

文章编号: 1671-7449(2026)01-0045-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 45-54.

机场电动摆渡车动态无线充电耦合线圈抗偏特性

王鑫^{1*}, 余曼², 卫军朝¹, 赵坤¹

(1. 西安航空学院 车辆工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 机场电动摆渡车由于其使用环境路线较为固定, 且整车设计一般具有较低的离地间隙, 因此与电动汽车动态无线电能传输技术具有良好的适配性。为进一步研究耦合线圈构型对抗偏传输性能的影响, 选用适配电动汽车动态无线充电的LCC-S补偿电路对威海广泰某型机场电动摆渡车DD型耦合线圈进行抗偏性能分析。根据发射线圈间距和机场摆渡车行驶环境特点设计了一种基于纵向和侧向偏移的测试方案。通过Ansoft Maxwell与Simplorer联合仿真分析, 当DD线圈采用等增变匝间距圆角优化设计并配合I型铁氧体磁芯的方法, 该线圈在未发生偏移时, 输出功率达到7.31 kW, 传输效率最大达到91.3%, 即使在耦合线圈X轴偏移200 cm及Y轴偏移50 cm的情况下, 输出功率仍能够达到6.83 kW, 传输效率也达到85.3%, 满足国家电动汽车无线充电耦合线圈的抗偏性能传输要求。

关键词: 机场电动摆渡车; 耦合线圈设计; 联合仿真分析; 抗偏性能

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026001

引用格式: 王鑫, 余曼, 卫军朝, 等. 机场电动摆渡车动态无线充电耦合线圈抗偏特性[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 45-54.

WANG Xin, YU Man, WEI Junzhao, et al. Anti-deflection coupling coil for magnetically coupled resonant wireless charging technology of airport electric shuttle bus[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 45-54.

Anti-Deflection Coupling Coil for Magnetically Coupled Resonant Wireless Charging technology of Airport Electric Shuttle Bus

WANG Xin^{1*}, YU Man², WEI Junzhao¹, ZHAO Kun¹

(1. School of Vehicle Engineering, Xihang University, Xi'an 710077, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The airport electric shuttle bus has good adaptability to the dynamic wireless power transmission technology of electric vehicles due to its fixed usage environment and generally low ground clearance design. To further investigate the influence of coupling coil configuration on the anti-bias transmission performance, an LCC-S compensation circuit adapted for dynamic wireless charging of electric vehicles is used to analyze the anti-bias performance of the DD type coil of an airport electric shuttle bus from Weihai Guangtai. A testing scheme is designed based on longitudinal and lateral offset according to the spacing between transmission coils and the characteristics of the airport shuttle driving environment. Through Ansoft Maxwell and Simplorer joint simulation analysis, it is found that when the DD coil is optimized with equal increasing and variable turn

【收稿日期】2024-12-29

【基金项目】陕西省科技厅重点研发计划资助项目(2023-YBGY-122)

*【通信作者】王鑫(1984—), 男, 副教授, 主要从事新能源汽车无线充电技术研究。E-mail: power0913@126.com。

spacing rounded corners and combines with I-type ferrite core, the output power of the coil and the maximum transmission efficiency reach 7.31 kW and 91.3%, respectively, without displacement. Even when the coupling coil is offset by 200 cm in the X-axis and 50 cm in the Y-axis, the output power can still reach 6.83 kW and the transmission efficiency reaches 85.3%, meeting the anti-bias performance transmission requirements of the national electric vehicle wireless charging magnetic coupling coil.

Key words: airport electric shuttle bus; coupling coil design; joint simulation analysis; anti-deviation performance

0 引言

电动汽车动态无线充电技术是指汽车在行进过程中通过敷设于地面以下的供电导轨,以高频交变电磁场的形式将电能传输给行驶在地面上一定范围内的车辆电能接受机构,从而为车载储能设备充电^[1]。

在当前技术发展趋势下,由于电磁耦合谐振式无线充电技术可以有效避免火花和触电等问题,在提升设备运行可靠性、安全性、便利性和延长使用寿命等方面具有相当优势^[2],已然成为电动汽车动态无线充电技术领域的主流发展方向。

而对于机场摆渡车这一特殊车型,鉴于其作为非道路标准车辆,运行环境主要集中于地势平坦的停机坪区域,在整车设计环节,无需着重考虑越野性能,因而,通常采用较低的离地间隙设计方案。这种设计特性恰好与电动汽车无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术高度适配,有效降低了能量传输过程中的损耗,进而显著提升无线电能的传输效率,为机场摆渡车的高效、稳定运行提供有力支撑。

在电动汽车动态无线充电过程中,由于受到车辆载荷、路面情况、汽车行驶轨迹偏移等因素的影响,致使车辆在进行磁耦合谐振式无线充电

过程中,车载接收线圈与地面发射线圈相对位置频繁发生纵向或横向偏移,从而导致无线电能传输功率与效率出现较大变动。为进一步优化耦合线圈在偏移情况下的传输效率,目前,国内学者基于磁耦合谐振式电动汽车无线充电技术系统的研究主要致力于磁耦合结构优化、补偿电路拓扑优化、电磁兼容性优化、控制策略优化、双向馈电等方面^[3]。本文围绕磁耦合谐振式无线电能传输系统,深入探究其传输特性与磁场构型,同时结合电动机场摆渡车底盘结构特点,重点研究不同绕线构型磁耦合线圈在偏移时自感系数、耦合系数及传输效率的变化。借助理论推导与模拟分析,选定并设计适配的线圈结构与参数,提升偏移情况下的系统传输功率与效率,为开发纯电动机场摆渡车无线充电系统提供理论与实践参考。

