doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.019

基于凸轮振动板辅助充种的气吸式大蒜精量排种器设计与试验

孟煜柏[1,2]　李　骅[1]　王永健[1]　齐新丹[3]　高筱钧[1]　汤　亮[2,3]

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210095; 2. 江苏省高等学校智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;
3. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘要: 针对大蒜种子粒径大且三轴尺寸差异显著所引发的流动性差和充种效率低等技术难题,设计了一种基于凸轮振动板辅助充种装置的气吸式大蒜精量排种器,该装置通过对充种区种群进行扰动,提高了种群离散性与吸附稳定性;结合充种机理与受力分析,揭示了多物理场作用下蒜种的运动规律及其对充种质量的影响,搭建了六圆弧凸轮轮廓框架与凸轮振动板运动原理框架,确定了排种盘的关键结构参数;搭建试验台架,选取驱动振幅、凸轮转速、气室负压进行单因素试验,分析各因素对播种质量的影响并确定取值范围;以合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标,进行三因素三水平的二次回归正交组合试验,试验结果表明,各因素对排种器合格指数影响的主次顺序为:凸轮转速、气室负压、驱动振幅,且存在交互效应。经多目标优化确定最优参数组合:气室负压为 10.082 kPa、驱动振幅为 14.278 mm、凸轮转速为 225.148 r/min,此时合格指数、重播指数、漏播指数分别为 89.1%、2.4%、8.5%。试验验证结果与优化结果高度一致,满足大蒜播种作业技术要求,并可为大粒径异形种子播种装置的设计与优化提供技术参考。

关键词: 蒜种; 振动; 气吸式排种器; 充种; 凸轮

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)23-0204-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Air-suction Precision Seed-metering Device for Garlic Based on Cam-assisted Vibrating Plate Seed Filling

Meng Yubai[1,2]　Li Hua[1]　Wang Yongjian[1]　Qi Xindan[3]　Gao Xiaojun[1]　Tang Liang[2,3]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*
3. *College of Mechanical and Power Engineering*, *Nanjing Tech University*, *Nanjing* 211816, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenges of poor flowability and low filling efficiency associated with large and irregular garlic seeds, a cam-driven vibrating plate assisted pneumatic precision seeding device was developed. The device introduced controlled disturbances to the seed population in the filling zone, enhancing seed dispersion and suction stability. Through analysis of the filling mechanism and multi-physical force interactions, the motion behavior of seeds and its impact on filling quality were systematically investigated. A six-arc cam profile and a vibration plate motion framework were established, and key structural parameters of the seed plate were determined. Single-factor experiments on driving amplitude, cam speed, and chamber vacuum identified their influence on seeding performance and feasible operational ranges. A three-factor, three-level quadratic regression orthogonal experiment was conducted by using qualified index, multiple-seeding index, and miss index as evaluation metrics. Results indicated that cam speed exerted the greatest effect on the qualified index, followed by chamber vacuum and driving amplitude, with significant factor interactions. Multi-objective optimization determined the optimal combination as follows: chamber vacuum of 10.082 kPa, driving amplitude of 14.278 mm, and cam speed of 225.148 r/min, achieving 89.1% qualified index, 2.4% multiple

收稿日期: 2026-06-30　修回日期: 2026-09-05

基金项目: 江苏省现代农业装备和技术示范推广项目(NJ2021-12、NJ2022-09)和江苏省中晚熟大蒜产业集群子项目

作者简介: 孟煜柏(2001—),男,博士生,主要从事精准种收技术与装备研究,E-mail: mengyubai@stu.njau.edu.cn

通信作者: 李骅(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事精准种收技术与装备研究,E-mail: lihua@njau.edu.cn

index, and 8.5% miss index. The experimental validation results were in close agreement with the optimization outcomes, demonstrating compliance with the technical requirements of garlic seeding operations and thereby providing a reliable reference for the design and optimization of seeding devices for large, irregular seeds.

Key words: garlic seed; vibration; air-suction seed metering device; seed filling; cam

0　引言

大蒜排种器作为播种的核心作业部件,其性能直接影响播种质量和作业效率[1-2]。区别于玉米[3]、小青菜[4]等小粒径种子,大蒜属于大粒径种子,且形状不规则、三轴尺寸差异显著;在机械化播种过程中,普遍面临着漏播率偏高、重播现象频发以及种子损伤严重等问题,从而制约了大蒜播种机械的发展。气力式排种器利用气流作用进行吸附、运移,对种子的损伤更低,适合高速播种,针对大粒径种子的气力播种作业,其核心难点在于如何通过种群扰动以提高种群离散程度、降低移出阻力。

在气力式排种研究方面,针对大粒径种子的吸附效果,Bakhtiari 等[5]对大蒜种子进行了系统的物理特性与气动特性研究;Li 等[6]研究表明型孔吸附力的有效作用存在显著的空间局限性;彭成鹏[7]以芹菜种子为研究对象,提出基于气流扰动的供种方法,并探讨其在气力滚筒式排种器中的吸附性能;赖庆辉等[8]以微型薯为研究对象,通过振动频谱分析优化了气吸式排种器的工作参数。谢东波等[9]研发了扰种齿辅助气吸式排种器,基于杂交蒜形态特征,建立了扰种齿的曲面方程,以改善种群分散效果;苏徽等[10]设计了带有平带辅助充种装置的蚕豆气吸式排种器,通过将种群对被吸附种子的阻力转化为托持力,实现种群的有序运动与稳定吸附;郭鹏等[11]提出了气力辅助充种式花生精量排种器,利用自下而上的竖直气流扰动增强空间离散性。还有部分相关研究[12-14]侧重于通过主动激励降低移出阻力以增强充种效果。尽管上述研究在提升充种性能方面取得了一定进展,但对于大粒径种子的种群扰动机制仍需进一步探索。

基于此,本文设计一种具有凸轮振动板辅助充种装置的振动气吸式大蒜精量排种器。结合蒜种的物料特性,系统分析在充种过程中蒜种的运动规律与受力状态。完成排种盘与凸轮振动板辅助充种装置的参数设计,并通过台架试验及二次回归正交优化方法确定最优工作参数组合,进行试验验证。

1　排种器结构与工作原理

1.1　整体结构

设计的振动气吸式大蒜精量排种器结构如图 1 所示。主要由负压气室、O 型密封圈、排种盘、护种板、异型限位板、种箱、振动板、振动轴、扰种凸轮、种室壳体、主轴、毛刷、密封垫等构成。排种盘通过中心的六棱槽结构与带有六棱块的主轴卡接;振动板旋转中心位于种室壳体上,扰种凸轮利用键与振动轴连接,振动轴与主轴之间通过链轮差速传动;异型限位板与护种板利用钣金折弯工艺制成,安装在种室壳体上;气室壳体通过吸气口与风机相连接,气室壳体的负压区周围设有密封垫,与排种盘紧密连接,此外排种盘与气室壳体间也设有 O 型密封圈,以形成负压气室;毛刷安装在种室壳体上。

