

The Influence of the Coil Radius on Magnetic Coupled Resonant Wireless Power

Shen Su, Qiang Li, Mingzan Wu, Wei Sun

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: mewtwo2@126.com

Received: Mar. 7th, 2018; accepted: Mar. 22nd, 2018; published: Mar. 29th, 2018

Abstract

Transmission characteristics of Magnetic Coupled Resonant Wireless Power can be affected by the power frequency f , mutual inductance M between two coils and the influence of load R_L , and the transmission power in strong coupling zone exists frequency division phenomenon. In this paper, we study the influence of the coil radius on the transmission properties of system, analysis of the two kinds of different radius of coil case system change with power frequency power transmission characteristics and efficiency characteristic of the changing with distance. The results are verified by experiments: in the case that the inductance of the resonant coil is constant, the resonant coil with a larger coil radius has a further effective transmission distance (critical coupling distance). For coil inherent in power frequency constant when the resonant frequency, with the increase of transmission distance, system transmission power were first increases then decreases, and the efficiency of the system decreases monotonously with the increase of distance, and at the same efficiency when the coil radius greater system can achieve further transmission distance.

Keywords

Magnetic Coupled Resonant, Wireless Power Transmission, Coil Radius, Power Characteristics, Efficiency Characteristics

线圈半径对磁耦合谐振式无线电能传输特性的影响

苏 申, 李 强, 吴明赞, 孙 炜

南京理工大学, 江苏 南京
Email: mewtwo2@126.com

收稿日期: 2018年3月7日; 录用日期: 2018年3月22日; 发布日期: 2018年3月29日

摘要

磁耦合谐振式无线电能传输系统的传输特性受电源频率 f 、两线圈之间的互感 M 和负载 R_L 的影响,且传输功率在强耦合区存在频率分裂现象。本文研究线圈半径对系统的传输特性的影响,对比分析了两种不同线圈半径情况下系统随电源频率变化的功率传输特性和随距离变化的效率特性。并通过实验验证,得到结论:在谐振线圈电感不变的情况下,线圈半径更大的谐振线圈具有更远的有效传输距离(临界耦合距离);在电源频率恒定为线圈固有自谐振频率时,随着传输距离的增大,系统传输功率均先增大后减小,而系统的效率随距离的增大而单调减小,且在相同效率时线圈半径更大的系统能够达到更远的传输距离。

关键词

磁耦合谐振, 无线电能传输, 线圈半径, 功率特性, 效率特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着材料学、电磁学、电力电子器件和现代控制技术的发展,无线电能传输(wireless power transfer, WPT)已经步入人们的生活。传统电能是通过插孔、导线、插头等接触器的连接进行传输,由于导线的磨损、损坏、老化、外漏与摩擦,很容易产生电击、电火花现象,不仅导致供电可靠性、安全性下降,而且大大降低电气设备的使用寿命。在油田开采、矿井等特殊领域,不良的导线连接会增大接触电阻,导致线路温度升高,导线因摩擦极易产生电火花,从而引起爆炸,造成严重的损失[1]。

无线电能传输没有导线相互连接,即用电设备以非接触方式从固定电网获取电能,是一种安全、可靠的能量传输形式[2]。无线电能传输不仅能避免导线插拔、断路等弊端;还能在保证电能稳定可靠的基础上,解决房屋导线杂乱、插孔破坏装饰等问题,使得人们生活更加美观便利高效。因此无线电能传输技术被列为“10大引领未来的科学技术”之一。无线电能传输是实现能源方便快捷、高效利用的重要途径,在电动汽车充电[3]、航空航天器供电、便携式移动设备充电、医疗器械设备供电和煤矿油田开采、能源化工、水下作业等特殊领域具有广阔的应用前景,对磁耦合理论的发展和充电技术具有重要的应用和研究价值[4]。

2007年美国麻省理工学院(MIT)的Marin Soljacic教授课题组提出了磁耦合谐振式无线电能传输理论,并在传输距离为2 m时点亮60 W的灯泡[5]。磁耦合谐振式无线电能传输具有传输效率高、传输距离远、传输功率大以及对介质依赖性小等优点[6],为无线电能中等传输距离的研究指明了方向,因此磁耦合谐振式无线电能传输技术的研究立即受到世界各国科学学者的关注。

