

气吸针式摇摆叶菜精量播种机设计与试验研究

王晨健^{1,2}, 赵倩², 郭文忠², 贾冬冬², 王琨琦¹, 贾海遥^{1,2}

(1. 西安工业大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对叶菜类种子粒径小且无规则形状、传统播种机存在精量化程度不高及播种成功率低等问题。以气吸针式播种方式为基础,设计了一种气吸针式摇摆叶菜精量播种机,并采用笔型气缸将直线往复运动转化为播种机摇摆往复运动来实现气缸运动一次完成两次播种。设计了导种结构代替传统播种机垂直运动方向的机械结构,并加入了振动装置使种子处于高频振动状态,提高种子吸附成功率的同时,也避免了种子间相互粘连。依据叶菜种子的三维尺寸,通过理论计算得出了实现种子吸附的临界气流速度为 10.1m/s,且采用仿真软件对播种机核心部件笔型气缸的行程、吸嘴内腔结构和负压分流管的结构进行了确定。搭建了气吸针式摇摆叶菜精量播种试验平台,以负压大小、吸嘴口直径大小、种盘振动强度为试验因素,以漏播率、重播率、单粒率为试验指标,进行三因素三水平正交试验,通过对方差与极差的分析确定了试验因素的最优组合参数,即负压大小-25kPa、吸嘴口直径大小 0.6mm、种盘振动强度 64Hz;依据此参数组合进行播种验证试验,漏播率为 2.75%、重播率为 5.5%和单粒率为 91.75%,可满足叶菜的精量播种要求,为叶菜精量播种提供了一种新的方法。

关键词: 叶菜; 气吸针式; 精量播种; 仿真; 正交试验

中图分类号: S223.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2021)07-0064-09

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.07.010

0 引言

据统计,我国蔬菜成为继粮食后第二大农作物,累计在田面积已达到 2233 万 hm^2 。其中,设施蔬菜种植面积达到 548 万 hm^2 ,占全国蔬菜种植面积 24.54%^[1],叶菜类植物的种植面积占全国蔬菜种植面积的 1/3^[2-3]。在设施园艺中,播种作为叶菜种植的关键一步^[4],播种质量的优劣将直接影响到叶菜的生长与产量^[5]。播种与其他种植环节相比,存在劳动强度大、工作繁琐、重复性高等特点,更需要利用机械化设备来代替传统人工播种。目前,适用于叶菜类种子的播种方式主要以气吸式为主^[6-8],主要分为滚筒式和针式^[9]:滚筒式^[10-15]结构紧凑且播种效率高,但加工成本较高,前期加工和后期维护难度大,难以适用于叶菜类粒径小且无规则形状的裸种播种^[16-17];针式^[18-20]相比于滚筒式运动机构简单,播种作业更稳定,可针对不同尺寸的叶菜种子选取不同的吸嘴来满足播种要求,但播种效率整体偏低。为此,设计了一

种气吸针式摇摆新型播种机,对传统播种机进行了改进与优化,并以气吸针式摇摆播种机的核心部件排种器作为研究对象,借助仿真软件^[21]对笔型气缸、吸嘴内腔结构^[22-23]和负压分流管结构^[24]进行了分析与设计;选取影响吸种效果的主要因素作为试验因素,以漏播率、重播率和单粒率作为试验指标,进行三因素三水平的正交试验,通过对正交试验的极差和方差结果分析,确定了试验因素的最优组合参数,为设施园艺中叶菜精量播种提供一种可行性的参考依据。

1 气吸针式摇摆播种机结构设计

新型叶菜针式精量播种机主要由传送装置、穴盘、机架、导种支撑板、导种管、轴承座、排种器外壳、旋转轴、负压分流管、吸嘴、曲柄连杆、Y型接头、笔型气缸、气缸固定板、红外线传感器、振动器、振动托架、种盘支撑板和种盘组成,如图1所示。

气吸针式摇摆精量播种机通过曲柄连杆将笔型气缸的直线往复运动转化为旋转轴的摇摆往复运动,旋转轴带动排种器外壳,固定在排种器外壳内的两个负压分流管分别连接两排吸嘴,实现旋转轴、排种器外壳、两排吸嘴三者的同步转动。播种过程可分为取种、运种和排种3个过程:首先,排种器运动到第一排吸嘴位于种盘上方的初始位置,启动空气压缩机,由真空发生器产生负压,并通过负压分流管将负压分配

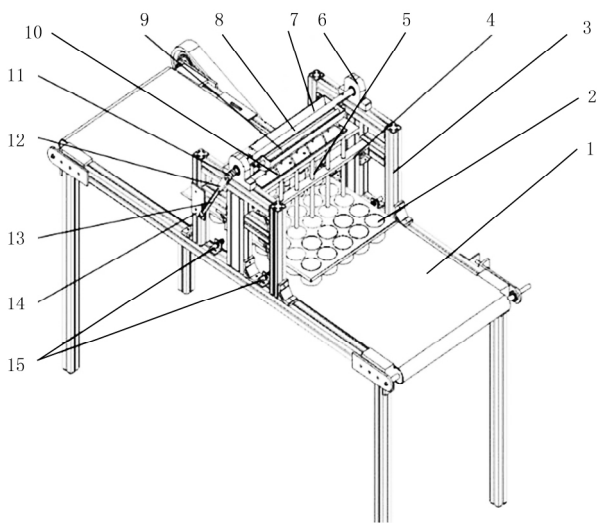
收稿日期: 2020-04-23

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划农业农村领域重大项目(2019BBF02010); 陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-149); 陕西省教育厅产业项目(2013JC26)

