

# 石英谐振加速度计振梁内部热应力的抑制方法研究

周圣翔<sup>1</sup>, 王 铎<sup>2</sup>, 赵玉龙<sup>1</sup>, 李 村<sup>1</sup>

(1 西安交通大学机械工程学院 机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;

2 中国人民解放军某部队 北京 100085)

**摘要:** 石英谐振加速度计具有抗干扰能力强、准数字输出和易于集成等优点, 但温漂成为了制约其稳定性指标的关键因素。本文通过全石英无异质材料设计和热应力隔离结构方案有效抑制加速度计振梁内部产生的热应力。传感器敏感结构由惯性质量块、铰链、固定基底和微谐振器组成, 均采用石英晶体材料制备, 且两个微谐振器呈差动布置可以通过差分对振梁内热应力进行部分抑制。通过微谐振器的四边形框架设计可以将工作环境中产生的热应力与振梁隔离, 再对固定基底上的热应力敏感部分进行拓扑优化设计来抑制工作时从固定锚点处传递至振梁内部的热应力。本文对石英谐振加速度计进行了全温度下的有限元仿真计算分析, 工作环境温度从室温到 75 °C, 微谐振器振梁内部产生的热应力经优化后减少了 99.41% 以上。

**关键词:** 石英谐振; 加速度计; 差动布置; 隔离结构; 温漂

中图分类号: TP212.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)06-0119-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230905001

引用格式: 周圣翔, 王铎, 赵玉龙, 等. 石英谐振加速度计振梁内部热应力的抑制方法研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 119-125.

## Research on thermal stress suppression method inside vibrating beam of quartz resonant accelerometer

ZHOU Shengxiang<sup>1</sup>, WANG Duo<sup>2</sup>, ZHAO Yulong<sup>1</sup>, LI Cun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Chinese People's Liberation Army X Unit, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Quartz resonant accelerometer has some advantages of strong anti-interference ability, quasi-digital output and simple integration, but temperature drift has become a pivotal factor restricting its stability. In this paper, the thermal stress generated inside the vibrating beam of the accelerometer is effectively suppressed by the all-quartz non-heterogeneous material design and the thermal stress isolation structure scheme. The sensitive component of sensor is composed of mass block, hinge, fixed base and microresonators, which are manufactured by quartz, while these two microresonators are arranged differentially to realize the compensation of the thermal stress inside the vibrating beam. The quadrilateral frame design of the microresonator can isolate the thermal stress generated in the surroundings from the vibrating beam. Topology design, applied on sensitive portion of fixed base, is carried out aiming to suppress the thermal stress transferring to the vibrating beam as well. This paper utilized the finite element simulation analysis of the quartz resonant accelerometer at full temperature. Within the range, when the ambient temperature reaches at 75 °C, the thermal stress generated inside the vibrating beam is reduced by more than 99.41% after optimization.

**Keywords:** Quartz resonator; Accelerometer; Differential configuration; Isolation structure; Temperature drift

**Citation:** ZHOU Shengxiang, WANG Duo, ZHAO Yulong, et al. Research on thermal stress suppression method inside vibrating beam of quartz resonant accelerometer [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 119-125.

## 引言

加速度传感器是惯性测量组合单元(IMU, Inertial Measurement Unit)的重要组成部分之一, 运动载体在导航坐标系中的速度和位置可以由加速度传感器获得的加速度数据多次积分得到。目前, 采用微机电系统技术(MEMS, Micro Electro Mechanical System)制作的谐振式加速度计应用广泛, 具有体积小、高精度、高稳定性、易于集成、抗干扰能力强和准数字输出等特点<sup>[1,2]</sup>。

