

基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验

武广伟¹ 安晓飞¹ 颜丙新¹ 李立伟¹ 何宇凡² 孟志军¹

(1. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 甘薯种植多以裸苗移栽为主,对机械化移栽要求较高。针对国内甘薯移栽设备自动化程度低,作业时需要人工喂苗导致劳动强度大、机械化栽植质量不高的问题,结合甘薯裸苗栽植农艺要求,基于预处理苗带喂苗装置和挠性圆盘栽植装置设计了一种甘薯裸苗自动移栽机,结合甘薯裸苗移栽机喂苗装置、挠性圆盘栽植装置和浇水装置自动作业控制需要,设计了基于 CAN 总线的甘薯裸苗自动移栽机控制系统,能够一次性完成旋耕、起垄、开沟、自动有序喂苗、定株距栽植、镇压覆土、自动浇水、修垄等作业。田间试验表明,机具在目标株距 25 cm 以及作业速度 0.25、0.35、0.45 m/s 的情况下,栽植株距变异系数和栽植深度合格率均达到了标准要求,栽植株距变异系数和栽植姿态合格率受作业速度影响较大,栽植深度受作业速度变化影响较小,在作业速度为 0.25 m/s 时,栽植株距变异系数平均值为 10.16%,栽植深度合格率平均值为 95.56%,作业性能优于 0.35 m/s 和 0.45 m/s,栽植姿态合格率平均值为 90%。本研究为甘薯裸苗机械化、自动化移栽机械的理论研究和设计提供了新的参考。

关键词: 移栽机械; 甘薯; 裸苗; 自动喂苗; 苗带

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0099-11

Design and Experiment of Automatic Transplanter for Sweet Potato Naked Seedlings Based on Pretreatment Seedling Belt

WU Guangwei¹ AN Xiaofei¹ YAN Bingxin¹ LI Liwei¹ HE Yufan² MENG Zhijun¹

(1. *Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China*
2. *School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

Abstract: Naked seedling transplanting is the main planting method of sweet potato in China, which requires high mechanized transplanting. At present, the domestic sweet potato transplanting machinery is relatively lacking, the existing equipment has a low degree of automation, and most of them adopt manual seedling feeding, which leads to high labor intensity in the field and low quality of mechanized planting. Combined with the agronomic requirements of planting naked sweet potato seedling, an automatic transplanter for naked sweet potato seedlings was designed based on the pretreatment seedling belt feeding device and the flexible disc planting device. According to the requirement of automatic operation control of feeding device, flexible disc planting device and watering device of sweet potato bare seedling transplanter, a control system of sweet potato bare seedling automatic transplanter based on CAN bus was designed, which can complete rotary tillage, ridging, ditching, automatic and orderly seedling feeding, planting at fixed plant distance, pressing soil covering, automatic watering, ridge repairing and other operations at one time. Field experiments showed that when the distance of target plant spacing was 25 cm and the working speed was 0.25 m/s, 0.35 m/s and 0.45 m/s, the coefficient of variation of planting plant spacing and the qualified rate of planting depth all met the standard requirements, the variation coefficient of plant spacing and the qualified rate of planting posture were affected by the working speed greatly, but the planting depth was less affected by the working speed. When the working speed was 0.25 m/s, the working performance index was better than 0.35 m/s and 0.45 m/s. The average variation coefficient of plant spacing was 10.16%, the average qualified rate of planting depth was 95.56%, and the average qualified rate of planting posture was 90%. The research result can provide a reference for

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022CXGC010608)和北京市农林科学院科技创新能力建设项目(KJXC20200415)

作者简介: 武广伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事精准农业智能装备技术研究,E-mail: wugw@nercita.org.cn

通信作者: 孟志军(1975—),男,研究员,博士,主要从事精准农业智能装备技术研究,E-mail: mengzj@nercita.org.cn

the theoretical research and innovative design of mechanized and automatic transplanting machinery for naked sweet potato seedlings.

Key words: transplanting machinery; sweet potato; naked seedlings; automatic seedling feeding; seedling belt

0 引言

甘薯,别名红薯、地瓜、红苕,是我国重要的粮食作物、淀粉工业原料、新型能源用原料和优质的保健食品^[1]。移栽是甘薯生产中非常重要的作业环节,移栽质量对收获期切蔓、收获等有着重要影响^[2-3]。目前国内甘薯移栽以高剪苗(或拔苗)等裸苗移栽为主,栽植方法有斜栽法、水平栽法、直栽法、船底形栽法等方法。甘薯裸苗对栽植入土姿态要求较高,对机械化移栽提出了更高的要求^[4-5]。

欧美和日本等发达国家在甘薯移栽机械研究应用方面起步较早^[6-7]。欧美国家主要以适用于大规模农场的半自动移栽机为主,如美国玛驰尼克公司生产的大马力拖拉机牵引的半自动链夹式甘薯裸苗栽植机和意大利 FERRARI F-MAX 型移栽机一次可完成十几垄栽插^[1]。日本以自走带夹式移栽机、牵引式乘坐型人工栽插机等小型化机械为主,主要有日本井关农机株式会社研制的 PVH103 型自走带夹式甘薯栽植机^[5]。近年来,随着我国甘薯产业的发展,对甘薯移栽机械的需求逐渐增多,农业农村部南京农业机械化研究所研制了 2ZFG-2 型甘薯移栽复式作业机,能够一次进垄完成两垄甘薯的旋耕、起垄、移栽作业^[1];南通富来威农业装备有限公司与国家甘薯产业技术体系联合研制了 2CGF 型甘薯复式移栽机和 2ZL-2 型甘薯移栽机,能够实现半自动栽插作业;江苏海洋大学与连云港元帝科技有限公司研制了一种甘薯盘夹式半自动移栽机,能够完成倾斜栽植^[8];青岛农业大学与山东火绒农业科技发展有限公司联合研制了一种多功能甘薯移栽机,能够完成旋耕起垄、施肥、覆膜、裸苗输送、栽插和浇水多个环节作业过程^[9];朱斌彬^[10]设计了由地轮提供动力的带夹式甘薯裸苗移栽机,可以实现膜上栽插。由于甘薯裸苗分苗困难,国内外现有甘薯移栽机械多采用人工分苗、摆苗和喂苗,以半自动移栽机为主^[11-13]。

本文针对现有甘薯移栽设备自动化程度低,作业时需要人工喂苗导致劳动强度大、机械化栽插质量不高的问题,结合甘薯裸苗栽植农艺要求,提出一种基于预处理苗带的自动喂苗方法,基于预处理苗带喂苗装置和挠性圆盘栽植装置设计一种甘薯裸苗自动移栽机,并进行田间试验研究,以期甘薯裸苗

机械化、自动化移栽机械的理论研究和创新设计提供新的参考。

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构

移栽机通过三点悬挂的方式与拖拉机挂接,主要由移栽机控制终端、旋耕起垄装置、浇水装置、自动喂苗装置、挠性圆盘栽植装置、起垄侧翼犁、垄型镇压辊、覆土镇压轮、开沟器等部分组成。主要工作部件及结构如图 1 所示。

