

# 温室穴盘育苗劣质钵苗螺旋式剔除机构设计与试验

童俊华<sup>1,2</sup> 商凯源<sup>1</sup> 王小琴<sup>1</sup> 孙良<sup>1,2</sup> 张宁<sup>1</sup> NORUPIRI R O<sup>1</sup> 马尚全<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 在温室穴盘育苗过程中,有5%~20%的穴孔存在漏播、发育不良等现象,为提高穴盘利用率,保证成品苗质量,需要将这些劣质钵苗基质块干净剔除并及时补充健康钵苗。常见的剔除末端主要有指铲式、气吸式,但存在指铲式剔苗方式易造成钵体松散破碎难以抓取、气吸式剔苗在高含水率下剔净率低等问题,为此本文设计了一种螺旋式劣质钵苗剔除装置。该装置使用输送带移动穴盘,升降模组带动横移模块进行升降,横移模块上安装两个剔苗末端执行器,剔苗末端执行器使用螺旋叶片对基质进行破碎,通过螺旋输送和负压吸附的方式将穴孔中的基质破碎并输送到顶部蓄土槽中,升降时自动转移到排土槽中。以200孔带基质穴盘为研究对象,对螺旋叶片的升土方式进行理论分析,确定相关设计参数,并对螺旋式劣质钵苗剔除装置进行路径规划。搭建螺旋式劣质钵苗剔除装置,开展螺旋式基质剔除四因素三水平正交试验,结果表明,试验因素的影响由大到小为凹口切角、螺距、转速、升降速度,确定最优参数为:螺距16 mm、凹口切角10°、转速2500 r/min、升降速度10 mm/s。在最优参数组合下进行性能验证试验,结果表明,剔苗机构作业效率平均为832孔/h(约42盘/h),基质平均剔净率在83%以上,满足剔补苗作业需求。

**关键词:** 温室移栽; 劣质钵苗剔除装置; 螺旋式执行器

中图分类号: S223.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0129-09

OSID:



## Design and Test of Spiral Rejection Mechanism for Inferior Bowl Seedlings

TONG Junhua<sup>1,2</sup> SHANG Kaiyuan<sup>1</sup> WANG Xiaoqin<sup>1</sup> SUN Liang<sup>1,2</sup> ZHANG Ning<sup>1</sup>  
NORUPIRI R O<sup>1</sup> MA Shangquan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In the process of seedling raising in the greenhouse hole tray, about 5% to 20% of the holes had the phenomenon of missed seeding, stunted development, etc. In order to improve the utilization rate of the hole tray and ensure the quality of the finished seedlings, it was necessary to remove the inferior seedling substrate block neatly and replenish the healthy bowl seedlings in time. There were two common rejection ends: finger shovel type and air suction type. There were problems such as the finger shovel type seedling removal method and the air suction seedling removal method. The finger shovel type seedling was easy to cause the bowl body to be loose, fragile and difficult to grasp and the air suction seedling removal method had a low rejection rate under high moisture content. The conveyor belt was used to move the hole plate, and the lifting module drove the traversing module to lift, and two seedling removal end effector were installed on the traversing module, and the culling end-effector used spiral blades to break up the substrate. The matrix in the hole was broken and transported to the top soil storage tank by means of spiral conveying and negative pressure adsorption, and automatically transferred it to the soil discharge tank when it was lifted. Taking the 200-hole strip matrix cavity disc as the research object, the soil lifting mode of the spiral blade was theoretically analyzed and the relevant design parameters were determined, and the path planning of the spiral inferior seedling rejection device was carried out. The test platform of the spiral inferior seedling rejection device was built and the four-factor and three-level

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2024-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2000600)、浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2024SNJF069)和浙江理工大学科研业务费专项资金项目(24242118-Y)

作者简介: 童俊华(1984—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与数字农业技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn

通信作者: 孙良(1981—),男,教授,博士,主要从事农业机构设计与优化研究,E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

orthogonal experimental research on the removal of spiral substrate was carried out. The influence of experimental factors, from large to small, included notch cutting angle, pitch, rotation speed and lifting speed. The optimal parameters were determined to be 16 mm pitch,  $10^\circ$  notch cutting angle, 2 500 r/min rotation speed and 10 mm/s lifting speed. The performance verification test was carried out under the optimal combination of parameters, and the results showed that the average operating efficiency of the whole machine was 832 holes/h (42 trays/h). The average rejection rate of the substrate was over 83%, which met the needs of the seedling rejection operation.

**Key words:** inferior seedlings; defective seedling removal device; spiral type actuator

## 0 引言

温室穴盘育苗相比于传统育苗方式,具有苗龄短、秧苗整齐度高、种子成本低等优点,可以批量生产优质蔬菜苗<sup>[1-3]</sup>。在育苗过程中,由于种子品质、播种精度、培育方式等因素,部分穴孔中会出现钵苗生长发育不良或未播种成功的状况。劣苗或缺苗穴孔占总体穴盘苗的5%~20%<sup>[4-5]</sup>。为提高穴盘利用率,保证成品苗质量,在穴盘培育一段时间后,需要将不健康的钵苗和未播种成功的苗坨剔除,并从供苗穴盘中移栽发育健康的钵苗对该穴孔进行及时补充,以得到整盘健康幼苗<sup>[6]</sup>。当前的剔补苗工作大部分由人工完成,劳动强度大、生产效率低。

