

蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置设计与试验

韩长杰¹, 周 亭¹, 尤 佳¹, 徐 阳¹, 毛罕平^{1,2}, 梁 佳³

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 3. 巴州良佳农机制造有限公司, 焉耆 841100)

摘 要: 针对穴盘苗取投苗装置机械结构较复杂、取投苗易失败等问题, 该研究设计了一种蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置。通过对取投苗作业过程进行分析, 提出整排取苗、弧形展开投苗的自动取投苗作业方式, 对夹苗组件、导向槽、旋转接苗机构等进行设计, 并确定各部件关键参数, 搭建 PLC 自动控制系统, 设计执行单元的气动回路方案, 并提出匹配延时函数。以辣椒穴盘苗为试验对象, 以平均取投苗频率、供气压力、基质平均含水率为试验因素, 以取投苗成功率、损伤率为试验指标进行正交试验, 并以较优参数组合进行重复验证试验。试验结果表明: 平均取投苗频率为 90 株/min、供气压力为 0.4 MPa、基质平均含水率为 30% 时, 取投苗成功率为 94.05%, 损伤率为 1.19%, 该研究可为自动取投苗装置的研发提供参考。

关键词: 农业机械; 自动化; 蔬菜; 移栽; 取投苗装置; 气压驱动; PLC 控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302045

中图分类号: S223.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0054-11

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302045 <http://www.tcsae.org>

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 seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 54-64. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302045 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

育苗移栽是蔬菜穴盘苗的主要种植方式^[1]。目前, 移栽作业仍以人工移栽、半自动移栽为主, 劳动力成本高、机械化效益不明显^[2]。自动穴盘苗移栽机可实现移栽作业过程自动化, 提高蔬菜穴盘苗种植效率, 降低农民劳动强度, 因此研发能够自动取投苗的移栽机是实现高效率机械化移栽的必然趋势^[3]。

自动取投苗装置是全自动移栽机的核心部件^[4-5]。国内外学者对自动取投苗装置进行了大量研究^[6-7]。典型机型有美国 Renaldo 公司研制的负压取苗、导苗管送苗的直落式取投苗装置, 结构简单伤苗率低, 但只适合小型秧苗的移栽, 且需要特制的倒锥形苗盘, 造价较高。意大利法拉利公司研制的顶夹结合式取投苗装置, 采用顶杆将穴盘苗顶出穴盘, 夹苗合页夹持秧苗, 经翻转后投入苗杯中, 该取投苗装置采用气、电、液系统, 自动化程度高, 工作效率高, 但系统复杂、尺寸较大且需专用硬质穴盘。综上, 国外发达国家如美国、意大利等, 自动取投苗装置价格昂贵、结构复杂, 且不宜旱地膜上移栽农艺要求, 不宜中国国情^[8-13]。国内部分高校、科研

院所与农机企业着眼于国内移栽农艺要求, 研制了多种自动取投苗装置^[14-21]。谢守勇等设计了一种斜插夹钵式取投苗装置, 利用凸轮控制夹钵闭合与打开, 调节步进电机的转角改变苗夹打开的角度, 增强了装置对不同钵苗的适应性^[8]。文永双等设计了一种插入顶出式取投苗装置, 该装置取投苗频率可达 120 株/min, 有效解决了顶出式取苗机构落苗一致性差、机构复杂等问题, 具有结构简单、取苗及落苗一致性好等优点^[1,22-24]。袁挺等设计了一种气吹振动复合式取苗机构, 通过振动装置克服一部分钵苗基质与穴盘间的粘结力, 再由压缩空气将钵苗吹落至落苗管, 取苗性能稳定, 但只适用叶展较小的钵苗^[25-27]。王超等设计了一种气动下压式取苗装置及配套组合式穴盘, 可实现快速低损下落、低损取苗作业^[28]。胡建平等设计了一种顶夹拔组合式取苗装置, 该装置取苗机构采用先顶松钵苗再插入拔取穴盘苗的取苗模式, 具有较高的取苗成功率和钵体完整率^[29]。俞高红等提出了一种大重合度非圆齿轮传动机构应用于行星轮系取苗机构中, 可降低齿侧间隙引起的传动误差进而提高取投苗运动的准确性^[30]。

目前主流的自动取投苗装置接苗机构以长槽形、矩形输送链式为主, 一般采用增加苗杯口径、数量的方式来保证投苗成功率, 致使取投苗装置结构较复杂, 尺寸较大。

为简化自动取投苗装置整体结构, 减小尺寸, 提高取投苗准确性, 本文设计了一种蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置, 并搭建配套 PLC 自动控制系统。以辣

收稿日期: 2023-02-10 修订日期: 2023-03-14

基金项目: 自治区天山创新团队项目(2021D14010); 国家自然科学基金项目(50905153, 51565059); 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800); 农机一体化项目(YTHSD2022-21); 新疆蔬菜产业技术体系岗位科学家项目

作者简介: 韩长杰, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业机械设计与智能农业装备。Email: hcj_627@163.com

椒穴盘苗为试验对象, 获得较优参数组合并通过重复试验验证该装置的取投苗效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置如图 1 所示, 主要由升降气缸、导向槽板、支臂轴、变位气缸、弧形挡片、电控箱、旋转接苗机构、齿轮换向器、电容式传感器、移盘气缸、移盘机构、夹苗组件、支臂、机架等组成。齿轮换向器由地轮驱动, 将动力输入旋转接苗机构, 驱动苗杯旋转。移盘机构采用课题组前期研究成果, 通过移盘气缸驱动变步距角棘轮实现间歇移盘。电控箱集成西门子 PLC S7-200 SMART, 型号 SR40、磁性开关、接线端子、气动三联件、气动控制阀组、通断开关等元器件, 取投苗过程由电控箱进行信号集中处理, 控制各执行气缸有序动作, 满足自动取苗、投苗作业要求。

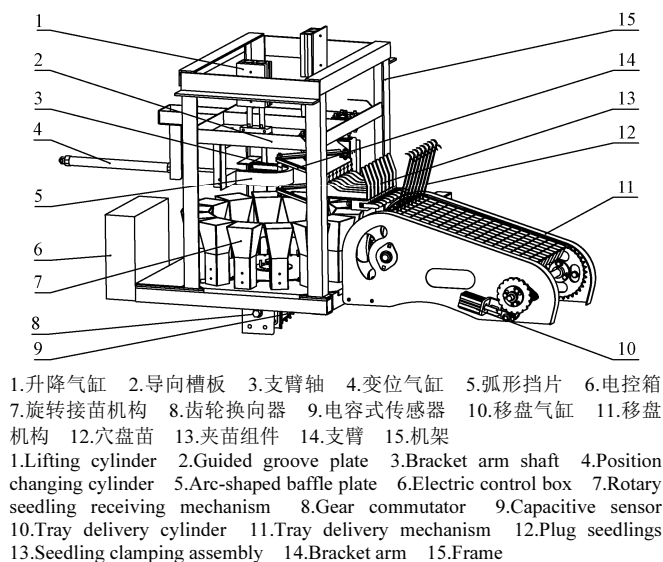


图 1 弧形展开式自动取投苗装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of arc expansion type automatic seedling taking and throwing device

本文弧形展开式自动取投苗装置利用可进行整排取苗并能弧形展开投苗的夹苗组件完成取投苗作业, 横向尺寸最大为 730 mm, 采用气压驱动方式, 主要技术参数如表 1 所示。

表 1 弧形展开式自动取投苗装置主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of arc expansion type automatic seedling taking and throwing device

