

谐振式压力传感器温度补偿结构的仿真研究

邹梦启 邢维巍 韦 伟

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘 要: 温度漂移是影响谐振式传感器精度的重要因素,在精密测量场合,必须进行温度补偿,基于此,提出一种可实现温度补偿的谐振式压力传感器新结构。整体结构为硅-玻璃-金属复合结构,通过 3 种材料的热膨胀系数匹配实现热应力抵消。硅基底上设有补偿梁,进一步补偿工作梁的温度漂移。为了选择合适的玻璃材料,利用有限元方法研究了玻璃的热膨胀系数和厚度与温度灵敏度的关系,结果表明,采用厚度为 1.5 mm 的 pyrex7740 # 玻璃时传感器的温度灵敏度最低,该结构能够实现温度补偿,提升传感器精度。

关键词: 谐振式压力传感器;温度漂移;温度补偿;温度灵敏度

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Simulation research on temperature compensation structure of
resonant pressure sensor

Zou Mengqi Xing Weiwei Wei Yi

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

Abstract: Temperature drift is an important factor affecting the accuracy of resonant sensors. Therefore, temperature compensation is essential in precision measurement. Then a new structure of resonant pressure sensor for temperature compensation is proposed. The overall structure includes three layers of silicon-glass-metal, thermal stress can be offset when the thermal expansion coefficients of these three materials satisfy a certain relationship. Moreover, a compensation beam is provided on the silicon substrate to further compensate the temperature drift of the working beam. In order to choose the suitable glass material, finite element method is used to study how the thermal expansion coefficient and thickness affect temperature sensitivity. The results show that the sensor has the lowest temperature sensitivity when using pyrex7740 # glass with a thickness of 1.5 mm and the structure does compensate the temperature and improve the accuracy.

Keywords: resonant pressure sensor; temperature drift; temperature compensation; temperature sensitivity

0 引 言

当环境温度改变时,传感器的灵敏度将会随之变化,这种现象被称为传感器的灵敏度温度漂移。任何传感器在工作时都不可避免地受到温度变化的影响,对于谐振式传感器而言,环境温度变化引起的热应力将会导致谐振元件的谐振频率变化,严重影响测量的精度与灵敏度。因此,在精密测量场合使用时必须进行温度补偿^[1]。

现有的温度补偿方法主要有硬件补偿法^[2-4]和软件补偿法^[5-7],硬件补偿法通过电路参数设计对测量电路进行优化,由于精度不足,适用性不强,不利于实际使用;软件补偿法主要基于神经网络、遗传分析等人工智能方法或数值分析方法,精度有所提高但对系统硬件要求高,难以实时补

偿。为了克服上述补偿方法的缺陷,学者们提出通过结构设计实现温度补偿的想法并展开了相关研究:1991 年 Tilmans 等^[8]设计了一种中间具有突起的柔性膜,实现了差动式硅谐振器结构。日本 Yokogawa 公司生产的硅谐振式差压传感器也采用了差动设计,两个谐振梁同时受压力和温度的调制,在提高测压灵敏度的同时,对温度也有很强的抑制作用^[9-11]。1994 年英国 Schlumberger 公司 Seibert 等^[12]设计了一种同时测量压力和温度的光纤传感器。通过在感压膜片表面上制作两个谐振梁,其中双端固支梁感受压力调制,与之垂直放置的悬臂梁感受温度调制,从而实现谐振式测温补偿,但是由于悬臂梁对应力不敏感,故其灵敏度相对较低;2000 年美国密歇根大学 Hsu 等^[13]通过增加一个具有反温度系数的支撑座产生一个与悬臂梁热应力

相反的力,来抵消原有悬臂梁谐振器的温度漂移量。但是该方案不适用于基于应力测量原理的传感器,因为温度抵消机制是伴随着应力敏感机制产生的,温度作用抵消的同时,应力的作用也抵消了,因此该方案不实用。

本文将 Seibert 方案中的悬臂梁改进为双端固支梁,显著提高了测量灵敏度;将 Hsu 方案中的抵消思想用于整体结构设计上,而不对敏感结构施加应力。通过对上述方案的改进和结合,提出一种双梁敏感结构、3 层复合结构的方案,能有效降低传感器的温度灵敏度,提高传感器精度。

