

储能式轨道列车非接触牵引供电系统设计与效率优化^{*}

杨 鹏 李美征 陈敬东 田裕鹏 李东义

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛)

摘 要 [目的] 非接触供电方式凭借其原副边线圈无直接电气接触的优点, 目前在轨道交通行业内有探索性的应用。大功率、高频化的应用场景给非接触供电系统的设计、器件选型及耦合机构的设计带来了一定的难度, 需要对其设计方案及效率进行优化。[方法] 针对轨道交通应用场景, 介绍了基于 LCC-S 型补偿拓扑的非接触牵引供电系统的系统结构, 设计了 250 kW 非接触供电系统, 原边线圈与副边接收线圈均采用双 D 形线圈。研究了耦合线圈的互感及磁性材料的损耗等因素对系统效率的影响, 建立了系统的电路模型及耦合线圈模型。基于模型对系统进行了仿真, 对副边线圈不同区域的磁芯厚度进行了参数优化。搭建了非接触牵引供电系统试验平台, 并进行了 250 kW 功率等级的试验, 以验证本优化方法的有效性。[结果及结论] 仿真与试验结果验证了该优化方法的有效性与可行性, 磁芯布局的优化措施可有效保证线圈互感并降低磁芯损耗。系统具备了额定工况 250 kW 大功率输出的能力。在气隙高度为 70 mm、80 mm 下, 系统的静态工作效率及动态工作效率均大于 90%。

关键词 轨道列车; 非接触式供电; 牵引供电; 效率优化

中图分类号 U223.2; U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.015

Contactless Traction Power Supply System Design and Efficiency Optimization of Battery Energy Storage Rail Trains

YANG Peng, LI Meizheng, CHEN Jingdong, TIAN Yupeng, LI Dongyi

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China)

Abstract [Objective] Contactless power supply method, leveraging the advantages of no direct electrical contact between the primary and secondary side coils, is currently being explored in the rail transit industry. The high-power, high-frequency application scenarios pose challenges in the design of the contactless traction power supply system, component selection, and coupling mechanism design. It requires optimization of the design scheme and system efficiency. [Method] For rail transit application scenarios, the system structure of a con-

tactless traction power supply system based on the LCC-S (inductance-capacitor-capacitor-series) compensation topology is introduced. A 250 kW contactless power supply system is designed, utilizing double D-shaped coils for the primary track coils and secondary receiving coils. The impact of factors such as mutual inductance of coupling coils and losses in magnetic materials on system efficiency is studied. System circuit model and coupling coil model are established. The system is simulated based on the model, and parameters for the magnetic core thickness in different regions of the secondary coils are optimized. An experimental platform for contactless traction power supply system is built, and tests are conducted at a power level of 250 kW to validate the effectiveness of the design optimization method. [Result & Conclusion] The simulation and experimental results confirm the effectiveness and feasibility of the design optimization method. Optimization of the core layout ensures coil mutual inductance and reduces core losses. The system demonstrates the capability of delivering a rated output power of 250 kW. Under air gap heights of 70 mm and 80 mm, the static and dynamic operating efficiencies of the system are both greater than 90%.

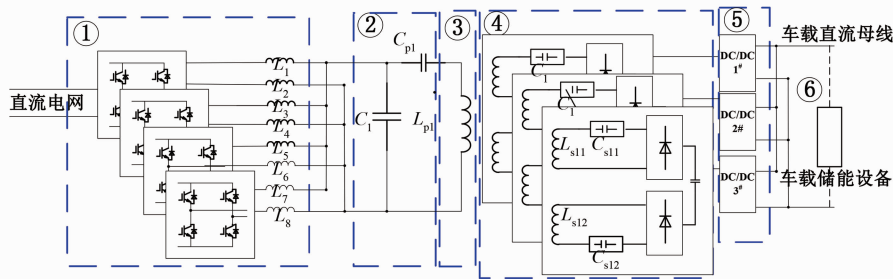
Key words rail train; contactless power supply; traction power supply; efficiency optimization

