

PVDF 谷物传感器减振结构的动力学分析*

赵 湛^{1,2}, 李耀明¹, 陈 义¹, 梁振伟¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室 镇江, 212013)

(2. 江苏大学机械工程学院 镇江, 212013)

摘要 为了实现联合收割机工作过程中谷物损失量的实时测量, 研究以聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, 简称 PVDF) 压电薄膜作为敏感元件的谷物检测传感器, 通过由电荷放大、带通滤波、包络检波和电压比较器等构成的信号调制电路, 实现谷物冲击信号的检测。为了减小联合收割机振动的干扰, 传感器设计为双层隔振结构, 分析了减振系统的动力学特性, 数值模拟瞬时冲击作用下的响应。将传感器安装在联合收割机振动筛尾端支架上进行谷物检测实验, 结果表明, 通过合理选择减振材料和调制电路参数, 传感器能够从振动噪声背景中有效提取谷粒冲击信号。

关键词 联合收割机; 谷物检测; 聚偏氟乙烯压电薄膜; 双层隔振; 动力学分析

中图分类号 O327; S126

引 言

随着联合收割机向大型化和高效智能化方向的发展, 除了要求具有稳定可靠的工作性能、方便灵活的操纵以外, 还要求联合收割机能够实时监测工作状态和优化工作参数^[1-3]。联合收获机在田间作业不可避免地会产生谷物损失, 主要形式为清选损失和夹带损失。谷物损失率是衡量联合收割机作业性能的重要技术指标, 也是联合收割机工作参数调控的重要依据, 而实现谷物损失检测的核心问题是研制传感器。国外, 谷物检测传感器的研究^[4-5]主要是采用压电陶瓷检测谷物的冲击信号进行损失量测量。国内也开展该研究^[6-7]并取得了一些成果。由于农业谷物的质量较小, 其冲击信号比较微弱, 联合收割机在收获过程中由于机组振动和地面的颠簸会对压电材料的输出信号产生影响, 导致测量误差增大。

PVDF 作为一种新型的高分子压电材料, 与压电陶瓷相比具有压电常数高、柔韧性好、频响宽、稳定性好、易于加工和安装、对系统本身的结构影响小的优点, 在微弱冲击和加速度测量领域得到广泛应用^[8-9]。笔者提出采用 PVDF 压电薄膜作为敏感材料, 通过双层隔振结构设计^[10]减小机器振动干扰, 提高了谷物测量精度。

1 传感器结构

选用的 PVDF 压电薄膜厚度为 $50\ \mu\text{m}$, 极化方向为方向 3, 压电系数 $d_{33} = 21\ \text{pC/N}$, 几何尺寸为 $20\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$, 采用冷压端子将电极引出, 为了防止表面划伤, 在上、下表面均粘贴厚度为 $0.1\ \text{mm}$ 的 PET 塑封薄膜, 将塑封好的 PVDF 压电薄膜粘贴于支撑板上构成一个检测单元, 将多个检测单元平行排列在传感器底板上, 在每个检测单元与底板、底板与基座之间加装独立减振片, 构成双层隔振结构形式, 如图 1 所示。

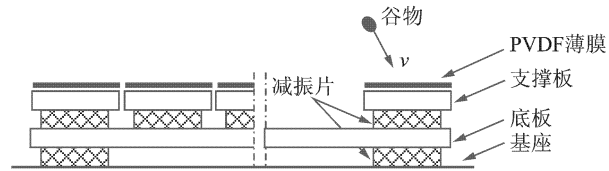


图1 传感器结构原理图

由压电效应可知, 当 PVDF 压电薄膜受到谷物冲击或振动惯性力作用下会产生电荷, 且电荷量的大小与冲击强度和加速度大小有关。由于电荷不能被直接测量, 可以通过电荷放大器将其转换为电压信号。物体的碰撞时间主要取决于质量、刚度和碰撞

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2010AA101402); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PADP); 江苏大学高级人才启动基金资助项目(10JDG083)