1 传感器复合结构设计

本文设计的传感器为硅-玻璃-金属复合结构,由硅基底、玻璃底座和金属管壳底座 3 部分组成,如图 1 所示。从图 1 可以看出,玻璃底座用于实现硅基底与金属管壳的电气绝缘与隔离,并可以起到降低热应力的作用;金属管壳用于保护敏感结构不受外界影响,实现真空封装,优化谐振器的工作环境,考虑实际情况,本文采用的铁钴镍玻璃封接金属(4J29)。

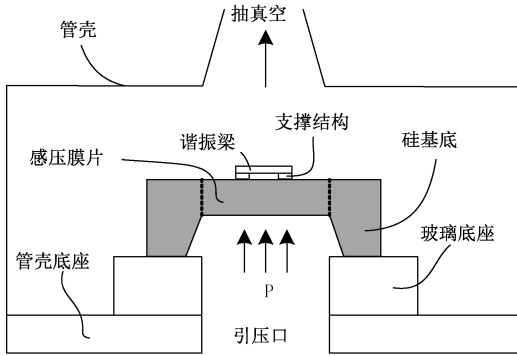


图1 硅谐振式压力传感器结构剖视

2 温度补偿机理

本文采用一对双端固支硅谐振梁敏感结构的方案:双梁尺寸相同,均通过支撑结构固定于硅基底之上(图2),工作梁同时敏感被测压力和温度,补偿梁只敏感温度。谐振梁的一阶谐振频率如下式^[14]:

$$f_1(\sigma_x) = f_0 \left(1 + 0.295 \frac{l^2}{Eh^2 \sigma_x} \right) \quad (1)$$

式中: $f_0 = 1.028 \frac{h}{l^2}$ 为梁在轴向应力 $\sigma_x = 0$ 时的一阶固有频率; l 为梁长; h 为梁厚; E 、 ρ 分别为材料的弹性模量和密度。式(1)可以被简化为:

$$f_1^2(p) = f_0^2 + kp \quad (2)$$

式中: k 为传感器的压力灵敏度; p 为被测压力。实际情况中,除了被测压力以外,其他因素也会引起谐振梁轴向应力的变化,主要包括环境温度变化引起的热应力、直流热功率引起的热应力以及加工过程中引入的残余应力。由于梁的

谐振频率由上述多种因素共同决定,综合这些因素得到梁的谐振频率表达式为:

$$f_{r1}^2 = f_{01}^2 + k_{b1}k_{p1}p + k_{b1}k_{\Delta T1}\Delta T + k_{b1}k_{w1}P_{stat} + k_{b1}\sigma_{res1} \quad (3)$$

式中: f_{r1} 为工作梁的一阶谐振频率; f_{01} 为工作梁的一阶固有频率; k_{b1} 为工作梁的应力灵敏系数; k_{p1} 为工作梁所在位置膜片的压力灵敏系数; $k_{\Delta T1}$ 、 k_{w1} 分别为工作梁由环境温度变化 ΔT 和直流热功率 P_{stat} 引起的轴向应力灵敏系数; σ_{res1} 为工作梁加工过程中引入的残余应力。

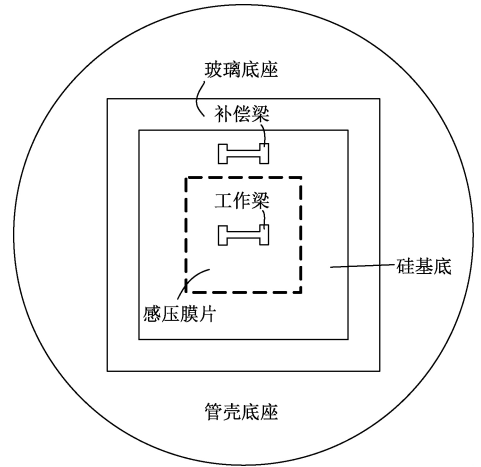


图2 硅谐振式压力传感器结构俯视

虽然双梁尺寸的设计值相同,但是由于加工误差,实际样件中双梁尺寸会有所差异,参照式(3)将补偿梁的谐振频率表示为:

$$f_{r2}^2 = f_{02}^2 + k_{b2}k_{p2}p + k_{b2}k_{\Delta T2}\Delta T + k_{b2}k_{w2}P_{stat} + k_{b2}\sigma_{res2} \quad (4)$$

