

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107736

基于镓基液态金属的高带宽柔性 NFC 标签天线设计及特性测试*

孙英^{1,2}, 刘乃源^{1,2}, 翁玲^{1,2}, 周严³

(1. 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; 2. 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; 3. 天津商业大学 理学院 天津 300134)

摘要:利用镓基液态金属作为柔性导电材料,制备基于 NFC 的可穿戴柔性标签天线。通过理论、仿真和实验分析,设计的 NFC 标签天线具有良好的柔性特点和较高的带宽,其在较大拉伸和弯曲变形下的电感变化和谐振偏移程度不大,具有较好的工作稳定性。与传统的 NFC 天线不同,设计的天线具有较好的柔性和可拉伸性,可以柔和地贴合在人体皮肤表面,利用该天线制备的 NFC 标签能够在 13.56 MHz 工作频率下进行无线通信,最大通信距离约为 3.36 cm,与人体手腕处皮肤接触后的最大通信距离约为 3.12 cm。制备的柔性 NFC 标签天线以其独特的优点,在信息交换、个人健康数据监测和可穿戴生物传感等领域有着较大的潜在应用。

关键词: NFC 标签天线;镓基液态金属;高带宽;柔性

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 and characteristic test of high bandwidth flexible NFC tag antenna based on gallium-based liquid metal

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

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

Abstract: A wearable and flexible NFC tag antenna is fabricated by using gallium-based liquid metal as flexible conductive material. Through theoretical, simulation and experimental analysis, the NFC tag antenna designed has good flexibility and high bandwidth. Its inductance change and resonance offset degree are very small under large stretching and bending deformation, and the working stability is well. Different from traditional NFC antenna, the antenna designed has good flexibility and stretchability, which can be gently attached to the surface of human skin. The NFC tag prepared by this antenna can communicate wirelessly at the operating frequency of 13.56 MHz. The maximum communication distance is about 3.36 cm, and the maximum communication distance after contacting with human wrist skin is about 3.12 cm. Due to its unique advantages, the flexible NFC tag antenna fabricated has great potential applications in information exchange, personal health data monitoring and wearable biosensors.

Keywords: NFC tag antenna; gallium-based liquid metal; high bandwidth; flexible

0 引言

近场通信(near field communication, NFC)是在非接

触式射频识别(radio frequency identification, RFID)技术的基础上,结合无线互联技术研发而成,其工作频率通常设置在 13.56 MHz 附近,可以实现不同设备在短距离内的快速通信^[1-3]。NFC 对许多低成本电子标签开发很

收稿日期:2021-04-09 Received Date: 2021-04-09

* 基金项目:国家自然科学基金(52077052)、河北省自然科学基金(E2017202035)、天津市自然科学基金(18JCYBJC87100)项目资助

有意义,因为近场通信可以实现对数据的快速无线通信,尤其是基于 NFC 的可穿戴柔性标签在人体运动传感、生物医疗等领域有着广泛应用前景。

NFC 标签天线作为标签设计的重要一环,其可以在短距离内通过电磁耦合从读写器的电磁场中获取标签上集成芯片所需的能量,无需外部电源供电。然而,NFC 标签天线在可穿戴无线通信领域一直面临挑战。传统铜金属材料制备的 NFC 标签天线可以使用柔性衬底使其具有一定的柔性,但拉伸性能非常差,不适合粘贴在皮肤上工作。另外,拉伸弯曲形变可以改变 NFC 标签天线的电感、谐振频率等重要参数,从而降低天线的性能,甚至会导致通信的失败。因此,需要一种可拉伸的柔性材料来代替传统的铜金属材料,使制备的 NFC 标签天线柔和地贴合在人类皮肤表面。同时优化该天线设计,使其具有较高的带宽,在承受较大的拉伸形变时,依然具有较高的工作稳定性。

镓基液态金属是非常合适的柔性导电材料,其具有良好的可变形性和良好的导电性 ($\approx 3 \times 10^4 \text{ S/cm}$)^[4]。镓基液态金属常见的有两种,一种是共晶镓铟合金 (eutectic gallium-indium, EGaIn),质量分数配比为 75% Ga 和 25% In,熔点为 15.7°C ^[5-6];另一种是镓锡合金 (galinstan),质量分数配比为 68% Ga, 22% In 和 10% Sn,熔点为 -19°C ^[7],本文采用 EGaIn 作为柔性导电材料。另外,镓基液态金属具有无毒性的特点,使用过程中十分安全,该特性与我们日常生活中常见的汞液态金属不同^[7]。利用镓基液态金属制备的 NFC 标签可以承受较大的拉伸形变,封装的弹性体决定了其拉伸特性和机械特性,而且镓基液态金属容易回收,可重复利用,节约能源。

利用镓基液态金属制备 NFC 标签天线的研究进展如下。2017 年,韩国首尔高丽大学的 Jeong 等^[8]利用 Gallistan 设计了一款轻薄且小型化的 NFC 标签,并对不同拉伸程度的天线性能影响进行了分析,但是该 NFC 标签天线制作工艺复杂,成本过高,不宜批量生产。2019 年,深圳大学 Teng 等^[9]利用镓基液态金属设计了一款基于 PVA 衬底的 NFC 标签,由于 PVA 衬底易溶于水的特点,该标签具有良好的水降解能力,非常适合液态金属的回收利用,但是不宜直接粘贴在皮肤上使用。

上述研究均忽略了弯曲形变对 NFC 标签工作性能的影响,因此,针对可穿戴 NFC 标签随着人体运动弯曲变形,其天线谐振频率偏移容易导致通信失败的问题,本文重点研究利用 EGaIn 作为导电材料设计制备一款高带宽可穿戴 NFC 标签天线,使其能够在较大拉伸弯曲变形下可靠工作。

