

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.005

气吸圆盘式微型薯排种器设计与试验

赖庆辉 马文鹏 苏 微 胡子武 邢金龙
(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对微型薯等大粒种子不易充种问题,设计了一种可振动供种的气吸圆盘式微型薯排种器。阐述了该排种器的工作原理,通过理论计算与数值模拟,确定了其主要结构参数。为寻求最佳工作参数组合,采用三因素四水平正交试验方法,对排种器进行排种性能试验,结果表明:影响其排种性能的主次因素依次为作业速度、振动频率和吸种负压,较优参数组合为作业速度 2.4 km/h、振动频率 6.5 Hz、吸种负压 6 kPa,在此条件下排种合格指数为 94.2、漏播指数为 1.7、重播指数为 4.1,满足微型薯的精密播种要求。研究了振动供种机构对微型薯造成的损伤情况:在不同的振动频率下,微型薯的破损率均小于 1%,振动供种机构对微型薯的损伤不大。

关键词: 微型薯; 气吸式排种器; 振动供种; 排种性能; 设计

中图分类号: S223.2⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0030-08

Design and Experiment of Pneumatic Disc Seed-metering Device for Mini-tuber

Lai Qinghui Ma Wenpeng Su Wei Hu Ziwu Xing Jinlong
(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to realize the mechanized planting of mini-tuber and solve the problem of large seed filling, a vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber was designed. The seed-metering device was made up of metering plate, air chamber, frame and vibrating seed feeding device. The working principle of the pneumatic disc seed-metering device was expounded. The physical properties of mini-tuber, including geometric dimension, average weight and angle of repose were researched. The structural parameters of metering plate were determined by the theoretical calculation, which contained the metering plate diameter, suction hole diameter and suction hole number. The FLUENT software was used to analyze the internal flow field of air chamber and optimize the location of pressure-outlet. The vibration frequency was calculated and verified by analyzing the movement characteristics of vibration plate. In order to verify the performance of the seed-metering device and find the best parameter combination, the orthogonal test was carried out by using the eligible index, multiple index, missing index as experimental indexes and the operating speed as experimental factor. The optimal experimental results were: the operating speed of 2.4 km/h, vibration frequency of 6.5 Hz, negative pressure of 6 kPa, and the corresponding performance indexes were as following: the eligible index was 94.2, the missing index was 1.7 and the multiple index was 4.1, which could completely meet the requirement of technical specifications of quality evaluation in China. This study can provide references for further improving quality, optimizing the parameter for pneumatic disc seed-metering device and designing the potato planter used in farmland. The damage of mini-tuber caused by the machine was researched, and the breakage rate was under 1% with different vibration frequencies.

Key words: mini-tuber; pneumatic seed-metering device; vibrating seed feeding; seeding performance; design

收稿日期: 2016-07-07 修回日期: 2016-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51305187)、云南省重点新产品开发计划项目(2014BC007)、云南省科技计划项目青年项目(2015FD011)、昆明理工大学自然科学基金项目(KKS201323067、KKS201323025、14118940)和云南省教育厅项目(2016ZZX048)
作者简介: 赖庆辉(1980—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

引言

目前我国大多采用人工作业方式种植微型薯，劳动强度大、生产效率低^[1]，迫切要实现微型薯的机械化播种。而排种器作为播种机的核心部件，其工作性能是影响播种质量的主要因素之一。

国内外先进的排种器普遍采用了气吸式原理^[2-6]，这是因为气吸式排种器具有对种子外形要求不严、不需要精选分级、不伤种、能适应较高速度的播种作业等优点。目前，国内外研究学者对水稻、油菜、小麦等小粒种子的气力式排种器的研究已趋于成熟，并得到了广泛推广^[7-16]，但针对微型薯等大粒种子的气力式排种器研究较少，匀轮式排种仍然是微型薯播种普遍采用的形式^[17-19]。法国 ERME 型气力式微型薯播种机采用气吸式排种方式实现对微型薯的精密高速播种，可通过调换吸种盘实现对不同大小微型薯的排种^[20]；MCLEOD 等^[21]研发了一种气力式微型薯排种器，以负压实现吸种和携种过程，以正压实现对种子的排种过程。张宝库^[22]、马雪峰^[23]分别设计了 2CM-2 型马铃薯种薯播种机和半自动微型薯播种机，解决了微型原种播种过程中的漏播重播及伤皮问题，但该机需要人工辅助取种放种；谢敬波^[24]、毛琼^[25]研制了一种气吸倾斜圆盘式微型薯排种器和适用于单垄双行宽窄行种植模式的气吸式微型薯播种机。综上，对振动供种式气吸式微型薯排种器的研究较少。

