

电容对石英晶体微天平质量灵敏度影响分析^{*}

孙世政 郑天成 何泽银 黄思成 刘鑫鹏
(重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074)

摘要:为探究振荡电路中电容对石英晶体微天平质量灵敏度的影响,提出了振荡电路的等效电路模型阻抗分析方法。首先,建立等效电路模型,分析阻抗与频率关系,揭示了电容容值与其质量灵敏度对应关系;其次,进行多物理场耦合仿真实验,探究了电容容值对其质量灵敏度的影响规律;最后,搭建实验系统平台,开展了质量灵敏度实验。结果表明,并联电容对其质量灵敏度影响较小;串联 1.01 pF 电容其质量灵敏度提升 8.01×10^{-2} Hz/ng, 串联 15.84 pF 电容其质量灵敏度提升 1.49×10^{-2} Hz/ng。该结论有助于更好地理解电容对石英晶体微天平质量灵敏度影响,为该类传感器便携化、微型化设计提供有力支持。

关键词:石英晶体微天平;质量灵敏度;压电效应;阻抗分析

中图分类号: TN752.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Analysis of influence of capacitance on mass sensitivity of quartz crystal microbalances

Sun Shizheng Zheng Tiancheng He Zeyin Huang Sicheng Liu Xinpeng
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To investigate the influence of capacitance on the mass sensitivity of quartz crystal microbalances in oscillating circuits, an equivalent circuit model impedance analysis method for oscillating circuits was proposed. Firstly, an equivalent circuit model was established to analyze the relationship between impedance and frequency, and the corresponding relationship between capacitance and mass sensitivity was revealed. Secondly, multi physics field coupling simulation experiments were conducted, and the influence of capacitance on its mass sensitivity was explored. Finally, the experimental system platform was built, and the quality sensitivity experiment was carried out. The results indicate that parallel capacitors have a relatively small impact on their mass sensitivity. The mass sensitivity of the 1.01 pF capacitor in series is increased by 8.01×10^{-2} Hz/ng, while the mass sensitivity of the 15.84 pF capacitor in series is increased by 1.49×10^{-2} Hz/ng. This conclusion helps to better understand the influence of capacitance on the mass sensitivity of quartz crystal microbalances, providing strong support for the portable and miniaturized design of such sensors.

Keywords: quartz crystal microbalance; mass sensitivity; piezoelectricity; impedance analysis

0 引言

石英晶体微天平是一种高灵敏度质量传感器,由于其基频通常能达到几十兆赫兹,因此该类传感器可进行纳克级测量,现已广泛应用于物理、化学、医学研究、环境科学

和材料科学等领域^[1-5]。灵敏度是传感器的重要指标之一,反映了传感器对输入信号变化的敏感程度,具有较高灵敏度的传感器能够捕捉和测量更加精细地信号变化。孙世政等^[6]针对嵌入式角位移传感器长期使用出现精度损失问题,结合传感器结构特点提出了一种基于单测头误

收稿日期:2023-12-25

^{*} **基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金(52105542)、重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2023NSCQ-LZX0081)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K202200705)、重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2023TIAD-STX0016)资助

差相位偏移法的自校准方法,将整周测量误差大幅度降低,误差峰峰值由 127.80"降低至 5.90"。陈自然等^[7]开发了基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器,在精密机械加工中测量分辨率高达 0.15 μm;Yu 等^[8]设计了全织物超薄电容式传感器,实现 0.5 Pa~80 kPa 的精确测量。在石英晶体微天平中,质量灵敏度作为该类传感器的核心指标,对其深入研究和理解具有重要的理论和实际意义。

