

基于压电冲击法的水稻穴直播监测系统设计及试验

王金武 张 垦 王 菲 姜业明 周文琪

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为精准实时监测水稻穴直播机播种状态,提高监测稳定性,以弹射式耳勾型水稻穴直播排种器为研究载体,采用 PVDF 压电薄膜为传感元件,以 ATmega328P MCU 控制器为核心,基于压电冲击法设计了水稻穴直播监测系统。通过分析种群投种轨迹,设计了可辅助监测且导种成穴的导种管,确定了 PVDF 压电薄膜传感器的安装部位。结合排种器多粒穴播作业特点,确定了 4 种作业故障监测算法。设计了系统硬件电路,开发了蓝牙无线串口传输 APP,实现了上、下位机无线通信。台架测试表明:在不同工况下系统灵敏度均在 90.83% 及以上,可实现对信号的有效采集。由田间试验得到系统的重播监测精度、漏播监测精度及有效监测精度的平均值的最小值分别为 81.79%、80.42% 和 97.67%,且系统在机具发生重播或漏播时可进行声光报警。该监测系统满足水稻穴直播监测要求,有助于提高水稻穴直播作业质量。

关键词: 水稻穴直播; 压电冲击法; PVDF 压电薄膜; 监测系统

中图分类号: S223.2*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0074-11

Design and Experiment of Monitoring System for Rice Hill-direct-seeding Based on Piezoelectric Impact Method

WANG Jinwu ZHANG Zhao WANG Fei JIANG Yeming ZHOU Wenqi
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to accurately monitor the sowing state of rice hill-direct-seeding machine in real time and improve stability, taking rebound dipper rice hill-direct-seeding metering device as research carrier, PVDF piezoelectric film as sensing element, ATmega328P MCU as control core, a monitoring system for rice hill-direct-seeding based on piezoelectric impact method was designed. Based on analysis of seed throwing trajectory of rice seeds, seed-conducting tube which could be used to assist monitoring and indenting seed-conducting was designed, and the installation position of PVDF piezoelectric film sensor was determined. The control algorithm to four kinds of seeding faults was determined with characteristics of multi-seed hill-direct-seeding. The whole hardware circuit of system was designed and Bluetooth wireless serial transparent transmission APP was developed, so that wireless communication between the host computer and the slave computer could be realized. The results of bench test showed that the sensitivity of system can reach more than 90.83% under different working conditions, so the system can realize the effective capture of signal. The field performance experiment results showed that acousto-optic alarm operation can be done when fault was happened. Counting reseeded hill amount and miss seeding hill amount were shown on Bluetooth wireless serial transparent transmission APP, which were contrast with actual reseeded hill amount and miss seeding hill amount counted by manpower, and the minimum mean values of reseeded monitoring accuracy, miss seeding monitoring rate and effective monitoring rate of system were 81.79%, 80.42% and 97.67%, respectively, which can meet the monitoring requirement of rice hill-direct-seeding and enhance the operation quality of rice hill-direct-seeding.

Key words: rice hill-direct-seeding; piezoelectric impact method; PVDF piezoelectric film; monitoring system

收稿日期: 2018-11-14 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)和黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目

作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

通信作者: 周文琪(1989—),男,讲师,博士,主要从事田间作业机械研究,E-mail: zhouwenqi1989@163.com

0 引言

随着我国农业机械化水平的不断提升,水稻穴直播种植方式逐渐应用于农业生产中。该种植方式可使植株结构更加合理,与水稻插秧相比具有节本增效的优点,是一种省工、省力、省时的高效水稻种植方式^[1-3]。水稻穴直播机将经催芽与包衣的稻种以多粒穴播方式播入田中,排种器作为水稻穴直播机的关键部件,其性能直接决定了机具的播种质量。目前水稻穴直播机播种过程普遍处于封闭状态,仅凭人的感观无法直接监测机具作业质量^[4-6]。若机具出现重播或漏播现象,则会造成植株通风性差、成苗率低,影响农业生产收益^[7-10]。因此,在满足水稻穴直播作业条件下,实现精准实时监测具有重要意义。

目前国外对旱田播种监测技术的研究较多。法国库恩 NODET 气吸式播种机上的响铃式排种故障报警器^[11],在发生故障时以敲击铃罩的方式不断发出声响,进行报警;澳大利亚 AEE 公司为气力播种机设计了一种报警器^[12],其利用红外线传感器监控输种管中种子的排量,当输种管停止输种时,报警器立即进行声光报警。虽然国外播种机监测技术智能化程度及可靠性较高^[13-17],但监测对象局限于旱田播种机,而对于水稻穴直播监测技术研究较少。

随着机电一体化技术在农业机械领域的迅速发展^[18-20],近年来,国内部分学者对水稻穴直播监测技术进行了探索。崔红光等^[21]采用光电法设计了一种基于 ZigBee 技术的水稻穴直播机漏播监测装置,该装置虽可在机具出现漏播时发出报警信号,但传感器位于导种管下种口处,易受水田泥浆影响,造成下种口堵塞,影响直播作业,且该监测装置仅对穴距漏播进行监测,并未对穴粒数漏播或重播现象进行监测。文献[22]依托型孔轮式排种器设计了水稻穴直播机光电漏播检测装置,该装置采用灌注方式固定在排种管上,有效保证了光电传感器的光路传播并防水防尘,但装置在工作时会出现检测盲区,减少了有效检测区域面积,影响检测准确率。

针对上述问题,本文依托课题组所设计的弹射式耳勺型水稻穴直播排种器,在保证成穴播种的前提下,基于压电冲击法设计适应水田环境的水稻穴直播监测系统,并进行台架测试与田间性能试验,以期改善水稻穴直播作业质量。

1 监测系统结构设计

1.1 研究载体

弹射式耳勺型水稻穴直播排种器作为监测系统

的研究载体,其具体工作原理见文献[23],结构如图1所示,主要由容种箱、取种耳勺、挡杆、扭转弹簧、柱销、旋转底座、导种管、柔性护种辊、辊座、辊架和清种毛刷等部件构成,其工作过程可分为舀种、清种、护种和投种4个阶段,本研究基于排种器投种阶段,完成导种管结构设计,确定 PVDF 压电薄膜传感器安装部位,为监测系统后续优化提供前期基础。

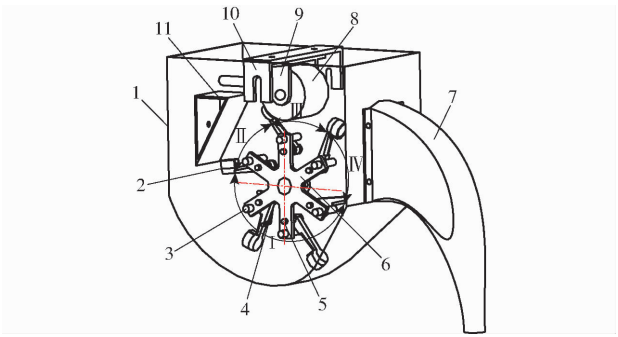


图1 弹射式耳勺型水稻穴直播排种器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of rebound dipper rice hill-direct-seeding metering device

1. 容种箱 2. 取种耳勺 3. 挡杆 4. 扭转弹簧 5. 柱销 6. 旋转底座 7. 导种管 8. 柔性护种辊 9. 辊座 10. 辊架 11. 清种毛刷
I. 舀种弧段 II. 清种弧段 III. 护种弧段 IV. 投种弧段

