

文章编号: 1671-7449(2024)01-0085-08

磁耦合谐振式电动汽车无线充电技术 耦合线圈抗偏性设计

王鑫, 赵炜华, 卫军朝

(西安航空学院 车辆工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 通过研究无线充电磁耦合谐振线圈传输性能影响因素, 建立电动汽车无线充电磁耦合线圈联合仿真模型。对比圆形和方形不同构型耦合线圈在偏移情况下耦合系数和传输效率的仿真结果, 表明圆形线圈在侧向偏移10 cm的情况下, 仍能保证70%左右的传输效率, 其输出功率远高于方形线圈。此外, 通过优化圆形线圈结构参数, 并增加E型铁氧体磁芯, 仿真证明其优化电磁耦合线圈即使在侧向偏移达到20 cm时, 输出功率也达到了2 996.4 kW, 保证85%的传输效率, 达到国家电动汽车无线充电磁耦合线圈的抗偏移性能传输要求。

关键词: 磁耦合谐振线圈; 联合仿真; 抗偏移性

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.01.013

引用格式: 王鑫, 赵炜华, 卫军朝. 磁耦合谐振式电动汽车无线充电技术耦合线圈抗偏性设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(1): 85-92.

WANG Xin, ZHAO Weihua, WEI Junzhao. Design of anti-offset coupling coil for magnetically coupled resonant wireless charging technology of electric vehicles[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(1): 85-92.

Design of Anti-Offset Coupling Coil for Magnetically Coupled Resonant Wireless Charging Technology of Electric Vehicles

WANG Xin, ZHAO Weihua, WEI Junzhao

(School of Vehicle Engineering, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper establishes a joint simulation model for the magnetically coupled resonant coil in electric vehicle wireless charging by analyzing influencing factors of coil transmission performance. According to the simulation results comparing the coupling coefficient and transmission efficiency of different circular and square coupling coils in the case of offset, it is shown that the circular coil can still guarantee about 70% transmission efficiency in the case of lateral offset of 10 cm, and its output power is much higher than that of the square coil. And the paper optimizes the structure parameters of the circular coil, adds the E-type ferrite core, and optimizes the output power of the electromagnetic coupling coil by simulation, even when the lateral offset reaches 20 cm, the output power also reaches 2 996.4 kW, ensuring 85% of the transmission efficiency, and meeting the anti-offset performance transmission requirements of the national electric vehicle wireless charging magnetic coupling coil.

Key words: magnetically coupled resonant coil; joint simulation; anti-offset performance

收稿日期: 2023-01-15

基金项目: 陕西省科技厅重点产业创新链(群)重点研发计划资助项目(2020ZDLGY16-01)

作者简介: 王鑫(1984—), 男, 副教授, 教研室主任, 主要从事新能源汽车无线充电技术研究。E-mail: power0913@126.com。

0 引言

伴随新能源汽车产业的快速发展,电动汽车保有量不断增加,受充电便捷性和安全性的影响,电动汽车传统有线充电方式已难以满足人们的出行需求。近年来,无线电能传输技术(Wireless Power Transmission, WPT)已成为新能源汽车领域的热点研究课题。从便利性来看,应用无线充电技术给电动汽车动力电池充电优势更加明显,从使用性来看,非接触式无线充电技术比有线充电技术更加安全^[1]。

根据电动汽车是否在行驶状态下充电,无线电能传输系统可分为动态无线电能传输和静态无线电能传输^[2]。动态无线电能传输技术能够有效减轻车载电池重量,并在电动汽车行驶状态下进行充电,可有效缓解电动汽车驾驶员的里程焦虑问题。目前,无线电能传输的方式类型主要有电磁感应式、无线电波式、耦合谐振式。相比较而言,磁耦合谐振式无线电能传输技术可以实现无辐射、高效率、中距离的电能传输^[3],在电动汽车充电领域具有较高的应用空间。

鉴于电动汽车动态无线充电技术的应用价值,本文以磁耦合谐振式无线充电耦合线圈结构类型与参数选择设计为研究对象,通过仿真分析对比不同结构类型耦合线圈在轴向偏移情况下的传输特性,并根据分析结果确定传输效率最佳的线圈构型,在此基础上进行优化设计。仿真结果表明,该优化设计方案能够有效提升磁耦合线圈的抗偏移能力。

1 动态磁耦合谐振线圈传输性能影响因素分析

1.1 磁耦合谐振式 WPT 系统偏移影响

磁耦合谐振式无线电能传输技术是通过发射端与接收端产生谐振而实现电能的无线传输。在理想情况下,发射端将电网的工频交流电经整流电路转换为稳压直流电,后经高频逆变电路将直流电转化为高频交流电,并在 LC 补偿电路作用下实现对发射线圈供电,使发射线圈周围产生电磁场。接收端通过 LC 补偿电路将接收线圈自谐振频率调整与发射端相同,致使发射线圈与接收线圈处于谐振状态,若接收线圈未发生偏移,此