目前针对石英晶体微天平质量灵敏度研究大多基于电极结构、材料属性和表面敏感薄膜制备等。Hu 等^[9]设计了具有非对称 N-M 型电极的石英晶体微天平传感器,并通过电化学沉积实验证实了该结构传感器质量灵敏度显著增强。Huang 等^[10]通过电沉积法研究了金电极厚度对石英晶体微天平质量灵敏度的影响。Swaminathan 等^[11]设计了一种独特的分布式电极结构石英晶体微天平传感器,结果表明新型电极拓扑结构具有更高的质量灵敏度和均匀性。当前石英晶体微天平正朝着便携化和微型化的方向发展,旨在摆脱大型化的测量仪器,实现小型化检测。若要实现石英晶体微天平传感器的微型化设计,构建稳定的振荡电路是非常必要的,在调谐振荡电路中,添加电容是一种常用的技术。缪春海等^[12]通过调整并联电容大小来补偿石英晶体静态电容,使得石英晶体微天平工作在串联谐振频率。刘国华等^[13]采用负电容补偿技术设计稳定的石英晶体微天平前端振荡驱动电路。鲍钰文等^[14]通过矫正晶振负载电容,实现芯片封装后振荡电路输出频率的校准。李东等^[15]分析了分布电感对石英晶体谐振频率测试精度影响,并采用电容补偿方法减小影响。然而,石英晶体微天平质量灵敏度在振荡电路中受到电容的影响规律尚不明确,因此,探究振荡电路中电容对石英晶体微天平质量灵敏度影响具有重要的研究意义。

针对上述情况,本文基于 Sauerbrey 方程和晶体等效电路模型建立电容与石英晶体微天平质量灵敏度关系式,通过 COMSOL^[16]进行多物理场耦合仿真实验,并搭建实验平台进行系统实验,探究电容对石英晶体微天平质量灵敏度的影响,这对于石英晶体微天平传感器在便携化、微型化设计中具有重要意义。

1 电容对石英晶体微天平质量灵敏度影响分析

1.1 石英晶体微天平质量灵敏度

Sauerbrey 研究了石英晶体谐振频率与其表面吸附质量的关系,提出了著名的 Sauerbrey 方程,方程如下:

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

式中: Δf 为石英晶体微天平电极表面吸附物质质量引起的谐振频率变化量; Δm 为石英晶体微天平电极表面吸附物质质量变化量; f_0 为石英晶体基频; A 为电极表面有效面积; ρ_q 为石英晶体密度; u_q 为石英晶体剪切模量。

根据 Sauerbrey 方程,石英晶体微天平的质量灵敏度

定义为:

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

式中: k_f 是质量灵敏度常数。

1.2 振荡电路

在石英晶体微天平传感器便携化设计过程中,为了探究石英晶体微天平质量灵敏度在电路中受电容容值变化的影响规律,以科尔皮兹晶体振荡电路进行分析,科尔皮兹晶体振荡电路如图 1 所示^[17]。科尔皮兹振荡电路是一种简单且稳定的电子振荡电路,其灵活性高,使用方便,成本低廉,被广泛应用于电子领域。

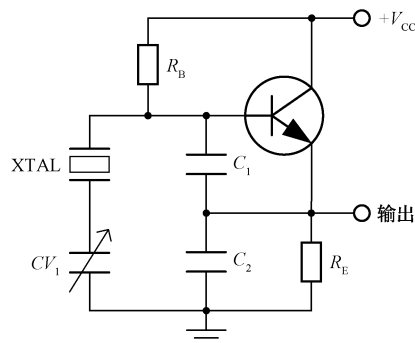


图1 科尔皮兹晶体振荡电路

Fig.1 Colpitts crystal oscillator circuit

针对科尔皮兹晶体振荡电路,构建等效电路模型,如图 2 所示。其中,石英晶体微天平被等效为一个由静态电容 C_0 、动态电容 C 、动态电感 L 和动态电阻 R 构成的 BVD 等效电路;外围电路被等效为一个交流源;探究对象被等效为一个串联电容 C_3 和一个并联电容 C_4 。

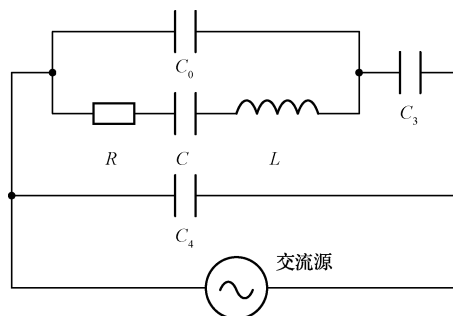


图2 晶体振荡等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of crystal oscillation

