

油菜裸苗移栽机柔性夹持分苗装置设计与试验

廖庆喜^{1,2} 刘凯文¹ 袁华¹ 杨恒¹ 邓承诺¹ 杜文斌¹ 万星宇^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油菜裸苗机械化移栽根茎相互缠绕导致分苗难度大、常规分苗装置易损伤根茎等问题, 本文提出了一种人工辅助成排铺放 + 柔性夹持输送 + 间歇拨动分离的分苗工艺, 设计了一种柔性夹持分苗装置。测定适栽期油菜裸苗物料特性, 确定了柔性夹持机构横向输送带宽度为 216 mm; 通过柔性夹持输送过程油菜裸苗动力学分析, 确定喂入口角度为 30°; 模拟人工分苗轨迹, 并基于 Burmester 理论对分苗机构刚体导引分析, 确定了曲柄长度 32 mm, 摇杆长度 50 mm; 开展柔性夹持机构和分苗机构运动参数匹配分析, 确定了柔性夹持机构输送速度为 25 ~ 55 mm/s, 分苗机构拨动频率为 50 ~ 120 次/min; 以分苗口角度、柔性夹持机构输送速度、分苗机构拨动频率为试验因素, 以分苗成功率、伤苗率为评价指标, 开展台架正交试验。试验结果表明, 最优参数组合为: 分苗口角度 55°、柔性夹持机构输送速度 48 mm/s、分苗机构拨动频率 85 次/min, 此时, 分苗装置分苗成功率和伤苗率为 89.06% 和 3.91%; 田间试验结果表明, 分苗装置各机构运行平稳, 作业性能满足油菜裸苗机械化移栽作业要求。研究结果可为油菜裸苗自动移栽设备设计提供技术参考。

关键词: 油菜裸苗; 移栽机; 分苗装置; Burmester 理论; 刚体导引

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)06-0141-13

OSID:



Design and Experiment of Flexible Clamping Seeding Detaching Device for Rape Bare Seedling Transplanter

LIAO Qingxi^{1,2} LIU Kaiwen¹ YUAN Hua¹ YANG Heng¹ DENG Chengnuo¹ DU Wenbin¹ WAN Xingyu^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problems that the roots and stems of mechanized transplanting of bare rape seedlings are intertwined, which makes it difficult to separate seedlings and the conventional seedling separation device is easy to damage the roots and stems, a seedling separation process of artificial assisted row placement + flexible clamping transportation + intermittent dial separation was proposed, and a flexible clamping seedling separation device was developed. A flexible clamping seedling separation device was designed. The material characteristics of rapeseed bare seedlings during the optimal transplanting period were measured, determining the transverse conveyor belt width of the flexible clamping mechanism to be 216 mm. The dynamics of rapeseed bare seedlings during the flexible clamping and conveying process were analyzed, and the feed inlet angle was determined to be 30°. The trajectory of manual seedling separation was simulated, and rigid-body guidance of the separation mechanism was analyzed based on Burmester theory, resulting in the determination of a crank length of 32 mm and a rocker length of 50 mm. Motion parameter matching analysis was conducted for the flexible clamping mechanism and the seedling separation mechanism, determining the flexible clamping mechanism's conveying speed to be 25 ~ 55 mm/s and the separation mechanism's poking frequency to be 50 ~ 120 times/min. An orthogonal bench test was conducted with the separation outlet angle, the conveying speed of the flexible clamping mechanism, and the poking frequency of the separation mechanism as test factors, and the seedling separation success rate and seedling damage rate as evaluation indices. The test results showed that the optimal parameter combination was a separation outlet angle of 55°, a conveying

收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-03-07

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(CASR-12-27)

作者简介: 廖庆喜(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

speed of 48 mm/s for the flexible clamping mechanism, and a poking frequency of 85 times/min. Under these conditions, the seedling separation success rate and damage rate of the device were 89.06% and 3.91%. The field test showed that each mechanism of the seedling separation device ran smoothly, and the operation performance met the requirements of mechanized transplanting of bare rape seedlings. The research results can provide technical reference for the design of automatic transplanting equipment for bare rape seedlings.

Key words: bare rape seedlings; transplanter; seeding detaching device; Burmester theory; rigid-body guiding

0 引言

中国冬油菜种植区主要集中在长江流域,采用稻-油或稻-稻-油轮作种植模式,茬口矛盾突出。油菜机械化移栽是缓解茬口矛盾的主要方式之一,是缩短作物生长周期、减少种子浪费、提高作物单产的有效途径^[1-3]。油菜移栽对象多以毯状苗、钵苗、穴盘苗、基质块苗和裸苗为主,其中裸苗移栽具有无需配套育苗设备,减少输送环节,节约成本等优点^[4]。现有的油菜裸苗移栽机多为鸭嘴式移栽机或挠性圆盘式移栽机^[5-8],一次作业最多栽植2行,且需要人工单株分苗,劳动强度大,移栽效率低^[9]。并且油菜裸苗适栽期内质地脆嫩、根茎缠绕,常规分苗装置易损伤根茎并难以分苗,导致栽植不均匀、成活率低。

国外对移栽机及其配套分苗装置研究较早,具有自动化程度高、机电液结合的特点,如意大利 Ferrari 公司生产的 FUTURA 全自动移栽机,采用气缸顶出和机械手夹取结合的整排分苗方式,分苗效率高^[10];荷兰 TTA 公司生产的 Packplanter 自动移栽机,采用微机系统控制分苗爪成排分苗,分苗性能较好,在温室环境下可实现高速移栽作业,上述国外移栽机分苗装置主要针对钵苗和穴盘苗^[11-12],分苗效率较高,但成本高且结构复杂,不适用于我国大田作物移栽。针对国内移栽机械分苗工作长期依靠人工完成,严重制约移栽效率的问题,学者们展开了大量研究,在现有移栽机基础上,根据不同作物物料特性,研制了许多自动化分苗装置。王徐建^[13]根据甘草苗根物理特性,设计了一种基于曲柄连杆机构驱动的振动分苗装置,可有效提高分苗效率;汲文峰等^[14]基于振动机理设计了一种藜蒿扦插机分苗机构,可实现裸苗渐次有序分离;胡乔磊等^[15]对现有的取苗装置进行机构改进,采用气动分苗和对辊取苗联动有序配合的方式,提高了油菜基质块苗栽植效率和质量;张学东等^[16]针对顶夹结合式分取苗装置易出现顶苗失败、钵体受损等问题,结合仿真试验,对顶夹分取苗装置末端执行器进行优化设计,提高了分苗成功率;计东等^[17]设计了一种双排移栽机

机械手联动式高速移栽装置,采用联动控制方式,分苗效率较高;韩绿化等^[18]设计了一种两指四针钳夹式分取苗装置,通过 PLC 控制气缸机械手指的闭合和撑开进行分苗和放苗。综上,国内学者从结构设计、仿真分析等方面开展了对分苗装置研究,但多以钵苗、基质块苗为研究对象,需配套育苗设施,劳动强度大且会降低油菜种植效益,因此开展裸苗移栽机及其配套的分苗装置研究对提升油菜种植效益,减轻劳动强度具有重要意义。

本文以适栽期油菜裸苗为研究对象,设计一种柔性夹持分苗装置,测定分析适栽期油菜裸苗外形几何特征和力学特性,分析分苗过程动力学,以高分苗成功率和低伤苗率为目标,通过台架试验和田间试验验证分苗装置作业性能,以为油菜裸苗移栽机配套分苗装置研制提供参考。

1 油菜裸苗物料特性测定

油菜裸苗在机构约束条件下实现分苗,其物料特性是开展分苗装置关键部件参数分析的基础。以“华油杂 62”,播种后生长期 23 d,叶片 3~5 片的油菜裸苗为研究对象,开展油菜裸苗外形尺寸测定试验、油菜裸苗茎秆压缩试验及油菜裸苗摩擦特性测定试验。试验过程如图 1 所示,物料特性测定结果

