

高温环境下AT切石英谐振器振动特性分析

温连鹏, 崔健敏, 冯俊一, 刘曦, 王国华, 聂晶*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了研究AT切型石英晶体谐振器在不同温度环境下的振动状态, 利用有限元仿真软件COMSOL Multiphysics 6.0分析了石英晶体在不同温度下沿 x 方向振动位移分布情况, 直观地观察了寄生模态的振动位移, 计算了不同温度下电极区能量占比以及品质因数, 并通过实验测量了不同温度下AT切型石英晶体品质因数及温频效应。仿真结果表明, 随温度变化, AT切型石英晶体表面始终存在典型的能陷效应, 未加剧模态间的耦合问题。实验结果表明, AT切型石英晶体频率随温度变化趋势与理论一致, 实验数据与仿真计算的品质因数随温度改变均无明显变化。研究成果证明AT切型石英晶体具有良好的热稳定性, 可以作为石英晶体微天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)传感器在高温环境下的敏感元件, 对高温环境下敏感器件的选择具有指导意义。

关键词: 振动特性; AT切型; 石英晶体谐振器; 高温; COMSOL

中图分类号: TB9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0076-07

Analysis of vibration characteristics of AT-cut quartz resonator in high temperature environment

WEN Lianpeng, CUI Jianmin, FENG Junyi, LIU Xi, WANG Guohua, NIE Jing*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the vibration state of AT-cut quartz crystal resonators under different temperature environments, the vibration displacement distribution of quartz crystals along the x direction at different temperatures was analyzed using the finite element simulation software COMSOL Multiphysics 6.0. The vibration displacement of parasitic modes was visually observed and the energy ratio and quality factor of electrode region at different temperatures were calculated. The quality factor and temperature frequency effect of AT-cut quartz crystal at different temperatures were measured experimentally. The simulation results show that the typical energy trapping effect always exists on the surface of AT-cut quartz crystal with the change of temperature, and the coupling between modes is not aggravated. The experimental results show that the variation trend of AT-cut quartz crystal frequency with temperature is consistent with the theory, and the experimental data and the quality factor calculated by simulation have no obvious change with temperature. The research results show that AT-cut quartz crystal has good thermal stability and can be used as the sensitive element of Quartz Crystal Microbalance (QCM) sensor in high temperature environment, which has guiding significance for the selection of sensitive devices in high temperature environment.

Key words: vibration characteristics; AT-cut; quartz crystal resonators; high temperature; COMSOL

收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2023-10-20

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2022601A001)

引用格式: 温连鹏, 崔健敏, 冯俊一, 等. 高温环境下AT切石英谐振器振动特性分析[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 76-82.

Citation: WEN L P, CUI J M, FENG J Y, et al. Analysis of vibration characteristics of AT-cut quartz resonator in high temperature environment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 76-82.



0 引言

在工业领域中,湿度传感器被广泛应用于化学气体净化、变压器油健康监测、半导体晶圆加工以及纸张和纺织品生产。湿度传感器还可用于温室空调监控、种植园保护(防露)、土壤湿度监测和农业中的谷物储存^[1]。露点温度测量法是精度最高的湿度测量方法,在国际上被作为湿度量值传递标准^[2],其核心环节是露点检测和识别,目前主要的露点识别方法包括表面声波法、QCM法等。QCM是一种基于石英晶体的逆压电效应制成的表面敏感器件,其原理是通过测量谐振频率的变化来检测质量负载的变化,具有结构简单、高灵敏度、可进行在线检测等优点^[3-5]。与其他方法相比,QCM法具有稳定性高和对纳克级质量变化测量灵敏度高的优点。

AT切石英晶体谐振器具有优良的频率-温度特性、宽频率覆盖范围、成熟的设计和制造技术等优点,已被广泛用于制造石英谐振式传感器^[6]。现有的QCM湿度传感器大多应用于常温环境下,应用于高温环境场景下的QCM湿度传感器较少^[7]。作为QCM湿度传感器的敏感元件,石英晶体为各项异性材料,且材料属性大多受温度影响,给研究高温环境下石英晶体的物理特性带来了巨大困难。为了探究石英晶体作为高温环境下QCM湿度传感器的敏感元件的稳定性、可靠性,本文利用COMSOL Multiphysics 6.0软件(安装环境为Windows 10专业版),通过有限元仿真的方法分析不同温度下AT切石英晶体谐振器的厚度剪切振动特性,得到石英晶体在不同温度下的振型和位移分布,直观地分析石英晶体的振动特性,同时计算不同温度下,石英晶体表面电极区能量占比及品质因数,最后进行实验验证。

