

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802394

磁耦合谐振式无线电能发射系统的设计与实现

刘宝航 王秉森 李子奇

(河北大学 电子信息工程学院 保定 071000)

摘要: 磁耦合谐振式无线电能传输技术是现代电工技术领域研究与开发的热点,是目前最有可能为便携式电器及植入式医疗器械、智能可穿戴技术,实时无线供电的一种最佳的电能柔性接入与传输手段。为了摆脱传统电源线的束缚,解决供电方式在空间与距离上的限制。以强耦合理论为基础制作了一套高度为20 cm、直径为60 cm、匝数为5.25的空心铜线发射及接收线圈,据此理论谐振频率为7.65 MHz,与实际测量值8 MHz偏差4.5%。通过8 MHz方波信号控制E类功率放大器栅极,在功放的漏极考虑了非线性电容和线性并联电容的非理想因素影响,并对外接电容值进行了优化以获得E类功放的最大效率。对功放的输出端进行阻抗匹配,达到最大功率发射。最后实现了发射线圈几何尺寸直径为60 cm的最大传输距离为6 m。由实验分析可知,本系统在传输距离上有很大的提高。

关键词: 磁耦合;无线电能传输;发射线圈;接收线圈;功率放大器

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design and implementation on the emission system of magnetic coupled resonant wireless power transmission

Liu Baohang Wang Bingsen Li Ziqi

(College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: Wireless power transmission (WPT) based on the magnetically-coupled resonant is a hot topic in the research and development in modern electrical technology. It is the most likely to be a technology to provide solutions for wireless power supply of electrical equipment, such as household appliances, various consumer electronic products, smart wearable devices and embedded medical devices. The WPT is a flexible access and transmission for real-time power supply. In order to get rid of the shackles of the traditional power cord, the limitation of the space and distance of the power supply mode is solved. Using coupled-mode theory, the two identical helical coils are built with the height of 20 cm, the diameter of 60 cm and the number of turns of 5.25. Both coils are made of hollow copper wire. The expected resonant frequency given is 7.65 MHz, which is about 4.5% off from the measured resonance at 8 MHz. Control the class E power amplifier (PA) gate with an 8 MHz square wave signal, The effects of the nonlinear and linear shut capacitance have been considered in the drain of PA, it is important to predict the performance when an external capacitor is necessary to add for the optimal Class-E mode. Impedance matching is designed to maximum the power transfer from the drain of PA to the transmission coil. The system achieves the maximum transmission distance of 6 meters on the theoretical basis of the transmitting coil of diameter of 60 cm. According to experimental analysis, the system has a great improvement in transmission distance.

Keywords: magnetic coupled; wireless power transmission; transmitting coil; receiving coil; power amplifier

0 引言

自特斯拉首次证明无线电能传输的可行性并发现了耦合谐振^[1],无线电能传输的研究和实践在不同电压、功率及谐振频率点上取得了很多成就^[2]。无线电能传输主要通过电磁感应、电磁谐振、射频微波、激光等方式实现非接触式的

电能传输。其中磁耦合谐振式无线电能传输(magnetically coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)与磁感应相比适合于中距离无线电力传输^[3],并且理想情况下在非辐射方式下的传输效率比微波或激光充电更高^[4]。MCR-WPT技术可应用于便携式电器及植入式医疗设备^[5]。此外,大多数常用材料的磁响应比电响应(电介质或

导电)要弱,与电耦合或辐射系统相比,磁耦合谐振通常可以为无线电力传输提供更安全和更强大的机制^[6]。近些年有学者验证了使用磁耦合共振来增加传输范围的可能性^[7]。2007年麻省理工学院在科学杂志上发表了谐振频率为9.93 MHz在2米距离处点亮了60 W的灯泡,传输效率为40%的MCR-WPT技术成果^[8]。文献[2]在谐振频率100 KHz两米传输效率可达70%。这些研究均未实现MCR-WPT最大传输距离。国内外学者虽然在该领域取得了很大的进步,但是无线电能传输系统的主要性能指标^[9],如传输功率和传输效率以及传输距离等问题^[10],仍未解决。

本文根据强耦合理论,设计谐振频率8 MHz、输出功率为5 W的谐振式无线电能传输发射系统,实现了最大传输距离。

1 强耦合理论

耦合模理论^[11]为磁谐振无线电能传输提供了一个简单而精确的建模方法,可以更直观地了解在强耦合情况下的功率传输效率。其微分方程如下:

$$\dot{a}_m(t) = -(i\omega_m - i\Gamma_m)a_m(t) - \sum_{n \neq m} ik_{mn}a_n(t) + F_m(t) \quad (1)$$