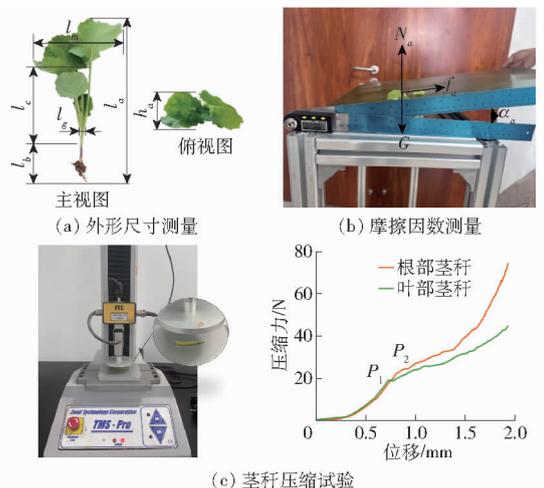


图 1 油菜裸苗物料特性测定试验

Fig. 1 Determination of material characteristics of rape seedlings

如表1所示。

表1 油菜裸苗外形尺寸参数及与不同材料间摩擦因数测定

Tab.1 Determination of friction coefficients between naked rape seedlings and different materials

参数	数值
株长 l_a /mm	192.30
根长 l_b /mm	24.86
茎长 l_c /mm	62.47
质量 m /g	5.37
株高 h_a /mm	20.45
根茎结合部直径 l_g /mm	4.97
苗幅宽 l_m /mm	40.01
油菜裸苗与塑料带间摩擦因数	0.58
油菜裸苗与橡胶带间摩擦因数	0.73
油菜裸苗与海绵带间摩擦因数	1.82

随机选取10株,测取裸苗在自然躺平状态下的外形尺寸参数,结果取平均值,如图1a所示,图中 l_m 为油菜裸苗平均苗幅宽、 l_a 为平均株长、 l_c 为平均茎长、 l_b 为平均根长、 l_g 为平均根茎结合部直径、 h_a 为平均株高。试验结果表明,油菜裸苗平均株长 l_a 为192.30 mm、平均株高 h_a 为20.45 mm。

采用自制摩擦角测定装置进行摩擦特性试验,如图1b所示,将油菜裸苗分别水平放置在塑料带、海绵带和橡胶带上,并缓慢抬升斜面,当油菜裸苗产生轻微滑动时,记录数显倾角仪角度,结果表明,油菜裸苗与海绵带之间摩擦因数最大,与塑料带之间摩擦因数最小,当输送带材料为塑料时裸苗滑动能力强,有利于提高分苗效果,当输送带材料为海绵时,有较好的自由度约束能力。

采用FTC公司生产的TMS-PRO型质构仪及其配套的压缩平板对油菜裸苗柔性夹持区根部、叶部茎秆分别进行屈服力测定,预设压缩力为1 N,压缩速度10 mm/min,压缩量大于2 mm,记录压缩全过程压缩力与位移情况,试验结果如图1c所示,点O为初接触点,OP₁和OP₂阶段压缩力随位移增加近似为线性增加,到达点P₁、P₂后,压缩力随位移增加不再保持线性,压缩力先减小后增大。以上曲线说明茎秆在OP₁和OP₂阶段属于弹性变形阶段,点P₁和P₂为其生物屈服点,卸载后可恢复;点P₁和P₂后茎秆变形与损伤为永久性不可恢复。故茎秆可承受的压缩屈服极限分别为24.8、19.3 N。

2 整机结构及工作过程

2.1 整机结构

油菜裸苗移栽机主要由螺旋匀土器、三点悬挂、限深装置、机架、座椅、控制箱和3个并行排列的移

栽单元组成,每个移栽单元由柔性夹持分苗装置、苗箱、竖向送苗装置、开沟装置和覆土镇压装置组成,其中柔性夹持分苗装置是该机关键部件。油菜裸苗移栽机结构如图2所示,其主要技术参数如表2所示。

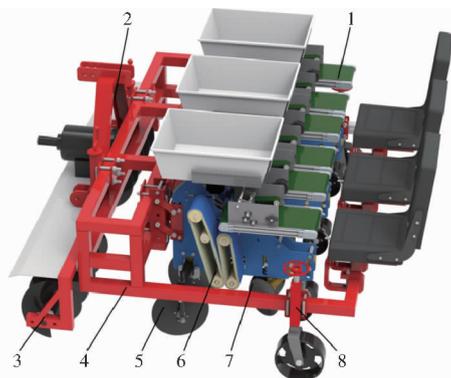


图2 油菜裸苗移栽机结构示意图

Fig.2 Structure diagram of rape bare seedling transplanting machine

1. 柔性夹持分苗装置 2. 三点悬挂 3. 螺旋匀土器 4. 机架
5. 开沟器 6. 竖向送苗装置 7. 覆土镇压装置 8. 限深装置

表2 油菜裸苗移栽机主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 400×2 000×1 350
整机质量/kg	700
栽植行距(宽窄行)/mm	200/500/200
栽植株距/mm	100~300
工作行数/行	6
工作幅宽/mm	2 000
配套电机功率/kW	1.8

2.2 工作过程

油菜裸苗移栽机工作过程主要包括厢面整理、苗沟制备、柔性夹持分苗、竖向夹持送苗、覆土镇压5个工序。柔性夹持分苗过程分为人工辅助成排铺放、柔性夹持输送、间歇拨动分离3个阶段,工作原理如图3所示。在人工辅助成排铺放阶段,人工将油菜裸苗成排铺放到柔性夹持机构的横向输送带后端,横向输送带以速度 v 携带裸苗向前运动;到柔性夹持输送阶段,横向输送带和压顶输送带夹持油菜裸苗继续以速度 v 向前输送^[19],且输送过程横向输送带与压顶输送带之间的距离逐渐减小,对油菜裸苗充分约束;至间歇拨动分离阶段,曲柄连续回转带动分苗爪将输送到该处的裸苗单株间歇拨动分离,因为柔性夹持机构约束,正在分离的裸苗无法对待分离裸苗姿态产生干扰。

3 柔性夹持分苗装置设计

分苗装置主要包括通过联轴器连接对称分布的

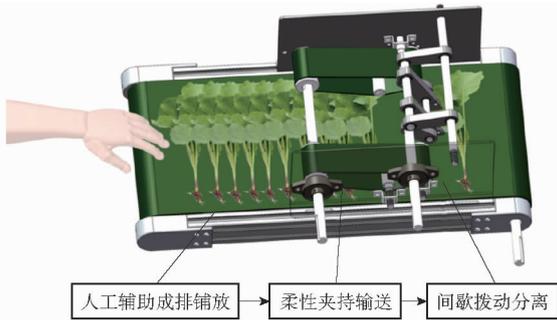


图3 分苗装置工作流程图

Fig. 3 Working flowchart of seedling separating device

2个分苗单元,每个分苗单元主要包括柔性夹持机构、分苗机构和分苗挡板3部分,如图4所示,柔性夹持机构由压顶输送带、横向输送带等组成,可以将成排铺放的油菜裸苗稳定有序地向分苗机构输送,为实现间歇拨动分苗提供条件;分苗机构由曲柄、摇杆、分苗爪等组成,可将输送来的成排裸苗单株拨动分离。

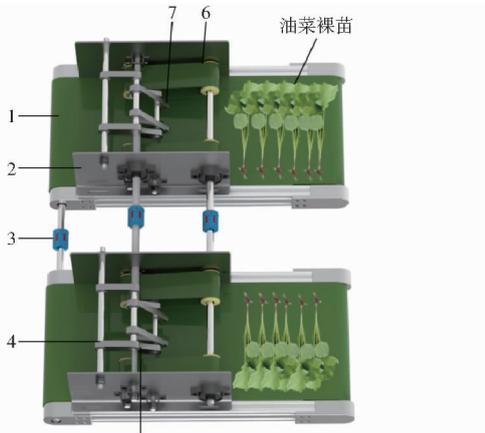


图4 分苗装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of seedling separating device

