

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.025

含金属异物的无线充电系统场域等效建模分析

苏文博¹, 王维¹, 吕晓飞², 窦真兰³, 王劼杰²

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要:无线充电系统中,电能传输遵循发射线圈和接收线圈之间的磁耦合关系。当发射线圈和接收线圈之间存在金属异物时,异物的涡流或聚磁效应将会影响无线充电系统的传输性能与运行稳定性,严重时还会危害充电安全。为了厘清不同材质金属异物对无线充电系统性能的影响机理,有效分析异物的影响规律,迫切需要一种精确的金属异物建模方法,提高金属异物的检测精度。为此,文中计及金属的材质、位置、等效面积等关键因素,提出一种金属异物场域等效建模方法,通过构造金属异物影响下的无线充电系统耦合方程,对比得到异物引入前后发射线圈电流和接收线圈电流间的相位差表达式。在此基础上,进一步提出了铁磁性金属与非铁磁性金属的等效线圈模型及其参数配置方法,可精确得到金属异物介入条件下的电流相位差值。最终通过仿真与实验验证了建模方法的准确性与有效性,为无线充电系统中引入金属异物的特性分析与在线检测提供了一种新思路。

关键词:无线充电;异物检测;金属异物;数值计算;场域建模;相位分析

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0226-07

0 引言

无线充电快捷、安全,对于现代“智能化”社会的发展具有重要意义,受到越来越多科技工作者的关注^[1-4]。在无线充电过程中,存在于传输场域内的金属异物对无线充电的效率影响极大^[5-6],主要表现为2个方面:(1)非铁磁性金属会屏蔽发射线圈产生的传输磁场,降低磁场均匀度与磁通密度;(2)铁磁性金属虽然有利于磁场的增强,但其自身将产生较多的热量损耗,间接降低系统的传输效率。因此,无线充电系统的鲁棒性与商用化要求对其传能过程中场域内的金属检测目标提出了迫切的需要。

目前,已有学者提出设计相关激励源来获取多谐波并进行金属检测的方法^[7-8]。通过对检测线圈中的多谐波进行频域和时域分析可以得出金属有无铁磁性材料成分,相较于传统的单谐波检测,该方法准确率更高,但应用场合较单一,仅适用于检测铁磁性金属异物。标准正交化模型常用于磁场计算,不仅可以通过对磁源的逆向求解来识别目标并生成特征模型^[9],还可以通过检测特定金属的频谱^[10]来进行金属识别,检测结果准确,检测方法较传统检测技术更具有竞争力,但该方法需要大量的数据采样点才能保证数据裕度,进而提高异物检测

的准确度。相较于增加检测机构来获取系统是否存在金属异物,磁耦合技术^[11-12]既是无线充电的关键技术基础之一,也可作为金属异物检测方法的重要理论组成。将激励线圈设计为网状结构,在保证电能无线传输的同时还可以辅助检测金属异物的存在^[13-15],检测方法简单易行,可以快速定位金属所在区域,并且对传输能量的损耗影响较小,但该方法在金属异物的分类识别上仍有欠缺;通过金属在磁场中引发的特性变化,可以定位金属所在位置^[16-19],但在金属体积大小等相关参数的检测上还有待提高^[20-21]。除此之外,平衡线圈^[22-23]、有限元仿真^[24]、不同的机械学习算法^[25]也作为探索的不同方式被用于金属检测,但是对金属的分类都存在欠缺。

文中提出一种基于磁场计算的金属建模方法,通过分析铁磁性金属和非铁磁性金属在充电系统中的场域特性,使用等效线圈模型替代金属物理模型,将金属模型转化为可计算的线圈模型。等效线圈在充电系统中的场域外特性与金属异物相匹配,二者外特性基本相等。文中提供的金属异物等效建模方法基于传统仿真建模方法提供了一条基于数值计算的等效模型新思路,为磁耦合无线充电系统中的金属异物检测技术的研究和发展提供了理论基础和方法指导。

1 含金属异物的无线充电系统建模分析

金属异物可以分为铁磁性金属和非铁磁性金

收稿日期:2022-10-23;修回日期:2022-12-19

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“基于混合储能的电动船舶岸电与互动技术研究”(52094021N00R)

属,其中前者对磁场的外特性主要为聚合作用,能够增强金属附近的磁场强度,而后者对磁场主要为屏蔽反射作用,会减弱发射线圈传输的磁场大小。

1.1 金属场域特性等效分析

金属异物介入无线充电系统后,无线充电系统传输功率及传输效率会发生波动,且发射及接收线圈上电流相位会产生偏移。这一现象出现一方面是因为铁磁性金属对充电场域起到磁聚合的作用,另一方面则是因为非铁磁性金属对充电场域起到屏蔽的作用。这一现象与单中继系统里因中继线圈失谐而引发的系统传输功率、效率波动及电流相位偏移现象相似,因此可将金属等效为小型的中继线圈代入系统模型中进行计算。

