

文章编号:1671-251X(2020)04-0054-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019090001

磁耦合谐振式无线电能传输系统传输特性研究

孙翔宇, 龚立娇, 李宏伟, 靳郑伟

(石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)



扫码移动阅读

摘要:针对磁耦合谐振式无线电能传输(MCR-WPT)系统中线圈参数和负载电阻改变对系统传输性能造成的影响,利用两线圈结构的MCR-WPT等效电路模型,推导了系统输出功率和效率表达式,分析了线圈互感、负载电阻与系统输出功率和传输效率的关系,以及线圈线径、匝数与互感的关系;借助COMSOL有限元仿真软件建立线圈三维模型,并搭建多组两线圈MCR-WPT实验系统对理论分析结果进行了验证。研究表明:通过增大收发线圈线径和匝数,可以提高系统输出功率和传输效率,但与线圈线径相比,线圈匝数对传输效率的影响更为明显,而且随着匝数的增加,系统会在更远的传输距离处取得输出功率最大值;随着负载电阻不断增大,系统输出功率和传输效率都呈现先增加后减小的趋势,证明了系统的输出功率和传输效率均存在最大值,但系统输出功率和传输效率达到最大值时的最佳负载不同,即不存在可使输出功率和传输效率同时取最大值的最优负载电阻。

关键词:磁耦合谐振式无线电能传输;输出功率;传输效率;线圈线径;线圈匝数;负载电阻
中图分类号:TD60 **文献标志码:**A

Research on transmission characteristics of magnetically coupled resonant wireless power transfer system

SUN Xiangyu, GONG Lijiao, LI Hongwei, JIN Zhengwei

(Mechanical and Electrical Engineering College, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In view of the influence of coil parameters and load resistance changes on transmission performance of magnetically coupled resonant wireless power transfer(MCR-WPT) system, output power and efficiency of the system are derived using equivalent circuit model of two coil structure MCR-WPT system. The relationship between coil mutual inductance, load resistance and system output power and transmission efficiency, as well as the relationship between coil wire diameter, coil turns and mutual inductance are analyzed. Three-dimensional coil model is established using finite element simulation software COMSOL, and multiple sets of two-coil MCR-WPT experimental systems are built to verify the theoretical analysis results. Research results show that by increasing coil wire diameter and turns, the output power and transmission efficiency of the system can be improved, but the influence of turns on transmission efficiency is more obvious than that of coil wire diameter, and the transmission distance increases when the maximum output power is obtained as the turns increases; as the load resistance continues to increase, the system output power and transmission efficiency both increase first and then decrease, proving that output power and transmission efficiency both have maximum value, but the optimal load is different when the system output power and transmission efficiency reach the maximum

收稿日期:2019-09-02;**修回日期:**2020-03-25;**责任编辑:**胡娴。
基金项目:国家自然科学基金项目(51867021)。
作者简介:孙翔宇(1994—),男,河南淮阳人,硕士研究生,研究方向为电能无线传输,E-mail:1787732758@qq.com。通信作者:龚立娇(1978—),女,甘肃武威人,教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为电能无线传输、新型环境能量采集,E-mail:glj_mac@shzu.edu.cn。
引用格式:孙翔宇,龚立娇,李宏伟,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统传输特性研究[J].工矿自动化,2020,46(4):54-59.
SUN Xiangyu,GONG Lijiao,LI Hongwei,et al. Research on transmission characteristics of magnetically coupled resonant wireless power transfer system[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(4):54-59.

value, that is, there is no optimal load resistance that can maximize the output power and transmission efficiency at the same time.

