

籽粒损失监测传感器敏感板振动特性与试验*

李耀明 梁振伟 赵湛

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为实现联合收获机工作过程中籽粒清选损失的实时自动监测,运用 ANSYS 软件分别以不锈钢 304 板、T6 铝板、黄铜板作为敏感板,在不同厚度、边界条件下进行模态分析并以 YT-5L 型压电陶瓷作为敏感元件制成不同形式的籽粒损失监测传感器进行了籽粒碰撞试验,研究了敏感板振动特性与检测性能之间的关系,优选了籽粒损失监测传感器敏感板的材料及结构。设计了由电压放大器、带通滤波器电路、绝对值峰值检波放大电路、包络线检波电路、电压比较器电路和整波电路等组成的信号调制电路,以 AT89C52 单片机为核心开发测控系统,实时采集籽粒损失信号并具有报警、通讯输出功能。将研制的籽粒损失监测传感器安装在联合收获机上进行田间试验,结果表明所研制的籽粒损失监测传感器能够有效识别出饱满籽粒并实时显示清选损失率,最大测量相对误差为 2.39%。

关键词: 联合收获机 籽粒损失 传感器 振动特性 试验

中图分类号: S225.3; TH703.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0104-08

Experiment and Vibration Characteristics of Sensitive Plate on Grain Loss Monitoring Sensor

Li Yaoming Liang Zhenwei Zhao Zhan

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To monitor grain cleaning loss of combine harvester automatically and real-timely during the working process, a grain loss monitoring sensor was developed. Modal analysis was carried out under the conditions of different thicknesses and different boundaries by using ANSYS software with 304 stainless steel plate, T6 aluminum, brass plate as sensitive plates. Grain collision tests were carried out to study the relationship between the sensitive plate vibration characteristics and detecting performance by using YT-5L piezoelectric ceramic as sensitive element. Material and structure of the sensitive plate was selected. A signal process circuit which composed of voltage amplifier, band-pass filter, precision full-wave rectification and envelope detector and a control instrument which used AT89C52 microcontroller as the core chip were developed to measure the grain impact signal. The control instrument also had the alarm and communication functions. Field experimental results showed that the instrument could discriminate grain impact signal from strong interference effectively, and the grain cleaning loss ratio could be real-timely displayed, the maximum monitoring error was 2.39%.

Key words: Combine harvester Grain loss Sensor Vibration characteristics Experiment

引言

籽粒损失率是衡量联合收获机性能的重要技术

指标,也是联合收获机实现负荷反馈控制的重要技术参数^[1]。国外先进的联合收获机,如美国 John Deere 公司生产的 JD9660STS 型联合收获机、Case

收稿日期:2013-01-29 修回日期:2013-02-28

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A502)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012382、BE2012312)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8 号)

作者简介:李耀明,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设计及理论研究,E-mail: ymli@ujs.edu.cn

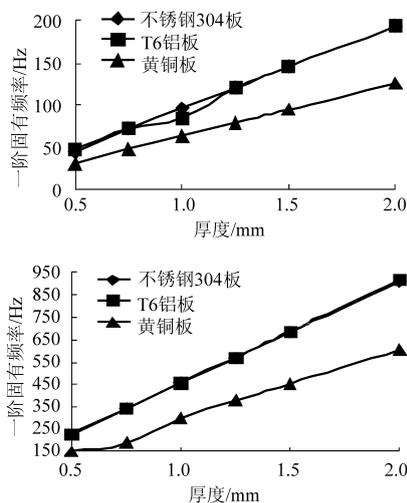
公司生产的 Case2366IH 型联合收获机等均已配备了籽粒损失监测传感器。国外研制的籽粒损失监测传感器对小麦籽粒适应性较好,监测精度较高,但对水稻籽粒的适应性较差^[2-8]。近年来,国内学者也开展籽粒损失自动监测方面的研究,介战等总结了国内外联合收获机籽粒损失测试的发展和现状,提出了将虚拟仪器技术应用于籽粒损失监测的设想^[9];周利明等为提高籽粒损失监测传感器的检测频率设计了阵列式聚偏氟乙烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)传感器^[10]。国内对籽粒损失监测传感器研究重点主要集中在籽粒损失测试方法上^[11-12],对籽粒损失监测传感器结构研究较少,研制的籽粒损失监测传感器大多处于实验室阶段,存在检测频率低、振动干扰大、测量误差高等问题,成型产品少,国产联合收获机上仍未配备相关的籽粒损失监测装置。