本文首先介绍了利用 EGaIn 为导电材料的 NFC 标

签天线设计和仿真,提出了 3 种尺寸不同、 Q 值近似的设计方案,介绍了其制备方法。其次,对制备的 NFC 标签的电阻、电感、带宽测量,与传统铜材料制备的商用 NFC 标签的带宽进行对比。测试制备的柔性 NFC 标签天线在不同拉伸和弯曲程度下的天线幅频特性变化,确定其中最优设计,并测试了该天线在不同弯曲程度和人体不同接触程度下的无线通信距离。设计的 NFC 标签天线以其独特的柔性优点和良好的工作稳定性,在信息交换、可穿戴传感和生物医疗等领域有着较大的潜在应用。

1 NFC 标签天线的设计和仿真

NFC 标签可以在短距离内通过电磁耦合从读写器的电磁场中获取标签上集成芯片所需的能量。NFC 标签的设计主要包括标签天线的设计、调谐电路的设计和 NFC 芯片的选择。NFC 标签等效电路如图 1 所示。

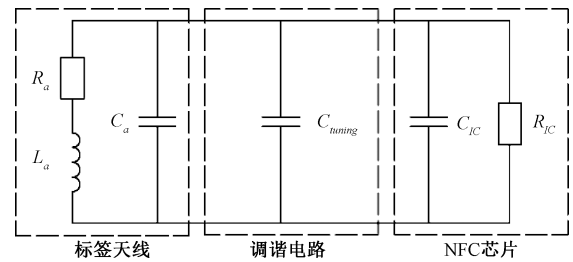


图1 NFC 标签等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of NFC tag

关于标签天线部分, L_a 是标签天线的电感, R_a 是标签天线的等效电阻, C_a 是标签天线的寄生电容。关于 NFC 芯片部分,其中 R_{IC} 是 NFC 芯片的等效电阻, C_{IC} 是 NFC 芯片的等效电容。关于调谐电路部分, C_{tuning} 是调谐电容,其作用是使整个电路的谐振频率工作在 13.56 MHz 频率附近。标签天线的谐振频率 f_r 如式(1)所示。

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

本文设计的 NFC 标签天线采用正方形结构,标签天线设计的重要参数如图 2 所示,天线的电感可以由式(2)求得^[10]。

$$L_a = K_1\mu_0N^2\frac{d}{1 + K_2p} \quad (2)$$

式中: d 为标签天线外径 (d_{out}) 和内径 (d_{in}) 的平均值; d_{out} 和 d_{in} 分别为天线的外部长度和内部长度; N 是匝数; K_1 和 K_2 是与布局有关的参数,对于方形电感, K_1 和 K_2 分别为 2.34 和 2.75; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

p 表示天线的填充率, $p = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in})$ 。

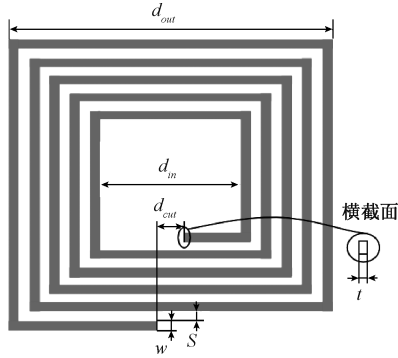


图2 NFC标签天线的重要参数

Fig. 2 Important parameters of NFC tag antenna

对于镓基液态金属制备的 NFC 标签,其等效电阻 R_a 主要由交流损耗电阻 R_s 和附加损耗电阻 R_o 决定,具体如式(3)所示。

$$R_a = R_s + R_o \quad (3)$$

根据衬底材料的不同,附加的损耗电阻会有不同。本文采用聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 作为柔性衬底,附加的损耗电阻 R_o 可忽略不计,即 $R_a \approx R_s$,交流损耗电阻 R_s 可由式(4)求得^[11]:

$$R_s = \frac{\rho L}{w \cdot \delta \cdot (1 - e^{-L/\delta})} \quad (4)$$

其中, ρ 是 EGaln 的电阻率, $\rho = 2.94 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, L 为 NFC 天线走线总长度; w 为 NFC 天线走线宽度; t 为 NFC 天线走线厚度; δ 为液态金属的趋肤深度。

NFC 天线走线总长度 L 可由式(5)求得:

$$L = 4nd_{out} - (4n^2 + n)w - (4n^2 - 3n + 1)s - d_{cut} \quad (5)$$

式中: n 为线圈的匝数; s 为 NFC 天线走线间距; d_{cut} 为 NFC 天线引出线之间的距离,在本文 NFC 标签天线的设计中 $d_{cut} = 2 \text{ mm}$ 。

共晶镓钢合金的趋肤深度可由式(6)求得^[12]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (6)$$

最终求得共晶镓钢合金在 13.56 MHz 时的趋肤深度 $\delta = 74 \mu\text{m}$ 。

标签天线的寄生电容 C_a 与标签天线的面积、走线间距和基底介电常数有关,可以通过天线的自谐振频率计算,通常情况下寄生电容 C_a 的值很小,只有几 pF,一般可忽略不计。

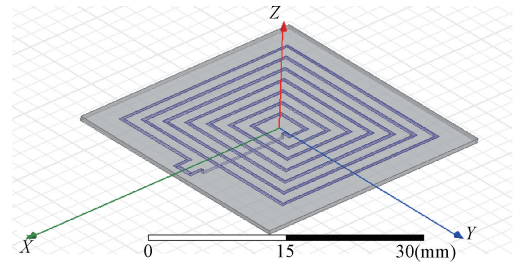
天线的带宽与 Q 因数成反比,即较大的带宽与较低的 Q 因数相对应。以铜金属材料制备的商用 NFC 标签通常设计为较窄带宽和较大的 Q 因数(约在 30~40 之

