

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407874

基于开口谐振环的小型化无线无源应变 传感器阵列设计*

王 贤 高 尚 杨尚可 马立军 江 剑 雷一菲

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:现有无线无源应变传感器存在检测方向单一、灵敏度低、尺寸大等问题,难以满足复杂受力条件下飞机机翼等大型金属结构应变状态评估的需求。针对这一问题,利用开口谐振环高辐射能力、低损耗以及高品质因数等优点,基于三角函数与矢量分解原理设计了一种基于开口谐振环的小型化无线无源应变传感器阵列。该传感器阵列由3个夹角 120° 的传感器构成,通过提取各传感器谐振频率偏移量实现金属结构件上应变大小和方向的反演。通过ADS软件得到传感器的阻抗参数,以传感器谐振频率为优化目标采用HFSS软件完成了传感器结构小型化和阻抗匹配优化设计,并利用COMSOL软件进行“力-磁”耦合分析验证了传感器的应变检测性能,随后完成传感器制备。实验结果表明,传感器在电长度方向和电宽度方向的灵敏度分别为 -1.517 和 -0.732 kHz/ $\mu\epsilon$,所提出的传感器阵列应变大小的检测精度在8.5%以内,应变方向检测误差在 10° 以内。该传感器阵列能够实现金属结构表面应变大小和方向的检测,具有灵敏度高、尺寸小以及成本低等优点。

关键词: 射频识别;开口谐振环;谐振频率偏移量;无线应变测量;传感器阵列

中图分类号: TP212.9; TN304.3

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.1025

Design of miniaturized wireless passive strain sensor array based on split ring resonator

Wang Xian Gao Shang Yang Shangke Ma Lijun Jiang Jian Lei Yifei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Existing wireless passive strain sensors suffer from limitations such as single-direction measurement, low sensitivity and large size, making them unsuitable for strain state evaluation of large metallic structures including aircraft wings, under complex loading conditions. To address these issues, a miniaturized wireless passive strain sensor array is proposed based on split ring resonator (SRR) with the advantages of high radiation capability, low loss, and high-quality factor and the principle of trigonometric functions and vector decomposition. The proposed sensor array consisting of three sensors arranged at 120° angles can reconstruct the magnitude and direction of strain field by extracting the resonant frequency shift. After the impedance parameters of the sensor are acquired by ADS software, the sensor structure miniaturization and impedance matching optimization design are carried out by HFSS software, aiming at the target of resonant frequency optimization. In addition, “force-magnetic” coupling analysis in COMSOL software verifies the performance of sensor’s strain detection. Furthermore, the fabrication of the sensor is implemented based on the above analysis and optimization. Experimental results show that the sensitivity of proposed sensor in the electrical length and width directions is -1.517 and -0.732 kHz/ $\mu\epsilon$, respectively. The proposed sensor array achieves a strain magnitude detection accuracy within 8.5% and a direction detection error within 10° . The sensor array can achieve strain magnitude and direction detection on metallic surface with the ability of high sensitivity, compact size, and low cost.

Keywords: radio frequency identification; split ring resonator; resonant frequency shift; wireless strain measurement; sensor array

收稿日期: 2024-10-08 Received Date: 2024-10-08

* 基金项目: 国家重点研发项目基金、中央高校基础研究基金(309181A8804, 30919011263)、江苏省自然科学基金(BK20190464)项目资助

0 引言

飞行器在长期服役的过程中,其机翼壁板和起落架等结构中不可避免地将累积一些应力损伤,产生疲劳裂纹^[1],对飞行器在服役期间的安全性和可靠性构成了严重威胁。由于,疲劳裂纹主要萌生在飞机结构的应变集中处,因此,对飞机结构特定区域进行应变检测是实现飞行器在役健康监测的关键^[2]。目前全球范围内的飞机壁板结构主要采用铝合金材料构建,占比达到60%以上^[3]。因此,针对铝合金壁板等金属材料表面应变的检测具有重要的意义^[4]。

传统的金属结构应变检测方法,如电阻应变传感器和光纤应变传感器,存在设备结构复杂、成本高、布线困难等问题^[5]。近年来,基于射频识别技术(radio frequency identification, RFID)的无线无源传感器因其低成本、尺寸小、无需复杂布线等优势,受到了广泛关注。Yi等^[6]将RFID和开槽贴片天线相结合,用于金属结构表面应变的测量。沈雁彬等^[7]学者提出一种组合式矩形贴片天线应变传感器,只能检测单一方向应变幅度。Kuhn等^[8]提出利用平面倒F天线(planar inverted f antenna, PIFA)的新型RFID应变传感器用于无线结构健康监测。Chakarvarthi等^[9]提出使用弯折分型技术小型化的偶极子天线,用于金属应变测量,并通过传感器的接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)的变化来识别试样的屈服点。上述研究中的应变传感器大多采用单一的矩形贴片天线或倒F天线作为传感器的敏感元件,存在传感器尺寸较大、灵敏度、集成度低等问题。

近年来,将辐射能力强、低损耗、高品质因数的开口谐振环(split ring resonator, SRR)等不同拓扑形状的谐振器结构引入传感器的设计实现无损参数检测引起了国内外学者的广泛研究^[10-11]。Dijvejin等^[12]、Baghelani等^[13]陆续提出了利用单个SRR和基于机械超材料的SRR阵列用于实现高灵敏度的微小应变测量。Hua等^[14]提出利用互补叉指开口谐振环(cross finger split ring resonator detector, CFSRRD)结构的集中电磁场分布提高传感器的灵敏度,开展了对金属管道的应力检测。以上研究工作表明,相对于矩形贴片天线,SRR及其扩展结构具有低损耗、小尺寸和高灵敏度等特性。在此基础上,部分学者开展了多维应变测量传感器设计的研究。周凯等^[15]提出了利用两片间隔45°布置的矩形贴片天线进行平面二维应变测量方法,但传感器结构复杂、面积较大,仅能检测固定方向的应变。Song等^[16]研究了圆形贴片天线在应变大小和方向测量中的应用,但检测系统相当复杂,需要喇叭天线垂直于天线表面,并不断调整喇叭天线和贴片天线之间的角度。Lu等^[17]提出一种基于太赫兹超材料

