第 44 卷 第 1 期
2023 年 1 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 44 No. 1
Jan. 2023

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210644

硅微谐振式加速度计温度补偿方法研究综述*

蒋金玲,张 晶,朱欣华,苏 岩,周 同
(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要:硅微谐振式加速度计具有体积小、成本低、动态范围宽、高精度准数字频率信号输出等优势,但零偏、标度因数等关键性能指标受到了温度等因素的制约,尚不能满足高精度导航制导的高性能要求。因此,本文在简要介绍硅微谐振式加速度计温度特性及温度误差来源的基础上,综述了近年来国内外学者针对硅微谐振式加速度计进行的温度补偿方面的研究,包括无源温度补偿技术、有源温度补偿技术;介绍了无源温度补偿技术与有源温度补偿技术常用的方法和最新的研究成果;分析总结了各种方法的优缺点,提出探索更加精确的测温手段、热隔离效果更好的隔离装置以设计一种低功耗、预热时间短、控制稳定性强的微烘箱系统进行器件层的加热控温,以及寻求无源补偿技术与有源补偿技术相结合的更多可能性以获得温度补偿最优组合是后续温度补偿工作的重点研究方向。

关键词: 硅微谐振式加速度计;有源温度补偿技术;无源温度补偿技术;微电子机械系统
中图分类号: TH824 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Review of temperature compensation methods for silicon micro-resonant accelerometers

Jiang Jinling, Zhang Jing, Zhu Xinhua, Su Yan, Zhou Tong
(*College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: Silicon micro-resonant accelerometers have advantages of small size, low cost, wide dynamic range, and high-precision quasi-digital frequency signal output. But, the key performance indicators, such as zero bias and scale factor, are constrained by temperature and other factors, which cannot meet the high-performance requirements of high-precision navigation guidance. Therefore, on the basis of briefly introducing the temperature characteristics and temperature error sources of silicon micro-resonant accelerometers, this article reviews researches on temperature compensation of silicon micro-resonant accelerometers in recent years, including passive temperature compensation technology and active temperature compensation technology. The common methods and the latest research of passive temperature compensation technology and active temperature compensation technology are introduced. The advantages and disadvantages of various methods are analyzed and summarized. It is proposed to explore more accurate temperature measurement methods and isolation devices with better thermal isolation effect to design a micro-oven system with low power consumption, short preheating time and strong control stability for heating and temperature control at the device layer, and to seek more possibilities of combining passive compensation technology and active compensation technology to obtain the optimal combination of temperature compensation is the key research direction of subsequent temperature compensation work.

Keywords: silicon micro-resonant accelerometer; active temperature compensation technology; passive temperature compensation technology; MEMS

收稿日期:2022-10-31 Received Date: 2022-10-31
*基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3201604)、国家自然科学基金(62101263)、江苏省自然科学基金(BK20190417)、中央高校基本科研业务费专项资金(30920021110)项目资助

0 引 言

惯性技术是以牛顿力学、光电子学等为基础的多学科综合技术,涉及导航、制导、控制与测量等应用领域,各类惯性器件及系统是战术导弹、军用飞机等武器和武器平台以及卫星、运载火箭、航天飞船等航天器必备的导航/制导设备[1]。硅谐振式加速度计是一种基于微加工工艺的惯性器件,具有高灵敏度、直接频率信号输出、宽动态范围和芯片级尺寸等优势,具有极高性能的巨大潜力,可广泛应用于惯性导航系统和地震探测等领域。近年来对于硅微谐振式加速度计的噪声方面的研究已经取得了很大的进展,噪声性能已得到显著改善,满足了导航级加速度计的要求,如新加坡国立大学 Hopkins 等[2]研发的硅微谐振式加速度计的分辨率达到了 23 μg $\sqrt{\text{Hz}}$,Allan 方差的偏置稳定性为 4 μg;Draper 实验室[3]作为研究硅微谐振式加速度计的领军单位,研发的舰载导航硅微谐振式加速度计的分辨率达到了 4.5 μg/ $\sqrt{\text{Hz}}$,Allan 方差的偏置稳定性为 0.08 μg。但是战略性武器系统需要高精度惯性制导系统,要满足高精度导航/制导的应用需求,仍需要进一步改善硅微谐振式加速度计的零偏和标度因数的温度稳定性,使其在更宽的温度范围内有更强的稳定性,能够更快速的适应极端恶劣的环境。

硅微谐振式加速度计的工作温度通常在-40℃~60℃之间,但由于其谐振频率的温敏特性,温度变化会引起硅材料弹性模量和膨胀系数改变[4],同时也会产生更多机械热噪声,使得其谐振频率发生偏移,从而降低加速度计的精度、频率稳定性和标度因数稳定性。如何抑制温度对关键性能的影响,从而提升硅微谐振式加速度计的温度稳定性,满足更高的性能要求,是目前国内外惯性器件共同面临且迫切需要解决的关键问题之一。

目前国内外针对硅微谐振式加速度计温度补偿方法的研究主要分为 2 个方向,无源温度补偿技术和有源温度补偿技术。无源温度补偿技术主要针对谐振器的组成,从降低硅材料的频率温度系数和减少结构热应力出发降低谐振器频率对温度的依赖性。目前常用的有硅-二氧化硅复合结构[5-8]、简并掺杂[9-11]、优化锚点位置和隔离框架设计[12-13],还有最新提出一种基于晶体取向优化的方法[14]。无源温度补偿技术虽然从根本上降低了谐振频率对温度的依赖性,无需增添外部电路,不产生功耗,但对于微加工工艺的要求高,周期长,成型后难以更改灵活性差,且补偿范围固定有限,同时环境适应性差。有源温度补偿技术通常需要额外的电路、温度传感器或谐振器组件,目前常用的有烘箱加热控制恒定工作温度[15-16]、外围电路优化设计[17-23]、建立温度模型采用软件算法预测补偿[24-35],其中大量的研究集中在利用烘箱加热控制恒定的工作温度的方法上。相较于无源技术,有源技术能够提供更加精确的温度补偿,但是功耗高、预热时间长和控制稳定性弱是需要解决的问题,同时更精确的测温手段和热隔离效果更好的隔离装置是它需要进一步研究的方向。也有部分研究采用无源技术与有源技术相结合的温度补偿方式取得了较好的补偿效果,因此探索无源技术与有源技术相结合的更多可能性,寻找最优组合方式也是进一步研究温度补偿方法的一个方向。

针对硅微谐振式加速度计温度补偿方法的研究,目前尚缺乏一个更加清晰、详细具体的分类综述和系统性的归纳总结,因此本文旨在成为研究硅微谐振式加速度计温度补偿方法的一个有力媒介,从有源温度补偿技术和无源温度补偿技术 2 个方面具体的、系统的介绍了目前广泛使用的几种温度补偿方法以及最新研究,分析了每种方法各自的优缺点,为后续研究提供清晰、详细、有力的参考。文章首先简要介绍了硅微谐振式加速度计的温度特性及温度误差的来源,说明了温度补偿的重要性;其次,从优化材料特性和优化结构特性两个方面说明了目前对无源补偿技术的研究及其成果;再次,介绍了有源补偿技术的几种常用方法及其最新研究进展,包括恒定温度控制、温度模型建立、外围电路优化设计;然后展示了在近年来在无源补偿技术与有源补偿技术结合使用这一方向进行的探索;最后总结了目前的研究工作和后续的研究方向。

1 硅微谐振式加速度计的温度特性与机理分析

硅微谐振式加速度计的工作温度通常为-40℃~60℃,实际工程应用中,环境温度的波动会影响加速度计的输出,产生温度误差,降低加速度计的频率稳定性。为了深入研究加速度计的温度补偿方法,抑制环境温度波动对加速度计性能的影响,国内外众多研究机构对硅微谐振式加速度计的温度特性进行了研究,研究表明温度误差的主要来源包括材料的热敏特性、热应力、加工工艺产生的残余应力、封装内部真空度、外围电路噪声[36-40]。

1.1 谐振频率的温度特性与机理分析

硅微谐振式加速度计的结构尺寸、材料的弹性模量、加工工艺产生的残余应力、封装贴片材料与硅材料的热膨胀系数差异产生的热应力等都会受到加速度计工作环境温度的影响,从而使得加速度计的关键性能发生变化。

硅微谐振式加速度计谐振器固有谐振频率 f_n 为[36]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \tag{1}$$

式中:M_{eff} 为谐振器等效质量,K_{eff} 为谐振器等效刚度。其中谐振器等效刚度 K_{eff} 为[36]:

$$K_{eff} = \alpha \frac{EI}{L^3} + \beta \frac{\sigma}{V} \tag{2}$$

式中:E 为硅材料的弹性模量,I 为谐振梁的惯性矩,L、V 分别为谐振梁的轴向长度和体积,α、β 为主模态振形决定的常数,σ 为谐振梁受到的轴向应力。

实际工作过程中,谐振梁受到的轴向应力 σ 包括 3 个部分[36],结构和衬底材料的热膨胀系数不匹配产生的热应力 σ_{th},加工工艺导致的谐振梁的残余应力 σ_{in},外部输入加速度产生的应力 σ_{ex},即:

$$\sigma = \sigma_{th}(T) + \sigma_{in}(T) + \sigma_{ex}(a) \tag{3}$$

同时硅材料对于温度的敏感性使得温度变化的过程中,硅材料的杨氏模量也随之发生变化,杨氏模量与温度的关系可以表示为[41]:

$$E(T) = E_0 - E_0 K_E (T - T_0) \tag{4}$$

式中:K_E 是硅材料的杨氏模量温度系数,E_0 是硅材料在绝对温度时的杨氏模量。

结合式(1)~(4)可得加速度计固有谐振频率与温度的关系为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\alpha \frac{E(T)I}{L^3} + \beta \frac{\sigma_{th}(T) + \sigma_{in}(T) + \sigma_{ex}(a)}{V}}{M_{eff}}} \tag{5}$$

