



# 一种基于磁耦合谐振式的高效率 双频无线能量传输系统

## 摘要

为了提高磁耦合谐振式无线能量传输系统的效率,本文提出了一种新型的双频无线能量传输的发射和接收装置.在发射端和接收端中,该装置在发射端和接收端中均采用一个馈电线圈对两个谐振线圈馈电;两个谐振线圈工作在不同的频率并通过磁耦合的方式把能量从发射端向接收端同频传输.由于两个谐振线圈均参与了能量传输,所以该传输装置能在较远的距离实现效率较高的双频能量传输.为了验证该理论模型的特性,本文将其设计在PCB板材上并进行仿真和实验测试.仿真和实验结果表明:该双频磁谐振耦合无线能量传输装置的能量传输频率为6.78和13.56 MHz;在传输距离为装置尺寸60%时达到最高效率,其最高效率分别为88.5%和56.7%.

## 关键词

双频;磁耦合谐振;高效率;无线能量传输

中图分类号 TN01

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-21

资助项目 国家自然科学基金(61671210);广东省自然科学基金(2015A030310249)

## 作者简介

郑艳华,男,博士,讲师,研究方向为无线能量传输和智能信息处理.44864223@qq.com

章秀银(通信作者),男,博士,教授,2015年国家优秀青年科学基金获得者,教育部长江青年学者,中组部万人计划青年拔尖人才,研究方向为微波电路与天线、LTCC、无线能量传输.zhangxiuyin@hotmail.com

1 广州大学 物理与电子工程学院,广州,510006

2 华南理工大学 电子与信息学院,广州,510640

3 广东轻工职业技术学院 信息技术学院,广州,510300

## 0 引言

随着2007年MIT团队利用磁耦合谐振进行中距离无线能量传输取得新进展以来<sup>[1]</sup>,许多学者开始对其产生兴趣并进行了大量研究<sup>[2-8]</sup>,其中包括电动汽车<sup>[6-7]</sup>和生物医学<sup>[8]</sup>等诸多领域.但是随着电子技术的发展,越来越多的设备不仅仅需要传输能量,而且在发射端和接收端之间需要进行通信.而现有的单通带磁耦合谐振无线能量传输已不符合发展的需求,所以现在越来越多的学者投入到多频化和高效率无线传输的研究中<sup>[9-11]</sup>.相比单频无线能量传输系统,多频无线能量传输系统可以提供更多的通道来传输能量或信息.然而,如何产生多频传输通道和提高各通道的效率仍然是一个很大的挑战.

目前,已经出现了一些产生双频无线能量传输系统的方法.在文献[9]中,作者利用了并联的集总电容和电感来产生双频传输通道.但是由于集总元器件仅能用于多产生一个谐振通带而实际中并没有增加一个直接参与能量传输的媒介,所以该无线能量传输系统仅能在较短的传输距离下实现高效率的传输.文献[10]采用圆形谐振线圈及与之共面的馈电线圈组成的双频线圈模型进行能量传输.该方法虽然提高了传输的效率,但是其提升依旧仅限于较短传输距离的情况,远距离的传输效率并未见改善.文献[11]中,通过在发射端和接收端引入匹配网络来提高双频无线能量传输系统的传输效率.虽然效率可以获得提升,但是由于需要接入额外的电路,系统变得复杂.因此,设计一个结构简单、传输距离较远且效率高的双频无线能量传输系统对于进一步推动无线能量传输技术的发展具有重要意义.

为了克服双频无线能量传输系统中传输距离近和效率低的问题,本文提出了一种高效率的双频平面无线能量传输发射和接收装置.通过理论模型对该装置的工作原理进行分析.在该理论模型中,双频无线能量传输系统利用2个不同工作频率的谐振线圈以磁耦合谐振的形式来传输能量.其中,发射端和接收端中的2个不同频率的谐振器分别采用同一馈电线圈馈电.为了验证该理论模型的特性,本文将其设计在PCB板材上并进行仿真和实验测试,仿真结果和实验结果吻合度良好.

