

基于 EMD 的联合收获机籽粒损失监测传感器设计与试验

杜岳峰^{1,2} 张丽榕^{1,2} 毛恩荣^{1,2} 栗晓宇^{1,2} 王皓洁^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 玉米清选损失监测受清选脱出物种类多样、环境噪声复杂等影响严重,为了解决清选损失监测精度差、效率低的问题,设计了一款基于最小能量准则 EMD(Empirical mode decomposition)去噪方法的清选损失监测传感器,实现了对采集信号中的振动、工噪和杂余等信号分离。利用 Matlab 仿真对模拟信号进行去噪,与小波去噪、低通滤波法和移动平均法 3 种去噪方法相比,基于最小能量准则 EMD 去噪方法在不同信噪比下方均方根误差(RMSE)最小,为 0.169 8,信噪比(SNR)最高,为 12.745 3,处理后的信号最接近原始信号。为验证该方法的实用性,以籽粒损失率分别为 0、5%、10%、15% 和 20% 的冲击样本开展损失率监测传感器台架试验,结果表明:该传感器最小检测误差为 1.8%,最大检测误差为 3.9%,对比小波去噪、低通滤波法和移动平均法 3 种去噪方法所得试验数据,最小能量准则 EMD 去噪方法的平均误差分别减小了 2.12、4.40、6.52 个百分点,与仿真试验结果一致。该研究对于提高玉米清选损失率检测精度特别是信号处理过程中去噪方法的研究具有重要意义。

关键词: 清选损失; 传感器; 最小能量准则; 经验模态分解; 玉米联合收获机

中图分类号: S225.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0158-08

Design and Experiment of Corn Combine Harvester Grain Loss Monitoring Sensor Based on EMD

DU Yuefeng^{1,2} ZHANG Lirong^{1,2} MAO Enrong^{1,2} LI Xiaoyu^{1,2} WANG Haojie^{1,2}

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

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The current corn cleaning loss monitoring sensors are affected by various problems such as the variety of cleaning products and the complex environmental noise, and the monitoring accuracy is difficult to meet the actual needs. In order to solve this problem, a clearing loss monitoring sensor based on PVDF piezoelectric sensitive element was designed to separate the vibration, industrial noise and stray signals in the collected signal. A minimum energy criterion based on DSP electronic signal processing was proposed. The EMD denoising method used the decomposition order corresponding to the minimum energy point of the IMF component as the signal-to-noise boundary point. The amplitude discrimination circuit identified the impact signal and calculated the loss rate. In order to verify the feasibility of this method, the signal with Gaussian white noise was simulated for denoising. Compared with wavelet denoising, low-pass filtering and moving average, the Matlab simulation results showed that the EMD denoising method based on the minimum energy criterion had the smallest root mean square error (RMSE), the highest signal-to-noise ratio (SNR), and the processed signal was the closest to the original signal. Changing the signal-to-noise ratio of the original simulation signal further verified that the results obtained by this method were always optimal. In order to verify the accuracy of the method, the corn kernels and miscellaneous mixtures with loss rates of 0, 5%, 10%, 15% and 20% were used as impact samples. Compared with the experimental data obtained by three denoising methods, wavelet denoising, low-pass filtering and moving average method, the average error of the minimum energy criterion EMD denoising method was reduced by 2.12 percentage points, 4.40 percentage points and 6.52 percentage points, respectively. The research result was of great significance for improving the detection accuracy of corn cleaning loss rate, especially the research on denoising methods in the process of signal processing.

Key words: cleaning loss; sensor; minimum energy criterion; empirical mode decomposition; corn combine harvester

0 引言

玉米联合收获机作业过程中难以避免产生籽粒损失^[1], 清选损失是衡量联合收获机性能的重要指标。同时, 通过实时监测损失率实现对风机转速、清选筛间隙等参数的调控对减损收获具有重要意义^[2-3]。

目前, 国外清选损失传感器主要应用于小麦和水稻等收获机, 与麦稻相比, 由于粉碎的玉米芯与玉米籽粒的形状和质量相近, 排出物识别相对更困难, 因此无法直接应用或借鉴稻麦损失率监测装置相关技术^[4-6]。国内对于玉米籽粒损失率监测传感器研究尚处于实验室和样机测试阶段, 并未有成熟的产品; 当前, 收获机械田间作业清选损失评价主要依靠人工, 费时费力且难以满足收获作业要求。通过对当前国内外清选损失传感器的调研可知, 在实验室条件下, 损失传感器监测误差基本在 4% 以上, 田间样机测试误差基本维持在 6% ~ 20%^[7-11], 无法满足实际使用需求。李耀明等^[12]和孙莹^[13]在对于籽粒损失传感器的研究中指出, 导致传感器误差较大的重要因素是籽粒信号易受较强的机组振动和外部环境噪声影响, 进而使饱满籽粒和杂余等碰撞信号淹没于振动和工业噪声中。目前清选损失传感器信号处理方法以滤波法为主, 其主要通过测量并计算玉米籽粒截止频率进行信号分离^[4, 14-15]。GIERZ 等^[16]提出通过窗口信号记录籽粒撞击信号, 利用高通滤波器减少周期噪声影响, 魏纯等^[17]通过 Kalman 滤波解决籽粒信号产生码间串扰问题, 另外还有 Butterworth 滤波器和 Chebyshev 滤波等^[18-19]噪声去除方法的应用; 而针对杂散因素和工噪引起的噪声问题, 聂鑫^[7]提出使用连续采样次数 $N = 4$ 的算术平均值滤波法处理采样数据, 运用主动降噪耳机原理抵消噪声的方法处理信号, 在传统信号研究思路基础上提供了一种新的信号处理方法。然而, 针对清选损失传感器测试精度的提高, 在信号降噪处理方法研究上仍有改进空间。

