

文章编号:1673-095X(2016)03-0012-04

## 液相单片阵列式压电传感器测量系统研究

胡远威<sup>1</sup>, 赵新华<sup>1</sup>, 盛 烜<sup>1</sup>, 高志贤<sup>2</sup>, 朱惠忠<sup>3</sup>

(1. 天津理工大学 机械工程学院 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;

2. 军事医学科学院 卫生学环境医学研究所 天津市环境与食品安全风险监控技术重点实验室,

天津 300050; 3. 深圳清华大学研究院 信息与光机电研究所, 深圳 518057)

**摘 要:**阵列化、集成化、智能化是近年来压电传感器的重要研究方向,因此本文设计并研制了一种用于液相检测的单片式阵列压电传感器测量系统,在单个压电晶片上制作五个电极单元,并以塑料封装的形式用于液相检测,五对电极由单片机控制选时导通,以消除测量时的共性干扰因素。采用锁相环电路和变压器支路补偿的硬件电路方式补偿晶体制作时不可避免的并联电容,以提高晶体的液相起振性能,使其工作在串联谐振频率。将所研制的测试系统用于沙门氏菌的生物检测中,有较好的测试效果。

**关键词:**阵列式传感器;锁相环电路;电容补偿;生物检测

中图分类号:TP212.13

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-095X.2016.003.003

## Monolithic piezoelectric sensor array system for liquid phase

HU Yuan-wei<sup>1</sup>, ZHAO Xin-hua<sup>1</sup>, SHENG Xuan<sup>1</sup>, GAO Zhi-xian<sup>2</sup>, ZHU Hui-zhong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechatronical System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Risk Assessment and Control Technology for Environment and Food Safety, Institute of Health and Environment Medicine, Tianjin 300050, China; 3. Center for Information and Optomechatronics, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** In recent years, the research of array integrated and intelligent is an important development direction of piezoelectric sensor. A novel monolithic array piezoelectric sensor measuring system is designed and fabricated, which can be used in liquid phase detection. Five electrode units are fabricated on a single piezoelectric chip which are used in the form of plastic packaging. The operation mode of the five pairs of electrodes are controlled by a single chip microcomputer to eliminate the common interference factors during the measurement. Phase locked loop circuit and transformer branch circuit is used to compensate for the inevitable parallel capacitor, which is used to improve the vibration performance of the crystal, and to make it work in series resonant frequency. The developed test system is used for the detection of Salmonella and has a good test result.

**Key words:** array sensor; phase locked loop circuit; capacitance compensation; biological detection

压电传感器是一类以压电晶体为换能元件,利用压电效应,将待测物的质量信号转换成频率信号,从而实现质量、浓度等检测的仪器<sup>[1]</sup>。而阵列化、集成化、智能化是压电传感器近年来的重要研究方向。本文所研究的测量系统是一种基于单片扫描式阵列传感器<sup>[2-3]</sup>所构建的单面触液的监测系统平台。位于同一晶片上的不同电极对单元共处于同一液相环境

下,在相同的测量时间和测量环境下,分时选通测量,消除干扰因素,为传感器测量提供参比,进而提高检测的精度和准确度。石英晶体以其频率稳定性好、价格低廉、化学性稳定而被广泛作为常用的传感器敏感材料,而近年来硅酸镓镧以其良好的液相稳定性作为新型压电材料也正在被应用<sup>[4]</sup>,所研制的传感器分别使用了这两种压电晶体制备传感器。

收稿日期:2015-10-28.

作者简介:胡远威(1989—),男,硕士研究生,Email:1021139401@qq.com.

通讯作者:赵新华(1962—),男,博士,教授,硕士生导师,E-mail: xinhua Zhao@tjut.edu.cn.

