

# 轨道式IPT系统线圈互感建模及偏移特性分析

胡国珍<sup>1,2</sup>,李伟雷<sup>1,2</sup>,罗维平<sup>1</sup>,黄志敏<sup>1,2</sup>

(1.武汉纺织大学 机械工程与自动化学院,湖北 武汉 430200; 2.湖北理工学院 电气与电子信息工程学院,湖北 黄石 435003)

**摘要:**以工业轨道应用中的松耦合感应电能传输系统为研究对象,建立原边轨道-副边拾电线圈间互感数学模型,并给出精确的互感表达式。在此基础上,研究线圈轴向偏移和径向偏移对互感值的影响;最后,通过Maxwell对模型进行仿真,同时搭建实验平台进行验证。结果表明,拾电线圈数学模型及偏移特性分析正确,能较好地用于轨道式应用场合。

**关键词:**感应式电能传输;互感;偏移特性

**中图分类号:**TM724 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19646

## Mutual Inductance Modeling and Misalignment Characteristics Analysis of Orbital IPT System Coil

HU Guozhen<sup>1,2</sup>, LI Weilei<sup>1,2</sup>, LUO Weiping<sup>1</sup>, HUANG Zhimin<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, Hubei, China; 2. School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, Hubei, China)

**Abstract:** Looking into the loosely coupled inductive power transfer system in industrial track application, the mutual inductance mathematical model between the primary orbital and secondary side pick-up coils were established, and the accurate mutual inductance expression was given. On this basis, the effects of axial offset and radial offset on the mutual inductance were studied. Finally, the model was simulated by Maxwell and the experimental platform was built to verify the results. The results show that the mathematical model and misalignment analysis are correct and can be used in rail applications.

**Key words:** inductively power transfer(IPT); mutual inductance; misalignment characteristics

感应式电能传输(inductive power transfer, IPT)系统是通过电磁感应原理实现能量的非接触传输,具有电气隔离、维护成本低、可靠性高等优点,可广泛用于汽车工业物料输送领域<sup>[1-4]</sup>。

图1为轨道导引小车(rail guide vehicles, RGV)非接触感应式电能传输系统原理图,该系统中的松耦合结构实现能量的非接触传输,系统原边为单匝轨道,因此其能量传输受耦合系数影响较大。相关机构已展开对轨道式应用IPT系统的研究并取得一定成果。

文献[5-6]给出了LCL谐振拓扑及多种串并补偿特性的分析。文献[1]通过详细分析得出IPT系统中效率最高时原边与副边线圈形式<sup>[7]</sup>;还有一些研究着重分析了不同形状如D型、DD型线

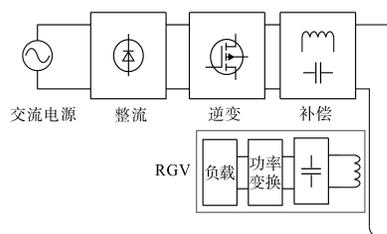


图1 RGV非接触感应式电能传输系统原理图

Fig.1 Schematic for non-contact inductively power transfer system of RGV

圈特性及其对系统效率的影响<sup>[8-10]</sup>。

现有的研究虽在一定程度上为IPT系统效率优化提供解决思路,但其研究出发点多基于静止状态时的系统状态,针对实际工程中动态多参数线圈特性则并没有具体分析。基于此,

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金(2018ZYD006);湖北省自然科学基金青年项目(2017CFB195)

作者简介:胡国珍(1979—),男,博士,副教授,Email:hgz\_hs@163.com

本文提出一种全新的导轨-线圈互感建模方式,在模型基础上对系统进行分析,定量探讨运行过程中线圈动态参数对互感的影响。通过Maxwell仿真及实验验证,最终得出线圈轴向、径向偏移时导轨-线圈互感随之变化的函数关系,为实际工程中线圈与导轨几何关系的确立提供理论依据。

