

# 平面螺旋线圈的无线电能传输特性研究\*

杜玉洁 刘宜成 涂海燕

(四川大学电气信息学院 成都 610065)

**摘要:**收发谐振体是无线电能传输系统的重要组成部分,它的性能直接决定了整个系统传输效率的大小。选择平面螺旋线圈作为收发谐振体,通过有限元仿真软件 HFSS 分析了线圈的属性(匝数、基板材料、层数等)对线圈参数的影响趋势,并分析了谐振体之间的能量传输特性,仿真结果表明了线圈之间的耦合因数比线圈  $Q$  值对传输效率的影响更大。最后综合考虑线圈的性能和制作成本,选择最优线圈作出实物并搭建无线电能传输装置,整个装置能够在线圈直径 2.5 倍的 450 mm 距离内点亮 15 W 的 LED 灯泡,传输效率达到 60% 以上。

**关键词:**无线电能传输;平面螺旋线圈;HFSS;传输特性

**中图分类号:** TN99    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510

## Study on transfer characteristics of planar spiral coil in wireless power transfer system

Du Yujie Liu Yicheng Tu Haiyan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Sending and receiving resonator is a key part in wireless power transfer system, its performance directly determines the size of the transmission efficiency of the whole system. In this paper, the plane spiral coil is chosen as the sending and receiving resonator. The influence of coil properties (number of turns, substrate material, number of layers, etc.) on the coil parameters is analyzed by finite element simulation software HFSS, and the energy transfer characteristics between the resonators is analyzed. The simulation results show that the coupling factor between the coils has a greater effect on the transmission efficiency than the coil  $Q$  value. Finally, considering the coil performance and production costs, choose the best coil to make in-kind and build a wireless power transmission device. The entire device is capable of lighting a 15 W LED bulb within 450 mm of the coil diameter of 2.5 times, and the transmission efficiency is more than 60%.

**Keywords:** wireless power transfer; planar spiral coil; HFSS; transfer characteristics

## 0 引言

近年来,无线电能传输技术由于其特殊的传能方式和很高的利用价值在国内外得到广泛关注<sup>[1]</sup>。2007年,美国麻省理工大学的 Marin Soljacic 团队首次运用磁耦合谐振原理建立的无线电能传输系统在 2 m 的距离内穿越障碍物点亮一个 60 W 的灯泡<sup>[2]</sup>。此后,磁耦合谐振式无线电能传输成为国内外学者研究的热点。运用在磁耦合谐振式无线电能传输系统中谐振体主要有盘式线圈<sup>[3]</sup>、螺旋线圈以及基于 PCB 板的平面线圈<sup>[4]</sup>,而平面螺旋线圈品质因数大、体积小、易于集成化、可植入性好,可用于手机、平板电脑、电动自行车等设施的无线充电。

目前,国内外已有一些文献<sup>[5]</sup>对收发谐振体的传输特性进行研究,大多数都是已知线圈参数,直接利用线圈参数对线圈的功率传输进行计算分析,但对线圈自身的属性对线圈参数的影响并未有详细的仿真研究。本文利用有限元仿真软件 HFSS (high frequency structure simulator) 通过控制变量法对平面螺旋线圈的匝数、线圈层数以及基板材料等属性进行仿真分析,并对不同  $Q$  值的线圈之间的传输效率进行对比研究,由仿真结果推出不同情况下线圈的选择方式,最后根据仿真结果选择最优线圈搭建无线电能传输系统,验证了仿真的正确性。

## 1 磁耦合无线电能传输系统理论分析

### 1.1 系统工作原理

为了减小能量损耗,实现阻抗匹配,本文采用如图1所示的四线圈结构的无线电能传输系统<sup>[6]</sup>,高频信号经过功率放大器传输到驱动线圈,驱动线圈通过电磁感应将信号传输到发射谐振体,发射谐振体通过强磁耦合将电量传递到接收谐振体,接收谐振体通过电磁感应将电能传送到负载,从而完成整个电能的传递过程,其中,发射谐振体与接收谐振体的能量交换是无线电能传输系统的核心。

