

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508812

无线无源柔性 RFID 压力传感器^{*}

贺刘劝 吴佳慷 梁峻阁 顾晓峰

(江南大学集成电路学院 无锡 214401)

摘要:针对柔性电子与物联网感知需求,设计并制备了一种集成超高频 (ultra-high frequency, UHF) 射频识别 (radio frequency identification, RFID) 技术与电容传感原理的无线无源柔性压力传感器。该传感器将传统 RFID 标签与电容单元相结合,可实现对压力的实时监测。研究基于外部压力与 RFID 信号相位变化之间的响应机制,即当外力施加于传感器时,其柔性介电层发生压缩形变,导电层间距离减小引起敏感单元的电容变化。这一变化改变了天线端口的反射边界条件,体现为阅读器接收信号相位的显著偏移。为优化传感器性能,实验分析了微金字塔结构介电层对传感器灵敏度的影响。性能测试结果表明,所研发的传感器在 0~5 kPa 的范围内表现出优异的响应特性,灵敏度可达 4.011°/kPa,且检测上限可达 20 kPa,显示出宽泛的线性检测范围与良好的稳定性。研究为 UHF 频段的无线实时压力检测提供了一个参考方案,有助于扩大无线无源压力传感器在可穿戴电子设备领域的应用范围。

关键词: 射频识别;柔性介电层;电容式压力传感器;无线无源传感器

中图分类号: TN98;TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Wireless passive flexible RFID-based pressure sensor

He Liuquan Wu Jiakang Liang Junge Gu Xiaofeng

(School of Integrated Circuits, Jiangnan University, Wuxi 214401, China)

Abstract: A wireless passive flexible pressure sensor integrating ultra-high frequency (UHF) radio frequency identification (RFID) technology with capacitive sensing principles was designed and fabricated to address the sensing requirements of flexible electronics and the Internet of Things. The sensor combines a conventional RFID tag with a capacitive unit to enable real-time pressure monitoring. The response mechanism linking external pressure to the phase variation of the RFID signal was elucidated: under applied load, the flexible dielectric layer undergoes compressive deformation, reducing the spacing between conductive layers and thus altering the capacitance of the sensing element. This capacitance change modifies the reflection boundary condition at the antenna port, manifested as a pronounced phase shift in the reader-received signal. To optimize performance, the influence of a micro-pyramidal structured dielectric layer on sensitivity was experimentally investigated. Performance tests demonstrate that the developed sensor exhibits excellent response characteristics in the 0~5 kPa range, with a sensitivity of 4.011°/kPa and an upper detection limit of 20 kPa, evidencing a broad linear detection range and good stability. This work provides a reference scheme for wireless real-time pressure detection in the UHF band and promotes the potential application of wireless passive pressure sensors in the field of wearable electronic devices.

Keywords: radio frequency identification; flexible dielectric layer; capacitive pressure sensor; wireless passive sensor

0 引言

柔性压力传感器因其具有高柔性、高灵敏度、高分辨

率和快速响应等特性,在医疗健康监测、软体机器人及智能交互系统等领域展现出广泛的应用前景。传统有线或电池功能的传感方式难以满足长期植入、大面积分布及复杂形变场景下的使用需求。无线无源柔性传感器凭借

其无需外部供电、使用寿命长及无电气布线的固有优势,成为上述场景中的重要技术路线^[1-3]。

目前,主流的无线能量及数据传输技术主要包括电感-电容谐振^[4-6]、超高频 (ultra-high frequency, UHF) 射频识别 (radio frequency identification, RFID)^[7-9] 及近场通信 (near field communication, NFC)^[10-12] 等。其中, UHF RFID 技术通过阅读器天线发出电磁波为标签供电并进行双向通信,凭借其远距离 (可达数米) 识别能力及良好的多标签读写性能,已成为无源无线传感领域的研究热点^[13-14]。根据是否包含芯片, UHF RFID 传感器可分为无芯片与有芯片两种类型。前者通过阅读器天线向无芯片天线发射预定频率的电磁波,利用谐振结构对反向散射信号进行调制,实现对环境参数的感知^[15]。后者则通过天线-芯片阻抗失配引起的反向散射信号变化来完成传感^[16-17]。这些无源 UHF RFID 传感器已经在湿度^[18]、重金属离子浓度^[19]、冷链运输^[20] 及结构健康监测^[21] 等方面得到了广泛应用。

高性能压力传感器难以同时兼备无源、无线、柔性化与稳定的读取性能。Xu 等^[22] 提出了一种植入式压力传感器,通过检测谐振频率微小偏移实现对颅内压监测、眼压测量及组织力学评估。Nguyen 等^[23] 设计了一种无源智能传感器标签能够高精度地检测到气压。Brinker 等^[24] 开发一种无芯片传感器,通过建立谐振频率与压力的模型,实现了传感特性的定制。这些类传感器通常需要借助矢量网络分析仪等设备来确定谐振频率,难以实现便携化的实时监测。有芯