1.2 结构与工作原理

监测系统主要包括 Arduino Uno 开发板(内含 ATmega328P MCU 控制器)、导种管(内壁附着 PVDF 压电薄膜传感器)、电荷放大整形器、12 V 直流电源、可调直流降压稳压器、I/O 传感器扩展板、红蓝 LED 报警灯、电磁式有源蜂鸣报警器、HC-05 嵌入式蓝牙串口通讯模块和蓝牙无线串口传输 APP,监测系统整体结构如图2所示。

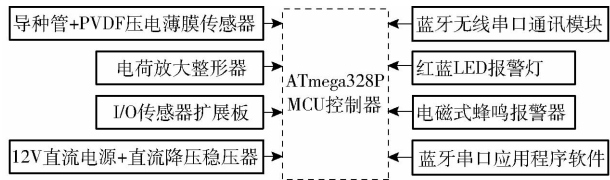


图2 监测系统结构框图

Fig.2 Structural diagram of monitoring system

监测系统工作原理如图3所示。由排种器工作原理可知,被弹射出取种耳勺的稻种具有一定的初速度,在重力的作用下冲击贴附于导种管内壁的 PVDF 压电薄膜传感器,PVDF 压电薄膜由于受到冲击力而发生形变,内部产生极化现象,在其上、下表面出现正负相反的电荷,从而生成电压信号。信号经放大整形电路进行放大与整形处理,形成脉冲波,经 D/A 转换器送入 ATmega328P MCU 控制器系统,形成模拟量输出。当排种器发生漏播或重播故障时,PVDF 压电薄膜传感器产生的模拟电压信号大

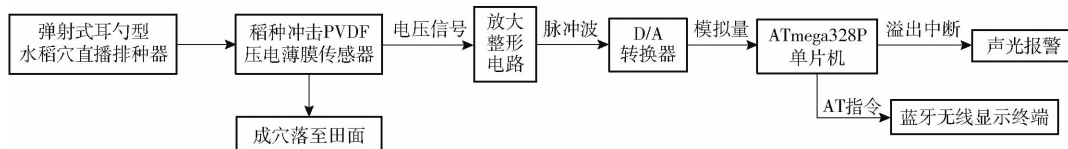


图3 监测系统工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of monitoring system

小或时间间隔超出理论阈值范围,从而驱动报警电路工作进行声光报警,稻种冲击PVDF压电薄膜传感器后,沿着导种管内壁下滑,成穴落至水田田面,完成直播作业。

1.3 导种管结构设计

为保证被弹射入导种管内的稻种顺利地冲击到传感器,使ATmega328P MCU控制器采集到模拟电压信号,须对排种器投种过程进行理论分析,寻求稻种被弹射出取种耳勺后的运动轨迹,确定导种管结构参数,以提高稻种对PVDF压电薄膜传感器的有效冲击概率并保证稻种成穴播至田面。

由运动学分析可知,投种过程稻种下落模型可简化为平面斜下抛运动^[24]。以取种耳勺内水稻种群为研究对象,将种群视为统一质点 M ,其质心作为坐标原点,分别以种群水平运动方向和竖直运动相反方向为正方向,建立 XOY 坐标系,如图4所示。

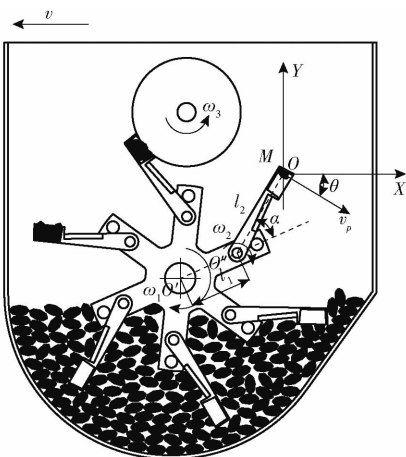


图4 投种过程稻种受力分析

Fig. 4 Stress analysis of rice seed in process of seed throwing

取种耳勺脱离柔性护种辊压制作用,排种器进入投种阶段,在旋转底座带动下取种耳勺绕柱销快速旋转并与挡杆碰撞,稻种被抛离出取种耳勺,则

$$\begin{cases} v_{O'} = \omega_1 l_1 \\ v_{O''} = \omega_2 l_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω_1 ——柱销相对底座转动角速度,rad/s

ω_2 ——种群 M 相对柱销转动角速度,rad/s

l_1 ——柱销相对底座等效回转半径,mm

l_2 ——种群 M 相对柱销等效回转半径,mm

$v_{O'}$ ——柱销相对底座转动线速度,mm/s

$v_{O''}$ ——种群 M 相对柱销转动线速度,mm/s

种群 M 被抛离出取种耳勺时的瞬时速度为柱销相对旋转底座中心转动的线速度与稻种相对柱销中心转动的线速度的合速度,为简化分析,忽略空气阻力影响以及种群 M 与取种耳勺舀种部内壁的摩擦,由余弦定理可得

$$v_p = \sqrt{v_{O'}^2 + v_{O''}^2 - 2v_{O'}v_{O''}\cos(\pi - \alpha)} \quad (2)$$

式中 v_p ——种群 M 被抛离出取种耳勺瞬时速度,mm/s

α ——取种耳勺与挡杆接触时,取种耳勺与旋转底座安装臂夹角,(°)

将式(1)代入式(2),得

$$v_p = \sqrt{\omega_1^2 l_1^2 + \omega_2^2 l_2^2 + 2\omega_1 \omega_2 l_1 l_2 \cos \alpha} \quad (3)$$

由于种群 M 被抛离出取种耳勺后做平面斜下抛运动,分析可得

$$x = v_p t \cos \theta \quad (4)$$

$$y = -v_p t \sin \theta - \frac{1}{2} \times 1000 g t^2 \quad (5)$$

式中 x ——种群 M 在水平方向位移,mm

y ——种群 M 在竖直方向位移,mm

θ ——种群 M 被抛离出取种耳勺瞬时速度与水平方向夹角,(°)

t ——种群 M 下落时间,s

g ——重力加速度,9.8 m/s²

将式(3)代入式(4),解得种群 M 下落时间为

$$t = \frac{x}{\sqrt{\omega_1^2 l_1^2 + \omega_2^2 l_2^2 + 2\omega_1 \omega_2 l_1 l_2 \cos \alpha} \cos \theta} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),整理得种群 M 的轨迹方程为

$$y = -x \tan \theta - \frac{500 g x^2}{(\omega_1^2 l_1^2 + \omega_2^2 l_2^2 + 2\omega_1 \omega_2 l_1 l_2 \cos \alpha) \cos^2 \theta} \quad (7)$$

其中,由文献[25]可知, $l_1 = 40$ mm, $l_2 = 60$ mm, $\alpha = 36^\circ$ 。利用Matlab软件编写绘图程序,改变参数 ω_1 、 ω_2 与 θ 的值,绘制不同工作转速下水稻种群的投种轨迹,如图5所示。

为满足所设计导种管具有辅助监测和导种成穴功能,结合水稻种群投种轨迹曲线形式,设计导种管由信号采集弧段和垂直导种段两部分组成。为保证水稻种群与传感器充分接触并沿导种管内壁成穴落至田面,需对导种管结构尺寸及传感器安装部位进

