

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.03.010

一种用于液相检测的耗散型石英晶体微天平振荡电路设计

缪春海, 王 鷗, 郭 兴

(兰州空间技术物理研究所 空间环境载荷工程中心, 兰州 730000)

摘要: 由于液相环境的特殊性, 传统石英晶体微天平 (quartz crystal microbalance, QCM) 仅依靠谐振频率 f 无法完整描述溶液与吸附膜的力学性质, 为此需引入新的参数——耗散因子 D 。同时, 液相环境中普通振荡电路存在诸多问题, 所以研究基于耗散因子 D 的耗散型石英晶体微天平 (QCM-D) 振荡电路具有重要意义。本文将 QCM 振荡电路与耗散因子 D 相结合, 通过使用并联电容补偿与自动增益控制技术, 设计出适用于 QCM-D 的振荡电路和相应的系统调试方案, 其能稳定振荡在 80% 浓度的丙三醇溶液中。

关键词: 耗散型石英晶体微天平 (QCM-D); 耗散因子 D ; 振荡电路

中图分类号: V443

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)03-0060-06

A dissipative quartz crystal microbalance oscillation circuit design for liquid phase detection

MIAO Chunhai, WANG Yi, GUO Xing

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Due to the special characteristics of the liquid phase environment, the conventional quartz crystal microbalance (QCM) cannot completely describe the physical properties of the liquid phase by only relying on the resonant frequency f . The introduced new parameter, dissipation factor D , can relatively completely characterize the mechanical properties of the solution and the adsorption membrane, so it is important to study the dissipative quartz crystal microbalance based on the dissipation factor D (QCM-D) is of great importance. In this paper, the QCM oscillator circuit is combined with the dissipation factor D . By using parallel capacitance compensation and automatic gain control technology, an oscillator circuit suitable for QCM-D and corresponding system debugging and experimental verification schemes are designed, which can stabilize the oscillation at 80% concentration in glycerol solution.

Key words: dissipative quartz crystal microbalance (QCM-D); dissipation factor D ; oscillator circuit

0 引言

基于经典 Sauerbrey 公式, 石英晶体微天平 (quartz crystal microbalance, QCM) 因其低成本、高灵敏度、易于实时监测等优势, 既可作为膜厚传感器应用于膜厚检测^[1]; 又可作为气敏传感器检测目标气体质量, 在 PM_{2.5} 检测^[2]、塑料制品或食品中塑化剂气体检测^[3]、糖尿病患者的丙酮气体检测^[4]、爆

炸挥发性气体检测^[5]等诸多领域得到广泛应用。但目前 QCM 的使用需要同时满足气相环境与刚性吸附膜这两个条件, 因为液相环境的阻尼远远大于气相环境, 不同的溶液环境阻尼大小也不一致, 这使得传统 QCM 在液相中难以稳定工作。同时, 阻尼增大导致石英晶体静态电容对谐振频率相位的影响不容忽视。

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-03-11

基金项目: 甘肃省青年基金 (编号: 21JR7RA743)

引用格式: 缪春海, 王鷗, 郭兴. 一种用于液相检测的耗散型石英晶体微天平振荡电路设计[J]. 空间电子技术, 2022, 19(3): 60-65.

MIAO C H, WANG Y, GUO X. A dissipative quartz crystal microbalance oscillation circuit design for liquid phase detection[J].

Space Electronic Technology, 2022, 19(3): 60-65.

目前适用于液相环境的 QCM 振荡电路主要分为普通振荡电路和锁相环振荡电路。普通振荡电路基于自激振荡原理,具有代表性的普通振荡电路有射极耦合振荡电路^[6]、桥式振荡电路^[7]和平衡桥式振荡电路^[8]。这类电路多采用增大电路增益的方法提高起振性能,使用并联电感补偿静态电容,虽然在一定程度上能够使得 QCM 在液相中稳定起振,但是存在起振性能并不宽泛、静态电容补偿不完善等问题,对测量结果存在较大影响。锁相环振荡电路利用石英晶体的电抗特性,将晶体锁定在纯阻性的状态下,控制石英晶体发生串联谐振^[9-10]。该类型电路具有较好的起振性能,但是依然需要对静态电容进行补偿。

