

面向汽车进入的NFC天线设计

代 闯, 张振东

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月2日; 录用日期: 2024年5月3日; 发布日期: 2024年5月10日

摘 要

为了使得用户更加便捷的开启车门, 本文面向汽车进入系统, 基于NFC技术和原理设计了一种置于门把手环境下的NFC天线。利用HFSS软件完成了NFC天线的模型设计, 仿真分析了天线面积、走线宽度、走线间距和介质板厚度对天线等效电感值的影响, 结果表明, 较大的线圈面积、较小的走线宽度和走线间距可以有效地提高天线的等效电感值, 而介质板的厚度对等效电感值影响较小, 需根据仿真值进行选择。随后基于Smith原图工具完成了天线电路的阻抗匹配设计, 将计算出的匹配参数值带回到模型中进行仿真, 对匹配后天线的回波损耗、电压驻波比进行了评价。从结果得知本次所设计的NFC天线匹配程度高、反射损耗较小, 具有良好的性能。

关键词

汽车进入, NFC技术, 天线设计, 阻抗匹配, HFSS

NFC Antenna Design for Automobile Entry

Chuang Dai, Zhendong Zhang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 2nd, 2024; accepted: May. 3rd, 2024; published: May. 10th, 2024

Abstract

In order to make the user more convenient to lock the automobile, this paper designs an NFC antenna based on NFC technology and principle for the automobile entry system under the door handle environment. HFSS software is used to complete the model design of the NFC antenna, and the effects of antenna area, wire width, wire spacing, and dielectric plate thickness on the antenna equivalent inductance value are simulated and analyzed. The results show that a larger coil area, smaller wire width and wire spacing can effectively improve the antenna equivalent inductance value, while the thickness of the dielectric plate has little effect on the equivalent inductance value. The selection should be based on the simulation value. Then the impedance-matching design of

the antenna circuit is completed based on the Smith tool. The calculated matching parameters are brought back to the model for simulation, and the return loss and voltage standing wave ratio of the antenna after matching are evaluated. The results show that the NFC antenna designed in this paper has a high matching degree, low reflection loss and good performance.

Keywords

Automobile Entry, NFC, Antenna Design, Matching Design, HFSS

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汽车“新四化”[1]的发展,汽车钥匙也在经历着翻天覆地的变化,从最初的摇把[2]机械结构到21世纪初的无钥匙进入及启动(Passive Entry Passive Start, PEPS)系统[3] [4] [5],再到如今以近场通讯(Near Field Communication, NFC)技术[6] [7]、低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy BLE)技术[8] [9]和超宽带(Ultra Wideband, WUB)技术[10] [11]为主流的数字钥匙技术。数字钥匙技术以云端为桥梁,构建了用户手机或者智能钥匙设备与汽车终端的双向认证通道,实现了智能钥匙端与车载终端之间的通讯,让用户可以仅凭一部手机便可解锁汽车并不需要携带额外的车钥匙。其中NFC技术作为第一代数字钥匙技术存在着诸多优势。首先,NFC技术的安全性通过硬件实现,10 cm的工作距离也使得NFC钥匙在使用时被窃听的风险得到降低。其次,NFC技术整体硬件框架简单,开发成本较低,并且射频芯片货源成熟且稳定。最后NFC技术的功耗极低,通过相关的软件设计和元器件选择可以实现低功耗检测卡片,即使在手机关机的情况下也能开启汽车门锁。

综上所述,本文面向汽车进入功能提出一种基于NFC技术的汽车门把手天线设计,利用HFSS软件对NFC天线进行建模与仿真,并通过回波损耗、电压驻波比、方向性对天线性能进行综合评价。

2. 基于HFSS的NFC天线设计

2.1. NFC系统工作原理

通常NFC系统由读卡器设备与卡/标签设备共同组成,二者内部均置有NFC天线且在13.56 MHz频段下工作。如图1所示,当NFC系统开始工作时,读卡器将通过天线不断地向外部发射电磁波无线信号,如果带有NFC天线的卡片或者标签靠近读卡器的工作距离时,两者的线圈通过电磁耦合的形式产生足够的能量产生感应电流,激活卡/标签设备中的芯片并开始工作,读卡器识别到卡/标签设备后,通过电磁波发射带有信息的编码并读取来自卡/标签设备的回复,从而实现数据间的传输。

本次所设计的门把手天线属于读卡器天线,用户使用NFC手机或者NFC设备在门把手区域进行刷卡操作即可实现开锁功能。

2.2. NFC天线设计要求

NFC天线被要求在13.56 MHz频率下工作,相较于传统天线而言工作距离较短,需要通过电磁耦合的方式传输电磁信号,因此可将NFC天线视为一种耦合线圈。表征耦合线圈天线特性参数主要有:回波损耗、输入阻抗、增益、辐射方向图、频宽等。在设计天线时需要结合本门把手系统对天线的要求,在

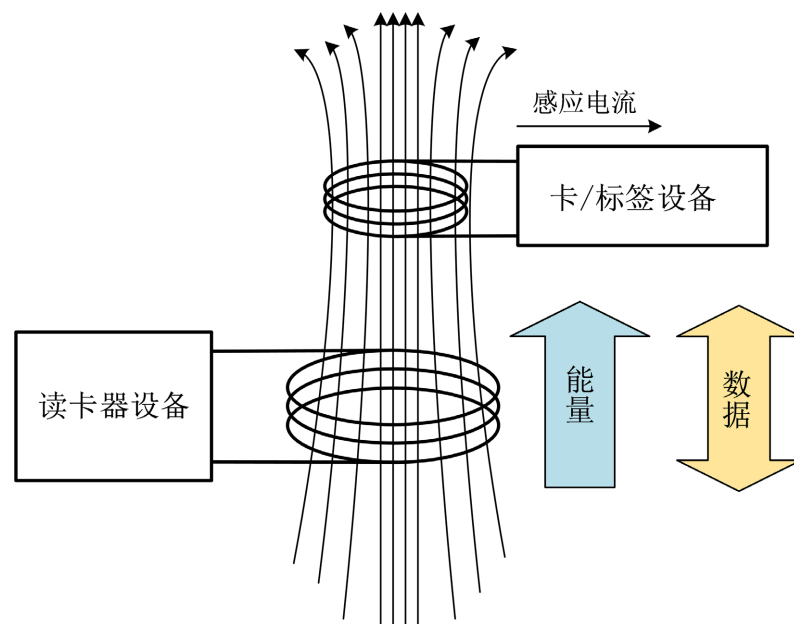


Figure 1. Working principle of NFC system
图 1. NFC 系统工作原理图

本系统中, 天线需要被安置在汽车门把手内部狭窄修长的空间中, 属于小型天线, 因此需要合理设计天线的尺寸, 以符合门把手内的布局, 同时满足天线的性能要求。本次 NFC 门把手系统的天线设计要求如下:

- (1) NFC 的工作频率为 13.56 MHz;
- (2) 天线整体尺寸满足门把手内部 90 mm × 18 mm 的空间使用;
- (3) 天线的等效电感值约等于 1 μH [12];
- (4) 需要合理设计匹配电路, 确保天线的回波损耗小于 -10 dB, 且电压驻波比接近 1。

3. 基于 HFSS 的天线设计

3.1. 模型设计

在本设计中, 根据门把手的结构大小初步将 PCB 板的尺寸设置为长 90 mm, 宽 18 mm, 天线的结构尺寸设置为长 80 mm, 宽 17 mm。如图 2 所示, 图中线圈的长和宽分别定义为 L_x 与 L_y , 走线宽度与走线间距分别定义为 w 与 s , 板厚设置为 H 。Input 与 Gnd 为板载天线的馈电输入点, 在 Input 端与 Gnd 端设置了一个集总端口来定义端阻抗。

在该模型中, 设置 NFC 天线走线为理想导体边界条件, 设置空气盒为辐射边界条件, 空气盒大小为 500 mm × 500 mm × 500 mm, 介质板材料选用了玻璃纤维环氧树脂, 即 FR-4, 端口阻抗值定义为 50 Ω 。

3.2. 天线结构参数对等效电感值的影响

天线的尺寸与天线的性能并不呈现正相关性, 如果天线的尺寸设计得过小, 那么天线的等效电感值将减小。反之, 天线的尺寸设计得过大将会增加天线的等效电感值, 但是会减小与之匹配的电容值, 增大匹配设计难度[13]。设计时, 需要综合考虑天线的结构尺寸、天线电感值大小以及天线参变量选择。

首先, 本节研究天线电感值与工作频率之间的关系。当 L_x 为 80 mm, w 为 1 mm, s 为 1 mm, H 为 1.6 mm, 频率的变化范围为 5~20 MHz 时, 天线的等效电感值与频率的变化关系如图 3 所示。

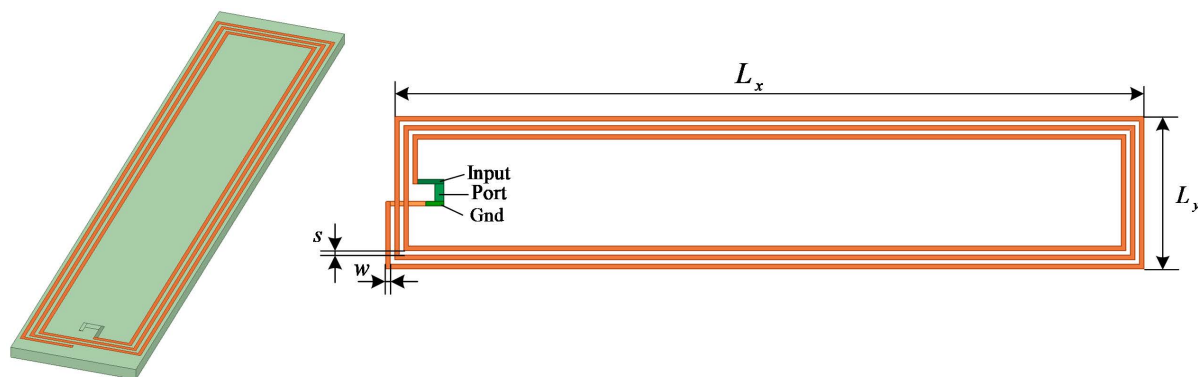


Figure 2. NFC antenna model
图 2. NFC 天线模型

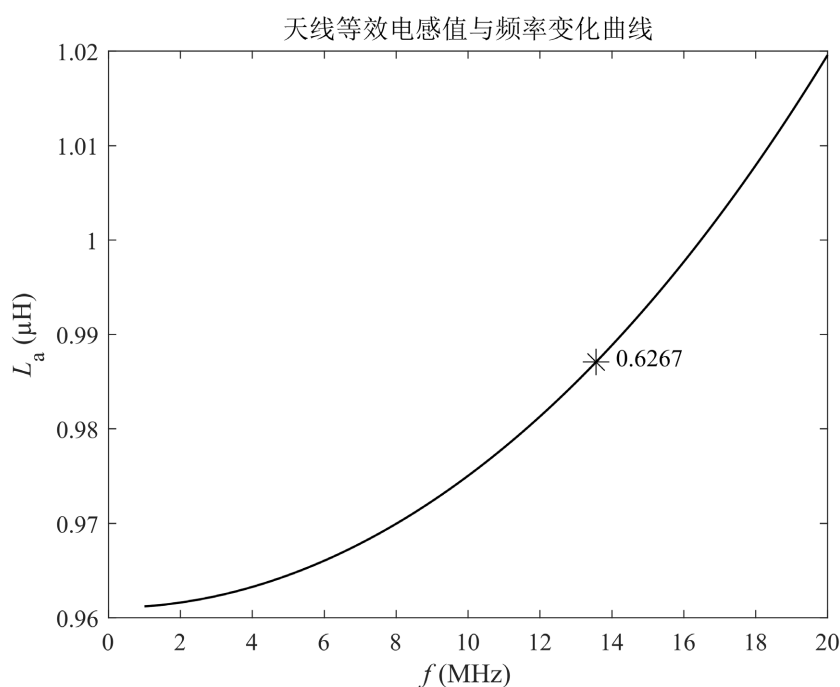


Figure 3. Curve of antenna equivalent inductance value and frequency
图 3. 天线等效电感值与频率的关系曲线

通过上图可知, 天线的等效电感值与频率呈现正相关关系, 随着工作频率的增大, 天线的等效电感值也不断增大, 在工作频率 13.56 MHz 下, 天线的等效电感值为 0.6267 μH 。

第二, 本节研究天线电感值与线圈长边 L_x 的变化关系。当 w 为 1 mm, s 为 1 mm, H 为 1.6 mm 时, 线圈的长边 L_x 的变化范围为 75~85 mm, 天线的等效电感值与线圈长边 L_x 的变化关系如图 4 所示。

通过上图可知, 线圈的面积对天线的等效电感值影响较大, 并且呈现出正相关性, 当线圈长边 L_x 逐步增大的过程中, 天线的等效电感值也逐步增大, 并且当 L_x 取得最大值 85 mm 时, 等效电感值也为最大值 0.6563 μH 。为了保证天线的性能, 并尽可能接近设计目标值, 本文将采用 $L_x = 85$ mm。

