

无线无源力/热传感器与测试技术研究现状*

谭秋林^{1,2}, 刘佳佳^{1,2}, 王宁^{1,2}, 樊磊^{1,2}, 张磊^{1,2}, 冯瑞^{1,2}

(1. 微纳器件与系统教育部重点实验室 太原, 030051)

(2. 省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原, 030051)

摘要 针对力热传感器多数采用有线有源的技术方案,难以适用于高温、高压、强振以及机械动力旋转部件等环境下的力热参数原位测试问题,阐述了进行无线无源传感器研究的重要意义,并对声表面波(surface acoustic wave, 简称SAW)传感器、LC谐振互感耦合传感器以及超材料传感器等3类无线无源力热传感器进行了总结及现状分析。首先,描述了无线无源力热传感器的需求情况;其次,介绍了3类传感器的工作原理、传感性能及其在独特场景下的具体应用;最后,讨论了无线无源传感器发展过程中的瓶颈问题,指出了未来可能改善和提升的发展方向。

关键词 无线无源传感器;高温环境;高旋环境;振动测量

中图分类号 TH113;TB9

引言

随着传感技术的发展,传感器被广泛应用于航空航天、装备制造、金属冶炼及能源开采等领域,这些环境下的参数测试都伴随着高温、高旋、强振等制约因素。常规传感器难以满足高温、高旋环境中力热参数的原位实时监测,这是因为在旋转环境下,传统的有线传感器和被测旋转部件之间难以建立固定的有线连接^[1]。此外,在高温环境下有源元件失效,进而导致传统传感器无法长期正常工作。无线无源传感器可以实现在高温、高旋工况下的力热参数原位测试,具有广阔的应用前景。

笔者归纳总结了3类无线无源力热传感器,从不同类型传感器的原理、传感性能及应用等方面进行综述,并对无线无源传感器的未来发展趋势和前景进行了展望。

1 无线无源力/热传感器需求分析

高温、高旋、强振等恶劣环境下的无线无源力热参数获取,对航空航天、装备制造、特种冶金以及能源开采等领域的发展有重要意义。例如,燃气涡轮发动机^[2]在工作过程中表面温度可达2 000 °C,在强大的气流作用力及高温的持续作用下,涡轮叶片表

面可能会发生损伤,而叶片的质量对整个发动机的可持续使用时间有重要影响。因此,采用无线无源传感器对涡轮叶片力热参数的实时原位测试十分重要^[3]。力热参数测试需求典型场景如图1所示。



图1 力热参数测试需求典型场景

Fig.1 Typical scenario of force and heat parameter testing requirements

在装备制造领域,轴承作为必不可少的旋转部件,一旦其出现故障,与之相连的区域内的运动部件将无法正常工作,进而对财产及生命安全造成严重威胁^[4]。因此,对轴承进行健康监测是保证机械设备安全性和可用性的必要措施。

在特种冶金行业,高炉炉温、连铸铸坯温度以及电炉、转炉冶炼过程中温度可达1 000 °C以上,并产生较大的热应变。尤其是板坯连铸工艺环节,对特种冶金生产的质量具有决定性作用,需要对生产过程中的温度、压力及应变等参数进行实时监测^[5]。

* 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3209104, SQ2023YFB3200238);山西省重点研发计划资助项目(202102030201005)
收稿日期:2024-03-25;修回日期:2024-04-03

在能源开采领域,通过对关键设备参数的实时检测,便于调整各项开采工作,提升能源开采效率^[6]。

上述领域的高温、高旋、狭小空间等特殊环境对传感器的发展提出了新的要求。与传统的有线有源器件相比,无线无源传感器在高温、高旋以及振动等恶劣环境下对各参数测试具有显著优势。

2 声表面波传感器及其测试技术

声表面波传感器具有体积小、灵敏度高、稳定性好、频率选择性强及对环境的变化反应速度快等优点,特别适用于极端恶劣环境下的实时监测^[7]。声表面波传感器对于测量参数的获取具有重要意义,常用于温度、应变、压力及振动等方面的测量^[8]。

2.1 声表面波温度传感器

声表面波温度传感器可以用于外界温度变化的检测。当传感器暴露在高温环境中时,基底材料会受到热应力的影响使其属性发生变化,进而导致频率的变化,同时也影响了声表面波的传播速度。通常以频率表示SAW温度传感器的传感特征,通过测量频率的偏移来反映温度的变化情况^[9]。

国内外学者研究了基于SAW原理的耐高温温度传感器。Zheng等^[10]以Pt为电极,并将偶极子天线连接到叉指换能器(interdigital transducer,简称IDT)发射机终端,使得声表面波传感器实现了700℃的高温无线测试。Behanan等^[11]使用Pt-Rh/HfO₂ IDT电极、原子层沉积Al₂O₃界面和覆盖层制作的SAW谐振器在1100℃下工作2h以上。偶极子天线集成和多层复合薄膜SAW谐振器如图2所示。

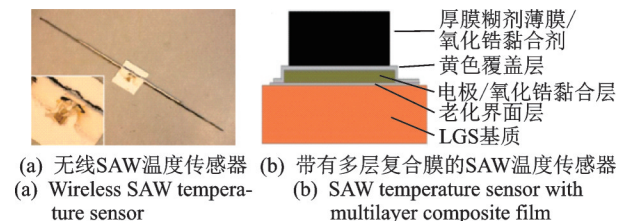
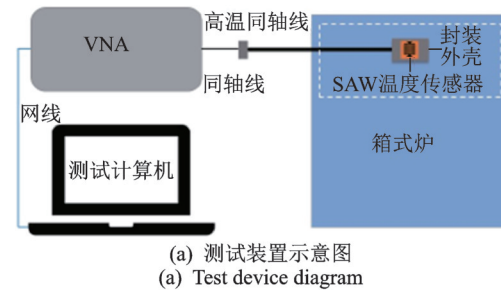


图2 偶极子天线集成和多层复合薄膜SAW谐振器

Fig.2 Dipole antenna integration and multi-layer composite thin film SAW resonator

王博文等^[12]采用耐高温的压电材料CTGS作为压电基底,通过脉冲激光沉积技术在压电基底表面制备Al₂O₃/ITO/Pt/Al₂O₃多层薄膜作为电极,测

试结果表明,所制作的SAW温度传感器可以在1000℃环境中持续工作5h。沟槽电极型声表面波耐高温谐振器如图3所示。张启轮等^[13]设计了一种Pt作为电极、硅酸镓镧(La₃Ga₅SiO₁₄,简称LGS)作为压电基底的耐高温SAW谐振器,并提出了沟槽结构叉指电极的制造工艺,使得谐振器可以在1000℃下稳定工作。