针对大粒种子不易充种的问题，本文设计一种可振动供种的气吸圆盘式微型薯排种器，通过理论计算与数值模拟，确定其主要结构和工作参数，并进行排种性能试验。

1 排种器结构与工作原理

振动供种气吸圆盘式微型薯排种器结构如图 1 所示，主要由振动供种机构、气力排种机构和机架等组成。

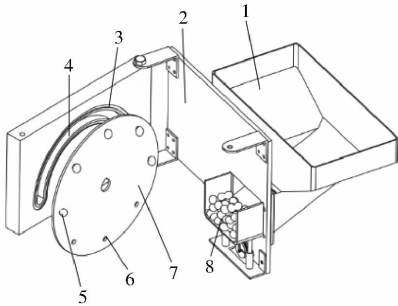


图 1 振动供种气吸圆盘式排种器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of vibrating feeding pneumatic

disc seed-metering device

1. 种箱 2. 机架 3. 密封槽 4. 气室 5. 微型薯 6. 吸孔
7. 排种盘 8. 振动板

组成。

气室外围设有密封槽，排种盘与密封条紧密贴合，机架上安装有种箱和振动供种机构。微型薯从种箱进入振动板，在振动作用下种群处于“沸腾”状态，接通风机使气室内部形成负压区，播种机地轮带动排种盘转动，微型薯在吸孔内外压差的作用下被吸附在吸孔上，并随着排种盘一起运动。当微型薯运动到气室末端时，随着吸孔移出气室，负压消失，微型薯在自身重力作用下从吸孔脱落掉入种沟，实现排种过程。该排种器主要技术参数如表 1 所示。

表 1 振动供种气吸圆盘式微型薯排种器技术参数

Tab. 1 Design parameters of vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device

参数	数值
单粒种子质量/g	5 ~ 10
粒距/cm	10 ~ 30
风机功率/kW	1. 5
播种行数	1
作业速度/(km·h ⁻¹)	1 ~ 3
合格指数	> 90
漏播指数	< 5
重播指数	< 5

2 关键部件设计和参数确定

2.1 微型薯物理机械特性

2.1.1 微型薯三轴尺寸和平均粒质量

选取“丽薯 6 号”微型薯为研究对象，随机抽取 500 粒，利用精度为 0.02 mm 的游标卡尺对每粒微型薯的长、宽、厚进行测量，测 5 次取平均值，其结果如表 2 所示。利用 ME204E 型电子天平（称量范围 0 ~ 220 g，精度 0.000 1 g）测定微型薯的平均粒质量为 5.57 g。

表 2 微型薯外形几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of mini-tuber mm

品种	长度 <i>L</i>		宽度 <i>W</i>		厚度 <i>Z</i>	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
丽薯 6 号	24. 1	0. 65	20. 5	0. 74	18. 2	0. 69

2.1.2 微型薯休止角

将适量体积的微型薯放入如图 2 所示的休止角测定装置中，使其自然下落到漏斗正下方的圆形口径器皿中，形成种堆。将铁架台上可移动标杆放到种堆的顶端，读取铁架台上标尺的刻度，即种堆的总高度 *H*。重复试验 5 次，用测量种堆的总高度减去器皿高度，即得出种堆净高 ΔH ，器皿直径为 *D*₀，根据公式

$$\theta = \arctan \frac{2\Delta H}{D_0} \quad (1)$$

求得微型薯的休止角 θ 为 32.35° 。

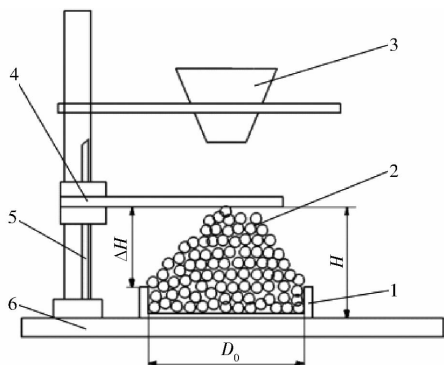


图2 休止角测量装置

Fig. 2 Measuring device of repose angle

1. 器皿 2. 微型薯 3. 漏斗 4. 标杆 5. 刻度标尺 6. 铁架台

2.2 排种盘设计

2.2.1 排种盘直径

排种盘直径是排种器的基本结构特征参数,决定了排种器其他附属零部件的结构及尺寸。排种盘结构参数如图3所示。图中 d 为吸孔直径, D_d 为吸孔分布圆直径, D 为排种盘直径, δ 为充种区弧度。

