

基于解耦DDQP的三相无线充电系统的设计与研究

王飞^{1,2}, 陈向荣^{2*}, 张洪利³, 石凡鲁⁴

(1. 奇瑞新能源汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241100; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 杭州职业技术学院 汽车学院, 浙江 杭州 310018; 4. 开瑞新能源控股有限公司, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 无线充电技术可以完美解决直流充电带来的风险和不便, 从而极大推动电动汽车的发展。无线充电系统发射模块或接收模块端线圈可以由一个或多个形状或大小不同的线圈组成。采用双电源模式的DDQP分别驱动DD和Q线圈, 通过ANSYS Maxwell仿真辅助设计, 优化线圈结构及参数, 并搭建试验平台开展试验, 论证了一种高效率基于解耦DDQP结构的三相无线充电系统, 最终通过实车验证, 该充电系统线圈效率最高可达到92.97%。

关键词: 无线充电; 仿真; DDQP结构; 三相交流充电

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025059

引用格式: 王飞, 陈向荣, 张洪利, 等. 基于解耦DDQP的三相无线充电系统的设计与研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 449-459.

WANG Fei, CHEN Xiangrong, ZHANG Hongli, et al. Design and research on a three-phase wireless charging system based on decoupled DDQP[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 449-459.

Design and Research on A Three-Phase Wireless Charging System Based on Decoupled DDQP

WANG Fei^{1,2}, CHEN Xiangrong^{2*}, ZHANG Hongli³, SHI Fanlu⁴

(1. Chery New Energy Automobile Technology Co., Ltd., Wuhu 241100, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. School of Automotive Engineering, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China;

4. Karry New Energy Holdings Co., Ltd., Wuhu 241002, China)

Abstract: Wireless charging technology can perfectly solve the risks and inconveniences caused by DC charging, and its development can greatly promote the development of electric vehicles. The transmitter module or receiver end coil of the wireless charging system can be composed of one or more sets of coils of different shapes or sizes. In this paper, the DDQP was a dual-power mode, which can drive the DD and Q coils respectively. A high-efficiency three-phase wireless charging system based on a decoupling DDQP structure was demonstrated through ANSYS Maxwell simulation-assisted design, optimization of coil structure and parameters, and construction of an experimental platform for testing. Finally, through the actual vehicle verification, the coil efficiency of the charging system can reach up to 92.97%.

Key words: wireless charging; simulation; DDQP structure; three-phase AC charging

收稿日期: 2024-09-14

基金项目: 高校国内访问工程师“校企合作项目”(FG2023044)

作者简介: 王飞(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电动汽车无线充电、动力电池、高压安全等研究。E-mail: wangfei3@mychery.com。

* 通信作者: 陈向荣(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事先进电气材料与高压绝缘测试技术、先进电力装备与新型电缆系统、高电压新技术等研究。E-mail: chenxiangrongxh@zju.edu.cn。

0 引言

近年来,由于电动汽车能够减轻内燃机交通工具造成的污染,使其在全球范围内大受欢迎。交通工具排放的碳占全球总排放量的四分之一以上,而解决全球变暖问题的紧迫性正在推动交通工具向电气化转变^[1]。然而,扩大电动汽车市场的主要障碍是缺乏充电设施。如今,直流快速充电技术在工业应用方面已经非常成熟^[2-3],同时,无线电力传输方法作为一种具有吸引力的电动汽车充电方法,能以更便捷的方式为汽车充电,移除沉重的电缆,减轻触电风险。此外,传统的充电站将被埋在地下的发射台所取代,这可以在空

间有限的城市地区节省空间。发射器和接收器之间没有物理接触,因此无线充电站的建设地点选择范围相比直流充电站更广。同时,无线充电的过程中减少了人的参与,自动化程度更高。无线充电技术的发展和普及对于扩大电动汽车市场以及自动交通的发展有着至关重要的作用^[4]。

无线充电系统通过发射线圈和接收线圈之间的磁耦合向动力电池充电。该技术主要基于法拉第电磁感应定律,其中发射线圈产生的高频磁通感应接收线圈的电压。如图1所示,对于电动汽车无线充电,接收线圈布置在车辆底部,发射线圈埋在地面。地面与车辆底部之间的距离称为离地间隙。充电系统将电源从发射线圈通过离地间隙传输到接收线圈,从而为车辆远程充电。

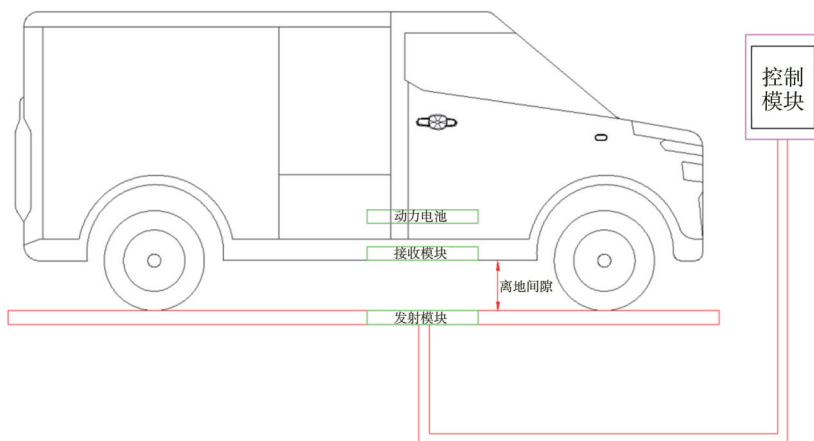


图1 无线充电系统

Fig.1 Wireless charging system

无线充电系统发射模块或接收模块端线圈可以由一个或多个组形状或大小不同的线圈组成。发射机(接收机)线圈组通常称为发射机(接收机)垫。传统的无线充电系统方法已经发展多年,采用各种垫配置,如圆形垫(Circular Pad, CP)、磁通管(Flux Pipe Pad, FP)、矩形垫(Rectangular Pad, RP)、DD垫(Double D Pad, DDP)、DD正交垫(Double D Quadrature Pad, DDQP)、双极垫(Bipolar Pad, BP)和三相垫(Triple Phase Pad, TPP)^[4-5]。线圈的形状如图2所示,TP1表示三叶垫,TP2表示三极垫。每种线圈结构特点不同,其性能也不同,具体差异对比如表1所示。需要强调的关键点是线圈数和相位数之间的关系。相数指焊盘内部传导的独立电流数,线圈数指焊盘内部的磁绕组数,相数小于或等于线圈数。例如,DDP有2个线圈,但以相同的电流驱动,在