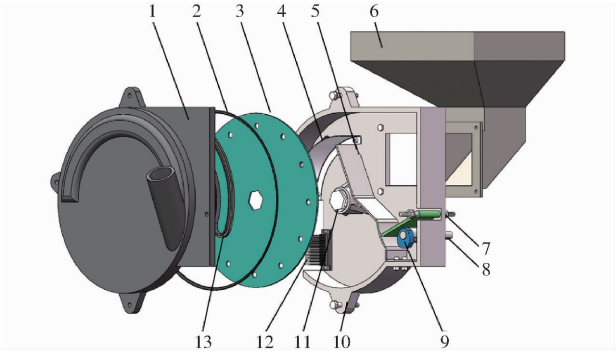

图 1　振动气吸式大蒜排种器结构图

Fig. 1　Vibration air-suction garlic seed discharger structure diagram

1. 负压气室　2. O 型密封圈　3. 排种盘　4. 护种板　5. 异型限位板　6. 种箱　7. 振动板　8. 振动轴　9. 扰种凸轮　10. 种室壳体　11. 主轴　12. 毛刷　13. 密封垫

1.2　工作原理

根据排种器的工作状态,其运动区域可划分为充种区、携种区、投种区与过渡区,如图 2 所示。在排种器工作过程中,种子从种箱落入充种区的凸轮振动板辅助充种装置上。振动轴的传动带动扰种凸轮,使得振动板进行规律性往复运动。振动板的扰动作用促使充种区内的种子种群离散,局部空隙率增大;种群下端受到振动板的冲击力和种群的重力阻碍作用,使得种群上端的离散程度最大,移出阻力最小。排种盘吸孔在种群表层区域运动,其轨迹方向与种子群运动方向一致,吸孔可能吸附 1 ~ 2 颗种子,并随着排种盘运动,由于振动轴的转速要远大于主轴转速,吸孔在通过充种区时将经历振动板多次振动,即吸孔吸附种子后,会受到种群对其进行的多次碰撞,吸附稳定性不足的多余种子将被有效剔除

并返回充种区,实现充种与清种同步进行的动态清种机制。在携种区内,种子在护种板的支撑作用下能够保持稳定运移,并稳定运移至投种区。随着负压消失后,种子在惯性与重力的作用下沿着既定轨迹运动,精准落入导种管中。然而,部分种子仍会留在吸孔中随着排种盘继续运动,经过毛刷的阻挡被扫落至导种管,至此完成整个排种过程。

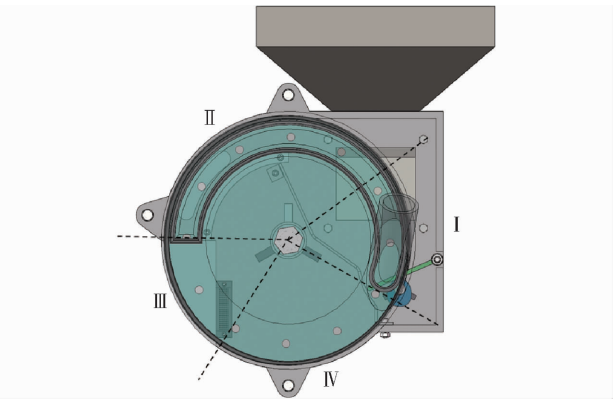

图 2 排种器分区示意图

Fig. 2 Schematic of seed dispenser partition

Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 携种区 Ⅲ. 投种区 Ⅳ. 过渡区

2 充种过程及受力分析

充种过程在很大程度上决定振动气吸式大蒜排种器的播种合格率。结合蒜种的动力学特性,将充种过程分为 4 个阶段:振动离散阶段、竞争充种阶段、吸附运移阶段和自清种阶段。同时,根据种群运动特征可划分为:振动区、吸附区、自清种区,如图 3 所示。

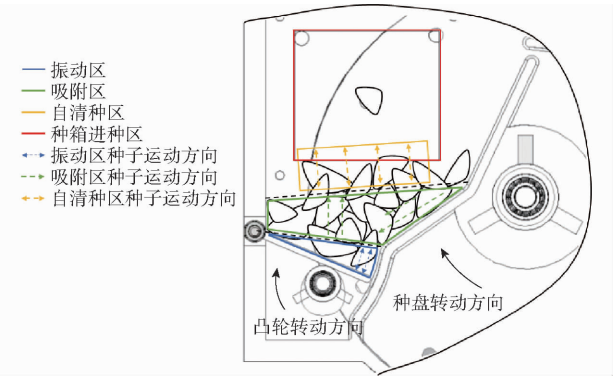

图 3 充种过程分析

Fig. 3 Analysis of seed filling process

2.1 振动离散阶段

在凸轮振动板辅助充种装置的周期性激励作用下,蒜种种群在充种区内呈现受迫振动与气体耦合的复合运动状态。振动作用通过接触碰撞传递能量,使种群由初始堆积状态逐渐离散化,形成类流态化运动[15]。当振动频率接近固有频率[16]时,共振作用使内摩擦减小,群体离散效率得到提高。

2.2 竞争充种阶段

经振动离散阶段作用后,蒜种种群呈现离散状态。在气流场的作用下,吸孔附近的蒜种向吸孔移动;由于多颗蒜种之间存在相互干扰,最终,每个吸孔会稳定吸附 1 ~ 2 颗蒜种。为明确该竞争吸附机制,对蒜种吸附竞争关系进行受力分析,如图 4 所示。

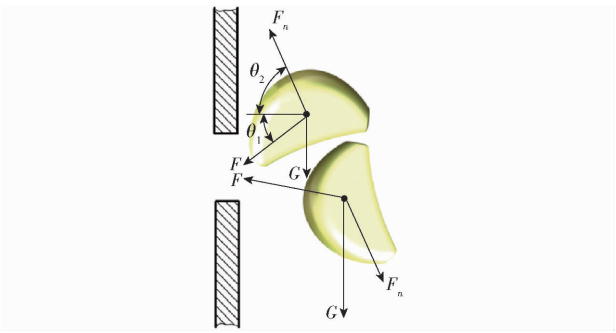

图 4 竞争充种受力示意图

Fig. 4 Force analysis of competitive seed filling

由图 4 可得

$$\begin{cases} F\cos\theta_1 + F_n\cos\theta_2 > 0 \\ F\sin\theta_1 + G > F_n\sin\theta_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中 G——蒜种重力,N

F——气流场对蒜种的作用力,N

F_n——蒜种间竞争阻力,N

θ_1——F 与水平面之间夹角,(°)

θ_2——F_n 与水平面之间夹角,(°)

整理公式(1)可得

$$\begin{cases} F > -\dfrac{F_n\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \\ F > \dfrac{F_n\sin\theta_2 - G}{\sin\theta_1} \end{cases} \tag{2}$$

由公式(2)可知,蒜种间的阻力 F_n 和其与水平面之间的夹角 θ_1 越大,其需要的气流场对蒜种的作用力 F 越大;气流场对蒜种的作用力与水平面之间的夹角 θ_2 越小,所需要的气流场对蒜种的作用力 F 越大。当夹角 θ_2 较小或夹角 θ_1 较大时,其蒜种更容易被吸附到吸孔上。

