



用于飞行器结构监控的柔性无线曲率传感器

吴承根¹, 张吉超², 王永青², 韩磊¹

1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 江苏 南京 211102

摘 要: 曲率传感器是提供高速飞行器机体结构曲率信息的关键器件, 对构建关键部位载荷方程和提高局部载荷预测精度至关重要, 在内部柔性部件主动控制及机体结构健康监测等方面展现出无可替代的作用。针对传统有线硬质器件难以适应柔性结构主动控制应用需求的“瓶颈”问题, 结合新型二维材料及 LC 无线传感技术, 本文提出了一种柔性无线曲率传感器, 用以精确获取柔性结构主动控制信号的反馈信息。采用多孔疏松的氧化石墨烯作为 LC 谐振器的介质层以获得较高的曲率灵敏度, 银质 LC 谐振器被丝网印刷于氧化石墨烯介质层表面, 聚酰亚胺/聚二甲基硅氧烷层被用作柔性衬底。进行了表面形貌表征及性能测试, 结果表明, 曲率传感器实现了无源无线检测, 灵敏度达到 1.55 MHz/mm, 重复性误差小于 0.54%, 验证了利用新型二维材料研制无线曲率传感器的可行性, 为提高高速飞行器内部柔性结构主动控制部件的精度和可靠性提供了研究基础。

关键词: 柔性; 无线; 曲率传感器; 氧化石墨烯; LC 谐振器

中图分类号: V444

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.09.013

高速飞行器内部结构的振动控制主要由含有作动器和传感器的柔性部件协同完成^[1]。曲率是监控柔性部件振动状态的关键参数, 对构建关键部位载荷方程和提高局部载荷预测精度至关重要。在分析小型涡扇发动机柔性转子临界转速、振型和稳定不平衡响应等动力特性时^[2], 采用实时准确的曲率信息能够帮助建立涡扇发动机柔性转子稳定不平衡响应随悬臂端长度的变化模型, 通过计算柔性转子的载荷来预测在不同模式下的临界转速。直升机桨叶的拉扭承载能力难以通过理论计算获得^[3], 因此, 利用曲率传感器对直升机无轴承柔性梁扭转能力进行预先测试, 利用获取的曲率数据对后续直升机的结构和性能设计进行优化将极大提高效率, 降低飞行器的设计成本。此外, 由高速气流、高温冲击或金属疲劳等因素引起的机体或部件异常振动, 也会极大威胁飞行器飞行安全^[4]。为了避免异常振动带来的飞行安全隐患, 准确稳定地获取飞行器柔性部件的振动状态显得至关重要。

曲率传感器是控制柔性部件精准进行目标动作的核心器件^[5]。通过获取柔性部件关键节点的实时弯曲曲率信息, 能够对柔性部件的振动状态进行评估, 利用反馈曲率信息对致动器指令进行查验和校正, 避免误操作或结构异常振动带来的安全隐患^[6]。目前, 根据检测原理不同, 曲率传感器可分为 4 类: 光纤曲率传感器、压阻式曲率传感器、压电式曲率传感器和电容式曲率传感器^[7]。光纤曲率传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰强等优势, 但结构复杂、无法集成等问题使其难以与飞行器结合^[8-11]; 压阻式曲率传感器成本低廉且结构简单, 但一致性和重复性差^[12-14]; 压电式曲率传感器功耗低、高频性能优异, 但温度带来的信号耦合干扰问题一直未能得到完全解决^[15-17]。最重要的是, 上述三种器件未能摆脱有源有线的束缚, 引线是器件电信号传输的唯一途径, 在飞行器长期保存或使用过程中, 来自高低温的反复冲击或湿度的长期腐蚀可能带来引线的接触不良或脱落, 这将极大降低传感器的可靠性^[18-20]。

收稿日期: 2022-03-25; 退修日期: 2022-04-13; 录用日期: 2022-04-28

基金项目: 航空科学基金 (20200028069001)

引用格式: Wu Chenggen, Zhang Jichao, Wang Yongqing, et al. Flexible wireless curvature sensor for aircraft structure monitoring [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(09): 127-134. 吴承根, 张吉超, 王永青, 等. 用于飞行器结构监控的柔性无线曲率传感器 [J]. 航空科学技术, 2022, 33(09): 127-134.

