

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.04.013

# 基于铁氧体反射器的磁谐振无线能量传输效率的优化

李永烽, 郭庆功

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 为了改善磁耦合无线能量传输系统的传输效率随距离增加而快速衰减问题, 提出一种基于铁氧体结构的优化设计方案. 将四谐振体无线能量传输系统等效为二端口网络, 分析推导了系统传输效率的表达式. 仿真并设计制作了收发线圈直径为 30 cm 的磁耦合无线能量传输系统, 实测在 30 cm 传输距离内传输效率达 90% 以上, 在 60 cm 处传输效率约 40%, 测试结果与仿真结果相吻合. 在此基础上, 保持原始系统的结构参数不变, 引入基于铁氧体结构的磁反射面. 研究了两种不同面积大小的磁反射面对系统传输效率的影响, 发现不同面积的磁反射面对系统的传输效率有积极和消极两种影响. 通过对铁氧体结构的优化设计, 实现在 30 cm 到 90 cm 的传输距离内, 相比原始系统传输效率最大有 15% 的提升.

**关键词:** 磁谐振; 无线能量传输; 铁氧体反射器; 传输效率

**中图分类号:** TM13; TM15      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2017)04-0742-05

## Efficiency improvement of magnetic resonant wireless power transfer system based on ferrite reflector

LI Yong-Feng, GUO Qing-Gong

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

**Abstract:** A ferrite reflector-based optimization design of magnetic resonant wireless power transfer (WPT) system to improve transmission efficiency is proposed. The WPT system composed of four resonators is considered as a two-port network to deduce the transfer efficiency. Then a magnetic resonant WPT system whose receiving and transmitting coils have a diameter of 30cm is designed and manufactured. The measured transmission efficiency is above 90% at the distance of 30cm while decreases to about 40% when the distance increases to 60cm. Measured results are in good agreements with simulated ones. Based on this WPT system, two different ferrite reflectors are introduced to improve the transmission efficiency. Results show that the different size of magnetic reflectors may have positive or negative effects on transmission efficiency. By optimizing the ferrite reflector, the maximum 15% improvement of transmission efficiency is obtained at the distance range of 30cm to 90cm.

**Keywords:** Magnetic resonance; Wireless power transfer; Ferrite reflector; Transmission efficiency

## 1 引言

2007 年 MIT 的 Marin Soljaci 小组首次提出

了基于磁耦合的无线能量传输技术<sup>[1]</sup>, 因其高效率、中距离和具有广阔的应用前景, 在世界范围内掀起了相关技术理论研究的热潮. 目前, 磁耦合式

收稿日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1530143)

作者简介: 李永烽(1993-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为无线能量传输. E-mail: li\_yongfeng\_scu@163.com

通讯作者: 郭庆功. E-mail: guoqingong@scu.edu.cn

无线能量传输技术研究已经朝着应用的方向发展,在植入式医疗设备、电动汽车和消费电子领域等都有许多的应用研究<sup>[2-8]</sup>. 实际应用中,常常需要在传输距离大范围动态变化中系统的传输效率始终保持一个较高的水平. 然而,现有的磁耦合无线能量传输系统普遍存在随着传输距离的增加,传输效率会出现快速衰减的问题,这已经成为制约磁耦合无线能量传输技术推广应用的关键因素.

为了解决上述问题,已有学者提出了一些优化系统传输效率的方案<sup>[9-12]</sup>. 其中,文献[10]从理论上解释效率快速衰减是因为系统耦合失配,随着传输距离的增加发射线圈与接收线圈之间的耦合系数减小,需要同时减小源线圈与发射线圈和负载线圈与接收线圈之间的耦合系数来提高传输效率,但实际应用中无法实时改变线圈的结构. 文献[12]首次在磁耦合无线能量传输系统中引入了铁氧体结构,但其仿真分析并未取得良好的效果,在近距离时无明显效率提升,在中距离时反而出现效率大幅下降.

