

便携式蔬菜穴盘自动播种机设计与试验

朱盘安¹ 李建平² 楼建忠³ 韩志英⁴

(1. 温州科技职业学院, 温州 325006; 2. 浙江大学生物系统工程学系, 杭州 310029;

3. 浙江机电职业技术学院机械工程学院, 杭州 310053; 4. 农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310029)

摘要: 针对现有中小农户大棚蔬菜穴盘栽培手工播种生产率低、劳动强度大等问题,以及国外大型播种机不适合我国中小规模种植经营户需求的现状,设计了一种应用于大棚栽培的穴盘自动化便携式播种机。该播种机一端可折叠,折叠后尺寸为500 mm×500 mm×750 mm,携带方便;播种机采用多功能集成化设计,将传统的穴盘打孔、播种集成于一体,通过激光传感器检测穴盘凹口位置,准确地实现了穴盘基质的自动打孔和播种。经油菜种子和黄瓜种子试验表明,当孔径处于0.6~1.2 mm时,选择真空度为8 kPa,吸附效果较好;若选用0.6 mm孔径气吸吸头,当油菜种子气吸真空度超过6.2 kPa,以及黄瓜种子真空度超过8.3 kPa时,吸附成功率达到90%以上。经正交试验,发现油菜种子和黄瓜种子在孔径为0.6 mm,真空度为10 kPa时吸附效果最好。与手工播种相比,播种机播种效率是手工播种效率12.9倍,较好地实现了蔬菜种子的穴盘播种。

关键词: 蔬菜; 播种机; 打孔; 穴盘; 便携式; 设计

中图分类号: S233.74; S606.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0007-07

Design and Test of Portable Automatic Vegetable Seeding Machine

Zhu Pan'an¹ Li Jianping² Lou Jianzhong³ Han Zhiying⁴

(1. Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, China

2. Department of Biological Systems Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China

4. Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310029, China)

Abstract: With the development of specialization and large-scale vegetable planting in China, factory seeding was widely used, and there was high requirement for sowing. Vegetable tray seeding machinery is one of the core equipment of vegetable seedling. In order to solve the problems of low productivity, high labor intensity in manual seeding and the current planting machine being not suitable for the need of small and medium sized planting greenhouses in China, the automatic seeding device used in greenhouses was designed on the base of the analysis of characteristic parameters of rape and cucumber seeds. One side of the seeding device can be folded in order to carry it easily. The size of folded seeding machine was 500 mm×500 mm×750 mm. The device was designed with a multifunctional integrated structure, including hole-punching and seeding, which simplified the working procedure. Both the hole-punching and seeding can be achieved accurately through detecting the position of the notch in the tray by laser sensor. The success rate of seed adsorption was an important factor of seeding machine. The success rate of adsorption would directly affect the success rate and production efficiency of seeding machine. Experimental results showed that the size of suction head had effect on suction success rate when pressure was decided. The suction success rate was high when the diameter of suction head was within 0.6 ~

收稿日期: 2016-03-15 修回日期: 2016-05-26

基金项目: 浙江省科技厅公益基金项目(2014C32023、2014C32105)

作者简介: 朱盘安(1965—),男,副教授,主要从事农业机械研究,E-mail: zhepanan@163.com

通信作者: 李建平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人研究,E-mail: jpli@zju.edu.cn

1.2 mm and the vacuum degree was 8 kPa. Selecting the diameter of 0.6 mm, the success rate reached over 90% when pressure was higher than 6.2 kPa for rape seeds and 8.3 kPa for cucumber seeds. By orthogonal experiment, it was found that the best adsorption effect was with vacuum degree of 10 kPa and diameter of 0.6 mm. Compared with manual seeding, the efficiency of seeding machine was improved by 12.9 times. The research provided a new structure and design idea to solve problem in seeding.

