doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.024

育苗穴盘错位层叠储运式摆放机设计与试验

张秀花　老福兴　于　洋　袁永伟　李珊珊　魏华杰
（河北农业大学机电工程学院，保定 071001）

摘要：针对小型育苗场内地面摆放软质穴盘劳动强度大、人工费用高的问题，提出了一种穴盘错位层叠存储形式，有效解决了穴盘层叠存储基质土受压及种子移位的问题；设计了错位解垛装置和平移-回转关节变换式摆放装置，实现了育苗穴盘的错位解垛与摆放功能；研发了一种育苗穴盘错位层叠储运式摆放机，并对机器的关键部件进行了设计计算与工作情况分析。通过单因素试验确定优化试验中各因素选取范围，进行 Box－Behnken Design 响应面优化试验设计，探究了穴盘托板倾角、穴盘托板前端离地高度、平移-回转关节变换式摆放装置中的丝杠滑块下降速度、整机移动速度 4 个试验因素对摆正合格率、纵向偏距合格率、横向偏距合格率 3 个评价指标的影响规律，利用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行参数优化，为验证优选出的组合参数的可靠性，考虑机器的实际工作参数，设定优选出的摆盘参数为：穴盘托板倾角 28.0°、穴盘托板前端离地高度 44.5 mm、丝杠滑块下降速度 38.5 mm/s、整机移动速度 59.0 mm/s 进行试验验证，可得摆正合格率 93.3%、纵向偏距合格率 93.3%、横向偏距合格率 94.4%，与预测值误差绝对值均小于 5%，试验与优化结果基本一致，满足穴盘摆放农艺要求。

关键词：穴盘育苗；穴盘存储；解垛；穴盘摆放；平移-回转关节
中图分类号：S229　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0254-11　　**OSID**：

Design and Experiment of Seedling Tray Dislocation Stacking Storage and Transportation Placement Machine

ZHANG Xiuhua　LAO Fuxing　YU Yang　YUAN Yongwei　LI Shanshan　WEI Huajie
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*)

Abstract: In view of the problem that the seeds are easy to be squeezed and displaced after the transportation and placement of soft trays in vegetable seedling raising, a kind of dislocation stacking storage and transportation machine for seedling trays was designed. In order to avoid the compression of the matrix soil and the displacement of the seeds, a storage form of dislocation stacking of the tray was innovatively proposed, and the key components of the machine were designed and calculated, and the hardware selection and software design of the control system were completed. The selection range of each factor in the optimization test was determined by single factor test, and the Box－Behnken Design response surface optimization test design was carried out. The influence of four test factors, such as the dumping angle of the tray support plate, the height of the front end of the tray support plate, the descending speed of the screw slider in the translation－rotation joint conversion placement device and the moving speed of the whole machine, on the three evaluation indexes of the qualified rate of the declination pass rate, the longitudinal deflection distance and the transverse deflection distance was explored. The Design-Expert 13.0 software was used to optimize the parameters of the test results to verify the reliability of the optimized combination parameters. Considering the actual working parameters of the machine, the optimized pendulum parameters were set as the dumping angle of the tray support plate of 28.0°, the height of the front end of the tray support plate from the ground of 44.5 mm, the descending speed of the screw slider of 38.5 mm/s, and the moving speed of the whole machine of 59.0 mm/s. The pass rate of above parameters were 93.3%, 93.3% and 94.4%, respectively. The absolute value of the error between the predicted value and the predicted value was less than 5%. The test and optimization results were basically the same, which met the agronomic requirements of the tray placement.

Key words: tray seedling; tray storage; unstacking; tray placement; translation－rotation joint

收稿日期：2024－09－24　修回日期：2024－12－06
基金项目：河北省重点研发计划项目(20327207D)和河北省引进留学人员项目(C20200336)
作者简介：张秀花(1972—)，女，教授，博士，主要从事果蔬智能装备研究，E-mail：zhang72xh@163.com

0　引言

蔬菜工厂化育苗在实现种苗的规模化、产业化发展和保障蔬菜质量中发挥重要作用[1-2]。蔬菜穴盘播种后需搬运至棚室内进行育苗[3]，而我国大多数蔬菜育苗设施简陋[4]，缺乏与播种设备衔接的穴盘搬运[5]和摆放机械化设备[6]。国外现代化育苗设施和设备投资大、维护和运行成本高[7]，且设备大多适用于特定的硬质穴盘，并不适用国内软质穴盘摆放作业[8]。软质穴盘运输与摆放仍需人工作业，劳动强度大、作业效率低，严重制约蔬菜育苗产业的发展。为此，亟需一种播种后穴盘自动搬运与摆放设备，以提升育苗机械化水平。

20 世纪 60 年代，美国、澳大利亚、荷兰等发达国家的工厂化育苗产业已形成了一定的规模，形成播种-摆盘自动化流水线，实现了育苗作业的机械化和自动化[9-11]。荷兰 Visser 公司[12]、意大利 Mosa 公司[13]已研制较为完善的穴盘播种-输送-摆放流水线，减少人力消耗。日本关于育苗设备的研发已有大量成果，如久保田公司 S-ST1200 系列育苗箱自动堆叠设备[14]、铃木锻工公司的育苗箱自动供给装置[15]、日本纽荷兰株式会社设计的自动育苗箱摆放机 NSB-H200[16]及 YANMAR 公司的全自动育苗箱供给装置[17]等，但以上机器作业对象为硬质穴盘，同时受国内棚室结构的限制，其育苗装备生产线并不适用于国内软穴盘情况。

我国在育苗方面研究较晚，20 世纪 80 年代中期从国外引进穴盘育苗技术，目前国内育苗环境主要分为两种：对于大型育苗场将穴盘铺在苗床上；对于小型育苗场则直接将穴盘摆在处理过的地上。目前育苗播种技术相对成熟[18-20]，但关于软质穴盘摆放作业机械化设备研发不足，仍需人工作业[21-22]。CHIU 等[23-25]针对水稻育苗先后研制秧盘搬运、码垛及摆放等育苗设备，为全程水稻育苗机械化生产提供了技术支持。ZHOU 等[26]设计的全自动龙门轨道式水稻秧盘摆放机，可实现横向摆盘和纵向换行摆放。程晋等[27]设计的一种高速秧盘落盘机构，可使上下秧盘分离，实现最下方秧盘摆放。张秀花等[28]设计的关节式蔬菜育苗穴盘播后自动摆放机，可适应不同高度的穴盘摆放。虞佳佳等[29]设计了一种全自动双边轨道式田间铺盘装置，可实现育苗自动化铺盘。沈金星[30]设计了一种水培蔬菜自动上盘系统，整个系统通过送料小车与摆盘小车协同作业，完成苗盘装载、运输与摆放。国内蔬菜穴盘摆放机械化研究日益得到重视，但均未进行商业化应用和实际应用。

综上所述，国外穴盘自动搬运与摆放设备实现了育苗作业机械化与自动化，具备了高速稳定的作业能力。然而，无论是独立的搬运摆放设备还是穴盘育苗流水线，都不适用于国内的软质穴盘及其棚室结构。我国现阶段多采用软质穴盘作为育苗容器，但国内针对软质穴盘搬运与摆放作业的机械存在存储量有待提高且在播种后软质穴盘在整理、搬运与摆放过程中基质土和种子会发生移位和挤压现象。

本文以小型育苗场内地面摆放软质穴盘为研究对象，提出一种穴盘错位层叠存储形式，拟解决穴盘层叠存储基质土受压及种子移位的问题；设计错位解垛装置和平移-回转关节变换式摆放装置，研发一种育苗穴盘错位层叠储运式摆放机，拟实现穴盘播种、存储到育苗棚穴盘摆放的机械化作业，以期在提升育苗质量、促进育苗机械化及设施蔬菜产业化方面发挥作用。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

