

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106979

无线电能传输系统中铁磁性金属异物对 DD/BP 磁耦合机构的影响研究*

周润棠 杜贵平 沈栋
(华南理工大学电力学院 广州 510640)

摘要: 铁磁性金属异物是无线电能传输系统在实际运行中常见的干扰物之一,其通过影响磁耦合机构的电气参数间接影响无线电能传输系统的输出特性。DD/BP 结构作为电动汽车无线电能传输系统最常见的磁耦合机构类型,本文将其为例通过磁场模型分析铁磁性金属异物对 DD/BP 磁耦合机构的线圈自感和线圈间互感的影响,通过磁理论的分析说明不同位置的铁磁性金属异物对 DD/BP 磁耦合机构的影响,借助 Maxwell 构建 DD/BP 磁耦合机构电磁仿真模型,在模型中不同垂直位置和水平位置加入铁磁性金属,来证实理论推导的正确性。仿真结果表明铁磁性金属异物处于 DD/BP 线圈两侧时会增大线圈自感和线圈间互感,而处于两 D 线圈交界处时会增大线圈自感并减小线圈间互感;在垂直方向上铁磁性金属异物越靠近线圈对相应线圈的自感的影响越大,越靠近任意线圈对线圈间的互感影响越大。

关键词: 无线电能传输;DD/BP 磁耦合机构;铁磁性金属异物;电磁仿真

中图分类号: TM910 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on the influence of ferromagnetic metal foreign body on DD/BP magnetic coupling mechanism

Zhou Runtang Du Guiping Shen Dong
(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Ferromagnetic metal foreign Bodies are one of the common interference objects in the actual operation of wireless power transmission systems. It indirectly affects the output characteristics of the wireless power transmission system by affecting the electrical parameters of the magnetic coupling mechanism. DD/BP structure is the most common type of magnetic coupling mechanism for electric vehicle wireless power transmission system. This paper takes DD/BP magnetic coupling mechanism as an example to analyze the influence of ferromagnetic metal foreign bodies on the coils' self-inductance and mutual inductance, and introduces the influence of ferromagnetic metal foreign bodies in different positions on the magnetic coupling mechanism of DD/BP based on the analysis of magnetic theory. An electromagnetic simulation model of the DD/BP magnetic coupling mechanism is built to simulate the electrical influence by using Maxwell. Ferromagnetic metal foreign Bodies are set in different horizontal or vertical position of the model to verify the correctness of the theoretical derivation. The simulation results show that when the ferromagnetic metal foreign body is on both sides of the DD/BP coil, it will increase the coil self-inductance and the mutual inductance between the coils, while at the junction of the two D coils, it will increase the coil self-inductance and reduce the mutual inductance between the coils. In the vertical direction, the closer the ferromagnetic metal foreign body is to the coil, the greater the influence on the self-inductance of the corresponding coil, and the closer to any coil the greater the influence on the mutual inductance between the coils.

Keywords: wireless power transfer; DD/BP magnetic coupler; ferromagnetic metal foreign body; electromagnetic simulation

0 引言

传统的电能传输往往通过电线进行从一端到另一端的

传输,而这往往会带来导线老化、被腐蚀的问题,而且传统的有线电能传输,在设备电线插拔的过程中,还很容易产生火花,这影响到了用电设备的寿命,也威胁到了用电环境的

收稿日期:2021-06-18

* 基金项目:广东省自然科学基金(2017B030312001)、广东省应用型科技研发专项资金(2015B020238012)项目资助

安全性。另外,对于一些特殊的应用场景,有线电能传输往往受到限制,例如给植入式医疗设备充电或进行水下充电等工况。因此,近几年来无线电能传输应运而生并迅速发展,无线电能传输具有占地面积小、维护成本低、不受恶劣天气影响、无需插拔等优点,因而越来越受到人们的关注^[1-3]。