Key words: vegetable; seeding machine; punching; tray; portability; design

引言

随着我国蔬菜生产的专业化、规模化,工厂化穴盘育苗技术的应用越来越普遍,蔬菜穴盘播种机械成为育苗的核心设备之一^[1-3],其中,气吸式播种机是蔬菜穴盘播种机主要形式。气吸式播种机是利用气体负压产生真空度吸取种子进行精密播种的播种机^[4],目前,气吸式精密播种分为吸针式^[5-6]、滚筒式^[7-8]和吸盘式^[9]3种主要方式,其中吸针式播种机因播种精确,播种性能良好且能适应种子籽粒形状尺寸多样性而被广泛应用^[10-12]。

美国、日本等国家都先于我国研制了不同形式的自动气吸式播种机,但是目前国外的气吸播种设备,主要是针对较大规模的农业企业用于田间播种生产,且设备价格昂贵,一般经营户很难有能力购买^[13-17];我国目前蔬菜播种主要还是靠手工作业,近几年通过引进、吸收、消化国外先进技术,也开发了相应的播种设备,如陈进等^[18]、李耀明等^[19-20]、赵立新等^[12]对种子振动的运动规律做了研究,机构设计也有所创新。然而现有研发单位忽视了个体或中小规模经营户对小型、价格便宜的播种机的强烈需求^[21-22]。

本文针对现有大型播种机不适合中小农户,而现有小型播种机功能不全、不便于携带的问题,设计一种适合于中小农户携带方便、可移动的穴盘自动播种机,将大型机的打孔功能引入小型机,并可通过更换种子吸头及吸头数量,以适应不同种子及穴盘孔数。

1 播种机总体结构与工作原理

便携式蔬菜穴盘自动播种机总体结构如图1所示。该播种机机架上固定有基质打孔机构、种子气吸机构、种子存储料斗。机架上装有穴盘导向机构,引导穴盘在输送带带动下不发生偏斜,以保证精确打孔和播种;在打孔机构和播种机构处放置激光传感器,用于检测穴盘凹口位置,打孔和播种相互独立,互不干涉;料斗处安装有振动机构,通过振动使种子处于抛振状态,以便气吸机构吸取种子。

播种机结构轻巧,总质量约30 kg,工作状态总

体尺寸为500 mm×500 mm×1 100 mm,输送带离地面高度200 mm,输送带一端只需拔出插销即可折叠,折叠后尺寸为500 mm×500 mm×750 mm,节省了存放与搬运空间,携带方便。

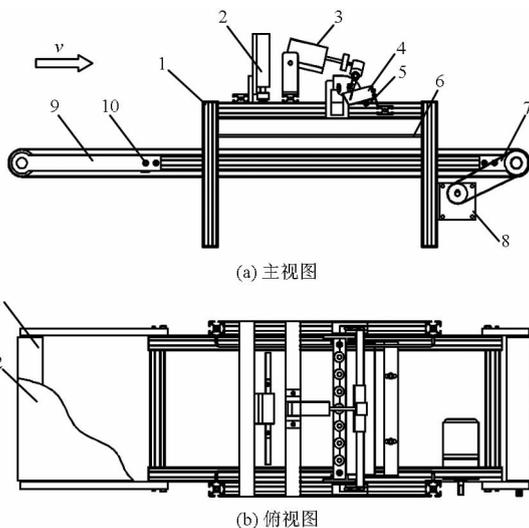


图1 便携式蔬菜穴盘自动播种机总体结构图

Fig. 1 Structure of suction automatic seeding machine

1. 机架 2. 基质打孔机构 3. 种子气吸机构 4. 种子存储料斗
5. 振动电动机 6. 托盘导向机构 7. 输送带 8. 电动机 9. 折叠杆
10. 插销 11. 滚筒 12. 输送带

2 种子气吸机构设计

种子气吸机构如图2a所示,其结构由气缸、气缸固定板、气缸支撑板、通气管路、种子吸头、种子存储料斗、振动电动机、销轴、导向板和导种管等组成;气缸与气缸固定板用螺栓连接,气缸固定板通过销轴与气缸支撑板连接,使气缸能绕销轴转动;气缸支撑板固定在机架上,导向块引导通气管运动。通气管结构如图2b所示,其机构由管塞、接头、密封头、通气管座和通气管组成。为了密封,通气管两端用管塞堵住,种子吸头通过接头连接于通气管上,通气管座经密封头与通气管连接并用O型密封圈密封。当气缸伸缩时,拉动通气管座,通气管在导向块上作滑动,带动种子吸头按轨迹运动。当吸附有种子的种子吸头沿着导向块运动至落料位置时,气吸系统断气,使种子落下,通过种子导向管引导种子落入已打好的穴盘孔。为了适应不同孔数穴盘的使用,通

