

甘蓝基质块苗移栽机双排链式栽植装置设计与试验

崔志超^{1,2} 管春松² 徐陶³ 付菁菁² 陈永生² 郑书河¹

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350100; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014;

3. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014)

摘要: 针对甘蓝传统栽植装置存在栽植深浅不一、倒伏率及伤苗率高、影响机收作业性能的问题,以甘蓝基质块苗为对象,设计了一种双排链式栽植装置,通过该装置及关键部件进行理论分析,确定装置的工作参数。搭建甘蓝基质块苗双排链式栽植装置试验台,以前进速度、栽植频率、栽植器内夹板夹力为试验因素对倒伏率和伤苗率进行三因素五水平二次回归正交旋转组合试验;通过 Design-Expert 8.0.6 软件建立回归模型,分析了各因素对指标的影响关系,同时采用响应面法对影响因素进行了综合优化,得到最优参数组合:前进速度 1.6 km/h、栽植频率 57 株/min、内夹板夹力 91.83 N,对应倒伏率 2.9%、伤苗率 2.83%。对参数组合进行台架试验验证,结果为倒伏率 3.13%、伤苗率 3.07%,与优化结果基本一致,验证了所建模型与优化参数的合理性。田间试验结果为:倒伏率 3.35%、伤苗率 3.14%,与两指标的优化结果相对误差分别为 0.45% 和 0.31%,表明该装置具有较高的稳定性。

关键词: 甘蓝; 基质块苗; 移栽机; 双排链; 栽植装置

中图分类号: S223.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)06-0046-09

OSID:



Design and Experiment of Double-row Chain Planting Device for Cabbage Substrate Block Seedlings

CUI Zhichao^{1,2} GUAN Chunsong² XU Tao³ FU Jingjing² CHEN Yongsheng² ZHENG Shuhe¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

3. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China)

Abstract: In view of the problems of different planting depths, high lodging rate and seedling injury rate in traditional cabbage planting devices, which affect the workability of machine harvesting, a double-row chain planting device was designed for cabbage substrate block seedlings, through theoretical analysis of the device and key components, the operating parameters of the device were determined. A double-row chain planting device test bench for cabbage substrate block seedlings was built, and the three-factor five-level quadratic regression orthogonal rotation combination test was carried out on lodging rate and seedling injury rate with forward speed, planting frequency, and clamping force of splint in the planter as test factors; through Design-Expert 8.0.6 software, the regression model of each influencing factor on the index was established, and the relationship between influencing factors on the index was analyzed, while the response surface method was used to optimize the influencing factors comprehensively, and the optimal combination of parameters was obtained: forward speed was 1.6 km/h, planting frequency was 57 plants/min, internal splint clamping force was 91.83 N, corresponding to the lodging rate of 2.9% and seedling injury rate of 2.83%. The combination of parameters was verified by bench test, the lodging rate was 3.13% and the seedling injury rate was 3.07%, which were basically consistent with the optimization results, which verified the rationality of the built model and the optimized parameters. Field test results showed that the lodging rate was 3.35%, the seedling injury rate was 3.14%, and the relative errors with optimized results of the two indicators were 0.45% and 0.31%, indicating that the device had high stability.

Key words: cabbage; substrate block seedlings; transplanter; double-row chain; planting device

收稿日期: 2022-09-23 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX[22]3092)、南京市现代农机装备与技术创新示范项目(NJ[2022]03)和江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2022]511)

作者简介: 崔志超(1990—),男,博士生,农业农村部南京农业机械化研究所助理研究员,主要从事蔬菜生产机械化技术与装备研究, E-mail: cuizhichaoabc@163.com

通信作者: 郑书河(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬茶全程机械化技术与装备研究, E-mail: zsh@fafu.edu.cn

0 引言

甘蓝是我国种植最广泛的蔬菜品种之一,甘蓝要求单株定植,对栽植质量要求较高,现有栽植装置多适用于穴盘苗,移栽质量受土壤墒情影响较大,秧苗栽植深浅不均,易造成秧苗倒伏,导致甘蓝成熟后结球倾斜,机收适应性下降^[1-2]。基质块苗块体规则、站立稳定性好,可有效抑制栽后倒伏,提高秧苗立直率;块体可保持足够的养分和水分,栽后无缓苗期、成活率高;机械移栽时对育苗质量要求低,苗龄不影响取苗和栽苗效果,为甘蓝机械化优质移栽提供了条件^[3]。

荷兰、法国、意大利等欧洲国家的基质块苗移栽技术及装备较为成熟,多采用气动夹爪式栽植装置,通过输入程序参数可实现不同蔬菜栽植的农艺要求^[4]。以荷兰 ISO Group 公司 (IG Agri Systems BV)、法国 CM&Regero 公司、意大利 Ferrari 公司和 Hortech 公司生产的基质块苗移栽机为代表^[5],均采用程序控制气压传动原理实现蔬菜、花卉的高效移栽,该类机型为全自动移栽机,作业幅宽大、配套动力大、价格高,对土地条件要求高,不适合我国土地多样性状况下甘蓝的移栽。国内蔬菜移栽在一定程度上实现了机械化作业,但多以穴盘苗或毯状苗为主^[6-10];胡建平等^[11-12]针对穴盘苗研制了行星轮式栽植装置,通过 Matlab 优化得出机构的最佳参数,田间试验苗栽植直立度优良率达到 94.8% 以上;王永维等^[13]针对穴盘苗设计了一种吊杯式栽植装置,优化结构参数后应用在高速移栽机上,移栽速度 0.47 m/s 时,栽植合格率 98.01%;吴俊等^[14]研制了一种毯状苗移栽机,其取苗和栽植动作由同一套循环插取栽植装置完成,可实现连续切块栽插,栽植合格率达到 87.01%。在基质块苗移栽方面,徐陶等^[5]针对基质块苗设计了一种取苗爪式栽植器,采用托举转送的方式将基质块苗栽入土中;廖庆喜研究团队^[15-18]设计了基质块苗对辊式和往复夹取式栽植装置,通过对结构参数进行优化,基本满足油菜基质块苗的移栽要求。综上,国内鲜有对甘蓝基质块苗移栽机的研究,同类机型目前暂处于试验阶段。

