

气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验

廖宜涛^{1,2} 张百祥¹ 郑娟¹ 廖庆喜^{1,2} 刘嘉诚¹ 李成良¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对菠菜等小粒径蔬菜种子采用窄行密植、播种均匀性要求高, 缺乏适用播种技术装备的问题, 设计了一种适用于菠菜等小粒径蔬菜种子密植精密播种的气力针式行星轮系多行并联低位投种精密排种器。阐述了排种器工作原理, 构建吸种和投种环节种子力学模型, 确定排种器主要结构参数; 利用 ADAMS 软件仿真分析行星轮系排种机构吸种针的静轨迹和动轨迹, 明确低位零速投种条件; 开展排种器性能试验。排种试验结果表明, 影响合格指数的主次顺序为排种转速、吸种负压和卸种正压, 最佳参数组合为排种转速 19.56 r/min、吸种负压 2.05 kPa、卸种正压 1.00 kPa。经台架试验验证, 其性能指标为合格指数均值 91.48%、漏播指数均值 4.28%、重播指数均值 4.24%。投种试验结果表明, 当投种正压为 0.8~1.0 kPa、工作转速为 18~20 r/min、投种高度小于 200 mm 时, 粒距变异系数不大于 13.2%, 工作性能较优。

关键词: 小粒径蔬菜种子; 精密排种器; 气力针式; 行星轮系; 窄行密植

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0086-14

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Needle Planetary Gear
Narrow-row Close Planting Precision Seed-metering Device

LIAO Yitao^{1,2} ZHANG Baixiang¹ ZHENG Juan¹ LIAO Qingxi^{1,2} LIU Jiacheng¹ LI Chengliang¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering at the problem that the narrow-row close planting, high sowing uniformity and lack of suitable sowing technology and equipment for small-size vegetable seeds such as spinach, a pneumatic needle planetary gear train multi-row parallel low-drop precision metering device suitable for close planting precision sowing of small-size vegetable seeds such as spinach was designed. The working principle of seed metering device was expounded, and the seed mechanical models of seed suction and seed feeding were constructed, and the main structural parameters of seed metering device were determined. ADAMS software was used to simulate and analyze the static trajectory and dynamic trajectory of the suction needle of the planetary gear train seeding mechanism, and the low zero-speed seeding conditions were clarified. The performance test of seed metering device was carried out. The results of seed-metering test showed that the primary and secondary order of affecting the qualified index was rotation speed of seeding, suction negative pressure and unloading positive pressure. The best combination of parameters was seed metering speed of 19.56 r/min, suction negative pressure of 2.05 kPa, and unloading positive pressure of 1.00 kPa. Through bench test verification, the performance indexes were as follows: the average qualified index was 91.48%, the average missing index was 4.28%, and the average replay index was 4.24%. The results of seeding test showed that when the seed pressure was 0.8~1.0 kPa, the working speed was 18~20 r/min and the seed height was no more than 200 mm, the coefficient of variation of grain spacing was not more than 13.2%, and the working performance was better. The research result can provide a reference for the design of vegetable narrow row close planting precision seeder.

Key words: small size vegetable seeds; precision seed-metering device; pneumatic needle; planetary gear train; densely planted vegetables

0 引言

菠菜等叶菜类作物采用窄行密植种植模式,通过增加单位面积内的植株数,使植株在合理密度下更好地发挥产量优势,但种植密度大,行株距小,对播种均匀性要求高^[1-3],且籽粒小、质量小,因此机械化精密播种难度大,以人工播种或机械播种后间苗生产为主,生产成本低、劳动力消耗大,迫切需要开发适用播种装备。

排种器是播种装备的核心装置,其性能直接决定播种质量^[4-6]。常见排种器有机械式和气力式两种^[7]。目前蔬菜窄行密植播种应用的排种器以窝眼轮机械式排种器为主^[8-9],具有结构简单、成本低等优点,但受取充种方式影响,存在易卡种造成漏播率较高、种子破损率较高等问题。气力式排种器对种子外形尺寸要求不严,通用性好,对种子损伤小,播种精度高,已广泛应用于玉米、大豆、棉花等宽行低密度作物的精密播种^[10-14]。在气力式窄行密植排种技术方面,文献^[15-16]研制的窄行距排种器主要用于 2~4 行的密植排种,更多行数的播种需要配置多个排种器,播种机的传动和配气系统较为复杂。在穴盘苗播种中,多采用滚筒式和板针式等结构,实现一器 6 行以上的窄行密植精密播种^[17-18],但在大田生产上,由于相应播幅较宽、排种器连续工作等要求,滚筒式与气室密封结构复杂,长时间作业气压稳定性差;板针式多采用往复复式结构,作业效率较低。课题组前期针对窄行密植作物单粒精密播种问题,设计了一种采用两端气室、回转气力针式结构的排种装置,解决了排种器工作时气室与滚筒密封性差的问题,可实现 24 行并联单粒排种,单粒精密排种合格指数达 90% 以上,但排种器是水平位置投种,投种高度偏高,存在下落种子与种床土壤弹跳滑移导致播种粒距不均的问题^[19];在该排种器基础上设计点播式全约束导种装置,实现了单粒排种和平稳导种于一体的功能,消除了种子与土壤的碰撞弹跳现象,播种机穴粒数合格率为 86.2%,穴距合格率为 93.9%,但排种装置和导种装置分布排列,整机结构较复杂,质量较大^[20]。

本文基于前期气力针式排种器和导种机构,设计一种采用行星轮系排种机构的气力针式窄行密植精密排种器,通过行星轮系机构和气流分配管吸种针的配合,改进原有吸种针运动轨迹,吸种时降低吸种针与种子的相对运动速度,投种时降低种子与种床的高度,以提高播种性能。

1 排种器结构与工作原理

1.1 排种器结构

气力针式行星轮系窄行密植精密排种器结构如图 1 所示,主要由行星轮系排种机构、机架、左气室、种仓、右气室等组成。其中,行星轮系排种机构为实现低速吸种、低位投种的关键,主要包括行星轮系机构、气流分配管、吸种针和链轮等。

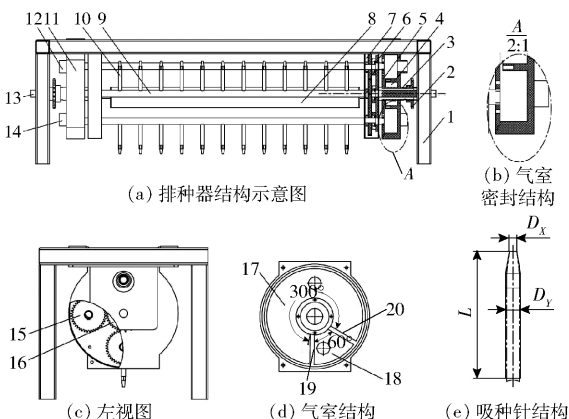


图 1 气力针式行星轮系窄行密植精密排种器结构示意图

Fig. 1 Schematics of pneumatic needle planetary gear narrow row precision seed-metering device

1. 机架 2. 链轮 3. 驱动轴 4. 右气室 5. 气室盖 6. 行星轮架 7. 行星轮系机构 8. 种仓 9. 气流分配管 10. 吸种针 11. 左气室 12. 负压进气口 13. 太阳轮轴 14. 正压进气口 15. 行星轮 16. 太阳轮 17. 负压区 18. 正压区 19. 左气室隔板 20. 右气室隔板

排种器为对称结构,行星轮系排种机构两端各有一个气室,气室主体内设计有气室隔板将气室圆周区域分割为 300° 的负压区和 60° 的正压区,气室正压区一侧隔板与竖直方向夹角为 0°,另一侧隔板与竖直方向夹角为 60°;行星轮系机构包括固定在太阳轮轴上的太阳轮和 4 个绕太阳轮转动且均匀对称分布在行星轮架上的行星轮;吸种针根据播种行距安装在气流分配管上^[17],气流分配管与行星轮固定连接并穿过行星轮架通到气室内,驱动轮与行星轮架为刚性连接的一体结构,驱动轴在动力驱动下带动行星轮架转动,进而带动行星轮和气流分配管转动。