本文运用 ANSYS 11.0 软件对不同结构形式的敏感板进行模态分析和单籽粒碰撞试验,探讨敏感板振动特性与籽粒损失监测传感器性能的关系,以期提高籽粒损失监测传感器检测性能,减小测量误差;以 YT-5L 型压电陶瓷为敏感元件,根据联合收获机脱出物各成分碰撞敏感板所产生信号的特性开发信号调制电路,把籽粒碰撞信号从强背景中识别出并送入以 AT89C52 单片机为核心的测控系统中;将研制的籽粒损失监测传感器安装在联合收获机上进行田间试验以检验其适应田间复杂工况的能力。

1 敏感板结构参数

1.1 敏感板振动特性分析

籽粒碰撞敏感板产生信号的电压幅值及信号衰



减时间是衡量籽粒损失监测传感器性能的 2 个重要指标。2 个指标都与敏感板的振动特性密切相关,即敏感板一阶固有频率越高,瞬态响应分量衰减越迅速,籽粒损失监测传感器检测频率越高;相对变形率越大,压电元件变形量越大,籽粒损失监测传感器的灵敏度越高。根据泊松-克希霍(Passion-Kirchhoff)平板理论的小挠度薄板理论,籽粒碰撞敏感板的振动满足薄板横向振动方程

$$\rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + D \nabla^2 \nabla^2 \omega(x, y, t) = F(x, y, t) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

式中 ∇^2 ——拉普拉斯算子

ω ——振型函数 μ ——泊松比

E ——弹性模量, GPa

ρ ——薄板密度, kg/m³

h ——薄板厚度, mm

a ——薄板长度, mm

b ——薄板宽度, mm

D ——抗弯刚度, N/m

F ——激励力, N

由式(1)及相关振动理论可知,不同材料、厚度、边界条件敏感板的振动特性不同。分别选用不锈钢 304 板、T6 铝板、黄铜板作为敏感板,取敏感板长度为 180 mm、宽度为 120 mm,在厚度为 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、2.00 mm 及边界条件为四角固定、四边固定的情况下,运用 ANSYS 11.0 软件对不同结构形式的敏感板选用 Shell 63 板壳单元作为单元类型进行模态分析,各种材料敏感板一阶固有频率和相对变形率随厚度的变化曲线,如图 1 所示。各材料敏感板的力学特性如表 1 所示。

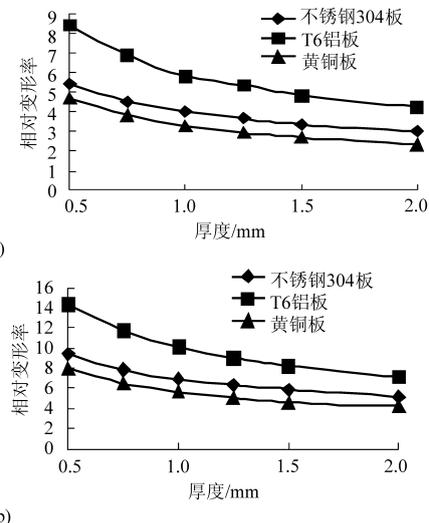


图 1 不同边界条件下,各材料敏感板一阶固有频率和相对变形率随厚度的变化曲线

Fig. 1 Effect of boundary condition, materials and thickness on first natural frequency and relative deformation ratio

(a) 四角固定 (b) 四边固定

表1 敏感板材料特性参数

Tab.1 Property parameter of sensitive plate materials

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
不锈钢 304 板	210	0.30	7 850
T6 铝板	68	0.33	2 700
黄铜板	93	0.37	8 800

从图1可以看出,①在敏感板厚度及边界条件相同的情况下,黄铜板的一阶固有频率最小,不锈钢304板和T6铝板的一阶固有频率近似相等;相对变形率由小到大依次为黄铜板、不锈钢304板和T6铝板。②在敏感板的材料及边界条件相同时,随着敏感板厚度的增加,一阶固有频率单调增加,一阶变形率总体下降;敏感板厚度大于1.5 mm时一阶变形率有逐步稳定在一恒定值附近的趋势。③在敏感板厚度及材料相同的情况下,边界条件对敏感板的一阶固有频率和相对变形率影响较大,敏感板四边固定明显大于四角固定时的一阶固有频率和相对变形率。

综合考虑籽粒损失监测传感器的检测频率和整体灵敏度,当敏感板材料选不锈钢304板或T6铝板、厚度1.0~1.5 mm、边界条件四边固定时,敏感板的一阶固有频率和一阶变形率都相对较大,是籽粒损失监测传感器敏感板合适的结构参数。

1.2 单籽粒碰撞试验与结果分析

为验证模态分析的结果,以YT-5L型压电陶瓷为敏感元件,把厚度为1 mm的3种材料敏感板制成不同形式的籽粒损失监测传感器进行单籽粒碰

撞试验。试验过程中将同一颗质量为25.47 mg的水稻籽粒从距离敏感板350 mm处自由落下碰撞籽粒损失监测传感器敏感板,采用示波器记录经电压放大处理后的信号,采样频率100 kHz。测量点在敏感板上的分布如图2所示。敏感板平放在试验台上,籽粒碰撞3种材料敏感板时的输出电压信号波形图,如图3所示。

