文章编号：2095-4980(2019)03-0452-05

四线圈并联谐振磁耦合无线传能系统设计

马菁勖，钟　贻，陈　星

(四川大学 电子信息学院，四川 成都 610065)

摘　要：采用四线圈并联谐振的磁耦合单元，设计了高效率磁耦合谐振式无线传能系统。分析了四线圈磁耦合单元在品质因数和可调节性的优势，结合多物理场仿真软件 COMSOL 和电路设计软件 Multisim，对设计的磁耦合谐振式无线传能系统中磁耦合单元和发射电路单元进行了混合仿真。无线传能系统中源线圈和负载线圈设计为半径 9 cm 的单匝线圈，发射线圈和接收线圈为半径 13 cm 的 4 匝线圈组，发射和接收线圈距离为 40 cm(1.5 倍线圈直径)。测试表明，该系统的谐振频率为 4.78 MHz，系统从直流输入到交流输出的无线传能效率达到了 96.7%。

关键词：磁耦合谐振式无线能量传输；四线圈；混合仿真；效率

中图分类号：TN622　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201903.0452

Design of a four-coil parallel resonant magnetic coupled wireless power transmission system

MA Jingxu，ZHONG Yi，CHEN Xing

(College of Electronics and Information Engineering，Sichuan University，Chengdu Sichuan 610065，China)

Abstract：A magnetic coupled wireless power transmission system with high wireless transmitting efficiency by utilizing the four-coil parallel resonant unit is proposed. The advantages of the four-coil magnetic coupling unit in the quality factor and adjustability are analyzed. A hybrid simulation method, which integrates the multi-physical simulator COMSOL with the circuit design software Multisim, is utilized to analyze the magnetic coupling unit and the transmitting circuit. For this magnetic coupled wireless power transmission system, its source and load coils are designed to be single-turn coil with a radius of 9 cm, the transmitting and receiving coils are 13 cm four-turn ones, and the distance between the transmitting and receiving coils are 40 cm, correspondingly 1.5 times the coils' diameter. Measurement results demonstrate, the wireless power transmission system has a resonant frequency of 4.78 MHz, and achieves a high DC-AC wireless transmission efficiency up to 96.7%.

Keywords：magnetic coupling resonance wireless power transmission；four-coil model；hybrid simulation；efficiency

近年来，无线能量传输这一研究领域受到人们的广泛关注。按照原理，无线能量传输可分为 4 种：感应式无线能量传输、磁耦合谐振式无线能量传输、微波无线能量传输以及激光无线能量传输[1]。微波无线能量传输和激光无线能量传输是 2 种远距离能量传输技术；感应式无线能量传输和磁耦合谐振式无线能量传输应用在近距离传能中。感应式无线能量传输技术主要应用松耦合原理，与变压器原理类似[2]，可实现短距离(一般为毫米级)高效率的无线能量传输。磁耦合谐振式无线能量传输主要应用共振原理，在相同谐振频率的线圈之间传输能量，传输距离可达到几十厘米以上。

磁耦合谐振式无线能量传输技术由美国麻省理工学院的 Marin Soljacic 团队于 2007 年首次提出[3]，此后便掀起了研究热潮，在工业上也获得广泛的应用，如电动汽车[4]、植入式医疗设备[5]、电子产品充电等领域[6]。在系统仿真设计中，多数研究者采用 ANSYS 有限元分析软件，对线圈的实验系统进行电磁仿真[7]。磁耦合谐振式无线传能系统，线圈设计对无线传能效率有关键性影响。现有二线圈、三线圈、四线圈等设计模型，但无线传能效

收稿日期：2018-12-03；**修回日期：**2018-12-31

基金项目：装备预先研究教育部联合基金资助项目(6141A02022519)

率都有待提高。如，以近 5 年研究文献为例，文献[8]实现了二线圈模型在传输距离 7 cm(小于一倍线圈直径)条件下，41%的传输效率；文献[9]实现了二线圈模型在 10 cm(约一倍线圈直径)的距离下 37%的传输效率，以及四线圈模型在 14 cm(接近一倍线圈直径)的距离下 56%的传能效率；文献[10]实现了四线圈模型在传输距离 22 cm 处 85%的系统效率；文献[11]实现了三线圈模型在 21 cm(1.47 倍线圈直径)的距离下 84.8%的效率；文献[12]实现了四线圈模型在传输距离 17 cm 处 65%的最大仿真效率；文献[13]实现了四线圈模型在传输距离 18 mm(0.5 倍直径)的距离下 72.6%的传输效率。