时接收线圈接收的能量达到最大^[4]。总体组成如图 1 所示。

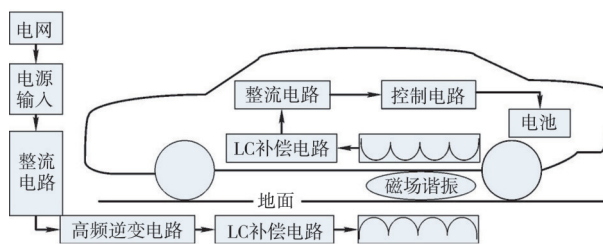


图 1 磁耦合谐振式无线电能传输系统

Fig. 1 Magnetically coupled resonant wireless charging system

然而,在电动汽车行驶中出现轨迹偏移的情况下,车载接收线圈相对于发射线圈产生侧向偏移导致线圈间的耦合作用减小,线圈的互感降低,从而引起系统输出功率与传输效率产生波动^[5]。但在汽车行驶过程中,受外界及驾驶员驾驶因素影响,汽车行驶轨迹偏移现象难以避免。因此,提升磁耦合谐振线圈的抗偏特性是实现电动汽车动态谐振无线充电技术实用化的关键点。

1.2 无线充电谐振电路耦合线圈抗偏因素分析

由于无线充电谐振电路中串联-串联电路在输出功率与传输效率上具有明显优势,因此,本文主要以串联-串联谐振电路作为主要研究对象进行理论分析,其电路模型如图 2 所示。

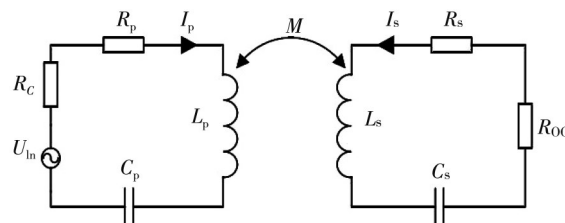


图 2 串联-串联谐振电路模型

Fig. 2 Series-series resonant circuit model

图 2 中, U_s 为交流电源; R_c 为电源内阻; L_p 为发射线圈的自感; C_p 为发射端的谐振电容; R_p 为发射线圈的等效电阻; I_p 为发射端回路电流; L_s 为接收线圈的自感; C_s 为接收端的谐振电容; R_s 为接收线圈的等效电阻; R_{oc} 为负载; I_s 为接收端回路电流; M 为发射线圈和接收线圈之间的互感值。

通过运用基尔霍夫定理和互感原理对该谐振电路模型建立方程如下

$$U_{in} = \left(R_p + R_c + j\omega L_p - \frac{j}{\omega C_p} \right) I_p - j\omega M I_s, \quad (1)$$

$$0 = j\omega M I_p - \left(R_{oc} + R_s + \omega L_s j - \frac{j}{\omega C_s} \right) I_s, \quad (2)$$

式中： ω 为交流电源的角频率， $\omega = 2\pi f$ ， f 为交流电源频率。为便于计算与分析，在模型设计中设定发射线圈与接收线圈同轴并参数相同，即 $L_p = L_s$ ，且在理想下互感系数 M 可近似为

$$M = \frac{\pi\mu_0 r^4 N^2}{2d^3}, \quad (3)$$

式中： μ_0 为真空磁导率； r 为线圈半径； N 为线圈匝数； d 为发射线圈和接收线圈之间的距离。

根据戴维南定理，可得

$$I_p = \frac{U_{in}}{R_p + R_c + j(\omega L_p - 1/\omega C_p) - (\omega M)^2 / [R_{oc} + R_s + j(\omega L_s - 1/\omega C_s)]}, \quad (4)$$

$$I_s = \frac{j\omega M}{R_{oc} + R_s + j(\omega L_s - 1/\omega C_s)} I_{p0} \quad (5)$$

$$M = k\sqrt{L_p L_s} = kL. \quad (14)$$

谐振电路输入功率 P_{in} 为

$$P_{in} = U_{in} I_{p0} \quad (6)$$

同上，输出功率 P_{out} 为

$$P_{out} = |I_s|^2 R_{oc0} \quad (7)$$

系统的传输效率 η 为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (8)$$

当发生谐振时，电路中发射端与接收端回路中容抗和感抗相互抵消，满足下式

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega C_p}, \quad (9)$$

$$\omega L_s = \frac{1}{\omega C_s} \quad (10)$$

由于在模型假设中有 $L_p = L_s$ ，即可得到

$$C_p = C_s = \frac{1}{\omega^2 L_p} = \frac{1}{\omega^2 L_s} \quad (11)$$

因此，结合式(4)，式(5)，式(7)，式(8)，式(11)，可得

$$P_{out} = \frac{\omega^2 M^2 U_{in}^2 R_{oc}}{[\omega^2 M^2 + (R_p + R_c)(R_{oc} + R_s)]^2}, \quad (12)$$

$$\eta = \frac{\omega^2 M^2 R_{oc}}{[\omega^2 M^2 + (R_p + R_c)(R_{oc} + R_s)](R_{oc} + R_s)} \quad (13)$$

