

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208797

基于垂直中继的U型线圈切换系统设计与优化

曹广华 彭江伟 王星轲

(东北石油大学电气信息工程学院 大庆 163318)

摘要: 与三线圈中继无线电能传输结构相比,两线圈结构具有更高的效率但传输距离较短,而三线圈结构多应用于中远距离无线电能传输,在近距离系统中效率偏低。对于电动汽车底盘距离不一导致充电效率低下的问题,本文给出一种基于垂直中继的U型线圈切换系统,该系统在适合的距离点切换,即在不同传输距离到达最优效率,可以解决间距变化导致效率低下的问题。本文对三线圈电路模型进行分析,对其线圈特性、负载特性和无线电能传输的距离特性进行分析及优化,推导出其效率影响因素,在此基础上进行系统仿真分析。仿真结果表明,与单一两线圈或三线圈结构模型相比,所设计的切换系统在较近和较远距离下无线电能传输效率都提升了58%;与普通三线圈结构相比,该系统无线电能传输效率最高提升了71%。

关键词: 电动汽车;无线电能传输;U型线圈;垂直中继;效率优化

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.47040

Design and optimization of U-coil switching system based on vertical relay

Cao Guanghua Peng Jiangwei Wang Xingke

(School of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Compared with the three-coil relay wireless power transmission structure, the two-coil structure has higher efficiency but short distances, while the three-coil structure is mostly used for medium and long-distance wireless power transmission, the efficiency is low in the short-distance system. For electric vehicles with different chassis distances, resulting in low charging efficiency, a U-shaped coil switching system based on vertical relay is presented here. The system switches at a suitable distance point, that is, the optimal efficiency can be reached at different transmission distance, the problem of low efficiency caused by changes in spacing is solved. This paper has analyzed the three-coil circuit model, its coil characteristics, load characteristics and energy transmission distance characteristics are analyzed and optimized, efficiency influence factors have been deduced, and system simulation analysis are performed. The simulation results show that compared with the single two-coil or three-coil structure model, the designed switching system improves the wireless power transfer efficiency by 58% at both near and far distances compared with the two-coil structure, and compared with ordinary three-coil structure, the system has increased to its highest efficiency of 71%.

Keywords: electric vehicle; wireless power transmission; U-shaped coil; vertical relay; efficiency optimization

0 引言

随着经济发展,我国作为能源消耗大国,天然气、石油等传统化石资源日益枯竭,能源问题变得愈发严重。传统燃油汽车依靠汽油行驶,但是运行过程中排放大量二氧化碳,是造成全球温室效应主要来源之一,相比之下电动汽车能够有效克服这些缺点。世界各国正在加紧研发电动汽车,在未来有着美好前景。其中电动汽车一个重要部分就是其输电方式,无线电能传输 WPT(wireless power transfer)

技术输电相比于接触式导线输电,具有安全可靠,供电方便等优点,目前已成功应用在电动汽车无线充电中^[1-2]。但是对于电动汽车底盘不一,传输距离动态变化导致效率下降问题,即传统两线圈结构系统会随着间隔距离的增加,其传输效率会急剧降低。为了应对这一问题,以下几种提升传输效率方法:一般情况下会增加线圈间耦合系数,增加铁氧体或加大发射与接收线圈面积,但需要更大的成本及更大的汽车接收端安装面积;调节系统频率或变流器占空比来达到优化效率的目的,但系统成本会增加;使用多个线圈及

收稿日期:2022-01-07

阵列开关在系统参数变换时及时切换,提升系统效率,但整个系统控制方法较为复杂,不易统一工业化设计生产^[13-17]。

为了解决实际生活中电动汽车底盘间距变化引发的效率低下问题,如从跑车低间距到SUV车高间距灵活充电问题,大量文献表明三线圈模型在中远距离传输效果好于两线圈模型,结合两线圈特点,特引入两/三线圈中继线圈切换模型,在变化间距情况下,可以有效提升电动汽车无线输电效率。针对电动汽车无线充电时空分布特性,难以寻找支点进行安装,放弃隔空平行中继线圈结构,所以不考虑在两线圈中间安装中继线圈。

