

轨道交通无线电能传输系统动态 谐振线圈耦合模型研究

赖一雄 罗 金 范建伟

(中铁电气化局集团有限公司城铁公司, 100036, 北京//第一作者, 工程师)

摘 要 鉴于传统采用平板式线圈结构的无线电能传输系统, 不适合列车在运行过程中的电能传输, 设计了一种 E 型铁心线圈的 RX (接收端) 耦合结构来满足轨道交通供电系统的动态需求。综合考虑车辆停靠的偏移、横向与竖向的间隙及列车上允许的安装体积, 建立了动态谐振线圈耦合模型, 分析了谐振状态的变量因素, 包括线圈自感、线圈互感及耦合电容等; 充分考虑工程应用的实际需求, 对 RX 与 TX (发射端) 的结构参数进行了设计; 通过系统仿真验证了 E 形铁心线圈分别在 x 轴 (线路横向) 正向进行偏移, 在 y 轴 (线路纵向) 正向进行小范围偏移, 在 y 轴负向进行大范围偏移, 以及到达极限位置时对耦合系数的影响。结果表明: E 形铁心线圈在 x 方向的偏移对自感和互感等耦合参数几乎无影响, E 形铁心线圈结构除偏移至极限位置外线圈耦合系数基本保持稳定。该模型能够有效减小耦合系数变化对无线电能传输系统稳定性的影响。

关键词 轨道交通; 无线电能传输系统; 动态谐振线圈耦合模型

中图分类号 TM724:U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.019

tions, the structural parameters of RX and TX (transmitting end) are designed. The E-shaped iron-core coil is simulated to verify its influence on coupling coefficient in different situations, such as an offset in x -axis (line transverse) positive direction, a small-range offset in y -axis (line longitudinal) positive direction, a large-range offset in y -axis negative direction, and offset to the limit position. The results show that the E-shaped iron-core coil in the x -axis direction has almost no effect on coupling parameters such as self-inductance and mutual inductance. Except when the coil structure is offset to the limit position, the coupling coefficient of E-shaped iron-core coil remains relatively stable. The model can effectively reduce the impact of coupling coefficient changes on wireless power transmission system stability.

Key words rail transit; wireless power transmission system; dynamic resonant coil coupling model

Author's address Urban Railway Company of China CREC Railway Electrification Bureau (Group) Co., Ltd., 100036, Beijing, China

Dynamic Resonant Coil Coupling Model of Rail Transit Wireless Power Transmission System

LAI Yixiong, LUO Jin, FAN Jianwei

Abstract Given that the conventional wireless power transmission system using a flat coil structure is not suitable for the energy transmission of trains during operation, a coupling structure of an E-shaped iron-core coil for RX (receiving end) is designed to meet the dynamic requirements of rail transit power supply system. Comprehensively considering the deviation of vehicle parking, the horizontal and vertical clearances and the allowable installation volume on the train, a dynamic resonant coil coupling model is established, and the variable factors of the resonant status are analyzed, including self-inductance, coil mutual inductance and coupling capacitance. Considering the actual requirements of engineering applica-

1 轨道交通无线电能传输系统

无线电能传输技术, 在广义上是指在空间中通过磁场与电场等软介质实现电能的非接触传输, 其有别于传统的接触式供电, 是一种全新的供电模式。目前, 无线电能传输技术主要分为磁谐振偶数式、磁感应耦合式、超声无线电能传输式、光电无线电能传输式、微波式、电场式耦合共六类。其中, 磁感应耦合式无线电能传输技术 (见图 1) 是以电磁场近场耦合的方式实现电能近距离传输的无线电能技术, 目前此种技术在供电领域应用最广泛也最成熟。

面向轨道交通的无线电能传输技术正处于快速发展中。与电动汽车动态无线充电类似, 该技术采用沿轨道铺设线圈阵列或分段长导轨, 并通以高频交变电流, 通过谐振式磁耦合方式向安装于列车

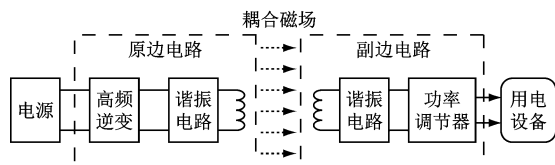


图1 磁感应耦合式无线电能传输系统结构

Fig. 1 Structure of magnetic induction coupled wireless power transmission system

