

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104862

变形工作状态下非等间距柔性 NFC 标签天线设计*

孙 英^{1,2} 花赛月^{1,2} 刘乃源^{1,2} 周 严³ 翁 玲^{1,2}

(1. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130; 2. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130; 3. 天津商业大学理学院 天津 300134)

摘 要: 柔性 NFC 标签天线常处于变形工作状态,为解决该工作状态下易出现的频率偏移及偏移引起的工作性能下降问题,提高其在人体无线健康监测应用领域的适用性,本文设计了一款可贴合人体皮肤且性能优良的柔性 NFC 标签天线。该天线采用镓铟液态金属作为柔性导电材料,与 PDMS 柔性衬底材料相结合,使其具有良好的可拉伸性和可弯曲性;基于小型化 NFC 天线设计的原则,提出非等间距结构设计方案,提高其工作带宽,实现 NFC 标签天线在变形工作状态下依然保持相对稳定的电学参数、谐振频率及通信距离,增强其工作稳定性。通过仿真和实验测试结果表明,外形尺寸为 25 mm×25 mm 且线间距增长率为 200% 的非等间距 NFC 标签天线,在 -10 dB 以下工作带宽高达 0.87 MHz,相较于具有相同面积的等间距天线,工作带宽最大增幅高达 52.6%;针对此柔性 NFC 标签天线应用环境的特殊性,通过不同变形状态下的工作性能稳定性测试显示,30% 拉伸工作状态时,天线的中心频率偏移率仅为 3.2%;曲率半径为 5 mm 的弯曲工作状态时,天线的中心频率偏移率仅为 2.4%,天线通信距离始终不低于 30 mm,在变形工作状态下总体表现出良好的工作稳定性。

关键词: 柔性 NFC 天线;变形工作状态;镓铟合金液态金属;非等间距

中图分类号: TP202;TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of non-equal spacing flexible NFC tag antenna under deformed working states

Sun Ying^{1,2} Hua Saiyue^{1,2} Liu Naiyuan^{1,2} Zhou Yan³ Weng Ling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. College of Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Since the flexible NFC tag antenna is usually in a deformed working state, in order to solve the problem of frequency offset and the performance degradation caused by the frequency offset in this working state, and to improve its applicability in the application of wireless human health monitoring, a flexible NFC tag antenna with human skin adaptation and excellent performance is designed. The antenna uses gallium indium liquid metal as a flexible conductive material, combined with PDMS flexible substrate material to enhance the stretchability and flexibility of the NFC tag antenna. Based on the principle of miniaturized NFC antenna design, this paper proposes a novel non-equal spacing structural design scheme to increase the working bandwidth of the antenna, maintain relatively stable electrical parameters, resonant frequency as well as communication distance under different deformed states and improve the working stability. The simulation and experimental results show that the working bandwidth below -10 dB of the non-equal spacing NFC tag antenna with an external size of 25 mm×25 mm and a line spacing growth rate of 200% can reach 0.87 MHz. Compared with an equal line spacing antenna with the same area, the maximum increase in working bandwidth is up to 52.6%. Aiming to the particularity of the application environment of this flexible NFC tag antenna, in the stretching working state with a stretching degree of 30% and the bending working state with a curvature radius of 5 mm, the center frequency deviation of the antenna is 3.2% and 2.4%. The antenna communication distance is always no less than 30 mm, and it shows good working stability under deformed working states.

Keywords: flexible NFC tag antenna; deformed working states; gallium-indium liquid metal; non-equal spacing

收稿日期: 2021-11-02 Received Date: 2021-11-02

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52077052)资助

0 引言

近场通信(NFC)是目前应用于实际系统中最成功的一种简单而安全的非接触式短距离数据传输技术^[1-2],在移动支付、教育、娱乐、医疗等不同领域展现了较好的应用潜力^[3],并逐渐应用于运动监测和健康监护的可穿戴智能设备^[4-5]。进一步研究结构简单、质量轻、面积小,同时在穿戴时不影响人体活动的高性能柔性 NFC 标签天线,对促进便携式可穿戴智能设备的发展具有重要意义^[6-8]。

随着天线理论及材料、加工工艺的发展,开发新型柔性 NFC 天线势在必行。新的柔性导电材料和柔性衬底的组合出现推动柔性 NFC 标签天线的发展。以流动性和高导电性为特质的新兴柔性材料镓铟液态金属,使得制成具有高柔性且性能良好的新型天线成为可能。

用于可穿戴设备中的柔性 NFC 标签天线大多处于拉伸、弯曲等变形工作状态,文献[9]研究表明变形工作状态会改变穿过天线线圈的磁通量,改变天线电学参数,从而产生失调或频率偏移问题,导致天线性能迅速恶化,甚至在实际应用中出现标签失效、无法识别等问题,但文中并未给出相应的解决办法。因此,在多处于变形工作状态的应用场景下,设计在较大拉伸和弯曲变形状态下依然能够保持稳定电学性能和通信性能的柔性 NFC 标签天线极其重要。

带宽是天线的重要性能参数之一,是天线的电学参数在容许范围之内变化的频率范围,带宽越小,越不利于标签识别。文献[10]提出较低的 NFC 标签天线工作带宽会使得读写距离无法按满足阅读器的要求,从而影响天线的通信性能。文献[11]提出较高的工作带宽有助于在机械变形作用引起谐振频率偏移的情况下,确保 NFC 标签天线的稳健运行。文献[12]针对不同变形工作状态下天线的机械变形对电学性能的影响进行了分析,从结构设计角度证明轴对称结构天线的工作稳定性较强,测试结果显示在弯曲变形曲率半径为 5 mm 时,天线的中心频率偏移依旧高达 0.8 MHz。文献[13]研究表明不同结构参数(包括天线的线宽及线间距等)会对标签天线性能产生影响,增大天线线间距可以提高天线工作带宽,但是可穿戴应用中柔性天线的尺寸也是设计中需要重点考虑的因素之一。因此,有必要在小型化天线的设计基础上,设计新型天线结构以改善天线的工作带宽,从而提高天线在变形工作状态下的稳定性。

本文引入镓铟液态金属柔性导电材料,提出一种适用于变形工作状态下具有稳定性能的非等间距结构 NFC 标签天线设计方案。对标签等效模型及天线模型中的电学参数进行理论分析;设计非等间距结构以提高天线工

