

压电式种子计数系统*

张霖 赵祚喜 可欣荣 冯贤超 张智刚 黄健
(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

【摘要】提出了一种基于压电传感器的种子数粒系统,该系统用悬臂梁结构感受种子冲击以及用压电元件将冲击转换为电信号,经过放大整形后变成脉冲信号输入单片机计数并显示。根据典型的弹簧-质量-阻尼系统的二阶传递函数理论,对系统阻尼振动频率和阻尼比进行了分析。选用合适的高分子材料和安装方式,使系统拥有较好的阻尼比,种子短暂的冲击作用变换为单个波峰电压信号以实现准确计数。实验室试验结果表明,数粒系统单粒测量误差小于0.4%。

关键词: 种子 压电传感器 悬臂梁 振动 数粒
中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0041-05

Seed-counting System Design Using Piezoelectric Sensor

Zhang Lin Zhao Zuoxi Ke Xinrong Feng Xianchao Zhang Zhigang Huang Jian
(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

A seed-counting system was put forward with a cantilever beam detecting the impact of falling seeds, a piezoelectric sensor converting the impact into electrical signals, and a micro-controller counting and displaying seed counts. Based on the classical second-order transfer function model of the spring-mass-dashpot system, the natural frequency and damping ratio were analyzed. By using appropriate polymer material and signal conditioning, a testing system with proper damping ratio was constructed. The impact of a single seed became a single fast decaying pulse signal so that easy counting could be implemented. The experimental system showed the measurement error was less than 0.4% in single seed counting tests.

Key words Seed, Piezoelectric sensor, Cantilever beam, Vibration, Seed counting

引言

培育、选种、产量预测都涉及千粒质量。人工数种繁琐而枯燥,费时且易产生误差。华南农业大学研制的水稻精量穴直播机,可实现播量可调、多穴(10穴)和精量穴直播^[1]。为监测水稻直播机排种性能,排种器上装有排种状态红外监测计数系统,但限于光电式结构,多粒种子重叠时易出现漏检现象。现有的计数仪器属于光电式,在机械结构上保证种子排队单粒下落,速度只能达到330粒/min左右^[2~3]。国内对光电式排种检测系统作了不少研

究,改善了漏检、重播的情况^[4~5]。王树才等采用压电声电传感器将下落籽粒机械碰撞产生的声脉冲转换为电脉冲,利用单片机处理,可以检测单粒排种器排种性能参数^[6]。文献[7~9]提出利用图像处理技术对种子进行计数,准确率很高,但易受环境影响,还处于试验阶段。图像处理技术应用在排种性能检测中可得到很高的精度,但图像法存在振动和环境噪声干扰等问题,安装困难,且成本高昂,使其应用受到限制^[10~12]。

本文设计基于压电传感器的种子计数系统,利用压电陶瓷片检测种子撞击悬臂梁后产生的振动,

收稿日期: 2010-07-21 修回日期: 2010-08-16
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10A304,2006AA10Z255)
作者简介: 张霖,硕士生,主要从事农业机械自动导航研究,E-mail: zhln@163.com
通讯作者: 赵祚喜,教授,主要从事农业机械与装备自动控制研究,E-mail: zhao_zuoxi@hotmail.com

将振动转换为电压波形,经放大整形后变成单个窄脉冲信号,实现种子计数。

1 总体方案

当种子从某一高度下落,与固定在落种导管下方且有一定倾角的悬臂梁式机构撞击,悬臂梁受撞击后产生的振动经过悬臂梁下端的压电传感器变换为电压信号,经信号处理电路输入单片机进行计数。压电式计数系统结构如图 1 所示。

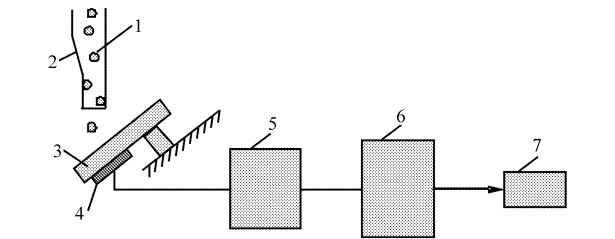


图 1 压电式计数系统结构示意图

Fig.1 Structural diagram of piezoelectric seed-counting system

1. 种子 2. 落种导管 3. 悬臂梁 4. 压电传感器 5. 放大电路
6. 单片机 7. LED 数码管

2 机械结构与传感器电路

2.1 机械结构

悬臂梁拥有合适的阻尼是传感器能检测到良好振动衰减波形的基础。阻尼方法主要有系统阻尼、结构阻尼和材料阻尼^[13]。系统阻尼是在系统中设置专用的阻尼减振器,如减振弹簧、冲击阻尼器等;结构阻尼是在系统的某一振动结构上附加材料或形成附加结构,增加系统自身的阻尼能力;而材料阻尼是利用材料本身具有的高阻尼特性。本文选择材料阻尼法。