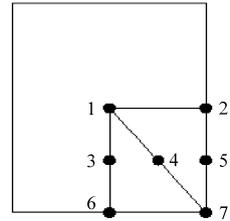


图2 测量点在敏感板表面上的分布

Fig.2 Distribution of measuring points on sensitive plate

从图3并结合图1可以看出,在敏感板厚度1 mm,边界条件为四角固定时,不锈钢304板和T6铝板的一阶固有频率相差不大,信号衰减时间相差不大;黄铜板的一阶固有频率最小,信号衰减时间明显加长。相对变形率由大到小依次为T6铝板、不锈钢304板、黄铜板;信号电压幅值由大到小依次为T6铝板、不锈钢304板、黄铜板;当边界条件为四边固定时,各材料敏感板一阶固有频率和相对变形率增加,信号衰减时间明显缩短,电压信号幅值有所增加。一阶固有频率是影响信号衰减的主要因素,而相对变形率是影响信号电压幅值的主要因素。

为进一步验证上述结论,对不同结构形式的敏

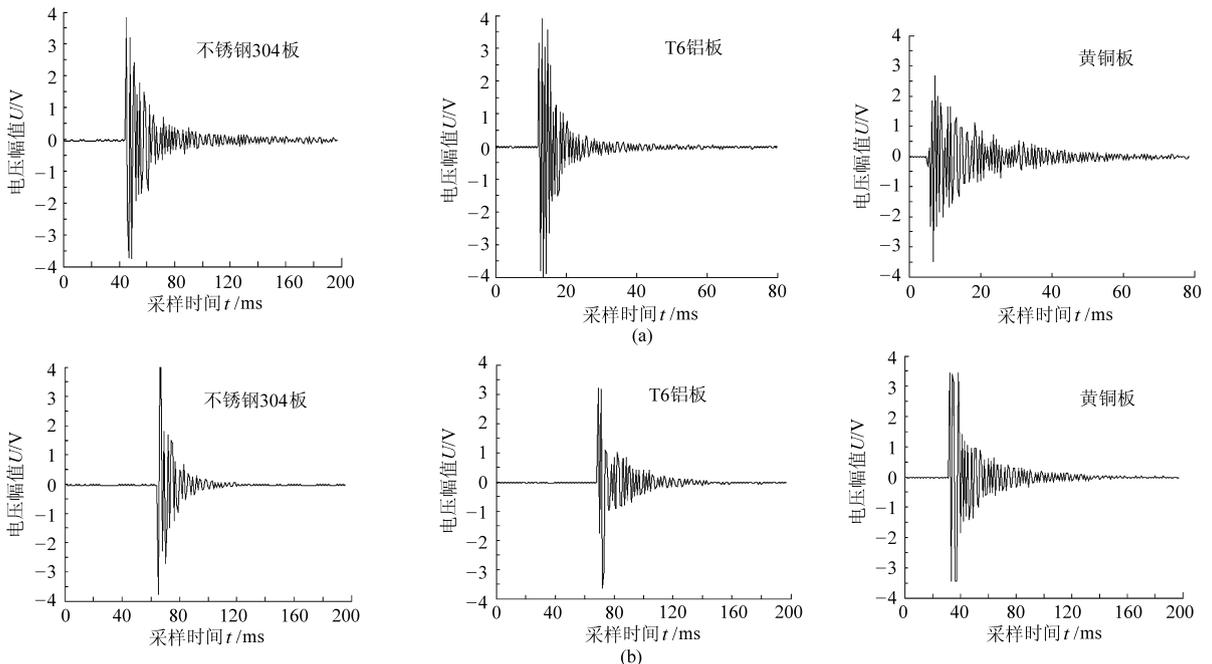


图3 籽粒碰撞不同边界条件、不同材料、厚度1.00 mm敏感板时电压信号波形图

Fig.3 Grain collision signal waveform diagram on different boundary conditions when sensitive plate thickness is 1.00 mm

(a) 四角固定 (b) 四边固定

感板进行籽粒碰撞试验,每个测量点下进行 10 次,统计得到各种结构形式敏感板的输出电压信号幅值 U 与信号衰减至 1.5 V 时所用时间 t 。试验发现,籽粒碰撞敏感板不同位置时输出电压信号幅值 U 与信号衰减至 1.5 V 时所用时间 t 均有差异。具体表现在:籽粒碰撞位置靠近敏感板中心点 1 时电压信

号幅值 U 较大、但信号衰减至 1.5 V 时所用时间 t 较长;籽粒碰撞敏感板边缘位置的测量点 2、5、6、7 时,电压信号幅值 U 较小、而信号衰减至 1.5 V 时所用时间 t 较短,籽粒碰撞同一块敏感板产生信号的特征值分布在一定范围内,试验结果如表 2、3 所示。