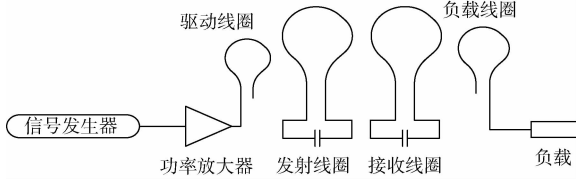


图1 磁耦合谐振式无线电能传输系统

### 1.2 电路模型的计算

目前,国内外学者已经通过“耦合模”理论推导出电能高效传输的两个关键因素<sup>[3]</sup>:1)谐振线圈有相同的谐振频率,且具有较高的品质因数 $Q$ ;2) $k/\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2} \ll 1$ ,其中 $k$ 为耦合因数, $\Gamma_1, \Gamma_2$ 为发射线圈和接收线圈的固有损耗率。由文献[7]可知, $\omega_1, \omega_2$ 分别为两线圈的谐振频率,由于两个线圈的参数完全一致,因此 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0, k_{12}$ 为线圈间的耦合因数,则磁耦合无线电能传输系统的固有频率:

$$\omega = \omega_0 \pm k_{12} \quad (1)$$

由式(1)可知,耦合系统的频率是以 $2k_{21}$ 分开,即频率分裂现象,此时为过耦合状态,当传输距离加大时,耦合逐渐减弱,当频率分裂消失时,系统进入临界耦合状态,随着距离增大,系统进入欠耦合状态。

“耦合模”理论虽然分析了无线电能传输的机理,但未涉及电路中的具体参数。为了简化分析计算,将整个系统等效为图2所示的串联耦合电路<sup>[8]</sup>,其中 $U_s$ 是电源等效电压, $L_1, L_2$ 分别是发射线圈与接收线圈的等效电感, $C_1, C_2$ 分别是发射端与接收端的等效谐振电容, $R_1, R_2$ 分别是发射端电路与接收端电路的等效电阻, $M$ 是线圈间的互感, $R_L$ 是接收端负载电阻, $I_1, I_2$ 分别是发射端与接收端的回路电流。根据基尔霍夫电压定律可以列出如下方程组:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = Z_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 \\ 0 = -j\omega M \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$$

根据式(2)可求出输入功率为

$$P_{in} = \dot{I}_1 \dot{U}_s = \frac{\dot{U}_s^2 |Z_2|}{|Z_1 Z_2 + (\omega M)^2|} \quad (3)$$

输出功率为

$$P_{out} = \dot{I}_2^2 R_L = \frac{\dot{U}_s^2 (\omega M)^2 R_L}{|[Z_1 Z_2 + (\omega M)^2]|^2} \quad (4)$$

系统的传输效率为:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{|Z_2 (Z_1 Z_2 + (\omega M)^2)|} \times 100\% \quad (5)$$

为了使发射线圈和接收线圈具有相同的谐振频率,可采用两个完全相同的线圈,则线圈的等效电感 $L_1 = L_2 = L$ ,等效电容 $C_1 = C_2 = C$ ,等效电阻 $R_1 = R_2 = R$ 。在谐振时, $\omega L = 1/\omega C, Z_1 = R_1, Z_2 = R_2 + R_L$ ,根据品质因数 $Q = \omega L/R$ ,互感值 $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ ,在大负载的情况下<sup>[9]</sup>, $Q_2^2 = R_L/R_2$ 可将传输效率简化为

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{2}{Q^2} + \frac{1}{Q^4}\right) + \frac{1}{Q^2} + 1} \times 100\% \quad (6)$$