文献[8]通过分析两线圈结构模型设计出了一种新型三线圈结构,将传统两线圈分割为三线圈结构,抛弃传统中间式中继线圈结构,采用发射或接收共面中继线圈结构,将一个线圈拆分为两个同轴线圈,相比对两线圈结构,能够有效提高传输效率。中继线圈放在发射端能够将电源阻抗转化为一个较小的值,有效的提升了系统传输效率,中继线圈放置在接收端能够将反射到发射端的负载阻抗调整到最佳值,提升了系统大功率传输能力。

文献[9]提出一种垂直中继U型高压线路无线供电系统。中继线圈垂直发射线圈对电能进行接力,将高压线路输电线路在线检测设备进行超远距离供电,在1.2 m传输距离下效率接近60%。

虽然三线圈中继线圈能够有效提升中远距离效率,但是也带来一些新的问题,线圈之间交叉耦合会导致系统功率多路径传输。在近距离处,三线圈结构会因频率分裂等造成效率降低。对于汽车底盘高度不同导致的间距变化,如果单一采用一种线圈,必然不能满足变化需求。

基于以上问题,本文对三线圈模型进行分析,满足传输效率情况下,根据特性进行分析优化,得到最优三线圈模型,并结合两线圈近距离特性,给出了两/三线圈切换系统模型,满足间距变化情况下电动汽车高效率稳定充电,为未来电动汽车静态无线充电大规模商业化提供一定的参考意见^[10-17]。

1 基于U型中继线圈的三线圈切换模型

1.1 两线圈结构建模及分析

两线圈结构系统如图1所示。其中 $S_1 \sim S_4$ 为MOSFET, C_1, C_2 为谐振补偿电容, $D_1 \sim D_4$ 为二极管, I_1, I_2 分别表示发射线圈与接收线圈电流, M_{12} 是线圈间互感,其中负载可等效为^[18]:

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

两线圈WPT系统效率为:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_2^2 R_{eq}}{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2} \quad (2)$$

式中: R_1, R_2 分别是发射线圈端总电阻,接收线圈端总电阻,其中 $R_1 = R_{L1} + R_F, R_2 = R_{L2} + R_{eq}$ 。

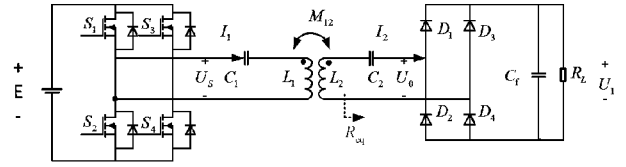


图1 双线圈 WPT 系统

由电路 KVL 方程知:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_s R_2}{\omega^2 M_{12}^2 + R_1 R_2} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)代入到式(2)中,得到效率公式:

$$\eta = \frac{R_{eq}}{\frac{R_1 R_2^2}{\omega^2 M_{12}^2} + R_2} \quad (4)$$

本文采用双/三线圈切换无线电能传输结构,设计方案应保证最远间距 300 mm 效率在合理区间,结合两线圈模型结构,在 150 mm 处达到 80% 以上效率,由效率表达式(4)推出式(5)求得满足效率条件下 M_{12} 应该大于 13.27 μH 。根据式(4)知考虑实用性将发射与接收线圈设为:

$$M_{12} = \sqrt{\frac{(R_{L1} + R_F)(R_{L2} + R_{eq})^2}{\omega^2 \left[\frac{R_{eq}}{\eta} - (R_{L2} + R_{eq}) \right]}} \quad (5)$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \frac{l}{2\pi a}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \frac{n r}{a}} \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; a 为导线半径; r 为线圈半径; n 为线圈匝数; σ 为电导率; l 为导线长度。线圈电阻由线圈半径和线圈匝数确定,为了汽车能够满足快速充电,将 R_L 设置为 10 Ω ,线圈内径 75 mm,匝数 $N = 25$,线间距 0.1 mm,线直径 3 mm,在 85 kHz 频率下,使用 ANSYS Maxwell 对其线圈进行仿真。仿真测得 R_{L1}, R_{L2} 电阻为 0.69 Ω ,自感为 155.31 μH 。这里将 R_{L1}, R_{L2}, R_F 分别设为 0.5 Ω ,与实测相差很小,方便计算。得到两线圈结构互感和效率随距离变化如图2所示。

