

# 移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗系统设计与试验

韩长杰<sup>1,2</sup> 李德生<sup>1</sup> 徐阳<sup>1,2</sup> 陈蒙<sup>1</sup> 石岩<sup>1,2</sup> 袁盼盼<sup>1,2</sup> 毛罕平<sup>1,3</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农机装备工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052;  
3. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为解决辣椒钵苗全自动移栽机因穴盘缺苗造成的漏栽问题,通过分析移栽机分苗作业过程,提出了2组苗筒独立驱动,落苗位空杯递补的分苗作业方式,设计了双组苗筒电驱共轨式分苗机构。2组苗筒运行轨迹相同,第1组苗筒在静态接苗的同时,第2组苗筒仍可正常完成落苗动作或执行空杯递补操作,确保栽植器鸭嘴始终有钵苗连续落入。选定光纤识别传感器进行钵苗检测,基于PLC构建自动控制系统,实时采集传感器输出信号并依据二值化阈值判定空杯状态,触发执行机构加速运动,完成空杯递补操作。以取投苗频率、供气压力、检补功能开启状态为试验因素,以取投苗失败率和栽植器鸭嘴接苗率为评估指标进行试验,确定了优选参数组合并进行田间试验。结果表明:当取投苗频率为120株/min、供气压力0.4 MPa时,关闭检补功能,平均栽植器鸭嘴接苗率为86.46%,开启检补功能,平均栽植器鸭嘴接苗率为98.27%,栽植器鸭嘴接苗率显著提升。研究结果可为辣椒钵苗移栽机分苗装置设计提供参考。

**关键词:** 移栽机; 钵苗检测; 空杯递补; 分苗机构

中图分类号: S223.9      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2026)04-0162-10      OSID: 

## Design and Experiment of Transplanter Electric Drive Double Group Seedling Cup Common Rail Type Separating Seedling System

HAN Changjie<sup>1,2</sup> LI Desheng<sup>1</sup> XU Yang<sup>1,2</sup> CHEN Meng<sup>1</sup> SHI Zhai<sup>1,2</sup> YUAN Panpan<sup>1,2</sup> MAO Hanping<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China  
2. Xinjiang Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering and Technology Research Center, Urumqi 830052, China  
3. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Aiming to address the seedling leakage issue caused by missing seedlings in fully automatic pepper tray seedling transplanters, the seedling separation process of the transplanter was analyzed and a dual-seedling cylinder independent drive system with empty-cell replenishment for seedling separation was proposed, aiming to minimize missed planting. An electric drive double group seedling cup common rail type separating seedling system was designed. The two sets of seedling cylinders operated on identical trajectories. While one set remained stationary to receive seedlings, the other set can continue performing seedling-dropping operations or execute empty-cell replenishment tasks, ensuring a continuous supply of seedlings to the planting device's duckbill mechanism. An optical fiber identification sensor was selected for seedling absence detection, and a PLC-based automatic control system was established to acquire the sensor output signals in real time. Based on the determination of the empty-cell state derived from a binary threshold algorithm, the system triggered the actuator to initiate accelerated motion for empty-cell replenishment operations. With planting frequency, air supply pressure, and the status of the detection and compensation function (on/off) as experimental factors. The trial evaluated transplant failure rates and duckbill seedling reception rates of the planting device to identify optimal parameter combinations, followed by field validation. Results showed that under the combination of 120 plants per minute planting

收稿日期: 2025-06-20    修回日期: 2025-09-22

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2023B02021-2)、国家自然科学基金项目(50905153、51565059)、新疆维吾尔自治区蔬菜产业技术体系项目(XJARS-07-06)、新疆维吾尔自治区“天山英才”青年拔尖人才培养项目(2024TSYCCX0035)和新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2025G118)

**作者简介:** 韩长杰(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: hej\_627@163.com

**Key words:** transplanter; plug seedling detection; empty cup refills; seedling separation mechanism

如图2所示,用2种颜色区分2组苗筒及链轮链条,红色为第1组苗筒,蓝色为第2组苗筒,分别由2个步进电机驱动。取苗爪初始位置位于第1排钵苗正上方。系统启动后,第1组苗筒运动至接苗

位  $A$ 、 $B$  处,第 1 个苗杯触碰固定在接苗位  $B$  的行程开关后停止运动。取苗爪闭合,整排夹紧 8 株钵苗,纵向移动横向展开至接苗位第 1 组苗筒正上方,取苗爪松开,钵苗落入苗杯中,完成 1 次取投苗动作。电机带动第 1 组苗筒运行,直至其触碰固定在苗筒落苗位点  $C$  的行程开关,随后停止运动,同时,第 2 组苗筒运行至接苗位  $A$ 、 $B$  处进行接苗。

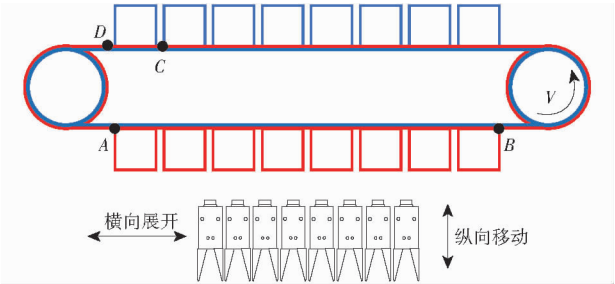


图 2 分苗机构工作原理图  
Fig. 2 Seedling separation structure working principle diagram

苗筒落苗处下方固定栽植器检测开关,栽植器检测开关每触发 1 次,电机带动落苗处苗筒向前运动 1 个苗杯位,钵苗落入栽植器鸭嘴中。苗筒落苗处上方固定光纤传感器,检测苗杯中是否存在钵苗。光纤传感器检测有苗,则第 1 组苗筒等待栽植器鸭嘴触碰栽植器检测开关进行落苗,若检测空杯,则电机带动第 1 组苗筒在下 1 个栽植器鸭嘴到达栽植器检测开关前,快进 1 个苗杯位,实现空杯递补操作,苗杯组每运动 1 个苗杯位后光纤传感器重复进行空杯检测。第 2 组苗筒完成接苗后,加速运动到第 1 组苗筒的末端苗杯位置,随后同第 1 组苗筒同步运动,防止 2 组苗筒发生碰撞。当固定在点  $C$  的光电传感器检测到 8 个苗杯后,电机带动第 1 组苗筒加速运行至接苗位进行接苗。第 2 组苗筒重复第 1 组苗筒落苗动作,2 组苗筒重复不间断运行,互不干扰,能在高速移栽过程中进行空杯递补,共同完成移栽任务。

