

基于 FPGA 软件的非接触供电列车运行模拟分析*

李娜 裴春兴 王远霏 孙海荣

(中车唐山机车车辆有限公司运修技术中心, 063035, 唐山//第一作者, 工程师)

摘要 非接触式供电是轨道交通未来重点发展的新型牵引供电技术之一。以掌握非接触供电列车的核心控制技术及其与电源基地的匹配关系为目标, 搭建实时仿真平台对非接触供电列车进行运行模拟分析。针对非接触供电系统供电电源的高频特性, 提出基于 FPGA(现场可编程门阵列)软件的高速仿真方案, 分析基于特定线路条件下, 列车在牵引、制动、惰行等不同工况下的运行控制策略, 并考虑在列车设计中加入储能单元, 进行节能优化方案设计。仿真分析结果可为非接触供电系统的电源基地设计和系统配置提供参考依据。

关键词 轨道交通; FPGA 软件; 非接触供电

中图分类号 U223.5⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.011

Simulation and Analysis of Contactless Power Supply Train Operation Based on FPGA

LI Na, PEI Chunxing, WANG Yuanfei, SUN Hairong

Abstract Contactless power supply is one of the key aspects of new rail transit traction power supply technologies for the future. Aiming to master the core control technology of contactless power supply train and the relationship between the train and power base station, a real-time simulation platform is built to simulate the operation process of train with contactless power supply for analysis. Due to the high-frequency characteristics of contactless power supply system, a high-speed simulation scheme based on FPGA is introduced. Operation control strategies of train under different working conditions such as traction, braking and idling are analyzed, and to add energy storage unit in train design is considered, carrying out energy saving optimization scheme design. Simulation results provide reference for the design and configuration of power base station of contactless power supply system.

Key words rail transit; FPGA software; contactless power supply

Author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

采用新型非接触供电能够降低轨道交通牵引供电系统维护成本, 提高安全性, 是未来重点发展的新型牵引供电技术之一。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内外研究机构就开始了轨道交通非接触供电的研究, 并取得了一定成果。在理论研究方面, 电磁耦合机构作为非接触供电的核心部分, 是国内外重点研究对象。文献[1]提出了一种低阻性的接收线圈参数设计方法, 对于由几何参数和材料确定的接收线圈, 通过理论计算分析得到了导线直径的最优值。文献[2]研究了一种新型的闭合双环型拾取机构, 利用磁场通路与铁心环路匹配减小磁阻, 提高了接收线圈与发射线圈之间的耦合系数。文献[3]提出的接收线圈与发射线圈矩形缠绕结构, 可以有效解决线圈未对准造成的传输效率低的问题, 允许更大的偏移和角倾斜。文献[4]采用非对称结构的 S 形磁心极大地提高了耦合系数。文献[5]研究了一种 double D 结构的电磁机构, 增加了横向偏移能力。文献[6]发现双 U 型耦合电磁机构在全阻性负载条件下具有更大的耦合系数及传输效率。此外, 在非接触供电系统的基本原理分析、系统控制方法设计、高频逆变电路设计等方面也有众多的研究成果。

目前, 世界上仍没有成熟的基于非接触供电的轨道交通运营线路, 但韩国研究团队于 2013 年在韩国五松站建成无线供电的有轨电车示范线路并试验成功。该车通过多接收线圈拾取实现大功率能量传输, 系统整体效率达到 82.7%。2009 年, 加拿大庞巴迪旗下的 PRIMOVEP 品牌推出基于无线供电的有轨列车解决方案, 并在德国建立一条示范线, 无线供电系统输出功率可达 100 至 500 kW; 当列车工作在 270 kW 输出功率时, 可以加速到 80 km/h。

我国科研机构对非接触供电技术在轨道交通中的应用研究起步相对较晚, 且大多停留在理论层面。

* 国家重点研发计划项目(2017YFB11201002)

本文另辟蹊径,从研究非接触式供电列车与轨旁牵引供电系统的匹配关系的角度出发,采用基于 FPGA (现场可编程门阵列) 软件的高速仿真平台对非接触供电列车进行模拟运行,并考虑在车辆系统中配置储能单元进行能耗优化分析。仿真结果为非接触供电系统电源基站设计和系统配置提供了参考依据。

