

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.012

# 勺链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验

牛康<sup>1,2</sup> 周利明<sup>2</sup> 苑严伟<sup>2</sup> 刘阳春<sup>2</sup> 方宪法<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

**摘要:** 针对勺链式马铃薯排种器普遍存在的漏种问题, 提出了一种基于电容值精确测量技术的漏种检测方法, 设计了电容式漏种检测传感器, 以及以 PLC 为核心的自补种系统, 实现了该系统在马铃薯种植机上的应用, 并试验研究了该系统的补种性能。试验结果表明: 排种速度为 0.3 ~ 0.7 m/s 时, 原始漏种率为 7% ~ 11.3%, 排种株距误差率为 3.3% ~ 9.1%; 经自补种系统补偿后, 最终漏种率为 1.1% ~ 1.75%, 补种株距误差率为 7.6% ~ 16.9%; 在试验范围内, 随排种速度增大, 补种成功率变化不大, 平均为 84.6%。设计的电容式漏种检测传感器检测可靠, 自补种系统补偿效果显著, 补种株距精度满足马铃薯种植要求。

**关键词:** 勺链式排种器; 马铃薯; 漏种检测; 自动补种; 电容传感器

**中图分类号:** S223.2<sup>+</sup>3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0076-08

## Design and Experiment on Automatic Compensation System of Spoon-chain Potato Metering Device

Niu Kang<sup>1,2</sup> Zhou Liming<sup>2</sup> Yuan Yanwei<sup>2</sup> Liu Yangchun<sup>2</sup> Fang Xianfa<sup>2,3</sup>

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Spoon-chain metering is the most widely used metering device in small and medium-sized potato planter at present because of its high reliability, low cost and adjustable plant spacing. Its performance is closely related with the planting quality. However, spoon-chain metering still encounters loss sowing problem, which can be reduced by optimizing structure and parameters of metering device. Nevertheless, the rate of loss sowing is still around 7%. Artificial assistance metering can resolve these problems effectively but with increased labor intensity and hidden danger. In order to solve this problem, a loss sowing detection method based on capacitance value precision measurement technology was proposed in this paper, and an automatic re-seeding system was designed which was mainly composed of control system, capacitance sensor and reseed-metering device. In order to test performance of the automatic compensation system, a performance test was carried out using self-made device. Spoon-chain was driven by a servo motor and its speed was adjusted by servo driver. Reseeding-chain was driven by a servo motor and its speed was controlled by PLC controller. Micro potatoes, with diameter of 25 ~ 30 mm, were used in main metering system and re-seeding system. The metering speed was set as 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 m/s, and the number of theoretical seed metering was 600 at different speeds. By mounting a laser sensor on seed discharge hole, the number of normal seeding and re-seeding were recorded by PLC automatically. Total seeding, loss sowing, normal seeding, theoretical seeding, re-

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0700103)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAF32B02)

作者简介: 牛康(1987—), 男, 博士生, 主要从事农业机械设计及应用研究, E-mail: niukag@163.com

通信作者: 方宪法(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械化和农业工程领域技术研究, E-mail: fangxf@caams.org.cn

seeding rate, original rate and final rate of loss sowing can be calculated. The tests showed that, with the metering speed increasing from 0.3 m/s to 0.7 m/s, the original rate of loss sowing, the final rate of loss sowing, the metering row spacing error and the reseeding row spacing error were increased from 7% to 11.3%, 1.1% to 1.75%, 3.3% to 9.1% and 7.6% to 16.9%; with the increasing of chain speed, changes of reseeding rate were relatively small, and the final rate of loss sowing was less than 1.75%, and rate of reseeding was around 84.6%. The performance of the designed compensation system is stable, and the loss sowing problem of potato spoon-chain metering device can be solved well.

**Key words:** spoon-chain metering device; potato; loss sowing detection; automatic compensation; capacitance sensor

## 引言

勺链式排种器是现有中小型马铃薯种植机上应用最广泛的排种装置,具有可靠性高、造价低、株距可调且精度高等优点,但存在严重的漏种问题,其排种性能随排种速度增大而降低<sup>[1-2]</sup>。目前针对勺链式排种器排种性能的研究较多,但仅从排种器结构参数优化的角度入手,不能从根本上解决漏种问题<sup>[3-4]</sup>。生产中常采用人工补种的方法减少漏种率,但劳动强度大、作业成本高,且存在安全隐患<sup>[5-6]</sup>。

