第 41 卷 第 2 期 2017 年 1 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20160927007
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.2 Jan.25，2017

电动汽车移动式无线充电系统动态建模与特性分析

郭彦杰[1,2]，王丽芳[1,3]，李树凡[1]，张玉旺[1]，廖承林[1,3]
（1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室，中国科学院电工研究所，北京市 100190；
2. 汽车安全与节能国家重点实验室，清华大学，北京市 100084；3. 北京电动车辆协同创新中心，北京市 100081）

摘要：移动式无线充电系统能够显著减少电动汽车动力电池的携带量，具有广阔的应用前景。文中基于分段式多发射导轨方案，建立了电动汽车移动式无线充电系统的状态空间模型，进而推导出能够描述系统动态特性的小信号模型。搭建了试验平台，利用实际系统参数研究了移动充电过程中系统输出功率和效率的动态变化过程，以及导轨切换开通过程中系统的瞬态特性，并分析了不同切换开通位置对瞬态过程的影响。通过实验对建立的模型和分析得到的结论进行了验证。

关键词：移动式无线充电系统；动态模型；移动充电动态过程；导轨切换瞬态过程

0 引言

相对于传统的电动汽车有线充电方法，无线充电方式[1-2]具有充电便利、节省空间、充电设施不易被破坏，以及不受雨雪等不良天气影响等优点。移动式无线充电系统更是能够在电动汽车运行过程中实现边走边充，进而显著减少动力电池的携带量，具有广阔的应用前景，因此受到了越来越多的关注[3]。

2009 年，韩国科学技术院（KAIST）开展了在线电动汽车（on-line electric vehicle，OLEV）[4]移动式无线充电项目，在系统实用化等方面取得了显著进展；美国橡树岭国家实验室（ORNL）[5]等国外单位也开展了相关研究。国内的多所大学和研究机构也对移动式无线充电系统进行了分析和研究[6-9]。文献[10]提出了一种移动式无线供电系统原边导轨的改进设计方案；文献[11]给出了一种采用电感-电容-电容（LCC）阻抗匹配网络的移动式无线充电系统设计方法，并对系统特性进行了分析；文献[12]采用地面端多线圈方案，通过耦合模理论建立了高速列车移动式无线供电系统的数学模型，并得出了实现最大传输效率的条件；文献[13]采用多初级绕组并联的供电方案，能够减小电动汽车在移动充电过程中传输效率的变化，保证供电的稳定性和高效性。此外，文献[14-15]在导轨设计及导轨长度的影响等方面进行了研究。

由上述文献可知，电动汽车移动式无线充电系统有单一长发射导轨[4]和分段式多发射导轨[8-9,12-13]两种实现方案。前者具有结构简单、易于实现的优点。但即使没有电动汽车在发射导轨上运行充电，单一长导轨中依然通有电流，这就造成了额外的功率损耗和电磁辐射问题。因此，分段式多发射导轨方案有着一定的应用优势。在分段式多发射导轨电动汽车移动式无线充电系统中，动态过程主要包括移动充电动态过程，以及地面端导轨切换的瞬态过程[16]。前者由于持续时间尺度较长，可以通过电路模型[17]等稳态模型近似进行分析；而后者持续时间仅为毫秒甚至是微秒级，只能通过小信号模型来进行描述[18-20]，并利用系统对瞬态输入的响应来研究瞬态特性[16]。

基于上述研究成果，本文针对分段式多发射导轨电动汽车移动式无线充电系统在运行过程中的移动动态过程和导轨切换瞬态过程进行研究；建立了系统的动态模型，并基于实际系统参数，分析了移动动态过程中系统的输出功率和效率特性，以及导轨切换开通时系统的瞬态特性；最后通过实验对模型和分析结果进行了验证。

1 系统动态建模

电动汽车移动式无线充电系统地面端发射导轨具有两种状态：一种是通电传输能量的工作状态；另一种是不通电的静息状态。因此，能够通过工作导

收稿日期：2016-09-27；修回日期：2016-10-27。
上网日期：2016-12-14。
国家自然科学基金资助项目（51507168）；国家科技支撑计划资助项目（2015BAG17B06）；北京市科技计划资助项目（D15110900290000）。