(a) 测试装置示意图
(a) Test device diagram



(b) 测试装置实物图

(b) Test device physical drawing



(c) 封装后SAW温度传感器实物图

(c) SAW physical picture of the temperature sensor after packaging

图3 沟槽电极型声表面波耐高温谐振器

Fig.3 Grooved electrode type surface acoustic wave high temperature resistant resonator

2.2 声表面波压力传感器

当外力作用于压电材料时,其内部应力发生变化。压电材料的非线性弹性、弹性常数及密度等特性均随外力作用发生变化,并影响SAW的传播波速。同时,压电材料膜表面也发生形变,谐振器的结构尺寸随之发生改变,从而引起波长变化,最终实现压力的测量。

文献[14]提出一种氮化铝(aluminum nitride,简称AlN)基的声表面波压力传感器,并实验研究了膜片形状对该压力传感器灵敏度的影响,结果表明,膜片的形状影响纵向/横向应变比,通过改变晶片平面、SAW传播方向和纵向/横向应变有助于增强主应变效应,能最大限度地减少反向应变。文献[15]提出了一种SAW压力传感器,其在0~3×10⁵Pa的压力范围内工作,利用在石英膜上以大约393MHz工作的2端口SAW谐振器获得高分辨率值(3.5Pa)。传感器和调节电子设备照片见图4。

薛涛^[16]设计了硅酸镓镧基的声表面波压力传感器,选择Pt作为电极材料,使用双通道温度补偿方

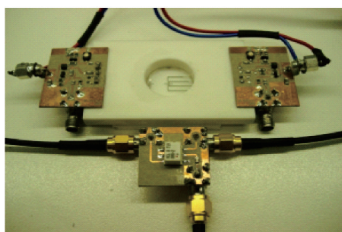


图4 传感器和调节电子设备照片

Fig.4 Photo of the sensor with the conditioning electronics

法使得传感器在1 000 °C时压力灵敏度为137 Hz/kPa。基于AIN的声表面波压力传感器如图5所示。万江^[17]制作了基于AIN压电薄膜材料的声表面波压力传感器,通过改变压力敏感膜的厚度和尺寸提高了传感器的耐高压、耐高温能力。声表面波压力传感器实物图如图6所示。

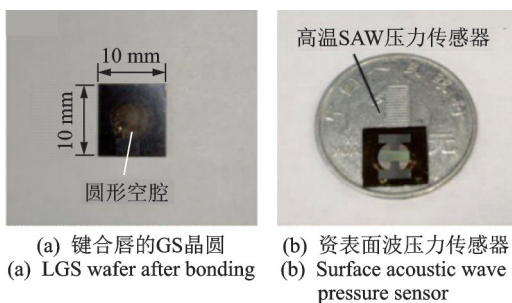


图5 基于AIN的声表面波压力传感器

Fig.5 Surface acoustic wave pressure sensor based on AIN

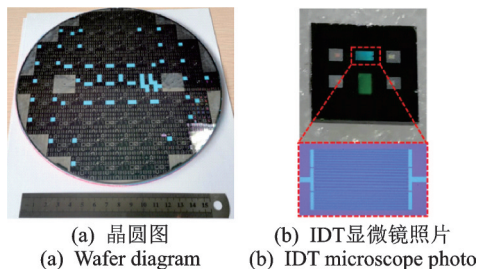


图6 声表面波压力传感器实物图

Fig.6 Surface acoustic wave pressure sensor physical image

2.3 声表面波应变传感器

应变传感器处于高温等恶劣环境中时,由压电效应产生的声表面波被限制在压电衬底的1个或2个波长深度内,因此对外界扰动非常敏感。受到外力影响时,压电基板材料的特性以及叉指换能器的螺距会发生变化,导致传感器谐振频率的偏移,这一特性已被用于开发基于SAW的应变传感器方面^[18]。

笔者团队针对高温、高旋环境下部件健康监测的需求,设计了一种背部带有凹槽的基于硅酸镓镧的声表面波应变传感器^[19]。通过COMSOL软件建

立应变传感器模型,对应变传感器表面应变分布情况及传感器灵敏度进行仿真,确定了制备传感器的最佳模型参数。同时,通过对传感器施加不同的温度场,得到了传感器的应变灵敏度随温度的变化规律。当温度变化到1 000 °C时,传感器的应变灵敏度也相应增大。

Shu等^[20]提出了一种新型的声表面波高温应变传感器,在欧拉角分别为(0°, 138.5°, 117°)和(0°, 138.5°, 27°)的硅酸镓镧基底上制备了声表面波谐振器。温度的测量范围为20~500 °C,应变的测量范围为0~400 $\mu\epsilon$ 。2种SAW传感器的应变因子均随环境温度的升高而增大,且沉积在欧拉角为(0°, 138.5°, 117°)基底上的SAW传感器对施加应变更敏感。Li等^[21]提出基于LGS的声表面波高温应变传感器,如图7所示。在同一切向基底上制备了3个应变传感器,通过等截面悬臂梁对应变传感器进行标定。将3个传感器沿着声表面波的传播方向与施加应变方向平行的、垂直的以及成30°的3个方向黏贴在悬臂梁上,分别测试3个传感器在0~700 $\mu\epsilon$, 0~250 °C范围内对温度和应变的响应,根据3个应变传感器提出温度应变解耦算法。结果表明,测试应变可由3个传感器的频移线性来表示,实现了温度应变的精确测量。

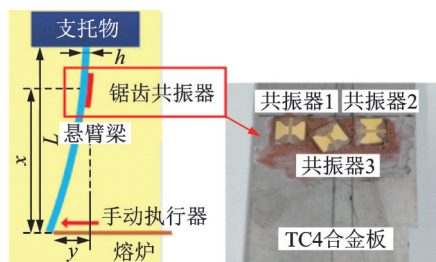


图7 基于LGS的声表面波高温应变传感器

Fig.7 Surface acoustic wave high-temperature strain sensor based on LGS

2.4 声表面波振动传感器

SAW振动传感器的敏感元件为位于梁上的SAW谐振器,其具有基础电学谐振频率 f_0 。

当外界发生振动时,SAW振动传感器的梁产生应变 ϵ ,导致声表面波传播路径上的相速度 v 与波长 λ 发生改变,从而引起SAW谐振器的电学谐振频率 f 变化^[22]。因此,可以用该变化来表征外界振动。

