doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.032

全自动高速移栽机连续供盘收盘装置设计与试验

李玉华[1]　张康博[1]　侯　瑞[2]　周　凯[1]　施国英[1]　侯加林[1]

（1.山东农业大学机械与电子工程学院，泰安 271018；2.北京邮电大学人工智能学院，北京 100876）

摘要：针对现有自动移栽机供盘、收盘仍需人工操作，自动化程度低等问题，提出一种基于多传感器融合的移栽机连续供盘收盘方法，设计了移栽机连续供盘与收盘装置。对横向送盘机构、纵向步进移盘机构、垂直连续取落盘机构、双开合收盘机构及控制系统进行了设计及优化，运用 Box－Behnken 中心组合试验研究了接盘倾斜角、进盘气压、穴底距对苗盘衔接连续率的作用规律，通过方差分析、响应面分析得出进盘气压为 0.37 MPa、落盘倾斜角为 27.29°、穴底距为 5.26 mm 时，苗盘衔接连续率最优，达 96.81%，以移盘偏差为指标开展移盘拨齿位置准确度试验，得出移盘最大偏差为 14.17%。满足移栽机最高栽植效率的条件下使用最优参数组合进行田间试验，结果表明，栽植效率达 128 株/min 时，苗盘衔接连续率为 95%，叠盘成功率为 99%。各项性能均满足移栽机工作要求。提出的连续供盘收盘方法可显著提高移栽机的自动化程度。

关键词：移栽机；苗盘衔接；连续供盘；气动；穴盘回收

中图分类号：S223.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0405-12　　**OSID**：

Design and Test of Continuous Tray Supply and Take-up Device for Automatic High-speed Transplanting Machine

LI Yuhua[1]　ZHANG Kangbo[1]　HOU Rui[2]　ZHOU Kai[1]　SHI Guoying[1]　HOU Jialin[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Department of Artificial Intelligence*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

Abstract: Aiming at the issue of manual operation required for feeding and stacking trays in existing automatic transplanters, which results in a low level of automation, a method for continuous feeding and stacking trays in transplanters was proposed. A device for continuous feeding and stacking trays in transplanters was designed based on multi-sensor fusion technology, and the structure and working principle of the device were analyzed. The design and optimization of the horizontal tray feeding mechanism, longitudinal stepwise tray moving mechanism, vertical continuous tray picking and placing mechanism, dual opening and closing tray stacking mechanism, and control system were carried out. Kinematic models for each stage of the tray movement were established. The Box－Behnken central combination test was used to study the role of tray tilt angle, tray feed air pressure, hole bottom distance on the continuous rate of seedling tray articulation, and the design of orthogonal tests through analysis of variance and response surface analysis showed that when the tray feed air pressure was 0.37 MPa, the tray drop tilt angle was 27.29°, and the hole bottom distance was 5.26 mm, the optimal rate of seedling tray articulation was 96.81%, to transfer disk deviation as an indicator to carry out the transfer disk toggle position accuracy test concluded that the maximum deviation of the step transfer disk was 14.17%. Under the condition of meeting the highest planting efficiency of the transplanter, the optimal parameter combination was used to conduct field tests, and the results showed that when the planting efficiency reached 128 plants/min, the continuous rate of seedling tray articulation was 95%, and the success rate of stacking trays was 99%. All the performances met the working requirements of the transplanter. The proposed method of continuous tray supply and collection can significantly improve the automation degree

收稿日期：2024－04－29　修回日期：2024－08－16

基金项目：山东省重点研发计划（重大科技创新工程）项目（2022CXGC010611）、财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目（CARS－24－D－01）和国家重点研发计划项目（2024YFD2000400）

作者简介：李玉华（1983—），男，副教授，博士生导师，主要从事智能农业装备研究，E-mail：liyuhua@sdau.edu.cn

通信作者：侯加林（1963—），男，教授，博士生导师，主要从事智能农业装备研究，E-mail：jlhou@sdau.edu.cn

of the transplanter, and the research result can provide technical support for the research and development of tray supply and collection of the transplanter.

Key words: transplanter; seedling tray connection; continuous supply tray; pneumatic; hole tray recovery

0 引言

目前我国约 60% 的蔬菜品种采用育苗移栽的方式种植[1-3]，钵苗移栽可提高产量 6.2% ~ 9.3%[4-6]。现阶段我国蔬菜移栽机作业时仍需人工完成供盘、收盘等作业，劳动强度大，人工成本高。因此需要研发自动化装置代替人工完成有序供盘和收盘作业，降低人工依赖，推进蔬菜生产向机械化、自动化迈进[7-9]。

近年，国内外科研人员对移栽机进行了大量研究[10-12]。文献[13-15]针对送盘技术进行设计优化。王超等[16-17]研制的气动下压式高速移栽机自动控制系统，实现了有序供盘，高速取投苗，但供盘数量有限，需要特制穴盘。祝嗣朔等[18]设计一种全自动移栽机穴盘回收机构，采用向上托举方式承接取苗后不同下落状态的空穴盘。马振等[19]研制的移栽机自动化送盘装置，利用穴盘自重特点提供运动的动力，实现自动化送盘功能，但机构体积庞大，结构复杂，不适合田间作业。杨传华等[20]基于可编程控制器设计了一种蔬菜钵苗移栽机自动输送系统，实现钵苗取苗送苗及投苗全过程自动化。赵英杰等[21]研制的移栽机自动进给机构利用同步带、推杆导槽机构，控制自动进给机构的步进精度，定位精准率可达 99%，仍需人工进行补盘工作。姚梦娇等[22]基于区间分析的自动移栽机苗盘定位，提出了一种双传感器融合的苗盘精确定位控制方法，增强了穴盘定位的准确度和稳定性。文献[23-26]针对移栽机自动取苗、直立栽植等关键装置进行了深入研究，提高了取苗合格率、栽植质量和作业效率，为高速移栽的设计提供了理论支撑[27-29]。但针对连续自动供盘收盘技术的研究相对较少，而这一技术是影响移栽机全自动化水平的关键因素。

综上，为降低人工成本、提高移栽机自动化水平，提出一种多级联动的连续供盘收盘方法，基于多传感器融合方式对苗盘进行准确定位，建立二级苗盘位置等待节点，对横向送盘装置、纵向移盘装置、垂直连续取落盘装置及控制系统进行设计及优化，实现移栽机的自动连续供盘、平稳收盘。通过理论分析与试验验证移栽机自动连续供盘收盘机构的可靠性与合理性，以期为全自动移栽机供盘收盘装置的设计提供参考。

1 连续供盘收盘装置结构与工作原理

1.1 连续供盘收盘装置结构

设计的移栽机自动连续供盘收盘装置，主要由横向送盘机构、纵向步进移盘机构、垂直连续取落盘机构、双开合收盘机构、控制系统等组成，如图 1 所示。

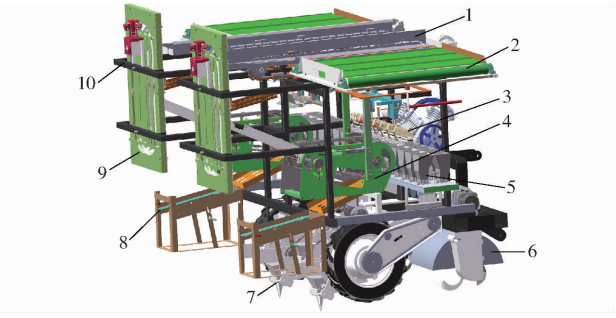


图 1 连续供盘收盘移栽机整机结构图

Fig. 1 Structural diagram of whole machine for continuous tray closing and transplanting machine

