

电动汽车无线充电系统双边 LCC 型 谐振补偿网络及电磁安全性研究

杨阳¹, 王澍¹, 颜黎明¹, 陈轶嵩¹, 张久鹏²

(1. 长安大学汽车学院, 710064, 西安; 2. 长安大学公路学院, 710064, 西安)

摘要: 为了研究电动汽车无线充电系统谐振补偿网络和充电线圈电磁暴露的安全性问题, 首先对无线充电系统中 4 种基本谐振补偿网络的传输特性进行了分析, 接着应用电路模型对双边 LCC 型补偿网络进行了理论分析, 并采用 Matlab/Simulink 对 4 种基本补偿网络和双边 LCC 型补偿网络模型进行仿真, 比较了二者的传输功率和传输效率。其次, 分析了原边线圈与副边线圈耦合系数和磁通密度随线圈间气隙变化和水平偏移变化的情况。最后, 通过建立简易人体模型, 采用有限元仿真软件 COMSOL 构建了人体模型不同位置处的磁感应强度。结果表明: 双边 LCC 型谐振补偿网络较 4 种基本补偿网络具有更好的抗偏移能力, 适用于大功率电动汽车动态无线充电系统中; 磁感应强度最大值出现在人体脚踝处, 最大值为 $2.043 \mu\text{T}$, 占国标规定值的 7.57% , 其他位置处均远小于国标规定的安全限制。这说明电动汽车在进行无线充电时, 线圈产生的高频电磁暴露不会对人体安全产生影响, 有利于电动汽车无线充电的推广应用。

关键词: 电动汽车; 无线充电; 磁耦合谐振; 双边 LCC 型补偿网络; 电磁安全

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202105019 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0171-10



OSID 码

Research on Double-Sided LCC Resonant Topology and Electromagnetic Safety for Wireless Charging System of Electric Vehicles

YANG Yang¹, WANG Shu¹, YAN Liming¹, CHEN Yisong¹, ZHANG Jiupeng²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

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

Abstract: To study the compensation networks in wireless charging systems and the safety of electromagnetic exposure in wireless charging with charging coil for electric vehicles, the transmission characteristics of four basic resonance compensation networks are analyzed. Then, a double-sided LCC resonant topology is proposed and analyzed based on the circuit model theoretically. The four basic resonance compensation networks and the double-sided LCC resonant topology are compared with respect to the transmission power and the transmission efficiency using the Matlab/Simulink software. The coupling coefficient and magnetic flux density are studied at different air-gaps and misalignments between the primary coil and the secondary coil. A human body model is modeled to study the magnetic flux density at different measuring points using the finite element method software COMSOL. The results show that the double-

收稿日期: 2020-11-04。 作者简介: 杨阳(1986—), 男, 博士, 讲师; 张久鹏(通信作者), 男, 教授。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JQ-385); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2020QD-32); 中央高校基金基础研究资助项目(300102220108)。

网络出版时间: 2021-01-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210118.1458.009.html>

sided LCC resonant topology has a high anti-offset capability, which is suitable for dynamic high-power wireless charging for electric vehicles. Moreover, the maximum magnetic induction intensity at the ankle point is $2.043\ \mu\text{T}$, accounting for 7.57% of the threshold. The magnetic induction density at other points in a human body model is below the safety limits of GB/T 38775.4—2020 guidelines. It indicates that the high frequency electromagnetic exposure produced by coils will not affect human electromagnetic safety when the electric vehicles are wireless charged. The assessment in this paper is conducive to the development of wireless charging for electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; wireless charging; magnetic coupling resonance; double-sided LCC resonant topology; electromagnetic safety

近年来,随着电动汽车技术,尤其是电动汽车车载动力电池技术的快速发展^[1-3],越来越多的消费者开始使用电动汽车。与此同时,作为电动汽车新型充电方式的无线充电技术,也在电动汽车充电领域得到了越来越广泛的关注。相对于传统的有线充电方式,无线充电技术不需要人为进行电器插拔,有利于实现电动汽车充电的自动化与智能化。同时,发射线圈铺设于地面下,可以避免占用地面上的空间,避免受恶劣环境的影响,有利于提高系统的安全性与可靠性。

无线充电技术根据传输机理的不同可以分为电磁感应式、磁耦合谐振式及微波式^[4]。微波式无线充电技术可以传输较远的距离,但传输效率过低;电磁感应式无线充电技术尽管有着较高传输效率,但受制于传输机理,只适用在传输距离较短的场合^[5];磁耦合谐振式无线充电技术基于磁共振原理,可以实现较高传输效率及较远传输距离,因而更加适用于应用在电动汽车领域^[6]。因此,本文重点研究磁耦合谐振式的无线充电。

典型的磁耦合谐振式无线电能传输系统的组成包括激励端直流电源、高频逆变电路、由原边线圈和副边线圈组成的耦合机构、改善系统电路特性的谐振补偿网络、实现直流供电的整流和功率变换电路以及负载或车载电池^[7],如图 1 所示。

电动汽车充电需要满足大功率、高效率充电的

要求,提高无线充电系统的传输效率与功率的关键因素在于耦合线圈与谐振补偿网络的设计。耦合线圈的形状、尺寸与系统的传输效率有着密切的关系,如线圈匝数、气隙间隙、水平偏移等都对系统的传输效率有着影响。文献[8]对常见线圈在不同气隙与偏移下的耦合系数进行研究,比较分析了不同线圈的抗偏移特性;文献[9]提出了一种新型线圈,DD(double D)线圈,提高了线圈在偏移时的耦合能力;文献[10]研究了磁芯形状、排布方式及数量与 DD 线圈及矩形线圈耦合系数之间的关系;文献[11]分析了线圈的匝数、半径及谐振频率的影响,提出了一种针对于平面盘式圆形线圈的优化设计方法。由于无线充电系统耦合系数较小的特点,因而需要在电感线圈两端加入谐振补偿网络来提高能量传输效率。文献[12]比较总结了发射端与接收端采用 S 型、P 型拓扑结构的特性;文献[13]对传统的串联-串联拓扑结构改进,提高了稳定功率传输范围;文献[14]对串联-串联、串联-并联补偿特性进行分析,证实了两种拓扑结构可以应用于电压源与电流源;文献[15]分析了双边 LCC 谐振网络中各补偿元件参数调整对系统输入阻抗角和输出电流的影响。另外,无线充电系统的电磁辐射关系到公众健康安全,因而在无线充电系统设计时需要考虑电磁安全等因素,文献[16]通过建立传导电磁干扰等效电路模型,分析了在线圈偏移较大及整流电路工作在断续导通模式(DCM)的情况下,系统传导电磁干扰特性及其对安全性的影响。