参数 Parameters	值 Values
总体尺寸 (长×宽×高) Over size (length×width×height)/mm×mm×mm	1 500×730×1 000
平均取投苗频率 Average frequency of seedling taking and throwing/ (株·行 ⁻¹ ·min ⁻¹)	90
供气压力 Air supply pressure/MPa	0.4
行数 Number of rows	1

1.2 工作原理

工作时, 由磁性开关、电容式传感器进行信号采集,

经 PLC 控制系统处理, 将控制信号输出给气动控制阀组, 控制移盘机构、夹苗组件、旋转接苗机构等有序配合、协调运动, 完成移盘、取苗、拔苗、投苗作业。具体过程如下: 移盘气缸驱动苗盘移动, 使得苗盘移动至取苗位置, 完成移盘动作。当变位气缸杆推出, 通过支臂轴、支臂, 驱动夹苗组件沿导向槽运动至取苗位置, 此时, 夹苗组件呈一字形整排排列, 如图 2a、2b 所示。夹苗气缸动作, 夹苗组件夹取整排 8 株穴盘苗, 完成取苗动作。升降气缸驱动夹苗组件、导向槽板等上升, 将穴盘苗从穴盘中拔出, 完成拔苗动作。然后变位气缸杆缩回, 通过支臂使得夹苗组件沿导向槽向投苗位置移动。升降气缸经过一定延时后驱动夹苗组件下降至投苗高度。夹苗组件返回至与弧形挡片接触时, 因弧形挡片与导向槽板固接, 夹苗组件沿弧形挡片的半圆表面弯折, 逐渐展开成半圆弧形, 完成分苗, 展开后如图 2c、2d 所示。经过匹配延时之后, 夹苗组件将穴盘苗投入苗杯中。

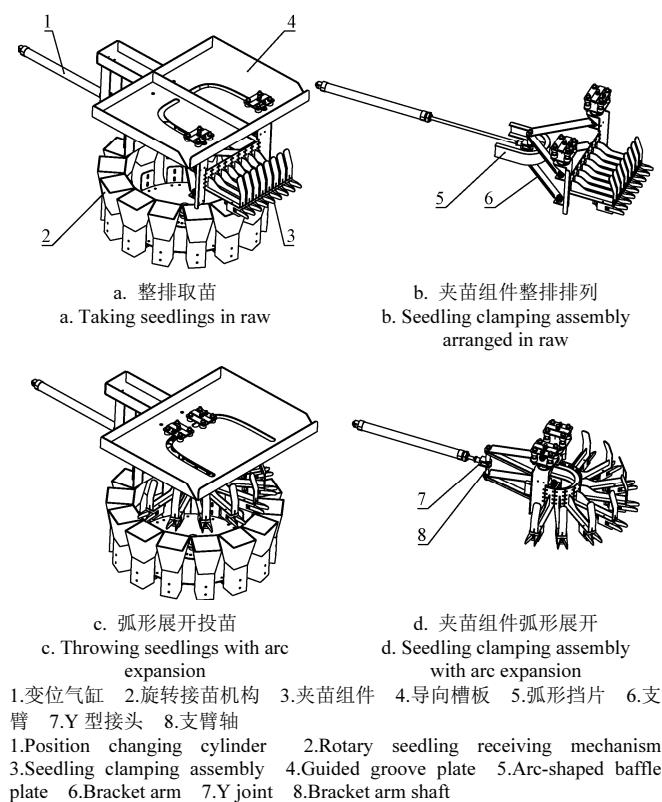


图 2 取苗和投苗示意图

Fig.2 Schematic diagram of seedling taking and throwing

2 关键部件设计

2.1 夹苗组件

夹苗组件与穴盘苗直接接触, 利用夹苗气缸完成夹苗、投苗动作, 并且需要满足整排取苗, 弧形展开投苗的作业要求, 是取投苗装置的核心部件。夹苗组件主要由固定板、万向球、铰接轴、左侧板、铰链、8 组夹苗机械手、右侧板、辅助轴、辅助轴承、限位轴承、限位轴等组成, 如图 3a 所示。单组夹苗机械手由挡苗支撑板、加强筋、夹苗气缸组成, 如图 3b 所示。

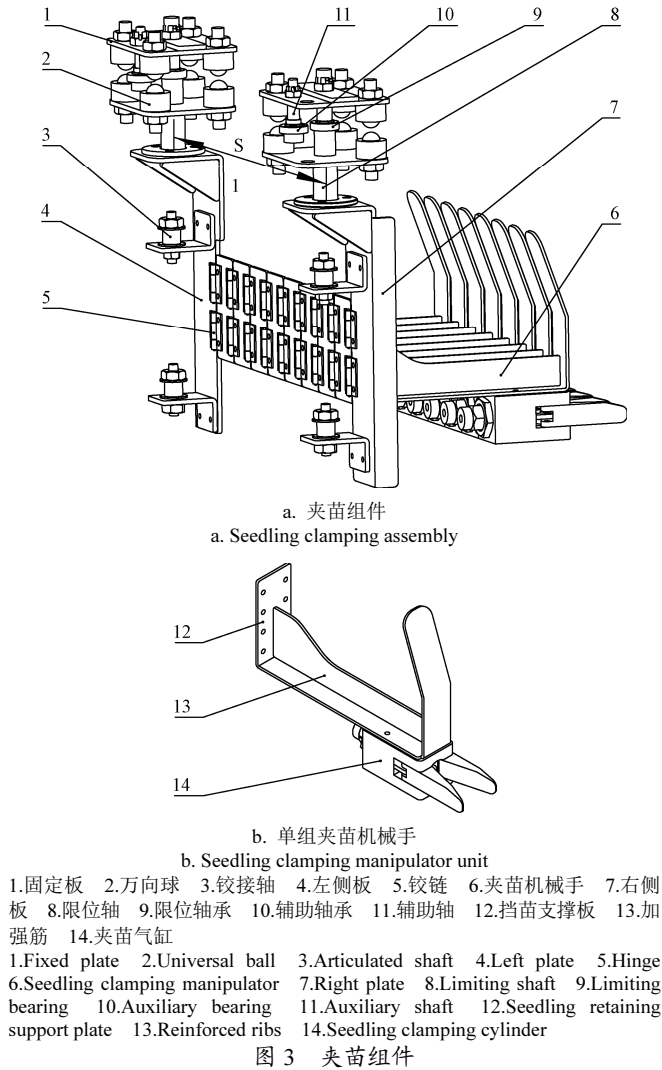


图3 夹苗组件

Fig.3 Seedling clamping assembly

铰接轴同辅助轴共轴心布置,固定板与辅助轴、限位轴固接,限位轴承与导向槽内壁接触。为防止夹苗组件在滑轨内运动时因单一轴承限位而转动,辅助轴承也与导向槽内壁接触,并与限位轴承存在一定间距 J 。

万向球同固定板固接,每组4个,共有滚珠朝上的万向球组及滚珠朝下的万向球组各2组。上下组共同作用,限制夹苗组件仅沿导向槽内侧滑动并起到固定支撑的作用。辅助轴上设有防松螺母,可通过调节辅助轴上螺纹连接预紧力调节上下万向球组与导向槽的夹持力至适宜范围,防止夹持力过小取投苗过程中产生松动、摇晃或夹持力过大夹苗组件沿导向槽滑动困难。8组夹苗机械手以双排铰链的方式铰接。根据一次夹取整排8株穴盘苗的取苗方案,当夹苗组件呈一字形取苗时,两辅助轴间距与两限位轴间距相等,记为 S_1 ,穴盘穴距为 d_0 ,则有:

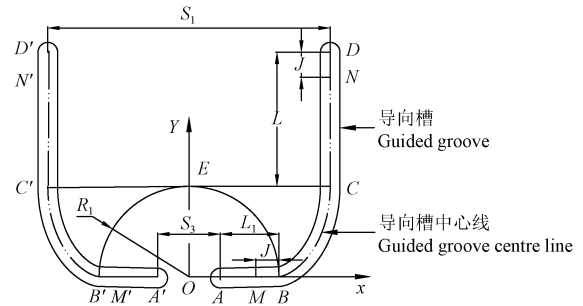
$$S_1 = 9d_0 \quad (1)$$

本文选用 8×16 穴盘,穴距 $d_0 = 32$ mm,由式(1),可得 $S_1 = 288$ mm。

2.2 导向槽

如图4所示,导向槽板上设置有关于 Y 轴对称的导向槽,夹苗组件中限位轴承、辅助轴承与导向槽内壁接触,可沿导向槽中心线 $AMBCND$ 及 $A'MB'C'N'D'$ 运动。

取苗、投苗作业时,限位轴承沿 $BCND$ 、 $B'C'N'D'$ 路径运动。辅助轴承与限位轴承由于存在间距 J ,辅助轴承沿 $MBCN$ 、 $M'B'C'N'$ 运动。



注: D' 、 D 为取苗时两限位轴的位置; S_1 为两限位轴间距, mm; N' 、 N 为取苗时两辅助轴的位置; C' 、 C 为夹苗组件与弧形挡片刚刚接触时两限位轴的位置; E 为夹苗组件与弧形挡片刚刚接触时的接触点; B' 、 B 为夹苗组件投苗时两限位轴的位置; M' 、 M 为夹苗组件投苗时两辅助轴的位置; A' 、 A 为导向槽的终点位置; Y 轴为导向槽对称轴; O 为基圆圆心; R_1 为基圆半径, mm; J 为辅助轴承与限位轴承的间距, mm; L 为 CND 的长, mm; L_1 为 AMB 的长, mm; S_2 为 $A'A$ 的长, mm。

Note: D' 、 D are the positions of the two limiting shafts during seedling taking; S_1 is the distance of the two limiting shafts, mm; N' 、 N are the positions of the two auxiliary shafts during seedling taking; C' 、 C are the positions of two limiting shafts when seedling clamping assembly just contacts the arc-shaped baffle plate; E is the contact point between the seedling clamping assembly and the arc-shaped baffle plate when they just come into contact; B' 、 B are the positions of the two limiting shafts during seedling throwing; M' 、 M are the positions of the two auxiliary shafts during seedling throwing; A' 、 A are the end positions of the guided groove; The Y axis is the symmetric axis of the guided groove; O is the center of the base circle; R_1 is the base circle radius, mm; J is the distance between the auxiliary bearing and the limiting bearing, mm; L is the length of CND , mm; L_1 is the length of AMB , mm; S_2 is the length of $A'A$, mm.

图4 导向槽结构参数

Fig.4 Structural parameters of guided groove

两限位轴位于 D' 、 D 时,夹苗组件8组夹苗机械手呈一字形整排排列,两限位轴间距 S_1 。受变位气缸驱动,夹苗组件自取苗位置向投苗位置运动,当夹苗组件铰链与弧形挡片刚刚接触时,两限位轴位置为 C' 、 C ,夹苗组件保持整排取苗状态,间距为 S_1 。随着变位气缸继续驱动夹苗组件向投苗位置移动,由于夹苗组件铰链可弯折且弧形挡片与导向槽板固接,使得夹苗组件接触弧形挡片后沿弧形挡片的半圆表面弯折,直至夹苗组件成半圆弧形展开,展开完全时两限位轴到达投苗位置 B' 、 B 。由于弯折过程前后铰链长度不变,可将弧形展开的夹苗组件围成的半圆半径近似等于弧形挡片半圆面的半径,夹苗组件围成的半圆弧长近似等于 S_1 。因此,弯折过程中,限位轴自点 C 运动至点 B 的轨迹近似于直线 EC 绕半径 R_1 的基圆做纯滚动。因此, BC 为一段渐开线,记其基圆圆心为点 O ,半径为 R_1 ,展角为 t ,则点 B 的展角 $t=0$ rad,点 C 的展角 $t=0.5\pi$ rad。同理 $B'C'$ 为与 BC 关于 Y 轴对称的一段渐开线,其基圆圆心为点 O ,半径为 R_1 。

结合以上分析可知,两限位轴自 C' 、 C 运动至 B' 、 B 的轨迹为一段渐开线,且基圆圆心为点 O ,半径为 R_1 ,展角为 t , $0 \leq t \leq 0.5\pi$ 。直线 AMB 、 CND 与渐开线段 BC 相切。

基于以上分析可得渐开线段 BC 参数方程为

$$\begin{cases} X_t = R_1(t \sin t + \cos t), \\ Y_t = R_1(\sin t - t \cos t), \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

式中 X_t 、 Y_t 为渐开线段 BC 上任意点的横、纵坐标, mm。

由式(2)可得渐开线上任一点的斜率 K_t 为

$$K_t = \frac{Y_t |dt}{X_t |dt} = \tan t \quad (3)$$

AMB 与 BC 相切, 则 AMB 段直线斜率为

$$\lim_{t \rightarrow 0} K_t = \lim_{t \rightarrow 0} \tan t = 0 \quad (4)$$

故 AMB 直线方程为

$$\begin{cases} y = \lim_{t \rightarrow 0} Y_t = 0 \\ \frac{S_3}{2} \leq x \leq \frac{S_3}{2} + L_1 \end{cases} \quad (5)$$

同理, CND 段直线斜率为

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}} K_t = \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}} \tan t = \infty \quad (6)$$

故 CND 直线方程为

$$\begin{cases} x = S_1 / 2 = 144 \\ R_1 \leq y \leq R_1 + L \end{cases} \quad (7)$$

因此 CND、C'ND'直线平行于 Y 轴且间距为 S_1 , 符合上文末苗组件保持整排排列状态自取苗位置运动至与弧形挡片刚刚接触的设计方案。C 点既是渐开线上展角 $t=0.5\pi$ 的一点, 又是直线段 CND 上的一点, 其横坐标为

$$\begin{cases} X_t = S_1 / 2 \\ X_t = R_1 \left(\frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} + \cos \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

由此求得 $R_1=91.6$ mm, 取整为 92 mm。

L 、 L_1 、 S_3 、 J 所受尺寸限制较少, 设计时保证各零部件分布合理、不干涉、尺寸小、满足限位轴承与辅助轴承能够在导向槽顺利滑动即可, 因此本文取 $L=138$ mm; $L_1=60$ mm; $S_3=65$ mm; $J=20$ mm。通过 SolidWorks 仿真及样机实测, 夹苗组件可在导向槽内顺利滑动且无干涉。

2.3 旋转接苗机构设计

旋转接苗机构与夹苗组件相配合接住投下的穴盘苗并将苗转移至栽植部件, 故接苗机构是保证投苗成功率的关键部件。为了与弧形展开状态下的夹苗组件相适应, 接苗机构采用圆形旋转板接苗, 如图 5a 所示。主要由苗杯、旋转板、苗杯固定钣金、底板、落苗口调节板组成, 与现有长槽型、矩形输送链式接苗机构相比, 减小了接苗机构的整体尺寸。

