doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.03.012

蔬菜泡沫育苗盘多适应性自动叠盘装置设计与试验

李　旭[1,2]　伍硕祥[1]　匡敏球[1]　刘　青[1]　刘大为[1,3]　谢方平[1,3]

(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.智能农机装备湖南省重点实验室,长沙 410128;
3.农业农村部南方智能育秧(苗)重点实验室,益阳 413055)

摘要:为了提高蔬菜育苗流水线育苗盘转运效率,针对人工取盘叠放存在的劳动强度大和整齐度偏低的问题,设计了一款针对蔬菜漂浮育苗的多适应性自动叠盘装置。该装置由机架、育苗盘输送机构、育苗盘叠盘机构和控制系统组成,装置以 200Smart PLC 为控制核心,利用主副传送带实现育苗盘的输送,并结合光电传感器实现育苗盘的定位,可以完成不同尺寸泡沫育苗盘的自动叠盘,设计的水平调节单元和减振单元可实现育苗盘在叠盘机构上的水平位置调节并降低叠盘过程的振动冲击。试验结果表明,育苗流水线播种环节在生产率 450 盘/h 下,自动叠盘装置在减振弹簧线径为 1.5 mm、主副传送带速度差为 0.1 m/s 以及电缸升降速度为 0.13 m/s 时,200 孔穴育苗盘叠盘效果最佳,叠盘成功率为 100%,叠盘错位差方差为 2.32 mm^2,同时振动检测试验中育苗盘 X 轴、Y 轴、Z 轴方向的振幅均未超过 0.8 mm,更换 135、160 孔穴的泡沫育苗盘进行试验,叠盘成功率均为 100%,叠盘错位差方差分别为 3.94 mm^2 和 5.98 mm^2,说明该装置满足多适应性的要求。在此最优作业参数下,将育苗流水线播种环节生产率提升至 900 盘/h 时,育苗盘最大振幅为 0.709 mm,振幅无明显变化,说明该装置作业稳定性较好。该研究结果可为播种流水线叠盘装置提高叠盘效果和降低叠盘振动等研究提供参考。

关键词:漂浮育苗;泡沫育苗盘;自动叠盘装置;减振;叠盘整齐度;尺寸适应性

中图分类号:S223.1+9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)03-0122-11　　**OSID**:

Design and Test of Automatic Tray Stacking Device for Vegetable Foam Seedling Trays

LI Xu[1,2]　WU Shuoxiang[1]　KUANG Minqiu[1]　LIU Qing[1]　LIU Dawei[1,3]　XIE Fangping[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128, *China*
2. *Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha* 410128, *China*
3. *Key Laboratory of Southern Intelligent Seedling, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yiyang* 413055, *China*)

Abstract: In order to improve the transfer efficiency of seedling tray in vegetable seedling raising line, and aiming at the problems of high labor intensity and low uniformity that exist in manual tray stacking, a multi-adaptive automatic tray stacking device for vegetable floating seedling was designed. The device was composed of frame, seedling tray conveying mechanism, tray stacking mechanism and the control system. The device took 200Smart PLC as the control core, and used the main and auxiliary conveyor belts to realize the transportation of the seedling trays, and combined the photoelectric sensor to realize the positioning of the seedling trays, which can complete the automatic stacking of foam seedling trays of different sizes, and the designed horizontal adjustment mechanism and vibration reduction mechanism can achieve the horizontal position adjustment of the seedling trays on the stacking mechanism and reduce the vibration impact of the stacking process. The test results showed that under the production rate of 450 plates/h of seedling line, the best effect of automatic stacking device was achieved when the wire diameter of the damping spring was 1.5 mm, the speed gap between the main and auxiliary conveyor belts was 0.1 m/s and the rising and falling speed of the electric cylinder was 0.13 m/s for tray of 200 holes, and the success rate of tray stacking was 100%, and the deviation variance of tray stacking uniformity

收稿日期:2023-07-31　修回日期:2023-10-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1600300-4/06、2020YFD1000300)

作者简介:李旭(1981—),男,副教授,博士,主要从事农业装置智能控制技术研究,E-mail:leexu@hunau.edu.cn

通信作者:刘大为(1983—),男,副教授,博士,主要从事蔬菜生产全程机械化技术与装备研究,E-mail:liudawei8361@163.com

was 2.32 mm^2. At the same time, the amplitudes of X axis, Y axis and Z axis of the seedling trays did not exceed 0.8 mm in the vibration detection test. And when 135 holes and 160 holes of foam seedling trays were replaced in the test, the success rate of stacking were 100%, and the deviation variance of tray stacking uniformity were 3.94 mm^2 and 5.98 mm^2, which showed that the device met the requirements of multi-adaptability. Under the optimal operating parameters, when the productivity of seedling line was increased to 900 plates/h, the maximum amplitude of the seedling trays was 0.709 mm, and there was no significant change in the amplitude, which indicated that the device had good operational stability. The research results can provide reference for improving the stacking effect and reducing the vibration of the seedling line.

Key words: floating seedling; foam seedling tray; automatic stacking tray device; vibration damping; stack uniformity; dimensional adaptability

0　引言

漂浮育苗技术是近年来兴起的一种现代无土育苗技术,是在温室、塑料大棚等设施覆盖的条件下,利用聚苯乙烯泡沫穴盘作为漂浮体,盘中装填育苗基质,再将育苗盘漂浮于含营养液的育苗池中,完成种子的萌发、生长和成苗过程的育苗。其优点是能有效克服传统土壤育苗存在的土传性病害、杂草多等弊病,同时在节约成本、提高育苗经济效益方面明显优于传统育苗,适用于工厂化育苗,现已成为湖南、四川、贵州等省份的蔬菜主要育苗方式[1-3]。工厂化育苗是采用机械化和自动化等技术措施批量生产优质秧苗的育苗方式,随着工厂化育苗在我国农业生产中的大力推广,育苗盘等容器的育苗方式得到了广泛的认可[4-5]。工厂化漂浮育苗广泛采用的育苗播种流水线可一次性完成泡沫育苗盘铺底土、压穴、播种、覆表土、喷淋等工序[6-9]。但现有的育苗播种流水线大多是人工逐一取盘堆叠转运,存在劳动强度大和堆叠整齐度偏低的问题,不利于育苗的工厂化、产量化[10-11]。因此,为了提高育苗播种流水线自动化程度及作业效率,降低劳动强度,需进行漂浮育苗泡沫育苗盘自动叠盘装置的研究。

