

无线电能传输阵列式差分线圈金属异物检测方法

张 献, 付志远, 薛 明, 任年振, 王奉献

(天津工业大学天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387)

摘要: 本文针对无线电能传输系统中金属异物检测的问题, 基于磁耦合谐振式无线电能传输系统, 设计一种阵列式差分线圈金属异物检测系统。通过建立线圈模型, 分析金属异物对检测线圈阻抗影响规律, 并根据影响规律设计一种具有对称结构的位于发射线圈表面的密绕阵列式差分线圈检测结构, 通过金属异物介入后引起检测线圈输出电压变化实现对金属异物的检测。结果表明, 这种检测结构吸收系统功率明显低于单线圈检测结构, 具有对系统影响小的优点并且可以实现对直径为 25 mm, 厚度为 1.85 mm 的钢心镀镍合金进行检测, 检测精度高, 检测正确率达到 93%。

关键词: 无线充电; 异物检测; 差分线圈; 阵列结构

DOI: 10.12067/ATEEE2003021 **文章编号:** 1003-3076(2020)11-0009-09 **中图分类号:** TM724

1 引言

目前, 无线电能传输技术因其便捷、设备磨损率低、应用范围广而且更加灵活等优点, 受到研究人员的广泛关注^[1]。典型的应用场景包括铁路运输, 电动汽车^[2], 消费性电子产品, 植入式医疗器件以及矿井、水下、无人机^[3]等。在无线电能传输技术受到越来越多关注的同时, 保证传输系统的安全性也是非常必要的。当使用无线电能传输技术供电时, 发射端与接收端之间的能量传输空间存在高频交变磁场^[4], 外界异物进入该空间中, 会对系统安全性、传输效率等造成影响^[5]。其中影响较为严重的异物种类为金属, 例如生活中常见的钥匙、易拉罐、硬币等金属制品。在金属异物进入能量传输空间后, 金属在传输空间的高频交变磁场中会产生涡流, 金属严重发热, 威胁无线电能传输系统甚至是使用者的安全, 同时降低系统的传输效率, 造成能量损耗^[6,7]。因此, 本文采用具有串联补偿结构的磁耦合谐振式无线电能传输系统, 对金属异物检测进行研究。

针对无线电能传输系统异物检测问题, 国内外学者做了诸多研究。文献[8]提出一种基于阻抗检测的多路自动调谐式无线充电金属检测系统, 利用

阻抗变化进行金属异物检测。文献[9]基于机器视觉原理, 设计一种利用摄像传感器的异物检测方法。该方法是利用摄像头, 对螺钉、螺栓等异物进行检测, 并通过实验验证了这种方法的可行性。但这种方法存在占用空间, 后期维护困难的缺点。文献[10]提出一种热能损耗检测方法, 通过搭建检测电路以及功率分析装置, 对系统功率变化进行采集计算, 当金属异物介入时, 功率损耗大于 1.5 W, 超过设定的报警阈值, 实现了金属异物的检测。文献[11]提出一种品质因数异物检测方法, 通过搭建无线电能传输装置以及检测电路, 实现了对硬币的检测。然而, 在大功率无线电能传输系统中, 金属异物造成的损耗比例与系统相比很小, 变化较难检测, 因此这种方法只适用于小功率应用场景。文献[12]提出一种改进的平衡线圈检测方法, 解决了传统平衡线圈的占用空间问题, 并实现了对铁质圆柱体异物的检测。文献[13]设计了一种多功能辅助线圈, 不仅可以辅助电动汽车对位, 而且实现了对面积为 4.1 cm²、4.5 cm² 硬币的检测。文献[14]设计了一种组合式矩形检测线圈, 这种线圈组合可布满发射线圈表面, 消除了检测盲区, 并在线圈间距 160 mm, 系统频率 85 kHz 的条件下, 实现了对尺寸为 40 mm×40 mm×1 mm 的铝片的检测。这种检测线圈检测

收稿日期: 2020-03-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0106300)
作者简介: 张 献(1983-), 男, 河北籍, 教授, 博士, 研究方向为无线电能传输技术、工程电磁场与磁技术;
付志远(1994-), 男, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输技术。

方法可以有效检测到金属异物,但存在吸收系统功率,影响传输效率的问题。

本文设计了一种具有辅助结构的阵列式差分线圈金属异物检测方法。这种方法利用改进的差分线圈结构,将多组差分线圈对角分布于发射线圈表面,保证输出电压接近于零,降低了检测结构对系统的影响。并增加了辅助线圈,消除了同组线圈上同时出现相同异物而无法检测的情况。当金属异物进入时,检测线圈输出电压大于零,实现对金属异物的检测。

2 金属异物对检测线圈的影响

2.1 非铁磁性金属异物对检测线圈的影响

差分线圈由两个单线圈反向绕制而成,因此下面以单线圈进行分析。非铁磁性金属相对磁导率约为1,电导率较大,常见的非铁磁性金属包括铅、锡、金、银、铜等。这类金属导电性能良好,导磁性能差,主要产生涡流效应,磁效应可以忽略不计。位于高频交变磁场中的金属内部会产生涡流,可将检测线圈与异物耦合拓扑等效为图1所示结构。

