

群组吸孔气吸式芹菜排种器设计与试验

李 骅^{1,2} 马云龙^{1,2} 於海明^{1,2} 王永健^{1,2} 孙新平^{2,3} 尹家巧^{2,3}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 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: 气吸式排种器可实现小颗粒种子的精密排种,但芹菜种子球度较小,且农艺要求一穴多粒,成为芹菜气吸式排种器精量排种的难点。为此本文基于 CFD 流体仿真,结合多因素、多水平试验分析及验证等方法,设计一种群组吸孔的气吸式芹菜精量排种器。以西芹“文图拉”芹菜种子为研究对象,首先,根据芹菜种子三轴尺寸,确定吸孔形状及尺寸;其次,通过 CFD 流场仿真研究不同吸孔分布结构下吸孔负压并确定群组吸孔数量;再次,通过理论分析推导确定最低吸种负压;最后,以气室真空度、种盘转速、吸孔分布结构为试验因素,以漏播率、重播率、合格率为试验指标,进行三因素三水平正交试验。通过极差分析和方差分析确定了影响排种性能的主次因素与最佳参数组合。结果表明:气吸式芹菜精密排种器较优组合参数为气室真空度 -4 kPa 、种盘转速 20.75 r/min 、吸孔分布结构为正等边三角形,此时播种合格率为 88.9% ,漏播率为 5.1% ,重播率为 6.0% 。田间试验结果为:合格率 83.48% ,重播率 9.15% ,漏播率 7.37% 。本研究实现了气吸式芹菜精密穴播,可为一穴多粒球度较小的小颗粒种子精量排种器设计提供参考。

关键词: 芹菜; 气吸; 排种器; 群组吸孔

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0087-09



Design and Experiment of Group Air-suction Type Celery Seed Metering Device

LI Hua^{1,2} MA Yunlong^{1,2} YU Haiming^{1,2} WANG Yongjian^{1,2} SUN Xinping^{2,3} YIN Jiaqiao^{2,3}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, 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: The air-suction seed metering device can realize precise seed metering of small particles, but the low sphericity of celery seeds and the agronomic requirements of multiple seeds in one hole bring difficulties to the accurate seed metering research of celery. Aiming at this problem, a celery precise seed metering device was designed and developed with a group of suction holes by using CFD flow field simulation, vacuum derivation, and bench test. Taking celery seed “Ventura” as the research object, firstly, the shape and size of the suction hole were determined according to the triaxial size of the celery seed. Secondly, the CFD flow field simulation determined the numbers of group suction holes. Thirdly, vacuum degree theory determined the lowest negative pressure of seed suction. Finally, a three factors and three levels orthogonal test was carried out with vacuum degree of gas chamber, the rotational speed of seeding plate, and distribution structure of suction hole as test factors, and the missed sowing rate, replaying rate and qualified rate as test indexes. The primary and secondary elements, and the optimal parameter combinations affecting seeding performance were determined using range and variance analyses. The experimental results showed that when the optimal combination parameters of air-suction celery precision seed metering device comprised of vacuum degree of -4 kPa , seed disk speed of 20.75 r/min , and distribution structure of holes being an equilateral triangle, the qualified rate of seeding was 88.9% , the missed seeding rate was 5.1% , and the replaying rate was 6.0% . Field test demonstrated that the qualified rate of seeding was 83.48% , the missed seeding rate was 9.15% , and the replaying rate was 7.37% . The research realized precision hill-drop planting of celery with an air-suction seed arrangement device.

Key words: celery; air-suction; seed metering device; group suction hole

0 引言

根据芹菜播种农艺要求,每穴播种 2~4 粒芹菜种子,待出苗后间苗、定苗以保证芹菜苗生长所需空间。目前,中国芹菜播种机械化程度较低,大多地区仍以人工条播和育苗移栽为主,相比于传统的芹菜播种模式,精密排种器能保证芹菜农艺要求所需的行距、株距、穴粒数^[1-2],不仅省去了种子催芽、育苗、移栽等环节,且有利于提高播种的效率和质量^[3]。精密排种器按工作原理分为机械式和气力式两大类,相比于机械式排种器,气力式排种器具有不伤种、种子形状尺寸适应性强等优点^[4-7]。近年来,芹菜种植面积不断增加,种植规模不断扩大,对每穴播种 2~4 粒芹菜种子的精量穴播技术及配套设备需求更为迫切。

国外学者对气力式排种器进行了相关研究。YAZGI 等^[8]研究了不同吸孔数对排种器排种时种子均匀性的影响;PAREEK 等^[9]建立了斜板排种装置充种预测的 3-5-1 人工神经网络(ANN)模型,应用粒子群算法(PSO)获得 100% 充种所对应的最优运行参数值;NAL 等^[10]利用流体力学的基本原理阐述了气吸式排种器充种机理。我国对气力式排种器的研究始于 20 世纪 70 年代末^[11]。但目前气吸式排种器播种的是球度高且单粒穴播的种子,针对球度较低的种子研究较少。相关研究^[12-16]针对的种子球度较低,但种子尺寸较大,实现气吸精量播种相对容易。针对小颗粒、非球形且一穴多粒的排种器研究较少。

本文基于芹菜多粒穴播的农艺要求,设计一种群组吸孔的气吸式芹菜精密排种器,确定排种器关键部件的结构参数。通过台架试验研究不同气室真空度、种盘转速及吸孔分布对排种性能的影响,从而确定排种器工作参数的最优组合,实现芹菜精密、高效穴直播。