基于上述情况分析, 本文选用稳定性和可靠性较好的 PVDF 压电薄膜, 针对信号处理过程中出现的工噪和振动等问题, 采用基于数字信号处理 (Digital signal processing, DSP) 的经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 算法实现信号最小能量准则去噪; 针对玉米籽粒和玉米芯难以分离的问题, 根据玉米芯和玉米籽粒的频率特征值计算截止频率提取籽粒信号。通过 Matlab 仿真试验及台架试验分别与小波去噪、低通滤波法和移动平均法相对比以验证最小能量准则 EMD 去噪方法的

可行性, 为提高玉米清选损失监测精度提供技术支撑。

1 传感器系统设计

1.1 整体电路设计

电路原理如图 1 所示, 主要包括电源、信号调理、数据处理和储存单元等。电源模块为传感器电路提供电压; 信号调理包括电荷放大、DSP 和模数转换; 数据处理单元以 Arduino Mega2560 为核心芯片, 将冲击信号进行软件滤波、提取特征值并进行信号鉴幅; 采用 SD 模块储存数据, 损失率通过仪表显示。

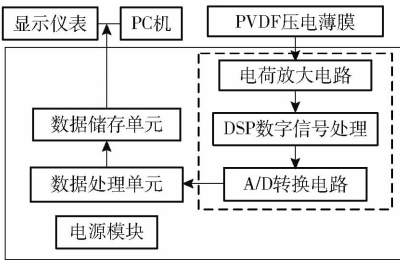


图 1 电路原理图
Fig. 1 Circuit principle diagram

1.2 传感元件选型与设计

PVDF 压电薄膜是一种柔软、质轻、高韧度的塑料薄膜, 抗冲击和抗疲劳强度能力强, 具有响应速度快、压电常数高、频带响应宽 (0 ~ 500 MHz) 等优点, 在压力传感方面已得到广泛应用^[20-22]。考虑到 PVDF 压电薄膜不能直接焊接引线, 在压电薄膜短边两侧贴合同尺寸铜胶带并分别接正负极, 将 0.15 mm 的绝缘胶带固定薄膜于承载板几何中心, 既不影响系统的弹性柔顺系数, 也可以延长高冲击工作环境下压电薄膜使用寿命, 以聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜封装 PVDF 压电薄膜, 表 1 为 PVDF 压电薄膜主要参数。

表 1 PVDF 压电薄膜参数	
Tab. 1 Parameters of PVDF piezoelectric film	
参数	数值/形式
材质	铜镍
面积 A/mm^2	120 × 50
厚度 $d/\mu\text{m}$	52
电极类型	银墨水
最大工作电压 U/V	280 (DC)、840 (AC)
工作温度 $T/^\circ\text{C}$	-40 ~ 85
最大受力 F/N	88.2 ~ 127.4 (电压输出 830 ~ 1 275 V)
电容 C/nF	1.36
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.8
压电常数 M	33

1.3 阻尼减振设计

联合收获机工作振动部件较多, 需对传感器做

隔离振动设计^[23]。在作业过程中,玉米籽粒不同侧边撞击压电薄膜会引起由接触面大小不同而造成的波形差异。根据振动原理,隔振器的固有振动频率应小于工作最小激振频率的 70.7%^[24]。试验测得联合收获机的激振频率一般为 15~60 Hz,振动噪声频率一般为 60~280 Hz。阻尼粘弹材料的工作温度需大于收获机工作温度 4~20℃。选用兼具粘性和伸缩性的橡胶作为减振材料,安装于基板和薄膜之间,其弯曲刚度低且具备较高的固有衰减能力,有利于衰减内部结构振动,同时隔离振动和噪声。

为了使阻尼粘弹材料达到较好的效果,必须满足以下要求^[25]:①损耗因子的峰值温度与传感器工作温度一致。②损耗因子 $H > 0.7$ 的范围要广。③不易老化,有良好的工艺性能。根据以上要求选用 ZN-1 阻尼橡胶,其主要性能参数如表 2 所示。

表 2 ZN-1 阻尼橡胶性能参数

Tab.2 Performance parameters of ZN-1 damping rubber

参数	数值
固有频率 w/Hz	7~9
阻尼比 k	0.07
$H > 0.7$ 温度 $T_1/^\circ\text{C}$	-16~50
最大阻尼损耗因子 m	1.4~1.5
阻尼峰值温度 $T_2/^\circ\text{C}$	13