阻尼材料也称为粘弹性材料,粘弹性材料的力学特性介于粘性液体和弹性固体之间,它既是粘性的又是弹性的,同时具备流体和弹簧的性质^[14]。在机械系统中,线性粘性阻尼是最常用的一种阻尼模型。把种子的一次撞击近似为一次冲击输入,而材料近似为线性粘弹性材料系统,则系统可用 Kelvin 阻尼模型描述,它由一个虎克弹簧(弹性模量为 k)和一个牛顿粘壶(阻尼为 η)并联而成,如图 2 所示。

二阶系统传递函数的数学模型为

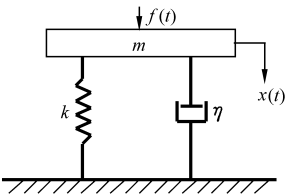


图 2 Kelvin 阻尼系统模型

Fig.2 Kelvin damping system model

其中 $\omega_n = \sqrt{k/m}$

式中 ω_n ——系统固有频率
 k ——材料的弹性模量
 m ——质量
 ξ ——阻尼比

由经典控制理论可知,对于弹簧-质量-阻尼二阶系统模型,阻尼比一定时系统固有频率越大,瞬态响应分量衰减越迅速,系统能够更快达到稳态值,响应的快速性越好。由 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 可知,系统应有较大的弹性模量 k 和较小质量 m 。图 3 为二阶系统在不同阻尼比情况下对单位脉冲信号的时间响应曲线。由图可知,当二阶系统有合适的弹性模量、质量和阻尼比时,脉冲响应近似为单个波峰且响应迅速。材料的理想阻尼比为 0.2~1.0,即第一个波峰与第二个波有较大的差值,便于设定触发参考电平,为后续计数提供方便。

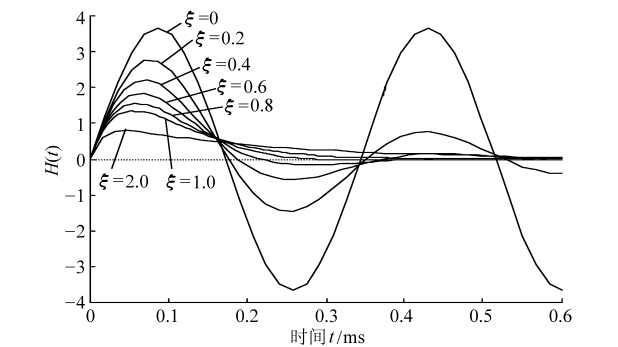


图 3 二阶系统对单位脉冲信号的时间响应曲线

Fig.3 Impulse response curves of second-order system with different inertial factors

通过多种材料试验求证,最后选用减震橡胶作为悬臂梁材料。橡胶是典型的粘弹性材料,是一种高分子聚合物,能通过橡胶分子和分子之间以及橡胶分子和填充剂之间的相互作用产生内摩擦而起阻尼作用^[15]。压电传感器选用环形压电陶瓷片,外圆直径为 32 mm,中孔直径为 10 mm,厚度为 2 mm。压电陶瓷片质量较小,谐振频率接近 100 kHz。根据压电陶瓷片的尺寸和安装要求,选用 70 mm×40 mm 的减震橡胶块作为悬臂梁。

为了让种子撞击后顺利弹开,避免再次撞击,悬臂梁安装倾斜角约为 45°,种子则由落种导管引向悬臂梁下端。用硅胶把压电陶瓷片粘贴在受种子冲击的悬臂梁背面,悬臂梁另一端固定。悬臂梁上粘贴有压电传感器的区域对振动有较好的响应。落种导管中间段呈缩口型,种子下落出口段为矩形段,落种导管的整体高度应使种子冲击力有足够的余量,补偿因部分种子质量较轻或者与导管接触碰撞后损失的能量。整体结构如图 4 所示。