1. 纵向步进移盘机构 2. 横向送盘机构 3. 取苗机构 4. 苗盘衔接进盘机构 5. 输苗机构 6. 旋耕开沟机构 7. 栽植机构 8. 双开合收盘机构 9. 连续取落盘机构 10. 机架

本装置所使用穴盘为 8×16 的标准 128 孔塑料穴盘，穴盘规格如图 2 所示。其外轮廓尺寸为 280 mm×540 mm，穴型呈近四棱台。

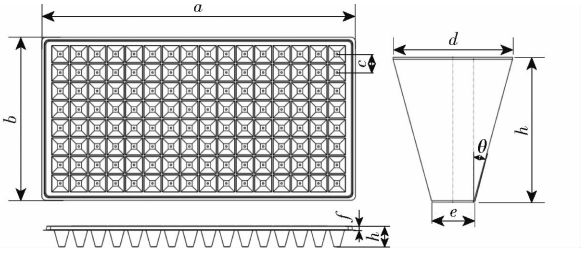


图 2 穴盘结构参数示意图

Fig. 2 Schematic of tray structure parameters

1.2 连续供盘收盘装置工作原理

移栽机连续供盘收盘装置采用 PLC 控制，由气动方式提供动力，动力来源为拖拉机输出轴驱动空压机产生的压缩空气。

作业前由人工将一批次苗盘(11 盘)放置到自动连续送盘装置中。装置工作流程如图 3 所示，分为横向送盘、纵向步进移盘、连续取落盘、平稳收盘。①横向送盘：气动马达Ⅰ驱动输送辊子将输送带上的苗盘送至补盘区。②纵向步进移盘：移盘气缸推动棘轮转动链条，链条上的移盘拨齿将补盘区上的



图 3　连续供盘收盘流程图

Fig. 3　Continuous supply and closing flowchart

苗盘运送至苗盘一级等待位置。③连续取落盘：气动马达Ⅱ驱动垂直连续取落盘装置上的取盘托将处于二级苗盘等待位置的苗盘落入苗盘衔接装置上，同时取走一级等待位置的苗盘运动到二级等待位置准备下一次落盘，处于苗盘衔接装置上的苗盘在自重的作用下落入进盘轨道中供取苗装置取苗。④平稳收盘：取苗后空穴盘在自重和后续穴盘推力的作用下落入穴盘回收机构中依次叠起。

2　关键部件设计

2.1　横向送盘装置设计

横向送盘装置由气动马达Ⅰ驱动，如图 4 所示，输送带表面附着 7 组 8 mm×8 mm×5 mm 的梯形凸台导条，不同组相邻导条间距为 255 mm，将苗盘限制在输送带上，由导条形成的每个单元可容纳 2 盘苗盘纵向分布。输送带下方支撑板减少输送带下垂带来的影响，使得苗盘在移动过程保持水平。输送带的水平段上表面可摆放 6 盘苗盘，支架尾部采用螺栓张紧。

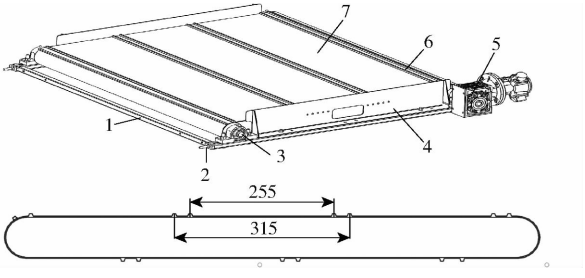


图 4　横向送盘机构示意图

Fig. 4　Schematic of lateral feeding mechanism

1. 机架　2. 从动辊子　3. 张紧装置　4. 苗盘护板　5. 气动马达Ⅰ　6. 输送带导条　7. PVC 输送带

2.2　纵向步进移盘装置设计

通过摩擦因数测定仪测量钢板与穴盘材料之间的摩擦因数（图 5），穴盘开口向上时动摩擦因数为 0.308、静摩擦因数为 0.364，穴盘开口向下时动摩擦因数为 0.354、静摩擦因数为 0.422。这里只选用静摩擦因数进行计算，摩擦因数测定结果如图 6 所示。

纵向步进移盘机构结构如图 7 所示，苗盘承载

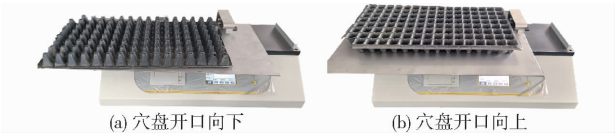


图 5　摩擦因数测定试验

Fig. 5　Friction coefficient measurement test

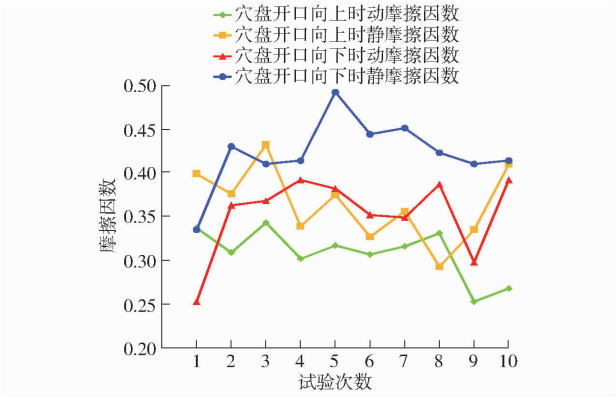


图 6　摩擦因数测定结果

Fig. 6　Measurement results of friction coefficient

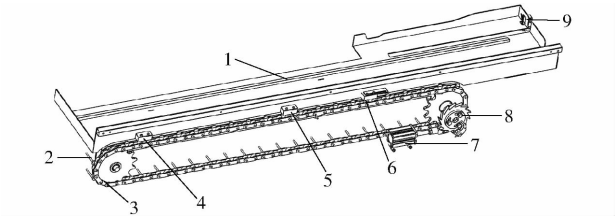


图 7　纵向步进移盘机构结构示意图

Fig. 7　Schematic of longitudinal shifting mechanism

1. 移盘限位条　2. 移盘拨齿　3. 移盘链条　4. 补盘区传感器Ⅰ　5. 补盘区传感器Ⅱ　6. 补盘区传感器Ⅲ　7. 移盘气缸　8. 棘轮　9. 一级等待位置传感器

量为 3 盘，平台划分补盘区和一级苗盘等待位置，补盘区接收横向送盘补充的苗盘，补盘区朝向苗盘的位置安装有补盘区传感器Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ。实时监测补盘区苗盘的位置情况并反馈给 PLC，控制横向送盘进程。

苗盘入口端设置移盘限位条，长度延伸至一级苗盘等待位置。补盘进程中移盘限位条卡住苗盘底部的倒数第 2 节凹槽处，限制苗盘在补盘区的位置。移盘限位条对苗盘施加必要的力，减少苗盘在向前直线移动过程中产生的偏差，将其准确引导至预定

的一级苗盘等待位置。

纵向步进移盘机构通过气缸推动棘轮转动,步进移盘棘轮装置结构如图 8 所示,棘轮连接着移盘主动链轮同步转动,已知穴盘的穴距为 31.75 mm,本装置选用链条型号为 20A,链条节距为 31.75 mm,实现苗盘之间步进移动,对应主动链轮选择为 14 齿,棘轮设计为 14 齿和链轮保持同步转动。棘齿向前推进 1 齿,链条向前移动一个穴距距离。

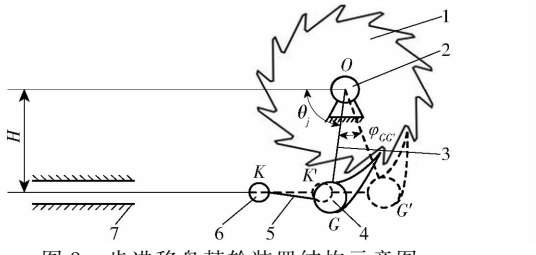


图 8 步进移盘棘轮装置结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of step shift ratchet device