本文从无线充电系统 4 种基本补偿网络拓扑出发,搭建了系统电路模型,分析了基本谐振补偿网络拓扑的输出特性;在此基础上,对双边 LCC 谐振拓扑的特性进行了理论分析与推导,并与串联谐振补偿拓扑进行了比较,分析了双边 LCC 谐振补偿拓扑的特点;其次,利用 COMSOL 软件对磁耦合机构进

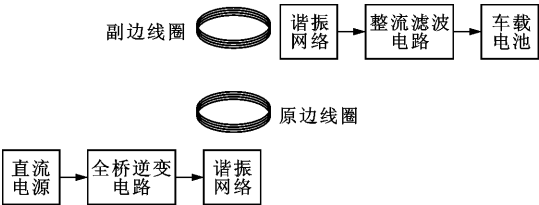


图 1 磁耦合谐振式无线电能传输系统组成图
Fig. 1 The composition diagram of magnetic coupling resonance wireless power transmission system

行了仿真,分析了圆形线圈耦合系数随线圈间气隙变化和水平偏移变化的情况;最后,对简易人体模型在不同位置处的磁感应强度,以及铝板对磁感应强度的屏蔽作用进行了分析。

1 谐振补偿网络拓扑仿真与分析

1.1 基本谐振补偿网络拓扑与仿真分析

根据电感线圈与补偿网络拓扑连接方式不同,无线充电系统有 4 种基本的补偿拓扑,分别为串联-串联(SS)、串联-并联(SP)、并联-串联(PS)、并联-并联(PP),如图 2a~2d 所示。

当系统在工作频率 ω_0 发生谐振时,系统的传输功率及效率可以表示为^[17]

$$P = \frac{\omega_0^2 M^2 Q_s}{L_s} I_p^2 \tag{1}$$

$$\eta = \frac{R_L I_2^2}{R_1 I_p^2 + R_2 I_s^2 + R_L I_2^2} \tag{2}$$

式中 Q_s 为副边线圈的品质因数。

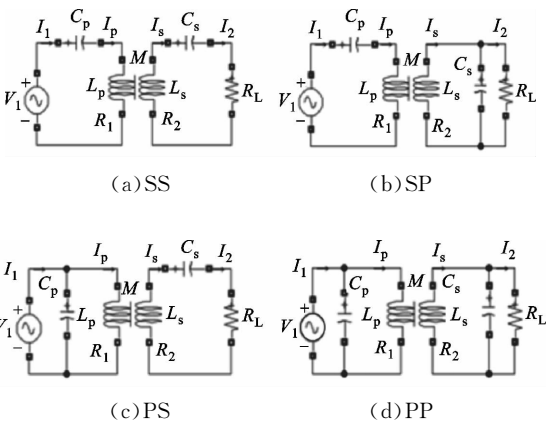


图 2 4 种基本谐振补偿网络拓扑电路图

Fig. 2 The circuit diagrams of four basic resonance compensation network topologies

V_1 —电源电压; M —互感; L_p —原边线圈电感; L_s —副边线圈电感;
 C_p —原边补偿电容; C_s —副边补偿电容; R_L —负载电阻;
 I_p 和 I_s —流经原边和副边线圈两端的电流;
 I_1 —电源电流; I_2 —流经负载的电流。

图 2 4 种基本谐振补偿网络拓扑电路图

Fig. 2 The circuit diagrams of four basic resonance compensation network topologies

为了对 4 种基本拓扑结构输出特性进行比较,利用 Matlab/Simulink 对 4 种模型进行仿真,分析各拓扑结构的传输效率和传输功率随负载电阻的变化情况。表 1 给出了 4 种基本谐振补偿网络拓扑仿真参数值。根据表 1 的参数值,系统仿真结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和 4 仿真结果可知,原边采用串联补偿方式能够实现较大的传输功率,而原边采用并联补偿的传输功率较小。SS 补偿可选用的负载阻值范

