

基于改进 YOLO v5n 的工厂化育秧田间铺盘装置设计与试验

虞佳佳¹ 李玉² 周延锁³ 胡万里⁴ 郝帅⁵ 李雷⁶

(1. 浙江机电职业技术学院, 杭州 310053; 2. 浙江省农业机械学会, 杭州 310003;

3. 浙江省工业和信息化研究院, 杭州 310003; 4. 正阳科技股份有限公司, 金华 321300;

5. 浙江省现代农业装备设计研究院, 杭州 310003; 6. 浙江理工大学信息科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对目前工厂化育秧育苗田间铺盘自动化程度低、成本高等问题,设计了一种全自动双边轨道式田间铺盘装置,并配备苗床异常凸起视觉检测模块。首先对铺盘结构工作原理进行分析,之后对铺盘装置满载作业状况进行结构设计、受力分析和仿真分析。为了防止苗床异常凸起导致铺盘时秧盘倾斜,影响炼苗成活率,提出了一种基于 CBAM-YOLO v5n 的苗床异常凸起目标识别算法,改进后的 YOLO v5n 算法添加了注意力机制,对苗床异常凸起目标检测准确率、召回率和平均精度均值分别为 98.1%、91.7% 和 94.9%,相对于原模型分别提高 1.2、1.7、0.9 个百分点。对设计的铺盘样机进行了正交试验,试验结果表明,当铺盘高度为 90 mm、铺盘机构转速为 550 r/min、铺盘箱平移速度为 0.14 m/s 时,铺盘成功率最高为 96.4%,植入机器视觉模块后,铺盘成功率可达 99.3%。设计的铺盘装置可有效降低人工铺盘劳动强度,降低铺盘劳动成本。

关键词: 田间铺盘; 工厂化育秧; 双边轨道式; 机器视觉; YOLO v5n

中图分类号: S223.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)08-0071-10

OSID:



Design and Testing of Field Disk Spreading Device Based on Improved YOLO v5n

YU Jiajia¹ LI Yu² ZHOU Yansuo³ HU Wanli⁴ HAO Shuai⁵ LI Lei⁶

(1. Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China

2. Zhejiang Society for Agricultural Machinery, Hangzhou 310003, China

3. Zhejiang Institute of Industry and Information Technology, Hangzhou 310003, China

4. Zhengyang Technology Co., Ltd., Jinhua 321300, China

5. Zhejiang Modern Agricultural Equipment Design and Research Institute, Hangzhou 310003, China

6. School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of low automation and high cost of field spreading device for factory planting seedlings, a fully automated bilateral rail type field spreading device with a visual detection module for abnormal bumps in seedbed was designed. Firstly, the working principle of the tray spreading structure was analyzed, and then the structural design, force analysis and simulation analysis were carried out on the full-load operation condition of the tray spreading device. In order to prevent the abnormal bulge of seedbed from tilting the seedling tray when spreading the tray, which affected the survival rate of seedling refining, an abnormal bulge target recognition algorithm was proposed based on CBAM-YOLO v5n, and the improved YOLO v5n algorithm added the attention mechanism, and the average values of accuracy, recall, and average precision for the detection of the abnormal bulge target of the seedbed were respectively 98.1%, 91.7% and 94.9%, which were 1.2 percentage points, 1.7 percentage points and 0.9 percentage points higher than that of the original model, respectively. The developed tray-laying prototype was tested by orthogonal test method, and the test results showed that when the height of tray-laying was 90 mm, the rotational speed of tray-laying mechanism was 550 r/min, and the translational

收稿日期: 2024-04-11 修回日期: 2024-05-18

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02022, 2022C02056)

作者简介: 虞佳佳(1983—),女,教授,博士,主要从事设施农业装备和机器视觉检测与运动控制研究, E-mail: yjxdg@qq.com

通信作者: 李玉(1989—),女,工程师,主要从事现代农机装备和农机农艺融合研究, E-mail: 991448513@qq.com

speed of tray-laying box was 0.14 m/s, the highest tray-laying success rate was 96.4%, and after implanting the machine vision module, the tray-laying success rate can reach 99.3%. The designed tray spreading device can effectively reduce the labor intensity of manual tray spreading and reduce the labor cost of tray spreading.

Key words: field spreading trays; factory seeding; bilateral rail type; machine vision; YOLO v5n

0 引言

近年来,随着国家对农业机械化重视程度不断提高,2023年全国农作物耕种收综合机械化率已超过73%^[1],其中机耕率、机播率、机收率分别达到86.42%、60.22%、64.66%^[2]。播种育苗已然成为制约我国农业机械化的瓶颈,育苗是农艺和农机融合的关键,也是机械移栽技术的核心,培育健壮的秧苗在农业生产中有重要的作用。工厂化育苗必将取代传统育苗方式^[3-4],采用秧盘育苗可以弥补传统育苗方式幼苗质量差、成活率低等不足。秧盘育苗后幼苗分布均匀、长势一致、产量高、秧盘易于运输,方便管理。采用秧盘育苗可以节省人力,提高效率,达到较高的经济效益^[5]。田间铺盘是工厂化育苗的重要一环,秧盘铺放直接影响幼苗后期生长,幼苗质量又对作物产量和品质起决定性作用。由于目前工厂化育苗过程中播种地点固定,远离育苗棚室,人工搬运摆放秧盘劳动量大,人力成本高,效率低,压缩了育苗产业经济效益。

国外关于育苗铺盘装置研究较早,其中日本对于工厂化育苗流水线中供盘叠盘装置研究较多,例如铃木锻工和久保田公司的育苗箱自动供给装置、井关农机公司的苗箱自动供给和堆集装置、洋马农机公司的箱体装载装置等,可以较好地实现苗盘的运输和叠放^[6-11]。

近些年国内关于田间铺盘的自动化装置也进行了相关研究。李风雷^[12]发明了一种苗床用穴盘搬运装置,实现了穴盘在苗床上的平稳放置,但没有考虑苗盘运输且单次放置苗盘数量较少。黄硕等^[13]研制了一种育苗穴盘储运摆放装置,模仿人手托举摆放穴盘。王康军等^[14]设计了一种自动摆盘育秧播种一体机,可一次性完成摆盘、铺土、播种、覆土及洒水等作业。马旭等^[15]设计了水稻秧盘自动码垛机,实现了秧盘精准定位、夹取和码垛作业。李旭等^[16]设计了一种蔬菜泡沫育苗盘自动叠盘装置,解决了人工叠放苗盘劳动强度大和整齐度偏低的问题,将育苗流水线播种环节生产率从450盘/h提升至900盘/h。夏旭东等^[17]设计了双凸轮控制的育秧铺盘机器,铺盘效率为360盘/h,但体积太大。平整田地有利于开展农业规模化和精细化^[18-19]。然

