

双驱动端口的中高频 RFID 双层天线设计^①

廖晓东, 余自锋, 王建华

(福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

(福建师范大学 福建省光子技术重点实验室, 福州 350007)

摘要: 为了提升天线线圈在空间中产生的磁场强度, 提出一种双驱动端口的双层天线方案. 首先, 从理论出发介绍了设计双层天线时应该考虑的各个参数; 其次, 改变双层天线的参数, 通过三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 进行建模仿真, 探究两线圈的匝数、间距、半径以及相对位置对双层天线的的影响; 最后, 对仿真结果进行分析, 找出了最优的双层天线设计方案, 对实际设计的中高频 RFID 读写器天线具有一定的参考价值.

关键词: RFID; 双驱动端口; 双层天线; 磁场强度; HFSS

Design of Medium-High Frequency RFID Double-Layer Antenna with Two Drive Ports

LIAO Xiao-Dong, YU Zi-Feng, WANG Jian-Hua

(Key Laboratory of OptoElectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to enhance the magnetic field strength of antenna coil in space, this paper proposes a method of double-layer antenna with two drive ports. First of all, this paper introduces each parameter which should be considered in the view of theory. Secondly, we change the parameters of the double-layer antenna, model and simulate it with the 3D electromagnetic simulation software Ansoft HFSS. Then, the influence of the coil number, the coil spacing, radius and the relative position of two coils on the double-layer antenna is researched. Finally, the simulate results show that the optimal design of double-layer antenna is found out and it is meaningful to the actual design of the antenna in medium-high frequency RFID reader systems.

Key words: RFID; two drive ports; double-layer antenna; the magnetic field strength; HFSS

1 引言

Radio Frequency Identification(射频识别技术)简称 RFID, 是一种能够实现自动识别目标对象的非接触式的无线电信息技术. RFID 系统包括电子标签(Tag)、读写器(Reader)和应用系统(Application System)这三个部分, 该系统广泛应用于收费、物流、门禁控制、图书馆管理等领域^[1,2]. 各领域对于采用电感耦合方式工作的中高频 RFID 系统, 均要求系统的识别距离尽可能的远以及对目标对象识别的灵敏度尽可能的高, 而这就需要 RFID 系统的读写器天线产生的足够强的磁场强度. 因此, 必须对 RFID 读写器天线进行研究.

在目前已公开的文献和专利中, 对于读写器天线的研究有: 文献[3]为了找到最优的天线线圈设计, 研究其在面积限定时场强的变化情况; 文献[4,5]为了充分的利用线圈上下平面的空间, 对天线的双层结构进行了研究; 文献[6]为了提升天线中央位置的磁场强度, 在天线圈环绕的平面内串联多个多匝线圈; 文献[7]为了增强无线传输系统中接收线圈所接收的能量, 提出采用多个发射机共同作用于接收端的方法, 并研究了发射端线圈之间的耦合损耗.

本文基于 13.56MHz(中高频段的典型频率)这一特定频率, 提出一种双驱动端口的双层天线, 探究线圈

^① 基金项目:福建省教育厅项目(JB12039)

收稿时间:2016-03-14;收到修改稿时间:2016-04-27 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005491]

的匝数、上下两线圈之间的距离，线圈的半径以及两线圈的相对位置对双层天线场强的影响。

2 理论解析

当两个通有交变电流的导体靠的很近的时候，两个导体各自都会受到另一个靠近导体的影响，这种邻近导体产生的现象称为邻近效应(Proximate effect)。对于邻近效应，当交变电流的频率越高并且两导体靠的越近时，该效应的效果越显著，它会使得导体中的电流分布不均匀，产生额外的损耗。

目前，已经有大量的文献对单端端口驱动的天线以及为天线添加谐振线圈等方面进行了研究，但由于邻近效应的存在，对于双端口或多端口驱动天线的研究相对较少，本文将对双驱动端口的双层天线进行初步的研究，旨在找出该双层天线的最优设计方案。

2.1 磁耦合

本文研究的双层天线由两个环形线圈组成，而两个线圈之间由于高频交变电流的存在使得两线圈相互感应，设两线圈为同轴线圈如图 1 所示，则它们之间的互感 M 应用诺以曼公式^[7]有：

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{d\vec{l}_2 \cdot d\vec{l}_1}{r} \quad (1)$$