图1中, U_s 为高频电压源, L_1 、 L_2 分别为发射线圈

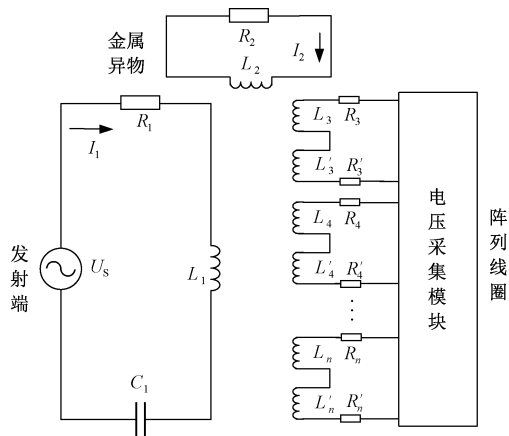


图1 金属异物与检测线圈耦合电路

Fig.1 Metal foreign object and detection coil coupling circuit

圈和金属异物等效电感, R_1 、 R_2 为发射线圈和金属异物等效电阻。 $L_3 \sim L_n$ 及 $L'_3 \sim L'_n$ 为检测线圈等效电感, $R_3 \sim R_n$ 及 $R'_3 \sim R'_n$ 为检测线圈等效电阻。

M_1 为发射与检测线圈之间的互感, M_2 为发射线圈与异物之间的互感, M_3 为检测线圈与异物之间的互感。当系统谐振频率为 ω 时,可列写基尔霍夫电压定律并化简得矩阵:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2 \omega^2 M_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} - \frac{jL_2 \omega^2 M_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} & -j\omega \left(M_1 - \frac{j\omega M_2 M_3}{R_2 + j\omega L_2} \right) \\ -j\omega \left(M_1 - \frac{j\omega M_2 M_3}{R_2 + j\omega L_2} \right) & R_3 + j\omega L_3 + \frac{R_2 \omega^2 M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} - \frac{jL_2 \omega^2 M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

检测线圈等效电阻与等效电感变为:

$$R_{3r} = R_3 + \frac{R_2 \omega^2 M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2)$$

$$L_{3i} = L_3 - \frac{L_2 \omega M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (3)$$

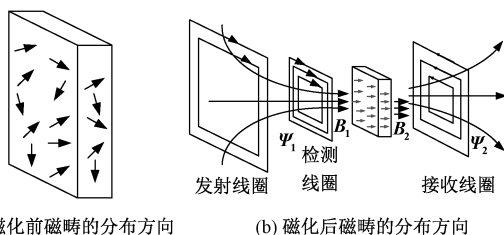
可得出非铁磁性金属进入系统后检测线圈阻抗变化规律,由于金属异物涡流效应使检测线圈电阻值增大,电感值减小。

2.2 铁磁性金属异物对检测线圈影响

铁磁性金属的特性是相对磁导率与电导率都较大,铁磁性材料磁矩的净效应远大于顺磁性或抗磁性的情况。典型金属包括铁、镍、钴等。这类金属在高频交变磁场中既产生涡流效应也会产生磁效应。

在铁磁性金属异物进入线圈之前,铁磁性金属内部磁畴方向随机排列,如图2(a)所示,磁畴之间磁性相互抵消,对外不表现磁性。

铁磁性金属进入检测线圈中时,经过发射线圈



(a) 磁化前磁畴的分布方向

(b) 磁化后磁畴的分布方向

图2 磁畴分布方向

Fig.2 Magnetic domain distribution direction

磁场的作用,金属内部各磁畴顺着磁场方向转动,如图2(b)所示,加强了内部磁场,随着外磁场的增强,同外磁场方向一致的磁畴会越来越多,磁感应强度会增强,产生与检测线圈磁场方向相同的附加磁场,从而使磁场增强。根据电磁场理论可知,线圈电感可以表达为磁链随单位长度电流的变化:

$$L = \frac{d\lambda}{di} = \frac{Nd\psi}{di} \quad (4)$$

磁化后,金属异物激发出磁场 B_2 与发射线圈激

发出磁场 B_1 方向相同,此时检测线圈的电感为:

$$L = \frac{N_1 \int B_1 ds_1 + N_2 \int B_2 ds_2}{i} = L_3 + \Delta L \quad (5)$$

式中, N_1, N_2 分别为发射线圈匝数与异物内部涡流数; s_1 为检测线圈面积; s_2 为金属异物面积; ΔL 为检测线圈受涡流效应影响产生的电感变化。

结合 2.1 节非铁磁性金属异物介入系统后,检测线圈阻抗变化可得,铁磁性金属异物介入系统后,检测线圈等效电阻与电感表达式为:

$$R'_{3r} = R_3 + \frac{R_2 \omega^2 M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (6)$$

$$L'_{3i} = L_2 - \frac{L_2 \omega M_3^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + \Delta L \quad (7)$$