### 1 系统结构

为保证原边侧轨道能够恒流输出,在实际工业轨道应用中常采用LCL拓扑结构,其原理图如图2所示。

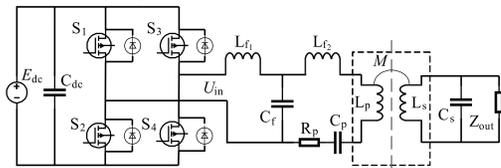


图2 IPT系统转换器原理图

Fig.2 Schematic of IPT system converter

在LCL谐振网络中, $L_{f1}$ 为逆变器侧的电感, $L_{f2}$ 为轨道侧的电感, $C_f$ 为原边的谐振电容; $L_{f1}$ 和 $C_f$ 谐振共同决定系统的开关频率 $\omega$ 。当直流母线电压 $E_{dc}$ 保持不变时,初级侧的轨道电流 $I_p$ 为

$$I_p = \frac{U_{in}}{\omega L_{f2}} \quad (1)$$

式中: $U_{in}$ 为逆变桥的输出电压。

IPT系统次级侧电路可等效图3。

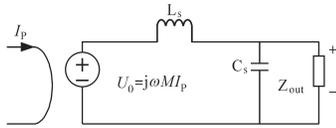


图3 IPT系统次级侧电路等效图

Fig.3 IPT system secondary side circuit equivalent diagram

次级侧拾取线圈能够等效为一个电动势为 $j\omega M I_p$ 的电压源。通常线圈自感在线圈制作完成后便为定值,因此对IPT系统而言,如何最大程度地提高原边轨道与副边拾取线圈间的互感值将直接决定整个系统的功率传输特性。

### 2 互感精确建模

根据IPT系统在RGV中的实际应用,其耦合平面图可等效为图4,其中,A,B为轨道电缆,次级拾取线圈通过电磁感应获取电能; $d_1$ 为轨道间距; $d_2$ 为线圈宽度; $L$ 为线圈长度; $r$ 为线圈各匝间的间距。系统工作时,次级 $N$ 匝线圈的磁链是单匝线圈产生磁通的总和。轨道和线圈之间的

垂直面等效图如图5所示, $h$ 为线圈和轨道之间的垂直距离。

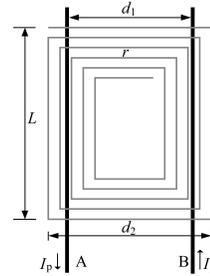


图4 IPT系统磁场耦合模型

Fig.4 IPT system magnetic field coupling model

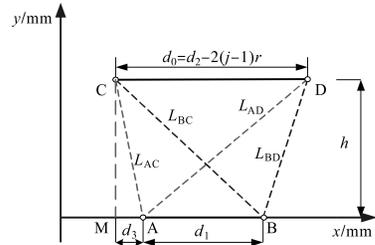


图5 线圈与轨道垂直等效图

Fig.5 Vertical equivalent diagram of coil and track

取 $AM=d_3=K(d_0-d_1)$ (其中 $0 \leq K \leq 1$ ), $d_0$ 为第 $j$ 匝线圈宽度。当 $K=0.5$ 时,线圈宽CD中点与导轨宽AB中点连线垂直于 $x$ 轴,即线圈没有发生偏移;当 $K>0.5$ 时线圈沿 $-x$ 轴方向偏移,由于线圈与轨道均为对称分布,因此其各变量与 $K<0.5$ 时相同;当 $K<0$ 时,线圈与导轨正对面积减小,此时系统的效率会急剧下降。因此本文在具体分析过程中,取 $0 \leq K \leq 1$ 。

根据Biot-Savart定律,轨道A产生的通过第 $j$ 个线圈的磁通量为

$$\Phi_A = \int_0^{L-2(j-1)r} dz \int_{L_{AC}}^{L_{AD}} \frac{u_0 I}{2\pi\rho} d\rho = \frac{u_0 I [L - 2(j-1)r]}{2\pi} \ln \frac{L_{AD}}{L_{AC}} \quad (2)$$

轨道B产生的通过第 $j$ 个线圈区域的磁通量为

$$\Phi_B = \frac{u_0 I [L - 2(j-1)r]}{2\pi} \ln \frac{L_{BD}}{L_{BC}} \quad (3)$$

结合式(2)、式(3)可知通过第 $j$ 匝线圈的总磁通量为

$$\Phi = \frac{u_0 I [L - 2(j-1)r]}{2\pi} \ln \frac{L_{AD} \times L_{BC}}{L_{AC} \times L_{BD}} \quad (4)$$

轨道A,B在 $N$ 圈线圈上产生的总磁通量为

$$\Phi = \sum_{j=1}^N \frac{u_0 I [L - 2(j-1)r]}{2\pi} \ln \frac{L_{AD} \times L_{BC}}{L_{AC} \times L_{BD}} \quad (5)$$