2 关键部件设计

2.1 共轨式分苗机构设计

移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗机构需要满足精准、高效、稳定分苗等要求。在不同栽植频率工况下,均需实现快速且精准分苗作业。为实现空杯递补操作,分苗机构需具备变速能力,并与栽植器鸭嘴接苗周期保持精准匹配,确保接苗环节可靠性,最终提升整体移栽效率和质量。

为提升栽植器鸭嘴接苗率并有效降低投苗失败率,在同一运行轨迹上设置 2 组分苗组件,通过阶梯轴固定 2 组链轮,上下 2 层布置,一组苗筒落苗的同

时不影响另一组苗筒静态接苗。每组分苗组件上安装 8 个苗杯,共轨式分苗机构如图 3 所示。

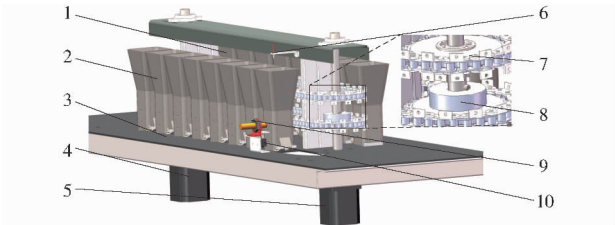


图 3 共轨式分苗机构示意图  
Fig. 3 Schematic of common rail seedling structure  
1. 第 2 组苗筒 2. 第 1 组苗筒 3. 分苗托板 4. 电机 1 5. 电机 2  
6. 光纤传感器 7. 从动链轮 8. 主动链轮 9. 光电传感器 10. 行程开关

2 组苗筒分别由上下 2 层独立的链轮链条进行驱动控制,其阶梯轴采用对称式配置:一组以上链轮作为主动轮,下链轮作为从动轮;另一组则采用上从动、下主动的布置方式。通过上下 2 层布置,2 组苗筒在运行过程中互不干涉。整个传动系统动力源为下方步进电机,为阶梯轴上的链轮提供动力输入。PLC 控制器实时采集光电传感器、光纤传感器及行程开关信号,动态调节分苗速度。当检测到空苗杯时,PLC 将控制对应苗筒的步进电机在栽植器鸭嘴抵达落苗位前,加速运动一个苗杯间距,自动执行空杯递补操作,实现每个栽植器鸭嘴中均落入钵苗,减少栽植器鸭嘴因无苗导致的漏栽情况。

考虑到整机尺寸及空间利用率问题,对苗杯布置结构进行设计,如图 4 所示。通过计算苗杯布置结构长度  $L$ 、宽度  $b$ ,确定分苗机构最终尺寸。

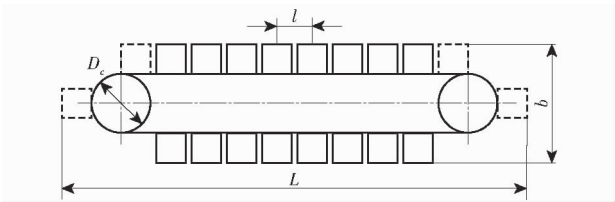


图 4 苗杯布置结构示意图  
Fig. 4 Schematic of seed cup layout structure

苗杯杯口尺寸  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ ,链传动使用滚子链 10A 系列,节距  $15.875\text{ mm}$ ,齿数选择 25,苗杯固定在链节上,苗杯与苗杯之间的链节数为偶数,则

$$\begin{cases} 4p \leq 80 \leq 6p \\ l = 6p \end{cases} \quad (1)$$

式中  $p$ ——链轮节距,mm  
 $l$ ——苗杯与苗杯之间距离,mm

由式(1)可得,4 个链节距离为  $63.5\text{ mm}$  小于苗杯杯口尺寸,基于上述分析,苗杯与苗杯之间距离为  $95.25\text{ mm}$ 。为实现变速分苗完成空杯递补,机构布

置需解决一组苗筒加速时可能与另一组苗筒发生运动干涉问题。基于 2 组苗筒极限运动分析,将 2 阶梯轴轴距设计为 10 个苗杯位。该布局确保在执行递补操作过程中,执行递补操作的苗筒与前置苗筒始终保持非接触运动状态。分苗机构布置尺寸  $L$ 、 $b$  计算式为

$$\begin{cases} L = 9l + D_c + 240 \\ b = D_c + 160 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $D_c$ ——机构回转直径,mm

传动件回转直径等于链轮分度圆直径与滚子中心到苗杯固定点距离之和,传动件回转直径计算式为

$$D_c = D + D_b \quad (3)$$

其中  $D = \frac{P}{\sin \frac{180^\circ}{z}} \quad (4)$

式中  $D$ ——链轮分度圆直径,mm

$D_b$ ——滚子中心与固定点距离,mm

$z$ ——链轮齿数

滚子中心到苗杯固定点之间距离为 10.22 mm,联立式(2)~(4)可得共轨式分苗机构长度  $L$  为 1 234.13 mm,宽度  $b$  为 296.88 mm。

2.2 驱动系统设计

2.2.1 苗杯底部参数计算

分苗装置中,苗杯与链条采用螺栓联接,通过链轮旋转运动驱动苗杯沿既定轨迹移动,实现分苗作业。分苗机构由 2 组独立链条构成,每组链条固定 8 个苗杯。苗杯选用结构稳定、可靠性高的成熟通用件。苗杯在运动至非落苗位时,其底盖由分苗托板提供支撑,此时,苗杯内部圆柱扭转弹簧处于被压缩状态,弹簧力迫使苗杯底盖与分苗托板产生摩擦力;当运动至落苗位,底盖失去分苗托板支撑,内部圆柱扭转弹簧迅速回弹,底盖打开。苗杯底盖打开时圆柱扭转弹簧受力分析如图 5 所示。