2.3 吸附运移阶段

吸孔附近的压差促使蒜种被吸附并跟随排种盘运移。假设蒜种在角度 α 上被吸附,如图 5a 所示。依据刚体动力学理论,蒜种被成功吸附时,需要满足条件

$$\frac{F_L d}{2} \geqslant F_h B_1 \tag{3}$$

式中 F_L——单个吸孔吸力,N

d——吸孔直径,mm

F_h——蒜种所受排种盘平面合力,N

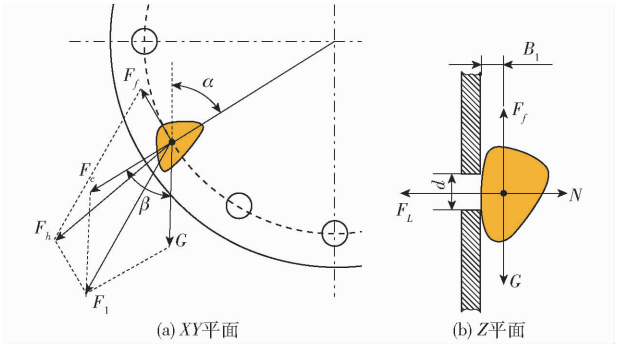

图 5　吸附运移受力示意图

Fig. 5　Force analysis of adsorptive seed transport

B_1——蒜种质心到排种盘平面距离，mm

根据相关物理量之间的关系，并且利用三角函数余弦定理对力进行合成，得到相关公式

$$\begin{cases} H_c = \dfrac{F_L}{S} \\ S = \dfrac{\pi d^2}{4} \\ F_h = \sqrt{F_f^2 + F_1^2 + 2F_1F_f\cos\beta} \\ F_c = \dfrac{Gv_c^2}{gr^2} \\ F_1 = \sqrt{F_c^2 + G^2 + 2GF_c\cos\alpha} \end{cases} \tag{4}$$

式中　S——吸孔面积，m^2

H_c——吸孔处负压，kPa

F_f——蒜种所受排种盘的摩擦力，N

F_c——蒜种所受离心力，N

F_h——蒜种所受合力，N

α——蒜心垂角，(°)

β——力 F_c 与 G 的夹角，(°)

g——重力加速度，m/s^2

F_1——G 与 F_c 的合力，N

v_c——吸孔中心蒜种线速度，m/s

r——吸孔中心作业半径，m

在实际工作过程中，蒜种间、蒜种与排种器之间会存在碰撞以及外界的冲击振动，故需要引入吸孔可靠性系数 k_1 与工作可靠性系数 k_2；蒜种吸附姿态区别显著，依据蒜种与吸孔接触面积的不同，可将吸附姿态分为："竖直""平躺""侧卧"姿态。如图 6 所示。定义吸种影响系数 k_3，其为蒜种与吸孔的接触面积与蒜种完全被吸附时接触面积的比值。联立公式(4)得到蒜种被成功吸附时，吸孔需要满足的负压条件为

$$H_c \geqslant \frac{8GB_1k_1k_2}{\pi d^3k_3}\cdot \sqrt{F_f^2 + F_c^2 + G^2 + 2GF_c\cos\alpha + 2\sqrt{F_c^2 + G^2 + 2GF_c\cos\alpha}\cos\beta} \tag{5}$$

根据理论计算，当 $\cos\alpha = 1$ 且 $\cos\beta = 1$ 时，可将公式(5)简化为

$$H_c \geqslant H_{\min} = \frac{8GB_1k_1k_2}{\pi d^3k_3}\sqrt{1 + \frac{v_c^2}{gr} + \lambda} \tag{6}$$

式中　λ——蒜种的综合摩擦因数

$H_{\min}$——振动气吸式排种器实际工作时，蒜种被成功吸附所需要的最小临界负压

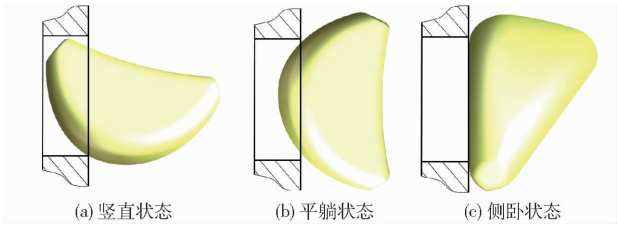

图 6　蒜种吸附姿态示意图

Fig. 6　Schematics of adsorption posture of garlic seeds

根据前期预试验与相关研究，确定蒜种千粒质量为 4 331 g，k_1 为 1.8 ~ 2.0、k_2 为 1.8 ~ 2.0、k_3 为 0.4 ~ 0.6、B_1 为 3 ~ 4 mm、蒜种休止角 ε 为 30.3°，根据公式 $6\tan\varepsilon < \lambda < 10\tan\varepsilon$，确定蒜种的综合摩擦因数为 3.5。

由公式(6)可知，排种器工作所需的气室负压不仅受蒜种的物理机械特性的影响，还与排种盘转速和吸孔直径密切相关。在相同作业目标下，吸孔数量减少或排种盘转速降低时，所需的气室负压较小。排种器需要的气室负压应大于 H_c 的最大值。基于上述理论分析，初步选取气室负压为 7 ~ 11 kPa。

2.4　自清种阶段

经过振动离散与吸附充种阶段，排种器吸孔可能会吸附 1 ~ 2 颗蒜种，但是由于吸孔尺寸仅仅满足稳定吸附 1 颗蒜种，则剩余蒜种吸附较为不稳定。本文设计的振动气吸式排种器，其振动板振动频率远大于排种盘旋转频率，则当吸孔吸附蒜种经过充种区时，重吸状态下的蒜种会受到来自振动区蒜种的撞击，吸附不稳定的蒜种会被清落，以实现自清种过程。定义蒜种 A、蒜种 B 为被撞击者，蒜种 C 为撞击者，自清种阶段示意图如图 7 所示。

在自清种过程中，吸附不稳定的蒜种 B 会被蒜种 C 撞击掉落，即蒜种 B 所受合力小于其所受吸孔吸附力，需要满足关系为

$$F_h < H_c = \frac{8GB_1k_1k_2}{\pi d^3k_3}\left(1 + \lambda + \frac{v_c}{gr}\right) \tag{7}$$