液相中 QCM 获取到的谐振频率 f 并不只与吸附膜质量有关,还受吸附膜与溶液力学性质的影响^[11],因此谐振频率 f 不能准确描述吸附质量。Rodahl 等人提出了耗散因子 D 的概念,其与溶液的密度、黏性等性质有关,与谐振频率 f 一同能够相对完整地描述溶液密度、黏度、吸附膜质量、剪切模量等物理参数。

本文结合普通振荡电路与耗散因子,设计出适用于液相环境下,能够同时获取谐振频率与耗散因子的耗散型石英晶体微天平(QCM-D)振荡电路。利用自动增益控制技术解决液相环境阻尼过大的难题,并且能显著提升起振性能;经过理论分析提出使用并联电容补偿技术,有效避免静态电容对谐振频率相位的影响;最后对振荡电路进行实验测试以验证性能。

1 QCM-D 工作原理

根据经典 Sauerbrey 公式,当气相环境中石英晶体表面附着一层刚性薄膜时,石英晶体谐振频率的变化量 Δf 与附着物质质量的变化量 Δm 存在线性关系:

$$\Delta f = \frac{-2f_0^2}{A \sqrt{\mu_q \rho_q}} \Delta m \quad (1)$$

其中, f_0 表示石英晶体的谐振频率, μ_q 、 ρ_q 分别为石英晶体的剪切模量、密度。因此基于 Sauerbrey 公式原理的 QCM 主要应用于气相环境下微质量的检测,如月尘测量^[12]、膜厚检测。

1985 年 Kanazawa 和 Gordon 推导出了 Kanazawa-Gordon 公式^[13],当石英晶体工作于牛顿流体中时,谐振频率的变化量 Δf 与牛顿流体的密度 ρ_l 和黏度 η_l 存在一定的关系,如式(2)所示:

$$\Delta f = -f_0^{3/2} \left(\frac{\eta_l \rho_l}{\pi \mu_q \rho_q} \right)^{1/2} \quad (2)$$

耗散因子 D 的概念由 Rodahl 等在 1996 年提出,它表示石英晶体在一个振荡周期内消耗能量与储存能量的比例^[14],如式(3)所示:

$$D = \frac{1}{Q} = \frac{E_{\text{dissipated}}}{2\pi E_{\text{stored}}} \quad (3)$$

根据 Kanazawa 和 Rodahl 建立的力学模型^[15],当石英晶体表面有一层吸附薄膜,并且薄膜上方有一厚度视为无穷大的液体时, ρ_f 、 h_f 、 μ_f 、 η_f 分别表示膜的密度、厚度、剪切模量和黏度, ρ_q 、 h_q 分别表示石英晶体的密度和厚度, ρ_l 、 h_l 、 μ_l 分别表示液体的密度、厚度和剪切模量,如式(4)、式(5)所示:

$$\Delta f \approx \frac{1}{2\pi \rho_q h_q} \left[h_f \rho_f \omega + \frac{\eta_f}{\delta_f} - 2h_f \left(\frac{\eta_f}{\delta_f} \right) \frac{\eta_f \omega^2}{\mu_f^2 + \eta_f^2 \omega^2} \right] \quad (4)$$

$$\Delta D \approx -\frac{1}{\pi f \rho_q h_q} \left[\frac{\eta_f}{\delta_f} + 2h_f \left(\frac{\eta_f}{\delta_f} \right) \frac{\eta_f \omega^2}{\mu_f^2 + \eta_f^2 \omega^2} \right] \quad (5)$$