目前,国内外开展了不同程度研究。一些欧洲国家用于蔬菜、水果、花卉等植物的温室育苗播种流水线已经较为成熟[12-13],例如荷兰 Visser 公司和 Flier Systems 公司研制的蔬菜播种流水线配备的自动叠盘装置,可适用不同大小的育苗盘,不仅人工需求量少,劳动强度低,而且整机效率可达 1 000 盘/h 以上。美国蔬菜种植所采用的 Blackmore System、Marksman、Hamilton 等机型,工作质量好,功能齐全,自动化程度较高。日本的久保田、矢崎等农机公司也公开了一些自动叠盘装置的专利产品[14-16],例如久保田株式会社研制的 S-ST 系列自动叠盘装置等,有着工作效率高、自动化程度高等优点,但进口的机器成本较高。国内自动叠盘装备主要采用中国台湾以及浙江、福建等省份农机公司研制的气动式叠盘装置,例如浙江台州一鸣机械设备有限公司的 X 式叠盘装置简单可靠,但自动化程度有待提高。文献[17-18]研制了一款适用于不同软硬水稻育秧秧盘的自动叠盘装置,其试验表明,硬、软秧盘的叠盘成功率较高,能有效地减轻劳动强度。但目前国内针对泡沫育苗盘自动叠盘装备的研究还较少,而且国内的不同孔穴泡沫育苗盘的尺寸不相同,如 135、160、200 孔穴泡沫育苗盘尺寸(长×宽×高)分别为 555 mm×340 mm×60 mm、520 mm×330 mm×50 mm 和 660 mm×335 mm×50 mm,甚至同一孔穴数量育苗盘存在不同尺寸,现有自动叠盘装置大多只适用于单一尺寸的育苗盘,为提高自动叠盘装置的适应性,本文提出一种针对蔬菜漂浮育苗的多适应性自动叠盘装置,以提高蔬菜育苗流水线的轻简化和集约化[19-21]。

1　总体结构设计

多适应性自动叠盘装置主要由机架、育苗盘输送机构、叠盘机构和控制系统等组成,整体结构如图 1 所示。其中机架由型材拼接而成;育苗盘输送机构的功能是将上一级的育苗盘稳定输送至叠盘区域,堆叠结束后再将叠好的育苗盘运往育苗流水线

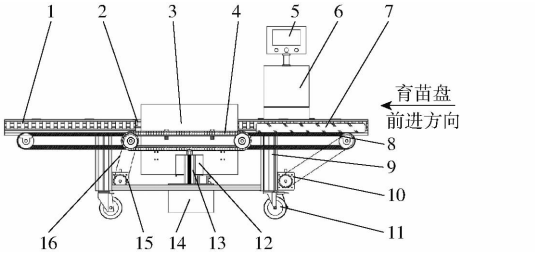

图 1　多适应性自动叠盘装置整体结构简图

Fig. 1　Structural schematic of multi-adaptive automatic stacking device

1. 流利条　2. 光电传感器　3. 育苗盘挡板　4. 副传送带　5. 触摸屏　6. 控制柜　7. 泡沫育苗盘　8. 主传送带　9. 机架　10. 驱动电机 M1　11. 脚轮　12. 挡板支撑架　13. 电缸　14. 电缸支撑架　15. 驱动电机 M2　16. 链轮链条

的下一环节;叠盘机构的功能是实现育苗盘的自动堆叠;而控制系统的功能是接收传感器的信息并发出控制指令,驱动各机构协同工作。

该装置工作原理为:开机后首先通过触摸屏对自动叠盘装置的作业参数进行设置,包括叠盘数量和作业效率等,装置启动后,驱动电机 M1、M2 通过链轮链条传动方式驱动主、副传送带转动,将育苗盘输送至叠盘机构,育苗盘触发光电传感器后,副传送带停止转动,育苗盘停止在叠盘机构相应位置,叠盘机构开始叠盘动作,将依次进入叠盘机构的育苗盘进行堆叠,达到设定叠盘数后,育苗盘输送机构将堆叠的育苗盘送离自动叠盘装置。装置参数如表 1 所示。

表 1 多适应性自动叠盘装置参数

Tab. 1 Parameters of multi-adaptive automatic stacking device

参数	数值
电机静力矩/(N·m)	12.5
机身总长度/mm	2 300
机身总宽度/mm	530
机身总高度/mm	1 580
电缸总行程/mm	100
电缸有效行程/mm	90
电缸单位脉冲行程/mm	0.003
光电传感器响应时间/ms	1
主传送带长度/mm	2 000
副传送带长度/mm	660

2 关键部件设计

多适应性自动叠盘装置关键部件包括育苗盘输送机构、叠盘机构和控制系统。

2.1 育苗盘输送机构设计

育苗盘输送机构是影响育苗流水线生产率和保证育苗盘平稳输送的重要部分,其主要部件包括:主传送带、副传送带、光电传感器、流利条和流利条连接片等,结构简图如图 2 所示。

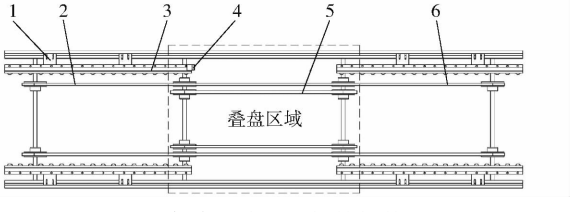

图 2 育苗盘输送机构结构简图

Fig. 2 Structural schematic of tray conveying mechanism

1. 流利条连接片 2. 后部分主传送带 3. 流利条 4. 光电传感器 5. 副传送带 6. 前部分主传送带

设计上副传送带垂直高度稍高于主传送带,主传送带用于将育苗盘运往和运离叠盘区域,副传送带用于将育苗盘从主传送带分离并运送至叠盘区域;光电传感器用于检测育苗盘在叠盘区域的位置信息;流利条用于导向,提高育苗盘输送流畅程度,流利条连接片可调整流利条的间距,实现不同宽度的泡沫育苗盘作业。

该自动叠盘装置用于配合课题组研制的蔬菜气吸式精量播种流水线作业[22],育苗流水线播种环节生产率为 450 盘/h,传送带速度由计算式

$$v_0 = \frac{L_1 Q}{3\,600} \tag{1}$$

式中 v_0——播种环节育苗盘速度,m/s

L_1——育苗盘长度,m

Q——播种环节生产率,盘/h

计算得约为 0.08 m/s,而叠盘环节运行速度需高于播种环节,故设定自动叠盘装置主传送带最低速度为 0.1 m/s。

设置副传送带最低速度目的是在叠盘过程中前后育苗盘之间不产生干涉,对叠盘装置的输送机构进行分析,建立如图 3 所示模型,假设连续不断的育苗盘从叠盘装置上一环节以速度 v_0 进入主传送带前段(Ⅰ段),随之开始加速,当育苗盘的前一半进入Ⅰ段后开始随着主传送带以速度 v_1 继续向前,随后二次加速进入副传送带(Ⅱ段),同样当育苗盘的一半进入Ⅱ段时停止加速,以速度 v_2 继续运行,到达Ⅱ段终点位置停止。电缸开始上升,经过时间 t_1 后将育苗盘 1 举起,此时育苗盘 2 若刚好到达Ⅰ段终点位置,则通过公式

$$\frac{L_1}{v_1 + v_2} + \frac{2L_3 - L_1}{2v_2} + t_1 \leqslant \frac{L_1}{v_0} \tag{2}$$