收稿日期: 2011-04-27; 修改稿收到日期: 2011-05-25

速度,与颖壳和茎秆相比,饱满谷物的刚度较大,产生的冲击时间较短,实验测量获得饱满谷物与压电薄膜的冲击时间通常在0.05~0.2 ms,因此可以通过带通滤波器进行鉴别。冲击所产生的都是衰减振荡信号,为了消除谐振波的干扰,增加了检波二极管和包络检波器,通过电压比较器进行整波,从而实现谷物冲击一次,信号调制电路输出一个矩形脉冲电压,调制电路原理如图2所示。



图2 信号调制电路原理

2 减振结构的动力学分析

目前,联合收割机清选损失的检测方法主要是在清选筛尾端支架上安装传感器,如图3所示,联合收割机在工作参数下运转时,传感器随清选筛同频率振动,损失的谷物和清选杂余从清选筛尾部排出,部分谷物冲击到PVDF薄膜表面产生矩形脉冲电压,根据传感器检测到的谷物量与总损失量的比例关系,计算联合收割机谷物清选损失大小。

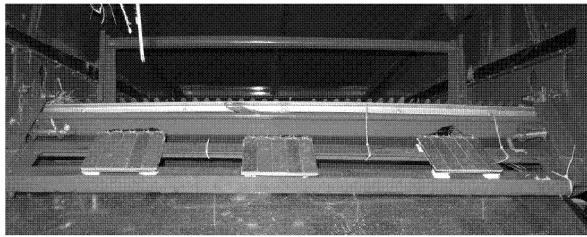


图3 传感器安装方式

2.1 动力学模型

支架振动对传感器的影响可以简化为受支撑激励的二自由度振动系统,如图4所示,其中: m_1 为底板质量; m_2 为支撑板和PVDF薄膜的质量; k_1, k_2 为减振片弹簧刚度; c_1, c_2 为黏性阻尼系数; x_0, x_1, x_2 分别为基座、底板和支撑板的位移。

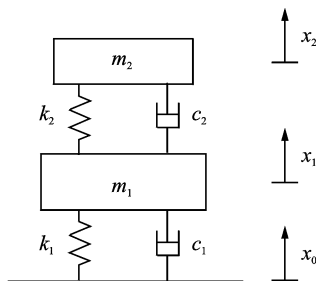


图4 减振结构力学模型

系统的运动微分方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \dot{x}_0 + k_1 x_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在简谐周期激励下的响应为

$$\begin{cases} x_0 = X_0 e^{st} \\ x_1 = X_1 e^{st} \\ x_2 = X_2 e^{st} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $s = \omega j$; ω 为振动频率; $j = \sqrt{-1}$; X_0 为基座激励振幅值; X_1, X_2 分别为底板和支撑板的响应振幅。

将式(2)代入式(1),得到

$$\begin{bmatrix} m_1 s^2 + (c_1 + c_2)s + k_1 + k_2 & -c_2 s - k_2 \\ -c_2 s - k_2 & m_2 s^2 + c_2 s + k_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_1 s + k_1)x_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算得到传递函数为

$$G(s) = \frac{x_2}{x_0} = \frac{(c_1 s + k_1)(c_2 s + k_2)}{(m_1 s^2 + (c_1 + c_2)s + k_1 + k_2)(m_2 s^2 + c_2 s + k_2) - (c_2 s + k_2)^2} \quad (4)$$

实验采用厚度为3 mm的低密度海绵制作减振片,测得其小变形时的刚度 k_1 约为6 kN/m, k_2 约为2 kN/m,阻尼比 ξ 为0.1~0.05, $m_1 = 0.20$ kg, $m_2 = 0.04$ kg,在不同频率 x_0 激励下, x_2 的振幅响应如图5所示。可以看出,在共振频率 $\omega_1 = 148.7$ Hz和 $\omega_2 = 260.5$ Hz附近,幅值比 $B(B = X_2/X_0)$ 存在峰值,随着阻尼比 ξ 的增大, B 逐渐减小,当激振频率 $\omega \ll \omega_1$ 时, $B \approx 1$ 且 ξ 影响很小,当 $\omega \gg \omega_1$ 时, B 趋向于0,说明该结构对高频振动具有很好的减振效果。由于共振频率主要与 $\sqrt{m_1/k_1}, \sqrt{m_2/k_2}$ 有关,因此适当增加传感器底座和支撑板质量,并选用低刚度的柔性减振材料可以降低系统的共振频率,提高减振性能。

