳体 2. 种盘

2.2 重吸现象

由于种子吸附姿态以及种子外形尺寸的差异,吸孔不能完全密封,气流通过不完全密封的型孔后,较强的吸附力再次吸附种子,导致一孔吸附多粒种子的现象^[16],即重吸现象。凹型组合型孔盘较圆孔种盘在同等作业条件下吸附力和接触面积均较大,更容易导致型孔吸附多粒种子,结合试验发现,当种子脱离充种区时,多稳定携带 2 或 3 粒种子进入清种区。

2.3 清种过程

2.3.1 上侧清种分析

上侧锯齿形清种结构对吸孔处种子进行持续碰撞、挤压,完成初步清种,并将型孔处未能清落的多余种子挤压至吸孔下侧,再由下侧双弧清种机构完成进一步清种,对种子在锯齿形清种区进行受力分析,如图 4 所示。

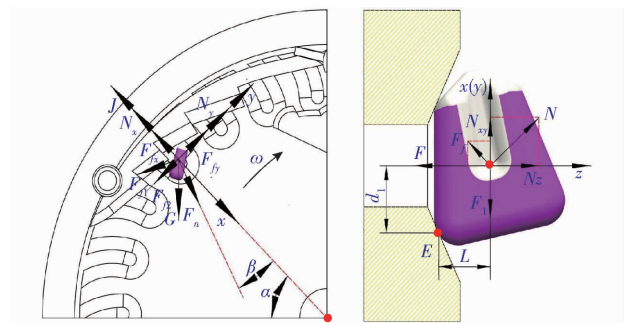


图 4 清种受力分析

Fig. 4 Force analysis of seeds in seed clearing area

种子吸附在型孔处,随着种盘以角速度 ω 顺时针转动,以吸孔中心为原点建立 xyz 三维坐标系, x 轴正向为种子受到离心力负方向, y 轴正向为种子受到空气阻力的负方向(与种盘相切), z 轴正向为垂直于吸孔方向,种子受到吸孔吸附力 F ,吸孔的支持力 N ,清种装置对种子的推力 F_n ,吸孔表面对种子的摩擦阻力 F_f ,清种锯齿对种子的摩擦力 F_{f1} ,空气阻力 F_p (忽略不计),其中 J 、 G 、 F_{f1} 、 F_n 的合力为 F_1 。吸附在型孔周围的种子转至清种区,在清种锯齿的作用下将未占据吸孔优势的种子清掉,使占据优势的种子更加稳定,为保证占据优势的种子不发生掉落,负压气流对种子产生的吸附力应至少大于种子掉落所需的力,其中种盘对种子的摩擦力起到阻碍掉落的作用,为保证吸附更加稳固,可忽略不计,因此应满足平衡条件

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow G \sin \alpha + F_n \cos \beta - N_x - J - F_{f1} \sin \beta = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow N_y - G \cos \alpha - F_n \sin \beta - F_{f1} \cos \beta = 0 \\ \sum F_z = 0 \Rightarrow F - N_z = 0 \\ \sum M_A = 0 \Rightarrow F d_1 - F_1 L = 0 \end{cases}$$

(1)

其中

$$F_{f1} = \mu F_n$$

(2)

式中

G ——种子重力, N

J ——种子受到的离心力, N

N_x ——种子支持力在 x 方向的分力, N

N_y ——种子支持力在 y 方向的分力, N

N_z ——种子支持力在 z 方向的分力, N

μ ——玉米种子与种盘的摩擦因数

d_1 ——吸孔中线到点 E 的距离, m

L ——合力 F_1 到点 E 的距离, m
 α ——受力点与水平方向的夹角, $(^\circ)$
 β ——推力方向与 x 轴的夹角, $(^\circ)$

N_{xy} 为 N_x 和 N_y 在 xy 平面内的合力, 结合式 (1) 可得

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \tag{3}$$

由种子在 z 平面内受力平衡, 有

$$F_1 = N_{xy} \tag{4}$$

由式 (1) ~ (4) 可得

$$F = \frac{LF_1}{d_1} = \frac{L}{d_1} \{ [G\sin\alpha + F_n(\cos\beta - \mu\sin\beta) - J]^2 + [G\cos\alpha + F_n(\sin\beta + \mu\cos\beta)]^2 \}^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

吸附力和真空度之间的关系为

$$F = \Delta p S_i \tag{6}$$

式中 Δp ——型孔两侧压差, Pa

S_i ——稳定吸附所需面积, m^2

种子受到的离心力为

$$J = m\omega^2 r \tag{7}$$

式中 m ——种子质量, kg

r ——吸孔位置半径, mm

在实际工作中, 考虑种间碰撞和机器振动等的影响, 取吸种可靠性系数 K_1 和工作稳定可靠性系数 K_2 , 结合式 (5) ~ (7) 可得

$$S_i = \frac{K_1 K_2 L}{\Delta p d_1} \{ [mgsin\alpha + F_n(\cos\beta - \mu\sin\beta) - m\omega^2 r]^2 + [mcos\alpha + F_n(\sin\beta + \mu\cos\beta)]^2 \}^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

由式 (8) 可知, 在排种器种盘结构和工作条件确定的情况下, 种子稳定吸附所需面积 S_i 与锯齿对种子的作用力 F_n 呈正相关, 增加清种锯齿的作用力 F_n , 可打破原本稳定吸附的平衡状态, 将未占据优势位置的种子清除, 完成清种。因此锯齿清种机构的锯齿工作面在设计时要满足逐渐逼近吸种孔的挤压原理, 以实现对种子作用力 F_n 的逐渐增大, 打破原本稳定吸附的平衡状态, 实现清种功能。

