

磁谐振无线电能传输系统的 PCB 线圈优化设计

丘小辉¹, 肖宇迪¹, 兰石发², 毛行奎¹

(1.福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108; 2.古田溪水力发电厂, 福建省 宁德市 352000)

Optimal design for PCB coils of magnetic resonant wireless power transfer system

QIU Xiao-hui¹, XIAO Yu-di¹, LAN Shi-fa², MAO Xing-kui¹

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China;

2. Gutian brook hydroelectric power station, Ningde352000, Fujian Province, China)

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2016) 08-6-125

ABSTRACT: There are various systems that based on the magnetic resonant wireless power transfer technology getting more attention in last few years. Under the fixed operating frequency, the main factors that affect the transmission efficiency are mutual inductance between the transmitting and receiving coils and AC resistance. In the coil design process the characteristics and constraint relationship of variable parameters are considered, and then an optimal design method of PCB coils with the limited coil sizes. With the transmission efficiency as the optimization objective, this method considers the numbers of turns, the wire spacing, the line spacing and the copper thickness. The problem of optimal design of PCB coils with limited coil size is solved by means of theoretical and simulation analysis. Finally according to the optimization results, we make a set of the coils. Then mutual inductance between the transmitting and receiving coils and the AC resistance were tested. The test results are basically the same with theoretical calculation and simulation results, which verify the feasibility of this method.

KEY WORDS: magnetic resonant wireless power transfer; transmission efficiency; PCB coils; optimal design

摘要: 近年来, 基于磁谐振无线电能传输技术的各类系统受到了越来越广泛的关注。系统在固定工作频率下, 发射和接收线圈之间的互感、交流电阻是影响传输效率的主要因素。针对线圈设计过程中各参数之间的特性和相互制约关系, 本文提出了一种在有限尺寸空间下的 PCB 线圈优化设计方法。该方法综合考虑线圈的匝数、线间距、线宽以及铜厚的影响, 以传输效率为优化目标, 运用理论与仿真分析相结合的手段, 解决了在有限尺寸下的 PCB 线圈优化设计问题。最后根据优化结果, 制作了一组线圈, 并对线圈之间的互感及交流电阻进行了测试, 测试结果与理论计算和仿真结果基本一致, 验证了该方法的可行性。

关键词: 磁谐振无线电能传输; 传输效率; PCB 线圈; 优化设计

1 引言

磁谐振无线电能传输技术在便携式移动设备、特殊应用场合的无线供电、医疗设备、电动汽车无线充电等领域显示出广阔的应用前景。该技术是由 2007 年 MIT 的科学家首次提出^[1], 此后该技术得到迅速发展。磁谐振无线电能传输系统之所以能实现中等距离的传输, 与发射和接收线圈之间的品质因数以及耦合系数息息相关。因此设计出具有高品质因数或较强耦合系数的线圈是系统设计的关键。

在很多应用场合中, 线圈的尺寸都受到一定限制, 因此在有限尺寸空间下对其进行优化设计是很有必要的。首先, 本文通过对磁谐振无线电能传输系统进行建模分析可知, 系统最大传输效率取决于品质因数和耦合系数。接着, 运用 mathcad 数学软件作出强耦合系数随线圈各参数的变化曲线, 通过寻找该曲线的最优点以初步确定线圈各参数。然后, 在此基础上, 采用电磁场有限元分析软件 ansoft 进行仿真优化设计。由于交流电阻的计算公式可能不够准确, 因此有必要通过仿真得到线圈的交流电阻, 而互感的计算公式通常较准确, 将互感计算值和电阻仿真值代入最大传输效率的表达式, 通过寻求最优的传输效率以最终确定线圈各参数。最后, 根据优化结果制作了一组线圈, 并对互感和交流电阻进行了测试, 验证了该方法的正确性。