表 2 敏感板四角固定时信号电压幅值与衰减时间

Tab.2 Amplitude and attenuation time of impact signal when four corners of sensitive plate fixed

敏感板 厚度/mm	不锈钢 304 板		T6 铝板		黄铜板	
	电压幅值/V	衰减时间/ms	电压幅值/V	衰减时间/ms	电压幅值/V	衰减时间/ms
0.50	3.64~4.00	18.6~22.8				
0.75	3.52~4.00	14.2~16.8				
1.00	2.92~4.00	12.6~15.2	3.12~4.00	10.4~12.2	1.64~3.20	15.4~17.2
1.25	1.78~3.46	10.4~12.2				
1.50	1.22~2.04	7.8~9.2	1.44~1.92	5.6~7.2		
2.00	0.86~0.98	4.2~5.8	0.92~2.04	4.4~6.2	1.04~1.68	7.2~10.4

表 3 敏感板四边固定时信号电压幅值与衰减时间

Tab.3 Amplitude and attenuation time of impact signal when four sides of sensitive plate fixed

敏感板 厚度/mm	不锈钢 304 板		T6 铝板		黄铜板	
	电压幅值/V	衰减时间/ms	电压幅值/V	衰减时间/ms	电压幅值/V	衰减时间/ms
0.50	3.72~4.00	11.2~15.4				
0.75	3.44~3.84	8.2~10.8				
1.00	3.32~4.00	6.0~8.8	2.54~4.00	3.2~5.4	1.52~3.60	10.4~13.2
1.25	2.24~3.72	4.4~5.8				
1.50	1.42~2.38	3.0~5.2	1.64~2.42	3.0~4.4		
2.00	1.06~1.74	3.2~4.8	1.02~1.94	3.2~4.8	0.84~2.04	3.2~4.8

从表 2、3 并结合图 1 可以看出:①在敏感板材料及边界条件相同的情况下,随着敏感板厚度增加,相对变形率逐渐降低,籽粒碰撞敏感板产生的电压信号的电压幅值也不断减小;敏感板材料选用厚度为 0.5~1.0 mm 不锈钢 304 板时,碰撞信号的电压幅值相差不大,一般都在 3.0 V 以上;随着敏感板厚度增加一阶固有频率单调增加,籽粒碰撞敏感板产生的电压信号波形衰减至 1.5 V 时所用时间不断减小。②在敏感板厚度及边界条件相同的情况下,敏感板的一阶固有频率由大到小依次为不锈钢 304 板、T6 铝板、黄铜板;籽粒碰撞不锈钢 304 板、T6 铝板、黄铜板产生的电压信号衰减至 1.5 V 时所用时间依次增大;籽粒碰撞不锈钢 304 板、T6 铝板产生信号的电压幅值相差不大;当各敏感材料厚度为 1.00、1.50 mm 时,黄铜板的相对变形率最小,籽粒碰撞黄铜板的信号电压幅值也最小。③在敏感板材料及厚度相同的情况下,敏感板的边界条件为四边固定时,一阶固有频率和相对变形率都相对较高,籽粒碰撞敏感板信号的电压幅值较大;四边固定时信号衰减时间比四角固定时信号衰减时间明显减小。

籽粒碰撞信号情况进一步验证了一阶固有频率

是影响信号衰减的主要因素,而相对变形率是影响信号电压幅值的主要因素。综合考虑信号电压幅值、衰减时间及敏感板的易加工性、经济性等因素,敏感板采用不锈钢 304 板,厚度为 1.00 mm,边界条件四边固定是籽粒损失监测传感器理想的结构形式,此时信号衰减时间为 6.0~8.8 ms,电压幅值为 3.32~4.0 V,能够保证传感器的检测频率且整体灵敏度较高。

2 传感器电路设计

压电陶瓷的频率响应范围较高(0~20 kHz),具有对应微小变化的高灵敏性且成本较低^[13-14]。以 YT-5L 型压电陶瓷为敏感元件,脱出混合物和机器振动冲击敏感板产生的电信号输入到由电压放大器、滤波器电路、绝对值峰值检波放大电路、包络线检波电路、电压比较器电路和整波电路等组成的信号调制电路后,只保留籽粒碰撞信号并调制成标准脉冲信号,然后通过外部中断口送入以 STC89C52 单片机为核心的测控系统中,单片机根据内置的清选损失率程序模型算出当前的损失率并送 LCD 显示,电压比较器的阈值电压可根据不同作物特性进行调节。