1 芹菜种子三轴尺寸测量与分析

芹菜种子三轴尺寸是设计吸孔等结构的重要参数。选取国内产量高、种植广泛、品质好的芹菜品种西芹“文图拉”作为试验材料。从芹菜种子中随机抽取 100 粒,利用 OLS4100 型激光共聚焦扫描显微镜分别测量长度(L)、宽度(W)、厚度(T),并记录数据。对芹菜外形尺寸测量值进行统计,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,芹菜种子三轴尺寸均较小且有一定差别,三轴尺寸变异系数较大,球度较低(64.2%),整体呈椭球形。长度、宽度、厚度统计值

表 1 芹菜种子尺寸统计结果

Tab.1 Statistical results of celery seed size

参数	平均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
长度	1.70	0.13	7.6
宽度	0.95	0.09	9.1
厚度	0.80	0.09	11.2

均近似符合正态分布,85% 以上种子长度、宽度、厚度在 1.55~1.99 mm、0.86~1.13 mm、0.68~0.98 mm 间。

2 排种器工作原理与结构参数确定

如图 1a 所示,气吸式芹菜精量排种器主要由种箱、排种盘、搅种轮、壳体、清种装置、传动装置等组成。根据种子在排种器中的运动过程,可将排种器分为充种区 I、外圈清种区 II、内圈清种区 III、携种区 IV、落种区 V、清堵区 VI、过渡区 VII,如图 1b 所示。电机动力经联轴器、排种轴驱动排种盘转动,排种器壳体与种盘之间通过螺栓连接,便于更换不同种盘,密封圈与排种盘和排种器壳体贴合形成负压气室,风机通过气流缓冲箱经气流管与正负压口连接,向气室提供稳定气流,保持气室压力稳定。

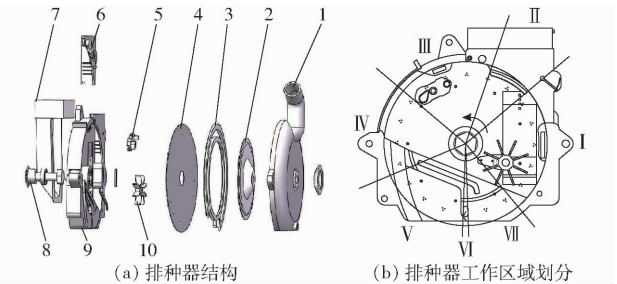


图 1 排种器结构与工作区域划分示意图

Fig.1 Structure and working principle of metering device area division diagram

1. 负压壳体 2. 密封环挡板 3. 密封圈 4. 排种盘 5. 内圈清种装置 6. 外圈可调节清种装置 7. 种箱 8. 传动装置 9. 箱体 10. 搅种轮 I. 充种区 II. 外圈清种区 III. 内圈清种区 IV. 携种区 V. 落种区 VI. 清堵区 VII. 过渡区

排种器工作时,启动电机,使排种盘按一定转速转动,启动风机,使气室形成稳定正负压。当种盘吸孔转动至充种区时,气室负压与大气压形成的压差使芹菜种子吸附于吸孔处;当种盘吸孔转动至落种区时,密封圈将负压气室与排种盘之间的气流隔断,种子所受吸附力消失,在重力作用下落种,完成排种过程。

2.1 清种装置设计

清种装置与种子碰撞将吸孔吸附的多余种子去除,确保一孔一吸,合适的清种距离有利于降低重播率,清种装置与吸孔距离过大,无法与种子接触,距

离过小,将造成过度清种,漏播率提高。根据台架试验及田间验证试验,排种盘为正等边三角形吸孔分布结构的排种器工作性能最优,因此清种装置包含内圈清种装置及外圈清种装置,如图 2 所示。

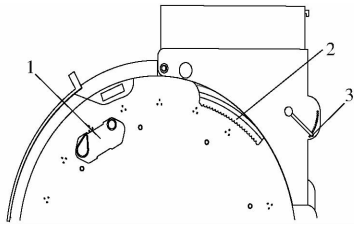


图 2 清种装置结构示意图

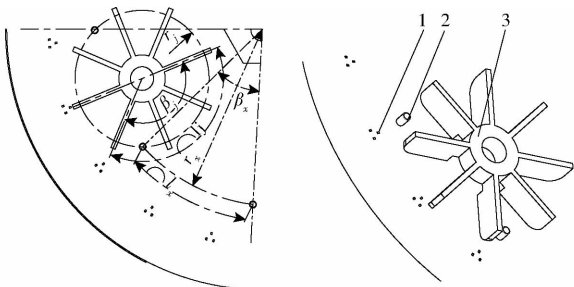
Fig.2 Structure diagram of seed clearing device

1. 内圈清种装置 2. 外圈清种装置 3. 调节装置

外圈清种装置设计有调节装置,可手动调节清种刮板与外圈吸孔之间距离;内圈清种装置清种过程分为两级:第一级碰撞使距离吸孔中心较远的重吸种子被清除,第二级碰撞使距离吸孔中心较近的重吸种子被清除。

2.2 搅种装置设计

搅种装置由搅种轮与搅种柱组成,如图 3b 所示,搅种轮固定于箱体处,9 个搅种柱均布于种盘圆周方向,搅种柱随种盘同步转动过程中与搅种轮发生周期性碰撞带动搅种轮转动,使种群里的种子处于运动状态,使种子易被吸孔吸附。搅种柱转动时需接触搅种轮叶片,搅种轮分布圆直径应小于型孔分布圆直径,选取搅种柱分布圆直径 r_j 为 160 mm,如图 3a 所示。