该项技术的深入研究分析可以为其扩大在多个领域内的实际应用范围提供理论基础的支持。随着该技术越来越深入的研究,其实用价值日益增加,人们已将该技术应用到了各种便携式的移动设备装置中。相信在不久以后,无线电能传输技术必将广泛应用到工业、民用和医疗等各类场所,且具有极大的市场应用价值。

2. 系统模型和理论分析

2.1. 系统模型

本文所研究的磁耦合谐振式无线电能传输的系统结构简化电路模型如图 1 所示。系统由两个具有相同谐振频率的 LC 串联谐振回路组成，考虑到逆变电路的开关损耗，电源具有内阻 R_0 ；由于具有相同的谐振频率，设发射线圈和接收线圈具有相同的电容、电感和电阻，即 $C_S = C_D$, $L_S = L_D$, $R_S = R_D$ ；设接收线圈所接负载为 R_L 。

2.2. 理论分析

本节利用电路理论对所研究的磁耦合谐振式无线电能传输系统的功率传输特性和效率特性进行分析，分析线圈半径对磁耦合谐振式无线电能传输的影响[7]。

2.2.1. 系统功率传输特性

利用 KVL 定律，得到发射线圈和接收线圈中的电流分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{(R_D + R_L + jX_D)\dot{V}_S}{(R_2 + jX_D)(R_1 + jX_S) + (\omega M)^2} \\ \dot{I}_2 = \frac{j\omega M\dot{V}_S}{(R_2 + jX_D)(R_1 + jX_S) + (\omega M)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $X_S = \omega L_S - \frac{1}{\omega C_S}$, $X_D = \omega L_D - \frac{1}{\omega C_D}$,

且：

$$X_D = X_S = X,$$

$$R_1 = R_S + R_0, \quad R_2 = R_D + R_L, \quad R_S = R_D = \frac{l}{4\pi a} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}},$$

M 为发射和接收线圈之间的互感。

$$P_{Load} = |\dot{I}_2|^2 R_L = \left| \frac{j\omega M\dot{V}_S}{(R_2 + jX)(R_1 + jX) + (\omega M)^2} \right|^2 R_L \quad (2)$$

对于同轴平行放置的两线圈，线圈半径分别为 r_1 和 r_2 ，匝数分别为 n_1 和 n_2 ，轴向距离为 D ，它们之间的互感为

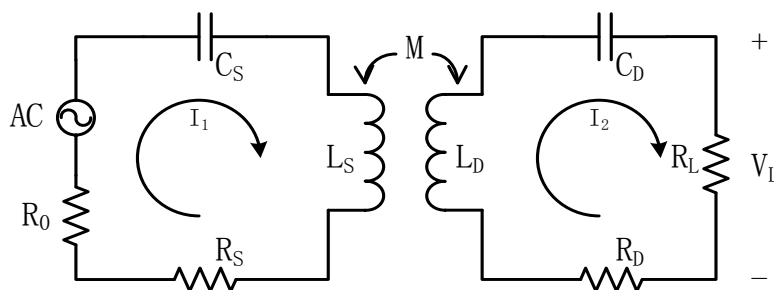


Figure 1. Magnetic coupling resonant radio transmission system simplified model
图 1. 磁耦合谐振无线电能传输系统简化模型

$$M = \mu_0 n_1 n_2 \cdot \sqrt{r_1 \cdot r_2} \cdot b \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2 \sin^2 \theta - 1}{\sqrt{1 - b^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (3)$$

$$\text{式中, } b = \sqrt{\frac{4r_1 \cdot r_2}{(r_1 + r_2)^2 + D^2}}。$$

由该式可知, 对于两同轴放置的线圈, 互感 M 与两线圈之间的轴向距离 D 、线圈匝数 n_1 、 n_2 以及线圈半径 r_1 、 r_2 有关。

对于具有对称结构, 即电路参数相同的发射和接收线圈, 系统满足 $n_1 = n_2 = n$, $r_1 = r_2 = r$, 即可将互感 M 的表达式简化为

$$M = \mu_0 n^2 r \cdot \sqrt{\frac{4r^2}{4r^2 + D^2}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2 \sin^2 \theta - 1}{\sqrt{1 - \frac{4r^2}{4r^2 + D^2} \sin^2 \theta}} d\theta \quad (4)$$

