doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.002

甘薯移栽机漏栽检测及补栽装置设计与试验

杨然兵[1,2]　程梦迪[1,2]　吕丹阳[2,3]　吕士亭[1,2]　梁启敏[1,2]　张　涛[1,2]　王　涛[1,2]

（1.海南大学机电工程学院，海口 570228；2.农业农村部热带高效农业智能装备重点实验室，儋州 571737；
3.海南大学信息与通信工程学院，海口 570228）

摘要：为解决指夹式甘薯移栽机因薯苗姿态不佳、喂苗量不足等原因导致栽植夹未能成功夹取薯苗栽植入土的问题，本文基于 2ZQX－2/1 型移栽机，设计了一种对射式红外光电传感器漏栽检测系统及自动补栽装置。漏栽检测系统及补栽装置为移栽机的独立工作模块，漏栽检测系统采用对射式红外光电传感器构建的延时判别机制，通过检测栽植夹与甘薯苗在限定的时间窗口内对传感器的触发情况，实时判别栽植夹是否成功夹取甘薯苗栽植入土。补栽装置的栽植机构采用步进电机驱动补栽夹，并结合电动推杆与导轨实现左行及右行的补栽作业；补栽装置的送苗机构则采用步进电机控制的丝杠导轨实现补栽装置精确推送薯苗。构建了以 PLC 为核心的控制系统，实现了漏栽判定及补栽操作之间的自动化协同工作。台架试验表明，移栽机速度在 0.2～0.4 m/s 范围内，漏栽检测系统漏检和误检率之和不超过 5%。田间试验结果表明，移栽机工作速度分别为 0.2、0.3、0.4 m/s 时，漏栽检测系统识别成功率均超过 97%，整机平均漏栽率分别为 0.68%、0.85%、1.37%，相较于未启用补栽装置降低了 8.11～9.55 个百分点。

关键词：移栽机；甘薯；漏栽检测；补栽装置

中图分类号：S223.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)09-0016-11　　**OSID**：

Design and Test of Sweet Potato Transplanter Missed-planting Detection and Replanting Device

YANG Ranbing[1,2]　CHENG Mengdi[1,2]　LÜ Danyang[2,3]　LÜ Shiting[1,2]　LIANG Qimin[1,2]
ZHANG Tao[1,2]　WANG Tao[1,2]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
2. *Key Laboratory of Tropical High-efficiency Agricultural Intelligent Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou* 571737, *China*
3. *School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the finger-clamp sweet potato transplanter fails to successfully pick up the potato seedlings and plant them into the soil due to poor posture of potato seedlings and insufficient feeding amount, based on the 2ZQX－2/1 transplanter, a missed planting detection system with infrared photoelectric sensor and an automatic replanting device were designed. The missed planting detection system and replanting device were independent working modules on the transplanter, and the missed planting detection system adopted a delayed discrimination mechanism constructed by a through-beam infrared photoelectric sensor, which detected the triggering of the sensor between the planting clip and the sweet potato seedlings within a limited time window, and determined whether the planting clip successfully picked up the sweet potato seedlings and implanted them into the soil in real time. The planting mechanism of the replanting device adopted a stepper motor to drive the replanting clamp, and combined the electric push rod and guide rail to realize the left and right row replanting operations. The seedling feeding mechanism of the replanting device adopted a lead screw guide rail controlled by a stepper motor to accurately push the potato seedlings for the replanting device. A control system with PLC as the core was constructed to realize the automatic collaborative work between

收稿日期：2025－11－26　修回日期：2026－01－05

基金项目：国家自然科学基金项目(52265029)

作者简介：杨然兵(1979—)，男，教授，博士，主要从事农业机械装备研究，E-mail：yangranbing@163.com

通信作者：王涛(1980—)，男，副教授，主要从事热带农业装备及测试研究，E-mail：gxdxyjs@163.com

missed planting judgment and replanting operation. The bench test showed that the sum of missed detection and false detection rate of the missed planting detection system was less than or equal to 5% in the range of transplanter speed of 0.2 ~ 0.4 m/s. The field test results showed that when the working speed of the transplanter was 0.2 m/s, 0.3 m/s and 0.4 m/s, the success rate of missing planting detection system was more than 97%, and the average missed planting rate of the whole machine was 0.68%, 0.85% and 1.37%, respectively, compared with that when the replanting device was not activated, it was decreased by 8.11 to 9.55 percentage points.

Key words: transplanter; sweet potato; missed planting detection; replanting device

0　引言

联合国粮农组织 2022 年数据显示，中国是全球最大的甘薯生产国，种植面积占全球 29.8%，产量占 54.2%，均居世界首位[1]。海南地处热区，为甘薯的全年种植提供了得天独厚的条件，孕育了“桥头地瓜”“高系 14”等高价值甘薯品种[2-3]。甘薯移栽是甘薯生产过程中的重要环节，其用工量仅次于收获，占整个甘薯生产过程的 26%[4-5]。由于甘薯苗枝干交织、形态差异大，其栽植方式有别于常规作物，国内甘薯移栽机械大多采用高剪苗（或拔苗）等裸苗移栽的半自动移栽机[6-8]。半自动移栽存在漏栽现象，其主要原因是人工放苗时薯苗姿态不佳或喂苗量不足，导致栽植夹未能成功夹取薯苗栽植入土。漏栽会导致减产，人工补栽费时费力且效率低下[9]，对于甘薯这种种植面积较大的作物来说，产量损失是巨大的。故而降低漏栽率是半自动移栽机亟待解决的问题[10]。

目前国内外学者在漏检和补偿技术方面已开展了大量研究。针对钵苗作物漏栽补偿的研究主要为：利用机器视觉或红外光电传感器检测穴盘中钵苗的存在状态和健康状况，计算出最优移栽路径，控制取苗机械手抓取正常钵苗或触发补栽装置进行补栽，从而降低移栽漏栽率[11-13]。BESHARATI 等[14]研制了一种基于红外 LED 与光电二极管的播种检测装置。该装置通过构建输出电压与光强度之间的对应关系来估算种子流量，从而实现了对鹰嘴豆、小麦等作物播种量的监测。贺磊盈等[15]利用机器视觉检测穴盘内幼苗的健康信息，并提出了一种贪婪遗传算法优化末端执行器抓取钵苗的路径进行补苗操作。文永双等[16]利用光纤与激光传感器检测穴盘中的钵苗并控制补苗系统快速补苗。此外，针对马铃薯漏检也有广泛研究[17-19]，WANG 等[20]研制出了一种无需额外补种装置的一体化马铃薯播种机，在马铃薯勺链式播种机上利用霍尔传感器及红外光电传感器监测漏种，当发生漏种时控制单向离合器加速播种链条，使有薯块的取种勺加速到漏种位置，达到补种的目的。目前国内针对甘薯苗漏栽补栽问题研究较少，LIU 等[21]研制出了一种履带式甘薯移栽机，分为移栽部分和补栽部分，利用机械臂移栽和补栽薯苗，由机器视觉检测漏栽，为甘薯的漏栽检测与补栽提供了方法和思路。然而，机器视觉在尘土飞扬的实际作业环境中检测准确性易受影响，且补栽装置与移栽装置结构相同，系统较为复杂。

综上所述，现有研究多集中于钵苗作物，而针对甘薯裸苗漏栽率高、补栽需求迫切的问题，研究尚显不足。鉴于此，本文提出一种基于“红外检测-步进电机驱动”的简化补栽机制。由于甘薯移栽的工作环境尘土多，机械振动大，因此漏栽检测的可靠性和耐久性需首要考虑。本研究采用抗尘能力较强的对射式红外光电传感器作为漏栽检测系统的硬件[22]，以 PLC 为控制系统的核心，通过协调控制步进电机、电动推杆及导轨丝杠等元器件联动，设计一套自动化补栽装置，并通过试验验证其补栽效果与可行性，以期为甘薯移栽机漏栽补栽的理论研究和装备创新提供参考。