在无线电能传输系统(WPT)中,在不受电缆和插头接触限制的情况下,磁芯材料和线圈绕组的形状、尺寸和位置等对无线充电系统的性能起着至关重要的作用,其中包括充电功率、传输效率、传输距离。在通常情况下,原副边的磁耦合机构通常分别由一个线圈构成,在一般的无线充电系统处于工作状态时,两个磁耦合机构的相对位置往往是不变的。磁耦合机构目前的研究主要目标在于提高线圈之间的耦合、提高线圈间的抗偏移能力、减小线圈的体积实现高能量传输密度等方面。目前国外研究机构主要有奥克兰大学、韩国 KAIST、日本埼玉大学、美国密歇根大学及橡树岭国家实验室等。

在无线充电的早期发展中,学者们先提出了应用多年的圆角矩形线圈,这种结构主要改善了磁通面积,减小了边缘漏磁。在 2010 年,奥克兰大学的 Budhia 等^[4]提出了 Flux pipe 型线圈,这种线圈采用了双线圈的结构,在磁路上采用了让一个线圈的磁通从另外一个线圈穿出,形成一个磁路上串联、电路上并联的结构,从而有效的提高了线圈的抗偏移能力。但是这种磁耦合结构存在着漏磁较大和对磁通利用率低的缺点,而且不利于集成。在 2011 年, Budhia 等^[5]又对圆形线圈进行改进,提出了通过加入磁芯,并对磁芯的数量和摆放进行了优化,进而减少了磁芯的用量并提高了系统的效率。在 2013 年, Budhia 等^[6]提出了一种单侧磁通型线圈,即 DD 型线圈,这种线圈通过左右线圈绕线相反,并且在磁路上形成串联,在外围上布置铁氧体,形成磁通沿着铁氧体流动的平行磁场模式,进而形成较为集中的磁场,这样有效的提高磁场的高度、密度,提升了磁耦合机构间的耦合以及抗偏移的能力,但是这种单侧磁通型线圈不能与单线圈混用。由于 DD 线圈在 X 轴上偏移约 30% 时会出现耦合的零点,因此在 DD 线圈的基础上,该团队的 Boys 等^[7]提出了 DDQ 型线圈,通过偏移时 Q 线圈对不同方向磁通的特性进行磁通的补偿,避开耦合零点。之后, Zaheer 等^[8]提出了 BP 型线圈,该线圈实现的功能与 DDQ 线圈类似,但是相比之下减少了线圈的用量。KAIST 的 Choi 等^[9]提出了以两个 U 形磁芯,加上 8 字形绕线的方式制作的初级测远小于次级侧的电磁耦合机构,该电磁耦合机构的亮点在于能够很好的屏蔽电磁辐射,而且提高了发射侧和接受侧的横向偏移容忍度。

铁磁性金属异物和非铁磁性金属异物是 WPT 系统在实际工况中最常见的两种金属干扰异物^[10-11],会对 WPT 系统的磁耦合机构的电气参数产生直接的影响。但两者的影响机理大不相同^[12-13],铁磁性金属异物主要是通过形成

良好的磁场通道,使得磁耦合机构的线圈自感和线圈间互感得到明显的增强;而非铁磁性金属异物主要是形成涡流效应来削弱线圈原有的磁场。除此之外,由于存在磁滞效应等非线性约束条件,铁磁性金属异物的磁场干扰分析往往更加的困难,不同的金属形状和金属尺寸的影响也是各不相同,通常采用电磁仿真的形式完成铁磁性金属异物对 WPT 系统磁耦合机构的干扰影响研究。学者们对于铁磁性金属异物在磁耦合机构中会对系统产生严重的影响的观点有着共同的认识,在实际的工作中往往通过异物检测或者调查线圈感量变化等特征来探查金属异物的存在^[14],但是对于铁磁性金属异物对磁耦合机构的量化影响却很少有做深入的研究,本文通过建立 DD/BP 磁耦合机构的电磁仿真模型,对铁磁性金属异物对 DD/BP 磁耦合机构的影响做了量化的仿真,为后续金属异物对于不同磁耦合机构产生影响的量化分析做了铺垫。

本文以 DD/BP 磁耦合机构为研究对象,首先通过 Maxwell 电磁仿真软件建立了 DD/BP 磁耦合机构的电磁仿真模型,然后通过磁场模型分析阐述了铁磁性金属异物对磁耦合机构的电气参数影响机理,最后通过电磁仿真的方式对不同位置下铁磁性金属异物的影响进行了仿真分析,最后得到了铁磁性金属异物对 DD/BP 磁耦合机构电气参数影响的一般规律。