的接收端提供电能,以消除列车与供电线路的直接机械接触。与传统供电方式相比,无线电能传输技术可以完全消除第三轨供电方式中电刷磨损、断轨产生电弧、摩擦发热量大等问题,在提升其安全性和可靠性的同时,减少了维护成本,并且更加适用于包含诸多分岔路段的轨道交通线网。图2给出了基于无线电能传输技术的轨道交通供电系统的结构。

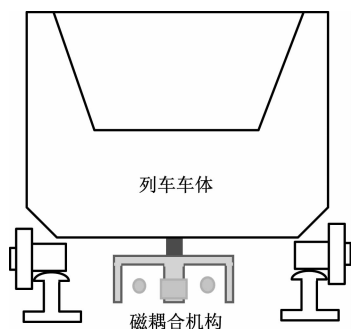


图2 基于无线电能传输技术的轨道交通供电系统

Fig. 2 Rail transit power supply system based on wireless power transmission technology

文献[1]提出一种可旋转的发射线圈结构,使无线电能传输系统在偏移时的传输效率得到了保障。文献[2]对多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统进行建模,对线圈方位特性、线圈品质因数特性及系统功效特性进行了研究。文献[3]提出了一种分组周期串联螺旋耦合器的分散耦合结构,改进了发射线圈和接收线圈的结构。文献[4]提出了一种利用二次谐振频率运行并带有分岔现象的优化方法,建立了中间线圈的无线电能传输系统原型,在输出功率为6.6 kW时,系统总效率达到95.57%。

无线电能传输系统的磁耦合机构主要通过谐振式电磁感应实现电能无线传输。该系统的关键部件是线圈耦合结构。动态谐振线圈耦合结构模型包括E型RX(接收端)与导轨式TX(发射端)。相比于传统电动汽车无线充电使用的平板式线圈,E型RX的方案更适用于列车动态运动情况下的电能无线传输。本文将基于此方案进行设计和研究。

2 动态谐振线圈耦合模型的建立

为保持谐振状态,要求施加在动态谐振线圈耦合结构工作电路上交流电压的频率等于电路的固有谐振频率。电路的固有频率受线圈自感、线圈互感、耦合电容的影响,其计算公式^[5-6]为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中:

f ——工作电路固有频率;

L ——将副边电感归算到原边电路的总电感;

C ——电路总耦合电容。

由式(1)可知,保持工路运行于谐振状态就需要保证电容、电感等耦合参数的稳定。

以E型铁心线圈为RX的耦合结构如图3所示。该方案TX为单匝或双匝线圈,无铁心,线圈沿列车行进方向延伸较长距离,发射线圈的形态类似于长直导轨。RX磁耦合机构以E型铁心为主体,在其上绕多匝线圈。发射导轨嵌入RX的凹槽中,但保持非接触状态。1套接收模块包含4个RX,为充分利用车顶空间,采用2×2的布局。同一导轨上的RX需间隔一定距离,以减小相邻线圈磁场互相削弱带来的影响。对应的发射线圈也拆分为左、右两个进行串联,并令其产生的磁场相互叠加。

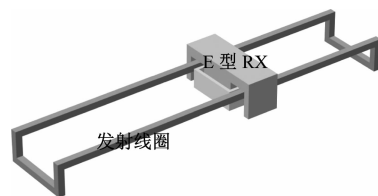


图3 E型铁心线圈RX耦合结构

Fig. 3 E-shaped iron-coil RX coupling structure

2.1 TX设计

TX如图4所示,不使用磁材料。在满足机械偏差和晃动需求的前提下,尽可能减小发射线圈的宽度和发射接收间隙。在满足发射导轨自感、互感和耦合系数的前提下,应当尽可能减小发射线圈的长度和匝数,从而减小损耗。本文仅考虑列车静止状态下的容差,设计TX与RX的间隙不小于50 mm,列车停靠前后最大偏差取500 mm。