由于金属异物介入无线充电系统时通常紧贴发射线圈表面,因此将金属等效为与接收线圈无物理连接的中继线圈。可通过对线圈的匝数、线径、谐振电容等参数设置未知量,进行方程组求解以获得等效线圈参数。

1.1.1 无线充电系统中的金属线圈等效模型

金属异物在无线充电系统中的等效线圈模型如图1所示。该等效线圈模型可以直观地将金属等效成可以计算的小型中继线圈^[26],帮助整体磁场进行数值分析。图1中, h_1 为发射线圈与接收线圈之间的距离; R 为线圈内径。

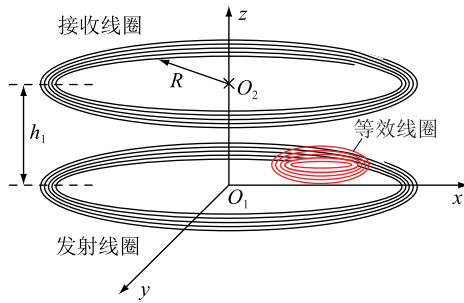


图1 金属介入的无线充电系统模型

Fig.1 Model of wireless charging system with metal intervention

1.1.2 数学模型建立

对等效线圈模型中的各线圈回路进行数学建模并标定参数。为模拟实际中金属异物紧贴发射线圈的情况,只考虑等效线圈与发射线圈之间存在互相影响,忽略等效线圈与接收线圈之间的联系,建立串联谐振等效模型,如图2所示。

图2中, R_T 、 R_R 、 R_0 、 R_L 分别为发射线圈、接收线圈、等效线圈、等效负载的内阻; M' 、 M_{T0} 分别为发射线圈与接收线圈之间的互感、发射线圈与等效线圈之间的互感; L_T 、 L_0 、 L_R 分别为发射线圈、等效线圈、接收线圈上串联的谐振电感; C_T 、 C_0 、 C_R 分别为发射

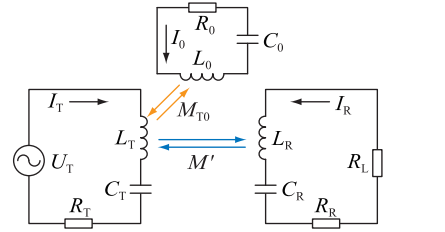


图2 金属介入的无线充电系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of wireless charging system with metal intervention

线圈、等效线圈、接收线圈上串联的谐振电容^[27-28]; U_T 为发射线圈上的电源电压; I_T 、 I_0 、 I_R 分别为发射线圈、等效线圈、接收线圈上的电流。等效线圈和接收线圈无物理连接,根据松耦合变压器模型可列写三线圈耦合方程^[29-30],即式(1),其中 ω 为角频率。

$$\begin{bmatrix} R_T & j\omega M' & j\omega M_{T0} \\ j\omega M' & R_R & 0 \\ j\omega M_{T0} & 0 & R_0 + j\omega L_0 + 1 \\ & & j\omega C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_R \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过该方程,可以计算得到发射线圈及接收线圈回路中的电流大小。

$$\begin{cases} I_T = \frac{U_T (R_0 R_R + R_R / \omega C_0 + j\omega R_R L_0)}{R_R \omega M_{T0}^2 + (R_0 + 1/\omega C_0 + j\omega L_0) [R_R R_T + (\omega M')^2]} \\ I_R = \frac{U_T (-jR_0 \omega M' - j\omega M' / \omega C_0 + \omega L_0 \omega M')}{R_R \omega M_{T0}^2 + (R_0 + 1/\omega C_0 + j\omega L_0) [R_R R_T + (\omega M')^2]} \end{cases} \quad (2)$$

简化该方程后将电流表达式写作复相量形式:

$$\begin{cases} \dot{I}_T = \left\{ \frac{R_R U_T \{ R_R [R_T (A^2 + B) + AD] + (A^2 + B) E^2 \}}{F + 2R_R [R_T (A^2 + B) + AD] E^2 + (A^2 + D) E^4}, \right. \\ \left. j \frac{R_R^2 U_T \omega^2 L_0 M_{T0}^2}{\omega L_0^2 (R_R R_T + E^2)^2 + \left[R_R \omega M_{T0}^2 + \left(R_0 + \frac{1}{\omega C_0} \right) (R_R R_T + E^2) \right]^2} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_R = \left\{ \frac{R_R U_T \omega^2 L_0 M_{T0}^2 E}{\omega L_0^2 (R_R R_T + E^2)^2 + \left[R_R \omega M_{T0}^2 + \left(R_0 + \frac{1}{\omega C_0} \right) (R_R R_T + E^2) \right]^2}, \right. \\ \left. j \frac{U_T E \{ R_R [R_T (-A^2 - B) - AD] - (A^2 + B) E^2 \}}{F + 2R_R [R_T (A^2 + B) + AD] E^2 + (A^2 + B) E^4} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} A = 1 + R_0 \omega C_0 \\ B = \omega^2 C_0^2 L_0^2 \\ D = \omega^2 C_0^2 M_{T0}^2 \\ E = \omega M' \\ F = R_R^2 [R_T^2 (A^2 + B^2) + 2R_T AD + D^2] \end{cases} \quad (5)$$