1 电动摆渡车动态 WPT 系统影响因素分析

1.1 电动摆渡车动态 WPT 系统结构

电动汽车谐振式无线充电系统主要由发射端电路和接收端电路组成,其总体结构组成如图 1 所示。

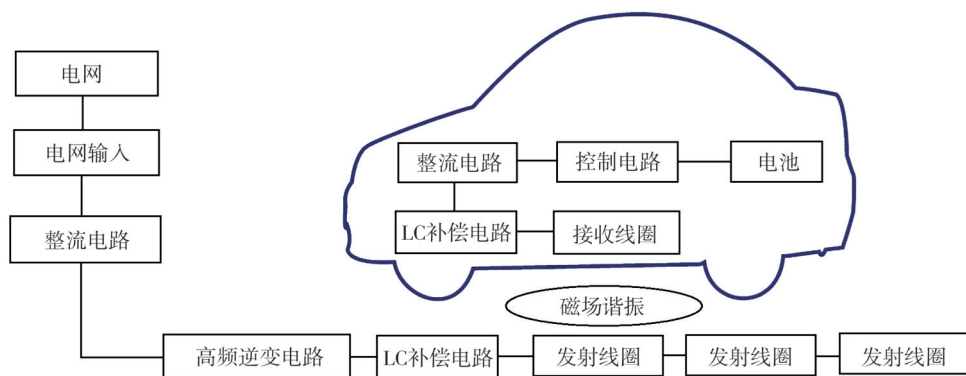


图 1 磁耦合谐振式动态无线电能传输系统

Fig. 1 Magnetically coupled resonant dynamic wireless charging system

其工作原理是发射端铺设在路基内部, 通过将电网的交流电进行整流滤波变为直流电, 之后通过高频逆变电路将其转换成高频交流电, 输送给发射线圈。接收端嵌入在电动车中, 一般为汽车的底盘内部。为提升能量传输效率, 在发射端与接收端的两个耦合线圈上引入 LC 补偿电路, 通过该电路的精准调节作用, 促使整个无线充电系统达到谐振状态。在此谐振条件下, 接收端能够产生磁感应电流, 此电流经整流器实施整流操作后, 即可为车载动力电池提供充电电能, 从而实现无线电能的高效传输。

在分析动态无线充电过程中, 如图 2 所示, 由于电动汽车在行驶过程中, 其所处位置及行驶速度始终处于动态变化的状态, 因此, 动态无线充电耦合系统的设计需要考虑如何适应不同的行驶状态和路况条件, 以提高系统充电效率和抗偏性^[4]。在接收线圈由位置 A 移动到位置 B 的过程中, 通过发射线圈 1 和发射线圈 2 两者交替切换工作, 实现接收线圈在动态行驶过程中即使出现了轴线偏移, 也能确保收发线圈互感值不会出现急剧下降的情况。因此,

在针对电动机场摆渡车动态无线充电电路拓扑结构展开深入探究的过程中, 基于其运行特性与实际工况, 本文创新性地提出一种分析模型。考虑到电动机场摆渡车通常在相对固定的停机坪路线行驶, 且其分段式动态无线充电系统具备一定特殊性, 从电路分析角度而言, 该系统内的线圈位置关系可近似看作一个静态无线充电系统的接收线圈在由多个呈阵列分布的发射线圈所构建的轨道上进行移动。这种模型的构建为后续精准剖析电动机场摆渡车动态无线充电电路的拓扑结构、传输特性以及优化策略等诸多方面, 提供了简洁且有效的理论基础, 有助于进一步深化对该领域的研究。考虑到接收线圈与发射线圈 3~n 之间距离较远, 系统磁漏较大, 互感值接近零, 且所有发射线圈都处于工作状态, 会造成不必要的能量损耗与浪费。因此, 为进一步简化动态无线充电等效电路模型, 本文采用两个发射线圈和一个接收线圈的静态无线充电拓扑电路形式进行磁耦合性能分析, 有助于间接分析分段式动态无线充电系统的抗偏性能。

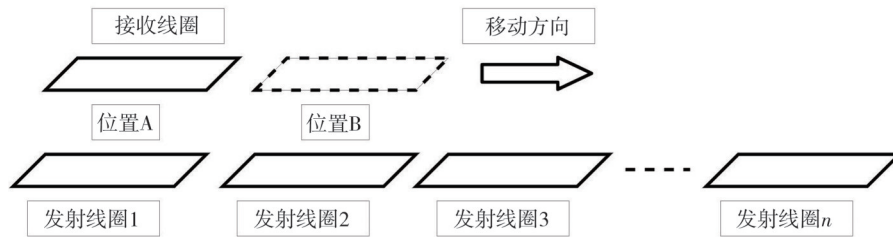


图 2 动态无线充电过程中收发线圈位置变化情况

Fig. 2 Position of receiving and transmitting coils during dynamic wireless charging process

1.2 补偿电路结构选择与分析

相对于其他拓扑补偿电路结构, 串联-串联(SS)补偿电路结构简单, 发送端与接收端的参数完全独立且不会相互影响, 输出功率比串联-并联(SP)补偿电路的更大, 且适合短距离传输。但 SS 补偿电路也同样存在抗偏能力不强, 受传输环境的影响较大, 容易导致传输性能不稳定或传输效率下降的问题^[5]。因此, 为优化 SS 补偿电路传输性能的局限性, 本文采用 LCC-S 型补偿电路结构, 该电路原边采用 LCC 优化拓扑结构, 不仅可以保证原边恒流输出, 且可以改善无线电能传输的抗偏性能^[6]; 同时, 副边采用 S 型补偿电路, 可以简化车载补偿电路结构, 满足电动汽车轻量化设计需求。