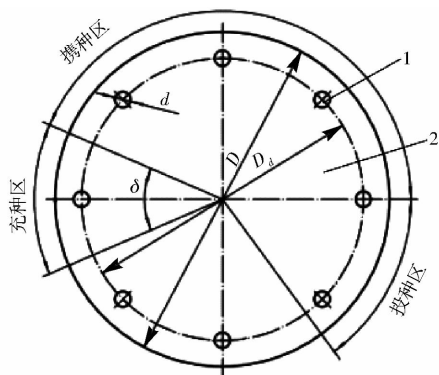


图3 排种盘结构参数示意图

Fig. 3 Schematic of structural parameters of seeding disc

1. 吸孔 2. 排种盘

一般来说,吸孔停留在充种区的时间越长,即认为充种可靠性越高,充种性能越好^[18]。为考察排种盘直径对充种时间的影响,求得吸孔在充种区停留时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{l_c}{v_p} \quad (2)$$

其中

$$l_c = \delta \frac{D - \Delta h}{2} \quad (3)$$

$$v_p = \pi n_p \frac{D - \Delta h}{60} \quad (4)$$

式中 l_c ——充种区弧长, m

 v_n ——排种盘吸孔处线速度, m/s Δh ——排种盘直径与吸孔分布圆直径差, m n_p ——排种盘转速, r/min

由式(2)~(4)整理得

$$t_0 = \frac{30\delta}{n_p \pi} \quad (5)$$

由式(5)可知,吸孔在充种区停留时间 t_0 只与排种盘转速有关,而与排种盘直径无关。因此排种盘直径的确定需要考虑播种作业速度以及排种器整体结构等因素,这里选取排种盘直径 $D=0.38\text{ m}$ 。

2.2.2 吸孔直径

吸孔是影响排种器排种性能的重要因素,为了便于加工,将其设计为直圆柱形吸孔。

吸孔直径对所需的气室真空度影响很大,吸孔直径小则需要较高的真空度,在真空度相同的条件下,若孔吸孔直径太小则吸力不足,从而使空穴增加。球度与吸孔直径的计算公式分别为

$$S_p = \frac{(LWH)^{\frac{1}{3}}}{L_c} \times 100\% \quad (6)$$

$$d = (0.64 \sim 0.66) W \quad (7)$$

由式(6)可知,微型薯球度 $S_p = 86.27\%$,可近似为球体,因此可按式(7)确定吸孔直径 $d = 13 \text{ mm}$ [26-27]。

2.2.3 吸孔深度

为探究吸孔深度对吸种性能的影响,利用 Fluent 软件对吸孔流场进行仿真分析。参数设置为:流体为空气,流体密度 1.205 kg/m^3 ,流体粘度 $1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,吸孔压力出口负压 2 kPa ,入口负压 0 kPa 。选择孔径为 13 mm ,吸孔深度 H_k 分别为 3 、 6 、 9 mm 的直孔进行仿真试验,试验结果如图 4 所示。由图 4 可知,吸孔深度为 3 、 6 、 9 mm 时,吸孔入口处的气流速度分别为 56.97 、 56.69 、 56.46 m/s 。可知吸孔深度增加后,吸孔处气流速度有所减小,但并不明显。根据实际加工情况,最终选取吸孔深度(即排种盘厚度)为 6 mm 。

2.2.4 吸孔数量

在作业速度和穴距一定的条件下,同一直径的排种盘,吸孔数量增加,则排种盘的线速度降低,但是需要风机提供的空气流量也相应增加,从而能耗增加,因此需要选取合适的吸孔数量。排种盘上吸孔数量 N 的计算公式^[26] 为

$$N = \frac{\pi D_d v_m}{s v_p (1 - c)} \quad (8)$$

其中

$$v_p = \frac{\pi D_d n_p}{60} \quad (9)$$

式中 v_m ——播种作业速度, m/s

s ——微型薯粒距, m

c ——地轮滑移系数

排种盘直径 $D = 0.38 \text{ m}$, Δh 应为微型薯厚度尺寸的 3 倍^[22], 因此吸孔分布圆直径 $D_d = D - \Delta h =$