系统还具有报警、通讯输出等功能,模拟信号处理电路如图 4 所示。

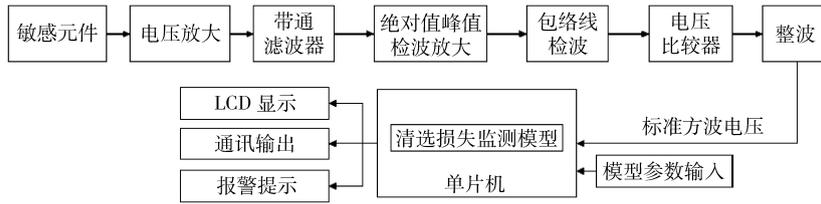


图 4 模拟信号处理电路

Fig. 4 Analog signal processing circuit

2.1 电压放大器

鉴于籽粒碰撞信号非常微弱,需要设计良好的低噪声宽带前置放大电路对微弱信号进行放大,以驱动后一级电路工作。本文与压电陶瓷配套的测量电路的前置放大器采用电压放大器^[15]。

压电陶瓷的电荷等效电路接到 AD620an 型放大器 A1 中,电压放大器的简化电路如图 5 所示。其中等效电阻 R 为压电陶瓷的漏电阻 R_a 与输入电阻 R_i 的并联电阻;等效电容 $C = C_a + C_i + C_c$,其中 C_a 为以压电陶瓷为电介质的电容器的电容量, C_i 为输入电容, C_c 为连接电缆电容。假设籽粒碰撞力 $F = F_m \sin \omega t$ 作用于压电陶瓷上,则压电陶瓷表面所产生的电荷及电压均按正弦规律变化,即 $q = d_{33} F$ 而 $i = dq/dt$,从而得到电压幅值为

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (2)$$

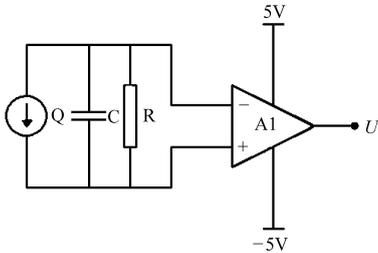


图 5 电压放大器简化电路图

Fig. 5 Simplified diagram of voltage amplifier circuit

当 R 为无限大时,输入到放大器 A1 中的电压

$$U_m = \frac{d_{33} F_m}{C} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,此时电压放大器输入电压与籽粒碰撞力呈正比例。本设计选用 AD620an 型放大器作为放大电路的主芯片,该放大器因其低噪声、低功耗等特性,通常用于高精度测试仪器的前置放大器中,只要在 1、8 管脚之间跨接一个电阻 R_c 即可实现电压放大倍数的调节。

2.2 带通滤波器

水稻籽粒碰撞信号上升时间是选择滤波器截止频率的重要特征参数。测量水稻籽粒碰撞敏感板产生电压信号的电压峰值和上升时间采用的方法与

图 2 所示方法相同,试验重复 3 次,试验结果如图 6 所示。

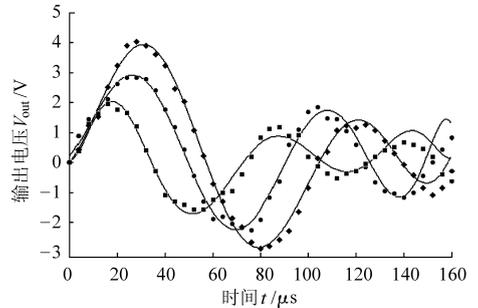


图 6 碰撞信号电压峰值与信号上升时间关系

Fig. 6 Measuring results of grain impact force

从图 6 可以看出,在相同的碰撞速度下,由于籽粒与敏感板的碰撞姿态是随机的,造成碰撞信号的峰值和上升时间存在明显差异。在每个测量点的重复试验结果表明,输出电压峰值一般为 2 ~ 4 V,上升时间为 15 ~ 35 μ s。同样的方法可测得茎秆碰撞敏感板的信号电压峰值为 0.7 ~ 1.5 V,上升时间为 60 ~ 100 μ s。减振后振动干扰信号频率在 300 Hz 以下。选择 OP07 放大器设计一个切比雪夫 (Chebyshev) 四阶有源带通滤波器以滤除干扰信号、快速识别出损失的籽粒。设定带通滤波器的截止频率为 5 ~ 20 kHz,滤波电路采用压控电压源 (VCVS) 拓扑结构,由一个二阶低通滤波器和一个二阶高通滤波器串联而成,如图 7 所示。其中,低通滤波器和高通滤波器的放大倍数 $A = 2$,通带纹波为 0.5 dB 的切比雪夫滤波器系数 $a_1 = 1.361 4, b_1 = 1.382 7$,品质因子 $Q = 0.86$ 。

