

基于 LCC 谐振网络的全方位无线电能传输实验

刘升光¹ 王明娥² 李宏升¹ 孟祥地² 石航睿² 陶艾龙²

(¹ 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266520; ² 大连理工大学物理学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要 无线充电技术以安全方便的优势, 在市场上展现出巨大的应用前景。目前市场上主要是以二维单向线圈作为发射线圈, 难以满足日益增长的生产需要。针对低成本、低复杂度的全向无线电能传输系统的需求, 通过 COMSOL 有限元仿真软件分析, 提出了一种三维全向无线电能传输线圈, 并结合 LCC 谐振网络, 研究了线圈全方位电能传输的能力以及耦合系数与传输角度和距离的关系。实验结果表明, 三维线圈可以产生全空间均匀分布的磁场, 并且通过 LCC 谐振网络可以将线圈传输效率从 17.86% 提升至 85.79%, 发射线圈任意角度均能满足无线功率传输系统的要求, 其中传输角度在 0~10° 以及 50~90° 附近有较好的传输效率以及较高的稳定性。

关键词 全方位无线电能传输; 线圈结构; 谐振网络; 有限元分析

OMNIDIRECTIONAL WIRELESS POWER TRANSFER EXPERIMENT BASED ON LCC RESONANCE NETWORK

LIU Shengguang¹ WANG Ming'e² LI Hongsheng¹ MENG Xiangdi² SHI Hangrui² TAO Ailong²

(¹ School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520;

² School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024)

Abstract Wireless charging technology, with its advantages of safety and convenience, has demonstrated significant application potential in the market. Currently, wireless charging devices on the market mainly use a two-dimensional unidirectional coil as a transmitting coil, which is difficult to meet the increasing production needs. To address the need for low-cost and low-complexity omnidirectional wireless power transfer systems, a three-dimensional omnidirectional wireless power transfer coil is proposed through analysis using the COMSOL finite element simulation software. Combining the LCC resonant network, the omni-directional power transmission capability of the coil and the relationship between the coupling coefficient and the transmission angle and distance are studied. Experimental results show that the three-dimensional coil can generate a uniformly distributed magnetic field in the entire space. The transmission efficiency of the coil can be increased from 17.86% to 85.79% through the LCC resonant network. The transmitting coil can meet the requirements of the wireless power transfer system at any angle. The transmission efficiency and stability are particularly good at angles around 0° to 10° and 50° to 90°.

Key words omnidirectional wireless power transfer; coil structure; resonance network; finite element analysis

收稿日期: 2024-05-26

基金项目: 国家重点研发计划(ZX20180815)。

通信作者: 刘升光, liushengguangqut@163.com。

引文格式: 刘升光, 王明娥, 李宏升, 等. 基于 LCC 谐振网络的全方位无线电能传输实验[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 231-236.

Cite this article: LIU S G, WANG M E, LI H S, et al. Omnidirectional wireless power transfer experiment based on LCC resonance network[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 231-236. (in Chinese)

根据无线电能传输(wireless power transmission, WPT)的原理,主要分为电磁辐射、电场耦合和磁耦合谐振三种实现方法^[1-3]。其中,电磁辐射利用远场进行传输,定向范围较差,且传输功率一般较小;电场耦合传输距离短,且利用电容电场进行的电能传输,对人体的危害相较磁场更加严重;因此,磁感应耦合逐渐成为学术界和工业界的主流研究方向^[2]。在磁耦合感应式无线电能传输(magnetically-coupling inductive wireless power transmission, MCI-WPT)中,利用原线圈产生交变磁场,根据法拉第电磁感应定律,可以将电能传输至负载,但是 MCI-WPT 传输效率会随传输距离急速衰减^[4-5],只适用于短距离传输。磁耦合谐振式无线电能传输(magnetically-coupling resonant wireless power transmission, MCR-WPT)利用谐振的原理,可以在远距离传输的情况下,保持较高的传输效率和功率^[6-8]。因此,MCR-WPT 受到了广泛的研究和关注。