1　磁耦合谐振式无线能量传输系统设计原理

磁耦合谐振式无线能量传输系统主要包括：磁耦合单元(包括源线圈、发射谐振电路、接收谐振电路和负载线圈)、电路单元(包括电源、放大电路)，结构图如图 1 所示。系统无线传能总效率主要由磁耦合单元的传输效率和电路单元的放大效率决定。而磁耦合单元的传输效率由耦合线圈对应等效谐振电路的品质因数和线圈之间的传输距离等因素决定。通常情况下，谐振电路品质因数越大，线圈传输距离越近，效率越高，但诸多工程应用要求线圈之间有较远传输距离。

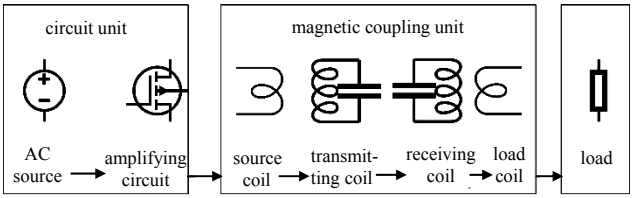

Fig.1 Structure diagram of magnetic coupling resonant wireless power transfer system
图 1 磁耦合谐振式无线输能系统结构图

1.1 磁耦合单元

1.1.1 磁耦合单元传输机理

在磁耦合单元中，源线圈与发射线圈、接收线圈与负载线圈之间通过感应耦合的方式进行能量传输；发射线圈与接收线圈之间通过共振，形成能量通路进行能量传输。

1.1.2 线圈模型设计

常用的磁耦合单元线圈模型主要有 3 种：二线圈模型、三线圈模型和四线圈模型。线圈模型的选择主要从两方面考量：一是谐振电路的品质因数，较高的品质因数会有较高的传输效率；二是实际加工测试中是否方便调节线圈电感值。二线圈模型结构简单，但加工后的多匝绕制线圈结构不易变动，磁耦合单元的复合阻抗不易调整，可调节性较差；三线圈模型是在二线圈模型的基础上，增加中继线圈，提高系统的传输效率和距离，结构较二线圈模型更复杂，可调节性较差；四线圈模型结构相对复杂，品质因数更高，源线圈和负载线圈为单线圈结构，尺寸变化更灵活，可调节性更强。

四线圈磁耦合单元的品质因数更高。以四线圈磁耦合单元中发射谐振电路为例进行分析。图 2 中 L_1 和 L_2 之间通过感应耦合方式进行能量传输，因此对于发射谐振电路，线圈 L_2 两端存在感应电动势。发射谐振电路等效模型为并联谐振电路，如图 3 所示，其中 r 在实际电路中为开路。根据并联谐振电路的品质因数定义，计算出四线圈磁耦合单元的品质因数 $Q_{四线圈}=r/(\omega_0 L)$为无穷大。二线圈磁耦合单元结构是内阻 50 Ω 的电压源直接与 L_2,C_2 并联。同理计算出二线圈磁耦合单元的品质因数 $Q_{二线圈}=1/2$。因此四线圈磁耦合单元的品质因数高于二线圈磁耦合单元。

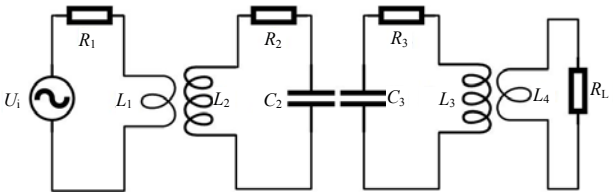

Fig.2 Schematic diagram of magnetic coupling unit with four coils
图 2 四线圈磁耦合单元原理图

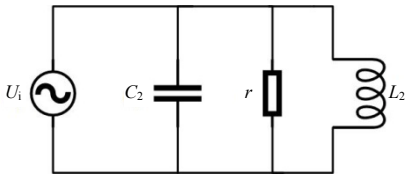

Fig.3 Parallel resonant circuit
图 3 并联谐振电路

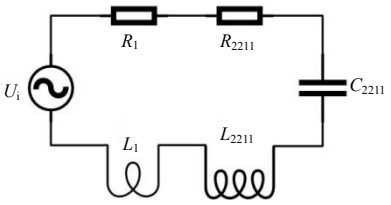

Fig.4 Equivalent circuit diagram of magnetic coupling unit with four coils
图 4 四线圈磁耦合单元等效电路图