第三, 本节研究天线电感值与线圈走线宽度 w 之间的关系。当 L_x 为 80 mm, s 为 1 mm, H 为 1.6 mm 时, 线圈的走线宽度 w 的变化范围为 0.5~1 mm, 天线的等效电感值与线圈的走线宽度 w 的变化关系如图 5 所示。

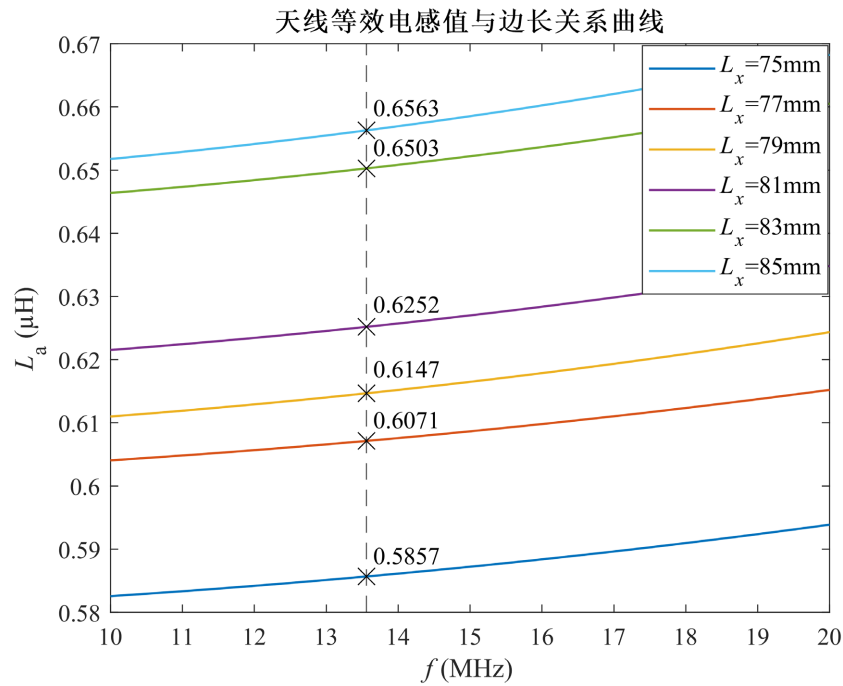


Figure 4. Curve of antenna equivalent inductance value and L_x

图 4. 天线等效电感值与边长关系曲线

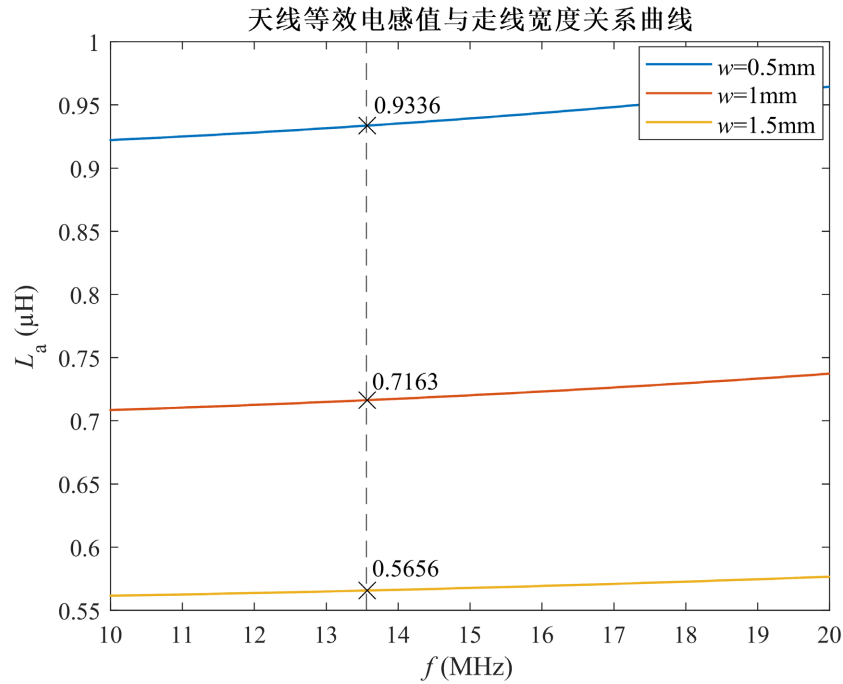


Figure 5. Curve of antenna equivalent inductance value and w

图 5. 天线等效电感值与走线宽度关系曲线

通过上图可知, 线圈的走线宽度 w 对天线的等效电感之影响较大, 并且呈现出负相关关系。在走线宽度从 0.5 mm 增大到 1 mm 的过程中, 天线的等效电感值逐步减小, 当线圈走线宽度 w 为 1.5 mm 时等效电感值取得了最小值 0.5656 μH , 在 w 为 0.5 mm 时等效电感值取得了最大值 0.9336 μH 。为了保证天

线的性能, 让天线的等效电感值逼近设计目标值, 本文将采用 $w = 0.5 \text{ mm}$ 。

第四, 本节研究天线电感值与线圈走线间距 s 之间的关系。当 L_x 为 80 mm , w 为 1 mm , H 为 1.6 mm 时, 线圈的走线间距 s 的变化范围为 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$, 天线的等效电感值与线圈的走线间距 s 的变化关系曲线如图 6 所示。