电容式曲率/应变传感器能够兼容无源无线传感技术,可以将曲率引起的器件结构变化转化为电容变化,从而实现无线曲率检测,同时电容式曲率传感器对微小曲率信号也有极高的灵敏度,与其他类型的曲率传感器相比,具有可集成、体积小、制造简单、灵敏度高和可靠性好等明显优势^[21]。J. Mouro 等提出了多层复合薄膜材料的曲率和应变传感模型,为研制电容式器件提供了理论基础^[22];Dong Tianyun 等利用碳纳米管与柔性 3M4905 胶带结合,构成电容式曲率/应变传感器。器件在 0~100% 应变范围内,电容变化高达 45%^[23]。H. Nesser 等将纳米金胶体作为敏感膜滴涂于叉指电容结构,制成的电容式曲率/应变传感器在 0~10% 应变范围能够产生高达 20% 的电容变化^[24]。虽然电容式曲率传感器取得了一些成果,但目前的研究仍未摆脱需要引线才能工作的困境^[25],未能充分发挥电容式传感器能够兼容无源无线技术的优势。

基于此,本文提出一种新型柔性无线曲率传感器。柔性无线曲率传感器采用氧化石墨烯薄膜作为介质层,氧化石墨烯是一种典型的绝缘二维材料^[26-28],表面具有丰富的羟基和羧基等官能团,能够敏感湿度、压力和应变等多种物理量。Hyun-Woo Yu 的团队利用氧化石墨烯结合聚(4-苯乙烯磺酸钠)研制了高性能的电容式湿度传感器^[29]。Tatiana M. Pessanha 等将氧化石墨烯作为界面电容的介质层应用于生物传感领域^[30]。东南大学 Shu Wan 等发现氧化石墨烯泡沫用作电容式压力传感器的介质层与同类器件相比具有灵敏度高、响应时间快等优势^[31]。除了上述方法,氧化石墨烯还可以通过滴涂、抽滤等方法成膜,从而具有疏松多孔的结构,是用于制作电容式曲率传感器介质层的理想材料。由于氧化石墨烯介质层在面对不同曲率变化时会产生压缩形变从而极大改变自身的介电常数,因此可对曲率信号完成高灵敏检测。本文基于抽滤法和丝网印刷工艺,提出了柔性无线曲率传感器的制备工艺,对制备完成的样机进行了材料分析、表面形貌表征和性能测试,实现了对曲率的无源无线检测,灵敏度达到 1.55MHz/mm,重复性误差小于 0.54%,为研制应用于高速飞行器柔性部件振动状态测控的柔性无线曲率传感器提供新的思路。

1 曲率传感器的设计与制备

1.1 器件结构及敏感原理

如图 1(a)所示,本文提出的柔性无线曲率传感器分为三个部分:银质 LC 谐振器、氧化石墨烯介质层和柔性衬底,其中,柔性衬底由聚酰亚胺层(PI)和聚二甲基硅氧烷层

(PDMS)组成,PDMS 层由浇筑法制成,厚度约为 2mm,与 PI 层通过热压法结合形成柔性衬底;氧化石墨烯介质层由氧化石墨烯分散液通过抽滤法制备而成;银质 LC 谐振器由螺旋电感和叉指电容两个部分组成,通过丝网印刷法制作于氧化石墨烯介质层表面,图形最小线宽为 0.5mm,谐振器线条宽度为 1mm。

当曲率传感器受到弯曲时,如图 1(b)所示,疏松多孔的氧化石墨烯介质层各纳米片层之间结合得更加紧密,内在结构的变化使介质层介电常数产生改变,从而影响介质层上 LC 谐振器的总电容,由于 LC 谐振器的叉指电容的正对面积和间距受曲率的影响相对于氧化石墨烯介质层介电常数的变化较小,因此可以忽略。LC 谐振器的电容变化使曲率传感器谐振频率产生变化,通过外部线圈获得谐振频率和曲率之间的变化关系,即可实现对目标的无源无线检测。

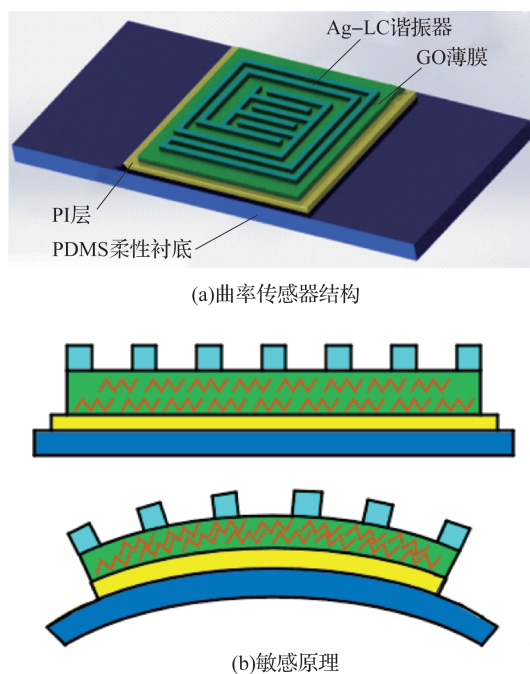


图1 曲率传感器结构及敏感原理

Fig.1 Structure and sensing mechanism of curvature sensor

1.2 器件制备工艺

柔性无线曲率传感器分为三个部分:银质 LC 谐振器、氧化石墨烯(GO)介质层和 PI/PDMS 柔性衬底。如图 2 所示,首先将 100mg 氧化石墨烯粉末加入 50mL 去离子水中,再将样品超声分散 30min,直至溶液无明显固态沉淀,得到氧化石墨烯悬浊液,然后利用离心机对样品进行离心处理,去除