### 1 电路设计与分析

图1为双频无线能量传输系统的原理图.它由1个馈电线圈,1个负载线圈和4个谐振器组成.馈电线圈包含电感 $L_s$ 、内阻 $R_s$ 和2个不同频率的能量发射源.负载线圈包括电感 $L_L$ 和负载 $R_L$ .4个谐振器分别由对应的谐振电感 $L_n$ 、谐振电容 $C_n$ 和内阻 $R_n$ ( $n=1,2,3,4$ )组成.

该无线能量传输系统的2个子系统分别工作在不同的频率.第一子系统的工作频率为 $\omega_1$ ,其通过耦合路径 $k_{s1}$ 、 $k_{13}$ 和 $k_{l3}$ 把能量从 $V_{s1}$ 传送 $R_L$ ;第二子系统的工作频率为 $\omega_2$ ,其通过耦合路径 $k_{s2}$ 、 $k_{24}$ 和 $k_{l4}$ 把能量从 $V_{s2}$ 传送 $R_L$ . $k_{s1}$ ( $k_{s2}$ )和 $k_{l3}$ ( $k_{l4}$ )为电磁耦合,起到馈电的作用; $k_{13}$ ( $k_{24}$ )为谐振式耦合,用于同频发射端和接收端之间的耦合.除了主要的耦合路径,第一谐振器和第二谐振器之间也存在耦合,其耦合系数为 $k_{12}$ ,第三谐振器和第四谐振器之间的耦合系数为 $k_{34}$ . $k_{12}$ 和 $k_{34}$ 的存在对2个子系统的工作频率有轻微的影响,但可以通过微调谐振器中的电容消除它们对系统的影响,故在此不做仔细研究.

为了让无线能量传输系统实现较高的效率,一般将谐振器的谐振频率调整为与源相同的工作频

率<sup>[1]</sup>.第一谐振器和第三谐振器的谐振频率为 $\omega_1$ ,第二谐振器和第四谐振器的谐振频率为 $\omega_2$ .其表达式分别为

$$\omega_1 \approx \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}},$$

$$\omega_2 \approx \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_4 C_4}}. \tag{1}$$

在该原理图的基础上,本文设计了一对高效率的双频无线能量传输的发射器和接收器.其对应的参数如表1所示.

### 2 PCB 模型分析

基于图1所示的原理图,本文在PCB上设计了对应的发射和接收装置.由于发射端和接收端是相同的,所以下面的分析仅以发射端为例.发射端的结构如图2所示,尺寸如表2所示.

该发射装置分为3个部分,由外到内分别为第一谐振器、馈电线圈和第二谐振器.其中,第一谐振器和第二谐振器采用了类似的结构<sup>[12]</sup>.其电感包括一圈顺时针方向绕行的方形环和一圈逆时针方向绕行的方形环,调谐电容跨接在这2个方形环之间.可