联立式(3)和式(4),求解2个复相量之间的

夹角:

$$\theta = \arccot \left(\frac{R_R^2 [R_T (A^2 + B) + AD]}{R_R^2 \omega L_0 D - R_R [R_T (A^2 + B) + D] E - (A^2 + B) E^3} + \frac{R_R \omega^2 M' [L_0 C_0 D + M' (A^2 + B)]}{R_R^2 \omega L_0 D - R_R [R_T (A^2 + B) + D] E - (A^2 + B) E^3} \right) \quad (6)$$

式(6)中发射、接收线圈相关的互感以及电流、电阻数据可通过仿真得到,但仍存在等效线圈的内阻以及自感等未知数据,因此须对等效线圈的相关数值进行进一步的等效计算。由聂依曼公式^[31]可得到发射线圈与等效线圈之间的互感计算公式为:

$$M_{T0} = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} dx \times \int_0^{2\pi} \frac{R_1 R_2 (\sin x \sin y + \cos x \cos y) dy}{\sqrt{(R_1 \cos x + R_2 \cos y)^2 + (R_1 \sin x - R_2 \sin y - C_{12})^2 + h_{12}^2}} \quad (7)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为等效线圈、发射线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; R_1 、 R_2 分别为等效线圈、发射线圈半径; C_{12} 、 h_{12} 分别为发射线圈与等效线圈的水平距离、垂直距离。由式(7)可以计算等效线圈和发射线圈之间的互感大小,并且在该设定下还可求得等效线圈的自感大小,将该数据代入式(6)进行验证,若满足等式关系,则可确定该等效线圈模型与金属在充电系统中的场域特性基本一致,金属建模准确。

1.2 等效线圈场域特性分析

从式(7)可以看出,匝数与互感大小呈线性关系,在偏移位置相同的情况下影响互感变化的主要因素是等效线圈匝数。接入无线充电系统的等效线圈相同时,影响发射线圈及接收线圈电流相位的主要因素是等效线圈并联的谐振电容值,因此须着重对这些变量进行分析。

1.2.1 等效线圈匝数对充电系统场域特性影响

在对金属进行等效建模时,金属介入无线充电系统中的相对面积是其导致无线充电系统功率、效率发生波动及相位出现偏移的重要因素。如图3所示,等效线圈发生轻微位置偏移时已出现等效线圈与发射线圈互感大幅下降现象。

为使等效结果尽可能精准,文中将介入无线电能传输系统的金属异物等效为与其单侧表面积相同的圆形线圈。这一圆形线圈采用一对线径、线圈半径、匝数相同的线圈,将其同名端相连后即可在介入无线充电系统的等效线圈面积不变的情况下获得更大的线圈自感,从而矫正大幅降低的互感。

1.2.2 谐振电容对等效线圈场域特性影响

确定等效线圈参数后,将其介入无线充电系统,唯一影响无线充电系统性能的是等效线圈的串

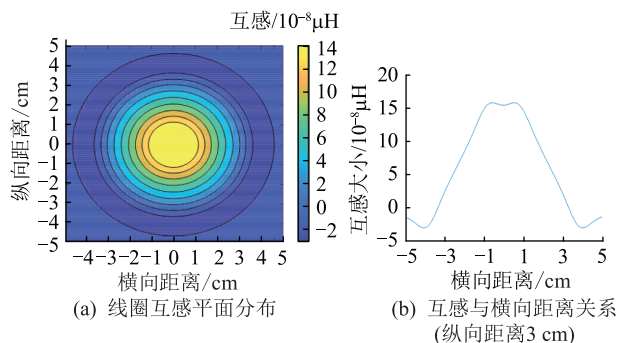


图3 等效线圈偏移条件下的幅频相角

Fig.3 Amplitude-frequency phase angle under equivalent coil migration

联谐振电容。改变谐振电容值即改变等效线圈的谐振频率,从而改变无线充电系统功率、效率及发射线圈与接收线圈上电流相位的偏移。式(6)、式(7)联立的分析结果如图4所示。

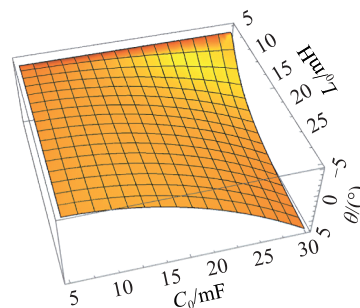


图4 谐振电容和自感对电流相位差影响

Fig.4 Influence of resonant capacitance and self-inductance on current phase difference