围较大,SP 补偿能够保持稳定的传输效率。

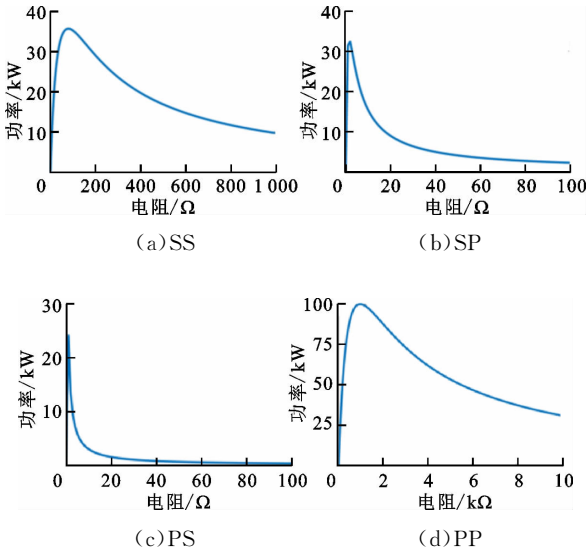


图 3 4 种基本谐振补偿网络传输功率随负载阻值的变化

Fig. 3 Curves of transmission power versus load resistance

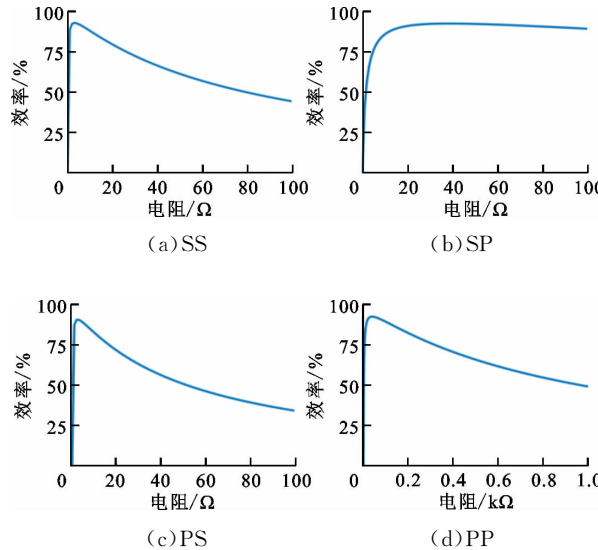


图 4 4 种基本谐振补偿网络传输效率随负载阻值的变化

Fig. 4 Curves of transmission efficiency versus load resistance

表 1 4 种基本补偿网络拓扑仿真参数

Table 1 The simulation parameters of four basic compensation network topologies

参数	数值
$L_p/\mu\text{H}$	1 600
$L_s/\mu\text{H}$	20
$M/\mu\text{H}$	19. 81
C_s/nF	272. 34
谐振频率 f/kHz	68. 12

本文还分析了谐振频率对 4 种基本补偿网络的传输功率和传输效率的影响,仿真结果如图 5 和图

6 所示。

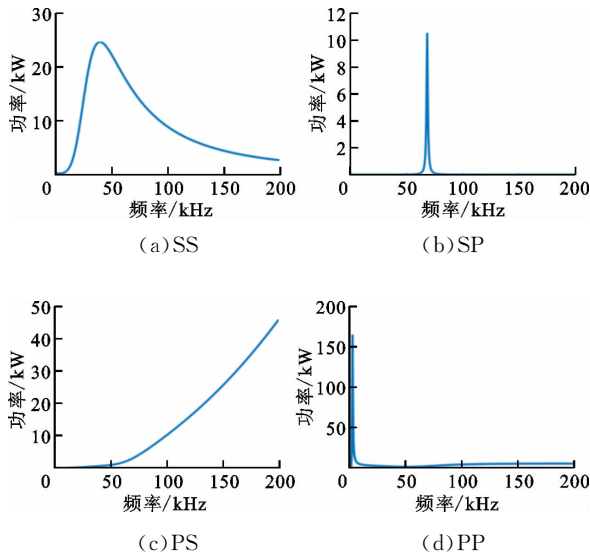


图5 4种基本谐振补偿网络传输功率随频率的变化

Fig. 5 Curves of transmission power versus frequency

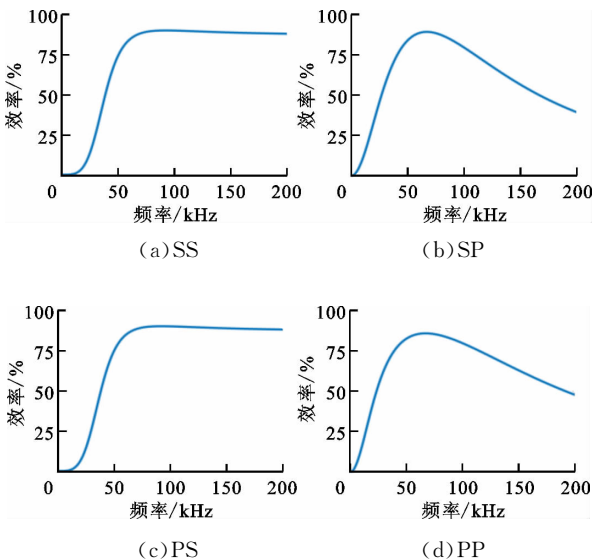


图6 4种基本谐振补偿网络传输效率随频率的变化

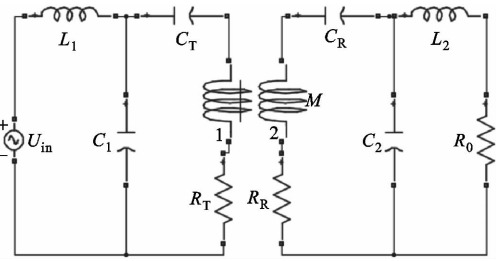
Fig. 6 Curves of transmission efficiency versus frequency

从图5和6可以看出,原边采用串联补偿可以实现较大的传输功率,副边采用串联补偿可以在较大频带范围内实现稳定且较高的传输效率。由于SS补偿网络的原边补偿电容与线圈之间的互感和负载均无关,因此SS补偿被广泛应用于大功率可变负载的无线充电系统。

1.2 双边 LCC 谐振补偿拓扑的理论分析

尽管基本补偿网络结构简单、容易实现,但基本谐振补偿网络抗偏移能力较弱,且系统容易受到耦合系数与负载和谐振频率的影响。为了解决此问题,由基本补偿网络衍生出各种高阶补偿网络,本

文重点对双边 LCC 谐振拓扑进行分析,如图7所示。



U_{in} —电源电压; L_T —发射线圈电感; L_1 —发射端的补偿电感;
 C_1 、 C_T —发射线圈和发射端的补偿电容; R_T —发射线圈的电阻;
 I_T —流经发射端的电流; L_R —接收线圈电感; L_2 —接收端的补
偿电感; C_2 、 C_R —接收线圈和接收端的补偿电容; R_R —接收
线圈的电阻; I_R —接收端的电流; R_0 —负载电阻。