2.3.2 下侧双弧清种分析

上侧锯齿形清种刀, 对种子产生连续碰撞挤压, 将重吸的种子进行清除, 由于凹型组合型孔种盘良好的吸附和托持性能, 采用单侧锯齿形清种刀难以实现彻底清种。为保证下侧清种的作业效果, 借助高速摄像技术对经过上侧清种后重吸种子的吸附姿态进行分析, 如图 5 所示, 经过上侧清种后漏清重吸姿态多为上下紧贴, 少数为双粒左右紧贴、3 粒紧贴, 且重吸种子均位于吸孔中心偏下位置。因此通过在吸孔中心下侧增加清种机构, 实现对重吸种子的二次清种。下侧清种机构采用双弧清种刀结构,

通过弧形结构实现对重吸种子的两次碰撞, 破坏重吸平衡状态, 将未占据优势的种子进一步清除, 保证排种器的单孔单粒排种作业。

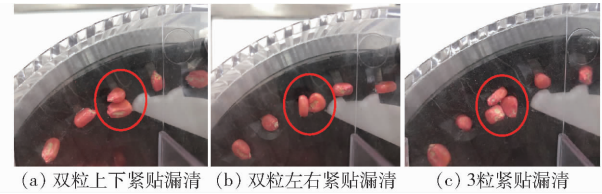


图 5 上侧清种后重吸情况

Fig. 5 Situation of multiple seeds sucked after seed clearing

3 关键参数设计

双侧清种机构是提高排种器分离精度的重要部件, 结合排种器结构确定双侧清种装置上侧为锯齿形清种机构, 下侧为双弧清种机构。上侧清种机构采用锯齿形清种结构, 对重吸种子进行初步清除, 并将吸孔种子向吸孔下侧挤压; 下侧清种机构采用双弧形结构, 对重吸种子进一步清除, 以保证排种器的分离精度。

3.1 上侧清种刀关键参数

上侧清种刀利用 4 级锯齿结构, 安装在吸孔上侧, 从吸孔上侧对种子产生连续碰撞, 振落清除多余的种子。上侧清种刀分为清种引入段和清种作用段两部分, 如图 6 所示, $\widehat{EA_1}$ 为弧形引入段, 主要引导种子逐渐进入清种区, 点 A_1 之后为直线清种作用段, 将吸孔处多余的种子清除。

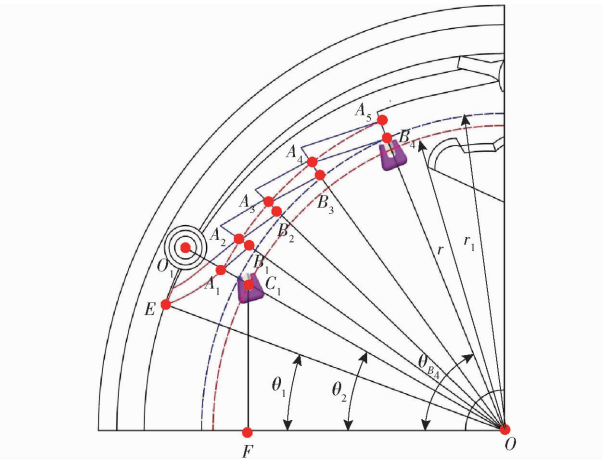


图 6 上侧清种刀结构图

Fig. 6 Upper clearing structure

3.1.1 引入段范围确定

充入吸孔内的种子随着排种盘的转动离开充种区, 位于吸孔边缘未能稳定吸附的种子在重力和离心力的作用下脱离型孔落回充种区, 稳定吸附的种子随种盘进入清种区。通过试验发现, 当吸孔上的种子离开充种区距离大于 3 个种子长度时开始清种作业, 可避免种群和清落种子回落对清种效果的影响。

响,即 $L_{C_1F} \geq 3l_m$,以郑单 958 种子为研究对象,通过实测取玉米种子最大长度 $l_m = 13 \text{ mm}$,结合种盘结构有

$$\theta_2 = \arcsin \frac{L_{C_1F}}{r} \quad (9)$$

结合种盘结构参数,取 $r = 82.5 \text{ mm}$,可知清种作用起始点位置 $\theta_2 \geq 28.2^\circ$,为扩大清种区范围,使得清种更加稳定,取清种作用段起始点 A_1 位置 θ_2 为 30° ,引入段避免清种刀对种子产生剧烈碰撞造成过清,引入段位置确定时要避免充种区种群的影响,结合试验确定引入段起始点 E 的位置 θ_1 为 20° ,因此引入段范围为 $[20^\circ, 30^\circ]$ 。

3.1.2 清种段形状参数确定

锯齿形状参数主要由与吸孔中心距离和与水平方向角度确定,为确定清种段形状参数,以工作面作用点与吸孔中心距离 L 为纵坐标,清种工作面作用点与水平方向角度 θ 为横坐标,建立清种刀工作面长度和角度关系图,如图 7 所示。其中点 E 为引入段起始位置,点 A_1 为清种作用段起始点位置,点 A_2 、 A_3 、 A_4 为每个锯齿的初始位置点,点 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 为每个锯齿末端位置点,锯齿关键拐点组成了锯齿形状参数。

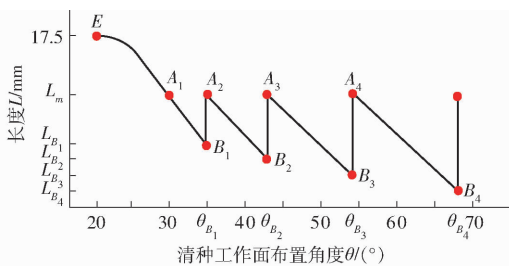


图 7 清种刀工作面长度和角度关系曲线

Fig. 7 Relation diagram of working face length and angle of cleaning mechanism

点 E 位于水平位置 20° 方向的种盘边缘,可确定点 $E(20^\circ, 17.5 \text{ mm})$ 。点 A_1 位于水平 30° 方向上,与吸孔中心距离为 L_m ,当吸孔吸附多粒种子时,每粒种子占据一部分吸孔面积,相对于单粒吸附稳定性较差,过大的碰撞力容易产生过清情况发生^[13],因此在点 A_1 位置清种刀对吸孔种子产生较小的清种强度,主要对吸附多粒种子进行作用,要保证清种刀与多粒吸附种子接触并产生作用力,不与单粒吸附种子接触,则需满足

