

气动下压式高速移栽机自动控制系统设计与试验

王超^{1,2} 李永磊^{1,2} 宋建农^{1,2} 马荣华¹ 刘彩玲^{1,2} 李方林^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对气动下压式高速移栽机有序供盘和高速取苗作业自动控制需求, 本文基于 Arduino 微控制器设计移栽机自动控制系统。该系统包括苗盘位移监测、有序供盘、高速取苗等任务模块, 以苗盘位置和苗盘位移为主要控制条件, 根据供盘速度-送盘速度、高速取苗间隔-苗盘位移等参数匹配要求确定供盘速度和取苗间隔控制方法, 建立有序供盘、高速取苗两个有限状态机, 并基于动态时间片轮询算法设计控制流程, 实现有序供盘、高速取苗作业过程自动控制。以供盘位置准确度和取苗位置准确度为指标开展控制系统运行准确性试验, 结果表明, 高速取苗时 (90 ~ 150 株/min), 供盘位置最大相对误差 1.27%, 取苗位置最大相对误差 12.85%, 第 2 ~ 6 时序取苗位置最大累积相对误差分别为 11.85%、5.63%、4.25%、1.94% 和 2.44%, 均在允许误差范围内, 满足作业要求。以供盘成功率、取投苗成功率为指标开展移栽性能试验, 试验结果表明, 高速作业时自动控制系统运行正常、性能可靠, 供盘送盘有效衔接、送盘取苗精准配合, 供盘成功率、取苗成功率为 100%, 投苗成功率不小于 94.44%, 实现了气动下压式高速移栽机有序供盘、高速取苗过程自动化作业。

关键词: 高速移栽机; 自动控制系统; 气动下压式; 有序供盘

中图分类号: S223.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0114-12

OSID:



Design and Test of Automatic Control System of Pneumatic Ejecting Type High-speed Transplanter

WANG Chao^{1,2} LI Yonglei^{1,2} SONG Jiannong^{1,2} MA Ronghua¹ LIU Cailing^{1,2} LI Fanglin^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the automatic control demands of the pneumatic ejecting type high-speed transplanter, an automatic control system for the transplanter was designed based on Arduino microcontroller. The system mainly included multi task modules of tray displacement detection, orderly tray supplying and high-speed seedling ejecting. Taking the position and displacement of the seedling tray as the main control conditions, the methods for controlling tray supplying speed and seedling ejecting interval were determined by analyzing the coordinated relationships of the tray supplying speed-tray feeding speed, and seedling ejecting interval-tray displacement. Two finite state machines were established respectively; the control flow was designed based on the dynamic time slice polling algorithm. The accuracy test of the control system was carried out to assess position accuracies, results of which showed that the maximum relative errors of tray supplying position and the seedling ejecting position were 1.27% and 12.85% respectively at high-speed (90 ~ 150 plants/min), the maximum cumulative relative errors of the 2nd to 6th seedling ejecting positions were 11.85%, 5.63%, 4.25%, 1.94% and 2.44%, respectively, which were all within the allowable error range and met the working requirements. The transplanting performance test was carried out with the indicators of the success rate of tray supplying, seedling ejecting and throwing. The test results showed that the automatic control system worked reliably at high-speed, the tray supplying and tray feeding motions were connected effectively, and the seedling ejecting sequences were synchronized with continuous tray feeding accurately, the success rate of tray supplying and the success rate of seedling ejecting were both 100%, and the success rate of seedling throwing was above 94.44%. The automatic working of the orderly tray supplying and seedling ejecting at high-speed of the pneumatic ejecting type high-speed transplanter was realized.

Key words: high-speed transplanter; automatic control system; pneumatic ejecting type; tray supplying

收稿日期: 2021-12-09 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0700302)

作者简介: 王超 (1990—), 男, 博士生, 主要从事高速移栽机研究, E-mail: cauwangchao@cau.edu.cn

通信作者: 宋建农 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械与农业装备研究, E-mail: songjin@cau.edu.cn

0 引言

目前我国蔬菜移栽机作业时仍需人工完成供盘、取投苗等操作,劳动力强度大,人工成本较高,受人工操作速度限制,作业效率低^[1-2],影响了蔬菜生产经济效益和产业快速发展^[3]。研发自动化装置代替人工完成有序供盘和高速取苗作业,可提高栽植效率、降低人工依赖^[4-7],推进蔬菜生产机械化、自动化发展^[8]。

国内外学者对供盘、取苗装置及其控制系统进行了广泛研究^[9-23]。梁高震等^[21]设计了一种穴盘苗移栽机自动送盘机构实现穴盘自动化送入取苗输送装置。HUANG等^[24]提出了两种在移栽机应用的供盘方法,但作业效率有限。意大利 Ferrari 公司移栽机采用机电技术结合的成排顶夹式取苗和两级分投苗装置,整机结构和控制系统较复杂,价格昂贵。魏新华等^[25]研制的全自动移栽机运动协调控制系统,实现了送苗、取苗和栽植动作驱动系统分离后协调同步配合,但当作业速度高于 40 株/min 时,机械手取/放苗速度跟不上栽植速度,投苗成功率明显降低。胡建平等^[26]基于可编程控制器(PLC)设计了一种整排取苗间隔投苗控制系统,但随着栽植频率从 40 株/min 增至 70 株/min,投苗失败率升高,取投苗综合成功率下降。文永双等^[27]设计了钵苗检测与缺苗补偿系统,降低投苗失败对漏栽率影响,提高了移栽作业质量,单行栽植频率达 80 株/min。

取苗作业高速化是实现高速移栽关键和前提,笔者设计了气动下压式高速取苗装置及配套组合式穴盘^[28],实现了 120 株/min 高速取苗作业。为实现有序供盘自动化作业,研发了供盘机构,在此基础上集成有序供盘、连续送盘、高速取苗、栽植镇压等作业工序,研制了气动下压式高速移栽机。

针对气动下压式高速移栽机有序供盘和高速取苗自动控制需求,本文基于 Arduino 微控制器设计该移栽机自动控制系统,以苗盘位置和苗盘位移为主要控制条件,根据协调运动参数匹配关系确定供盘速度、取苗间隔控制方法,建立有序供盘、高速取投苗两个有限状态机,基于动态时间片轮询算法设计控制流程,以期实现高速移栽机有序供盘、高速取投苗作业过程自动控制。

