

基于弹性体拓扑优化的AT切型石英谐振式力传感器研究

梅思雨^{1*}, 殷仁松^{1*}, 刘冲¹, 巫晟逸², 谢龙涛¹, 郁峰¹, 赵岷江², 陈晖^{1,3#}

¹宁波大学力学与工程科学学院, 极端环境交叉力学研究中心, 浙江 宁波

²台晶(宁波)电子有限公司, 浙江 宁波

³宁波大学力学与工程科学学院, 压电器件技术实验室, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年6月11日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

针对AT切型石英晶体谐振式力传感器小载荷下频率偏移有限、灵敏度受限的问题, 提出基于不锈钢弹性体拓扑优化的力信号放大方法。以安装凹槽侧壁平均压应力幅值为目标, 优化弹性体中部材料分布, 并通过有限元对未挖孔、双圆孔、矩形孔、椭圆孔及拓扑优化结构进行对比。结果表明, 0~100 N范围内各结构压应力与载荷近似线性; 拓扑优化结构相对未挖孔和双圆孔结构的平均应力放大倍数分别为10.9081和3.1238。将100 N工况下侧壁压应力作为石英晶体等效边界输入, 拓扑优化结构对应厚度剪切模态频率较未挖孔结构降低约7 kHz。该方法可改善载荷传递路径, 提高局部压应力响应, 为传感器灵敏度提升提供参考。

关键词

石英谐振式力传感器, AT切型石英晶体, 拓扑优化, 频率偏移

Research on AT-Cut Quartz Resonant Force Sensor Based on Elastomer Topology Optimization

Siyu Mei^{1*}, Rensong Yin^{1*}, Chong Liu¹, Chengyi Wu², Longtao Xie¹, Feng Yu¹,
Min Chiang Chao², Hui Chen^{1,3#}

¹Center for Mechanics Plus under Extreme Environments, School of Mechanics and Engineering Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

²TXC (Ningbo) Corporation, Ningbo Zhejiang

*同等贡献作者。

#通讯作者。

文章引用: 梅思雨, 殷仁松, 刘冲, 巫晟逸, 谢龙涛, 郁峰, 赵岷江, 陈晖. 基于弹性体拓扑优化的AT切型石英谐振式力传感器研究[J]. 力学研究, 2026, 15(3): 185-198. DOI: 10.12677/ijm.2026.153018

³Piezoelectric Device Laboratory, School of Mechanics and Engineering Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Received: June 11, 2026; accepted: June 22, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

To address the limited frequency shift and sensitivity of AT-cut quartz resonant force sensors under small loads, a force-signal amplification method based on topology optimization of a stainless-steel elastic body is proposed. The material distribution in the middle region of the elastic body is optimized by maximizing the average compressive stress magnitude on the sidewalls of the mounting groove. Finite element comparisons are conducted among unperforated, double-circular-hole, rectangular-hole, elliptical-hole, and topology-optimized structures. The results show that the groove-sidewall compressive stress is approximately linear with the applied load in the range of 0~100 N. The topology-optimized structure achieves average stress amplification factors of 10.9081 and 3.1238 relative to the unperforated and double-circular-hole structures, respectively. Using the side-wall compressive stress under 100 N as the equivalent boundary input for the quartz crystal, the corresponding thickness-shear modal frequency is about 7 kHz lower than that of the unperforated structure. The proposed method improves the load transfer path and local compressive stress response, providing a design reference for sensitivity enhancement of quartz resonant force sensors.

Keywords

Quartz Resonant Force Sensor, AT-Cut Quartz Crystal, Topology Optimization, Frequency Shift

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石英晶体具有压电特性, 因其频率稳定性好、温度稳定性高和机械品质因数大, 在频率控制、精密测量和力学传感等领域得到广泛应用[1]-[3]。传统压电式力传感器基于正压电效应, 适用于动态力测量, 但在静态或准静态载荷下易出现电荷泄漏, 难以保持长期稳定输出。石英谐振式力传感器以谐振频率作为输出信号, 当外部载荷作用于石英晶体或其封装结构时, 晶体应力状态和等效刚度发生变化, 从而引起谐振频率偏移。由于频率信号具有抗干扰能力强、便于数字化处理和长期稳定性好等特点, 石英谐振式传感器在力、压力及微小载荷检测中具有较高应用价值[4] [5]。AT 切型石英晶体温度稳定性较好, 是石英谐振式力传感器中常用的敏感单元。相关研究表明, AT 切型石英晶体在电极激励下可产生厚度剪切振动模态, 其谐振特性受电极结构、材料阻尼、边界约束和应力状态等因素影响[6]-[8]。当外部载荷经封装结构传递至石英晶体边界时, 晶体内部应力状态发生改变, 进而引起厚度剪切模态频率偏移。已有研究进一步表明, 石英晶体的几何形状、加载方式及力敏结构形式均会影响其力频响应规律[9]。然而, 石英晶体尺寸、切型、电极区域和封装形式通常由谐振器设计确定, 直接改变晶体本体结构可能影响基频、模态形态和封装一致性。因此, 灵敏度提升不宜仅依赖石英晶体本体设计, 还需要关注外部弹性体结构对载荷的传递与放大作用。在实际传感器结构中, 石英晶体通常先封装于金属壳体内部, 再通过胶材与弹性体安装凹槽连接。外部载荷首先作用于不锈钢弹性体, 经凹槽侧壁、有机硅胶和金属封装传递至内

部石英晶体。若弹性体能够在相同输入载荷下使凹槽侧壁产生更高压应力，则石英晶体边界应力也会相应增大，从而产生更明显的厚度剪切模态频率偏移。由此可知，弹性体结构不仅影响传感器的机械支撑性能，也直接影响外部载荷向石英敏感单元的传递效率。拓扑优化能够根据目标函数和约束条件自动调整设计域内材料分布，在给定载荷、边界条件和设计空间内形成更合理的载荷传递路径。密度法、过滤方法和投影方法是连续体拓扑优化中常用的数值策略，可用于改善材料分布清晰度并降低网格依赖性[10][11]。近年来，拓扑优化已广泛应用于结构刚度设计、轻量化设计和多学科结构优化等问题[12]-[15]。对于力传感器而言，弹性体结构和载荷传递路径直接影响敏感区域的应力响应。将拓扑优化引入弹性体结构设计，有助于在不改变石英敏感元件本体结构的前提下，提高外部载荷向目标区域的传递效率。