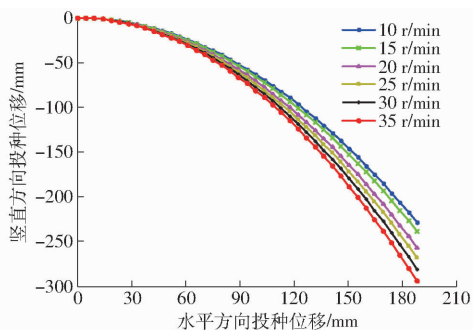


图5 水稻种群投种轨迹示意图

Fig. 5 Diagram of seed throwing trajectory of rice seeds

行确定。

由图5可知,若将信息采集弧段设置在种群水平方向投种位移较小处,种群较为集中,有利于种群与传感器充分接触,但此时种群距离田面较高,致使种群接触传感器后下落时间增长,种群籽粒易分散,导致成穴性差;若将信息采集弧段设置在种群水平方向投种位移较大处,可减少种群接触传感器后的下落时间,但此时种群的速度较大,其在导种管内易反弹,造成伤种。综合以上分析,确定导种管的水平长度为132 mm,竖直高度为260 mm,弧段宽度为55 mm,下种口内径为20 mm,如图6a所示。

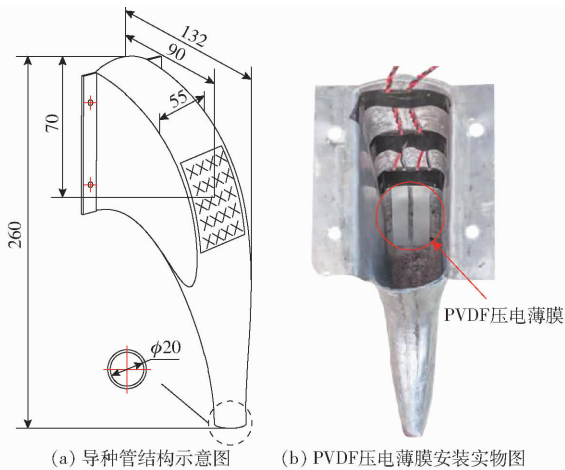


图6 PVDF压电薄膜传感器安装示意图

Fig. 6 Diagram of PVDF piezoelectric film sensor installation

由于PVDF压电薄膜具有柔软坚韧与耐冲击的特点,且不易受水影响,故采用两片长、宽和厚分别为75、25 mm和52 μm的PVDF压电薄膜并列贴附于导种管信号采集弧段的内壁作为传感器,位置如图6b所示。

2 监测指标控制算法确定

由于水稻穴直播机是以多粒穴播的方式进行播种作业,故其可能会发生两种情况下的漏播或重播现象,即穴粒数重播、穴粒数漏播、穴距重播和穴距漏播。

2.1 穴粒数重播和穴粒数漏播监测算法

监测系统采用PVDF压电薄膜作为信号采集传感器,其晶体内部的压电效应可将稻种冲击传感器的力学量转化成电信号输出。由于压电薄膜符合机械自由、电学短路的边界条件,故其满足第一类压电方程

$$D = d_0 \sigma + \epsilon^T E_0 \quad (8)$$

式中 D ——电位移, C/m^2

d_0 ——压电常数矩阵

σ ——应力, Pa

ϵ ——介电常数矩阵

E_0 ——电场强度, N/C

当PVDF压电薄膜作为传感器时,其外界电场 E_0 为0,此时对应的第一类压电方程为

$$D = d_{ij} \sigma \quad (9)$$

式中下标 i 表示产生极化电荷方向,即垂直于 X 、 Y 、 Z 轴的面法线方向, $i = 1, 2, 3$; 下标 j 表示作用力方向,即沿 X 、 Y 、 Z 轴正应力方向, $j = 1, 2, 3$; 垂直于 X 、 Y 、 Z 轴平面内切应力方向, $j = 4, 5, 6$ 。

对于PVDF压电薄膜,极化方向为厚度方向,故切应力对应的压变系数为0。同时薄膜很薄,无法从侧面引出电极,通常引出的是 Z 轴方向上的电荷,如图7所示。此时压电方程可简化为

$$D_z = d_{31} \sigma_{xx} + d_{32} \sigma_{yy} + d_{33} \sigma_{zz} \quad (10)$$

式中 D_z ——垂直于 Z 轴表面的电位移, C/m^2

d_{31} 、 d_{32} ——极化方向与外力方向垂直的压电常数, C/N

d_{33} ——极化方向与外力方向平行的压电常数, C/N

σ_{xx} ——沿 X 轴方向应力, Pa

σ_{yy} ——沿 Y 轴方向应力, Pa

σ_{zz} ——沿 Z 轴方向应力, Pa

由于薄膜受力主要在厚度方向,故式(10)可进一步简化为

$$D_z = d_{33} \sigma_{zz} \quad (11)$$

根据胡克定律可知,在材料的线弹性范围内有

$$\sigma = E \epsilon \quad (12)$$

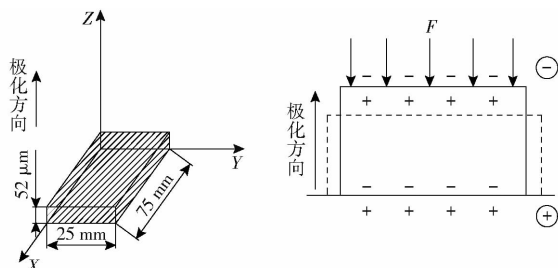


图7 PVDF压电薄膜极化示意图

Fig. 7 Diagram of PVDF piezoelectric film polarization

式中 E ——PVDF 压电薄膜弹性模量, Pa

ε ——应变

此时 PVDF 压电传感器的输出电荷可表示为

$$Q = D_z S = d_{33} \sigma_z S = d_{33} E \varepsilon S \quad (13)$$

式中 Q ——PVDF 压电薄膜输出电荷, C

S ——PVDF 压电薄膜面积, m^2

由于 PVDF 压电薄膜具有平板电容器结构^[26], 可得

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d_{33} \sigma_z S}{C} = \frac{d_{33} E \varepsilon S}{C} \quad (14)$$

式中 U ——PVDF 压电薄膜输出电压, V

C ——PVDF 压电薄膜电容, F

由式(14)可知, 当 PVDF 压电薄膜面积一定时, 输出电压与应变成正比。但在实际工作过程中, 由于压电薄膜自身存在迟滞、蠕变等现象, 影响输出与输入的线性关系。由于稻种与传感器接触为瞬时冲击, 故可将产生的冲击力视为静态力^[27]。为保证监测系统的精准性与可靠性, 应探究所选用 PVDF 压电薄膜传感器的静态响应特性, 对其输出电压与应变的线性关系进行标定。通过在 PVDF 压电薄膜表面添加不同质量的砝码, 使之产生不同应变, 测出其在不同应变下的输出电压。采用动态数据采集最高输出电压和相应应变^[28], 利用 Excel 软件得到 PVDF 压电薄膜静态标定曲线, 如图 8 所示。

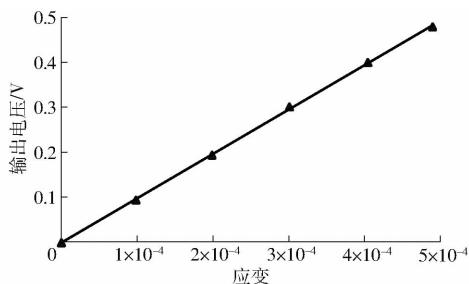


图 8 PVDF 压电薄膜静态标定曲线

Fig. 8 Static calibration curve of PVDF piezoelectric film

由图 8 可知, 在静态力作用下, PVDF 压电薄膜输出电压与应变之间线性相关程度较高, 且呈线性增长趋势, 表明所选用的 PVDF 压电薄膜传感器满足监测系统设计要求。

为保证 PVDF 压电薄膜传感器采集信号的有效性及监测系统的稳定性, 探究排种器高速作业条件下 PVDF 压电薄膜传感器与第 M 穴稻种冲击后的稳态恢复情况。取排种器最优工作转速范围内的最大工作转速 $n = 35 \text{ r/min}$ ^[29], 并使排种器转动一圈 (对应 6 穴稻种), 通过 LabVIEW 虚拟仪器输出 6 穴稻种冲击传感器产生的模拟电压随时间变化的脉冲波形图, 如图 9 所示。由图 9 可知, 相邻两脉冲之间无明显干扰信号, 表明 PVDF 压电薄膜传感器与第

M 穴稻种冲击后可迅速恢复至稳定状态, 可对第 $M+1$ 穴稻种冲击信号进行有效采集, 且所选用 PVDF 压电薄膜传感器频率响应宽, 在 $10^{-5} \sim 10^9 \text{ Hz}$ 范围内响应平坦^[30], 可以采集连续的冲击信号。

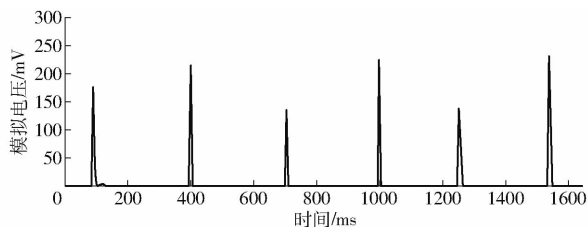


图 9 6 穴稻种冲击 PVDF 压电薄膜传感器输出波形图

Fig. 9 Output waveform of PVDF piezoelectric film sensor impacted by six hole rice seeds

由排种器工作原理可知, 稻种对 PVDF 压电薄膜传感器的冲击力与排种器工作转速、冲击传感器的稻种粒数有关。为探究实际工况下稻种粒数对传感器模拟电压的影响, 对相同工作转速 (10 r/min) 下不同稻种粒数 (1 ~ 10 粒) 冲击 PVDF 压电薄膜传感器时产生的模拟电压进行标定, 结果如图 10 所示。

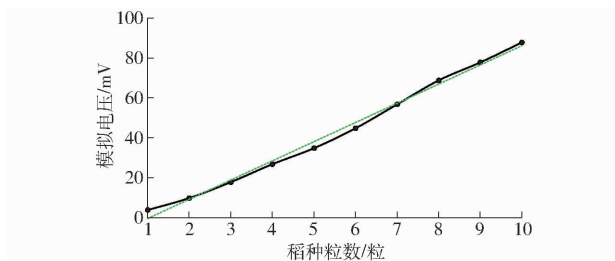


图 10 相同转速下不同稻种粒数标定曲线

Fig. 10 Calibration curve of different rice seed amounts at the same speed

由图 10 可知, 当排种器工作转速一定时, 稻种冲击 PVDF 压电薄膜传感器产生的模拟电压与稻种粒数的数学模型呈单调递增变化规律。根据水稻穴直播农艺要求及机具实际作业情况, 合格穴粒数为 5 ~ 8 粒之间的动态值^[31], 故对不同转速下 5 ~ 8 粒稻种冲击 PVDF 压电薄膜传感器产生的模拟电压进行极限阈值 ($V_{\min}$ 和 $V_{\max}$) 选定, 如图 11 所示。

故可确定针对机具发生穴粒数重播和穴粒数漏播时的监测算法为: ATmega328P MCU 控制器系统读取每穴稻种冲击传感器产生的模拟电压信号 V_i , 并与各工况下预置的两个极限阈值进行比较判断。若 $V_i > V_{\max}$, 则判定为穴粒数重播; 若 $V_i < V_{\min}$, 则判定为穴粒数漏播; 若 $V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$, 则判定为穴粒数合格。

2.2 穴距重播和穴距漏播监测算法

根据 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》中穴播机性能评价指标及实际播种作业对穴

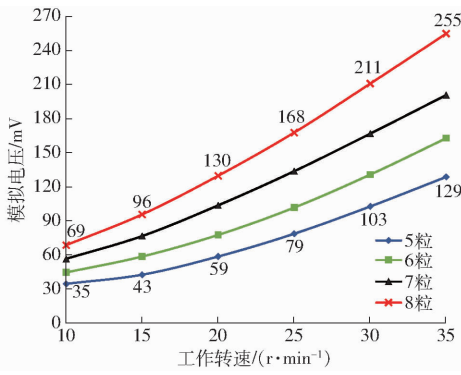


图 11 模拟电压阈值选定

Fig. 11 Selection of analog voltage threshold

距和前进速度的要求,得

$$\bar{\Delta t} = \frac{\bar{d}}{v} \quad (15)$$

式中 $\bar{d}$ ——理论穴距, m

v ——机具前进速度, m/s

$\bar{\Delta t}$ ——相邻两穴稻种理论下落时间间隔, s

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》可知,当实际株距小于或等于 0.5 倍理论株距时为重播;实际株距大于 1.5 倍理论株距时为漏播,介于二者之间为合格,即

$$\text{重播} \quad d \leq 0.5 \bar{d}_0 \quad (16)$$

$$\text{漏播} \quad d > 1.5 \bar{d}_0 \quad (17)$$

$$\text{合格} \quad 0.5 \bar{d}_0 < d \leq 1.5 \bar{d}_0 \quad (18)$$

式中 $\bar{d}_0$ ——理论株距, m

d ——实际株距, m

将式(15)~(18)合并整理可得

$$\text{重播} \quad d \leq 0.5 \bar{\Delta t} v \quad (19)$$

$$\text{漏播} \quad d > 1.5 \bar{\Delta t} v \quad (20)$$

$$\text{合格} \quad 0.5 \bar{\Delta t} v < d \leq 1.5 \bar{\Delta t} v \quad (21)$$

为简化分析,将每穴稻种视为一个整体,忽略稻种冲击传感器后的下落时间,则机具在不同工况下作业的穴距为

$$d_i = \Delta t_i v \quad (22)$$

式中 d_i ——实际穴距, m

Δt_i ——不同工况下相邻两穴稻种实际下落时间间隔, s

将式(22)代入式(19)~(21)中整理得

$$\text{重播} \quad \Delta t_i \leq 0.5 \bar{\Delta t} \quad (23)$$

$$\text{漏播} \quad \Delta t_i > 1.5 \bar{\Delta t} \quad (24)$$

$$\text{合格} \quad 0.5 \bar{\Delta t} < \Delta t_i \leq 1.5 \bar{\Delta t} \quad (25)$$

故监测系统在进行穴距重播和穴距漏播判定时,可将实际穴距 d_i 转化为相邻两穴稻种实际下落时间间隔 Δt_i 进行判定,由此可确定针对机具发生穴距漏播和穴距重播时的监测算法为: ATmega328P MCU 控制器系统读取每穴稻种冲击传感器产生的

模拟电压信号,通过 Arduino 语言内置的 millis 函数计算相邻两个模拟电压信号产生的时间间隔 Δt_i ,并与各工况下的预置理论阈值 $\bar{\Delta t}$ 进行比较判断。若 $\Delta t_i \leq 0.5 \bar{\Delta t}$,则判定为穴距重播;若 $\Delta t_i > 1.5 \bar{\Delta t}$,则判定为穴距漏播;若 $0.5 \bar{\Delta t} < \Delta t_i \leq 1.5 \bar{\Delta t}$,则判定为穴距合格。

3 监测系统设计

3.1 监测系统硬件设计

监测系统硬件以嵌入在 Arduino Uno 开发板上的 ATmega328P MCU 控制器为微处理器,外围电路主要由稳压电源电路、信号采集电路、声光报警电路和蓝牙无线串口传输电路构成。系统总电路图如图 12 所示。

3.1.1 稳压电源电路设计

采用 12 V 直流锂电池作为系统供电电源,由于各模块所需的工作电压不同,故降压芯片选用降压型开关电压调节器 LM2596S,先将 12 V 输入电压降至 5 V,再通过低压差电压调节芯片 LM1117-5 获得 3.3 V 的输出电压,以满足各模块对供电电压的要求,电路图如图 13 所示。

3.1.2 信号采集电路设计

如图 14 所示,水稻种群冲击 PVDF 压电薄膜传感器所产生的模拟电压信号通过电解电容与电阻组成的稳压旁路,形成稳定的脉冲信号;放大整形电路采用双运算放大器 LM358,脉冲信号经放大整形后经 D/A 转换器转入 ATmega328P MCU 控制器系统。放大整形电路设有变阻器,工作时可通过调节电阻值来抑制外部干扰信号,进而提高监测精度。

3.1.3 声光报警电路设计

机具在播种作业期间,若系统检测到故障时, ATmega328P MCU 控制器系统通过输出带有间隔的高低电平驱动红、蓝 LED 发光模块闪烁;同时,通过脉冲宽度调制方式持续输出占空比不同的 PWM 波,控制蜂鸣器工作,实现声光报警功能,如图 15 所示。

3.1.4 蓝牙无线串口传输电路设计

采用 HC-05 嵌入式蓝牙串口通讯模块(内嵌 CSR BC417143 蓝牙芯片,波特率范围为 4 800 ~ 1 382 400 b/s,有效传输距离 10 m,传输速率 3 Mb/s)实现信号的无线传输功能,内置 LDO 集成低压差线性稳压器,外接旁路电解电容和使能电路如图 16 所示,可起到降压稳压、负载短路保护与反接保护的作用。本系统通过 AT 指令将模块设置在自动连接工作模式下的从机模式来实现数据的无线传输。

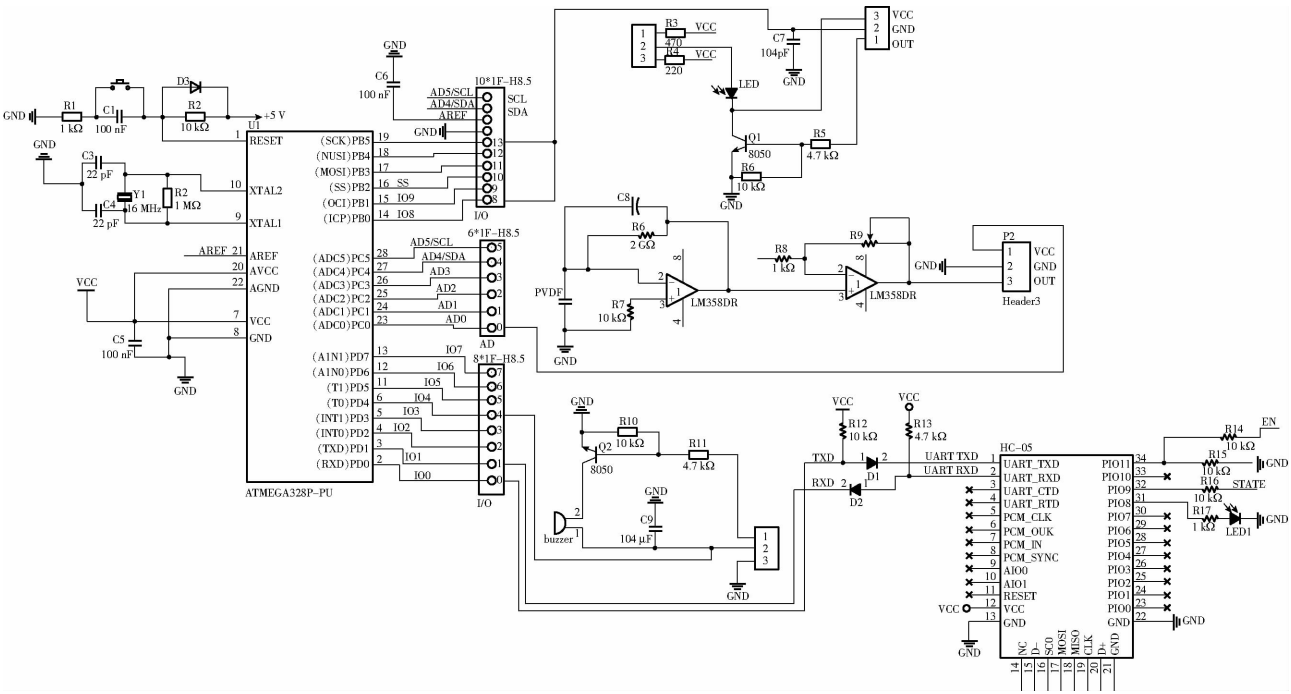


图 12 监测系统总电路图

Fig. 12 Schematic of monitoring system total circuit

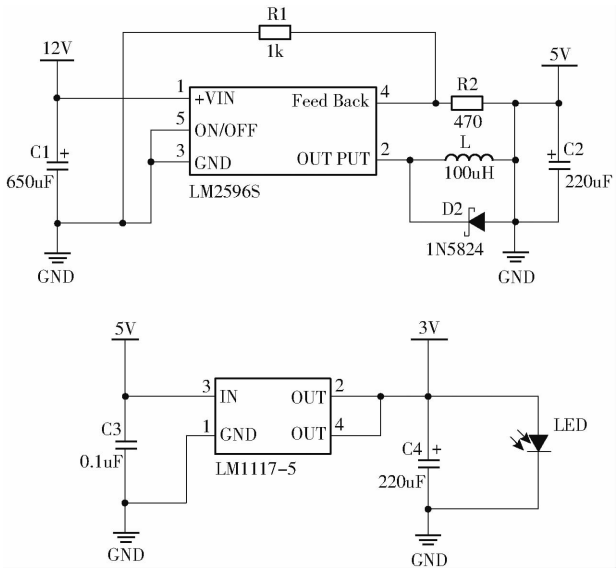


图 13 稳压电源电路图

Fig. 13 Schematic of stabilized voltage supply circuit

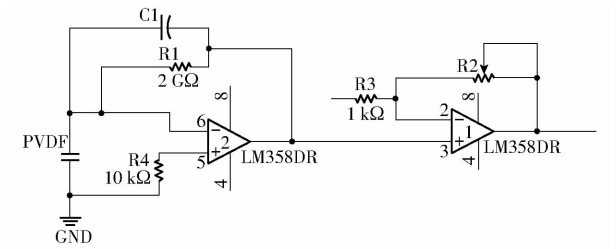


图 14 信号采集电路图

Fig. 14 Schematic of signal acquisition circuit

3.2 监测系统软件设计

系统软件部分主要包括 Arduino Uno 开发板程序编写软件与蓝牙无线串口传输 APP,通过编写监

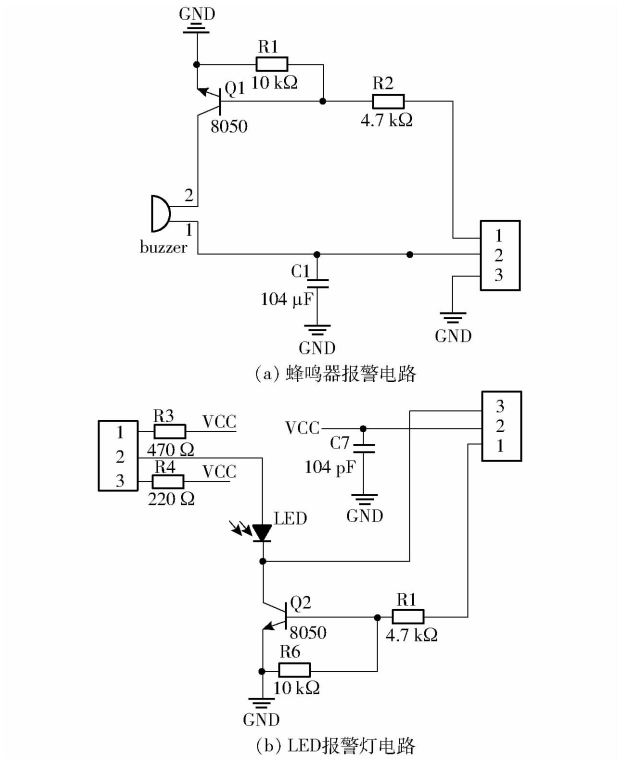


图 15 声光报警电路图

Fig. 15 Schematic of acousto-optic alarm circuit

测控制程序及安卓应用程序代码,完成信号采集与数据传输功能,实现直播作业过程的实时无线监测。

3.2.1 Arduino Uno 开发板软件程序设计

在基于 Processing/Wiring 开发环境下的 Arduino IDE 软件上编写 Arduino 程序代码控制系统多路模块电路,编译并上传至微控制器,实现系统工

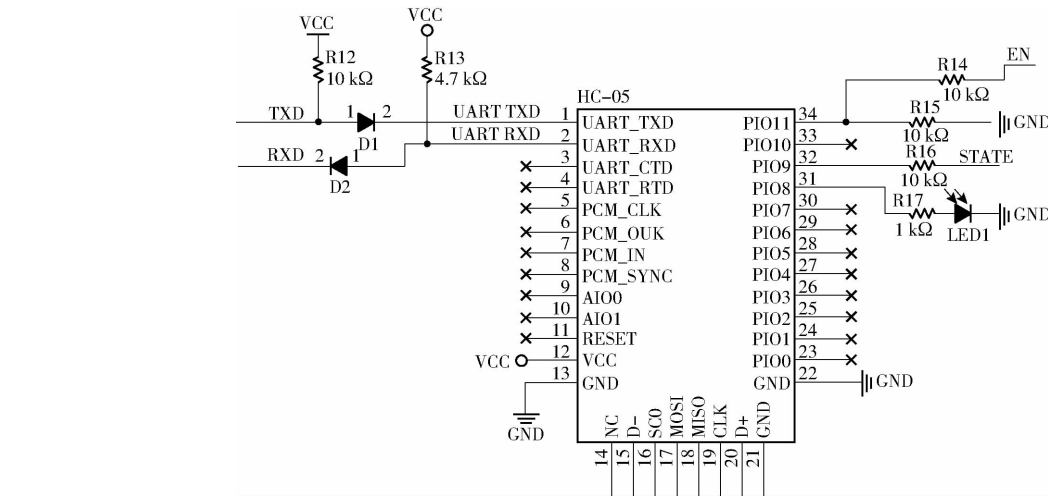


图 16 HC-05 嵌入式蓝牙串口通讯模块电路图

Fig. 16 Schematic of HC-05 embedded serial communication module circuit

作模块、相关寄存器和 I/O 口初始化设置以及传感器数据采集与预处理,具有良好的可移植性和灵活的扩展性。系统程序流程如图 17 所示。

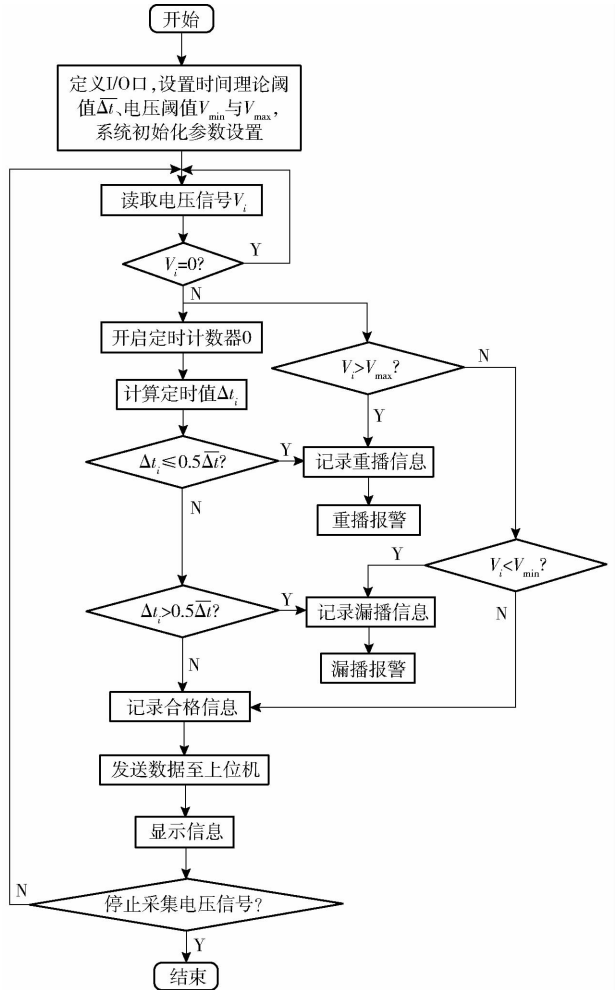


图 17 监测系统程序流程图

Fig. 17 Flow chart of monitoring system program

3.2.2 蓝牙无线串口传输 APP 设计

为实现监测系统的无线传输,代替传统计算机端通信软件作为监测系统的显示终端,需建立 HC-

05 嵌入式蓝牙串口通讯模块与安卓手机间完整的通信路径。易安卓开发平台 (E4A) 是基于谷歌 Simple 语言的可视化开发环境下的编程工具,通过 Basic 语法编写安卓应用程序,代码采用纯中文编写^[32]。利用易安卓开发平台自主设计开发适用于安卓系统的手机蓝牙无线串口传输 APP,可实现实时接收并显示由 HC-05 嵌入式蓝牙串口通讯模块所发射的 ATmega328P MCU 控制器系统串口数据信息,并进行相关操作。APP 界面及程序代码如图 18 所示。

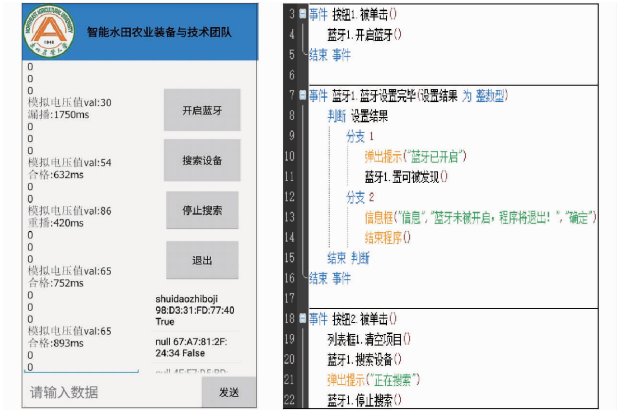


图 18 蓝牙无线串口传输 APP 界面与程序代码

Fig. 18 Bluetooth wireless serial port transmission APP interface and program code

4 试验结果与分析

4.1 灵敏度台架测试

为探究不同排种器工作转速下监测系统灵敏度的变化规律,开展监测系统灵敏度台架测试,测试地点为东北农业大学排种性能实验室;测试品种为龙庆稻 3 号,稻种需催芽至破胸露白,后经晾晒至含水率为 26.34%~29.62%;测试装置为弹射式耳勺型水稻穴直播排种器、监测系统、JPS-12 型排种器性

能检测试验台和计算机等,如图 19 所示。

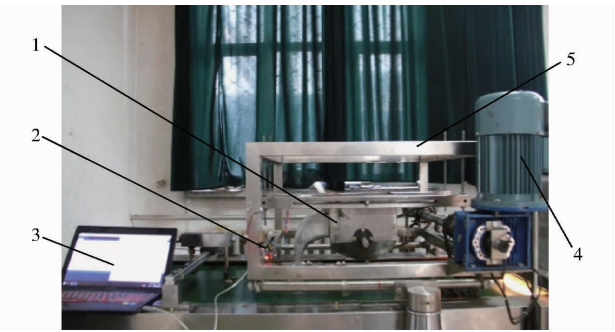


图 19 监测系统灵敏度台架测试装置

Fig. 19 Sensitivity bench test of monitoring system

1. 弹射式耳勺型水稻穴直播排种器 2. 监测系统 3. 计算机
4. 驱动电动机 5. 安装台架

由前期预试验可知,当排种器工作转速高于 35 r/min 时,排种合格率逐渐降低,无法满足监测系统灵敏度测试的要求,故取排种器工作转速范围为 10 ~ 35 r/min (对应机具前进速度为 0.54 ~ 1.89 km/h),通过 JPS-12 型排种器性能检测试验台的计算机控制面板设置不同的排种器工作转速,各工况下选取 120 穴作为被测对象,记录监测系统的响应次数,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,所选取的 120 穴稻种的平均穴粒

表 1 监测系统灵敏度测试结果

Tab. 1 Sensitivity test results of monitoring system

工作转速/ (r·min ⁻¹)	检测结果				灵敏度/ %
	平均穴粒 数/粒	标准差/ 粒	实际 穴数/穴	响应 穴数/穴	
10	8	0.2	120	119	99.17
15	7	0.3	120	117	97.50
20	7	0.3	120	115	95.83
25	7	0.4	120	112	93.33
30	6	0.5	120	111	92.50
35	5	0.6	120	109	90.83

数在 5 ~ 8 粒动态区间内,符合水稻穴直播农艺要求,在此条件下,各工况下系统灵敏度均不小于 90.83%,表明穴粒数对系统灵敏度影响较小。通过台架预试验可知,在适宜寒地水稻直播作业的合理含水率范围内(25% ~ 30%),稻种含水率对系统灵敏度无任何影响。综合分析可知,该系统可对冲击到 PVDF 压电薄膜传感器的稻种进行信号采集,可靠性较高。

4.2 田间试验

为探究所设计的水稻穴直播监测系统的工作性能,于 2018 年 5 月 7—10 日在黑龙江省哈尔滨市阿城区试验田进行田间试验,如图 20 所示。



图 20 整机配置与田间试验

Fig. 20 Whole machine configuration and field experiment

水稻穴直播机播种作业时,其动力来源于乘坐式高速水稻插秧机底盘,底盘具有多个变速挡位来控制机具的前进速度,且动力输出轴转速与前进速度相互关联。由于预置阈值 Δt 、 V_{min} 、 V_{max} 与排种器工作转速有关,而工作转速随前进速度变化而变化。故在进行田间试验前,首先对乘坐式高速水稻插秧机底盘各挡位下的前进速度与动力输出轴转速进行标定,以设置不同工况下算法程序中的预置阈值, I ~ V 挡对应的前进速度分别为 0.10、0.50、0.90、1.28、1.67 km/h;对应排种器(与动力输出轴传动比为 1:1)工作转速为 2、10、18、26、34 r/min。

由于 I 挡速度较低,不符合实际田间作业要求,故田间试验时,设定前进速度分别为 0.50、0.90、1.28、1.67 km/h。首先,对不同工况下监测系统灵敏度进行试验,试验方法与台架测试方法相同,在不同工况下分别选取 120 穴进行统计,得到当工作转

速分别为 10、18、26、34 r/min 时,系统灵敏度分别为 99.17%、95.83%、91.67% 和 90%,与台架测试结果基本一致;在保证机具田间实际作业时监测系统灵敏度的前提下,进行监测系统工作性能试验。在各工况下选取 300 穴作为被测目标,统计经蓝牙串口模块传输至手机 APP 上的模拟电压、相邻两穴稻种下落时间间隔与故障判断记录等数据信息,得到并记录监测系统判断的重播穴数和漏播穴数,并与人工统计的实际重播穴数和漏播穴数进行对比,基于以上数据,计算得到不同工况下监测系统工作性能指标结果,如表 2 所示。其中部分指标的计算方式如下:漏播监测精度为漏播报警穴数与漏播穴数的百分比;重播监测精度为重播报警穴数与重播穴数的百分比;有效监测精度为合格穴数、漏播报警穴数与重播报警穴数之和与应播穴数的百分比;绝对误差为应播穴数、合格穴数的差值与漏播报警穴数、

表 2 监测系统田间性能试验结果

Tab.2 Field performance experiment results of monitoring system

工作 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	前进 速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	应播 穴数/穴	合格 穴数/穴	漏播 穴数/穴	重播 穴数/穴	穴径/ mm	漏播 报警 穴数/穴	重播 报警 穴数/穴	漏播 监测 精度/%	重播 监测 精度/%	有效 监测 精度/%	绝对 误差/ 穴	相对 误差/ %
10	0.50	300	273	19	8	40	18	7	94.74	87.50	99.33	2	0.67
		300	275	18	7	42	17	6	94.44	85.71	99.33	2	0.67
		300	273	18	9	41	16	8	88.89	88.89	99.00	3	1.01
18	0.90	300	270	16	14	42	14	12	87.50	85.71	98.67	4	1.35
		300	267	18	15	42	16	13	88.89	86.67	98.67	4	1.35
		300	269	17	14	43	15	12	88.24	85.71	98.67	4	1.35
26	1.28	300	266	15	19	43	13	16	86.67	84.21	98.33	5	1.69
		300	266	16	18	44	13	15	81.25	83.33	98.00	6	2.04
		300	267	16	17	43	13	14	81.25	82.35	98.00	6	2.04
34	1.67	300	263	15	22	45	12	18	80.00	81.82	97.67	7	2.39
		300	264	15	21	44	12	17	80.00	80.95	97.67	7	2.39
		300	261	16	23	46	13	19	81.25	82.61	97.67	7	2.39

重播报警穴数之和的差值;相对误差为绝对误差与合格穴数、漏播报警穴数与重播报警穴数的百分比。

为直观地分析各工况下监测系统工作性能的变化规律,运用 Excel 软件对不同工况下监测系统的漏播监测精度、重播监测精度和有效监测精度的平均值进行拟合,曲线如图 21 所示。

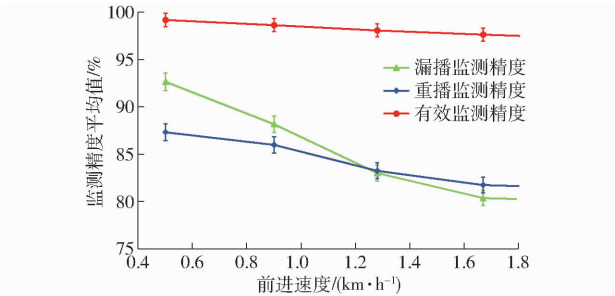


图 21 监测精度平均值与前进速度关系曲线

Fig. 21 Relationship curves between mean monitoring rate and forward speed

由表 2 和图 21 可知,监测系统的重播监测精度、漏播监测精度及有效监测精度平均值的最小值分别为 81.79%、80.42% 和 97.67%,各监测指标随机具的前进速度增大而降低,分析其原因为当排种器工作转速过高时,稻种被抛离出取种耳匀舀种部的瞬时速度与水平方向夹角 θ 增大,稻种水平位移减小,竖直位移增大,部分稻种无法冲

击到 PVDF 压电薄膜传感器,导致信号采集率降低,且系统灵敏度随前进速度增大而略有降低,但系统的有效监测精度仍大于 95%,满足水稻穴直播的监测要求。

5 结论

- (1)基于压电冲击法设计了水稻穴直播监测系统,阐述了监测系统结构及工作原理,对种群投种轨迹进行了研究,确定了导种管结构参数及 PVDF 压电薄膜传感器的安装部位。根据水稻多粒穴播实际作业情况下可能出现的 4 种播种故障,确定了监测系统针对各播种状态的监测算法。
- (2)设计了监测系统整体电路及外围电路,编写 Arduino 语言控制程序,并开发了蓝牙无线串口传输 APP,实现了系统监测过程中数据信号的采集、处理和无线传输。
- (3)进行了监测系统台架灵敏度测试与田间性能试验。台架测试结果表明,在不同工况下监测系统灵敏度均达到 90.83% 及以上,系统可实现对信号的有效采集。由田间试验得到实际作业过程中系统的重播监测精度、漏播监测精度及有效监测精度平均值的最小值分别为 81.79%、80.42% 和 97.67%,满足水稻穴直播的监测要求。

参 考 文 献

[1] 臧英,罗锡文,周志艳. 南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J]. 农业机械学报,2008,39(1):60-63.
ZANG Ying,LUO Xiwen,ZHOU Zhiyan. Development strategy on rice planting and harvesting mechanization in south China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(1): 60-63. (in Chinese)

[2] 程建平,罗锡文,樊启洲,等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2010,29(1):1-5.
CHENG Jianping,LUO Xiwen,FAN Qizhou,et al. Influence of different planting types on growth and development characteristics and yield of rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2010,29(1):1-5. (in Chinese)

- [3] 张文忠,苏悦,殷延勃,等. 北方水稻穴直播栽培的农艺问题与对策[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(6):699-703.
ZHANG Wenzhong, SU Yue, YIN Yanbo, et al. Agronomic problems and counter measures of north rice in direct seeding cultivation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(6):699-703. (in Chinese)
- [4] 胡建平,陆黎. 磁吸式穴盘播种器图像监控系统设计[J]. 农业机械学报,2006,37(11):88-91.
HU Jianping, LU Li. Design of the image monitored control system for the magnetic type precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11):88-91. (in Chinese)
- [5] 王铁军. 水稻直播机漏播监测装置试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [6] 梁琨,罗汉亚,沈明霞,等. 水稻播种质量检测技术的研究进展及展望[J]. 浙江农业学报,2010,22(2):253-257.
LIANG Kun, LUO Hanya, SHEN Mingxia, et al. Review and prospect for the detection technology of paddy seeding quality [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(2) 253-257. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(9):29-36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9):29-36. (in Chinese)
- [10] 史智兴,高焕文. 排种监测传感器的试验研究[J]. 农业机械学报,2002,33(2):41-43.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. RLD optoelectronic sensor for seeding monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2):41-43. (in Chinese)
- [11] 刘洪强. 精密排种器性能检测装置的研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [12] 郑送军. 精密播种机排种器自动监测系统研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [13] 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)
- [14] 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):1-6.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.001. (in Chinese)
- [15] LAN Y, KOCHER M F, SMITH J A. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(2):119-127.
- [16] SHIRINOV A V, SCHOMBURG W K. Pressure sensor from a PVDF film[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(1):48-55.
- [17] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(4):1-8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):1-8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001. (in Chinese)
- [18] 胡建平,常航,杨丽红,等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):78-84.
HU Jianping, CHANG Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):78-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.009. (in Chinese)
- [19] SATU K, JUKKA L, HANNU K, et al. Development of a piezoelectric polymer film sensor for planter normal and shear stress measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 154(1):57-64.
- [20] 蔡睿妍. Arduino 的原理及应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16):155-157.
CAI Ruiyan. Principle and application of Arduino[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(16):155-157. (in Chinese)
- [21] 崔红光,王铁军,张本华,等. 一种基于 ZigBee 技术的水稻穴直播机播种监测系统设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(1):101-107.
CUI Hongguang, WANG Tiejun, ZHANG Benhua, et al. Design and experiment of a monitoring system for rice direct seeding based on ZigBee technology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(1):101-107. (in Chinese)
- [22] 可欣荣,罗锡文. 一种有盲区的水稻精量穴直播机漏播检测装置设计[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会,重庆,2011.

- Chinese)
- [17] AN X F, MENG Z J, WU G W. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2):262-266.
- [18] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于CAN总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 35-42.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 35-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.006. (in Chinese)
- [19] 白晓平,王卓,胡静涛,等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14-21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.002. (in Chinese)
- [20] 蒋建东,张钧,李聪聪,等. 履带式移动机器人自主跟随算法研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(4): 355-360.
JIANG Jiandong, ZHANG Jun, LI Congcong, et al. Study on autonomous following algorithm of crawler-type mobile robot[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017, 45(4): 355-360. (in Chinese)
- [21] 张钧. 履带式农业移动机器人自主跟随控制系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
ZHANG Jun. Research on autonomous follow-up control system of crawler-type agricultural mobile robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第84页)
- [23] 田立权,唐汉,王金武,等. 弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 65-71.
TIAN Liquan, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Design and experiment of rebound dipper hill-drop precision direct seed-metering device for rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 65-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.008. (in Chinese)
- [24] WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 43-54.
- [25] 田立权. 弹射式耳勺型水稻芽种播种装置机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [26] 具典淑,周智,欧进萍. PVDF压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料, 2004, 35(4): 450-453.
JU Dianshu, ZHOU Zhi, OU Jinping. Study on strain-sensing of PVDF films[J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(4): 450-453. (in Chinese)
- [27] 张霖,赵祚喜,可欣荣,等. 压电式种子计数系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 41-45.
ZHANG Lin, ZHAO Zuoxi, KE Xinrong, et al. Seed-counting system design using piezoelectric sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 41-45. (in Chinese)
- [28] 张安跃,唐志平,郑航. PVDF压力传感器的冲击压电特性研究[J]. 实验力学, 2009, 24(3): 244-250.
ZHANG Anyue, TANG Zhiping, ZHENG Hang. A study of impact piezoelectric property of PVDF stress gauges[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(3): 244-250. (in Chinese)
- [29] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 46-52.
TIAN Liquan, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 47(5): 46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007. (in Chinese)
- [30] 徐宏伟,周润景,陈萌. 常用传感器技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [31] WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, TIAN Liquan, et al. Virtual simulation analysis and verification of seed-filling mechanism for dipper hill-drop precision direct rice seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 77-85.
- [32] 朱鹏. ARDUINIO开发板与ANDROID手机蓝牙通信的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(21): 65-66.
ZHU Peng. Design and implementation of Bluetooth communication between ARDUINIO development board and ANDROID mobile phone[J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(21): 65-66. (in Chinese)