1 系统结构与工作原理

1.1 气动下压式高速移栽机

气动下压式高速移栽机(以下简称高速移栽机)主要由供盘机构、送盘机构、取投苗机构、栽植

机构、地轮、控制系统等组成(图 1)。其中供盘机构、送盘机构、取投苗机构是实现有序供盘、高速取投苗关键装置(图 2)。

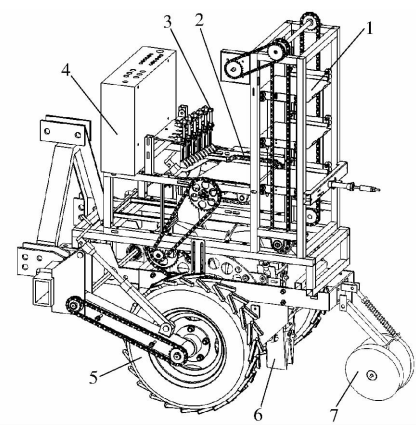


图 1 气动下压式高速移栽机结构图
Fig.1 Structure diagram of pneumatic ejecting type high-speed transplanter

1. 供盘机构 2. 送盘机构 3. 取投苗机构 4. 控制柜 5. 地轮
6. 栽植机构 7. 镇压轮

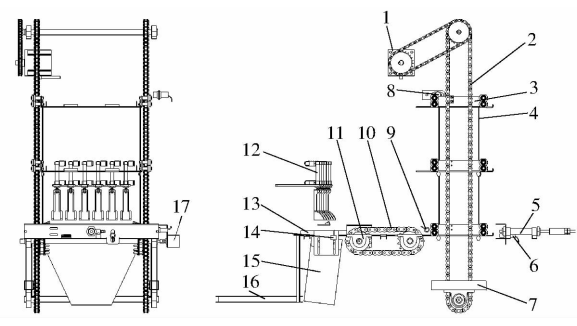


图 2 供盘、送盘与取投苗机构结构图(机架隐藏)
Fig.2 Structure diagram of devices of orderly tray supplying, tray feeding, and seedling ejecting and dropping (rack hidden)

1. 步进电机 M1 2. 供盘链 3. 托盘 4. 吊线 5. 推盘气缸 6. 供盘位置传感器 SQ3 7. 托盘堆积架 8. 托盘初始位置传感器 SQ1 9. 苗盘脱离位置传感器 SQ2 10. 送盘链 11. 送盘链轮 12. 取苗单体 13. 送盘底板 14. 第 1 取苗位置传感器 SQ4 15. 投苗斗 16. 空盘架 17. 旋转编码器 RE

供盘机构主要包括步进电机、供盘链、托盘、推盘气缸等。送盘机构主要包括送盘链轮、送盘链和送盘底板,其动力来源于地轮转动。取投苗机构主要包括安装架、6 组取苗单体和投苗斗等,取苗单体由取苗气缸和顶苗器组成,每个气缸由单独电磁阀控制。栽植机构主要包括偏心圆盘驱动机构和吊杯栽植器。控制系统包括苗盘位移监测、有序供盘、高速取苗等任务模块,供盘送盘有序衔接、送盘取苗精准配合是自动控制系统主要控制内容。控制系统采用 4 个光电接近开关传感器 SQ1~SQ4 和 1 个旋转编码器 RE 实时获取托盘位置、苗盘位置和苗盘位移等信息。

1.2 工作原理

作业前自动控制系统初始化并复位托盘至初始位置,人工将一批次(3个)无底苗盘^[28]逐个放置到托盘上,按下启动按钮,高速移栽机由动力机械牵引前进,地轮驱动栽植机构转动带动送盘链轮旋转进而实现送盘链连续运动,地轮、栽植机构、送盘机构三者同步运动。

高速移栽机按有序供盘、连续送盘、高速取投苗、栽植和镇压等作业工序完成高速移栽作业,工作流程如图3所示。有序供盘:推盘气缸伸出推送苗盘至送盘机构,当苗盘最后一穴孔即将脱离托盘时,M1驱动供盘链带动托盘下降,下一托盘及时到达供盘位置(对齐送盘底板位置)并定位保持,开始下次供盘。连续送盘:送盘链带动苗盘连续移向取苗位置。高速取投苗:苗盘某列穴孔到达第1取苗位置时,各行取苗单体针对连续运动的穴孔逐行间隔伸出,带动顶苗器下压推出穴盘苗后复位;穴盘苗在惯性和重力作用下经投苗斗导向快速下落投入栽植机构吊杯。栽植镇压:栽植机构在地轮驱动下转动完成栽植作业,镇压轮完成镇压。

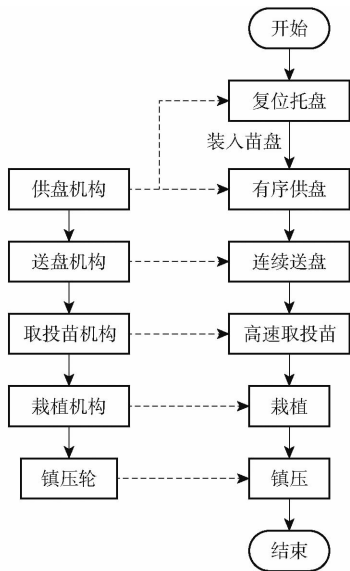


图3 高速移栽机工作流程图

Fig. 3 Working flow chart of high-speed transplanter

1.3 控制方案

控制系统结构如图4所示。控制系统以Arduino控制器为处理核心,完成信号实时检测、处理,实现作业过程自动控制。送盘链轮轴随地轮转动同步旋转,苗盘位移监测模块采用1个旋转编码器RE连接在送盘链轮轴端监测其转动,实时获取苗盘位移脉冲信息。有序供盘模块采用2个按钮(SBW、SBS)获取启停状态信息 S_{ws} ,3个光电接近开关传感器SQ1~SQ3分别获取托盘初始位置信