针对 AT 切型石英谐振式力传感器小载荷下频率偏移量较小、灵敏度提升受限的问题，对不锈钢弹性体中部结构进行拓扑优化。在保持 AT 切型石英晶体、封装结构和凹槽安装形式不变的条件下，调整弹性体中部材料分布，以提高输入载荷与凹槽侧壁压应力之间的响应灵敏度。通过有限元仿真对未挖孔、双圆孔、矩形孔、椭圆孔和拓扑优化结构进行对比，提取不同结构的凹槽侧壁平均压应力，并将代表工况应力结果用于石英晶体厚度剪切模态频率偏移分析，建立“外部载荷 - 弹性体应力响应 - 石英晶体频率偏移”的仿真分析关系。该方法从前端弹性体载荷路径调控入手，可在敏感单元结构保持不变的条件下提高力信号传递效率，为石英谐振式力传感器弹性体结构设计及灵敏度提升提供参考。

2. 石英谐振式力传感器结构及力频响应机理

2.1. 传感器结构组成

研究对象由不锈钢弹性体、封装式石英敏感单元及粘接材料组成。弹性体为轴类梁式结构，轴向长度为 125 mm，主体直径为 33 mm；中部设置尺寸为 7 mm × 7 mm × 0.5 mm 的传感器安装凹槽。AT 切型石英晶体封装于金属壳体内部，封装外侧通过有机硅胶与弹性体凹槽壁面连接。封装结构参与整体力传递过程，但不作为拓扑优化设计对象。图 1 给出了石英谐振式力传感器的结构组成。图 1(a)为传感器整体结构及敏感单元安装示意图，展示了不锈钢弹性体、安装凹槽、有机硅胶和传感器封装壳体之间的装配关系。图 1(b)为封装式石英敏感单元的爆炸结构示意图，主要包括上盖、承载体、石英晶体、基座和电极等部分。AT 切型石英晶体由上下承载体夹持固定，基座与上盖共同形成封装结构，并通过电极实现电学连接。该结构使外部载荷能够沿“不锈钢弹性体 - 凹槽侧壁 - 有机硅胶 - 铝制封装壳体 - 石英晶体”的路径逐级传递，为弹性体应力放大和石英晶体频率偏移分析提供结构基础。

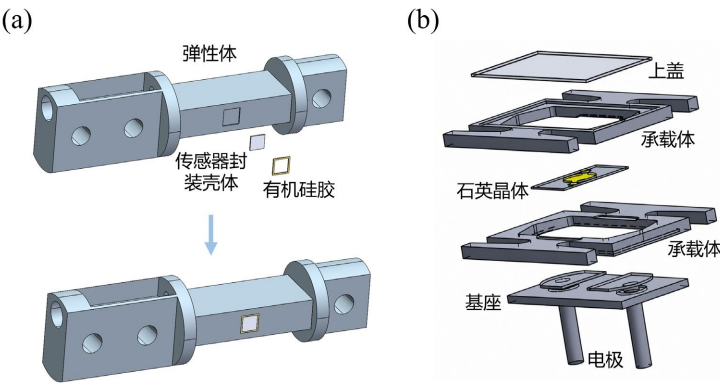


Figure 1. Structural composition of the quartz resonant force sensor. (a) Overall structure and installation of the sensing unit; (b) Exploded view of the packaged quartz sensing unit

图 1. 石英谐振式力传感器结构组成示意图。(a) 整体结构及敏感单元安装示意图；(b) 封装式石英敏感单元爆炸结构示意图

2.2. AT 切型石英晶体厚度剪切模态

在弹性体结构优化之前,需要先确定 AT 切型石英晶体的厚度剪切模态特征频率。图 2(a)给出了石英晶体及电极区域的几何模型,其中 AT 切型石英晶体作为主要振动基体,表面电极用于施加激励电场并形成压电耦合振动。对于厚度剪切模态,晶体厚度方向尺寸对其基频具有主导影响,其理论基频可由石英晶体厚度、厚度剪切方向等效弹性常数和密度估算:

$$f_0 = \frac{1}{2T} \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}} \quad (1)$$

式中, T 为石英晶体厚度, c_{66} 为厚度剪切方向等效弹性常数, ρ 为石英晶体密度。根据理论计算, AT 切型石英晶体厚度剪切模态基频为 24.8824 MHz。随后建立石英晶体压电有限元模型,并进行特征频率分析。图 2(b)给出了厚度剪切模态下的位移幅值分布。由图可见,模态振动主要集中于电极覆盖区域附近,晶体上下表面呈现相对剪切变形特征,符合 AT 切型石英晶体厚度剪切振动的典型模态形式。

有限元仿真得到的厚度剪切模态特征频率为 24.884 MHz,与理论计算结果较为接近,二者差值约为 -0.0016 MHz,相对误差约为 0.0065%。理论估算与有限元结果之间的一致性表明,所建立的压电有限元模型能够较准确地反映 AT 切型石英晶体的厚度剪切振动特性。同时,模态位移分布集中于电极区域,说明电极布置能够有效激发目标厚度剪切模态,并避免其他非目标模态对频率识别造成明显干扰。该模态具有较清晰的振动形态和稳定的频率特征,适合作为评价边界应力作用下频率响应变化的目标模态。

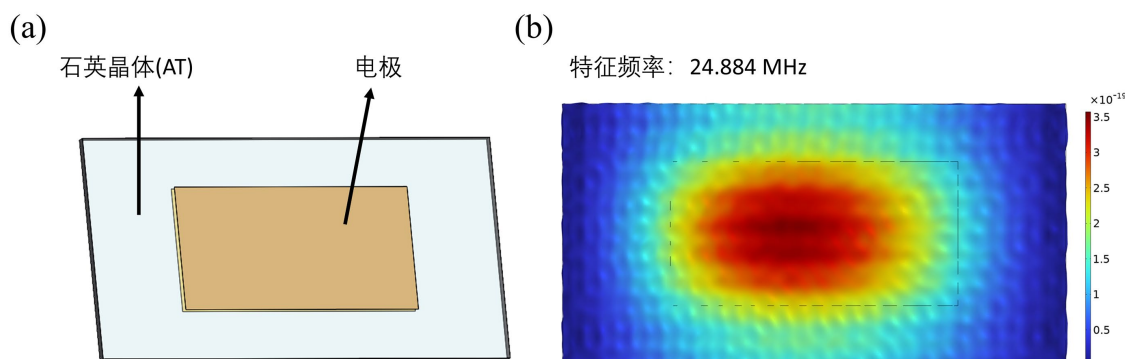


Figure 2. Thickness-shear mode analysis of the AT-cut quartz crystal. (a) Quartz crystal and electrode structure; (b) Displacement amplitude distribution of the thickness-shear mode

