

蔬菜气吸式排种器四级清种机构设计与试验

言育谦^{1,2} 刘立晶^{1,2} 刘云强^{1,2} 吴海华^{1,2} 卢琦^{1,2} 刘芳建^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决蔬菜气吸式排种器吸种时出现一孔多粒现象导致播种质量下降的问题,提出4级锯齿清种作业的方法,并设计了四级清种机构。阐述排种器出现重吸现象的原因,对清种过程中种子的受力建立数学模型,从而确定清种机构安装位置、齿形角度等关键参数。选取清种齿顶与型孔距离、排种器工作转速和气室负压为主要因素进行二次回归正交旋转组合试验并对试验结果进行显著性和回归分析,获得最优参数组合为第4级清种齿顶与型孔距离0.41 mm、负压1.22 kPa、排种器工作转速5.85 r/min,并对最优工作参数进行验证试验和对比试验。验证试验表明,在工作转速为4.5~9.5 r/min时,漏清率不大于1.50%,过清率不大于1.88%,与回归方程计算值基本一致。对比试验表明,在转速分别为4.5、7.0、9.5 r/min时,采用四级清种机构漏清率分别降低3.2、4.0、5.0个百分点,过清率分别降低0.19、0.83、1.45个百分点,排种合格率分别提升3.42、4.83、6.45个百分点。采用四级清种机构有效降低了清种环节的漏清率,提升了排种器的工作质量。

关键词: 蔬菜; 气吸式排种器; 四级清种机构; 正交试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0057-09

Design and Test of Four-stage Seed Cleaning Mechanism for Air-suction Vegetables Seed-metering Device

YAN Yuqian^{1,2} LIU Lijing^{1,2} LIU Yunqiang^{1,2} WU Haihua^{1,2} LU Qi^{1,2} LIU Fangjian^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem in vegetables seed-metering device that the seeding quality decreased due to multiple grains in one hole during seed suction, a four-stage sawtooth for seed cleaning was proposed and a four-stage seed cleaning mechanism was designed. The reasons for the phenomenon of resuction were expounded, and a mathematical model was established to determine the key parameters such as the installation position and tooth profile angle of the seed clearing mechanism. The distance between the top of the tooth and the mold hole, the working speed of the seed dispenser and the negative pressure of the chamber were selected as the main factors to carry out the quadratic regression orthogonal rotation combination test. The significance and regression analysis of the test results were carried out. The optimal parameter combination was obtained as the distance between the top of the tooth and the mold hole of the 4th seed dispenser was 0.41 mm, the negative pressure was 1.22 kPa and the working speed of the seed dispenser was 5.85 r/min. The verification test and comparison test of the optimal working parameters were carried out. The verification test showed that when the working speed was 4.5~9.5 r/min, the leakage rate was not more than 1.50%, and the overclearing rate was not more than 1.88%, which was basically consistent with the calculated value of the regression equation. The comparative test showed that when the rotation speed was 4.5 r/min, 7.0 r/min and 9.5 r/min, the leakage rate of the four-stage seed clearing mechanism was reduced by 3.2 percentage points, 4.0 percentage points and 5.0 percentage points, the overclearing rate was reduced by 0.19 percentage points, 0.83 percentage points and 1.45 percentage points, and the qualified rate of seed discharge was increased by 3.42 percentage points, 4.83 percentage points and 6.45 percentage points, respectively.

收稿日期: 2023-06-31 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 北京市科技计划项目(Z221100006422007)

作者简介: 言育谦(1998—),男,硕士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: 1024956858@qq.com

通信作者: 吴海华(1981—),男,研究员,博士,主要从事农村发展与农业机械化、农业装备技术创新战略研究,E-mail: caamswhh@163.com

The four-stage seed cleaning mechanism can effectively reduce the leakage rate of seed cleaning link and improve the working quality of seed discharging device.

Key words: vegetable; air-suction seed-metering device; four-stage seed cleaning mechanism; orthogonal test

0 引言

蔬菜气吸式播种机的核心部件为排种器,其排种原理是利用负压气流将种子吸附在排种盘的型孔上,在清种区将多余的种子清掉,单粒种子随排种盘转动至排种口,因失去气流吸附而脱离排种盘完成排种^[1-3]。气吸式排种器有单粒性好、品种适应性强、伤种率较低等优点,能适应蔬菜播种的农艺要求,逐渐在蔬菜种植中得到推广和应用^[4-7]。清种机构能将排种盘型孔上吸附的多余种子清除,是保证排种单粒性的关键装置。其设计不合理会引起过清或漏清从而导致漏播和重播现象^[8-11]。因此,清种机构对排种器的排种性能起着关键作用。