这种情况下,DDP被划分为单相垫原型;DDQP包括一个DDP(底部)和一个RP(顶部)。

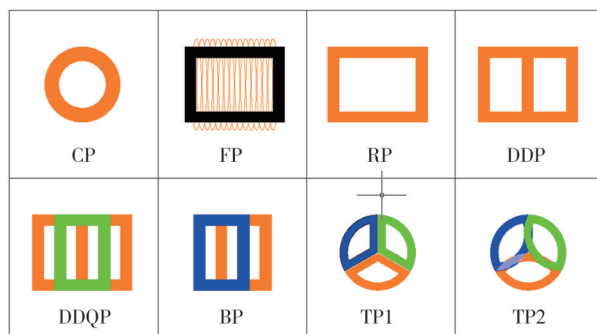


图2 无线充电系统线圈形状

Fig.2 Wireless charging system coil shape

CP、FP、RP是早期无线充电系统为发射机和接收机设计的圆形线圈,这种线圈结构具有良好的耦合性能以及安全性能,并能有效降低磁通泄露。研究人员通过多种尝试来提高圆形线圈的性能。

Bossard 等^[6]通过优化圆形线圈几何形状来提高效率以及单位面积的功率密度。Aditya 等^[7]提出利用不对称圆形线圈结构(发射线圈大于接收线圈)提高横向偏移容忍度。Budhia 等^[8]对线圈磁芯铁氧体进行了优化,以减少漏磁并增加磁耦合。Huang 等^[9]分析了 CP 无线充电系统的电容补偿,提高了错位情况下的充电性能。FP 线圈结构由线圈围绕矩形铁氧体组成^[10-11],与 CP 相比,重量更轻、体积更小,但是偏移容忍度更好。RP 的磁通特性几乎和 CP 相当,但同样具有很好的横向偏移容忍度。CP、FP、RP 线圈结构都属于单极低磁耦合。

表 1 无线充电系统线圈性能

Tab. 1 Coil performance of wireless charging system

垫片结构	错位公差	耦合系数	漏磁通包含度	相数
CP	差	低	低	1
FP	中等	中等	低	1
RP	中等	低	中等	1
DDP	差	高	高	1
DDQP	高	高	高	2
BP	中等	高	高	2
TPP	高	高	高	3

为了提高充电功率,研究人员提出了 DD 线圈结构^[10],DD 线圈结构磁耦合显著增加并且电磁泄露降低,但是在错位 15 cm 后,磁耦合下降到 50%,错位公差较低。为了进一步提高 DD 线圈结构对错位的公差,在 DD 线圈加入中心正交线圈形成 DDQP 线圈结构,在垂直和水平方向有效增加了磁通量。尽管 DDP 增强了磁耦合,但是发射线圈 CP、FP、RP、DDP 电源为单相模式,只有一个电流注入,只能产生定向磁场,在发射线圈和接收线圈错位时,接收线圈和发射线圈的耦合会严重降低,接收线圈无法接收到最佳磁通量。DDQP 为双电源模式,可以分别驱动 DD 和 Q 线圈,在错位状态下,可以通过相位调整磁场,使得接收线圈与发射线圈有效耦合,提高传输功率^[11]。

在无线充电效率的优化方面,周晓燕等^[12]提出一种由光伏供能的无线电力传输系统,其主要应用于电动汽车的恒流和恒压充电拓扑结构,只需调整继电器的开关状态,即可实现电感电容器-电感电容器的恒流输出和电感电容串联的恒压输出,可以有效提高充电效率;张龙玺等^[13]针对无线充电系统的传输效率易受负载影响的问题,对 SS 耦合提出了一种基于阻抗匹配的最大效率跟踪以及 PI 控制的恒压输出复合控制方法,并证明了其有效性;黄莹等^[14]、王新月等^[15]针对无线充电

系统的磁场屏蔽优化展开研究,通过仿真及试验验证的方式对屏蔽设计进行了优化工作;李加定等^[16]针对无线充电的电源系统开展设计研究,搭建了智能小车平台进行无线充电测试;王鑫等^[17]通过研究无线电磁耦合谐振线圈传输性能影响因素,建立了电动汽车无线电磁耦合线圈联合仿真模型,优化了圆形线圈结构参数,提高了其传输效率;丁云广等^[18]基于无线传感器网络系统,建立了磁耦合无线能量传输模型和简化电路图,并结合实际工程需要,利用有限元法和控制变量法对磁耦合模型进行仿真分析,详细探讨了磁耦合无线电能传输中的各模型参数对传输功率的影响;李井贺等^[19]提出了电动汽车无线充电系统在多对多场景下的解决方案,这些都有效推动了电动汽车无线充电系统的优化和改进工作。

1 系统建模

1.1 基于 ANSYS Maxwell 的垫模型要求

本文提出的系统是一个三相系统,主要目的是连接一个传统的三相逆变器到三相发射模块。发射模块由 3 个沿 x 轴排列的矩形线圈组成。与圆形线圈相比,矩形线圈对横向偏移容忍度较高,能在正方形空间内填充更多的励磁线,因此采用矩形线圈形状。接收线圈形状和大小是根据车辆上的间距来确定的。接收线圈采用了一个简单的方形线圈,以减少安装在电动汽车上的重量和成本。降低接收模块的重量和成本可以直接降低电动汽车的总重量和成本,这对于无线充电的推广极为重要。

对于所提无线充电线圈系统,如图 3 所示,其电感矩阵可表示为

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{ar} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{br} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cr} \\ M_{ra} & M_{rb} & M_{rc} & L_{rr} \end{bmatrix} \mu\text{H}, \quad (1)$$