气管上的接头可根据需要进行增减,吸头孔径可根据需要进行更换,具有较好的适应性。

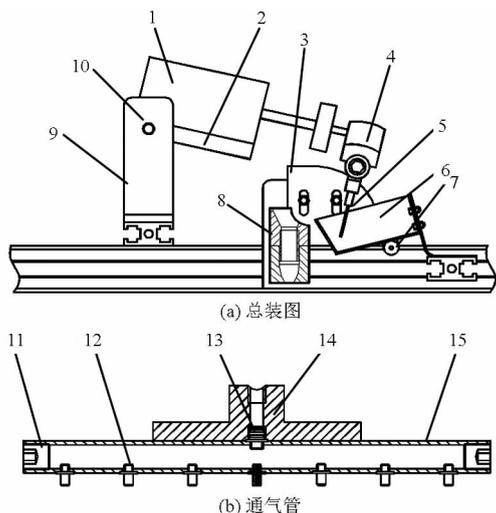


图 2 种子气吸机构

Fig. 2 Seed suction mechanism

1. 气缸 2. 气缸固定板 3. 导向板 4. 通气管路 5. 种子吸头
6. 种子存储料斗 7. 振动电动机 8. 导气管 9. 气缸支撑板
10. 销轴 11. 管塞 12. 接头 13. 密封头 14. 通气管座
15. 通气管

3 种子气吸模型建立

3.1 种子选取

为了测试播种机的通用性,播种用种子选用外观形状为圆形的白杆油菜种子和外观形状为扁状的黄瓜种子,如图 3a、3b 所示,用 105 (15 × 7) 眼的穴盘进行播种,覆上 7:3 比例混合的草炭和蛭石营养土,穴盘营养土如图 3c 所示。

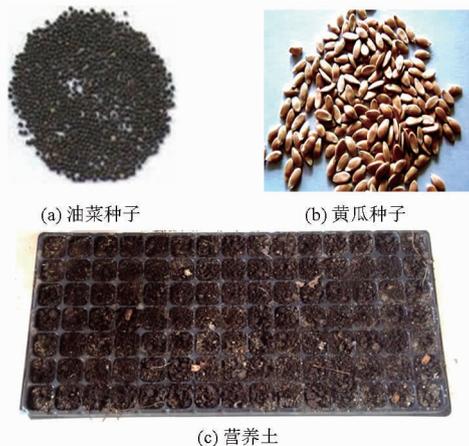


图 3 播种用种子及营养土

Fig. 3 Seeds and nutrition soil for seeding

3.2 种子特征参数测定

为了减少误差,选择相互垂直的 3 个方向对油菜和黄瓜种子进行特征参数测量,测得油菜种子特征参数结果如表 1 所示,测得黄瓜种子特征参数结果如表 2 所示,种子结构特征参数如图 4 所示,其中

圆形油菜种子直径为 d (图 4a),黄瓜种子长度为 a ,宽度为 b ,厚度为 h (图 4b),种子样本质量为 m 。

表 1 油菜种子特征参数测量结果

Tab. 1 Results of characteristic parameters of rapeseeds and radish seeds

参数	直径 d /mm	质量 m /g
平均值	1.81	2.84×10^{-3}
标准差	0.251	0.312

注:随机取种子 30 粒,重复 3 次,取平均值作为样本测量值,下同。

表 2 黄瓜种子特征参数测量结果

Tab. 2 Results of characteristic parameters of cucumber seeds

参数	长度 a /mm	宽度 b /mm	厚度 h /mm	质量 m /g
平均值	9.81	4.02	1.24	6.34×10^{-2}
标准差	1.071	0.359	0.525	0.372