目前,已经有大量国内外学者对剔补苗移栽机械进行研究<sup>[7-9]</sup>。童俊华等<sup>[10-11]</sup>设计了指铲式末端执行器,可以对苗坨基质进行包裹式提取,在含水率60%的情况下劣苗剔净率达到70.8%,在含水率高于或低于60%时,无法达到70%的剔净率。然而,剔除缺苗基质质量小于原钵体质量70%时,残留基质会阻碍健康幼苗的补入,不利于后期生长管理。董文勋<sup>[12]</sup>以自动化低损、高效剔补为设计目标,设计了一种基于Delta并联机器人的气缸驱动式插拔铲末端,在最优参数组合下平均剔净率达到82.15%。TIAN等<sup>[13]</sup>设计了一种多针取苗器,分析了不同末端针头直径、末端插入基质深度、基质抓取速度对基质抓取整体效果的影响,基质破碎散落现象得到改善。胡建平<sup>[14]</sup>提出了一种基于顶夹拔相互组合的取苗装备,通过顶压脱盘提高取苗成功率。崔永杰等<sup>[15]</sup>针对穴盘缺苗穴孔内钵体松散易碎的特性,提出气吸式剔除方式,当基质含水率为50%~55%时,穴孔内基质松散,与穴孔内侧壁的粘附力低,基质剔净率达到92.3%,但是当含水率高时,剔净率较低,同时,负压吸附可能使部分穴孔被吸扁聚拢,出现整体带盘、破坏穴盘的问题。苗场在实际使用中,由于培育方式、剔苗效率等因素,难以保证剔除时基质含水率稳定,当基质含水率较高时,指铲式和气吸式的剔净率均无法达到使用需求,适用性较低。因此,需要设计一种在不同含水率下剔

净率均能达到70%的剔苗末端执行器。

关于螺旋切削去除基质和螺旋垂直输送已有大量的研究<sup>[16-18]</sup>,在农业应用中常采用螺旋钻进行钻孔施肥和排肥<sup>[19-20]</sup>,但未应用到温室穴盘剔苗中。DING等<sup>[21]</sup>设计了一种螺旋挖掘末端执行器用于穴盘苗的播种,通过螺旋体去除穴孔内上层10~15 mm的基质,排出的基质被堆叠到其他穴孔内,验证了螺旋式去除基质的可行性。程洋洋<sup>[22]</sup>采用EDEM软件对垂直螺旋输送机各个设计参数(输送机的螺距、叶片直径与轴径、螺旋体转速与填充系数)进行单因素试验,分析了各个设计参数对输送性能的影响规律。黄亚光<sup>[23]</sup>对挖坑机钻头进行了土壤力学分析,确定了钻头角速度和钻进速度及其运动过程中钻头重力变化为钻头受力的主要影响因素。李郁<sup>[24]</sup>论证了螺旋气力吸取料机方案的可行性,建立临界分离粒径的数学模型,结合了垂直螺旋输送与负压气力输送技术,能够快捷高效地完成从料堆取料及实现气固分离的动作。当前仍缺乏对螺旋式剔除穴盘苗的研究。

综上,针对指铲式和气吸式剔苗产生的问题,本文设计一种螺旋式劣苗剔除装置,将基质破碎后通过螺旋输送出穴孔,解决高含水率情况下难以剔净、易于粘连的问题,为开发高效省力的剔补苗移栽机械提供参考。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

整体结构如图1所示,螺旋式劣苗剔除装置主要包括机架、链条传送带、限位挡板、横移模块、升降模组、排土槽、剔苗末端执行器。链条传送带、升降模组和排土槽安装在机架上,链条传送带内置有多个光电传感器。横移模块安装在升降模组上,同时搭载2个剔苗末端执行器,可以使剔苗末端执行器在同一排上横向移动。限位挡板在链条传送带两侧,用于对穴盘进行限位,避免剔除时跑偏。排土槽用于储存排出的土壤基质,预留排出口将基质排出。

### 1.2 工作原理

螺旋式劣苗剔除装置剔苗工作步骤为:①首先

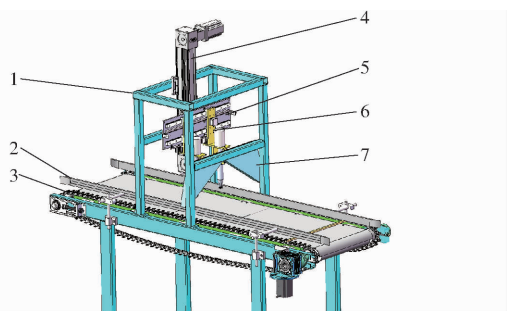


图1 整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram

1. 机架 2. 限位挡板 3. 链条传送带 4. 升降模组 5. 横移模块 6. 剔苗末端执行器 7. 排土槽

穴盘苗在前置工序进行劣质苗识别,并通过传送带将识别后的穴盘苗输送到本装置前端。②链条传送带启动,将穴盘苗移动到横移模块下方,第1行正对剔苗末端执行器下方。③横移模块将多个末端执行器分别移动到需要剔除的穴孔上,若本行需要剔除的穴孔数少于末端执行器数量,则将超过数量的剔苗末端执行器移动到穴盘两侧。④升降模组下降,剔苗末端执行器开始进行工作,基质临时储存在末端执行器的蓄土槽中。⑤剔苗结束后,升降模组上升,剔苗末端执行器自动将剔出的基质倒入排土槽中。⑥链条传送带启动,使第2行穴盘苗正对剔苗末端执行器下方,重复步骤③~⑤。⑦剔苗结束后,穴盘输送到下一个工序进行补栽,放入新的穴盘重复以上步骤。本研究主要针对步骤②~⑦展开,假设已知劣质苗位置坐标。