穴盘错位层叠储运式摆盘机整体结构如图 1 所示，各部分相互配合完成穴盘的存储、解垛和摆放，整机尺寸为长 1 680 mm、宽 1 300 mm、高 910 mm。工作宽度为 840 mm。穴盘储存总量为 36 个。在单个工作行程中，摆盘数为 6 个。摆盘工作效率达到 270 个/h，而工作行走速度为 0.27 m/s。

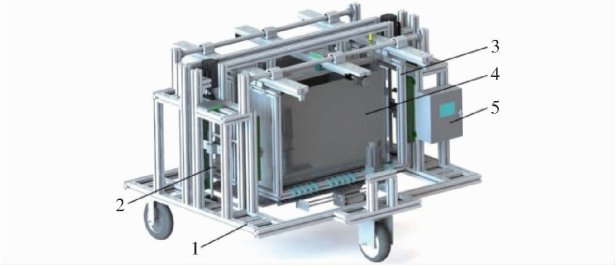

图 1　摆盘机结构三维图

Fig. 1　Structure diagram of tray placing machine

1. 移动底盘　2. 平移-回转关节变换式摆放装置　3. 龙门解垛装置　4. 穴盘垛箱　5. 控制箱

1.2　工作过程

整机工作过程如图 2 所示，状态 1 为穴盘存储状态，穴盘垛由穴盘托板支撑。

具体工作过程如下：

(1)解垛过程。解垛叉盘展开至下层横梁滑轨两侧末端时，穴盘托板托动穴盘下降一个穴盘高度，如图 2 状态 1、2 所示，线性错位驱动推杆推动解垛叉盘横向移动一个穴孔间距，解垛叉盘开始闭合，插

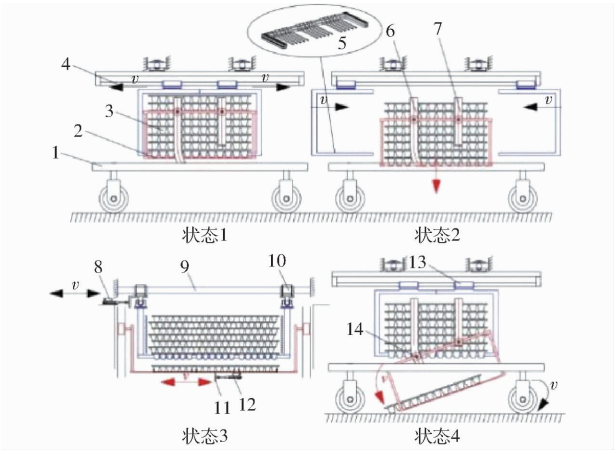

图2 整机工作流程图

Fig. 2 Schematic of whole machine workflow

1. 移动底盘 2. 穴盘托板 3. 穴盘垛 4. 下层横梁滑轨 5. 解垛叉盘 6. 线性-圆弧槽轮轨道 7. 线性槽轮轨道 8. 线性错位驱动推杆 9. 上层横梁滑轨 10. 直线滑块Ⅱ 11. 限位直性移动条 12. 线性校齐驱动推杆 13. 直线滑块Ⅰ 14. 导向轮

入底部第2层的穴盘槽孔外壁之间的缝隙中,穴盘托板托动底层穴盘下降,使得底层穴盘与穴盘垛分离,脱离后的穴盘垛由解垛叉盘进行支撑,如图2状态2、3所示。

(2)摆盘过程。分离后的底层穴盘由平移-回转关节变换式摆放装置上的穴盘托板进行托动,先后托动穴盘完成下降、倾卸动作,当穴盘托板托动穴盘倾卸并下滑至接触地面时,移动底盘移动,使得穴盘脱离穴盘托板,完成穴盘地面摆放,如图2状态3、4所示。

2 关键部件设计与分析

2.1 龙门解垛装置

根据已确定的错位层叠存储方案,设计出龙门解垛装置,如图3所示。

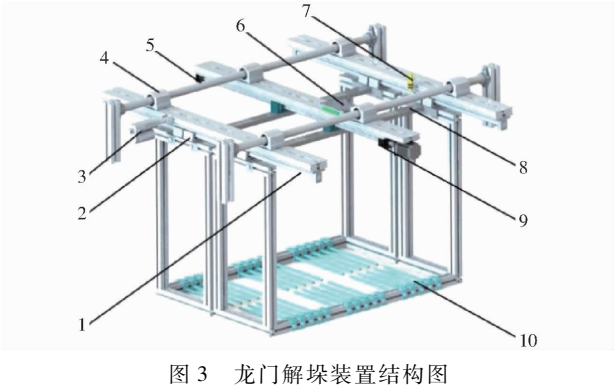

图3 龙门解垛装置结构图

Fig. 3 Gantry depalletizing device

1. 下层横梁滑轨 2. 直线滑块Ⅰ 3. 线性错位驱动推杆 4. 上层横梁滑轨 5. 直线滑块Ⅱ 6. 驱动器 7. 光电开关 8. 滑块-丝杠螺母连接板 9. 展开式解垛驱动机构 10. 解垛叉盘

解垛叉盘通过电机驱动双向反螺牙丝杠转动实现展开与闭合操作,并由线性错位驱动推杆控制解垛叉盘横向移动,完成错位解垛工序。

解垛叉盘中的梳条设计为圆柱形状,根据对穴盘尺寸参数的测定,得出穴盘槽底间隙宽度 $b_1 \approx 24$ mm、穴孔外壁倾角 $\alpha \approx 76°$。为保证梳条在支撑穴盘状态下,对穴盘有良好的支撑效果及防止穴盘槽壁在梳条接触点处发生较大弯折量,以梳条与穴盘槽底之间的高度15 mm为定位基准,确定出梳条圆截面直径为10 mm,梳条长度为280 mm。

2.2 平移-回转关节变换式摆放装置

平移-回转关节变换式摆放装置如图4所示。穴盘托板通过旋转杆与线性-圆弧槽轮轨道、线性槽轮轨道上的导向轮及姿态转换机构上的轴承连接,姿态转换机构的主要作用是补偿滚珠丝杠升降组件上的丝杠滑块在穴盘托板发生倾卸动作时所需的径向位移以及扭转角,以使得穴盘托板进入倾卸过程;限位直线移动条滑动安装在穴盘托板上的圆柱滑轨上,由线性校齐驱动推杆推动限位直线移动条往复直线移动。

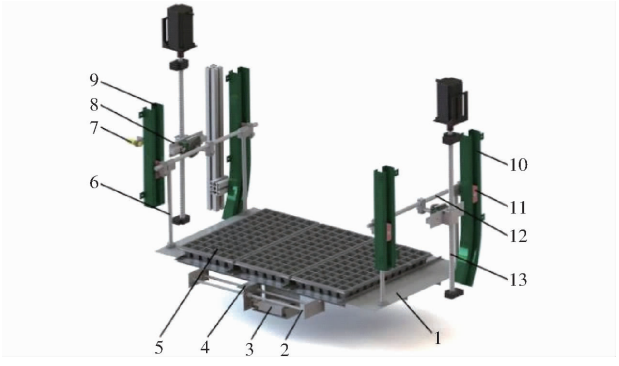

图4 平移-回转关节变换式摆放装置结构图

Fig. 4 Translation - rotation joint conversion placement device

1. 穴盘托板 2. 圆柱滑轨 3. 线性校齐驱动推杆 4. 限位直线移动条 5. 穴盘 6. 悬挂杆 7. 光电开关 8. 姿态转换机构 9. 线性槽轮轨道 10. 线性-圆弧槽轮轨道 11. 导向轮 12. 旋转杆 13. 滚珠丝杠升降组件