国内外学者对气吸式排种器清种机构做了大量研究,取得了一定成果,国外农机企业 Precision Planting、John Deere、Maschio 等对玉米气吸式播种的清种技术进行了大量研究,目前该技术较为成熟,美国 Precision Planting 公司^[12]和意大利 Maschio 公司^[13]采用内外两侧清种方式,通过两侧同时扰动种子,保障播种单粒率;美国 John Deere 公司^[14]采用在种盘内侧安装 3 级毛刷方式进行清种,采用毛刷清种可防止过清现象,同时避免种子破损,3 级清种保障了清种效果。国内学者同样对气吸式排种器清种机构进行了研究,丁力等^[15]优化设计了玉米气吸式排种器的清种机构,建立了适用于气吸式排种器清种机构的参数化数学模型,有效地提高了排种合格指数;邢赫等^[16]设计了一种适用于水稻的清种装置,建立了吸种过程中的受力模型,有效地清除了排种器重吸附的稻种;李玉环等^[17]设计了玉米气吸式排种器的双侧清种装置,确定了上下侧清种机构关键参数的设计方法,有效降低了漏清率,在高速情况下对过清率有所改善。目前清种机构的研究多针对粮食作物,鲜见以蔬菜为对象。

由于蔬菜种子存在质量轻、粒径小的特点,采用气吸式播种时重吸现象较为严重^[18],设计合理的清种机构能有效降低播种重播率。但目前蔬菜气吸式排种器清种机构多为经验设计,存在对种子、种盘和清种机构三者之间的运动、受力情况分析不足,清种机构参数设计的理论依据不充分,清种环节试验缺失等问题,导致目前蔬菜气吸式排种器的清种机构漏清、过清情况严重。本文以蔬菜种子和蔬菜气吸

式排种器为对象,对清种过程中种子、清种机构和种盘三者的互作关系建立数学模型,通过数学模型合理确定清种机构的结构参数,随后对清种过程进行正交试验,探究最佳工作参数组合,并完成性能对比试验,为蔬菜气吸式排种器清种机构设计和清种过程理论分析提供参考。

1 气吸式排种器结构和工作原理

蔬菜气吸式排种器结构如图 1 所示,由气道、后壳体、气室密封条、种盘、清种机构、前壳体组成。根据其工作流程可将其分为充种区、清种区、携种区和卸种区 4 部分(图 2)。工作时,气道通负压气流后,种盘背面的气室形成负压,种子在充种区被负压吸附至种盘型孔,种盘由传动轴带动旋转,经过清种区时,清种机构将多余的种子清除,保留的种子随种盘旋转进入卸种区,此时负压被阻断,种子在重力、离心力和外力作用下从卸种孔排出,完成排种。

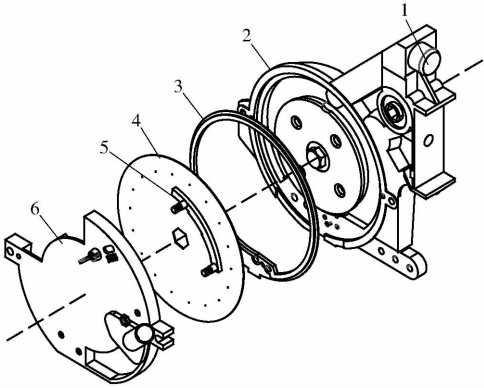


图 1 排种器结构爆炸图

Fig. 1 Seed-metering device structure explosion diagram
1. 气道 2. 后壳体 3. 气室密封条 4. 种盘 5. 清种机构 6. 前壳体

2 重吸现象与清种原理

2.1 重吸现象

按照设计要求,在充种过程中,种盘上每一个型孔应吸附 1 粒种子。但由于蔬菜种子存在形状不规则、尺寸较小等特点,种子在被吸附后无法完全贴合型孔边缘,仍有负压气流通过未密封的型孔,从而形成较强吸附力吸附其他种子,造成重吸现象,如图 3 所示。经过试验发现,若此时不及时进行清种,便会

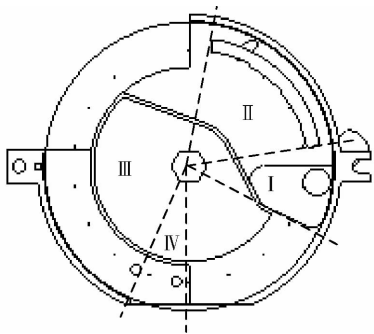


图 2 排种器工作区域划分示意图

Fig. 2 Work area division diagram of seed-metering device

I. 充种区 II. 清种区 III. 携种区 IV. 卸种区



图 3 排种器重吸现象

Fig. 3 Situation of multiple seeds sucked

2.2 清种原理

清种机构能有效保障种盘型孔的单粒吸附性能,本文结合排种器的结构和工作流程设计了清种机构,主要包括旋转螺母、清种刮刀、刻度表、位置调整滑槽和紧固蝶形螺母,如图 4 所示。锯齿清种刮刀逐级逼近种盘型孔,清种刮刀施加给待清除种子的侧压力逐渐增大,将种子挤落回种室,其一端固定在前壳体定位孔上,另一端安装在前壳体的滑槽中,可根据蔬菜种子的外形尺寸调节刮刀位置,清种刮刀有 4 级锯齿,工作面可与种子产生多次碰撞,从而将吸孔上的待清种子清除,保障播种单粒率。