本文针对基质块苗特性和甘蓝机械化栽培要求,设计一种双排链式栽植装置,开展理论和运动分析,得出栽植器的位移方程和运动轨迹,得到相关参数范围,以降低倒伏率和伤苗率为目标,通过搭建试验台验证优化装置作业性能,以期为甘蓝基质块苗移栽机研究提供参考。

1 栽植装置结构与工作原理

1.1 基本结构

基质块苗双排链式栽植装置主要由主动链轮 a 与从动链轮 a 通过链条组成的轨道 I、主动链轮 b 与从动链轮 b 通过链条组成的轨道 II、连接轨道 I 和轨道 II 的 Z 形杆、栽植器、打开器及支架等组成,基本结构如图 1 所示。主动链轮 a 和从动链轮 a 安装在支撑架的左侧,主动链轮 b 和从动链轮 b 安装在支撑架的右侧,两对链轮各自安装链条形成轨道 I 与轨道 II,两轨道之间铰接与栽植器数量对应的 Z 形杆,栽植器安装到 Z 形杆伸出轴,位于主、从动链轮 b 侧,轨道一侧设置固定杆用于安装导向板和打开器,其中打开器与链轮端面平行布置。

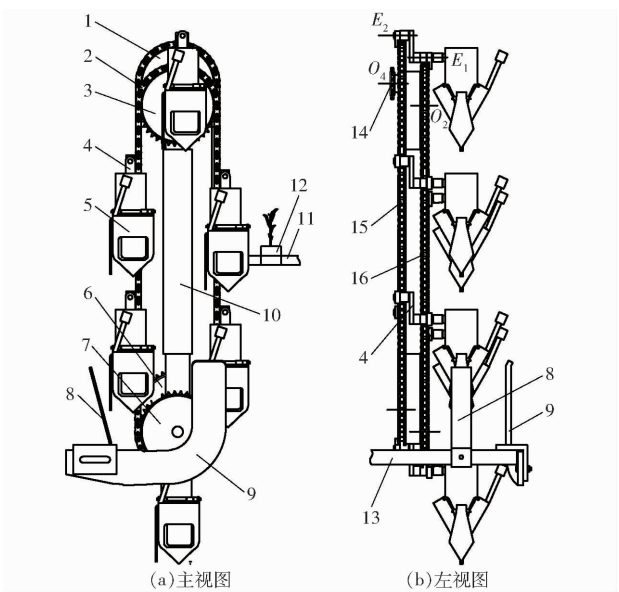


图1 双排链式栽植装置结构示意图
Fig.1 Schematics of structure of double-row chain planting device

- 1. 主动链轮 a 2. 链条 3. 主动链轮 b 4. Z 形杆 5. 栽植器
- 6. 从动链轮 a 7. 从动链轮 b 8. 导向板 9. 打开器 10. 支架
- 11. 送苗输送带 12. 基质块甘蓝苗 13. 固定杆 14. 传动链轮
- 15. 轨道 I 16. 轨道 II

1.2 工作过程及原理

轨道 I 与轨道 II 平行且错位布置,由 Z 形杆连接,Z 形杆与两轨道的连接点和两轨道转弯处的圆心形成平行四杆机构。工作时,栽植器随链条运动的同时在 Z 形杆的作用下始终保持尖部垂直地面,基质块苗经分苗后停留在输送带顶端,栽植器运动至输送带处时跨过前输送带,左右夹板在输送带支架作用下被撑开夹住基质块将其取走;栽植器载苗运动至移栽位置时,在打开器压迫下,左右夹板克服弹簧的预紧力绕各自转轴对称打开,基质块苗靠自重落入开沟器开出的栽植沟内;栽植器随链条继续

运动,当转过打开器约束区后左右夹板在弹簧的作用力下围绕转轴迅速闭合保持一定的预紧力,恢复待取苗工作状态,逐次循环。

2 关键部件设计与分析

2.1 栽植机构

2.1.1 理论模型构建

栽植机构的运动是一种复合运动,由栽植器的环周回转运动和机器的前进运动复合而成。由于环周内 6 组栽植器结构相同且均匀分布,因此取任一组栽植器作为研究对象对栽植机构进行建模分析,其机构原理如图 2 所示。

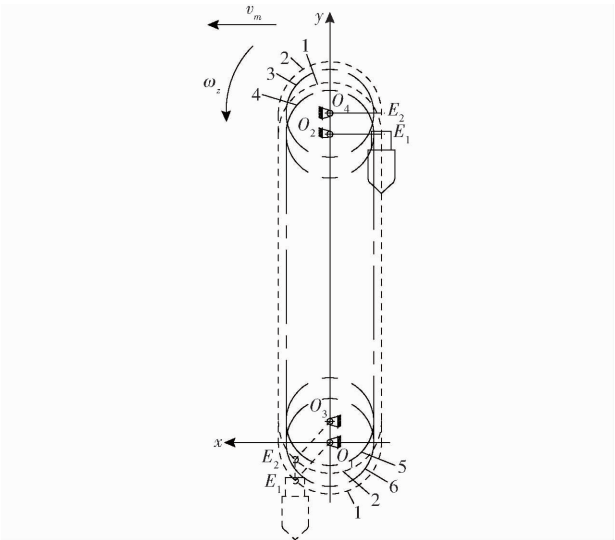


图 2 栽植机构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of planting mechanism