未充分分散的团状氧化石墨烯,离心机转速为10000r/min,持续时间为15min,离心完成后取上层清液,则获得充分分散的浓度为2mg/mL的氧化石墨烯分散液。氧化石墨烯分散液由抽滤系统制备为氧化石墨烯薄膜,抽滤系统由真空泵、滤嘴和滤瓶组成。首先将滤纸平铺于滤嘴表面,然后加入17mL的氧化石墨烯分散液于滤嘴,开启真空泵为滤嘴和滤瓶之间提供大小为100kPa的压力差。在压力差的作用下,氧化石墨烯分散液中的片状氧化石墨烯在范德华力的作用下形成层状堆叠,从而形成氧化石墨烯薄膜。此时氧化石墨烯薄膜附着于滤纸,再利用PI胶带黏附于氧化石墨烯薄膜另一侧,用以增加样品薄膜的机械强度,将滤纸从氧化石墨烯表面剥离,然后样品被置于70°C的烘箱处理20min,用以释放薄膜的残余应力。取导电银浆0.6g,加入120 μ L稀释液并充分搅拌混合,利用丝网印刷机将LC谐振器的图形印刷至氧化石墨烯表面,LC谐振器尺寸为2.2cm $\times$ 2.2cm,最小线宽为0.5mm,线条宽度为1mm。印刷完毕后,样品被置于120°C的烘箱固化表面银浆,持续30min,银质LC谐振器的阻值约为20 Ω 。完成LC谐振器的制造后,将样品置于柔性衬底模具底部。按10:1的比例混合PDMS溶液和固化剂,将混合溶液浇筑至模具内,然后放入70°C的烘箱持续3h,直到样品完全固化,PDMS柔性衬底尺寸为4.5cm $\times$ 2.8cm,所得柔性无线曲率传感器如图3所示。