本文研究了磁芯和两种不同形状磁反射面对磁耦合无线能量传输系统的影响,得出了磁反射面半径的大小非常重要,磁反射面过小反而会对系统的传输效率起消极作用. 通过对铁氧体结构的优化设计,在无需改动线圈情况下,最终实现了在30 cm到90 cm的传输距离内,传输效率有较大提升,最大效率提升达15%,使其在60 cm的动态范围内均保持较高的传输效率,具有一定的实际应用价值.

## 2 四谐振体磁耦合无线能量传输系统电路模型分析

四谐振体磁耦合无线能量传输系统包括源线圈、发射线圈、接收线圈和负载线圈. 为了简化分析,忽略了线圈之间的交叉耦合,将系统看作是一个对称网络,其等效电路模型如图1所示<sup>[10]</sup>. 基于这个电路模型进行理论研究,电路模型的参数可以简化为式(1). 其中, $M_{xy}$ 为 $x, y$ 线圈之间的互感, $k_{xy}$ 为 $x, y$ 线圈之间的耦合系数,表达式如(2)所示. 运用基尔霍夫电压定律,耦合线圈中的电压和电流可以用式(3)来描述,其中 $\omega = 2\pi f$ .

$$\begin{cases} R_2 = R_3 = R_{\text{coil}}; L_2 = L_3 = L_{\text{coil}} \\ C_2 = C_3 = C_{\text{coil}}; R_S = R_L = R_0 \\ R_1 = R_4 = R_{\text{loop}}; L_1 = L_4 = L_{\text{loop}} \\ M_{12} = M_{34} = M_{\text{ic}}; k_{12} = k_{34} = k_{\text{ic}} \end{cases} \quad (1)$$

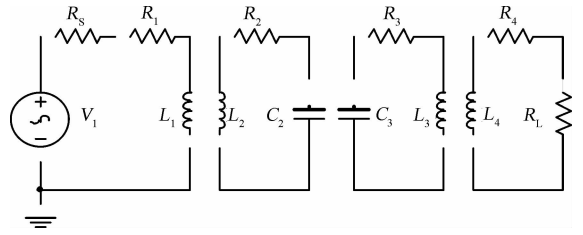


图1 四谐振体磁耦合无线能量传输系统电路模型  
Fig. 1 Circuit model of the magnetic resonance-coupled wireless power transfer system

$$K_{xy} = \frac{M_{xy}}{\sqrt{L_x L_y}} \quad (x, y = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & 0 & 0 \\ j\omega M_{12} & Z_2 & -j\omega M_{23} & 0 \\ 0 & -j\omega M_{23} & Z_3 & j\omega M_{34} \\ 0 & 0 & j\omega M_{34} & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $Z_1, Z_2, Z_3$ 和 $Z_4$ 为电路的阻抗,如式(4)所示. 由式(3)和式(4)得出负载上的电压与电源电压的比值如式(5)所示,系统的传输效率如式(6)所示<sup>[12]</sup>.

$$\begin{cases} Z_1 = Z_4 = Z_{\text{loop}} = R_0 + R_{\text{loop}} + j\omega L_{\text{loop}} \\ Z_2 = Z_3 = Z_{\text{coil}} = R_{\text{coil}} + j\omega L_{\text{coil}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{coil}}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{V_L}{V_1} =$$

$$\frac{j\omega^3 k_{23}^2 k_{\text{ic}}^2 L_{\text{coil}}^2 L_{\text{loop}} R_L}{(\omega^2 k_{\text{ic}}^2 L_{\text{coil}} L_{\text{loop}} + Z_{\text{coil}} Z_{\text{loop}})^2 + (\omega k_{23} L_{\text{coil}} Z_{\text{loop}})^2} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{4R_S}{R_L} \left( \frac{V_L}{V_1} \right)^2 = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (6)$$

