

基于 DDS 技术的石英晶体天平测量理论的探讨

□郁峰 胡阳 黄浩

宁波联测传感科技有限公司

【摘要】传统的微小质量检测仪器因制造成本过于高昂、测量精度不理想等原因，通常无法满足精准测量的要求。石英晶体微天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)诞生于上世纪60年代，作为一类十分重要的质量测量仪器，目前已广泛应用于环境监测、生物医学和材料学领域^[1]。本文设计了一款利用直接数字频率合成技术(Direct Digital Synthesis, DDS)进行扫频，以此测量出液相条件下谐振频率的石英晶体微天平。该天平具有成本低廉、体积小方便携带、测量精度高等优点^[2]。

【关键词】石英晶体微天平(QCM)；DDS信号源；液相检测

文献标识码：A 文章编号：1003-1870(2025)12-0019-03

Discussion on Measurement Theory of Quartz Crystal Microbalance Based on DDS Technology

【Abstract】Traditional micro-mass testing instruments often fail to meet the requirements for accurate measurement due to their high manufacturing costs, unsatisfactory measurement accuracy, etc. Quartz crystal microbalance (QCM) was invented in the 1960s. As a very important mass measurement instrument, it is now widely used in environmental monitoring, biomedicine and materials science^[1]. This paper presents a quartz crystal microbalance that utilizes Direct Digital Synthesis (DDS) technology for frequency sweeping to measure the resonant frequency under liquid-phase conditions. The balance has such advantages as low cost, small size, portability and high measurement accuracy^[2].

【Keywords】quartz crystal microbalance (QCM); DDS signal source; liquid phase detection

引言

基于DDS技术的石英晶体微天平质量检测方法如图1所示，它的基本原理是利用石英晶体的压电效应，对石英晶体微天平施加特定频率的激励信号，将QCM表面吸附物的质量转换为谐振频率的变化，通过测量这个频率偏移大小，就可以得到吸附物的质量大小^[3]。

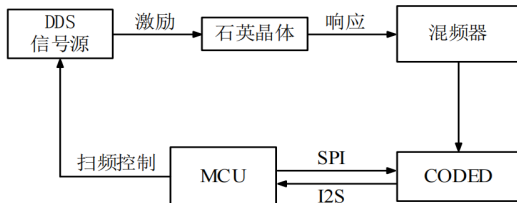


图1 扫频检测系统框图

本文就上述目标主要开展了以下工作：

1 DDS 扫频源设计

本文采用扫频^[4]测量法，使用DDS信号源输出某一角频率为 ω 的激励信号加到如图2所示的被测网络输入端。通过测量晶振两端的响应信号V1和V2的幅度和相位，在已知激励信号源幅度和相位的情况下，根据式(1)可以计算出石英晶振在当前频率下的阻抗。向相位累加寄存器写入不同的频率控制字实现扫频输出，计算出晶振在不同频率下的阻抗，将阻抗最小时的频率作为晶振的谐振频率。

$$\frac{\dot{V}_1}{R_1 + Z} = \frac{\dot{V}_2}{R_1} \quad (1)$$

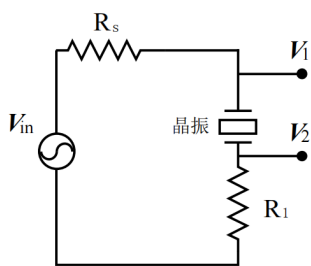


图2 扫频测量原理图

QCM 传感器的谐振频率一般在5MHz 左右，表面吸附物质时频率偏移在10KHz 以内，因此激励信号源至少要产生 $5\text{MHz} \pm 10\text{KHz}$ 频率范围内的扫频信号，在实际使用时，扫频范围应该更宽。为了满足以上技术指标，本系统选择ADI 公司性能更加优越的DDS 器件AD9954 作为扫频信号源。

AD9954 使用外接的25MHz 晶振为内部DAC 提供采样时钟频率，由采样定理可知，输出信号最高频率为12.5MHz。当使用25MHz 的采样时钟时，AD9954 的频率分辨率达到0.006Hz。在满足采样定理的条件下，可以适当降低采样频率来提高输出信号的分辨率。当采样时钟为1MHz 时，频率分辨率达到0.0002Hz，可以输出高质量的正弦波和三角波，片上

集成了一个电压比较器，可以产生方波作为时钟发生器，采用三线SPI 协议传输控制信号。

2 混频器原理介绍与芯片选型

混频器是一种非线性元件，用于将信号搬移到其他范围的频段上，如图3 是混频器的工作示意图，它是一个三端口器件，其中射频端和本振端作为输入端口，中频端作为输出端口。混频后的中频信号是射频输入信号各频谱成分发生频谱搬移的结果，频率差等于本振信号的频率。乘法器是混频器中的核心元件，是一个非线性器件，通过将两个信号相乘实现频谱的线性偏移^[5]。