式中: L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} 为发射线圈的自感; L_{rr} 为接收线圈的自感; $M_{ab}, M_{ba}, M_{ac}, M_{ca}, M_{bc}, M_{cb}$ 为发射线圈之间的互感, $M_{ar}, M_{ra}, M_{br}, M_{rb}, M_{cr}, M_{rc}$ 为发射线圈与接收线圈之间的互感。该系统是线性的,因此从互感的定义来看,矩阵是对称的, $M_{ab}=M_{ba}, M_{ac}=M_{ca}, M_{bc}=M_{cb}, M_{ar}=M_{ra}, M_{br}=M_{rb}, M_{cr}=M_{rc}$ 。考虑到这一点,线圈设计的两大目标可以概括为

$$\text{Max}\{M_{ar}, M_{br}, M_{cr}\}, \text{Min}\{M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}\}. \quad (2)$$

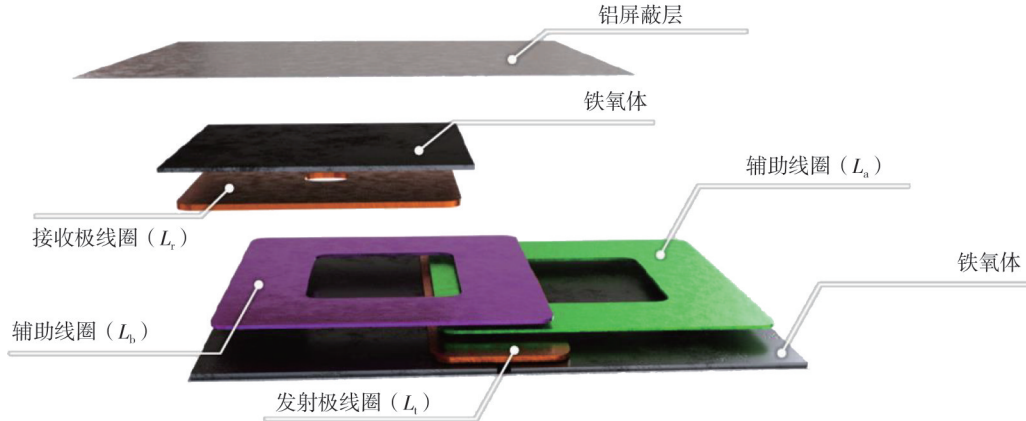
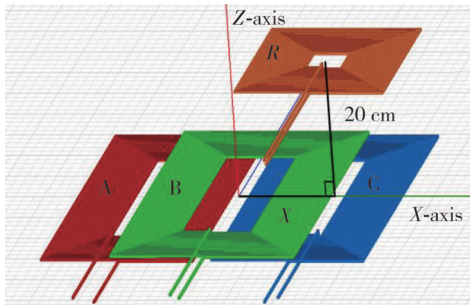


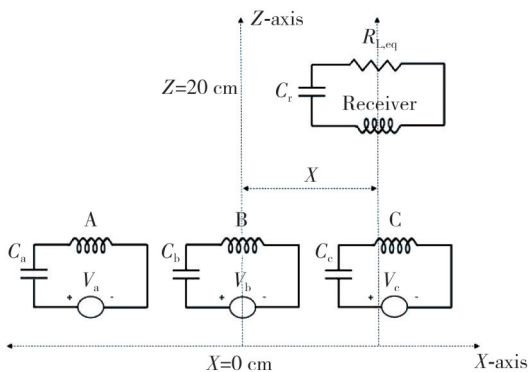
图3 线圈模型
Fig.3 Coil model

1.2 线圈模型

对于本文提出的三相系统，电感模型适配度更高，因为它可以为所有不对准的情况应用固定的补偿电容值，并允许所有的发射极电流相同。三相模型是对单相电感模型的扩展，它复制了额外线圈的磁耦合关系。图4(b)为三相系统的等效电路，分别定义为A、B、C三相。



(a) 三相系统线圈定义



(b) 三相系统等效电路

图4 三相系统线圈定义及等效电路

Fig.4 Coil definition and equivalent circuit of the three-phase system

离地间隙定义为接收器线圈所在平面与发射器线圈所在平面之间的Z轴距离。错位距离定义为接收器线圈中心与发射器线圈中心之间的水平

距离。根据等效电路可推导出三相系统的电感模型，如图5所示。该模型采用并联电容补偿，发射机由电流源激励，而本文推导的模型则采用串联电容补偿和电压源激励。在使用半桥电力电子转换器驱动发射级线圈时(本文所述情况)，需要使用串联补偿电容器来滤除直流电压。

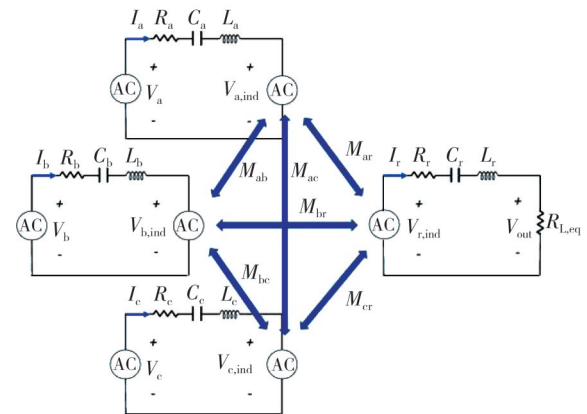


图5 三相系统电感模型

Fig.5 Inductance model of a three-phase system

根据图5中的电感模型，系统方程可通过4×4矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & j\omega M_{ab} & j\omega M_{ac} & j\omega M_{ar} \\ j\omega M_{ab} & Z_b & j\omega M_{bc} & j\omega M_{br} \\ j\omega M_{ac} & j\omega M_{bc} & Z_c & j\omega M_{cr} \\ j\omega M_{ar} & j\omega M_{br} & j\omega M_{cr} & Z_r + R_{L,eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z_a到Z_r的阻抗定义为

$$Z_n = j\omega L_{nn} - \frac{j}{\omega C_n} + R_n, \quad (4)$$

式中：R_n为线圈固有电阻；L_{nn}为自感；ω为激励电流的角频率；C_n为线圈的串联补偿电容。

对于接收器电路，如图6所示，引入了等效电

阻 $R_{L,eq}$ 以简化倍增器电路。倍增器直流侧的电感和电感用于滤波,在推导等效电阻时可以忽略。

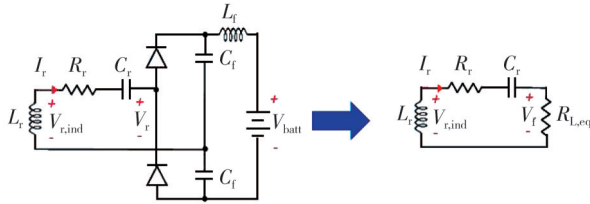


图 6 电压倍增器的等效电阻

Fig. 6 Equivalent resistance of a voltage multiplier

等效电阻是通过基频近似法确定的,图 6 中 V_r 的反射均方根电压为 $\frac{\sqrt{2} V_{batt}}{\pi}$, 而基频接收器电流的均方根值 I_r 是根据所需的输出功率 P_o 计算得