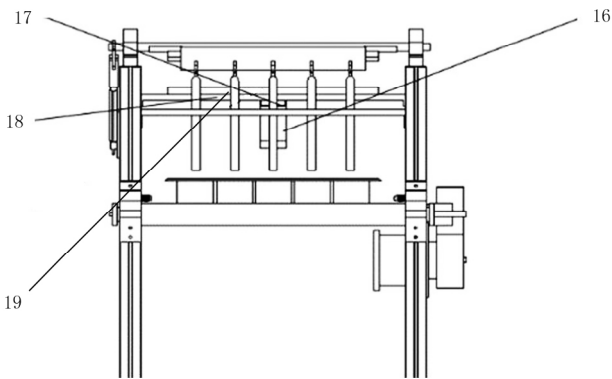
作者简介: 王晨健(1993-),男,西安人,硕士研究生,(E-mail) 2470877259@qq.com。

通讯作者: 郭文忠(1970-),男,宁夏中卫人,教授,硕士生导师,(E-mail) guowz@nrcita.org.cn。

到每个吸嘴,同时启动振动器,使种子处于“沸腾”状,在振动器的辅助下完成取种;由笔型气缸提供动力,带动排种器外壳实现转动,第一排吸嘴运动到一侧的导种管上方完成运种。吸嘴内气流由负压转为正压,将种子吹入导种管完成排种,在第一排吸嘴完成排种的同时,第二排吸嘴位于种盘上方,重复取种动作完成取种,再由笔型气缸将第一排吸嘴回到初始位置进行下一次取种动作;同时,第二排吸嘴到达另一侧导种管上方完成排种动作,实现两排吸嘴按顺序交替播种作业,达到气缸完成一次往复运动实现两次播种。导种管的设计替代了传统针式播种机上下方向的机械运动机构,既实现了快速精确排种,也提高了整个播种机的工作效率。



(a) 播种机整体视图



(b) 播种机主视图

1. 传送装置 2. 穴盘 3. 机架 4. 导种支撑板 5. 导种管
6. 轴承座 7. 排种器外壳 8. 旋转轴 9. 负压分管 10. 吸嘴
11. 曲柄连杆 12. Y 型接头 13. 笔型气缸 14. 气缸固定板
15. 红外线传感器 16. 振动器 17. 振动托架
18. 种盘支撑板 19. 种盘

图 1 新型叶菜针式精量播种机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of new leafy needle precision seeding machine

2 种子被吸附受力理论分析

选取叶菜类中最为常见的生菜即罗生 1 号种子

作为研究对象,随机选取 100 粒种子测量其长、宽、厚 3 个外形尺寸(保留 1 位小数)结果如表 1 所示。

表 1 生菜三维尺寸
Table 1 Three-dimension of lettuce mm

参数	最大值	最小值	均值
长度	4.0	2.4	2.9
宽度	1.2	0.7	0.8
高度	1.1	0.5	0.6

经过测量,生菜种子整体为扁平状,在理论计算中种子的形状近似为椭球体,长径 h_1 均值为 2.9mm,短径 h_2 均值为 0.8mm,高度 h_3 均值为 0.6mm,并对种子在被吸附过程中的受力情况进行了分析,如图 2 所示。

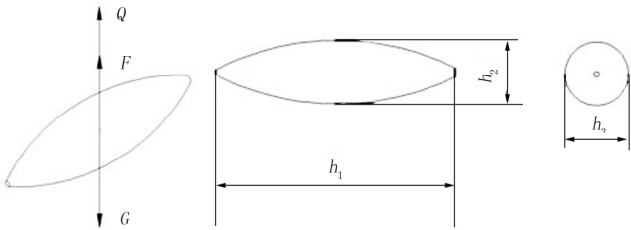


图 2 生菜种子受力与尺寸示意图

Fig.2 Lettuce seed size and force diagram

其计算公式^[28-30]为

$$F = C_d \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = C_d \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \tag{1}$$

$$Q = \frac{1}{6} \cdot v \cdot \rho \cdot g = \frac{2}{9} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \rho \cdot g \tag{2}$$

$$G = v \cdot \rho_1 \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \rho_1 \cdot g \tag{3}$$

式中 F —种子绕流阻力(N);

C_d —常参数;

S —种子横截面积(m^2);

ρ —空气密度(kg/m^3);

v —气流速度(m/s);

a —种子长径(m);

b —种子短径(m)。

c —种子高度(m/s);

Q —种子浮力(N);

g —重力加速度(m/s^2)。

G —种子重力(N);

ρ_1 —种子密度(kg/m^3)。

满足种子被吸起的条件是:向上的合力要不小于向下的合力,即

$$F + Q \geq G \tag{4}$$

临界状态为

$$F + Q = G \quad (5)$$

将式(1)~式(3)代入式(5)整理得到种子能被吸起的临界气流速度 v 为

$$v = \sqrt{\frac{24c \cdot \rho_1 \cdot g - 4c \cdot \rho \cdot g}{9C_d \cdot \rho}} \quad (6)$$