由式(6)看出,影响系统传输效率主要有品质因数 $Q$ 和耦合因数 $k$ ,提高系统传输效率就要使品质因数和耦合因数尽可能大。

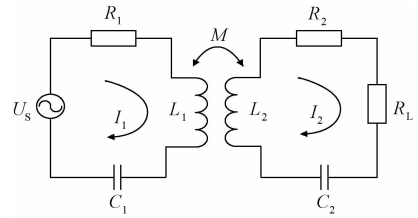


图2 无线电能传输等效电路

## 2 平面线圈的仿真

HFSS是美国Ansoft公司开发的基于有限元算法的三维电磁仿真软件,可以直观地设计线圈的三维模型,能直接得到线圈的品质因数、电感值等重要参数。仿真过程<sup>[10]</sup>主要包括求解类型的设置、模型建立、边界条件的设置、激励方式的设置、扫频范围的设置以及对仿真结果的后处理等。对于分布式参数的平面螺旋线圈,特征参数主要包括等效电感 $L$ 、品质因数 $Q$ 、 $S$ 参数、谐振频率、特征阻抗等。HFSS数据后处理功能可以直接得到 $S$ 参数、 $Y$ 参数以及 $Z$ 参数,由此可得到:

$$Q = \frac{\text{Im}(Y_{11})}{\text{Re}(Y_{11})} \quad (7)$$

$$L = \frac{1}{-2\pi \cdot f \cdot \text{Im}(Y_{11})} \quad (8)$$

线圈间的传输效率可以用下式表示<sup>[11]</sup>:

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (9)$$

### 2.1 线圈匝数对线圈参数的影响

线圈模型如图3所示,基板材料为FR-4,厚度为

1.5 mm,铜的厚度为 0.6 mm,通过 HFSS 的参数优化模块,得到线圈最优的线宽  $W$  为 8.3 mm,线间距  $S$  为 6.7 mm,即每圈的变化量为 15 mm。保持线圈的外径为 180 mm,线圈匝数由 3 到 6,内径随着匝数变化而变化,表 1 所示为不同匝数下线圈的内外径参数。

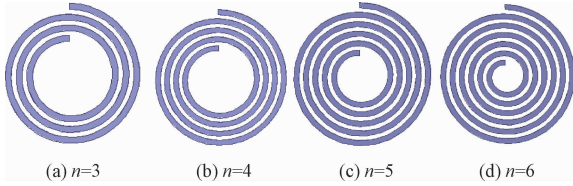


图 3 线圈平面图

表 1 不同匝数下线圈的内外径参数

$n$	$d_{out}/mm$	$d_{in}/mm$
3	103	180
4	73	180
5	43	180
6	13	180

表 2 中列出了线圈的仿真结果,包括  $Q$  值最高时的峰值频率以及此频率下的  $Q$  值和电感值。

表 2 不同匝数下线圈的  $Q$  值与电感值仿真结果

$n$	$f/MHz$	$Q_{max}$	$L/\mu H$
3	8.4	791	2.16
4	8.4	406	3.48
5	6.8	389	4.02
6	6.9	354	4.34

由仿真结果看出,随着线圈匝数的增大,线圈匝与匝之间的分布电容增大,线圈总损耗电阻增大,使得线圈的品质因数  $Q$  值减小;相反,线圈匝数的增加会增大导体面积,使得线圈的电感值  $L$  增大。

### 2.2 基板材料对线圈参数的影响

将基板材料改为以下两种不同的铁磁性材料,表 3 列出基板的材料属性,线圈的匝数固定为 3,对线圈进行仿真。

表 3 基板的材料属性

	相对介电常数	相对磁导率	介质损耗正切角
FR-4	4.4	1	0.02
基板材料 1	5.25	2	0.003
基板材料 2	11	1.5	0.003

表 4 所示为两种不同基板材料下的  $Q$  值和电感值  $L$  在峰值频率下的仿真结果。

表 4 不同基板材料下线圈的仿真结果

	$f/MHz$	$Q_{max}$	$L/\mu H$
线圈 1(基板材料 1)	8.6	973	2.28
线圈 2(基板材料 2)	11.7	690	2.39

由表 4 看出,将基板材料换为铁磁性材料,可以增加线圈的电感值,在相同几何条件下,如果要增加线圈电感值,可以考虑使用适当的铁磁性基板。另外基板材料也会影响线圈的品质因数。为了对比材料属性对品质因数的影响大小,又增加两种材料如表 5 所示。