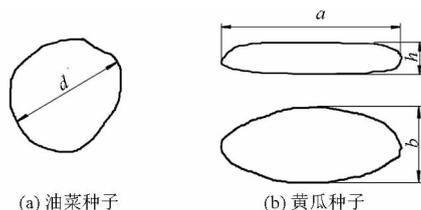


图 4 种子结构参数示意图

Fig. 4 Sketches of structure parameters of seeds

3.3 种子气吸模型建立

种子气吸机构设计需要确定气吸形式、最小真空度、吸口的适合尺寸,其中吸口直径以及吸头真空度直接影响种子是否能吸住,从而影响种子播种的成功率。

将种子放入供料斗中,启动振动电动机,使得种子处于抛振状态,气吸吸头靠近供料斗,通过气吸吸头的负压产生真空,吸附处于抛振状态的种子,此时,种子在吸头上,承受气吸吸头的吸附力 F_c 和种子自身的质量 m 。吸头与垂直面夹角为 θ ,为使种子不掉落,必须满足一定的条件。种子在吸头上的受力情况如图 5 所示,图中 F_s 为吸头对种子的摩擦力。

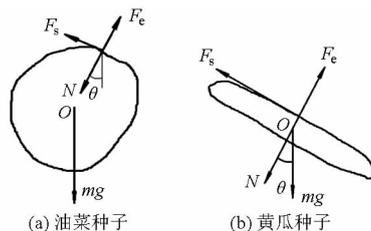


图 5 种子在气吸吸头上的受力情况

Fig. 5 Force of seed on needle

由图 5 可知,气吸吸头吸住种子时,为了使种子能较好吸住,在系统处于平衡时,有

$$F_c = N + mg \cos \theta \quad (1)$$

$$F_s = mgsin\theta \quad (2)$$

其中 $F_s = \mu N$ (3)

式中 μ ——摩擦因数

将式(3)代入式(2)得

$$N = \frac{mgsin\theta}{\mu} \quad (4)$$

代入式(1)得

$$F_e = \frac{mgsin\theta}{\mu} + mgcos\theta \quad (5)$$

将式(5)化简后得

$$F_e = \frac{mg}{\mu} \sqrt{1 + \mu^2} \left(\frac{sin\theta}{\sqrt{1 + \mu^2}} + \frac{\mu cos\theta}{\sqrt{1 + \mu^2}} \right) \quad (6)$$

令 $\frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} = cos\alpha$ $\frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} = sin\alpha$

从而式(6)为

$$F_e = \frac{mg}{\mu} \sqrt{1 + \mu^2} (cos\alpha sin\theta + sin\alpha cos\theta) \quad (7)$$

即 $F_e = \frac{mg}{\mu} \sqrt{1 + \mu^2} sin(\alpha + \theta)$ (8)

式(8)中,由于 μ 都为定值,故

$$\alpha = arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}}$$

也为定值。

同时 $F_e = \frac{\pi d_1^2}{4} p$ (9)

式中 p ——种子吸头真空度

由式(8)和式(9)可知,种子吸附合力 F_e 与种子质量 m 、吸头孔径 d_1 、吸头与种子的摩擦因数 μ 、吸头真空度 p 和吸头与垂直面的夹角 θ 有关。式中种子质量 m 根据表1和表2获得,吸头孔径 d_1 根据不同种子进行选择。

4 试验

4.1 试验目的

本试验主要检验在给定条件下所设计的气吸机构可行性及种子吸附机构的作业成功率。在温室内用所设计的播种机对2种种子籽粒(油菜和黄瓜)用不同吸头孔径在不同气吸真空度下进行试验,以期获得播种机在不同条件下的气吸播种成功率,并将所设计的播种机与手工播种进行生产效率比较试验。

4.2 试验方法

试验时首先用手工将种子放入种子存储料斗,打开气泵,调节气压至要求值,启动输送机构,在穴盘中覆上基质,将其放入输送带,完成前期工作。

播种工作流程图如图6所示。虚线框部分为手工完成的动作,双点画线框表示传感器位置。整体动作通过激光传感器协调工作,当第1个传感器检

测到穴盘底部凹口时,进行基质打孔;当穴盘运动到第2个传感器位置时,由传感器检测穴盘底部凹口完成种子播种。打孔和播种在不同位置独立进行,互不干涉,直至穴盘最后一排穴孔完成播种,手工取走穴盘完成整个穴盘播种。