1. 横向输送带 2. 分苗挡板 3. 联轴器 4. 摇杆 5. 曲柄 6. 压顶输送带 7. 分苗爪

3.1 柔性夹持机构设计

3.1.1 压顶输送带参数设计

压顶输送带在输送过程中可对裸苗根叶充分约束,如图5所示,结合适栽期油菜裸苗外形尺寸设计压顶输送带宽度 L_b 为40 mm,压顶输送带长度 L_d 应满足

$$L_d = \frac{b-e}{\tan\alpha} + \frac{d-e}{\tan\beta} \quad (1)$$

式中 b ——喂入口高度,mm

e ——压顶输送带与横向输送带距离最近处距离,mm

d ——分苗口高度,mm

α ——喂入口角度, $(^\circ)$

β ——分苗口角度, $(^\circ)$

由式(1)可知, L_d 与 b 、 e 、 d 、 α 和 β 有关。

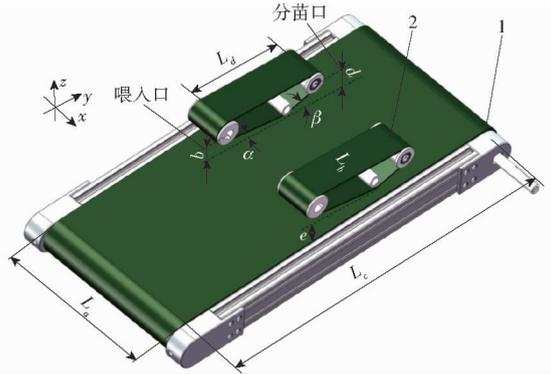


图5 柔性夹持机构示意图

Fig. 5 Schematic of flexible clamping mechanism

1. 横向输送带 2. 压顶输送带

当输送的裸苗到达喂入口处时,为保证裸苗能够稳定喂入,喂入口高度 b 应大于裸苗在自然躺平时测得的平均株高,根据试验测量的适栽期油菜裸苗平均株高 h_a 为20.45 mm,高度余量取 $h_a/2$,计算得喂入口高度 b 为30.68 mm,取整得31 mm。并且在喂入口处裸苗易发生堵塞,为保证稳定喂入并输送,对喂入的第1株裸苗进行受力分析,如图6所示,其受力满足

$$\begin{cases} F_1 \sin\alpha - f_1 \cos\alpha - f_2 + F_t = ma_x \\ f_1 \sin\alpha + G + F_1 \cos\alpha - F_{n1} = ma_y \\ f_1 = \mu_1 F_1 \\ f_2 = \mu_2 F_{n1} \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_t ——油菜裸苗之间的纠缠力,取0.05 N

f_1 ——喂入口压顶输送带对油菜裸苗摩擦力,N

G ——油菜裸苗重力,N

μ_1 ——海绵带对油菜裸苗摩擦因数

F_{n1} ——喂入口横向输送带对油菜裸苗支持力,N

m ——油菜裸苗质量,g

a_x ——喂入口油菜裸苗水平加速度, mm^2/s

a_y ——喂入口油菜裸苗垂直加速度, mm^2/s

f_2 ——喂入口横向输送带对油菜裸苗摩擦力,N

μ_2 ——塑料带对油菜裸苗的摩擦因数平均值

F_1 ——喂入口压顶输送带对油菜裸苗压力,N

由式(1)、(2)可知,喂入口角度 α 越大,油菜裸苗在水平向左的加速度越大,减速越显著,越容易发生堵塞;喂入口角度 α 越小,压顶输送带长度 L_d 越大,分苗装置尺寸越大,因此基于输送流畅性及分苗装置尺寸,设计喂入口角度 α 为 30° 。

为了保证分苗机构能够进行稳定分苗,并避免在裸苗之间牵扯力的作用下,正在分离的裸苗带动

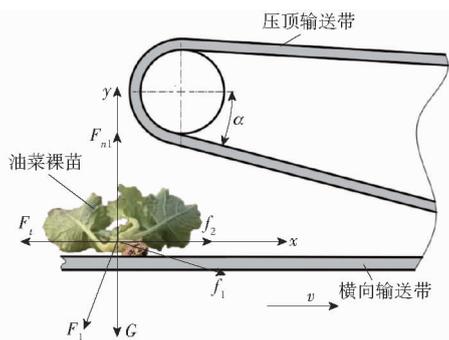


图6 喂入口裸苗受力分析

Fig. 6 Force analysis of feeding entrance bare seedlings

后续未分离的裸苗,影响分苗效果,对分苗口角度 β 进行设计,其参数应满足

$$\begin{cases} \frac{d-e}{\tan\beta} \geq l_m \\ \beta \geq \arctan \frac{2h_a}{l_m} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,分苗口角度 β 与压顶输送带与横向输送带距离最近处距离 e 、分苗口高度 d 、平均苗幅宽 l_m 和平均株高 h_a 有关,压顶输送带与横向输送带距离最近处高度 e 应略小于油菜裸苗根茎结合部直径,考虑压顶输送带收缩余量,设计压顶输送带与横向输送带距离最近处距离 e 为 4.5 mm,并设计分苗口高度 d 为 65 mm,计算得分苗口角度 β 为 $44.92^\circ \sim 56.31^\circ$ 。

柔性夹持输送过程中若挤压力过大,会造成油菜裸苗茎秆形变及损伤,对首株运输到分苗口处裸苗进行受力分析^[20-21],如图7所示,其受力满足

$$\begin{cases} f_4 - F_t - f_3 = 0 \\ F_{n2} - F_2 - G = 0 \\ f_4 = \mu_1 F_2 \\ f_3 = \mu_2 F_{n2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 f_4 ——分苗口压顶输送带对油菜裸苗摩擦力, N

F_2 ——分苗口裸苗所受压力, N

F_{n2} ——分苗口横向输送带对油菜裸苗支持力, N

f_3 ——分苗口横向输送带对油菜裸苗摩擦力, N

由式(4)计算得分苗口处裸苗所受的压力 $F_2 = 0.06$ N,远小于预压缩试验测得的使裸苗茎秆产生损伤的最小挤压力,满足无损输送条件。

3.1.2 横向输送带参数设计

为使油菜裸苗能顺利铺放到横向输送带上,且平稳向前输送,输送带宽度应大于油菜裸苗平均株长,根据试验测量的适栽期油菜裸苗平均株长 l_a 为 192.3 mm,宽度余量取 $L_a/8$,计算得横向输送带宽

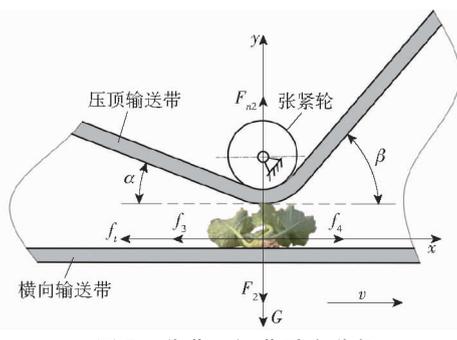


图7 分苗口裸苗受力分析

Fig. 7 Stress analysis of bare seedlings at seedling mouth

度 L_a 为 216.34 mm,取整为 216 mm^[22]。

横向输送带设计长度过长会使其结构庞大,过短则会增加取苗频率。为保证输送机构能够容纳整排裸苗,其长度应满足

$$L_c = n_l l_m (1 - K_s) + l_m K_s + \Delta L + L_d \quad (5)$$

式中 n_l ——整排油菜裸苗数量,取 8

L_c ——横向输送带长度, mm

K_s ——相邻两油菜裸苗重叠系数,取 0.35

ΔL ——横向输送带长度余量, mm

由式(5)可知,横向输送带长度与整排油菜裸苗数量 n_l 、相邻两油菜裸苗重叠系数 K_s 和压顶输送带长度 L_d 有关,由式(1)计算得压顶输送带长度为 85.95 ~ 90.41 mm,长度余量至少预留 2 株油菜裸苗的苗幅宽,计算并圆整得到横向输送带长度为 388 ~ 392 mm。为满足范围调节,在设计张紧螺栓进行调节。

3.2 分苗机构设计

3.2.1 人工拨动分苗动作

为模拟人工分苗动作,对人工拨动分苗过程采用高速摄像机拍摄,以实际动作为参考建立人工分苗模型,并分析人工分苗过程指尖点轨迹,如图8所示。



图8 人工分苗动作分析模型

Fig. 8 Analysis model of artificial seedling sorting action

3.2.2 指尖点轨迹

根据手指对整排油菜裸苗拨动分离最佳效果轨迹,如图9所示,采用分苗机构实现刚体导引,并且分苗爪在运动过程中需要避免运动干涉,分苗爪在驱动件作用下按照预定轨迹运动,将柔性夹持机构输送到分苗口的裸苗进行单株分离。根据 Burmester 精确位置综合理论,给定分苗爪尖点预期运动轨迹上 4 个位置 $E_1 \sim E_4$,即可反求出所需的分