图7 双边 LCC 谐振拓扑电路图

Fig. 7 The circuit diagram of double-sided LCC resonant topology

结合文献[18-19]和系统谐振条件,系统副边的等效阻抗 Z_R 和原边输入阻抗 Z_{in} 的表达式分别为

$$Z_R = R_R + \frac{R_0(1 - \omega^2 L_2 C_2) + R_0 \omega^2 L_2 C_2}{(1 - \omega^2 L_2 C_2)^2 + R_0^2 \omega^2 C_2^2} + \frac{(1 - \omega^2 L_2 C_2)j\omega L_2 - j\omega C_2 R_0}{(1 - \omega^2 L_2 C_2)^2 + R_0^2 \omega^2 C_2^2} \quad (3)$$

$$Z_{in} = [(R_T + Z_r) + Z_{L_T} + Z_{C_T}] // Z_{C_1} + Z_{L_1} \quad (4)$$

式中: Z_r 为反映阻抗,表达式如下

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{R_R + \alpha^2 R_0} \quad (5)$$

其中 α 为引入参数,满足以下关系式

$$1 - \frac{1}{\alpha^2} = \omega^2 L_2 C_2 \quad (6)$$

因此,双边 LCC 补偿拓扑在负载为 R_0 时的输出功率^[20]为

$$P_{LCC-LCC} = (\omega^2 M^2 U_{in}^2 \alpha^2 R_0) / [(1 - \omega^2 L_1 C_1)^2 \cdot (R_T(\alpha^2 R_0 + R_R) + \omega^2 M^2)^2 + \omega^2 L_1^2 (\alpha^2 R_0 + R_R)^2] \quad (7)$$

假设副边替换成 S 补偿,此时 LCC-S 补偿结构系统输出功率为

$$P_{LCC-S} = (\omega^2 M^2 U_{in}^2 R_0) / [(1 - \omega^2 L_1 C_1)^2 (R_T(R_0 + R_R) + \omega^2 M^2)^2 + \omega^2 L_1^2 (R_0 + R_R)^2] \quad (8)$$

同样,可以得到 SS 补偿结构系统输出功率为

$$P_{S-S} = \frac{\omega^2 M^2 U_{in}^2 R_0}{[R_T(R_0 + R_R) + \omega^2 M^2]^2} \quad (9)$$

从式(7)~(9)可以得出,当设定的参数 $\alpha = 1$ 时,系统将从双边 LCC 拓扑变换成 LCC-S 拓扑。通过比较3种补偿拓扑输出功率的表达式可以看出,双边 LCC 谐振拓扑的输出功率同时受电感 L_1 、

电容 C_1 和参数 α 的影响,系统抗偏移敏感度更高,即可以通过不同的元件数值控制,设计双边 LCC 谐振拓扑的抗偏移性能^[21]。

1.3 双边 LCC 谐振补偿拓扑的仿真与分析

为了研究 LCC-LCC、SS 和 LCC-S 补偿拓扑输出功率与原边线圈和副边线圈之间距离的关系,根据式(7)~(9),对双边 LCC 谐振补偿拓扑与 SS 谐振补偿拓扑仿真结果进行比较,如图 8 所示。

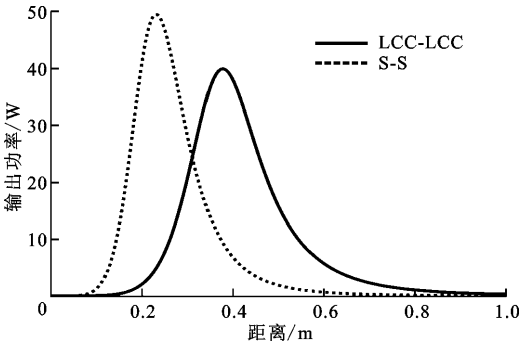


图 8 双边 LCC 与 SS 拓扑输出功率与传输距离的关系
Fig. 8 The relationship between transmission power and distance of double-sided LCC and SS resonant topologies

从图 8 可以看出,双边 LCC 谐振拓扑的峰值输出功率相比于 SS 谐振拓扑有所下降,但是其输出功率平稳的区间要大于 SS 谐振拓扑。仿真结果表明,采用双边 LCC 补偿拓扑的系统拥有更强的抗偏移能力,这与前面理论推导的结论相一致。

图 9 展示了双边 LCC 与 LCC-S 拓扑输出功率与距离的关系。从图 9 可以看出,LCC-S 补偿拓扑作为 SS 拓扑至双边 LCC 补偿拓扑之间的过渡拓扑,LCC-S 谐振补偿拓扑拥有类似 SS 补偿拓扑的输出性能,其最佳的传输距离与 SS 补偿拓扑接近,

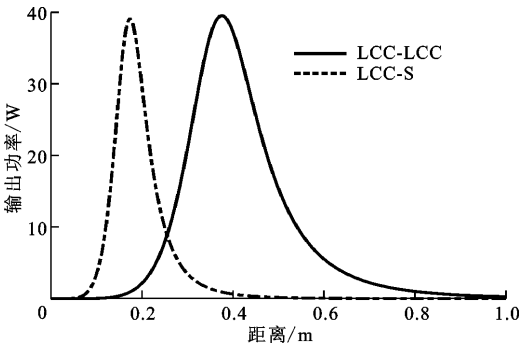


图 9 双边 LCC 与 LCC-S 拓扑输出功率与传输距离的关系
Fig. 9 The relationship between transmission power and distance of double-sided LCC and LCC-S resonant topologies

原边线圈与副边线圈之间距离为 0.18 m。但是,LCC-S 补偿拓扑输出功率的平稳区间显然略小于双边 LCC 补偿拓扑的范围,其输出性能介于 SS 和双边 LCC 补偿拓扑之间。

根据 1.2 节的分析,当 $\alpha=1$ 时,系统副边的补偿拓扑将由 LCC 拓扑转变为串联拓扑,即为 LCC-S 补偿拓扑。对 α 进行分析,使 $\alpha=1$ 为参考组,此时补偿结构为 LCC-S 补偿拓扑,随着 α 依次增大,观察位于耦合系数 $k_{\max}$ 处系统的输出功率变化,结果如图 10 所示。