的应变传感器阵列。该传感器利用电偶极共振和磁偶极共振两个独立的谐振频率偏移量(resonant frequency shift, RFS)来检测 x 和 y 方向的应变,最终通过正交分解实现二维平面内应变方向的检测。然而,该传感器主要针对可穿戴设备设计,不适用于金属材料的应变检测。Zhang等^[18]设计了一种由4个间隔45°的短路截线馈电贴片天线构成的应变传感器阵列,实现了对应变大小和方向的定量检测。该传感器在电长度和电宽度方向上的灵敏度分别-0.874和-0.057 kHz/ $\mu\epsilon$,传感器尺寸为40.8 mm×25.0 mm×0.8 mm,存在传感器灵敏度较低,尺寸较大的问题。

然而,以上工作中提出的应变传感器大多只能检测沿辐射元件的长度或宽度的单一方向的应变大小。对于复杂应力条件下的飞机机翼、板梁等大型金属承重结构,必须综合考虑应变的方向和大小,才能准确评估其应变状态。为解决飞机机翼壁板等金属结构表面应变多方向检测的问题,基于SRR设计了一种由3个夹角为120°的传感器构成的小型化无线无源应变传感器阵列。该阵列能产生集中的电磁场分布而提高传感器的灵敏度,有望解决现有研究中传感器灵敏度不高、尺寸过大、无法检测多方向应变等问题。

1 无线无源应变传感器的检测原理及设计

1.1 无线无源应变传感器的传感机制

基于RFID的无线无源应变传感系统如图1所示,该系统由上位机、基于SRR的小型化无线无源应变传感器阵列、RFID阅读器和平板天线组成。上位机用于设置RFID阅读器的工作频段等参数。RFID阅读器通过平板天线发射电磁信号,同时对传感器的反射信号进行解调。平板天线发射电磁波,并将接收到的反射信号转换为电流信号。基于SRR的小型化无线无源应变传感器阵列由3个夹角为120°的传感器单元组成。传感器单元由贴片天线和RFID芯片构成,贴片天线同时承担应变传感和无线通信的功能。在应变检测过程中,RFID阅读器通过平板天线向传感器发射连续的询问电磁信号。传感器捕获信号,并将其中部分能量传输到RFID芯片。当RFID芯片获得的能量超过其激活阈值时,芯片被激活。芯片对的传感器的贴片天线进行信号调制后,向平板天线反射向散载有应变信息的RFS、RSSI等特征参数信号。平板天线接收反向散射信号,将其转换为电流信号,由RFID阅读器进行处理。当传感器检测到应变时,传感器的贴片天线几何尺寸随结构变形而改变,导致其特征参数发生变化。因此,通过RFID阅读器获取载有应变信息的特征参数信号,可以反演出被测结构的应变信息。当RFID阅读器读取应变传感器阵列时,每个RFID

芯片所包含的唯一 EPC 编码可供 RFID 阅读器识别,从而实现对各传感器单元特征参数的提取。

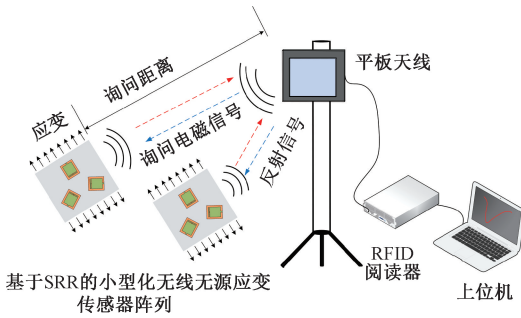


图 1 基于 RFID 的无线无源应变传感系统

Fig. 1 Wireless passive strain sensing system based on RFID

1.2 贴片天线应变检测原理

贴片天线由介质基底、辐射元和接地平面构成,其基本结构如图 2 所示。根据电磁场理论,贴片天线的谐振频率 f_0 可表示为:

$$f_0 = \frac{c}{2(L_e + L_{oc}) \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; L_e 为贴片的电长度; ϵ_{re} 为天线的有效介电常数; L_{oc} 为边缘效应产生的附加电长度。当天线沿长度方向产生应变 ϵ_L 时,辐射元的电长度发生改变,此时天线的谐振频率会变化为:

$$f_{\epsilon_L} = \frac{c}{2(1 + \epsilon_L)(L_e + L_{oc}) \sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{f_0}{1 + \epsilon_L} \quad (2)$$

实际应用中,结构产生的应变通常在微应变量级。因此,可以将式(2)使用泰勒公式展开,忽略高次项,并整理式得式(3),由此可知,贴片天线的 Δf_L 与应变呈线性关系。

$$\Delta f_L = f_{\epsilon_L} - f_0 \approx K_L \cdot \epsilon_L \quad (3)$$

式中: Δf_L 为贴片天线在电长度方向上产生的 RFS; $K_L = -f_0$ 为贴片天线在电长度方向的灵敏度系数。同理,当天线沿宽度方向产生应变 ϵ_w 时,此时贴片天线的 Δf_w 与应变的关系可以表示为:

$$\Delta f_w = f_{\epsilon_w} - f_0 \approx K_w \cdot \epsilon_w \quad (4)$$

式中: Δf_w 为贴片天线在电宽度方向上产生的 RFS; $K_w = \nu f_0$ 为贴片天线在电宽度方向上的灵敏系数, ν 表示泊松比(假定贴片和介质基底材料的泊松比相等,均为 ν)。

当任意方向应变作用于贴片天线时,天线的 RFS 与应变的关系可表示为:

$$\Delta f = \Delta f_L + \Delta f_w = K_L \cdot \epsilon_L + K_w \cdot \epsilon_w \quad (5)$$

当金属结构产生应变时,传感器的 RFS 也会发生改变,因此,通过检测传感器的 RFS,可以反演出待测金属结构的应变大小。

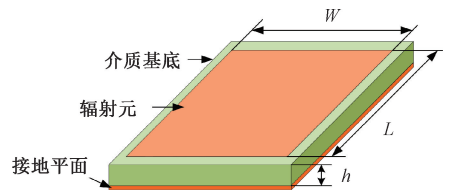


图 2 贴片天线基本结构

Fig. 2 Basic structure of the patch antenna

1.3 传感器的阻抗匹配

设计的传感器谐振频率为 915 MHz,为实现传感器与射频芯片的阻抗匹配,以达到最佳的传输效率,需事先确定 RFID 芯片在工作频率下的阻抗。因此,选择 Alien 公司的 Higgs-3 芯片作为传感器的 RFID 芯片,该芯片支持 EPC1G2 和 ISO18000-6C 标准,读灵敏度为 -18 dBm,写灵敏度为 -13.5 dBm。芯片的等效电路如图 3 所示,其中, C_p 为 0.85 pF, R_p 为 1 500 Ω 。

