网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.018

自走式马铃薯放苗机行走装置设计与试验

庞树杰[1],马梦良[2],马壮红[2],张军昌[2,3,4],陈雨[2]
(1 中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2 西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100;
3 陕西省农业装备工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100;4 农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】针对膜下马铃薯种植破膜过程中劳动强度大、人工成本高的问题,设计了一种履带式马铃薯自动放苗机行走装置。【方法】基于履带行走特性,建立了履带式底盘运动学模型和差速转向模型,并结合农艺要求对关键部件的结构参数进行设计。提出一种以导航距离和导航角为输入、履带速度差为输出的模糊控制导航算法,用于实现放苗机的精准路径跟踪与稳定作业,通过整机行驶性能测试及田间试验对所设计行走装置的性能进行验证。【结果】行走装置的最大实际速度达到1.11 m/s,平均偏驶率为1.62%,随着作业速度由0.3 m/s提升至0.5 m/s,横向偏差及其标准差均有所增大,导航稳定性有所下降,其中0.5 m/s工况下最大横向偏差为108 mm,标准差为41.13 mm;放苗机以0.3 m/s的速度在不同初始位置进行导航时,放苗机能够在较短的距离内趋于稳定,系统稳定后的横向偏差不超过70 mm,标准差不超过37 mm。【结论】设计的履带式马铃薯自动放苗机行走装置具备较强的稳定性和较高的导航精度,能够满足马铃薯自动放苗作业的实际需求。

[关键词] 马铃薯;自动放苗机行走装置;双电机履带底盘;模糊PID
[中图分类号] S220.32;S532.059 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0170-11

Design and experiment of walking device for self-propelled potato seedling planter

PANG Shujie[1], MA Mengliang[2], MA Zhuanghong[2], ZHANG Junchang[2,3,4], CHEN Yu[2]
(1 *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*; 2 *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3 *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 4 *Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization (Yellow River Basin) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 Aiming at the issues of high labor intensity and cost in the film-breaking process for potato planting under the film, a crawler-type walking device for an automatic potato seedling planter was designed. 【Method】 Based on the operational characteristics of the track, the kinematic model and differential steering models of the track chassis were established, and the structural parameters of the key components were designed according to the requirements of agronomy. A fuzzy-control navigation algorithm was proposed, using navigation distance and navigation angle as inputs and track speed difference as output, to enable precise path tracking and stable operation of the seedling planter. The designed walking device was validatd through the driving performance tests of the whole machine and field experiments. 【Result】 The maximum actual speed of the walking device reached 1.11 m/s, with an average deviation rate of 1.62%. As the operating speed increased from 0.3 to 0.5 m/s, both the lateral deviation and its corresponding standard deviation increased, indicating a

[收稿日期] 2025-08-02 [修回日期] 2025-08-29
[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-202,2024NC-YBXM-244)
[作者简介] 庞树杰(1976—),男,河北保定人,高级工程师,主要从事智能农业装备研究。E-mail:pangshujie@139.com
[通信作者] 张军昌(1972—),男,甘肃通渭人,副教授,硕士生导师,主要从事现代农业技术与装备研究。
E-mail:zhangjunchang@126.com

reduction in navigation stability. Specifically, the maximum lateral deviation under the 0.5 m/s operating condition was 108 mm, with a standard deviation of 41.13 mm. When operating from different initial positions at a speed of 0.3 m/s, the seedling planter stabilized within a relatively short distance. After stabilization, the lateral deviation of the system remained below 70 mm, with a standard deviation not exceeding 37 mm.【Conclusion】The designed crawler-type walking device for the automatic potato seedling planter exhibits strong stability and high navigation accuracy, meeting the practical requirements for automatic potato seedling placement operations.

Key words: potato; automatic seedling planter walking device; dual-motor tracked chassis; fuzzy PID control

我国是全球最大马铃薯生产国，北方地区播种面积和产量约占全国的50%[1-3]。由于干旱寒冷气候的限制，利用地膜覆盖技术可以改善土壤环境，提高水分利用率和促进根系发育，以有效提升马铃薯的产量[4-5]。然而，膜下种植需人工切割地膜放苗（亦称破膜），劳动强度大且成本高[6-7]，因此设计适用于马铃薯破膜的自走式行走装置，具有提升作业效率和作业质量的重要作用。

目前，国内针对马铃薯及其他作物自动化放苗的研究尚较为有限，近年来仅有少数研究机构开始关注此领域。韩岳霖[8]设计了一种用于设施内单垄单行种植的轮式自走破膜机，利用YOLOX网络识别幼苗并破膜放苗，但该设备仅能沿田垄直行，缺乏转向和自主导航功能。施国英等[9]开发的履带式视觉辅助大蒜破膜机，通过远程监控操作，效率较人工提高约2.5倍，但仍依赖人工控制。OPIYO等[10]设计了一种履带式果园农业机器人平台，通过将相机捕获的植被图像转化为灰度图像，经过滤波和K均值聚类操作生成二值图像，进而提取到导航路径，将偏移量和航向角作为模糊控制器的输入量对底盘导航进行控制，该设备的试验结果较好，最大跟踪误差为14.6 mm。总体来看，国内外机械化放苗仍处于初期阶段，现有设备自动化程度有限，难以实现完全自动导航且多依赖人工干预。

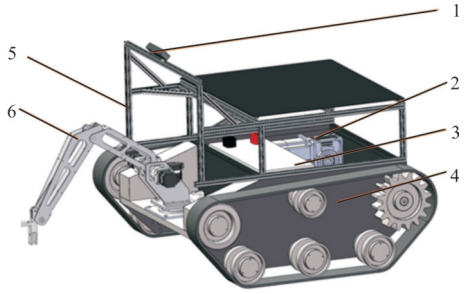
基于此，本研究设计了一种履带式马铃薯自动放苗机行走装置，结合农艺要求对行走装置关键参数进行设计。基于履带行走特性，建立差速转向模型，设计基于模糊控制的导航算法，以导航距和导航角为输入，履带速度差为输出，实现放苗机的精准导航控制，保证路径跟踪和作业稳定，并通过田间试验对其行走性能进行评估，以期为马铃薯自动放苗作业提供理论基础与技术支持。

1　马铃薯自动放苗机行走装置设计

西北地区马铃薯种植常采用一垄双行模式，垄上2行马铃薯的行距为400 mm，株距270～300 mm，垄高150～180 mm，垄沟宽300 mm，垄面宽600 mm。为满足农艺要求及放苗作业需求，放苗机车架处离地间隙应大于田垄的高度，并且行走装置需要具备一定的越障能力，必要时能够翻越田垄。

1.1　放苗机整体结构

马铃薯自动放苗机的整机结构如图1所示，主要由双目相机、驱动机构、电池、箱体、机架及放苗机械臂组成。系统选用计算机作为视觉导航系统的上位机，搭载Ubuntu 20.04操作系统，基于机器人操作系统（ROS）运行导航程序。上位机配置AMD Ryzen 7处理器，主频3.20 GHz，内存16 GB，视觉导航算法采用Visual Studio Code与OpenCV 4平台开发。下位机采用STM32f103单片机。



1. 双目相机；2. 电机与减速器；3. 锂电池；4. 箱体；5. 机架；6. 放苗机械臂。
1. Binocular camera; 2. Motor and reducer; 3. Lithium battery; 4. Control box; 5. Rack; 6. Seedling placement robotic arm.