图 2. AT 切型石英晶体厚度剪切模态分析。(a) 石英晶体及电极结构示意图; (b) 厚度剪切模态位移幅值分布

2.3. 力信号放大机理

石英谐振式力传感器以频率偏移作为输出信号,其响应与石英晶体边界应力状态密切相关。外部载荷首先作用于不锈钢弹性体,经凹槽侧壁、有机硅胶和金属封装传递至内部 AT 切型石英晶体,从而改变晶体边界应力并引起厚度剪切模态频率偏移。在石英晶体和封装结构确定的条件下,弹性体的载荷传递能力直接影响晶体边界应力水平。为表征弹性体对外部载荷的应力放大能力,定义凹槽侧壁应力灵敏度为:

$$S_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma_{slot}}{\Delta F} \quad (2)$$

式中, $\Delta\sigma_{slot}$ 为凹槽侧壁平均压应力变化量, ΔF 为外加载荷变化量。 S_{σ} 越大,说明单位外加载荷能够在传感器安装区域产生更高的应力响应,弹性体的力传递与放大能力越强。石英谐振式力传感器的力频灵

敏度可表示为:

$$S_f = \frac{\Delta f}{\Delta F} \quad (3)$$

式中, Δf 为石英晶体厚度剪切模态频率偏移量。由于 Δf 与石英晶体边界应力变化有关, 提高凹槽侧壁应力灵敏度 S_σ 有助于增强晶体边界受力, 从而提高力频灵敏度 S_f 。因此, 弹性体拓扑优化的核心是提高输入载荷与凹槽侧壁压应力之间的响应灵敏度。

3. 弹性体拓扑优化模型

3.1. 几何模型与边界条件

为分析弹性体结构对力信号传递过程的影响, 建立不锈钢弹性体有限元模型。弹性体中部设置传感器安装凹槽, 用于放置封装式石英敏感单元。拓扑优化阶段仅将弹性体中部区域作为设计域, 传感器安装凹槽、端部连接区、安装孔、封装结构、有机硅胶和石英晶体均设为非设计域, 以保证传感器安装形式、载荷施加位置和边界条件在优化过程中保持不变。

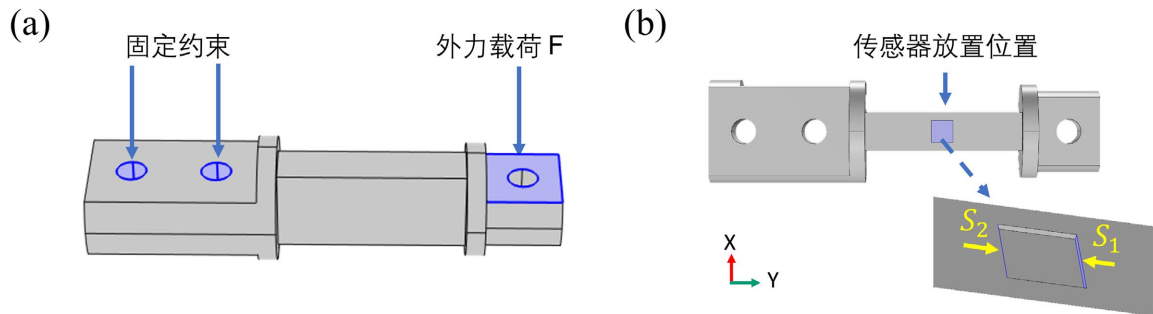


Figure 3. Finite element model of the elastomer and stress extraction regions. (a) Fixed constraint and external load; (b) Sensor installation position and groove-sidewall stress extraction regions

图 3. 弹性体有限元模型及应力提取区域。(a) 固定约束与外加载荷; (b) 传感器安装位置及凹槽侧壁应力提取区域

图 3 给出了弹性体有限元模型及应力提取区域。图 3(a)为加载与约束条件, 左端安装孔区域施加固定约束, 右端加载区域施加外部载荷 F , 载荷由 0 N 增至 100 N, 间隔为 10 N。图 3(b)为凹槽侧壁应力提取区域。由于封装式石英敏感单元主要受凹槽两侧壁挤压作用, 选取两侧壁作为应力评价边界, 并定义其平均应力为 s_1 和 s_2 。凹槽侧壁 y 方向平均压应力幅值定义为:

$$\begin{cases} s_1 = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \sigma_y dA \\ s_2 = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \sigma_y dA \end{cases} \quad (4)$$

式中, A_1 和 A_2 分别为凹槽两侧壁的应力提取区域面积, σ_y 为 y 方向正应力, s_1 和 s_2 分别表示凹槽两侧壁在对应区域内的平均 y 方向应力, 单位为 MPa。该表达式表示对侧壁区域内的局部应力进行面积平均, 可用于表征封装式石英敏感单元在凹槽两侧壁处受到的等效挤压作用。相比单点最大应力, 面积平均应力能够减小局部网格波动和应力集中点对评价结果的影响, 更适合作为弹性体结构优化的响应指标。在所设加载方向下, 凹槽两侧壁 y 方向应力主要表现为负值, 说明侧壁区域处于受压状态。压应力幅值越大, 表明凹槽侧壁对封装式石英敏感单元的挤压作用越强, 外部载荷向石英敏感单元的传递效率越高。

因此，后续拓扑优化以提高相同输入载荷下凹槽两侧壁平均压应力为目标，用于增强弹性体对外部力信号的机械放大能力。

3.2. 拓扑优化密度模型设置

拓扑优化采用密度法描述设计域内材料分布，设计变量为材料体积因子 θ ，取值范围 $0 \sim 1$ ， $\theta = 1$ 其中表示实体材料， $\theta = 0$ 表示空域，中间值表示灰度材料。通过连续密度变量描述材料的保留与去除状态，可将结构拓扑变化转化为连续变量优化问题，从而便于在有限元框架下进行迭代求解。

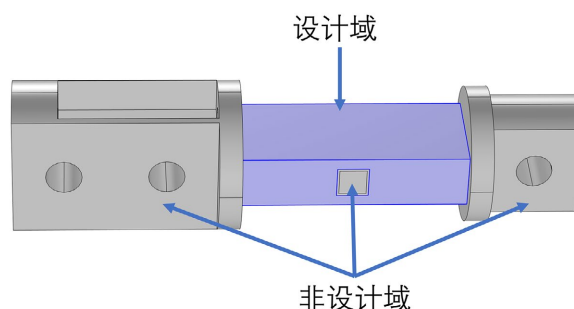


Figure 4. Design and non-design regions of the topology optimization model
图 4. 拓扑优化模型设计域与非设计域划分