为减轻高频下集肤效应和邻近效应的影响,TX线圈选用利兹线铺设。为了维持TX与RX的间隙,应尽力防止TX出现下垂、晃动等现象,使用非

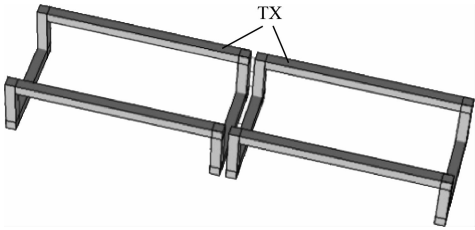


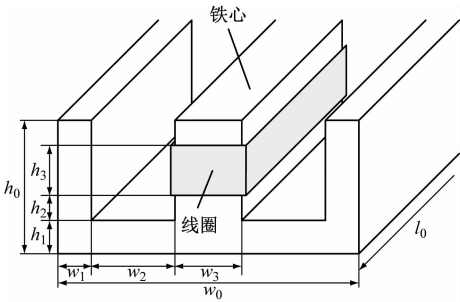
图 4 TX 结构示意图

Fig. 4 Diagram of TX structure

金属线槽作为 TX 导线外壳进行支撑。

2.2 RX 设计

如本文所述,1 套接收模块包含 4 个 RX,单个 RX 包含铁心、线圈和外壳。在不包括外壳的情况下,其基本结构如图 5 所示。



注:图中所标注的变量皆为其尺寸参数。

图 5 RX 铁心与线圈结构示意图

Fig. 5 Diagram of RX magnetic iron-core and coil structure

经迭代设计和仿真,确定铁心的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 铁心尺寸

Tab. 1 Dimensions of iron-core

尺寸参数	单位:mm								
	w_0	w_1	w_2	w_3	h_0	h_1	h_2	h_3	l_0
取值	480	50	140	100	220	50	30	80	200

在具体实现上,RX 铁心使用小块磁体拼接而成,铁心采用 PC95 铁氧体或同等级磁材,铁心外壳初定采用聚丙烯材料。接收线圈从铁心底部以单层方式向上绕制,共 16 匝。相邻 RX 在 x 方向(线路横向)上的中心距为 500 mm,在 y 方向(线路纵向)上的中心距为 1 000 mm(与发射线圈对应)。接收线圈同样采用利兹线绕制。

3 无线电能传输系统仿真验证

3.1 无线电能传输系统模型的建立

相比于平面线圈搭配的平板铁心,E 形铁心在中心柱到两边柱间留出了一定空气间隙,可以避免

在交流大电流或直流偏置情况下的磁饱和现象,能够更好地控制电感量;且空气间隙在不影响铁心原本特性的同时,加大了铁心工作的磁通密度和饱和磁通密度。铁心柱间的磁开路可以减少铁心在涡流磁场状态下工作时的剩磁,使得相同体积的铁心可以输出更大的功率。

无线电能传输系统的磁路结构如图 6 所示。E 形铁心线圈可搭配长导线槽构成嵌入式无线电能传输系统,其外部采用热塑型高分子结构材料外壳进行包裹。

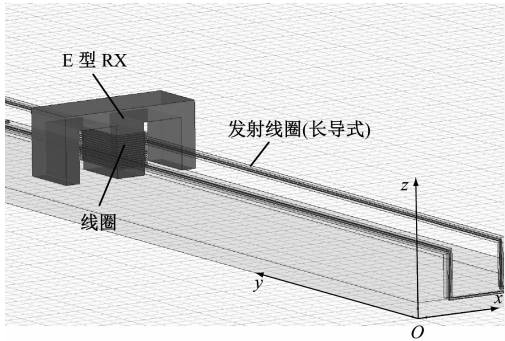


图 6 无线电能传输系统的磁路结构

Fig. 6 Magnetic circuit structure of wireless power transmission system

线圈自感 $L_{\text{自}}$ 可表示为^[7]:

$$L_{\text{自}} = N\Phi/I \quad (2)$$

其中:

$$\Phi = NI/R_m \quad (3)$$

式中:

N ——线圈匝数;

Φ ——单匝通过的磁通量;

R_m ——磁阻;

I ——线圈上所加电流。

则式(2)可简化为:

$$L_{\text{自}} = N^2/R_m \quad (4)$$

式(4)中, N 通常保持恒定, $L_{\text{自}}$ 与 R_m 成反比。 R_m 可由式(5)计算得出:

$$R_m = l/A\delta \quad (5)$$

式中:

l ——介质长度;

A ——导线的截面积;

δ ——介质磁导率。

由式(5)可知, R_m 主要与介质导磁性能和所占空间大小有关。磁路中的磁阻主要由 E 型铁心线圈上端开口的空气隙磁阻决定;其开口长度和截面

积由铁心结构决定,与运行状态无关。结合式(4)可知,一般情况下,线圈自感只由自身结构决定,与工作状态无关;无线充电电路工作过程中的自感始终保持恒定。

而原、副边线圈间互感受线圈相对位置、角度及间距偏差的影响会有所变化。线圈间互感 $M^{[8-9]}$ 可表示为:

$$M = k/\sqrt{L_1L_2}$$

(6)