微谐振式加速度计根据材料可分为硅微谐振加速度计和石英谐振加速度计。硅微谐振加速度计的激励和检测方式固定, 具有工艺成熟、成本低等优点, 但其主要缺点在于硅不是压电材料, 需要借助静电力、热膨胀力、电磁力、或沉积其他压电材料等手段激励谐振器振动。这些激励方式需要采用的闭环方案容易引入噪声干扰, 同时复杂的检测电路会限制硅微谐振加速度计与微陀螺、原子钟等微器件的集成<sup>[3,4]</sup>。石英晶体相比于硅材料的优势在于石英材料自身具备压电特性, 且石英材料的品质因数比硅高, 所以石英谐振器具有很强的选频能力和抗干扰能力, 有利于传感器的稳定性和重复性。石英谐振加速度计的起振电路较为简单, 利于系统集成。据报道, 目前石英谐振加速度计的实测分辨率可以达到 50 ng, 比硅微谐振加速度计高 1~2 个数量级。但石英晶体同硅材料相比微加工工艺方法单一、精度低、成品率难以控制, 且复杂的敏感结构很难采用湿法腐蚀加工<sup>[5-8]</sup>, 导致石英谐振加速度计加工成本较高, 难度较大。

温漂(Temperature Drift)是目前制约石英谐振加速度计稳定性指标进一步提升的关键因素。石英谐振加速度计工作温度通常在  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 环境温度的变化会造成传感器敏感结构内部温度分布不均, 热量的流动会损耗微谐振器振梁的振动能量进而降低传感器的品质因数<sup>[9-11]</sup>。另一方面, 由于传感器表头的结构布局、固定方式以及异质材料等条件的限制, 敏感结构会随着温度变化而产生热应力, 根据石英晶体材料的力频特性可知, 振梁内部产生的热应力会改变微谐振器的固有频率<sup>[12-14]</sup>。本文通过全石英无异质材料设计和热应力隔离结构方案有效抑制微谐振器振梁内部产生的热应力。通过微谐振器的四边形框架设计可以将

封装过程产生的和工作环境中的热量与振梁隔离, 再对固定基底上的热应力敏感部分进行拓扑设计来抑制工作时传递至振梁内部的热应力。通过对热应力的有效抑制, 可以进一步提升传感器的稳定性, 实现微型高性能加速度敏感元件的设计。

## 1 微谐振器的工作原理

本文设计的双端固支音叉(DETF, Double Ended Tuning Fork)在工作时, 要求两根振梁在同一平面内沿宽度方向以相反相位作横向弯曲振动, 如图 1 所示<sup>[15,16]</sup>。

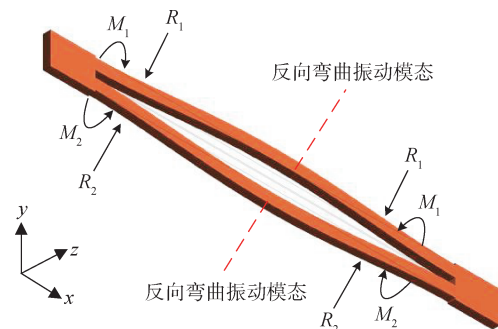


图 1 双端固支音叉振动模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the vibration model of a double-ended tuning fork

图 1 中,  $M_1$ 、 $M_2$  为音叉根部的扭矩,  $R_1$ 、 $R_2$  为音叉所受的力。

DETF 的两根振梁尺寸参数完全相同, 且在同一平面内沿宽度方向以相反相位作横向弯曲振动, 为了简便起见, 计算分析 DETF 的一根振梁, 另一振梁同理。振梁在  $xoy$  平面内双端固支, 作横向弯曲振动, 如图 2 所示。其中,  $x$  为梁的轴向坐标,  $t$  为振梁厚度,  $y(x, t)$  为固支梁在轴向坐标  $x$  处对应的纵向的变形量,  $dx$  为轴向微小变形,  $l$  为梁的长度。

在低频振动时可以忽略振梁的剪切变形以及截面绕中性轴的转动惯量的影响, 即假设振梁为

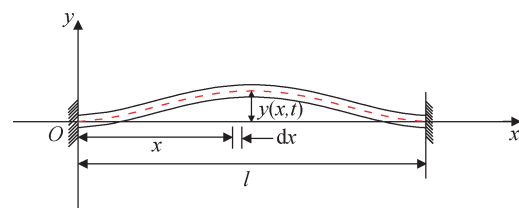


图 2 双端固支梁振动模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the vibration model of a double-ended fixed beam

