doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012

玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验

王　卓[1]　车　东[1,2]　白晓平[1]　胡河春[1]

(1.中国科学院沈阳自动化研究所,沈阳 110016;2.东北大学信息科学与工程学院,沈阳 110819)

摘要:针对玉米籽粒收获时,损失率检测不准的问题,以压电薄膜作为敏感材料,设计了一种由冲击传感器、信号处理电路和安装装置等组成的玉米收获机籽粒清选损失监测装置,并采用支持向量机多分类算法提取玉米籽粒冲击信号,实现了玉米籽粒损失的实时监测。首先,在不同冲击角度和高度的试验条件下,对不同大小的玉米籽粒和杂余进行冲击信号的采集试验,提取冲击信号的主要特征。采用支持向量机多分类算法对模型进行训练,并在监测装置上实现实时分类。使用不同品种和含水率玉米对分类模型进行验证。然后,在不同风机转速和清选筛开度条件下,得到测试时间内传感器检测的籽粒数与总损失量之间的关系,并根据谷物流量值,计算得到实时的清选损失率。最后,将该监测装置安装在 4YL-8 型玉米联合收获机上进行田间试验。结果表明,该监测装置与人工检测相比,平均相对误差为 12.98%,可以为收获机的控制提供反馈信息。

关键词:玉米联合收获机;清选损失;监测装置;支持向量机;压电薄膜

中图分类号:S225.5+1;TP216　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)12-0100-09

Improvement and Experiment of Cleaning Loss Rate Monitoring Device for Corn Combine Harvester

WANG Zhuo[1]　CHE Dong[1,2]　BAI Xiaoping[1]　HU Hechun[1]

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*
2. *College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang* 110819, *China*)

Abstract: Piezoelectric films were used as sensor sensitive materials. A grain cleaning loss rate monitoring device suitable for corn harvesting was designed. The impact sensor, signal processing circuit and mounting device were designed, and the corresponding processing algorithm was used to collect the impact signal. Firstly, under different experimental conditions of impact angle and height, the impact signal acquisition experiments of different sizes of corn kernels and impurities were carried out. The main characteristics of impact signal were also extracted. Secondly, the support vector machine was used for multi-classification. The model was trained by the support vector machine multi-classification algorithm and real-time classification was implemented on the monitoring device. And the classification model was validated by using different corn varieties and moisture content. Then, under the conditions of different fan speeds and cleaning screen opening degrees, the relationship between the number of grains detected by the sensor and the total loss during the test time was obtained. And the real-time cleaning loss rate was calculated according to the grain flow value. Finally, the monitoring device was mounted on a 4YL-8 combine harvester and field trials were conducted. The results showed that the average relative error of the monitoring device compared with manual detection was 12.98%, which can provide feedback for the control of the harvester.

Key words: corn combine harvester; cleaning loss; monitoring device; support vector machine; piezoelectric films

0　引言

联合收获机的清选系统是收获机的重要组成部分,清选系统工作参数调节性能直接影响到粮食收获的损失率和清洁率。清选损失率是联合收获机作业时的重要工作参数,根据清选损失率,可对清选系

收稿日期:2018-07-10　修回日期:2018-08-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0700105-03)

作者简介:王卓(1976—),男,教授,主要从事农机精准作业控制技术研究,E-mail:zwang@sia.cn

统进行准确的调节。在实际收获过程中，实时监测较为困难，更多情况下依靠人工监测，根据驾驶员的经验调节，这种调节时滞性大，调节效果差。

清选损失率的监测一直是国内外相关专家学者的研究重点。监测方法主要分为两类：一类是依靠冲击板进行检测[1-9]；另一类是基于图像处理的识别[10-11]。基于图像识别的方法能够真实地区分籽粒和杂余，但最大的制约是在多粉尘环境中很难保持相机镜头洁净，采集的图像质量差，且维护成本高，研究仍处于实验室阶段。

目前针对水稻等作物的清选损失监测研究较多，多采用压电传感器监测谷物冲击峰值或者识别特定频率的方法，然而在实际收获过程中，谷物冲击到传感器的过程受到的影响因素较多，无法保证籽粒等以实验时特定的速度、角度冲击到传感器，也不能保证谷物和杂余质量完全不同。在实际监测时，容易造成误识别。对于玉米这类杂余类型复杂、籽粒与杂余区分度低的收获作物来说，这种误识别的情况就更容易出现。使用幅值区别的方法，只能将质量较轻的杂余冲击信号判断出来，与籽粒大小、质量相差不大的杂余所产生的冲击信号和籽粒产生的冲击信号幅值分布较为相似。针对以上问题，本文设计一种基于支持向量机的玉米籽粒冲击信号的识别算法。通过对试验过程中籽粒和杂余的冲击信号进行采集并存储，然后对信号特征进行分析，形成训练集和测试集，采用交叉验证法，对玉米籽粒冲击信号和杂余信号进行多分类，识别玉米籽粒冲击信号的主要特征值，进而在监测装置上实现识别算法，通过进一步计算得到清选损失率。