## 1 单片阵列传感器制备

结合实验室前期理论研究,所研制的传感器如图 1、图 2 所示。选用 AT 切型的石英晶片,基频为 10 MHz,晶片尺寸为 22×10×0.21(mm),在晶片的两面蒸镀上 5 对阵列单元电极,通过触点 B、D(正面电极)和触点 A、C、E(背面电极)的不同接入组合,实现在某一时刻只有一对电极工作,从而避免各单元之间的振动耦合。

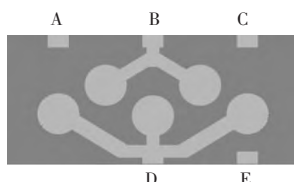


图 1 正面电极

Fig.1 Positive electrode

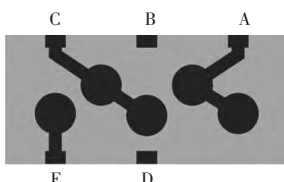


图 2 背面电极

Fig.2 Back electrode

封装后的传感器阵列器件如图 3 所示,采用双列直插式的传感器封装结构,以方便接入后续系统及传感器的更换;设计制作 PCB 底板,通过导电银浆将传感器的触点与 PCB 板的引线联通,再在 PCB 板上焊接上引脚,正面通过塑封形成检测所需液相池,最后通过硅胶密封外壳与晶片之间的缝隙。加液后晶体为单面触液,这种设计保证了晶体免受外界干扰,并且使阵列电极共处于同一液相检测环境下。封装后的传感器经实际使用,有良好的起振性能。

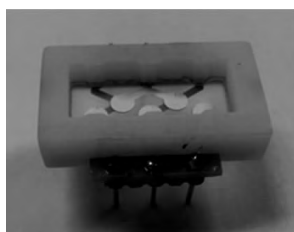


图 3 压电阵列传感器

Fig.3 Piezoelectric array sensor

## 2 阵列式传感器测量系统

### 2.1 系统结构

如图 4 所示,系统由阵列式传感器、继电器选通电路、单片机控制模块、锁相环振荡电路、混频电路,及频率采集模块等组成。

系统工作原理为:通过软件编程控制单片机 3 个 I/O 口输出高低电平来控制对应 3 个继电器的导通方式,使阵列传感器有且仅有一对阵列单元选通,选通的阵列单元与后续的锁相环振荡电路联通,当频率

稳定时,锁相环电路输出阵列单元的振荡频率和阻抗值,通过混频电路,将锁相环输出频率与一个 10 MHz 标准石英晶振做差频以便捕捉频率变化,最后通过测频模块显示晶体频率。

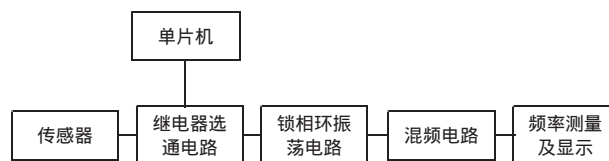


图 4 系统结构

Fig.4 System structure

### 2.2 继电器选通电路

系统所使用的选通电路如图 5 所示,3 个继电器(黑色方框)的地端相连后与单片机共地,单片机与矩阵按键相连接,通过软件编程,以按键的方式控制 3 个单片机 I/O 口的输出组合,从而实现相应阵列单元的选通。

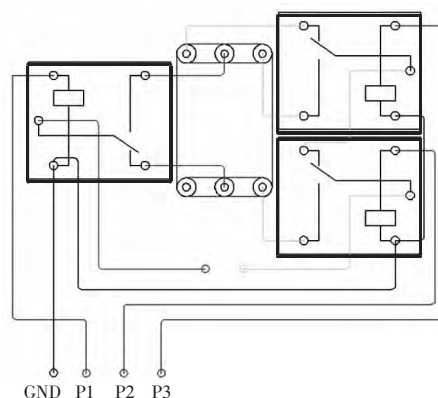


图 5 继电器选通电路

Fig.5 Relay operation mode circuit

### 2.3 单片机控制

在定时器中断中设置周期为 1 s 的按键扫描,同时以软件编程的形式,消除按键按下时的抖动。主函数为按键函数检测,按键按下时,对应 3 个 I/O 口有高低电平输出。

### 2.4 锁相环振荡电路

在所设计的锁相环振荡电路中,包含如图 6 所示各部分,由以往的研究可知压电晶体的液相起振性能主要由晶体电极间并联电容所限制,本文的设计则是利用锁相环电路<sup>[5]</sup>的特点对晶体的并联电容进行补偿<sup>[6-7]</sup>,所用到的电容补偿方法是变压器支路补偿法<sup>[8]</sup>如图 7 所示。