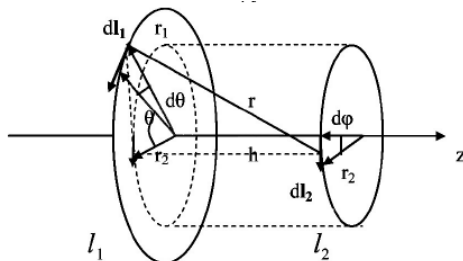


图 1 两圆线圈的互感求解

其中，圆线圈 1、2 的周长(一匝时)分别为 l_1 、 l_2 ， l_1 、 l_2 在圆线圈任取的两个线元分别为 $d\vec{l}_1$ 、 $d\vec{l}_2$ ，用极坐标描述两线元的夹角为 θ ， N_1 、 N_2 分别为两圆线圈的匝数。

由于线圈在通过中高频交变电流时，其线圈本身也会产生相应的电感阻碍线圈的电流的变化，对于图 1 所示的圆线圈它们的电感值可用如下公式计算^[8]：

$$L(nH) = 2 * l_i [cm] * [\ln(\frac{l_i}{D_i}) - 1.07] * N^{1.8} \quad (2)$$

设流过两个圆线圈的电流分别为 I_1 、 I_2 ，两电流的流向相同，则由互感元件的伏安关系可知，两个线圈所经过的总磁链为：

$$\begin{aligned} \psi_1(t) &= L_1 i_1 + M_{12} i_2 \\ \psi_2(t) &= L_2 i_2 + M_{21} i_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中的互感值： $M_{12}=M_{21}=M$ 。线圈总的电感值

L 为：

$$L = L_{\text{自感}} + M_{\text{互感}} \quad (4)$$

互感系数 K：该系数是为了更简便和更准确的看出两个线圈之间的耦合程度而设定的物理量。当两个线圈之间的相互感应为无漏磁的互感时，互感量 M 达到最大值 $\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ ，而实际的设计中 M 是小于 $\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ 的，故需要用互感系数 K 去描述线圈的耦合程度，K 为，

$$K = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (5)$$

2.2 寄生电容

在中高频条件下，电感、电阻、导线以及线圈等元器件之间表现出电容特性，这些分布的电容称为寄生电容。

对于电容 C，它的定义为：

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (6)$$

其中， ϵ 为介电常数，它是由电容的极板间的介质决定；两个极板的正对面积为 S；k 是静电力常量；d 为两个极板之间的距离。由式(6)可知，在介质确定的情况下，对电容值大小影响最大的是极板间的距离以及其正对面积。

2.3 频率偏移

线圈在中高频段上时，线圈不仅具备了电阻，还呈现出不同程度的容抗和感抗，当线圈处在某一频率时，其所具备的容抗和感抗相等，如式(7)所示，则称这一频率为该线圈的自谐振频率。

$$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L \quad (7)$$

由式(7)可得自谐振频率 f 为：

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (8)$$

对于式(8)提到的自谐振频率 f，它与线圈的电感以及电容相关，当其电容或者电感发生变化时都能引起自谐振频率的大小发生改变，这种自谐振频率大小发生变化的现象称为频率偏移现象。

2.4 S 参数

S 参数就是信号传输中需要考虑的散射参数。该参数主要用于评估信号传输时反射信号和传送信号的性能。对于双驱动端口的网络，两端口设为 1、2，则 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 分别代表端口 1 与端口 2 在传输信号时，两个端口自己对自己以及它们之间相互作用的传输系数，这些参数都是描述线圈天线阻抗匹配好坏程度的参数。例如： S_{11} 表示端口 1 传输信号时，其输入信号对该端口的输入反射系数，即为输入信号的回波损耗，表示有多少能量被反射回端口 1。

回波损耗(dB)为入射功率与反射功率之间的比值。

设计时,回波损耗的值越小越好,要小于 0.1,也就是损耗要小于-20dB.

3 天线线圈的设计

3.1 天线线圈 Q 值的计算

品质因子 Q 值表示电感线圈的损耗性能,天线的品质因子 Q 由下面的公式定义^[9]:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \tag{9}$$

式(9)中, $\omega = 2\pi f$, f 为谐振频率; R 为天线等效电阻; L 为天线的等效电感.

