

压电谐振式微质量测量系统

谢建宏

(南昌大学 信息工程学院,江西 南昌 330031)

摘要:基于压电晶体的正、逆压电效应,对压电谐振器的构成原理及压电晶片谐振频率的质量敏感原理(Sauerbrey方程)进行了分析。基于Sauerbrey测量原理,设计了压电谐振式微质量测量系统,对该系统的设计方案进行了分析。为减小温度等环境因素对压电晶体检测性能的影响,系统采用两个相同的石英晶体振荡电路构成双谐振式的压电晶体振荡器。采用模块化设计思想,对该测量系统各模块进行了设计与实现,并对系统性能进行了测试。结果表明,当测量端加载的质量越大,系统测量出的谐振差频值则越大,实验结果与理论分析结果吻合较好。相对于线性的理论结果,该实验结果的非线性误差为5.5%。该系统实现了压电谐振频率的变化与被测微质量之间的变换,能够实现对微质量进行测量。

关键词:压电晶体;谐振频率;微质量;测量系统

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Micro-mass Measurement System Based on Piezoelectric Resonance

XIE Jianhong

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Based on direct and converse piezoelectric effects of piezoelectric crystal, the construction principle of piezoelectric resonator and the mass sensitivity principle of piezoelectric wafer resonant frequency (Sauerbrey equation) are analyzed in this paper. According to the Sauerbrey equation, a micro-mass measurement system based on piezoelectric resonance is designed, and its design scheme is analyzed. To reduce the influence of environmental factors on the piezoelectric crystal detection, the system consists of a dual-resonant piezoelectric crystal oscillator which uses two same quartz oscillation circuits. By the method of modular design, each of modules in the system is designed and implemented, and the performance of the system is tested. The results show that when the loading quality at the measuring end increases, the resonance frequency difference measured by the system is greater, and the experimental results are consistent with the theoretical analysis results. Compared with the linear theoretical results, the nonlinear error of experimental results is 5.5%. The system implements the transformation between the change of the piezoelectric resonant frequency and the measured micro-mass, and can achieve the micro-mass measurement.

Key words: piezoelectric crystal; resonant frequency; micro-mass; measurement system

0 引言

质量是基本的物理量之一,已经有很多为人们所熟知的测量方法,而微小质量的测量特别是精确测量却始终是一个测量难题。微小质量的测量在物理、化学、生物等领域的研究中有着重要的作用,精确的测量数据是理论产生的基础与保证。国内、外现有的微小质量测量方法主要可分为传统的电子天平测量法和新型的谐振式微质量测量法两大类^[1-2]。

新型的谐振式测量方法主要以压电石英晶体作为检测元件,通过测量探测区吸附质量后引起的结构谐振频率的变化量来对被测物进行定性和定量分析,该测量方法具有响应速度快,稳定性好,抗干扰及成本低等特点,精度可达纳克级,在生物分子(DNA、细胞、细菌及病毒等)的识别与检测、微小颗粒探测以及液体、气体成分与浓度的检测等方面得到了广泛应用^[3-4]。

收稿日期:2016-10-19

基金项目:江西省科技支撑计划基金资助项目(20141BBG70006);江西省教育厅科技计划基金资助项目(GJJ14163)

作者简介:谢建宏(1971-),男,江西高安人,教授,博士,主要从事测控技术与智能仪器的研究。

1 测量原理

石英晶体不仅是光学材料,还是一种优良的压电晶体材料,具有正、逆压电效应^[5]。石英晶体在沿一定方向受到外力作用时,内部会产生极化现象,同时某两个表面上产生大小相等、符号相反的电荷,这种将机械能转化为电能的现象称为“正压电效应”。反之,如对晶体施加电场,晶体将在一定方向上产生机械变形,当外加电场撤去后,该变形也随之消失,这种将电能转化为机械能的现象称为“逆压电效应”。当给石英晶体的电极上施加交变激励电压时,根据逆压电效应,石英晶体会产生机械振动。当晶体振动时两电极上会出现交变电压,如果把石英晶体接入具有正反馈的放大电路中,两电极上出现的电压经放大后又以相同的相位反馈到晶体电极上,加强了原来的交变电场,于是晶体的振动能够继续维持。如果振动频率等于晶体的固有振动频率时,晶体会产生谐振,这就是石英晶体谐振器的基本原理^[6],如图1所示。