电路设计原理为:由压控振荡电路(VCO)输出一稳定的正弦信号作为参考信号,将传感器与电容补

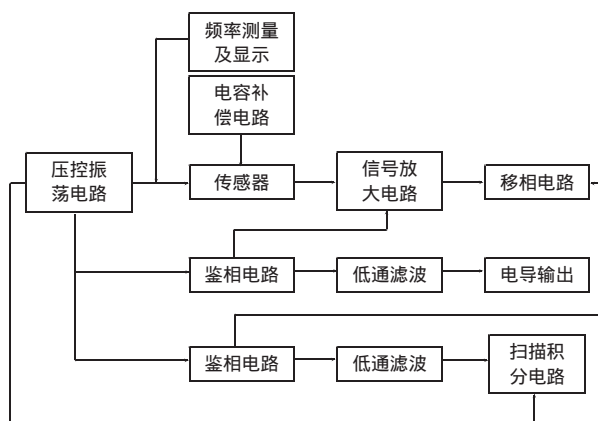


图 6 锁相环电路系统框图

Fig.6 Phase locked loop circuit system block diagram

偿电路连接后接入锁相环电路,根据电容补偿程度的不同,传感器输出的信号将会产生  $0 \sim \frac{\pi}{2}$  的相位变化;传感器输出的信号经放大电路放大后,分两路分别进入两个双二极管平衡电路(鉴相电路)与压控振荡器输出的参考信号进行混频鉴相;由于进入双二极管平衡电路前后的信号频率相同,电压与相位不同,故根据二极管平衡电路的性质经滤波后由相位的变化将产生两路直流信号,第一路可作为晶体阻抗的检测输出,同时根据后续电路的设计其阻抗对应的幅值可以作为锁相环电路锁定状态的检测信号,而第二路则接入后续扫描积分电路,当且仅当电容完全补偿时,第二路输出直流为 0,扫描积分电路停止扫描,电路锁定,压控振荡输出所求频率。

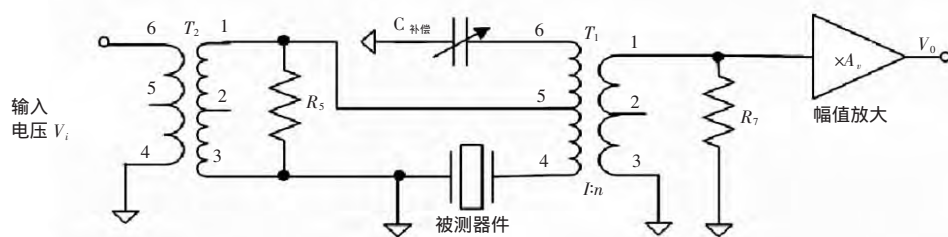


图 7 变压器电容补偿电路

Fig.7 Transformer capacitor compensation circuit

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 传感器阵列单元测试

在实际实验前先对传感器性能进行检测。图 8 所示的是,网络分析仪 HP8752A 对传感器各单元的检测结果显示。图中横坐标为扫描频率值,纵坐标为反射功率电平的分贝值,反映待测器件的阻抗值,峰值越尖锐,阻抗值越小,表示该元件有更好的起振性能,由于加工因素,1、2 单元有明显的寄生振荡可能干扰测量,故选用 3、5 两个单元做吸附实验,其中单元 4 作为空白对照,实验室不参与质量吸附。

#### 3.2 传感器系统生物实验

将所设计的检测系统用于沙门氏菌的检测,其方法如下:实验前将传感器阵列单元反复洗涤(酸洗),记录下每个阵列单元的初始频率 F1;在金电极表面滴加浓度为 1.2 mg/ml 的葡萄球菌蛋白 A (SPA) 为下一步与沙门氏菌抗体做准备,并记录下频率 F2;金电极表面与 SPA 结合完成后,将浓度为 20 ng/ml 的沙门氏菌抗体滴加在固定有 SPA 的金电极表面,为下一步结合抗原做准备并测得频率 F3;待抗体与 SPA 结合完全后,将浓度为 105 CFU/ml 的沙门氏菌