而国内关于铺盘时对苗床平整度的实时检测的研究却很少。郑劲松^[20]提出一种土地平整算法,将激光控制技术和平地机结合,利用激光反馈控制平地机的升降,使其工作在同一水平面。密雅荣^[21]使用激光传感器获取土地的三维地形信息,使用土地所有测量点相对高程的标准偏差和相对高程与期望高程的绝对差值来检测土地平整程度。李泽昕等^[22]利用履带式遥控小汽车和激光放线仪发明了一种地面平整度检测装置,小车移动在平整地面上时水平激光照射在感光贴条上,当地面不平整就会触发传感器指示灯。目前这些研究只能大体上检测土地平整度,适合秧盘铺放前机械整地。而整地时可能会存在遗漏小石块等因素造成的异常凸起,这些凸起体积较小但又会影响秧盘铺放,所以这些方法不适合应用于秧盘铺放时对下方土地的实时检测。

从国内外秧盘摆放机的研制情况来看,虽然一些发达国家已经有较为成熟的秧盘摆放装置,但是绝大多数只适用于所在国家特定的秧盘,且国外秧盘摆放机造价过于昂贵,售后难以保障,加之存在技术壁垒,使得好的产品难以大规模进入中国市场应用。国内相关样机研制种类繁多,但整体自动化水平并不高,绝大多数需要人工逐一把盘放到输送线上,仅减轻了弯腰铺盘劳动,并未完全脱离人工铺盘。

为解决上述问题,本文设计一种自动化程度高、铺盘效率高、成本低、柔性度高的全自动秧盘铺放机,并融合机器视觉算法识别田间异常凸起目标,以期提高铺盘成功率。

1 结构与原理

1.1 整体结构和设计需求

铺盘机系统由2个铺盘箱、1个中控台和基本框架构成,如图1所示。工作时铺盘机在铺设好的轨道上进行移动,电控柜上的触摸屏用于发出指令,由750 W电机控制铺盘机整体前进和后退。2个铺盘箱各自的水平电机可以控制其左右移动,秧盘放置在铺盘箱料框中,升降电机负责料框上升下降,铺盘箱舵机可以收紧张开,张开状态下,料框中摆放的秧盘在其自身重力作用下落入苗床,一次只能通过一张秧盘,其他秧盘会被舵机卡住,等待下一步指

令。铺盘箱上的接近开关则用于触发控制程序的铺盘信号,可通过设置合适铺盘高度放置秧盘,防止过高时损坏秧盘。铺盘机有手动运行和自动运行两种状态,自动运行状态下,系统将按照设定好的运行速度和放料高度铺放秧盘,无需人为操作,自动化程度高。

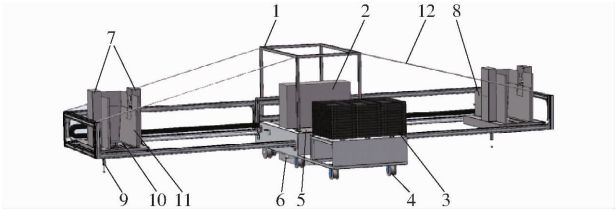


图 1 铺盘机结构图

Fig. 1 Structure of disk spreader

1. 拉绳架 2. 电控柜 3. 秧盘堆放区 4. 轨道滑轮 5. 电池
6. 750 W 电机 7. 升降电机 8. 水平电机 9. 接近开关 10. 舵机
11. 铺盘箱 12. 钢丝绳

铺盘机主要应用于温室大棚中,本设计结构工作宽度小于 6 m,规格化育秧盘尺寸 600 mm × 300 mm × 32 mm(外尺寸)、580 mm × 280 mm × 30 mm(内尺寸)。考虑到大棚里环境封闭,动力方式选择电力驱动,工作噪声小且环保节能。

1.2 铺盘机工作受力分析

因铺盘机装置体积较大,负载主要加在机器两侧,若机器两侧受力不同,可能发生倾斜的风险。因此对机器作受力分析,如图 2 所示。

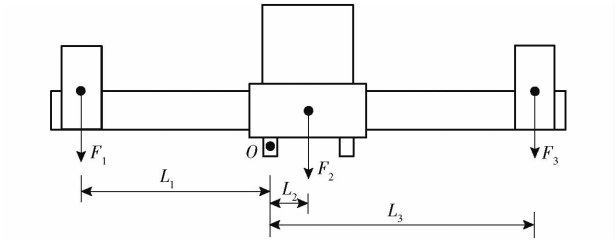


图 2 铺盘机受力分析图

Fig. 2 Force analysis of disk spreader

铺盘机操作简单方便,一人即可操控。在只有一人工作情况下,需先将一侧铺盘箱装满秧盘,再去另一侧装载,此时一侧受力较大,一侧受力较小,容易发生侧翻,如图 2 所示。其中 F_1 为铺盘箱和满载载荷所受重力, F_2 为中控台所受重力, F_3 为另一侧铺盘箱空载时所受重力。 L_1 、 L_2 、 L_3 分别是各点到支点 O 的力臂,可得

$$F_1 L_1 = (150 + 25 + 70) \text{ kg} \times 9.80 \text{ m/s}^2 \times 2.4 \text{ m} = 5\,762.40 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_2 L_2 + F_3 L_3 = 200 \text{ kg} \times 9.80 \text{ m/s}^2 \times 0.4 \text{ m} + (150 + 25) \text{ kg} \times 9.80 \text{ m/s}^2 \times 3.25 \text{ m} = 6\,357.75 \text{ N} \cdot \text{m}$$

其中铺盘箱自身质量为 150 kg,两侧支架质量各 25 kg,载荷质量为 70 kg,中控台质量为 200 kg。

L_1 、 L_2 、 L_3 分别为 2.40、0.40、3.25 m。重力加速度取 9.80 m/s^2 。

考虑到发生倾斜最大一种情况受力分析,若机器发生一侧倾斜,需 $F_1 L_1 > F_2 L_2 + F_3 L_3$,实际受力 $F_1 L_1 < F_2 L_2 + F_3 L_3$,故机器在使用过程中不会发生此种情况。

铺盘机采用对称式结构设计,在铺盘时两侧铺盘箱装载的秧盘数量、质量一致,即两侧受力情况一致。且铺盘箱工作为对称平移。铺盘机两侧达到动态平衡,动态工况稳定性好。

2 关键部件设计与参数设计

2.1 车架设计

为确保铺盘机稳固安全,在中控台上焊接一个拉绳架,拉绳架上方四角各有一条钢丝绳连接车架两端。两侧车架采用对称式结构来保证机器运行稳定性,整体设计重心偏低。在确保车架强度和刚度的前提下,选用质量较轻的铝型材作为车架材料,提高其运载能力,车架各部件之间以及中控台连接部分采用角钢固定,车架设计可靠,稳定性高,车架结构如图 3 所示。