息 S_1 、苗盘脱离信息 S_2 和供盘位置信息 S_3 。供盘位置处苗盘和托盘触发SQ2和SQ3, S_2 、 S_3 置1,执行供盘指令:M1定位保持,推盘气缸伸出延时2s后复位,推送苗盘至送盘机构。当苗盘随送盘链前移即将脱离托盘时SQ2复位, S_2 置0,执行托盘下降指令:根据供盘速度与送盘速度协调运动关系控制器实时计算并输出脉冲,实时控制供盘速度驱动下一个托盘下降至供盘位置并定位保持,再次执行供盘指令,实现有序供盘作业。高速取苗模块采用1个微动行程开关传感器SQ4获取第1取苗位置信息 S_4 ,与旋转编码器RE实时获取的苗盘位移脉冲信息配合,根据取苗间隔-苗盘位移参数匹配关系实现各取苗单体逐行对应最佳取苗位置间隔高速取苗,最终实现有序供盘和高速取苗作业过程自动控制。适配电源模块为各电气元件供电(DC 24 V、7 V和5 V),空气压缩机经减压阀为气动部件提供高压气体(0.3 MPa)。

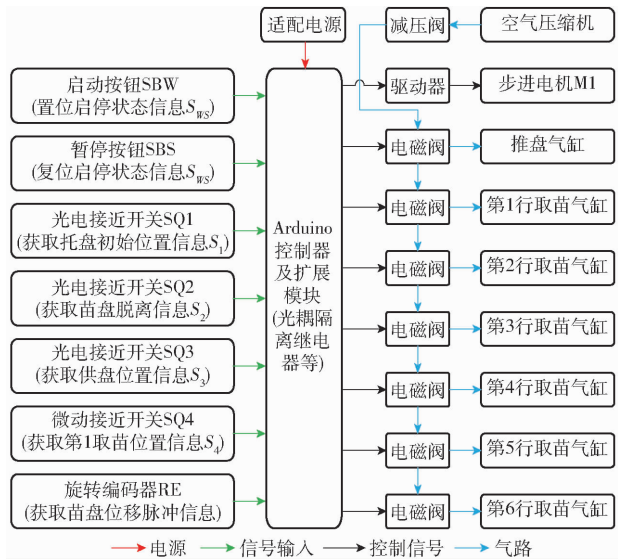


图4 控制系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of control system

控制系统综合各信息判断当前供盘和取苗作业状态,根据控制策略执行相关指令控制步进电机、推盘气缸和取苗气缸动作,控制策略如表1所示。

2 控制系统硬件设计

2.1 总体设计

Arduino Mega 2560 微控制器具有54路数字输入/输出端口,其中15个端口可以输出PWM脉冲,工作频率为16 MHz,单周期指令执行时间达到微秒级别,能够满足多任务自动控制系统搭建需求。控制系统硬件组成如图5所示。

2.2 Arduino 主控制系统

Arduino主控制系统配电原理如图6所示,SBE

表 1 有序供盘与高速取苗作业状态与控制策略

Tab.1 Working states and control strategy of orderly supply and high-speed seedling ejecting

任务模块	信息组合	作业状态	控制策略
有序供盘	$S_{WS}=1, S_1=0$	复位托盘	M1 顺时针匀速转动
	$S_{WS}=0, S_1=1$	等待装盘	M1 停止定位保持
	$S_{WS}=1, S_1=1$		M1 逆时针转动, 根据苗盘
	$S_2=0, S_3=0$	托盘下降	位移信息实时调整供盘速度
	$S_{WS}=1, S_1=1$	推送供盘	M1 停止定位保持, 推盘气缸伸出后延时 2 s 复位
	$S_2=1, S_3=1$		如果供盘未结束, 开始下一次供盘; 如果结束等待完全脱离后上升复位
	$S_{WS}=1, S_1=1$	等待脱离	
高速取苗	$S_{WS}=1, S_4=0$	等待取苗	按设定参数正常运行
	$S_{WS}=1, S_4=1$	间隔取苗	第 1 取苗单体伸出延时 0.1 s 后复位; 根据苗盘位移逐行间隔高速取苗

指急停开关,KA指中间继电器,HL 指电源指示灯,SBP 指电源按钮,OR1 ~ OR8 指光耦隔离继电器,IN1 ~ IN8 为对应光耦隔离继电器控制输入端,YV1 ~ YV6、YVT 为二位五通电磁阀,HG 为启动状态指示灯,LR 为暂停状态指示灯,MA860C 为步进电机驱动器,M1 指步进电机。电路原理如图 7 所示。控制

系统通过实时检测并处理按钮、各传感器和旋转编码器信息,根据控制策略完成步进电机 M1、推盘气缸、各取苗气缸等部件的运动控制,实现有序供盘和高速取苗作业。

3 控制系统软件设计

3.1 控制流程

为实现苗盘位移检测、有序供盘和高速取苗多任务在不同时间尺度上“并发”执行自动控制 and 建立清晰灵活程序结构^[29],本文将苗盘位移监测任务模块设置为中断任务,对有序供盘和高速取苗任务模块建立有限状态机,并按逻辑顺序排成队列,基于动态时间片轮询算法设计控制流程(图 8),减少任务进程切换次数和空闲等待时间,提高系统实时响应性能^[30]。