由图4可知,改变等效线圈的电感与其谐振电容均能改变发射与接收线圈上电流的相位差。这一特性与铁磁性或非铁磁性金属介入无线充电系统中,磁场受到聚合或屏蔽的现象一致。通过这一现象可以肯定的是,在提供表面积与金属异物相等且自感足够大的等效线圈时,改变其谐振电容即可对不同性质金属介入无线充电系统进行等效,而具体效果则由发射线圈与接收线圈上电流的相位差进行表征。

2 仿真结果分析与建模

在得到理论分析方法后,对系统相关指标进行仿真,可以通过电磁仿真软件得到发射线圈与接收线圈之间的互感大小、发射线圈与接收线圈的电阻大小以及发射线圈与接收线圈回路中的电流大小。

在电磁仿真软件中,考虑到计算简便性,发射线圈与接收线圈的尺寸设计成相同参数,同时将等效线圈面积、厚度与金属异物设置为相同大小。仿真参数如表1所示,金属材质为铁氧体和铝板。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---------------------|------|-----------------|------|
| 发射线圈内径/cm | 3.8 | 接收线圈内径/cm | 3.8 |
| 发射线圈外径/cm | 13 | 接收线圈外径/cm | 13 |
| 发射线圈线径/cm | 0.25 | 接收线圈线径/cm | 0.25 |
| 发射线圈匝数 | 18 | 接收线圈匝数 | 18 |
| 发射线圈和接收线圈之间的垂直距离/cm | 2.3 | 金属距离发射线圈平面高度/cm | 0.01 |
| 金属半径/cm | 2.7 | 系统工作频率/kHz | 85 |
| 金属厚度/cm | 2 | | |

将表 1 中相关数据代入电磁仿真软件中建模仿真可以得到模型图,并与相同面积及厚度的金属异物接入无线电能传输系统模型进行对比,如图 5 所示。仿真结果见表 2。

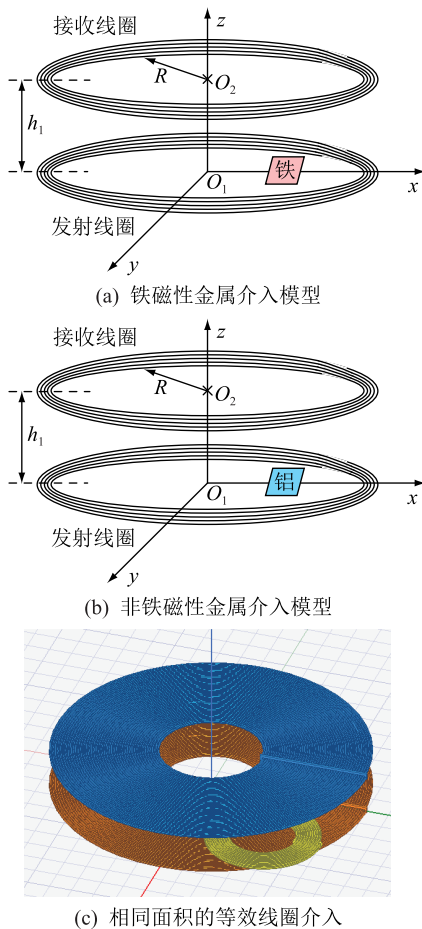


图 5 电磁仿真软件中的系统模型

Fig.5 System model in electromagnetic simulation software

将图 5 中等效线圈模型接入联合仿真拓扑,如图 6 所示。

比对仿真中发射线圈与接收线圈上电流的相位差,如图 7 所示。图中, θ 为发射线圈与接收线圈上电流的相位差,通过改变等效线圈上的谐振电容

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

| 参数 | 数值 |
|-------------------------------|-------|
| 发射线圈回路中的电流/mA | 400 |
| 发射线圈内阻/ Ω | 0.350 |
| 接收线圈内阻/ Ω | 0.262 |
| 发射线圈与接收线圈之间的互感/ μH | 254 |

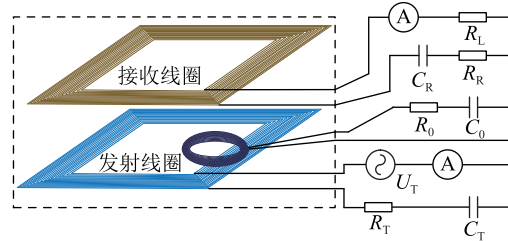


图 6 联合仿真模型

Fig.6 Co-simulation model

大小即可调整发射线圈与接收线圈上电流的相位差。当谐振电容为 $2 \mu\text{F}$ 时,接收线圈上电流相位相较于发射线圈电流相位超前 18.3° ;当谐振电容为 24 nF 时,接收线圈上电流相位相较于发射线圈电流相位滞后 38° ,这与前文基于金属介入的等效分析结果基本一致。这一仿真结论充分说明,在发射线圈与接收线圈间加入与金属异物相同面积的双层线圈并配置谐振电容即可模拟不同材质金属介入无线电能传输系统带来的影响。