$$l_m/2 < L_m \leq l_n \quad (10)$$

式中 l_n ——种子最小长度,mm

由式(10)可知,单粒种子稳定吸附(可看作种子中心与吸孔中心重合)时不与 A_1 接触,即 L_m 大于玉米种子最大长度的一半;多粒种子稳定吸附(可

看作种子一端与吸孔中心重合)时与 A_1 接触,即 L_m 小于等于玉米种子最小长度,通过实测取郑单 958 种子最小长度 $l_n = 9 \text{ mm}$,可得 $6.5 \text{ mm} < L_m \leq 9 \text{ mm}$,为减小清种强度,保证种子进入清种作用段的稳定性,最终取 $L_m = 9 \text{ mm}$,确定点 $A_1(30^\circ, 9 \text{ mm})$ 。

进入清种作用段,由 A_1 至 B_1 逐渐逼近吸孔,到达 B_1 位置,第 1 级清种力度达到最大,经过 B_1 位置,回到 A_2 位置,清种力度瞬间减小,未清落的种子在吸孔吸附力的作用下恢复最佳吸附状态,完成第 1 级清种;再由 A_2 至 B_2 重复逐渐逼近吸孔过程,完成下一级清种。4 级清种过程每次均从同一清种力度开始逐渐增大,且每一级的清种力度逐渐加大,可确定 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 与吸孔中心的距离相同,均为 L_m 。 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 与吸孔中心距离逐渐减小。经过第 1 级清种尽可能多的吸孔种子受到清种作用,因此,应能保证最小种子单粒稳定吸附(可看作种子中心与吸孔中心重合)时与 B_1 接触,则有

$$L_{B_1} \leq l_n/2 \quad (11)$$

为保证逐级清种的效果, L_{B_1} 取最大值,即 $L_{B_1} = l_n/2 = 4.5 \text{ mm}$ 。

经过最后一级清种后,型孔处未占优势的多余种子大部分被清除,未清除的多余种子在清种刀的作用下位于吸孔下侧,以便于下侧清种机构的清种作业。为保证种子位于吸孔下侧,并且高速条件下减少过清的情况,取点 B_4 位于吸孔边缘,即 $L_{B_4} = 2.5 \text{ mm}$ 。为获取逐级增大的清种强度,点 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 应逐渐接近吸孔中心,即与吸孔中心距离 ΔL 逐级减小,可得

$$\Delta L = (L_{B_1} - L_{B_4})/3 \quad (12)$$

$$L_{B_2} = L_{B_1} - \Delta L \quad (13)$$

$$L_{B_3} = L_{B_1} - 2\Delta L \quad (14)$$

式中 ΔL ——每级清种点相差的距离,mm

L_{B_1} ——点 B_1 与吸孔中心距离,mm

L_{B_2} ——点 B_2 与吸孔中心距离,mm

L_{B_3} ——点 B_3 与吸孔中心距离,mm

L_{B_4} ——点 B_4 与吸孔中心距离,mm

将 L_{B_1} 、 L_{B_4} 的值代入式(12)~(14)可得 $\Delta L \approx 0.67 \text{ mm}$, $L_{B_2} = 3.83 \text{ mm}$, $L_{B_3} = 3.16 \text{ mm}$ 。

为起到振落清种效果,要保证种子经过每一级清种后恢复吸附状态,即第 2 级清种后的每个锯齿长度均大于最大玉米种子长度,且锯齿长度逐渐增大,则有

$$l_{A_4B_4} > l_{A_3B_3} > l_{A_2B_2} > l_m \quad (15)$$

对于三角形 A_2OB_2 ,由余弦定理可知

$$\Delta\theta_{B_2} = \arccos \frac{l_{OA_2}^2 + l_{OB_2}^2 - l_{A_2B_2}^2}{2l_{OA_2}l_{OB_2}} \quad (16)$$

由式(15)、(16)可得

$$\Delta\theta_{B_2} > \arccos \frac{l_{OA_2}^2 + l_{OB_2}^2 - l_m^2}{2l_{OA_2}l_{OB_2}} \quad (17)$$

$$\text{又因} \quad l_{OA_2} = L_m + r \quad (18)$$

$$l_{OB_2} = L_{B_2} + r \quad (19)$$

则有

$$\Delta\theta_{B_2} > \arccos \frac{(L_m + r)^2 + (L_{B_2} + r)^2 - l_m^2}{2(L_m + r)(L_{B_2} + r)} \quad (20)$$

将 L_{B_2} 、 r 、 L_m 和 l_m 代入式(20)得 $\Delta\theta_{B_2} > 7.7^\circ$ 。

为保证锯齿清种强度逐级增加条件下清种的稳定性,每个锯齿的清种时间等值增加,即每个锯齿占有角度以 $\Delta\theta$ 等值增加,则有

$$\begin{cases} \Delta\theta_{B_2} = \Delta\theta_{B_1} + \Delta\theta \\ \Delta\theta_{B_3} = \Delta\theta_{B_1} + 2\Delta\theta \\ \Delta\theta_{B_4} = \Delta\theta_{B_1} + 3\Delta\theta \end{cases} \quad (21)$$

为合理利用清种区域范围,由式(21)和前期试验结果,最终确定 $\Delta\theta_{B_1}$ 为 5° , $\Delta\theta_{B_2}$ 为 8° , $\Delta\theta_{B_3}$ 为 11° , $\Delta\theta_{B_4}$ 为 14° , $\Delta\theta$ 为 3° 。