1 系统结构及原理

图1为非接触供电列车系统架构。如图1所示,电源基站将三相 50 Hz、380 V 交流电转换成高频交流电。高频交流电加到松耦合变压器原边线圈(即电能发射板,铺在两根钢轨中间),并在空间产生高频磁场,在车载接收板感应出电压,从而实现无接触电能传输。车载能量接收板感应出的电压经整流器和 DC-DC 变换器生成稳定的 750 V 直流电压,为列车牵引系统和辅助系统提供电力。列车中配置超级电容作为储能单元,通过双向 DC-DC 变换器连接到直流母线,可实现能量的双向供电。

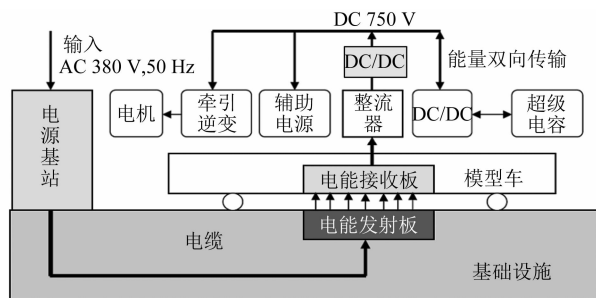


图1 非接触供电列车系统架构

2 模拟运行模型

为了最大程度模拟真实非接触供电系统的运行工况,并能够进行运行控制策略和能量管理策略的研究,本文针对图1所示的非接触供电列车系统架构搭建基于真实物理拓扑结构的牵引传动系统数字仿真模型。分别对图1所示的电源基站、能量耦合线圈、车载整流器、DC-DC 变换器、储能单元、牵引、辅助负载等建立其数学模型。此外,需建立列车运行于特定线路上的动力学模型^[7]。

2.1 牵引传动系统模型

以核心的松耦合变压器(耦合线圈)为例。对其进行数学原理分析,为建立虚拟列车模型提供建模依据。本文中对单节列车进行运行模拟,列车底部放置3块能量接收板,如图2所示。因此对应的松耦合变压器结构为1个原边线圈+3个副边线圈

的结构形式。无线供电系统多采用在电路中串联谐振电容的形式,使整个系统工作在谐振状态,以提供能量传递效率。根据谐振电容在电路部署位置的不同,可分为 SS 型、SP 型、PP 型、PS 型,此处采用使用最多的 SS 型结构设计。松耦合变压器的等效电路图如图3所示。

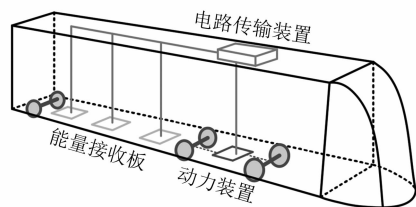


图2 能量接收板布局示意图

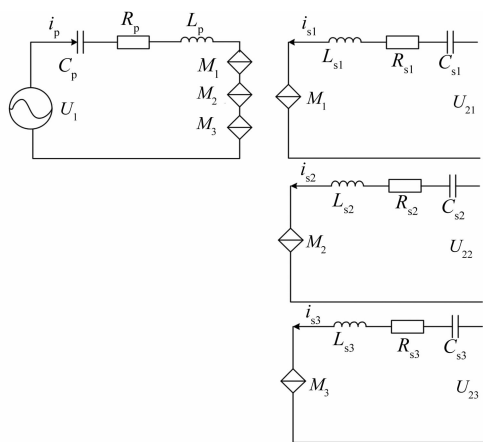


图3 松耦合变压器等效电路图

根据松耦合变压器的等效电路图,可建立其数学模型:

$$U_1 = U_{Cp} + L_p \frac{dI_p}{dt} + R_p I_p + M_1 \frac{dI_{s1}}{dt} + M_2 \frac{dI_{s2}}{dt} + M_3 \frac{dI_{s3}}{dt}$$

$$U_{21} = U_{Cs1} + L_{s1} \frac{dI_{s1}}{dt} + R_{s1} I_{s1} + M_1 \frac{dI_p}{dt}$$

$$U_{22} = U_{Cs2} + L_{s2} \frac{dI_{s2}}{dt} + R_{s2} I_{s2} + M_2 \frac{dI_p}{dt}$$

$$U_{23} = U_{Cs3} + L_{s3} \frac{dI_{s3}}{dt} + R_{s3} I_{s3} + M_3 \frac{dI_p}{dt}$$

$$C_p \frac{dU_{Cp}}{dt} = I_p$$

$$C_{s1} \frac{dU_{Cs1}}{dt} = I_{s1}$$

$$C_{s2} \frac{dU_{Cs2}}{dt} = I_{s2}$$

$$C_{s3} \frac{dU_{Cs3}}{dt} = I_{s3}$$

式中:

C_p ——原边线圈的串联谐振电容;

R_p ——原边线圈的等效阻值;

L_p ——原边线圈自感;

$L_{s,i}(i=1,2,3)$ ——副边线圈的自感;

$R_{s,i}(i=1,2,3)$ ——副边线圈的电阻;

$C_{s,i}(i=1,2,3)$ ——副边线圈的谐振补偿电容值;

$M_i(i=1,2,3)$ ——原边、副边线圈间的互感值;

U, I, R ——分别为电压、电流、电阻。

2.2 动力学模型

轨道交通中,列车在运行过程中的受力情况非常复杂,本文中仅考虑与列车速度相关的纵向力,主要包括牵引力、制动力、运行阻力。

2.2.1 牵引力与制动力模型

列车牵引力主要来自列车的牵引供电系统,通过牵引电动机将电能转换为机械能,然后传递到车轮上;通过车轮与钢轨间的接触和摩擦产生轮周牵引力,从而使列车能够向前运行。

列车制动力是由制动装置产生的、与列车在轨道上运行方向相反的、阻碍列车运动的力。对现在的轨道交通列车来说,由于车辆牵引传动系统均采用了先进的变压变频交流电机驱动系统,因此在高速运行时具有良好的电制动性能。只有当列车速度降低到很低时,此时电制动效果衰减,必须采用空气制动系统进行列车制动^[8]。常见地铁列车的牵引及电制动力特性曲线如图4所示。

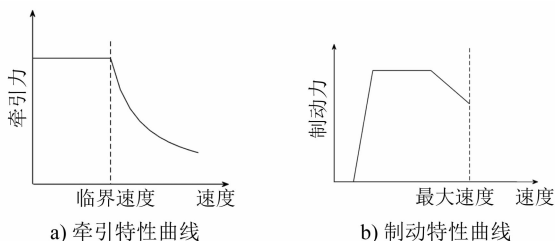


图4 地铁列车牵引及电制动力特性曲线

2.2.2 列车运行阻力模型

列车运行阻力包括基本阻力和附加阻力。基本阻力包括列车自身及与钢轨之间的机械阻力、空气阻力,主要取决于列车运行速度的大小。附加阻力与基本阻力不同,受车型影响很小,主要取决于线路条件,包括坡道附加阻力、曲线附加阻力和隧道附加阻力。

1) 基本阻力:是牵引计算中常用的重要参数之

一。影响基本阻力的因素除包含零部件之间、车表面与空气之间以及车轮与钢轨之间的摩擦和冲击外,还包括列车外形、动车结构、技术状态、气候条件、列车运行速度等。这些因素极为复杂,实际运用中很难用理论公式精确计算,通常采用由大量列车试验得到的经验公式进行计算^[9]。列车运行过程的单位基本阻力计算公式一般为运行速度的二次三项式,即

$$\omega_0 = A + Bv + Cv^2$$

式中:

ω_0 ——列车单位基本阻力, N/kN;

A, B, C ——与车型有关的经验常数;

v ——列车运行速度, km/h。

目前,成熟的车型均已总结出相应的经验公式。但是由于非接触供电列车目前我国仍未有成熟的商业运行,因此也缺乏相应的基本阻力经验公式。本文根据经验选取 CRH1-200 型动车组的经验公式作为非接触供电列车的参考值,虽与实际情况有差异,但仍具有理论参考意义。列车单位基本阻力计算公式如下:

$$\omega_0 = 1.12 + 0.00542v + 0.000146v^2$$

列车基本阻力 W_0 计算公式如下:

$$W_0 = M\omega_0 g$$

式中:

M ——列车总质量, t;

g ——重力加速度, m/s^2 。

2) 附加阻力:主要体现在坡道阻力、曲线阻力和隧道阻力中。坡道附加阻力有正负之分,列车在上坡运行时,坡道附加阻力为正,下坡运行时坡道附加阻力为负。列车的单位坡道附加阻力 w_i , 其数值(单位为 N/kN)等于该坡道的坡度千分数 i , 即:

$$w_i = i$$

曲线附加阻力为当列车进入曲线时因摩擦加剧而产生的阻力。其值与曲线半径、列车速度、曲线外轨超高,以及轨距加宽、车辆轴距等许多因素都有关系,计算时一般采用经验公式。当列车长度小于等于圆曲线长度,即列车全长都在曲线内时,一般采用如下经验公式:

$$w_r = \frac{2000}{R}, \text{ 或 } w_r = \frac{35\alpha}{L_y}$$

式中:

w_r ——单位曲线附件阻力, N/kN;