作带宽,增强工作稳定性,并研究线间距增长率对天线电学参数及工作性能的影响;仿真和实验相结合,对等间距和非等间距结构天线的输入阻抗、等效电感、品质因数、工作带宽等性能参数进行对比分析;制作等间距和非等间距 NFC 标签天线,对其在拉伸、弯曲的变形工作状态下进行通信距离及工作稳定性的测试。

1 柔性 NFC 标签天线设计

1.1 标签天线选材

近年来,液态金属已逐步应用于叉指电极、软机械传感器、柔性电路板和互连^[14],并在微带天线、偶极子天线、可重构天线等柔性天线设计中表现出良好的应用前景^[15-17]。2009 年,镓铟合金被研究人员发现,镓铟合金(75%Ga 和 25%In)是一种稳定安全无毒的低熔点(15.7℃)液态金属,作为高毒性汞的替代品而受到关注,其电导率 $\sigma=3.46\times10^6\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[18],远高于其他柔性 NFC 标签天线中采用的导电材料,具体数据如表 1 所示。同时镓铟合金具有极高的回收率、良好的经济性和环境可行性。

表 1 柔性导电材料电导率比较
Table 1 Comparison of conductivity of flexible conductive materials

柔性材料	电导率 $\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
镓铟合金	3.46×10^6
汞	1.4×10^6
石墨烯	4.2×10^5
纳米银标准导电油墨	3.36×10^5

聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种柔性材料,具有柔软、疏水性、耐热性、高弹性等突出特性;它的表面能低,成膜后易于从模具上剥离,介电常数 $\epsilon_r\approx2.68$,损耗正切值 $\tan\delta\approx0.0375$ ^[19],是一种优秀的衬底材料。

本文利用室温下为液态的镓铟合金替代固体金属线,与柔性 PDMS 衬底结合设计新型柔性 NFC 标签天线,该标签天线不仅外形小巧轻薄,易于贴合人体皮肤,而且随着人体拉伸弯曲变形依旧可以保持良好的机械特性和电磁特性。

1.2 标签等效模型分析

标签等效模型如图 1 所示。NFC 标签通常包括标签天线、芯片以及一个匹配电路来调整 13.56 MHz 的谐振频率。标签天线可以等效为寄生电容 C_a 和等效电感 L_a 、损耗电阻 R_a 的并联电路, C_{ic} 和 R_{ic} 分别为所选用 NFC 芯片的内部电容和电阻,该参数可根据厂家提供的芯片信息获取, C_{tuning} 为调谐电容,使得整个电路的谐振频率工作在 13.56 MHz 左右。

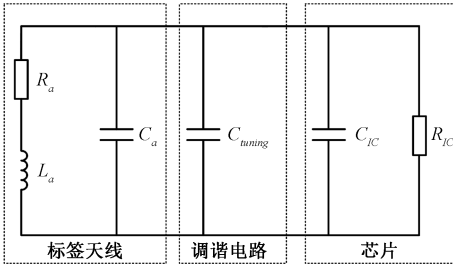


图1 标签等效模型

Fig. 1 Equivalent model of the tag

根据标签等效模型,标签谐振频率 f_0 表达式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a(C_a + C_{tuning} + C_{IC})}} \quad (1)$$

在天线设计中,对谐振频率影响最大的参数是该天线在工作频率下的电感值 L_a ,矩形天线等效电感 L_a 的修正惠勒表达式为^[20]:

$$L_a = \frac{1.176 \times 10^{-5} a^2 n^2}{2a + 2.75b} \quad (2)$$

$$a = \frac{d_{in} + (n+1)w + ns}{2} \quad (3)$$

$$b = (n+1)w + ns \quad (4)$$

式中: d_{in} 为线圈的最内圈直径, n, w, s 分别为线圈匝数、宽度和线间距。

将式(3)和(4)代入式(2),可得到涉及天线尺寸、匝数、线宽和线间距的等效电感综合表达式为:

$$L_a = \frac{2.94 \times 10^{-3} [d_{in} + (n+1)w + ns]^2 n^2}{d_{in} + 3.75(n+1)w + 3.75ns} \quad (5)$$

其次,天线的损耗电阻 R_a 对天线性能有很大的影响,高频工作环境下,考虑天线集肤效应的影响,天线损耗电阻表达式如式(6)^[21]所示。

$$R_a = R_{dc} \cdot \frac{t}{\delta(1 - e^{-\frac{t}{\delta}})} \quad (6)$$

其中的趋肤深度 δ 和天线直流电阻 R_{dc} 表达式如式(7)和(8)所示。

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{wt} \quad (7)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f_0}} \quad (8)$$

其中, ρ, l 和 t 分别为导电材料的电阻率、导线的长度和厚度, μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和导体相对磁导率。将式(7)和(8)代入式(6)后整理,可得涉及天线尺寸、匝数、线宽和线间距的天线损耗电阻表达式为:

$$R_a \approx 3.97 \times 10^{-3} \times \frac{4nd_{in} + 4n^2w + (4n^2 - 2n)s}{w(1 - e^{-\frac{t}{7.4 \times 10^{-5}}})} \quad (9)$$

本文设计的柔性 NFC 标签天线为了更好的适用于可穿戴设备,解决在拉伸、弯曲等变形工作状态下的频率偏移引起天线工作性能下降的问题,需要设计具有更高工作带宽的天线。

文献[11]研究表明 NFC 标签天线的工作带宽与品质因数呈现反比关系,可以通过低品质因数实现高带宽,品质因数 Q 的理论表达式为^[23]:

$$Q = \frac{2\pi f_0 [L_a - (R_a^2 + 4\pi^2 f_0^2 L_a^2) C_a]}{R_a} \approx \frac{2\pi f_0 L_a}{R_a} \quad (10)$$

标签天线的寄生电容 C_a 通常极小,因此可以忽略不计。从式(10)可见,天线的品质因数 Q 与天线的等效电感 L_a 和损耗电阻 R_a 密切相关,式(5)和(9)显示,线圈型天线的等效电感 L_a 和损耗电阻 R_a 受很多因素影响,包括天线的尺寸大小和结构参数。