在 MCR-WPT 的传输过程中,原线圈和副线圈的形状及位置对电能传输的效率和功率有很大的影响^[9-12],Rim 等^[8]利用二维原线圈实现了在二维平面中近距离的均匀无线电能传输;Zhang 等人^[10-11]建立了二维原线圈无线充电系统,以解决飞机无线充电的难题,但是二维原线圈无法实现三维空间内电磁场的均匀分布,对负载的接收位置有很强要求;Chabalko 等^[12]利用三维原线圈实现了在线圈内部任何位置对多个小型接收线圈电能传输,但是这种线圈位形需要昂贵的功率放大器来驱动;Zhao 等^[13]构建了三相移相驱动的全方位无线电能传输系统,但是这种系统需要多个激励电源进行相位和电流控制,降低了系统的实用性,且外部测量和反馈回路使系统成本大大增加。

因此,本文基于 MCR-WPT 原理,从线圈设计的角度出发,构建了一种单电源三维空间内电磁场均匀分布的无线电能传输系统,以满足低成本、低复杂度的全向无线电能传输系统的需求,研究了发射线圈角度和距离对传输功率和传输效率的影响。

1 实验设计

1.1 线圈结构的设计

全方位无线电能传输线圈如图 1 所示,发射

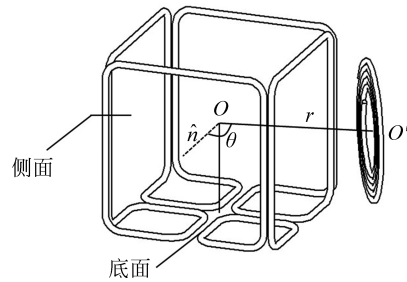


图 1 发射线圈与接收线圈示意图

线圈是一个用带有绝缘层的铜线圈缠制的三维线圈,其外形为正方体,其中一面由四个正方形构成,发射线圈边长为 15cm,匝数为 5 匝,高频感抗为 $38.02\mu\text{H}$;接收线圈直径为 19cm,匝数为 18 匝,高频感抗为 $220\mu\text{H}$ 。由于线圈为三维立体线圈,与二维平面接收线圈发生互感时,会出现非正对的情况,以三维正方体线圈中心点 O 为极点建立球坐标系,极点与二维圆形线圈中心点 O' 的间距为 r ,设 r 与某一侧面法线 $\hat{n}$ 的夹角为 θ 。根据 Neumann 公式,在发射线圈的一段回路与接收线圈上分别取线元 $d\mathbf{l}$ 与 $d\mathbf{l}'$,两线元相距 R ,则互感系数可以表示为

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \oint \frac{d\mathbf{l} \times d\mathbf{l}'}{R} \quad (1)$$

式中 μ_0 为真空中的磁导率,假设接收线圈平面与底面垂直,则两线圈之间的总互感系数可以表示为发射线圈的四个子回路之和。由此可以得出,发射线圈与接收线圈之间的互感系数与两线圈的正对角度以及距离有关。因此可以通过有限元分析,来探究互感与传输距离和角度之间的关系。

1.2 谐振网络的构建

实验中为了提高能量转换效率以及功率传输的能力,MCR-WPT 系统需要选择合适的谐振网络^[14]。单输入单输出型 WPT 系统主要分为三类^[15]:第一,以串联结构(series-series, SS)为代表的四种基础谐振网络;第二,将串、并联电路进行组合得到了 LCL 谐振网络^[16];第三,通过添加更多的无功元件得到了高阶谐振网络,如 LCC 结构^[17,18],双侧 LCC 补偿网络在谐振频率时具有恒流输出的同时,传输效率高的优点^[18],且与其他谐振网络相比,输入导纳更大,可以实现更大功率的传输^[18],LCC 谐振网络所具有的并联电容的滤波结构,使得其通频带更窄,稳定性更强^[15]。图 2 为 LCC 谐振网络的拓扑结构。

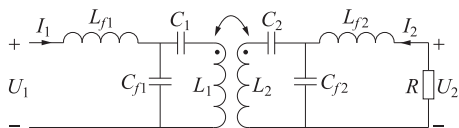


图2 LCC 谐振网络的拓扑结构

由于三维线圈的复杂结构,在电能传输的过程中可能会出现面与面之间的互感现象,进而输出频率不稳定,可能会造成接收端负载的损坏,因此针对 LCC 通频带窄稳定性好的特点,选用 LCC 谐振网络构成无线电能传输系统。