## 2 关键部件设计

### 2.1 剔苗末端执行器设计

如图2所示,剔苗末端执行器包括直流电机、固定架、联轴器、螺旋叶片、外壳、蓄土板。直流电机、外壳安装在固定架上,直流电机通过联轴器带动螺旋叶片匀速旋转。螺旋叶片末端为刀片状,用于切削、破碎基质和劣质苗。螺旋叶片和外壳间留少量间隙,避免蛭石堵塞叶片。外壳上部、中部呈直径不变的圆筒状,下部直径减小,用于配合穴孔锥度,末端切出4个凹口,便于螺旋叶片对周围基质的切削、破碎,破碎的基质和劣质苗通过螺旋叶片向上运输。外壳顶部留一定空间,使螺旋叶片送出的土壤基质和劣质苗落到蓄土板和外壳中间的蓄土槽中。蓄土板与外壳铰接,利用120°弹簧保持蓄土姿态,当剔苗末端执行器上升时蓄土板接触到排土槽外边,蓄土板下压,基质自动排出到排土槽中。

将螺旋式剔苗末端执行器设置在需要剔除的穴孔正上方,穴盘在作业过程中保持固定。工作时升

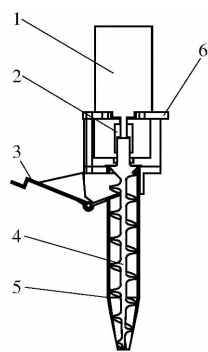


图2 剔苗末端执行器结构图

Fig. 2 Structural diagram of end effector for seedling removal

1. 直流电机 2. 联轴器 3. 蓄土板 4. 螺旋叶片 5. 外壳 6. 固定架

降模组控制末端下降,到达穴孔正上方指定距离时直流电机启动并带动螺旋叶片匀速旋转,升降模组继续下降,叶片螺旋末端在高速旋转作用下将劣质苗和大块基质破碎,此时破碎后的基质块主要以3种方式被剔除出穴孔:较大的基质块在螺旋叶片和穴孔壁的挤压下,依靠摩擦力输送到蓄土槽中;螺旋叶片高速旋转时会产生负压吸力,使得部分细小的基质颗粒被负压吸附到螺旋叶片顶部,最终落到蓄土槽中;少量穴孔边缘的基质被外壳挤压到其他穴孔中。升降模组每下降一段距离需要进行一次短距离上升,避免基质残留在螺旋包裹外壳和穴孔内侧壁之间,同时避免一次性上料太多导致管道堵塞。

#### 2.1.1 螺旋叶片升土理论分析

在螺旋叶片转速不同时,会出现两种不同的物料运输方式,低速状态下依靠叶片和管道之间的挤压进行输送,高速状态下依靠负压吸附运输。

当转速较低时,外壳、螺旋叶片表面的压力、摩擦力、离心力和重力形成一个动力平衡系统。图3为受力图,颗粒在重力 $G$ 、离心力 $F_n$ 、螺旋叶片反作用力 $F$ 和摩擦力 $F_t$ 的作用下达到平衡。

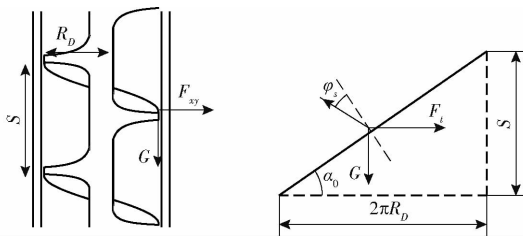


图3 物料颗粒受力图

Fig. 3 Force diagram of material particles

受力关系为

$$\tan(\alpha_0 + \varphi_s) = \frac{F_t}{G} \quad (1)$$

其中

$$F_t = \mu_1 F_{xy} \quad (2)$$

$$F_{xy} = m\omega_k^2 R_0 \quad (3)$$

$$\omega_k = \frac{\pi n_k}{30} \quad (4)$$

可得临界转速

$$n_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\mu_1 R_D} \tan(\alpha_0 + \varphi_s)} \quad (5)$$

式中  $\alpha_0$ ——螺旋叶片升角, ( $^\circ$ )

$\varphi_s$ ——物料颗粒与螺旋叶片摩擦角, ( $^\circ$ )

$F_{xy}$ ——物料离心力, N

$\mu_1$ ——物料与外壳筒壁摩擦因数

$m$ ——物料质量, kg

$R_D$ ——螺旋叶片半径, mm

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$

$\omega_k$ ——临界角速度,  $\text{rad/s}$

$n_k$ ——临界转速,  $\text{r/min}$

从临界转速表达式可以看出, 当  $\alpha_0 + \varphi_s = 90^\circ$  时, 则  $n_k \rightarrow \infty$ , 为避免临界转速过高, 应使  $\alpha_0 < 90^\circ - \varphi_s$ , 即

$$\tan \alpha_0 = \frac{S}{2\pi R_D} < \tan(90^\circ - \varphi_s) = \frac{1}{\mu_2} \quad (6)$$

式中  $\mu_2$ ——物料与叶片摩擦因数

$S$ ——螺距, mm

因此, 管壁粗糙度越高, 螺旋叶片半径越大, 螺距越小, 其临界转速越小。

当转速较高时, 物料在气流中受到自身重力、空气浮力以及气流对物料动力的作用达到悬浮状态, 依据文献[24]可得物料临界分离粒径  $d_s$  为

$$d_s = \sqrt{\frac{18\mu \left[ \frac{\pi R_0^2 v_0}{(1-\psi)(R_D - R_d)S} - \frac{n_0 r}{\cos \alpha_0} \right]}{\rho_s n_0^2 \mu_1}} \quad (7)$$