Maskay等^[23]在镍基合金悬臂梁上黏贴硅酸镓镧SAW传感器进行高温振动测试,实现了500 °C的振动频率与幅值测量。振动高温实验装置如图8所

示。Merkulov等^[24]将SAW传感器黏贴在旋转体上模拟旋转振动环境无线测试,以实现多路SAW传感器集成系统在高温电力行业的应用。

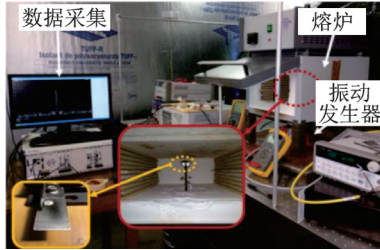
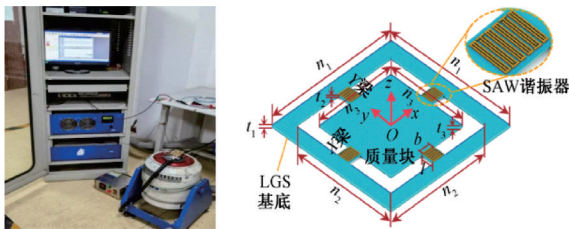


图8 振动高温实验装置

Fig.8 Vibration high temperature experimental device

郭欣榕^[25]设计了一种基底为LGS材料的声表面波温度-加速度传感器,测量温度可高达450℃,实现了较高温度的温度加速度测量。张娟等^[26]提出一种基于四端固支梁对称结构的LGS声表面波高温振动传感器,采用算法优化设计,可实现高灵敏度、宽频段等特性,最高耐温可达800℃。高灵敏度声表面波振动传感器如图9所示。



(a) 温度加速度混合测试平台
(a) Temperature acceleration hybrid test platform

(b) SAW振动传感器
(b) SAW Vibration sensor

图9 高灵敏度声表面波振动传感器

Fig.9 High sensitivity surface acoustic wave vibration sensor

SAW集成传感器具有多参共面集成、耐高温等优点,可以实现对采集的数据实时处理与解耦。因此,SAW集成传感器及其测量系统可以用于恶劣环境下高端装备实时故障诊断及健康监测,但其一般需要额外设计信号传输天线,限制了整个传感系统的小型化。

3 LC传感器及其测试技术

LC传感器是一种基于电感和电容原理的传感器。当外界环境发生变化,引起传感器电容值和电感值改变,从而改变了传感器的谐振频率。其具有响应快的特点,能够快速捕捉环境变化并输出相应的信号。

3.1 LC温度传感器

LC谐振传感器在温度变化的环境中,其电感和电容的数值会随温度发生相应的改变,进而影响LC振荡电路的频率,可以用于环境温度变化的检测。

笔者团队设计的基于平面LC谐振回路的无线无源温度传感器,最高测试温度可达900℃,最远测试距离约为10mm^[27]。Radovanovic等^[28]设计出一种新式结构的LC谐振式温度传感器,其主要由平面螺旋电感及平面叉指电容结合而成,两者并行连接,形成LC谐振回路。

笔者团队将一种基于谐振电路的无线无源温度传感器制作在多层高温共烧陶瓷(high temperature co-fired ceramic,简称HTCC)带上,并采用无线耦合方式用天线进行测量^[29],测试实物图如图10所示。测试结果表明,该传感器从室温到900℃的温度范围内表现出稳定的性能,与其他类型的无线无源温度传感器相比,具有高灵敏度、良好的重复性和可靠性等优点。

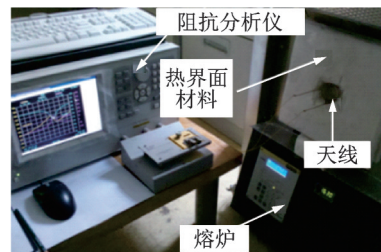


图10 采用无线耦合方式的测试实物图

Fig.10 Test object with wireless coupling

王渊朝等^[30]设计了一种基于高介电常数陶瓷基板的无线无源LC谐振温度传感器,采用电感耦合的方式无线测试了传感器在不同温度下的特性,结果表明,该传感器的谐振频率随着温度的升高向低频方向移动,当温度为125℃时,谐振频率降为0.95MHz左右。基于陶瓷基板的LC温度传感器如图11所示。

丁利琼等^[31]提出了基于LC谐振原理的陶瓷材料的非共烧无线无源温度传感器的理念,设计出其

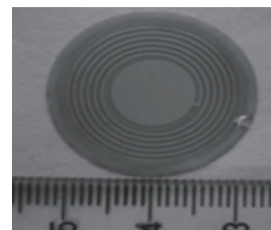


图11 基于陶瓷基板的LC温度传感器

Fig.11 LC temperature sensor based on ceramic substrate

结构模型参数,并在室温至 700 °C 的温度环境下进行了 3 次性能测试。非共烧无线无源温度传感器测试平台如图 12 所示。结果表明,3 次测试谐振频率都随着温度的升高而降低,显示出较好的稳定性。由 3 次测试数据可推算出 3 次重复出现错误的概率为 5.47%。当温度在 430 °C 以下时,传感器的灵敏度为 -5.75 kHz/°C;当温度上升到 700 °C 时,灵敏度达到 -16.67 kHz/°C。



图 12 非共烧无线无源温度传感器测试平台
Fig.12 Non-co-fired wireless passive temperature sensor test platform

笔者团队通过高温烧结技术获得了总体尺寸为 28 mm×28 mm×0.47 mm 的氧化铝陶瓷基板,结合厚膜技术在该基板上印刷无源 LC 串联谐振电路,设计并制备了一种基于氧化铝陶瓷的无线无源温度传感器^[32],如图 13 所示。在 18~300 °C 的温度范围内进行传感器的无线测试,结果表明,该温度传感器呈现出良好的线性特征,线性范围大且非线性误差小,其谐振频率对温度的灵敏度约为 2.75 kHz/°C,可应用于高温恶劣环境下的温度检测。

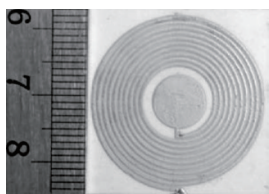


图 13 基于氧化铝陶瓷的无线无源温度传感器
Fig.13 Physical picture of wireless passive temperature sensor based on alumina ceramics

3.2 LC 压力传感器

LC 压力传感器是一种基于电容变化原理的压力传感器,一般包含 2 个平行的金属电极。当外部施加压力时,电极之间的电容会发生变化,通过测量电容的变化可以确定外部施加的压力大小。

Radosavljevic 等^[33]提出了一种完全嵌入式谐振器压力传感器,其利用低温共烧陶瓷(low temperature co-fired ceramic,简称 LTCC)技术工作在兆赫

兹范围内。在常温环境下对 LC 无线无源压敏传感结构进行了灵敏度和线性度的优化和设计,并得知 LTCC 材料的弹性模量增大则传感器的灵敏度将减小。笔者团队研制出一种将 LC 压力传感器埋入陶瓷中,以降低传感器在高温环境下的温漂以及无排气孔的碳膜挥发技术^[34]。实验表明,环境温度每变化 1 °C,传感器的频率偏移 0.75 kHz,其灵敏度为 3.1×10^6 kHz/Pa,在压力范围内大气压至 6×10^6 Pa,极大地优化了 LTCC 传感器的性能。