增加自动补偿装置是解决漏种问题的有效办法<sup>[7-11]</sup>,目前针对小麦、玉米、油菜等小粒种子,在漏种实时检测方法和自动补种系统实现方面已取得较多成果<sup>[12-15]</sup>。针对勺链式排种器的漏种问题,国内相关科研人员做了一些研究工作,并取得了一定成果:张晓东等<sup>[16]</sup>设计了由红外光电传感器检测漏种、单片机控制步进电机驱动补种的装置;刘全威等<sup>[17]</sup>提出了红外光电传感器检测漏种、曲柄滑块机构执行补种的方案;孙伟等<sup>[18]</sup>设计了由定位和测薯模块组成漏种检测系统和由固态继电器和电磁铁组成的补种装置。但是,目前所见补种系统均处于实验室研究阶段,未能应用于农业生产过程,主要原因有:红外光电传感器检测空种虽然技术上可行,但该类传感器抗灰尘能力极差,无法在田间高扬尘环境下长时间持续使用;补种系统采用步进电动机、曲柄滑块、磁钢等方法产生往复运动,实现单粒取种和补种动作,这些采用型腔实现种薯单粒分离的方法对种薯尺寸要求极高,需对种薯尺寸进行严格筛选,费时费力,增加了生产成本。

针对上述问题,本文提出基于电容值精确测量技术的漏种检测方法,以 PLC 为核心设计由电容传感器、伺服电动机和补种执行机构组成的补种系统,并将该系统成功应用在勺链式马铃薯种植机上,进

行补种性能试验。

## 1 总体方案

### 1.1 结构组成

漏种自补种系统配置在勺链式马铃薯排种器上,每一排种单体配备一套漏种自补种系统,补种链与一般排种链使用相同结构形式,电容传感器布置种箱内上部,排种链穿过电容传感器的检测通道。排种器由播种机地轮驱动,补种链由 PLC 驱动伺服电动机控制。排种器和补种器排出的种薯流入同一排种口。勺链式马铃薯排种器及漏种自补种系统如图 1 所示。

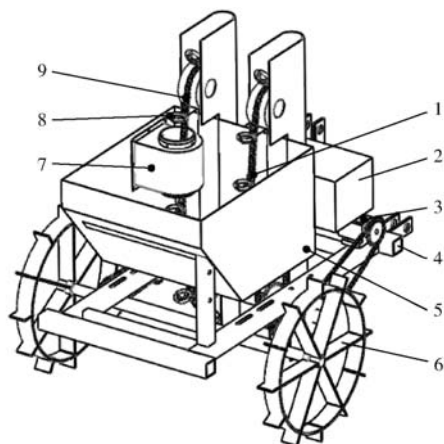


图 1 勺链式排种器及漏种补种系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of spoon-chain metering device and system of loss sowing testing and compensation

1. 补种链 2. 控制系统 3. 伺服电动机 4. 机架 5. 种箱
6. 地轮 7. 电容传感器 8. 取种勺 9. 排种链

漏种自补种系统硬件组成如图 2 所示,由电源模块、检测模块、中央处理单元、补种单元、液晶显示模块、人机接口、声光报警模块等组成。其中,检测模块是指电容传感器;中央处理单元采用西门子 S7-200 系列 PLC;补种单元包括补种链、伺服电动机和驱动器等;人机接口包括手动复位按钮等。由于机具作业时振动较大,系统各模块间采用航空插头连接,系统使用拖拉机 12 V 车载直流电源供电,

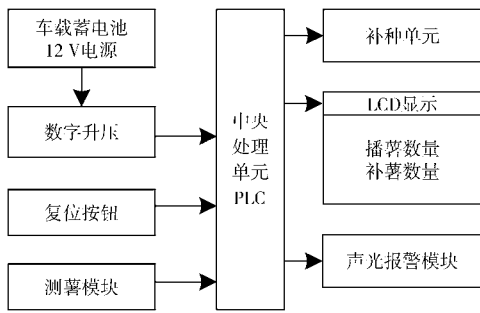


图2 系统硬件结构框图

Fig.2 Structure block diagram of system hardware

经升压模块升为24V给PLC供电。

## 1.2 工作原理

漏种自补种系统配备在勺链式排种器上,与之组成统一的整体。电容传感器实时高频采集电容值并传送到控制系统,控制系统将该值与设定阈值比较,判断是否存在漏种,当无漏种现象时,控制系统不发出任何操作指令,补种链无动作,当判断出漏种情况时,控制系统发出使能指令驱动伺服电动机动作,控制补种链动作完成补种。