当线圈处于耦合状态且发射线圈和接受线圈参数相同下，有

通过式(12)~式(14)，再结合式(3)可以看出，串联-串联磁耦合谐振式无线电能传输电路输出功率和传输效率与磁耦合线圈的互感系数和线圈电阻有直接关系，而线圈互感系数与磁耦合线圈的匝数、半径、线圈之间距离及耦合系数等因素有关^[6]。因此，在线圈侧向偏移情况下，为保证无线充电谐振电路电能传输效率，本文的研究重点是在线圈发生侧向偏移的情况下，分析不同构型线圈的传输特性，并根据最佳的线圈构型进行结构参数优化，以提升无线充电耦合线圈抗偏传输特性。

2 耦合线圈选择及性能仿真分析

通过上节分析，耦合线圈作为能量的发送和接受装置，其结构直接影响无线电能传输系统的输出性能。目前，对于电动汽车无线充电技术，在考虑电动汽车底盘布置等要求情况下，其耦合线圈普遍采用平面结构布置类型，根据平面线圈结构不同可分为圆形线圈、方形线圈和DD型线圈^[7]。由于DD型线圈是方形线圈的衍生版，其特性与方形线圈类似，所以本文主要以平面圆形线圈与方形线圈在同等面积情况下进行互感分析。

为满足 GB/T 38775.1-2020 标准规定的电动汽车 WPT1 等级要求^[8]，参考轿车最小离地间隙范围，选取线圈垂直距离 15 cm，输入功率 3.5 kW，磁耦合线圈设计参数如表 1 所示。

表 1 磁耦合线圈设计规格尺寸

Tab. 1 Design specifications and dimensions of magnetic coupling coil

参数	线圈匝数	线圈线径/cm	线圈内径(圆形)/cm	线圈内圈边长(方形)/cm	线圈匝间距/cm	线圈材质
发射线圈	15	0.4	10	10	1	铜
接收线圈	15	0.4	10	10	1	铜

然而在实际应用中，为考虑车辆行驶过程中的随机性，车辆上的接受线圈位置在行驶过程中会存在一定的径向偏移。这种磁耦合线圈的位置偏移，会导致磁场出现更多的边缘通量和磁漏，

影响发射线圈和接受线圈的无线充电传输性能。因此，为进一步研究两种线圈在偏移情况下耦合线圈无线充电传输性能，本文运用 ANSYS Maxwell 和 ANSYS Simplerer 建立磁耦合线圈联合仿

真模型，如图3和图4所示。

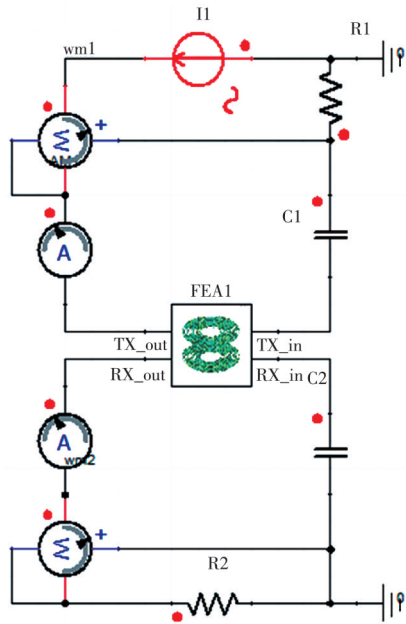


图3 ANSYS Simplorer磁耦合线圈电路仿真模型

Fig. 3 ANSYS Simplorer magnetic coupling coil circuit simulation model

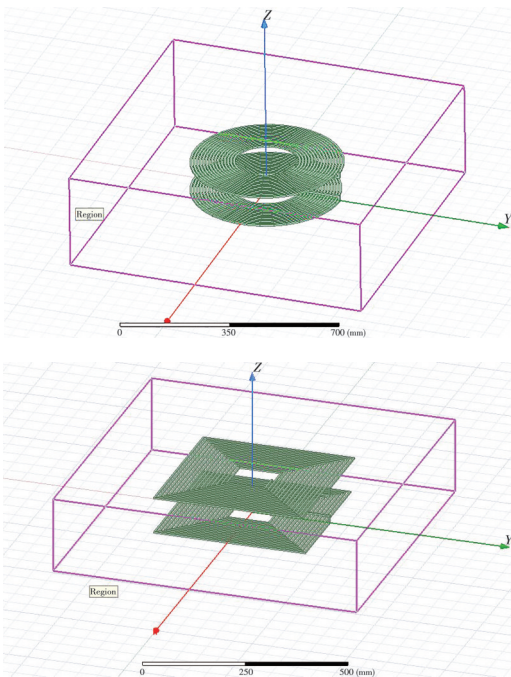


图4 ANSYS Maxwell圆形及方形线圈仿真模型

Fig. 4 ANSYS Maxwell circular and square coil simulation model

在确定输入条件及模拟X轴和Z轴偏移量不变的条件下，分析磁耦合线圈在Y轴（径向）方向偏移条件下的系统传输效率，其仿真测试方案Y轴偏移步长为10 cm，偏移范围为0~20 cm(左右偏移类同)。具体测试方案如表2所示，其仿真磁场分布和磁力线云图结果如图5~图10所示。