Key words: magnetically coupled resonant wireless power transfer; output power; transmission efficiency; coil wire diameter; coil turns; load resistance

0 引言

磁耦合谐振式无线电能传输 (Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer, MCR-WPT) 是一种新兴的无线电能传输方式。与感应式无线电能传输方式相比, MCR-WPT 具有传输距离远、抗偏移性强、电磁辐射小等优点; 与微波辐射式无线电能传输方式相比, MCR-WPT 传输性能更优^[1-3]。MCR-WPT 技术除可应用在电动汽车、消费电子等领域外, 也可应用于煤矿、化工、水下环境等特殊场合, 展现出较大的潜力, 因此, 成为近年来的研究热点^[4-6]。文献[7]通过分析不同形状的线圈对系统传输性能的影响, 得出合适形状的耦合线圈, 并分析了线圈参数对线圈品质因数和系统传输性能的影响, 但没有研究负载对系统传输性能的影响。文献[8]从线圈自身属性与线圈参数(品质因数、电感)的关系入手, 分析了线圈参数对系统传输效率影响更大, 但没有讨论线圈参数对系统传输功率的影响。文献[9]保持线圈匝数和半径不变, 对比分析了不同平面结构的谐振线圈对系统传输性能的影响, 但谐振线圈制作较为复杂。文献[10]通过 DC/DC 变换器改变系统的负载, 保证系统处于最优输出功率状态, 但没有分析负载改变对传输效率的影响。

在上述研究基础上, 本文推导了 MCR-WPT 系统输出功率和传输效率与线圈间互感和系统负载的关系, 并分析了线圈结构参数与互感的关系; 探讨了线圈参数和负载电阻改变时系统输出功率和传输效率的变化趋势, 得出在不同传输距离下使系统输出功率最大化的线圈结构参数和负载电阻选择。最后通过实验分析对理论和仿真结果进行了验证。

1 MCR-WPT 系统模型

两线圈结构的 MCR-WPT 系统等效电路模型如图 1 所示。其中, U_s 为高频电源, R_s 为电源内阻, L_1 、 L_2 分别为发射、接收线圈的等效电感, C_1 、 C_2 分别为发射、接收线圈的外接调谐电容, R_1 、 R_2 分别为发射、接收线圈的等效电阻, R_L 为负载电阻, M 为两线圈间的互感, I_1 、 I_2 分别为发射、接收回路电流。

根据基尔霍夫电压定律可列出图 1 所示模型的回路方程^[11-13]:

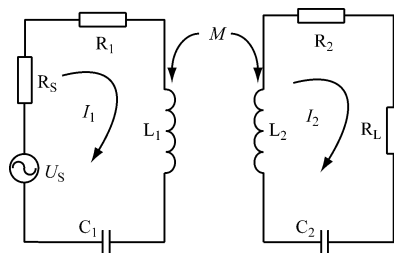


图 1 两线圈结构 MCR-WPT 系统等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of two coil structure MCR-WPT system

$$\begin{cases} (R_s + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1})\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}_s \\ (R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2})\dot{I}_2 - j\omega M\dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω 为角频率。

两线圈谐振时系统的传输效率最高, 此时有

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2)$$

输入功率 P_s 、输出功率 P_L 和传输效率 η 分别为

$$P_s = |\dot{U}_s \dot{I}_1| = \frac{U_s^2 (R_L + R_2)}{(\omega M)^2 + (R_s + R_1)(R_L + R_2)} \quad (3)$$

$$P_L = |\dot{I}_2|^2 R_L = \frac{(\omega M U_s)^2 R_L}{[(\omega M)^2 + (R_s + R_1)(R_L + R_2)]^2} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_s} = \frac{R_L}{R_L + R_2} \frac{(\omega M)^2}{(\omega M)^2 + (R_s + R_1)(R_L + R_2)} \quad (5)$$

平面螺旋线圈各参数间关系为

$$\begin{cases} r_{out} = r_{in} + 2aN \\ r_{avg} = (r_{out} + r_{in})/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: r_{out} 和 r_{in} 分别为线圈外径和内径; a 为导线的线径; N 为线圈匝数; r_{avg} 为线圈平均半径。

平面螺旋线圈的电感值 L 可由经验公式获得^[14]:

$$\begin{cases} L = \frac{\mu_0 N^2 r_{avg}}{2} \ln\left(\frac{2.46}{q} + 0.2q^2\right) \\ q = \frac{r_{out} - r_{in}}{r_{out} + r_{in}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; q 为填充系数。

当接收线圈与发射线圈的结构参数相同并同轴且平行放置时, 平面螺旋线圈间互感为^[8]

$$M = \frac{\mu_0 \pi N^2 r_{\text{avg}}^4}{2(\sqrt{D^2 + r_{\text{avg}}^2})^3}$$