表 5 新增基板的材料属性

	相对介电常数	相对磁导率	介质损耗正切角
基板材料 3	11	2	0.003
基板材料 4	5.25	1.5	0.003

图 4 所示分别为基板材料 1~4 的线圈品质因数的仿真结果,由曲线可以看出,相同相对介电常数材料的仿真曲线的趋势一致,说明相对介电常数对线圈参数影响更大,其他属性也有一定的影响,但没有明显的规律性。

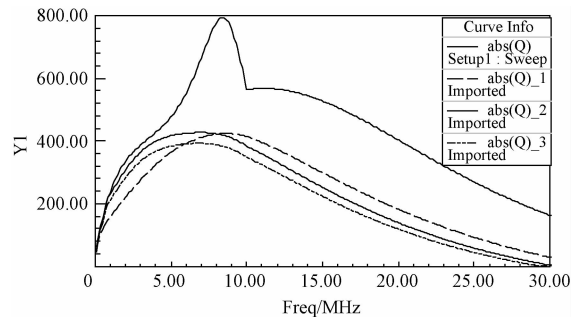


图 4 4 种基板材料的线圈品质因数仿真曲线

### 2.3 线圈层数对线圈参数的影响

为了充分利用基板的空间,可将线圈的层数增加为两层,线圈的模型如图 5 所示,为了能清楚的展示线圈的形态,图中拉大了上下线圈之间的间距,上下两层线圈的匝数均为 3,绕向均为右手螺旋。

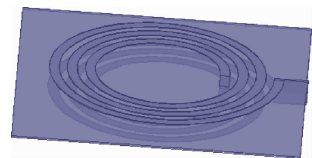


图 5 双层线圈的模型

表 6 列出了双层线圈的仿真数据,可以看出双层线圈的品质因数远小于单层线圈,原因是上下两层线圈之间存在层间电容会直接影响品质因数,使得品质因数减小。但是双层线圈的峰值频率要远小于单层线圈,在某种程度上

使用双层线圈可以减小了系统工作频率,有助于降低系统电路中开关管的损耗,并且电感值有所增大,相同面积下需要增加电感值可以考虑使用双层线圈。

表6 双层线圈的仿真结果

$f/\text{MHz}$	$Q_{\max}$	$L/\mu\text{H}$
1.5	269	6.8

## 2.4 线圈传输特性的仿真

本文针对不同 $Q$ 值的3组线圈进行仿真,以此来研究传输效率的影响因素。由式(6)可知,要提高系统的传输效率,应尽量提高线圈的品质因数和耦合因数,通过2.1和2.2节已经得到线圈的品质因数和电感值,可将线圈品质因数最高时的峰值频率作为系统的谐振频率,则需要在线圈两端并联谐振电容 $C$ ,这样与线圈自身的电感 $L$ 产生并联谐振,根据式(10)可以计算出所需的电容值 $C$ :

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (10)$$

这样对两个相同的线圈同时匹配相应的电容使得系统的谐振频率在峰值频率处,改变线圈之间的距离,得到不同距离下线圈 $S_{21}$ 参数的仿真结果,再由式(9)推出线圈间的传输效率。

图6(a)~(c)所示分别为匝数 $n=3$ 、 $n=4$ 和 $n=5$ 时,两个线圈距离在20、40、60、80、100、120、140 mm的传输效率曲线。

从仿真曲线看出, $n=3$ 时,线圈距离在20~40 mm时,系统处于过耦合状态,有频率分裂现象,传输效率在98.6%以上,最高为99.6%,距离大于40 mm时,频率分裂现象消失,系统由临界耦合状态变为欠耦合状态,此时系统的谐振频率为10 MHz,传输效率由98.6%降到59.7%; $n=4$ 时,线圈距离在20~60 mm时,系统处于过耦合状态,传输效率在98.99%以上,最高为99.3%,在60 mm时有频率分裂现象,大于60 mm后,系统由临界耦合状态变为欠耦合状态,系统的谐振频率为9.4 MHz,传输效率由98.9%降到74.6%; $n=5$ 时与 $n=4$ 时状态相似,谐振频率为7.8 MHz,传输效率最高99.3%,最低63.1%。