式中  $\rho_s$ ——物料密度,  $\text{kg/m}^3$

$v_0$ ——物料悬浮速度,  $\text{m/s}$

$\psi$ ——物料充填率, %

$R_d$ ——螺旋轴半径, mm

$R_0$ ——吸料口半径, mm

$r$ ——物料所处位置半径, mm

$n_0$ ——物料转速,  $\text{r/min}$

$\mu$ ——空气粘性系数, 取  $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

由式(7)可知, 物料临界分离粒径与螺旋尺寸、物料充填率、空气特性、物料转速以及进料口流速有关。提升负压吸附效率可以通过增加物料临界分离粒径实现, 因此, 吸料口半径越大, 螺距和叶片长度越小, 负压吸附效率越高。

### 2.1.2 螺旋剔除参数设计

螺旋剔除末端执行器通过叶片旋转和向下进给来完成对基质的剔除, 基质剔除质量与叶片、外壳结构形状、作业参数有直接关系。

### (1) 外壳设计

本试验的对象是200孔穴盘苗, 实际测量得穴孔下边长为10 mm, 上边长为23 mm, 锥度  $8.6^\circ$ , 穴盘材质为塑料, 允许少量变形。因此, 外壳呈圆筒状, 上端直径不变, 下端直径减小, 配合穴孔直径, 设计上端内壁直径  $L_1 = 24 \text{ mm}$ , 下端内壁直径  $L_2 = 10 \text{ mm}$ , 锥度  $\alpha = 8.6^\circ$ , 厚度  $h_1 = 1.5 \text{ mm}$ 。

外壳下端外壁直径为13 mm, 无法与穴孔底部贴合, 会造成底部的基质无法剔除。因此, 为了较好地与穴孔贴合, 同时, 避免被蛭石堵塞末端进料口, 仿造穴孔形状去除外围方锥部分, 留出4个凹口, 增加螺旋叶片与基质接触面积和进料口尺寸。设置去除方锥的边长为9 mm, 根据锥度不同产生大小不同的凹口, 图4为去除方锥体锥度角(下文称凹口切角)分别为  $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$  时的凹口。

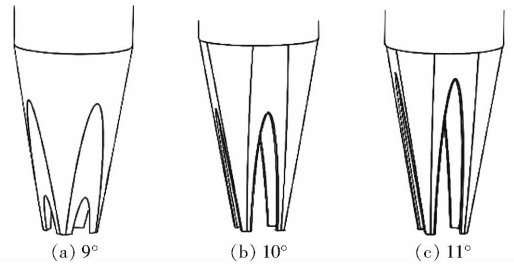


图4 凹口切角为  $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$  的外壳末端图

Fig. 4 Removing end of case with taper ratios of  $9^\circ$ ,  $10^\circ$ , and  $11^\circ$

螺旋叶片与基质接触面积越大, 在剔除高含水率基质时越容易将基质挤压入螺旋管中输送, 但较大的凹口会使输送中的基质更容易掉出, 需要进一步试验确定凹口尺寸。

### (2) 螺旋叶片设计

螺旋叶片与外壳内壁之间预留间隙约1 mm, 末端尺寸较小, 预留间隙0.5 mm, 因此叶片半径  $R_D = 11 \text{ mm}$ , 末端叶片直径  $l_D = 9 \text{ mm}$ 。

依据式(7)可知, 螺旋轴直径越大, 负压吸附的临界分离粒径越大, 但是由于穴孔尺寸小, 较大的轴径会造成堵塞, 因此设计轴径  $l_d = 4 \text{ mm}$ 。

依据式(5)可知, 筒壁粗糙度越高, 叶片粗糙度越低, 临界转速越低, 本末端为采用3D打印的铝合金, 具有较高的粗糙度, 筒壁和叶片与基质摩擦因数  $\mu_1 = \mu_2 = 0.8$ 。螺距影响临界转速和螺旋末端切入基质的角度, 较小的螺距可以降低临界转速, 同时使切入角度减小, 减少切削时受到的阻力, 但是同时增加了输送距离, 降低基质输送效率。螺距限制条件为

$$\frac{S}{2\pi R_D} < \frac{1}{\mu_2} \quad (8)$$

代入数据计算得螺距  $S < 35 \text{ mm}$ 。

### (3) 作业参数设计

作业参数主要包括叶片的转速和升降模组的进给速度。转速越高,基质的输送效率越高,但由于直流电机功率固定,力矩随着转速升高而降低,容易被大块无法切割的基质卡住,发生憋钻现象。根据预试验结果,转速超过 3 000 r/min 时有较大概率被卡住,因此转速  $n_0 < 3\ 000$  r/min。依据式(5),当螺距为 34 mm 时,临界转速  $n_k$  为 1 191 r/min,实际转速公式为

$$n_0 = (1 + k)n_k \quad (9)$$

式中  $k$ ——常数

$k$  视土的性质、成孔直径、进给速度等因素而定,通常取 0.2 ~ 0.3,本文取 0.2。计算得叶片转速区间为  $1\ 429$  r/min  $< n_0 < 3\ 000$  r/min。