表2 磁耦合线圈Y轴偏移测试方案

Tab. 2 Test scheme for Y-axis offset of magnetic coupling coil

测试方案	线圈类型	Y轴偏移量/cm
测试1	圆形线圈	0
		10
		20
测试2	方形线圈	0
		10
		20

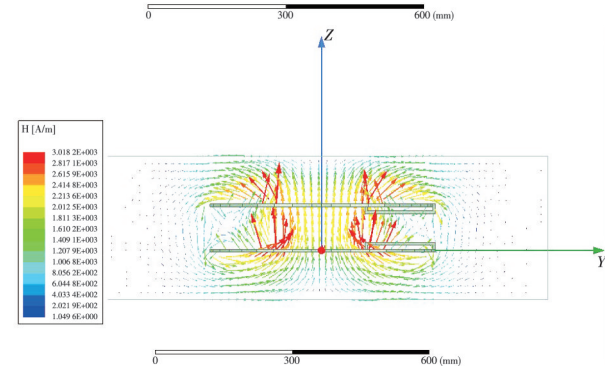
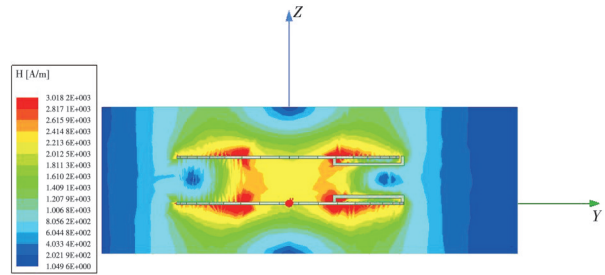


图5 圆形线圈在Y轴偏移量为0 cm的磁场分布及磁力线云图

Fig. 5 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of circular coil with Y-axis offset of 0 cm

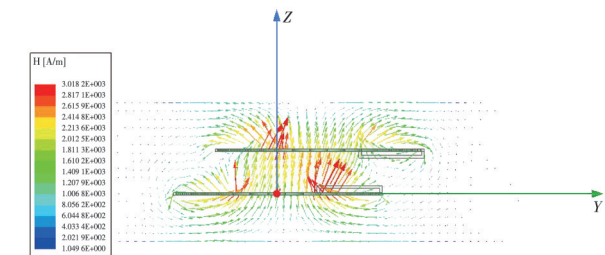
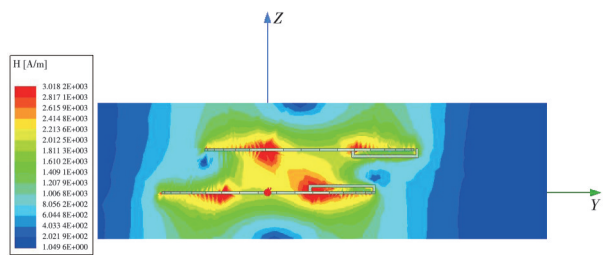


图6 圆形线圈在Y轴偏移量为10 cm的磁场分布及磁力线云图

Fig. 6 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of circular coil with Y-axis offset of 10 cm

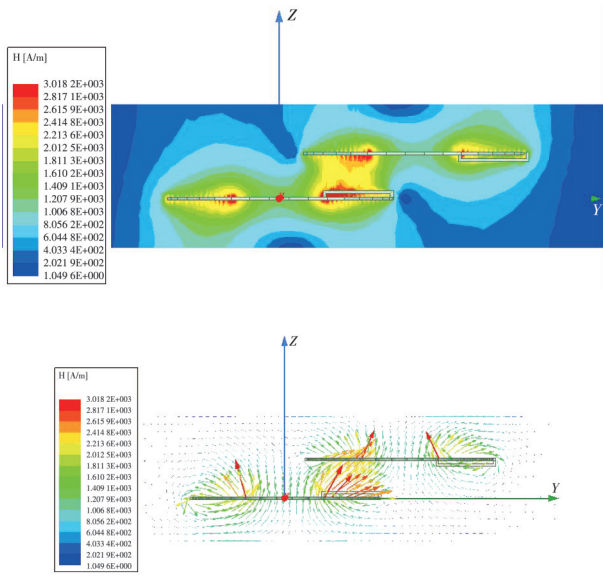


图 7 圆形线圈在 Y 轴偏移量为 20 cm 的磁场分布及磁力线云图
 Fig. 7 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of circular coil with Y-axis offset of 20 cm