则可得点位置关系为

$$\begin{cases} \theta_{B_1} = \theta_2 + \Delta\theta_{B_1} \\ \theta_{B_2} = \theta_2 + \Delta\theta_{B_1} + \Delta\theta_{B_2} \\ \theta_{B_3} = \theta_2 + \Delta\theta_{B_1} + \Delta\theta_{B_2} + \Delta\theta_{B_3} \\ \theta_{B_4} = \theta_2 + \Delta\theta_{B_1} + \Delta\theta_{B_2} + \Delta\theta_{B_3} + \Delta\theta_{B_4} \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\Delta\theta_{B_1}$ ——第 1 级清种所占角度, ($^\circ$)

$\Delta\theta_{B_2}$ ——第 2 级清种所占角度, ($^\circ$)

$\Delta\theta_{B_3}$ ——第 3 级清种所占角度, ($^\circ$)

$\Delta\theta_{B_4}$ ——第 4 级清种所占角度, ($^\circ$)

θ_{B_1} ——点 B_1 所在位置与水平方向夹角, ($^\circ$)

θ_{B_2} ——点 B_2 所在位置与水平方向夹角, ($^\circ$)

θ_{B_3} ——点 B_3 所在位置与水平方向夹角, ($^\circ$)

θ_{B_4} ——点 B_4 所在位置与水平方向夹角, ($^\circ$)

通过式(22),可得 $\theta_{B_1} = 35^\circ$, $\theta_{B_2} = 43^\circ$, $\theta_{B_3} = 54^\circ$, $\theta_{B_4} = 68^\circ$, 因此可确定点 B_1 (35° , 4.5 mm), 点 B_2 (43° , 3.83 mm), 点 B_3 (54° , 3.16 mm), 点 B_4 (68° , 2.5 mm)。点 A_2 、 A_3 、 A_4 分别与 B_1 、 B_2 、 B_3 在同一水平位置, 因此可确定 A_1 (35° , 9 mm), A_2 (43° , 9 mm), A_3 (54° , 9 mm)。以直线依次连接 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 、 A_4 、 B_4 , 可得锯齿的形状尺寸参数。

3.2 上下侧清种装置间隔角度

种子经过上侧清种装置位于吸孔下侧, 经过下侧清种装置碰撞将未清除干净的重吸种子清除, 上下清种装置安装位置用间隔角度来表示, 为避免上下侧清种装置相互干扰造成过清发生, 下侧清种装置位置确定时要保证在上侧清种完成后, 需满足宽

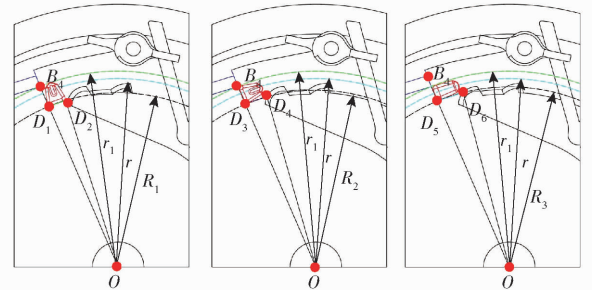
度方向吸附不产生交互碰撞, 如图 8a; 长度方向吸附不产生交互碰撞, 如图 8b; 厚度方向吸附不产生交互碰撞, 如图 8c。其中点 D_1 、 D_2 位于半径为 R_1 的圆上, 点 D_3 、 D_4 位于半径为 R_2 的圆上, 点 D_5 、 D_6 位于半径为 R_3 的圆上, 由余弦定理可得

$$\begin{cases} \theta_{D_1OD_2} > \arccos \frac{2R_1^2 - l_{D_1D_2}^2}{2R_1^2} \\ \theta_{D_3OD_4} > \arccos \frac{2R_2^2 - l_{D_3D_4}^2}{2R_2^2} \\ \theta_{D_5OD_6} > \arccos \frac{2R_3^2 - l_{D_5D_6}^2}{2R_3^2} \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$\begin{cases} R_1 = r_1 - l_{B_4D_1} \\ l_{B_4D_1} = l_m \\ l_{D_1D_2} = b_m \\ R_2 = r_1 - l_{B_4D_3} \\ l_{B_4D_3} = b_m \\ l_{D_3D_4} = l_m \\ R_3 = r_1 - l_{B_4D_5} \\ l_{B_4D_5} = c_m \\ l_{D_5D_6} = l_m \end{cases} \quad (24)$$

式中 r_1 ——点 B_4 的半径, mm
 b_m ——种子最大宽度, mm
 c_m ——种子最大厚度, mm



(a) 种子宽度方向吸附 (b) 种子长度方向吸附 (c) 种子厚度方向吸附

图 8 上下清种装置间隔角度分析

Fig. 8 Analyses of separation angle between upper and lower seed cleaning devices

将式(24)代入式(23)中有

$$\begin{cases} \theta_{D_1OD_2} > \arccos \frac{2(r_1 - l_m)^2 - b_m^2}{2(r_1 - l_m)^2} \\ \theta_{D_3OD_4} > \arccos \frac{2(r_1 - b_m)^2 - l_m^2}{2(r_1 - b_m)^2} \\ \theta_{D_5OD_6} > \arccos \frac{2(r_1 - c_m)^2 - l_m^2}{2(r_1 - c_m)^2} \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可知, 上下清种装置间隔角度与上侧清种刀末端 B_4 的位置及种子外形尺寸有关, 由前文分析确定了 B_4 的位置, $r_1 = 85$ mm, 以郑单 958 种子