2 有限元模拟与实验结果分析

2.1 COMSOL 有限元模拟

采用 COMSOL 软件建立模型分析了线圈的磁场位形分布和线圈之间的互感系数,模拟参数如表 1 所示,所建立线圈模型的边长为 10cm,考虑到缠制线圈过程中四个侧面会存在气隙,同时过小的气隙会导致计算量急剧增加,为简化模型,在建模时预留 0.5cm 的空间作为气隙,以探究气隙存在情况下全方位无线电能传输线圈的电能传输能力。

表1 COMSOL 模拟线圈磁场及互感的参数选择

发射线圈边长	10cm
发射线圈激励电流	1A
接收线圈外直径	9cm
接收线圈内直径	5cm
接收线圈励磁电流	0A
线圈导线直径	0.8mm
线圈导线间隙	0.5cm
线圈电导率	$5.998 \times 10^7 \text{ S/m}$
相对磁导率	1
相对介电常数	1
模型绝对导入容差	1×10^{-5}

图 3 为过线圈极点 O 选取不同切面的磁场分布情况,图 3(a)选取了过极点 O 平行于底面的切面,从图 3(a)可以看出,在三维立体线圈内部磁场均匀分布,在线圈外部磁场随着距离的增加缓慢衰减,但是在距离极点 O 同样的距离内,磁场大小近似保持相同,说明线圈磁场满足全方位的分布;为了进一步证实磁场在全空间内的分布,在图 3

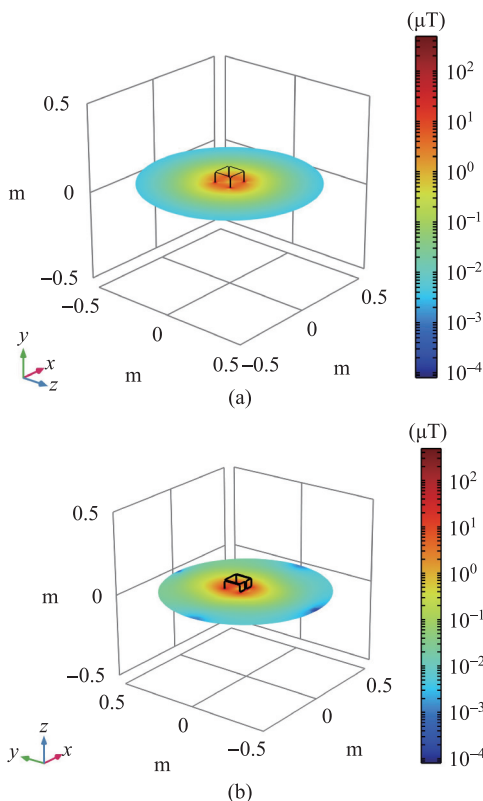


图3 磁场截面分布图

(a) 平行于线圈底面切面的磁场分布图; (b) 垂直于线圈底面切面的磁场分布图

(b)中选取了过极点 O 垂直底面的切面,从图 3 (b)中可以看出,在线圈内部磁场依然是均匀分布,但是在线圈外部,由于缠制线圈间隙的存在,超过一定距离后,线圈产生的磁场不再均匀,相较于其他方位,线圈正上方的磁场衰减较慢,电能传输距离更远。