2 系统建模

图 1 所示是四线圈结构的磁谐振无线电能传输系统的等效电路图。 U_s 为高频激励源电压, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为各个线圈的自感, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (#51207025);
福建省高校杰青资助项目 (#JA13028);
福建省自然科学基金资助项目 (#2013J01179)

为各个线圈的补偿电容, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为各个线圈的交流电阻, M_{12} 、 M_{23} 、 M_{34} 为各个线圈之间的互感, R_L 为负载电阻。

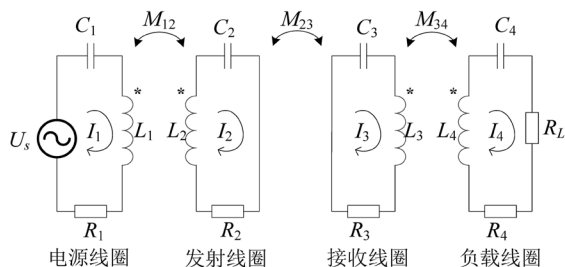


图1 系统的等效电路图

当系统处于谐振状态 ($\omega L_i = 1/\omega C_i$) 时, 且电源线圈和负载线圈均为单匝圆环 (忽略 R_1 和 R_4)。对图1所示的电路进行分析^[2], 得到传输效率表达式为:

$$\eta = \frac{(\omega M_{23})^2 R_0}{(R_2 + R_0) [R_1 (R_2 + R_0) + (\omega M_{23})^2]} \quad (1)$$

求出最大传输效率表达式为:

$$\eta_{\max} = \frac{(\omega M_{23})^2}{2R_2 R_3 + 2\sqrt{R_2^2 R_3^2 + R_2 R_3 (\omega M_{23})^2} + (\omega M_{23})^2}$$

(2)

设发射和接收线圈的耦合系数为 k_{23} , 品质因数为 Q_2 、 Q_3 , 则有:

$$\begin{cases} k_{23} = M_{23} / \sqrt{L_2 L_3} \\ Q_2 = \omega L_2 / R_2 \\ Q_3 = \omega L_3 / R_3 \end{cases} \quad (3)$$

引入强耦合系数 k_Q 的概念, 可表示为:

$$k_Q = k_{23} \sqrt{Q_2 Q_3} = \omega M_{23} / \sqrt{R_2 R_3} \quad (4)$$

则2式可以用 k_Q 表示为:

$$\eta_{\max} = \frac{k_Q^2}{k_Q^2 + 2\sqrt{k_Q^2 + 1} + 2} \quad (5)$$

由5式可知, 系统最大传输效率只与强耦合系数 k_Q 有关, 且 k_Q 越大, 效率越高, 这就是本文提出的优化设计方法所依据的原理。

3 交流电阻及互感计算公式

本文所采用的 PCB 线圈^[3]形状为长方形, 图4是长方形 PCB 线圈的俯视图与截面图, 有如下的数学关系式:

$$\begin{cases} A_{\min} = A_{\max} - 2(N-1)(w+s) \\ B_{\min} = B_{\max} - 2(N-1)(w+s) \\ l_w = 2N(A_{\max} + B_{\max}) - 4N(N-1)(w+s) \end{cases} \quad (6)$$

其中, A_{\max} 和 B_{\max} 为最大尺寸, A_{\min} 和 B_{\min} 为最小尺寸, l_w 为线圈导体的总长度, w 为线宽, s 为线间距, t 为铜厚, N 为匝数。