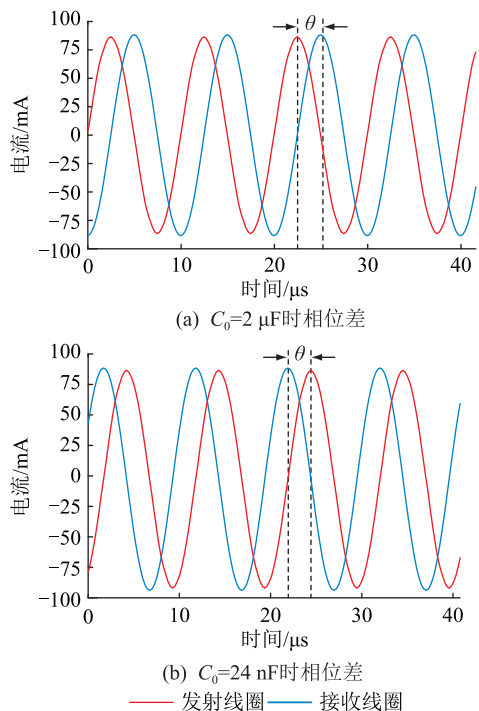


图 7 电磁仿真软件中的电流相位差

Fig.7 Current phase difference in electromagnetic simulation software

3 样机搭建与测试

得到相关理论和仿真验证后,文中设计了一套金属检测样机进行实验验证。样机组成包括由高频逆变电源、发射线圈与接收线圈组成的无线充电装置一套以及电流检测装置,具体如图 8 所示。

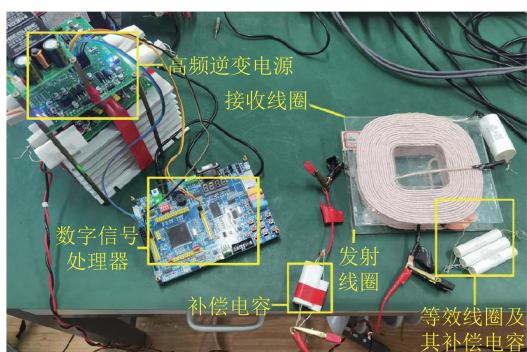


图 8 样机模型

Fig.8 Prototype model

相同面积与厚度的铁磁性、非铁磁性金属介入无线充电系统后电流相位差如图 9 所示。

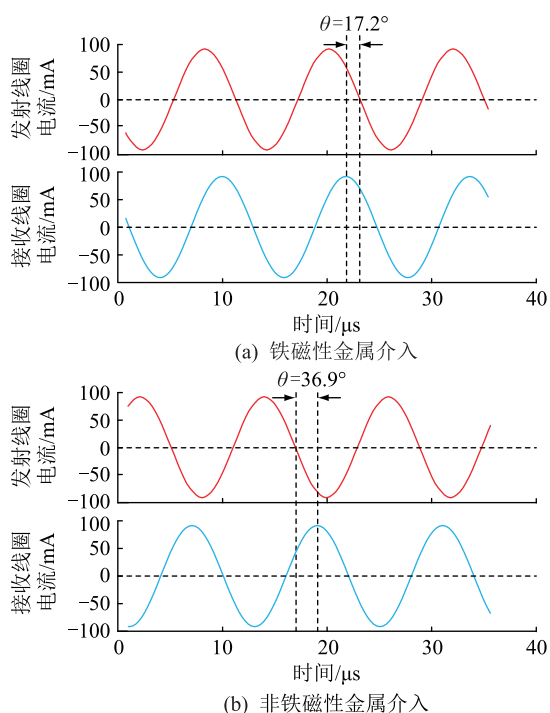


图 9 不同性质金属介入后的电流相位差

Fig.9 Current phase difference after metal intervention with different properties

从图 9 可以看出,铁磁性金属介入后,接收线圈上电流相较于发射线圈上电流出现了相位超前现象,超前角为 17.2° ;而非铁磁性金属介入后,接收线圈上电流相较于发射线圈电流出现了相位滞后现象,滞后角为 36.9° 。这与前文金属介入的影响分析结果一致。