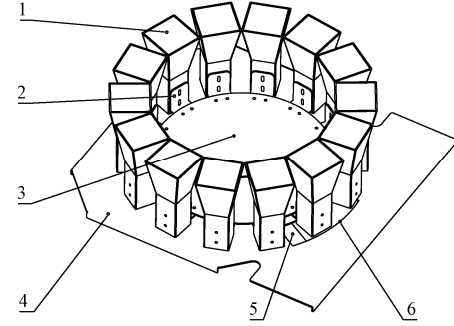
取投苗装置工作时, 由地轮驱动齿轮换向器, 齿轮换向器驱动旋转板旋转, 由旋转板带动苗杯旋转。苗杯底部内置活门托板, 活门托板与底板接触时, 处于关闭状态; 当苗杯旋转至落苗口时, 活门托板与底板脱离接触, 托板打开, 将穴盘苗投入至栽植装置, 完成投苗作业。旋转接苗机构参数设计如图 5b 所示。

根据图 5b: 可得

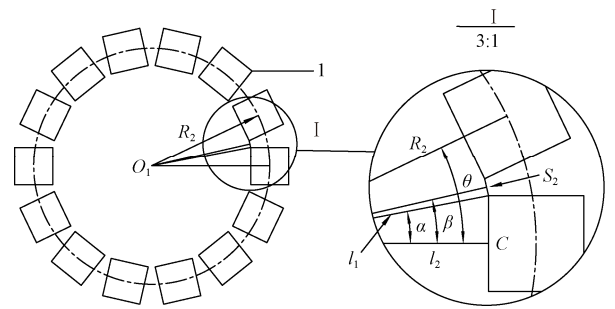
$$\begin{cases} \theta = 2\pi / n \\ \beta = \theta / 2 \\ l_2 = R_2 - C / 2 \\ S_2 / 2 = l_1 \sin(\beta - \alpha) \\ C / 2 = l_1 \sin \alpha \\ l_2 = \frac{C}{2} \cot \alpha \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可得

$$R_2 = \frac{CS_2}{4 \sin \beta} + \frac{C \cot \beta}{2} + \frac{C}{2} \quad (10)$$



a. 结构示意图
a. Structure diagram



b. 俯视图
b. Top view

1. 苗杯 2. 苗杯固定板 3. 旋转板 4. 底板 5. 落苗口调节板 6. 落苗口
1. Seedling cup 2. Fixing plate of seedling cup 3. Rotating plate 4. Base board 5. Adjustment plate of seedlings throwing hole 6. Seedlings throwing hole
注: O_1 为苗杯几何中心所在圆的圆心, R_2 为该圆的半径, mm; θ 为相邻两苗杯的几何中心夹角, rad; n 为苗杯数量, 本文 $n=14$; S_2 为相邻两苗杯间最小间距, mm; l_1 为圆心到苗杯顶点的距离, mm; l_2 为圆心 O_1 到苗杯的中垂线长度, mm; α 为 l_1 与 l_2 的夹角, rad; β 为 l_2 与 S_2 中垂线的夹角, rad; C 为苗杯边长, $C=70$ mm。

Note: O_1 is the center of the circle formed by the geometric center of the seedling cups, R_2 is the radius of the circle, mm; θ is the included angle between the geometric centers of two adjacent seedling cups, rad; n is the number of seedling cups and $n=14$; S_2 is the minimum distance between two adjacent seedling cups, mm; l_1 is the distance from the center of the circle to the apex of the seedling cup, mm; l_2 is the length from the center of the circle O_1 to the middle perpendicular of the seedling cup, mm; α is the included angle between l_1 and l_2 , rad; β is the included angle between the center perpendicular of l_2 and S_2 , rad; C is the length of the seedling cup side, $C=70$ mm.

图 5 旋转接苗机构

Fig.5 Rotary seedling receiving mechanism

为了减小机构尺寸且保证机构容易装配、苗杯不干涉, 半径 R_2 及最小间距 S_2 应取适宜的较小值。考虑到保证苗杯圆形排列时互不干涉且容易装配, S_2 不宜过小, 取 $S_2=20$ mm, 代入式 (10), 可得 $R_2=233.296$ mm, 圆整为 235 mm。

2.4 投苗方案设计与匹配延时

在取投苗装置的齿轮换向器上装有电容式传感器, 可检测轮齿转动, 用于定位苗杯位置以及记录转过的苗杯数量, 每当第 8 个苗杯旋转至夹苗机械手正下方时, 电容式传感器检测到上升沿信号, PLC 控制系统控制夹苗气缸杆缩回, 夹爪立即松开, 完成投苗动作。通过电容式传感器记录转过的苗杯数量可换算为每分钟取投苗株数, 即平均取投苗频率。

取投苗过程中, 每分钟从落苗口投入栽植器的穴盘

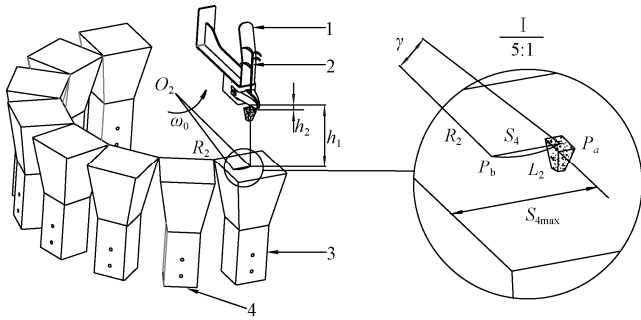
苗株数也与夹苗组件每分钟取投苗的株数一致, 故得出苗杯旋转角速度与平均取投苗频率关系式为

$$\omega_0 = \frac{2\pi A}{60n} \quad (11)$$

式中 ω_0 为苗杯旋转角速度, rad/s; A 为平均取投苗频率, 株/min。

穴盘苗以自由落体落入正下方苗杯时, 由于苗杯作旋转运动, 基质落下后与正下方苗杯中心产生一定的偏移量, 该偏移量影响投苗效果。

如图 6 所示, 投苗开始时刻, 穴盘苗被夹苗机械手夹持在苗杯 1 正上方, 其基质中心与苗杯 1 的中心 P_a 点重合, 夹苗机械手松开夹爪后, 穴盘苗作自由落体运动落入苗杯中, 记穴盘苗自由落体至穴盘苗基质上表面与苗杯上表面重合的时长为 t_n 。苗杯作角速度 ω_0 , 半径为 R_2 的匀速旋转运动, 圆心为 O_2 点, 记 t_n 时段内苗杯 1 转过的角度为 γ 。以苗杯 1 作为参照物, t_n 时段后, 穴盘苗相对苗杯 1 从 P_a 点旋转至 P_b 点。直线段 P_aP_b 的长即穴盘苗基质中心与苗杯中心产生的偏移量, 记为 S_4 。当 R_2 较大而角 γ 较小时, 可将偏移量 S_4 近似于角 γ 对应的弧长, 记为 L_2 。



1. 夹苗机械手 2. 穴盘苗 3. 苗杯 1 4. 苗杯 2
1. Seedling clamping manipulator 2. Plug seedling 3. Seedling cup 1 4. Seedling cup 2

注: O_2 为苗杯旋转中心; ω_0 为苗杯旋转角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; R_2 为苗杯所在圆的半径, mm; h_1 为夹苗机械手与苗杯 1 上表面的高度差, mm; h_2 为夹苗机械手与穴盘苗基质上表面的高度差, mm; γ 为 t_n 时段内苗杯 1 转过的角度, rad; P_a 为苗杯的几何中心; P_b 为 t_n 时段后穴盘苗相对苗杯 1 的位置; L_2 为角 γ 对应的弧长, mm; S_4 为穴盘苗基质中心相对苗杯中心的偏移量, mm; $S_{4\max}$ 为偏移量最大值, mm。

Note: O_2 is the rotation center of the seedling cups; ω_0 is the angular velocity of the seedling cups, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; R_2 is the radius of the circle formed by seedling cups, mm; h_1 is the height difference between the seedling clamping manipulator and the upper surface of the seedling cup 1, mm; h_2 is the height difference between the seedling clamping manipulator and the upper surface of the substrate, mm; γ is the angle of seedling cup 1 rotates during the t_n period, rad; P_a is the geometric center of seedling cup; P_b is the position of the plug seedling relative to the seedling cup 1 after the t_n period; L_2 is the arc length of angle γ , mm; S_4 is the offset distance between the center of the substrate and the geometric center of the seedling cup, mm; $S_{4\max}$ is the maximum offset distance of S_4 , mm.

