

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210666

# 三线圈 MCR-WPT 系统中继线圈轴向位置的优化研究<sup>\*</sup>

赵永秀 万光一 王亚辉 魏艺超

(西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710054)

**摘要:** 探究三线圈磁耦合谐振式无线电能传输系统中继线圈的最优轴向位置对优化系统传输性能至关重要,为此深入研究三线圈 MCR-WPT 系统的传输特性,应用电路互感耦合理论结合同轴线圈互感计算方法得出了系统最大功率和最大效率传输条件;基于上述最优传输条件,对宽负载范围内中继线圈轴向偏移对系统传输特性的影响进行了电磁仿真。仿真结果表明:中继线圈传输功率和传输效率的最优轴向位置与负载有关,均随负载的增大向接收线圈一侧偏移,当电源内阻与负载相等,中继线圈位于耦合机构中间位置时系统可获得最大传输功率,靠近发射线圈一侧时可获得最大传输效率。最后,搭建了三线圈 MCR-WPT 系统实验平台,实验验证了理论与仿真的正确性。

**关键词:** 中继线圈;磁耦合谐振;最优轴向位置;传输特性

中图分类号: TM724 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4031

## Optimization research on the axial position of the relay coil in the three-coil MCR-WPT system

Zhao Yongxiu Wan Guangyi Wang Yahui Wei Yichao

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science &amp; Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Exploring the optimal axial position of the relay coil of the three-coil magnetic coupling resonant wireless power transmission system is very important to optimize the transmission performance of the system. To this end, the transmission characteristics of the three-coil MCR-WPT system are deeply studied, the maximum power and maximum efficiency transmission conditions of the system are obtained by applying the circuit mutual inductance coupling theory combined with the coaxial coil mutual inductance calculation method. Based on the above optimal transmission conditions, the electromagnetic simulation of the influence of the axial offset of the relay coil on the transmission characteristics of the system in a wide load range is carried out. The simulation results show that the optimal axial position of the relay coil transmission power and transmission efficiency is related to the load, and both shift to the receiving coil side with the increase of the load. When the internal resistance of the power supply is equal to the load, the system can obtain the maximum transmission power when the relay coil is located in the middle of the coupling mechanism, and the system can obtain the maximum transmission efficiency when it is close to one side of the transmitting coil. Finally, a three-coil MCR-WPT system experimental platform is built, and the experiment verifies the correctness of the theory and simulation.

**Keywords:** relay coil; magnetic coupling resonance; optimal axial position; transmission characteristics

## 0 引言

磁耦合谐振式无线电能传输(magnetic coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)技术是一种利用高频电磁场实现电能的非接触传输技术,由于其突破了传统有线式

电能传输的局限性,近年来已成为国内外研究热点<sup>[1]</sup>。相比电磁感应式和微波辐射式无线电能传输技术,该技术有着传输距离远、辐射小、传输效率高、可穿透非磁性障碍物等优点<sup>[2-3]</sup>,现已广泛应用于各类消费电子产品、医疗设备的无线充电<sup>[4]</sup>,以及电动汽车<sup>[5-6]</sup>的大功率无线充电应用中。

收稿日期:2022-07-13

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(51777167,51604217)、陕西省教育厅自然科学基金(19JK0529,19JK0545)项目资助

由于这种技术是通过两个具有相同固有频率的线圈之间高频电磁场的耦合来实现能量的传递,因此其传输距离将受到限制。研究发现双线圈磁耦合谐振系统存在一个临界耦合距离,若线圈间距超出该值,线圈间耦合程度迅速减弱,系统传输功率和传输效率将迅速下降<sup>[7-9]</sup>。为提高中程距离的无线电能传输效率和传输功率,应用最广泛的是在 WPT 系统中引入中继谐振线圈<sup>[10-12]</sup>,对于引入单中继线圈的三线圈 WPT 系统,石河子大学和中南大学研究团队重点研究了系统的频率分裂特性和耦合机理<sup>[13-14]</sup>,但并未给出系统传输性能优化方法,西南交通大学陈飞彬等<sup>[15-16]</sup>分别采用调频控制和双线圈与三线圈结构切换的方法解决了三线圈系统在过耦合状态下由于交叉耦合效应导致的效率降低问题,但并未考虑系统临界耦合及欠耦合状态的传输效率问题,中国矿业大学刘旭等<sup>[17]</sup>利用切换中继线圈补偿电容的方法使系统在不同负载工况下可始终工作在最大效率点,但切换方法复杂且未关注系统的传输功率。