### (4) 升降速度设计

在通常的情况下,在功率一定时,采用小进给高转速的参数设计来提高剔苗的效率。剔苗时间与进给速度的关系为

$$t = h/v \quad (10)$$

式中  $h$ ——钻孔设计深度,mm

$v$ ——进给速度,mm/s

$t$ ——剔苗时间,s

设置深度  $h$  为穴孔高度 43 mm,进给时为避免憋钻现象,进给方式设置为每进给 15 mm,后退 5 mm,共 4 轮进给和 3 轮后退,进给和后退速度设置升降速度区间为 10 ~ 14 mm/s,单次剔苗用时区间为 5 ~ 7 s。

## 2.1.3 基质排出机构设计

基质在剔苗完成后临时储存在剔苗末端执行器的蓄土槽中,蓄土槽空间较小,每次剔苗完成后需要将基质转移出去便于下一次剔苗。

如图 5 所示,在机架上安装一个排土槽,排土槽一侧设置外延斜板,当剔苗末端执行器升起时,蓄土板被按压,内部基质随之倒出到排土槽中,排土槽槽体向边缘倾斜,便于基质聚沉到两侧,便于工人回收。

## 2.2 横移模块设计

横移模块如图 6 所示,横移模块主要由安装板、导轨、滑块、齿轮齿条、电机、固定架、传感器组成。安装板固定在升降模组的滑块上。安装板上搭载 2 根导轨和 1 根齿条,固定架通过电机驱动齿轮进行移动,两个剔苗末端执行器分别安装在固定架上。安装板两侧各有一个接触传感器,作为两个剔苗末端执行器的归零位置。安装板底部设置光栅,光栅间隔为一个穴孔距离,根据光电传感器通过的光栅数量确定剔苗末端执行器是否移动到指定穴孔位置。

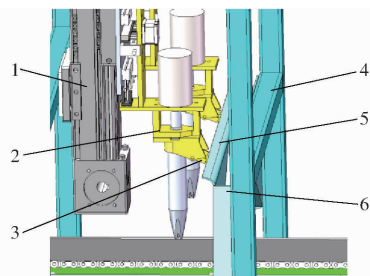


图 5 基质排出机构结构图

Fig. 5 Matrix discharge mechanism diagram

1.升降模组 2.剔苗末端执行器 3.蓄土板 4.机架 5.外延斜板 6.排土槽

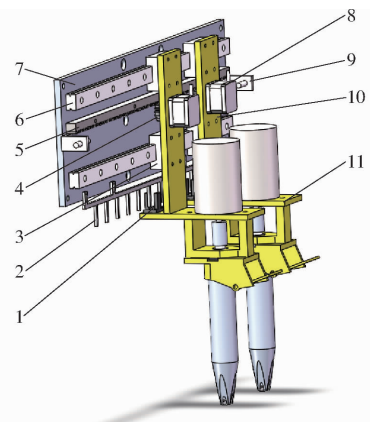


图 6 横移模块结构图

Fig. 6 Structure diagram of traverse module

1.光电传感器 2.光栅 3.滑块 4.齿轮 5.齿条 6.导轨 7.安装板 8.电机 9.接触传感器 10.固定架 11.剔苗末端执行器

横移模块每次工作时可以同时剔除同一排上的两个劣苗,但是当某一排仅有一个劣苗时,需要将一个剔苗末端执行器移动到穴盘外以避免触碰到健康钵苗。

## 2.3 双末端执行器剔苗路径规划

在剔苗作业中,设需要剔除的劣苗数量为  $n$ ,则螺旋式剔苗装置有  $(n-1)n!$  种路径可以选择。在劣苗率高的状况下,采用遍历搜索算法的运算量非常大,无法满足实时性要求,因此采用贪心算法,并对贪心算法进行修改以适应本装置。

贪心算法规划方法为:①两模块分别从点  $(0,3)$  和  $(0,8)$  开始搜寻最近坐标,找到最近点。②对搜寻结果进行干涉检验,若结果干涉,则交换位置。③若该排仅有一个穴孔需要剔苗,则将另一个模块移动到穴盘外。④根据当前位置搜寻下一个最近点,重复以上步骤。

设置传送带电机和剔苗末端执行器的移动电机速度相同,例如从  $(0,0)$  移动到  $(1,6)$  需要两个电机分别移动 1 格和 6 格,所用时长为 6 个单位,移动到  $(5,5)$  需要两个电机各移送 5 格,所用时长为 5 个

单位,因此移动到(5,5)的速度快于移动到(1,6),计算时以时间为单位进行统计。计算公式为

$$L = \max(x_1 - x_2, y_1 - y_2) \quad (11)$$

式中  $L$ ——路径长度,mm

$x_1, x_2, y_1, y_2$ ——开始行数、结束行数、开始列数、结束列数

通过 Matlab R2016a 生成 200 孔穴盘进行仿真。

各穴盘上的劣苗位置随机,数量占总数的 5% ~ 20%,如图 7 所示。

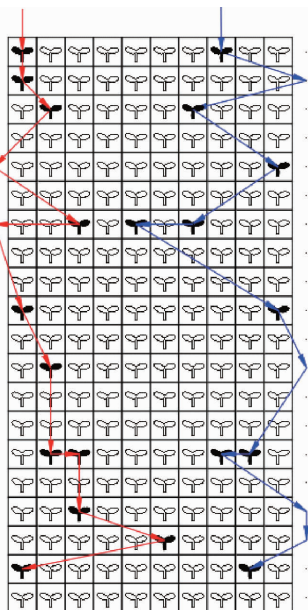


图 7 贪心优化方案

Fig. 7 Greedy optimization schemes

## 2.4 控制模块设计

控制方案如图 8 所示。信号检测元件包括光电传感器和接触传感器。上位机得到前置工序传递的劣苗坐标后进行贪心路径规划,规划后的坐标顺序通过以太网与 PLC 通信进行传输。