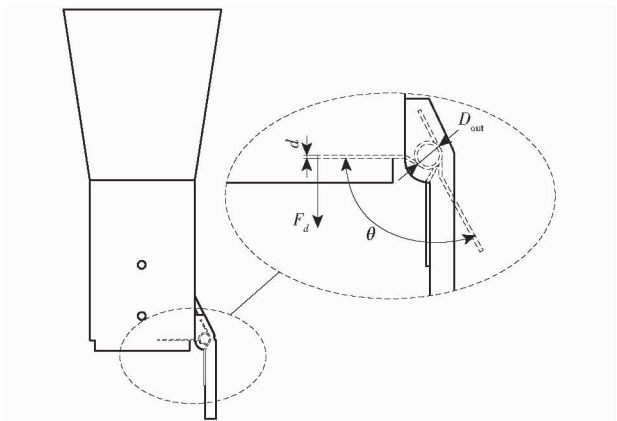


图 5 圆柱扭转弹簧受力分析图

Fig. 5 Force analysis diagram of cylindrical torsion spring

圆柱扭转弹簧转矩与扭转角关系式为

$$T_N = \frac{EI\theta}{L_N} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} I = \frac{\pi d^4}{64} \\ L_N = \pi D_N N_l \end{cases} \quad (6)$$

式中  $T_N$ ——圆柱扭转弹簧转矩, N·mm

$E$ ——材料弹性模量, MPa

$I$ ——簧丝截面惯性矩, mm<sup>4</sup>

$d$ ——簧丝直径, mm

$D_N$ ——圆柱扭转弹簧中径, mm

$N_l$ ——圆柱扭转弹簧有效圈数

$\theta$ ——扭转角度, (°)

$L_N$ ——圆柱扭转弹簧有效长度, mm

弹簧中径  $D_N = D_{out} - d$ , 根据设计要求圆柱扭转弹簧材料为 65Mn 钢, 其弹性模量约为  $2 \times 10^5$  MPa, 簧丝直径为 0.8 mm, 扭转角度为 120°, 有效圈数 14 圈, 弹簧外径  $D_{out}$  为 7.50 mm。

圆柱扭转弹簧施加于底盖的作用力为

$$F_d = \frac{T_N}{L_c} \quad (7)$$

式中  $F_d$ ——圆柱扭转弹簧施加于底盖的力, N

$L_c$ ——力臂长度, mm

苗杯底部与分苗托板摩擦力计算式为

$$F_{fric} = \mu F_N \quad (8)$$

其中

$$F_N = F_d + G_m \quad (9)$$

式中  $F_{fric}$ ——负载摩擦力, N

$\mu$ ——动摩擦因数

$G_m$ ——钵苗重量, N

$F_N$ ——物体对分苗托板的正压力, N

联立式(5)~(7)得  $F_d$  为 0.476 N。由于苗杯与链条螺栓联接, 且未安装圆柱扭转弹簧时, 苗杯底盖与分苗托板刚好接触无相互作用力。物料试验测得辣椒钵苗平均重量  $G_m$  为 0.092 N, 单个苗杯平均重量  $G_b$  为 1.64 N。因此, 在安装圆柱扭转弹簧后, 圆柱扭转弹簧施加于底盖的力与钵苗重量之和, 共同构成  $F_N$ , 物体与分苗托板动摩擦因数取 0.3<sup>[31]</sup>。根据式(8)、(9)可得 1 个苗杯底盖与分苗托板摩擦力为 0.170 N。

2.2.2 链轮驱动转矩计算

链轮节距为 15.875 mm, 齿数为 25, 链轮质量  $m_L$  为 1.25 kg, 根据上述结构布置, 通过图 6 得单个苗杯对链条力  $F_L$  为

$$F_L = G_b + G_m - F_d \quad (10)$$

由式(10)可得单个苗杯对链条的作用力为 1.256 N。10A 型链节, 其链条总重量  $G_s$  为 20.864 N,

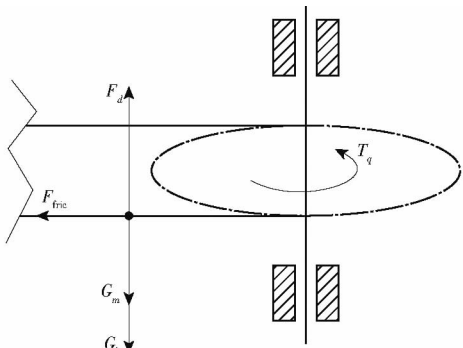


图 6 固定点受力分析图

Fig. 6 Force analysis diagram of fixed point

1 组链条上固定安装有 8 个苗杯,链条及其负载与链轮间的摩擦力转矩计算式为

$$T_f = F_f r \tag{11}$$

其中  $F_f = (G_s + 8F_L)\mu$  (12)

式中  $F_f$ ——链条及负载对链轮的摩擦力,N  
 $T_f$ ——链条及负载对链轮摩擦力转矩,N·mm  
 $r$ ——链轮半径,mm

链轮与链条之间的动摩擦因数取 0.15,因此链轮总摩擦转矩计算式为

$$T_z = \sum_{i=1}^n T_i + T_f \tag{13}$$

其中  $T_i = F_i r_i$  (14)

式中  $T_i$ ——第  $i$  个与平台摩擦力产生的转矩,N·mm  
 $F_i$ ——第  $i$  个负载摩擦力,N  
 $r_i$ ——第  $i$  个负载力臂长度,mm  
 $T_z$ ——链轮总摩擦力转矩,N·mm

每个负载相对于链轮中心的距离为负载力臂长度,由式(11)~(14)得链轮总摩擦力转矩为 2.74 N·m。

为实现检补功能,在传感器检测到空杯时,链轮需执行加速运动。取投苗频率为 120 株/min,链轮在落苗位每 0.5 s 转动 1 个苗杯距离,此时链轮转速为 33.8 r/min。当光纤传感器连续识别到 2 个空苗杯,链轮需在 0.5 s 内移动距离为 190.5 mm,瞬时转速为 54.3 r/min,故链轮、链条及负载转动惯量计算式为

$$\begin{cases} J_L = \frac{1}{2} m_L r^2 \\ J_F = m_F r^2 \end{cases} \tag{15}$$

式中  $J_L$ ——链轮转动惯量,kg·mm<sup>2</sup>  
 $J_F$ ——链条及负载转动惯量,kg·mm<sup>2</sup>  
 $m_F$ ——链条及负载质量,kg

链轮加速过程中总惯性转矩计算式为  $T_G = (J_L + J_F) \alpha$  (16)

其中  $\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$  (17)

式中  $T_G$ ——总惯性转矩,N·mm  
 $\alpha$ ——角加速度,rad/s<sup>2</sup>  
 $\Delta \omega$ ——角速度变化量,rad/s  
 $\Delta t$ ——时间变化量,s