2.2 振动冲击的动态响应特性

支架振动对传感器的影响主要由两部分组成:

a. 支架随着清选筛往复振动,频率通常为4~6 Hz,由于频率较低,可以通过带通滤波器消除;b. 由于联合收割机整机振动以及支架安装等原因,造成支架在往复振动过程中产生瞬时冲击,通过示波器测量发现,这种瞬时冲击近似呈现三角波形态,冲击时间与清选筛振动频率有关,通常小于10 ms,由于它

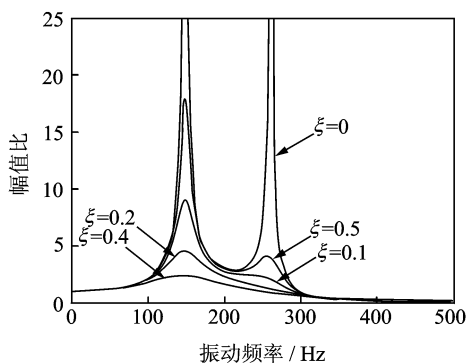


图5 振幅比随激励频率的变化曲线

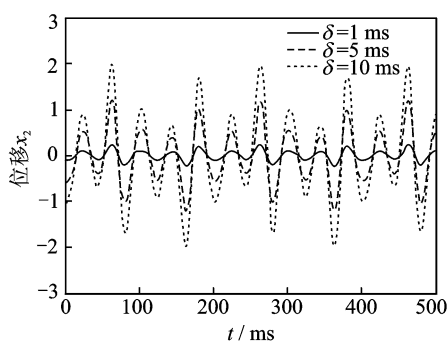


图7 冲击响应曲线

与饱满谷物冲击信号相似,很难通过信号调制电路进行区分,必须从传感器结构上进行消除。

通过求解传递函数可以计算系统对任意激励的响应,假设传感器受到瞬时三角波冲击,归一化后如图6所示,图中 δ 为上升沿时间。

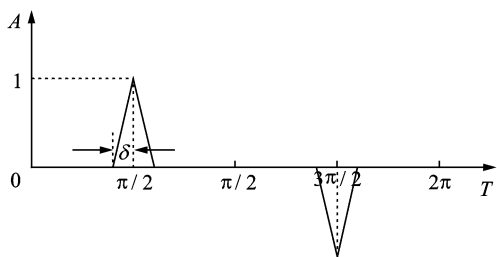


图6 周期冲击波形

通过傅里叶级数展开,得到其简谐激励函数为

$$f(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{4(1 - \cos(n\delta))}{n^2\pi\delta} \sin(nt) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)逐项求解,再将结果进行线性叠加,即得到系统的响应。

采用 Matlab 编程计算,当清选筛振动频率为 5 Hz, $\xi = 0.05$, $\delta = 1, 5, 10$ ms 时, PVDF 压电薄膜的稳态响应如图7所示。可以看出, PVDF 压电薄膜主要作光滑的周期振动,振幅的大小与 δ 有关,且 δ 越大,振幅越大。