其中, $\delta_l = \sqrt{\frac{2\eta_l}{\rho_l \omega}}$ 表示液体的穿透深度。

从式(4)可看出,液相中谐振频率 f 的影响主要包括 3 个部分: $h_f \rho_f \omega$ 表示石英晶体表面吸附薄膜的

质量, $\frac{\eta_f}{\delta_f}$ 表示液体密度与黏度, $2h_f \left(\frac{\eta_f}{\delta_f} \right) \frac{\eta_f \omega^2}{\mu_f^2 + \eta_f^2 \omega^2}$ 表示吸附膜与液体的黏度;当液体性质变化较小时,影响谐振频率 f 的主要因素为晶体表面吸附膜的质量。从式(5)可知,耗散因子 D 的影响因素主要包括液体密度和黏度、液体与吸附膜之间的力学性质,并不受吸附膜质量的影响;若液体性质变化较小,此时耗散因子 D 则主要表征吸附膜的黏度等力学性质。通过监测耗散因子与谐振频率的实时变化,不仅能够获得研究物质在固体表面下的沉积过程^[16],而且可以研究吸附过程中单分子或多分子膜力学性质的变化^[17]。

获取耗散因子 D 的方法由 Rodahl 和 Hook 等^[18-20]提出,石英晶体当进入稳定振荡状态后与振荡电路断开,开始进行衰减振荡,其波形满足:

$$u = Ae^{(-t/\tau)} \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

τ 为时间常数, f 为谐振频率。耗散因子 D 为:

$$D = \frac{1}{\pi f \tau} \quad (7)$$

耗散因子 D 与气/液相下吸附物质的黏性、质量、吸附膜的剪切模量等存在一定的关系,通过耗散因子 D 的测量能够得出这些信息。

2 QCM-D 振荡电路设计

如图 1 所示, QCM-D 基本结构为液体池、石英晶体传感器、振荡电路、数据采集电路、模拟开关、

FPGA 控制模块与上位机。待测溶液导入液体池，与液体池中的石英晶体传感器的工作面电极接触；振荡电路激励石英晶体传感器使其稳定振荡；模拟开关控制石英晶体与振荡电路断开、与数据采集电路连接，数据采集电路再将模拟信号转化为数字信号，最后传输给上位机；上位机对原始数据存储后进行处理，显示最终的测量结果。QCM-D 振荡电路原理图如图 2 所示，本文基于自激振荡原理、结合耗散因子 D 设计出 QCM-D 的振荡电路部分，针对液相中 QCM-D 难以起振的问题进行深入分析，再选择合适的方案进行解决。

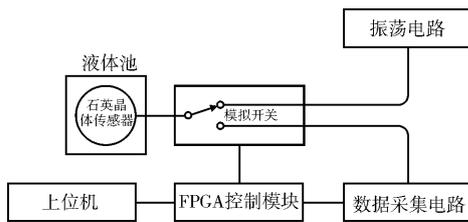


图 1 QCM-D 基本结构

Fig. 1 Basic structure of QCM-D

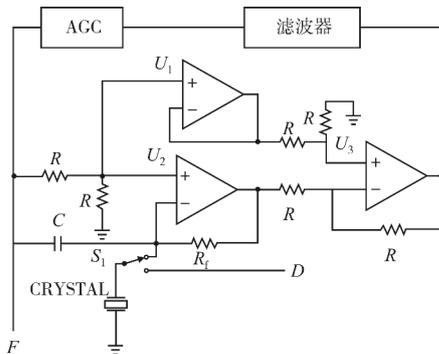


图 2 QCM-D 振荡电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of QCM-D oscillation circuit

2.1 静态电容的补偿

石英晶体等效电路模型如图 3 所示，该模型中石英晶体包含两条支路：一条是静态支路，只包括静态电容 C_0 ，静态电容 C_0 是晶体两个电极平板电容、引线及夹具分布电容和驱动电路输入电容等归纳而成的一个与动态支路并联的电容；另一条是动态支路，包括 R_m 、 C_m 和 L_m ， R_m 受到机械摩擦和石英晶体所处环境阻尼的损耗的影响。

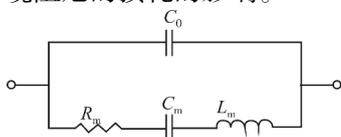


图 3 石英晶体的 Butterworth-Van Dy (BVD) 电路模型

Fig. 3 Butterworth-Van Dy (BVD) circuit model of quartz crystal

石英晶体动态支路的导纳 G_m 如式(8)所列：

$$G_m = \frac{1}{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} \left[R_m - j \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right] \quad (8)$$