1. 棘轮 2. 主动轴 3. 棘爪摇臂 4. 棘爪 5. 连杆 6. 棘爪固定转轴 7. 步进气缸

棘轮的关键参数有

$$\varphi = \frac{360k_s}{Z_{yj}} \tag{1}$$

式中 φ——棘轮步距角,(°)

k_s——棘爪运动一次推过的棘齿数

Z_{yj}——主动链轮齿数

$$\begin{cases} d_{cd} = mZ_{yj} \\ h_{cg} = 0.75m \\ d_{cg} = d_{cd} - 1.5m \end{cases} \tag{2}$$

式中 d_{cd}——棘轮齿顶圆直径,mm

h_{cg}——棘轮齿高,mm

d_{cg}——齿根圆直径,mm

m——模数,mm

按照强度要求确定模数 m 为 8 mm,得出棘轮棘齿的设计参数为 φ = 25.7°、d_{cd} = 112 mm、d_{cg} = 100 mm、h_{cg} = 6 mm。

为满足机构工作要求,当机构达到最高位置时,为保证棘爪在棘轮齿根圆上,有约束式

$$d_{cg}^2 = (l_{GO}\sin\theta_j - L_1)^2 + (l_{GO}\cos\theta_j)^2 \tag{3}$$

式中 l_{GO}——连杆点 G 与棘轮转动中心距离,mm

L_1——棘爪工作长度,mm

θ_j——初始棘爪摇臂与水平面的夹角,(°)

在机构转动过程中,为保证摇臂转动正常,有约束式

$$\theta_j \geqslant 180° + 2\arcsin\frac{l_{GK} - H}{l_{GO}} \tag{4}$$

式中 H——活塞杆轴线与棘轮转动中心的垂直距离,mm

l_{GK}——棘爪与活塞杆之间连杆长度,mm

取不等式(4)作为设计的优化目标,使 l_{GK} 与 l_{GO} 在满足机构工作要求的条件下取得最小值,以保证变步距角棘轮装置结构紧凑,对不等式(4)进行求解,最终取整得到 l_{GK} = 25 mm,l_{GO} = 146 mm。

移盘拨齿直径和长度应根据所需的力矩进行优化,确保拨齿在工作负载下能够承受所施加的力,并不会发生过大的弯曲或形变。为了保证从横向送盘装置的苗盘能刚好卡入移盘拨齿,移盘拨齿间距 H_{bj} 设置为穴距的 2 倍。移盘拨齿的受力分布如图 9 所示。

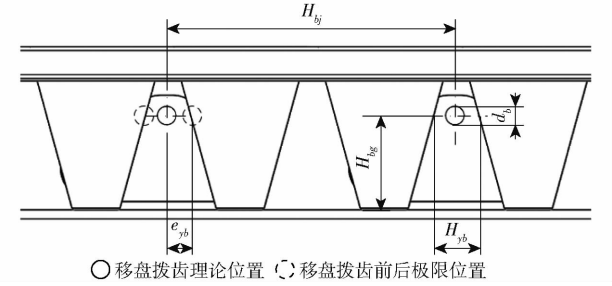


图 9 移盘拨齿分布图

Fig. 9 Distribution of shifting lever

移盘拨齿卡入穴槽的理论位置与实际位置存在偏差,根据移盘拨齿的前后极限位置计算移盘拨齿卡入穴槽的偏差范围

$$\begin{cases} e_{yb} = \dfrac{H_{bj} - 2e}{4} - H_{bg}\tan\theta \\ H_{yb} = 2e_{yb} \\ H_{bj} = 2c \end{cases} \tag{5}$$

式中 H_{bg}——拨齿高度,取 21 mm

θ——穴盘倾角,(°)

e_{yb}——移盘允许误差,mm

H_{yb}——移盘拨齿前后极限误差和,mm

H_{bj}——移盘拨齿的间距,mm

e——穴盘孔下径,mm

c——穴距,mm

计算得出移盘的前后极限允许误差 e_{yb} = 5 mm。

苗盘在纵向步进移盘平台受力情况如图 10 所示。

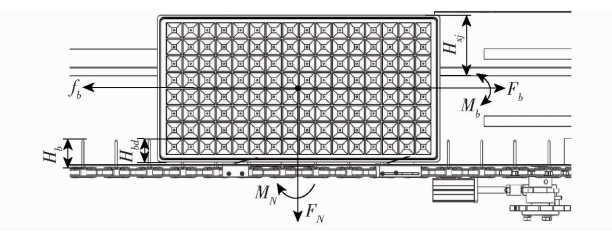


图 10 移盘平台穴盘受力图

Fig. 10 Diagram of force on tray of tray-moving platform

移盘平台上的苗盘平衡方程为

$$\begin{cases} F_b\left(\frac{b}{2}-\frac{H_{bd}}{2}\right)-F_N\left(\frac{b}{2}-H_{xj}\right)=0 \\ F_b>(128m_bg+F_N+m_xg)\alpha \end{cases} \tag{6}$$

式中　F_b——拨齿向前作用力，N

f_b——苗盘移盘平台所受的摩擦力，N

H_{bd}——苗盘边界与拨齿端头距离，mm

F_N——移盘限位条对苗盘的反作用力，N

H_{xj}——苗盘边界与限位条距离，mm

H_b——拨齿长度，mm

m_b——单株钵苗质量，g

m_x——穴盘质量，g

α——穴盘与钢板之间的静摩擦因数

b——穴盘宽度，mm

移盘拨齿强度公式为

$$\delta_b=\frac{Pl}{\frac{\pi d_b^3}{32}}=\frac{32F_b\left(\frac{1}{2}H_bH_{bd}\right)}{\pi d_b^3}$$

$$\delta_b\leqslant[\delta_b] \tag{7}$$

式中　δ_b——移盘拨齿所受应力，N

P——移盘拨齿所受力，N

l——移盘拨齿所受力臂，m

d_b——移盘拨齿直径，mm

$[\delta_b]$——移盘拨齿强度许用应力，为 235 MPa

移盘拨齿向前作用力 F_b 要大于等于苗盘在移盘平台所受的摩擦力，拨齿的直径和长度选择 d_b = 4 mm、H_b = 55 mm 可满足移盘拨齿的强度要求，为使移盘拨齿更好卡入穴槽，拨齿前端作磨圆处理。

2.3　垂直连续取落盘装置设计

垂直连续取落盘装置如图 11 所示，设置有 2 个

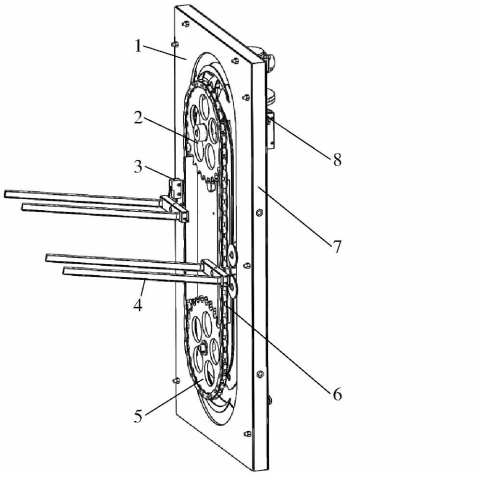


图 11　垂直连续取落盘装置结构示意图

Fig. 11　Schematic of vertical continuous compass taking mechanism

1. 导轮导槽板　2. 主动链轮　3. 二级等待位置传感器　4. 取盘托　5. 从动链轮　6. 输送链条　7. 框架　8. 气动马达Ⅱ

取盘托，一侧处于一级苗盘等待位置下方，另一侧位于二级苗盘等待位置，取盘托与防翻转机构通过螺栓连接，可使取盘托始终平行于地面，维持取落盘过程的稳定。工作时，一侧的取盘托向上移动，穿过一级苗盘等待位置上的通过槽取走该位置的苗盘并向二级苗盘等待位置移动。对应另一侧的取盘托向下移动，穿过苗盘衔接装置上的通过槽，将苗盘平稳落入苗盘衔接装置，随着链条转动，取盘托继续运行到一级苗盘等待位置下方，以备下次取盘工作。