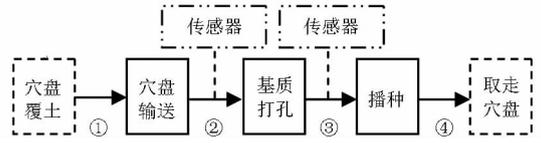


图6 温室播种试验及流程图

Fig. 6 Greenhouse seeding equipment and its flow chart

种子气吸播种环节有4个动作,即通气管利用负压产生真空吸附种子,拉动通气管至导种管上方,消除负压使种子沿着导种管落入穴盘,机构复位。

4.3 吸头孔径对吸附能力的影响

在常温条件下,取真空度8 kPa,选择油菜和黄瓜2种结构不同的种子和8种不同孔径大小的气吸吸头,气吸吸头如图7所示,其尺寸参数见表3。



图7 不同孔径的气吸吸头

Fig. 7 Suction heads with different sizes

表3 气吸吸头的尺寸参数

Tab. 3 Dimension parameters of suction head

序号	颜色	内径 d' /mm	外径 D' /mm	总长 l' /mm
1号	橄榄色	1.55	1.84	30
2号	琥珀色	1.37	1.81	30
3号	灰色	1.20	1.60	30
4号	黑色	0.84	1.26	30
5号	粉色	0.60	0.92	30
6号	紫色	0.51	0.82	30
7号	浅蓝	0.41	0.70	30
8号	红色	0.26	0.50	30

气吸式播种机顺利完成播种,其中一个重要的因素就是种子吸附成功率,吸附是否成功将直接影响播种机的播种成功率和生产效率。

试验时,分别选取1~8号气吸吸头,对油菜和黄瓜2种不同结构特征类型的种子进行气吸试验,以单个穴盘105孔(7列15行)进行试验,其中种子准确落入穴孔被定为播种成功,播种成功率为

$$P = \frac{E}{T} \times 100\% \quad (10)$$

式中 E ——每个穴盘成功播种种子平均数目,粒

T ——每个穴盘播种种子总数目,粒

不同直径吸头试验结果如图8所示。通过试验可知,当真空度为8 kPa时,气吸吸头孔径对气吸成

功率影响较大,孔径较小时,无法吸住种子,当孔径太大时,吸附成功率下降,在孔径处于 0.6 ~ 1.2 mm 时,吸附效果较好,其吸附成功率达到 90% 以上。

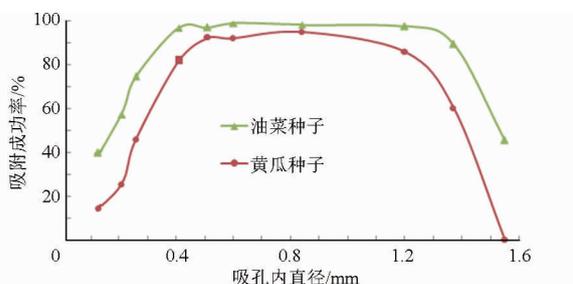


图 8 不同直径气吸试验结果

Fig.8 Test result with different diameters

4.4 吸头真空度对吸附能力的影响

选择内径为 0.6 mm 孔径气吸吸头进行气吸试验研究,不同真空度下气吸试验结果如图 9 所示。

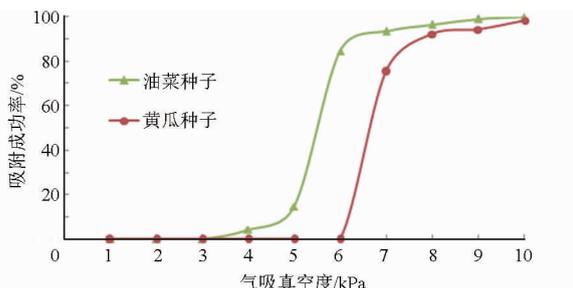


图 9 不同真空度下气吸试验结果

Fig.9 Test result with different pressures

从图 9 中可以看出,调节气吸真空度,当气吸真空度较小时,种子无法被吸附;当油菜种子气吸真空度超过 6.2 kPa,黄瓜种子在真空度超过 8.3 kPa 时,吸附成功率达到 90% 以上,基本趋势相同;还可以看出,油菜种子较黄瓜种子易吸附,油菜种子在真空度超过 7 kPa 后,成功率基本趋于稳定,而黄瓜种子在真空度超过 8 kPa 后,吸附成功率基本趋于稳定。