苗机构(曲柄摇杆机构) $A_0A_1B_1B_0$,使其连杆上一点 I 在运动过程中按顺序经过这 4 位置,从而实现前述分苗爪刚体导引。图 9 中位置 $E_1 \sim E_4$ 由分苗爪通过该位置时的导引点坐标 (x, y) 和 $\Delta\delta_i$ 确定^[23]。

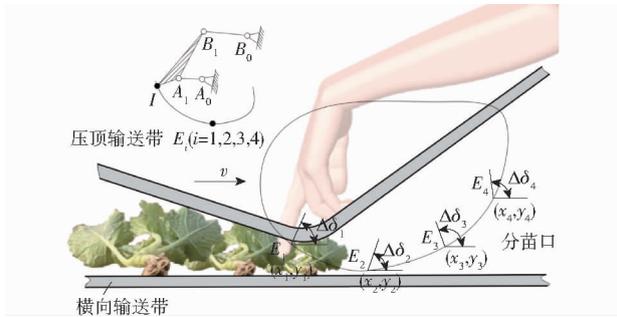


图 9 分苗爪导引轨迹

Fig.9 Seedling claw guidance trajectory

根据所设计分苗爪导引轨迹,给出分苗爪位置坐标如表 3 所示。为了分苗稳定性,每排裸苗分苗爪及其导引机构共配置 2 组,并且相对于横向输送带中线左右对称,为方便表述,取其中 1 组进行讨论。

表 3 分苗爪位置信息

Tab.3 Seedling claw position information

位置	x/mm	y/mm	$\Delta\delta_i/(^\circ)$
E_1	-51.16	166.35	0
E_2	-31.18	140.95	-11.42
E_3	-24.99	107.24	-33.42
E_4	-33.26	85.41	-48.75

3.2.3 分苗机构刚体导引模型建立

采用矢量环法导出圆心曲线方程,直接建立圆心点坐标在直角坐标系的几何描述,将分苗机构分解为 2 个二杆组,如图 10 所示。2 个二杆组计算方法完全相同,因此只需计算其中 1 个二杆组,选择左侧由 r_2 和 r_3 组成的二杆组进行讨论^[24-25]。

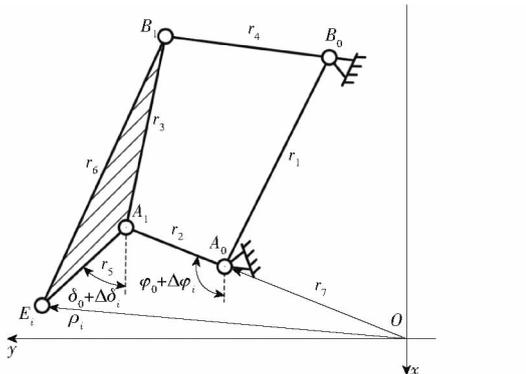


图 10 分苗机构刚体导引模型

Fig.10 Rigid body guidance model of seedling mechanism

由封闭四边形 $OA_0A_1E_i$ 可得二杆组 r_2, r_3 在第 i 个位置矢量环封闭方程为

$$r_7 + r_2 + r_3 - \rho_i = 0 \quad (6)$$

将式(6)转换为标量表达式,并向 x, y 方向投影可得到各杆件尺寸关系为

$$\begin{cases} x_{A_0} + r_2 \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) + r_3 \cos(\delta_0 + \Delta\delta_i) - x_{E_i} = 0 \\ y_{A_0} + r_2 \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) + r_3 \sin(\delta_0 + \Delta\delta_i) - y_{E_i} = 0 \\ (i = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (7)$$

- 式中 φ_0 ——曲柄 A_0A_1 初始幅角, ($^\circ$)
- φ_i ——曲柄 A_0A_1 在第 i 个位置时幅角, ($^\circ$)
- $\Delta\varphi_i$ ——曲柄 A_0A_1 在第 i 个位置相对于初始位置的相对转角, ($^\circ$)
- r_2 ——曲柄 A_0A_1 长度, mm
- δ_0 ——分苗爪短侧 A_1E_i 初始幅角, ($^\circ$)
- δ_i ——分苗爪短侧 A_1E_i 在第 i 个位置时的幅角, ($^\circ$)
- $\Delta\delta_i$ ——分苗爪短侧 A_1E_i 在第 i 个位置相对于初始位置的相对转角, ($^\circ$)
- r_3 ——分苗爪短侧 A_1E_i 长度, mm

曲柄 A_0A_1 幅角 $(\varphi_0 + \Delta\varphi_i)$ 满足

$$\cos^2(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) + \sin^2(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) = 1 \quad (8)$$

联立式(7)、(8),可得

$$\sum_{j=0}^5 f_{ji} S_j + F_{E_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

其中 $f_{0i} = (x_{A_0} - x_{E_i}) \cos\Delta\delta_i - y_{E_i} \sin\Delta\delta_i$

$$f_{1i} = -(x_{A_0} - x_{E_i}) \sin\Delta\delta_i - y_{E_i} \cos\Delta\delta_i$$

$$f_{2i} = -y_{E_i} \quad f_{3i} = 1$$

$$f_{4i} = \cos\Delta\delta_i \quad f_{5i} = \sin\Delta\delta_i$$

$$F_{E_i} = \frac{1}{2}(x_{E_i}^2 + y_{E_i}^2 + x_{A_0}^2) - x_{A_0} x_{E_i}$$

$$S_0 = r_5 \cos\delta_0 \quad S_1 = r_3 \sin\delta_0$$

$$S_2 = y_{A_0} \quad S_3 = \frac{1}{2}(y_{A_0}^2 - r_2^2 + r_5^2)$$

$$S_4 = y_{A_0} r_3 \sin\delta_0 \quad S_5 = y_{A_0} r_3 \cos\delta_0$$

Burmester 曲线即为圆心曲线和圆点曲线总称,圆心点可作为定铰链铰接点,圆点可作为动铰链铰接点。由式(9)可知,给定 A_0 的 x 坐标 x_{A_0} ,即可得到圆心点坐标 (x_{A_0}, y_{A_0}) ,对于求出圆心点坐标,其对应的圆点坐标 A_1 为 $(x_{A_0} + UZ_1 - VZ_2, y_{A_0} + UZ_2 + VZ_1)$,其中

$$\begin{cases} V = \pm \sqrt{\frac{r_2^2}{Z_3} - U^2} \\ Z_1 = x_{E_1} - x_{A_0} \\ Z_2 = y_{E_1} - y_{A_0} \\ Z_3 = Z_1^2 + Z_2^2 \\ U = \frac{Z_3 + r_2^2 - r_5^2}{2Z_3} \end{cases} \quad (10)$$

设计 x_{A_0} 取值为 $-100 \sim 100$ mm, 将上述运动学模型导入 Matlab 进行计算, 并将求得圆心点和圆点分别用直线进行连接, 即可得到圆心点曲线和相对圆点曲线如图 11 所示^[26-27]。

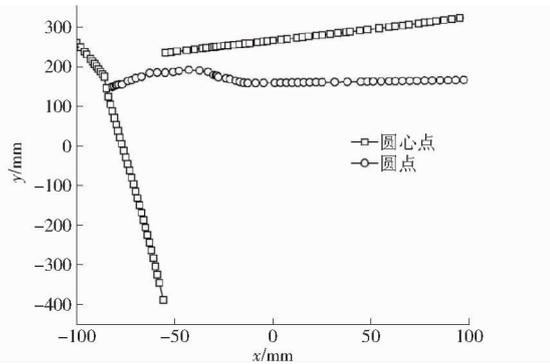


图 11 Burmester 曲线
Fig. 11 Burmester curve

当曲柄转角 φ_0 为 180° , 曲柄与机架运动学尺寸共线时, 机构存在最小传动角 γ_{\min} , 本分苗机构工作时转速较高, 为保证良好的传力性能, 最小传动角应大于 50° ^[28], 即

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{r_3^2 + r_4^2 - (r_1 - r_2)^2}{2r_3r_4} > 50^\circ \quad (11)$$