等效电路模型总阻抗 Z 为:

$$Z = [j(CC_3L + C_0CL)\omega^2 + (CC_3R + C_0CR)\omega - j(C_0 + C + C_3)] / [(C_0CC_4L + C_0CC_3L)\omega^3 + (CC_3C_4L - jCC_3C_4R - jC_0CC_4R - jC_0CC_3R)\omega^2 - (C_3C_4 + C_0C_4 + CC_4 + C_0C_3 + CC_3)\omega] \quad (3)$$

式中: ω 为角频率。

由于石英晶体微天平在工作时其振动幅度十分微弱,

故其相应的机械损耗非常小,动态电阻 R 的理论值很小,可以忽略不计。因此,式(3)可以被化简为:

$$Z = j[(CC_3L + C_0CL)\omega^2 - (C_0 + C + C_3)] / [(C_0CC_4L + C_0CC_3L)\omega^3 + CC_3C_4L\omega^2 - (C_3C_4 + C_0C_4 + CC_4 + C_0C_3 + CC_3)\omega] \quad (4)$$

当石英晶体微天平振荡电路产生谐振时,式(4)虚部为0,可以得到谐振频率 f_0 关系式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C + C_3}{(C_0 + C_3)CL}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),可得到石英晶体微天平质量灵敏度与电容容值的关系式为:

$$k_f = \frac{C_0 + C + C_3}{2\pi^2 (C_0 + C_3)CLA \sqrt{\rho_q u_q}} \quad (6)$$

由式(6)可知,石英晶体微天平质量灵敏度只与串联电容 C_3 有关,与并联电容 C_4 无关。

2 多物理场耦合仿真实验分析

为了探究电容容值对石英晶体微天平质量灵敏度的影响规律,通过 COMSOL 进行多物理场耦合仿真实验分析。实验选取了频率为 10 MHz 的 AT 切型石英晶体微天平,其结构如图 3 所示,由石英晶体及晶体上下表面镀有的金电极组成。石英晶体密度为 $2.648 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,剪切模量为 $2.947 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,直径为 15 mm,其表面金电极直径为 5.1 mm。

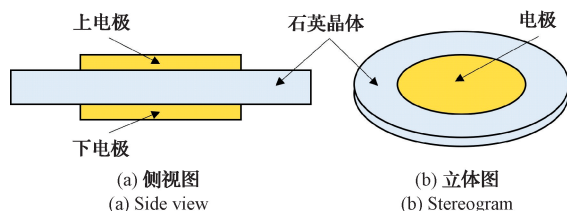


图 3 石英晶体微天平结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of quartz crystal microbalance structure

在压电场中,导入模型并构建旋转坐标系,将欧拉角中 β 角改为 125.25° ,材料属性选择 Quartz LH (1978 IEEE)。在固体力学中,设置机械阻尼,阻尼类型选择各向同性损耗因子, η 设置为 1×10^{-3} 。在电路场中,将电容的一端端子与石英晶体微天平上表面电极连接,电容另一端端子与交流电压源连接,石英晶体微天平下表面电极与交流电压源另一端相连并接地,电压源幅值为 10 V。选择频域研究自适应频率扫描,设置频率范围为 8~12 MHz,质点最大位移处即为石英晶体微天平谐振频率。仿真得到石英晶体微天平无串联电容和串联 1 pF 电容时谐振频率对比曲线图,如图 4 所示。无串联电容时的石英晶体微天平谐振频率为 10.000 064 MHz,代入式(2)得到其质量灵敏度为 1.108 3 Hz/ng;串联 1 pF 电容时的石英晶体微天平谐振频率为 10.114 318 MHz,代入式(2)得到

其质量灵敏度为 1.114 2 Hz/ng。仿真结果表明串联电容对石英晶体微天平谐振频率有明显影响,使其质量灵敏度得到提升,相比于无串联电容时其质量灵敏度提升 $5.9 \times 10^{-3} \text{ Hz/ng}$ 。

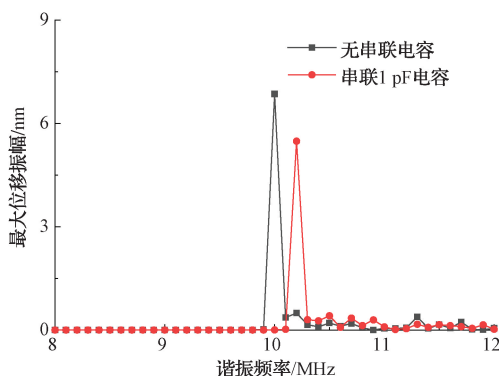


图 4 有无串联电容谐振频率对比

Fig. 4 Comparison between of resonant frequency with and without series capacitors