图1　马铃薯放苗机的整机结构
Fig. 1　Overall structure of the potato seedling planter

作业过程中，双目相机实时采集地膜中心线坐标并传输至上位机。上位机同步获取底盘的位置与姿态信息，结合地膜中心线坐标计算底盘在导航路径上的偏差，包括导航角度和导航距离；同时接收左右履带驱动轮测速传感器的速度反馈信息，运行导航PID控制算法，生成调节电机转速的指令，并通过通信接口下发至电机控制器，从而实现底盘沿规划路径的精准跟踪及行驶速度的动态调节。

放苗机的主要技术参数如表1所示。

表1 放苗机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of seedling planter

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
整机尺寸/mm Overall machine dimensions	900×750×850	最大爬坡角度/(°) Maximum climbing angle	20
离地间隙/mm Ground clearance	250	履带节距/mm Track pitch	40
整机质量/kg Total machine mass	200	履带接地长度/mm Track grounding length	75
放苗装置安装平台尺寸/mm Size of seedling-placement device mounting platform	500×300	履带宽度/mm Track width	100
最大行驶速度/(m·s^{-1}) Maximum travel speed	1.2	整机功率/W Overall machine power	1 515

1.2 行走装置主要参数设计

1.2.1 *履带关键参数设计* 根据国家标准GB/T 20786－2015,农用机械常用履带包括轮孔驱动式、轮齿驱动式和摩擦驱动式3种。轮齿履带通过驱动轮齿插入驱动孔传动,摩擦驱动履带则依靠橡胶凸起与驱动轮表面接触实现动力传递[11]。本研究设计橡胶履带结合了驱动轮的传动齿和橡胶凸起,兼具两种驱动方式的特点。

(1)橡胶履带节距t_0。履带节距的设计与整机质量密切相关,且对驱动轮尺寸具有显著影响。节距过大会导致驱动轮的齿数减少,进而增加行走机构的整体高度及整机质量;节距过小则会增加制造工艺的复杂性与成本,降低履带的承载能力。适当的节距有助于降低轮系所受到的冲击,提高运动平稳性,进而延长履带及轮系的使用寿命。橡胶履带的理论节距t_0根据下式[12]计算:

$$t_0=(17.5\sim23)\times\sqrt[4]{m}/2。\tag{1}$$

式中:m为整机质量,取值为200 kg。

代入相关参数计算可得橡胶履带的理论节距t_0为32.90～43.25 mm,本研究最终取值为40 mm。

(2)橡胶履带的接地长度L_0。橡胶履带的接地长度不仅与整机的接地比压有关,还对行走装置的行驶性能具有重要影响。接地长度过短会导致行走装置的直线行驶稳定性下降,影响运动精度;接地长度过长则限制了其在田间、垄间的活动范围,进而不利于运动控制的实现。基于此,可依据式(2)计算履带的接地长度L_0。

$$L_0=K_A\sqrt[3]{m}。\tag{2}$$

式中:K_A表示尺寸系数,一般取1.25～1.5。

代入相关参数计算可得履带的接地长度L_0为0.73～0.88 m,本设计最终取值为0.75 m。

(3)橡胶履带的宽度b。由前期测量得知,垄沟处土壤的坚实度均大于50 kPa。结合放苗机的满载质量与履带接地长度,可利用下式确定履带宽度:

$$b\geqslant\frac{mg}{2[p]L_0}。\tag{3}$$

式中:g表示重力加速度;$[p]$表示允许接地压力,本设计取40 kPa;L_0表示履带接地长度。

代入计算可得橡胶履带宽度的取值范围为$b\geqslant32.7$ mm。鉴于两侧履带需在垄沟中通过,其宽度应适当控制以避免破坏田垄。综合农艺要求及放苗作业的实际需求,本设计b最终取值为100 mm。

1.2.2 *履带轮系设计* (1)驱动轮。驱动轮通过减速器和输出轴传递电机动力,其齿面接触弯曲应力会引起磨损,设计时需降低接触应力以延长使用寿命。增加齿数可提升啮合齿数,有效减小应力并提高传动平稳性,但过多齿数会增大直径和驱动力矩。综合考虑,设计选用16齿驱动轮[13],其节圆直径按式(4)计算。

$$D=\frac{t_0}{\sin(180/z)}。\tag{4}$$

式中:D表示驱动轮的节圆直径;z表示驱动轮齿数。

代入可得驱动轮的节圆直径为205.03 mm,本设计最终取值为200 mm。

(2)引导轮。履带式行走装置在原地转向时,履带易发生脱落现象。引导轮可以保证履带的正常缠绕,防止履带跑偏,同时起到张紧履带的作用。引导轮直径D_d的计算公式为:

$$D_d=(2\sim4)t_0。\tag{5}$$

代入可得引导轮直径取值为80～160 mm,本设计最终取值为150 mm。

(3)支重轮。支重轮安装于驱动轮与引导轮之间,承载放苗机质量并支撑履带正常运行。增加支重轮数量可均匀分布压力,减少在松软土壤的下

陷，但因履带接地长度固定，数量增加导致直径减小，进而增加滚动阻力并影响行进速度。单侧支重轮通常为3～4个，其直径d_z与橡胶履带节距t_0满足式(6)，即：

$$d_z=(3\sim4)\times t_0。\tag{6}$$

当系数取3时，代入可得支重轮直径d_z为120 mm。

本设计的放苗机行走装置单边履带均安装3个支重轮，履带接地段的长度为750 mm，则各支重轮之间的距离为375 mm，满足履带接地长度的要求及放苗机接地压力的平均分布。

(4)托轮。托轮安装于驱动轮与引导轮之间，与上部履带配合使用，主要用于支撑上部履带，防止其跑偏，并有效减小上方履带的下垂量。托轮直径应略小于支重轮，且形状与支重轮相似，本设计中托轮直径d_t取100 mm。

