

线圈位置及特殊路况对轨道交通非接触供电系统的影响*

裴春兴 李 娜 王远霏 孙海荣

(中车唐山机车车辆有限公司技术研究中心, 063035, 唐山//第一作者, 高级工程师)

摘 要 在轨道交通非接触供电系统中,当车辆上接收线圈与轨道上发射线圈相对位置发射变化时,其能量传输效率会发射变化。利用 Maxwell 软件建立发射线圈与接收线圈的三维模型,仿真得到线圈自电感与互感等参数,并通过 Simplorer 软件搭建基于串联-串联拓扑结构的系统仿真模型,得到不同工况下的供电系统能量传输效率,并深入分析了不同路况对非接触供电系统的影响。

关键词 轨道交通; 非接触供电系统; 能量传输效率; 磁耦合谐振

中图分类号 U231+.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.015

Influence of Coil Position and Special Road Conditions on Rail Transit Non-contact Power Supply System

PEI Chunxing, LI Na, WANG Yuanfei, SUN Hai-rong

Abstract For rail transit non-contact power supply system, when the relative position between the receiving coil on vehicle and the transmitting coil on track changes, the energy transmission efficiency of the system changes. Maxwell software is used to establish a three-dimensional model of the transmitting coil and the receiving coil, and the parameters such as self-inductance and mutual inductance of the coils are simulated. The system simulation model based on SS topology structure is built by Simplorer to obtain the transmission efficiency of the power supply system under different working conditions. Influence of different road conditions on the non-contact power supply system is analyzed in-depth.

Key words rail transit; non-contact power supply system; power transfer efficiency; magnetic coupled resonance

Author's address Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

谐振式磁耦合无线能量传输技术具有电能传输功率大、短距离范围内传输效率高等特点,在轨道交通领域的非接触供电系统中有广泛的应用前景。采用非接触供电系统的轨道交通车辆,能取消受电弓及受电靴等机械接触部件,可有效降低触电和漏电风险。

列车非接触供电系统的工作原理如图 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;高频交流电通过轨道边的发射线圈时,会在空间产生高频磁场;在发射线圈中产生感应电流,并经整流器输出直流电压,从而实现非接触电能传输^[1-2]。

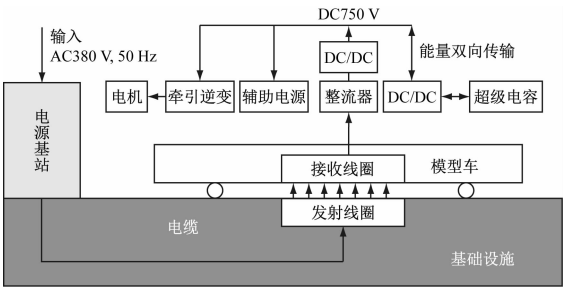


图 1 列车非接触供电系统工作原理框图

由图 1 可知,为了实现该系统高效率的能量传输,需对发射线圈结构、接收线圈结构及谐振电路进行详细设计。

目前,大部分关于非接触供电系统的研究均从如何设计线圈结构和谐振电路出发,很少考虑车辆经过发射线圈边缘以及转弯、爬坡等特殊路况时对该供电系统能量传输的影响。当车辆出现上述情形时,发射线圈与接收线圈的相对位置发生变化,将会影响 2 个线圈间的能量传输。因而有必要详细分析线圈位置及特殊路况对系统能量传输的影响。

本文基于 Maxwell 软件建立不同相对位置下的

发射线圈和接收线圈模型,通过 Simplorer 软件仿真分析线圈相对位置对系统耦合的影响,并考虑车辆在不同路况运行时的线圈相对位置变化对非接触供电系统的影响。

1 线圈电磁耦合原理

如图 2 所示,当空间中存在 2 个线圈时,如果其中 1 个线圈中流过变化的电流,则该线圈周围会产生变化的磁场,从而在另 1 个线圈中产生感应电动势。

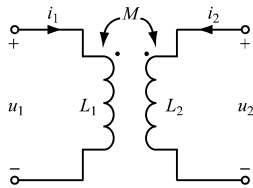


图 2 线圈电磁耦合原理示意图

对图 2 的电路假设:左边线圈为发射线圈,与输入交流源相连;右边线圈为接收线圈,与负载相连。当发射线圈侧电流 i_1 不断变化时,其周围产生自感磁通量为 Φ_{11} 的变化磁场,其中一部分自感磁通交链接收线圈,产生互感磁通 Φ_{21} 。同理,接收线圈的自感磁通量为 Φ_{22} ,其与发射线圈交链产生互感磁通 Φ_{12} 。由此,根据等效模型可得:

$$u_1 = \frac{d(\Phi_{11} - \Phi_{12})}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{d(\Phi_{12} - \Phi_{22})}{dt} = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