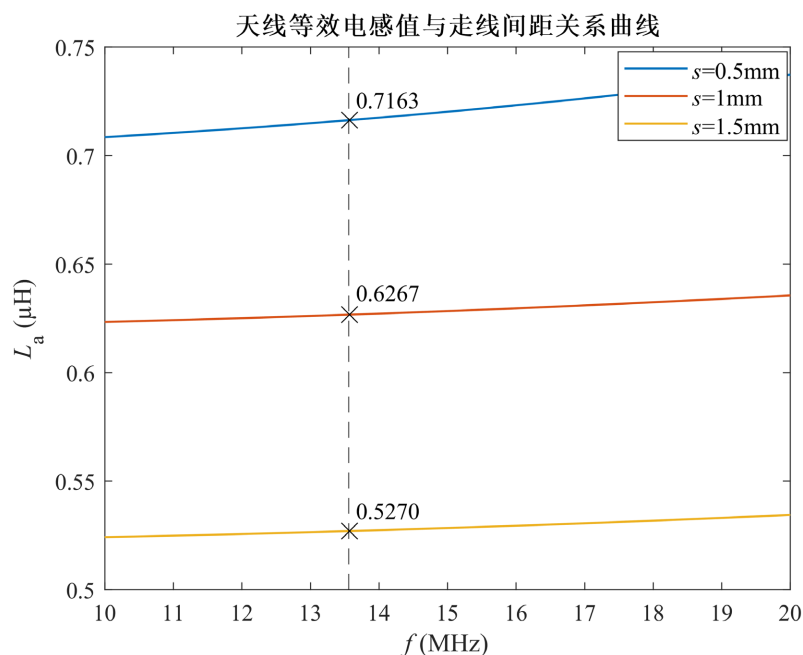


Figure 6. Curve of antenna equivalent inductance value and s

图 6. 天线等效电感值与走线间距关系曲线

通过上图可知, 线圈的走线间距 s 对于天线的等效电感值影响很大, 并且呈现负相关性。在走线间距 s 从 0.5 mm 增大到 1 mm 的过程中, 天线的等效电感值逐步减小, 并且在 s 为 1.5 mm 时等效电感值取到最小值 $0.527 \mu\text{H}$, 在 s 为 0.5 mm 时等效电感值取到最大值 $0.7163 \mu\text{H}$ 。为了保证天线的性能, 并让等效电感值趋近设计目标值, 文本将采取 $s = 0.5 \text{ mm}$ 。

最后, 本节研究天线电感值与介质板厚度 H 之间的关系。当 L_x 为 80 mm , w 为 1 mm , s 为 1 mm 时, 介质板厚度 H 的变化范围为 $1 \sim 2 \text{ mm}$, 天线的等效电感值与介质板厚度 H 的变化关系如图 7 所示。

由上图可知, 介质板厚度 H 对天线的等效电感值影响较小, 呈现出非线性关系, 当介质板厚度 H 从 1 mm 增大到 2 mm 的过程中时, 等效电感值在 H 为 1.2 mm 时取得最大值 $0.6315 \mu\text{H}$, 在 H 为 2 mm 时取得最小值 $0.6121 \mu\text{H}$ 。本文为了使后续的制板过程方便, 选取了 PCB 常见的厚度, 即取 $H = 1.6 \text{ mm}$ 。

综上所述, 本文所设计的 NFC 天线各个结构参数确定为, 线圈长边为 85 mm , 线圈短边为 17 mm , 线圈走线宽度为 0.5 mm , 走线间距为 0.5 mm , 介质板厚度为 1.6 mm , 匝数为 3 匝。将上述参数重新对天线进行建模, 经过仿真得到结构改进后的天线等效电感值与频率的关系如图 8 所示。

经过结构改进后, 目前的天线等效电感值可以达到 $0.9871 \mu\text{H}$, 这个值已经非常接近目标设计值 $1 \mu\text{H}$, 后文将根据这个值作为基准, 进行后文的匹配电路计算。

3.3. 匹配电路设计

阻抗匹配的目的在于实现射频电路中最大功率传输和频率宽带性能。当天线的输入和输出端口的阻抗与传输线的阻抗不匹配时, 会导致反射信号的出现, 使得信号能量衰减无法完全传输到天线上, 造

成功率损失并影响信号的频响特性。因此在天线射频电路的设计中进行阻抗的匹配是非常重要的。常见的串联形式单端匹配电路如图 9 所示, 包含一个串联电阻 R_m 、一个串联电容 C_1 和一个并联电容 C_2 。

从 HFSS 软件中获得的 Smith 圆上, 可以读出天线达到自谐振频点时所在的 0° 相位的位置, 利用标记工具获取在工作频点 13.56 MHz 下天线的阻抗值与电感值。

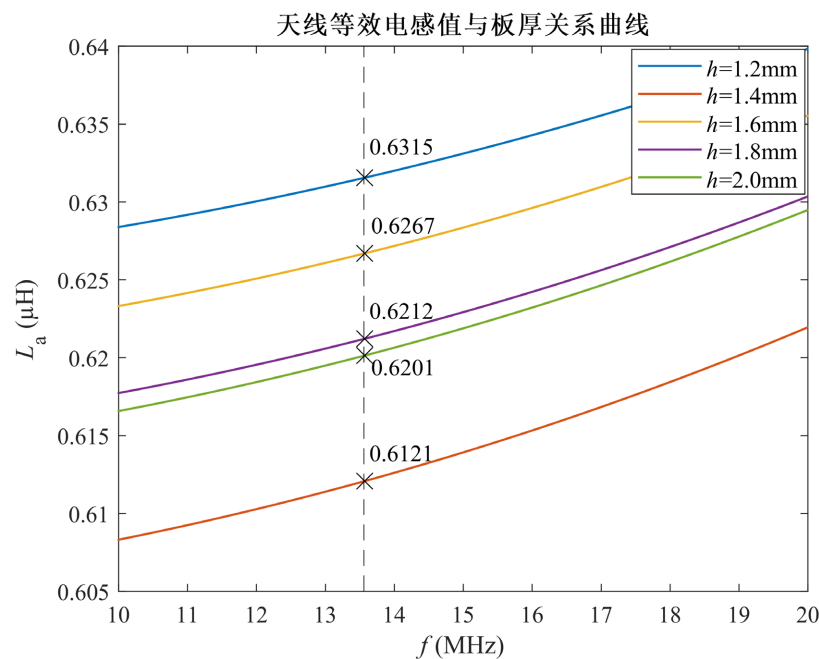


Figure 7. Curve of antenna equivalent inductance value and H
图 7. 天线等效电感值与板厚关系曲线

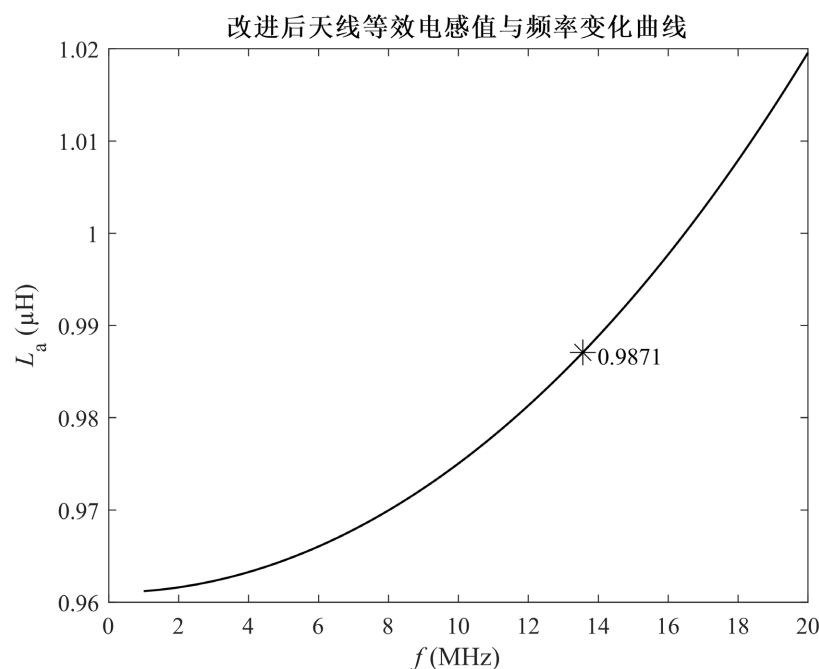


Figure 8. Curve of improved antenna equivalent inductance value and frequency
图 8. 改进后天线等效电感值与频率关系曲线