式中 L_3——副传送带长度,m

v_1——主传送带速度,m/s

v_2——副传送带速度,m/s

t_1——电缸单程作用时间,s

得出副传送带临界速度。

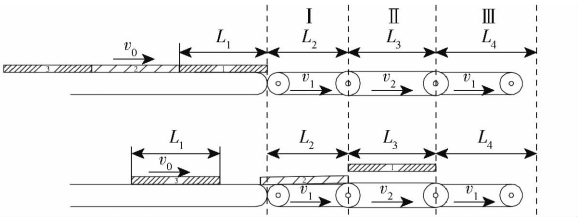

图 3 前部分育苗盘的临界位置

Fig. 3 Critical position of front part of seedling tray

如图 4 所示,假设叠盘结束,育苗盘 1、2、3 运离时在副传送带上首先获得一次较短时间的加速度,即当育苗盘的 1/4 进入Ⅲ段时加速至 v_2,随后以初速度 v_2 开始减速,育苗盘的一半进入Ⅲ段后,减速到 v_1 匀速前进,随后全部进入Ⅲ段,再进入播种流水线

的下一环节，此过程也存在育苗盘的临界位置，即已叠好的育苗盘 1、2、3 刚好脱离副传送带（Ⅱ段）时，后续育苗盘 4 也正好停在副传送带即Ⅱ段的终点位置，此时通过公式

$$\frac{L_1}{2v_2}+\frac{L_1}{2(v_1+v_2)}+\frac{L_1}{2v_1}+t_1\leqslant\frac{L_1}{v_0} \tag{3}$$

可计算出副传送带的另一临界速度。由此可知，若要实现育苗盘的正常堆叠，副传送带速度 v_2 需同时满足式(2)、(3)，在电缸单程作用时间不大于 1 s 的情况下，算得副传送带速度应不小于 0.128 m/s。

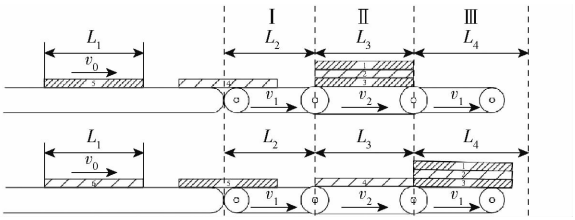

图 4　后部分育苗盘的临界位置

Fig. 4　Critical position of rear part of seedling tray

2.2　叠盘机构设计

多适应性自动叠盘装置的功能是完成育苗盘的自动堆叠，育苗盘叠盘机构的设计是自动叠盘装置的关键环节，其主要部件有：电缸、育苗盘挡板、拨齿、减振单元、调平单元等，结构简图如图 5 所示。

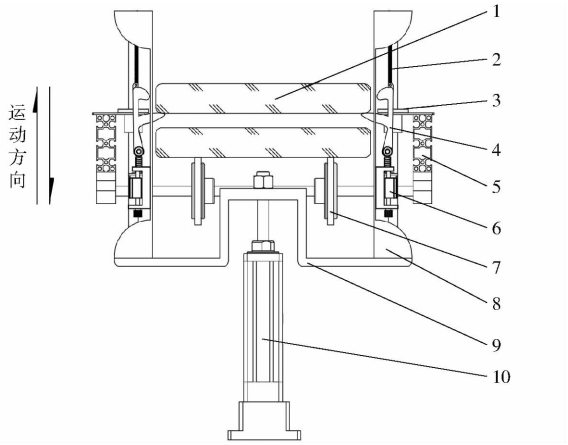

图 5　育苗盘叠盘机构结构简图

Fig. 5　Structural schematic of stacking tray mechanism

1. 泡沫育苗盘　2. 复位拉簧　3. 导向单元　4. 拨齿　5. 机架　6. 调平单元　7. 副传送带　8. 育苗盘挡板　9. 挡板支撑架　10. 电缸

其叠盘原理是：育苗盘进入叠盘区域后触发光电传感器，副传送带停止转动，育苗盘停止在叠盘区域，电缸带动育苗盘挡板上行，安装在挡板上的拨齿在上行过程中将育苗盘举起并运动到预定位置，副传送带启动，后续育苗盘进入并停止在叠盘区域后，电缸带动挡板下行，在下行过程中，拨齿接触到下方育苗盘后，在压力的作用下向两侧张开从下方育苗盘的两侧滑过，同时将托举的育苗盘叠放在下方育苗盘上，当拨齿脱离下方育苗盘侧壁后，在复位拉簧的作用下，拨齿回弹至下方育苗盘底部，如果没有达到预设的叠盘数，电缸再次向上运行，拨齿将已叠好的育苗盘全部举起，为下一次叠盘做准备，如果达到预设的叠盘数，则电缸不向上运行，副传送带启动将叠好的育苗盘送至主传送带。

作业过程中，可以调节挡板宽度和光电传感器位置，实现不同尺寸泡沫育苗盘的叠盘作业。

2.3　调平与减振单元设计

在叠盘的过程中，育苗盘在拨齿上是否水平，会很大程度上影响叠盘成功率[23]。同时，电缸的往复运动会产生较大的振动冲击，影响育苗盘的叠盘整齐程度，甚至导致基质遮盖的种子露出，影响其出芽率。为此，设计了调平与减振单元，其原理是结合可自锁的丝杆滑块来调节拨齿的水平位置，用弹簧缓冲的方式来降低振动冲击。结构简图如图 6 所示。

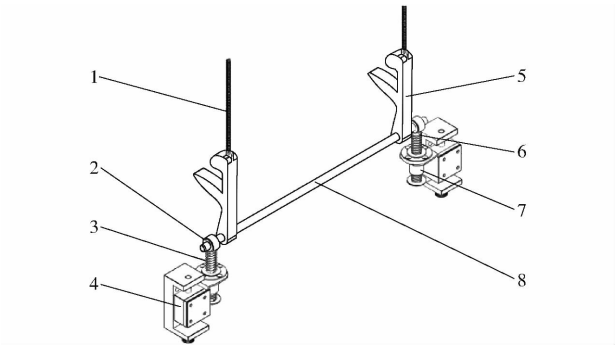

图 6　调平与减振单元结构简图

Fig. 6　Structural schematic of horizontal adjustment and damping unit

1. 复位拉簧　2. 法兰轴承　3. 弹簧　4. 丝杆滑块　5. 拨齿　6. 弹簧导向杆　7. 滑动轴承　8. 拨齿支撑杆

其工作原理是：拨齿支撑杆同时连接拨齿与弹簧导向杆，且相互能够自由转动，弹簧导向杆也能在滑动轴承中自由滑动，轴承两端装有弹簧，用垫片和卡簧限位，当拨齿受力下压时，通过拨齿、拨齿支撑杆和弹簧三者间力的传递达到减振的效果。滑动轴承通过特制连接片将其连接在丝杆滑块上，只需拧动滑块下方的旋钮，便可实现水平位置的调节，作业参数如表 2 所示。