片的 UHF RFID 技术为上述问题提供了更可行的解决方案。

针对上述挑战,提出了一种基于 UHF RFID 技术的无线无源柔性压力传感器,该传感器将电容单元与 RFID 标签一体化集成,通过外力作用下介电层的弹性形变引起电容变化,进而调制反向散射信号的相位信息,实现压力信息的无线获取。核心创新主要体现在两个方面: 1) 在敏感材料层面,构建互锁金字塔结构介电层,使传感器在 0~5 kPa 区间的灵敏度达到单层金字塔结构介电层的 1.52 倍; 2) 在传感机制层面,因相位信息具有更高的稳定性与可靠性^[25],利用相位参数作为敏感量,有效提高了传感器的抗干扰能力和测量稳定性,拓宽其适用环境。实验结果表明,传感器的相位灵敏度达 $4.011^{\circ}/\text{kPa}$ (0~5 kPa),检测上限扩至 20 kPa,整体性能优于现有同类传感方案。本研究不仅发展了一种结构新颖、性能优越的柔性压力传感器,也为工业自动化、人机交互及康复医疗中的动态力监测提供了可靠且具应用前景的解决方案。

1 传感器的设计与制备

图 1 所示为传感器的设计与制备过程。介电层的制备流程如图 1(a) 所示。为获得 Ecoflex 介电层,首先,将 Ecoflex 硅橡胶的 A 和 B 组分按 1:1 的质量比混合均匀。将混合物倒入模具中,置于真空干燥箱中抽真空 4 h 去除气泡,随后转移至 50 °C 干燥箱中固化 2 h。

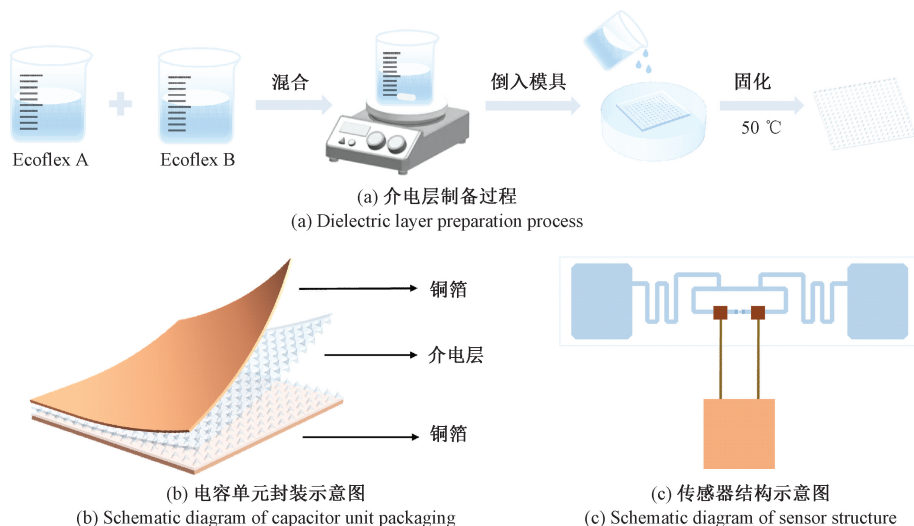


图 1 传感器的设计与制备

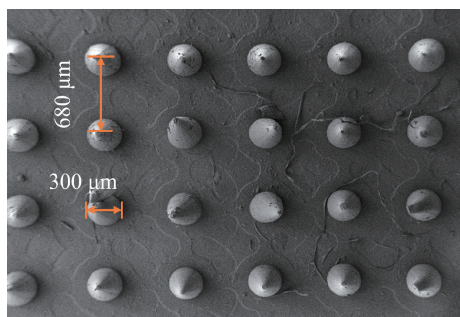
Fig. 1 Design and fabrication of sensors

电容单元为三明治结构,如图 1(b) 所示,包括上下两层导电金属电极及中间的介电层。采用厚度为 0.1 mm 的铜箔作为导电电极,将其贴合于所制备的介电

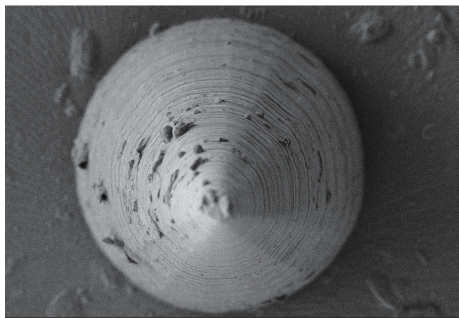
层两侧。最后用两根直径为 20 μm 的商用铜线分别焊接到上下铜箔表面引出电极。电容单元集成到 RFID 标签时,将两根铜线分别连接至标签天线和芯片之间,形成并

联模式,完成传感器的制备。传感器结构示意图如图 1(c)所示。

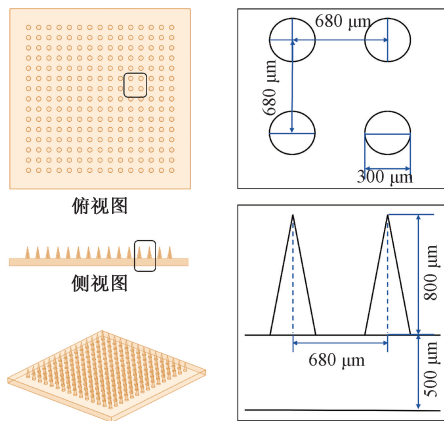
为了观察制作的介电层表面的微结构,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对其微结构进行表征。如图 2(a)所示,金字塔结构完整,轮廓清晰,并且均匀排列。单个金字塔底面直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$,相邻金字塔距离为 $680\text{ }\mu\text{m}$ 。图 2(b)是放大的单独一个金字塔的 SEM 图片。为进一步清晰展示金字塔结构的几何特征,图 2(c)给出了金字塔结构的俯视和侧视示意图,并标注了关键尺寸。