出的,即

$$I_r = \frac{\pi P_o}{\sqrt{2} V_{batt}} \quad (5)$$

$R_{L,eq}$ 的值由式(6)确定,

$$R_{L,eq} = \frac{P_o}{I_r^2} = \frac{2V_{batt}^2}{\pi^2 P_o} \quad (6)$$

1.3 模型设计

励磁-正交-中继(Excitation-Quadrature-Relay, EQR)无线充电系统的高级原理图如图 7 所示。在该系统中,发射端由 3 个线圈组成。只有主发射线圈(L_t)直接由逆变器供电,另外 2 个辅助线圈(L_a 和 L_b)充当无源中继器。这些辅助线圈对称置于主发射器线圈的两侧。

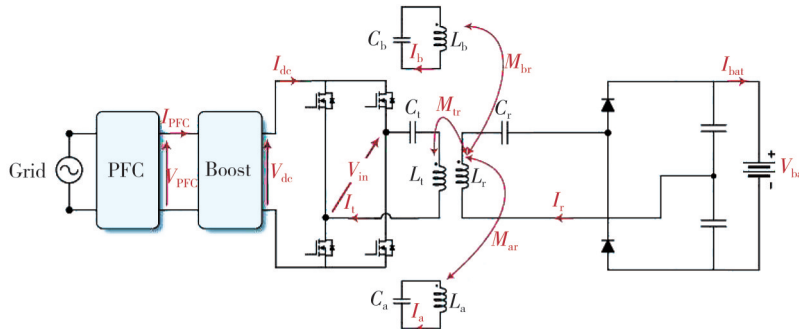


图 7 无线充电系统电路图

Fig. 7 Circuit diagram of a wireless charging system

发射器和接收器之间的互感(M_{tr})明显低于辅助线圈和接收器线圈之间的互感(M_{ar} 和 M_{br})。因此,当发射器和接收器对齐时,所有 3 个发射器侧线圈都有助于功率传输。然而,当 Y 方向出现偏差(假设为 +200 mm)时,接收器线圈将对准辅助线圈“a”,此时互感(M_{ar})将明显大于 M_{br} 和 M_{tr} 。因此,在理想情况下,大部分功率将从主发射器线圈传递到线圈“a”(M_{at}),再从线圈“a”传递到接收器线圈。当偏差为 -200 mm 时,也可以考虑类似的情况。

需要注意的是,发射器线圈($I_t=I_{in}$)的额定电流高于辅助线圈(I_a 和 I_b)。另一方面,发射器线圈(N_t)的匝数设计低于辅助线圈(N_a 和 N_b)。因此,与发射器线圈相比,辅助线圈需要更小的线径。

在该电路中,采用倍压整流器来降低接收器侧线圈的电压。因此,发射器侧需要更小的电流来产生接收器线圈上的感应电压。考虑到前面提到的所有想法与传统无线充电系统相比,EQR 系统可降低线圈的额定电流,这一特点使 EQR 系统可在高错位条件下运行。同时,在该电路中,固定电压 PFC 用于提高连接到电网的电路的功率因数。该 PFC 产生

一个固定的电压 V_{pfc} ,必要时可通过升压转换器将其转换为更高的电压(V_{dc})。如有必要,可使用升压转换器将其转换为更高的电压(V_{dc})。升压转换器可根据应用情况移除。在不同的工作条件下,采用移相调制方案来控制逆变器。直流链路电压和逆变器相移都用于调节不同错位和电池电压条件下的功率。表 2 列出了该系统的标称规格。

表 2 设计参数

Tab. 2 Design parameters

参数说明	参数	数值
发射机串联电容器	C_t/nF	100
辅助线圈 a 电容器	C_a/nF	10.1
辅助线圈 b 电容器	C_b/nF	10.85
接收器串联电容器	C_r/nF	37.40
PFC 电压	V_{pfc}/V	364
标称气隙	g/mm	140
标称输出功率	P_n/kW	6.6
标称电池电压	V_{bat}/V	370
标称电池电流	I_{bat}/A	18
发射机线圈电流范围	I_t/A	20~40
辅助线圈 a 电流范围	I_a/A	5~20
辅助线圈 b 电流范围	I_b/A	5~20
接收器线圈电流范围	I_r/A	40
开关频率	f_{sw}/kHz	85