图 6 投苗方案分析

Fig.6 Analysis of seedling throwing scheme

结合图 6 可得:

$$\begin{cases} (h_1 - h_2) \times 10^{-3} = \frac{1}{2} g_0 t_n^2 \\ \gamma = \omega_0 t_n \\ L_2 = \gamma R_2 \\ S_4 = L_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 g_0 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

由式 (11) ~ (12) 可得

$$S_4 = \frac{\pi A R_2}{30n} \sqrt{\frac{2(h_1 - h_2) \times 10^{-3}}{g_0}} \quad (13)$$

由图 6 可知, h_1 越小, 穴盘苗自由落体时间越短, 越易落入苗杯, 基质落地碰撞损失也越少, 但 h_1 过小时, 由于穴盘苗滞空时间过短, 姿态不稳, 容易发生翻转、枝叶碰撞、挂苗缠叶等情况。穴盘苗茎秆从顶部至根部, 有趋于竖直、接近苗穴中心位置的趋势, 因此高度差 h_2 越小, 夹苗机械手夹取穴盘苗的成功率越高, 但机械手也更易与基质接触甚至插入基质中而发生基质损失、根系损伤。经过多次试验, 取 $h_1=115$ mm 可保证 h_1 较小的同时有较好的下落姿态; 取 $h_2=15$ mm 可保证 h_2 尽量小且夹苗机械手不损伤基质。

苗杯开口为 70 mm \times 70 mm, 穴盘苗基质块长宽尺寸约为 28 mm \times 28 mm。当苗杯旋转至与穴盘苗基质接触时偏移量取得最大值, 经计算 $S_{4\max}=0.5\times(70-28)=21$ mm。

根据预试验, 平均取投苗频率为 $80\sim 100$ 株/min 时取投苗效果较好。将 $A=100$ 株/min、 $R_2=235$ mm、 $n=14$ 、 $h_1=115$ mm、 $h_2=15$ mm、 $g_0=9.8$ m/s^2 代入式 (13) 中, 可得 $S_4=25$ mm。由于 $S_4=25$ mm $>$ $S_{4\max}=21$ mm, 故当平均取投苗频率较高时, 偏移量较大, 基质与苗杯边缘有碰撞风险。因此, 必须设计合理的投苗方案以防基质与苗杯边缘碰撞。

本研究的投苗方案为: 引入一定的延时, 并且该延时能够依据当前取投苗频率设定, 使得穴盘苗落入苗杯 2 中。且当穴盘苗基质上表面与苗杯上表面重合时, 穴盘苗基质中心与苗杯几何中心理论上重合无偏移, 避免碰撞造成的基质损失及投苗失败问题。记该延时为 t_m , 结合以上分析有:

$$\begin{cases} \theta = \omega_0 t_p \\ t_p = t_m + t_n \end{cases} \quad (14)$$

式中 t_p 为苗杯旋转过 θ 角所需时间, s。

由式 (9)、式 (11) ~ (12)、式 (14) 可得匹配延时 t_m 为

$$t_m = \frac{60}{A} - \sqrt{\frac{2(h_1 - h_2) \times 10^{-3}}{g_0}} \quad (15)$$

由于 h_1 、 h_2 、 g_0 均为常数, 由式 (15) 可知, 匹配延时 t_m 仅与平均取投苗频率相关。为实现匹配延时 t_m 可依据当前平均取投苗频率自动调整, 以上次投苗完毕为计时初始时刻 t_a , 以第 8 个空苗杯转过为计时结束时刻 t_b , 则当前平均取投苗频率 A_1 为

$$A_1 = \frac{8 \times 60}{t_b - t_a} \quad (16)$$

式中 t_a 、 t_b 由电容式传感器测得。

依据式 (15) ~ (16) 在 PLC 控制系统中设置匹配延时函数 t_6 , 则

$$t_6 = t_m = \frac{t_b - t_a}{8} - \sqrt{\frac{2(h_1 - h_2) \times 10^{-3}}{g_0}} \quad (17)$$

实际试验过程中地轮转速取决于装置前进速度，考虑到车速难以保持以及轮胎打滑等影响，接苗机构难以保持匀速旋转，故将试验过程中测得的所有当前平均取投苗频率 A_1 取平均值，圆整后作为该次试验的平均取投苗频率 A 。

依据式（17）可得平均取投苗频率 A 取 80、90、100 株/min 对应的延时时长，如表 2 所示。

表 2 取投苗频率延时时长对照表	
Table 2 Comparison Table of frequency of seedling taking and throwing and delay duration	
平均取投苗频率 Average frequency of seedling taking and throwing / (株·min ⁻¹)	延时时长 Delay duration/ms
80	607
90	524
100	457

3 控制系统设计

3.1 控制系统硬件组成

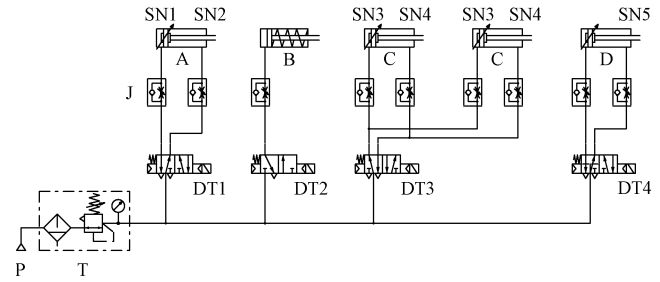
本控制系统硬件由信号输入单元、信号处理单元、信号输出单元、气动执行单元组成。启动按钮 SB1、停止按钮 SB2、电容式传感器 CT、磁性开关 SN1~SN5 为信号输入单元；PLC 为信号处理单元，型号为西门子 S7-200 SMART SR40；二位五通电磁阀 DT1、DT3、DT4，二位三通电磁阀 DT2 为信号输出单元；变位气缸、夹苗气缸、升降气缸、移盘气缸为气动执行单元。PLC 控制系统 I/O 端口定义如表 3 所示。

表 3 I/O 地址与控制说明					
Table 3 I/O address and control description					
输入信号 Input signal	地址 Address	控制说明 Control description	输出信号 Output signal	地址 Address	控制说明 Control description
X1	I0.1	变位气缸杆缩回完毕	X7	I0.7	停止按钮按下
X2	I0.2	变位气缸杆伸出完毕	X8	I1.5	电容式传感器上升沿信号
X3	I0.3	升降气缸杆缩回完毕	Y1	Q1.1	变位气缸杆伸出
X4	I0.4	升降气缸杆伸出完毕	Y2	Q1.2	升降气缸杆缩回
X5	I0.5	移盘气缸杆伸出完毕	Y3	Q1.3	夹苗气缸杆伸出
X6	I0.6	启动按钮按下	Y4	Q1.4	移盘气缸杆伸出

