doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.014

# 玉米籽粒直收机夹带损失检测系统设计与试验

刘阳春[1,2]　李明辉[1,2]　王吉中[2]　冯　林[1,2]　汪凤珠[2]　何晓宁[1]

(1.青岛农业大学机电工程学院,青岛 266109;
2.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083)

**摘要**:针对目前玉米籽粒直收机籽粒损失检测系统缺乏检测夹带损失技术的问题,设计了基于嵌入式单片机的玉米籽粒直收机夹带损失检测系统。该检测系统包括损失检测传感器、数据采集器和数据显示终端,可以同时监测收获机的清选损失和夹带损失,实时反馈收获机的收获损失速率以及损失量。通过模态仿真软件对不同材料、不同厚度的监测板进行有限元分析,选择厚 0.5 mm 的不锈钢板作为监测板;运用 Multisim 对滤波器性能进行仿真分析;设计基于 STM32 系列单片机的自适应限时滤波算法,可以有效抑制谷物撞击引起的的余振干扰。在试验台架上,对不同大小的玉米籽粒、杂余以及玉米穗进行标定试验,获取信号特征;经装机试验表明,玉米籽粒夹带损失检测结果最大误差为 9.96%,平均误差约为 6.52%,损失速率变化趋势反馈及时,能够辅助工作人员进行作业决策。

**关键词**:玉米籽粒直收机;夹带损失检测系统;嵌入式单片机;自适应限时滤波算法

**中图分类号**:S225.5⁺1;S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)05-0140-10　　**OSID**:

# Design and Test of Entrainment Loss Detection System for Corn Kernel Direct Harvester

LIU Yangchun[1,2]　LI Minghui[1,2]　WANG Jizhong[2]　FENG Lin[1,2]　WANG Fengzhu[2]　HE Xiaoning[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agriculture University, Qingdao* 266109, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: Aiming at the lack of entrainment loss detection technology in the current domestic corn kernel direct harvester kernel loss detection system, a corn kernel direct harvester entrainment loss detection system based on an embedded single-chip microcomputer was designed. The detection system included a loss detection sensor, a data collector and a data display terminal, which can monitor the cleaning loss and entrainment loss of the harvester at the same time, and feedback the harvesting loss rate and loss amount of the harvester in real time. The finite element analysis of monitoring boards of different materials and thicknesses was carried out through modal simulation software, and a 0.5 mm thick 304 stainless steel plate was selected as the monitoring board; domestic EDA software was used to design signal processing circuits, including voltage followers and Butterworth filters, Multisim was used to simulate and analyze the performance of circuit; an adaptive time-limited filtering algorithm was designed based on the STM32 series single-chip microcomputer, which can effectively suppress the aftershock interference caused by the impact of grains and improve the accuracy of the sensor. On the test bench, under different conditions, the calibration test was carried out on corn kernels, residues and corn ears of different sizes to obtain signal characteristics; the installation test showed that the maximum error of the detection result of corn kernel entrainment loss was 9.96%, and the average error was about 6.52%, and the loss rate change trend feedback was timely, which can assist the staff in making operation decisions.

**Key words**: corn kernel direct harvester; entrainment loss detection system; embedded single-chip microcomputer; adaptive time-limited filtering algorithm

收稿日期:2022-09-03　修回日期:2022-10-29

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2021YFD2000601)和中国机械工业集团有限公司重大科技专项(ZDZX2020-2)

**作者简介**:刘阳春(1980—),女,研究员,主要从事精准农业与农机测控技术研究,E-mail:lyc215@163.com

## 0　引言

我国现有的玉米籽粒直收机的谷物损失较为严重，智能化程度较低，玉米籽粒直收机谷物损失中的夹带损失和清选损失占有较大比重[1]，玉米籽粒直收机在作业过程中，工作人员仅能凭借工作经验来调整作业速度，通过降低作业速度减少谷物损失，但是降低作业速度就会影响作业效率，同时，达不到标准喂入量也会增加谷物损失[2-4]，因此设计一款谷物损失检测系统十分必要。通过检测系统可以实时获取谷物的损失速率，辅助驾驶员更直观地权衡谷物损失与作业速度，减少收获损失，提高作业质量。

国外主流检测方式是采用一块长方形薄金属板作为监测板，在监测板中心处粘贴一片压电晶体，通过损失籽粒下落撞击监测板引起的机械振动，由压电晶体将机械振动转变为电信号，再对电信号进行处理，通过计算得到损失量[5-8]。

近年来，我国的联合收获机也开始逐渐智能化，相关谷物损失检测传感器和监测系统的研究也逐渐增多[9-20]。国内检测原理主要是利用压电效应，也有利用图像识别技术。张恬等[21]将图像识别应用到谷物损失监测中，采用高速摄像机捕捉谷物籽粒等物料，可以有效地区分籽粒和茎秆。但是这种方式无法捕捉被遮挡的籽粒，且成本高，图像处理速度较慢，摄像头容易被遮挡，很难产品化。周利明等[22]设计了压电薄膜阵列式传感器，可以得到单位空间上的籽粒损失分布。王卓等[23]以压电薄膜作为敏感材料，以 STM32F4 为核心芯片，采用支持向量机多分类算法提取玉米籽粒冲击信号，设计了一种玉米收获机籽粒清选损失监测装置，实现了玉米籽粒损失的实时监测，相对误差为 12.98%。刘新怡等[24]针对目前联合收获机谷物清选损失实时测量精度不高的问题，设计了一种基于 STM32F407 的谷物清选损失监测装置，装置能够实时采集联合收获机清选损失信号，同时通过 CAN 总线同步接收联合收获机的相关作业参数，由清选损失计算模型综合上述参数得到实时清选损失率，标定误差小于 4.53%。

综上可知，检测系统的检测原理主要以压电效应为主[25]，本文结合玉米收获脱粒的独有特性，选择 STM32F103 作为数据采集器内核，STM32F407 作为数据显示终端内核，采用 PZT-5 柔性压电陶瓷作为敏感材料，设计一款玉米籽粒直收机夹带损失检测系统，实时监测收获机的玉米籽粒清选损失和玉米芯夹带损失，通过信号处理电路和自适应限时滤波算法相互配合，解决谷物撞击监测板时产生的余振干扰问题，得到收获机实时的籽粒损失速率，用于辅助工作人员决策，以期提高玉米籽粒直收机的作业效率和质量。

## 1　系统硬件设计

### 1.1　系统总体组成

该玉米籽粒直收机夹带损失检测系统包括 2 组损失检测传感器、信号处理电路、数据显示终端、数据采集器、CAN 总线、外部按键、显示屏、SD 存储卡、预警灯和电源模块，检测系统原理图如图 1 所示。

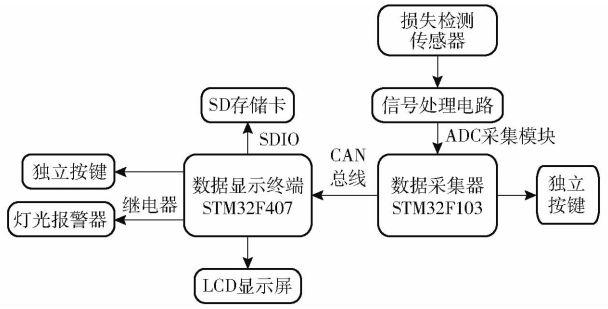


图 1　损失检测系统原理图

Fig. 1　Loss detection system schematic

损失检测系统主要是利用压电材料的正压电效应。将柔性压电陶瓷粘在监测板背部，组成一个传感器，物料撞击监测板产生机械应力，使压电陶瓷内部正负电荷重心相对位移而发生极化进而产生电荷。通过信号处理电路把电荷转变成相对应的电压，经滤波、放大后通过数据采集器的 ADC 采集模块进行采集，若采集值符合特征值，内部计数器就进行叠加，两个传感器分别采集清选损失信号和夹带损失信号，其中不同的玉米穗因为夹带籽粒数不同因此产生的信号值也不同，对应的特征值和累加数也不同。采集到的数据还可以通过外部按键控制，存入 SD 卡进行保存。数据采集器将籽粒损失数和玉米穗特征值通过 CAN 总线发送给数据显示终端，数据显示终端内部进行数据汇总，通过自适应限时滤波算法求出实时籽粒损失速率，并显示在数据显示终端的 LCD 屏上，如果损失速率过大，数据显示终端的灯光报警器将报警提醒。

### 1.2　机械装置设计

检测系统安装示意图如图 2 所示，清选损失传感器和夹带损失传感器分别安装在联合收获机尾部的清选口和排杂口下方。数据显示终端安装在收获机驾驶室内。

安装架零部件通过 16 个硬质橡胶螺栓相互连接，可以有效减缓联合收获机机械振动产生的影响。压电材料采用 PZT-5 柔性压电陶瓷，长度 60 mm，

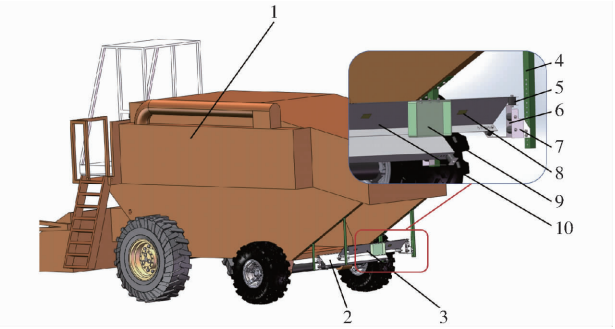


图 2 检测系统安装示意图

Fig. 2 Schematic of detection system installation

1. 联合收获机 2. 夹带损失检测传感器 3. 清选损失检测传感器 4. 支撑架 5. 橡胶减振螺栓 6. 减振支架 7. 高度调节架 8. 应变片 9. 电路封装盒 10. 监测板

宽度 30 mm,厚度 0.8 mm,振动频率 0 ~ 28 kHz。传感器安装架的宽度和高度均可调节,具备一定的通用性。数据采集器、信号处理电路以及变压器装在电路封装盒内,可有效隔绝尘土和雨水。

不同的监测板材料对信号的检测影响很大,因为不同材料的一阶固有频率和振幅变化是不同的,因此选择硬质 PVC、亚克力板、304 不锈钢 3 种材料,然后运用 SolidWorks 中的 simulation 进行一阶固有频率和振幅的有限元仿真分析。通过分析发现一阶固有频率越大且变形比例越小,检测速度就越快[26]。仿真结果如图 3 所示,为了保证传感器灵敏度,根据仿真结果,本文传感器监测板材料选择 304 不锈钢。

监测板厚度会影响材料的振动频率以及振幅,因此对不同厚度的不锈钢板也进行了对比仿真分析,结合压电陶瓷性能以及实际波形测试,测试结果如图 3 所示,随着材料厚度增加,监测板一阶固有频率会提升,传感器灵敏度会更高,但是谷物信号和干扰信号也会变得更难区分,会导致精度变低,最终根据实际测试情况选择厚度 0.5 mm 的不锈钢板,几何尺寸为 1 320 mm × 200 mm,压电陶瓷通过 uv 光固化胶粘在监测板背部。

### 1.3 电路设计

电源供电采用收获机上自带的 24 V 蓄电池,通过 DC - DC 降压模块将输出电压稳定至 12 V,数据采集器和数据显示终端电路设计有 MP2359 芯片,可以接受 6 ~ 24 V 宽电压输入。从单片机上引出 5 V 引脚,用于信号处理电路的供电。

#### 1.3.1 放大电路

信号放大电路如图 4 所示,该电路采用 LM2904 运放器,将压电陶瓷产生的微弱电荷信号转换成相对应的电压信号并进行放大,放大倍数可以通过可调电阻器进行调节,可以将特征信号调整至 0 ~ 3.3 V,以便进行 ADC 特征值采集。

#### 1.3.2 滤波器电路

滤波器电路采用 Butterworth 低通滤波,该滤波器的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦,没有波纹,而在阻频带逐渐下降为零,不影响检测系统的整体准确性。$n$ 阶巴特沃斯低通滤波器的传递函数 $H(j\omega)$ 满足

$$H(j\omega)H(-j\omega)=\frac{G_0^2}{1+\left[\frac{-(j\omega)^2}{\omega_c^2}\right]^n} \tag{1}$$

于是 $n$ 阶巴特沃斯低通滤波器幅度和频率的关系为

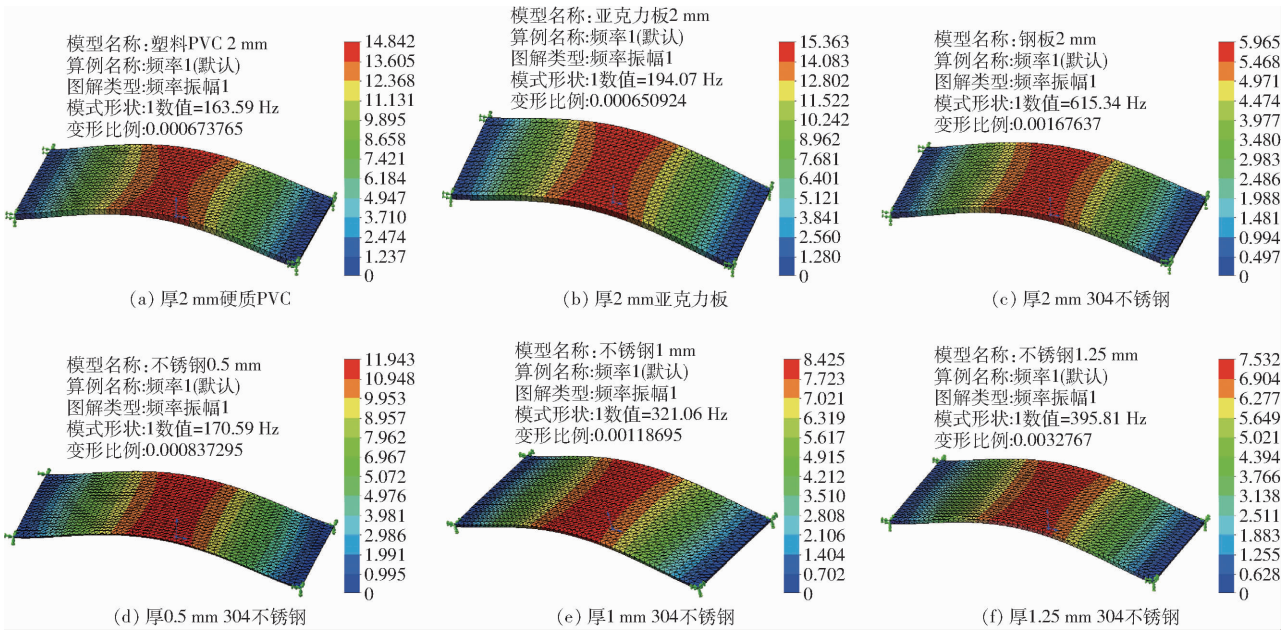


图 3 监测板模态分析

Fig. 3 Monitoring board modal analysis diagram

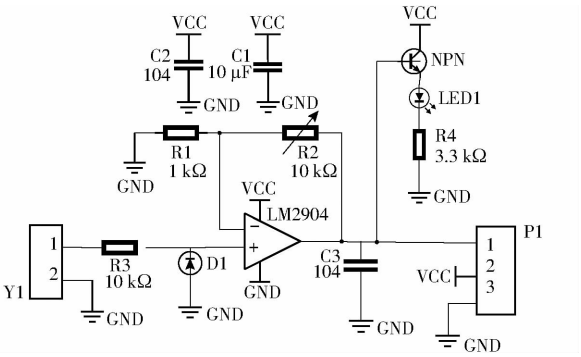


图 4　信号放大电路

Fig. 4　Signal amplifier circuit

$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \tag{2}$$

式中　$G$——滤波器放大率

$H$——传递函数

$n$——滤波器级数

$G_0$——通带内滤波器放大率

$H_n$——$n$ 阶滤波器传递函数

$\omega$——信号角频率，rad/s

$\omega_c$——截止频率，Hz

令 $\frac{1}{A} = G_n(\omega)$，得

$$n = \frac{\lg(A^2-1)}{2\lg\frac{\omega}{\omega_c}} \tag{3}$$

滤波器的截止频率由籽粒敲击时间确定。对压电传感器分 5 组进行敲击试验，每组 10 粒玉米籽粒。测试结果显示，籽粒敲击时间平均为 1.342 ms，最长时间为 1.8 ms，最短为 0.8 ms，频率范围为 0.565 ~ 1.25 kHz。在 $\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{1.5\text{ kHz}}{0.5\text{ kHz}} = 3$ 时，取 $A = 9$，代入式(3)得：$n \approx 1.995$，向上取整，$n = 2$，因此采用二阶低通巴特沃斯滤波器。

通过 Multisim 12.0 对滤波器电路进行仿真分析，分别对滤波器施加 1、5、10 kHz 的三角波信号，幅值为 400 mV，占空比 50%，仿真结果如图 5 所示。

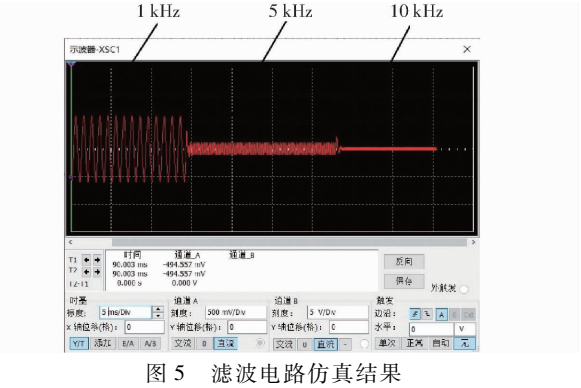


图 5　滤波电路仿真结果

Fig. 5　Filter circuit simulation results

从图中可以看出该滤波电路对于高频信号具有很好的抑制作用。

最终信号处理电路实物图如图 6 所示。

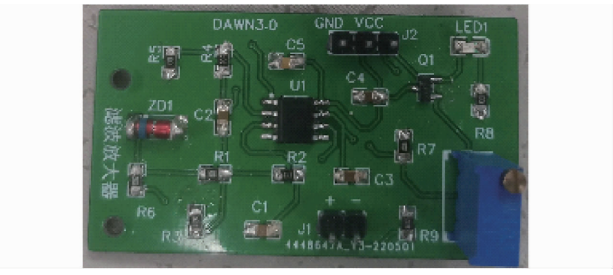


图 6　信号处理电路板

Fig. 6　Signal processing board

### 1.4　单片机控制程序设计

损失检测程序分为数据采集程序和数据显示程序，数据采集器和数据显示终端主控芯片为 STM32，编程语言为 C 语言，开发环境是 Keil uVision5。数据采集器和数据显示终端通过 CAN 总线传输数据，数据显示终端采用 F407ZGT6 作为主控芯片，数据采集器采用 F103ZET6 作为主控芯片，数据采集器程序流程图如图 7 所示。

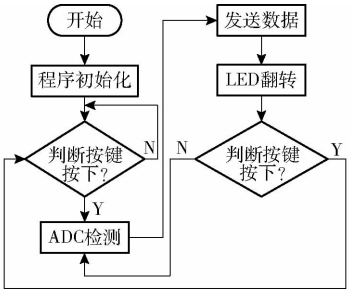


图 7　数据采集器程序流程图

Fig. 7　Data collector program flow chart

数据显示终端将获取的数据进行二次转换，实时计算清选损失的玉米籽粒数、夹带损失的玉米籽粒数，总损失籽粒数、实时损失速率以及累计损失速率，并将结果实时显示在 LCD 屏幕上。

## 2　传感器标定

通过台架试验来获得清选损失和夹带损失的信号特征值，台架试验系统由传送带、风机和导风管组成，如图 8 所示。风机和导风管用于模拟清选风机，电机采用变频器控制的三相异步交流电机，最大转速为 2 800 r/min，出风口方向可调，风速可调。风速设置为 10 m/s，出风口对准损失检测传感器，监测板与水平方向夹角 45°，撞击高度为 62 cm，传送带速度为 5 cm/s。试验玉米品种为纪元 128。

### 2.1　损失谷物阈值范围确定

为确定清选损失物的阈值范围，进行了玉米籽粒信号采集试验。分别选择大、中、小 3 种玉米籽粒

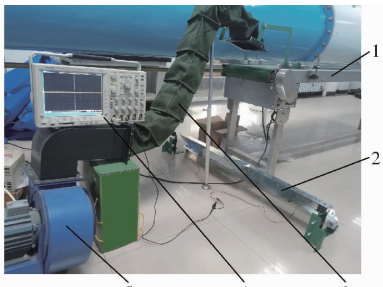


图 8 试验台架

Fig. 8 Test bench

1. 传送带 2. 传感器 3. 导风管 4. 示波器 5. 风机

各 6 粒,以及玉米籽粒直收机收获时,清选口处常见的杂余玉米芯大、中、小 3 组各 6 个作为试验对象。试验对象如图 9 所示。

采集试验在实验室台架上完成,ADC 信号特征值范围为 0 ~ 3 300 mV,因此信号处理电路的可调电阻需要进行合理设置,过大会超量程,过小会导致采样不精确。原则上保证小籽粒撞击信号能够检测到,同时大籽粒撞击信号不超量程,最终将可调电阻器阻值设置为 5.6 kΩ,放大倍数为 6.6 倍,6 组试验



图 9 玉米籽粒试验样品

Fig. 9 Corn kernel test sample

对象放在传送带上,试验对象从传送带跌落撞击监测板,产生的信号经过信号处理电路,由数据采集器的 ADC 采集模块实时采集信号值,采集值直接发送至计算机端。

对采集的特征值进行分析,试验结果如图 10 所示,分析结果如表 1 所示,确定了玉米籽粒的特征值范围,原则上舍弃干瘪的小籽粒以便尽可能地排除杂余干扰,最终选择玉米籽粒的特征阈值为 650 ~ 1 450 mV,对应的籽粒损失检测传感器安装在清选口的下方,只要在限定时间内,ADC 特征值在650 ~ 1 450 mV 之间,数据显示终端籽粒损失计数器便进行累加。

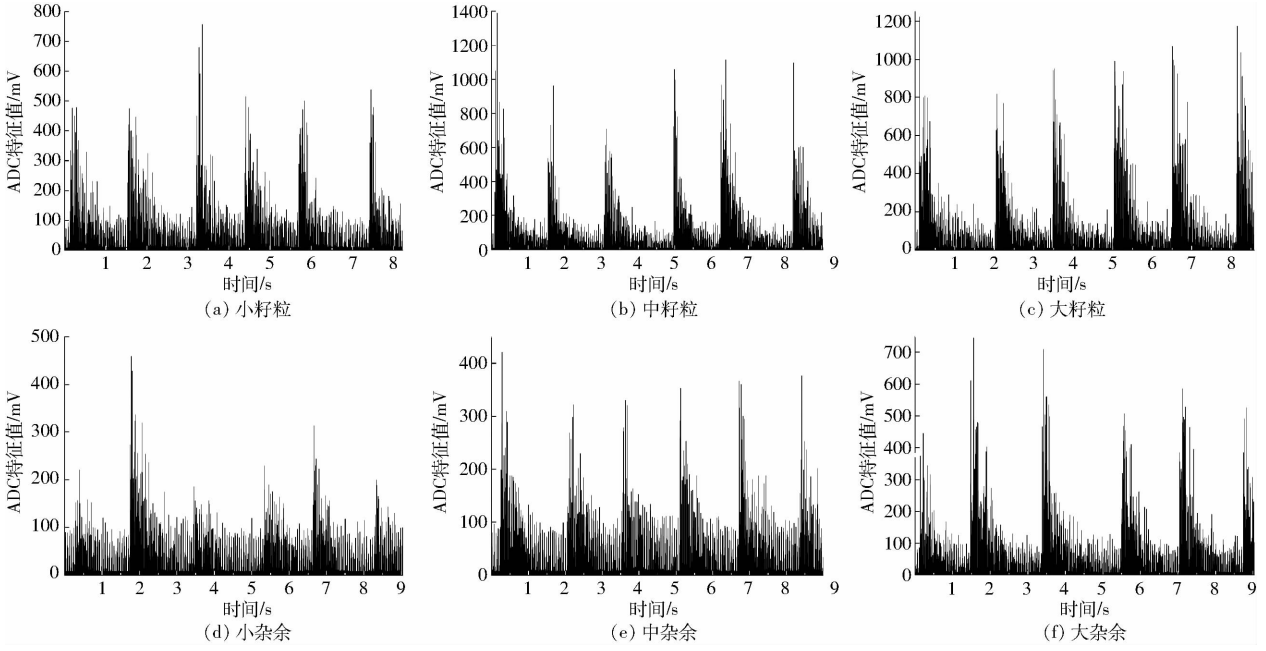


图 10 试验样品 ADC 特征值变化曲线

Fig. 10 Test sample ADC characteristic value change curves

**表 1 玉米籽粒及杂余信号 ADC 采集值**

**Tab. 1 Test results of corn kernel and residual signal acquisition** mV

| 类别 | 第 1 组 | 第 2 组 | 第 3 组 | 第 4 组 | 第 5 组 | 第 6 组 | 均值 | 最大值 | 最小值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 小籽粒 | 477.8 | 474.5 | 758.1 | 514.8 | 544.6 | 538.2 | 551.3 | 758.1 | 474.5 |
| 中籽粒 | 1 389.8 | 961.2 | 706.6 | 1 057.8 | 1 115.8 | 1 096.5 | 1 054.6 | 1 389.8 | 706.6 |
| 大籽粒 | 1 221.4 | 817.7 | 952.3 | 936.2 | 1 065.9 | 1 173.0 | 1 027.8 | 1 221.4 | 817.7 |
| 小杂余 | 219.9 | 459.2 | 186.1 | 229.6 | 313.4 | 199.0 | 267.9 | 459.2 | 186.1 |
| 中杂余 | 420.6 | 321.5 | 329.5 | 352.9 | 365.8 | 376.2 | 361.1 | 420.6 | 321.5 |
| 大杂余 | 446.3 | 745.2 | 709.8 | 506.8 | 584.9 | 526.1 | 586.5 | 745.2 | 506.8 |

通过 2019 年 10 月的田间试验观察以及数据分析可知，玉米芯的夹带损失占比较大，是清选损失的十几倍到几十倍不等，且损失情况复杂，数量各异，单个玉米芯可能夹带 0 ~ 20 粒玉米籽粒，因此针对玉米穗信号特征的采集，分为不同质量的玉米穗块共计 13 组，试验对象如图 11 所示。试验对象 2021 年 10 月采集自中国农业机械化科学研究院集团有限公司山东分院科研实验基地的田间收获现场。



图 11　玉米穗试验样品

Fig. 11　Corn ear test sample

同样在实验室中进行台架试验，关闭风机，仅通过传送带传送。由于质量大，信号值较强，为避免超过采集端口量程，将可调电阻器阻值设置为 1 kΩ，放大倍数为 2 倍，通过数据采集器采集不同玉米穗的 ADC 特征值，单次采集结果如图 12 所示，连续 10 次采集的平均特征值结果如表 2 所示。

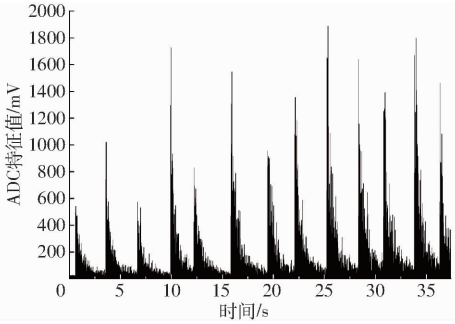


图 12　玉米穗 ADC 特征值变化曲线

Fig. 12　Characteristic value change curve of corn ear ADC

**表 2　玉米穗信号采集试验结果**

**Tab. 2　Results of corn ear signal acquisition test**

| 序号 | 质量/g | 籽粒数/个 | ADC 特征值/mV |
|---|---|---|---|
| 1 | 2. 614 | 0 | 673 |
| 2 | 4. 014 | 0 | 1 264 |
| 3 | 3. 080 | 0 | 709 |
| 4 | 4. 926 | 3 | 2 143 |
| 5 | 5. 907 | 4 | 1 029 |
| 6 | 7. 844 | 8 | 1 917 |
| 7 | 6. 642 | 9 | 1 183 |
| 8 | 8. 322 | 11 | 1 683 |
| 9 | 10. 130 | 15 | 2 340 |
| 10 | 9. 090 | 16 | 2 033 |
| 11 | 10. 636 | 18 | 1 725 |
| 12 | 11. 227 | 22 | 2 229 |
| 13 | 8. 227 | 24 | 1 815 |

对于玉米穗特征值的处理分析，设 ADC 采集值与玉米芯夹带籽粒数存在线性关系，通过最小二乘法求解线性方程。公式为

$$y = b_1 x + b_0 \tag{5}$$

式中　$y$——玉米芯夹带籽粒数，粒

$x$——ADC 采集值，mV

$b_0$——斜率　　$b_1$——截距

整理得

$$\begin{cases} b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \\ b_1 = \dfrac{\sum x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2} \end{cases} \tag{6}$$

将试验 5 ~ 13 的数据代入式(6)得 $b_1 \approx 9.636\,772 \times 10^{-3}$，$b_0 \approx -2.97$。即

$$y = 9.636\,772 \times 10^{-3} x - 2.97 \tag{7}$$

因此根据式(7)，令 $y = 20$，得 $x \approx 2\,383.578$ mV，则玉米穗 ADC 特征值阈值为 1 100 ~ 2 800 mV。

实时损失速率为每秒损失的清选籽粒损失和夹带籽粒损失数量之和，计算公式为

$$N = \frac{c(n_1 + n_2)}{t} \tag{8}$$

其中　$n_2 = y = 9.636\,772 \times 10^{-3} x - 2.97$　　(9)

式中　$N$——实时损失速率，g/s

$n_1$——清选损失籽粒数，粒

$n_2$——夹带损失籽粒数，粒

$c$——平均单个玉米籽粒质量，g

$t$——单位时间，s

单片机内部程序通过式(9)，代入玉米穗的 ADC 特征值求解出玉米芯上夹带的籽粒数。

## 2.2　不同含水率的玉米穗标定

由于含水率会对玉米穗的撞击信号产生很大影响，因此针对不同含水率的玉米穗需要重新标定。先对干燥的玉米穗等试验对象测含水率并进行标定试验，选择合适的信号放大倍数，连续试验 3 次使标定误差不超过 10%，记录对应的可调电阻器阻值，然后对干燥的试验对象用水进行 12 h 的浸泡，然后晾晒、轻微干燥，最终得到合适的多组高含水率试验样本。

对不同含水率的玉米穗分别进行标定，对应可调电阻器的阻值如表3所示。将数据代入式(6)得

**表 3　谷物含水率与可调电阻器阻值对应关系**

**Tab. 3　Corresponding relationship between grain moisture content and adjustable resistance value**

| 序号 | 含水率/% | 可调电阻器阻值/kΩ |
|---|---|---|
| 1 | 13. 0 | 1. 56 |
| 2 | 17. 3 | 1. 15 |
| 3 | 20. 6 | 0. 91 |
| 4 | 23. 1 | 0. 65 |
| 5 | 24. 6 | 0. 50 |

$$m = -0.09z + 2.73 \quad (10)$$

式中 $m$——可调电阻器阻值,kΩ

$z$——玉米穗含水率,%

## 3 自适应限时滤波算法设计

为了消除玉米籽粒直收机籽粒损失撞击监测板产生的余振干扰,采用自适应限时滤波算法进行算法滤波,即单片机监测到籽粒损失有效值后的一定时间段内,只允许一个有效值存在。对于数据采集器,在限定时间内玉米籽粒损失值只累加一次;对于数据显示终端,在限定时间内,对所有有效值遍历取最大值为有效值。

为了得出限时步长,首先分析谷物损失信号值采集的试验数据,如图 10、12,得出在有效阈值范围之内,玉米籽粒的最大数据跨度为 391 个数据位,玉米穗最大数据跨度为 321 个数据位,然后通过软件 Keil uVision5 对单片机进行程序仿真,计算出单个数据位的发送周期,仿真结果如表 4 所示。

**表 4 数据采集器仿真结果**

**Tab. 4 Data collector simulation results** ms

| 序号 | 起始时刻 | 结束时刻 | 发送时长 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.028 30 | 5.365 30 | 4.337 0 |
| 2 | 5.393 20 | 9.703 90 | 4.310 7 |
| 3 | 9.731 80 | 14.062 40 | 4.330 6 |
| 4 | 14.090 30 | 18.385 00 | 4.294 7 |
| 5 | 18.412 90 | 22.714 50 | 4.301 6 |

根据仿真结果,选择最大值 4.337 0 ms 为单个数据发送时间,结合数据跨度,最终数据采集器籽粒最大限时步长设置为 1 214.3 ms,数据显示终端玉米穗最大限时步长设置为 1 444.3 ms。限时滤波程序流程图如图 13 所示。

而对于喂入量大、排杂快的玉米籽粒直收机,数据显示终端内部程序可以自动调节限时步长,进一步缩短单次检测时间以适应不同工作环境。选择 ADC 特征值 2 000 ~ 2 500 mV 为调节阈值,通过实时时钟(Real time clock,RTC)累计 6 次以上连续记录位于调节阈值内峰值的实时时间,并计算出峰值之间的间隔时间,若间隔时间的最大时长与最大限时步长时间相差超过 100 ms,则重加载限时步长的定时器,重加载值为间隔时间平均值。

## 4 损失检测系统台架试验

### 4.1 系统标定台架试验

在实验室内对整套损失检测系统进行测试。对清选损失和夹带损失依次进行试验,试验样本和试验参数与之前标定试验相同,将有效样本与杂余混合放置,随机放置在传送带上,全程开启风机,以便尽可能地还原田间收获状况。

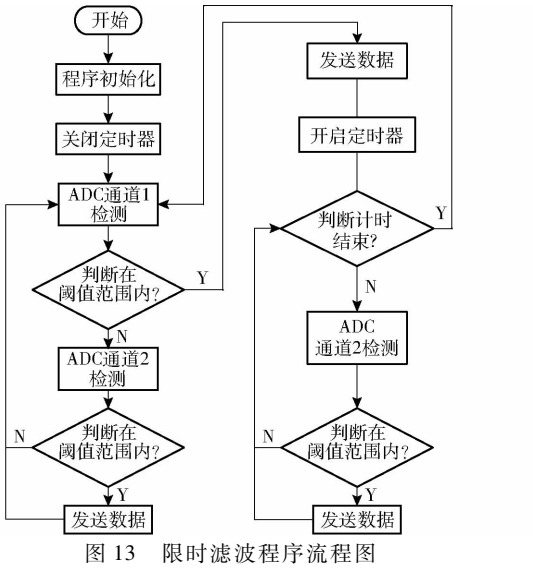


图 13 限时滤波程序流程图

Fig. 13 Time-limited filter procedure flowchart

对于低含水率和高含水率的玉米穗,由于质量差距较大,所以将其对应的信号处理电路的可调电阻器阻值分别设置为 1.56 kΩ 和 0.65 kΩ。

试验结果如表 5、6 所示。其中,玉米籽粒清选损失检测结果最大误差为 8.7%,平均误差约为 4.27%;玉米籽粒夹带损失检测结果最大误差为 9.88%,平均误差约为 5.35%。

**表 5 玉米籽粒清选损失试验结果**

**Tab. 5 Test results of corn kernel cleaning loss**

| 序号 | 含水率/% | 速度/(cm·s$^{-1}$) | 籽粒数/粒 | 杂余数/个 | 识别数/粒 | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 14.9 | 2 | 23 | 10 | 24 | 4.35 |
| 2 | 14.9 | 2 | 36 | 10 | 37 | 2.78 |
| 3 | 14.9 | 2 | 45 | 10 | 46 | 2.22 |
| 4 | 14.9 | 5 | 23 | 10 | 22 | 4.35 |
| 5 | 14.9 | 5 | 36 | 10 | 34 | 5.56 |
| 6 | 14.9 | 5 | 45 | 10 | 43 | 4.44 |
| 7 | 23.5 | 2 | 23 | 10 | 24 | 4.35 |
| 8 | 23.5 | 2 | 36 | 10 | 36 | 0 |
| 9 | 23.5 | 2 | 45 | 10 | 46 | 2.22 |
| 10 | 23.5 | 5 | 23 | 10 | 21 | 8.70 |
| 11 | 23.5 | 5 | 36 | 10 | 34 | 5.56 |
| 12 | 23.5 | 5 | 45 | 10 | 42 | 6.67 |

### 4.2 玉米双纵轴流脱粒试验台试验

为了检验本损失检测系统的实际检测效果,在全国重点实验室的玉米双纵轴流脱粒试验台上安装本套损失检测系统进行试验。该试验台由 4YZ-5 型自走式玉米籽粒收获机改装,标准喂入量为8 ~ 12 kg/s,风机转速为 300 ~ 500 r/min,采用大功率三相异步交流电机作为动力输出,通过变频器控制电机转速,可高度还原田间作业过程,整个试验台如

**表 6　玉米籽粒夹带损失试验结果**

**Tab. 6　Experimental results of entrainment loss of corn kernels**

| 序号 | 含水率/% | 速度/(cm·s$^{-1}$) | 玉米穗数/个 | 杂余数/个 | 籽粒数/粒 | 识别数/粒 | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 13.0 | 2 | 6 | 6 | 90 | 87 | 3.33 |
| 2 | 13.0 | 2 | 8 | 8 | 125 | 132 | 5.60 |
| 3 | 13.0 | 2 | 10 | 10 | 154 | 147 | 4.55 |
| 4 | 13.0 | 5 | 6 | 6 | 76 | 74 | 2.63 |
| 5 | 13.0 | 5 | 8 | 8 | 114 | 103 | 9.65 |
| 6 | 13.0 | 5 | 10 | 10 | 136 | 126 | 7.35 |
| 7 | 23.1 | 2 | 6 | 6 | 75 | 78 | 4.00 |
| 8 | 23.1 | 2 | 8 | 8 | 81 | 89 | 9.88 |
| 9 | 23.1 | 2 | 10 | 10 | 114 | 117 | 2.63 |
| 10 | 23.1 | 5 | 6 | 6 | 71 | 75 | 5.63 |
| 11 | 23.1 | 5 | 8 | 8 | 104 | 103 | 0.96 |
| 12 | 23.1 | 5 | 10 | 10 | 137 | 126 | 8.03 |

图 14 所示。



图 14　玉米双纵轴流脱粒试验台

Fig. 14　Corn double longitudinal axial flow threshing test bench

籽粒损失检测传感器和玉米穗损失传感器分别安装在清选口和排杂口下方，与水平方向呈 45°夹角，撞击高度均为 60 cm，安装位置如图 15 所示。由于排杂口处排出物情况复杂，所以只检测单个玉米穗的夹带籽粒情况，对于多个玉米穗同时碰撞的情况、不成熟的玉米籽粒和未敲击到监测板上的玉米穗不纳入夹带损失统计。因为本检测系统监测面较大，且旨在实时反映收获机的损失速率变化，以便提醒驾驶人员调整作业速度，准确的损失值没有必要记录，故不再加入修正系数调整损失总数。

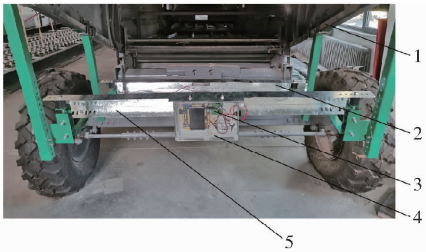


图 15　传感器安装图

Fig. 15　Sensor mounting diagram

1. 试验台架　2. 清选损失检测传感器　3. 信号处理电路　4. 数据采集器　5. 夹带损失检测传感器

试验台后部装有高速摄像头，用于记录单个试验对象的敲击情况。地上铺设塑料布，与收获机车身等宽，所有的杂余和损失都落在塑料布上便于收集。凹板间隙设置为 20 mm，玉米籽粒平均含水率为 22.6%，根据式(10)计算可调电阻器阻值，将可调电阻器阻值设置为 0.7 kΩ。试验结果如表 7 所示。其中，玉米籽粒清选损失检测结果最大误差为 9.52%，平均误差为 6.02%，玉米籽粒夹带损失检测结果最大误差为 9.96%，平均误差约为 6.52%。

**表 7　检测系统综合试验结果**

**Tab. 7　Comprehensive test results of detection system**

| 喂入量/(kg·s$^{-1}$) | 风机转速/(r·min$^{-1}$) | 试验时间/s | 清选损失籽粒撞击数/粒 | 玉米穗夹带籽粒数/粒 | 清选损失检测值/粒 | 夹带损失检测值/粒 | 清选损失检测误差/% | 夹带损失检测误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 300 | 78 | 22 | 1 207 | 24 | 1 302 | 9.01 | 7.87 |
| | | 58 | 22 | 762 | 21 | 816 | 4.55 | 7.09 |
| | | 71 | 15 | 1 007 | 14 | 1 046 | 6.67 | 3.87 |
| 10 | 400 | 36 | 21 | 887 | 23 | 923 | 9.52 | 4.06 |
| | | 35 | 17 | 1 385 | 16 | 1 523 | 5.88 | 9.96 |
| | | 47 | 10 | 937 | 11 | 1 002 | 10.00 | 6.94 |
| 14 | 500 | 37 | 17 | 2 342 | 18 | 2 489 | 5.88 | 6.28 |
| | | 23 | 0 | 1 625 | 0 | 1 715 | 0 | 5.54 |
| | | 36 | 15 | 1 865 | 16 | 1 997 | 6.67 | 7.08 |

## 5　结论

(1)采用柔性压电陶瓷 PZT－5 和厚 0.5 mm 的 304 不锈钢做成的监测板，可以有效地监测籽粒冲击信号，对于不同质量的玉米穗也可以有效区分；通过信号处理电路，在实验室条件下对损失检测系统进行标定，能够达到良好的识别效果；通过自主设计的自适应限时滤波算法处理信号值，可以有效抑制谷物撞击引起的余振干扰。

(2)在收获机试验台上进行装机测试，玉米籽粒清选损失检测结果最大误差为 9.52%，平均误差约为 6.02%；玉米籽粒夹带损失检测结果最大误差为 9.96%，平均误差约为 6.52%，数据结果表明所使用的方法能够很好地识别损失谷物的信号，可以实时反馈收获机的损失速率，协助作业人员调整收获速度，减少不必要的谷物损失。

## 参 考 文 献


[1] LI Yang, XUE Zhen, XU Lizhang, et al. Research progress on the monitoring methods of the separating loss in grain combine harvester[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization(in Chinese and English), 2020, 1(1): 13 - 23.

[2] 王志文. 基于喂入量预测的联合收获机作业速度控制系统研究[D]. 镇江:江苏大学, 2021.
WANG Zhiwen. Research on speed control system of combine harvester based on feed quantity forecast[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[3] 陈度,王书茂,康峰,等. 联合收获机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 18 - 21.
CHEN Du, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 18 - 21. (in Chinese)

[4] XU Jiaojiao, LI Yaoming. A PVDF sensor for monitoring grain loss in combine harvester[C] // Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2009: 499 - 505.

[5] 梁振伟. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测传感器的研究[D]. 镇江:江苏大学, 2013.
LIANG Zhenwei. Study on grain separation loss monitoring sensor for axial flow combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)

[6] 魏纯才. 油菜联合收获机清选损失监测方法与装置研究[D]. 镇江:江苏大学, 2018.
WEI Chuncai. Study on the monitoring method and device for cleaning loss of the rapeseed combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)

[7] 陈义. 联合收获机清选损失监测方法与装置研究[D]. 镇江:江苏大学, 2013.
CHEN Yi. Study on the monitoring method and device for cleaning loss of the combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)

[8] GUY H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters. US: 4540003[P]. 1985 - 09 - 10.

[9] 冉军辉,吴崇友. 传感器在谷物联合收获机中的应用进展及发展方向[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 23 - 29.

[10] 张猛,耿爱军,张智龙,等. 谷物收获机智能监测系统研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 85 - 90.
ZHANG Meng, GENG Aijun, ZHANG Zhilong, et al. Research status and development trend of intelligent monitoring system for grain harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 85 - 90. (in Chinese)

[11] 周贤龙,朱瑞祥,周贤娟,等. 基于传感器技术的谷物联合收获机清选损失监测系统[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 85 - 87.
ZHOU Xianlong, ZHU Ruixiang, ZHOU Xianjuan, et al. The nonitoring system for cleaning loss of the grain combine harvester based on sensor technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 85 - 87. (in Chinese)

[12] 李耀明,梁振伟,赵湛,等. 联合收获机谷物损失实时监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 99 - 102.
LI Yaoming, LIANG Zhenwei, ZHAO Zhan, et al. Real-time monitoring system of grain loss in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 99 - 102. (in Chinese)

[13] 卢文涛,张莉杰,张东兴,等. 联合收获机监控系统研究现状[J]. 农机化研究, 2014, 36(9): 256 - 259, 264.
LU Wentao, ZHANG Lijie, ZHANG Dongxing, et al. The research situation of monitoring and controlling system of combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 256 - 259, 264. (in Chinese)

[14] 唐飞龙. 联合收获机清选损失监测装置设计及试验[D]. 成都:西华大学, 2017.
TANG Feilong. Design and test of monitoring device of cleaning-loss for combine harvester[D]. Chengdu: Xihua University, 2017. (in Chinese)

[15] 张光跃,金诚谦,杨腾祥,等. 联合收获机清选损失率监测系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4): 146 - 150.
ZHANG Guangyue, JIN Chengqian, YANG Tengxiang, et al. Design and implementation of cleaning loss rate monitoring system for combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 146 - 150. (in Chinese)

[16] 熊思华,李彦明,焦中元,等. 稻麦联合收获机械总线化监控系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 190 - 193, 199.
XIONG Sihua, LI Yanming, JIAO Zhongyuan, et al. Research on CAN-Bus monitoring system of rice and wheat combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 190 - 193, 199. (in Chinese)

[17] 王振玉. 玉米籽粒收获机脱粒分离装置设计及夹带损失自动调控系统[D]. 镇江:江苏大学, 2021.
WANG Zhenyu. Design of threshing and separating device about corn grain harvester and automatic control system of entrainment loss[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[18] 杜岳峰,张丽榕,毛恩荣,等. 基于 EMD 的联合收获机籽粒损失监测传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 158 - 165.
DU Yuefeng, ZHANG Lirong, MAO Enrong, et al. Design and experiment of corn combine harvester grain loss monitoring sensor based on EMD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 158 - 165. (in Chinese)

[19] WU Yanhan, LI Xiaoyu, MAO Enrong, et al. Design and development of monitoring device for corn grain cleaning loss based on piezoelectric effect[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105793.

[20] 梁振伟,李耀明,赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 18 - 26.

LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 18 – 26. (in Chinese)

[21] 张恬,赵德安. 图像处理技术在联合收获机夹带损失检测中的应用[J]. 农机化研究,2009,31(4):70 – 72.
ZHANG Tian, ZHAO Dean. Application of image processing technology in entrainment loss detection in combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 70 – 72. (in Chinese)

[22] 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.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167 – 171. (in Chinese)

[23] 王卓,车东,白晓平,等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):100 – 108.
WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 100 – 108. (in Chinese)

[24] 刘新怡,陈进,张西良. 基于 STM32 的联合收获机清选损失监测装置的研制[J]. 农机化研究,2020,42(10):200 – 204,210.
LIU Xinyi, CHEN Jin, ZHANG Xiliang. Development of STM32-based combine harvester cleaning loss monitoring device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 200 – 204, 210. (in Chinese)

[25] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报,2019,50(10):1 – 16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1 – 16. (in Chinese)

[26] 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 基于模态分析的联合收获机籽粒损失监测传感器结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(4):22 – 29.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Structure optimization and performance experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester in using modal analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 22 – 29. (in Chinese)

(上接第 70 页)

[22] 朱彤. 气力与机械充种复合式花生精量排种器的研究[D]. 石河子:石河子大学,2021.
ZHU Tong. Research on pneumatic and mechanical seed filling composite peanut precision seed discharger[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. (in Chinese)

[23] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
SHI Song. Design and experimental research of pneumatic combination hole type corn precision seed discharger[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[24] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(3):62 – 69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed filling performance of pneumatic combination hole seeder based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)

[25] 廖庆喜,高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报,2003,34(4):57 – 59.
LIAO Qingxi, GAO Huanwen. Experimental study on corn seed damaging in a horizontal plate precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 57 – 59. (in Chinese)

[26] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报,2021,52(7):40 – 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 40 – 50. (in Chinese)