1　清选损失监测装置硬件设计

1.1　压电薄膜检测原理

压电薄膜（PVDF）是一种压电聚合物，依据正压电效应，它可以将微力信号或动态形变信号转换为电荷信号。这类材料具有材质柔韧、低密度、低阻抗、响应速度快和压电常数高等优点，在水声超声测量、压力传感等方面得到广泛应用[12-13]。由于压电薄膜较薄，易受到损坏且不易于安装，需要在上下表面粘贴 PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）保护层。本文设计的监测装置所使用的是 MEAS 公司生产的 LDT4 - 028 型压电薄膜，几何尺寸为 20 mm × 155 mm，厚度为 205 μm，压电材料厚度为 52 μm，压电常数 d_{33} = 33 pC/N。将压电薄膜粘贴在橡胶基板上，作为检测单元；将 5 组检测单元排放在一起粘贴到不锈钢基板上，形成检测阵列，以此结构作为检测敏感元件[14]。橡胶基板选用弹性形变量较差的橡胶，以减少玉米籽粒不同侧边接触到压电薄膜后，由于接触面大小的不同而引起波形的差异，并可减少波形振荡时间，便于以更高频率检测信号。为了减少机械振动对检测的影响，在检测阵列与横梁之间安装橡胶隔振片。传感器结构图和实物图如图 1 所示。

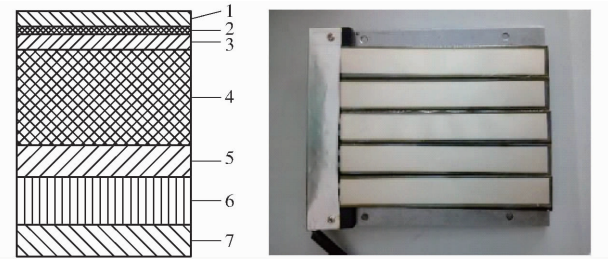

图 1　传感器结构图和实物图

Fig. 1　Sensor structure diagram and physical map

1. 上层 PET 保护层　2. PVDF　3. 下层 PET 保护层　4. 橡胶基板　5. 不锈钢基板　6. 橡胶隔振片　7. 横梁

1.2　硬件结构设计

硬件电路原理图如图 2 所示。其中传感器电路主要包括电源模块、CAN 通信模块、信号处理电路模块、数据处理单元和数据存储单元。电源模块可以实现监测装置的电源隔离并为其他电路提供合适的电压。CAN 通信模块可以实现监测装置挂载到整车 CAN 总线，进而实现通信。信号处理电路主要包括电荷放大电路、滤波放大电路、模数转换电路。每片压电薄膜都对应各自的电荷放大电路和滤波放大电路。压电薄膜实现玉米或杂余冲击力的物理量到电荷信号的转换；电荷放大电路将电荷量转换为能够测量的电压，并进行检测电压的放大；滤波放大电路将压电薄膜振动时产生的 50 Hz 自振频率滤除，并将 20 kHz 以下的其他频率进行幅值放大；模数转换电路以模数转换芯片为核心，将各路电压模拟量转换为可以存储的数字量，通过 SPI 接口发送到数据处理单元。数据处理单元使用 STM32F4 作为核心芯片，将冲击信号进行软件滤波、提取特征值、并对不同波形进行区分识别，控制清选损失率的计算、发送以及数据的存储。数据存储单元主要包括 SD 卡存储模块，用于

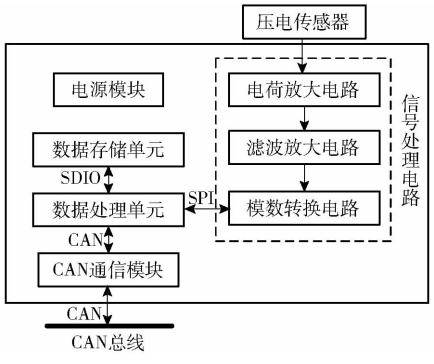

图 2　硬件电路原理图

Fig. 2　Circuit principle diagram

存储原始冲击信号的数据,并间隔一定时间存储清选损失率的计算值,以便于实验室数据分析。

监测装置的整体机械结构如图 3 所示。将每块冲击板安装在可调节水平角度的横梁上,横梁安装在距离筛箱尾部后方 10 cm、下方 30 cm 处,此位置不与振动的筛箱发生碰撞。左、右支架固定在整车车体上。在筛面同一水平面上安装间距为 2 cm 的筛板,便于将大的杂余和未脱粒的玉米隔离开。将电路板固定在防水电路盒中,并安装在冲击板下方,冲击板信号引出线以最短距离连接到电路板,减少信号的扰动,3 个电路模块使用 CAN 总线相互连接,并全部挂载到整车 CAN 总线上。

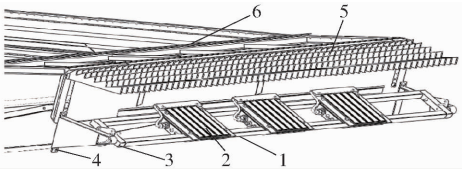

图 3 监测装置整体机械结构图

Fig. 3 Mechanical structure drawing of detector

1. 冲击板 2. 电路盒 3. 横梁 4. 左、右支架 5. 筛板 6. 筛箱

2 籽粒和杂余冲击信号采集和特征提取

2.1 冲击信号处理

首先,将模数转换芯片传回的信号转换为在零点附近上下振动的信号。由于籽粒与杂余击打到冲击板上的时间是随机的,且有效信号时间较短,需要确定信号开始记录的时间。对于开始信号,采用两缓冲区循环计数取平均值的方法进行识别,如果某一缓冲区的平均值超过设定阈值,将该缓冲区与其前一个缓冲区的数据依次存储,并跳出循环开始之后的数据采集,一次采集 6 000 个数字量,即 15 ms 作为一次信号的长度。该方式可防止由轻微振动引起的数据记录,并可避免存储与采集的时间冲突,以防止采集信号时进行数据的存储。为了进一步减少机械振动的影响,进行高斯平滑滤波,对于某位置的数字量,取相邻 5 个数字量的均值作为记录值。对于其他扰动所引起的波形跳变或记录间断,若相邻差值大于某阈值,则该信号无效。