谐振器等效刚度与等效质量的比值决定了固有谐振频率的大小,其中等效刚度与硅材料的杨氏模量、谐振器的结构尺寸以及谐振梁的轴向应力有关。谐振器的轴向应力由热应力、外加应力、残余应力组成。其中热应力由结构硅材料和衬底材料之间热膨胀系数不匹配产生[39]。如图 1 所示,结合式(5)可知,温度变化导致硅材料的杨氏模量和热膨胀系数改变,引起谐振器刚度变化,进而导致谐振器固有频率改变,产生不必要的温度漂移,降低了加速度计的精度,同时影响了加速度计的零偏稳定性和标度因数稳定性。

1.2　噪声的温度特性与机理分析

硅微谐振式加速度计在工作过程中存在着机械噪声和电噪声,其中机械噪声是一种热噪声,它由结构内部分子的无规则热运动产生,在恒定温度下,机械热噪声的单位功率谱密度 $S(w)$ 为[41]:

$$S(\omega) = 4K_B Tc \ \mathrm{N^2/Hz} \tag{6}$$

式中:K_B 为玻尔兹曼常数,T 为绝对温度,c 为阻尼系数,机械热噪声可以等效为 F_n:

$$F_n = \sqrt{4K_B Tc} \ \ \mathrm{N/\sqrt{Hz}} \tag{7}$$

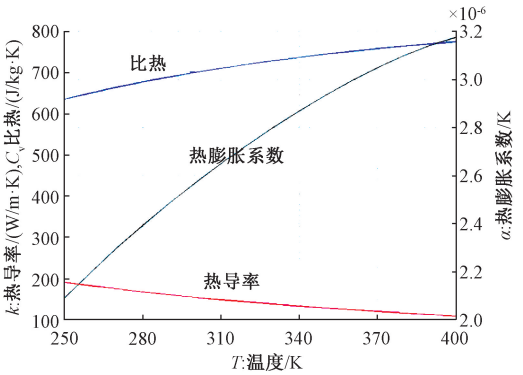


图 1　硅在正常工作温度(250~350 K)下的材料特性[42]

Fig. 1　Material characteristics of silicon at normal operating temperature (250~350 K)[42]

机械热噪声等效到加速度 α_n 为[41]:

$$a_n = \frac{\sqrt{4K_B Tc}}{M} \tag{8}$$

式中:M 为敏感质量块质量。由式(6)~(8)可知,温度越高,机械热噪声越大,机械热噪声的等效加速度越大,从而使得加速度计的分辨率降低。

加速度计的电噪声主要来自于外围检测电路中的元器件,其中与温度相关的主要是电阻的热噪声和二极管的散粒噪声,电阻热噪声在单位频带内的电压均方值为[41]:

$$\overline{U}_n^2(\omega) = 4K_B TR \ \mathrm{V^2/Hz} \tag{9}$$

式中:K_B 为玻尔兹曼常数,T 为绝对温度,R 为电阻阻值。

二极管散粒噪声在单位频带内的电流均方值为[41]:

$$\overline{I}^2(\omega) = 2K_B TG \ \mathrm{A^2/Hz} \tag{10}$$

式中:K_B 为玻尔兹曼常数,T 为绝对温度,G 为二极管等效电导值。由式(9)、(10)可知,电阻热噪声大小和二极管的散粒噪声大小都与温度呈线性关系。

温度的变化会引起加速度计的机械热噪声和电热噪声的变化,从而影响加速度的测量精度和准确性,降低加速度计的稳定性。

1.3　品质因数的温度特性和机理分析

品质因数的定义是系统谐振过程中储存的能量与每个周期损耗能量的比值,它是反映加速度计性能好坏的关键指标之一。谐振器在振荡时主要由 4 种能量损耗机制,包括:空气阻尼(Q_{air})、热弹性耗散(Q_{TED})、锚点耗散($Q_{anchorloss}$)、其他损耗(Q_{others}),这些能量的损耗制约了加速度计的品质因数,加速度计的品质因数 Q_{total} 为[40]:

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{air}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{anchorloss}} + \frac{1}{Q_{others}} \tag{11}$$

其中空气阻尼和热弹性耗散起主导作用,如图 2 所示,当封装内部真空度较低时,谐振器的品质因数主要受

空气阻尼的影响,温度越高,空气阻尼越低,谐振器的品质因素越低;当封装内真空度较高时,谐振器的品质因数主要受热弹性耗散的影响,温度越高,热弹性耗散越低,谐振器的品质因数越低,温度和封装内部的真空度共同决定了谐振器的品质因数[41]。

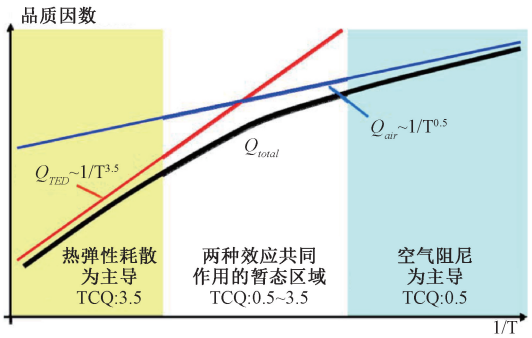


图 2 品质因数的温度依赖性[42]

Fig. 2 Temperature dependence of quality factor[42]

由空气阻尼限制的品质因数 Q_{air} 为[41]:

$$Q_{air} = \frac{h\rho f_0}{4P}\sqrt{\frac{\pi R}{2MT}}C \tag{12}$$

$$C = \frac{P}{T} \tag{13}$$

式中:h 为谐振器结构厚度,ρ 为硅材料密度,f_0 为谐振器的固有频率,R 为广义摩尔气体常数,M 为摩尔气体质量,P 为封装内部大气压强,T 为绝对温度

由热弹性阻尼产生的热弹性耗散对品质因数的制约 Q_{TED} 为[41]:

$$Q_{TED} = \frac{C_V}{Ea^2T}\frac{1+(f_0\tau)^2}{f_0\tau} \tag{14}$$

$$\tau = \frac{C_V b^2}{k\pi^2} \tag{15}$$

式中:C_V 为硅材料单位体积比热容,E 为硅材料的杨氏模量,α 为硅材料的热膨胀系数,f_0 为固有谐振频率,T 为绝对温度,b 为谐振梁宽度,k 为硅材料的热导率。

保持较高的品质因数可以减少频率读出误差、降低功耗、提高稳定性和灵敏度,但是在温度和封装内部真空度的影响下,以空气阻尼和热弹性耗散为主的能量损耗机制制约了品质因数的提升。

2 无源补偿技术

无源补偿技术是指直接设计谐振器组成元素的方法,根据材料特性和结构特性可以分为降低谐振器的频率温度系数(frequency temperature coefficient,TCF)和降低结构热应力 2 个方向。

2.1 使用复合材料或简并掺杂补偿硅材料 TCF

硅材料因其近乎理想的晶体结构成为微机械谐振器的理想材料,但它杨氏模量的温度系数可以达到 $-25\sim-75(\times10^{-6}\cdot℃^{-1})$,具有很高的温度敏感性,这使得硅谐振器呈现出大约 $-31\times10^{-6}\cdot℃^{-1}$ 的负线性 TCF[5]。Shen 等[6]和 Sandberg 等[7]提出了采用二氧化硅对硅谐振器进行温度补偿,美国斯坦福大学 Melamud 等[5,8]证明了这一方法的可行性,采用 SiO_2 作为补偿材料,构建硅和二氧化硅的复合结构,利用 SiO_2 的正频率温度系数对硅材料的负温度系数进行补偿,降低了谐振器整体的频率温度系数,如图 3、4 所示,经过二氧化硅补偿的复合硅-二氧化硅谐振器的频率温度系数为 $-0.02\times10^{-6}\cdot℃^{-1}$。

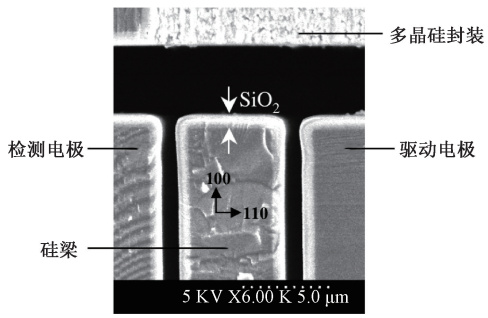


图 3 复合硅-二氧化硅谐振器硅梁顶部 SEM 图像[8]