因此,本文通过设计新型非等间距结构标签天线,改变天线的电学参数降低天线品质因数,从而提高工作带宽,增强天线工作可靠性及稳定性。

1.3 标签天线非等间距结构设计

本文将设计的标签天线外形尺寸固定,外径和内径分别为 25 mm 和 4 mm,图 2 为天线在不同线圈匝数下天线等效电感随频率的变化示意图。从图 2 可见,天线等效电感随天线匝数 n 的增大而增大,当匝数 $n=4 \sim 6$ 时,电感值随频率的变化几乎为一条直线,电感值较为稳定;而当 $n=7$ 时,电感值随频率的增长呈现平滑上升趋势,且随着线圈匝数的增大趋势愈发明显。NFC 天线的工作频率为 13.56 MHz,电感变化较大时会影响天线的工作稳定性,因此天线匝数选取不宜过大,本文选择天线匝数 $n=5$ 。

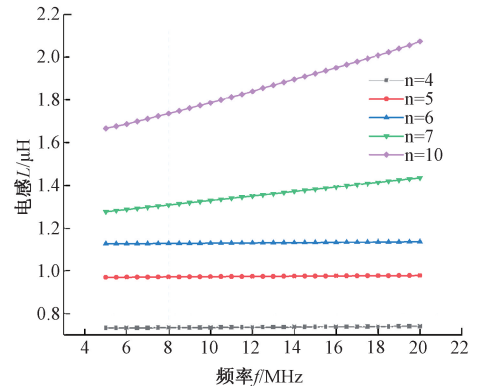


图2 不同线圈匝数的标签天线电感值

Fig. 2 The inductance of the tag antenna with different coil turns

相较于传统的等间距天线结构,本文设计的新型天线为非等间距结构,如图 3 所示。图中 d_{out} 、 d_{in} 、 w 和 s 分

别表示天线的外径、内径、线宽和最内圈线间距。天线内圈到外圈的线间距按照一定的增长率 k 均匀增大,第 n 圈天线的线间距表达式为 $s_n = (1 + nk)s$ 。

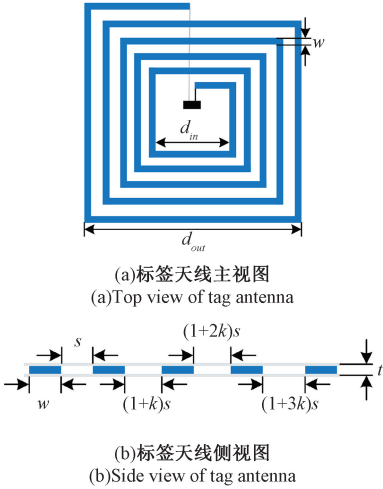


图 3 标签天线结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the tag antenna structure

2 非等间距柔性 NFC 标签天线仿真分析

基于有限元法的三维结构电磁场仿真软件,对非等间距的镓钢液态金属柔性标签天线的电特性和工作特性进行研究,仿真图如图 4 所示。

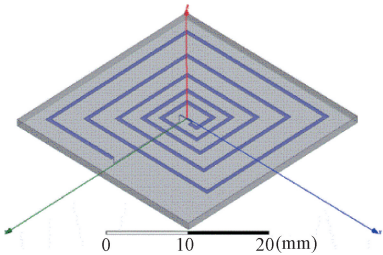


图 4 非等间距标签天线仿真图
Fig. 4 Simulation diagram of the non-equal spacing tag antenna

2.1 非等间距与等间距结构天线对比分析

1) 电学参数及品质因数分析

设计了 3 款基于镓钢液态金属的 NFC 标签天线,在保持天线内、外径、线圈匝数和线宽均相同的情况下,将传统等间距结构天线 A 和新型非等间距结构天线 B 进行对比分析,同时设计一款与天线 B 有相同品质因数但尺寸不同的天线 C。天线的具体结构参数如表 2 所示, $s_1 \sim s_4$ 表示天线从内圈到外圈的线间距,表中参数单位均为 mm。

表 2 标签天线结构参数

Table 2 Structural parameters of the tag antenna

结构参数	天线 A (等间距)	天线 B (非等间距)	天线 C (等间距)
n	5	5	5
d_{out}	25	25	29
d_{in}	4	4	4
w	0.5	0.5	0.5
s_1	2	0.5	2.5
s_2	2	1.5	2.5
s_3	2	2.5	2.5
s_4	2	3.5	2.5

对不同结构参数的 NFC 标签天线进行仿真分析后,得到了天线的电阻、电抗等基本电学参数,如图 5 所示,可以看出,相对于等间距天线 A,非等间距天线 B 的电阻小幅度下降,这是由于非等间距天线 B 的总线长会略微减小,根据式(7),线长的减小会降低天线直流电阻,从而降低天线的损耗电阻 R_a 。同时从图 5 可以发现,天线电抗下降更为明显,这是由于非等间距天线 B 外圈线间距的增大,会削弱线圈间的互感,根据等效电感的表达式(5)也可以看出,增大的线间距会导致天线等效电感 L_a 下降,由于电抗 $X_a = 2\pi f_0 L_a$,因而,高频工作环境下,天线 B 的电抗下降更为显著。根据品质因数的表达式(10),针对天线 B,分子的下降程度远大于分母,因此非等间距天线 B 具有更低品质因数,仿真结果与理论分析相一致。

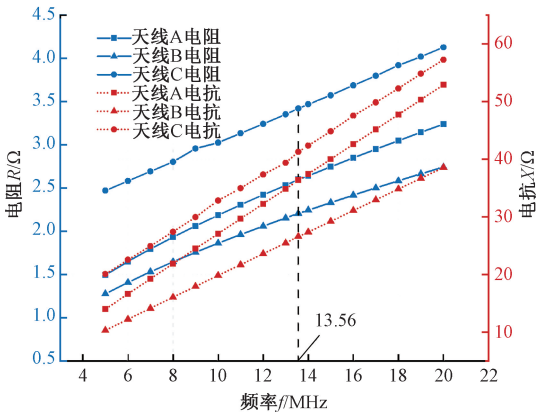


图 5 标签天线输入阻抗仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of the tag antenna input impedance

最终的仿真结果数据显示,在工作频率 13.56 MHz 处,非等间距天线 B 电阻从 2.6 Ω 下降至 2.205 Ω,电抗从 36.395 Ω 下降至 26.585 Ω,等效电感从 0.427 2 μH 下降至 0.312 μH,经过计算得出非等间距天线 B 的品质因数为 12.06,近似等于天线 C 的品质因数,相比于等间距天线 A 品质因数下降了约 13.86%,