取盘托上对称分布两根取盘齿，使得取盘齿受力相同，取盘齿贴近根部向上折起一定角度 θ_{qz} 减少部分受力，同时防止取盘齿上的苗盘发生滑落。根据前文所测钵苗单体质量 m_b 以及取盘托的自重，为了预防潜在的过载情况，保证机构运行的可靠性，这里选择将取盘托整体负载定为 2 kg 进行计算。取盘齿与导轮导槽板、限位导轮之间建立受力关系，确保苗盘在运输过程中保持在正确的位置，如图 12 所示。

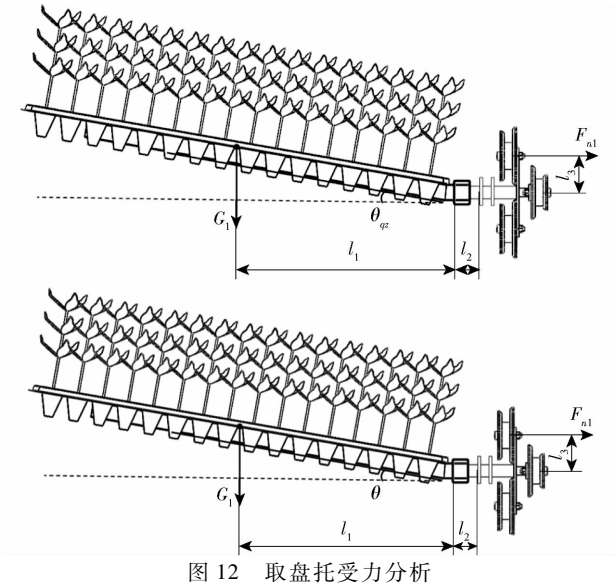


图 12　取盘托受力分析

Fig. 12　Schematic of tray structure

取盘齿穿过主梁后焊接，危险截面为接近取盘管的截面。取盘齿选择 20 mm × 5 mm × 1.5 mm 的矩形方管，矩形方管由 Q235 钢制成，杆件许用应力 $[\delta]$ = 235 MPa。矩形方管所受应力为

$$\begin{cases} \delta_q=\frac{M_{qt}}{W_{qt}}\leqslant[\delta_q] \\ M_{qt}=G_1l_1 \\ l_1=\frac{c}{2}\cos\theta_{qz} \\ W_{qt}=\frac{B_cH_c^3-b_ch_c^3}{6H_c} \end{cases} \tag{8}$$

式中　M_{qt}——弯矩，N·m

W_{qt}——抗弯截面系数

G_1——取盘齿整体受力,N

B_c——取盘齿外宽,mm

b_c——取盘齿内宽,mm

H_c——取盘齿外高,mm

h_c——取盘齿内高,mm

l_1——负载重心与危险截面距离,mm

取盘托固接的安装轴另一端采用前后两组呈十字结构分布的 H 型约束导轮组对取盘托的姿态进行固定,保持其水平状态在轨道内通行,与其连接的取盘托时刻保持水平状态运行,防止苗盘发生倾覆,导轮的受力公式为

$$F_{n1}l_3 - G_1(l_1 + l_2) = 0 \tag{9}$$

式中 F_{n1}——H 型导轮所受反作用力,N

l_2——危险截面与转动链板距离,取 32 mm

l_3——H 型导轮中心与中心轴距离,取 45 mm

经过计算,在取盘齿弯折角度 θ_{qz} 取 20°时,所选用的矩形方管抗弯强度 $\delta_q = 19.97$ MPa,远小于许用应力,满足强度需求。异面十字 H 型导轮受力经计算 F_{n1} 为 125.91 N,不会使树脂材料导轮发生断裂。

2.4 苗盘衔接装置设计及运动学分析

苗盘衔接装置结构如图 13 所示,包括斜面下滑平台和连续取落盘气动马达Ⅱ的控制开关。落盘触发传感器安装在进盘机构上。当落盘传感器触发时,气动马达Ⅱ启动。斜面下滑平台承接由二级等待位置落下的苗盘,苗盘在重力作用下滑入进盘机构,苗盘首排紧靠进盘机构的苗盘拉杆,随着链轮转动苗盘拉杆顺利将苗盘拉入进盘机构,后续带动苗盘向取苗机构方向行进以供取苗机构取苗。斜面下滑平台与水平面形成夹角 θ_3,通过调整下滑平台与进盘机构的角度和高度关系使苗盘衔接精准,确保取苗过程的连续性。

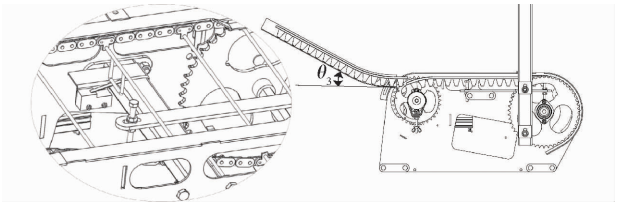
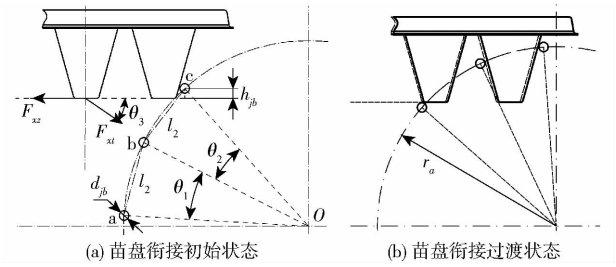


图 13 取落盘传感器触发位置

Fig. 13 Trigger position of sensor of take-up disk

苗盘由连续取落盘装置落入到苗盘衔接装置,如图 14 所示,将苗盘衔接的整个过程分为 3 个状态,苗盘衔接初始状态(图 14a),连续取落盘装置接收到落盘信号时,将处于二级等待位置的苗盘落入到苗盘衔接装置,苗盘拉杆阻止苗盘继续下滑。苗盘首排底部紧贴苗盘拉杆,随着进盘棘轮向前移动一齿,衔接过程由初始状态向过渡状态(图 14b)转变,过渡状态的苗盘首排已经卡入苗盘拉杆 b、c 中,此时苗盘拉杆 a 接触到苗盘底部,调整角度 θ_1、θ_2,避免苗盘拉杆 a 与苗盘之间的干涉。棘轮向前移动一齿时,苗盘的前两盘穴卡入拉杆中,苗盘衔接过程完成。苗盘拉杆在进盘装置内的运动分为圆周阶段和水平阶段,圆周阶段衔接下一盘苗盘,水平阶段向前将苗盘输送到指定位置,供取苗装置进行取苗作业。