当 $Re < 1$ 时 $C_d = \frac{24}{Re}$; 当 $Re > 1$ 时在工程中常用近

似计算^[31], 当 $Re = 10 \sim 1000$, $C_d = \frac{13}{\sqrt{Re}}$; $Re = 1000 \sim$

200 000, $C_d = 0.48$ ^[32]。

依据本文的研究条件, 确定参数 $C_d = 0.48$, $\rho_1 = 2400 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 由于生菜种子的尺寸大小不完全相同, 受到的绕流阻力也不断变化, 因此选取最大绕流阻力作为参考对象。其中 c 为种子的厚度, 取其最大值 0.001 m , 代入式(6), 得到临界吸附气流速度 $v = 10.1 \text{ m/s}$ 。当气流的速度不小于 10.1 m/s 时, 可实现对种子的吸附。

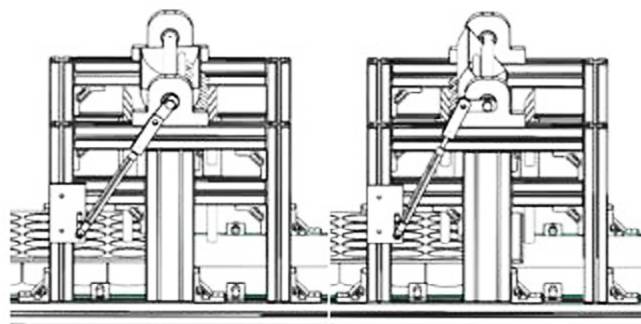
3 播种机关键部件设计与分析

3.1 基于 SolidWorks 笔型气缸运动仿真分析

笔型气缸作为播种机的动力部件, 由曲柄连杆与播种机的旋转轴进行连接, 通过空气压缩机产生的气源带动笔型气缸做直线往复运动, 将直线运动转化为主轴的旋转往复运动, 从而同步带动吸嘴实现转动完成运种, 为整个运种过程提供了动力。由于穴盘规格确定为 5×8 , 每排穴槽间中心距为 74 cm 。因此, 两排导种管间距离设定为 74 cm 。采用 SolidWorks 软件对各个部件机构进行三维建模, 并对各部件进行装配, 通过对整机的播种运动进行仿真, 得到播种机从取种位置 a 到排种位置 b 两个极限位置, 即完成一次播种过程笔型气缸所伸缩的距离进行测量, 得出完成一次播种运动笔形气缸所需运动的量程为 21.5 cm 。考虑实际使用中存在误差, 因此应增加 $10\% \sim 30\%$ 的量程误差量, 笔形气缸的量程范围应为 $24 \sim 28 \text{ cm}$ 时, 可满足播种机的运动要求, 如图 3 所示。

3.2 基于 FLUENT 吸嘴内腔结构确定

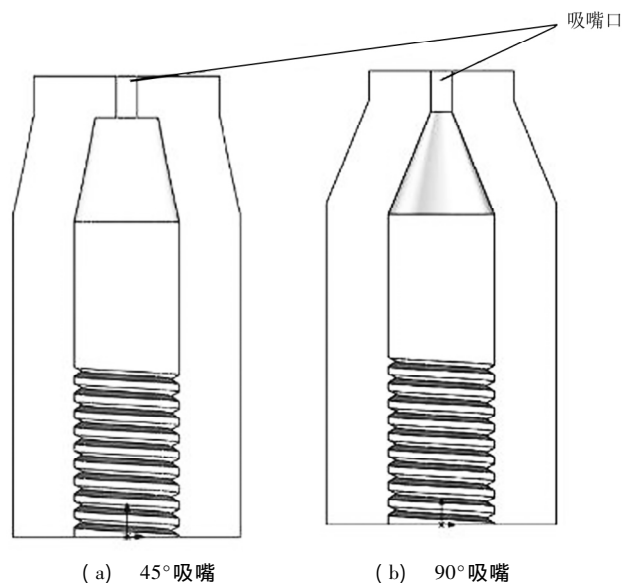
吸嘴作为播种器的核心部件之一, 其结构与尺寸参数会对整个吸种效果产生较大影响, 且吸嘴的内腔结构是影响吸种效果的主要因素, 因此, 选取 45° 和 90° 两种不同吸嘴口锥度的吸嘴, 采用 FLUENT 软件对两种吸嘴的流场进行仿真, 如图 4 所示。



(a) 开始位置 (b) 结束位置

图 3 播种机播种过程运动仿真示意图

Fig.3 Schematic diagram of motion simulation of sowing machine seeding process

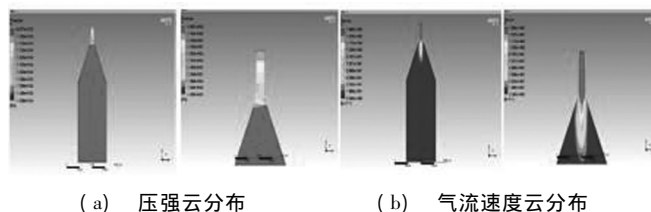


(a) 45° 吸嘴 (b) 90° 吸嘴

图 4 吸嘴型腔结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the nozzle cavity structure