加入串联不同谐振电容的等效线圈后电流相位差如图 10 所示。

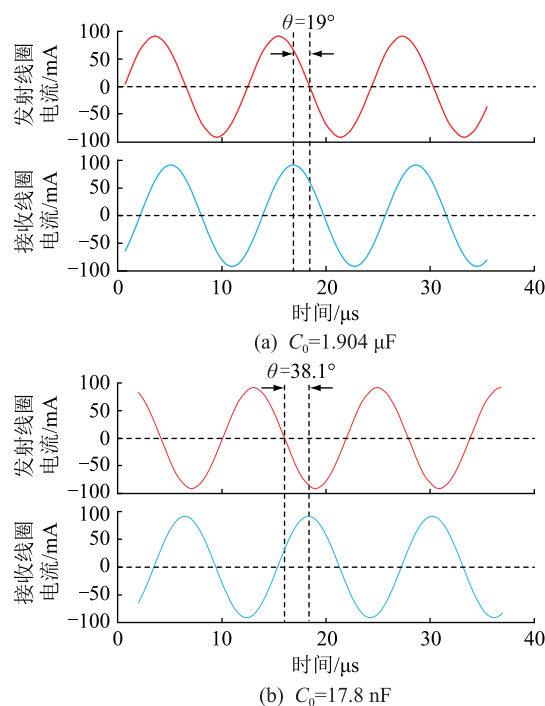


图 10 不同谐振电容下的电流相位差

Fig.10 Current phase difference under different resonant capacitance values

由图 10 可发现,不同谐振电容与相同面积、不同材质的金属介入无线充电系统中带来的相位误差误差不超过 5%。谐振电容为 $1.904 \mu\text{F}$ 时相位差偏移为超前 19° ,而谐振电容为 17.8 nF 时相位差偏移为滞后 38.1° 。这一实验结果与仿真中加入等效线圈后的相位偏移保持一致,且电容取值偏差不超过 3%。因而将无线电能传输系统中介入金属异物等效为线圈并分析其影响的理论成立。

4 结论

文中研究了一种金属异物介入下的无线充电系统场域建模及分析方法,通过物理模型与数学模型相结合的手段,面对金属异物介入无线充电系统的情况,实现金属异物的准确识别,为无线充电系统的优化设计提供参考。主要结论如下:

(1) 无线充电系统中,发射线圈与接收线圈之间介入金属异物时,接收线圈电流相位相对于发射线圈将产生偏移,且金属异物材质、介入位置、介入面积等变化时,电流相位偏移度也会发生改变。经过仿真和实验验证,金属异物特性和介入条件对发射线圈与接收线圈间电流相位造成的影响可通过数值计算即电流相位偏移度来表示。

(2) 在金属介入无线充电系统的场域模型中,

可采用表面积与介入金属的面积相等且自感足够大的等效线圈进行类比,将金属异物物理模型转换成可高效计算的磁耦合线圈模型。通过改变等效线圈的匝数、介入位置、谐振电容可实现等效线圈在充电系统中的场域外特性与金属异物相匹配,在不损失精度的前提下降低无线充电系统金属异物介入后的场域仿真分析复杂度。

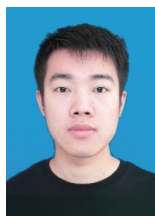
文中在等效建模的过程中进行了一定程度的简化处理,在后续研究中将建立考虑多重实际因素影响的模型,并在文中研究基础上进一步研究如何主动抑制金属异物对无线电能传输系统的影响。

参考文献:

- [1] 江炳蔚,魏斌,何浩,等. 磁耦合谐振式无线电能传输技术在电力系统中的应用[J]. 发电技术,2022,43(1):32-43.
JIANG Bingwei, WEI Bin, HE Hao, et al. Application of magnetic coupling resonance wireless power transfer in power system [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 32-43.
- [2] 谢哲慧,夏能弘. 基于磁路模型的新型半包围磁芯结构设计及优化[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):193-201.
XIE Zhehui, XIA Nenghong. Design and optimization of a novel semi-enclosed core structure based on magnetic circuit models [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 193-201.
- [3] 彭桂喜,吴玉龙,袁思遥,等. 变电站物联网系统的无线取电供电方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):181-189.
PENG Guixi, WU Yulong, YUAN Siyao, et al. Research on wireless power supply method of Internet of Things system in substations [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 181-189.
- [4] 方艺翔,张宇华,赵晓轲,等. 一种宽负载高效率磁耦合谐振式无线输电逆变器设计[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(2):209-216.
FANG Yixiang, ZHANG Yuhua, ZHAO Xiaoke, et al. Wide load and high efficiency power inverter design applied to magnetically coupled resonant wireless transmission [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 209-216.
- [5] 温明森. 金属异物对无线功率发射器温升的影响[J]. 电子产品世界,2021,28(4):73-75.
WEN Mingsen. The influence of metal foreign body on the temperature rise of wireless power transmitter [J]. Electronic Engineering & Product World, 2021, 28(4): 73-75.
- [6] 钟汝莹. 电动汽车无线充电系统金属影响特性分析及共存干扰问题研究[D]. 南京:东南大学,2021.
ZHONG Ruying. Research on metal influence characteristics and coexistence interference in wireless charging system of electric vehicle [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [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):715-728.
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): 715-728.
- [8] 王跃跃,夏能弘. 应用于无线电能传输系统的金属异物三级定位检测系统设计[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):205-212.
WANG Yueyue, XIA Nenghong. A design of three-stage location and detection system for the metallic foreign body applied in the wireless power transfer system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 205-212.
- [9] 吴昕,何小斌,蓝建宇,等. 基于螺线方程的MCR-WPT系统线圈设计[J]. 电源学报,2021,19(5):75-82.
WU Xin, HE Xiaobin, LAN Jianyu, et al. Coil design for MCR-WPT system based on spiral equation [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 75-82.
- [10] 任秉银,汤欣宁,马云辉. 电动汽车无线充电金属异物检测线圈电磁特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(7):35-42.
REN Bingyin, TANG Xinning, MA Yunhui. Electromagnetic characteristics of metal foreign object detection coil in wireless charging system of electric vehicle [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(7): 35-42.
- [11] 张振丽. 电动汽车动态无线充电技术[J]. 中国科技信息,2022(10):78-80.
ZHANG Zhenli. Dynamic wireless charging technology for electric vehicles [J]. China Science and Technology Information, 2022(10): 78-80.
- [12] 李阳,石少博,刘雪莉,等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报,2021,36(S2):389-403.
LI Yang, SHI Shaobo, LIU Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 389-403.
- [13] 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.
LI Chuan, ZHANG Baoqiang, WANG Zhaohui, et al. Foreign object detection technology in electric vehicle wireless power transfer system [J]. Auto Electric Parts, 2021(6): 13-16.
- [14] 张献,邢子瑶,薛明,等. 无线电能传输系统异物检测技术研究综述[J]. 电工技术学报,2022,37(4):793-807.
ZHANG Xian, XING Ziyao, XUE Ming, et al. Overview of foreign object detection in wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 793-807.
- [15] 杜凯,朱国荣,陆江华,等. 电动汽车无线充电系统金属异物检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(1):56-62,74.
DU Kai, ZHU Guorong, LU Jianghua, et al. Metal object detection method in wireless electric vehicle charging system [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(1): 56-62, 74.
- [16] BAI S Z, BAI Y H. High precision algorithm of metal detector based on balance coil [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju,

- Korea (South). IEEE,2018:684-687.
- [17] SVATOŠ J, VEDRAL J, POSPISIL T. Advanced instrumentation for polyharmonic metal detectors[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2016, 52(5):1-4.
- [18] BIJAMOV A, FERNÁNDEZ J P, BARROWES B E, et al. Camp butner live-site UXO classification using hierarchical clustering and Gaussian mixture modeling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8):5218-5229.
- [19] 周润棠, 杜贵平, 沈栋. 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[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17):19-25.
- ZHOU Runtang, DU Guiping, SHEN Dong. Research on the influence of ferromagnetic metal foreign body on DD/BP magnetic coupling mechanism[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(17):19-25.
- [20] SHUBITIDZE F, O'NEILL K, SHAMATAVA I, et al. Fast and accurate calculation of physically complete EMI response by a heterogeneous metallic object[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(8):1736-1750.
- [21] PATIL D, MCDONOUGH M K, MILLER J M, et al. Wireless power transfer for vehicular applications; overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1):3-37.
- [22] 孙冬, 高子宸, 韩晓娟, 等. 基于平面线圈阵列的电动汽车无线充电金属异物检测方法研究[J/OL]. 电测与仪表:1-8 [2022-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220602.2114.015.html>.
- SUN Dong, GAO Zichen, HAN Xiaojuan, et al. Metal object detection for wireless charging of electric vehicles using planar coil array[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8 [2022-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220602.2114.015.html>.
- [23] 唐春森, 钟良亮, 吴新刚, 等. 基于阻抗特性的电动汽车无线充电系统异物检测方法[J]. 电气技术, 2018, 19(6):7-13.
- TANG Chunsen, ZHONG Liangliang, WU Xingang, et al. Foreign objects detection method based on impedance characteristics for EV wireless charging systems[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(6):7-13.
- [24] 徐翀, 王松岑, 郭伟健, 等. 应用于电动汽车无线充电系统的金属材料屏蔽结构研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(5):9-11, 15.
- XU Chong, WANG Songcen, GUO Weijian, et al. Research on metal shielding structure applied to electric vehicle wireless charging system[J]. Electrical Automation, 2020, 42(5):9-11, 15.
- [25] 余程龙, 李丕丁. 电解质溶液中微小金属检测算法实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15):44-50.
- YU Chenglong, LI Piding. Implementation of algorithm for detection of tiny metal in electrolyte solution[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15):44-50.
- [26] 徐妍, 王成亮, 李军, 等. 多中继线圈无线电能传输系统的交叉解耦研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(1):40-42.
- XU Yan, WANG Chengliang, LI Jun, et al. Research on cross-decoupling of wireless power transfer system with multirelay coils[J]. Power Electronics, 2022, 56(1):40-42.
- [27] 翟千庆, 秦玉伟. 电动小车无线充电系统[J]. 电子设计工程, 2022, 30(10):27-30, 35.
- ZHAI Qianqing, QIN Yuwei. Electric car wireless charging system[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(10):27-30, 35.
- [28] 郭星, 刘利强, 齐咏生, 等. 基于 LCL-LCL/S 混合自切换谐振式无线充电系统[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10):2422-2434.
- GUO Xing, LIU Liqiang, QI Yongsheng, et al. Hybrid self-switching resonant wireless charging system based on LCL-LCL/S[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2422-2434.
- [29] 王宇, 龚国庆. 磁耦合谐振式无线电能传输系统三线圈结构研究[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):92-96.
- WANG Yu, GONG Guoqing. Research on the three-coil structure of magnetically coupled resonant wireless power transmission system[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2021, 36(3):92-96.
- [30] 陈庆彬, 杨丰钢, 陈为. 具有可变增益恒压特性的三线圈 WPT 系统补偿网络结构及参数确定新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6):2277-2289.
- CHEN Qingbin, YANG Fenggang, CHEN Wei. A new compensation network structure and parameter determination method with variable constant voltage gain characteristics based on three-coil WPT system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2277-2289.
- [31] 张存. 基于电磁平衡原理的电动汽车无线充电高精度定位技术研究[D]. 南京:南京师范大学, 2021.
- ZHANG Cun. Research on high-precision positioning technology of electric vehicle wireless charging based on electromagnetic balance principle[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.