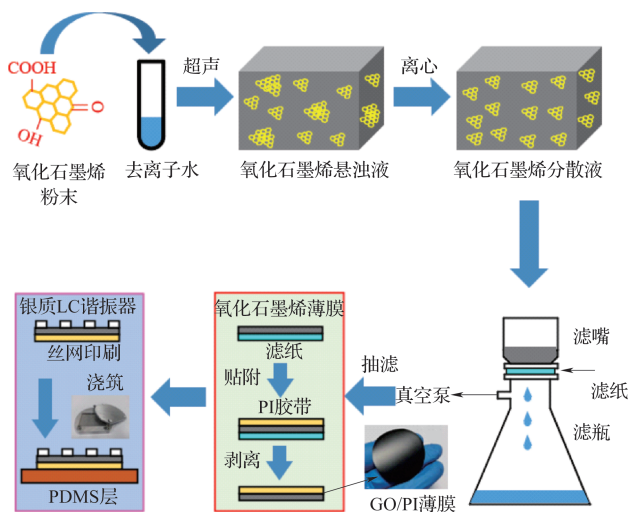


图2 曲率传感器制备工艺

Fig.2 Fabrication method of curvature sensor

2 曲率传感器形貌分析及表征

对制备出的氧化石墨烯薄膜以及曲率传感器表面形貌进行表征和分析。图4展示了柔性无线曲率传感器横截面的SEM图,可以看出,经过抽滤工艺片状氧化石墨烯薄膜

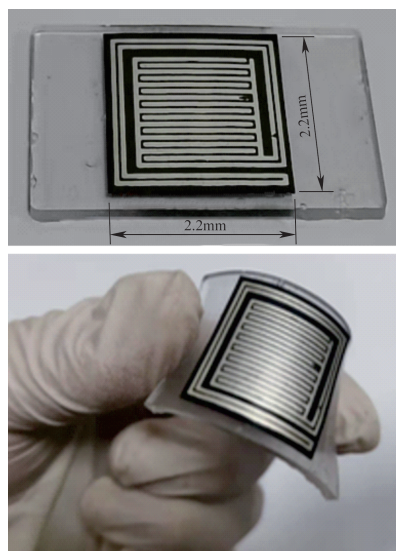


图3 曲率传感器实物图

Fig.3 Images of curvature sensor

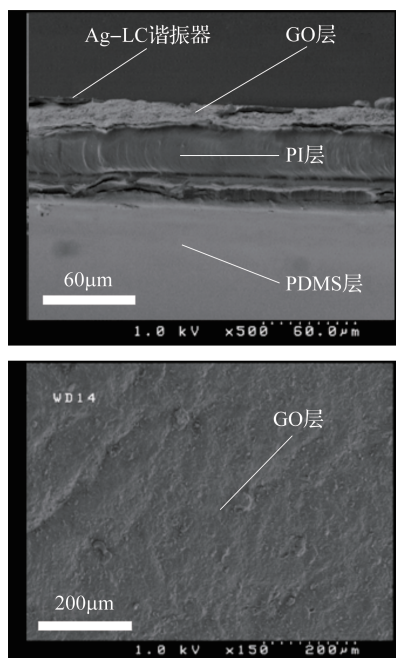


图4 曲率传感器截面SEM图

Fig.4 SEM image of curvature sensor

在范德瓦耳力的作用下层状堆叠形成薄膜,厚度约15 μ m。PI层位于氧化石墨烯层下方,厚度约为30 μ m,浇筑形成的PDMS层位于PI层下方,作为上层部件的柔性支撑结构。银质LC谐振器被印刷于氧化石墨烯薄膜表面,厚度约为5 μ m。如图5所示,利用拉曼光谱仪对制备完成的氧化石墨烯薄膜进行表征,可以看出两个特征峰出现在1350 cm^{-1} 和1593 cm^{-1} ,两峰强度比值达到0.95,这表明抽滤获得的氧化

石墨烯薄膜具有良好的质量。这种疏松多孔的氧化石墨烯介质层结构在曲率传感器发生弯曲时,各片层之间会变得更加紧致,从而改变叉指电容介质层的介电常数,这种变化会影响银质谐振器的电容,最终引起曲率传感器的谐振频率变化。

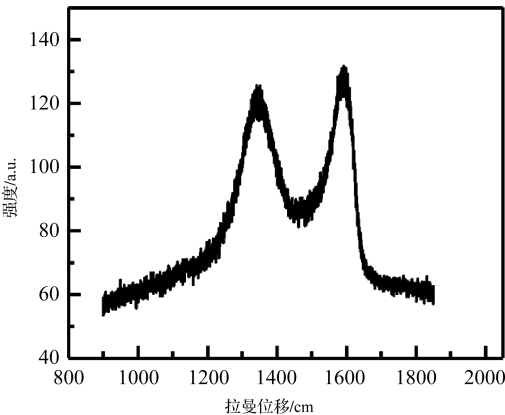


图5 氧化石墨烯薄膜拉曼光谱
Fig.5 Raman spectra of GO membrane

3 曲率传感器的测试平台

3.1 测试方案

图6展示了柔性无线曲率传感器测试平台的示意图,包括矢量网络分析仪、检测线圈、不同曲率半径的测试台。检测线圈与矢量网络分析仪相连,待测柔性无线曲率传感

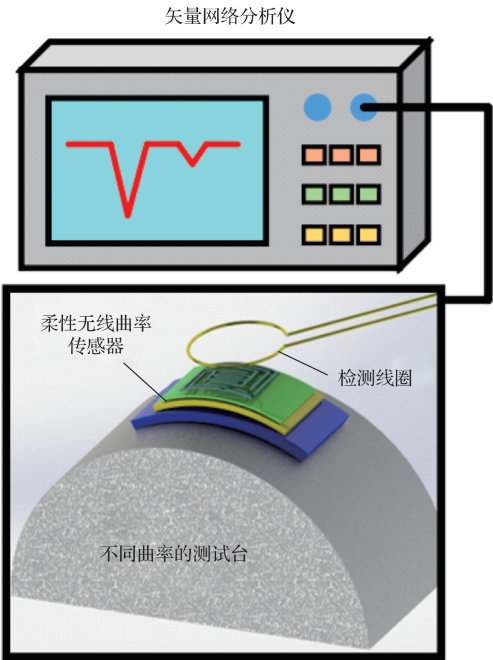


图6 测试平台示意图
Fig.6 Schematic diagram of test platform

器被固定于不同曲率半径的测试台,检测线圈置于待测器件正上方 1.5mm 处。测试平台的等效电路如图 7 所示,检测线圈一侧包含线圈电阻 R_a 、线圈电感 L_a 以及线圈电容 C_a , 曲率传感器一侧包含谐振器电阻 R_s 、谐振器电感 L_s 以及谐振器可变电容 C_s 。当测试过程开始,面对不同曲率半径的测试台,曲率传感器具有不同的电容值 C_s ,不同的电容值将使曲率传感器的谐振频率发生变化,这种变化通过 L_a 与 L_s 的互感效应在矢量网络分析仪上进行实时显示和记录。