## 2 漏种检测与自补偿系统设计

### 2.1 漏种检测原理

漏种检测系统主要由电容传感器、屏蔽壳体、附属电路等组成。在排种链圆周布置铜极板,构成电容传感器,在电容极板外部使用金属罩屏蔽,以消除外界电磁干扰。

由于马铃薯、链条、取种勺和空气的介电常数不同,当链条、空勺和载薯勺通过电容传感器极板间形成的检测场时,电容传感器的等效介电常数发生变化,引起电容输出值改变。设载薯种勺通过极板时,板间介质的等效介电常数为 $\varepsilon$ ,种薯、种勺、链条和空气的介电常数分别为 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ ,则

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^4 V_i \varepsilon_i}{V} \quad (1)$$

式中  $V_1$ ——种薯所占体积,  $m^3$   
 $V_2$ ——种勺所占体积,  $m^3$   
 $V_3$ ——链条所占体积,  $m^3$   
 $V_4$ ——空气所占体积,  $m^3$   
 $V$ ——电容传感器极板间检测场总体积,  $m^3$

由于  $V = \sum_{i=1}^4 V_i$ ,代入电容关系式  $C = \varepsilon S/d$ ,载薯勺处于电容传感器内部时,电容为

$$C_1 = \frac{S \sum_{i=1}^4 V_i \varepsilon_i}{dV} \quad (2)$$

式中  $d$ ——极板间距,  $m$

$S$ ——极板面积,  $m^2$   
 空勺处于电容传感器内部时,电容为

$$C_2 = \frac{S \sum_{i=2}^4 V_i \varepsilon_i}{dV} \quad (3)$$

链条处于电容传感器内部时,电容为

$$C_3 = \frac{S \sum_{i=3}^4 V_i \varepsilon_i}{dV} \quad (4)$$

则空勺穿过电容传感器时,传感器电容变化量为

$$C_2 - C_3 = \frac{SV_2 \varepsilon_2}{dV} \quad (5)$$

载薯种勺通过平行板电容传感器时,传感器电容变化量为

$$C_1 - C_3 = \frac{SV_2 \varepsilon_2 + SV_1 \varepsilon_1}{dV} \quad (6)$$

由式(6)知,载薯种勺或空勺穿过电容传感器时,电容值发生变化,且变化量不同,载薯种勺或空勺通过后,电容恢复为初始状态。通过实时采集电容,可以实现种勺穿过传感器过程的动态捕获。利用寻峰算法对所捕获的电容脉冲信号进行处理,获取峰值电容,通过与基础电容零点比较,判断是否出现漏种。

### 2.2 自动补种工作过程

漏种检测及补种系统安装示意图如图3所示。在排种勺链的通道内布置电容极板,实时检测排种状态。田间作业过程中,作业速度变化大且频率高,当控制系统检测到一个种勺漏种后,该种勺到达排种口的时间非定值,因此不能采用固定延时的方法驱动补种链补种。本研究根据电容检测值判断种勺位置,并将种勺位置信息和漏种信息存入PLC的寄

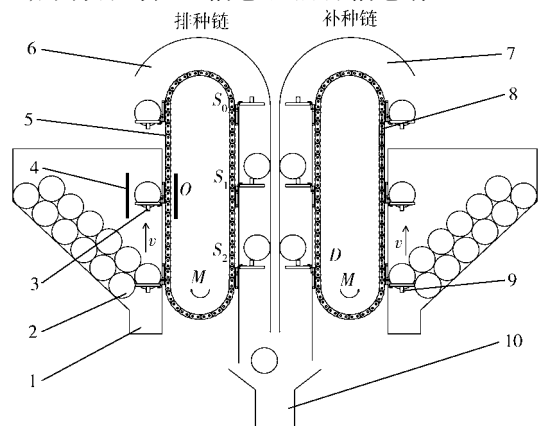


图3 漏种检测及补种系统安装示意图

Fig.3 Installation diagram of checking and re-seeding system

1. 种箱 2. 种薯 3, 9. 取种勺 4. 电容极板 5. 排种链  
 6, 7. 种薯通道 8. 补种链 10. 排种口

寄存器,使用寄存器移位的方法循环记录漏种信息,并使用寄存器指定高位驱动伺服电动机动作执行补种操作。

为了清晰阐明补种工作过程,将种勺完成检测后经过的关键位置点与寄存器存储地址及内容匹配,如图4所示。取种勺经过图3所示 $O$ 点位置时电容传感器检测漏种,之后经过位置 $S_0$ 、 $S_1$ 后到 $S_2$ ,控制系统发出指令驱动补种链动作,将补种链 $D$ 位置的种薯排出。在一般情况下,具体补种流程如下:排种过程中,取种勺从种箱通过,自下而上提升种薯,通过布置有电容传感器的区域时,电容传感器采集电容值,之后通过寻峰算法找到电容极值,并将极值与设定阈值对比,判断是否漏种,判断依据为

$$\begin{cases} y_1 - y_0 \geq 0.5 \text{ pF} & (\text{有种}) \\ y_1 - y_0 < 0.5 \text{ pF} & (\text{无种}) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $y_1$ ——电容极值,pF