3.2 苗盘位移监测模块

根据旋转编码器 RE 的 B 相信号判断旋转方向,A 相脉冲下降沿触发中断,在中断任务中对 A 相脉冲累积计数实时获取苗盘位移信息,控制流程图如图 9 所示。

3.3 有序供盘任务模块

3.3.1 供盘速度控制方法

为实现有序供盘与连续送盘衔接,根据供盘速

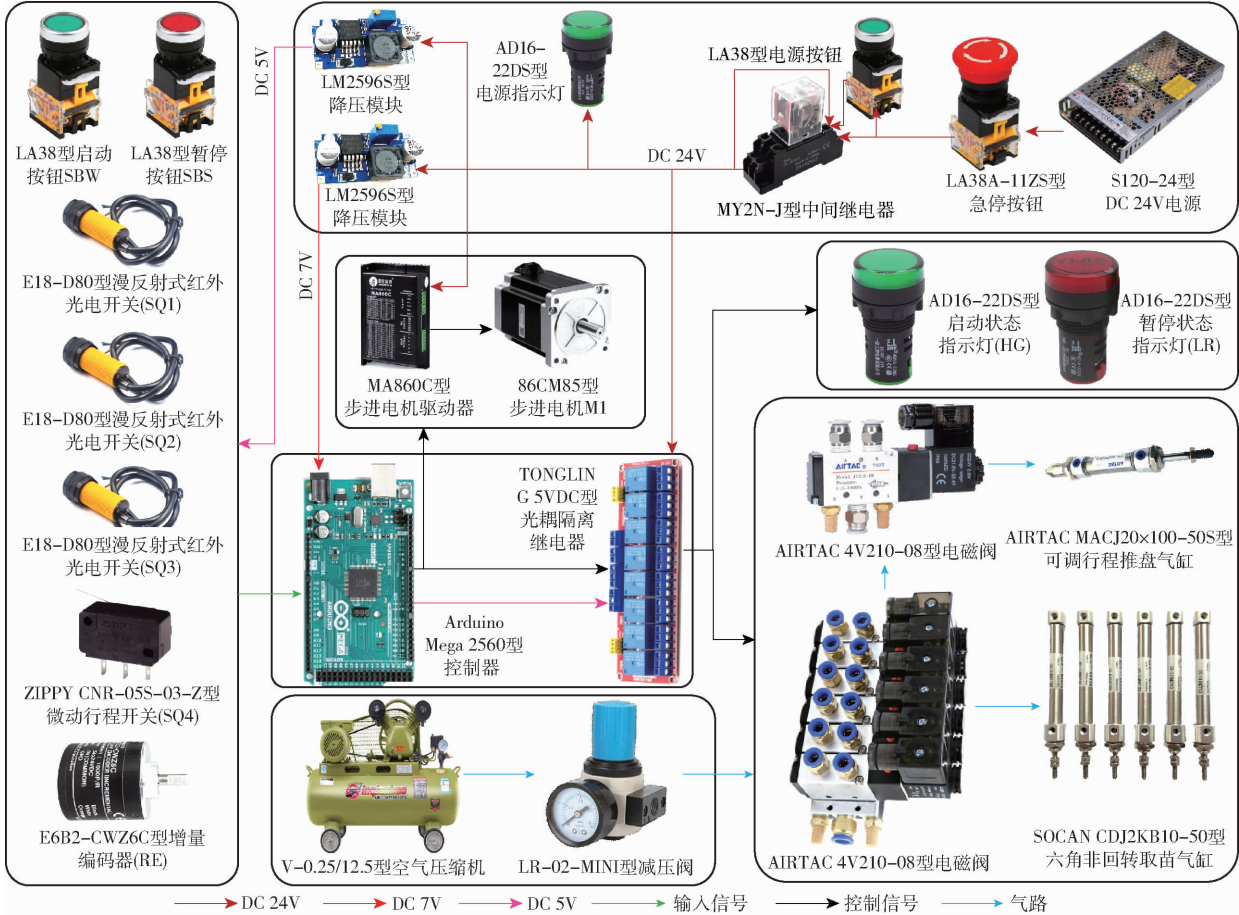


图 5 控制系统硬件组成

Fig. 5 Hardware composition of control system

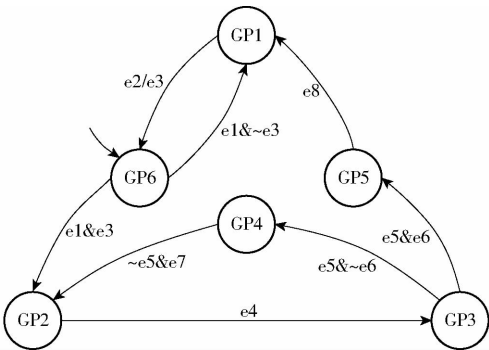


图 11 有序供盘任务模块有限状态机状态迁移图
Fig. 11 State transition diagram of FSM model of orderly tray supplying task module

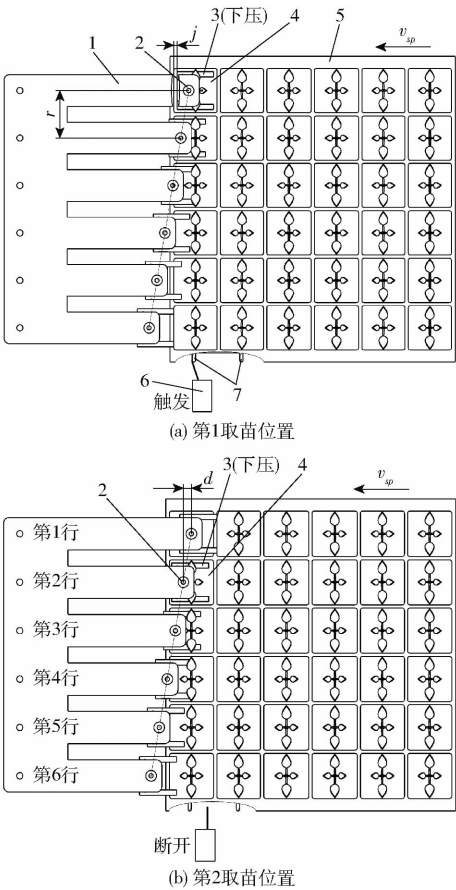


图 12 高速取苗原理图
Fig. 12 Schematics of high-speed seedling ejecting sequence mechanism

1. 安装板 2. 当前作业取苗单体取苗气缸 3. 当前作业取苗单体顶苗器 4. 当前作业被下压推出穴盘 5. 无底穴盘 6. 第 1 取苗位置传感器 SQ₄ 7. 穴盘侧筋

机。从第 1 取苗位置开始，苗盘位移等于相邻行取苗位置纵向间距时对应脉冲设定值 N_{pul} 计算式为

$$N_{pul} = \frac{dR_{RE}}{\pi D_{sp}} \quad (5)$$

式中 d ——相邻行取苗位置纵向间距，取 7.5 mm

每到达一个取苗位置，控制系统重新判断苗盘位移对应脉冲增量是否超过该设定值，以获取下一

行取苗位置到达和取苗单体作业时机，控制取苗间隔随送盘速度变化而变化，以适应不同的移栽机前进速度。图 12 中 j 为当前取苗位置顶苗器后端与穴孔内壁间距，理论值 (3 ± 2) mm； r 为相邻取苗位置横向间距，45 mm。