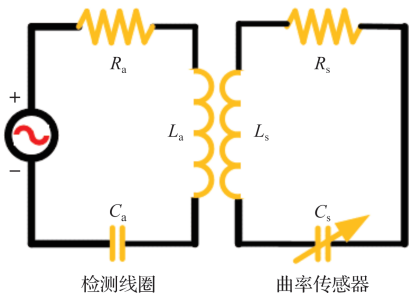


图7 测试平台等效电路
Fig.7 Equivalent circuit of test platform

3.2 搭建测试平台

如图 8 所示,4 种不同曲率半径的测试台被用于对曲率传感器的性能检测试验,其曲率半径分别为 10mm、20mm、30mm 和 40mm。曲率传感器被固定于测试台表面,检测线圈位于其正上方 1.5mm 处。搭建完成的柔性无线曲率传感器测试平台如图 9 所示。

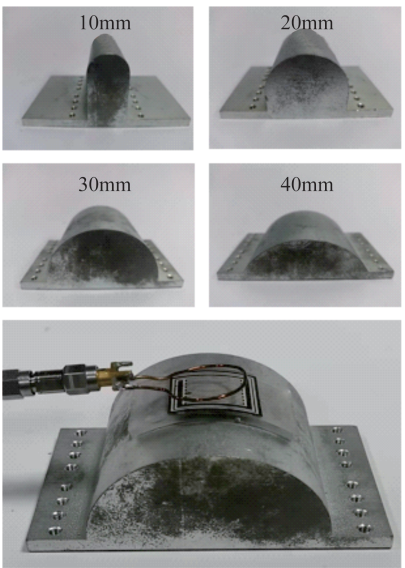


图8 不同曲率的测试台
Fig.8 Test platform with different curvature radius

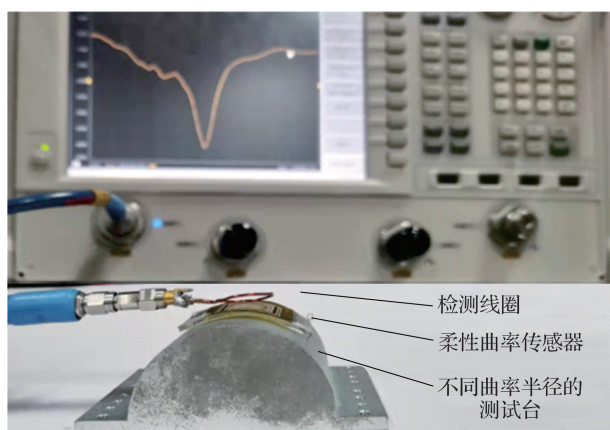


图9 曲率传感器测试平台

Fig.9 Test platform of curvature sensor

4 曲率传感器的性能

为了检测曲率传感器面对不同弯曲时的响应,测试了在4种不同曲率半径条件下器件的谐振频率。如图10所示,紫色曲线为曲率传感器在无弯曲状态下的回波损耗响应,谐振频率峰值出现在835MHz,强度为-17.458dB,在测试中将该谐振峰作为器件的起始谐振频率。随着曲率半径的减小,曲率传感器发生的形变逐渐增大,对应的器件谐振频率随之减小。

从图10中可以看出,随着曲率的增大,曲率传感器谐振频率的强度在逐渐减小,样品的曲率半径由无弯曲状态变化到40mm时,器件谐振频率减小到819MHz,强度为-15.084dB,由40mm变化到30mm时,器件谐振频率减小到807MHz,强度为-9.034dB,由30mm变化到20mm时,器件谐振频率减小到793.5MHz,强度为-5.622dB,由20mm变化到10mm时,器件谐振频率减小到772.5MHz,强度为-5.103dB。随着曲率的增大,曲率传感器上谐振器与检测线圈之间耦合系数将逐渐减小,从而导致谐振峰的 Q 值减小,这种变化反映在矢量网络分析仪上即表现为谐振峰强度的降低。同时,除了形状会影响器件与检测线圈之间的耦合系数外,检测线圈与曲率传感器的间距和夹角等因素也会影响耦合系数,在多重因素的影响下,曲率与谐振峰强度的对应关系不再固定,在实际应用中,测试位置的震颤、抖动等会直接改变检测线圈与曲率传感器之间的距离或角度,这使谐振峰强度无法作为曲率输入信号的因变量。