1 石英晶体物理参数-温度系数

对于给定切型的石英晶体,其频率常数由尺寸、密度、弹性系数等参数决定。同时,石英晶体的尺寸、密度、弹性系数又受到温度的影响。因此,石英晶体的特征频率受温度影响变化明显。石英晶体的本构关系方程为

$$T = C_E S - e^T E \quad (1)$$

$$D = eS + \varepsilon_s E \quad (2)$$

式中: T 为应力, S 为应变, E 为电场, D 为电位移, C_E 为弹性矩阵, e 为耦合矩阵, ε_s 为介电矩阵。

石英的材料性质与温度有关,可通过温度变化的三阶多项式表示^[8],即

$$e' = e_{ij} \left(1 + T_{e_{ij}}^{(1)} (T - T_0) \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon^T = \varepsilon_0^T \left(1 + T_{\varepsilon^T}^{(1)} (T - T_0) \right) \quad (4)$$

$$c'_{ij} = c_{ij} \left(1 + T_{c_{ij}}^{(1)} (T - T_0) + T_{c_{ij}}^{(2)} (T - T_0)^2 + T_{c_{ij}}^{(3)} (T - T_0)^3 \right) \quad (5)$$

式中: T_0 为参考温度,本研究中 $T_0 = 25^\circ\text{C}$; c_{ij} 为弹性刚度系数; e_{ij} 为压电应力常数; ε^T 为介电常数。在参考温度下,石英晶体被假定为材料的自然状态,晶体不产生位移、应力和应变^[9]。

1986年, Lee 和 Yong 利用拉格朗日方程的热弹性非线性场方程推导了稳态和均匀温度变化叠加在热致变形上的小振动的线性方程组。基于 Lee 提出的增量热场理论,张良梦等人以石英晶体在 25°C 时的弹性常数、厚度和密度作为参考^[9],研究了石英晶体在热场作用下的小幅度振动。已知石英晶体在 25°C 下的弹性常数、厚度和密度,当 AT 切型石英晶体谐振器在 70°C 下工作时,石英晶体的弹性刚度常数、尺寸、压电常数和介电常数可以通过增量热场方程求得(仅考虑温度对石英晶体的弹性矩阵、耦合矩阵、相对介电常数带来的影响)^[10]。在 25°C 条件下,石英晶体的弹性温度系数如表 1 所示^[11], Y 切压电常数温度系数如表 2 所示^[12]。

表 1 25°C 时弹性温度系数

ij	$T_{c_{ij}}^{(1)} / (10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1})$	$T_{c_{ij}}^{(2)} / (10^{-9} ^\circ\text{C}^{-1})$	$T_{c_{ij}}^{(3)} / (10^{-12} ^\circ\text{C}^{-1})$
11	-48.5	-107	-70
33	-160	-275	-250
22	-3 000	-3 050	-1 260
13	-550	-1 150	-750
44	-177	-216	-216
66	178	118	21
14	101	-48	-590

表2 25 °C时Y切压电常数温度系数

Tab.2 Temperature coefficient of Y-cut piezoelectric constant at 25 °C

ij	$e'_{ij}^{(1)}/(10^{-6} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$e'_{ij}^{(2)}/(10^{-9} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$e'_{ij}^{(3)}/(10^{-12} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
11	-1.370	-0.749	1.955
33	3.124	2.600	-4.692

在25 °C条件下Y切型介电常数温度系数^[12]分别为 $\varepsilon'_{11}^{(1)} = 1.59020$ 、 $\varepsilon'_{11}^{(2)} = 5.37230$ 、 $\varepsilon'_{11}^{(3)} = 5.10574$ 、 $\varepsilon'_{33}^{(1)} = 5.46123$ 、 $\varepsilon'_{33}^{(2)} = 0.18948$ 、 $\varepsilon'_{33}^{(3)} = -9.23095$ 。AT切型石英晶体的压电常数温度系数矩阵可通过邦德坐标变换法得到。

在COMSOL Multiphysics 6.0软件中,将石英晶体的弹性矩阵、相对介电常数矩阵、耦合矩阵等参数修改为关于温度的函数,通过给定石英晶体表面温度分析其处于不同温度下的振动状态。