作者简介:



苏文博

苏文博(1999),男,硕士在读,研究方向为环境取能技术(E-mail:suwenboo@126.com);

王维(1988),男,博士,副教授,通讯作者,研究方向为无线电能传输技术;

吕晓飞(1986),男,硕士,研究员级高级工程师,从事全控型电力电子器件相关工作。

(下转第 249 页)

Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable

FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, OUYANG Benhong, ZHAO Jiankang
(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ablation failures of buffer layer in high voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables occur frequently, which has attracted widespread attention in the industry. The optimization of cable structure is conducive to solving the problem of discharge ablation. From the perspective of the discharge burn mechanism of buffer layer, the finite element model of cable is established for electric field simulation to analyze and discuss the variation of air gap electric field distribution under different structural parameters, thus designing and studying the structure optimization scheme. The results show that, on the premise of satisfying the design requirements of cable, it is beneficial to reduce the air gap electric field distortion because of poor contact, by reducing the thickness of the buffer layer and corrugated depth, as well as increasing extrusion depth between the metal sheath and the buffer layer. The smooth aluminum sleeve structure has low contact resistance with the buffer layer, so it has advantages in restraining fault of buffer layer discharge ablation.

Keywords: cable buffer layer; discharge burns; electric field distribution; cross-linked polyethylene (XLPE); structure improvement; smooth aluminum sheath

(编辑 李栋)

(上接第 232 页)

Field equivalent modeling analysis of wireless charging system with metal foreign objects

SU Wenbo¹, WANG Wei¹, LYU Xiaofei², DOU Zhenlan³, WANG Jiemin²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: In the wireless charging system, the power transmission follows the magnetic coupling relationship between the transmitting coil and receiving coil. When there are metal foreign objects between the transmitting coil and receiving coil, the eddy current effect or magnetic focusing effect of the foreign objects will affect the transmission performance and operational stability of the wireless charging system, and in severe cases, it can also endanger charging safety. In order to clarify the influence mechanism of metal foreign objects with different materials on the performance of wireless charging system and effectively analyze the influence law of foreign objects, an accurate modeling method of metal foreign objects is urgently needed to improve the detection accuracy of metal foreign objects. Therefore, an equivalent modeling method of metal foreign objects field is proposed, taking into account the key factors of metal material, location, equivalent area and so on. By constructing the coupling equation of wireless charging system under the influence of metal foreign objects, the expression of phase difference between the transmitting coil current and receiving coil current before and after the introduction of foreign objects is obtained. On this basis, the equivalent coil model of ferromagnetic metal and non-ferromagnetic metal and its parameter configuration method are further proposed, which can accurately obtain the current phase difference under the condition of metal foreign objects intervention. Finally, the accuracy and effectiveness of the modeling method are verified by simulation and experiment. This method provides a new idea for the characteristic analysis and online detection of metal foreign objects introduced in wireless charging system.

Keywords: wireless charging; foreign objects detection; metal foreign objects; numerical calculation; field modeling; phase analysis

(编辑 方晶)