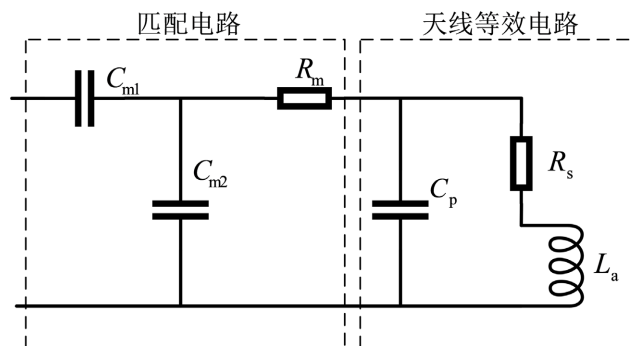


Figure 9. Antenna matching circuit

图 9. 天线匹配电路

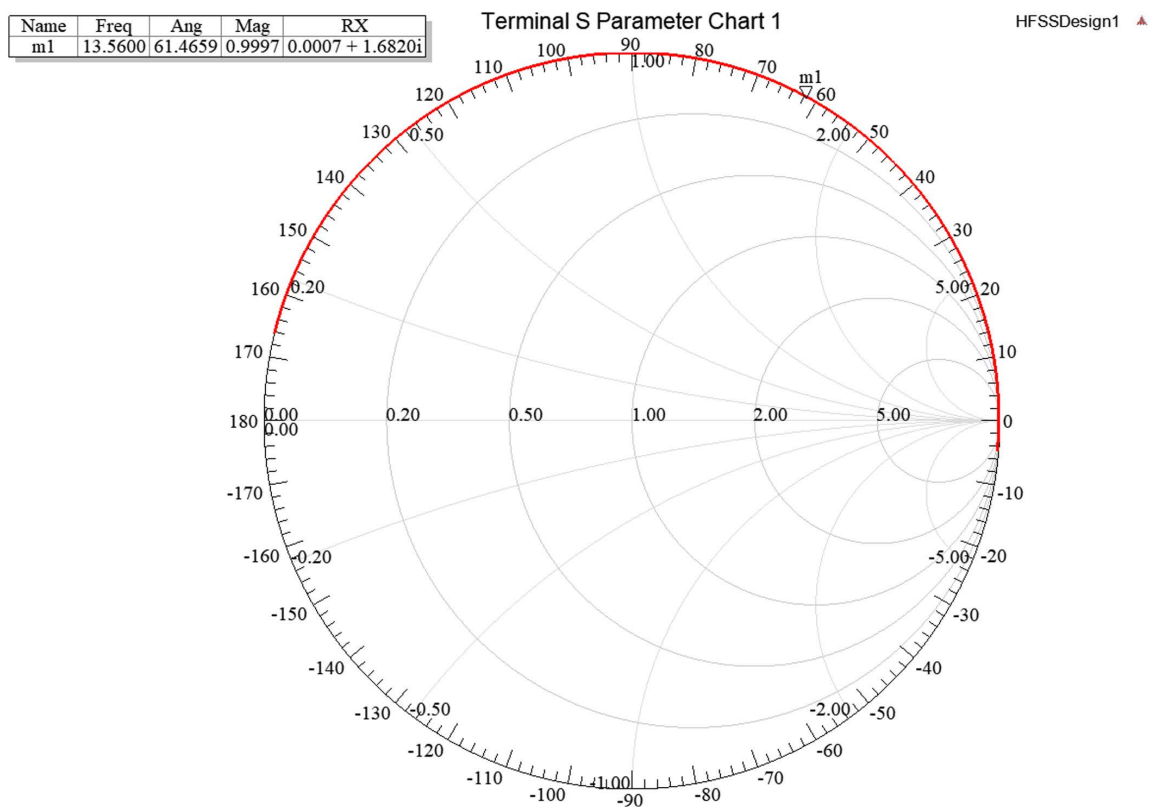


Figure 10. Smith chart of antenna self-resonance

图 10. 天线自谐振 Smith 圆图

令归一化的阻抗为 50Ω 时, 由图 10 可知。

$$Z = 0.0007 + j1.6820 \quad (1)$$

则天线的损耗电阻为:

$$R_s = ra(Z) \times 50 = 0.0007 \times 50 = 0.035 \Omega \quad (2)$$

此时, 等效电感值可从阻抗的虚部计算而得, 即:

$$L = \frac{im(Z)}{\omega} = \frac{1.6820 \times 50}{2 \times \pi \times 13.56} = 0.98708 \mu\text{H} \quad (3)$$

与计算值与等效电感曲线获得的值几乎相同, 且落在合理的设计范围之内。
若定义品质因数 $Q = 10$, 那么在阻抗匹配电路中的串联电阻阻值则可根据下述公式计算获得:

$$Q = \frac{X}{R} \tag{4}$$

其中 X 为所设计天线的总阻抗, 即归一化总阻抗的虚数部分。 R 为阻抗匹配电路中的总电阻值, 即 $R = R_m + R_s$ 。将公式(1)与公式(2)中所获得的值代入公式中, 便可获得串联匹配的电阻值, 即:

$$R_m = \frac{\omega L}{Q} - R_s = \frac{1.682 \times 50}{10} - 0.035 = 8.375 \, \Omega \tag{5}$$

借助 Smith 圆图工具可得, 如图 11 所示, 在确定好 Smith 圆起点后沿着等电感线确定 R_m 值为 $8.4 \, \Omega$ 所在的点, 其次确定出 $8.4 \, \Omega$ 所在的等电阻圆与 $50 \, \Omega$ 等电阻圆的交点, 确定出需要并联的电容 C_2 值为 $82.1 \, \text{pF}$, 最后逆时针沿着等电阻圆与纯电阻线的交点确定出串联电容 C_1 的值为 $59.4 \, \text{pF}$, 如图 12 所示。