2 有限元仿真

2.1 石英晶体谐振器模型建立

采用直径为8.6 mm,厚度为0.416 mm,切角为35°15'的AT切石英晶体作为研究对象。如果电极厚度小于50 nm,则质量负载将太小,不会引起能量捕获效应;如果电极过厚,将导致能量耗散增加和品质因子下降^[13]。基于此,本文选择在石英晶体两圆面上镀直径为5 mm,厚度为2 μm的金电极。压电材料为Quartz LH,根据石英晶体材料参数-温度解析表达式,修改弹性矩阵、相对介电常数、耦合矩阵的参数。在电极两端施加0.1 V的电位差。有限元模型施加的物理场为固体力学、静电、固体传热。为了简化模型,在固体力学场中施加大小为 1.45×10^{-7} 的各向同性损耗因子,忽略电极发热损耗,通过固体传热模块下温度子模块指定石英晶体表面温度。AT切石英晶体的有限元几何模型如图1所示,紫色圆形区域为电极区,外侧灰色环形区域为石英晶体。网格划分如图2所示,自由度数为104 227。石英晶体不加任何约束,处于自由振动状态。频率扫描范围为3.98 ~ 4.01 MHz,步长为0.1 kHz。

2.2 温度对石英晶体振动特性的影响分析

对环境温度40、90、110、130、150 °C条件下

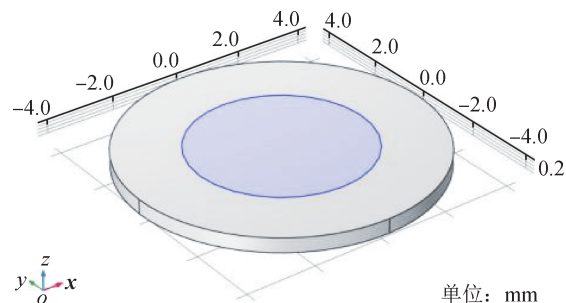


图1 石英晶体几何模型

Fig.1 Geometric model of quartz crystal

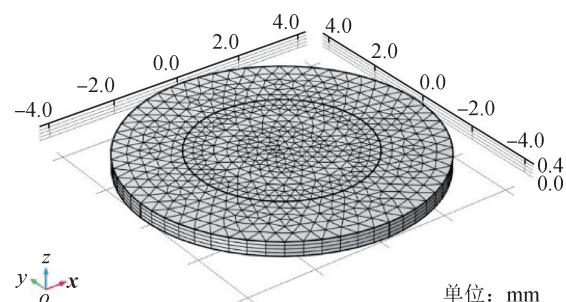


图2 石英晶体网格划分

Fig.2 Quartz crystal meshing

的石英晶体分别进行有限元分析。上述温度下石英晶体表面厚度剪切振动位移分布云图如图3所示。

从图3中可以看出,随着温度变化,石英晶体表面振动位移始终集中分布在电极区域内,且振动位移由电极区域内向外侧迅速衰减,表现出明显的能量捕获现象;还可看出随着温度升高,石英晶体电极区始终呈现出典型的能量捕获效应,表明了AT切石英晶体良好的热稳定性。

环境温度40、90、110、130、150 °C条件下,石英晶体沿x、y、z方向上的振动位移绝对值如图4所示,其中弧长为石英晶体沿x方向的位置坐标。沿x方向的振动位移属于厚度剪切模式下的位移,沿y、z方向的位移属于寄生模态产生的位移。