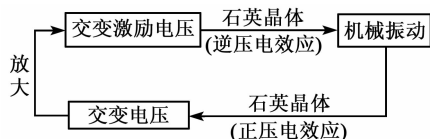


图1 石英晶体谐振器构成原理

常压下,不同切型的石英晶体具有不同的振荡及温度特性,其中以AT切型的晶体具有良好的温度特性,是石英晶体元件最常采用的切型^[7-8]。基于压电元件的正、逆压电效应,德国物理学家 Sauerbrey 对 AT 切型的石英晶体在气相中的振荡规律进行了系统研究,研究了石英晶体表面吸附的微小质量和其频率偏移的关系,并进行了实验验证,推导出了质量吸附和晶体谐振频率偏移的关系式,即 Sauerbrey 方程^[9-10]:

$$\Delta f = -2.27 \times 10^6 \cdot f^2 \cdot \Delta m / A \quad (1)$$

式中: f 为石英晶体的基频; Δm 为敷层即被测物质量; A 为敷层面积; Δf 为晶体谐振频率的变化量;负号表示质量的增加导致频率的下降。式(1)表明,在假定外加质量均匀刚性地附着于晶片表面的条件下,晶片的谐振频率变化与外加质量成正比关系,利用这种特性可以在微克级水平上测量物质的质量。

2 系统设计方案

基于以上 Sauerbrey 测量原理,采用模块化设计思想,设计压电谐振式微质量测量系统。为实现

对微质量的测量,首先必须要设计能因微质量变化而使固有频率变化的石英晶片和晶体振荡电路,接着必须测量出其因微质量引起的谐振频率的变化量,再通过频率变化与质量之间的关系,将谐振频率的变化量转换为质量的变化量,最后将变化的质量显示出来。具体而言,该系统主要包括压电晶体检测子系统和频率测量子系统。压电晶体检测子系统主要包括石英晶片、晶体振荡电路和差频检测电路等;频率测量子系统主要包括主控器、放大整形模块、分频选择模块、基准频率模块、电源、显示模块及报警模块等。为减小温度等环境因素对压电晶体检测性能的影响,系统采用两个相同的压电石英晶体振荡电路构成双谐振式的压电晶体检测子系统。系统设计方案如图2所示,采用的石英晶片如图3所示。该石英晶片采用AT切型,晶体直径为 $\varnothing 13.7$ mm,晶体厚为0.205 mm,晶体的密度为 2.684 g/cm^3 ,频率为 $7.995 \pm 10 \times 10^{-6} \text{ MHz}$,电极直径为 $\varnothing 5.10$ mm,电极材料为10 nm 钛基底+100 nm 纯金(>99.99%),谐振电阻 $<15 \Omega$,并联电容 $<7 \text{ pF}$,工作温度为 $0 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