1 DD/BP 磁耦合机构

DD 线圈^[6]组成的磁耦合机构能提供更强的磁场和更好的抗偏移特性,被广泛应用于电动汽车的无线电能传输系统^[15-16]磁耦合机构的设计。而由于 DD 线圈的耦合零点的问题,副边线圈往往会使用 BP 型线圈或者 DDQ 型线圈。目前发射侧使用 DD 线圈,接收侧采用 BP 线圈是较为常见的电动汽车 WPT 系统的磁耦合机构设计方法^[8]。其中,DD/BP 磁耦合机构的结构示意图如图 1 所示,其由 DD/BP 线圈以及相应的铁氧体构成,磁耦合机构中加入了铁磁性金属异物。

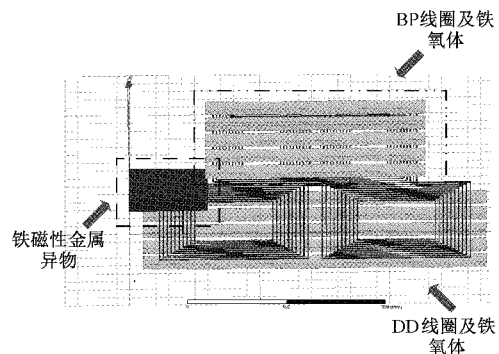


图 1 线圈结构示意图

2 电磁建模与理论探讨

对于铁磁性金属异物,由于存在磁滞效应等多方面非

线性的因素影响,很难建立电路模型进行分析,为了避免金属性异物在磁耦合机构中产生的影响,学者们提出图像识别或者负载感应等方法实现异物检测,但是少有对带有异物的磁耦合机构进行建模并做量化分析。本节将会从磁场模型的角度,建立带有铁磁性金属异物的磁耦合机构的模型,就铁磁性金属异物给 DD/BP 磁耦合机构带来的影响进行量化并分析。

2.1 电磁模型的建立

为了仿真建模的方便,通过用直角矩形线圈去替代圆角矩形线圈,实际上这并不会引起太大的误差,整体精度误差基本可以控制在 1% 以内。本文建立的 Maxwell 电磁模型参数如表 1 所示。

表 1 Maxwell 电磁模型参数表

| 电磁模型 | DD/BP 磁耦合机构 (带金属异物) | DD/BP 磁耦合机构 (不带金属异物) |
|------------|---|---|
| DD 线圈自感 | 77.05 μH | 77.05 μH |
| BP 线圈自感 | 53.90 μH | 53.90 μH |
| 线圈线径 | 2 mm | 2 mm |
| 线圈匝数 | 10 | 10 |
| DD/BP 线圈间距 | 15 cm | 15 cm |
| 铁氧体 | 2 cm \times 50 cm \times 5 (条间间隔 2 cm) | 2 cm \times 50 cm \times 5 (条间间隔 2 cm) |
| 铁磁性金属异物尺寸 | 12 \times 8 \times 2 cm | 无 |

2.2 位置对线圈电气参数影响的理论分析

铁磁性金属异物如铁、钴等,相对磁导率远大于 1,相比于非铁磁性金属异物,其对线圈自身参数的影响程度很深且复杂。存在于磁场中的铁磁性金属异物产生的涡流远大于非铁磁性金属的涡流,一定方向的磁力线穿过铁磁性金属时,便可引发铁磁性金属磁畴的定向排列,产生较大的涡流效应,使原有磁场显著增强。当外加磁场加强时,铁磁性金属的磁化程度也愈加增高,直至饱和。对于 D 线圈,当铁磁性金属异物通过其正上方时,可以促使其产生更密集的磁力线。

而对于非铁磁性金属异物,其在电路模型中主要存在着涡流效应消耗此磁场能量的特性;对应在磁路模型中,当磁耦合机构中存在非铁磁性金属异物时,磁耦合机构的自感和互感都会下降,影响线圈间能量的传输,本文通过单一变量设置,在相同的实验情况下以非铁磁性金属异物做铁磁性金属异物仿真的对比。