3.4.2 高速取苗任务模块有限状态机

采用 1 个微动行程开关 SQ4 获取各列穴孔第 1 取苗位置，以旋转编码器 RE 实时获取苗盘位移脉冲，通过二者配合完成各取苗单体逐行在最佳取苗位置间隔取苗，实现取苗间隔随送盘速度变化而变化，适应不同移栽机前进速度下高速取苗作业，控制流程如图 13 所示。 N_{qm} 记录当前取苗位置瞬时旋转编码器 RE 脉冲计数值 p ， n_{qm} 为取苗单体行序数。

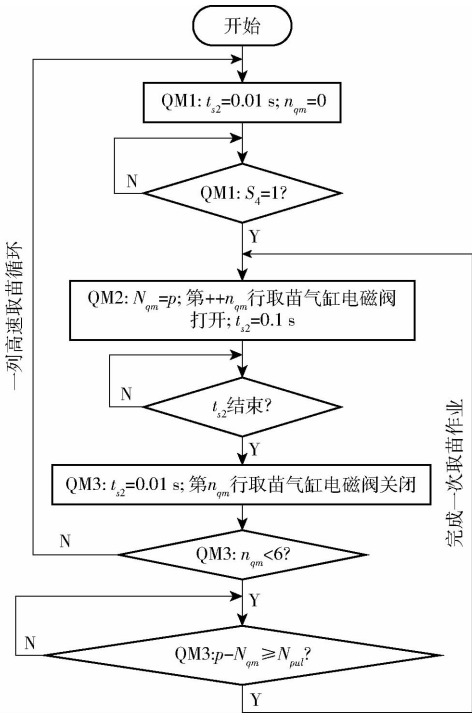


图 13 高速取苗任务模块控制流程图
Fig. 13 Control flow chart of high-speed seedling ejecting task

该任务 3 个作业状态及对应子任务如表 4 所示。表 5 给出了该任务控制过程中的事件，建立高速取苗任务模块有限状态机状态迁移图(图 14)。

4 控制系统准确性试验

为了在送盘速度均匀稳定情况下开展控制准确性试验，断开栽植机构与送盘机构之间链传动，由送盘步进电机(86CM45)驱动送盘链轮轴，如图 15 所示，在供盘机构上横架安装激光传感器(TM60 型，精度 1 mm)，测量托盘 3(最上层托盘)从上一个定位保持位置运动到供盘位置位移。用高速摄像机(Phantom V9.1 型)拍摄 6 个时序取苗位置，之后在 PCC 软件内使用“Measurement”功能测量从第 1 时

表 4 高速取苗任务模块状态及对应子任务

Tab. 4 Sates and corresponding sub-tasks of high-speed seedling ejecting task module

状态编号	状态名称	对应子任务
QM1	空闲	$n_{qm} = 0; t_{s2} = 0.01\text{ s}$
QM2	取苗气缸下压	$N_{qm} = p; YV(+ + n_{qm})$ 打开; $t_{s2} = 0.1\text{ s}$
QM3	取苗气缸缩回等待	YVn_{qm} 关闭等待下一行取苗; $t_{s2} = 0.01\text{ s}$

表 5 高速取苗任务模块有限状态机中事件

Tab. 5 Events in FSM model of high-speed seedling ejecting task module

事件编号	事件描述或相关标志位变化	信号来源
e9	置位第 1 取苗位置信息 S_4	SQ4 触发
e10	第 n_{qm} 行取苗气缸伸出延时结束	时间片 t_{s2} 结束
e11	一行高速取苗循环完成	$n_{qm} \geq 6$
e12	一次高速取苗间隔完成	$p - N_{qm} \geq N_{pul}$

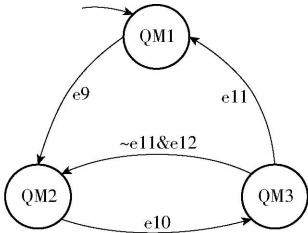


图 14 高速取苗任务模块有限状态机状态迁移图

Fig. 14 State transition diagram of FSM model of high-speed seedling ejecting task

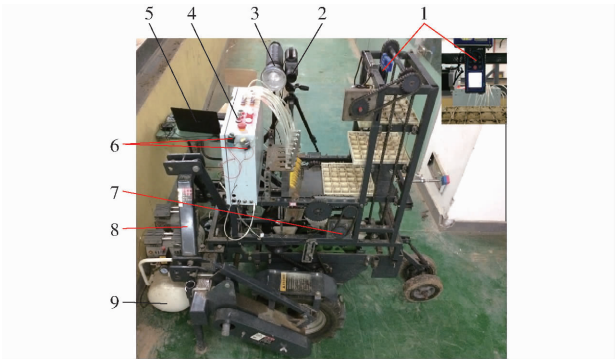


图 15 供盘及取苗位置准确性试验

Fig. 15 Accuracy test of tray supplying and seedling ejecting positions

1. 激光传感器 2. 高速摄像机 3. 补光灯 4. 控制系统柜 5. 计算机 6. 送盘电机启停按钮 7. 送盘电机 8. 高速移栽机 9. 空压机

序到第 2~6 时序取苗位置位移。以取苗频率为试验因素,取 90、120、150 株/min 3 个水平,设置对应送盘步进电机转速,评价其对供盘位置和取苗位置控制准确性的影响,允许相对误差和相对误差计算式为

$$[E] = \frac{[e]}{x_0} \times 100\%$$

(6)

$$E = \frac{|x - x_0|}{x_0} \times 100\%$$

(7)

式中 $[E]$ ——允许相对误差, %
 $[e]$ ——允许误差, mm
 x ——测量位移, mm
 x_0 ——理论位移, mm
 E ——相对误差, %

4.1 供盘位置控制准确性试验

如图 16 所示,供盘位置上、下极限允许误差 $[e_{gp}]$ 为 3 mm,单次供盘理论位移等于托盘间距 H_{ij} ,由式(6)计算供盘位置允许相对误差为 1.43%。采用激光位移传感器,测量托盘从上一个定位保持位置运动到供盘位置位移,根据式(7)计算相对误差。每个取苗频率每批有序供盘试验重复 3 次,试验结果如表 6 所示。供盘位置相对误差最大 1.27%,满足供盘位置控制准确性要求。