Fig. 3 SEM image of the top of an oxidized Si beam of a DETF resonator[8]

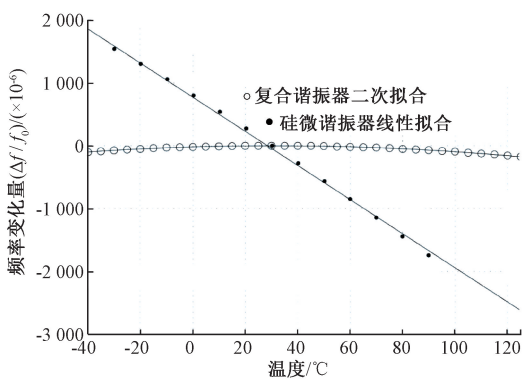


图 4 Si-SiO_2 复合 DEFT 谐振器与硅 DEFT 谐振器比较[8]

Fig. 4 Comparison of silicon DETF resonator with a Si-SiO_2 composite DETF resonator[8]

这种使用不同材料通过正 TCF 补偿负 TCF 的复合谐振器的确能够降低谐振频率对温度的敏感性,但是不同材料界面处的应力不匹配会产生磁滞现象,同时复合材料结构的频率取决于复合材料中每一层弯曲刚度的线性组合,需要合理的设计复合材料每一层的厚度,对设计和加工工艺的要求很高,并且两种不同材料的热弹性阻尼产生的热弹性耗散会进一步降低谐振器的 Q 值。

针对上述构建复合材料结构方法的不足,Samarao 等[9]提出采用简并掺杂的方法,使用硼和铝掺杂剂对硅体声波谐振器(Si-bulk acoustic resonator,SiBAR)进行简并掺杂,如图 5、6 所示,使谐振器的频率温度系数分别降低到$-1.5\times10^{-6}\cdot℃^{-1}$和$-2.7\times10^{-6}\cdot℃^{-1}$。Jaakkola 等[10]和 Ng 等[11]证明了这一方法的可行性。

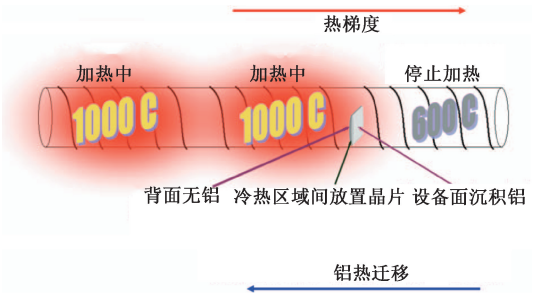


图 5　晶圆级铝热迁移工艺示意图[9]

Fig. 5　Diagram of the wafer-level aluminum thermomigration process[9]

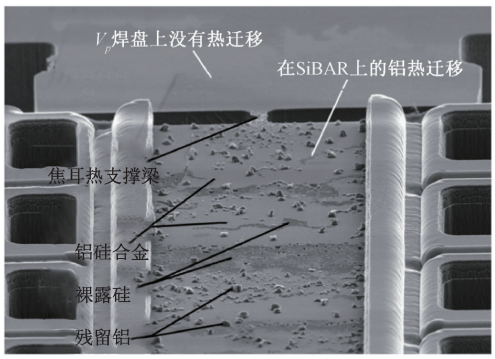


图 6　铝热迁移表面 SEM 图[9]

Fig. 6　SEM showing a close-up of the aluminum thermomigrated[9]

相较于构建不同材料的复合结构方法,简并掺杂的方法能够在实现低频率温度系数的同时保持较高的 Q 值,但是这种方法会受到基板厚度的限制,并且对掺杂工艺要求高。

2.2　优化锚点、隔离框架设计降低热应力

复合结构和简并掺杂的方法都是从材料的特性出发,补偿硅材料的频率温度系数从而降低谐振器的频率对温度的敏感性。也有研究从结构特性出发,减少结构热应力,通过结构上的优化从源头上进行温度补偿,采用完全对称的双谐振器的差分频率就是一种方法[43-48],相同的谐振器具有相似的频率和频率温度系数,因此,通过差分测量减小共模误差,可以在很大程度上消除温度变化引起的频率波动,但受加工工艺的制约,两个谐振器无法做到完全的对称,不能消除理想状态下对称的温度效应。

锚作为连接传感元件和基板的桥梁的支撑结构,提供了将温度引起的热应力从基板传输到 DETF 的独特路径,因此可以通过适当设计锚点位置、采用隔离框架来抑制热应力。2019 年清华大学 Yin 等[12]提出了两种结构设计来衰减热应力的影响,第一种就是通过优化键合锚点的位置来降低玻璃基板和硅结构之间的热应力,如图 7 所示,倒置梁和悬挂梁的 4 个锚点相对于膨胀中心对称排列,彼此靠近,实现锚点之间的 x 轴距离 (δ)为 0,以降低沿加速度敏感轴方向的热应力,同时采用一种专用的 H 形基板隔离结构,如图 8 所示,减少贴片过程中封装胶层产生的热应力。

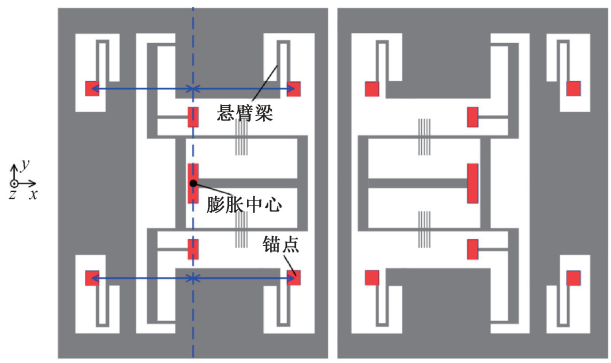


图 7　优化锚点位置[12]

Fig. 7　The optimized anchor position[12]

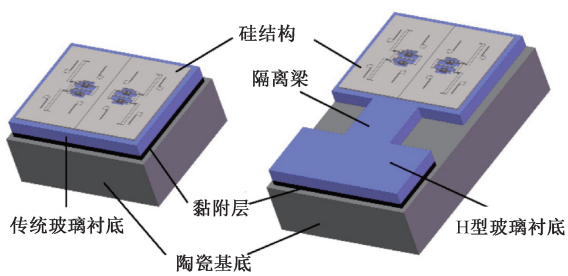


图 8　H 型玻璃基底隔离结构与传统矩形玻璃基底[12]

Fig. 8　The isolation structure of the H-shaped glass substrate and the traditional rectangular glass base[12]

这种优化锚点位置的方式只能消除大部分沿 x 敏感轴的热应力,但 y 轴的应力依然存在,且 H 型玻璃基底的额外加工步骤如激光切割、切屑清洗等会导致致良率下降,因此他们对此进行了改进,如图 9 所示,移除传统锚点,采用单锚点矩形隔离框架,降低了封装应力,且谐振器和悬挂梁远离锚点,谐振梁中的热应力可忽略。实验结果表明:这两种结构设计都能有效降低微加工和器件封装过程中产生的热应力,加速度测量的温度漂移系数降至 1.9 μg/℃,15 天零偏不稳定性达到 76 ng,零偏稳定性大大提高。

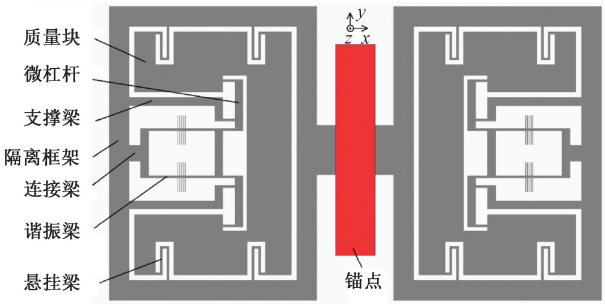


图 9 单锚点隔离结构[12]

Fig. 9 Single anchor isolation structure[12]

2019 年,北京大学 Cui 等[13]也提出了一种锚点和隔离框架的设计,将谐振梁与沿着检测轴方向的热应力隔离开,以降低谐振频率的漂移,如图 10 所示,经测试,±80 g 的测量范围内,补偿后的偏置热灵敏度和频率稳定性(1σ)在-40℃~60℃的温度范围内约为 0.7 mg/℃和 1 mg。

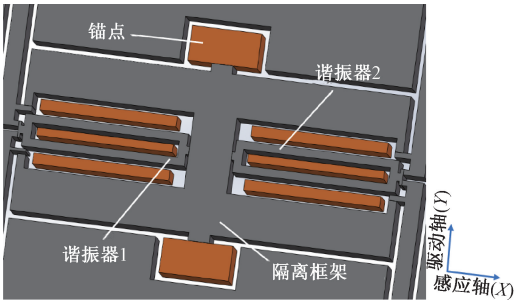


图 10 应力释放锚点和隔离框架结构[13]

Fig. 10 Stress relief anchor point and isolation frame structure[13]