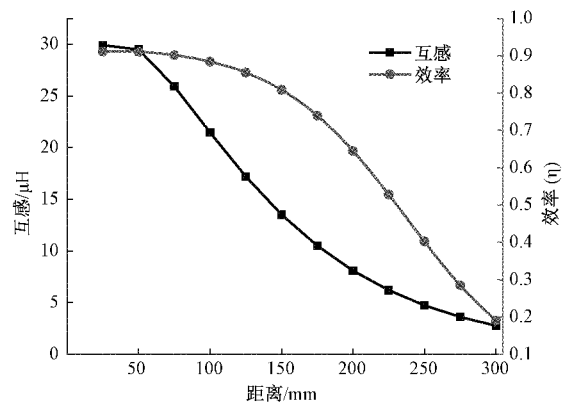


图2 两线圈结构互感和效率随距离变化

由图2可知两线圈结构互感及效率随着间距变化,在25~150 mm间距下保持80%以上传输效率,在低25 mm

时效率达到 91%，间距当间距大于 150 mm 时效率迅速下降，整体效率随着互感的降低而下降，在间距 300 mm 时效率只有 19%，为了适应变化间距高效率充电，于是引入三线圈结构。

1.2 三线圈结构建模及分析

三线圈结构在两线圈结构上加了一个中继线圈，中继线圈垂直于发射线圈，整体呈 U 型线圈形状，其电路如图 3 所示。

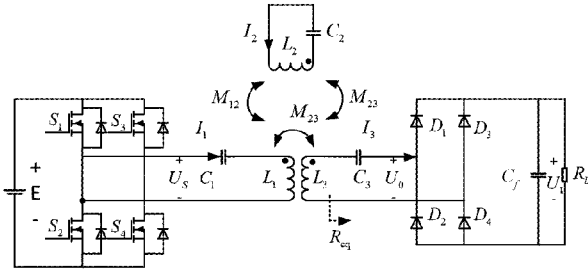


图 3 三线圈 WPT 系统

其中图 3 为三线圈 WPT 系统，其等效电路图如图 4 所示。 U_s 是高频电源； R_E 是电源内阻； R_1, R_2, R_3 与 L_1, L_2, L_3 分别为发射、中继、接收线圈等效电阻和自感； C_1, C_2, C_3 分别为发射、中继、接收线圈谐振电容； C_f 为滤波电容， $R_1 = R_E + R_{L1}, R = R_3 + R_{eq}$ 。

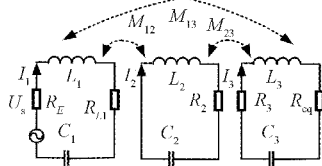


图 4 三线圈 WPT 系统等效电路图

设 3 个回路中都处于完全谐振条件下， ω_0 为谐振角频率。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} \quad (7)$$

根据电路 KVL 方程有：

$$\begin{bmatrix} R_1 & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{12} & R_2 & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

求解等式(8)得：

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = [R_2 R + (\omega M_{23})^2] \dot{U}_s \cdot X \\ \dot{I}_2 = [\omega^2 M_{23} M_{13} + j\omega M_{12} R] \dot{U}_s \cdot X \\ \dot{I}_3 = [\omega^2 M_{12} M_{23} + j\omega M_{13} R_2] \dot{U}_s \cdot X \end{cases} \quad (9)$$

其中，

$$X = \frac{1}{R_1 R_2 R + \omega^2 [M_{12}^2 R + M_{23}^2 R_1 + M_{13}^2 R_2] + j2\omega^3 M_{12} M_{23} M_{13}} \quad (10)$$

进而得到三线圈结构效率公式：

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_3^2 R_{eq}}{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 (R_3 + R_{eq})} \quad (11)$$

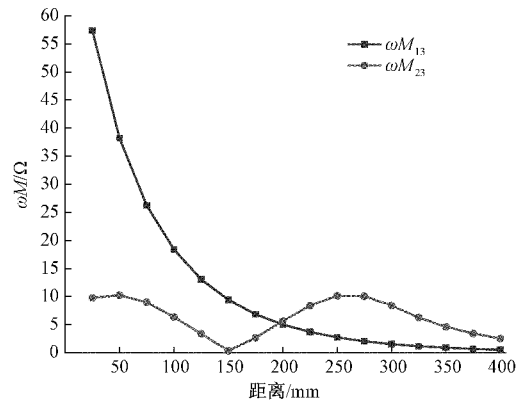
将各自电流带入到系统效率公式中，通过计算可知式(12)为三线圈结构电能传输效率：

$$\eta = \frac{R_{eq}}{\frac{[\omega^2 M_{23}^2 + R_2 R]^2 R_1 + [\omega^4 M_{13}^2 M_{23}^2 + \omega^2 M_{12}^2 R^2] R_2}{\omega^4 M_{12}^2 M_{23}^2 + \omega^2 M_{13}^2 R_2^2} + R} \quad (12)$$