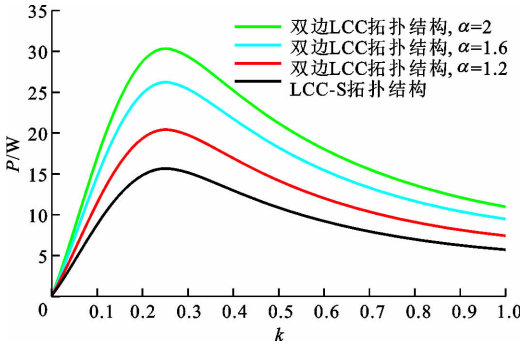


图 10 系统在不同 α 时输出功率随耦合系数的变化
Fig. 10 The changes of transmission power with coupling coefficient k for different α

从图 10 可以看出,整个系统输出功率随 α 增加也在不断增大,且系统的抗偏移能力有所增强,符合理论分析的结果。由此可见,双边 LCC 补偿拓扑的抗偏移能力有着显著的优势,其谐振频率与负载和耦合系数无关,能实现更高的系统传输效率和功率,因此双边 LCC 补偿拓扑系统可应用于大功率、高效率的动态无线充电系统^[22-23]。

2 磁耦合机构的建模与仿真

2.1 磁耦合机构的建模

为了提高大功率、高效率无线充电系统的传输效率与功率,除了满足谐振补偿网络拓扑的设计要求外,还需要对磁耦合机构尤其是充电线圈的磁场分布和偏移情况进行研究。为了研究无线充电磁耦合机构磁场的分布情况,本文利用 3D 有限元仿真软件 COMSOL 构建了圆形线圈,保持初级线圈与次级线圈尺寸完全相同,如图 11 所示。为研究磁芯对耦合系数的影响,在初级线圈与次级线圈两端分别添加了 6 根长条形磁芯,如图 12 所示。为分析铝板的屏蔽作用,分别在线圈和铁芯的两侧添加了屏蔽铝板,如图 13 所示。圆形线圈、磁芯以及铝板的具体参数如表 2 所示。

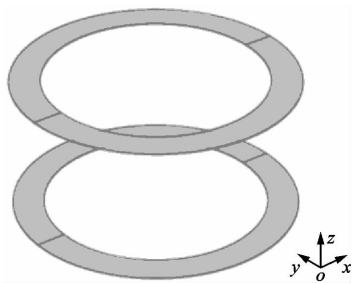


图 11 圆形线圈示意图
Fig. 11 The diagram of circular coil

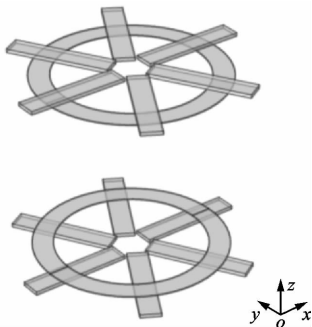


图 12 带有磁芯的圆形线圈示意图
Fig. 12 The diagram of circular coil with magnetic cores

表 2 圆形线圈、磁芯及铝板的参数
Table 2 The parameters of circular coil, magnetic core and aluminum plate

参数	数值
谐振频率 f/kHz	85
线圈内半径 R_i/mm	146
线圈外半径 R_o/mm	186
线圈匝数 N	22
导线横截面积 S/mm^2	2.6
磁芯长度 a/mm	200
磁芯宽度 b/mm	40
磁芯厚度 t/mm	7
相对磁导率 μ_r	900
铝板长度 c/mm	600
铝板宽度 d/mm	600
铝板厚度 h/mm	30

2.2 圆形线圈的仿真与分析

由于原边线圈和副边线圈之间存在位置偏移, 本文研究线圈发生水平方向偏移和垂直方向(气隙)偏移时, 线圈间耦合系数及磁通密度分布情况。

首先对圆形线圈发生水平方向偏移的情况进行仿真, 仿真中线圈间的气隙距离始终保持在 80 mm 不变, 每次的横向偏移设定为 25 mm, 从正对位置即无偏移开始共进行 8 组测试, 线圈间水平偏移最

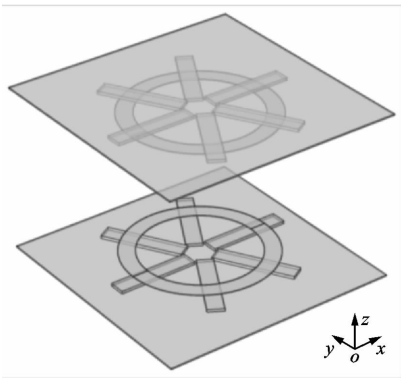


图 13 带有磁芯与铝板的圆形线圈示意图
Fig. 13 The diagram of circular coil with magnetic cores and aluminum plates

大距离为 175 mm, 耦合系数随水平方向偏移的变化如图 14 所示。

从图 14 可以看出: 当圆形线圈处于正对位置即无偏移时, 两线圈之间的耦合系数为 0.304; 当线圈开始水平移动时, 耦合系数也随之开始下降, 且随着水平偏移距离的增加, 耦合系数的下降幅度逐渐增大, 当发射线圈和接收线圈的偏移距离为 175 mm 时, 耦合机构间的耦合系数已经下降至 0.109, 对系统的传输效率将产生影响。

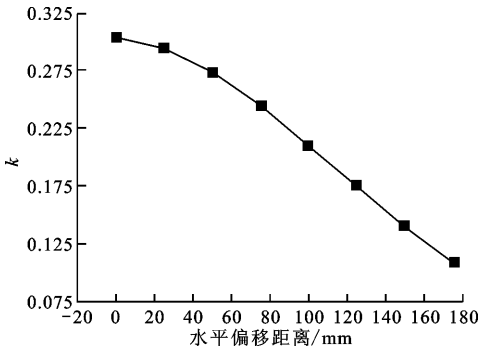


图 14 耦合系数随水平方向偏移变化曲线
Fig. 14 The curve of coupling coefficient versus horizontal deviation

为了观察原边和副边线圈发生水平偏移时线圈磁通密度变化情况, 利用 COMSOL 进行仿真。图 15 仿真了不同线圈水平偏移距离下原边线圈和副边线圈间的磁通密度变化情况。从图 15 中可以看出, 当发生水平偏移时, 原边线圈(图 15 中下方线圈)与副边线圈(图 15 中上方线圈)的磁场耦合状态发生了变化, 磁场在不断变小。仿真结果表明, 图 15 与图 14 水平偏移变化规律一致。