2.2 压电传感器信号放大电路

压电传感器是基于介质材料的压电效应实现压力-电荷转换。当材料受力作用产生形变时,其两极表面会有正、负电荷产生,从而实现非电量参数测量(本文是冲击力)。压电传感器可以看作一个电荷发生器,等效为一个与电容并联的电压源^[16]。压电传感器本身具有极高的阻抗,输出能量较小,它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的放大器,把压电传感器的高输出阻抗转换成低阻抗输出和放大传感器输出的微弱信号^[16]。

实际使用中常使用电荷放大电路^[17]。通常为了提高测量精度,在输入前置电荷放大电路后面会加入适调放大电路、低通滤波和高通滤波部分及同相放大电路等。

本设计中压电传感器放大电路不需要很高的测量精度,故设计了单电源的电压放大电路,无需负电源,输出可与单片机直接连接。电路原理图如图 5 所示。

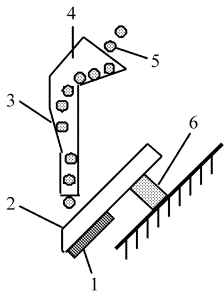


图 4 整体结构示意图
Fig. 4 Mechanical structure model

1. 压电传感器 2. 悬臂梁
3. 落种导管 4. 落种引导口
5. 种子 6 固定连接块

$$\frac{u_o - u_-}{R_5} = \frac{u_- - u_r}{R_4}$$
$$u_- \approx u_+ = u_i + u_r$$

联立两式 (其中 $u_r = \frac{u_{cc}}{R_1 + R_2} R_2$), 可解得

$$u_o = u_r + \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) u_i \tag{2}$$

由式(2)可知,此放大电路是一种直流放大,电路运放的输出电压与偏置电压 u_r 和电阻 R_4 、 R_5 有关,调节 R_4 可调节放大倍数。

3 单片机计数系统

3.1 信号波形分析

压电陶瓷片上方的悬臂梁区域是系统响应的敏感区域,让一粒种子(绿豆)距 10 cm 高处下落撞击此区域,并用示波器检测压电陶瓷经运放电路放大的波形,其典型波形如图 6a 所示。对于长宽相同、厚度不同的橡胶板(质量不同),其波形响应周期不同,且其阻尼大小随厚度的增加而增加。选用长、宽、高为 70 mm、40 mm、15 mm 的橡胶板作为悬臂梁。测量此波形的振荡周期 $T \approx 200 \mu s$,对比图 2 中二阶系统对单位脉冲信号的时间响应曲线可知阻尼比 $\xi \approx 0.2$ 。由 $\omega_n = \sqrt{k/m}$,可求得减震橡胶的弹性模量的数量级为 10^7 Pa,与材料参数接近。根据减震橡胶的弹性模量 k 、质量 m 和阻尼比 ξ ,在 Matlab 中建立传递函数模型,输入悬臂梁材料的弹性模量 k 、质量 m 和阻尼比 ξ ,得到模型对脉冲的响应曲线,如图 6b 所示。两波形相近,可知在材料弹性模量和阻尼较大且冲击力不大时,可忽略悬臂梁结构的挠

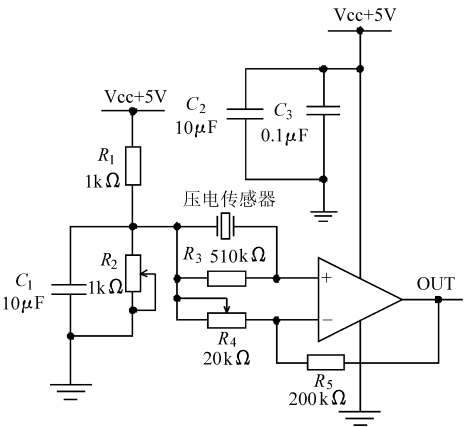


图 5 单电源压电传感器电压放大电路
Fig. 5 Single supply amplifying circuit for the piezoelectric sensor

运算放大器选用 TLC27M2,单电源工作,具有很高的输入阻抗(高达 $10^{12} \Omega$)和低偏置电流(pA 级, 10^{-12} A)。 R_1 和 R_2 提供运放的偏置电压, R_3 提供运放正常工作所需的微弱的偏置电流。设压电传感器左端的参考电压为 u_r ,压电传感器产生的电压为 u_i ,输出电压为 u_o ,放大器同相输入端电压为 u_+ ,反相输入端电压为 u_- ,假定将运放视为理想运放,则有