在传感器实际工作过程中,为了保证谐振梁始终工作在线性振动状态,会对激励功率加以限制,并保持为常值;此外,传感器一旦加工成型,其残余应力也就固定了。因此,定义如下参数:

$$\begin{cases} \overline{f_{0n}^2} = f_{0n}^2 + k_{bn}k_{wn}P_{stat} + k_{bn}\sigma_{resn} \\ k_n = k_{bn}k_{pn} \\ s_n = k_{bn}k_{\Delta Tn} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n = 1, 2$; $\overline{f_{01}^2}$ 和 $\overline{f_{02}^2}$ 为包含激励功率和残余应力影响的梁的等效固有频率,在标定时可以认为是 0 压力 0 温升时的起始频率; k_1 、 k_2 分别为工作梁和补偿梁的压力灵敏度; s_1 、 s_2 分别为工作梁和补偿梁的温度灵敏度。

因此,双梁的谐振频率可以表示为如下方程组:

$$\begin{cases} f_{r1}^2 = \overline{f_{01}^2} + k_1p + s_1\Delta T \\ f_{r2}^2 = \overline{f_{02}^2} + k_2p + s_2\Delta T \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以准确解算出被测压力为:

$$p = \frac{s_2(f_{r1}^2 - \overline{f_{01}^2}) - s_1(f_{r2}^2 - \overline{f_{02}^2})}{k_1s_2 - k_2s_1} \quad (7)$$

式(7)即为双谐振梁结构压力传感器的压力解算算法,当 $k_2 = 0, s_1 = s_2 = s$ 时,进一步简化为:

$$p = \frac{1}{k_1} [(f_{r1}^2 - \overline{f_{01}^2}) - (f_{r2}^2 - \overline{f_{02}^2})] \quad (8)$$

由式(8)可知,补偿梁压力灵敏度为 0,双梁温度灵敏度完全一致时,只需利用工作梁的压力灵敏度标定值即可准确解算出被测压力。

3 传感器温度灵敏度

根据式(1)可知,环境温度对谐振频率的影响主要表现在 3 个方面:对梁的材料特性的影响、对梁的几何尺寸的影响和对梁的轴向应力的影响。

根据小作用量独立原理,将式(1)平方后对温度 T 求导并除以自身即可得到由温度引起的谐振频率的相对变化^[15],称之为谐振器的温度系数:

$$\frac{1}{f_1^2} \frac{\partial(f_1^2)}{\partial T} \approx \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} - \frac{2}{l} \frac{\partial l}{\partial T} + \frac{0.312}{1.057 \left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0.312 \epsilon_x} \frac{\partial \epsilon_x}{\partial T} \quad (9)$$

式中: $\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial T}$ 、 $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ 和 $\frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T}$ 分别是梁所用材料的弹性模量、密度和长度的相对温度系数。对于硅材料来说, $\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial T}$

的值为 $-63 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ 的值为 $-13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\frac{1}{l} \cdot$

$\frac{\partial l}{\partial T}$ 即热膨胀系数,其值为 $2.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,最后一项是梁的

轴向应变的相对温度系数,由式(9)可知,谐振器的温度系数与谐振器的弹性模量、密度、几何尺寸和轴向应变有关。在进行敏感结构设计时,谐振梁的弹性模量、密度和长度已经确定,因此,想要降低谐振器的温度系数,需从减小结构热应力入手。

对图 1 所示传感器结构进行简化后,得到图 3 所示的简化图。图中假设各层薄板形状规则且长度厚度均相同,各层材料的弹性模量、厚度和热膨胀系数分别为 E_i 、 h_i 、 α_i ($i = 1, 2, 3$);在初始温度 T_0 下,薄板长度为 l_0 ;当温度为 $T = T_0 + \Delta T$ 时,伸长至 l_t 。