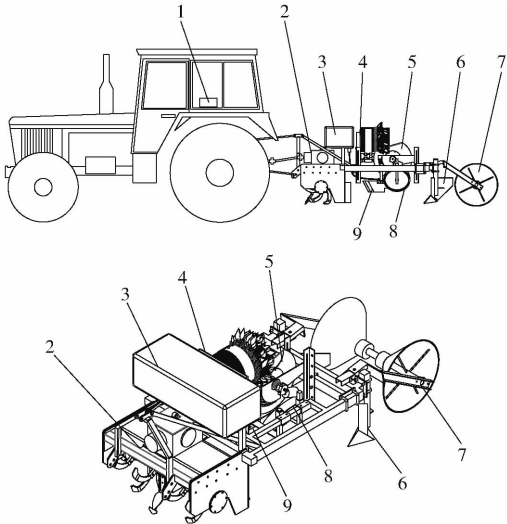


图 1 基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机结构简图
Fig.1 Diagram of automatic transplanting machine for naked seedlings of sweet potato based on pretreatment seedling belt

1. 移栽机控制终端 2. 旋耕起垄装置 3. 浇水装置 4. 自动喂苗装置 5. 挠性圆盘栽植装置 6. 起垄侧翼犁 7. 垄型镇压辊 8. 覆土镇压轮 9. 开沟器

自动喂苗装置和挠性圆盘栽植装置是核心工作部件。自动喂苗装置主要由喂苗苗带、喂苗电机、喂苗装置支架、导向装置、卷苗带轮、链轮、链条等组成。挠性圆盘栽植装置主要由挠性圆盘、栽植电机、栽植装置支架、压轮压板等组成。主要工作部件如图 2 所示。

1.2 工作原理

甘薯裸苗具有细长弯曲、枝叶交织的特点,目前已有的甘薯裸苗移栽机械均需要人工跟随机具一同前进实时进行分苗喂苗工作^[1]。这种喂苗方式效率低,且劳动强度大,长时间工作情况下容易造成漏苗现象。本文结合已有的输送带式喂苗方式,提出

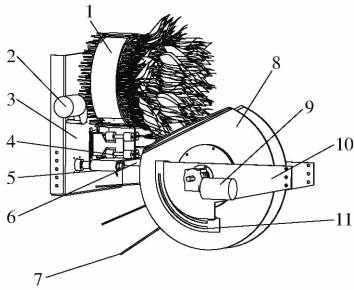


图2 自动喂苗装置和挠性圆盘栽植装置结构简图

Fig.2 Structure diagram of automatic seedling feeding device and flexible disc planting device

1. 喂苗苗带 2. 喂苗电机 3. 喂苗装置支架 4. 导向装置 5. 卷苗带轮 I 6. 卷苗带轮 II 7. 甘薯裸苗 8. 挠性圆盘 9. 栽植电机 10. 栽植装置支架 11. 压轮压板

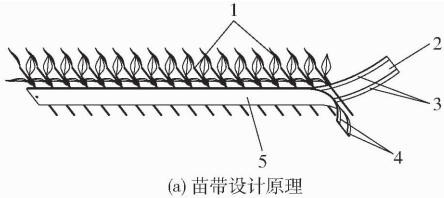
表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

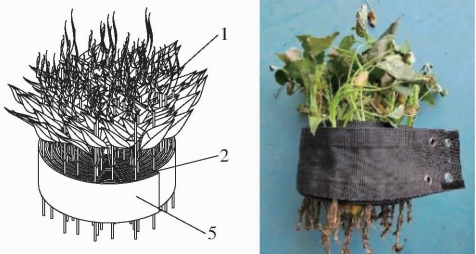
参数	数值
外形尺寸/(mm×mm×mm)	2 700×1 000×1 000
作业幅宽/mm	900
作业行数	1
起垄高度/mm	280
垄顶宽度/mm	300
垄底宽度/mm	800
栽植株距/mm	200~300
单卷苗带最大种植株数	200
水箱容量/L	320

了一种利用预处理苗带实现自动持续喂苗的方法。喂苗苗带如图 3 所示,预处理苗带由 2 条带有粘连层的尼龙带组成,甘薯裸苗等间距排列于苗带之间,利用粘连层粘合特性固定甘薯裸苗^[14]。固定甘薯裸苗的苗带可以卷起来形成苗带卷,移栽作业过程中,当一卷苗带上的甘薯裸苗完成移栽后,可以通过更换苗带的方式实现喂苗装置持续作业。

该机能够一次性完成旋耕、起垄、开沟、自动喂苗、栽植、镇压覆土、自动浇水、修垄等作业。移栽机作业前,利用苗带将甘薯裸苗固定并卷起形成苗带卷,将苗带卷安装在自动喂苗装置上。通过拖拉机上的移栽机控制终端设置栽植株距,拖拉机通过三点悬挂装置牵引机具前进,同时动力输出轴通过万向节联轴器向旋耕机传递动力,带动旋耕刀进行旋耕作业,前进过程中起垄装置完成起垄作业。移栽机控制终端在接收到车辆前进速度信息后,通过提前设置好的株距信息自动计算出喂苗电机与栽植电机转速并发送给电机控制器控制自动喂苗装置和挠性圆盘栽植器运转。自动喂苗装置下方左右两侧的卷苗轮在喂苗电机的驱动下分别向相反方向旋转将苗带卷起,使裸苗在导向轮的引导下随苗带做纵向运动至指定位置释放后被挠性圆盘夹持,完成喂苗



(a) 苗带设计原理



(b) 苗带整体效果与实物

图 3 喂苗苗带

Fig.3 Design of seedling belt

1. 甘薯裸苗 2. 苗带内面 3. 粘连层 4. 粘连层 5. 苗带外面

动作。挠性圆盘在栽植电机的驱动下旋转,夹持裸苗向地面输送,当裸苗到达挠性圆盘的释放点时释放裸苗,将裸苗放入下方开沟器开好的苗沟内,随后覆土镇压轮进行覆土镇压,浇水装置随后对栽植入土的裸苗进行浇水,起垄侧翼犁和垄型镇压辊对垄形进行修垄压实,保证垄形完整,完成移栽作业。移栽机控制终端可根据作业速度控制栽植电机的转速调节栽插频率,使秧苗株距保持稳定。

1.3 甘薯移栽农艺要求

结合河北省卢龙县甘薯移栽生产要求^[14],确定垄型如图 4 所示,垄顶宽 300 mm,垄高 280 mm,两垄间距为 900 mm,垄底宽 800 mm。

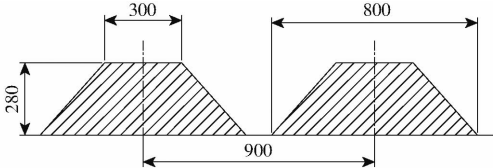


图 4 甘薯栽植垄形图

Fig.4 Ridge diagram of sweet potato planting

目前,国内甘薯移栽以裸苗移栽为主,与蔬菜、棉花、烟草等移栽要求秧苗直立不同,甘薯移栽对秧苗栽插入土姿态有特殊要求,栽植方法有直栽法、斜栽法、水平栽法和船底形栽法等^[1],如图 5 所示。水平栽法和船底形栽法在甘薯产量和结薯大小一致性上有一定的优势,结合挠性圆盘栽植器特点,本研究以实现水平栽法为研究目标。

