

# 对称传感结构的谷物清选损失监测装置研制

毛罕平, 刘 伟, 韩绿化, 张晓东

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**摘 要:** 该文设计研制了一种联合收割机清选损失监测装置, 采用对称传感器结构补偿干扰信号, 带通电荷放大处理激励信号, 经带通滤波电路有效提取谷粒损失信号, 最后由单片机单元实时监测计数。通过实验室与田间试验分析, 设计的监测仪能有效的监测联合收割机清选损失, 最大测量误差为 2.81%, 满足实际设计监测要求。该研究可为谷物联合收割机清选损失测试研究提供参考。

**关键词:** 传感器, 联合收割机, 监测, 清选损失

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.006

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0034-06

毛罕平, 刘 伟, 韩绿化, 等. 对称传感结构的谷物清选损失监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 34-39.  
Mao Hanping, Liu Wei, Han Lühua, et al. Design of intelligent grain cleaning losses monitor based on symmetry sensors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 34-39. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

联合收割机的清选损失率是考察收割机作业性能的重要指标, 设计清选损失实时在线监测装置, 不仅有利于减少粮食的损失, 更有利于提高收割机的整体性能。

近年来国内的研究大多采用 PVDF (聚偏二氟乙烯) 压电薄膜作为传感器敏感材料来设计检测传感器, 但试验中发现谷粒的冲击强度较小, 使 PVDF 压电薄膜材料的电信号输出灵敏度不高, 检测准确度不高、可靠性差, 且没有解决收割机振动及其他强噪声信号干扰的难题, 目前国内 PVDF 研究基本上集中在实验室试验研究阶段<sup>[1-3]</sup>。国内学者也开展了阵列式压电晶体谷物损失传感器的研究<sup>[4-6]</sup>, 但对背景信号强干扰的问题尚有待提高。国外研究的传感器对国产收割机振动和噪声的强干扰的适应性差, 检测数据可靠性不高, 价格较贵只是作为联合收割机的附件出售<sup>[7-10]</sup>。本文针对背景信号强干扰、传感器检测精度和可靠性不高的问题, 利用对称传感器的原理, 研制了联合收割机清选损失监测仪, 并进行了试验分析。

## 1 监测装置的系统设计

### 1.1 总体设计

监测装置的整体系统如图 1 所示, 主要由对称结构传感器、信号调理单元、监测控制单元组成。其中, 对称结构传感器的压电元件采用 TS1100 型压电传感器; 放大电路的主芯片采用 TS5863 型放大器芯片; 监控单元主

处理器采用 STC89C52RC 单片机; 带通电荷放大电路主要针对谷粒信号放大, 带通滤波电路可以准确的选择滤波截止频率点, 从强背景信号中有效提取微弱信号。

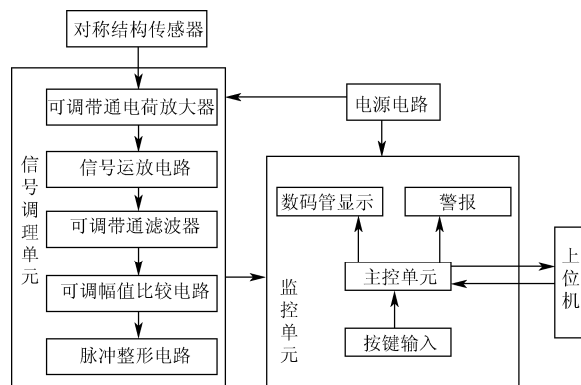


图 1 监测装置的整体系统原理图

Fig.1 Schematic of grain cleaning losses monitor system

### 1.2 对称传感器结构

在清选筛的抛出物中, 谷粒的含量相比茎秆和草较少, 加上收割机振动等信号干扰, 谷粒损失信号相对非常微弱。采用“对称传感器”结构, 通过上下传感器进行振动信号补偿, 可以消弱干扰信号, 增强谷粒信号, 提高系统的监测精度和可靠性。对称传感器结构的关键是保证上下弹性元件和结构对称性, 使得在相同振动状况下上下两弹性元件传感器的激励响应一致。对称传感器结构如图 2 所示。