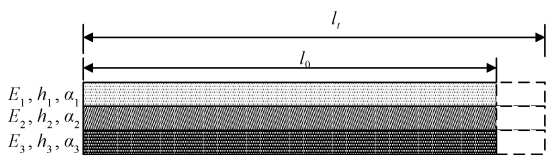


图 3 复合结构简化

在自由膨胀条件下,第一层薄板的热应力为^[16]

$$\sigma_1 \approx E_1 \Delta T \left[\frac{E_2 h_2 (\alpha_3 - \alpha_1) + E_3 h_3 (\alpha_2 - \alpha_1)}{E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3} \right] \quad (10)$$

由式(10)可知,当各层材料和厚度一定时,环境温度与其引起的第一层结构的热应力呈线性关系。如果 $\alpha_3 - \alpha_1$ 与 $\alpha_2 - \alpha_1$ 的符号相反,即 α_3 与 α_2 中的一个比 α_1 大,另一个比 α_1 小,则可通过调节 $E_2 h_2$ 或 $E_3 h_3$ 的值,使得 $\sigma_1 = 0$ 。

由于传感器的第 1 层(硅)和第 3 层(4J29)的材料是固定的,因此只能通过选择用于绝缘隔离的玻璃层来减小温度引起的结构热应力。理论上,可以通过选择具有合适热膨胀系数 α_2 和合适厚度 h_2 的玻璃材料,以达到消除内应力的目的。

实际上,传感器结构形状不规则,一方面感压膜片的上表面有用于架设双梁的支撑结构,背面有采用各向异性腐蚀技术得到的感压空腔;另一方面玻璃底座和金属底座的中间均开有方形通气孔,且各层结构的面积也不一致。因此,由式(10)所得的热应力与实际传感器的热应力有所差异,通过上述分析只能定性地得出玻璃材料的选择有助于降低热应力的结论,并无法确定 α_2 和 h_2 的具体数值。

4 仿真与分析

采用有限元分析方法对传感器结构建模并进行热-机耦合分析,以研究玻璃的热膨胀系数和厚度对双梁温度灵敏度的影响规律。使用 SOLIDWORKS 建立几何模型,导入 ANSYS18.0,建立如图 4 所示的有限元模型。

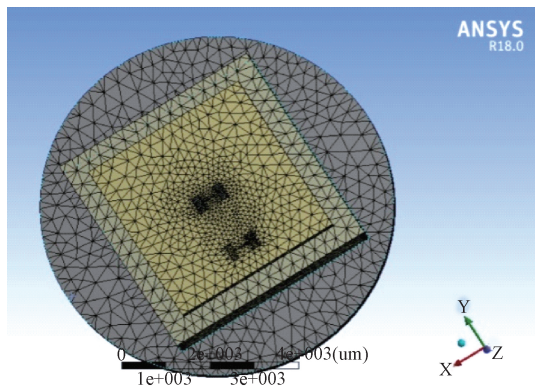


图 4 传感器复合结构有限元网格模型

仿真步骤如下:1)对除金属底面和压力作用面之外的所有表面施加绝热边界,在金属底面和压力作用面上施加环境温度,进行稳态热传导分析,得到整体结构的稳态温度分布;2)将上一步的热传导分析结果作为温度载荷加载到模型上进行静力学分析,得到结构的热应力分布;3)将热应力载荷加载到模型上,并固定金属底座底面,进行包含预应力的模态分析,得到双梁在热应力作用下的谐振频率。

通过上述有限元仿真步骤,得到玻璃的热膨胀系数分别为 0.5、1、1.5、1.8、1.9、2 和 $2.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 时双梁谐振频率的平方随环境温度的变化规律,结果如图 5 所示。由图 5 可知,在玻璃热膨胀系数取不同数值时,双梁的谐振频率平方均随着环境温度呈线性变化。当玻璃的热膨胀系数取

值为 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,双梁的谐振频率平方随环境温度的升高而降低,而当取值为 $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,双梁的谐振频率平方随环境温度的升高而升高;这证明了存在某个取值,使得双梁谐振频率不随温度变化而变化。