2.3 优化晶体取向

2021 年 Liu 等[14]首次提出一种基于晶体取向优化的硅谐振加速度计,如图 11 所示,该方法通过将器件的振动轴旋转到特定的晶体取向角来改变杨氏模量的温度漂移,从而显着降低 TCS 的温度系数,实验结果表明,在无任何后处理补偿的情况下,采用 33.75°取向的硅微谐振式加速度计获得 3×10^{-6}·℃$^{-1}$的 TCS,与传统的 0°取向器件相比降低了约 8.6 倍,经过简单的多项式补偿,从-10℃~70℃,标度因数的总体变化可以进一步降低到仅 2.98×10^{-6}。

无源补偿技术根据材料特性和结构特性,采用复合材料、简并掺杂、优化锚点位置、采用隔离框架的方法,能够从根本上降低谐振器频率对温度的依赖性,并且不需要额外的外部设备,功耗低。但是它对于微加工工艺和设计人员的要求高,成本高,周期长,一旦成型就难以更改,灵活性差,补偿范围有限,且优化锚点位置和热隔离

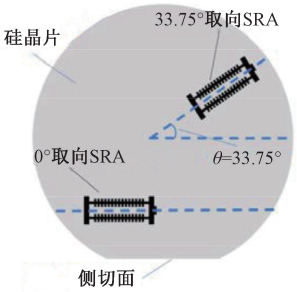


图 11 晶体取向优化工艺[14]

Fig. 11 Schematic view of fabrication orientation[14]

结构的方法只能抑制或减小热应力的产生,不能做到完全消除,对于快速变化的环境,无法及时提供足够的热隔离,环境适应性较差。

3 有源补偿技术

有源补偿技术指要使用额外的电路、温度传感器、谐振器组件的方法,包括控制恒定工作温度、合理设计外围电路、建立温度补偿模型。相较于无源补偿技术,有源补偿技术能提供更加精确的温度补偿。

3.1 控制恒定工作温度

常用的控制恒定工作温度的方法是使用控制环路将谐振器的温度提升到固定值以保持稳定的频率,主要包括利用烘箱或加热器在封装层加热和器件层加热两种方式,为了提高温度控制的准确性,需要对于谐振器的温度进行精确的测量,目前报道的谐振器温度测量的方法主要有:温敏电阻测温、根据谐振器谐振频率测温、根据谐振器品质因数测温。

美国斯坦福大学 Chen 等[15]采用在封装层集成微烘箱加热的方式,如图 12、13 所示,但由于温度梯度和热应力的存在,微烘箱在封装层内部散发的热量会影响封装区域内其他传感器的稳定性和性能,并且由于从烘箱加热器到谐振器的热传递发生在器件层中,整个器件层被加热,器件层和基板之间缺乏热隔离就会导致整个芯片产生不必要的加热,使得加热时间长,产生更多的热损失,从而导致输入功率增加。因此为了尽量减少热量散发,以减少芯片内相邻元件的热效应,器件层烘箱局部加热吸引了更多研究机构的关注[16,40],通过仅加热谐振器并同时在谐振器及其在器件层中的紧邻区域之间提供热隔离来提高加热效率。

2009 年 Salvia 等[16]提出了一种基于锁相环(phase-locked loop,PLL)控制双谐振器差分频率的温度补偿系统,该系统在器件层通过流过加热器(A\B)的直流电流,利用焦耳热加热谐振器,如图 14~16 所示。双谐振器基频相近,对称悬浮在封装腔体内且具有不同的频率温度

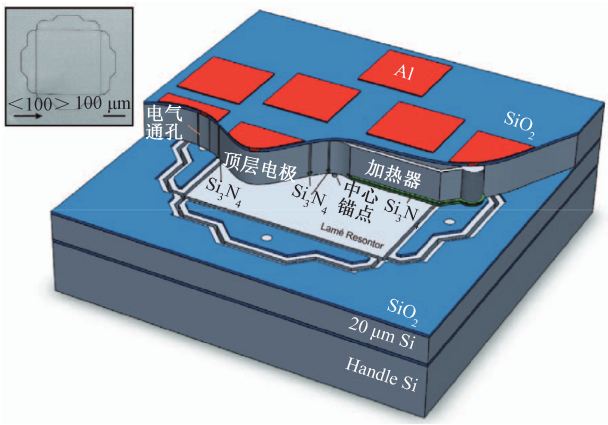


图 12　封装层微烘箱加热谐振器设计[15]

Fig. 12　Encapsulation layer microoven heating resonator design[15]

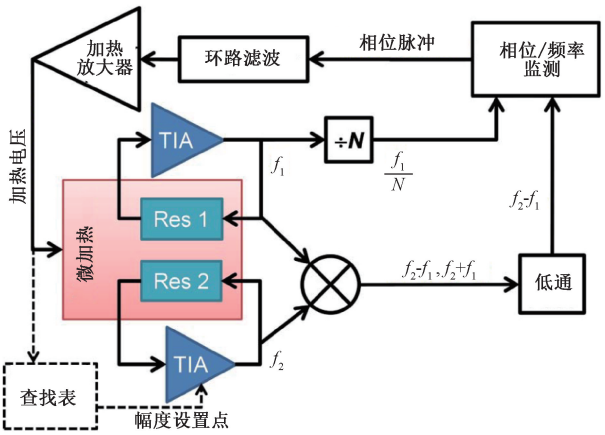


图 15　基于 PLL 控制器的温度控制系统结构图[16]

Fig. 15　Block diagram of the temperature control system based on PLL controller[16]

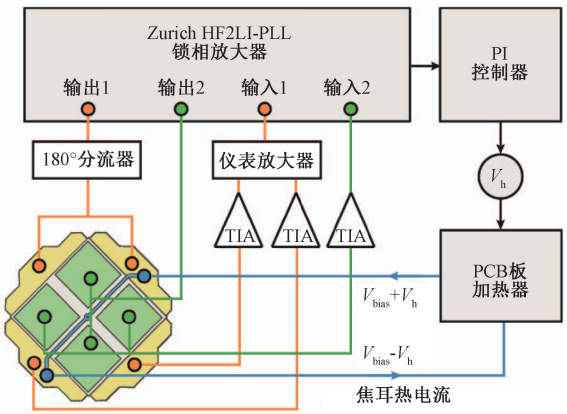


图 13　封装层微烘箱加热器控制系统[15]

Fig. 13　Encapsulation layer micro-oven heater control system[15]

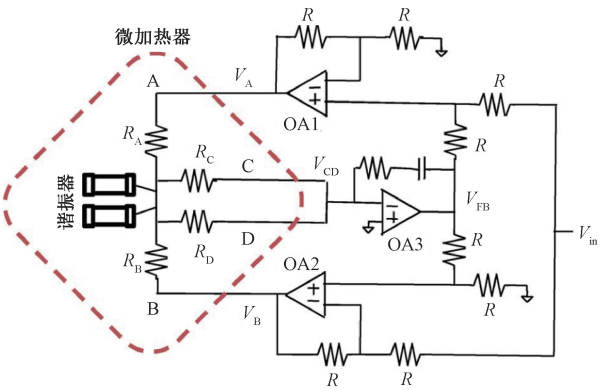


图 16　微型烘箱加热器驱动电路图[16]

Fig. 16　Micro oven heater drive circuit diagram[16]

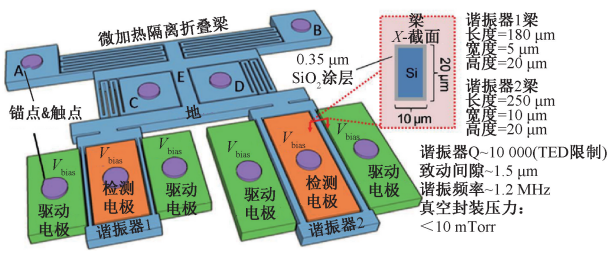


图 14　微型烘箱加热器结构图[16]

Fig. 14　Diagram of micro oven heater structure[16]

系数,利用 PLL 控制器控制恒定温度,实现了 -20℃ ~ 80℃ 下 $\pm1\times10^{-6}$ 的频率稳定性。

该基于 PLL 控制的器件层微烘箱系统的优势在于:采用频率作为温度传感信号,因此温度测量电路的增益、偏移或相位响应的变化不会影响系统的精度,同时系统性能将随着谐振器性能的提高而相应提高。与采用铂电阻测温相比,选择烘箱内部谐振器的频率信号作为参考比较信号,不需要提供温度稳定的外部电压或电流,但是这种采用双谐振器的差分频率信号感测温度,容易受到耦合效应的影响,包括来自两谐振器的机械耦合、芯片与封装管壳的电气耦合、板子电路耦合。

2006 年, Hopcroft 等[40] 比较了外置铂电阻测温、COMS 集成热敏电阻测温、和品质因数 Q 测温 3 种方法,如图 17、18 所示,Q 值测温具有很大潜力。2008 年 Kim 等[42] 提出通过检测谐振器振动幅度得到 Q 值,利用 Q 值控温,如图 19 所示,并进行实验初步证明了这种补偿方法的可行性。同年,Salvia 等[49] 使用 Q 值作为温度传感信号,搭建温度补偿系统,如图 20 所示,讨论了 Q 值测温的局限性,实验表明,多点校准后谐振器在 0℃ ~ 70℃ 范围内实现 $\pm1\times10^{-6}$ 的温度稳定性,单点校准后实现 $\pm25\times10^{-6}$ 的温度稳定性。尽管利用 Q 值作为温度计进行温度补偿具有不消耗功耗、无时间滞后、不受周围环境