4.5 试验安排

如表 4 所示,试验采用 3 水平 2 因素,根据各因素不同的水平组合进行试验研究。试验结果为种子气吸成功率,在一定范围内,吸力越大,则吸头吸附种子性能越好。试验设计方案及试验结果见表 5,极差分析结果见表 6。

表 4 吸头正交试验因素水平

Tab.4 Orthogonal test factors and levels of suction nozzle

水平	因素	
	真空度 A/kPa	孔径 B/mm
1	8	0.51
2	9	0.60
3	10	0.84

因素第 i 个水平的均值为

$$k_i = K_i / N_i \quad (11)$$

式中 K_i ——与该因素第 i 个水平有关的试验结果之和

N_i ——水平 i 的试验次数

极差
$$R = \max_{i \neq j} |k_i - k_j| \quad (12)$$

表 5 试验方案及试验结果

Tab.5 Test scheme and test results

试验号	因素		成功率	
	真空度 A/kPa	孔径 B/mm	油菜种子 R_1 /%	黄瓜种子 R_2 /%
1	8	0.51	96.2	92.4
2	8	0.60	98.1	93.3
3	8	0.84	95.2	93.3
4	9	0.51	9.71	94.2
5	9	0.60	98.1	97.1
6	9	0.84	96.2	95.2
7	10	0.51	97.1	97.1
8	10	0.60	98.1	98.1
9	10	0.84	97.1	98.1

表 6 极差分析结果

Tab.6 Result of range analysis

指标	油菜种子		黄瓜种子	
	真空度 A_1 /kPa	孔径 B_1 /mm	真空度 A_2 /kPa	孔径 B_2 /mm
均值 k_1	0.965	0.974	0.930	0.946
均值 k_2	0.971	0.984	0.955	0.962
均值 k_3	0.987	0.965	0.978	0.955
极差 R	0.022	0.019	0.048	0.016

(1)极差反映了各因素对指标的影响,由 $R^{B1} < R^{A1}, R^{B2} < R^{A2}$ 知,对种子吸力的影响重要性依次为真空度 A、孔径 B。

(2)由于 $k_1^{A1} < k_2^{A1} < k_3^{A1}, k_1^{B1} < k_2^{B1} < k_1^{A2} < k_2^{A2} < k_3^{A2}, k_1^{B1} < k_2^{B1} < k_3^{B1}$,各因素水平对油菜种子吸种效果的影响由大到小顺序是: $A_{13}, A_{12}, A_{11}, B_{12}, B_{11}, B_{13}$,所以最佳方案为 $A_{13}B_{12}$;各因素水平对黄瓜种子吸种效果的影响由大到小顺序是: $A_{23}, A_{22}, A_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{21}$,所以最佳方案为 $A_{23}B_{22}$,即油菜和黄瓜籽在选择真空度为 10 kPa,孔径为 0.6 mm 时吸附效果最好。