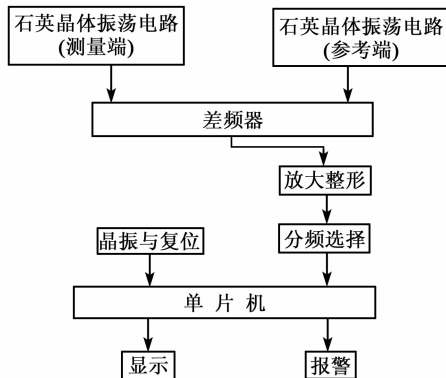


图2 系统设计方案

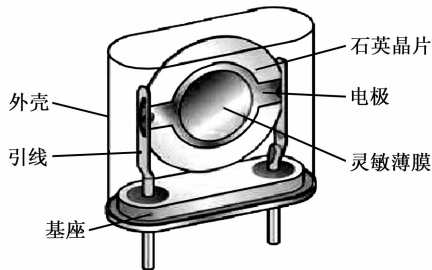


图3 石英晶片

3 系统实现与测试

基于以上设计方案,采用模块化设计思想,对系统各模块进行电路设计。图4、5为系统主要模块设

计电路图。

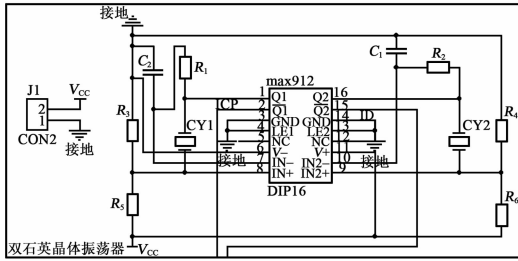


图 4 双石英晶体谐振电路

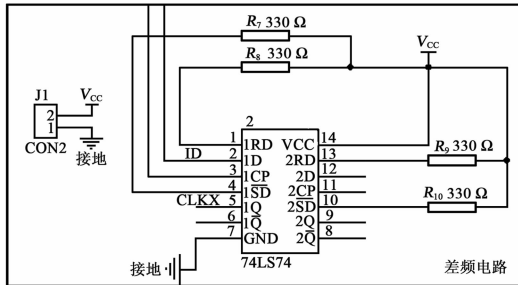


图 5 差频电路

本系统的主程序为基于单片机的频率测量子系统控制程序,如图 6 所示。

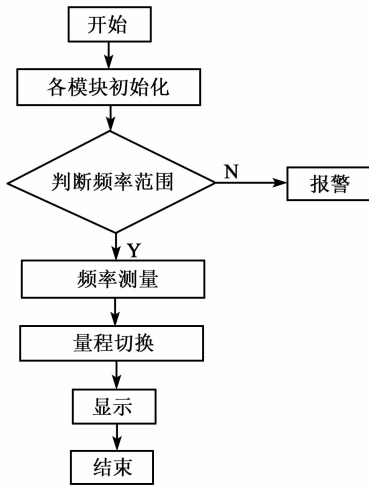


图 6 主程序流程图

通过对系统各模块进行制作,并对各模块进行软、硬件调试与集成,得到系统实物如图 7 所示。

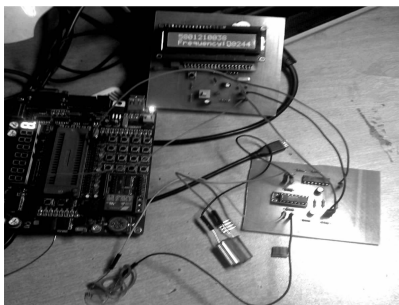


图 7 系统实物图

为评价系统性能,对该测量系统进行测试。将系统测量端空载($\Delta m = 0$),并与参考端处于相同状况下,此时显示器示值在一定范围内跳动,表明系统很灵敏。待系统稳定后,显示器显示测量的 $\Delta f = 0$ 。对系统测量端分别加载不同微质量(Δm)的精面粉,待系统稳定后,分别记录显示器显示测量的 Δf ,绘制“ $\Delta m - \Delta f$ ”的实验曲线,如图 8 所示。图中,实直线为根据式(1)绘制的“ $\Delta m - \Delta f$ ”理论关系曲线。该图结果表明,当测量端加载的质量越大,系统测量出的谐振差频值则越大,实验曲线与理论直线的变化趋势基本一致,但两者存在一定的偏差。相对于理论直线,该实验曲线的非线性误差可通过下式计算,即

$$Y_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ΔL_{\max} 为最大非线性绝对误差; Y_{FS} 为满量程输出。由式(2)可得 $Y_L = 5.5\%$ 。

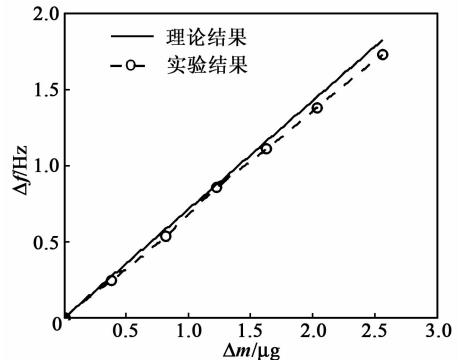


图 8 Δm 与 Δf 的关系曲线

本系统实现了压电谐振频率的变化与被测微质量之间的变换,能够实现对微质量进行测量。下一步的研究需对该系统进行误差分析及精确标定,实现对微质量的直接精确测量。

4 结束语

基于压电晶片谐振频率的质量敏感原理,采用模块化设计思想,设计了压电谐振式微质量测量系统,并对系统性能进行了测试。结果表明,当测量端加载的质量越大,系统测量出的谐振差频值则越大,实验结果与理论分析结果吻合较好。本系统实现了压电谐振频率的变化与被测微质量之间的变换,能够对微质量进行测量。下一步的研究需对该系统进行误差分析及精确标定,实现对微质量的直接精确测量。