与谐振峰强度不同,曲率传感器的谐振频率完全不受检测线圈与器件的间距和夹角等因素影响,与曲率变化具有唯一的对应关系,可以作为曲率输入信号理想的因变量。

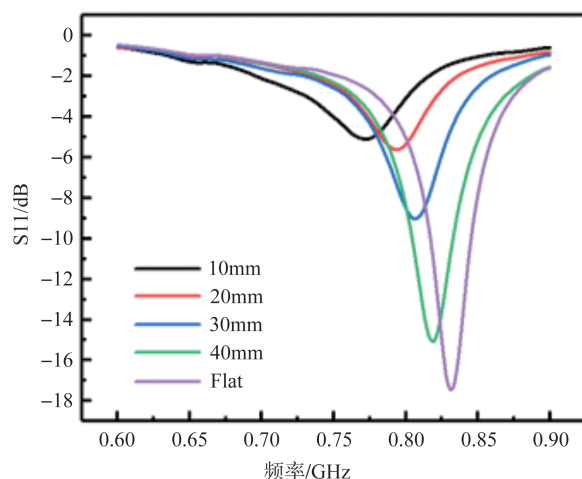


图10 不同曲率下器件的响应

Fig.10 Sensor responses to different curvatures

如图11所示,将曲率传感器在不同曲率下的谐振峰峰值提取出来,得到曲率随谐振频率变化的响应曲线。可以看出,40mm曲率半径下,曲率传感器谐振频率减至819MHz处,30mm曲率半径下,曲率传感器谐振频率减至807MHz处,20mm曲率半径下,曲率传感器谐振频率减至793.5MHz处,10mm曲率半径下,曲率传感器谐振频率减至772.5MHz处。图12展示了曲率传感器的灵敏度曲线,曲率半径40到10mm的测试区间内,谐振频率的变化量为34.5MHz,器件灵敏度为1.55MHz/mm,测试表明,基于氧化石墨烯介质层的柔性无线曲率传感器具有较高的灵敏度。

由于曲率半径的变化,柔性无线曲率传感器与检测线圈之间的距离呈现两侧大、中间小的状态。随着曲率半径的不断减小,器件两侧与检测线圈之间的距离逐渐增大,两

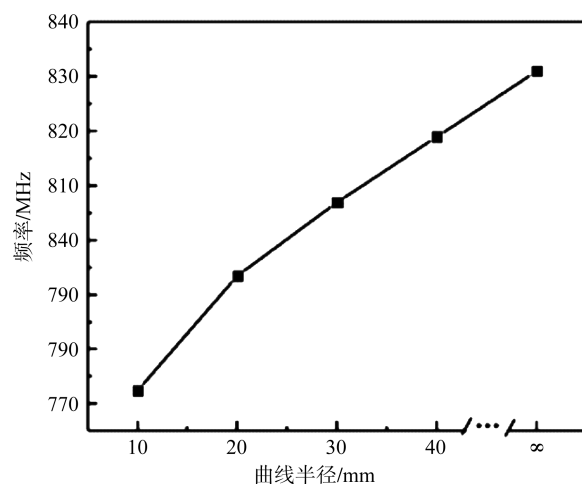


图11 曲率传感器谐振频率变化曲线

Fig.11 Resonant frequency shift of curvature sensor

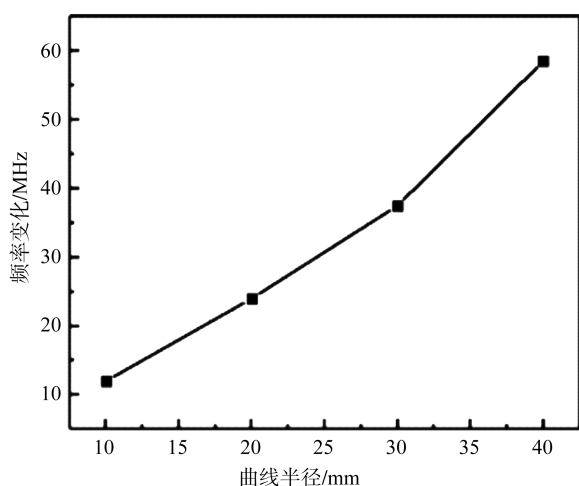


图12 曲率传感器灵敏度曲线

Fig.12 Sensitivity curve of curvature sensor

者的正对面积逐渐减小,这等同于增大了检测线圈与柔性传感器之间的平均距离,这将对检测结果产生两个影响:(1)曲率的变化引起柔性传感器形状的变化,造成与检测线圈之间的平均距离增大,从而使检测结果中LC谐振器谐振峰的强度降低。(2)曲率的变化引起柔性传感器形状的变化,造成与检测线圈之间正对面积的减小,使检测线圈与LC谐振器之间的耦合系数减小,从而降低检测结果中谐振峰的Q值。

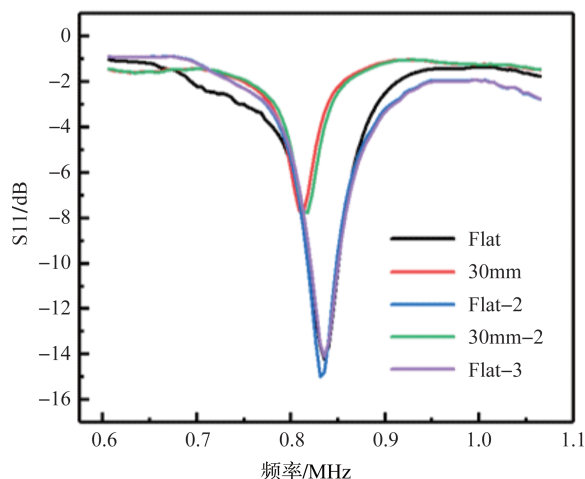


图13 曲率传感器的重复性曲线

Fig.13 Repeatability curves of curvature sensor

为测试器件在多次测试循环中的重复性,选取曲率半径为30mm的测试台,对曲率传感器进行无弯曲状态到曲率半径30mm状态的循环测试,结果如图13所示。根据测试结果和重复性误差计算公式可获得器件的最大重复性误差。