从而可得到:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & -M \\ M & -L_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

L_1 ——发射线圈的自电感;

L_2 ——接收线圈的自电感;

M ——2 个线圈间的互感。

由式(1)及式(2)可得:当 2 个线圈之间的相对位置发生变化时,线圈周围的磁通将发生变化;受其影响,2 个线圈间的互感磁通 Φ_{21} 及 Φ_{12} 发生变化,进而导致 2 个线圈间的电感发生变化,从而影响接收线圈两端电压。

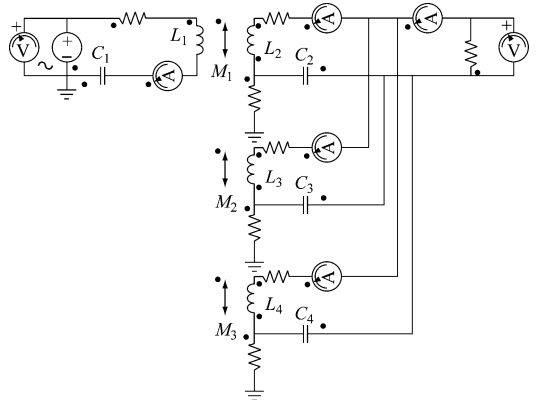
对于轨道交通非接触供电系统,当车辆经过特殊位置及遇到特殊路况时,车辆上的接收线圈与轨道上的发射线圈相对位置发生变化,从而使 2 个线

圈间的互感磁通发生变化,最后影响了供电系统的能量传输效率。

2 能量传输效率的仿真计算

2.1 构建非接触供电系统模型

在本文研究的非接触供电系统中,在车辆底部有 3 个接收线圈,按间距为 3.5 m 均匀分布,并联输出。建立 1 个发射线圈 + 3 个接收线圈的线圈电路模型,如图 3 所示。考虑到发射线圈与接收线圈距离很近,故采用串联-串联(SS 拓扑结构)的电路拓扑结构^[3,4]。



注: L_3 、 L_4 均为接收线圈的自电感。

图 3 线圈电路模型图

当发射线圈和接收线圈的谐振频率一致时,能量在线圈之间交换,总能量不随时间变化。当发射线圈与接收线圈间的谐振频率不一样时,线圈间的能量交换不完全,仅有部分能量在线圈间传递,且 2 组线圈谐振频率相差越大,能量交换越少。因此,为了实现非接触供电系统的能量传输效率最大,须保证 2 组线圈的谐振频率相同。

为了确保发射线圈和接收线圈的谐振频率一致,采用图 3 中的谐振电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 作为匹配电容,各电容值需根据发射线圈及接收线圈的自感值和互感值来确定。

在 Maxwell 软件中建立线圈模型,如图 4 所示。发射线圈与接收线圈均为由 Litz 线缆绕制的矩形线圈。接收线圈置于车辆底部。参考动车车底空间尺寸信息,模型中的接收线圈外尺寸为 1 050 mm × 1 050 mm,匝数为 6。发射线圈限制在轨道内侧。出于减小漏感和节约成本的考虑,模型中设置匝数为 2、宽度为 0.8 m、长度为 40 m 的发射线圈。发射线圈与接收线圈间距为 10 cm。

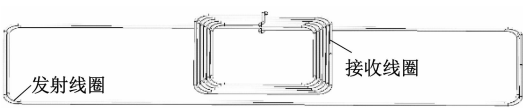


图4 非接触供电系统的线圈模型

2.2 常规工况的计算

假设接收线圈处于发射线圈中部为常规工况。此时,长度为40 m的发射线圈模型过大,其仿真效率低下,需进行模型优化。本研究仅考虑接收线圈在发射线圈内部的情况。当车辆位于发射线圈正上方时,长发射线圈中间部分的场强分布较为平均,3个接收线圈与发射线圈之间的互感值基本一致。故而,为了提高仿真效率,常规工况采用4 m长度的发射线圈及1个接收线圈模型来完成仿真。

