

# NFC 天线场强及频率特性研究

戴昌金 电信科学技术研究院硕士研究生  
王智玮 工业和信息化部通信计量中心工程师  
李 光 工业和信息化部通信计量中心测试工程师  
杨 军 工业和信息化部通信计量中心工程师

**摘要:** NFC 技术是目前发展迅速、应用广泛的 RFID 技术之一。文章主要研究了 NFC 的空间场强和工作频率的物理特性, 通过理论计算得出空间位置的场强变化并指出了 NFC 线圈的最佳匝数。对金属材料的涡流特性和铁氧体材料的屏蔽效果分别进行了仿真, 指出相对位置的规律。通过阻抗匹配的方法对 NFC 线圈进行调谐, 分别研究了相同频率和不同频率的线圈之间的能量传递问题。

**关键词:** NFC, 空间场强, 阻抗匹配, 材料特性, 能量传递

**Abstract:** NFC is a rapidly developed and widely used RFID technology. This paper mainly studied the physical characteristics of NFC space field strength and frequency. Based on theoretical calculation we obtained the field strength variation of spatial position and the optimum number of turns of the coil. The vortex property of metal materials and shielding effect of ferrite material was simulated and the rules of relative position were found. We tuned the NFC coil by impedance matching method and investigated the energy transmission between the coils at the same frequency of different frequencies.

**Keywords:** NFC, space field strength, impedance matching, material properties, energy transfer

## 1 引言

近距离无线通信 (NFC :Near Field Communication) 是由非接触式射频识别(RFID)及互联互通技术整合演变而来, 在单一芯片上结合感应式读卡器、感应式卡片和点对点的功能, 能在短距离内与兼容的多个电子设备之间进行识别和数据交换。这项技术最初只是 RFID 技术和网络技术的简单合并, 现在已经演变成一种短距离无线通信技术, 发展态势相当迅速。NFC 芯片装在手机上, 手机就可以实现小额电子支付和读取其他 NFC 设备或标签的信息。NFC 的短距离交互简化整个认证识别过程, 使电子设备间互相访问更直接、更安全和更清楚。通过 NFC, 电脑、数码相机、手机、PDA 等多个设备之间可以很方便快捷地进行无线连接, 进而实现数据交换和服务。

与 RFID 不同的是, NFC 具有双向连接和识别的特点, 工作于 13.56 MHz 频率范围, 作用距离 10 厘米左右。NFC 技术在 ISO 18092、ECMA 340 和 ETSI TS 102 190 框架下推动标准化, 同时也兼容应用广泛的 ISO

14443 Type-A、B 以及 Felica 标准非接触式智能卡的基础架构。目前, NFC 技术对于传输供应商和内容供应商、设备制造商、金融服务机构和其他领域而言, 都颇具商业价值。

NFC 天线结果虽然简单, 但是批量生产时很难做到性能稳定。通常天线的质量与匹配电路、材料、工艺息息相关, 在手机中使用 NFC 技术还会受到手机内部材料的影响。同时在测试过程中也需要熟悉 NFC 天线的特性。由于 NFC 技术是新兴技术, 目前对这方面定量的研究比较少, 本文通过理论计算、仿真数据、实测结果系统的研究了 NFC 天线的场强和频率特性。

## 2 NFC 空间场强特性

### 2.1 NFC 场强计算结果

目前 NFC 天线多为矩形线圈天线, 矩形线圈可以看作四段载流直导线, 利用电磁场理论中常用的微元法, 分别计算各段直导线上的电流产生的磁场并进行积分和叠加就可以得到空间任何一点的磁场强度。在实际计算中为便于计算在计算中引入矢量磁位, 导线上的线电流元产生的矢量磁位为<sup>[1]</sup>:

$$dA = \frac{uIdz'}{4\pi\sqrt{(z-z')^2+r^2}}$$

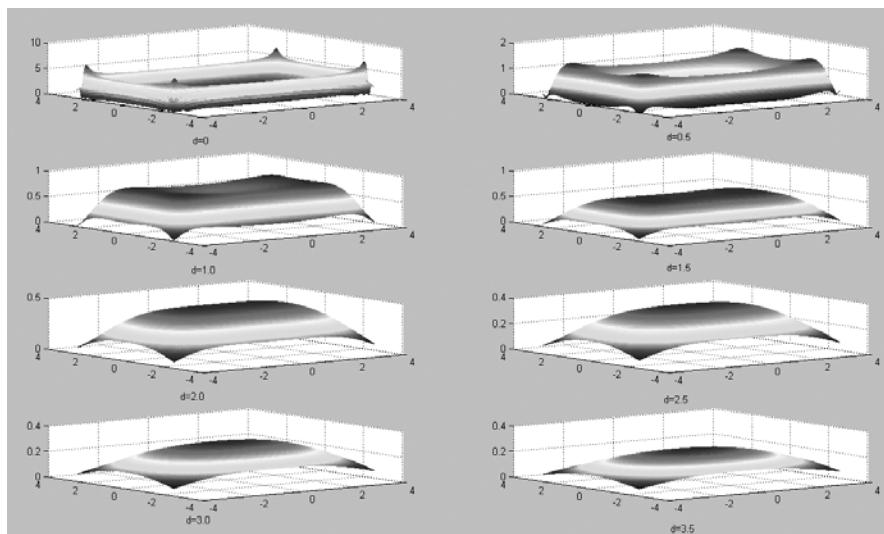


图 1 单圈 NFC 线圈空间场强变化

对一根长度为  $L$ , 电流为  $I$  的直导线进行积分, 可得一条导线在空间中任意一点的矢量磁位:

$$A_z = \frac{uI}{4\pi} \ln \left[ \frac{\sqrt{(l/2-z)^2+r^2} + (l/2-z)}{\sqrt{(l/2+z)^2+r^2} - (l/2-z)} \right]$$

对矢量位求旋度就可以得到相应空间点的磁感应强度。计算中采用长宽比为 8:5 的线圈分别在高度为 0 cm、0.5 cm、1 cm、1.5 cm、2 cm、2.5 cm、3 cm、3.5 cm 进行计算, 空间场强变化如图 1 所示。

对于单圈 NFC 线圈天线, 在较低位置四个角磁感应强度较大, 在距离天线 1.5 cm 后中心位置磁感应强度最大。随着高度的增加, 磁感应强度在开始衰减很快, 基本随着高度线性衰减, 在 2.5 cm 后衰减变缓慢。最大磁场强度随高度的增加由 5 逐渐缩小为 0.2。

### 2.2 理论计算的最佳线圈匝数

对于多圈天线, 计算方法类似, 随着线圈数量的增加, 磁场强度成倍增加。然而, 实际的 NFC 芯片在工作时都是电压驱动, 由于谐振时电感电容相互抵消, 输入阻抗为纯电阻, 我们假设随着天线圈数的增加阻抗线性增加, 在考虑电流的变化后, 分别计算 1、2、3、4、5、6 圈的磁场强度, 结果如图 2 所示。

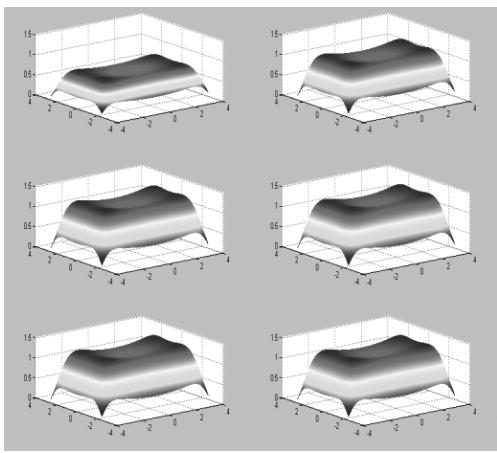


图 2 NFC 不同匝数线圈的空间场强

图 2 中可以看到,在低于 3 圈时,随着圈数的增加,磁场强度增加。在高于 4 圈时,磁场强度基本不变。这意味着在实际设计和制造中,为增加磁场强度并降低成本,一般选天线的线圈圈数为 3 或者 4 圈就足够了。