其次, 对圆形线圈发生垂直方向偏移(气隙变化)情况进行仿真。仿真中保持两线圈始终正对, 初

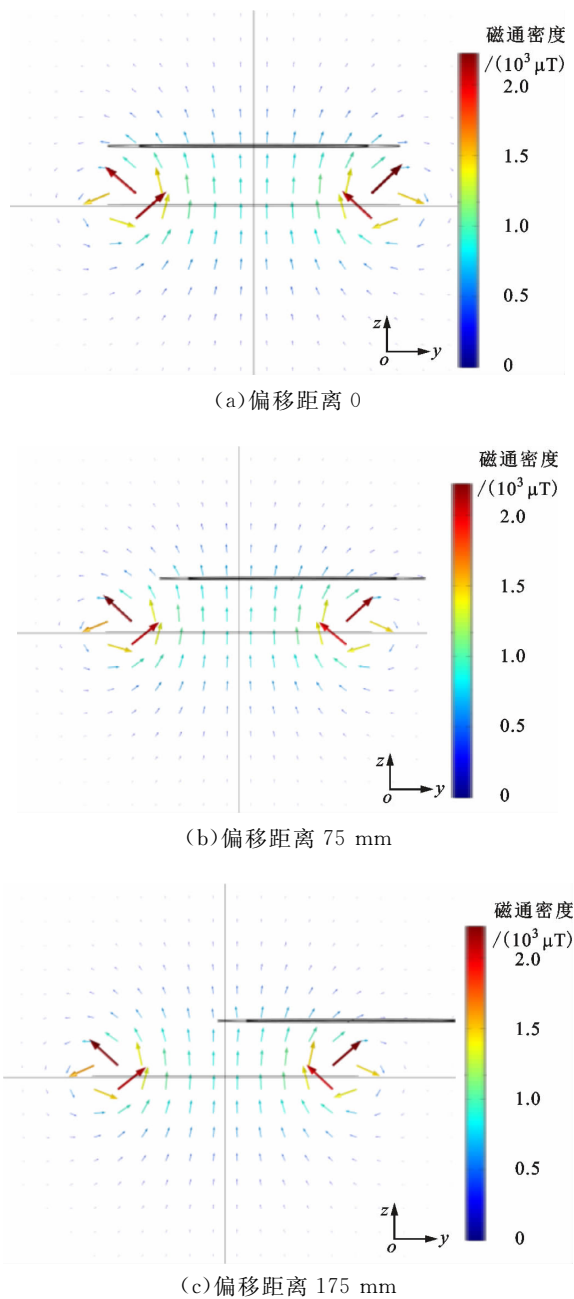


图 15 不同水平偏移下原边线圈和副边线圈的磁通密度
Fig.15 The magnetic flux density diagrams of the primary coil and secondary coil under different horizontal offsets

始气隙距离保持在 80 mm 不变,气隙距离每间隔 10 mm 递增,当气隙距离在 80~180 mm 的范围内变化时,耦合系数随气隙距离的变化如图 16 所示。由图可以看出,当原边线圈与副边线圈正对时,随着气隙距离的增大,线圈间的耦合系数不断减小。因此,适当减小线圈间的垂直偏移距离可以有效地提高系统的耦合系数,从而提高系统效率。

为了观察原边线圈和副边线圈气隙距离发生变化时线圈磁通密度的变化,利用 COMSOL 进行仿

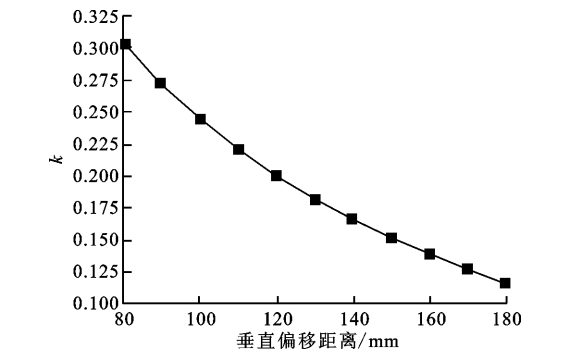


图 16 耦合系数随气隙距离的变化
Fig.16 The curve of coupling coefficient versus air gap

真。图 17 展示了当线圈气隙距离分别在 120 mm 和 180 mm 时,原边线圈和副边线圈间的磁通密度变化情况。由图可以看出,当线圈间气隙距离为 180 mm 时,两线圈之间的磁场强度较 120 mm 处发生了明显的减弱。仿真结果表明,图 17 与图 16 气隙距离变化规律一致。

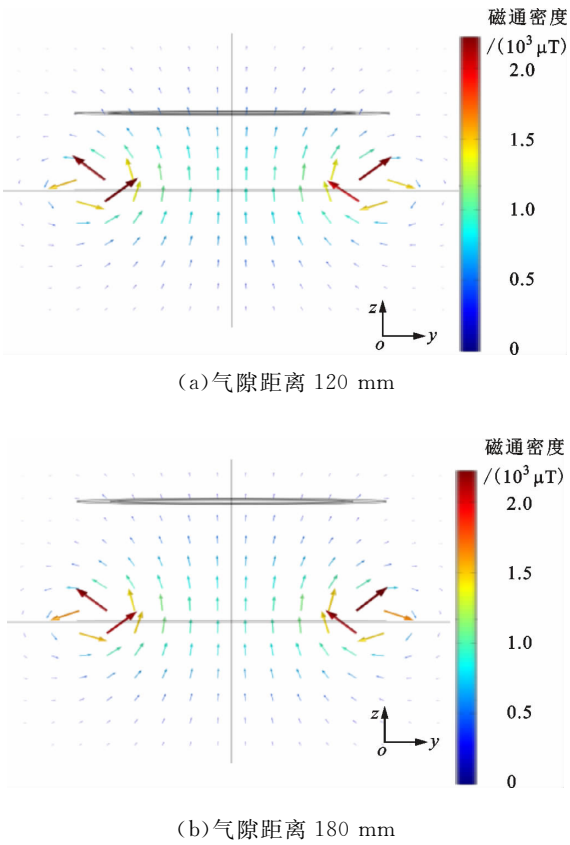


图 17 不同气隙距离下原边线圈和副边线圈的磁通密度
Fig.17 The magnetic flux density diagrams of the primary coil and secondary coil under different air gaps