2.2.1 滚珠丝杠升降组件设计

滚珠丝杠轴径与导程是穴盘托板运动与定位的核心。考虑平移-回转关节变换式摆放装置尺寸、造成材料及成本最小化,需选用合适的丝杠螺纹长度、丝杠公称直径与导程。选用的滚珠丝杠总长 $l_T = 680$ mm,丝杠螺纹长度 l_0 为

$$l_0 = l_T - l_1 - l_2 \tag{1}$$

式中 l_1、l_2——丝杠两端支撑轴长度,取56、20 mm

根据摆盘效率,穴盘托板升降最大运动速度5 m/min,即 $V_{max} = 5\,000$ mm/min。丝杠导程[31]计算式为

$$P_h = \frac{V_{max}}{in_1} \tag{2}$$

式中　P_h——丝杠导程，mm

i——电机与丝杠直联传动比，取 1

n_1——电机最高转速，r/min

电机选用 86BYG250H 型步进电机，电机转子惯量为 4.57×10^{-3} kg·m^2，电机额定转速为 200 r/min，保持转矩为 12 N·m。则计算得出丝杠导程：$P_h\approx8.33$ mm。结合常用导程选择相近的最大值，即丝杠导程选用 10 mm。

通过 Solidworks 软件对穴盘托板体积进行测量并计算，得到穴盘托板质量 $m_3=24.25$ kg，穴盘托板主要做垂直升降，则滚珠丝杠最小工作载荷（空载）$F_{\min}$与滚珠丝杠最大工作载荷 $F_{\max}$为[32]

$$\begin{cases}F_{\min}=m_3g\\F_{\max}=m_3g+36m_1g\end{cases}\tag{3}$$

式中　m_1——覆土后穴盘质量，取 1.38 kg

根据文献[33]等效载荷满足

$$F_m=\frac{2F_{\max}+F_{\min}}{3}\tag{4}$$

选用滚珠丝杠有效行程为 564 mm，参考文献[34]，确定定位精度 $\sigma'=0.006$ mm，滚珠丝杆允许最大轴向变形量

$$\sigma_m\leqslant\frac{\sigma'}{5}\tag{5}$$

估算滚珠丝杠直径

$$d\geqslant0.039\sqrt{\frac{F_ml_0}{1\,000\sigma_m}}\tag{6}$$

根据 $F_m=408.1$ N、$l=604$ mm，求得允许最大轴向变形量 $\sigma_m=0.001\,2$ mm，可得滚珠丝杠直径 $d\geqslant17.68$ mm。综合以上计算，选用的滚珠丝杠总长为 680 mm、螺纹长度 604 mm，丝杠公称直径为 20 mm，导程为 10 mm。

2.2.2　限位直线移动条设计

同层间 3 个穴盘在托板下滑过程中，易发生相对侧移，导致摆放效果差。因此，添加限位直线移动条，如图 5（b_2为限位条长度，mm；L_1为穴盘底部宽度，mm；L_2为同组内限位条间距，mm；L_3为相邻组限位条间距，mm；h_2为限位条高度，mm）所示，以解决穴盘发生侧移式下滑及前后排穴盘不排齐的问题。

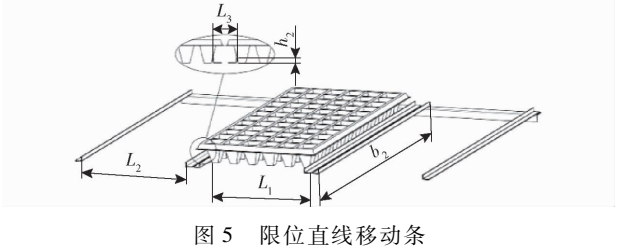

图 5　限位直线移动条

Fig. 5　Limit straight moving bar

对穴盘底部宽度 L_1进行多次测量，并计算其平均值得到 $L_1=230$ mm，设定限位条的高度 h_2等于穴盘高度的 1/3，建立限位直线移动条与穴盘间的结构参数关系式

$$\begin{cases}h_2=\dfrac{h}{3}\\L_2=\dfrac{2h_2}{\tan\alpha}+L_1\\L_3=280-L_2\end{cases}\tag{7}$$

式中　h——穴盘的高度，mm

α——穴孔外壁倾角，(°)

对穴盘高度多次测量得到 $h\approx44.6$ mm，并代入式(7)进行计算，得出 $h_2\approx15$ mm，$L_2\approx237.5$ mm，$L_3\approx42.5$ mm。穴盘长度为 540 mm，穴盘托板加工宽度为 600 mm，则限位条长度 b_2取 650 mm。

2.2.3　悬挂杆设计

平移-回转关节变换式摆放装置进行摆盘作业时，穴盘托板包含两个动作，即下降与倾卸动作，因此，需要求滚珠丝杠升降组件中的丝杠滑块间歇进行 2 个下降行程。第 1 个下降行程为解垛行程（图 6 中黑线），即丝杠滑块从某一高度处下降 1 个穴盘高度，实现穴盘垛中最下层穴盘与穴盘垛分离；第 2 个行程为摆放行程（图 6 中红线），即在完成解垛行程后，丝杠滑块继续下降，直至达到穴盘托板倾卸规定角度，完成穴盘摆放。

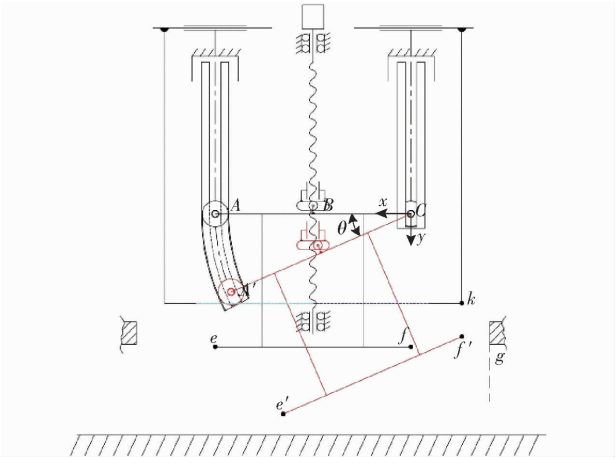

图 6　平移-回转关节变换式摆放装置运动简图

Fig. 6　Motion diagram of translation－rotation joint conversion placement device

平移-回转关节变换式摆放装置运动简图如图 6 所示（C 为坐标原点；B 为横向连杆中点；A、A'分别为穴盘托板倾卸始末状态下的导向轮中心点；θ为穴盘托板倾卸角度，(°)；e、f分别为穴盘托板倾卸初始状态下穴盘托板前端点与末端点；e'、f'分别为穴盘托板倾卸末状态下穴盘托板前端点与末端点；g 为底盘前端横梁）。

建立如图 6 所示的直角坐标系，以图中点 C 为圆心，水平方向为 x 轴，垂直距离为 y 轴，点 A、C 与 e、f 关于横向连杆中点 B 对称布置，点 f 位移方程为

$$\begin{cases} x_f = \dfrac{L_{AC}}{2} - \dfrac{L_{ef}}{2} \\ y_f = H_{Cf} \end{cases} \tag{8}$$

式中 L_{AC}——点 A、C 水平方向距离，mm

L_{ef}——点 e、f 水平方向距离，mm

H_{Cf}——点 C、f 垂直方向距离，mm

倾卸初始状态下，穴盘托板末端点 f 以点 C 旋转角度 θ，得到倾卸末状态下穴盘托板末端点 f' 坐标为

$$\begin{cases} x_{f'} = x_f\cos\theta - y_f\sin\theta \\ y_{f'} = y_f\cos\theta + x_f\sin\theta \end{cases} \tag{9}$$

点 f' 至解垛叉盘底部点 k 的垂直方向距离 $H_{f'k}$ 为

$$H_{f'k} = |y_{f'} - y_k| \tag{10}$$

因槽轮轨道可在铝材架上升降调节，通过 Solidworks 软件测量，可知 $y_k \in (135\ \text{mm}, 175\ \text{mm})$，$x_g = -314.5$ mm。在槽轮轨道固定于铝材架最高位置时，即 $y_k = 175$ mm 时，e 与 k 的垂直距离 H_{ek} 应大于穴盘的高度。因此，在托板进行倾卸动作时，为避免穴盘托板末端与解垛叉盘和底盘前端横梁产生干涉，则有

$$\begin{cases} H_{f'k} \geqslant 100\ \text{mm} \\ x_{f'} \geqslant -314.5\ \text{mm} \\ y_f \geqslant 240\ \text{mm} \end{cases} \tag{11}$$