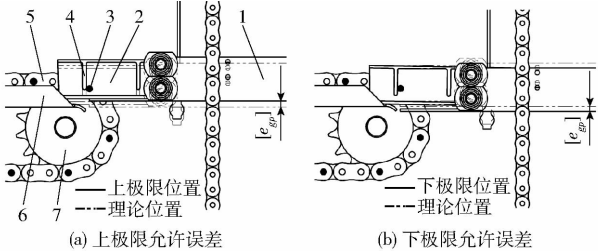


图 16 供盘位置允许误差示意图

Fig. 16 Schematics of the allowable error of tray supplying position

1. 托盘 2. 无底穴盘 3. 拨杆 4. 穴盘侧筋 5. 送盘链 6. 送盘底板 7. 送盘从动链轮

表 6 供盘位置相对误差

Tab. 6 Relative error of tray supplying position of each pallet

取苗频率/(株·min ⁻¹)	托盘 1/%	托盘 2/%	托盘 3/%	平均值/%
90	1.27	0.63	0.63	0.85
120	0.95	0.79	0.79	0.85
150	0.79	0.79	0.63	0.74

4.2 取苗位置控制准确性试验

如图 17 所示,取苗位置前、后极限允许误差 $[e_{qm}]$ 为 2 mm,第 1 时序至第 2 时序取苗位置苗盘理论位移为相邻行取苗位置纵向间距 d ,至第 3 时序取苗位置苗盘理论位移为 $2d$,以此类推,至第 6 时序取苗位置苗盘理论位移为 $5d$,由式(6)计算各时序取苗位置允许相对误差为 26.66%,第 2~6 时序取苗位置累积允许相对误差分别为 26.66%、13.33%、8.89%、6.67% 和 5.33%。采用高速摄像拍摄高速取苗作业过程,在 PCC 软件中测量相邻时序取苗位置苗盘位移,根据式(7)计算相对误差。每个取苗频率高速取苗试验重复 3 次,试验结果如

表 7 所示,取苗位置相对误差最大为 12.85%,第 2~6 时序取苗位置最大累积相对误差分别为 11.85%、5.63%、4.25%、1.94% 和 2.44% (表 8),满足取苗位置控制准确性要求。

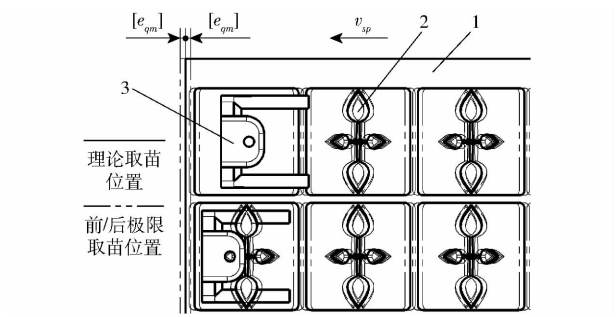


图 17 取苗位置允许误差示意图
Fig.17 Schematic of allowable error of seedling ejecting position

1. 无底穴盘 2. 穴盘苗 3. 顶苗器

表 7 各时序取苗位置相对误差

Tab.7 Relative errors of each seedling ejecting position							
取苗频率/ (株·min ⁻¹)	时序 1/ %	时序 2/ %	时序 3/ %	时序 4/ %	时序 5/ %	时序 6/ %	平均 值/%
90	3.84	6.14	2.47	0.39	6.62	4.02	3.91
120	5.32	4.71	2.48	2.44	12.85	4.48	5.38
150	5.30	6.55	4.34	2.26	8.89	5.66	5.50

表 8 第 2~6 时序取苗位置累积相对误差

Tab.8 Cumulative relative errors of 2nd to 6th seedling ejecting position					
取苗频率/ (株·min ⁻¹)	时序 2/%	时序 3/%	时序 4/%	时序 5/%	时序 6/%
90	9.98	3.02	1.89	1.02	1.41
120	10.03	3.77	1.94	1.94	2.44
150	11.85	5.63	4.25	1.36	1.90

5 高速移栽机性能试验

5.1 试验条件

为了综合考察高速移栽机在自动控制系统作用下有序供盘、高速取苗作业效果,在中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室土槽开展综合性能试验。试验前土槽经过旋耕作业处理,表面平整无杂物。试验材料为“国福 419”辣椒苗,采用有机营养育苗基质培育,泥炭、珍珠岩和蛭石体积配比为 3:1:1,苗龄 45 d,苗高为(141±11) mm,展宽为(110±12) mm,真叶数为(9±1) 叶,如图 18 所示,基质含水率为 63.37%~75.63%。

5.2 试验方案

根据有序供盘高速取苗作业动作流程,将供盘成功率 Y_1 、取苗成功率 Y_2 、投苗成功率 Y_3 和综合成功率 Y_4 作为评价指标,计算式为



图 18 试验用苗盘
Fig.18 Bottomless tray with pepper seedlings for test

$$Y_1 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \tag{8}$$

$$Y_2 = \frac{N_4}{N_3} \times 100\% \tag{9}$$

$$Y_3 = \frac{N_5}{N_4} \times 100\% \tag{10}$$

$$Y_4 = Y_1 Y_2 Y_3 \tag{11}$$

式中 N_1 ——供盘次数,次
 N_2 ——供盘成功次数,次
 N_3 ——单次试验钵苗株数,株
 N_4 ——取苗成功株数,株
 N_5 ——投苗入杯成功株数,株

高速移栽机如图 19 所示,托盘复位到初始位置后,选取 3 个苗盘依次放入供盘机构托盘。按下启动按钮,对应 3 种不同取苗频率(90、120、150 株/min)设定土槽车牵引速度(1.62、2.16、2.70 km/h)牵引高速移栽机前进。因土槽有效测试长度限制,连续取完一盘苗为一次试验,每次试验重复 3 次,共计 108 株穴盘苗。