可知铁磁性金属进入系统后检测线圈阻抗变化规律。由于金属异物涡流效应使检测线圈等效电阻值增大,又由于铁磁性金属的涡流效应强于磁效应,最终使检测线圈等效电感值减小。

3 线圈检测原理分析

线圈检测方法基本原理是通过线圈上电压变化实现金属异物的检测^[15]。同种金属对于不同结构参数的线圈影响各有不同,因此需要对线圈结构进行选择。目前常用的线圈结构包括等间距圆形和方形两种,如图 3 所示。由于在阵列式结构中,圆形线圈之间易存在相对较大的检测盲区。因此本节选用矩形线圈进行分析。

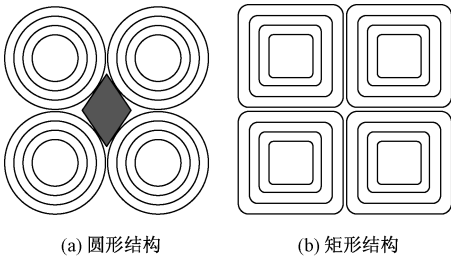


图 3 典型检测线圈

Fig.3 Typical detection coil

以每组线圈中的一个线圈为研究对象,为实现金属异物的检测,检测线圈需位于发射线圈表面。

如图 4 所示为检测线圈与发射线圈同轴情况。为便于计算,将线圈简化为单匝,发射线圈为 C_i ,边长为 $2L_i$ 和 $2W_i$,检测线圈为 $2L_j$ 和 $2W_j$,发射线圈 BC 边在检测线圈内一点 P 激发磁场, θ 为电流元 R 激发的磁场 B 与检测线圈夹角。

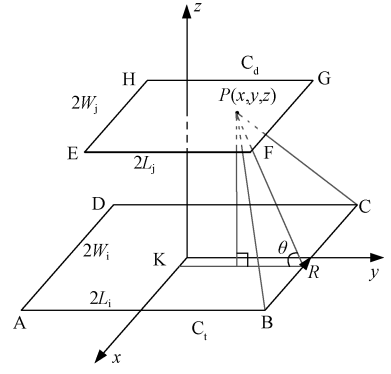


图 4 线圈同轴情况

Fig.4 Coils coaxial condition

可以计算通过检测线圈有效磁场强度为:

$$B_{BCz} = B_{BC} \cos \theta \quad (8)$$

$$\text{式中, } \cos \theta = \frac{w_i - y}{\sqrt{(w_i - y)^2 + z^2}}.$$

结合毕奥-萨伐尔定律可得,BC 边激发的 z 轴方向的磁场强度:

$$B_{BCz} = \frac{\mu_0 I (w_i - y)}{4\pi [(w_i - y)^2 + z^2]} \left[\frac{L_i + x}{\sqrt{(w_i - y)^2 + z^2 + (L_i + x)^2}} + \frac{L_i - x}{\sqrt{(w_i - y)^2 + z^2 + (L_i - x)^2}} \right] \quad (9)$$

可得发射线圈 BC 边在检测线圈内产生的磁通量为:

$$\phi_{BC} = \int_j B_{BCz} ds_j = \int_{-W_j}^{W_j} dx \int_{-L_j}^{L_j} B_{BCz} dy \quad (10)$$

发射线圈在检测线圈内产生的总磁通量为:

$$\phi_{TD} = \phi_{AB} + \phi_{BC} + \phi_{DC} + \phi_{DA} \quad (11)$$

为保证检测灵敏度,检测线圈将覆盖发射线圈表面,因此检测线圈存在与发射线圈不同轴的情况,如图 5 所示。

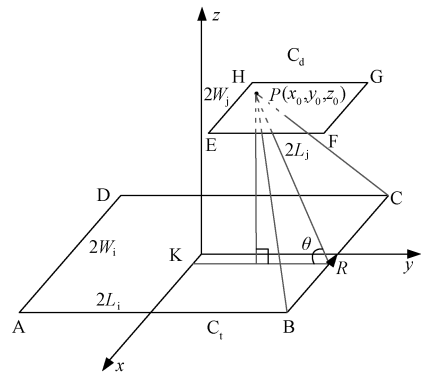


图 5 线圈不同轴情况

Fig.5 Coils not coaxial condition

其中,发射线圈边长分别为 $2L_i$ 和 $2W_i$,检测线圈边长为 $2L_j$ 和 $2W_j$,检测线圈内点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 。对比发射线圈与检测线圈同轴,可以通过坐标变换进行磁通量计算,并结合式(10)可得检测线圈内,BC边产生的磁通量为:

$$\phi'_{BC} = \int_{-W_j+x_0}^{W_j+x_0} dx \int_{-L_j+y_0}^{L_j+y_0} \frac{\mu_0 I (w_i - y)}{4\pi [(w_i - y)^2 + z^2]} \cdot \left[\frac{L_i + x}{\sqrt{(w_i - y)^2 + z^2 + (L_i + x)^2}} + \frac{L_i - x}{\sqrt{(w_i - y)^2 + z^2 + (L_i - x)^2}} \right] dy \quad (12)$$