结果表明等面积的新型非等间距结构有效降低了标签天线的品质因数。

2) 工作带宽分析

在仿真测试 NFC 标签天线的工作带宽之前,根据标签的等效模型对标签进行电路匹配,使其工作于 13.56 MHz 的工作频率附近,从而达到更好的通信效果,本文通过使用 Smith Chart 工具进行电容匹配,匹配的串联电容 C_s 和并联电容 C_p 结果如表 3 所示。

表 3 标签匹配电路参数

Table 3 Matching circuit parameters of the tag

天线类型	C_s/pF	C_p/pF
天线 A(等间距)	71	231
天线 B(非等间距)	96	313
天线 C(等间距)	80	295

使用三维结构电磁场仿真软件测量天线的阻抗特性和回波损耗 S_{11} 参数,回波损耗的绝对值越大,反射系数越小,天线向测量系统传输的能量越多,通常在天线设计中,定义回波损耗小于 -10 dB 的带宽为工作带宽。标签天线的 S_{11} 参数仿真结果如图 6 所示,中心频率均调整在 13.56 MHz 左右,标签天线 B 的回波损耗约为 -42.3 dB,表明天线实现良好的阻抗匹配,3 款天线在 -10 dB 以下的工作带宽分别为 0.57、0.8 和 0.8 MHz。在工作频率 (13.56 MHz) 处 3 款天线的具体电学特性及工作特性参数如表 4 所示,对比具有相同面积的天线 A 和 B,结果表明非等间距标签天线达到了提高天线工作带宽的目的;对比具有相同工作带宽的天线 B 和 C,在小型化标签天线设计原则下,实现相同的工作带宽,天线 B 的面积更小,用料降低,节约成本,因此该非等间距 NFC 标签天线设计更具优势。

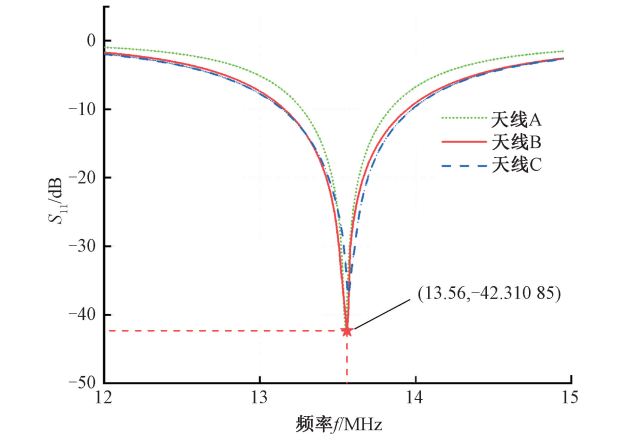


图 6 标签天线 S_{11} 仿真图

Fig. 6 S_{11} simulation diagram of tag antennas

表 4 标签天线特性参数

Table 4 Parameters of tag antenna characteristic

天线特性参数	天线 A	天线 B	天线 C
输入阻抗 R/Ω	2.6+j36.395	2.205+j26.585	3.42+j41.28
等效电感 $L/\mu\text{H}$	0.427 2	0.312	0.484 5
寄生电容 C/pF	2.013 2	1.792 5	1.808 2
品质因数 Q	14	12.06	12.07
工作带宽 Bw/MHz	0.57	0.8	0.8

2.2 非等间距天线线间距增长率影响分析

1) 线间距增长率对天线电学参数的影响

研究不同增长率对天线参数的影响,仿真结果如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看出随着线间距增长率 k 的增大,天线输入阻抗呈现下降趋势,天线的输入阻抗从 $(2.6+j36.395)\Omega$ 降低至 $(2.175+j26.105)\Omega$ 。当增长率 $k<200\%$ 时阻抗下降较为明显;当增长率 $k\geq 200\%$ 时下降开始趋于平缓。研究不同增长率对天线的等效电感的影响,仿真结果如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出随着天线线间距增长率不断增大,相邻线圈间的互感逐渐减小,天线的等效电感从 0.427 2 μH 降低至 0.306 4 μH 。

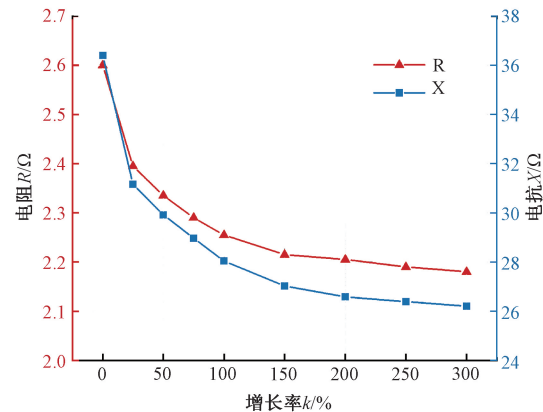
2) 线间距增长率对天线品质因数的影响

根据仿真结果图 7 和式 (10) 对不同线间距增长率的品质因数进行计算,由于天线等效电感下降的更为迅速且明显,计算结果如图 8 所示,可以看出随着线间距的增长率不断增大,天线的品质因数呈现下降趋势。当增长率 $k<200\%$ 时品质因数从 14 降低至 12.06;当增长率 $k\geq 200\%$ 时下降开始趋于平缓;最终当增长率 $k=300\%$ 时天线的品质因数下降至 12.02。

3) 线间距增长率对天线工作带宽的影响

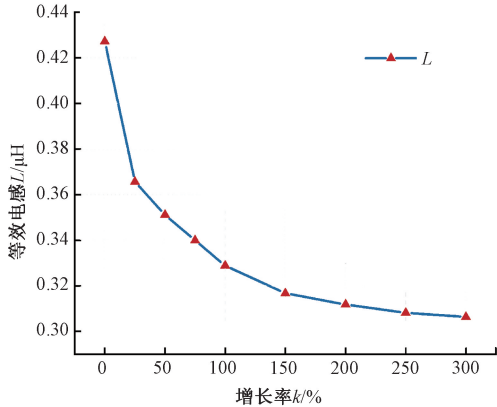
从天线 S_{11} 仿真结果中提取不同线间距增长率对应的 -10 dB 以下工作带宽结果如图 9 所示,可以看出随着线间距增长率的不断增大,天线的工作带宽呈现上升趋势。当增长率增大至 $k=200\%$ 时工作带宽迅速从 0.57 MHz 上升至 0.8 MHz;当增长率从 200% 继续增加,天线的工作带宽变化不大趋于稳定,当增长率至 300% 时,天线的工作带宽上升到 0.81 MHz,此时天线最内圈的线间距仅为 0.36 mm。继续增大增长率,对天线的工作性能改善不大,但会使得最内圈线间距过小,对天线的制作提出更高的要求,因此非等间距天线的增长率可以根据天线的尺寸进行适度选择。