G_m 的实部和虚部分别如式(9)、式(10)所列：

$$\text{Re} \{ G_m \} = \frac{1}{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} R_m \quad (9)$$

$$\text{Im} \{ G_m \} = \frac{1}{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \quad (10)$$

当 $\omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}}$ 时， $\text{Im} \{ G_m \} = 0$ ， $\text{Re} \{ G_m \} = \frac{1}{R_m}$ ，动态支路发生串联谐振，此时石英晶体呈纯阻性，可等效成电阻 R_m ，串联谐振频率为 ω_s 。

此时考虑静态支路的影响，石英晶体的实际导纳 G 如式(11)所列：

$$G = G_m + G_0 = \frac{1}{R_m} + j\omega_s C_0 \quad (11)$$

G_0 为静态支路的导纳， G 的相位可表示为：

$$\varphi = \arctan(\omega_s C_0 R_m) \quad (12)$$

由式(12)可以看出，静态电容 C_0 对相位的影响随着 R_m 的增大而增大，这使得串联谐振频率 ω_s 的相位不为零，且出现的相位偏移越大。如图 4 所示，一般静态电容 C_0 在 20 pF 左右，这里选取 $C_0 = 20$ pF。石英晶体在空气中等效阻抗 R_m 大概为几十 Ω ，当谐振频率为 10 MHz 时， φ 仅有几度，石英晶体因静态电容 C_0 带来的相位偏移很小，几乎没有影响，因而在空气中石英晶体容易起振；在液相中 R_m 可达到几百甚至上千 Ω ，当 R_m 为 500 Ω 时， φ 超过了 30°，相位偏移较大，使得振荡电路不满足相位平衡条件，难以起振，对于更高频率 30 MHz，静态电容 C_0 引起的相位偏移也更多。为了液相环境中的 QCM-D 振荡电路满足相位平衡条件，需要采取措施去除电路中晶体并联电容的影响。

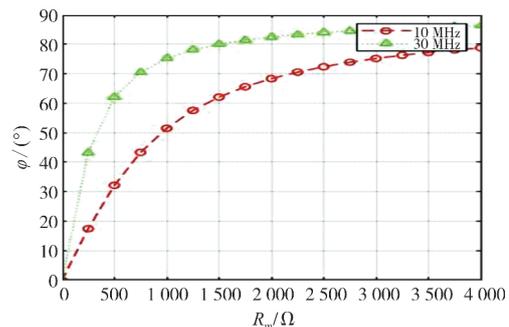


图 4 $C_0 = 20$ pF 时， φ 与 R_m 的关系

Fig. 4 When $C_0 = 20$ pF, the relationship between the φ and the R_m

如图 5 所示,在电路中添加一电容 C ,在 A 点使用基尔霍夫电流定律。

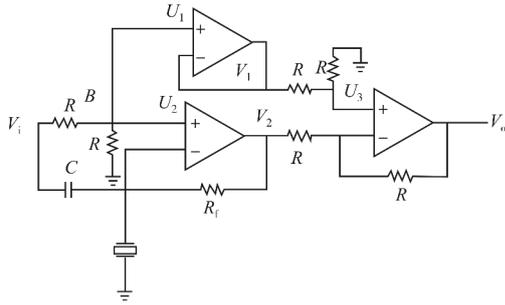


图 5 电容补偿电路

Fig. 5 Capacitance compensation circuit

如式(13)所列:

$$(U_i - U_A)j\omega C + \frac{U_2 - U_A}{R_f} = U_A(G_m + G_0) \quad (13)$$

仅考虑静态支路 G_0 的影响, $U_A = \frac{U_i}{2}$, 有式(14):

$$U_2 = \frac{U_i}{2}(1 + G_0 R_f - j\omega C R_f) \quad (14)$$

当 $G_0 = j\omega C$ 时, $U_2 = \frac{U_i}{2}$, 并联电容得到补偿, 石英晶体振荡时有 $\omega = \omega_s$, $G_m = \frac{1}{R_m}$, 有:

$$U_2 = \frac{U_i}{2} \left(1 + \frac{R_f}{R_m} \right) \quad (15)$$

此时 C_0 被补偿后 U_2 的相位在晶体的串联谐振频率点时为 0, 根据相位平衡条件, 振荡电路的其他部分相位也需要为零。因此, 调整 $C = C_0$ 后, 在任何频率下 C_0 都可以得到补偿。