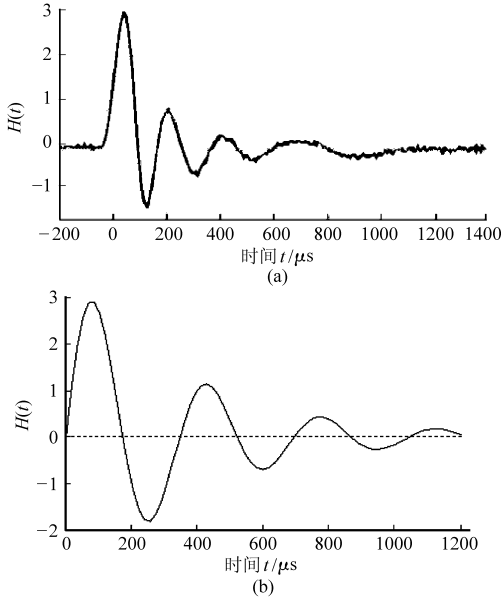


图 6 系统脉冲响应波形图
Fig. 6 System impulse response waveform
(a) 示波器所测实际波形 (b) Matlab 仿真波形

性形变,直接把系统近似为材料本身的阻尼模型。 $\xi \approx 0.2$,说明机械结构部分中系统的阻尼不够大,但可满足本应用的要求。

3.2 单片机系统

计数系统硬件由 C8051F040 单片机和数码管组成。单片机内部有比较器模块,当经放大后的振动波形超过设定的参考电压时,触发比较器中断。图 7 为波形处理过程的示意图。横坐标每个网格的间隔为 $200\ \mu\text{s}$ 。当振动波形电压超过参考电压时,触发中断。进入中断后,种子粒数加 1,置一引脚为高电平;中断服务程序结束时,把该引脚电平拉低(便于示波器观察),适当延时使整个中断处理时间约为 $100\ \mu\text{s}$;再把中断位清零,则中断程序处理时间近似为脉冲宽度。主程序中把种子粒数显示在数码管上。

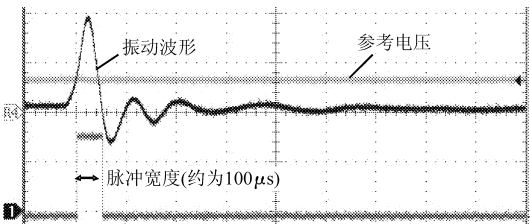


图 7 波形处理过程示意图
Fig. 7 Waveform processing procedure

4 性能试验

由系统工作原理可知,种子下落时间间隔 $100\ \mu\text{s}$ 以上时能保证种子计数的准确性。本系统中,种子从距悬臂板 $15\ \text{cm}$ 高处落种导管落下,则可知只要保证种子间隔在 $0.2\ \text{mm}$ 以上,即可保证时间间隔大于 $100\ \mu\text{s}$ 。绿豆种子大部分呈长圆形,与悬臂梁撞击后有可能会翻滚而产生第二次撞击。设置的参考电压需大于豆子第二次撞击且小于第一次撞击产生的波形,还要保证一定的余量。通过多次试验,确定参考电压比运放静态下的输出电压 u_{out} 大 $0.3\ \text{V}$ 时有较好的适应性。

为验证压电式数粒系统的性能,设置参考电压与运放静态下的输出电压 u_{out} 压差为 $0.32\ \text{V}$,进行如下试验:试验 1 是每次向落种导管口放入 1 粒种

子(绿豆),重复 6 次试验;试验 2 是每次向落种导管口随机放入 $2 \sim 10$ 粒种子,重复 6 次,试验结果如表 1 所示。

表 1 种子(绿豆)下落测试结果
Tab. 1 Testing results of falling seeds (beans) 粒

项目	试验 1 (单粒下落)	试验 2 (多粒下落)
实际值	1 000	1 000
实测值 1	998	993
实测值 2	1 001	996
实测值 3	997	990
实测值 4	1 000	988
实测值 5	1 002	992
实测值 6	997	989
测量误差/%	0.4	1.3

试验过程中,全程观察示波器上运放电路输出电压、参考电压和脉电压波形。对于试验 1,小部分种子本身质量较小且下落过程中与落种导管多次碰撞,损失能量较大,与悬臂梁撞击后产生的波形小于设定的参考电平。对于试验 2,虽有多粒种子同时下落,但显示在示波器上的振动波形间隔都在 $1\ \text{ms}$ 以上。可见,经过落种导管,种子之间有较好的间隔,粒子数的增加在一定程度上相当于增加粒子下落频率。其误差来源主要是多粒种子下落碰撞时可能会相互干扰,造成能量损失,甚至是直接被撞开未能与悬臂梁撞击。