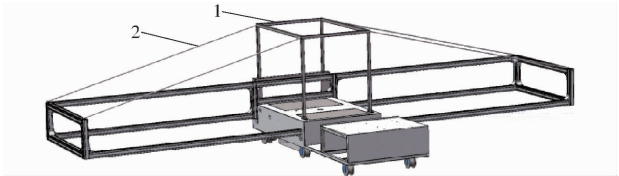


图 3 车架整体结构图

Fig. 3 Overall frame structure

1. 拉绳架 2. 钢丝绳

2.2 铺盘箱结构设计

铺盘机主要由铺盘箱和中控台构成,其中铺盘箱由料框、升降电机、水平电机、行程电缸、接近开关、舵机和 CCD 相机构成,如图 4 所示。

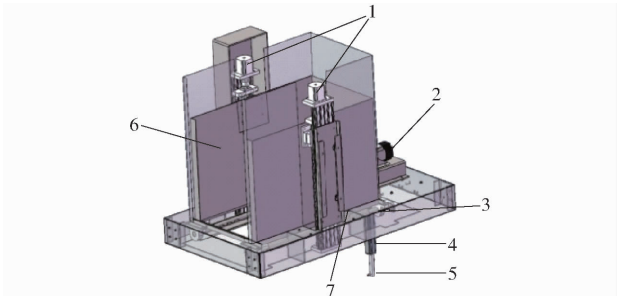


图 4 铺盘箱结构图

Fig. 4 Structure of tray-laying box

1. 升降电机 2. 水平电机 3. 舵机 4. 行程电缸 5. 接近开关
6. 料框 7. CCD 相机

选用额定电压 48 V、额定功率 400 W 的直流无刷电机,通过齿轮传动,控制铺盘箱在左右方向水平

移动,铺盘箱升降系统和料框固定在一起,通过电控柜统一控制,其中升降系统主要由步进电机、联轴器、SFU 型滚珠丝杠和丝杠螺母构成,通过滚珠丝杠将电动机旋转运动变为直线运动,传动效率和精度较高。舵机控制秧盘放置,在舵机转动过程中可实现秧盘次序下落。与舵机相连接的焊接挡板安装在料框下方出料口,两侧焊接挡板齿轮与秧盘两侧边缘相嵌合,可以阻挡秧盘下落(图 5)。料框中最多可堆放 14 个播种好的秧盘。当收到电控柜放料的指令后,舵机控制挡板旋转 90°,最下边秧盘没有齿轮阻挡,垂直落下,上一个秧盘则被挡板的圆弧结构卡住无法下落,挡板逆向旋转 90°,秧盘则又被齿轮阻挡,从而完成单次铺盘动作,实现了料框中秧盘次序放置,图 6 为铺盘示意图。

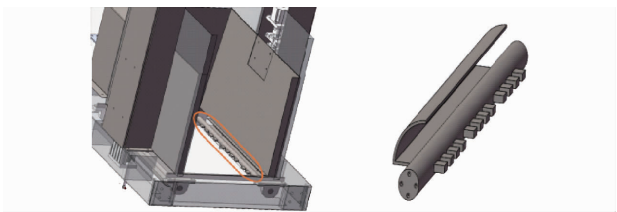


图 5 焊接挡板设计图
Fig. 5 Welding baffle design

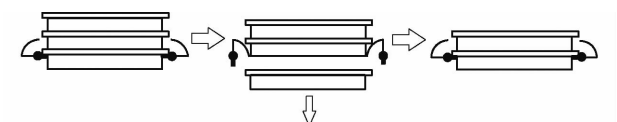


图 6 铺盘示意图
Fig. 6 Schematic of tray spreading

行程电缸下方安装接近开关,可实现料框在指定高度放置秧盘。接近开关是一种不与运动对象产生直接接触而可以感应其存在的位置开关,按种类可分为涡流式、电容式、光电式等;可用于位置检测、计数和速度控制等环节;具有检测距离远、精度高、寿命长等优点。本系统将接近开关安装在行程电缸下端,通过行程电缸上下直线运动可以调节接近开关位置,首先由行程电缸向下运动带动接近开关,当开关接近地面或到达放置秧盘合适高度时电缸停止运动。根据控制指令放料车料框升降时,料框底部焊接的金属圆条随之下落,当金属圆条达到接近开关的感应距离,即料框放料口和接近开关在同一高度时,接近开关发出信号给控制台,控制台收到信号后停止运转料框的升降电机,舵机打开进行秧盘放置。通过这些设计可以保证秧盘放置时不会因高度过大而产生损伤。通过 CCD 相机可以采集当前下方的苗床图像,以检测其平整度是否适合放置秧盘。

2.3 中控台结构设计

中控台主要由电池、电控柜、秧盘堆放区、轨道

滑轮、主电机和中央车架构成,如图 7 所示。

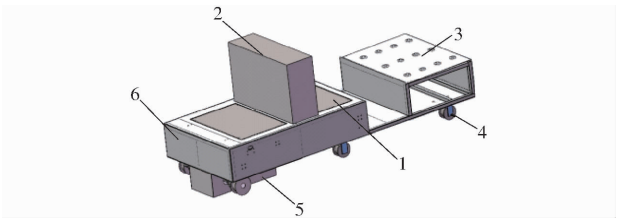


图 7 中控台结构图

Fig. 7 Structure of center console

1. 电池 2. 电控柜 3. 秧盘存放区 4. 轨道滑轮 5. 主电机
6. 中央车架

根据设计要求,选定主电机功率 750 W,控制整台铺盘机在轨道上的前进后退,由于轨道运输有结构简单、操纵方便、运行稳定、运载能力强等优点,所以选择此种运行方案。选择电压 12 V、容量 48 A·h 的 4 节铅酸电池串联,总电压 48 V,用于给整台铺盘机供电。秧盘存放区可存放最大质量 100 kg 的待放置秧盘。电控柜中搭载整台机器电气系统,表面的触摸屏用于人机交互。

2.4 铺盘机控制系统设计

PLC 具有扩展能力强、操作简单、运行速度快、可靠性高等优点,广泛应用于工业自动化生产中^[23]。由于本系统中需要控制的电机较多,且在系统运行过程中用到许多顺序控制,故选用 PLC 作为本系统的控制方式。系统部分硬件组成如图 8 所示,铺盘机工作流程如图 9 所示。

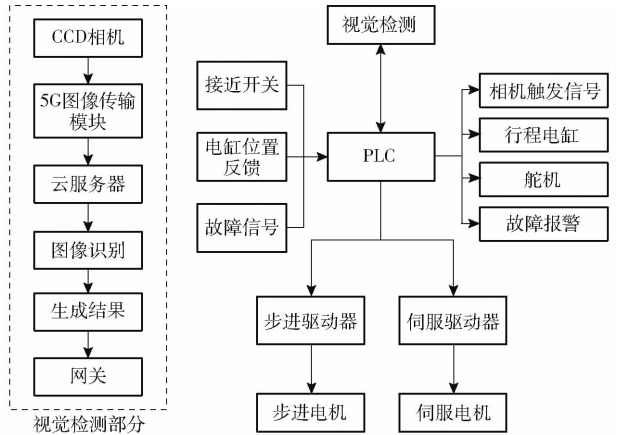


图 8 系统部分硬件组成框图

Fig. 8 Block diagram of hardware components of system section

铺盘机系统需要控制的硬件包含直流电机驱动器、直流蓄电池、PLC、1 个 750 W 的伺服电机、2 个 400 W 的伺服电机、4 个步进电机、2 个接近开关、2 个行程电缸、4 个舵机、CCD 相机和 5G 图像传输模块。其中总电压 48 V 的直流蓄电池分别直接给伺服电机、步进电机和行程电缸供电,经电压转换模块将电压降至 5、24 V 后分别给舵机、接近开关和