公式如下所示

$$E = \Delta f / f_0$$

式中: E 为器件的最大重复性误差, Δf 为循环测试中的最大频率误差, f_0 为无弯曲状态下曲率传感器的谐振频率。

无弯曲状态下,曲率传感器的谐振频率为835MHz,随着器件弯曲,两次分别减至803MHz和807.5MHz处,误差为4.5MHz。两次回到无弯曲状态,谐振频率分别为835MHz和831MHz,误差为4MHz,两次循环测试中,器件的测试信号未因形变而产生大幅漂移。根据上述结果,可得到曲率传感器的最大重复性误差为0.54%。这表明,本文提出的柔性无线曲率传感器具有良好的重复性,可保证在长期重复使用中具有较好的性能。

5 结论

本文提出了一种基于氧化石墨烯介质层的柔性无线曲率传感器,验证了应用二维材料氧化石墨烯研制新型柔性无线曲率传感器的可行性,实现了对曲率信号的无源无线检测。同时,完成了对柔性无线曲率传感器的表面形貌分析及氧化石墨烯薄膜制备质量表征,用以解释器件的敏感原理。针对制备好的器件搭建了曲率测试平台进行了性能测试,在无弯曲状态到曲率半径10mm测试范围内,器件灵敏度达到1.55MHz/mm,重复性误差小于0.54%,为无源无线曲率检测提供了新的思路。

AST

参考文献

- [1] 张蓓蓓. 面向多传感器综合探测的信息融合试飞方法[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 31-35.
Zhang Beibei. Information fusion flight test method for multi-sensor comprehensive detection[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 31-35. (in Chinese)
- [2] 袁胜, 邓旺群, 徐友良, 等. 大长径比悬臂柔性转子动力特性研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(7): 62-68.
Yuan Sheng, Deng Wangqun, Xu Youliang, et al. Dynamic characteristics analysis of a cantilever flexible rotor with large length-to-diameter ratio[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(7): 62-68. (in Chinese)
- [3] 陈亮, 滕二, 李玉龙. 直升机新型无轴承柔性梁扭转能力试验装置[J]. 航空科学技术, 2012(4): 58-60.
Chen Liang, Teng Er, Li Yulong. A new pull and torsion test device[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(4): 58-60. (in Chinese)