将本振信号表示为：

$$V_{Lo}(t) = V_{Lo} \cos \omega_{Lo} t \quad (2)$$

射频信号表示为：

$$V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}) \quad (3)$$

将两式相乘得：

$$V_{Lo} V_{RF} = \frac{1}{2} V_{RF} V_{Lo} [\cos(\omega_{RF} t + \omega_{Lo} t + \varphi_{RF}) + \cos(\omega_{RF} t - \omega_{Lo} t + \varphi_{RF})] \quad (4)$$

使用低通滤波器将高频分量滤除，就得到角频率为 $\cos(\omega_{RF} t - \omega_{Lo} t + \varphi_{RF})$ 的信号。

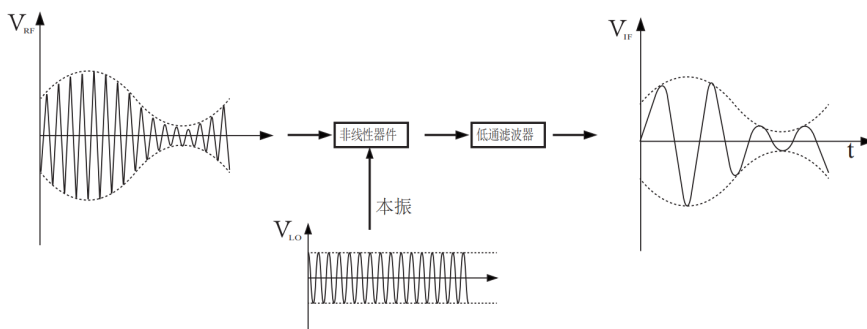


图3 混频示意图

本文采用恩智浦公司的双平衡混频器芯片SA612A 对QCM 两端的响应信号下混频到2KHz。SA612A 射频输入端信号的频率最高为500MHz，本振信号最高频率为200MHz，能提供18dB 的增益。

3 数据采集电路设计

为了测量出扫频信号通过被测晶振网络后的响应信号幅度和相位信息，本文采用的方法是直接对响应信号采样。利用傅里叶分析计算出待测信号的幅度和相位，虽然STM32 单片机上集成了

ADC 通道，但是分辨率只有12 位，测量精度不够高。本文采用了一款市面上常见的音频编解码器TLV320AIC23 对混频器输出的信号采样。该芯片的分辨率可以达到32 位，使用音

频编解码芯片的另一个好处是可以保证左右两声道输入电压信号的同步性。

首先，我们需要明确一个关键概念：TLV320AIC23 的ADC 采样是针对时域的瞬时电压值，而不是直接测量相位。因此，相位差的信息是

隐含在左右声道ADC采样值的序列中的。要理解这种对应关系，我们需要从模拟信号到数字采样的整个过程来分析。

TLV320AIC23的左右声道ADC是同步采样的。这意味着在每一个采样时刻 t_n ，它会同时捕获左声道和右声道混频器输出的瞬时电压。

在时刻 t_n 它得到的AD值为：

$$AD_L[n] = kA\cos(\omega t_n) \quad (5)$$

$$AD_R[n] = kA\cos(\omega t_n + \varphi) \quad (6)$$

序列分析：相位差的信息蕴含在整个左右声道AD值序列的波形关系中。

当 $\phi = 0^\circ$ 时， $AD_R[n]$ 的波形与 $AD_L[n]$ 的波形完全重合。对所有 n ， $AD_R[n] \approx AD_L[n]$ 。

当 $\phi = 180^\circ$ 时， $AD_R[n]$ 的波形与 $AD_L[n]$ 的波形完全相反。 $AD_R[n] \approx -AD_L[n]$ 。

当 $0^\circ < \phi < 180^\circ$ 时， $AD_R[n]$ 的波形相对于 $AD_L[n]$ 的波形有一个水平移位。

从序列上看， AD_R 的峰值、过零点等特征会比 AD_L 的对应特征延迟 $\Delta t = \phi / \omega$ 的时间出现。

4 结语

结合所选测量方案进行硬件设计，本系统的硬件部分主要包括DDS信号源模块、混频器模块和采样电路。其中DDS信号源使用了AD9954芯片，混频器模块使用SA612A双平衡混频器芯片，ADC采样芯片采用音频编解码器TLV320AIC23。本方案所选硬件对5MHz谐振频率的标准QCM传感器进行测量，所测谐振频率为5000000.006Hz，精度高于其它硬件系

统所测谐振频率5000000.012Hz。

参考文献

[1] Lim H J, Saha T, Tey B T. Quartz crystal microbalance-based biosensors as rapid diagnostic devices for infectious diseases[J]. Biosensors& Bioelectronics, 2020, 168: 112513.

[2] 邹春阳, 王博伟, 闫雪晴, 何贤, 吴文娟. 石英晶体微天平(QCM)应用的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2020, v.37;No.168(05):187-194.

[3] 闫俊杰. QCM质量灵敏度的分析与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2014, 1-3.

[4] Schröder J, Borngräber R, Eichelbaum F, et al. Advanced interface electronics and for QCM[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 97: 543-547.

[5] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京: 科学出版社. 2006:201-203.

作者简介

郁峰(1979—)，男，高级工程师，工学硕士，现就职于宁波联测传感科技有限公司，从事动态力测量仪表研发、数字信号处理等工作。