$y_0$ ——设定电容阈值,pF

若检测结果为无种,则将有效使能信号存入 PLC 的寄存器 M2.0 位,并由低向高对寄存器执行一位整体移位操作;若检测结果为有种,则标记无效使能信号并存入 PLC 的寄存器 M2.0 位,并由低向高对寄存器执行一位整体移位操作;当排种链每转过一个勺距,M2 寄存器的最低位 M2.0 记录空种信息,并向高位移一位;当取种勺转过  $n$  个位置后脱离取种勺排出,此时若无种薯排出,则寄存器 M2.  $n$  位使能信号有效,此时 PLC 的 IO 口 00.1 输出高电平,D/A 模块输出模拟电压控制电动机转速,伺服电动机驱动器接收使能信号和模拟电压信号,驱动补种电动机动作执行补种操作。

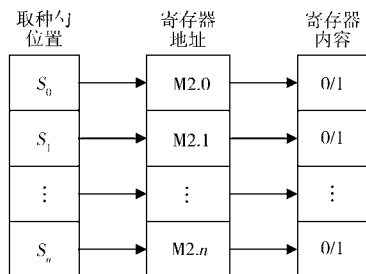


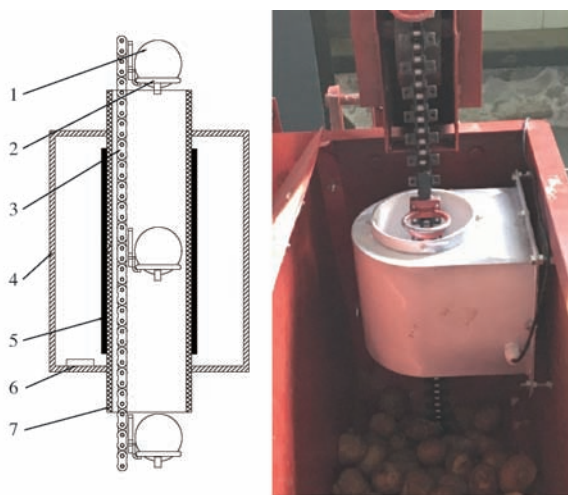
图4 取种勺位置在寄存器中的存储形式

Fig.4 Storage form of seed spoon position in register

## 2.3 补种控制系统设计

### 2.3.1 传感器设计

所设计电容式漏种检测传感器的结构简图和安装效果图如图5所示。排种链外围安装 PVC 管作为电容极板支撑基体。PVC 管长 120 mm,直径 80 mm,壁厚 2 mm,极板采用厚度为 0.1 mm 薄铜板制作,极板宽度为 80 mm,外部屏蔽罩采用 2 mm 厚铁板加工而成。信号调理电路安装在屏蔽罩内,通



(a) 结构简图

(b) 安装效果图

图5 电容传感器结构图

Fig.5 Structure diagram of capacitive sensor

1. 种薯
2. 取种勺
3. 排种链
4. 屏蔽壳体
5. 电容极板
6. 信号调理电路板
7. 固定筒体

过短导线与电容极板相连,尽可能消除杂散电容干扰。

电容检测电路以单片机 STC12C5A32S2 和电容数字转换芯片 AD7745 为核心元件搭建而成,传感器直接与 AD7745 相连接,完成电容测量。单片机通过 I<sup>2</sup>C 接口实现对 AD7745 内部寄存器配置及内部转换结果读取。考虑到电容信号易受环境温度影响,AD7745 内部集成温度传感器,单片机在读取 AD7745 内部电容信息的同时,一并获取温度信息,对电容信号进行补偿。

### 2.3.2 漏种检测软件设计

系统上电后,单片机首先执行初始化操作,完成对单片机及 AD7745 初始化,并读取单片机内部 EEPROM 存储的漏种阈值信息,然后进入电容采集状态。通过采集初始 100 个电容信号计算平均值作为系统基础零点,之后单片机进入检测判断状态,连续读取 AD7745 内部电容转换结果并计算得到实时电容,并将电容以十六进制格式通过 RS485 总线发送至 PLC。流程如图6所示。

