动态无线电能传输系统线圈形状研究

李美征，李东义，陈敬东，杨 鹏，田裕鹏

（中车青岛四方车辆研究所有限公司，山东 青岛 266031）

摘要：无线电能传输系统以耦合线圈为媒介进行能量的传输，针对动态应用场景合理选择线圈形状对系统效率的提升有重要作用。首先，推导得到LCC/S拓扑下效率的表达式；然后，通过ANSYS分别建立矩形、双D形耦合线圈模型，仿真得到二次线圈在水平移动、垂直偏移和横向偏移过程中互感的变化曲线；最后，分析两种类型线圈的优缺点，从而确定动态无线电能传输系统中应选择双D形线圈，并通过实验验证了仿真结果的正确性。

关键词：无线电能传输；线圈形状；LCC/S拓扑；磁感应强度

Research on the coil shape of dynamic wireless power transfer system

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

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

Abstract: The wireless power transfer system uses the coupling coil as the medium to transmit the energy. It is important to choose the coil shape reasonably for the dynamic application scenario to improve the efficiency of the system. Firstly, the expression of efficiency under LCC/S topology is derived, then the rectangular and double D-shaped coupling coil models are established by ANSYS, and the mutual inductance curves of the secondary coil in the process of horizontal movement, vertical offset and lateral offset are obtained by simulation. Then, the advantages and disadvantages of the two types of coil are analyzed, so that the double D-shaped coil should be selected in the dynamic wireless power system. The correctness of the simulation results is verified by experiments.

Key words: wireless power transfer; coil shape; LCC/S topology; magnetic induction intensity

0 引言

自改革开放以来，我国的经济迅速发展，但同时也带来了环境恶化、交通拥堵等问题。这些问题的出现，促使政府加强对基础设施建设的力度，使得城市轨道交通得到快速的发展。现代有轨电车作为一种新型的城市轨道交通工具，具有行驶速度快、建设成本低、周期短和节能环保等诸多优点，符合现代城市交通发展的需求,也可有效地提高人们出行的效率，并解决汽车尾气带来的污染问题。因此现代有轨电车具备较大的发展优势与前景，在城市轨道交通建设中将得到大力发展[1]。

相比于传统的有线充电技术，无线电能传输技术具有无须电气连接、不受外界环境影响和充电安全等优势。其中，电磁感应式无线电能传输技术具有能量传输容量大、近距离传输时效率高且对频率要求不高的特点，较为符合现代有轨电车等大功率无线电能传输的要求，因而成为研究热点[2]。

耦合线圈是无线充电系统中实现电能无线

国家重点研发计划资助（2017YFB1201003-010）

传输的重要部分，要提高无线充电设备的效率，线圈的设计十分关键。在耦合线圈的优化设计方面，新西兰奥克兰大学的团队提出了两类基本的平面线圈：圆形和双D形（Double D）[3]，其中双D形耦合机构能够大大提高耦合系数。美国橡树岭国家实验室（ORNL）对耦合机构、电磁辐射、介质损耗和传输特性等展开研究，提出了“蛛网线圈”的绕制方法，有效提高了系统的品质因数。

文献[4]针对线圈设计过程中各参数之间的特性和相互约束关系，提出一种在给定工作频率、传输距离下的盘式谐振器的优化与设计方法。文献[5]借助COMSOL Multiphysics 对平面圆形、平面方形和螺旋筒形三种常见形状进行了仿真分析，确定了耦合线圈的最佳形状。文献[6]利用COMSOL软件对磁耦合谐振式系统的线圈结构进行了仿真分析，提出了在固定线圈距离时线圈参数优化的方案。以上研究均是针对一次、二次线圈形状一致的模型进行的研究，一般的应用场景为静止式无线电能传输。

本文基于互感模型，对LCC/S拓扑结构下的效率进行分析，针对移动式无线电能传输系统利用ANSYS建立仿真模型，对比分析矩形和双D形两种线圈形状下的系统传输特性，从而确定选用的线圈类型，最后通过实验进行验证。

1 系统电路模型

WPT系统主要由电源、高频逆变部分、线圈及补偿部分、电能变换部分和负载组成，如图1所示。其中线圈是将能量从电源传递到负载的重要媒介，地面端敷设的一次线圈内流过的交变电流感应产生交变磁场，从而在车辆所搭载的二次线圈上产生感应电动势，进而产生感应电流。

本文采用具有恒压输出特性的LCC/S补偿拓扑，根据互感模型得到如图2所示的拓扑模型。图2中，M为互感；U_{in}为逆变器输出电压；I_{in}、I_p和I_s分别表示逆变器输出电流、发射线圈电流和接收线圈电流；L_r、L_p和L_s分别表示谐振电感、一次线圈自感和二次线圈自感；C_r、C_p和C_s

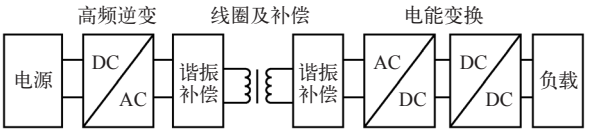


图 1 系统组成框图

Fig. 1 System composition diagram

分别表示一次并联补偿电容、一次串联补偿电容和二次侧补偿电容；R_{Lr}、R_p、R_s和R_{eq}分别表示谐振电感、发射线圈、接收线圈的内阻和等效负载电阻。

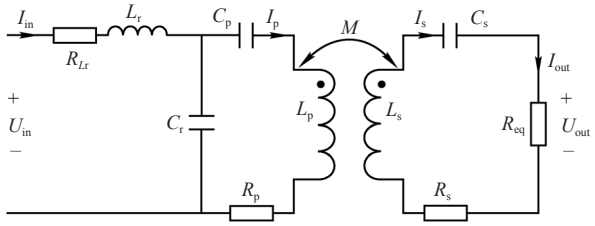


图 2 LCC/S 型补偿拓扑

Fig. 2 LCC / S type compensation topology

对于LCC/S补偿拓扑，二次侧补偿电容的选取满足串联谐振的条件，即$\omega^2 L_s C_s=1$。当一次侧满足$\omega^2 L_r C_r=1$时，可保证在逆变器输出稳定的状态下，一次线圈电流近似为恒流[9]。将二次电阻折算到一次侧，得到从输入端看整个电路的输入阻抗表示式为

$$Z_{in}=R_{Lr}+j\omega L_r+\frac{-j\omega L_r(Z_r+R_p)+(\omega L_p-\frac{1}{\omega C_p})\omega L_r}{j(\omega L_p-\frac{1}{\omega C_p}-\omega L_r)+Z_r+R_p} \tag{1}$$

$$\omega L_r=\frac{1}{\omega C_r}=\omega L_p-\frac{1}{\omega C_p} \tag{2}$$

当满足式（2）时，输入阻抗呈现纯阻性，此时系统产生的无功功率最小。

当满足上述谐振条件时，推导得到二次侧输出电压的表达式为

$$U_{out}\approx\frac{M}{L_r}U_{in} \tag{3}$$

可以看出，当互感M和谐振电感L_r确定时，该拓扑满足恒压输出特性。

进一步推导得到系统效率的表达式为

$$\eta\big|_{\omega=\omega_0}=\frac{\omega_0^{\ 4}M^2L_r^{\ 2}\dfrac{R_{eq}}{(R_s+R_{eq})^2}}{[\dfrac{(\omega_0M)^2}{R_s+R_{eq}}+R_p][\dfrac{(\omega_0M)^2R_{lr}}{R_s+R_{eq}}+R_{Lr}R_p+(\omega_0L_r)^2]} \tag{4}$$

可以看出，系统效率和多个参数相关。但在一个特定系统中，输入电压、频率和负载可看作固定值。根据输出电压要求，谐振电感和互感设置为一定的比例关系，因此当忽略线圈内阻变化时，可认为效率只和互感有关，系统效率和互感的关系曲线如图3所示。效率随互感的增加而增大，因此可通过合理选择线圈形状和参数增大互感，从而使系统达到较高效率。

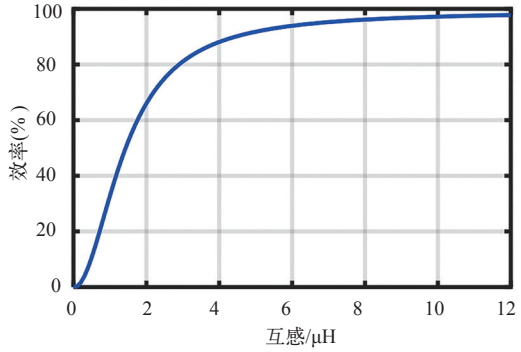


图 3　效率随互感变化曲线

Fig. 3 Efficiency versus mutual inductance curve

2　耦合线圈形状选择

针对移动式无线电能传输系统，耦合线圈模型的一次侧为长线圈，二次侧为短线圈，两线圈形状保持一致。常见线圈形状包括圆形、矩形和双D形，如图4所示。由于圆形线圈无法敷设成长线圈，现对矩形和双D形两种线圈进行分析。两种形状下保持线圈尺寸、匝数等参数一致，具体参数如表1所示。

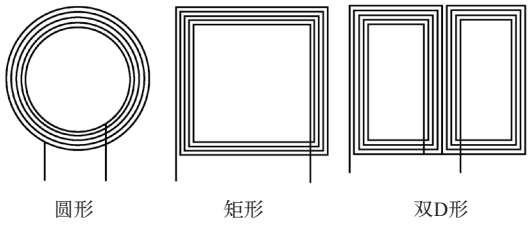


图 4　耦合线圈形状

Fig. 4 Coupling coil shape

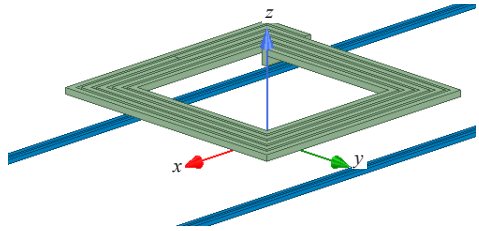
表 1　耦合线圈参数

Tab. 1 Coupling coil parameters

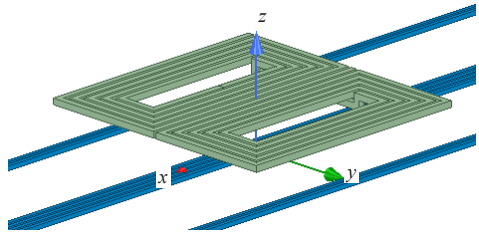
一次侧匝数	一次侧尺寸/m²	二次侧匝数	二次侧尺寸/m²
2	12×0.06	5	0.06×0.06

2.1　磁感应强度分布

通过ANSYS仿真软件分别建立矩形和双D形两种耦合线圈的仿真模型，如图5所示。图6为在图5模型下yz截面的磁感应强度分布图。可以看出磁感应强度较大的区域出现在绕制线圈的铜线附近，即分布在矩形线圈两侧、双D形线圈的两侧及中间部分。双D形线圈空间中的磁感应强度整体较大，有利于能量的传输，但同时会产生较大的漏磁。



（a）矩形线圈

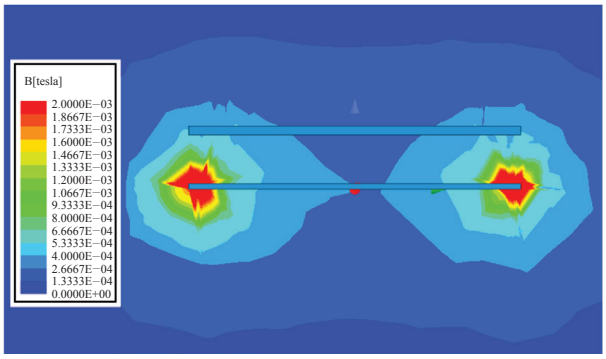


（b）双D形线圈

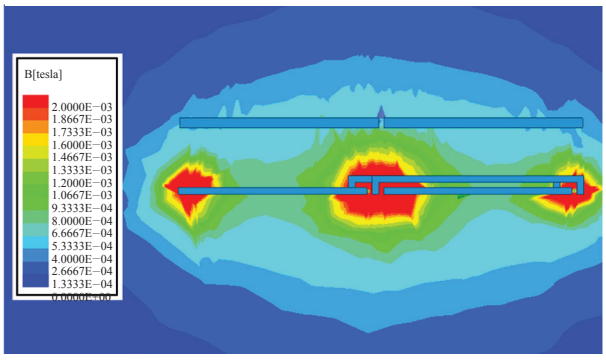
图 5　两种形状耦合线圈仿真模型

Fig. 5 Simulation model of coupling coil with two shapes

选择与线圈同样尺寸的铁氧体作为磁心材料添加到二次线圈上方，仿真得到两种形状耦合线圈的磁感应强度分布图，如图7所示。对比图6可以看出，添加磁心后，一次、二次线圈之间的磁感应强度整体增加，二次线圈上方的磁感应强度减小，说明磁心具有增大能量传输能力、屏蔽磁力线和减小漏磁的作用。另外，添加磁心后，双D形两线圈间的磁感应强度仍整体高于矩形，且磁心的屏蔽效果更佳。



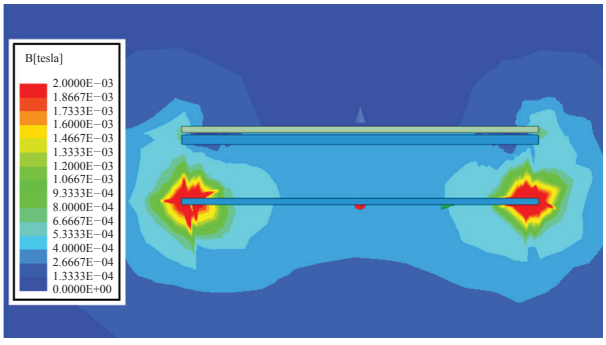
（a）矩形线圈



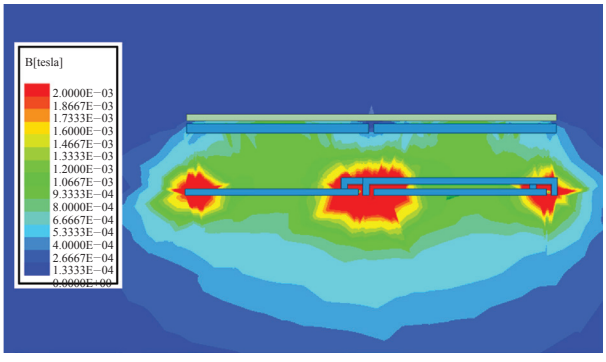
（b）双D形线圈

图 6　纯线圈－磁感应强度分布图

Fig. 6 Pure coil-distribution of magnetic induction intensity



（a）矩形线圈



（b）双D形线圈

图 7　含磁心线圈－磁感应强度分布图

Fig. 7 Coil with magnetic core - distribution of magnetic induction intensity

2.2　互感随水平方向位移变化

以二次线圈和一次线圈中心位置对齐处为原点，将一次线圈沿图中车辆前进方向移动，设置一次、二次线圈间的垂直距离100 mm，如图8所示。在两种线圈形状下分别设置二次线圈无磁心、有磁心两种方式，仿真得到该移动过程中互感变化情况，并绘制曲线如图9所示。

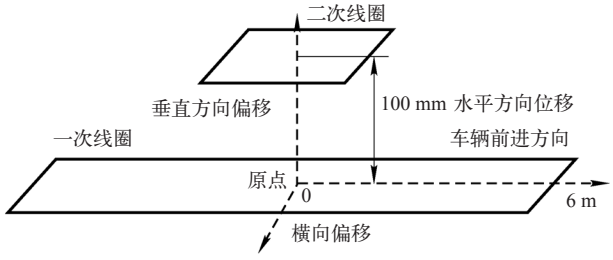


图 8　耦合线圈示意图

Fig. 8 Schematic diagram of coupling coil

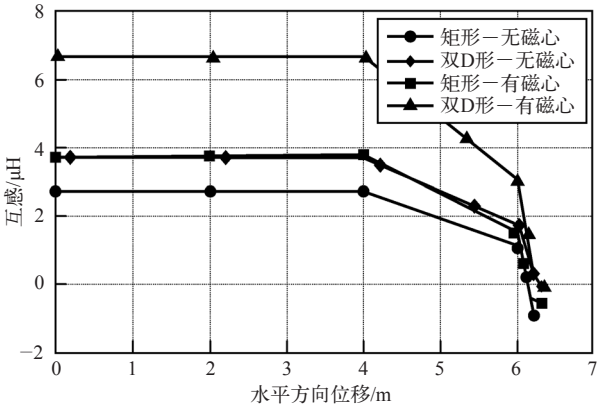


图 9　互感随水平方向位移变化曲线图

Fig. 9 Curve of mutual inductance changing with horizontal displacement

从图9中可以看出，车辆在水平移动过程中，互感先基本保持不变，到达一次线圈边缘处开始下降；添加磁心可有效提升互感，且对双D形线圈互感的提升效果优于矩形；在有磁心和无磁心两种情况下，双D形线圈均可提供较大的互感值，而矩形线圈的互感在整个移动过程中变化范围较小，因此输出电压波动范围较小。

2.3　互感随垂直方向偏移变化

在图8所示的原点位置，改变一次、二次线圈之间的垂直高度，由50 mm变化到100 mm，仿真得到该偏移过程的互感，并绘制曲线如图10所示。

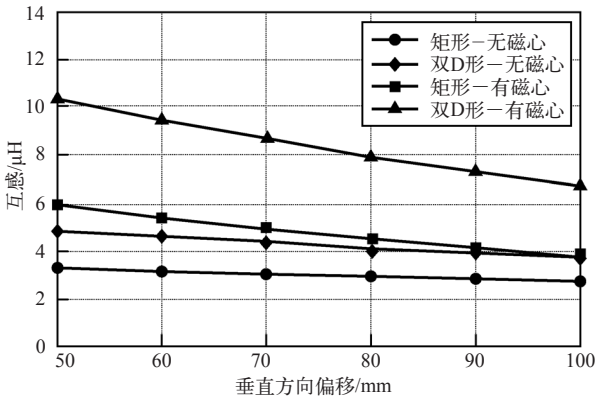


图 10　互感随垂直方向偏移变化曲线图

Fig. 10 Curve of mutual inductance changing with vertical offset

从图10中可以看出，互感随垂直距离的增大而减小。在每个位置，双D形耦合线圈的互感都大于矩形线圈，而矩形线圈的互感在垂直方向偏移过程中变化范围较小，具有较好的抗垂直偏移特性。

2.4　互感随横向偏移变化

在图8所示的原点位置，改变一次、二次线圈之间的横向偏移距离，由0 mm变化到100 mm，仿真得到该偏移过程的互感，并绘制曲线如图11所示。

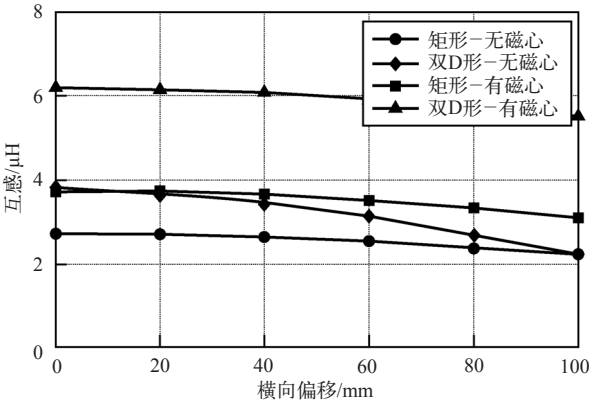


图 11　互感随横向偏移变化曲线图

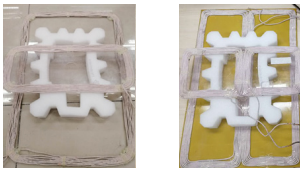
Fig. 11 Curve of mutual inductance changing with lateral offset

从图11中可以看出，互感随横向偏移距离的增大而减小。在每个位置，双D形耦合线圈的互感都大于矩形线圈；矩形线圈在添加磁心后虽增大了互感，但在横向偏移过程中互感波动范围较大，因此会引起较大的电压波动。

由以上对两种形状四个方面的分析，可以得到结论：相较于双D形线圈，相同尺寸和匝数下的矩形线圈虽在水平移动和垂直偏移过程中互感波动范围较小，但在任一位置处的互感值都小于双D形线圈，因此可使系统达到的效率较低。另外，添加磁心可有效将磁力线束缚在磁心内部通过减少漏磁，得到增强一次侧、二次侧间隙内的磁感应强度，从而达到提高互感的目的。因此，选用添加磁心的双D形线圈将更有利于耦合线圈的设计。

3　实验验证

实验中受条件所限，采用了小于仿真时的线圈进行特性比较和验证。耦合线圈的绕制选择利兹线，它是由多股独立绝缘的细线绞合而成的，可有效减小趋肤效应的影响。绕制矩形和双D形线圈各一组，匝数均为7匝，两种类型的线圈尺寸保持一致：一次线圈为600 mm × 400 mm，二次线圈为200 mm × 400 mm。绕制耦合线圈的实物图如图12所示。



（a）矩形线圈　（b）双D形线圈

图 12　耦合线圈的绕制方式

Fig. 12 Winding mode of coupling coil

使用阻抗分析仪，分别测量两侧线圈同名端、异名端串联情况下的电感值，通过计算得到互感值。同名端串联时，测量电感为L_1，将异名端串联，测量电感为L_2，L_1、L_2 与两侧线圈自感的关系为

$$\begin{cases} L_1 = L_p + L_s - 2M \\ L_2 = L_p + L_s + 2M \end{cases} \tag{5}$$

可得互感M的表达式为

$$M = \frac{L_2 - L_1}{4} \tag{6}$$

以两线圈中心对准位置为原点，垂直距离设置为25 mm，测量计算水平方向位移过程中两种类型线圈的互感变化情况；并在原点处改变垂直

方向偏移得到互感变化情况，根据数据分别绘制曲线如图13、图14所示。

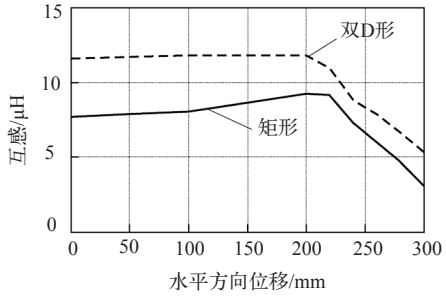


图 13　互感随水平方向位移变化曲线图

Fig. 13 Curve of mutual inductance changing with horizontal displacement

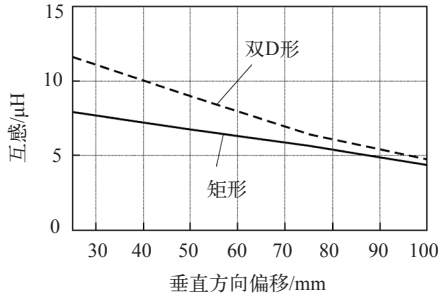


图 14　互感随垂直方向偏移变化曲线图

Fig. 14 Curve of mutual inductance changing with vertical distance

从图13中可以看出，在整个过程中，相同位置处，双D形耦合线圈的互感始终大于矩形线圈；对于水平方向位移的变化，当接收线圈全部在发射线圈上方时（0～200 mm 范围内），矩形线圈的互感波动较大；随着两侧线圈不重合面积的增加（200～300 mm 范围内），两种线圈的互感都表现为下降的趋势；图14中对于垂直方向偏移的变化，当传输距离增加时，两种类型耦合线圈的互感均逐渐下降，且双D形线圈的互感将会逼近矩形线圈。实验得到的结论与仿真一致，验证了仿真结果的正确性。

3　结束语

本文以效率为评价指标，通过仿真确定了适用于移动式无线电能传输系统的线圈形状。在相同尺寸、匝数下，双D形线圈可在水平方向位移、垂直方向偏移和横向偏移过程中提供更大的互感，且添加磁心可进一步有效提高互感，并从磁感应强度分布的角度对上述结论进行了分析。实验验证了两种形状的耦合线圈在水平方向位移和垂直方向偏移的特性，与仿真结果一致。

参考文献

[1] 王俊超．有轨电车无线电能传输系统耦合线圈的设计[D]．北京：北京交通大学，2016．

[2] 杨芳勋．基于ICPT的无线电能传输网关键技术研究[D]．重庆：重庆大学，2012．

[3] 张贤达．现代信号处理[M]．北京：清华大学出版社，2002．

[4] NING Puqi, MILLER J M, ONAR C O, et al. A compact wireless charging system development[C]. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach California, 2013, 3045-3050.

[5] 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]．2013，28(8)：1-6，33．

[6] 诸嘉慧，高强，刘齐，等．谐振式WPT耦合线圈形状设计与参数优化[J]．电工电能新技术，2019，38(7)：67-72．

[7] 肖思宇，马殿光，张汉花，等．耦合谐振式无线电能传输系统的线圈优化[J]．电工技术学报，2015(增刊1)：221-225．

[8] 李彬．有轨电车无线电能传输系统谐振补偿器设计及效率优化研究[D]．北京：北京交通大学，2017．

作者简介

李美征

李美征（1990－），男，工程师，主要研究方向为电力系统自动化。

(收稿日期：2020－05－24)EA