### 2.3 NFC 空间场强仿真结果

#### 2.3.1 NFC 线圈空间磁场随高度的变化

HFSS 软件是目前天线仿真常用有效的软件之一,它在微波电路分析、天线仿真分析、信号完整性分析以及电磁兼容中都有广泛的应用<sup>[2]</sup>。HFSS 软件中对单一线圈的最大磁场强度随高度的变化进行仿真。并将最大磁场强度用 MATLAB 画图结果如图 3 所示。

最大磁场仿真结果与计算结果很吻合,对于特

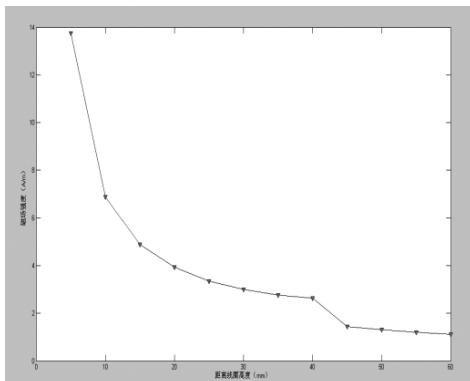


图 3 单一线圈场强随高度变化

定圈数的天线随着高度的增加,磁场强度衰减由快变慢,近似指数函数。

#### 2.3.2 金属及铁氧体对线圈磁场强度的影响

目前,NFC 技术主要集成在手机中,手机就可以实现小额电子支付和读取其他 NFC 设备或标签的信息,这大大推动了 NFC 技术和移动支付技术的发展。然而手机设备上存在大量的金属材料,而金属材料会产生涡流效应。当线圈中的电流随时间变化时,由于电磁感应,线圈附近的任何导体都会产生感应电流,从而影响 NFC 线圈的空间磁场。铁氧体材料可以显著的减弱金属的涡流效果<sup>[3]</sup>,通常手机中都用铁氧体材料来做 NFC 天线的衬底。

随着电流的相位的变化,空间磁场是动态变化的。NFC 线圈天线在 20 mm 处磁场强度会在电流变化最快的时候达到最大值,空间的磁力线也最为密集。图 4 为仿真的结果图。

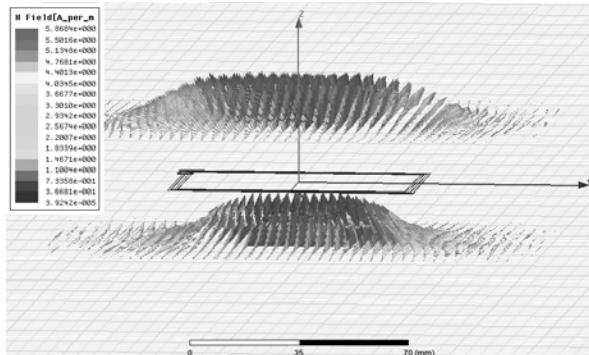


图 4 单一线圈的空间磁场分布图

在天线下方 2 mm 处增加等大的铁氧体后,仿真空间磁场分布可以看到,铁氧体一侧的磁场强度变小,而另一侧的磁力线变的更密集,铁氧体单独作用有类似反向器的效果。如图 5 所示。

图 6 是在图 5 的基础上,在 25 mm 处增加铝片后,20 mm 处的磁场分布图。可以看到磁力线明显被压缩,密集的磁力线变得很稀疏。Z 方向的磁场几乎没有。