3 磁耦合机构对人体安全的影响

电动汽车在大功率无线充电工作过程中,原边

与副边线圈之间通过产生高频交变磁场传递能量,但高频电磁场有可能对充电时周边的人及其他生物电磁暴露安全性产生影响^[24]。因此,在大功率高频无线充电系统的设计中,需要考虑电磁安全等因素对人体安全的影响^[25],因而有必要对无线充电系统的电磁安全进行分析。

3.1 简易人体模型

为了评估人体在电动汽车无线充电环境中的电磁辐射值,根据人体工程学建立了 95 百分位的简易人体模型,利用 COMSOL 仿真并分别测量了在 85 kHz 频率下,简易人体模型脚踝(A 点)、肾脏(B 点)、心脏(C 点)和大脑(D 点)4 处的磁感应强度。图 18 展示了无线充电系统中人体各个不同位置磁感应强度测量点示意图。在图 18 中,根据中国成年男士站姿身高,建立身高为 177.5 cm 的成年男子模型,此时原边线圈与副边线圈之间气隙距离为 18 cm,原边线圈距地表距离为 3 cm,测量点距磁耦合机构中心处距离为 1 m。

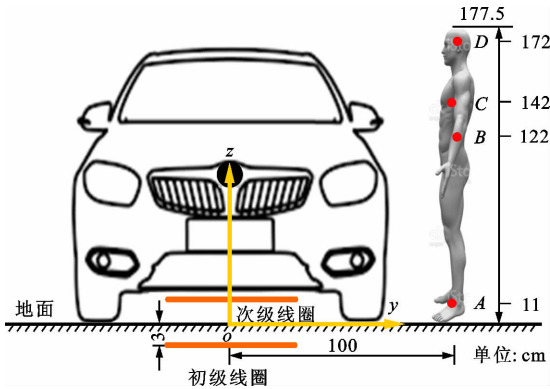


图 18 无线充电系统人体不同位置测量点示意图
Fig. 18 Electromagnetic induction measurement points in the WPT system

3.2 无线充电电磁环境对人体安全的影响

3.2.1 电磁安全标准 为了控制电磁场所导致的公众暴露,电气与电子工程师协会(IEEE)、国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)以及中国国家标准 GB/T 38775.4—2020《电动汽车无线充电系统 第 4 部分:电磁环境限值与测试方法》都对电磁环境中电场和磁场场量参数的极限值做出了明确的规定^[26-28]。表 3 给出了 85 kHz 频率下不同标准的公众暴露控制限制。

3.2.2 结果分析 利用 COMSOL 软件仿真,得到简易人体模型在不同位置测量点如脚踝(A 点)、肾脏(B 点)、心脏(C 点)和大脑(D 点)4 处分别在只有线圈、线圈两端添加磁芯与线圈带有磁芯及铝板

3 种情况下的磁感应强度,具体见表 4。图 19 仿真了不同线圈模型在距离地面不同位置处的磁感应强度。

表 3 85 kHz 频率下不同标准的公众暴露控制限制
Table 3 Standards' safety levels with respect to human exposure to electromagnetic field with the frequency 85 kHz

标准	磁感应强度/ μT
IEEE	205
ICNIRP	27
GB/T 38775.4—2020	27

表 4 人体模型在 4 处测量点的磁感应强度
Table 4 The magnetic induction intensity at four measurement points of the human body model

测点	磁感应强度/ μT		
	线圈	带磁芯线圈	带磁芯和铝板线圈
A	1.942	2.043	0.361
B	0.780	0.818	0.122
C	0.603	0.637	0.093
D	0.418	0.439	0.064

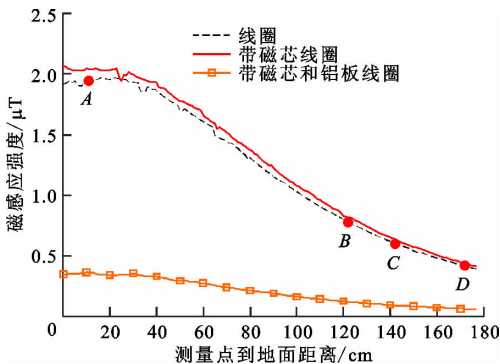


图 19 不同线圈模型距离地面不同位置处的磁感应强度
Fig. 19 Curves of magnetic flux density versus the distance from measuring point to ground for different coil models

由表 4 和图 19 可以得出,在不同测量点处带磁芯线圈的磁感应强度最大,但 4 个测量点处的磁感应强度均小于 GB/T 38775.4—2020 所规定的磁感应强度最大值 27 μT 。脚踝处(A 点)的磁感应强度要明显大于其他测量点处,最大值为 2.043 μT ,占国标规定值的 7.57%,其他处均远小于国标规定的安全限制。仿真结果表明,人体磁感应强度最大值出现在脚踝处,当有铝板加入时,磁感应强度屏蔽效果明显。因此,在设计大功率无线充电系统对人体

安全影响时,需要对人体脚踝处的磁场强度进行有效抑制。

4 结 论

本文以电动汽车无线充电系统的谐振补偿网络为研究对象,分析了4种基本谐振补偿网络和双边LCC谐振补偿网络的传输特性,比较了两者的特点。对磁耦合机构进行了建模,分析线圈间发生水平偏移和垂直偏移时耦合系数的变化,同时比较了简易人体模型距地面不同位置处的磁感应强度,得到如下结论。