1.2 工作原理

排种器工作过程可分为吸种区、携种区、投种区和过渡区 4 个阶段,其中充种区、携种区和过渡区为负压区,投种区为正压区,如图 2 所示。

排种器工作时,位于气室外侧驱动轴上的链轮在动力作用下带动行星轮架以角速度 ω_1 逆时针转动,太阳轮固定不动,行星轮架带动行星轮逆时针转动,同时行星轮与太阳轮啮合,行星轮绕太阳轮以角速度 ω_2 逆时针自转,与行星轮固接的气流分配管同

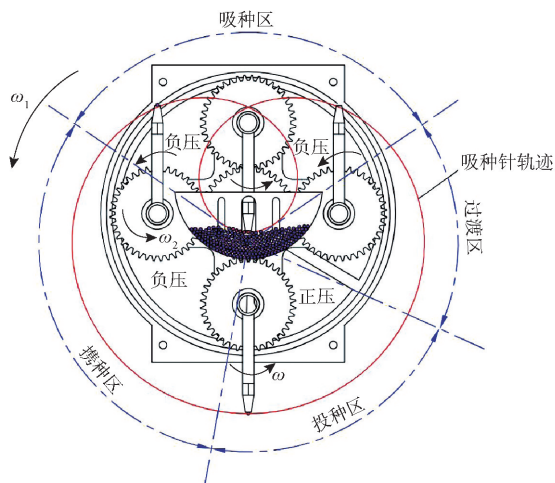


图2 气室工作区域与排种器工作原理图

Fig.2 Working area of air chamber and working principle diagram of seed metering device

步转动,进而带动吸种针转动。气流分配管运动到种仓正上方时吸种针竖直向下,在负压作用下单粒吸种,经过携种区进入投种区,气流分配管运动到种仓正下方时吸种针同样竖直向下,在正压、自重作用下卸种,完成投种作业后吸种针经过过渡区再次到达种仓正上方进行吸种动作,如图2所示。排种器连续工作,气流分配管和吸种针将种子群转变为均匀单粒种子,行星轮系排种机构保证吸种针特定轨迹,实现在吸种区低速吸种和在投种区低位投种。

2 吸种与投种环节分析

吸种环节是排种过程初始环节,种子在行星轮系排种机构的作用下从种仓由种群定量分离形成连续种子流;投种环节是种子保持均匀有序状态入土的末端环节,平稳运移来的单粒等间隔种子流被运送到投种区进行投种;通过行星轮系的运动带动气流分配管绕太阳轮公转,同时又与行星轮同步自转,气流分配管上的吸种针完成高位低速吸种和低位零速投种。吸种与投种环节既影响种子的有序状态,又决定种子入土后分布均匀性。因此,为保证排种器性能,需开展排种过程的吸种和投种环节种子运动规律和轨迹研究,为排种器关键部件结构与尺寸设计提供依据。

2.1 吸种环节分析

2.1.1 吸种环节受力分析

吸种环节理想状态为单粒种子吸附在吸种针上并随其一起转动,对种子的运动和受力进行分析,以菠菜密植单粒精密播种为例,菠菜种子可看作球体,种子的受力情况如图3所示,吸种针完成吸种,下一瞬时离开种仓进入携种区,此时被吸附单粒种子满足吸种受力平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{N2} \sin \beta - F_{S2} \cos \beta - F_{S1} - G \sin \beta = 0 \\ \sum F_y = F_Q + F_{N2} \cos \beta + F_{S2} \sin \beta - F_{N1} - G \cos \beta - F_L = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F_L = m \omega^2 R_L \\ F_{S1} = F_{N1} \tan \varphi_1 \\ F_{S2} = F_{N2} \tan \varphi_2 \\ G = mg \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_Q ——吸种瞬间种子所受吸附力,N

G ——种子自身重力,N

F_L ——种子受到的离心力,N

F_{N1} ——种子受到吸种针的支持力,N

F_{N2} ——种子受到种群的支持力,N

F_{S1} ——种子受到吸种针的摩擦力,N

F_{S2} ——种子受到种群的压力,N

ω ——吸种针角速度,为驱动轴公转角速度 ω_1 与行星轮自转角速度 ω_2 矢量和, rad/s

R_L ——吸种针末端种子运动半径,mm

β ——吸种角, ($^\circ$) m ——种子质量,kg

φ_1 ——种子与吸种针之间滑动摩擦角, ($^\circ$)

φ_2 ——种子的自然休止角, ($^\circ$)

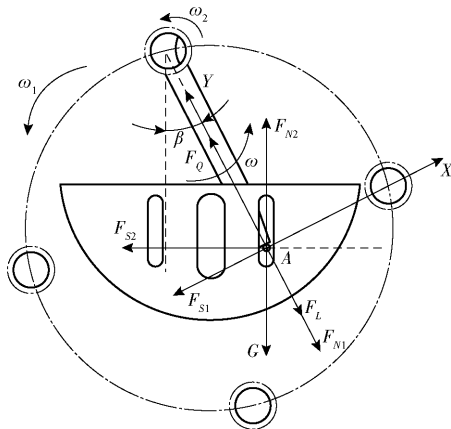


图3 吸种环节种子受力分析

Fig.3 Force analysis of sucking seed progress

由式(1)、(2)可得

$$F_Q = m \omega^2 R_L + \frac{mg(\cos \beta \tan \varphi_1 - \sin \beta) + F_{N2}[\sin \beta - \cos \beta - (\sin \beta + \cos \beta) \tan \varphi_2]}{\tan \varphi_1} \quad (3)$$

当 $F_{N2} = G$ 时,有

$$F_Q = m \omega^2 R_L + \frac{mg[\tan \varphi_1(\cos \beta - 1) - \tan \varphi_2(\sin \beta + \cos \beta)]}{\tan \varphi_1} \quad (4)$$

由式(4)可知,单粒吸种所需吸附力 F_Q 与种子自重、吸种角 β 、吸种针角速度 ω 、吸种针末端种子

自重和正压作用下离开吸种针,对卸种瞬间种子受力进行分析,如图6所示,此时种子应满足的力学方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{S1} \cos \beta + F_{N1} \sin \beta + F_L \sin \beta + F_Q \sin \beta = ma_n \\ \sum F_y = F_{S1} \sin \beta - F_L \cos \beta - F_{N1} \cos \beta - F_Q \cos \beta - G = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = F_{N1} \tan \varphi_1 \\ F_L = m\omega^2 R_L \\ G = mg \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)、(10)可得

$$F_Q = \frac{m[(a_n - \omega^2 R_L) \tan \varphi_1 - g(\sin \beta + \cos \beta \tan \varphi_1)]}{\tan \varphi_1} \quad (11)$$

式中 a_n ——法向加速度, m/s^2

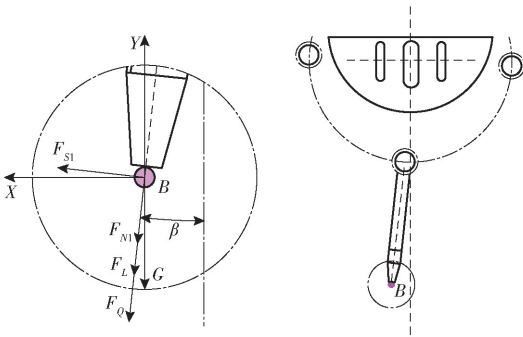


图6 投种环节受力分析

Fig. 6 Force analysis of unloading progress

由式(11)可知,卸种瞬间种子所受的吸附力 F_Q 与种子自重、投种角 β 、吸种针角速度 ω 、吸种针末端种子运动半径 R_L 、种子滑动摩擦角 φ_1 等有关。

