

磁共振耦合无线电能传输系统的传输特性研究

薛卧龙, 冀文峰, 杜凯召, 陈莉
(河北大学 电信学院, 河北 保定 071002)

摘要: 基于两线圈无线电能传输结构, 采用实验的方法, 分析了磁共振耦合无线电能传输系统的谐振频率、传输距离以及传输效率三者之间的关系。验证了系统处于谐振状态时传输效率最高这一结论。实验表明, 系统的谐振频率会随传输距离的变化而产生波动, 且在特定传输距离上传输效率最高, 称为最佳传输距离。此外, 收发线圈之间的距离处于最佳传输距离附近时, 系统的谐振频率越高, 传输效率越高。利用互感耦合理论, 对最佳传输距离作了理论分析, 结果表明, 最佳传输距离与电源和负载的阻抗的匹配情况有关。

关键词: 磁共振耦合; 无线能量传输; 谐振频率; 传输距离; 传输效率

中图分类号: TM724

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)01-0060-03

Transmission characteristics research of magnetic resonance coupling for wireless power transmission

Xue Wolong, Ji Wenfeng, Du Kaizhao, Chen Li
(School of Telecommunication, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: In this paper, the relationship between frequency, distance and efficiency is researched by the method of experiments based on the two coils transfer structure. It verifies that in order to make maximum transmission efficiency, the system must be in the state of resonance. Experiment indicates that the resonance frequency of the system will fluctuate with the change of transmission distance. The system will get maximum efficiency when in a specific transmission distance, known as the optimize transmission distance, and when the air gap between the transfer device and receiver device is the optimal transmission distance, the higher the resonance frequency of the system, the higher transmission efficiency. This paper analyzes the phenomena of the optimal transmission distance through the mutual inductance coupling theory. The result shows that the best transmission distance is associated with the impedance matching conditions of power supply and load.

Key words: magnetic resonance coupling; wireless power transfer; resonance frequency; optimal transmission distance; transmission efficiency

为了摆脱有形输电介质的束缚, 实现电能的无线传输, 早在 20 世纪初, Nikola Tesla 提出无线输电试验的构想, 虽然当时这一设想并未实现, 但人们对无线电能传输技术的研究探索并未中断。近年来, 无线电能传输技术作为 21 世纪最值得期待的技术受到了国际社会的广泛关注。

无线电能传输 WPT (Wireless Power Transfer), 又称无接触式电能传输 CPT (Contactless Power Transfer), 是一种以非接触的方式实现电源与用电设备之间的能量传输方式, 即通过电磁感应、共振、射频、微波和激光等

方式实现电能的非接触式传输^[1]。现有的无线电能传输技术, 根据现有实现手段可分为感应耦合传输、共振耦合传输、无线电射频传输、微波传输和激光传输等。

磁共振耦合无线电能传输技术是利用接收线圈固有频率与发射电磁频率一致时引起电磁共振^[2], 发生强电磁耦合, 从而实现电能高效传输的一种技术。该技术自 2007 年由麻省理工学院的 Marin Soljatic 教授所在团队^[3]提出以来, 备受各国研究人员关注。目前已针对磁共振耦合无线电能传输技术做了大量研究, 已有文献涉及的主要研究内容包括无线电能传输系统的结构模型^[4]、

网络与通信

Network and Communication

线圈设计和传输特性^[5-7]等,其主要目的是在保证传输距离的前提下提高传输效率,实现电能高效稳定传输。本文以实验的方法得出无线电能传输的传输频率、传输效率以及传输距离三者间的关系,并通过分析论证了实验的合理性。

1 无线电能传输系统模型构建

1.1 基本结构

利用磁共振耦合技术实现电能的无线传输,至少需要两个线圈作为收发线圈,即为两线圈结构。参考文献[3]为了便于实现电源匹配和负载匹配,采用四线圈结构,即增加两个线圈分别作为发射线圈和接收线圈,以独立于电源和负载。本文为了便于分析,采用两线圈结构,其等效电路如图1所示。

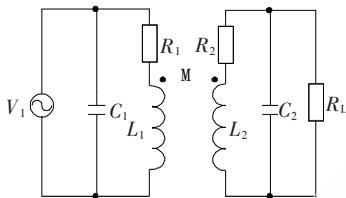


图1 两线圈结等效电路图

电源与发射线圈直接耦合,接收线圈与负载直接耦合。线圈等效为一个电感串联一个电阻,然后并联一个电容。由于自制收发线圈的分布电容不一致,造成收发线圈自谐振频率不同,从而影响了传输效率,通常在收发端外加电容以忽略这种影响,电容的选择和接入方式根据需要而定。