通过Maxwell软件的仿真计算可得,发射线圈和接收线圈的耦合参数如表1所示。

表1 发射线圈和接收线圈的耦合参数			
$L_1/\mu\text{H}$	$L_2/\mu\text{H}$	$M/\mu\text{H}$	耦合系数
27.0	61.3	7.00	0.172

在Simplorer软件中导入Maxwell软件建立的模型及仿真参数,并进行仿真。代入表1中的相关参数,按常规工况,对图3中的电路进行仿真:设置激励源频率为10 kHz;在保持各匹配电容的值满足主边与副边谐振频率一致的情况下,进行参数扫描。仿真参数扫描得到谐振状态下电源和负载上的电压和电流波形,如图5所示。根据谐振状态下的电压及电流峰值,可初步估算出该情况下的无接触供电系统能量传输效率约为95%。

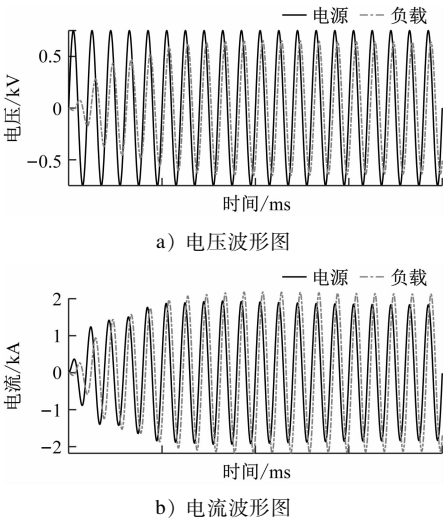


图5 常规工况在谐振状态下的电源和负载波形图

在上述计算中,谐振电容的值是按接收线圈位

于发射线圈中间位置处计算得到的。在实际应用中,谐振电容的值为固定值,无法在车辆运行过程中进行改变。

当车辆经过特殊位置及特殊路况时,线圈间的互感值会发生变化,进而使发射线圈及接收线圈各自的谐振电容之间的谐振频率发生偏差,从而导致车辆在整个运行过程中的能量传输状态偏离理想预期。

2.3 线圈位置变化的影响

在车辆实际运行过程中,由于发射线圈长度有限,故接收线圈分别处于发射线圈中心或边界时对应的耦合系数会有差别。本文定义接收线圈处于发射线圈边缘处为边缘工况。通过仿真可得, L_1 、 L_2 及 M 随接收线圈在列车前进方向上偏离发射线圈中心的距离 d 变化而变化,如图6所示。对应的耦合系数变化趋势如图7所示。