投种阶段影响种子入土状态,气力式排种器投种时种子从脱离型孔到落入种床土壤过程受惯性力、重力和正压力作用,种子做自由落体运动,投种角决定正压区位置,即投种高度。投种高度越低,种子与种床土壤碰撞弹跳滑移现象概率越小,有利于提高种子分布均匀性,因此合理设计气室正压区位置,降低投种高度,减小投种时种子的水平初始速度使其达到零速投种,可以提高排种器投种精度。

2.2.2 运动轨迹分析

吸种针投种轨迹决定投种点位置,直接影响排种器投种精度,吸种针与地面的绝对运动是确保排种器满足合格粒距以及保证粒距均匀性的重要因素,因此投种环节运动轨迹重点分析其绝对运动轨迹。同样以太阳轮中心为坐标原点,排种器作业时前进方向为 X 轴正向,过坐标原点垂直向上为 Y 轴正向建立坐标系。吸种针端点绝对运动轨迹如图7所示,其中, C_1 、 C_2 、 C_3 为吸种点, A_1 、 A_2 、 A_3 为投种点,

H 为株距。

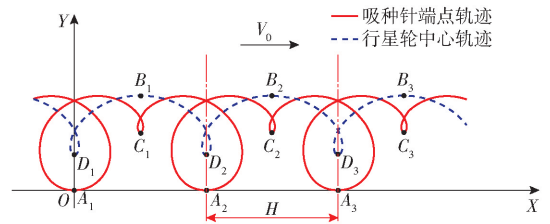


图7 排种执行机构绝对运动轨迹

Fig. 7 Absolute motion trajectory of row actuator

实际作业中,行星轮架一边绕坐标原点 O 作匀速圆周运动,一边由机架牵引作前进运动,行星轮中心的运动轨迹为余摆线,根据几何关系,其坐标方程为

$$\begin{cases} X_0 = V_0 t + 2R \cos \theta \\ Y_0 = 2R \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

式中 V_0 ——排种器前进速度, m/s

吸种针端点的绝对运动轨迹方程和速度表达式分别为

$$\begin{cases} X = V_0 t + L \cos(2\theta + \varphi_0) + 2R \cos \theta \\ Y = L \sin(2\theta + \varphi_0) + 2R \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} V_x = V_0 - 2L\omega \sin(2\theta + \varphi_0) - 2R\omega \sin \theta \\ V_y = 2L\omega \cos(2\theta + \varphi_0) + 2R\omega \cos \theta \end{cases} \quad (14)$$

则吸种针端点 P 绝对速度为

$$V_P = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{V_0^2 + 4\omega^2(L^2 + R^2) + 8LR\omega^2 \cos(\theta + \varphi_0) - 4V_0\omega(L \sin(2\theta + \varphi_0) + R \sin \theta)} \quad (15)$$

为保证实际工作过程中在确定株距下动轨迹(绝对运动轨迹)的实现^[24],引入速比特征系数 λ

$$\lambda = \frac{2R_1 \pi}{HN} \quad (16)$$

式中 R_1 ——回转半径,太阳轮中心 o 与行星轮中心的距离, mm

N ——吸种针并联数量

根据窄行密植种植模式,排种器理论株距设计为 80 mm ,为保证排种器排种质量,排种器排种转速需保持在一定范围内,排种转速与前进速度之间的匹配关系是考虑的关键因素,确定排种器前进速度为

$$V_0 = \frac{2\pi n R_1}{60\lambda} \quad (17)$$

由式(13)~(17)可知,投种绝对运动轨迹与排种器前进速度、行星轮系排种机构回转半径和排种转速等因素有关, λ 主要取决于回转半径,影响排种器前进速度。

2.3 吸种针运动仿真分析

为探究排种器吸种针运动规律和排种器实现高位低速吸种、低位零速投种条件,在 SolidWorks 2018

中完成排种器三维实体模型设计装配, 导入 ADAMS 2018 中进行运动仿真分析, 设置运动循环周期为 6 s, 排种器吸种针端点仿真运动轨迹和位移与速度曲线 (相对运动轨迹下) 如图 8 所示。

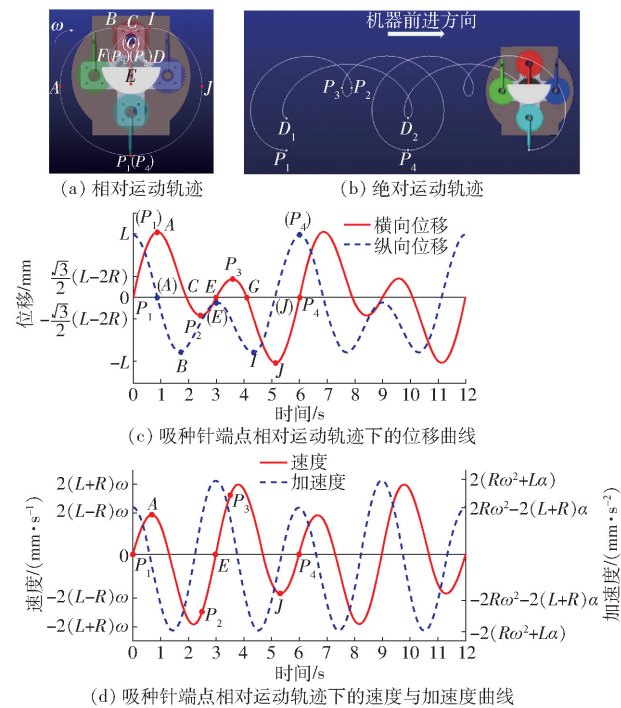


图 8 吸种针端点仿真轨迹和位移与速度曲线

Fig. 8 Simulation trajectory and displacement-velocity curves of end point of seed-absorbing needle

根据排种器工作过程, 在一个运动循环周期内, 结合相对运动轨迹下的位移曲线与速度曲线, 吸种针端点的运动过程可分为回转段、吸种段、携种段和投种段 4 个阶段:

(1) 回转段指吸种针完成投种后运动至充种区的过程, 如图 8a 中 P_1P_2 段。由图可知, 吸种针投种后从最低点上升运动到过渡区, P_1A 段横向位移增大, 纵向位移减小, 点 A 回转段横向位移最大, 纵向位移为 0; 由图 8c、8d 可知 AC 段横向位移减小, 纵向位移增大, 点 B 纵向位移最大, 吸种针端点速度从 0 增加到 $2(L-R)\omega$; CP_2 段横向位移从 0 减小到最小值, 纵向位移逐渐增大, 运动到点 C 时横向位移为 0, 点 D 为前半周期位移最小点, BD 段速度从 0 增加到 $2(L+R)\omega$, 速度加快可减少过渡区时间。

(2) 吸种段指吸种针处于种仓正上方时的运动轨迹, 如图 8a 中 P_2P_3 段。吸种针运动到吸种区, P_2E 段横向位移从最小值增加到 0, 点 E 为吸种针与种床接触最低点, 吸种针竖直向下, 保证与种群接触充分; EP_3 段横向位移增大, 纵向位移增大, 吸种针离开种仓。由图 8d 可知, P_2P_3 段吸种针与种群接触时速度减小, 吸种后速度增加离开种群, 速度降低可以增加充种时间, 即型孔与种子群接触时间, 保证

充分吸种提高充种概率, 吸种完成离开种群速度增大可减小重吸概率。

(3) 携种段指吸种针离开种仓运动至投种口前的运动过程, 如图 8a 中 P_3P_4 段。结合图 8c、8d 可知, 携种段轨迹与回转段一致, P_3G 段横向位移减小, 纵向位移增大, 速度增大到最大值 $2(L+R)\omega$; GJ 段横向位移增大, 纵向位移减小; JP_4 段横向位移减小, 纵向位移增大, 点 J 携种段横向位移最大, 纵向位移为 0, 吸种针端点速度减小到 $2(L-R)\omega$, 此时绝对速度为 $V_0 - 2(L+R)\omega$ 。