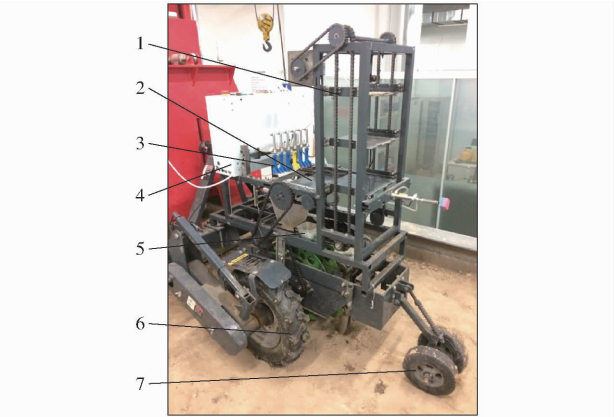


图 19 高速移栽机

Fig.19 High-speed transplanter

1. 供盘机构 2. 送盘机构 3. 取投苗机构 4. 控制柜 5. 栽植机构 6. 地轮 7. 镇压轮

5.3 试验结果与分析

当取苗频率为 90 株/min 时移栽作业效果如图 20 所示,试验结果如表 9 所示。由表 9 可知,随着栽植频率从 90 株/min 增至 150 株/min,综合成功率从 98.15% 降至 95.37%。主要影响因素是投苗成功率随着栽植频率提高而下降,其原因是吊杯运



图 20 取苗频率 90 株/min 时移栽作业效果

Fig. 20 Transplanting effect at 90 plants/min

1. 土槽牵引台车 2. 高速移栽机 3. 穴盘苗

表 9 有序供盘和高速取苗时序综合性能试验结果

Tab. 9 Results of performance test of high-speed transplanter at different frequencies of ejecting seedlings

取苗频率/ (株·min ⁻¹)	试验 序号	供盘成功 率 Y ₁ /%	取苗成功 率 Y ₂ /%	投苗成功 率 Y ₃ /%	综合成功 率 Y ₄ /%
90	1	100	100	100	100
	2	100	100	97.22	97.22
	3	100	100	97.22	97.22
	平均值	100	100	98.15	98.15
120	1	100	100	97.22	97.22
	2	100	100	97.22	97.22
	3	100	100	97.22	97.22
	平均值	100	100	97.22	97.22
150	1	100	100	94.44	94.44
	2	100	100	94.44	94.44
	3	100	100	97.22	97.22
	平均值	100	100	95.37	95.37

动速度越来越快,完成单次投苗入杯时间越来越短,投苗速度、时机、轨迹不变的情况下,投苗运动和吊

杯运动协调关系发生变化,造成高速运动吊杯经过投苗斗下方时,部分穴盘苗未投入苗杯导致投苗失败。

6 结论

(1)提出了融合多有限状态机和中断任务的动态时间片轮询算法控制流程,基于 Arduino 设计了高速移栽机自动控制系统,包括苗盘位移监测、有序供盘、高速取苗等任务模块。

(2)自动控制系统以苗盘位置和苗盘位移为主要控制条件,根据供盘速度-送盘速度、取苗间隔-苗盘位移协调运动关系确定供盘速度和取苗间隔控制方法,建立有序供盘、高速取苗两个有限状态机,实现步进电机供盘、推盘气缸推盘和取苗气缸取苗动作同步协调控制,实现供盘送盘有序衔接,送盘取苗精准配合。

(3)以供盘位置准确度和取苗位置准确度为指标开展控制系统运行准确性试验,结果表明高速取苗时(90~150 株/min),供盘位置最大相对误差 1.27%,取苗位置最大相对误差 12.85%,第 2~6 时序取苗位置最大累积相对误差分别为 11.85%、5.63%、4.25%、1.94% 和 2.44%,均在允许误差范围内,满足作业要求。

(4)采用 45 d 苗龄的无底穴盘辣椒苗为试验对象,在不同栽植频率下进行有序供盘和高速取苗性能试验,结果表明:该控制系统运行正常,实现了有序供盘和高速取苗作业过程自动控制,当栽植频率为 90~150 株/min 时,供盘成功率、取苗成功率为 100%,投苗成功率不小于 94.44%,随着栽植频率增大综合成功率从 98.15% 降至 95.37%,满足高速移栽机作业性能要求。

参 考 文 献

[1] 赵匀,刘星,薛向磊,等. 茄子钵苗全自动移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):152-160.
ZHAO Yun, LIU Xing, XUE Xianglei, et al. Optimal design and experiment of fully-automated potted eggplant seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):152-160. (in Chinese)

[2] 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 mechanical transplanting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3):85-92. (in Chinese)

[3] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014,45(8):44-53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44-53. (in Chinese)

[4] 薛亮,张真和,柴立平,等. 关于“十四五”期间我国蔬菜产业发展的若干问题[J]. 中国蔬菜,2021(4):5-11.
XUE Liang, ZHANG Zhenhe, CHAI Liping, et al. Several issues concerning the development of China vegetable industry during the “14th Five-Year Plan”[J]. China Vegetables, 2021(4): 5-11. (in Chinese)

[5] TIAN Subo, QIU Lichun, KONDO N, et al. Development of automatic transplanter for plug seedling[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010,43(26): 79-82.

[6] 吴传云,冯健,高庆生,等. 我国市场主流蔬菜移栽机型作业效果综合评判[J]. 中国蔬菜, 2021(1): 11-14.