同理可得不同轴时检测线圈内总磁通量:

$$\phi'_{TD} = \phi'_{AB} + \phi'_{BC} + \phi'_{DC} + \phi'_{DA} \quad (13)$$

将式(13)代入电磁感应定律表达式中可得每组差分线圈中单个线圈电压表达式:

$$u = N \frac{d\phi'_{TD}}{dt} \quad (14)$$

同组差分线圈输出电压表达式为:

$$\Delta u = |u - u'| \quad (15)$$

由于同组线圈反向绕制,极性相反,在理想条件下,检测线圈两端输出电压为零。根据基本公式 $N\phi = Li(t)$,当金属异物位于检测线圈上时,当金属异物为非铁磁性金属时,检测线圈电感和磁通量减小,差分检测线圈输出电压升高,当金属异物为铁磁性金属异物时,检测线圈电感随异物种类以及尺寸变化而变化,使差分检测线圈输出电压升高。铁磁性金属产生磁效应,铁磁性金属介入系统后,差分检测线圈输出的电压应低于同尺寸的非铁磁性金属介入后线圈产生的电压。

4 线圈优化与对比

4.1 矩形线圈优化

本文选用矩形线圈作为检测用线圈,并进行有限元仿真,对矩形线圈线间距变化对检测效果的影响进行分析。

根据以上分析可知,线圈电感值影响线圈输出电压,选用不同匝间距的线圈上出现金属异物时,其电感变化量作为检测性能的标准。仿真参数如表 1 所示,选择尺寸均为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 的铁、铝、铜片作为异物。

选取线圈边线(50,0)、边角(50,50)和中心(0,0)作为异物出现的典型位置,异物介入线圈如图 6

所示,并计算异物出现后电感变化量并绘制成图 7。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameter

仿真参数	数值
线圈尺寸/mm	150×150
匝间距变化范围/mm	1~10
线径/mm	1
激励频率/kHz	85

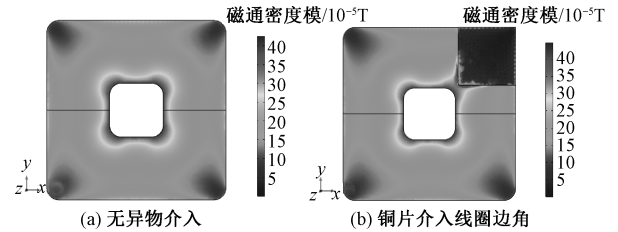


图 6 线圈磁通分布变化
Fig.6 Variation of coil flux distribution

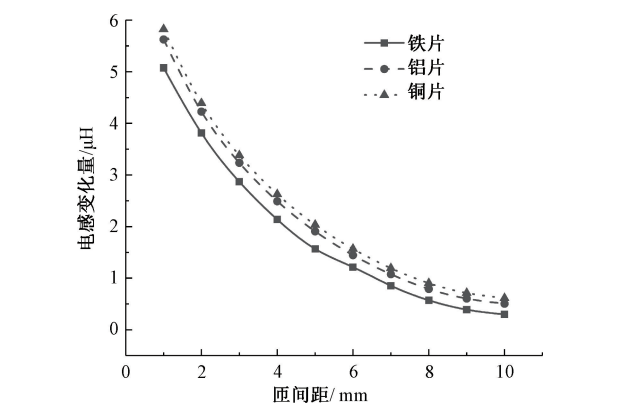


图 7 不同匝间距电感变化量
Fig.7 Inductance variation at different turns spacing

由仿真结果可知,在仿真条件下,匝间距为 1 mm 时,线圈电感量到最大为 $75.78\text{ }\mu\text{H}$,随着匝间距增大,检测线圈电感量降低。三种金属异物介入后,线圈电感量均在匝间距为 1 mm 时变化最大,最大变化量为 $5.83\text{ }\mu\text{H}$ 。线圈电感变化反应检测电压的变化,检测线圈匝间距越小,金属异物介入后电感变化量越大。因此,在后续研究中尽量将线圈匝间距缩小,以实现电压最大变化,提高异物检测的精确度。

4.2 差分线圈与单线圈功率损耗对比

单线圈检测法的基本原理是利用线圈电压等参数的变化实现对金属异物的检测。线圈介入系统后会吸收充电系统的能量,降低系统传输效率。差分结构的检测线圈,不存在金属异物时,线圈两端输出

电压为零,不会造成系统的功率损耗。

在系统频率 85 kHz,发射功率 180 W,传输效率为 90%的仿真条件下对匝数为 10,尺寸为 40 mm×40 mm 的单线圈及差分线圈吸收的系统功率进行对比。根据对称性,选取线圈中的 15 个位置进行仿真如图 8 所示,得出单线圈与差分线圈中的功率如图 9 所示。