间),以实现较高传输效率。本文设计的基于镓基液态金属的可穿戴 NFC 标签为了解决由拉伸或弯曲应变产生的谐振频率偏移的问题,需要较宽的工作带宽,因此设计一款 Q 值较低的 NFC 天线来确保其具有较宽的带宽, Q 值可由式(7)求得。

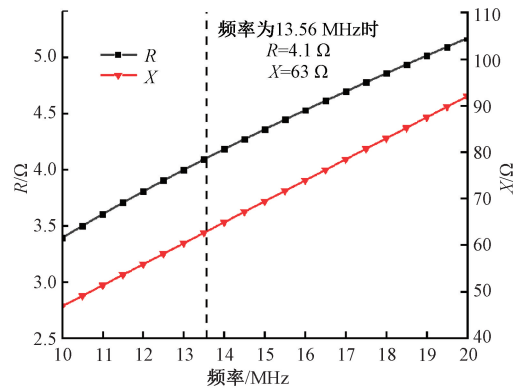
$$Q = \frac{2\pi f_r L_a}{R_a} \quad (7)$$

由式(7)可知, Q 值的大小主要由天线的谐振频率 f_r 、电感 L_a 和等效电阻 R_a 决定。镓基液态金属的电阻率比铜金属材料的电阻率大一些,更容易设计 R_a 更大的 NFC 天线,获得更小的 Q 值,进而获得较宽的带宽。

NFC 天线的电感和电阻可以由三维有限元仿真求得,仿真模型和仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 描述了 NFC 天线的仿真模型,图 3(b) 描述了 NFC 天线的电阻和感抗的仿真结果。



(a) NFC天线的仿真模型
(a) Simulation model of NFC antenna



(b) NFC天线阻抗的仿真结果
(b) Simulation results of NFC antenna impedance

图3 NFC天线的仿真模型和仿真结果

Fig. 3 Simulation model and results of NFC antenna

本文设计的柔性可拉伸 NFC 标签天线主要应用于可穿戴无线传感领域,为保证该 NFC 天线有足够的带宽,在该应用领域下天线的 Q 因数通常设计在 20 以下^[13-17]。然而 Q 因数决定天线的功率传输效率和带宽, Q 值过小会使 NFC 天线有更宽的带宽,但是会影响天线传输效率,故 NFC 天线的设计需要在两个参数之间进行

权衡。为了使设计的 NFC 天线有较宽的带宽,同时保持相对较好的传输效率,可以选择一个相对适中的 Q 值,故本文设计的天线 Q 值选为 14.5 左右。

通过理论和仿真分析,设计了 3 款尺寸不同,但 Q 值近似的 NFC 天线。3 种尺寸 NFC 天线的具体参数如表 1 所示。

表 1 标签天线的具体参数

Table 1 Specific parameters of tag antennas

型号	d_{out}/mm	d_{in}/mm	$n/\text{匝}$	w/mm	s/mm	$t/\mu\text{m}$	L/mm	Q (理论值)
天线 A	25	3.8	7	0.4	1.3	200	390.7	14.1
天线 B	30	5.2	7	0.4	1.6	200	477.9	14.5
天线 C	35	6.6	7	0.4	1.9	200	565.1	14.8

2 NFC 标签天线的制备

基于镓基液态金属制备 NFC 天线的过程如图 4 所示,首先通过 3D 打印机制备模板,然后在制备好的模具里浇注混合好的 PDMS (型号为美国康道宁 DC184, PDMS 主剂和固化剂混合比例为 10:1), 60℃ 下固化 3 个小时,将固化后的 PDMS 模板从模具中取出,然后在提前制备好的 PDMS 薄膜上涂抹一层混合好的 PDMS,然后在 60℃ 温度下固化 85 min,该步骤是制备该柔性天线最重要的环节,其目的是使 PDMS 半固化,减少其流动性,防止将 PDMS 薄膜覆盖在制备的 PDMS 模具上时,粘连通道。接下来,将半固化的 PDMS 薄膜覆盖在制备的 PDMS 模具上面,使其在 60℃ 温度下完全固化,最终形成封闭的空间,然后将镓基液态金属注入进去,封装后即可完成 NFC 天线的制备,制备好的 NFC 天线如图 5 所示,该天线具有良好的柔性和可拉伸性。为了方便天线的电磁参数测量,可以通过两条铜导线引出。

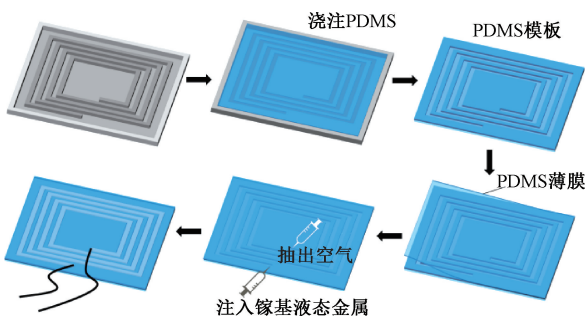
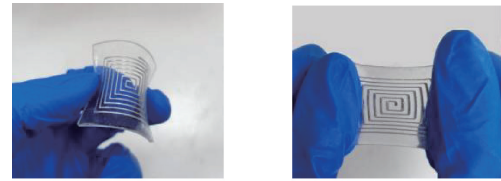