选择油菜籽在真空度为 10 kPa、孔径为 0.6 mm 时对气吸式播种与手工播种进行比较试验,试验结果如表 7 所示,种子吸附情况如图 10 所示。

表 7 播种机与手工播种比较试验

Tab.7 Comparison of machine seeding and manual seeding

播种方式	播种成功率/ %	漏播率/ %	播种效率/ (粒·min ⁻¹)
手工播种	84.8	15.2	65
机器播种	98.1	1.9	840

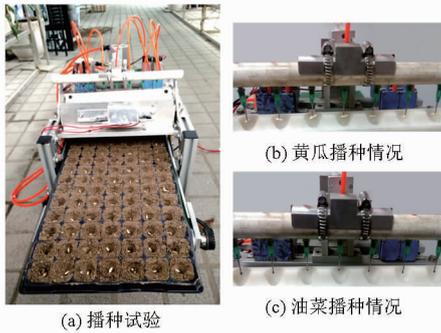


图10 种子吸附情况

Fig. 10 Suction of seeds

通过试验,在给定的真空度和吸孔条件下,所设计的播种机对油菜籽播种成功率为98.1%,漏播率为1.9%,同时播种效率是手工播种效率12.9倍。由于利用激光传感器同步检测穴盘底部凹口位置,并用PLC进行控制,使各动作相互协调,达到了种子播种的要求。

5 结论

(1)设计的便携式穴盘自动播种机集成了基质打孔和播种两大功能,一端可折叠,结构紧凑。播种机吸头大小和数量可根据需要进行更换,以满足中小型农户对不同外形、大小种子及不同穴盘规格的种子播种要求。

(2)气吸吸头孔径和真空度大小对气吸成功率影响较大。当真空度为8 kPa,孔径为0.6~1.2 mm时,吸附效果较好;当孔径为0.6 mm时,油菜种子气吸真空度超过6.2 kPa,黄瓜种子在真空度超过8.3 kPa时,吸附成功率达到90%以上。

(3)经正交试验,发现油菜和黄瓜籽在选择真空度为10 kPa、孔径为0.6 mm时吸附效果最好,此时,播种机对油菜籽播种成功率为98.1%,漏播率为1.9%。与手工播种比较,在真空度为10 kPa、孔径为0.6 mm时,播种效率是手工播种效率的12.9倍。

参 考 文 献

- 刘如魁. 蔬菜集约化育苗栽培技术探讨[J]. 农业技术与装备, 2013(12): 46-47.
- 程欢庆, 张祖立, 张为政. 蔬菜穴盘播种装置的研究进展[J]. 农业科技与装备, 2010(4): 31-33.
- 梁宝忠, 赵永亮, 赵金英, 等. 水稻直播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 63-66.
LIANG Baozhong, ZHAO Yongliang, ZHAO Jinying, et al. Design and test of rice direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 63-66. (in Chinese)
- 王永维, 曹林, 王俊, 等. 气吸式水稻育秧整盘播种机吸孔流场模拟与播种试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 96-102.
WANG Yongwei, CAO Lin, WANG Jun. Flow field simulation and seeding experiment on suction nozzle of cupule-type rice seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 96-102. (in Chinese)
- 宋建农. 针状气吸式精密播种装置: 中国01222990.3[P]. 2002-01-30.
- 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, 24(7): 20-24.
ZHANG Shiping, CHEN Jin, LI Yaoming. Analysis of seeds ‘boiling’ motion on vibrational air-suction tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 20-24. (in Chinese)
- 张晓慧, 宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[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)
- 韩豹, 吴文福, 王宏业. 水稻机摆钵育苗气吸滚筒式自动清堵排种器[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 96-99.
HAN Bao, WU Wenfu, WANG Hongye. Suction drum-type seed metering device with auto-cleaning block of transplanter for tray grown rice seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 96-99. (in Chinese)
- 刘彩玲, 宋建农, 王继承, 等. 水平吸盘式水稻育秧精密播种装置吸种真空度的研究[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 121-125.
LIU Cailing, SONG Jiannong, WANG Jicheng. Research on vacuum of a leve-1 sucker precision metering device for rice seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(5): 121-125. (in Chinese)
- 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.
YANG Mingjin, QIU Bing, YANG Ling, et al. Metering performance of the vibrational vacuum precision tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 139-143. (in Chinese)
- 张石平, 陈进, 李耀明. 振动气吸式穴盘精播装置振动条件理论分析与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 56-59.
ZHANG Shiping, CHEN Jin, LI Yaoming. Theoretical analysis and experiment on vibration conditions for vibrational air-suction tray precision seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 56-59. (in Chinese)
- 赵立新, 郑立允, 刘志民, 等. 气动振动器气吸播种机的种子振动性能研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 65-68.
ZHAO Lixin, ZHENG Liyun, LIU Zhimin, et al. Seed vibration performance of vibrational air-sucking seeder with air-style vibrator[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 65-68. (in Chinese)
- 林静, 钱巍, 李宝筏, 等. 2BG-2型玉米垄作免耕播种机播种深度数学模型的仿真与验证[J]. 农业工程学报, 2015,