本次试验设置参考电压与运放静态下的输出电压差值为 $0.32\ \text{V}$,减小此值会使试验结果值大于实际数,且在一定范围内越来越大。相反,增大会使试验结果值小于实际数,且在一定范围内越来越小。

5 结束语

压电式种子计数系统能达到较高的精度,单粒测量误差小于 0.4% 。选用的悬臂梁材料具有较好阻尼特性,满足此应用要求。压电传感器的放大电路简单有效,真实地放大了原始信号。

参 考 文 献

1 罗锡文,蒋恩臣,王在满,等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(12): 52 ~ 56.
Luo Xiwen, Jiang Enchen, Wang Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12): 52 ~ 56. (in Chinese)

2 侯加林,米庆华,丁毅. 精密种子数粒仪的研制[J]. 农机化研究,2000(3): 78 ~ 81.

3 张小津,刘顺康. DS 型多用数粒仪的研制[J]. 电子工程师,1995(2): 34 ~ 37.

4 郑一平,花有清,林 ,等. 水稻直播机的排种数检测方法[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(4): 471 ~ 474.

Zheng Yiping, Hua Youqing, Lin Jie, et al. Research on methods of working out seeding quantity of rice drill[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005, 31(4): 471 ~ 474. (in Chinese)

5 赵立业, 蹇兴东. 排种性能检测传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 42 ~ 44.

Zhao Liye, Jian Xingdong. Study on optoelectronic sensor for performance detection of a seedmeter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mechinery, 2005, 36(7): 42 ~ 44. (in Chinese)

6 王树才, 许绮川, 彭传友, 等. 单粒排种器单片机检测系统性能研究[J]. 华中农业大学学报, 1998, 17(1): 96 ~ 100.

Wang Shucui, Xu Qichuan, Peng Chuanyou, et al. Studies on the measurement of chip microprocessors system of single seed drill[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1998, 17(1): 96 ~ 100. (in Chinese)

7 张云鹤, 乔晓军, 王成, 等. 种子自动数粒仪[J]. 自动化技术与应用, 2005(3): 59 ~ 61.

Zhang Yunhe, Qiao Xiaojun, Wang Cheng, et al. An automatic seed-counting system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2005(3): 59 ~ 61. (in Chinese)

8 苏威. 基于机器视觉的重叠类圆颗粒计数系统[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

Su Wei. A system for counting overlapped quasi-circular granule by machine vision technology[D]. Zhenjiang: Jinagsu University, 2009. (in Chinese)

9 何有根. 基于图像识别的千粒重仪研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

He Yougen. Research on the instrument of the mass of 1 000 based on image recognition[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007. (in Chinese)

10 姜忠爱. 虚拟仪器技术和图像处理技术在精密种机排种性能测试中的应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.

Jiang Zhongai. Application research of virtual instruments and image processing technique on seedmeter performance test [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005. (in Chinese)

11 王朝辉. 基于高速摄像的精密排种器性能检测的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2003.

Wang Chaohui. A study of information fusion appiled to remove sensing and identity verification system[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2003. (in Chinese)

12 安爱琴. 精密排种器排种质量的机器视觉检测方法[D]. 太谷: 山西农业大学, 2003.

An Aiqin. Detection method to quality of the seed metering device of the precise sowing based on the machine vision[D]. Taigu: Agricultural University of Shanxi, 2003. (in Chinese)

13 张忠明, 刘宏昭, 王锦程, 等. 材料阻尼及阻尼材料的研究进展[J]. 功能材料, 2001, 32(3): 227 ~ 230.

Zhang Zhongming, Liu Hongzhao, Wang Jincheng, et al. Damping of materials and progress in the damping materials[J]. Journal of Functional Materials, 2001, 32(3): 227 ~ 230. (in Chinese)

14 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007.

15 户原春彦, 牟传文. 防振橡胶及其应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.

16 王君, 凌振宝. 传感器原理及检测技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003.

17 查万纪. 压电加速度传感器测量电路的研究与设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2005.

Cha Wanji. The study and design of the measurement circuit for the piezoelectric accelerometer detection method to quality of the seed metering device of the precise sowing based on the machine vision [D]. Hefei: Anhui University, 2005. (in Chinese)