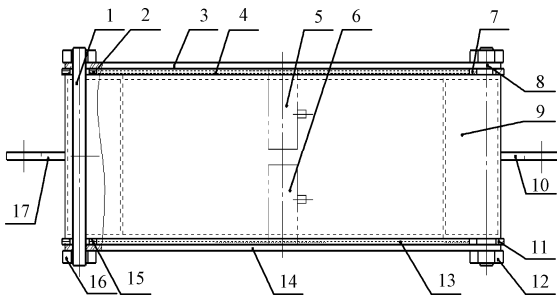
选用压电晶体作为转换元件, 获取谷粒损失信号。压电晶体体积小质量轻, 使用频带宽, 灵敏度高, 动态特性好, 广泛用于振动与冲击等测量中。压电晶体不置于电场中, 所以电场强度 E 可以不用考虑。根据压电学理论, 压电晶体在受到谷粒冲力后, 在其弹性变形范围

收稿日期: 2011-11-19 修订日期: 2012-01-11

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2010AA101402)和江苏大学科研立项资助项目(10A210)

作者简介: 毛罕平(-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事系统监测与控制、智能化农业装备技术、计算机视觉研究。镇江 江苏大学农业工程研究院。Email: maohp@ujs.edu.cn

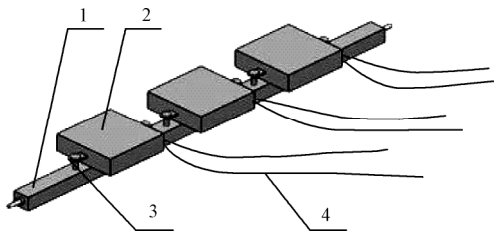
之内，表面电荷与形变大小成线性关系<sup>[11-12]</sup>。压电晶体主要在振动方向上发生较明显的形变，其余方向的形变都很微弱，只考虑振动方向的压电特性。



1、8.螺柱 2、7、11、15.减振垫片 3、14.弹性元件 4、13.防护层  
5、6.压电晶体 9.金属盒框架 10、17.安装孔 12、16.螺母

图 2 对称传感器结构  
Fig.2 Symmetry sensor structure

利用 NI（美国国家仪器公司）ModalVIEW 软件对弹性元件进行模态分析，弹性元件的结构参数定为：301 号不锈钢；长 150 mm，宽 150 mm，厚 1.0 mm；平面钢板采用双头螺柱对两端加固，为保证上下弹性元件受力的一致性，采用定力矩扳手进行加固。为提高监测的精度，设计 3 个监测区域，均匀分布在清选筛排出口处，传感器整体安装结构如图 3 所示。



1.台架 2.传感器 3.安装螺柱 4.屏蔽线

图 3 传感器安装形式  
Fig.3 Form of sensor installation

### 1.3 信号调理系单元

信号调理系统主要由带通信号放大电路、信号补偿电路、带通通滤波电路、信号整形电路等组成。设计的核心部分为带通信号放大电路和信号补偿电路。

#### 1.3.1 带通信号放大电路

本设计选用 TS5863 电荷放大芯片作为放大电路的主芯片。电荷放大电路采用一个高输入阻抗的运算放大器作输入级。在放大电路反馈回路里有一只电容器以此形成一个积分网络，对输入电流进行积分。这个输入电流是由加速度计内部高阻抗压电元件上产生的电荷形成的。图 4 表示压电加速度计和前置放大器相连的等效电路，可完成的功能为：选择任意频段的信号进行电信号放大。可以针对各粒激励响应的频段进行选择放大，根据实际工况需要调节放大倍数，并可实现放大倍数的微调。