根据以上仿真分析,非等间距新型结构有效提高了标签天线的工作带宽,相比同等面积工作带宽为 0.57 MHz 的等间距结构,非等间距标签天线的工作带宽增长率最高可达 42.11%。根据仿真结果,针对尺寸为 25 mm×25 mm 的标签天线,设计增长率为 200% 的非等间距天线结构较为合适。



(a)不同增长率的标签天线输入阻抗图

(a)Input impedance diagrams of tag antennas with different growth rates



(b)不同增长率的标签天线电感图

(b)The inductance of tag antennas with different growth rates

图 7 不同增长率的标签天线输入阻抗和等效电感图

Fig. 7 Input impedance and equivalent inductance diagrams of tag antennas with different growth rates

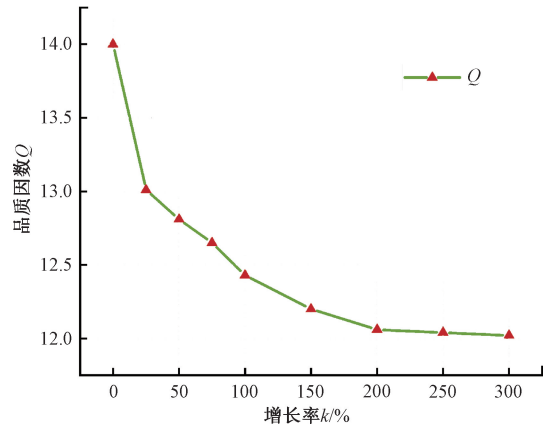


图 8 不同增长率的标签天线品质因数

Fig. 8 Quality factor of tag antennas with different growth rates

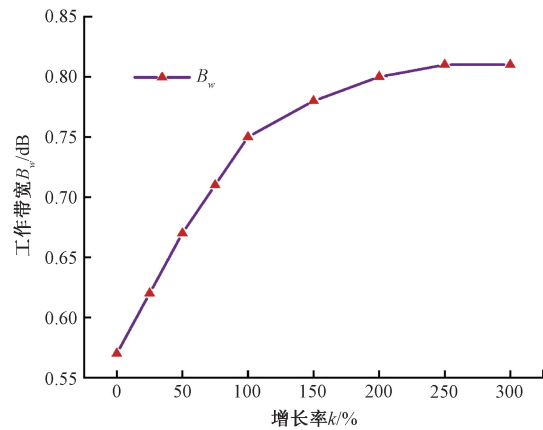


图 9 不同增长率的标签天线工作带宽图

Fig. 9 Working bandwidth diagrams of tag antennas with different growth rates

3 非等间距柔性 NFC 标签天线测试

3.1 NFC 标签天线工作带宽测试

选择线间距增长率为 200% 的非等间距 NFC 标签天线 B, 与制成的等间距 NFC 标签天线 A 进行对比测试。使用 mini-VNA PRO Lite 矢量网络分析仪分别测试标签天线 A 与 B 的 S_{11} 参数, 从而得到天线的工作带宽及回波损耗, 实验结果与仿真结果具有较高的一致性, 如图 10 所示。从图 10 可以看出, 实验天线 A 的 -10 dB 以下工作带宽为 0.57 MHz, 实验天线 B 的 -10 dB 以下工作带宽提高到 0.87 MHz, 工作频点处回波损耗为 -38.09 dB, 表现出良好的天线性能。

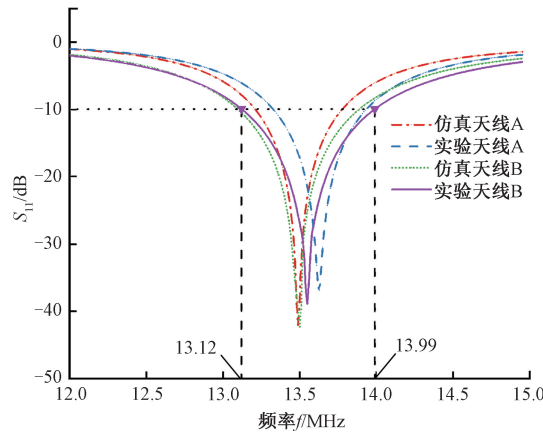


图 10 NFC 标签天线 S_{11} 仿真和实验图

Fig. 10 S_{11} simulation and experimental diagrams of NFC tag antennas

3.2 变形工作状态下的 NFC 标签天线稳定性测试

为了评估非等间距铟锡液态金属柔性 NFC 标签天线的工作稳定性和灵活性,对工作于不同变形状态和变形程度下的等间距天线 A 与非等间距天线 B 电学特性及频率偏移情况进行测试。

1) 拉伸测试

将两种天线从自然状态拉伸至 30% 的拉伸程度,图 11 和 12 展示了两种柔性 NFC 标签天线在不同拉伸程度下的等效电感和 S_{11} 参数变化。与理论分析一致,从图 11 和 12 可以看出,当天线的拉伸程度变大时,两种天线的等效电感值逐渐增大,中心频率逐渐下降,但天线 A 的变化程度略微明显于天线 B。从图 12 的放大图中可以看出,天线 A 中心频率从自然状态下的 13.56 MHz 逐步下降至 30% 拉伸状态下的 12.93 MHz,最终中心频率下降约 0.63 MHz; 天线 B 中心频率从自然状态下的 13.56 MHz 逐步下降至 30% 拉伸状态下的 13.12 MHz,最终中心频率仅小幅度下降约 0.44 MHz。这表明非等间距结构 NFC 柔性标签天线即使在较大拉伸工作状态下,等效电感和频率偏移幅度更小,对标签识别产生的影响更小,能保持更好的工作稳定性。