线圈模型的详细视图如图8所示,图8(c)为磁耦合器的叠层。

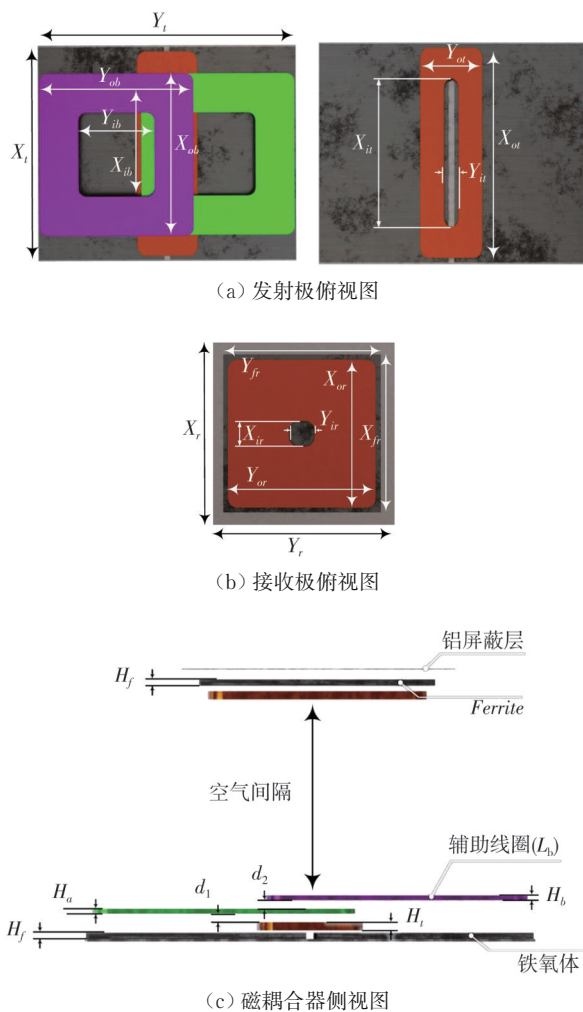


图8 线圈模型视图

Fig. 8 Coil model view

由图可以看出,辅助线圈a更靠近发射器,而辅助线圈b更靠近接收器,因此,发射器与线圈a之间的互感(M_{ia})高于发射器与线圈b之间的互感(M_{ib})。同样,接收器与线圈a之间的互感($M_{ia}=M_{br}$)也高于接收器与线圈b之间的互感($M_{ar}=M_{br}$)。理想情况下,磁耦合器的设计应使辅助线圈之间的互感(M_{ab})接近于零。表3列出了EQR磁耦合器的参数尺寸。线圈的压数及其他电气参数详见表4,不同偏移条件下的实测电感矩阵见表5。

本文完成了基于解耦DDQP的三相无线充电系统的模型仿真设计,对线圈的物理几何与线圈的电气参数(如电感、电阻、限流和电绝缘等)之间的关系进行了设计说明,此外,研究了线圈盘的屏蔽设计,并设计了一种3D打印线圈托盘,为电气绝缘提供了一个旋转气隙。

表3 磁耦合器结构参数尺寸

Tab. 3 Parameter dimensions of the magnetic coupler structure

参数	数值/mm
X_t	560
Y_t	670
X_r	370
Y_r	370
X_{fr}	350
Y_{fr}	350
$X_{oa}=X_{ob}$	410
$X_{ia}=X_{ib}$	212.5
$Y_{oa}=Y_{ob}$	390
$Y_{ia}=Y_{ib}$	192.5
X_{ot}	410
X_{it}	291.5
Y_{ot}	155
Y_{it}	36.5
X_{or}	325
X_{ir}	55.9
Y_{or}	325
Y_{ir}	55.9
H_f	5
H_i	6.53
H_a	3.75
H_b	3.75
d_1	7
d_2	7
弯曲半径	20

表4 电气参数

Tab. 4 Electrical parameters

参数	数值
N_t /turn	8
$N_a=N_b$ /turn	21
N_r /turn	18
发射机线圈线规	AWG 6
辅助线圈线规	AWG 10
接收器线圈线规	AWG 6
发射机铝屏蔽厚度/mm	2
接收器铝屏蔽厚度/mm	1
标称气隙/mm	140

表5 电感矩阵

Tab. 5 Inductance matrix

参数	(0, -200, 140)	(0, 0, 140)	(0, 200, 140)
$L_t/\mu\text{H}$	31.88	32.67	31.92
$R_t/m\Omega$	27	26	27
$L_a/\mu\text{H}$	272.52	276.53	272.33
$R_a/m\Omega$	247	246	248
$L_b/\mu\text{H}$	251.59	260.75	259.97
$R_b/m\Omega$	225	236	243
$L_r/\mu\text{H}$	92.11	91.94	92.07
$R_r/m\Omega$	115	114	115
$M_{ia}/\mu\text{H}$	25.6	25.28	25.57
$M_{ib}/\mu\text{H}$	21.85	21.23	21.31
$M_{ab}/\mu\text{H}$	1.70	9.47	1.28
$M_{ra}/\mu\text{H}$	23.74	15.55	-2.78
$M_{rb}/\mu\text{H}$	-4.3	16.38	24.91
$M_{tr}/\mu\text{H}$	0.66	4.87	0.46

2 仿真与实验验证

2.1 测试准备

2.1.1 测试环境

温度：15.3~16.1℃，相对湿度：45.1~47.3%RH，大气压强：101.90~101.96 kPa。

2.1.2 测试设备与仪器

无线充电测试仪器仪表如表 6 所示，通过这些设备采集不同偏移距离下的电压、电流值来计算输出功率以及瞬时效率。

表 6 测试仪器仪表

Tab. 6 Test instruments and meters

序号	名称	型号	编号
1	ScopeCORDER(示波器)	DL850EV	91U817779
2	电压探头	702902	DYTT-1
3	电流探头	E3N	DLTT-1
4	电流钳	PAC 12	QXB-1
5	万用表	15B+	46720253WS
6	钳形表	303	40010123WS
7	卷尺	(0-5)m	8203
8	电子负载	63212A600	/
9	Chroma 交流电源	61512	/

2.2 测试样品

EQR无线充电系统的发射线圈和接收线圈，如图 9 所示，发射控制部件和接收控制部件，如图 10 所示。

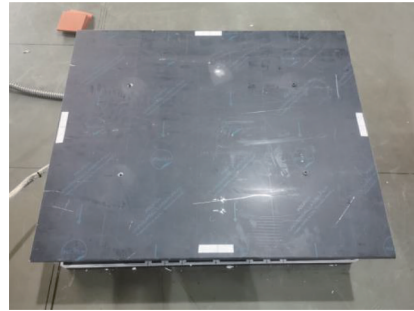


图 9 测试样品(发射线圈、接收线圈)

Fig. 9 Test samples (transmitter coil, receiver coil)



图 10 测试样品(发射控制部件、接收控制部件)

Fig. 10 Test samples (transmit control unit, receive control unit)