由以上3组曲线看出, $n=4$ 和 $n=5$ 的线圈在距离大于40 mm时比匝数 $n=3$ 的线圈传输效率高,在140 mm时,传输效率明显大于 $n=3$ 。由此,耦合因数 $k$ 对系统传输效率的影响更大,仅仅提高品质因数,不一定能得到更高的传输效率,因此要综合考虑两者的影响。

## 3 实验验证

文中采用匝数 $n=4$ 的线圈为原型,按照PCB电路板的制作流程做出两个相同的线圈,并在发射线圈和接收线圈两侧加了直径为60 mm的驱动线圈和负载线圈,组成了四线圈结构的无线电能传输系统。实验分为两个部分,第一部分

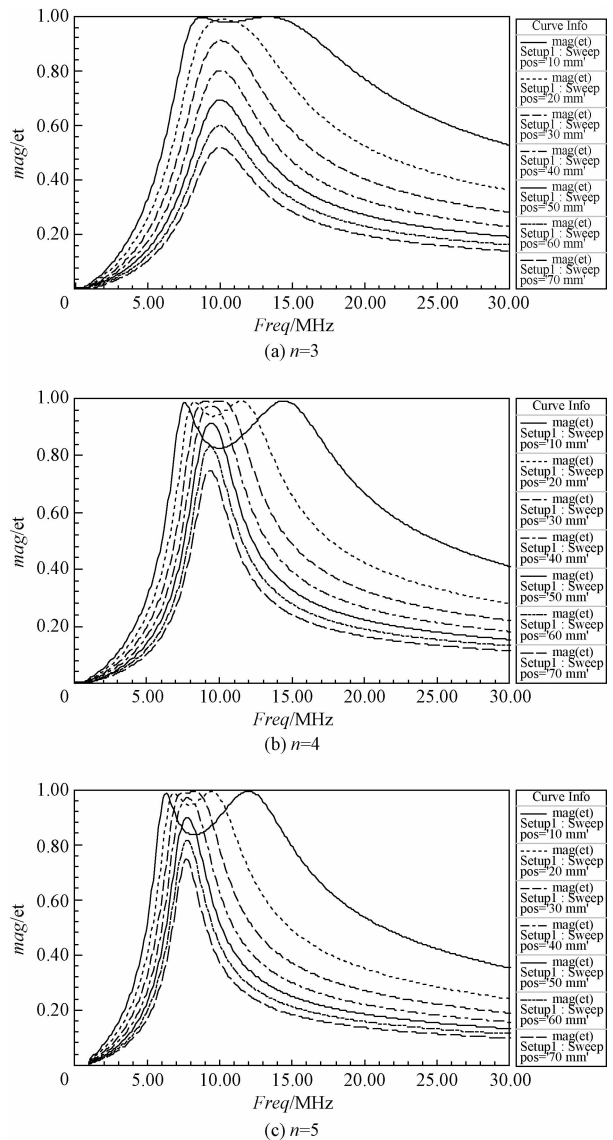


图6 线圈之间传输效率曲线

是利用网络分析仪测量线圈之间的 $S$ 参数<sup>[12]</sup>,用来验证 $S$ 参数仿真结果的正确性;另一部分是将线圈接入实际电路,搭建完整的无线电能传输系统,观察系统的传输特性。

### 3.1 $S$ 参数的测量

本文使用安捷伦ENA系列E5061B型的网络分析仪,测量菜单选为 $S_{21}$ 参数,扫频范围设置为100~30 MHz,直接将线圈接到网络分析仪的两个端口上,一端作为输入,一端作为输出,实验电路如图7所示。网络分析仪可直接显示出 $S_{21}$ 参数的曲线,也可读出不同频率点下 $dB(S_{21})$ 的示数。改变线圈之间的距离,可以得到不同距离下系统的 $S$ 参数,经过换算推出系统的传输效率。

实验结果分析如下,过耦合的距离在30~120 mm,整个过耦合状态下,系统传输效率维持在90%左右;当线圈距离大于120 mm,系统进入临界耦合状态,随着距离的增