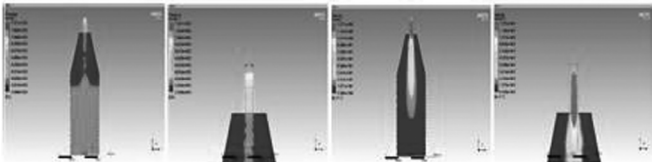
采用三维软件 SolidWorks 对两种吸嘴内腔的流场建立有限元模型, 利用流体力学仿真软件 FLUENT 对两种模型进行分析。为了保证仿真结果的可靠性, 设吸嘴下方为 int, 压强大小为 -25 kPa ; 吸嘴出口为 out, 压强大小为 0 kPa , 得出两种吸嘴内腔的压强与气流速度云分布图, 如图 5、图 6 所示。图 5、图 6 中 (a)、(b) 分别表示 45° 和 90° 吸嘴的压强、气流速度仿真云分布图。



(a) 压强云分布 (b) 气流速度云分布

图 5 45° 吸嘴压强与气流速度云分布图

Fig.5 45° nozzle pressure and air velocity cloud distribution map



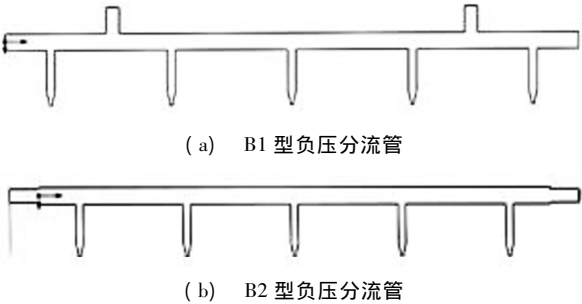
(a) 压强云分布 (b) 气流速度云分布
图 6 90°吸嘴压强与气流速度云分布图

Fig.6 90° nozzle pressure and air velocity cloud distribution map

由图 5、图 6 可以得出: 在吸嘴型腔部分, 45°吸嘴相对于 90°吸嘴压强未出现明显变化, 未出现湍流, 气流速度出现湍流范围也较小; 吸嘴口部分, 45°与 90°吸嘴压强均未出现明显变化; 45°吸嘴口气流速度未出现明显的速度梯度变化, 90°吸嘴出现明显的速度梯度变化。因此, 45°吸嘴内部的压强和气流速度较稳定, 整体结构更优。

3.3 基于 FLUENT 负压分流管结构确定

气吸针式摇摆播种机中负压分流管的使用简化了对多路吸嘴固定机构的使用, 也减少了气路连接的数量, 便于对负压的检测与控制。负压分流管内压强和气流速度的稳定性决定了各路吸嘴完成吸种时的一致性, 负压分流管入口位置是影响各路压强与气流速度稳定性的主要因素。因此, 选取两种不同结构的负压分流管作为研究对象: B1 型模型为两个负压入口, 位于负压分流管的中间; B2 型模型为两个负压入口, 位于负压分流管的两侧, 如图 7 所示。



(a) B1 型负压分流管 (b) B2 型负压分流管
图 7 负压分流管排布示意图

Fig.7 Schematic diagram of negative pressure distribution pipe arrangement

选取两个负压入口为 int, 五路出口为 out, 设负压入口总压力为 -25kPa。其中, 负压分流管每个入口的压力均为 -12.5kPa, 每路出口压力为 0kPa, 通过 FLUENT 仿真软件从左到右分别对每个出口压力与气流速度进行测量, 通过计算得出两种结构负压分流管出口处压强和气流速度的极差、均值与标准差, 如表 2 所示。

由表 2 得到: 极差 $B1 > B2$ 、标准差 $B1 > B2$ 、均值 $B2 > B1$, 极差与方差代表了吸嘴之间压强与气流速度的变化波动程度, 极差与方差越小表示吸嘴间的变化程度越小, 代表了取种一致性更好; 均值代表了吸嘴

吸附种子的整体水平, 压强与气流速度的均值越高表示吸附种子的整体能力越强。因此, 依据较小极差和方差、较大均值的原则, 得出 B2 即两个负压入口并位于负压分流管两侧的结构形式较优。

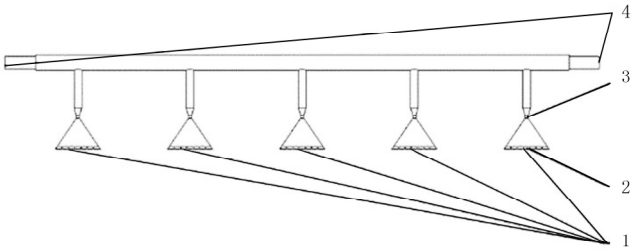
表 2 负压分流管仿真结果

Table 2 Simulation results of air distribution pipe

负压分流管类型	吸嘴序号	气流速度 / $m \cdot s^{-1}$	压强 kPa
B1	1	349.88	-3.94
	2	289.90	-2.50
	3	379.88	-4.18
	4	389.88	-4.66
	5	369.88	-4.18
气流速度: 极差 $R_1 = 99.98m/s$, 均值 $N_1 = 355.88m/s$, 标准差 $X_1 = 35.54$ 压强: 极差 $R_1 = 2.16kPa$, 均值 $N_1 = -3.90kPa$, 标准差 $X_1 = 0.73$			
B2	1	379.9	-4.50
	2	360.4	-4.00
	3	379.9	-4.26
	4	379.9	-4.26
	5	360.4	-4.00
气流速度: 极差 $R_2 = 19.5m/s$, 均值 $N_2 = 372.1m/s$, 标准差 $X_2 = 9.55$ 压强: 极差 $R_2 = 0.50kPa$, 均值 $N_2 = -4.20kPa$, 标准差 $X_2 = 0.18$			