压电晶体的阻值、前置放大电路中的输入电阻及反馈回路阻值都是很高的，因此图 4 可简化为图 5 所示。

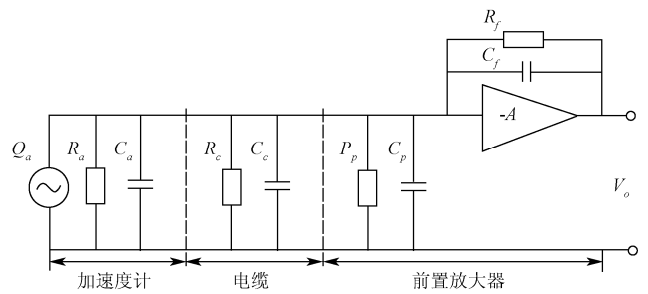


图 4 电荷放大电路等效电路图  
Fig.4 Schematic of electricity amplifier

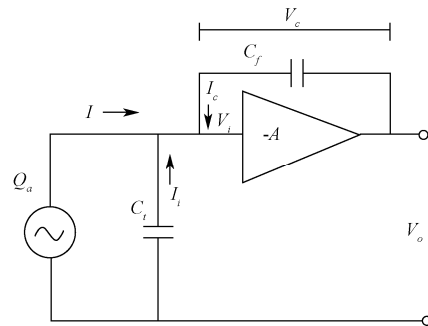


图 5 简化电路  
Fig.5 Simplified diagram

在图 5 中运用基尔霍夫定律可得

$$I + I_c + I_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dQ_a}{dt} = -(1 + \frac{1}{A})C_f \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{AC_i} \frac{dV_o}{dt} \quad (2)$$

对式 (2) 积分得

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_f + 1/A(C_f + C_i)} \quad (3)$$

考虑到 A 的值很大则式 (3) 可简化为

$$V_o = \frac{Q_a}{C_f} \quad (4)$$

式中， $Q_a$  为输入电荷量，C； $V_o$  为输出电压，V；A 为运算放大器增益； $C_f$  为反馈电容，F； $C_i$  为电容量，F；I 为传感器总电流，A； $I_c$  反馈回路电流，A； $I_i$  为 Ct 流出的电流，A。

从式 (4) 可清楚看到输出电压与输入电荷成正比，传感器电容、电缆电容对放大电路系统输出电压几乎不起作用，即电荷放大电路可以使用较长的输入电缆而不影响其灵敏度。

中间放大电路及滤波电路均采用同相放大器，滤波系统采用二阶巴特沃思型 RC 有源滤波器，使得通带内有较好的平坦度。

#### 1.3.2 信号补偿电路

当收割机在田间工作时，上下 2 层弹性元件同时振动，但下层弹性元件没有谷粒激励信号，通过信号的补偿，可以很好的消除收割机振动引起的强干扰信号，有利于谷粒信号的识别提取。信号补偿电路如图 6 所示。

放大器 A1 完成对上层弹性元件激励响应信号 1 的运放; 放大器 A2 完成对下层弹性元件激励响应信号 2 的运放。A3 为加法器, 主要完成对信号 1 和信号 2 的加减补偿合成运算。根据信号叠加定理, U1 中的信号与 U2 中的信号当相位和幅值一致时, 可以通过信号运算合成抵消。但在实际中, 两敏感元件的激励响应特性不可能完全一致, 通过放大器和加法器上的微调旋钮进行相位和幅值调整, 补偿消除干扰信号。

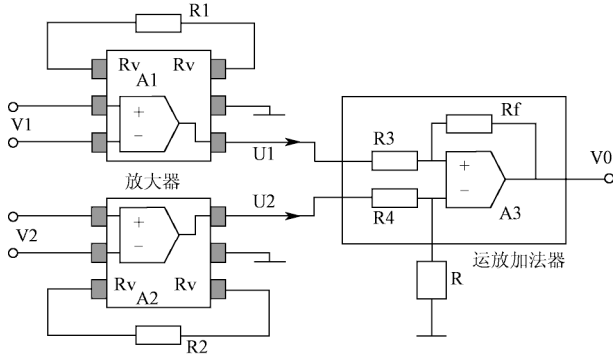


图 6 信号补偿电路图  
Fig.6 Vibration eliminating circuit

### 1.3.3 带通滤波器电路

本设计中采用 RC 有源滤波电路获得谷粒信号。阻带衰减速率  $\delta$  为

$$\delta = \frac{\omega - \rho}{K} \quad (5)$$

式中,  $K$  为过渡带, Hz;  $\omega$  为阻带衰减, dB;  $\rho$  为通带波动, dB。其中在选择截止频率点时, 根据香农定理, 输入信号的分析频率  $f_s > 2f$ , 式中,  $f_s$  采样频率;  $f$  为最高分析频率。一般采用  $f_s = 2.56f$ , 本滤波电路的过渡带较窄 ( $f < 0.5f_s$ ), 故有限的采集速率对输入信号所造成的混迭效应很小。因此, 在选择滤波器截止频率点时根据  $f_s \geq 2.56f$  的原则, 可以保证测试数据的准确性。