(8)

式中 D 为线圈之间的传输距离。

综合式(4)、式(5)、式(8)可知,对线圈间的互感和负载进行优化,可提升系统的传输性能;线圈间的互感主要由线圈匝数、线圈的平均半径及线圈间的传输距离决定。对于利兹线,线圈的平均半径由线圈线径和匝数共同决定。

2 有限元仿真研究

2.1 参数设置及建模过程

为了验证理论分析的正确性,利用 COMSOL 有限元仿真软件对使用利兹线制作的不同结构参数的平面螺旋线圈产生的磁场进行数值分析和计算,得到系统发射、接收线圈各自发生谐振时的磁通密度。

首先在 COMSOL5.3 中建立空白的三维模型,物理场选择“AC/DC 模块”-“磁场”-“频域”。定义全局参数:工作频率 $f=6.8\text{ MHz}$,电源电压有效值 $U_s=100\text{ V}$ 。线圈构建部分,选择 z 坐标为 50 mm 的 xy 工作平面,在该平面构建半径为 100 mm 的圆,该圆的厚度参考线圈线径和匝数进行设置;发射线圈的自身厚度根据线圈线径进行拉伸构建,再通过设置该工作平面的对称镜像,获得发射、接收线圈的三维几何模型。在三维模型中构建一个半径为 300 mm 的球体空气域,将线圈模型包围起来。线圈三维模型参数见表 1。

表 1 线圈三维模型参数

Table 1 Coil 3D model parameters

项目	参数
线圈材料	铜
导线模型	均匀多匝(即密绕不带匝距)
线圈类型	数值
线圈激励	电路(电流)激励
外部电路耦合机构	外部电流 vs 电压
网格单元尺寸	细化

2.2 线圈线径对传输性能的影响

设定系统模型的线圈匝数 $N=10$,负载 $R_L=100\text{ }\Omega$,调节线圈线径 a ,并调节传输距离 D (参数扫描区间为 $100\sim 200\text{ mm}$,间隔为 10 mm)。不同线径线圈仿真参数见表 2,系统的磁通密度与线圈线径的关系及线径对系统传输特性的影响分别如图 2、图 3 所示。

由图 2 可知,线圈线径较大、传输距离较小时,系统接收侧线圈与坐标平面接触的地方颜色更

表 2 不同线径线圈仿真参数

Table 2 Simulation parameters of coils with different wire diameters

线圈编号	a/mm	r_{avg}/mm	r_{in}/mm	$L/\mu\text{H}$
I	0.89	191.1	182.2	45.39
II	1.10	189.0	178.0	43.31
III	1.26	187.4	174.8	40.68