3.4 基于 FLUENT 软件取种过程仿真分析

采用 SolidWorks 对前期仿真得出的较优的吸嘴和负压分流管进行装配, 并加入取种时外部流场进行建模, 如图 8 所示。

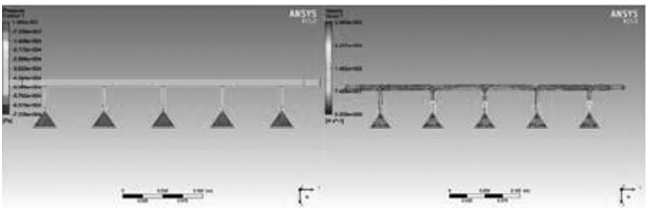


1.出口 2.种子 3.吸嘴口 4.负压分流管入口

图 8 取种装配体模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of taking an assembly model

设负压分流管入口压强大小为 -25kPa ;外部流场边界压强大小为 0kPa 。通过 FLUENT 仿真软件得到装配体的压强与速度云分布图,如图 9 所示。为了便于观察,按顺序均匀的选取外部负压流场在垂直和水平方向的 7 个层次,代表整个外部负压流场,并借助 CFD-Post 软件得到 7 个层次在垂直和水平方向各点气流速度的变化趋势图,如图 10 所示。



(a) 压强云分布图 (b) 气流速度云分布图

图 9 取种装配体压强与气流速度云分布图

Fig.9 Distribution of pressure and airflow velocity cloud of assembly

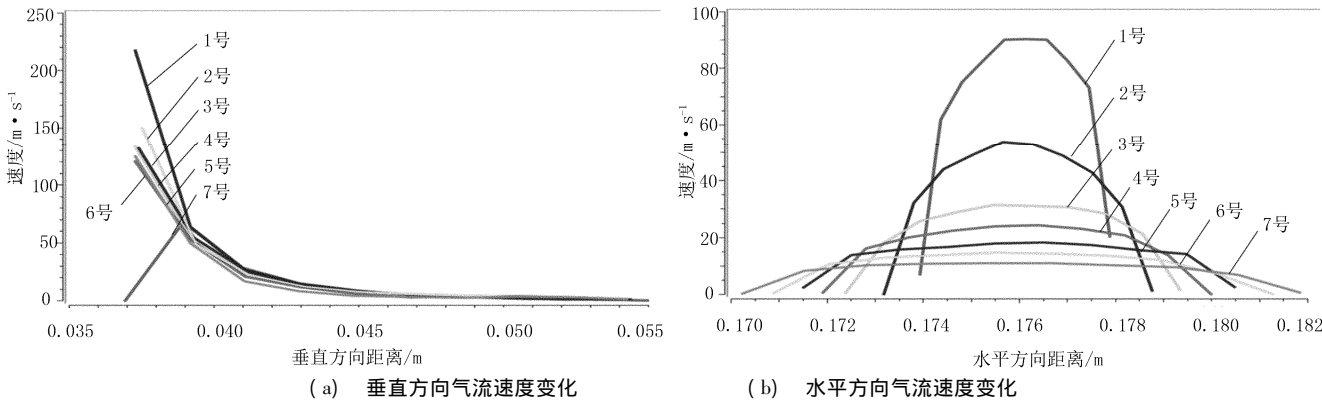


图 10 取种装配体外部流场气流速度变化趋势图

Fig.10 Trend diagram of the airflow velocity of the external flow field of the assembly

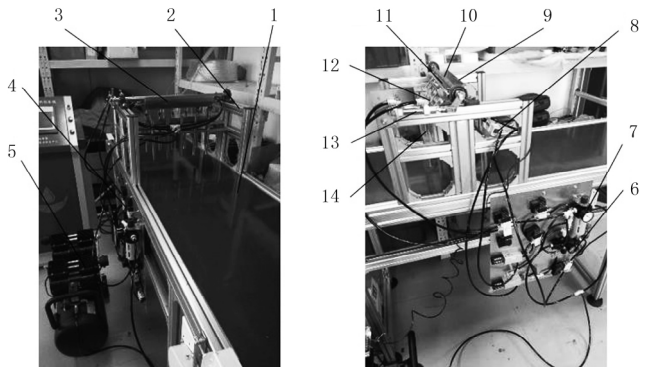
由图 9、图 10 可以得出:装配体内部流场压强与气流速度分布较为均匀,整体取种平稳。在垂直方向,气流速度与吸嘴口距离之间整体呈现反比关系,通过理论计算已知实现吸附的临界气流速度为 10.1 m/s ,因此当负压大小为 -25kPa 时,实现取种临界垂直距离为 43mm ;在水平方向,气流速度呈现快速的先上升后下降趋势,位于中心区域气流速度达到最大值,可以得出实现取种的最佳区域为吸嘴口垂直正下方,且其他区域气流速度衰减较快,有效避免了在取种时出现吸附多粒种子情况的发生。因此,吸嘴和负压分流管装配体整体完成取种效果较好,各部件设计合理。

4 试验与结果分析

4.1 试验材料与试验设备

试验材料选为具有典型代表的罗生 1 号生菜种子若干。试验在北京农业智能装备中心提供的播种试验平台上进行。叶菜精量播种试验平台主要由传送装置、排种器支撑架、精量排种器、气动控制系统和空气压缩机组成,如图 11 所示。依据前期仿真分析得到各部件较优结构和尺寸,选用型号 MIJ20 $\times$ 30-10S 型笔形气缸,负压分流管结构为两个负压入口位于负压分流管两侧、吸嘴选用 45° 锥度的吸嘴,气动振动器选用 FP-25-M 型、储气量为 50L 空气压缩机。气动