为进一步分析电动摆渡车耦合线圈动态无线充电效果, 本文采用双发射线圈 LCC-S 型补偿电路作为电动摆渡车使用的电路拓扑结构, 且设定

双发射电路结构相同, 如图 3 所示。

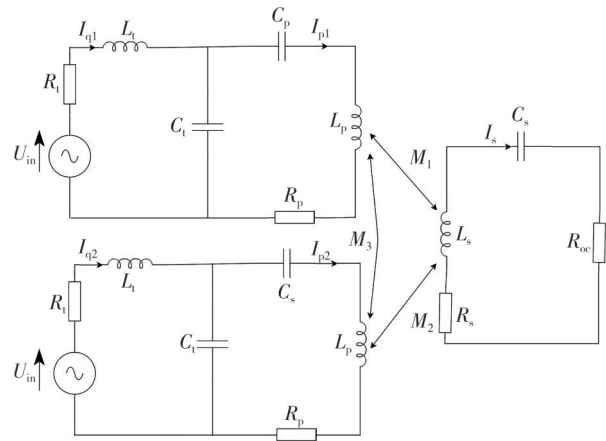


图 3 LCC-S 补偿电路模型

Fig. 3 LCC-S compensation circuit model

图 3 中, U_{in} (V) 为交流电源, L_p (μ H) 和 L_s (μ H) 分别为发射线圈自感和接收线圈自感, R_l (Ω) 为补偿线圈内阻及电源内阻之和, R_p (Ω) 和

$R_s(\Omega)$ 为发射线圈与接收线圈的内阻, $R_{oc}(\Omega)$ 为接收回路负载, $C_t(\text{pF})$ 为原边电路并联补偿电容, $C_p(\text{pF})$ 和 $C_s(\text{pF})$ 分别为原边和副边串联补偿电容, $I_q(\text{A})$ 、 $I_p(\text{A})$ 、 $I_s(\text{A})$ 为各支路电流, $M_1(\mu\text{H})$ 、 $M_2(\mu\text{H})$ 和 $M_3(\mu\text{H})$ 分别为线圈之间的互感值。

根据戴维南-诺顿等效定理, 为进一步简化电路, 便于后续分析, 图3可简化并等效为图4。其中, U_{int} 为变换后的等效输入电压, X_t 为变换后等效电抗, Z_{in} 和 Z_{int} 分别为原边电路阻抗和等效电路原边阻抗。且满足

$$\begin{cases} X_{L_t} = \omega L_t, \\ X_{C_t} = 1/\omega C_t, \\ X_t = \frac{X_{C_t} \cdot X_{L_t}}{X_{C_t} - X_{L_t}}, \\ \frac{U_{\text{in}}}{U_{\text{int}}} = \frac{Z_{\text{int}}}{Z_{\text{in}}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{L_t} 为原边电路补偿线圈的电抗; X_{L_c} 为原边电路并联补偿电容的电抗; ω 为交流电源的角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为交流电源频率。

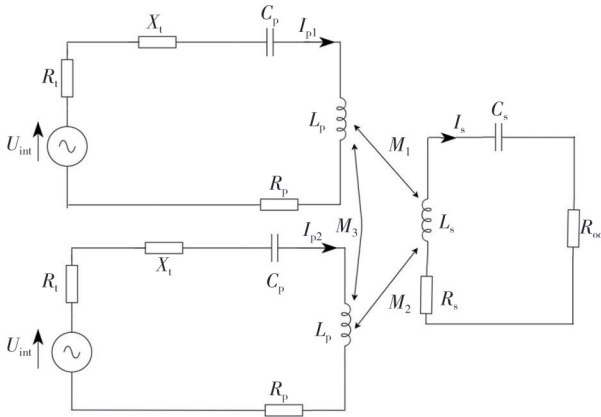


图4 LCC-S等效电路模型

Fig. 4 LCC-S equivalent circuit model

且有

$$\begin{cases} X_{L_p} = \omega L_p, \\ X_{C_p} = 1/\omega C_p, \\ X_{L_s} = \omega L_s, \\ X_{C_s} = 1/\omega C_s, \\ X_{\text{int}} = X_t + X_{L_p} - X_{C_p}, \\ X_s = X_{L_s} - X_{C_s}, \\ I_p = I_{p1} + I_{p2}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_{int} 和 X_s 为等效电路原边和副边的电抗; X_{L_p} 和 X_{L_s} 为原边和副边电路耦合线圈的电抗; X_{C_p} 和 X_{C_s} 为原边和副边电路补偿电容的电抗; I_{p1} 和 I_{p2} 分别为原边电路1和原边电路2等效电流; I_p 为原边

供电系统总电流。因此, 有

$$Z_{\text{int}} = R_t + R_p + jX_{\text{int}}, \quad (3)$$

$$Z_s = R_s + R_{oc} + jX_s. \quad (4)$$

运用基尔霍夫定理和互感原理对等效谐振电路模型建立方程, 有

$$Z_{\text{int}} I_{p1} - j\omega(M_1 I_s + M_3 I_{p2}) = U_{\text{int}}, \quad (5)$$

$$Z_{\text{int}} I_{p2} - j\omega(M_2 I_s + M_3 I_{p1}) = U_{\text{int}}, \quad (6)$$

$$Z_s I_s - j\omega(M_1 I_{p1} + M_2 I_{p2}) = 0. \quad (7)$$

由于两个原边耦合线圈之间的互感值较小, 可以忽略, 为进一步简化计算, 设定 $M_3 = 0$ 。上式可求得

$$\begin{cases} I_{p1} = \frac{U_{\text{int}} + j\omega M_1 I_s}{Z_{\text{int}}}, \\ I_{p2} = \frac{U_{\text{int}} + j\omega M_2 I_s}{Z_{\text{int}}}, \\ I_s = \frac{j\omega(M_1 + M_2)U_{\text{int}}}{Z_{\text{int}}Z_s + \omega^2(M_1^2 + M_2^2)}. \end{cases} \quad (8)$$

同时, 求得原边供电系统总电流为

$$I_p = \frac{\omega^2(M_1 + M_2)^2 U_{\text{int}}}{Z_{\text{int}}(Z_{\text{int}}Z_s + \omega^2(M_1^2 + M_2^2))}, \quad (9)$$