2.2 信号采集试验

根据实际收获过程的调研,玉米收获过程中的大块杂余多为脱粒系统所排出的与籽粒大小相差不大的玉米芯。选用华农 138 品种玉米,取 3 组成熟度不同的玉米籽粒和 3 组大小不同的块状玉米芯作为试验样本,玉米芯的大小、质量与籽粒相差不大,样品如图 4 所示。



图 4 试验样品

Fig. 4 Experimental samples

在实验室条件下搭建试验台架,使用传送带,间隔 5 cm 放置一个试验样品,传送带速度为 1 cm/s,由于水平速度很小,样品离开传送带时近似于自由落体运动。为了模拟实际收获过程中,籽粒与杂余冲击到传感器上的不同角度和高度,将冲击板安装在可以调节角度和高度的支撑台架上。根据国家标准[15],在高度 30、40 cm 和冲击板角度 30°、45°条件下进行交叉组合试验,对每组玉米籽粒和杂余分别进行 100 次的冲击试验,共得到 8 组试验数据,所采集到的各组信号波形如图 5 所示,由上到下分别按

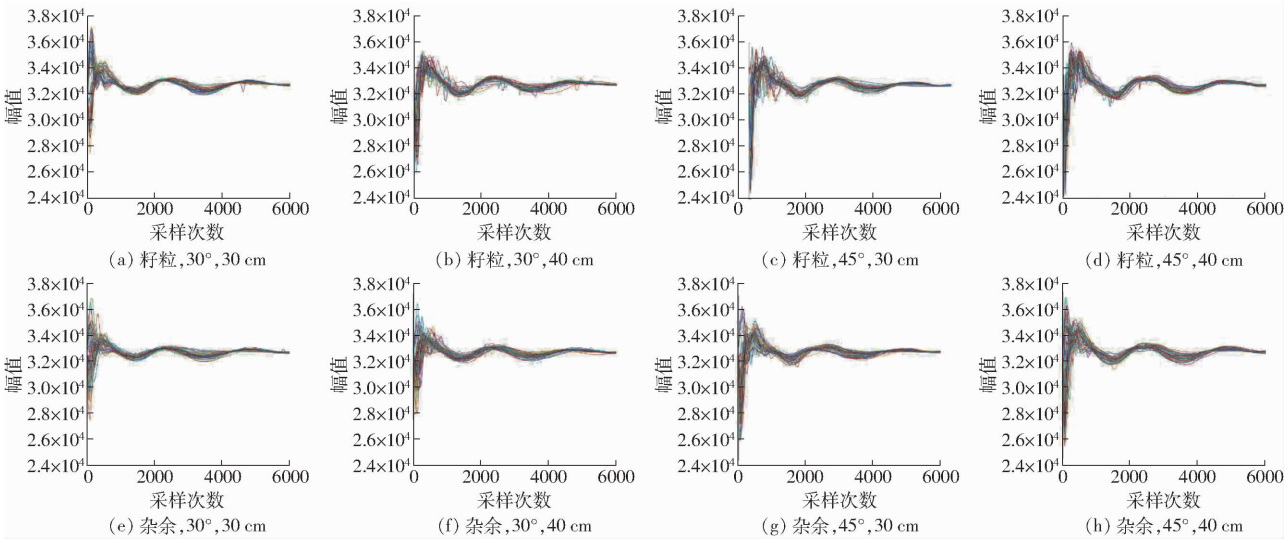

图 5 不同测试条件下的信号波形图

Fig. 5 Signal waveforms under different experiment conditions

顺序标记为第 1 组～第 8 组。

2.3　识别特征选取

整个波形共包括 6 000 个数据，将 6 000 个值作为特征值进行训练和测试，所需的时间较长，很难满足实时性的要求，并且计算量较大，难以在嵌入式系统中实现。为保证波形的可识别度，并尽量减少识别特征，选取能够代表整个波形的特征。波形开始变化得较快，幅值大，需要提取的特征较多，比较所有波形，对波形前 1 000 个数值每 10 个提取一个特征值，1 000～2 000 每 20 个提取一个特征值，后 4 000 个每 50 个提取一个特征值，最后得到 230 个特征值，作为每组的识别特征。得到大小为 230 × 100 × 8 的数据集，对此数据集进行训练。

3　识别算法与清选损失率计算

3.1　清选损失率计算原理

支持向量机（Support vector machines，SVM）是根据统计学习理论中结构风险最小化原则提出的，SVM 在解决小样本、非线性及高维模式识别中有很多优势[16]。SVM 支持二分类或多分类方法，在工业生产中得到了较好的应用[17-19]。

根据支持向量机模型所得的分类方法，得到冲击板监测到的籽粒冲击个数，由冲击板大小和安装位置计算清选损失率，根据收获机的工作参数调整计算参数。

3.2　支持向量机模型的训练方法

对已得到的 8 组数据，将所有籽粒数据标为一组，杂余数据标为一组，即 1、2、3、4 组标记为籽粒类，5、6、7、8 组标记为杂余类。每组选出 3/5 作为训练集，剩余 2/5 作为测试集，采用支持向量机二分类方法对训练集进行分类模型的学习，使用测试集进行验证，分类准确率最大达到 72%，分类结果如图 6 所示。