2 主要结构设计与参数分析

2.1 甘薯裸苗预处理苗带设计

预处理苗带是 2 条带有粘连层的尼龙扣带,如图 6 所示,每根苗带粘连层呈条带状,并与苗带的长边平齐,苗带上粘连层宽度小于扣带宽度,保证裸苗

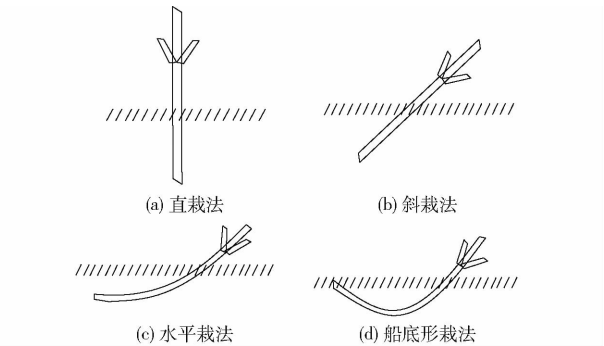


图 5 甘薯裸苗不同栽植方式示意图

Fig. 5 Schematics of different planting methods of naked sweet potato seedlings

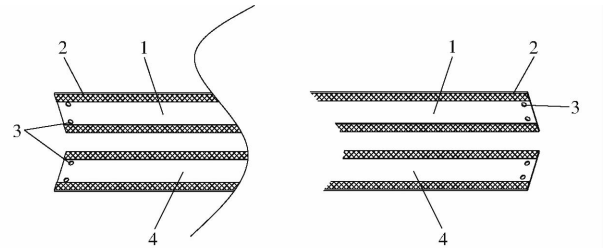


图 6 苗带设计示意图

Fig. 6 Schematic of seedling belt

1. 左扣带 2. 粘连层 3. 金属环 4. 右扣带

可以固定在扣带上同时降低左右扣带之间的粘接力,便于分离。

苗带宽度根据甘薯裸苗的长度确定,通过前期对哈密、红瑶、济薯 25 号、济薯 26 号、“玛莎莉”、西瓜红、徐薯 27 号、烟薯 25 号与紫薯等常见甘薯品种的秧苗物理尺寸进行了测量,甘薯裸苗平均长度为 250 ~ 300 mm,其中裸苗最短长度也达 200 mm,最长为 400 mm,夹持部位根部直径在 3 ~ 5 mm 之间且直径差距较小^[14]。为了让裸苗在苗带上固定牢固且直立,同时苗带宽度尽量小,以降低苗带制作成本,扣带宽度设计为 100 mm,苗带长度可根据作业量需求决定。根据前期苗带剥离试验结果^[14],粘连层宽设计为 20 mm。扣带边缘铆接两个相距 60 mm 的金属环,金属环直径为 10 mm,方便苗带与卷轮相连后同步转动。

2.2 自动喂苗装置设计

2.2.1 整体设计

自动喂苗装置是实现预处理苗带稳定有序自动喂苗的关键部件。喂苗装置主要由喂苗轮、栽植板、卷苗带轮、导向装置、喂苗电机、光电编码器、链轮、张紧轮等组成,如图 7 所示。栽植板由一块厚 5 mm 的钢板折弯而成,折弯部分宽度为 50 mm,侧面折弯部分开有通孔,通过螺栓安装在机架上。喂苗电机通过链传动方式带动两个卷苗带轮反向转动,导向装置保证苗带在指定点进行分离,防止分离点变化影响喂苗质量。

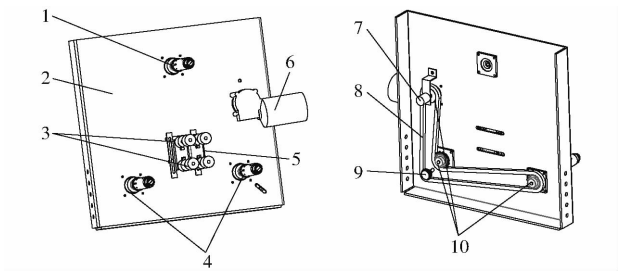


图 7 喂苗装置示意图

Fig. 7 Schematic of seedling feeding device

1. 喂苗轮 2. 栽植板 3. 导向轮 4. 卷苗带轮 5. 导向装置 6. 喂苗电机 7. 光电编码器 8. 链条 9. 张紧轮 10. 链轮

2.2.2 栽植板设计

栽植板是喂苗装置的基础部件,主要用以固定喂苗轮、卷苗带轮、导向装置与喂苗电机,栽植板的尺寸参数与苗带卷直径尺寸相关,工作过程中需要保证苗带快速安装与扣带分离,主要设计参数以苗带卷起尺寸确定(图 8)。将苗带卷起后测量其平均厚度,单根扣带厚度为 3 mm,当左右扣带固定住甘薯裸苗后,预处理苗带整体厚度为约为 10 mm。为了避免相邻两株裸苗的枝叶相互干涉,裸苗在预处理苗带中排列间距以 150 mm 为宜,本研究以单卷苗带最大容纳 200 株裸苗计算,预处理苗带设计理论长度能够达到 30 000 mm。

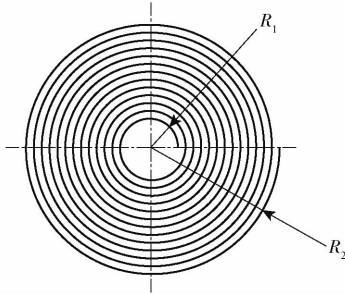


图 8 成卷苗带长度计算简图

Fig. 8 Sketch for calculating length of a rolled seedling strip

将苗带卷起后如图 8 所示,苗带长度 L_1 计算式为^[15]

$$L_1 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{16\delta} \pi \quad (1)$$

式中 L_1 ——苗带长度,mm

R_1 ——卷起苗带内径,mm

R_2 ——卷起苗带外径,mm

δ ——苗带厚度,mm

苗带卷起后最内圈半径 R_1 看作与喂苗轮半径相等, R_1 设计值为 40 mm,根据式(1)得到在单卷苗固定的裸苗数量达到上限时,卷起的苗带半径 $R_2 = 310$ mm,裸苗从苗带脱离后,单条扣带卷起半径 $R_3 = 170$ mm。喂苗轮和卷苗带轮安装中心距栽植板边

缘距离设为 100 mm,同时导向装置沿中线布置,导向轮直径为 30 mm,底部与两个卷苗带轮中心处于同一高度,整体尺寸为 80 mm × 100 mm, L_3 为扣带卷起后与导向装置的距离, H_2 为苗带卷起后与导向装置的距离,则栽植板外形尺寸需满足 $H_1 \geq 610 + H_2$, $L_2 \geq 620 + 2L_3$ 。自动喂苗装置在旋耕起垄装置上方,起垄后,垄底宽 800 mm,为了实现多垄作业,单个栽植板宽度 L_2 应小于 800 mm,栽植板尺寸设计值为栽植板高度 $H_1 = 650$ mm,栽植板宽度 $L_2 = 700$ mm,如图 9 所示。

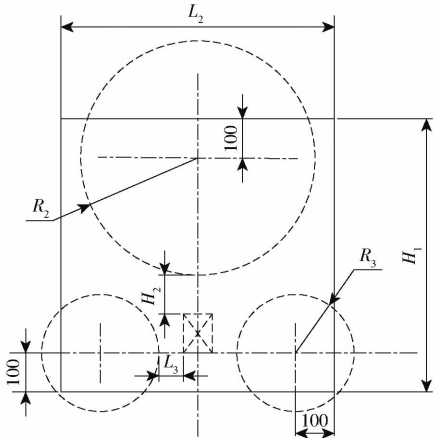


图 9 栽植板正面尺寸设计

Fig. 9 Design of front dimensions of planting plate

2.2.3 自动喂苗装置传动系统设计

为了适应田间作业环境和减少控制部件,自动喂苗装置采用 1 台 12 V 直流电机驱动链轮,功率 100 W,通过链轮带动链条传动,分别控制两个卷苗带轮以相反方向转动,链轮和链条布局如图 10 所示,喂苗电机链轮和卷苗带轮链轮之间传动比为 1:1,工作转速为 10 ~ 60 r/min,链条选取 06B 型滚子链。