输入功率与输出功率分别为

$$P_{\text{in}} = U_{\text{int}}(I_{p1} + I_{p2}), \quad (10)$$

$$P_{\text{out}} = |I_s|^2 R_{oc}, \quad (11)$$

则系统的传输效率 η 为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}. \quad (12)$$

当系统发生谐振, 电路中发射端与接收端回路的容抗和感抗应相互抵消, 则有

$$\omega L_t = \frac{1}{\omega C_t}, \quad \omega L_p = \frac{1}{\omega C_p}, \quad \omega L_s = \frac{1}{\omega C_s}. \quad (13)$$

因而, 结合式(1)~(13)得出

$$P_{\text{out}} = \frac{\omega^2 U_{\text{int}}^2 (M_1 + M_2)^2 R_{oc}}{[(Z_{\text{int}}Z_s + \omega^2(M_1^2 + M_2^2))]^2}, \quad (14)$$

$$\eta = \frac{U_{\text{int}} Z_{\text{int}} R_{oc}}{Z_{\text{int}}Z_s + \omega^2(M_1^2 + M_2^2)}. \quad (15)$$

由式(14)和(15)可以看出, 在确定LCC-S补偿电路中输出电压、输出电压频率及电源电阻和负载电阻参数后, 影响输出功率 P_{out} 和传输效率 η 的主要因素是双发射线圈与接收线圈之间的互感值、耦合线圈的阻抗、输入电压及电流频率。因而, 在车辆进行动态无线充电过程中, 随着收发线圈之间相对位置的变化, M_1 和 M_2 的互感值也在发生动态变化。 M_1 和 M_2 可表示为

$$M_1 = k_1 \sqrt{L_{p1} L_s}, \quad M_2 = k_2 \sqrt{L_{p2} L_s}, \quad (16)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为耦合线圈之间的耦合系数; L_{p1} 、 L_{p2} 和 L_s 分别为耦合线圈的自感值。对线圈耦合系数的影响因素主要有发射端与接收端两个互感线圈的构型、匝数、内径、外径、线圈切面直径、匝间距及线圈材料等^[7]。因此, 本文的研究重点是车辆在行驶过程中, 当耦合线圈发生纵向及侧向偏移时, 为进一步改善耦合谐振式无线充电系统的传输效率, 提升其线圈抗偏性能, 以耦合线圈结构选型设计和参数优化为研究对象, 根据某型电动机场摆渡车的底盘参数, 最终设计一款符合无线充电传输性能要求的耦合线圈。

2 电动摆渡车无线充电系统收发线圈设计与仿真分析

2.1 电动摆渡车无线充电系统收发线圈设计

无线充电平面耦合线圈常见结构主要有传统的圆形、矩形线圈以及 DD 型、DDQ 型和 BP 型等组合线圈。圆形耦合线圈目前广泛应用在静态电动汽车无线充电领域, 由于其结构无方向性, 因此各方向偏移容忍度一致。圆形线圈与同尺寸其他线圈相比, 在相同气隙且未发生偏移的情况下传输能力较强, 但相对耦合系数较小, 在发生线圈偏移的情况下, 传输性能急剧下降; 相较于圆形线圈, 矩形线圈耦合系数高、产生的磁场范围大、抗水平偏差能力强, 且线圈结构和电动汽车底盘契合度较高, 但也存在拐角处的磁场分布不均匀, 会增加线圈的漏磁损耗等问题; DD 型线圈是由两个电路并联、磁路串联的矩形线圈组成, 具有高磁通路径、单极磁场、低损耗、低泄露等优点^[8]; DDQ 型线圈是在 DD 型线圈的基础上增加了一个 Q 型线圈, 在 x 、 y 轴方向都具有较好的抗偏移能力, 但该线圈结构复杂, 用铜量较多, 线圈总体损耗较高^[9]; BP 型线圈与 DDQ 型线圈类

似, 具有相同的优点, 且用铜量减少, 但该型线圈控制电路复杂。因此, 综合上述线圈抗偏性能、传输性能及经济性, 本文在电动摆渡车动态无线充电耦合线圈结构设计上采用发射线圈为矩形线圈结构, 接收线圈为 DD 型线圈结构, 其效果如图 5 所示。

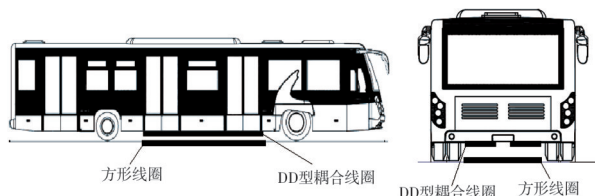


图 5 电动机场摆渡车无线充电耦合线圈设计与布置

Fig. 5 Design and arrangement of wireless charging coupling coils for electric airport shuttle buses

DD 型耦合线圈结构参数设计不仅对 DD 型线圈自感起着关键作用, 还会显著影响 DD 型磁耦合机构互感性能和抗偏性能。对于 DD 型线圈, 匝数越多, 线圈的电感量越大, 抗偏性能越好, 但也会增加线圈的电阻和体积。同时, DD 型线圈直径越大, 线圈的电感量越大, 抗偏性能越好, 但也会增加线圈的体积和成本; 而线圈的线径越大, 其线圈的电阻越小, 抗偏性能越好, 但也会增加线圈的成本和重量。因此, DD 型线圈的抗偏性能和尺寸参数之间存在一定的关系, 需要根据具体的应用场景和要求进行综合考虑。

本文以威海广泰某型机场电动摆渡车为设计目标, 其车身参数为 14 300 mm×3 140 mm×3 200 mm, 在行驶工况下, 车辆最小离地间隙为 330 mm。为满足 GB/T 38775.1—2020 标准规定的电动汽车 WPT3 等级要求^[10], 选取耦合线圈接收距离为 300 mm, 无线充电系统输出功率为 8.0 kW, 在综合考虑汽车底盘参数、机场单向行驶路面宽度、线圈重量及应用成本等因素下, 发射线圈和接收线圈尺寸参数设计如表 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

	线圈匝数	线圈线径/cm	线圈内圈长边/cm	线圈内圈短边/cm	线圈匝间距/cm	线圈材质
发射线圈	16	0.5	200	100	2	铜
接收线圈	10	0.5	70	30	5	铜