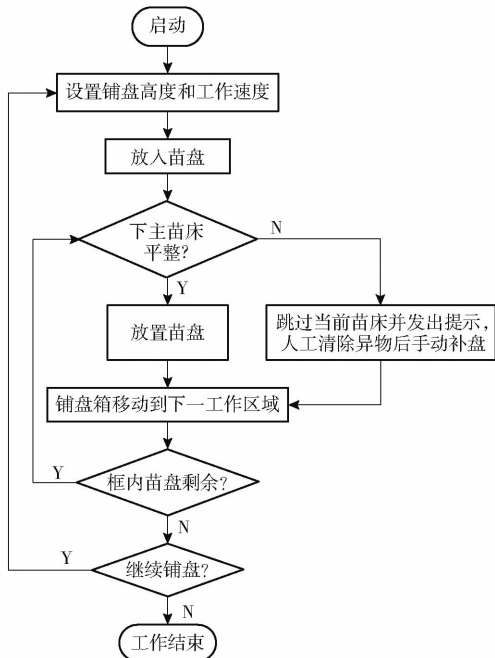


图 9 铺盘机工作流程图
Fig. 9 Tray spreader workflow diagram

PLC 供电。在电源侧安装有 WS1521 型直流电压隔离变送器,直流电压隔离器是一种采用线性光耦隔离原理,将输入信号隔离变送成线性的直流模拟信号的装置。避免信号在传输过程中被干扰,保证变换后信号、电源、地之间绝对独立。

PLC 的 CPU 模块选择台达 AS 系列 AS228T-A,电源要求直流电压 24 V,内建 Ethernet、RS-485 * 2、USB 通讯口、支持 28 点 IO (包括 16DI 和 12DO),满足使用要求。数位 I/O 模块选择 AS16API1T-A,24V DC,8 输入点,8 输出点,模拟 I/O 模块选择 2 个 AS04AD-A,4 通道模拟信号输入。

接近开关接入到 CPU 的输入中,当料框到达指定位置触发接近开关信号,信号传入到 CPU 中,CPU 向放料车升降电机发出急停指令。CPU 输出分别连接到伺服电机伺服脉冲和方向以及步进电机步进脉冲和方向,伺服脉冲和方向可以控制铺盘机整体前进后退和速度,步进脉冲和方向可以控制放料车左右移动和速度。通过扩展数位 I/O 模块 AS16API1T-A 增加输入输出接口,行程电缸正反转信号接入数位 I/O 模块的输出,控制电缸直线运动。各电机故障信号分别接入到数位 I/O 模块的输入,当电机故障时,CPU 收到故障信号,可通过输出生报警信号,提示工作人员,指明故障电机,及时了解电机运转状况。行程电缸位置反馈信号接入到模拟 I/O 模块 AS04AD-A 的输入端,实时检测行程电缸垂直位置,舵机接入到模拟 I/O 模块输出端,发出信号即可运转或停止舵机。伺服电机和步

进电机在驱动过程中需要安装伺服驱动器和步进驱动器,电机驱动器是一种将信号脉冲转换为角位移的控制装置,可以实现电机速度控制、扭矩控制和方向控制等。

对于视觉检测部分,PLC 触发相机拍摄信号,CCD 相机将采集的苗床图像经 5G 图像传输模块上传到云服务器进行图像识别,将生成的结果传回到 PLC。相比传统的嵌入式系统,5G 图像传输模块使得端到端时延达到 5 ~ 10 ms,云计算资源灵活调度和分配,使得系统可以并行处理多个任务,从而提高整体处理效率。视觉检测系统架构如图 10 所示。

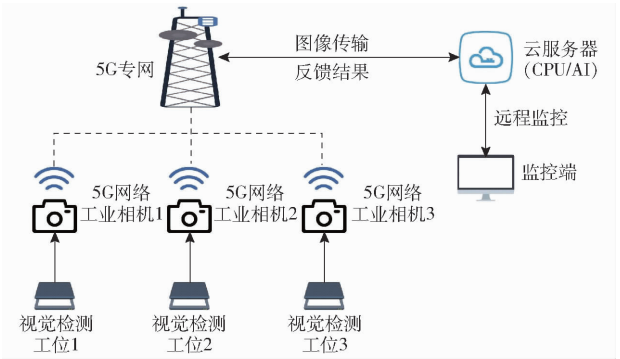


图 10 视觉检测系统架构图
Fig. 10 Architecture of visual inspection system

PLC 控制程序由 ISPSOFT 软件编写,电控柜上安装有触摸屏,便于人为控制铺盘机运转。触摸屏上有自动运行、手动运行、报警信息和 I/O 监控等虚拟按键,铺盘机自动运行状态下,通过设定好的程序自动放置秧盘,适合环境简单、场地整齐的苗场环境,手动运行状态下,工作人员可自主决定秧盘放置。报警信息会显示当前系统故障位置,出于安全考虑,报警状态下,系统无法运行。I/O 监控页面则可实时监测各部件运行状态。

3 铺盘识别算法与仿真

3.1 苗床异常凸起目标识别算法

在秧盘放置过程对苗床平整度要求较高,以前在摆秧盘前整地阶段多采用传统的人工平地,近年来随着农业机械化的推进,针对摆秧盘前整地作业,多采用旋耕和犁耕农机,保证田块高低差不超过 3 cm^[24]。整地要求床面无直径大于 1.5 cm 的土块或石块,据实地研究,苗床土中约有 6.46% 粒径大于等于 20 mm 的土壤颗粒^[25],多为硬质颗粒。其中一些颗粒随着整地作业埋在土下,一些则会留在床面上。若苗床上有石子或较高的凸起会影响秧盘放置成功率。在人工摆盘时可人为把这些石子从苗床上剔除。而在机械化摆盘作业中,则需要机器去识

别这些颗粒。为此,本文提出了一种基于 CBAM - YOLO v5n 的目标识别算法,用于检测苗床上的异物或凸起。

首先构建数据集,采集苗床上有凸起的图像。如图 11 所示,采集地点为杭州市萧山区金牛水稻机械化育秧中心的育秧炼苗温室中。由于温室专用于育秧炼苗,苗床基本平整,不会在每一次铺盘前都进行旋耕整地,床面状态无太大变化。



图 11 育秧炼苗温室现场

Fig. 11 Site of seedling refining greenhouse

根据实地考察,苗床为泥土地。由于育苗工作分季节进行,一些苗床会在育苗前长出苔藓或杂草。苗床之间建有水泥路段供人员行走,铺盘机可工作于 6 m 的苗床上,若工作时苗床宽度小于 6 m,铺盘机可能会工作在部分水泥路面上,水泥路面并不适合铺放秧盘,为防止此种情况发生,在数据集中加入水泥路面图像,当视觉检测模块检测下方存在水泥路面时,铺盘机会跳过这一工作区域。图 12 为采集的部分图像,图像采集设备为 MV - CE120 - 10UC 型相机,共采集 jpg 格式的地面图像 400 幅,筛选其中的图像,保留质量较好的不同图像 385 幅。使用软件 LabelImg 在图像中标注床面凸起的最小外接矩形,尽量保证矩形框中不含有其他的背景区域,一