(5)轮系布置。履带式行走装置可根据驱动轮的安装位置分为前驱和后驱两种形式。鉴于放苗机械臂需安装于行走装置前端，行走装置车架前部需预留足够的机械臂安装空间，电机及减速器等驱动部件则需布置于车架后端。因此，本设计的履带式行走装置采用后驱布局，以满足结构布局及功能需求。

驱动轮与引导轮的轴向距离L_i通过式(7)进行计算，即：

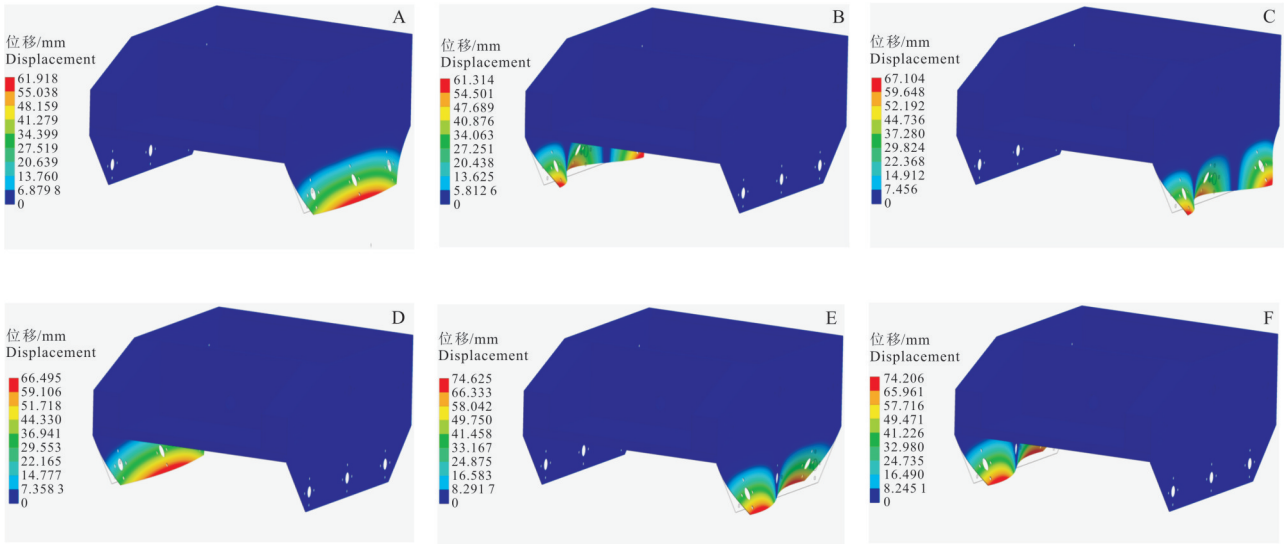
$$L_i=K_i\sqrt[3]{m}。\tag{7}$$

式中：K_i表示尺寸系数，一般取1.0～1.2。

代入计算可得驱动轮与引导轮的轴向距离取值为584.8～701.8 mm。本设计的轴向距离L_i为700 mm。

1.2.3　车架设计　箱体尺寸为宽750 mm、长900 mm、高850 mm。前端设有放苗机械臂安装平台，尺寸为560 mm×300 mm，满足机械臂的运动空间需求；后半部则用于安置电机、电池及控制系统等动力与硬件设备。箱体采用Q235钢材质，由20 mm×20 mm方管与5 mm厚钢板构成，根据轮系布置在箱体上并开设安装孔位。箱体顶部搭建有铝合金型材支架，用于安装导航相机及计算机设备，有效减轻整机质量。

在Workbench中对车架进行了模态分析，分析行走装置在运行过程中是否会产生共振现象。图2展示了箱体的前6阶振型，表2列出了车架前6阶模态的固有频率及对应振型描述。当激励频率接近固有频率时易引发共振[14]；而放苗机所受路面激励频率通常低于10 Hz，结合转速与频率转换关系[15]，驱动轮传动轴的最大激励频率约为10 Hz。由于箱体固有频率显著高于路面及传动轴激励频率，故作业过程中放苗机箱体不会发生共振，设计符合使用要求。



A. 第1阶振型；B. 第2阶振型；C. 第3阶振型；D. 第4阶振型；E. 第5阶振型；F. 第6阶振型。

A. First-order mode shape; B. Second-order mode shape; C. Third-order mode shape; D. Fourth-order mode shape; E. Fifth-order mode shape; F. Sixth-order mode shape.

图2　Workbench对车架第1～6阶振型模态及对应变形云图

Fig. 2　Workbench analysis of the 1st–6st order mode shapes of the frame and the corresponding deformation cloud diagram

表2 车架前6阶模态频率及振型描述

Table 2 Descriptions of the first six-order modal frequencies and shapes of the frame

模态阶数 Modal order	固有频率/Hz Natural frequency	振型描述 Mode shape description
1	86.62	产生X方向位移和Z方向位移 Displacement in the X and Z directions
2	86.88	产生Y方向位移和绕X轴转动 Displacement in the Y-direction and rotation around the X-axis
3	101.29	支重轮安装处发生弯扭振动 Bending and torsional vibrations occur at the installation point of the idler wheels
4	101.46	产生绕Y轴转动和绕Z轴转动 Rotation around the Y-axis and the Z-axis
5	132.43	支重轮安装处发生弯扭振动 Bending and torsional vibrations occur at the installation point of the idler wheels
6	132.45	支重轮安装处发生弯扭振动 Bending and torsional vibrations occur at the installation point of the idler wheels

2 放苗机动力计算与力学分析

2.1 整机附着力

行走装置的通过性能与附着力密切相关。若装置所需驱动力超过附着力,容易引发履带打滑现象。履带式行走装置在平地及斜坡上的附着力分别可通过式(8)和式(9)进行计算。

$$F_{\varphi 1}=\varphi mg, \tag{8}$$

$$F_{\varphi 2}=\varphi mg\cos\left(\frac{\pi}{9}\right)。 \tag{9}$$

式中:$F_{\varphi 1}$、$F_{\varphi 2}$分别表示行走装置在平地和坡面上的附着力;φ表示附着系数,在农田中装置附着系数取0.6。

经计算得马铃薯自动放苗机在平地上的附着力$F_{\varphi 1}$=1 176 N,在20°斜坡上的附着力$F_{\varphi 2}$=1 105 N。

2.2 田间直行加速运行时所需功率

放苗机在田间直线加速时,功率需求主要来自滚动阻力(F_f)和加速阻力(F_j)。滚动阻力受放苗机质量及土壤特性的影响,履带滚动阻力系数一般为0.05~0.12[16-17]。加速阻力包括惯性力及惯性力偶矩,后者可通过转换系数δ换算为平移惯性力。