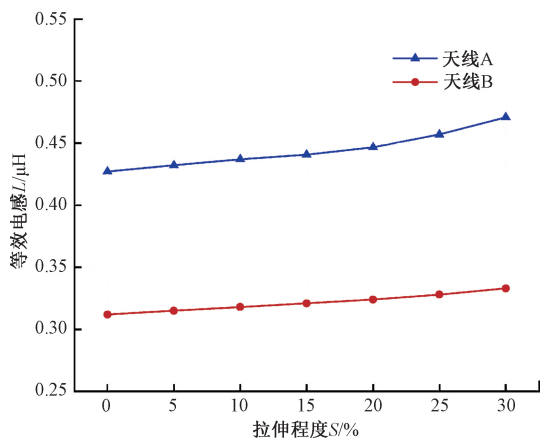


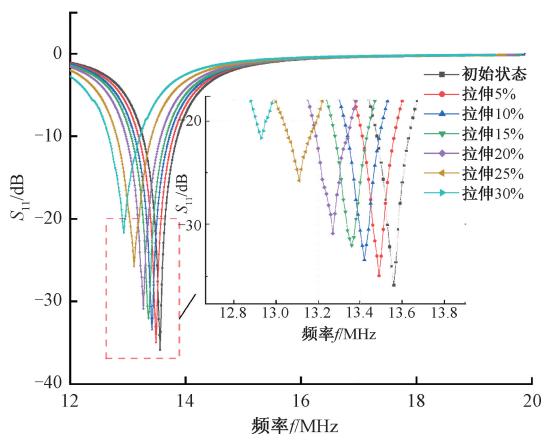
图 11 不同拉伸程度电感图

Fig. 11 The inductance diagrams of different stretching tests

2) 弯曲测试

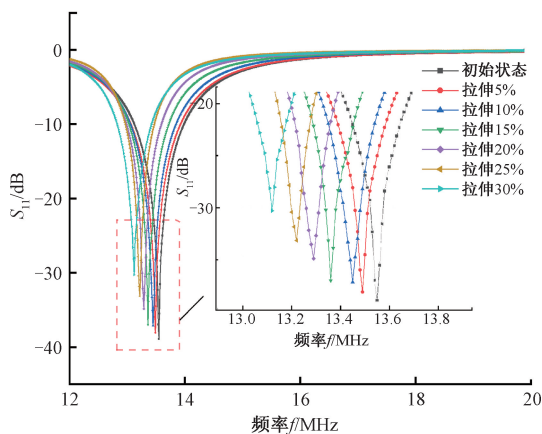
图 13 展示了该柔性 NFC 标签天线在不同程度弯曲应变下的状态,并进行弯曲实验测试,将两种标签天线分别粘贴在半径为 5~30 mm 的圆柱体上,利用圆柱体曲率半径 R 从 5 mm 变化到 30 mm,来表征柔性 NFC 标签天线不同程度的弯曲状态,圆柱体的半径越小,表示其弯曲程度越大。

将两种天线从自然状态逐步弯曲至曲率半径 $R = 5$ mm 的弯曲程度,图 14 和 15 展示了两种柔性 NFC 标签天线在不同弯曲程度下的等效电感和 S_{11} 参数变化。从图 14 和 15 可以看出,当天线的曲率半径逐渐减小时,



(a) 天线 A 不同拉伸程度测试 S_{11} 图

(a) S_{11} diagrams of antenna A for different stretching tests



(b) 天线 B 不同拉伸程度测试 S_{11} 图

(b) S_{11} diagrams of antenna B for different stretching tests

图 12 不同拉伸程度测试 S_{11} 图

Fig. 12 S_{11} diagrams of different stretching tests

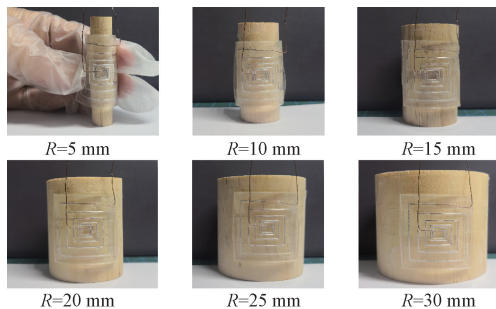


图 13 不同弯曲程度测试实验图

Fig. 13 Experimental diagrams of different bending tests

两种天线的等效电感值逐渐减小,中心频率逐渐上升。但天线 A 的变化程度略微明显于天线 B。从图 15 的放大图中可以看出,天线 A 从自然状态逐步弯曲至曲率半径 $R = 5$ mm 时,天线的中心频率则从 13.56 MHz 逐步上升至 14.47 MHz,最终中心频率下降约 0.91 MHz; 天线 B 的中心频率则从 13.56 MHz 逐步上升至 13.89 MHz,最

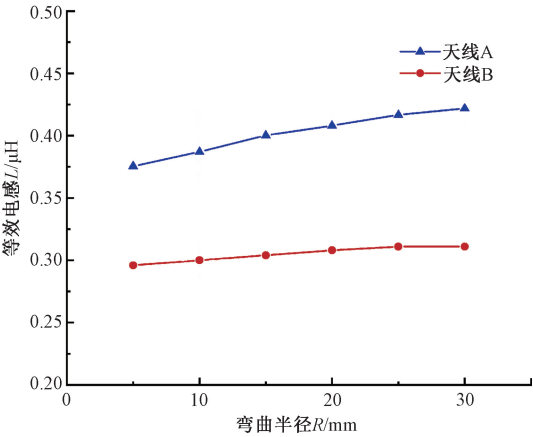
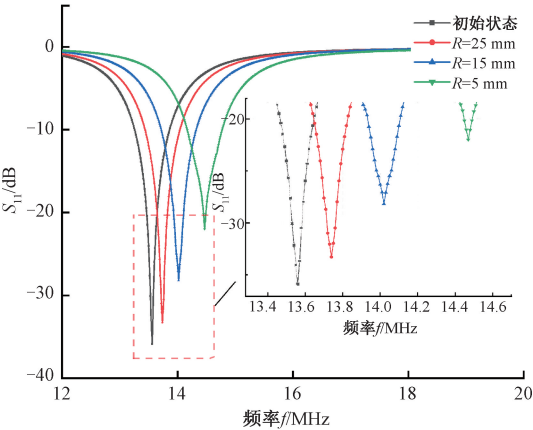