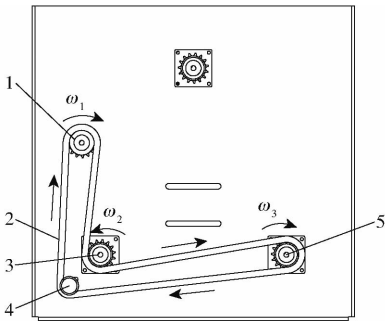


图 10 喂苗装置传动方案

Fig. 10 Feeding device transmission scheme

1. 喂苗电机链轮 2. 链条 3. 卷苗带轮链轮Ⅱ 4. 张紧轮 5. 卷苗带轮链轮Ⅰ

2.3 挠性圆盘栽植装置设计

2.3.1 整体设计

挠性圆盘栽植装置主要结构如图 11 所示,主要

由挠性圆盘、挠性圆盘固定支座、栽植电机、压板、压轮、栽植装置固定支架、强制张开装置等组成。其中栽植装置固定支架后端通过角钢固定支架固定在机架的中间横梁上,并可跟随中间横梁前后移动。栽植装置通过挠性圆盘的贴合与分离来夹持与释放甘薯裸苗。

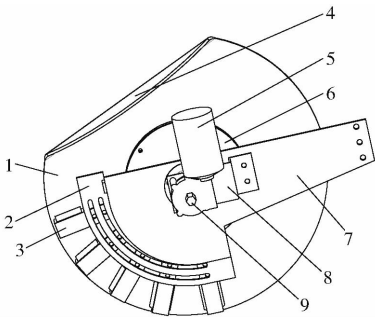


图 11 栽植装置示意图

Fig. 11 Schematic of planting device

1. 挠性圆盘 2. 压板 3. 压轮 4. 强制张开装置 5. 栽植电机 6. 挠性圆盘固定支座 7. 栽植装置固定支架 8. 栽植电机固定支架 9. 六方轴

2.3.2 挠性圆盘夹持裸苗运动过程分析

挠性圆盘栽植器在大葱等秧苗直立移栽中应用较多,能够实现连续夹持秧苗^[16]。为了实现甘薯裸苗水平栽植,挠性圆盘栽植器需要满足两个条件,一是甘薯裸苗还未达到释放点时,苗根已与地面接触,圆盘继续转动会拖动裸苗发生弯曲,二是圆盘夹持裸苗的夹持力需要在保证不伤苗的前提下足够大,保证苗根弯曲时被圆盘夹持的裸苗部分不动,直到裸苗转动至释放点完成释放。作业原理如图 12 所示。

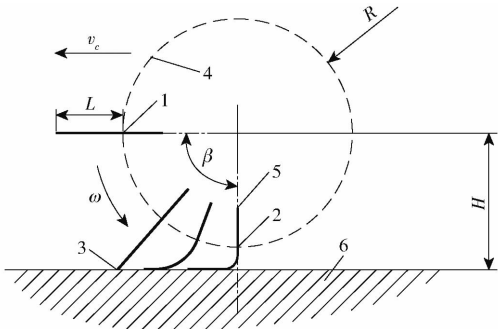


图 12 挠性圆盘水平栽植原理

Fig. 12 Principle of horizontal planting of flexible discs

1. 夹持点 2. 释放点 3. 触地点 4. 挠性圆盘 5. 甘薯裸苗 6. 土壤

挠性圆盘在夹持点夹持住裸苗后带动裸苗旋转,在转动至释放点前苗根已与地面接触,此时圆盘继续夹持裸苗旋转,裸苗会发生弯曲且变形量逐渐加大,理想状态下,当圆盘转动至释放点时部分裸苗水平躺在沟底,此时释放裸苗在覆土完成后便可完

成水平栽植。但考虑到躺在沟底的裸苗不可能完全水平,因此挠性圆盘只能完成类水平栽植作业。

为保证挠性圆盘夹持的裸苗旋转到释放点时整体姿态达到本研究中对于栽植姿态的要求,挠性圆盘外处于弯曲状态的裸苗长度需在 120 mm 以上,设定圆盘露出裸苗长度 L 为 150 mm。为保证挠性圆盘夹持裸苗时圆盘内裸苗枝叶不与圆盘旋转的中心轴干涉,根据前期测定的甘薯裸苗的长度范围,确定挠性圆盘的旋转半径 R 为 280 mm。当挠性圆盘旋转中心距沟底的高度 H 为 350 mm 时,裸苗旋转至最低点触地弯曲可满足类水平栽植姿态要求。

在栽植过程中,挠性圆盘夹持裸苗触地后会有两种不同的弯曲朝向:向前弯曲与向后弯曲。为找出 2 种弯曲朝向的影响因素,对触地瞬间的裸苗根部进行速度分析,将裸苗视为与圆盘直径重合,裸苗触地瞬间根部速度情况如图 13 所示,点 A 为裸苗与地面初始接触点,点 D 为裸苗刚接触地面时圆盘边缘的夹苗点, θ 为苗根刚触地时裸苗所在直线与铅垂线夹角, v_r 为甘薯裸苗随挠性圆盘旋转产生的线速度, v_x 为线速度在水平方向分速度。

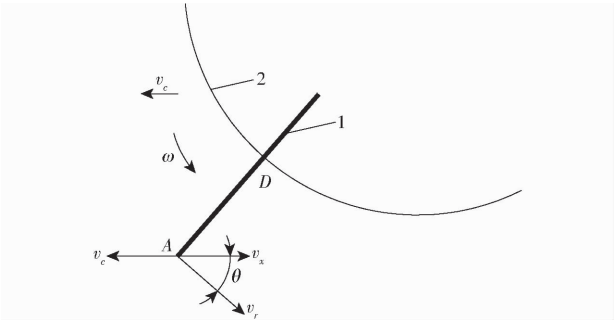


图 13 裸苗触地时刻根部速度图
Fig. 13 Root velocity diagram of naked seedling at touchdown time
1. 甘薯裸苗 2. 挠性圆盘

苗根处具有两个速度,一个是机具前进速度 v_c ,方向水平向前,一个是由于圆盘转动而产生的线速度 v_r ,方向垂直于裸苗所在直线向下,而其水平分速度 v_x 满足

$$v_x = \omega (R + L) \cos \theta \tag{2}$$

其中
$$\cos \theta = \frac{H}{R + L} \tag{3}$$

$$v_x = \omega H \tag{4}$$

式中 ω ——圆盘与裸苗转动的角速度,rad/s
 H ——挠性圆盘旋转中心与地面距离,mm
 R ——挠性圆盘等效旋转半径,mm
 L ——挠性圆盘夹持裸苗时露出圆盘长度,mm

当 $v_x > v_c$,即 $\omega > v_c/H$ 时,苗根合速度水平向后,有向后运动趋势,会受到水平向前的摩擦力,苗根在外力作用下会向前弯曲。

当 $v_x < v_c$,即 $\omega < v_c/H$ 时,苗根合速度水平向前,有向前运动趋势,会受到水平向后的摩擦力,苗根在外力作用下会向后弯曲。

在理想状态下,当圆盘中心距地面高度为定值时,机具前进速度与圆盘角速度两者决定了触地瞬间弯曲朝向,两种弯曲朝向的临界转速 ω_i 为

$$\omega_i = \frac{v_c}{H} \tag{5}$$

挠性圆盘栽植器理论上在其夹持角 β 内可以夹持密排的裸苗,但由于裸苗枝叶之间互相缠绕会影响裸苗释放,因此同一时刻挠性圆盘夹持裸苗数量存在上限 $N^{[16]}$ 。挠性圆盘转速 ω 与喂苗频率 f 应满足

$$\begin{cases} \omega > \frac{v_c \beta}{ZN} \\ Z = \frac{v_c}{f} \end{cases} \tag{6}$$

式中 Z ——栽植株距,m

裸苗向前弯曲时,圆盘转速 ω 满足 $\omega > v_c \beta / (ZN)$ 与 $\omega > v_c / H$,能够求出合适转速。裸苗向后弯曲,圆盘转速 ω 需要满足 $v_c \beta / (ZN) < \omega < v_c / H$,合适转速选择区间小。为了便于电机调速控制,本研究以满足裸苗向前弯曲的作业条件进行参数选择。

2.3.3 挠性圆盘尺寸设计

为了在特定位置夹持甘薯裸苗,并在特定位置释放栽插,挠性圆盘分成喂入区、夹持区与释放区,夹持区内的两圆盘贴合夹持裸苗,喂入区和释放区的两圆盘分离方便裸苗的喂入与释放。两挠性圆盘相隔一定距离安装在固定支座上,再利用强制压紧装置将圆盘边缘贴合在一起用来夹持甘薯裸苗,因此非夹持区域的挠性圆盘相互平行,夹持区域的挠性圆盘中心处平行,边缘处贴合,整体呈 Y 形,如图 14 所示。

挠性圆盘贴合区域由分离区、折弯区和贴合区 3 段构成,其中分离区的挠性圆盘固定在挠性圆盘固定支座上,圆盘平行且相隔一定距离,贴合区的挠性圆盘在压轮作用下两圆盘贴合,其中三者半径尺寸满足

$$\begin{cases} R = R_f + R_w \cos \frac{\gamma}{2} + R_t \\ L_f = 2R_w \sin \frac{\gamma}{2} \end{cases} \tag{7}$$

式中 R_f ——分离区挠性圆盘半径,mm

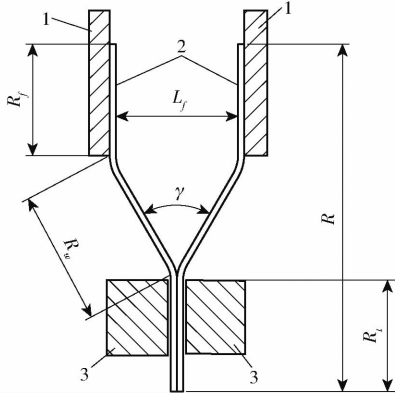


图 14 挠性圆盘尺寸设计

Fig. 14 Design of flexible disc dimensions

1. 挠性圆盘固定支座 2. 挠性圆盘 3. 压轮

R_w ——折弯区挠性圆盘半径,mm
 R_t ——贴合区挠性圆盘半径,mm
 L_f ——分离区圆盘相距距离,mm
 γ ——挠性圆盘折弯角,rad
由于 $\gamma = \pi/3$, $R = 280\text{ mm}$, $L_f = 100\text{ mm}$, $R_f = 100\text{ mm}$, 因此设计 $R_w = 100\text{ mm}$, $R_t = 100\text{ mm}$, 挠性圆盘未折弯前半径为 300 mm 。

2.4 开沟器设计

开沟器开沟效果直接影响甘薯裸苗移栽入土后姿态。为了保证开沟深浅一致,沟底平整,且具有自回土功能,结合现有移栽设备的开沟装置设计了一种滑刀框架式开沟器,如图 15 所示。前方滑刀破开土壤后由两侧翼板开出苗沟,翼板上打有通孔方便通过开沟器固定支架固定到机架上,翼板后部开有土壤回流口,方便土壤回流覆盖住裸苗^[17],土壤回流口高度 H_t 小于栽植深度,为保证甘薯裸苗栽植深度合格,设计土壤回流口高度 $H_t = 80\text{ mm}$,土壤回流口长度 $L_t = 150\text{ mm}$,根据开沟深度设计值 100 mm ,为保证开沟效果覆土效果,开沟器整体高度设计为 $H_k = 150\text{ mm}$,依据农业机械设计手册^[18],开沟器入土角设计为 $\alpha = 118^\circ$ 。

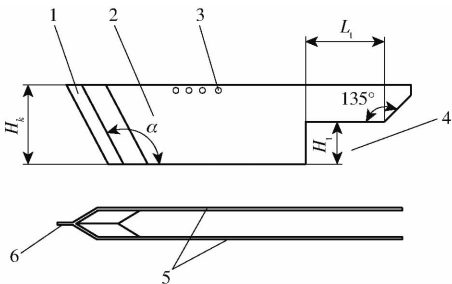


图 15 开沟器示意图

Fig. 15 Schematic of opener

1、6. 滑刀 2、5. 翼板 3. 通孔 4. 土壤回流口

2.5 旋耕起垄装置设计

旋耕起垄装置采用前旋耕后起垄刮板的设计方

案,如图 16 所示。旋耕装置采用中央传动方式,两侧旋耕刀轴与旋耕刀片对称布置并在传动齿轮箱底部安装防漏耕犁,防止漏耕^[8]。为保持整体结构紧凑,同时保证垄面高度一致性,起垄刮板在旋耕装置后部,起垄刮板尺寸参数由垄形参数所决定,如图 17 所示。

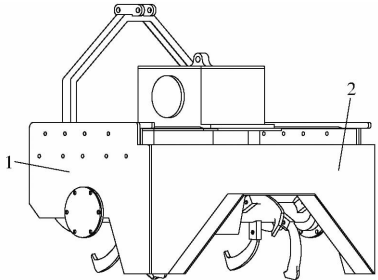


图 16 旋耕起垄装置结构图

Fig. 16 Schematic of rotary tillage and ridging device

1. 旋耕装置 2. 起垄刮板

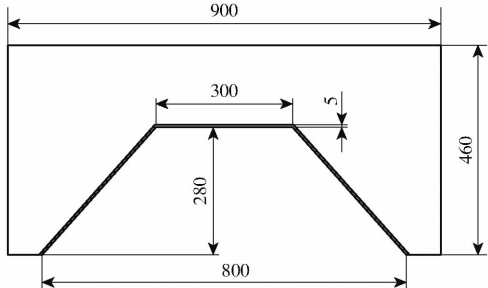


图 17 起垄刮板尺寸图

Fig. 17 Dimension drawing of ridging scraper

3 移栽机控制系统设计

3.1 控制系统组成

为了实现对甘薯裸苗移栽机喂苗装置、挠性圆盘栽植装置和浇水装置进行自动作业控制,本研究设计了基于 CAN 总线的甘薯裸苗自动移栽机控制系统,控制系统总体架构如图 18 所示。