放苗机总阻力F_{w1}可按式(10)计算:

$$F_{w1}=F_f+F_j=mgf+\delta m\frac{dv}{dt}。 \tag{10}$$

式中:f表示滚动阻力系数,取0.12;δ表示旋转质量换算系数,取1.3;v表示放苗机行驶速度,取1.2 m/s;t代表放苗机行驶时间;dv/dt表示放苗机的加速度,取0.7 m/s^2。

将滚动阻力(F_f)与加速阻力(F_j)代入公式(10)计算得出,放苗机在平坦地面进行直线加速运动时所受的总阻力F_{w1}=417 N。放苗机所需的驱动力$F_q=F_{w1}$=417 N,此时放苗机所需功率P_q可通过式(11)进行计算。

$$P_q=\frac{F_q\times v}{\eta}。 \tag{11}$$

式中:η表示履带式行走装置的传动效率,取0.85。

由式(11)计算可得,放苗机在田间进行直线加速运动时所需功率P_{q1}=589 W。

2.3 田间爬坡加速运行时所需功率

当放苗机在设计最大坡度20°的坡面上行驶时,其受力示意图如图3所示。

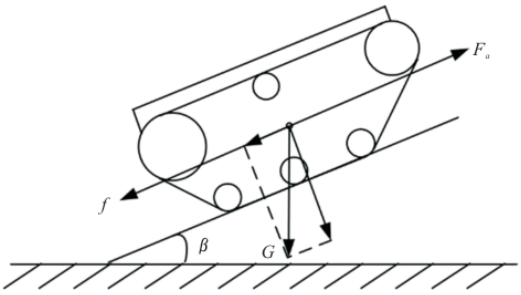


图3 行走装置在坡面上的受力示意图

Fig. 3 Force diagram of the walking device on a slope

在放苗机爬坡加速运动过程中,放苗机所受阻力包括滚动阻力、加速阻力及坡道阻力。此时放苗机所受的最大阻力F_{w2}可通过式(12)进行计算。

$$F_{w2}=G(f\cos\beta+\sin\beta)+\delta m\frac{dv}{dt}。 \tag{12}$$

式中:G表示放苗机所受重力;β表示斜面角度。

代入数据可得此时最大阻力F_{w2}=1 073 N,对应所需驱动力为F_q=1 073 N,代入式(11)可得放苗机在爬坡加速运动中所需的驱动功率P_{q2}=1 515 W。

在马铃薯自动放苗机田间作业过程中,为实现高效转向控制,需实时检测两侧履带的速度并调整其差速以修正姿态。由于田间环境复杂,履带实际

速度与理论牵引速度存在差异，造成高速侧履带出现滑转、低速侧履带出现滑移现象，尤其在松软土壤中更为明显[18-19]。同时，履带接地面积的变化导致转向瞬心位置不确定，进一步增加了精准控制难度。针对这些复杂工况，本研究采用模糊控制算法，基于两侧履带的实时速度信息，通过调节电机转速实现差速控制，无需依赖精确的数学模型，确保设备在复杂环境下具备良好的适应性和稳定的转向性能。

3　导航参数计算及控制策略研究

3.1　深度相机安装位置与视野优化设计

马铃薯放苗机深度相机的安装位置及其视野范围如图 4 所示。

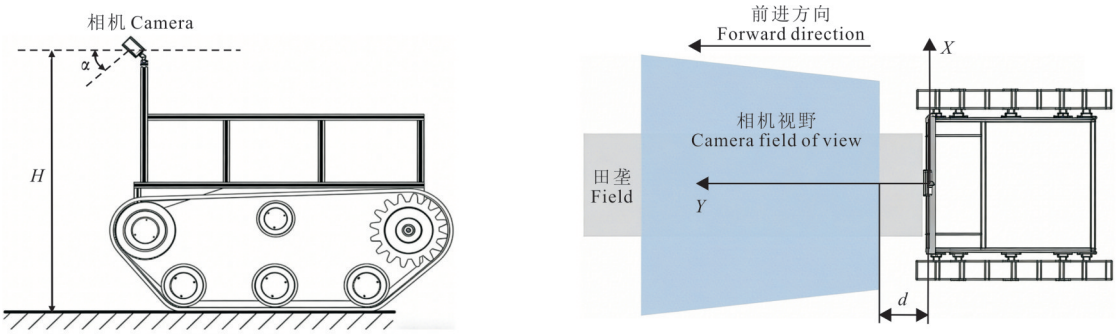


图 4　马铃薯田间图像的拍摄示意图

Fig. 4　Schematic diagram of potato field images

深度相机应安装于放苗机前端上方，且需倾斜一定角度以拍摄前方田垄（图 4-A）。相机倾角 α 和相机高度 H 影响相机的视野和成像质量：角度过小可捕捉远处但近处信息缺失，且易受阳光影响；角度过大则视野受限，降低导航精度。考虑算法延迟需预留视野距离 d，确保前进区域覆盖（图 4-B）。综合调整后，确定相机倾角为 45°，高度为 1 m。

3.2　模糊控制算法

基于双目相机获取的地膜中心线坐标与底盘位置信息，计算行走装置的导航距 λ 和导航角 θ，其中当目标路径与世界坐标系 X_W 轴的交点位于原点 O_W 右侧时，导航距 λ 取正值；放苗机中轴线顺时针旋转至与目标路径重合形成锐角时，导航角 θ 取正值。模糊控制器以导航距和导航角为输入，输出两侧履带转速差 ΔV，左转时 ΔV 为正。结合履带宽度、接地长度及垄间距离等参数，限制导航距 λ 在 [−30 cm，30 cm] 内以避免踩踏幼苗，导航角 θ 限定在 [−35°，35°]，输出 ΔV 范围则设定为 [−0.3 m/s，0.3 m/s]，以确保行驶稳定性。针对不同偏差大小，分别采用响应快、计算量小的三角形隶属度函数和平滑性好的钟形隶属度函数，兼顾放苗机的快速姿态调整与平稳行驶，提升整体导航与控制性能[20-21]。