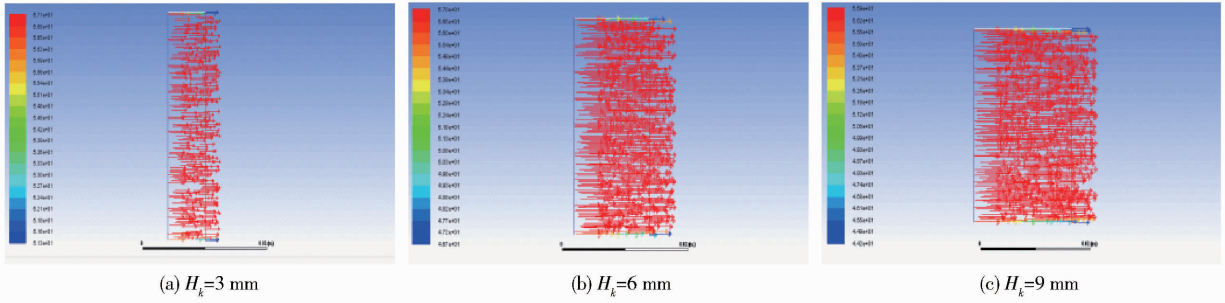


图 4 不同深度的吸孔气流速度分布情况

Fig. 4 Air velocity distributions of straight nozzle at different depths

0.35 m; 播种作业速度在 0.3 ~ 0.9 m/s 之间, 取 0.5 m/s; 根据农艺要求微型薯种植穴距为 0.13 ~ 0.3 m 之间^[28], 取 0.2 m; 地轮滑移系数 c 取 0.08; 排种盘转速取 20 r/min; 从而确定吸孔数量为 $N = 8$ 。

2.3 气室接口位置确定

2.3.1 吸孔真空度

排种器负压区吸孔处真空度是微型薯能否顺利被吸附到吸孔上的决定性参数, 现对排种盘携种过程中微型薯的受力情况进行理论分析, 得到吸孔处所需的临界真空度^[29]为

$$H_{\text{cmax}} = \frac{8K_1K_2C_0mg}{\pi d^2} \left(1 + \frac{1}{g} \frac{2v_p^2}{D_d} + \lambda \right) \quad (10)$$

其中 $\lambda = (6 \sim 10) \tan \theta \quad (11)$

式中 C_0 ——微型薯几何中心与排种盘断面之间的距离, cm

m ——单粒微型薯质量, kg

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

λ ——微型薯的摩擦阻力综合系数

K_1 ——吸种可靠性系数, 即考虑种子架空或相互碰撞对吸种效果的影响

K_2 ——外界条件系数, 即考虑外界振动或冲击对种子吸附的影响

微型薯几何中心离排种盘断面之间的距离为 1.045 cm; 单粒微型薯质量为 5.57×10^{-3} kg; 排种盘吸孔处线速度为 0.35 m/s; 微型薯摩擦阻力综合系数取 3.8 ~ 6.3; 吸种可靠性系数取 1.8 ~ 2; 外界条件系数取 1.6 ~ 2。计算得播种微型薯临界真空度 H_{cmax} 约为 1.7 kPa。为了使种子能牢固地吸附在吸孔上, 吸室孔处实际真空度必须大于 1.7 kPa。

2.3.2 气室内部流场分析

以气室 (不包含风机及连接管道) 为参照对象, 在 Pro/E 三维实体建模软件中建立其简化后的实体模型, 如图 5 所示。该模型主要包括: 排种盘吸孔、气道和风机接口, 气道中分布的吸孔数量为 5 个, 气道宽度以及接口直径均为 45 mm。

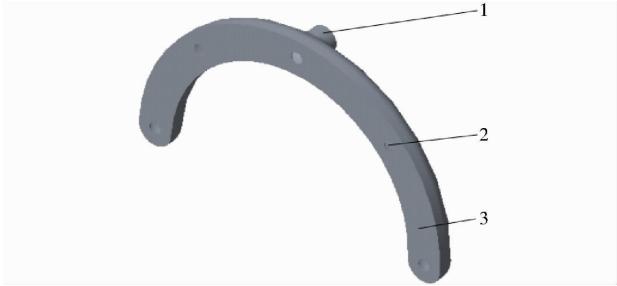


图 5 排种器气室模型

Fig. 5 Seed-metering chamber model

1. 接口 2. 吸孔 3. 气道

对气室内部进行网格划分和流场模拟, 模拟过程采用 $k-\varepsilon$ 模型, 选取吸孔为压力进口边界条件, 接口为压力出口条件, 壁面采用无滑移边界条件。图 6 为不同风机接口位置时排种器负压腔内压力分布云图。图中箭头所指位置为接口位置, 出口负压均设置为 15 kPa。如图 6a 所示, 气室内部压降较大, 气压分布不均匀, 且端部吸种孔处负压为 1.2 kPa, 小于临界值 (1.7 kPa)。如图 6b 所示, 气室内部压降较小, 压力分布较均匀, 且每个吸种孔处的负压均大于临界值。如图 6c 所示, 气室压力分布最均匀, 压降最小, 且每个吸种孔处的负压均大于临界值, 但供种位置的负压小于图 6b 中供种位置的负压。研究表明, 携种过程所需压差小于吸种过程, 吸种过程完成后携种过程也能顺利进行^[24]。综合以上分析, 最终选取的接口位置如图 6b 所示。