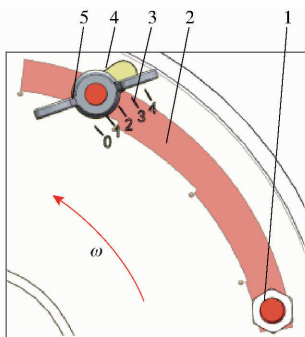


图 4 清种机构结构示意图

Fig. 4 Seed cleaning mechanism structure diagram

1. 旋转螺母 2. 清种刮刀 3. 刻度(毫米) 4. 位置调整滑槽
5. 紧固蝶形螺母

排种器完成充种后,型孔上会吸附一粒或多粒

种子。当种子随种盘转动经过清种区时,吸附在型孔周围多余的种子和清种装置发生碰撞,远离型孔中心的种子在碰撞力和种子重力的作用下脱离型孔吸附并落回种室,靠近型孔中心的种子被型孔完全吸附,完成清种。

对吸附于型孔的种子进行受力分析,以型孔中心为原点建立三轴直角坐标系,种盘中心指向型孔方向为 x 轴正向,种子瞬时运动方向为 y 轴正向,垂直于种盘指向种子方向为 z 轴正向,受力分析如图 5 所示。

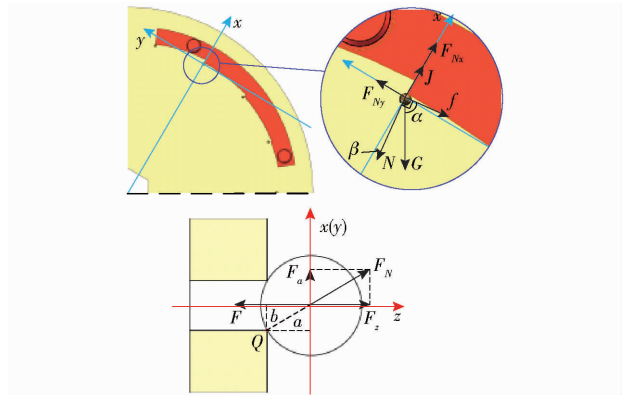


图 5 清种受力分析

Fig. 5 Force analysis of seed-cleaning

在清种过程中,受到清种机构作用力,未掉落的种子仍处于受力平衡状态,将蔬菜种子简化为球形,对此建立清种过程的力平衡方程

$$\begin{cases} G\sin\alpha + N\cos\beta - J - f\sin\beta - F_{Nx} = 0 \\ F_{Ny} - F_f - f\cos\beta - G\cos\alpha - N\sin\beta = 0 \\ F - F_{Nz} = 0 \\ Fb - F_a a = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad f = \mu N \quad (2)$$

式中 G ——种子重力, N
 J ——种子所受离心力, N
 N ——清种装置对种子的作用力, N
 F ——种子受型孔吸附力, N
 f ——清种装置对种子的摩擦力, N
 F_{Nx} ——种盘对种子的支持力在 x 轴分力, N
 F_{Ny} ——种盘对种子的支持力在 y 轴分力, N
 F_{Nz} ——种盘对种子的支持力在 z 轴分力, N
 F_a ——种盘对种子的支持力在 xy 轴平面的分力, N
 α ——种子与种盘中心连线和水平面的夹角, $(^\circ)$
 β ——作用力 N 与 x 轴负方向的夹角, $(^\circ)$
 μ ——清种装置与种子的摩擦因数
 a ——点 Q 与种子中心的水平距离, mm
 b ——点 Q 与种子中心的竖直距离, mm

种子在平面内受力平衡,有

$$F_a = \sqrt{F_{Nx}^2 + F_{Ny}^2}$$

(3)

由式(1)~(3)得

$$F = \frac{a}{b} \{ [G\sin\alpha + N(\cos\beta - \mu\sin\beta) - J]^2 + [G\cos\alpha + N(\sin\beta - \mu\cos\beta)]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

(4)

种子所受离心力为

$$J = m\omega^2 r$$

(5)

式中 m ——种子质量,kg
 r ——型孔至种盘中心的距离,mm
 ω ——排种盘旋转角速度,rad/s

吸附力与气室真空度的关系为

$$F = \Delta p S_i$$

(6)

式中 Δp ——气室与外界压差,Pa
 S_i ——种子吸附于型孔的面积,m²

考虑实际工况较为恶劣,存在机器振动、摩擦阻力等因素影响,取外界条件系数 K_1 和吸种可靠性系数 K_2 ^[19],结合式(4)~(6)可得

$$S_i = \frac{K_1 K_2 a}{\Delta p b} \{ [G\sin\alpha + N(\cos\beta - \mu\sin\beta) - J]^2 + [G\cos\alpha + N(\sin\beta - \mu\cos\beta)]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

(7)

由式(7)可知,在排种器工作参数确定的情况下,由于待清种子被型孔吸附的面积存在最大值,随种盘转动待清种子被吸附的面积将逐渐减小,随转盘转动,待清种子受到负压的吸力逐渐减小,直至待清种子脱离型孔。此时,留下的种子完全吸附于型孔,不再受到清种装置影响,清种步骤完成。依据此原理,清种刮片的设计应满足刚接触待清种子时能打破其原本稳定吸附的状态,随种盘转动将其完全推离型孔;且当清除吸附于型孔的多余种子后,不影响正常吸附的种子,实现清种功能。