经测量得到 $L_{AC} = 520$ mm、$L_{ef} = 600$ mm，在最大倾角为 30°下，联立式(8)～(11)得到

$$340.65\ \text{mm} \leqslant y_f \leqslant 559.72\ \text{mm} \tag{12}$$

选取悬挂杆长度为 350 mm，通过式(12)可知，满足设计要求。

2.3 地面摆盘受力分析

本研究设计了平移-回转关节变换式摆放装置，实现了育苗穴盘依赖于自由滑落的摆放功能，该装置避开了设计驱动式推盘机构，简化了机构。当摆盘小车向前移动时，穴盘后端能稳定在地面不随车行走是成功摆盘的关键，为此，对穴盘触地时进行受力分析，以确保摆盘顺利进行。

当托板倾斜穴盘下落接触到地面时，穴盘受力如图 7 所示，此时穴盘受到得力包括：重力 W、穴盘托板对穴盘的法向支持力 F_{N1}、穴盘托板与穴盘摩擦力 F_{f1}、地面对穴盘的法向支持力 F_{N2}、穴盘与地面摩擦力 F_{f2}。

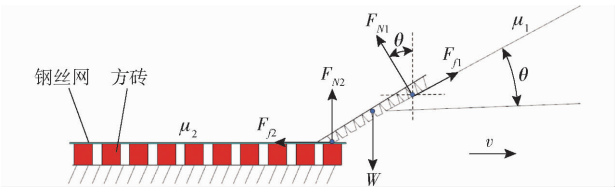

图 7 穴盘摆放受力分析图

Fig. 7 Force analysis diagram of acupoint disc placement

通过试验测定，穴盘装土后质量 m 为 1.38 kg，穴盘长度 l 为 540 mm，穴盘与穴盘托板动、静摩擦因数分别为 0.3 和 0.36，穴盘与铺有钢丝网育苗地面之间动、静摩擦因数分别为 0.45 和 0.5。为简化计算，假设穴盘在摆放过程中不变形且质心在穴盘的两个支撑点的中心，此时，穴盘受到的摩擦力为

$$F_{f1} = \mu_1 F_{N1} \tag{13}$$

$$F_{f2} = \mu_2 F_{N2} \tag{14}$$

根据力矩平衡有

$$F_{N1} l - W\cos\alpha l/2 = 0 \tag{15}$$

$$W\cos\alpha l/2 - F_{N2}\cos\alpha l - F_{f2}\sin\alpha l = 0 \tag{16}$$

穴盘在竖直方向的平衡方程为

$$W = F_{N2} + F_{N1}\cos\alpha + F_{f1}\sin\alpha \tag{17}$$

穴盘在水平方向上，若

$$F_{f2} + F_{N1}\sin\alpha > F_{f1}\cos\alpha \tag{18}$$

则当摆盘小车向前移动时，穴盘可以稳稳地落在地面而不会被托板带盘前行。

将穴盘质量、长度及其与地面和托板摩擦因数等参数代入上述公式进行计算，可以得到穴盘托板倾角超过 24°时，移动底盘向前移动不会带盘前行。

3 样机试验

3.1 材料与方法

3.1.1 试验材料

样机试验于 2024 年 1 月，在河北农业大学校工厂进行。试验设备与材料包括穴盘、基质土、量角器、游标卡尺(精度 0.02 mm)、钢尺(量程 30 mm，精度 1 mm)、电子数显倾角仪(量程 4 × 90°，精度 0.05°)、育苗穴盘错位层叠储运式摆放机样机(图 8)。

3.1.2 试验指标

摆盘质量采用 3 个指标来进行衡量：摆正合格率、纵向偏距合格率和横向偏距合格率，数据测量如图 9 所示。

(1)摆正合格率：穴盘摆放至地面时，定义偏角 ϕ 为被测试穴盘与基准穴盘(第 1 行第 1 列的穴盘)之间的偏角，即穴盘长度方向与摆盘小车行走方向

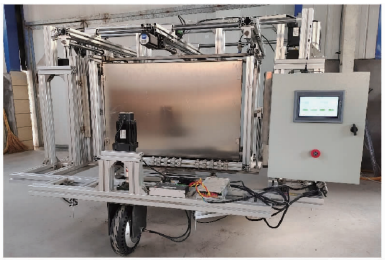

图 8　摆盘试验样机

Fig. 8　Test prototype of tray placing machine

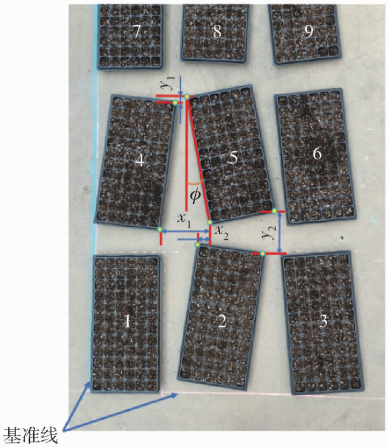

图 9　穴盘摆放的数据测量

Fig. 9　Data measurement of tray placement

之间的夹角，如图 9 所示。穴盘的偏角 ϕ 不大于 4°即表示穴盘摆正合格。设穴盘摆正合格数为 n_a，则摆正合格率为

$$P_1 = \frac{n_a}{n} \times 100\% \tag{19}$$

式中　n——穴盘摆放总数量，取 36

（2）纵向偏距合格率：同一排相邻的两个穴盘相邻侧对应点之间的纵向偏距计为 y_1，如图 9 所示，测试中分别测量穴盘前后两个纵向偏距，取大者作为 y_1；同一列相邻的两个穴盘同侧相邻点之间的纵向偏距计为 y_2，如图 9 所示，测试中分别测量穴盘左右两个偏距，取大的作为 y_2。实际生产中为了保证每排横向对齐且前后盘间距合适，要求偏距 y_1、y_2 均不超过 10 mm，则表示摆盘横向排齐，纵向偏距合格，计摆盘纵向偏距合格数量为 n_b，则纵向偏距合格率为

$$P_2 = \frac{n_b}{n} \times 100\% \tag{20}$$

（3）横向偏距合格率：同一排相邻的两个穴盘相邻侧对应点之间的横向偏距计为 x_1，如图 9 所示，测试中分别测量穴盘前后两个横向偏距，取大者作为 x_1；同一列相邻的两个穴盘同侧相邻点之间的横向偏距计为 x_2，如图 9 所示，测试中分别测量穴盘前后两个偏距，取大的作为 x_2。实际生产中为了保证每列纵向对齐且左右盘间距合适，要求偏距 x_1、x_2 均不超过 10 mm，则表示摆盘纵向排齐，横向偏距合格，计摆盘横向偏距合格数量为 n_c，则横向偏距合格率为

$$P_3 = \frac{n_c}{n} \times 100\% \tag{21}$$

3.2　单因素试验与结果分析

3.2.1　单因素试验设计

通过前期的试验，观察到穴盘由摆盘器至地面的落地过程中，影响穴盘落地姿态及摆盘效果的因素主要与穴盘前端落地所受冲击力与穴盘落地前变形量有关。通过反复进行摆盘试验，确定与穴盘托板倾角、穴盘托板前端离地高度、丝杠滑块下降速度及整机移动速度有关，对 4 个因素进行单因素摆盘试验。