模糊控制器的输入变量为放苗机的导航距 λ 和导航角 θ（表 3），输出变量为两侧履带的转速差值 ΔV，所以模糊规则的语句形式可表示为：

$$IF(\lambda = x)\,\text{and}\,(\theta = y)\,\text{then}\,(\Delta V)。\tag{13}$$

表 3　导航距离与导航角的模糊控制规则表

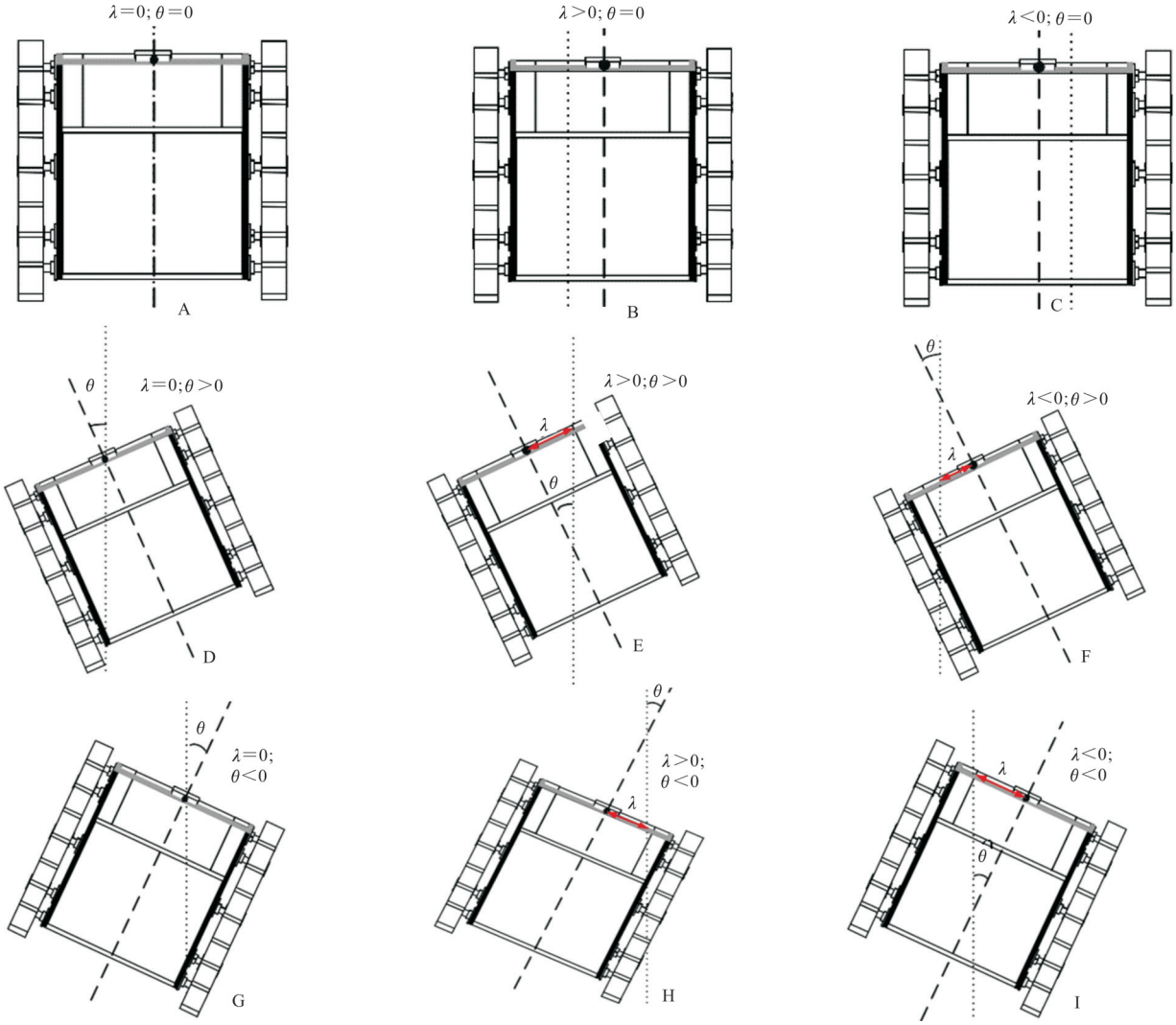
Table 3　Fuzzy control rule table for navigation distance and navigation angle

参数 Parameter		导航角 θ Navigation Angle						
		−3(LB)	−2(LM)	−1(LS)	0(ZE)	1(RS)	2(RM)	3(RB)
导航距(λ) Navigation distance	−3(LB)	3(RB)	3(RB)	3(RB)	3(RB)	2(RM)	1(RS)	0(ZE)
	−2(LM)	3(RB)	2(RM)	2(RM)	2(RM)	1(RS)	0(ZE)	−1(LS)
	−1(LS)	3(RB)	2(RM)	1(RS)	1(RS)	0(ZE)	−1(LS)	−2(LM)
	0(ZE)	2(RM)	2(RM)	1(RS)	0(ZE)	−1(LS)	−2(LM)	−2(LM)
	1(RS)	2(RM)	1(RS)	0(ZE)	−1(LS)	−1(LS)	−2(LM)	−3(LB)
	2(RM)	1(RS)	0(ZR)	−1(LS)	−2(LM)	−2(LM)	−2(LM)	−3(LB)
	3(RB)	0(ZE)	−1(LS)	−2(LM)	−3(LB)	−3(LB)	−3(LB)	−3(LB)

注：LB 表示左偏大；LM 表示左偏中；LS 表示左偏小；ZE 表示正中；RS 表示右偏小；RM 表示右偏中；RB 表示右偏大。

Note：LB represents left skew large；LM represents left medium；LS represents skew small；ZE represents center；RS represents right skew；RM represents right skew medium；RB represents right skew large.

放苗机作业时,其位姿共有9种形式(图5),根据放苗机与目标路径的不同位置关系,应该设计不同的控制策略,对不同姿态的分析如下:(1)目标导航线与行走装置中轴线重合时(图5-A),导航距$\lambda=0$,角度偏差导航角$\theta=0$,无需对放苗机的姿态进行调整,输出变量转速差值$\Delta V=0$;(2)目标导航线与行走装置中轴线平行时(图5-B),放苗机应该向左转,此时导航距$\lambda>0$,角度偏差导航角$\theta=0$,输出变量转速差值$\Delta V>0$;(3)目标导航线与行走装置中轴线平行时(图5-C),放苗机应该向右转,此时导航距$\lambda<0$,角度偏差导航角$\theta=0$,输出变量转速差值$\Delta V<0$;(4)当导航距$\lambda=0$,导航角$\theta>0$时(图5-D),放苗机应该向右转,输出变量转速差值$\Delta V<0$;(5)当导航距$\lambda>0$,导航角$\theta>0$时(图5-E),放苗机应该向右转,输出变量转速差值$\Delta V<0$;(6)当导航距$\lambda<0$,导航角$\theta>0$时(图5-F),根据导航距和导航角数值的大小,放苗机直行、左转和右转均可能发生,转速差值ΔV根据模糊规则进行决策;(7)当导航距$\lambda=0$,导航角$\theta<0$时(图5-G),放苗机应该向左转,输出变量转速差值$\Delta V>0$;(8)当导航距$\lambda>0$,导航角$\theta<0$时(图5-H),与(图5-F)相似,转速差值ΔV根据模糊规则进行决策;(9)当导航距$\lambda<0$,导航角$\theta<0$(图5-I),放苗机应该向左转,输出变量转速差值$\Delta V>0$。同时,在MATLAB环境下设计了49条模糊控制规则(表3),并通过MATLAB曲面图形象化得到输入与输出变量的变化趋势如图6所示。从图6可以看出,控制规则的曲面较为平滑、控制效果较好。