3 清种机构设计

目前在排种器上应用较多的清种机构有杠杆式、毛刷式、弹性插板式、橡皮刮板式、光滑曲线刮板式及锯齿形刮板式等^[20-22]。目前使用较多的锯齿形刮板式清种结构在清种过程中对种子进行高频拨动,容易使种子吸附不稳定从而导致过清现象发生。本清种机构结合光滑曲线式和锯齿式清种原理,在保证清种过程中吸种稳定的前提下实现4次清种功能,提高清种合格率。

3.1 清种机构安装位置

清种步骤在充种完成后开始,为确保清理落下的种子能顺利回到充种室,清种装置的位置安装在充种室的侧上方。为保证吸附于型孔的种子与清种

下落的种子互不影响,相邻的2个型孔应有充足的水平投影距离。考虑作业对象蔬菜种子粒径通常不超过5 mm,因此需保证两型孔水平投影 L_m 大于2倍种子粒径即10 mm,具体位置分析如图6所示。

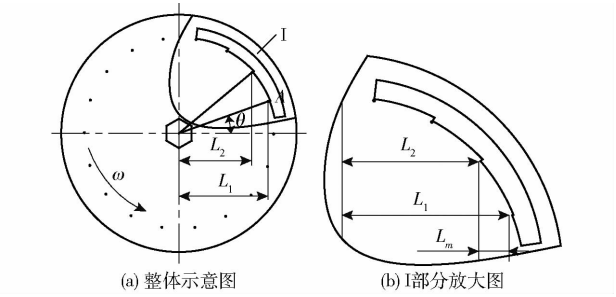


图6 清种机构安装位置分析
Fig. 6 Analyses of installation position of seed cleaning mechanism

假设点 A 为清种步骤的起始位置,清种装置位置条件方程为

$$\begin{cases} L_1 = r\cos\theta \\ L_2 = r\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{h}\right) \\ L_m = L_1 - L_2 \geq 10 \text{ mm} \end{cases}$$

(8)

式中 L_1 ——清种起始位置到圆心的水平距离,mm
 L_2 ——相邻型孔到圆心的水平距离,mm
 θ ——清种起始位置与水平面夹角,(°)
 h ——种盘型孔数

代入数据可求得 $\theta \geq 18.66^\circ$,取 $\theta = 20^\circ$ 。

3.2 清种机构齿数确定

通过锯齿对种子的推挤和碰撞实现清种。当锯齿数增加,种子在受到连续碰撞时处于不稳定状态,更容易掉落,实现清种。根据前期试验积累,选取4级锯齿清种结构。4个锯齿排布分别对应种盘上的4个型孔,此时清种机构两端与种盘圆心连线的夹角 φ 为

$$\varphi = \frac{2\pi}{h}(4 - 1) = 60^\circ$$

(9)

3.3 清种机构齿顶曲线参数求解

清种机构应随种盘转动逐渐靠近型孔,推挤待清种子使其被型孔吸附的面积减小。为保证清种的全面性,从起始齿顶到末位齿顶应由外至内清理种子,因此4级齿顶的位置会逐渐靠近型孔中心。将清种锯齿的4个齿顶用曲线连接,可将其看作椭圆。以清种机构末端与种盘中心连线为 y 轴,建立直角坐标系。其中,点 K_4 作为最后一个清种齿顶,应保证能最难清理的待清种子清除;而点 K_1 作为第1个清种齿顶,应保证能将最易清理的待清种子清除,如图7所示。

由于 K_1 、 K_4 两点位置已确定,可计算出点 O 与

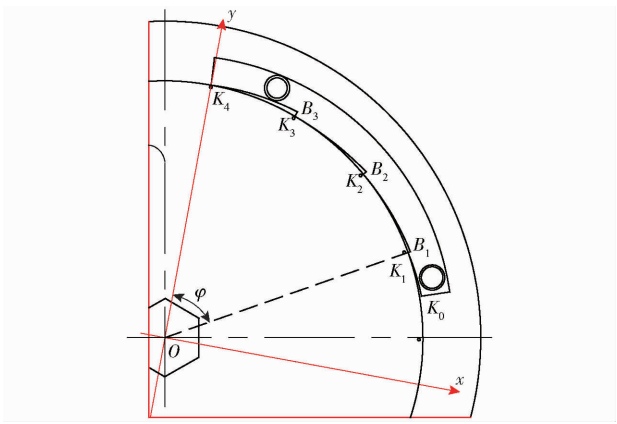


图 7 清种机构曲线示意图

Fig. 7 Schematic of cleaning mechanism curve

点 K_1 、 K_4 的距离为

$$l_{OK_1} = r + \frac{3}{2}d_1 \tag{10}$$

$$l_{OK_4} = r + \frac{1}{2}d_1 \tag{11}$$

式中 d_1 ——种子平均直径,mm

将椭圆上 K_1 、 K_4 两点位置参数代入椭圆参数方程 $\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} = 1$ 中,化简求得清种机构曲线参数方程为

$$\frac{x^2 \left[\left(r + \frac{1}{2}d_1 \right)^2 - \left(r + \frac{3}{2}d_1 \right)^2 \cos^2 \varphi \right]}{\left(r + \frac{3}{2}d_1 \right)^2 \left(r + \frac{1}{2}d_1 \right)^2 \sin^2 \varphi} + \frac{y^2}{\left(r + \frac{1}{2}d_1 \right)^2} = 1 \tag{12}$$

