

带勺式马铃薯排种器漏播检测与补种系统设计与试验

温宝琴^{1,2} 宋鹏翔^{1,2} 李景彬^{1,2} 黄勇^{1,2} 岑红蕾^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 现代农业机械兵团重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 针对带勺式马铃薯排种器作业过程中存在漏播问题,分析排种器工作过程,设计漏播检测与补种系统。对检测模块、补种模块、单片机模块、显示模块和声光报警模块进行电路设计、硬件选型和机械结构设计,针对整个控制系统的控制要求编写控制程序,实现马铃薯漏播检测与补种控制。采用高速摄像技术,对补种模块动作的响应速度进行分析,结果显示,可以满足排种器在当前最快运行速度 6.8 km/h 下的连续补种需求。搭建试验台进行系统漏播检测与补种的成功率性能测试,结果表明,当取种带线速度为 0.14 ~ 0.54 m/s 时,原始漏播率为 5.9% ~ 11.4%,经该系统补种后,最终漏播率为 0.9% ~ 2.1%,该漏播检测模块漏播检测成功率为 100%,补种模块的补种成功率平均为 83.0%,在试验速度范围内,随着取种带线速度的增大,该系统漏播检测仍准确,且补种成功率较为稳定。

关键词: 马铃薯; 带勺式排种器; 漏播检测; 自动补种

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0036-11 OSID: 

Design and Test of Seeding Monitoring and Compensating System for Belt-spoon Type Potato Seed Metering Device

WEN Baoqin^{1,2} SONG Pengxiang^{1,2} LI Jingbin^{1,2} HUANG Yong^{1,2} CEN Honglei^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China
2. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi 832003, China)

Abstract: Miss-seeding of a belt-spoon type potato seed metering device can cause significant congenital yield loss. Through analysis of the working process of a seed metering device, a miss-seeding detection module was designed. This miss-seeding detection method needed to design a detection hole on the seed metering device protection shell, seed belt and sensor protection plate. The detection process used the opposite photoelectric sensor. This miss-seeding detection method did not require a location sensor to determine the location of the spoon. By analyzing the actual working requirements of the seeder, a compensation module using electromagnet push rod for compensation was designed. This compensation method would not affect the actual working efficiency of the seeder, and it can ensure the qualified rate of plant spacing after supplementary inoculation. Through the circuit design, hardware selection and mechanical structure design of detection module, compensation module, single chip microcomputer module, display module and sound and light alarm module, the design of miss-seeding detection and compensation system was completed. The control system software was designed by analyzing the control requirements of the entire control system. In order to ensure that the response time of the compensation module can meet the requirements of continuous compensation, the response speed of the compensation module was analyzed by means of high-speed camera technology. The results showed that the supplementary inoculation module could meet the continuous compensation requirement of the metering device at the fastest operating speed of 6.8 km/h. In order to test the success rate of miss detection and compensation of the system, by building a test rig for performance testing. When the speed of the seed metering belt was varied from 0.14 m/s to 0.54 m/s, the original miss-seeding rate was changed from

收稿日期: 2021-10-08 修回日期: 2021-12-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51775358)、科技发展(新建)农业机械兵团重点实验室建设项目(KC005601)和石河子大学成果转化与技术推广计划项目(CGZH201807)
作者简介: 温宝琴(1980—),女,教授,主要从事农业机械装备创新与性能设计研究,E-mail: wendy-wbq@163.com
通信作者: 黄勇(1968—),男,高级实验师,主要从事农业机械装备结构设计研究,E-mail: 1216009003@qq.com

5.9% to 11.4% . After compensation by the proposed system , the final miss-seeding rate was varied from 0.9% to 2.1% . The success rate of the miss-seeding detection module was 100% . The average success rate of automatic compensation was 83.0% . In the test speed range ,and relatively stable with increased belt line speed. In the range of test speed ,with the increase of seed belt line speed ,the system miss-seeding detection was accurate and the success rate of compensation was stable. The missing sowing detection and supplementary inoculation system can effectively reduce the missing sowing rate of spoon potato metering device during operation.

Key words: potato; seed metering device; miss-seeding detection; automatic compensation

0 引言

勺式马铃薯排种器是目前国内外广泛使用的一种排种器^[1-2],既适用于整薯种薯的排种,也适用于切块种薯的排种^[3],此类排种器具有结构简单、可靠性高、适应性强等特点^[4-6],但是存在较高的漏播问题,通过结构参数优化后,该排种器漏播率仍约 7%^[7]。为保证作业质量,在实际作业过程中部分地区通过人工进行补种^[8],该补种方式不仅增加了作业成本和劳动强度,而且实际播种过程中排种器运行速度较快,补种效果难以保证。

目前,解决马铃薯排种器漏播问题的有效方法是对漏播情况进行检测并通过补种装置进行自动补种^[9]。在国内,勺式马铃薯排种器主要分为勺链式和带勺式。针对勺链式马铃薯排种器漏播问题,牛康等^[10]设计了一种电容式漏播检测传感器,在种勺通过种箱取得种薯向上运动的过程中进行漏播检测,通过 PLC 控制一组独立并列的勺链式排种器进行补种;孙伟等^[11]设计了一种由霍尔传感器定位,红外光电传感器测薯的漏播检测装置,通过单片机控制速动补种装置实现补种,漏播检测过程中需要对种勺进行定位,输出定位信号控制漏播检测传感器在种勺两侧进行测漏;张晓东等^[12]设计了自动补偿系统,通过驱动步进电机带动补偿排种器转动进行自动补种;官洪民等^[13]为了保证漏播检测的准确性,将霍尔传感器、光电传感器和压电传感器进行结合,通过种勺定位结合多次漏播判定来提高漏播检测的准确性。

针对带勺式马铃薯排种器漏播问题,ZHANG 等^[14]通过对种勺进行结构优化,在种勺上增加负压吸管的方式,可以将漏播率降至 4%;樊婧婧^[15]采用图像处理的方式对漏播情况进行检测,以 PLC 作为控制器,结合工控机来实现株距控制和漏播补偿;孙传祝等^[16]通过 PLC 控制排种器液压马达的转速进而控制株距,通过控制排种器速度来降低漏播率。

通过分析,针对勺式马铃薯排种器,目前大部分漏播检测方式利用霍尔传感器对种勺是否到达检测

位置进行检测,进而将信号传递给控制器,由控制器控制漏播检测传感器在种勺的两侧进行检测。漏播补种方式主要分为导种过程中速动补种和投种过程中独立排种器补种^[17]。本文研究的对象为 2CM-2/4 型带勺式马铃薯播种机,播种行数大于等于 2,该播种机工作速度最快可达 6.8 km/h,工作速度较快,工况复杂,所以使用霍尔传感器定位配合光电传感器在种勺侧面测漏的漏播检测方式难以保证高速工作过程中漏播检测的成功率。同时,马铃薯排种器体积较大,对于该播种机,在有效的行距空间内设置单独的补种排种器会对该播种机的作业效率造成较大影响,并且当播种机作业速度较快时,独立补种排种器难以保证后补种薯的株距合格率^[18-19]。