1) 垂直移动

当铁磁性金属异物位于 D 线圈中央,在此位置的垂直移动都会使得线圈耦合程度增加,自感互感增大。随着铁磁性金属与线圈之间的距离增加,这种增量会逐渐的下降,线圈的自感以及线圈间的互感会逐渐逼近无异物时耦合模

型的自感互感参数。

当铁磁性金属异物位于两个 D 线圈的交界处,由于 DD 线圈的结构特性,铁磁性金属异物左侧的磁力线向下,右侧的磁力线向上,两种磁力线在铁磁性金属上引起的涡流效应相互抵消,使得此时副边线圈接收到的磁力线数量明显下降,线圈间的互感出现下降的现象。越是靠近副边线圈,DD 交界处的此时铁磁性金属越接近原边线圈,由于铁磁性金属的汇聚作用,原边线圈的自感会显著增大。

2) 水平移动

当铁磁性金属异物在水平移动时,先经过左侧 D 线圈中央,此时对线圈的自感和互感都有较为明显的增强;其后铁磁性金属异物经过 DD 线圈交界处,由于上述的涡流效应抵消,使得线圈间的互感明显减小;而异物移动到右侧线圈时对磁场的作用由对称性可以推测出跟左侧无异,会增强自感和互感,加强线圈的耦合。

3 电磁模型仿真结果分析

3.1 无金属异物时的仿真分析

本文利用 2.1 节中建立的电磁仿真模型,对无金属异物时 DD/BP 磁耦合机构的磁场进行仿真分析,如图 2 和 3 所示。

图 2 所示为 DD 原边线圈和 BP 副边线圈的耦合模型磁力线走向,从图 2 可以看出,左右 DD 线圈的正中心都是各自磁力线最密集的地方,其中左侧的磁力线朝下,右侧的磁力线朝上,使得 BP 线圈的左右侧 D 线圈产生相反的电势,而 DD 线圈反向串接正好使其同向化。

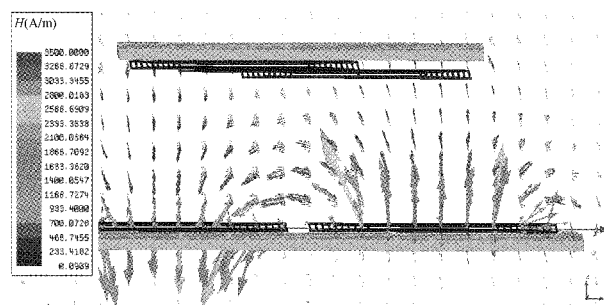


图 2 模型磁力线分析图

图 3 所示为 DD 原边线圈和 BP 副边线圈的耦合模型磁场强度分布,从图 3 可以获知,DD 线圈正上方的磁场强度阶梯曲线呈现马鞍形,即在同一个垂直高度上,位于左右两侧 D 线圈中央的磁场强度大于两 D 线圈交界处的磁场强度,意味着阻碍磁通流动的异物在两侧 D 线圈中央处的对线圈的电气参数影响更大。而且在垂直位置 150 mm 以内,随着不同的垂直位置副边线圈能够接收到的磁场强度有着显著的区别,线圈间距的大小很大程度的决定了互感值的大小。

3.2 金属异物水平移动仿真

以水平移动步长为 4 cm 研究铁磁性金属异物对磁耦

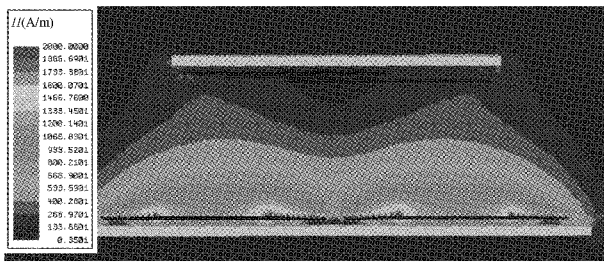
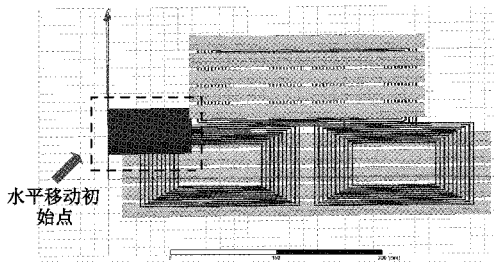