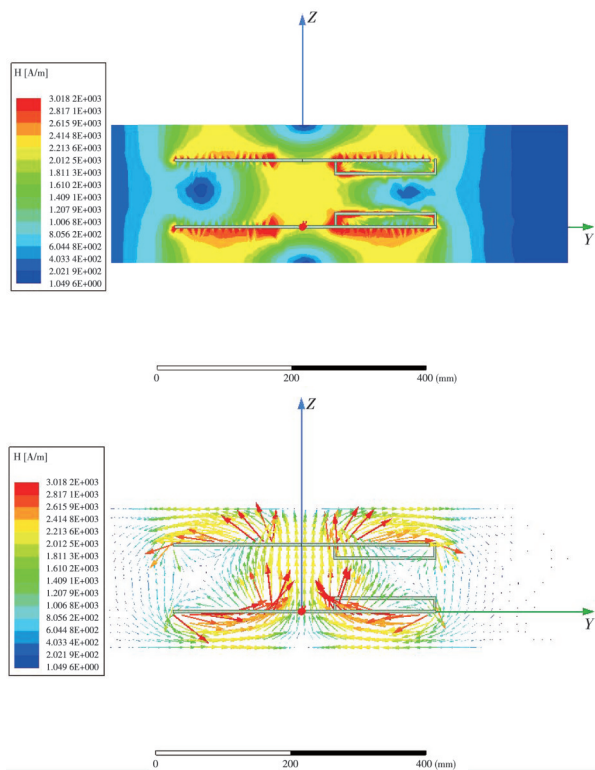


图 8 方形线圈在 Y 轴偏移量为 0 cm 的磁场分布及磁力线云图
 Fig. 8 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of square coil with Y-axis offset of 0 cm

通过对比圆形线圈和方形线圈在互感值、输出电流、输出电压、输出功率及传输效率在 Y 轴偏移情况下的测量参数，可以看到圆形线圈的互感值远高于方形线圈，随着 Y 轴偏移距离越大，两种线圈的耦合系数、输出电流、输出电压输出功率及传输效率都呈现减小趋势。虽然在偏移过

程中方形线圈耦合系数、输出电压和电流比圆形线圈变化率要小，功率输出稳定性较好，但在偏移量小于 20 cm 时，圆形线圈的输出功率和传输效率要优于方形线圈，如图 11 所示。

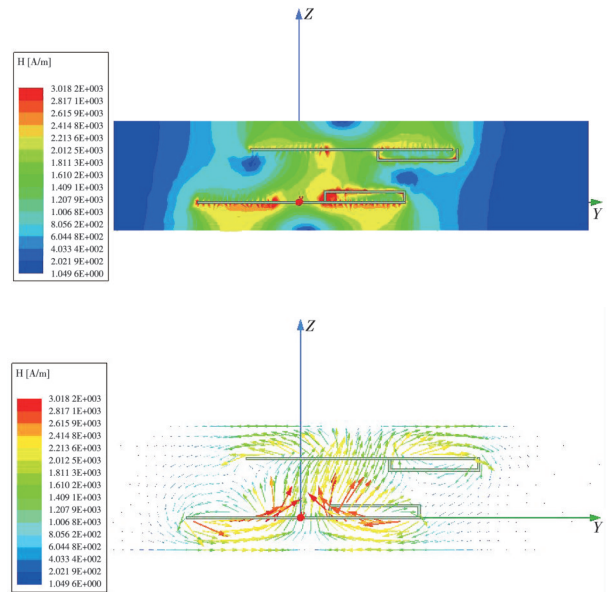


图 9 方形线圈在 Y 轴偏移量为 10 cm 的磁场分布及磁力线云图
 Fig. 9 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of square coil with Y-axis offset of 10 cm

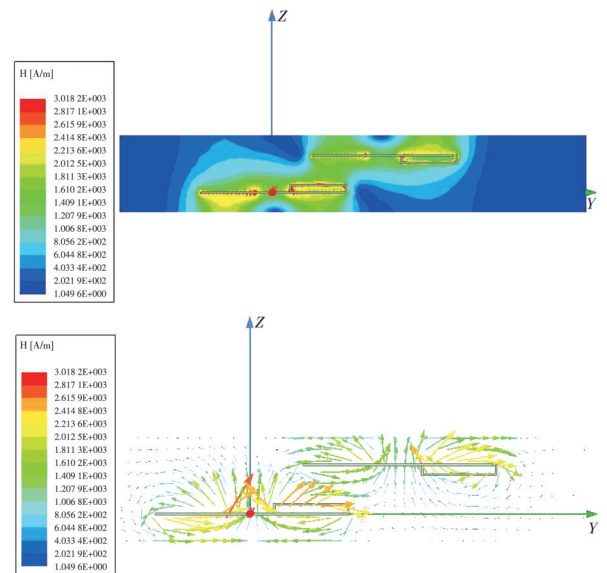


图 10 方形线圈在 Y 轴偏移量为 20 cm 的磁场分布及磁力线云图
 Fig. 10 Magnetic field distribution and magnetic line cloud diagram of square coil with Y-axis offset of 20 cm