由图 1 所示的等效电路模型可知, 当 $R_L = R_S$, 即满足阻抗匹配时, 该二端口网络实现最大功率传输。所研究的两种线圈半径情况下, 输出功率 P_{Load} 关于电源角频率 ω 和谐振线圈轴向距离 D 的关系曲面分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

由图 2 可以看出, 磁耦合谐振式无线电能传输系统的输出功率在强耦合区, 即临界耦合距离内发生频率分裂现象。且在强耦合区内任一传输距离处, 系统均在分裂谐振频率处达到最大传输功率, 且当系统阻抗匹配, 即 $R_S = R_L$ 时, 所能达到的最大输出功率保持不变。由于线圈电阻存在少许差异, 系统所能达到的最大输出功率分别为 59 W 和 56 W [8]。系统在临界耦合距离处满足条件

$$\frac{\omega M}{R} = 1 \quad (5)$$

结合式(4)可以得到临界耦合距离 D_0 由线圈半径 r , 线圈匝数 n , 线圈导线截面圆半径 a 和电源频率 f 共同决定。

2.2.2. 系统效率特性

系统效率为

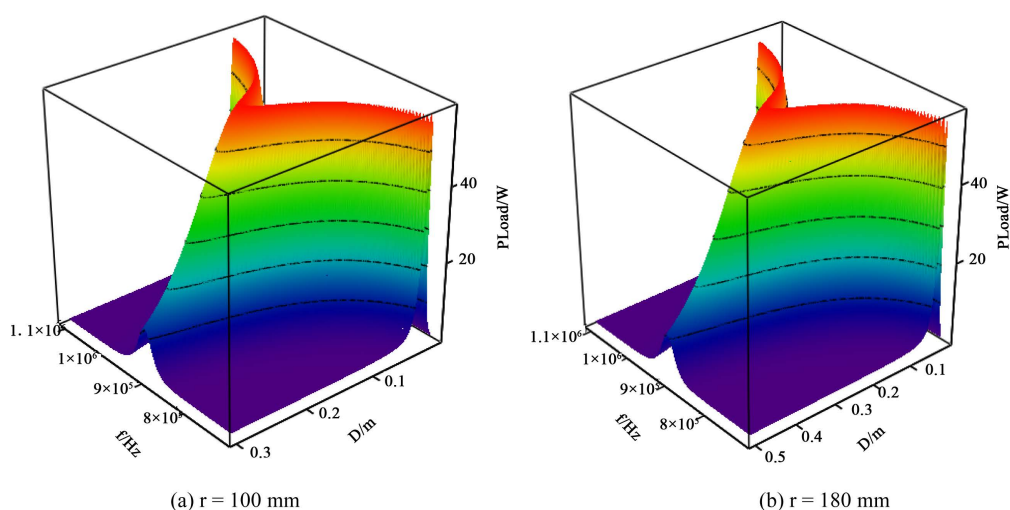


Figure 2. Relational surface diagram of P_{Load} , ω , D
图 2. P_{Load} , ω , D 关系曲面图

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_L}{P_{Total}} = \frac{|i_2|^2 R_L}{|i_1|^2 (R_0 + R_S) + |i_2|^2 (R_D + R_L)} \\ &= \frac{(\omega M)^2 R_L}{\left[(R_D + R_L)^2 + X_D^2 \right] (R_0 + R_S) + (\omega M)^2 (R_D + R_L)} \\ &= \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_2^2 + X^2) R_1 + (\omega M)^2 R_2} \end{aligned} \tag{6}$$

式中， $M = \mu_0 n^2 r \cdot \sqrt{\frac{4r^2}{4r^2 + D^2}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2 \sin^2 \theta - 1}{\sqrt{1 - \frac{4r^2}{4r^2 + D^2} \sin^2 \theta}} d\theta$ 由式(6)可以看出 η 是关于 X 和 D 的表达式，