表 2　调平与减振单元参数

Tab. 2　Parameters of horizontal adjustment and damping unit

参数	数值
丝杆滑块总行程/mm	20
拨齿数量/个	4
拨齿间距/mm	240
拨齿厚度/mm	15
滑动轴承内孔径/mm	8
弹簧导向杆轴长/mm	45

2.4 控制系统设计

该自动叠盘装置采用 200Smart PLC 作为控制系统的核心，型号为 S7－200 Smart ST30，包含 18 个输入端口、12 个输出端口，最大脉冲频率 100 kHz，可用以太网和传统串口通讯，能运用于多种场景；人机交互采用 MCGS TPC7032Kt 型触摸屏，工作电源 24 V；电机型号 86EBP181ALC－TK0，驱动装置选用时代超群公司的 86 版 ZDM 系列步进驱动器，驱动电压 AC18～80V/DC24～110V；电缸型号 KDJ60，行程 100 mm，驱动装置采用台达 ASDA－B2 系列伺服驱动器；检测单元包括欧姆龙 E3Z－R61 型光电传感器和电缸磁性开关；系统通过开关电源提供 24 V 和 48 V 工作电压。控制系统硬件组成如图 7。

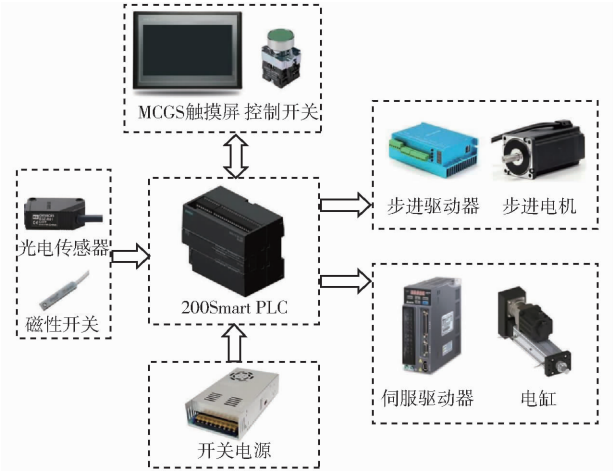

图 7 控制系统硬件组成

Fig. 7 Hardware composition of control system

自动叠盘装置工作时，各部分电气设备与机械装置协同运作实现育苗盘的自动堆叠，控制系统流程如图 8 所示。

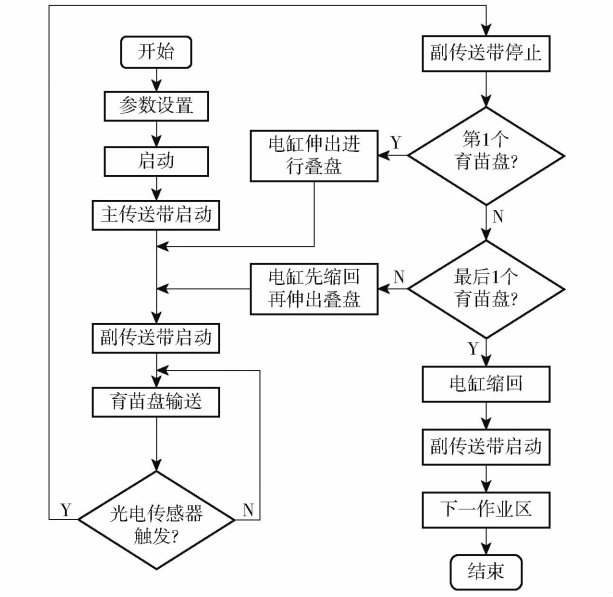

图 8 控制系统流程图

Fig. 8 Flowchart of control system

3 性能试验与结果分析

3.1 试验材料

试验地点在湖南农业大学智能农机装备湖南省重点实验室。选用 200 孔穴、135 孔穴和 160 孔穴，尺寸分别为 660 mm×335 mm×50 mm、555 mm×340 mm×60 mm 和 520 mm×330 mm×50 mm 的泡沫育苗盘进行试验，试验用的种子选用兴蔬皱辣 2 号，育苗基质为湘正农科通用型，根据农艺要求将基质喷水，湿润后装盘，测量采用游标卡尺（精度 0.01 mm）和弹簧测力计（量程 5 N），试验装置及试验现场如图 9 所示。



图 9 叠盘试验现场

Fig. 9 Stack trial site

3.2 试验指标

以叠盘成功率和叠盘错位差方差（叠盘错位差方差下文简称叠盘整齐度）作为试验指标，定义与计算检测方法如下。

（1）叠盘成功率

叠盘成功率是指叠盘成功总数与叠盘总数的百分比。叠盘成功的条件为每次叠盘数符合设定，苗盘正常升落并不卡盘，叠好的苗盘前后对齐，以最底层育苗盘为基准，盘间错位不超过 10 mm。实际生产中，5 个育苗盘叠盘后总质量约为 5.40 kg，高度约为 290 mm，叠盘后方便农户转运，故试验选取每 5 盘为一垛，测试 100 盘，叠盘成功率 X_1 计算公式为

$$X_1 = \frac{Z_2}{Z_1} \times 100\% \tag{4}$$

式中 Z_1——叠盘总数，盘

Z_2——叠盘成功总数，盘

（2）叠盘整齐度

育苗盘堆叠后盘与盘之间的错位差，包括横向错位差和纵向错位差，由于流利条与育苗盘挡板限位的作用，横向错位差较小，所以叠盘整齐度主要考察纵向错位差，其计算的方差越小，则叠盘装置过程就越稳定。以最底层苗盘为基准，并默认其错位差为 0 mm，记录其上每个苗盘与第 1 个苗盘前后之间的最大错位差，记为 x_i。每 5 个盘计算一次方差，记

为 y_j，重复 20 次，取 20 次方差均值作为叠盘整齐度。计算公式为

$$N = \sum_{j}^{a} y_j \frac{1}{a} \tag{5}$$

其中

$$y_j = \sum_{i}^{b} \frac{(x_i - \overline{X})^2}{b} \tag{6}$$

式中　N——叠盘整齐度，mm^2

a——育苗盘总垛数，垛

y_j——第 j 垛的错位差方差，mm^2

b——每垛育苗盘个数，盘

x_i——第 i 盘的最大错位差，mm

$\overline{X}$——每垛育苗盘的错位差均值，mm

3.3　预试验处理与结果

为了探究叠盘装置的性能，更科学合理地进行试验，对叠盘装置采取预试验处理，确定叠盘试验的因素与水平[24-25]。

由于该叠盘装置的结构特点，主、副传送带具有不同的速度，故而育苗盘在主、副传送带上的速度差决定了副传送带的速度。当副传送带的速度增大后，育苗盘在运走的过程中从停止到突然加速启动，此过程会产生较大冲击惯性，使已叠好的育苗盘再次产生位错，影响叠盘整齐效果，为了使叠盘过程顺利进行，根据式(1)、(3)算得副传送带最低速度为 0.128 m/s，但实际可能会出现打滑等误差，故选取副传送带最低速度 0.14 m/s 进行单因素试验，即主、副传送带速度差为 0.04 m/s。经实际验证，副传送带速度为 0.14 m/s 时并未产生干涉。随之以速度差 0.02 m/s 为一个刻度进行增加，每个速度差测试 30 个盘。试验发现当速度差超过 0.16 m/s 时，叠盘成功率开始明显下降，且叠盘整齐度也较大，如图 10、11 所示。