因此,轨道与 $N$ 匝线圈之间的互感 $M$ 为

$$M = \frac{\Phi}{I} = \sum_{j=1}^N \frac{u_0 [L - 2(j-1)r]}{4\pi} \ln \frac{[h^2 + (d_0 - d_3)^2][h^2 + (d_1 + d_3)^2]}{(h^2 + d_3^2)[h^2 + (d_0 - d_1 - d_3)^2]} \quad (6)$$

其中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率。式中对数项始终为正, 因此要使得互感  $M$  有实际意义, 其表达式中需满足以下关系式:

$$d_2 - 2(j-1)(r+D) > 0 \quad (7)$$

$$\text{即 } j_{\max} = \frac{d_2}{2(r+D)} + 1 \quad (8)$$

式中:  $D$  为线圈导线直径, 单位: mm。

式(6)反映出互感与线圈自身状态参数有关, 当  $r$  固定时, 互感  $M$  是匝数  $N$  的前  $N$  项之和。取  $h=10 \text{ mm}$ ,  $K=0.5$  时,  $M$  随  $N$  与  $r$  之间的变化关系如图6所示。

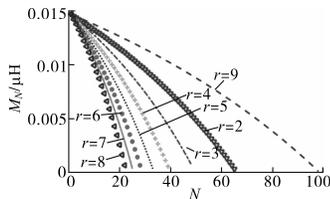


图6  $M_N-N-r$  变化关系

Fig.6 Relation chart of  $M_N-N-r$

图6中, 纵坐标为第  $N$  匝线圈与轨道间的互感, 从图6上曲线走势可知, 当  $N$  固定时, 取第  $N$  匝线圈的感量用  $M_N$  表示, 则  $M_N$  随  $r$  减小而增大, 且当  $r$  减小时,  $j$  的最大取值  $N$  变大。因此对整个线圈而言, 间隙  $r$  越小, 次级线圈每一匝与轨道间的互感增大且匝数变大, 因此  $M$  越大。

### 3 线圈偏移特性分析

图7为线圈偏移模型图, 其中图7a为线圈轴向偏移, 图7b为线圈径向偏移。

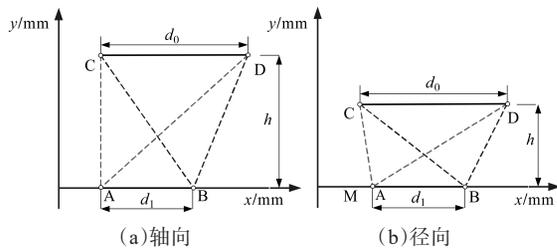


图7 线圈偏移数学模型

Fig.7 Mathematical model of coil offset

RGV 在运行过程中, 由于线圈是沿轨道方向运动的, 根据式(6)可知, 对互感值有影响的参数有轴向偏移变量  $K$ 、径向偏移变量  $h$  以及角度偏

移。其中当角度偏移过大时, 小车将无法正常运行, 因此只需分析轴向与径向偏移对互感  $M$  的影响。

#### 3.1 $h$ 对 $M$ 的影响

代入相关数据, 当  $K=0.5$  时, 满足:

$$M = 2 \times 10^{-4} \times \sum_{j=1}^{60} (391-j) \ln \frac{4h^2 + (301-j)^2}{4h^2 + (81-j)^2} \quad (9)$$

对  $h$  进行求导, 可得:

$$M|_h = -2 \sum (1 + \frac{f}{h^3 + e}) < 0 \quad (10)$$

式中:  $e, f$  为与  $j$  有关的正常数, 取  $0 < h < 20$ , 单位: mm。

$M$  与  $h$  关系如图8所示。

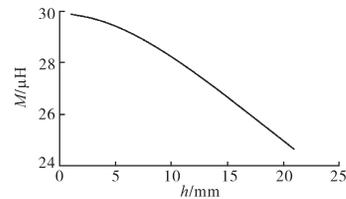


图8  $M-h$  变化关系图

Fig.8 Relation chart of  $M-h$

由式(10)可知:  $M$  为关于  $h$  的递减函数, IPT 系统松耦合结构互感大小直接受穿过副边线圈磁感线数量影响。间距越小, 穿过次级线圈的由原边恒定交流电产生的“磁力线”磁通量越多, 互感值增大。在实际应用中, 当次级线圈满足安装运行要求的前提时, 应尽可能地减小线圈纵向偏移。