非接触供电作为一种新型的供电技术, 对其在大功率应用场景上的研究不断增多。文献[1-2]总结了无线电能传输技术在各领域内的应用情况及存在的共性问题, 指出该技术在交通领域产业化中仍存在诸多需要突破的难点。韩国科学技术研究院攻克了非接触供电技术, 其传输功率为 100 kW, 效率约为 85.0%^[3]。韩国科学技术研究院与韩国铁路研究院在轨道列车上实现了 1 MW 的非接触供电, 当线圈气隙为 5 cm 时, 该非接触供电系统的效率约为 82.7%^[4]。庞巴迪的 Privmove 系统根据轻轨车辆长度、数量等因素, 提供了 100 ~ 500 kW 的功率输出^[5]。美国 WAVE 公司已实现了电动公交车 125 ~

^{*} 国家重点研发计划项目 (2017YFB1201003-010)

500 kW 的非接触充电^[6]。文献[7-9]通过理论分析与试验验证等方式,对基于 LCC-S 型补偿拓扑的参数优化进行了深入研究。文献[10]对 DWPT(动态无线电能传输)的结构及优缺点进行了对比,并对 DWPT 在工程中的应用进展进行了总结与展望。综上,目前针对轨道列车等大功率非接触供电应用场景的研究仍较少,对于影响系统效率的因素(如互感、磁屏蔽及磁芯损耗等)仍需要在实践中进一步改进及优化。

本文针对储能式轨道列车的大功率非接触牵引供电系统效率进行优化设计,搭建了非接触牵引供电系统试验平台,并进行了 250 kW 功率等级试验,以验证本设计及优化方法的有效性。



注:①为地面高频逆变电源柜;②为补偿电容箱;③为原边线圈轨道;④为整流箱;⑤为车载 DC/DC 变流器;⑥为车载储能设备; f 为逆变模块的工作频率; C_1 、 C_{p1} 分别为谐振补偿网络的并联补偿电容、串联补偿电容; L_{p1} 为原边线圈轨道自感; L_{s11} 、 L_{s12} 为副边线圈自感; C_{s11} 、 C_{s12} 为串联谐振补偿电容; L_1 — L_8 为电感编号。

图 1 轨道列车非接触牵引供电系统的结构示意图

Fig. 1 Diagram of rail train contactless traction power supply system structure

1.2 系统等效电路模型

根据 T 形二端口网络对系统的谐振补偿网络等效电路进行建模,如图 2 a) 所示。本文的拓扑包含 2 个 T 形网络,每个 T 形网络均具有阻抗变换功能。根据回转器理论对模型进行简化,得到回转电路模型如图 2 b) 所示。

设 Z_1 、 Z_2 为回转器的回转电阻,则每个回转器内电压电流方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_1 \\ -Z_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ I_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_2 \\ -Z_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{out} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

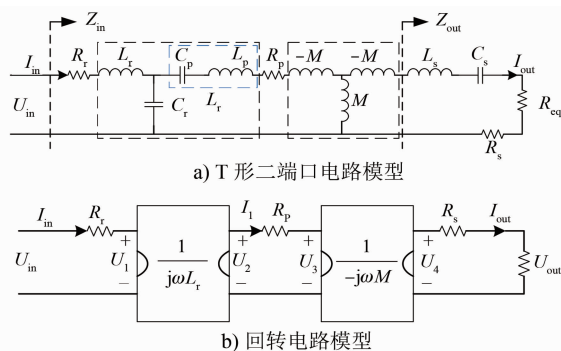
则有 $Z_1 = -j\omega L_r$, $Z_2 = -j\omega M$ 。再设 ω_0 为谐振频率,根据 LCC-S 型谐振补偿拓扑,若系统工作在谐振状态时,其电路参数及工作频率应满足下列条件:

1 基于 LCC-S 型补偿的非接触牵引供电系统

本文采用 LCC-S 型拓扑作为非接触牵引供电系统耦合线圈的补偿拓扑,原副边线圈采用双 D 形线圈。该拓扑能够实现对原边线圈恒流励磁,副边线圈则采用串联谐振来实现其恒压输出。