发射线圈和接收线圈的品质因数定义为式(7),源线圈和负载线圈的品质因数在谐振频率下定义为式(8),谐振时系统的 $|S_{21}|$ 如式(9)所示.

$$Q_{\text{coil}} = \frac{1}{R_{\text{coil}}} \sqrt{\frac{L_{\text{coil}}}{C_{\text{coil}}}} = \frac{1}{\omega_0 R_{\text{coil}} C_{\text{coil}}} = \frac{\omega_0 L_{\text{coil}}}{R_{\text{coil}}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{loop}} = \frac{\omega L_{\text{loop}}}{R_0 + R_{\text{loop}}} \quad (8)$$

$$|S_{21}| =$$

$$\frac{2k_{\text{ic}}^2 k_{23} Q_{\text{coil}}^2 Q_{\text{loop}}}{(k_{\text{ic}}^2 Q_{\text{coil}} Q_{\text{loop}} + \frac{Z_{\text{loop}}}{R_0})^2 + (\frac{k_{23} Q_{\text{coil}} Z_{\text{loop}}}{R_0})^2} \quad (9)$$

## 3 系统仿真及实验验证

设计制作了频率连续可调的高功率放大电

路作为源电路,如图 2 所示,包含可调振荡电路,驱动电路和 C 类功率放大电路.线圈采用线径为 2.5 mm 的漆包铜线绕制,源线圈和负载线圈半径  $r_1$  为 14 cm,圈数  $n_1$  为 2,测试电感为 3.2  $\mu\text{H}$ ;发射线圈和接收线圈半径  $r_2$  为 15 cm,圈数  $n_2$  为 15,测试电感为 125.9  $\mu\text{H}$ ,串联 100 pF 的电容.用 100  $\Omega$  的功率电阻作为负载,实验测试如图 3(a)所示,图 3(b)展示了在 60 cm 处点亮了 24 个高亮度 LED 灯,额定功率为 12 W.

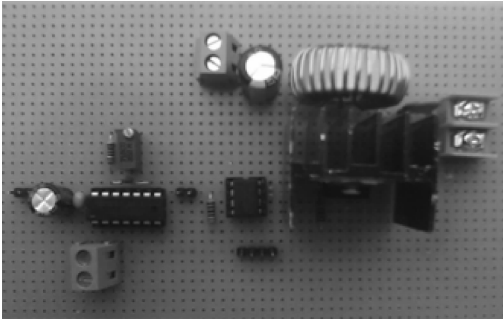
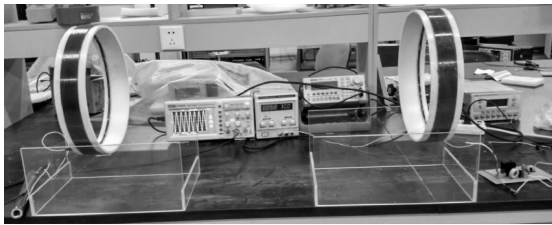


图 2 C 类功率放大电路

Fig. 2 Class C power amplifier circuit



(a)



(b)

图 3 (a) 实验测试图; (b) 实验效果图;

Fig. 3 (a) Experimental testing picture; (b) Experimental renderings picture

运用基于矩量法的三维全波电磁场仿真软件 FEKO 7.0 对系统进行研究分析.仿真模型与实验模型相同,仿真中线圈所用的材料为铜,其电导率为  $5.813 \times 10^7$  S/m. FEKO 仿真得到的稳定谐振频率为 1.393 MHz,实测谐振频率为 1.25 MHz.将 FEKO 仿真传输效率与实测传输效率进行对比分析,如图 4 所示,仿真结果与实测结果相吻合.实测在 30 cm(一倍直径)内传输效率可达 90% 以上,

在 60 cm(两倍直径)内传输效率在 40% 以上,在 30 cm 到 80 cm 的传输距离内,出现了传输效率的快速衰减区.