A. 无偏移;B. 左转;C. 右转;D右转;E. 右转;F. 不确定;G. 左转;H. 不确定;I. 左转。

A. No offset;B. Turn left;C. Turn right;D. Turn right;E. Turn right;F. Uncertain;G. Turn left;H. Uncertain;I. Turn left.

图5 放苗机行走装置的9种位姿

Fig. 5 Nine postures of the walking device for seedling planter

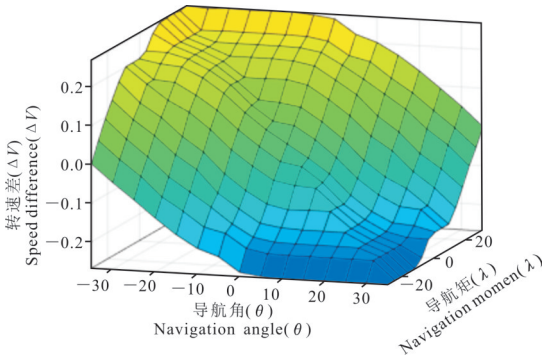


图 6　模糊控制规则输入输出变量变化的三维曲面图

Fig. 6　Three-dimensional surface diagram of the fuzzy control rules for input and output variable changes

4　田间试验

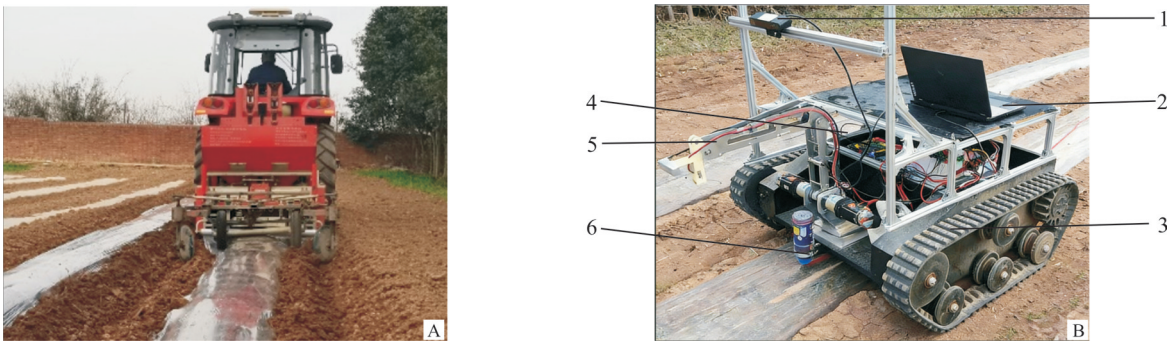
4.1　试验环境

为确保马铃薯放苗机视觉导航试验顺利进行，2023 年 10 月 8 日在西北农林科技大学旱区节水农业研究院西北侧农田，采用青岛洪珠 2CM-2C 型大垄双行马铃薯播种机进行了马铃薯覆膜播种，该设备集起垄、施肥、播种及覆膜于一体。如图 7-A 所示，播种完成后，田垄宽度为 60～65 cm，高度约为 15 cm，地膜裸露部分宽度约 40 cm，均符合试验要求[22]。

基于前期的研究，视觉导航系统已成功集成于放苗机行走装置上，整机结构如图 7-B 所示。放苗机中轴线前端安装有彩砂瓶，彩砂在地膜上留下的轨迹用于记录放苗机的行驶路径，通过测量该轨迹与田垄中心线的横向偏差，计算其标准差 σ、最大偏差值(D_{max})及偏驶率(ξ)，进而对导航系统的性能进行分析与评估[23]。

4.2　试验方法及结果分析

4.2.1　行走装置最大速度测试　履带式行走装置在运动中存在滑移现象，由于履带与地面的有效摩擦降低，从而降低了装置的驱动力和行驶效率，导致装置的速度不能达到理论值。通过测试得到装置实际能够达到的最大速度，进而评判行走装置是否满足设计需求。



A. 试验环境布置；B. 马铃薯自动放苗机。1. 双目相机；2. 计算机；3. 履带行走装置；4. STM32 单片机；5. 放苗机械臂；6. 彩砂瓶。

A. Test environment layout; B. Automatic potato seedling planter. 1. Binocular camera; 2. Computer; 3. Track walking device; 4. STM32 microcontroller; 5. Seedling placement robotic arm; 6. Marker bottle.

图 7　马铃薯自动放苗机及其田间试验环境布置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of automatic potato seedling planter and its field test layout

在水平的水泥路面上，标记一段距离为 50 m 的路程，然后使履带式行走装置加速到最大速度后，直行通过这段路程，并记录下通过所用的时间，重复测量 3 次，测试数据如表 4 所示。

表 4　最大速度测试结果

Table 4　Maximum speed test results

测试序号 Number	时间/s Time	速度/(m·s^{-1}) Speed	平均速度/(m·s^{-1}) Average speed
1	45.03	1.11	
2	44.77	1.12	1.11
3	45.54	1.10	

表 4 显示，履带式行走装置的实际最高行驶速度为 1.11 m/s，略低于理论速度 1.20 m/s，表明行进过程中存在一定程度的滑移，但滑移幅度较小，满足设计要求。

4.2.2　行走装置直线性能测试　行走装置具有良好直线行驶性能，可以减少放苗机因偏移和摆动造成的能量损耗，确保装置作业时的稳定性，同时能够提高放苗作业的效率。根据国标 GB/T 15370.4—2012 中的规定，履带式行走装置在平整干硬且坡度不大于 1% 的路面上行驶时，偏驶率不大于 6%。

试验时，在水平路面上测量一段 25 m 的距离，并标记起始线与终点线。将履带式行走装置左侧履带的外边缘与垂线对齐，履带前端与起始线重

合,且不对行驶方向进行调整,使装置沿直线前进至终点。随后,使用卷尺测量左侧履带前端外侧至标定垂线的垂直距离,作为偏驶距离。试验分别在3种不同速度下进行,记录对应的偏驶距离,每组试验重复3次,计算其平均值,测试结果如表5所示。表5显示,随着行驶速度的提升,履带装置的偏驶率有所增加,但始终保持在2%以下,平均偏驶率为1.62%,满足国标对装置偏驶率的要求。