图 4 柔性 NFC 标签天线的制备过程

Fig. 4 Preparation process of flexible NFC tag antenna

值得注意的是,铜引出线与镓基液态金属相接触会产生一层氧化层,该氧化层会严重削弱铜引出线与液态金属之间的导电性能。为解决这一问题,可以在铜导线表面电镀一层导电的 CuGa_2 ,其与液态金属具有良好的润湿性,用来防止氧化的产生和保持铜引出线与液态金



(a) 柔性展示 (a) Flexibility display (b) 拉伸性展示 (b) Stretchability display

图 5 NFC 标签天线的柔性和拉伸性展示

Fig. 5 Flexibility and stretchability display of NFC tag antenna

属之间良好的电接触。将准备的镓基液态金属浸泡在 0.5 mol/L NaOH 溶液中,将铜导线插入液态金属中并施加 0.1 A 的直流电流,这样可以对铜导线电镀一层 CuGa_2 [18]。电镀过程和电镀后的铜导线如图 6 所示,在制备的天线两端接出引出线后,需要在引出线的接口处涂抹混合好的 PDMS,防止漏液。

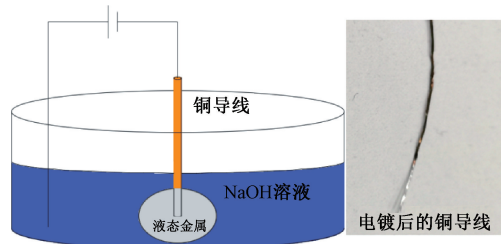


图 6 电镀过程和电镀后的铜导线

Fig. 6 Electroplating process and electroplated copper wire

按照设计的 3 种尺寸,制备出表 1 中的 NFC 天线实物图如图 7 所示。

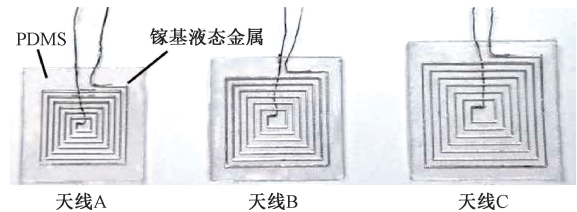


图 7 3 种尺寸 NFC 天线的实物图

Fig. 7 Three sizes of NFC antennas

3 天线特性测试

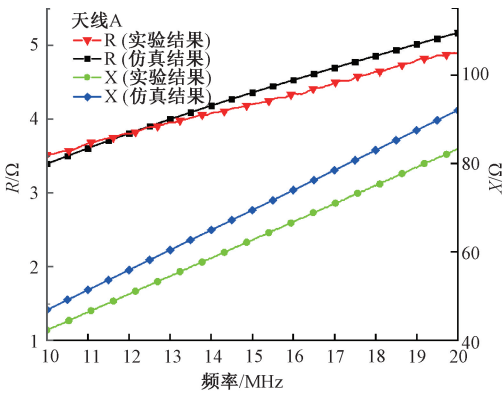
3.1 阻抗特性测试

使用 miniVNA PRO Lite 矢量网络分析仪测试上述制备的 NFC 柔性天线的电感、电阻等基本参数,表 2 显示了上述 3 款 NFC 天线测试后的结果。

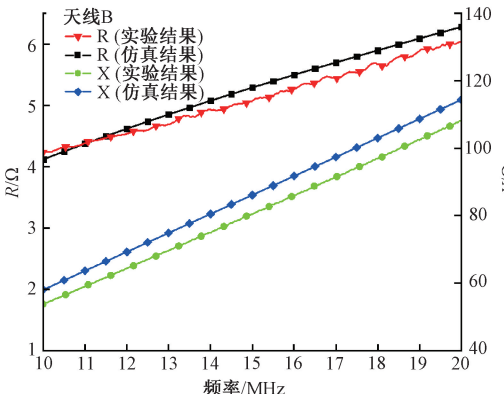
表 2 天线的电感、电阻和 Q 因数实验结果
Table 2 Experimental results of inductance, resistance and Q factor of antenna

型号	$L_a/\mu\text{H}$	R_a/Ω	Q 因数
天线 A	0.668	4.0	14.23
天线 B	0.856	4.8	15.19
天线 C	1.045	6.0	14.83

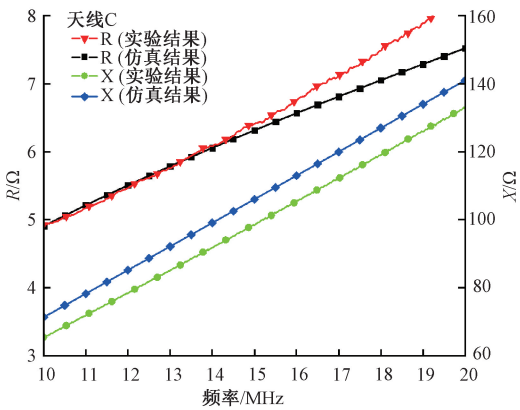
将天线 A、B 和 C 的实验结果和仿真结果进行对比,其结果如图 8 所示。图 8(a) 为天线 A 的电阻和感抗的实验和仿真结果,图 8(b) 为天线 B 的电阻和感抗的实验和仿真结果,图 8(c) 为天线 C 的电阻和感抗的实验和仿真结果,由此可以看出,天线阻抗的实验结果和仿真结果相近。