影响等优点,但实际实现中出现需要冗长校准、增加的电子元件成本和长期稳定性降低的局限性。

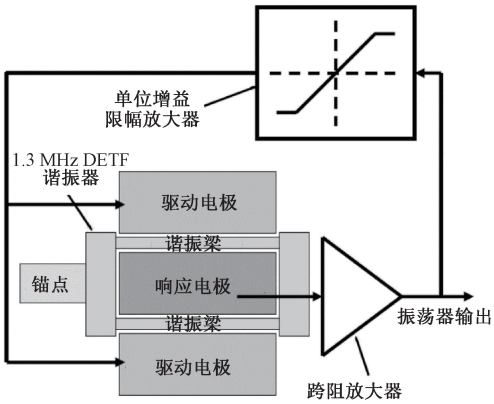


图 17 基于 Q 值测温[40]

Fig. 17 Temperature measure based on Q[40]

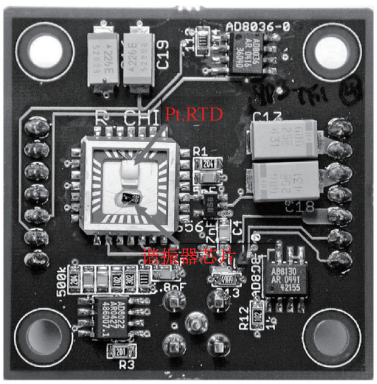


图 18 外置 RTD 测温[40]

Fig. 18 Temperature measure with outside RTD[40]

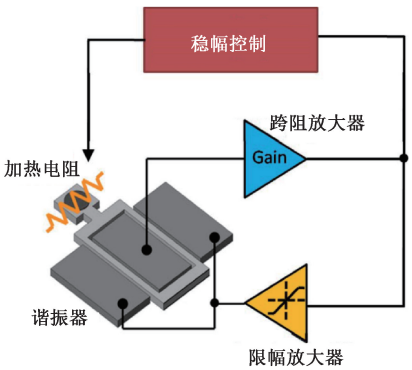


图 19 基于 Q 值的温度控制电路[42]

Fig. 19 Temperature control circuit based on Q value[42]

上述利用微烘箱温控系统在封装层或者器件层加热谐振器来控制谐振器稳定在恒定的工作温度下的方法会增加器件的体积功耗,并且预热时间长、成本高,实现起

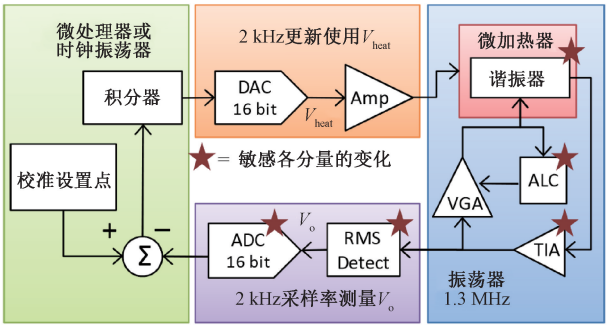


图 20 温度补偿系统框图[49]

Fig. 20 Temperature compensation system diagram[49]

来复杂,稳定性控制弱,但是这种方法在使用合适的测温手段、提供足够的热隔离的情况下,可以更加精确的进行温度控制。

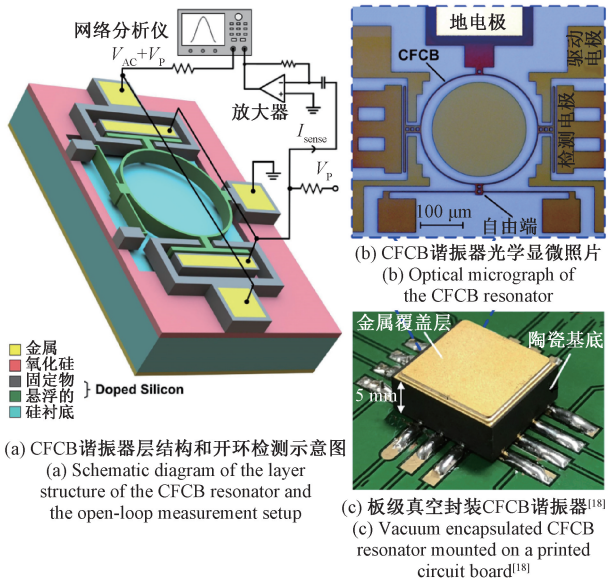
3.2 合理设计外围电路

外围电路设计最典型的就是采用静电调谐减弱杜芬效应抑制温度频率漂移[4,17-18],然而大多数传统的静电 MEMS 谐振器使用双端音叉作为振动元件,在受限边界条件下和超出临界振动幅度的情况下与 Duffing 非线性相互作用,表现出非线性静电刚度软化效应(electrostatic stiffness softening effect,ESS),在这种情况下,需要预先校准复杂的非线性直流偏置电压查找表,以响应线性温度变化,这使得这种传统的静电调谐方法的实用性较差。

2019 年,浙江大学 Chen 等[18]对温度和直流偏置进行线性频率调制的相互独立性进行了理论建模和实验验证,提出一种采用静电调谐控制 ESS 的 TCF 补偿方案,如图 21 所示,这种方案将谐振器的 TCF 抵消到低于 0.1×10^{-6}·℃$^{-1}$的水平,在 70℃的测试范围内,谐振器具有轻微的 Duffing 非线性度,最大频率误差仅为 66×10^{-6}。静电调谐通过直流偏置电压的调节来调整频率,能够直接实现温度补偿,但很少在封装的 MEMS 谐振器上实现,因为它需要在宽温度范围内实现调谐所需的窄间隙,对制造工艺的要求高,温度稳定性差。

2020 年,Zhang 等[17]提出了力平衡读出电路、静电调谐和查找表校准 3 种方法相结合的补偿方法,如图 22 所示,实验表明,该加速度计具有 5.721 V/g 的高灵敏度,±1 g 工作范围内闭环非线性度为 30×10^{-6},未补偿时,−10℃~90℃的温度范围内谐振频率、偏置和标度因数的热漂移,分别为 $3\ 361\times10^{-6}$、900 mg 和 $2\ 755\times10^{-6}$;补偿后,这些值分别降低到 121×10^{-6},109 μg,52.1×10^{-6},补偿效果明显。

环境温度的变化使加速度计检测电路产生漂移,从而造成敏感质量块闭环位置漂移,2013 年清华大学徐哲等[19]针对这一问题提出了加速度计闭环点位置控制方法,核心思想是在不同温度下,在环内加入不同的补偿控



(a) CFCB谐振器层结构和开环检测示意图
(a) Schematic diagram of the layer structure of the CFCB resonator and the open-loop measurement setup

(b) CFCB谐振器光学显微照片
(b) Optical micrograph of the CFCB resonator

(c) 板级真空封装CFCB谐振器[18]
(c) Vacuum encapsulated CFCB resonator mounted on a printed circuit board[18]

图 21　CFCB 谐振器层结构、检测方案及封装[18]

Fig. 21　CFCB resonator structure, detection scheme and packaging[18]

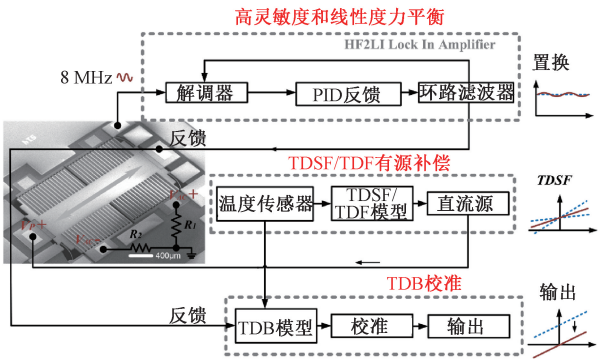


图 22　力平衡读出电路、静电调谐和查找表校准结合的补偿方法[17]

Fig. 22　A compensation method combining force balance readout circuit, electrostatic tuning, and look-up table calibration[17]

制电压,将闭环点拉回原平衡位置,抑制由闭环点移动带来的系统输出温漂,如图 23 所示。经试验,使用该方法的零偏温漂系数从 7 mg/℃降低到 0.361 mg/℃,且温漂滞环可被压缩至±1 mV(±7.77 mg)以内,但是该方法中的控制电压需要额外电路生成,这无疑会增加加速度计的体积功耗,因此徐哲等[20]在 2015 年提出一种改进的方法,即加入测温电路由加速度计内部生成控制电压,测温电路根据温度的变化生成线性测温电压,再通过线性变换生成控制电压控制闭环点位置,如图 24 所示,改进后的方法不依赖于外部硬件,易于实现,经试验,加入线性控制电压后闭