四线圈磁耦合单元设计调节更灵活方便。图 2 中四线圈磁耦合单元通过映射，得到等效后的单电路[14]，如图 4 所示。等效后复阻抗 $Z=R_{2211}+jwL_1+jwL_{2211}+1/(jwC_{2211})$。等效后的电路中阻抗虚部越小，对交流信号的阻碍作

用越小，整个磁耦合单元的传输效率越高。因此，可以通过对源线圈的尺寸设计，改变等效电路中的电感值，从而使等效阻抗为实数，提升传输效率。一般四线圈模式中的源线圈为直径略小于发射线圈的单线圈结构，因此改变源线圈尺寸的调节方式更灵活方便。

1.1.3 磁耦合单元设计方案

由于四线圈磁耦合单元在品质因数和可调节性上具有明显优势，因此本文采用四线圈模式的磁耦合单元。线圈尺寸设计中，将线圈等效为电感，密绕线圈的特性参数与电感值 L 存在式(1)所示关系[15]：

$$L=\mu_0 N^2 R\left[\ln(8R/a)-1.75\right] \tag{1}$$

式中：N 为线圈匝数；R 为线圈半径；a 为导线半径；μ_0 为真空磁导率。

发射线圈和接收线圈采用密绕多匝结构，在能量不变的条件下，提高发射线圈和接收线圈上的电压值可以减小回路中的电流值，从而减小能量损耗，提高传输效率。选择合适的电容，使发射线圈与接收线圈构成 LC 并联谐振回路，调整谐振频率获得最佳传输效率，谐振频率 f 计算如式(2)所示：

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

式中 L,C 分别为等效电感和电容值。

为实现高无线传能效率，本文设计的四线圈磁耦合单元参数如表 1 所示(对应图 2 中各参数)。

表 1 四线圈磁耦合单元参数表

Table1 Parameters of magnetic coupling unit with four coils

symbol	value	remark
inductance of source coil(load coil) $L_1(L_4)$/μH	1	radius is 9 cm
internal resistance of signal source R_1/Ω	50	–
inductance of transmitting coil(receiving coil) $L_2(L_3)$/μH	10	radius is 13 cm
capacitance of transmitting coil(receiving coil) $C_2(C_3)$/pF	100	radius is 9 cm
resistance of transmitting coil(receiving coil) $R_2(R_3)$/ Ω	0.5	–
resistance of load R_L/Ω	10	–
AC signal source U_i	–	–

1.2 电路单元

放大电路的效率作为整个传能系统中的一部分，越高越好。本文采用 E 类放大器，理论效率可达 100%。选用 N 沟道场效应管 IRF530，耐压 100 V，最大电流 14 A，功率 40 W。在基本共源放大电路的基础上构成 E 类放大器，电路原理图如图 5 所示。

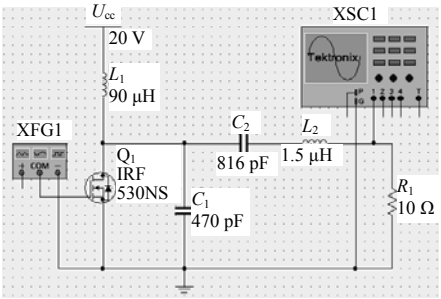

Fig.5 Amplifying circuit

图 5 放大电路

2 磁耦合谐振式无线能量传输系统混合仿真

磁耦合谐振式无线能量传输系统中包含有磁耦合单元和发射电路单元，本文采用多物理场仿真软件 COMSOL 和电路设计软件 Multisim 进行混合仿真。

2.1 磁耦合单元

在仿真软件 COMSOL 中，设置搭建等效电路模型，使用二维轴对称模式缩短运算时间，用圆形代表源线圈和负载线圈的平面结构，长方形代表发射线圈和接收线圈，背景为空气介质，边界条件设置为磁绝缘和轴对称。电容电阻等元器件之间的电路关系通过节点进行设置。

模型激励为信号源输出幅值 5 V 的正弦波，频率为谐振电路的谐振频率。设置全局变量探针，可以获得源线圈所在回路电流值、负载两端电压值、负载接收功率值。这种仿真方法可以完全模拟磁耦合单元实验中的各元器件以及线圈间的互耦情况，通过计算负载接收功率与信号源发射功率比值，可以获得磁耦合单元的输能效率。