2.4 振动供种机构设计

在振动的作用下, 种群出现“沸腾”状态, 在这种状态下种子间的内摩擦力减小, 单粒种子能够更容易地从种群中分离出来。微型薯属于大粒种子, 需要专门研究和设计适用于微型薯的振动供种机构。

2.4.1 振动供种机构结构

图 7 为振动供种机构结构示意图, 振动板在连杆的带动和直线轴的限位作用下, 实现上下振动。其中, 曲柄的转速由步进电动机控制, 曲柄上开有调节孔, 可以调节振动板的振动幅度。

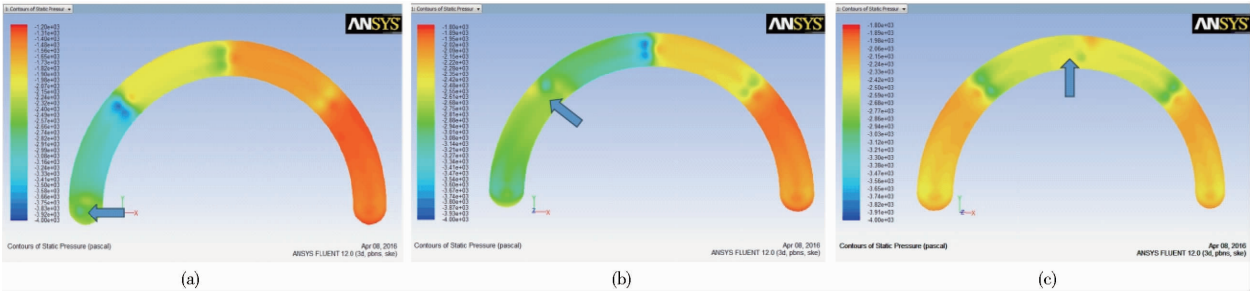


图6 不同接口位置负压腔内部压力分布云图

Fig. 6 Internal pressure clouds of negative pressure chamber

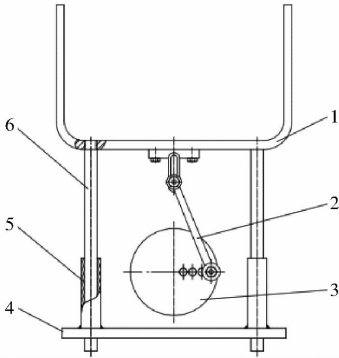


图7 振动供种机构结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vibration mechanism

1. 振动板 2. 连杆 3. 曲柄 4. 支架 5. 直线轴承 6. 直线轴

2.4.2 振动频率

为了便于进行振动分析,将振动板的运动理想化为简谐振动,由机械振动理论可知^[30],振动板上某一粒微型薯沿竖直方向的位移为

$$S_y = A_0 \sin w \sin h = A_0 \sin w \sin (kt) \tag{12}$$

其中 $k = 2\pi f \tag{13}$

式中 A_0 ——微型薯沿振动方向的振幅
 h ——振动相位角
 k ——振动圆频率
 f ——振动频率 t ——时间
 w ——该点振动方向与水平方向的夹角

微型薯在竖直方向速度 v_y 和加速度 a_y 分别为

$$v_y = A_0 k \sin w \cos (kt) \tag{14}$$

$$a_y = -A_0 k^2 \sin w \sin (kt) \tag{15}$$

当微型薯在振动板上做相对运动时,设竖直方向的相对加速度为 a' ,则微型薯沿竖直方向作用于振动板的正压力为

$$F = m(a_y + a') + mg \tag{16}$$

当微型薯抛离振动板时, $F = 0, a' = 0$,由式(15)、(16)可得

$$A_0 k^2 \sin w \sin h_0 - g = 0 \tag{17}$$

因此有
$$h_0 = \arcsin \frac{1}{K_p} \tag{18}$$

其中
$$K_p = \frac{A_0 k^2 \sin w}{g} \tag{19}$$

式中 K_p ——抛掷指数
 h_0 ——微型薯开始被抛起的瞬时振动相位角
当 $K_p > 1$ 时,振动板在竖直方向上最大加速度 $A_0 k^2 \sin w > g$,种子能够被连续抛起。当 $K_p > 3.3$ 时,种群作高速抛掷运动^[31]。令 $K_p > 3.3, A_0 = 0.02 \text{ m}, w = 90^\circ$,得到 $f > 6.5 \text{ Hz}$ 。