Euler-Bernoulli细长梁, 这时振梁横向弯曲无阻尼自由振动的动力学微分方程为<sup>[15]</sup>:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)中,  $y(x,t)$ 为振梁在 $x$ 处的挠度,  $E$ 为材料弹性模量,  $I$ 为振梁的横截面绕中性轴的惯性矩,  $\rho$ 为材料密度,  $A$ 为振梁横截面积。

根据石英谐振加速度计的设计要求, DETF每根振梁的横向弯曲振动模式为一阶模式, 二阶及二阶以上的模式难以激励和检测且不适用于微谐振器的工作要求, 可得振梁的固有振动频率表达式为:

$$f_1 = \frac{3.57}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho t w}} \quad (2)$$

式(2)中,  $f_1$ 是振梁的固有频率,  $t$ 为振梁的厚度,  $w$ 为振梁的宽度,  $l$ 为振梁长度。

力频特性是设计石英谐振加速度计的理论基础, 即当振梁受到轴向力作用时其固有频率发生变化, 依据自由振动微分方程可以求得频率的数值解。在轴向力 $F$ 作用下, 振梁的横向弯曲自由振动微分方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + F \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

DETF振梁的横向弯曲振动模式为一阶模式, 可得振梁轴向力 $F$ 作用下的固有振动频率 $f_{1F}$ 表达式为:

$$f_{1F} = f_1 \sqrt{1 + \frac{0.2949l^2}{Etw^2} F} \quad (4)$$

当有轴向力 $F$ 作用于DETF时, 根据其结构的对称性, 每根谐振梁受到的作用力为 $F/2$ 。将石英的材料参数, 包括杨氏模量 $E=9 \times 10^{10}$  N/m, 密度 $\rho=2.65 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 代入式(4), 且根据 $F=2\sigma wt$ ,  $\sigma$ 为谐振梁的轴向应力, 可得受轴向应力作用的固有频率 $f(\sigma)$ :

$$f(\sigma) = 5.828 \times 10^3 \times \frac{w}{l^2} \times \sqrt{1 + 3.277 \times 10^{-12} \times \frac{\sigma l^2}{w^2}} \quad (5)$$

选定振梁的横向弯曲振动工作模式为一阶模式, 在轴向力 $F$ 的作用下, 引起振梁固有频率的变化, 则振梁的力敏感性即频率的变化量 $\Delta f$ 为:

$$\Delta f = f_{1F} - f_1 = f_1 \left( \sqrt{1 + \frac{0.5898l^2 \sigma}{Ew}} - 1 \right) \quad (6)$$

在Euler-Bernoulli细长梁的假设下, 振梁的工作模式为横向弯曲振动的一阶模式。由式(6)可知,

当受到轴向力 $F$ 时, 振梁的固有频率会发生变化, 且振梁的固有频率只与其长度和宽度有关, 而与厚度无关。

## 2 振梁热应力抑制方法研究

### 2.1 石英谐振加速度计温度漂移产生的原因

温度漂移是指当敏感方向没有加速度作用在谐振加速度计上时, 由于温度的变化, 在一段时间内谐振加速度计的微谐振器出现固有频率漂移的现象, 进而限制了谐振加速度计测量精度、重复性和稳定性的提高。石英谐振加速度计温度漂移通常来自于以下两个方面:

#### ① 温度变化引起材料杨氏模量的改变

杨氏模量是描述固体材料抵抗形变能力的物理量, 材料的杨氏模量通常受到温度的影响。当温度升高时, 由于石英晶体原子间距离增大, 从而使原子间化学键减弱, 导致石英晶体的杨氏模量降低。温度对石英晶体的杨氏模量的影响通常用弹性温度系数表示, 当温度引起的晶体原子间距离的变化较小时, 杨氏模量 $E$ 可估计为

$$E = E_0(1 + TCE \times \Delta T) \quad (7)$$

式中,  $E_0$ 为参考温度下的杨氏模量,  $\Delta T$ 为温度变化量,  $TCE$ 为弹性温度系数。

由于石英晶体材料本身的各向异性, 可以通过选择合适的切型, 选择弹性温度系数低的切型, 从而降低温度对石英晶体材料杨氏模量的影响, 提高谐振器的温度抗性和频率稳定性。本文综合考虑目前石英晶体的微加工工艺水平和温度频率特性, 选择采用Z切 $\alpha$ 石英晶体作为传感器敏感结构的材料, 故不对温度变化时所引起的材料杨氏模量的改变做进一步的讨论。