通过仿真结果可以看出，圆形线圈即使在 Y 轴偏移 10 cm 的情况下，仍能保证接近 70% 的传输效率，其输出功率达到了 2.43 kW，远高于方形线圈，如表 3 所示。因此，本文耦合线圈在最终方案选取及优化设计上选用圆形线圈作为设计对象。

表3 圆形及方形线圈Y轴偏移测试参数

Tab. 3 Y-axis offset test parameters of circular and square coils

线圈类型	Y轴偏移量/cm	耦合系数	输出电压(有效值)/V	输出电流(有效值)/A	输出功率/W	传输效率/%
圆形线圈	0	0.31	199.7	14.6	2 915.6	83.3
	10	0.23	196.3	12.4	2 433.5	69.5
	20	0.02	156.3	6.8	1 063.4	28.2
方形线圈	0	0.19	193.2	12.7	2 454.3	70.1
	10	0.13	188.1	9.8	1 843.2	52.7
	20	0.03	162.0	8.4	1 361.1	38.9

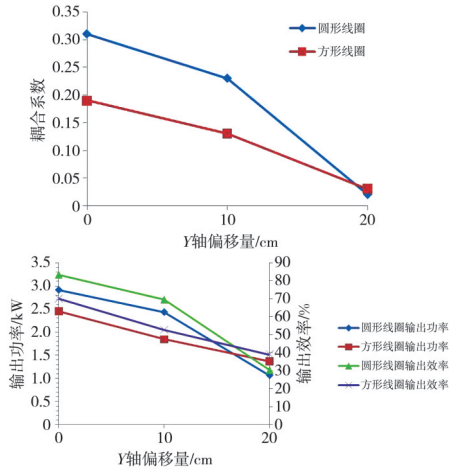


图11 圆形线圈和方形线圈在不同偏移情况下的耦合系数、输出功率及输出效率的变化情况

Fig. 11 Changes of coupling coefficient, output power and output efficiency of circular coil and square coil under different offsets

3 耦合线圈抗偏移优化设计

提升无线电能传输功率和耦合线圈传输效率的关键因素是线圈的耦合系数。由于线圈的稀疏绕线方法对耦合线圈的自感系数和互感系数有一定影响^[9], 因此在不改变线圈匝数和尺寸参数的条件下, 本文采取调整线圈间距的方法提升线圈的耦合系数。在不改变原线圈内径的情况下, 将圆形线圈后5扎铜线改为等减间距的缠绕方式(每扎间距减少0.2 cm)进行优化, 其优化设计如图12所示。

通过仿真分析可知, 优化线圈的耦合系数和传输效率在线圈未偏移的情况下达到了0.34和85.1%, 在发生10 cm侧向偏移情况下依旧能够达到0.29和75.8%, 虽然在20 cm侧向偏移情况下也存在耦合系数和传输效率急剧下降的现象, 但相较于原线圈传输性能在偏移情况下有了明显提升, 且耦合系数、输出电压和电流的变化率较优化前也得到了有效改善。其仿真结果和效果如图13所示。

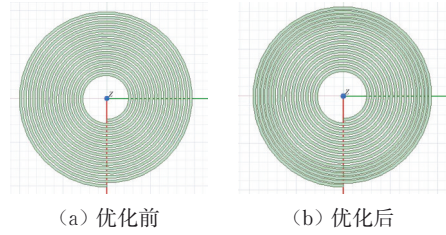


图12 圆形线圈优化方设计

Fig. 12 Optimal design of circular coil

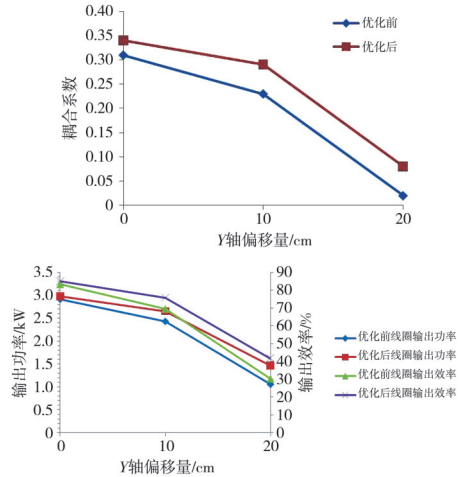


图13 优化前后线圈在不同偏移情况下的耦合系数、输出功率及输出效率的变化情况

Fig. 13 Changes of coupling coefficient, output power and output efficiency of coils before and after optimization under different offsets

由于无磁芯的耦合线圈结构磁场空间外溢较大, 能量利用率较低, 因此, 在优化线圈的结构基础上, 本文通过采用增加铁芯的方法提升耦合线圈的磁场聚拢性, 从而进一步加强车载无线充电线圈的传输功率和效率。目前耦合线圈磁芯结构常见有I型、U型和E型3种方案。虽然E型磁芯价格成本高于I型和U型磁芯, 并在磁场屏蔽性能上不如U型磁芯, 但在传输距离和传输效率上要远优于I型和U型磁芯^[10], 因此, 本文最终采用E型铁氧体磁芯的线圈组合方案。磁芯中部圆柱体设计半径为4.5 cm, 圆柱体厚度与磁芯四周外边厚度一致, 设计厚度为1 cm。增加铁芯效果如图14所示。通过相同Y轴偏移实验结果