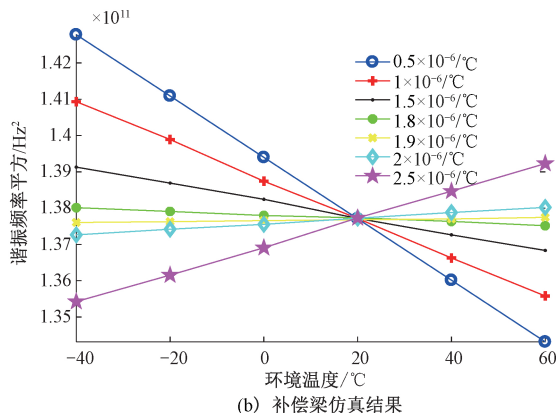
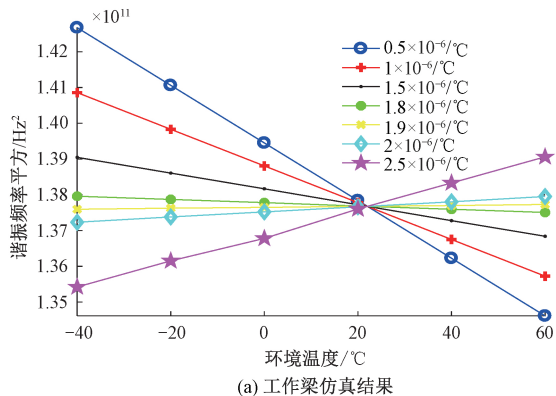


图5 不同热膨胀系数时双梁谐振频率平方与温度的关系

对仿真结果进行最小二乘线性拟合,得到双梁在不同玻璃热膨胀系数下的温度灵敏度和双梁温度灵敏度偏差的绝对值。将双梁温度灵敏度及其相互之间偏差的绝对值随玻璃热膨胀系数的变化规律绘制成曲线,结果如图6、7所示。由图6、7可知,双梁温度灵敏度随着玻璃热膨胀系数的增大均逐渐从负值线性增大为正值,在热膨胀系数为 $1.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,双梁温度灵敏度均接近于0。此外,工作梁的温度灵敏度随热膨胀系数的增大略大于补偿梁;因此在取值从 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 增加到 $1.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,双梁温度灵敏度偏差的绝对值逐渐减小,一致性逐渐变好,而当取值继续增大时,偏差的绝对值开始增大,一致性逐渐变差。

综上所述,理论上选取热膨胀系数约为 $1.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的玻璃材料能够将结构热应力降低至0。但是实际情况中,玻璃的热膨胀系数不能任意选定。因此,为了尽量减小安装过程中的热应力以及安装完成之后由于材料热膨胀系数的不匹配导致的热应力,应该选取与理论值最为接近的玻璃材料。本文选用 pyrex7740 # 玻璃,其热膨胀系数为 $2.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