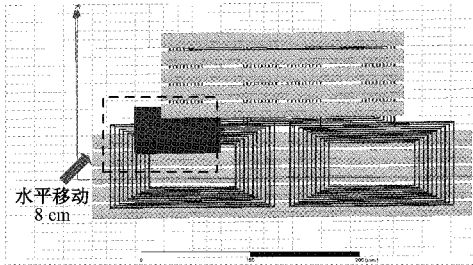
图 3 模型磁场强度分析图

合机构的影响,如图 4 所示,同时保持金属异物到两个线圈的垂直距离相同。

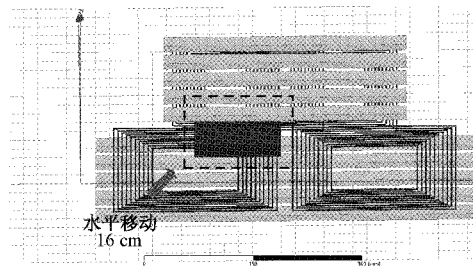
铁异物在水平移动的过程中,由于一定方向的磁力线穿过铁磁性金属时,便可引发铁磁性金属磁畴的定向排列,



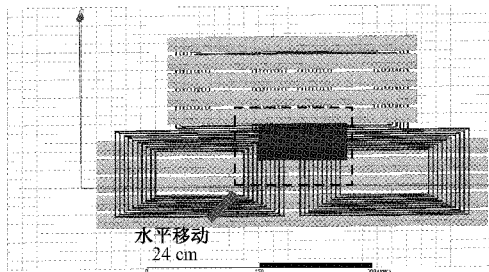
(a) 初始点



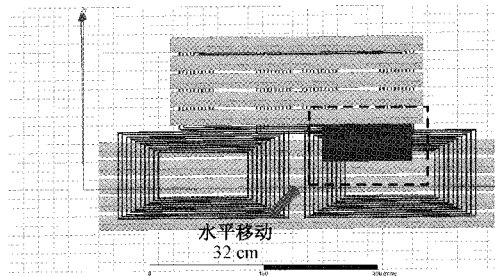
(b) 水平移动 8 cm



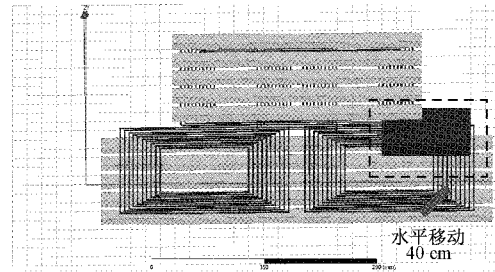
(c) 水平移动 16 cm



(d) 水平移动 24 cm



(e) 水平移动 32 cm



(f) 水平移动 40 cm

图 4 金属异物水平移动走向图

使原有磁场显著增强。所以一般结论上,铁氧体有助于提高线圈耦合模型的自感和互感。当铁磁性金属异物在 0~160 mm 或 320~480 mm 时,其处于 D 线圈的中心区域,通过其的磁力线都朝一个方向,能够引发铁磁性金属磁畴的定向排列。在此区域内原副边线圈的自感和互感都有了 1%~3% 的提升,这验证了铁磁性金属能够提高线圈的自感和互感,提高耦合系数的理论。

但是由于 DD 线圈的结构特殊性,原边线圈的两个 D 线圈产生相反的磁场,当铁异物经过两个 D 线圈的交界处时,两种相反方向的磁力线在铁异物中引起的磁畴定向排列相互抵消,不能使缘由磁场加强。在 D 线圈交界处的铁异物为回流的磁力线提供了低磁阻的导通回路,导致很大一部分磁力线未与副边线圈相交链就流回原边线圈,短路程低磁阻的磁力线导通回路使得线圈的自感大大增强,如图 5 所示。160~280 mm,原副边线圈自感均提升了 1% 左右,同时与副边线圈交链的磁力线数量变得少了,线圈互感下降了 26%。仿真实验的结果与理论相符,很好的验证了其准确性。而对于非铁磁性金属异物,其在任意位置都会使得磁耦合机构的自感和互感都会下降,影响线圈间能量的传输,而当其越靠近某一线圈时,该线圈的自感和互感下降量增大。