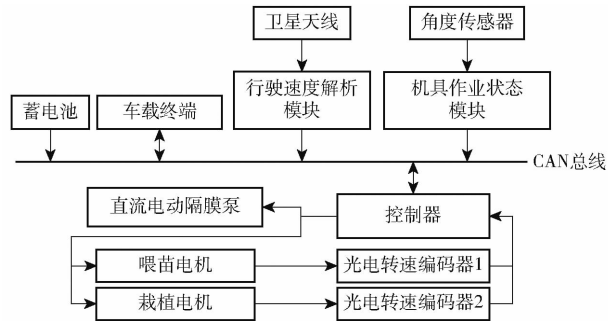


图 18 控制系统工作原理图

Fig. 18 Principle of control system

系统主要由车载终端、卫星定位模块、控制器、喂苗电机、栽植电机、测速编码器、直流电动隔膜泵、角度传感器等组成。系统能够对机具作业状态、前进速度、电机转速信息进行监测,根据预设的目标株

距和机具行进速度实时调控喂苗、栽植机构的电机转速,实现自动有序喂苗和定株距栽插作业,根据喂苗电机和栽植电机的工作状态控制电动隔膜泵的开关进行自动浇水作业,拖拉机的蓄电池为控制系统提供电能,各控制模块和车载终端之间的数据通过CAN总线进行传输^[19]。

3.2 车载控制终端

车载控制终端主要实现设置目标株距等作业参数和实时显示作业速度、电机转速、栽植频率等作业信息的功能^[14]。系统采用新汉 VMC1000 型车载显示终端,该车载终端预装的操作系统为 Windows XP Embedded,配备 7 英寸液晶显示屏,提供 RS-232/485 接口、USB 2.0、GPIO 和 DB37 接口的网络信号、GPS 模块和 WLAN 模块。通过 RS485 串行总线接口连接显示终端与 STM32 控制器进行数据通信。终端软件通过调用终端集成的 GPS 模块,解析接收到的 GPS 数据,获取车体行驶速度。

3.3 移栽机控制器

移栽机控制器是整个系统的核心硬件,其内部集成了电压转换、数据采集与处理、串口通讯与电机驱动等功能。主要功能是采集机具前进速度与电机的实际转速信息;与车载控制终端通讯接收目标作业参数并向车载终端发送实时作业数据;根据机具速度与目标株距实时计算电机理论转速;驱动电机实现喂苗栽植作业;根据电机工作状态控制电动隔膜泵开关进行自动浇水。

为了实现相应功能,本文设计了基于意法半导体公司的 STM32F407VGT6 微处理器的喂苗栽植控制器,STM32F4 系列微处理器内核为 ARM Coretex-M4,最高主频可达 168 MHz,内置 4 个定时器,3 个 U(S)ART 串口通讯接口,外设资源丰富,满足本控制系统的性能要求^[14]。

3.4 电机与光电编码器选型

为了适应田间作业环境,自动喂苗装置和挠性圆盘栽植装置分别采用 12 V 直流减速电机驱动,功率 100 W,最高转速达到 60 r/min,电机六角孔对边间距 16 mm,可通过六角轴连接。为了实现电机转速的精确反馈,采用在电机上加装光电编码器的方式对转速进行测量,选用欧姆龙 E6HZ-CWZ6C 600P/R 增量型编码器^[14]。编码器的输出方式为 NPN 集电极开路输出,其分辨率为 600 线,电机每转 1 圈,编码器输出 600 个脉冲到控制器,最高响应频率为 100 kHz。控制器通过每秒收到的脉冲数来计算电机的实际转速。

3.5 自动浇水装置

甘薯裸苗移栽入土后马上浇水有利于发根还

苗,确保成活、全苗、壮株。为了能够对移栽甘薯裸苗及时浇水,在自动移栽机设计加装了自动浇水装置,由长方体塑料水桶、直流电动隔膜泵组成和连接水管组成。电动隔膜泵通过塑料水管连接,出水口在开沟器的尾部和覆土镇压轮之间,便于浇水后进行覆土镇压,起到保墒作用。自动移栽机控制器在接收到喂苗电机和栽植电机转速信号后,控制电动隔膜泵打开进行浇水作业,当喂苗电机和栽植电机停止转动后,控制器控制电动隔膜泵关闭停止浇水。

甘薯栽插后的浇水量较大,根据田间不同墒情一般在 15 000~45 000 kg/hm²,根据甘薯栽植农艺要求^[20],甘薯栽植密度一般不超过 60 000 株/hm²。为了防止过量浇水,按最小计算,每株苗需浇水 0.25 kg,按照移栽速度 60 株/min 计算,浇水量达到 15 kg/min,在考虑移栽机结构尺寸和拖拉机后液压提升能力的情况下,选用 1 020 mm×560 mm×560 mm 长方体塑料水桶,载水量 320 kg,选用 FL-40 型直流电动隔膜泵,采用 12 V 直流供电,流量 17 L/min,扬程达到 28 m。

3.6 系统控制算法和软件界面设计

3.6.1 控制算法设计

根据甘薯裸苗移栽机喂苗装置、挠性圆盘栽植装置和浇水装置自动作业控制的功能需求,对系统的控制算法流程进行了设计,如图 19 所示。

车载终端程序启动后,通过车载终端设置设备参数、目标株距等信息,各模块与车载终端进行数据通信,通过卫星定位模块获取机具作业速度,利用下拉杆角度传感器数据对移栽机工作状态进行解析^[21],通过采集电机转速编码器的信号,获取喂苗、栽植电机实际转速和转动圈数,控制器程序根据目标株距和当前作业速度分别计算栽植、喂苗电机的理论转速,计算式为

$$n_1 = \frac{3\,000v_c\beta}{\pi NZ} \tag{8}$$

$$n_2 = \frac{3\,000v_cB}{\pi Z(r+\delta j)} \tag{9}$$

- 式中 n_1 ——栽植电机理论转速,r/min
 n_2 ——喂苗电机理论转速,r/min
 N ——夹持裸苗数量
 B ——苗带夹苗间隔,mm
 r ——卷苗轮半径,mm
 j ——旋转圈数, $j=1,2,\cdots$

并通过控制器输出 PWM 控制信号驱动电机旋转,PID 控制程序则根据电机实际转速与所计算的理论转速的偏差,采用 PID 算法对电机驱动的 PWM

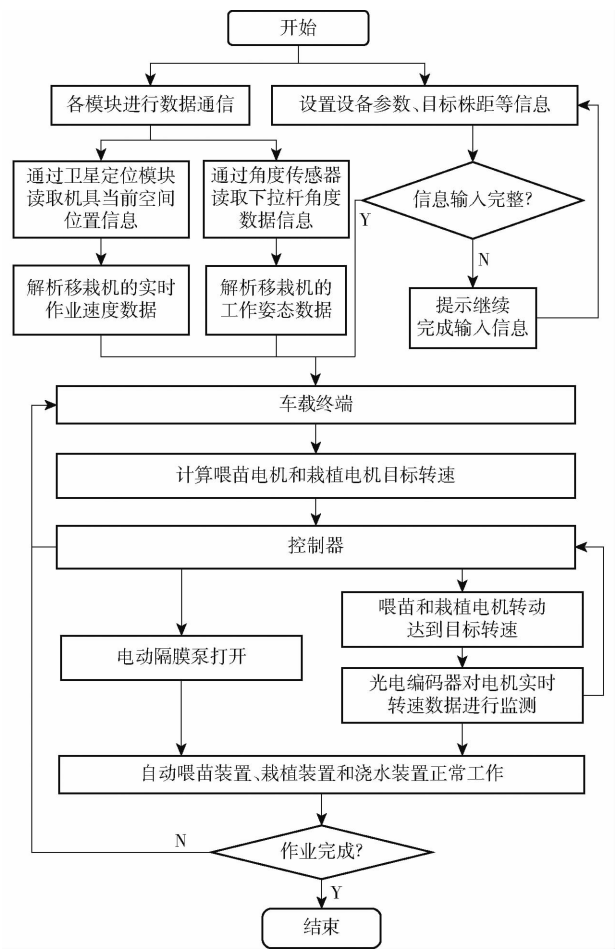


图 19 系统控制流程图

Fig. 19 Control flow diagram of system

控制信号进行调整,使电机达到目标转速^[14],实现系统的闭环控制,保证拖拉机行驶速度变化时移栽株距的稳定,同时控制器根据喂苗电机和栽植电机的工作状态控制电动隔膜泵的开关进行自动浇水作业,串口通信程序定时发送作业数据到上位机进行显示。