本文针对带勺式马铃薯排种器工作过程中出现的漏播率较高的问题,以不影响排种器自身工作效率和作业质量为出发点,提出一种漏播检测方式,并以单片机为控制核心,通过电磁推杆式补种模块进行补种,设计漏播检测与补种系统,并通过试验台对该系统进行性能测试。

1 总体方案

1.1 技术要求

由于马铃薯播种机在室外工作,环境较为复杂,漏播检测过程中易受到尘土、雾、雨、太阳光等外界因素的干扰^[20],所以传感器选型与漏播检测模块的设计需要尽可能排除环境干扰。该播种机取种带运行速度可达 0.54 m/s,所以传感器响应速度需达到 10 ms,根据排种器结构尺寸,传感器检测距离应不小于 200 mm。由于该播种机排种器之间间距较小,为保证补种装置不影响排种器的运行速度和播种质量,无法使用独立的补种排种器进行补种,选择在排种器的导种区域,通过快速动作装置从外部通过排种器保护壳进行速动补种,为满足补种需求,根据排种器运行速度,补种模块动作时间应在 250 ms 以内。检测模块在补种模块之前,且模块之间距离可调,从输出漏播信号到控制执行机构动作需在 50 ms 内完成,所以选择体积较小、性价比较高的单片机作为控制器即可,检测与补种技术要求如表 1 所示。

表 1 技术要求参数

Tab.1 Parameters for technical requirements	
参数	数值
传感器响应时间/ms	< 10
传感器检测距离/mm	> 200
补种机构响应时间/ms	< 250
补种机构动作距离/mm	> 50
控制器运行时间/ms	< 50

1.2 基本结构

漏播检测与补种系统结构与安装示意图如图 1 所示,该系统漏播检测模块和补种模块通过排种器保护壳安装在排种器上,由于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,分别通过传感器调节架与执行机构安装架安装于排种器保护壳之上,每一套漏播检测模块有两组对射式光电传感器,每组传感器有发射端和接收端,安装于排种器保护壳表面和取种带内部,与检测孔处于同一轴线上。每一套补种模块由补种种道、执行机构安装架、电磁铁推杆、单向开合门等组成,位于漏播检测模块正下方,垂直于取种带安装。同时,为统计排种器工作过程中的总播种数,设计一组播种数统计传感器,通过传感器调节架安装于排种器保护壳侧面。控制面板安装于种箱侧壁。

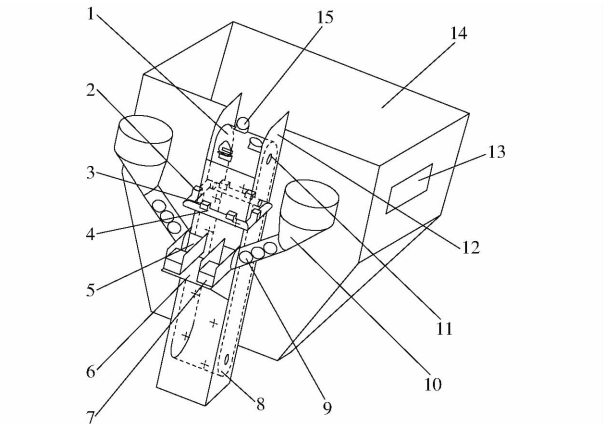


图 1 漏播检测与补种系统结构示意图
Fig.1 Structure diagram of proposed miss-seeding detection and compensation systems

1. 取种带 2. 播种数统计传感器组 3. 漏播检测传感器组 4. 传感器调节架 5. 单向开合门 6. 执行机构安装架 7. 电磁铁推杆 8. 从动轮 9. 补种薯 10. 补种种道 11. 主驱动轮 12. 排种器保护壳 13. 控制面板 14. 种箱 15. 种勺

1.3 硬件组成

漏播检测与补种系统硬件组成如图 2 所示,主要由电源模块、单片机模块、检测模块、补种模块、显示模块和声光报警模块组成,检测模块主要进行漏播检测与播种数量统计,并将结果输入单片机,补种模块的主要作用是在单片机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,显示模块和声光报警模块将总漏播数量和总播种数量进行统计显示并进行相应的漏播提示。

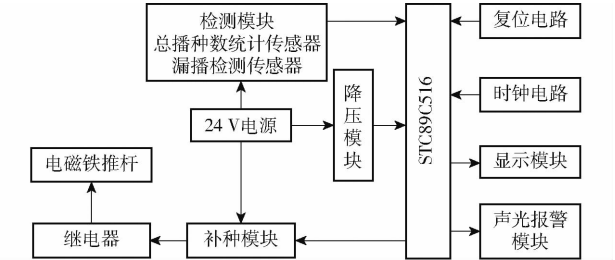


图 2 控制系统硬件组成

Fig.2 Hardware composition of control system

1.4 工作原理

电机通过链传动带动如图 1 所示排种器主驱动轮逆时针运转,取种带表面种勺正面自下而上通过种箱取得种薯,当种勺通过最高点后种薯掉落至前一种勺的背面共同向下运动。当种勺到达漏播检测位置,排种器保护壳、取种带和传感器护板上的检测孔处于同一轴线上,若背部无种薯,则漏播检测传感器两个信号发射端发射的信号穿过所有检测孔,两个接收端接收到信号,传感器电路对信号进行处理后向单片机输出漏播信号,单片机接收到漏播信号后驱动补种程序控制继电器导通,电磁铁推杆通电动作推动执行块将补种口种薯推入排种器保护壳,而后电磁铁推杆在归位弹簧的作用下返回原位,完成一次补种。反之,若背部有种薯,检测装置无信号输出,补种模块不动作。每个种勺通过播种数统计检测区都将向单片机输出一个低电平信号。漏播信号和播种数统计信号输入单片机后,显示模块对总漏播数与总播种数进行同步显示。

2 漏种检测与补种系统设计

为选择最佳的漏播检测与补种区域,将排种器工作过程划分为 4 个区域,如图 3 所示。区域Ⅰ为取种区,该区域种勺负责从种箱中舀取种薯,不具备漏播检测与补种条件。区域Ⅱ为清种区,该区域是清种装置工作区,主要通过冲击振动的方式清除种勺中的多余种薯和种勺之间夹带的多余种薯,该区域取种带振动较大^[21],且尘土较多,不利于传感器的检测工作。区域Ⅲ为护种区,取种带运行平稳,有利于漏播检测与补种,并且该区域排种带与排种器保护壳配合间隙较小,通过改进取种带与排种器保护壳结构,可以使得漏播检测过程在一个相对封闭的检测环境实现。区域Ⅳ为排种区,种薯在该区域从种勺背面落下,排入种沟,该区域距离土表较近,尘土弥漫严重,容易对检测造成干扰^[22],同时,若在