3.2 执行单元气动回路设计

控制系统气动执行单元由变位气缸、夹苗气缸、升降气缸、移盘气缸组成，各气缸规律动作、有序配合实现取投苗作业。执行单元气动回路如图 7 所示。

变位气缸由电磁阀 DT1 控制，夹苗气缸由电磁阀 DT2 控制，升降气缸由电磁阀 DT3 控制，移盘气缸由电磁阀 DT4 控制。磁性开关 SN1 用于检测变位气缸杆缩回是否到位，磁性开关 SN2 用于检测变位气缸杆伸出是否到位，磁性开关 SN3 用于检测升降气缸杆缩回是否到位，磁性开关 SN4 用于检测升降气缸杆伸出是否到位，磁性开关 SN5 用于检测移盘气缸杆伸出是否到位。



注：P 为气源泵；T 为气动三联件；J 为单向节流阀；A 为变位气缸；B 为夹苗气缸；C 为升降气缸；D 为移盘气缸；DT1、DT3、DT4 为二位五通电磁阀；DT2 为二位三通电磁阀；SN1~SN5 为磁性开关。
Note: P is air source pump; T is filter regulator/lubricator combination; J is one-way throttle valve; A is deflection cylinder; B is seedling clamping cylinder; C is Lifting cylinder; D is tray delivery cylinder; DT1、DT3、DT4 is 2/5-way solenoid valve; DT2 is 2/3-way solenoid valve; SN1-SN5 is magnetic switch.

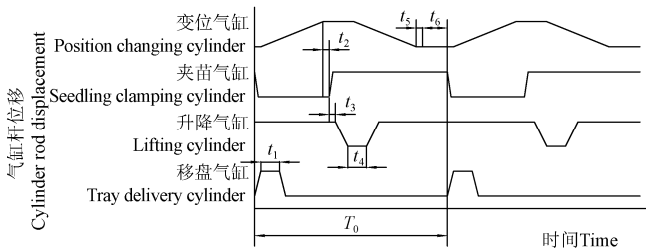
图 7 气动回路原理图
Fig.7 Schematic diagram of pneumatic circuit

3.3 控制系统工作原理

当取投苗装置接通气源、电源时，执行单元中各气缸初始状态为：变位气缸、夹苗气缸、移盘气缸为气缸杆缩回状态，升降气缸处于气缸杆伸出状态。开始工作后，各气缸动作时序如图 8 所示。

工作时，按下启动按钮 SB1，取投苗装置开始工作，PLC 输出 Y4 信号使得电磁阀 DT4 开始动作，移盘气缸杆伸出，苗盘被向前送一个苗穴的距离，当磁性开关 SN5 检测到 X5 信号时，表明移盘气缸杆已伸出完毕，第一排穴盘苗被送至预定取苗位置，移盘气缸经移盘复位延时 t_1 后自动复位。穴盘苗达到取苗位置后 PLC 输出 Y1 信号使得电磁阀 DT1 动作，变位气缸杆开始伸出，夹苗组件由弧形转变为一字形，并向取苗位置移动。当 SN2 检测到 X2 信号时，即变位气缸杆已伸出完毕，夹苗组件到达取苗位置。为减少变位气缸杆伸出至行程终点时的振动对取苗的影响，设定变位气缸杆伸出完毕至夹苗气缸杆开始伸出这段时间为变位气缸伸出停稳延时 t_2 。经延时 t_2 后，PLC 输出 Y3 信号使得电磁阀 DT3 动作，夹苗气缸杆开始伸出，为保证 8 个夹苗机械手都能夹住并夹稳穴盘苗茎秆，设定夹苗气缸杆开始伸出至升降气缸杆开始缩回这段时间为夹苗稳定延时 t_3 。经延时 t_3 后，PLC 输出 Y2 信号使得电磁阀 DT2 动作，升降气缸杆开始缩回，夹苗组件上升，当 SN3 检测到 X3 信号时，即夹苗组件上升到最高点，此时 DT1 复位，使得变位气缸杆缩回，夹苗组件向投苗位置移动。变位气缸杆开始缩回时，升降气缸没有与之同时下降，而是经一定的延时 t_4 后，DT2 复位，夹苗组件开始下降，引入 t_4 是为了避免夹苗组件下降过早，穴盘苗与穴盘等部件相撞，记延时 t_4 为升降气缸下降防撞延时。变位气缸缩回完毕前，升降气缸已下降完毕。当 SN1、SN4 检测到 X1、X4 信号时，表明夹苗组件已下降完毕且变位气缸也缩回完毕。为保证投苗准确，避免变位气缸杆缩回至行程终点时振动对投苗的影响，设定变位气缸缩回停稳延时 t_5 。整个取投苗过程中，电容传感器 CT 一直累计转过的苗杯数，当计数结果为 8 时，经 t_6 延时后，DT3 复位，同时 DT4 动作，夹苗气缸将穴盘苗被精准投入苗杯中心，移盘机构再次

驱动苗盘移动开始下一次取投苗作业。记一个取投苗周期为 T_0 。



注： t_1 为移盘气缸复位延时，ms； t_2 为变位气缸伸出停稳延时，ms； t_3 为夹苗稳定延时，ms； t_4 为升降气缸下降防撞延时，ms； t_5 为变位气缸缩回停稳延时，ms； t_6 为匹配延时函数的延时时长，ms； T_0 为一个取投苗周期，ms。
Note: t_1 is the reset delay of tray delivery cylinder, ms; t_2 is the extension and stop delay of position changing cylinder, ms; t_3 is the stability delay of seedling clamping, ms; t_4 is the anti-collision delay for falling of lifting cylinder, ms; t_5 is the retraction stop delay of position changing cylinder, ms; t_6 is the delay duration of matching delay function, ms; T_0 is one seedling taking and throwing cycle, ms.

图 8 气缸动作时序
Fig.8 Cylinder action sequence

4 样机试验

4.1 试验条件

为验证蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置的取投苗效果，并以较少的试验次数寻求较优参数组合，根据设计结果试制样机并开展自动取投苗装置正交试验及重复验证试验。试验于新疆农业大学农业装备重点实验室进行。试验仪器包括土壤-机器-植物系统技术平台（TCC-3.0 型）、恒美土壤水分测定仪（量程 0~100%，测量精度：0~50% 范围内±2%；50%~100% 范围内±2%，复测误差<2%）。试验材料为辣椒穴盘苗，每组试验使用 56 株，重复 3 次取平均值，穴盘苗培育在 128 穴型硬质塑料穴盘，穴距 32 mm，育苗基质体积配方比例为泥炭：蛭石=2：1。

4.2 试验指标与因素

试验以取投苗成功率、损伤率为试验指标。取投苗成功率是指成功取苗并投苗的概率，损伤率是指取投苗过程中穴盘苗出现茎叶损伤的概率，试验中叶片出现破损及茎秆出现夹伤、折断时为茎叶损伤。取投苗成功率越高、损伤率越低，取投苗效果越好。取投苗成功率与损伤率计算式如下：

$$\begin{cases} Q = \frac{S-R}{S} \times 100\% \\ U = \frac{W}{S} \times 100\% \end{cases} \quad (18)$$