由式(12)求得方程离心率为

$$e = \sqrt{1 - \frac{\left(r + \frac{1}{2}d_1 \right)^2 - \left(r + \frac{3}{2}d_1 \right)^2 \cos^2 \varphi}{\left(r + \frac{1}{2}d_1 \right)^2 \sin^2 \varphi}} \tag{13}$$

根据排种器设计可知型孔分度圆半径 r 为 90 mm,本清种机构选取白菜种子确定部件设计参数,经测量白菜的平均尺寸 $d_1 = 1.5$ mm,将 $r = 90$ mm、 $\varphi = 60^\circ$ 代入式(12),可得适用于该排种器的清种齿顶的曲线方程为

$$\frac{x^2}{8\,614.95} + \frac{y^2}{8\,244.64} = 1 \tag{14}$$

由式(13)求得离心率 $e = 0.11$ 。

3.4 齿形参数确定

为方便确定并表达清种齿形参数及形状,以齿面工作点与型孔中心的距离 l 为纵坐标,齿面工作点与水平方向夹角 σ 为横坐标,建立清种齿距离角

度关系图,如图 8 所示。点 K_0 为清种齿的起始位置,点 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为每段清种齿的齿顶,点 B_1 、 B_2 、 B_3 为每段清种齿的齿底(图 8)。

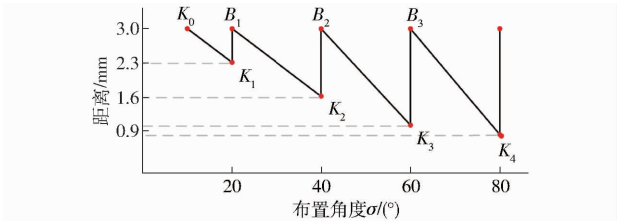


图 8 清种机构齿形与角度关系曲线

Fig. 8 Relation diagram of tooth profile and angle of cleaning mechanism

将 4 个清种齿顶参数代入清种齿顶的曲线方程式(14)中计算,可得点 K_1 (20° , 2.3 mm)、点 K_2 (40° , 1.6 mm)、点 K_3 (60° , 1.0 mm)、点 K_4 (80° , 0.8 mm)。

点 K_0 为清种起始位置,与水平面夹角 σ 为 10° ,与吸孔中心距离为 l_m 。当多粒种子吸附于型孔时,最外侧种子应接近点 K_0 ,以便开始清种过程;同时应保证种子进入清种区时状态较为稳定,避免型孔吸附的所有种子掉落导致漏播。因此为保证种子进入清种区时稳定,取 $l_m = 3$ mm,确定点 K_0 为 (10° , 3 mm)。

按照设计要求,清种齿齿底与型孔距离相同,即 K_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 与型孔中心的距离均为 l_m 。确定所有点的位置后,以圆滑曲线依次连接 K_0 、 K_1 、 B_1 、 K_2 、 B_2 、 K_3 、 B_3 、 K_4 ,得到清种机构的齿形参数。

3.5 清种机构调节方式及调节范围确定

为适应不同蔬菜种子的播种需求,清种机构设计为可调机构^[23]。将清种机构起始位置中心固定,末端设计滑槽供清种机构滑动调节。由于该排种器作业对象为蔬菜,种子粒径均较小,考虑排种器的通用性,设计第 4 级齿顶与型孔中心的距离为 0 ~ 4 mm 可调。

4 试验

4.1 试验材料

试验排种器采用吸种孔为直径 1 mm 圆孔的种盘,为防止种子堵塞型孔,选用经 1.5 mm 漏筛分选后的白菜种子,物理特性如表 1 所示。

表 1 白菜种子物理特性参数

Tab. 1 Physical parameters of seeds

参数	平均粒 径/mm	千粒质量/ g	含水率/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	滑动摩擦 角/(°)
数值	1.5	4.61	4.83	0.867	22.1

排种器安装在 2PST 型排种器性能测试系统上,如图 9 所示,利用高速摄像机记录试验影像^[24]。

高速摄像机选用瑞士 AOS Technologies AG 公司生产的 L - PRI 1000 型高速摄像机,最高分辨率为 1 280 像素×1 024 像素,频率范围为 23 ~2 070 Hz。

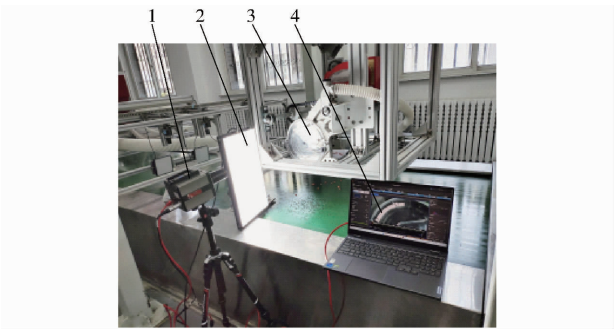


图 9 排种器性能测试系统

Fig. 9 Seed metering performance test device

1. 高速摄像机 2. 摄像机补光灯 3. 气吸式精量排种器 4. 高速摄像影像采集处理软件

4.2 试验方法

由文献[9]可知,转速和风机负压对排种器的作业质量影响较大,同时清种机构的安装位置也对排种质量有影响,故选取第 4 级清种齿顶与型孔的距离 l 、排种器工作转速 n 和气室负压 k 为主要因素进行试验。经预试验发现,在第 4 级清种齿顶与型孔的距离小于 0.8 mm 时,清种机构可对型孔吸附白菜种子产生清种作用,因此选取第 4 级清种齿顶与型孔的距离 l 为 0.4、0.6、0.8 mm 3 个水平。实际作业中,蔬菜播种机的作业速度 v 通常不超过 5 km/h,作业速度 v 与排种器转速 n 关系为