轨和静息导轨这两种典型状态来代表地面端一系列的多个导轨，进而使建模过程得以简化。此外，由于原边 LCC 网络具有较好的阻抗匹配性能[11]，故本文采用该结构的阻抗匹配网络。

采用原边 LCC 阻抗匹配网络的电动汽车移动式无线充电系统的等效电路如图 1 所示。其中，地面部分采用两个回路分别代表静息导轨回路和工作导轨回路；U_{s1} 为静息导轨回路逆变器输出等效电压源；U_{s2} 为工作导轨回路逆变器输出等效电压源；L_{s1}，C_{1s}，C_{1p}，R_{s1}，R_{1p} 和 L_{s2}，C_{2s}，C_{2p}，R_{s2}，R_{2p} 分别为静息导轨和工作导轨的 LCC 阻抗匹配网络及其杂散电阻；L_1，R_1，L_2，R_2 和 L_3，R_3 分别为静息导轨、工作导轨和接收线圈的自电感和等效电阻；M_{12}，M_{13}，M_{23} 分别为静息导轨、工作导轨和接收线圈之间的互电感；C_{3s} 为接收端串联补偿电容；R_L 为等效负载电阻。

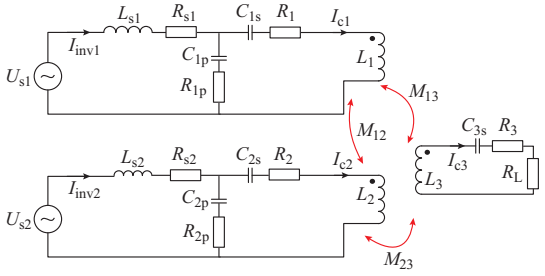

图 1　电动汽车移动式无线充电系统等效电路
Fig.1　Equivalent circuit for dynamic wireless charging system of EV

在系统建模过程中，本文选取导轨的等效电阻、自电感，以及互电感参数组成的等效电路来描述导轨。这些电路参数及其变化能够反映绕制导轨的导线类型、匝数、尺寸、屏蔽材料、接收线圈的位置，以及地面端与车载端之间的垂直距离等实际导轨参数的影响。其中，导轨的等效电阻会带来损耗，与系统效率直接相关；导轨等效电阻越大，系统效率越低。导轨的自电感会影响 LCC 阻抗匹配网络的参数选择；而汽车的位置则主要是通过线圈之间的互感参数进行描述，并在模型中建立与其他变量的数学关系。在移动充电过程中，线圈之间的互感值会不断变化，从而带来系统特性的改变；而当导轨切换时，则可近似使用切换时接收线圈所处位置的互感值进行分析。

基于图 1 所示的等效电路，能够求得系统的状态空间模型。首先，定义电感 L_{s1} 中的电流 I_{inv1} 为状态变量 x_1；电容 C_{1p} 两端的电压为状态变量 x_2；电容 C_{1s} 两端的电压为状态变量 x_3；静息导轨中的电流 I_{c1} 为状态变量 x_4；电感 L_{s2} 中的电流 I_{inv2} 为状态变量 x_5；电容 C_{2p} 两端的电压为状态变量 x_6；电容 C_{2s} 两端的电压为状态变量 x_7；工作导轨中的电流 I_{c2} 为状态变量 x_8；接收线圈中的电流 I_{c3} 为状态变量 x_9；电容 C_{3s} 两端的电压为状态变量 x_{10}。基于定义的状态变量，分别求解包含状态变量 x_1，x_2，x_3，x_5，x_6，x_7，x_{10} 的状态空间方程，以及包含导轨和线圈状态变量 x_4，x_8，x_9 的状态空间方程，并将两者结合得到系统的状态空间模型。其中，前者的表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} L_{s1}x_1{}' = u_{s1} - R_{s1}x_1 - x_2 - R_{1p}(x_1 - x_4) \\ C_{1p}x_2{}' = x_1 - x_4 \\ C_{1s}x_3{}' = x_4 \\ L_{s2}x_5{}' = u_{s2} - R_{s2}x_5 - x_6 - R_{2p}(x_5 - x_8) \\ C_{2p}x_6{}' = x_5 - x_8 \\ C_{2s}x_7{}' = x_8 \\ C_{3s}x_{10}{}' = x_9 \end{cases} \tag{1}$$