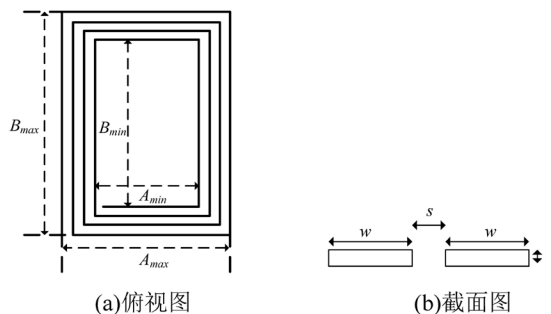


图4 长方形 PCB 线圈

3.1 交流电阻计算公式

根据电路理论可知线圈的直流电阻为:

$$R_{dc} = \frac{l_w}{w\sigma t} \quad (7)$$

高频下, 趋肤效应变得明显, 一定程度上增加了线圈的交流电阻, 可以用以下公式近似表达^[4]:

$$\begin{cases} \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma\mu_0 f}} \\ R_{ac} = R_{dc} \frac{t}{\delta \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right)} \end{cases} \quad (8)$$

其中 σ 为铜的电导率, δ 为趋肤深度, μ_0 为真空磁导率, f 为工作频率。

3.2 互感计算公式

图5是单匝圆形线圈和长方形线圈的互感耦合模型, 假设这两种线圈形状有相同的面积, 各尺寸由表1给出。

表1 线圈结构的参数

	参数	数值 (mm)
圆形	r_1	50.5
	r_2	35.7
长方形	a_1	40
	b_1	50
	a_2	25
	b_2	40

图5(a)所示单匝圆形线圈之间的互感为:

$$\begin{cases} k = \sqrt{\frac{4r_1r_2}{4(r_1+r_2)^2 + D^2}} \\ K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-k^2\sin^2(\alpha)}} d\alpha \\ E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2\sin^2(\alpha)} d\alpha \\ M_c(r_1, r_2, D) = \mu_0 \sqrt{r_1 r_2} \frac{2}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中, r_1 和 r_2 分别为发射和接收线圈的半径, D 为两线圈之间的轴向距离 (即传输距离), $E(k)$ 、 $K(k)$ 分别为具有模数 k 的第一类和第二类椭圆积分。

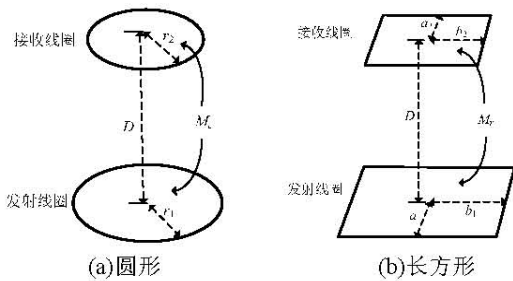


图5 单匝线圈之间的互感耦合模型

具有相同面积的圆形和长方形线圈, 其互感值近似相等^[5], 因此多匝长方形线圈之间的互感可表示为:

$$M = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} M_c(r_i, r_j, D) \approx N_1 N_2 M_c(r_{1a}, r_{2a}, D) \quad (10)$$

其中, N_1 、 N_2 分别为发射和接收线圈的匝数, r_{1a} 、 r_{2a} 分别为发射和接收线圈的平均半径。这个平均半径, 是指长方形最大尺寸和最小尺寸的等效圆形半径 (表 1 所示的计算方法) 的平均值。以下叙述中的下标 1 和 2 分别表示发射和接收线圈

4 线圈的优化设计

由 8 式可知, 影响最大传输效率的关键因素是互感耦合系数和品质因数 (即强耦合系数), 在有限的线圈尺寸下, 有必要对线圈结构进行优化设计, 以获得较理想的传输效率。

线圈的优化约束条件为:

$$\begin{aligned} A_{1max} &= 80\text{mm}, B_{1max} = 100\text{mm}, A_{2max} = 50\text{mm}, \\ B_{2max} &= 80\text{mm}, f = 4\text{MHz}, D = 130\text{mm}, A_{1min}, B_{1min}, \\ A_{2min}, B_{2min} &\text{均不小于零。} \end{aligned}$$