Yang 等^[35]研发了一种基于低温共烧陶瓷的无线无源压力传感器,其测试图如图 14 所示。该传感器可以等效为一个 LC 谐振电路,具有一个平面螺旋电感和一个数字间电容电连接。实验结果表明,传感器的谐振频率随压力的增大而减小;压力的变化转化为传感器谐振频率的移位,可以无线检测信号。该传感器可用于高温、密闭空间和旋转组件环境。

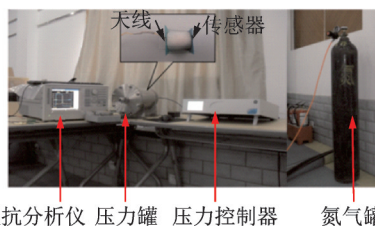


图 14 基于低温共烧陶瓷的无线无源压力传感器测试图
Fig.14 Test diagram of wireless passive pressure sensor based on low-temperature co-fired ceramics

郑庭丽等^[36]利用低温共烧陶瓷 LTCC 技术,分别设计和制作了陶瓷基片上电感及电容器件,并进行高温特性测试。基于低温共烧陶瓷 LTCC 技术的测试系统如图 15 所示。测试结果表明:在 100~500 °C 温度范围内,电感 L 基本保持不变,等效串联电阻 R 增大了 2.7 倍,电容 C 增大了 5.3%,则 LC 谐振传感器的品质因数 Q 减小了 72.8%。

文献[37]研究发现,LC 谐振式传感器在高温下的测试随温度升高会发生信号衰减、频带变宽等现

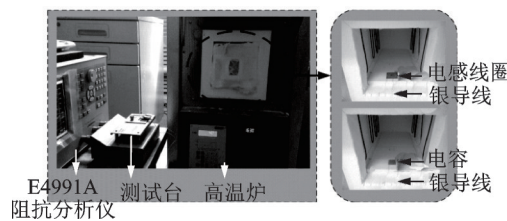


图 15 基于低温共烧陶瓷 LTCC 技术的测试系统
Fig.15 Test system based on LTCC technology for low-temperature co-fired ceramics

象,并通过 Matlab 软件理论分析了各个因素对信号衰减的影响,得出传感器寄生电阻是信号衰减的主要原因^[37]。笔者团队制作了电感线圈和电容陶瓷片模型,并在 500 °C 范围内进行测试,结果显示,电感线圈寄生电阻值增加了 6.7 Ω,极板电容值增加了 0.55 pF,说明寄生电阻是信号读取衰减的主要原因。LC 谐振式传感器陶瓷高温测试如图 16 所示。

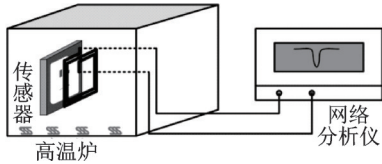


图 16 LC 谐振式传感器陶瓷高温测试

Fig.16 LC resonant sensor ceramic high temperature test

王海星^[38]提出一种陶瓷封装的 HTCC 高温压力传感器,通过陶瓷机械精加工工艺制备了封装结构,完成了传感器的封装,并对其进行了压力测试。陶瓷封装结构测试平台如图 17 所示。测试结果显示,传感器谐振频率随压力变化表现出良好的线性度,其压力灵敏度约为 4.58×10^4 MHz/Pa。在 25~700 °C 对封装结构进行了 4 次重复高温测试,多次测试重复性良好,证明了封装结构具有较高的可靠性。在 700 °C 时传感器仍有约 7 dB 的信号,说明传感器的陶瓷封装结构能够在 700 °C 以上高温环境中工作。

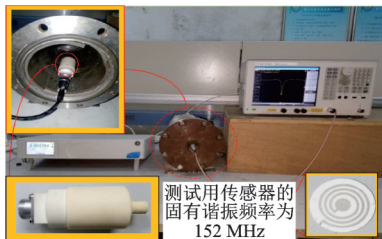


图 17 陶瓷封装结构测试平台

Fig.17 Ceramic package structure test platform

3.3 LC 应变传感器

LC 振动传感器原理是通过测量振动引起的电感和电容的变化来检测振动信号。当传感器受到振动时,会导致电感和电容的数值发生变化,进而产生对应的电信号输出。

Yamada 等^[39]提出了一种基于碳纳米管的应变传感器,该薄膜传感器在拉伸时能测量 280% 的应变,能以 10.6 mm/s 的速度在 5%~100% 应变范围内循环,恢复时间仅为 5 s。该传感器也可应用到娱

乐、运动以及虚拟现实等领域,促进可穿戴设备的发展。Ramalingame 等^[40]提出了一种基于多壁碳纳米管-石墨烯复合纳米材料的温度自补偿应变传感器,经过测试可知,该材料构成的传感器灵敏度为 0.022 Ω/°C,可以在 100 个循环周期内表现出良好的稳定性,通过测试显示其应变灵敏系数高达 16.21,性能优异。

Jia 等^[41]研发了一种带有新型封装蛇形螺旋电感的 LC 应变传感器,传感器的螺旋线圈由蛇形线形成,以此降低径向刚度,并采用具有高泊松比的材料进行封装。当对该封装电感施加轴向变形时,由于径向刚度较低,螺旋线圈的横截面积将发生明显变化,进而引发电感以及 LC 谐振频率的变化,以此增强 LC 应变传感器灵敏度。该蛇形螺旋电感传感器的灵敏度达到 121.9 kHz/0.01ε,高于传统的螺旋电感传感器。电感敏感型 LC 应变传感器如图 18 所示。

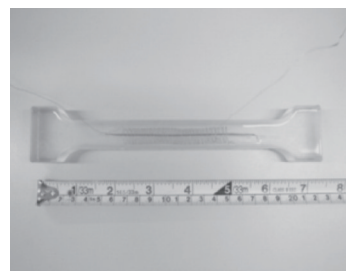


图 18 电感敏感型 LC 应变传感器

Fig.18 Induction-sensitive LC strain sensor

笔者团队提出了一种基于 LC 的无线无源柔性应变传感器^[42],如图 19 所示。该传感器由 PI 薄膜电镀铜制成,制备工艺简单,成本较低。通过应变测试平台测试了传感器的应变范围和应变分辨率,结果表明,此应变传感器能够在 0~2 500 με 的应变范围内工作,其应变灵敏度为 7.6 Hz/με,具有良好的稳定性。