链轮总驱动转矩计算式为  $T_s = (T_G + T_z) K_A$  (18)

式中  $T_s$ ——总驱动转矩,N·mm  
 $K_A$ ——工况系数,取 2

由式(15)~(18)可得链轮加速总瞬时转矩为 7.77 N·m。

根据上述链轮总驱动转矩理论计算结果,结合移栽机作业环境与经济性,选用 86HSE8.5N 型闭环步进电机,额定转矩为 8.5 N·m。

3 控制系统设计

3.1 控制系统总体设计

移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗控制系统由缺苗检测模块和运动控制模块组成,两者配合能够快速准确地完成空杯递补。系统配备人机交互界面,用于控制移栽机检补功能启停、调节栽植频率并记录空杯数据。移栽机分苗控制系统作为整机核心控制单元,具备空苗杯状态实时检测与步进电机驱动分苗两项关键功能。该系统采用 PLC 控制器实现对共轨式分苗系统的控制<sup>[32]</sup>。

3.2 检测点高度设计

在缺苗检测模块中,传感器选型对检测精度具有决定性影响。为验证不同传感器检测效果,制作试验平台进行对比。根据装置结构要求,试验选用株高为 160~200 mm 的辣椒钵苗作为检测对象。结果表明,光电传感器在空杯检测过程中识别准确性较低,其检测空杯数与实际空杯数存在较大偏差;而光纤传感器检测空杯数与实际空杯数基本保持一致,识别较为准确,基于上述分析,采用光纤传感器作为缺苗检测模块核心传感元件。

光纤传感器安装高度需综合考虑辣椒钵苗高度、苗杯结构参数及光纤传感器检测特性等因素。为确定最优安装高度,搭建光纤传感器安装高度检测试验平台。将苗杯固定于指定位置,动态调节光纤传感器垂直高度,得到光纤探头与检测平面距离关系如图 7 所示。

由图 7 可知,随着光纤探头高度增加,其形成的光斑直径呈线性增大趋势。在空杯状态下,光纤传感器输出值较小,且随光纤探头高度增加呈递减趋势,当检测距离超过 60 mm 后,输出值为 0;在有苗状态下,输出值初始值较高,随后随光纤探头高度增加逐渐降低。

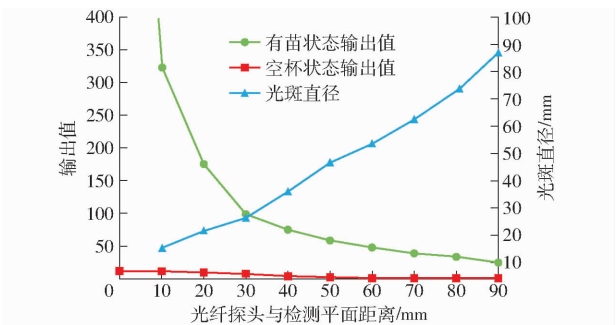


图 7 光纤传感器不同高度检测特性

Fig. 7 Test results of optical fiber sensors at different heights

由于苗杯高度为 190 mm,辣椒钵苗株高为 160 ~ 200 mm,同时兼顾光纤探头不能影响苗杯正常运转,因此将光纤探头设定为距离苗杯口上方 20 mm 处,光纤传感器阈值设定为 40,固定位置如图 3 所示。

3.3 控制系统硬件设计

选用西门子 PLC S7-200 SMART ST 系列,CPU 模块集成了以太网接口,用于外接 Win CC 组态界面<sup>[33]</sup>。电驱双组苗筒共轨式分苗控制系统由电机、驱动器、传感器和西门子 PLC 控制器组成,使用西门子 SMART 700 IE V4 显示屏搭载 Win CC 实现与 PLC 的通信。

系统采用 6-EVF-38.2 型蓄电池为 HBS86H 型步进电机驱动器供电,并通过 DC+48V 转 DC+24V 的变压器进行降压,为 PLC、传感器、显示屏供电。PLC 控制系统硬件功能如图 8 所示。

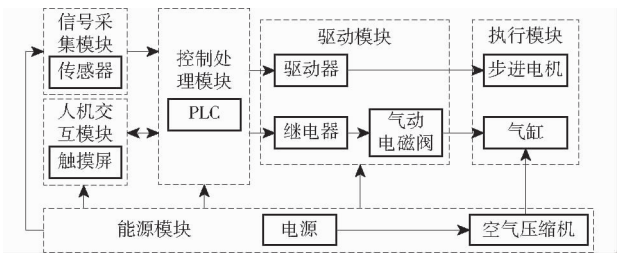


图 8 控制系统硬件框图

Fig. 8 Control system hardware block diagram

3.4 控制系统软件设计

控制系统由气动程序、驱动程序、复位程序、检补程序 4 部分组成。气动程序可控制取苗爪气缸、升降气缸、送盘气缸、移位气缸的协同运动,完成取投苗动作。驱动程序控制分苗过程,通过改变电机转速达到改变分苗速度。

复位程序功能是当整机运转过程出现异常情况使移栽机各部件恢复至初始位置。检补程序功能是在落苗位进行苗杯有无钵苗检测,将检测信号传递给 PLC,通过二值化阈值进行判定,当判定落苗位苗杯为空杯状态,系统触发执行机构加速运动,直至传感器检测到苗杯内存在钵苗,随即停止递补动作并进入待落苗状态,能够实现栽植器鸭嘴中始终有钵苗落入。整机控制流程如图 9 所示。