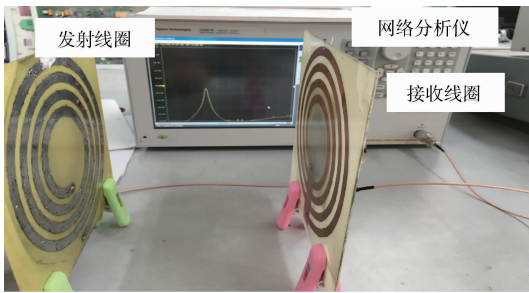


图7 S参数测量电路

大,系统进入欠耦合状态,传输效率也不断下降,直到距离为200 mm时,传输效率为69.1%,实验结果与仿真结果基本一致。

### 3.2 无线电能传输系统实验

整个无线电能传输系统的电路采用DG4062型信号发生器,产生频率为6~11 MHz的输入信号,采用DF1731SL3A直流稳压电源为前级驱动电路和功率放大器供电。如图8所示为线圈距离200 mm时的传输效果,在实验中,最远可在450 mm点亮15 W的LED灯泡,传输距离是线圈直径的2倍以上,传输效率达到63.6%,与实验室现有的匝数 $n=3$ 的线圈传输距离在300 mm内相比,传输距离有较大的提升,验证了仿真结果的正确性。

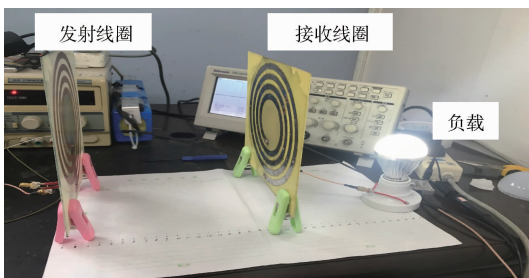


图8 线圈距离为200 mm时的传输效果

## 4 结论

本文通过仿真得到线圈属性对线圈参数的影响方式,由此规律可以对线圈进行仿真设计,并且适当使用特殊类型的线圈可以满足更多的设计需求。另外,由不同Q值线圈的传输效率可以看出,Q值与传输效率不成正比,单纯地提高品质因数而忽略耦合因数不一定得到更好的传输效果,因此在无线电能传输系统设计过程中,要重视耦合因数的影响力,提高耦合因数会极大地改进传输效果。目前,鉴于实验室的测量设备有限,且线圈制作较为粗糙,传输功率的测量还不够准确,今后会在功率测量方面做一些改善工作,从而更精确地改进系统的传输效率。

## 参考文献

- [1] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3):1-13.
- [2] KURS A, ARISTEIDIS K, ROBERT M, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(6): 83-86.
- [3] ARISTEIDIS K, JOANNOPOULOS J D, SOLJACIS M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer [J]. Annals of Physics, 2008, 32(3): 34-38.
- [4] 宋俊霖,刘宜成,赵耀,等. 面向便携式电子设备的无线电能传输研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(10):64-66.
- [5] 陈新,张桂香. 基于PCB线圈的无线传输系统功率与效率分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-167.
- [6] SAMPLE A P, MEYER D A, SMITH J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically couple resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554.
- [7] NIU W Q, GU W, CHU J X, et al. Coupled-mode analysis of frequency splitting phenomena in CPT systems[J]. Electronics Letters, 2012, 48(12): 723-724.
- [8] 汪强,李宏. 基于磁耦合谐振的无线电能传输系统的研究[J]. 电子技术应用, 2011, 37(12):72-75.
- [9] 吴星,刘宜成,宋俊霖. 基于磁耦合谐振的线圈优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(6):101-104.
- [10] 李明洋. HFSS电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [11] HIOSHI H, TOSHIYUKI O, YOSUKE H, et al. A consideration of electro-magnetic-resonant coupling mode in wireless power transmission [J]. Ieice Electronics Express, 2009, 6(19): 1421-1425.
- [12] 是德科技发布无线充电测试方案,实时测量无线电能传输效率[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 150-150.

## 作者简介

杜玉洁,硕士生,主要研究方向为磁耦合式无线电能传输。

E-mail: duyujie1114@foxmail.com