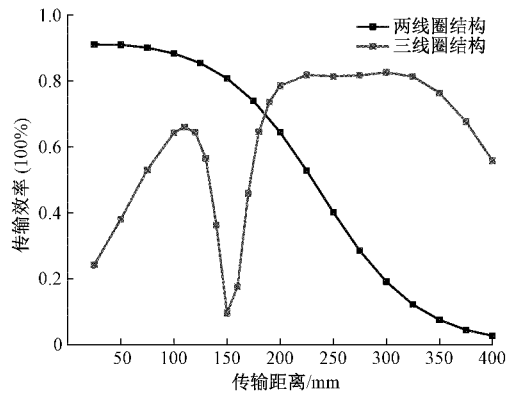
2 三线圈结构系统仿真与优化

2.1 三线圈结构系统仿真

由式(12)知当其他参数确定时，三线圈结构传输效率只与相互间互感有关，设中继线圈与发射、接收线圈相同电阻值 $R_2 = 0.5 \Omega$ ，发射线圈与中继线圈垂直且固定，其副阻抗 $\omega M_{12} = 7.765 \Omega$ ，其他设定与两线圈相同。为了后期统一量化生产中继线圈和发射，初步设定与接收线圈线径一致，设置中继线圈匝数 $N = 25$ ，放置在 z 轴 150 mm (半径距离) 处，得到如下互阻抗与效率随距离变化的关系图如图 5 所示。



(a) 三线圈结构互阻抗



(b) 两/三线圈结构系统效率随传输距离变化

图 5 系统传输特性

如图 5(a) 所示， ωM_{13} 随着传输距离的增加而急剧减小，在远距离时接近于 0，中继线圈与接收线圈间互阻抗 ωM_{23} 变化幅度较小，间距大于 200 mm 时超过了 ωM_{13} 值，

ωM_{23} 在间距 150 mm 时接近于 0, 在 270 mm 处达到最大值, 整体系统效率变化趋势与 ωM_{23} 趋势相近, 远距离处 ωM_{13} 对系统效率影响极小。

如图 5(b) 所示, 三线圈结构在 150 mm 处效率迅速降低接近于 0, 而后增加, 随着距离的增加表现出先增后减小, 再增加再减小。从图中分析可知, 三线圈模型在低距离处存在频率分裂现象导致效率降低, 而接近中继线圈中心点距离时, 中继线圈和接收线圈间互感会陡降至 0, 相比两线圈结构, 在近距离处 $\eta_2 > \eta_3$, 远距离时 $\eta_2 < \eta_3$, 在效率交点处进行切换, 实现全变化间距高效率电能传输。

2.2 中继线圈设计及优化

本小节对于垂直 U 型三线圈结构对其安装位置, 线圈特性及负载变换进行特性分析, 对中继线圈进行分析并优化, 设置中继线圈匝数为变量, 从 15~35 匝, 间隔 5 匝, 其他参数不变, 仿真分析得到匝数变化系统效率图。如图 6 所示, 随着匝数变化, 整体传输效率都是先增后减, 再增加后减小, 在 150 mm 间距处效率接近于 0, 在 200~300 mm 时, 匝数为 25~35 时系统传输效率相差不大。为了有效提升远距离传输距离效率, 同时节省材料, 节约成本, 选取与发射, 接收线圈同等匝数 $N=25$ 作为中继线圈匝数, 保证在远距离处效率接近理想值。

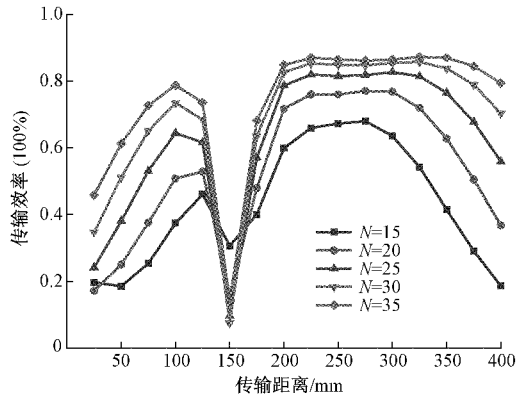
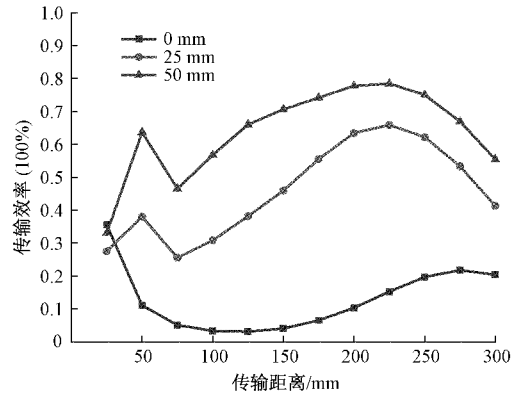