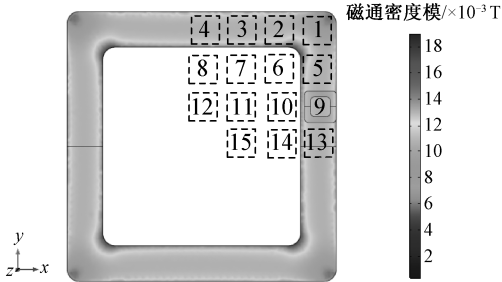


图 8 线圈位置
Fig.8 Coil position

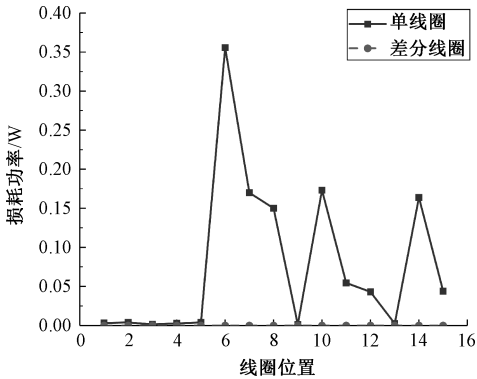


图 9 线圈功率损耗对比
Fig.9 Coil power loss comparison

由仿真结果可以得出,在 180 W 的发射功率下每个单线圈吸收的平均功率为 0.09 W,差分线圈吸收的平均功率数量级达到 10^{-30} W,可以忽略。差分检测法对系统的影响远小于单线圈检测法。

5 检测线圈设计与异物检测实验

5.1 检测线圈结构设计

为保证差分线圈的对称性,将每组线圈分别置于发射线圈的两对角处,依次排列,布满发射线圈表面。如图 10 所示,为一组检测线圈位置示意以及阵列检测线圈分布,相同编号线圈为同组。

为避免差分线圈组中,两线圈同时出现相同异物,输出电压为 0,无法检测的情况,增加了一组辅助差分线圈,位于阵列线圈下方,如图 11 所示。

将差分线圈组中的两个线圈对角放置,减小上

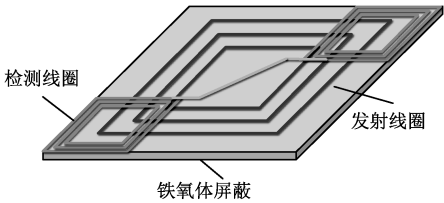


图 10 对角放置检测线圈
Fig.10 Detection coil diagonally phased

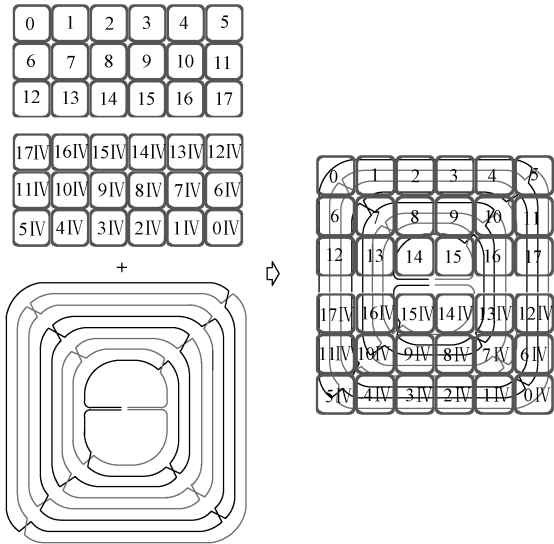


图 11 检测线圈分布示意
Fig.11 Detection coils distribution

述情况发生的概率。理想条件下,当第一层阵列差分线圈中,同组的两线圈出现相同的金属异物时,该组线圈输出电压为 0,辅助线圈输出电压变化,可以实现对金属异物的检测,避免了检测盲区的存在。

5.2 金属异物检测系统搭建

考虑到实际应用中,由于制作工艺问题,无法做到完全对称,检测线圈输出电压无法完全等于零,而金属异物介入后,输出电压将发生变化。为便于判断金属异物是否进入系统,将线圈感应出的高频电压整流为直流。考虑到实用性,本节线圈电压转换电路采用不可控整流电路。

为测试本文提出的阵列式差分线圈金属异物检测方法的实用性,搭建了串联补偿结构的磁耦合谐振式无线电能传输系统,系统由高频电源、发射线圈、谐振电容、接收线圈和负载组成。

系统整体结构如图 12 所示。传输系统参数如表 2 所示。发射与接收线圈均为由线径为 0.2 cm 利兹线绕制的 15 匝矩形结构线圈,线间距为 0.3 cm。检测系统由阵列式差分线圈,电压转换电路与