$$n = \frac{60v}{Lh(1 - \varepsilon)} \tag{15}$$

式中 L ——种植株距,cm
 ε ——地轮滑移率

其中排种盘型孔数 $h = 18$,取白菜种植株距 $L = 40$ cm,忽略地轮滑移率,选取排种器转速 n 的试验水平为 4.5、7.0、9.5 r/min,对应的作业速度 v 分别为 1.9、3.0、4.1 km/h,符合实际作业情况。通过前期试验发现,白菜种子在负压为 0.15 kPa 时即可被吸附,当负压大于 2 kPa 时,型孔重吸现象较为严重,故负压选取 0.6、1.2、1.8 kPa 3 个水平。试验确定为三因素三水平二次回归正交旋转组合试验^[25-26],试验共有 17 组,各因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Codes of test factors

编码	因素		
	l/mm	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	k/kPa
-1	0.4	4.5	0.6
0	0.6	7.0	1.2
1	0.8	9.5	1.8

为准确反映排种器清种机构的性能,将漏清率和过清率作为试验指标,漏清率和过清率计算公式为

$$\begin{cases} Y_1 = n_1/n_3 \times 100\% \\ Y_2 = n_2/n_3 \times 100\% \end{cases} \tag{16}$$

式中 Y_1 ——漏清率,% Y_2 ——过清率,%
 n_1 ——种子漏清数 n_2 ——种子过清数
 n_3 ——种子总数

试验时为匹配排种器的旋转速度,设置摄像机拍摄频率为 100 Hz。当种子被种盘吸附离开种室位置开始拍摄,完全转离清种刮刀时结束,将记录的视频保存为 .raw4 格式,并通过高速摄像分析软件 AIS v4.7.0.8 进行观察分析,如图 10 所示。种盘在转过清种机构后开始观察,试验指标判断依据为型孔吸附种子超过 1 粒记为漏清,若型孔未吸附种子记为过清,每组试验检测型孔数量为 300 个。

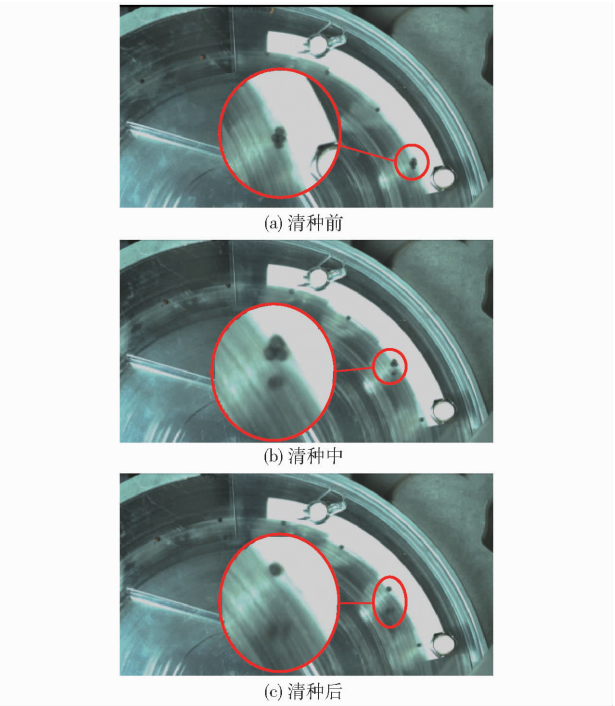


图 10 清种过程高速影像

Fig. 10 High-speed photos of seeds-cleaning process

4.3 试验结果与回归分析

试验结果如表 3 所示。对结果进行回归分析,各因素及各因素交互作用对漏清率 Y_1 、过清率 Y_2 影响如表 4 所示。

由表 4 可知,漏清率、过清率模型显著性 P 值小于 0.05,表明该模型具有统计学意义。第 4 级清种齿顶与型孔的距离和气室负压对漏清率和过清率的影响为显著,3 个因素对过清率和漏清率不存在交互作用。根据表 4 回归模型方差分析得到性能指标的拟合回归方程为

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test plan and result

试验 编号	因素			评价指标	
	<i>l</i> /mm	<i>n</i> /(r·min)	<i>k</i> /kPa	<i>Y</i> ₁ /%	<i>Y</i> ₂ /%
1	0.4	4.5	1.2	1.17	2.26
2	0.8	4.5	1.2	2.33	0.86
3	0.4	9.5	1.2	1.20	2.77
4	0.8	9.5	1.2	2.35	0.78
5	0.4	7.0	0.6	0.83	2.52
6	0.8	7.0	0.6	1.95	1.18
7	0.4	7.0	1.8	1.31	2.03
8	0.8	7.0	1.8	2.42	0.78
9	0.6	4.5	0.6	1.42	1.44
10	0.6	9.5	0.6	1.59	1.99
11	0.6	4.5	1.8	1.88	1.22
12	0.6	9.5	1.8	1.83	1.32
13	0.6	7.0	1.2	1.64	1.44
14	0.6	7.0	1.2	1.58	1.78
15	0.6	7.0	1.2	1.61	1.35
16	0.6	7.0	1.2	1.70	1.60
17	0.6	7.0	1.2	1.67	1.56