(a) 搅种装置分析示意图 (b) 搅种装置结构示意图

图 3 搅种装置

Fig.3 Stirring device

1. 排种盘 2. 搅种柱 3. 搅种轮

搅种柱、搅种轮叶片数量影响充种效果,搅种轮、搅种柱最优工作状态为:搅种柱随种盘转动时,当第 1 个搅种柱接触搅种轮叶片,带动搅种轮转动,第 1 个搅种柱离开搅种轮叶片时,第 2 个搅种柱与搅种轮叶片接触,从而使搅种轮持续转动。由公式

$$\begin{cases} l_x = \frac{\beta_x \pi r_x}{180} \\ l_j = \frac{\beta_j \pi r_j}{180} \end{cases} \quad (1)$$

式中 l_x ——两相邻扰种柱之间弧长,m
 β_x ——两相邻扰种柱之间角度,(°)
 r_x ——扰种柱圆直径,m
 l_j ——与两相邻扰种柱接触叶片之间弧长,m
 β_j ——与两相邻扰种柱接触的叶片之间角度,(°)

计算得 $r_x \beta_x = r_j \beta_j$,考虑排种器整体结构,综合选择 $r_j = 45 \text{ mm}$, $\beta_x = 40^\circ$,搅种柱间夹角为 40° ,均匀分布于排种盘表面, $\beta_j = 135^\circ$,叶片数为 8 个,夹角为 45° 。

2.3 排种盘设计

排种盘是气吸式精量排种器的技术核心,其结构参数对排种器吸排种性能有重要影响。参考《农业机械设计手册》^[17],气吸式排种器种盘直径选取范围为 80 ~ 260 mm,增大排种盘尺寸,有利于提高充种性能,但会增大排种器整体尺寸,综合考虑设计排种盘直径为 220 mm,如图 4 所示。由于芹菜种子球度低,种子间摩擦阻力大,流动性差,因此排种盘装有 9 个搅种柱,种盘转动的同时搅种柱驱动搅种轮转动,提高种箱内种子流动性,便于吸种。

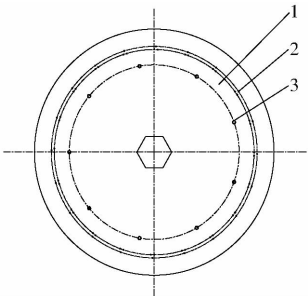


图 4 排种盘结构示意图

Fig.4 Structure diagram of planter plate

1. 排种盘 2. 吸孔 3. 搅种柱

排种盘参数主要包括吸孔孔径及吸孔分布结构,这些参数是保证充种、携种、投种的关键。

2.3.1 吸孔孔径确定

吸孔是排种器设计的关键,其结构、尺寸直接影响充种质量及其他部件工作参数。如图 5 所示,种子被吸孔吸附的姿态有 3 种:横卧、侧卧和直立姿态,依据最小势能原理,种子以横卧姿态被吸附时所需吸附力最小^[18]。目前,气吸圆盘式精密排种器吸孔多采用直孔或直孔组合孔,适用于球形或丸粒化

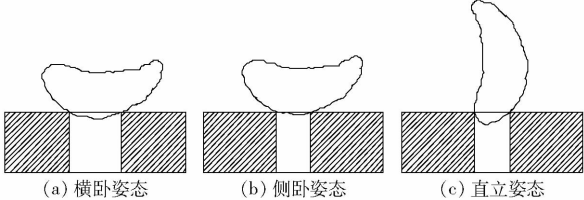


图 5 芹菜种子吸附姿态

Fig.5 Adsorption attitude of celery seed

的种子,但芹菜种子球度小,在直孔或直孔组合孔情况下充种质量差,漏播严重,不能满足播种要求。

当种子球度较大时,由经验公式 $d = (0.64 \sim 0.66)D$ (d 为直孔直径, D 为种子平均宽度)确定的吸孔尺寸既能保证种子有足够的附着力随种盘运动,又能减少漏吸与重吸。针对非球形的三轴尺寸,同样取三轴尺寸的 0.64 ~ 0.66 倍作为矩形吸孔的尺寸。吸孔开设倒角,易减小气流流通阻力,但造成种子与吸孔之间密封不严,增大间隙造成一孔多吸,对于非球形种子,吸孔处不宜开设倒角。由芹菜种子平均长、宽、高计算得出型孔尺寸为 1.09 ~ 1.12 mm、0.61 ~ 0.62 mm、0.512 ~ 0.528 mm。为防止种子以直立姿态吸入吸孔,最终确定矩形吸孔长、宽分别为 1、0.5 mm,吸孔高度等于种盘厚度,为 1 mm。

2.3.2 排种盘吸孔分布及吸孔组数设计

芹菜种子发芽率低,因此采用群组吸孔精量吸附芹菜种子,以满足每穴 2 ~ 4 粒种子的播种需求,根据芹菜播种农艺要求确定每组吸孔数量为 3 个。合理的吸孔分布结构,有利于提高粒距合格率、控制成穴面积、改善每穴种子集中程度。本文设计 3 种吸孔分布结构:正等边三角形吸孔分布结构、倒等边三角形吸孔分布结构、直线形吸孔分布结构,如图 6 所示。