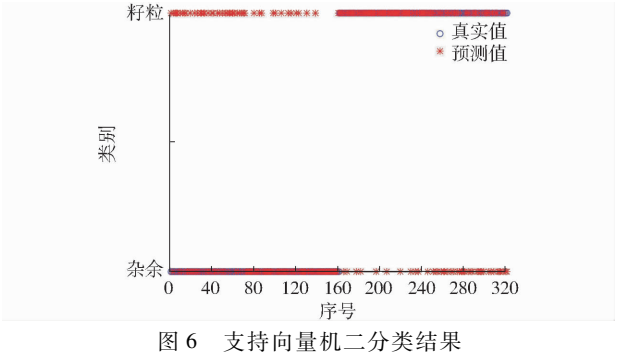

图 6　支持向量机二分类结果

Fig. 6　Result with binary-class SVM

根据以上分类结果可以看出，当进行简单的二分类时，所得到的分类模型对冲击角为 30°时的籽粒信号与冲击角为 45°时的杂余信号的分类准确率不高，即 1、2、7、8 组存在误识别的情况。原因是在二分类时，受 3、4、5、6 组对支持向量的影响，使得 1、2、7、8 组的分类特征不明显。因此使用多分类结合决策树层分类方法进行改进。分类结构如图 7 所示。

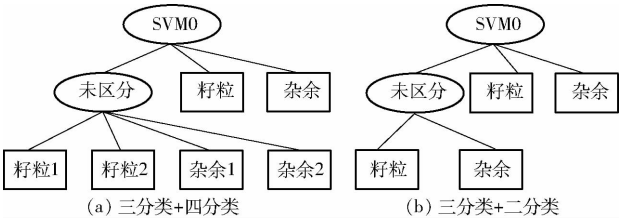

图 7　决策树多分类结构

Fig. 7　Structure of multi-class SVM with decision tree

第 1 层分类时，使用三分类方法，将 3、4 组标记为籽粒类，5、6 组标记为杂余类，1、2、7、8 标记为未区分类，使用该标记方法进行训练，测试集分类准确率为 85%，分类结果如图 8a 所示。第 2 层对未区分类进行四分类，即将每一类标记为组号进行分类，分类准确率为 89%，分类结果如图 8b 所示，存在将 7、8 组互相误分类的情况，因为 7、8 组都是杂余，可将该情况认为是正确分类，最终准确率为 92%。为了避免这种情况，可将 1、2 组标记为籽粒类，7、8 组标记为杂余类，这种分类准确率为 95%，分类结果如图 8c 所示。按照两种分类方法对测试集进行测试，最终的识别准确率为 87% 和 92%，分类结果如图 8d、8e 所示。最后选择使用第 2 种方法进行分层训练，并应用到实际的检测工作中。

以上分类方法的训练模型在高度 30 cm 或 40 cm 和角30°或 45°的交叉试验条件下进行训练，在实际收获过程中，玉米籽粒或杂余每次冲击到检测传感器的高度与角度是不同的，因此设计一组不同角度和高度的交叉试验，验证在该模型下的识别效果，最终的识别准确率如图 9 所示。

由图 9 可以看出，在靠近训练条件的位置，准确率相对较高，整体识别准确率在 85% 左右。说明在实际检测过程中，可按照以上分类模型进行分类。

另外，针对不同品种以及不同含水率的籽粒和杂余进行试验，以测试分类算法的推广性。选取华农 138、纪元 168 和郑单 958 的籽粒和杂余作为测试样本，籽粒含水率分别为 23%、21% 和 24%，杂余含水率分别为 28%、27%、30%。选取一部分在干燥箱中干燥以得到不同含水率样本。然后以 30 cm 冲击高度和 45° 冲击角在传送带实验台架上进行试验，识别准确率结果如表 1 所示。可以看出籽粒识别准确率受品种影响小，随含水率下降准确率有下降趋势。

