

引用格式:

孙国峻, 张金然, 徐勇, 余洪峰, 何瑞银. 基于 PVDF 双压电薄膜的油菜播种监测系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 601–607.

SUN G J, ZHANG J R, XU Y, YU H F, HE R Y. Design and experiment of rapeseed sowing monitoring system based on PVDF bi-piezoelectric film[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(5): 601–607.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于 PVDF 双压电薄膜的油菜播种监测系统的设计与试验

孙国峻<sup>1,2</sup>, 张金然<sup>1</sup>, 徐勇<sup>1</sup>, 余洪峰<sup>1</sup>, 何瑞银<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2.添唯检验检测(江苏)有限公司, 江苏 盐城 224007)

**摘要:** 针对苏南地区油菜播种一体机作业过程中种子监测困难的问题, 设计了一种基于 PVDF 双压电薄膜的油菜单粒精密播种机播种性能监测系统。系统通过播种机安装在测速轮上的编码器采集机具作业速度, 结合设定的目标播量, 得到理论排种间距, 采用聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜监测装置, 采集油菜种子落粒数。为了滤除机器振动信号干扰, 设置参照压电薄膜, 通过逻辑运算模块降低振动干扰, 采用施密特电路迟滞原理消除比较器抖动干扰。系统采用 STM32F103VBT6 单片机作为中央处理器, 结合设定的理论株距、相邻脉冲电压信号的时间间隔与播种机前进速度, 计算得出播种量、排种速度、漏播率与重播率等性能指标。试验台试验表明, 在 26.5~42.2 r/min 排种轴转速下, 系统对排种量的检测精度不低于 96.4%, 漏播检测精度高于 95.8%, 重播检测精度高于 98.4%; 振动频率 8~16 Hz 条件下, 系统播量检测精度高于 95.2%。

**关键词:** 油菜播种机; 播种性能监测系统; 漏播率; 重播率; PVDF 双压电薄膜; 振动信号消除; 比较器抖动消除

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)05-0601-07

### Design and experiment of rapeseed sowing monitoring system based on PVDF bi-piezoelectric film

SUN Guojun<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinran<sup>1</sup>, XU Yong<sup>1</sup>, YU Hongfeng<sup>1</sup>, HE Ruiyin<sup>1\*</sup>

(1.College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210031, China; 2.Tianwei Inspection and Testing(Jiangsu) Co. Ltd, Yancheng, Jiangsu 224007, China)

**Abstract:** In order to address the difficulty of monitoring small seeds during the operation of an integrated rape sowing machine in southern Jiangsu, a monitoring system for the sowing performance of a single seed precision seeder for rapeseed is designed based on PVDF bi-piezoelectric film. The system collects the operating speed of the machine through the encoder installed on the tachometer wheel of the seeder, and obtains the theoretical seeding spacing in combination with the set target seeding rate. The PVDF bi-piezoelectric film monitoring device is used to collect the number of rapeseeds. In order to filter the interference of machine vibration signal, a reference piezoelectric film is set up to eliminate vibration interference through logic operations, and the Schmitt circuit hysteresis principle is used to eliminate comparator jitter interference. The system uses the STM32F103VBT6 microcontroller as the central processor to calculate the performance indicators such as sowing volume, seeding speed, omission rate and reseeding rate by combining the set theoretical plant distance, the time interval between adjacent pulse voltage signals and the forward speed of the seeder. The test bench shows that under the conditions of 26.5-42.2 r/min seeding shaft speed, the system detects the seeding volume with an accuracy of 96.4%, the

收稿日期: 2021-04-28

修回日期: 2022-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300908); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(19)2012]; 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2019-14)

作者简介: 孙国峻(1996—), 男, 江苏滨海人, 硕士研究生, 主要从事现代农业智能装备研究, [guojunsun0318@163.com](mailto:guojunsun0318@163.com); \*通信作者, 何瑞银, 博士, 教授, 主要从事农业智能装备研究, [ryhe\\_njau@163.com](mailto:ryhe_njau@163.com)

missed sowing with an accuracy of 95.8% and the resowing with an accuracy of 98.4%. Under the condition that the vibration frequency is 8-16 Hz, the system can detect the sowing volume with an accuracy higher than 95.2%.

**Keywords:** rapeseed planter; seeding performance monitoring system; leakage sowing rate; replay rate; PVDF bi-piezoelectric film; vibration signal cancellation; comparator jitter cancellation

油菜免耕播种直播机因作业速度快、工作效率高被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但当出现缺种、单行或多行排种装置故障时,会导致重播、漏播,降低油菜播种质量<sup>[3-5]</sup>;因此,对油菜播种机加装监测装置具有现实意义。

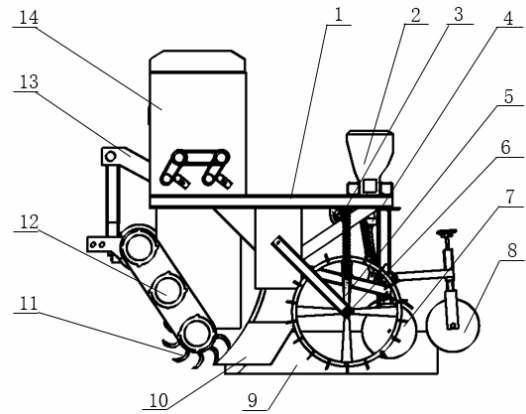
AL-MALLAHI<sup>[3]</sup>研发了一种排种流量光纤传感系统,结合田间环境因素对排种流量拟合模型修正后,估算以团块形式流动的谷物种子的质量,检测准确率约为95%。HOBERGE等<sup>[4]</sup>针对谷物气送式播种机,研发了一种压电阵列传感系统,提高了种子流高频撞击条件下的检测准确度。美国Precision Planting公司研制的WaveVision颗粒传感器,采用微波监测原理,克服了光学传感器会在连续2粒或多粒种子穿越传感器时被误测为1粒的问题,适用于玉米、大豆等大籽粒种子。陈建国等<sup>[5]</sup>针对小麦种子设计了电容式排种流量传感器,建立落种数与电容积分值的回归模型,检测精度都高于97%。黄东岩等<sup>[6]</sup>研发了聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜传感器,将种子与薄膜撞击信号转化为脉冲信号,实现了玉米精播排种检测。这些播种监测系统大多适用于玉米、花生、大豆<sup>[7]</sup>等较大粒径种子的监测。油菜种子质量轻、播种频率较高、粒径较小(平均粒径1.72~2.21 mm),对光电传感器的精度要求更高,对田间尘土污染敏感;而电容传感器易受到田间振动、温度变化、寄生电容等因素影响,还未用于实际播种作业。丁幼春等<sup>[8]</sup>针对气力式油菜播种机设计了一款监测装置,田间检测精度高于96%,但气力式播种机结构复杂,故障率高,易受到环境干扰,需要较高的成本,现阶段还难以推广。

笔者针对苏南地区油菜播种一体机工作过程中振动干扰大、小籽粒种子难检测的问题,设计了一种基于PVDF压电薄膜的油菜播种质量监测系统,设定压电传感器1与压电传感器2,采集到的信号经单片机逻辑运算,降低了外部振动环境干扰,提高了监测精度。现将结果报告如下。

## 1 油菜播种机一体机的结构与监测装置结构及工作原理

基于江苏欣田机械制造有限公司生产的油菜

旋耕灭茬施肥播种开沟一体机,机具结构与监测装置安装位置如图1所示。

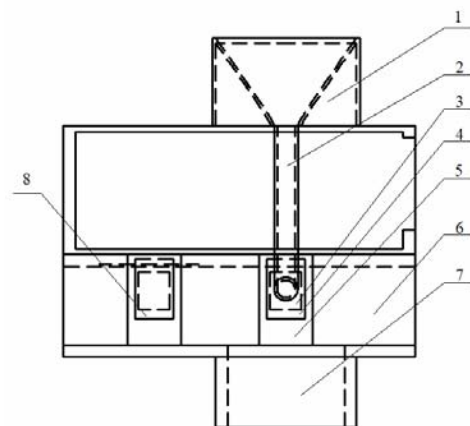


1 机架; 2 种箱; 3 排种电机; 4 播种监测装置; 5 测速轮; 6 编码器; 7 圆盘开沟器; 8 镇压轮; 9 护沟板; 10 开沟犁; 11 旋耕刀; 12 传动箱; 13 三点悬挂装置; 14 肥箱。

图1 油菜旋耕灭茬施肥播种开沟一体机的结构

Fig.1 Structure of the integrated machine for rapeseed rotary tillage, stubble removal, fertilization, sowing and trenching

该油菜播种一体机可以一次性完成旋耕、灭茬、开沟、播种、施肥、镇压等作业。针对该机具工作会受到较大的振动干扰的问题,设计了一种聚偏二氟乙烯(PVDF)双压电薄膜监测装置,结构如图2所示。



1 入种口; 2 导种管; 3 矩形孔; 4 压电传感器1; 5 导种槽; 6 倾斜基板; 7 出种口; 8 压电传感器2。

图2 PVDF双压电薄膜监测装置的结构

Fig.2 Structure of PVDF bi-piezoelectric film monitoring device

播种作业时,油菜种子流经导种管落至倾斜向

下的压电传感器 1, 与其在碰撞腔发生擦碰后沿导种槽从出种口流出。采用沉槽基板-压电薄膜结构, 在倾斜基板上开出矩形孔槽, 可降低种子因碰撞薄膜产生的自激振荡, 提高信号的收敛速度(小于 1 ms), 并同一倾斜基板相同结构处设置压电传感器。

## 2 基于 PVDF 双压电薄膜的油菜播种质量监测系统的设计

### 2.1 结构

油菜播种机排种监测系统主要由压电传感器模块、信号调理电路、增量式编码器测速模块、液晶显示模块、按键模块、声光报警模块与中央处理器等构成, 如图 3 所示。油菜直播机排种作业时, 使用按键模块设置相关播种参数(理论粒距、测速轮直径、滑移率、报警系数范围等), 单片机通过传感器信号调理电路获取种子下落信号, 通过编码器测速模块获取机具前进速度, 根据国家标准<sup>[9]</sup>计算得到相关的油菜播种量信息。监测系统通过液晶显示屏实时显示当前播种状态信息, 并在出现重播、漏播、报警系数不合格等情况下, 控制声光报警模块发出声光报警。

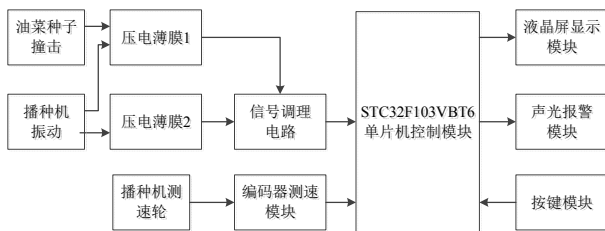


图 3 播种质量监测系统框图

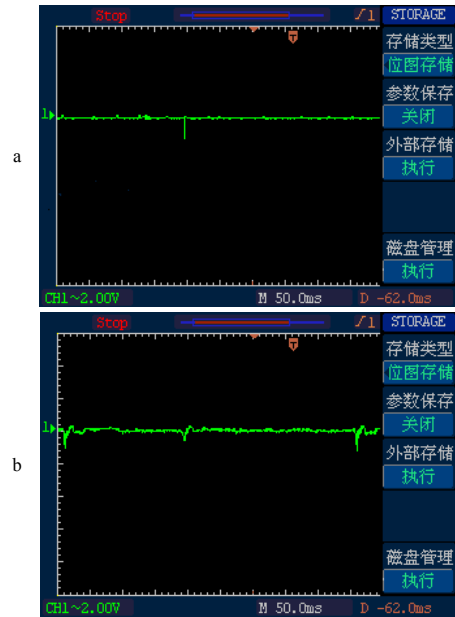
Fig.3 Sowing quality monitoring system block diagram

### 2.2 压电传感器监测方法

聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜是一种新型的压电高分子材料, 近年来在医疗电子、结构振动、机器人等领域有着广泛的应用<sup>[10-11]</sup>。较传统的压电陶瓷, 具有压电系数高(为压电陶瓷的 10~20 倍)、响应速度快、频率范围宽、柔顺性好等优点<sup>[11-14]</sup>。

压电传感器会因油菜种子碰撞到 PVDF 压电薄膜传感器产生形变, 出现极化现象, 产生尖脉冲压电信号。经过油菜种子碰撞试验对信号进行分析, 选用 MEAS 公司的 LDT0-028K 压电薄膜, 其厚度为 0.2 mm, 最小感应应力为 0.01 N。

基于所设计的监测装置, 油菜种子与压电薄膜碰撞产生的电压峰值经运算放大器放大后约为 2 V, 信号衰减时间低于 1 ms; 机具振动下压电薄膜产生的电压峰值经运算放大器放大后可达到 2 V 以上, 产生相似的干扰信号, 造成监测系统误检测。用双通道示波器(LDS21010)观测, 并将波形用外部 U 盘存储方式保存, 当油菜种子碰擦压电薄膜产生的信号如 4-a, 振动对监测系统产生的干扰信号如图 4-b。



a 油菜种子下落信号; b 振动干扰信号。

图 4 油菜种子下落与振动干扰波形

Fig.4 Waveforms of rapeseed dropping and vibration disturbance

### 2.3 播种质量的监测

排种作业时, 通过按键设定株距, 记录 PVDF 传感器输出信号的时间间隔, 结合安装在测速轮上的编码器采集实时机具车速, 根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》<sup>[9]</sup>, 可计算出播种机的排种速度、播种面积、排种量、重播漏播率等性能指标, 实现对油菜精密直播机播种状态的监测。判断依据为式(1)。

$$\begin{cases} v\Delta t \geq 0.5\bar{d} \text{ 时, 重播} \\ 0.5\bar{d} < v\Delta t < 1.5\bar{d} \text{ 时, 正常播种} \\ v\Delta t \geq 1.5\bar{d} \text{ 时, 漏播} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta t$  为相邻 2 粒种子下落时间间隔;  $v$  为播种机行进速度;  $\bar{d}$  为设定的油菜种子理论株距, 由人机交互模块设定。

在油菜播种机上外接测速轮, 选用增量式编码器(型号 E6B2-CWZ6C 400P/R)采集测速轮旋转信息, 通

过编码器产生的脉冲信号获取机具前进速度(v)。

$$v = \frac{N\pi D(1+\delta)}{400T} \tag{2}$$

式中：N为编码器产生的脉冲个数；T为机具速度测量周期；D为外接测速轮直径；δ为测速轮转动滑移率。

定义单位时间t内播种机前进距离除以按键设定的理论株距为理论排种量Q<sub>i</sub>，系统监测到的油菜粒数为Q<sub>p</sub>，传感器1检测得到的脉冲数为Q<sub>m</sub>(包括油菜种子数与达到电压阈值以上的振动次数)、传感器2检测到的达到电压阈值以上的振动次数S，则

$$Q_i = \frac{vt}{d} \tag{3}$$

由于油菜种子下落与机具振动均产生1 ms内的信号，且为相互独立的事件，则油菜籽下落信号与振动信号同时发生概率为W。

$$W = \frac{S(Q_m - S)}{1000 \times 1000} \tag{4}$$

为了提高油菜种子监测系统的检测精度，降低振动信号干扰，在单位时间内用传感器 1 检测到的脉冲数量 Q<sub>m</sub>减去传感器 2 检测到的脉冲数量并加上 W<sub>t</sub>，即可得到播量监测系统检测到的油菜粒数 Q<sub>p</sub>。

定义报警系数P为Q<sub>i</sub>与Q<sub>p</sub>的比值。

在播种作业时，当报警系数P的值不在设定的范围时，判定作业效果为不合格，监测系统控制报警模块报警。

### 2.4 硬件设计

油菜监测系统主控电路由传感器检测模块、地轮测速模块、声光报警模块、液晶显示模块、人机交互模块、电源模块等 6 个模块组成，如图 5 所示。采用 STM32F103VBT6 单片机作为中央处理器，包括内部参数设置，获取采样信息，数据运算以及驱动报警电路等，其中电源由 12 V 蓄电池经过 LM2596S 降压芯片 DC12V-DC5V 降压后提供。

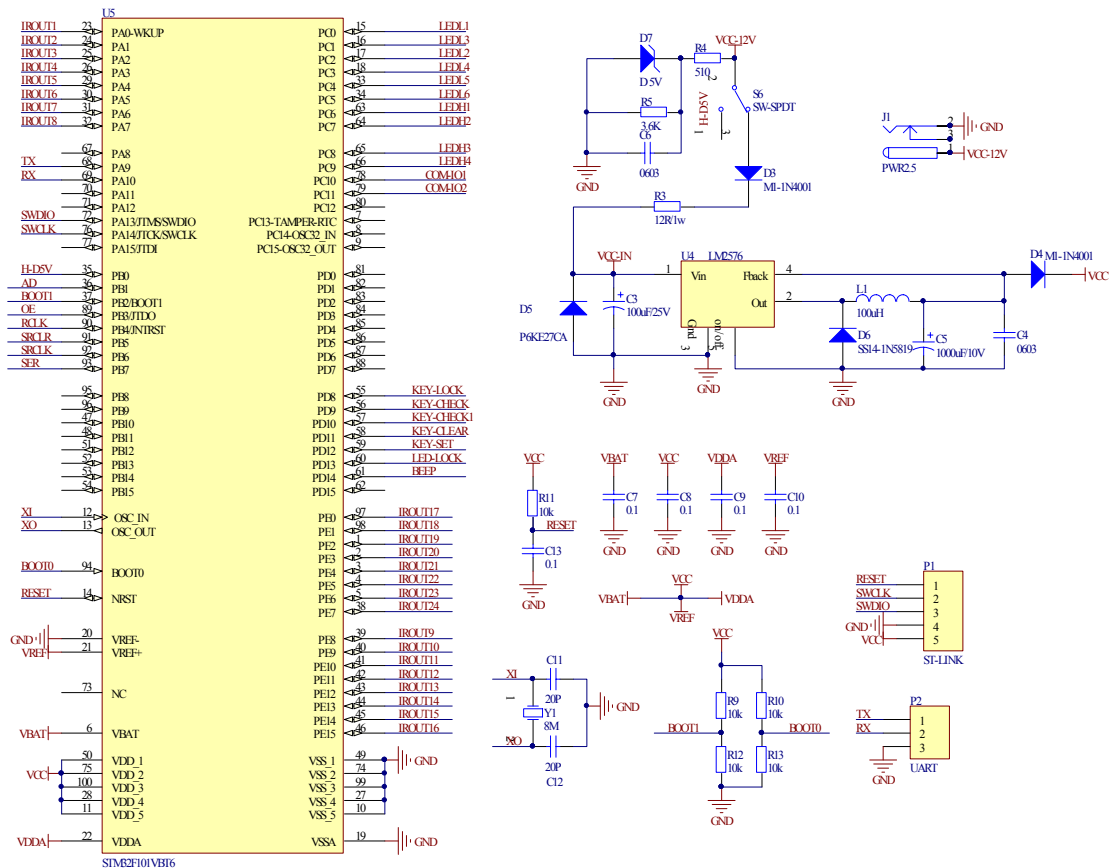


图 5 监测系统的主控电路

Fig.5 Schematic diagram of the main control circuit for the monitoring system

由于 PVDF 传感器受到油菜籽冲击后产生的电荷较小，必须经过电荷放大装置来放大碰撞信号，再通过比较器电路转换为可以计数的方波。由于输

入比较器的电压信号在阈值附近变化会出现比较器抖动现象，因而采用单电源反向施密特电路的迟滞消除比较器抖动。选用了 LF412CN 运算放大器，

并结合 LM393 芯片构成了迟滞比较器，输出单片机可处理 TTL 信号，调理电路如图 6 所示。通过调节电阻 Rt6、Rt7 的电阻值大小来调节信号灵敏度与 TTL 信号高电平电压，最终输出约 1 ms 脉宽的方波

波信号，实现单粒油菜种子与单个方波信号的转换。示波器观测结果如图 7 所示，表明该调理电路可以准确地检测到油菜种子下落和振动信号，并转换为计数的方波。

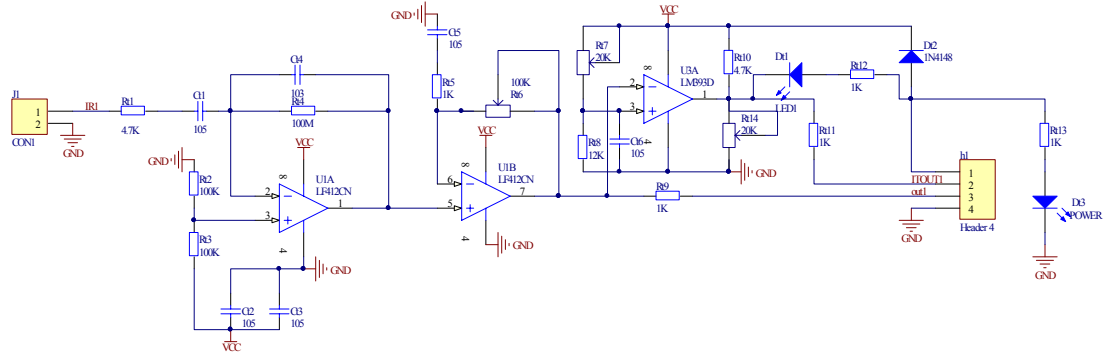


图 6 信号调理电路

Fig.6 Signal conditioning circuit schematic



a 油菜种子下落信号与 TTL 信号; b 振动干扰信号与 TTL 信号。  
图 7 调理电路采集的油菜种子下落与振动干扰信号

Fig.7 Rapeseed falling and vibration interference signals collected by conditioning circuit

为了降低振动信号对监控系统检测精度的干扰，采用双传感器采集法，传感器 1 检测得到的脉冲数为  $Q_m$  (包括种子数与达到电压阈值以上的振动次数)、传感器 2 检测到的达到电压阈值以上的振动次数  $S$ ，依据公式(4)，由单片机程序计算出消除振动干扰后的种子数。

### 2.5 软件设计

监测系统运行流程如图8所示。对系统的工作模块、相关I/O和寄存器进行初始化设置化后，启动

定时器与计数器，并读取按键模块输入信息。

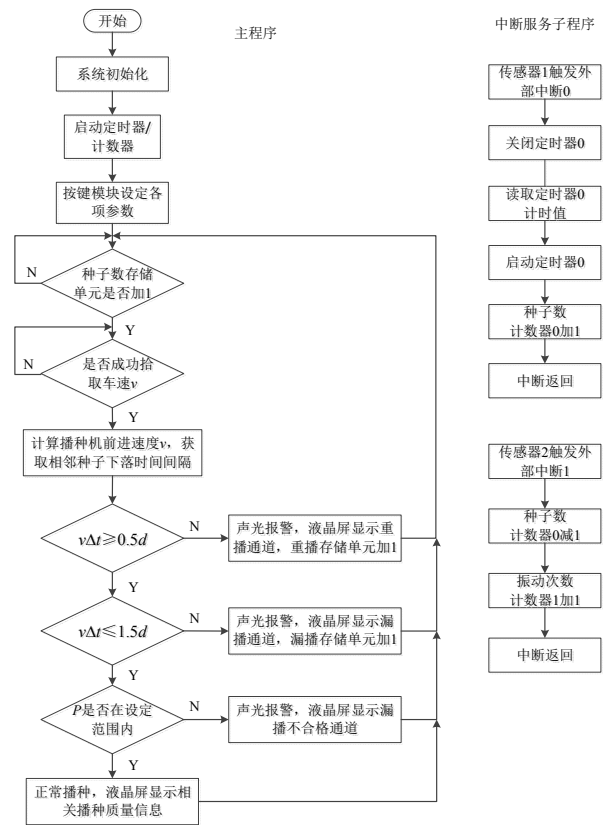


图 8 监测系统运行流程

Fig.8 Flow chart of the monitoring system software program

传感器1检测到信号时，触发外部中断0，关闭定时器0，读取定时值 $\Delta t$ ，计数器0加1，之后再开启定时器0重新计时，定时值 $\Delta t$ 为相邻2粒种子下落时间间隔。传感器2检测到信号时，触发外部中断1，计数器0减1，计数器1加1。将2个传感器信号返回STM32F103ZET6单片机，结合编码器所采集前进速

度,监测系统对相关数据进行处理分析,获取播种机的排种量、排种速度、播种面积、报警系数、重播漏播率、粒距合格率等信息,同时作出相应的声光报警,并通过液晶屏显示有关性能指标及报警信息。

### 3 监测系统性能测试

#### 3.1 播种质量的检测

播种质量监测在试验台架<sup>[15]</sup>上进行。‘中双 11 号’油菜种子,含水率为 7.65%,平均粒径为 1.72~2.21 mm,千粒质量为 4.68 g,自然休止角为 27.2°,纯净度为 98.5%。选用窝眼轮式排种器,其窝眼轮直径为 60 mm,厚度为 20 mm,窝眼直径为 3.5 mm,圆周上均匀分布 12 个窝眼,即排种轴旋转 1 周排种 12 粒,充种角度为 90°,护种区角度为 120°。

在试验台输送带上铺油,以减小种子弹跳与落

点误差。设定油菜精量排种系统播种穴距为 16 cm,根据现有的油菜精量直播机一般工作速度,分别设置种床输送带前进速度 0.85、1.1、1.35 m/s,根据理论粒距以及排种器窝眼数设定排种轴转速分别为 26.5、34.3、42.2 r/min<sup>[16]</sup>,即实际每秒落粒数分别为 5.3、6.86、8.44,设定播种粒数 500 粒时停止播种,在排种试验台上采集不同工况下的实际粒数与粒距<sup>[19]</sup>。每种播量与转速条件下重复 3 次试验,结果取平均值。

压电薄膜采用沉槽-基板式安装,在安装位置与排种管内未出现堵塞现象。由表 1 可知,在排种轴转速为 26.5~42.2 r/min 时,单粒播种量检测精度不低于 96.4%。监测系统对于漏播检测精度高于 95.8%,对于重播检测精度高于 98.4%。

表 1 不同转速下播种质量的监测结果

Table 1 Results of seeding quality tests at different revolutions

| 排种量/<br>粒 | 排种轴转速/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 监测播种<br>量/粒 | 播量监测<br>精度/% | 台架漏播<br>率/% | 监测漏播<br>率/% | 漏播率<br>监测精度/% | 台架重播<br>率/% | 监测重播<br>率/% | 重播率监测<br>精度/% |
|-----------|----------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| 500       | 26.5                             | 490         | 98.0         | 3.0         | 4.8         | 98.2          | 3.4         | 2.6         | 99.2          |
| 500       | 34.3                             | 484         | 96.8         | 5.6         | 8.6         | 97.0          | 4.2         | 2.8         | 98.6          |
| 500       | 42.2                             | 482         | 96.4         | 12.2        | 16.4        | 95.8          | 5.0         | 3.4         | 98.4          |

#### 3.2 振动排种性能的检测

油菜播种一体机旋耕转速为 270 r/min,同一截面装刀数量为 3,所以旋耕产生的理论基准频率为 13.5 Hz<sup>[17]</sup>。经检测,机具正常播种工作时播种机的振动频率主要集中在 8~16 Hz<sup>[18-19]</sup>。设置激振器振动频率为 8、12、16 Hz,使用单 PVDF 压电薄膜与双 PVDF 压电薄膜进行对比试验。鉴于监测系统在

不同播量情况下检测精度变化较小,设定播种数为 500 粒时停止工作。

由表 2 可知,在振动干扰频率 8~16 Hz 条件下,随着振动频率增加,使用双 PVDF 压电薄膜监测精度不低于 95.2%,单 PVDF 压电薄膜检测精度最低为 76.2%。表明采用双传感器的监测系统较好地解决了外部环境振动干扰,能够有效地监测机具排种性能。

表 2 不同转速和不同振动频率下的播量检测

Table 2 Results of sowing volume testing at different revolutions and vibrational frequencies

| 振动频率/Hz | 排种轴转速/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 监测播种量/粒 |       | 精度/%  |       |
|---------|----------------------------------|---------|-------|-------|-------|
|         |                                  | 单压电薄膜   | 双压电薄膜 | 单压电薄膜 | 双压电薄膜 |
| 8       | 26.5                             | 575     | 487   | 85.0  | 97.4  |
| 8       | 34.3                             | 558     | 483   | 88.4  | 96.6  |
| 8       | 42.2                             | 548     | 477   | 90.4  | 95.4  |
| 12      | 26.5                             | 631     | 486   | 73.8  | 97.2  |
| 12      | 34.3                             | 602     | 482   | 79.6  | 96.4  |
| 12      | 42.2                             | 583     | 476   | 83.4  | 95.2  |
| 16      | 26.5                             | 688     | 488   | 62.4  | 97.6  |
| 16      | 34.3                             | 645     | 481   | 71.0  | 96.2  |
| 16      | 42.2                             | 619     | 479   | 76.2  | 95.8  |

监测系统检测结果与实际结果有一定的偏差,产生的原因:一方面,油菜种子下落时与导种管碰撞或与压电薄膜碰撞飞离后与第2粒下落种子发生碰撞,造成油菜种子动量损失较大,甚至未能撞击压电薄膜,导致压电传感器无法产生有效信号;另一方面,油菜种子碰撞信号衰减时间为1 ms,多粒种子在1 ms内与压电薄膜发生碰撞会导致漏检测,但播种机工作时落种频率不超过10 Hz,经计算这种情况发生的概率低于0.1%。可在后续改进试验中增加修正系数,提高检测准确率。

#### 4 结论

针对小粒径油菜种子播种监测困难的问题,设计了基于PVDF双压电薄膜传感器的油菜直播机监测系统,运用迟滞比较器电路消除波形抖动,采用双传感器检测去除机具振动信号干扰,并对其检测精度与抗振动进行了性能试验。测试结果表明,在26.5~42.2 r/min排种轴转速条件下,无振动干扰播种作业时,该系统播量检测精度不低于96.4%,漏播检测精度高于95.8%,重播检测精度高于98.4%;在8~16 Hz振动条件下,系统播量检测精度高于95.2%。

#### 参考文献:

- [1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
- [2] 周广生,左青松,廖庆喜,等. 我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2153-2157.
- [3] AL-MALLAHI A A, KATAOKA T. Estimation of mass flow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99: 116-122.
- [4] HOBERGE S, HILLERINGMANN U, JOCHHEIM C, et al. Piezoelectric sensor array with evaluation electronic for counting grains in seed drills[C]//IEEE. IEEF Africon. Victoria Falls, Zambia: IEEE, 2011: 1-6.
- [5] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 51-58.
- [6] 黄东岩,贾洪雷,祁悦,等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 15-22.
- [7] 聂秀展,于艳,江景涛,等. 花生精量播种漏播检测及补偿系统设计与试验[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2020, 37(2): 140-145.
- [8] 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.
- [9] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S].
- [10] 张兢. 基于 PVDF 的表面计测传感特性分析与应用[J]. 压电与声光, 2008, 30(2): 164-166.
- [11] 刘昭博,彭光正. 基于 PVDF 压电薄膜灵巧手触觉传感器的研究[J]. 传感器世界, 2007, 13(11): 11-14.
- [12] 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 167-171.
- [13] 舒方法,姜寿山,张欣,等. PVDF 压电薄膜在足底压力测量中的应用[J]. 压电与声光, 2008, 30(4): 514-516.
- [14] 杨清志,孙式运. 基于压电薄膜便携式脉搏仪的设计[J]. 东莞理工学院学报, 2017, 24(5): 27-31.
- [15] 郝向泽,何旭鹏,邹翌,等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统的研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 120-124.
- [16] 张金然,李存超,李询,等. 基于 GIS 的油菜播种控制系统设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 518-526.
- [17] 邱白晶. 旋耕机整机随机振动响应分析[J]. 农业机械学报, 1996, 27(S1): 29-33.
- [18] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9-18.
- [19] 张旭,赵满全,刘飞,等. 免耕播种机排种装置振动特性数学模型的建立[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 56-59.

责任编辑: 罗慧敏  
英文编辑: 吴志立