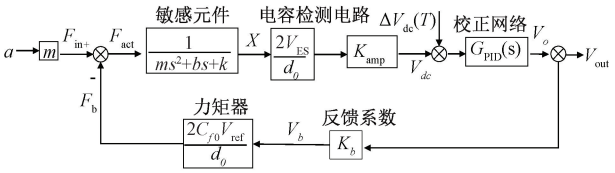
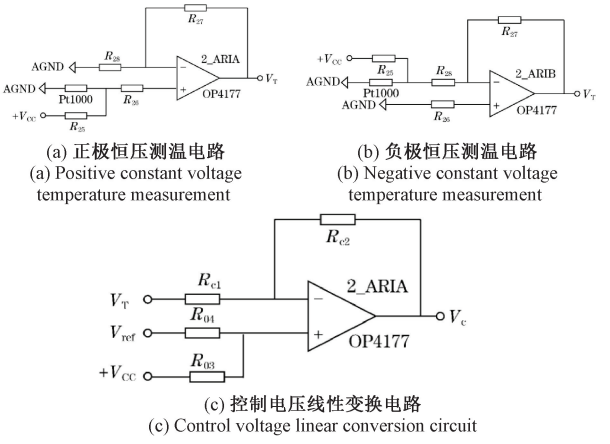


图 23　闭环控制环路[19]

Fig. 23　The closed-loop control loop[19]



(a) 正极恒压测温电路
(a) Positive constant voltage temperature measurement

(b) 负极恒压测温电路
(b) Negative constant voltage temperature measurement

(c) 控制电压线性变换电路
(c) Control voltage linear conversion circuit

图 24　测温电路及控制电压变换电路[20]

Fig. 24　Temperature measurement circuit and control voltage conversion circuit[20]

环加速度计的零偏温漂下降到 0.1 mg/℃ 以内,但是该方法的局限性在于只能生成线性的控制电压,当加速度计的开环零偏曲线具有较大非线性时,零偏温漂的抑制效果不理想,且这种方法无法生成具有滞环效果的控制电压,因此对于温漂滞环无抑制效果。

2018 年意大利米兰理工大学 Marra 等[21-23]提出一种新颖的基于时间切换的差分频率读出电路,如图 25 所示,该方法基于对单个谐振器振荡频率的双重采样,在两种不同的时间配置中连续配置,替代在空间上使用两个

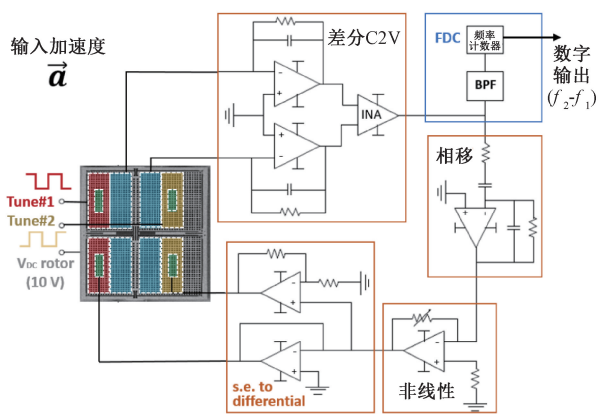


图 25　基于时间切换的差分频率读出电路[21]

Fig. 25　Time-switched differential frequency readout circuit[21]

单独的谐振器,避免了由两谐振器 TCF 不匹配产生热漂移,理论上可以在工艺不均匀的情况下实现与 TCF 相关的偏置漂移分量调零。同年,在此基础上该团队又提出一种增加了 AGC 的新的时间切换的差分频率读出电路[22],如图 26 所示,实现了功耗、灵敏度热系数和噪声之间的权衡,该加速度计功耗低,温度漂移低于 50 μg/K,在 100 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$分辨率下,满量程高于 32 g。

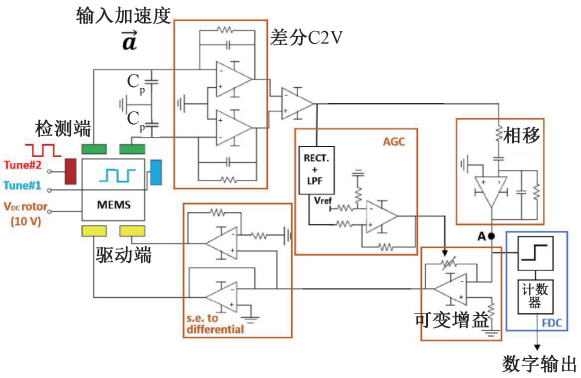


图 26 改进后的基于时间切换的差分频率读出电路[22]

Fig. 26 The improved time-switched differential frequency readout circuit[22]

3.3 建立温度模型采用软件算法补偿

建立的温度模型,通过软件算法进行温度补偿,结构简单、成本低且易于实现。常用的温度模型建立方法有:多项式拟合[24]、向量机[25]、小波网络[26]、BP 神经网络[27]等。2012 年清华大学徐哲等[28]对比了曲面拟合法、SVM 模型和 RVM 模型 3 种方法,指出曲面拟合法简单、精度高,但对系统重复性要求高,对噪声敏感;SVM 模型法计算能力强,但计算量较大,模型参数较多;RVM 模型法模型参数较少,计算量小,但训练时间较长,且预测精度不如其他两种方法高,图 27 为温漂预测补偿模型。

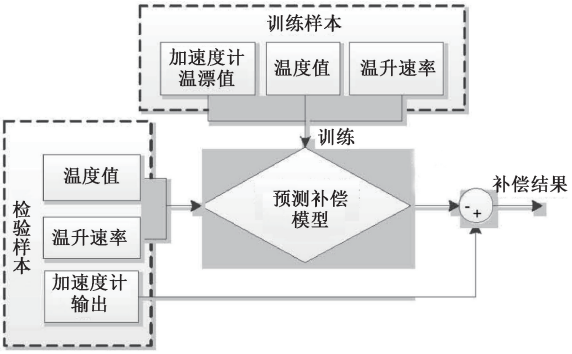


图 27 温漂预测补偿模型原理[28]

Fig. 27 Schematic diagram of temperature drift prediction compensation model[28]

2021 年 Chung 等[29]在 CMOS-MEMS 加速度计系统中嵌入一系列应力和温度传感器,利用深度神经网络补偿算法补偿由应力和温度引起的漂移,如图 28 所示,结果表明,应力和温度引起的漂移补偿消除了加速度随机游走,并在 4 h 内将零偏不稳定性保持在 5 mg 以内。

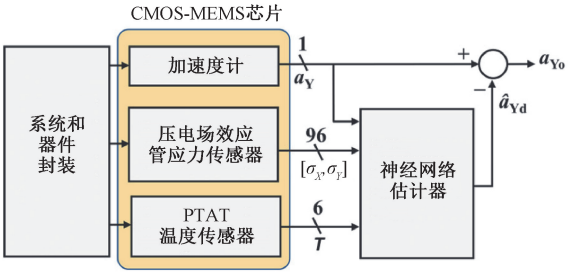


图 28 应力和温度漂移补偿系统[29]

Fig. 28 Stress and temperature drift compensation system[29]

单一的建模方法只能适用于简单的温度漂移,对于复杂的温度漂移不能详细描述,因此需要对其进行优化,目前的优化算法有 LM_BP 神经网络模型[30]、SCM-ANFIS 模型[31]、小波包-神经网络模型[32]、PSO 优化 SVM 模型[33]等。2021 年东南大学张含等[34]结合加速度计的外围控制系统,根据温度对谐振频率和控制电压两个电路参数的影响,将温度作为桥梁建立加速度计频率偏移与控制电压的模型,进行温度补偿,结果表明,在-20℃~30℃温度范围内,补偿后零偏漂移减小 66.7%。此方法克服了温度场分布不确定性和热传导延迟给补偿结果带来精度偏差的缺陷,能够实时高精度补偿,无需增加额外传感器。

2017 年 Yang 等[35]首次提出微烘箱加热与补偿算法相结合的方法,如图 29 所示,微烘箱加热平台通过隔离平台实现低功耗,对于温度引起的非线性残差采用最小均方补偿算法(LMS)和随机森林(random forest)算法进行校准和补偿,-40℃~85℃的工作范围内,加速度计补偿前后的零偏分别为 1.92 mg、665.2 μg。

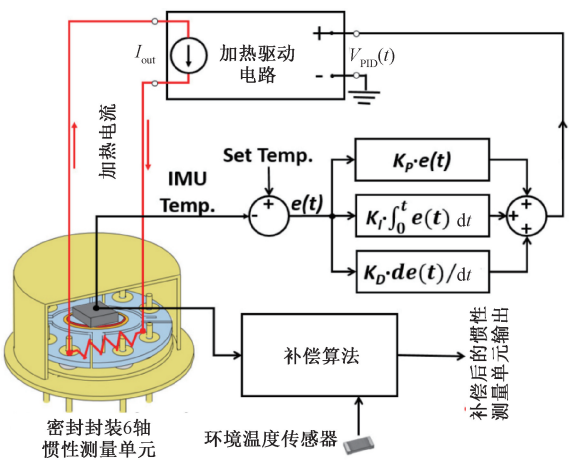


图 29 微烘箱加热平台结合算法补偿的温度控制方法[35]

Fig. 29 Temperature control method combining the micro-oven heating platform with compensated algorithm[35]

采用软件算法进行温度补偿的方法对于模型的准确性要求高,需要设计专用的温控箱或者复杂的测试设备进行大量的重复性温度实验来对模型参数进行标定,但是独立的测温装置与敏感结构所处的温度场不一致会导致温度误差,造成温度测量的精度降低,制约了补偿效果,同时模型参数的预先标定也使得这种方法的通用性较差。