承载板对于减振设计也必不可少。其一方面可以保护减振材料,保证敏感材料牢固固定,同时可防止阻尼材料长期暴露导致的老化。承载板材料要求具有一定的硬度,可抵抗疲劳变形,同时具有一定的韧性^[26-27],表 3 为常用材料板性能对比。

表 3 常用的材料板性能对比

Tab.3 Performance comparison of commonly used material plates

材料	硬度/HB	韧度/($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
不锈钢 304	180~200	70~90
铝板 6063	90~100	10~20
铜板 C2680	145~190	15~40

由表 3 可看出,不锈钢 304 兼具硬度高、韧性好的优势,因此选择不锈钢 304 设计承载板。对传感器组成元件封装,其侧视图和俯视图如图 2 所示,传感器样机如图 3、4 所示。

2 损失率检测方法

2.1 数字电压信号处理方案设计

传统监测谷物损失率的基本思路为:电信号经过放大电路、滤波电路和鉴幅电路处理后,将结果传送到二次仪表显示^[7,12-13],这种信号处理方法去噪效果并不理想,导致后续信号脉冲计数容易产生误

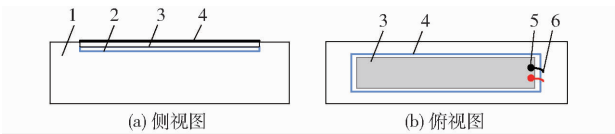


图 2 传感元件封装侧视图和俯视图

Fig.2 Side view and top view of sensor element package

- 1.敏感板 2.橡胶层 3.传感元件 4.绝缘胶带 5.铜片
6.导线

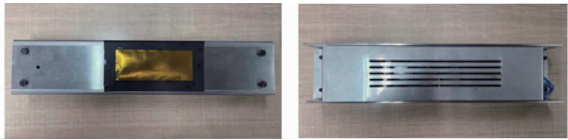


图 3 传感器信号发送端

Fig.3 Sensor signal sender



图 4 PC 机接收端

Fig.4 PC receiver

差。为有效去除采集信号中包含的工噪和其他噪声信号,提高信号提取的准确性,本文使用 DSP 数字信号处理器模块调理信号,通过数字信号处理实现基于最小能量准则 EMD 去噪算法^[28]。采集信号经过电荷放大电路、信号调理电路和鉴幅电路并显示于二次仪表,处理流程如图 5 所示。

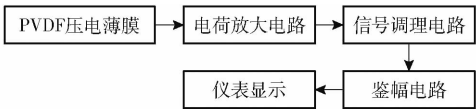


图 5 信号处理流程

Fig.5 Signal processing flow chart

随机选取玉米籽粒、玉米芯和玉米茎秆进行多次试验,测得不同的成分对应电压峰值范围有所不同,试验发现玉米籽粒冲击电压信号峰值范围为 6.4~9.5 V,采集信号如图 6 所示,其他冲击物如玉米芯的电压峰值范围为 7.0~12.8 V,茎秆的电压峰值范围为 1.5~3 V,苞叶几乎不会引起大幅度波动,电压峰值范围为 0~0.5 V,这说明该传感器对采集信号设置阈值电压可以准确地分离出茎秆和苞叶信号,玉米籽粒和杂余信号因其峰值电压波动范围高度相似而难以直接分离。为此,将籽粒和杂余冲击信号进行 FFT 变换,得到当玉米籽粒的带通滤波频率为 12~17 kHz 时,可分离玉米籽粒信号和玉米芯信号,从而通过计算脉冲计数计算玉米损失率。

2.2 基于最小能量准则 EMD 去噪算法

谷物冲击信号为

$$Q = Q_1 + V + R \tag{1}$$

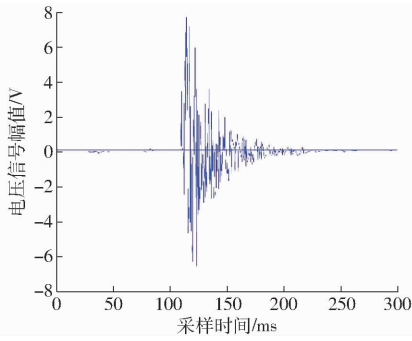


图 6 玉米籽粒碰撞信号波形图

Fig. 6 Waveform of corn grain collision signal

式中 Q ——冲击信号测量值
 Q_1 ——冲击信号真值
 V ——机械振动噪声
 R ——随机噪声

机械振动可以通过添加阻尼材料等减振结构设计而得到有效控制,因此主要对随机噪声进行去除。随机噪声包括传感器内部噪声和环境干扰噪声,内部噪声主要为压电薄膜自身漂移噪声,试验发现:每次试验测量的启动常值漂移量并不相同,且同一工作过程中常值漂移量也是变化的。环境噪声干扰主要是由温度和磁场的变化导致的,传感器模型的合理描述应采用高斯分布,假设传感器测量过程中的随机噪声为高斯白噪声,此时传感器的测量模型满足高斯分布,符合传感器的工作实况。因此,对添加高斯白噪声的模拟信号进行分析。去噪的主要工作是判断信噪分界点。