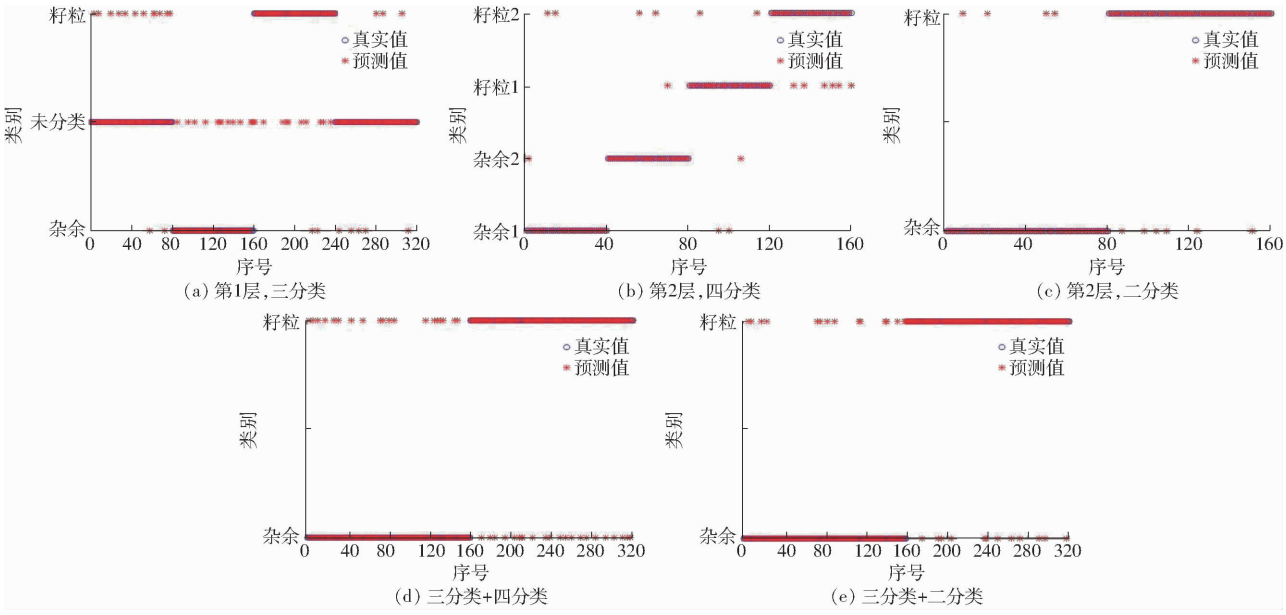

图 8 支持向量机多分类结果

Fig. 8 Result with multi-class SVM

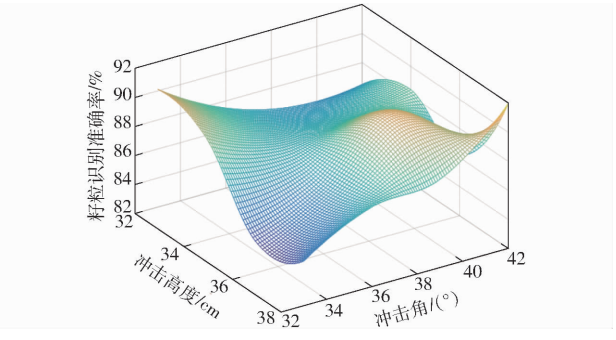

图 9 不同高度、角度时支持向量机分类结果

Fig. 9 Result with SVM at different heights and angles

表 1 不同品种和含水率条件下籽粒和杂余识别准确率

Tab. 1 Accuracy rate of grain and other material in different varieties and moisture content %

序号	华农 138		纪元 168		郑单 958	
	含水率	准确率	含水率	准确率	含水率	准确率
籽粒 1	23	87	21	85	24	84
籽粒 2	21	85	20	86	22	83
籽粒 3	20	84	19	85	20	83
杂余 1	28	82	27	82	30	79
杂余 2	23	84	25	82	25	81

3.3 支持向量机分类方法的实现

支持向量机的分类方法在计算机上能够得到很好的应用,但是受训练集的影响,训练时间较长,且对硬件的要求较高,需要进行浮点运算和矩阵运算等,在联合收获机上实现训练的算法难以满足实时性要求,且成本较高。采用线下训练、线上实时预测的方法[20]。在嵌入式设备中的实时计算只需要训练时得到的支持向量和相应的核函数参数即可,并且每次只对一条记录进行分类判定,所用时间较少,能够满足实时性要求。

3.4 清选损失率的计算

清选损失率为一段时间内损失量占粮仓收集谷物总量的比值。清选损失率的计算公式为

$$N_i = \frac{m_z + m_c}{m_L} \times 100\% \tag{1}$$

式中 N_i——谷物损失率,%

m_z——在测定段内,机器排出秸秆中分离出的自由谷粒质量,g

m_c——在测定段内,机器排出杂草中分离出的自由谷粒质量,g

m_L——在测定段内,从粮仓收集的谷粒质量,g

谷物总量可以使用谷物流量传感器获得的谷物流量数值,计算公式为

$$m_L = q_l t \tag{2}$$

式中 q_l——流量传感器获得的 t 时间段内平均籽粒流量,kg/s

t——测定时间,s

损失率可以通过一段时间内检测到的玉米籽粒信号个数乘以籽粒质量,并乘以某个占比得到。籽粒质量公式表示为

$$m_l = m_z + m_c = \frac{s_i}{c_i} m_i \tag{3}$$

式中 m_l——清选室排出物自由谷粒质量,g

s_i——冲击板检测到的谷粒数,个

m_i——单个籽粒质量,g

c_i——冲击板检测到的籽粒数占总籽粒数量的比值

清选监测装置共 3 组,在整车行走系统关闭的

情况下，开启收获机的收粮系统，人工定量喂入玉米，将脱粒系统和传送系统调节到正常工作状态，在不同清选风机转速和清选筛开度下进行组合试验（转速设定为 750、950、1 150 r/min，清选筛开度设定为 4、8、12 cm），令谷物流量恒定在 2kg/s。根据在谷物收获机上所做的试验[21]，在清选室排出口放置与排出口等大的接料盒，接料盒大小为 120 cm × 80 cm，按照 10 cm × 10 cm 的大小分成小的接料盒。接料时间为 5 min，统计每个小接料盒中籽粒的个数。其中某一次的籽粒分布情况如图 10 所示。

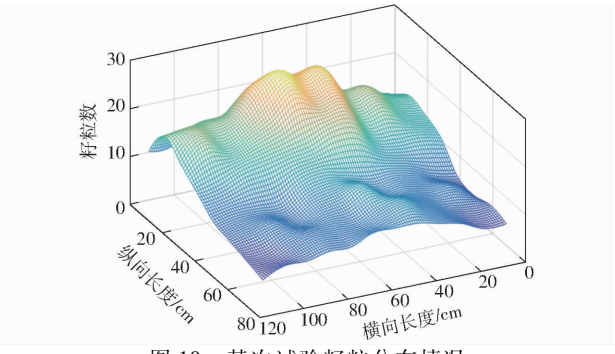

图 10　某次试验籽粒分布情况

Fig. 10　Distribution of corn for one test

由图 10 可以看出，由中间到左右两边籽粒数量呈现下降趋势，在冲击板安装位置附近的接料盒籽粒分布相差不大，将整个接料盒分为左、中、右 3 部分。将同一部分同一行的小接料盒籽粒数求和后的纵向分布如图 11 所示。