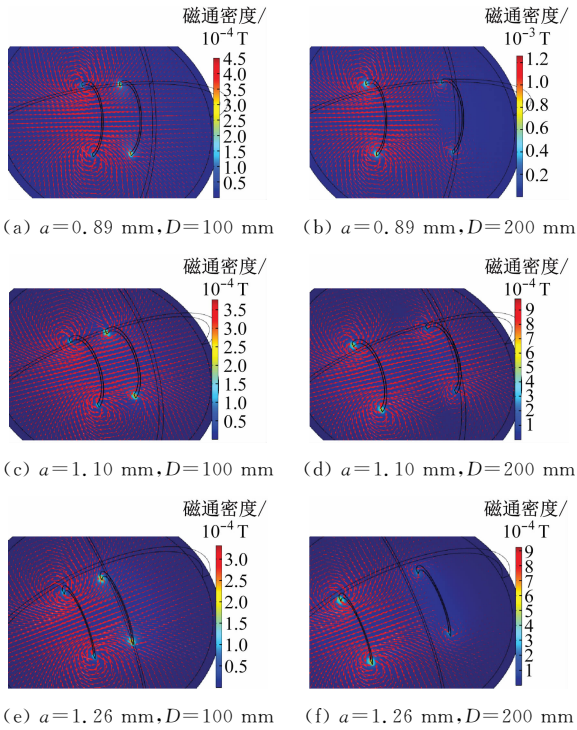


图 2 系统的磁通密度与线圈线径的关系

Fig. 2 Relationship between system magnetic flux density and coil wire diameter

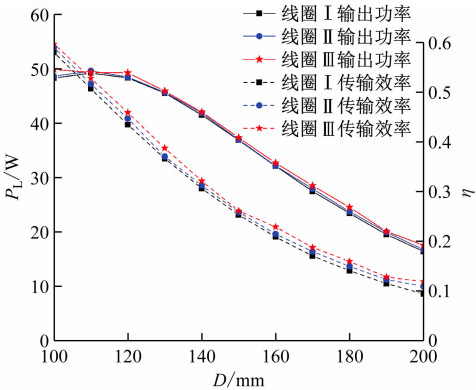


图 3 线圈线径对系统传输特性的影响

Fig. 3 Influence of coil wire diameter on system transmission characteristics

“亮”,说明线圈线径较大时,接收线圈的磁通量较大,并且其内部产生的感应电动势也较大,系统传输性能较好。由图 3 可知,系统的输出功率、传输效率均随着线圈线径增大、传输距离减小而增大,但是线径对系统性能的影响较小。由式(4)、式(5)、式(8)

可推导出,增大线圈线径、减小传输距离可以增大线圈间的互感,进而提高系统输出功率和传输效率。仿真结果和理论分析结果一致。

2.3 线圈匝数对传输性能的影响

设定线圈线径 $a=1.26\text{ mm}$,负载 $R_L=100\text{ }\Omega$ 不变,调节线圈匝数 N 和传输距离 D 。不同匝数的线圈仿真参数见表 3,系统磁通密度与线圈匝数的关系及匝数对系统传输特性的影响分别如图 4、图 5 所示。

表 3 不同匝数线圈仿真参数

Table 3 Simulation parameters of coils with different coil turns				
线圈编号	N	r_{avg}/mm	r_{in}/mm	$L/\mu\text{H}$
Ⅲ	10	187.40	174.80	40.68
Ⅳ	14	182.36	164.72	70.36
Ⅴ	18	177.32	154.64	104.24

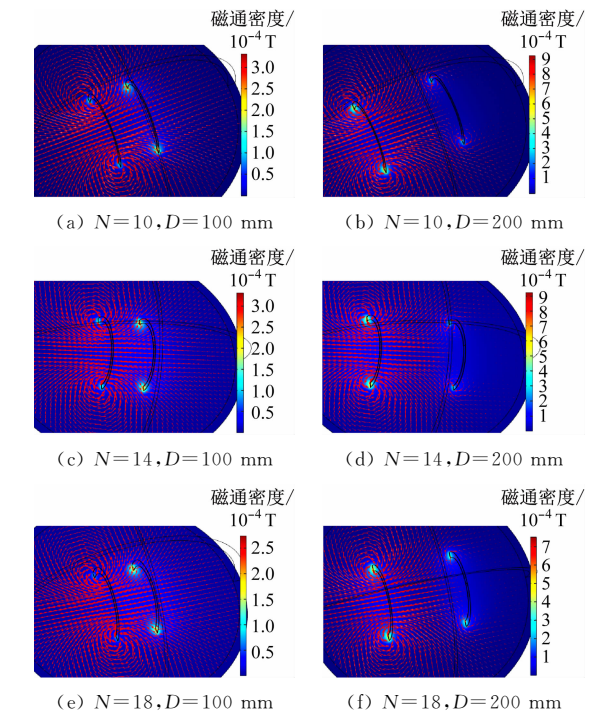


图 4 系统磁通密度与线圈匝数的关系

Fig. 4 Relationship between system magnetic flux density and coil turns

由图 4 可知,传输距离为 200 mm 时,线圈匝数为 18 的系统接收侧线圈与坐标平面接触的地方颜色更“亮”,说明增大线圈匝数会增大接收线圈的磁通量,进而影响到系统的传输性能。由图 5 可知,线圈匝数为 10 时,系统输出功率随着传输距离增大而减小;线圈匝数为 14 和 18 时,系统输出功率随着传输距离增大而先增大后减小;系统传输效率随着传输距离增大而减小。随着线圈匝数增大,系统会在更远的传输距离处取得输出功率最大值,当传输距