EMD 信号处理方法可以使信号平稳化,自适应地将信号分解为不同频率的变化趋势,形成一系列具有不同特征的数据序列,分解的每个序列即本征模式函数(IMF),直接从信号中提取的 IMF 是反映原始信号的分量^[28]。对于原始信号 $y(t)$,EMD 分解后结果为

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \text{IMF}_i + r_N \quad (2)$$

式中 $y(t)$ ——原始信号

IMF_i ——第 i 个 IMF 函数

r_N ——原函数 IMF 分解后的余项

高斯白噪声由 EMD 分解产生的 IMF 分量除了第 1 阶外,其余功率谱密度基本相同,表达式为

$$S_k(f) = S_{k'}(f') \quad (k > k' \geq 2) \quad (3)$$

式中 k ——分解阶数

$S_k(f)$ ——第 k 阶 IMF 分量功率谱密度

$S_{k'}(f')$ ——第 k' 阶 IMF 分量功率谱密度

同时各 IMF 分量的极值点数随分解阶数的增加递减,即

$$p(k) \propto \beta^{-k} \quad (4)$$

式中 β ——参数,取 2

$p(k)$ ——极值点数

零点数反映的是每阶 IMF 分量平均频率,IMF 分量之间的频率关系为

$$f' = \beta^{k-k'} f \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),结果为

$$S_k(f) = S_{k'}(\beta^{k-k'} f) df \quad (6)$$

根据功率谱密度性质,推导 IMF 分量方差间关系为

$$\delta_k^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_k(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} S_{k'}(\beta^{k-k'} f) df =$$

$$\beta^{k-k'} \int_{-\infty}^{\infty} S_{k'}(\beta^{k-k'} f) d(\beta^{k-k'} f) =$$

$$\beta^{k-k'} \int_{-\infty}^{\infty} S_{k'}(f') df' = \beta^{k-k'} \delta_{k'}^2 \quad (7)$$

信号为能量信号时,IMF 能量之间的关系为

$$E_k = \beta^{k-k'} E_{k'} \quad (8)$$

式中 $E(k)$ ——第 k 阶 IMF 分量能量

$E(k')$ ——第 k' 阶 IMF 分量能量

式(7)表示的是噪声方差,即噪声水平,噪声水平随着高斯白噪声分解逐渐减小。当信号为能量信号时,式(8)表示白噪声能量随着分解阶数增大而递减,在含噪声的信号中噪声频段较高,有效信号会打破递减规律,反映为能量最小点,在该阶数点之后,信号代替噪声成为每一阶模态的能量主导,该点作为信噪分界点,这种信噪分离法称为最小能量准则^[29]。

将原始信号 $y(t)$ 进行 EMD 分解,残余分量作为最后一阶 IMF 分量,得到一系列分量 $c_1(t)$, $c_2(t), \dots, c_n(t)$, 即

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (9)$$

假设各 IMF 分量对应能量分别为 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 。最小能量准则即 IMF 能量最小点所对应的分解阶数 d 即信噪分界点,信噪的判断准则为

$$d = \arg \min(E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (1 < d < n) \quad (10)$$

去噪后信号为

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=d+1}^n c_i(t) \quad (11)$$

2.3 去噪算法和仿真试验

判断两个相邻 IMF 分量的能量差,当 $\Delta E > 0$, 表明 IMF 分量中噪声占主导地位, $\Delta E < 0$ 表明有用信号占主导地位,EMD 分解停止标准为

$$d = \arg \text{firstnegative}[E_i - E_{i+1}] \quad (12)$$

式中 $\arg \text{firstnegative}$ ——第一次能量差小于零的判断函数

当 $\Delta E > 0$ 首次出现,EMD 分解停止,记信噪分界点为 $d = i$,记去噪后信号为 $\hat{y}(t) = c_{d+1}(t) +$

$y(t)$,其中, $y(t)$ 为不包含前 $i + 1$ 个 IMF 分量的信号。

用添加高斯白噪声的干扰信号对本算法仿真去噪,并与其他信号去噪方法的降噪效果对比。仿真信号设定为

$$z(t) = \sin(2\pi t/100) + (2\pi t/200)\sin(2\pi t/50) + n(t)$$

(13)