4　无源补偿技术与有源补偿技术相结合

无源补偿技术能从根本上降低谐振器频率对温度的依赖性,且功耗低,但是对于加工工艺要求高且温度补偿范围有限,环境适应性较差。有源补偿技术能够提供更精确的温度补偿,但是会受到功耗、预热时间等的限制。无源补偿技术与有源补偿技术的结合可以协调功耗和温度稳定性之间的权衡,达到更好的温度补偿效果。

2007 年 Hopcroft 等[50] 使用 Si-SiO_2 复合结构谐振器,将谐振器的 Q 值作为温度传感器,控制谐振器的工作温度。使用品质因数 Q 作为温度传感器这种有源温度补偿方法能够以毫度的精度控制谐振器的温度,从而将谐振器的输出频率稳定在大约 0.1×10^{-6};Si-SiO_2 复合结构谐振器作为无源补偿方法降低了谐振器的固有频率温度系数。这种无源技术与有源技术的结合将频率变化降低到约 0.01×10^{-6},并且利用 Q 值测温不消耗功耗,无时间滞后,温度的变化直接反应到 Q 值的变化上,通过反馈控制环路及时进行温度调整,不受周围环境影响,但不可避免地是 Q 值测温需要前期冗长校准且长期稳定性会降低。

2011 年 Lee 等[51] 在 Si-SiO_2 复合结构谐振器中采用静电调谐的方式进行温度补偿,如图 30 所示,实验结果表明在 90℃ 宽的温度范围内,频率的稳定性为 $\pm2.5\times10^{-6}$。传统的静电调谐属于有源温度补偿方法,需要极窄的间隙,对制作工艺要求高,因而很少在封装的 MEMS 谐振器上实现,使用 Si-SiO_2 复合结构谐振器降低了谐振器的频率温度系数,从而放宽了对于窄间隙的要求,克服了传统的静电调谐的弊端。且静电调谐本身具有功耗低的优势,同时可以通过调整直流偏置电压直接进行频率的调整,能够根据环境温度变化做出快速调整,实现温度补偿。

2017 年 You 等[52] 提出了一种烘箱控制的 N++掺杂硅谐振器,使用基于加热电压和环境温度的查找表的控制算法,实现了工业温度范围内 $\pm0.5\times10^{-6}$ 的频率稳定性,如图 31、32 所示。采用简并掺杂的无源技术降低谐振器 TCF,通过烘箱控制这一有源技术加热谐振器将温度保持在周转温度,降低频率温度系数的同时控制恒定温度。需要精确的测温手段和稳定的控制是烘箱控温的弊端之一,当谐振器被简并掺杂补偿以实现非常低的 TCF 时,可以放宽对测温精度和烘箱控制的高要求。

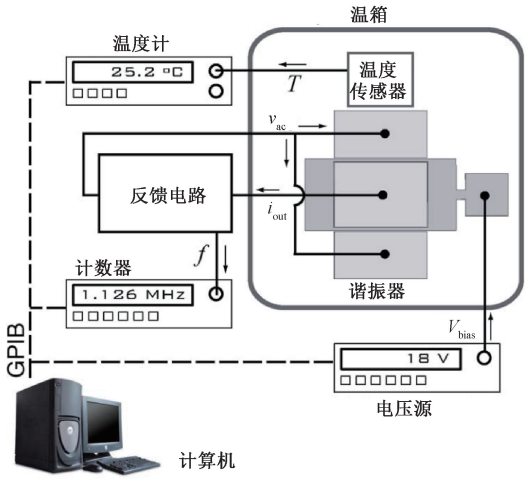


图 30　Si-SiO_2 复合结构谐振器静电调谐[51]

Fig. 30　Si-SiO2 composite resonators electrostatic tuning[51]

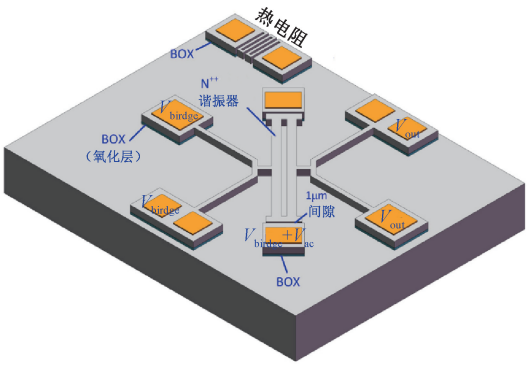


图 31　烘箱控制 N++掺杂硅谐振器[52]

Fig. 31　The oven controls the N++ doped silicon resonator[52]

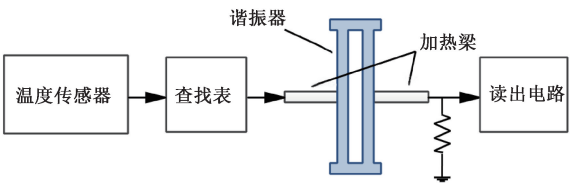


图 32　开环加热控制算法[52]

Fig. 32　The Open-loop heating control algorithm[52]

5　结　　论

硅微谐振式加速度计的关键性能受到温度制约,因此温度补偿成为了国内外研究机构关注的焦点,温度补偿方法主要分为两大类,无源温度补偿技术和有源温度补偿技术,无源温度补偿技术通常包括复合材料结构、简

并掺杂、锚点或隔离框架结构优化,最新提出了一种晶体取向优化的方法,无源补偿技术从设计谐振器组成出发,无需引入额外的硬件电路设计,功耗低,但一旦成型就难以更改,且温度补偿的范围固定有限。有源温度补偿技术通常包括:控制恒定的工作温度、外围电路设计、建立温度模型采用软件算法补偿。其中采用微烘箱系统可以更加精确的进行温度控制,不需要外部复杂的测温设备进行大量测温标定实验,但是缺点在于功耗高、预热时间长。在后续的研究工作中,应继续探索更加精确的测温手段、热隔离效果更好的隔离装置以设计一种低功耗、预热时间短、控制稳定性强的微烘箱系统进行器件层的加热控温,研究准确性、通用性更高的温度模型和优化算法,同时根据无源补偿技术与有源补偿技术的优缺点,探索更多无源补偿技术和有源补偿技术相结合的可能性,寻找到最优组合。

参考文献

[1] 李立新. 2020年中国惯性技术科学发展研究[J]. 2020年中国科学和技术发展研究(下), 2004: 493-503.
LI L X. Research on the development of inertial technology science in China in 2020[J]. Research on China's Science and Technology Development in 2020 (Part II), 2004: 493-503.

[2] HOPKINS R, MIOLA J, SAWYER W, et al. The silicon oscillating accelerometer: A high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance applications[C]. Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2005: 970-979.

[3] MALUF N. An introduction to microelectromechanical systems engineering[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(2): 229-229.

[4] HO G K, SUNDARESAN K, POURKAMALI S, et al. Micromechanical IBARs: Tunable high-Q resonators for temperature-compensated reference oscillators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(3): 503-515.

[5] MELAMUD R, CHANDORKAR S A, KIM B, et al. Temperature-insensitive composite micromechanical resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(6): 1409-1419.

[6] SHEN F, LU P, O'SHEA S J, et al. Thermal effects on coated resonant microcantilevers[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 95(1): 17-23.

[7] SANDBERG R, SVENDSEN W, MØLHAVE K, et al. Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(8): 1454-1458.

[8] MELAMUD R, KIM B, HOPCROFT M A, et al. Composite flexural-mode resonator with controllable turnover temperature[C]. 2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2007: 199-202.

[9] SAMARAO A K, AYAZI F. Temperature compensation of silicon resonators via degenerate doping[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(1): 87-93.

[10] JAAKKOLA A, PRUNNILA M, PENSALA T, et al. Determination of doping and temperature-dependent elastic constants of degenerately doped silicon from MEMS resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(7): 1063-1074.

[11] NG E J, HONG V A, YANG Y, et al. Temperature dependence of the elastic constants of doped silicon[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(3): 730-741.

[12] YIN Y, FANG Z, LIU Y, et al. Temperature-insensitive structure design of micromachined resonant accelerometers[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1544.

[13] CUI J, YANG H, LI D, et al. A silicon resonant accelerometer embedded in an isolation frame with stress relief anchor[J]. Micromachines, 2019, 10(9): 571.

[14] LIU M, CUI J, LI D, et al. A 3 PPM/℃ temperature coefficient of scale factor for a silicon resonant accelerometer based on crystallographic orientation optimization[C]. 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021: 116-119.

[15] CHEN Y, NG E J, SHIN D D, et al. Ovenized dual-mode clock (ODMC) based on highly doped single crystal silicon resonators[C]. 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2016: 91-94.

[16] SALVIA J C, MELAMUD R, CHANDORKAR S A, et al. Real-time temperature compensation of MEMS oscillators using an integrated micro-oven and a phase-locked loop[J]. Journal of Microelectromechanical

Systems, 2010, 19(1): 192-201.

[17] ZHANG H, WEI X, GAO Y, et al. Analytical study and thermal compensation for capacitive MEMS accelerometer with anti-spring structure [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(5): 1389-1400.