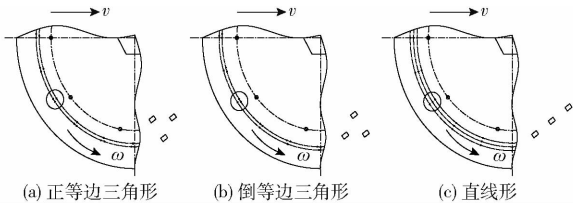


图 6 吸孔分布结构图

Fig. 6 Structure diagram of suction distribution

群组吸孔吸附种子时,吸孔间距是影响成穴率的关键,吸孔间距过大会导致每穴种子分散严重;吸孔间距过小,当种子以“横卧”姿态被吸附时,会出现多个吸孔吸附一粒种子的情况。由

$$S \geq 2L_{\max} \tag{2}$$

式中 S ——吸孔间距,mm

$L_{\max}$ ——种子最大尺寸,mm

可知,吸孔间距应由种子最大尺寸确定,根据所测种子最大尺寸,取吸孔间距为 4.00 mm。

不同吸孔分布结构产生不同的气室流场,影响气室内压强,进而影响吸种效果。但由于孔间距离较短,气流场产生影响较大,压强分布复杂,目前尚无针对此类多孔结构的文献可供借鉴。群组吸孔数量与排种机前进速度、种盘直径、株距有关,在不影响排种器作业质量及整体结构情况下应尽量增加群组吸孔数量^[19]。但吸孔数量增多所需风机提供的

负压也将增大,种盘制作成本也随之提高,综合选择吸孔组数范围为 20 ~ 40 组,为获取相同吸孔组数下最佳吸孔分布结构,通过 CFD 对排种器流场进行仿真,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[20-21],分别对吸孔组数 20、30、40 条件下的 3 种排种器的流场分布进行仿真研究。设置进口压力为 0 Pa,出口压力为 -2 000 Pa,收敛条件为 10^{-4} 。在 CFD-Post 中建立气室云图,并通过 Function Calculator 获取气室内吸孔端面平均压力、气流场仿真结果如图 7 ~ 9 所示。

由图 7 ~ 9 可知,吸孔组数为 20 时,气室内压力分布较为均匀,有利于吸种均匀性,群组吸孔组数为 20、30、40 时,吸孔分布结构为正等边三角形的排种器吸孔端面平均压力分别为 -1 573.88、-1 446.45、-1 268.2 Pa;吸孔分布结构为倒等边三角形的排种器吸孔端面平均压力分别为 -1 576.98、-1 500.13、-1 321.23 Pa;吸孔分布结构为直线形的排种器吸孔端面平均压力分别为 -1 594.99、-1 517.15、-1 346.37 Pa,排种器气室流场压力均由中心处向两端逐渐降低,且随着吸孔组数增多,气室压力逐渐降低,这是由于在相同负压条件下,吸孔组数增多,气室内部压力会出现不同程度的衰减。

在相同吸孔组数下,3 种吸孔分布结构的吸孔分布半径不同,或吸孔分布半径相同而吸孔个数不同,产生不同的吸孔端面压力,吸孔端面平均压力由大到小均为直线形结构、倒等边三角形结构、正等边三角形结构,但三者差异较小,需通过试验进一步确定吸种效果较优的吸孔分布结构。

随着吸孔组数增多,气室负压与吸孔端面平均负压逐渐减小。吸孔组数为 20 时,气室负压与吸孔平均负压均最大且气室内压力分布最为均匀,因此,风机提供相同的负压情况下,吸孔组数为 20 时,吸孔吸种能力最强、吸种效果最优。

2.4 充种区受力分析

排种器的吸种能力是保证播种质量的核心,吸种环节中种子受到气流场、种群作用力和重力的作用。不同种子被吸附的姿态所需吸力不同,因此,通过对芹菜种子的受力分析可以得出矩形吸孔不同吸附姿态下所需的负压气室真空度。

芹菜种子被吸附于排种盘吸孔上的受力分析如图 10 所示。

单个吸孔吸附一个芹菜种子须满足

$$(P - F_N) \frac{A}{2} = QC \tag{3}$$

其中

$$P = pAB$$

$$Q = G + J\cos\theta + F_f\sin\theta$$

式中 P ——种子所受吸附力,N

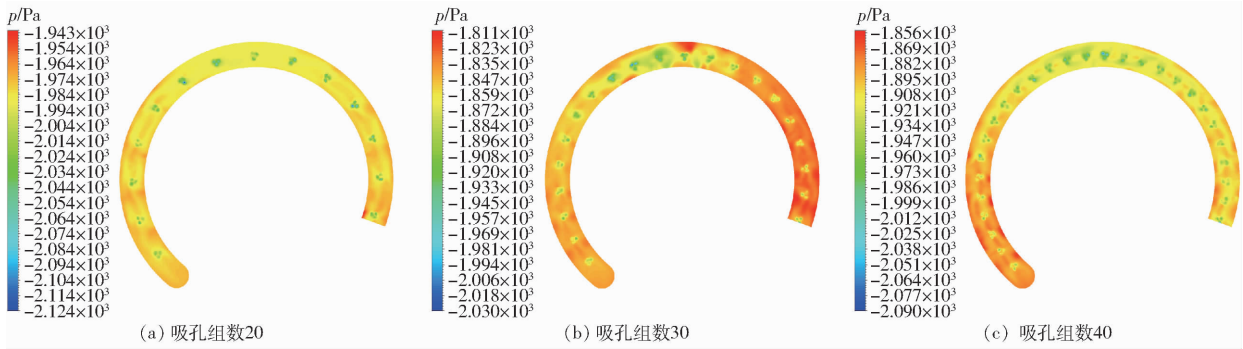


图 7 正等边三角形吸孔分布结构排种器气室压力云图

Fig. 7 Air chamber pressure cloud diagrams of equilateral triangle suction distribution structure seed metering device