3.5 控制系统气路设计

采用气缸作为取投苗机构运动驱动元件,其动作由电磁阀控制,气路原理如图 10 所示。

取投苗机构配置 4 个三位五通电磁阀,其中多

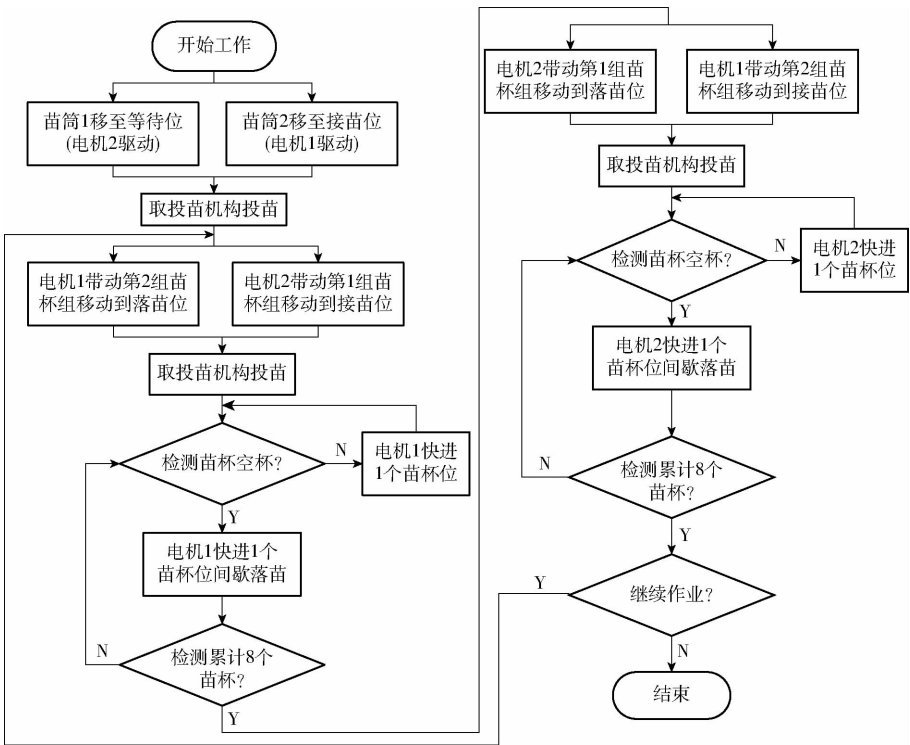


图 9 控制程序流程图

Fig. 9 Flowchart of control program

个气缸同步动作由同一个电磁阀进行集中控制。取投苗装置中的气动元件包括驱动取苗爪夹取钵苗夹苗气缸 A、将钵苗从穴盘中提起的升降气缸 B、驱动穴盘前进 1 排送盘气缸 C 以及将钵苗从穴盘上方移动到苗杯上方移位气缸 D。自动取投苗装置为整排取投苗,采用 1 个电磁阀控制 8 个夹苗气缸,KA<sub>1</sub>、KA<sub>5</sub>控制 8 个取苗爪同时夹苗与投苗。升降气缸左右对称布置,KA<sub>2</sub>、KA<sub>5</sub>控制升降气缸的抬起与降落,KA<sub>3</sub>、KA<sub>6</sub>控制送盘气缸将穴盘向前移动 1 排。KA<sub>4</sub>、KA<sub>6</sub> 控制移位气缸将取苗爪移动到苗杯正上方。

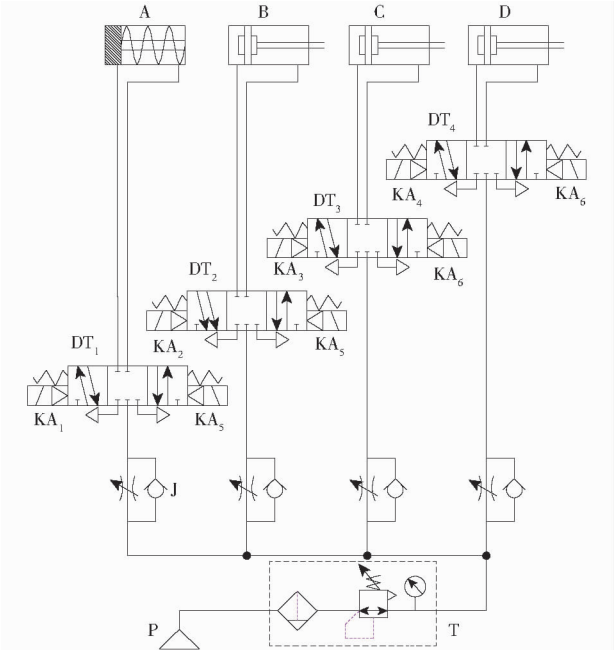


图 10 气路原理图  
Fig. 10 Airway diagram

4 样机试验

4.1 共轨式分苗系统试验

4.1.1 试验条件

为了验证移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗系统的检补功能,并以较少的试验次数寻求较优参数组合,试制样机开展正交试验。试验材料为 128 穴辣椒钵苗,且穴盘无空穴。为消除初始阶段系统稳定性影响,试验取连续转动 40 个栽植器鸭嘴作为观测样本,统计各栽植器鸭嘴中落入钵苗数量,重复 3 次取平均值。

4.1.2 试验指标与因素

以取投苗失败率、栽植器鸭嘴接苗率为试验指标。取投苗失败率为取苗爪未成功取苗的概率与未成功将钵苗投入苗杯的概率之和,栽植器鸭嘴接苗率为在连续转动的栽植器鸭嘴内,成功落入钵苗的概率。取投苗失败率与栽植器鸭嘴接苗率计算式为

$$\begin{cases} Q = \frac{R}{S} \times 100\% \\ N = \frac{U}{F} \times 100\% \end{cases} \quad (19)$$

式中 Q——取投苗失败率,%  
S——钵苗总数,个  
R——取投苗失败数,个  
N——栽植器鸭嘴接苗率,%  
U——栽植器鸭嘴成功落入钵苗数,个  
F——栽植器鸭嘴连续转动数,个

预试验结果表明,当取投苗频率为 140 株/min 时效果较差,当取投苗频率为 80 ~ 120 株/min 时具有较好的取投苗效果且栽植器鸭嘴接苗率较高。因此,正交试验选取取投苗频率为 80、100、120 株/min 3 个水平。气动执行单元供气压力直接影响气缸动作与振动情况,压力变化会导致气缸运动速率改变,影响投苗稳定性;同时,过高的压力会导致钵苗损伤。因此在取苗爪夹持区域加装柔性海绵垫片基础上,将供气压力设为 0.4、0.5、0.6 MPa 3 个水平。移栽机检补功能开启状态选取开启和关闭检补功能 2 个水平。试验因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平  
Tab. 1 Factors and levels of experiment

| 水平 | 因素                                |               |                |
|----|-----------------------------------|---------------|----------------|
|    | 取投苗频率<br>A/(株·min <sup>-1</sup> ) | 供气压力<br>B/MPa | 检补功能开启<br>状态 C |
| 1  | 80                                | 0.4           | 开启             |
| 2  | 100                               | 0.5           | 关闭             |
| 3  | 120                               | 0.6           |                |