2.3 测试要求

2.3.1 测试原理

通过测试设备采集输入端及输出端电压、电流，具体如图 11 所示。

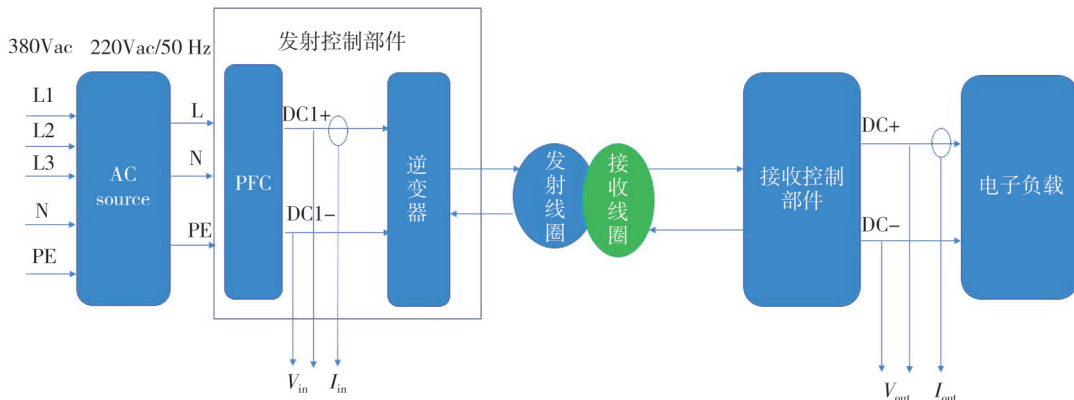


图 11 输出功率及瞬时效率检测示意图

Fig. 11 Schematic diagram of output power and instantaneous efficiency measurement

2.3.2 测试过程

测试过程中，首先在发射装置上通过卷尺做好尺寸标识，以方便针对不同偏移位置测试对准，如图 12 和图 13 所示。根据检测示意图，在输入端发射控制部件 PFC 和逆变器之间连接好示波器，输出端接收控制部件处连接好万用表、电流钳，如图 14 所示。



图 12 发射装置

Fig. 12 Launcher



图 13 发射装置尺寸标识

Fig. 13 Marking of the dimensions of transmitter



图 14 设备连接图

Fig. 14 Device connection diagram

之后, 根据测试位置要求, 分别测试横向偏移0、5、10、15、20 cm位置时的输入端和输出端电压和电流, 如图 15~图 16 所示。

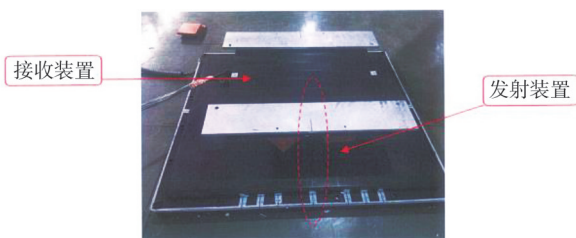
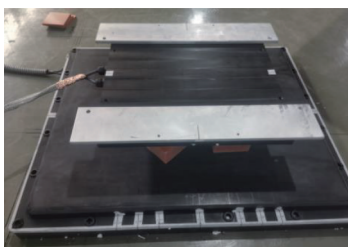
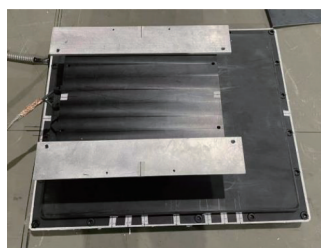


图 15 试验发射装置及接收装置

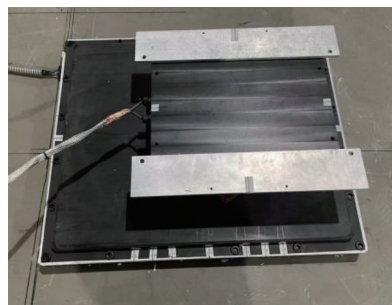
Fig. 15 Test transmitter and receiver



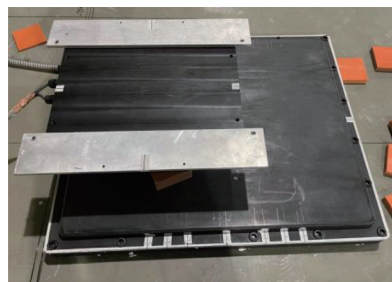
(a) 横向偏移 0 cm



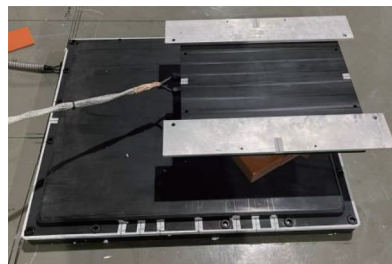
(b) 横向偏移 5 cm



(c) 横向偏移 10 cm



(d) 横向偏移 15 cm



(e) 横向偏移 20 cm

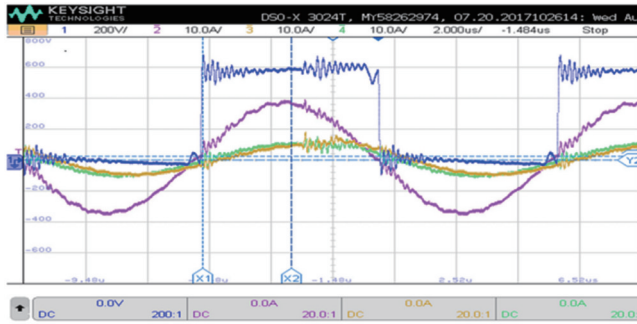
图 16 不同横向偏移实验图

Fig. 16 Experiment diagram of different lateral migration

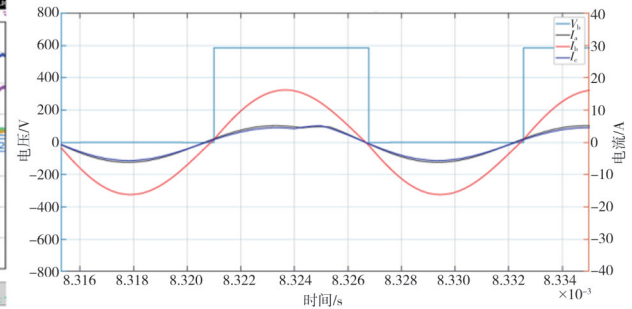
2.4 仿真与实验结果分析

2.4.1 电压电流分布模式

图 17 为4通道示波器的屏幕截图, 显示了0、10和 20 cm 错位时各相的电流和发射功率最大相的逆变器电压。与右侧的模拟结果相比, 实验中各相电流的对应关系非常接近。在不同的错位情况下, 电流的大小和相位都非常吻合。电压波形显示, 实验直流母线电压比模拟电压高出约 20 V。这与逆变器的死区时间设置有关, 死区时间设置导致实际发射器电压脉冲比预期的窄, 因此需要更高的直流母线电压来确保每相的基波电压与模拟电压相匹配。如上所述, 系统以开环模式运行, 通过输入正确的占空比和相移来调节各相电压。任何干扰或未模拟的电压降都会影响实际电压幅值, 从而影响输出功率。这种敏感性表明, 有必要对系统实施反馈闭环控制以增强其充电的稳健性。