图 4 显示了优化模型的设计域划分：蓝色区域为可优化设计域，即弹性体中部待优化区域；灰色区域为非设计域，包括传感器安装凹槽、端部连接区、安装孔及封装敏感单元。该区域划分能够在保持传感器安装结构和边界条件不变的前提下，对弹性体中部材料分布及载荷传递路径进行优化。材料刚度与密度变量之间采用 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) 插值模型描述：

$$E(\theta) = E_{\min} + \theta^p (E_0 - E_{\min}) \quad (5)$$

式中， E_0 为实体材料弹性模量， $E_{\min}$ 为极小弹性模量以避免刚度矩阵奇异， p 惩罚指数用于抑制中间密度材料，使优化结果趋向于清晰的实体/空域分布。该模型中取 $p = 3$ ，以增强材料分布的 0/1 特征。为提升数值稳定性并减少棋盘格效应，引入 Helmholtz 密度过滤和投影方法，过滤半径取 $2.5 \sim 3 \text{ mm}$ ，投影斜率 β 取 $4 \sim 8$ ，以获得边界清晰、可对比的拓扑结果。该方法确保设计域材料分布合理，形成有利于载荷传递至凹槽侧壁的主要力流路径，为后续不同结构的应力响应对比提供一致的数值基础。

3.3. 目标函数、约束条件及优化列式

拓扑优化目标为提高输入载荷与传感器安装凹槽侧壁压应力之间的响应灵敏度。凹槽侧壁压应力越大，传递至封装结构及内部石英晶体的等效边界应力越高，有利于增强厚度剪切模态频率响应。根据第 3.1 节定义的两侧壁平均应力 s_1 和 s_2 ，目标函数定义为：

$$obj = \frac{s_1 + s_2}{2} \quad (6)$$

在所设加载方向下， s_1 和 s_2 主要为负值，表明凹槽两侧壁处于压缩状态。因此，对目标 obj 进行最小化，等价于增大凹槽两侧壁平均压应力的绝对值。该目标函数并非追求弹性体整体应力最大，而是针对传感器安装区域的局部压应力响应进行优化，其物理意义在于提高单位外加载荷下凹槽侧壁对封装式石英敏感单元的等效挤压作用，从而增强弹性体对力信号的传递与放大能力。以弹性体中部设计域内的材料体积因子 θ 作为设计变量，结合有限元静力平衡方程、材料体积分数、整体刚度和结构强度约束，拓扑

优化的优化列式可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \min obj &= \frac{s_1 + s_2}{2} \\ K(\theta)u &= F \\ 0 \leq \theta &\leq 1 \\ 0.50 \leq \theta_{\text{avg}} &\leq 0.52 \\ U_{\text{opt}} &\leq 1.8U_0 \\ \sigma_{\text{vM,max}} &\leq \sigma_{\text{allow}} \\ \sigma_{\text{allow}} &= 120\text{MPa} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中， θ 为材料体积因子， $\theta=1$ 表示实体材料， $\theta=0$ 表示空域； $K(\theta)$ 为由材料密度分布决定的整体刚度矩阵， u 为位移向量， F 为外载荷向量， $K(\theta)u=F$ 表示弹性体在当前材料分布下的有限元静力平衡关系。 θ_{avg} 为设计域内材料体积因子的平均值，用于控制材料保留率。 U_0 为未优化结构在相同载荷下的总弹性应变能， U_{opt} 为优化结构的总弹性应变能。由于相同外加载荷下结构柔度越大，总弹性应变能越高，因此设置 $U_{\text{opt}} \leq 1.8U_0$ ，以限制优化结构的整体柔化程度，避免通过过度降低刚度获得非合理的局部应力放大效果。 $\sigma_{\text{vM,max}}$ 为优化结构最大 von Mises 应力， σ_{allow} 为许用应力，取 120 MPa，用于对优化结果进行强度校核。上述优化列式中，目标函数用于提高凹槽侧壁压应力响应，体积分约束用于控制材料保留比例，刚度约束用于保证结构整体承载能力，强度约束用于判断优化结果在所设载荷范围内是否满足安全要求。为保证应力提取精度，凹槽侧壁和拓扑优化设计域采用局部加密网格，其他非关键区域采用相对较粗网格，以兼顾计算精度和求解效率。拓扑优化模型主要参数见表 1。为进一步明确拓扑优化的迭代求解过程，图 5 给出了弹性体拓扑优化流程。首先建立弹性体有限元模型并划分优化区域，随后初始化密度变量，设置目标函数与约束条件。在每次迭代中，通过有限元计算获得凹槽侧壁应力响应，并根据目标函数和约束条件更新密度变量。当结果满足收敛条件后，输出密度分布并提取拓扑结构；若强度校核不满足要求，则调整约束参数并重新优化，直至获得满足强度要求的优化结构。

Table 1. Main parameters of the topology optimization model
表 1. 拓扑优化主要参数

参数	设置
优化对象	不锈钢弹性体中部区域
非优化对象	封装结构、有机硅胶、石英晶体、凹槽和端部连接区
设计变量	材料体积因子 (θ)
目标函数	$\min obj = \frac{s_1 + s_2}{2}$
平衡方程	$K(\theta)u = F$
体积分	$0.50 \leq \theta_{\text{avg}} \leq 0.52$
刚度约束	$U_{\text{opt}} \leq 1.8U_0$
强度约束	$\sigma_{\text{vM,max}} \leq 120 \text{ MPa}$
SIMP 指数	3
过滤半径	2.5~3 mm
投影斜率 β	8
许用应力	120 MPa

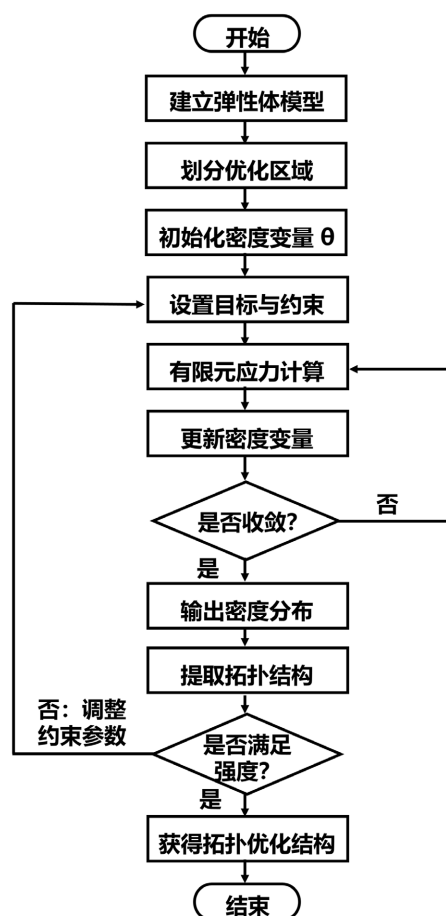


Figure 5. Flowchart of the elastomer topology optimization process
图 5. 弹性体拓扑优化求解流程图