控制组件主要由总调压阀、振动气压调节阀、负压数字传感器和各类气动电磁阀组成。



(a) 试验平台整体实物图 (b) 试验平台局部实物图

- 1.传送装置 2.排种器固定架 3.精量排种器 4.气动控制系统
- 5.空气压缩机 6.振动气压调节阀 7.总调压阀 8.负压数字传感器
- 9.排种器外壳 10.旋转轴 11.负压分流管 12.吸嘴
- 13.笔型气缸 14.导种管

图 11 气吸针式摇摆叶菜精量排种器试验平台

Fig.11 Air suction swing needle leaf precision seed metering test platform

4.2 试验因素指标与方案确定

前期对播种机关键部件进行仿真分析,确定了各部件的较优结构,后期试验中对各部件的尺寸与运行参数进行试验分析,选取负压大小、吸嘴口直径大小和种盘振动强度 3 个因素作为试验因素。其中,负压大小通过负压数字传感器测得,种盘振动强度可由气压大小换算得到振动频率,通过前期仿真得到吸嘴距离种盘高度的临界距离为 43mm ,考虑防止排种器与

种盘之间发生干涉 ,试验设定吸嘴距离种盘高度为 25mm ,如表 3 所示。

表 3 试验因素水平
Table 3 Level of test factors

水平	负压大小 A /kPa	吸嘴口直径 B /mm	振动强度 C /Hz
1	-20	0.4	58
2	-25	0.5	61
3	-30	0.6	64

为了体现播种性能的优劣 ,选取 3 个评价指标 ,即漏播率、重播率和单粒率。漏播率体现排种器的稳定性 ,漏播率越低代表播种稳定性越高;重播率体现排种器的精量化程度 ,重播率越低代表播种的精量化程度越高;单粒率体现排种器性能的优劣 ,单粒率越高代表性性能越优。

选取负压大小、吸嘴口直径大小和种盘振动强度作为试验因素 ,漏播率、重播率和单粒率作为试验指标 ,进行三因素三水平的正交试验 ,2 个试验评价指标通过选用 5×8 的穴盘 ,一次完成 5 个穴盘的连续播种作业 ,即试验样本的数量为 200 个;通过对每个穴槽内种子数量的统计 ,得出空穴数、重播穴数和单粒穴数 ,与总穴槽数量(200) 的比值分别代表漏播率、重播率和单粒率。

4.3 正交试验结果与分析

正交试验结果如表 4 所示。利用正交助手软件对试验数据进行分析 ,得出各试验指标的极差、方差 ,结果如表 5、表 6 所示。

表 4 试验结果
Table 4 Test result

序号	气流 负压 /kPa	吸嘴口 直径 /mm	误差	振动 强度 /Hz	漏播率 /%	重播率 /%	单粒率 /%
1	1	1	1	1	14	12	74
2	1	2	2	2	8	17	75
3	1	3	3	3	6	30	64
4	2	1	2	3	12	11	77
5	2	2	3	1	7	17	76
6	2	3	1	2	3	35	62
7	3	1	3	2	6	26	68
8	3	2	1	3	3	24	73
9	3	3	2	1	1	43	56

表 5 极差分析结果
Table 5 Range analysis results

试验指标	气流负压	吸嘴口直径	误差	振动强度	
漏播率	K1	9.333	10.667	6.667	7.333
	K2	7.333	6.000	7.000	5.667
	K3	3.333	3.333	6.333	7.000
	极差 R	6	7.167	0.667	1.666
	主次顺序	B>A>C			
	较优组合	A ₃ B ₃ C ₂			
重播率	K1	19.667	16.333	23.667	24.000
	K2	21.000	19.333	23.667	26.000
	K3	31.000	36.000	24.333	21.667
	极差 R	11.333	19.667	0.666	4.333
	主次顺序	B>A>C			
	较优组合	A ₁ B ₁ C ₃			
单粒率	K1	71.000	73.000	69.667	68.667
	K2	71.667	74.667	69.333	68.333
	K3	65.667	60.667	69.333	71.333
	极差 R	6.000	14.000	0.334	3.000
	主次顺序	B>A>C			
	较优组合	A ₂ B ₂ C ₃			

表 6 方差分析结果
Table 6 Analysis of variance

试验指标	方差来源	平方和	自由度	F 值	显著性
漏播率	A	56.000	2	83.958	显著
	B	82.667	2	123.939	特显著
	误差	0.67	2		
	C	4.667	2	6.997	不显著
重播率	A	230.222	2	258.967	特显著
	B	673.556	2	757.656	特显著
	误差	0.89	2		
	C	28.222	2	31.746	显著

续表 6

试验指标	方差来源	平方和	自由度	F 值	显著性
单粒率	A	64.889	2	292.293	特显著
	B	350.889	2	1580.581	特显著
	误差	0.22	2		
	C	16.222	2	73.072	显著

注: $F_{0.05}(2, 2) = 19$, $F_{0.01}(2, 2) = 99$ 。 $F(2, 2) > F_{0.01}(2, 2)$ 表示特别显著; $F_{0.01}(2, 2) > F(2, 2) > F_{0.05}(2, 2)$ 表示显著; $F(2, 2) < F_{0.05}(2, 2)$ 表示不显著。