为了查看线圈磁场在整个空间内的分布,图 4 给出了磁场在三维空间中的分布图像,从图中可以看出,在距离中心极点 O 一定的距离内,线圈产

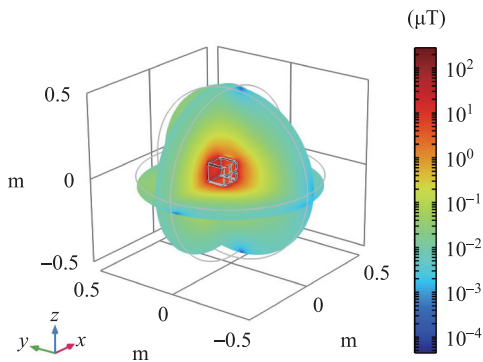


图4 磁场空间分布图

生的磁场近似是均匀的,超过一定距离后,磁场分布逐渐衰减。因此可以得出结论,本文描述的线圈可以实现全方位无线电能传输。

图 5 为发射线圈与接收线圈互感系数 M 与传输角度和传输距离的变化图像。图 5(a)中是取传输距离为 10cm 时,互感系数关于传输角度的变化曲线,从图中可以看出,三维线圈具有全方位无线电能传输的能力,但是由于线圈气隙的存在造成了磁场在空间中的非对称分布,所以模拟结果发现线圈角度与互感为非线性关系,在 $0\sim90^\circ$ 之间有极大值与极小值,极大值出现角度为 75° ,极小值出现在 35° 。图 5(b)中是取传输角度为 75° 时互感系数关于传输距离的变化曲线,从图中可以看出,线圈互感系数随着发射线圈与接收线圈的距离增加逐渐减小,互感系数关于线圈距离近似呈指数规律衰减。

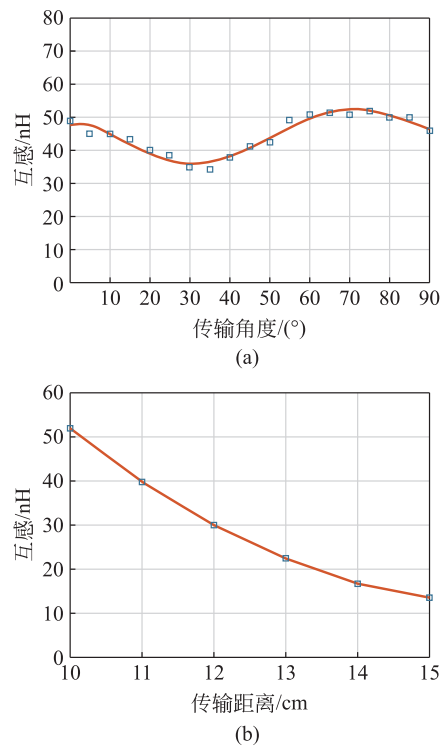


图 5 互感系数与传输角度和传输距离的变化图
(a) 互感系数随传输角度变化; (b) 互感系数随传输距离变化

2.2 实验结果分析

实验中采用高频功率源作为激励电源,电源频率为 0.18MHz,输出功率为 10W,电阻作为接收端负载。式(2)和式(3)给出了 LCC 谐振条件^[15],通过谐振条件,可以计算出实验中所需要选取元件的参数值,如表 2 所示。

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_{f1}C_{f1}} = \frac{1}{(L_1 - L_{f1})C_1} \tag{2}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_{f2}C_{f2}} = \frac{1}{(L_2 - L_{f2})C_2} \tag{3}$$

表 2 LCC 谐振网络元件实验参数

元件	参数
U_1	10V
L_{f1}	1.66μH
C_{f1}	0.047μF
C_1	0.036μF
L_1	38.02μH
L_2	220μH
C_2	0.003μF
C_{f2}	0.047μF
L_{f2}	1.66μH

实验中先将发射线圈与接收线圈不与 LCC 谐振网络连接,发射线圈另一端接入高频信号源,接收线圈另一端接入负载进行测量,测量过程为先固定发射线圈与接收线圈正对,设此时传输角度为 0° ,逐步改变两线圈的间距,来验证线圈间距对于传输效率的影响,然后再固定发射线圈与接收线圈的相对距离为 11.5cm,从 $0\sim90^\circ$ 逐步改变传输角度以验证角度对于传输效率的影响。最后将 LCC 谐振网络接入,构成无线电能传输系统,重复上述测量过程。

图 6 为传输功率关于传输距离的关系,可以看出无论是否引入谐振网络,传输功率始终随距离增加近似呈指数规律衰减,但根据拟合曲线方程可知,LCC 谐振下的传输功率衰减速度更慢,且相同距离下,谐振时传输功率远大于无谐振网络的功率。传输功率无法直接反映无线电能传输过程中的能量损失程度,为了研究能量损失程度,需