式中:

$L_1、L_2$ ——分别为原边自感和副边自感;
 k ——原、副边耦合系数。

由式(6)可知,自感恒定的情况下, M 与 k 成正比。通过对不同线圈工作状态下的 k 进行对比,可判断出 M 的变化情况。若在改变线圈位置后 k 变化较小,说明线圈设计较为稳定。

3.2 E形铁心线圈偏移对耦合系数的影响

为验证E形铁心线圈偏移至极限位置时对 k 的影响,在平台中建立嵌入式无线电能传输系统模型。设定E形铁心线圈模型的初始状态为长导线槽在 x 方向上以E形铁心为中心对称; y 轴正向间距2 900 mm,负向间距200 mm; z 方向与铁心中心柱顶端平齐。初始状态下的E形铁心线圈模型如图7所示。

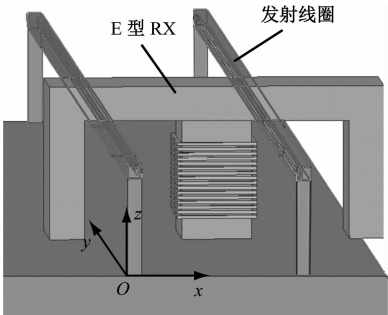


图7 初始状态下的E形铁心线圈模型
Fig.7 E-shaped iron-core coil model in the initial state

对该模型进行涡流场有限元仿真,所得 k 值如表2所示。

将E形线圈在 $x、y、z$ 等3个方向上进行偏移,记录不同位置下的 k 值,具体如下:

1) E形铁心线圈在 x 轴正向上进行偏移。将E形铁心线圈沿 x 轴正向偏移10~50 mm(步长10 mm)时,其 k 值如表3所示。由表3可知:E形铁心线圈在 x 方向上进行偏移时,随着偏移距离增加, k

表2 初始状态下E形铁心线圈模型 k 取值
Tab.2 k value of E-shaped iron-core coil model in the initial state

原边自感值/ μH	副边自感值/ μH	互感值/ μH	k
18.345	294.19	13.495	0.183

表3 E形铁心线圈在 x 轴正向上偏移时的 k 取值
Tab.3 k value of E-shaped iron-core coil with offset in x -axis positive direction

偏移距离/mm	10	20	30	40	50
k	0.185	0.186	0.187	0.190	0.192

略有上升。造成这一现象的原因是:E形铁心线圈 x 轴正向一侧随偏移距离增加逐渐向导线槽靠近,使 k 有所增加;同时E形铁心线圈 x 轴反向一侧以相同距离远离导线槽,使得 k 总体增幅较小,最大不超过4%。

2) E形铁心线圈在 y 轴正向上进行小范围偏移。将E形铁心线圈沿 y 轴正向偏移10~50 mm(步长10 mm)时,其 k 值如表4所示。由表4可知:E形铁心线圈在 y 轴正向上偏移不同距离时的 k 略有差别。究其原因是有限元仿真过程中为了加速计算,将ansoft软件中最大允许计算误差设定为5%,故而上述数据有所波动,但实际 k 值仍保持恒定。

表4 E形铁心线圈在 y 轴正向上小范围偏移时的 k 取值
Tab.4 k value of E-shaped iron-core coil with small-range offset in y -axis positive direction

偏移距离/mm	10	20	30	40	50
k	0.183	0.184	0.184	0.183	0.184

3) E形铁心线圈在 y 轴负向上进行大范围偏移,沿 y 轴负向分别偏移200 mm、400 mm,以及到达极限位置。由于 y 轴负向上E形铁心线圈与长导线槽边沿间距200 mm,该线圈沿 y 轴负向偏移200 mm时,E形铁心与导线槽边沿平齐;该线圈沿 y 轴负向偏移400 mm时,E形铁心已远离导线槽,线圈另一侧距离导线槽边沿间距为100 mm。E形铁心线圈在 y 轴负向上偏移时的 k 值如表5所示。

4) E形铁心线圈在 z 方向进行偏移。将E形铁心线圈沿 z 轴偏移-20~20 mm(步长为10 mm),其 k 值如表6所示。E形铁心线圈在 x 方向的 k 值基本对称分布, k 在其中部4 cm、5 cm处最小,且向 x 轴两侧偏移时略有增加。由表6可知: z 方向上,E形铁心线圈向上偏移使得导线槽靠近铁