从图4中可以看出,在不同温度下,电极区内沿x方向的位移高于沿y、z方向的位移,表明了厚度剪切振动模态始终为主导模态,且温度变化并未加剧模态间的耦合。

为了量化AT切石英晶体在不同温度下的表面的振动位移,引入了电极区的能量分布计算公式^[14],即

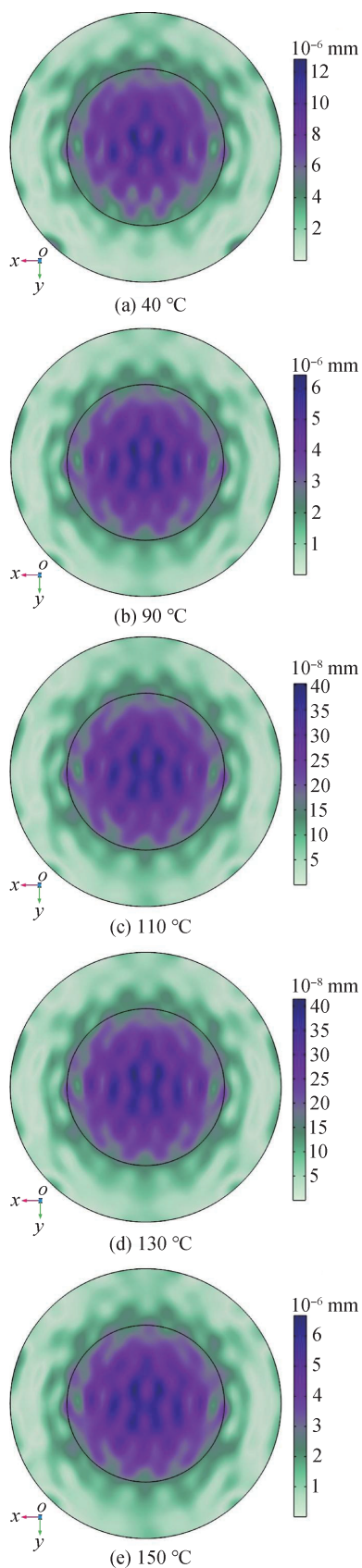


图3 不同温度下厚度剪切位移分布云图
Fig.3 Thickness shear displacement distribution cloud map at different temperatures

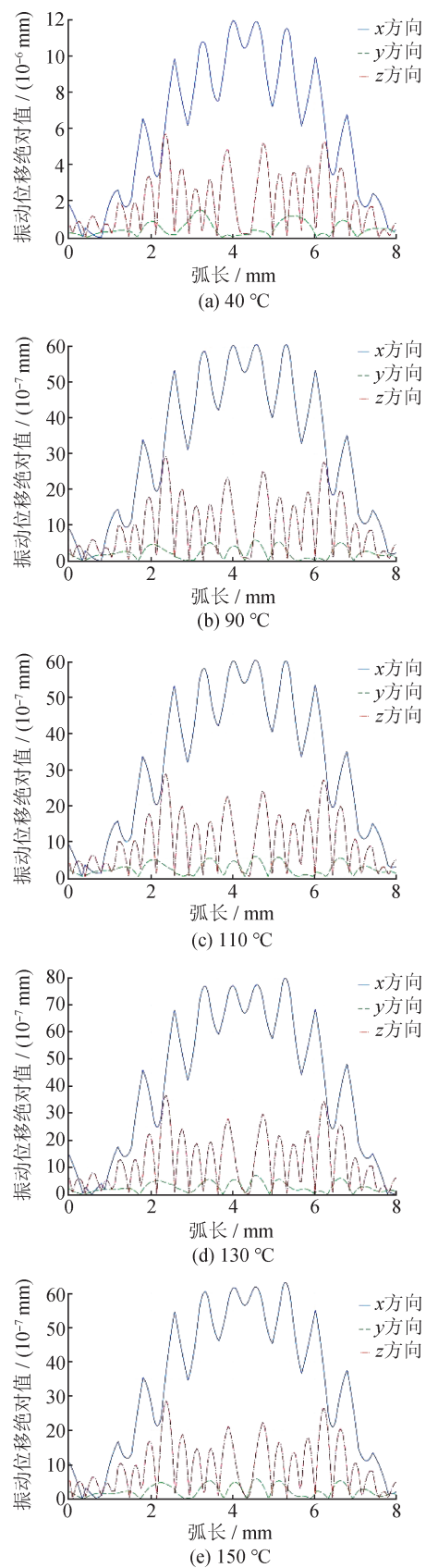


图4 不同温度下沿x轴线位移分布
Fig.4 Displacement distribution along x axis at different temperatures

$$E = \frac{\int_{x=-\frac{1}{2}d_q}^{x=\frac{1}{2}d_e} |u_x|}{\int_{x=-\frac{1}{2}d_q}^{x=\frac{1}{2}d_q} |u_x|} \quad (6)$$

式中： E 为电极区与石英晶体板的能量之比， d_e 为电极区直径， d_q 为石英晶体的直径， u_x 为石英晶体表面沿 x 方向的位移。式(6)通过对电极区厚度剪切位移幅值积分与石英晶体表面位移积分之比来计算石英晶体在电极区的能量占比，能够反映AT切石英晶体在高温环境下厚度剪切振动状况。石英晶体表面的能量占比如图5所示。