该区域进行补种,需要后补种薯的初速度、补种时间点和下落运动轨迹与正常种薯保持同步,才能确保后补种薯的落点满足株距要求,若在区域Ⅲ进行补种模块的设计,只需将后补种薯在既定时间范围内补入缺种种勺背部,即可保证与其他种薯同步的运动规律。因此,该研究选择在排种器的区域Ⅲ护种区进行漏播检测与补种。

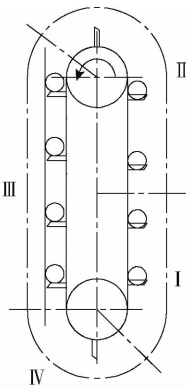


图 3 排种器工作区域

Fig. 3 Work area of seed metering device

I. 取种区 II. 清种区 III. 护种区 IV. 排种区

2.1 漏种检测模块

根据排种器结构尺寸,传感器检测范围应不小于 200 mm,由于取种带线速度超过 0.5 m/s,传感器响应速度需在 10 ms 以内,根据其田间运行环境,传感器需要较好的灵敏度和穿透性,且检测方式为非接触式检测,由于控制器核心为单片机,最终检测模块需输出 TTL 电平信号。

研究选用 PRS4Y20TZ10TZ 型对射式光电传感器,搭配 ER2-502 型光纤放大器进行信号处理和输出,输出电路如图 4 所示,该传感器检测距离可达 300 mm,响应时间在 500 μs 以内,PRS4Y20TZ10TZ 型对射式光电传感器通过光纤线传输光线,光束的聚拢程度较高,因而检测精度较高,光源的发光波长为 625 nm,波的能量大,频率高,穿透能力强,可以减少尘土等外界环境对检测过程的干扰,并且由于光波频率高于电磁辐射频率,可以抵抗电磁干扰^[23],防止电机、变频器等硬件对检测过程的干扰,

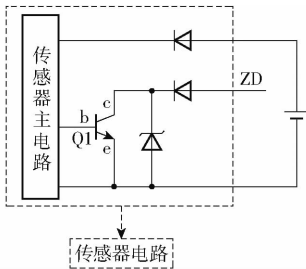


图 4 漏播检测传感器的信号输出电路

Fig. 4 Signal output circuit of miss-seeding detection sensors

当检测到信号后,通过放大器对检测信号进行处理,最终通过 ZD 端口向单片机输出 NPN 开关量信号。

漏播检测传感器安装布局如图 5 所示,两组传感器通过传感器安装架固定于排种器保护壳之上,每组传感器两个端头处于同一轴线上。取种带内侧两个传感器端头前部设计了传感器护板,防止排种器运行过程中由于取种带振动损坏传感器端头,外侧两个传感器端头紧贴排种器保护壳。因此,传感器端头、排种器保护壳和取种带之间形成较为封闭的检测空间,隔绝了大部分尘土、太阳光等外界因素对检测的干扰,从结构上为检测模块提供了良好的检测环境。

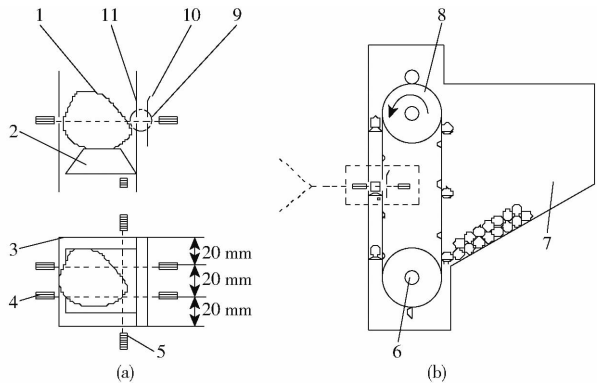


图 5 漏播检测模块结构示意图

Fig. 5 Schematic of miss-seeding detection module

1. 候补种薯 2. 种勺 3. 排种器保护壳 4. 漏播检测传感器
5. 播种数统计传感器 6. 从动轮 7. 种箱 8. 主动轮 9. 检测孔
10. 传感器护板 11. 取种带

为保证检测的准确性,将种勺背部落种区域划分为 3 等份,分别在 1/3 和 2/3 处各设置一组传感器,则每个区域宽度均为 20 mm,通过统计可得种薯直径在 30 ~ 55 mm 之间,将两组传感器检测信号进行逻辑与运算,即只有当两组传感器的接收端共同接收到信号,才会输出漏播信号,排除了由于种薯直径太小造成的误检情况。同时,为防止两组检测传感器信号发射与接收之间相互产生干扰,将两组传感器的 2 个发射端与 2 个接收端设置为相反方向,即每一端由一个发射端头和接收端头组成。传感器端头之间的间距为 20 mm(图 5),取种带、传感器护板和排种器保护壳表面检测孔如图 6 所示,考虑到取种带运行过程会出现横向移动,使得检测孔向一侧产生轻微偏移的情况,偏移距离小于 5 mm,因此检测孔总长度 $L = 50$ mm,以便于传感器的安装调试。当播种机达到最快运行速度时,传感器检测时间为

$$t = \frac{W}{v} \tag{1}$$

式中 t ——传感器检测时间,ms

W ——检测孔总宽度,mm
 v ——取种带线速度,m/s

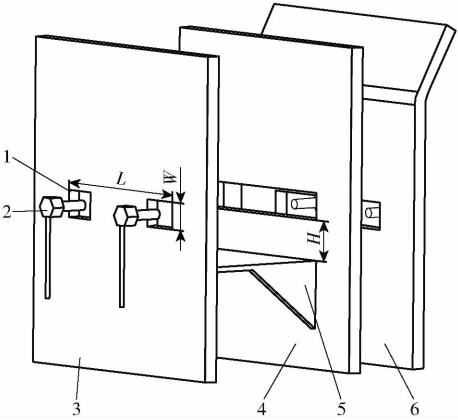


图 6 检测孔结构位置示意图

Fig. 6 Detection hole structure position diagram

1. 检测孔 2. 漏播检测传感器 3. 排种器保护壳 4. 取种带
5. 种勺 6. 传感器护板

最大取种带线速度 $v = 0.54 \text{ m/s}$,假设检测孔总宽度 $W = 10 \text{ mm}$,通过计算可得 $t \approx 18.52 \text{ ms}$,而传感器的响应时间在 $500 \text{ }\mu\text{s}$ 以内,所以检测孔总宽度 $W = 10 \text{ mm}$ 时,满足播种机任一工作速度下的漏播检测。取种带表面的检测孔位于每个种勺背部种薯落点相对应的位置,由于种薯直径在 $30 \sim 55 \text{ mm}$ 之间,所以取种带表面检测孔距离种勺高度 $H = 20 \text{ mm}$,当排种器运行时,其检测孔随取种带处于运动状态,传感器护板和排种器保护壳上的检测孔相对于传感器位置不变,当种勺运动至检测位置,若种勺背部无种薯,则 3 个检测孔处于同一轴线,传感器发射端发送的信号可以通过检测孔被接收端接收,产生漏播信号,反之,种勺背部种薯遮挡检测孔,接收端接收不到检测信号,不产生漏播信号。