求解式(1)，得到包含系统状态变量 x_1，x_2，x_3，x_5，x_6，x_7 和 x_{10} 的状态空间方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} x_1{}' = -\dfrac{R_{s1}+R_{1p}}{L_{s1}}x_1 - \dfrac{1}{L_{s1}}x_2 + \dfrac{R_{1p}}{L_{s1}}x_4 + \dfrac{1}{L_{s1}}u_{s1} \\ x_2{}' = \dfrac{1}{C_{1p}}x_1 - \dfrac{1}{C_{1p}}x_4 \\ x_3{}' = \dfrac{1}{C_{1s}}x_4 \\ x_5{}' = -\dfrac{R_{s2}+R_{2p}}{L_{s2}}x_5 - \dfrac{1}{L_{s2}}x_6 + \dfrac{R_{2p}}{L_{s2}}x_8 + \dfrac{1}{L_{s2}}u_{s2} \\ x_6{}' = \dfrac{1}{C_{2p}}x_5 - \dfrac{1}{C_{2p}}x_8 \\ x_7{}' = \dfrac{1}{C_{2s}}x_8 \\ x_{10}{}' = \dfrac{1}{C_{3s}}x_9 \end{cases} \tag{2}$$

再利用图 1 所示的等效电路，得到包含导轨和线圈状态变量 x_4，x_8，x_9 导数的表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} L_1x_4{}' + M_{12}x_8{}' - M_{13}x_9{}' = R_{1p}x_1 + x_2 - x_3 - \\ \qquad (R_1 + R_{1p})x_4 \\ M_{12}x_4{}' + L_2x_8{}' - M_{23}x_9{}' = R_{2p}x_5 + x_6 - x_7 - \\ \qquad (R_2 + R_{2p})x_8 \\ -M_{13}x_4{}' - M_{23}x_8{}' + L_3x_9{}' = (R_3 + R_L)x_9 + x_{10} \end{cases} \tag{3}$$

求解式(3)，得到包含导轨和线圈状态变量 x_4，x_8，x_9 的状态空间方程如式(4)所示。其中，分母 d 的表达式如式(5)所示。然后，结合式(2)和式(4)、式(5)就能得到系统的状态空间模型。

$$
\begin{cases}
x_4' = \dfrac{1}{d}[R_{1p}(L_2L_3 - M_{23}^2)x_1 + (L_2L_3 - M_{23}^2)x_2 - (L_2L_3 - M_{23}^2)x_3 - (R_1 + R_{1p})(L_2L_3 - M_{23}^2)x_4 + \\
\quad R_{2p}(M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_5 + (M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_6 - (M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_7 - \\
\quad (R_2 + R_{2p})(M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_8 + (R_3 + R_L)(M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_9 + (M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_{10}] \\
x_8' = \dfrac{1}{d}[R_{1p}(M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_1 + (M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_2 - (M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_3 - \\
\quad (R_1 + R_{1p})(M_{13}M_{23} - M_{12}L_3)x_4 + R_{2p}(L_1L_3 - M_{13}^2)x_5 + (L_1L_3 - M_{13}^2)x_6 - (L_1L_3 - M_{13}^2)x_7 - \\
\quad (R_2 + R_{2p})(L_1L_3 - M_{13}^2)x_8 + (R_3 + R_L)(M_{23}L_1 - M_{12}M_{23})x_9 + (M_{23}L_1 - M_{12}M_{13})x_{10}] \\
x_9' = \dfrac{1}{d}[R_{1p}(M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_1 + (M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_2 - (M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_3 - \\
\quad (R_1 + R_{1p})(M_{13}L_2 - M_{12}M_{23})x_4 + R_{2p}(M_{23}L_1 - M_{12}M_{13})x_5 + (M_{23}L_1 - M_{12}M_{13})x_6 - \\
\quad (M_{23}L_1 - M_{12}M_{13})x_7 - (R_2 + R_{2p})(M_{23}L_1 - M_{12}M_{13})x_8 + (R_3 + R_L)(L_1L_2 - M_{12}^2)x_9 + \\
\quad (L_1L_2 - M_{12}^2)x_{10}]
\end{cases}
\tag{4}
$$