信号采集模块构成。阵列式检测线圈与辅助线圈由 PCB 制作,由二十组差分线圈组成,线圈外径 5 cm,内径 4.4 cm,绕制 6 匝。

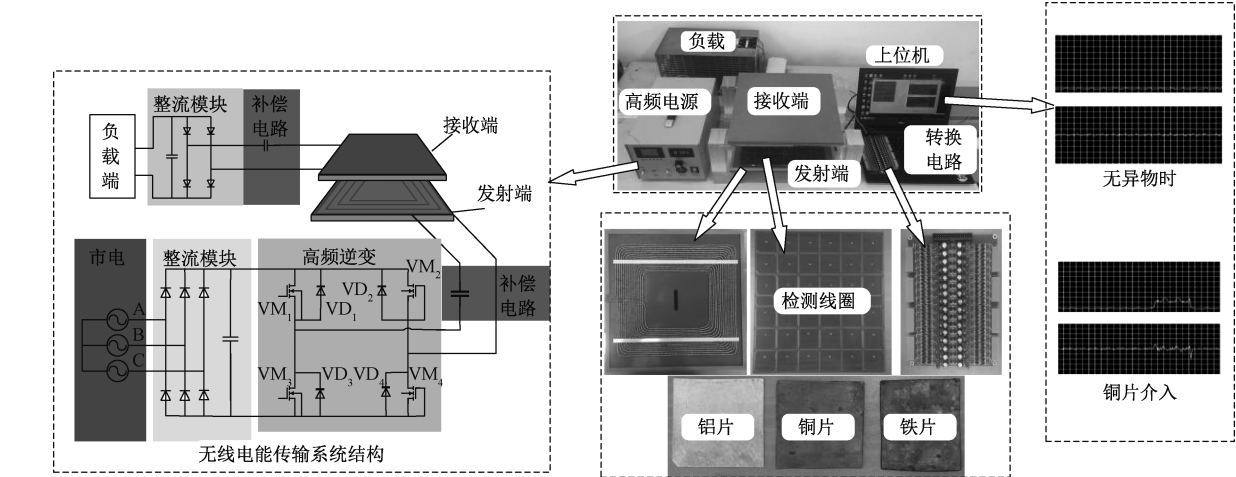


图 12 磁耦合谐振式无线充电及金属异物检测系统

Fig.12 Magnetically coupled resonant wireless charging with metal foreign objects detection system

表 2 系统参数
Tab.2 System parameters

系统参数	数值
发射端电感/ μH	94.57
接收端电感/ μH	84.95
发射端补偿电容/ nF	59.35
接收端补偿电容/ nF	49.86
负载电阻/ Ω	12

信号采集模块可对电压信号实现高速采集,可将电压信号传输至上位机,对金属异物进行检测。选用尺寸为 4 cm×4 cm×0.1 cm 的铁、铝、铜及直径为 2.5 cm,厚度为 0.185 cm 的钢心镀镍合金作为检测用金属异物。

5.3 金属异物检测实验

根据对称性,选取阵列线圈中的 18 组线圈进行金属异物检测。如图 13 所示。铜片介入第一组线圈前后电压变化情况如图 12 所示,上位机界面第一组为电压,第二组为电压变化率。

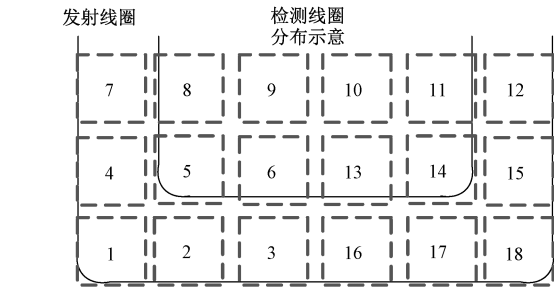


图 13 检测线圈位置示意

Fig.13 Position of detection coil

首先在选定的 18 组线圈范围内以发射功率 100 W、150 W、200 W 的条件进行金属异物位置不重复的随机掉落检测实验。在三种发射功率条件下,分别令铁片、铝片、铜片及钢心镀镍合金随机不重复掉落 100 次,检测结果如表 3 所示。

表 3 随机掉落实验结果

Tab.3 Random drop test results

金属异物	成功次数 (100 W)	成功次数 (150 W)	成功次数 (200 W)
铁片	100	100	100
铝片	100	100	100
铜片	100	100	100
钢心镀镍合金	93	94	96

实验结果表明,在发射功率 100 W、150 W、200 W 的条件下随机掉落的实验用铁片、铝片、铜片和钢心镀镍合金检测正确率在 93% 以上。钢心镀镍合金检测正确率分别为 93%、94% 和 96%,检测正确率随功率的升高而升高。

然后选定 1~9 号线圈范围内以发射功率 100 W、150 W 和 200 W 的条件进行检测线圈电压采集实验。分别将铁片、铝片、铜片和钢心镀镍合金依次置于检测线圈表面中心处,进行电压采集实验。记录不同功率下每种异物介入后检测线圈输出电压,如图 14 所示。并计算每组实验的电压变化率,如图 15 所示。根据图 14 可知,当不存在金属异物时,检测线圈输出电压受系统功率影响较小,接近于

零。1、4、7 号检测位于发射线圈绕线上方,由于发射线圈绕线问题,检测线圈输出电压高于其他组线圈输出电压。随着系统发射功率提高,无金属异物时的检测线圈输出电压无明显变化,阵列检测结构具有良好的稳定性。