由于 PVDF 压电薄膜输出电压与加速度线性相关,定义加速度衰减系数

$$\chi = 20 \log(a_{d\max}/a_{\max}) \quad (6)$$

其中: a_{\max} , $a_{d\max}$ 分别为减振前、后的最大加速度; χ 的物理意义为减振后最大加速度的衰减程度。

图8为 χ 随 δ 的变化曲线,可以看出,所设计的双层减振结构可以有效减小瞬时冲击加速度,且冲击时间越短,降噪性能越显著。

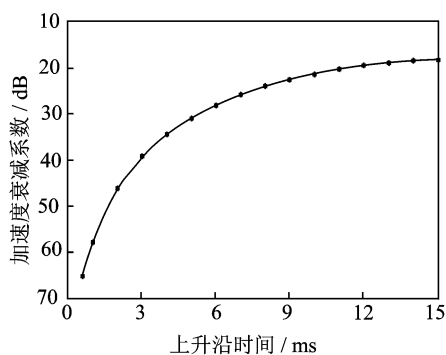


图8 冲击时间对振动加速度衰减系数的影响

3 传感器减振性能实验

为了分析减振结构对传感器输出信号的影响,实验将传感器分别以刚性和柔性减振方式固定在支架上,信号调制电路中设计了4阶带通滤波器,截至频率分别为500 Hz和20 kHz,并采用存储数字示波器记录信号调制电路包络检波后的输出电压,采样频率为15 kHz。

传感器刚性连接在清选筛尾部振动板上时,输出信号如图9所示。清选筛往复振动产生的低频信号被高通滤波器消除,而高频冲击信号则不能有效去除,使得输出电压值在0~4 V范围内波动,谷物冲击信号混杂在其中,无法有效识别。

通过减振结构的动力学分析可知,减振材料的力学参数对传感器的减振性能有显著影响,且低刚度柔性材料更有利于提高减振性能。实验分别选择了低密度海绵和橡胶(小变形刚度 k_1, k_2 约为 80, 30 kN/m)制作减振片并进行对比,结果如图10所示。可以看出,采用低密度海绵减振片时,振动干扰能够控制在0~0.8 V范围内,而谷物撞击到 PVDF 压电薄膜上产生的输出电压峰值一般在2~4 V。因此,谷物冲击可以被清晰地识别出来,设定电压比较器阈值电压为1.5 V左右,能够实现谷物一次冲击,

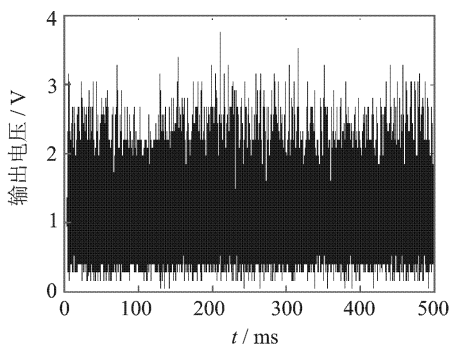
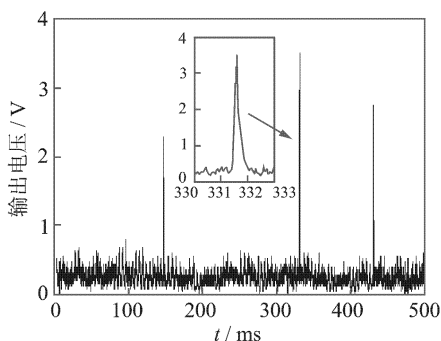


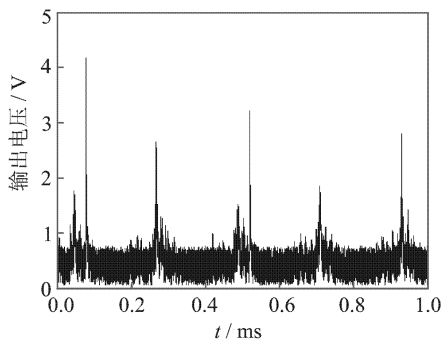
图9 刚性连接时传感器输出信号

传感器输出一个矩形脉冲电压,从而实现联合收割机工作过程中谷物损失量的实时测量。采用橡胶减振片时,由于其刚度较大,传感器输出存在周期冲击干扰,频率与清选筛振动频率一致,这主要是由支架安装所引起,最大幅值超过4V,这与谷物冲击信号强度相当,会对传感器测量精度造成影响。

分析实验结果可以看出,采用双层隔振结构、选择柔性减振材料抑制振动干扰,是提高谷物测量精度的关键技术环节。



(a) 采用低密度海绵减振片



(b) 采用橡胶减振片

图10 减振后传感器输出信号

4 结论

1) 采用PVDF压电薄膜作为敏感材料研制双

层隔振结构的谷物损失检测传感器,设计由电荷放大、带通滤波、包络检波和电压比较器等构成的信号调制电路,可以实现谷物冲击信号的测量。

2) 通过减振结构的动力学分析,数值模拟了传感器在冲击作用下的响应,结果表明,选用低刚度柔性减振片、适当增加传感器底座和支撑板质量、降低隔振结构的共振频率,可以抑制联合收割机高频振动干扰。