- [4] 孙侠生, 肖迎春. 飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3199-3212.
Sun XiaSheng, Xiao Yingchun. Opportunities and challenges of aircraft structural health monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3199-3212. (in Chinese)
- [5] Wang Q, Liu Y. Review of optical fiber bending/curvature sensor[J]. Measurement, 2018, 130: 161-176.
- [6] 张彦军, 王斌团, 宁宇, 等. 飞机结构应变监控技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 109-114.
Zhang Yanjun, Wang Bintuan, Ning Yu, et al. Research progress on strain monitoring technology for aircraft structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 109-114. (in Chinese)
- [7] Di H T, Xin Y, Jian J Q. Review of optical fiber sensors for deformation measurement[J]. Optick, 2018, 168: 703-713.
- [8] Jang M S, Kim J S, Um S H, et al. Ultra-high curvature sensors for multi-bend structures using fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2074-2084.
- [9] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2237-3340.
- [10] Arnaldo G, Frizzera A, Pontes M J. Sensitive zone parameters and curvature radius evaluation for polymer optical fiber curvature sensors[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 100: 272-281.
- [11] Monteur C S, Ferreira M S, Silva S O, et al. Fiber fabry-perot interferometer for curvature sensing[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(4): 339-344.
- [12] Ozel S, Skorina E H, Luo M, et al. A composite soft bending actuation module with integrated curvature sensing[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 2016: 4963-4968.
- [13] Nassour J, Ghadiya V, Hugel V, et al. Design of new sensory soft hand: combining air-pump actuation with superimposed curvature and pressure sensors[C]. IEEE International Conference on Soft Robotics, Livorno, Italy, 2018: 164-169.
- [14] Sato Y, Kanada A, Mashimo T. Self-sensing and feedback control for a twin coil spring-based flexible ultrasonic motor[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5425-5431.
- [15] Feng G H, Chu G Y. An arc-shaped polyvinylidene fluoride/ionic polymer metal composite dynamic curvature sensor with contact detection and scanning ability[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 208: 130-140.
- [16] Chung S Y, Lee H J, Lee T I, et al. A wearable piezoelectric bending motion sensor for simultaneous detection of bending curvature and speed[J]. RSC Advances, 2017(7): 2520-2526.
- [17] Chung S Y, Lee H J, You R D, et al. Piezoelectric bending motion sensor for simultaneous detection of bending curvature and speed[J]. ECS Transactions, 2016, 75(16): 277-279.
- [18] Dong L, Wang L F, Huang Q A. Implementation of multiparameter monitoring by an LC-type passive wireless sensor through specific winding stacked inductors[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(2): 168-174.
- [19] Wang Y, Tan Q L, Zhang L, et al. Wireless passive LC temperature and strain dual-parameter sensor[J]. Micromachines, 2021(12): 34.
- [20] Bhar I, Mandal N. A review on advanced wireless passive temperature sensors[J]. Measurement, 2022, 187: 110255.
- [21] Duan C L, Jiang Y D, Chen L J. Development of MEMS capacitive large-scale strain sensors[J]. Integrated Ferroelectrics, 2013, 147: 123-130.
- [22] Mouro J, Ferreira M, Silva A V. Derivation of analytical expressions for the stress/strain distributions, bending plane and curvature radius in multilayer thin-film composites[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31: 113003.
- [23] Dong T Y, Gu Y, Liu T, et al. Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: Comparison and their wearable applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 326: 112720.
- [24] Nesser H, Grisolia J, Alnasser T, et al. Towards wireless highly sensitive capacitive strain sensors based on gold colloidal nanoparticles[J]. Nanoscale, 2021, 10: 10479.
- [25] Nesser H, Lubineau G. Strain sensing by electrical capacitive variation: From stretchable materials to electronic interfaces[J]. Advanced Electronic Materials, 2021(7): 2100190.
- [26] Chen B G, Wang W L, Yan X X, et al. Highly tough, stretchable, self-adhesive and strain-sensitive DNA-inspired hydrogels for

- monitoring human motion[J]. Chemistry European of Journal, 2020, 26: 11604-11613.
- [27] Zhang W Q, Yin B, Wang J, et al. Ultrasensitive and wearable strain sensors based on natural rubber/graphene foam[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 785: 1001-1008.
- [28] Wu G Z, Mahyar P S, Xiao X L. Fabrication of capacitive pressure sensor with extraordinary sensitivity and wide sensing range using PAM/BIS/GO nanocomposite hydrogel and conductive fabric[J]. Composites: Part A, 2021, 145: 106373.
- [29] Yu H W, Kim H K, Kim T, et al. Self-powered humidity sensor based on graphene oxide composite film intercalated by Poly (Sodium 4-Styrenesulfonate) [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014(6): 8320-8326.
- [30] Pessanha T M, Paschoalino W J, Dcrocio P B, et al. Interfacial capacitance of graphene oxide films electrodes: Fundamental studies on electrolytes interface aiming (bio)sensing applications[J]. Electroanalysis, 2022, 34: 692-700.
- [31] Wan S, Bi H C, Zhou Y L. Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors [J]. Carbon, 2017, 114: 209-216.

Flexible Wireless Curvature Sensor for Aircraft Structure Monitoring

Wu Chenggen¹, Zhang Jichao², Wang Yongqing², Han Lei¹

1. Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 211102, China

Abstract: Curvature sensor has a significant effect to provide structure curvature of aircraft. It is important to build the load equation of key parts and improve the accuracy of load prediction. Curvature sensor plays a considerable role to the active control of flexible structures and health monitoring of aircraft structures. Aiming at the bottleneck that traditional wired hard-substrate sensors are difficult to apply in the active control of flexible structures. This paper has combined two-dimensional material and LC wire-less sensing technology to propose a flexible wireless curvature sensor which could accurately obtain the feedback information of active control signals of flexible structures. Porous graphene oxide is employed as the dielectric layer of LC resonator to obtain high curvature sensitivity. Silver LC resonator is screen printed on the surface of graphene oxide dielectric layer, and polyimide(PI)/ Polydimethylsiloxane (PDMS) layer is used as flexible substrate. Surface morphology characterization and performance test are carried out. The results show that the curvature sensor realizes passive wireless detection, the sensitivity reaches 1.55MHz/mm, and the repeatability error is less than 0.54%. It verifies the feasibility of developing wireless curvature sensor using innovative two-dimensional materials, which provides a research basis for improving the accuracy and reliability of active control components of flexible structures in high-speed aircraft.

Key Words: flexible; wireless; curvature sensor; graphene oxide; LC resonator

Received: 2022-03-25; Revised: 2022-04-13; Accepted: 2022-04-28

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200028069001)