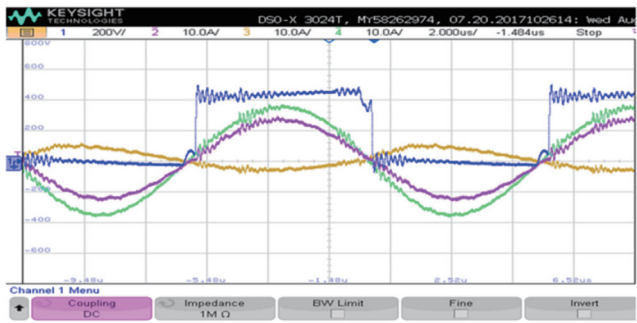


测量图

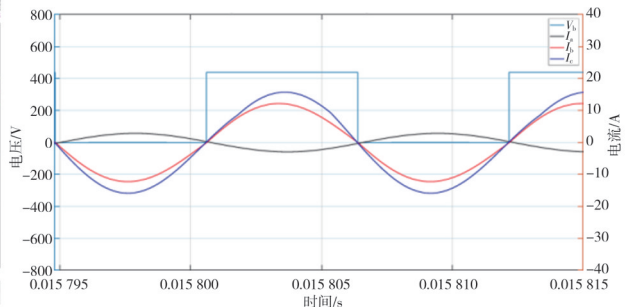


模拟图

(a) 错位0 cm

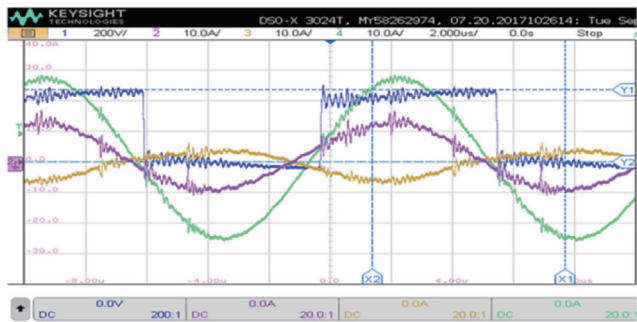


测量图

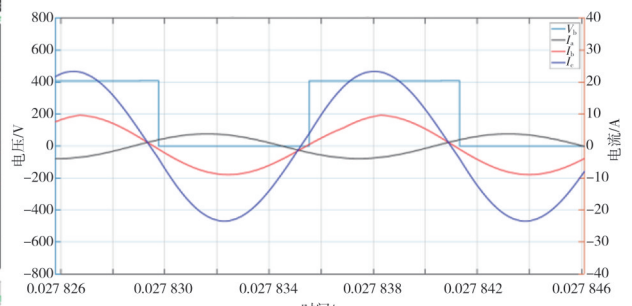


模拟图

(b) 错位10 cm



测量图



模拟图

(c) 错位20 cm

图 17 测量和模拟的电压和电流波形

Fig. 17 Measured and simulated voltage and current waveforms

2.4.2 磁场方位

从图 18 可以看出,在所有情况下,磁场的峰值都朝向接收器的位置。在完全对准的情况下,磁场集中在 Z 轴,电流分布在 A 相和 C 相之间对称。然而,随着接收器向右移动(X 轴正向),C 相的电流开始增加,而 A 相和 B 相的电流减少。在 10 cm 错位时,发射器产生的磁场峰值向右移动。最高磁通密度出现在 $x=10$ cm 沿线,与接收器中心重叠。在 20 cm 处,磁场进一步向右移动,左侧(线圈 A 周围)几乎不产生磁场。这样的磁场定位可以在电动汽车充电时实现出色的磁场控制,因为无论车辆如何偏移,磁通量始终位于接收器的中心。

2.4.3 功率因数

表观功率因数是实际功率与包括谐波在内的表观功率之比。位移功率因数是由于基波电压波形和基波电流波形(不包括谐波)之间的相位差引起的功率因数。

表 7 为各相的模拟和测量表观功率因数,表 8 为各相的模拟和测量位移功率因数,表中测量结果与模拟结果十分吻合。

通过实车实验验证了本文设计的结构的无线充电传输效率,其中,0 偏移情况下线圈效率可以达到最高 92.97%,在 20 cm 错位时达到 90.52% 的线圈效率。

表 7 模拟和实验的表现功率因数

Tab. 7 Performance power factor in simulations and experiments

		表观功率因数				
		0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
模拟	APF(a)	0.32	0.21	0.04	0.37	0.34
	APF(b)	0.63	0.63	0.64	0.62	0.35
	APF(c)	0.34	0.44	0.67	0.63	0.63
测量	APF(a)	0.38	0.31	0.14	0.27	0.28
	APF(b)	0.63	0.64	0.64	0.62	0.46
	APF(c)	0.33	0.46	0.60	0.63	0.61

表 8 模拟和测量的位移功率因数

Tab. 8 Displacement power factor for simulations and experiments

		位移功率因数				
		0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
模拟	DPF(a)	0.81	0.55	0.07	0.66	0.56
	DPF(b)	1	1	1	0.93	0.92
	DPF(c)	0.82	0.97	1	0.96	0.97
测量	DPF(a)	0.85	0.53	0.06	0.55	0.54
	DPF(b)	1	1	1	1	0.84
	DPF(c)	0.84	0.92	1	0.96	0.95