其所对应两种线圈半径情况下的曲面图如图 3 所示。

由图 3 可以看出，磁耦合谐振式系统效率在固有谐振频率处达到最大值。考虑到两线圈电阻的差异，系统所能达到的最大效率分别达 93% 和 90%。

3. 线圈半径对磁耦合谐振式无线电能传输特性的影响

本文对 100 mm 和 180 mm 两种线圈半径情况下的磁耦合谐振式无线电能传输特性进行分析，通过改变其匝数以保持它们的感量相当。利用有限元软件计算得它们在相同电感情况下的线圈匝数分别为 9 匝和 6 匝。分析线圈半径对输出功率的频率特性和系统效率的距离特性的影响[9]。

3.1. 线圈半径 r 对传输系统两线圈间互感 M 的影响

利用有限元软件计算得到两同轴平行线圈间的互感随距离的变化曲线大致如图 4 所示。

由图 4 可以看出：

- 1) 线圈半径 r 对两线圈间的互感影响很大。在距离不变的情况下，线圈间的互感随线圈半径的增大而增大；
- 2) 随着距离的增大，线圈间的互感均单调减小。从而得到线圈半径 r 和传输距离 D 是影响系统互感的主要因素，这亦可从式(4)中看出。

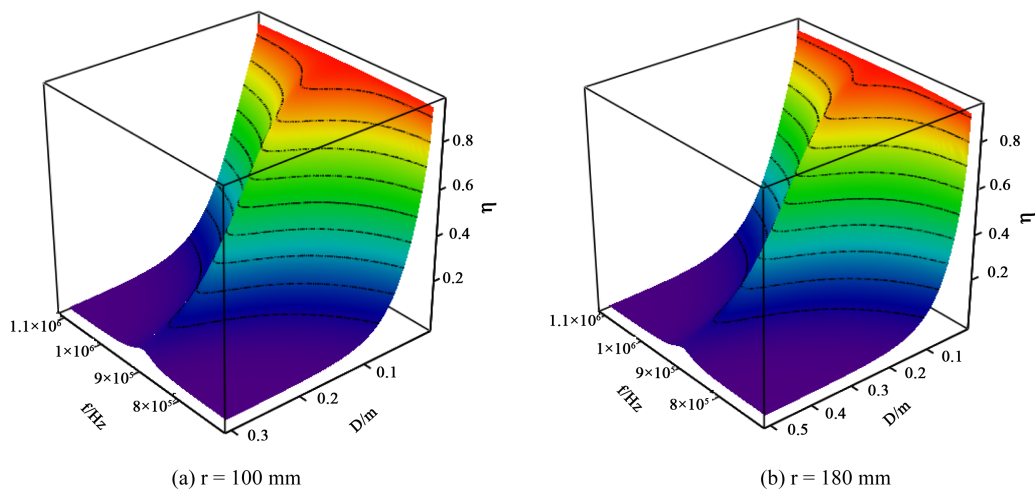


Figure 3. Relational surface diagram of P_{Load} , ω , D
图 3. P_{Load} , ω , D 关系曲面图