表5 偏驶率测试结果

Table 5 Deflection rate test results

测试序号 Number	时间/s Time	速度/(m·s^{-1}) Speed	偏驶距离/m Deviation distance	偏驶率/% Deviation rate	平均偏驶率/% Average deviation rate
1	54.47	0.48	0.36	1.44	
2	41.63	0.60	0.42	1.68	1.62
3	22.72	1.10	0.44	1.76	

4.2.3 导航精度试验 放苗系统对膜下马铃薯幼苗的识别成功率与放苗机的作业速度密切相关。为评估作业速度对视觉导航系统精度与稳定性的影响,并确定最佳作业速度,同时兼顾工作效率,分别以0.3,0.4和0.5 m/s的速度在覆膜田垄上进行自主导航。每隔15 cm设1个测量点,每组试验采集100个测量点,所得横向偏差曲线如图8所示。

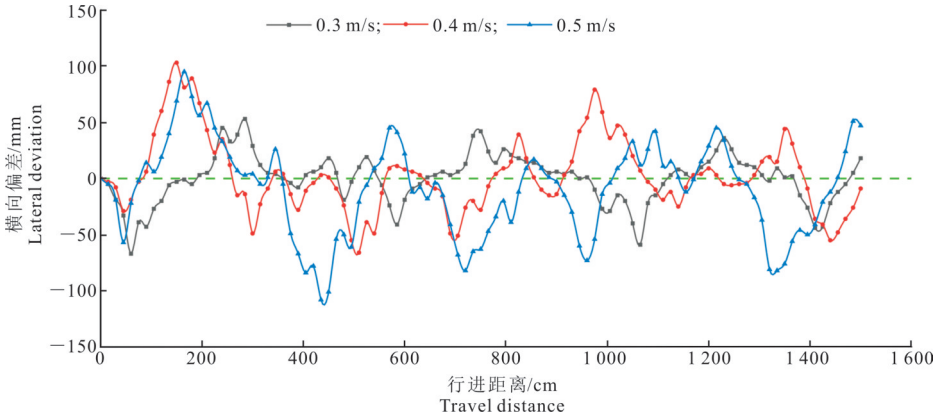


图8 不同作业速度下导航的横向偏差曲线

Fig. 8 Lateral deviation curves for navigation at different operating speeds

图8显示,放苗机以0.3 m/s速度导航时,横向偏差最大67 mm,标准差22.02 mm,偏差集中且围绕零线波动,表明放苗机能稳定靠近田垄中心线。速度提升至0.4 m/s时,最大偏差增至103 mm,标准差33.75 mm,偏差波动频率和幅度有所增加,但放苗机仍能保持较好的稳定性。进一步加速到0.5 m/s时,最大偏差达到108 mm,标准差为41.13 mm,偏差分布更为分散,出现超调现象,放苗机绕田垄摆动较大,导航稳定性下降,但仍能满足基本需求。综合考虑放苗效果与导航性能,确定放苗机的最佳作业速度为0.3 m/s。

4.2.4 导航稳定试验 为验证放苗机在发生较大位置偏移后,导航系统是否能够及时调整运动姿态并保持系统稳定性,试验将放苗机以最佳作业速度0.3 m/s,在同一段田垄上分别从初始偏差为100 mm和200 mm的位置启动自动导航。通过观察放苗机从最大偏差位置恢复至系统稳定所需的行驶距离,评估导航系统的响应性能,试验结果如图9所示。由图9-A可知,当放苗机以初始偏差100 mm开始自动导航时,其横向偏差值快速减小至接近零线,约在行进0.9 m时导航系统趋于稳定,此时横向偏差最大值为70 mm,标准差为27.98 mm,偏差数据围绕零线波动,表明系统响应迅速且稳定性良好。图9-B显示,当初始偏差为200 mm时,横向偏差值同样快速衰减至零线附近,约在1.1 m处趋于稳定,此时最大偏差为69 mm,标准差为36.95 mm,偏差值稳定波动于零线附近,表明导航系统具备良好的响应速度和稳定性。

综上所述,放苗机在0.3 m/s作业速度下,即使初始位置存在较大偏差,导航控制算法依然能够在较短距离内将放苗机稳定引导至田垄中心线附近,表明所设计的视觉导航系统具备快速响应能力,能够满足实际应用需求。

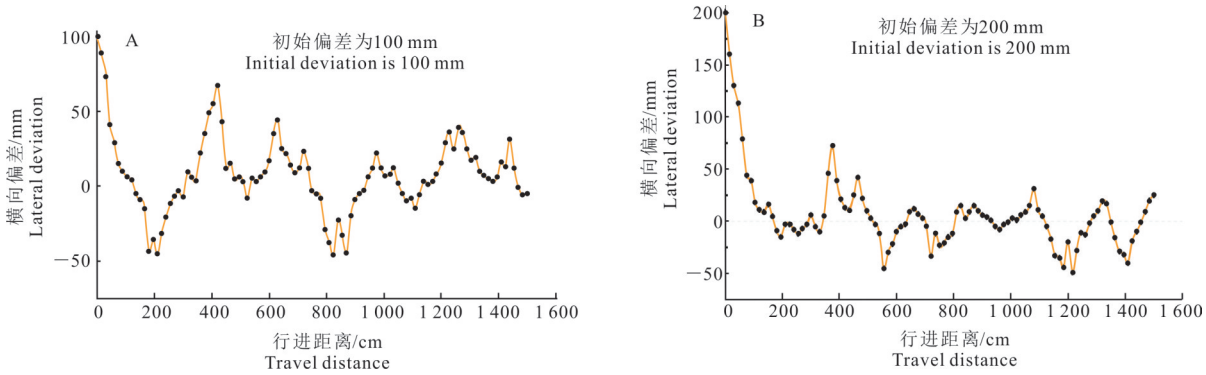


图 9　不同初始位置下导航的横向偏差曲线

Fig. 9　Lateral deviation curves for navigation from different initial positions

5　结　论

针对马铃薯膜下种植过程中缺乏自动化放苗机械的问题，设计了一种适合田间放苗作业的履带式行走装置，并基于模糊控制理论建立导航算法对放苗机的运动轨迹进行控制，实现放苗机的精准导航作业。

1）基于马铃薯膜下种植模式的田间环境及放苗需求，完成了自动放苗机行走装置的机械结构设计，并重点针对履带式底盘的关键部件进行了优化。通过对整机开展模态分析，结果表明放苗机箱体在作业过程中不会发生共振，验证了设计的合理性和适用性。

2）根据导航路径与放苗机中轴线的位置关系，设计了导航系统的模糊控制算法，以导航角和导航距为导航参数并作为模糊控制器的输入量，两侧履带的转速差为输出量，通过 MATLAB 仿真试验验证了模糊控制算法的可行性。

3）对马铃薯放苗机行驶性能的测试结果显示，其最大实际速度为 1.11 m/s，平均偏驶率为 1.62%，均能满足作业要求。放苗机分别以不同速度进行导航时，横向偏差不超过 108 mm，标准差不超过 42 mm；放苗机以 0.3 m/s 的速度在不同初始位置进行导航时，放苗机能够在较短距离内趋于稳定，稳定阶段的横向偏差不超过 70 mm，标准差不超过 37 mm，体现出良好的导航稳定性。

[参考文献]

[1] 王海，刘泉东，孙伟，等. 马铃薯苗带覆土装置研制与试验[J]. 中国农机化学报，2025，46(5)：12-18.
WANG H，LIU Q D，SUN W，et al. Development and experiment of potato seedling cover device with soil[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2025，45(5)：12-18.