2.2 电动摆渡车无线充电系统抗偏性能仿真分析

电动摆渡车在行驶过程中由于受驾驶员及外界因素影响难以一直保持沿发射线圈道路中线行驶, 致使车辆在行驶过程中必然会出现发射线圈与接收线圈在纵向及侧向位置产生偏移现象, 而这种现象

会导致无线充电电磁耦合磁场存在一定漏磁现象, 影响无线充电系统的传输效率^[11]。因此, 本文对耦合线圈结构进行优化设计, 以改善电动摆渡车在动态无线电能传输过程中, 因耦合线圈发生纵向及侧向偏移而导致充电效率下降的问题。

为进一步验证耦合线圈的优化效果, 本文通

过构建无线充电磁耦合线圈的 ANSYS Maxwell 与 Simplorer 联合仿真模型,模拟在给定输入条件下接收线圈相对于发射线圈在纵向及侧向位置发生偏移的情况,并分析其不同情况下的传输性能。在偏移测试方案设计中,考虑车辆结构及偏移极限等因素,设置测试方案的纵向(X轴)偏移步长为 100 cm,偏移范围为 0~200 cm,侧向(Y轴)偏移步长为 25 cm,偏移范围为 0~50 cm。由于耦合线圈为轴线对称结构,因此,在发生前后偏移或左右偏移时,其传输性能近似,因此,本文在实验设计过程中只设计了正向偏移测试,具体测试方案如表 2 所示。

表 2 磁耦合线圈偏移测试方案

Tab. 2 Test scheme for offset of magnetic coupling coil

测试方案	Y轴偏移量/cm	X轴偏移量/cm
测试 1	0	0
		100
		200
测试 2	25	0
		100
		200
测试 3	50	0
		100
		200

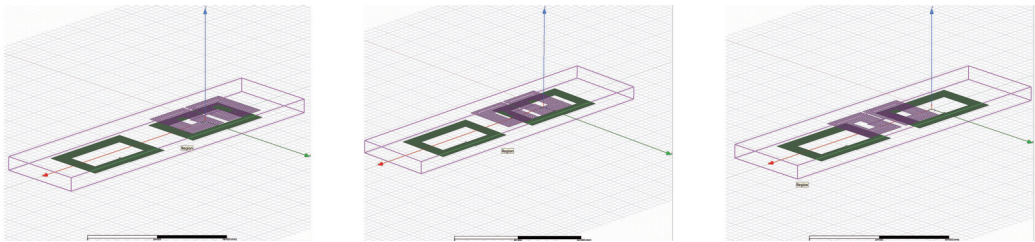


图 6 ANSYS Maxwell DD线圈仿真模型(测试 1 方案)

Fig. 6 ANSYS Maxwell DD coil simulation model(test plan1)

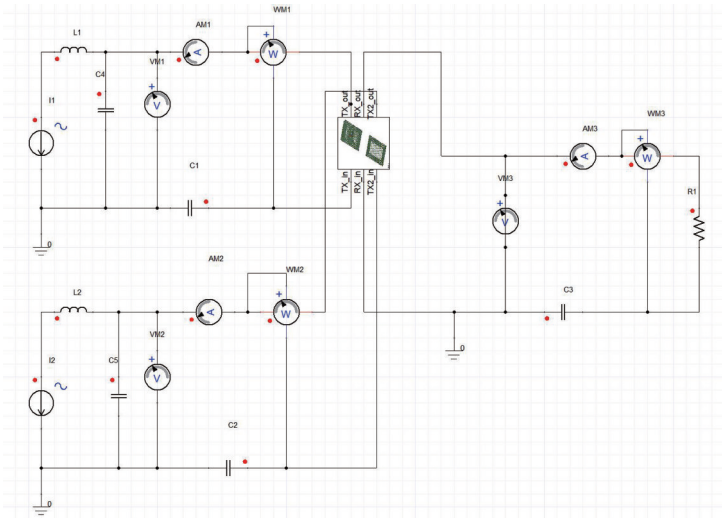


图 7 ANSYS Simplrer磁耦合线圈电路仿真模型(测试 1 方案)

Fig. 7 ANSYS Simplorer magnetic coupling coil circuit simulation model (test plan1)

图 6 为测试方案 1 的仿真效果,图 7 为 ANSYS Simplrer 磁耦合线圈电路仿真模型,图 8~图 10 为测试方案 1~3 仿真的磁场云图,表 3 为测试方案 1~3 的 DD 线圈偏移测试参数。

表 3 DD线圈偏移测试参数

Tab. 3 DD coil offset test parameters

测试方案	Y轴偏移量/cm	X轴偏移量/cm	线圈互感值/ μH	输出功率/kW	传输效率/%
测试 1	0	0	55.18	5.46	68.3
		100	12.45	1.85	23.1
		200	12.10	1.78	22.2
测试 2	25	0	46.64	4.96	62.0
		100	6.45	1.17	14.6
		200	7.05	1.52	19.0
测试 3	50	0	30.21	2.92	36.5
		100	0.000 02	0.45	5.6
		200	0.000 06	0.61	7.6

通过对比表 3 仿真实验结果,可以看出 DD 线圈随着 Y 轴偏移距离增大,其线圈的互感值、输出功率及传输效率都呈现减小趋势。而线圈随着 X 轴偏移,由于受双发射线圈的影响,其线圈的互感值在 100 cm 偏移和 200 cm 偏移时变化量不大。当 DD 线圈在 X 轴和 Y 轴同时偏移时,在 X 轴偏移 100 cm 及 Y 轴偏移 50 cm 范围以上时,线圈的互感值急剧下降,传输效率急剧减少。