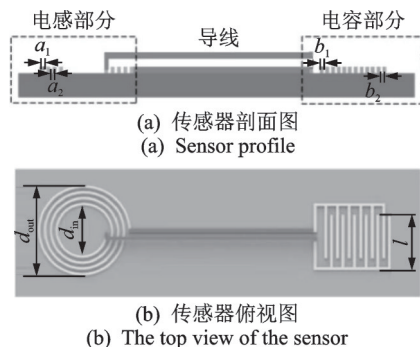


图 19 基于 LC 的无线无源柔性应变传感器

Fig.19 Wireless passive flexible strain sensor based on LC

郝竹雅^[43]提出使用 LC 无线无源应变传感器来进行轴承的应变测量,在 HFSS 软件中对传感器进行建模。天线直径为 30 mm,与电感线圈的外径相等,可以让磁感线最大程度地通过电感线圈。对天线施加激励,通过快速扫频确定 LC 传感器在自由空间中谐振频率为 40.52 MHz,对应的反射系数 S_{11} 为 -27.2 dB。LC 无线无源应变传感模型如图 20 所示。

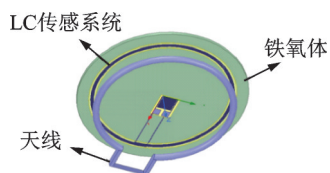


图 20 LC 无线无源应变传感模型

Fig.20 Wireless passive strain sensing model

文献[44]提出一种柔性应变传感器,通过电磁耦合方式实现信号的无线监测,具有无需供电的特性,可通过谐振频率的变化来监测装备应变。通过建立应变测量平台,测试无线无源应变传感器叉指电容的电容值,测试结果表明,叉指电容的电容值随应变的增大而减小,符合预期结果。柔性应变传感器测试示意图如图 21 所示。应变传感器量程及分辨率检测结果表明,该无线无源应变传感器能够在 0~3 000 $\mu\epsilon$ 范围内平稳运行,应变分辨率达 20 $\mu\epsilon$ 。

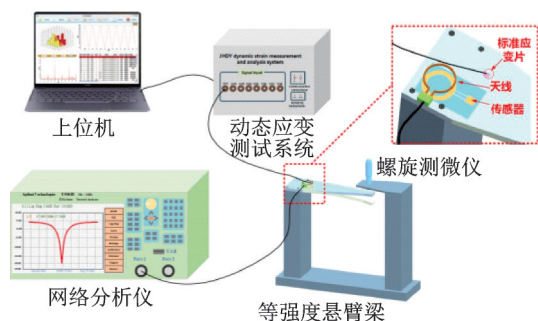


图 21 柔性应变传感器测试示意图

Fig.21 Test diagram of flexible strain sensor

3.4 LC 振动传感器

LC 振动传感器的工作原理是通过测量振动引起的电感和电容的变化来检测振动信号。国产的典型器件可以在 450 °C 环境下稳定工作,国外的器件甚至可在 700 °C 条件下工作。瑞士 Vibrometer 公司生产的型号为 CA250M8XX 的传感器,主要利用电气石的纵向效应原理制成,耐高温压电加速度传感器能够承受最高 760 °C 的高温。随着微机电系统 (micro-electro-mechanical system, 简称 MEMS) 技

术的发展及保温隔热材料性能的提高,国内的高温环境测量技术发展迅速,耐高温传感器种类也较多^[45]。上海硅酸盐研究所研制了一种中心压缩式压电加速度传感器,并对其隔热结构进行了改进,改进后的压电加速度传感器可在 450 °C 的温度下对加速度进行测量。

刘鹏飞^[46]设计了一种耐高温加速度传感器,该传感器采用 LC 耦合谐振原理实现传感器与检测电路之间的非接触式信号传输,并通过高温热防护使传感器能够在高温环境下正常工作 0.5 h,工作温度最高可达 1 250 °C。该传感器的酒精喷灯实验图如图 22 所示。

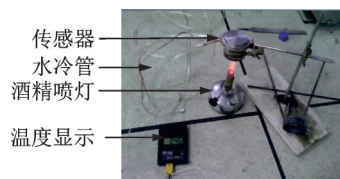


图 22 酒精喷灯实验图

Fig.22 Alcohol blowtorch test diagram

张驰^[47]研究了 LC 多参数无源无线传感器在轴承上的应用,多参数电路的加速度测试如图 23 所示。将多参数传感电路竖直贴在箱子上,重力会有竖直向下的 1 g 加速度,通过旋转传感器电路可以对加速度计施加 $\pm 1 g$ 范围内的加速度,从而实现静态下的加速度测量。

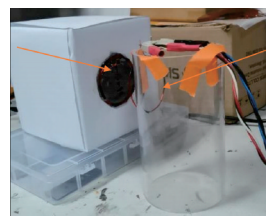


图 23 多参数电路的加速度测试

Fig.23 Acceleration test of multi-parameter circuit

LC 耦合式谐振传感器具有结构简单、易于集成和数据传输率高等优点,然而较低的 Q 值和近场耦合特性使其无法适用于远距离信号的传输,因此应用场合受到了限制。

4 超材料传感器及其测试技术

超材料是一类具有特殊性质的人造材料,具有自然界材料不具备的特性^[48]。基于超材料的传感器不仅 Q 值、灵敏度更高,而且拥有更加优良的抗干扰性能,以及更高的工作频率与带宽,可以实现远距离信号定向传输^[49]。

4.1 超材料温度传感器

对于超材料温度传感器,当外界温度变化时,传感器衬底的介电常数也会随之变化,从而引起谐振频率的偏移。通过检测谐振频率的偏移可以得到温度与谐振频率的变化关系。超材料温度传感器工作原理如图 24 所示。

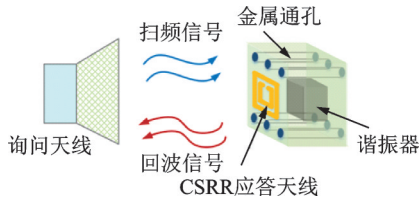


图 24 超材料温度传感器工作原理

Fig.24 Working principle of metamaterial temperature sensor

达姆斯塔特工业大学的研究人员将射频标签与半圆柱型陶瓷基底结合,制作了射频标签温度传感器^[50],如图 25 所示。该传感器在环境温度发生变化时陶瓷基底材料介电常数会发生变化,从而导致射频标签的谐振频率发生偏移,再将谐振信号通过喇叭天线进行信号传输,实现了 25~370 °C 的温度测试。

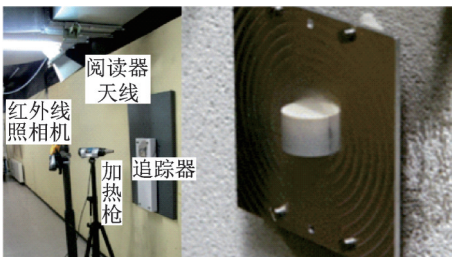


图 25 达姆斯塔特工业大学研制的射频标签温度传感器
Fig.25 Radio frequency tag temperature sensor developed by Darmstadt University of Technology