3.2.2　单因素试验结果分析

单因素试验结果如图 10 所示。

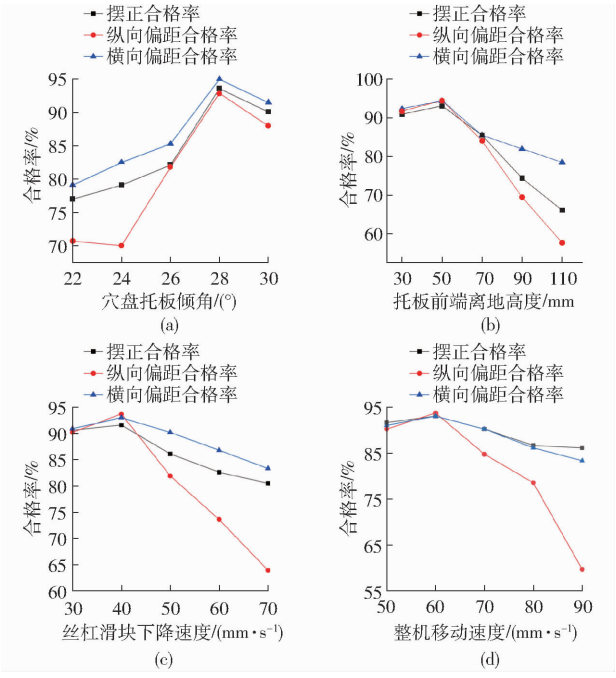

图 10　各因素对摆正、纵向偏距、横向偏距合格率的影响

Fig. 10　Influence of various factors on pass rate of deflection angle, longitudinal deflection distance and transverse deflection distance

（1）穴盘托板倾角

穴盘摆放效果随穴盘托板倾角变化趋势如图 10a 所示。随着穴盘托板倾角的增加，摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率逐渐增加。当穴盘托板倾角超过 24°时，纵向偏距合格率增加幅度较为明显。观察摆盘过程，在低倾卸角度下，穴盘底部脱离托板面积小，易导致托板拖动穴盘移动，导致摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率较低。穴盘托板倾角过高，在穴盘托板未达到目标倾卸角度时，穴盘已接触地面，但穴盘中部位置发

生变形,影响穴盘摆放效果。综合考虑托板倾角取 26°~30°进行优化试验。

(2)穴盘托板前端离地高度

穴盘摆放效果随穴盘托板前端离地高度变化的趋势如图 10b 所示。当穴盘托板前端离地高度低于 50 mm 时,摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率缓慢增加;在穴盘托板前端离地高度超过 50 mm 时,摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率急剧减小。穴盘托板前端离地高度越高,在穴盘接触地面时,穴盘所受地面冲击越大,并且脱离穴盘托板穴盘前端部分变形量越大,落地姿态不确定性增加。因此,选取穴盘托板前端离地高度 30~70 mm 进行优化试验。

(3)丝杠滑块下降速度

穴盘摆放效果随丝杠滑块下降速度变化趋势如图 10c 所示。当丝杠滑块下降速度超过 40 mm/s 时,摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率逐渐下降。通过观察摆盘过程,丝杠滑块下降速度超过 40 mm/s 时,穴盘落地所受冲击变大,导致不同穴盘间落地姿态不同,相邻穴盘间纵向偏距变化较为明显。因此,选取丝杠滑块下降速度 30~50 mm/s 进行优化试验。

(4)整机移动速度

穴盘摆放效果随整机移动速度变化趋势如图 10d 所示。当整机移动速度超过 60 mm/s 时,摆正合格率、纵向偏距合格率与横向偏距合格率逐渐下降。通过观察摆盘过程,发现整机移动速度超过 60 mm/s 时,穴盘落地面时,穴盘前端底部受地面冲击较大,影响穴盘落地姿态。综合考虑选取整机移动速度 50~70 mm/s 进行优化试验。

3.3 正交试验与结果分析

3.3.1 正交试验设计

以摆正合格率 P_1、纵向偏距合格率 P_2、横向偏距合格率 P_3 3 个评价指标为响应值,将各影响因素水平进行编码,如表 1 所示。应用 Design-Expert 13.0 软件,通过 Box-Behnken Design 响应面优化方法设计四因素三水平的正交试验[35],使用 Design-Expert 13.0 软件,为提高试验误差的精确估计,依据 Box-Behnken 组合设计原则,设定每个区块中心点数为 5,确定 29 组试验。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Factors and codes of test

编码	因素			
	穴盘托板倾角/(°)	穴盘托板前端离地高度/mm	丝杠滑块下降速度/(mm·s^{-1})	整机移动速度/(mm·s^{-1})
-1	26	30	30	50
0	28	50	40	60
1	30	70	50	70

3.3.2 试验结果与分析

正交试验结果如表 2 所示,表中 A、B、C、D 为因素编码值。采用 Design-Expert 13.0 软件对摆盘试验数据进行了多元回归拟合分析。方差分析结果如表 3 所示。基于此分析,构建涵盖 4 个影响因素的二次多项式回归模型。在剔除不显著因素后,获得优化后数学模型为

$$\begin{cases} P_1 = 93.14 + 1.38A - 3.64B + 1.35C + 0.81D - \\ \quad 3.27AC - 2.40AD - 3.74A^2 - 6.10B^2 - \\ \quad 1.72C^2 - 2.53D^2 \\ P_2 = 93.28 + 0.30A - 2.66B - 1.10C - 1.02D + \\ \quad 2.43AD + 2.08BC + 3.82BD + 2.43CD - \\ \quad 3.89A^2 - 5.73B^2 - 3.54C^2 - 4.33D^2 \\ P_3 = 93.84 + 1.85A - 2.55B - 1.38C - 2.07D - \\ \quad 2.77A^2 - 5.70B^2 - 2.60C^2 - 4.65D^2 \end{cases} \tag{22}$$

表 2 试验结果

Tab.2 Test results

试验序号	因素				P_1/%	P_2/%	P_3/%
	A	B	C	D			
1	1	0	1	0	85.4	88.8	88.8
2	-1	-1	0	0	83.3	88.8	83.3
3	0	0	0	0	93.0	94.4	95.1
4	0	1	1	0	83.3	80.5	78.4
5	0	-1	-1	0	90.2	90.9	91.6
6	0	0	1	-1	90.2	83.3	86.1
7	0	0	-1	-1	86.1	90.2	88.8
8	0	1	0	1	80.3	85.4	78.5
9	1	-1	0	0	90.2	86.1	91.6
10	0	1	-1	0	78.5	80.5	88.8
11	0	0	0	0	93.7	93.7	90.9
12	1	0	-1	0	88.8	86.1	91.6
13	-1	1	0	0	78.5	80.5	78.4
14	1	0	0	-1	90.2	84.0	90.2
15	0	0	-1	1	90.2	83.3	83.3
16	0	0	0	0	91.6	93.7	93.0
17	0	0	1	1	91.2	86.1	83.3
18	0	0	0	0	93.7	91.6	95.1
19	-1	0	0	1	88.8	80.5	83.3
20	0	-1	0	1	88.8	80.5	86.1
21	1	0	0	1	86.1	85.4	86.1
22	-1	0	0	-1	83.3	88.8	88.8
23	0	-1	1	0	90.2	82.6	86.1
24	-1	0	1	0	91.6	82.6	90.2
25	-1	0	-1	0	81.9	86.1	85.4
26	0	-1	0	-1	85.4	88.8	85.4
27	0	1	0	-1	80.5	78.4	86.1
28	1	1	0	0	83.3	80.5	83.3
29	0	0	0	0	93.7	93.0	95.1

该模型的建立为进一步优化摆盘操作提供了理论依据，并有助于提升试验过程中各项参数的合理性和有效性。

表 3　回归模型方差分析

Tab. 3　Variance analysis of regression model

试验指标	摆正合格率 P_1		纵向偏距合格率 P_2		横向偏距合格率 P_3	
	F	P	F	P	F	P
模型	16.73	<0.000 1 **	15.44	<0.000 1 **	5.83	0.0011 **
A	9.22	0.008 9 **	0.40	0.538 2	6.14	0.026 5 *
B	63.89	<0.000 1 **	31.26	<0.000 1 **	11.67	0.004 2 **
C	8.78	0.010 3 *	5.35	0.036 4 *	3.43	0.085 0
D	3.15	0.097 8	4.65	0.049 0 *	7.67	0.015 1 *
AB	0.44	0.516 7	0.67	0.426 1	0.43	0.521 5
AC	17.22	0.001 0 **	3.54	0.080 8	2.16	0.163 8
AD	9.25	0.008 8 **	8.67	0.010 7 *	0.073	0.790 5
BC	2.31	0.150 6	6.35	0.024 5 *	0.90	0.359 4
BD	1.30	0.273 2	21.57	0.000 4 **	2.58	0.130 8
CD	0.96	0.342 7	8.67	0.010 7 *	0.27	0.6097
A^2	36.44	<0.000 1 **	36.26	<0.000 1 **	7.47	0.016 2 *
B^2	97.00	<0.000 1 **	78.56	<0.000 1 **	31.51	<0.000 1 **
C^2	7.67	0.015 1 *	30.04	<0.000 1 **	6.55	0.022 7 *
D^2	16.65	0.001 1 **	44.87	<0.000 1 **	20.97	0.000 4 **
失拟项	3.79	0.105 6	2.97	0.152 8	2.25	0.225 3