4.1.3 试验结果与分析

选用 L<sub>18</sub>(2×3<sup>7</sup>) 混合型正交表进行试验,试验过程中,在 PLC 控制下,各执行机构协调动作,作业过程流畅。正交试验方案和结果如表 2 所示。极差分析和方差分析结果如表 3、4 所示。

由表 3、4 可知,取投苗频率与供气压力对取投苗失败率影响极显著,各因素对取投苗失败率影响的显著性顺序为 B、A、C。检补功能开启状态对栽植器鸭嘴接苗率影响极显著,取投苗频率对栽植器鸭嘴接苗率影响显著,各因素对栽植器鸭嘴接苗率影响的显著性顺序为 C、A、B。采用综合平衡法,在保证栽植器鸭嘴接苗率的基础上,尽可能降低投苗失败率、提升取投苗频率。移栽机漏栽率不大于 5%,即满足行业标准,选用较优参数组合为 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>。

4.2 田间试验

为了检验移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗系统

表 2 移栽机栽植试验方案和结果

| Tab.2 Transplanter planting test scheme and result |                              |       |    |            |             |
|----------------------------------------------------|------------------------------|-------|----|------------|-------------|
| 序号                                                 | 因素                           |       |    | 取投苗        | 栽植器鸭        |
|                                                    | A/<br>(株·min <sup>-1</sup> ) | B/MPa | C  | 失败率<br>Q/% | 嘴接苗率<br>N/% |
| 1                                                  | 80                           | 0.4   | 开启 | 2.5        | 100         |
| 2                                                  | 80                           | 0.5   | 开启 | 2.5        | 100         |
| 3                                                  | 80                           | 0.6   | 开启 | 5.0        | 100         |
| 4                                                  | 100                          | 0.4   | 开启 | 2.5        | 100         |
| 5                                                  | 100                          | 0.5   | 开启 | 2.5        | 100         |
| 6                                                  | 100                          | 0.6   | 开启 | 7.5        | 97.5        |
| 7                                                  | 120                          | 0.4   | 开启 | 5.0        | 100         |
| 8                                                  | 120                          | 0.5   | 开启 | 5.0        | 97.5        |
| 9                                                  | 120                          | 0.6   | 开启 | 7.5        | 97.5        |
| 10                                                 | 80                           | 0.4   | 关闭 | 5.0        | 97.5        |
| 11                                                 | 80                           | 0.5   | 关闭 | 2.5        | 92.5        |
| 12                                                 | 80                           | 0.6   | 关闭 | 5.0        | 92.5        |
| 13                                                 | 100                          | 0.4   | 关闭 | 5.0        | 92.5        |
| 14                                                 | 100                          | 0.5   | 关闭 | 2.5        | 95.0        |
| 15                                                 | 100                          | 0.6   | 关闭 | 5.0        | 90.0        |
| 16                                                 | 120                          | 0.4   | 关闭 | 7.5        | 90.0        |
| 17                                                 | 120                          | 0.5   | 关闭 | 5.0        | 90.0        |
| 18                                                 | 120                          | 0.6   | 关闭 | 7.5        | 87.5        |

表 3 极差分析

| Tab.3 Range analysis |    |                |                |                |      |                |
|----------------------|----|----------------|----------------|----------------|------|----------------|
| 指标                   | 因素 | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | 极差 R | 较优水平           |
| Q                    | A  | 3.75           | 4.17           | 6.25           | 2.50 | A <sub>1</sub> |
|                      | B  | 4.58           | 3.33           | 6.25           | 2.92 | B <sub>2</sub> |
|                      | C  | 4.44           | 5.00           |                | 0.56 | C <sub>1</sub> |
|                      | 主次 | B、A、C          |                |                |      |                |
| N                    | A  | 97.08          | 95.83          | 93.75          | 3.33 | A <sub>1</sub> |
|                      | B  | 96.67          | 95.83          | 94.17          | 2.50 | B <sub>1</sub> |
|                      | C  | 99.17          | 91.94          |                | 7.23 | C <sub>1</sub> |
|                      | 主次 | C、A、B          |                |                |      |                |

表 4 方差分析

| Tab.4 Range analysis |    |         |     |         |        |                           |
|----------------------|----|---------|-----|---------|--------|---------------------------|
| 指标                   | 因素 | 平方和     | 自由度 | 均方      | F      | P                         |
| Q                    | A  | 21.492  | 2   | 10.746  | 10.353 | 0.002 4 **                |
|                      | B  | 25.756  | 2   | 12.878  | 12.407 | 0.001 2 **                |
|                      | C  | 1.411   | 1   | 1.411   | 1.359  | 0.266 4                   |
|                      | 误差 | 12.452  | 12  | 1.038   |        |                           |
|                      | 总和 | 61.111  | 17  |         |        |                           |
|                      |    |         |     |         |        |                           |
| N                    | A  | 33.956  | 2   | 16.978  | 6.606  | 0.011 6 *                 |
|                      | B  | 19.422  | 2   | 9.711   | 3.779  | 0.053 4                   |
|                      | C  | 235.228 | 1   | 235.228 | 91.528 | 5.7 × 10 <sup>-7</sup> ** |
|                      | 误差 | 30.834  | 12  | 2.570   |        |                           |
|                      | 总和 | 319.440 | 17  |         |        |                           |
|                      |    |         |     |         |        |                           |

注：\*\*表示影响极显著(P<0.01)，\*表示影响显著(0.01≤P<0.05)。

在农田环境中的作业性能,2025 年 4 月 19 日,在新疆巴州焉耆县五号渠乡进行田间试验。根据前期正

交试验方案将供气压力设为 0.4 MPa,单行取投苗频率设为 120 株/min,田间试验如图 11 所示。



图 11 田间试验

Fig.11 Field testing

试验钵苗平均分为 2 组,每组穴盘中间 12 排的钵苗人为随机设置 10 处空穴,且 2 组所用穴盘空穴位置完全一致。每次试验一盘钵苗,每组在开启和关闭检补功能条件下进行移栽试验。为消除初始阶段系统稳定性影响,试验数据去除前两排(16 穴),取中间 12 排(96 穴),观察地面连续 96 个栽植穴位钵苗入穴情况,重复 3 次,试验指标为取投苗失败率和栽植器鸭嘴接苗率,计算式为

$$\begin{cases} Q' = \frac{R' - D'}{S'} \times 100\% \\ N' = \frac{U'}{F'} \times 100\% \end{cases} \quad (20)$$