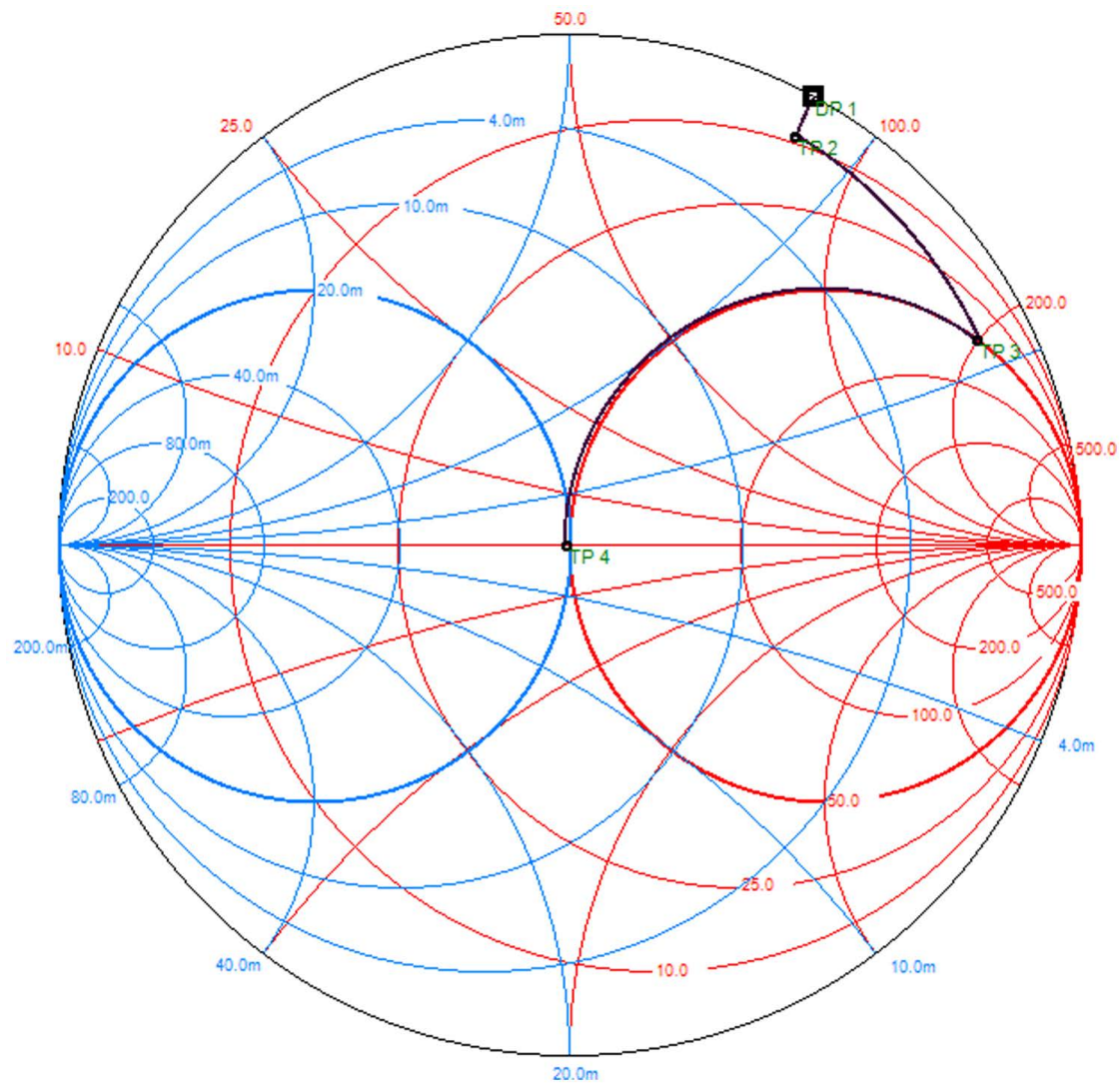


Figure 11. Impedance matching
图 11. 阻抗匹配图

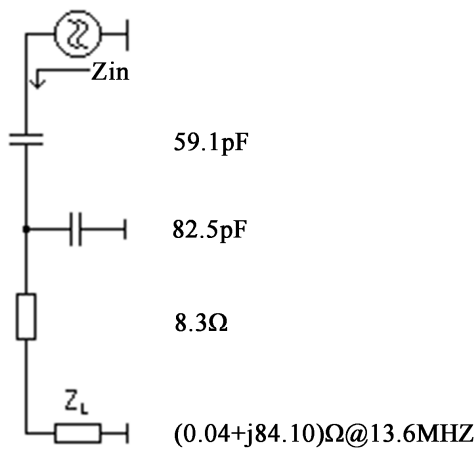


Figure 12. The calculated results of impedance matching
图 12. 阻抗匹配结果值

4. 天线性能评价

如图 13 所示，将前一章节所计算的匹配电路参数值代入天线模型的馈电部分后，可以借助仿真对所设计的天线性能进行评价，主要包括 Smith 圆图、回波损耗与电压驻波比。