R ——曲线半径, m;

α ——曲线中心角, (°);

L_y ——圆曲线长度, m。

城市轨道交通中,隧道也是常见的轨道路况之一。列车在隧道中运行时,头部正压力与尾部负压产生压力差;同时由于车辆外形结构的原因,隧道内的空气产生紊流,与列车表面摩擦,因此产生隧道附加阻力。隧道附加阻力也与众多因素相关,且隧道越长、牵引车辆数越多、运行速度越高,隧道空气附加阻力越大。单位隧道空气附加阻力 w_s (单位为 N/kN) 值很难从理论上推导出经验公式,通常采用经验公式或根据试验数据进行计算。

隧道内有限制坡道时:

$$w_s = L_s v_s^2 / 10^7$$

隧道内无限制坡道时:

$$w_s = 0.000\ 13 L_s$$

式中:

L_s ——隧道的长度, m;

v_s ——列车在隧道内的速度, km/h。

3) 阻力之和:用 w_j 表示因线路条件产生的单位附加阻力之和,即:

$$w_j = w_i + w_r + w_s$$

则,列车运行时所受的阻力 W 为基本阻力与附加阻力之和,其计算公式为

$$W = (Mw_0 + Mw_j)g \times 10^{-3}$$

3 模拟运行平台

3.1 高速仿真工具

在非接触供电系统中,为了提高系统的耦合效

率,提升能量传输功率,需要给发射线圈通入高频的交流电,其频率等级往往为几十 kHz,甚至 100 kHz,因此针对非接触供电系统的模拟运行实时仿真需要非常小的仿真步长。

目前市面上基于 x86、PowerPC 的处理器,其仿真步长理论上最快能达到 20 μ s (仿真速度 50 kHz) 的仿真步长,但在实际应用中一般采用 50~100 μ s 甚至更大的仿真步长,无法满足非接触供电系统的仿真需求。

为解决上述问题,本项目中采用基于 FPGA 高速仿真板卡的模拟运行仿真方案。利用 FPGA 处理器高速、并行的运算能力,弥补 x86 处理器的不足。FPGA 用于专门计算高速、复杂的模型,仿真步长可达 10 ns (仿真速度 100 MHz)。

3.2 平台架构

非接触供电列车的模拟运行平台采用下位机架构。上位机中运行实时仿真监控软件以及建模环境软件等。本项目中的模型均基于 matlab/simulink 以及 Xilinx System Generator 环境搭建。下位机采用 NI 公司的实时仿真机箱及处理器,处理器中运行 QNX 实时操作系统。仿真机箱中配置 3 块 FPGA 板卡用于运行对仿真速率要求较高的模型,对运行速率要求不高的模型运行在 CPU 处理器中,具体的模型分布如图 5 所示。上位机与下位机之间通过以太网进行通信,监控界面可实时显示非接触供电系统状态,如电压、电流、功率、车速等,并可通过在线调参功能对列车进行起动、加速、减速等运行工况设置。