3.6.2 软件界面设计

为便于系统操作和数据交互,设计了人机交互界面如图 20 所示。人机交互软件主要包括参数设置,数据接收和实时作业信息显示 3 个功能。用户可以通过交互界面输入目标株距和苗带夹苗间隔等作业参数。交互软件还可以接收控制器传输的数据并实时显示机具当前的移动速度及栽植频率等作业信息^[14]。将作业参数设置完善后,点击开始作业按钮,软件便将作业参数发送到控制器,并实时接收显示控制器发送的数据。交互软件采用 RS232 串口与控制器进行通讯。

4 田间性能试验与结果分析

机具设计完成后,委托连云港市元帝科技有限公司进行了样机的试制加工。2022 年 5 月,在北京

昌平区小汤山国家精准农业示范基地试验田进行了样机的田间作业性能试验(图 21)。



图 20 控制系统人机交互软件

Fig. 20 Control system man-machine interaction software

1. 数据接收区域 2. 参数设置区域 3. 数据显示区域

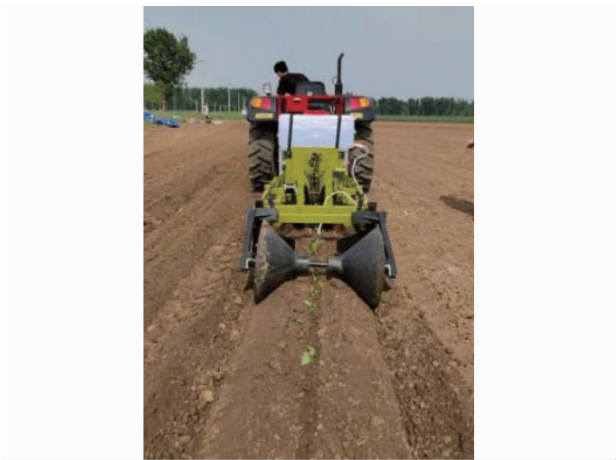


图 21 样机田间试验

Fig. 21 Field test

试验区域地势平坦,土质为粘壤土,土壤含水率 10.6%,土壤坚实度 0.29 MPa。机具配套动力为东风 554 型拖拉机(带爬行挡);选择西瓜红品种的甘薯苗作为试验用苗,裸苗平均直径 4 mm,平均长度 280 mm。试验前利用 3 条 5 m 长苗带按照 150 mm 的间距对甘薯苗进行排列,每卷苗带固定 30 株甘薯苗。

试验中以拖拉机前进速度 0.25、0.35、0.45 m/s 分别进行性能试验,车载终端目标株距设为 25 cm,每个作业速度下进行 3 组试验,每组完成一个苗带 30 株甘薯裸苗的栽植。试验完成后,分别对甘薯苗栽植株距、栽植深度等进行测量,参照 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械标准》选取株距标准差、株距变异系数、栽植深度合格率、栽植姿态合格率对样机的栽植精度和栽植质量进行评价。

4.1 栽植精度

甘薯裸苗与垄面的交点为该裸苗的栽植点,相邻两株甘薯裸苗的栽植点在栽植垄面中心线上的投影距离即为这两株甘薯裸苗的种植株距,测量每组甘薯裸苗的株距 X_i ,利用变异系数评价栽植精度。

栽植精度实验结果如表 2 所示。

表 2 栽植精度试验结果

Tab.2 Analysis of planting accuracy test results

序号	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	株距平均 值/cm	标准差/ cm	变异 系数/%
1	0.25	24.94	2.46	9.85
2	0.25	25.64	2.72	10.60
3	0.25	24.19	2.43	10.05
4	0.35	23.81	3.08	12.91
5	0.35	22.79	2.98	13.07
6	0.35	22.04	2.77	12.55
7	0.45	20.17	2.99	14.80
8	0.45	20.80	3.33	16.00
9	0.45	21.67	3.31	15.25

4.2 栽植深度合格率和栽植姿态合格率

为了测量甘薯苗栽植深度和栽植姿态,秧苗株距测量之后,利用挖土铲将裸苗侧面土挖除,观察裸苗入土姿态,设定裸苗最深部位向上距离 H_s 为 2 cm 为类水平栽植区域,测量裸苗最深部位距垄面距离 H_b 和裸苗位于类水平栽植区内裸苗类水平栽植长度 L_s (图 22)。

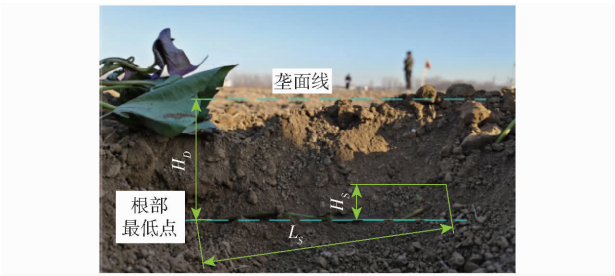


图 22 栽植姿态测量示意图

Fig. 22 Diagram of planting posture measurement

根据甘薯移栽农艺要求,当栽植深度满足 $5\text{ cm} \leq H_b \leq 8\text{ cm}$ 时,即可视为栽植深度合格,记录栽植入土总株数 N_i 与栽植深度合格株数 N_d ,见表 3,则栽植深度合格率 P_d 计算式为

表 3 栽植深度和姿态试验结果

Tab.3 Analysis of planting accuracy test results

序号	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	株数	栽植深度合格 株数	栽植姿态合格 株数	栽植深度合格 率/%	栽植姿态合格 率/%
1	0.25	30	28	27	93.33	90.00
2	0.25	30	29	26	96.67	86.67
3	0.25	30	29	28	96.67	93.33
4	0.35	30	26	26	86.67	86.67
5	0.35	30	27	25	90.00	83.33
6	0.35	30	28	25	93.33	83.33
7	0.45	30	27	24	90.00	80.00
8	0.45	30	28	22	93.33	73.33
9	0.45	30	28	23	93.33	76.67

$$P_d = \frac{N_d}{N_i} \times 100\%$$

(10)

在甘薯裸苗满足栽植深度合格的基础上,测量平栽区内裸苗长度 L_s 满足 $L_s \geq 8\text{ cm}$ 时,即可视为栽植姿态合格,记录栽植姿态合格株数 N_l ,见表 3,则栽植姿态合格率 P_l 计算式为

$$P_l = \frac{N_l}{N_i} \times 100\%$$

(11)