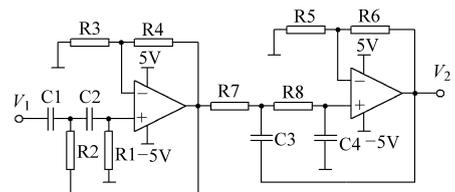


图 7 四阶 Chebyshev 带通滤波器

Fig. 7 Fourth-order Chebyshev band-pass filter

运用 Matlab/Simulink 软件对所设计的带通滤波器进行性能仿真^[16-17],滤波器的传递函数为

$$A(s) = A_h(s)A_l(s) \quad (4)$$

其中

$$A_h(s) = \frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_2 R_3 (C_1 + C_2) + R_1 C_2 R_4}{\omega_c R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 S} + \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 S^2}} \quad (5)$$

$$A_l(s) = \frac{1 + \frac{R_6}{R_5}}{1 + \omega_c \left[C_4 (R_7 + R_8) + \frac{R_7 R_6 C_3}{R_5} \right] S + \omega_c^2 R_7 R_8 C_3 C_4 S^2} \quad (6)$$

式中 $A_h(s)$ 、 $A_l(s)$ ——高通和低通滤波器传递函数

假设电荷放大器输出幅值为 1 的三角冲击信号,时间宽度为 t_r ,当 t_r 在 0.01 ~ 0.5 ms 范围内,带通滤波器输出响应曲线如图 8 所示。可以看出,当冲击时间 t_r 小于 0.01 ms 或大于 0.5 ms 时,滤波器具有很好的抑制作用,对冲击时间 t_r 在 0.1 ms 左右的谷物冲击信号具有良好的通过性,因此可以通过带通滤波将籽粒碰撞信号从杂余冲击干扰中识别出来。

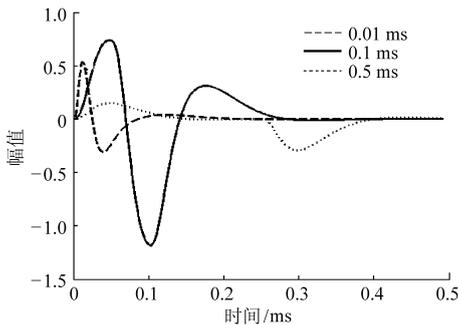


图 8 带通滤波器籽粒碰撞响应曲线

Fig. 8 Grain collision response curve of band-pass filter

2.3 测控系统

以 STC89C52 单片机为核心开发的测控系统,主要包括电源及复位模块、晶振电路、信号采集模块、显示模块、预警模块、外部通讯模块、外部控键接口模块及 ISP 下载电路等并以 Keil uVision3 软件为开发平台,采用 C 语言编写测控程序,系统流程图如图 9 所示。

3 籽粒损失监测传感器性能试验

3.1 实验室标定试验

为确定信号调制电路中电压比较器的阈值电压,分别选取饱满水稻籽粒、不饱满水稻籽粒、长茎秆(长度 40 ~ 50 mm)、短茎秆(长度 15 ~ 20 mm),以 1.0 ~ 2.5 m/s 的速度对安装角度为 45° 的籽粒损失

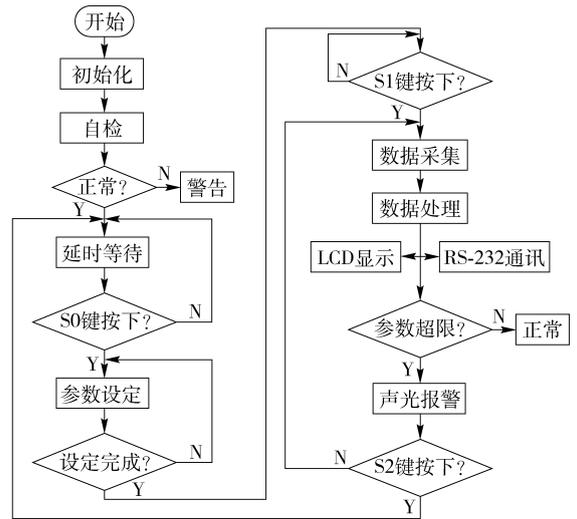


图 9 程序流程图

Fig. 9 Flow chart of process

监测传感器进行实验室内碰撞试验,得到不同试验样品在不同碰撞速度下的输出电压峰值的变化曲线,如图 10 所示。试验表明,随着物料下落速度的增加,物料碰撞籽粒损失监测传感器输出电压增大。碰撞速度在 1.5 ~ 2.5 m/s 内时,饱满籽粒输出电压峰值为 2.0 ~ 4.0 V,且输出电压峰值随碰撞速度的增加而不断增大;长茎秆、不饱满籽粒、短茎秆碰撞输出信号电压基本在 1.5 V 以下,因此设定电压比较器的阈值电压为 1.5 V,此时籽粒损失监测传感器能有效识别出饱满水稻籽粒。