利用设计的“对传感器结构”弹性元件, 采用 NI 系统对机组振动和冲击信号的特征进行测试分析。具体测试方法为, 在收割机空转状态下测试传感器的振动信号; 发动收割机, 喂入脱粒后的无谷粒稻草及杂草, 茎秆碎草从清选筛排出口排出并打击在传感器上, 测试茎秆碎草的打击频率; 将谷粒从 35 cm 高处自由落下, 打击在传感器上, 测试谷粒的打击频率。测试结果如下: 收割机机组振动信号在 7.0 kHz 以下; 茎秆碎草的主要能量频率低于 5.8 kHz; 谷粒的最大幅值频率在 8.0~10.5 kHz 之间。由此确定滤波器的下限为 8.0 kHz, 上限为 10.5 kHz。

### 1.4 监控单元

本监测仪的主监控单元采用 STC89C52RC 单片机进行谷物清选损失信号的监测处理。滤波之后的信号经幅值电压比较后提取单谷粒波峰, 利用 555 定时器整形成单脉冲信号, 单片机接收一次脉冲信号计一次, 即计为谷粒损失。其中, 比较电压大小取决于放大电路的放大倍数, 如当放大器倍数为 50 倍时, 比较电压取 0.5 V,

当放大倍数为 100 时, 则幅值比较电压取 1.0 V。采样频率为 500 Hz, 进行连续采样, 单片机完成谷物清选损失量计算后通过数码管实时显示监测结果。

可通过按键对监测仪的 2 种工作模式切换, 显示监测到的谷粒损失粒数或谷粒损失质量。设有 3 个输入控制键, 完成运行、存储、复位功能。另设有 232 串口, 可以与上位机连接, 将损失信号数据传输至上位机并便于进行硬件参数设置。本“863”项目还开发了收割机智能控制系统, 需要融合谷物损失信息、产量信息和脱粒滚筒转速等数据, 进行前进速度自动调控。该系统设有报警装置, 当损失量超过设定值, 警报灯亮起, 提示采取相应措施。系统流程如图 7 所示。

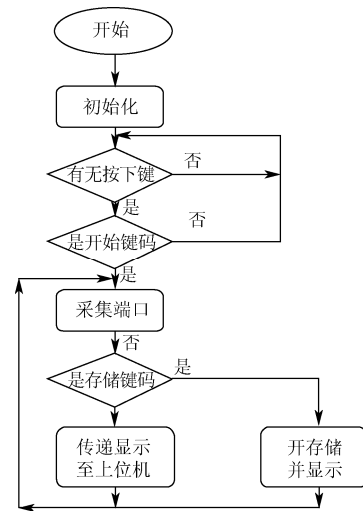


图 7 监控系统流程图  
Fig.7 Flowchart of monitoring system

由于本装置只是监测联合收割机清选排出口的部分区域, 因此需要对监测到的谷粒数进行修正  
谷粒损失粒数

$$n = a\mu \quad (6)$$

谷物损失量

$$m = \frac{ab\mu}{1000} \quad (7)$$

式中,  $n$  为谷粒损失粒数;  $m$  为谷物损失量, kg;  $a$  为谷粒损失检测值;  $\mu$  为修正系数;  $b$  为谷物千粒质量, kg。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 信号补偿特性试验

将清选损失检测传感器固定在收割机上, 如图 3 所示, 将放大倍数设置为 50 倍, 利用美国 WAVEBOOK/512H 数据采集分析仪同时采集 2 路信号, 并将 2 路信号进行补偿处理。原地发动收割机, 先喂入脱粒后的无谷粒稻草, 上下两压电晶体信号如图 8a、8b 所示, 进行补偿之后试验效果如图 9a 所示; 后喂入带有谷粒的稻秆进行补偿特性试验, 试验效果如图 9b。采集到的收割机及茎干的信号输出幅值在 0~1 V, 补偿之后幅值在 0.2 V 以下, 大大的降低了噪声信号对谷粒信号的干扰, 提高了损失谷粒信号的分辨率。