式中 $n(t)$ ——高斯白噪声

设定信号噪声水平 $\delta^2 = 1$,采样间隔 0.1 s,采样区间为[0,500],仿真信号如图 7 所示。

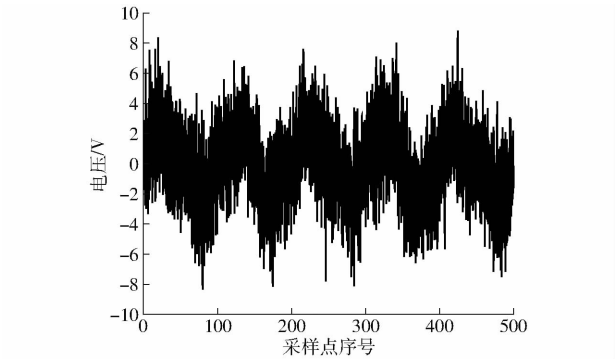


图 7 仿真试验信号

Fig. 7 Simulation experiment signal

对仿真信号进行 EMD 经验模态分解,分解后 IMF 分量如图 8 所示,计算每阶 IMF 分量能量,如图 9 所示,可以看出,经过 EMD 分解后信号 IMF 分量能量从第 1 阶到第 5 阶 IMF 分量能量递减,第 6 阶开始突然上升,然后减小,根据最小能量准则,信号中噪声去除选择第 5 阶作为分界点 d ,保留的第 6 阶之后的信号为去噪后的仿真信号,仿真结果另外通过方差进行验证,计算前 5 阶 IMF 信号方差和为 1.008 3,与仿真信号的噪声水平 $\delta^2 = 1$ 一致,验证了该算法准确性。

使用小波去噪(小波基函数为 SVM6,分解层数为 6 层)、低通滤波法和移动平均法分别对仿真信号去噪,采用均方根误差(RMSE)和信噪比(SNR)指标对方法进行评估。信噪比越高,均方根误差越小,去噪信号对原始信号的还原程度越高,去噪效果越好。去噪效果的评价指标如表 4 所示。可以看出,基于最小能量准则 EMD 去噪方法最大程度还原了信号,在保持信号波动趋势和平滑性方面有很好的效果。

试验过程中产生的机械噪声和随机噪声的特性不同,联合收获机的激振频率一般为 15 ~ 60 Hz,振动噪声频率一般为 60 ~ 280 Hz。不同来源的试验噪声是同时产生的,难以在试验中进行人为干预分离,因此在仿真过程中设置不同的噪声水平,模拟实际工况中产生的不同噪声并进行信噪分离。

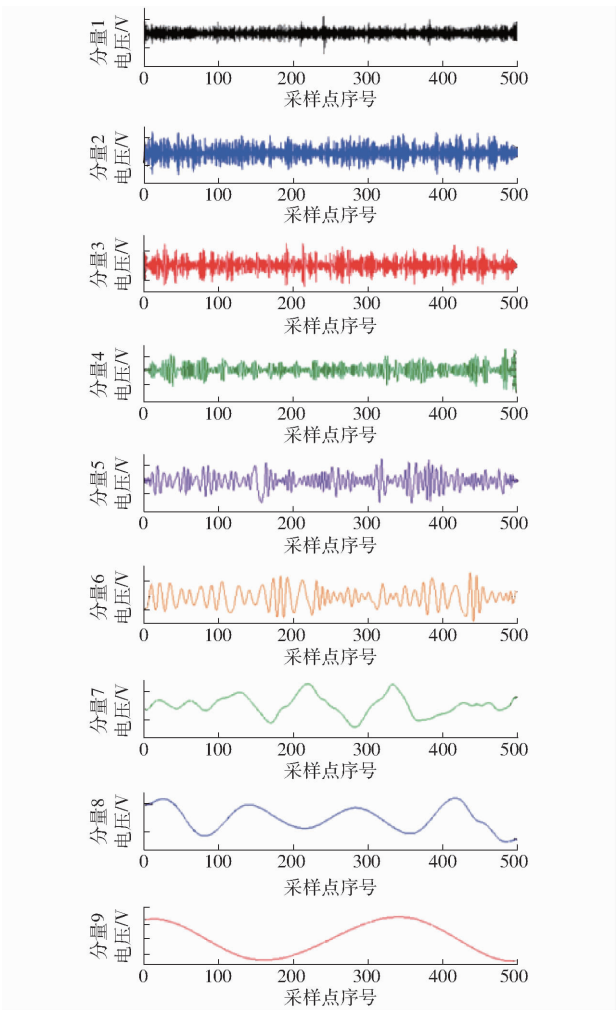


图 8 仿真信号 EMD 经验模态分解

Fig. 8 EMD empirical mode decomposition of simulation signal

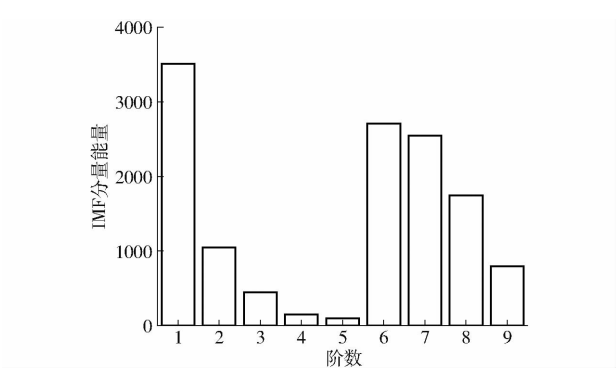


图 9 每阶 IMF 能量

Fig. 9 IMF energy per order

表 4 去噪算法性能比较

Tab. 4 Performance comparison of denoising algorithms

指标	最小能量准则 EMD 去噪	小波去噪	低通滤波 法	移动平均 法
SNR	12. 745 3	11. 794 6	6. 756 4	6. 563 5
RMSE	0. 169 8	0. 243 8	0. 376 5	0. 502 1