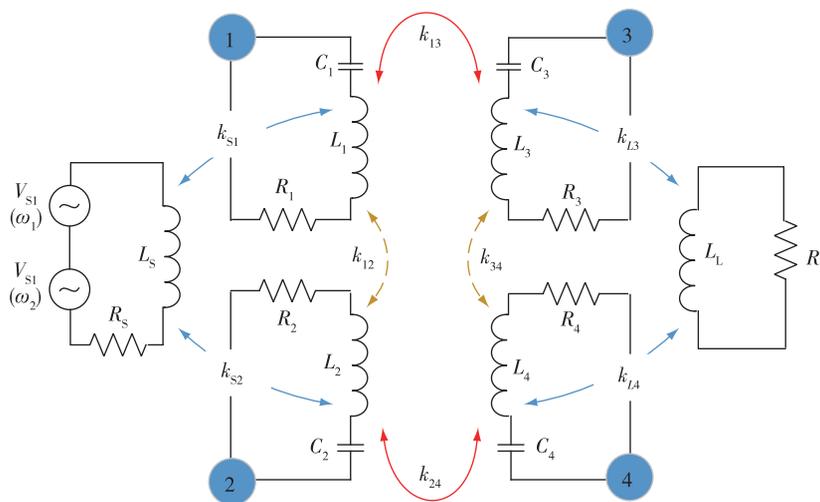


图1 双频无线能量传输系统的原理  
Fig.1 Schematic of a dual-band WPT system

表1 原理图对应变量的参数值  
Table 1 Design parameters of the dual-band WPT system in Fig.1

变量	$R_s(R_L)$	$L_s(L_L)$	$C_1(C_3)$	$C_2(C_4)$	$L_1(L_3)$	$L_2(L_4)$	$R_1(R_3)$
参数值	50 $\Omega$	411 nH	1.38 nF	0.76 nF	404 nH	200 nH	0.07 $\Omega$
变量	$R_2(R_4)$	$k_{s1}(k_{l3})$	$k_{s2}(k_{l4})$	$k_{13}$	$k_{24}$	$\omega_1$	$\omega_2$
参数值	0.045 $\Omega$	0.4	0.27	0.088	0.051	6.78 MHz	13.56 MHz

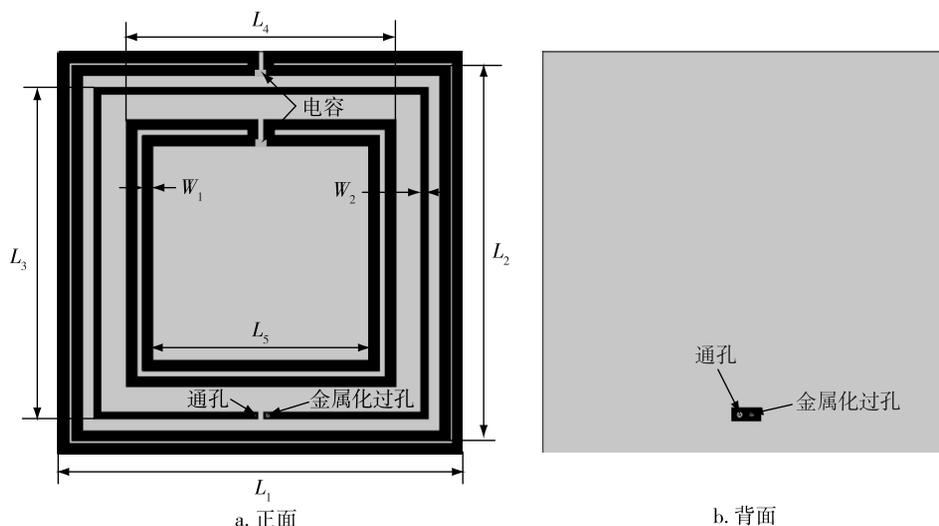


图2 双频发射装置的结构

Fig. 2 Front and back view of the configuration of the proposed transmitter

表2 发射装置结构图对应的尺寸大小

Table 2 Design parameters of the proposed transmitter

变量	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$W_1$	$W_2$
参数值/mm	150	140.4	124	100	80	4	2.8

以通过调节其电感的边长和电容值的大小来获得所要的谐振频率.馈电线圈为一圈方形环,其一端连接着一个金属化过孔,另一端连接着一个通孔,分别用于连接 SMA 的地和它的芯,这可以使馈电线圈形成一个回路.馈电线圈通过耦合馈电的方式将功率源提供的能量分别传送到第一谐振器和第二谐振器.它与谐振器之间的耦合强度可以通过耦合系数  $k_{s1}$  和  $k_{s2}$  来调节,具体方法是通过调节馈电线圈和谐振器之间的距离和馈电线圈的边长来实现.通过  $k_{s1}$  和  $k_{s2}$  的调节可以实现发射装置和功率源之间的阻抗匹配.利用这种方式,可以让负载在一定的范围内变动时均能实现比较好的匹配.