表 4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

因素	漏清率 <i>Y</i> ₁				过清率 <i>Y</i> ₂			
	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	2.98	9	127.11	<0.000 1	5.23	9	21.00	0.000 3
<i>l</i>	2.576 45	1	989.58	<0.000 1	4.47	1	161.65	<0.000 1
<i>n</i>	0.003 613	1	1.39	0.277 3	0.15	1	5.27	0.055 3
<i>k</i>	0.340 313	1	130.71	<0.000 1	0.40	1	14.32	0.006 9
<i>ln</i>	2.5×10 ⁻⁵	1	9.6×10 ⁻³	0.924 7	0.09	1	3.15	0.119 3
<i>nk</i>	2.5×10 ⁻⁵	1	9.6×10 ⁻³	0.924 7	2.03×10 ⁻³	1	0.07	0.794 5
<i>lk</i>	0.012 1	1	4.65	0.068	0.05	1	1.83	0.218 1
<i>l</i> ²	0.005 158	1	1.98	0.202 1	0.07	1	2.50	0.157 5
<i>n</i> ²	0.032 237	1	12.38	0.009 7	1.92×10 ⁻⁴	1	6.94×10 ⁻³	0.936 0
<i>k</i> ²	0.009 5	1	3.65	0.097 7	9.20×10 ⁻³	1	0.33	0.582 1
残差	0.018	7			0.19	7		
失拟	9.225×10 ⁻³	3	1.37	0.373 1	0.09	3	1.07	0.456 7
误差	9.0×10 ⁻³	4			8.52×10 ⁻³	4		
总和	3.00	16			5.42	16		

表 5 验证试验结果
Tab.5 Verification test result

<i>l</i> /mm	<i>n</i> / (r·min)	<i>k</i> /kPa	漏清率/%		过清率/%	
			理论值	实际值	理论值	实际值
0.41	4.5	1.22	1.36	1.10	1.51	1.48
0.41	7.0	1.22	1.51	1.25	1.74	1.67
0.41	9.5	1.22	1.67	1.50	1.97	1.88

4.4 对比试验

为考察四级清种机构方式对排种器清种效果改善情况,采用同一排种器安装四级清种机构和锯齿形刮板式清种装置进行对比试验。在相同的试验条

$$Y_1 = -0.068 + 1.848l - 0.141n + 0.930k - 5 \times 10^{-3}ln - 0.021nk - 0.037lk + 0.875l^2 + 0.014n^2 - 0.132k^2 \quad (17)$$
$$Y_2 = 3.036 - 5.745l - 0.336n + 0.353k - 0.295ln + 0.188nk - 0.075lk + 3.206l^2 + 1.080 \times 10^{-3}n^2 - 0.12986k^2 \quad (18)$$

根据拟合回归方程,以漏清率与过清率之和最小为寻优条件,采用 Design-Expert 8.0 软件进行处理^[27],得到清种最佳组合参数为第 4 级清种齿顶与型孔的距离 *l* 为 0.41 mm、气室负压 *k* 为 1.22 kPa,在该组作业参数下工作转速 *n* 为 5.85 r/min,效果最佳。考虑到实际作业时播种速度应根据实际要求调节,因此在作业转速为 4.5、7.0、9.5 r/min 时对优化后的理论值进行试验验证,验证试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,采用最佳参数组合在排种试验台作业时漏清率不大于 1.50%,过清率不大于 1.88%,实际作业结果和理论计算结果基本一致。

件下选用小白菜种子,进行作业转速为 4.5、7.0、9.5 r/min 的试验,试验时清种装置均调为最优工作参数,利用高速摄像机记录试验影像并统计漏清率和过清率,每组试验检测型孔数量 300 个,试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知,在转速为 4.5 r/min 时,采用四级清种机构漏清率降低 3.23 个百分点,过清率降低 0.19 个百分点,排种合格率提高 3.42 个百分点;在转速为 7.0 r/min 时,采用四级清种机构漏清率降低 4 个百分点,过清率降低 0.83 个百分点,排种合格率提高 4.83 个百分点;在转速为 9.5 r/min 时,采用

表6 对比试验结果
Tab.6 Contrast test result

清种方式	工作转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	漏清率/%	过清率/%	合格率/%
四级清种机构	4.5	1.10	1.48	97.42
	7.0	1.25	1.67	97.08
	9.5	1.50	1.88	96.62
锯齿形刮板式清种装置	4.5	4.33	1.67	94.00
	7.0	5.25	2.50	92.25
	9.5	6.50	3.33	90.17