其中，蒜种 B 受力较为复杂，对其进行受力分析，可得蒜种 B 所受排种盘平面合力为

$$F_h = F_{CB} + F_{AB} + f_{AB} + G \tag{8}$$

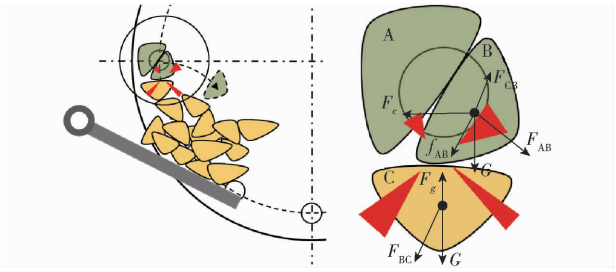

图 7 自清种受力示意图

Fig. 7 Force analysis diagram of self-cleaning seed

式中 F_{AB}——蒜种 B 受到蒜种 A 的挤压力,N

F_{CB}——蒜种 B 受到蒜种 C 的冲击力,N

f_{AB}——蒜种 B 受到蒜种 A 的摩擦力,N

其中,蒜种 B 受到蒜种 C 的冲击力来自蒜种 C 所受的合力,蒜种 C 受力为

$$F_h = F_g + G + F_{BC} \tag{9}$$

式中 F_g——蒜种 C 受振动产生的惯性力,N

F_{BC}——蒜种 C 受蒜种 B 的相对冲击力,N

3 关键零部件设计

在上述充种过程与受力分析中,排种盘通过吸孔数量、直径及布置参数控制种子吸附与输送精度,保障株距均匀;凸轮振动板通过振动改善种子充种状态,提高吸附稳定性,减少漏播和重播。因此,本节将重点研究凸轮振动板辅助充种装置的结构设计;同时结合蒜种的形态特性,设计相应的排种盘,以解决蒜种充种困难及堵塞问题。

3.1 排种盘

排种盘是吸附、携带蒜种并保证排种器实现精量排种的关键部件,其主要设计参数包括:吸孔直径、吸孔数量、吸孔周向布置半径和排种盘直径。

3.1.1 吸孔直径

吸孔直径控制着吸孔作用面的压力面积与压力强度,尤其对于大蒜等中大粒径作物的吸附起着关键作用。吸孔直径受研究对象的三轴尺寸影响[17],具体由蒜种的平均等效直径与平均球形度决定,蒜种的平均等效直径与平均球形度计算公式为

$$D_s = \sqrt[3]{LWT} \tag{10}$$

$$\Phi = \frac{D_s}{L} \times 100\% \tag{11}$$

式中 D_s——蒜种平均等效直径,mm

Φ——蒜种平均球形度,%

L——蒜种长度,mm

W——蒜种宽度,mm

D——蒜种厚度,mm

根据文献[17],吸孔直径 d 与蒜种的宽度间关系式为

$$d = (0.64 \sim 0.66)W \tag{12}$$

根据前期研究[18],蒜种平均长度为 32.36 mm,平均宽度为 17.02 mm,平均厚度为 18.32 mm;代入公式(10)、(11),可得蒜种的平均等效直径为 21.61 mm、蒜种的平均球形度为 67%,呈现显著的非等轴性形态特征。根据公式(12),计算得知吸孔直径范围为 10 ~ 11 mm,具体选择孔径为 10 mm 进行后续相关设计。

3.1.2 吸孔周向布置半径、排种盘直径

排种盘直径与吸孔周向布置半径直接影响吸孔数量与排种器整体结构布置[19]。根据排种器布置的几何关系可得

$$\begin{cases} l_{\mathrm{I}} = vt_{\mathrm{I}} \\ v = \dfrac{n\pi r}{30} \\ l_{\mathrm{I}} = \alpha_1 r \end{cases} \tag{13}$$

式中 l_{I}——吸孔充种区弧长,m

v——吸孔线速度,m/s

t_{I}——充种时间,s

n——排种盘转速,r/min

α_1——充种角,rad

由公式(13)可得

$$t_1 = \frac{30\alpha}{\pi n} \tag{14}$$

根据公式(14)可知,充种时间主要受充种角和排种盘转速影响,前者与其成正比,后者与其成反比,并且排种盘直径变化对其无影响。结合排种器整体结构及大蒜的农艺要求,确定排种盘直径为 300 mm,吸孔周向布置半径为 128 mm。

3.1.3 吸孔数量和排种盘转速

在相同的工作目标要求下,排种盘吸孔数量直接影响排种盘转速。根据大蒜播种农艺要求,蒜种株距为 9 ~ 12 cm,可得吸孔数量 k 的计算式为

$$\begin{cases} k = \dfrac{v_a t}{l_z} \\ t = \dfrac{1}{n} \end{cases} \tag{15}$$

式中 l_z——株距,m

v_a——播种机作业速度,m/s

t——排种盘转一圈的时间,s

整理公式(15)可得

$$k = \frac{v_a}{nl_z} \tag{16}$$

由公式(16)可知,排种盘吸孔数量与作业速度呈正相关,与排种盘转速呈负相关。在相同作业要求下,为了降低排种盘转速,应适当增加吸孔数量[20];

确定排种盘转速为 10 r/min，吸孔数量为 12 个。

3.2　凸轮振动板辅助充种装置

3.2.1　平面凸轮轮廓解析

鉴于前期学者对于六圆弧凸轮的研究成果[21]，本文在其基础上对凸轮结构进行进一步约束与优化，如图 8 所示。该类型凸轮的主要参数包括推程角 ϕ_a、远停留角 ϕ_d、回程角 ϕ_r、近停留角 ϕ_s、作用角 $\phi(\phi=\phi_a+\phi_d+\phi_r)$ 和最大推程 h_0。其特征轨迹由 3 部分组成：4 段过渡圆弧，分别以 C_1、C_2、C_3、C_4 为圆心，R_1、R_2、R_3、R_4 为半径的圆弧 AG、$G'A'$、$F'G'$、GF；底弧 AA'，以 O 为圆心，R_0 为半径；顶弧 FF'，以 O 为圆心，R_5 为半径。在建立模型时，进一步约束条件包括：C_1 位于线段 OA 的延长线上；C_2 位于线段 OA' 的延长线上。为了满足凸轮轮廓的连续性，必须满足：C_3 位于线段 OF' 与线段 C_2G' 上；C_4 位于线段 OF 与线段 C_1G 上。确定六圆弧凸轮各阶段运动角为 $\phi_a=\frac{2}{3}\pi$、$\phi_d=\frac{1}{6}\pi$、$\phi_r=\frac{2}{3}\pi$、$\phi_s=\frac{1}{4}\pi$。此外，基于前期对于种室壳体的结构设计，确定基圆半径为 13 mm，顶弧半径最大为 28 mm，最终凸轮轮廓的形成由顶弧半径 R_5 控制，从而满足不同工况下的设计需求。