因此,为在不同负载工况下快捷提高系统的传输性能,本文提出了在系统传输距离固定的情况下,调整中继线圈轴向位置以提高系统传输性能的方法。应用电路理论和互感耦合理论建立三线圈 MCR-WPT 系统能量传输模型,推导其最大功率和最大效率传输条件;探究了临界耦合状态下宽负载范围内中继线圈轴向偏移对系统传输性能的影响,以此找到中继线圈的最优轴向位置,根据实际应用需求提高系统传输效率或传输功率。

## 1 理论分析

### 1.1 系统原理与模型结构

三线圈 MCR-WPT 系统由信号发生器产生高频正弦信号(频率与线圈固有频率一致)驱动功率放大电路中的开关管,由功率放大电路进行功率放大并产生高频电流信号激励发射线圈,在三线圈之间因固有频率一致且达到谐振状态而建立起较强的高频电磁场,接收线圈在高频电磁场下感应出电流,因此能量传递到接收端,最后经后级整流滤波和 DC-DC 稳压电路后给负载供电,系统工作原理如图 1 所示。

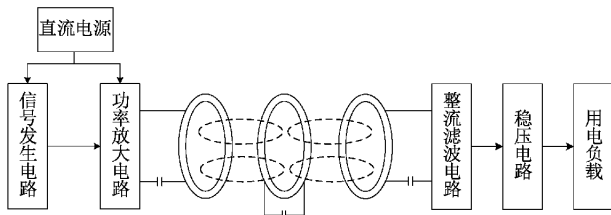


图 1 磁耦合谐振式无线电能传输系统工作原理

图 2 为三线圈 MCR-WPT 系统的等效电路模型,其中  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  分别为发射线圈、中继线圈和接收线圈的回路电流; $M_{12}$ 、 $M_{23}$  分别为中继线圈与发射线圈和接收线圈的互感;发射线圈和接收线圈互感系数  $M_{13}$  相对较小可忽略不计; $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为发射线圈、中继线圈和接收线圈的等

效电阻; $R_s$  为高频信号源内阻; $R_L$  为接收端负载; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为发射线圈、中继线圈和接收线圈的调谐电容(为最大化传输电能,各线圈均采用串联谐振方式接入谐振电容); $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为 3 个线圈的电感值。为方便计算,定义  $R'_1=R_1+R_s$ 、 $R'_2=R_2$ 、 $R'_3=R_3+R_L$ 。

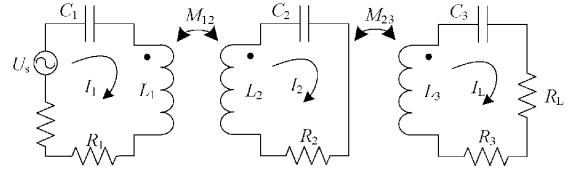


图 2 三线圈 MCR-WPT 系统等效电路图

根据基尔霍夫定律和互感耦合理论可得到矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_{12} & 0 \\ -j\omega M_{12} & Z_2 & j\omega M_{23} \\ 0 & j\omega M_{23} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