- 31(9):19-24.
LIN Jing, QIAN Wei, LI Baofa, et al. Simulation and validation of seeding depth mathematical model of 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):19-24. (in Chinese)
- 14 董春旺, 胡斌, 坎杂. 工厂化穴盘育苗精量播种装置现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2008(8):247-249.
DONG Chunwang, HU Bin, KAN Za. The existing circumstance and development strategy on industrial precision seedling-machine equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(8):247-249. (in Chinese)
- 15 周海波, 马旭, 姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4):301-306.
ZHOU Haibo, MA Xu, YAO Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):301-306. (in Chinese)
- 16 赵德金, 崔永汉, 朴香兰. 精密排种器检测装置的现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2002(7):5-7.
ZHAO Dejin, CUI Yonghan, PIAO Xianglan. The actuality and development direction on metering device of precision seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002(7):5-7. (in Chinese)
- 17 王应彪, 赵学观, 徐丽明, 等. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1):79-88.
WANG Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. Experiment and directional movement technology of corn seed based on electro-magnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):79-88. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种子盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):55-59.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):55-59. (in Chinese)
- 20 李耀明, 王显仁, 徐立章, 等. 水稻谷粒的挤压力学性能研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11):56-59.
LI Yaoming, WANG Xianren, XU Lizhang, et al. Study on compression properties of rice grains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11):56-59. (in Chinese)
- 21 刘文忠, 赵满全, 王文明. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):133-138.
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):133-138. (in Chinese)
- 22 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):108-112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):108-112. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 21 页)

- 15 谷云庆, 牟介刚, 代东顺, 等. 基于气体射流的气液两相流动减阻特性[J]. 推进技术, 2015, 36(11):1640-1647.  
GU Yunqing, MU Jiegang, DAI Dongshun, et al. Drag reduction characteristics on gas-liquid two-phase flow based on gas jet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(11):1640-1647. (in Chinese)
- 16 HAROUN Y, LEGENDRE D, RAYNAL L. Direct numerical simulation of reactive absorption in gas-liquid flow on structured packing using interface capturing method[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(1):351-356.
- 17 邱白晶, 徐溪超, 杨宁, 等. 射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):76-80.  
QIU Baijing, XU Xichao, YANG Ning, et al. Simulation analysis of structure parameters of jet-mixing apparatus on jet-mixing performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):76-80. (in Chinese)
- 18 吴静, 石新, 阎其荣, 等. FJCA20-4 型煤用喷射式浮选机工作压力的优选[J]. 煤炭加工与综合利用, 2010, 36(1):7-10.  
WU Jing, SHI Xin, YAN Qirong, et al. Optimal operation pressure of the FJCA-4 jet flotation machine for coal[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2010, 36(1):7-10. (in Chinese)
- 19 欧鸣雄, 贾卫东, 邱白晶, 等. 射流混药装置变工况流场特性试验与数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9):107-111.  
OU Mingxiong, JIA Weidong, QIU Baijing, et al. Experiment and numerical analysis of flow field in jet mixing device under variable working condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):107-111. (in Chinese)
- 20 张弛宇, 尹侠. 双层圆盘涡轮式搅拌器的 CFX 流场模拟[J]. 化工装备, 2010, 12(2):14-19.  
ZHANG Chiyu, YIN Xia. Numerical simulation for flow field around dual rushton turbine agitators based on CFX[J]. China Chemical Industry Equipment, 2010, 12(2):14-19. (in Chinese)
- 21 张建伟, 程龙, 冯颖, 等. 水平三向撞击流反应(混合)器内湍流数值模拟研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(3):263-267.  
ZHANG Jianwei, CHENG Long, FENG Ying, et al. Numerical simulation of flow in three-jet impinging streams reactor[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2015, 29(3):263-267. (in Chinese)