1　整机结构与工作原理

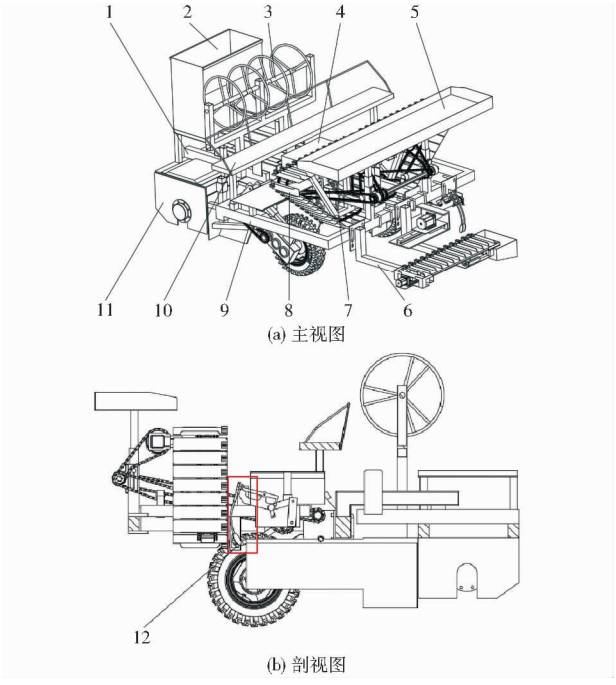
1.1　整机结构及技术参数

2ZQX－2/1 型甘薯移栽机主要由牵引架、浇水装置、覆膜装置、控制箱、置苗架、补栽装置、移栽机栽植区域、移栽机送苗传动系统、车架、人工操作区、旋耕起垄装置、漏栽检测系统等构成，其基本结构如图 1 所示。该甘薯移栽机可一次性完成甘薯的旋耕、起垄、浇水、覆膜、移栽及补栽等作业。该机主要技术参数见表 1。

该甘薯移栽机栽植方式为单垄双行，其主要作业规格：行距 l 为 300 mm，株距 d 为 180 ~ 300 mm，垄顶宽 b_1、垄底宽 b_2、垄高 h 均值分别为 600、900、300 mm。2ZQX－2/1 型甘薯移栽机栽植及起垄尺寸示意图如图 2 所示。

1.2　工作原理

作业时，甘薯移栽机由拖拉机牵引向前运动，拖拉机旋转轴驱动旋耕起垄装置中的旋耕刀对土地进行翻耕和碎土，起垄板对翻耕过的土壤整垄成型；覆



(a) 主视图

(b) 剖视图

图 1 2ZQX－2/1 型甘薯移栽机结构图

Fig. 1 2ZQX－2/1 sweet potato transplanter structural diagram

1. 牵引架 2. 浇水装置 3. 覆膜装置 4. 控制箱 5. 置苗架 6. 补栽装置 7. 移栽机栽植区域 8. 移栽机送苗传动系统 9. 车架 10. 人工操作区 11. 旋耕起垄装置 12. 漏栽检测系统

表 1 整机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 120×2 000×1 500
整机质量/kg	2 800
适应垄宽/mm	≤900
生产率/(株·h^{-1})	5 000
作业行数	2
作业垄数	1

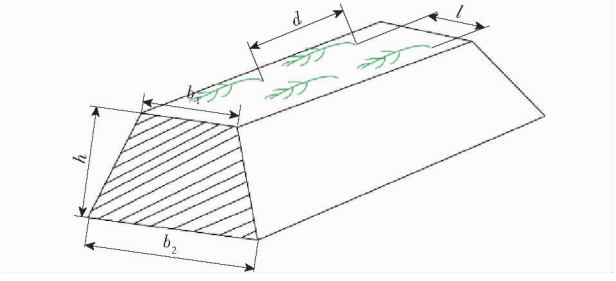


图 2 2ZQX－2/1 型甘薯移栽机栽植及起垄尺寸示意图

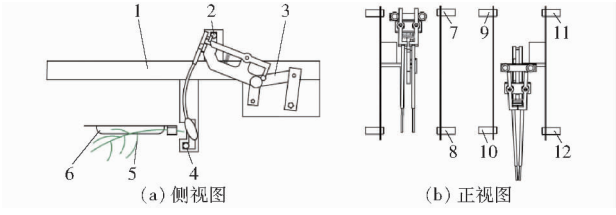
Fig. 2 Schematic of planting and ridge size of 2ZQX－2/1 sweet potato transplanter

膜装置在垄体成型后对垄面进行覆膜作业,并通过压膜结构将薄膜与土壤紧密贴合,形成稳定的覆膜栽培环境;人工操作区的工人将置苗架上的薄苗依次固定在苗板上[23],地轮带动传动链驱动栽苗装置中的栽植夹作曲柄摇杆运动,将苗板上固定好的薄苗破膜送入土壤中完成插植;漏栽检测系统采用对射式红外光电传感器检测移栽机的栽植夹是否成功夹取薄苗栽植入土,并将信号输入控制系统;控制系统通过对射式红外光电传感器输入的信号判定是否漏栽,并决定是否向补栽装置输出补栽信号;补栽装置包括栽苗机构及送苗机构,接收到控制系统输出的补栽信号后执行自动化栽苗及送苗动作;浇水装置对栽植后的薄苗完成浇水操作。

2 漏栽检测系统设计

漏栽检测系统位于移栽机栽植区域,用于检测移栽机栽植薄苗过程中的漏栽情况。移栽机作业环境尘土较多,选用了具有较强抗尘能力和高抗干扰性能的对射式红外传感器,型号为 BKF－5DN1(E3F－5DL)。该传感器检测距离为 10～500 cm,响应时间小于 2 ms,可以在检测时做出快速响应;发射端的红外波长为 950 nm,穿透尘土的能力较强且具有较低的散射效应,能够减少环境干扰,从而提高检测系统的稳定性和准确性;该传感器还有抗 10～55 Hz 双向振动的能力,可以确保在机械振动环境下的稳定性;防护等级为 IP65,能够起到防尘防水的作用。其输出方式为 NPN 型,在检测到物体阻挡时输出开关量信号。所选用的红外传感器能够稳定应对甘薯移栽过程中可能出现的尘土、振动等环境干扰,保证检测系统的可靠性和准确性。

移栽机为单垄双行栽植模式,有两个栽植夹,因此漏栽检测系统采用 4 组对射式红外光电传感器,每组都含有 1 个发射端和 1 个接收端,以移栽机前进方向为正方向,对射式红外光电传感器 SQ1、SQ2 检测左栽植夹栽植状况,对射式红外光电传感器 SQ3、SQ4 检测右栽植夹栽植状况,如图 3 所示。



(a) 侧视图 (b) 正视图

图 3 漏栽检测系统示意图

Fig. 3 Schematics of missing plant detection system

1. 车架 2. 对射式红外光电传感器 SQ1 接收端 3. 栽植夹 4. 对射式红外光电传感器 SQ2 接收端 5. 甘薯苗 6. 苗板 7. 对射式红外光电传感器 SQ1 发射端 8. 对射式红外光电传感器 SQ2 发射端 9. 对射式红外光电传感器 SQ3 发射端 10. 对射式红外光电传感器 SQ4 发射端 11. 对射式红外光电传感器 SQ3 接收端 12. 对射式红外光电传感器 SQ4 接收端

工作时,拖拉机以速度 v 牵引移栽机前进,地轮通过传动链驱动栽植夹做夹苗栽苗动作,在栽植夹运动至车架上方时,其顶部会扫过对射式红外光电传感器 SQ1 或 SQ3;运动至车架下方时,其栽植夹夹取的

薯苗会扫过对射式红外光电传感器 SQ2 或 SQ4。系统的判定逻辑为：对于同一栽植夹，当上方传感器被触发后，若在设定的时间间隔内，对应的下方传感器也被触发，则判定为成功夹苗；否则判定为漏苗，则无薯苗栽植入土。此时间间隔即为一次漏栽判定时间。