(a) 苗盘衔接初始状态 (b) 苗盘衔接过渡状态

图 14 苗盘衔接状态示意图

Fig. 14 State diagrams of connecting holes and disks

处于斜面下滑平台的苗盘受自身重力向下滑动,产生向前作用力 F_t,有

$$\begin{cases} F_{xt} = m_q g\sin\theta_3 - m_q g\alpha\cos\theta_3 \\ f_{xt} = m_s g\alpha \\ F_t = F_{xt}\cos\theta_3 - f_{xt} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_{xt}——斜面上苗盘产生向下滑动的力,N

f_{xt}——水平段苗盘产生的摩擦阻力,N

m_q——倾斜段苗盘质量,g

m_s——水平段苗盘质量,g

若使苗盘衔接位置上的苗盘保持向前移动的趋势,F_t 需满足

$$\begin{cases} F_t \geqslant 0 \\ l_{ab} = 2r_a\sin\dfrac{\theta_1}{2} \\ \theta_1 + \theta_2 \geqslant 44.2° \\ l_{bc} \geqslant c + d_{jb} - H_k \\ l_{bc} = 2r_a\sin\dfrac{\theta_2}{2} \end{cases} \tag{11}$$

式中 θ_1、θ_2——苗盘拉杆 a 与 b、b 与 c 夹角,(°)

θ_3——苗盘衔接装置与水平面的夹角,(°)

r_a——进盘链轮的分度圆半径,mm

h_{jb}——穴盘底部与拉杆中心点的距离,mm

d_{jb}——苗盘拉杆直径,mm

H_k——穴间间隙宽度,mm

l_{ab}、l_{bc}——苗盘拉杆 a 与 b、b 与 c 之间的距离,mm

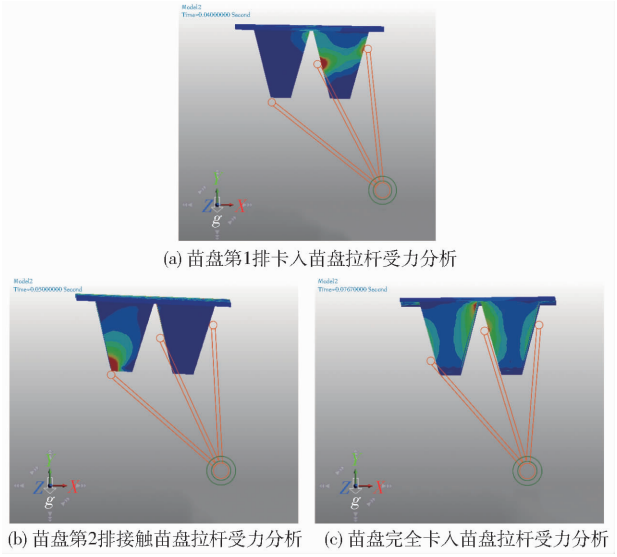
根据参数设置(表 1),RecurDyn 仿真效果如图 15 所示,经计算,取 $\theta_1 = 21°$,$\theta_2 = 23.2°$,$\theta_3 = 26.5°$,$h_{jb} \leqslant 18.86$ mm 时苗盘拉杆与苗盘之间不发生干涉,选择 $h_{jb} = 4$ mm,使得苗盘与进盘机构在同

一水平面，使苗盘衔接过程更顺畅。

表 1　RecurDyn 材料属性设置

Tab. 1　Material attribute settings of RecurDyn

部件	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比
穴盘	1.38×10^3	2.3×10^3	0.35
苗盘拉杆	7.85×10^3	2.08×10^4	0.31



(a) 苗盘第1排卡入苗盘拉杆受力分析

(b) 苗盘第2排接触苗盘拉杆受力分析　(c) 苗盘完全卡入苗盘拉杆受力分析

图 15　RecurDyn 仿真界面

Fig. 15　RecurDyn simulation interface

2.5　双开合收盘机构设计

双开合收盘机构如图 16 所示，位于进盘机构出料端下方，包括光电传感器、开合板、箱体、连接绳、收盘气缸、承接板。开合板倾斜等高设置在收盘框架内侧壁，空穴盘在自重和后续穴盘的推力经承接板滑入苗盘放置腔，承接板上的矩形孔对应穴盘孔的位置交错排列，矩形孔尺寸设计为 60 mm×40 mm，其宽度和长度均远大于穴孔尺寸，便于残余基质从矩形孔落出。处于开合板底端的光电传感器检测到穴盘出现，收盘气缸拉动开合板旋转打开，穴盘落入苗盘放置腔并逐个层叠。

穴盘依靠重力下滑需满足条件

$$\theta_s \geqslant \arctan\alpha \tag{12}$$

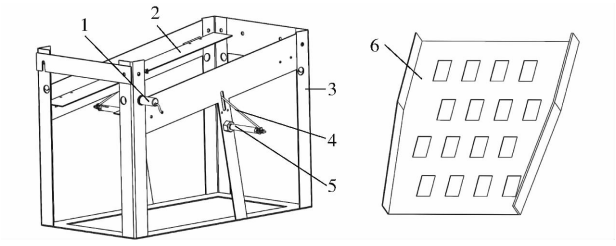


图 16　收盘机构示意图

Fig. 16　Schematic of closing mechanism

1. 光电传感器　2. 开合板　3. 箱体　4. 连接绳　5. 收盘气缸　6. 承接板

式中　θ_s——收盘装置开合板与水平面夹角，(°)

2.6　气动系统设计及耗气量计算

移栽机自动连续供盘收盘系统采用气压传动。各气动部件之间独立运行。由节流阀调节速度，对气动回路进行仿真分析，利用 FluidSIM 对系统进行建模，设置各个气动元件的有关参数，如气源气体压力、节流阀开度、行程参数，再运用软件的查错功能对所建立的系统模型进行检查，气动系统模型如图 17 所示。图中 P 为气源，L 为过滤器，T 为调压阀，G 为压力表，YV1 ~ YV4 为电控-机械换向阀，M1 ~ M8 为排气消声器，W1 ~ W4 为电控换向阀的触点，J1 ~ J6 为节流阀。A 为横向送盘气动马达Ⅰ，B 为步进移盘气缸，C 为垂直取落盘马达，D、E 为收盘气缸。

各气动元件平均耗气量计算式为

$$\begin{cases} Q_{qg} = \dfrac{\pi}{2} N D^2 L \dfrac{p+0.1}{0.1} \times 10^{-3} \\ Q_{md} = \dfrac{p}{RT_1} n_1 Z V \end{cases} \tag{13}$$

式中　Q_{qg}、Q_{md}——气缸、气动马达平均耗气量，L/min

N——气缸动作频率，次/min

D——气缸缸径，cm

L——气缸行程，cm

p——气缸工作压力，MPa

R——气体常数，空气取 281.13 N·m/(kg·K)

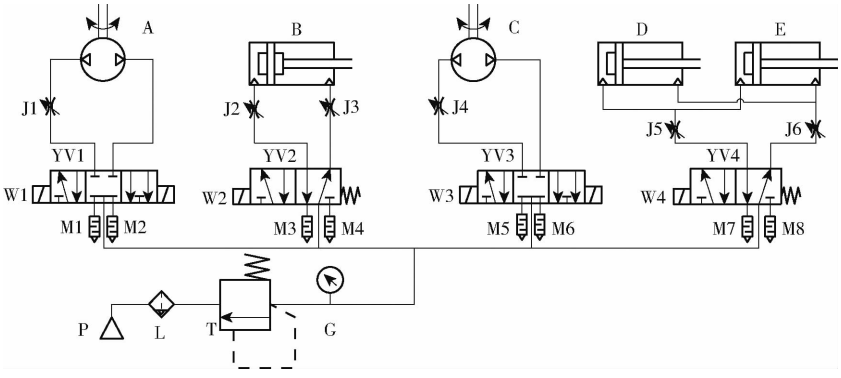


图 17　气压驱动回路布置方案

Fig. 17　Schematic diagram of pneumatic drive system

T_1——热力学温度,K

n_1——活塞转速,r/min

V——进气容积,m^3

Z——气动马达活塞数

移栽机最高栽植频率为 128 株/min,根据气缸和气动马达参数计算总耗气量,各气动部件耗气量计算结果见表 2。

表 2 耗气量计算结果

Tab. 2 Calculation results of air consumption

气动元件	型号	数量	运行时长/s	耗气量/(L·min^{-1})
气动马达Ⅰ	XS-HS010	1	4	197
步进移盘气缸	SDA32×55B	1	10	7.72
气动马达Ⅱ	XS-HS025	1	3	259
收盘气缸	MI12*80-S-CA	2	1	15.21