分析, 在铁氧体铁芯的作用下, 优化后的线圈耦合系数和输出功率有显著提升, 其磁场云图和磁力线云图如图 15~图 17 所示。

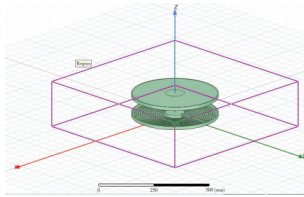


图 14 ANSYS Maxwell 优化圆形线圈磁芯方案

Fig. 14 optimization scheme of ANSYS Maxwell circular coil core

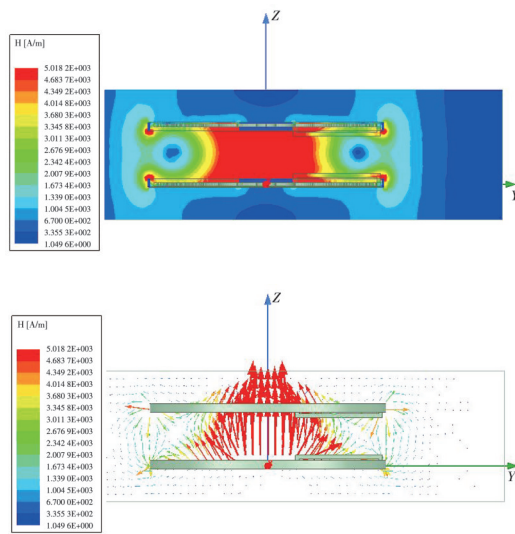


图 15 优化圆形线圈在 Y 轴偏移量为 0 cm 的的磁场分布及磁力线云图

Fig. 15 Magnetic field distribution and magnetic force line cloud diagram of optimized circular coil with Y-axis offset of 0 cm

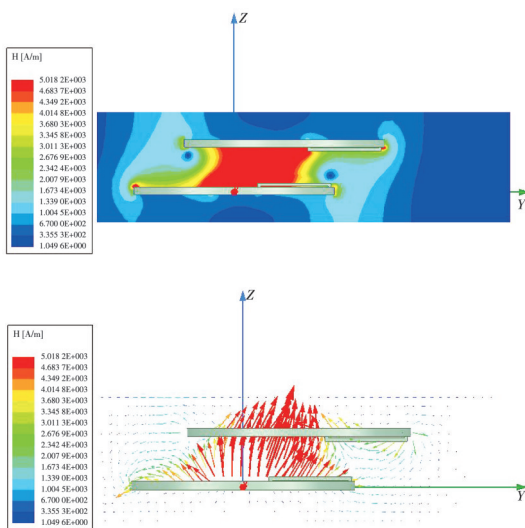


图 16 优化圆形线圈在 Y 轴偏移量为 10 cm 的的磁场分布及磁力线云图

Fig. 16 Magnetic field distribution and magnetic force line cloud diagram of optimized circular coil with Y-axis offset of 10 cm

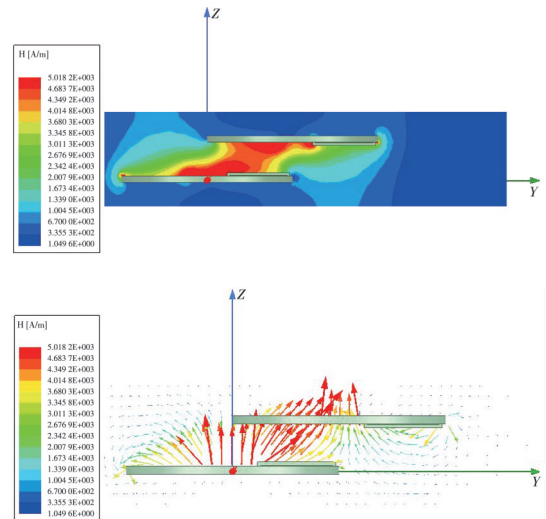
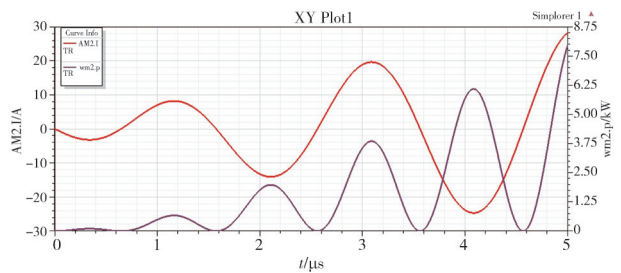
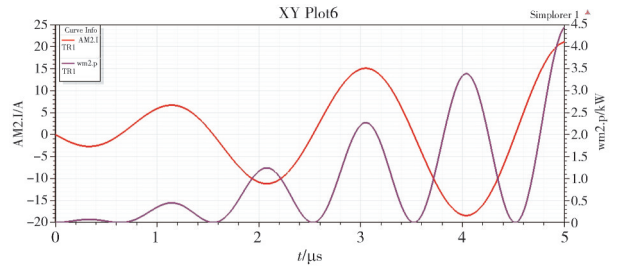