移栽机完成一次栽苗所需时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{c}{vq} \tag{1}$$

进行一次漏栽检测判定所需时间，即从上方传感器被触发到下方传感器被触发的时间间隔 t_2 为

$$t_2 = t_1 \frac{\omega}{360} \tag{2}$$

式中　c——地轮周长，m

q——地轮转动一周栽植夹栽苗株数，株

ω——一次漏栽检测判定栽植夹转动角度，(°)

根据 2ZQX－2/1 型甘薯移栽机的设计参数，其中 c 为 1.884 m、q 为 7 株、ω 为 136°，移栽机前进速度越快，移栽机栽植一次薯苗用时 t_1 越短，即检测一次漏栽用时 t_2 也会变短，2ZQX－2/1 型移栽机实际工作时前进速度范围为 0.2 ~ 0.4 m/s。根据公式(1)、(2)计算可得，栽植周期 t_1 的范围为 673 ~ 1 346 ms，相应的漏栽判定理论时间 t_2 的范围为 254 ~ 508 ms，为实现统一阈值判定，本文引入系统漏栽判定时间窗口 X。若 X 取值过小，当移栽机发生瞬时减速或运动节律波动时，栽植夹到达下传感器的时间将延长，可能出现尚未来得及触发下方传感器而判定窗口已结束的情况，从而将正常栽植误判为漏栽，导致系统误检率增加；若 X 取值过大，则其长度可能超过最小栽植周期 673 ms。此时，当栽植夹触碰到上方传感器后，系统将进入一次持续时间为 X 的漏栽判定过程；然而在该判定窗口尚未结束前，该栽植夹已完成一个工作周期并再次进入检测区域，系统仍处于上一轮判定状态，无法重新触发新的漏栽判定，从而导致第 2 次漏栽不能被识别，产生漏检风险。由此可得，为同时满足判定窗口完整性(t_2 不被截断)且避免漏检，系统时间窗口 X 的理论取值范围为 508 ~ 673 ms。

综合考虑检测可靠性与实时性，本文将系统漏栽判定时间窗口设定为 X = 600 ms。该值位于理论范围中部，既完全覆盖各工作速度下的理论值 t_2，又保留适当裕量，可有效降低漏检率和误检率。

3　补栽装置设计

3.1　补栽装置结构设计

补栽装置位于移栽机尾部，当漏栽检测系统判定为漏栽时及时执行补栽。补栽装置由栽苗机构及送苗机构两部分组成，其中栽苗机构由电动推杆Ⅰ、栽苗步进电机、补栽夹、滑轨、法兰滑块及碳钢支撑架组成；送苗机构由收集框、伸缩板、电动推杆Ⅱ、苗板、托板及步进导轨丝杠组成，如图 4 所示。

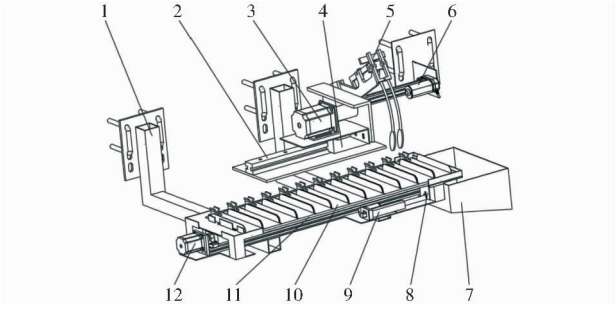


图 4　补栽装置整体结构示意图

Fig. 4　Overall structural diagram of replanting device

1. 支撑架　2. 滑轨　3. 栽苗步进电机　4. 法兰滑块　5. 补栽夹　6. 电动推杆Ⅰ　7. 收集框　8. 伸缩板　9. 电动推杆Ⅱ　10. 苗板　11. 托板　12. 步进导轨丝杠

栽苗机构负责检测到漏栽后夹取薯苗并栽植入土。其栽苗步进电机驱动补栽夹作曲柄摇杆运动实现甘薯苗的夹取及栽植。栽苗步进电机及补栽夹通过碳钢支撑板固定于法兰滑块上，法兰滑块内嵌有钢珠与导轨接触滑动，摩擦阻力小，精度高。通过控制电动推杆Ⅰ推拉碳钢支撑板带动法兰滑块在直线滑轨上滑动，从而实现垄上左、右行薯苗的补栽。滑轨长度为 400 mm，电动推杆Ⅰ的行程为 300 mm。

送苗机构用于向栽苗机构有序输送苗板，其结构如图 5 所示，其核心部件为步进导轨丝杠，固定于碳钢支撑架上。丝杠上的滑块装有推板，由步进电机驱动实现往复运动。丝杠首尾两端分别安装有接近传感器，用于检测滑块极限位置并控制其自动返回。

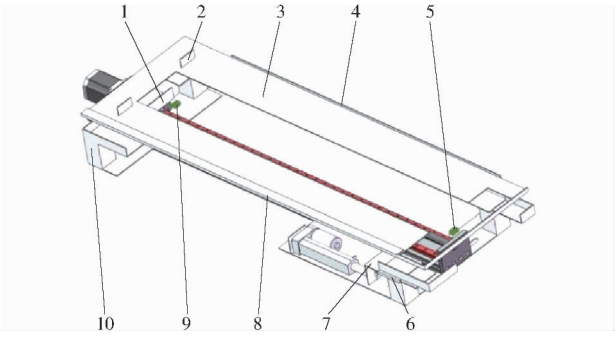


图 5　补栽装置中送苗机构示意图

Fig. 5　Schematic of seedling delivery mechanism in replanting device

1. 推板　2. 挡片　3. 托板　4. 挡条　5. 下接近传感器　6. 卡槽　7. 伸缩板　8. 夹槽　9. 上接近传感器　10. 支撑座

支撑座上放置托板，托板设有挡片、挡条及夹槽，可固定苗板防止送苗过程中苗板的移位及栽苗

过程中拖拽导致苗板脱落。托板中部及尾部开有空槽,中部空槽允许推板穿过以推动苗板(宽 65 mm)前进。单次推送行程为 65 mm,即一个苗板宽度。挡片至托板末端的有效容纳距离为 780 mm,可连续存放 12 个苗板。尾部空槽用于使取苗后的苗板掉落至收集框。尾部下方安装有电动推杆Ⅱ控制的伸缩板,其行程为 100 mm,伸缩板伸出时支撑末端苗板,收缩时苗板从尾部 70 mm 空槽处掉落收集框。

3.2 补栽装置工作原理

为了便于后续描述,首先界定 4 个核心统计参数。①自然栽植数(K_1):通过对射式红外光电传感器 SQ1、SQ3 检测到的栽植夹数量。②自然漏栽数(K_2):对射式红外光电传感器 SQ1、SQ3 检测到栽植夹 t_2 时间内,对射式红外光电传感器 SQ2、SQ4 处没有检测到的薯苗数。③补栽成功数(K_3):补栽装置成功执行的次数。④最终漏栽数(K_4):因补栽条件冲突而未能执行补栽的漏栽次数。

补栽装置启动前自动控制系统初始化:按下启动按钮后,电动推杆Ⅰ缩回复位,使补栽夹与移栽机右行栽植夹对齐;栽苗步进电机复位使补栽夹处于张开预夹苗状态,此时补栽夹曲柄与水平夹角 θ_1 为 60°,如图 6 所示;导轨丝杠上的滑块复位至上接近传感器处;电动推杆Ⅱ处于伸出状态;苗板自挡片处沿夹槽整齐排列于托板尾部。