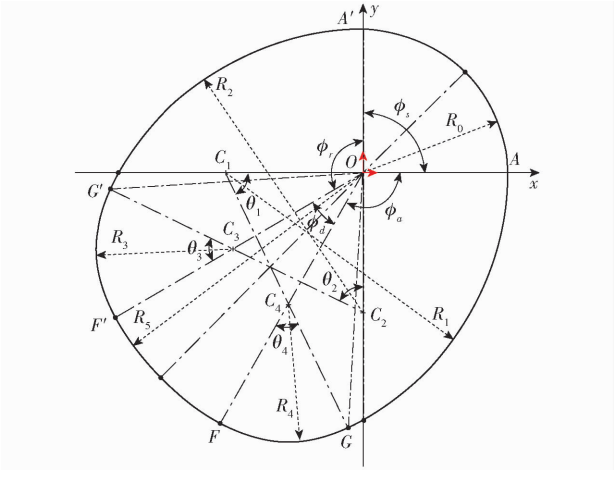

图 8　平面凸轮轮廓解析设计

Fig. 8　Analytical design of planar cam profile

3.2.2　平底摆动从动件平面凸轮解析

本文设计的凸轮振动板辅助充种装置属于平底摆动从动件平面凸轮机构，如图 9 所示。

设凸轮转角为 φ 时，振动板与凸轮轮廓相切于点 K，对应的初始位置振动板（虚线）与凸轮基圆相切于点 C。两振动板之间夹角即从动件的对应角位移 ψ。ψ_b 为振动板的初始位置角，计算式为

$$\psi_b=\arctan\frac{R_b}{\sqrt{L_{OA}^2-R_b^2}} \tag{17}$$

式中　L_{OA}——OA 长度

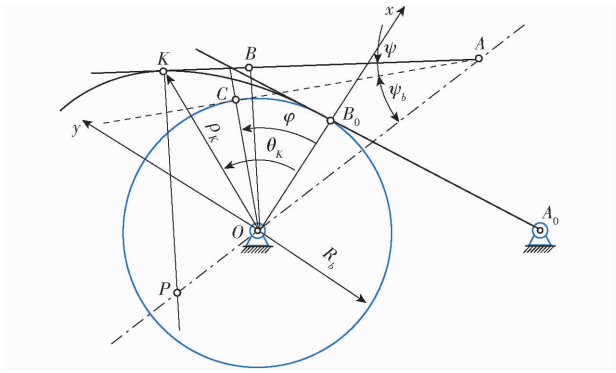

图 9　平底摆动从动件平面凸轮解析设计

Fig. 9　Analytical design of planar cam with flat-bottom oscillating follower

R_b——基圆半径

由点 O 作振动板垂直线，相交于点 B，则凸轮轮廓曲线上点 K 的极坐标矢量可由矢量三角形 OBK 确定，即

$$\rho_K e^{j\theta_K}=L_{OB}e^{j(\varphi-\psi)}-L_{BK}e^{j\left(\varphi-\psi+\frac{\pi}{2}\right)} \tag{18}$$

公式（18）中矢量的模为

$$\begin{cases}L_{OB}=L_{OA}\sin(\psi_b+\psi)\\ L_{BK}=\dfrac{\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}\varphi}L_{OA}\cos(\psi_b+\psi)}{1-\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}\varphi}}\end{cases} \tag{19}$$

整理公式（19），可得凸轮轮廓坐标式为

$$\begin{cases}\theta_K=\arctan\dfrac{L_{OB}\sin(\varphi-\psi)+L_{BK}\sin\left(\varphi-\psi+\dfrac{\pi}{2}\right)}{L_{OB}\cos(\varphi-\psi)+L_{BK}\cos\left(\varphi-\psi+\dfrac{\pi}{2}\right)}\\ (\theta_K\in[0,2\pi])\\ \rho_K=L_{OB}\cos(\varphi-\psi-\theta_K)+L_{BK}\cos\left(\varphi-\psi+\dfrac{\pi}{2}-\theta_K\right)\end{cases} \tag{20}$$

式中　θ_K——接触点 K 极角，rad

ρ_K——凸轮轮廓接触点 K 的瞬时作用半径，m

为了保证凸轮振动板辅助充种装置的有效运行，需要对平底线即振动板的工作长度 L_{AK} 进行设定，即

$$L_{AK}=L_{AP}\cos(\psi_b+\psi) \tag{21}$$

由瞬心的定义得

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}L_{OP}=\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}L_{AP} \tag{22}$$

由于 $L_{OP}=L_{AP}-L_{OA}$，故得

$$L_{AP}=\frac{L_{OA}}{1-\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}\varphi}} \tag{23}$$

整理公式（21）~（23），可得

$$L_{AK}=\frac{L_{OA}}{1-\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}\varphi}}\cos(\psi_b+\psi) \tag{24}$$

为满足在振动气吸式排种器工作过程中，所设计六圆弧凸轮的轮廓均起作用，需要对于振动板长度 L_{AK} 值进行确定；根据种室壳体的具体结构参数，振动板旋转中心到凸轮旋转中心的距离（即 L_{OA} 值）为 60 mm，并且结合 L_{OC} 的值，确定振动板初始位置角，由三角函数可得

$$\psi_b=\arcsin\frac{L_{OC}}{L_{OA}} \tag{25}$$

结合具体结构参数，计算得振动板初始位置角为 27.8°，振动板长度为 90 mm，满足结构布置要求。

3.2.3 种箱壳体设计

为了配合凸轮振动板辅助充种装置，防止大蒜鳞芽卡在缝隙中，造成蒜种的挤压损坏和振动板失效，需要对种箱壳体中异型限位板下端的圆弧部分进行参数确定，其设计图如图 10 所示；需要满足空隙小于蒜种三轴尺寸中的较小值且防止运动干涉，即

$$L_{OA}+R_5\leqslant R_L<L_{OA}+R_5+\min(L,W,D) \tag{26}$$

式中 R_L——限位板圆弧段曲率半径，mm

根据设计的凸轮远端曲率半径、振动板长度及空间布置，确定限位板圆弧段曲率半径 R_L 为 92 mm。

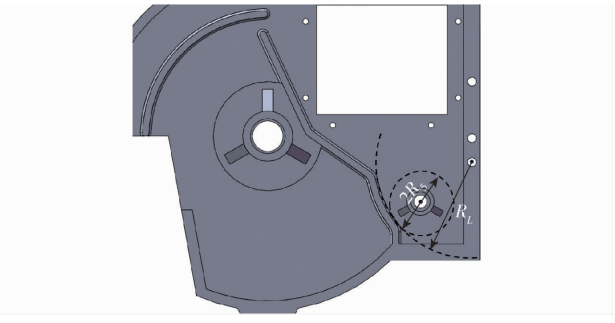

图 10 种箱壳体结构示意图

Fig. 10 Schematic of seed chamber design

4 台架试验

4.1 试验材料与设备

为了进一步验证凸轮振动板辅助充种装置对振动气吸式大蒜精量排种器充种性能的提升效果，搭建排种器性能试验台架，如图 11 所示。试验对象采用邳州白蒜种子。选取台州亚士霸电机有限公司的 HG－1500S 型高压漩涡风机，并配合 LK350－2.2G3 型变频器，共同构成气力输送系统的动力单元。该风机-变频器组合通过调节电机转速实现气流参数的精确控制，为试验装置提供稳定的气源条件。其中，HG－1500S 型风机采用旋涡式结构设计，具有高压输出特性；配套的 LK350 系列变频器可实现 2.2 kW 电机的无级调速，满足不同工况下的气力需求；选择普菲德型号为 7IK40CRGU－CF、功率为 400 W 的电机作为排种盘的驱动电机，选定伟普 M425－402 型电机作为扰种凸轮的驱动电机。依据 GB/T 6973—2005《单颗（精密）播种机试验方法》，在排种器稳定运行条件下，连续统计 251 粒种子，每组参数重复 5 次并取平均值。