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

由表 3 可知，各指标的回归模型极显著（P_1 与 P_2 的 P 均小于 0.000 1 且 P_3 的 P 为 0.001 1），失拟项不显著（失拟项均大于 0.05），表明模型所拟合的回归方程与实际相符，回归模型可较好地对性能试验中各试验结果进行预测。影响摆正合格率的主次因素为 B、A、C、D，影响纵向偏距合格率的主次因素为 B、C、D、A，影响横向偏距合格率的主次因素为 B、D、A、C。对 P_1 的影响因素中 A、B、AC、AD、A^2、B^2、D^2 影响极显著（$P < 0.01$），因素 C、C^2 影响显著（$P < 0.05$），其余因素不显著；对 P_2 的影响因素中 B、BD、A^2、B^2、C^2、D^2 影响极显著（$P < 0.01$），因素 C、D、AD、BC、CD 影响显著（$P < 0.05$），其余因素不显著；对 P_3 的影响因素中 B、B^2、D^2 影响极显著（$P < 0.01$），因素 A、D、A^2、C^2 影响显著（$P < 0.05$），其余因素不显著。

3.3.3　响应曲面

由表 3 可知，AC、AD 交互作用对摆正合格率 P_1 有显著影响，AD、BC、BD、CD 交互作用对纵向偏距合格率 P_2 有显著影响，交互项对横向偏距合格率 P_3 无显著影响，因此对摆正合格率 P_1、纵向偏距合格率 P_2 影响显著的交互作用进行分析，各因素交互作用响应面如图 11、12 所示。由图 11a 可知，当穴盘托板倾角为 26°～30°时，摆正合格率 P_1 随着穴盘托板倾角的增加而先增加后减小，穴盘托板倾角对摆正合格率 P_1 显著性高于丝杠滑块下降速度；当穴盘托板倾角处于较低水平时，摆正合格率 P_1 随着丝杠滑块下降速度的增加而增加；当穴盘托板倾角处于较高水平时，摆正合格率 P_1 随着丝杠滑块下降速度的增加而缓慢减小；观察响应面趋势，响应面最高处出现在穴盘托板倾角 28°左右处，因此，为提高摆正合格率 P_1，穴盘托板倾角不宜选取过小，丝杠滑块下降速度不宜选取过大。

由图 11b 可知，当整机移动速度较低时，摆正合格率 P_1 随穴盘托板倾角的增加而增加，这主要是在整机移动速度较低情况下，穴盘落地时冲击较小，穴盘托板倾角对摆正合格率 P_1 有显著影响。穴盘落地时，穴盘脱离托板长度随穴盘托板倾角呈线性变化，使得穴盘底部与地面接触面积不如较高的托板倾角下接触面积充足，易导致托板轻微带动穴盘滑移，影响穴盘摆正效果。当整机移动速度较高时，穴盘托板倾角对试验指标的影响较小，摆正合格率 P_1 随穴盘托板倾角增加先增加后减小，因此，整机移动速度不宜选取过大。

从图 12a 可以看出，纵向偏距合格率 P_2 随穴盘托板倾角的增加而先增大而减小；当整机速度移动为 50～70 mm/s 时，纵向偏距合格率 P_2 随着穴盘托

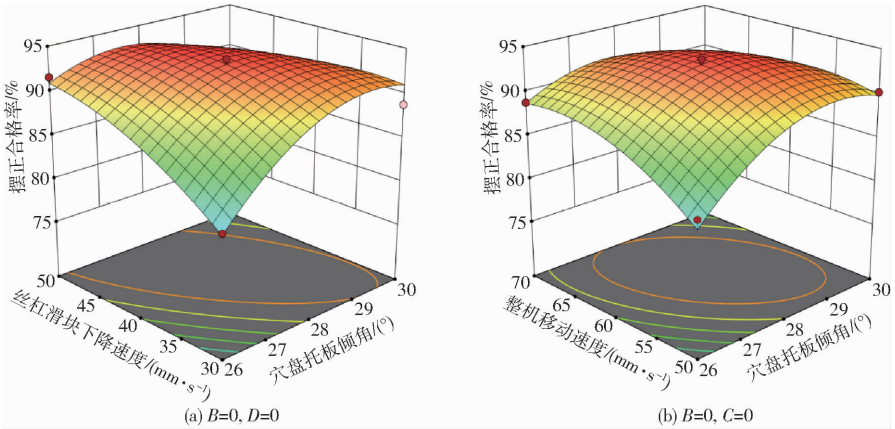

图 11　因素交互作用对摆正合格率的影响

Fig. 11　Effects of factor interaction on declination pass rate

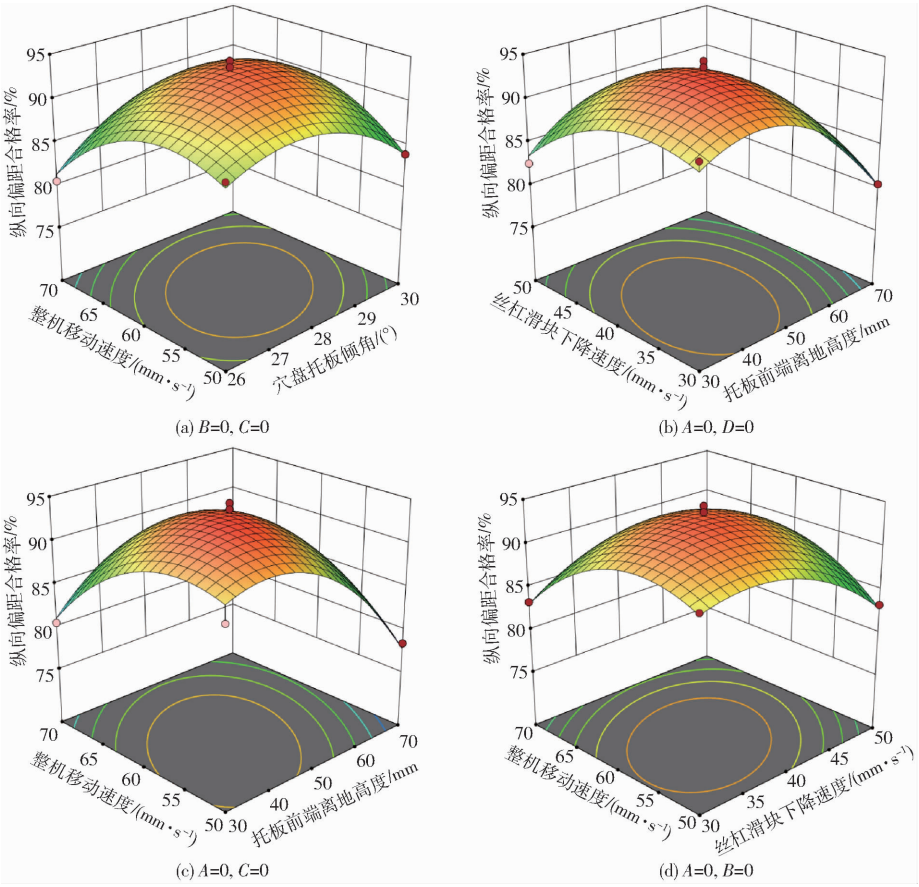

图 12 因素交互作用对纵向偏距合格率的影响

Fig. 12 Effects of factor interaction on longitudinal bias pass rate

板倾角的增加而先增加后减小,但较低整机移动速度下的纵向偏距合格率 P_2 幅值变化明显小于较高整机移动速度下纵向偏距合格率 P_2 幅值变化,说明了在较高的整机速度移动下,穴盘落地时所受冲击越大,对纵向偏距合格率 P_2 影响越大,因此,整机移动速度不宜选取过大。

