

履带自走式全自动烟草移栽机设计

白泽圣^{1,2,3}, 杨婉丽², 顾玉麒¹, 宋东方¹, 王辉³, 王万章¹

(1. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039; 3. 河南省烟草公司洛阳分公司, 河南 洛阳 471026)

摘要:【目的】针对烟草移栽机械化程度低、人工成本高、现有移栽机自动化不足等问题, 结合河南许昌、平顶山等平原烟区的烟草移栽农艺要求, 设计一种履带自走式全自动烟草移栽机, 可以一次完成打窖、移栽、注水的工作。【方法】设计井窖式栽植机构, 包括栽植变速箱、8 连杆机构、打窖钻头、鸭嘴栽植器等部件; 基于 Adams 软件对栽植机构进行运动仿真, 分析鸭嘴运动轨迹、间歇运动特性与打窖垂直度; 建立履带车纵向与横向极限倾翻角计算模型评估稳定性; 开展田间试验验证移栽性能。【结果】在河南焦作农先锋试验用地中, 对履带自走式全自动烟草移栽机样机进行试验, 结果表明, 在栽植频率为 50 株·min⁻¹, 苗龄 60 天时, 伤苗率为 1.67%, 平均漏栽率 4%, 栽植合格率 94.33%。【结论】履带自走式全自动烟草移栽机有良好的移栽性能, 通过性好, 栽植效率高, 伤苗率低, 满足田间作业要求。未来研究将进一步优化栽植机构的精度和耐久性, 并探索其在其他作物移栽中的应用潜力。

关键词: 烟草; 移栽机; 自走式; 履带; 井窖; 稳定性

中图分类号: S223.9

文献标志码: A

Design and research of a crawler self-propelled fully automatic tobacco transplanting machine

BAI Zesheng^{1,2,3}, YANG Wanli², GU Yuqi¹, SONG Dongfang¹, WANG Hui³, WANG Wanzhang¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2.State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China; 3.Henan Tobacco Company Luoyang Company, Luoyang 471026, China)

Abstract:【Objective】Aiming at the problems such as the low degree of mechanization of tobacco transplantation, high labor cost, and insufficient automation of existing transplanters, and in combination with the agronomic requirements for tobacco transplantation in the plain tobacco-growing areas such as Xuchang and Pingdingshan in Henan Province, a crawler self-propelled fully automatic tobacco transplanter is designed, which can complete the operations of hole digging, transplantation, and water injection at one time. 【Method】A well-cellar-type planting mechanism was developed, comprising a planting gearbox, eight-link mechanism, hole-drilling bit, and duckbill planter. Motion simulation of the planting mechanism was conducted using Adams software to analyze the duckbill trajectory, intermittent motion characteristics, and hole-drilling verticality. Longitudinal and lateral limit overturning angle models were established to

收稿日期: 2024-08-22

基金项目: 河南省烟草公司重大科技专项 (2023410000240028); 全国智能农业装备重点实验室开放课题 (SKLIAPE 2024011)

作者简介: 白泽圣 (2000-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事智能农机装备研究, E-mail:bruce12138@henau.edu.cn。

通信作者: 王辉 (1987-), 男, 河南兰考人, 农艺师, 硕士, E-mail:kflinghao@126.com; 王万章 (1963-) 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, E-mail:wangwz@henau.edu.cn。

evaluate vehicle stability. Field trials were performed to validate transplanting performance.

【Result】Field tests conducted at the experimental site in Jiaozuo, Henan Province, demonstrated that at a transplanting frequency of 50 plants · min⁻¹ and seedling age of 60 days, the seedling damage rate was 1.67%, average missed planting rate was 4%, and transplanting qualification rate reached 94.33%. 【Conclusion】The crawler self-propelled fully automatic tobacco transplanter exhibits excellent performance with superior terrain adaptability, high operational efficiency, and low seedling damage rate, meeting field operation requirements. Future research will focus on optimizing the precision and durability of the planting mechanism and exploring its adaptability for other cash crops.

Key words: Tobacco; Transplanter; Self-propelled; Tracked; Well cellar; Stability

目前, 国内烟草移栽仍以半自动机械或人工为主, 存在效率低、伤苗率高、漏栽率大等问题, 难以满足平原烟区规模化种植需求。全自动机械化移栽技术不仅可以提高移栽效率、降低用工成本, 还能解决传统手工移栽方式存在的劳动强度大、种植质量难以保证等问题, 提高烟草种植的生产效益, 推动烟草种植全过程的机械化和自动化发展^[1-2]。

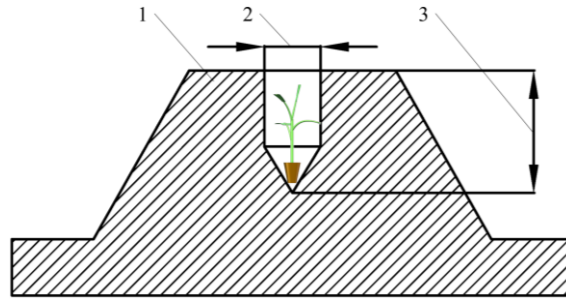
当前全自动移栽技术发展呈现出明显的区域化差异特征^[3-4]。以英国 Pearson、意大利 Ferrari Futura 系列和新西兰 Ubinati RW32 为代表的欧美机型适配规模化种植但兼容性差^[5-14]。相比之下, 日本久保田全自动鸭嘴式膜上移栽机、洋马 PF2R 型全自动移栽机、井关 PZP-80 型移栽机等, 适应复杂地形却因精密结构难以产业化^[15-17]。国内研究主要聚焦于对半自动移栽机的改良与核心部件优化。栽植机构是全自动移栽机的核心工作部件之一, 其性能直接影响到移栽机的工作效率和钵苗栽植质量。国内学者进行了大量的研究, 但栽植机构设计复杂、对整体机械加工精度要求高, 加之目前移栽标准化程度较低, 导致栽植装置整体做工粗糙, 栽植效果不稳定。秦伟等^[18]设计的导苗管式三七种苗栽植机构采用倾斜导苗管设计, 作业效率较高, 但需配合开沟器使用^[19-20]; 刘洋等^[21]设计的吊篮式移栽机构通过膜上打穴实现精准栽植, 常用于全自动移栽机, 但其属于打穴移栽, 不符合并窖移栽的农艺要求; 鸭嘴式移栽机栽植株距稳定, 但机构复杂、易振动, 适合单株作业; 史玉鹏等^[22]设计的山地作物移栽机并窖式单线螺旋成穴装置以及徐高伟等^[23]设计的丘陵山地作物移栽机并窖式成穴机构, 成穴效果好, 适用于烟草移栽, 但机构较为复杂, 无法与取投苗装置配合作业。在底盘技术方面, 当前主流的轮式设计由于转弯半径过大, 在丘陵山区作业时不仅容易造成整体损坏, 还会影响成穴质量稳定性^[24]。同时, 履带式移栽机由于动力传输效率偏低、缺乏充分的田间试验数据以及量产工艺尚未成熟等原因, 目前仍停留在理论阶段。如向伟等^[25]设计的履带式油菜苗移栽栽植孔成型机, 通过性好, 能形成满足设计要求的栽植孔, 但没有进行实际生产与应用。