### 3 仿真和测试结果

本文所提出的双频高效率无线能量传输装置采用 FR4 板材制作.其板材厚度为 1.6 mm,介电常数为 4.4,损耗角正切为 0.02,金属铜的厚度为 35  $\mu\text{m}$ .本次实验中,发射端与接收端间隔 90 mm,为其边长的 60%.图 3 为该实验的测试平台,将矢量网络分析仪的 2 个端口分别连接发射和接收装置来测量传输系数曲线和效率曲线.传输曲线和效率曲线的等效关系式表示为

$$\eta = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \quad (2)$$

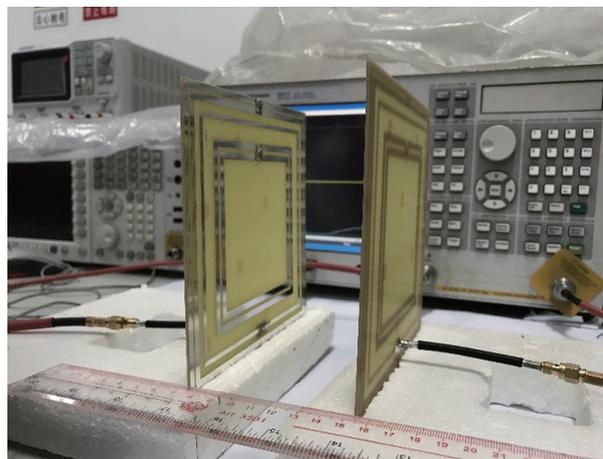


图3 发射和接收装置测试平台

Fig. 3 Experiment platform of the proposed transmitter and receiver

图 4 为仿真和测试得到的传输系数曲线.其中黄色带方形的曲线为仿真得到的  $S_{11}$  曲线,红色带圆形的曲线为仿真得到的  $S_{21}$  曲线,绿色带星形的曲线为测试得到的  $S_{11}$  曲线,蓝色带三角形的曲线为测试得到的  $S_{21}$  曲线.仿真结果和测试结果十分吻合.从曲

线特性可以看到该传输曲线在 6.78 和 13.56 MHz 产生 2 个通带.其中,6.78 MHz 的插入损耗为 0.57 dB,13.56 MHz 的插入损耗为 2.53 dB,达到了较高的传输水平.2 个通带的回波损耗均在 20 dB 以下,该发射接收装置实现了源端和负载端的良好匹配.

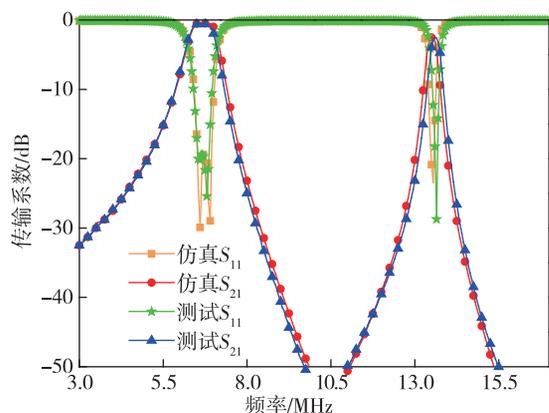


图 4 仿真和测试的传输系数

Fig. 4 Transmission coefficients used in simulation and experiment

仿真和测试得到的效率曲线如图 5 所示.从图 5 可以看出,当发射和接收装置之间的间距为装置尺寸的 60%,即 90 mm 的时候,在 6.78 MHz 测试得到的传输效率为 88.5%,在 13.56 MHz 测试得到的传输效率为 56.7%.因此,该发射和接收装置可以在较远的距离实现高效率的双频无线能量传输.