机构选用气动马达耗气量大,但运行时间短且两个气动马达不同时气动。为保证气源气压稳定,选用排气量为 500 L/min,压力达 0.8 MPa 的空气压缩机,为自动连续供盘收盘系统提供压缩空气。

2.7 控制系统设计与工作原理

移栽机整机工作时,系统中各动作的执行由 PLC 控制气动元件驱动。控制器为中达优控 PLC 一体机,型号为 MM40MR-12MT-700-ES-E-COM3,程序设计原理如图 18 所示。各位置节点的微动传感器型号为 YBLXW-5/11N1。

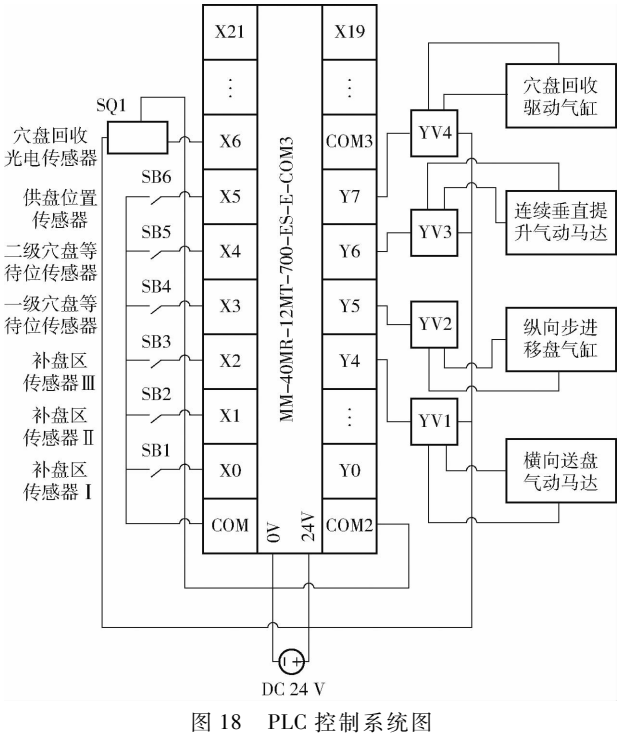


图 18 PLC 控制系统图

Fig. 18 PLC control system diagram

工作时,进盘装置向前送盘,落盘传感器 X5 触发,PLC 输出信号 Y6,电磁阀 YV3 动作,二级等待位置苗盘落入苗盘衔接装置内,取盘托取走一级等待位置苗盘,绕装置转动半周后接触到传感器 X4,延时运动 t_2 使取盘托脱离 X4 的控制,此刻定为二级苗盘等待位置。取盘托取走一级苗盘等待位置苗盘时,传感器 X3 释放补盘信号,PLC 输出信号 Y5,电磁阀 YV2 控制步进移盘气缸间歇动作,苗盘由补盘区运送到一级等待位置时传感器 X3 输出到位信号,移盘气缸停止运动。补盘区的传感器 X0、X1、X2 都处于弹开状态时,即补盘区空盘,此时 PLC 控制气动马达Ⅰ转动,输送带上的苗盘向补盘区方向进盘,补盘区传感器触发后气动马达Ⅰ延时 t_1 停止,使补盘区传感器压紧。取苗后的空穴盘落入收盘机构时,光电传感器 X6 输入信号,经 t_3 延迟,电磁阀 YV4 控制收盘气缸收缩打开开合板,穴盘落入回收腔,再经 t_4 延时,开合板复位等待收盘。

3 试验

3.1 移盘拨齿位置准确性试验

对移盘拨齿进行位置准确性试验,任选两盘满载的苗盘放置移盘平台的补盘区。试验前,标记移盘拨齿的初始位置,单次步进移盘命令需要完成 16 次往复行程,记录移盘拨齿的最终位置与初始位置的位移差。单次拨齿允许的浮动范围定义为进盘域。在进盘域内,从横向送盘机构方向过来的苗盘可顺利卡入移盘拨齿。移盘平台上苗盘存在情形(a)(图 19a)、情形(b)(图 19b)两种进盘的位置状态。

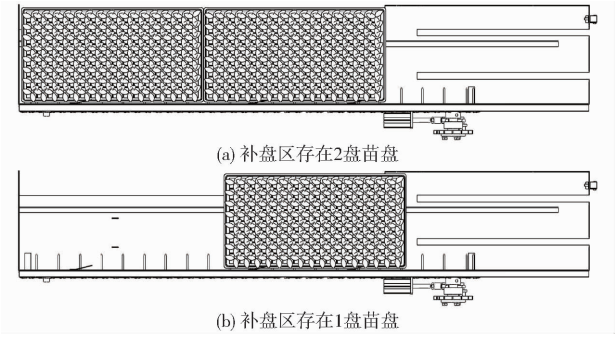


图 19 移盘平台苗盘位置情况

Fig. 19 Position of hole plate on shifting platform

允许相对偏差和相对偏差计算式为

$$\begin{cases}[E]=\dfrac{[e]}{x_0}\times 100\% \\ E=\dfrac{|x-x_0|}{x_0}\times 100\%\end{cases} \tag{14}$$

式中 $[E]$——允许相对偏差,%

E——相对偏差,%

$[e]$——允许偏差,mm

x_0——实际位移,mm

x——理论位移,mm

移盘拨齿前、后极限允许偏差[e_{yb}]为 5 mm，移盘拨齿的伸出端作磨圆处理。穴盘底部凹槽经过移盘拨齿中心线即可顺利卡入移盘拨齿，移盘拨齿单次理论移动间距为 $H_{bj}/2$，计算出移盘拨齿相对允许误差为 15.74%。将补盘区苗盘移至苗盘一级等待位置时，计算相对偏差，调整移盘气缸气压分别在 0.3、0.4、0.5 MPa 下进行试验，每个状态步进移盘试验重复 3 次，试验结果如表 3 所示，移盘拨齿相对误差最大为 14.17%，满足移盘拨齿位置控制准确性要求。

表 3　移盘拨齿位置相对偏差试验结果

Tab.3　Relative error test results of shifting lever position　%

参数	试验序号	气压/MPa		
		0.3	0.4	0.5
情形(a)移盘偏差	1	4.09	5.35	10.39
	2	0.63	3.46	14.8
	3	4.72	1.57	14.17
情形(b)移盘偏差	1	5.35	0.63	10.08
	2	0	3.46	9.76
	3	5.67	4.72	2.52
平均值		3.41	3.19	10.28

3.2　苗盘衔接连续率试验

对移栽机进行苗盘衔接连续率试验，若两苗盘衔接过程不间断视为衔接成功，连续率为 100%，若衔接过程出现间断或者两盘之间有间隔，视为衔接失败，每组供盘试验进行 30 次衔接动作。穴孔内放入螺母模拟钵苗重量进行地面苗盘衔接试验。苗盘衔接连续率 Y_c 为

$$Y_c = \frac{N_c}{N_z} \times 100\% \tag{15}$$

式中　N_c——供盘衔接成功数

N_z——试验总盘数

苗盘衔接过程中，以斜面倾斜角、进盘气压、穴底距为自变量，苗盘衔接连续率为响应值，采用 Box-Behnken 中心组合设计方案进行多因素正交试验，试验因素和编码如表 4 所示。