为研究对象,取 $l_m = 13\text{ mm}$, $b_m = 11\text{ mm}$, $c_m = 9\text{ mm}$, 代入式(25)中可得 $\theta_{D_1OD_2} > 8.8^\circ$, $\theta_{D_3OD_4} > 9.8^\circ$, $\theta_{D_5OD_6} > 10.2^\circ$, 即上下清种间隔角度在半径为 $R_1 = 72\text{ mm}$ 圆位置上大于 8.8° , 上下清种间隔角度在半径 $R_2 = 74\text{ mm}$ 圆位置上大于 9.8° , 上下清种间隔角度在半径 $R_3 = 76\text{ mm}$ 圆位置上大于 10.2° 。下侧清种弧线确定时满足上下清种角度间隔要求,可避免上下清种干扰造成的过清发生,结合试验确定了间隔角 $\theta_{D_1OD_2}$ 为 9° 、 $\theta_{D_3OD_4}$ 为 10° 、 $\theta_{D_5OD_6}$ 为 11.3° 。

3.3 下侧清种强度

下侧清种机构采用双弧形结构,对种子进行两次逐级增强的清种作业,以保证排种器的排种精度。清种弧线顶端与型孔中心的距离决定了种子经过清种装置时受到的清种强度,当距离越小时,清种强度越大,多余种子越容易被清落,但同时增大了正常吸附的单粒种子被清落的概率。如图 9 所示,点 C_2 、 C_3 为吸孔中心位置, C_4 、 C_5 分别为下侧第 1 次和第 2 次清种弧线顶部位置,在半径为 r_2 、 r_3 的半圆上,则有

$$\begin{cases} l_{C_2C_4} = r - r_2 \\ l_{C_3C_5} = r - r_3 \end{cases} \quad (26)$$

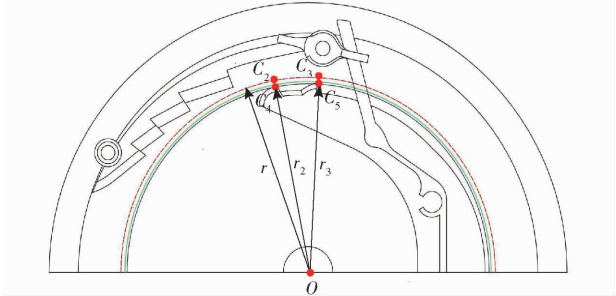


图 9 下侧清种强度分析

Fig. 9 Analysis of intensity of underside clearing

为达到逐级增强的清种效果,则有

$$l_{C_2C_4} > l_{C_3C_5} \quad (27)$$

由式(26)、(27)可知

$$r_3 > r_2 \quad (28)$$

由式(28)可知,清种弧线顶端位置在圆心为 O ,半径为 r_2 、 r_3 的圆上,且 r_3 大于 r_2 ,为方便表达,将 r_2 、 r_3 分别定义为第 1 级和第 2 级清种弧线顶部半径,确定合理的下侧清种位置(即 r_2 、 r_3 的值),可保证稳定的清种效果,本文通过优化试验对下侧清种半径 r_2 、 r_3 进行确定。

4 试验

4.1 试验材料与设备

试验选用未分级处理的郑单 958 玉米种子,千粒质量为 308.1 g 。排种器通过螺栓固定安装在 JPS-12 型计算机视觉精密排种器性能检测试验台

(黑龙江省农业机械科学研究院)上,如图 10 所示,以离开充种区进入上侧清种刀时的位置作为初始点,以离开下侧清种刀位置为终止点,划定试验指标观察区,利用高速摄像机记录观察区影像^[20-21],统计清种情况。

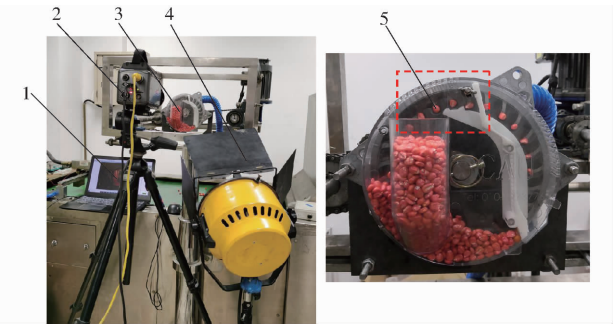


图 10 排种器性能试验装置

Fig. 10 Seed metering performance test device

1. 高速摄像图像采集处理软件 2. 高速摄像机 3. 气吸式精量排种器 4. 摄像机照明灯 5. 观察区

4.2 试验方法

选取影响清种效果的第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 、第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 和排种器工作转速为试验因素进行全因素试验^[22-23],本研究的气吸式玉米精量排种器旨在实现 10 km/h 以上高速作业条件下的精量播种作业^[19],考虑高速作业工况下的效果,确定排种器转速 n 为 26.67 、 32.00 、 37.33 r/min 3 个水平,排种器吸孔数为 25,在株距 25 cm 条件下对应的作业速度分别为 10 、 12 、 14 km/h 。结合前期试验,选取第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 为 80 、 81 、 82 mm 3 个水平,第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 为 80 、 81 、 82 mm 3 个水平,开展三因素三水平的全因素试验,试验共有 27 组,各因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Levels of test factors

水平	因素		
	$n/(r \cdot \min^{-1})$	r_2/mm	r_3/mm
1	26.67	80	80
2	32.00	81	81
3	37.33	82	82

为重点考察排种器清种性能,定义漏清率、过清率为试验指标。为满足该排种器正常工作的条件,结合前期工作压力试验,确定试验工作压力为 3.5 kPa ;另根据玉米种植株距要求,确定试验株距为 25 cm 。排种器工作过程中,采用高速摄像机记录观察区内的工作影像,为避免排种器转速增大产生漏吸进而影响考察清种装置清种效果,采用高速摄像统计数据时去除漏吸情况,将经过观察区型孔上种子未被清除导致 2 粒(包含 2 粒)的情况判定

为漏清,被清落导致无种子的情况判定为过清,每组试验检测型孔的数量不低于 360 个,重复 3 次^[24],漏清率与过清率计算公式为

$$M_p = n_1 / N_p \times 100\%$$

(29)

$$D_p = n_2 / N_p \times 100\%$$

(30)