#### ② 温度变化引起敏感结构膨胀而产生热应力

当环境温度变化时, 由于石英谐振加速度计固定基底受固定约束而产生的热应力会传递到DETF的振梁上, 同时, 振梁两端也受约束而产生热应力。当温度变化量为 $\Delta T$ 时, 振梁的应力应变方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 分别为沿 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的正应变,

$\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分别为沿  $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的正应力,  $\nu$ 为泊松比,  $\alpha$ 为振梁材料的热膨胀系数。

由于振梁的长度远大于其宽度和厚度, 因此温度对于宽度和厚度的影响较小, 如果忽略这两个方向上的热应力影响, 可以等效于在振梁的轴向上施加了应力 $\sigma$ , 由前述对振梁力频特性的分析可知, 振梁的固有频率会发生变化。即当环境温度变化时, 振梁轴向产生的热应力会使得其固有频率产生漂移。

### 2.2 振梁轴向热应力抑制方案

目前用于制作谐振加速度计的敏感材料主要

包括: 单晶硅、多晶硅、碳化硅、石英、陶瓷等, 用于加工传感器敏感结构的材料特性对传感器性能起决定性作用。而其中的热膨胀特性对于传感器的稳定性至关重要。常见材料的特性参数见表1。由表1可知, 不同材料间的热膨胀系数相差较大, 若传感器的敏感结构由不同材料制备, 当环境温度改变时, 敏感结构由于材料的热膨胀系数的不同而在微装配处产生应力, 进而传递至振梁, 影响其固有频率, 限制传感器的稳定性提高以及精度的保证。

表1 谐振式加速度传感器中常见材料特性参数

Table 1 Common material characteristic parameters in resonant accelerometers

材料	屈服强度/GPa	努氏硬度/(kg/mm <sup>2</sup> )	杨氏模量/GPa	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /°C)
石英晶体	8.4	741	80	2.65	7.1 (13.2)
单晶硅	7	850	160	2.33	2.33
碳化硅	21	2 480	700	3.2	4.2
铍青铜	1.03	∖	134	8.25	17.6
Ni <sub>42</sub> CrTiAl	1.25	∖	195	8.0	7.5
不锈钢	2.1	660	200	7.8	17.3

本文设计的石英谐振加速度计的敏感结构包括惯性质量块、铰链、固定基底和微谐振器, 如图3所示, 其中, 两个微谐振器呈差动布置。传感器的工作原理即将微谐振器一端固定在惯性质量块上, 另一端固定在固定基底上, 利用谐振电路将微谐振器激振至预设的工作模态, 当有加速度沿敏感方向作用于传感器时, 惯性质量块受到惯性力作用会产生微小的位移, 一个微谐振器的振梁轴向上将产生压缩力, 谐振频率减小, 另一个微谐振器的振梁轴向上产生拉伸力, 谐振频率增大。通过测量两个微谐振器差动频率值从而实现加速度的数字化测量。传感器的敏感材料均采用Z切 $\alpha$ 石英晶体材料通过湿法腐蚀工艺制备, 可以抑制由于异质材料热膨胀系数不匹配产生的热应力。同时, 由于两个微谐振器呈差动布置, 可以将由于环境温度变化引起一部分振梁上产生的热应力, 通过对两个微谐振器的谐振频率差分进行抑制。

图3所示的敏感结构经过全石英无异质材料的设计以及微谐振器的差动布置, 已经对微谐振器振梁轴向产生的热应力进行了一定程度的抑制。同时, 为了进一步分析谐振器所受热应力的影响, 使用仿真软件ANSYS Workbench 19.2建立有限元仿