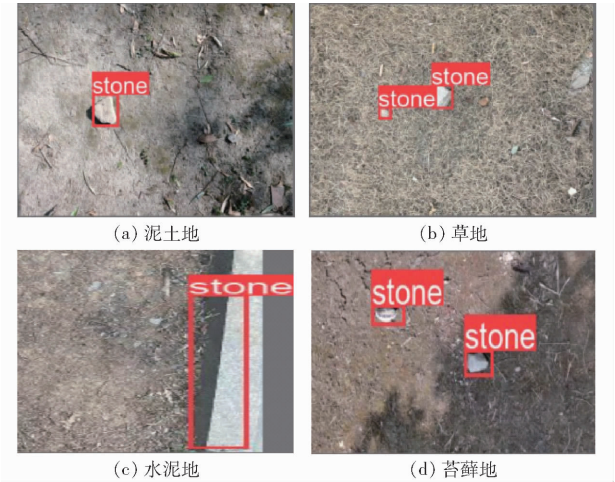


图 12 不同地面数据图像

Fig. 12 Pictures of data on different ground surfaces

些嵌入苗床裸露在外部分直径大于 1.5 cm 的石子,即视为异常凸起进行标注。设定矩形框的类别信息为“stone”,保存后生成 txt 格式的标签文件,其中含有标注矩形框的类别、中心点坐标、相对高度和宽度。由于图像数据不足,可能会使模型产生过拟合的情况,因此需要进行数据增强,使用 Python 代码原始图像进行旋转、翻转和增减亮度来扩充图像。最终的训练集共含有 3 080 幅图像,将 3 080 幅地面图像按比例 8:2 分为训练集和验证集。

YOLO v5 网络按照模型大小有 5 种架构:YOLO v5n、YOLO v5s、YOLO v5m、YOLO v5l 和 YOLO v5x。模型越大,准确性越高,而检测速度也越慢,根据不同场景需求可以选择不同模型。在育苗工厂进行铺盘时对铺盘机工作速度有较高要求,相应地对苗床异常凸起的检测速度也要提高。为了满足苗床检测实时要求,选择 YOLO v5n 模型来进行检测。虽然 YOLO v5n 为轻量级模型,但在地面检测任务中准确性相对较高。因此,综合考虑模型准确性和速度,决定采用 YOLO v5n 架构来实现地面平整检测任务。

YOLO v5n 模型结构主要包括:主干网络 (Backbone)、颈部网络 (Neck) 和检测头 (Head)。Backbone 首先通过一系列的卷积层和池化层对输入图像进行处理,提取图像中重要特征。由 Neck 在主干网络提取特征基础上,进行特征融合和上采样操作 (Upsample),结合不同尺度特征,输出 3 个特征层。最后,Head 分别对特征层进行判断,输出检测目标在图像中的位置、类别和置信度。

为了提高目标检测精度,在 YOLO v5n 网络架构中加入注意力模块 CBAM (Convolutional block attention module)。CBAM 由通道注意力模块 (Channel attention module) 和空间注意力模块 (Spatial attention module) 两个组件组成^[26]。在地面凸起检测任务中,模型需要快速检测到目标以及目标位置,通过在网络结构中加入 CBAM 注意力机制,可以加强模型在通道和空间维度上对目标的关注,聚焦特征图上有用的目标信息和目标位置,降低了对无用信息的关注,提高了模型精度,同时不增加网络复杂性。

通道注意力模块可以增强每个通道特征表达。输入尺寸为 $H \times W \times C$ 的特征图 F ,将经过全局最大池化 (MaxPool) 和全局平均池化 (AvgPool) 运算后获得的两个 $1 \times 1 \times C$ 的通道特征送入 1 个由多层感知器 (MLP) 和 1 个隐藏层共享的两层神经网络,然后将输出的两个特征元素进行乘积加和操作后,通过 Sigmoid 激活函数获得新的通道特征图 M_c 。计算公

式为

$$M_c(F) = \sigma(MLP(AvgPool(F)) + MLP(MaxPool(F)))$$

(1)

式中 σ ——Sigmoid 激活函数

MLP ——多层感知器

$AvgPool$ ——平均池化操作

$MaxPool$ ——最大池化操作

空间注意力模块用于从空间角度提取关键信息。输入尺寸为 $H' \times W' \times C'$ 的特征图 F' , 进行全局

最大池化和全局平均池化运算, 将获得的两个 $H' \times W' \times 1$ 大小的通道特征经过一个大小为 7×7 的卷积层和 Sigmoid 激活函数后计算得到新的空间特征图 M_s 。计算公式为

$$M_s(F) = \sigma(f^{7 \times 7}((AvgPool(F); MaxPool(F))))$$

(2)