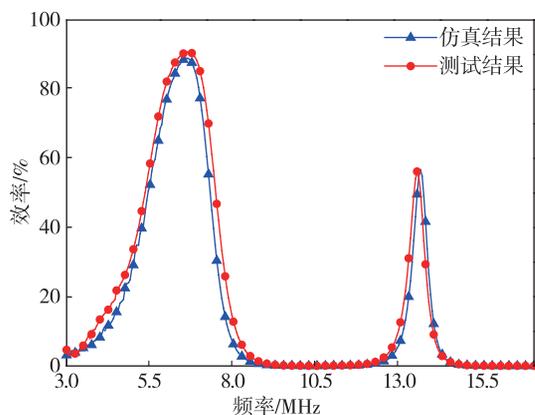


图 5 仿真和测试的传输效率

Fig. 5 Simulated and measured transmission efficiencies

#### 4 结束语

本文针对双频无线能量传输系统中传输效率低的问题,设计了一种基于 PCB 板的高效率双频无线能量传输装置.该传输装置用一个馈电线圈通过不

同的耦合强度对 2 个不同工作频率的谐振器进行馈电,利用同频谐振器之间的谐振式耦合,在较远的距离下获得较高的传输效率,同时该传输装置在源端和负载端都获得了良好的匹配.仿真和测试结果均表明,该传输装置能够在较远的距离下获得较高的传输效率.

#### 参考文献

##### References

- [ 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 ] Jolani F, Yu Y, Chen Z. A planar magnetically coupled resonant wireless power transfer system using printed spiral coils [ J ]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2014, 13( 1 ): 1648-1651
- [ 3 ] Wang J, Ho S L, Fu W N, et al. A comparative study between witrlicity and traditional inductive coupling in wireless energy transmission [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47( 5 ): 1522-1525
- [ 4 ] Huang R H, Zhang B. Frequency, impedance characteristics and HF converters of two-coil and four-coil wireless power transfer [ J ]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3( 1 ): 177-183
- [ 5 ] Ean K K, Chuan B T, Imura T, et al. Novel band-pass filter model for multi-receiver wireless power transfer via magnetic resonance coupling and power division [ C ] // IEEE Wireless and Microwave Technology Conference, 2012: 1-6
- [ 6 ] Zhou S J, Mi C C. Multi-paralleled LCC reactive power compensation networks and its tuning method for electric vehicle dynamic wireless charging [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63( 10 ): 6546-6556
- [ 7 ] Shin J, Shin S, Kim Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61( 3 ): 1179-1192
- [ 8 ] Yan L, Wang T Y, Liu D L, et al. Capsule robot for obesity treatment with wireless powering and communication [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62( 2 ): 1125-1133
- [ 9 ] Kung M-L, Lin K-H. Investigation of dual-band coil module for near-field wireless power transfer systems [ C ] // IEEE Wireless Power Transfer Conference, 2014: 265-268
- [ 10 ] Dionigi M, Mongiardo M. A novel resonator for simultaneous wireless power transfer and near field magnetic communications [ C ] // IEEE Microwave Symposium Digest, 2012: 1-3
- [ 11 ] Beh T C, Kato M, Imura T, et al. Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60( 9 ): 3689-3698

- [12] Lee W S, Oh K S, Yu J W. Distance-insensitive wireless power transfer and near-field communication using a current-controlled loop with a loaded capacitance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (2): 936-940

## A dual-band wireless power transfer transmitting and receiving device with high efficiency

ZHENG Yanhua<sup>1,2</sup> LIN Jiekai<sup>2</sup> ZHANG Xiuyin<sup>2</sup> MAI Xiaodong<sup>3</sup>

1 School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006

2 School of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640

3 School of Information Technology, Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou 510300

**Abstract** In order to improve the efficiency of dual-band magnetic resonance wireless power transfer (WPT) system, this paper presents a pair of dual-band transmitter and receiver at Industrial Scientific and Medical (ISM) band. Firstly, the two different resonators of the transmitting end are fed by one feeding loop, which is the same as that of the receiving end. Power is transferred from the transmitter to the receiver at the operating frequency of the two resonators by magnetic resonance. Since the two resonators are both delivering power at their own resonant frequency, the efficiency of proposed WPT can reach impressive values at a relative long distance. A pair of prototype transmitter and receiver is implemented using printed circuit boards (PCB) to validate the advance of the proposed scheme. Simulation and measurement results illustrate that the two operating frequencies of the WPT are 6.78 MHz and 13.56 MHz. The power transfer efficiencies reach their maximum value of 88.5% and 56.7% respectively when the distance is 60% of the overall dimensions.

**Key words** dual-band; magnetically coupled resonance; high efficiency; wireless power transfer (WPT)