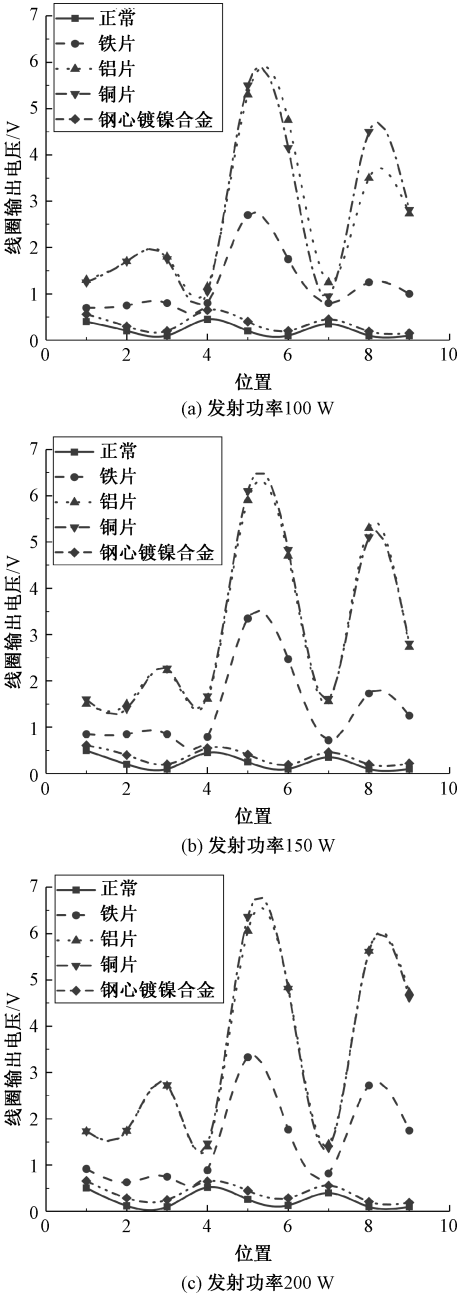


图 14 不同功率时检测线圈输出电压

Fig.14 Detection coil output voltage at different power levels

当金属异物介入检测线圈表面时,检测线圈输出电压升高,最高为铜片介入 5 号检测线圈,输出电压为 6.56 V。由于铜、铝均属于非铁磁性金属,属性相近,金属内部产生涡流效应,忽略磁效应,使检

测线圈电感值减小,检测线圈输出电压升高明显,铜片、铝片变化趋势相近。铁片属于铁磁性金属,不仅产生涡流效应使线圈电感值下降,还会产生磁效应使线圈电感值升高,导致铁片造成的电压变化会小于相同尺寸铝、铜造成的电压变化,验证了理论分析的正确性。

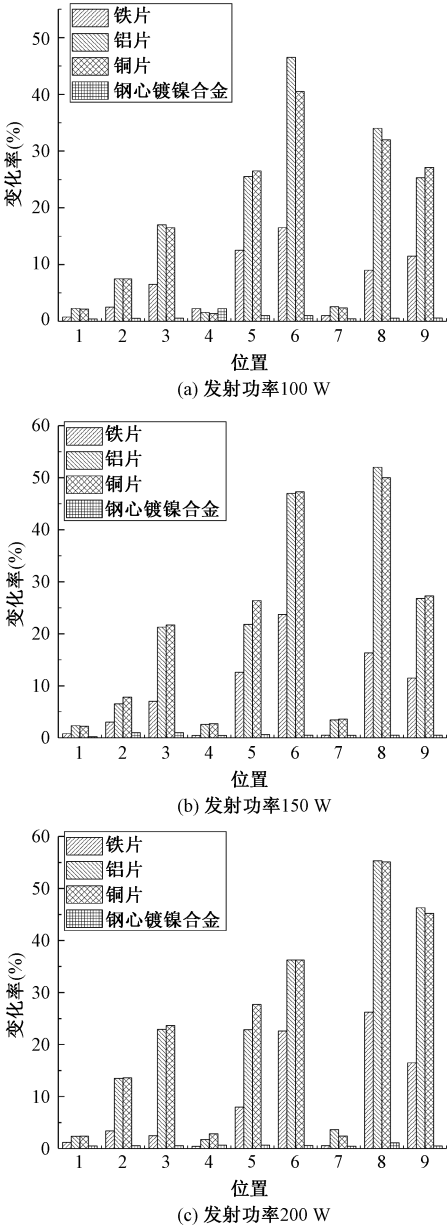


图 15 不同功率时线圈电压变化率

Fig.15 Detection coil voltage change rates of different power levels

根据图 15 可知,功率为 100 W 条件下,铁、铝、铜片均在 6 号线圈处产生最大变化,最大变化率达到 47.3%。功率为 150 W、200 W 时,三种金属均在 8 号线圈处产生最大变化,变化率达到 37%。四种