表 4　正交试验因素编码

Tab.4　Factors codes of orthogonal test

编码	因素		
	进盘气压/MPa	倾斜角/(°)	穴底距/mm
-1	0.3	26	4
0	0.4	27	6
1	0.5	28	8

试验方案与结果如表 5 所示，运用 Design-Expert 进行多元回归拟合分析，得出苗盘衔接连续率 Y_c 的二次多项式回归模型

$$Y_c = 96.04 - 1.24A + 2.48B - 1.24C - 5.78AB + 1.65AC + 2.48BC - 6.27A^2 - 5.45B^2 \tag{16}$$

式中　A、B、C——进盘气压、倾斜角、穴底距因素编码值

表 5　正交试验方案与结果

Tab.5　Scheme and results of orthogonal experiment

序号	因素			苗盘衔接连续率/%
	A	B	C	
1	0	0	0	96.7
2	0	1	1	93.4
3	-1	0	-1	93.4
4	0	0	0	93.4
5	0	-1	-1	90.1
6	0	0	0	96.7
7	0	1	-1	90.1
8	-1	-1	0	76.9
9	0	0	0	96.7
10	-1	0	1	86.8
11	1	0	-1	86.8
12	-1	1	0	93.4
13	1	0	1	86.8
14	1	-1	0	86.8
15	0	0	0	96.7
16	0	-1	1	83.5
17	1	1	0	80.2

方差分析如表 6 所示。对正交试验结果进行显著性方差分析，苗盘衔接连续率 Y_c 回归模型的 P 值小于 0.000 1，说明模型极显著，失拟项 P 值大于 0.05，说明失拟项不显著，回归模型拟合效果较好，能正确反映苗盘衔接连续率 Y_c 与进盘气压 A、倾斜

表 6　苗盘衔接连续率方差分析

Tab.6　Analysis of variance for continuity rate of seedling trays

来源	平方和	自由度	均方和	P
模型	565.095	9	62.788	<0.000 1 **
A	12.251	1	12.251	0.029 0 *
B	49.005	1	49.005	0.000 9 **
C	12.251	1	12.251	0.029 0 *
AB	133.403	1	133.403	<0.000 1 **
AC	10.890	1	10.890	0.036 4 *
BC	24.503	1	24.503	0.006 1 **
A^2	165.528	1	165.528	<0.000 1 **
B^2	124.834	1	124.834	<0.000 1 **
C^2	7.336	1	7.336	0.071 8
残差	11.435	7	1.634	
失拟项	2.723	3	0.908	0.751 0
误差	8.712	4	2.178	
总计	576.529	16		

注：* 表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)；** 表示极显著($P < 0.01$)。

角 B、穴底距 C 之间的关系。

使用 Design-Expert 中的 optimization 功能，以苗盘衔接连续率最大为评价指标。优化函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_c(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

经求解，当进盘气压为 0.37 MPa，落盘倾斜角为 27.29°、穴底距为 5.26 mm 时，苗盘衔接连续率达 96.81%，供盘工作性能最优。

探究交互作用对苗盘衔接连续率的影响，通过优化后的回归方程可知，对苗盘衔接连续率影响最大的因素为倾斜角，进盘气压与穴底距对苗盘衔接连续率的影响程度较弱。利用 Design-Expert 进行试验数据分析，通过 Orign 绘制 3D 交互响应面，如图 20 所示。

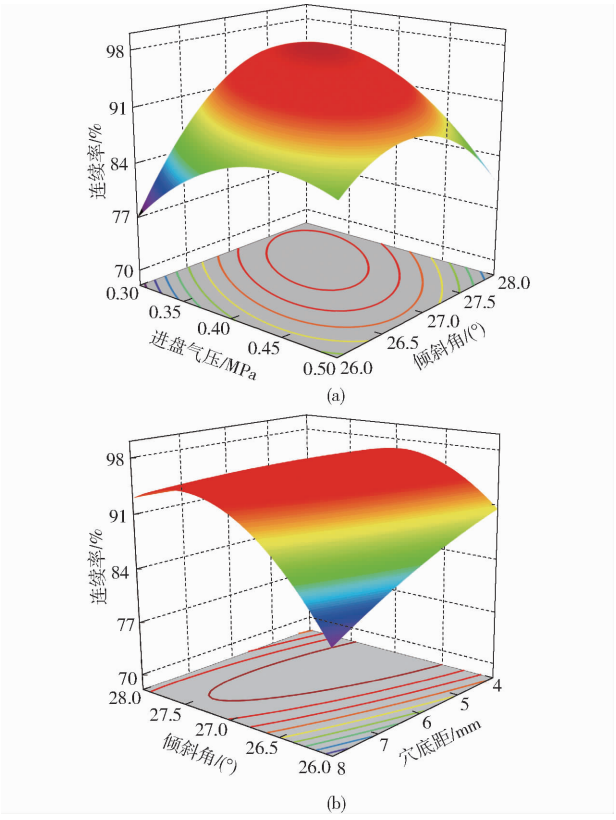


图 20 各因素交互作用的响应曲面

Fig. 20 Response surfaces of interaction of various factors

如图 20a 所示，倾斜角取任一水平时苗盘衔接连续率随着进盘气压的增大先增大后减小，区别在于同进盘气压的情况下响应值产生了明显的差异。如图 20b 所示，穴底距取任一水平值苗盘衔接连续率随倾斜角的减小先增大后减小，区别是在穴底距为 8 mm 时，苗盘衔接连续率减小的坡度明显，穴底距为 4 mm 时苗盘衔接连续率减小的坡度较缓。

3.3 叠盘成功率试验

测定穴盘回收的叠盘成功率，基质残留以及穴盘破损导致穴盘的回收无法紧密配合，回收穴盘间隙大于 5 mm 则视为叠放不整齐。不整齐的叠盘达到一定高度时存放稳定性降低，同时穴内基质挤压会损伤穴盘。在室内进行 100 盘空穴盘回收试验，出现 3 盘基质无法及时清除干净导致落盘不整齐，盘下落位置未触发收盘气缸，整体收盘成功率达 99%，收盘整齐率达 97%。

3.4 田间试验结果与分析

为综合考察移栽机优化试验准确性，2023 年 9 月 20 日在山东省德州市福瑞特农业机械制造有限公司进行田间试验（图 21）。试验前，对试验地进行旋耕作业保证土壤疏松平整。采取上述较优参数开展验证试验，考虑到实际试验可操作性，根据 GB/Z 26583—2011《辣椒生产技术规范》本试验采用春季栽培，栽植株距为 20 ~ 23 cm，小行距为 50 cm，大行距为 70 cm，每公顷栽植 35 × 15 ~ 45 × 15 盘辣椒苗。连续作业 40 盘，进盘气压选择 0.4 MPa，气动马达气压选择 0.7 MPa，落盘倾斜角选择 27°，穴底距为 5 mm，苗盘衔接连续率为 95%，叠盘成功率为 100%，苗盘衔接连续率、叠盘成功率与回归模型分别相差 1.81 个百分点和 1 个百分点，试验与优化结果基本一致，满足移栽机连续供盘与收盘的作业要求。



图 21 田间试验

Fig. 21 Field trial

试验中 40 盘苗盘仅出现 2 盘衔接不流畅的情况，机器后方检验人员监控程序运行的同时，可应对出现的突发情况，不影响供盘作业连续性，田间试验过程中机器运行产生的振动有利于收盘动作的整齐回收。