该检测方式利用带勺式马铃薯排种器的结构特点,通过结构改进,只需对射式光电传感器就可以实现漏播检测,不需要独立的传感器对种勺是否到达漏播检测区域进行判断,降低了漏播检测的复杂性。

2.2 补种模块

由于候补种薯直径在 $30 \sim 50 \text{ mm}$ 之间,因此执行机构动作的行程不能小于 50 mm ,根据播种机工作速度,补种模块完成 1 次动作时间应小于 250 ms ,根据排种器结构尺寸,补种执行机构宽度应不大于排种器保护壳宽度。选用电磁铁推杆作为补种执行机构,工作电压为 24 V ,电流为 9 A ,行程为 60 mm ,可产生推力 60 N ,该电磁铁宽度为 50 mm ,高度为 45 mm ,可以满足补种需求。

补种控制电路如图 7 所示,由于电磁铁推杆工作电压与电流较大,单片机无法实现对电磁铁推杆的直接控制,需要使用两级开关来实现对电磁铁推

杆的间接控制。使用三极管 Q2 作为第 1 级开关控制继电器 PK1 的闭合与断开,继电器 PK1 作为第 2 级开关控制电磁铁推杆的动作。单片机通过 ZX 端向三极管 Q2 的基极输出低电平信号使得三极管 Q2 的发射极与集电极导通,即第 1 级开关导通,进而继电器 PK1 通电吸合,其端口 3、4 之间导通,即第 2 级开关导通,电磁铁推杆通电推动执行块进行补种。

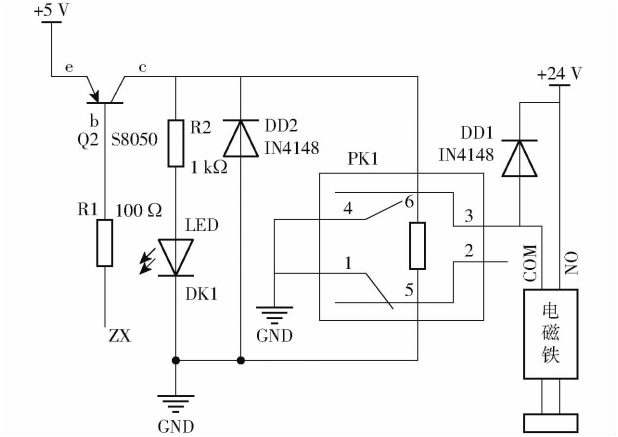


图 7 补种控制电路

Fig. 7 Compensation control circuit

补种模块结构如图 8 所示,补种模块主要由补种种道、执行机构安装架、单向补种门、推拉式电磁铁和执行块组成,执行块的行程平面与重力方向的夹角为 80° ,且补种种道出口边线与执行块前端面相切,以保证候补种薯通过补种种道后,最终位置保持与执行块前端面处于接触状态,防止候补种薯与执行块之间由于距离差导致补种过程中产生冲击。候补种薯由补种种道滑落至执行块前方,当补种控制电路启动,使得电磁铁通电动作,通过执行块推动候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。

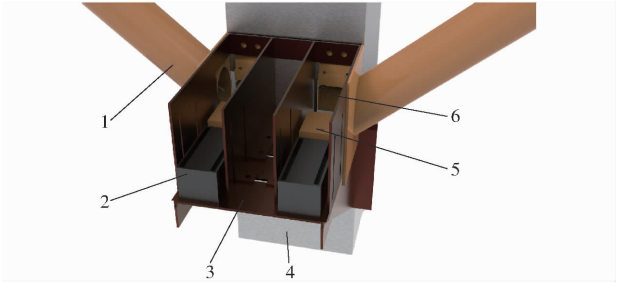


图 8 补种模块结构示意图

Fig. 8 Schematic of compensation module

1. 补种种道 2. 电磁铁推杆 3. 执行机构安装架 4. 排种器保护壳 5. 执行块 6. 单向补种门

在补种过程中,候补种薯需要通过排种器保护壳表面的补种口落入缺种种勺背部。为防止排种器正常运行过程中种薯通过补种口流出,在补种口设计开合角为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的单向补种门,在补种过程

中,执行块推动候补种薯向前运动,使得单向补种门逆时针旋转,在限位结构的控制下,该装置的最大开启角为 90°。补种结束后,通过其自身重力或随后种勺压力的作用下顺时针旋转下落,在限位结构控制下最大下落角为 180°。

同时,为了降低执行块的质量对电磁铁推杆的能量消耗,提高单向补种门结构适用性,降低其制造难度。采用 SolidWorks 软件对执行块和单向开合补种门进行三维建模,并对其内部进行网格化,使用 ABS 材料(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)进 3D 打印。

2.3 单片机模块

控制面板示意图如图 9 所示,当排种器以最快的速度运行时,要求该控制系统在 50 ms 以内完成信号处理和输出,STC89C516 单片机选用 12 MHz 晶振时,机器周期即可达 1 μs,满足使用要求,且该单片机功耗低、价格便宜,适用于农业机械,同时,选用蜂鸣器与 LCD 液晶对漏播情况进行提示和统计数据的实时显示。

单片机模块以 STC89C516 为核心,电路如图 10

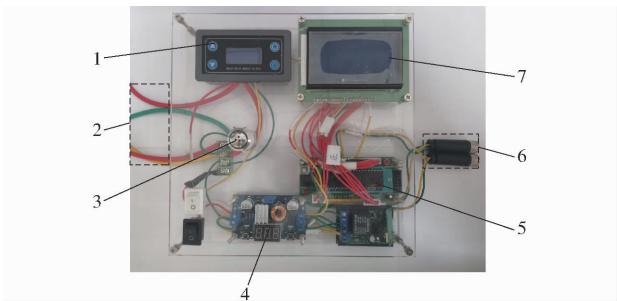


图 9 控制面板示意图

Fig. 9 Schematic of control panel

1.继电器 2.电源线 3.蜂鸣器 4.降压模块 5.单片机 6.检测模块信号输入端口 7.显示模块

所示。主要对各个模块的信号进行接收、处理和输出。检测模块的漏播检测传感器和播种数统计检测传感器向单片机模块输入漏播信号和总播种数统计信号,占用 P3.2 和 P2.4 引脚。单片机通过 P2.0 引脚向补种控制电路发送补种信号。显示模块采用 LCD12864 实时显示总漏播数和总播种数,占用 P1.0 ~ P1.7, P0.0 ~ P0.4 引脚。声光报警模块由蜂鸣器和指示灯组成,对漏播情况进行及时提醒,占用 P2.2 引脚。晶振电路和复位电路保证单片机的正