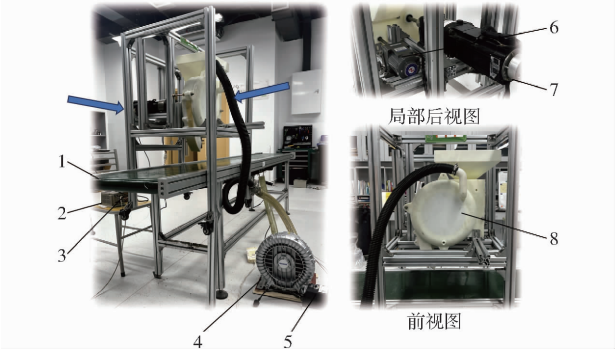

图 11 排种器试验台架

Fig. 11 Seed discharger test bench

1. 胶质输送机 2. 主轴电机调频器 3. 振动轴电机调频器 4. 风机 5. 风机调频器 6. 振动轴电机 7. 主轴电机 8. 振动气吸式排种器

4.2 单因素试验结果与分析

4.2.1 气室负压

根据前期理论分析，确定气室负压分别为 7、8、9、10、11 kPa。设置驱动振幅为 12 mm、凸轮转速为 216 r/min。试验结果如图 12 所示。

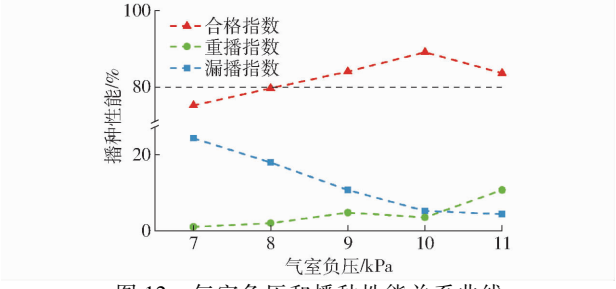

图 12 气室负压和播种性能关系曲线

Fig. 12 Curves of air chamber negative pressure versus seeding performance

播种合格指数随着气室负压的增加而先升后逐渐降低，而重播指数不断上升，漏播指数则逐渐下降。当气室负压偏低时，排种盘上吸孔转至工作区时吸附力不足，导致蒜种不能在排种盘吸孔上长期稳定地吸附，而蒜种被吸附至携种区时，吸孔上被吸附的蒜种会提前脱离排种盘，以致于落回充种区，从而使得漏播指数明显提高。然而，当气室负压过高时，排种盘上吸孔的吸附力增强，多颗蒜种可能同时被吸附在一个吸孔上，使得重播指数上升。综合分析表明，当气室负压维持在 9～11 kPa 时，播种合格

指数超过 80%。

4.2.2　驱动振幅

凸轮驱动振幅按照预试验分别设置为 3、6、9、12、15 mm，即凸轮顶弧半径分别为 16、19、22、25、28 mm。气室负压为 9 kPa，凸轮转速为 216 r/min。试验结果如图 13 所示。

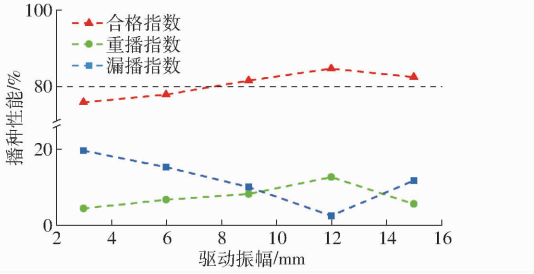

图 13　驱动振幅与排种性能关系曲线

Fig. 13　Curves of driving amplitude versus seeding performance

播种合格指数随驱动振幅增加呈先升后降趋势，而重播指数也呈先升后降，漏播指数则呈先降后升的变化规律。当驱动振幅较低时，振动板的角位移较小，无法对蒜种种群进行有效扰动，随着驱动振幅的增加，其运动破坏了蒜种种群原始的堆积状态；但当驱动振幅超过 12 mm 时，过大的振幅使得蒜种种群在下落过程中产生较大的运移和惯性效应，同时增加气室负压克服种群阻力的难度。综合分析表明，当驱动振幅维持在 9 ~ 15 mm 时，播种合格指数超过 80%。

4.2.3　凸轮转速

凸轮转速根据预试验确定为 162、189、216、243、270 r/min。气室负压为 9 kPa、驱动振幅为 12 mm。试验结果如图 14 所示。

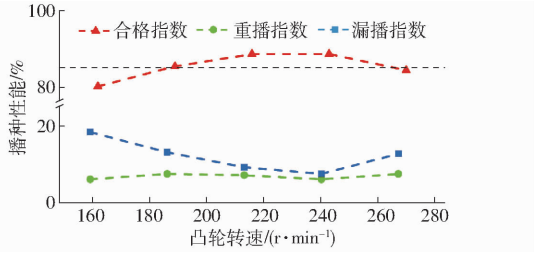

图 14　凸轮转速与播种性能关系曲线

Fig. 14　Curves of cam speed versus seeding performance

排种器播种合格指数随扰种凸轮转速增加呈先升后降趋势，而重播指数基本保持稳定，漏播指数呈先降后升的规律。当扰种凸轮转速过小时，振动板的振动频率过低，且仅靠气室负压难以吸附处于堆积状态的蒜种，导致漏播指数上升，合格指数下降；随着扰种凸轮转速的增加，振动板振动频率增加，位于种室内振动板上的蒜种的堆积时间减少，蒜种的离散程度增加，扰种凸轮的高速转动对振动板有一定的冲击作用，位于振动板上大蒜种群上部的蒜种被振飞，使得被吸附的蒜种被撞击下落，以致于排种器的漏播指数升高，合格指数降低。综合分析表明，扰种凸轮的转速应该维持在 189 ~ 243 r/min 范围内，此时播种合格指数超过 85%。

4.3　二次回归正交组合试验

4.3.1　试验设计

为提升排种器作业性能，采用 Box - Behnken 试验，选取气室负压（x_1）、驱动振幅（x_2）、凸轮转速（x_3）作为试验因素，以合格指数（Y_1）、重播指数（Y_2）和漏播指数（Y_3）作为评价指标。每组试验重复进行 3 次取平均值，以控制试验误差。试验因素和编码见表 1，试验方案和结果见表 2。X_1、X_2、X_3 为试验因素编码值。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Experimental factors and codes

编码	因素		
	气室负压 x_1/kPa	驱动振幅 x_2/mm	凸轮转速 x_3/(r·min^{-1})
-1	9	9	189
0	10	12	216
1	11	15	243

4.3.2　回归方程建立及显著性检验

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行了多元回归建模与显著性分析，结果如表 3 所示。结果表明，各回归模型拟合效果良好，能够较好地反映各因素与评价指标之间的关系。在剔除不显著因素