确定线圈的优化目标函数为:

$$K_Q = g(N, w, s, t) \text{ 或者 } \eta = \zeta(N, w, s, t) \quad (11)$$

4.1 理论分析优化设计

根据第 3 章的互感及交流电阻计算公式, 运用 mathcad 数学软件, 再结合控制变量法可以作出 k_Q 随线圈各参数的变化曲线, 最后逐一选择各参数。

1) 线间距

由于限定了线圈的最大尺寸, 可以固定 $N_1=8$, $w_1=2\text{mm}$, $N_2=8$, $w_2=1\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=35\mu\text{m}$ (1 盎司), 其强耦合系数随 s_1 的变化曲线如图 6 所示。

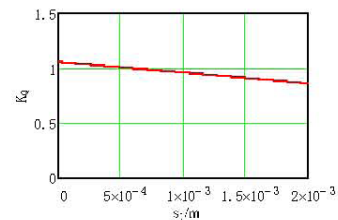


图6 k_Q 随 s_1 变化曲线

由图 6 可知, 线间距 s_1 越小越有利于提高 k_Q , 因此本文初步选定 $s_1=0.5\text{mm}$ 。

固定 $N_1=8$, $w_1=2\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=8$, $w_2=1\text{mm}$, $t_1=t_2=35\mu\text{m}$, 有如下图形:

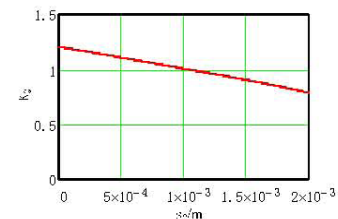


图7 k_Q 随 s_2 变化曲线

同样的, 初步选定 $s_2=0.5\text{mm}$ 。

2) 铜厚

固定 $N_1=8$, $w_1=2\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=8$, $w_2=1\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, 这里假设 $t_1=t_2$, 则有如下曲线:

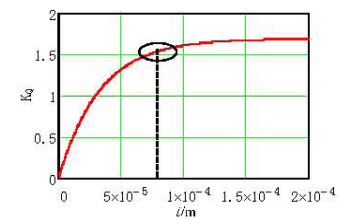


图8 k_Q 随 t 变化曲线

从图 8 可以看出, 在一定范围内增加铜厚可以使 k_Q 迅速提高, 这是因为铜厚增加使其交流电阻下降; 但铜厚超过 $70\mu\text{m}$ (图 8 所示) 时, k_Q 提高的不明显, 再增加铜厚使其性价比降低。因此初步选定 $t_1=t_2=70\mu\text{m}$ 。

3) 线宽

固定 $N_1=8$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=8$, $w_2=1\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 有如下曲线:

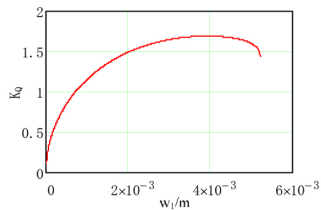


图9 k_Q 随 w_1 变化曲线

由图9可知, 线宽 w_1 超过 3mm 时, k_Q 基本不增加, 因为随着线宽的增加, 线圈导体中的涡流损耗会增大, 线宽不宜选得过大。初步选定 $w_1=3\text{mm}$ 。

固定 $N_1=8$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=8$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 有如下图形:

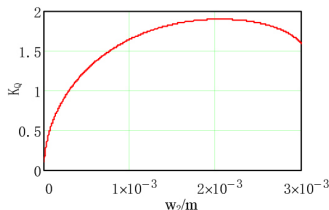


图10 k_Q 随 w_2 变化曲线

同样的, 初步选定 $w_2=2\text{mm}$ 。

4) 匝数

固定 $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=8$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 有如下图形:

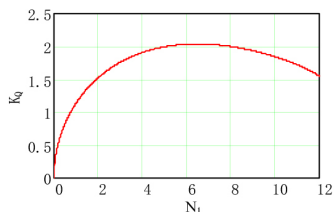


图11 k_Q 随 N_1 变化曲线

由图11可知, 当匝数 N_1 为 $5\sim 7$ 时, k_Q 达到最大值; 再增加匝数, k_Q 有所下降。这表明, 对平面 PCB 线圈而言, 并不是匝数越多越好, 越往里绕对互感的贡献值小于其对交流电阻的增加值。因此, 初步选定 $N_1=7$ 。