式中 M_p ——漏清率, %
 D_p ——过清率, %
 n_1 ——漏清型孔数
 n_2 ——过清型孔数
 N_p ——记录的总型孔数

4.3 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示,表中数据形式为平均值 ± 标准差。整理试验结果,在 3 种不同速度下,分别对第 1 级下侧清种强度和第 2 级下侧清种强度进行显著性分析,结果如图 11 所示。图中相同转速、相同半径下的不同字母表示差异显著。

表 2 全因素试验结果
Tab.2 Result of three factors test

$n / (r \cdot \min^{-1})$	r_2 / mm	r_3 / mm	漏清率 $Y_1 / \%$	过清率 $Y_2 / \%$
26.67	80	80	2.30 ± 0.10	0.37 ± 0.15
		81	1.47 ± 0.15	0.43 ± 0.15
		82	1.30 ± 0.10	0.63 ± 0.15
	81	80	1.70 ± 0.10	0.47 ± 0.15
		81	1.20 ± 0.10	0.37 ± 0.06
		82	1.03 ± 0.21	0.67 ± 0.15
	82	80	0.97 ± 0.15	0.50 ± 0.20
		81	0.83 ± 0.15	0.60 ± 0.10
		82	0.63 ± 0.15	1.10 ± 0.10
	80	80	1.50 ± 0.20	0.50 ± 0.10
		81	1.43 ± 0.15	0.60 ± 0.10
		82	1.03 ± 0.21	0.67 ± 0.06
32.00	80	80	1.03 ± 0.15	0.53 ± 0.15
		81	1.07 ± 0.15	0.60 ± 0.10
		82	0.90 ± 0.10	0.83 ± 0.06
	81	80	1.10 ± 0.26	0.87 ± 0.15
		81	1.03 ± 0.21	0.90 ± 0.26
		82	0.57 ± 0.15	1.07 ± 0.23
	82	80	2.27 ± 0.15	0.97 ± 0.21
		81	1.40 ± 0.10	1.17 ± 0.06
		82	1.23 ± 0.15	1.20 ± 0.10
	80	80	1.47 ± 0.15	1.03 ± 0.21
		81	1.23 ± 0.06	0.97 ± 0.21
		82	1.13 ± 0.15	1.30 ± 0.10
37.33	80	80	1.30 ± 0.10	1.17 ± 0.15
		81	1.10 ± 0.20	1.37 ± 0.21
		82	1.03 ± 0.15	1.43 ± 0.15

4.3.1 各因素对漏清率的影响

在工作转速 26.67 r/min 下,第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 和第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 对漏清率均

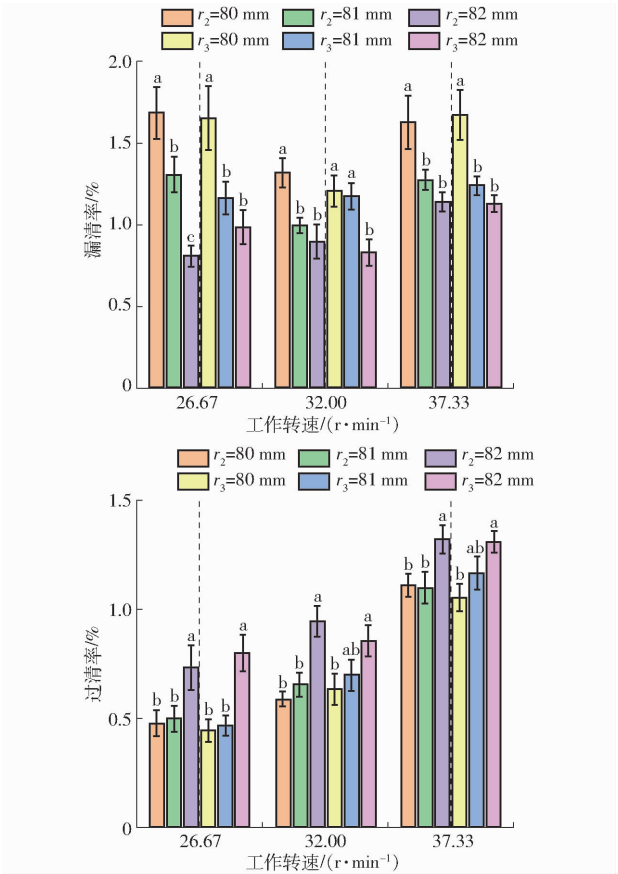


图 11 不同转速下各因素对漏清率和过清率的影响
Fig. 11 Influences of various factors on missing-clearing rate and over-clearing rate at different rotational speeds

有显著影响。随着 r_2 的增大,漏清率显著降低,在 r_2 为 80 mm 时,漏清率最高, r_2 为 82 mm 时,漏清率最低。随着 r_3 的增大,漏清率出现显著降低,在 r_3 为 80 mm 时,漏清率最高, r_3 为 82 mm 时,漏清率最低,但 81 mm 和 82 mm 对漏清率的影响差异不显著。

在工作转速 32.00 r/min 下,第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 和第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 对漏清率均有显著影响。随着 r_2 的增大,漏清率出现显著降低,在 r_2 为 80 mm 时,漏清率最高, r_2 为 82 mm 时,漏清率最低,但 81 mm 和 82 mm 对漏清率的影响差异不显著。随着 r_3 的增大,漏清率出现显著降低,在 r_3 为 80 mm 时,漏清率最高, r_3 为 82 mm 时,漏清率最低,但 80 mm 和 81 mm 对漏清率的影响差异不显著。

在工作转速 37.33 r/min 下,第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 和第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 对漏清率均有显著影响。随着 r_2 的增大,漏清率出现显著降低,在 r_2 为 80 mm 时,漏清率最高, r_2 为 82 mm 时,漏清率最低,但 81 mm 和 82 mm 对漏清率的影响差异不显著。随着 r_3 的增大,漏清率出现显著降低,在 r_3 为 80 mm 时,漏清率最高, r_3 为 82 mm 时,漏清率最低,但 81 mm 和 82 mm 对漏清率的影响差异不显著。