因此, 本研究针对烟草移栽机械化程度低、人工成本高等问题, 结合烟区农艺要求, 研制了一种履带自走式全自动烟草移栽机。通过系统化的结构优化与功能集成, 该设备采用模块化设计理念, 改进了履带底盘和间歇式 8 连杆栽植机构, 实现了打窖、移栽一体化协同作业。该机具有稳定性好、通过性强、操作简便等特点, 田间试验表明其能有效提高移栽效率和质量, 为烟草生产提供了新型高效装备。

1 整机设计方案

1.1 农艺要求

现有移栽机大部分是针对蔬菜移栽进行设计, 由于烟草钵苗的农艺性状与蔬菜钵苗有着较大差异, 蔬菜移栽机在烟草移栽的工作上效果不佳, 存在着取苗成功率较低、伤苗率较高等情况。因此, 需要根据烟草移栽的作业环境和农艺要求, 制定满足要求的履带自走式全自动烟草移栽机设计方案^[26]。烟草是垄作植物, 垄的高度一般在 250~300 mm, 如图 1 所示, 行间距一般为 1 200 mm, 株距一般在 450~550 mm。采用膜下移栽, 移栽后进行覆膜。



1. 烟垄; 2. 井窖直径; 3. 井窖深度。

1. Tobacco Ridge; 2. Well-Pit Diameter; 3. Well-Pit Depth.

图 1 移栽井窖规格

Fig.1 Transplanting Well-Pit Specifications

注：井窖直径一般为 80~100 mm，烟苗顶部到垄顶距离一般为 20~30 mm，井窖深度为 180~200 mm，垄底宽度在 600~800 mm 之间。

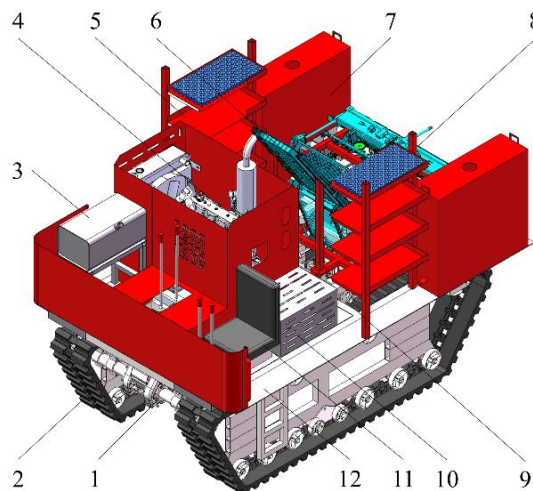
Note: The well-pit diameter generally measures 80~100 mm, the distance from the top of the tobacco seedling to the ridge top is usually 20~30 mm, the well-pit depth is 180~200 mm, and the ridge base width is between 600~800 mm.

1.2 整机布局

发动机采用横向布置于设备前部中央位置，变速箱前置并与驾驶位、油箱形成合理的人机工程布局，动力系统与燃油箱分置于前后区域，工作与行走传动系统左右对称布置，投取苗装置后置且两侧布置苗盘架。

1.3 结构设计与工作原理

移栽机主要由行走系统、全自动投取苗系统和栽植系统三个部分组成。整机结构如图 2 所示。行走系统由柴油发动机、履带、变速箱、车架等组成；全自动投取苗系统由压缩气泵、储气罐、送盘装置、投取苗装置等组成；栽植系统由变速箱、连杆、打窑头、接苗筒、鸭嘴栽植器等组成。



1. 行走变速箱; 2. 履带底盘; 3. 油箱; 4. 发动机; 5. 苗盘架; 6. 送盘装置;
7. 水箱; 8. 取投苗装置; 9. 传动装置; 10. 空压机; 11. 驾驶位; 12. 机架。

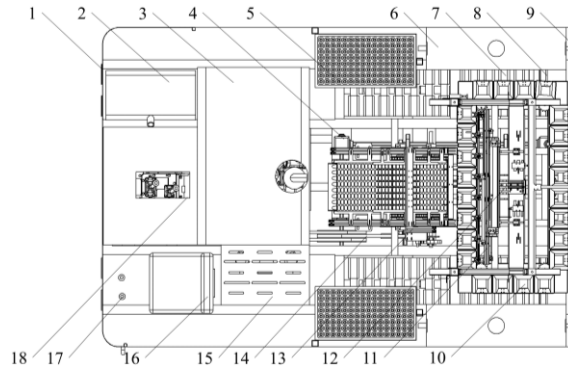
1. Gearbox for propulsion; 2. Tracked chassis; 3. Fuel tank; 4. Engine;

5. Tray rack; 6. Tray feeding device; 7. Water tank; 8. Seedling picking mechanism;

9. Transmission device; 10. Air compressor; 11. Driver's seat; 12. Frame.

(a) 三维整机结构图

(a) 3D Complete Machine Structure Diagram



1. 驱动轮; 2. 油箱; 3. 发动机; 4. 变速角箱; 5. 苗盘架; 6. 水箱; 7. 履带;
8. 张紧轮; 9. 机架; 10. 苗杯; 11. 自动取投苗装置; 12. 栽植装置; 13. 自动送盘装置;
14. 皮带; 15. 空压机; 16. 驾驶位; 17. 驾驶挡杆; 18. 变速箱。

1. Drive wheel; 2. Fuel tank; 3. Engine; 4. Bevel gearbox; 5. Tray rack; 6. Water tank; 7. Track; 8. Tension wheel;
9. Frame; 10. Seedling cup; 11. Automatic seedling picking and planting device; 12. Planting device;
13. Automatic tray feeding device; 14. Belt; 15. Air compressor; 16. Driver's seat; 17. Driver's lever; 18. Gearbox.

(b) 整机俯视图

(b) Top View of the Complete Machine

图 2 整机结构图

Fig.2 The structural diagram of the entire machine

工作时, 发动机动力经皮带传递至变速箱, 变速箱上方挡杆控制整机的行走速度和前进倒退; 驾驶位前方操纵杆控制车辆转向, 一侧的手油门调节油门大小, 保证行驶速度稳定。发动机动力从变速箱经过传动轴传递至空压机和栽植机构, 通过手动控制的张紧轮调节皮带张紧度, 从而控制变速箱与后续装置之间动力的连接与断开。空压机向储气罐储存压缩空气, 并以此驱动整套投取苗机构, 完成将钵苗从苗盘中取出并投入苗杯的操作。钵苗从苗杯落入栽植机构的鸭嘴栽植器中, 栽植机构在打窖的同时将钵苗准确投入井窖中。

田间作业时, 操作人员首先设定油门开度以维持恒速作业, 随后完成育苗盘装载。自动投取苗系统通过气动执行机构精确实现取苗和投苗动作, 当苗杯运动到预设位置时, 钵苗准确投入鸭嘴栽植器中。栽植机构同步完成井窖成型和钵苗栽植, 最终通过定量注水系统完成定根水浇灌, 形成完整的移栽作业循环。

1.4 整机参数

本研究设计的烟草移栽机离地间隙在 300 mm 以上, 履带中心距 1 200 mm, 履带宽度 ≤ 400 mm; 最低稳定前进速度 $\leq 1.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 移栽效率在 $45 \text{ 株} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上; 操作要求简单方便, 整车使用安全可靠。整机主要技术参数见表 1。

表 1 整车主要技术参数表

Table. 1 Main technical parameters table of the entire vehicle

参数名称 Parameter name	参数值 Parameter value
外形尺寸/mm Overall dimensions	2 900×1990×2 220
整机重量/kg Overall weight	1 800
发动机功率/kW Engine power	20
最低速度/(km·h ⁻¹) Minimum speed	1.2

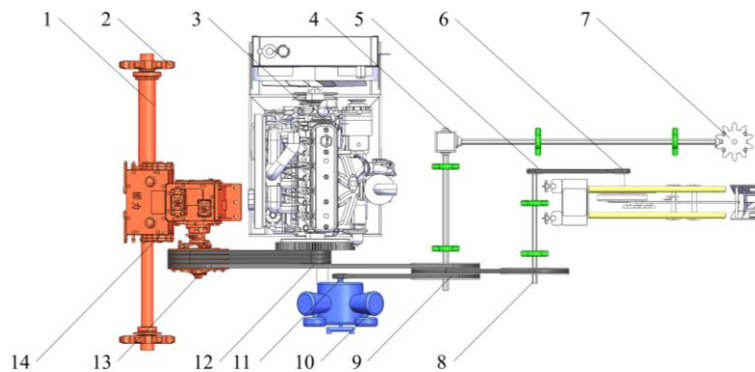
最大爬坡角度/ °	30
Maximum climbing angle	
离地间隙/ mm	350
Ground clearance	
履带中心距/ mm	1 200
Track center distance	
履带宽度/ mm	320
Track width	
株距/ mm	550 (可调)
Plant spacing	
打窖深度/ mm	200
Pit digging depth	
移栽行数	1
Transplanting rows	

2 动力配置与传动计算

2.1 传动系统的设计计算

发动机输出动力经主传动带分流至两个子系统：前端动力通过变速箱经驱动轴带动履带行走机构，其中变速箱为 4+2 挡位配置，含 3 个前进挡、1 个后退挡及高低速挡；后端动力经过渡轴传递至作业系统。作业系统动力经传动角箱二次分配，通过齿轮副和直角变速箱分别驱动栽植机构和苗杯输送装置，实现各执行机构的协调运作。

整机传动布置如图 3 所示：



1. 驱动轴；2. 履带驱动轮；3. 发动机；4. 传动角箱；5. 栽植系统输入带轮；
6. 栽植系统输出带轮；7. 苗杯驱动链轮；8. 栽植系统过渡带轮；9. 过渡轴带轮；
10. 空压机；11. 空压机带轮；12. 发动机带轮；13. 变速箱带轮；14. 变速箱。

1. Drive shaft; 2. Track drive wheel; 3. Engine; 4. Bevel gearbox; 5. Planting system input pulley; 6. Planting system output pulley; 7. Seedling cup drive sprocket; 8. Planting system transition pulley; 9. Transition shaft pulley; 10. Air compressor; 11. Air compressor pulley; 12. Engine pulley; 13. Gearbox pulley; 14. Gearbox.

图 3 整机传动布置图

Fig.3 Overall machine transmission layout diagram

2.1.1 空压机的传动设计

空压机额定输入转速 $800\sim 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，忽略履带在地面上的滑移，则此时机器前进需要的速度 v_0 和履带的线速度 v_1 相等，取 $1.65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，则空压机带轮实际所需工作转速为：

$$n_4 = \frac{i_0 \cdot d_2 \cdot v_0}{6 \times 10^7 \pi D_0 \cdot d_4} \quad (1)$$

式中： i_0 为变速箱传动比； d_2 为变速箱带轮节圆直径，mm； D_0 为驱动轮节圆直径，229.30 mm； d_4 为空压机带轮节圆直径，90 mm。

本研究选用民华 21 型变速箱，代入数据可得空压机转速满足要求。

2.1.2 栽植系统和苗杯的传动设计

过渡轴带轮到苗杯驱动链轮的传动比为：

$$i_{3b} = \frac{\pi n_4 \cdot d_4 \cdot d_b}{60 v_b \cdot d_3} \quad (2)$$

式中： d_b 为苗杯驱动链轮节圆直径，81.37 mm； v_b 为苗杯线速度，取 $105.83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ； d_3 为过渡轴带轮节圆直径，240 mm。

经过传动系统优化设计，选用速比为 4 的直角减速器实现动力换向与减速功能。根据公式(2)计算并考虑安装空间限制，选定主动齿轮为 3 模 29 齿圆柱齿轮，从动齿轮为 3 模 79 齿。

2.2 动力装置选型计算

2.2.1 功率计算

低速行驶时，履带移栽机处于工作状态，动力消耗包括行走和作业两部分；高速时，没有工作装置功率消耗，整机发动机功率全部用于行走装置。

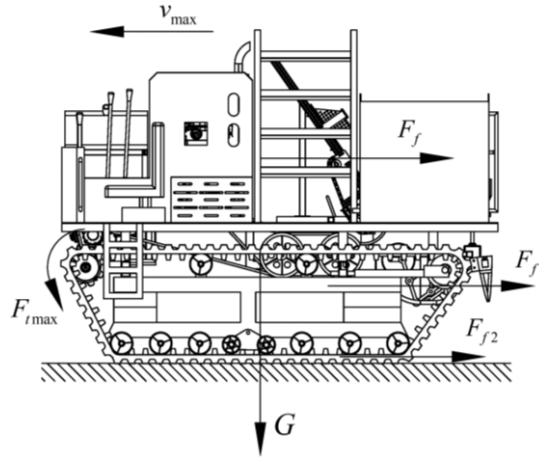


图 4 车辆受力示意图

Fig.4 Diagram of forces acting on the vehicle

机器在田间行进过程中，车辆需要克服土壤对履带的阻力、履带内部机械摩擦阻力以及车辆自身的惯性阻力^[27]，整机受力如图 4 所示。最大驱动功率 P_{\max} 为：

$$P_{\max} = \frac{(f_1 mg + f_2 mg + 0.02 mg) \times v_{\max}}{3600 \eta_1 \eta_2} \quad (3)$$

式中： f_1 为地面摩擦系数，取 0.1； f_2 为履带内部摩擦系数，取 0.06； m 为满载作业时履带车质量，1 800 kg； g 为重力加速度， $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ； v_{\max} 为最大行驶速度，取 $19.28 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ； P_{\max} 为最大驱动功率，kW； η_1 为传动系统效率，取 0.96； η_2 为行走系统效率，取 0.9。

最大栽植频率下移栽速度 $1.62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，行走所需的最大功率 $P_t = 1.65 \text{ kW}$ 。

过渡轴上所需要的功率 P_0 为：

$$P_0 = \frac{P_z + P_b + P_k}{\eta_z} \quad (4)$$

式中： P_z 为栽植装置所需功率，kW； P_b 为苗杯运转所需功率，kW； P_k 为空压机功率，2.29 kW。

由 $P_z = \frac{P_{z \max}}{\eta_z}$ ，其中 $P_{z \max}$ 为栽植装置所需最大功率，4.1 kW； η_z 为发动机到栽植装置的综合传

动效率，经过两个轴承、两次带传动，查机械设计手册，取 0.9； $P_b = \frac{\mu mg v_b}{\eta_b} \times \frac{1}{1000}$ ，其中 μ 为树脂

和碳钢的动摩擦因数, 0.28; m 为苗杯、钵苗和链条的总质量, 10.3 kg; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; v_b 为苗杯主动链轮线速度, 取 $0.127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; η_b 为发动机到苗杯的综合传动效率, 经过一次开式齿轮传动、一个直角变速箱、四个轴承、一个传动角箱和一次链传动, 取 0.77; 计算可得移栽机非工作状态下消耗的最大功率为 $P_{\max} = 19.68 \text{ kW}$; 工作状态下, 行走所需最大功率 $P_t = 1.65 \text{ kW}$, 整机消耗的最大功率为 $P_t + P_0 = 9.22 \text{ kW}$ 。因此选用 20 kW 柴油发动机。

2.2.2 动力装置选型

发动机的输出转矩经过传动系统传递至履带驱动轮上, 则履带驱动轮转矩 M_x 为:

$$M_x = T_{tq} i_0 \eta_T \quad (5)$$

式中: T_{tq} 为输出转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; η_T 为机械效率。

根据烟草移栽机行驶平衡方程式, 得出:

$$T_{tq} \geq \frac{F_d + F_s + F_r + F_i + F_n}{i_0 \eta_T} \quad (6)$$

式中: F_d 为土壤变形引起的行驶阻力^[28], N ; F_s 为坡道阻力, N ; F_r 为弯道阻力^[29], N ; F_i 为加速阻力^[30], N ; F_n 为履带内阻力, N 。

由 $F_d = \omega G$, 其中 ω 为阻力系数, 取 0.175; G 为移栽机总重量, N ; $F_s = G \sin \alpha$, 其中 α 为坡道角度, 取 25° ; $F_r = 0.25 \frac{\mu GL}{R}$, 其中 μ 为附着系数; L 为轴距, m ; R 为最小转弯半径, m ; $F_i =$

$\left(1 + \frac{\sum I_w}{mr^2} + \frac{I_f i_0^2 \eta_T}{mr^2}\right) \cdot m \frac{du}{dt}$, 其中 I_w 为移栽机传动系统的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; I_f 为飞轮的旋转惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; m 为整备质量, kg ; du/dt 为行驶加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; $F_n = \mu d_1 \frac{\pi}{zt} (P_1 + 3P_2)$, 其中 P_1 为履带松边拉力, N ; P_2 为紧边拉力, N ; d_1 为履带销直径, m ; z 为驱动轮齿数; t 为履带节距, m ; 计算可得发动机转矩 $T_{tq} = 9550 \cdot P_e > 41025 \text{ N} \cdot \text{m}$, 因此选用常柴 L28 柴油发动机能满足履带自走式烟草移栽机的动力要求。

3 栽植机构的设计与仿真试验

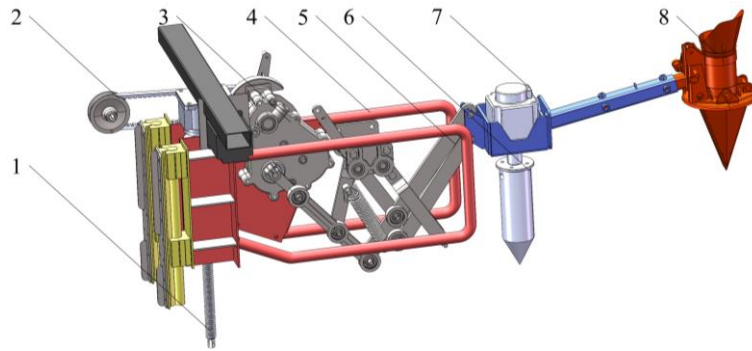
本研究设计的打窖落苗一体栽植机构, 在现有连杆式鸭嘴栽植器的基础上, 集成打窖装置实现同步作业; 同时, 通过变速箱中的间歇式齿轮机构, 将现有连杆栽植机构的连续往复运动, 改变为间歇式往复运动, 使鸭嘴运动到最高点接苗时有一定的时间与机具相对静止, 保证苗杯中的钵苗能准确落入鸭嘴中, 提高移栽质量。

3.1 结构原理

本研究设计的栽植机构如图 5 所示, 主要由鸭嘴栽植器、打窖钻头、8 连杆机构、栽植变速箱等组成。

栽植机构加装了一个用于打窖的电机和打窖钻头, 并通过优化鸭嘴栽植器的空间位置, 使其精准对位苗杯。采用直流电机驱动的丝杆升降系统配合四组直线轴承导向机构, 实现了栽植高度的准确调节, 确保在不同垄高条件下均能获得理想的作业效果。

作业时, 发动机动力经变速箱、过渡轴和带轮系统传输至栽植机构变速箱, 栽植机构变速箱传动布置如图 6 所示, 该变速箱采用链轮-齿轮二级减速设计, 驱动间歇齿轮组产生周期性运动。曲柄连杆机构将旋转运动转换为末端执行器的间歇摆动, 带动打窖钻头和鸭嘴栽植器协同作业。

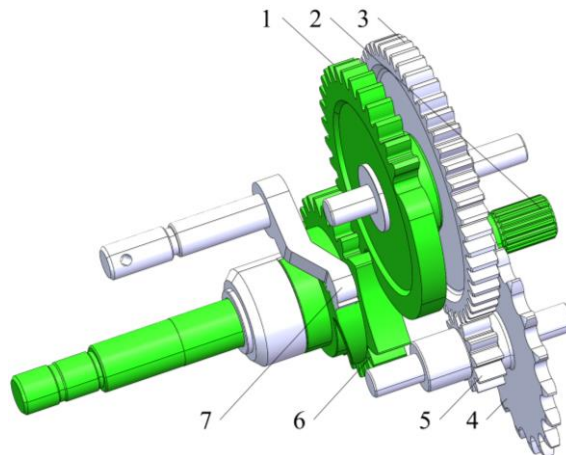


1. 升降丝杆; 2. 栽植系统输入带轮; 3. 栽植机构变速箱; 4. 栽植机架;
5. 连杆机构; 6. 打窖钻头; 7. 打窖电机; 8. 鸭嘴栽植器。

1. Lifting lead screw; 2. Planting system input pulley; 3. Planting mechanism gearbox; 4. Planting frame;
5. Linkage mechanism; 6. Pit digging drill; 7. Pit digging motor; 8. Duckbill planter.

图 5 连杆栽植机构

Fig.5 Linkage planting mechanism



1. 间歇大齿轮; 2. 变速箱输出轴; 3. 减速大齿轮; 4. 减速大链轮;
5. 减速小齿轮; 6. 间歇小齿轮; 7. 栽植拨叉。

1. intermittent large gear; 2. transmission output shaft; 3. large reduction gear; 4. large reduction sprocket;
5. small reduction gear; 6. small intermittent gear; 7. planting shift fork.

图 6 栽植机构变速箱传动布置图

Fig.6 Transmission layout diagram of the planting mechanism gearbox

3.2 仿真与试验

栽植机构变速箱主要由一条传动链条和特制齿轮组成,经研究后发现特制齿轮是该变速箱的核心部件,因此仿真时仅保留此特制齿轮、连杆机构及打窖钻头、鸭嘴等关键部件。

将模型导入 ADAMS 中进行仿真分析^[31],添加约束和驱动后以栽植频率 50 株/分钟,前进速度 $1.323 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 进行仿真分析,获得了如图 7 所示的运动特性曲线。仿真结果表明,机构运动周期可明确划分为入土、打窖、出土和等待四个阶段,其中等待阶段占据了大量时间,即在栽植器最高点时,鸭嘴和机体相对静止,有助于提高落苗成功率。同时,栽植机构在打窖和出土时均保持与地面垂直,保证了井窖的垂直度和成型质量。

试验表明,本研究设计的栽植机构成窖效果好,株距准确,落苗等待时间长,与苗杯有着适应性良好的运动轨迹,可以一次性完成打窖、栽植的工作,大大解放了劳动强度。

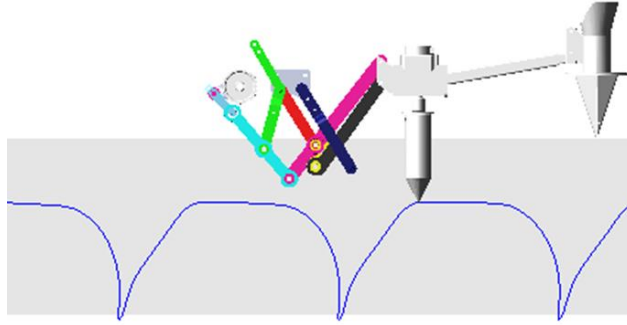


图 7 栽植机构仿真结果

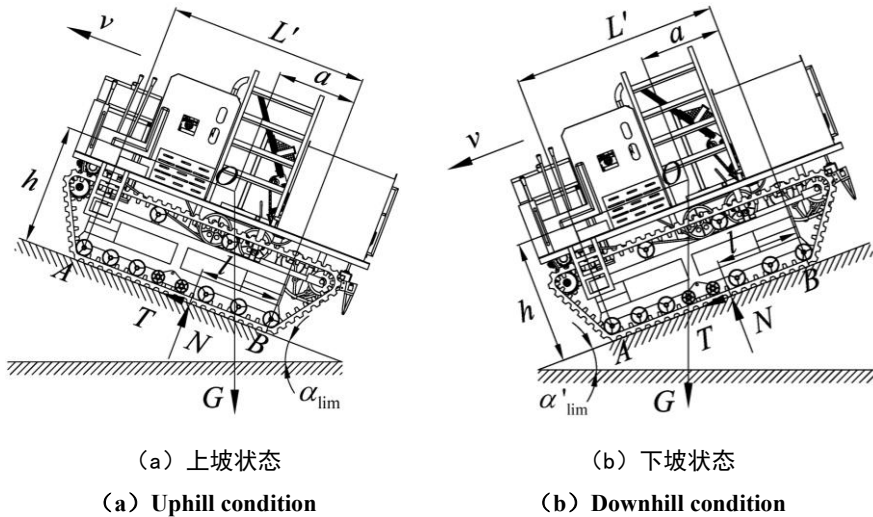
Fig.7 Simulation results of the planting mechanism

4 整机稳定性分析

坡道行驶稳定性包括纵坡和横坡稳定性，其中纵坡分为纵上坡和纵下坡^[32]。本研究采用极限倾翻角和极限滑移角对整机横向稳定性、纵向稳定性进行评价。

4.1 纵坡行驶稳定性分析

纵向倾翻是指在上下坡时，履带绕前或后支重轮的倾翻^[33]，受力如图 8 所示。



(a) 上坡状态

(b) 下坡状态

(a) Uphill condition

(b) Downhill condition

图 8 纵向极限倾翻受力分析

Fig.8 Longitudinal limit tipping force analysis

支重轮 B 轴线与垂直支反力之间的距离 l ，单位：mm，可通过对支重轮 B 取力矩，建立力学平衡方程式求得：

$$\begin{cases} N = G \cos \alpha_{\text{lim}} \\ Nl + Gh \sin \alpha_{\text{lim}} - Ga \cos \alpha_{\text{lim}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： N 为地面对整机的垂直支反力，N； α_{lim} 为纵上坡极限倾翻角，°； h 为整机重心到地面的距离，1 027.98 mm； a 为重心与支重轮 B 轴线之间的距离，833.21 mm。