(a) 规整排列的金字塔微结构阵列
(a) Neatly arranged array of pyramid microstructures



(b) 单个金字塔图
(b) Single pyramid chart



(c) 金字塔三维示意图
(c) 3D schematic of the pyramid

图 2 金字塔结构表面形貌与几何特征
Fig. 2 Surface morphology and geometric features of the pyramid structure

2 结果与讨论

2.1 工作原理

图 3 所示为所提出的 UHF RFID 系统模型及柔性压力传感器的等效电路。无线传输中,阅读器通过发射天线持续辐射 UHF 频段(922.625 MHz)的电磁波以询问标签。当标签处于阅读器天线的有效工作区域时,其天线捕获部分入射电磁波能量,并通过阻抗匹配网络将其转换为 RFID 芯片工作所需的直流电源,从而激活标签;当外力施加于电容单元时,介电层受到压缩,导致上下导电层间距减小,电容值相应增大,该电容的变化进一步影响射频反射边界条件,引起反向散射信号的相位偏移。因此,标签通过内置天线返回的反向散射信号中既包括 RFID 芯片的身份信息,也携带了可被数字识别的相位偏移信号。标签通过反向散射将数据传回阅读器的过程则称为反向链路。柔性压力传感器的数字身份由集成 RFID 芯片的电子产品代码标识符(electronic product code identifier, EPC ID)唯一标识。阅读器可通过识别该 EPC ID 跟踪特定标签,从接收到的反向散射信号中解析出信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)和相位(Phase)值。因此,当前研究中可以利用 Phase 和 RSSI 估计外部施加的力,实现基于 RFID 的传感功能。

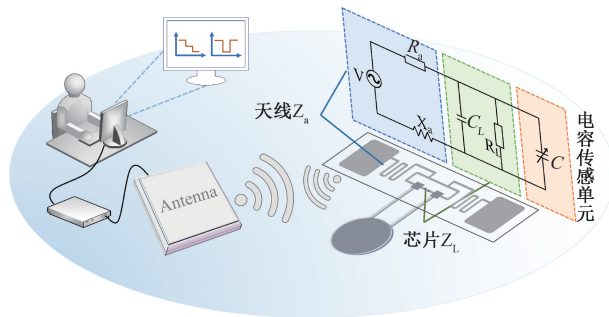


图 3 UHF RFID 系统模型与柔性压力传感器等效电路

Fig. 3 UHF RFID system model and equivalent circuit of flexible pressure sensor

标签通过改变天线的反射系数 Γ 来调制反向散射信号。反射系数 Γ 定义为:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_a^*}{Z_L + Z_a} \quad (1)$$

式中: $Z_L = R_L + jX_L$ 芯片的负载阻抗; $Z_a = R_a + jX_a$ 是标签天线的阻抗; R_a 、 R_L 分别为标签天线和标签芯片电阻; X_a 、 X_L 分别标签天线和标签芯片电抗; Z_a^* 为天线阻抗 Z_a 的共轭, $Z_a^* = R_a - jX_a$ 。

传感器的核心在于天线与芯片接口处并联电容单元

时,传感模块的电容 C 会随压力 P 变化,即 $C = C(P)$ 。当外力作用于传感器时,介电层发生压缩,其电容可表示为:

$$C(P) = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d_0 - \Delta d(P)} \quad (2)$$

式中: ε_0 为真空介电常数; ε_r 为介电层相对介电常数; A 为有效面积; d_0 为介电层的初始厚度; $\Delta d(P)$ 为在压力 P 作用下的厚度变化量。该可变电容 $C(P)$ 与标签芯片的固有负载阻抗 Z_L 并联,共同构成了一个压力敏感的等效负载阻抗 Z'_L :

$$Z'_L(P) = \frac{1}{\frac{1}{Z_L} + j\omega C(P)} = \frac{Z_L}{1 + j\omega C(P) Z_L} \quad (3)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为角频率; f 为阅读器发射的无线电电磁波的频率; 等效负载阻抗 Z'_L 是压力 P 的函数; 负载阻抗的变化转化为反射系数 Γ 的相位偏移,变为:

$$\Gamma(P) = \frac{Z'_L(P) - Z_a^*}{Z'_L(P) + Z_a} \quad (4)$$

$\Gamma(P)$ 是一个复数,可表示为:

$$\Gamma(P) = |\Gamma(P)| \cdot e^{j\angle\Gamma(P)} \quad (5)$$

式中: $|\Gamma(P)|$ 为反射系数的幅度; $\angle\Gamma(P)$ 即为反射系数的相位,也称为标签的响应相位,记为 $\varphi_{tag}(P)$ 。

Φ_m 是阅读器直接测量的每个标签反向散射信号的相位值^[26],可表示为:

$$\Phi_m = \varphi_{tag}(P) + \varphi_{offset} + \varphi_{noise} + \frac{4\pi fd}{c} \quad (6)$$