[2] 王鹏程. 二倍体马铃薯普通疮痂病抗性的QTL分析及抗性基因定位[D]. 黑龙江：黑龙江八一农垦大学，2022.
WANG P C. QTL analysis and genes mapping for common scab resistance in diploid potato[D]. Heilongjiang：Heilongjiang Bayi Agricultural University，2022.

[3] 付桢. 基于SD模型的我国马铃薯产业发展路径研究[D]. 石家庄：河北经贸大学，2021.
FU Z. China's potato industry based on SD model development path research[D]. Shijiazhuang：Hebei University of Economics and Business，2021.

[4] 李正鹏，宋明丹，韩梅，等. 覆膜与生物炭对青藏高原马铃薯水分利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报，2020，36(15)：142-149.
LI Z P，SONG M D，HAN M，et al. Effects of film mulching and biochar interaction on yield and water use efficiency of potato in the eastern agricultural area of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)，2020，36(15)：142-149.

[5] ZHANG Y，WANG F，SHOCK C C，et al. Effects of plastic mulch on the radiative and thermal conditions and potato growth under drip irrigation in arid Northwest China[J]. Soil & Tillage Research，2017，172：1-11.

[6] 孙卫孝，刘发英，杨振宇，等. 基于主动热红外成像的马铃薯与杂质分类方法[J]. 中国农机化学报，2024，45(2)：143-150.
SUN W X，LIU F Y，YANG Z Y，et al. Classification of potato and impurities based on active thermal infrared imaging[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(2)：143-150.

[7] 郑红娜，周理想，王强. 基于YOLO-PS的马铃薯幼苗检测方法研究[J]. 中国农机化学报，2024，45(12)：245-250.
ZHENG H N，ZHOU L X，WANG Q. Research on detection method of potato seedling based on YOLO-PS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(12)：245-250.

[8] 韩岳霖. 基于深度学习马铃薯幼苗检测的自动破膜机设计与试验[D]. 山东泰安：山东农业大学，2023.
HAN Y L. Design and experiment of automatic film breaker based on deep learning potato seedling detection[D]. Taian，Shandong：Shandong Agricultural University，2023.

[9] 施国英，王化琴，李天华，等. 基于视觉辅助的大蒜幼苗破膜机的研制与试验[J]. 农业装备技术，2023，49(6)：15-19.

SHI G Y, WANG H Q, LI T H, et al. Development and experiments of garlic seedling film breaker[J]. Agricultural Equipment and Technology, 2023, 49(6): 15-19.

[10] OPIYO S, OKINDA C, ZHOU J, et al. Medial axis-based machine-vision system for orchard robot navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106153.

[11] 王念政. 轮履复合磁吸附式水下壁面机器人行走机构的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2019.
WANG N Z. Research on the method of harmonizing adsorption and flexible movement of underwater wall-climbing robots[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.

[12] 梅松, 唐敦兵, 石志刚, 等. 基于阵列化振动单元的枸杞采收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 115-125.
MEI S, TANG D B, SHI Z G, et al. Design and test of a Chinese wolfberry harvester using arrayed vibration units[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 115-125.

[13] 雷志强. 履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
LEI Z Q. Design and performance experiment of a tracked chassis of harvester for ratoon rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.

[14] 李岩, 王威, 崔永杰, 等. 电动拖拉机机械电磁式振动馈能装置设计与性能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 133-143, 154.
LI Y, WANG W, CUI Y J, et al. Design and performance of a mechanical electromagnetic vibration energy feeder for electric tractors[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(7): 133-143, 154.

[15] 刘志鹏. 山地果园电控割草机设计与试验研究[D]. 江苏镇江:江苏大学, 2020.
LIU Z P. Design and experimental study of electronic controlled lawn mower for mountain orchard[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2020.

[16] 吉理想. 橡胶履带式喷雾机行走装置的设计及性能研究[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
JI L X. Design and performance study of the rubber crawler combined with high-range sprayer[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.

[17] 董继伟, 潘良, 曹中华, 等. 履带式果园对靶仿形施药机设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(9): 251-260.
DONG J W, PAN L, CAO Z H, et al. Design and experiment of tracked orchard target alignment and profiling sprayer machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(9): 251-260.

[18] 关卓怀. 履带式水稻联合收获机辅助导航系统关键技术研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2020.
GUAN Z H. The key technology of auxiliary navigation system for crawler rice combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.

[19] 李尚平, 韦雨彤, 任泓宇, 等. 丘陵地区履带式甘蔗收获机横向调平系统设计与试验[J]农业机械学报, 2025, 56(6): 374-385.
LI S P, WEI Y T, REN H Y, et al. Design and experiment of leveling system for crawler-type sugarcane harvesters in hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 374-385.

[20] 王庆华, 周晶, 侯俊才. 基于变论域模糊PID的水肥控制策略研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 144-154.
WANG Q H, ZHOU J, HOU J C. Irrigation and fertilizer control strategy based on variable domain fuzzy PID[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 144-154.

[21] 瞿济伟, 郭康权, 宋树杰, 等. 农用柔性底盘偏置转向机构工作参数试验及优化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 125-136.
QU J W, GUO K Q, SONG S J, et al. Experiment and optimization on working parameters of off-center steering mechanism for agricultural flexible chassis[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 125-136.

[22] 孙伟, 王虎存, 赵武云, 等. 残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 105-114.
SUN W, WANG H C, ZHAO W Y, et al. Design and experiment of potato digger with waste film recollection for complete film mulching, soil covering and ridge sowing pattern[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 105-114.

[23] 蔡存成, 姚立健, 曾松伟, 等. 基于改进型Bug算法的林间移动平台避障方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 145-154.
CAI C C, YAO L J, ZENG S W, et al. Obstacle avoidance method for inter-forest mobile platform based on improved Bug algorithm[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 145-154.

(责任编辑:温晓平)