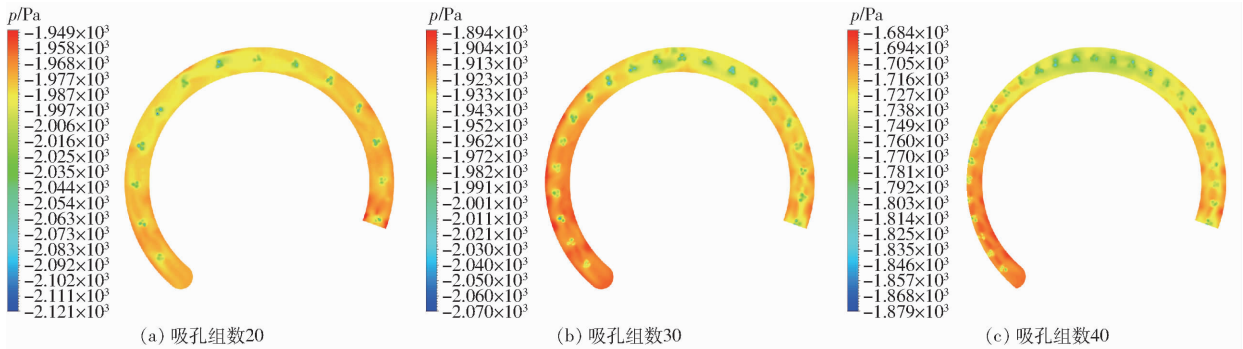


图 8 倒等边三角形吸孔分布结构排种器流场气室压力云图

Fig. 8 Air chamber pressure cloud diagrams of inverse equilateral triangle suction distribution structure seed metering device

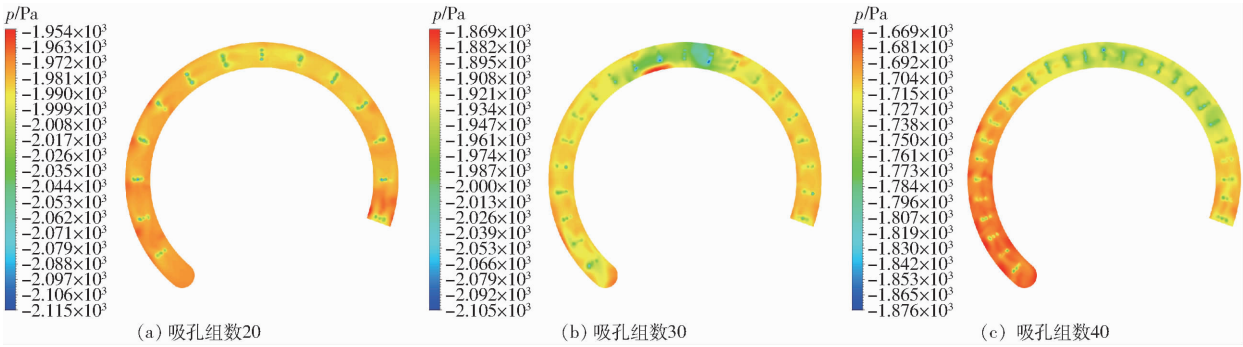


图 9 直线形吸孔分布结构排种器流场气室压力云图

Fig. 9 Air chamber pressure cloud diagrams of linear type suction distribution structure seed metering device

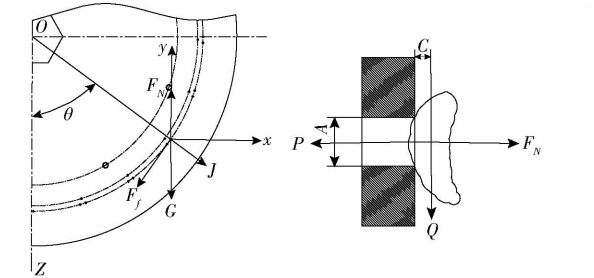


图 10 种子受力分析图

Fig. 10 Stress analysis of seeds

p ——吸孔处临界真空度,Pa
 θ ——离心力与线段 OZ 夹角, ($^{\circ}$)
 F_N ——种子充种区所受支持力,N
 C ——种子中心至排种盘距离,cm
 Q ——合力,N J ——离心力,N

G ——单粒种子质量,N
 F_f ——种子运动过程中所受内摩擦力,N
 A ——型孔长度,m
 B ——型孔宽度,m

得到负压气室真空度为

$$p = \frac{2K_1K_2K_3GC}{A^2B} \left(1 + \lambda \cos \theta + \frac{v^2}{gR_i} \sin \theta \right) \quad (4)$$

式中 λ ——种子摩擦阻力综合系数

K_1 ——吸种可靠系数
 K_2 ——工作稳定可靠系数
 K_3 ——环境可靠系数
 R_i ——排种盘吸孔分布半径,m
 v ——吸孔中心处线速度,m/s
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

当种子以横卧、侧卧姿态被吸附时,种子中心与排种盘距离 C 为种子厚度 T 的一半,此时吸孔处真空度为

$$p = \frac{K_1 K_2 K_3 G T}{A^2 B} \left(1 + \lambda \cos \theta + \frac{v^2}{g R_i} \sin \theta \right) \quad (5)$$

当种子以直立状态姿态被吸附时,种子中心与排种盘距离 C 为种子长度 L 的一半,此时吸孔处真空度为

$$p = \frac{K_1 K_2 K_3 G L}{A^2 B} \left(1 + \lambda \cos \theta + \frac{v^2}{g R_i} \sin \theta \right) \quad (6)$$