由式(15)可知, 当 R_m 过大时, $\frac{R_f}{R_m}$ 过小, $U_2 \approx \frac{U_i}{2}$,

石英晶体对电路振荡频率的影响逐渐减弱, 会导致测量结果的不准确。如图 5 所示, 添加一差分放大电路后有式(16):

$$U_o = U_1 - U_2 = -\frac{U_i R_f}{2 R_m} \quad (16)$$

此时电路增益只与 R_m 有关, 石英晶体稳定控制着电路的谐振频率。

2.2 自动增益控制驱动

如图 6 所示, 在输出与输入之间加入一自动增益控制放大器 AGC, 实际工作中 R_m 的值变化范围很大, 导致 U_o 变化较大, AGC 能输出几乎恒定的电平幅值, 满足振荡电路幅度平衡的要求。该 AGC 的选择要求为: 一方面为实现较好的起振性能需要很宽的动态范围; 另一方面, 需要较大的带宽且在晶

体谐振频率处的相移为 180° 的整数倍, 以满足相位平衡条件。

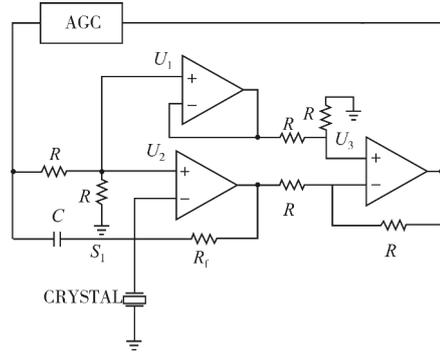


图 6 自动增益控制振荡电路

Fig. 6 Automatic gain control oscillator circuit

2.3 带通滤波器设计

本文设计的 QCM-D 振荡电路采用基频为 10 MHz 的石英晶体传感器, 振荡频率采用 10 MHz, 为滤除不必要的高次谐波, 需要设计带通滤波器。贝塞尔滤波器在通带内延时特性最为平坦, 但也存在截至特性较差的缺点。然而, 由于在高次谐波点处引入了较大的相移, 使得电路无法在这些频率点振荡。所以本文采用三阶贝塞尔带通滤波器, 如图 7 所示。在根据三阶贝塞尔带通滤波器计算公式得出本文所需的滤波器后, 经由实际电路调试与测试结果, 对滤波器元件值进行合理调整。

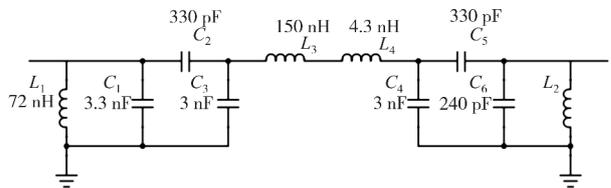


图 7 三阶贝塞尔带通滤波器

Fig. 7 Third-order Bessel bandpass filter

2.4 耗散因子 D 的获取

由式(6)、式(7)可知, 为获取石英晶体的耗散因子 D : 首先需要将石英晶体与 QCM-D 振荡电路连接, 石英晶体起振; 稳定振荡后, 石英晶体与 QCM-D 振荡电路断开, 石英晶体进入衰减振荡状态; 获取石英晶体两端的电压信号, 再通过式(6)得出 τ 值与谐振频率 f , 由式(7)最终计算得出耗散因子 D 的值。因此, 如图 2 所示, 加入一高速开关 S_1 。

石英晶体在空气中衰减振荡的时间大概为十几 ms, 在液体中为几百 μs , 因此, 高速开关的导通时间应在 $1 \mu s$ 之内, 减小导通时间对波形的影响。其次, 高速开关在导通时存在导通电容与电阻, 当