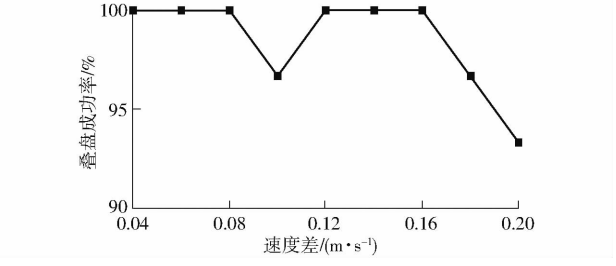

图 10　不同速度差下的叠盘成功率

Fig. 10　Success rate of stacking under different speed gaps

由于在叠盘的过程中，电缸的往复运动会在一定程度上影响叠盘成功率和叠盘整齐度。而且最上盘所受的冲击次数最多，可能导致育苗盘内的基质外漏，甚至出现种子露出，影响种子正常的生长发育，为了确定电缸升降速度的范围，进行了种子露出预试验。将辣椒种子以人工点播的方式播入压穴后的育苗盘，并按农艺要求覆上表层基质。根据公式

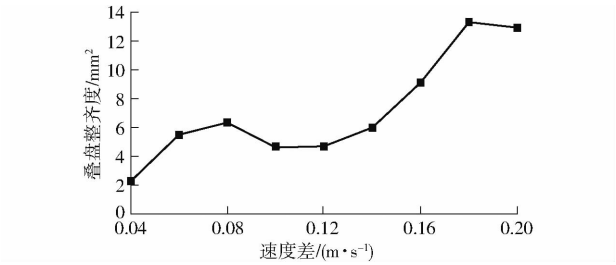

图 11　不同速度差下的叠盘整齐度

Fig. 11　Uniformity of stacking under different speed gaps

$$H = ct_1 \tag{7}$$

式中　H——电缸有效行程，mm

c——电缸升降速度，m/s

电缸有效行程 H 为 90 mm，电缸单程作用时间 t_1 为 1 s 时，电缸升降速度最小，约为 0.09 m/s，设置伺服电缸驱动器脉冲频率(简称驱动频率)为30 kHz，以 5 kHz 为一个刻度增加驱动频率进行试验，观察最上育苗盘种子露出情况，结果表明驱动频率提高到 50 kHz 时，仍未出现种子露出的情况。在驱动频率 55 kHz 时，装置出现宕机情况，取 50 kHz 为最大驱动频率，根据公式

$$c = \mu f \tag{8}$$

式中　μ——电缸单位脉冲行程，mm

f——驱动频率，kHz

计算可得对应的电缸升降速度为 0.15 m/s。

3.4　试验因素

根据预试验，发现减振单元上弹簧线径、主副传送带速度差以及电缸升降速度 3 个因素对试验指标影响较大，为此进行进一步的试验与分析。

(1)弹簧线径

在叠盘的过程中，弹簧对育苗盘的叠放起到了缓冲减振的效果，在一定程度上影响着叠盘的整齐度。对 20 个育苗盘逐一单独称量后，计算出单个育苗盘平均质量为 1.04 kg，则每个拨齿所受正压力与已叠育苗盘参数之间的关系表达式为

$$P_1 = \frac{Z_3 m_1}{n_1} g \tag{9}$$

式中　P_1——拨齿正压力，N

Z_3——已叠育苗盘个数，盘

m_1——单盘平均质量，kg

n_1——拨齿数量，个

g——重力加速度，m/s^2

查《机械设计手册》[26]可知，弹簧变形量与弹簧各参数之间的计算公式为

$$l = \frac{8 P_1 D^3 n_2}{K d^4} \tag{10}$$

式中 l——工作载荷作用下的变形量,mm

D——弹簧中径,mm

n_2——弹簧有效圈数,圈

K——切变模量,MPa

d——弹簧线径,mm

当弹簧线径过小时,弹簧弹性变形幅度过大,不利于叠盘;而线径过大时,弹性变形极小,无法起到减振效果,根据计算可得,不同线径弹簧变形量如表 3 所示,故选取弹簧线径 1.0、1.5、2.0 mm 共 3 个水平。

表 3 工作载荷作用下不同线径弹簧的变形量

Tab.3 Deflection of spring with different diameters under working load

弹簧线径/mm	切变模量/MPa	弹簧中径/mm	弹簧有效圈数/圈	变形量/mm
0.8		10		15.56
1.0		10		6.37
1.2		10		3.07
1.4	$(7.85\sim8.14)\times10^4$	10	5	1.66
1.6	(取 8×10^4)	10		0.97
1.8		11		0.80
2.0		11		0.53
2.2		11		0.36

(2)主副传送带速度差

结合蔬菜育苗流水线播种环节 450 盘/h 的生产率,自动叠盘装置主传送带运行速度 0.10 m/s,副传送带运行速度不得低于 0.14 m/s,在此基础参考前期预试验结果,选取主副传送带速度差 0.04、0.10、0.16 m/s 共 3 个水平。

(3)电缸升降速度

电缸升降速度参考前期预试验处理结果,在电缸驱动频率范围内,虽未出现种子露出的情况,但对叠盘成功率和整齐度的影响还需进一步的探讨,故选取升降速度为 0.09、0.12、0.15 m/s 共 3 个水平。

综上所示,该自动叠盘装置响应面试验因素编码如表 4 所示。

表 4 响应面试验因素编码

Tab.4 Response surface test factors and levels

编码	因素		
	弹簧线径/mm	速度差/(m·s^{-1})	电缸升降速度/(m·s^{-1})
-1	1.0	0.04	0.09
0	1.5	0.10	0.12
1	2.0	0.16	0.15

3.5 响应面试验与方差分析

采取人工放盘的方式进行试验,叠盘数量设为 5 盘,重复 6 次,计算出叠盘成功率和叠盘整齐度。试验安排与结果如表 5 所示(表中 A、B、C 分别表示弹簧线径、速度差、电缸升降速度编码值)。

表 5 自动叠盘装置响应面试验安排与结果

Tab.5 Arrangement and result of response surface test of automatic stacking tray machine

试验序号	因素			叠盘成功率/%	叠盘整齐度/mm^2
	A	B	C		
1	1	-1	0	98	8.48
2	1	0	1	100	4.55
3	-1	0	-1	100	3.46
4	0	1	-1	100	6.45
5	0	0	0	100	3.10
6	-1	1	0	99	6.98
7	-1	0	1	100	3.75
8	0	-1	1	99	6.28
9	0	0	0	100	3.62
10	-1	-1	0	99	6.44
11	1	0	-1	100	4.12
12	0	0	0	100	2.37
13	0	-1	-1	99	7.13
14	1	1	0	99	5.46
15	0	0	0	100	1.56
16	0	1	1	100	4.25
17	0	0	0	100	2.54