为验证不同噪声水平下各方法的去噪效果,将噪声水平设置为 $\delta^2 = 1, 2, 3, 4, 5$,采用 4 种算法处理

信号,每种方法的信噪比和均方根误差结果如图 10、11 所示。

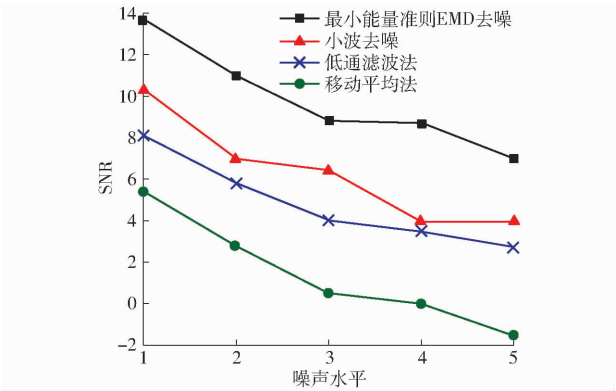


图 10 不同噪声水平下各种方法的 SNR

Fig. 10 SAR of various methods at different noise levels

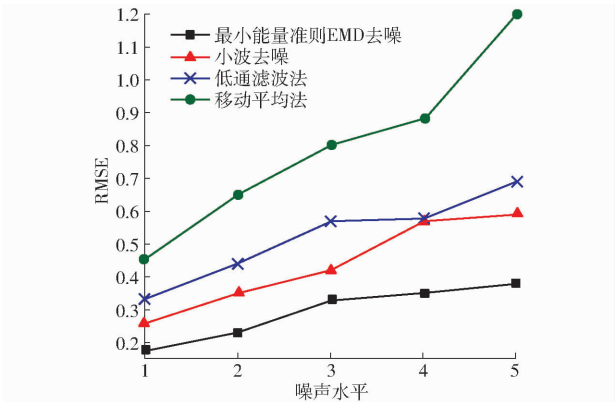


图 11 不同噪声水平下各种方法的 RMSE

Fig. 11 RMSE of various methods at different noise levels

由图 10 可发现,随着噪声水平增大,各方法信噪比均减小;由图 11 可看出,随着噪声水平增大,均方根误差均增加。但最小能量准则 EMD 去噪方法的效果保持最优,说明本方法具有较强的适应性。

3 损失率检测台架试验

3.1 试验条件

为了验证最小能量准则 EMD 去噪方法在实际损失率监测过程中的正确性和实用性,搭建了清选损失测试试验台。试验条件为:室温(20℃),一个标准大气压,相对湿度小于 85%。将传感器几何中心安装在与台架水平距离 10 cm、下方距离 40 cm 的位置,倾斜角度 20°~35°,风机转速 4 m/s。试验台设计如图 12 所示,通过风机转速控制物料下落速度,传送带传送物料,样本经物料输出口落下,根据排出物料位置调整排口和传感器的水平距离,保证物料落在传感器的几何中心。

根据 GB/T 21962—2020《玉米收获机械》:玉米含水率在 15%~25% 之间,破碎率 5% 以下满足收获条件。采用玉米品种为纪元 168,籽粒含水率 16%,玉米芯含水率 26%。试验样本为玉米芯、秸

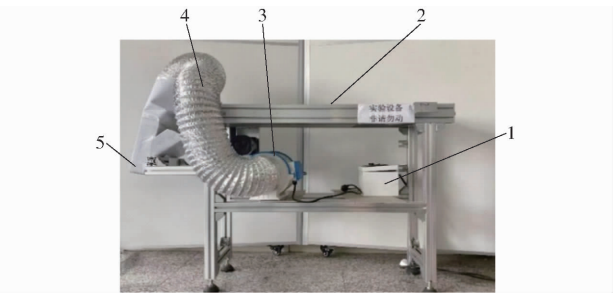


图 12 试验台

Fig. 12 Test bench

1. 电源 2. 物料传送带 3. 风机 4. 风筒 5. 物料排出口

秆、玉米籽粒以及少数苞叶组成的混合物。图 13 为样本分类和物料传送。



图 13 样本分类和物料传送

Fig. 13 Sample classification and material transfer

3.2 台架试验

试验基于已知损失率样本进行检测。由于不同噪声的激振频率范围不同,同一噪声的激振频率基本固定,且单个采集信号包含了不同噪声水平的成分,无需以噪声为变量进行试验。玉米籽粒、杂余和茎秆等总数为 500,改变玉米籽粒和杂余数量控制损失率。以损失率为 0、5%、10%、15% 和 20% 的玉米籽粒为样本进行检测,每组样本进行 25 次冲击试验,共计 125 组试验数据,取每组试验数据平均值,试验结果如表 5 所示。