1.1 系统结构

轨道列车非接触牵引供电系统主要包括以下部分:地面高频逆变电源柜、补偿电容箱、原边线圈轨道、整流箱、车载 DC/DC 变流器及车载储能设备,其系统结构如图 1 所示。其中:地面高频逆变电源柜中包括 4 个两电平逆变模块,谐振补偿网络采用分布式补偿电感方式;整流箱包括整流器、副边线圈及串联谐振补偿电容,与车载 DC/DC 变流器相连。



注: U_{in} —谐振网络输入电压; I_{in} —谐振网络输入电流; R_p —原边线圈内阻; R_s —副边线圈内阻; M —原副边线圈之间的互感; Z_{in} —输入阻抗; Z_{out} —输出阻抗; R_r —原边线圈补偿电感内阻; R_{eq} —负载电阻; L_r —原边线圈补偿电感; C_p —串联补偿电容; C_s —副边线圈串联补偿电容; C_r —并联补偿电容; L_s —副边线圈自感; L_p —原边线圈自感; U_{out} —谐振网络输出电压; I_{out} —谐振网络输出电流; U_1 、 U_2 —回转器的输入电压; U_3 、 U_4 —回转器的输出电压; I_1 —回转器电流; ω —工作角频率。

图 2 基于 LCC-S 型补偿拓扑的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model based on LCC-S compensation topology

$$\text{s. t.} \begin{cases} j\omega_0 L_r = -j \frac{1}{\omega_0 C_r} \\ j\omega_0 L_r = \frac{1}{j\omega_0 C_p} + j\omega_0 L_p \\ j\omega_0 L_s + \frac{1}{j\omega_0 C_s} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

设系统的输入功率为 P_{in} 、输出功率为 P_{out} ，系统的传输效率为 η ，则 η 的计算式为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_1 R_{eq}}{U_{in} \left(\frac{R_p}{\omega^2 M^2} + \frac{1}{R_s + R_{eq}} \right) (R_s + R_{eq})^2} \quad (3)$$

由式(3)可知, η 与 M 、 R_{eq} 、 R_p 、 R_s 等有关。 η 随 M 的升高而升高,且随着 M 的升高, η 的提升速率逐渐降低; M 一定时,系统存在最优负载,当系统工作在最优负载时, η 的值最大。

2 系统的仿真设计及优化

2.1 副边铝壳对互感的影响

图3为原边线圈励磁时磁感应强度分布情况。在模型中加入外壳模型,线圈气隙高度设为90 mm。由图3可知,原边线圈磁感应强度最大值约为33 mT。

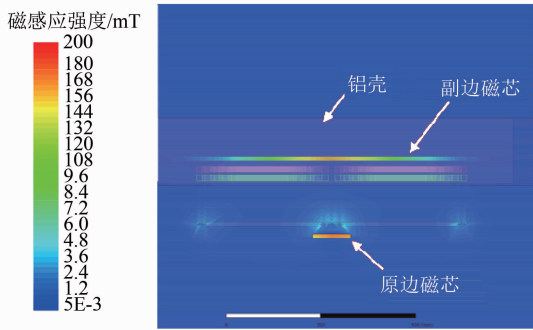


图3 原边线圈励磁时磁感应强度分布云图

Fig. 3 Nephogram of magnetic induction strength distribution during primary track coil excitation

图4为副边线圈感应耦合时磁感应强度分布云图。如图4所示,副边在感应耦合时磁感应强度超过200 mT,磁损耗严重,磁芯温升较高。此时需要对副边的磁芯厚度进行优化,以避免产生局部饱和现象。箱体以上区域内的磁感应强度均小于10 μ T。

2.2 铁轨对互感的影响

在模型中加入铁轨模型。图5为加入铁轨后系统的磁感应强度分布云图。由图5可知,铁轨附近

的磁感应强度低于5 μ T。原副边线圈的互感约为20.50 μ H,铁轨对系统的互感影响较小。

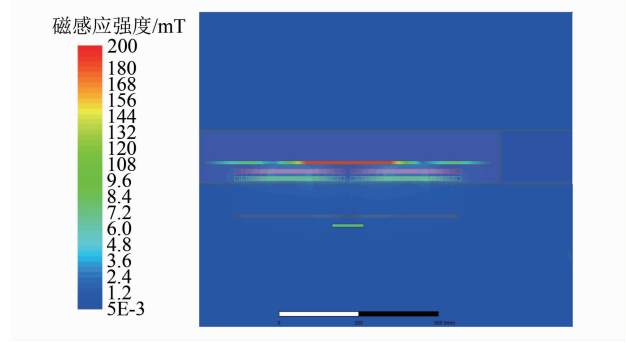


图4 副边线圈感应耦合时磁感应强度分布云图

Fig. 4 Nephogram of magnetic induction strength distribution of secondary receiving coil during induction coupling