#### 3.2 $K$ 对 $M$ 的影响

线圈发生横向偏移时, 取  $h=10 \text{ mm}$ , 代入各量到式(6)并保留变量  $K$ , 可得出  $M$  与  $K$  的关系如图9所示。

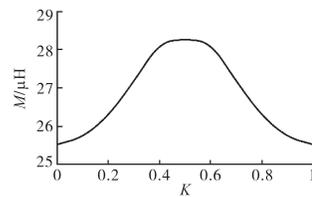


图9  $M-K$  变化关系

Fig.9 Relation chart of  $M-K$

轴向偏移时, 仿真结果显示线圈左偏与右偏将会对互感值产生相同影响, 并且线圈偏移量越多, 互感值越小, 与前文理论分析一致。  $K=0.5$  为安装过程中最优安装位置, 在实际应用中, 次级线圈常被安装在 RGV 上, 小车沿轨道运行, 原边轨道与小车运行轨道平行铺设。为确保松耦合系统互感值最大, 应使得次级线圈宽边中点与轨道中点连线平行于垂直方向, 以保证偏移系数  $K=0.5$ 。

## 4 仿真及实验

### 4.1 有限元分析

借助 Maxwell 有限元软件进行仿真分析,仿真参数为:线圈匝数  $N=60$ ,线圈间隙  $r=0.5\text{ mm}$ ,线圈导线直径  $D=1\text{ mm}$ ,轨道线圈垂直距离  $h$  满足  $0 < h < 20$ ,线圈水平偏移系数  $K$  满足  $0 < K < 1$ 。

轨道与线圈间互感 Maxwell 仿真模型如图 10 所示。

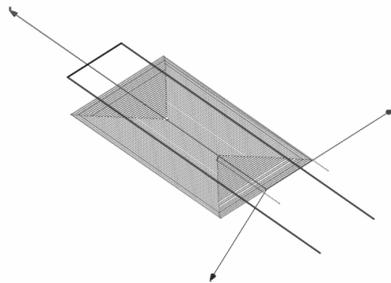


图 10 有限元仿真模型

Fig.10 Simulation model of finite element

为方便建模,由于线圈坐标较多,在参数设置上将线圈坐标设为定量,且线圈  $Z$  轴坐标为 0,轨道坐标为变量。轨道由 4 个坐标点确定,其坐标表示形式为  $(x+a,y,z+b)$ ,其中,  $-40 < a < 40, -20 < b < 0$ 。

当参数  $a$  为定量时,  $b$  的变化反映出线圈垂直方向偏移时  $h$  对互感  $M$  的影响;当参数  $b$  为定量时,  $a$  的变化反映出线圈水平偏移时  $K$  对互感  $M$  的影响,仿真数据见表 1。其中取  $K=0.1, 0.3, 0.5$  时分别对应  $h=5, 10, 15$  时的互感值,其变化规律如图 11 所示。

表 1 Maxwell 仿真结果

Tab.1 Maxwell simulation result

$K$	$h/\text{mm}$	$M/\mu\text{H}$
0.1	5	29.428 2
0.1	10	28.229 9
0.1	15	26.661 8
0.3	5	30.619 0
0.3	10	28.969 5
0.3	15	27.041 7
0.5	5	37.112 8
0.5	10	30.881 0
0.5	15	27.661 9

从图 11 中曲线走势可以明确得出互感随着间距  $h$  的增加而变小,随着  $K$  的增加先变大后变小,且当  $K=0.5$  时互感值达到最大,并且曲线关于直线  $K=0.5$  对称。

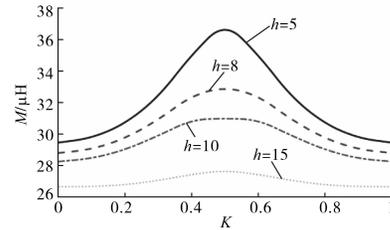


图 11  $M-K-h$  有限元仿真结果

Fig.11 Element simulation result of  $M-K-h$

### 4.2 实验验证

依照 Maxwell 仿真参数搭建 IPT 系统实验平台,实验输入电压为 73.1 V,轨道输出电流 8.47 A,系统频率为 20.8 kHz,拾取线圈自感为 266.5  $\mu\text{H}$ ,线圈补偿电容为 0.238  $\mu\text{F}$ ,原边输入输出波形如图 12 所示,其中,  $U_{in}$  为系统输入电压,即原边整流后得到的高频交流电,  $I_p$  为系统原边轨道输出高频交流电流。