图 7 为在图 6 的基础上,在 22 mm 处增加铁氧体材料后,20 mm 处磁场分布图。结果表明,位于铝

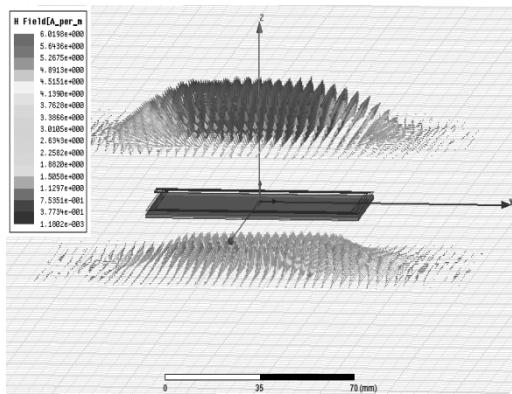


图 5 铁氧体对空间磁场分布的影响

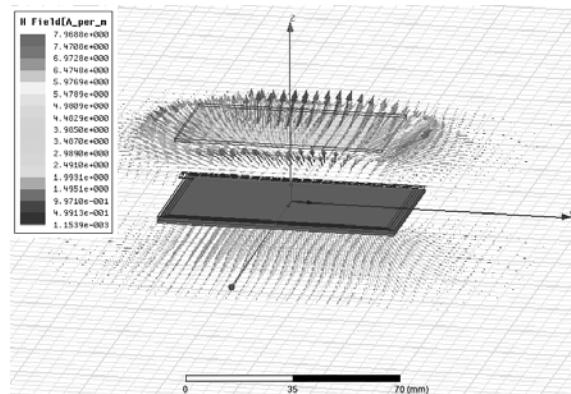


图 6 铝片对空间磁场分布的影响

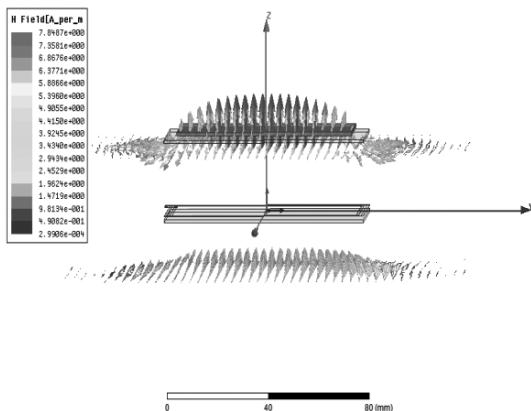


图 7 铁氧体对铝片的屏蔽效果

片下方的铁氧体材料减弱了铝片的影响。磁力线分布重新变得均匀。

NFC 手机在应用中一个很大的特点是可作为卡片来进行刷卡消费和能量传递, 又可以作为读卡器来读取其他卡片和 NFC 手机的信息。以 NFC 工作的典型距离 2 cm 为例, 作为读卡器使用时, 手机中金属材料会影响其后背工作区域的磁场。在手机作为卡片使用时, 金属材料会影响读卡器在工作区域产生的磁场。为研究铁氧体材料不同的相对位置对金属涡流效果的屏蔽作用, 分别对两种情况进行仿真, 将软件计算的结果汇总如表 1、表 2 所示。

仿真结果可以看出, 铁氧体材料基本屏蔽了铝片的影响, 磁场强度大大提高磁场强度和磁通量在铁氧体距离线圈 4 mm 处得到最大。

表 1 线圈附近金属及铁氧体材料对磁场强度影响

铁氧体 \ 铝片 位置	最大磁场强度 (单位: A/m)	通过 50mm*80mm 磁 通量 (Wb)	通过整个平面 磁通量 (Wb)
0\5 mm	4.87	0.01426	0.01756
-2 mm\5 mm	5.83	0.01554	0.01898
-3 mm\5 mm	5.92	0.01576	0.01938
-4 mm\5 mm	6.05	0.01592	0.01974

表 2 工作区域内金属及铁氧体材料对磁场强度的影响

铁氧体 \ 铝片 位置	最大磁场 强度 (A/m)	通过接收线圈 磁通量 (Wb)	20mm 平面 磁通量 (Wb)
20\25 mm	1.15	0.0000123	0.01757
20.5 mm\25 mm	8.96	0.02014	0.02402
21 mm\25 mm	8.70	0.01836	0.02173
22 mm\25 mm	8.51	0.01722	0.02018
23 mm\25 mm	7.84	0.01655	0.01932
23 mm\30 mm	7.16	0.01584	0.01876
25 mm\30 mm	6.86	0.01522	0.0182
27 mm\30 mm	6.51	0.01456	0.01789