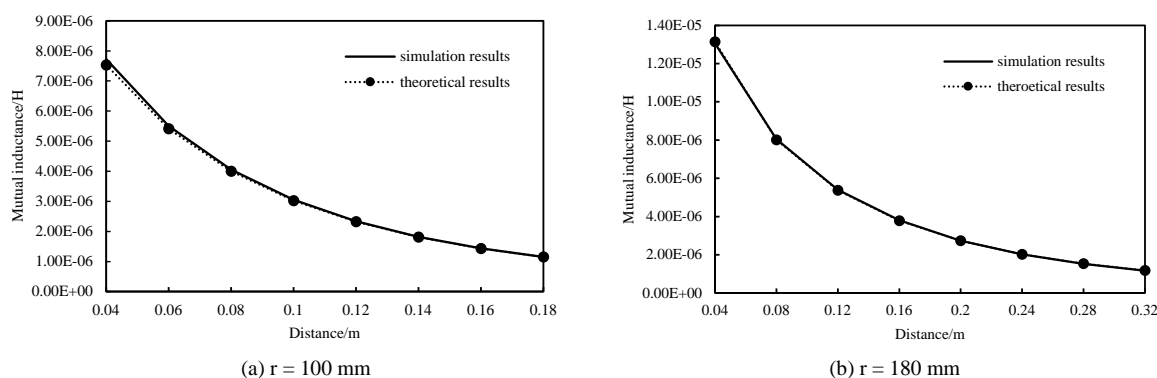


Figure 4. The relationship of mutual inductance and distance between two coils

图 4. 两线圈间互感随距离的关系

3.2. 线圈半径 r 对系统输出功率的频率特性的影响

由式(2)可得, 当电源频率固定为线圈自然谐振频率时, 归一化的输出功率随距离的变化规律如图 5 所示。此外, 还可由式(2)得出, 在不同传输距离时, 所研究两种线圈半径情况下的谐振线圈所对应的归一化输出功率随频率的变化曲线如图 6 所示。

由图 5 可知, 对于所研究的磁耦合谐振系统, 系统分别在 0.16 m 和 0.255 m 处达到临界耦合状态。结合式(5)可知, 在发射和接收线圈参数已经确定的情况下, 系统的有效传输距离主要由线圈半径 r 决定。对照图 4 可知, 当电源频率为 905 kHz 时, 100 mm 和 180 mm 两种线圈半径情况下系统的临界耦合距离所对应的互感均在 1.8~1.9 μH 左右, 与式(5)所得结果一致。结合式(4), 当谐振系统已经确定, 即线圈匝数 n 和临界耦合状态时的互感 M 一定的情况下, 随着线圈半径 r 的增大, 为了维持等式两边相等, 最大功率的有效传输距离也将不断增大, 即谐振系统的有效传输距离随线圈半径的增大而增大。

由图 6(a)和图 6(b)可知: 1、当谐振系统处于强耦合区, 即传输距离小于临界耦合距离时, 系统将发生频率分裂现象; 2、系统的分裂频率均在临界耦合点汇合, 此时的系统谐振频率为线圈自然谐振频率, 且输出功率最大不变; 3、当系统处于弱耦合区时, 系统不发生频率分裂现象, 系统输出功率在自然谐振频率处达到最大值, 且随传输距离的最大而急剧下降; 4、谐振系统的临界耦合距离, 即有效传输距离随线圈半径的增大而增大。

由图 7 可知, 半径分别为 100 mm 和 180 mm 的线圈分别相距 140 mm 和 250 mm 时的发射和接收线圈周围所感应磁场分布利用有限元软件计算得到 100 mm 和 180 mm 两种线圈半径情况下, 系统处于临界耦合状态时, 发射线圈和接收线圈周围所感应磁场的分布情况分别如图 7(s)和(b)所示。从而得到理论分析与有限元计算结果的一致性。

3.3. 线圈半径 r 对系统效率的距离特性的影响

固定电源频率为线圈自然谐振频率, 改变系统传输距离 D , 得到不同线圈半径情况下, 系统效率的理论计算结果和有限元仿真结果随传输距离的变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出:

- 1) 理论计算结果与有限元瞬态仿真结果具有完全一致性, 从而验证了理论分析的正确性;
- 2) 随着传输距离的最大, 系统效率均单 z 减小, 且在同等传输距离的情况下, 线圈半径较大的传输系统具有较大的效率;
- 3) 在同等传输效率情况下, 线圈半径较大的传输具有更远传输距离的能力。

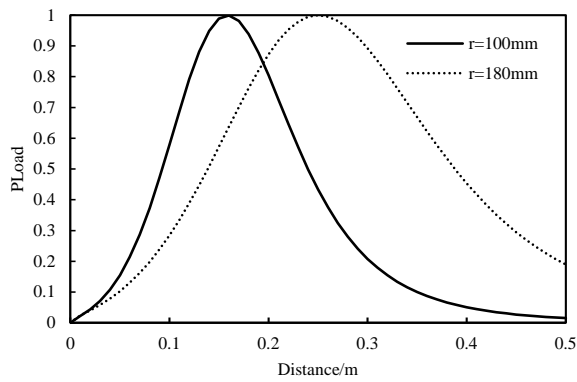


Figure 5. The normalized output power varies with the distance
图 5. 归一化的输出功率随距离的变化规律