(a) 天线A的阻抗
(a) Impedance of antenna A



(b) 天线B的阻抗
(b) Impedance of antenna B



(c) 天线C的阻抗
(c) Impedance of antenna C

图 8 天线阻抗的实验结果和仿真结果

Fig. 8 Simulation and practical experiment results of antenna impedance

3.2 天线带宽测试

使用 miniVNA PRO Lite 矢量网络分析仪测量制备的可穿戴 NFC 标签天线的 S_{11} 参数,从而测出天线的谐振频率和带宽。同时,测试一款铜金属材料制备的电阻为 $4\ \Omega$,电感为 $1.63\ \mu\text{H}$, Q 值为 34.7 的商用 NFC 标签天线的带宽,与本文制备的柔性 NFC 标签天线的带宽进行对比。

为测试标签天线在 NFC 工作频率下的性能,且使其在谐振点反射功率最小,为此给标签天线设计匹配电路,使匹配后的等效电路总阻抗 Z_{eq} 近似为 $50\ \Omega$ 。NFC 标签天线的匹配电路如图 9 所示,匹配电路采用在标签天线两端并联电容 C_1 和串联电容 C_2 的方法。匹配电容大小如表 3 所示。

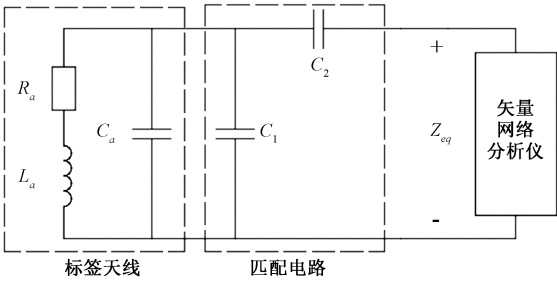


图 9 NFC 标签天线的匹配电路

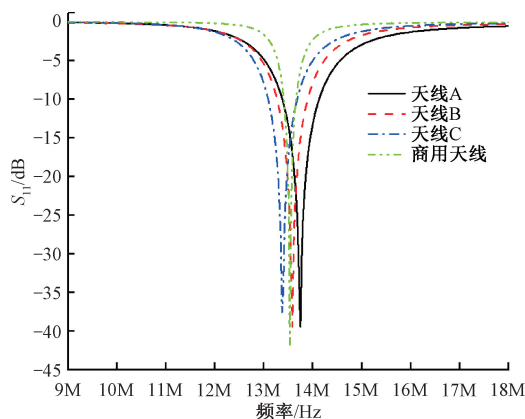
Fig. 9 Matching circuit of NFC tag antenna

表 3 匹配电容的值

Table 3 Value of matching capacitor

型号	C_1/pF	C_2/pF
天线 A	148	61
天线 B	112	50
天线 C	86	47
商用天线	60	24

4款 NFC 标签天线的 S_{11} 参数如图 10 所示。经过详细对比,4款天线的共振频率均在 13.56 MHz 左右,回波损耗分别为 -39.48、-39.48、-37.61 和 -41.88 dB。4款天线在 $S_{11} = -10$ dB 时的带宽分别为 0.70、0.65、0.60 和 0.27 MHz,可以看出由镓基液态金属设计的 NFC 标签具有较宽的带宽,比商用天线带宽大约宽 0.35 MHz,而高带宽是 NFC 标签用于可穿戴设备的一个关键性能指标,因为当天线被弯曲或者拉伸时,天线的谐振频率会发生小幅偏移。带宽较窄的 NFC 天线,谐振频率的偏移可能会导致标签无法被 NFC 阅读器读取。从上述分析可知,利用镓基液态金属制备的高带宽可穿戴 NFC 标签天线适合用于可穿戴领域。

图 10 NFC 标签天线的 S_{11} 结果Fig. 10 S_{11} results of NFC tag antenna

3.3 拉伸和弯曲时天线性能测试

将制备的 NFC 天线集成到可穿戴设备中,需保证天线在人体自然运动时具有稳定的工作性能。为此,测试 NFC 标签天线在不同弯曲和拉伸情况下的天线性能。

1) 拉伸测试

采用图 11 所用的方法确定 NFC 标签天线的拉伸程度,测得不同拉伸程度下天线 A、天线 B 和天线 C 的电感变化如图 12 所示,电感分别从 0.668 H 上升到 0.756 H,从 0.856 H 上升到 0.946 H,从 1.045 H 上升到 1.136 H。在 0~25% 拉伸范围内,电感变化不大,大约增长 0.1 H,且呈线性上升趋势。由式(1)可知,天线的谐振频率变化与天线电感的变化密切相关,因为在 25% 拉伸程度下,天线电感的增大幅度较小,所以天线 A、天线 B 和天线 C 在该拉伸程度下均有较好的工作性能。

2) 弯曲测试

如图 13 所示,使用角度尺测量标签天线的弯曲角度,进行弯曲试验,测得不同弯曲角度下天线 A、B 和 C 的电感变化如图 14 所示,电感分别从 0.668 H 下降到 0.44 H,从 0.856 H 下降到 0.417 H,从 1.045 H 下降到