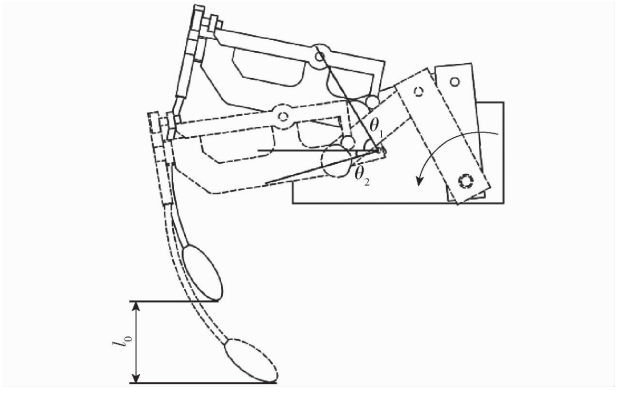


图 6 夹苗动作示意图

Fig. 6 Diagram of seedling pinching movements

系统初始化完成后,补栽装置进入待命状态,其控制逻辑主要包括以下环节:

(1)漏栽检测系统采集栽植夹的夹苗状态,并将信号输入控制系统,控制系统判定是否漏栽并记录参数 K_1、K_2。

(2)系统判定为左行漏栽时,因补栽夹和栽植夹之间存在距离 L,补栽指令延迟执行。执行时,栽苗步进电机驱动曲柄逆时针转动 θ_2 完成夹苗,转动后苗夹顶端下移 l_0 = 60 mm(如图 6 所示),距垄面 130 mm,避免垄面刮擦薯苗。随后电动推杆Ⅰ伸出,推动支撑板带动滑块左移 300 mm,将苗夹送至左行栽植位。栽苗步进电机继续逆时针转动,将薯苗栽入土中并返回初始状态,随后电动推杆Ⅰ缩回,使苗夹回到右行待栽位置(完整左行补栽用时 t_3)。与此同时,电动推杆Ⅱ收回伸缩板,空苗板掉落收集框后伸缩板再次伸出,送苗步进电机推动滑块前进 65 mm,将新苗板输送至尾部。

(3)系统判定为右行漏栽时,电动推杆Ⅰ不动,补栽夹直接由栽苗步进电机带动旋转一周,完成一次栽植并复位(用时 t_4)。送苗机构在夹苗后执行一次推送苗板动作。系统记录成功执行的补栽次数 K_3。

(4)当托板上剩余的最后一个苗板上的薯苗被夹取后,步进电机驱动滑块将最后一个空苗板推入收集框中,滑块到达丝杠的尾端触发下接近传感器,驾驶舱蜂鸣器长鸣,移栽机停车,随后滑块自动返回首端上接近传感器处,将空的托板换下,更换新的满载薯苗的托板后即可继续进行补栽。

3.3 补栽装置关键参数设定

栽苗电机是栽苗机构中的关键部件,通过驱动补栽夹的曲柄实现薯苗夹苗及栽植,其驱动曲柄转动的力矩图如图 7 所示。

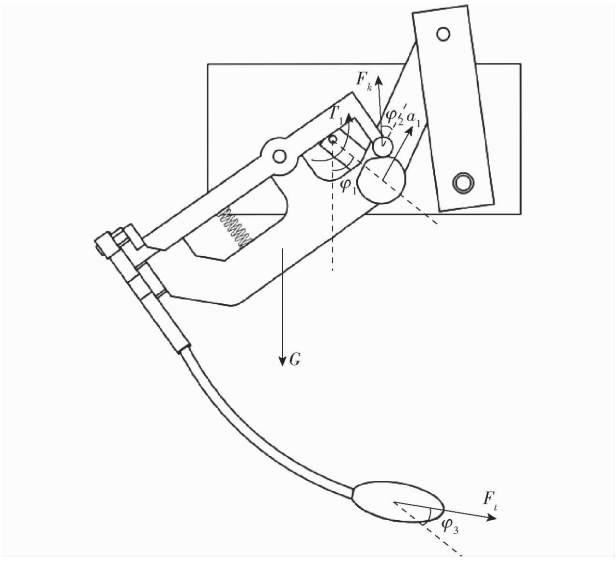


图 7 栽苗电机扭矩示意图

Fig. 7 Seedling planting motor torque chart

栽苗电机带动补栽夹的曲柄转动,作业时补栽夹扭矩满足条件

$$\begin{cases} T_1 \geqslant \dfrac{(G\sin\varphi_1 + m_1 a_1 + F_k\cos\varphi_2 + F_t\sin\varphi_3)\,r}{\eta} \\ G = m_1 g \end{cases} \tag{3}$$

式中 T_1——补栽夹扭矩,N·m

r——补栽夹曲柄转动半径,m

G——补栽夹重力,N

φ_1——曲柄与竖直方向的夹角，(°)

m_1——补栽夹质量，kg

a_1——补栽夹加速度，m/s^2

F_k——凸轮推动夹爪张开的弹力，N

φ_2——弹力与曲柄转动方向的夹角，(°)

F_t——土壤阻力，N

φ_3——土壤阻力与曲柄的夹角，(°)

η——机械效率

g——重力加速度，m/s^2

作用于栽植夹上的负载力矩计算基于以下实测与设定参数：$r=0.07$ m、$m_1=13$ kg、$a_1=0.4$ m/s^2、$\eta=0.7$、$\varphi_1=50°$、$\varphi_2=30°$、$\varphi_3=30°$，此外，栽植夹弹簧的额定夹紧力 $F_k=30$ N，根据文献[24]设计土壤阻力 $F_t=100$ N，由式(3)计算出栽苗机构所需驱动扭矩 $T_1=17.89$ N·m。为此，选用保持力矩为 12 N·m 的86 系列闭环步进电机，并匹配一款减速比为 2∶1 的行星减速器。经核算，该组合在考虑传动效率($\eta\geqslant0.9$)后，其额定输出扭矩可达 21.6 N·m，满足扭矩需求并留有充足的设计余量。

送苗电机通过驱动丝杠将旋转运动转化为直线运动，从而推动载有薯苗的苗板向前运动，达到送苗目的，其驱动力矩图如图 8 所示。

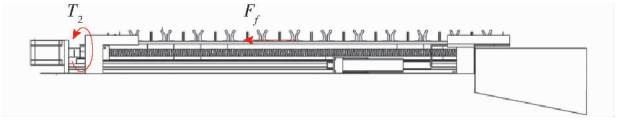


图 8　送苗电机扭矩图

Fig. 8　Torque diagram of seedling feeding motor

送苗电机需驱动丝杠转动，其扭矩需满足关系

$$\begin{cases} T_2\geqslant\dfrac{F_fP}{2\pi\eta} \\ F_f=n\mu m_2g \end{cases} \tag{4}$$

式中　T_2——送苗电机扭矩，N·m

F_f——托板满载时最大摩擦力，N

P——丝杠导程，m

μ——静摩擦因数

m_2——托板上薯苗及苗板的总质量，kg

n——综合安全系数

根据送苗的实际情况，实测参数为：$m_2=3$ kg、$P=0.02$ m，根据文献[25]可知 $\mu=1.1$，考虑到导轨滚动阻力、丝杠/螺母效率、对中误差、粉尘粘滞与冲击载荷等，综合安全系数 n 取 6。由式(4)计算出送苗电机扭矩 $T_2=0.88$ N·m，因此选用保持扭矩为 1.2 N·m 的步进电机满足扭矩需求。

在自动补栽装置的设计中，为协调步进电机与电动推杆的动作时序以满足可靠性与效率要求，预设了完整的补栽周期。据此，系统控制逻辑被设计为：确定一次完整右行补栽周期的设计目标值 $t_4=1.3$ s；而将包含额外推杆伸缩动作的左行补栽周期设计为 $t_3=2.6$ s；同时，设定送苗机构的单次作业周期为 1 s。该组参数的设定为后续的机构优化与控制逻辑设计提供了明确的时序基准。