3.4. 关键约束参数选取依据与影响讨论

拓扑优化结果与目标函数、体积分数、刚度约束、强度约束及过滤投影参数密切相关。本文以提高传感器安装凹槽侧壁平均压应力为优化目标，并非单纯追求结构柔化或局部最大应力，而是在保证弹性体整体承载能力的前提下，引导外加载荷更多地传递至传感器安装区域。体积分数约束主要用于控制材料保留率和载荷传递路径。体积分数过大时，设计域材料去除不足，原始直通传力路径仍占主导，凹槽侧壁压应力放大效果有限；体积分数过小时，结构承载截面减小，容易导致整体刚度不足和局部应力集中。因此，本文将设计域平均材料体积分数控制在 0.50~0.52 范围内，以兼顾材料重分布效果和整体承载能力。

刚度约束 $U_{opt} \leq 1.8U_0$ 用于限制优化结构相对于未优化结构的整体柔化程度。在相同外载荷条件下，总弹性应变能越大，说明结构柔度越高。若不设置刚度约束，优化过程可能通过大幅削弱中部结构刚度来获得较高的局部压应力，但这种放大并不一定具有工程可用性。本文通过限制优化结构总弹性应变能，使应力放大主要来源于载荷路径重构，而不是单纯依赖结构过度柔化。强度约束 $\sigma_{vM,max} \leq 120 \text{ MPa}$ 用于保证优化结构在所设载荷范围内具有基本安全裕度。由于拓扑优化会在设计域内形成非规则孔洞和窄连接区域，若仅以凹槽侧壁压应力为目标，局部区域可能出现较高应力集中。引入最大 von Mises 应力约束后，可以抑制不合理的尖锐结构和过高局部应力，使优化结果更适合后续结构提取和工程制造。

此外, 过滤半径和投影参数主要影响拓扑边界清晰度和最小结构特征尺寸。较小过滤半径可能导致棋盘格或细小枝状结构, 不利于制造; 较大过滤半径则会削弱局部材料重分布能力, 使优化结构趋于平滑但应力放大能力下降。本文采用 2.5~3 mm 的过滤半径和 $\beta = 8$ 的投影参数, 以兼顾边界清晰度、数值稳定性和结构可制造性。综上, 本文关键约束参数的选取原则是在提高凹槽侧壁压应力响应的同时, 兼顾弹性体整体刚度、强度安全和结构可制造性。

4. 对比结构设计

为评价拓扑优化弹性体的力传递与应力放大效果, 设置未挖孔、双圆孔、矩形孔和椭圆孔四种规则结构作为对比模型。各结构采用相同的外形尺寸、材料参数、边界条件、载荷范围和应力提取方法, 以保证结果可比性。未挖孔结构作为基准模型, 双圆孔、矩形孔和椭圆孔结构用于分析不同孔型对局部刚度分布、力流路径及凹槽侧壁应力响应的影响。图 6 给出了不同对比弹性体结构的三维模型, 其中图 6(a) 为未挖孔结构, 图 6(b) 为双圆孔结构, 图 6(c) 为矩形孔结构, 图 6(d) 为椭圆孔结构。上述结构仅在弹性体中部区域进行几何调整, 传感器安装凹槽、约束位置和外载荷施加方式保持一致。通过比较不同结构在相同载荷下的凹槽侧壁平均压应力, 可分析规则孔型与拓扑优化结构在载荷路径调控和局部应力放大能力方面的差异。

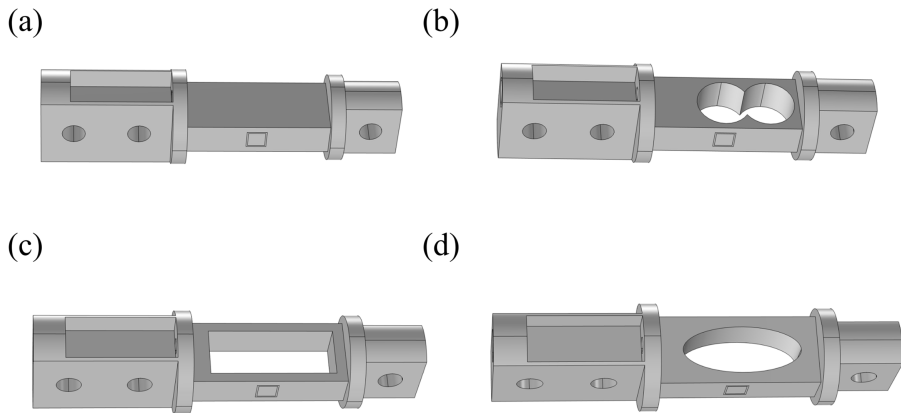


Figure 6. Three-dimensional models of different comparison elastomer structures. (a) Unperforated structure; (b) Double-circular-hole structure; (c) Rectangular-hole structure; (d) Elliptical-hole structure

图 6. 不同对比弹性体结构三维模型。(a) 未挖孔结构; (b) 双圆孔结构; (c) 矩形孔结构; (d) 椭圆孔结构

5. 结果与分析

5.1. 拓扑优化结果

拓扑优化结果如图 7 所示。图 7(a) 为弹性体中部设计域的材料体积因子分布云图, 颜色由蓝色到红色表示材料体积因子由低到高变化。红色区域表示趋向于保留的实体材料, 蓝色区域表示对应力响应贡献较小、趋向于被削弱的区域。由图 7(a) 可见, 低密度区域主要分布于弹性体中部, 并在传感器安装凹槽附近形成非规则材料去除区域, 表明优化过程改变了原始载荷传递路径。图 7(b) 为以材料体积因子 0.5 作为阈值提取得到的拓扑结构, 并与弹性体整体线框模型叠加显示。在右端加载、左端固定的边界条件下, 若中部区域保持完整, 载荷易沿整体梁路径直接传递, 凹槽侧壁压应力响应有限。拓扑优化后, 中部低密度区域削弱了原有直通传力路径, 使载荷在设计域内重新分配, 并促使部分力流向凹槽附近集中。由

图 7(b)可见, 保留材料主要分布在设计域上缘、右侧边界及凹槽附近, 形成围绕传感器安装区域的连续承载路径。该非规则构型是在提高凹槽侧壁压应力目标下形成的结果, 有利于将右端输入载荷传递至凹槽两侧壁, 从而提高传感器安装区域的局部压应力响应。