式中: $\varphi_{tag}(P)$ 由压力引起相位值; $\varphi_{offset}(P)$ 是阅读器、电缆和天线本身的固定相位偏置; $\varphi_{noise}(P)$ 是环境多径效应、电磁干扰等引入的随机相位噪声; $4\pi fd/c$ 是传播相位项,与阅读器和标签之间的距离 d 成正比; c 是光速。

在固定距离下进行测量时,初始压力 P_0 (通常为 0) 下,记录一个相位测量值 $\Phi_m(P_0)$,在压力变为 P 时,记录新的相位测量值 $\Phi_m(P)$,两者相减可以消除固定偏置和传播相位项,环境噪声也被一定程度抑制,最终得到相位差 $\Delta\Phi$ 仅由压力的变化 ΔP 引起:

$$\Delta\Phi = \Phi_m(P) - \Phi_m(P_0) \approx \Delta\varphi_{tag}(P) \quad (7)$$

针对动态场景测试中距离变化对压力引起的相位偏移测量的干扰,利用双标签差分处理方法^[27]。该方法通过阅读器同步采集来自传感标签与参考标签的反向散射信号,并由数据处理终端(计算机)对 2 路信号进行解调与解码。对传感信号与参考信号的相位及幅度变化进行差分处理,可有效抑制共模干扰(主要为距离引起的相位波动),从而提取出由外力引起的传感信号特征变化量,可实现移动场景下外力的准确估计。

2.2 柔性压力传感器性能测试

为确定传感器的优化设计方案,提高介电层的介电

常数,本研究通过构建单层微金字塔、互锁金字塔结构的介电层以增大其有效压缩量。针对不同介电层的传感器,测量了其在多种压力下的相位响应。传感器制备完成后,采用绝缘胶带将其固定于水平载物台中心位置,并与阅读器天线保持 10 cm 距离水平对准。通过依次垂直施加梯度负载(1、2、5、10、20、50、100 和 200 g 标准砝码),在每个负载稳定状态下同步采集标签反向散射信号的相位数据。每组实验重复 3~5 次,取平均值以降低随机误差。

如图 4 所示,2 种不同介电层制备的传感器,其相位均随压力的增加先迅速下降,然后缓慢降低。在 0~5 kPa 的第 1 线性区内,采用互锁金字塔结构时,传感器的灵敏度从 2.636°/kPa 显著提高至 4.011°/kPa。在 5~20 kPa 的第 2 线性区内,传感器的灵敏度也从 0.015°/kPa 显著提高至 0.420°/kPa。灵敏度的显著提升源于互锁金字塔结构独特的形变机制。在单层金字塔结构中,形变过程主要表现为单个圆锥体的垂直压缩,其侧壁与平板电极接触快速且不可控,导致电容响应过早饱和。相比之下,互锁金字塔结构中的圆锥体单元在一定程度上相互支撑,直到圆锥体变形达到饱和。受压过程中,上层圆锥侧壁沿下层圆锥侧壁发生渐进滑动与贴合,在微小形变快速缩小电极间距。随着压力增大,相互嵌入的圆锥体对介电层产生横向拉伸作用,使同一垂直压力下介电层间距变化更显著。当压力持续增大至上下圆锥体完全嵌合,形成稳定结构,有效分散压力并推迟电容响应的饱和点,从而扩展了传感器的高压工作区间。基于 2 种结构的形变机理分析与实验数据对比,互锁金字塔结构表现出更优的相位响应特性,因此最终采用该结构的介电层用于传感器制备。

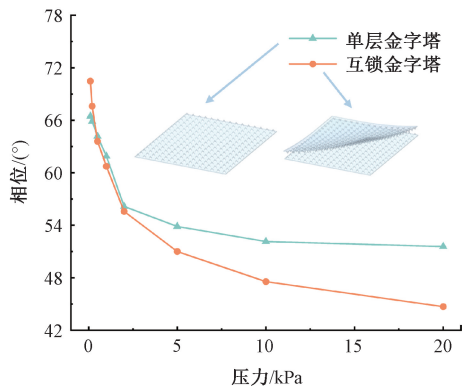


图 4 介电层优化与传感性能

Fig. 4 Dielectric layer optimization and sensing performance

传感器的性能测试结果如图 5 所示。为评估传感器在微小压力下的检测性能,将质量为 0.1~0.3 g 的轻质塑料置于传感器表面进行多次实验,结果表明在 0.3 g (30 Pa) 负载下传感器可检测到微小压力变化,并

伴随相位跃变,如图 5(a) 所示,证明其具有较低的检测下限,适用于微弱力学信号的捕捉。通过将 20 g 标准砝码(2 kPa)施加于传感器表面,测量其动态响应特性,结果如图 5(b) 所示。由于当物体靠近传感器的瞬间,相位会发生跳变,因此为减少外界干扰,将砝码垂直方向悬空放置后轻缓释放。传感器表现出快速的响应行为,响应时间约 112 ms,恢复时间约为 183 ms。进一步地,为验证传感器在较大预压背景下检测小信号的能力,预先施加 15 kPa 的压力后,依次施加 4 个小幅压力(2、2、1、