(4) 投种段指吸种针运动至投种口时与投种完成下一瞬时离开正压区的运动轨迹, 理想状态下, 吸种针在点 P_4 进行投种。由图 8c 可知, 点 P_4 横向位移为 0, 纵向位移最大; 当播种机以 V_0 速度匀速前进时, 吸种针端点线速度方向与前进方向相反, 吸种针到达投种区投种时绝对速度从 $V_0 - 2(L+R)\omega$ 逐渐减小至 0, 速度降低实现零速投种, 保证种子在种床分布均匀。根据式 (16), 计算得速比特征系数 $\lambda = 1.53$, 投种完成后吸种针经过回转段进入下一运动循环周期。

仿真试验结果表明, 一个运动循环周期内存在一个上半周的最低点 E 和一个下半周的最低点 $P_1(P_4)$, 可以保证吸种针在上半周最低点吸种, 实现低速吸种, 在下半周最低点投种, 实现低位零速投种。吸种针的运动轨迹是排种器设计的关键, 通过对比仿真轨迹与理论轨迹可知^[25-26], 两者整体基本一致, 初步验证了该排种器的运动规律满足设计要求。

行星轮系排种机构确定了吸种针的运动轨迹, 气流分配管和吸种针的运动是两个相对运动和一个机器前进运动的合成: 机器前进运动, 地轮通过链传动带动行星轮架转动, 行星轮架带动气流分配管和吸种针转动, 行星轮系机构带动气流分配管和吸种针绕太阳轮转动, 即气流分配管和吸种针随行星轮架转动的同时受行星轮约束作用转动。

卸种后种子在惯性作用下有一线速度, 由图 9

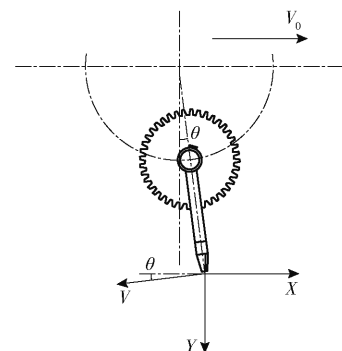


图 9 投种过程运动分析图

Fig. 9 Motion analysis diagram of seeding progress

可知,下落的种子在重力和正压的作用下做自由落体运动。投种时种子水平初始速度越小,投种精度越高,投种点种子水平初始速度 V_c 为

$$V_c = V_0 - V \cos \theta \quad (18)$$

其中 $V = \omega R_L$ (19)

式中 V ——种子具有的线速度, m/s

由式(18)可知,当吸种针角速度和吸种针末端种子运动半径一定时, $\theta = 0^\circ$, 投种点种子水平初始速度 V_c 最小,即吸种针在正下方轨迹最低点投种,低位投种降低了投种点与种沟垂直高度,在一定程度上降低种子与种床土壤碰撞弹跳滑移。零速投种是种子水平分速度与排种器前进速度大小相等,方向相反,可有效提高排种合格指数^[27-29]。实现零速投种即需要保证卸种后种子下落过程中 X 方向合速度为 0, 即

$$V_c = 0 \quad (20)$$

即 $V_0 = V \cos \theta$ (21)

由式(18)和式(21)及结合仿真分析可知,排种器满足低位零速投种的条件是:投种角 $\theta = 0^\circ$ (低位投种); $\lambda = 1.53$ (零速投种,此时排种器前进速度 V_0 等于种子在最低点的切线速度 V)。

3 排种器关键部件设计

3.1 行星轮系机构

行星轮系机构为对称结构,左右两侧均包括 1 个太阳轮和 4 个行星轮,结构如图 10 所示,通过对排种过程的分析,结合设计要求,需满足

$$\begin{cases} Z_1 = Z_2 \\ D_1 = D_2 \\ R_2 > R_1 + \frac{MZ_2}{2} \end{cases} \quad (22)$$

式中 Z_1 ——太阳轮齿数

Z_2 ——行星轮齿数

D_1 ——太阳轮直径, mm

D_2 ——行星轮直径, mm

R_2 ——行星壳盘外壁沿半径, mm

M ——齿轮模数, mm

结合设计要求及装配关系,选定齿厚为 10 mm、模数为 2 mm、压力角为 20° 的直齿圆柱齿轮,计算得出行星轮与太阳轮齿数 $Z_1 = Z_2 = 39$,行星壳盘外壁沿半径 $R_2 = 130 \text{ mm}$ 。

3.2 吸种针和气流分配管

以菠菜为播种对象,采用墨绿先锋菠菜种子,其平均三轴尺寸为 $3.69 \text{ mm} \times 3.25 \text{ mm} \times 2.36 \text{ mm}$,几何平均宽度为 3.05 mm。吸种针直管内径为 10 mm,

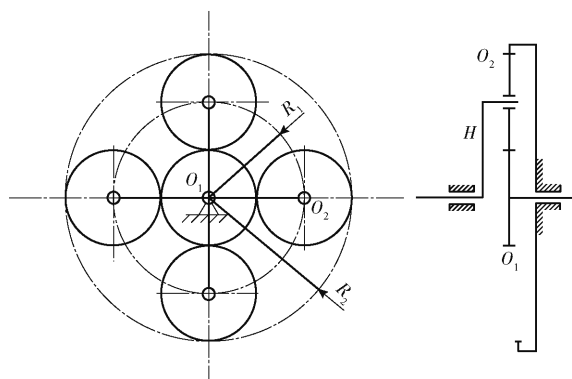


图 10 行星轮系机构

Fig. 10 Planetary gear train mechanism

根据

$$D_X = (0.64 \sim 0.66) B \quad (23)$$

式中 B ——种子几何平均宽度,取 3.05 mm

计算得出吸种针型孔直径为 2.00 mm,吸种针通过螺纹连接固定在气流分配管上。

气流分配管与行星轮数量相同,气流分配管上布置吸种针,通过对排种过程的分析,结合前期研究和播种农艺要求,4 根气流分配管对称分布,设定播种行距为 70 mm,播种行数为 12 行,气流分配管内径为 20 mm,满足气流分配管内径大于全部吸种针末端种子吸附面过流面积的要求^[19]。

3.3 种仓

种仓底部为弧形结构,与吸种针运动轨迹相符,并保证种仓底部弯曲弧形 S_2 大于吸种针的回转弧形轨迹 S_1 ,保证良好的吸种效果。吸种针长度 L 、行星轮与太阳轮中心距离 R_1 等参数都会影响种仓结构尺寸,定义吸种针长度 L 与行星轮、太阳轮中心距离 R_1 比值为系数 K , K 直接影响吸种针端点在吸种区的轨迹。

图 11a 是系数 K 取 0.5、1.0、1.2、1.5、2.0 时吸种针端点在吸种区运动轨迹。由图 11a 可知,吸种针在点 b 处于吸种最低点,当 $K = 2.0$ 时,吸种针在点 $c_{2.0}$ 开始吸种,至 $c'_{2.0}$ 时完成吸种,当 $K = 0.5$ 时,吸种针在点 $b_{0.5}$ 完成吸种。因此,速比系数影响吸种针吸种时间,且 K 越大吸种时间越长,有利于提高排种器吸种性能,当速比系数过小时吸种针只与种群最上层接触,下层种子无法完成吸种。