式中 Q 为取投苗成功率，%； S 为该次试验的穴盘苗总株数； R 为该次试验未能成功取苗并投苗的株数； U 为损伤率，%； W 为该次试验出现茎叶损伤的株数。

预试验结果表明，平均取投苗频率在 80~100 株/min 时具有较好的取投苗效果且不易产生茎叶损伤。因此，正交试验选取平均取投苗频率为 80、90 和 100 株/min 三个水平。气动执行单元供气压力直接影响气缸动作的速度及振动情况，供气压力较低（<0.4 MPa）时，气缸动作慢、作业效率较低但振动小、取投苗成功率

高、茎叶损伤小；供气压力较高（>0.6 MPa）时，气缸动作快作业效率高，但振动大、茎叶易损伤，因此选取供气压力为 0.4、0.5 和 0.6 MPa 三个水平。穴盘苗基质平均含水率直接影响钵体力学特性（如钵体与穴盘的粘结力、钵苗重心等）从而影响取投苗成功率，当基质平均含水率过低（<20%）时，基质过于干燥，质量轻，投苗时容易受振动、重心偏移等影响导致基质破碎、下落姿态不稳、翻转等现象，造成投苗失败。投苗失败的穴盘苗常常伴随碰撞、跌落等情况，因而茎叶损伤的概率增加。基质含水率过高（>40%）时，根系不发达的穴盘苗因含水率上升，基质与穴盘的粘结力增大，受振动等影响，穴盘苗基质中根系不发达的部分粘结在穴盘内或运动中途出现破碎掉落等现象，致使投苗失败概率增加；另一方面，基质平均含水率过高时，穴盘苗茎秆抗压能力降低，易被夹伤^[22]。因此选取基质平均含水率水平为 20%、30%、40%。试验因素及水平如表 4 所示。

表 4 因素水平表

Table 4 Factors and levels table

水平 Levels	平均取投苗频率 Average frequency of taking and throwing seedlings $A/(\text{株} \cdot \text{min}^{-1})$	供气压力 Air supply pressure B/MPa	基质平均含水率 Average moisture content of substrates $C/\%$
1	80	0.4	20
2	90	0.5	30
3	100	0.6	40

4.3 试验结果与分析

本试验选取 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行试验，整个试验过程中，取投苗装置在 PLC 控制系统下，各机构协调动作，取投苗过程工作良好。取投苗正交试验方案和试验结果如表 5 所示。采用极差分析法、方差分析法对试验结果进行分析，如表 6、表 7 所示。

表 5 取投苗正交试验方案和结果表

Table 5 Orthogonal experiment scheme and results of seedling taking and throwing table

序号 No.	$A/(\text{株} \cdot \text{min}^{-1})$	B/MPa	$C/\%$	取投苗成功率 Succeed rate of taking and throwing seedlings $Q/\%$	损伤率 Rate of wounded seedlings $U/\%$
1	80	0.4	20	89.29	3.57
2	80	0.5	30	87.50	0
3	80	0.6	40	85.71	3.57
4	90	0.4	30	94.64	0
5	90	0.5	40	91.07	1.79
6	90	0.6	20	91.07	3.57
7	100	0.4	40	87.50	5.36
8	100	0.5	30	87.50	1.79
9	100	0.6	20	85.71	5.36

由表 6、表 7 可得，各因素对取投苗成功率影响的显著性顺序为 A 、 B 、 C 。各因素对损伤率影响的显著性顺序为 C 、 A 、 B 。采用综合平衡法，综合分析各因素对试验指标的影响，在保证取投苗成功率的基础上，尽可能获得较低的损伤率，因此得出较优参数组合为 $A_2B_1C_2$ ，即平均取投苗频率为 90 株/min，供气压力为 0.4 MPa，

基质平均含水率为 30%。

表 6 极差分析
Table 6 Range analysis

指标 Indexs	因素 Factors	k_1	k_2	k_3	极差 R Range R	优方案 Optimal scheme
Q	A	87.50	92.26	86.90	5.36	A_2
	B	90.48	88.69	87.50	2.98	B_1
	C	88.69	89.88	88.10	1.79	C_2
	主次	$A、B、C$				
U	A	2.38	1.79	4.17	2.38	A_2
	B	2.98	1.19	4.17	2.98	B_2
	C	4.17	0.60	3.57	3.57	C_2
	主次	$C、B、A$				

表 7 方差分析
Table 7 Range analysis

指标 Indexs	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
Q	A	51.707	2	25.854	182.054	0.005**
	B	11.793	2	5.896	41.520	0.024*
	C	3.260	2	1.630	11.479	0.080
	误差	0.284	2	0.142		
	总和	67.044	8			
U	A	9.236	2	4.618	32.796	0.030*
	B	1.127	2	0.563	4.000	0.200
	C	9.647	2	4.823	34.253	0.028*
	误差	0.282	2	0.141		
	总和	20.292	8			

注：**表示极显著 ($P<0.01$)；*表示显著 ($0.01\leq P<0.05$)。
Note: ** indicates extremely significant ($P<0.01$); * indicates significant ($0.01\leq P<0.05$).

为验证正交试验结果的准确性，以较优参数组合进行重复验证试验，试验过程如图 9 所示，试验结果如表 8 所示。



图 9 验证试验

Fig.9 demonstration test

表 8 重复验证试验结果表
Table 8 Table of repeated demonstration test results

序号 No.	$Q/\%$	$U/\%$
1	92.86	0
2	92.86	1.79
3	96.43	1.79
平均 Average	94.05	1.19

重复验证试验结果表明，平均取投苗频率为 90 株/min，供气压力为 0.4 MPa，基质平均含水率为 30%时，平均取

投苗成功率为 94.05%，平均损伤率为 1.19%，满足农业生产要求。

5 结 论

1) 设计了一种蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置，对夹苗组件、导向槽、旋转接苗机构等进行设计与参数确定，实现了整排取苗，弧形展开投苗作业方式，该自动取投苗装置，相较于机械式取投苗装置，结构较简单、体积较小。

2) 设计了 PLC 自动控制系统并搭建了控制系统硬件，设计了执行单元气动回路，并提出了匹配延时函数，可以主动匹配取投苗频率。

3) 以取投苗成功率、损伤率为试验指标，以平均取投苗频率、供气压力、基质平均含水率为试验因素，开展了正交试验，得出较优参数组合为平均取投苗频率为 90 株/min，供气压力为 0.4 MPa，基质平均含水率为 30%。以此较优工作参数组合进行重复验证试验，结果表明：平均取投苗成功率为 94.05%，平均损伤率为 1.19%。

该取投苗装置在较优参数组合下满足移栽作业要求，可为自动取投苗装置设计提供参考。装置中夹苗组件使用的铰链结构由于田间作业环境复杂，长期使用必须提高弯折的可靠性，后续研究中可采用具有更高可靠性的弯折结构。

[参 考 文 献]

[1] 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 with English abstract)

[2] 李华, 曹卫彬, 李树峰, 等. 辣椒穴盘苗自动取苗机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 20-27.
LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Kinematic analysis and test on automatic pick-up mechanism for chili plug seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 20-27. (in Chinese with English abstract)

[3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 51-61. (in Chinese with English abstract)

[4] 马晓晓, 李华, 曹卫彬, 等. 番茄钵苗移栽机自动取苗装置作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 46-55.
MA Xiaoxiao, LI Hua, CAO Weibin, et al. Optimization and