美国中佛罗里达大学的研究人员研制了一种温度传感器^[51],如图 26 所示。该传感器将陶瓷基底与缝隙天线结合,利用缝隙天线进行信号的接收和发送,实现了 1 000 °C 范围内的温度检测,且温度灵敏度达到了 380 kHz/°C。

在国内,中北大学多年来致力于高温超材料传感方面的研究。Xiong 等^[52]将缝隙天线集成在 HTCC 基底上,制作了一种超材料温度传感器,该传感器利用缝隙天线与波导天线之间的信号耦合,实现了 800 °C 的温度检测。笔者团队提出使用分离谐振环作为传输天线,制备了平面薄膜型无线无源高温传感器^[53],实现了当温度从 28 °C 升高至 1 100 °C

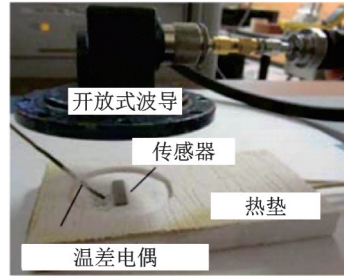


图 26 美国中佛罗里达大学研制的高温传感器
Fig.26 High temperature sensor developed by the University of Central Florida in the United States

时,谐振频率从 2.417 GHz 降低至 2.320 GHz,其平均灵敏度为 95.63 kHz/°C。中北大学设计的高温传感器如图 27 所示。

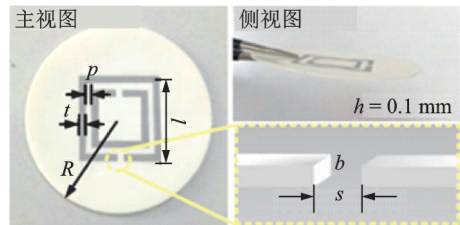


图 27 中北大学设计的高温传感器
Fig.27 High temperature sensor designed by North Central University

4.2 超材料压力传感器

高温超材料压力传感器中的谐振腔在受到压力时,敏感膜会发生形变,导致谐振腔电容发生变化,从而谐振频率发生变化,通过检测谐振频率的偏移就可得出谐振频率与压力的关系。

美国中佛罗里达大学的研究人员将贴片天线、缝隙天线集成于凹形压力谐振腔,制作了微波压力传感器^[54],如图 28 所示。凹形腔谐振器受缝隙天线激励而发生谐振,腔体受压时,缝隙天线将信号耦合到微带天线进行传输。实验表明,该传感器实现了距离为 15 mm、温度为 800 °C 及 5 N 的接触式压力测试。

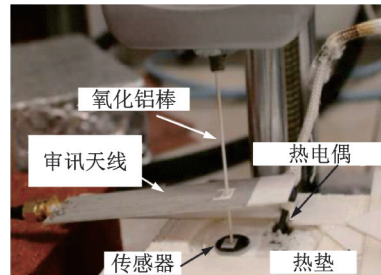


图 28 美国中佛罗里达大学研制的微波压力传感器
Fig.28 Microwave pressure sensor developed by the University of Central Florida in the United States

马来西亚国立大学的研究人员在介质板两侧制备了六角形金属超材料结构,研制了微波压力传感器^[55],如图 29 所示。施加压力时会引起传感层电容发生变化,导致超材料传感器透射和反射的变化,从而实现压力测量。

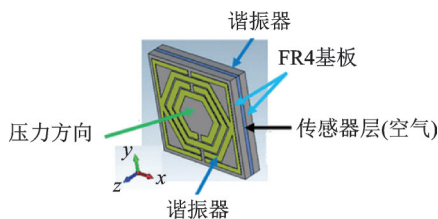


图 29 马来西亚国立大学研制的微波压力传感器

Fig.29 Microwave pressure sensor developed by National University of Malaysia

寇海荣^[56]设计了一种基于互补分离谐振环 (complementary split ring resonators, 简称 CSRR) 结构的高温压力传感器,实现了 10 kPa~300 kPa 压力环境下压力信号的无线拾取。实验表明,该传感器在 25 °C 下的压力灵敏度为 106.89 kHz/kPa,在 800 °C 超高温下的压力灵敏度为 206.89 kHz/kPa。基于 CSRR 结构的高温压力传感器如图 30 所示。

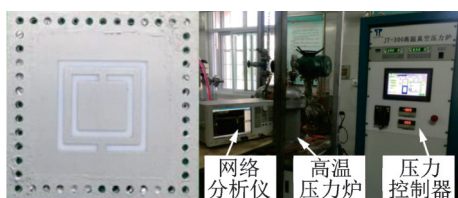


图 30 基于 CSRR 结构的高温压力传感器

Fig.30 High temperature pressure sensor based on CSRR structure

4.3 超材料应变传感器

超材料应变传感器在受到外界应力时,金属结构之间的电容发生变化,继而会引起谐振腔谐振频率变化,通过检测谐振频率的频移就可以得出金属结构的位移和谐振频率的关系,从而实现应变参数的无线拾取。

Großmann 等^[57]设计了一种双层超材料应变传感器,如图 31 所示。该传感器的单元为上下两层十字形结构,将单元结构进行排列组合后可以形成一个完整的传感器。经过验证,组合后的传感器在 27~30 GHz 的频段内实现了 5% 的应变。

Liu 等^[58]制作了一种基于双垂直交叉超材料的太赫兹双轴应变传感器,如图 32 所示。该传感器底



图 31 双层十字形超材料应变传感器

Fig.31 Double layer cross shaped metamaterial strain sensor

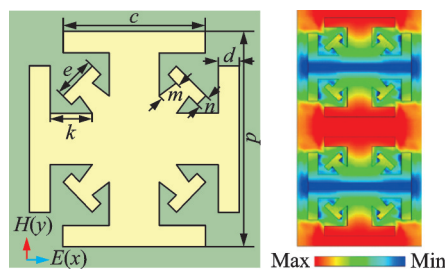


图 32 基于双垂直交叉超材料的太赫兹双轴应变传感器

Fig.32 Terahertz biaxial strain sensor based on dual vertical cross metamaterials

座采用耐高温、耐腐蚀材料制成,能够在 200 °C 范围内正常工作。仿真结果表明,该传感器在横向电和横向磁极化条件下,电场集中在金属结构中间,并且在 1.0~2.2 THz 频率范围内。表面金属结构移动时,谐振频率变化明显,灵敏度可达 346 GHz/ μm 。

超材料传感器将超材料结构集成在传感器基底上,不仅可以实现器件小型化,提高测试灵敏度,而且可通过调制其尺寸参数实现多参数传感器设计,在无线无源传感器领域具有巨大的发展潜力。