1.2 线圈设计

收发线圈作为系统的主体部分,其形状和规格等性质对接收效率影响极大。参考文献[8]已论证平面型螺旋线圈结构的综合性能最好。参考文献[9]指出,平面螺旋线圈功率发射模型无论在电磁场的传播方向性,还是在电磁场的集中程度方面,相比传统的螺线管都有明显优势,且4圈时具有最佳的耦合特性。同时,平面螺旋线圈与传统螺线管相比占用空间小,相对易于集成,并在已有的无线充电产品中得到应用。因此,本文利用漆包铜线绕制两个相同规格的平面螺旋线圈作为收发线圈,其中漆包线线径 $w=0.18\text{ cm}$,线圈内半径 $r_1=4.5\text{ cm}$,外半径 $r_2=8.5\text{ cm}$,匝数 $N=4$ 。根据平面线圈电感计算经验公式^[10]:

$$L=2.15 \times 10^{-6} a N^2 \ln \frac{8a}{b} \quad (1)$$

其中, N 为匝数, $a=\frac{1}{2}(r_1+r_2)$ 为平均半径, b 为线圈总宽度,即 $b=r_2-r_1$,电感单位为H,长度单位为m。计算得线圈的电感值 $L=3.6\text{ }\mu\text{H}$ 。由于该经验公式未考虑线径因素,本文选用平面螺旋线圈计算式(2)进行计算^[11]:

$$L=0.39r^2 \frac{N^2}{8r+11w} \quad (2)$$

其中, N 为线圈匝数, r 为线圈内半径, w 为线径,电感单位为 μH ,长度单位为 cm 。代入数据计算得到 $L=3.3\text{ }\mu\text{H}$,利用数字电桥实际测量得 $L_1=3.3\text{ }\mu\text{H}$, $L_2=3.3\text{ }\mu\text{H}$ 。

1.3 电容选择

本实验用数字电桥测得线圈的分布电容分别为 $C_1=7.3\text{ mF}$, $C_2=7.5\text{ mF}$,经计算线圈自谐振频率约为 1 kHz 。为了提高系统的谐振频率,且保证谐振频率可控,需在收发端另接入电容。由电容串联公式 $C=\frac{C_0C'}{C_0+C'}$ 可知,总电容由小的电容决定,因此在收发端分别串联一个纳法级电容,可以忽略分布电容的影响。

1.4 搭建实验平台

本实验利用信号发生器作为信号源,将绕制的线圈并联电容作为收发线圈,用数字示波器观察接收端波形。其示意图如图2所示。



图2 实验平台示意图

2 实验研究与分析

在线圈两端并联电容 $C=4.7\text{ nF}$,精度为 10% ,由并联谐振频率计算公式 $f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 得谐振频率为 1.28 MHz 。

利用信号发生器输入 $V_{\text{IP}}=5\text{ V}$ 的正弦信号,接收端用示波器观测并联电路两端的电压值。

给定收发线圈间的距离 D 为 10 cm 和 20 cm ,改变输入信号的频率,用数字示波器读取接收端电压波形,找出相应距离下的谐振频率。实验数据如图3所示。

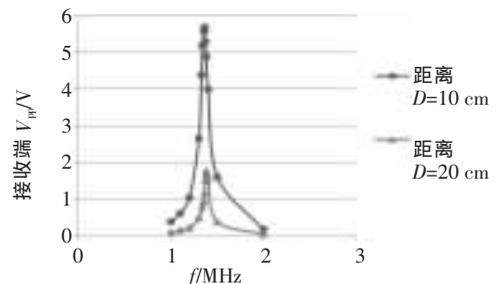


图3 距离 D 分别为 10 cm 和 20 cm 时频率与效率曲线

由图3可知,随频率的增加,传输效率先增大后减小,且在谐振点时达最大值,即收发线圈在发生谐振时传输效率最高。此外,在距离 $D=10\text{ cm}$ 时,谐振频率 $f_1=1.359\text{ MHz}$; $D=20\text{ cm}$ 时,谐振频率 $f_2=1.382\text{ MHz}$ 。谐振频率前后变化不大,但其效率明显下降,说明传输距

网络与通信

Network and Communication

离对谐振频率影响不大,却是影响传输效率的重要因素。

改变收发线圈间的距离,调节信号发生器的输出频率使接收端示波器观测到的输出电压峰值最大。实验数据如图4所示。

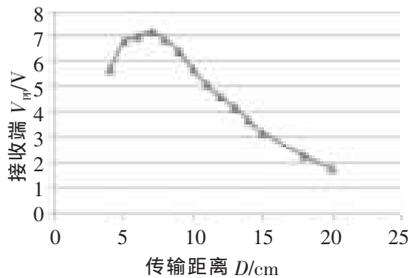


图4 系统谐振时传输距离与效率的关系

分析图4可知,随距离增加,系统在谐振点处的传输效率先增加后减小,且在距离 $D=7$ cm 时最大。此现象可用互感耦合理论解释:由互感 M 与距离 D 的关系 $M=k/D^{121}$ 可知,距离越小,互感越大。互感耦合回路一般形式如图5所示。