需要说明的是,铁磁性金属异物距离线圈的垂直距离越近,其对线圈自感的影响越大。

3.3 D 线圈交界处金属异物垂直移动仿真

DD 线圈的左侧 D 线圈中心和两个 D 线圈交界处是较为特殊的位置,铁磁性金属异物在这两个位置下造成的干扰区别较为显著。

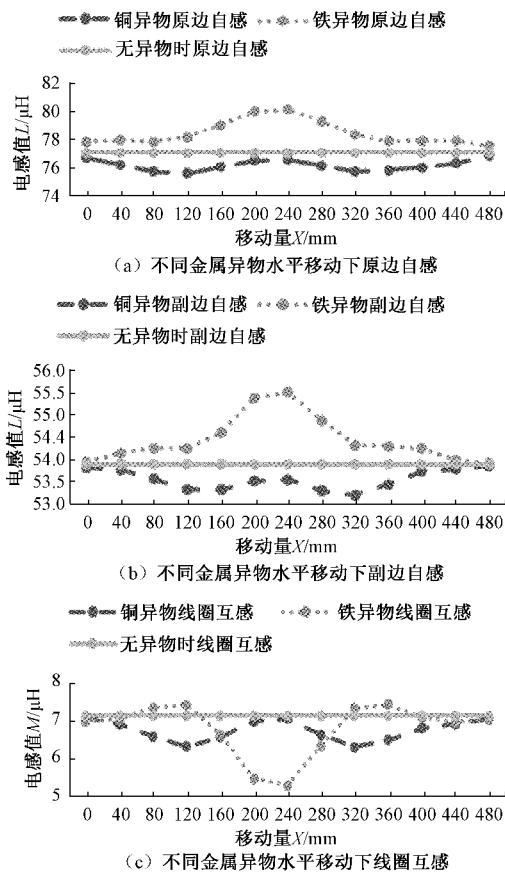


图5 水平移动下线圈自感和互感的变化

如图6所示,本节先以两个D线圈交界处的金属异物垂直移动为例,步长为2 cm,通过电磁仿真分析了铁磁性金属异物对线圈自感和线圈间互感的影响。



图6 D线圈交界处垂直移动走向图

如图7所示,当铁异物水平位置在两线圈交界处,铁异物靠近原边线圈时,原边线圈的自感上升了29.8%,随着

其垂直上升,原边线圈的自感下降,下降速度先快后慢;而副边线圈的自感处于上升状态,且速度越来越快,最终铁异物贴近副边线圈时,自感上升了27%。根据前面的推论,在DD线圈交界处,铁异物会严重降低线圈的互感。随着铁异物逐渐靠近副边线圈,线圈互感逐渐下降,与理论一致。对于非铁磁性金属异物,其在任意位置都会使得磁耦合机构的自感和互感都会下降,影响线圈间能量的传输,而当其越靠近某一线圈时,该线圈的自感和互感下降量增大,与理论一致。