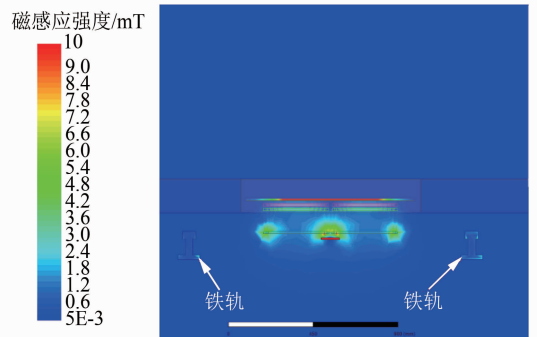


图5 加入铁轨后系统的磁感应强度分布云图

Fig. 5 Nephogram of system magnetic induction strength distribution after adding the rails

2.3 副边磁芯优化

通过仿真发现,在副边线圈工作过程中,峰值电流使副边磁芯的磁感应强度大于250 mT,进而导致磁芯的损耗增加。由Steinmetz磁芯损耗经验公式可知,磁芯损耗与其材料性能、系统工作频率和磁感应强度有关。由于系统在固定的频率下工作,因此应通过降低磁芯处的磁感应强度来降低磁芯损耗。

经过多次仿真对比后,本文确定了磁芯敷设方案。图6为优化前后磁芯处的磁感应强度分布云图。由图6可知:优化副边线圈不同区域的磁芯厚度,可减小磁感应强度超过250 mT区域的面积。

如图6 a)所示,在优化前磁芯处的磁感应强度分布中,磁感应强度超过250 mT的区域面积约占磁芯总面积的1/3;如图6 b)所示,优化后,磁感应强度超过250 mT的区域面积大为减小,从而避免了磁芯长时间工作时温升过高的情况。此外,耦合线圈互感也由优化前的15.64 μ H下降至优化后的15.54 μ H。

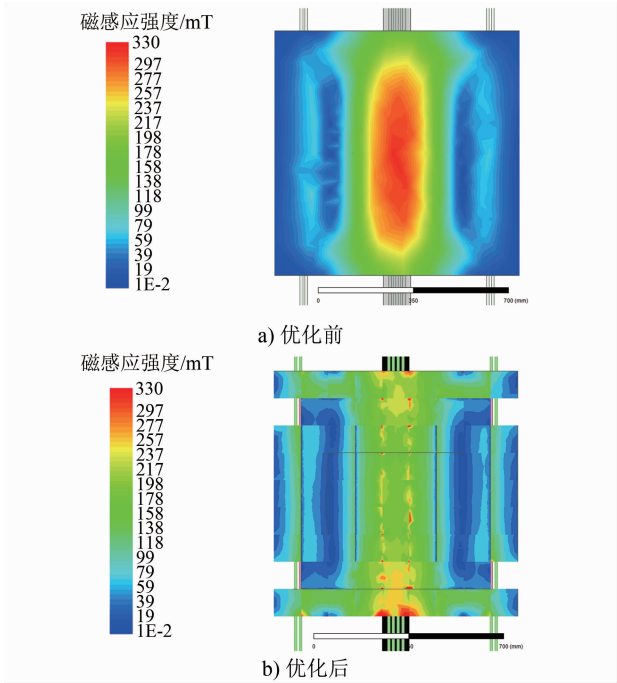


图 6 优化前后磁芯处的磁感应强度分布云图

Fig. 6 Nephogram of magnetic induction strength distribution at ferrite core before and after optimization