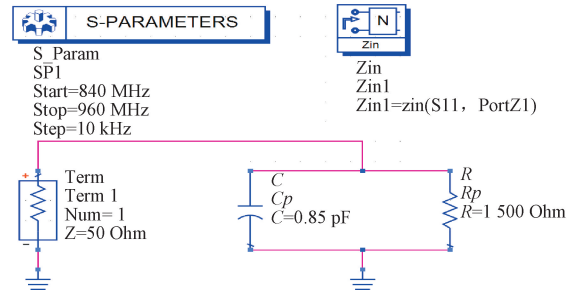


图 3 Higgs-3 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of Higgs-3

在 ADS 仿真软件中建立 Higgs-3 芯片的等效电路仿真模型,得到 860~960 MHz 范围内芯片阻抗与频率的关系,实部如图 4(a) 所示,芯片的电阻随频率的增加而减小。虚部如图 4(b) 所示,芯片电抗随频率的增加而增大。在 915 MHz 处,芯片的阻抗为 27.406-200.892i Ω 。

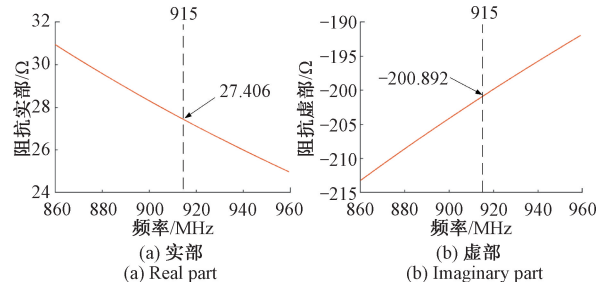


图 4 Higgs-3 阻抗与频率的关系

Fig. 4 Relationship between impedance and frequency of Higgs-3

由高频电路原理可知,RFID 传感器贴片天线与 RFID 芯片之间的阻抗匹配程度可以用反射系数 Γ 来

表征:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a} \quad (6)$$

式中: Z_a 为 RFID 传感器贴片天线的输入阻抗; Z_c 为 RFID 芯片的阻抗。回波损耗参数 S11 与反射系数之间的关系可表示为:

$$S11 = 20 \log | \Gamma | = 20 \log \left| \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a} \right| \quad (7)$$

回波损耗越小,表示传感器天线的反射波功率与入射波功率之比越小,传感器的信号能量损耗越低。因此,由式(7)可知,为保证 RFID 传感器的工作效率和性能,传感器的阻抗值应设计为 $27.406 + 200.892i \Omega$ 。

1.4 传感器的结构设计

由式(1)可知,为使贴片天线的工作频率达到 915 MHz,贴片天线辐射元的电长度需达到 150 mm。然而,为更好的将传感器应用于航空结构的应变测量,以精确地反映其局部变形,该尺寸无法要求,因此需要对传感器进行结构优化。然而,通过对贴片天线辐射元开孔、加载集总元件和弯折,虽能减小其尺寸,但会导致传感器电磁性和灵敏度降低。SRR 可在不增加传感器尺寸的情况下,改善其电磁特性、提高辐射效率、减小标签天线间的耦合^[19],从而实现传感器小型化设计和灵敏度提高。因此,通过将贴片天线的辐射元设计为 SRR 和 T 型阻抗匹配网络的耦合结构,以调整阻抗,实现传感器的小型化和灵敏度提高。最终设计的传感器结构如图 5 所示,其由辐射元、介质基底、接地平面和 RFID 芯片 4 部分构成,整体结构左右对称。 L 和 W 分别表示传感器的长度和宽度、 a 和 b 分别表示阻抗匹配网络的长度和宽度、 g 表示 SRR 的开口宽度、 L_s 表示 SRR 的方环宽度、 W_s 表示 T 型阻抗匹配网络的缝隙宽度、 h 表示介质基底的厚度。介质基底采用相对介电常数为 4.4,介电损耗为 0.02 的 FR4。辐射元、阻抗匹配网络和接地平面均由 35 μm 厚的敷铜构成。

传感器的等效电路如图 6 所示,主要包括 RFID 芯片、阻抗匹配结构、SRR 结构和辐射场 4 部分。通过调节阻抗匹配结构的参数,使其感抗与 RFID 芯片部分的容抗相互抵消,实现传感器与 RFID 芯片之间的良好共轭匹配。

1.5 传感器阵列的应变大小和方向检测机制

单个传感器只能检测单向应变,为实现应变大小和方向的定量检测,利用 1.4 节设计的传感器构建了如图 7 所示的传感器阵列。该传感器阵列由 3 个传感器单元组成,每个传感器单元之间间隔 120° 。假设被测结构应变的方向 θ 为应变与传感器 1 独立坐标系 y 轴正向之间所形成的夹角,根据三角函数与矢量分解原理,传感器单元

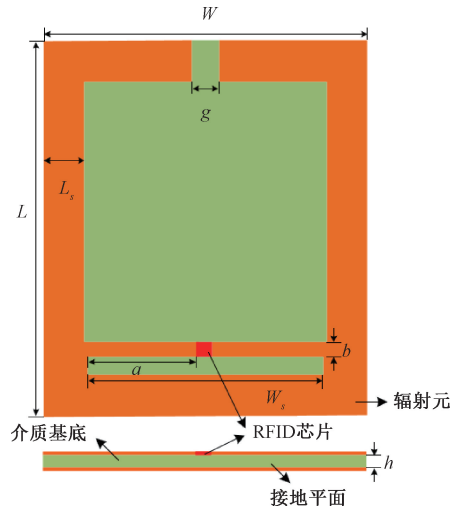


图 5 传感器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sensor structure

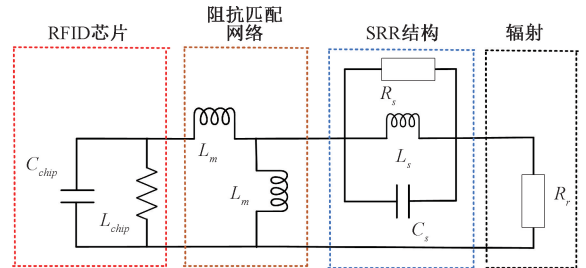


图 6 传感器的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of sensors

的 RFS 和应变之间的关系^[20]可以表示为:

$$K_L \varepsilon | \cos(\Delta\theta_n) | + K_W \varepsilon | \sin(\Delta\theta_n) | = \Delta f_n \quad (8)$$