4 结论

（1）基于多传感器融合位置感应设计了移栽机苗盘苗连续供盘与收盘系统，实现了各苗盘的位置监测和有序衔接，以及穴盘回收的协调控制。连续垂直取落盘装置可解决空间不同高度苗盘的转移。提出一种双开合收盘方法，利用双气缸同步控制收盘开合板使得空穴盘稳定落入穴盘放置腔，实现整齐有序的叠起。

（2）构建苗盘衔接过程的运动方程，通过仿真

软件 RceurDyn 分析了影响苗盘衔接过程的关键因素，确立了实现苗盘连续衔接的条件。Design-Expert 以衔接连续率为评价指标，得出二次多项式回归模型，通过正交试验方差分析与响应面分析得出最优工作参数为：进盘气压 0.37 MPa，落盘倾斜角 27.29°，穴底距 5.26 mm。

（3）采用 128 穴标准苗盘为试验对象，满足移栽机最高栽植效率的条件下使用最优参数组合进行田间试验，试验结果表明：控制系统运行正常，实现有序供盘和稳定落盘功能，栽植效率达 128 株/min 时，苗盘衔接连续率不小于 95%，叠盘成功率不小于 99%，满足移栽机自动连续送盘收盘的要求。

参 考 文 献

[1] 崔志超，管春松，杨雅婷，等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报，2020，41(3)：85－92.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, YANG Yating, et al. Research status of vegetable mechanical transplanting technology and equipmen[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 85－92. (in Chinese)

[2] 俞高红，王磊，孙良，等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：1－20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1－20. (in Chinese)

[3] 吕志军，单伊尹，王杰，等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报，2017，38(11)：30－34.
LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seedling-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 30－34. (in Chinese)

[4] 于晓旭，赵匀，陈宝成，等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报，2014，45(8)：44－53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44－53. (in Chinese)

[5] 华琛. 自动移栽机移箱系统设计及运动控制技术研究[D]. 镇江：江苏大学，2018.
HUA Chen. Research on design and motion control technology of automatic shifting machine box system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)

[6] 韩长杰，肖立强，徐阳，等. 辣椒穴盘苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(13)：20－29.
HAN Changjie, XIAO Liqiang, XU Yang, et al. Design and experiment of the automatic transplanter for chili plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 20－29. (in Chinese)

[7] 龙新华，韩长杰，张静，等. 穴盘苗自动移栽机苗盘进给装置的设计与试验[J]. 农机化研究，2022，44(2)：103－107，113.
LONG Xinhua, HAN Changjie, ZHANG Jing, et al. Design and test of the feeding device of the automatic transfer machine of the cave seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(2): 103－107, 113. (in Chinese)

[8] 那明君，滕乐，周振响，等. 全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(9)：54－61.
NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Zhenxiang, et al. Design and experiment of fully automatic slide-track type dryland pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 54－61. (in Chinese)

[9] 张妮，张国忠，王姣，等. 旱地作物机械化移栽关键技术研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报，2022，43(8)：22－31.
ZHANG Ni, ZHANG Guozhong, WANG Jiao, et al. Research status and development trend of upland crops mechanized transplanting key technologies[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 22－31. (in Chinese)

[10] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182(1): 106017.

[11] HU S Y, HU M J, WEI Y, et al. Design and experiment of an integrated automatic transplanting mechanism for picking and planting pepper hole tray seedlings[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 557.

[12] JIN X, CHENG Q, ZHAO B, et al. Design and test of 2ZYM－2 potted vegetable seedlings transplanting machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 101－110.

[13] 金鑫，杜新武，杨传华，等. 蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(7)：103－111.
JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on automatic transporting mechanism for vegetable potted seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 103－111. (in Chinese)

[14] 任玲，曹卫彬，马锐，等. 送盘机构位移误差检测及控制系统研究[J]. 农机化研究，2019，41(6)：88－92，103.
REN Ling, CAO Weibin, MA Rui, et al. Detection of seeding tray displacement error and research of control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 88－92, 103. (in Chinese)

[15] 梁高震，黄勇，胡斌，等. 移栽机自动送盘机构性能的试验研究[J]. 农机化研究，2018，40(10)：145－148，153.
LIANG Gaozhen, HUANG Yong, HU Bin, et al. Experimental study on the performance of the automatic sending mechanism of transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 145－148, 153. (in Chinese)

[16] 王超，李永磊，宋建农，等. 气动下压式高速移栽机自动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(3)：114－125.
WANG Chao, LI Yonglei, SONG Jiannong, et al. Design and test of automatic control system of pneumatic ejecting type high-

speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):114 – 125. (in Chinese)

[17] 王超,刘彩玲,李永磊,等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):35 – 43,51.
WANG Chao,LIU Cailing,LI Yonglei,et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):35 – 43,51. (in Chinese)

[18] 祝嗣朔,袁挺,文永双,等. 全自动移栽机穴盘回收机构设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(2):172 – 176.
ZHU Sishuo,YUAN Ting,WEN Yongshuang,et al. Design and test of hole tray recovery mechanism of automatic transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(2):172 – 176. (in Chinese)

[19] 马振,胡斌,李俊虹. 移栽机自动化送盘装置的关键部件及送盘方法的设计分析[J]. 农机化研究,2017,39(1):68 – 71.
MA Zhen,HU Bin,LI Junhong. Design and analysis of key components of the automatic feeding device for seedling transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(1):68 – 71. (in Chinese)

[20] 杨传华,方宪法,杨学军,等. 基于 PLC 的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊):19 – 23,18.
YANG Chuanhua, FANG Xianfa, YANG Xuejun, et al. Automatic delivery mechanism of potted-seedling for vegetable transplanter based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.):19 – 23,18. (in Chinese)

[21] 赵英杰,马振,陈永,等. 移栽机自动进给机构的设计研究[J]. 农机化研究,2018,40(7):68 – 71,76.
ZHAO Yingjie,MA Zhen,CHEN Yong,et al. Study and design on the automatic feeding device of transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(7):68 – 71,76. (in Chinese)

[22] 姚梦娇,胡建平,刘伟,等. 基于区间分析的自动移栽机苗盘定位控制方法[J]. 农业工程学报,2023,39(4):27 – 36.
YAO Mengjiao,HU Jianping,LIU Wei,et al. Positioning control method for the seedling tray of automatic transplanters based on interval analysis[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(4):27 – 36. (in Chinese)

[23] JI J, YANG L, JIN X,et al. Design of intelligent transplanting system for vegetable pot seedling based on PLC control[J]. J. Intell. Fuzzy Syst., 2019, 37:4847 – 4857.

[24] DU X, YUN Z, JIN X, et al. Design and experiment of automatic adjustable transplanting end-effector based on double-cam [J]. Agriculture, 2023, 13(5): 987.

[25] YUE R, HU J, LIU Y, et al. Design and working parameter optimization of pneumatic reciprocating seedling-picking device of automatic transplanter[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 1989.

[26] SRI M, HWANG S J, NAM J S. Experimental safety analysis of transplanting device of the cam-type semi-automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Terramechanics, 2022, 103: 19 – 32.

[27] JIN X, LI M, LI D, et al. Development of automatic conveying system for vegetable seedlings[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018(1): 1 – 9.

[28] PARADKAR V, RAHEMAN H, RAHUL K. Development of a metering mechanism with serial robotic arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 5: 52 – 63.

[29] KHADATKAR A, MATHUR S M. Design and development of an automatic vegetable transplanter using a novel rotating finger device with push-type mechanism for plug seedlings[J]. International Journal of Vegetable Science, 2022, 28(2): 121 – 131.