谐振状态下  $\omega$  既为系统角频率也为线圈固有角频率,  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}}$ , 矩阵方程中  $Z_i = R'_i + j(\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i})$ ,  $i=1,2,3$ , 解上式矩阵方程可得三线圈回路电流分别为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{[\omega^2 M_{23}^2 + R'_3] \dot{U}_s}{\omega^2 [M_{23}^2 R'_1 + M_{12}^2 R'_3] + R'_1 R'_2 R'_3} \\ \dot{I}_2 &= \frac{\omega^2 M_{12} R'_3 \dot{U}_s}{\omega^2 [M_{23}^2 R'_1 + M_{12}^2 R'_3] + R'_1 R'_2 R'_3} \\ \dot{I}_3 &= \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} \dot{U}_s}{\omega^2 [M_{23}^2 R'_1 + M_{12}^2 R'_3] + R'_1 R'_2 R'_3} \end{aligned} \quad (2)$$

此时系统的传输功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  分别为:

$$\begin{cases} P_L = |\dot{I}_3|^2 R_L = \frac{\omega^4 M_{12}^2 M_{23}^2 U_s^2 R_L}{[\omega^2 (M_{23}^2 R'_1 + M_{12}^2 R'_3) + R'_1 R'_2 R'_3]^2} \\ \eta = \frac{|\dot{I}_3|^2 R_L}{|\dot{U}_s \dot{I}_1|} = \frac{\omega^4 M_{12}^2 M_{23}^2 R_L}{[\omega^2 (M_{23}^2 R'_1 + M_{12}^2 R'_3) + R'_1 R'_2 R'_3][\omega^2 M_{23}^2 + R'_2 R'_3]} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知若线圈结构参数一定,三线圈 MCR-WPT 系统在谐振状态下的传输功率和传输效率仅与互感  $M_{12}$ 、 $M_{23}$  和负载  $R_L$  有关。

### 1.2 三线圈结构互感分析

当三线圈同轴放置时,发射线圈与中继线圈及中继线圈与接收线圈之间互感  $M_{12}$  和  $M_{23}$  可分别由式(4)和(5)表示:

$$M_{12} = \frac{\pi \mu_0 r_1^2 r_2^2 \sqrt{N_1 N_2}}{2d_{12}^3} \quad (4)$$

$$M_{23} = \frac{\pi\mu_0 r_2^2 r_3^2 \sqrt{N_2 N_3}}{2(D - d_{12})^3} \quad (5)$$

其中,  $r_1, r_2, r_3$  和  $N_1, N_2, N_3$  分别为发射、中继及接收线圈的外半径和匝数,  $d_{12}$  和  $D$  分别为中继线圈与发射线圈的间距和系统总传输距离,  $\mu_0$  为真空磁导率。

上式表明在三线圈 MCR-WPT 系统中, 在线圈尺寸、匝数等内部结构参数确定的情况下, 两耦合线圈之间的互感值与线圈间距相关, 即可通过调整中继线圈与发射线圈和接收线圈的距离来调整三线圈之间互感值使系统传输性能达到最优。

### 1.3 系统最佳传输特性分析

利用 1.1 节式(3)中得到的系统传输功率和传输效率表达式分别令  $\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = 0$  和  $\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0$  可得到系统获得最大传

$$\frac{\partial R_{Lopt2}}{\partial M_{12}} = \frac{-\{[(\omega M_{23})^2 + R'_2 R_3] R'_1 M_{23}^2 M_{12} \omega^4\}}{\sqrt{R'_2 [(\omega M_{12})^2 + R'_1 R'_2] [(\omega M_{23})^2 + R'_2 R_3] [R'_1 R'_2 R_3 + \omega^2 (M_{12}^2 R_3 + M_{23}^2 R'_1)] [(\omega M_{12})^2 + R'_1 R'_2]}} < 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial R_{Lopt2}}{\partial M_{23}} = \frac{\omega^2 M_{23} [(\omega M_{12})^2 R_3 + 2(\omega M_{23})^2 R'_1 + 2R'_1 R'_2 R_3]}{\sqrt{R'_2 [(\omega M_{12})^2 + R'_1 R'_2] [(\omega M_{23})^2 + R'_2 R_3] [R'_1 R'_2 R_3 + \omega^2 (M_{12}^2 R_3 + M_{23}^2 R'_1)]}} > 0$$