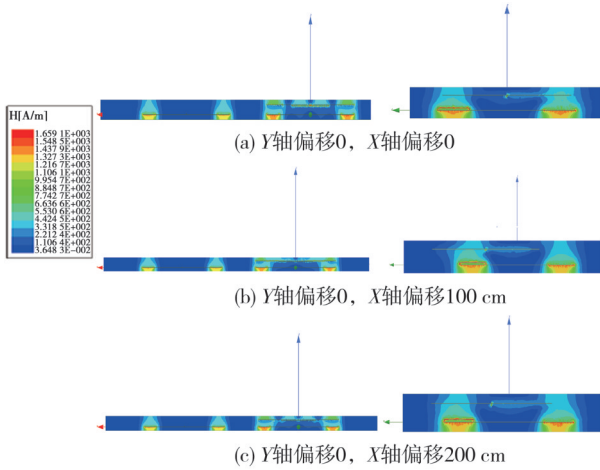


图 8 DD线圈在实验测试1方案下的磁场云图

Fig. 8 Magnetic field cloud map of DD coil under experimental test plan 1

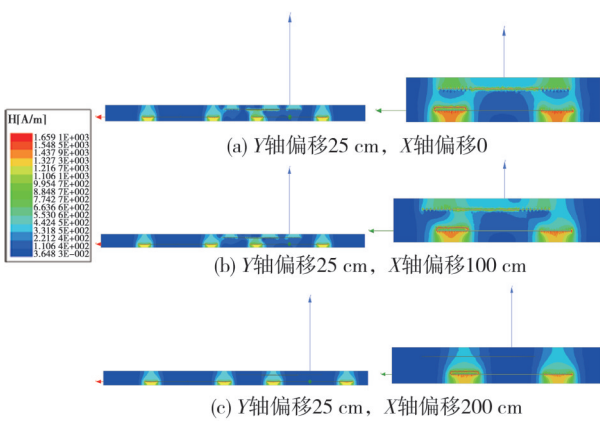


图 9 DD线圈在实验测试2方案下的磁场云图

Fig. 9 Magnetic field cloud map of DD coil under experimental test plan 2

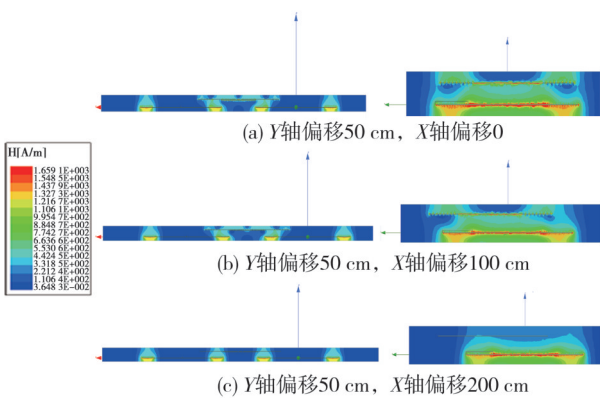


图 10 DD线圈在实验测试3方案下的磁场云图

Fig. 10 Magnetic field cloud map of DD Coil under experimental test plan 3

3 电动摆渡车无线充电耦合线圈抗偏移优化设计

在无线电能传输过程中,线圈互感值的高低

对电能传输功率和效率有着显著影响。在传输过程中,线圈发生偏移会降低电能传输的功率与效率,即线圈的互感值在线圈偏移过程中呈现下降趋势。为提升电动摆渡车无线电能传输抗偏性能,在不改变线圈尺寸参数的条件下,本文采用了优化磁耦合结构设计手段。郭微等^[12]在电动汽车无线充电系统耦合线圈的优化设计中,在不改变耦合线圈尺寸及内径的情况下,采用等增设计,即线圈匝间距从外至内等值增加,可以提升线圈磁耦合区域和互感值,优化了线圈的抗偏移性能,具有更好的传输性能。谭菊华等^[13]指出耦合线圈采用圆角设计可以减少电流在拐角处的集中,使电流分布更均匀,降低电阻和热量,有助于减少电磁场的散射和干扰,增强线圈之间的耦合效果,进而提高传输性能和效率。因此,本文对电动摆渡车无线充电 DD 型耦合线圈采用等增变匝间距圆角优化方案,即不改变原线圈内圈尺寸参数,将 DD 线圈直角结构调整为圆角结构,线圈前 5 匝铜线匝间距不变,圆角半径设计为 0.5 cm,将线圈 5 匝后铜线匝间距减少至 0.2 cm,且 5 匝后线圈圆角半径参数为 0.4 cm,其与原线圈对比效果如图 11 所示。

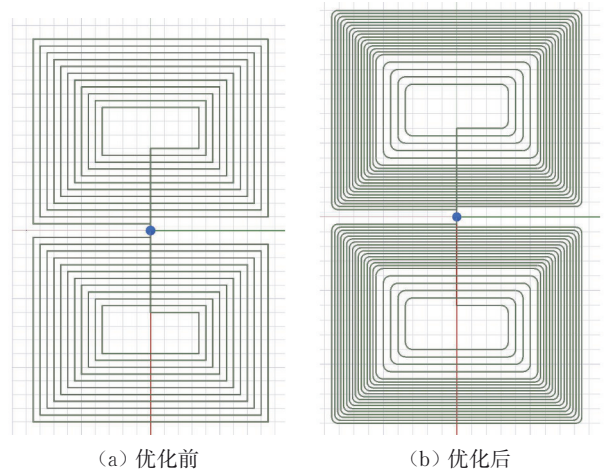


图 11 DD形线圈优化方设计

Fig. 11 Optimal design of DD coil

通过仿真分析可知,优化线圈的互感值和传输效率在线圈未偏移时为 132.3 μH 和 83.5%,耦合线圈在发生 X 轴偏移 100 cm 及 Y 轴偏移 25 cm 的情况下,互感值和传输效率依旧能够达到 82.1 μH 和 74.3%,但在 Y 轴偏移 50 cm 以上时,受线圈磁耦合区域面积减少的影响,优化线圈同样出现互感值和传输效率急剧下降的现象,但其传输性有显著提升。为进一步改善并优化耦合线