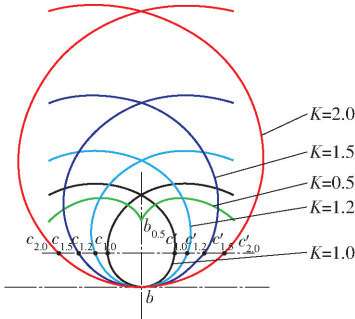
排种机构设计为多行并联结构,根据装配关系, L 需小于相邻两根气流分配管的中心距 L_{d1} ,种仓宽度 D_c 需小于对称两根气流分配管的中心距 L_{d2} ,其中

$$\begin{cases} L_{d1} = 2\sqrt{2}R \\ L_{d2} = 4R \end{cases} \quad (24)$$

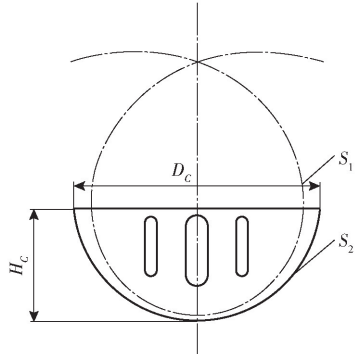
式中 R ——行星轮分度圆半径,取 39 mm

经计算确定 $K = 1.2$, $L = 95 \text{ mm}$, $D_c = 130 \text{ mm}$,

如图 11b 所示,根据排种器种仓安装位置,设计种仓高度 $H_c = 60\text{ mm}$ 。



(a) 不同K值时吸种针端点在吸种区的轨迹



(b) $K=1.2$ 时吸种针端点轨迹与种仓位置关系

图 11 不同 K 值时吸种针端点在吸种区的轨迹

Fig. 11 Trajectory of end point of seed-sucking

needle in seed-sucking area at different K values

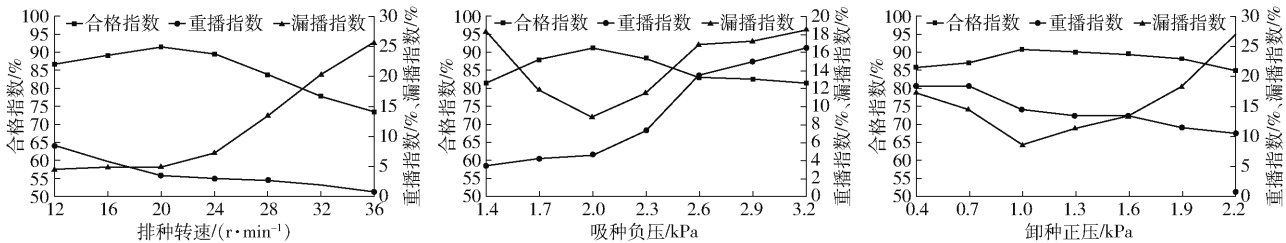


图 13 排种转速、吸种负压和卸种正压与排种性能指标关系曲线

Fig. 13 Relationship curves of rotation speed of seeding, suction negative pressure and unloading positive pressure with seeding performance indicators

4.2 试验设计与方法

由前期研究进展^[19]可知,排种转速、吸种负压和卸种正压对排种性能有较大影响,因此选择三者为试验因素,为寻求最佳参数范围,进行三因素五水平二次回归正交旋转组合试验,根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》选择排种合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 、漏播指数 Y_3 为评价指标,试验因素编码如表 1 所示,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果,每组试验统计排种器稳定工作状态连续排出的 251 粒种子。

根据前期预试验和单因素试验结果,确定排种转速为 12 ~ 28 r/min,以 4 r/min 为增量,吸种负压为 1.4 ~ 2.6 kPa,卸种正压为 0.4 ~ 1.6 kPa,以 0.3 kPa 为增量。

4 排种性能试验

4.1 试验材料与装置

试验材料选用菠菜种子,试验时种子含水率为 37.3%,千粒质量为 9.13 g。试验装置采用 BENETECH GM520 型手持式风压表测定风机出风口和进风口气压,排种性能检测装置采用华中农业大学自主研制的小粒径种子精量排种器种子流传感装置^[30],排种性能试验如图 12 所示。单因素试验排种转速、吸种负压和卸种正压与排种性能指标关系曲线如图 13 所示。

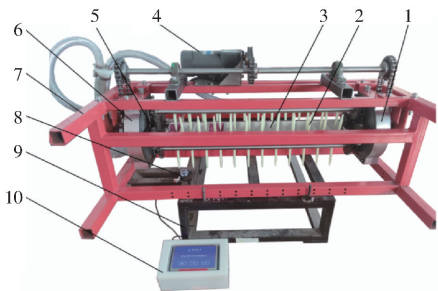


图 12 排种性能试验装置实物图

Fig. 12 Physical map of seeding performance test device

1. 右气室 2. 吸种针 3. 种仓 4. 电机 5. 行星轮系机构 6. 左气室 7. 机架 8. 压电薄膜式种子流传感器 9. 试验台架 10. 监测显示终端装置

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of experimental factors

编码	因素		
	排种转速 x_1 /	吸种负压 x_2 /	卸种正压 x_3 /
	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	kPa	kPa
-1.682	12.00	1.40	0.40
-1	15.24	1.64	0.64
0	20.00	2.00	1.00
1	24.76	2.36	1.36
1.682	28.00	2.60	1.60

4.3 结果与分析

4.3.1 试验结果

根据三因素五水平正交旋转组合试验方案,共开展 20 组试验,试验结果如表 2 所示。 X_1 、 X_2 、 X_3 为排种转速、吸种负压和卸种正压编码值。

表 2 正交试验结果
Tab.2 Orthogonal test results

试验 序号	因素			合格指数	重播指数	漏播指数
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	86.06	7.97	5.97
2	1	-1	-1	82.07	4.78	13.15
3	-1	1	-1	86.85	9.16	3.99
4	1	1	-1	84.46	5.18	10.36
5	-1	-1	1	86.45	3.59	9.96
6	1	-1	1	80.08	3.99	15.93
7	-1	1	1	87.25	8.37	4.38
8	1	1	1	83.67	5.58	10.75
9	-1.682	0	0	87.25	8.76	3.99
10	1.682	0	0	78.09	4.78	17.13
11	0	-1.682	0	82.87	4.38	12.75
12	0	1.682	0	86.85	7.97	5.18
13	0	0	-1.682	86.45	8.37	5.18
14	0	0	1.682	84.86	5.18	9.96
15	0	0	0	91.23	3.99	4.78
16	0	0	0	90.84	3.59	5.57
17	0	0	0	88.45	3.99	7.56
18	0	0	0	90.04	3.59	6.37
19	0	0	0	91.63	3.19	5.18
20	0	0	0	89.64	3.19	7.17

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 Y_1				重播指数 Y_2				漏播指数 Y_3			
	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	243.71	9	27.14	<0.000 1 **	80.60	9	29.33	<0.000 1 **	298.79	9	36.90	<0.000 1 **
X_1	73.74	1	73.92	<0.000 1 **	19.34	1	63.35	<0.000 1 **	168.63	1	187.44	<0.000 1 **
X_2	14.90	1	14.93	0.003 1 **	14.35	1	46.99	<0.000 1 **	58.48	1	65.01	<0.000 1 **
X_3	1.59	1	1.60	0.235 1	8.74	1	28.62	0.000 3 **	17.79	1	19.78	0.001 2 **
X_1X_2	2.41	1	2.41	0.151 3	1.98	1	6.48	0.029 0 *	0.021	1	0.023	0.881 6
X_1X_3	1.59	1	1.60	0.235 0	2.86	1	9.35	0.012 1 *	0.18	1	0.20	0.661 6
X_2X_3	0.18	1	0.18	0.677 5	2.56	1	9.65	0.071	4.49	1	4.99	0.049 6 *
X_1^2	95.79	1	96.01	<0.000 1 **	13.88	1	45.46	<0.000 1 **	36.74	1	40.84	<0.000 1 **
X_2^2	46.89	1	47.00	<0.000 1 **	8.57	1	28.06	0.000 3 **	15.37	1	17.08	0.002 0 **
X_3^2	33.42	1	33.49	0.000 2 **	13.93	1	45.63	<0.000 1 **	4.19	1	4.66	0.056 2
残差	9.98	10			3.05	10			9.00	10		
失拟	3.13	5			2.41	5			2.78	5		
误差	6.85	5	0.46	0.795 3	0.64	5	3.77	0.085 8	6.22	5	0.45	0.801 5
总和	253.69	19			83.65	19			307.79	19		