为使烟草移栽机上坡时不发生倾翻，地面对整机的垂直支反力 N 作用线应落在支重轮 B 之前，即 $l \geq 0$ ，推导得上坡极限倾翻角 α_{lim} 为：

$$\alpha_{\text{lim}} = \arctan \frac{a}{h} \quad (8)$$

同理，履带底盘下坡极限倾翻临界状态如图 8 (b) 所示，下坡极限倾翻角 α'_{lim} 为：

$$\alpha'_{lim} = \arctan \frac{L'-a}{h} \quad (9)$$

式中： α'_{lim} 为纵下坡极限倾翻角，°； L' 为支重轮 A、B 轴线间的距离，1 838.65 mm。

根据式(8)、(9)可知，整机的纵向稳定性与重心高度和重心到支重轮轴线的距离有关。重心高度 h 较小且重心与支重轮轴线距离较大时，纵向稳定性更好。计算结果显示，上坡极限倾翻角 α_{lim} 为 39.01° ，下坡极限倾翻角 α'_{lim} 为 44.36° ，满足烟草移栽机在缓坡地行驶的稳定性要求。

4.2 横坡行驶稳定性分析

底盘的横向稳定主要是横向滑动和侧倾。烟草移栽机在横向坡道静止或匀速直线行驶时的受力情况如图 9 所示。

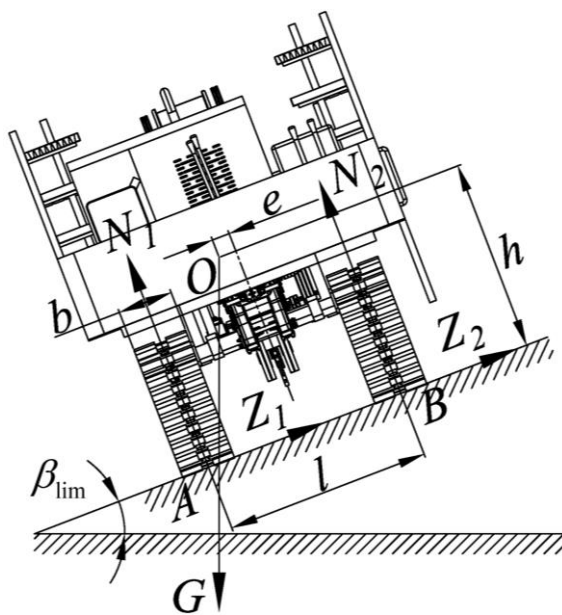


图 9 横坡受力分析图

Fig.9 Lateral slope force analysis diagram

B 点的支反力 N_2 ，单位：N，可通过对整机受力平衡和对点 A 取力矩的力矩平衡求得：

$$\begin{cases} N_1 + N_2 = G \cos \beta_{lim} \\ Z_1 + Z_2 = G \sin \beta_{lim} \\ N_2(l + 0.5b) + Gh \sin \beta_{lim} = G[0.5(l + b) - e] \cos \beta_{lim} \end{cases} \quad (10)$$

式中： N_1 为地面对下侧履带的法向作用力，N； N_2 为地面对上侧履带的法向作用力，N； G 为整机重力，N； β_{lim} 为横向极限倾翻角，°； Z_1 为坡道对下侧履带的侧向反力，N； Z_2 为坡道对上侧履带的侧向反力，N； l 为履带轨距，1 200 mm； b 为履带宽度，320 mm； h 为重心高度，mm； e 为重心离开纵向中心平面的偏移距离，59.68 mm。

为了避免烟草移栽机发生倾翻，需满足 $N_2 \geq 0$ ；由于 $l > 0$ ，故可推导得整机不产生倾翻的横向极限倾翻角 β_{lim} 为：

$$\beta_{lim} = \arctan \frac{0.5(l + b) - e}{h} \quad (11)$$

在横向坡道行驶时，为避免产生侧滑，整机横向极限滑移角 β'_{lim} 为：

$$\alpha'_m = \arctan \mu \quad (12)$$

式中： μ 为地面附着系数，取 0.67。

根据式(11)、(12)，整机横向稳定性与重心位置、轨距、履带宽度及地面情况有关。为优化稳定性，履带底盘的重心高度和偏移距离应较小，轨距和履带宽度应较大。计算得横向极限倾翻角 β_{lim} 为 34.26° ，横向极限滑移角 β'_{lim} 为 33.82° ，满足烟草移栽机的行驶稳定性要求。

5 田间试验

5.1 试验条件与评价指标

在河南焦作进行田间试验，如图 10 所示。试验前对土地进行旋耕、起垄作业，求地面凭证，无坷拉、薄膜等杂物，垄型笔直，大小符合井窖式移栽规程。为了验证烟草移栽机的工作性能，以栽植间距合格率、伤苗率以及漏栽率为指标对烟草移栽机进行田间试验。



图 10 田间试验现场

Fig.10 Field test site

根据农艺要求：移栽行距 110~125 cm，株距 45~55 cm 为宜。井窖深度 25~30 cm，直径 15~20 cm，每穴浇定根水不少于 1.0 kg。移栽用钵苗苗龄 60 天左右，茎高 8~12 cm，直径 >0.6 cm，茎秆韧性好，不易折断。叶色正绿，整齐健壮。试验评价指标如表 2 所示。

移栽作业过程中连续栽植 100 株烟苗，统计烟苗损伤数，伤苗率为：

$$S = \frac{S_1}{100} \times 100\% \quad (13)$$

统计任意两株烟苗的距离，间距合格率为：

$$G = \frac{G_1}{99} \times 100\% \quad (14)$$

统计漏栽的总株数，漏栽率为：

$$R = \frac{R_1}{100} \times 100\% \quad (15)$$

统计符合栽植要求的总株数，栽植合格率为：

$$N = \frac{N_1}{100} \times 100\% \quad (16)$$

式中： S 为伤苗率，%； S_1 为烟苗损伤总数，株； N 为栽植合格率，%； G 为间距合格率，%； G_1 为间距合格数，个； R 为漏栽率，%； R_1 为栽总数，株； N_1 ——栽植合格数，株。