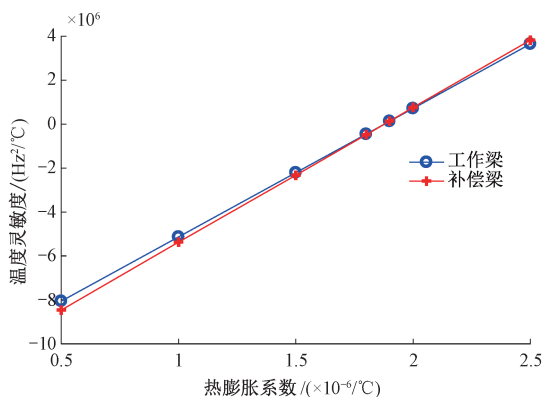


图6 温度灵敏度与热膨胀系数的关系

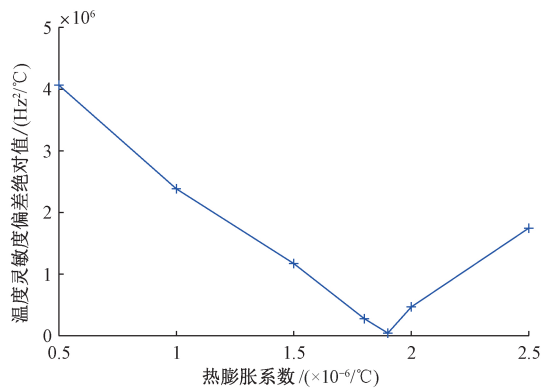
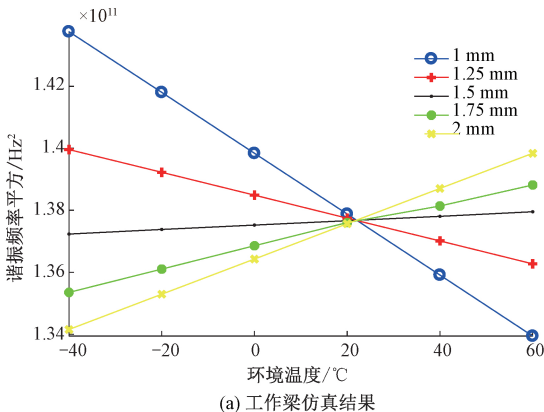


图7 偏差绝对值与热膨胀系数的关系

之后,使用相同方法得到玻璃热膨胀系数为 $2.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、玻璃厚度分别取为 1.00、1.25、1.50、1.75 和 2.00 mm 时双梁谐振频率的平方随环境温度的变化规律,结果如图8所示。由图8可知,随着玻璃厚度的增加,双梁的谐振频率平方均随着环境温度呈线性变化。同理,这证明了存在某个厚度值,使得双梁的谐振频率不随温度的变化而变化。

对仿真结果进行最小二乘线性拟合,得到双梁在不同玻璃厚度下的温度灵敏度,以及双梁温度灵敏度偏差的绝



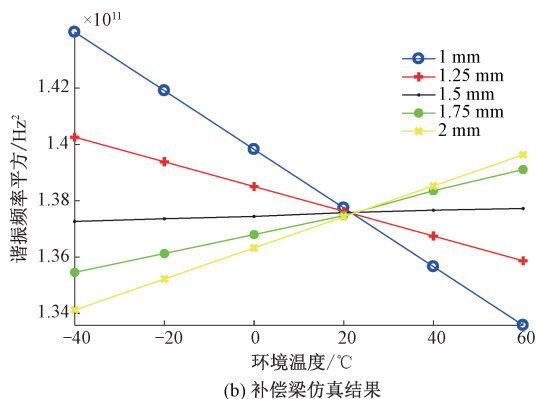


图 8 不同玻璃厚度时双梁谐振频率平方与温度的关系

对值。将双梁温度灵敏度及其相互之间偏差的绝对值随玻璃厚度的变化规律绘制成曲线,如图 9 和 10 所示。由图 9、10 可知,双梁温度灵敏度均随玻璃厚度的增大而逐渐从负值增大为正值,且在厚度接近 1.5 mm 时,双梁温度灵敏度均接近于 0。在厚度由 1 增大至 1.5 mm 的过程中,工作梁的温度灵敏度随厚度的增大幅度略大于补偿梁;因此在厚度从 1 增加到 1.5 mm 时,双梁温度灵敏度偏差的绝对值逐渐减小,一致性逐渐变好,而当取值继续增大时,双梁温度灵敏度的一致性基本不随着厚度的增大而有所改善或者恶化。考虑谐振器综合尺寸,本文选用厚度 1.50 mm 的玻璃底座。