0.5 kPa),如图 5(c) 所示,相位变化仍清晰可见,表明该传感器在复杂负载条件下仍具有良好的小压力分辨能力。最后,对传感器进行了不同压力下循环测试,在 0.1~20 kPa 范围内以阶梯递增方式加载,每个压力水平重复循环 3 次,如图 5(d) 所示,相位响应均匀稳定,未出现明显性能衰减。对传感器进行连续 500 次循环压缩/释放测试(压力为 5 kPa),如图 5(e) 所示。可见,该传感器在整个测试过程中具有良好的可重复性与机械耐久性,能够适应复杂环境下的长期使用需求。

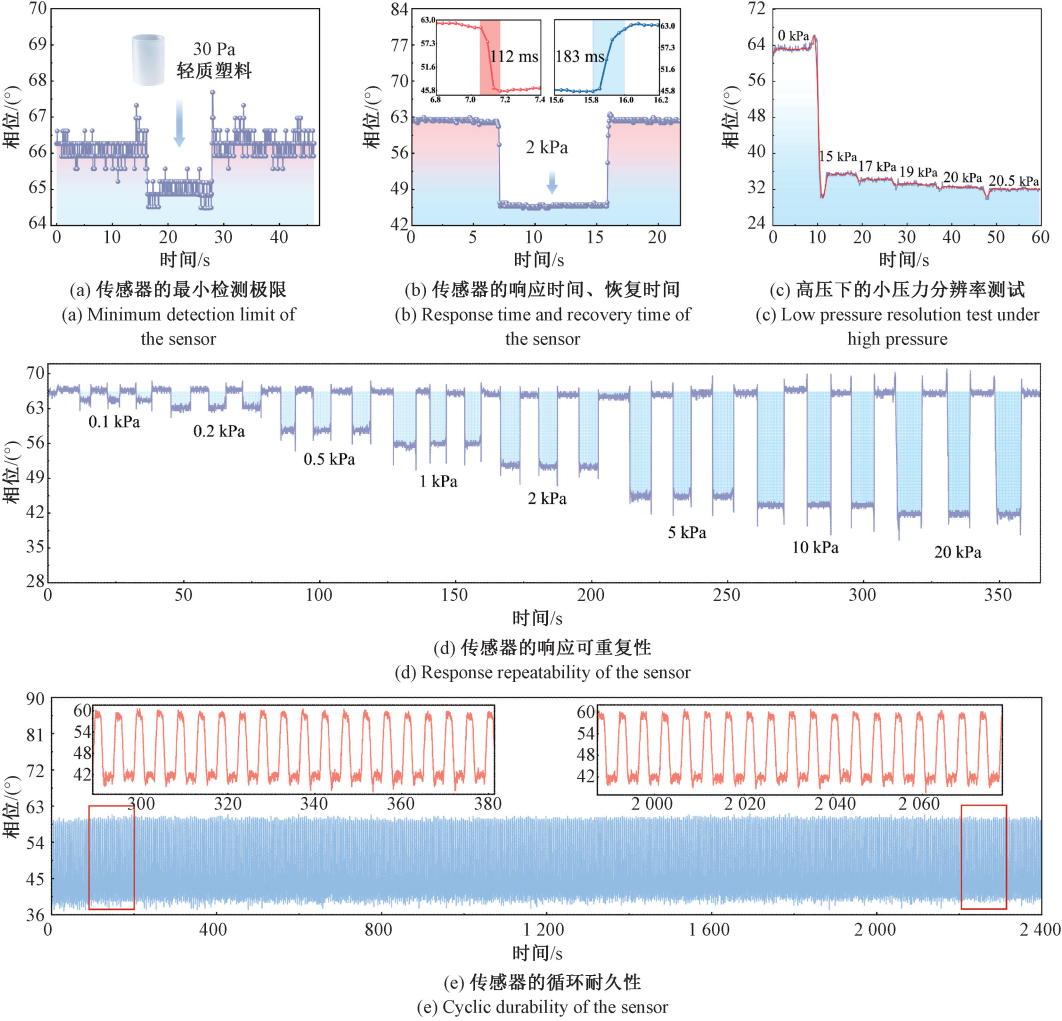


图 5 传感性能测试结果
Fig. 5 Sensor performance test results

在无线无源传感器的性能表征中,有效工作距离是衡量传感器实际可用性的关键指标。本文依据传感器的 RSSI 和压力引起的相位差,对有效工作距离进行判定。在无负载状态下,于 10 cm 固定距离处连续采集 10 次相位读数,测得其相位标准差为 0.57°,以 3 倍噪声水平作为最小可分辨相位差阈值(约 1.71°),以确保可靠检测。为量化传感器在实际场景中的工作范围,实验测量了在

恒定 0.2 kPa 压力下,RSSI 与相位差随阅读器天线距离的变化关系。结果如图 6 所示,随着距离从 10 cm 增加至 48 cm,RSSI 由-33.5 dBm 递减至-47 dBm,当 RSSI 低于-47 dBm 时,阅读器天线无法稳定获取传感器的反射信号。相位差也随距离增加而发生变化,当距离增加至 44 cm 时,相位差衰减至 1.76°,接近所设阈值;距离达到 48 cm 时,压力引起的相位差信号衰减至 0°。因此,本传