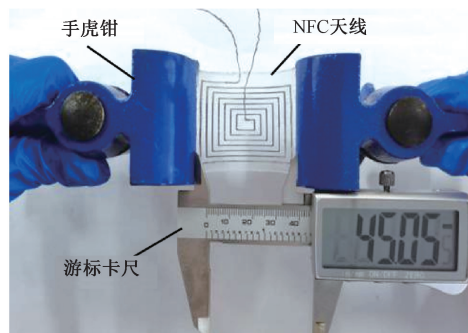


图 11 标签天线拉伸程度的测量

Fig. 11 Measurement of stretching degree of tag antenna

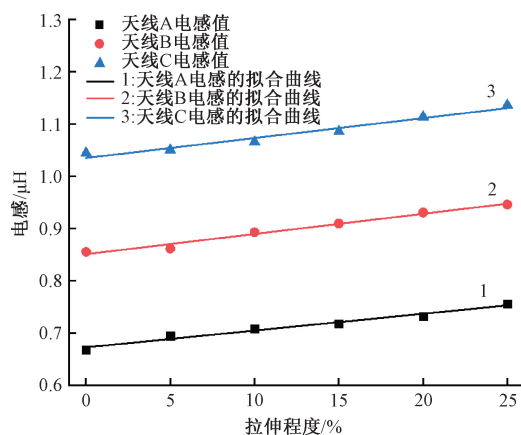


图 12 不同拉伸程度天线电感变化

Fig. 12 Variation of inductance of antenna with different stretching degree

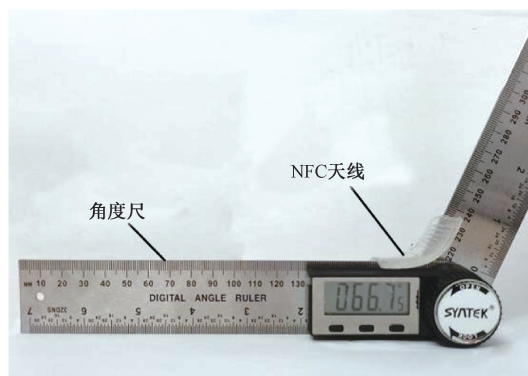


图 13 标签天线弯曲角度的测量

Fig. 13 Measurement of bending angle of tag antenna

0.589 H。从图 14 可以看出,在 120°~180°之间的弯曲范围内,下降速度比较快。

由式(1)可知,天线电感的减小会导致天线谐振频率的小幅增加。选择电感值最小的天线 A 和电感值最大的天线 C 进行弯曲测试对比,如图 15 所示,图 15(a)给出了天线 A 在未弯曲、弯曲 90°、弯曲 120°和弯曲 150°的

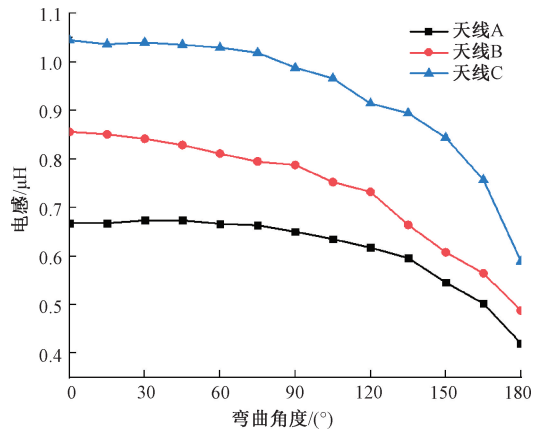
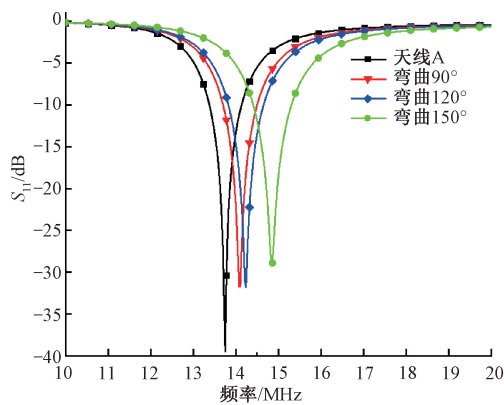
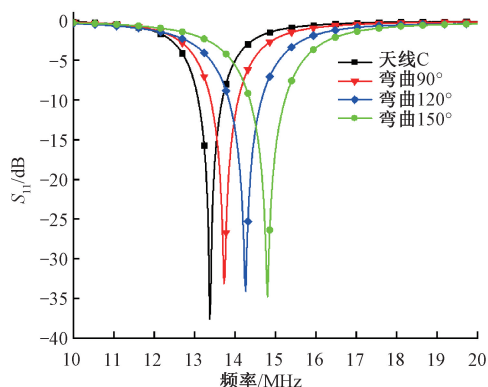


图 14 不同弯曲角度天线电感变化

Fig. 14 Variation of inductance of antenna with different bending angles

(a) 天线A的 S_{11} 结果
(a) The S_{11} results of antenna A(b) 天线C的 S_{11} 结果
(b) The S_{11} results of antenna C图 15 不同弯曲角度天线 A 和 C 的 S_{11} 结果Fig. 15 S_{11} results of antenna A and C with different bending angles

S_{11} 结果,图 15(b)给出了天线 C 在未弯曲、弯曲 90° 、弯曲 120° 和弯曲 150° 的 S_{11} 结果。从天线 A 和 C 的 S_{11} 结果可以看出 NFC 天线的谐振频率随弯曲程度的增大而

增大,弯曲后 S_{11} 的幅值相比未弯曲时的 S_{11} 的幅值有所减少,主要是因为弯曲变形后,标签天线的等效阻抗偏离 50Ω 导致。与图 14 所示的电感下降趋势相对应, $90^\circ \sim 150^\circ$ 的弯曲角之间的频率偏移较大。在 150° 弯曲时,天线 A 谐振点偏移 1.09 MHz,天线 C 谐振点偏移 1.43 MHz,这意味着天线 C 对无线读取性能的影响更大。考虑到标签天线在穿戴过程中不可避免地受人体自然运动而产生拉伸弯曲影响,天线 A、B 和 C 在 25% 拉伸时天线性能差距不大,但在较大程度弯曲变形过程中,天线 A 性能更加稳定且体积较小,因此更适合贴合在人体皮肤表面使用。