4.3 试验结果讨论

通过样机进行田间试验,在设定目标株距 25 cm 以及作业速度 0.25、0.35、0.45 m/s 的情况下,样机都能够一次性完成旋耕起垄,利用预处理苗带自动喂苗、栽植、覆土镇压和自动浇水的作业过程。作业速度为 0.25 m/s 时,栽植株距平均值 24.92 cm,栽植株距变异系数平均值 10.16%,栽植深度合格率平均值 95.56%,栽植姿态合格率平均值 90%;作业速度为 0.35 m/s 时,栽植株距平均值 22.88 cm,栽植株距变异系数平均值 12.85%,栽植深度合格率平均值 90%,栽植姿态合格率平均值 84.44%;作业速度为 0.45 m/s 时,栽植株距平均值 20.88 cm,栽植株距变异系数平均值 15.35%,栽植深度合格率平均值 92.22%,栽植姿态合格率平均值 76.67%。样机作业速度为 0.25 m/s 时参照 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械标准》栽植株距变异系数小于等于 20%、栽植深度合格率大于等于 75%,在 3 种作业速度下,样机栽植株距变异系数和栽植深度合格率均达到了标准要求,栽植株距变异系数随着作业速度的增加而变大,说明该样机作业速度变大后,对株距影响较大;栽植深度相对稳定,受作业速度变化影响较小。栽植姿态合格率目前没有相关标准要求,无法进行评价,但从试验结果可以看出,栽植姿态合格率受作业速度影响较大,栽植姿态合格率随着作业速度的增加而变小。从田间试验结果看出,该样机在作业速度为 0.25 m/s 时,作业性能优于 0.35 m/s 和 0.45 m/s。

5 结论

(1)结合甘薯裸苗栽植农艺要求,基于预处理苗带喂苗装置和挠性圆盘栽植装置设计了一种甘薯裸苗自动移栽机,能够一次性完成旋耕、起垄、开沟、自动喂苗、栽插、镇压覆土、自动浇水、修垄等作业环节,机具采用预处理苗带固定甘薯裸苗实现有序、自动喂苗,利用挠性圆盘栽植器旋转速度与机具前进速度配合关系实现甘薯裸苗连续类水平栽插,为解决田间作业情况下人工分苗、摆苗劳动强度大,容易出现漏栽和栽插质量差的问题提出了一种解决方案。

(2)设计了基于 CAN 总线的甘薯裸苗自动移栽机控制系统,实现对甘薯裸苗移栽机喂苗装置、挠性圆盘栽植装置和浇水装置进行控制。系统能够对机具作业状态、前进速度、电机转速信息进行监测,根据预设的目标株距和机具行进速度实时调控喂苗、栽植机构的电机转速,实现自动有序喂苗和定株距栽插作业,根据喂苗电机和栽植电机的工作状态控制电动隔膜泵进行自动浇水作业。

(3)田间试验结果表明,机具在目标株距 25 cm

以及作业速度 0.25、0.35、0.45 m/s 的情况下,栽植株距变异系数和栽植深度合格率均达到标准要求。栽植株距变异系数和栽植姿态合格率受作业速度影响较大,栽植株距变异系数随着作业速度的增加而变大,栽植姿态合格率随着作业速度的增加而变小,栽植深度受作业速度变化影响较小。在作业速度为 0.25 m/s 时,栽植株距变异系数平均值 10.16%,栽植深度合格率平均值 95.56%,栽植姿态合格率平均值 90%,作业性能优于 0.35 m/s 和 0.45 m/s。

参 考 文 献

- [1] 胡良龙,王冰,王公仆,等. 2ZGF-2 型甘薯复式栽植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 8-16. HU Lianglong, WANG Bing, WANG Gongpu, et al. Design and experiment of type 2ZGF-2 duplex sweet potato transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 8-16. (in Chinese)
- [2] 马代夫,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 969-973. MA Daifu, LI Qiang, CAO Qinghe, et al. Development and prospect of sweet potato industry and its technologies in China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(5): 969-973. (in Chinese)
- [3] 陆建珍,汪翔,秦建军,等. 我国甘薯种植业发展状况调查报告(2017 年)——基于国家甘薯产业技术体系产业经济固定观察点数据的分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 393-398.
- [4] 胡良龙,胡志超,谢一芝,等. 我国甘薯生产机械化技术路线研究[J]. 中国农机化, 2011, 32(6): 20-25. HU Lianglong, HU Zhichao, XIE Yizhi, et al. Study on the route of mechanization of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) production technology in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(6): 20-25. (in Chinese)
- [5] 严伟,张文毅,胡敏娟,等. 国内外甘薯种植机械化研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(2): 12-16. YAN Wei, ZHANG Wenyi, HU Minjuan, et al. Present situation of research and expectation on plant mechanization of sweet potato in China and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(2): 12-16. (in Chinese)
- [6] FUJIMURA H. Japanese agricultural machinery situation and the role of institute of agricultural machinery[J]. Ama-agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2017, 48(2): 88-91.
- [7] 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.
- [8] 吴旋,申屠留芳,刘涵,等. 甘薯盘夹式移栽机设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 107-112. WU Xuan, SHENTU Liufang, LIU Han, et al. Design of sweet potato tray clamping transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 107-112. (in Chinese)
- [9] 青岛农业大学,山东火绒农业科技发展有限公司,海南大学. 一种多功能甘薯移栽机: CN202011058407[P]. 2021-01-05.
- [10] 朱斌彬. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计与仿真[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [11] 赵海,刘新鑫,潘志国,等. 甘薯种植农艺及机械化种植技术研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 21-26. ZHAO Hai, LIU Xinxin, PAN Zhiguo, et al. Agronomic characteristics and mechanized planting technology of sweet potato [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 21-26. (in Chinese)
- [12] 胡良龙,计福来,王冰,等. 国内甘薯机械移栽技术发展动态[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 289-291, 317. HU Lianglong, JI Fulai, WANG Bing, et al. Latest developments of sweet potato mechanical transplanting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 289-291, 317. (in Chinese)
- [13] 马标,胡良龙,许良元,等. 国内甘薯种植及其生产机械[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 42-46. MA Biao, HU Lianglong, XU Liangyuan, et al. Status about sweet potato planting and its production machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1): 42-46. (in Chinese)
- [14] 陈进. 甘薯裸苗精准喂苗栽植控制系统设计与研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [15] 张振存,陈玉明,赵波,等. 估算成卷输送带的长度[J]. 设备管理与维修, 2017(19): 34-35.
- [16] 胡军. 挠性圆盘式大葱移栽机的优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [17] 王徐建,宋建农,刘彩玲,等. 甘薯倾斜移栽开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 16-23. WANG Xujian, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 16-23. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 祝清震,武广伟,朱志豪,等. 冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 25-35. ZHU Qingzhen, WU Guangwei, ZHU Zhihao, et al. Design and test on winter wheat precision separated layer fertilization and wide-boundary sowing combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 25-35. (in Chinese)
- [20] 王公仆,胡良龙,胡志超,等. 甘薯机械移栽浇水作业模式简析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8): 212-215.
- [21] 祝清震,武广伟,罗长海,等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 155-163. ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155-163. (in Chinese)
- [22] 全国农业机械标准化技术委员会. 旱地栽植机械: JB/T 10291—2013[S]. 北京: 机械科学研究院, 2013.