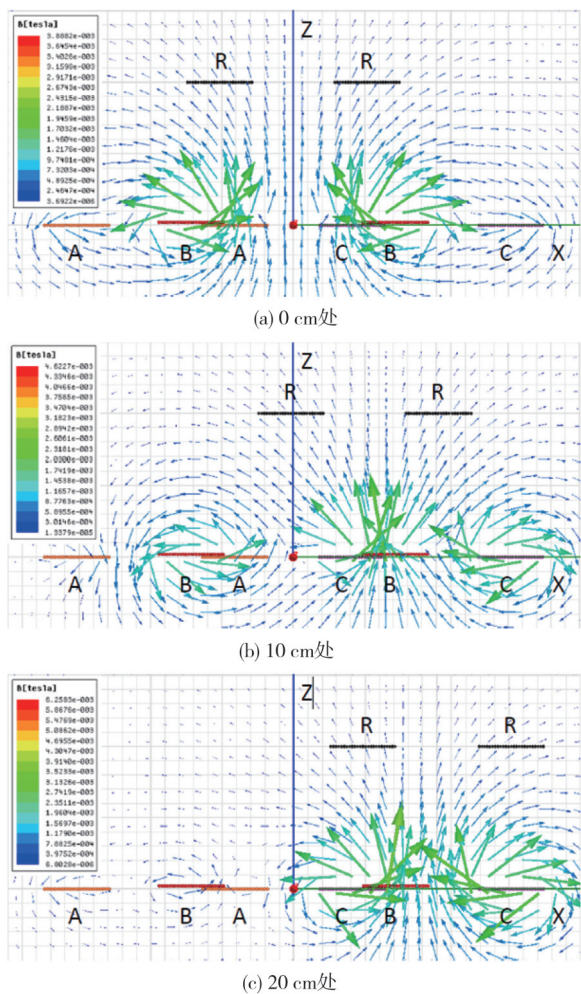


图 18 磁场矢量图

Fig. 18 Vector diagram of magnetic field

3 结论

本文针对电动汽车三相无线充电系统的应用开展研究,通过仿真和试验对比论证了无线充电设施结构以及线圈效率,对解耦DDQP结构线圈的发射盘、接受盘以及磁场的抑制与屏蔽结构在ANSYS MAXWELL有限元仿真的辅助下进行了结构参数设计,并对实物进行了装置搭建与实验测试。测试结果表明,在0偏移情况下,该线圈结构的圈效率可以达到最高92.97%,在20 cm错位时达到90.52%的线圈效率,高于市面现有结构的充电效率。

参考文献:

[1] SCHMIDT R, IYENGAR M. Information technology energy usage and our planet[C]//2008 11th Inter-society Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008: 1255-1275.

[2] IEC61851-24: Electric vehicle conductive charging system-Part 23: DC electric vehicle charging station [S]. London: International Electrotechnical Commission, 2023.

[3] Global EV Outlook 2018 [EB/OL]. [2024-07-02]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>.

[4] AHMAD A, ALAM M S, CHABAAN R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 4(1): 38-63.

[5] PATIL D, MCDONOUGH M K, MILLER J M, et al. Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 4(1): 3-37.

[6] BOSSHARD, KOLAR, MUHLETHALER, et al. Modeling and q-a-Pareto optimization of inductive power transfer coils for electric vehicles [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 50-64.

[7] ADITYA K, SOOD V K, WILLIAMSON S S. Magnetic characterization of unsymmetrical coil pairs using Archimedean spirals for wider misalignment tolerance in IPT systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 454-463.

[8] BUDHIA M, COVIC G A, BOYS J T. Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems [J]. IEEE Transac-

- tions on Power Electronics, 2011, 26 (11) : 3096-3108.
- [9] HUANG C Y, JAMES J E, COVIC G A. Design considerations for variable coupling lumped coil systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(2): 680-689.
- [10] FUJITA T, YASUDA T, AKAGI H. A moving wireless power transfer system applicable to a stationary system[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 4943-4950.
- [11] NAGATSUKA Y, EHARA N, KANEKO Y, et al. Compact contactless power transfer system for electric vehicles[C]//The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA, 2010: 807-813.
- [12] 周晓燕, 王鹤霖, 贾海涛, 等. 一种适用于电动汽车无线充电的恒压恒流混合补偿拓扑[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 343-351.
ZHOU Xiaoyan, WANG Helin, JIA Haitao, et al. A hybrid compensation topology with constant voltage and constant current for ev bidirectional wireless charging[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(11): 343-351. (in Chinese)
- [13] 张龙玺, 刘国巍. 基于 SS 耦合的无线充电系统复合控制[J]. 自动化应用, 2024(18): 62-65.
ZHANG Longxi, LIU Guowei. Composite control of wireless charging system based on SS coupling [J]. Automation Application, 2024 (18) : 62-65. (in Chinese)
- [14] 黄莹, 杨夏喜, 王猛猛, 等. 电动自行车无线充电系统电磁辐射的仿真研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(9): 137-140.
HUANG Ying, YANG Xiayi, WANG Mengmeng, et al. Simulation research on electromagnetic radiation of electric bicycle wireless charging system [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2024, 14(9): 137-140. (in Chinese)
- [15] 王新月, 张立炎, 陈启宏, 等. 基于电动汽车无线充电系统 DD 线圈的磁场屏蔽优化[J/OL]. 电源学报, 2024: 1-12. [2024-09-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240924.1723.002.html>.
- WANG Xinyue, ZHANG Liyan, CHEN Qihong, et al. Magnetic field shielding optimization for the DD coil-based electric vehicle wireless charging system [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024: 1-12. [2024-09-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240924.1723.002.html>. (in Chinese)
- [16] 李加定, 缪文南, 王豪. 基于超级电容恒功率无线充电的电源系统设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32 (22): 11-16.
LI Jiading, MIAO Wennan, WANG Hao. Design of power supply system based on super capacitor constant power wireless charging [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(22): 11-16. (in Chinese)
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 丁云广, 闵昌万. 基于线圈磁耦合模型的无线充电仿真研究[J]. 测试技术学报, 2018, 32(2): 106-111.
DING Yunguang, MIN Changwan. Research on wireless charging simulation of coil magnetic coupling model [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(2): 106-111. (in Chinese)
- [19] 李井贺, 胡越, 王金明, 等. 电动汽车无线充电系统在多对多场景下的解决方案 [J/OL]. 汽车文摘, 2024: 1-8. [2024-12-15]. <https://doi.org/10.19822/j.cnki.1671-6329.20240087>.
LI Jinghe, HU Yue, WANG Jinming, et al. A solution for electric vehicle wireless charging system in multi-to-multi scenarios [J/OL]. Automotive Digest, 2024: 1-8. [2024-12-15]. <https://doi.org/10.19822/j.cnki.1671-6329.20240087>. (in Chinese)