(1)SS补偿结构可应用于大功率可变负载的无线充电系统;双边LCC补偿结构抗偏移性能调节范围大,适合于大功率、高效率的动态无线充电系统。

(2)磁耦合机构之间的水平偏移和气隙变化会使耦合磁场有效范围减小,导致线圈之间耦合系数下降。

(3)在屏蔽时应考虑铝板对周边磁辐射的影响;在大功率无线充电系统的设计中,应考虑对人体脚踝处磁感应强度的抑制。

参考文献:

- [1] 陈猛,乌江,焦朝勇,等. 锂离子电池健康状态多因子在线估计方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 169-175.
CHEN Meng, WU Jiang, JIAO Chaoyong, et al. Multi-factor online estimation method for health status of lithium-ion battery [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 169-175.
- [2] 续丹,毛景禄,王斌,等. 分布式电池电源模块储能系统的荷电状态均衡控制[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 79-85.
XU Dan, MAO Jinglu, WANG Bin, et al. A balance control scheme of SOC for power module energy storage systems with distributed batteries [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 79-85.
- [3] 赵云飞,徐俊,王海涛,等. 采用 Morlet 小波的锂电池相对健康状态估计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 97-103.
ZHAO Yunfei, XU Jun, WANG Haitao, et al. An estimation method of relative state-of-health for lithium-ion batteries using morlet wavelet [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 97-103.
- [4] 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.
- [5] 黄学良,王维,谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 2-14.
HUANG Xueliang, WANG Wei, TAN Linlin. Technical progress and application development of magnetic coupling resonant wireless power transfer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 2-14.
- [6] 赵争鸣,刘方,陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
ZHAO Zhengming, LIU Fang, CHEN Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40.
- [7] 邹爱龙,王慧贞,华洁. 基于 LCL 补偿的多负载移动式感应非接触电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4000-4006.
ZOU Ailong, WANG Huizhen, HUA Jie. The movable ICPT system with multi-loads based on the LCL compensation circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4000-4006.
- [8] YANG Yang, CUI Jinlong, CUI Xin. Design and analysis of magnetic coils for optimizing the coupling coefficient in an electric vehicle wireless power transfer system [J]. Energies, 2020, 13(16): 4143.
- [9] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.
- [10] ZHANG Wei, WHITE J C, ABRAHAM A M, et al. Loosely coupled transformer structure and interoperability study for EV wireless charging systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6356-6367.
- [11] 谭林林,黄学良,赵俊锋,等. 一种无线电能传输系统的盘式谐振器优化设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 1-6.
TAN Linlin, HUANG Xueliang, ZHAO Junfeng, et al. Optimization design for disc resonators of a wireless power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 1-6.
- [12] 高大威,王硕,杨福源. 电动汽车无线充电技术的研究进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(4): 314-327.
GAO Dawei, WANG Shuo, YANG Fuyuan. State-of-art of the wireless charging technologies for electric vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy,

- 2015, 6(4): 314-327.
- [13] FENG Hao, CAI Tao, DUAN Shanxu, et al. A dual-side-detuned series-series compensated resonant converter for wide charging region in a wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2177-2188.
- [14] ADITYA K, WILLIAMSON S S. Comparative study of series-series and series-parallel compensation topologies for electric vehicle charging [C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 426-430.
- [15] 王付胜, 郭娟娟, 王文洋, 等. 电动汽车无线充电系统实现软开关的参数优化设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 258-267.
- WANG Fusheng, GUO Juanjuan, WANG Wenyang, et al. A method of parameter optimization design to achieve ZVS for electric vehicle wireless charging system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 258-267.
- [16] 郭彦杰, 王丽芳, 张俊智, 等. 电动汽车无线充电系统传导电磁干扰及其对安全性的影响 [J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(4): 374-380.
- GUO Yanjie, WANG Lifang, ZHANG Junzhi, et al. Conducted electromagnetic interference in electric vehicle wireless charging system and its effects on system safety [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(4): 374-380.
- [17] SALLAN J, VILLA J L, LLOMBART A, et al. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2140-2149.
- [18] 夏晨阳, 邵祥, 李玉华, 等. 双 LCL 拓扑 ICPT 系统恒频恒流稳压特性研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 156-163.
- XIA Chenyang, SHAO Xiang, LI Yuhua, et al. Characteristic research of ICPT system based on double LCL structure for achieving constant frequency, constant current and stable voltage output [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(3): 156-163.
- [19] 张成良. 基于双边 LCC 拓扑结构的抗偏移静态无线充电系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [20] MILLER J M, ONAR O C, CHINTHAVALI M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 147-162.
- [21] 赵俊锋, 黄学良. 小功率无线电能传输系统应用研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 470-474.
- ZHAO Junfeng, HUANG Xueliang. Application research of low-power wireless power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 470-474.
- [22] 董纪清, 杨上苹, 黄天祥, 等. 用于磁耦合谐振式无线电能传输系统的新型恒流补偿网络 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4468-4476.
- DONG Jiqing, YANG Shangping, HUANG Tianxiang, et al. A novel constant current compensation network for magnetically-coupled resonant wireless power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4468-4476.
- [23] ZHU Qingwei, WANG Lifang, GUO Yanjie, et al. Applying LCC compensation network to dynamic wireless EV charging system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6557-6567.
- [24] 李海燕, 逯迈, 董绪伟. 纯电动汽车典型无线充电线圈电磁暴露安全评估研究 [J]. 电工电能新技术, 2019, 38(11): 74-80.
- LI Haiyan, LU Mai, DONG Xuwei. Research on electromagnetic exposure safety assessment of typical wireless charging coil for battery electric vehicle [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(11): 74-80.
- [25] 高妍, 张献, 杨庆新, 等. 电动汽车无线充电环境的生物电磁安全评估 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3581-3589.
- GAO Yan, ZHANG Xian, YANG Qingxin, et al. Bio-electromagnetic safety assessment of wireless charging environment for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3581-3589.
- [26] LI Siqu, MI C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 4-17.
- [27] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.
- [28] IEEE. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz: IEEE Std C95.1TM—2005 [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005.

(编辑 荆树蓉)