在上述仿真基础上,设置电容容值取值在 1~15 pF,间隔 1 pF,选择频域求解。经数值分析处理后,将解析值与仿真值进行比较,得到电容容值与石英晶体微天平质量灵敏度变化关系曲线,如图 5 所示。结果表明串联电容会增加石英晶体微天平质量灵敏度,且随着串联电容容值逐渐增大,其质量灵敏度增幅逐渐减小。

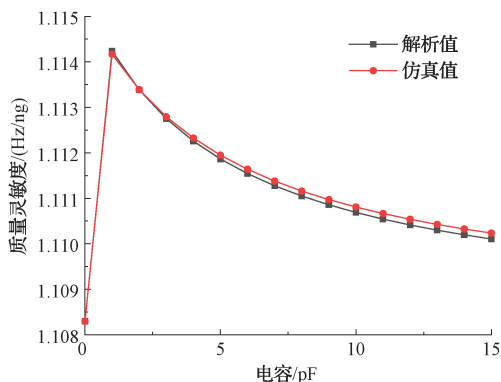


图 5 电容容值-石英晶体微天平质量灵敏度变化关系
Fig. 5 Relationship of capacitance value and mass sensitivity change of quartz crystal microbalance

3 实验与结果分析

3.1 实验技术路线

为了进一步探究石英晶体微天平质量灵敏度在电路中受电容容值变化的影响规律,验证理论与仿真结果的可靠性,进行实验分析,图 6 所示为实验技术路线。首先,通过电容实测实验得到电容的实测值;其次,分别对覆膜前后石英晶体微天平进行电容串并联测试,得出覆膜前后石英晶体频差;最后,通过 Sauerbrey 方程计算覆膜质量。

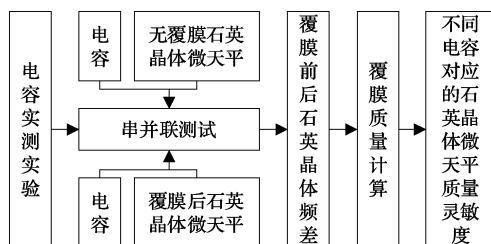


图6 实验技术路线

Fig. 6 Experimental technology roadmap

3.2 电容实测实验

为研究电容容值对石英晶体微天平质量灵敏度的影响,实验选取了尺寸相同(0603封装)、耐压值相同(50 V)和材质相同(镁钛酸钠)的不同容值电容。由于电容自身误差以及串并联电路中寄生电容的存在,使得电容标称值与实际值存在偏差,因此进行电容实测实验。

构建电容实测实验系统如图7所示,包括 Wayne Kerr WK6500B精密阻抗分析仪和不同容值电容。阻抗分析仪测试电容最高精度到 aF 级,能实验较为精确的电容实际值测量。实验选取 16 个电容作为测试样本,其中最小标称电容值为 0.5 pF,最大标称电容值为 15 pF,进行电容实测实验。

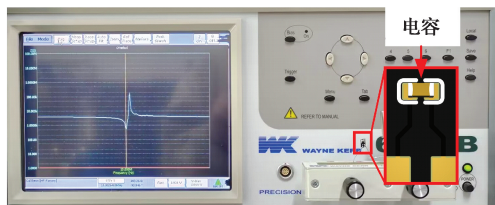


图7 电容实测实验系统

Fig. 7 Capacitance measurement experimental system

经数值分析处理后得到电容标称值与实测值对比曲线,如图8所示。结果表明电容实测值比标称值平均增加 0.58 pF,其中标称值为 7 pF 的电容容值对比实测值偏差

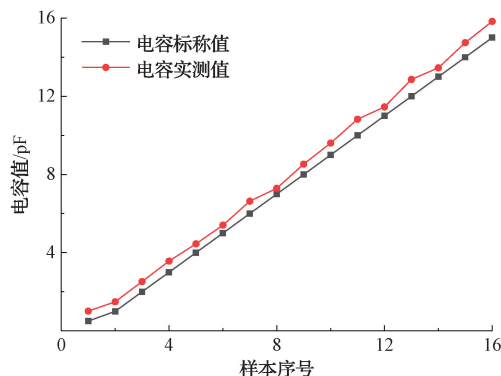


图8 电容标称值与实测值对比

Fig. 8 Comparison between nominal and measured capacitance values

最小,偏差为 0.29 pF,标称值为 12 pF 的电容容值对比实测值偏差最大,偏差为 0.86 pF。标称值为 0.5 pF 的电容实测值为 1.01 pF。