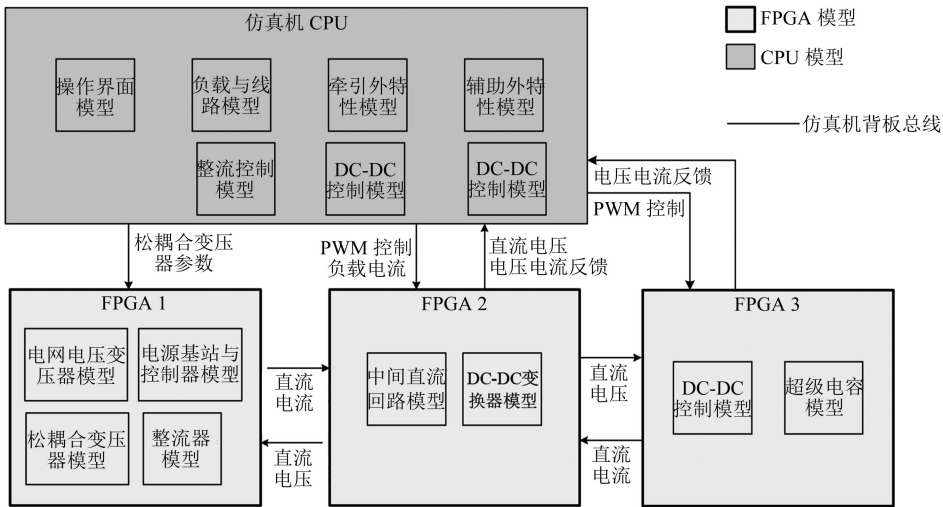


图 5 非接触供电列车模拟运行模型分布框图

4 模拟运行结果分析

模拟运行线路数据参考北京地铁亦庄线线路数据,挑选亦庄线荣京东街站至万源街车站段进行模拟运行,限速数据如表 1 所示。模拟运行结果如图 6~9 所示。

表 1 北京地铁亦庄线荣京东街站一万源街车站段限速值

| 起点位置/m | 终点位置/m | 限速值/(km/h) |
|--------|--------|------------|
| 0 | 131 | 56 |
| 131 | 1 095 | 80 |
| 1 095 | 1 300 | 56 |

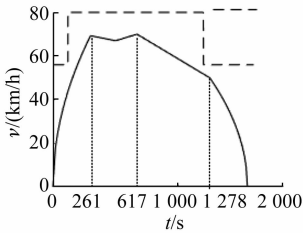


图 6 列车模拟运行曲线

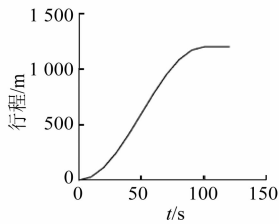


图 7 列车行程曲线

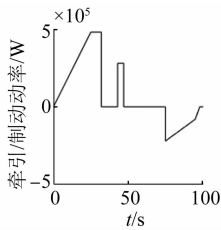


图 8 列车牵引/制动功率曲线

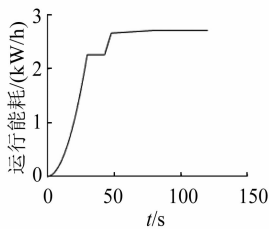


图 9 列车运行能耗曲线

对上述非接触供电列车模拟运行仿真结果进行总结,结果如表 2 所示。

表 2 非接触供电列车模拟运行结果

| 线路长度/m | 列车质量/t | 列车长度/m | 平均速度/(km/h) | 模拟运行时间/s | 运行能耗/(kWh) |
|--------|--------|--------|-------------|----------|------------|
| 1 300 | 30 | 25 | 46.86 | 99.87 | 2.73 |

以上为未考虑储能单元的模拟运行,以下模拟考虑加入储能单元驱动方式,并在制动时进行能量回收。模拟场景为,在始发站进行非接触无线充电,充电完成后行驶 1 300 m 到达终点站。如图 10 所示为列车储能单元 SOC(荷电状态)变化曲线。

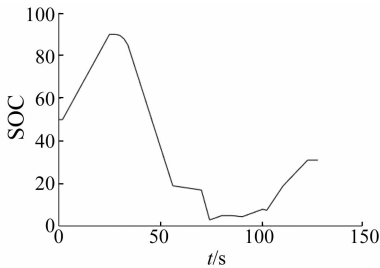


图 10 列车储能单元 SOC 变换曲线

列车在站台充电时,充电电流设定为 500 A,储能单元 SOC 从 50% 充电至 90%,所需时间为 29 s。考虑充电时间的储能单元驱动下的列车运行结果如表 3 所示。

表 3 考虑储能单元驱动的非接触供电列车
模拟运行结果

| 储能单元额定容量/(kWh) | 站台充电时间/s | SOC 放电范围/% | 平均速度/(km/h) | 总运行时间/s | 运行能耗/(kWh) |
|----------------|----------|------------|-------------|---------|------------|
| 3.15 | 29 | 3.21~90.00 | 36.32 | 128.87 | 1.96 |

列车在牵引-惰行阶段 SOC 从 90% 下降至 3.21%。引入储能单元后,由于实现了制动能量回收,可为储能单元反向充电。列车制动停稳后,SOC 上升至 33.27%。列车模拟运行能耗为 1.96 kWh,比未考虑储能单元情况能耗减少了 0.77 kWh,减少幅度为 28.21%,节能效果显著。