由式(4)~(6)可知,吸孔处真空度与种子中心至排种盘距离成正比,因此,种子应尽量贴近种盘吸孔,以促进种子与种群脱离;吸孔中心线速度与吸孔处真空度成正比,随种盘转速提高,所需负压增加;种子摩擦阻力综合系数对吸孔吸附效果影响显著,因此,增大种群离散程度,降低种层厚度有利于提高吸孔吸附能力;吸孔面积与吸孔处真空度成反比,因此,合理增大吸孔面积有利于提高吸孔吸附能力。由式(4)~(6)可知,种子以横卧、侧卧姿态被吸附时所需负压气室真空度最小,为保证各吸孔均能稳定吸附种子,吸孔处最低真空度应满足式(6)。当种盘转速为 20.75 r/min 时,根据式(6)可得充种区吸孔处临界真空度 p 的变化如图 11 所示。

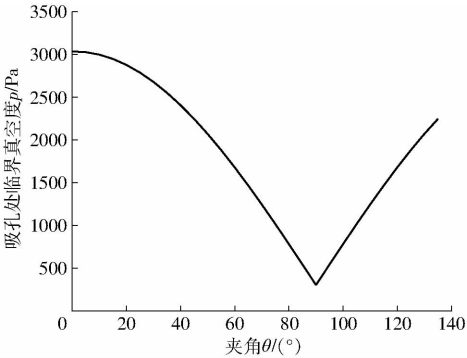


图 11 充种区吸孔处临界真空度变化曲线
Fig. 11 Variation curve of critical vacuum degree at suction hole in seed filling area

3 排种器工作参数优化

3.1 试验装置

试验所用芹菜品种为西芹“文图拉”,排种器试验台如图 12 所示,通过更换 3 种种盘,实现排种器结构参数的变化。排种器正负压由高压旋涡风机提供(型号 HG-1500S,功率 1.5 kW,最大风压 27 kPa),通过调节风机变频器(型号 LK350-2.2G3,功率 2.2 kW)改变气室真空度;传送带模拟拖拉机田间行驶情况,通过调节变频调速器(功率 1.5 kW,型号 BT40D1.5 KWT)改变传送带速度;电机(型号

AM-370L-B/BL2104L,功率 370 W)动力经联轴器传递给排种盘,从而实现种盘转动。试验前在传送带上涂一层糯米胶用于粘附排种器排出的芹菜种子。

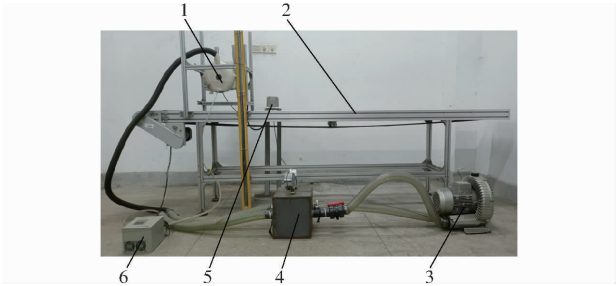


图 12 试验装置

Fig. 12 Test device

1. 排种器 2. 传送带 3. 高压旋涡风机 4. 气流缓冲箱 5. 电机变频器 6. 变频调速器

3.2 试验因素与试验指标

通过预试验发现,气吸式芹菜精量排种器进行作业时,负压气室真空度、排种盘转速以及吸孔分布结构对排种器作业性能都具有较大的影响。为明确以上因素对排种器性能的影响,得到芹菜精量排种器的较优工作参数,以负压气室真空度、种盘转速、吸孔分布结构为试验因素,设计三因素三水平正交试验,通过试验结果分析各个因素对试验指标的影响,以期得到较优的工作参数组合。

气室真空度:气室真空度较小,吸孔处气流不足,吸附力难以克服种群间的作用力以及种子重力,即使种子被吸附,在种子随种盘做圆周运动的同时受到气流曳力等因素也会致使种子从吸孔处掉落;气室真空度较大,由于种子球度不高,种子被吸附时与吸孔之间存在间隙,气流通过间隙吸附其余种子,造成一孔多吸现象。当种盘转速提高,为保证播种质量,气室负压也需相应提高,根据台架预试验确定气室真空度范围为 -4.5 ~ -3.5 kPa。

排种盘转速:通过预试验发现,种盘转速较低时,易产生一孔多吸现象;转速逐渐提高,吸孔与种群达到较为适宜的接触时间,此时排种性能较优;种盘转速增大到一定范围后,吸孔与种群接触不充分,充种时间减少,而且种子随种盘转动过程中受到离心力、曳力等因素导致种子掉落^[22],使漏播率增大,合格率降低。根据拖拉机挡位前进速度,综合选择种盘转速为 12.45、20.75、29.05 r/min,对应拖拉机前进速度为 1.5、2.5、3.5 km/h。

吸孔分布结构:不同的群组吸孔分布结构对种子在排种盘中的运动有直接影响,对充种效果、排种成穴性也有重要影响。针对排种器内部气室,不同群组吸孔结构导致排种器内部流场不同,直接影响

排种器工作性能。

参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》，试验指标为合格率 Y 、重播率 E 、漏播率 M 。其中选取大于 4 粒/穴为重播,0 或 1 粒/穴为漏播,2~4 粒/穴为合格。