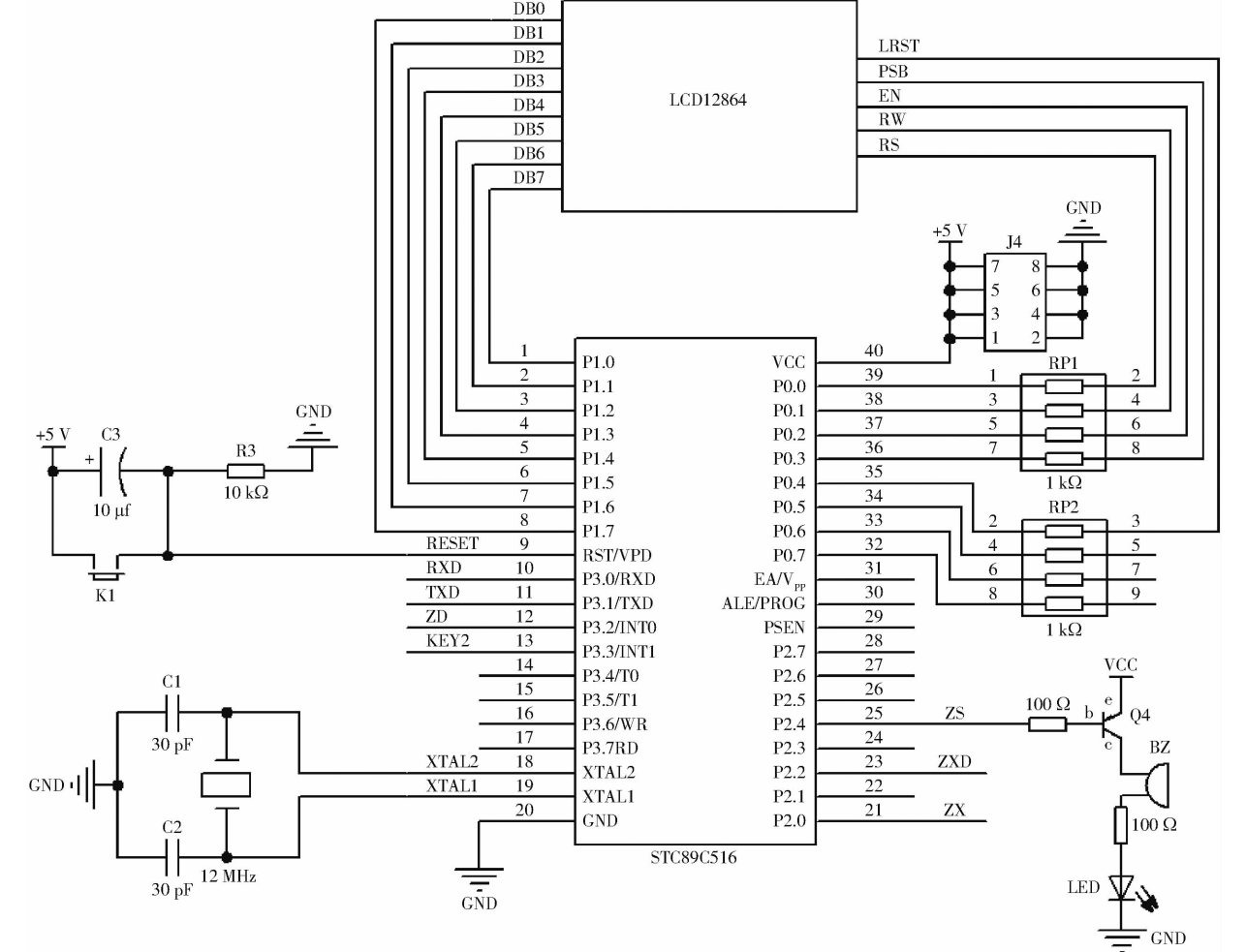


图 10 单片机模块电路

Fig. 10 Circuit diagram of single chip microcomputer module

常运行。

2.4 软件设计

根据控制需求,当漏播检测传感器和总播种数统计传感器输出检测信号后,单片机模块需要对信号进行快速识别,出现漏播信号时,单片机需要对漏播信号进行优先处理。当单片机检测到播种数统计信号,需对信号进行二次判别,并将该信号进行累加统计后调用 LCD 显示程序进行实时显示。当单片机检测到漏播信号后,通过外部中断对漏播信号进行优先处理,并对信号进行二次判别,根据漏播检测与补种之间的距离差,需延时后向补种模块发送补种信号,同时延时过程不能占用单片机的运行,需要在外部中断中嵌套定时器中断。同时单片机需要对漏播数进行统计并通过 LCD 显示。主程序和中断程序是主要的组成部分。

主程序流程图如图 11 所示,系统上电之后进入系统初始化、外部中断初始化和 LCD 显示初始化;初始化之后进行系统的自检,排除系统故障;打开外部中断,对漏播传感器产生的中断信号和播种数统计传感器产生的播种数统计信号进行循环扫描,当出现中断信号,执行中断程序控制补种模块进行补种,中断程序执行完毕返回主程序,检测到播种数统计信号,对总播种数进行累加统计,并通过 LCD 进行实时显示;终止信号控制系统各个模块停止运行。

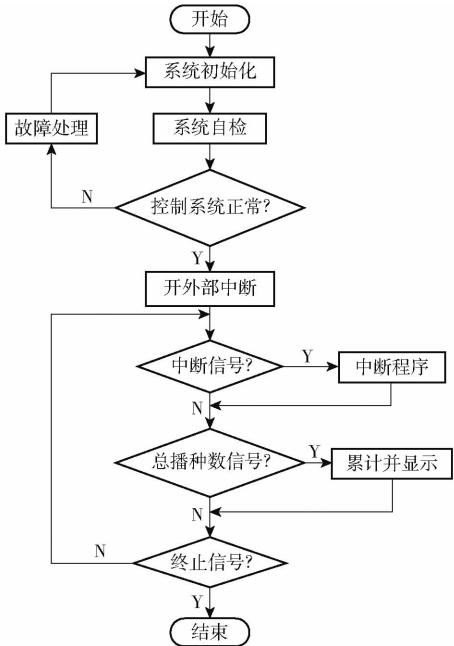


图 11 主程序流程图

Fig. 11 Main program block diagram

中断程序流程图如图 12 所示,当单片机接收到漏播检测传感器输出的外部中断信号时,程序执行从主程序跳入中断子程序,为防止干扰信号输入,再次对该信号进行判断,由于检测模块与执行模块之

间有一定的距离,需要检测模块检测到漏播信号之后延时固定时间后,补种模块才能动作,所以在外部中断程序中对定时器进行初始化,跳入定时器进行计时,当计时结束之后向补种模块发送动作信号启动补种控制电路,同时,漏播数量进行累加, LCD 进行同步显示。