$$
d = L_1L_2L_3 + 2M_{12}M_{13}M_{23} - M_{23}^2L_1 - M_{13}^2L_2 - M_{12}^2L_3 \tag{5}
$$

如果只考虑线性扰动，则式(2)和式(4)、式(5)中的状态变量和输入变量均能够表示为如式(6)所示的稳态项和线性动态扰动项的组合。

$$
\begin{cases}
x_m = X_m + \tilde{x}_m & m = 1, 2, \cdots, 10 \\
u_{sn} = U_{sn} + \tilde{u}_{sn} & n = 1, 2
\end{cases}
\tag{6}
$$

在分析系统移动充电动态过程时，由于其持续时间尺度较长，可以忽略动态扰动项的影响。同时，由于逆变器输出等效电压源 U_{s1} 和 U_{s2} 可以通过逆变器直流母线电压近似求得，所以能够将 U_{s1} 和 U_{s2} 作为已知量，通过忽略动态扰动项计算系统状态空间模型在不同位置上的稳态解，从而近似得到移动过程中不同位置上电流 I_{inv1}，I_{inv2}，I_{c1}，I_{c2} 和 I_{c3} 的值，并利用如式(7)所示的表达式，对系统移动动态过程中输出功率 P_o 和效率 η 的变化过程和特性进行分析。在式(7)中，Re 表示求复数的实部，以求得有功功率。

$$
\begin{cases}
P_o = I_{c3}^2 R_L \\
\eta = \dfrac{I_{c3}^2 R_L}{\mathrm{Re}(U_{s1} I_{inv1}) + \mathrm{Re}(U_{s2} I_{inv2})}
\end{cases}
\tag{7}
$$

而在分析导轨切换的瞬态过程时，动态扰动项则起到主要作用，由此能够得到系统的小信号模型。其中，包含状态变量 x_1，x_2，x_3，x_5，x_6，x_7，x_{10} 线性动态扰动项的小信号模型如式(8)所示；同理，能够求得包含导轨和线圈状态变量 x_4，x_8，x_9 的小信号模型。上述推导分析表明，能够通过状态空间模型的稳态解来分析系统的移动动态过程，并利用小信号模型描述导轨切换的瞬态过程，进而对分段式多发射导轨电动汽车移动式无线充电系统中的主要动态过程及其特性进行研究。

$$
\begin{cases}
\tilde{x}_1' = -\dfrac{R_{s1} + R_{1p}}{L_{s1}}\tilde{x}_1 - \dfrac{1}{L_{s1}}\tilde{x}_2 + \dfrac{R_{1p}}{L_{s1}}\tilde{x}_4 + \dfrac{1}{L_{s1}}\tilde{u}_{s1} \\
\tilde{x}_2' = \dfrac{1}{C_{1p}}\tilde{x}_1 - \dfrac{1}{C_{1p}}\tilde{x}_4 \\
\tilde{x}_3' = \dfrac{1}{C_{1s}}\tilde{x}_4 \\
\tilde{x}_5' = -\dfrac{R_{s2} + R_{2p}}{L_{s2}}\tilde{x}_5 - \dfrac{1}{L_{s2}}\tilde{x}_6 + \dfrac{R_{2p}}{L_{s2}}\tilde{x}_8 + \dfrac{1}{L_{s2}}\tilde{u}_{s2} \\
\tilde{x}_6' = \dfrac{1}{C_{2p}}\tilde{x}_5 - \dfrac{1}{C_{2p}}\tilde{x}_8 \\
\tilde{x}_7' = \dfrac{1}{C_{2s}}\tilde{x}_8 \\
\tilde{x}_{10}' = \dfrac{1}{C_{3s}}\tilde{x}_9
\end{cases}
\tag{8}
$$