传感器的有效距离确定为 44 cm。该结果表明,基于 RFID 的无线无源传感机制能在在一定距离内实现稳定的信号获取与压力解调。

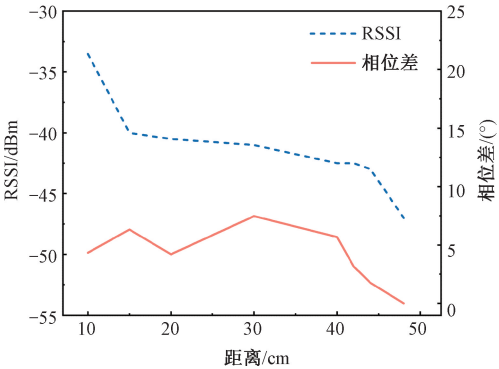


图 6 不同距离下传感器响应变化

Fig. 6 Sensor response variation at different distances

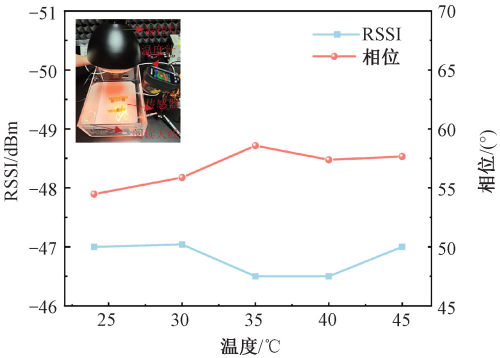
为了模拟实际应用下不同环境对传感器性能影响,测试了不同温度和湿度下传感器的输出响应,如图 7(a)所示,将传感器置于亚克力板制作的支架中,温控灯对准传感器以加热,阅读器天线固定于支架下方。实验测试了传感器在 24~45 ℃ 的温度范围内 RSSI 和 Phase 值变化,在测量过程中对每个温度值采集 5 次数据取平均值,经测试传感器在测量的温度范围内 RSSI 值波动极小,仅 0.5 dBm,温度达到 45 ℃ 时,相位值发生最大漂移 3.19°。如图 7(b)所示,将传感器放置于亚克力板制作的密闭容器中,用加湿器增加容器内的湿度,并在容器内放置湿度计测量容器内的湿度,实验测试了传感器在 32% RH~85% RH 湿度范围内的 RSSI 和 Phase 值变化,同样对每个湿度值采集 5 次数据并取平均值,经测试传感器在所测量的湿度范围内 RSSI 值波动较小,仅 0.49 dBm,湿度值在 32% RH~50% RH 时,相位值基本不变,超过 50% RH 时,略有减小,最大漂移为 2.48°。测试的环境参数在正常室内的温湿度范围内时,传感器性能基本维持稳定,因此可以说明传感器在正常室温环境下具有良好的稳定性。

表 1 传感器性能对比

Table 1 Comparison of sensor performance

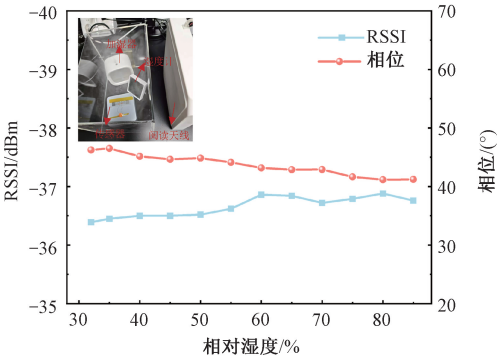
来源	灵敏度(最大)	检测范围/kPa	有效距离/cm	传感方式
文献[2]	1.394 MHz/kPa	0~200		电磁耦合
文献[6]	-2.52 MHz/kPa	0~330		电磁耦合
文献[16]	-6.75 dBm/kPa	0~3.09	10	收发电磁波
本文	4.011°/kPa	0~20	44	收发电磁波

表 1 为本文提出的传感器与相关研究的 3 种无线无源柔性压力传感器的性能比较。文献[2,6]均基于电磁耦合谐振原理,通过压力引起的谐振频率偏移实现高灵



(a) 温度对传感器性能影响

(a) The impact of temperature on sensor performance



(b) 湿度对传感器性能影响

(b) The impact of humidity on sensor performance

图 7 不同环境对传感器性能影响

Fig. 7 The impact of different environments on sensor performance

敏感知,然而,其有效工作距离受限于近场耦合范围,通常不超过 2 cm。文献[16]采用 UHF RFID 架构,通过 RSSI 的变化反应压力,灵敏度较高,但检测范围较窄且有效距离与传统方案相比未实现显著提升。本文提出的传感器同样基于 UHF RFID 通信机制,采用电容式敏感单元直接调制反向散射信号的相位。实验结果表明,该传感器相较于基于频率调制的近场耦合方案,本工作实现了中距离范围内的可靠压力感知;与同类 RSSI 调制的 RFID 传感器相比,在检测范围与有效距离上均有明显提升。

2.3 传感器应用探索

基于对传感器性能的测试结果,本研究提出的基于 UHF RFID 的柔性压力传感器表现出高灵敏度、低检测极限、快速响应和良好的重复稳定性等特点。为进一步评估其实际应用能力,将传感器应用于人体生理信号监测和人机交互等多个场景中。