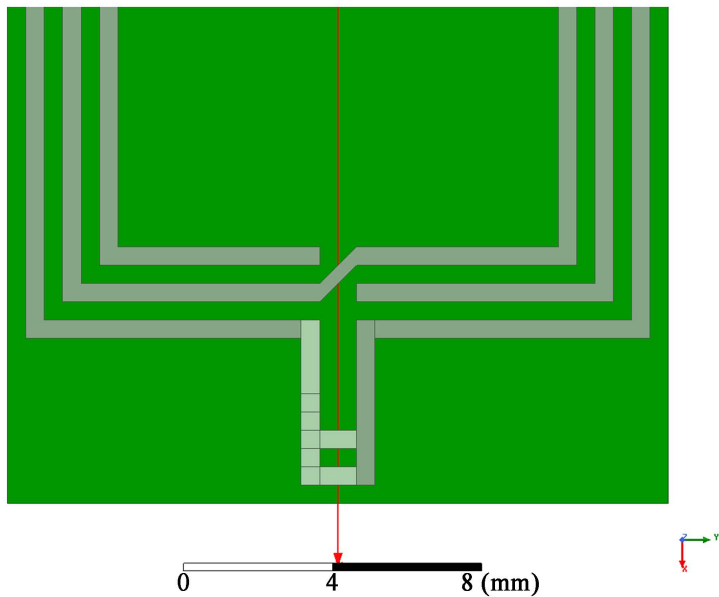


Figure 13. Adding matching components to antenna model
图 13. 模型中加入匹配元件

4.1. 匹配后的 Smith 圆图

由图 14 可知，天线经过匹配设计之后，阻抗曲线产生了变化，此时工作频点接近纯电阻线，天线幅值差为 0.0436。当该差值越小时，表示天线越接近完全匹配。

4.2. 回波损耗

反射系数定义为反射波电压和入射波电压的比值，数学表达式见公式(6)。

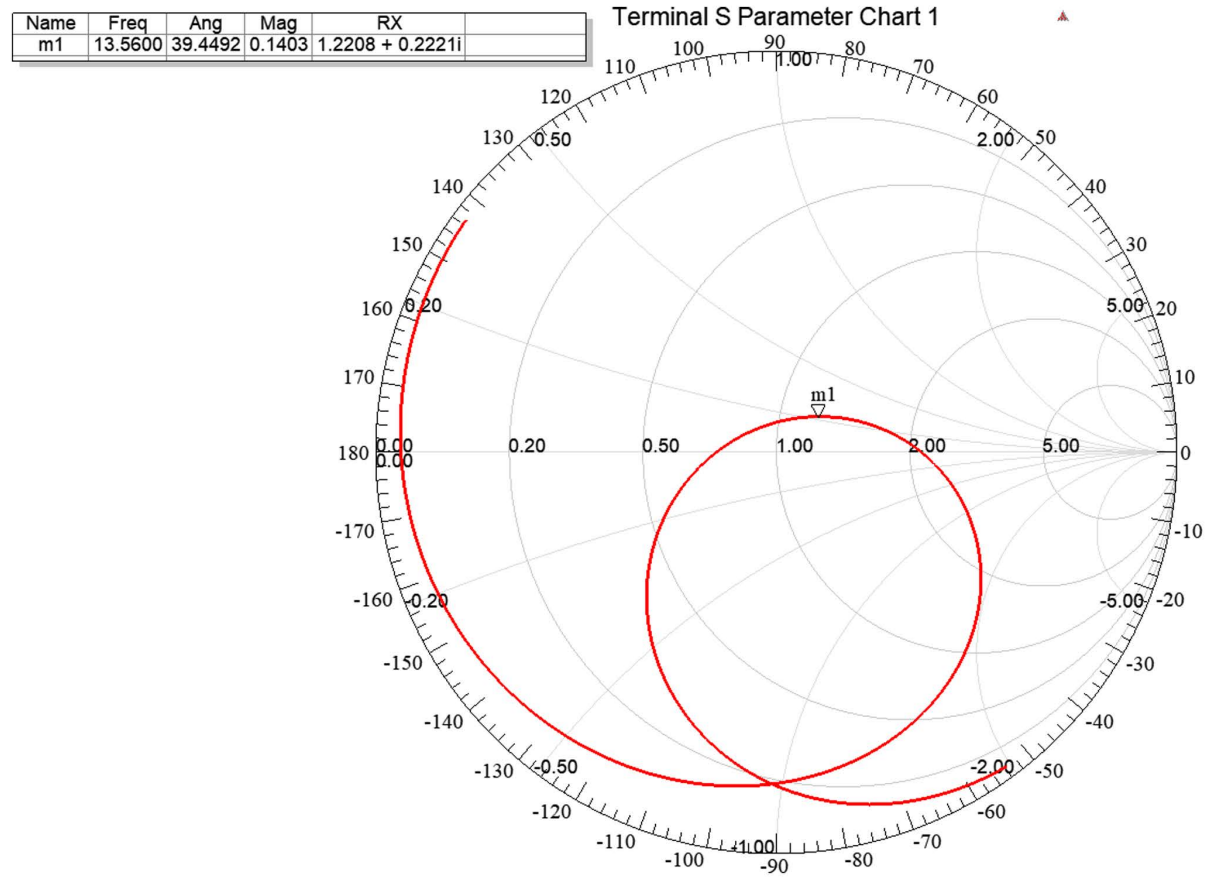


Figure 14. Smith chart after matching
图 14. 匹配后的 Smith 圆图

$$\Gamma = \frac{V_{inc}}{V_{ref}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

$$S_{11} = -20 \log(|\Gamma|) \quad (7)$$

其中 Z_0 为系统的源阻抗, Z_L 则为系统的负载阻抗, 可见示意图。当系统的源阻抗与负载阻抗相等时, 即系统处于完全匹配时, 传输的电压能量被负载完全吸收, 此时反射系数值为 0。

回波损耗定义为入射功率和反射功率的比值, 并以 dB 形式表示, 见公式(7)。一般要求所设计的天线的回波损耗要小于-10 dB, 即反射约 30%的信号, 基于 HFSS 软件得到的天线回波损耗曲线如图 15 所示。

由图可知, 当天线达到工作频点 13.56MHz 时, 回波损耗降至-24.9dB, -10dB 以下的有效带宽为 0.86MHz, 符合本次 NFC 天线的设计要求。

4.3. 电压驻波比

电压驻波比定义为波腹电压和波节电压的比值, 其数学表达式见公式(8)。电压驻波比的变化范围是 1 到 $+\infty$, 在完全匹配的状态下, 即无反射电压时, 电压驻波比为 1。因此在设计阶段应当保证此值尽可能接近 1。如图 16 所示, 本次 HFSS 仿真中, 所设计的天线的电压驻波比为 1.1208, 损失了较少的能量。