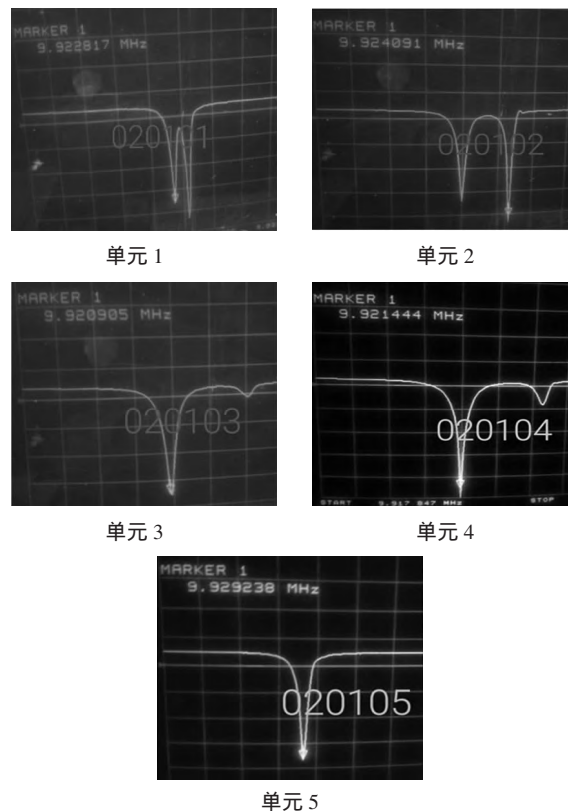


图 8 各单元起振特性

Fig.8 Vibration characteristics of each unit

溶液滴加到与沙门抗体结合完毕的金电极表面 ,待结合完成后记录最终频率 F4.结果如表 1.

表 1 实验结果  
Tab.1 Experimental results

频率/MHz 单元数	F1	F2	F3	F4
通道 3	9.920 905	9.920 621	9.919 761	9.918 363
通道 4	9.921 444	9.921 332	9.920 927	9.920 542
通道 5	9.929 238	9.928 973	9.928 194	9.926 914

从结果可以看出有质量吸附的单元 3 和单元 5 相比于没有质量吸附的通道 4 有明显的频率变化 ,这证明系统初步达到实验预期.

4 结 论

所设计的液相单片阵列式压电传感器测量系统基本可以实现预期功能 ,能够定性的反映出晶片表面吸附质量与晶片频率之间的对应变化关系 ,即随着吸附质量的增加晶体的谐振频率随之下降. 这表明所设计的系统方案是可行的. 阵列式传感器提高了晶片的利用率及检测的效率 ,消除了液相检测中的诸如温度、粘度等环境干扰因素. 选时导通的设计方案 ,又可以很好的避免电极之间的振动耦合. 锁相环电路的使用有效的解决了了晶体加工存在的并联电容所带来的晶体液相起振难的问题 ,提高了晶体频率

测量的精度.

参考文献：

[1] 陈 柱,聂立波,常 浩. 石英晶体微天平的研究进展及应用[J]. 分析仪器,2011(4):18-22.

[2] 石志松,朱惠忠,王文炎. 用于液相生物量检测的单片阵列 QCM 传感器[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1630-1632.

[3] 石志松,朱惠忠,梁吴迪. 单片扫描 QCM 阵列的封装及浸液中频率稳定性[J]. 微纳电子技术,2007,44(7):400-403.

[4] 张海婷. 硅酸镓镧压电传感器的理论与应用研究[D]. 山东:山东师范大学,2007.

[5] 曾兴雯,刘乃安,陈 健,等. 高频电子线路[K]. 北京:高等教育出版社,2009.

[6] Arnau A, Sogorb T, Jiménez Y. A continuous motional series resonant frequency monitoring circuit and a new method of determining butterworth-van dyke parameters of a quartz crystal microbalance in fluid media[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6):2563-2571.

[7] Arnau A, Sogorb T, Jiménez Y. Circuit for continuous motional series resonant frequency and motional resistance monitoring of quartz crystal resonators by parallel capacitance compensation[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73 (7):2724-2737.

[8] 刘小伟. 差分石英晶体微天平的设计与构造[D]. 安徽:中国科学技术大学,2009.