式中: $\Delta\theta_n = \theta - \theta_n$ 为应变与第 n 个传感器单元局部坐标系 y 轴的夹角,其中, θ_n ($n = 1, 2, 3$) 为第 n 个传感器单元的角度间隔; ε 为应变大小; Δf_n 为第 n 个传感器单元产生的 RFS。以上的公式均在各谐振器的独立笛卡尔坐标系内成立。基于此,3 个传感器单元的频移方程构成了超定方程组:

$$\begin{aligned} K_L \varepsilon | \cos\Delta\theta_1 | + K_W \varepsilon | \sin\Delta\theta_1 | &= \Delta f_1 \\ K_L \varepsilon | \cos\Delta\theta_2 | + K_W \varepsilon | \sin\Delta\theta_2 | &= \Delta f_2 \\ K_L \varepsilon | \cos\Delta\theta_3 | + K_W \varepsilon | \sin\Delta\theta_3 | &= \Delta f_3 \end{aligned} \quad (9)$$

应变的大小和方向可以由式(10)确定。

$$e = \min \sum_1^n (K_L \varepsilon | \cos(\Delta\theta_n) | + K_W \varepsilon | \sin(\Delta\theta_n) | - \Delta f_n)^2 \quad (10)$$

式中: e 表示超定方程组(式(9))的最小二乘解,使 e 具有最小值的 ε 是待测结构应变的大小; θ 为待测结构应变的方向。传感器的灵敏度通过不同方向和大小的应变引起的 RFS,代入式(11)进行求解。

$$Q = \min \sum_i (K_L \varepsilon_i | \cos(\theta_i) | + K_W \varepsilon_i | \sin(\theta_i) | - \Delta f_i)^2 \quad (11)$$

式中: i 为不同方向和大小的应变数据的总数、 Δf_i 、 ε_i 和 θ_i 已知。 Δf_i 表示传感器阵列单元在不同应变方向和大小下的 RFS; θ_i 为传感器阵列单元与应变方向之间的角度。 Q 为式(11)的最优解,当 Q 取最小值时, K_L 和 K_W 为传感器灵敏度的反演值。

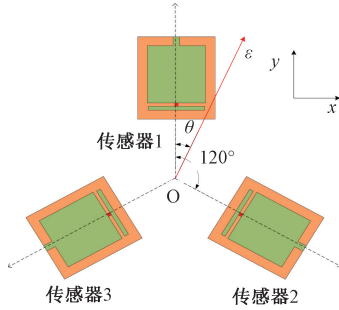


图 7 传感器阵列示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sensor array

2 无线无源应变传感器的仿真分析

2.1 传感器结构参数仿真优化

采用有限元仿真软件 HFSS 对 1.4 节设计的传感器进行结构参数优化与仿真分析。仿真模型中,介质基底设置为 FR4 材料,辐射元和接地平面使用理想导体代替。在 HFSS 中,将所设计传感器的结构参数设置为优化变量,并将优化目标设定为 $f=915$ MHz 时,传感器的阻抗参数 $Z=27.406+200.892i \Omega$ 。为了确保传感器尺寸满足小型化和阻抗匹配的要求,设定了优化约束条件: L 尺寸范围为 26.6 ~ 28.2 mm, W 尺寸范围为 25.8 ~ 27.6 mm, g 尺寸范围为 1.8 ~ 3.1 mm, b 尺寸范围为 0.8 ~ 1.4 mm, a 尺寸范围为 3.0 ~ 8.6 mm。采用 HFSS 软件中的拟牛顿参数优化算法对传感器各结构参数进行迭代优化。最终传感器的设计参数如表 1 所示。

表 1 传感器的设计参数

Table 1 Design parameters of the sensor

参数	值/mm	参数	值/mm
a	7.95	W_s	16.91
b	1.09	L	27.00
g	2.00	W	26.00
L_s	3.00	h	1.00

优化后的传感器回波损耗曲线,如图 8(a) 所示,可以看出传感器谐振频率为 915.18 MHz。在谐振频点处回波损耗小于 -36 dB,这表明由于采用了 SRR,传感器的

品质因数较高。优化后传感器的阻抗与传感器工作频率的关系如图 8(b) 所示,可以看出在 915.18 MHz 处,传感器的阻抗为 $29.27+198.87i \Omega$,表明传感器与 RFID 芯片实现了良好的阻抗匹配。

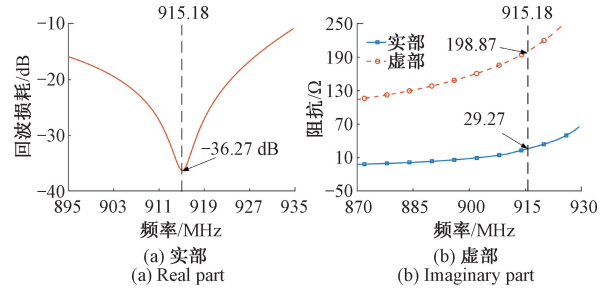


图 8 传感器性能仿真结果

Fig. 8 Simulation results of sensor performance

传感器的电流分布仿真结果如图 9 所示。由于传感器结构具有左右对称性,其表面电流分布也呈现左右对称的形式。在 SRR 结构的影响下,传感器的表面电流通路形成双环形扰流,有效增大了辐射元的电长度,从而实现了传感器的小型化设计。

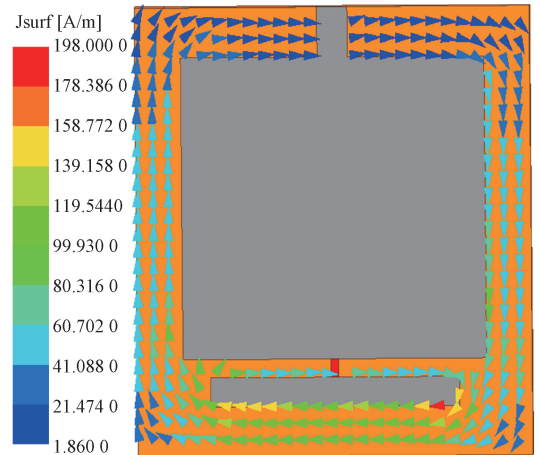


图 9 传感器表面电流路径分布

Fig. 9 Distribution of surface current paths on the sensor

传感器的表面电场分布如图 10 所示,同样因为传感器结构左右对称,其表面电场分布也呈现左右对称形式。在 SRR 结构的影响下,传感器在局部区域的电磁场强度较高,表现出良好的辐射性能,有助于提升传感器的灵敏度。