3 排种性能试验

本试验选取了对排种器工作性能影响较大的作业速度、吸种负压和振动频率作为试验因素,按照正交试验的方法,寻求影响排种性能因素的主次关系,确定较优组合。

3.1 试验条件

试制的振动供种气吸圆盘式排种器样机如图8所示。选取“丽薯6号”微型薯作为排种对象,在JPS-12型计算机视觉排种器性能检测试验台上进行试验,如图9所示。该试验台以种床带为种床,排种器在试验时保持固定状态,种床相对于排种器进行运动,微型薯排落在涂有油层的种床带上,图像采集处理系统对种床带上的微型薯进行实时检测,检测完毕后,系统根据国家标准GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》对检测数据进行处理保存,输出粒距合格指数、漏播指数和重播指数。

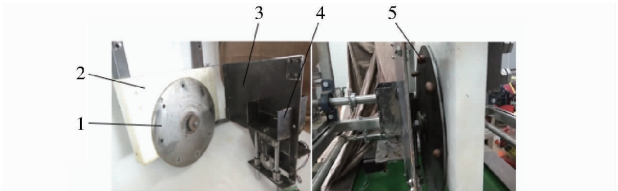


图8 振动供种气吸圆盘式排种器样机

Fig. 8 Vibrating feeding pneumatic disc seed-metering device

1. 排种盘 2. 气室 3. 机架 4. 振动板 5. 微型薯

3.2 试验方法

为了验证所设计排种器的排种性能,寻求较优的工作参数组合,对所选取的3个因素进行了三因素四水平的正交试验,即选用正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行试验设计与分析,其因素与水平如表3所示。其中作业速度(即种床带速度)可通过试验台控制柜进行



图 9 JPS-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台
Fig.9 Computer vision seed-metering performance test bench
1.控制柜 2.计算机 3.种床带 4.微型薯 5.摄像头 6.微型薯排种器

监测与调控;利用 KANOMAX6036 型热式风速风压仪测定吸种负压,可通过控制柜对配套风机进行调节;利用 AZ8000 型手持非接触式红外线转速表测定曲柄转速,转换为振动频率,并通过控制步进电动机转速对频率进行调节。试验以合格指数、重播指数和漏播指数作为评价指标,连续记录吸附 200 粒微型薯的试验结果,每次试验重复 5 次取平均值。试验结果如表 4 所示。

表 3 试验因素与水平

Tab.3 Experimental factors and levels

水平	因素		
	作业速度/(km·h ⁻¹)	吸种负压/kPa	振动频率/Hz
1	0.8	2	5.0
2	1.6	4	6.5
3	2.4	6	8.0
4	3.2	8	9.5

3.3 试验结果与分析

3.3.1 极差分析

因素在不同水平下性能指标的极差越大,说明该因素对试验指标的影响越大。因此,根据表 4 中对试验结果的极差分析,确定了各因素对合格指数、漏播指数和重播指数的影响主次顺序,如表 5 所示。

3.3.2 方差分析

对试验结果进行方差分析,如表 6 所示,可知作业速度、吸种负压和振动频率对各项排种性能指标均有显著影响。作业速度较小时,吸孔转过充种区的时间较长,充种几率大,易造成重播;随着作业速度的增大,吸孔转过充种区的时间变短,漏播指数增大。吸种负压较小时,种子所受吸力较小,不易被吸附在吸孔上,易造成漏播;随着吸种负压的增大,种子所受吸力增大,重播指数增大。振动频率较小时,种间摩擦力较大,种子不易脱离种群,易造成漏播;随着振动频率的增大,处于“沸腾”状态的种子增多,种子易被吸附,重播指数增大。因此,需要对 3 个因素选取合适的参数。

通过极差和方差的试验数据分析,综合各试验因素对排种器性能指标的影响及其优化组合,按照

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test design scheme and results