图 17 优化圆形线圈在 Y 轴偏移量为 20 cm 的的磁场分布及磁力线云图

Fig. 17 Magnetic field distribution and magnetic force line cloud diagram of optimized circular coil with Y-axis offset of 20 cm



(a) 10 cm 偏移



(b) 20 cm 偏移

图 18 优化线圈在偏移 10 cm 和 20 cm 时输出线圈功率和电流值
Fig. 18 Output power and current value of optimized coil with Y-axis offset of 10 cm and 20 cm

通过仿真结果可知, 耦合线圈优化方案在采用了 E 型铁氧体磁芯后, 耦合线圈互感值得到了较大提升。在 Y 轴偏移量测试中, 即使当 Y 轴偏移量为 10 cm 时, 输出功率有效值最大可达 3 174.4 kW, 传输效率达到了 90.1%; 即使 Y 轴偏移为 20 cm 时, 输出功率也达到了 2 996.4 kW, 传输效率达到了 85% 以上, 其 Simplorer 仿真测试结果如图 18 所示, 符合 GB/T 38775.1—2020 标准规定的在偏移条件下系统

效率不低于85%的测试要求^[11]。

4 结 语

本文对磁耦合谐振式WPT系统的耦合线圈抗偏性能进行研究。在根据耦合线圈的互感系数对磁耦合谐振式WPT传输电路输出功率和传输效率有显著影响的理论研究基础上,通过建立ANSYS Maxwell和ANSYS Simplorer联合仿真模型,对耦合线圈结构类型和优化设计进行仿真分析。分析得出圆形线圈在小于20 cm的偏移条件下的传输性能要优于方形线圈,并且圆形线圈在采用等减间距的优化方案后,耦合系数和传输效率在线圈偏移情况下有了明显提升。为进一步提升线圈传输功率,在耦合线圈上增设E型铁氧体磁芯,经过仿真分析,当线圈Y轴偏移20 cm时,传输效率达到了85%以上,符合GB/T 38775.1—2020标准中偏移条件下传输效率测试要求。该仿真结果能够为电动汽车磁耦合谐振式无线充电线圈设计提供一定参考依据。

参考文献:

- [1] 邱兴阳, 梁锋林, 郑维清, 等. 微型电动汽车动态无线充电技术的研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 99-104.
 QIU Xingyang, LIANG Fenglin, ZHENG Weiqing, et al. Research on dynamic wireless charging technology for micro electric vehicle[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 99-104. (in Chinese)
- [2] 胡超, 李宏海, 李振华, 等. 电动汽车无线充电应用及发展趋势[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 330-336.
 HU Chao, LI Honghai, LI Zhenhua, et al. Application and development trend of electric vehicle wireless charging[J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 16(2): 330-336. (in Chinese)
- [3] 韩子新, 王存旭. 基于电磁超材料的磁耦合谐振式无线电能传输研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2022, 18(3): 51-56.
 HAN Zixin, WANG Cunxu. Research on magnetically coupled resonant radiowireless energy transmission based on electromagnetic metamaterials[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2022, 18(3): 51-56. (in Chinese)
- [4] 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.
 LI Yang, SHI Shaobo, LIU Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 389-403. (in Chinese)
- [5] 谭泽富, 张伟, 王瑞, 等. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 42-47.
 TAN Zefu, ZHANG Wei, WANG Rui, et al. Review on wireless charging technology for electric vehicles[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 42-47. (in Chinese)
- [6] 尚新娟. 磁耦合谐振式WPT系统的传输特性和磁场构型[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [7] 郝文美, 张立伟, 蔡娇, 等. 基于输出能效最优的感应电能传输系统耦合线圈设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1904-1914.
 HAO Wenmei, ZHANG Liwei, CAI Jiao, et al. Coupling coils design of inductive power transfer system based on optimal output power efficiency[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1904-1914. (in Chinese)
- [8] 孔治国, 张宝强, 李川, 等. 浅析电动汽车无线充电系统测试技术[J]. 汽车电器, 2021(5): 13-17.
 KONG Zhiguo, ZHANG Baoqiang, LI Chuan, et al. Analysis on electric vehicle wireless power transfer system test technology[J]. Auto Electric Parts, 2021(5): 13-17. (in Chinese)
- [9] 郭微, 张健. 电动汽车无线充电系统耦合线圈的优化设计[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2021, 34(4): 36-43.
 GUO Wei, ZHANG Jian. Optimal design of coupling coil for wireless charging system of electric vehicle[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 36-43. (in Chinese)
- [10] 刘佳欣. 电动汽车行驶无线充电系统磁耦合机构的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电动汽车无线充电系统, 第1部分: 通用要求 GB/T 38775.1—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.