2　移动充电动态过程分析

2.1　实验系统与参数

从电动汽车移动式无线充电系统的建模过程中可以看出：系统动态过程几乎受系统中所有参数的影响。这就意味着如果要定量分析系统动态特性，就首先需要明确系统参数的实际值。因此，搭建了如附录 A 图 A1 所示的电动汽车移动式无线充电系统试验平台。与建模过程一致，试验平台通过工作导轨和静息导轨这两种典型状态代表地面端一系列的多个导轨。同时，附录 A 图 A1 中以接收线圈与工作导轨对准的位置为坐标零点，给出了移动充电过程中，试验平台上接收线圈所处不同位置的距离标度，便于后续分析。

在建立的试验平台中，系统输入电压为直流 150 V，工作频率为 50 kHz；两个全桥单相逆变器分别给工作导轨和静息导轨回路供电；与建模过程一致，工作导轨和静息导轨回路均采用 LCC 阻抗匹配

网络，而接收线圈回路则采用电容串联补偿；导轨和接收线圈均为盘式结构，并使用 Litz 线绕制而成；接收线圈通过二极管全桥整流器与电阻负载相连。导轨和线圈的自电感值如下：$L_1=88.1\ \mu H$，$L_2=90.8\ \mu H$，$L_3=230.5\ \mu H$。阻抗匹配网络的主要参数值如下：$C_{1s}=198.6\ nF$，$C_{1p}=264.1\ nF$，$C_{2s}=198.7\ nF$，$C_{2p}=265.6\ nF$，$C_{3s}=43.4\ nF$。

2.2　移动动态特性分析

在移动充电过程中，导轨和接收线圈之间的互感 M_{13} 和 M_{23} 会发生变化。因此，在附录 A 图 A2 中给出了互感变化过程的测量结果，以便对系统移动动态特性进行分析。从该图中可以看出，当接收线圈与导轨对准时，两者之间的互感最大，并且互感值会随着接收线圈与导轨之间偏移距离的增大而逐渐减小。

基于附录 A 图 A2 中的互感变化测量结果，能够利用系统状态空间模型的稳态解，计算系统移动过程中不同位置上的输出功率和效率，其结果如图 2 所示。同时，为了对比验证推导的模型，系统输出功率和效率的实验测量结果也在图 2 中给出。

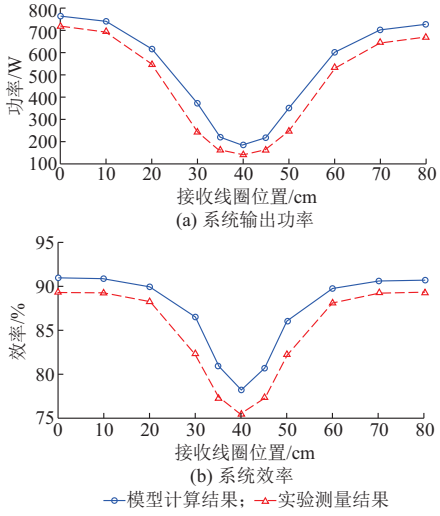

图 2　移动动态过程计算结果与实验结果对比
Fig.2　Comparison between model calculated and experiment measured results of system output power and efficiency in dynamic moving process