- WU Chuanyun, FENG Jian, GAO Qingsheng, et al. Comprehensive evaluation of the operational effect of mainstream vegetable transplanting machines in the Chinese market[J]. *China Vegetables*, 2021(1): 11–14. (in Chinese)
- [7] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 1–18.
- LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 1–18. (in Chinese)
- [8] 陈永生,刘先才,韩柏和,等. 2020 年中国蔬菜生产机械化发展报告[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(6): 1–9, 34.
- CHEN Yongsheng, LIU Xiancai, HAN Baihe, et al. Development report of China vegetable production mechanization in 2020[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(6): 1–9, 34. (in Chinese)
- [9] RAHUL K, RAHEMAN H, PARADKAR V. Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019: 166105014.
- [10] JIN Xin, ZHAO Kaixuan, JI Jiangtao, et al. Design and implementation of intelligent transplanting system based on photoelectric sensor and PLC[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018,88: 127–139.
- [11] YANG Qizhi, HUANG Guanlong, SHI Xinyi, et al. Design of a control system for a mini-automatic transplanting machine of plug seedling[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020: 169105226.
- [12] WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, TIAN Jinyuan, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021: 182106017.
- [13] YANG Qizhi, XU Li, SHI Xinyi, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 147:131–145.
- [14] HAN Lühua, MAO Hanping, KUMI F, et al. Development of a multi-task robotic transplanting workcell for greenhouse seedlings[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2018,34(2): 335–342.
- [15] 崔巍,赵亮,刘立晶,等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 79–84, 98.
- CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2): 79–84, 98. (in Chinese)
- [16] 那明君,滕乐,周振响,等. 全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 54–61.
- NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Zhenxiang, et al. Design and experiment of fully automatic slide-track type dryland pot seedling transplanting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(9): 54–61. (in Chinese)
- [17] 童俊华,俞高红,朱赢鹏,等. 三臂回转式蔬菜钵苗取苗机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 113–121.
- TONG Junhua, YU Gaohong, ZHU Yingpeng, et al. Design and experiment of three-arms rotary vegetable plug seedling pick-up mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 113–121. (in Chinese)
- [18] 尹大庆,王佳照,周脉乐,等. 探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 64–71.
- YIN Daqing, WANG Jiazhao, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of vegetable potted seedlings pick-up mechanism for exploring and picking-pushing plugs[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 64–71. (in Chinese)
- [19] 叶秉良,唐涛,俞高红,等. 添加配重的蔬菜移栽机旋转式取苗机构动力学分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 117–122.
- YE Bingliang, TANG Tao, YU Gaohong, et al. Dynamic analysis of rotary seedling pick-up mechanism of vegetable transplanting machine with counterweight[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 117–122. (in Chinese)
- [20] 马振,胡斌,李俊虹. 移栽机自动送盘装置的关键部件及送盘方法的设计分析[J]. *农机化研究*, 2017,39(1): 68–71.
- MA Zhen, HU Bin, LI Junhong. Design and analysis of key components of the automatic feeding device for seedling transplanting machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(1): 68–71. (in Chinese)
- [21] 梁高震,黄勇,胡斌,等. 移栽机自动送盘机构性能的试验研究[J]. *农机化研究*, 2018, 40(10): 145–148, 153.
- LIANG Gaozhen, HUANG Yong, HU Bin, et al. Experimental study on the performance of the automatic sending mechanism of transplanter[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(10): 145–148, 153. (in Chinese)
- [22] 袁挺,王栋,文永双,等. 蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 80–87.
- YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of seedlings unloading mechanism based on methods of air-blowing and vibration for vegetable transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 80–87. (in Chinese)
- [23] 韩豹,申大帅,郭畅,等. 可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器的设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 111–120.
- HAN Bao, SHEN Dashuai, GUO Chang, et al. Design and experiment of adjustable end-effector of cabbage seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 111–120. (in Chinese)
- [24] HUANG B K, SPLINTER W E. Development of an automatic transplanter[J]. *Transactions of the ASAE*, 1968, 11(2): 191–194, 197.
- [25] 魏新华,包盛,刘晓凯,等. 穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J]. *农业机械学报*, 2016,

- 47(12): 1-7, 52.
- WEI Xinhua, BAO Sheng, LIU Xiaokai, et al. Design and experiment on potted-seedling automatic transplanter control system for motion coordinating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 1-7, 52. (in Chinese)
- [26] 胡建平, 常航, 杨丽红, 等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.
- HU Jianping, CHANG Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 78-84. (in Chinese)
- [27] 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及试验[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)
- [28] 王超, 刘彩玲, 李永磊, 等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 35-43, 51.
- WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 35-43, 51. (in Chinese)
- [29] 白晓平, 王卓, 胡静涛. 基于有限状态机的农机导航多任务调度研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 26-31.
- BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao. Multi-task scheduling research of farm machinery navigation system based on the FSM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 26-31. (in Chinese)
- [30] 赵丽敏, 郑文艳, 王文博. 轮转调度算法中动态时间片的 CPN 实现[J]. 软件, 2020, 41(8): 129-131.
- ZHAO Limin, ZHENG Wenyan, WANG Wenbo. The CPN implementation of dynamic time slice in round robin scheduling algorithm[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(8): 129-131. (in Chinese)
-

(上接第 113 页)

- [17] 范沿沿, 张秀丽, 李建华. 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 Yanyan, ZHANG Xiuli, LI Jianhua. Design and test of tobacco cellar-type transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 40-46. (in Chinese)
- [18] 张大斌, 张元常, 张云飞, 等. 间歇移动烟苗移栽机成穴机构设计与运动特性分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(3): 106-112.
- ZHANG Dabin, ZHANG Yuanchang, ZHANG Yunfei, et al. Design and locomotion characteristics analysis of cavitation mechanism of intermittent mobile tobacco seedlings transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 106-112. (in Chinese)
- [19] 何敬良, 吴序堂, 李建刚. 变形椭圆齿轮连杆机构的运动特性及齿轮副设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 62-65.
- HE Jingliang, WU Xutang, LI Jian'gang. Kinematic characteristics and gear pair design for deformed elliptical geared linkage elliptical geared linkage mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 62-65. (in Chinese)
- [20] 陈建能, 王英, 黄前泽, 等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52-57.
- CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 52-57. (in Chinese)
- [21] 喻丽华, 胡长寿, 徐志波, 等. 面向大窝移栽的螺旋成穴装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 198-202.
- YU Lihua, HU Changshou, XU Zhibo, et al. Design and test of spiral cavitation device for transplanting in large den[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 198-202. (in Chinese)
- [22] 刘光辉, 喻丽华, 陈雪, 等. 背负式大窝深栽成穴机设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 263-267.
- [23] 全伟, 吴明亮, 罗海峰, 等. 油菜钵苗移栽机成穴作业方式及参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 13-21, 327.
- QUAN Wei, WU Mingliang, LUO Haifeng, et al. Soil hole opening methods and parameters optimization of pot seedling transplanting machine for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 13-21, 327. (in Chinese)
- [24] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124-136.
- WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124-136. (in Chinese)
- [25] WANG Xuezhen, LI Peng, HE Jinpu, et al. Discrete element simulations and experiments of soil-winged subsoiler interaction[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(1): 50-62.