表 2 试验评价指标

Table. 2 Experimental evaluation indicators

评价指标 Evaluation Index	指标要求 Requirement
伤苗率/% Seedling damage rate	≤2.0
间距合格率/% Spacing qualification rate	≥67.0
漏栽率/% Missed planting rate	≤2.0

5.2 试验方法

为检验自走式履带全自动烟草移栽机的田间作业性能，本研究依据 JB/T10291—2013《旱地栽植机械》设计试验方案。试验使用 60 天苗龄的“中烟 100”钵苗，确保“一穴一苗”。频率设为 50 株·min⁻¹，株距设为 550 mm，共移栽 128 株。移栽后统计栽植合格率、漏栽率及伤苗率，并测量株距、打窝深度和直径。完成移栽后，拔出钵苗，将基质清洗取出后，观察钵苗损伤情况。

5.3 试验结果与分析

试验共进行 3 组，去除最前 14 株与最后 14 株苗，以中间 100 株苗作为评价对象。第一次试验后记录数据并取出田间钵苗，再进行第二次试验。试验过程中检测栽植合格率、漏栽率和伤苗率，每垄实验结果见表 3。

表 3 试验结果

Table. 3 Test results

参数名称 Parameter name	第一组 First group	第二组 Second group	第三组 Third group
移栽数量/株 Number of transplants	100	100	100
间距合格率/% Spacing qualification rate	80	83	80
漏栽率/% Missed planting rate	5	3	4
伤苗率/% Seedling damage rate	2	1	2
栽植合格率/% Planting qualification rate	93	96	94

试验结果如图 11 所示，在大田移栽试验中，漏苗率均不超过 5%，其中第一组为 5%，其他两组低于 5%；伤苗率均不超过 2%。第一组栽植合格率较低，可能由于其钵苗生长较弱影响了移栽效果。田间试验前，样机经过调试，采用 55° 送盘角度、0.6 Mpa 气体压力和 50 株·min⁻¹ 的取苗频率进行试验。结果显示，在栽植频率 50 株·min⁻¹、苗龄 60 天时，伤苗率为 1.67%，漏栽率为 4%，栽植合格率为 94.33%，满足烟草移栽田间作业要求。



图 11 试验效果图

Fig.11 Test result diagram

6 结论与讨论

本研究根据河南许昌、平顶山等地区的烟草移栽农艺要求,设计了一种履带自走式全自动烟草移栽机,主要由柴油发动机、履带底盘、取投苗装置和栽植装置等组成,可以一次完成打窖、移栽、注水的工作。与国内外同类研究相比,日本久保田 PF2R 膜上移栽机虽适应复杂地形,但采用轮式底盘,在垄体保护和通过性上弱于履带设计;意大利 Ferrari Futura 系列移栽机适配规模化种植但兼容性差;与叶海平等^[34]设计的烟草钵苗自动移栽机不同,本研究采用打窖、投苗后再进行覆膜的工序,满足河南许昌、平顶山等特定地区的烟草移栽农艺要求。相比徐高伟等设计的丘陵山地作物移栽机井窖式成穴机构,本研究改进设计了一种基于扇形齿轮带动的 8 连杆烟草栽植机构,结构简单,鸭嘴间歇运动确保了接苗成功率,并与自动取投苗装置协同配合,提高了移栽效率。通过仿真和田间试验,验证了栽植机构的合理性,其间歇运动有效提高了投苗成功率。试验结果表明,该机构打窖成功率高,成窖参数符合要求,成窖后落土少,避免了钵苗入土后掩埋芯叶降低成活率,不挂垄,与鸭嘴栽植器运动匹配良好,井窖直径在 110~120 mm,株距在 450~550 mm 范围内可调。栽植机构可由升降丝杆控制打窖深度,适应不同高度的烟垄,与张飞等^[35]设计的井窖式烟苗移栽机相比,本研究的栽植机构成窖规范,深度一致,结构灵活,工作可靠。栽植机构等待落苗时间长、动作稳定,移栽效果好。

履带底盘设计使得该机具有更小的转弯半径和更强的地面适应能力,尤其在复杂地形中表现出较好的通过性。通过对整机稳定性的分析,研究表明质心位置和支重轮间距对车辆的极限倾翻角具有重要影响,计算结果显示其在不同坡道和横坡行驶时的稳定性符合要求。田间试验结果进一步验证了该移栽机的性能。在栽植频率为 50 株·min⁻¹、苗龄 60 天的条件下,移栽机的伤苗率为 1.67%,平均漏栽率为 4%,栽植合格率 94.33%,满足田间作业要求,履带自走式全自动烟草移栽机技术基本达成。然而设计仍存在的问题:在水分过高的土壤中,打窖钻头易缠土,导致井窖垂直度偏差,反映出复杂土壤适应性不足;注水系统依赖人工调节流量,未集成土壤湿度传感器,定根水用量一致性有待提高。未来研究可着重从智能控制与精准作业、多作物适配与产业化等方面展开,通过集成视觉识别技术实现漏栽自动补苗,降低漏栽率;通过调整鸭嘴开口尺寸和打窖深度以探索在辣椒、番茄等钵苗移栽中的应用。

参考文献 References

- [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 G H, WANG L, SUN L, 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.