式中: m 和 n 代表不同的谐振对象; $|a_m(t)|^2$ 是谐振对象 m 的总能量; $|a_n(t)|^2$ 是谐振对象 n 的总能量; k_{mn} 是谐振对象 m 和 n 的耦合系数; ω_m 是 m 的谐振角频率; Γ_m 为 m 的衰减率; $F_m(t)$ 为系统的激励源。

在只有一个发射装置S和一个接收装置D情况下,它们的耦合系数为 k ,当接收装置有负载 R 时,设负载的衰减率为 Γ_L ,空载时接收装置衰减率为 Γ_D ,则接收装置总的衰减率为 $\Gamma'_D = \Gamma_D + \Gamma_L$,系统的传输效率为:

$$\eta = \frac{\Gamma_L |a_D|^2}{\Gamma_S |a_S|^2 + (\Gamma_D + \Gamma_L) |a_D|^2} = \frac{\Gamma_L k^2}{\Gamma_D \Gamma_S \Gamma_D} \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{\Gamma_L}{\Gamma_D}\right) \frac{k^2}{\Gamma_S \Gamma_D} \right] + \left[\left(1 + \frac{\Gamma_L}{\Gamma_D}\right)^2 \right]} \quad (2)$$

由公式(2)可得,当 $\frac{\Gamma_L}{\Gamma_D} = \sqrt{1 + k^2 / \Gamma_S \Gamma_D}$ 时,可获得最大效率。只有当 $k > \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$ 时,才能实现无线电能的传输。 $k > \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$ 是耦合模理论的强耦合模式。

MCR-WPT传输距离可达发射线圈直径的8~10倍^[11]。MCR-WPT原理是发射线圈和接收线圈在相同的频率下通过谐振实现电能的高效传输^[12]。为实现电能的高效传输需要两个参数完全相同的线圈作为收发线圈。磁耦合谐振无线电能传输的收发线圈的结构示意图和等效电路模型如图1。

图中 h 为线圈高度, D 为线圈直径, C 为线圈的分布

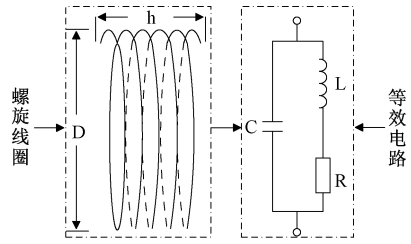


图1 螺旋线圈结构示意图与等效电路

电容, L 为线圈电感, R 为线圈总电阻。线圈铜线绕制总长度 L 的计算公式:

$$L = N \sqrt{(\pi D)^2 + \left(\frac{h}{N-1}\right)^2} \quad (3)$$

式中: N 表示线圈匝数,其单位为匝; $\frac{h}{N-1}$ 表示线圈各匝的间距。

螺旋线圈的电感 L 计算公式:

$$L = \frac{100DN^2}{\frac{h}{D} + 0.04} \quad (4)$$

螺旋线圈的谐振频率 f_0 计算公式:

$$f_0 = 10^7 \frac{3}{ND} \left(\frac{h}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

螺旋线圈的分布电容的计算公式:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} \quad (6)$$

由上述分析可得线圈物理参数决定线圈的电气参数。根据上述公式设计了一组螺旋发射和接收线圈,其具体参数为:线圈直径60 cm、匝数5.25匝、线圈高度20 cm、线径6 mm,线圈理论谐振频率为7.65 MHz,实测两线圈谐振频率为8 MHz。

2 发射系统的设计

发射系统把220 V、50 Hz的交流电变成8 MHz的射频电磁波,经发射线圈发射出去,发射模块结构如图2。

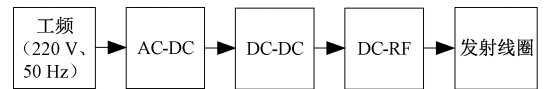


图2 发射模块结构

2.1 控制信号电路设计

16 MHz的方波通过74LS74双D触发器产生占空比可调的8 MHz的方波,控制信号电路如图3所示。

2.2 功率放大器的设计

1) 谐波抑制原理

具有周期性的非正弦射频信号可分解为正弦波和余弦波:

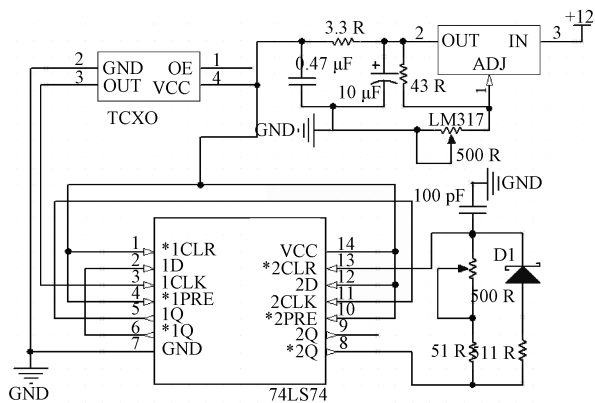


图 3 控制信号电路原理

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (7)$$

式中: a_n 和 b_n 为傅里叶系数。由正余弦函数的正交条件可得傅里叶系数表达式为:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt, n = 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt, n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

式中: T 为 $f(t)$ 的周期; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 为角频率。

控制信号电路产生的 8 MHz 的方波, 该方波信号为 $f(t)$, 周期为 $T=125 \text{ ns}$, 角频率 $\omega = 2\pi f$, 将该方波信号展开为傅里叶级数, 由公式(8)可得:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt =$$

$$\frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^0 f(t) \cos(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt =$$

$$\frac{2}{T} \cdot \frac{1}{n\omega} [-\sin(n\omega t)] \Big|_{-\frac{T}{2}}^0 + \frac{2}{T} \cdot \frac{1}{n\omega} [\sin(n\omega t)] \Big|_0^{\frac{T}{2}} \quad (9)$$

由于 $\omega = \frac{2\pi}{T}$, 可得

$$a_0 = c$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^0 f(t) \sin(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt =$$

$$\begin{cases} 0, n = 2, 4, 6, \dots, \\ \frac{2f(t)}{n\pi}, n = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (10)$$

把公式(10)代入公式(7), 可以得到控制信号的傅里叶级数展开式为:

$$f(t) = c + \frac{2f(t)}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \\ \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots + \\ \frac{1}{n} \sin(n\omega t) + \dots \end{bmatrix},$$

$$n = 1, 3, 5, \dots \quad (11)$$

傅里叶展开式中, c 为方波控制信号中的直流分量, 其通过 IRF510 MOS 管会产生功率损耗, 产生局部过热、噪声增大、温升增加, 从而加速绝缘老化、缩短 MOS 管的使用寿命, 进而降低 E 类功率放大器的效率, 因此需要电容滤除该直流分量。此外控制信号还包含 1、3、5、... 奇次谐波分量。

2) 电路设计

功率放大器是 MCR-WPT 的核心模块, 通常应用在电力电子和射频领域^[13-14]。E 类放大器工作在开关模式, 功率管从导通到关断瞬间, 电流与电压不交叠, 功率管自身功耗为零^[15]。

本系统设计输出功率为 5 W, Class-E 功率放大器电路图如图 4 所示。

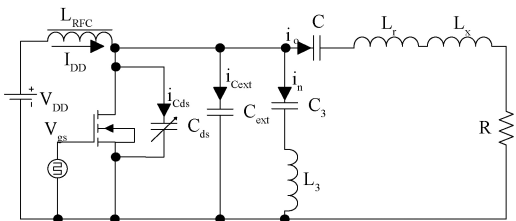


图 4 E 类功率放大器原理

功放管输出结构由线性并联电容 C_{ext} 和非线性并联电容 C_{ds} , 三次谐波抑制电路 $C_3 - L_3$, 谐振电路 $L_r - C$, 剩余电感 L_x 和负载 R 构成。设计放大器需满足最佳条件, 假设如下:

- (1) 并联电容由线性并联电容 C_{ext} 和非线性并联电容 C_{ds} 组成。
- (2) 扼流线圈 L_{RFC} 为理想线圈, 提供恒定直流电流。
- (3) 为了在输出端得出正弦信号, 只允许基波通过, 需要很高的谐振品质因数 Q 值。
- (4) MOSFET 管关断和开启时, 其阻抗分别为无穷大和零。
- (5) 串联电感 L 由 L_r 和 L_x 组成, 电感 L_r 和电容 C 选出基频, 电感 L_x 改变信号的相位。