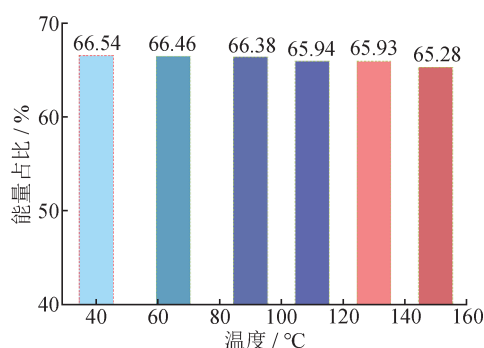


图5 石英晶体电极区能量占比

Fig.5 Quartz crystal electrode area energy ratio

从图5中可以看出，随着温度的升高，石英晶体表面电极区的能量占比降低。40℃时能量占比为66.54%，150℃时能量占比为65.28%，能量分布受温度影响变化较小，在高温环境下能够保持相对稳定。

谐振器件的振动稳定性是被研究者们重点关注的特性。品质因数作为表征振动系统在振动过程中能量损耗程度的物理量，能够反映石英晶体谐振器的振动稳定性。在石英晶体中，品质因数 Q 的定义为^[15]

$$Q = \frac{1}{4\pi RC\Delta f} \quad (7)$$

式中： R 为石英晶体的等效电阻， C 为等效静态电容， Δf 为频率变化量。

R 与 C 的计算公式为

$$R = \frac{d^3 r}{8Ae_{26}} \quad (8)$$

$$C = \frac{\varepsilon_{22} A}{d} \quad (9)$$

式中： d 为石英晶体的厚度， A 为电极区的面积， e_{26} 为机电耦合系数， ε_{22} 为介电常数， r 为阻尼系数。本研究， $d = 0.416 \text{ mm}$ ， $A = 4.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ， $e_{26} = 9.65 \times 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $\varepsilon_{22} = 39.82 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ， $r = 1.45 \times 10^{-7}$ ，经有限元软件求解可直接得出石英晶体的品质因数，如图6所示。

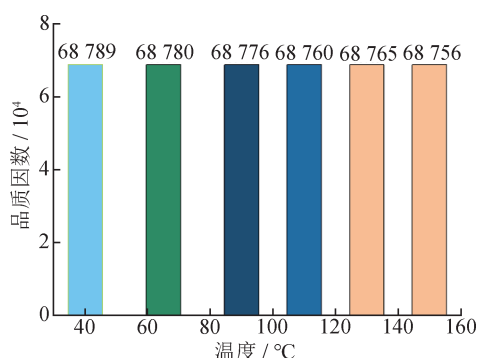


图6 石英晶体的品质因数

Fig.6 Quality factor of quartz crystals

从图6中可以看出，随着温度变化，AT切石英晶体的品质因数基本保持不变，表明AT切石英晶体在高温环境下具备良好的热稳定性，可以作为QCM湿度传感器应用在高温场景下的敏感元件。

3 实验验证

为了验证AT切石英晶体谐振器仿真结果的可靠性，本文搭建了一套由阻抗分析仪、上位机、加热装置等组成的实验系统，如图7所示，通过实验测量了AT切石英晶体在40 ~ 150℃范围下的温频效应及品质因数，实验数据如图8所示。



图7 测量系统实物图

Fig.7 Physical diagram of measuring system

由图8可知，随着温度变化，AT切石英晶体呈现出不同程度的频率漂移，频率漂移趋势与理论值保持一致^[15-17]。在若干个温度点上，品质因数

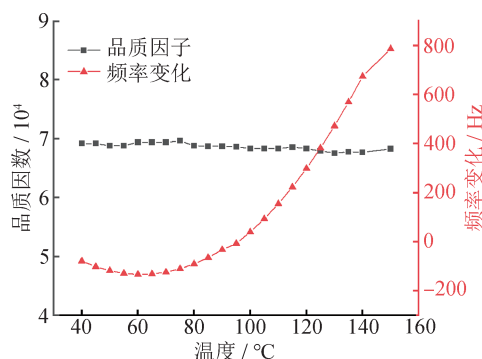


图8 AT切石英晶体品质因数及温频特性

Fig.8 Quality factor and temperature frequency characteristics of AT-cut quartz crystal