3.4　复杂漏栽情况及补栽规则

在移栽机实际作业中仍有一些复杂工况，如左右行同时漏栽、单行连续漏栽及多行连续漏栽的情况，虽然移栽机采用人工放苗的方式，根据预试验及田间作业，以上情况发生概率较低，但其补栽策略的完备性是衡量系统鲁棒性的关键，而在出现以上漏栽状况时，其补栽逻辑也将发生改变。

由于补栽动作的执行本身需要固定的时间周期，因此若移栽机出现两个以上薯苗连续漏栽的情况，栽植机构可能无法在完成当前补栽任务前，及时响应下一个漏栽点。

由式(1)可知移栽机进行一次栽苗所需时间为 t_1。当系统判定移栽机漏栽后，补栽装置执行补栽，在左行补栽周期 t_3 或右行补栽周期 t_4 内，无法对其它漏栽薯苗进行补栽操作，鉴于左、右行漏栽共用一个补栽装置，且两行薯苗的栽植间隔时间为 $t_1/2$，因此，在一次补栽作业期间，因资源占用而无法执行补栽的薯苗数量存在一个理论上限。

左行补栽过程中，理论最大漏栽株数 n_1 满足

$$\frac{1}{2}n_1t_1\leqslant t_3 \tag{5}$$

右行补栽过程中，理论最大漏栽株数 n_2 满足

$$\frac{1}{2}n_2t_1\leqslant t_4 \tag{6}$$

若计算结果不为整数，则向上取整。

根据设定参数一次完整左行补栽用时 $t_3=2.6$ s，一次完整右行补栽用时 $t_4=1.3$ s，由式(1)可知，一次栽苗周期 t_1 介于 673 ms 与 1 346 ms 之间，由式(5)与式(6)可计算出理论漏栽范围分别为 $8\geqslant n_1\geqslant4$，$4\geqslant n_2\geqslant2$。

据此，系统设定了分级报警机制，若单次补栽任务执行期间，实际因冲突而未能补栽的薯苗数量 $n_1<3$ 或 $n_2<3$，则轻度报警，驾驶舱蜂鸣器短鸣，PLC 记录未能执行补栽的株数累加到参数 K_4，移栽作业不停止。若该数量 $n_1\geqslant3$ 或 $n_2\geqslant3$，则重度报警，驾驶舱蜂鸣器长鸣，移栽机停车，检查移栽机及系统是否故障，若故障，修复故障并使补栽装置复位重新记录参数(K_1、K_2、K_3、K_4)；若无故障，系统从断点处恢复，并保留参数的原始值，以确保后续漏栽率及补栽成功率统计的准确性。

3.5　补栽装置可行性分析

为评估补栽可行性，需确保移栽机的补栽装置

能在离开漏栽点之前完成补栽动作[26]。移栽机从漏栽检测点运动至补栽执行点的距离为 L。则该移动所需时间 S_1 为

$$S_1 = \frac{L}{v} \tag{7}$$

其中 $L = 1\,260$ mm，移栽机作业时的速度 v 取值范围为 0.2 ~ 0.4 m/s，补栽可行的必要条件为补栽动作时间需小于 S_1。

左行补栽分析：当移栽机以最大速度 $v_{max} = 0.4$ m/s前进时，计算得 $S_1 = 3.15$ s，左行补栽周期 $t_3 = 2.6$ s，$t_3 < S_1$，因此左行补栽操作是可行的。

右行补栽分析：因补栽夹初始及回归位置位于右行，右行补栽相较于左行补栽省略了横向移动环节，因此右行补栽周期显著缩短为 1.3 s，$t_4 < S_1$，因此右行补栽同样是可行的。

送苗机构在苗板上薯苗被夹取后立即执行送苗操作，其每次送苗周期为 1 s，该时间既短于左行补栽周期 t_3，也短于右行补栽周期 t_4，因此能够在不成为瓶颈的前提下，及时为后续补栽操作补充薯苗。

4 控制系统设计

控制系统的设计旨在精准响应移栽机作业中的不同漏栽工况并执行相应补栽动作。该系统采用西门子 S7 - 1200 型 PLC 作为核心控制器，其 CPU 为 1215C，输出方式为晶体管，其电气原理图如图 9 所示。

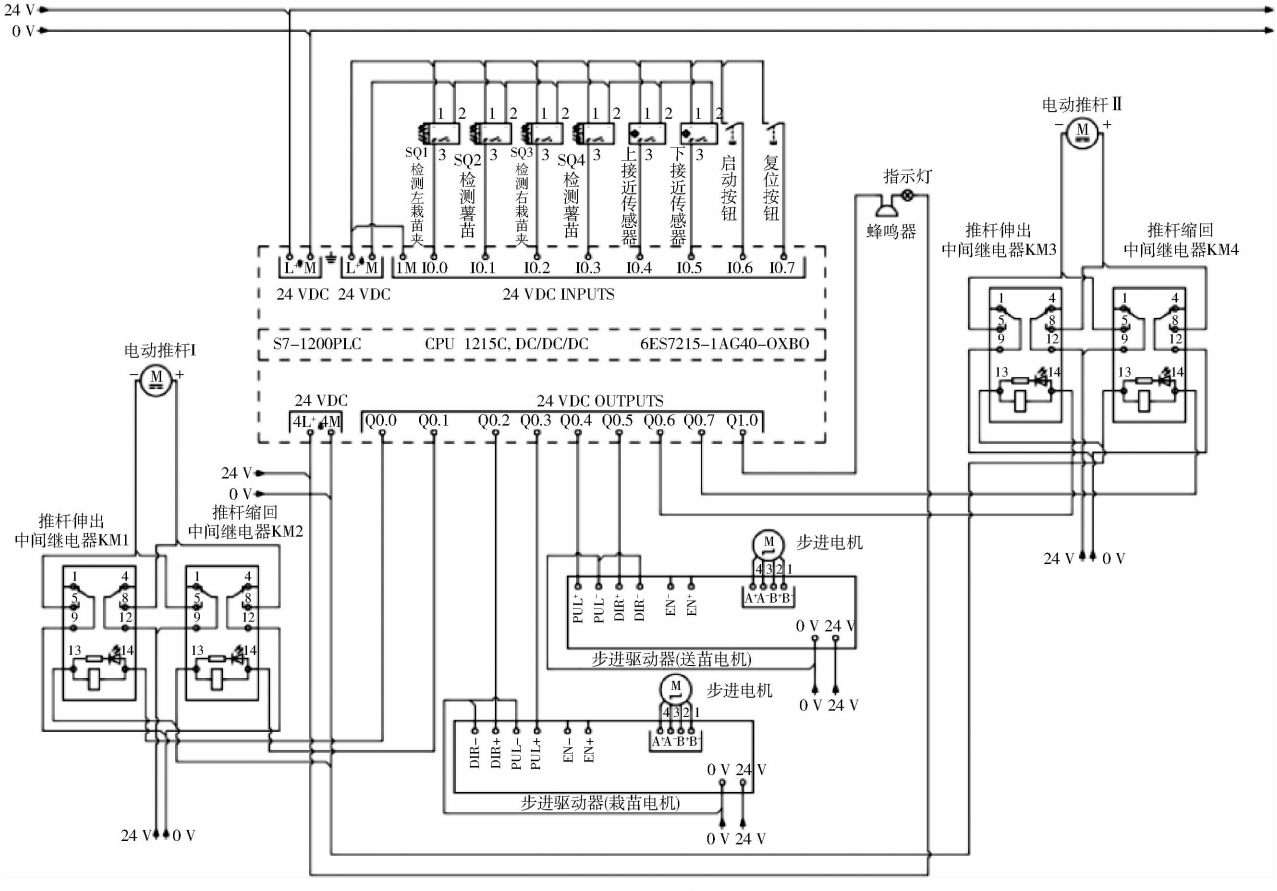


图 9 控制系统电气原理图

Fig. 9 Electrical schematic of control system

整个控制系统动力来源为 24 V 锂电池，为 PLC、电动推杆、传感器、步进电机等整个控制系统的硬件供电，PLC 信号输入端与漏栽检测传感器连接，用于采集作业状态；其信号输出端则连接栽植及送苗机构的执行单元，从而构成一个漏栽检测、自动补栽与有序送苗的协同控制系统。

控制程序采用梯形图逻辑，在 S7 - 1200 型 PLC 专用软件 TIA Portal V15 中编写完成[27]，可以实现漏栽检测、补栽及送苗的协调控制。依据本作业要求，共包含 8 个运动输入工况，9 个运动输出工况。由传感器和按钮作为输入点，闭环步进电机、蜂鸣器和电动推杆作为输出点，输入输出地址分配见表 2，控制系统的工作流程见图 10。

5 样机试验

由于试验机器含有漏栽检测系统和补栽装置，本研究首先在台架条件下开展判定时间窗口的验证试验，然后进行传感器可靠性试验，最后进行田间综合性能测试。

表 2　输入输出地址分配

Tab. 2　I/O address assignment

输入地址	工作状况	输出地址	工作状况
I0.0	检测左栽植夹工作信号	Q0.0	电动推杆Ⅰ伸出信号
I0.1	检测左夹苗状态信号	Q0.1	电动推杆Ⅰ缩回信号
I0.2	检测右栽植夹工作信号	Q0.2	栽苗步进电机方向信号
I0.3	检测右夹苗状态信号	Q0.3	栽苗步进电机脉冲信号
I0.4	上接近传感器	Q0.4	送苗步进电机脉冲信号
I0.5	下接近传感器	Q0.5	送苗步进电机方向信号
I0.6	启动信号	Q0.6	电动推杆Ⅱ伸出信号
I0.7	复位信号	Q0.7	电动推杆Ⅱ缩回信号
		Q1.0	蜂鸣器指示灯信号

5.1　判定时间窗口 $X=600$ ms 的试验验证

为验证所选漏栽判定时间窗口 $X=600$ ms 的有效性，在台架条件下开展了小规模验证试验。系统固定时间窗口 $X=600$ ms，当栽植夹触发上方传感器后，在该时间内是否触发下方传感器作为漏栽判定依据。为覆盖常见作业工况，分别选取 0.2、0.3、0.4 m/s 3 个工作速度进行试验；每个速度挡位下，左右栽植夹各运动 100 次，共 200 次，其中随机布置 160 株甘薯秧苗，预留 40 个空位模拟漏栽工况。试验过程中同步记录系统判定结果与实际情况，对误检与漏检情况进行统计与分析。

为评价检测性能，定义系统判定正常次数（N_1）为经漏栽系统判定为正常栽植的次数；系统判定漏栽次数（N_2）为经漏栽系统判定为漏栽的次数。

正常栽植检测成功率 R_1 为

$$R_1=\frac{N_1}{160}\times 100\% \tag{8}$$

漏栽检测成功率 R_2 为

$$R_2=\frac{N_2}{40}\times 100\% \tag{9}$$

不同速度条件下的试验结果统计见表 3。由

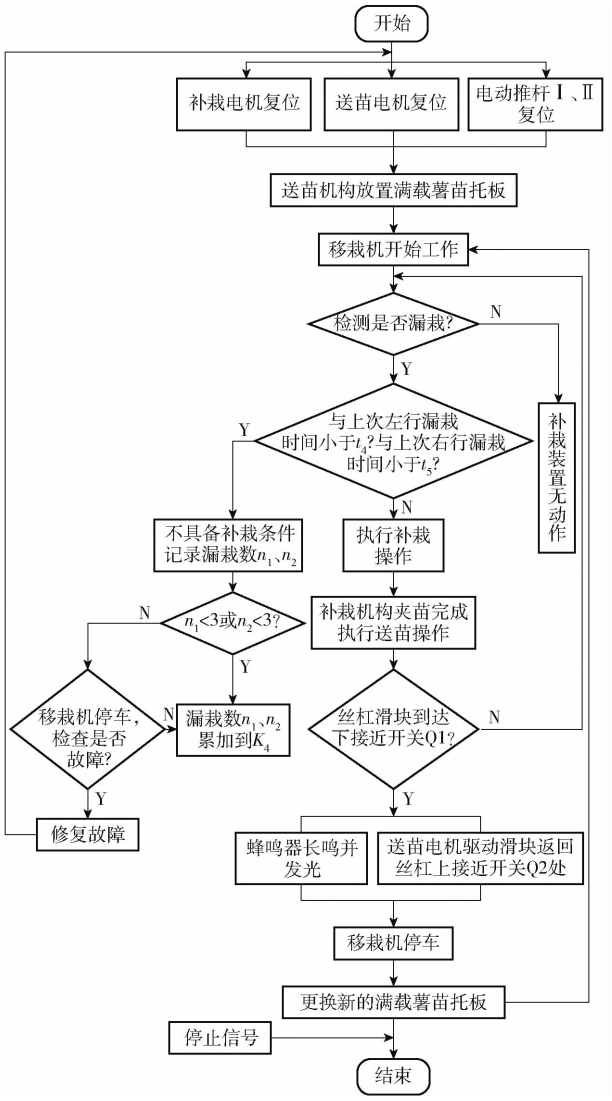


图 10　控制流程图

Fig. 10　Control flowchart

表 3 可知，在 3 种不同速度条件下，系统都能较为准确地识别正常栽植与漏栽情况。正常栽植检测成功率平均为 99.16%；漏栽检测成功率平均为 96.67%。说明在不同作业速度下，系统均具有较高检测准确性与稳定性。

表 3　不同速度下 $X=600$ ms 条件漏栽检测试验结果

Tab. 3　Experimental results of missed planting detection under $X=600$ ms condition at different speeds

速度/（m·s^{-1}）	总检测次数/次	实际正常次数/次	实际漏栽次数/次	系统判定正常次数 N_1/次	系统判定漏栽次数 N_2/次	正常栽植检测成功率 R_1/%	漏栽检测成功率 R_2/%
0.2				159	39	99.37	97.5
0.3	200	160	40	158	39	98.75	97.5
0.4				159	38	99.37	95.0
平均值	200	160	40	158.67	38.67	99.16	96.67

试验表明，所选时间窗口 $X=600$ ms 具有良好的适应性与可靠性，可满足移栽作业漏栽检测需求，为后续传感器可靠性试验与田间试验提供可靠基础。

5.2　传感器可靠性试验

为验证漏栽检测系统在海南高温高湿热带环境下的可靠性，本研究于 2025 年 9 月在海南大学智能农机装备研究所，利用模拟田间条件的台架

进行了系统测试,测试环境为室外当地 9 月午间的强光照条件,光照强度为 80 000 ~ 120 000 lx;尘土浓度控制在 10 ~ 15 mg/m^3,台架试验模拟了 0.2、0.3、0.4 m/s 的移栽机前进速度,每个给定的速度重复测试 3 次,每次试验连续检测 200 株薯苗,对每次试验进行人工核对。测试结果表明传感器的选型及布局均合理,其漏检和误检率总和不超过 5%。这为后续的田间试验创造了良好条件,台架试验如图 11 所示。



图 11 漏栽检测台架试验

Fig. 11 Missing planting detection bench test

1. 检测栽植夹对射式红外光电传感器 2. 检测薯苗对射式红外光电传感器

5.3 田间试验

2025 年 9 月 15—30 日,在海南大学智能农机装备研究所甘薯试验田进行了田间试验,试验用薯苗品种为“高系 14 号”,采用高剪苗方式取苗,试验栽植时,秧苗平均苗长为 370 mm,茎粗为 5.1 mm,结节数为 6 ~ 9 个。配套动力为 81 kW 的东方红 LY1104 型轮式拖拉机,移栽机由固定驾驶员操作,喂苗人员均经过统一培训。数据采集在每小区作业后立即进行,采用双人独立调查、现场标记、后期核对的方法,精准记录各项核心数据,以确保数据来源的可靠性。田间试验如图 12 所示。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field trial

移栽机在给定的 0.2 ~ 0.4 m/s 速度下进行试验,每个速度水平重复 3 次,每次试验选取薯苗 200 株。在田间试验中,将漏栽检测系统及补栽装置的功能全部开启,其中漏栽检测系统中对射式红外光电传感器能成功识别到移栽机栽苗个数的检测成功率 δ 表示为

$$\delta = \frac{K_1}{200} \times 100\% \tag{10}$$

其中漏栽检测系统检测移栽机在田间的原始漏栽率 α 表示为

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \times 100\% \tag{11}$$

由上述 3.2 节可知,并不是所有的漏栽都可以被成功补栽。因此,被识别出的漏栽中,补栽装置成功执行补栽的补栽成功率 β 表示为

$$\beta = \frac{K_3}{K_2} \times 100\% \tag{12}$$

此外,还需要研究开启补栽装置后的漏栽情况,即最终漏栽率 γ,其计算式为

$$\gamma = \frac{K_4}{K_1} \times 100\% \tag{13}$$

根据田间试验的试验数据由式(10) ~ (13)得出每 3 次试验数据的平均值如表 4 所示,为评估移栽机前进速度对作业性能的显著性影响,对田间试验数据进行了单因素方差分析,显著性水平设定为 $P < 0.05$。方差分析结果见表 5。

根据田间试验数据(表 4)与方差分析结果(表 5)。当移栽机前进速度由 0.2 m/s 增至 0.4 m/s 时,系统平均检测成功率 δ 从 98.67% 降至 97.67%,单因素方差分析证实该下降趋势具有统计学意义($F = 5.600$, $P = 0.042$);平均检测漏栽率 α 从 8.79% 升至 10.92%,该增长同样达到显著水平($F = 8.872$, $P = 0.016$)。上述统计结果表明,前进速度对检测系统的性能存在较大的影响。当速度提升至 0.4 m/s 时,田间机械振动较大且尘土干扰超出了台架试验所模拟的环境条件,导致对射式红外光电传感器检测稳定性降低;同时,移栽机在高速运转时操作人员送苗速度跟不上输苗带的输送速度也会导致原始漏栽率增加。

在补栽装置开始执行后,平均补栽成功率 β 从 92.36% 降至 87.56%,证明了第 3.4 节的理论分析:由于补栽装置的作业时间是固定不变的,在工作速度较高情况下发生连续漏栽时,补栽装置难以在有限的时间内完成所有补栽任务,出现应补栽的位置无法补栽的概率增大。然而,方差分析表明,速度变化对 β 的影响未达到显著水平($F = 2.436$, $P = 0.168$),表明补栽装置在试验速度范围内保持相对稳定的执行能力。

此外,虽然最终漏栽率 γ 的平均值从 0.68% 升至 1.37%,但其变化并不显著($F = 4.330$, $P = 0.069$),表明 γ 被成功控制在 1.37% 以下的低水平。启用补栽装置后,系统最终漏栽率 γ 相较于未补栽时的

表 4　移栽田间试验结果

Tab. 4　Transplanting field trial results

移栽机运行速度/(m·s^{-1})	试验编号	试验株数/株	检测的栽植株数 K_1/株	检测的漏栽株数 K_2/株	执行补栽株数 K_3/株	最终漏栽株数 K_4/株	检测成功率 δ/%	检测漏栽率 α/%	补栽成功率 β/%	最终漏栽率 γ/%
0.2	1	200	197	18	16	2	98.5	9.14	88.89	1.02
	2	200	198	16	15	1	99.0	8.08	93.75	0.50
	3	200	197	18	17	1	98.5	9.14	94.44	0.51
	平均值	200	197.33	17.33	16	1.33	98.67	8.79	92.36	0.68
0.3	1	200	196	19	17	2	98.0	9.69	89.47	1.02
	2	200	195	18	16	2	97.5	9.23	88.89	1.03
	3	200	197	17	16	1	98.5	8.63	94.12	0.51
	平均值	200	196	18	16.33	1.67	98.00	9.18	90.83	0.85
0.4	1	200	195	23	20	3	97.5	11.79	86.96	1.54
	2	200	196	20	18	2	98.0	10.20	90.00	1.02
	3	200	195	21	18	3	97.5	10.77	85.71	1.54
	平均值	200	195.33	21.33	18.67	2.67	97.67	10.92	87.56	1.37

表 5　不同前进速度对性能指标影响的方差分析

Tab. 5　Variance analysis of impact of different forward speeds on performance indicators

性能指标	F	P	显著性
检测成功率 δ	5.600	0.042	s
检测漏栽率 α	8.872	0.016	s
补栽成功率 β	2.436	0.168	ns
最终漏栽率 γ	4.330	0.069	ns

注：s 表示显著；ns 表示不显著。

检测漏栽率 α 降幅达 8.11 ~ 9.55 个百分点。此结果从统计上证实，所研究构建的漏栽检测系统与补栽装置在速度较高时也可以有效地降低漏栽率。

6　结论

（1）针对 2ZQX－2/1 型甘薯移栽机，构建了漏栽检测与自动补栽的协同作业系统。通过设计专用机械机构与控制逻辑，构建了从漏栽检测到补栽装置执行的闭环控制流程，实现了漏栽检测、精准补栽与有序送苗三者间高效、可靠的协同作业。

（2）提出了基于对射式红外光电传感器的延时检测机制，设计了传感器安装布局并编写 PLC 判定逻辑程序，构建了“先检测栽植夹，再判定夹苗状态”的检测流程，精确可靠地识别甘薯苗漏栽情况。

（3）设计了由步进电机与电动推杆驱动的补栽机构，能够实现对不同行位的补栽任务；步进电机驱动的丝杠送苗机构，在补栽过程中精准送苗，且托板式苗架具有无苗报警功能，提升了作业的自动化程度以及人工效率。

（4）田间试验结果表明：在作业速度 0.2 ~ 0.4 m/s 范围内，该系统检测成功率均超过 97%；启用补栽装置后，最终漏栽率保持在 1.37% 以下，有效降低了甘薯移栽机的漏栽率。

参　考　文　献

[1] 原欣语，赵霞. 中国甘薯生产布局变迁及其影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划，2025，46(7)：111－121.
YUAN Xinyu, ZHAO Xia. Study on the changes and influencing factors of sweet potato production layout in China[J]. Chinese Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(7): 111－121. (in Chinese)

[2] 孙言博，祝志欣，黄婷，等. 海南甘薯主栽品种再生体系的优化[J]. 热带作物学报，2020，41(2)：244－251.
SUN Yanbo, ZHU Zhixin, HUANG Ting, et al. Optimization of the regeneration system for main sweet potato varieties in Hainan [J]. Tropical Crops, 2020, 41(2): 244－251. (in Chinese)

[3] 刘健，娄运生，任丽轩，等. 海南澄迈甘薯营养品质与土壤养分相关性研究[J]. 西南农业学报，2021，34(11)：2398－2403.
LIU Jian, LOU Yunsheng, REN Lixuan, et al. Study on the correlation between nutritional quality of sweet potatoes and soil nutrients in Chengmai, Hainan [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2398－2403. (in Chinese)

[4] 武广伟，王瑞雪，李鑫，等. 国内外甘薯移栽技术装备研究现状及展望[J]. 农机化研究，2024，46(7)：1－8.
WU Guangwei, WANG Ruixue, LI Xin, et al. Research status and prospect of transplanting technology and equipment of sweet potato at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7): 1－8. (in Chinese)

[5] 庄如月. 甘薯裸苗移栽机构优化设计与试验研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2021.
ZHUANG Ruyue. Optimization design and experimental study on transplanting mechanism of sweet potato seed seedlings[D].

Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)
[6] PAN Zhiguo, LIN Li, CHEN Dongquan et al. Design and optimization of a boat-bottom-shaped transplanting device for sweet potato (*Ipomoea batatas*) with low seedling damage rate[J]. Appl. Sci., 2022, 12: 2817.
[7] 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)
[8] 朱倩,王公仆,张万枝,等. 甘薯种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2025,46(7):36-42.
ZHU Qian, WANG Gongpu, ZHANG Wanzhi, et al. Research progress on key technologies and equipments of sweet potato planting mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7): 36-42. (in Chinese)
[9] 张云鹏,谭芊,许鹏,等. 基于 EDEM-ADAMS 的甘薯水平移栽机构优化设计[J]. 中国农机化学报,2024,45(1):35-41,337.
ZHANG Yunpeng, TAN Qian, XU Peng, et al. Optimization design of sweet potato horizontal transplanting mechanism based on EDEM-ADAMS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 35-41,337. (in Chinese)
[10] 刘姣娣,曹卫彬,许洪振,等. 自动补苗装置精准定位自适应模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报,2017,33(9):37-44.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, XU Hongzhen, et al. Adaptive fuzzy-PID control of accurate orientation for auto-detect seedling supply device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 37-44. (in Chinese)
[11] LIN Kaiyuan, SI Huiping, CHEN Jie, et al. A new approach for measuring leaf projected area for potted plant based on computer vision[C] // TAN T, WANG G, WANG S, et al. Advances in Image and Graphics Technologies. IGTA 2016. Communications in Computer and Information Science. Singapore: Springer, 2016: 1-7.
[12] DINESH A, BALAKANNAN S P, MARAGATHARAJAN M. A novel method for predicting plant leaf disease based on machine learning and deep learning techniques[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 155: 111071.
[13] 童俊华,王钦源,李振,等. 温室穴盘苗多末端补苗移植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):227-235.
TONG Junhua, WANG Qinyuan, LI Zhen, et al. Design and test of multi-end seedling transplantation mechanism for greenhouse cave tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 227-235. (in Chinese)
[14] BESHARATI B, NAVID H, KARIMI H, et al. Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 874-881.
[15] 贺磊盈,杨太玮,武传宇,等. 基于贪心遗传算法的穴盘苗补栽路径优化[J]. 农业机械学报,2017,48(5):36-43.
HE Leiying, YANG Taiwei, WU Chuanyu, et al. Optimization of replugging tour planning based on greedy genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 36-43. (in Chinese)
[16] 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)
[17] 孙伟, 王关平, 吴建民. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 8-15.
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 8-15. (in Chinese)
[18] 刘树峰,张广玲,李光提,等. 马铃薯播种漏播检测自动补种装置设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(3):78-83.
LIU Shufeng, ZHANG Guangling, LI Guangti, et al. Design and experiment on the monitoring and reseeding device of potato sower[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 78-83. (in Chinese)
[19] 雷小龙,邹洪宇,杨正颖,等. 马铃薯播种机漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2022,27(12):234-244.
LEI Xiaolong, ZOU Hongyu, YANG Zhengying, et al. Design and experiment of miss-seeding monitoring and reseeding system for potato seeder[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12): 234-244. (in Chinese)
[20] WANG Guanping, SUN Wei, ZHANG Hua, et al. Research on a kind of seeding monitoring and compensating control system for potato planter without additional seed metering chamnel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177(4): 10-21.
[21] LIU Zhengduo, XU Wang, ZHENG Wenxiu, et. al. Design of a sweet potato transplanter based on a robot arm[J]. Appl. Sci., 2021, 11: 9349.
[22] 冯全,栗震霄,吴建民,等. 免耕播种机高抗尘排种监测器的设计与试验[J]. 农业机械学报,2006,37(9):68-70.
FENG Quan, LI Zhenxiao, WU Jianmin, et al. Development of dustproof annunciator system for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 68-70. (in Chinese)
[23] 徐亚雷,杨红光,潘志国,等. 甘薯裸苗斜插式栽植机构及电控系统研制[J]. 中国农机化学报,2024,45(6):53-57,71.
XU Yalei, YANG Hongguang, PAN Zhiguo, et al. Development of oblique-planting mechanism for sweet potato seedlings and its electric control system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 53-57,71. (in Chinese)

(下转第 104 页)

conveying[J]. Powder Technology, 2025, 464: 121216.
[17] ZHANG Q, WANG J F, LIU J X, et al. Instantaneous multi-frequency tracker for nonstationary vibration signal in mechanical system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 203: 110695.
[18] JI C, LIU W R, DENG Y G, et al. Calibration of DEM parameters and microscopic deformation characteristics during compression process of lateritic soil with different moisture contents[J]. Agriculture, 2025, 15: 1548.
[19] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报,2025,41(5):38 - 49.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(5): 38 - 49. (in Chinese)
[20] WU Z Y, WANG X S, LIU D W, et al. Calibration of discrete element parameters and experimental verification for modelling subsurface soils[J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 215 - 227.
[21] LIU G Y, XIA J F, ZHENG K, et al. Effects of vibration parameters on the interfacial adhesion system between soil and metal surface[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105294.
[22] YU C L, WANG J G, ZHAO P C, et al. Low-frequency vibration energy harvesting using electret-piezoelectric complementary coupling with optimized bandwidth and power density[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 532: 146953.
[23] CHENG J, ZHENG K, XIA J F, et al. Effects of ultrasonic vibration-assisted cutting on tillage blade performance and soil fragmentation characteristics under different soil moisture contents[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 252: 106575.
[24] MA X D, GUO B J, LI L L. Simulation and experiment study on segregation mechanism of rice from straws under horizontal vibration[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 1 - 13.
[25] COSTA J C, BORGES J A R, PIRES L F. Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: analysis of system geometry [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 23 - 31.
[26] LI T, SHU J J, LI Y, et al. Wave propagation characteristics of fluid-containing soil granular materials at different frequencies under multiple dissipation mechanisms: a case study on calcareous sand in the South China Sea[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 174: 106621.
[27] LIU H F, ZHAO L Y, CHANG Y L, et al. Design and characteristic analysis of magnetostrictive bistable vibration harvester with displacement amplification mechanism[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114361.
[28] JIA N, ZHANG H Y, BO J C, et al. Study on walnut dynamic response to different excitations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110432.
[29] MACNIDER B, XIU H, TAMUR C, et al. Customizable wave tailoring nonlinear materials enabled by bilevel inverse design [J]. Nature Communications, 2025, 16: 3425.
[30] PANG J, LI Y M, JI J T, et al. Vibration excitation identification and control of the cutter of a combine harvester using triaxial accelerometers and partial coherence sorting[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 25 - 34.
[31] LAU J A, CHEN L, CHOUDHURY A, et al. Transporting and concentrating vibrational energy to promote isomerization[J]. Nature, 2021, 589: 391 - 395.
[32] XU T L, LI Y G, ZHANG C, et al. Low frequency band gap prediction and broadband vibration reduction of multi-scale elastic metabeams with particle damping[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 235: 112929.
[33] DU J, HENG Y F, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.

(上接第 26 页)

[24] 王颖,李建桥,邹猛,等. 仿生锥形触土部件水平阻力研究[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊 1):124 - 129.
WANG Ying, LI Jianqiao, ZOU Meng, et al. Research on drag force for bionic cone soil contact part[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp. 1):124 - 129. (in Chinese)
[25] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 六版. 北京:机械工业出版社,2018.
[26] 刘正铎. 机械臂式甘薯移栽机关键技术与移栽机理研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
LIU Zhengduo. Key technology and transplanting mechanism of sweet potato transplanter with mechanical arm[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)
[27] 孔德航,张学东,崔巍,等. 基于模糊 PID 的顶夹式取苗装置苗盘定位控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 207 - 216,229.
KONG Dehang, ZHANG Xuedong, CUI Wei, et al. Control method for seedling tray positioning in top-clamping seedling-taking device based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):207 - 216, 229. (in Chinese)