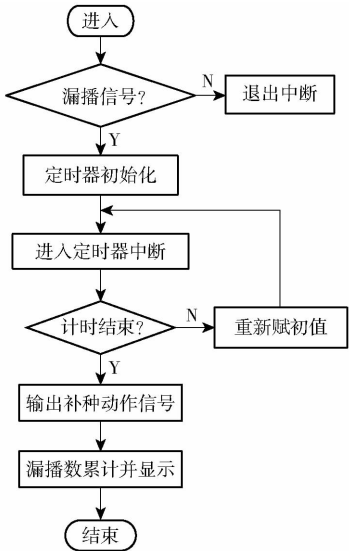


图 12 中断程序流程图

Fig. 12 Interrupt program flowchart diagram

3 性能试验

3.1 补种可行性测试

3.1.1 试验方法

为确保补种模块在有效补种时间 t_0 内能够完成补种,设计测试试验如图 13 所示。使用斜面仪结合角度测量仪将电磁铁推杆固定于 10.08° 的斜面,以模拟补种模块实际安装的倾斜角。随机挑选候补种薯作为补种对象。在执行块表面粘贴反光贴,用于对执行块的运动轨迹进行跟踪。采用 510 f/s 的高速摄像机对补种过程进行拍摄。

最终利用 ProAnalyst 软件对推块表面反光贴片的运动轨迹进行跟踪,并以时间为自变量输出运动轨迹所对应的位移距离和相应的帧数数据。通过提取推块关键位置对应的帧数,计算补偿时间,并与有效补偿时间进行比较,分析补种模块的可行性。

当播种机实际工作最大速度为 6.8 km/h 时,对应取种带线速度为 $v = 0.54\text{ m/s}$ 。此时取种带运行一个种匀间距的时间,即有效补种时间为

$$t_0 = \frac{L_2}{v}$$

(2)

式中 t_0 ——有效补种时间,ms

L_2 ——取种带表面单列种匀间距,mm

补种模块完成一次补种动作的时间即补种时

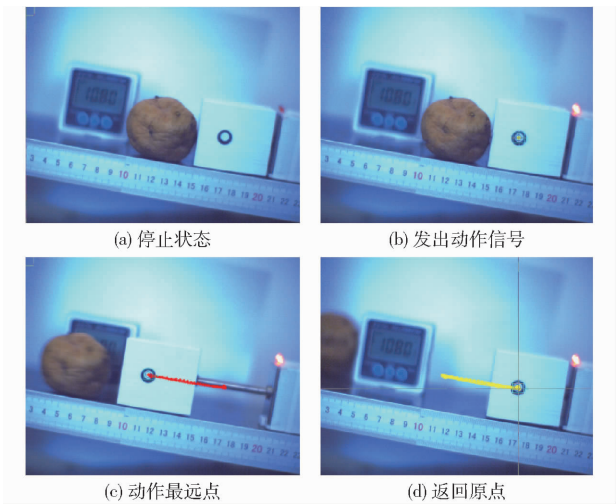


图 13 补种模块动作过程

Fig. 13 Action process of compensation module

间,由补种模块从接收到补种信号到开始动作的系统误差时间与补种模块从开始工作到正行程结束的过程需要的正行程时间组成,其关系为

$$t_1 = t_2 + t_3 \tag{3}$$

式中 t_1 ——补种时间,ms
 t_2 ——系统误差时间,ms
 t_3 ——正行程时间,ms

根据 ProAnalyst 软件输出的数据,结合补偿时间与系统误差时间及正行程时间之间的关系,确定如图 13b 所示单片机发出补种动作信号时对应帧数、电磁铁推杆开始动作时对应帧数和图 13c 所示电磁铁推杆达到动作最远点时对应帧数,则补种时间为

$$t_1 = \frac{(F_3 - F_2) + (F_2 - F_1)}{510} \tag{4}$$

式中 F_1 ——发出补种动作信号时对应帧数,f
 F_2 ——电磁铁推杆开始动作时对应帧数,f
 F_3 ——电磁铁推杆达最远点时对应帧数,f

根据电磁铁推杆达最远点时对应帧数与图 13d 所示电磁铁推杆恢复原位时对应帧数,求得电磁铁推杆从最远点返回初始位置所用的回位时间为

$$t_4 = \frac{F_4 - F_3}{510} \tag{5}$$

式中 t_4 ——回位时间,ms
 F_4 ——电磁铁推杆恢复原位时对应帧数,f

为确保执行机构的连续动作可行性,确定补种模块完整完成一次补种过程所需的补种总时间为

$$t_5 = t_1 + t_4 \tag{6}$$

式中 t_5 ——补种总时间,ms

3.1.2 试验结果与分析

为保证数据的稳定性,该试验重复进行 4 次,并通过 ProAnalyst 软件对每一次试验中对应的关键帧

数 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 进行输出,为表达简洁,将试验数据重新定义了零点,统计结果如表 2 所示。

表 2 补种测试试验结果
Tab. 2 Compensation module test results f

试验序号	F_1	F_2	F_3	F_4
1	0	15	49	97
2	0	16	49	95
3	0	20	50	95
4	0	14	49	95

对 4 次试验结果分别进行计算,求得补种过程中平均补种时间 $t_1 \approx 96$ ms,取种带表面单列种匀间距 $L_2 = 145$ mm,根据式(2)计算有效补种时间 $t_0 = 268.52$ ms,通过对比可得 $t_1 < t_0$,该补种模块推送种薯到漏取种勺背部的时间可以满足播种机最快作业速度下的单个漏种的补种需求。根据式(6)计算平均完成一次动作总时间 $t_5 \approx 187$ ms,通过对比可得 $t_5 < t_0$,该补种模块完整完成一次补种动作时间可以满足播种机最快作业速度下的连续漏种的补种需求。

3.2 漏播检测与补种系统性能测试

试验台架如图 14 所示,为测试该漏播检测与补种系统在带勺式马铃薯排种器上的漏播检测与补种的成功率,搭建漏播检测与补种试验台进行性能测试。

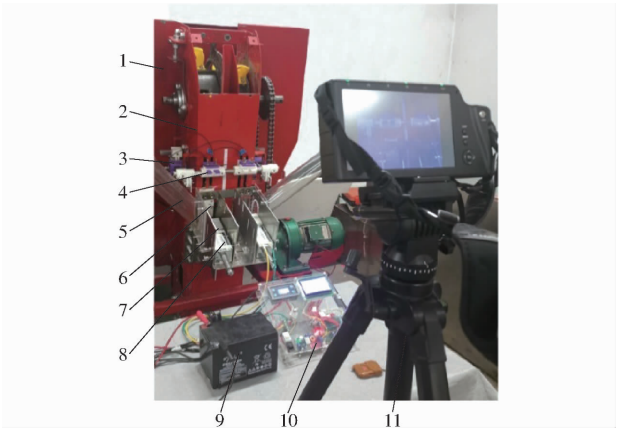


图 14 漏播检测与补种试验台

Fig. 14 Test stand for miss-seeding detection and automatic compensating

1. 种箱 2. 排种器 3. 播种数统计传感器 4. 漏播检测传感器
5. 补种种道 6. 单项开合门 7. 执行块 8. 电磁铁推杆 9. 电源
10. 控制面板 11. 高速摄像机