表 5 最小能量准则 EDM 去噪方法损失率检测结果

Tab. 5 Loss rate detection results of EDM denoising method based on minimum energy criterion

试验 序号	籽粒 数量 g	杂余 数量 l	实际损失 率 L/%	识别籽 粒数量 c	传感器计算 损失率 L'/%	误差/ %
1	0	500	0	11	2.2	2.2
2	25	475	5	34	6.8	1.8
3	50	450	10	63.5	12.7	2.7
4	75	425	15	59.5	11.9	-3.1
5	100	400	20	80.5	16.1	-3.9

由表 5 可以看出,去噪算法检测的损失率试验误差在 1.8%~3.9% 之间,当试验损失率为 0 时,部分玉米芯撞击产生信号接近玉米籽粒,造成传感器多计数,使 $L' > L$,记多计数数量为 δ_1 ;本试验中,当 $L = 5\%$ 时,损失率检测误差最小;随着损失率增加,损失率误差开始增加,此时检测损失率 L' 高于实际损失率 L ;当 L 增大到一定值, L' 低于 L ,这是因为 δ_1 随损失率变化波动不大,而随着损失率增

加,同一时间冲击传感器籽粒增多,未能识别出的籽粒数量增加,记漏计数量为 δ_2 ,当 $\delta_2 > \delta_1$,此时未计数数量大于误识别的籽粒数,从而使测量损失率 L' 小于真实值,在本试验数据中表现为 $L = 15\%$ 。

采用小波去噪、低通滤波法和移动平均法3种去噪方法进行相同条件下试验,每种方法得到25组有效试验数据,试验结果如表6所示,4种去噪方法结果误差对比如表7所示。

表 6 不同去噪方法损失率检测结果

denoising methods						
试验 序号	籽粒 数量 g	杂余 数量 l	实际 损失率 $L/\%$	小波去噪 损失率 $L'_1/\%$	低通滤波 法损失率 $L'_2/\%$	移动平均 法损失率 $L'_3/\%$
1	0	500	0	3.7	5.3	7.2
2	25	475	5	8.3	13.4	15.1
3	50	450	10	14.2	15.7	19.7
4	75	425	15	9.6	7.4	6.3
5	100	400	20	12.8	11.3	9.4

表 7 不同方法的损失率误差

Tab.7 Loss rate error of different methods %						
去噪方法	误差					误差 均值
	1	2	3	4	5	
基于最小能量准则						
EMD 去噪方法	2.2	1.8	2.7	3.1	3.9	2.74
小波去噪	3.7	3.3	4.7	5.4	7.2	4.86
低通滤波法	5.3	8.4	5.7	7.6	8.7	7.14
移动平均法	7.2	10.1	9.7	8.7	10.6	9.26

由表6可以看出,当损失率 L 为0、5%、10%时,每种方法测得的损失率 $L'_n > L(n = 1, 2, 3)$,这是因为采用不同的噪声去除方法均存在玉米芯误识别为籽粒的情况,造成计数偏大;当损失率 L 为15%、20%时, $L'_n < L(n = 1, 2, 3)$,说明随着损失率增加,同一时间冲击传感器籽粒增多,未能识别出的籽粒数量增加,当 $\delta_2 > \delta_1$,此时未计籽粒数量大于误识别的籽粒数,从而使得测得损失率偏小,即 $L'_n > L$ 。表7表明所设计传感器在采用不同去噪方法下的检测精度变化规律基本一致,误差均值由小到大分别

为基于最小能量准则 EMD 去噪、小波去噪、低通滤波法、移动平均法。这是因为针对该试验,每种方法存在其固有缺点:小波去噪方法对于白噪声的去除效果较差;低通滤波在采集信号中难以滤除频率较低的噪声信号;移动平均法存在对每个频率段信号都有不同程度滤除的缺点,从而滤除了玉米籽粒的冲击信号,导致测量误差较大。与上述3种方法相比,基于最小能量准则 EMD 去噪方法对样本信号的适应性最好,试验所得结果最优,相比之下,其平均误差分别减小了2.12、4.40、6.52个百分点。

4 结论

(1)设计了一种基于 PVDF 压电薄膜的玉米损失率监测传感器,设计了阻尼减振结构,提出了基于最小能量准则 EMD 去噪方法,对于玉米损失率监测的采集信号具有较强的适应性,解决了信号噪声滤除不彻底的问题,提高了清选损失传感器的监测精度,为损失率监测过程噪声去除提供了新思路。

(2)通过 Matlab 软件仿真,对添加高斯白噪声的干扰信号分别采用基于最小能量准则 EMD 去噪方法、小波去噪、低通滤波法和移动平均法去噪方法进行降噪效果对比,基于最小能量准则 EMD 去噪方法 RMSE 为 0.169 8,SNR 为 12.745 3,信噪分离效果最好。设置不同噪声水平 $\delta^2 = 1, 2, 3, 4, 5$ 进行仿真去噪,基于最小能量准则 EMD 去噪方法去噪效果最优,表明所提出的基于最小能量准则 EMD 去噪方法在不同噪声水平下具有较强的适应性。