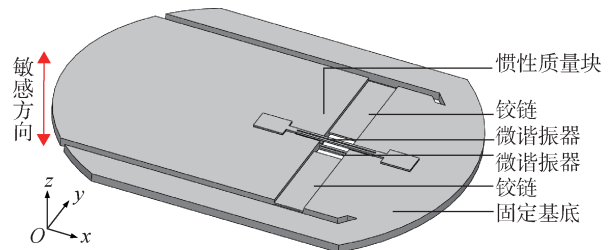


图3 石英谐振加速度计敏感结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of quartz resonant accelerometer

真模型, 分析得到在对传感器敏感结构进一步优化前其微谐振器振梁在高温下轴向产生的热应力的分布情况。设置的环境温度为75 °C, 约束固定基底的六个自由度, 仿真分析计算得到微谐振器的四个振梁在轴向上的热应力分布情况, 如图4所示。

由图4可知, 当环境温度为75 °C时, 对石英谐振加速度计敏感结构进一步优化前, 其振梁A、振梁B、振梁C和振梁D在轴向上产生的平均热应力分别为1.49 MPa、1.53 MPa、1.51 MPa和1.54 MPa。根据式(6)可知, 此时振梁A、振梁B、振梁C和振梁D的谐振频率分别100.122 Hz、102.807 Hz、101.465 Hz和103.478 Hz, 传感器稳定

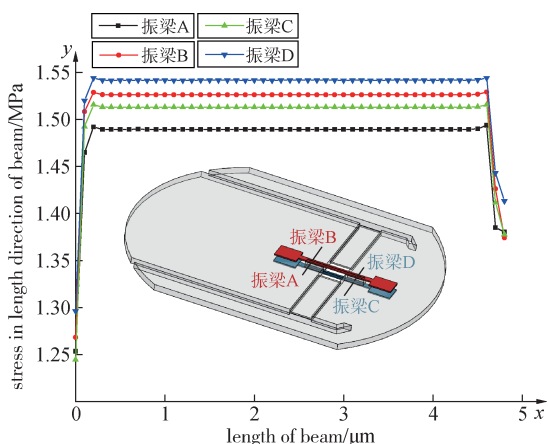


图4 优化前石英谐振加速度计振梁的热应力分布  
Fig. 4 Thermal stress distribution of beams of the quartz resonant accelerometer before optimization

性得不到有效保证。

根据上述对热应力来源的分析并结合对优化前石英谐振加速度计振梁热应力分布的仿真计算分析可知，在环境温度升高时，由于固定基底在固定锚点处受到多个自由度的约束，当环境温度升高时，在固定锚点处会产生大量的热应力，进而通过敏感结构传递到振梁上，在振梁轴向产生大量的热应力，如图5所示。

基于图5的仿真计算分析的结果，本文首先对敏感结构中的微谐振器做进一步的优化，即在

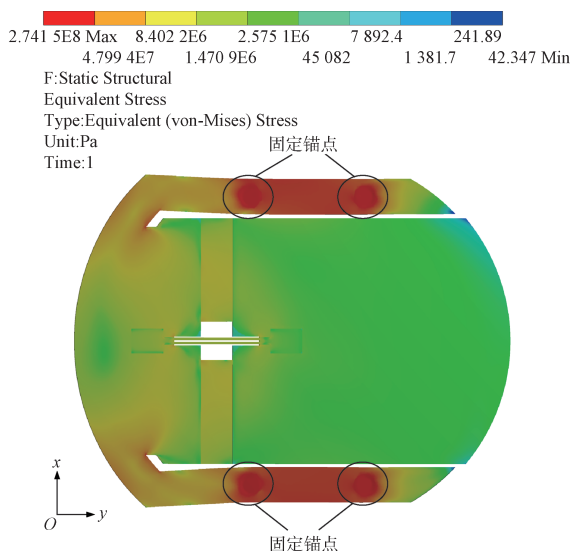


图5 优化前石英谐振加速度计敏感结构热应力云图

Fig. 5 Thermal stress contour of the sensitive structure of the quartz resonant accelerometer before optimization