从试验效果看，经过信号补偿之后，可以有效地减弱收割机、茎干等噪声的干扰，提高了谷粒损失信号的识别检测精度和可靠性。

### 2.2 实验室试验

实验室试验在江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室进行。将检测传感器安装到福田雷沃谷

神切纵流联合收割机上，接通监测仪，按实际工况发动收割机，监测仪无计数显示。选用联合收割机清选损失排出物，距离传感器 35 cm 处抛掷收割机 3 种清选筛排出物。经试验检查，所设计的监测仪可有效监测谷粒数，结果如表 1 所示。

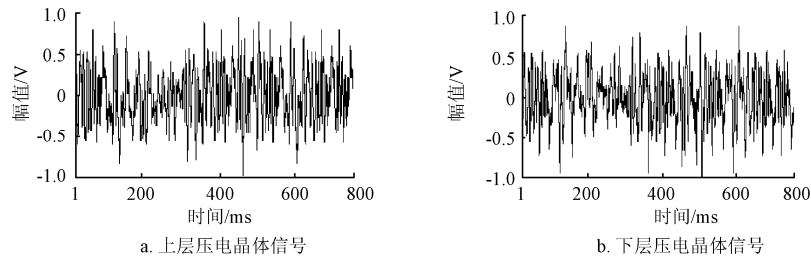


图 8 振动及茎秆信号图

Fig.8 Vibration signal and stem signal

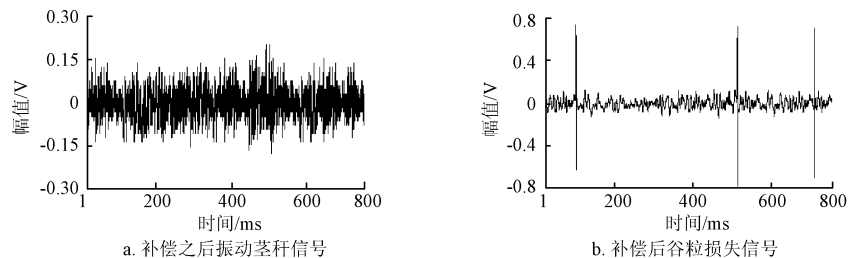


图 9 信号补偿图

Fig.9 Signal compensation effect

表 1 实验室试验数据

Table 1 Measurement data of Laboratory test

试验号	排出物	监测仪计数	准确率
1	茎秆	无	
2	颖壳、碎草	无	
3	谷草混合物	有	98.4%

从试验结果看，监测仪的检测精度和可靠性较好。

### 2.3 田间试验

为检验研制监测装置的实际工作性能，于 2011 年 6 月 3 日在江苏丹阳练湖农场进行小麦田间收获试验；2011 年 10 月 9 日在黑龙江佳木斯宝泉岭农场进行水稻田间收获试验。

在进行田间收获试验时，联合收割机使用福田雷沃谷神切纵流联合收割机。一般情况下，放大电路的放大倍数设为 100，比较电压为 1.0 V，同时可根据田间的实际工况，对放大倍数进行微调。调整原则为：试验前让收割机正常工作状态下在田间走动一段时间，在没有稻谷喂入时，监测仪没有数据显示；当人工向监测传感器扔掷清选排出物（谷草混合物）时，监测仪显示监测损失谷粒数据且准确，这表明在该参数下，监测装置可以有效精确的提取谷粒的激励信号。试验时，联合收割机以正常的工作状态进行收获，机组每行进 10 m 作为一次测量点，共测试 3 次。试验中用油布兜住清选筛抛出物，

后将收集物进行人工分离谷草，称出损失谷粒总质量，根据千粒重计算出谷粒总数，试验数据如表 2、3 所示。

表 2 田间麦收鉴定试验数据

Table 2 Measurement data of wheat cleaning losses monitor

试验号	测量值/粒	实际值/粒	相对误差/%	平均误差/%
1	1962	1928	1.81	
2	2055	2104	2.35	2.16
3	1746	1787	2.27	