由微波理论可知,几何结构参数中的传感器长度 L 、宽度 W 和 SRR 的开口宽度 g 是影响传感器谐振频率的主要因素。首先讨论 L 对传感器谐振频率的影响,设置 L 的变化范围从 27.0 ~ 27.8 mm,步长为 0.2 mm, L 对传感器谐振频率的影响如图 11(a) 所示,从图 11(a) 可以看出,随着 L 的增加,谐振频率明显向低频偏移。传感器宽

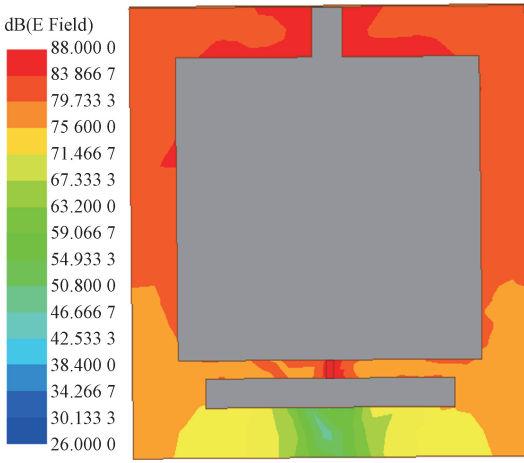


图 10 传感器表面电场分布

Fig. 10 Electric field distribution on the surface of the sensor

度 W 对传感器谐振频率的影响如图 11(b) 所示,随着 W 的增加,谐振频率明显向低频移动。SRR 结构的开口宽度 g 对传感器谐振频率的影响如图 11(c) 所示,随着 g 的增加,谐振频率向高频方向偏移,但其对谐振频率的影响程度低于参数 L 和 W 。

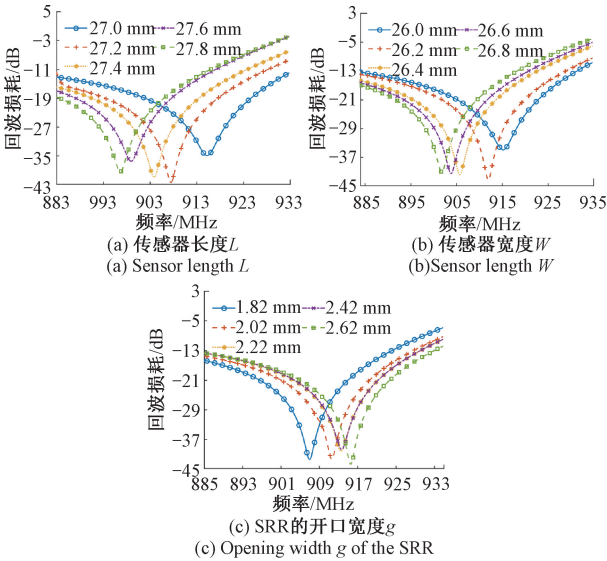


图 11 几何参数对传感器谐振频率的影响

Fig. 11 Effect of geometric parameters on the resonant frequency of the sensor

2.2 传感器“力-磁”耦合仿真分析

由于 HFSS 只能处理电磁场仿真问题,无法处理力学耦合问题,因此采用 COMSOL 多物理场仿真软件中的力学模块和电磁场模块,研究传感器的 RFS 与应变参数之间的关系。在 COMSOL 中建立的仿真模型如图 12 所示,包括理想匹配层、传感器和 6061 铝板,铝板长为 100 mm,宽为 80 mm,传感器和铝板置于外围球体的中

心。辐射元和接地平面均采用理想导体模拟,RFID 芯片被设置为集总端口。

传感器附着在被测铝板表面,传感器与铝板之间为理想连接,接触面共享节点。在 COMSOL 固体力学物理场中对传感器进行力学分析,将待监测铝制构件的一端设置为固定约束,另一端施加均匀荷载。以应变方向 θ 为参数变量,分别建立 $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 共 4 组模型,每个方向的应变范围分为 $0 \sim 1\ 250\ \mu\epsilon$,步长为 $250\ \mu\epsilon$,共 6 组应变等级。

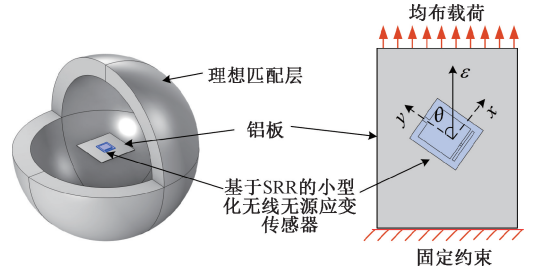


图 12 COMSOL“力-磁”耦合仿真模型

Fig. 12 COMSOL “force-magnetic” coupling simulation model

仿真过程中铝板的位置和施加荷载方向保持不变,通过旋转传感器的方式调整其所受应变方向。力学仿真结束后将变形后的传感器模型导入电磁模块。在电磁模块仿真中,对传感器模型进行扫频分析,得到了传感器在不同方向和不同大小应变下的回波损耗曲线,如图 13(a)~(d)所示。仿真结果表明,在不同方向应变下传感器的谐振频率随着应变的增加而减小,并且谐振频率与应变大小基本呈线性关系,这表明设计的应变传感器具有检测不同方向应变的能力。

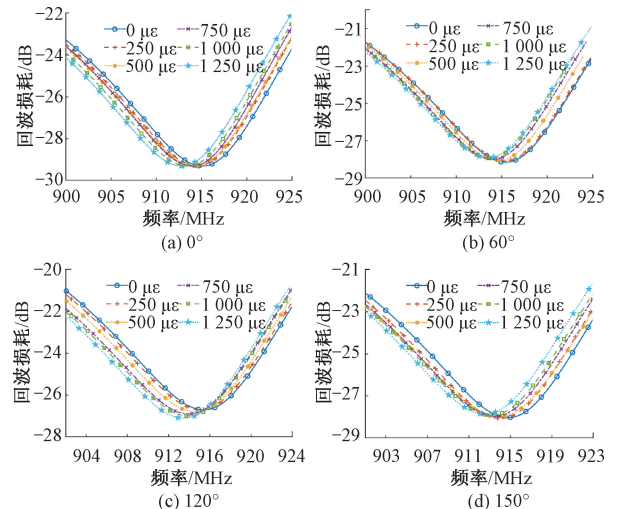


图 13 不同方向和不同大小应变下的回波损耗曲线

Fig. 13 Return loss curves under strains of different directions and magnitudes

通过提取传感器回波损耗曲线的“波谷”点对应的谐振频率,计算不同应变参数下传感器的 RFS,结果如表 2 所示。将表 2 的各方向应变下传感器的 RFS 代入式(11)中,并采用最小二乘法求解得到传感器电长度和电宽度方向灵敏度反演值 K_L 和 K_W 分别为 -1.669 和 $-0.876 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ 。结果表明,传感器在电长度方向上的灵敏度高于电宽度方向上的灵敏度。从传感器的电流分布和电场分布可以观察到,由于长度和宽度方向上的应