表 5 E 形铁心线圈在 y 轴负向上偏移时的 k 取值

Tab.5 k value of E-shaped iron-core coil with offset in y -axis negative direction

偏移距离/mm	0	200	400
k	0.183	0.147	0

表 6 E 形铁心线圈在 z 方向偏移时的 k 取值

Tab.6 k value of E-shaped iron-core coil with offset in z -axis direction

偏移距离/mm	-20	-10	0	10	20
k	0.173	0.179	0.184	0.187	0.190

心, k 有所上升, 但越接近铁心偏移引起的 k 改变越小; E 形铁心线圈向下偏移使得导线槽远离铁心, 且 k 变化率随偏移量增大而增大。

4 结论

E 形铁心线圈在 x 方向的偏移对自感和互感参数几乎无影响。E 形铁心线圈横向偏移在 0 ~ 300 mm 范围内时, RX 自感变化在 1% 以下, TX 自感略有增大, RX 和 TX 之间的互感略有增大, k 呈现上升趋势, 其变化幅值在 1 μ H 以下。E 形铁心线圈在 x 、 y 方向上分别偏移 50 mm 后, k 偏差分别为 3.8% 和 0.5%; E 形铁心线圈在 z 轴正、负方向分别偏移 20 mm 后, k 偏差分别为 6.0% 和 3.2%; E 形铁心线圈偏移至极限位置, 即远离导线槽时, k 从初始值 0.183 降至 0。证明了 E 形铁心线圈结构除极限位置外线圈 k 基本保持稳定, 能够有效减小 k 变化对无线充电电路稳定性的影响。

参考文献

[1] 刘璐, 徐桂芝, 石凯凯, 等. 线圈偏移对无线电能传输效率的影响及优化[J]. 现代电子技术, 2021, 44(8): 123.

LIU Lu, XU Guizhi, SHI Kaikai, et al. Influence of coil offset on wireless power transmission efficiency and its solution[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(8): 123.

[2] 李建坡, 王一钧, 杨涛, 等. 多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统特性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 722.

LI Jianpo, WANG Yijun, YANG Tao, et al. Transmission characteristic research on multi-loads wireless power transfer via magnetic coupling resonance [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 722.

[3] ZHANG X, YUAN Z, YANG Q, et al. Coil design and efficiency analysis for dynamic wireless charging system for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1.

[4] MOON S, KIM B C, CHO S Y, et al. Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5861.

[5] CAI B, LI K. Research on the contactless traction power supply for modern trams [J]. Urban Rail Transportation, 2015, 1(1):72.

[6] PHAM T S, KHUYEN B X, TUNG B S, et al. Enhanced efficiency of asymmetric wireless power transmission using defects in 2D magnetic metamaterials[J]. Journal of Electronic Materials, 2021, 50(2): 443.

[7] 苏玉刚, 侯信宇, 戴欣. 磁耦合无线电能传输系统异物检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 715.

SU Yugang, HOU Xinyu, DAI Xin. Review of foreign object detection technology in magnetic coupling wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 715.

[8] MIRBOZORGI S, MAGHSOUDLOO E, BAHRAMI H, et al. Multi-resonator arrays for smart wireless power distribution: comparison with experimental assessment[J]. IET Power Electronics, 2020, 13: 4183.

[9] CHUNG Y D, LEE C Y, KIM D W, et al. Conceptual design and operating characteristics of multi-resonance antennas in the wireless power charging system for superconducting maglev train[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1.

(收稿日期:2021-04-17)

(上接第 105 页)

[7] XU K, BA J, KIROS R, et al. Show, attend and tell: neural image caption generation with visual attention[J]. Computer Science, 2015,35(8):2048.

[8] BAEVSKI A, ZHOU H, MOHAMED A, et al. wav2vec 2.0: a framework for self-supervised learning of speech representations [EB/OL]. (2020-10-22) [2023-01-08]. <https://arxiv.org/abs/2006.11477>.

[9] 张斌. 基于非完备集知识迁移的结构健康状态压电超声导波监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.

ZHANG Bin. Research on piezoelectric ultrasonic guided wave monitoring method for structural health based on incomplete set knowledge transfer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

[10] 张韩飞. 板结构损伤的超声 Lamb 波特性分析及检测成像方法研究[D]. 上海: 上海大学, 2020.

ZHANG Hanfei. Analysis of ultrasonic Lamb wave characteristics of plate structure damage and research on detection imaging method[D]. Shanghai: Shanghai University, 2020.

(收稿日期:2023-03-31)