仿真结果表明, 在接收端, 线圈紧贴铁氧体表面可以获得最好的屏蔽效果, 此时通过线圈平面的磁场强度, 磁通量都是最大的。

### 3 NFC 谐振频率与能量传递

NFC 的工作频率被设定为 13.56 MHz, 然而在测试中我们发现有的测试线圈的谐振频率并不是 13.56 MHz。例如 EMVCo 中的 Reference PICC 的谐振频率为 16.1 MHz。在这一节中, 将主要研究 NFC 线圈的调谐, 以及谐振频率为相同频率和不同频率的线圈间的能量传递问题。

#### 3.1 NFC 线圈的阻抗匹配

NFC 线圈的调谐实际就是一个阻抗匹配的问题<sup>[4]</sup>。结合之前的研究, 对于一个特定的线圈, 在 HFSS 软件中可以仿真得到其在任意频率的阻抗。对于激励源, 我们设定其阻抗为 50 欧姆, 特性阻抗也为 50 欧姆。在 HFSS 软件中可以看到在 13.56 MHz 的频率点阻抗为  $0.1929+j \times 13.3958$  欧姆。

$$L=13.3958/2\pi \times 13.56 \times 10^6 = 157.307 \text{ nH}$$

因此负载可以等效为 0.1929 欧姆的电阻和 157.307 nH 的电感串联。结合激励源的阻抗, 在 ADS 软件中用 SMITH 圆图进行阻抗匹配<sup>[5]</sup>。电路图如图 8 所示。

用 SMITH 圆图的方法进行调谐, 在 ADS 软件中可以达到匹配点, 然而由于精度的限制, ADS 软件中负载的值与输入值的存在差异。这会对最终结果造成影响, 根据 SMITH 圆图的原理, 在 HFSS 中

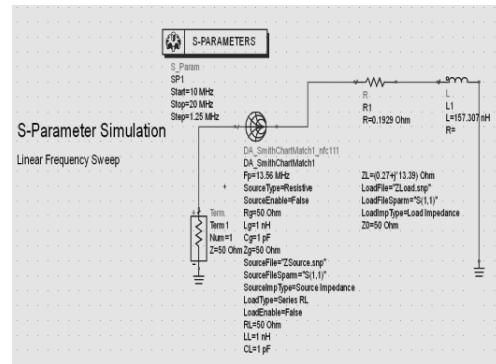


图 8 ADS 中阻抗匹配

生成的圆图中将 13.56 MHz 的频率手动微调到匹配点, 结果如图 9 所示。

#### 3.2 线圈间的能量传输

对于特定的线圈可以并联和串联不同的电容来调整谐振频率, 因此可以据此来研究不同谐振频率从对线圈间能量传输的影响。首先将上文中调谐到 13.56 MHz 的线圈复制一个, 放置在圆线圈上方 2 cm 的位置。研究 NFC 工作频率下, 两个线圈间的能力传输。仿真中, 设定激励 1 为 1 W, 激励 2 为 0 W。图 10、图 11 分别为 S11 和 S12 参数。

如图可以看出, 同为 13.56 MHz 的两个线圈, 在工作时 S11 参数波谷并不在 13.56 MHz, 在 12.9 MHz 处 S11 值最小为 -7.48 dB, 在 14.4 MHz 处为 -4.7 dB。对于 S12 值, 在 12.9 MHz 到 14.4 MHz