在各个工作转速梯度下,随着清种强度的增加,

漏清率逐渐降低。究其原因为:当 r_2 和 r_3 增加时,清种弧线顶端与吸孔中心距离越近,对种子的作用力增强,加剧了对多余种子碰撞,更容易将吸孔处的多余种子清除,降低漏清的情况发生率。

4.3.2 各因素对过清率的影响

在各个工作转速下,第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 和第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 对过清率均有显著影响。随着清种强度增大,过清率出现显著升高。在 r_2 和 r_3 为 80 mm 时,过清率最低;在 r_2 和 r_3 为 82 mm 时,过清率最高。但 r_2 为 80、81 mm 与 r_3 为 80、81 mm 对过清率的影响差异不显著。随着 r_2 和 r_3 的增加,清种弧线顶端与吸孔中心距离越近,对种子的作用力增强,加剧了对种子碰撞,容易将未稳定吸附的种子清除,造成漏播发生。

4.4 回归分析

对试验结果进行回归分析,各因素及其交互作用对漏清率 Y_1 、过清率 Y_2 影响如表 3 所示。

表 3 各参数对排种性能的显著性分析
Tab.3 Significance analysis of each factor on metering performance

参数	Y_1	Y_2
n	0.352 9	<0.000 1 **
r_2	<0.000 1 **	<0.000 1 **
r_3	<0.000 1 **	<0.000 1 **
n^2	0.005 2 **	0.000 8 **
r_2^2	0.477 2	0.005 8 **
r_3^2	0.477 2	0.056 3
nr_2	0.080 1	0.661 5
nr_3	0.566 3	0.330 1
r_2r_3	0.043 6 *	0.198 9

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

由表 3 可以看出, r_2 、 r_3 对漏清率具有极显著影响,且 r_2 和 r_3 存在交互作用。工作转速 n 、第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 、第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 对过清率具有极显著影响,且工作转速与第 1 级清种弧线顶部半径 r_2 不存在交互作用,工作转速与第 2 级清种弧线顶部半径 r_3 不存在交互作用。

根据表 3 的方差分析结果,得到 3 个性能指标拟合回归方程为

$$Y_1 = 1\,568.965\,7 - 2.468\,2n - 18.806\,9r_2 - 18.373\,3r_3 + 0.018\,2nr_2 + 0.005\,7nr_3 + 0.113\,9r_2r_3 + 0.008\,3n^2 + 0.053\,7r_2^2 + 0.053\,7r_3^2 \tag{31}$$

$$Y_2 = 1\,385.629\,6 + 0.280\,4n - 20.496\,3r_2 - 14.111\,0r_3 + 0.002\,1nr_2 + 0.004\,7nr_3 + 0.033\,3r_2r_3 + 0.005\,1n^2 + 0.111\,1r_2^2 + 0.072\,2r_3^2 \tag{32}$$

式中各参数均为实际值,模型显著性检验 $p < 0.05$,表明该模型具有统计学意义。根据试验结果和拟合回归方程,以漏清率和过清率最小为寻优条件采用 Design-Expert 软件进行处理^[25],综合考虑各个速度条件下的清种效果,得到清种强度的最佳参数组合为 $r_2 = 80.70$ mm、 $r_3 = 81.42$ mm,在该强度组合下工作转速为 29.31 r/min 时作业效果最佳。然后,考虑实际作业过程中播种速度的多变性,在 26.67 ~ 37.33 r/min 的作业条件下,对优化后的理论值进行试验验证,在相同的试验条件下重复验证试验 3 次,理论最佳参数组合和试验结果如表 4 所示。

表 4 工作参数理论值和实际值
Tab.4 Theoretical and practical values of working parameters

$n / (r \cdot \min^{-1})$	r_2 / mm	r_3 / mm	漏清率/%		过清率/%	
			理论值	实际值	理论值	实际值
26.67	80.7	81.42	1.19	0.83	0.49	0.47
32.00	80.7	81.42	0.98	0.77	0.64	0.60
37.33	80.7	81.42	1.24	1.10	1.08	1.03

由表 4 可知,在 r_2 为 80.70 mm、 r_3 为 81.42 mm 的最佳参数组合下,理论优化结果和实际作业结果基本一致。实际作业过程中,工作转速 26.67 ~ 37.33 r/min 条件下,漏清率均不大于 1.10%,过清率均不大于 1.03%,清种效果较好。说明采用清种强度逐级增强(即为第 2 级清种弧线顶部半径大于第 1 级清种弧线顶部半径)的清种方法,可有效提高下侧清种效果,避免漏清、过清造成的排种器性能下降的情况发生,与前文的理论分析一致。

4.5 对比试验

为考察双侧清种方式对排种器清种性能的改善效果,采用同一排种器结构安装双侧清种和单侧清种(锯齿形上侧清种装置)进行对比试验。选取工作转速为 26.77、32.00、37.33 r/min,在相同试验条件下选用玉米品种郑单 958 进行试验,试验时清种装置处于最佳作业状态,利用高速摄像机记录并统计漏清率和过清率,采用中国农业大学自主研发的排种器性能检测试验台^[26]检测安装不同清种装置排种器的合格率、漏播率、重播率,以验证清种装置对排种器性能的提升效果,每组试验检测播种量不低于 360 个,重复 3 次,试验结果如表 5 所示。

对比试验结果可知,在工作转速为 26.67 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 6.70 个百分点,过清率基本不变,排种器合格率升高 7.04 个百分点;在工作转速为 32.00 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 4.63 个百分点,过清率基本不变,排