E 类功率放大器设计公式及参数如表 1。

由于扼流线圈 L_{RFC} 的非理想因素, 为使电流 I_{DD} 近似于直流, 所以选取扼流线圈为 $100 \mu\text{H}$ ^[16]。

3) 功率放大器的阻抗匹配

为使功率放大器输出最大功率, 需要对源阻抗和负载阻抗进行阻抗匹配。匹配后的电路如图 5 所示, 放大器的功率附加效率如图 6 所示。

从图 6 中可得输出功率为 5 W, 功率附加效率为 90.3%。负载端的电压仿真波形如图 7。

此时 E 类功率放大器的输出功率是 5 W, 漏极功率为 5.4 W, 所以 E 类功率放大器漏极效率为 92.5%。通过仿

表 1 E 类功率放大器电路参数

电路参数	计算值
C_{j0}	366.5 pF
$\tan\phi = \frac{18\pi}{8-9\pi^2}$	$\phi = -0.61$
$R = \frac{2V_{DD}^2 \sin^2\phi}{P_o}$	30 Ω
$\tan\phi_1 = \frac{\int_0^\pi v_s(\theta) \cos(\theta) d\theta}{\int_0^\pi v_s(\theta) \sin(\theta) d\theta}$	0.173
$X = L_s\omega = R \tan(\phi_1 - \phi)$	28.9
$L = \frac{RQ}{\omega}$	5.8 μH
$C = \frac{1}{\omega(RQ - X)}$	75.5 pF
$L_{RFC} \geq 2\left(\frac{\pi^2}{4} + 1\right) \frac{R}{f}$	$L_{RFC} \geq 25 \mu\text{H}$

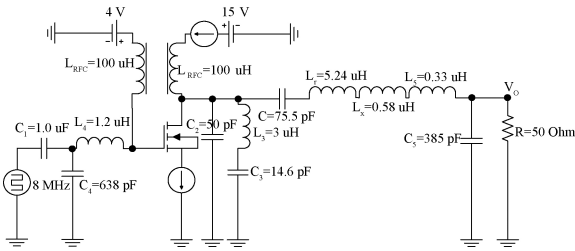


图 5 E 类功率放大器电路图

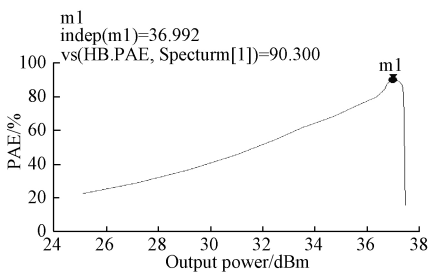


图 6 E 类功率放大器的功率附加效率

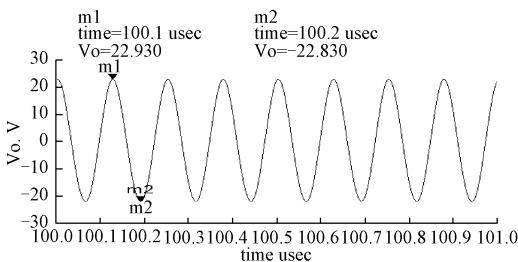


图 7 负载电压波形

真结果可以验证本文理论正确,设计参数均能满足设计要求。

3 系统测试

为使功放输出最大功率,需要对负载和线圈内阻进行阻抗匹配,匹配后的负载电压波形如图 8 所示。

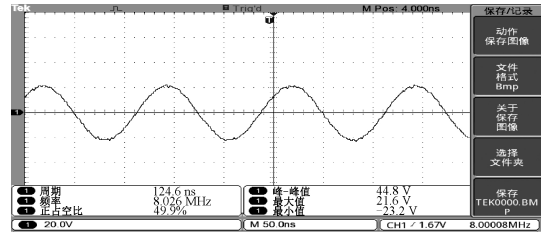


图 8 负载电压波形

由图 8 可知输出功率为 5 W,此时漏极功率为 5.55 W,漏极效率为 90%。

最后搭建磁耦合谐振式无线电能发射系统,将发射模块接入发射线圈,将一个额定功率为 3 W 的灯泡接入接收线圈,两线圈相距 6 m,此时发射模块中功放的漏极功率为 5 W,完全充分点亮了 3 W 灯泡,磁耦合无线电能传输系统整体测试如图 9 所示。