3.3 正交试验

3.3.1 正交试验设计

以气室真空度、吸孔分布结构、种盘转速为试验因素,设计三因素三水平试验,试验按照 $L_9(3^4)$ 正交表设计,共 9 组试验,每组试验重复 3 次取平均,试验因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Levels of experimental factors

水平	因素		
	气室真空度/kPa	种盘转速/(r·min ⁻¹)	吸孔分布结构
1	-3.5	12.45	正等边三角形
2	-4.0	20.75	倒等边三角形
3	-4.5	29.05	直线形

3.3.2 试验结果与分析

正交试验方案及结果如表 3 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素水平值),传送带种子分布情况如图 13 所示,为确定试验因素对试验指标的影响,对各试验因素进行极差分析与方差分析,试验分析结果如表 4、5 所示。

表 3 试验结果
Tab.3 Experimental results

序号	因素			漏播率/%	重播率/%	合格率/%
	X_1	X_2	X_3			
1	1	1	1	9.6	6.5	83.9
2	1	2	2	11.5	4.3	84.2
3	1	3	3	16.5	3.6	79.9
4	2	1	3	7.2	11.4	81.4
5	2	2	1	5.1	6.0	88.9
6	2	3	2	9.7	7.3	84.2
7	3	1	2	4.2	11.3	83.0
8	3	2	3	7.1	7.8	85.1
9	3	3	1	7.9	6.4	85.7

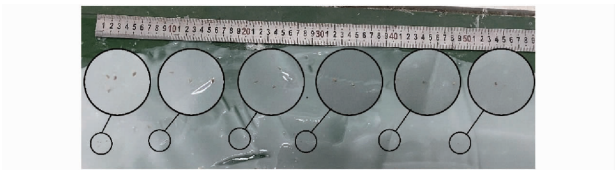


图 13 种子分布图
Fig.13 Seed distribution diagram

由表 4 可知,对播种漏播率影响的主次顺序是气室真空度、种盘转速、吸孔分布结构;对播种重播率影响的主次顺序是种盘转速、气室真空度、吸孔分布结构;对播种合格率影响的主次顺序为

表 4 极差分析结果

Tab.4 Results of range analysis

试验指标	分析项	A	B	误差	C
漏播率	K_1	37.6	21.0	26.4	22.6
	K_2	22.0	23.7	26.6	25.4
	K_3	19.2	34.1	25.8	30.8
	极差 R	18.4	13.1	0.8	8.2
	主次顺序	A、B、C			
	较优组合	$A_3B_1C_1$			
重播率	K_1	14.4	29.2	21.6	18.9
	K_2	24.7	18.1	22.1	22.9
	K_3	25.5	13.7	20.9	22.8
	极差 R	11.1	15.5	1.2	4.0
	主次顺序	B、A、C			
	较优组合	$A_1B_3C_1$			
合格率	K_1	248.0	248.3	253.2	258.5
	K_2	254.5	258.2	251.3	251.4
	K_3	253.8	249.8	251.8	246.4
	极差 R	6.5	9.9	1.9	12.1
	主次顺序	C、B、A			
	较优组合	$A_2B_2C_1$			

表 5 方差分析

Tab.5 Analysis of variance

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
漏播率	A	65.3	2	32.76	567.08	0.002 **
	B	31.90	2	15.95	276.02	0.004 **
	C	11.58	2	5.79	100.23	0.010 *
	误差	0.12	2	0.06		
	合计	109.11	8			
重播率	A	25.55	2	12.77	105.48	0.009 **
	B	29.50	2	14.79	121.77	0.008 **
	C	3.47	2	1.73	14.32	0.065
	误差	0.24	2	0.12		
	合计	58.76	8			
合格率	A	8.49	2	4.24	13.12	0.071
	B	18.98	2	9.49	29.35	0.033 *
	C	24.65	2	12.32	38.11	0.026 *
	误差	0.65	2	0.32		
	合计	52.76	8			

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

吸孔分布结构、种盘转速、气室真空度。

由表 4 可知,漏播率的较优组合为 $A_3B_1C_1$,重播率的较优组合为 $A_1B_3C_1$,合格率的较优组合为 $A_2B_2C_1$ 。由表 5 可知,气室真空度对漏播率、重播率有极显著影响,对合格率有显著影响;种盘转速对漏播率、重播率有极显著影响,对合格率有显著影响;吸孔分布结构对漏播率、重播率、合格率有显著影响。根据芹菜播种要求,需保证合格率的同时降低漏播率、重播率,综上所述,气吸式芹菜精密排种器

较优组合为 $A_2B_2C_1$,即气室真空度为 -4 kPa 、种盘转速为 20.75 r/min 、吸孔分布为正等边三角形,此时排种合格率较优,为 88.9% ,漏播率较低,为 5.1% ,重播率为 6.0% ,满足芹菜精密播种要求。

3.4 田间试验

为进一步验证气吸式芹菜精密排种器的田间作业性能,2022 年 9 月 26 日于上海农业科学院进行芹菜播种试验,如图 14 所示。播种芹菜籽粒品种为西芹“文图拉”(台架试验所用品种),播种前预先旋耕起垄,垄长 1.2 m ,高 15 cm ,试验配套动力为久保田 M704K 型拖拉机。试验前,利用夜光剂染色种子,播种完成后测量每穴种子粒数、粒距,获得播种指标。



图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiment

试验时参照台架试验最优作业参数,选取气室真空度为 -4.0 kPa ,种盘转速为 20.75 r/min ,对应拖拉机前进速度为 2.5 km/h ,吸孔分布结构为正等边三角形。取播种机匀速前进的 20 m 为一组取样长度,每组试验重复 3 次,取平均值为最终结果。田间试验结果为:合格率 83.48% ,重播率 9.15% ,漏播率 7.37% 。