由图 11 可知，清选筛开度变化的影响较小，且在不同风机转速的情况下需要乘以校正系数进行校正，以风速 750 r/min 为标准，得到风速分别在 750、950、1 150 r/min 时的校正系数为 $k_1=1.0$，$k_2=0.8$，$k_3=0.7$。传感器所在位置分布的籽粒数分别占对应部分总籽粒数的百分比为 $c_1=11.1\%$，$c_2=11.0\%$，$c_3=12.0\%$。

最终的清选损失率计算公式为

$$N_i=\frac{k(n)m_i}{m_L}\sum_{j=1}^{3}\frac{z_j}{c_j}\times 100\% \tag{4}$$

其中

$$k(n)=\begin{cases}1.75-0.001n & (750\ \text{r/min}\leqslant n\leqslant 950\ \text{r/min})\\ 1.275-0.000\,5n & (950\ \text{r/min}<n\leqslant 1\,150\ \text{r/min})\end{cases} \tag{5}$$

式中　$k(n)$——校正系数函数

n——风机转速，r/min

z_j——在测定段内，每块冲击板检测到的籽粒冲击次数

测得的清选损失籽粒个数为

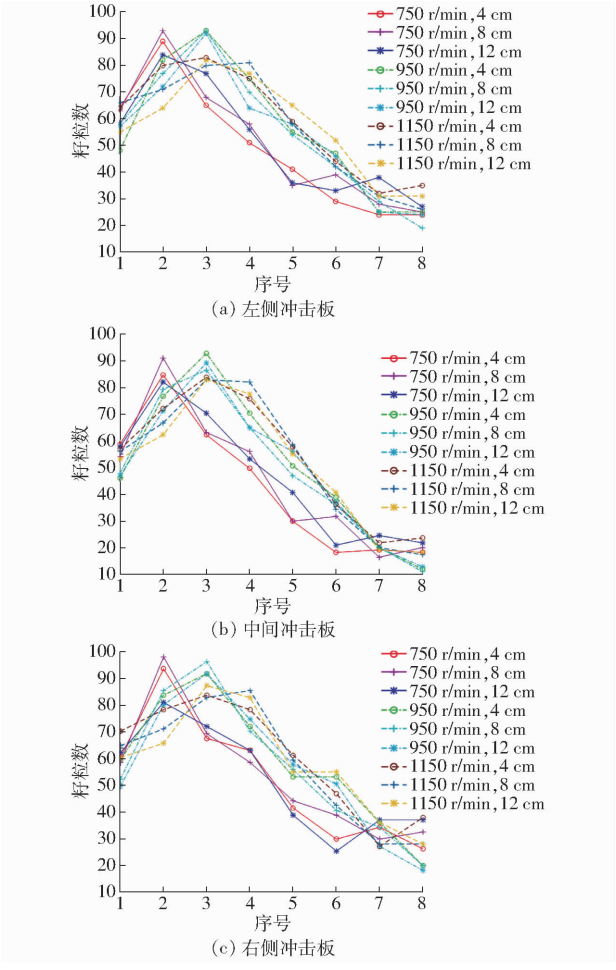

图 11　不同试验条件下 3 部分纵向籽粒分布情况

Fig. 11　Distributions of corn under different conditions

$$z_T=k(n)\sum_{j=1}^{3}\frac{z_j}{c_j}$$

4　试验验证

4.1　试验条件

为了实际验证所设计的监测装置的检测效果，2018 年 1 月 20 日在天津市里自沽农场进行了玉米收割田间试验。将传感器安装在勇猛公司研制的 4YL－8 型玉米收获机上进行田间试验，如图 12 所示，田间试验如图 13 所示。



图 12　清选损失监测装置在联合收获机上的安装位置

Fig. 12　Installation position of device in combine harvester

1. 筛箱　2. 调理电路　3. 传感器

本次试验所使用的谷物流量传感器为冲量式传



图 13 田间试验

Fig. 13 Field trial

1. 监测装置 2. 收获机杂物排出口

感器[22-23],传感器测量的最大误差为 3.02%;使用玉米作为测产对象,在匀速升运试验台架上进行标定后,传感器的最大测量误差为 5.20%。风机转速传感器为霍尔转速传感器,精度为 1/16 圈。

田间试验时,玉米品种为纪元 168,夏播无倒伏,收获时已自然干燥,平均株高 150 cm,千粒谷物质量 350 g,籽粒平均含水率 19%,玉米芯平均含水率 18%。

由于联合收获机杂物的排出口都集中在清选筛后侧,对于清选损失率准确数值的获取较为困难,需要区分清选损失、夹带损失、割台损失等。为了区分割台损失,试验时在车辆前轮后侧安装与车身等宽的一卷油布,油布随收获机行走而展开。在人工捡拾油布上的玉米籽粒时不统计由于脱粒不完全造成的籽粒损失,以区分夹带损失,即粘连在玉米芯上的玉米籽粒不作为清选损失统计。

4.2 试验方法及过程

根据国家标准[24]检测方法要求,确定了试验过程:

(1)在相邻垄收获玉米,并调节收获机工作参数到最佳工作参数。根据不同的行走速度得到收获机工作参数为:当行走速度为 1m/s 时,风机转速为 925 r/min、清选筛开度为 5 cm、谷物流量范围为 1.5 ~ 2.0 kg/s;当行走速度为 2 m/s 时,风机转速为 1 125 r/min、清选筛开度为 6 cm、谷物流量范围为 3.0 ~ 3.7 kg/s。此时行走速度传感器、谷物流量传感器和风机转速传感器工作正常,与田间计算机通信正常,数据显示和存储正常。