3.2.1 试验设备与材料

排种器主驱动轮动力由 1.5 kW 电机通过链传动方式提供,电机转速通过 NVF2G-22/PS4 型变频器进行控制,主驱动轮转速通过 TA8146C 型转速测量仪进行测定。排种器工作过程使用种薯为切块种薯,直径在 30~55 mm 之间。补种过程使用尺寸满

足要求的整薯种薯作为候补种薯,直径在 30 ~ 50 mm 之间。漏播检测与补种过程使用 MS55KS2 型高速摄像机进行拍摄。

3.2.2 试验方法

漏播检测与补种系统以不影响排种器实际工作质量为前提,因此,衡量该系统的评价指标是当排种器处于不同工作速度时,该系统的补种成功率,即试验以播种机实际前进速度为影响因素,通过搭建试验台,根据速度关系,通过控制主动轮转速模拟播种机实际工作速度,以补种成功率为评价指标进行单因素 6 水平试验。

马铃薯播种机在实际工作的过程中,排种器的动力通过地轮提供,所以单位时间内播种机前进距离与速度的比值和单位时间内种匀运动距离与取种带线速度的比值相等,即当种匀运动一个相邻种匀间距的时间与播种机前进一个株距的时间的关系为

$$\frac{L}{v} = \frac{L_1}{v_1} \tag{7}$$

式中 L ——相邻种匀间距,mm
 L_1 ——株距,mm
 v_1 ——播种机前进速度,m/s

排种器主动轮角速度与其转速之间、取种带线速度与主动轮角速度之间的关系为

$$\begin{cases} \omega = 2\pi n \\ v = \omega r \end{cases} \tag{8}$$

式中 ω ——主动轮角速度,rad/s
 n ——主动轮转速,r/min
 r ——主动轮半径,mm

则取种带线速度 v 与主动轮转速 n 之间的关系为

$$n = \frac{v}{2\pi r} \tag{9}$$

由于试验以播种机实际前进速度为影响因素,该马铃薯播种机实际工作速度为 2.0 ~ 6.8 km/h,株距 L_1 为 250 mm,取种带表面种匀为双列交错排布,相邻种匀之间距离 L 为 72.5 mm,单列种匀之间的距离 L_2 为 145 mm,排种器主动轮半径 r 为 95.5 mm。在该区间内设定 6 个水平,并依次递增,

通过式(7) ~ (9)计算得到播种机实际前进速度、取种带线速度与主动轮转速之间的换算关系如表 3 所示。

表 3 速度换算关系
Tab.3 Speed conversion relationship

项目	播种机前进速度/(km·h ⁻¹)					
	2.00	2.96	3.92	4.88	5.84	6.80
取种带线速度/ (m·s ⁻¹)	0.14	0.22	0.30	0.38	0.46	0.54
主动轮转速/ (r·min ⁻¹)	14	22	30	38	46	54

试验过程中,每个速度水平下理论排种 500 粒种薯,重复 5 次,排种器主动轮转速 n 通过转速测量仪进行测量。为实现台架试验数据的准确统计,使用高速摄像机统计原始播种数、原始漏播数、补种数、最终播种数和最终理论播种数,其关系为

$$\begin{cases} m_4 = m_0 + m_1 \\ m_3 = m_4 - m_1 + m_2 \end{cases} \tag{10}$$

式中 m_0 ——原始播种数 m_1 ——原始漏播数
 m_2 ——补种数 m_3 ——最终播种数
 m_4 ——最终理论播种数

据统计数据可以得到无该系统时,漏播数量与理论播种数量的比值,即原始漏播率为

$$\eta_1 = \frac{m_1}{m_4} \times 100\% \tag{11}$$

式中 η_1 ——原始漏播率

使用该系统后最终的漏播数量与理论播种数量的比值,即最终漏播率为

$$\eta_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_4} \times 100\% \tag{12}$$

式中 η_2 ——最终漏播率

该系统补种模块的补种成功率为

$$\eta_3 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \tag{13}$$

式中 η_3 ——补种成功率

通过高速摄像机对每组试验过程中的排种器取种过程、漏播检测过程和补种过程进行拍摄记录,对每组试验的 m_0 、 m_1 和 m_2 进行统计,结果如表 4 所示。

表 4 取种及补种性能试验结果
Tab.4 Statistics of test results

试验序号	0.14 m/s			0.22 m/s			0.30 m/s			0.38 m/s			0.46 m/s			0.54 m/s		
	m_0	m_1	m_2	m_0	m_1	m_2	m_0	m_1	m_2	m_0	m_1	m_2	m_0	m_1	m_2	m_0	m_1	m_2
1	458	30	26	455	25	19	468	46	42	450	29	24	473	42	33	469	51	40
2	450	26	23	463	27	23	454	38	29	447	26	23	479	40	33	479	63	50
3	448	33	30	471	29	24	451	43	36	443	27	19	483	39	32	482	62	53
4	453	21	16	466	40	34	454	34	27	448	24	22	478	47	39	483	68	56
5	460	34	26	460	33	28	449	40	34	464	35	31	478	50	43	473	62	51
平均值	454	29	24	463	31	26	455	40	34	450	28	24	478	44	36	477	61	50

3.2.3 试验结果与分析

如表 4 所示,当排种带速度超过 0.46 m/s 时,排种器原始漏播率显著增加,主要原因是排种带线速度增加使得种勺充种时间变短,充种效果变差,导致充种率下降^[24]。

根据高速摄像机采集的结果,该系统漏播检测成功率为 100%,该系统补种模块补种成功率如图 15 所示,平均补种成功率约为 83.0%,补种模块作业过程中未出现对种薯造成损伤的现象,不考虑补种过程中的损伤率对补种成功率造成的影响。

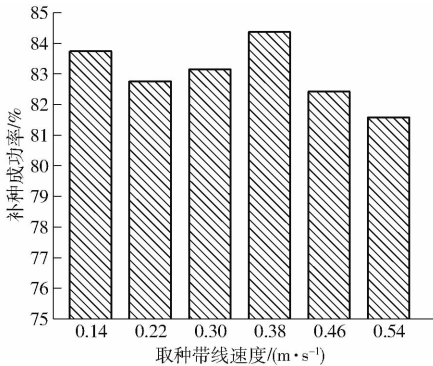


图 15 补种成功率

Fig. 15 Success rate of compensating

根据统计结果计算原始漏播率和最终漏播率如图 16 所示。若不使用该系统,当排种带线工作速度在 0.14 ~ 0.54 m/s 之间时,排种器的原始漏播率在 5.9% ~ 11.4% 之间,平均原始漏播率约为 7.7%,使用该系统后,最终漏播率在 0.9% ~ 2.1% 之间,平均最终漏播率为 1.3%,该系统可平均降低漏播率 6.4 个百分点。