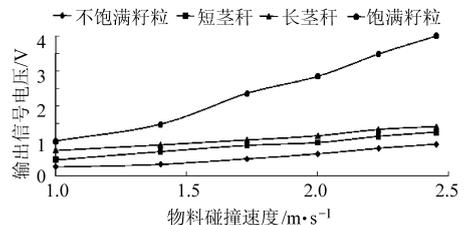


图 10 输出电压随不同物料冲击速度的变化曲线

Fig. 10 Output voltage changes with drop velocity of different materials

为检验籽粒损失监测传感器从复杂标定混合物中识别出饱满籽粒的能力,分别选取饱满水稻籽粒、不饱满水稻籽粒、不同长度的茎秆作为标定物料,在标定试验台上对籽粒损失监测传感器进行标定试验^[18]。物料下落高度为 350 mm,传感器安装角度为 45°,饱满籽粒流量在 100 粒/s 左右,每次标定试验重复 3 次,取平均值,试验结果如表 4 所示。从试验结果可以看出,传感器的检测精度和可靠性较好。

3.2 田间试验

2012 年 11 月 15 日以无锡联合收割机厂生产的 TH988 型履带式联合收获机为试验样机,将研制的籽粒损失监测传感器安装在联合收获机上,在江苏省无锡市锡山区鹅湖镇进行了水稻收获试验,籽

表4 不同物料下籽粒损失监测传感器检测误差

Tab.4 Errors on detecting full rice from different mixture

碰撞物料量	10 s 内监测量/粒	相对误差/%
不饱满籽粒 100 粒	0	
短茎秆(15~20 mm) 10 g	0	
长茎秆(40~50 mm) 10 g	0	
饱满籽粒 1 000 粒、不饱满籽粒 100 粒、短茎秆 10 g 和长茎秆 10 g 混合物	1 019	1.9

粒损失监测传感器安装位置如图 11 所示。联合收获机割幅 1.92 m, 水稻品种南粳 46, 株高 78 cm, 千粒质量 29.8 g, 产量 8 920 kg/hm², 草谷比 1.79, 茎秆含水率 52.1%, 籽粒含水率 20.5%。试验前, 调节信号调制电路的阈值电压至 1.5 V, 联合收获机各工作部件以正常的工作状态在田间空地上行进 10 m, 往复 3 次, 经观察测控仪液晶屏显示值基本上在 2~3 粒左右, 表明机组振动、地面颠簸等干扰对籽粒清选损失监测传感器的影响较小。试验时每种工况下进行 3 次试验, 第 1 次是确定人工检测值与传感器检测值之间的比例关系, 具体方法是: 在标定距离 25 m 内人工筛选出标定收获距离内清选室排出混合物中的籽粒量, 籽粒损失监测传感器监测到的籽粒数量根据试验田块水稻千粒质量转换成质量, 计算得到两者之间的比例系数; 第 2、3 次试验, 把第 1 次得到的比例系数输入到测控仪表中, 然后籽粒损失监测传感器显示值与人工检验值进行比较, 试验结果如表 5 所示, 试验结果表明, 随着联合



图 11 籽粒清选损失监测传感器安装位置

Fig. 11 Installation position of grain loss monitoring sensor

收获机前进速度的增加, 测量相对误差增大; 最大相对误差为 2.39%, 最大绝对误差为 0.028%, 符合测量要求。

表 5 水稻田间试验检测结果

Tab.5 Field experiment results

试验 编号	前进 速度 /m·s ⁻¹	清选损失				绝对 误差 /%	相对 误差 /%
		传感器检测值		人工检测值			
		质量/g	损失率/%	质量/g	损失率/%		
1	0.8	367.8	0.865	374.6	0.881	0.016	1.84
2	1.0	458.0	1.078	467.8	1.101	0.023	2.13
3	1.2	497.3	1.170	509.2	1.198	0.028	2.39

4 结论

(1) 在其他情况不变的情况下, 随着敏感板厚度增加, 相对变形率逐渐降低、一阶固有频率单调增加; T6 铝板、不锈钢 304 板、黄铜板的一阶固有频率依次升高、相对变形率依次下降; 边界条件对一阶固有频率、相对变形率影响较大。

(2) 籽粒碰撞试验表明, 在敏感板宽度 180 mm、长度 120 mm 的情况下, 敏感板一阶固有频率越高, 籽粒碰撞信号衰减时间越短; 相对变形率越大, 碰撞信号电压幅值越高。敏感板的边界条件是影响信号衰减的主要因素, 而敏感板的厚度是影响信号电压幅值的主要因素; 敏感板采用不锈钢 304 板, 厚度 1.0 mm, 边界条件为四边固定时, 能够保证籽粒损失监测传感器的检测频率和整体灵敏度。