圈的传输性能,降低和减少耦合线圈在无线电能传输过程中的磁场外溢现象,本文通过增加铁氧体磁芯的方式提升耦合线圈的能量传输利用率。史佳兰^[14]指出在考虑磁场屏蔽性能、制造成本及传输距离等因素下,I型磁芯性能相较于阵列型磁芯、米字型磁芯、双米字型磁芯,其磁屏蔽效果最好、磁场耦合情况最佳,更加适配于车用DD型耦合线圈结构。因此,本文通过在线圈中增加I型铁芯的方式,进一步强化耦合线圈的磁场聚拢性,提升耦合线圈的电能传输抗偏性能,其效果如图12所示。

通过仿真结果可知,在使用I型铁氧体磁芯后,线圈的互感值得到了较大提升。当线圈未发生偏移时,输出功率为7.31 kW,传输效率达到最

大,为91.3%。即使在X轴偏移200 cm及Y轴偏移50 cm的情况下时,输出功率为6.83 kW,传输效率为85.3%,其磁场云图和Simplorer仿真测试结果如图13~图16所示。

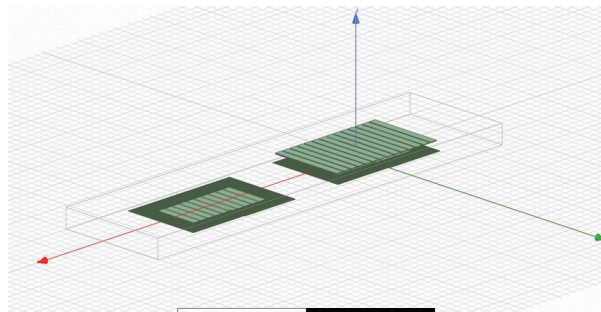


图12 增加I型铁芯的DD形线圈方案

Fig. 12 DD coil scheme with added I-type iron core

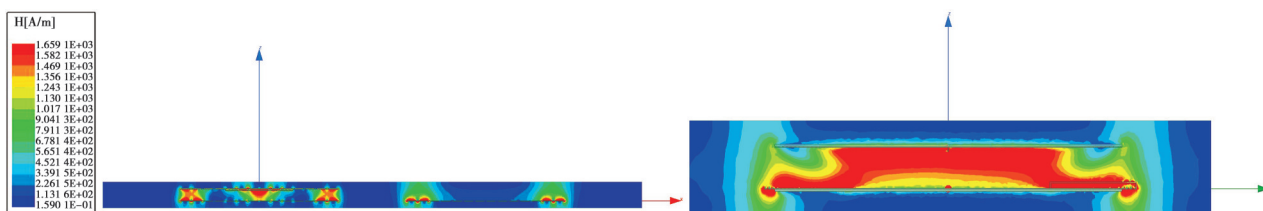


图13 优化后DD线圈在X轴偏移量为0 cm, Y轴偏移量为0 cm的磁场分布云图

Fig. 13 Magnetic field distribution cloud diagram of optimized DD coil with X-axis offset of 0 cm and Y-axis offset of 0 cm

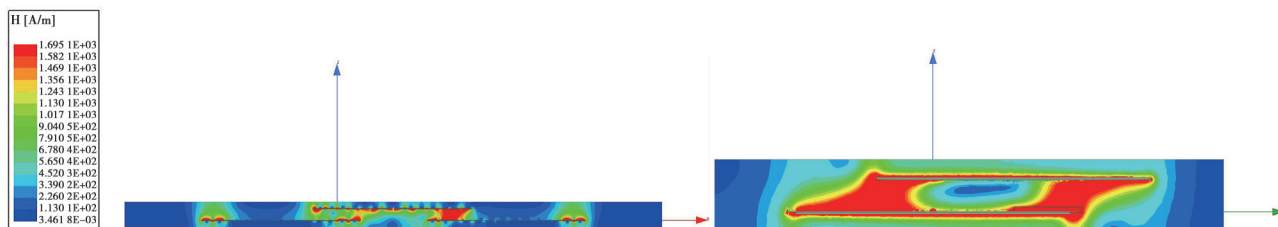


图14 优化后DD线圈在X轴偏移量为200 cm, Y轴偏移量为50 cm的的磁场分布云图

Fig. 14 Magnetic field distribution cloud diagram of optimized DD coil with X-axis offset of 200 cm and Y-axis offset of 50 cm

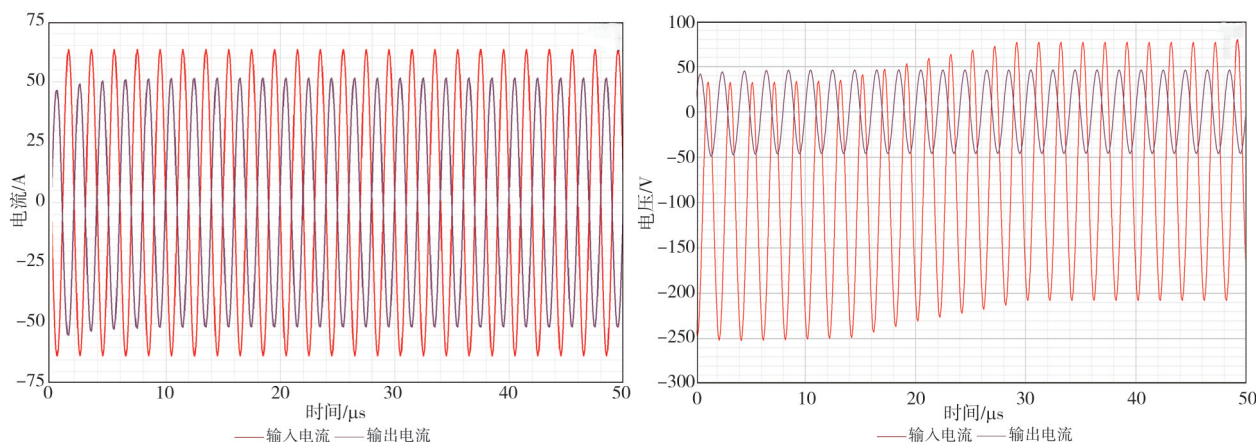


图15 优化后DD线圈在X轴偏移量为0 cm, Y轴偏移量为0 cm的电流和电压参数在50 μs的变化情况

Fig. 15 TVariation of input and output current and voltage parameters of the optimized DD coil with X-axis offset of 0 cm and Y-axis offset of 0 cm at 50 μs