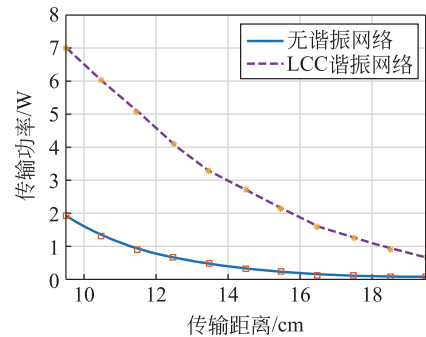


图 6 传输功率关于传输距离的关系

要引入传输效率,其定义为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (4)$$

其中 η 是传输效率, P_1 是发射端输入的总功率, P_2 是接收端收到的有效功率。实验中,测量误差的大小主要取决于仪器的精度,输入功率由标准功率信号源提供,最小输出功率为 0.01W,接收功率采用示波器测量负载两端的电压波形曲线计算得出,示波器的垂直灵敏度为 $500\mu\text{V}$,负载为 0.02 级的十进制电阻箱。图 7 给出了传输效率和传输距离的关系,从图中可以看出,LCC 谐振网络下的传输效率会更高,LCC 谐振网络的传输功率最高可达 6.99W,传输效率最高可达 85.79%,而在无谐振网络条件下,传输功率最高仅为 1.93W,传输效率只有 17.86%。

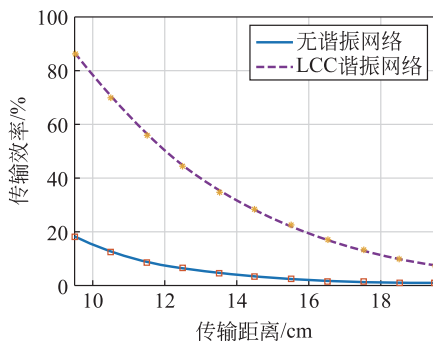


图 7 传输效率关于传输距离的关系

图 8 为 LCC 谐振网络下无线电能传输系统传输功率及效率关于传输角度的关系,可以看出在各种角度下传输效率都超过 40%,而且输出功率比较稳定,满足全方位无线电能传输的需求,其中传输功率在 30° 附近为极小值,在 70° 附近为极大值,与 COMSOL 软件的模拟结果基本一致。传输效率相对其他角度,在 $0\sim 10^\circ$ 以及 $50\sim 90^\circ$ 有较好的传输效率。

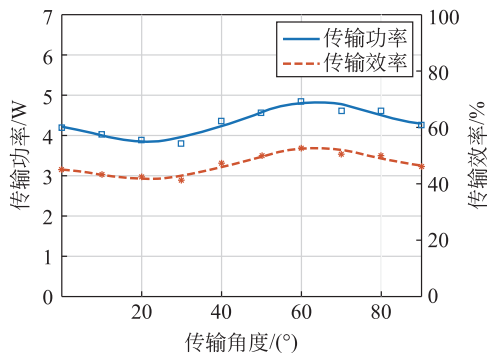


图 8 传输功率及效率关于传输角度关系

3 结论

通过有限元分析以及实验研究,提出了一种新型全方位无线电能传输系统,其中发射线圈为三维结构线圈,可以产生全空间内相对均匀的磁场分布,满足全方位无线电能传输的需求,并采用 LCC 谐振网络构成磁耦合谐振式电路进行无线电能传输,研究表明采用 LCC 谐振网络可以大幅增大传输效率与距离,并实现恒流输出,同时还发现接收线圈在角度为 $0\sim 10^\circ$ 以及 $50\sim 90^\circ$ 附近有较好的传输效率。本文提出的全方位无线电能传输系统结构简单、制作方便、抗干扰性强且成本低廉,研究结果为全方位无线电能传输市场提供了一种可行的方案。在实际教学中,此实验为研究型实验教学项目,内容开放,学生需要自行绕制线圈设计无线电能传输系统,确定电感、电容及谐振频率等参数。教学效果反馈良好,充分锻炼了学生的自主探索能力和创新能力。