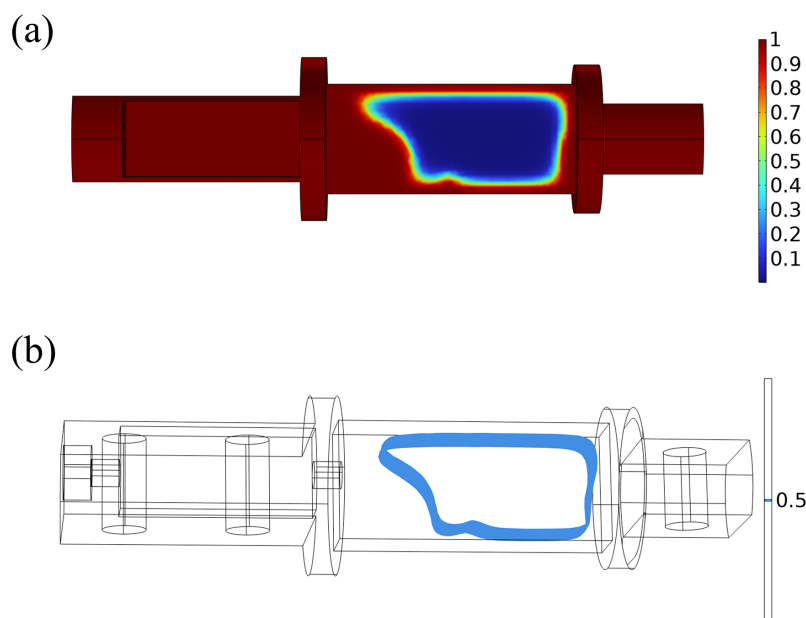


Figure 7. Density distribution and structural result of topology optimization. (a) Material volume factor distribution; (b) Topology-optimized structure extracted using a density threshold and superimposed on the overall model

图 7. 拓扑优化密度分布及结构结果。(a) 材料体积因子分布; (b) 阈值提取后的拓扑结构与整体模型叠加示意

从力流传递角度看, 未优化弹性体中部区域较为完整, 外加载荷主要沿弹性体轴向整体梁路径由右端传递至左端固定端, 传感器安装凹槽仅作为局部开槽区域参与变形, 因此凹槽侧壁压应力响应有限。拓扑优化后, 设计域中部形成低密度去除区域, 原有直通传力路径被削弱, 载荷沿保留材料区域重新分配。由图 7(a)和图 7(b)可见, 优化后保留材料主要分布在设计域上缘、右侧边界及凹槽附近, 形成围绕传感器安装凹槽的连续承载路径。该路径既保证外加载荷能够继续向固定端传递, 又促使部分力流在凹槽附近发生转向和汇聚, 从而增强凹槽两侧壁的挤压作用。换言之, 拓扑优化结构使弹性体内部力流由“直接跨越凹槽区域”转变为“经过并挤压凹槽侧壁”的传递模式。上述力流重构也解释了图 8 和表 2 中的应力响应差异。未挖孔结构力流主要沿轴向传递, 凹槽侧壁压应力较低; 矩形孔和椭圆孔结构虽改变了局部材料分布, 但未能有效引导载荷向凹槽侧壁集中, 因此应力响应低于未挖孔结构; 双圆孔结构可在一定程度上改善载荷传递路径; 而拓扑优化结构根据凹槽侧壁压应力目标自动形成有利的材料保留路径, 因此表现出最高的应力放大效果。

5.2. 载荷 - 弹性体凹槽侧壁应力关系

为定量评价不同弹性体结构对外加载荷的应力响应能力, 对未挖孔、双圆孔、矩形孔、椭圆孔及拓扑优化结构进行 0~100 N 参数化载荷分析, 并提取传感器安装凹槽侧壁平均压应力, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 各结构凹槽侧壁平均压应力均随外加载荷增加而近似线性增大, 表明弹性体在所设载荷范围内主要处于线弹性响应状态, 外加载荷与凹槽侧壁压应力之间具有稳定对应关系。

Table 2. Average groove-sidewall stress under different loads
表 2. 不同载荷下凹槽侧壁平均应力

F/N	未挖孔/MPa	矩形孔/MPa	椭圆孔/MPa	双圆孔/MPa	拓扑优化/MPa
0	0	0	0	0	0
10	0.1133	0.069306	0.05868	0.3956	1.2357
20	0.2266	0.13861	0.11736	0.7912	2.4715
30	0.3399	0.20792	0.17604	1.1867	3.7072
40	0.4531	0.27722	0.23472	1.5823	4.9430
50	0.5664	0.34653	0.2934	1.9779	6.1787
60	0.6797	0.41583	0.35208	2.3735	7.4145
70	0.7930	0.48514	0.41076	2.7691	8.6502
80	0.9063	0.55445	0.46944	3.1647	9.8860
90	1.0196	0.62375	0.52812	3.5602	11.1220
100	1.1329	0.69306	0.5868	3.9558	12.3570

从 100 N 工况结果来看, 未挖孔结构凹槽侧壁平均压应力为 1.1329 MPa, 矩形孔结构为 0.6931 MPa, 椭圆孔结构为 0.5868 MPa, 双圆孔结构为 3.9558 MPa, 拓扑优化结构为 12.3570 MPa。矩形孔和椭圆孔结构的应力响应低于未挖孔结构, 说明在当前孔型尺寸和布置方式下, 其未能增强载荷向凹槽区域的有效传递; 双圆孔结构能够提高凹槽侧壁压应力, 表明中部对称孔洞可改变局部刚度分布并引导载荷向凹槽附近集中。

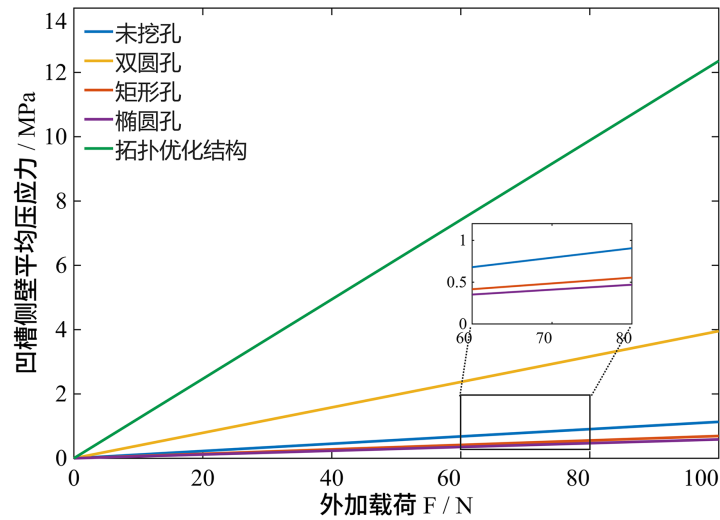


Figure 8. Comparison of average compressive stress on groove sidewalls for different elastomer structures under load
图 8. 不同弹性体结构载荷 - 凹槽侧壁平均压应力对比