容值与阻值较大时,静态电容无法被补偿,因此需要导通电容与电阻值尽可能小。

3 QCM-D 性能测试

如图 8 所示,为本文设计的 QCM-D 振荡电路实物图。为验证该 QCM-D 振荡电路的性能,室温 23℃ 下,将石英晶体激励电极滴入纯水,每隔 10 s 采集 QCM-D 的输出频率,获得 QCM-D 在 6000 s 内频率的变化情况。如图 9 所示,在 6000 s 内石英晶体的频率漂移在 7 Hz 以内,实验表明该 QCM-D 具有良好的频率稳定性。同时,测得石英晶体在水中的衰减时间 τ 为 121.5 μs ,根据式(7)可得水中的耗散因子 D 为 2.636×10^{-4} 。

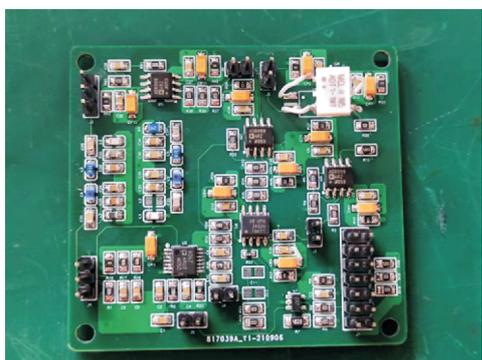


图 8 QCM-D 振荡电路实物图

Fig. 8 QCM-D oscillator circuit diagram

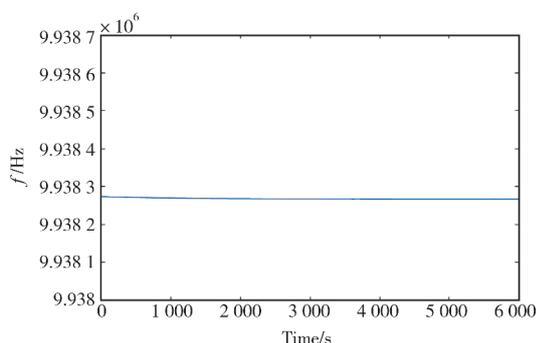


图 9 水中的频率稳定性

Fig. 9 Frequency stability in water

4 结论

本文设计的耗散型石英晶体微天平 QCM-D,通过采用自动增益控制放大器 AGC 解决液相环境阻尼大难以起振的问题,实现较宽范围的起振性能,并通过手动调整并联电容大小的方式补偿石英晶体静态电容,使得 QCM-D 能够真正工作在串联谐振频率上,该 QCM-D 能稳定工作于 80% 浓度丙三醇

溶液。对比仅适用于气相环境刚性薄膜的普通 QCM, QCM-D 具有普通 QCM 功能的同时,还适用于液相环境与粘弹性薄膜中,通过获取耗散因子 D 能反映溶液的黏度、薄膜的质量、剪切模量等物理参数,且保持体积小、便捷性强、成本低廉的特点,易于推广,适用于诸多领域,存在广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] WAJID A. On the accuracy of the quartz-crystal microbalance (QCM) in thin-film depositions [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, 63(1): 41-46.
- [2] PILLAI P S, BABU S S, MOORTHY K K. A study of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration at a tropical coastal station [J]. *Atmospheric Research*, 2002, 61(2): 149-167.
- [3] WANG Y, DING P F, HU R F, et al. A dibutyl phthalate sensor based on a nanofiber polyaniline coated quartz crystal monitor [J]. *Sensors*, 2013, 13(3): 3765-3775.
- [4] 曾磊, 黄洪湖, 陈声育, 等. 沸石分子筛修饰用于疾病诊断的 QCM 气敏传感器 [J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2005, 44(1): 41-45.
- [5] PROCEK M, STOLARCZYK A, PUSTELNY T, et al. A study of a QCM sensor based on TiO₂ nanostructures for the detection of NO₂ and explosives vapours in air [J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 9563-9581.
- [6] EICHELBAUM F, BORNGRÄBER R, SCHRÖDER J, et al. Interface circuits for quartz-crystal-microbalance sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(5): 2537-2545.
- [7] WESSENDORF K O. The Lever oscillator for use in high resistance resonator applications [C] // 1993 IEEE International Frequency Control Symposium, 1993: 711-717.
- [8] BENES E, GRÖSCHL M, BURGER W, et al. Sensors based on piezoelectric resonators [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 48(1): 1-21.
- [9] FERRARI V, MARIOLI D, TARONI A. Improving the accuracy and operating range of quartz microbalance sensors by a purposely designed oscillator circuit [C] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018: 1119-1122.
- [10] 侯天明, 高波, 武荣, 等. 航天器开关电源差模滤波器设计研究 [J]. *空间电子技术*, 2021, 18(4): 85-90.
- [11] KANAZAWA K K, GORDON J G. Frequency of a quartz microbalance in contact with liquid [J]. *Analytical Chemistry*, 1985, 57(8): 1770-1771.
- [12] 王鹤, 庄建宏, 杨生胜, 等. 石英晶体微天平在月尘累积量测量中的应用 [J]. *传感技术学报*, 2016, 29(2): 297-300.