试验序号	因素			合格指数	漏播指数	重播指数
	作业速度	吸种负压	振动频率			
	A	B	C			
1	1	1	1	37.4	58.6	4.0
2	1	2	2	59.6	31.2	9.2
3	1	3	3	67.5	9.5	23.0
4	1	4	4	41.7	3.5	54.8
5	2	1	2	71.2	26.7	2.1
6	2	2	1	60.4	36.8	2.8
7	2	3	4	76.5	5.7	17.8
8	2	4	3	64.1	8.4	27.5
9	3	1	3	85.5	11.6	2.9
10	3	2	4	80.3	12.2	7.5
11	3	3	1	83.6	14.1	2.3
12	3	4	2	93.9	1.2	4.9
13	4	1	4	34.7	40.9	24.4
14	4	2	3	58.2	15.5	26.3
15	4	3	2	77.5	20.9	1.6
16	4	4	1	34.4	44.8	20.8
合格指数	k_1	51.55	57.20	53.95		
	k_2	68.05	64.63	75.55		
	k_3	85.83	76.28	68.83		
	k_4	51.20	58.53	58.30		
	R	34.66	19.08	21.60		
漏播指数	k_1	25.70	34.45	38.58		
	k_2	19.40	23.93	20.00		
	k_3	9.78	12.55	11.25		
	k_4	30.53	14.48	15.58		
	R	20.75	21.90	27.33		
重播指数	k_1	22.75	8.35	7.48		
	k_2	12.55	11.45	4.45		
	k_3	4.40	11.18	19.93		
	k_4	18.28	27.00	26.13		
	R	18.35	18.65	21.68		

表 5 试验指标分析

Tab.5 Analysis of test indexes

项目	合格指数	漏播指数	重播指数
较优水平	$A_3、B_3、C_2$	$A_3、B_3、C_3$	$A_3、B_1、C_2$
主次因素	$A、C、B$	$C、B、A$	$C、B、A$
较优组合	$A_3C_2B_3$	$C_3B_3A_3$	$C_2B_1A_3$

合格指数较大、兼顾漏播指数和重播指数较小的原则,确定 $A_3C_2B_3$ 为较优组合,即作业速度 2.4 km/h、振动频率 6.5 Hz、吸种负压 6 kPa。经试验,在此条件下该排种器的排种合格指数为 94.2,漏播指数为 1.7,重播指数为 4.1,满足国家精量播种的技术要求。

4 微型薯破损试验

在振动作用下,处于沸腾状态下的微型薯之间

表 6 排种器性能指标方差分析

Tab. 6 Variance analysis of seeding performance					
试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	F	显著性
合格指数	A	3 246. 779	3	66. 609	**
	B	909. 015	3	18. 649	**
	C	1 160. 499	3	23. 808	**
	误差列	97. 487	6		
漏播指数	A	963. 449	3	6. 090	*
	B	1 211. 613	3	7. 658	*
	C	1 735. 993	3	10. 973	**
	误差列	316. 425	6		
重播指数	A	752. 654	3	4. 972	*
	B	857. 590	3	5. 665	*
	C	1 260. 100	3	8. 323	*
	误差列	302. 786	6		
$F_{0.1}(3,6)=3.29$ $F_{0.05}(3,6)=4.76$ $F_{0.01}(3,6)=9.87$					

发生碰撞,易造成表皮破损,影响播种后的发芽率。因此,需要验证本文所设计的振动供种机构对微型薯造成的破损情况。选取 200 粒无破损微型薯,设定排种器的作业速度为 2.4 km/h、吸种负压为 6 kPa。分别在振动频率为 2、4、6、8、10 Hz 条件下进行排种,将 200 粒微型薯全部排净后,记录破损微型薯的数量,计算破损率。每次试验重复 5 次,且微型薯不重复使用。在不同振动频率条件下微型薯的破损率如图 10 所示。由图 10 可知,随着振动频率的增加,微型薯破损率呈上升趋势,这是由于随着振动频率的增加,振动板对微型薯的扰动性增强,种间的碰撞更加剧烈,导致破损率增加,但未超过 1%,

因此,振动供种机构对微型薯的损伤不大。

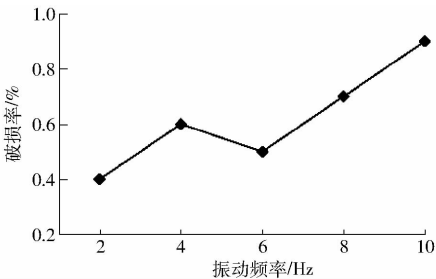


图 10 微型薯破损率随振动频率的变化曲线

Fig. 10 Changing curve of breakage rate with vibration frequency

5 结论

- (1)利用振动供种与负压吸种组合作用原理,基于微型薯的基本物理机械特性,设计了一种适用于微型薯等大粒种子的振动供种气吸圆盘式排种器,并通过理论计算和数值模拟确定了其主要结构和工作参数。
- (2)通过正交试验确定了影响排种性能的主次因素依次为作业速度、振动频率和吸种负压;较优组合为作业速度 2.4 km/h、振动频率 6.5 Hz、吸种负压 6 kPa。在该条件下排种合格指数为 94.2、漏播指数为 1.7、重播指数为 4.1。
- (3)研究了微型薯破损率随振动频率的变化趋势,在不同工作参数条件下,微型薯破损率均小于 1%,所设计振动供种机构对微型薯的损伤不大。