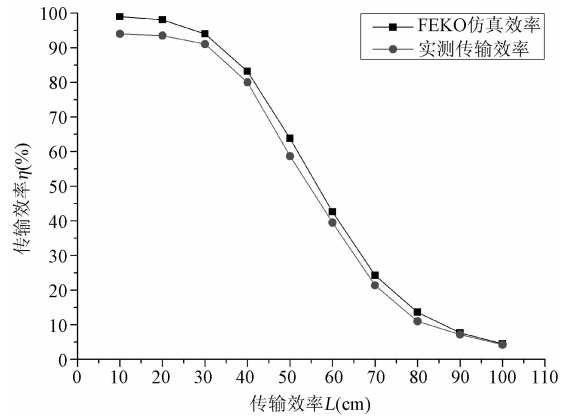


图 4 传输效率与传输距离的关系

Fig. 4 The relationship between transfer efficiency and transfer distance

## 4 铁氧体材料对系统传输效率的优化

由式(6)~式(9)可以得出,系统的传输效率主要由线圈之间的耦合系数和线圈的品质因数决定,发射线圈和接收线圈之间的耦合系数越大,品质因数越高,系统的传输效率就越高.引入铁氧铁结构可以增加线圈的电感,进而提高线圈的品质因数.加入平面磁芯可以增加线圈之间的互感,提升耦合线圈之间的耦合系数.同时,铁氧体可以反射磁场,使磁场集中于耦合线圈之间,增加线圈的磁通量.综上,合理的铁氧体结构可以提升系统的传输效率.

选用的铁氧体材料应当具有较高的磁导率、小的磁损耗和高的电阻率,并且能够工作在较高的频率.使用的铁氧体材料参数如表 1 所示,在上述实验模型的基础上,加入铁氧体结构进行研究.

表 1 铁氧体材料参数

Tab. 1 Parameters of the ferrite material

铁氧体种类	相对磁导率	磁损耗角正切	相对介电常数	电阻率	质量密度
4F1	300	0.00035	15	$\sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$	4600 kg/m <sup>3</sup>

### 4.1 加入磁反射面对系统的影响

设计了圆形磁反射面  $m_1$  和边缘突起的圆形磁反射面  $m_2$ ,如图 5 所示,其中反射面的厚度都为 0.5 cm,传输距离为 40 cm,磁反射面  $m_2$  的边缘突起高度为线圈高度 4 cm.保持传输距离 40 cm 不变,改变反射面的半径  $r_3$ .可以得到系统传输效率

随反射面半径的变化规律如图 6 所示, 其中虚线为未加磁反射面时的传输效率. 由图 6 可以得出, 磁反射面的半径对系统传输效率的影响非常大, 当磁反射面半径小于线圈半径的 1.7 倍时, 对系统传输效率起消极作用, 磁反射面  $m_2$  的消极作用更为明显. 随着磁反射面  $m_1$  的半径的增加, 系统的传输效率先下降然后增加; 随着磁反射面  $m_2$  的半径增加, 系统的传输效率增加. 当磁反射面的半径大于线圈半径的 1.7 倍时, 磁反射面对系统传输效率起积极作用, 可有效提升系统传输效率, 磁反射面  $m_2$  相对于磁反射面  $m_1$  无明显优势.

量传输系统和引入铁氧体结构优化后系统的磁场分布如图 8 所示. 改变传输距离, 得到不同传输距离下系统的传输效率, 如图 9 所示.