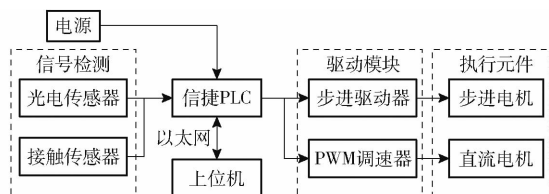


图 8 控制方案

Fig. 8 Control plan

选用信捷 XD5-32T4-E 型 PLC,具有 4 个高速脉冲口,可以同时控制链条、升降模组及两个横移电机的动作。升降模组上有两个光电传感器保证剔苗末端执行器在两个传感器之间升降,其中最高点为剔苗末端执行器的基质导出位置,最低点为螺旋叶片与输送底板接触位置;链条输送带内部安装对射型光电传感器,用于判断穴盘是否到达剔苗位置,到达位置后通过脉冲数控制穴盘

进给。横移模块通过接触传感器确定归零位置,启动时将两个剔苗末端执行器分别移动到左右两端归零,通过光电传感器经过的光栅数量确定剔苗末端执行器移动位置。

## 3 试验

### 3.1 试验材料与设备

为模拟发育不良的劣苗,试验选择 7 ~ 9 d 苗龄的孔雀草苗,穴盘尺寸为 540 mm × 280 mm,育苗基质采用泥炭、蛭石和珍珠岩,按照质量比 6:3:1 配比而成,制作相对含水率为 50% ~ 55%、55% ~ 60%、60% ~ 65% 的 3 种基质。

所用输送模块和升降模组的电机均采用 86BYGH114 型步进电机,扭矩为 850 N·cm,输送电机配合 NMRV040 型减速器,减速比为 20;升降模组为瑞芯 RXP60-L300 型同步带线性模组;横移模块采用 28HS28 型步进电机,扭矩为 8 N·cm;直流电机为 795 型电机,扭矩为 53 N·cm,工作电压 24 V;直流电机调速器为 PWM 无级调速器,工作电压 24 V;电机转速测量使用深圳振洲科技公司 QT-2243C 型非接触式转速表,准确度 0.05%,采样时间 0.8 s;基质称量使用凯丰 KFZBC-02 型多功能电子秤,精度 0.03 g。螺旋叶片和外壳采用 3D 金属打印,材料为 AlSi10Mg 铝合金,屈服强度 245 MPa。螺旋式劣苗剔除装置如图 9 所示。



图 9 螺旋式劣苗剔除装置

Fig. 9 Spiral type seedling removal device

### 3.2 试验指标

常规的测量方式是称量统计剔除前后基质剔净率  $T$ ,但是在试验中发现,有少部分基质被挤压或被螺旋叶片带出到相邻穴孔中(主要在含水率较低时发生,体积占比 5% ~ 10%),因此无法通过称量剔

除前和剔除后穴盘基质质量来计算基质剔除率。本试验采用的测量方法是:测量得到空穴孔填平基质需要质量为  $M$ , 使用已知质量  $m_1$  的基质, 将已剔除完成的穴孔填至与穴盘表面相平, 剩余基质质量为  $m_2$ , 通过填充前和填充后质量差值计算剔除率, 即

$$T = \frac{m_1 - m_2}{M} \times 100\% \quad (12)$$

### 3.3 试验方案设计

利用螺旋式剔苗装置剔除穴盘缺苗基质, 主要影响因素有螺旋叶片的切入速度及角度、螺旋叶片与基质接触面积、基质与穴孔壁的粘附力和基质间内聚力。螺旋叶片的螺距影响螺旋叶片切入的角度, 前面理论计算得到螺距需要小于 35 mm, 考虑到较小的螺距可以降低临界转速, 因此螺距水平设置为 16、20、24 mm。预留凹口可以增加螺旋叶片与基质接触面积, 设置凹口切角为 9°、10°、11°。根据前面理论计算, 电机转速设置为 1 500、2 000、2 500 r/min (由于剔苗过程中受力不均匀, 电机的转速不稳定, 该转速为空载转速), 电机升降速度设置为 10、12、14 mm/s。基质含水率影响基质间内聚力和基质与穴孔壁的粘附力, 是缺苗基质剔除作业中重要的可控影响因素, 试验选择含水率分别为 50% ~ 55%、55% ~ 60%、60% ~ 65% 的基质测试平均螺旋剔除率。钵体含水率测定, 先对试验钵钵浇透水, 分时段剪去幼苗后采用干湿质量法测钵体含水率, 从而得到 3 种含水率水平下试验样品。为保证螺旋式剔苗装置能够在不同含水率下均有较好的剔除率, 需要对 3 种不同含水率的穴孔基质分别进行验证试验, 以平均剔除率作为最终结果。

综上所述, 正交试验因素水平如表 1 所示。每组试验样本量为 3 种不同含水率各 10 个穴孔基质, 共 30 个穴孔基质。

表 1 正交试验因素水平  
Tab.1 Test factors and levels

水平	因素			
	螺距/ mm	凹口切角/ (°)	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	升降速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )
1	16	9	1 500	10
2	20	10	2 000	12
3	24	11	2 500	14