固定 $N_1=7$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 有如下曲线:

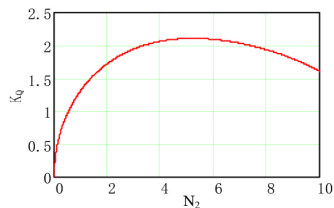


图12 k_Q 随 N_2 变化曲线

同样的, 初步选定 $N_2=7$ 。

综上, 可以初步确定线圈各参数如下: $N_1=7$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=7$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$ 。

4.2 仿真分析优化设计

由于线圈形状为长方形, 因此有必要通过 ansoft 的三维仿真来获得其交流电阻, 线圈的 3D 建模如图13所示。

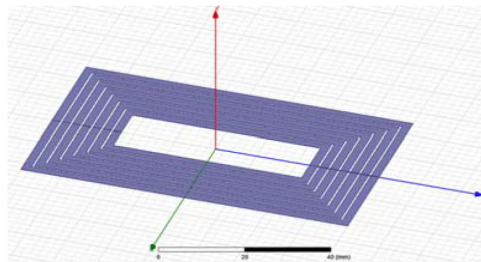


图13 线圈的3D结构示意图

在理论分析优化的基础上, 用仿真分析的手段重新调整线圈各参数。

1) 匝数

固定 $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=7$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$ 。将匝数 N_1 由 2 增加到 9, 通过仿真得到发射线圈的交流电阻, 以及接收线圈的交流电阻, 再根据 10 式计算出互感值, 代入 2 式所示的最大效率表达式, 得到如下曲线:

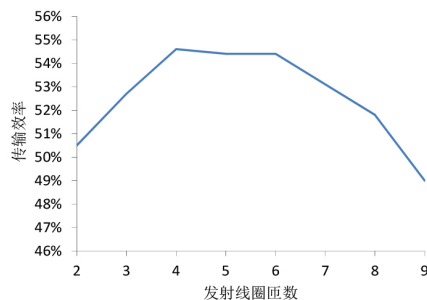


图14 效率随 N_1 变化曲线

由图14可知, 效率的峰值位于匝数 N_1 在 $4\sim 6$ 之间, 最终选定 $N_1=6$ 。

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 将匝数 N_2 由 2 变化到 9, 得到如下图形:

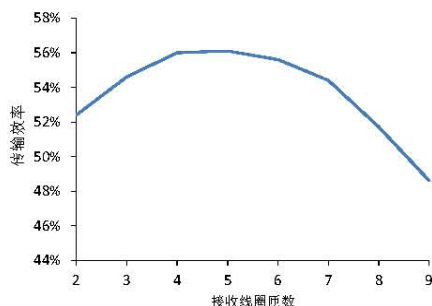


图 15 效率随 N_2 变化曲线

同样，最终选定 $N_2=5$ 。

2) 线宽

固定 $N_1=6$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=5$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 将线宽 w_1 由 0.5mm 变化到 5mm , 有如下曲线:

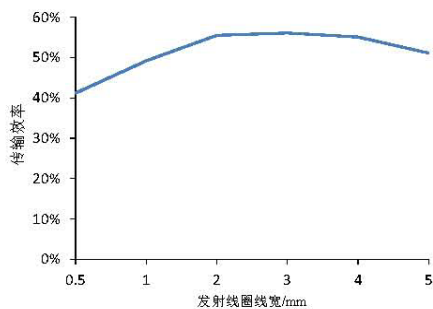


图 16 效率随 w_1 变化曲线

从图 16 可以看出，线宽 w_1 为 3mm 时，效率最优，最终选定 $w_1=3\text{mm}$ 。

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=0.5\text{mm}$, $N_2=5$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 将线宽 w_2 由 0.5mm 变化到 4mm , 有如下图形:

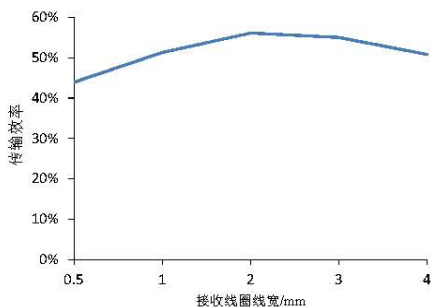


图 17 效率随 w_2 变化曲线

同样，最终选定 $w_2=2\text{mm}$ 。

3) 线间距

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $N_2=5$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 将线间距 s_1 由 0.2mm 变化到 3mm , 有如下曲线:

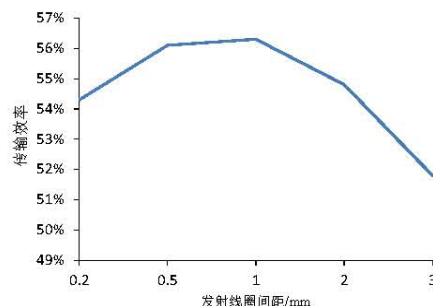


图 18 效率随 s_1 变化曲线

由图 18 可知，最终选定 $s_1=1\text{mm}$ 。

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=1\text{mm}$, $N_2=5$, $w_2=2\text{mm}$, $t_1=t_2=70\mu\text{m}$, 将线间距 s_2 由 0.2mm 变化到 3mm , 有如下曲线:

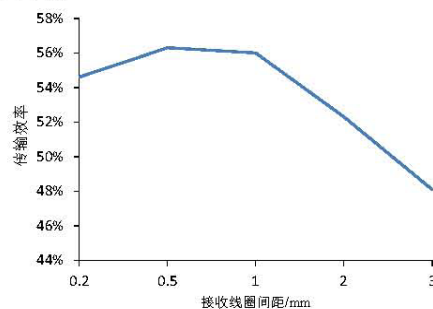


图 19 效率随 s_2 变化曲线

同样的，最终选定 $s_2=0.5\text{mm}$ 。

4) 铜厚

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=1\text{mm}$, $N_2=5$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, $t_2=70\mu\text{m}$, 将铜厚 t_1 由 $18\mu\text{m}$ 变化到 $175\mu\text{m}$, 有如下曲线:

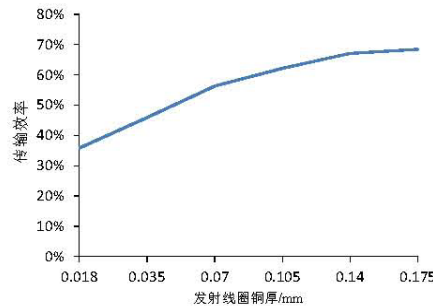


图 20 效率随 t_1 变化曲线

按照 4.1 节所述的情况，最终选定 $t_1=70\mu\text{m}$ 。

固定 $N_1=6$, $w_1=3\text{mm}$, $s_1=1\text{mm}$, $t_1=70\mu\text{m}$, $N_2=5$, $w_2=2\text{mm}$, $s_2=0.5\text{mm}$, 将铜厚 t_2 由 $18\mu\text{m}$ 变化到 $175\mu\text{m}$, 有如下曲线:

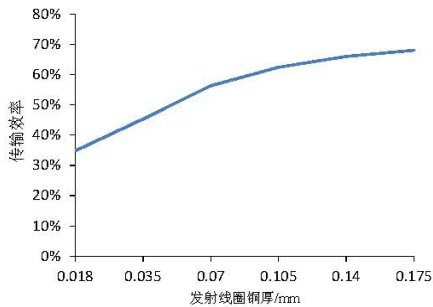


图 21 效率随 t_2 变化曲线

同样的，最终选定 $t_2=70\mu\text{m}$ 。

综上所述，最终确定线圈各参数为： $N_1=6$ ， $w_1=3\text{mm}$ ， $s_1=1\text{mm}$ ， $N_2=5$ ， $w_2=2\text{mm}$ ， $s_2=0.5\text{mm}$ ， $t_1=t_2=70\mu\text{m}$ 。

5 线圈的制作与测试

根据理论分析优化的结果，制作的线圈实物图如图 22 所示。

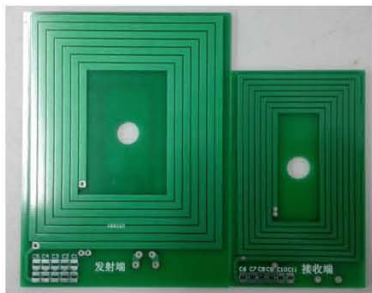


图 22 线圈实物图

采用阻抗分析仪在 4MHz 频率下测得线圈的交流电阻如表 2 所示（阻抗分析仪的型号为 WK-6520A，最高测试频率为 15MHz）。从表中可知，电阻的计算值与仿真值有一些误差，而仿真值与实测值误差较大，这可能有以下几个原因导致：测量探头的接触电阻而带来的附加电阻；铜导体精度不纯或表面产生氧化，导致电流在导体中的分布不均匀，使交流电阻增加；线圈导体的铜厚未达到设计值的要求。

表 2 线圈的交流电阻/ Ω

	计算值	仿真值	实测值
发射线圈	0.38	0.33	0.79
接收线圈	0.41	0.31	0.66

利用阻抗分析仪测得发射线圈输入阻抗实部的最大值，根据反射阻抗的计算公式，可间接得到发射和接收线圈的互感值，如表 3 所示，互感的计算值和实测值是很接近的。

表 3 不同距离下线圈之间的互感/mH

距离/cm	13	14	15	16	17	18
计算值	39	32	27	22	19	16
实测值	39	31	27	23	18	17

6 结论

本文通过对四线圈结构的磁谐振无线电能传输系统进行建模分析，可知其最大传输效率取决于线圈的品质因数和耦合系数。本文以传输效率为优化目标，提出了一种在有限尺寸空间下的 PCB 线圈优化设计方法，并给出了详细的设计过程。综合考虑品质因数和耦合系数，在寻求最优传输效率的过程中确定线圈各参数。最后根据优化设计结果，制作了一组线圈，并对其互感和交流电阻进行了测试，测试结果与理论计算和仿真结果基本一致，验证了该方法的可行性与正确性。

参考文献

- [1] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [2] 翟渊, 孙跃, 戴欣. 磁共振模式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 155-160.
- [3] 毛银花. 用于无线传感器网络的磁共振式无线能量传输系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [4] Lee T. H. The design of CMOS radio-frequency integrated circuits [M]. Cambridge Univ Pr, 2004: 139-140.
- [5] Wang-Sang Lee, Wang-Ik Son, Kyoung-Sub Oh, Jong-Won Yu. Contactless Energy Transfer Systems Using Antiparallel Resonant Loops[J]. IEEE Transactions on industrial electronic, 2013, 60(1): 350-359.

作者简介:

丘小辉 (1989), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输技术, 314969610@qq.com;

肖宇迪 (1993), 男, 江苏扬州人, 2011 级电气工程与自动化专业本科生, 835248499@qq.com;

兰石发 (1966), 男, 福建宁德人, 高级工程师, 古田溪水力发电厂生产副厂长, 无线电工程专业毕业, 长期从事水电厂安全生产、调度、运行、检修及电力工程施工管理, 314969610@qq.com;

毛行奎 (1978), 男, 福建宁德人, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子高频磁技术、新能源发电技术、无线电能传输技, 839009247@qq.com。