3.2 天线匹配电路的设计

如图 2,采用^[10]串联分压式的匹配电路.

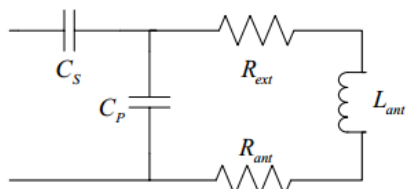


图 2 串联分压式的匹配电路

其中 R_{ant} 为天线等效电阻, R_{ext} 为外加的串联电阻, L_{ant} 为天线的等效电感,串联分压式匹配电路中电容计算如下:

$$C_S = \frac{1}{\omega^2 L_{ant}} \cdot \sqrt{\frac{R_{ext} + R_{ant}}{Z_{IN}}} \tag{10}$$

$$C_P = \frac{1}{\omega^2 L_{ant}} \cdot (1 - \sqrt{\frac{R_{ext} + R_{ant}}{Z_{IN}}}) \tag{11}$$

4 双层天线线圈的建模与结果分析

现今,对于工作在 13.56MHz 频段的 RFID 读写器天线设计,鉴于其实际的制作方法是在 PCB 板(单层或多层)平面上制作,由于天线线圈各个参数的细微改变都将引起其匹配电路设计的参数发生改变,并且在实际中对于天线线圈是否完全匹配以及求解其回波损耗、驻波比等等都需要进行大量的测量和验证,故本文运用业界认可的三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 模拟其实际的工作环境,对其进行建模仿真,既节省工作量又能使结果更可视化.

在 HFSS 中,天线的基板选用玻璃布基板 FR-4,为了使设计的天线能够运用到实际中,天线线圈的厚度为 0.05mm(PCB 板上铜箔的厚度),线圈材质选用铜箔.天线的 Q 值设为 30,天线线圈电感的取值一般在 1~2uH^[11],端口的输入功率统一设置为 3.3W,采用快速扫描方式对该天线进行仿真.为了方便设计天线线

圈的匹配电路,将上下两层天线的模型(形状、大小、线间距等)设计成一样的.仿真时,采用控制变量法,探究线圈匝数、线圈半径、两线圈的间距以及相对位置对双端口驱动的双层天线的的影响.

4.1 匝数对双层天线的的影响

由于线圈的匝数对线圈产生的磁场影响很大,故首先研究匝数改变时,双层天线产生的场强变化规律.保持上下两层线圈的间距 1mm 不变(PCB 板的厚度),两个线圈同轴,线圈的最外圈半径为恒定值 24mm,天线线宽为 0.85mm,同一个线圈中相邻的天线走线之间的距离为 0.15mm,线圈的匝数由 1 匝递增变化至 8 匝,图 3 为 2 匝时双层线圈的结构,通过 HFSS 软件对这八种线圈的自身电感和互感进行仿真分析,结果如表 1 所示.

表 1 匝数不同时,线圈电感值及谐振频率的大小

| | 1 匝 | 2 匝 | 3 匝 | 4 匝 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 单层时的电感 L(uH) | 0.1093 | 0.4266 | 0.8296 | 1.3725 |
| 双层时的自感 L(uH) | 0.1161 | 0.425 | 0.857 | 1.3851 |
| 双层时的互感 L(uH) | 0.0876 | 0.3301 | 0.6857 | 1.1433 |
| 谐振频率 f(MHz) | 552.73 | 105.95 | 82.00 | 63.4 |
| | 5 匝 | 6 匝 | 7 匝 | 8 匝 |
| 单层时的电感 L(uH) | 1.9634 | 2.6132 | 3.2707 | 3.9419 |
| 双层时的自感 L(uH) | 1.9755 | 2.626 | 3.2513 | 3.933 |
| 双层时的互感 L(uH) | 1.6903 | 2.2273 | 2.7815 | 3.4071 |
| 谐振频率 f(MHz) | 62.03 | 60.96 | 59.31 | 48.45 |

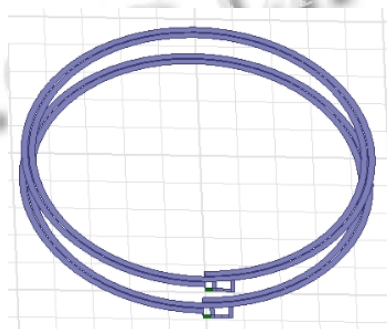


图 3 双驱动双端口的双层天线(2匝)