### 3.4 结果与分析

以上述 4 个影响因素为自变量, 基质平均剔除率为评价指标, 试验结果如表 2 所示。 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  为因素水平值。

根据  $k$  值确定优组合为  $X_{11}X_{22}X_{33}X_{41}$ , 即螺距 16 mm, 凹口切角 10°, 转速 2 500 r/min, 升降速度

表 2 试验结果与极差分析

Tab.2 Experimental results and range analysis

编号	因素				含水率 50% ~ 净率/%	含水率 55% ~ 净率/%	含水率 60% ~ 净率/%	平均 剔除 率/%
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	55%时剔 净率/%	60%时剔 净率/%	65%时剔 净率/%	
1	1	1	1	1	92.7	72	64.9	76.5
2	1	2	3	2	94.8	89.3	79.7	87.9
3	1	3	2	3	75.1	74	58.1	69.1
4	2	1	3	3	89.0	76.1	64.5	76.5
5	2	2	2	1	94.2	82.7	70.1	82.3
6	2	3	1	2	71.8	68.6	51.3	63.9
7	3	1	2	2	86.2	65.9	58.5	70.2
8	3	2	1	3	81.3	61.9	56.5	66.6
9	3	3	3	1	67.7	67.2	56.8	63.9
$k_1$	77.8	74.4	69.0	74.3				
$k_2$	74.3	78.9	73.9	74.0				
$k_3$	66.9	65.6	76.1	70.7				
$R$	10.9	13.3	7.1	3.6				

10 mm/s。据极差分析的  $R$  确定试验因素影响从大到小顺序为凹口切角、螺距、转速、升降速度。在螺旋式基质剔除正交试验中, 凹口切角显著影响基质剔除率, 较小的凹口使得大量基质被破碎后难以挤入输送通道, 容易出现憋钻现象, 大凹口在输送中有基质从凹口上端掉落, 同时在螺旋叶片与基质开始接触时出现较明显的飞溅现象。在限制范围内, 转速越高, 剔除率也越高, 在 1 500 ~ 2 000 r/min 区间内转速提升对剔除率影响大, 超过 2 000 r/min 后影响减弱。较小的螺距可以提高剔除率, 但会降低剔除效率, 增加剔除时间。合理的范围区间内, 升降速度对剔除率影响较小, 速度的增加会逐渐降低剔除率, 在使用中可以适当提升速度, 提升工作效率。

此外, 基质含水率对剔除率有很大的影响, 基质含水率为 60% ~ 65% 时, 有较多的基质黏附于穴孔壁, 这是由于边缘的基质在螺旋叶片下降过程中无法被接触到, 同时较高的含水率使得黏附在穴孔壁上的基质难以被负压吸附到, 在末端执行器的外壳和穴孔壁的挤压下, 少部分基质被挤到相邻穴孔中, 其余基质被牢牢黏在穴孔壁和外壳上。基质含水率为 50% ~ 55% 时, 穴孔内基质松散, 其内聚力和穴孔壁的粘附力低, 即使边缘基质无法接触到叶片, 但在螺旋叶片对中间基质破碎并吸附后, 可以自行下落, 因此, 基质剔除率可以较为容易达到 90% 以上, 仅有少量在穴孔底部的基质留存。

### 3.5 性能验证

将最优组合工作参数应用到醉蝶花穴盘苗, 开展验证性试验。选择 9 d 苗龄的 200 孔穴盘孔雀草苗 3 盘, 控制含水率分别为 50% ~ 55%、55% ~

60%、60%~65%，通过前置相机识别并输入劣苗坐标。试验结果为96.6%、89.9%、83.7%，结果表明基质平均剔净率为90.07%，整机作业效率平均为832孔/h(约42盘/h)。

在试验中发现，在叶片破碎基质的过程中，部分根茎可以在叶片带动下清理掉黏附在穴孔壁上的基质，有幼龄根须的穴孔基质剔净率略高于无根茎的穴孔，但是个别较长的根须会卡死在叶片与管壁的缝隙中，出现憋钻现象。在剔除过程中电机转速会有一定程度下降，根据含水率的不同转速下降5%~15%，这是在高含水率下剔净率较低的原因之一。本文中升降模组采用的是步进电机，受到较大阻力时会出现丢步现象，实际进行一次升降剔苗用时约为7.2s，通过安装两个剔苗末端执行器的方式可以提升装备剔苗效率。图10为螺旋式剔苗装置剔除效果，含水率分别为50%~55%、60%~65%时，通过螺旋叶片对基质进行剔除的方式具有可行性。

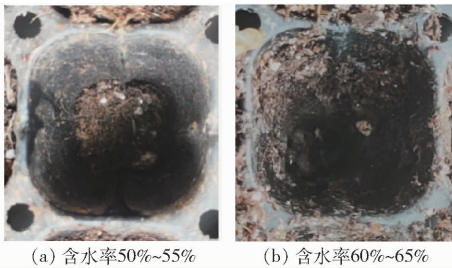


图10 螺旋式剔苗装置剔除效果

Fig.10 Removal effect of spiral seedling removal device

从图10可以看出，本文研究的螺旋式基质剔除装置，利用螺旋叶片对周围基质切削、破碎，能够在不同含水率条件下具有较高的剔净率。整体装置可与现有补苗移栽机组合配套使用，形成自动化剔补苗装置，显著提高穴盘苗剔补苗成功率。

## 4 结论

(1)针对指铲式和气吸式剔苗产生的问题，本文设计了一种螺旋式劣苗剔除装置，将基质破碎后通过螺旋输送出穴孔，有效避免指铲式剔除时含水率过低无法完整抓取，纯负压式剔除时含水率过高黏附管壁等问题，在不同含水率下均具有较高的剔净率。