式中 f ——卷积运算

其中 7×7 为卷积核大小。

CBAM 模块整体结构如图 13 所示。

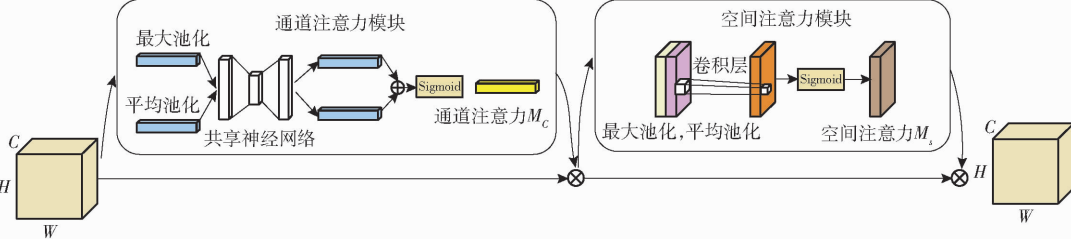


图 13 CBAM 模块整体结构

Fig. 13 CBAM module

添加注意力模块时不能增加网络复杂度, 需要确保网络实时性能, 本文在颈部结构中加入 4 组注

意力模块, 以增强图像更深层次的特征融合能力。改进后 YOLO v5n 模型结构如图 14 所示。

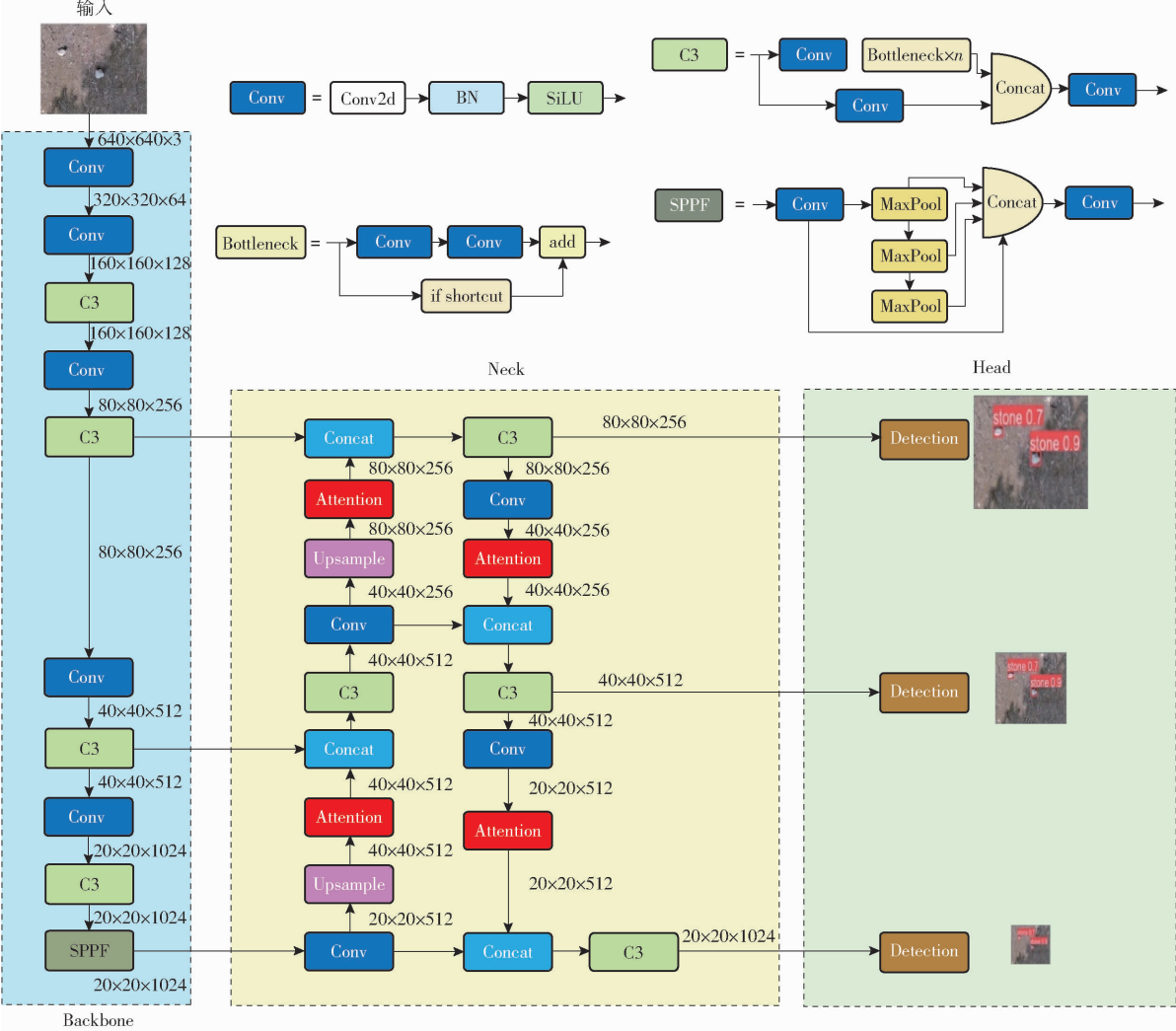


图 14 改进后 YOLO v5n 模型结构

Fig. 14 Improved YOLO v5n model structure

为了评估网络模型检测性能,选取准确率 (Precision, P)、召回率 (Recall, R)、平均精度均值 (Mean average precision, mAP) 和每秒传输帧数 (Frames per second, FPS) 作为评价指标。

为了体现 CBAM-YOLO v5n 的检测效果,选取一些轻量级模型做对比测试。各模型检测结果对比如表 1 所示。

表 1 各检测模型对比训练结果
Tab.1 Comparison of training results for each detection model

模型	$P/\%$	$R/\%$	mAP/%	FPS/($\text{f}\cdot\text{s}^{-1}$)	内存占用量/MB
YOLO v5n	96.9	90.0	94.0	90.91	3.67
YOLO v5s	97.5	90.1	95.3	66.58	13.60
YOLO v7-tiny	95.0	88.8	95.7	29.67	11.60
YOLO v8n	94.6	88.8	93.7	170.23	5.93
YOLO v8s	98.7	90.5	93.6	147.92	21.40
CBAM-YOLO v5n	98.1	91.7	94.9	77.52	3.70

从表 1 可以看出,改进后模型相对于 YOLO v5n 准确率、召回率和平均精度均值分别提高 1.2、1.7、0.9 个百分点。相比较其他模型检测性能也较好且模型更加轻量。YOLO v8 采用无锚框 (anchor-free) 方法,虽减少了算力,提高了检测速度,但对于小目标检测能力有下降,由于地面凸起检测任务包含许多小目标,所以此模型不适用于本文。这方面 YOLO v5 的表现较好,虽牺牲了一部分检测速度,但已能满足实际铺盘时对苗床的检测要求。

3.2 铺盘机仿真

3.2.1 静力学

利用 ANSYS workbench 对机器进行仿真。铺盘机实际模型过于复杂,在分析前对模型进行简化处理。由于钢丝绳相对于整机过于细小难以进行受力网格划分,因此在钢丝绳和拉绳架连接点用相等的力来代替钢丝绳,同样在钢丝绳和车架两端的连接点施加相等的力,同一钢丝绳两端连接点力大小相等,方向相反。选择车架作为分析对象,为了保证机器在工作时稳定运行,考虑到机器在承受载荷下能够正常运转,对摆盘机满载时机身结构变形和应力进行分析,满载时秧盘总质量 70 kg,考虑机器自重,有限元分析结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出,最大变形量为 8.566 5 mm,位于车架两端承重两台铺盘箱的连接处,根据工程设计标准,变形量相对较小,满足使用要求。由等效应力图可知,最大应力为 407.57 MPa,这是因为载荷全都加在车架两侧上,应力比较集中,为此在应力最大的相连处采用 7003 铝合金,其屈服强度大于等

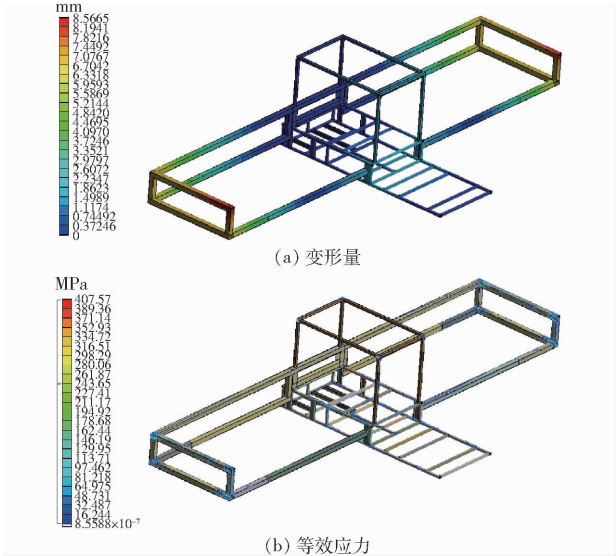


图 15 车架变形量与等效应力

Fig.15 Frame deformation and equivalent stress

于 500 MPa,最大应力低于其材料屈服强度,满足使用要求。

3.2.2 运动仿真

为检验机器工作稳定性,使用 ADAMS 软件对铺盘机工作状态进行仿真。将模型导入到 ADAMS 中,为了方便计算,对结构进行了简化,相关部分使用同等的作用力代替,将除行走轮之外的结构作为一个整体。给车轮和轨道施加摩擦,在车轮上添加旋转驱动。选择最外侧车架上的点,得到此点速度、水平位移、垂直位移随时间变化曲线如图 16 所示。