3.3 电容对石英晶体微天平质量灵敏度影响实验

构建石英晶体微天平串并联电容实验系统如图9所示,包括 wayne kerr WK6500B精密阻抗分析仪、不同容值电容和 10 MHz AT 切型石英晶体微天平。阻抗分析仪最大测量频率为 30 MHz,频率分辨率为 1 mHz,能实现电路中频率的精确测量。



图9 石英晶体微天平串并联电容实验系统

Fig. 9 Experimental system for series parallel capacitance of quartz crystal microbalance

实验分为两部分,首先将已知实测值的电容逐一与无覆膜石英晶体微天平串并联,测得其在不同电容下的基频;其次将石英晶体微天平一侧均匀涂抹光刻胶,放置烘箱设置 80 °C 烘烤 60 min,光刻胶受高温烘烤固化,再将其与已知实测值电容逐一串并联,测得其在负荷下的谐振频率。已知石英晶体微天平基频为 10.001 713 MHz,涂抹光刻胶的石英晶体微天平谐振频率为 9.866 509 MHz,频差为 135.205 kHz,通过式(1)计算得出固化后的光刻胶质量为 $1.219\ 53 \times 10^5$ ng。在同一电容下,将覆膜后石英晶体微天平的谐振频率与基频做差,得到其在对应电容下的频差。将所得频差与已知质量进行数据分析处理,得到电容容值与石英晶体微天平质量灵敏度变化关系曲线如图10所示。

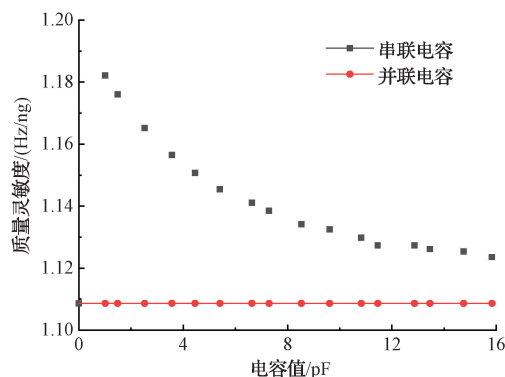


图10 电容容值—石英晶体微天平质量灵敏度变化关系

Fig. 10 Relationship of capacitance value and mass sensitivity change of quartz crystal microbalance

实验结果表明,在并联电容电路中,石英晶体微天平质量灵敏度不随电容容值变化而变化,质量灵敏度保持为

1.108 7 Hz/ng;在串联电容电路中,串联电容的石英晶体微天平质量灵敏度皆大于无串联电容的石英晶体微天平,其中无串联电容的石英晶体微天平质量灵敏度为1.108 7 Hz/ng,串联实测值为1.01 pF 电容的石英晶体微天平质量灵敏度最大,为1.188 8 Hz/ng,相比于无串联电容的石英晶体微天平质量灵敏度提升 8.01×10^{-2} Hz/ng;串联实测值为15.84 pF 电容的石英晶体微天平质量灵敏度最小,为1.123 6 Hz/ng,相比于无串联电容的石英晶体微天平质量灵敏度提升 1.49×10^{-2} Hz/ng。

4 结 论

本文采用理论、仿真和实验相结合的分析方法,探究了振荡电路中电容容值对石英晶体微天平质量灵敏度的影响。实验结果表明,在并联电容电路中,电容容值对石英晶体微天平质量灵敏度影响较小;在串联电容电路中,串联电容会增加石英晶体微天平质量灵敏度,且随着串联电容容值逐渐增大,其质量灵敏度逐渐减小,其中串联1.01 pF 容值电容的石英晶体微天平质量灵敏度增加最多,为 8.01×10^{-2} Hz/ng,串联15.84 pF 容值电容的石英晶体微天平质量灵敏度增加最少,为 1.49×10^{-2} Hz/ng。该结论有助于石英晶体微天平传感器便携化、微型化设计,为晶体振荡电路设计时兼顾传感器质量灵敏度提供了有力支持。