5 结语

非接触供电系统高安全性、美观性、易于维护保养等特性是传统牵引方式无法比拟的。本文通过对非接触式供电列车运行情况进行模拟仿真,得出了列车在非接触供电方式下的牵引功率及能耗。仿真分析结果可为将来非接触供电列车的工程设计提供参考依据。

(下转第 54 页)

是走行距离对乘客的疏散时间则有更大影响。彭城广场站 1 号口的出口宽度较大,虽然在折线拐角位置行人密度较大,但滞留时间较短,对整体疏散影响并不大。场景 2-1 的疏散时间最长,说明在保持一定的空间服务水平的前提下,站厅走行距离对疏散影响最大。当紧急情况发生时,工作人员应及时引导乘客从走行距离较短的出口进行疏散,以提高疏散效率。

表 3 不同疏散场景的仿真结果

| 场景 | 疏散总时间/s | 站厅最大走行距离/m | 走行流线复杂程度 | 时间差/s |
|--------|---------|------------|----------|-------|
| 基本场景 | 321 | 76 | 5 | 0 |
| 场景 2-1 | 387 | 117 | 2 | 66 |
| 场景 2-2 | 361 | 97 | 5 | 40 |
| 场景 2-3 | 359 | 102 | 5 | 38 |

3 结语

本文设计了不同位置的楼扶梯和出口无法用于疏散的场景,研究了地铁车站不同位置的楼扶梯和出口开放情况对疏散的影响。

1) 针对楼扶梯空间位置对疏散的影响,设置了 2 个场景与基本场景进行对照。在站台层楼扶梯空间位置分布差异较大的场景下,通过合理引导乘客能够大幅提高乘客使用设备的均衡程度,提高疏散效率。

2) 针对出口开放情况对疏散的影响,设置了 3 个场景与基本场景进行对照。在疏散通道宽度不受限的情况下,流线的复杂程度对乘客疏散时间有一定影响,但乘客在站厅层的走行距离对疏散时间影响较大。

本文研究内容可为地铁车站客运组织和应急组织提供一定的指导。本文研究的是典型空间结构的车站按既定规范条件下的基本疏散情况中的 2 个关键因素,其中乘客行为、闸机位置对疏散的影响,以及不同的车站空间布局、换乘站的布置与使用等因素对疏散的影响还需进一步研究。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁安全疏散规范: GB/T 33668-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2017.

[2] 梅艳兰,谢科范,刘思施,等. 地铁站密集人群应急疏散能力分析模型及仿真 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2018(4): 370.

[3] 马清源,王晨,陆键,等. 轨道交通车站应急疏散仿真研究 [J]. 城市轨道交通研究,2016(10): 71.

[4] 姚国伟. 基于乘客疏散仿真的地铁车站建筑结构布置和设施协调研究 [D]. 北京:北京交通大学,2008.

[5] 苏清. 地铁一般车站标准化设计研究 [J]. 现代城市轨道交通,2017(12): 44.

(收稿日期:2019-09-30)

(上接第 50 页)

参考文献

[1] RICKERS S, NAVARROIR, BRUCKGH, et al. Receiver coil parameter optimization process for the efficiency of an implantable inductive power transfer system [C] //2014 Middle East Conference on Biomedical Engineering. Doha, Qatar: [s. n.], 2014: 33-38.

[2] LEE J Y, SHEN H Y, CHAN K C. Design and implementation of removable and closed-shape dual-ring pickup for contactless Linear inductive power track system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 4036-4046.

[3] CHOW J P W, CHEN N, CHUNG H S H. An investigation into the use of rthogonal winding in loosely coupled link for improving power transfer efficiency under coil misalignment [J]. IEEE, Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (10): 5632-5649.

[4] KACPRZAK D, COVIC G A, BOYS J T. An improved magnetic design for inductively coupled power transfer system pickups

[C] //Proceedings of the IEEE International Power Engineering Conference. Singapore: [s. n.], 2005: 1136.

[5] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G, 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.

[6] PARK C B, LEE B S, LEE H W. Magnetic and thermal characteristics analysis of inductive power transfer module for railway applications [C] //2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul: [s. n.], 2012: 576-579.

[7] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012(9): 167.

[8] 戴欣,余奎,孙跃. CLC 谐振型感应电能传输系统的 H 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010(30): 47.

[9] 封阿明. 基于全桥谐振变换器的非接触电能传输系统基本特性研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.

(收稿日期:2019-08-13)