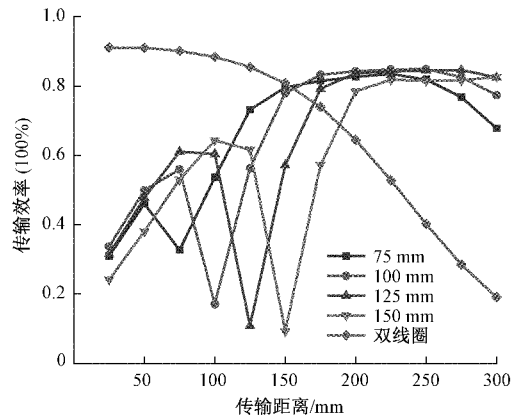
图 6 系统效率随中继线圈匝数变化

确定了中继线圈匝数, 现在改变中继线圈相对位置 d_z (z 轴方向与发射线圈距离), 对系统进行优化, 设置 85 kHz 不变, 负载电阻依然还是 10 Ω , 上小节仿真时中继线圈初始位置在 z 轴 150 mm 处, 图 5(b) 中三线圈结构与两线圈结构效率交叉点处存在一个凹点, 为了减缓凹点, 提升效率, 设想将三线圈系统效率曲线左移, 先设置中继线圈在 z 轴垂直移动, 动态移动中继线圈中心点在与发射线圈同平面, 到一个直径距离, 即中继线圈中心点在 z 轴上从 0~300 mm 动态变化, 仿真得到如图 7 所示效率曲线。

从图 7(a) 可知中继线圈在 z 轴 0~50 mm 处, 其系统传输效率较低, 由图 7(b) 可知在 75~150 mm 时系统传输效率变化趋势一致, 凹点逐渐左移, 75 mm 处虽然使得凹点处最低, 但在远距离 300 mm 时效率较低, 综合考虑采用



(a) 中继线圈相对位置 d_z (0~50 mm)



(b) 中继线圈相对位置 d_z (75~150 mm)

图 7 中继线圈位置变化分析

z 轴 100 mm 设置中继线圈。

上文设计中继线圈位置仅考虑 z 轴偏移, 没有考虑 y 轴, 以下设定发射线圈与接收线圈距离 150 mm 处, 设置中继线圈 y 轴位置从 0~100 mm 负轴方向移动, z 轴从 0~100 mm 处移动, 得到以下不同位置系统传输效率, 如表 1 所示, y 轴 0 mm 位置, z 轴 125 mm 位置, 系统传输效率最大, 但由图 7 知, 远距离效率会有所下降, 故中继线圈中心点位置选取在 y 轴 0 mm, z 轴 100 mm 处。

表 1 中继线圈位置变换系统传输效率 η %

d_z / mm	d_y / mm					
	0	20	40	60	80	100
0	2.58	4.59	7.93	12.99	19.92	28.58
25	40.56	36.29	31.09	27.69	28.09	32.76
50	68.09	62.04	53.90	45.72	40.39	40.01
125	78.28	71.50	62.83	53.74	46.90	40.87
150	76.79	69.03	59.51	50.5	44.98	44.87

下面分析线径影响系统效率, 线径直径为 3 mm 利兹线绕制, 使用利兹线圈可以降低趋肤效, 减小线圈等效串联电阻, 提高系统传输效率。改变线径从 2~4 mm, 间隔 0.5 mm, 仿真分析如图 8 所示。