参 考 文 献

- [1] 张家泰,文玉梅,鲍祥祥,等.表面溅射 FeGa 薄膜的 AT 切型石英谐振磁场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3):42-49.
ZHANG J T, WEN Y M, BAO X X, et al. AT-cut quartz resonant magnetic field sensor with surface sputtered FeGa film[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 42-49.
- [2] ISHIGURO Y, NISHITANI T, LI C, et al. A graphitic carbon nitride-coated quartz crystal microbalance gas sensor for H₂ detection[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(30): 10178-10184.
- [3] 王青.基于石英晶体传感器的凝血酶检测系统的实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(10):47-50.
WANG Q. Development of thrombin detection system based on quartz crystal sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(10): 47-50.
- [4] CAI J, YAN Y, WANG W, et al. Detection of formic acid and acetic acid gases by a QCM sensor coated with an acidified multi-walled carbon nanotube membrane[J]. Environmental Technology, 2023, 44(6): 751-761.
- [5] KARA S, ARDA E, DOLAŞTIR F, et al. A quartz crystal microbalance (QCM) study on the formation of aqueous κ -carrageenan-chitosan composite bilayers with NaCl and graphene oxide [J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2023, 62(8): 385-398.
- [6] 孙世政,张俊明,韩宇,等.基于单测头误差相位偏移法的嵌入式角位移传感器自校准研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12):96-103.
SUN SH ZH, ZHANG J M, HAN Y, et al. Self-calibration study of the embedded angular displacement sensor based on single probe error phase shift method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 96-103.
- [7] 陈自然,张桁潇,刘小康,等.基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 107-115.
CHEN Z R, ZHANG H X, LIU X K, et al. Novel magnetic-field type time-gating displacement sensors based on a combined measurement method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 107-115.
- [8] YU P, LI X, LI H, et al. All-fabric ultrathin capacitive sensor with high pressure sensitivity and broad detection range for electronic skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(20): 24062-24069.
- [9] HU J, YESILBAS G, LI Y, et al. Overtone mass sensitivity of quartz crystal microbalance sensor with asymmetric N-M type electrode configuration [J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(8): 4043-4049.
- [10] HUANG X, CHEN Q, PAN W, et al. The effect of electrode thickness on mass sensitivity of QCM cannot be ignored[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 68(4): 1458-1461.
- [11] SWAMINATHAN S, EMADI A. Design and analysis of a novel quartz crystal microbalance utilizing distributed mass loading area for improved sensitivity[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(6): 5643-5649.
- [12] 缪春海,王鹤,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 CH 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.
- [13] 刘国华,徐红,鲁楷滨,等.耗散型石英晶体微天平硬

- 件电路设计[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51(6): 8-12.
- LIU G H, XU H, LU K B, et al. A design of the hardware circuit of the dissipative type quartz crystal micro-balance [J]. Journal of Nankai University (Natural Science), 2018, 51(6): 8-12.
- [14] 鲍钰文,徐瑶,张金辉,等. 高性能晶体振荡器及频率校准电路设计[J]. 现代电子技术, 2014, 37(9): 148-153.
- BAO Y W, XU Y, ZHANG J H, et al. Design of high-performance crystal oscillator and frequency calibration circuit[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(9): 148-153.
- [15] 李东,王艳林. 分布电感对石英晶体测试精度的影响及补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 487-491.
- LI D, WANG Y L. Effect and compensation of distributed inductance on the test accuracy of quartz crystal[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 487-491.
- [16] 刘真伟,韩文花,杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 192-202.
- LIU ZH W, HAN W H, YANG T. Fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 192-202.
- [17] 魏巍,刘文波,沈骞. 微波 Colpitts 混沌电路在无线传输系统中的应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 11-14, 27.
- WEI W, LIU W B, SHEN Q. Optimal Colpitts chaotic oscillator for wireless power transmission[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 11-14, 27.

作者简介

孙世政,博士,教授,主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。

E-mail:ssz091011@163.com

郑天成,硕士研究生,主要研究方向为智能传感技术。

E-mail:570574814@qq.com