- [13] FU L, CHEN X N, HE J N, et al. Study viscoelasticity of ultrathin poly(oligo(ethylene glycol) methacrylate) brushes by a quartz crystal microbalance with dissipation [J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2008, 24(12):6100-6106.
- [14] RODAHL M, HÖÖK F, FREDRIKSSON C, et al. Simultaneous frequency and dissipation factor QCM measurements of biomolecular adsorption and cell adhesion [J]. *Faraday Discussions*, 1997, 10(7):229-246.
- [15] REED C E, KANAZAWA K K, KAUFMAN J H. Physical description of a viscoelastically loaded AT-cut quartz resonator [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(5):1993-2001.
- [16] 田旭, 王新炜. 原子层沉积薄膜的表征方法进展 [J]. *材料研究与应用*, 2021, 15(5):454-463.
- [17] 刘丰, 王前, 吴华南, 等. 渗滤液中 Na^+ 对生物膜形成初期吸附特性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1):213-219.
- [18] RODAHL M, KASEMO B. A simple setup to simultaneously measure the resonant frequency and the absolute dissipation factor of a quartz crystal microbalance [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67(9):3238-3241.
- [19] RODAHL M, KASEMO B. Frequency and dissipation-factor responses to localized liquid deposits on a QCM electrode [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1996, 37(1-2):111-116.
- [20] RODAHL M, HÖÖK F, KROZER A, et al. Quartz crystal microbalance setup for frequency and Q-factor measurements in gaseous and liquid environments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(7):3924-3930.

作者简介:缪春海(1997-),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为空间电子技术。E-mail:liaochunhai@outlook.com

欢迎订阅《空间电子技术》

《空间电子技术》创刊于1971年,由中国航天科技集团有限公司西安空间无线电技术研究所主办,国内公开发行,双月刊。

本刊内容涵盖卫星通信、微波遥感、天线及其展开技术、卫星测控、数据传输与处理、电磁环境与可靠性、计算机应用、航天工艺及材料、空间站与载人航天、深空探测等空间电子学领域及其交叉学科。凡在理论与应用实践上具有创新的,代表我国最新空间电子学科技研究水平的学术论文、有科学依据和可靠数据的技术报告、阶段性成果报告以及属于前沿学科并对学科发展有指导意义的展望评论性文稿均可投稿。

本刊被中国核心期刊遴选数据库、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中文科技期刊数据库(CSTJ)全文收录,已被“万方数据”、“中国知网”即《中国学术期刊(光盘版)》以及《中文科技期刊数据库》(维普)、超星网络等平台全网搜索。本刊国内外公开发行。

《空间电子技术》为双月刊,A4开本,彩色印刷,定价:每期12.00元、全年72.00元。

联系电话:029-85613384,传真:029-85613222,E-mail:kjdzjs504@163.com。

通信地址:西安市东长安街504号《空间电子技术》编辑部,邮编:710000。