5 讨论与展望

无线无源力热传感器在工业生产、安全控制及能源利用等多个领域中发挥着重要作用,可以提高生产效率、保障安全及节约能源;然而无线无源力热传感器的大规模量产应用中存在着一些技术瓶颈,主要问题如下:①无线无源传感器在无线传输方面还面临着距离有限和信号强度衰减等挑战,传感器需要具备更强的信号穿透能力和更远的传输距离,同时保持数据传输的可靠性,才能适应更广泛的应用场景;②无线无源传感器的信号多参数解耦方面的问题,在高温、旋转环境下,传感器信号的传输会受到电磁干扰、阻抗匹配等问题的影响,需要采用特殊的电路设计和信号处理方法来解决传感信号耦合问题;③传感器在高温、高旋环境下存在可靠性和寿命方面的问题,高温、高旋环境会加速传感器的老化和失效,因此需要采用耐高温材料和可靠的封装技术来延长传感器的使用寿命。

6 结束语

无线无源传感器的发展方向是在提高性能和稳定性的同时提升信号传输距离,解决多参数解耦难题,使其能够广泛应用于各个实际应用场景。未来将通过材料科学、制造工艺以及电子技术等方面的不断创新,提高传感器的性能和稳定性,并降低制造成本。同时,随着人工智能、物联网和5G等领域的发展,无线无源传感器将会有更广泛的应用领域。

参 考 文 献

- [1] 何巧. 高温高旋环境下动态参数无线测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [2] 孙运玺. 基于机匣振动信号的叶片振动分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [3] 冯强, 童锦艳, 郑运荣, 等. 燃气涡轮叶片的服役损伤与修复[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 21-34, 11. FENG Qiang, TONG Jinyan, ZHENG Yunrong, et al. Service damage and repair of gas turbine blades[J]. China Materials Progress, 2012, 31(12): 21-34, 11. (in Chinese)
- [4] CAESARENDRA W, WIDODO A, THOM P H, et al. Combined probability approach and indirect data-driven method for bearing degradation prognostics[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 14-20.
- [5] 侯锦涛, 王全先. 冶金起重机箱形主梁结构健康状态评价体系研究[J]. 科技创新与应用, 2019(5): 21-23. HOU Jintao, WANG Quaxian. Research on health status evaluation system of box-shaped main beam structure of metallurgical crane[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2019(5): 21-23. (in Chinese)
- [6] REN G, LI T, HU Z, et al. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering[J]. Optik, 2019, 185: 759-771.
- [7] JIANG X, KIM K, ZHANG S, et al. High-temperature piezoelectric sensing[J]. Sensors, 2013, 14(1): 144-169.
- [8] XU F, TAN Q. Langasite micromachining technology applied to surface acoustic wave sensors in ultra-high temperatures[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Gainesville, FL, USA.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021: 674-677.
- [9] 梁晓瑞. 基于硅酸镓镧的耐高温SAW集成器件及其测量系统关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [10] ZHENG P, CHIN T L, DAVID W G, et al. Pulse-mode temperature sensing with langasite SAW devices [C]//IEEE International Frequency Control Symposium.[S.l.]:IEEE, 2010.
- [11] BEHANAN R, MOULZOLF S C, CALL M, et al. Thin films and techniques for SAW sensor operation above 1000 °C[C]//2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS).[S.l.]:IEEE, 2013: 1013-1016.
- [12] 王博文, 刘兴鹏, 彭斌, 等. 耐1000℃高温的Pt/ITO薄膜电极SAW温度传感器[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 67-72. WANG Bowen, LIU Xingpeng, PENG Bin, et al. Pt/ITO thin film electrode SAW temperature sensor with high temperature resistance to 1000 °C[J]. China Test, 2020, 46(12): 67-72. (in Chinese)
- [13] 张启轮, 单清川, 李桦林, 等. 沟槽电极型声表面波耐高温谐振器的制备[J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 175-179. ZHANG Qilun, SHAN Qingchuan, LI Hualin, et al. Preparation of trench electrode type surface acoustic wave high temperature resistant resonator[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2022, 44(2): 175-179. (in Chinese)
- [14] AUBERT T, ASSOUAR M B, LEGRANI O, et al. Highly textured growth of AlN films on sapphire by magnetron sputtering for high temperature surface acoustic wave applications[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2011, 29(2): 021010.
- [15] LEGRANI O, AUBERT T, ELMAZRIA O, et al. AlN/IDT/AlN/sapphire SAW heterostructure for high-temperature applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63(6): 898-906.
- [16] 薛涛. 基于LGS热压键合的耐高温声表面波压力传感器及解耦算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [17] 万江. 基于AlN的高温声表面波压力传感器[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [18] WILSON W C, ROGGE M D, FISHER B H, et al. Fastener failure detection using a surface acoustic wave strain sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1993-2000.
- [19] 闫夏雯, 谭秋林. 具有高灵敏度声表面波应变传感器的仿真与设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(2): 21-24. YAN Xiawen, TAN Qiulin. Simulation and design of high sensitivity surface acoustic wave strain sensor[J]. Instrument Technology and Sensors, 2022(2): 21-24. (in Chinese)
- [20] SHU L, PENG B, YANG Z B, et al. High temperature SAW wireless strain sensor with langasite [J]. Sensors, 2015, 15(11): 28531-28542.