$$V_{SWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (8)$$

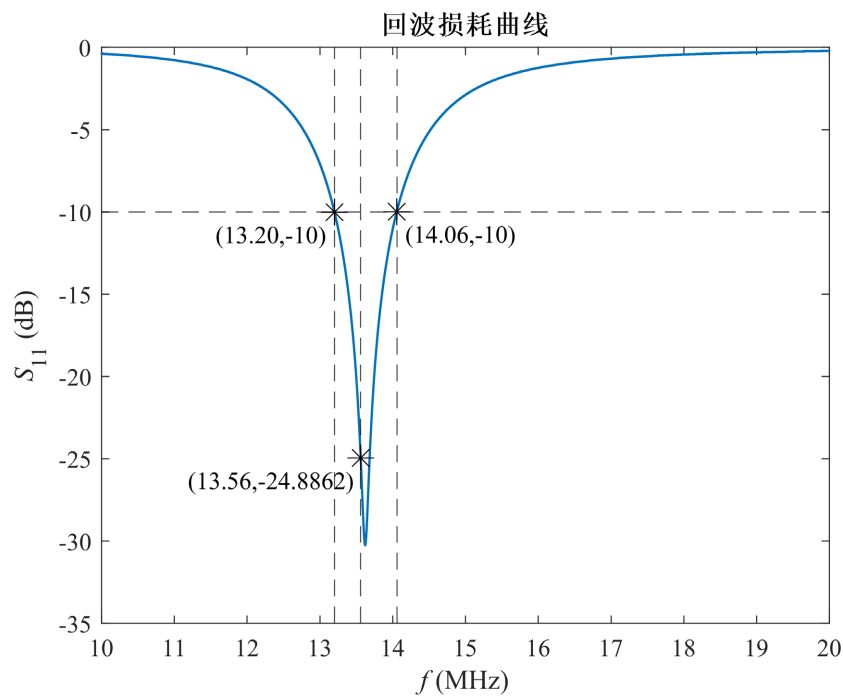


Figure 15. Curve of antenna return loss
图 15. 天线的回波损耗曲线

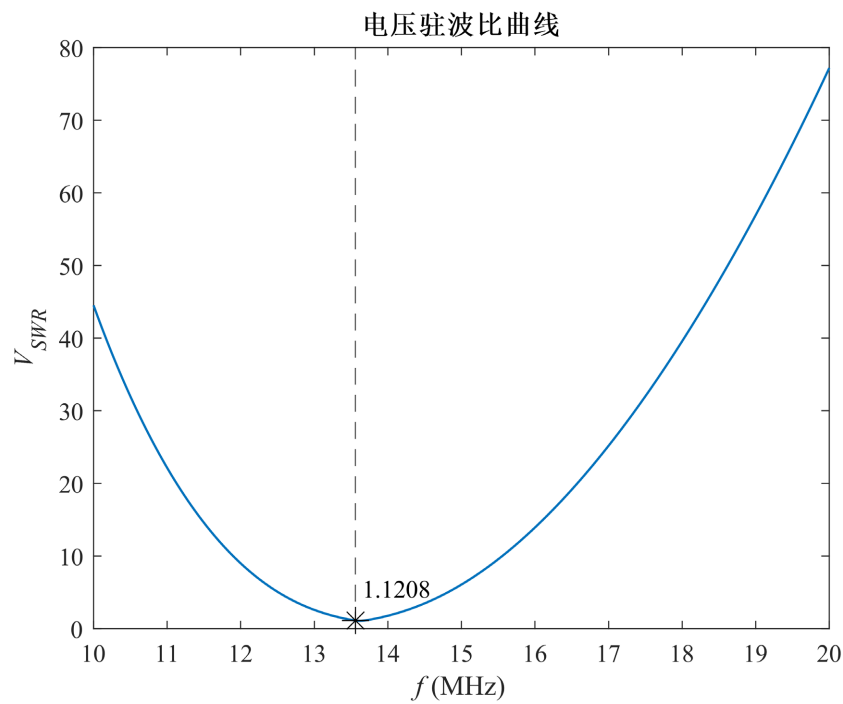


Figure 16. Curve of antenna voltage standing wave ratio
图 16. 天线的电压驻波比曲线

以上结果表明，天线实现良好的阻抗匹配，性能优异。天线工作在 13.56 MHz 频率下，回波损耗和 -10 dB 带宽都满足 NFC 通信中对天线的性能要求，驻波比系数反映了天线匹配电路良好，达到设计指标。

5. 总结

本文面向汽车进入功能, 设计一种用于汽车门把手环境下的 NFC 天线。基于 HFSS 软件完成了对门把手天线的模型设计, 通过分析天线的等效电感值得出了以下结论:

(1) 天线结构中, 矩形线圈的边长越大, 天线的等效电感值越大; 线圈的走线宽度越大, 天线的等效电感值越小; 线圈的走线间距越大, 天线的等效电感值越小。本次设计中确定了线圈的边长为 85 mm 与 17 mm, 走线宽度为 0.5 mm, 走线间距为 0.5 mm。

(2) 介质板的厚度与天线电感值呈现出非线性关系, 在设计阶段可以使用常见的制板厚度, 并选出令等效电感值较大的值。本次设计中采用了 1.6 mm 的厚度。

(3) 本次设计的天线的等效电阻值为 987 nH, 符合 NCF3320 的设计区间; 天线的回波损耗为 -24.9 dB 远小于 -10 dB, 损耗较小; 电压驻波比为 1.1208, 匹配程度较高。综上所述, 本次天线及其射频电路的设计较为成功。

后续可以完成的工作有: 将线圈匝数对天线等效电感值的影响考虑在内; 在匹配电路的设计过程中考虑 EMC 滤波器对天线性能的影响, 在仿真方面提高完整度; 在评价指标方面增加近场的磁场分布情况和场强云图来佐证天线设计的合理性。

致 谢

感谢学院张老师对本次研究的支持, 感谢杨师兄对论文的帮助和点播, 也离不开徐工、孙工等优秀工程师专业的指导和点评。

参考文献

- [1] 陈钰, 朱笛, 李飞星. 新四化(ACES)对中国汽车产业价值链的影响研究——基于汽车后市场规模的发展趋势分析[J]. 工业技术创新, 2023, 10(4): 35-44.
- [2] 宋菲. 汽车钥匙: 有形到无形[J]. 产品可靠性报告, 2017(2): 98-99.
- [3] 李晨旭. 汽车无钥匙进入和一键启动控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2018.
- [4] 王蕾. 轿车无钥匙进入和一键启动方案设计[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [5] 张晓杰. 汽车 PEPS 无钥匙系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [6] 冯红杰, 陈晓晨, 邓军军. NFC 技术在汽车电子领域的集成与应用[J]. 重型汽车, 2019(4): 37-38.
- [7] 许艳强. NFC 技术在智能手机中的研究[J]. 通讯世界, 2018(7): 81-82.
- [8] Francesco, B., Annalisa, L., Rosario, M.L.S., et al. (2022) An Improved Method Based on Bluetooth Low-Energy Fingerprinting for the Implementation of PEPS System. *Sensors*, **22**, 9615.
- [9] Wang, S.S., et al. (2018) A BLE-Based Pedestrian Navigation System for Car Searching in Indoor Parking Garages. *Sensors*, **18**, Article 1442.
- [10] 高驰. 无钥匙系统再升级, 超宽带技术融入智能进入系统[J]. 汽车与配件, 2020(17): 48-49.
- [11] 范博文, 范新欣. 车载超宽带通信发展现状与趋势[J]. 时代汽车, 2023(17): 10-12.
- [12] 张相飞, 周芝梅, 王永刚, 等. NFC 技术原理及应用[J]. 科技风, 2019(5): 69-70.
- [13] 刘超德. 基于近场通信技术的智能酒店门锁系统设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021.