DETf的四周设计一个四边形框架，由DETf和四边形框架组成优化后的微谐振器，如图6所示。

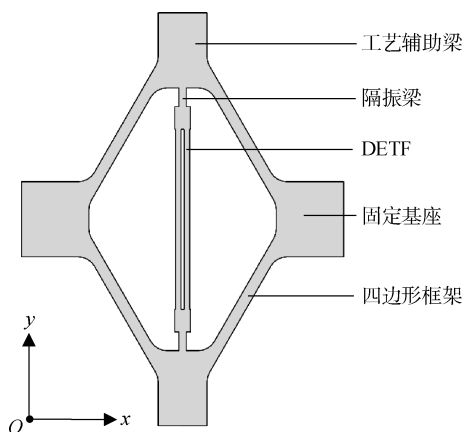


图6 优化后微谐振器结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the optimized microresonator structure

优化后的微谐振器的四边形框架可以延长环境温度升高时，从固定锚点处产生的大量热应力传递至振梁轴向上的路径，使得热应力在延长了的传递路径中得到一定程度的释放和损耗，从而减小最终在微谐振器振梁轴向上产生的热应力。同样地，设置环境温度为75℃，约束固定基底的六个自由度，通过仿真分析计算得到优化微谐振器结构后四个振梁在轴向上的热应力分布，如图7所示。

由图7可知，在环境温度为75℃时，优化微谐振器后其振梁A、振梁B、振梁C和振梁D在轴向上

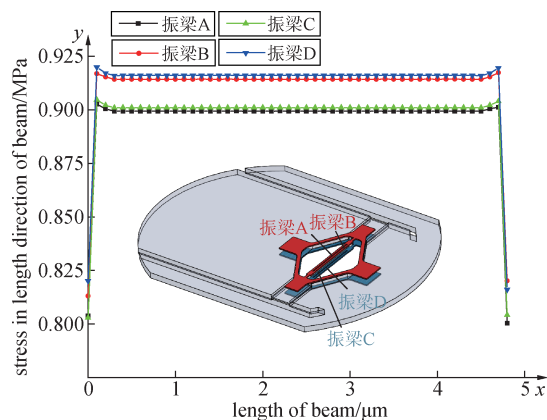


图7 优化微谐振器后石英谐振加速度计振梁的热应力分布

Fig. 7 Thermal stress distribution of beams of quartz resonant accelerometer with optimized microresonator

产生的平均热应力分别为 0.90 MPa、0.91 MPa、0.90 MPa 和 0.92 MPa。根据式(6)可知, 此时振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 的谐振频率分别变化了 60.465 Hz、61.465 Hz、60.572 Hz 和 61.584 Hz。尽管微谐振器经优化后, 振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 轴向热应力分别减少了 39.62%、40.10%、40.46% 和 40.58%, 但振梁的谐振频率变化还是在 60 Hz 以上, 石英谐振加速度计的稳定性指标依旧得不到保证。

从图 5 的仿真计算分析结果可以看到, 固定锚点处产生的热应力向微谐振器传递的路径中, 在固定基底的部分位置会产生热应力集中的现象, 这一位置即是热应力敏感部分。本文在对微谐振器进行优化以期抑制振梁上产生的部分热应力后, 再对固定基底上热应力敏感部分进行拓扑优化, 优化后的固定基底如图 8 所示。

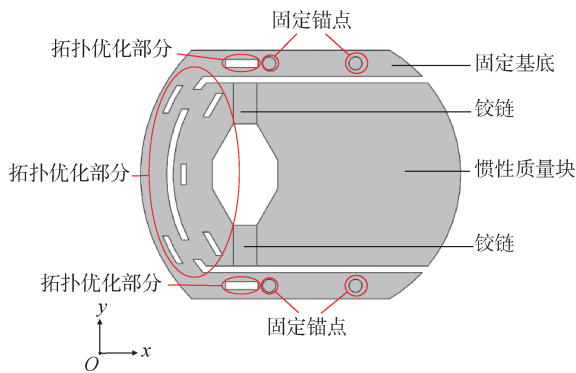


图 8 优化后固定基底结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the optimized fixed base