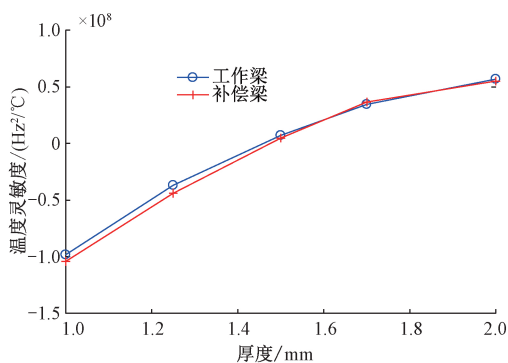


图 9 温度灵敏度与玻璃厚度的关系

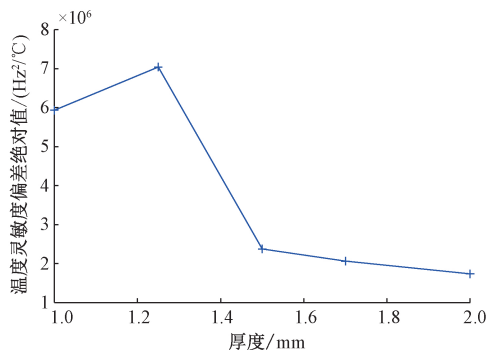


图 10 偏差绝对值与玻璃厚度的关系

5 结 论

本文提出了一种能有效减小灵敏度温度漂移的谐振式压力传感器结构设计方案,该方案采用硅-玻璃-金属 3 层复合结构,通过各层材料的热膨胀系数的匹配实现热应力抵消,将敏感结构的温度系数设计为 0。考虑实际工作环境,只能尽可能降低温度漂移,无法实现真正消除,因此,传感器敏感结构采用双谐振梁结构,工作梁同时敏感被测压力与温度,补偿梁只敏感温度,通过谐振频率差分运算实现进一步的温度补偿。本文首先运用热力学原理分析,定性得出选择合适的玻璃热膨胀系数与厚度能够有效降低温度灵敏度的结论,再通过有限元仿真方法,对玻璃的热膨胀系数和厚度进行了具体选择,最终决定选用厚度为 1.5 mm 的 pyrex7740 玻璃材料,热膨胀系数为 $2.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。实际上,仿真结果显示的热膨胀系数不能任意选定,最终选择了最为接近该热膨胀系数的材料,如能制作出更低热膨胀系数的玻璃材料,有望更佳地实现温度补偿。

参考文献

- [1] 杜永革, 何小映. 浅谈传感器的温度补偿技术[J]. 电子设计工程, 2009, 17(6): 63-64.
- [2] GONZÁLEZ A H, BELTRÁN J R, CERÓN J T, et al. New architecture for intelligent pressure sensors with analog and digital outputs[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(2): 116-121.
- [3] CHIU S R, TENG L T, CHAO J W, et al. An integrated thermal compensation system for MEMS inertial sensors[J]. Sensors, 2014, 14(3): 4290-4311.
- [4] LUO X L, XU T B, BI L H. Research on compensation method of temperature drift in pressure sensor using double wheatstone-bridge method[J]. Advanced Materials Research, 2012, 459: 311-314.
- [5] DING J C, ZHANG J, HUANG W Q, et al. Laser gyro temperature compensation using modified RBFNN[J]. Sensors, 2014, 14(10): 18711-18727.
- [6] FAN S. Temperature compensation of pressure sensor based on the interpolation of splines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 32(6): 684-686.
- [7] 张艳华, 陈玉玲, 赵爽, 等. 压阻式压力传感器温度补偿技术的研究及应用[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 138-142.
- [8] TILMANS H A C, BOUWSTRA S, IJNTEMA D J, et al. Differential resonator design using a bossed structure for applications in mechanical sensors[J]. Sensors and Actuators A, 1991, 26(1-3): 385-393.
- [9] 饶勤, 从 F-22 看第四代战斗机机载设备制造技术[J]. 航空精密制造技术, 1996, 32(2): 1-7.

- [10] IKEDA K, KUWAYAMA H, KOBAYASHI T, et al. There-dimensional micromachining of silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm[J]. Sensors and Actuators A, 1990, 21-23: 1007-1010.
- [11] SAIGUSA T, KUWAYAMA H. Intelligent differential pressure transmitter using micro-resonators [C]. International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992: 1634-1639
- [12] SEIBERT K, LARGEAU D, BONVALOT B, et al. Optical system for pressure and temperature sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1994, 43(1-3): 85-91
- [13] HSU W T, CLARK J R, NGUYEN C T C. Mechanically temperature-compensated flexural-mode micromechanical resonators[C]. International Electron Devices Meeting, IEDM Technical Digest, 2000: 399-402.
- [14] 刘广玉. 微传感器设计、制造与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 72-78, 118-120.
- [15] WALSH D, CULSHAW B. Optically activated silicon microresonator transducers: An assessment of material properties[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1991, 27(1-3): 711-716.
- [16] 陈德勇. 微机械谐振梁压力传感器研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2002.

作者简介

邹梦启, 硕士研究生, 主要研究方向为硅谐振式压力传感器结构设计与优化仿真。

E-mail: zmql211@163.com