1. 轨道Ⅱ 2. 轨道Ⅰ 3. 主动链轮 a 4. 主动链轮 b 5. 从动链轮 a 6. 从动链轮 b

栽植机构可以看作由多个平行四杆机构构成,平行四杆机构的数量取决于链条上安装栽植器的个数。如图 2 所示, O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 为机构 4 个传动链轮圆心,传动链轮固连在机架上,随机器向前运动,以 O_1 为原点建立坐标系, x 轴正向为机器前进方向, y 轴穿过 4 个链轮圆心竖直向上。

图 1、2 中 E_1E_2 为 Z 形连杆, O_1O_3 、 O_2O_4 为机架, O_2E_1 和 O_4E_2 为 1 对双曲柄, $O_2E_1E_2O_4$ 为双曲柄机构,同理, O_1O_3 与 E_1E_2 也构成双曲柄机构。Z 形杆 E_1E_2 连接轨道Ⅰ与轨道Ⅱ之间的链条,栽植器固定在 Z 形杆 E_1E_2 的一端,机构在运动过程中,栽植器在双曲柄机构的作用下始终保持尖部垂直于地面,从而保证基质块苗在随栽植器运动过程中保持直立状态。

2.1.2 运动学模型构建

如图 3 所示,以从动链轮 b 的圆心 O_1 为原点,以移栽机前进方向为 x 轴正方向,以栽植器垂直地

面向上运动方向为 y 轴正方向,建立栽植器运动平面直角坐标系。

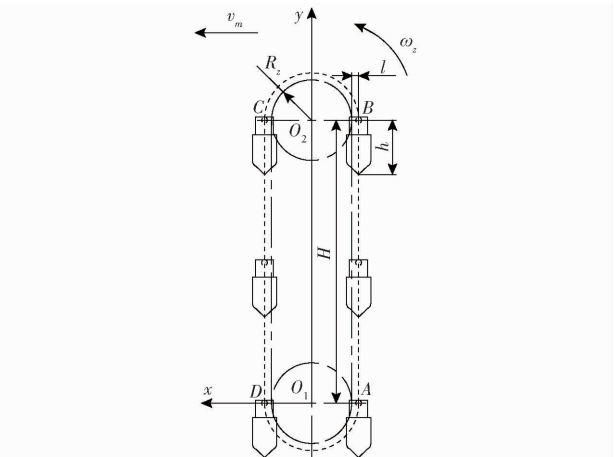


图 3 栽植机构简图

Fig. 3 Diagram of planting mechanism

由理论模型可知栽植器的运动轨迹为“跑道形”,存在直线运动和变向运动^[5,19],以任一栽植器尖部为参考点,推导出其周期内的位移方程。

栽植器尖部在 AB 内的位移方程为

$$\begin{cases} x = v_m t - (R_z + l) \\ y = -H + \omega_z R_z \left[t - \frac{1}{\omega_z} \left(2\pi + \frac{H}{R_z} \right) \right] \end{cases} \quad \left(\frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \leq t < \frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{2H}{\omega_z R_z} \right) \quad (1)$$

栽植器尖部在 BC 内的位移方程为

$$\begin{cases} x = v_m t - (R_z + l) \cos(\omega_z t) \\ y = H - h + (R_z + l) \sin(\omega_z t) \end{cases} \quad \left(0 \leq t < \frac{\pi}{\omega_z} \right) \quad (2)$$

栽植器尖部在 CD 内的位移方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + R_z + l \\ y = H - h - \omega_z R_z \left(t - \frac{\pi}{\omega_z} \right) \end{cases} \quad \left(\frac{\pi}{\omega_z} \leq t < \frac{\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \right) \quad (3)$$

栽植器尖部在 DA 内的位移方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + (R_z + l) \cos \left(\omega_z t - \left(\pi + \frac{H}{R_z} \right) \right) \\ y = -h - (R_z + l) \sin \left(\omega_z t - \left(\pi + \frac{H}{R_z} \right) \right) \end{cases} \quad \left(\frac{\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \leq t < \frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \right) \quad (4)$$

式中 x ——栽植器尖部在水平方向的位移,mm
 y ——栽植器尖部在垂直方向的位移,mm
 v_m ——移栽机前进速度,mm/s
 R_z ——栽植装置转动链轮分度圆半径,mm
 l ——栽植器固定点到转动链轮分度圆的距离,mm

ω_z ——链轮分度圆处转动角速度,rad/s
 h ——栽植器固定点到其尖部的距离,mm
 H ——主、从动链轮中心距,mm
 t ——时间,s

将栽植器尖部位移方程对时间 t 求导,得出其周期内的速度方程。

栽植器尖部在 AB 内的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v_m \\ v_y = \omega_z R_z \end{cases} \quad \left(\frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \leq t < \frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{2H}{\omega_z R_z} \right) \quad (5)$$

栽植器尖部在 $\widehat{BC}$ 内的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v_m + (R_z + l) \sin(\omega_z t) \\ v_y = (R_z + l) \omega_z \cos(\omega_z t) \end{cases} \quad \left(0 \leq t < \frac{\pi}{\omega_z} \right) \quad (6)$$