2.2 电路单元

在 Multisim 中，按照图 5 所示原理图对放大电路进行仿真。通过示波器获取负载电阻上的波形，记录电压有效值 U_{RMS}。通过公式 $P=U_{RMS}^2/R$ 计算负载功率；输入端通过设置直流探针获取电流值，通过公式 $P_{in}=UI$ 计算输入功率。放大器的效率 $\eta=P/P_{in}$。仿真结果如表 2 所示。

表 2 放大电路仿真结果

Table2 Simulation results of amplifying circuit

transmitting			receiving		efficiency/%
DC voltage/V	DC current/A	transmitting power/W	effective voltage of load/V	receiving power/W	
20	1.46	29.2	16.9	28.5	97.6

3　无线能量传输系统测量

按照表 1 所示的参数进行实验设备的加工制作，并搭建实验系统，如图 6 所示。实验测量中，对磁耦合单元进行测量，确定谐振频率，在理论频点附近微调信号源的输出频率。测得的电压幅值最大时的频率，便是实际电路谐振频率。经过调试，加工的并联谐振电路的谐振频率与仿真结果以及理论计算结果均接近，为 4.78 MHz。

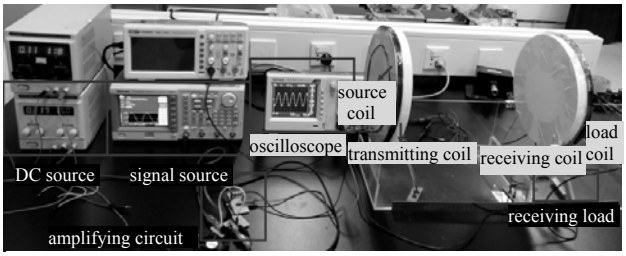

Fig.6 A system of wireless power transmission
图 6 无线能量传输系统

其次，对无线能量传输系统进行测量，整个系统的输入为直流源和信号源，输出为负载。其中信号源提供小信号输出，功率远小于放大器的输出功率，因此近似忽略。直流源是发射功率的提供者，负载是接收功率的消耗者。整个系统效率通过计算直流源的发射功率和负载的接收功率获得。如表 3 所示，该无线能量传输系统可以实现在 40 cm 的距离上传输 4.5 W 的功率，效率高达 96.7%。

表 3 无线能量传输系统实测结果
Table3 Measurement results of wireless power transmission system

distance/cm	transmitting			receiving			efficiency/%
	DC current/A	DC voltage/V	transmitting power/W	effective voltage of load/V	resistance of load/Ω	receiving power/W	
40	0.317	15	4.755	6.78	10	4.597	96.7

4　结论

针对磁耦合谐振式无线能量传输系统，分析和介绍了四线圈磁耦合单元的设计原理和方法，使用 COMSOL 和 Multisim 对磁耦合单元和电路单元进行混合仿真。设计并加工制作了四线圈并联谐振磁耦合无线传能系统，并完成了系统无线传能效率的测试。在发射线圈与接收线圈相距 40 cm(1.5 倍直径)的情况下，传输功率为 4.5 W，无线传能效率达到 96.7%。

参考文献：

[1] CHEN Q,CHEN X,FENG P. A comparative study of space transmission efficiency for the microwave wireless power transmission[C]// 2015 Asia-Pacific Microwave Conference. Nanjing,China:IEEE, 2016:1-3.

[2] GULBAHAR B. Energy harvesting and magneto-inductive communications with molecular magnets on vibrating graphene and biomedical applications in the kilohertz to terahertz band[J]. IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications, 2018,3(3):194-206.

[3] ANDRE K,ARESTEIDIS K,ROBERT M,et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007,7(317):83-86. DOI:10.1126/science.1143254.

[4] MOU X,GROLING O,GALLANT A,et al. Energy efficient and adaptive design for wireless power transfer in electric vehicles[C]// 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference. Nanjing,China:IEEE, 2016:1-5.

[5] NA K,JANG H,MA H,et al. Tracking optimal efficiency of magnetic resonance wireless power transfer system for biomedical capsule endoscopy[J]. IEEE Trans Microwave Theory Techiques, 2015,63(1):295-304. DOI:10.1109/tmtt.2014.2365475.

[6] NGUYEN V T,KANG S H,CHOI J H,et al. Magnetic resonance wireless power transfer using three-coils system with single planar receiver for laptop applications[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2015,61(2):160-166. DOI:10.1109/TCE.2015.7150569.