四级清种机构漏清率降低 5 个百分点,过清率降低 1.45 个百分点,排种合格率提高 6.45 个百分点。

采用锯齿形刮板式清种机构清种时,锯齿与种子运动轨迹重合度较差,若清种齿距种子较远则达不到清种效果,导致排种器重播率较高;而清种齿离种子较近,种子受清种齿连续碰撞扰动过大,容易导致过清情况严重,排种器漏播率升高。而 4 级清种对种子清种强度逐级缓慢增强,吸附种子稳定性较高,能在有效提高清种效率同时减少过清情况发生,有效提升了排种器性能。

5 结论

(1) 针对目前蔬菜气吸式排种器中锯齿形刮板式清种装置存在过清、漏清而造成排种性能下降的问题,分析出现重吸现象的过程和原因,对清种过程建立运

动和受力的数学模型,优化设计了四级清种机构,并对清种机构的安装位置、齿形参数等关键参数进行理论分析,确定了四级清种机构关键参数的设计方法。

(2) 选取第 4 级清种齿顶与型孔分度圆距离、排种器工作转速和气室负压为主要因素进行二次回归正交旋转组合试验,对结果进行显著性分析并建立了回归方程,以漏清率和过清率之和最小为寻优条件,得到清种最佳工作参数组合为第 4 级清种齿顶与型孔距离 0.41 mm、负压 1.22 kPa、排种器工作转速 5.85 r/min。在最优工作参数下进行验证试验,结果表明,排种器工作转速为 4.5 ~ 9.5 r/min 时,漏清率不大于 1.50%,过清率不大于 1.88%,与理论计算值基本一致。

(3) 进行了四级清种机构和锯齿形刮板式清种装置的对比试验,结果表明,在转速为 4.5 r/min 时,采用四级清种机构漏清率降低 3.23 个百分点,过清率降低 0.19 个百分点,排种合格率提高 3.42 个百分点;在转速为 7.0 r/min 时,采用四级清种机构漏清率降低 4 个百分点,过清率降低 0.83 个百分点,排种合格率提高 4.83 个百分点;在转速为 9.5 r/min 时,采用四级清种机构漏清率降低 5 个百分点,过清率降低 1.45 个百分点,排种合格率提高 6.45 个百分点。采用四级清种机构降低了漏清率和过清率,能有效提升排种器作业性能。

参 考 文 献

[1] 张宁, 廖庆喜. 我国小粒径种子播种技术与装备的应用与研究进展[J]. 中国农机化学报, 2012, 33(1): 93-96, 103. ZHANG Ning, LIAO Qingxi. Research progress of seeding technology and equipment for small seeds in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(1): 93-96, 103. (in Chinese)

[2] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)

[3] ARZU Y, ADNAN D. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.

[4] KAMGAR S, NOEI-KHODABADI F, SHAFAEI S M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat[J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(3): 169-176.

[5] 鲍余峰, 王方艳, 江景涛, 等. 蔬菜种子精密播种装备研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 247-254. BAO Yufeng, WANG Fangyan, JIANG Jingtao, et al. Research progress and development trend of precision seeding equipment for vegetable seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 247-254. (in Chinese)

[6] 杨晓霞, 张晓文, 邹岚. 我国露地蔬菜播种机的现状及发展趋势[J]. 农业技术与装备, 2021(5): 37-38. YANG Xiaoxia, ZHANG Xiaowen, ZOU Lan. Present situation and development trend of open field vegetable planter in China[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(5): 37-38. (in Chinese)

[7] 杨雅婷, 崔志超, 高庆生, 等. 我国大白菜机械化生产现状及发展建议[J]. 中国蔬菜, 2020(11): 9-16.

[8] 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)

[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] 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)
- [11] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充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] 美国 Precision Planting 公司产品介绍[EB/OL]. [2023–08–27]. <https://www.precisionplanting.com/products/product/vset>.
- [13] 意大利 Maschio 公司产品介绍[EB/OL]. [2023–08–27]. <https://www.maschio.com/home-zh-cmn/>.
- [14] 美国 John Deere 公司产品介绍[EB/OL]. [2023–08–27]. http://www.deere.com/en_US/products/equipment/planting_and_seeding_equipment/planters/planters.page?.
- [15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47–56. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 29–39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29–39. (in Chinese)
- [18] 王方艳, 杨亮, 王红提. 温室大棚电驱气力式胡萝卜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 64–73, 131.
WANG Fangyan, YANG Liang, WANG Hongti. Design and test of electric driving pneumatic carrot planter in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 64–73, 131. (in Chinese)
- [19] 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报, 1979, 10(3): 56–63.
LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56–63. (in Chinese)
- [20] 陈立东. 气吸式排种器性能参数设计及其对排种质量影响的试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2006.
CHEN Lidong. Performance parameter design of air-suction seed metering device and experiment study of effects on sowing quality[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [23] 李晓冉, 张银平, 刁培松, 等. 单盘多行独立气道式蔬菜精量排种器设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(2): 28–36.
LI Xiaoran, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. General situation of vegetable production and research status of precision seeder in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 263–268. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 李晓冉. 小型气力式蔬菜精量播种机关键部件设计与试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
LI Xiaoran. Design and experimental research on key components of small pneumatic vegetable precision seeder[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [26] 张开兴, 李金凤, 宋正河, 等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52–63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52–63. (in Chinese)
- [27] 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.