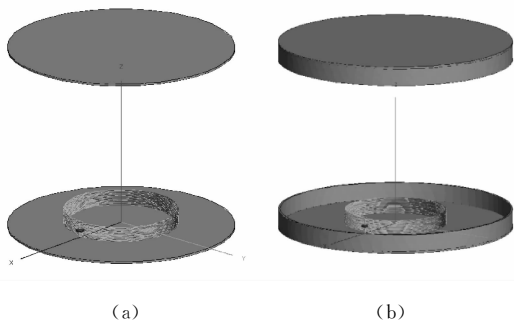


图 5 (a) 圆形磁反射面  $m_1$ ; (b) 边缘突起的圆形磁反射面  $m_2$

Fig. 5 (a) Circular magnetic reflection surface  $m_1$ ; (b) Circular magnetic reflecting surface of edge protrusion  $m_2$

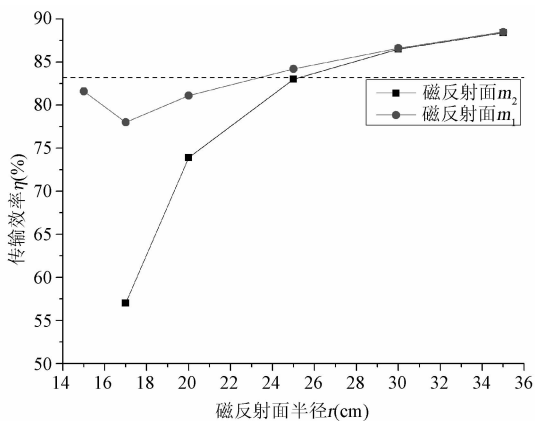


图 6 40 cm 处传输效率随磁反射面半径变化;  
Fig. 6 Transfer efficiency change with the radius of the magnetic reflection surface while distance is 40 cm

### 4.2 优化结构

最终采用磁反射面  $m_1$ , 其半径为 30 cm, 厚度为 0.5 cm. 并在线圈中心加入了磁芯, 其半径为 12 cm, 高度为线圈高度 4 cm, 在 30 cm 处系统的 3D 模型如图 7 所示. 运用 FEKO 7.0 仿真分析, 可以得到系统的场分布. 谐振时, 普通四谐振体无线能

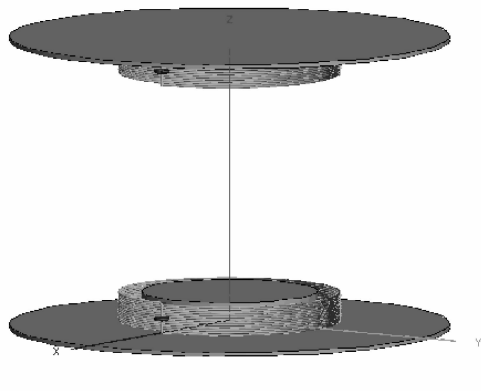


图 7 引入铁氧体结构后的 3 维模型  
Fig. 7 3D model of the system with ferrite structure

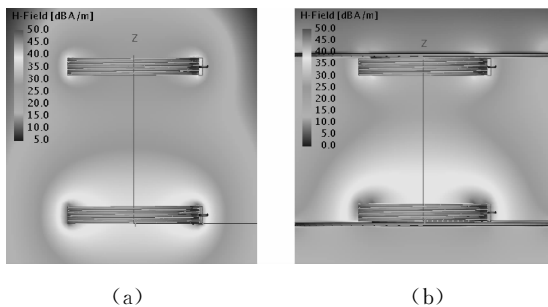


图 8 (a) 普通四谐振体的磁场分布图; (b) 加铁氧体结构优化后的磁场分布图

Fig. 8 (a) The H-field distribution of magnetic coupling wireless power transmission system; (b) The H-field distribution after added the ferrite structure

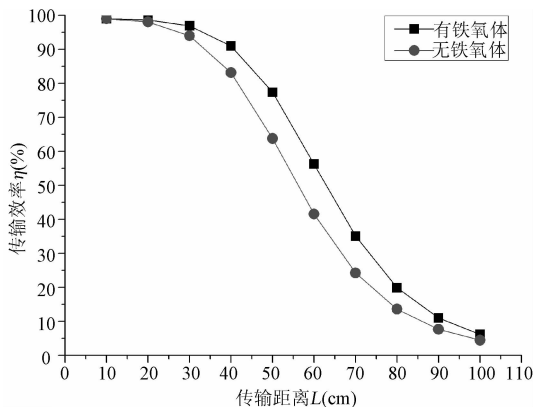


图 9 优化前后传输效率对比  
Fig. 9 Transfer efficiency comparison before and after optimization