变都会增加辐射元的电长度,因此传感器的谐振频率均向低频移动。长度方向上的电流路径大于宽度方向的电流路径,当待测试件产生应变时,传感器长度方向上的电流路径长度变化更为显著,导致谐振频率的变化量更大。此外,传感器在长度方向上的整体电场强度高于宽度方向上的整体电场强度。综上所述,传感器在电长度方向上的灵敏度高于电宽度方向上的灵敏度,所设计的传感器灵敏度较高。

表 2 不同方向应变引起的谐振频率偏移量

Table 2 RFS caused by strain in different directions

应变/ $\mu\epsilon$	RFS/MHz($\theta=0^\circ$)	RFS/MHz($\theta=60^\circ$)	RFS/MHz($\theta=120^\circ$)	RFS/MHz($\theta=150^\circ$)
250	-0.586 0	-0.085 9	-0.332 9	-0.731 9
500	-0.799 1	-0.793 0	-0.799 9	-0.967 0
750	-1.162 0	-1.421 0	-1.445 0	-1.365 0
1000	-1.680 0	-1.721 0	-1.508 0	-1.603 9
1250	-2.297 0	-1.962 9	-1.960 0	-2.226 0

3 实验测量及结果分析

3.1 传感器制备

该传感器通过感光刻蚀法制作,工艺流程如下:首先将 FR4 覆铜板涂覆感光蓝油并烘干;然后将带有传感器图案的菲林覆盖其上并曝光;随后进行显影、刻蚀及清洗处理,完成传感器的制备。工艺流程如图 14 所示。

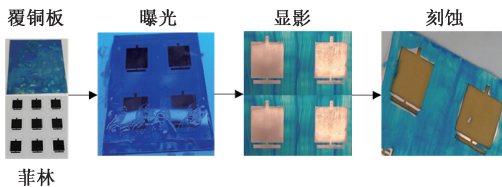


图 14 传感器制备工艺流程

Fig. 14 Sensor fabrication process flow

将制备好的传感器通过精密数控切割机按照设计尺寸切割为单个传感器并焊接 RFID 芯片。最终制作完成的传感器如图 15 所示。

3.2 实验设置

将制作好的传感器粘贴在待测铝板试件表面,压实并挤出接触面可能存在的汽包。然后在室温下持续压实固化 10 h 以上,确保粘接剂达到完全固化强度。在铝板试件背面的无线应变传感器对称位置粘贴两个电阻应变片,以获得标定应变,并通过 XL2118A 静态电阻应变仪读取应变值。为获得传感器在电长度和电宽度方向上的灵敏度的反演值 K_L 和 K_W ,在 0° 、 60° 、 120° 和 150° 应变方向下进行了拉伸试验,最终制作完成的拉伸试件如图 16 所示。

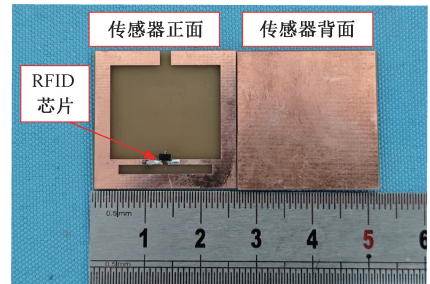


图 15 传感器实物

Fig. 15 Manufactured strain sensor

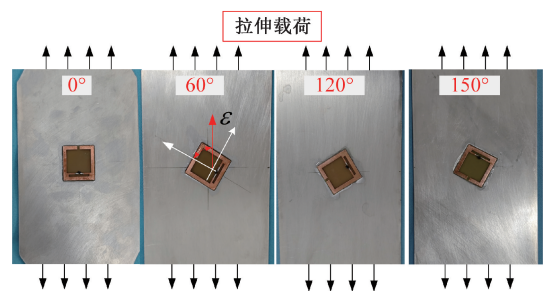


图 16 不同方向拉伸试件

Fig. 16 Tensile specimens in different directions

拉伸实验平台如图 17 所示,由 Tagformance Pro 标签阅读器、平板天线、6061 铝板试件、电阻应变片、无线应变传感器、XL2118A 静态电阻应变仪和 WANCE 公司的 ETM105D 拉伸试验机组成。Tagformance Pro 标签阅读器可根据 EPC 编码对指定无线应变传感器发送扫频询问信号,并自动测量每个频点下的询问功率。搭建好实验平台后,利用拉伸试验机对试件进行加载,将试件两端夹持,通过上位机程序控制拉伸试验机施加范围为 $0 \sim$

10 kN 的载荷,加载步长为 2 kN,在每一级加载完成后持续 2 min。待静态电阻应变仪读数稳定后记录电阻应变片的应变值。以此同时使用标签阅读器对无线应变传感器进行扫频询问,通过阅读器上位机软件记录传感器各频点的询问功率值。

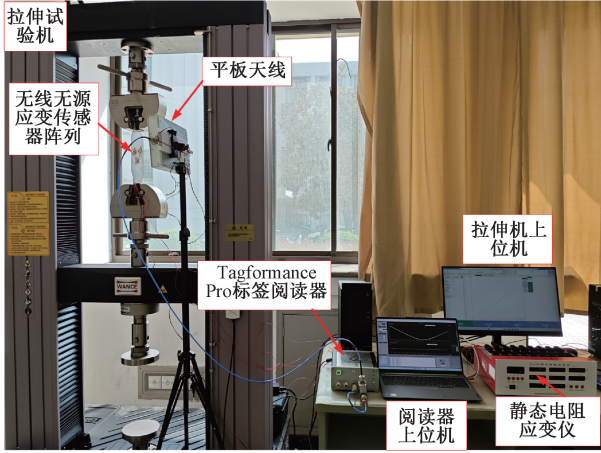


图 17 拉伸实验平台

Fig. 17 Experimental tensile testing platform

3.3 实验结果与分析

实际测试中通常使用询问功率曲线来获取传感器的谐振频率^[21],最小询问功率点对应的频率即为传感器的谐振频率,此时传感器的功率反生射系数最小,也即回波损耗参数最小。导出标签阅读器中记录的各应变下的询问功率数据,最终得到传感器在不同方向,不同大小应变下的询问功率曲线如图 18(a)~(d)所示。选取拟合曲线的波谷点对应的横坐标数值作为传感器在该级应变下的谐振频率。将拉伸实验得到不同方向,不同应变大小下的 RFS 代入式(11)求解,最终得到应变传感器在电长