参 考 文 献

1 袁贇. 脱毒马铃薯高产种植技术[J]. 吉林农业, 2014(6): 65.
YUAN Ze. Potato high yield cultivation technology[J]. Jilin Agricultural, 2014(6): 65. (in Chinese)

2 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 95-99.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Numerical simulation and experiment on the seeds pickup performance of precision air-suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 95-99. (in Chinese)

3 张晓慧, 宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器的设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 69-71.
ZHANG Xiaohui, SONG Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 69-71. (in Chinese)

4 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 54-58, 89.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54-58, 89. (in Chinese)

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

6 GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.

7 SINGH R C, SINGH G, SATASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.

8 SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting mustard seeds[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2006, 15(2): 31-41.

9 KARAYETA D, WIESEHOFFB M, ÖZMERZIA A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.

- 10 左彦军,马旭,玉大略,等.水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J].农业机械学报,2011,42(2):58-62.
ZUO Yanjun, MA Xu, YU Dalue, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket slot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):58-62. (in Chinese)
- 11 廖庆喜,李继波,覃国良,等.气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J].农业机械学报,2009,40(7):78-82.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang, et al. Simulation analysis on air current field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):78-82. (in Chinese)
- 12 赵晓顺,于华丽,张晋国,等.槽缝气吸式小麦精量排种器[J].农业机械学报,2013,44(2):48-51,74.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):48-51, 74. (in Chinese)
- 13 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. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):78-83. (in Chinese)
- 14 刘佳,崔涛,张东兴,等.机械气力组合式玉米精密排种器[J].农业机械学报,2012,43(2):43-47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):43-47. (in Chinese)
- 15 韩豹,杨亚楠,孟繁超,等.气吸滚筒式自动清堵梗稻排种器的改进设计与性能试验[J].农业工程学报,2016,32(19):18-25.
HAN Bao, YANG Ya'nan, MENG Fanchao, et al. Improved design and performance experiment on air-suction drum-type seed metering device for rice with auto-cleaning block[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19):18-25. (in Chinese)
- 16 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 experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):20-28. (in Chinese)
- 17 孙伟,王关平,吴建民.勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(11):8-15.
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):8-15. (in Chinese)
- 18 宋言明,王芬娥.国内外马铃薯机械的发展概况[J].农机化研究,2008(9):224-227.
SONG Yanming, WANG Fene. Potato machinery development situation at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(9):224-227. (in Chinese)
- 19 刘全威,吴建民,王蒂,等.马铃薯播种机的研究现状及进展[J].农机化研究,2013(6):238-241.
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Status and progress of potato planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(6):238-241. (in Chinese)
- 20 张勇,李丽霞,韩宏宇,等.马铃薯微型原种播种机的研究现状与展望[J].安徽农业科学,2015,43(4):372-375.
ZHANG Yong, LI Lixia, HAN Hongyu, et al. Development status and prospect of mechanized planting micro potato[J]. Journal of Anhui Agriculturas Sciences, 2015, 43(4):372-375. (in Chinese)
- 21 MCLEOD C D, CONLEY G C, TAI G C C, et al. A precision seeding device for true potato seed[J]. American Potato Journal, 1992, 69(4):255-264.
- 22 张宝库.2CM-2型马铃薯种薯播种机的设计[J].黑龙江科技信息,2014(22):113.
- 23 马学峰.半自动马铃薯播种机:中国,ZL200720127036.1[P].2007-07-20.
- 24 谢敬波.脱毒微型马铃薯排种器设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
XIE Jingbo. Design and experiment study on disease-free mini-tuber metering device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 25 毛琼.脱毒微型马铃薯播种机关键部件的设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
MAO Qiong. Design and research on key components of the planter for virus-free mini-potato seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 26 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1982.
- 27 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.
- 28 程亨曼,窦钰程,杜木军,等.马铃薯微型原种播种机关键部件的设计与研究[J].农机使用与维修,2015(10):26-28.
CHENG Hengman, DOU Yucheng, DU Mujun, et al. Design and research of miniature potato planter key components[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2015(10):26-28. (in Chinese)
- 29 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. Preliminary study on air-suction seed metering device theory and experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3):56-63. (in Chinese)
- 30 闻邦椿,刘凤翥.振动机械理论及应用[M].北京:机械工业出版社,1982.
- 31 陈进,李耀明.气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J].农业机械学报,2002,33(1):47-50.
CHEN Jin, LI Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1):47-50. (in Chinese)