由式(8)可得系统效率的最优负载  $R_{Lopt2}$  与  $R_{Lopt1}$  相似, 随  $M_{23}$  的减小而减小, 随  $M_{12}$  的减小而增大。联立式(4)、(5)和式(6)、(7)可得到系统传输功率和传输效率的最优负载与中继线圈轴向位置的关系如图 3 所示。

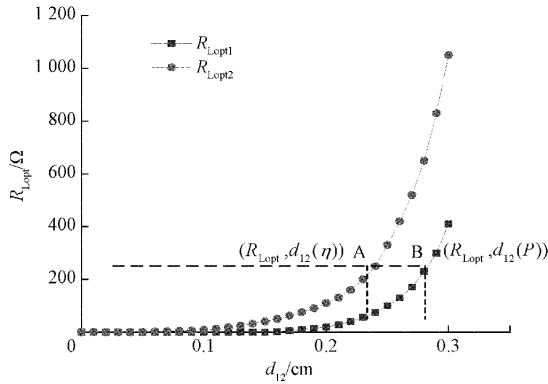


图 3 最优负载与中继线圈轴向位置的关系

显然  $R_{Lopt2}$  的增长率明显高于  $R_{Lopt1}$ , 控制变量法分析图 3, 当中继线圈位置确定, 即  $d_{12}$  为定值时,  $R_{Lopt2}$  始终大于  $R_{Lopt1}$ , 三线圈系统不存在令传输功率和传输效率同时达到最大的最优负载; 当负载为定值时, 做平行于 X 轴的直线与两曲线相交, 交点 A、B 坐标如图所示, 其中  $d_{12}(\eta)$  和  $d_{12}(P)$  分别为该负载值下, 系统获得最大传输效率和最大传输功率时中继线圈与发射线圈间的距离, 明显恒有  $d_{12}(\eta) < d_{12}(P)$ , 即系统获得最大传输效率相比获得最大传输功率的中继线圈位置更靠近发射线圈一侧。

## 2 有限元仿真研究与验证

本文利用 COMSOL 有限元仿真软件的 AC-DC 中的

输功率和最大传输效率所对应的最优负载  $R_{Lopt1}$  和  $R_{Lopt2}$ 。

$$R_{Lopt1} = R_3 + \frac{(\omega M_{23})^2 R'_1}{(\omega M_{12})^2 + R'_1 R'_2} \quad (6)$$

$$R_{Lopt2} = \sqrt{\frac{[(\omega M_{23})^2 + R'_2 R_3] [R'_1 R'_2 R_3 + \omega^2 (M_{12}^2 R_3 + M_{23}^2 R'_1)]}{R'_2 [(\omega M_{12})^2 + R'_1 R'_2]}} \quad (7)$$

式(6)和(7)即为三线圈系统的最大功率和最大效率传输条件。由式(6)可得当线圈等效电阻足够小且  $M_{12} = M_{23}$  时, 传输功率的最佳负载  $R_{Lopt1}$  近似与信号源内阻  $R_s$  相等, 且  $R_{Lopt1}$  与  $M_{23}$  变化同向, 与  $M_{12}$  变化反向, 随着负载增大, 若达到最优负载值, 需满足  $M_{12} < M_{23}$ , 即当  $R_L > R_s$  时, 中继线圈靠近接收线圈一侧系统可获得最大传输功率。为得到  $R_{Lopt2}$  与线圈之间互感的关系, 对式(7)关于互感  $M_{12}$  和  $M_{23}$  求偏导可得:

磁场和电路模块对三线圈 MCR-WPT 系统进行了电磁仿真分析。基于图 2 建立仿真电路, 三线圈匝数均为 20 匝, 线圈半径均为 15 cm, 导线直径 2 mm, 传输距离  $D$  为 45 cm (该系统模型的临界耦合距离), 系统谐振频率 6.7 MHz, 激励源为有效值为 100 V 的正弦交流电压源, 电压源内阻  $R_s$  为 50 Ω, 负载  $R_L$  初始值为 50 Ω, 忽略线圈等效电阻。

定义  $d_1$  为中继线圈偏离耦合结构中心位置的轴向偏移距离, 当偏向发射线圈一侧时为负值, 偏向接收线圈一侧时为正值, 调节中继线圈轴向偏移距离  $d_1$  (参数扫描区间在 -20~20 cm, 步长为 2 cm) 及负载  $R_L$  (参数扫描区间在 50~500 Ω, 步长为 150 Ω)。系统磁通密度和传输特性与轴向偏移距离及负载的关系如图 4 和 5 所示。

对比图 4(a)~(f) 可得, 若  $R_s = R_L$  且系统处于临界耦合状态, 无论中继线圈向发射或接收线圈任意一侧发生偏移, 随着偏移量的增大都会使接收线圈侧的磁通密度值减小, 线圈变“暗”, 系统的传输性能随之渐弱。由图 5 可得, 当  $R_s = R_L$ , 中继线圈位于中间位置时系统可获得最大传输功率, 而系统最大传输效率的中继线圈位置偏向发射线圈一侧。随着负载增大, 传输功率和传输效率的最优中继线圈位置均向接收线圈一侧偏移。

## 3 实验验证

基于理论与仿真研究, 建立三线圈 MCR-WPT 系统实验平台如图 6 所示, 由内阻为 50 Ω 信号发生器提供频率 6.7 MHz 的高频交流电, 并将其直接与发射线圈及其补偿结构相连, 系统发射线圈与接收线圈外侧均采用隔磁材料避免磁通量的流失, 接收线圈及其补偿结构连接负载, 示波器用于测量负载两端电压波形。三线圈均采用利兹线