从图 2 中可以看出，模型计算得到的系统输出功率和效率都略大于实验值。这主要是由于建模过程中未考虑逆变器和整流器的开关损耗，以及连接导线的损耗等因素引起的。但总的来说，在整个移动动态过程中，模型计算结果与实验测量结果具有相同的变化趋势，并且值相差不大，从而验证了文中建立的模型在移动动态过程中的有效性。同时，计算和实验结果表明：在移动无线充电过程中，系统输出功率和效率都会出现波动。互感 M_{13} 和 M_{23} 变化的叠加作用，进而引起的地面导轨和车载接收线圈之间耦合强度的变化是产生这种现象的主要原因。图 2(a)表明系统输出功率的波动较大。这就需要加入相应的控制策略，或在系统设计时保留一定的裕量，以保证系统稳定运行的同时达到额定的充电功率。图 2(b)表明系统效率的波动相对较小。试验系统在移动无线充电整个过程中的平均效率能够达到 86%，最小值也大于 75%。这说明系统总体上具有较高的能量利用效率。

3　导轨切换瞬态过程分析

基于搭建的试验平台，以静息导轨的切换开通为例，对导轨切换的瞬态过程进行分析。在导轨切换实验中，当接收线圈运行至试验平台 20 cm 位置时，将静息导轨逆变器的直流侧接入电源，并利用示波器测量工作导轨和接收线圈中的电流波形，测量结果如图 3 所示。同时，图 3 还给出了模型计算结果，以验证所建动态模型在瞬态过程中的有效性，进而分析导轨切换开通时的瞬态特性。此外，在图 3 绘图过程中对示波器测得的原始数据进行了处理，重新设定了时间坐标零点，将导轨切换开通时间移动至 0.1 ms 的整数时刻，以便显示更清楚、美观。但这种处理不会影响实验数据的真实性和可靠性。

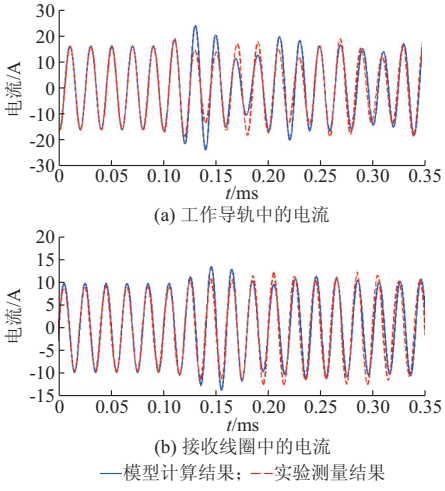

图 3　切换开通瞬态过程计算结果与实验结果对比
Fig.3　Comparison between model calculated and experiment measured results of currents in working track and receive coil in switch-on transient process

从图 3 中可以看出，模型计算得到的瞬态过程相比实验结果存在一定的差异。这主要由以下两方面因素造成：一是建模过程中忽略了逆变器和整流器的瞬态过程；二是瞬态过程对系统参数非常敏感，而试验平台中系统参数的测量结果存在一定的误差。但总的来说，在切换开通瞬态过程中，模型计算得到的结果与实验测量结果变化趋势类似；虽然在

个别点上瞬态值相差较大，但总体契合度较高，从而验证了本文建立的模型在导轨切换瞬态过程中的有效性。在后续工作中，会考虑加入逆变器和整流器的动态模型，以求更准确地描述系统瞬态过程。

进而，由于图 3 中的波形仍旧包含有稳态成分，不能完全表现瞬态特性，因此对结果进行处理，消除切换开通前稳态成分的影响，并基于试验系统输入电压 150 V 进行归一化，得到的结果如附录 A 图 A3 所示。其中，取每个周期内电流波形的幅值拟合成曲线以便更清楚地表现瞬态变化过程，并且对示波器测得的原始数据进行了处理，将导轨切换开通时间移动至 0.2 ms 的整数时刻。此外，因为模型计算结果和实验测量结果的对比分析在图 3 中已经给出，所以附录 A 图 A3 中仅使用实验结果来研究瞬态特性。从该图中可以看出，在切换开通瞬态过程中，静息导轨中电流的超调量较大，并且切换前后的稳态值也存在较大的差异；而工作导轨和接收线圈中电流的超调量较小，并且切换前后的稳态值差距也较小。这说明切换开通的导轨会承受较大的电应力，在系统设计时应考虑相应的裕量；而正在工作的导轨和接收线圈也会受到切换开通过程的影响，但受影响的程度相对较小。