通过 Design-Expert 13.0 对叠盘整齐度进行方差分析,结果如表 6 所示。

表 6 叠盘整齐度方差分析

Tab.6 Analysis of variance of uniformity of stacking

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	61.240 0	9	6.800 0	15.120 0	0.000 8
A	0.490 0	1	0.490 0	1.090 0	0.331 5
B	3.370 0	1	3.370 0	7.480 0	0.029 1
C	0.678 6	1	0.678 6	1.510 0	0.259 2
AB	3.170 0	1	3.170 0	7.040 0	0.032 8
AC	0.004 9	1	0.004 9	0.010 9	0.919 8
BC	0.455 6	1	0.455 6	1.010 0	0.347 9
A^2	5.790 0	1	5.790 0	12.850 0	0.008 9
B^2	43.920 0	1	43.920 0	97.570 0	<0.000 1
C^2	0.544 9	1	0.544 9	1.210 0	0.307 6
残差	3.150 0	7	0.450 1		
失拟项	1.890 0	3	0.631 2	2.010 0	0.255 2
误差	1.260 0	4	0.314 3		
合计	64.390 0	16			

由表 6 可以看出,叠盘整齐度模型 P 值小于 0.01,叠盘整齐度回归模型极显著,模型决定系数 $R^2=0.951\,1$,表明回归模型能够反映 95.11% 的响应值变化,失拟项不显著,说明试验误差小并且得到的回归方程的拟合效果较好。在叠盘整齐度回

归模型中，A^2 项和 B^2 项的 P 值小于 0.01，表明在置信区间 99% 范围内，对回归模型的影响极显著。B 项和 AB 项的 P 值大于 0.01 且小于 0.05，表明在置信区间 95% 范围内，对回归模型的影响较为显著。其余项的 P 值均大于 0.05，表明对回归模型的影响不显著。

根据方差分析的系数估计，得出叠盘整齐度的回归方程为

$$y = 2.44 + 0.247\,5A - 0.648\,7B - 0.291\,3C - 0.890\,0AB + 0.035\,0AC - 0.337\,5BC + 1.17A^2 + 3.23B^2 + 0.359\,8C^2 \quad (11)$$

弹簧线径与主副传送带速度差对叠盘整齐度的响应曲面如图 12 所示。

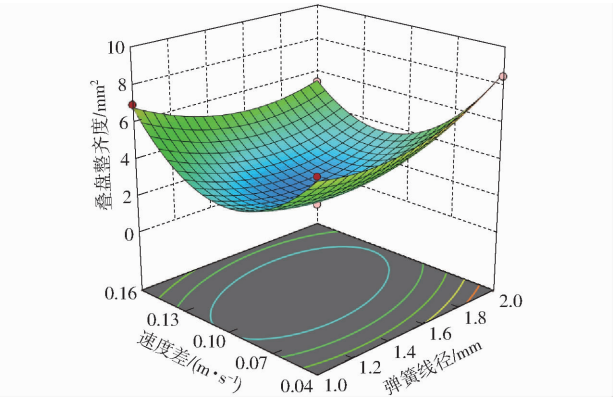

图 12　弹簧线径与速度差对叠盘整齐度的响应曲面

Fig. 12　Response surface analysis chart of spring wire diameter and speed gaps to uniformity of stacking

通过响应面试验与方差分析，得出该叠盘装置的最优参数组合，近似取值后分别为弹簧线径 1.5 mm、速度差 0.10 m/s、电缸升降速度 0.13 m/s。为了验证试验结果的准确性，取 100 个育苗盘，5 盘堆叠为一垛进行试验，记录试验结果，并通过式(4)～(6)计算出叠盘成功率为 100%，叠盘整齐度为 2.32 mm²。为了验证该叠盘装置的多适应性，在该最优参数组合下，选取尺寸(长×宽×高)分别为 555 mm×340 mm×60 mm 和 520 mm×330 mm×50 mm 的 135 孔穴和 160 孔穴育苗盘各 100 个进行试验，叠盘成功率均为 100%，叠盘整齐度分别为 3.94 mm² 和 5.98 mm²。

为了进一步探究不同尺寸育苗盘叠盘整齐度存在差异的原因，采用弹簧测力计分别对完成播种后的 200、135、160 孔穴的 3 种育苗盘进行滑动摩擦力测试。测得 3 种育苗盘与传送带之间的摩擦力分别为 4.5、4.3、2.6 N；同一种育苗盘之间的摩擦力分别为 4.2、3.8、2.2 N。分析可知，不同孔穴的育苗盘重量存在差异，导致育苗盘与传送带之间、育苗盘与育苗盘之间的摩擦力不同，进而影响叠盘整齐度，在 3 种育苗盘中，160 孔穴育苗盘与传送带及育苗盘与育苗盘之间的摩擦力均最小，所以叠盘整齐度较大，但叠盘成功率均能达到 100%，符合试验指标，说明该装置能满足多适应性要求。

3.6　振动检测试验

为探究叠盘过程中育苗盘所受振动情况，采用 WTVB01－485 型振动传感器对最优参数组合下叠盘过程中育苗盘的 5 个点进行振动检测，如图 13、14 所示。

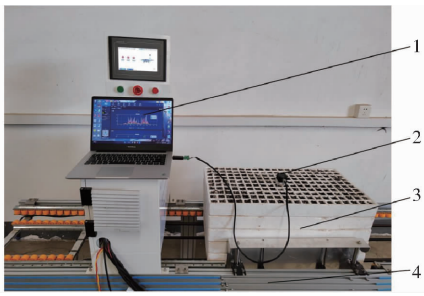

图 13　振动检测试验现场

Fig. 13　Test on vibration detection trial

1. 计算机　2. 振动传感器　3. 泡沫育苗盘　4. 自动叠盘装置

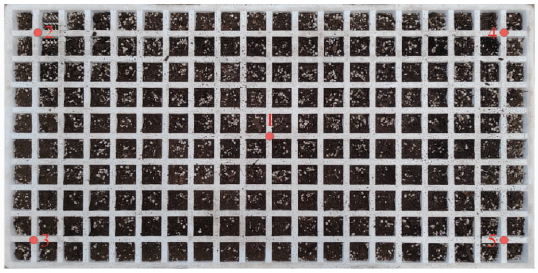

图 14　振动检测点

Fig. 14　Vibration detection point

记录 X 轴、Y 轴和 Z 轴的振动幅度，通过对最优参数组合下的 5 个点进行 3 轴的振动检测发现，最大振动发生在拨齿接触到育苗盘的时间点，随着电缸往复运动，拨齿周期性地接触育苗盘，产生了周期波动的振动信号，其中点 1(即中点)位置振动幅度最小，3 轴振幅均未超过 0.6 mm；点 2、3、4、5 振动较大，但均未超过 0.8 mm，其中，点 4 Z 轴方向振动最大，为 0.793 mm。检测结果如图 15 所示。