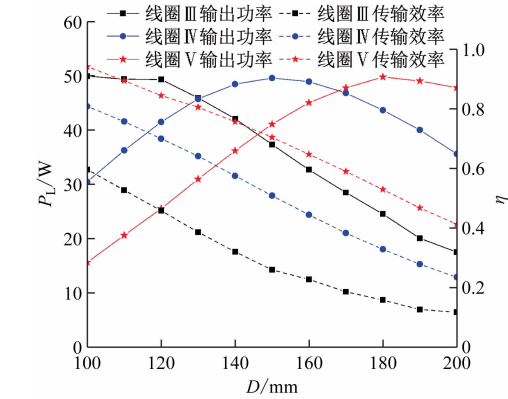


图 5 线圈匝数对系统传输特性的影响

Fig. 5 Influence of coil turns on system transmission characteristics

离较远时,采用较多匝数线圈,系统传输性能更好。

由式(8)可推导出,线圈线径和匝数固定时存在最佳传输距离,可以得到最大的互感值及系统最大输出功率。线圈线径 $a=1.26\text{ mm}$ 、匝数 $N=10$ 、传输距离 $D=180\text{ mm}$ 时,系统最大输出功率为 49.8 W,此时传输效率为 52.9%。

2.4 负载电阻对传输性能的影响

设定线圈线径 $a=1.26\text{ mm}$,匝数 $N=18$,传输距离 $D=180\text{ mm}$,调节系统负载 R_L (参数扫描区间为 20~600 Ω ,间隔为 20 Ω),系统磁通密度和传输特性与负载电阻的关系如图 6、图 7 所示。

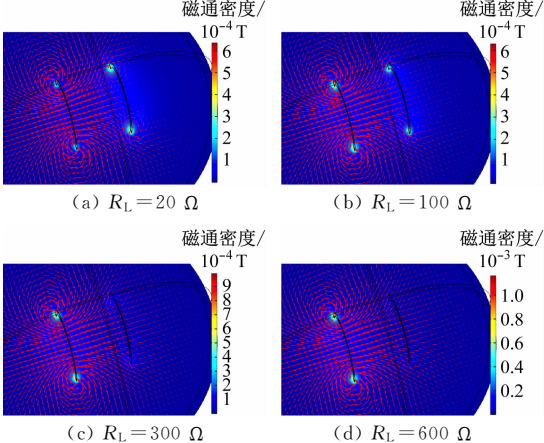


图 6 系统磁通密度与负载电阻的关系

Fig. 6 Relationship between system magnetic flux density and load resistance

从图 6 可知,随着负载电阻增大,系统接收侧线圈与坐标平面接触的地方颜色变“暗”,说明随着负载电阻增大,接收线圈的磁通量逐渐减小,系统传输性能随之降低。从图 7 可知,随着负载电阻不断增大,系统输出功率和传输效率都呈现先增加后减小的趋势,证明了系统的输出功率和传输效率均存在最大值。负载电阻约为 80 Ω 时,系统输出功率达到最大值 49.96 W;负载电阻约为 20 Ω 时,系统传输效率取得最大值,约为 0.7。这说明 MCR-WPT 系

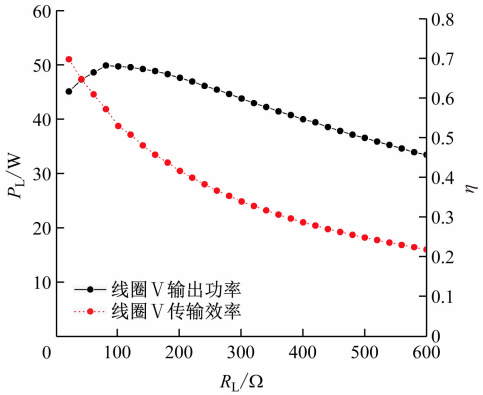


图 7 系统传输特性与负载电阻的关系

Fig. 7 Relationship between system transmission characteristics and load resistance