- [21] LI L, PENG B, ZHU J L, et al. Strain measurements with langasite SAW resonators at high temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4688-4695.
- [22] WILSON W, ATKINSON G. Characterization of langasite SAW devices to determine the temperature and strain coefficients of velocity[J]. *Sensors and Transducers*, 2014, 162(1): 21-28.
- [23] MASKAY A, DACUNHA M P. High-temperature microwave acoustic vibration sensor[C]//2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). [S.l.]: IEEE, 2018: 1-3.
- [24] MERKULOV A A, ZHGOON S A, SHVETSOV A S, et al. Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering[C]//2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). [S.l.]: IEEE, 2021: 1-5.
- [25] 郭欣榕. 应用于高温环境的硅酸镓钽声表面波温度-加速度传感技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [26] 张娟, 张磊, 程文华, 等. 一种高灵敏度声表面波振动传感器的设计研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(10): 100-111.
ZHANG Juan, ZHANG Lei, CHENG Wenhua, et al. Design and research of a high sensitivity surface acoustic wave vibration sensor[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 44(10): 100-111. (in Chinese)
- [27] 唐顺, 谭秋林, 王海星, 等. LC温度传感器的高温性能优化与设计[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(2): 96-100.
TANG Shun, TAN Qiulin, WANG Haixing, et al. Optimization and design of high temperature performance of LC temperature sensor[J]. *Microelectronics and Nanoelectronics Technology*, 2017, 54(2): 96-100. (in Chinese)
- [28] RADOVANOVIC M, MOJIC-LANTE B, CVEJIN K N, et al. A wireless LC sensor coated with Ba_{0.9}Bi_{0.066}TiO₃ for measuring temperature [J]. *Sensors*, 2015, 15(5): 11454-11464.
- [29] TAN Q, REN Z, CAI T, et al. Wireless passive temperature sensor realized on multilayer HTCC tapes for harsh environment [J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015:1-8.
- [30] 王澜朝, 彭斌, 黄武林. 一种LC谐振无线无源温度传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2013(10): 1341-1344.
WANG Yuanchao, PENG Bin, HUANG Wulin. Research on an LC resonant wireless passive temperature sensor[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2013(10): 1341-1344. (in Chinese)
- [31] 丁利琼. 基于陶瓷的无线无源高温压力与温度传感器的设计、制备及测试[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [32] 任重, 谭秋林, 李晨, 等. 基于高温烧结氧化铝陶瓷的无线无源温度传感器[J]. *传感技术学报*, 2014(5): 654-657.
REN Zhong, TAN Qiulin, LI Chen, et al. Wireless passive temperature sensor based on high-temperature sintered alumina ceramics[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2014(5): 654-657. (in Chinese)
- [33] RADOSAVLJEVIC G J, ZIVANOV L D, SMETANA W, et al. A wireless embedded resonant pressure sensor fabricated in the standard LTCC technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1956-1962.
- [34] LI C, TAN Q, XUE C, et al. A high-performance LC wireless passive pressure sensor fabricated using low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology [J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 23337-23347.
- [35] YANG M, LIU W, XIONG J, et al. Passive wireless pressure sensor fabricated in low-temperature co-fired ceramic technology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2015, 229(4): 160-165.
- [36] 郑庭丽, 赵卫军, 梁庭, 等. LC谐振式压力传感器的高温关键参数研究[J]. *传感技术学报*, 2014(10): 1332-1335.
ZHENG Tingli, ZHAO Weijun, LIANG Ting, et al. Research on high temperature key parameters of LC resonant pressure sensor[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2014(10): 1332-1335. (in Chinese)
- [37] 魏坦勇, 沈丹丹, 谭秋林, 等. LC谐振式高温压力传感器高温下信号衰减的研究[J]. *传感技术学报*, 2015(2): 165-169.
WEI Tanyong, SHEN Dandan, TAN Qiulin, et al. Research on signal attenuation of LC resonant high temperature pressure sensor at high temperature[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2015(2): 165-169. (in Chinese)
- [38] 王海星. 陶瓷封装HTCC高温压力传感器的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [39] YAMADA T, HAYAMIZU Y, YAMAMOTO Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5): 296-301.
- [40] RAMALINGAME R, BAUTISTA-QUIJANO J R, ALVES D D F, et al. Temperature self-compensated strain sensors based on MWCNT-graphene hybrid nanocomposite [J]. *Journal of Composites Science*, 2019, 3(4): 96.
- [41] JIA Y, SUN K, AGOSTO F J, et al. Design and characterization of a passive wireless strain sensor [J].

- Measurement Science & Technology, 2006, 17(11): 2869.
- [42] 李美朴, 谭秋林. 基于LC的无线无源应变传感器的制备与测试[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 29-32, 39.
LI Meipu, TAN Qiulin. Preparation and testing of wireless passive strain sensors based on LC[J]. Instrument Technology and Sensors, 2022(3): 29-32, 39. (in Chinese)
- [43] 郝竹雅. 集成铁氧体膜的LC无线无源柔性应变传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [44] 李美朴. 面向高速轴承的无线无源应变传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [45] 尤晖. 电容式微加速度传感器的现状及研究方向[J]. 中国机械工程, 1998, 9(10): 57-62.
YOU Hui. Current situation and research direction of capacitive micro-acceleration sensor[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(10): 57-62. (in Chinese)
- [46] 刘鹏飞. LC谐振式耐高温加速度传感器的设计[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [47] 张驰. 面向轴承状态监测的LC多参数传感器[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [48] ELEFThERIADES G V, ENGHETA N. Metamaterials: fundamentals and applications in the microwave and optical regimes[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(10): 1618-1621.
- [49] LIU C, TONG F. An SIW resonator sensor for liquid permittivity measurements at C band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(11): 751-753.
- [50] KUBINA B, SCHÜBLER M, MANDEL C, et al. Wireless high-temperature sensing with a chipless tag based on a dielectric resonator antenna[C]//Sensors. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-4.
- [51] CHENG H, EBADI S, GONG X. A low-profile wireless passive temperature sensor using resonator/antenna integration up to 1 000 °C[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11): 369-372.
- [52] XIONG J, WU G, TAN Q L, et al. Dielectrically-loaded cylindrical resonator-based wireless passive high-temperature sensor[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2037.
- [53] LU F, TAN Q L, JI Y, et al. A novel metamaterial inspired high-temperature microwave sensor in harsh environments[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2879.
- [54] CHENG H, SHAO G, EBADI S, et al. Evanescent-mode-resonator-based and antenna-integrated wireless passive pressure sensors for harsh-environment applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220: 22-33.
- [55] HOSSAIN M, FARUQUE M, ALAM M, et al. A broadband negative refractive index meta-atom for quad-band and sensor applications[J]. Microwave and Technology Letters, 2018, 60(12): 2899-2907.
- [56] 寇海荣. 高温环境下CSRR集成SIW传感器设计及其测量系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [57] GROBMANN T D, DECKER R, KURTH S, et al. Reflection based strain sensing using metamaterials[J]. Technologies for Lightweight Structures, 2019, 3(1): 25-33.
- [58] LIU Y, CHEN Y, LI J, et al. Terahertz biaxial strain sensor based on double-upright cross metamaterial[J]. Micromachines, 2023, 14(4): 816.



第一作者简介:谭秋林,男,1979年6月生,博士、教授。主要研究方向为无线无源传感器及其测试仪器。入选国务院特殊津贴专家、国家高层次人才计划、国家重点研发计划技术首席、山西省青年三晋学者特聘教授、山西省学术技术带头人、山西省委联系服务高级专家等。担任微纳器件与系统教育部重点实验室常务副主任、中国仪器仪表学会机械量测试分会常务理事、中国机械工程学会微纳制造技术分会委员、中国仪器仪表学会微纳系统分会理事、美国IEEE高级会员等。主持了国家自然科学基金航天联合重点项目、国家重点研发计划项目、国家重点工程项目等20余项。发表SCI论文100余篇,授权发明专利56项,出版专著1部,参编英文专著1部。
E-mail: tanqiulin@nuc.edu.cn