栽植器尖部在 CD 内的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v_m \\ v_y = -\omega_z R_z \end{cases} \quad \left(\frac{\pi}{\omega_z} \leq t < \frac{\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \right) \quad (7)$$

栽植器尖部在 $\widehat{DA}$ 内的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v_m + (R_z + l) \omega_z \sin \left(\omega_z t - \left(\pi + \frac{H}{R_z} \right) \right) \\ v_y = - (R_z + l) \omega_z \cos \left(\omega_z t - \left(\pi + \frac{H}{R_z} \right) \right) \end{cases} \quad \left(\frac{\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \leq t < \frac{2\pi}{\omega_z} + \frac{H}{\omega_z R_z} \right) \quad (8)$$

式中 v_x ——栽植器尖部在水平方向的运动速度,mm/s

v_y ——栽植器尖部在垂直方向的运动速度,mm/s

2.1.3 运动分析

栽植器的运动轨迹决定基质块苗的栽植效果,而对栽植效果影响显著的是图 3 中 $\widehat{DA}$ 段,其速度方程如式(8)所示。要使基质块苗平稳栽入土壤则栽植器需满足合成速度 $v_h = 0$,引入特征系数 λ ,即栽植器在近地端转动的切向速度与移栽机前进速度的比值,具体为

$$\lambda = \frac{R_z \omega_z}{v_m} \quad (9)$$

要使基质块苗平稳栽入土壤必须满足零速投苗^[20-21],分析图 4 中栽植器的 3 种运动轨迹(k_1 为 $\lambda > 1$, k_2 为 $\lambda = 1$, k_3 为 $\lambda < 1$)可知:短幅摆线不存在零速投苗点,普通摆线在栽植器最低植苗点有 1 个零速投苗点,余摆线运动轨迹形成环扣,在环扣最长横弦 ed 两端各有 1 个零速投苗点。栽植器栽苗过程中,基质块苗从栽植器释放苗至完全脱落需要短暂时间,而此时零速投苗点只存在 1~2 个时间点,因此理想的投苗位置应选择 k_2 运动轨迹的点 c_2 ,或 k_1 运动轨迹的点 e 与点 d 。

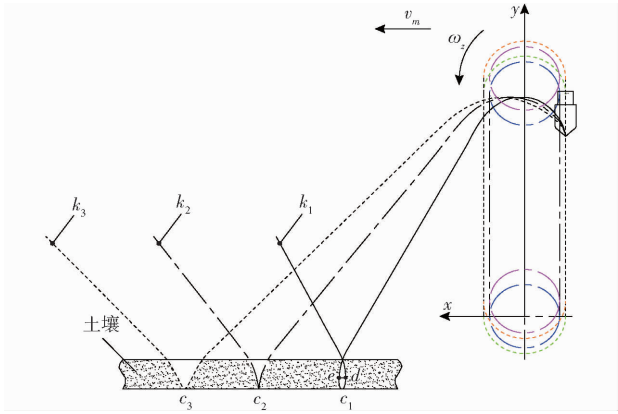


图 4 栽植器运动轨迹
Fig. 4 Motion trajectory of planter

机器在实际田间作业环境下会存在诸多不确定因素,因此 λ 值很难恰好等于 1。考虑移栽过程即基质块苗与栽植器快速分离的过程,在分离过程中要尽可能减少栽植器对基质块苗的干扰,所以要尽可能较少分离时间。图 4 中运动轨迹 k_1, ec_1 为栽植器下降段, c_1d 为栽植器提升段,基质块苗在栽植过程中除受复合运动的合力之外自身还存在自由落体运动, ec_1 段与 c_1d 段相比, c_1d 段基质块苗与栽植器的分离时间更短,因此, c_1d 为最佳投苗时间段,栽植器的真实运动轨迹为 $\lambda > 1$,即栽植器运动参数需满足 $0 < v_m < v_y$ 。

2.2 栽植器

2.2.1 结构设计

栽植器结构设计成对开式,由侧面将基质块苗送至内部,如图 5 所示,由一对外夹板、一对内夹板、相互啮合的凹凸板、固定架、弹簧、压杆、导向板等组成。外夹板用于破膜入土,内夹板用于夹取基质块,拨杆与外夹板固定连接,在凹凸板和两个弹簧的共同作用下实现栽植器的打开与闭合。为保证栽植器打开不影响基质块苗自由落体^[2],根据基质块外形尺寸(40 cm × 40 cm × 40 cm),栽植器打开宽度以基质块棱长的 10% 加上 1 mm 的设计原则保留误差余

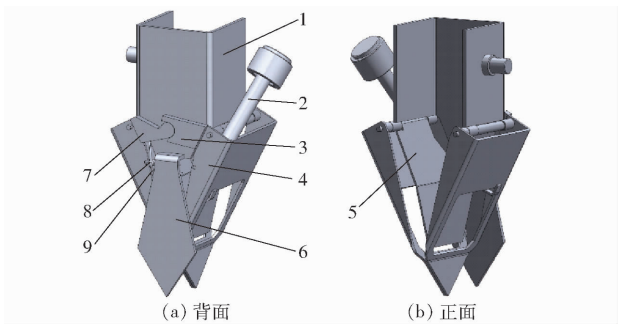


图 5 栽植器结构图

Fig. 5 Structure diagram of planter

1. 固定架 2. 压杆 3. 凹板 4. 外夹板 5. 内夹板 6. 导向板
7. 凸板 8. 外夹板弹簧 9. 内夹板弹簧

量,其开口尺寸最大值设计为 45 mm。同时,内夹板既要提高夹取苗成功率,又要减小施加在基质块上的夹力,以降低伤苗率,如图 6 所示,通过万能试验机对宜栽期基质块苗进行抗破坏试验,获得栽植器内夹板夹力的峰值范围在 89.95 ~ 119.29 N 之间。

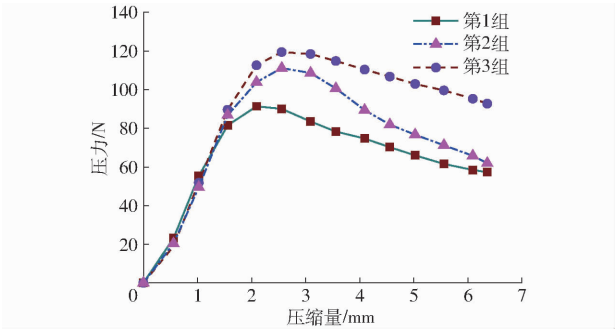


图 6 压力-压缩量变化曲线
Fig. 6 Pressure - compression curves

2.2.2 运动仿真分析

由于 6 个栽植器环周均匀布置,且结构形式和运动轨迹相同,为便于观察对其中 1 个栽植器进行仿真,仿真结果同样适用于其他 5 个栽植器。运用 SolidWorks 建立栽植器、基质块和秧苗三维模型并导入 ADAMS 中^[12],为便于运动分析,将基质块和秧苗近似为刚体(忽略叶片部分),基质块建成长、宽、高均为 40 mm 的正方体,秧苗茎秆建成直径 10 mm、高度 45 mm 的圆柱体。各零件之间添加运动副,基质块与栽植器左右夹板及地面之间添加接触副。

根据设计,在链轮分度圆半径 R_z 为 80 mm,栽植频率为 56 株/min 时,参考现有移栽机的作业速度范围 1 ~ 2 km/h^[2,22-23],对移栽机不同前进速度 v_m 下的基质块苗栽植过程进行仿真分析。

当 $v_m = 1.9$ km/h、 $\lambda = 0.87$ 时,仿真结果如图 7,栽植器左右夹板和导向板的运动轨迹均为短幅摆线,无零速投苗点,左右夹板打开过程不影响落苗,但受惯性影响,基质块紧贴导向板内侧,落苗后导向板避苗空间不充分,导向板上升会对苗块有刮带现象,致使基质块苗向前倾倒。

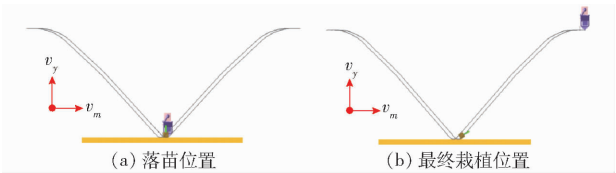


图 7 $\lambda = 0.87$ 时栽植仿真过程
Fig. 7 Planting simulation process when $\lambda = 0.87$

当 $v_m = 1.65$ km/h、 $\lambda = 1$ 时,仿真结果如图 8,栽植器左右夹板和导向板的运动轨迹均为普通摆

线,有零速投苗点,左右夹板打开过程不影响落苗,导向板有轻微刮苗现象,基质块苗向前进方向滑移,真实作业时易倾倒,且难以保证株距一致。

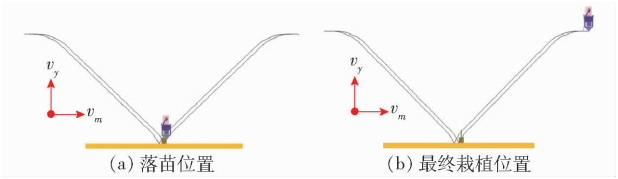


图 8 $\lambda = 1$ 时栽植仿真过程
Fig. 8 Planting simulation process with $\lambda = 1$

当 $v_m = 1.4$ km/h、 $\lambda = 1.17$ 时,仿真结果如图 9,栽植器左右夹板和导向板的运动轨迹均为余摆线,基质块苗在环扣对称轴左侧落苗,导向板避苗空间相对较充分,无刮苗现象,基质块苗落地后能够保持直立。

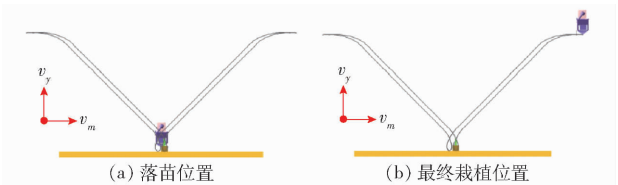


图 9 $\lambda = 1.17$ 时栽植仿真过程
Fig. 9 Planting simulation process when $\lambda = 1.17$

因栽植器为左右打开式,左右夹板和导向板的运动轨迹近似相同。综合上述仿真结果看出:特征系数 λ 分别取 0.87、1、1.17 时,栽植器左右夹板对落苗效果影响不大; $\lambda \leq 1$ 时导向板存在避苗不充分现象,仿真栽植质量差; $\lambda \geq 1.17$ 时导向板无刮带苗现象,仿真栽植效果较理想。

3 台架试验

3.1 试验设计

3.1.1 试验条件

2021 年 6 月在农业农村部南京农业机械化研究所东区实验室进行了台架试验,如图 10 所示。试验对象为苗龄 30 d 的 40 mm × 40 mm × 40 mm 的方体基质块甘蓝苗,平均苗高 82.74 mm,基质块间无粘连、串根,移栽时秧苗倾斜对基质块产生的力矩不影响栽植状态。



图 10 台架试验
Fig. 10 Bench tests

3.1.2 因素与指标

根据对栽植机构运动分析、基质块抗压试验与栽植器仿真研究可知,影响栽植性能的主要因素是移栽机的前进速度、栽植装置转动线速度和栽植器内夹板夹力等。因栽植装置转动线速度的直接表征是栽植频率,所以,以前进速度、栽植频率和内夹板夹力为试验因素,以倒伏率和伤苗率为试验指标,采用二次回归正交旋转组合设计方法进行三因素五水平的响应曲面试验。

基于栽植器运动仿真结果与基质块抗压试验结果,装置前进速度取值范围设置为 1.5 ~ 2.0 km/h,栽植频率取值范围设置为 56 ~ 60 株/min,内夹板夹力取值范围设置为 89.95 ~ 119.29 N。因素编码如表 1 所示,实际作业中,栽植频率应为整数,因此编码取值调整为整数。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Factors codes of experiment

编码	因素		
	前进速度/ (km·h ⁻¹)	栽植频率/ (株·min ⁻¹)	内夹板夹力/ N
1.628	2.00	60	119.29
1	1.90	59	113.41
0	1.75	58	104.62
-1	1.60	57	95.83
-1.628	1.50	56	89.95

进行 23 组移栽性能试验,每组试验重复 3 次,取 3 次测试结果的平均值作为试验结果。利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行试验设计及结果分析,如表 2 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 试验方案及结果
Tab.2 Experimental scheme and results

编号	因素			倒伏率	伤苗率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	1.99	3.17
2	1	-1	-1	4.22	3.05
3	-1	1	-1	3.79	3.23
4	1	1	-1	2.25	3.12
5	-1	-1	1	2.11	4.22
6	1	-1	1	7.03	4.07
7	-1	1	1	5.20	5.77
8	1	1	1	8.06	5.63
9	-1.682	0	0	4.12	4.25
10	1.682	0	0	7.33	4.02
11	0	-1.682	0	3.01	2.14
12	0	1.682	0	6.37	6.33
13	0	0	-1.682	3.87	2.26
14	0	0	1.682	7.45	5.74
15	0	0	0	4.88	3.86
16	0	0	0	6.31	4.13
17	0	0	0	6.45	4.22
18	0	0	0	5.45	3.91
19	0	0	0	6.23	3.75
20	0	0	0	5.51	4.22
21	0	0	0	6.02	4.55
22	0	0	0	5.79	4.01
23	0	0	0	5.77	3.59

3.2 结果分析

3.2.1 显著性分析

对试验结果进行方差分析,如表 3 所示,结果表明:倒伏率 Y_1 和伤苗率 Y_2 回归方程模型 $P < 0.000\ 1$,

表 3 回归模型方差分析
Tab.3 Variance analysis of regression models

来源	Y_1				Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	59.24	9	16.99	<0.000 1 **	21.05	9	15.23	<0.000 1 **
X_1	17.07	1	44.06	<0.000 1 **	0.060	1	0.39	0.542 1
X_2	6.96	1	17.96	0.001 0 **	7.32	1	47.64	<0.000 1 **
X_3	18.07	1	46.65	<0.000 1 **	12.32	1	80.23	<0.000 1 **
X_1X_2	2.45	1	6.33	0.025 8 *	5×10^{-5}	1	3.255×10^{-4}	0.985 9
X_1X_3	5.49	1	14.18	0.002 4 **	4.5×10^{-4}	1	2.930×10^{-3}	0.957 7
X_2X_3	1.83	1	4.73	0.048 6 *	1.11	1	7.23	0.018 6 *
X_1^2	0.75	1	1.93	0.187 8	2.056×10^{-4}	1	1.339×10^{-3}	0.971 4
X_2^2	6.28	1	16.21	0.001 4 **	0.20	1	1.29	0.276 1
X_3^2	0.92	1	2.36	0.148 3	0.031	1	0.20	0.661 8
残差	5.04	13			2.00	13		
失拟项	3.07	5	2.50	0.119 7	1.30	5	3.01	0.080 9
误差	1.97	8			0.69	8		
总和	64.28	22			23.05	22		

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

表明两模型极其显著;倒伏率 Y_1 失拟项 $P > 0.05$ (0.119 7),表明方程拟合度高,其决定系数 R^2 为 0.921 6,表明该模型可解释 92% 以上的评价指标;伤苗率 Y_2 失拟项 $P > 0.05$ (0.080 9),表明方程拟合度高,其决定系数 R^2 为 0.913 4,表明该模型可解释 91% 以上的评价指标。因此,双排链栽植装置的工作参数可以用两模型来优化。

倒伏率 Y_1 模型中有 7 个回归项影响显著 ($P < 0.05$),分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 ,其余项影响不显著 ($P > 0.05$);伤苗率 Y_2 模型中有 3 个回归项影响显著 ($P < 0.05$),分别为 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 ,其余项影响不显著 ($P < 0.05$)。剔除模型不显著交互回归项,得回归方程为

$$Y_1 = 5.52 + 1.12X_1 + 0.66X_2 + 1.15X_3 - 0.55X_1X_2 + 0.83X_1X_3 + 0.48X_2X_3 - 0.44X_2^2 \quad (10)$$

$$Y_2 = 4.08 - 0.066X_1 + 0.68X_2 + 0.95X_3 + 0.37X_2X_3 \quad (11)$$

分析优化后的模型,根据模型 Y_1 的 P 值 ($P < 0.000 1$)、失拟项 P 值 (0.119 7) 与模型 Y_2 的 P 值 ($P < 0.000 1$)、失拟项 P 值 (0.080 9),可知优化后的模型可靠。

3.2.2 各影响因素对倒伏率的影响

由图 11a 可知,当栽植器内夹板夹力为 104.62 N 时,倒伏率随前进速度增大而增大,随栽植频率的增

大先增大后减小,响应面沿前进速度方向变化较快,沿栽植频率方向变化相对慢。在栽植器内夹板夹力一定的情况下,前进速度对倒伏率的影响比栽植频率的影响显著。前进速度为 1.6 km/h、栽植频率为 57 株/min 时,倒伏率最低。

由图 11b 可知,当栽植频率为 58 株/min 时,倒伏率随前进速度和栽植器内夹板夹力的增大而增大,前进速度小于 1.68 km/h、内夹板夹力小于 98.23 N 时响应面变化趋势变化较慢,后期变化加快呈线性增加,说明栽植频率一定的情况下,内夹板夹力对倒伏率的影响比前进速度显著。

由图 11c 可知,当前进速度为 1.75 km/h 时,倒伏率随内夹板夹力增大而直线增大,随栽植频率增大而缓慢增大,响应面沿内夹板夹力方向变化较快,沿栽植频率方向变化缓慢,说明在前进速度一定的情况下,内夹板夹力对倒伏率的影响比栽植频率显著。

3.2.3 各影响因素对伤苗率的影响

由图 11d 可知,当前进速度为 1.75 km/h 时,伤苗率均随栽植频率和内夹板夹力的增大而线性增大,响应面变化趋势沿栽植频率方向变化速度低于沿内夹板夹力方向速度,说明前进速度一定的情况下,内夹板夹力对伤苗率的影响比栽植频率显著。

3.3 参数优化

为获得较好的栽植效果,以低倒伏率、伤苗率为

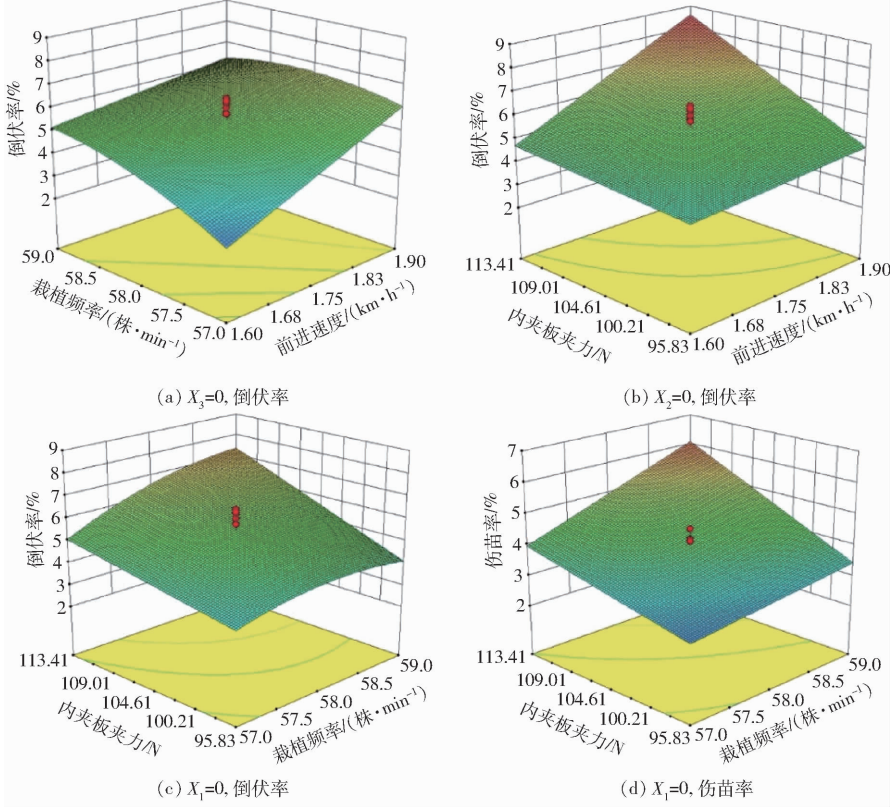


图 11 交互因素对倒伏率与伤苗率影响的响应曲面

Fig. 11 Influence of interactive factors on response surfaces of lodging rate and injury rate of seeding

优化目标,进行栽植装置工作参数和结构参数优化,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Optimization - Numerical 模块进行优化求解,其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

优化后得到影响因素最佳参数组合为前进速度 1.6 km/h、栽植频率 57 株/min、内夹板夹力 91.83 N,在该参数组合下倒伏率 2.9%、伤苗率 2.83%。采用获取的最佳参数组合进行台架验证试验,重复试验 3 次并取平均值作为试验验证值,试验结果为:倒伏率 3.13%、伤苗率 3.07%,验证值与优化结果基本一致。

4 田间试验

为检验栽植装置的田间实际作业效果,将栽植装置安装在基质块苗移栽机上,以约翰迪尔 1204 型轮式拖拉机为牵引动力,于 2021 年 12 月在常熟横塘蔬菜专业合作社开展田间试验(图 12)。

移栽前,对试验田进行旋耕起垄,确保土壤细碎垄面平整。选取参数组合为:前进速度 1.6 km/h、栽植频率 57 株/min、内夹板夹力 91.83 N,重复试验 3 次,每行取连续 120 株秧苗测量结果取平均值。田间试验得倒伏率 3.35%、伤苗率 3.14%,与两指标的优化结果相对误差分别为 0.45% 和 0.31%。表明该装置设计合理、作业可靠。



图 12 田间试验
Fig. 12 Field test

5 结论

(1)设计了一种双排链式基质块苗栽植装置,通过建立理论模型和数学模型得到了栽植器运动方程,并对其进行了运动分析,确定了运动参数范围 $0 < v_m < v_y$,运用 ADAMS 软件对装置进行运动仿真,结果表明当 $\lambda \geq 1.17$ 、 $v_m \geq 1.4$ km/h 时仿真效果较佳。

(2)对栽植装置进行了二次回归正交旋转组合台架试验,建立各因素与指标之间的回归模型,采用响应面法对参数进行优化,得到甘蓝基质块苗双排链式栽植装置最佳参数组合:前进速度 1.6 km/h、栽植频率 57 株/min、内夹板夹力 91.83 N,该参数组合下,倒伏率 2.9%、伤苗率 2.83%。台架验证试验结果为倒伏率 3.13%、伤苗率 3.07%,与优化结果基本一致。

(3)田间试验表明,双排链式栽植装置能够满足甘蓝基质块苗栽植作业要求,倒伏率 3.35%、伤苗率 3.14%,与两指标的优化结果相对误差分别为 0.45% 和 0.31%,表明该装置具有较高的稳定性,可为基质块苗移栽装置结构改进和参数优化提供参考。

参 考 文 献

[1] 管春松,高庆生,刘先才,等.我国甘蓝机械化生产现状及发展建议[J].中国蔬菜,2019(10):1-8.
GUAN Chunsong, GAO Qingsheng, LIU Xiancai, et al. Current situation and development suggestions of mechanized production of cabbage in China[J]. China Vegetables, 2019(10): 1-8. (in Chinese)

[2] CUI Z, GUAN C, XU T, et al. Design and experiment of transplanting machine for cabbage substrate block seedlings[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2021, 64(2): 375-384.

[3] 崔志超,管春松,徐陶,等.基质块育苗移栽技术与装备发展现状[J].中国农机化学报,2022,43(5):29-34.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, XU Tao, et al. Development status of technology and equipment of substrate block seedling cultivation and transplanting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 29-34. (in Chinese)

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

[5] 徐陶,崔志超,管春松,等.基质块苗移栽机送取苗装置的设计与试验[J].中国农机化学报,2021,42(7):50-55.
XU Tao, CUI Zhichao, GUAN Chunsong, et al. Design and experiment of sending and taking seedling device of substrate block seedling transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 50-55. (in Chinese)

[6] SUN K, GE R, LI T, et al. Design and analysis of vegetable transplanter based on five-bar mechanism[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019: 12-29.

- [7] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182(1): 1 – 12.
- [8] HAN L, MAO H, HU J, et al. Development of a riding-type fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2019, 17(3): 1 – 14.
- [9] 蒋兰. 油菜毯状苗机械移栽立苗机理研究与机构优化[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
JIANG Lan. Research on the mechanism of mechanical transplanting and establishment of rapeseed blanket seedlings and institutional optimization [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [10] 刘杰. 油菜毯状苗挖穴取苗一体化移栽机构优化设计与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
LIU Jie. Optimal design and experimental research on the integrated transplanting mechanism of rapeseed blanket seedlings with digging holes and seedlings [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020. (in Chinese)
- [11] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78 – 86.
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimal design and experiment of planetary planting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78 – 86. (in Chinese)
- [12] 胡建平, 张建兵, 何俊艺, 等. 移栽机行星轮转臂式栽植器运动分析与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 57 – 61.
HU Jianping, ZHANG Jianbing, HE Junyi, et al. Analysis and experiment on the movement of transplanter planetary wheel rotary arm transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 57 – 61. (in Chinese)
- [13] 王永维, 唐燕海, 王俊, 等. 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 91 – 100.
WANG Yongwei, TANG Yanhai, WANG Jun, et al. Parameter optimization for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter in high-speed condition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 91 – 100. (in Chinese)
- [14] 吴俊, 俞文轶, 张敏, 等. 2ZY-6 型油菜毯状苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 95 – 102, 275.
WU Jun, YU Wenyi, ZHANG Min, et al. Design and test of 2ZY-6 rapeseed carpet seedling transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 95 – 102, 275. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 胡乔磊, 张青松, 李心志, 等. 油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 18 – 27.
HU Qiaolei, ZHANG Qingsong, LI Xinzhi, et al. Design and parameter analysis of seedling collection device of rapeseed substrate block seedlings transplanter machine [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 18 – 27. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 王洋, 张青松, 胡乔磊, 等. 油菜基质块苗移栽机倾斜式分苗装置设计与稳定性分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 147 – 155.
WANG Yang, ZHANG Qingsong, HU Qiaolei, et al. Design and stability analysis of inclined detach device for rapeseed substrate block seedling transplanter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 147 – 155. (in Chinese)
- [19] 唐燕海. 蔬菜钵苗吊杯式栽植器参数优化与性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
TANG Yanhai. Research on parameters optimization and performance test for the dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [20] 张祖立, 王君玲, 张为政, 等. 悬杯式蔬菜移栽机的运动分析与性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 21 – 25.
ZHANG Zuli, WANG Junling, ZHANG Weizheng, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cantilever cup vegetable transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 21 – 25. (in Chinese)
- [21] 封俊, 秦贵, 宋卫堂, 等. 移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 48 – 50.
FENG Jun, QIN Gui, SONG Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type transplanters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48 – 50. (in Chinese)
- [22] 胡显威. 辣椒苗自动移栽机的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
HU Xianwei. Design and experimental study of automatic transplanter for pepper plug seedlings [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [23] 刘正铎. 机械臂式甘薯移栽机关键技术与移栽机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
LIU Zhengduo. Key technology and transplanting mechanism of sweet potato transplanter with mechanical arm [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)