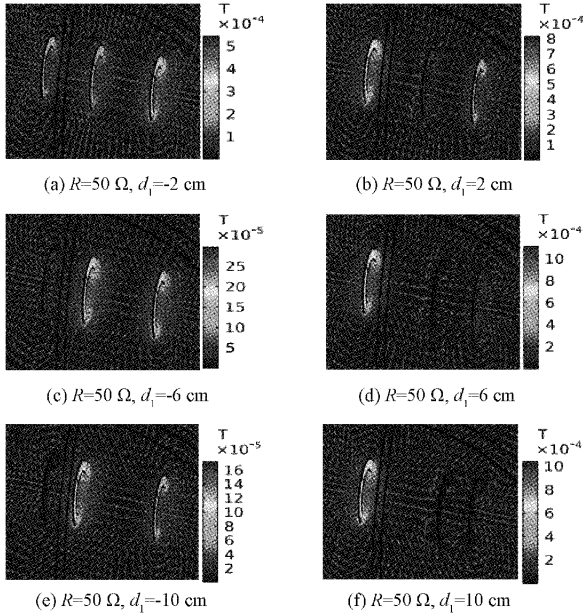


图 4 系统磁通密度与中继线圈轴向偏移距离关系

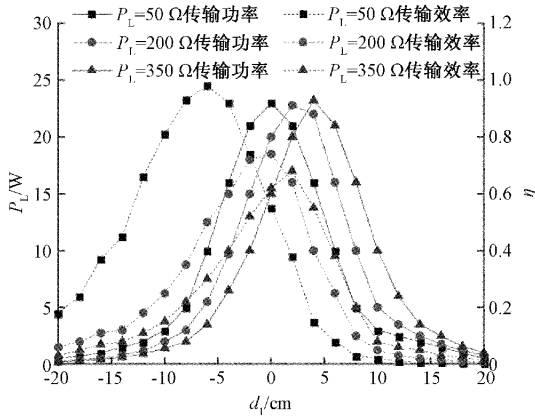


图 5 中继线圈轴向偏移距离对系统传输特性影响

绕制为平面圆形结构,半径 15 cm,匝数 20 匝,谐振线圈详细参数如表 1 所示。

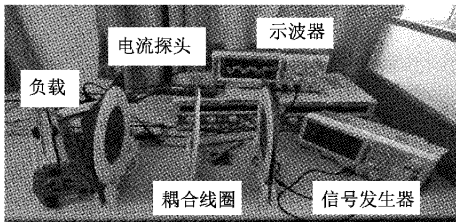


图 6 三线圈 MCR-WPT 系统实验平台

表 1 谐振线圈详细参数

	发射线圈	中继线圈	接收线圈
线圈自感 $L/\mu\text{H}$	113	118	116
补偿电容 $C/\text{pF}$	5	5	5
等效电阻 $R/\Omega$	0.812	0.92	0.873
谐振频率 $f/\text{MHz}$	6.7	6.7	6.7

实验中,负载选用 0~120 Ω 的滑动变阻器,用示波器测量负载两端电压以得到接收功率,用电流探头测量高频信号发生器的输出电流以得到系统输入功率。根据绕制线圈参数,调整系统总传输距离为 20 cm,将中继线圈位置由距发射线圈 2 cm 处向接收线圈侧移动,步长为 2 cm,在负载分别为 25、50 和 100 Ω 的情况下测量并计算得到系统的传输功率和传输效率如图 7 所示,其中  $d_{12}$  为发射与中继线圈间的距离。

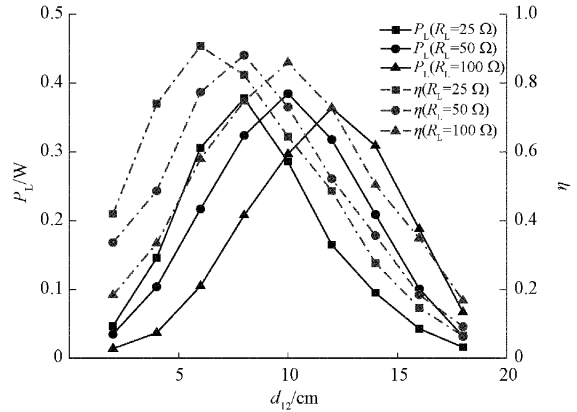


图 7 三线圈 MCR-WPT 系统实验数据图

由图 7 可得,负载为 50 Ω 时,中继线圈传输功率最优位置位于耦合机构中间,但传输效率的最优位置靠近发射线圈一侧;随着负载电阻增大,中继线圈传输功率和传输效率的最优位置均向接受侧偏移,对于系统负载值的变化,可调整中继线圈位置使系统传输性能达到最优。由于高频信号发生器输出功率有限,实验与仿真数据并不相同,但实验结果与仿真结果的变化趋势基本一致。固定负载值为 50 Ω,即满足  $R_s=R_L$ ,调整系统总传输距离  $D$ ,测量得到系统获得最大传输效率和最大传输功率的中继线圈位置分别如表 2 和 3 所示,其中  $d_{12}$  和  $d_{23}$  分别为中继线圈和发射与接收线圈间的距离。

表 2 最大传输效率与中继线圈位置关系

$D/\text{cm}$	$d_{12}/\text{cm}$	$d_{23}/\text{cm}$	$\eta_{\text{max}}/\%$
12	5.1	6.9	84.47
16	6.7	9.3	86.95
20	7.9	12.1	88.22
24	9.2	14.8	74.75

表 3 最大传输功率与中继线圈位置关系

$D/\text{cm}$	$d_{12}/\text{cm}$ 理论值	$d_{12}/\text{cm}$ 实验值	$P_{L\text{max}}/\text{W}$
12	6	6.1	0.361
16	8	7.9	0.393
20	10	10.2	0.385
24	12.0	11.8	0.337