由图 8 可以得出加入铁氧体结构后系统的磁场更加集中在发射端与接收端之间, 更加有利于系

统能量的传输. 由图 9 可以得出, 引入铁氧体结构优化后, 传输距离在 30 cm 内对系统传输效率改善较小; 在 30 cm 到 90 cm 内, 传输效率有明显提高, 最大效率提升达 15%; 在 90 cm 外, 对传输效率优化较小. 综上, 引入铁氧体结构在中距离可大幅提高系统的传输效率.

## 5 结 论

本文将四谐振体磁耦合无线能量传输系统等效为一个二端口网络, 通过研究其电路模型得到了系统传输效率和  $S_{21}$  参数的表达式. 设计制作了高频源电路和四谐振体磁耦合无线能量传输系统, 在 30 cm(一倍直径)内传输效率在 90% 以上, 在 60 cm(两倍直径)处可点亮 24 个高亮度 LED 灯, 传输效率约为 40%. 由于随着传输距离的增加, 传输效率会出现快速的衰减区, 为了优化这段距离的传输效率, 提出了引入铁氧体结构, 对系统进行优化.

运用 FEKO 7.0 仿真分析了加入铁氧体材料对系统的影响. 加入磁反射面时, 不同大小的磁反射面起不同的效果, 当磁反射面过小时会起消极的作用, 当磁反射面足够大时才会起积极的作用. 将最后设计的铁氧体结构加入系统, 相对于无铁氧体结构的四谐振体系统, 在 30 cm 到 90 cm 的传输距离内, 传输效率都有明显提高, 最大效率提升达 15%.

### 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: 83.
- [2] 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 Microw Theor Tech*, 2015, 63: 295.
- [3] Hu H, Georgakopoulos S V. Wireless power transfer in human tissue via conformal strongly coupled magnetic resonance [C]//*Proceedings of IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC*. Boulder, CO, United States; IEEE, 2015.
- [4] 杨新生, 赵军, 徐桂芝, 等. 一种小尺寸磁谐振耦合无线能量传输系统的实验研究[J]. *电工技术学报*, 2016, 31: 13.
- [5] Lee J Y, Han B M. A bidirectional wireless power transfer EV charger using self-resonant PWM[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2015, 30: 1784.
- [6] Kim S, Jung D H, Kim J J, *et al.* High-Efficiency PCB-and package-level wireless power transfer interconnection scheme using magnetic field resonance coupling[J]. *IEEE Trans Comp, Pack Man*, 2015, 5: 863.
- [7] Kong S, Bae B, Jung D H, *et al.* An investigation of electromagnetic radiated emission and interference from multi-coil wireless power transfer systems using resonant magnetic field coupling [J]. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2015, 63: 833.
- [8] Youn J H, Choi J R. High efficiency magnetic resonance wireless power transfer system and charging IC for mobile devices[C] //*Proceedings of Ph D Research in Microelectronics & Electronics, PRIME*. Glasgow, United Kingdom; IEEE, 2015.
- [9] Kar D P, Nayak P P, Bhuyan S, *et al.* Bi-directional magnetic resonance based wireless power transfer for electronic devices [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 133901.
- [10] Nair V V, Choi R J. An efficiency enhancement technique for a wireless power transmission system based on a multiple coil switching technique[J]. *Energies*, 2016, 9: 156.
- [11] Yin J, Lin D Y, Lee C K, *et al.* Front-End monitoring of multiple loads in wireless power transfer systems without wireless communication systems [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 31: 2510.
- [12] Dang Z G, Cao Y, Abu Q, *et al.* Reconfigurable magnetic resonance-coupled wireless power transfer system [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2015, 30: 6057.