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

$$Y_1=90.29-2.32X_1+1.04X_2-2.58X_1^2-1.8X_2^2-1.52X_3^2$$

(26)

通过对式(26)回归系数的检验,得到合格指数的因素影响由大到小为:排种转速、吸种负压和卸种正压。

(2)重播指数 Y_2

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响重播指数的回归模型为

4.3.2 回归模型的建立与显著性检验

运用数据处理软件 Design-Expert 10.0 对试验数据进行多元回归拟合,对试验结果进行回归分析,建立合格指数、重播指数、漏播指数与排种转速、吸种负压、卸种正压之间的回归方程,并对试验结果和回归方程进行方差分析,结果如表 3 所示。

(1)合格指数 Y_1

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响合格指数的回归模型为

$$Y_1=90.29-2.32X_1+1.04X_2-0.34X_3+0.55X_1X_2-0.45X_1X_3+0.15X_2X_3-2.58X_1^2-1.8X_2^2-1.52X_3^2$$

(25)

根据表 3 可知,该模型拟合度极显著($P<0.01$)。排种转速 X_1 、吸种负压 X_2 、排种转速的二次方项 X_1^2 、吸种负压的二次方项 X_2^2 、卸种正压的二次方项 X_3^2 的 P 值均小于 0.01,说明以上各项对合格指数的影响极显著,其余项对合格指数的影响不显著。失拟项不显著($P=0.7953$),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

$$Y_2=3.61-1.19X_1+1.02X_2-0.8X_3-0.5X_1X_2+0.6X_1X_3+0.6X_2X_3+0.98X_1^2+0.77X_2^2+0.98X_3^2$$

(27)

根据表 3 可知,该模型的拟合度极显著($P<0.01$)。排种转速 X_1 、吸种负压 X_2 、卸种正压 X_3 、排种转速的二次方项 X_1^2 、吸种负压的二次方项 X_2^2 、卸种正压的二次方项 X_3^2 的 P 值均小于 0.01,说明以上各项对重播指数的影响极显著;排种转速和吸种

负压的交互项 X_1X_2 、排种转速和卸种正压的交互项 X_1X_3 的 P 值均小于 0.05,说明以上各项对重播指数的影响显著,其余项对重播指数的影响不显著。失拟项不显著($P=0.0858$),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

$$Y_2=3.61-1.19X_1+1.02X_2-0.8X_3-0.5X_1X_2+0.6X_1X_3+0.98X_1^2+0.77X_2^2+0.98X_3^2 \quad (28)$$

通过对式(28)回归系数的检验,得到重播指数的因素影响由大到小为:排种转速、吸种负压和卸种正压。

(3)漏播指数 Y_3
通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响漏播指数的回归模型为

$$Y_3=6.1+3.51X_1-2.07X_2+1.14X_3-0.051X_1X_2-0.15X_1X_3-0.75X_2X_3+1.6X_1^2+1.03X_2^2+0.54X_3^2 \quad (29)$$

根据表 3 可知,该模型拟合度极显著($P <$

0.01)。排种转速 X_1 、吸种负压 X_2 、卸种正压 X_3 、排种转速的二次方项 X_1^2 、吸种负压的二次方项 X_2^2 的 P 值均小于 0.01,说明以上各项对漏播指数的影响极显著;吸种负压和卸种正压的交互项 X_2X_3 的 P 值小于 0.05,说明此项对漏播指数的影响显著,其余项对漏播指数的影响不显著。失拟项不显著($P=0.8015$),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

$$Y_3=6.1+3.51X_1-2.07X_2+1.14X_3-0.75X_2X_3+1.6X_1^2+1.03X_2^2 \quad (30)$$

通过对式(30)回归系数的检验,得到漏播指数的因素影响由大到小为:排种转速、吸种负压和卸种正压。

4.4 各因素对合格指数的影响

通过 Design-Expert 10.0 对数据进行处理,可得到排种转速 X_1 、吸种负压 X_2 和卸种正压 X_3 对合格指数的影响规律,其响应曲面如图 14 所示。

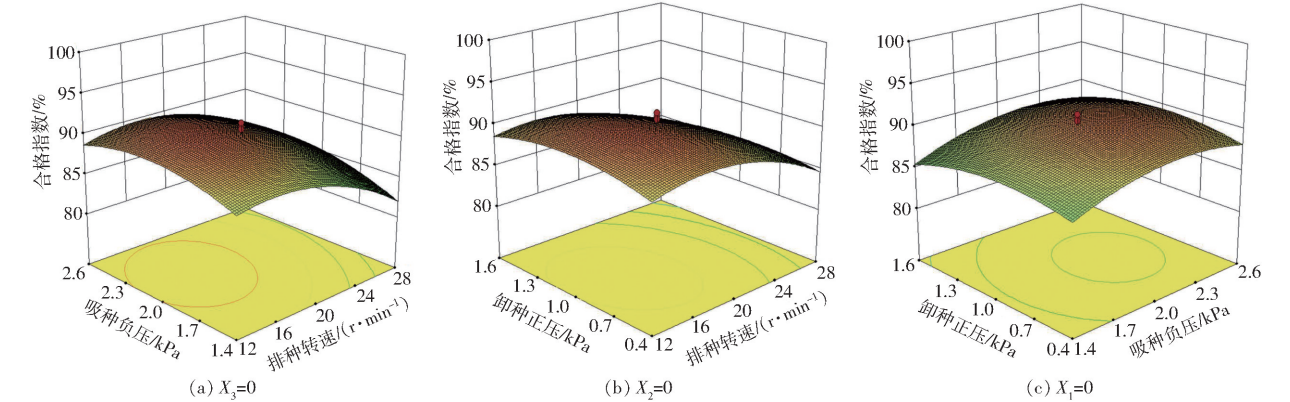


图 14 交互因素对合格指数影响的响应曲面

Fig. 14 Effects of interactive factors on qualified index

图 14a 为卸种正压为 1.0 kPa 时,排种转速和吸种负压交互作用的响应曲面。排种转速为 16 ~ 24 r/min、吸种负压为 1.7 ~ 2.3 kPa 时,排种合格指数较高。吸种负压一定时,随着排种转速的增大,排种合格指数先上升后下降。排种转速一定时,随着吸种负压的增大,排种合格指数先上升后下降。排种转速为 20 r/min、吸种负压为 2 kPa 时,合格指数最高。

图 14b 为吸种负压为 2.0 kPa 时,排种转速和卸种正压的交互作用的响应曲面。排种转速为 16 ~ 24 r/min、卸种正压为 0.7 ~ 1.3 kPa 时,排种合格指数较高。卸种正压一定时,随着排种转速的增大,排种合格指数先上升后下降。排种转速一定时,随着卸种正压的增大,排种合格指数先上升后下降。排种转速为 20 r/min、卸种正压为 1 kPa 时,合格指数最高。

图 14c 为排种转速为 20 r/min 时,吸种负压和卸种正压的交互作用的响应曲面。吸种负压为 1.7 ~

2.3 kPa 时,卸种正压为 0.7 ~ 1.3 kPa 时,排种合格指数较高。吸种负压一定时,随着卸种正压的增大,排种合格指数先上升后下降。卸种正压一定时,随着吸种负压的增大,排种合格指数先上升后下降。吸种负压为 2.0 kPa 时,卸种正压为 1.0 kPa 时,合格指数最高。