(3)设定已知损失率试验样本进行试验台检测,台架试验结果表明:基于最小能量准则 EMD 去噪方法传感器损失率最小检测误差为1.8%,最大检测误差为3.9%,平均误差为2.74%。对比小波去噪、低通滤波法、移动平均法3种去噪方法的试验结果,基于最小能量准则 EMD 去噪方法传感器检测的平均误差分别减小了2.12、4.40、6.52个百分点,与仿真结果一致。该研究可为损失率监测信号处理过程中去噪方法提供参考,符合传感器设计要求。

参 考 文 献

[1] 高利伟,许世卫,李哲敏,等. 中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究[J]. 农业工程学报,2016,32(23):1-11.
GAO Liwei, XU Shiwei, LI Zhemin, et al. Main grain crop postharvest losses and its reducing potential in China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 1-11. (in Chinese)

[2] 介战. 我国谷物随机损失率测试展望[J]. 农机化研究,2009,31(7):5-9.
JIE Zhan. Prospect of test method of grain random loss rate in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(7): 5-9. (in Chinese)

[3] 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[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 100-108. (in Chinese)

- [4] 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)
- [5] ZHAN Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 25(6): 1–6.
- [6] 李俊峰, 介战. 联合收获机谷物损失测试研究探讨[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 248–250.
LI Junfeng, JIE Zhan. Analyses of combine harvester grain loss measurement[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 248–250. (in Chinese)
- [7] 聂鑫. 稻麦联合收割机收获损失在线检测软件系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
NIE Xin. Design and implementation of online detection software system for harvesting loss of rice and wheat combine harvester[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] WELLINGTON C K, BRUNS A J, SIERRA V S, et al. Grain quality monitoring: 14583473.3[P]. 2014–12–26.
- [11] CHEN J, LIAN Y, LI Y M. Real-time grain impurity sensing for rice combine harvesters using image processing and decision-tree algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 194–199.
- [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 for the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 99–102. (in Chinese)
- [13] 孙莹. 基于 PVDF 压电薄膜的双层十字交叉型颗粒碰撞传感器的基本特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
SUN Ying. The basic characteristics of grain impact sensor utilizing two crossed PVDF films[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [14] 高建民, 张刚, 喻露, 等. 联合收割机清选损失传感器谷粒冲击信号的混沌检测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 22–27.
GAO Jianmin, ZHANG Gang, YU Lu, et al. Chaos detection of grain impact at combine cleaning loss sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 22–27. (in Chinese)
- [15] 关佳军. 基于独立分量分析的联合收割机损失谷粒信号检测[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
GUAN Jiajun. Grain loss signal detection of combine harvester based on independent component analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- [16] GIERZ U, PASZKIEWICZ B K. PVDF piezoelectric sensors for seeds counting and coulter clogging detection in sowing process monitoring[J]. Journal of Engineering, 2020, 2020: 1–7.
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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 piezo crystals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 175–177. (in Chinese)
- [20] KOWBEL W, XIA X, CHAMPION W, et al. PZT/polymer flexible composites for embedded actuator and sensor application[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3675: 32–42.
- [21] 唐忠, 李耀明, 赵湛, 等. 切纵流联合收获机小麦夹带损失检测试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 11–16.
TANG Zhong, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Test and analysis of wheat entrainment loss for tangential-longitudinal-axial combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 11–16. (in Chinese)
- [22] 丁贝贝, 吴先梅, 韩星晨, 等. PVDF 压电薄膜传感特性研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 170–173.
DING Beibei, WU Xianmei, HAN Xingchen, et al. Studies on sensing properties of PVDF piezoelectric films[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(2): 170–173. (in Chinese)
- [23] 赵玫, 周海亭, 陈光治, 等. 机械振动与噪声学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [24] 王芬娥, 曹新惠, 郭维俊, 等. 联合收获机主驾驶座振动强度及其频率结构试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 61–65.
WANG Fen'e, CAO Xinhui, GUO Weijun, et al. Research on vibration strength and frequency structure of main driver seat of the wheat combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 61–65. (in Chinese)
- [25] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 54–55.
- [26] 高建民, 张刚, 喻露, 等. 联合收割机清选损失传感器谷粒冲击信号的混沌检测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 22–27.
GAO Jianmin, ZHANG Gang, YU Lu, et al. Chaos detection of grain impact at combine cleaning loss sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 22–27. (in Chinese)
- [27] 张光跃, 金诚谦, 杨腾祥, 等. 联合收割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)
- [28] 贾玮. 基于 DSP 的 EMD 算法实现[D]. 太原: 中北大学, 2009.
JIA Wei. Implementation of EMD algorithm based on DSP[D]. Taiyuan: North University of China, 2009. (in Chinese)
- [29] 马鑫, 郝亚南. 经验模态分解去噪方法研究[J]. 科技视界, 2018(23): 72–73.