从图 16b 可以看出,机器运行是一个先加速再匀速的运动过程,从图 16d 可得,工作时机器外侧没有发生影响稳定的振动。根据 ADAMS 仿真结果显示,铺盘机工作时运行平稳,满足使用要求。

4 田间试验

为测试铺盘机工作性能,对研制的新型全自动育秧盘铺放机进行田间铺盘试验。

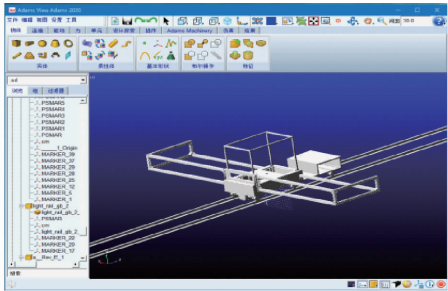
4.1 铺盘机样机

图 17 为样机装配图。铺盘机到达工作位置后,铺盘箱对称平移进行秧盘铺放,在完成一行秧盘铺放后,铺盘机向前移动,到达下一行工作位置。

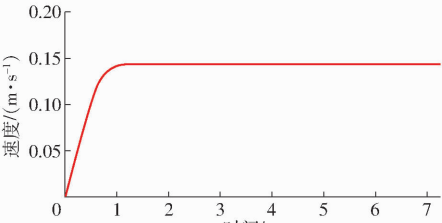
为了验证样机稳定性,分别对铺盘机空载和满载 2 种状况前进速度进行测试(表 2、3),试验结果表明样机工作时匀速前进,工况稳定,且前进速度与运动仿真时速度相差不大。

4.2 正交试验

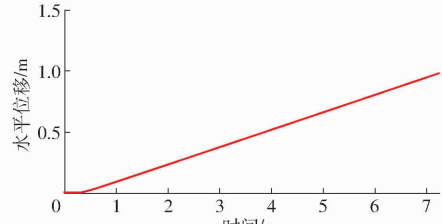
以铺盘成功率为评价指标,并以铺盘高度、铺盘机构转速和铺盘箱平移速度为试验因素,对铺盘机自动铺盘进行三因素三水平正交试验,其中试验因



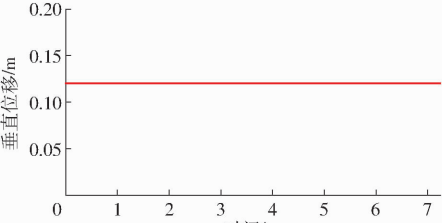
(a) ADAMS中模型



(b) 速度



(c) 水平位移



(d) 垂直位移

图 16 ADAMS 运动仿真及结果分析

Fig. 16 ADAMS motion simulation and result analysis



(a) 田间样机

(b) 铺盘示意图

图 17 秧盘摆放机整体装配图

Fig. 17 Overall assembly diagram of seedling tray placer

表 2 铺盘机空载前进速度测试

Tab. 2 No-load forward speed test of disk-laying machine

前进距离/m	前进时间/s	前进速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	7. 00	0. 143
2	13. 89	0. 144
3	20. 56	0. 146

素水平如表 4 所示。

表 3 铺盘机满载前进速度测试

Tab. 3 Plate spreader full load forward speed test

前进距离/m	前进时间/s	前进速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	7. 25	0. 138
2	15. 08	0. 133
3	22. 12	0. 136

表 4 试验因素和水平

Tab. 4 Experimental factors and levels

水平	因素		
	铺盘高度/ mm	铺盘机构转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	铺盘箱平移速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	90	500	0. 13
2	100	550	0. 14
3	110	600	0. 15

铺盘机一次可装载 28 个秧盘,一次试验中铺放 5 次共 140 个秧盘,每次试验重复 3 次。定义铺盘成功率为摆放成功秧盘数占总铺盘数百分比。记录每次铺盘成功数目并计算对应成功率,取平均值。正交试验方案与结果如表 5 所示。由表 5 可以得出,铺盘箱以平移速度 0. 14 m/s、铺盘高度 90 mm、电机转速 550 r/min 进行铺盘时的自动铺盘效果最优。

表 5 正交试验结果与极差分析

Tab. 5 Orthogonal test results and polar analysis

试验号	因素			铺盘成功 率/%
	铺盘高度/ mm	铺盘机构转 速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	铺盘箱平移速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
1	90	500	0. 13	89. 3
2	90	550	0. 14	96. 4
3	90	600	0. 15	89. 3
4	100	500	0. 14	85. 7
5	100	550	0. 15	89. 3
6	100	600	0. 13	85. 7
7	110	500	0. 15	78. 6
8	110	550	0. 13	82. 1
9	110	600	0. 14	78. 6
K_1	275. 0	253. 6	257. 2	
K_2	260. 7	267. 8	260. 7	
K_3	239. 3	253. 6	257. 2	
k_1	91. 67	84. 53	85. 73	
k_2	86. 90	89. 27	86. 90	
k_3	79. 77	84. 53	85. 73	
R	11. 9	4. 74	1. 17	

4. 3 对比试验

为了验证添加视觉检测模块后的铺盘效果,在田间进行了对比试验。控制铺盘高度、铺盘机构转速和铺盘箱平移速度相同,在未启动视觉检测功能

和启动视觉检测功能状态下分别进行一次田间铺盘试验。铺盘机装载 28 个秧盘,一次试验铺放 5 次共 140 个秧盘,每次试验重复 3 次,取平均值。对比试验结果显示,铺盘机以平移速度 0.14 m/s、铺盘高度 90 mm、电机转速 550 r/min 进行铺盘时,无视觉检测铺盘成功率为 96.4%,有视觉检测铺盘成功率为 99.3%。

5 结论

(1)设计了一种全自动双边轨道式田间铺盘装置,并配备含有机视觉的苗床异常凸起目标检测部件。对铺盘机主要部件进行了结构设计、受力分析和仿真分析,实现了铺盘机和铺盘箱运动配合。

(2)建立了基于 CBAM-YOLO v5n 的目标识别算法,用于检测苗床上异物或凸起,改进后模型准确率、召回率和平均精度均值分别为 98.1%、91.7% 和 94.9%,相对于原模型分别提高 1.2、1.7、0.9 个百分点。与其他模型相比检测性能也较好且模型更加轻量。

(3)为了保证铺盘质量的同时获得最佳参数组合,进行了田间试验,结果表明,铺盘箱以平移速度 0.14 m/s、铺盘高度 90 mm、电机转速 550 r/min 进行铺盘时自动铺盘效果最优,满足田间机械化要求。将含有该目标识别算法的视觉模块应用到铺盘机后,在最佳铺盘参数下铺盘成功率从 96.4% 提升至 99.3%。