根据表 1 的数据和式子(4)可得,天线线圈的匝数在 1 匝处,不论是单层还是多层,其总的电感值很小在 0.2uH 左右(电感值太小),并且它的谐振频率高达 552MHz(频率太大,匹配电路难设计);而当天线线圈的匝数大于等于 5 匝时,对于双层天线来说,其总的电感值接近 4uH(偏大,匹配电路难设计且损耗也大).因此,对于双层天线线圈,取线圈匝数为 2 匝、3 匝、4 匝进行

仿真设计, 通过软件 HFSS 中的场计算器对仿真的结果进行处理, 探究距离线圈平面 5mm 处的场强变化情况, 计算的数据以及各个线圈的匹配参数如表 2 所示。

表 2 线圈参数

| | 2 匝 | 3 匝 | 4 匝 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| 单层时的串联电容 C_s (PF) | 44 | 23 | 23.5 |
| 双层时的串联电容 C_s (PF) | 36.6 | 41.5 | 30.5 |
| 单层时的并联电容 C_p (PF) | 264.5 | 133 | 73.5 |
| 双层时的并联电容 C_p (PF) | 140.5 | 49 | 24 |
| 单层时的外接电阻 R_{ext} (Ω) | 1 | 1 | 1 |
| 双层时的外接电阻 R_{ext} (Ω) | 1 | 1 | 1 |
| 双层时的耦合系数 K (%) | 77.67 | 80.01 | 82.54 |
| 单层时总的平均场强(3.3V) | 19.2927 | 27.6422 | 21.6285 |
| 单层时总的平均场强(6.6V) | 38.5854 | 55.2844 | 43.2570 |
| 双层时总的平均场强 | 50.2893 | 32.1088 | 32.6250 |

由表 2 可知, 在理想的仿真环境中, 用双倍能量激励天线线圈产生的场强正好是正常激励的两倍; 当匝数为 2 匝时, 双层天线的总场强最强; 双层天线的匹配电容比单层天线的小(双层天线的寄生电容值大), 并且电容随着匝数的增加而减小。

4.2 线圈半径对双层天线的影响

根据式(1)可知, 两个线圈的半径会对线圈的互感产生影响, 而互感发生变化时, 双层天线产生的磁场强度就会改变, 故需要对双层天线的半径进行研究, 分析半径改变时的场强变化规律。保持上下两层线圈的间距 1mm 不变(PCB 板的厚度), 天线线宽为 0.85mm, 同一个线圈中相邻的天线走线之间的距离为 0.15mm, 两个线圈同轴, 线圈的匝数取 2、3、4, 线圈的最外圈半径取 20mm、22mm、24mm、26mm、28mm, 通过 HFSS 软件对这 15 种线圈结构进行仿真分析, 结果如表 3 所示。

表 3 各线圈的平均场强及耦合系数

| | 20mm | 22mm | 24mm | 26mm | 28mm |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (单 3.3V)2 匝 | 20.3140 | 19.8058 | 19.2928 | 18.7505 | 21.1064 |
| (双 3.3V)2 匝 | 70.4873 | 47.9769 | 50.2893 | 52.3237 | 46.9158 |
| K (2 匝, %) | 75.74 | 77.01 | 77.67 | 77.98 | 78.70 |
| (单 3.3V)3 匝 | 33.1288 | 28.4729 | 27.6422 | 30.8488 | 26.3523 |
| (双 3.3V)3 匝 | 45.0449 | 35.7574 | 32.1088 | 35.2149 | 26.3523 |
| K (3 匝, %) | 78.51 | 79.41 | 80.01 | 80.54 | 81.11 |
| (单 3.3V)4 匝 | 25.8469 | 22.0057 | 21.6285 | 34.7620 | 33.8905 |
| (双 3.3V)4 匝 | 35.7643 | 31.8790 | 32.6250 | 31.0403 | 29.8735 |
| K (4 匝, %) | 81.05 | 81.60 | 82.54 | 82.94 | 83.52 |

从表 3 的数据可以看出, 当双层天线线圈的半径发生变化时, 对于不同半径的双层天线, 其匝数的优

化与 4.1 中的分析是相似的, 不论半径怎么改变, 双层天线的匝数均取 2 为最优。从表 3 中还可以得出, 双层天线的耦合系数随着天线半径的增加而增大。图 4 和图 5 是半径为 24mm 的单双层天线线圈的场强分布图。