度和电宽度方向上的反演灵敏度分别为 -1.517 和 $-0.732 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ 。

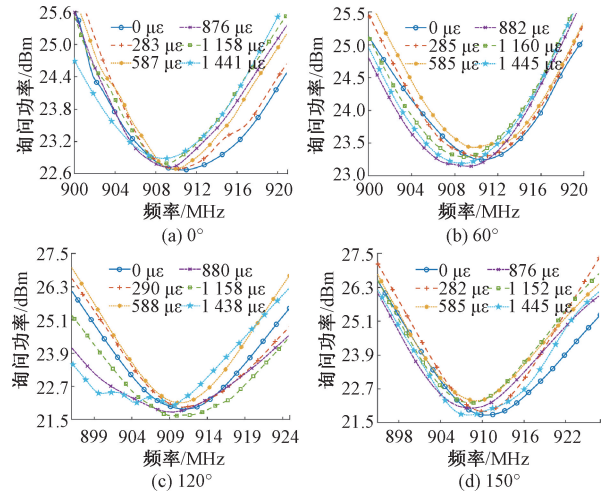


图 18 传感器在不同方向,不同大小应变下的询问功率曲线

Fig. 18 Interrogation power curves of the sensor under different strain magnitudes and directions

为了验证基于 SRR 的小型化无线无源应变传感器阵列对应变大小和方向定量检测能力,设计了应变方向为 60° 、 95° 和 135° 3 组传感器阵列拉伸实验。 60° 、 95° 和 135° 3 个不同角度拉伸试件无线无源应变传感器阵列的位置如图 19 所示,实验通过旋转 3 个传感器单元相对位置来实现不同方向应变的施加。实验过程中控制拉伸试验机施加范围为 $1\sim 7 \text{ kN}$ 的载荷,加载步长为 2 kN 。在每一级加载完成后持续 5 min ,同时使用 Tagformance Pro 标签阅读器根据 EPC 编码对传感器单元进行扫频询问,分别记录不同方向应变下传感器单元的 RFS。待静态电阻应变仪读数稳定后记录电阻应变片的应变值。

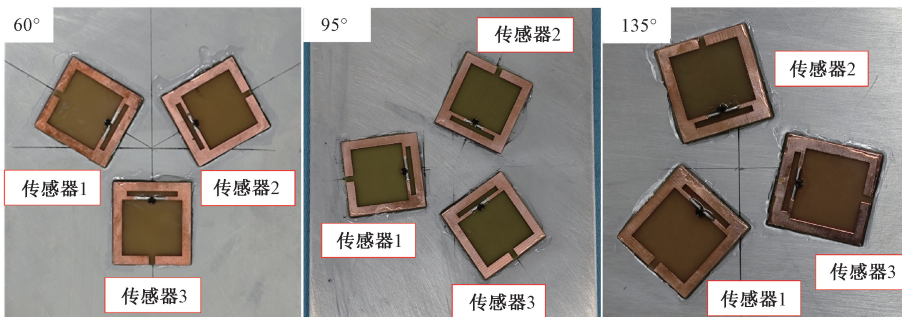


图 19 应变传感器阵列拉伸试件

Fig. 19 Tensile specimens of the strain sensor array

表 3 为无线应变传感器阵列应变大小和方向的实验测量结果。实验结果表明,无线应变传感器阵列的应变大小测量相对误差的绝对值在 8.5% 以内,应变方向的最

大绝对误差在以 10° 以内,平均绝对误差为 6.06° 。当应变大于 $450 \mu\epsilon$ 时,应变大小的相对误差小于 5% ,应变角度的绝对误差小于 7.5° ,应变大小的相对误差随应变的

增大而减小,传感器对较大应变的检测精度较高。实验误差主要来源于传感器的制造误差、焊接工艺、标签阅读器的随机误差以及解析式拟合误差。

近年来,国内外学者将 RFID 与贴片天线相结合,提出了多种用于金属结构表面应变检测的方法,具体对比如表 4 所示。与其他学者设计的传感器相比,基于 SRR

的小型化无线无源应变传感器在传感器尺寸和灵敏度等方面展现出显著优势,不仅提高了传感器的集成度,还有效降低了制造成本。此外,所提出的由 3 个传感器单元组成的 120° 应变传感器阵列,实现了金属结构表面应变大小和方向的定量检测。

表 3 应变大小和方向的实验测量结果

Table 3 Experimental measurement results of strain magnitude and direction

拉伸载荷/ kN	应变片测 量值/ $\mu\epsilon$	应变方向理 论值/ $(^\circ)$	应变大小反 演值/ $\mu\epsilon$	应变方向反 演值/ $(^\circ)$	应变大小相对 误差/ $\%$	应变方向绝对 误差/ $(^\circ)$
1	148	60	140.26	66.44	-5.23	6.44
1	149	95	136.65	102.02	-8.29	7.02
1	146	135	153.44	125.75	5.10	-9.25
3	450	60	429.78	67.40	-4.49	7.40
3	447	95	464.18	100.71	3.84	5.71
3	445	135	432.37	127.29	-2.84	-7.71
5	738	60	755.01	64.64	2.30	4.64
5	742	95	718.26	88.00	-3.20	-7.00
5	738	135	721.34	138.29	-2.26	3.29
7	1034	60	1015.15	56.16	-1.82	-3.84
7	1032	95	1065.11	101.39	3.21	-6.39
7	1028	135	1011.83	130.94	-1.57	-4.06

表 4 金属结构表面应变检测方法对比

Table 4 Comparison of strain detection methods for metallic structures

方法	传感器尺寸/mm	特征参数	灵敏度 ($\text{kHz} \cdot \mu\epsilon^{-1}$)
开槽矩形贴片天线 ^[6]	48.0×44.0×0.79	归一化 RFS	$-0.681 \times 10^{-6} / \mu\epsilon$
组合矩形贴片天线 ^[7]	60.0×30.0×1.5	RFS	-0.790
PIFA ^[8]	长×宽;92.0×27.0	RFS	-0.450
圆形贴片天线 ^[16]	直径:78.6	RFS	$0^\circ: -1.218, 15^\circ: -1.064, 30^\circ: -0.881$ $45^\circ: -0.375, 60^\circ: -0.054, 75^\circ: 0.068, 90^\circ: 0.415$
短路截线馈电贴片天线 ^[18]	48.0×27.0×0.8	RFS	$K_L = -0.874, K_W = 0.057$
双模矩形贴片天线传感器 ^[21]	119.13×61.98×0.762	RFS	$K_L = -0.582$
基于 SRR 的小型化无线无源应变传感器阵列(本文)	26.0×27.0×1.0	RFS	$K_L = -1.517, K_W = -0.732$