(2)对螺旋叶片升土理论进行分析，得出物料挤压输送时，管壁的粗糙度、螺旋叶片半径及螺距均会影响临界转速。物料进行负压吸附时，物料的临界分离粒径则主要受到螺旋尺寸、物料充填率、物料转速影响。对关键部件进行设计，得出外壳、螺旋叶片尺寸，确定作业参数。

(3)开展螺旋式基质剔除正交试验，结果表明，试验因素影响由大到小顺序为：凹口切角、螺距、转速、升降速度。最优参数组合为：螺距16mm、凹口切角 $10^\circ$ 、转速2500r/min、升降速度10mm/s。开展性能验证试验，结果表明，整机作业效率平均为832孔/h(约42盘/h)，基质平均剔净率在83%以上，满足剔补苗作业需求。

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 杨先超,马月虹. 设施内蔬菜机械化育苗移栽的现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2022, 44(7):8-13,32.  
YANG Xianchao, MA Yuehong. Current situation and development trend of vegetable mechanized seedling transplanting in facilities[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 8-13, 32. (in Chinese)
- [3] 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 Jinyuan, 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)
- [4] 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)
- [5] 徐浩. 基于深度学习温室辣椒钵苗剔补移栽装备设计与试验[D]. 扬州:扬州大学, 2021.  
XU Hao. Design and experiment of greenhouse seedling picking mechanism based on machine vision[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 胡建平,靳合琦,常燕超,等. 基于Delta并联机构钵苗移栽机器人尺度综合与轨迹规划[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 28-35.



- HU Jianping, JIN Heqi, CHANG Yanchao, et al. Dimensional synthesis and trajectory planning of plug seedling transplanting robot based on Delta parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 28-35. (in Chinese)
- [8] 杨启志,孙梦涛,蔡静,等. 温室穴盘苗并联高速移栽机器人运动误差分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 18-27.
- YANG Qizhi, SUN Mengtao, CAI Jing, et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for greenhouse based on parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 18-27. (in Chinese)
- [9] 黎波,辜松,谢忠坚,等. 穴盘苗吹叶补苗机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 1-8.
- LI Bo, GU Song, XIE Zhongjian, et al. Design and experiments of the mechanism of blowing leaves and replanting of plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 1-8. (in Chinese)
- [10] TONG J H, YU J L, WU C Y, et al. Health information acquisition and position calculation of plug seedling in greenhouse seedling bed[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185(3): 106146.
- [11] 童俊华,石虎峰,武传宇,等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107-116.
- TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107-116. (in Chinese)
- [12] 董文勋. 基于Delta机器人的穴盘剔补苗技术与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2022.
- DONG Wenxun. Technology and experimental research of plug tray picking seedlings based on Delta robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021, (in Chinese)
- [13] TIAN Z, MA W, YANG Q, et al. Design and experiment of gripper for greenhouse plug seedling transplanting based on EDM[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1487.
- [14] 胡建平,刘育彤,刘伟,等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 110-117, 184.
- HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experimental study on the combined plant-taking device of vegetable automatic transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 110-117, 184. (in Chinese)
- [15] 崔永杰,朱玉桃,马利,等. 穴盘缺苗气吸式基质剔除装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 140-151.
- CUI Yongjie, ZHU Yutao, MA Li, et al. Design and experiment of air-suction substrates removal device for plug lack of seedlings trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 140-151. (in Chinese)
- [16] 梅潇,薛玉坤,刘海文. 垂直螺旋输送不同物料特性的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(2): 26-33.
- MEI Xiao, XUE Yukun, LIU Haiwen. Experimental study on characteristics of vertical screw conveying different materials[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(2): 26-33. (in Chinese)
- [17] DHEERAJ M, ABHISHEK S, HARSH P, et al. Analysis of flow behavior of size distributed spherical particles in screw feeder[J]. Powder Technology, 2021, 382: 1-22.
- [18] FEBIANI D U, CINDY Y, MAHARANI R, et al. Evaluation of paddy drying with vertical screw conveyor dryer (VSCD) at different air velocities and temperatures[J]. Chemical Engineering and Processing, 2022, 174: 108881.
- [19] 范虎军,牛淑卿,唐春梅,等. 悬挂式土壤钻孔施肥一体机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 70-76.
- FAN Hujun, NIU Shuqing, TANG Chunmei, et al. Design and experiment of hanging soil drilling and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 70-76. (in Chinese)
- [20] 位国建,祁兵,焦伟,等. 水田机械式强制排肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 154-164.
- WEI Guojian, QI Bing, JIAO Wei, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 154-164. (in Chinese)
- [21] DING X T, WEI Y Z, YAN Z Y, et al. Simulation and experiment of the spiral digging end-effector for hole digging in plug tray seedling substrate[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 779.
- [22] 程洋洋. 垂直螺旋输送机螺旋体多目标优化设计研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2022.
- CHENG Yangyang. Research on multi-objective optimization design of helix of vertical screw conveyor[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [23] 黄亚光. 挖坑机执行机构动力学分析及参数研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- HUANG Yaguang. Dynamics analysis and parameters research on digging machine actuator[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [24] 李郁. 螺旋气力吸取料分离过程物料流动特性的试验研究与数值仿真[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
- LI Yu. The mathematical simulation and experimental research on the particle flowing nature in the screw-gas bulk sucking and taking equipment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)