3 试验验证

系统各部分的试验参数如表 1 所示。

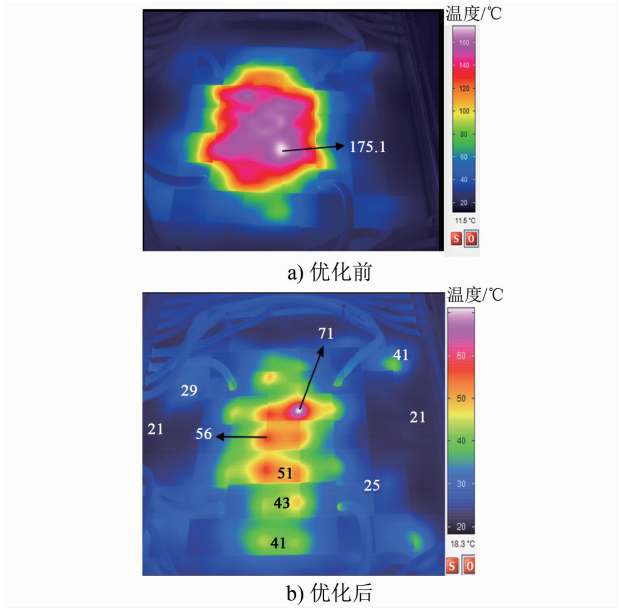
表 1 系统各部分的试验参数	
Tab. 1 Experimental parameters of each system component	
参数名称	参数值
逆变器工作频率/kHz	50
补偿电感/ μ H	20
并联补偿电容/nF	509
串联补偿电容/nF	51
原边线圈自感/ μ H	220
副边线圈自感/ μ H	104
副边串联补偿电容/nF	97

3.1 副边线圈磁芯温升试验

图 7 为优化前后副边线圈磁芯处的温升试验情况。由图 7 可知:优化前,副边线圈磁芯处的最高温度达 175.1 $^{\circ}$ C,且温度超过 120 $^{\circ}$ C 的区域较大,副边线圈散热较为困难;优化后,副边线圈磁芯处的温升有效降低,其最高温度约为 71.3 $^{\circ}$ C。

3.2 系统静态与动态试验

本研究设置了 250 kW 非接触牵引供电系统的试验平台,如图 8 所示。图 9 为气隙高度为 80 mm 时的静态、动态试验平台现场图。



注:图中数字均为温度值,单位为 $^{\circ}$ C。

图 7 优化前后副边线圈磁芯处的温升试验情况

Fig. 7 Test results of temperature rise at secondary receiving coil ferrite cores before and after optimization

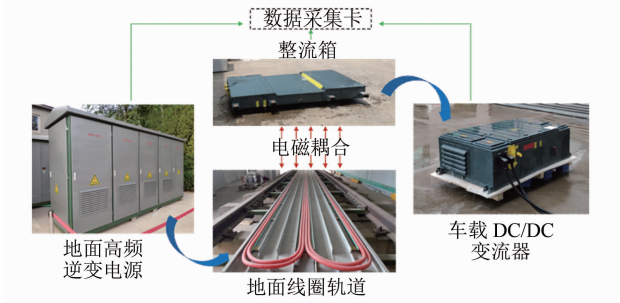


图 8 非接触牵引供电系统试验平台

Fig. 8 Test platform of contactless traction power supply system

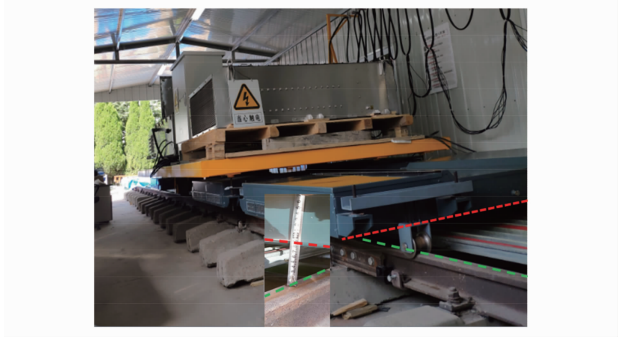


图 9 气隙高度为 80mm 时的静态、动态试验现场

Fig. 9 Static and dynamic test site at the air gap height of 80 mm

基于所搭建的 250 kW 非接触牵引供电系统试验平台,在原副边线圈气隙高度为 70 mm、80 mm 下进行效率测试。其中,当气隙高度为 80 mm 时,系统在静态下的功率、效率测试结果如表 2 所示,系