[7] 李江,张鹏,马腾,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的仿真与实验[J]. 电机与控制学报, 2015,19(11):72-77. (LI Jiang, ZHANG Peng,MA Teng,et al. Simulation and experimental analysis of wireless power transmission system via magnetic resonance coupling[J]. Electric Machines and Control, 2015,19(11):72-77.) DOI:10.15938/j.emc.2015.11.011.

[8] 王亚檬. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的开发[D]. 太原:太原理工大学, 2017. (WANG Yameng. Development of magnetic coupling resonance wireless power transfer system[D]. Taiyuan,China:Taiyuan University of Technology, 2017.)

[9] 曾孝平,王茂,于安宁,等. 基于磁耦合谐振的动态无线传能系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6):1014-1019. (ZENG Xiaoping,WANG Mao,YU Anning,et al. Design of dynamic wireless power transmission system based on magnetic resonance coupling[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):1014-1019.) DOI:10.11805/TKYDA201706.1014.

[10] 李均锋,廖承林,王丽芳. 基于E类放大器的中距离无线能量传输系统[J]. 电工技术学报, 2014,29(9):7-11. (LI Junfeng, LIAO Chenglin,WANG Lifang. Mid-distance wireless power transfer system using E-class amplifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(9):7-11). DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.002.

[11] 聂新毅,王豫,王秀芳,等. 基于超导中继线圈的磁耦合谐振式无线传输系统的传输效率分析[J]. 低温物理学报, 2017(2):32-37. (NIE Xinyi,WANG Yu,WANG Xiufang,et al. Transmission efficiency analysis of magnetic coupling resonant wireless transmission system based on superconducting relay coil[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2017(2): 32-37.) DOI:CNKI:SUN:DWWL.0.2017-02-006.

[12] CHENG J,WANG D. Research and analysis of frequency effect in magnetic resonance[C]// Chinese Automation Congress. [S.l.]:IEEE, 2017:2579-2582. DOI:10.1109/CAC.2017.8243210.

[13] LIU Z T,ZHONG Z,GUO Y X. In vivo high-efficiency wireless power transfer with multisine excitation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(9):3530-3540. DOI:10.1109/TMTT.2017.2681652.

[14] LI C,ZHANG H,JIANG X. Parameters optimization for magnetic resonance coupling wireless power transmission[J]. The Scientific World Journal, 2014(1):321203. DOI:10.1155/2014/321203.

[15] 刘修泉,曾昭瑞,黄平. 空心线圈电感的计算与实验分析[J]. 工程设计学报. 2008(2):149-153. (LIU Xiuquan,ZENG Zhaorui,HUANG Ping. Numerical and experimental analysis on performances of coreless coil inductance[J]. Chinese Journal Engineering Design, 2008(2):149-153.) DOI:10.3785/j.issn.1006-754X.2008.02.016.

作者简介:

马菁勖(1994-),女,辽宁省抚顺市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线输能. email:18702889321@163.com.

钟　贻(1995-),女,四川省眉山市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线输能.

陈　星(1970-),男,四川省巴中市人,教授,博士生导师,主要研究方向为电磁场理论和微波工程.

(上接第447页)

[7] QIAN Y,DEAL W R,KANEDA N,et al. Microstrip-fed quasi-Yagi antenna with broad-band characteristics[J]. Electronics Letters, 1998,34(23):2194-2196.

[8] ZHENG Guiping,KISHK A,YAKOVLEV A B,et al. Simplified feed for modified printed Yagi antenna[J]. Electronics Letters, 2004,40(8):464-466.

[9] 倪国旗,张涛,倪围,等. 一种微带准八木天线的改进设计[J/OL]. 微波学报, 2013,29(1):51-54. (NI Guoqi,ZHANG Tao,NI Wei,et al. An improved design of microstrip Yagi antenna[J/OL]. Journal of Microwaves, 2013,29(1):51-54.)

[10] ALHALABI R A,REBEIZ G M. High-gain Yagi-Uda antennas for millimeters-wave switched-beam systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009,57(11):3672-3676.

[11] 李明洋. HFSS天线设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2014. (LI Mingyang. Antenna design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2014.)

作者简介:

商　锋(1966-),男,西安市人,教授,主要研究方向为北斗天线.email:476436868@qq.com.

李晓娇(1991-),女,陕西省渭南市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术.