以往的综述研究中^[19],从天线制备方法出发,总结了利用传统金属材料传统结构^[13]、2D 结构^[14]、3D 结构^[15, 20]以及利用柔性金属材料中的导电纺织材料^[16]、镓基液态金属^[8]、导电纳米材料^[17]设计柔性/可拉伸 NFC 天线的研究进展。结合本文的实验测试数据,总结了不同类型的柔性/可拉伸 NFC 天线在弯曲/拉伸下的性能变化,其性能分析如下表 4 所示。由表 4 分析可知,大多可拉伸天线忽略了对其弯曲情况下的性能分析,本文设计的 NFC 标签天线 A 在 $0\% \sim 25\%$ 拉伸变形过程中天线电感变化 0.1 H 左右,其在 150° 弯曲时,电感变化 0.2 H 左右,频率偏移约 1.09 MHz,天线性能表现良好。

表 4 几种典型的可拉伸 NFC 天线的性能分析

Table 4 Performance analysis of several typical stretchable NFC antennas

可拉伸 NFC 天线类型	品质因数 (未变形时)	弯曲/拉伸下的天线性能变化
天线 A	14.1	单轴拉伸 25% 的情况下,天线电感变化 0.1 H 左右;在 150° 弯曲时,天线电感变化 0.2 H 左右,频率偏移约 1.09 MHz。
传统结构 ^[13]	14	单轴拉伸 30% 的情况下,天线电感变化不大,其频率偏移约为 1 MHz
2D 蛇形结构 ^[14]	≈ 10.5	单轴拉伸 20% 的情况下,天线电感变化不大
3D 螺旋结构 ^[15]	≈ 20	可实现 70% 程度拉伸
3D 扣状结构 ^[20]	—	100% 程度拉伸时,频率偏移约 2.33 MHz
纺织材料 ^[16]	8.85	弯曲 150° 仍然正常工作,不可拉伸
镓基液态金属 ^[8]	4.3	拉伸 30% 时,频率偏移约 0.76 MHz
导电纳米材料 ^[17]	5.02	数十万次弯曲,谐振频率和电感依旧稳定,不可拉伸

3.4 通信距离测试

从上述分析可知,天线 A 更适合贴合在人体表面使用,为测试天线 A 的通信距离,需要设计完整的 NFC 标签。NFC 标签的等效电路如图 1 所示,本设计采用的 NFC 芯片是 ST 公司的 M24LR04E-R,芯片内部调谐电容 C_{IC} 为 27.5 pF,寄生电容 C_a 较小,可忽略不计,为了使 NFC 标签的谐振频率在 13.56 MHz 附近,通过式(1)计算可知,需要在天线两端并联 175 pF 的调谐电容。

该 NFC 标签可以利用手机的 NFC 功能,配合使用 ST 公司提供的 ST25 这一 APP 读取 NFC 标签的信息,由手机读取的 NFC 标签芯片信息如图 16 所示。



图 16 NFC 标签芯片信息

Fig. 16 NFC tag chip information

从上述分析可以看出,设计的 NFC 标签天线在 0%~25% 拉伸变形过程中天线性能较好,且该天线应用于可穿戴领域时,更容易受弯曲变形影响,故本文重点研究在弯曲变形下对该 NFC 标签通讯距离的影响。

为了测试不同弯曲角度下 NFC 标签的通信距离,采用图 13 所示的方法标定 NFC 标签弯曲角度,用图 17 所示的方法测试其通信距离,采用 TRF7970A (Texas Instruments 公司) 作为读卡器。当 NFC 标签进入工作范围后,TRF7970A 中对应标签协议的 LED 灯会亮,从而标定 NFC 标签的通信距离。测试的不同弯曲角度下的通信距离如图 18 所示。该标签最大通信距离为 3.36 cm,在最大弯曲角度为 150° 时的通信距离为 1.63 cm,这样的结果对于实现短距离通信目标的 NFC 标签来说是令人满意的。

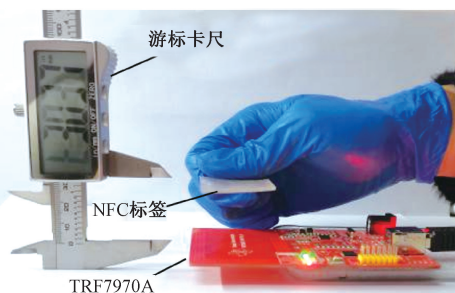


图 17 测试 NFC 标签的通信距离

Fig. 17 Communication distance test of NFC tags

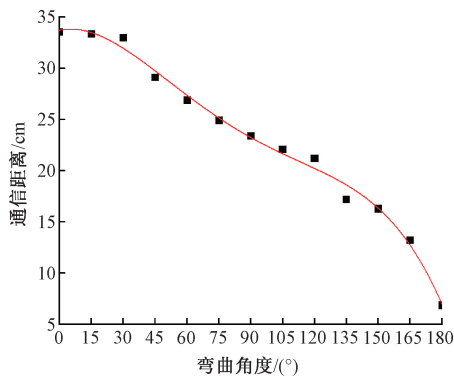


图 18 不同弯曲角度的通信距离

Fig. 18 Communication distance under different bending angles

另外,在现有的研究中,Salonen 等^[21]研究了人体周围环境对可穿戴贴片天线的性能影响,其阻抗和辐射特性几乎不受影响。为了保证镓基液态金属制备的 NFC 标签在可穿戴领域发挥功能,将标签天线与人体皮肤接触后进行通信距离测试。经查阅文献,日常生活中所使用的可穿戴方式多为腕式,故将标签贴合在手腕处进行通讯距离测试。实验测试该柔性标签在不同接触情况下的通信距离如表 5 所示。由实验测试可知,标签天线与人体接触后,其最大无线通信距离有所减少,这是由于传输的电磁能量被人体组织层部分吸收,导致通信距离轻微减少^[22]。