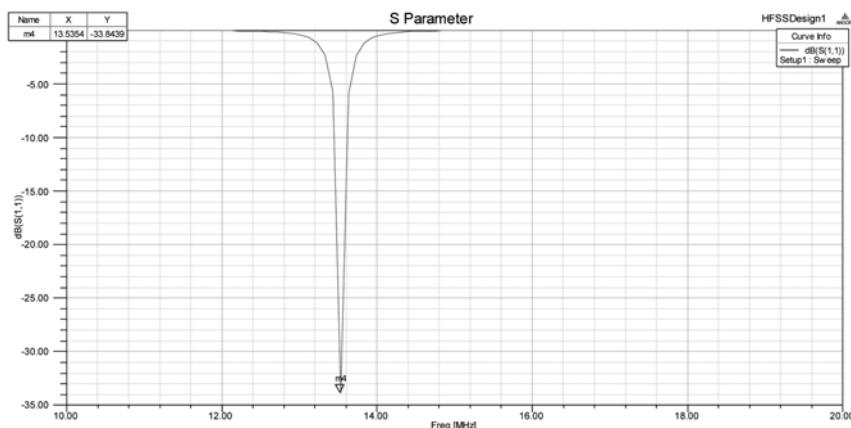


图 9 匹配后的线圈 S11 参数

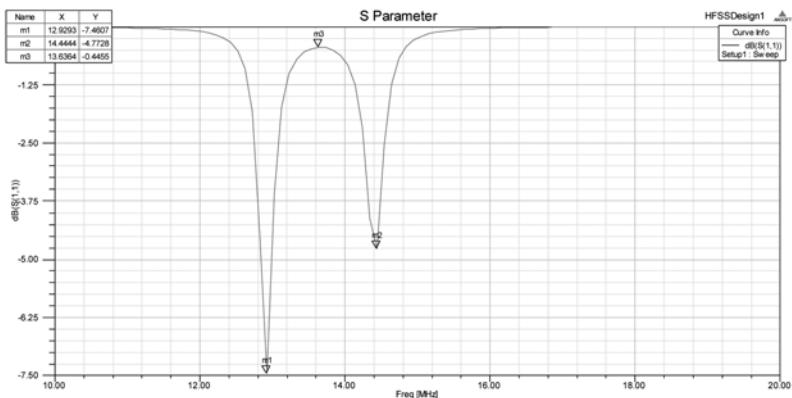


图 10 同频率线圈的 S11 参数

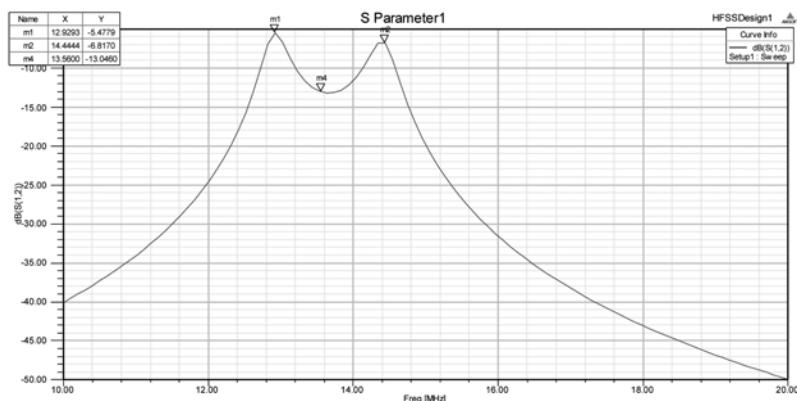


图 11 同频率线圈的 S12 参数

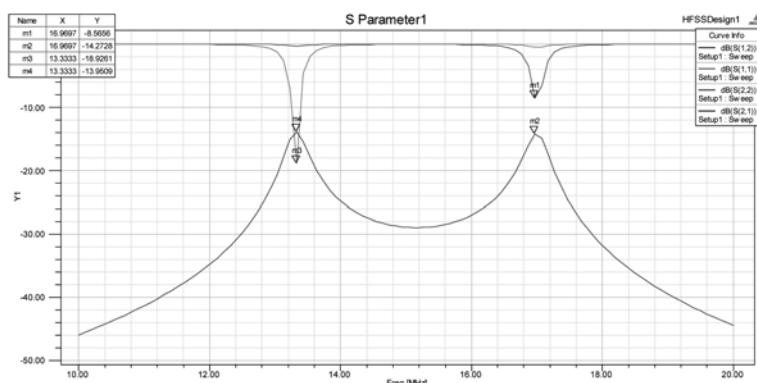


图 12 不同频率线圈的 S 参数

之间都实现了较好的能量传输。

对于 EMVCo 的参考线圈, 我们用同样的方法看一下 13.56 MHz 的线圈和 16.1 MHz 的线圈间的能量传输。S 参数如图 12 所示。

图 12 可以看到, 两个不同频率的线圈也会使各自的谐振频率发生偏移, 但是偏移量相对较小, 分别

为 13.33 MHz 和 16.98 MHz, 并且都只有一个波谷。S22 值分别在这两个频率点达到最大, 而且大小很接近。从能量传输的角度考虑, 此时 S22 在谐振点的值比上图中的小, 线圈间传输的能量相对比较小。