由表 2 和 3 中测量数据可得当信号源内阻与负载相等时,中继线圈靠近发射线圈一侧可获得最大传输效率;中继线圈位于耦合结构中间位置时系统可获得最大传输功率,理论值与实验值基本一致。以上实验测量数据均证明了理论与仿真分析的正确性。

#### 4 结 论

通过理论分析、仿真和实验验证,得到如下结论:

中继线圈传输功率的轴向最优位置与负载有关,当负载与信号源内阻近似相等时,中继线圈位于发射和接收线圈的中间位置系统可获得最大传输功率,当负载大于信号源内阻时,负载越大,中继线圈传输功率的轴向最优位置越靠近接收线圈一侧。

中继线圈传输效率的轴向最优位置同样与负载有关,当电源内阻与负载相等时,中继线圈靠近发射线圈一侧系统可获得最大传输效率,随着负载的增大,其最优位置不断向接收线圈一侧靠近。

实际应用中若系统传输距离或负载改变,通过联立式(4)、(5)和式(6)、(7)可分别得到系统获得最大传输功率或最大传输效率的中继线圈位置。

以上结论为实际应用中实现三线圈磁耦合谐振式无线电能传输系统能量的最优化传输具有一定指导意义。

#### 参考文献

- [1] 李阳,石少博,刘雪莉,等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报,2021,36(S2):389-403.
- [2] MUNIR A, RANUM B T. Wireless power charging system for mobile device based on magnetic resonance coupling[C]. The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics(ICEED), 2015, 221-224.
- [3] MOU X, GLADWIN D T, ZHAO R, et al. Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(12): 3005-3020.
- [4] 闫孝姮,黄明鑫,陈伟华. 无 SAR 评估条件下心脏起搏器谐振式无线供能系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(5):185-195.
- [5] 张宝群,李香龙. 电动汽车非接触式充电研究概况及实用化分析[J]. 电子测量技术,2012,35(3):1-6.
- [6] 程靖宜,武小兰,白志峰. 基于耦合系数估计的电动汽车无线电能传输最大效率跟踪[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):180-186.
- [7] 李星灿,王琪,杨飞. 磁耦合谐振式无线电能传输能效优化研究[J]. 国外电子测量技术,2022,41(6):99-104.
- [8] 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.
- [9] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模、设计与实验验证[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):153-158.
- [10] ZHANG X, MENG H, WEI B, et al. An improved three-coil wireless power link to increase spacing distance and power for magnetic resonant coupling system [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, DOI: 10.1186/s13638-018-1148-8.
- [11] WANG M, WANG H, ZHANG Y, et al. Operating characteristics of four-coil magnetic resonant coupling wireless power transfer under different resonant states[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2021, DOI:10.1002/cta.2850.
- [12] 田子建,林越,杨洪文,等. 具有中继谐振线圈的磁耦合谐振式无线电能传输系统[J]. 电工技术学报,2015,30(S1):168-174.
- [13] 李新恒,龚立娇,冯力,等. 三线圈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,2018,44(3):91-96.
- [14] 刘溯奇,谭健平,文学. 三线圈无线电能传输系统耦合机理研究[J]. 工矿自动化,2017,43(7):62-69.
- [15] 陈飞彬,麦瑞坤,李勇,等. 基于调频控制的三线圈结构无线电能传输系统效率优化研究[J]. 电工技术学报,2018,33(S2):313-320.
- [16] 陈飞彬,麦瑞坤,李勇,等. 基于中继线圈切换的三线圈结构 WPT 系统效率优化研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6373-6383.
- [17] 刘旭,宋翔昱,原熙博,等. 一种利用可切换补偿电容的三线圈无线电能传输系统互感识别及效率优化方法[J/OL]. 中国电机工程学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220121.1845.006.htm>.

#### 作者简介

赵永秀,博士,副教授,主要研究方向为无线电能传输技术、电力电子技术等。

E-mail:yongxiu\_zhao@163.com

万光一(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输技术。

E-mail:969633405@qq.com