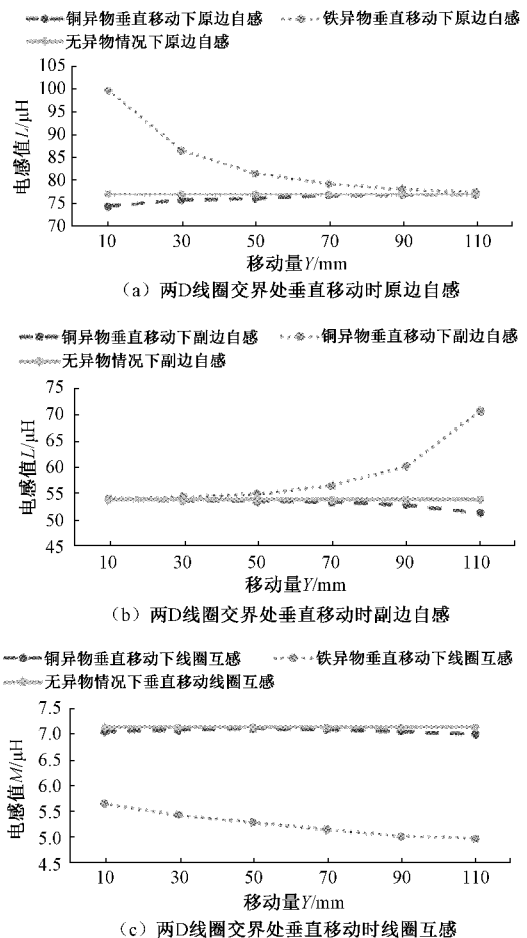


图7 两D线圈交界处垂直移动时线圈自感和互感的变化

3.4 左侧D线圈中心金属异物垂直移动仿真

如图8所示,本节以左侧D线圈中心处的金属异物垂直移动为例,步长为2 cm,通过电磁仿真分析了铁磁性金属异物对线圈自感和线圈间互感的影响。

如图9所示,当铁异物水平位置在左侧D线圈中心,铁异物在整个移动的过程中,原副边线圈的自感和线圈间的互感均高于无异物时的情况,且随着铁异物与线圈间的距离增加,这种影响会逐渐的减小,线圈的自感会逐渐逼近无异物时耦合模型的自感参数。

综上,可以分析得出铁磁性金属异物处于不同的水平

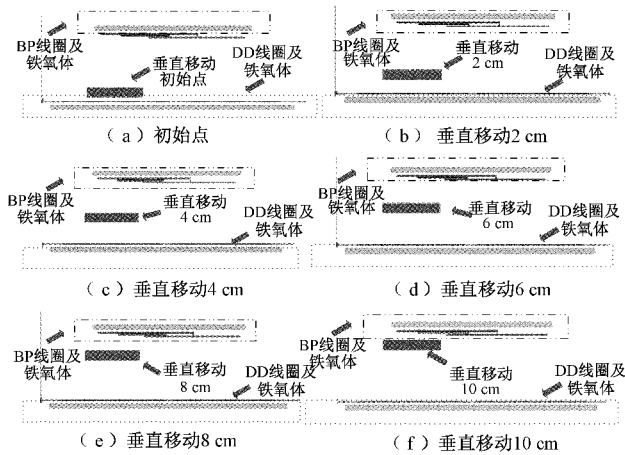


图 8 左侧 D 线圈中心垂直移动走向图

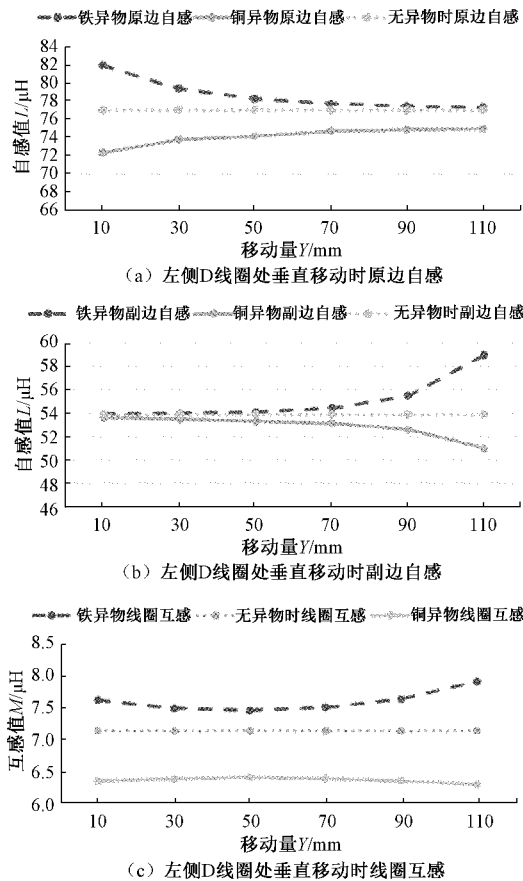


图 9 左侧 D 线圈中心垂直移动时线圈自感和互感的变化

和垂直位置时,对 DD/BP 线圈的影响差异显著。在水平移动或者垂直移动的过程中,具体的影响特性和趋势如表 2 所示。

仿真的数据与理论猜测相符合,验证了理论的合理性。

表 2 铁磁性金属异物在不同位置的影响特性与趋势

| 仿真结果 | 铁磁性金属异物 | 非铁磁性金属异物(对比) |
|------------------|--|---------------|
| 水平移动 | 处于 DD/BP 线圈两侧时会增大线圈自感和线圈间互感,而处于两 D 线圈交界处时会增大线圈自感并减小线圈间互感 | 会减小线圈自感和线圈间互感 |
| | 垂直移动(两 D 线圈交接处) | 会减小线圈自感和线圈间互感 |
| 垂直移动(左右 D 线圈中心处) | 增大线圈自感和线圈间互感 | 会减小线圈自感和线圈间互感 |