台架试验结果与田间试验结果存在差异,主要原因为:田间播种时机具存在振动,芹菜种子质量较轻,对充种合格率及投种轨迹存在一定影响;风机风压不稳定,风机风压与拖拉机 PTO 轴转速相关,拖拉机前进速度的变化导致风机风压不稳定,降低了播种合格率。

4 结论

(1)基于芹菜精量播种的农艺要求,设计了一种群组吸孔的气吸式芹菜精量穴播排种器,基于芹菜种子“文图拉”三轴尺寸设计了矩形吸孔,并通过台架试验及田间试验验证了矩形孔设计的合理性。排种盘包括 20 组吸孔,每 3 个吸孔一组。设计了 3 种吸孔分布形式:正等边三角形、倒等边三角形、直线形。

(2)通过 CFD 流场仿真,得出随群组吸孔数量增多,吸孔处平均负压降低的结论,最终确定群组吸孔数量为 20 组。对芹菜种子不同吸附姿态受力分析,研究了不同吸附姿态下所需气室真空度,得出了影响气室真空度的因素。

(3)进行三因素三水平正交试验,通过极差分析、方差分析结果得出气室真空度、种盘转速、吸孔分布结构对排种器工作性能的影响。当负压气室真空度为 -4 kPa 、种盘转速为 20.75 r/min 、吸孔分布结构为正等边三角形时,播种合格率为 88.9% ,漏播率为 5.1% ,重播率为 6.0% ,田间试验播种合格率为 83.48% ,重播率为 9.15% ,漏播率为 7.37% 。因芹菜出苗后尚需间苗,此合格率符合当前农艺要求。

参 考 文 献

[1] 刘彩玲,都鑫,张福印,等. 锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 56–65. LIU Cailing, DU Xin, ZHANG Fuyin, et al. Design and test of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 56–65. (in Chinese)

[2] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75–86, 139. (in Chinese)

[3] 王凤花,孙凯,赖庆辉,等. 单行气吸式微型薯精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 66–76. WANG Fenghua, SUN Kai, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of minituber precision single-row air-suction planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 66–76. (in Chinese)

[4] 杨文彩,阚成龙,张效伟,等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 95–105. YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 95–105. (in Chinese)

[5] 贾洪雷,张胜伟,陈天佑,等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 51–60. JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 51–60. (in Chinese)

[6] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54 - 66. (in Chinese)
- [7] 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 experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102 - 112. (in Chinese)
- [8] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56: 128 - 135.
- [9] PAREEK C M, TEWARI V K, MACHAVARAM R, et al. Optimizing the seed-cell filling performance of an inclined plate seed metering device using integrated ANN - PSO approach[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 5: 1 - 12.
- [10] NAL S, DEGIRMENCIOGLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. The Scientific and Technological Research Council of Turkey, 2012, 36(2): 133 - 144.
- [11] 祁亚卓, 相姝楠. 国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 205 - 208.
- QI Yazhuo, XIANG Shu'nan. Research status and development trend of vegetable planter at home and abroad[J]. Journal of Chinese for Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 205 - 208. (in Chinese)
- [12] 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(4): 70 - 78.
- LIU Hai, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Design and experiment of Chinese cabbage precision seed discharging device with combined positive and negative pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 70 - 78. (in Chinese)
- [13] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 22 - 33.
- GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seed scheduling performance of rape precision seed setter with cone-hole disc combined with positive and negative pressure[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 22 - 33. (in Chinese)
- [14] 顿国强, 毛宁, 刘文辉, 等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 70 - 78.
- DUN Guoqiang, MAO Ning, LIU Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for soybean plot breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 70 - 78. (in Chinese)
- [15] 邢赫, 臧英, 王在满, 等. 水稻气力式播量可调排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 20 - 28.
- XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and parameter optimization of rice pneumatic seeding metering device with adjustable seeding rate[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 20 - 28. (in Chinese)
- [16] 张顺, 杨继涛, 李勇, 等. 水稻内充气力式精量穴直播排种器吸种性能试验[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(8): 1379 - 1387.
- ZHANG Shun, YANG Jitao, LI Yong, et al. Experiment of sucking performance of inside-filling pneumatic type precision hill-drop drilling seed-metering device for rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(8): 1379 - 1387. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [18] 李娟娟, 张和平, 胡斌, 等. 组合式排种器的设计与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 551 - 556, 608.
- LI Juanjuan, ZHANG Heping, HU Bin, et al. Design and experiment of combined seed metering device[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2020, 41(5): 551 - 556, 608. (in Chinese)
- [19] 陈海涛, 王洪飞, 王业成, 等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 75 - 85.
- CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 75 - 85. (in Chinese)
- [20] 余金伟, 冯晓锋. 计算流体力学发展综述[J]. 现代制造技术与装备, 2013(6): 25 - 26, 28.
- YU Jinwei, FENG Xiaofeng. CFD development review[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2013(6): 25 - 26, 28. (in Chinese)
- [21] 吴民生, 段文广. 计算流体动力学(CFD)在流体机械领域的应用[J]. 装备制造技术, 2008(12): 36 - 37, 41.
- WU Minsheng, DUAN Wenguang. Applications of computational fluid dynamics in fluid machinery field[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(12): 36 - 37, 41. (in Chinese)
- [22] 尹文庆, 赵璐, 李骅, 等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 68 - 76, 136.
- YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 68 - 76, 136. (in Chinese)