由图 12b、12c 可知,当穴盘托板前端离地高度为 30 ~ 70 mm 时,纵向偏距合格率 P_2 随丝杠滑块下降速度或整机移动速度增加而先增加而减小,但较低穴盘托板前端离地高度下的纵向偏距合格率 P_2 幅值变化明显小于较高穴盘托板前端离地高度下纵向偏距合格率 P_2 幅值变化,穴盘托板前端离地高度对纵向偏距合格率 P_2 显著性明显高于丝杠滑块下降速度或整机移动速度;观察图 12b ~ 12d 的响应面,响应面曲线趋势几乎一致,在较高的丝杠滑块下降速度或整机移动速度下的纵向偏距合格率 P_2 均属于较低值。为减小穴盘落地冲击以提高纵向偏距合格率 P_2,穴盘托板前端离地高度不宜过高,丝杠滑块下降速度、整机移动速度不宜选取过大。

3.4 参数优化与试验验证

3.4.1 参数优化

为了获得摆盘机摆盘效果最佳的工艺参数组合,以评价摆盘效果的 3 个指标:摆正合格率 P_1、纵向偏距合格率 P_2、横向偏距合格率 P_3 为目标函数,对摆盘机工作参数进行优化。运用 Design-Expert 13.0 软件对 3 个指标回归数学模型进行优化。

摆盘效果 3 个指标目标及约束方程为

$$\begin{cases} \max P_1 \\ \max P_2 \\ \max P_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \\ -1 \leqslant D \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{23}$$

通过软件选出满意度最高的编码值组合:$A = 0, B = 0, C = 0, D = 0$,即穴盘托板倾角为 28°,穴盘托板前端离地高度为 50 mm,丝杠滑块下降速度为 40 mm/s,整机移动速度为 60 mm/s。得到最佳参数组合下 3 个评价指标预测值为:$P_1 = 93.6\%$,$P_2 = 93.7\%$,$P_3 = 94.7\%$。

3.4.2 验证试验

为了验证优选出的组合参数可靠性,考虑机器的实际工作参数,设定优选出的摆盘参数为:穴盘托板倾角 28.0°、穴盘托板前端离地高度 44.5 mm,丝

杠滑块下降速度 38.5 mm/s、整机移动速度 59.0 mm/s，将每 12 个穴盘编成一组，进行 4 组穴盘摆放试验，如图 13 所示。

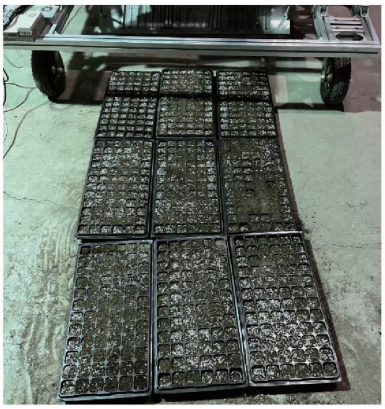

图 13　摆盘试验

Fig. 13　Test of tray placement

试验结果取均值可得 P_1 为 93.3%，P_2 为 93.3%，P_3 为 94.4%，试验结果与预测值误差绝对值均小于 5%，说明回归模型可靠，得到的最佳工艺参数组合符合穴盘摆放农艺要求。

4　结论

（1）以小型育苗场内地面摆放软质穴盘为研究对象，提出了一种穴盘错位层叠存储形式，有效解决了穴盘层叠存储基质土受压及种子移位的问题；设计了错位解垛装置和平移-回转关节变换式摆放装置，实现了育苗穴盘的错位解垛与摆放功能；研发了一种育苗穴盘错位层叠储运式摆放机，实现了穴盘播种、存储到育苗棚穴盘摆放的机械化作业，对提升育苗质量、促进育苗机械化及设施蔬菜产业化具有重要意义。

（2）对整机开展了四因素三水平正交组合优化试验，运用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行参数优化，考虑机器的实际工作参数，设定优选出的摆盘参数为：穴盘托板倾角 28.0°、穴盘托板前端离地高度 44.5 mm、丝杠滑块下降速度 38.5 mm/s、整机移动速度 59.0 mm/s 进行试验验证，试验结果为摆正合格率 93.3%、纵向偏距合格率 93.3%、横向偏距合格率 94.4%，摆盘效果良好，满足穴盘摆放农艺要求。

参　考　文　献

[1] 尚玉磊，孙浩轩，许利平，等. 我国蔬菜育苗基质及蔬菜种苗产业研究进展[J]. 园艺与种苗，2024，44(1)：97－99.
SHANG Yulei，SUN Haoxuan，XU Liping，et al. Research progress on vegetable seedling substrate and vegetable seedling industry in China[J]. Horticulture and Seedlings，2024，44(1)：97－99.（in Chinese）

[2] 冯婧媛，胡祥培，杜永臣. 农业生产性服务对接小农户的实践探索与经验启示——以我国蔬菜工厂化育苗为例[J]. 农村经济，2022(5)：134－144.
FENG Jingyuan，HU Xiangpei，DU Yongchen. Practical exploration and experience enlightenment of agricultural productive service docking small farmers—taking vegetable factory seedling raising in China as an example[J]. Rural Economy，2022(5)：134－144.（in Chinese）

[3] 黄硕，张秀花. 育苗穴盘储运摆放装置的设计与优化[J]. 农机化研究，2022，44(12)：112－118.
HUANG Shuo，ZHANG Xiuhua. Design and optimization of storage and transportation placement device for seedling trays[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，44(12)：112－118.（in Chinese）

[4] 孙晗，郭广川，唐帅，等. 蔬菜育苗播种流水线压穴滚筒装置改进与控制系统设计[J]. 农业工程学报，2021，37(22)：41－48.
SUN Han，GUO Guangchuan，TANG Shuai，et al. Improvement of hole pressing roller device and design of the control system for vegetable seedling's seeding assembly line[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(22)：41－48.（in Chinese）

[5] 齐飞，魏晓明，张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：1－9.
QI Fei，WEI Xiaoming，ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(24)：1－9.（in Chinese）

[6] 齐飞，李恺，李邵，等. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报，2019，35(2)：183－195.
QI Fei，LI Kai，LI Shao，et al. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(2)：183－195.（in Chinese）

[7] 刘霓红，蒋先平，程俊峰，等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报，2018，34(15)：1－9.
LIU Nihong，JIANG Xianping，CHENG Junfeng，et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(15)：1－9.（in Chinese）

[8] 辜松，杨艳丽，张跃峰，等. 荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报，2013，29(14)：185－194.
GU Song，YANG Yanli，ZHANG Yuefeng，et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(14)：185－194.（in