- experiment of working parameters of automatic seedling picking device for tomato seedlings transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 with English abstract)
- [6] 胡乔磊, 袁佳诚, 李心志, 等. 油菜基质块苗移栽机双向递进式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 106-115. HU Qiaolei, YUAN Jiacheng, LI Xinzhi, et al. Design and experiment of two-way progressive seedling feeding for rape substrate transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 106-115. (in Chinese with English abstract)
- [7] 韩长杰, 郭辉, 张学军, 等. 硬质穴盘苗自动取苗装置设计[J]. 农业工程, 2013, 3(4): 99-102. HAN Changjie, GUO Hui, ZHANG Xuejun, et al. Design of automatic hard-plug-seedlings pick device[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(4): 99-102. (in Chinese with English abstract)
- [8] 谢守勇, 阳尚宏, 刘军, 等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 1-10. XIE Shouyong, YANG Shanghong, LIU Jun, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [9] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 温室穴盘苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 59-67. HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and test of automatic transplanter for greenhouse plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 韩长杰, 徐阳, 张静, 等. 半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 54-61. HAN Changjie, XU Yang, ZHANG Jing, et al. Design and experiment of semi-automatic transplanter for watermelon seedlings raised on compression substrate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩长杰, 郭辉, 杨宛章, 等. 取苗机械手双气缸三位置的驱动及优化[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 17-21. HAN Changjie, GUO Hui, YANG Wanzhang, et al. The driving and optimization for double-cylinders three-position pick seedlings manipulator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 17-21. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张振国, 曹卫彬, 王鹏, 等. 番茄穴盘苗自动移栽机顶杆式取苗装置的设计: 基于 UG 三维软件[J]. 农机化研究, 2013, 35(4): 72-75. ZHANG Zhenguo, CAO Weibin, WANG Peng, et al. The design of the UG-based tomato plug seedlings transplanting machine ejector take seedlings institutions[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(4): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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(5): 52-63.
- [14] 王俊, 张海洋, 金鑫, 等. 穴盘苗自动移栽机苗钵夹持力检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 79-87. WANG Jun, ZHANG Haiyang, JIN Xin, et al. Design and experiment of seedling bowl clamping force detection system for plug seedling automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 79-87. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(13): 20-29. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 20-30. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡乔磊, 王磊, 李心志, 等. 油菜基质块苗移栽机对辊式取苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 12-23. HU Qiaolei, WANG Lei, LI Xinzhi, et al. Design and experiment of the counter roll seedling taking equipment for rapeseed substrate block seedlings transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 12-23.

- (in Chinese with English abstract)
- [18] 蒋兰, 吴崇友, 汤庆, 等. 油菜毯状苗移栽机栽植过程动力学模型及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 37-46.
JIANG Lan, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Kinematics model and parameter optimization of planting process of rape carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 37-46. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴俭敏, 张小超, 金鑫, 等. 苗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 Jianming, ZHANG Xiaochao, JIN Xin, et al. Design and experiment on transplanter pot seedling disk conveying and positioning control system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- [20] 胡乔磊, 廖庆喜, 王洋. 油菜机械移栽载苗基质块力学与生物学特性分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 58-65.
HU Qiaolei, LIAO Qingxi, WANG Yang. Mechanical and biological characteristics analysis of mechanically transplanted rapeseed substrate block seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(24): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese with English abstract)
- [22] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 96-104.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, ZHANG Yu, et al. Development of insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [23] WEN Y S, ZHANG L A, HUANG X M, et al. Design of and experiment with seedling selection system for automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Agronomy, 2021, 11(10): 2031.
- [24] WEN Y S, ZHANG J X, TIAN J Y, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.
- [25] 袁挺, 王栋, 文永双, 等. 蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 80-87.
YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of seedlings unloading mechanism based on methods of air-blowing and vibration for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [26] 任玲, 赵斌栋, 曹卫彬, 等. 穴苗移栽机双旋转式分苗装置设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 10-18.
REN Ling, ZHAO Bingdong, CAO Weibin, et al. Design of double-rotation seedlings separating device for transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(10): 18-27. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 with English abstract)
- [29] 胡建平, 刘育彤, 刘伟, 等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 110-117, 184.
HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experiment on combined seedling picking device with top clamping and pulling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 110-117, 184. (in Chinese with English abstract)
- [30] 俞高红, 王系林, 刘建刚, 等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 94-103.
YU Gaohong, WANG Xilin, LIU Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 94-103. (in Chinese with English abstract)

Design and experiments of an arc expansion type automatic seedling taking and throwing device for vegetable plug seedlings

HAN Changjie¹, ZHOU Ting¹, YOU Jia¹, XU Yang¹, MAO Hanping^{1,2}, LIANG Jia³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Bazhou Liangjia Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yanqi 841100, China)

Abstract: Seedling transplanting has been one of the most important planting steps for vegetable plug seedlings raising in China. However, manual and semi-automatic transplanting cannot fully meet the large-scale transplanting operations in recent years, due to the high labor cost. Alternatively, mechanization can also be a benefit to modern agriculture. An automatic seedling taking and throwing device can be expected for the vegetable plug seedlings to fully meet the vegetable transplanting for the high efficiency of vegetable plug seedling planting and the low labor intensity. Therefore, this study aims at the problems of the automatic seedling taking and throwing device for the vegetable plug seedling, such as the large structural size, easy failure in taking and throwing seedlings. The transplanting operation was proposed to analyze the individual taking and throwing seedlings, where the taking seedlings in a straight shape, and throwing seedlings in an arc shape. An arc-type expansion automatic seedling taking and throwing device was also designed for the transplanting operation of vegetable plug seedlings. A systematic analysis was performed on the main structure and working principle of this device. Three components included a seedling clamping assembly, a guided groove plate, and a rotary seedling receiving mechanism. Among them, the seedling clamping assembly was firstly bent into an arc-shaped expansion through the hinge structure, and then the eight vegetable plug seedlings were taken away from the seedling tray, and finally thrown into the seedling cups at one time. Theoretical analysis was carried out to determine the parameter equation of the guided groove centerline, including the radius of the circle formed by the geometric center of the seedling cups, and the minimum distance between two adjacent seedling cups. Some limitations were also considered, such as the reduced size of the rotary seedling receiving mechanism. As such, the mechanism was easy to assemble without the interference of seedling cups each other. A risk of collision was found between the vegetable plug seedling and the seedling cup when the seedling was thrown into the seedling cup with a high average frequency of taking and throwing seedlings. For this reason, the seedling throwing scheme was introduced to automatically set an appropriate delay using the current average frequency of taking and throwing seedlings. The centers of the substrate and the seedling cup coincided without deviation, in order to avoid substrates loss and seedling throwing failure caused by collision when the vegetable plug seedlings were thrown into the seedling cups under this seedling throwing scheme. The PLC automatic control system was built with the pneumatic circuits of the execution units, in order to coordinate the movements of various mechanisms, complete efficient and regular seedling taking and throwing operations. An orthogonal test was carried out, where the influencing factors, average frequency, air supply pressure, and average moisture content of substrates were selected as the experimental factors, while the success rate of taking and throwing seedlings and the rate of wounded seedlings were the target objectives. The range and variance analyses were performed on the experimental data. A better combination of experimental factors was obtained: the average frequency of taking and throwing seedlings was 90 plants per min, the air supply pressure was 0.4MPa, and the average moisture content of substrates was 30%. The demonstration tests were conducted with a combination of experimental factors. The success rate of taking and throwing seedlings was 94.05%, and the rate of wounded seedlings was 1.19%. This finding can provide a sound reference to design the automatic seedling taking and throwing device.

Keywords: agricultural machinery; automation; vegetable; transplants; seedling taking and throwing device; pneumatic driving; PLC control