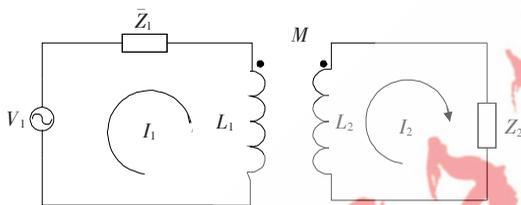


图5 互感耦合回路一般形式

令 $Z_{11}=Z_1+j\omega L_1$ 为原边回路阻抗, $Z_{22}=Z_2+j\omega L_2$ 为副边回路阻抗,则可求得:

$$I_2 = \frac{j\omega M \frac{V_1}{Z_{11}}}{Z_{22} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{11}}} = \frac{j\omega M}{Z_{11}Z_{22} + (\omega M)^2} V_1 \quad (3)$$

对式(2)求关于 ωM 的偏导数有

$$\frac{\partial I_2}{\partial (\omega M)} = \frac{j(Z_{11}Z_{22} - (\omega M)^2)}{(Z_{11}Z_{22} + (\omega M)^2)^2} V_1 \quad (4)$$

当 $\omega M = \sqrt{Z_{11}Z_{22}}$ 时, $\frac{\partial I_2}{\partial (\omega M)} = 0$, 此时有最值。即互感值 M 不是越大越好,而是在互感与阻抗相匹配时才能实现最高效率传输,换句话说就是,在阻抗给定时,系统会有一个最佳传输距离。

将线圈两端并联电容更换为 $C=1$ nF,精度为 10%,重复实验并进行比较,实验数据如图6所示。

分析图6可知:经计算得谐振频率为 2.77 MHz,即提高了系统的谐振频率。由曲线图可知,当距离 $D > 10$ cm 时,谐振频率的变化对传输效率影响不大;当距离 $D < 10$ cm 时,谐振频率越高效率越高。

本文对磁共振耦合无线电能传输系统的结构和线圈设计作了简要介绍,通过实验的方法得出了无线电能传输系统的传输频率、传输距离及传输效率三者之间的

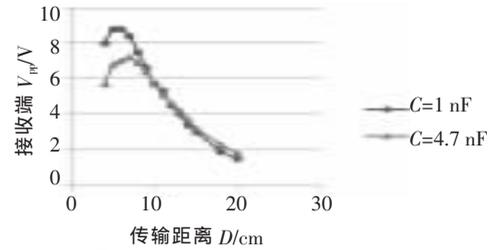


图6 分别并联电容 $C=4.7$ nF 和 $C=1$ nF 时传输特性

关系,验证了系统处于谐振时传输效率最高这一结论,并推导分析了实验中出现最佳传输距离这一现象。实验还表明,在最佳传输距离附近,系统的谐振频率越高,传输效率越高。本文的实验和分析结果对无线电能传输系统的优化设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 古丽萍.令人期待的无线电力传输及其发展[J].中国无线电,2012(1):27-30.
- [2] 傅文珍,张波,丘东元.基于谐振耦合的电能无线传输系统设计[J].机电工程学报,2011,28(6):746-749.
- [3] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834):83-86.
- [4] 翟渊,孙悦,戴欣.磁共振模式无线电能传输系统建模与分析[J].中国电机工程学报,2012,32(12):155-160.
- [5] 傅文珍,张波,丘东元,等.自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J].中国电机工程学报,2009,29(18):21-26.
- [6] 李阳,杨庆新,闫卓,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性[J].电机与控制学报,2012,16(7):7-11.
- [7] 武瑛,严陆光,徐善纲.新型无接触电能传输系统的稳定性分析[J].中国电机工程学报,2004,24(5):63-66.
- [8] 聂一雄,文波,刘艺.无接触功率传输技术[J].电力科学与技术学报,2010,25(3):13-24.
- [9] 刘艺,文波,聂一雄.新型无接触功率传输耦合机构仿真研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(11):90-94.
- [10] WANG N L L. Transistor technologies for RFICs in wireless applications[J]. Microwave Journal,1998,41(2):98.
- [11] PANNIER J, HENDRICKX D, PETRÉ F, et al. Wireless power transfer for industrial applications through strongly coupled magnetic resonances[EB/OL].www.fmtc.be/downloads.
- [12] GROVER FW. Inductance calculations[M]. New York: Courier Dover Publication, 2004.

(收稿日期:2013-09-14)

作者简介:

薛卧龙,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:无线电力传输,数字信号处理以及电磁兼容性电路理论。

冀文峰,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:无线电力传输,数字信号处理以及电磁兼容性电路理论。