Chinese)
[9] 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)
[10] 赵有生, 于海业. 国外工厂化育苗发展现状及其启示[J]. 世界农业, 2009(12): 47 - 48.
ZHAO Yousheng, YU Haiye. Development status and enlightenment of foreign industrialized seedling[J]. World Agriculture, 2009(12):47 - 48. (in Chinese)
[11] BAETEN J, KEVIN D, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester[C]// Field and Service Robotics: Results of the 6th International Conference. Springer Berlin Heidelberg, 2008:531 - 539.
[12] Visser Horti Systems. Tray delivery system[EB/OL]//Viscon Group. [2024 - 09 - 03]. https://viscongroup.eu/plant-technology/young-plant-automation/.
[13] MosaGreen-Macchine per OrtoFloro Vivaismo[EB/OL]. [2024 - 09 - 03]. https://www.mosagreen.it.
[14] 久保田鉄工株式会社. 育苗箱供给装置:昭 62 - 87008[P]. 1987 - 04 - 21.
[15] 鈴木鍛工株式会社. 播種装置の育苗箱供给装置:昭 61 - 58507[P]. 1986 - 03 - 25.
[16] Newholland. 自動苗箱並べ機 NSB - H200[EB/OL]. [2024 - 09 - 03]. https://www.nh-hft.co.jp/product/product-1311.
[17] YANMAR. お探しのページは見つかりません[EB/OL]. [2015 - 03 - 01]. https://www.yanmar.com/jp/agri/products/vegetable/seeding/box/.
[18] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005,21(增刊 2): 1 - 4.
GUO Shirong. Research progress,current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(Supp.2):1 - 4. (in Chinese)
[19] 李天鹏, 赵海涛, 颜志俊, 等. 菇渣基质添加蚓粪对番茄幼苗的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2016, 37(4): 103 - 108.
LI Tianpeng, ZHAO Haitao, YAN Zhijun, et al. Effects of the plug seedling media produced by mushroom residue added with vermicompost on tomato seedlings[J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition),2016,37(4): 103 - 108. (in Chinese)
[20] 衣淑娟,王鹏,李衣菲,等.水稻硬质育秧盘全自动起盘机提升与叠盘装置研究[J].农业机械学报,2024,55(7):168 - 178.
YI Shujuan, WANG Peng, LI Yifei, et al. Research on lifting and stacking device of automatic winch for rigid rice seedling tray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):168 - 178. (in Chinese)
[21] 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)
[22] 孙泽强, 杜小强, 李月婵, 等. 水稻钵苗育苗穴盘分离套盘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 85 - 92,101.
SUN Zeqiang, DU Xiaoqiang, LI Yuechan, et al. Design and experiment of tray separating and embedding machine for rice pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):85 - 92,101. (in Chinese)
[23] CHIU Y C, FON D S, WU G J. Development of an automatic pallet handling system for seeded trays[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 123 - 138.
[24] CHIU Y C, CHU Y H, WU G J. Development of an automatic tray-discharging system for rice seedlings[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(1): 27 - 33.
[25] CHIU Y C, WU G J, CHEN C H. Development of a generator-powered self-propelled automatic tray loading/unloading machine for use in rice nurseries[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2019,12(2):256 - 263.
[26] ZHOU Q, XIA X, WANG J, et al. Design and experiment of the automatic laying system for rice seedling tray[J]. Agriculture, 2021, 11(7):679.
[27] 程晋, 王丽, 章惠全, 等. 水稻工厂化育苗高速秧盘播种落盘机构的设计[J]. 农业科技与装备, 2019(2): 30 - 31.
CHENG Jin, WANG Li, ZHANG Huiquan, et al. Design of falling tray mechanism for rice industrial breeding high speed seedling sowing[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2019(2):30 - 31. (in Chinese)
[28] 张秀花, 谢晓东, 弋景刚, 等. 关节式蔬菜育苗穴盘播后自动摆放机设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 27 - 36.
ZHANG Xiuhua, XIE Xiaodong, YI Jinggang, et al. Design of joint-style automatic machine for placing planted vegetable seeding tray[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(21):27 - 36. (in Chinese)
[29] 虞佳佳,李玉,周延锁,等. 基于改进 YOLO v5n 的工厂化育秧田间铺盘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(8):71 - 80,116.
YU Jiajia, LI Yu, ZHOU Yansuo, et al. Design and experiment of field laying device for factory seedling rearing based on improved YOLO v5n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 20249,55(8):71 - 80,116. (in Chinese)

(下转第 287 页)

[19] SENOO E E K, ANGGRAIN L, KUMI J A, et al. IoT solutions with artificial intelligence technologies for precision agriculture: definitions, applications, challenges, and opportunities[J]. Electronics, 2024, 13(10):1894.
[20] 吕欢欢, 牛源艺, 韩雨晓,等. 日光温室作物冠层夏季光照强度与空气温湿度时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5):368－378.
LÜ Huanhuan, NIU Yuanyi, HAN Yuxiao, et al. Spatiotemporal variation of crop-canopy light intensity and air temperature and humidity in summer solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 368－378. (in Chinese)
[21] 王立舒, 李岩, 梁秋艳,等. 基于改进肖维涅算法的温室环境数据采集[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):212－217.
WANG Lishu, LI Yan, LIANG Qiuyan, et al. Greenhouse environmental data collection based on improved Chauvenet's criterion[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5):212－217. (in Chinese)
[22] 卢绮玲. 气象观测环境变化对气象记录准确性的影响情况分析[J]. 广东气象, 2003, 25(2):37－39..
[23] 王坤, 付钰, 段雪源,等. 基于深度学习的 SDN 异常流量分布式检测方法[J]. 通信学报, 2024, 45(11):114－130.
WANG Kun, FU Yu, DUAN Xueyuan, et al. Distributed abnormal traffic detection method for SDN based on deep learning [J]. Journal on Communications, 2024, 45(11):114－130. (in Chinese)
[24] 徐筠雯, 陈宗镭, 李天瑞,等. 基于季节分解的混合神经网络的时间序列预测[J]. 计算机科学, 2024, 51(增刊 2): 553－559.
XU Junwen, CHEN Zonglei, LI Tianrui, et al. Time series prediction of hybrid neural networks based on seasonal decomposition[J]. Computer Science, 2024, 51(Supp. 2):553－559. (in Chinese)
[25] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8):1735－1780.
[26] 刘建伟, 宋志妍. 循环神经网络研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(11):2753－2768.
LIU Jianwei, SONG Zhiyan. Overview of recurrent neural networks[J]. Control and Decision, 2022, 37(11):2753－2768. (in Chinese)
[27] 任延昭, 陈雪瑞, 贾敬敦,等. 基于微信平台的温室环境监测与温度预测系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 302－307.
REN Yanzhao, CHEN Xuerui, JIA Jingdun, et al. Environment monitoring and temperature prediction in greenhouse based on wechat platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):302－307. (in Chinese)
[28] VLADIMIR V, STEVEN E G, ALEX S. Support vector method for function approximation, regression estimation and signal processing[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Neural Information Processing Systems,1996:281－287.
[29] 陈一飞, 齐凯, 刘柏成,等. 日光温室集群大系统的复杂性与系统控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊 1):377－381.
CHEN Yifei, QI Kai, LIU Baicheng, et al. System control and complex characteristic of solar greenhouse cluster large system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(Supp. 1):377－381. (in Chinese)
[30] 张琴琴, 刘文强, 陈之鸿,等. 基于 LSTM－SVM 模型的河流流量预测[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(6):45－52.
ZHANG Qinqin, LIU Wenqian, CHEN Zhihong,et al. Forecasting of river flow based on LSTM－SVM model[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2023, 43(6):45－52. (in Chinese)

(上接第 264 页)

[30] 沈金星. 水培蔬菜苗盘自动上盘系统设计[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2019.
SHEN Jinxing. Design of automatic tray system for hydroponic vegetable seedling[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018. (in Chinese)
[31] 贾洪雷, 房殿海, 刘慧力, 等. 车载智能土壤采样系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 292－301,312.
JIA Honglei, FANG Dianhai, LIU Huili, et al. Design and experiment of vehicle-mounted intelligent soil sampling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):292－301,312. (in Chinese)
[32] 贺兴隆, 王玉琳. 控制力矩陀螺随形焊接装置的设计与实现[J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 92－96.
HE Xinglong, WANG Yulin. Design and implementation of shape-follow welding device for control moment gyroscope[J]. Machine Tool & Hydraulics,2022,50(21):92－96. (in Chinese)
[33] GB/T 17587.5—2008　滚珠丝杠副 第 5 部分:轴向额定静载荷和动载荷及使用寿命[S].2008.
[34] GB/T 17587.3—2017　滚珠丝杠副 第 3 部分:验收条件和验收检验[S].2017.
[35] 袁小伟,杨双平,金若成,等. 双螺旋对辊式辣椒收获装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(15):1－9.
YUAN Xiaowei, YANG Shuangping, JIN Ruocheng, et al. Design and experiment of double helix pair roller pepper harvesting device[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(15):1－9. (in Chinese)