### 2.3.3 控制系统设计

补种控制系统由电容式漏种检测传感器、电容检测电路、主控制器(PLC)等组成,其中电容式漏种检测传感器是控制系统的检测元件,用于判断种勺是否漏种;电容检测电路用于采集传感器电容信号;主控制器(PLC)对系统采集到的信息进行处理,并通过其自带 DA 模块输出模拟量电压驱动伺服电动机完成补种动作。补种控制系统如图7所示。

系统选用设备如下:PS70 型精密行星减速机,纽氏达特行星减速机有限公司;SGMJV-04ADE6S

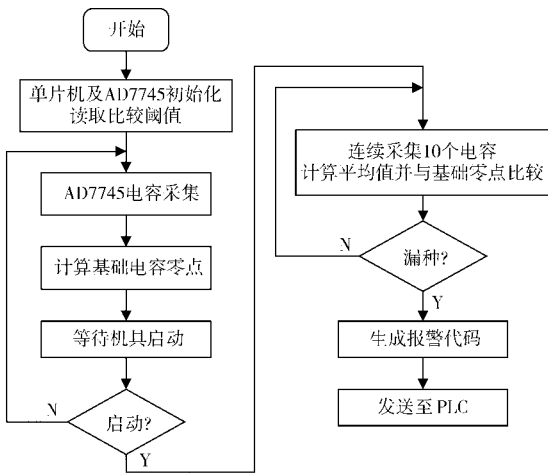


图6 检测软件程序流程图

Fig. 6 Program flow chart of detection software

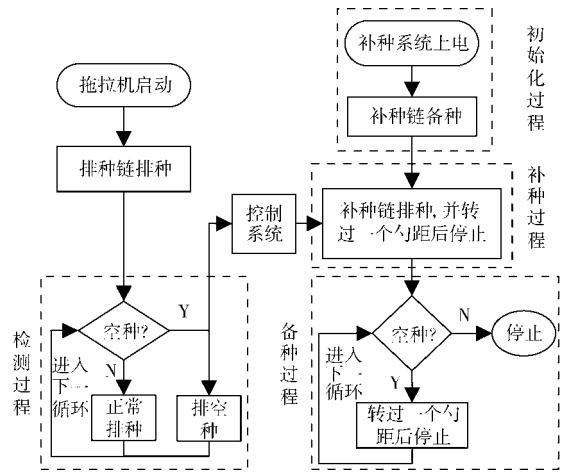


图8 补种控制系统流程图

Fig. 8 Control flow chart of re-seeding system

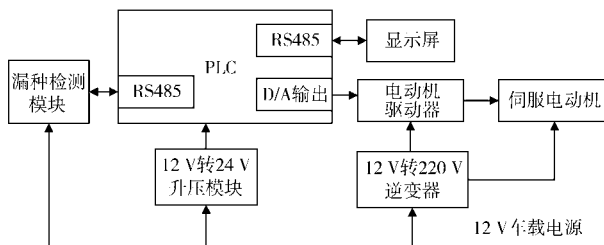


图7 补种控制系统原理框图

Fig. 7 Control principle block diagram of re-seeding system

型伺服电动机,安川电机有限公司;SGDV-2R8A01B002000型伺服驱动器,安川电机有限公司;西门子S7-200系列6ES7214-2AD23-OXB8型PLC模块。

补种控制系统流程如图8所示,可分为初始化、检测、补种和备种4个过程。补种系统上电,初始化开始,控制系统控制补种链动作,补种链转过设定距离,补种勺充满种薯;之后控制系统采集检测结果,当判断出无种时,驱动补种链执行一次补种操作,之后控制系统判断补种链下一种勺是否有种,若无种则再执行一次补种动作,如此循环直到补种勺内有种时停止,即完成一次检测、补种和备种过程;之后控制系统再次判断检测结果,进入下一循环。

### 3 性能试验

#### 3.1 试验设备和材料

为了测试漏种检测与补种系统的性能,利用自制勺链式马铃薯排种试验样机进行性能试验,试验样机如图9所示。为了精确控制试验条件,使用伺服电动机取代地轮驱动排种链,速度可通过伺服驱动器内部控制方式设定。补种链由另一伺服电动机驱动,由PLC指令控制运动。为了计算补种时间精度,排种器的排出口安装光电传感器,用以检测所补种子排出时距前一个种子排出的时间间隔。根据检