式中 Q'——田间取投苗失败率,%  
S'——穴盘内 12 排钵苗总数,个  
R'——实际空杯数,个  
D'——预设空杯数,个  
N'——田间栽植器鸭嘴接苗率,%  
F'——栽植器打穴数,个  
U'——入穴钵苗数,个

试验过程中检补功能运行稳定,试验结果如表 5 所示。关闭检补功能,平均栽植器鸭嘴接苗率为 86.46%、取投苗失败率最高为 4.65%;开启检补功能后,平均栽植器鸭嘴接苗率为 98.27%、取投苗失败率最高为 4.65%,栽植器鸭嘴接苗率显著提升,检补功能效果明显。开启检补功能后,移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗系统,满足行业标准要求。

5 结论

(1)设计了移栽机电驱双组苗筒共轨式分苗系统,用于移栽机的高效分苗作业。共轨式分苗机构通过其结构设计与参数确定,实现了在苗杯落苗位空苗杯加速递补与有苗杯正常落苗的作业模式,能够有效降低漏栽率。

(2)设计了 PLC 自动控制系统并搭建了控制系统硬件,通过西门子 SMART 700 IE V4 人机界面搭

表 5 关闭和开启检补功能移栽试验结果统计

Tab. 5 Close and open detection and compensation function to move transplant test results

| 取投苗<br>频率/<br>(株·min <sup>-1</sup> ) | 序号  | 打穴<br>数/个 | 预设空<br>杯数/<br>个 | 检补功能关闭      |             |              |                | 检补功能开启      |             |             |              |                |
|--------------------------------------|-----|-----------|-----------------|-------------|-------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
|                                      |     |           |                 | 实际空杯<br>数/个 | 入穴钵苗<br>数/个 | 取投苗失<br>败率/% | 栽植器鸭嘴<br>接苗率/% | 实际空杯<br>数/个 | 空杯递补<br>数/个 | 入穴钵苗<br>数/个 | 取投苗失<br>败率/% | 栽植器鸭嘴<br>接苗率/% |
| 120                                  | 1   | 96        | 10              | 14          | 82          | 4.65         | 85.42          | 14          | 12          | 94          | 4.65         | 97.92          |
|                                      | 2   | 96        | 10              | 12          | 84          | 2.33         | 87.50          | 13          | 12          | 95          | 3.49         | 98.96          |
|                                      | 3   | 96        | 10              | 13          | 83          | 3.49         | 86.46          | 12          | 10          | 94          | 2.33         | 97.92          |
|                                      | 平均值 | 96        | 10              | 13          | 83          | 3.49         | 86.46          | 12.7        | 12          | 94.33       | 3.49         | 98.27          |

载 Win CC 组态软件构件了完整的控制架构。系统采用光纤传感器对苗杯状态进行实时检测,能够在完成空苗杯识别与信号处理,并通过脉冲控制策略精确驱动步进电机执行空杯递补操作。

(3)以取投苗失败率、栽植器鸭嘴接苗率为试验指标,以取投苗频率、供气压力、检补功能的开启状态为试验因素,开展了正交试验,在满足行业标准

要求下,得较优参数组合为:取投苗频率 120 株/min、供气压力为 0.4 MPa、开启检补功能。以较优工作参数组合进行大田移栽验证试验。结果表明,开启检补功能,平均栽植器鸭嘴接苗率 98.27%,取投苗失败率最高为 4.65%,相较于检补功能关闭栽植器鸭嘴接苗率增加 11.81 个百分点,栽植器鸭嘴接苗率显著提升,满足行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 全伟,吴明亮,罗海峰,等.油菜钵苗移栽机成穴作业方式及参数优化[J].农业工程学报,2020,36(11):13-21.  
QUAN Wei, WU Mingliang, LUO Haifeng, et al. Soil hole opening methods and parameters optimization of pot seedling transplanting machine for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 13-21. (in Chinese)

[2] 廖庆喜,王洋,胡乔磊,等.油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):93-102.  
LIAO Qingxi, WANG Yang, HU Qiaolei, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 93-102. (in Chinese)

[3] 吴俊,俞文轶,张敏,等.2ZY-6型油菜毯状苗移栽机设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):95-102.  
WU Jun, YU Wenyi, ZHANG Min, et al. Design and test of 2ZY-6 rapeseed carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 95-102. (in Chinese)

[4] 胡乔磊,张青松,李心志,等.油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(10):18-27.  
HU Qiaolei, ZHANG Qingsong, LI Xinzhi, et al. Design and parameter analysis of seedling collection device of rapeseed substrate block seedlings transplanter machine[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 18-27. (in Chinese)

[5] 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲,等.蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(14):49-57.  
WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese)

[6] 文永双,张俊雄,袁挺,等.蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J].中国农业大学学报,2021,26(4):128-142.  
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, YUAN Ting, et al. Current situation and analysis of automatic pick-up technology for vegetable plug seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 128-142. (in Chinese)

[7] 方紫妍,王天野,余璐,等.新疆生产建设兵团蔬菜产业现状与高质量发展路径[J].中国蔬菜,2024(5):7-13.  
FANG Ziyen, WANG Tianye, YU Lu, et al. Present situation of vegetable industry in Xinjiang Production and Construction Corps and pathway for its high-quality development[J]. China Vegetable, 2024(5): 7-13. (in Chinese)

[8] 白晓虎,杜国静,张子浩,等.蔬菜密植移栽斜置式自动取投苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):300-308.  
BAI Xiaohu, DU Guojing, ZHANG Zihao, et al. Design and experiment of oblique automatic seedling picking and throwing device for vegetable dense transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 300-308. (in Chinese)

[9] 陈斌,胡广发,刘文,等.蔬菜自动移栽机对置秧盘交替自动取投苗机构研究[J].农业机械学报,2022,53(11):131-139,151.  
CHEN Bin, HU Guangfa, LIU Wen, et al. Alternate automatic seedling picking and dropping mechanism based on symmetrically arranged seedling trays for automatic vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 131-139, 151. (in Chinese)

[10] 薛向磊,王磊,许春林,等.旱田钵苗移栽机纵向送苗机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):76-84.  
XUE Xianglei, WANG Lei, XU Chunlin, et al. Optimal design and experiment of longitudinal feeding-seedling device of potted seedling transplanter for upland field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 76-84. (in Chinese)