最后，分析不同的切换开通位置对瞬态过程的影响。当接收线圈运行至试验平台 0 cm 位置开通时，处理后的归一化瞬态过程实验结果也在附录 A 图 A3 中给出。可以看出，在 0 cm 位置切换开通时，导轨和线圈中电流的瞬态超调会明显减小。这是由于当接收线圈处于 0 cm 位置时，静息导轨与工作导轨及接收线圈之间的耦合程度较小。因此，对于分段式多发射导轨电动汽车移动式无线充电系统，应提前切换开通静息导轨，以减少瞬态超调对系统的冲击。论文的后续工作会进一步研究具体提前多少距离切换最为合适，以实现最小化的切换瞬态冲击。

4　结语

本文针对分段式多发射导轨的电动汽车移动式无线充电系统进行了研究，建立了状态空间模型和小信号模型以描述系统的动态过程；进而基于实际系统参数，分析了系统移动充电动态过程和导轨切换瞬态过程，并通过实验对模型和分析结论进行了验证。但文中尚未明确提前多少距离切换线圈最为合适等问题，研究成果具有一定的局限性。因此，在后续工作中，应分析切换位置、开通线圈个数，以及逆变器与整流器对瞬态过程的影响，进而实现最小化的切换瞬态冲击，并得到相关经验参数，以指导电动汽车移动式无线充电系统的设计。

本文得到汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF16012)资助，谨此致谢！

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 张辉，王换民，李宁，等.电动汽车无线充电混合补偿拓扑电路分析[J].电力系统自动化，2016，40(16)：71-75. DOI：10.7500/AEPS20151012007.
ZHANG Hui，WANG Huanmin，LI Ning，et al. Analysis on hybrid compensation topology circuit for wireless charging of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(16)：71-75. DOI：10.7500/AEPS20151012007.

[2] 黄君涛，陈乾宏，陈文仙，等.四线圈激励共振式无线电能传输系统及其研究分析[J].电力系统自动化，2015，39(16)：108-114. DOI：10.7500/AEPS20141225006.
HUANG Juntao，CHEN Qianhong，CHEN Wenxian，et al. A four-coil excited wireless power transmission region via magnetic resonance and its research analysis[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(16)：108-114. DOI：10.7500/AEPS20141225006.

[3] DEFLORIO F P，CASTELLO L，PINNA I，et al. "Charge while driving" for electric vehicles：road traffic modeling and energy assessment[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2015，3(2)：277-288.

[4] KO Y D，JANG Y J. The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation System，2013，14(3)：1255-1265.

[5] MILLER J，ONAR O，WHITE C，et al. Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle：the benefit of electrochemical capacitor smoothing[J]. IEEE Power Electronics Magazine，2014，1(1)：12-24.

[6] 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]. Science China Technological Sciences，2012，55(7)：1886-1893.

[7] 王智慧，胡超，孙跃，等.基于输出能效特性的 IPT 系统磁耦合机构设计[J].电工技术学报，2015，30(19)：26-31.
WANG Zhihui，HU Chao，SUN Yue，et al. Design of magnetic coupler for inductive power transfer system based on output power and efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(19)：26-31.

[8] 祝文姬，孙跃，高立克.电动汽车多导轨无线供电方法[J].电力系统自动化，2016，40(18)：97-101. DOI：10.7500/AEPS20150730005.
ZHU Wenji，SUN Yue，GAO Like，et al. Wireless power supply method for multi-rail-based electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(18)：97-101. DOI：10.7500/AEPS20150730005.

[9] 赵锦波，蔡涛，段善旭，等.适用于分段式动态无线充电的接力方法[J].电力系统自动化，2016，40(16)：64-70. DOI：10.7500/AEPS20160119005.
ZHAO Jinbo，CAI Tao，DUAN Shanxu，et al. Relay control

method for sectional track based dynamic wireless charging system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 64-70. DOI: 10.7500/AEPS20160119005.