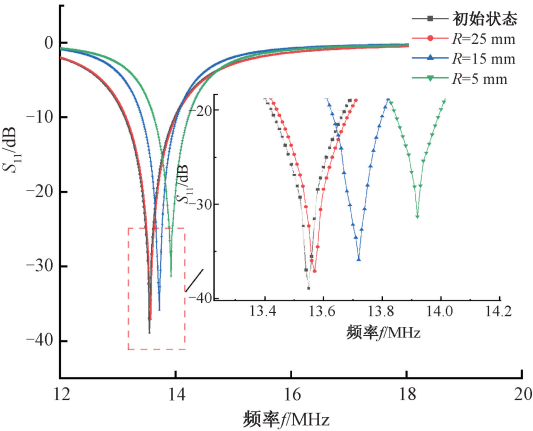
图 14 不同弯曲程度电感图

Fig. 14 The inductance diagrams of different bending degrees test



(a)天线A不同弯曲程度测试 S_{11} 图

(a) S_{11} diagrams of antenna A for different bending tests



(b)天线B不同弯曲程度测试 S_{11} 图

(b) S_{11} diagrams of antenna B for different bending tests

图 15 不同弯曲程度测试 S_{11} 图

Fig. 15 S_{11} diagrams of different bending degrees test

距结构 NFC 柔性标签天线即使在较大弯曲工作状态下,等效电感和频率偏移幅度更小,对标签识别产生的影响更小,能保持更好的工作稳定性。

3.3 变形工作状态下的 NFC 标签天线通信距离测试

使用阅读器 (TRF7970A) 测试两种 NFC 标签天线在不同变形工作状态下的通信距离,测试结果如表 5 所示。等间距天线 A 能够承受的最大拉伸程度为 20%,最小曲率半径为 10 mm,非等间距天线最大在拉伸工作状态下拉伸程度为 30%和弯曲工作状态下曲率半径 $R=5$ mm 时,天线均保持良好的工作状态,且通信距离 d 均大于 30 mm。

表 5 NFC 标签天线通信距离测试结果

Table 5 Working distance test results of NFC tag antennas

变形状态	天线 A 通信距离 d /mm	天线 B 通信距离 d /mm
10%拉伸	40.7	41.2
20%拉伸	33.9	39.5
30%拉伸	/	33.6
曲率半径 $R=30$ mm	40.3	42.0
曲率半径 $R=25$ mm	38.2	39.8
曲率半径 $R=20$ mm	35.4	37.9
曲率半径 $R=15$ mm	33.2	35.6
曲率半径 $R=10$ mm	30.2	31.8
曲率半径 $R=5$ mm	/	30.8

3.4 几种不同类型柔性 NFC 标签天线性能对比

结合本文的实验测试数据,表 6 总结了几种现有不同类型柔性 NFC 标签天线的性能,与本文设计的柔性 NFC 标签天线进行对比分析。

通过表 6 的对比分析可以看出,传统的 NFC 天线一般采用铜导体印制在 PCB 板上,但是不适用于可穿戴设备,尽管可以通过在柔性基底上减小导电材料的厚度使其变成金属薄膜或采用蜿蜒 3D 天线结构^[9,22-24],来实现一定程度的柔性可拉伸,但是效果不佳且大大提高制作成本。研究者又不断从新材料、新工艺等方面对柔性 NFC 标签天线的设计进行完善,实现了一定变形工作环境下的提高天线稳定性的效果^[25-26],但依旧有 1~2 MHz 左右的频率偏移,目前 NFC 柔性标签天线的工作带宽难以承受较大形变下的频率偏移。

综上,将本文设计的非等间距结构同等间距结构 NFC 标签天线进行对比后,发现匝数、尺寸、材料完全相同的情况下,相对于传统等间距结构,从图 11~15 的结果显示:1) 外形尺寸为 25 mm×25 mm,线间距增长率为 200%的非等间距结构天线,工作带宽提升至 0.87 MHz。2) 最大拉伸程度为 30%,最小曲率半径为 5 mm。3) 当从自然状态拉伸至 30%的工作状态时,天线的中心频率偏移下降至 0.44 MHz,偏移率仅为 3.2%;当从自然状态弯

终中心频率仅小幅度下降约 0.33 MHz。这表明非等间

表 6 几种不同类型柔性 NFC 标签天线的性能对比

Table 6 Performance comparison of several different types of flexible NFC tag antennas

天线类型	天线尺寸及工作带宽	拉伸测试	弯曲测试
商用天线	30 mm×30 mm	不可拉伸	不可弯曲
聚酰亚胺衬底和铜线 ^[9]	0.27 MHz	未测试	弯曲曲率半径 $R\geq 5$ mm 时, 频率偏移约 0.6 MHz
	直径 14 mm		
PI 衬底和蛇形结构铜线 ^[22]	0.7 MHz	30%拉伸测试下频率偏移约 1.2 MHz	未测试
	20 mm×14 mm		
PDMS 衬底和蛇形结构铜线 ^[23]	0.56 MHz	可承受单轴 53%应变和超过 500 次 30%应变	未测试
	70 mm×70 mm		
柔性印刷电路板和 3D 结构铜线 ^[24]	直径 15.5 mm	100%程度拉伸时,频率偏移约 2.33 MHz	未测试
	<0.8 MHz		
石墨烯材料 ^[25]	45 mm×60 mm	不可拉伸	可承受数十万次弯曲, 谐振频率变化不大
	0.6 MHz		
纺织材料 ^[26]	68 mm×68 mm	不可拉伸	曲率半径 $R=6.7$ mm 时, 频率偏移为 1.8 MHz
	0.5 MHz 左右		
非等间距镓铜液态金属	25 mm×25 mm	30%拉伸测试下频率偏移 0.44 MHz 左右	弯曲曲率半径 $R=5$ mm 时 频率偏移 0.33 MHz
	0.87 MHz		

曲至曲率半径 $R=5$ mm 的工作状态时,天线的中心频率偏移下降至 0.33 MHz,偏移率仅为 2.4%。4) 在各种拉伸、弯曲变形工作状态下的通信距离始终大于 30 mm,均能保持良好的通信性能。

4 结 论

本文设计并制备了一款工作在变形状态下的柔性 NFC 标签天线。新兴材料镓铜液态金属与 PDMS 柔性衬底的结合,实现了天线的高柔性和可拉伸性,使该天线能够更好的适用于变形工作状态,即使有较大的变形依旧保持良好的机械延展性和工作可靠性;新型非等间距的结构设计,不仅实现了 NFC 标签天线的小型化,相比于等面积的等间距设计,天线工作带宽明显提高;变形工作状态下的实验测试表明,该天线在拉伸、弯曲变形工作状态下,频率偏移极小,标签均能够被准确识别,表现出良好的工作性能及稳定性,具有较强的环境适应能力。

该天线为未来制备高强度、大形变且性能稳定的柔性 NFC 标签天线奠定了基础,在逐渐利用无线通信技术进行运动监测和健康监护的时代背景下,该设计对于可穿戴式智能医疗、健康数据监测等领域的发展提供了有力的支持。

参考文献

[1] LE V, LEMMER U, MACKENSEN E. Analysis of miniaturized printed flexible rfid/nfc antennas using different carrier substrates [J]. Radio Frequency Identification, 2020, 4(4): 428-437.

[2] CHEN I F, PENG C M, YAN Z D. A simple NFC RF performance measurement method based on ISO/IEC

14443 standard [J]. Radio Frequency Identification, 2020, 4(4): 438-443.

[3] JIANG Y, PAN K, LENG T, et al. Smart textile integrated wireless powered near field communication body temperature and sweat sensing system [J]. Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 2020, 4(3): 164-170.

[4] SILVA AF, TAVAKOLI M. Domiciliary hospitalization through wearable biomonitoring patches: Recent advances, technical challenges, and the relation to covid-19[J]. Sensors, 2020, 20(23): 6835-6871.

[5] ESCOBEDO P, BHATTACHARJEE M, NIKBAKHTNASRABADI F, et al. Smart bandage with wireless strain and temperature sensors and batteryless NFC tag[J]. Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 5093-5100.

[6] 吴一川,孟欢欢,黄启洋,等. 面向触觉力反馈的可穿戴柔性执行器研究现状[J]. 仪器仪表学报,2021, 42(9): 244-252.

WU Y CH, MENG H H, HUANG Q Y, et al. Research status of wearable and flexible actuators for force feedback [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 244-252.

[7] 孙英,刘乃源,余臻伟,等. 基于 NFC 的可穿戴传感器中柔性/可拉伸天线的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 122-137.

SUN Y, LIU N Y, YU ZH W, et al. Design and characteristic test of high bandwidth flexible NFC tag antenna based on gallium-based liquid metal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 122-137.

- [8] 何怡刚, 余培亮, 佐磊, 等. 高频 RFID 密集标签系统频率偏移预估研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 139-146.
- HE Y G, SHE P L, ZUO L, et al. Research on frequency offset estimation of HF RFID system with dense tags [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 139-146.
- [9] KIM J, BANKS A, XIE Z, et al. Miniaturized flexible electronic systems with wireless power and near-field communication capabilities [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(30): 4761-4767.
- [10] ZHAO A, AI F. Dual-resonance NFC antenna system based on NFC chip antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2856-2860.
- [11] SHI Y. Design and fabrication of fabric near field antenna for wearable applications [D]. Manchester: The University of Manchester (United Kingdom), 2017.
- [12] ZHAN B, LIU F, WENG Y, et al. The effect of mechanical deformation on electrical properties of near-field communication device [C]. 2019 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2019: 1-5.
- [13] 董尚文. NFC 天线结构设计及性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- DONG SH W. Structure design and performance study of NFC antenna [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [14] MATSUZAKI R, TABAYASHI K. Highly stretchable, global, and distributed local strain sensing line using gainsn electrodes for wearable electronics [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(25): 3806-3813.
- [15] ALQURASHI K Y, KELLY J R. Continuously tunable frequency reconfigurable liquid metal microstrip patch antenna [C]. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017: 909-910.
- [16] 王曳舟. 可拉伸液态金属天线与 RFID 标签设计 [D]. 华中科技大学, 2016.
- WANG Y ZH. A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [17] ZHANG G B, GOUGH R C, MOOREFIELD M R, et al. A liquid-metal polarization-pattern-reconfigurable dipole antenna [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1): 50-53.
- [18] FASSLER A, MAJIDI C. Liquid-phase metal inclusions for a conductive polymer composite [J]. Advanced Materials, 2015, 27(11): 1928-1932.
- [19] CHENG S, RYDBERG A, HJORT K, et al. Liquid metal stretchable unbalanced loop antenna [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(14): 94-97.
- [20] XU L L, CHEN X, TAN S R, et al. Characterization and modeling of embroidered nfc coil antennas for wearable applications [J]. Sensors Journal, 2020, 20(23): 14501-14513.
- [21] JOW U, GHOVANLOO M. Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission [J]. Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2007, 1(3): 193-202.
- [22] KIM J, BANKS A, CHENG H, et al. Epidermal electronics with advanced capabilities in near-field communication [J]. Small, 2015, 11(8): 906-912.
- [23] DANGA W, MANJAKKALA L, NAVARAJA W T, et al. Stretchable wireless system for sweat pH monitoring [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 107: 192-202.
- [24] KIM B H, LIU F, YU Y, et al. Mechanically guided post-assembly of 3D electronic systems [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(48): 1803149.
- [25] SCIDA A, HAQUE S, TREOSSI E, et al. Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices [J]. Materials Today, 2018, 21(3): 223-230.
- [26] JIANG Y, PAN K, LENG T, et al. Smart textile integrated wireless powered near field communication body temperature and sweat sensing system [J]. Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 2020, 4(3): 164-170.

作者简介



孙英 (通信作者), 分别于 1994 年、2001 年和 2008 年于河北工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为河北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: sunying@hebut.edu.cn

Sun Ying (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 1994, 2001 and 2008, respectively. Now she is a professor and supervisor for M. Sc. at Hebei University of Technology. Her main research interests include intelligent materials and devices.



花赛月, 2018 年于北京联合大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: huasy960528@163.com

Hua Saiyue received her B. Sc. degree from Beijing Union University of Engineering in 2018. She is currently a M. Sc. candidate at Hebei University of Technology. Her main research interests include intelligent materials and devices.