总的来说, 谐振频率相同的线圈工作时, 会使谐振频率发生偏移, 并产生其他波谷, 能量传输较好。

不同频率的线圈工作时,对彼此谐振频率的影响较小,波谷明显,频率特性比较稳定,然而会产生更大的能量损耗。

## 4 实测结果及分析

结合计算和仿真结果,我们使用 FIME 移动支付测试设备进行测试来验证理论结果,由于测试时空间场强很难定性测量,我们通过测量线圈的感应电压来验证上述规律。

图 13 为在读卡器 20 mm 处感应线圈的电压随发射信号频率的变化曲线。

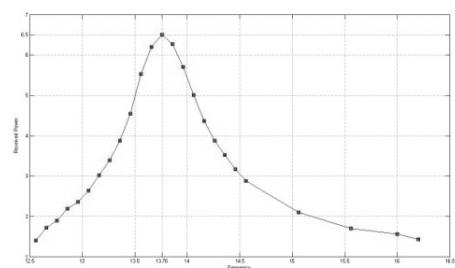


图 13 感应电压随输入频率的变化曲线

图 13 中可以看出,感应电压值在 13.76 MHZ 附近获得最大值。由于参考线圈上有后续的滤波,整流处理,16.1 MHZ 的峰值消失。对于不同线圈的能量传递,基本上会在 S12 最大值时获得最大感应电压,实测结果和仿真结果有偏差。

图 14 为在不同输入功率下感应电压的变化。

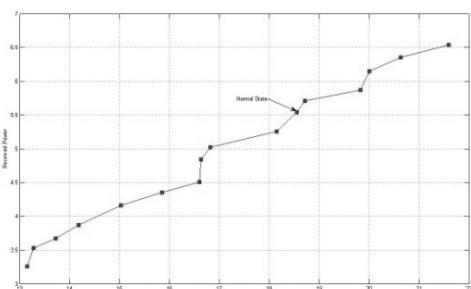


图 14 感应电压随输入电压的变化曲线

随着输入电压的增加,电流线性增加,感应电压值也基本呈线性变化。

计算和仿真中主要研究的是位置的变化,图 15 为在中心位置的不同高度的测试结果,测试曲线和计算以及仿真曲线比较吻合。

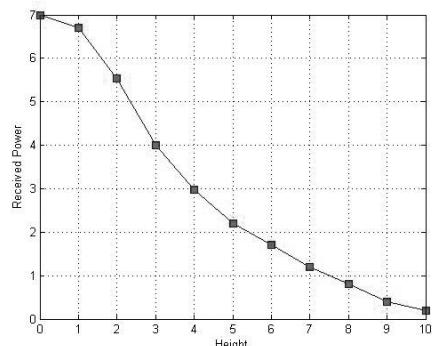


图 15 感应电压随高度的变化曲线

实测结果变化趋势与计算与仿真结果接近,验证了计算和仿真方法。

## 5 结语

本文结合理论计算,工程仿真和实际测试研究了 NFC 工作的主要物理特性,对空间场强、谐振频率、涡流效应、感应电压等进行了细致的分析。总结出场强以及频率的一些变化规律,提出了线圈的最佳匝数,分析了金属材料和铁氧体材料对 NFC 工作环境的影响。并通过实际计算验证了理论和仿真结果的正确性,对测试和开发和后续的研究提供了很好的支撑。

MSTT

## 参考文献

- [1] 苏东林,陈爱新,谢树果等. 电磁场与电磁波. 高等教育出版社,2009.
- [2] 谢拥军 王鹏 李磊等. Ansoft HFSS 基础与应用. 西安电子科技大学出版社,2007:1-37.
- [3] J.A.Stratton.Electromagnetic Theory.McGraw\_Hill:N.Y,1941.
- [4] WenxingLi, TongwenCllen, WilsunXu. On impedance matching and maximum power transfer. Electric Power Systems Research, September 2010.
- [5] 冯新宇,车向前,穆秀春等. ADS2009 射频电路设计与仿真. 电子工业出版社,2010.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>