基本保持不变。在整个温度测量范围内, AT切石英晶体的品质因数能够稳定保持较高的值。

对比有限元分析得出的品质因数可以看出, 实验数据与有限元分析得出的数据随温度改变均无明显变化, 验证了AT切石英晶体在高温环境下振动的稳定性。

4 结论

针对AT切石英晶体能否作为高温环境下QCM湿度传感器敏感元件这一问题, 通过有限元仿真进行了不同温度下石英晶体振动状态的分析。结果表明温度变化对石英晶体的模态耦合和能陷效应未产生明显影响, 且石英晶体的品质因数基本保持不变。此外, 使用阻抗分析仪测量了石英晶体的品质因数及温频特性, 实验数据与仿真结果一致, 表明AT切石英晶体能够在高温环境下保持稳定振动状态, 具备良好的热稳定性, 证明了AT切石英晶体可以作为高温环境下QCM传感器的敏感元件, 为石英晶体的设计与应用提供了重要参考。

参考文献

[1] NIE J, LIU J, MENG X F. A new type of fast dew point sensor using quartz crystal without frequency measurement [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 236: 749-758.

[2] 张文东, 崔体运, 沈淘淘, 等. 精密露点仪的露点与相对湿度换算及验证研究[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 97-101.

ZHANG W D, CUI T Y, SHEN T T, et al. Study on dew

point and relative humidity conversion and verification of precision dew point hygrometer[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 97-101. (in Chinese)

- [3] NANTO H, DOUGAMI N, MUKAI T, et al. A smart gas sensor using polymer-film-coated quartz resonator microbalance [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2000, 66(1-3): 16-18.
- [4] HENKEL K, OPREA A, PALOUMPA I, et al. Selective polypyrrole electrodes for quartz microbalances: NO₂ and gas flux sensitivities [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2001, 76(1-3): 124-129.
- [5] 邓凡霏. QCM传感器气体检测系统设计及其在鸡蛋品质检测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- DENG F F. Design of QCM sensor gas detection system and its application in egg quality detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [6] LUO P L, YUAN J B, SHAN X B. The analysis of harmonic frequency of AT-cut disc-typed quartz crystals resonator [C]// AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017, 1834(1). doi: 10.1063/1.4981584.
- [7] 胡艳青, 柴源, 陈洁新, 等. 高露点湿度标准装置的研制[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 34-38.
- HU Y Q, CHAI Y, CHEN J X, et al. Development of high dew point humidity standard device [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 34-38. (in Chinese)
- [8] LEE P, YONG Y. Frequency - temperature behavior of thickness vibrations of doubly rotated quartz plates affected by plate dimensions and orientations [J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(7): 2327-2342.
- [9] 张良梦. 考虑温度效应的石英晶体谐振器振动分析及最优切型探究[D]. 浙江: 宁波大学, 2018.
- ZHANG L M. Vibration analysis and optimal cutting of quartz crystal resonator considering temperature effect [D]. Zhejiang: Ningbo University, 2018. (in Chinese)
- [10] WEN J, SUN X, CHAO Z, et al. An analysis of frequency-temperature relations of AT-cut quartz crystal resonators by finite element method with comsol [C]// 2019 13th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA). IEEE, 2019: 1-4.
- [11] BECHMANN R, BALLATO A D, LUKASZEK T J. Higher-order temperature coefficients of the elastic stiffnesses and compliances of alpha-quartz [J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(8): 1812-1822.

- [12] LI M, LI N, LI P, et al. The multi-field coupled vibration analysis of AT-cut quartz crystal resonators with parallelism error [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2023, 36 (2): 349–360.
- [13] LU F, LEE H P, LU P, et al. Finite element analysis of interference for the laterally coupled quartz crystal microbalances [J]. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 2005, 119(1): 90–99.
- [14] LI N, MENG X F, NIE J, et al. Structure optimization and performance evaluation of dew point sensors based on quartz crystal microbalance [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1016–1022.
- [15] BOTTOM V. Introduction to quartz crystal unit design [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- [16] 崔志浩. 晶振动态温频特性测试系统的校正与数据模型分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2021.
- CUI Z H. Calibration and data model analysis of dynamic temperature-frequency measurement system for crystal vibration [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] 杨进华. 考虑热效应和压电效应的石英晶体谐振器振动分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- YANG J H. Vibration analysis of quartz crystal resonator

considering thermal and piezoelectric effects [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 温连鹏 (1999—), 男, 山东济南人, 主要研究方向为温湿压耦合条件下石英晶体的物理特性。



通讯作者: 聂晶 (1985—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为精密测量与特种传感技术等; 发表学术论文 70 余篇, 授权发明专利 15 项, 第一完成人获省部级科技进步二等奖 2 项; 现为中国仪器仪表学会高级会员、中国湿度与水分专业委员会副秘书长。