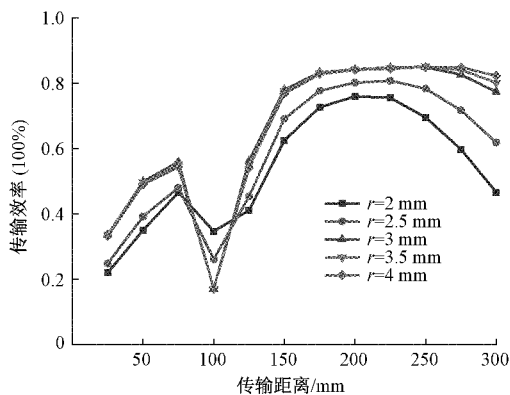


图 8 系统效率随中继线圈线径变化

由图 8 可知随着线径增加，系统效率逐渐增加，在 3 mm 及以上线径系统效率趋于一致，考虑成本及损耗，故选用 3 mm 作为中继线圈直径。

通过三线圈结构 WPT 系统电路图，在中继线圈回路中加入一个开关实现两线圈结构和三线圈结构的相互切换。基于垂直中继的 U 型线圈切换系统电路图如图 9 所示。

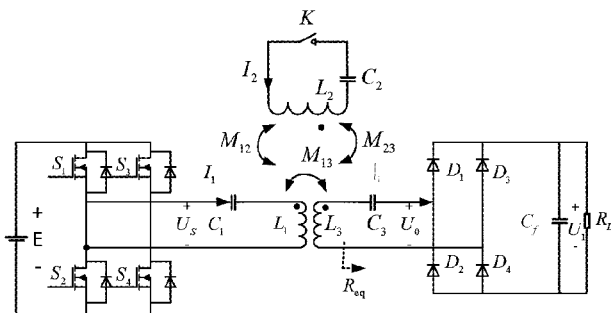


图 9 基于垂直中继的 U 型线圈切换系统电路图

综上所述，对图 5(b) 进行优化，设定中继线圈匝数 25 匝，线直径 3 mm，中心位置位于 y 轴 0 mm，z 轴 100 mm 处，模型结构如图 10 所示，摆放位置为垂直 U 型结构。

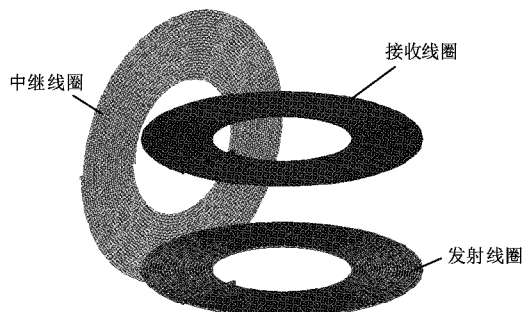


图 10 三线圈结构模型图

最后，考虑到电动汽车不同使用场景下负载会动态变化，对变化负载进行仿真，保持中继线圈位置与其他参数，系统工作频率保持为 85 kHz，为了满足快速充电，初始设置负载电阻为 10 Ω 改变负载电阻大小，得到如图 11 所示

的系统传输效率随负载电阻的变化趋势。从图 11 中可知，负载电阻在 5~20 Ω 变化时对系统传输效率影响极小。

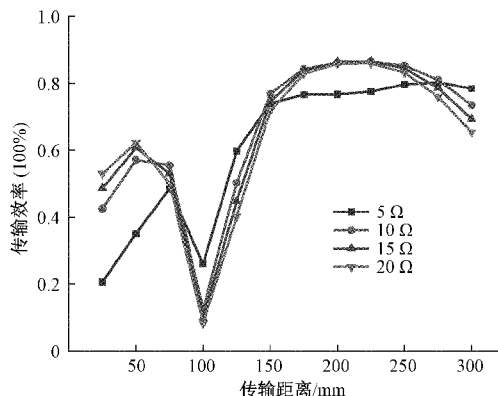


图 11 系统传输效率随负载电阻的变化趋势

在以上优化的参数下进行仿真，得到如图 12 所示两/三线圈结构系统效率随传输距离变化图，中继切换系统在双线圈与优化后三线圈交点进行切换。图 12 中三线圈与两线圈结构系统效率曲线交点在 150 mm 附近处效率为 79%，中继切换系统在最近距离 25 mm 效率到达 91%，最远处 300 mm 效率可到达 77.3%。优化后三线圈模型与两线圈模型切换模型对比三线圈结构模型，中继切换系统在 25 mm 传输距离下提升了 58%，远距离下 300 mm 中继切换系统相比两线圈结构同样提升了 58%。且系统在 100 mm 处最高提升了 71%。