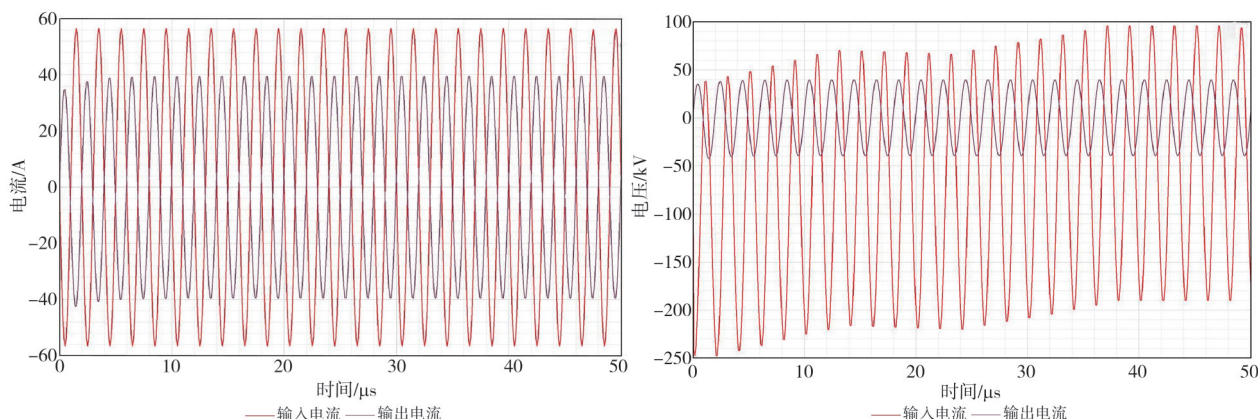


图 16 优化后 DD 线圈在 X 轴偏移量为 200 cm, Y 轴偏移量为 50 cm 的电流和电压参数在 50 μ s 的变化情况

Fig. 16 The variation of input and output current and voltage parameters of the optimized DD coil with X-axis offset of 200 cm and Y-axis offset of 50 cm at 50 μ s

4 结 论

为提升电动机场摆渡车动态无线充电抗偏性能,优化耦合线圈传输功率和效率,本文参考威海广泰某型机场电动摆渡车车体参数,设计并优化适配的 DD 型耦合线圈。通过对该线圈采用增变匝间距圆角设计,使电流分布更均匀,以改善耦合线圈传输效率。通过仿真显示,该型优化线圈搭配 I 型铁氧体磁芯时,系统最大输出功率 7.31 kW,传输效率最高 91.3%,即便 X 轴偏移 200 cm、Y 轴偏移 50 cm,输出功率仍有 6.83 kW,传输效率为 85.3%,满足 GB/T 38775.1—2020 标准中非偏移情况下传输效率不低于 85% 和偏移条件下传输效率不低于 80% 的测试要求。但目前该成果基于理论仿真分析,在实际应用过程中,系统会受外界环境、线圈铺设质量、驾驶员水平等因素影响,为进一步提升研究成果的真实性,后续需搭建实物测试系统做进一步论证研究。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

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] 潘文璇, 刘超, 张艺明, 等. 电动汽车磁场与电场混合耦合型无线电能传输技术综述[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 34-41.
PAN Wenxuan, LIU Chao, ZHANG Yiming, et al. Review of inductively and capacitively hybrid coupled wireless power transfer technologies for electric vehicles[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 34-41. (in Chinese)
- [3] 郑少杰. 电动汽车无线充电系统补偿电路拓扑与耦合结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [4] 严继超, 莫彬, 黄培新, 等. 电动汽车磁谐振无线充电系统关键技术研究综述[J]. 机电工程技术, 2024, 53(3): 7-12.
YAN Jichao, MO Bin, HUANG Peixin, et al. Review on key technologies of magnetic resonance wireless charging system for electric vehicles [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(3): 7-12. (in Chinese)
- [5] 张滨山, 张泽恒, 杨斌, 等. 基于钳位电路的 LCC-S 补偿型感应电能传输系统抗偏移方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2388-2399.
ZHANG Binshan, ZHANG Zeheng, YANG Bin, et al. LCC-S compensated inductive power transfer system against misalignment with a clamp circuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2388-2399. (in Chinese)
- [6] 季鸿宇. LCC-S 型 MC-WPT 系统的电能与信号同步传输技术研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [7] 黄建利. 基于磁耦合谐振式无线充电阵列线圈系统的研究与设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [8] 唐丽静. 电动汽车无线充电多种集成磁结构的对比与分析[J]. 现代信息科技, 2024, 8(9): 53-57.

- TANG Lijing. Comparison and analysis of many integrated magnetic structures for wireless charging of electric vehicles [J]. Modern Information Technology, 2024, 8(9): 53-57. (in Chinese)
- [9] 庄廷伟. 基于 DDQ/DD 耦合机构的强抗偏移无线电能传输系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 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: 中国国家标准化管理委员会, 2020.
- [11] 王鑫, 赵伟华, 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. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 谭菊华, 李晓芳, 郭小春. 磁耦合谐振式电动汽车无线充电线圈设计与优化分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 84-89.
- TAN Juhua, LI Xiaofang, GUO Xiaochun. Design and optimization analysis on wireless charging coils of magnetic coupling resonant electric vehicles[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(1): 84-89. (in Chinese)
- [14] 史佳兰. 电动汽车无线充电系统技术研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.