将育苗流水线播种环节生产率提高到 900 盘/h，即自动叠盘装置主传送带速度 0.18 m/s，副传送带速度 0.28 m/s，电缸升降速度 0.13 m/s。对 5 个点位进行振动检测试验，发现当生产率提高后 3 轴的振动振幅并无明显变化，其中点 1 振幅未超过 0.6 mm，点 4 最大振幅 0.709 mm，检测结果如图 16 所示，说明在不同工况下，自动叠盘装置的作业稳定性较好。

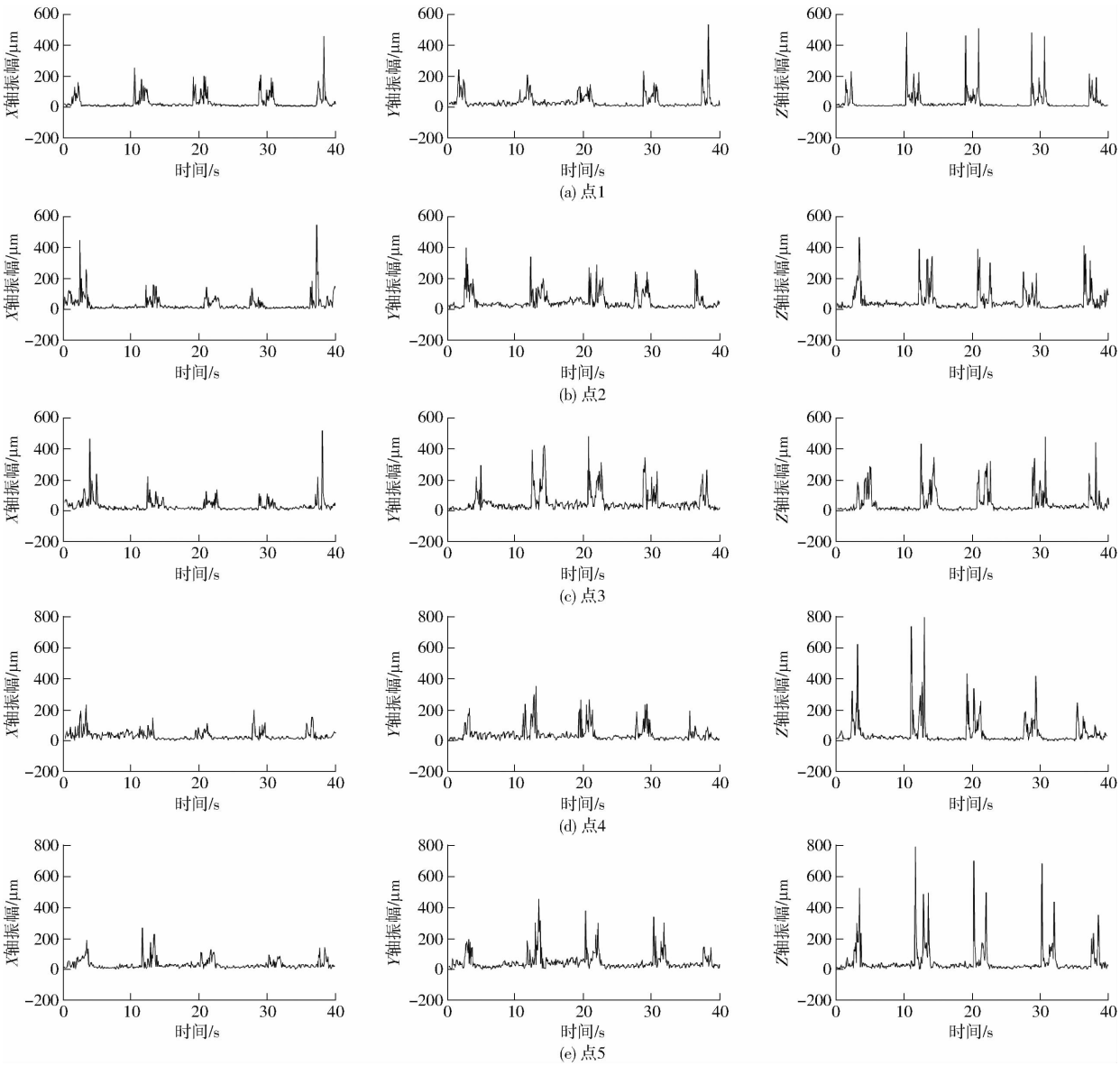

图 15 最优参数组合下测量点 X 轴、Y 轴和 Z 轴振幅

Fig. 15 Amplitude of X axis, Y axis and Z axis of the measuring point at the optimal parameter combination

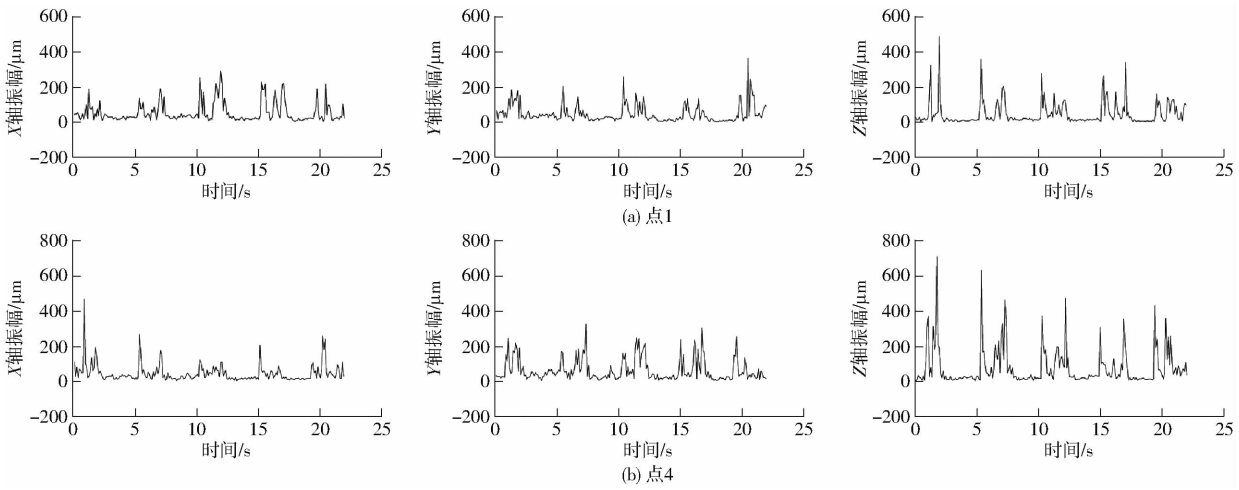

图 16 生产率 900 盘时点 1 和点 4 的 X 轴、Y 轴和 Z 轴振幅

Fig. 16 Amplitude of X axis, Y axis and Z axis of points 1 and 4 for the productivity of 900 plates/h

4　结论

（1）设计了一款适用于蔬菜漂浮育苗的多适应性自动叠盘装置，通过水平调节单元和减振单元可降低叠盘振动，提高叠盘质量，具有较高的叠盘成功率。同时，可调整流利条连接片和挡板宽度实现不同尺寸泡沫育苗盘的叠盘，提高了叠盘装置的适应性。

（2）通过响应面试验与方差分析，确定了多适应性自动叠盘装置的最佳参数组合为：弹簧线径 1.5 mm、主副传送带速度差 0.10 m/s、电缸升降速度 0.13 m/s。在该组合下，叠盘成功率为 100%，叠盘整齐度 2.32 mm^2，且采用不同尺寸育苗盘验证该装置能满足多适应性要求。最后通过对最优参数组合与提高育苗流水线播种环节生产率后的叠盘过程进行振动检测，发现当随着播种环节生产率提高，育苗盘各点的 X 轴、Y 轴和 Z 轴的振动幅度并无明显增大，且最大值均未超过 0.8 mm。试验指标满足蔬菜漂浮育苗生产技术要求。

参　考　文　献

[1] 肖伟，彭妙，王鑫，等. 湖南地区早春茄子漂浮育苗技术[J]. 蔬菜，2022(11)：78－80.