式中 r_1 ——机架 A_0B_0 长度, mm
 r_3 —— A_1B_1 长度, mm
 r_4 ——摇杆 B_0B_1 长度, mm

根据分苗挡板空间位置及分苗机构曲柄存在条件对图 11 中圆心点及圆点进行筛选得到多组可行解如表 4 所示。

表 4 位置信息可行解

Tab. 4 Feasible solution of location information

序号	x_{A_0}	y_{A_0}	x_{A_1}	y_{A_1}
1	-77	5.84	-74.41	161.67
2	-78	22.35	-76.87	156.73
3	-79	38.83	-78.65	156.28
4	-80	55.35	-79.66	155.04
5	-81	72.00	-80.21	154.13
6	-82	88.92	-81.11	152.32
7	-83	106.41	-81.32	151.87
8	-84	125.06	-81.53	151.41
9	-85	146.90	-81.93	150.49

选择表 4 中 1 组可行解, 对另一二杆组采用相同计算方法, 得到该机构在位置 E_1 时坐标为 $A_0(-84, 125.06)$ mm、 $A_1(-76.87, 156.73)$ mm、 $B_0(-120.75, 175.21)$ mm、 $B_1(-121.06, 124.99)$ mm, 结合加工工艺对杆件长度进行圆整, 得到分苗机构结构参数如表 5 所示。

表 5 分苗机构参数

Tab. 5 Parameters of seedling separating mechanism

参数	数值
机架 A_0B_0 长度 r_1	62
曲柄 A_0A_1 长度 r_2	32
分苗爪短侧 A_1E_i 长度 r_5	27
分苗爪长侧 B_1E_i 长度 r_6	81
摇杆 B_0B_1 长度 r_4	50
A_1B_1 长度 r_3	55

3.3 机构运行参数匹配

柔性夹持机构输送速度 v 和分苗机构拨动频率 n 决定分苗爪尖点相对于输送过程中的裸苗相对运动轨迹, 如图 12 所示。根据相关农艺要求对机构运行参数进行设计^[29]。

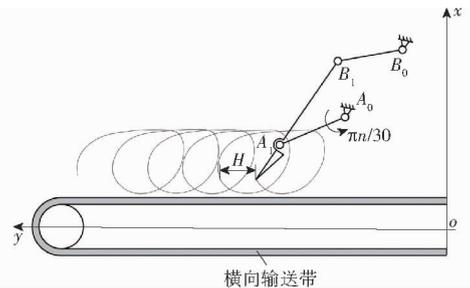


图 12 分苗爪尖点相对裸苗运动轨迹及参数
Fig. 12 Trajectory and parameters of seedling claw tip relative to bare seedling

拨苗间距 H 即为分苗爪 2 次触苗间距, 其与柔性夹持机构输送速度 v 和分苗机构拨动频率 n 之间关系为

$$H = \frac{60v}{n} \quad (12)$$

拨苗间距 H 会影响分苗质量, 当拨苗间距过大时, 会产生漏拨现象, 即拨动 1 次分苗多株; 当拨苗间距过小时, 会对同 1 株裸苗拨动多次, 造成裸苗姿态不稳, 影响分苗成功率, 所以拨苗间距 H 应满足 $l_d(1 - K_s) < H < l_d$ 。根据油菜机械化移栽的株距农艺要求及拖拉机前进度设计柔性夹持机构输送速度 v 为 $25 \sim 55$ mm/s, 拨苗间距 H 为 $26 \sim 40.01$ mm, 此时分苗机构拨动频率 n 为 $37.49 \sim 126.92$ 次/min。

为了将单株裸苗从群体分离并达到合理株距, 建立分苗机构拨苗运动学模型, 如图 13 所示。当分苗爪到达点 E_1 时, 分苗爪开始触苗; 当分苗爪到达点 E_6 时, 分苗爪在 y 轴上的分速度达到最大, 裸苗与分苗爪分离, 分苗爪短侧与分苗爪长侧之间的夹角和裸苗分离后做匀减速运动产生的位移可忽略不计, 根据图 13 可得点 E_6 位置方程为

$$\begin{cases} y_{E_6} = y_{A_0} - r_2 \sin(\varepsilon - \varphi_0) - \\ \left(r_6 - r_5 \frac{r_6^2 + r_3^2 - r_5^2}{2r_6 r_3} \right) \sin(\varepsilon - \varphi_0 - \theta) \\ x_{E_6} = x_{A_0} + r_2 \cos(\varepsilon - \varphi_0) + \\ \left(r_6 - r_5 \frac{r_6^2 + r_3^2 - r_5^2}{2r_6 r_3} \right) \cos(\varepsilon - \varphi_0 - \theta) \end{cases} \quad (13)$$

式中 ε ——曲柄转动角度, ($^\circ$)

θ ——点 E_6 曲柄与分苗爪长侧夹角, ($^\circ$)

r_6 ——分苗爪长侧 B_1E_6 长度, mm

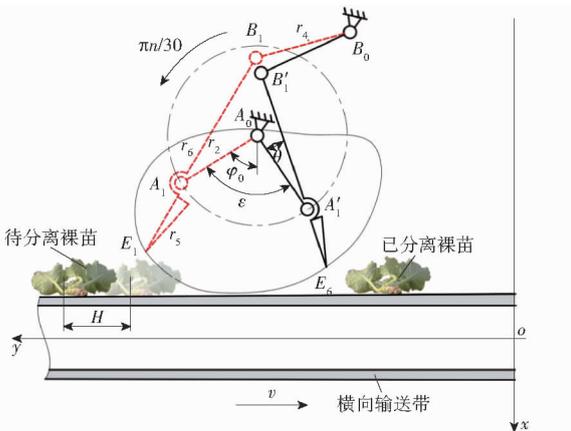


图 13 分苗爪拨苗运动学模型

Fig. 13 Kinematic model of seedling claw pulling

当曲柄角速度为 $n\pi/30$ 时, 曲柄转角 $\varepsilon = n\pi t/30$, 由式(13)可得已分离的裸苗与待分离裸苗之间株距 l_e 为

$$\begin{aligned} l_e = & y_{E_1} - y_{A_0} + r_2 \sin\left(\frac{\pi n t}{30} - \varphi_0\right) + H + \\ & \left(r_6 - r_5 \frac{r_6^2 + r_3^2 - r_5^2}{2r_6 r_3} \right) \sin\left(\frac{\pi n t}{30} - \varphi_0 - \theta\right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 t ——曲柄转动 ε 所需时间, s

根据拖拉机前进速度与机械化移栽农艺要求, 已分离裸苗与待分离裸苗之间株距 l_e 还应满足

$$\begin{cases} l_f = (v + 277.78v_m)t_1 \\ t_1 = \frac{l_e}{v} \end{cases} \quad (15)$$

式中 t_1 ——分离后裸苗进入送苗装置时间间隔, s

v_m ——拖拉机前进速度, km/h

l_f ——机械化移栽株距, mm

由式(14)、(15)可知, 分苗机构拨动频率 n 是影响已分离裸苗与待分离裸苗之间株距 l_e 和机械化移栽株距 l_f 的重要因素, 结合拨苗间距要求设计分苗机构拨动频率为 50 ~ 120 次/min。

为防止分苗爪末端对油菜裸苗茎秆挤压造成损伤, 对该状态下油菜裸苗茎秆进行力学分析。当分苗爪末端距横向输送带最近时, 油菜裸苗茎秆所受挤压力达到最大, 为简化分析, 将茎秆简化成圆形,