如图 8(a)所示,将传感器置于手指指尖处,监测点击鼠标操作时的相位变化。当点击动作发生时,传感器受压力作用,相位值迅速发生改变,随后恢复至初始水平。多次连续点击过程中,传感器能够准确识别每次点

击,且连续点击 4 次时,在第 3 次和第 4 次增加点击力度,可观察到相位变化幅度显著增大,表明传感器具备区分不同压力水平的能力与良好的动态响应特性。该结果验证了其在电子皮肤和精细触觉感知中的应用潜力。在生理信号监测方面,将传感器贴附于口罩内侧,用于检测咳嗽行为。结果如图 8(b) 所示,单次咳嗽对应单个响应峰值,多次咳嗽则产生与之数量一致的多个峰值,咳嗽强度减弱时,传感器相位变化幅度也相应提高表明传感器能够区分咳嗽频率与强度变化。上述实验结果表明,该传感器具备清晰的压力区分能力和快速的动态响应特性,在可穿戴感知与人机交互等领域具有良好的应用前景。

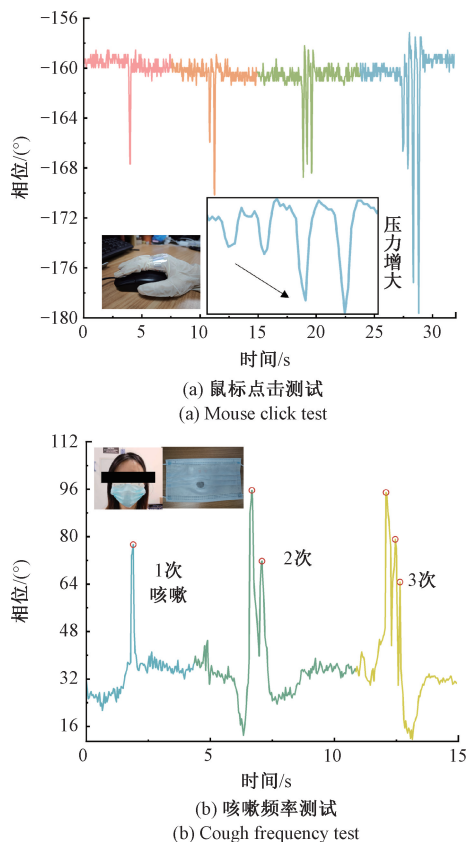


图 8 传感性能测试结果

Fig. 8 Sensor applications

3 结 论

本研究设计并验证了一种基于 RFID 反向散射机制的无线无源柔性压力传感器,实现了在 0.03~20 kPa 范围内无需外部供电的宽范围压力连续监测。在介电层微形貌调控方面,比较了单层金字塔结构和互锁金字塔结构对传感器性能的影响,实验结果表明,互锁金字塔结构的介电层用于传感器制备时可以显著提升传感器响应性

能。在 0~5 kPa 区间灵敏度达到 $4.011^{\circ}/\text{kPa}$,表现出良好的综合传感性能。通过鼠标点击测试、咳嗽频率监测等动态实验,初步验证了传感器具有良好的实时响应能力与稳定性。未来工作将研制传感器阵列,拓展在可穿戴电子皮肤及医用电子领域的应用,进一步提升其实用价值。

参考文献

- [1] Yue W, Guo Y J, Lee J C, et al. Advancements in passive wireless sensing systems in monitoring harsh environment and healthcare applications[J]. Nano-Micro Letters, 2025, 17(1): 106.
- [2] Wu E K, Liang J G, Kim N Y, et al. Wireless passive flexible radio frequency tactile sensor for material recognition [J]. Nano Letters, 2025, 25 (19): 7960-7968.
- [3] Dautta M, Hajiaghajani A, Ye F, et al. Programmable multiwavelength radio frequency spectrometry of chemophysical environments through an adaptable network of flexible and environmentally responsive, passive wireless elements [J]. Small Science, 2022, 2(6): 2200013.
- [4] Wang Y, Tan Q, Zhang L, et al. Wireless passive LC temperature and strain dual-parameter sensor [J]. Micromachines, 2021, 12(1): 1-10.
- [5] 闫金礼, 聂宝清, 刘杰, 等. 基于 LC 谐振的柔性无源无线压力传感器系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2023 (1): 27-30.
Yan Jinli, Nie Baoqing, Liu Jie, et al. Design of flexible passive wireless pressure sensor system based on LC resonator [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(1): 27-30.
- [6] Li Y X, Mu Z C, Liu J J, et al. Wireless passive flexible pressure sensor based on composite microstructure dielectric layer and asymmetric double-square inductor for biomedical and industrial monitoring [J]. Composite Structures, 2025, 372: 7119597.
- [7] 左秀江, 杨帆, 周一童, 等. 用于变压器状态监测的 RFID 传感器设计 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 128-132.
Zuo Xiujiang, Yang Fan, Zhou Yitong, et al. Design of RFID sensor for transformer condition monitoring [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46 (20): 128-132.
- [8] Wan Z Z, Chen X, Song D, et al. Battery-free flexible wireless temperature sensing for food storage [J]. FlatChem, 2024, 47: 100709.
- [9] 谢良波, 夏晨晖, 张钰坤, 等. 基于双频点载波相位