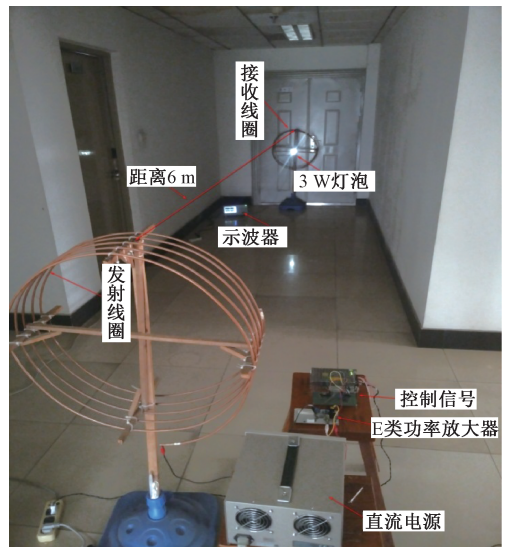


图 9 无线电能传输系统测试

4 结 论

本文根据耦合模理论设计磁耦合谐振式无线电能发射系统,该系统由发射模块、发射线圈和接收线圈组成。发射模块的核心部件采用基于 IRF510 的 E 类功率放大器,由于 IRF510 工作在开关模式,其导通时,漏极电压和漏极电流无重叠,管耗最小。根据自制线圈实际谐振频率,设计了 8 MHz 占空比可调的电路,为 E 类功率放大器提供控制信

号,在 E 类功放中考虑了非线性电容和线性并联电容的影响,增加三次谐波抑制电路,减小 IRF510 管被击穿的风险,提高了功放的效率。通过对功放漏极到发射线圈的阻抗匹配,发射线圈获得最大功率。最后通过实验在发射线圈和接收线圈距离 6 米的情况下实现了谐振频率为 8 MHz 的无线电能传输。当接收线圈中心偏离发射线圈中心时,接收功率减小,说明磁耦合谐振式无线电能传输系统在一定范围内都有辐射。这表明磁耦合谐振式无线电能传输技术完全可以在一定范围内对移动电器实现灵活便捷的充电。然而该系统产生的磁场环境对外界辐射是否在国家安全标准之下仍未可知,通过专用仪器对该系统的辐射范围及电磁环境的定量分析和测量是我们有待进一步研究的方向。

参考文献

- [1] WHEELER L P. II — Tesla's contribution to high frequency[J]. *Electrical Engineering*, 1943, 62(8): 355-357.
- [2] LEE S H, LORENZ R D. A design methodology for multi-kW, large air-gap, MHz frequency, wireless power transfer systems [C]. *Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE, 2011:3503-3510.
- [3] HUI S Y. Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6):1290-1301.
- [4] NAKAMURA S, NAMIKI M, SUGIMOTO Y, et al. Q controllable antenna as a potential means for wide-area sensing and communication in wireless charging via coupled magnetic resonances [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(1): 218-232.
- [5] MANDACHE L, MARINESCU A, IORDACHE M. On feasibility and optimization of WiTricity technology for implantable medical devices [C]. *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering*. IEEE, 2017.
- [6] BADOWICH C, MARKLEY L. Idle power loss suppression in magnetic resonance coupling wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, PP(99):1-1.
- [7] BEAMS D M, NAGOORKAR V. Design and simulation of networks for midrange wireless power transfer [C]. *International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, IEEE, 2013:509-512.
- [8] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834):83-86.
- [9] 刘志峰,刘瑞,黄海鸿,等. 磁耦合谐振串式无线电能传输研究[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(17): 127-132.
- [10] 李阳,杨庆新,闫卓,等. 无线电能有效传输距离及其影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1): 106-112.
- [11] JIANG Q, QIN Y, ZHAO Y, et al. Maximum power transfer scheme for magnetic resonance charging system [C]. *Wireless Power Transfer Conference*. IEEE, 2017.
- [12] ZHANG B, HAO X H. Modeling and analysis of wireless power transmission system via strongly coupled magnetic resonances [C]. *International Conference on Mechatronics and Control*. IEEE, 2014: 70-75.
- [13] MEDIANO A, SOKAL N O. A class-e rf power amplifier with a flat-top transistor-voltage waveform [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11): 5215-5221.
- [14] VASIĆ M, GARCÍA O, OLIVER J Á, et al. Envelope amplifier based on switching capacitors for high-efficiency rf amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(3):1359-1368.
- [15] 王秉森,张晨阳,刘宝航,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统 E 类功放的研究[J]. *电子测量技术*, 2018(10).
- [16] SHEIKHI A, HAYATI M, GREBENNIKOV A. A design methodology of class-e/f power amplifier considering linear external and nonlinear drain-source capacitance [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2017, PP(99):1-7.

作者简介

刘宝航,工学硕士,主要研究方向为无线电能传输。

E-mail:18330216374@163.com

王秉森,硕士,主要研究方向为无线电能传输。

李子奇,硕士,主要研究方向为图像处理。