从表 2 中可见，测量值经过修正系数调节后，麦收试验测量平均误差为 2.16%，最大误差为 2.27%。

表 3 田间稻收鉴定试验数据

Table 3 Measurement data of rice cleaning losses monitor

试验号	测量值/g	实际值/g	相对误差/%	平均误差/%
1	66.221	64.587	2.53	
2	60.302	59.054	2.11	2.48
3	77.204	75.094	2.81	

从表 3 中可见，测量值经过修正系数调节后，稻收测量平均误差 2.48%，最大误差为 2.81%。

江苏省农业机械试验鉴定站对上述水稻田间试验进行了鉴定。从鉴定结果看，监测系统具备了较高精度在

线测量清选损失的能力, 整个系统基本达到了实际应用的目标。

### 3 结 论

本文设计了联合收割机谷物清选损失监测装置, 通过 3 个途径有效的提取谷粒损失信号: 1) 采用对称结构进行信号补偿, 有效地消弱干扰信号, 增强谷粒信号识别能力; 2) 根据谷粒、茎秆打击传感器频率的差异, 采用滤波电路消除茎秆和碎草的影响; 3) 根据谷粒、茎秆和振动信号幅值的差异, 设定幅值比较电压。田间试验结果表明所设计的监测装置准确度高、可靠性好, 麦收试验测量平均误差为 2.16%, 最大误差为 2.27%; 稻收测量平均误差 2.48%, 最大误差为 2.81%。

#### [参 考 文 献]

- [1] 周利明, 张小超. 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, 6(41): 167—171.  
Zhou Liming, Zhang Xiaochao. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 6(41): 167—171. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李俊峰. 联合收割机谷物损失传感器结构改进设计及其实验室标定[J]. 农业装备与车辆工程, 2006(11): 10—13.  
Li Junfeng. Improvement design of the structure of combine harvester grain loss sensor and laboratory calibration[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2006(11): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李俊峰, 介站. 联合收割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 with English abstract)
- [4] 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 with English abstract)
- [5] 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 with English abstract)
- [6] 倪军, 毛罕平, 张晓东. 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. 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 with English abstract)
- [7] Osselaere, Guy H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters[P]. U. S. 4540003. 1985-09-10.
- [8] Diekhans, Norbert, et al. Lost-grain detector for harvesting machine: U.S., 4902264[P]. 1990-02-20.
- [9] Strubbe, Gilbert J I. Grain loss monitors for harvesting machines: U.S., 5046362[P]. 1991-09-10.
- [10] Gerd Bernhardt, Ralf Hübner. Apparatus and method for determining grain loss in combine harvesters[P]: U.S., 6869355. 2005-03-22.
- [11] 张福学, 孙慷. 压电学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [12] 李远, 秦自楷, 周志刚. 压电与铁电材料的测量[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [13] Ni Jun, Mao Hanping. Kinetic model about sensitive plate of the grain losses sensor[C]//Proceedings of the 2007 International Conference on Agriculture Engineering, 2007: 604—609.
- [14] Ni Jun, Mao Hanping. Study on array piezocrystals grain loss sensor[C]//ITESS 2008, 2008, 2: 1 058—1 061.
- [15] Kotyk W M, Kirk T G, Wilson R J, et al. U nthreshed head gra in loss m onito :rU S,4825146[P]. 1989-04-25.
- [16] 祁广云, 王熙. 谷粒损失监视仪的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1996, 8(4): 67—72.  
Qi Guangyun, Wang Xi. Study on the monitor for grain loss[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 1996, 8(4): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 22—27. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 142—147.  
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 142—147. (in Chinese with English abstract)

## Design of intelligent monitoring system for grain cleaning losses based on symmetry sensors

Mao Hanping, Liu Wei, Han Lühua, Zhang Xiaodong

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

**Abstract:** A kind of monitoring system for combined harvesters cleaning losses was designed. The symmetry sensors were used to eliminate machine vibration interferences. The stimulating signals were processed by charge amplifier bandpass and antialiasing filter, and the signals of cleaning losses were then extracted effectively. The single-chip computer unit was used for monitoring and counting in real-time. The results of laboratory test and field test showed that the designed monitoring system can effectively monitor combined harvesters cleaning losses, and the maximum measurement error is 2.81%, which meets the practical monitoring requirements.

**Key words:** sensors, combines, monitoring, cleaning losses