[11] 田志伟,马伟,杨其长,等.温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J].中国农业大学学报,2022,27(5):22-38.  
TIAN Zhiwei, MA Wei, YANG Qichang, et al. Research status and problem analysis of the transplanting machinery of greenhouse pot seedling[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22-38. (in Chinese)

[12] 李旭英,王玉伟,鲁国成,等.吊杯式栽植器的优化设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(14):58-64.  
LI Xuying, WANG Yuwei, LU Guocheng, et al. Optimization design and test of dibble-type transplanting device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 58-64. (in Chinese)

[13] 韩长杰,杨宛章,张学军,等.穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(8):51-61.  
HAN Changjie, YANG Wanzhang, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings

- transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(8): 51-61. (in Chinese)
- [14] 叶秉良,唐涛,俞高红,等. 组合式非圆齿轮行星轮系取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12): 74-82.
- YE Bingliang, TANG Tao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests on seedling pick-up mechanism of planetary gear train of combined gear transmission with non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12): 74-82. (in Chinese)
- [15] 张静,龙新华,韩长杰,等. 机械驱动式辣椒穴盘苗自动取投苗系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(5): 20-30.
- ZHANG Jing, LONG Xinhua, HAN Changjie, et al. Design and experiments of mechanically-driven automatic taking and throwing system for chili plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(5): 20-30. (in Chinese)
- [16] 张勇. 全自动移栽机穴盘苗识别与控制系统的研究[D]. 泰安: 山东农业大学,2019.
- ZHANG Yong. Research on plug seedling recognition and control system of fully automatic transplanter[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2019. (in Chinese)
- [17] 寻真福. 穴盘苗自动检测及补苗装置的设计[D]. 长沙: 湖南农业大学,2015.
- XUN Zhenfu. The design of seedlings replanting and automatic detection device [D]. Changsha: Hunan Agricultural University,2015. (in Chinese)
- [18] 王永维,肖玺泽,梁喜凤,等. 蔬菜穴盘苗自动补苗试验台穴孔定位与缺苗检测系统[J]. 农业工程学报,2018,34(12): 35-41.
- WANG Yongwei, XIAO Xize, LIANG Xifeng, et al. Plug hole positioning and seedling shortage detecting system on automatic seedling supplementing test-bed for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(12): 35-41. (in Chinese)
- [19] 冯青春,刘新南,姜凯,等. 基于线结构光视觉的穴盘苗外形参数在线测量系统研制及试验[J]. 农业工程学报,2013,29(21):143-149.
- FENG Qingchun, LIU Xinnan, JIANG Kai, et al. Development and experiment on system for tray-seedling on-line measurement based on line structured-light vision[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(21): 143-149. (in Chinese)
- [20] 俞高红,李成虎,汪应萍,等. 小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3): 96-105,138.
- YU Gaohong, LI Chenghu, WANG Yingping, et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3): 96-105,138. (in Chinese)
- [21] 谢天. 蔬菜移栽机通用自动喂苗装置设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学,2022.
- XIE Tian. Design and experimental study of universal automatic seedling feeding device for vegetable transplanter [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [22] 韩长杰,周亭,尤佳,等. 蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(8): 54-64.
- HAN Changjie, ZHOU Ting, YOU Jia, et al. Design and experiments of an arc expansion type automatic seedling taking and throwing device for vegetable plug seedling[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(8): 54-64. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 王小琴,俞高红,刘霓红,等. 劣质钵苗气吸式剔除装置参数优化及试验验证[J]. 农业工程学报,2023,39(16): 36-43.
- WANG Xiaoqin, YU Gaohong, LIU Nihong, et al. Parameter optimization and experimental verification of the air suction removal device for inferior bowl seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(16): 36-43. (in Chinese)
- [25] 宋文彬,任玲,赵斌栋,等. 穴盘苗移栽试验台漏苗检测及补苗系统设计[J]. 农机化研究,2023,45(7): 58-64.
- SONG Wenbin, REN Ling, ZHAO Bindong, et al. Design of the missing seedling detection and seedling replenishment system of the plug seedling transplanting test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(7): 58-64. (in Chinese)
- [26] 文永双,张宇,田金元,等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1): 123-129.
- WEN Yongshuang, ZHANG Yu, TIAN Jingyuan, et al. Design and experiment of detection and supply system of vegetable plug seedlings for transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1): 123-129. (in Chinese)
- [27] 贺磊盈,杨太玮,武传宇,等. 基于贪心遗传算法的穴盘苗补栽路径优化[J]. 农业机械学报,2017,48(5): 36-43.
- HE Leiyang, YANG Taiwei, WU Chuanyu, et al. Optimization of replugging tour planning based on greedy genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5): 36-43. (in Chinese)
- [28] 范开钧,刘小耿,辜美章,等. 多移植手穴盘苗补苗装置试验研究[J]. 农机化研究,2021,43(7): 182-186.
- FAN Kaijun, LIU Xiaogeng, GU Meizhang, et al. Experimental study on multiple transplanting hands replenishing seedling device for plug tray[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(7): 182-186. (in Chinese)
- [29] 梅李爽,任玲,常晨哲,等. 穴盘苗移栽机漏苗检测及补苗控制系统的设计[J]. 新疆农机化,2018(6): 18-21.
- MEI Lishuang, REN Ling, CHANG Chenzhe, et al. Design of leaking seedling detection and seedling filling control system of pothole seedling transplanter[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2018(6): 18-21. (in Chinese)
- [30] 吴俭敏,张小超,金鑫,等. 苗盘钵苗自动识别及控制装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1): 47-52.
- WU Jianmin, ZHANG Xiaochao, JIN Xin, et al. Design and experiment on transplanter pot seedling disk conveying and positioning control system[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(1): 47-52. (in Chinese)
- [31] 温诗铸,黄平,田煜,等. 摩擦学原理[M]. 5版. 北京: 清华大学出版社,2021: 190-220.
- [32] 韩相争. 西门子 S7-200 SMART PLC 编程技巧与案例[M]. 北京: 化学工业出版社,2017.
- [33] 付兴烨,薛玉翠,李美丽,等. 电机变频调速器电压稳态 PLC 控制仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(7): 359-362,372.
- FU Xingye, XUE Yucui, LI Meili, et al. Simulation of voltage steady state PLC control of motor variable frequency governor [J]. Computer Simulation,2023,40(7): 359-362,372. (in Chinese)