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Text design and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	78.83	5.15	16.02
2	1	-1	0	87.91	3.65	8.44
3	-1	1	0	80.81	4.16	15.03
4	1	1	0	74.26	3.71	22.03
5	-1	0	-1	76.16	11.98	11.86
6	1	0	-1	89.21	3.31	7.48
7	-1	0	1	78.74	8.19	13.07
8	1	0	1	82.01	8.07	10.02
9	0	-1	-1	79.37	3.61	17.02
10	0	1	-1	80.96	2.08	16.96
11	0	-1	1	85.96	2.16	11.88
12	0	1	1	84.17	4.77	11.06
13	0	0	0	88.14	3.45	8.41
14	0	0	0	83.24	5.88	10.88
15	0	0	0	82.75	5.83	11.41
16	0	0	0	87.51	3.02	9.47
17	0	0	0	87.17	4.45	8.38

表 3 合格指数、重播指数与漏播指数方差分析

Tab. 3 Variance analysis of qualified index, reseeding index and miss-seeding index

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	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	315.43	9	93.92	<0.000 1 **	98.65	9	23.49	0.000 2 **	243.27	9	49.41	<0.000 1 **
X_1	14.42	1	38.64	0.000 4 **	37.02	1	79.35	<0.000 1 **	97.02	1	177.35	<0.000 1 **
X_2	6.52	1	17.46	0.004 1 **	17.709	1	37.94	0.000 5 **	2.62	1	4.79	0.064 7
X_3	62.05	1	166.28	<0.000 1 **	17.02	1	36.49	0.000 5 **	14.10	1	25.77	0.001 4 **
X_1X_2	0.202 5	1	0.542 7	0.485 3	0.193 6	1	0.42	0.540 0	0.001 6	1	0.002 9	0.958 3
X_1X_3	0.547 6	1	1.47	0.265 1	9.15	1	19.61	0.003 0 **	5.20	1	9.50	0.017 8 *
X_2X_3	0.019 6	1	0.052 5	0.825 3	0.504 1	1	1.08	0.333 2	0.324 9	1	0.593 9	0.466 1
X_1^2	127.67	1	342.12	<0.000 1 **	10.65	1	22.84	0.002 0 **	64.93	1	118.69	<0.000 1 **
X_2^2	6.28	1	16.84	0.004 6 **	0.069 3	1	0.15	0.711 5	5.16	1	9.43	0.018 0 *
X_3^2	79.55	1	213.16	<0.000 1 **	5.24	1	11.23	0.012 2 *	43.58	1	79.65	<0.000 1 **
残差	2.61	7			3.27	7			3.83	7		
失拟	0.192 1	3	0.105 8	0.952 3	2.10	3	2.40	0.208 0	1.84	3	1.24	0.406 5
误差	2.42	4			1.17	4			1.99	4		
总和	318.05	16			101.92	16			247.10	16		

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

后，得到回归模型

$$Y_1 = 87.99 + 1.34X_1 + 0.902\,5X_2 + 2.79X_3 - 5.51X_1^2 - 1.22X_2^2 - 4.35X_3^2 \quad (27)$$

$$Y_2 = 3.58 + 2.15X_1 - 1.49X_2 - 1.46X_3 - 1.51X_1X_3 + 1.59X_1^2 + 1.12X_3^2 \quad (28)$$

$$Y_3 = 8.44 - 3.48X_1 + 0.572\,5X_2 - 1.33X_3 + 1.14X_1X_3 + 3.93X_1^2 + 1.11X_2^2 + 3.22X_3^2 \quad (29)$$

其中，合格指数模型结果显示，凸轮转速、气室负压和驱动振幅均对其具有显著影响，且影响程度由大到小依次为凸轮转速、气室负压、驱动振幅，而各因素间的交互作用不显著。重播指数模型表明，气室负压与凸轮转速是主要影响因素，驱动振幅及其交互项作用不显著，其影响程度由大到小排序为气室负压、凸轮转速、驱动振幅。漏播指数模型结果显示，气室负压与凸轮转速对其作用显著，驱动振幅影响较小，交互作用亦不显著，影响程度由大到小同样为气室负压、凸轮转速、驱动振幅。综上，气室负压在控制重播与漏播方面具有决定性作用，而凸轮转速则对提升合格指数影响最为突出。该结果为进一步优化排种器参数配置、兼顾作业质量与效率提供可靠的理论依据。

4.3.3 显著试验因素响应面分析

如图 15a 所示，当驱动振幅为 12 mm 时，重播指数随气室负压的增加呈现逐渐升高的趋势，表明较高的气室负压增强种子在吸孔处的附着能力，从而提高种子被吸附的可能性。在相同气室负压条件下，凸轮转速对重播指数的影响表现为先减小后增加的变化规律，整体呈现典型的二次曲线特征。这说明在低速阶段，由于扰动频率不足，部分附着不牢固的种子未能有效剔除，从而导致重播现象偏高；而在高速阶段，过快的扰动使得种子堆积扰动过度，增加了二次吸附的可能性，从而使重播指数再次升高。

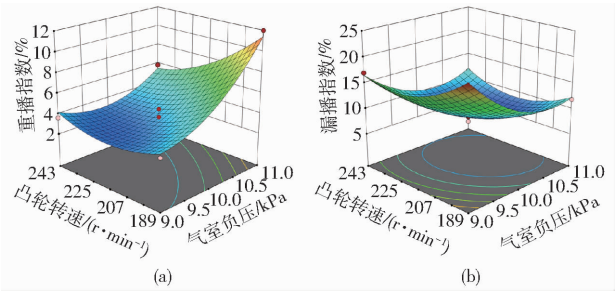

图 15 显著交互项的性能指标响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of significant interaction term

如图 15b 所示，在驱动振幅为 12 mm 时，漏播指数随气室负压的变化表现出显著的非线性规律，即在低负压区逐渐下降，而在高负压区则重新升高，整体呈现出明显的 U 型变化特征。这表明适度的负压有助于提高种子吸附稳定性，从而减少漏播，但过高的负压会导致部分吸孔因同时吸附多个种子而出现脱落，进而增加漏播指数。此外，在相同气室负压下，凸轮转速与漏播指数之间表现出明显的凹型变化关系，即随着转速增加，漏播指数先降低后趋于升高。

综上，在相同驱动振幅下，气室负压主要通过线性或非线性规律影响重播与漏播的整体水平，而凸轮转速则均表现出二次曲线型的调控作用，但对两指标的影响方向存在差异。

4.3.4 参数优化与试验验证

为了确定排种器的最佳工作参数，基于最大合格指数、最小重播指数和最小漏播指数为优化目标，

采用 Design-Expert 软件进行多目标优化分析。其目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 9\ \text{kPa} \leqslant x_1 \leqslant 11\ \text{kPa} \\ 9\ \text{min} \leqslant x_2 \leqslant 15\ \text{min} \\ 189\ \text{r/min} \leqslant x_3 \leqslant 243\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \tag{30}$$

当气室负压为 10.082 kPa、驱动振幅为 14.278 mm、凸轮转速为 225.148 r/min 时，合格指数最高，为 88.650%，重播指数最低，为 2.747%，漏播指数最低，为 8.598%。