参 考 文 献

- [1] 常江雪,白学峰,鲁植雄.基于农产品进出口贸易视角的农业机械化发展研究[J].中国农机化学报,2024,45(1):315-321.
CHANG Jiangxue, BAI Xuefeng, LU Zhixiong. Research on the development of agricultural mechanization based on the perspective of agricultural products import and export trade[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 315-321. (in Chinese)
- [2] 杜永红.基于中国国情的农业全产业链数字化转型路径[J].中国流通经济,2023,37(12):36-48.
- [3] 郭田田,赵竑博.工厂化育苗的技术特点与今后发展方向[J].现代园艺,2024,47(5):116-117.
- [4] 胡晓辉,王君正,彭铁梨,等.夏季黄瓜穴盘育苗施用甲基营养型芽孢杆菌的效果分析[J].农业机械学报,2020,51(9):284-293.
HU Xiaohui, WANG Junzheng, PENG Tieli, et al. Effect of *Bacillus methylotrophicus* on cucumber acupoint plate seedling in summer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 284-293. (in Chinese)
- [5] 周太刚.工厂化智能育秧关键技术[J].农业工程技术,2023,43(33):22-23.
- [6] 鈴木鍛工株式会社.播種装置の育苗箱供給装置:昭61-58507[P].1986-03-25.
- [7] 久保田鉄工株式会社.育苗箱供給装置:昭62-87008[P].1987-04-21.
- [8] 井關農機株式会社.播種機用育苗箱自動供給装置:昭60-199304[P].1985-10-08.
- [9] 井關農機株式會社.苗箱の段積装置:200347343[P].2003-02-18.
- [10] 株式会社クボタ.育苗箱積重ね機構:2003246450[P].2003-09-02.
- [11] YANMAR.お探しのページは見つかりません[EB/OL](2015-03-01).https://www.Yanmar.com/jp/agri/implement/agriimplement/flooded_rice/feature03.html.
- [12] 李风雷.一种苗床用穴盘搬运装置:CN213862282U[P].2021-08-03.
- [13] 黄硕,张秀花.育苗穴盘储运摆放装置的设计与优化[J].农机化研究,2022,44(12):112-118.
HUANG Shuo, ZHANG Xiuhua. Design and optimization of storage and transportation placement device for seedling tray[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 112-118. (in Chinese)
- [14] 王康军,潘松,廖禹,等.自动摆盘育秧播种一体机的设计与试验[J].农机化研究,2022,44(7):100-104,111.
WANG Kangjun, PAN Song, LIAO Yu, et al. Design and test of automatic swinging seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 100-104, 111. (in Chinese)
- [15] 马旭,魏宇豪,曹秀龙,等.水稻秧盘自动码垛机设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(3):1-10.
MA Xu, WEI Yuhao, CAO Xiulong, et al. Design and experiment of an automatic rice seedling tray palletizer[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(3): 1-10. (in Chinese)
- [16] 李旭,伍硕匡,匡敏球,等.蔬菜泡沫育苗盘自动叠盘装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):122-132.
LI Xu, WU Shuoxiang, KUANG Minqiu, et al. Design and test of automatic tray stacking device for vegetable foam seedling trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 122-132. (in Chinese)
- [17] 夏旭东,王健,周乔君,等.双凸轮控制的水稻工厂化育秧有序铺盘机构设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(5):44-51.
XIA Xudong, WANG Jian, ZHOU Qiaojun, et al. Design and experiment of sequential seedling trays laying mechanism controlled by double cams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 44-51. (in Chinese)

[17] 戴飞,杨杰,赵武云,等. 双孢蘑菇工厂化生产关键配套装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (6):43 – 51.
DAI Fei, YANG Jie, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of key assorted device based on factory production of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 43 – 51. (in Chinese)

[18] JB/T 7012—2020 辊子输送机[S]. 2020.

[19] 邱卫东. 常用辊子输送机的设计与计算[J]. 机械研究与应用,2010(4):69 – 70.

[20] JB/T 7430—2010 木工带锯机 锯轮[S]. 2010.

[21] 曾百功,黎奎良,叶进,等. 工厂化上海青流水线收割装置的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022,52(11): 2756 – 2764.
ZENG Baigong, LI Kuiliang, YE Jin, et al. Design and experiment of harvesting device for industrialized production line of Shanghaiqing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52 (11): 2756 – 2764. (in Chinese)

[22] 江平,丁泽林,丁侠胜,等. 带锯床张紧装置结构设计[J]. 轻工机械,2017,35(1):82 – 85.
JIANG Ping, DING Zelin, DING Xiasheng, et al. Structural design of tensioning device in band sawing machine[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(1): 82 – 85. (in Chinese)

[23] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

[24] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业,2014,61(8):453 – 457.
YAN Shan, WANG Wei. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(8): 453 – 457. (in Chinese)

[25] 华超,褚凯梅,陈昕,等. 软体水果采摘机械手系统设计分析与试验[J]. 林业工程学报,2021,6(3):127 – 132.
HUA Chao, CHU Kaimei, CHEN Xin, et al. Design, analysis and experimental study of soft picking manipulator system for fruit harvesting[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 127 – 132. (in Chinese)

[26] 李雪冰,危银涛. 一种改进的 Yeoh 超弹性材料本构模型[J]. 工程力学,2016,33(12):38 – 43.
LI Xuebing, WEI Yintao. An improved Yeoh constitutive model for hyperelastic material[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12): 38 – 43. (in Chinese)

(上接第 80 页)

[18] 汪沛,冯达文,陈高隆,等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报,2023,54(3):41 – 48.
WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):41 – 48. (in Chinese)

[19] 周俊,许建康,王耀羲,等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):38 – 43.
ZHOU Jun, XU Jiankang, WANG Yaoxi, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):38 – 43. (in Chinese)

[20] 郑劲松. 土地平整系统算法研究[D]. 长春:长春理工大学,2004.

[21] 密雅荣. 土地平整度传感测定评价系统设计与实现[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
MI Yarong. Design and implementation of land flatness evaluation system based on laser sensor[D]. Yangling:Northwest A&F University,2013. (in Chinese)

[22] 李泽昕,王宁,刘晓亮,等. 一种新型地面平整度检测装置[J]. 自动化应用,2022(3):159 – 161.

[23] 文永双,张宇,田金元,等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):123 – 129.
WEN Yongshuang, ZHANG Yu, TIAN Jinyuan, et al. Design and experiment of detection and supply system of vegetable plug seedlings for transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):123 – 129. (in Chinese)

[24] 刘诚. 农机与农艺相结合的水稻机插秧[J]. 云南农业,2024(2):88 – 89.

[25] 陆博远. 旋转式苗床平地机工作装置设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2024.
LU Boyuan. Design and experimental study on the working device of rotary seedbed grader[D]. Daqing:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2024. (in Chinese)

[26] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C] // Proceedings of the Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3 – 19.