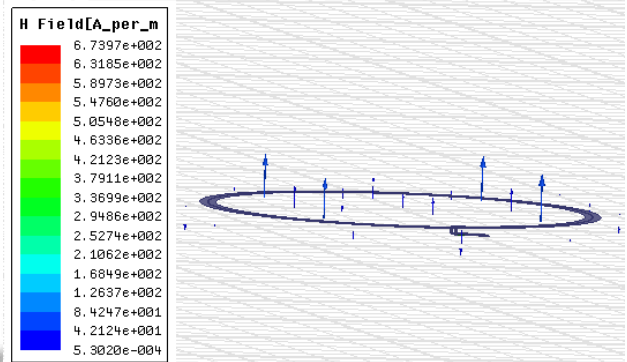


图 4 单层时的场强分布图(2 匝)

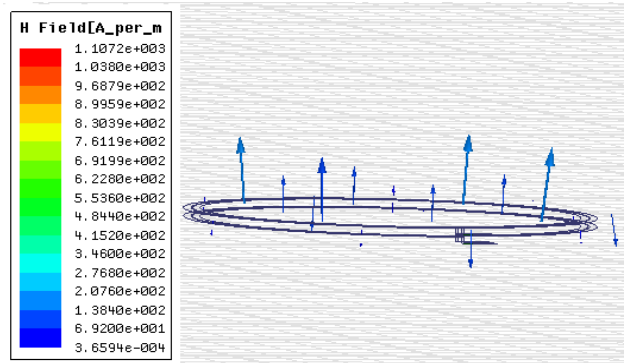


图 5 双层时的场强分布图(2 匝)

将图 4 和图 5 进行对比, 可以得出双驱动端口的双层天线其整体的磁场强度得到了很大的提升。

4.3 两线圈的间距对双层天线的影响

从上述分析可知, 天线线圈的匝数取 2 为最好, 故探究上下两层线圈的间距对线圈场强的影响时, 匝数取 2, 两线圈依然同轴, 线圈的最外圈半径仍旧保持 24mm 不变, 天线线宽为 0.85mm, 同一个线圈中相邻的天线走线之间的距离为 0.15mm, 上下两层线圈之间的距离由 1mm 递增变化至 50mm, 通过 HFSS 仿真, 研究两个线圈间距逐渐增加时, 它们之间的相互影响, 如图 6 中的 dB 损耗的变化值所示, 表示的是底层线圈对上层线圈的影响。

由图 6 可知, 随着间距的增加, dB 损耗值在逐渐的减小, 即随着线圈之间距离的增加, 底层天线线圈对上层线圈的影响也越来越小。虽然当线圈之间的距离大于 5mm 时, 线圈的 dB 损耗值小于 -20dB, 但是间距的增加, 不适合实际中的天线设计(PCB 板的厚度有

要求), 并且底层线圈与上层线圈在空间中产生的磁场强度(两个的叠加)也将减弱, 故对于两线圈间距的选择, 选择实际中 PCB 板默认的厚度, 为 1mm.

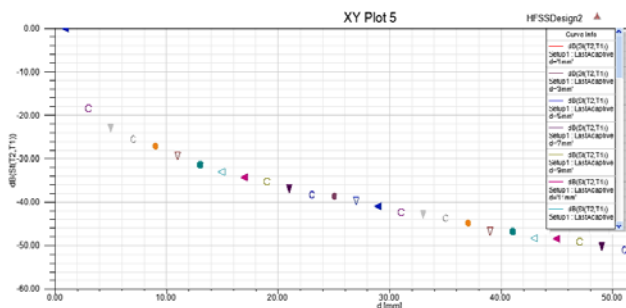


图 6 dB 损耗图

4.4 两线圈的相对位置对双层天线的影响

对于式(1)中的诺以曼公式, 其互感 M 计算是建立在两个线圈是同轴的前提下, 并未对非同轴线圈的互感进行描述和计算. 下面就针对两线圈的非同轴的情况进行仿真, 分析当相对位置发生变化时, 双层天线的磁场强度变化规律. 保持上下两层线圈的间距 1mm 不变(PCB 板的厚度), 线圈的最外圈半径为恒定值 24mm, 天线线宽为 0.85mm, 同一个线圈中相邻的天线走线之间的距离为 0.15mm, 双层天线线圈的匝数取 2(由 4.1、4.2、4.3 的仿真分析可知 2 匝时最优), 改变上下两层天线线圈的轴间距大小, 间距从 1mm 递增至 5mm, 通过 HFSS 软件对这 5 种线圈结构进行仿真分析, 结果如表 4 所示.