3) 将传感器安装在清选筛尾部振动板上进行实验,结果表明,采用低密度海绵减振片,传感器能够从振动噪声背景中识别谷粒冲击信号,实现联合收割机在工作过程中谷物损失量的实时测量。

参 考 文 献

- [1] 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): 7080-7085.
- [2] Geert C, Josse B, Bart M, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(2):103-111.
- [3] 李君略, 俞龙, 刘华, 等. 联合收割机监测系统研究现状及展望[J]. *现代农业装备*, 2005(12): 46-48.
Li Junlue, Yu Long, Liu Hua, et al. State-of-art and prospect on combine monitor system[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2005 (12): 46-48. (in Chinese)
- [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] 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.
- [6] 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): 137-171.
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): 137-171. (in Chinese)

[7] 毛罕平,倪军. 阵列式压电晶体谷物损失传感器有限元分析与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 123-126.
Mao Hanping, Ni Jun. Finite element analysis and measurement for array piezocrystals grain losses sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 123-126. (in Chinese)

[8] 刘建,裘进浩,常伟杰,等. 运用矩形压电片的冲击载荷定位新方法[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3): 257-259.
Liu Jian, Qiu Jinhao, Chang Weijie, et al. Location of impact load using rectangular piezoelectric sensors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 257-259. (in Chinese)

[9] Shirinov A V, Schomburg W K. Pressure sensor from a PVDF film[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(1): 48-55.

[10] 段小帅,梁青,陈绍青,等. 双层隔振系统隔振效果评价与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(6): 694-699.
Duan Xiaoshuai, Liang Qing, Chen Shaoqing, et al. Evaluation and experiment on vibration-isolation effect of double-stage vibration-isolation system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(6): 694-699. (in Chinese)



第一作者简介:赵湛,男,1978年9月生,博士、副研究员。主要研究方向为机械系统的检测与控制。曾发表《钴基非晶磁芯艺磁阻抗效应电流传感器》(《仪器仪表学报》2007年第28卷第3期)等论文。
E-mail:zhaozhan@uj.s.edu.cn

《振动、测试与诊断》2011年影响因子

根据中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》最新公布,《振动、测试与诊断》2011年影响因子为0.626,在29种航空、航天科学技术类期刊中排名第一。在收录的1998种中国科技核心期刊中(不含港澳台地区),综合评价排名为244名。在此,编辑部衷心感谢广大读者、作者和审稿人对本刊的一贯支持与关怀!

表1 2011年航空、航天科学技术类期刊影响因子

刊名	影响因子		刊名	影响因子	
	数值	排名		数值	排名
振动、测试与诊断	0.626	1	中国空间科学技术	0.281	15
航空学报	0.604	2	空气动力学学报	0.279	16
宇航学报	0.592	3	航天返回与遥感	0.278	17
CHINESE JOURNAL OF AERONAUTICS	0.543	4	航天器工程	0.264	18
计算机测量与控制	0.438	5	航空制造技术	0.261	19
电光与控制	0.435	6	飞行力学	0.255	20
南京航空航天大学学报	0.381	7	强度与环境	0.250	21
航空动力学报	0.351	8	测控技术	0.248	22
推进技术	0.315	9	航空计算技术	0.206	23
北京航空航天大学学报	0.310	10	导弹与航天运载技术	0.175	24
固体火箭技术	0.300	11	南昌航空大学学报自然科学版	0.132	25
航天控制	0.298	12	中国民航大学学报	0.130	26
航天器环境工程	0.295	13	飞行器测控学报	0.117	27
实验流体力学	0.283	14	航空精密制造技术	0.109	28
			宇航计测技术	0.104	29

(数据摘自中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,科学技术文献出版社)