(2)清选损失监测装置安装在距离筛箱尾部水平距离 10 cm、下方 30 cm 的位置,安装角为 45°。并将数据通过 CAN 总线上传到田间计算机,进行数据的显示和存储。用饱和玉米籽粒击打 10 次,清选损失监测装置统计个数正常,同时田间计算机显示结果正常。

(3)以行走速度 1 m/s 进行匀速收获,收获机参数按照步骤(1)确定的参数设置。收获长度为 50 m,为避免联合收获机启动时参数的波动以及流量的不稳定所造成的损失率检测不准确的情况,选取从 20 m 处开始的 20 m 作业长度作为试验数据的对比区间。

(4)清选损失监测装置每间隔 4 s 进行一次籽粒损失个数的统计,并将统计信息反馈给田间计算机。风机转速检测装置、谷物流量传感器实时反馈相应信息,以 4 s 时间内的平均值作为计算值。

(5)油布随着收获机行走展开,清选室和脱粒滚筒所排出的杂余和损失都落在油布上,对杂余和损失每隔 4 m 作为一个统计的点进行收集,根据国家标准的要求,将夹带损失去除,对大块杂余和未成熟籽粒进行筛除,筛取出成熟籽粒,得到籽粒个数和质量,该数据作为相对准确标准使用,得到的数据如表 2 所示。

(6)将行走速度改为 2 m/s,统计时间改为间隔 2 s 做一次统计,对应人工检测每隔 4 m 作为一个统计点,同样采集 5 组数据。根据步骤(3)~(5)重新进行试验,得到的数据如表 2 所示。

4.3 试验结果及分析

实际检测清选损失率为人工捡拾所得到的损失质量占总的收获量的比值,试验时为了得到较稳定的工作参数,收获机已经作业了一段距离,粮箱中已有粮食,因此无法获得实际的收获总质量;根据式(4)所得到的清选损失率受到谷物流量检测准确度和籽粒质量的影响,由于在任何实时检测的方法中都不能避免,所以在计算相对误差时,通过计算得到的籽粒损失个数作为检测结果,并与人工检测的籽粒损失个数作为比较。相对误差计算公式为

$$e = \frac{|z_T - z_R|}{z_R} \times 100\% \tag{6}$$

式中 z_R——在测定段内,人工检测到的籽粒损失数

根据式(4)得到清选损失的籽粒个数、清选损失率,根据式(6)得到相对误差,具体数据如表 2 所示。

试验过程中受到工作环境的影响较大,机械振动、田地不平整等对占比 c_i 的影响较大,传感器的面积无法保证能够全面反映整个排出口的情况,容易造成较大的误差;传感器所检测到的损失粒数的误差来源于传感器识别误差、校正系数函数误差和占比误差。

根据表 2 得到的数据和结果可以看出,计算得到的籽粒损失数总是少于实际损失数。存在该情况的原因可能是所使用的人工检测方法将应计为夹带损失的籽粒计算进去;并且收获时籽粒含水率较小,

表 2　田间试验检测结果

Tab. 2　Results of field experiments

速度/(m·s^{-1})	检测点序号	谷物流量 q_t/(kg·s^{-1})	风机转速 n/(r·min^{-1})	人工检测损失籽粒数 z_R	人工检测损失籽粒质量/g	传感器检测籽粒损失数			籽粒损失数计算值 z_T	清选损失率计算值 N_i/%	籽粒数相对误差 e/%
						左侧	中间	右侧			
1	1	1.75	919.7	110	28.5	15	12	13	103	1.46	6.86
	2	1.80	928.0	124	50.2	13	14	14	104	1.44	16.22
	3	1.78	923.0	140	49.6	16	15	17	122	1.72	12.71
	4	1.70	930.3	120	43.5	15	12	14	104	1.52	13.71
	5	1.75	927.3	126	40.3	16	13	14	109	1.56	13.38
	平均值	1.76	925.7	124	42.4	15	13	14	106	1.51	13.92
2	1	3.38	1 125.8	133	37.9	16	19	18	116	1.63	12.51
	2	3.33	1 121.3	124	47.1	18	17	16	112	1.72	9.25
	3	3.48	1 127.8	128	34.9	18	15	15	105	1.69	17.64
	4	3.38	1 124.3	126	55.4	19	18	18	121	1.51	4.00
	5	3.38	1 122.8	137	42.1	20	18	17	121	1.79	11.49
	平均值	3.39	1 124.4	130	43.5	18	17	17	115	1.68	12.03

识别算法将部分籽粒识别为较轻的杂余，导致检测个数较实际数量少，造成了较大的误差。通过计算得到，在不同速度和不同测试点，相对误差最大值为 17.64%，平均相对误差为 12.98%。

5　结论

(1)采用压电薄膜的压电效应，在实验室条件下，模拟不同的冲击角度和高度，将籽粒和杂余的冲击信号进行记录，基于支持向量机多分类方法，使用采集到的数据集进行训练；以该数据集下训练出的结果对其他不同冲击角度和高度的试验条件下所得到的冲击信号进行测试，能够达到较好的识别效果；针对不同品种和含水率的玉米具有良好的推广性。

(2)根据风机转速和冲击传感器位置所占整个排出口冲击籽粒数的比例，进行相应比例调整，得到损失率的计算公式，田间试验时，实时采集冲击信号进行分类，识别籽粒信号，进行清选损失率计算，结果表明所使用的方法能够很好地识别籽粒冲击信号。

(3)监测所得到的清选损失籽粒数能够反映实际清选损失籽粒数，最大相对误差为 17.64%，平均相对误差为 12.98%，实现了清选损失率的实时监测，能够为联合收获机工作参数的调节提供反馈量。

参　考　文　献

1　KIRK T G. Acoustic grain flow rate monitor:4004289[P]. 1977 - 01 - 18.

2　DENNING B K, ZIEGLER D H. Grain loss monitor sensor mounting arrangement for a combine:4517792[P]. 1985 - 05 - 21.

3　DIEKHANS N, BEHNKE W. Lost-grain detector for harvesting machine:4902264[P]. 1990 - 02 - 22.

4　BERNHARDT G, HUBNER R. Apparatus and method for determining grain loss in combine harvesters:20030199291[P]. 2005 - 03 - 22.

5　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)

6　江苏大学. 谷物联合收割机清选损失检测方法与装置:102090207[P]. 2011 - 06 - 15.

7　倪军，毛罕平，张晓东，等. 谷粒清选损失检测信号的 Butterworth 高通滤波器降噪[J]. 农业机械学报，2010，41(6)：172 - 176.
NI Jun, MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, et al. Application of Butterworth filter for testing grain cleaning loss[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 172 - 176. (in Chinese)

8　倪军，毛罕平，李萍萍. 阵列式压电晶体传感器谷粒清选损失监测仪设计[J]. 农业机械学报，2010，41(8)：175 - 177.
NI Jun, MAO Hanping, LI Pingping. Design of intelligent grain cleaning losses monitor based on array piezocrystals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 175 - 177. (in Chinese)

9　魏纯，李明，余良俊，等. 基于 Kalman 滤波的联合收获机籽粒清选损失监测研究[J]. 农机化研究，2016，38(3)：23 - 27.
WEI Chun, LI Ming, YU Liangjun, et al. Research on loss monitoring of grain cleaning in combine harvester based on Kalman filter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 23 - 27. (in Chinese)

10　张恬，赵德安，周童. 图像处理在联合收割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, ZHOU Tong. Application of image processing on combine harvester attachment loss[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 70 - 72. (in Chinese)

11　南京大学. 一种基于图像处理的谷物收割清选损失实时在线检测方法:107123115[P]. 2017 - 09 - 01.

12 ALI R, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. An analytical model of constrained piezoelectric thin film sensors[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2004, 116(3): 424 – 437.
13 ALI R, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. Constrained piezoelectric thin film for sensing of subsurface cracks[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(2): 376 – 386.
14 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)
15 JB/T 5672—1991 谷物联合收割机损失监视仪[S]. 1991.
16 白鹏,张喜斌,张斌,等. 支持向量机理论及工程应用实例[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.
17 刘志刚,李德仁,秦前清,等. 支持向量机在多类分类问题中的推广[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(7): 10 – 13.
LIU Zhigang, LI Deren, QIN Qianqing, et al. An analytical overview of methods for multi-category support vector machines[J]. Computer Engineering & Applications, 2004, 40(7): 10 – 13. (in Chinese)
18 马玥,姜琦刚,孟治国,等. 基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 297 – 303. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160140&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.040.
MA Yue, JIANG Qigang, MENG Zhiguo, et al. Classification of land use in farming area based on random forest algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 297 – 303. (in Chinese)
19 周植宇,杨明,薛林继,等. 一种基于高斯核支持向量机的非结构化道路环境植被检测方法[J]. 机器人, 2015, 37(6): 702 – 707.
ZHOU Zhiyu, YANG Ming, XUE Linji, et al. Vegetation detection approach based on Gaussian kernel support vector machine in unstructured road environment[J]. Robot, 2015, 37(6): 702 – 707. (in Chinese)
20 何强. 支持向量机在嵌入式图像识别中的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2015.
21 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 纵轴流联合收获机籽粒清选损失监测数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 106 – 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150116&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.016.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Monitoring mathematical model of grain cleaning losses on longitudinal-axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 106 – 111. (in Chinese)
22 中国科学院沈阳自动化研究所. 一种谷物流量检测实验平台:106813755[P]. 2017 – 06 – 09.
23 WANG He, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Development and optimization of a novel grain flow sensor based on PVDF piezoelectric film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 141 – 150.
24 NY/T 1355—2007 玉米收获机作业质量[S]. 2007.

(上接第 19 页)

15 麦春艳, 郑立华, 孙红, 等. 基于 RGB – D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 35 – 40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2015S006&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.006.
MAI Chunyan, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location method based on RGB – D camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 35 – 40. (in Chinese)
16 JIANG Y, LI C Y, PATERSON A H. High throughput phenotyping of cotton plant height using depth images under field conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 130: 57 – 68.
17 宗泽, 郭彩玲, 张雪, 等. 基于深度相机的玉米株型参数提取方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 50 – 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2015S009&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.009.
ZONG Ze, GUO Cailing, ZHANG Xue, et al. Maize plant type parameters extraction based on depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 50 – 56. (in Chinese)
18 DIONISIO A, ANGELA R, CESAR F Q, et al. Using depth cameras to extract structural parameters to assess the growth state and yield of cauliflower crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 122: 67 – 73.
19 EHUD B, ROTEM M, OHAD B S. Colour-agnostic shape-based 3D fruit detection for crop harvesting robots[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 57 – 70.
20 叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗, 等. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1104 – 1111.
YE Feng, CHEN Canjie, LAI Yizong, et al. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 1104 – 1111. (in Chinese)