构建相同试验因素的台架试验，对上述优化后的参数进行验证，试验结果表明：合格指数、重播指数、漏播指数分别为 89.1%、2.4%、8.5%，均符合排种器的作业要求。

5　结论

（1）针对大蒜三轴尺寸大、形状变异系数高导致的充种困难问题，研制了一种基于凸轮振动板辅助充种装置的振动气吸式大蒜精量排种器，阐明了大蒜充种过程中的运动机理和受力特性。

（2）构建了一种六圆弧凸轮轮廓理论模型和凸轮振动板运动学模型，明确了振动板长度为 90 mm，振动板初始角为 27.8°，旋转中心距为 60 mm；根据大蒜播种农艺要求以及物理机械特性，确定排种盘转速为 10 r/min、吸孔直径为 10 mm、吸孔数量为 12 个、吸孔周向布置半径为 128 mm、排种盘直径 300 mm。

（3）搭建试验台架，通过单因素和 Box－Behnken 试验，分析了气室负压、驱动振幅、凸轮转速对播种性能的作用规律；分析各试验因素对评价指标的交互影响，并通过多目标优化确定最佳工作参数：气室负压为 10.082 kPa、驱动振幅为 14.278 mm、凸轮转速为 225.148 r/min。验证试验表明，优化后的播种性能指标为：合格指数 89.1%、重播指数 2.4%、漏播指数 8.5%。该结果符合大蒜播种的农艺技术规范。

参　考　文　献

[1] 胡梦杰，夏俊芳，郑侃，等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：73－85.
Hu Mengjie, Xia Junfang, Zheng Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73－85. (in Chinese)

[2] 吕金庆，朱明芳，竹筱歆，等. 气吸式马铃薯播种机一体式风机优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(3)：80－90.
Lü Jinqing, Zhu Mingfang, Zhu Xiaoxin, et al. Optimal design and experiment of integrated fan of air suction potato planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 80－90. (in Chinese)

[3] Li C, Cui T, Zhang D, et al. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139083.

[4] 王浩屹，孙新平，陈曦，等. 气吸式小青菜精密排种器设计与试验[J]. 中国农机化学报，2022，43(6)：51－57.
Wang Haoyi, Sun Xinping, Chen Xi, et al. Design and test of air suction precision seed metering device for *Brassica chinensis* [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 51－57. (in Chinese)

[5] Bakhtiari M E, Ahmad D, Ackermann K. Determining physical and aerodynamic properties of garlic to design and develop of a pneumatic garlic clove metering system[J]. Agric Englnt: CIGR Journal, 2015, 17(1): 59－66.

[6] Li J, Lai Q, Zhang H, et al. Suction force on high-sphericity seeds in an air-suction seed-metering device[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 125－140.

[7] 彭成鹏. 异形种子在气力滚筒式排种器中的吸附特性研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2018.
Peng Chengpeng. Research on the suction characteristics of irregular-shaped seed in pneumatic cylinder-type seed-metering device[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018. (in Chinese)

[8] 赖庆辉，马文鹏，刘素，等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(5)：44－53.
Lai Qinghui, Ma Wenpeng, Liu Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44－53. (in Chinese)

[9] 谢东波，张春岭，吴晓庆，等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(2)：47－57.
Xie Dongbo, Zhang Chunling, Wu Xiaoqing, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 47－57. (in Chinese)

[10] 苏徽，赵庆辉，赖庆辉，等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(7)：144－156.
Su Wei, Zhao Qinghui, Lai Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 144－156. (in Chinese)

[11] 郭鹏，郑效帅，王东伟，等. 气力辅助充种式花生精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(3)：64－74.
Guo Peng, Zheng Xiaoshuai, Wang Dongwei, et al. Design and experiment of precision seed metering device with pneumatic assisted seed-filling for peanut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 64－74. (in Chinese)

[12] 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 1)：341－347.

Yang Li, Shi Song, Cui Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with a mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 341 – 347. (in Chinese)
[13] 颜丙新,张东兴,杨丽,等. 重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊 1):117 – 124.
Yan Bingxin, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Performance analysis of gravity assist filling precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 117 – 124. (in Chinese)
[14] Wang Y, Zhang W, Luo X, et al. Effect of vibration conditions on the seed suction performance of an air-suction precision seeder for small seeds[J]. Agriculture, 2024, 14(4): 559.
[15] 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79 – 83,100.
Chen Jin, Zhou Han, Zhao Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79 – 83, 100. (in Chinese)
[16] 邵伟. 穴盘式大葱育苗机精量播种装置的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2020.
Shao Wei. Design and experiment of precision seeding device for plug-type onion seeding planter[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[17] Feng D, Li H, Qi X, et al. Design and laboratory experiments of a pneumatic disc-type garlic precision seed-metering device [J]. Journal of the ASABE, 2024, 67(2): 451 – 460.
[18] 李骅,孟煜柏,齐新丹,等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报,2025,56(7):150 – 157.
Li Hua, Meng Yubai, Qi Xindan, et al. Discrete element modelling method and parameter calibration of garlic species based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 150 – 157. (in Chinese)
[19] 刘海,廖宜涛,王磊,等. 小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 54 – 65.
Liu Hai, Liao Yitao, Wang Lei, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 54 – 65. (in Chinese)
[20] 廖宜涛,张百祥,郑娟,等. 气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):86 – 99.
Liao Yitao, Zhang Baixiang, Zheng Juan, et al. Design and experiment of pneumatic needle planetary gear narrow-row close planting precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 86 – 99. (in Chinese)
[21] Hsieh J. Design and analysis of cams with three circular-arc profiles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(6): 955 – 965.

(上接第 121 页)

[19] 盛文溢, 吴凡, 胡轩, 等. 基于主动光源的手持式作物 NDVI 传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 301 – 310.
Sheng Wenyi, Wu Fan, Hu Xuan, et al. Design and experiment of handheld crop NDVI sensor based on active light source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 301 – 310. (in Chinese)
[20] Scofield J H. Frequency-domain description of a lock-in amplifier[J]. American Journal of Physics, 1994, 62(2): 129 – 133.
[21] Restelli A, Abbiati R, Geraci A. Digital field programmable gate array-based lock-in amplifier for high-performance photon counting applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(9): 093112.
[22] Galaviz-Aguilar J A, Vargas-Rosales C, Falcone F, et al. Field-programmable gate array (FPGA)-based lock-in amplifier system with signal enhancement: a comprehensive review on the design for advanced measurement applications[J]. Sensors, 2025, 25(2): 584.
[23] Harvie A J, de Mello J C. OLIA: an open-source digital lock-in amplifier[J]. Frontiers in Sensors, 2023, 4: 1102176.
[24] Kipp S, Mistele B, Schmidhalter U. The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 24 – 33.
[25] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127 – 150.
[26] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS – MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289 – 298.
[27] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691 – 2697.
[28] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1 – 2): 195 – 213.
[29] Hunt E R J, Cavigelli M, Daughtry C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359 – 378.
[30] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76 – 87.
[31] Gao B C. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257 – 266.