(3) 设计的带通滤波器, 对碰撞上升时间在 0.1 ms 左右的籽粒信号具有良好的通过性; 对碰撞上升时间小于 0.01 ms 或大于 0.5 ms 的信号滤波器具有很好的抑制作用; 在带通滤波器电路和电压比较器电路的共同配合下, 籽粒损失监测传感器能够从复杂的背景中有效识别出饱满籽粒, 田间试验表明测量最大相对误差为 2.39%, 最大绝对误差为 0.028%。

(4) 由于实际田间损失情况的复杂性, 现阶段清选损失监测只能通过现场标定的方法来确定监测参数且监测参数在不同田块不能通用。

参 考 文 献

- 1 介战, 刘红俊, 侯风云. 中国精准农业联合收获机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 179~182.
Jie Zhan, Liu Hongjun, Hou Fengyun. Research advances and prospects of combine on precision agriculture in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 179~182. (in Chinese)
- 2 Geert C, Wouter S, Bart M, et al. Identification of the cleaning process on combine harvesters, part II: a fuzzy model for prediction of the sieve losses[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 97~102.
- 3 Omid M, Lashgari M, Mobli H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7 080~7 085.
- 4 Maertens K, Ramon H, Baerdemaeker J D. An on-the-go monitoring algorithm for separation processes in combine harvesters[J].

- Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 197 ~ 207.
- 5 Guy H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters: US, 4540003[P]. 1985-09-10.
 - 6 Kotyk W M, Kirk T G, Wilson R J, et al. Unthreshed headgrain loss monitor: US, 4825146 [P]. 1989-04-25.
 - 7 Glibert J, Strubbe I. Grain lossmonitors for harvesting machines: US, 5046362[P]. 1991-09-10.
 - 8 van Quekelberg he, Eric P J. Grain sensor arrangement for an agricultural harvester: US, 6524183[P]. 2003-02-25.
 - 9 李俊峰, 介战. 联合收割机谷物损失测试研究探讨[J]. 农机化研究, 2007(12): 248 ~ 250.
Li Junfeng, Jie Zhan. Analyses of combine harvester grainloss measurement [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 248 ~ 250. (in Chinese)
 - 10 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)
 - 11 Zhao Zhan, Li Yaoming, Liang Zhenwei, et al. Optimum design of grain impact sensor utilising polyvinylidene fluoride films and a floating raft damping structure[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(3): 227 ~ 235.
 - 12 Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 183 ~ 188.
 - 13 王涛, 王晓东, 王立鼎. 压电陶瓷快速响应特性与应用研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 785 ~ 789.
Wang Tao, Wang Xiaodong, Wang Liding. Study on fast response characteristic and application of piezoceramics[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(6): 785 ~ 789. (in Chinese)
 - 14 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)
 - 15 李金田. 压电传感器与前置放大器的配接[J]. 传感器与微系统, 2004, 23(1): 54 ~ 56, 59.
Li Jintian. Connection of piezoelectric sensor and preamplifier[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2004, 23(1): 54 ~ 56, 59. (in Chinese)
 - 16 王正林, 王开胜, 陈国顺, 等. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 56 ~ 64.
 - 17 陈树人, 尹东富, 魏新华, 等. 变量喷药自适应神经模糊控制器设计与仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 272 ~ 276.
Chen Shuren, Yin Dongfu, Wei Xinhua, et al. Design and simulation of variable weed spraying controller based on adaptive neural fuzzy inference system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 272 ~ 276. (in Chinese)
 - 18 李耀明, 梁振伟, 赵湛, 等. 联合收获机籽粒损失监测传感器性能标定试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 79 ~ 83.
Li Yaoming, Liang Zhenwei, Zhao Zhan, et al. Calibration experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 79 ~ 83. (in Chinese)

(上接第 163 页)

- 11 徐海芳. 农田土壤入渗参数的空间统计特征[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- 12 王建伟, 贾文庆. 盐分胁迫下紫花苜蓿种子发芽特性的研究[J]. 浙江农业科学, 2008(2): 178 ~ 180.
Wang Jianwei, Jia Wenqing. The effect of salt stress on the seed germination of *Medicago sativa* [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2008(2): 178 ~ 180. (in Chinese)
- 13 秦峰梅, 张红香, 武祎, 等. 盐胁迫对黄花苜蓿发芽及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 71 ~ 78.
Qin Fengmei, Zhang Hongxiang, Wu Yi, et al. Effects of salt stress on germination and seedling growth of *Medicago falcata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(4): 71 ~ 78. (in Chinese)
- 14 高奔, 宋杰, 刘金萍, 等. 盐胁迫下囊果碱蓬出苗状况及苗期抗盐性[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6 131 ~ 6 135.
Gao Ben, Song Jie, Liu Jinping, et al. Seedling emergence and salt tolerance of *Suaeda physophora* Pall. under salt stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6 131 ~ 6 135. (in Chinese)