图 8 给出了五种弹性体结构的载荷 - 凹槽侧壁平均压应力对比曲线。可以看出, 各结构曲线均具有较好的线性特征, 但曲线斜率差异明显。其中, 拓扑优化结构的曲线斜率最大, 且在整个载荷范围内均显著高于未挖孔结构和各规则孔结构, 说明其在相同输入载荷下能够获得最高的凹槽侧壁压应力响应。相比之下, 规则孔结构的应力放大效果与孔型形状及其相对凹槽的位置密切相关, 简单设置孔洞并不一

定能够提高传感器安装区域的应力响应。结合表 2 和图 8 可知, 拓扑优化结构能够更有效地调整弹性体内部载荷传递路径, 使外部载荷更集中地传递至传感器安装凹槽侧壁, 从而提高输入载荷与凹槽侧壁压应力之间的响应灵敏度。该结果说明, 以凹槽侧壁压应力为优化目标的拓扑优化方法较规则孔型具有更强的力信号放大能力。

5.3. 应力放大倍数分析

为定量评价不同弹性体结构对输入载荷的应力放大能力, 以未挖孔结构作为基准模型, 计算双圆孔、矩形孔、椭圆孔和拓扑优化结构的平均应力放大倍数。由于 0 N 工况下各结构凹槽侧壁平均压应力均为 0, 无法进行比值计算, 因此选取 10~100 N 载荷范围内的数据进行平均, 结果如表 3 所示。

Table 3. Average stress amplification factors of different structures
表 3. 不同结构平均应力放大倍数

对比对象	平均应力放大倍数
双圆孔/未挖孔	3.4919
矩形孔/未挖孔	0.6118
椭圆孔/未挖孔	0.5180
拓扑优化结构/未挖孔	10.9081
拓扑优化结构/双圆孔	3.1238

表 3 结果表明, 双圆孔结构相对于未挖孔结构的平均应力放大倍数为 3.4919, 说明中部对称圆孔能够改变弹性体局部刚度分布和载荷传递路径, 使凹槽侧壁获得更高的压应力响应。矩形孔和椭圆孔结构相对于未挖孔结构的平均应力放大倍数分别为 0.6118 和 0.5180, 均小于 1, 表明在当前孔型尺寸和布置条件下, 两者未能增强传感器安装区域的应力响应。拓扑优化结构表现出最显著的应力放大效果, 其相对于未挖孔结构的平均应力放大倍数为 10.9081, 相对于双圆孔结构的平均应力放大倍数为 3.1238。该结果说明, 拓扑优化结构不仅优于原始未挖孔结构, 也优于规则孔型中效果较好的双圆孔结构。其主要原因在于, 规则孔型的材料去除区域由人工预设, 载荷传递路径调控能力受几何形式限制; 而拓扑优化结构能够根据目标函数自动调整材料分布, 使保留材料更有利于将外部载荷传递至传感器安装凹槽侧壁, 从而提高输入载荷与凹槽侧壁压应力之间的响应灵敏度。

5.4. 频率偏移分析

为验证弹性体结构优化对石英谐振式力传感器频率输出的影响, 选取 100 N 作为代表载荷工况, 将凹槽侧壁平均压应力作为石英晶体受载分析的等效边界输入。根据前述结果, 100 N 外加载荷下, 未挖孔结构的凹槽侧壁平均压应力为 1.1329 MPa, 拓扑优化结构为 12.3570 MPa, 后者约为前者的 10.91 倍, 说明拓扑优化结构能够在传感器安装区域产生更强的局部压应力响应, 并提高外部载荷向石英晶体边界的传递能力。在石英晶体频率偏移分析中, 保持 AT 切型石英晶体的尺寸、材料参数、电极区域和边界条件一致, 仅改变石英晶体侧边界的等效载荷输入。分别将未挖孔结构和拓扑优化结构在 100 N 工况下对应的凹槽侧壁平均压应力施加于石英晶体侧边界, 进行预应力特征频率分析。该处理方式能够在不改变石英晶体本体结构和模态形式的条件下, 比较不同弹性体结构传递至晶体边界的应力作用对厚度剪切模态频率的影响。分析结果如图 9 所示。图 9(a)为未挖孔结构对应边界应力输入下的厚度剪切模态结果, 其特征频率为 24.841 MHz; 图 9(b)为拓扑优化结构对应边界应力输入下的厚度剪切模态结果, 其特征频率为 24.834 MHz。与未挖孔结构相比, 拓扑优化结构对应的特征频率降低约 0.007 MHz, 即约 7 kHz。需要

说明的是，凹槽侧壁平均压应力在此作为石英晶体边界受力水平的等效输入，用于表征不同弹性体结构对石英晶体频率响应的相对影响。该处理能够反映弹性体结构优化对频率输出端的传递效应，但实际载荷传递过程还受到有机硅胶、铝制封装壳体和承载体等中间结构的影响。因此，后续仍需结合包含封装结构和粘接层的完整耦合模型及实验测试，对载荷传递过程和频率响应规律进行进一步验证。

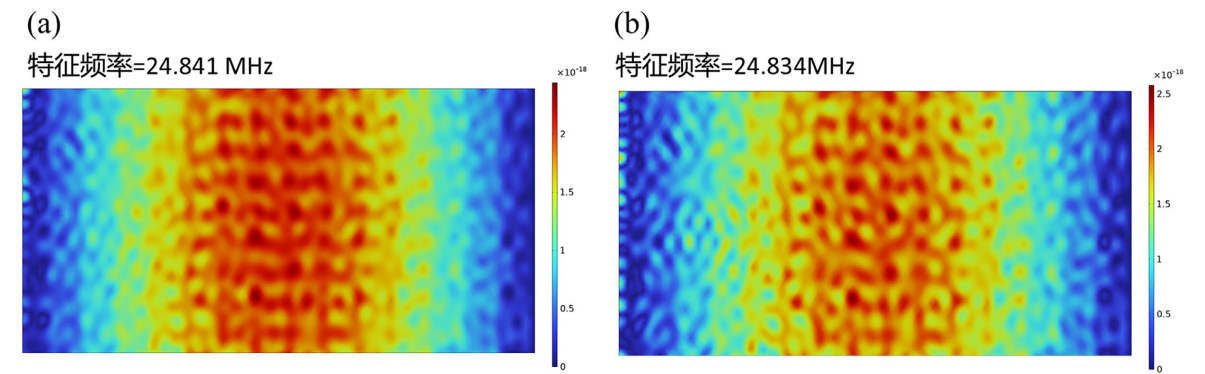


Figure 9. Comparison of the thickness-shear modal frequency of the AT-cut quartz crystal under equivalent boundary stress corresponding to the 100 N load condition. (a) Unperforated structure; (b) Topology-optimized structure