由极差分析试验结果可知:漏播率、重播率和单粒率的影响主次顺序为 $B>A>C$,极差越大说明试验因素水平对试验指标的影响越大。因此,吸嘴口径影响最大,气流负压影响次之,种盘振动强度影响相对最小,并得出单粒率、重播率和漏播率的较优组合分别为 $A_2B_2C_3$ 、 $A_1B_1C_3$ 、 $A_3B_3C_2$ 。

由方差分析试验结果可知:对于漏播率,吸嘴口径具有特别显著影响,负压大小和吸嘴口径两个因素具有显著影响;对于重播率和单粒率,负压大小、吸嘴口径和种盘振动强度 3 个因素都具有显著影响。其中,负压大小和吸嘴口径具有特别显著影响,种盘振动强度仅对重播率和单粒率具有显著影响。综上所述,吸嘴口径是影响 3 项试验指标的主要因素,负压大小是影响重播率和单粒率指标的主要因素,种盘振动强度是影响单粒率的主要因素。

综上所述,通过对极差和方差的试验分析结果,依据优先保证先完成对种子的吸附后再实现单粒播种精度的要求,应优先考虑漏播率,单粒率次之,即先满足较低漏播率,后满足较高单粒率的原则,最终得出较优组合参数为 $A_2B_3C_3$,即气流负压 -25kPa 、吸嘴口径 0.6mm 、种盘振动强度 64Hz 。

4.4 播种验证试验

通过正交试验得到了 3 个试验因素的最优组合参数,负压大小、吸嘴口径大小、振动频率分别为 -25kPa 、 0.6mm 、 64Hz 。为了验证三因素的最优组合参数的合理性,在最优参数组合下,以漏播率、重播率和单粒率作为试验指标,进行一排五吸嘴同时吸附取种,总共进行 3 组试验,每组试验连续重复进行 80 次取种动作,即总共连续完成 10 个穴盘 400 个穴槽的播种;对取种时每个吸嘴吸附种子的数量进行记录,用来表示一组试验中出现的所有空穴槽、重播穴槽和单粒穴槽数量,将试验得到的空穴槽、重播穴槽和单粒穴槽的数量与总样本数 400 的比值作为漏播率 P 、重播率

S 和单粒率 Q 3 个试验指标值,由于试验组数有限与试验过程中环境的变化,所得到的结果存在一定误差,因此应按照 3 组试验结果中最大漏播率和重播率作为最终试验结果,单粒率可由式(7)求得,通过单位 1 减去最大漏播率和最大重播率得出,结果如表 7 所示。

$$Q = (1 - P - S) \times 100\% \tag{7}$$

其中, Q 为单粒率指标(%); P 为最大漏播率指标(%); S 为最大重播率指标(%)。

表 7 验证试验结果

Table 7 Verification test results				%
试验组数	漏播率 P	重播率 S	单粒率 Q	
1	2.75	4.75	92.5	
2	2.50	5.25	92.25	
3	1.75	5.5	92.75	
试验结果	2.75	5.5	91.75	

通过验证试验,得到漏播率、重播率和单粒率分别为 2.75% 、 5.5% 和 91.75% 。由于关于叶菜类播种合格并没有明确的标准,依据现有国内精量播种机所达到的标准进行比较^[33-34],单粒率指标达到了 90% 以上,可以满足生菜精量播种的要求。

5 结论

1) 通过对叶菜类种子基本尺寸的测量,采用 SolidWorks 软件对叶菜种子的模型进行建立,确定了叶菜类种子的基本形状与特点,对种子的受力进行分析,理论计算得出实现吸附种子所需气流的临界速度为 10.1m/s 。

2) 采用 SolidWorks 软件对精量播种机播种过程的仿真得到了笔形气缸所需的量程;采用 ANSYS/FLUENT 仿真软件对吸嘴内腔和负压分流管内部结构的流场进行仿真分析,确定了其较优结构,并通过对取种过程的整体仿真分析得到了实现吸附种盘与吸嘴间的临界距离为 43mm ,位于吸嘴正下方区域的吸附能力最强。

3) 对气吸针式摇摆精量播种试验平台的搭建,通过三因素三水平正交试验,对试验结果极差和方差的分析得到了试验因素的最优组合参数,即气流负压 -25kPa 、吸嘴口径 0.6mm 、种盘振动强度 64Hz 。依据最优组合参数进行播种验证试验,得到试验指标,即漏播率、重播率和单粒率分别为 2.75% 、 5.5% 和 91.75% 。

致谢

本论文工作得到省部级项目课题的资助: 宁夏回族自治区重点研发计划农业农村领域重大项目(2019BBF02010), 项目名称《叶菜全程流水线自动生产系统与智能装备开发应用》; 陕西省农业科技创新与攻关资助项目(2016NY-149), 项目名称《设施蔬菜优质高产配套装备智能技术与开发》; 陕西省教育厅产业资助项目(2013JC26), 项目名称《车辆灯具配光性能动态测试系统》, 特此表示感谢。

参考文献:

- [1] 李辉尚, 王晓东, 杨唯, 等. 我国蔬菜市场 2017 年形势分析与后市展望[J]. 中国蔬菜, 2018(1): 7-12.
- [2] 胡童, 齐新丹, 李骅, 等. 国内外蔬菜播种机的应用现状与研究进展[J]. 江西农业学报, 2018, 30(2): 87-92.
- [3] 许剑平, 谢宇峰, 徐涛. 国内外播种机械的技术现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2011, 33(2): 234-237.
- [4] 贾冬冬. 种苗负压气吸夹设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [5] 陈爽. 气吸式播种机的发展现状与功能特点[J]. 农机使用与维修, 2018(8): 100.
- [6] 杜佳伟, 杨学军, 刘立晶, 等. 小粒种子精量播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 9-13.
- [7] 王敬锋. 精量播种机排种部件的技术现状及发展特点[J]. 农机使用与维修, 2018(10): 76.
- [8] B B GAIKWAD, N P S SIROHL. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- [9] 王波, 郭颖杰, 杨军. 气力式排种器的研究及进展[J]. 农业与技术, 2014, 34(3): 62-63.
- [10] 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35-38.
- [11] 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78-86.
- [12] 倪向东, 徐国杰, 王琦, 等. 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 58-67.
- [13] 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.
- [14] 刘中正, 侯加林, 辛杰, 等. 智能化设施育苗机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 136-142.
- [15] 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(02): 48-51, 74.
- [16] REIS A V D, FORCELLINI F A. Precision mechanical seed meter for small seeds: Functional tests [J]. Revista brasileira de engenharia agricola ambiental, 2009: 651-656.
- [17] OLIMPIA PANDIA, ION SARACIN, LON BOZGA, et al. Studies regarding pneumatic equipment for sowing small seeds in cups [J]. Agriculture and agricultural science, 2015(6): 690-695.
- [18] 杜韧. 气针式穴盘播种机吸种吸附性能的研究[C]//北京理工大学、中国机械工程学会机械设计分会. 2017 机械设计国际会议暨第 19 届机械设计学术年会论文集, 2017.
- [19] 杜韧, 王晓臣, 齐晓巧. 气针式穴盘播种机播种装置的研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2014, 24(2): 1-3.
- [20] 廖庆喜, 张猛, 余佳佳, 等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 30-34.
- [21] ChuangRen, Qinghui Lai, Zhaoguo Zhang. Internal Flow field Analysis of air-suction roller-type precision metering device [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3403: 84-88.
- [22] 张敏, 吴崇友, 张文毅. 吸盘式水稻育秧播种器吸孔气流场仿真分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 162-167, 393.
- [23] 陈进, 李耀明, 王希强, 等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007(9): 59-62.
- [24] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57-68.
- [25] 杨明金, 邱兵, 杨玲, 等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 139-143.
- [26] 张石平, 陈进, 李耀明. 振动气吸式穴盘精量播种装置种子群“沸腾”运动分析[J]. 农业工程学报, 2008(7): 20-24.
- [27] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.
- [28] 张鸿雁, 张志政, 王元. 流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 156-157.
- [29] 赵立新, 郑立允, 王玉果, 等. 振动气吸式穴盘播种机的吸种性能研究[J]. 农业工程学报, 2003(4): 122-125.
- [30] 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 56-59, 76.
- [31] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 1-2.
- [32] 庄森, 田盈辉, 蒋晶, 等. 真空气吸式播种器吸嘴流场的研究[J]. 农机化研究, 2007(11): 83-86.
- [33] 程修沛, 卢彩云, 孟志军, 等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 1-9.
- [34] 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.

Design and Test of Precision Seeding Machine of Air Suction Needle Sowing for Leaf-vegetables

Wang Chenjian^{1 2}, Zhao Qian², Guo Wenzhong², Jia Dongdong², Wang Kunqi¹, Jia Haiyao^{1 2}

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China; 2.Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: For the seeds with small particle size and irregular shape of leafy vegetables, the conventional seeding machine has problems such as low degree of precision and low seeding success rate. Based on the method of air suction needle seeding, this paper designs the air suction needle swing type leaf vegetable precision seeding machine, which uses the linear reciprocating motion of the cylinder is converted into the rotary rocking motion of the seeding machine to realize the cylinder movement ones and complete the seeding twice; designed the mechanical structure of the traditional planter to replace the vertical movement of the seeding machine; added the vibration device to make the seed in high-frequency vibration state, improve the success rate of the adsorption seed, and also reduce the mutual adhesion between the seeds. According to the three-dimensional size of the leaf seed, the critical air flow rate for seed adsorption was 10.1m/s by theoretical calculation, the range of the pen-shaped cylinder, the structure of the inner cavity of the suction nozzle and the structure of the negative pressure shunt tube were determined using simulation software. Through the construction of the air suction needle swing type leaf vegetable precision seed metering test platform, the negative pressure, the diameter of the nozzle, the vibration intensity of the seed disk were taken as test factors, and the leakage rate, re-broad rate, single-grain rate were used as test indicators. Three-factor and three-level orthogonal tests were carried out. The optimal combination parameters of the test factors are determined by analysis of variance and range the negative pressure is -25kPa, the diameter of the nozzle is 0.6mm, the vibration intensity of the seed disc is 64Hz. According to this parameter combination, seed verification test, the leakage rate is 2.75%, the replay rate is 5.5%, the single grain ratio is 91.75%. It can meet the precision seeding requirements of leafy vegetables, and provides a new method for the precision seeding of leafy vegetables.

Key words: leafy vegetables; air suction needle type; precision seeding; simulation; orthogonal test