并忽略其质量, 其力学模型如图 14 所示。

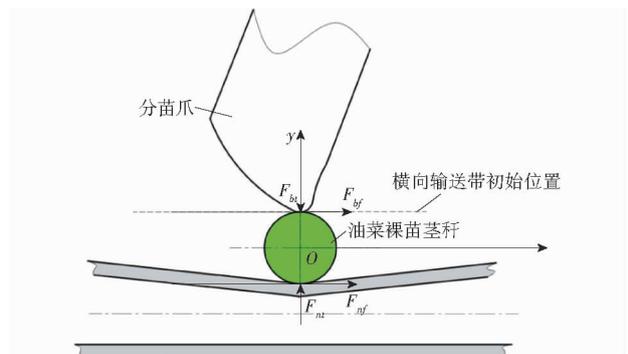


图 14 分苗爪末端挤压裸苗茎秆力学模型

Fig. 14 Mechanical model of extrusion bare seedling stem at end of seedling claw

由图 14 可知, 当分苗爪末端挤压裸苗茎秆时, 因横向输送带具有弹性且输送带中间存在空腔, 茎秆会将输送带下压, 当分苗爪末端到达最低点时, 此时油菜裸苗茎秆受力满足

$$\begin{cases} F_{nt} - F_{bt} = 0 \\ F_{bf} = F_{nf} = 0 \\ F_{nt} = k_t \Delta L_c \end{cases} \quad (16)$$

式中 F_{nt} ——油菜裸苗茎秆受到的弹性力, N

F_{bt} ——分苗爪末端给茎秆的挤压力, N

F_{bf} ——分苗爪末端给茎秆的摩擦力, N

F_{nf} ——最低点横向输送带给茎秆的摩擦力, N

k_t ——横向输送带弹性系数

ΔL_c ——横向输送带纵向变形量, mm

由式(16)可知分苗爪末端给茎秆的挤压力与横向输送带弹性系数、横向输送带纵向变化量有关。在横向输送带一端设计有张紧螺栓, 可通过调节张紧螺栓进给量对横向输送带弹性系数进行调节, 使分苗爪末端在挤压裸苗茎秆过程具有一定的缓冲并产生滑移, 保证分苗过程分苗爪末端不会对油菜裸苗茎秆造成机械损伤。采用 TMS-PRO 型质构仪(美国 FTC 公司)测得在张紧螺栓不同进给量下横向输送带纵向变化量与挤压力变化曲线如图 15 所示。

由图 15 可知, 当横向输送带纵向变化量一定时, 张紧螺栓进给量越大, 挤压力越大, 越易对油菜茎秆造成损伤, 但随着张紧螺栓进给量增大, 输送带越不易打滑, 传递越可靠。结合预试验测得油菜裸苗茎秆损伤受力曲线及油菜裸苗茎粗变化范围, 确定张紧螺栓进给量为 26.50 mm。

4 柔性夹持分苗装置性能试验

4.1 分苗机构轨迹对比试验

分苗爪尖点运动轨迹是柔性夹持分苗装置分苗机构设计的关键, 其轨迹的合理性和准确性影响分

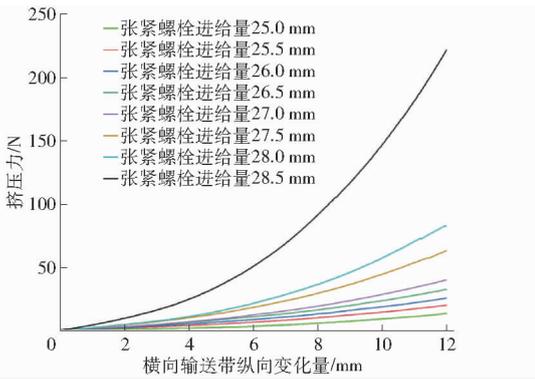


图 15 张紧螺栓不同进给量下横向往送带纵向变化量与挤压力变化曲线

Fig. 15 Variation curves of longitudinal variation and extrusion force of transverse conveyor belt at different feed rates of tension bolt

苗机构作业性能。在 Solidworks 中完成分苗机构虚拟结构设计,并导入 RecurDyn 中进行运动仿真。通过对比仿真轨迹与理论轨迹(图 9)可知,两者基本保持一致,验证了分苗机构设计正确性。

采用高速摄像技术验证分苗爪尖点的实际运动轨迹与仿真轨迹是否一致。将分苗机构安装在试验台架上进行空转试验,通过高速摄像机对分苗机构运转进行图像采集,并对试验视频进行解析,获得实际运动轨迹。实际运动轨迹和仿真轨迹如图 16 所示,两者基本一致,部分轨迹存在较小波动,主要由于样机加工装配的尺寸偏差、试验台架振动及部分零件强度不足导致。分苗机构轨迹和姿态达到预期设计目标^[30-32]。

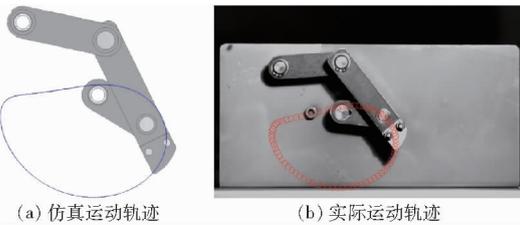


图 16 分苗机构轨迹对比试验

Fig. 16 Trajectory comparison test of split seedling mechanism

4.2 分苗装置性能试验

4.2.1 材料与方法

试验材料为华中农业大学试验田自主栽培 23 d、长势良好且无损伤的油菜裸苗,品种为“华油杂 62”。依托柔性夹持分苗装置(图 17),以分苗口角度、分苗机构拨动频率、柔性夹持机构输送速度为试验因素,以分苗成功率(裸苗之间无牵连)、伤苗率(裸苗茎、叶破损)为评价指标,开展回归正交试验,明确最佳参数组合并验证。

试验前随机将适栽期油菜裸苗分成若干组,每

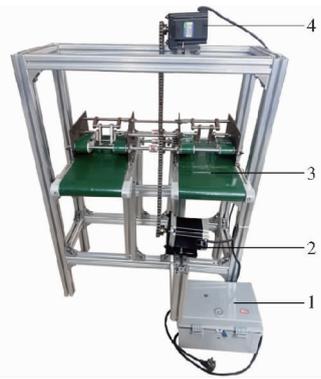


图 17 分苗装置台架实物图

Fig. 17 Physical diagram of bench of seedling sorting device

1. 电控箱 2. 步进电机 I 3. 分苗装置 4. 步进电机 II

组 32 株裸苗,通过电控系统设定分苗机构拨动频率、柔性夹持机构输送速度参数,通过调整压顶输送从动轮轴在固定板的位置从而调整分苗口角度,在分苗装置后设置 1 台输送机,输送机输送带高度与输送速度设置与横向往送带相同;调试后启动装置,待分苗完成后,统计输送机输送带上相互之间无牵连裸苗数量和茎、叶受损伤裸苗数量,并计算其算术平均值,对每组试验重复 8 次并取平均值,分苗成功率和伤苗率计算式为

$$Y_1 = \frac{W_1}{W_3} \times 100\% \quad (17)$$

$$Y_2 = \frac{W_2}{W_3} \times 100\% \quad (18)$$

式中 Y_1 ——分苗成功率,%

Y_2 ——伤苗率,%

W_1 ——相互之间无牵连裸苗数量,株

W_2 ——茎、叶破损油菜裸苗数量,株

W_3 ——每组试验油菜裸苗总数,株

4.2.2 试验设计

为探究试验因素对评价指标的影响显著性和各因素间交互作用对评价指标的影响,在理论分析和单因素试验基础上,确定分苗口角度为 $45^\circ \sim 55^\circ$,分苗机构拨动频率为 60 ~ 110 次/min,柔性夹持机构输送速度为 30 ~ 50 mm/s,根据 Box - Behnken 模型进行三因素三水平试验,因素编码如表 6 所示^[33]。各试验方案与结果如表 7 所示。

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Test factors and coding

编码	因素		
	分苗口角度/ ($^\circ$)	柔性夹持机构输送 速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	分苗机构拨动频 率/($\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$)
-1	45	30	60
0	50	40	85
1	55	50	110

表7 试验方案与结果
Tab.7 Test plan and results

试验号	因素			分苗成功率 $Y_1/\%$	伤苗率 $Y_2/\%$
	分苗口角度 X_1	柔性夹持机构输送速度 X_2	分苗机构拨动频率 X_3		
1	-1	0	-1	89.06	5.08
2	1	0	-1	89.45	3.13
3	-1	0	1	88.67	6.25
4	1	0	1	87.50	5.47
5	-1	-1	0	91.02	5.86
6	1	-1	0	90.23	4.30
7	-1	1	0	90.63	5.47
8	1	1	0	89.45	3.51
9	0	-1	-1	89.45	5.08
10	0	-1	1	89.84	6.25
11	0	1	-1	89.45	4.30
12	1	1	1	87.11	6.25
13	0	0	0	91.41	4.30
14	0	0	0	91.80	4.69
15	0	0	0	91.41	4.69
16	0	0	0	91.41	4.69
17	0	0	0	91.80	4.69