图9 漏种自动补种性能试验样机

Fig. 9 Performance test device of automatic re-seeding

测信号,PLC对正常播种数 $n_3$ 、补播数 $n_4$ 、实际排种时间间隔 $t_2$ 和补种时间间隔 $t_3$ 进行统计。

排种和补种装置均采用直径为25~30mm微型薯。

#### 3.2 试验内容和方法

常见马铃薯种植密度为67500株/hm<sup>2</sup>,以一垄双行的宽窄行种植为例,宽行行距为0.55m,窄行行距为0.35m,则株距 $L$ 为0.33m。勺链式排种器采用08A型链条,每8节布置1个种勺,相邻2个取种勺之间的间距称为勺距 $l$ ,则

$$l = 8 \times 2p \quad (8)$$

式中  $l$ ——勺距,m

$p$ ——链条节距,m

设排种速度为 $v$ ,作业前进速度为 $v'$ ,则

$$\frac{L}{v'} = \frac{l}{v} \quad (9)$$

式中  $L$ ——株距,m

$v$ ——排种速度,m/s

$v'$ ——作业前进速度,m/s

勺链式排种器主要应用在中小型马铃薯种植机上,作业速度一般为2~4 km/h,则排种勺的速度为0.34~0.68 m/s。因此,勺链线速度0.3~0.7 m/s范围内均分设置5个排种速度进行试验。每个试验点取600粒种子进行测定,重复5次。通过田间试验统计理论播种数 $n_0$ 、最终播种数 $n_1$ 、最终漏种数 $n_2$ 、正常播种数 $n_3$ 、补播数 $n_4$ 及正常漏种数 $n_5$ ,其中: $n_0 = n_1 + n_2$ , $n_3 = n_1 - n_4$ , $n_5 = n_0 - n_3$ 。则原始漏种率

$$\eta_1 = \frac{n_0 - n_3}{n_0} \times 100\% \quad (10)$$

补种成功率

$$\eta_2 = \frac{n_4}{n_0 - n_3} \times 100\% \quad (11)$$

最终漏种率

$$\eta_3 = \frac{n_0 - n_3 - n_4}{n_0} \times 100\% \quad (12)$$

检测时间误差、系统处理时间和电动机响应时间等均会影响补种株距精度。理论排种时间间隔为 $t_0$ ,实际排种时间间隔为 $t_2$ ,补种时间间隔 $t_3$ ;则排种

时间间隔误差 $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ ,补种时间误差 $\Delta t_3 = t_3 - t_0$ ,排种株距误差 $s_2 = (t_2 - t_0)v$ ,补种株距误差 $s_3 = (t_3 - t_0)v$ ,则:

排种株距误差率

$$\eta_4 = \frac{t_2 - t_0}{t_0} \times 100\% \quad (13)$$

补种株距误差率

$$\eta_5 = \frac{t_3 - t_0}{t_0} \times 100\% \quad (14)$$

相关文献指出,由于马铃薯出芽位置的不可控性,马铃薯的播种精度不能决定种植精度,如果保证马铃薯的种植密度,株距变异系数不超过60%~70%,不会引起产量显著降低<sup>[19]</sup>。

### 3.3 试验结果和分析

#### 3.3.1 试验结果

排种及补种性能试验结果如表1所示。试验结果表明,勺链式排种器线速度超过0.5 m/s时,原始漏种率显著增加,与前人的研究结果一致,这主要是因为随着排种器线速度的增大,种薯有效填充种勺的时间变短,充种率下降。

表1 排种性能试验结果

Tab.1 Results of metering performance test

试验 次序	排种速度 $v/(m \cdot s^{-1})$																			
	0.3				0.4				0.5				0.6				0.7			
	$n_3$	$n_4$	$t_2/s$	$t_3/s$	$n_3$	$n_4$	$t_2/s$	$t_3/s$	$n_3$	$n_4$	$t_2/s$	$t_3/s$	$n_3$	$n_4$	$t_2/s$	$t_3/s$	$n_3$	$n_4$	$t_2/s$	$t_3/s$
1	560	34	721	763	564	30	535	591	546	46	459	502	536	54	366	407	533	56	325	378
2	555	38	700	769	554	39	550	599	550	43	438	501	538	53	375	411	533	57	346	354
3	552	41	715	744	552	42	540	574	548	44	453	476	543	49	390	415	533	57	331	380
4	559	35	705	758	560	34	560	588	547	45	443	490	542	49	380	410	534	56	341	362
5	562	31	725	770	555	38	547	600	543	48	463	502	533	57	390	441	528	61	321	375
均值	558	36	713	761	557	36	546	590	547	45	451	494	538	52	380	417	532	57	333	369