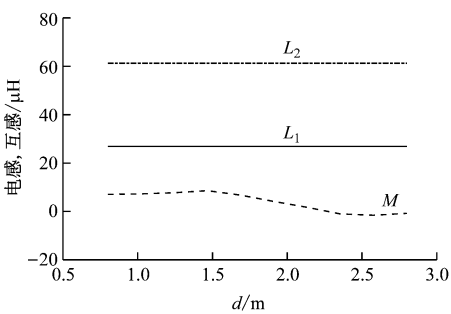


图6 发射线圈电感、接收线圈电感及互感的变化趋势

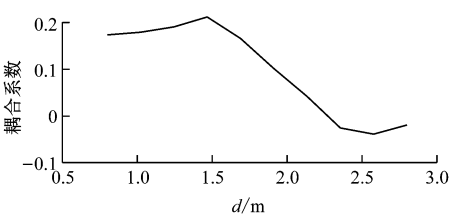


图7 耦合系数的变化趋势

由图7可见:当接收线圈接近发射线圈边缘时,两者的耦合系数会略微增大;当发射线圈进一步远离发射线圈中心时,线圈之间的耦合会迅速降低。

图8及图9分别为接收线圈在边缘工况和常规工况时的电磁场分布图。通过对比发现,边缘工况下的场强更大,而此时耦合系数也发生了相应的变化。

车辆底部设计有3个接收线圈。当车辆运行到发射线圈边缘时,同一车厢底部的3个接收线圈可能处在不同的耦合状态。按2个接收线圈处于常规

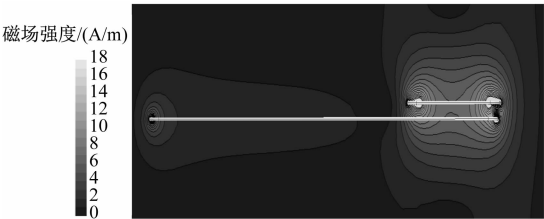


图8 边缘工况的场分布

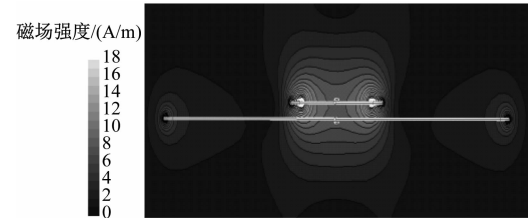
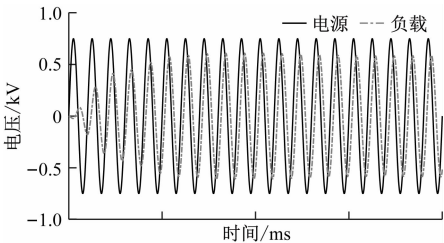
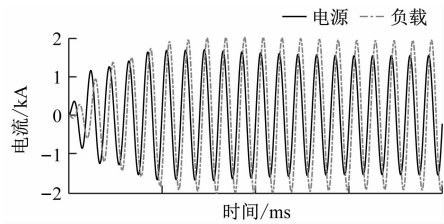


图9 常规工况的场分布

工况、1 个接收线圈处于边缘工况作为典型组合工况来取互感值,采用图 3 的电路原理图进行仿真。仿真结果如图 10 所示。由图 10 可知,能量传输效率约为 90%。对比图 5 发现,典型组合工况的能量传输效率约降低 5%。



a) 电压波形图



b) 电流波形图

图 10 典型组合工况下的电源及负载仿真波形图

由此可见,虽然接收线圈与发射线圈之间的互感在接收线圈靠近发射线圈边界时会有提升,但无接触供电系统的整体能量传输性能反而会有所下降。经分析,列车上匹配的谐振电容值保持恒定,在边缘工况下虽然线圈间的互感增加,却会导致无接触供电系统偏离预设的谐振状态,从而降低能量传输功率约 5%。

进一步考虑发射线圈与接收线圈之间的横向偏移量 X_x ,以及线圈平面距离 Z_z 对耦合系数的影

响,通过在 Maxwell 软件中进行参数扫描,得到对应的互感分布情况如图 11 所示。

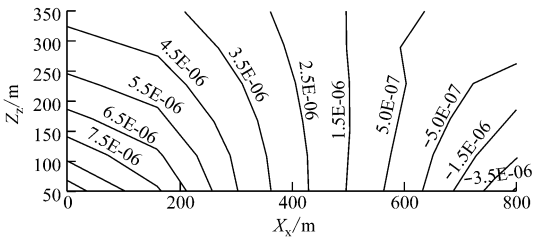


图 11 互感等值线随 X_x 和 Z_z 的分布

由图 11 可见:线圈互感随距离的增大而减小;在 $X_x > 650$ mm 时,互感变为负值。这是由于 $X_x > 650$ mm 时发射线圈产生的磁力线反向穿过接收线圈,使感应电动势反向。

2.4 不同路况的影响

车辆在实际运行中会遇到弯道、坡道等不同路况。在不同的路况下,随着接收线圈与发射线圈的相对位置不断变化,线圈之间的耦合系数也将发生变化,从而影响无接触供电系统的能量传输效率。本文以坡道和弯道作为 2 种典型路况进行仿真分析。

由于铁轨为金属材料,对线圈周围的磁场分布有一定的影响,故典型路况仿真中将计入钢轨模型。

2.4.1 坡道路况

当车辆开始缓慢爬坡时,车头方向的接收线圈比车尾方向的接收线圈距离发射线圈更远。因此,在线圈建模时,可将发射线圈方向设置为水平,将接收线圈按与水平方向有一定的倾角来设置,如图 12 所示。仿真得到不同倾角下的耦合结果如表 2 所示。由表 2 可见,耦合系数受倾角影响,随倾角的提升而单调降低。