[10] CHEN Z, JING W, HUANG X, et al. A promoted design for primary coil in roadway-powered system[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.

[11] ZHU Qingwei, WANG Lifang, GUO Yanjie, et al. Applying LCC compensation network to dynamic wireless EV charging system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6557-6567.

[12] 张献，苏杭，杨庆新，等.谐振耦合无线传能高速列车系统最大传输效率的研究[J].电工技术学报，2015，30(增刊1)：308-312.
ZHANG Xian, SU Hang, YANG Qingxin, et al. Research on maximum transmission efficiency of resonance coupling wireless transmission in high-speed train system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(Supplement 1): 308-312.

[13] 宋凯，朱春波，李阳，等.用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线电能传输技术[J].中国电机工程学报，2015，35(17)：4445-4453.
SONG Kai, ZHU Chunbo, LI Yang, et al. Wireless power transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4445-4453.

[14] 李明硕，陈乾宏，侯佳，等.一种具有聚磁作用的轨道式非接触变压器[J].电工技术学报，2013，28(10)：25-32.
LI Mingshuo, CHEN Qianhong, HOU Jia, et al. A new type of contactless transformer in track inductive power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 25-32.

[15] ZHANG W, WONG S C, TSE C K, et al. An optimized track length in roadway inductive power transfer systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 598-608.

[16] GUO Yanjie, WANG Lifang, ZHU Qingwei, et al. Switch-on modeling and analysis of dynamic wireless charging system used for electric vehicles[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6568-6579.

[17] LEE K, PANTIC Z, LUKIC S. Reflexive field containment in dynamic inductive power transfer systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(9): 4592-4602.

[18] LI H, WANG K, HUANG L, et al. Dynamic modeling based on coupled modes for wireless power transfer systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(11): 6245-6253.

[19] SUNGWOO L, BOHWAN C, RIM C T. Dynamics characterization of the inductive power transfer system for online electric vehicles by Laplace phasor transform[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(12): 5902-5909.

[20] HAO H, COVIC G A, BOYS J T. An approximate dynamic model of LCL-T based inductive power transfer power supplies [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(10): 5554-5567.

郭彦杰(1986—)，男，博士，助理研究员，主要研究方向：电动汽车无线充电技术、电磁兼容技术与电力电子技术。E-mail：yjguo@mail.iee.ac.cn

王丽芳(1971—)，女，通信作者，博士，研究员，主要研究方向：电动汽车无线充电技术、动力电池管理、整车控制技术、智能车与电磁兼容技术等。E-mail：wlf@mail.iee.ac.cn

李树凡(1990—)，男，博士研究生，主要研究方向：电动汽车无线充电技术。E-mail：lishufan@mail.iee.ac.cn

（编辑　章黎）

Dynamic Modeling and Characteristic Analysis on Dynamic Wireless Charging System of Electric Vehicle

GUO Yanjie[1,2], *WANG Lifang*[1,3], *LI Shufan*[1], *ZHANG Yuwang*[1], *LIAO Chenglin*[1,3]

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Collaborative Innovation Center for Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100081, China)

Abstract: The dynamic wireless charging system can significantly reduce the weight and size of electric vehicle (EV) power batteries. Hence it has broad application prospects. A state-space model of dynamic wireless EV charging system is developed first based on the segmented multi-track scheme. Also, a system small-signal model is obtained to describe the dynamic characteristics. Then, with the help of an experimental platform and the actual values of system variables, dynamic changes in system output power and efficiency are analyzed in the dynamic charging process. Furthermore, the transient characteristics in the track switch-on process are investigated, as is the influence of switching position. Meanwhile, experiments are conducted to verify the proposed model and analysis conclusions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507168), National Key Technologies R&D Program (No. 2015BAG17B06) and Beijing Municipal Science and Technology Project (No. D15110900290000).

Key words: dynamic wireless charging system; dynamic modeling; dynamic charging process; track switching transient process