参 考 文 献

- [1] 张克涵,阎龙斌,闫争超,等. 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 334-342.
ZHANG K H, YAN L B, YAN Z C, et al. Modeling and analysis of eddy-current loss of underwater contact-less power transmission system based on magnetic coupled resonance [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 334-342. (in Chinese)
- [2] 于歆杰,吴天逸,李臻. 基于 Metglas/PFC 磁电层状复合材料的电能无线传输系统[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 535-542.
YU X J, WU T Y, LI Z. Wireless energy transfer system based on metglas/PFC magnetoelectric laminated composites[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 535-542. (in Chinese)
- [3] 陈森,刘鑫,杨宇舜,等. 一种制作中远距离无线电能传输装置的方法[J]. 物理与工程, 2017, 27(S1): 229-233.
CHEN S, LIU X, YANG Y B, et al. A method to design a medium-distance wireless power transmission device [J]. Physics and Engineering, 2017, 27(S1): 229-233. (in Chinese)
- [4] 强浩,黄学良,谭林林,等. 基于动态调谐实现感应耦合无线电能传输系统的最大功率传输[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(7): 830-837.
QIANG H, HUANG X L, TAN L L, et al. Achieving maximum power transfer of inductively coupled wireless

- power transfer system based on dynamic tuning control[J]. Sci China Tech Sci, 2012, 42(7): 830-837. (in Chinese)
- [5] ZHANG C, LIN D, HUI S Y. Basic control principles of omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5215-5227.
- [6] 刘洋, 逢海萍. 基于 E 类逆变器的无线电能传输创新实验设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(12): 66-71.
- LIU Y, PANG H P. Design on innovative experiment of wireless power transmission based on E-class power inverter[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(12): 66-71. (in Chinese)
- [7] 赵越, 沈艳霞. 磁耦合谐振式无线电能传输系统效率优化研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 29-32.
- ZHAO Y, SHEN Y X. Research on efficiency optimization of magnetically coupled resonant wireless power transmission system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(4): 29-32. (in Chinese)
- [8] 王琦婷. 磁耦合谐振式无线充电系统线圈的研究[J]. 电工材料, 2020(6): 56-59.
- WANG Q T. The Research on coil of magnetically coupled resonant wireless charging system[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(6): 56-59. (in Chinese)
- [9] LEE E S, BO H C, SOHN Y H, et al. Multiple dipole receiving coils for 2-D omnidirectional wireless mobile charging under wireless power zone[C]//Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015: 3209-3214.
- [10] LIN D, ZHANG C, HUI S Y R. Mathematical analysis of omnidirectional wireless power transfer—part-I: two-dimensional systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(1): 625-633.
- [11] CHE B J, MENG F Y, LYU Y L, et al. Omnidirectional wireless power transfer system supporting mobile devices[J]. Applied Physics A, 2016, 122(2): 54.
- [12] CHABALKO M J, SAMPLE A P. Three-dimensional charging via multi-mode resonant cavity enabled wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6163-6173.
- [13] YE Z, SUN Y, LIU X, et al. Power transfer efficiency analysis for omnidirectional wireless power transfer system using three-phase-shifted drive[J]. Energies, 2018, 11(8): 2159.
- [14] 薛雪, 刘晓文, 刘成磊. 基于谐振原理的无线电能传输实验研究[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(5): 32-36+43.
- XUE X, LIU X W, LIU C L. Research on experiment for wireless power transmission based on resonance principle[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(5): 32-36+43. (in Chinese)
- [15] 石坤宏, 程志江, 王维庆, 等. 3 种谐振式无线电能传输系统的电路法模型及其特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2240-2250.
- SHI K H, CHENG Z J, WANG W Q, et al. Circuit model and characteristics of three resonant wireless power transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2240-2250. (in Chinese)
- [16] 赵靖英, 周思诺, 崔玉龙, 等. LCL 型磁耦合谐振式无线电能传输系统的设计方法研究与实现[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 228-235.
- ZHAO J Y, ZHOU S N, CUI Y L, et al. Research and implementation on design method for LCL type magnetically-coupled resonant wireless power transfer system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 228-235. (in Chinese)
- [17] 杨阳, 王澍, 颜黎明, 等. 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[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 171-180.
- YANG Y, WANG S, YAN L M, et al. Research on double-sided LCC resonant topology and electromagnetic safety for wireless charging system of electric vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 171-180. (in Chinese)
- [18] 董晓帅, 王林, 伍敏, 等. 基于 LCC 补偿的无线充电系统的分析与控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 10-12, 28.
- DONG X S, WANG L, WU M, et al. Analysis and control of wireless charging system based on LCC compensation network[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 10-12, 28. (in Chinese)