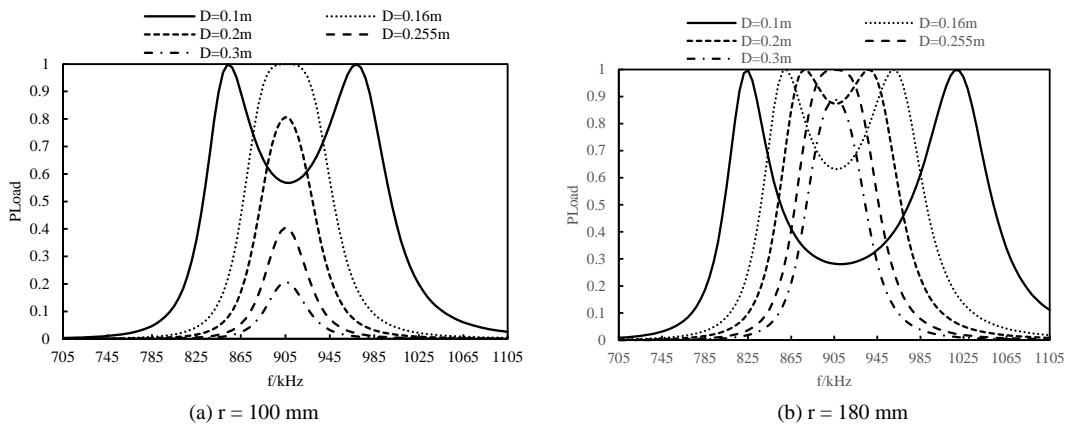


Figure 6. The normalized output power varies with the distance
图 6. 归一化的输出功率随距离的变化规律

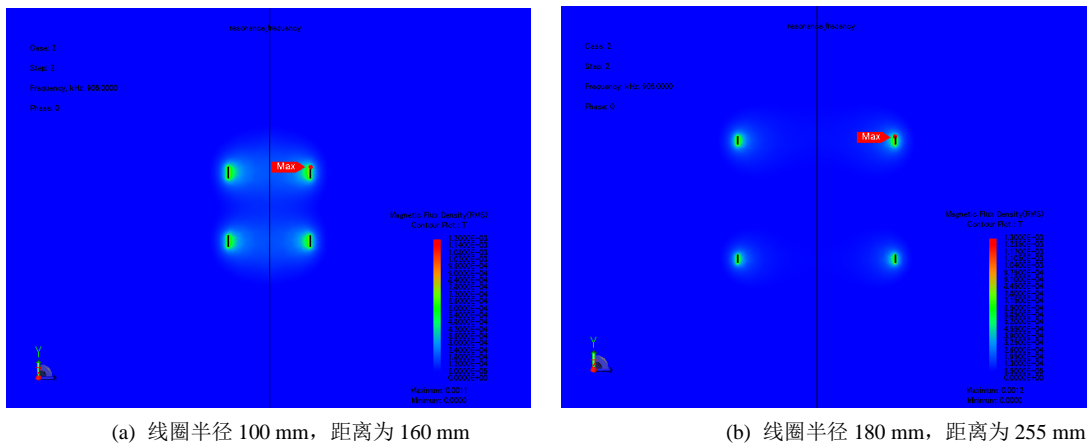


Figure 7. Induced field distribution
图 7. 感应磁场分布

4. 实验分析

基于本文的研究方向，即在谐振线圈电感不变的情况下，线圈半径不同的谐振线圈对有效传输距离的影响，搭建了如图 9 所示的实验装置。

得到了如图 10 所示的实验波形。

5. 结论

由图 10 可知: 线圈半径分别在 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 四种情况下, 负载上接收到的电压在 20 cm、