[18] CHEN D, WANG Y, CHEN X, et al. Temperature-frequency drift suppression via electrostatic stiffness softening in MEMS resonator with weakened duffing nonlinearity [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(2): 023502.

[19] 徐哲, 刘云峰, 董景新. 基于闭环点位置控制的硅微梳齿式加速度计温漂抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 114-119.
XU ZH, LIU Y F, DONG J X. Temperature drift suppression method of silicon microcomb accelerometer based on closed-loop point position control[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 114-119.

[20] 徐哲, 刘云峰, 董景新. 利用测温电路线性补偿MEMS加速度计零偏温漂[J]. 仪表技术与传感器, 2015(8): 45-47,53.
XU ZH, LIU Y F, DONG J X. Linear compensation of MEMS accelerometer zero bias drift using temperature measurement circuit [J]. Instrument Technology and Sensors, 2015(8): 45-47,53.

[21] MARRA C R, FERRARI F M, LANGFELDER G, et al. Single resonator, time-switched, low offset drift *z*-axis FM MEMS accelerometer [C]. 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), IEEE, 2018: 1-4.

[22] MARRA C R, TOCCHIO A, RIZZINI F, et al. Solving FSR versus offset-drift trade-offs with three-axis time-switched FM MEMS accelerometer [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27 (5): 790-799.

[23] MARRA C R, FERRARI F M, KARMAN S, et al. Single-resonator, time-switched FM MEMS accelerometer with theoretical offset drift complete cancellation [C]. 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Belfast: IEEE, 2018: 117-120.

[24] 符强, 马炳和, 常洪龙. 姿态参照系统中硅微机械加速度计的温度补偿[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 311(1): 12-14,17.
FU Q, MA B H, CHANG H L. Temperature compensation of silicon micromachined accelerometer in attitude reference system[J]. Instrument Technology and Transducers, 2009,311(1): 12-14,17.

[25] 徐哲, 刘云峰, 董景新. 基于相关向量机的MEMS加速度计零偏温漂补偿[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(11): 1558-1562.
XU ZH, LIU Y F, DONG J X. Zero bias drift compensation of MEMS accelerometer based on correlation vector machine [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(11): 1558-1562.

[26] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.
YU X T, ZHANG L, GUO L R, et al. Temperature modeling and compensation of accelerometer based on wavelet least squares support vector machine[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 95-98.

[27] 李志杰, 王卿, 党建军, 等. BP神经网络在半球谐振陀螺仪零偏温度补偿中的应用[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(2): 152-157.
LI ZH J, WANG Q, DANG J J, et al. Application of BP neural network in hemispherical resonant gyroscope bias temperature compensation[J]. Micro-Nano Electronics, 2021, 58(2): 152-157.

[28] 徐哲, 刘云峰, 董景新. MEMS加速度计温漂预测补偿模型[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5): 601-604,610.
XU ZH, LIU Y F, DONG J X. Temperature drift prediction compensation model of MEMS accelerometer[J]. Journal of China Inertial Technology, 2012, 20(5): 601-604,610.

[29] CHUNG V P J, LIN Y C, LI X, et al. Stress-and-temperature-induced drift compensation on a high dynamic range accelerometer array using deep neural networks[C]. 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021: 188-191.

[30] 杨志梅, 周小龙, 徐大诚. 基于LM_BP神经网络模型的MEMS加速度计温度补偿方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 30-33.
YANG ZH M, ZHOU X L, XU D CH. Research on MEMS accelerometer temperature compensation method based on LM_BP neural network model[J]. Instrument

Technology and Sensors, 2015(11): 30-33.

[31] 付红坡, 温云同, 苗风海, 等. 一种新的基于 SCM-ANFIS 的加速度计温度建模与补偿方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(12): 1795-1801.
FU H P, WEN Y T, MIAO F H, et al. A new temperature modeling and compensation method for accelerometer based on SCM-ANFIS[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(12): 1795-1801.

[32] 路永乐, 潘英俊, 任春华, 等. 基于小波包-神经网络的 MEMS 加速度计零漂补偿[J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 27-31.
LU Y L, PAN Y J, REN CH H, et al. MEMS accelerometer zero drift compensation based on wavelet packet-neural network[J]. Piezoelectricity & Acousto-Optics, 2015, 37(1): 27-31.

[33] 王法亮, 徐大诚. 基于 PSO-BP 神经网络的 MEMS 加速度计温度补偿[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2): 19-22.
WANG F L, XU D CH. Temperature compensation of MEMS accelerometer based on PSO-BP neural network[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2019, 38(2): 19-22.

[34] 张含, 丁徐锴, 李宏生. 硅微谐振式加速度计温漂补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 8-11.
ZHANG H, DING X K, LI H SH. Study on temperature drift compensation of silicon micro resonant accelerometer[J]. Transducer and Microsystem, 2021, 40(5): 8-11.

[35] YANG D, WOO J K, LEE S, et al. A micro oven-control system for inertial sensors[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(3): 507-518.

[36] 於陈程, 张俊辉, 李永亮, 等. 硅微谐振式加速度计温度效应标定与补偿[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(6): 476-482,497.
YU CH CH, ZHANG J H, LI Y L, et al. Temperature effect calibration and compensation of silicon microresonant accelerometer[J]. Micro-Nano Electronics, 2020, 57(6): 476-482,497.

[37] 张晶. 基于圆片封装的硅微谐振式加速度计温度特性与补偿算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
ZHANG J. Research on temperature characteristics and compensation algorithm of silicon micro-resonant accelerometer based on wafer package[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[38] 董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
DONG J H. Study on temperature characteristics of silicon micro resonant accelerometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[39] 王增跃, 李孟委, 刘国文. 硅微加速度计温度特性分析与误差补偿[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(1): 25-28.
WANG Z Y, LI M W, LIU G W. Temperature characteristic analysis and error compensation of silicon micro accelerometer[J]. Transducer and Microsystem, 2016, 35(1): 25-28.

[40] HOPCROFT M A, AGARWAL M, PARK K K, et al. Temperature compensation of a MEMS resonator using quality factor as a thermometer[C]. 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2006: 222-225.

[41] 李亨. 基于温敏结构的硅微谐振式加速度计温度补偿技术研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
LI H. Research on temperature compensation technology of silicon micro-resonant accelerometer based on temperature-sensitive structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[42] KIM B, HOPCROFT M A, CANDLER R N, et al. Temperature dependence of quality factor in MEMS Resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(3): 755-766.

[43] HUANG L, YANG H, GAO Y, et al. Design and implementation of a micromechanical silicon resonant accelerometer[J]. Sensors, 2013, 13(11): 15785-15804.

[44] SHI R, ZHAO J, QIU A P, et al. Temperature self-compensation of micromechanical silicon resonant accelerometer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 373: 373-381.

[45] XIAO D, LI Q, HOU Z, et al. A double differential torsional micro-accelerometer based on V-shape beam[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 258: 182-192.

[46] SHIN D D, AHN C H, CHEN Y, et al. Environmentally robust differential resonant accelerometer in a wafer-scale

encapsulation process[C]. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2017: 17-20.

[47] ZHAI D H, LIU D C, HE C H, et al. A resonnat accelerometer based on ring-down measurement [C]. 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), IEEE, 2015: 1125-1128.

[48] SHIN S, WEN H, KWON H K, et al. A dual-axis resonant accelerometer based on electrostatic stiffness modulation in epi-seal process[C]. 2019 IEEE Sensors, IEEE, 2019: 1-4.

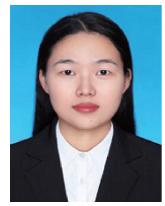
[49] SALVIA J, MESSANA M, OHLINE M, et al. Exploring the limits and practicality of Q-based temperature compensation for silicon resonators [C]. 2008 IEEE International Electron Devices Meeting, IEEE, 2008: 1-4.

[50] HOPCROFT M A, LEE H K, KIM B, et al. A high-stability MEMS frequency reference [C]. TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, IEEE, 2007: 1307-1309.

[51] LEE H K, MELAMUD R, KIM B, et al. Electrostatic tuning to achieve higher stability microelectromechanical composite resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(6): 1355-1365.

[52] YOU W, PEI B, SUN K, et al. Oven controlled N ++ [1 0 0] length-extensional mode silicon resonator with frequency stability of 1 ppm over industrial temperature range [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27(9): 095002.

作者简介



蒋金玲,2021 年于江苏大学获得学士学位,现为南京理工大学硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 惯性器件。

E-mail: Jiangjinling1999_3@163.com

Jiang Jinling received her B. Sc. degree from Jiangsu University in 2021. She is currently a master student at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interest is MEMS inertial devices.

张晶(通信作者),2012 年于南京理工大学获得学士学位,2019 年于南京理工大学获得博士学位,现为南京理工大学机械工程学院讲师,主要研究方向为 MEMS 惯性传感器设计、微系统动力学分析、微机电系统信号处理、环境适应性与可靠性研究等。

E-mail: zhangjing@njust.edu.cn

Zhang Jing (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2012 and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2019. She is currently a lecturer with the School of Mechanical Engineering at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interests include MEMS inertial sensor design, microsystem dynamics analysis, signal processing of microelectromechanical systems, environmental adaptability and reliability research.