统中不存在可使输出功率和传输效率同时取最大值的最优负载电阻。

3 实验验证

为了验证理论和仿真分析的正确性,搭建了两线圈 MCR-WPT 实验系统,如图 8 所示。实验中的发射、接收线圈使用利兹线绕制。为保证两线圈具有相同的谐振频率,在实验前利用阻抗分析仪 LCR-8100G 测量平面螺旋线圈的电感值 L ,结果见表 4。

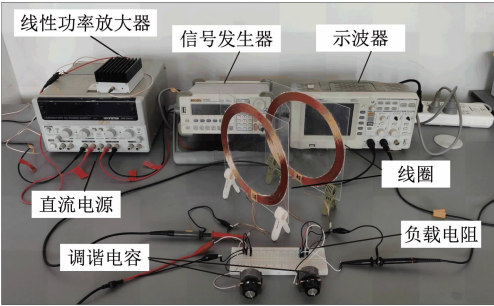


图 8 实验系统

Fig. 8 Experimental system

表 4 实验线圈参数

Table 4 Experimental coil parameters

绕线规格	线圈编号	a/mm	N	$L/\mu\text{H}$
0.2 mm×20 股	I	0.89	10	49.66
0.2 mm×30 股	II	1.10	10	46.59
0.2 mm×40 股	III	1.26	10	42.91
0.2 mm×40 股	IV	1.26	14	74.65
0.2 mm×40 股	V	1.26	18	111.93

用阻抗分析仪测量线圈 V 频率在 3~10 MHz 范围内时的动态阻抗特性,得到阻抗模、阻抗角曲线,如图 9 所示。频率为 8 MHz 时,阻抗显感性,阻抗模达到最大值 19.96 kΩ,阻抗角为 51.64°。

采用不同谐振线圈时的系统传输特性如图 10

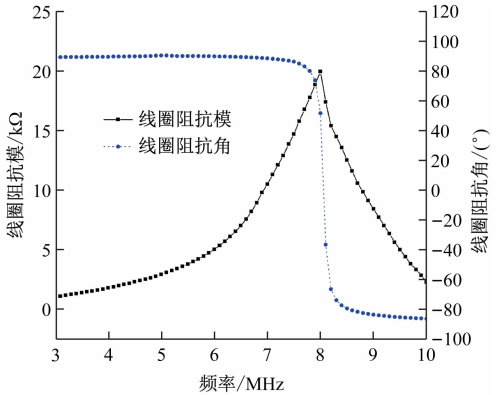
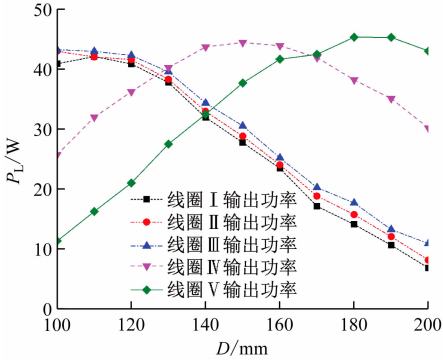


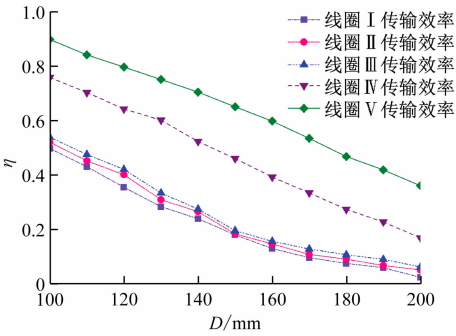
图 9 线圈阻抗曲线

Fig. 9 Coil impedance curves

所示。从图 10(a)可知,随着线圈线径的改变,系统输出功率最大值变化不大;随着线圈匝数增加,系统会在更远的传输距离处取得输出功率最大值。从图 10(b)可知,系统传输效率随着线圈线径、匝数增大及传输距离减小而增大。实验结果与仿真分析结果具有较好的一致性。因为实验中所用的线圈是纯手工绕制,与仿真模型中的理想化多匝线圈几何模型存在偏差,所以实验和仿真结果存在一些差异;另外,由于实验过程中存在仪器损耗,导致实验数据略小于仿真结果。