表 5 天线与人体手腕处皮肤不同接触情况下的通信距离

Table 5 Communication distance between the antenna and the human wrist skin under different contact conditions

接触情况	通信距离/cm
直接接触皮肤	3.12
与人体皮肤相隔 1 mm	3.28
与人体皮肤相隔 2 mm	3.30
不接触皮肤	3.36

4 结 论

本文介绍了基于镓基液态金属高带宽可穿戴 NFC 标签天线的设计和制备过程,测试分析 3 款 Q 值近似相等、尺寸不同的高带宽柔性 NFC 标签天线在不同拉伸变形和弯曲情况下的电感变化和谐振偏移程度。经测试,该 NFC 标签天线在较大拉伸和弯曲变形下,天线性能良好,有望贴合在人体表面,实现与读卡设备的可穿戴无线通信连接。该 NFC 标签天线在反射系数为 -10 dB 时的带宽为 0.75 MHz,质量因数为 14.23,最大通信距离为 3.36 cm,与人体手腕处皮肤接触后的最大通信距离约为

3. 12 cm, 这样的结果对于实现短距离通信目标的 NFC 标签来说是令人满意的。

本文利用镓基液态金属制备的高带宽 NFC 天线以其较高的灵活性和工作稳定性, 非常适合应用于柔性可穿戴传感领域, 且在信息交换、个人健康数据监测等领域有着较好的应用前景。

参考文献

- [1] COSKUN V, OZDENIZCI B, OK K. A survey on near field communication (NFC) technology [J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 71(3): 2259-2294.
- [2] LAZARO A, VILLARINO R, GIRBAU D. A survey of NFC sensors based on energy harvesting for IoT applications [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3746.
- [3] PIGINI D, CONTI M. NFC-based traceability in the food chain [J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1910.
- [4] YAN J, LU Y, CHEN G, et al. Advances in liquid metals for biomedical applications [J]. *Chem Soc Rev*, 2018, 47(8): 2518-2533.
- [5] DICKEY M D, CHIECHI R C, LARSEN R J, et al. Eutectic gallium-indium (EGaIn): A liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature [J]. *Advanced Functional Materials*, 2008, 18(7): 1097-1104.
- [6] CHIECHI R C, WEISS E A, DICKEY M D, et al. Eutectic gallium-indium (EGaIn): A moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47(1): 142-144.
- [7] LIU T, SEN P, KIM C. Characterization of nontoxic liquid-metal alloy galinstan for applications in microdevices [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(2): 443-450.
- [8] JEONG Y R, KIM J, XIE Z, et al. A skin-attachable, stretchable integrated system based on liquid GaInSn for wireless human motion monitoring with multi-site sensing capabilities [J]. *NPG Asia Materials*, 2017, 9(10): e443-e443.
- [9] TENG L, YE S, HANDSCHUH-WANG S, et al. Liquid metal-based transient circuits for flexible and recyclable electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(11): 1808739.
- [10] MOHAN S S, HERSHENSON M D M, BOYD S P, et al. Simple accurate expressions for planar spiral inductances [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1999, 34(10): 1419-1424.
- [11] ZOLOG M, PITICA D, POP O. Characterization of spiral planar inductors built on printed circuit boards [C]. 2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2007: 308-313.
- [12] VARGA M, MEHMANN A, MARJANOVIC J, et al. Adsorbed eutectic GaIn structures on a neoprene foam for stretchable MRI coils [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(44): 1703744.
- [13] KIM J, BANKS A, CHENG H, et al. Epidermal electronics with advanced capabilities in near-field communication [J]. *Small*, 2015, 11(8): 906-912.
- [14] CHUNG H U, KIM B H, LEE J Y, et al. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care [J]. *Science*, 2019, 363(6430): eaau0780.
- [15] YAN Z, ZHANG F, LIU F, et al. Mechanical assembly of complex, 3D mesostructures from releasable multilayers of advanced materials [J]. *Science Advances*, 2016, 2(9): e1601014.
- [16] JIANG Y, XU L, PAN K, et al. E-Textile embroidered wearable near-field communication RFID antennas [J/OL]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 13(1): 99-104 [2019-01-09]. <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2018.5435>.
- [17] SCIDÀ 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.
- [18] MA J L, DONG H X, HE Z Z. Electrochemically enabled manipulation of gallium-based liquid metals within porous copper [J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(4): 675-682.
- [19] 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.
- [20] SUN Y, LIU N Y, YU ZH W, et al. Research progress of flexible/stretchable antennas in wearable sensors based on NFC [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 122-137.
- [20] 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.

- [21] SALONEN P, RAHMAT-SAMII Y, KIVIKOSKI M. Wearable antennas in the vicinity of human body [C]. IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004, 461: 467-470.
- [22] KLEMM M, TROESTER G. EM energy absorption in the human body tissues due to UWB antennas[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2006, 62: 261-280.

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、研究生导师, 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 interest is intelligent materials and devices.



刘乃源, 2019 年于河北工程大学获得学士学位, 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: 2317622877@qq.com

Liu Naiyuan received his B. Sc. Degree from Hebei University of Engineering in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His main research interest is intelligent materials and devices.



周严, 2002 年于天津理工大学获得学士学位, 2005 年于天津师范大学获得硕士学位, 2009 年于河北工业大学获得博士学位, 现为天津商业大学教授, 主要研究方向为智能材料与器件。

E-mail: lxyzhy@tjcu.edu.cn

Zhou Yan received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 2002, received his M. Sc. degree from Tianjin normal University in 2005, received his Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2009. Now he is a professor at Tianjin Commercial University. His main research interest is intelligent materials and devices.