4.2.3 试验结果与分析

运用数据处理软件 Design-Expert 13.0.5 对试验数据进行多元回归拟合,得分苗成功率和伤苗率二次回归模型为

$$Y_1 = 91.57 - 0.3438X_1 - 0.4875X_2 - 0.5363X_3 - 0.39X_1X_3 - 0.6825X_2X_3 - 0.763X_1^2 - 0.4725X_2^2 - 2.13X_3^2 \quad (19)$$

$$Y_2 = 4.61 - 0.7813X_1 - 0.245X_2 + 0.8287X_3 + 0.2925X_1X_3 + 0.3303X_2^2 + 0.5277X_3^2 \quad (20)$$

对二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表8所示。由表8可知,分苗成功率和伤苗率回归模型均达到极显著水平 ($P < 0.01$),表明该回归模型具有统计学意义;失拟项 $P > 0.05$,表明不存在其他影响指标的因素,该回归模型与实

际试验数据和试验规律相近,可用来预测分苗装置最佳参数。

表8 试验方差分析结果

Tab.8 Test result variance analysis

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
分苗成功率	模型	31.74	9	3.53	36.15	0.0001**
	X_1	0.9453	1	0.9453	9.69	0.0170*
	X_2	1.90	1	1.90	19.49	0.0031**
	X_3	2.30	1	2.30	23.59	0.0018**
	X_1X_2	0.0380	1	0.0380	0.3899	0.5522
	X_1X_3	0.6084	1	0.6084	6.24	0.0411*
	X_2X_3	1.86	1	1.86	19.10	0.0033**
	X_1^2	2.45	1	2.45	25.13	0.0015**
	X_2^2	0.9321	1	0.9321	9.56	0.0175*
	X_3^2	19.16	1	19.16	196.41	<0.0001**
残差	0.6827	7	0.0975			
失拟	0.5002	3	0.1667	5.06	0.1214	
误差	0.1825	4	0.0456			
总和	32.42	16				
伤苗率	模型	13.16	9	1.46	42.87	<0.0001**
	X_1	4.88	1	4.88	143.19	<0.0001**
	X_2	0.4802	1	0.4802	14.08	0.0071**
	X_3	5.49	1	5.49	161.13	<0.0001**
	X_1X_2	0.0400	1	0.0400	1.17	0.3147
	X_1X_3	0.3422	1	0.3422	10.04	0.0158*
	X_2X_3	0.1521	1	0.1521	4.46	0.0726
	X_1^2	0.1041	1	0.1041	3.05	0.1241
	X_2^2	0.4592	1	0.4592	13.47	0.0080**
	X_3^2	1.17	1	1.17	34.39	0.0006**
残差	0.2387	7	0.0341			
失拟	0.1170	3	0.0390	1.28	0.3943	
误差	0.1217	4	0.0304			
总和	13.40	16				

注:**表示差异极显著 ($P < 0.01$), *表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

为了解各因素的交互作用对分苗成功率 Y_1 、伤苗率的影响 Y_2 ,采用 Design-Expert 得到各因素对分苗成功率、伤苗率影响的响应面,如图18所示。

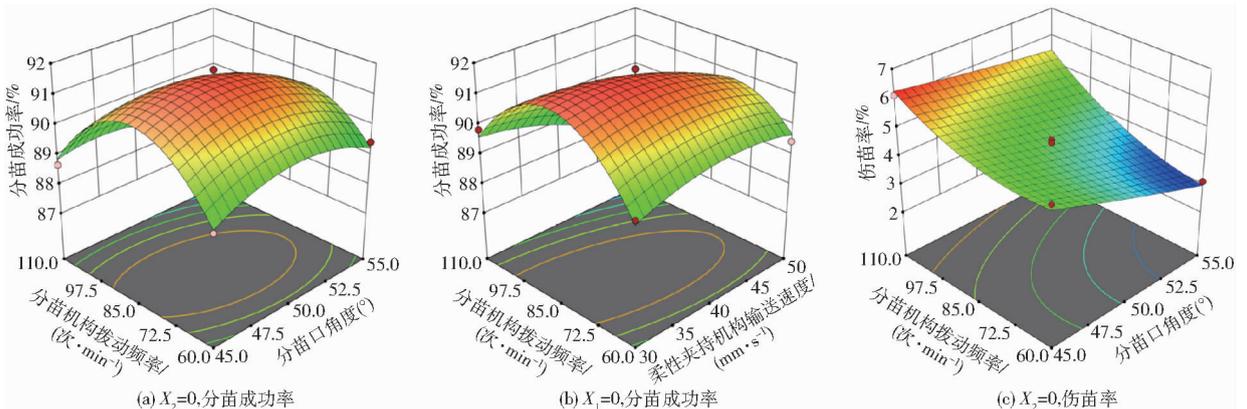


图18 试验因素对分苗成功率和伤苗率交互影响的响应面

Fig.18 Response surfaces of experimental factors interaction between success rate of seedling sorting and rate of injured seedlings

由图 18a 可知,当柔性夹持机构输送速度不变时,分苗成功率随分苗机构拨动频率和分苗口角度增加呈先增大后减小的趋势,响应面曲线沿分苗机构拨动频率方向变化更快,即分苗机构拨动频率比分苗口角度对分苗成功率的影响更为显著;由图 18b 可知,当分苗口角度不变时,分苗成功率随柔性夹持机构输送速度和分苗机构拨动频率增加呈先增大后减小的趋势,响应面曲线沿分苗机构拨动频率方向变化更快,即分苗机构拨动频率比柔性夹持机构输送速度对分苗成功率的影响更显著;由图 18c 可知,当柔性夹持机构输送速度不变时,伤苗率随分苗机构拨动频率增加和分苗口角度减小呈线性增长趋势,响应面曲线沿分苗机构拨动频率方向变化更快,即分苗机构拨动频率对伤苗率影响更显著。

4.2.4 最佳参数组合及验证

为提高装置分苗性能,以最大分苗成功率和最小伤苗率为优化指标,建立目标函数和边界约束函数为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

利用 Design-Expert 的 BBD 模块优化得最佳参数组合为:分苗口角度 55° 、柔性夹持机构输送速度 48.29 mm/s 、分苗机构拨动频率 84.71 次/min ,在最佳参数组合条件下,分苗成功率和伤苗率预测值分别为 89.67% 和 3.63% 。为验证优化参数可行性,综合控制精度选取最佳参数组合为:分苗口角度 55° 、柔性夹持机构输送速度 48 mm/s 、分苗机构拨动频率 85 次/min ,开展验证试验(图 19),对验证结果取平均值得分苗成功率为 89.06% ,伤苗率为 3.91% ,试验结果与优化结果基本一致。



图 19 柔性夹持分苗装置台架试验

Fig. 19 Bench test of flexible clamping seedling device

5 田间试验

为验证田间试验效果,2024 年 12 月中旬于华中农业大学现代农业示范基地进行试验。试验前用旋耕机对试验地进行旋耕,利用 TJSD-750 型土壤坚实度仪测得土壤坚实度为 $1\ 842.25 \text{ kPa}$;借助 DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥机箱测得含水率为 19.21% ,试验选用东方红 954 型拖拉机,设置分苗口角度为 55° 、分苗机构拨动频率为 85 次/min 、柔性夹持机构输送速度 48 mm/s 。田间试验过程如图 20 所示,试验发现作业地表不平、机械振动、拖拉机晃动、行驶速度变化等因素,是油菜裸苗产生株距不均的主要原因,分苗装置在测试过程中性能稳定,各机构运转正常,满足油菜裸苗机械化移栽作业要求。



图 20 田间作业状态

Fig. 20 Operational state in field conditions

6 结论

(1)设计了一种柔性夹持分苗装置,阐述了分苗装置与移栽机工作过程,统计了播种后 23 d 油菜裸苗外形几何参数,测试油菜裸苗力学特性,确定了柔性夹持机构横向输送带带宽为 216 mm 、压顶输送带带宽为 40 mm 。