表 5 对比试验结果

Tab.5 Results of comparative test

清种 方式	工作转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	漏清 率/%	过清 率/%	合格 率/%	漏播 率/%	重播 率/%
双侧清种	26.67	0.83	0.47	98.67	0.47	0.87
	32.00	0.77	0.60	98.57	0.63	0.80
	37.33	1.10	1.03	97.30	1.33	1.37
单侧清种	26.67	7.53	0.43	91.63	0.53	7.83
	32.00	5.40	0.63	93.50	0.77	5.73
	37.33	8.51	1.27	90.04	1.43	8.53

种器合格率升高 5.07 个百分点;在工作转速为 37.33 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 7.41 个百分点,过清率降低 0.24 个百分点,排种器合格率升高 7.26 个百分点。采用单侧锯齿形清种装置对吸孔处种子进行碰撞清种,由于种盘吸孔吸附稳定性的特点,漏清情况过多,导致排种器重播率较高,且增加清种强度容易造成过清,导致漏播率升高。采用双侧清种装置,对吸孔处种子进行两侧清种,有效降低了漏清率,减少了重播情况的发生;同时减小了单侧清种强度,对过清率也有一定的改善,降低了漏播率,有效改善了排种器的性能。

5 结论

(1)针对气吸式玉米排种器清种装置因存在漏清、过清而造成排种性能下降的问题,通过分析造成重漏的原因,建立了清种过程数学模型,分析了清种

过程的运动机理,优化设计了双侧清种装置,并对清种装置的关键参数进行理论分析,确定了上下侧清种机构关键参数的设计方法。

(2)选取第 1 级清种弧线顶部半径、第 2 级清种弧线顶部半径和工作转速为主要因素进行了全因素试验,并对试验结果进行显著性分析,建立了因素与指标的回归方程,以漏清率和过清率最小为寻优条件,得到较优清种强度最佳的参数组合为: $r_2 = 80.70\text{ mm}$ 、 $r_3 = 81.42\text{ mm}$ 。在最佳参数组合下进行了验证试验,结果表明,在实际作业过程中,当工作转速为 26.67 ~ 37.33 r/min 时,漏清率均不大于 1.10%,过清率均不大于 1.03%,与理论优化结果基本一致。

(3)采用同一排种器结构安装双侧清种和单侧清种进行了对比试验,结果表明,工作转速为 26.67 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 6.70 个百分点,过清率基本不变,排种器合格率提高 7.04 个百分点;工作转速为 32.00 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 4.63 个百分点,过清率基本不变,排种器合格率提高 5.07 个百分点;工作转速为 37.33 r/min 时,采用双侧清种装置漏清率降低 7.41 个百分点,过清率降低 0.24 个百分点,排种器合格率提高 7.26 个百分点。采用双侧清种装置有效降低了漏清率,在高速情况下对过清率也有一定的改善,可有效提高排种器的作业效果。

参 考 文 献

[1] 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.
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. 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. (in Chinese)

[2] 杨丽,史嵩,崔涛,等.气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J].农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.
YANG Li,SHI Song,CUI Tao,et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):48-53. (in Chinese)

[3] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等.玉米播种与测控技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):1-18.
YUAN Yanwei,BAI Huijuan,FANG Xianfa,et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)

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

[5] STJACK D,HESTERMAN D C,GUZZOMI A L. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds[J]. Biosystems Engineering,2013,115(2):171-183.

[6] BARUT Z B,ZMERZI A. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry,2004,28(6):435-441.

[7] 史嵩,周纪磊,刘虎,等.驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(5):61-70.
SHI Song,ZHOU Jilei,LIU Hu,et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):61-70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190507&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.007. (in Chinese)

[8] 李玉环,杨丽,张东兴,等.豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):61-73.
LI Yuhuan,YANG Li,ZHANG Dongxing,et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):61-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.006. (in Chinese)

- [9] 刘文忠,赵满全,王文明,等.气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J].农业工程学报,2010,26(9):133-138.
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese)
- [10] 高筱钧,徐杨,张东兴,等.气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(23):9-20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9-20. (in Chinese)
- [11] 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 air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [12] 于建群,申燕芳,牛序堂,等.组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J].农业工程学报,2008,24(5):105-109.
YU Jianqun, SHEN Yanfang, NIU Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 105-109. (in Chinese)
- [13] 祁兵,张东兴,刘全威,等.集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J].农业工程学报,2015,31(1):20-27.
QI Bing, ZHANG Dongxing, LIU Quanwei, et al. Design and experiment of cleaning performance in a centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 20-27. (in Chinese)
- [14] 刘云强,刘立晶,赵郑斌,等.蔬菜育苗播种机清种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):83-91.
LIU Yunqiang, LIU Lijing, ZHAO Zhengbin, et al. Design and experiment on plant seedling device for vegetable seedling seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 83-91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s012&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.012. (in Chinese)
- [15] 邢赫,臧英,罗锡文,等.水稻气力式排种器清种装置设计与试验[J].华南农业大学学报,2019,40(5):28-33.
XING He, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and test of seed cleaning device of pneumatic metering device for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 28-33. (in Chinese)
- [16] 丁力,杨丽,张东兴,等.气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):47-56.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.006. (in Chinese)
- [17] 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 research of the tic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 李玉环,杨丽,张东兴,等.气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(9):26-35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese)
- [20] 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等.基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J].华中农业大学学报,2014,33(3):103-108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 103-108. (in Chinese)
- [21] 邢赫,臧英,曹晓曼,等.水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J].农业工程学报,2015,31(12):23-30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23-30. (in Chinese)
- [22] 丁力,杨丽,张东兴,等.气吸式排种器卸种机构设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(1):37-46.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.004. (in Chinese)
- [23] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):75-86,139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [24] 史嵩,刘虎,位国建,等.基于DEM-CFD的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(5):54-66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54-66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)
- [25] 葛宜元.试验设计方法与Design-Expert软件应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
- [26] 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 seedmeter'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)