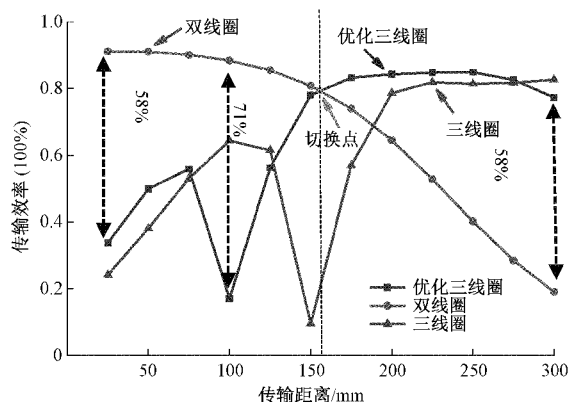


图 12 两/三线圈结构系统效率随传输距离变化

3 结 论

本文针对无线电能传输系统其传输效率随传输距离增大而降低的问题，将三线圈结构与两线圈结构相结合，得到高效率的基于垂直中继的 U 型线圈切换系统，切换系统在任意传输距离下比单一线圈结构效率高，引入切换系统后提升双线圈最远高效率传输距离效率。在本实验参数下，仿真结果表明，与单一两线圈或三线圈结构模型相比，所设计的切换系统在较近和较远距离下无线电能传输效率都提升了 58%；与普通三线圈结构相比，该系统无线电能传输效率最高提升了 71%。

参考文献

- [1] 曾玉凤,丘东元,张波.磁谐振无线电能传输系统线圈设计综述[J].电源学报,2019,17(4):94-104.
- [2] 缪远杰,刘宁,王海涛,等.水下无线电能传输系统建模与分析[J].国外电子测量技术,2021,40(8):13-17.
- [3] FENG H, TAVAKOLI R, PANTIC Z, et al. Advances in high-power wireless charging systems: Overview and design considerations [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3):886-919.
- [4] 麦瑞坤,林天仁,李勇,等.双发射线圈感应电能传输系统的小信号建模及控制研究[J].中国电机工程学报,2017,37(20):6068-6076.
- [5] DAI X, JIANG J C, WU J Q. Charging area determining and power enhancement method for multixcitation unit configuration of wirelessly dynamic charging EV system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5):4086-4096.
- [6] 黄智慧,王林,邹积岩.双中继和三中继线圈位置参数对无线电能传输功率的影响[J].电工技术学报,2017,32(5):208-214.
- [7] 毛世通,朱春波,李阳,等.应用于无线电能传输系统的中继线圈工作性能[J].电工技术学报,2014,29(9):27-32.
- [8] ZHONG W X, ZHANG C, LIU X, et al. A methodology for making a three-coil wireless power transfer system more energy efficient than a two-coil counterpart for extended transfer distance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(2):933-942.
- [9] 陶炳权,汪超,曲皓玥,等.基于垂直中继的U型高压线路无线供电系统设计[J/OL].电测与仪表,2021:1-8.
- [10] 夏能弘,朱益民,程志远.基于垂直中继线圈结构的L形无线充电装置设计与优化[J].电工技术学报,2019,34(13):2671-2678.
- [11] 孙跃,李云涛,叶兆虹,等.三线圈 ICPT 系统中继线圈的位置优化[J].电工技术学报,2016,31(13):164-171.
- [12] 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(2):313-320.
- [13] ZHANG F, HACKWORTH S A, FU W, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5):1478-1481.
- [14] 沈娜,李长生,张合.磁耦合共振无线能量传输系统建模与分析[J].仪器仪表学报,2012,33(12):2735-2741.
- [15] 胥云飞,沈文辉,王玮.基于中继线圈的磁耦合共振无线能量传输系统[J].电子测量技术,2019,42(17):16-22.
- [16] 仲崇德,朱武,张乐.谐振耦合式无线电能传输系统谐振线圈的优化设计[J].电测与仪表,2017,54(21):116-121.
- [17] 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.
- [18] SONG K, LI Z J, JIANG J H, et al. Constant current/voltage charging operation for series-series and series-parallel compensated wireless power transfer systems employing primary-side controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017,33(9):8065-8080.

作者简介

曹广华,教授,博士,主要研究方向为无线电能传输技术、测试理论与技术、智能传感器理论与技术。

E-mail:cgh_05@163.com

彭江伟(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:18271660504@139.com