统在动态下的功率、效率测试结果如表 3 所示。由此可知:气隙高度为 80 mm 时,系统的静态工作效率为 90%;气隙高度为 70 mm 时,系统在低速动态工况下的工作效率为 91%;车载 DC/DC 变流器的工作效率约为 97%;地面高频逆变电源的工作效率约为 98%。

表 2 系统在静态下的功率、效率测试结果

Tab. 2 Output power and system efficiency test results under static conditions

测试参数	测试值
直流总输入功率/kW	288.08
整流机箱总输出功率/kW	259.79
直流输入下的整流机箱效率/%	90.18
车载 DC/DC 变流器的总输出功率/kW	250.17
直流输入-车载 DC/DC 变流器的效率/%	86.84

表 3 系统在动态下的功率、效率测试结果

Tab. 3 Output power and system efficiency test results under dynamic conditions

测试参数	测试值
直流总输入功率/kW	285.38
整流机箱总输出功率/kW	258.23
直流输入下的整流机箱效率/%	90.49
车载 DC/DC 变流器的总输出功率/kW	253.97
直流输入-车载 DC/DC 变流器的效率/%	88.99

4 结语

本文基于 LCC-S 型补偿拓扑及双 D 形耦合线圈,提出了轨道列车大功率应用场景下的设计优化方法,验证了该方法下非接触供电系统的可行性。通过对比分析铝壳、铁轨对耦合机构互感的影响,对磁芯采取了仿真优化措施。试验表明,该措施可有效降低磁芯损耗。通过试验结果可知,系统具备了额定工况 250 kW 大功率输出的能力;在动、静态测试中,直流输入至整流箱输出的工作效率均超过 90%;系统的充电效率均高于 85%。这些试验结果进一步验证了本文所提的设计优化方法的有效性及其可行性。

参考文献

[1] FENG H, TAVAKOLI R, ONAR O C, et al. Advances in high-power wireless charging systems: overview and design considerations[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 886.

[2] 薛明,杨庆新,章鹏程,等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547.
XUE Ming, YANG Qingxin, ZHANG Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547.

[3] SHIN J, SHIN S, KIM Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1179.

[4] KIM J H, LEE B S, LEE J H, et al. Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6242.

[5] PRIMOVE. Bombardier PRIMOVE Light Rail Trams [EB/OL]. (2013-02-27) [2023-12-25]. <https://www.railway-technology.com/projects/bombardier-primove-light-rail-trams-germany/>.

[6] WAVE CHARGING. Leading the Wireless WAVE [EB/OL]. (2022-11-13) [2023-12-25]. <https://wavecharging.com/products/wireless/>.

[7] 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.
DONG Xiaoshuai, WANG Lin, WU Min, et al. Analysis and control of wireless charging system based on LCC compensation network[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 10.

[8] 国玉刚,崔纳新. LCC-S 型无线电能传输系统优化配置及特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3723.
GUO Yugang, CUI Naxin. Research on optimal configuration and characteristics based on LCC-S type wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3723.

[9] 田勇,朱泽,田劲东,等. 基于 LCC-S 补偿的电动汽车动态无线充电系统拓扑参数优化[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 150.
TIAN Yong, ZHU Ze, TIAN Jindong, et al. Parameters optimization of electric vehicles dynamic wireless power transfer system based on LCC-S compensation topology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 150.

[10] 薛明,王嘉浩,杨庆新,等. 电动汽车动态无线供电系统发射单元切换模式分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2517.
XUE Ming, WANG Jiahao, YANG Qingxin, et al. Analysis of transmitter unit switching mode in dynamic wireless charging for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2517.

· 收稿日期:2021-10-12 修回日期:2021-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2021-10-12 Revised:2021-12-30 Published:2024-04-10
· 通信作者:杨鹏,工程师,yang_peng56@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license