基于图 5 的热应力仿真分析云图, 对热应力集中部分进行拓扑优化, 如图 8 所示, 一方面延长了热应力由固定锚点传递至振梁的路径, 可以损耗一部分传递过程中的热应力, 另一方面通过对固定基底刚度的降低, 可以释放掉传递至拓扑优化部分的热应力。最终经拓扑优化固定基底后, 设置环境温度为 75 °C, 同样约束固定基底的六个自由度, 通过仿真分析计算得到优化微谐振器结构后四个振梁在轴向上的热应力分布, 如图 9 所示。

由图 9 可知, 在环境温度为 75 °C 时, 优化固定基底后其振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 在轴向上产生的平均热应力分别为 7.39E-3 MPa、2.37E-3 MPa、8.99E-3 MPa 和 3.94E-3 MPa。根据式(6), 此时振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 的谐振频率分别变化了 0.497 Hz、0.159 Hz、0.605 Hz

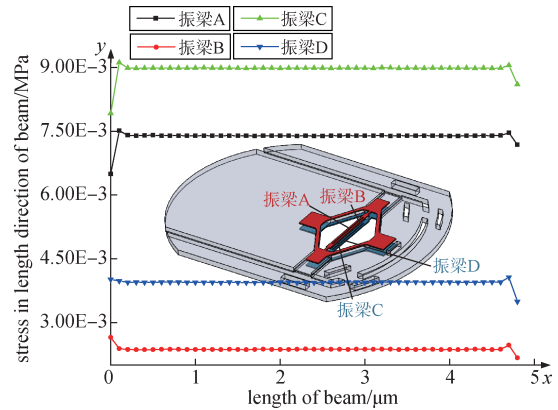


图 9 优化固定基底后石英谐振加速度计振梁的热应力分布

Fig. 9 Thermal stress distribution of beams of quartz resonant accelerometer with optimized fixed base

和 0.265 Hz。

表 2 所示为优化前、优化微谐振器后和优化固定基底后的石英谐振加速度计振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 轴向的热应力的平均值。

表 2 优化过程中石英谐振加速度计振梁轴向平均热应力

Table 2 Axial average thermal stress of the vibrating beam of a quartz resonant accelerometer during optimization

石英谐振加速度计	振梁 A 轴向平均热应力/MPa	振梁 B 轴向平均热应力/MPa	振梁 C 轴向平均热应力/MPa	振梁 D 轴向平均热应力/MPa
优化前	1.49	1.53	1.51	1.54
优化微谐振器	0.90	0.91	0.90	0.92
优化固定基底	7.39E-3	2.37E-3	8.99E-3	3.94E-3

由表 2 可知, 经微谐振器和固定基底的优化后, 石英谐振加速度计的振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 轴向的热应力分别减少了 99.50%、99.84%、99.41% 和 99.74%。同时, 热应力使得振梁 A、振梁 B、振梁 C 和振梁 D 谐振频率的变化分别从 100.122 Hz、102.807 Hz、101.465 Hz 和 103.478 Hz 减小到 0.497 Hz、0.159 Hz、0.605 Hz 和 0.265 Hz, 石英谐振加速度计振梁轴向产生的热应力被有效抑制, 传感器的稳定性得到了较好的保证。