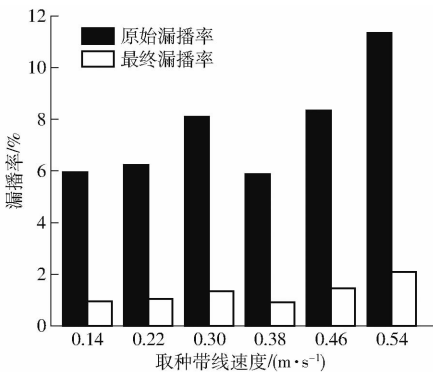


图 16 原始漏播率与最终漏播率

Fig. 16 Original and final miss rates

通过对高速摄像仪采集视频进行分析,确定补种模块补种失败的原因如图 17 所示。候补种薯沿

种道下滑,在终点处与挡板产生冲击,由于补种种道出口与执行块之间的过渡平缓,会出现候补种薯与挡板冲击后有回弹的情况,导致候补种薯的部分体积停留在补种种道中,电磁铁推杆前端的执行块向前推动候补种薯的过程中,电磁铁推杆的推力无法克服执行块、候补种薯和补种种道之间的相互作用力,在补种种道出口处出现卡种情况,无法使候补种薯通过单向补种门,导致补种失败。

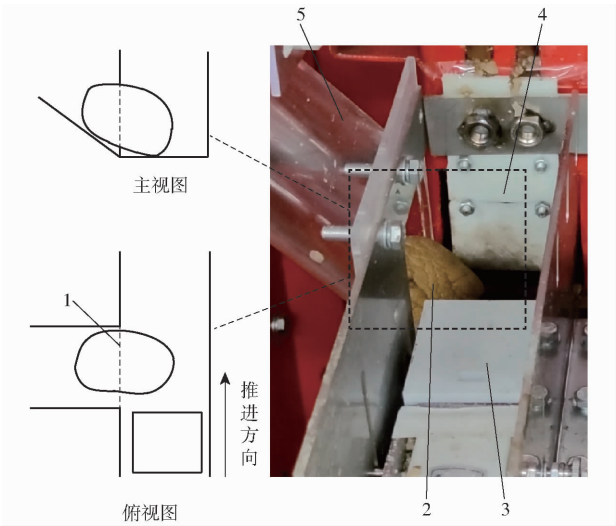


图 17 补种失败分析示意图

Fig. 17 Analysis diagram of compensation failure

1. 补种种道出口 2. 候补种薯 3. 执行块 4. 单向补种门 5. 补种种道

4 结论

(1) 针对带勺式马铃薯排种器作业过程中普遍存在的漏播率较高的问题,对漏播检测模块、补种模块、单片机模块、声光报警模块和显示模块进行硬件选型、电路设计、机械结构设计,并根据系统控制需求完成了主程序、中断程序和各个子程序的设计,完成了漏播检测与补种系统的搭建,可以对带勺式马铃薯排种器运行过程中的漏播情况进行检测并完成补种。

(2) 通过台架试验对该漏播检测与补种系统进行性能测试,结果表明当取种带线速度在 0.14 ~ 0.54 m/s 之间时,漏播检测成功率为 100%,补种成功率平均约为 83.0%,该系统可平均降低漏播率 6.4 个百分点,该漏播检测与补种系统工作稳定,为该系统在带勺式马铃薯播种机上的实际应用奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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 problems existing in potato planter elevate seeds device[J]. Machinery Industry Standardization

- & Quality, 2014(9):35–37. (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 on key technology and equipment of potato planting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):1–16. (in Chinese)
- [4] 陈貳浩, 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)
- [5] 余参参. 气吸式微型马铃薯排种器的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
YU Shenshen. Design and experimental study of air-suction micro potato seed metering device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [6] 台文硕. 夹持式马铃薯精密排种器设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
TAI Wenshuo. Design and experiment of clamping potato precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [7] 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 test of automatic compensation device for potato miss seeding detection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3):78–83. (in Chinese)
- [8] 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 channel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177(4):10–21.
- [9] 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 seed electric seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):77–83. (in Chinese)
- [10] 牛康, 周利明, 苑严伟, 等. 勺链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):76–83.
NIU Kang, ZHOU Liming, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of spoon-chain potato seed metering device self-complement inoculation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):76–83. (in Chinese)
- [11] 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 of missed seeding detection and compensation system for spoon-chain potato seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):8–15. (in Chinese)
- [12] 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 seeder[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(1):145–149, 155. (in Chinese)
- [13] 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. Development of control system for potato seeder with accelerated supplementary inoculation[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(4):44–49. (in Chinese)
- [14] ZHANG Wanzhi, LIU Chenglong, LV Zhaoqin, et al. Optimized design and experiment on novel combination vacuum and spoon belt metering device for potato planters[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 15(4):6–18.
- [15] 樊婧婧. 基于图像处理的马铃薯播种机研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
FAN Jingjing. Study on potato seeder based on image processing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [16] 孙传祝, 王法明, 李学强, 等. 马铃薯精密播种机智能控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18):36–44.
SUN Chuanzhu, WANG Faming, LI Xueqiang, et al. Design of intelligent control system for potato precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):36–44. (in Chinese)
- [17] 杨浩, 刘小龙, 王关平, 等. 马铃薯精密播种技术的研究现状及进展[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(5):15–18.
YANG Hao, LIU Xiaolong, WANG Guanping, et al. Research status and development of potato precision seeding technology[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(5):15–18. (in Chinese)
- [18] 王云霞, 张文毅, 严伟, 等. 气流辅助高速投种精量播种机压种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10):69–76.
WANG Yunxia, ZHANG Wenyi, YAN Wei, et al. Design and test of air-assisted high-speed precision seeder seed pressing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):69–76. (in Chinese)
- [19] 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 analysis on seed guiding technology and device of seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):1–14. (in Chinese)
- [20] 牛康. 马铃薯整薯精密播种关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
NIU Kang. Study on key techniques of whole potato precision seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 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 cleaning device for potato seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):51–60. (in Chinese)
- [22] 赵晓雪. 马铃薯排种装置的设计与排种性能试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
ZHAO Xiaoxue. Design of potato seed metering device and experimental study on seed metering performance[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [23] 何祖源, 刘庆文. 光纤分布式声波传感器原理与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13):11–25.
HE Zuyuan, LIU Qingwen. Principle and application of optical fiber distributed acoustic wave sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13):11–25. (in Chinese)
- [24] 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.