#### 3.3.2 补种率分析

漏种率和补种率随排种速度变化曲线如图10所示。当不加漏种补偿装置时,排种速度由0.3 m/s增大到0.7 m/s,原始漏种率由7%增大到11.3%;经补偿后,最终漏种率由1.1%增大到1.75%;随排种速度增大,补种成功率变化不大,平均补种率为

84.6%。

#### 3.3.3 补种精度分析

排种株距误差率 $\eta_4$ 和补种株距误差率 $\eta_5$ 随排种速度变化曲线如图11所示,可以看出,当排种速度由0.3 m/s增大到0.7 m/s,排种株距误差率由3.3%增大到9.1%;补种株距误差率由7.6%增大

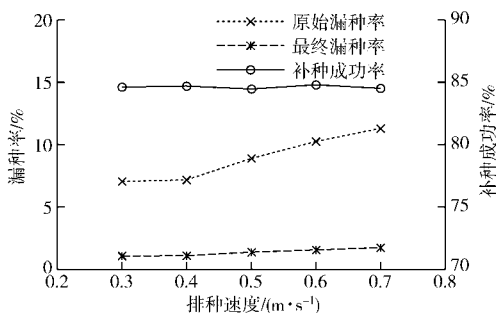


图10 漏种率和补种成功率变化曲线

Fig.10 Variation curve of loss sowing rate and reseeding rate

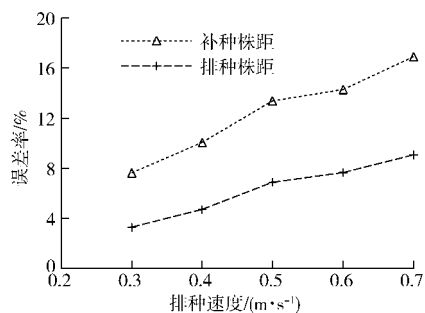


图11 误差率变化曲线

Fig.11 Variation curves of error rate

到16.9%。可以看出受采样误差和伺服电动机响应速度的影响,补种株距精度低于排种株距精度,但在试验选取的参数范围内,补种株距精度能够满足马铃薯种植株距要求。

## 4 结论

(1)提出了一种基于电容值精确测量技术的漏种检测方法,用于检测勺链式马铃薯排种器的漏种现象,并设计了采用普通勺链式排种结构作为补种执行机构的自补种系统,并实现了自补种系统在马铃薯种植机上的应用,试验研究了自补种系统的补

种性能。

(2)在试验范围内,随排种速度增大漏种率增加;排种速度为0.3~0.7 m/s时,原始漏种率为7%~11.3%;补偿后,最终漏种率为1.1%~1.75%;随排种速度增大,补种成功率变化不大,平均为84.6%,漏种补偿效果显著,基本解决了漏种问题。

(3)株距精度统计结果表明:在0.3~0.7 m/s的排种速度下,排种株距误差率为3.3%~9.1%;补种株距误差率为7.6%~16.9%,补种株距精度能够满足马铃薯种植要求。

## 参 考 文 献

- 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械化发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 258-263.  
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258-263. (in Chinese)
- BUITENWERF H, HOOGMOED W B, LERINK P, et al. Assessment of the behavior of potatoes in a cup-belt planter[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 35-41.
- EBRAHEM I Z, AYMAN A E, GUIDETTI R. New small potato planter for Egyptian agriculture [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 42(3): 7-13.
- SZCZEPANIAK J, PAWLOWSKI K, GRZECHOWIAK R, et al. Experimental tests and computer simulations of a combination tractor/potato planter: the identification and optimization of parameters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(5): 126-136.
- 刘全威,吴建民,王蒂,等. 马铃薯播种机的研究现状及进展[J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 238-241.  
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Current status and progress of the potato seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 238-241. (in Chinese)
- ILYES S, POPESCU S, VOICU E. Experimental device for the researches on the precision of the tubers planting distance within the row for different potato planters[C]//Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences, Proceedings of the Third International Conference, 2011: 153-158.
- 夏俊芳,周勇,张平华. 基于虚拟仪器的排种器性能检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 87-90.  
XIA Junfang, ZHOU Yong, ZHANG Pinghua. Testing technique of precise seed-metering device based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 87-90. (in Chinese)
- 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)
- 宋鹏,张俊雄,李伟,等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 71-74.  
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71-74. (in Chinese)
- 赵立业,蹇兴东. 排种性能检测传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 41-43.  
ZHAO Liye, JIAN Xingdong. Study on optoelectronic sensor for performance detection of a seedmeter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 41-43. (in Chinese)
- 朱瑞祥,葛世强,翟长远,等. 大籽粒作物漏播自补种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 1-8.  
ZHU Ruixiang, GE Shiqiang, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of automatic reseeding device for miss-seeding of crops with large grain[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 1-8. (in Chinese)
- 龚丽农,戴玉华,蒋金琳. 具有自动补种功能的机械精密排种系统[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 60-63.  
GONG Linong, DAI Yuhua, JIANG Jinlin. Experimental investigation of a new mechanical precision metering device with automatic compensative seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 60-63. (in Chinese)
- 李士军,宫鹤,顾洪军,等. 具有自动补种功能的机械精密播种系统的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(1): 106-109.  
LI Shijun, GONG He, GU Hongjun, et al. Research on precision seeding system with automatic reseeding[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2011, 33(1): 106-109. (in Chinese)
- 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 16-21.

- ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16-21. (in Chinese)
- 15 张锡志,李敏,孟臣. 精密播种智能监测仪的研制[J]. 农业工程学报,2004,20(2):136-139.  
ZHANG Xizhi, LI Min, MENG Chen. Research and development of precision seeding intelligent monitor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 136-139. (in Chinese)
- 16 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.  
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. (in Chinese)
- 17 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 the Arid Areas, 2013, 31(3): 260-266. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 MCPHEE J E, BEATTIE B M, CORKREY R, et al. Spacing uniformity-yield effects and in-field measurement[J]. American Potato Journal, 1996, 73(4):167-171.

~~~~~

(上接第 61 页)

- 3 李静. 水稻钵形毯状秧苗机械插秧技术[J]. 农村科技,2016(3): 12.
- 4 陈惠哲,朱德峰,徐一成. 水稻钵形毯状秧苗机插技术及应用效果[J]. 中国稻米,2009(3): 5-7.
- 5 薛志刚,王华. 井关 2BZP-580A 型水稻育秧播种机[J]. 新农业, 2012(1): 53.
- 6 冯帆. 2BDP-1000 型水稻育秧盘精量播种机的研制[J]. 农业工程,2015,5(2): 76-79.  
FENG Fan. Research of 2BDP-1000 rice seedlings precise seeder[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(2): 76-79. (in Chinese)
- 7 孙志强,湛小梅,李平,等. 五种水稻育秧播种机的试验研究[J]. 南方农业, 2012, 6(2): 137-139.
- 8 李志伟,邵耀坚. 电磁振动式水稻穴盘精量播种机的设计与试验[J]. 农业机械学报,2000,31(5):32-34.  
LI Zhiwei, SHAO Yaojian. Study and test of electromagnetic vibrating type rice seeder for hill seedling nursery box [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 32-34. (in Chinese)
- 9 周海波,马旭,玉大略,等. 2CYL-450 型水稻秧盘育秧播种流水线研制[J]. 农机化研究,2008,30(11):95-97.  
ZHOU Haibo, MA Xu, YU Dalue, et al. Rice seeding for nursing seedlings pipeline of 2CYL-450 type design[J]. Agricultural Mechanization Research,2008,30(11): 95-97. (in Chinese)
- 10 玉大略,马旭,周海波,等. 振动流动式水稻秧盘育秧播种器的试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 137-139.  
YU Dalue, MA Xu, ZHOU Haibo, et al. Experimental research of vibration flow type rice seedlings seeder[J]. Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 137-139. (in Chinese)
- 11 郑丁科,李志伟,区颖刚. 电磁振动组合式毯状秧苗播种装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2004, 25(1): 103-106.  
ZHENG Dingke, LI Zhiwei, OU Yinggang. Design and test for electromagnetic vibration combined blanket seedling planting device[J]. Journal of South China Agricultural University, 2004, 25(1): 103-106. (in Chinese)
- 12 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 42-48.  
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and test for paddy pneumatic type metering device room layering[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42-48. (in Chinese)
- 13 邓伟健,李志伟,邱秀丽,等. 基于交叉导流式种箱的稻种流动性及结拱研究[J]. 农机化研究, 2013,35(12): 145-149.  
DENG Weijian, LI Zhiwei, QIU Xiuli, et al. Research of box rice liquidity and arch based on cross diversion[J]. Agricultural Mechanization Research, 2013,35(12): 145-149. (in Chinese)
- 14 周海波. 水稻秧盘育秧精密播种机的关键技术研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2009.
- 15 胡立勇,丁艳锋. 作物栽培学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.