4.5 参数优化与验证试验

为寻求排种性能最优状态下的参数组合,以合格指数最大、重播与漏播指数最小为优化目标,对所建立的二次回归模型开展多因素优化求解,运用 Design-Expert 10.0 的优化模块求解得:当排种转速为 19.56 r/min、吸种负压为 2.05 kPa、卸种正压为 1.00 kPa 时,排种性能达到最优,对应排种合格指数为 90.92%,漏播指数为 4.98%,重播指数为 4.10%。模型求解出来的最优参数组合与零水平参数组合参数接近。为验证优化数据可靠性,根据试验参数控制条件,对求解的最优参数进行圆整,设定

吸种负压为 2.0 kPa、卸种正压为 1.0 kPa、排种转速为 20 r/min,重复进行 3 次台架试验,其平均值为合格指数 91.48%、漏播指数 4.28%、重播指数 4.24%,试验结果与优化结果相近。

5 投种试验

根据投种环节力学分析及排种器吸种针运动轨迹分析可知,投种后种子在种床分布的株距均匀性主要与排种转速和卸种正压有关^[18]。种子脱离排种器到落入种床土壤过程仅受惯性力、重力和正压力的作用,运动过程不受约束,属于无约束导种^[8]。

为测试排种转速、卸种正压以及投种高度对株距均匀性的影响,通过在排种器下方设计接种土槽,模拟排种器田间投种状态开展投种试验,试验装置如图 15 所示,其中接种土槽由土槽台架、土槽同步带模组、土槽台架控制模块、土槽等组成;铺设土层厚度为 50 mm,土壤为田间采集的细碎沙壤土,试验时土壤含水率为 18.37%,投种试验设计投种高度 100、200、300 mm,通过改变排种器在土槽台架上方的垂直高度来改变投种高度。

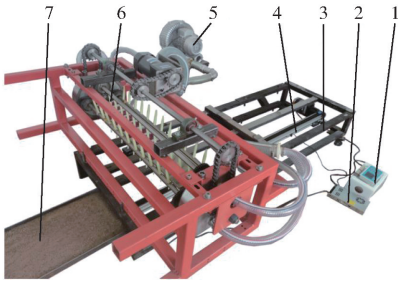


图 15 投种试验装置实物图

Fig. 15 Physical diagram of seeding test device

1. 土槽台架控制模块 2. 控制器电源 3. 土槽台架 4. 土槽同步带模组 5. 风机 6. 气力式行星轮系排种器 7. 土槽

为明确投种高度的影响,选取排种性能试验合格指数大于 90%,漏播指数小于 5%,重播指数小于 5%的工作条件下的参数组合进行投种试验,根据前期正交试验,对所建立的二次回归模型开展多因素优化求解,其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} Y_1(X_1, X_2, X_3) > 90\% \\ Y_2(X_1, X_2, X_3) < 5\% \\ Y_3(X_1, X_2, X_3) < 5\% \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

求解得:在吸种负压为 2.0 kPa、排种转速为 18 ~ 22 r/min、卸种正压为 0.8 ~ 1.2 kPa 时,合格指数均大于 90%,重播指数小于 5%,漏播指数小于 5%,投种试验在该工作条件下展开,参数如表 4 所示。

表 4 试验参数

Tab. 4 Test parameters

试验号	排种转速/(r·min ⁻¹)	卸种正压/kPa	投种高度/mm
1	18	0.8	100
2	20	1.0	200
3	22	1.2	300

将不同排种转速代入式(16)、(17),得到试验台土槽前进速度分别为 150、175、200 mm/s,可保证确定株距 80 mm 时轨迹的实现。试验参数如表 4 所示;根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》要求,测定 250 个粒距,选取合格指数和粒距变异系数作为评价指标;每组试验重复 3 次,统计其平均值,结果如表 5 所示。

表 5 投种试验结果

Tab. 5 Seeding test results

正压/ kPa	转速/ (r·min ⁻¹)	投种高度/ mm	性能指标	
			合格指数	粒距变异系数
0.8	18	100	86.3	11.8
		200	86.3	13.2
		300	84.4	18.1
	20	100	87.2	10.7
		200	85.8	11.4
		300	83.8	17.0
	22	100	87.6	12.4
		200	87.0	14.0
		300	82.6	20.5
1.0	18	100	89.2	11.6
		200	89.0	12.7
		300	84.8	18.3
	20	100	91.2	11.7
		200	90.4	12.3
		300	86.2	19.0
	22	100	88.4	15.7
		200	88.2	14.6
		300	86.6	21.6
1.2	18	100	86.4	14.2
		200	85.8	15.3
		300	80.4	23.0
	20	100	87.2	16.1
		200	84.6	16.0
		300	82.1	24.7
	22	100	84.6	15.7
		200	83.9	15.7
		300	79.8	24.1

由表 5 可知,相同工作参数下,由种子流传感器检测的排种合格指数均高于 90%,但投种后在种床土壤上测得的合格指数有所降低,投种高度越大,合格指数下降幅度越大,表明种子触地的随机碰撞改变了落种粒距间隔。在同一卸种正压下,投种高度

从 100 mm 增至 200 mm 时,粒距变异系数变化幅度相对较小;当投种高度增加到 300 mm 时,落种粒距间隔变化较大,粒距变异系数增大至 17.0% 以上;在同一投种高度下,排种转速越大,粒距变异系数增加越大。在相同工作转速和投种高度条件下,以卸种正压 1.0 kPa 为中心,正压增大或减小时,粒距变异系数均增大,从 1.0 kPa 增至 1.2 kPa 时粒距变异系数变化比降至 0.8 kPa 时更明显。当投种正压 0.8 ~ 1.0 kPa、工作转速 18 ~ 20 r/min、投种高度小于 200 mm 时,粒距变异系数不大于 13.2%,工作性能较优。

分析转速和正压因素造成粒距均匀性差的原因有:在正压增大时种子在下落过程中速度变大,种子弹跳现象明显,更易造成株距分布不均匀;转速和正压减小时吸种针卸种不及时,造成延迟投种现象,种子在下落过程中具有水平位移,粒距均匀性较差。分析投种高度因素造成粒距均匀性差的原因有:投种高度过高时,种子从投种口掉落到接触种床土壤的时间增大,增加了种子与种床碰撞弹跳滑移的概率,造成粒距变异系数变化明显。

结合投种环节力学分析和投种试验结果及分析可知,投种高度对粒距均匀性影响明显,随着投种高度的增大,粒距变异系数逐渐增大,投种高度小于 200 mm 时,粒距变异系数变化不明显;投种高度大于 200 mm 时,粒距变异系数显著增大。采用行星轮系与气流分配管结合的方式实现在排种器最低位投种,相比已有正负气压组合管针式集排器的水平位置投种^[19],降低了投种高度,以提高粒距均匀性。

6 结论

(1) 针对菠菜等小粒径蔬菜种子采用窄行密植、播种均匀性要求高,缺乏适用播种装备的问题,设计了一种气力针式行星轮系窄行密植多行并联低位投种精密排种器,通过行星轮系机构与气流分配管配合,改进吸种针运动轨迹,合理降低投种高度,以提高窄行密植单粒精密播种质量,适用于菠菜等小粒径蔬菜种子窄行精密播种。

(2) 构建了吸种和投种环节力学模型,通过理论与 ADAMS 虚拟样机仿真分析了吸种针端点的相对运动轨迹和绝对运动轨迹,结合相对运动轨迹下的位移与速度曲线,明确了排种器在吸种区低速吸种和在投种区低位投种的过程,以及排种器实现低位零速投种条件,确定了排种器关键部件结构参数。

(3) 采用二次回归正交旋转组合试验方法进行试验,并对试验结果进行方差分析,得出影响排种合格指数的主次顺序为排种转速、吸种负压和卸种正压。利用 Design-Expert 10.0 软件进行数据优化,得出最佳工作参数组合为:排种转速 19.56 r/min、吸种负压 2.05 kPa、卸种正压 1.00 kPa,此时合格指数最大,重播与漏播指数最小。经台架试验验证,其性能指标为合格指数均值 91.48%、重播指数均值 4.24%、漏播指数均值 4.28%,与优化结果基本一致。依据速比特征系数为 1.53 设置了投种试验,投种试验结果表明:当投种正压为 0.8 ~ 1.0 kPa、工作转速 18 ~ 20 r/min、投种高度小于 200 mm 时,粒距变异系数不大于 13.2%,工作性能较优。

参 考 文 献

- [1] SEN S, CHEN S L, FENG B, et al. Preventive effects of North American ginseng (*Panax quinquefolium*) on diabetic nephropathy[J]. *Phytomedicine*, 2012, 19(6): 494 - 505.
- [2] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 61 - 73. (in Chinese)
- [3] 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 test of Chinese herbal medicine Sanchi air suction drum type precision seed discharger[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 20 - 28. (in Chinese)
- [4] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 1 - 16. (in Chinese)
- [5] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王希英,唐汉,王金武,等. 双列交错匀带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 82 - 90.

- WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. (in Chinese)
- [8] 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):78–83.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, JIANG Xinming, et al. Soybean seeder bias double disc air suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78–83. (in Chinese)
- [9] 袁文胜,吴崇友,金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(5):72–75.
YUAN Wensheng, WU Chongyou, JIN Chengqian. Design and test of special-shaped hole socket eye wheel rapeseed seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72–75. (in Chinese)
- [10] 赖庆辉,曹秀龙,于庆旭,等. 三七压穴精密排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):85–95.
LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85–95. (in Chinese)
- [11] 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 test of high-speed precision seed discharger for internally inflatable cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73–85. (in Chinese)
- [12] 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 gas-suction high-speed precision seeder for maize with auxiliary filling tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1–11. (in Chinese)
- [13] 李天华,黄圣海,牛子儒,等. 行星轮式大蒜插播机播种直立度优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(3):37–45.
LI Tianhua, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Optimization and test of sowing uprightness of planetary wheeled garlic interpolator[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 37–45. (in Chinese)
- [14] 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]. 农业机械学报,2014,45(1):46–52.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiying, et al. Rape wheat combined type pneumatic precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46–52. (in Chinese)
- [15] 赖庆辉,于庆旭,苏微,等. 三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):102–112.
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and test of Sanchi ultra-narrow row air suction precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102–112. (in Chinese)
- [16] 陈美舟,刁培松,张银平,等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(21):8–16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of single disc and double row air suction seeder for soybean narrow row dense planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8–16. (in Chinese)
- [17] 夏红梅,李志伟,甄文斌. 气力板式蔬菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(6):56–60.
XIA Hongmei, LI Zhiwei, ZHEN Wenbin. Design and test of pneumatic plate vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 56–60. (in Chinese)
- [18] 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报,2013,44(12):68–73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic drum type rapeseed concentrate collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68–73. (in Chinese)
- [19] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):46–57.
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46–57. (in Chinese)
- [20] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 窄行密植西洋参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):92–103.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Design and test of narrow row dense planting American ginseng precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 92–103. (in Chinese)
- [21] 陈海涛,李桐辉,王洪飞,等. 气吸滚筒式垄上三行大豆密植排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(17):16–24.
CHEN Haitao, LI Tonghui, WANG Hongfei, et al. Design and parameter optimization of three-row soybean dense planting seeder on air-suction drum ridge[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 16–24. (in Chinese)
- [22] 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 test of seed filling performance of air-suction disc type micro potato steaker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44–53. (in Chinese)
- [23] 廖宜涛,廖庆喜,王磊,等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报,2018,34(24):10–17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Study on the influencing factors of seed absorption effect of pneumatic small particle size seed concentrate seed drainage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10–17. (in Chinese)
- [24] 单伊尹. 探出开孔式水稻膜上高速插秧机分插机构设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
SHAN Yiyin. Design and experiment of high-speed rice transplanter interpolation mechanism for protruding open-hole rice film [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

- [25] 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)
- [26] 廖庆喜,王迪,姚露,等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):62-72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and test of perforation device of rape laminated perforation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62-72. (in Chinese)
- [27] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):29-37.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29-37. (in Chinese)
- [28] 刘姣娣,曹卫彬,田东洋,等. 钵苗有效零速移栽栽植机构运动学分析与试验[J]. 机械工程学报,2017,53(7):76-84.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Kinematic analysis and test on transplanting mechanism with effective zero-speed transplanting on mulch film[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 76-84. (in Chinese)
- [29] 李沐桐,李天宇,官晓东,等. 旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):48-57.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48-57. (in Chinese)
- [30] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(9):29-36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment of seed transfer induction device for rapeseed precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29-36. (in Chinese)
- [31] 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.

(上接第 30 页)

- [19] 龚建伟,刘凯,齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京:北京理工大学出版社,2019:24-89.
- [20] 刘凯,陈慧岩,龚建伟,等. 高速无人驾驶车辆的操控稳定性研究[J]. 汽车工程, 2019,41(5):514-521.
LIU Kai, CHEN Huiyan, GONG Jianwei, et al. Study on handling stability of high-speed unmanned vehicle[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(5): 514-521. (in Chinese)
- [21] 陈威,廖文浩,刘明春. 基于 MPC 的自动驾驶车辆横向路径跟踪控制[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020,42(3):279-288.
CHEN Wei, LIAO Wenhao, LIU Mingchun. Lateral path tracking control of autonomous vehicle based on MPC[J]. Journal of Nanchang University (Engineering Edition), 2020, 42(3): 279-288. (in Chinese)
- [22] 刘凯,龚建伟,陈舒平,等. 高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的动力学建模分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14):141-151.
LIU Kai, GONG Jianwei, CHEN Shuping, et al. Dynamic modeling and analysis of optimal motion planning and control of high-speed unmanned vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 141-151. (in Chinese)
- [23] 张睿,谢正超,赵晶,等. 基于非线性预测和沿轨迹线性化 MPC 的车辆路径跟踪控制方法[J]. 汽车技术,2022(3):28-34.
ZHANG Rui, XIE Zhengchao, ZHAO Jing. Vehicle path tracking control method based on nonlinear prediction and linearized MPC along trajectory[J]. Automobile Technology, 2022(3): 28-34. (in Chinese)
- [24] 王博洋,龚建伟,高天云,等. 基于双层驾驶员模型的履带车辆纵向与横向协同跟踪控制方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(9):1675-1682.
WANG Boyang, GONG Jianwei, GAO Tianyun, et al. Longitudinal and lateral cooperative tracking control method of tracked vehicle based on double-layer driver model[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(9): 1675-1682. (in Chinese)
- [25] 刘凯,王威,龚建伟,等. 越野地形下智能车辆的动力学建模与轨迹跟踪[J]. 北京理工大学学报, 2019,39(9):933-937.
LIU Kai, WANG Wei, GONG Jianwei, et al. Dynamic modeling and trajectory tracking of intelligent vehicle in off-road terrain [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 39(9): 933-937. (in Chinese)
- [26] 刘西,明朗,胡远志. 基于 MPC 算法的车辆自适应巡航系统分层控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021,35(3):53-60.
LIU Xi, MING Lang, HU Yuanzhi. Research on hierarchical control of vehicle adaptive cruise system based on MPC algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(3): 53-60. (in Chinese)
- [27] 范贤波,彭育辉,钟聪. 基于自适应 MPC 的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(4):500-507.
FAN Xianbo, PENG Yuhui, ZHONG Cong. Trajectory tracking control of autopilot vehicle based on adaptive MPC[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 500-507. (in Chinese)
- [28] 何勇,蒋浩,方慧,等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018,34(9):21-32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of vehicle intelligent obstacle detection method and its agricultural application[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese)