doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.019

马铃薯播种机漏播检测与自动补种系统设计与试验

杨然兵[1,2]　刘　莎[1]　张　还[1]　潘志国[1]　吴洪珠[3]
李　洋[4]　李鑫林[1]　石　岳[1]　邓志熙[1]
(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 海南大学机电工程学院, 海口 570228;
3. 青岛洪珠农业机械有限公司, 青岛 266300; 4. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对马铃薯播种机在高速作业过程中存在漏种严重问题,以勺带式排种器为基础,设计了一种以 PLC 为控制核心的漏播检测与自动补种装置,该装置采用光电传感器组分别对勺带式排种器与补种排种装置的种薯漏播情况进行检测,实现种勺漏播位置精准定位,并设计了以补种排种装置与双电磁铁推杆为核心的自动补种装置,实现漏播位置的连续精准补种,同时采用加速补种原理实现补种排种装置自补种,避免因其排种不成功影响勺带式排种器的补种效果。针对漏播检测及补种控制要求编写控制程序,并设计人机交互界面,实现自动补种。利用试验台开展取种带线速度为 0.24 ~ 0.64 m/s 的漏播情况检测效果及补种成功率试验,结果表明,漏播检测准确率为 100%,原始漏播率为 6.08% ~ 13.64%,补种后漏播率为 0.72% ~ 1.96%,平均补种成功率为 87.16%。试验结果表明漏播检测与自动补种装置作业性能较好,对种勺连续缺种的情况补种效果也较为稳定,满足马铃薯播种机在高速作业下播种作业需求。

关键词: 马铃薯播种机; 勺带式排种器; 漏播检测; 自动补种装置
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0204-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Missing Seeding Detection and Automatic Reseeding System of Potato Planter

YANG Ranbing[1,2]　LIU Sha[1]　ZHANG Huan[1]　PAN Zhiguo[1]　WU Hongzhu[3]
LI Yang[4]　LI Xinlin[1]　SHI Yue[1]　DENG Zhixi[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*
3. *Qingdao Hongzhu Agricultural Machinery Co.*, *Ltd.*, *Qingdao* 266300, *China*
4. *Menoble Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the serious problem of seed omission in the high-speed operation of potato planters, a seed omission detection and automatic reseeding device was designed based on a spoon belt type seed metering device and with a PLC as the control core. The device used a group of photoelectric sensors to detect the seed omission of the spoon belt type seed metering device and the reseeding device respectively, achieving precise positioning of the seed spoon omission position. An automatic reseeding device with a reseeding device and a double electromagnetic iron push rod as the core was designed to achieve continuous and precise reseeding at the omission position. At the same time, the principle of accelerated reseeding was adopted to realize the self-reseeding of the reseeding device, avoiding the influence of unsuccessful reseeding on the reseeding effect of the spoon belt type seed metering device. Control programs were written according to the requirements of seed omission detection and reseeding control, and a human-machine interface was designed to achieve automatic reseeding. The detection effect of seed omission and the success rate of reseeding were tested on a test bench with the seed

收稿日期: 2024-11-13　修回日期: 2024-12-12
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000902)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P32)和中央引导地方科技发展专项计划项目(24-2-4-4-zyyd-nsh)
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: 潘志国(1977—),男,教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail: peter_panzg@163.com

metering belt speed ranging from 0.24 m/s to 0.64 m/s. The results showed that the detection accuracy of seed omission was 100%, the original seed omission rate was from 6.08% to 13.64%, and the seed omission rate after reseeding was from 0.72% to 1.96%, with an average reseeding success rate of 87.16%. The test results indicated that the seed omission detection and automatic reseeding device had good working performance and stable reseeding effect for continuous seed omission of the seed spoon, meeting the seeding operation requirements of potato planters under high-speed operation.

Key words: potato planter; spoon-belt type seed-metering device; missing seeding detection; automatic reseeding device

0　引言

马铃薯作为我国重要的粮食作物和经济作物，其产量对保障国家粮食安全、促进农业经济发展具有重要影响，而提升马铃薯机械化播种效率和质量是增加马铃薯产量的关键途径[1-3]。勺带(链)式马铃薯排种器作为国内外广泛使用的一种排种器，其在高速作业过程中存在较高的漏播问题[4-5]。为保证播种质量，当前在实际作业过程中，一般通过人工对漏播种勺进行补种，但人工补种存在劳动强度大、作业速度难以提高等问题[6-7]，无法适应不同播种速度下补种的精准性。因此，为解决马铃薯机械化播种过程中漏播指数高的难题，亟需开展排种过程漏播检测和补种作业关键技术研究。

现阶段解决漏种问题最为有效方法是增加补种装置及控制系统进行种薯补偿[8-9]。近年来，国内外学者在漏播检测和自动补种方面均取得了诸多成果[10-12]。AL-YAMANI 等[13]通过对种子进行排序编码，采用编码与监控相结合的方式，实现了播种过程中漏播位置的检测与补种。张晓东等[14]设计了由红外光电传感器、单片机和步进电机组成的马铃薯播种机自动补种系统，但漏播检测准确率较低。刘全威等[15]提出了一种基于单片机的红外光电传感器监测系统和曲柄连杆打击式的补种方案，该系统漏播监测部分可靠性明显提高，且能够较好地实现种薯补偿。官洪民等[16]研发了一种由多种传感器融合的检测系统，创建了加速补种控制模型，该系统实现了无需单独增加补种装置便可保证检测可靠性和补偿准确性。温宝琴等[17]设计了一种以单片机为控制核心的电磁推杆式补种系统，实现了带勺式马铃薯排种器在高速运行速度下的连续补种需求，但在补种种道出口处会出现卡种现象而导致补种失败。

通过分析，目前对漏播检测及补种装置的研究大多是解决单列勺链式排种器的漏播问题，但针对勺带式排种器在高速作业下的漏播问题研究较少。本文针对勺带式马铃薯播种机在高速作业下漏播严重的问题，以 PLC 为控制核心，设计一种漏播检测与自动补种装置，并搭建试验台进行系统优化试验，以实现漏播位置检测及连续精准补种，进而保证马铃薯播种机播种质量。

1　试验台总体方案

1.1　基本结构

漏播检测与自动补种试验台结构示意图如图 1 所示，主要包括机架、勺带式排种器、补种排种装置、电磁铁推杆、补种槽、步进电机、直流电机、漫反射型光电传感器、PLC 控制系统等部分组成，由于勺带式马铃薯排种器取种带表面交错排布两列种勺，所以每列种勺配备一套漏播检测模块与补种模块，每一套漏播检测模块有一套可调式光电传感器组，为了便于检测，漏播检测传感器通过传感器安装架安装在种箱板上，每一套补种模块由补种排种装置、第一补种槽、第二补种槽、第一电磁铁推杆、第二电磁铁推杆、毛刷、步进电机等组成，通过补种排种装置保护壳安装在勺带式排种器保护壳上。第一补种槽位于补种排种装置正下方，第一电磁铁推杆安装于第一补种槽内，用于对第二补种槽进行补种，保证第二

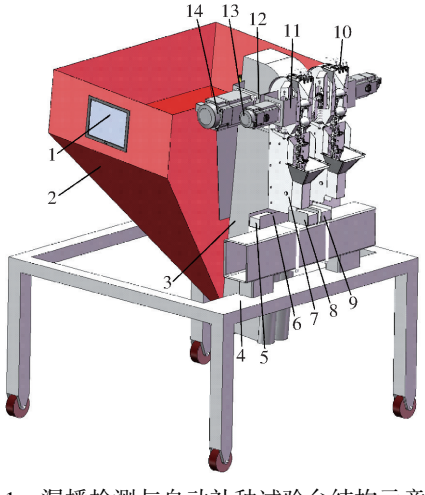


图 1　漏播检测与自动补种试验台结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of test bed for seed omission detection and automatic reseeding

1. 控制面板　2. 种箱　3. 排种器保护壳　4. 机架　5. 第一电磁铁推杆　6. 第一补种槽　7. 补种排种装置　8. 第二补种槽　9. 第二电磁铁推杆　10. 补种排种装置漏播检测传感器组　11. 步进电机安装架　12. 直流电机安装架　13. 步进电机　14. 直流电机

补种槽持续有种,第二补种槽位于补种口处,垂直于取种带安装,第二电磁铁推杆安装于第二补种槽内,用于对勺带式排种器漏播种勺的直接补种。补种排种装置上也安装有光电传感器组,通过传感器安装架安装在补种排种装置上部即将抛种位置处,用于补种排种装置的漏种检测。控制面板安装于配电箱箱门外侧。

1.2 工作原理

作业前,系统控制步进电机带动补种排种装置运转,其取种勺经过种箱取得待补种薯且随补种链上升,当待补种薯运动至其导种筒底部即排种口时落至第一补种槽内,此时第一电磁铁推杆通电动作将待补种薯推入第二补种槽内,而后第一电磁铁推杆在归位弹簧的作用下返回原位,同时补种排种装置继续运转,当下一个待补种薯落入第一补种槽后,步进电机迅速停止转动,补种装置备种结束。

工作过程中由直流电机带动如图 1 所示勺带式排种器主驱动轮运转,取种带表面种勺通过种箱取得种薯,当取种勺经过种勺检测传感器位置时,将信号传递给 PLC,然后 PLC 控制启动种薯传感器组开始检测,当检测到取种勺中存在种薯时,补种模块不动作,反之则向 PLC 输出漏播信号,PLC 接收到漏播信号后驱动补种程序控制继电器导通,第二电磁铁推杆通电动作将补种口待补种薯推入排种器保护壳后复位,当第二补种槽缺种时,第一电磁铁推杆动作将待补种薯从第一补种槽推至第二补种槽后复位,同时步进电机带动补种链条运转进行排种动作,将待补种薯排种至第一补种槽,循环往复。若补种排种装置漏播检测模块检测到补种排种装置取种勺漏种,则在该勺需排种的前一时刻,控制系统控制步进电机以正常排种速度 2 倍的速度加速该勺使下一种勺中种薯补上该位置的种薯,完成一次自补种。PLC 根据漏播检测信号,对播种总数与漏种数目进行统计,并将结果传达给显示模块进行同步显示。

2 漏播检测与补种系统设计

2.1 系统硬件组成

漏播检测与补种系统硬件构成如图 2 所示,主要由电源模块、PLC 模块、漏播检测模块、补种模块、显示模块组成,检测模块主要进行漏播检测与播种数量统计,并将结果输入 PLC。补种模块的主要作用是在 PLC 的控制下进行补种工作,电源模块负责为系统各个模块进行供电,显示模块除统计显示总漏播数和总播种数,进行排种器主动轮转速、株距等关键参数设置外,还可以对各个排种器进行清种操作。

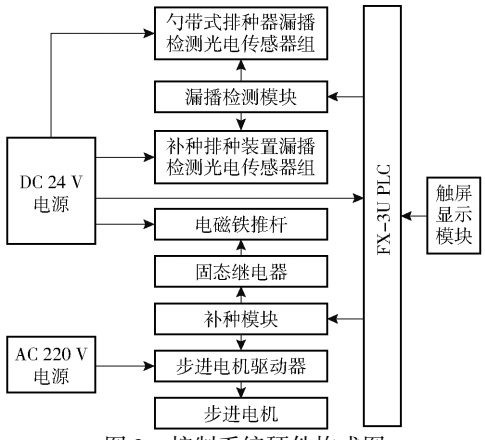


图 2 控制系统硬件构成图

Fig. 2 Control system hardware composition diagram

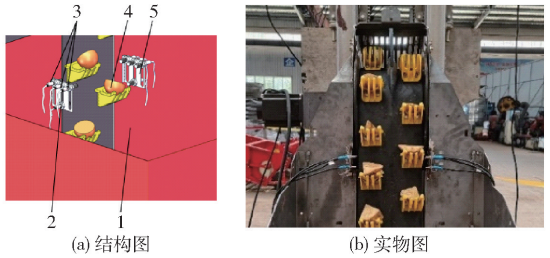
2.2 漏播检测模块

根据勺带式排种器及补种排种装置的结构特点,本研究采用基于漫反射型光电传感器的实时漏种检测技术对种勺取种情况进行检测,其具有体积小、重量轻,便于携带、安装和使用的优点[18]。

2.2.1 勺带式排种器漏播检测模块

根据勺带式排种器结构尺寸,以双列种勺分别检测互不干涉和保证检测精度为设计目标,传感器检测范围应在 50 ~ 150 mm 之间,由于取种带线速度较快,根据其田间运行环境,传感器需要较好的灵敏度和穿透性,研究中种勺检测传感器及种薯检测传感器均选用 LTD-05NO 型漫反射型光电传感器,其感应距离为 1 ~ 200 mm,可根据实际要求进行调节(精确到 0.01 mm),响应时间小于 5 ms。

勺带式排种器漏播检测模块主要由 1 组种勺检测传感器、3 组种薯检测传感器、传感器安装架、PLC 等组成,其结构图如图 3a 所示。其中 3 组种薯检测传感器沿平行于取种带方向等间距排列布置在传感器安装架上,一组种勺检测传感器安装在其中心正下方 5 cm 处。当种勺随取种带自下而上运动时,种勺检测传感器光源首先被遮挡,即检测到种勺到来,其与 3 组种薯检测传感器构成逻辑与的关系。当种勺检测传感器与种薯检测传感器中的任意 1 组传感



(a) 结构图 (b) 实物图

图 3 勺带式排种器漏播检测模块

Fig. 3 Spoon-belt type seed dispenser missed sowing detection module

1. 种箱 2. 种勺检测传感器 3. 种薯检测传感器 4. 切块种薯 5. 传感器安装架

器、任意 2 组传感器或 3 组传感器同时被遮挡时证明种勺中存在种薯；当种勺检测传感器组与种薯检测传感器组中的其中一组被阻挡而另一组没被遮挡时，证明种勺中没有种薯，即判定为漏种。

根据高速播种作业要求，该勺带式播种机行驶速度需在 3 ~ 8 km/h 范围内，取种带表面种勺为双列交错排布，相邻种勺之间距离 l 为 72.5 mm，参考马铃薯种植农艺要求知株距为 200 ~ 300 mm，此处取 250 mm。取种带线速度与播种机行驶速度关系由株距 L 确定，种勺运动一个相邻种勺间距的时间与播种机前进一个株距的时间相等，即

$$\frac{L}{V}=\frac{l}{v} \tag{1}$$

式中　V——播种机行驶速度，km/h

v——取种带线速度，m/s

根据式(1)计算得 v 为 0.24 ~ 0.64 m/s。

由于所选漫反射型光电传感器的响应时间小于 5 ms，为了取种带带着种勺经过时，传感器有足够的响应时间，响应时间按照 5 ms 计算，则勺带式排种器漏播检测传感器响应高度为

$$h_1=vt \tag{2}$$

式中　h_1——勺带式排种器漏播检测传感器响应高度，mm

t——传感器响应时间，ms

根据式(2)计算得 h_1 为 1.20 ~ 3.20 mm。因有种块种勺和无种块种勺高度差大于 5 mm，该传感器的响应时间精度满足设计要求。

2.2.2　补种排种装置漏播检测模块

由于补种排种装置结构较为紧凑，将检测装置安装至补种排种装置上部，即抛种位置处，研究中种勺检测传感器及种薯检测传感器选用尺寸较小的 LTD－06NO 型漫反射型光电传感器，检测距离 1 ~ 130 mm 可调，响应时间小于 5 ms。

补种排种装置漏播检测模块包括 1 组种勺检测传感器、2 组种薯检测传感器、传感器安装架、PLC 等，其结构图如图 4 所示，传感器组通过传感器安装架安装在垂直于种勺方向，如图 4c 所示。补种链带动种勺从种箱内自下而上取种，当种勺到达漏播检测位置时，种勺传感器光源被遮挡，产生低电平脉冲信号传递给 PLC，然后 PLC 控制启动种薯检测传感器组开始检测，当种薯检测传感器组中的至少一个传感器光源被遮挡时，信号反馈给 PLC 控制系统，表示此种勺有种薯；若任一种薯检测传感器没产生高电平脉冲到低电平脉冲的变化即光源通过种勺镂空位置，则表示此种勺漏种。

根据补种要求，补种排种装置需与第二电磁铁推杆同时工作，且需在第一电磁铁推杆复位后立即完成排种，经检测两电磁铁工作时间总和为 288 ms，补种排种装置种勺间距为 130 mm，则补种排种装置链条线速度为



(a) 结构图　(b) 实物图　(c) 传感器安装示意图

图 4　补种排种装置漏播检测模块

Fig. 4　Missed sowing detection module for replanting and seed arrangement device

1. 补种排种装置　2. 传感器安装架　3. 种勺检测传感器　4、5. 种薯检测传感器　6. 待补种薯

$$v_1=\frac{l_1}{t_1} \tag{3}$$

式中　v_1——补种排种装置链条线速度，m/s

l_1——补种排种装置种勺间距，mm

t_1——两电磁铁工作时间总和，ms

根据式(3)计算得 v_1 为 0.45 m/s。

由于此模块所选传感器的响应时间与勺带式排种器漏播检测传感器响应时间相同，则补种排种装置漏播检测传感器响应高度 h_2 为

$$h_2=v_1t \tag{4}$$

根据式(4)计算得响应高度 h_2 为 2.25 mm。因有种块种勺和无种块种勺高度差大于 5 mm，该传感器的响应时间精度满足设计要求。

2.3　**补种模块**

2.3.1　勺带式排种器补种模块

通过测量可得，切块种薯最大长度为 55 mm，最大宽度为 45 mm，最大厚度为 29 mm。因此补种执行装置的行程不能小于 55 mm，根据取种带线速度 v 最大为 0.64 m/s，勺带式排种器单列种勺间距 l_2 为 145 mm，则有效补种时间要求为

$$t_0=\frac{l_2}{v} \tag{5}$$

式中　t_0——有效补种时间，ms

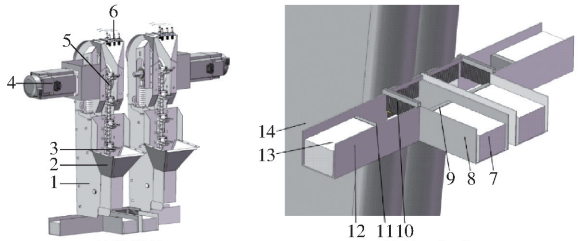
根据式(5)计算得 t_0 为 226.56 ms。

根据排种器结构尺寸，补种执行装置宽度应不大于勺带式排种器保护壳宽度。选用撞击式电磁铁推杆作为补种执行装置，工作电压为 24 V，电流为 8 A，行程为 60 mm，推力为 100 N，该电磁铁长度为 186 mm，宽度为 45 mm，高度为 51 mm，质量为860 g，可以满足补种要求。

由于电磁铁推杆工作电流较大，PLC 无法实现对电磁铁推杆的直接控制，为防止 PLC 输出点被烧

坏,采用 SSR－1 DD220D40 型固态继电器实现对电磁铁推杆的间接控制。当晶体管型 PLC 内部逻辑电路输出高电平信号时,晶体管处于导通状态,允许电流通过,与第二电磁铁推杆相连的固态继电器 2 导通,进而第二电磁铁推杆通电吸合带动动作块进行补种,而后 PLC 输出信号使与第一电磁铁推杆相连的固态继电器 1 导通,第一电磁铁推杆通电吸合,同时驱动步进电机驱动器工作。

补种模块结构如图 5 所示。补种模块主要由补种排种装置、步进电机、第一补种槽、第一电磁铁推杆-动作块、第二补种槽、第二电磁铁推杆-动作块组成,步进电机选择时代超群 86HCY155AL3S－TKO 型步进电机,步距角 1.2°,转矩 12 N·m,电流 4.0 A。第一补种槽设置在补种排种装置排种口正下方,第一补种槽与第二补种槽处于同一水平面。补种口及第一补种槽与第二补种槽之间,安装有毛刷条防止待补种薯因机器振动掉落、撞击反弹。勺带式排种器漏播检测模块检测到漏播信号后,补种控制电路启动,勺带式排种器漏播检测模块检测到缺种种勺位置到补种口相隔 8 个种勺,则勺带式排种器种勺计数传感器组即种勺检测传感器计数通过 7 个种勺后第二电磁铁推杆通电动作,推动待补种薯落入缺种种勺背部,电磁铁推杆铁芯在归位弹簧作用下返回初始位置,完成一次补种动作,此时第二补种槽缺种,第一电磁铁推杆动作将待补种薯从第一补种槽推至第二补种槽后复位,同时步进电机带动补种排种装置链条运转进行排种动作,将待补种薯排种至第一补种槽,确保补种槽内不缺种,保证连续补种要求。



(a) 整体结构 (b) 补种口部分

图 5 补种模块结构图

Fig. 5 Reseeding module structure diagrams

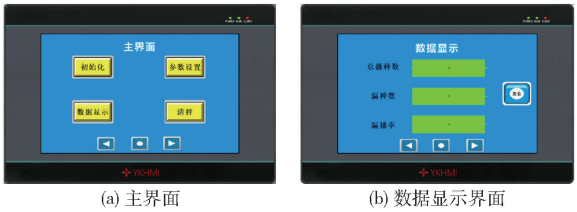
1. 补种排种装置保护壳 2. 补种排种装置种箱 3. 种勺 4. 步进电机 5. 排种链 6. 漏播检测传感器组 7. 第二电磁铁推杆 8. 第二补种槽 9、11. 动作块 10. 毛刷 12. 第一补种槽 13. 第一电磁铁推杆 14. 排种器保护壳

2.3.2 补种排种装置自补种模块补种过程

补种排种装置缺种种勺到排种口位置种勺个数为 10,即当补种排种装置漏播检测模块判别是缺种情况时,自补种控制电路启动,缺种补种排种装置种勺计数传感器组计数,通过 9 个种勺后,驱动步进电机以正常转速的 2 倍加速运行,将缺种种勺快速转过,即将下一个种勺上的种薯取代缺种种勺并快速排入补种槽中。

2.4 PLC 模块

由于 PLC 在自动控制领域中具有优异性能,且适用于农业机械[19],本漏播检测和自动补种控制系统采用 PLC 作为主控制器,能够满足有关的速度检测、数据处理和实时通信等控制要求。研究选用兼容版三菱 FX3U－40MT 型可编程控制器,晶体管输出类型响应时间快[20]。该控制器供电电压为 DC 24 V,24 路输入,16 路晶体管输出。PLC 模块主要对各个模块的信号进行接收、处理和输出。漏播检测模块传感器向 PLC 输入漏播、播种信号,进行漏播数和总播种数统计,占用 X010－X025 输入点。补种模块中 PLC 向左右步进电机驱动器及固态继电器输出信号,占用 Y000－Y001 和 Y011－Y014 输出点。显示模块采用中达优控 F700A 型触摸屏,采用 YKBuiler V5.3 组态软件开发,触摸屏界面如图 6 所示,可进行电机转速等参数的设定,以及试验台初始化及清种操作,实时显示总漏播数、总播种数、漏播率,方便试验进行。



(a) 主界面 (b) 数据显示界面

图 6 触摸屏界面

Fig. 6 Touchscreen interface

2.5 软件设计

控制系统相关程序采用三菱公司研发的 GX－Works2 开发软件编写,采用梯形图作为系统程序的编程语言,漏播检测与补种控制系统主程序流程图如图 7 所示,系统启动之后进入初始化,包括补种装置的备种、排种器的上种等;初始化之后通过相应显示模块进行排种器主动轮转速等参数设置。

相应参数设置后系统开始进入工作状态,当种勺检测传感器出现高电平向低电平的转变时,证明取种勺到达漏播检测位置,当至少一个种薯检测传感器发出的激光被遮挡,证明取种勺中存在种薯,若种薯检测传感器组发出的激光都没有被遮挡,则判定为漏播,需要进行补种操作。根据漏播检测与补种口之间的距离差,种勺检测传感器对漏播后经过一定量种勺计数后,控制系统控制补种模块进行补种。同时,补种排种装置相应漏播检测模块采用相同原理,即进行逻辑“与”运算结果判断是否正常排种。若漏播,则系统计数器开始通过种勺检测传感

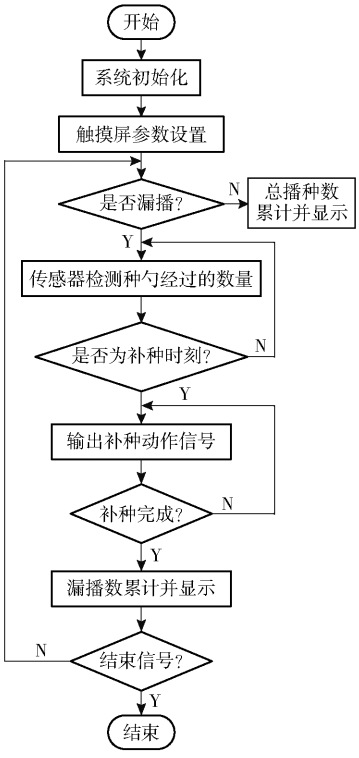


图 7　漏播检测与补种控制系统主程序流程图

Fig. 7　Flowchart of main program of seed omission detection and reseeding control system

器记录勺链运行时经过传感器的种勺个数，判断是否到达补种时刻，若达到补种时刻，则电机加速运行补种，反之系统将继续正常运行。

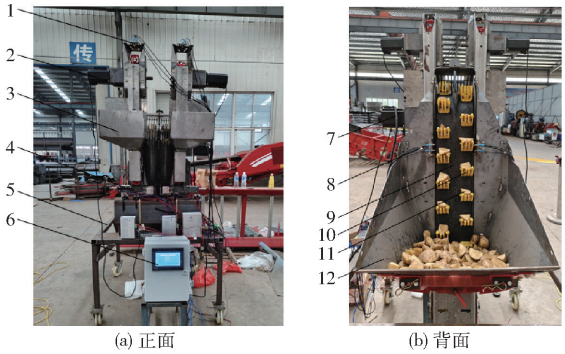
上述操作完成后，对总播种数与漏播数进行累加统计，计算漏播率并通过显示屏实时显示；若有结束信号，各个模块停止工作，反之，进行新一轮的漏播检测与补种。复位按钮控制总播种数、漏播数及漏播率清零。清种操作包括对勺带式排种器及补种排种装置中取种勺及种箱内剩余种薯进行清除。

3　性能试验

3.1　试验设备与材料

试验台架如图 8 所示，为验证该漏播检测与自动补种系统在勺带式马铃薯排种器上的漏播检测与补种的成功率，于 2024 年 6 月在青岛洪珠农业机械有限公司搭建漏播检测与自动补种试验台进行补种试验。

排种器主驱动轮动力由 1.5 kW 直流电机提供，电机转速可通过显示屏进行参数设定，主驱动轮转速通过旋转编码器进行测定，其测速原理为：当旋转编码器轴带动光栅盘旋转时，经发光元件发出的光被光栅盘狭缝切割成断续光线，并被接收元件接收产生初始信号，该信号经处理后输出脉冲信号[21]，PLC 通过接收脉冲信号进行速度计算。勺带式排种器使用切块种薯，补种过程采用平均直径为 35 ~ 40 mm 小型整薯，试验过程中以主动轮转速为主要影响因素，以补种成功率为评价指标进行单因素六水平试验。



(a) 正面　　(b) 背面

图 8　漏播检测与自动补种试验台

Fig. 8　Test bench for seed omission detection and automatic reseeding

1. 补种排种装置漏播检测模块　2. 步进电机　3. 补种排种装置　4. 电磁铁推杆模块　5. 机架　6. 控制系统　7. 直流电机　8. 勺带式排种器漏播检测模块　9. 取种带　10. 种勺　11. 切块种薯　12. 种箱

取种带线速度 v 与主动带轮转速关系为

$$n=\frac{v}{2\pi R} \tag{6}$$

式中　n——主动带轮转速，r/min

R——主动带轮半径，mm

播种机作业速度为 3 ~ 8 km/h，为测试漏播检测及自动补种系统的精准性，取种带线速度设置 0.24、0.32、0.40、0.48、0.56、0.64 m/s 6 个水平进行试验，每个水平下理论排种 400 个种薯，每组试验重复 5 次，通过台架试验统计勺带式排种器漏播检测装置检测漏种数 M、原始播种数 N_1、原始漏播数 N_2、最终理论播种数 N_3、最终播种数 N_4、补种数 N_5。

$$\begin{cases} N_3=N_1+N_2 \\ N_4=N_1+N_5 \end{cases} \tag{7}$$

通过式(1)和式(6)计算出播种机作业速度与取种带线速度及主动轮转速之间的对应关系，如表 1 所示，其中勺带式排种器主动带轮半径 R 为 135 mm。

表 1　速度对应关系

Tab. 1　Velocity correspondence

播种机作业速度/(km·h^{-1})	取种带线速度/(m·s^{-1})	主动带轮转速/(r·min^{-1})
3	0.24	16.76
4	0.32	22.34
5	0.40	27.93
6	0.48	33.51
7	0.56	39.10
8	0.64	44.68

根据统计数据可以计算出原始漏播率、最终漏播率、系统补种成功率为

$$\begin{cases}\gamma_1 = \dfrac{N_2}{N_3} \times 100\% \\ \gamma_2 = \dfrac{N_2 - N_5}{N_3} \times 100\% \\ \gamma_3 = \dfrac{N_5}{N_2} \times 100\% \end{cases} \tag{8}$$

式中 γ_1——原始漏播率,%

γ_2——最终漏播率,%

γ_3——补种成功率,%

3.2 试验结果与分析

漏播检测与自动补种系统性能试验结果如表 2 所示,试验过程采用摄像机进行统计,试验结果表明,每一个排种周期内实际漏种数与检测漏种数之差(测量误差)基本维持在一个范围内;排种器线速度超过 0.48 m/s 时,原始漏播率显著增加,主要原因是取种带线速度增加使得取种勺充种时间变短,充种效果变差,使得充种率下降[22]。

表 2 漏播检测与自动补种系统性能试验结果

Tab. 2 Seed omission detection and automatic reseeding system performance test results

取种带线速度/(m·s⁻¹)	统计量	试验号 1	2	3	4	5	均值
0.24	M	19	27	25	26	23	24
	N_1	377	373	368	365	371	371
	N_2	19	27	256	26	23	24
	N_5	15	24	22	22	21	21
0.32	M	29	34	30	28	27	30
	N_1	371	362	377	359	364	367
	N_2	29	34	30	28	27	30
	N_5	25	29	27	25	24	26
0.40	M	22	23	19	32	21	23
	N_1	365	358	370	361	363	363
	N_2	22	23	19	32	21	23
	N_5	19	20	17	28	19	21
0.48	M	34	40	36	33	39	36
	N_1	385	378	384	380	377	381
	N_2	34	40	36	33	39	36
	N_5	29	35	33	29	34	32
0.56	M	38	57	52	45	44	47
	N_1	379	386	382	373	388	382
	N_2	38	57	52	45	44	47
	N_5	32	49	47	40	37	41
0.64	M	65	63	54	60	57	60
	N_1	385	378	373	382	375	379
	N_2	65	63	54	60	57	60
	N_5	54	54	47	51	50	51

漏播率、补种成功率变化曲线如图 9 所示,当取种带线速度在 0.24 ~ 0.64 m/s 之间变化时,排种器的原始漏播率在 6.08% ~ 13.64%,且出现先增高后降低再升高的趋势。使用该系统后,最终漏播率在 0.72% ~ 1.96% 之间,平均最终漏播率为 1.15%。补种成功率随排种速度的增加出现先增加后平稳再降低的趋势,平均补种成功率为 87.16%,漏播检测成功率均为 100%,证明该补种系统可有效减少漏播率。

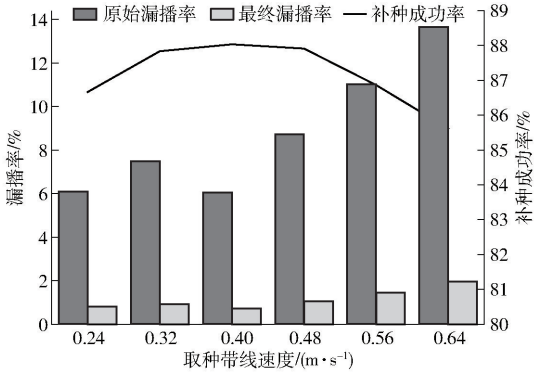


图 9 漏播率和补种成功率变化曲线

Fig. 9 Change curve of leakage rate and reseeding success rate

试验过程中通过对排种过程及补种过程采集图像发现,当取种带速度超过 0.48 m/s 时,取种勺出现 3 个及以上连续漏种的情况变多,由于 PLC 控制补种排种装置电机启动和减速过程具有时间差,其对第一补种槽的供种较慢,导致补种失败。后续研究可通过改变电机型号和优化系统程序等进行改进。

4 结论

(1)针对勺带式马铃薯排种器在高速排种下漏播严重的问题,设计了一种以 PLC 为控制核心的漏播检测与自动补种系统并搭建了试验台。

(2)分别设计了勺带式排种器和补种排种装置的漏播检测与补种模块,实现补种装置的精准高效补种。根据设计要求完成了硬件选型及程序设计,并设计了人机界面,实现试验过程中数据的可视化。

(3)开展了漏播检测与自动补种系统性能试验,试验结果表明:取种带线速度在 0.24 ~ 0.64 m/s 之间时,系统对漏播检测的成功率均为 100%,平均补种成功率为 87.16%,能够有效降低漏播率,满足马铃薯在高速作业下的播种要求。

参 考 文 献

[1] 吕金庆,刘齐卉,杨德秋,等. 气吸式马铃薯播种机智能供种系统设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(10):157 - 161.

LÜ Jinqing, LIU Qihui, YANG Deqiu, et al. Design and test of intelligent seed supply system for air suction potato lanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(10):157 - 161. (in Chinese)
[2] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):51 - 60.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type patato seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):51 - 60. (in Chinese)
[3] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报,2019,50(3):1 - 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):1 - 16. (in Chinese)
[4] 杨钦寿. 马铃薯种植机升运种子装置存在的问题浅析[J]. 机械工业标准化与质量,2014(9):35 - 37.
YANG Qinshou. Analysis on the existing problems of seed lifting device in potato planter[J]. Standardization and Quality of Machinery Industry,2014(9):35 - 37. (in Chinese)
[5] BUITENWERF H, HOOGMOED W B, LERINK P, et al. Assessment of the behaviour of potatoes in a cup-belt planter[J]. Biosystems Engineering,2006,95(1):35 - 41.
[6] 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)
[7] 卢延芳,孙传祝,王法明,等. 马铃薯播种机播种单元改进设计[J]. 农机化研究,2015,37(12):140 - 143.
LU Yanfang, SUN Chuanzhu, WANG Faming, et al. The improved design of potato planter seeding-unit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(12):140 - 143. (in Chinese)
[8] 邱兆美,张巍朋,赵博,等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):77 - 83.
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):77 - 83. (in Chinese)
[9] 陈贰浩,石林榕,孙步功. 马铃薯播种机及其排种器的研究现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备,2021,49(7):4 - 8.
CHEN Erhao, SHI Linrong, SUN Bugong. Research status and development trend of potato seeder and seed metering device [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2021,49(7):4 - 8. (in Chinese)
[10] 丁幼春,王凯阳,刘晓东,等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(8):30 - 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small-size seeds[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(8):30 - 41. (in Chinese)
[11] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):1 - 14. (in Chinese)
[12] 杨振宇,刘发英,章启祥,等. 并行识别种勺和种薯的缺种判别方法[J]. 农机化研究,2022,44(1):19 - 24,30.
YANG Zhenyu, LIU Faying, ZHANG Qixiang, et al. Discriminant method of missing seed using parallel recognition of seed scoop and seed potato[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(1):19 - 24,30. (in Chinese)
[13] AL-YAMANI A A, MITRA S, MCCLUSKEY E J. Optimized reseeding by seed ordering and encoding[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,2006,24(2):264 - 270.
[14] 张晓东,吴建民,孙伟,等. 马铃薯播种器自动补偿系统的设计[J]. 甘肃农业大学学报,2013,48(1):145 - 149,155.
ZHANG Xiaodong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Design of automatic compensation system for potato planter[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2013,48(1):145 - 149,155. (in Chinese)
[15] 刘全威,吴建民,王蒂,等. 2CM - 2 型马铃薯播种机漏播补偿系统的设计与研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):260 - 266.
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Design and test of a microcomputer-controlled loss sowing compensation system for 2CM - 2 potato seeder[J]. Agricultural Research in Arid Areas,2013,31(3):260 - 266. (in Chinese)
[16] 官洪民,李娟,王铁伟. 加速补种的马铃薯播种机控制系统研发[J]. 农业工程,2021,11(4):44 - 49.
GUAN Hongmin, LI Juan, WANG Tiewei. Research and development of potato seeder control system to accelerate reseeding [J]. Journal of Agricultural Engineering,2021,11(4):44 - 49. (in Chinese)
[17] 温宝琴,宋鹏翔,李景彬,等. 带勺式马铃薯排种器漏播检测与补种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):36 - 46.
WEN Baoqin, SONG Pengxiang, LI Jingbin, et al. Design and test of seeding monitoring and compensating system for belt-spoon type potato seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):36 - 46. (in Chinese)
[18] 高原. 三爪勺式马铃薯精量排种器及补种系统设计与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
GAO Yuan. Design and experimental research of spoon type potato precision seed metering device with three claw and reseeding system[D]. Yangling: Northwest A&F University,2022. (in Chinese)
[19] 程明志. 气吸式播种机风机液压驱动系统研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
CHENG Mingzhi. Research on hydraulic drive system of air-suction seeder fan[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
[20] 赵旭光. 基于 PLC 的新能源电池生产线自动控制系统设计[D]. 西安:西安石油大学, 2023.
ZHAO Xuguang. Design of automatic control system for new energy battery production line based on PLC[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University,2023. (in Chinese)
[21] 崔财豪,曹卫彬,杨萌,等. 基于作业速度的移栽机取苗送苗控制系统设计[J]. 农机化研究,2019,41(3):135 - 139, 143.
CUI Caihao, CAO Weibin, YANG Meng, et al. Design of control system for transplanting machine picking seedling and feeding seedling based on operation speed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(3):135 - 139, 143. (in Chinese)
[22] 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,2007:354 - 355.