- [2] 燕亚民, 乔新丽, 张贵明, 等. 烟草移栽机送苗装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 24-28.
YAN Y M, QIAO X L, ZHANG G M, et al. Design and test of seedling feeding device for tobacco transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 24-28.
- [3] HAN L H, MAO H P, HU J P, et al. Development of a doorframe-typed swinging seedling pick-up device for automatic field transplantation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(2): e0210.
- [4] PANDIRWAR A P, KUMAR A, MANI I, et al. Soil Bin studies on plug and finger-type onion seedling transplanting mechanisms[J]. Journal of Agricultural Engineering (India), 2024, 55(1): 1-14.
- [5] 武东东, 胡建平, 汪宽鸿, 等. 全自动蔬菜移栽机发展现状与趋势[J]. 长江蔬菜, 2023(24): 1-3.
WU D D, HU J P, WANG K H, et al. Development status and trend of automatic vegetable transplanting machine[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2023(24): 1-3.
- [6] 张妮, 张国忠, 王姣, 等. 旱地作物机械化移栽关键技术研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 22-31.
ZHANG N, ZHANG G Z, WANG J, et al. Research status and development trend of upland crops mechanized transplanting key technologies[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 22-31.
- [7] CHILUR R, NANDEDE B M, TIWARI P S. Development of an auger conveyor type metering device for transplanting of vegetable seedlings raised in paper pots[J]. Tropical Agricultural Research, 2018, 29(4): 258.
- [8] KHADATKAR A, MATHUR S M, GAIKWAD B B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation[J]. Current Science, 2018, 115(10): 1884-1892.
- [9] LIU D J, GONG Y, ZHU Y C, et al. Design and experiment of key part of 2zxs-2 cantaloupe transplanter[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2022: 367-372.
- [10] 孙晓晓, 刘洋, 李斌, 等. 穴盘苗自动移栽机取苗装置研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 22-28.
SUN X X, LIU Y, LI B, et al. Research status and prospect of the seedling collecting device of the automatic transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 22-28.
- [11] PÉREZ-RUIZ M, SLAUGHTER D C. Development of a precision 3-row synchronised transplanter[J]. Biosystems Engineering, 2021, 206: 67-78.
- [12] SHAO Y Y, LIU Y, XUAN G T, et al. Design and test of multifunctional vegetable transplanting machine[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30): 92-97.
- [13] DURGA M L, RAO A S, KUMAR A A, et al. Development and evaluation of mini-tractor drawn single row transplanter for vegetable crops[J]. Agricultural sciences, 2018, 9(3):681-683.
- [14] 赵明, 任玲, 李稻, 等. 番茄穴盘苗移栽机翻转式取送苗装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(7): 89-95.
ZHAO M, REN L, LI T, et al. Design and testing of a tilting seedling picking and feeding device for tomato cavity tray transplanters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7): 89-95.
- [15] DIHINGIA P C, PRASANNA KUMAR G V, SARMA P K, et al. Hand-fed vegetable transplanter for use with a walk-behind-type hand tractor[J]. International Journal of Vegetable Science, 2018, 24(3): 254-273.
- [16] 范沿沿, 张秀丽, 李建华, 等. 烟草井窖式移栽机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 40-46.
FAN Y Y, ZHANG X L, LI J H, et al. Design and test of tobacco cellar-type transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 40-46.
- [17] 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 Y S, ZHANG J X, YUAN T, 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.
- [18] 秦伟, 于英杰, 赖庆辉, 等. 导苗管式三七种苗栽植机构参数优化试验[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(3): 614-625.
QIN W, YU Y J, LAI Q H, et al. Parameter optimization experiment of seedling guiding tube transplanting machine of *Panax notoginseng* seedling[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(3): 614-625.

- [19] 刘蒙滋, 姜凯, 王秀, 等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 1-8, 20.
LIU M Z, JIANG K, WANG X, et al. Research status and prospect of automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 1-8, 20.
- [20] 王磊, 孙良, 徐亚丹, 等. 基于遗传算法的三臂轮式栽植机构多位姿运动综合[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 70-77.
WANG L, SUN L, XU Y D, 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.
- [21] 刘洋, 毛罕平, 李亚雄, 等. 吊篮式移栽机构工作参数优化与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 296-302.
LIU Y, MAO H P, LI Y X, et al. Optimization of working parameters and experiment for basket transplanter[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 296-302.
- [22] 史玉鹏, 薛博, 臧传江, 等. 山地作物移栽机井窖式单线螺旋成穴装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 103-114.
SHI Y P, XUE B, ZANG C J, et al. Design and experiment of hole-forming drill bit for cellar type transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Suppl 1): 103-114.
- [23] 徐高伟, 荐世春, 宋裕民, 等. 丘陵山地作物移栽机井窖式成穴机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 105-113, 125.
XU G W, JIAN S C, SONG Y M, et al. Design and experiment of cellar cavitation mechanism for crops of hilly mountains transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 105-113, 125.
- [24] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1-18.
SUN J B, LIU Z J, YANG F Z, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18.
- [25] 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 W, WU M L, GUAN C Y, et al. Design and experiment of planting hole forming device of crawler transplanter for rape(*Brassica napus*) seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 12-18.
- [26] 王颢杰, 李俊营, 何晓冰, 等. 不同育苗方式和移栽方式对烤烟田间抗病抗逆性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(6): 996-1007.
WANG H J, LI J Y, HE X B, et al. Effects of seedling raising and transplanting cultivation methods on tobacco field resistance to disease and stress[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(6): 996-1007.
- [27] 朱晨辉, 王淼森, 陈博, 等. 丘陵区履带式烟叶采收机液压行驶系统的创新设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(4): 532-542.
ZHU C H, WANG M S, CHEN B, et al. Creative design and experiment of hydraulic travel system for hilly region crawler tobacco harvester[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(4): 532-542.
- [28] 李灏, 刘新全, 师宪福. 履带车辆松软路面行驶阻力系数与附着系数关系研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(11): 34-36.
LI H, LIU X Q, SHI X F. Research on the relationship between the coefficient of resistance and the coefficient of attachment about tracked vehicles on soft soils[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012, 50(11): 34-36.
- [29] 韩彦勇, 朱永刚. 履带式收获机水田作业大半径转向阻力研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 157-160.
HAN Y Y, ZHU Y G. [Study on large radius steering resistance of crawler harvester in paddy field operation](#)[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 157-160.
- [30] 朱兴高, 顾亮. 履带车辆行驶速度对负重轮动位移的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 548-553.
ZHU X G, GU L. Effect of tracked vehicle speed on bogie wheels 'dynamic displacement[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(4): 548-553.

- [31] 屈哲, 刘龙, 赵胤伟, 等. 基于 ADAMS 蒜薹收获机关键部件设计与仿真试验[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(2): 306-313.
- QU Z, LIU L, ZHAO Y W, et al. Design and simulation experiment of key parts of garlic scape harvester based on ADAMS[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(2): 306-313.
- [32] 孙术发, 任春龙, 李涛, 等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 61-67.
- SUN S F, REN C L, LI T, et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 61-67.
- [33] 王德成, 赵彦瑞, 尤泳, 等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 178-187.
- WANG D C, ZHAO Y R, YOU Y, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 178-187.
- [34] 叶海平, 杨素珍. 烟草钵体苗自动移栽机关键部件的设计与试验[J]. 中国烟草科学, 2024, 45(4): 93-101.
- YE H P, YANG S Z. Design and experiment of key components for tobacco pot seedling automatic transplanter[J]. Chinese Tobacco Science, 2024, 45(4): 93-101.
- [35] 张飞, 马建民, 张传斌, 等. 井窖式烟苗移栽机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 5-10.
- ZHANG F, MA J M, ZHANG C B, et al. Design and experiment of well-cellar transplanter for tobacco seedling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(12): 5-10.