[2] 刘志雄，袁伟玲，陈卫芳，等. 瓜类蔬菜漂浮育苗技术[J]. 湖北农业科学，2022,61(增刊)：256－258.
LIU Zhixiong，YUAN Weiling，CHEN Weifang，et al. Floating seedling technology of gourd vegetables[J]. Hubei Agricultural Sciences，2022,61(Supp.)：256－258.（in Chinese）

[3] 张锦阁，范高领，胡明文. 辣椒漂浮育苗影响因素研究进展[J]. 中国瓜菜，2018，31(4)：5－9.
ZHANG Jin'ge，FAN Gaoling，HU Mingwen. Research progress on factors affecting pepper float seedling production[J]. China Cucurbits and Vegetables，2018，31(4)：5－9.（in Chinese）

[4] 李旭. 烟草育苗精密播种流水线同步智能控制系统研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2014.
LI Xu. Studies on the synchronous intelligent control system of the precision sowing pipeline for tobacco grow seedling[D]. Changsha：Hunan Agricultural University，2014.（in Chinese）

[5] 王秀，刘蒙滋，翟长远，等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(9)：122－132.
WANG Xiu，LIU Mengzi，ZHAI Changyuan，et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(9)：122－132.（in Chinese）

[6] 马旭，谭永炘，齐龙，等. 水稻秧盘育秧播种机气动式自动供盘装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2016，32(22)：63－69.
MA Xu，TAN Yongxin，QI Long，et al. Design and test on pneumatic type automatic tray feeder of seeder for tray nursing seedings of rice[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(22)：63－69.（in Chinese）

[7] 杨靖，谢方平，符志勇，等. 水稻机插硬盘育秧自动叠盘装置研究现状及展望[J]. 农业工程与装备，2022，49(6)：1－6.
YANG Jing，XIE Fangping，FU Zhiyong，et al. Research status and prospect of automatic tray stacking device for rice seedling cultivation with machine insert hard disk[J]. Agricul Engineering and Equipment，2022，49(6)：1－6.（in Chinese）

[8] 马旭，陈林涛，黄冠，等. 水稻秧盘育秧播种生产线电控式软硬秧盘自动供盘装置[J]. 农业机械学报，2017，48(6)：41－49.
MA Xu，CHEN Lintao，HUANG Guan，et al. Electric controlled automatic tray feeding device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(6)：41－49.（in Chinese）

[9] 张兆国，邓寓轩，王法安，等. 自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J]. 农业机械学报，2023，54(9)：164－177.
ZHANG Zhaoguo，DENG Yuxuan，WANG Faan，et al. Trafficability analysis and scaling model experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(9)：164－177.（in Chinese）

[10] 戴秋香，宗广鹏，邵珠同，等. 针吸式蔬菜穴盘育苗精量排种装置的设计与试验[J]. 农机化研究，2023，45(5)：117－121，127.
DAI Qiuxiang，ZONG Guangpeng，SHAO Zhutong，et al. Design and test of precision seed metering device for vegetable plug seedling based on air suction needle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(5)：117－121，127.（in Chinese）

[11] 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）

[12] 崔志超，管春松，徐陶，等. 甘蓝基质块苗移栽机双排链式栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(6)：46－54.
CUI Zhichao，GUAN Chunsong，XU Tao，et al. Design and experiment of double-row chain planting device for cabbage substrate block seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(6)：46－54.（in

Chinese)
[13] 辜松, 杨艳丽, 张跃峰. 荷兰温室盆花自动化生产装备系统的发展现状[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 1 - 8.
GU Song, YANG Yanli, ZHANG Yuefeng. Development status of automated equipment systems for greenhouse potted flowers production in Netherlands[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 1 - 8. (in Chinese)
[14] 株式会社クボタ. 育苗箱積重ね機構: 2003246450[P]. 2003 - 09 - 02.
[15] 井關農機株式會社. 苗箱の段積装置: 200347343[P]. 2003 - 02 - 18.
[16] ヤンマー農機株式會社. 箱体積載装置: 1056884[P]. 1998 - 03 - 03.
[17] 陈林涛, 马旭, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧流水线自动叠盘装备现状与展望[J]. 农机化研究, 2017, 39(6): 260 - 264, 268.
CHEN Lintao, MA Xu, QI Long, et al. Research and prospect of automatic tray stacking device of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6): 260 - 264, 268. (in Chinese)
[18] 马旭, 谭永炘, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 29 - 36.
MA Xu, TAN Yongxin, QI Long, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 29 - 36. (in Chinese)
[19] 刘斌, 尚庆茂, 司军. 重庆市蔬菜集约化育苗技术应用与经济效益[J]. 中国蔬菜, 2022(7): 117 - 120.
[20] 刘云强, 刘立晶, 赵郑斌, 等. 蔬菜育苗播种机清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 83 - 91.
LIU Yunqiang, LIU Lijing, ZHAO Zhengbin, et al. Design and experiment on plant seedling device for vegetable seedling seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 83 - 91. (in Chinese)
[21] 杨先超, 马月虹. 设施内蔬菜机械化育苗移栽的现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 8 - 13, 32.
YANG Xianchao, MA Yuehong. Current situation and development trend of vegetable mechanized seedling transplanting in facilities[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 8 - 13, 32. (in Chinese)
[22] 梅玉茹, 谢方平, 王修善, 等. 番茄气吸滚筒式排种器的优化设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 730 - 736.
MEI Yuru, XIE Fangping, WANG Xiushan, et al. Optimization design and experiment of tomato pneumatic roller type seed-metering device[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(6): 730 - 736. (in Chinese)
[23] 龚智强. 气吸振动盘式精密排种装置理论与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
GONG Zhiqiang. Theoretical and experimental study on vacuum-vibration tray precision seeding device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
[24] QI Jiangtao, PEI Minghao, KAN Za, et al. Parameter optimization and testing of a conveying and soil-removing device for tiger nut (*Cyperus esculentus*) mechanical harvesting[J]. Processes, 2023, 11(1): 67.
[25] 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)
[26] 成大先. 机械设计手册. 第 3 卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.