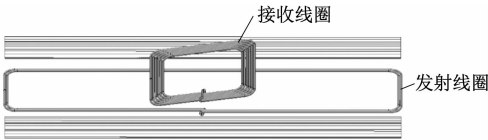


图 12 坡道路况的线圈模型

表 2 接收线圈不同倾角时的耦合结果

坡度/ $^{\circ}$	$L_1/\mu\text{H}$	$L_2/\mu\text{H}$	$M/\mu\text{H}$	耦合系数
0	27.2	61.8	7.29	0.178
3	27.2	61.9	7.26	0.177
6	27.2	61.9	7.24	0.176
9	27.3	62.0	7.21	0.175

由于坡道路况下, L_1 和 L_2 变化较小,故本文假定 L_1 和 L_2 为固定值。图 13 和图 14 为坡度为 0 及 9‰时的无接触供电系统性能的变化。由图 13 可见,坡度的变化对能量传输效率的影响小于 5%。

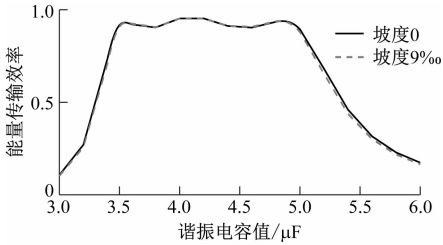


图 13 不同坡度下的能量传输效率

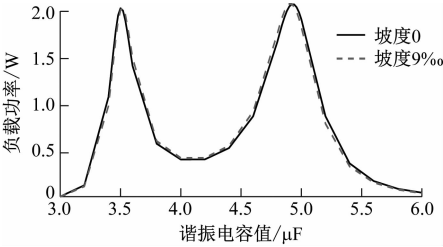


图 14 不同坡度下的负载功率

2.4.2 弯道路况

在弯道路况下,发射线圈与接收线圈虽所在平面平行,但线圈间存在一定的夹角。因此,在模型中将接收线圈旋转,使之与发射线圈形成一定的夹角来模拟弯道工况,如图 15 所示。不同夹角下的仿真结果如表 3 所示。

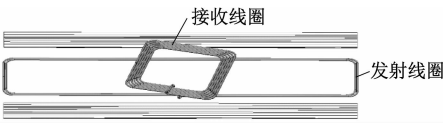


图 15 弯道情况下的模型变化示意图

表 3 不同弯道夹角下的仿真结果

弯道夹角/(°)	$L_1/\mu\text{H}$	$L_2/\mu\text{H}$	$M/\mu\text{H}$	耦合系数
0	27.2	61.8	7.29	0.178
5	27.2	61.8	7.29	0.178
10	27.2	61.8	7.30	0.178
15	27.2	61.8	7.29	0.178

由仿真结果可见,弯道路况下夹角对无接触供电系统的耦合性能没有显著影响。

3 结语

本文通过 Maxwell 软件与 Simplorer 软件的联合仿真搭建了非接触供电系统模型,并在模拟环境中实现了高效率的能量传输。在非接触供电系统中,随着列车的运行,发射线圈和接收线圈的相对位置发生变化,其耦合系数也相应发生变化,从而影响了无接触供电系统的能量传输效率。通过对线圈模型在不同工况和路况下的仿真计算,在各线圈与电容的谐振参数保持不变,而接收线圈与发射线圈的相对位置发生变化时,分析了无接触供电系统能量传输效率的变化趋势。本文采用的分析方法能定量评估无接触供电系统在多种工况下的能量传输性能变化,还能在一定程度上评估轨道设计对整个非接触供电系统的影响。

参考文献

[1] ROMAN B, JOHANN W K. Multi-objective optimization of 50 kW/85 kHz IPT system for public transport[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1370.

[2] KEIGO U, TAKAYUKI K, YASUAKI S, et al. Evaluation of a non-contact power supply system with a figure-of-eight coil for railway vehicles[C]//IEEE. PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power(2015 WoW). New York:IEEE, 2015.

[3] KEIGO U, TAKAYUKI K, YASUAKI S, et al. Power transmission performance verification of a non-contact power supply system for railway vehicles[J]. Foreign Rolling Stock, 2017, 57(3): 228.

[4] 田子建,杜欣欣,樊京,等. 磁耦合谐振无线输电系统不同拓扑结构的分析[J]. 电气工程学报,2015(6):47.

(收稿日期:2019-07-29)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—51030704