### 3 结束语

本文对石英谐振加速度计振梁热应力的抑制方法做了深入研究, 通过全石英无异质材料的设

计和热应力隔离结构方案来有效抑制振梁上产生的热应力。本文设计的加速度计敏感结构,即微谐振器、固定基底、铰链和惯性质量块均采用石英材料加工制备,解决了异质材料热膨胀系数不匹配带来的热应力问题。并且将两个微谐振器差动布置,将由于温度变化引起的两个微谐振器固有频率的变化通过差分进行一部分的热应力抑制。根据本文对双端固支梁的力频特性分析可知,环境温度 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,未经优化的石英谐振加速度计振梁轴向产生的热应力最高可以达到 $1.54\text{ MPa}$ ,振梁谐振频率的变化可达 $103.478\text{ Hz}$ ,造成传感器稳定性较差。通过对微谐振器四边形框架的设计以及对固定基底热应力敏感部分的拓扑优化设计,利用有限元仿真计算分析可知,经优化后石英谐振加速度计振梁上产生的热应力减少了 $99.41\%$ 以上,振梁轴向产生的热应力对其谐振频率的影响在 $0.605\text{ Hz}$ 以内,热应力得到了有效抑制,保证了石英谐振加速度计的稳定性,为微型高性能加速度计敏感元件的设计提供帮助。

### 参考文献

- [1] ABDULLAH S A, MOHD H M K, JOHN O D, et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2021, 16(1): 1-21.
- [2] THOMBRE S, ZHAO ZH, RAMM-SCHMIDT H, et al. Sensors and AI techniques for situational awareness in autonomous ships: A review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(1): 64-83.
- [3] HUANG L, YANG H, GAO Y, et al. Design and implementation of a micromechanical silicon resonant accelerometer[J]. *Sensors (Basel)*, 2013, 13(11): 15785-804.
- [4] HOPKINS R, MIOLA J, SETTERLUND R, et al. The silicon oscillating accelerometer: A high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance applications[C]//*Proceedings of Annual Meeting of The Institute of Navigation*, 2006.
- [5] LIANG Jinxing, TANG Qi, LIN Shengshou. Design and fabrication of quartz MEMS-based monolithic vibrating beam accelerometer[J]. *Sensors and Materials*, 2021, 33(4): 1113-1126.
- [6] LE T O, GUÉRARD J, PERNICE M, et al. The NGDIVA: A navigation grade differential inertial vibrating beam accelerometer[C]//*IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2018.
- [7] KASS W J, SNOW G S. Double-ended tuning fork quartz accelerometer characteristics[R]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1986: 1-22.
- [8] LI Cun, ZHAO Yulong, LI Bo, et al. A micro-machined differential resonance accelerometer based on silicon on quartz method[J]. *Sensors and Actuators A-physical*, 2017, 253: 1-9.
- [9] 裘安萍, 董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度效应及补偿[J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(3): 215-219.
- [10] FANG Zhengxiang, YIN Yonggang, HE Xiaofei, et al. Temperature-drift characterization of a micromachined resonant accelerometer with a low-noise frequency read-out[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 300: 111665.
- [11] ZOTOV S A, SIMON B R; TRUSOV A A, et al. High quality factor resonant MEMS accelerometer with continuous thermal compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 5045-5052.
- [12] WALWADKAR S S, CHO J. Evaluation of diestress in MEMS packaging: Experimental and theoretical approaches[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2006, 29(4): 735-742.
- [13] ZHANG J, QIU A P, SHI Q, et al. Research on temperature compensation method of silicon resonant accelerometer based on integrated temperature measurement resonator[C]//*Proceedings of 2015 IEEE 12th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2015: 1577-1581.
- [14] 王帆, 董景新, 赵淑明, 等. 硅微振梁式加速度计抗温漂的微结构及工艺设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(2): 227-232.  
WANG Fan, DONG Jingxin, ZHAO Shuming, et al. Temperature insensitive design of MEMS resonant accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(2): 227-232.
- [15] BOUWSTRA S, GEIJSELAERS B. On the resonance frequencies of microbridges[C]//*Preface Papers from the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1991.
- [16] ALBERT W C. Vibrating quartz crystal beam accelerometer[C]//*International Instrumentation Symposium*, 28th, 1982.

### [作者简介]

周圣翔 2000年生, 学士, 硕士研究生。  
王 铎 中国人民解放军某部队。  
赵玉龙 1968年生, 教授, 博士生导师。  
李 村 1986年生, 副教授, 硕士生导师。

(本文编辑: 杨秀丽)