表 4 相对位置发生变化时的磁场强度

| | 1mm | 2mm | 3mm | 4mm | 5mm |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (双 3.3v)2 匝 | 50.3653 | 50.6463 | 50.7317 | 49.0698 | 46.5896 |
| K(2 匝, %) | 75.93 | 71.27 | 65.40 | 60.91 | 55.39 |

通过表 4 可以看出, 当双层天线的上下两线圈轴线距离逐渐增大时, 该双层天线产生的磁场强度的变化规律是先增强后减弱. 原因分析: 由于两线圈的耦合程度是逐渐降低的, 这说明上下两线圈的耦合损耗也是逐渐减小的, 故刚开始场强有相应的增强, 但是随着轴线间距的增加, 两线圈相对部分之外有一部分产生的磁场方向是相反的, 相互抵消了, 如图 7 所示, 红色箭头所指的空白部分就是磁场相互抵消的部分, 随着间距的继续增大, 磁场抵消的部分越来越大, 当场强减弱的部分大于增强的时, 整体场强开始减弱. 所以, 双驱动端口的双层天线的磁场强度变化规律是先增强后减弱的, 最优的间距为 3mm.

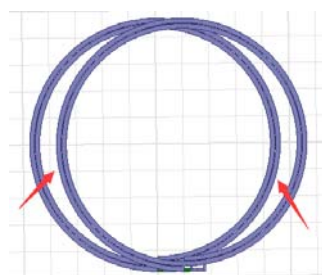


图 7 相对位置发生变化的双层天线

5 结语

为了提升天线线圈在空间中产生的磁场强度, 使天线线圈的识别距离变远, 本论文提出一种双驱动端口的双层天线方案. 通过三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对其进行建模仿真, 探究了两线圈的匝数、间距、半径以及相对位置对该双层天线的影 响, 利用 HFSS 中的场计算器对仿真的数据进行处理, 得出当双驱动端口的双层天线匝数取 2 且两线圈轴线相距 3mm 时, 天线整体的磁场强度得到很大程度的提升, 所以此时的设计为最优的设计方案. 本论文的设计可以为后续研究中高频(或者其典型频率 13.56MHz)RFID 读写器天线的人员提供一些参考.

参考文献

- 1 陈进, 邓景康, 景祥祜. 图书馆 RFID 技术及应用. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- 2 陈思国, 陈思义, 黄玲. 适用于多种环境的 RFID 标签天线研究. 消费电子, 2013, 12(24): 86.
- 3 刘华锐, 郑华, 廖晓东, 陈桂慧. 面积限定下 13.56MHz RFID 天线的仿真和设计. 计算机系统应用, 2015, 24(5): 241-244.
- 4 Chen KN, Zhao ZM. Analysis of the double-layer printed spiral coil for wireless power transfer. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(2): 114-121.
- 5 Zargham M, Gulak PG. Maximum achievable efficiency in near-field coupled power-transfer systems. IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems, 2012, 6(3): 228-245.
- 6 Yang CY, Lee SH, Yang WG. New multiple loop antenna design for 13.56MHz RFID reader. Progress in Electromagnetics Research Symposium. PIERS 2012 Moscow. 2012. 586-588.
- 7 皇甫国庆. 两圆线圈间互感及耦合系数讨论. 渭南师范学院学报, 2015, 30(14): 24-29.
- 8 黄冕, 罗志祥. 基于 13.56MHz RFID 阅读器的天线设计与实现. 计算机与数字工程, 2007, 35(7): 151-153.
- 9 Cheng D, Wang Z, Zhou Q. Analysis of distance of RFID system working under 13.56MHz. IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 219-230
- 10 樊文, 常青, 张其善. IC 卡读写器天线电路设计. 无线电工程, 2003, 33(8): 59-62.
- 11 李明洋. HFSS 天线设计. 北京: 电子工业出版社, 2011.