4 结 论

为满足复杂应力条件下的飞机机翼等大型金属结构应变大小和方向的检测需求,利用 SRR 辐射能力强、低损耗和品质因数高等优点,基于三角函数与矢量分解原理设计了一种由 3 个夹角为 120° 的传感器构成的小型化无线无源应变传感器阵列并完成了传感器制备。实验结果表明,该传感器在电长度方向和电宽度方向上的灵敏度分别为 -1.517 和 $-0.732 \text{ kHz}/\mu\epsilon$,所提出的传感器阵列应变大小检测精度在 8.5% 以内,方向检测误差在 10° 以内。该传感器阵列可实现应变大小和方向定量检测,且具有体积小、制作成本低、灵敏度高优势。在未来,

将对传感器阵列的抗干扰性能、不同 RFID 传感器之间的相互耦合进一步研究。

参考文献

- [1] ZENG X P, LIU X, SUN H. Prognosis of fatigue cracks in an aircraft wing using an adaptive tunable network and guided wave based structural health monitoring [J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(10): 105025.
- [2] YOON J, LEE J, KIM G, et al. Deep neural network-based structural health monitoring technique for real-time crack detection and localization using strain gauge sensors [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 20204.
- [3] LI S S, YUE X, LI Q Y, et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry [J].

- Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27(4): 944-983.
- [4] 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 Y J, WANG B T, NING Y, et al. Research progress on strain monitoring technology for aircraft structures [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 109-114.
- [5] 李子帆,邹希岳,梁晓瑜,等. 无源无线应变传感器中压电材料接触力学模型研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(2):243-251.
LI Z F, ZOU X Y, LIANG X Y, et al. Contact mechanics study of piezoelectric materials in passive wireless strain sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 243-251.
- [6] YI X, CHO C, WANG Y, et al. Battery-free slotted patch antenna sensor for wireless strain and crack monitoring [J]. Smart Structures & Systems, 2016, 18(6): 1217-1231.
- [7] 沈雁彬,黄程,黄蔚霞,等. 基于无源 RFID 技术的贴片天线应变传感器研究[J]. 空间结构,2022,28(2): 3-9.
SHEN Y B, HUANG CH, HUANG W X, et al. Research on antenna strain sensor based on passive RFID technology[J]. Spatial Structures, 2022, 28(2): 3-9.
- [8] KUHN M F, BREIER G P, DIAS A R P, et al. A novel RFID-based strain sensor for wireless structural health monitoring [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(2): 1-10.
- [9] CHAKARAVARTHI G, PRASATH L K, PHILIP J, et al. Reusable passive wireless RFID sensor for strain measurement on metals [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5143-5150.
- [10] 江正峰,高尚,江剑. 波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(1): 1-8.
JIANG ZH F, GAO SH, JIANG J. Design of resonant ring microstrip array multi-crack detection sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 1-8.
- [11] HERBKO M, LOPATO P. Application of a single cell electric SRR metamaterial for strain evaluation [J]. Materials, 2021, 15(1): 291-300.
- [12] DIJVEJIN Z A, KAZEMI K K, ZARASVAND K A, et al. Kirigami-enabled microwave resonator arrays for wireless, flexible, passive strain sensing [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(39): 44256-44264.
- [13] BAGHELANI M, ABBASI Z, DANESHMAND M. High-dynamic-range chipless microwave resonator-based strain sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(3): 1-7.
- [14] HUA J P, XIAO Q Y, PI Q S, et al. A noncontact feed microwave metal devices deformation and stress sensor based on metamaterial [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9642-9652.
- [15] 周凯,刘志平,毛艳飞,等. 贴片天线传感器平面二维应变测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(1): 136-143.
ZHOU K, LIU ZH P, MAO Y F, et al. Plane two-dimensional strain measurement method of patch antenna sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 136-143.
- [16] SONG G R, ZHANG B P, LYU Y, et al. Strain omnidirectional detection based on circular patch antenna[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 315(8): 112275.
- [17] LU X G, ZHANG F L, ZHU L G, et al. A terahertz meta-sensor array for 2D strain mapping [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 3157-3165.
- [18] ZHANG M C, QIU J C, LAN Y W, et al. Detection of strain magnitude and direction based on an RFID sensor array [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(1): 1-13.
- [19] ABDULLAH S, XIAO G, AMAYA R E. A review on the history and current literature of metamaterials and its applications to antennas & radio frequency identification (RFID) devices [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2021, 5(4): 427-445.
- [20] CHENG X, YU Y, WANG F, et al. A novel multiresonant chipless RFID tag for directional strain measurement on metal surface [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(2): 916-925.
- [21] LI D, WANG Y. Thermally stable wireless patch antenna sensor for strain and crack sensing [J]. Sensors, 2020, 20(14): 3835-3847.

作者简介



王贤,2018年于哈尔滨理工大学获得学士学位,现为南京理工大学硕士研究生,主要研究方向为无线无源传感器。

E-mail: wang_xian_cn@163.com

Wang Xian received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2018. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes wireless passive sensors.



高尚 (通信作者), 2017 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为结构健康监测。
E-mail: shang.gao@njust.edu.cn

Gao Shang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2017. He is now a lecturer at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes structural health monitoring.



杨尚可, 2024 年于南京理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为智能仪器设计。
E-mail: yangshangke@njust.edu.cn

Yang Shangke received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2024. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes intelligent sensor.



马立军, 2024 年于南京理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电机振动检测。
E-mail: malj0209@163.com

Ma Lijun received his B. Sc. degree

from Nanjing University of Science and Technology in 2024. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes Translation of motor vibration detection.



江剑, 分别于 1996 年和 1999 年获得南京理工大学学士学位和硕士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为测控技术与智能仪器。

E-mail: jiangj@njust.edu.cn

Jiang Jian received his B. Sc. and M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1996 and 1999, respectively. He is now an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include measurement and control technology and intelligent instruments.



雷一菲, 现为南京理工大学能源与动力工程学院在读本科生, 主要研究方向为武器发射工程专业。

E-mail: 3408688110@qq.com

Lei Yifei is now a B. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interest includes Weapon Launch Engineering.