(a) 输出功率



(b) 传输效率

图 10 采用不同谐振线圈时的系统传输特性

Fig. 10 System transmission characteristics when using different resonance coils

4 结论

(1) 发射、接收线圈匝数相同时,通过增大线圈

线径可以提高系统输出功率和传输效率,但是效果甚微。

(2) 发射、接收线圈线径相同时,通过增加线圈匝数可以有效提高传输效率,并且随着匝数的增加,系统会在更远的传输距离处取得输出功率最大值时,从而扩大了系统传输的有效范围。

(3) 随着负载电阻不断增大,系统输出功率和传输效率都呈现先增加后减小的趋势,证明了系统的输出功率和传输效率均存在最大值,但系统输出功率和传输效率达到最大值时的最佳负载不同,即不存在可使输出功率和传输效率同时取最大值的最优负载电阻。

参考文献(References):

[1] 黄学良,王维,谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):2-14.
HUANG Xueliang, WANG Wei, TAN Linlin. Technical progress and application development of magnetic coupling resonant wireless power transfer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2):2-14.

[2] 王娜,唐堂,张兆东,等. 磁耦合谐振式无线能量传输效率分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015,16(5):413-417.
WANG Na, TANG Tang, ZHANG Zhaodong, et al. Efficiency of wireless power transfer based on magnetic coupling resonance [J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2015,16(5):413-417.

[3] 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.
YANG Qingxin, ZHANG Pengcheng, ZHU Lihua, et al. Key fundamental problems and technical bottlenecks of the wireless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(5):1-8.

[4] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007,317:83-86.

[5] KARALIS A, JOANNOPOULOS J D, SOLJAČIĆ M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer[J]. Annals of Physics, 2007,323(1):34-48.

[6] 诸嘉慧,高强,刘齐,等. 谐振式 WPT 耦合线圈形状设计与参数优化[J]. 电工电能新技术,2019,38(7):67-72.
ZHU Jiahui, GAO Qiang, LIU Qi, et al. Design and parameter optimization on coupling coil in wireless

power transfer system via magnetic resonance [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019,38(7):67-72.

[7] 杜玉洁,刘宜成,涂海燕. 平面螺旋线圈的无线电能传输特性研究[J]. 电子测量技术,2017,40(8):48-52.
DU Yujie, LIU Yicheng, TU Haiyan. Study on transfer characteristics of planar spiral coil in wireless power transfer system [J]. Electronic Measurement Technology, 2017,40(8):48-52.

[8] 赵智忠,陈辉,李艳红,等. 谐振式无线电能传输线圈结构优化与实验研究[J]. 电力电子技术,2018,52(5):48-50.
ZHAO Zhizhong, CHEN Hui, LI Yanhong, et al. Optimization and experimental study of coil structure of resonant wireless power transmission [J]. Power Electronics, 2018,52(5):48-50.

[9] 贺养养,雷鸣,付永升,等. 无线充电系统负载功率特性研究[J]. 国外电子测量技术,2018,37(2):21-24.
HE Yangyang, LEI Ming, FU Yongsheng, et al. Research on load power characteristics of wireless charging system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018,37(2):21-24.

[10] FOTOPOULOU K, FLYNN B W. Wireless power transfer in loosely coupled links: coil misalignment model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011,47(2):416-430.

[11] 兰永均,龚立娇,蔡新红,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率特性分析[J]. 工矿自动化,2016,42(5):67-70.
LAN Yongjun, GONG Lijiao, CAI Xinhong, et al. Analysis of frequency characteristics of magnetic coupled resonant wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(5):67-70.

[12] ZHONG W, LEE C K, HUI S Y R. General analysis on the use of Tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(1):261-270.

[13] 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]. Journal of Engineering Design, 2008(2):149-153.

[14] 田子建,曹阳阳,樊京,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功率优化[J]. 工矿自动化,2016,42(6):33-37.
TIAN Zijian, CAO Yangyang, FAN Jing, et al. Transmission power optimization of magnetic resonance coupling wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(6):33-37.