图 9. 在 100 N 工况下 AT 切型石英晶体厚度剪切模态频率响应对比。(a) 未挖孔结构；(b) 拓扑优化结构

表 4 汇总了 100 N 工况下两种代表性弹性体结构对应的凹槽侧壁平均压应力和石英晶体特征频率结果。由表 4 可知，拓扑优化结构不仅提高了凹槽侧壁平均压应力，而且使厚度剪切模态频率产生更明显的可分辨偏移。该结果表明，弹性体拓扑优化产生的局部应力放大效应能够进一步传递至石英晶体频率输出端，从而增强石英谐振式力传感器的力频响应差异。

Table 4. Frequency response of the quartz crystal corresponding to different elastomer structures under the 100 N load condition

表 4. 在 100 N 工况下不同弹性体结构对应的石英晶体频率响应

弹性体结构	凹槽侧壁平均压应力/MPa	特征频率/MHz	相对未挖孔频率变化/kHz
未挖孔结构	1.1329	24.841	0
拓扑优化结构	12.3570	24.834	7

6. 结论

针对 AT 切型石英谐振式力传感器小载荷下灵敏度提升受限的问题，建立了基于拓扑优化的不锈钢弹性体结构设计方法，并通过有限元仿真分析了不同弹性体结构对凹槽侧壁压应力及石英晶体频率响应的影响。结果表明，弹性体结构对外部载荷向传感器安装凹槽及石英晶体边界的传递效率具有显著影响。与未挖孔、双圆孔、矩形孔和椭圆孔等结构相比，拓扑优化结构能够根据目标函数和约束条件调整材料分布，使载荷传递路径更有利于凹槽区域压应力集中。在 0~100 N 载荷范围内，各结构凹槽侧壁平均压应力与外加载荷基本呈线性关系。拓扑优化结构相对于未挖孔结构和双圆孔结构的平均应力放大倍数分别为 10.9081 和 3.1238，表现出更高的载荷 - 应力响应灵敏度。100 N 工况下，未挖孔结构和拓扑优化结构对应的石英晶体厚度剪切模态频率分别为 24.841 MHz 和 24.834 MHz，频率差约为 7 kHz。该结果说明，拓扑优化弹性体产生的局部应力放大效应能够进一步传递至石英晶体频率输出端，使厚度剪切模态频率产生更明显的可分辨偏移。需要指出的是，本文分析主要基于有限元仿真，采用凹槽侧壁平均压应力作为石英晶体边界受力的等效输入，并在既定体积分数、刚度约束、强度约束和过滤投影参数下开展

拓扑优化。结果从力流路径重构角度解释了优化结构的应力放大机理, 但实际传感器中的载荷还需经过有机硅胶、封装壳体和承载体等结构逐级传递, 且拓扑优化结构存在非规则边界和加工修正需求。因此, 后续仍需结合样件加工、强度校核、完整耦合模型和标定实验, 进一步验证优化结构对实际力频灵敏度的提升效果及其工程可制造性, 并系统分析关键优化参数对结构性能的影响。

基金项目

本文研究工作得到了台晶(宁波)电子有限公司和宁波大学研究生科研创新项目(IF2026042)的支持。

参考文献

- [1] 巫晟逸, 梁佳辉, 刘秋实, 等. 石英压电晶体谐振式力学传感器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 551-559.
- [2] 翁海舟, 徐西鹏, 黄辉, 等. 石英晶片剪切增稠抛光优化实验[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(3): 201-207.
- [3] 李艳杰. 一种差动输出石英谐振式力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 128-130.
- [4] 路峻岭, 田文杰. AT 切石英晶体频率力敏特性的实验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2003, 53(8): 46-47.
- [5] 潘安宝, 闻化, 姚东媛, 等. 石英晶体谐振式绝对压力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 85-86+89.
- [6] Wang, J., Zhao, W.H., Du, J.K., *et al.* (2011) The Calculation of Electrical Parameters of At-Cut Quartz Crystal Resonators with the Consideration of Material Viscosity. *Ultrasonics*, **51**, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.05.009>
- [7] Reviakine, I., Johannsmann, D. and Richter, R.P. (2011) Hearing What You Cannot See and Visualizing What You Hear: Interpreting Quartz Crystal Microbalance Data from Solvated Interfaces. *Analytical Chemistry*, **83**, 8838-8848. <https://doi.org/10.1021/ac201778h>
- [8] He, H., Liu, J. and Yang, J. (2012) Effects of Mismatched Electrodes on an ATCut Quartz Resonator. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **59**, 281-286. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2012.2188>
- [9] Mohammadi, M.M. and Hamed, M. (2016) Experimental and Numerical Investigation of Force-Frequency Effect in Crystal Resonators. *Journal of Vibroengineering*, **18**, 3709-3718. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16900>
- [10] Sigmund, O. (2001) A 99 Line Topology Optimization Code Written in MATLAB. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **21**, 120-127. <https://doi.org/10.1007/s001580050176>
- [11] Lazarov, B.S. and Sigmund, O. (2011) Filters in Topology Optimization Based on Helmholtz-Type Differential Equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **86**, 765-781. <https://doi.org/10.1002/nme.3072>
- [12] van Dijk, N.P., Maute, K., Langelaar, M. and van Keulen, F. (2013) Level-Set Methods for Structural Topology Optimization: A Review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **48**, 437-472. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0912-y>
- [13] Guo, X., Zhang, W. and Zhong, W. (2014) Doing Topology Optimization Explicitly and Geometrically—A New Moving Morphable Components Based Framework. *Journal of Applied Mechanics*, **81**, Article 081009. <https://doi.org/10.1115/1.4027609>
- [14] Deaton, J.D. and Grandhi, R.V. (2014) A Survey of Structural and Multidisciplinary Continuum Topology Optimization: Post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **49**, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>
- [15] Wu, J., Sigmund, O. and Groen, J.P. (2021) Topology Optimization of Multi-Scale Structures: A Review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **63**, 1455-1480. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02881-8>