- 的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 267-277.
- Xie Liangbo, Xia Chenhui, Zhang Yukun, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency carrier phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 267-277.
- [10] Singh N K. Near-field communication (NFC): An alternative to RFID in libraries [J]. Information Technology and Libraries, 2020, 39(2): 2-14.
- [11] 赵永峰, 王玉, 赖富文, 等. 基于 NFC 的无源无线扭矩测量系统[J]. 传感技术学报, 2021, 34(7): 989-994.
- Zhao Yongfeng, Wang Yu, Lai Fuwen, et al. Non-contact torque measurement system based on NFC [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(7): 989-994.
- [12] 唐高阳. 无线通信技术在电子设备中的应用与挑战[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(5): 71-73.
- Tang Gaoyang. Applications and challenges of wireless communication technology in electronic devices [J]. Digital Technology and Application, 2024, 42(5): 71-73.
- [13] LUO C Y, GIL I, RAÚL F G. Wearable textile UHF-RFID sensors: A systematic review [J]. Materials, 2020, 13(15): 3292.
- [14] 佐磊, 张一卓, 孔维业, 等. 线性阵列分布 RFID 系统性能建模方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 176-186.
- Zuo Lei, Zhang Yizhuo, Kong Weiye, et al. Research on RFID system performance modeling method under linear array distribution [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 176-186.
- [15] 彭国峰, 何兴理, 李鹏, 等. 基于 U 型谐振单元的无线无源 RFID 湿度传感器[J]. 电波科学学报, 2025, 40(2): 353-359.
- Feng Guofeng, He Xingli, Li Peng, et al. Wireless passive RFID relative humidity sensor based on U-shaped resonant unit [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(2): 353-359.
- [16] 徐明浩, 聂宝清, 寇文哲. 基于 RFID 的无线无源柔性压力传感器研究 [J]. 传感技术学报, 2023, 36(11): 1695-1700.
- Xu Haoming, Nie Baoqing, Kou Wenzhe, et al. Research on RFID-Based wireless passive flexible pressure sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(11): 1695-1700.
- [17] Si P X, Liang M R, Zou J H, et al. Battery-free antenna sticker for wireless sensing joint rotation [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 513: 162691.
- [18] 金钢跃, 王晶, 许宁, 等. 基于超高频射频识别技术的共形湿度传感器[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(2): 103-107.
- Jin Gangyue, Wang Ning, Xu Ning, et al. Conformal humidity sensor based on UHF RFID technology [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(2): 103-107.
- [19] Wang H, Ding Z Z, Wang X P, et al. A wireless and passive RFID tag sensor for the detection of Pb²⁺ in soil combining chemiresistive sensing and impedance mismatch: A new method for onsite detection of hazardous metals [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 494: 138763.
- [20] 佐磊, 朱良帅, 尹柏强, 等. 疫苗冷链运输中多环境交互作用时 RFID 系统分析与测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 169-177.
- Zuo Lei, Zhu Liangshuai, Yin Baiqiang, et al. Analysis and testing of RFID systems during multiple environmental interactions in vaccine cold chain transportation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 169-177.
- [21] Suresh S, Chakaravarthi G. A novel passive wireless RFID sensor for localized surface crack characterization on metals [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2024, 231: 114651.
- [22] Xu B C, Yu C J. Wireless, battery-free, implantable inductor-capacitor based sensors [J]. Advanced Electronic Materials, 2025, 11(10): 2500184.
- [23] Nguyen T B, Tran V T, Chung W Y. Pressure measurement-based method for battery-free food monitoring powered by NFC energy harvesting [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17556.
- [24] Brinker K R, Zoughi R. Tunable chipless RFID pressure sensor utilizing additive manufacturing-model, simulation, and measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-13.
- [25] Wang Z Q, Xiao F, Ye N, et al. A see-through-wall system for device-free human motion sensing based on battery-free RFID [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2017, 17(1): 1-21.
- [26] Liu Z J, Liu X L, Tong X Y, et al. MLiquid: Towards mobile liquid sensing with COTS RFIDs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(9): 7851-7865.
- [27] Occhiuzzi C, Parrella S, Camera F, et al. RFID-based dual-chip epidermal sensing platform for human skin monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 5359-5367.

作者简介



贺刘劭,2023 年于南通大学获得学士学位,现为江南大学硕士研究生,主要研究方向为无线无源柔性 RFID 传感器。

E-mail:15136049154@163.com

He Liuquan received her B. Sc. degree from Nantong University in 2023. Now she is a M.Sc. candidate at Jiangnan University. Her main research interest includes wireless passive flexible RFID sensors.



吴佳慷(通信作者),2024 年于江南大学获得博士学位,现为江南大学讲师,主要研究方向为传感器研发、射频无源器件设计和开发。

E-mail:wjk@jiangnan.edu.cn

Wu Jiakang (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Jiangnan University in 2024. Now he is a lecturer at Jiangnan University. His main research interests include sensor development, the design and development of RF passive devices.



顾晓峰,2003 年于约翰-霍普金斯大学获得博士学位,现为江南大学教授,博士生导师,主要研究方向为半导体材料和器件、电子系统设计和应用。

E-mail:xgu@jiangnan.edu.cn

Gu Xiaofeng received his Ph. D. degree from Johns Hopkins University in 2003. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Jiangnan University. His main research interests include semiconductor materials and devices, electronic system design and applications