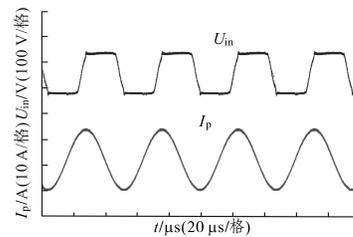


图 12 IPT 系统输入输出波形

Fig.12 Primary input and output waveform of IPT system

拾取线圈材质为 160 股利兹线,直径为 1 mm。分别获取  $K, h$  单一变化时经整流后的输出电压随另一参数变化的实际数据,见表 3;将输出电压绘制成关于  $h, K$  变化的曲线,变化规律如图 13 所示。由图 13 可看出,实验曲线变化规律与图 11 中仿真数据变化规律一致。当拾取线圈发生纵向偏移时,偏移量越大,互感值越小;当线圈发生轴向偏移时,偏移量越大,互感值越小,且线圈左偏与右偏呈现对称规律。

表 2 输出电压(单位:V)

Tab.2 Output voltage(V)

$K$	$h$		
	5	10	15
0.0	7.74	6.59	5.69
0.1	11.89	10.57	8.86
0.2	15.46	13.47	11.75
0.3	18.94	16.49	14.15
0.4	20.37	18.26	15.98
0.5	21.09	18.95	16.81
0.6	20.28	18.20	16.08
0.7	18.79	16.15	14.20
0.8	15.41	13.50	11.95
0.9	12.01	10.74	8.90
1.0	7.75	6.56	5.39

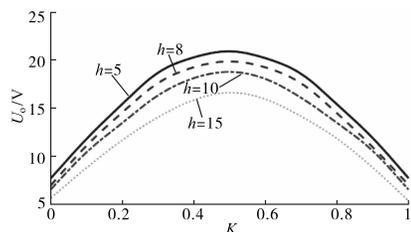


图13  $U_0-h-K$ 变化关系

Fig.13 Relation chart of  $U_0-h-K$

## 5 结论

本文针对IPT系统在工业应用中其耦合系数受多因素影响这一问题,提出一种基于Biot-Savart定律的互感精确计算方法,并以此模型准确分析出当线圈发生偏移时其偏移量与互感间的关系。通过Maxwell进行电磁仿真分析,同时搭建实验平台验证,结论表明,该数学模型能够较好地应用于对IPT系统互感和偏移特性的应用分析。

### 参考文献

[1] 吉莉,王丽芳,廖承林,等.基于单线圈双谐振结构的无线携能通信系统架构研究与设计[J].电工技术学报,2018,33(4):791-798.  
 [2] 吴晓康,杨庆新,张献,等.电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析[J].电工电能新技术,2016,35(9):8-13.  
 [3] 江兵,王俊刚,陈丽娟,等.一种非接触电能传输系统的原边

控制方法[J].电测与仪表,2014,51(11):86-90.

[4] 张波,疏许健,黄润鸿.感应和谐振无线电能传输技术的发展[J].电工技术学报,2017,32(18):3-17.  
 [5] 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 Electron., 2014, 29 (10) : 5554-5567.  
 [6] Budhia M, Boys J T, Covic G A, *et al.* Development of a Single-sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2013, 60(23):318-328.  
 [7] Pavol Bauer. Distributed IPT Systems for Dynamic Powering: Misalignment Analysis[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014,26(11):6012-6021.  
 [8] Bosshard R, Iruretagoyena U, Kolar J W. Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2016,18(4):1406-1415.  
 [9] Charalampos A S, Zaspalis V. Impact of Ferrite Shield Properties on the Low-power Inductive Power Transfer[J]. IEEE Trans. on Power Electron. Magn., 2016, 5(2):1-5.  
 [10] Zheng Cong, Ma Hongbo, Lai Jih-Sheng, *et al.* Design Considerations to Reduce Gap Variation and Misalignment Effects for the Inductive Power Transfer System[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 30(11):6108-6119.

收稿日期:2018-10-26

修改稿日期:2019-03-15