4 结 论

本文首先通过理论分析,初步分析了铁磁性金属异物处于 DD/BP 磁耦合机构中的不同水平位置和垂直位置时对 DD/BP 磁耦合机构的线圈自感和互感的影响情况,然后通过建立 Maxwell 电磁仿真模型的分析了 DD/BP 磁耦合机构的磁场特点,并对 3 种不同移动方式下铁磁性金属异物的影响效果进行了仿真分析,仿真结果表明铁磁性金属异物处于 DD/BP 线圈两侧时会增大线圈自感和线圈间互感,而处于两 D 线圈交界处时会增大线圈自感并减小线圈间互感;在垂直方向上铁磁性金属异物越靠近线圈对相应线圈的自感的影响越大,越靠近任意线圈对线圈间的互感影响越大。本文为铁磁性金属异物在磁耦合机构中影响的量化分析提供了方法指导,为优化磁耦合 WPT 系统并采取相应控制手段主动抑制金属异物对磁耦合 WPT 系统做了铺垫。但由于篇幅的限制,只说明了 DD/BP 中存在铁磁性金属异物时的量化分析,也未做系统外面的金属异物的影响分析,同时对该系统的量化计算也是未来前进的方向。

参 考 文 献

- [1] JIANG C Q, CHAU K T, LIU C H, et al. Wireless dc motor drives with selectability and controllability[J]. Energies, 2017, 10(1), DOI: 10.3390/en10010049.
- [2] ZHANG Z, CHAU K T, LIU C H, et al. An efficient wireless power transfer system with security considerations for electric vehicle applications [J]. Journal of Apply Physics, 2014, 115(17):17A328.
- [3] JIANG C, CHAU K T, CHING T W, et al. Time-

- division multiplexing wireless power transfer for separately excited dc motor drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11), DOI: 10.1109/TMAG.2017.2695656.
- [4] BUDHIA M, COVIC G, BOYS J. A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems[C]. IECON 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, 2010: 2487-2492.
- [5] BUDHIA M, COVIC G, BOYS J. Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3096-3108.
- [6] BUDHIA M, BOYS J, COVIC G, et al. A development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle ipt charging systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.
- [7] BOYS J, COVIC G. The inductive power transfer story at the university of Auckland[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2015, 15(2): 6-27.
- [8] ZAHEER A, KACPRZAK D, COVIC G. A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, 2012: 283-290.
- [9] CHOI S Y, HUH J, WOO Y L, et al. Asymmetric coil Sets for wireless stationary EV chargers with large lateral tolerance by dominant field analysis[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2014, 29(12): 6406-6420.
- [10] 马中原, 廖承林, 王丽芳. 金属异物对电动汽车无线充电系统影响分析[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2): 14-20.
- [11] ZHANG P C, YANG Q X, ZHANG X, et al. Comparative study of metal obstacle variations in disturbing wireless power transmission system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-4.
- [12] 沈栋, 杜贵平, 丘东元, 等. 无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2855-2869.
- [13] 陈琛. 谐振式无线电能传输系统的若干电磁问题研究及优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [14] 李川, 张宝强, 王朝晖, 等. 电动汽车无线充电系统异物检测技术[J]. 汽车电器, 2021, 6: 13-16.
- [15] 陈琛, 黄学良, 谭林林, 等. 电动汽车无线充电时的电磁环境及安全评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 61-67.
- [16] 陈陆韦, 刘泽军. 电动汽车的无线充电控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(24): 46-50.

作者简介

周润棠, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: runtangz@163.com

杜贵平, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为大功率电能变换技术研究。

E-mail: gpdu@scut.edu.cn

沈栋, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: az353787845@vip.qq.com