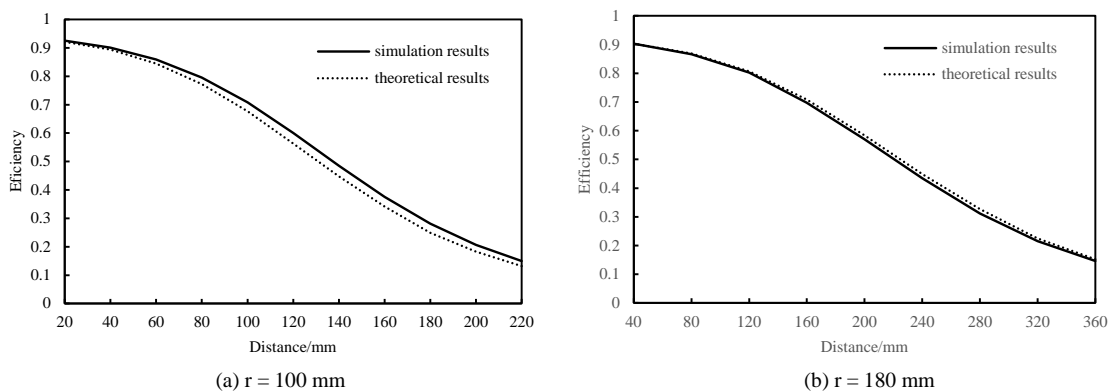


Figure 8. The system efficiency varies with the transmission distance

图 8. 系统效率随传输距离的变化曲线

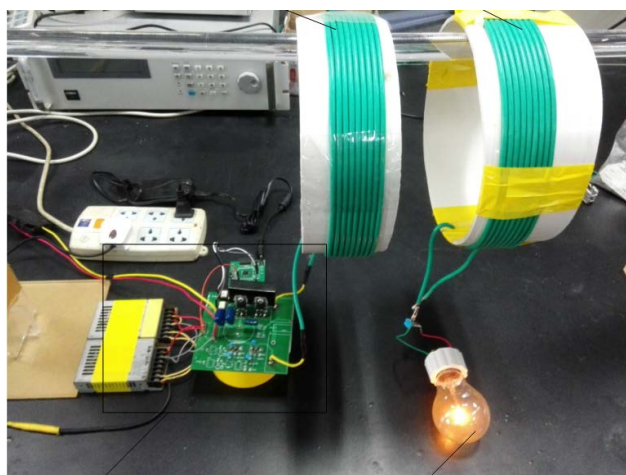


Figure 9. The experimental device

图 9. 实验装置

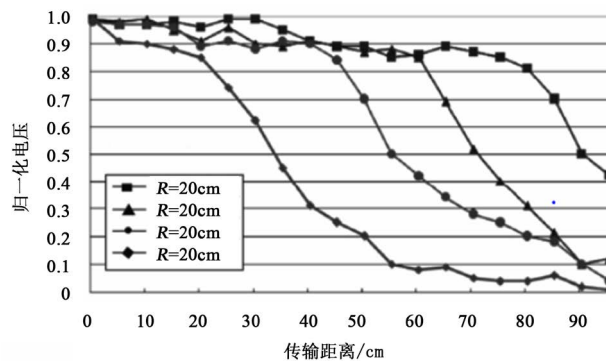


Figure 10. The experimental waveforms

图 10. 实验波形

45 cm、60 cm、75 cm 的距离处开始显著下降；在 20 cm、45 cm、60 cm、75 cm 的距离处负载上接收到的电压分别为最大值的 85%、85%、90%、85%。图中存在一定的误差主要是线圈手工绕制和忽略辐射损耗造成的，因此可以证明有效传输距离与线圈半径成正比。

参考文献

- [1] 王振亚. 谐振式无线电能传输系统的优化设计[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [2] 刘瑞. 小功率磁耦合谐振式无线电能传输特性及其实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [3] 张鹏. 电磁耦合共振式无线电能传输系统的仿真与实验[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
- [4] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13.
- [5] 杨庆新, 陈海燕, 徐桂芝, 等. 无接触电能传输技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 6-13.
- [6] Kaneko, Y. and Abe, S. (2013) Technology Trends of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle and Plug-In Hybrid Electric Vehicle. *IEEE*, 1009-1014. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2013.6527167>
- [7] 杨庆新, 章鹏程, 祝丽花, 等. 无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 1-8.
- [8] 李炜昕, 王灵, 张合, 等. 基于磁耦合谐振的无线能量传输系统[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 637-642.
- [9] 唐治德, 徐阳阳, 赵茂, 等. 耦合谐振式无线电能传输的传输效率最佳频率[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 8-13.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org