(2)建立了分苗机构刚体导引模型,确定机架长度 81 mm 、曲柄长度 32 mm 、摇杆长度 50 mm ;进行分苗机构预设轨迹、仿真轨迹、实际轨迹的轨迹对比试验,证明了柔性夹持分苗装置分苗机构设计正确性;开展柔性夹持机构和分苗机构运动参数匹配分析,确定了柔性夹持机构输送速度为 $25 \sim 55 \text{ mm/s}$ 、分苗机构拨动频率为 $50 \sim 120 \text{ 次/min}$ 。

(3)开展分苗口角度、柔性夹持机构输送速度、分苗机构拨动频率对分苗成功率、伤苗率影响的三因素二水平二次正交组合试验,对所得参数进行圆整,试验结果表明,当分苗口角度为 55° 、柔性夹持机构输送速度 48 mm/s 、分苗机构拨动频率为 85 次/min 时分苗效果较优,台架试验分苗成功率为 89.06% 、伤苗率为 3.91% ,表明分苗装置满足油菜裸苗机械化移栽作业要求。

参 考 文 献

- [1] 向伟,吴明亮,官春云,等.履带式油菜苗移栽栽植孔成型机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(15):12-18.
XIANG Wei, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design and experiment of planting hole forming device of crawler transplanter for rape (*Brassica napus*) seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 12-18. (in Chinese)
- [2] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J].农业机械学报,2015,46(11):49-56.
LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49-56. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 廖庆喜,胡先朋,张照,等.油菜移栽机分苗装置分苗过程与钵苗钵体完整性分析[J].农业工程学报,2015,31(16):22-29.
LIAO Qingxi, HU Xianpeng, ZHANG Zhao, et al. Analysis on detaching process of detaching device and seedling pot integrity about rape transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 22-29. (in Chinese)
- [5] 颜华,刘冲,李鹏斌,等.蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(5):71-81.
YAN Hua, LIU Chong, LI Pengbin, et al. Design and experiment of duckbill planting device with adjustable static trajectory for planting vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 71-81. (in Chinese)
- [6] 金鑫,姬江涛,刘卫想,等.基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J].农业工程学报,2018,34(9):58-67.
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 58-67. (in Chinese)
- [7] 付鹏洋,胡建平,刘发,等.齿轮连杆凸轮组合式栽植机构仿真与试验[J].农业机械学报,2014,45(增刊):52-56.
FU Pengyang, HU Jianping, LIU Fa, et al. Simulation analysis and experiment for gear-linkage-cam combination planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 52-56. (in Chinese)
- [8] 王石,王笑岩,李成华.基于量子遗传算法的挠性圆盘式移栽机投苗系统参数优化方法[J].中国农机化学报,2014,35(2):139-142.
WANG Shi, WANG Xiaoyan, LI Chenghua. Parameters optimization of soft disc-type vegetable seedling transplanting mechanism based on quantum genetic algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 139-142. (in Chinese)
- [9] 王秀,刘蒙滋,翟长远,等.蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(9):122-132.
WANG Xiu, LIU Mengzi, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 122-132. (in Chinese)
- [10] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等.移栽机械发展现状与展望[J].农业机械学报,2014,45(8):44-53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese)
- [11] AKM S I, MEHBUBA R, AKML R, et al. Techno-economic performance of 4-row self-propelled mechanical rice transplanter at farmers field in Bangladesh[J]. Progressive Agriculture, 2016, 27(3): 369-382.
- [12] ANDREW M B, LAURA H V, JAMES M M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards [J]. Horticultural Science and Biotechnology, 2019, 94(3): 277-283.
- [13] 王徐建.甘草倾斜移栽关键部件设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2017.
WANG Xujian. Design and experimental study on key components of licorice tilt transplanting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [14] 汲文峰,吴启明,黄海东,等.基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊1):21-27,379.
JI Wenfeng, WU Qiming, HUANG Haidong, et al. Design and experiment of seedling separation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 21-27, 379. (in Chinese)
- [15] 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 CSAE, 2022, 38(9): 12-23. (in Chinese)
- [16] 张学东,刘立晶,宁义超,等.蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):115-124,134.
ZHANG Xuedong, LIU Lijing, NING Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clamping of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 115-124,134. (in Chinese)
- [17] 计东,胡熙,哲旋瑞,等.双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):126-133,146.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126-133,146. (in Chinese)

- Chinese)
- [18] 韩绿化,毛罕平,缪小花,等.基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J].农业机械学报,2013,44(11):260-265.
HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260-265. (in Chinese)
- [19] 单伊尹,廖庆喜,万星宇,等.油菜薹对行自走式收获机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(8):93-104.
SHAN Yiyin, LIAO Qingxi, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled six-row harvester for oilseed rape shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 93-104. (in Chinese)
- [20] 崔志超,管春松,徐陶,等.基质块苗移栽机挡销式自动送苗分苗装置设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(13):68-79.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, XU Tao, et al. Design and experiment of the automatic conveying and separating device for substrate block seedling transplanting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(13): 68-79. (in Chinese)
- [21] 王奇,高鹏翔,王金武,等.胡萝卜联合收获机智能监控系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):118-128.
WANG Qi, GAO Pengxiang, WANG Jinwu, et al. Design and experiment of intelligent monitor system for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 118-128. (in Chinese)
- [22] 胡乔磊,袁佳诚,李心志,等.油菜基质块苗移栽机双向递进式送苗装置设计与试验[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)
- [23] 赵业慧,刘姝天,廖恒,等.基于Burmester理论的微耕机挡土板导引机构设计[J].中国农机化学报,2023,44(6):56-61.
ZHAO Yehui, LIU Shutian, LIAO Heng, et al. Design of soil-blocking plate guide mechanism of micro-cultivator based on Burmester theory[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 56-61. (in Chinese)
- [24] 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 CSAE, 2020, 36(6): 1-10. (in Chinese)
- [25] 廖庆喜,张照,胡乔磊,等.油菜钵苗移栽机气动取苗机构设计与轨迹分析[J].农业机械学报,2017,48(11):70-78.
LIAO Qingxi, ZHANG Zhao, HU Qiaolei, et al. Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape paper pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 70-78. (in Chinese)
- [26] 王光明,史立新.球面4R机构四位置综合的类型图方法[J].中国机械工程,2013,24(3):336-340.
WANG Guangming, SHI Lixin. Synthesis of spherical 4R linkages for four specified positions based on type map[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 336-340. (in Chinese)
- [27] 谢进,陈永.基于混沌的刚体导引Burmester点的求解方法[J].中国机械工程,2002,13(7):74-76,6.
XIE Jin, CHEN Yong. A chaos-based approach to obtain the global real solutions of Burmester points[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(7): 74-76,6. (in Chinese)
- [28] 廖庆喜,林建新,张青松,等.稻油轮作区铲锹式油菜直播种床整备机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):26-35.
LIAO Qingxi, LIN Jianxin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 26-35. (in Chinese)
- [29] 林建新,廖庆喜,张青松,等.油菜机械直播铲锹式种床整备机振动特性分析与结构改进[J].农业工程学报,2023,39(19):39-48.
LIN Jianxin, LIAO Qingxi, ZHANG Qingsong, et al. Vibration characteristics analysis and structural improvement of the shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed mechanical direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 39-48. (in Chinese)
- [30] 王磊,孙良,徐亚丹,等.基于遗传算法的三臂轮系式栽植机构多姿态运动综合[J].农业机械学报,2022,53(6):70-77.
WANG Lei, SUN Liang, XU Yadan, et al. Multi-pose motion synthesis of three-arm gear train planting mechanism based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 70-77. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 周海丽,刘建刚,俞高红,等.蔬菜移栽机斜齿轮-非圆齿轮行星轮系取苗机构研究[J].农业机械学报,2023,54(8):77-86.
ZHOU Haili, LIU Jian'gang, YU Gaohong, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism for helical gear-non circular gear planetary gear system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 77-86. (in Chinese)
- [33] 刘天湖,张锦狮,练卓谦,等.链喂入式菠萝采收机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(10):386-396.
LIU Tianhu, ZHANG Jinchong, LIAN Zhuoqian, et al. Design and experiment of chain-feeding pineapple harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 386-396. (in Chinese)