金属异物均在1号线圈处使其产生最小电压变化。钢心镀镍合金尺寸较小,三种功率状态下1号线圈电压变化率分别为0.4%,0.42%和0.49%,线圈输出电压变化相对不明显,但仍然可以实现检测。在一定发射功率范围内,随着发射功率升高,金属异物涡流效应更加明显,检测线圈输出电压变化率也升高。验证了阵列式差分线圈金属异物检测方法的可行性。

6 结论

本文针对无线电能传输系统金属异物检测问题,提出一种阵列式差分线圈金属异物检测方法。

由非铁磁性金属异物及铁磁性金属异物对检测线圈的影响进行理论分析可知,两种金属异物介入检测线圈后,检测线圈等效电阻增大,等效电感减小,差分检测线圈输出电压升高。由于铁磁性金属异物导磁能力强于非铁磁性金属,其介入系统后,差分检测线圈输出的电压应低于同尺寸的非铁磁性金属介入后线圈产生的电压。

建立了有限元仿真模型,对检测线圈匝间距进行优化,发现检测线圈匝间距与金属异物造成的电感变化量成反比。并对差分线圈与单线圈对系统传输效率的影响进行仿真分析。结果表明,差分检测结构可以降低检测系统对原无线电能传输系统的影响。

搭建了具有阵列式差分线圈检测结构的无线电能传输系统。对实验用金属异物进行随机掉落检测实验。实验结果表明,在发射功率100 W、150 W和200 W的条件下,检测系统对钢心镀镍合金的检测正确率分别为93%、94%和96%。并记录检测线圈输出电压。结果表明,在发射功率为200 W的条件下,铜、铝片造成检测线圈电压变化量分别比铁片高3.09 V和3.02 V。非铁磁性金属异物对检测线圈输出电压影响明显强于同尺寸的铁磁性金属异物对检测线圈输出电压影响。验证了理论分析的正确性及阵列式差分线圈金属异物检测方法的可行性。

参考文献 (References):

[1] 朱春波,姜金海,宋凯,等 (Zhu Chunbo, Jiang Jinhai, Song Kai, et al.). 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展 (Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of vehicle) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (2): 60-65, 72.

[2] 吴晓康,杨庆新,张献,等 (Wu Xiaokang, Yang Qingxin, Zhang Xian, et al.). 电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析 (Coil structure study and efficiency analysis for the driving wireless charging system of electric car) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 8-13.

[3] 马秀娟,武帅,蔡春伟,等 (Ma Xiujuan, Wu Shuai, Cai Chunwei, et al.). 应用于无人机的无线充电技术研究 (Research on wireless charging technology applied to UAVs) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2019, 23 (8): 1-9.

[4] 张献,金耀,苑朝阳,等 (Zhang Xian, Jin Yao, Yuan Zhaoyang, et al.). 电动汽车动态无线充电紧—强耦合模式分析 (Analysis on of tight-strong coupling mode for dynamic wireless charging of electric vehicle) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (2): 79-83.

[5] 陈琛,黄学良,孙文慧,等 (Chen Chen, Huang Xueliang, Sun Wenhui, et al.). 金属障碍物对磁耦合谐振无线电能传输系统的影响 (Impact of metal obstacles on wireless power transmission system based coupled resonance) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (9): 22-26.

[6] 马中原,廖承林,王丽芳 (Ma Zhongyuan, Liao Chenglin, Wang Lifang). 金属异物对电动汽车无线充电系统影响分析 (Analysis of metal foreign object setting on electric vehicle wireless power transfer system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (2): 14-20.

[7] Regensburger B, Kumar A, Sinhai S, et al. Impact of foreign objects on the performance of capacitive wireless charging systems for electric vehicles [A]. IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC [C]. Long Beach, CA, USA, 2018. 892-897.

[8] 张亚蒙,张希,张智敏 (Zhang Yameng, Zhang Xi, Zhang Zhimin). 基于阻抗检测的多路自动调谐式无线充电金属检测系统 (Impedance detection based multi-channel automatic tuning metal object detection system for wireless charging device) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (4): 53-63.

[9] Xu Q, Ning H, Chen W. Video-based foreign object debris detection [A]. 2009 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques [C]. 2009. 119.

[10] Kuyvenhoven N, Dean C, Melton J, et al. Development of a foreign object detection and analysis method for wireless power systems [A]. 2011 IEEE Symposium Product Com-

- pliance Engineering Proceedings [C]. San Diego, CA, USA 2011. 1-6.
- [11] Fukuda S, Nakano H, Murayama Y, et al. A novel metal detector using the quality factor of the secondary coil for wireless power transfer systems [A]. 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems and Application [C]. Kyoto, Japan, 2012. 241-244.
- [12] 曲晓东, 杨勇, 刘志珍, 等 (Qu Xiaodong, Yang Yong, Liu Zhizhen, et al.). 平衡线圈金属检测技术在无线电能传输中应用 (Metal detection technology based on balance coil in application of wireless power transmission) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2014, 48 (10): 61-63.
- [13] Jeong S, Kwak H G, Jang G C, et al. Dual-purpose non-overlapping coil sets as metal object and vehicle position detections for wireless stationary EV chargers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (9): 7387-7397.
- [14] Thai V, Jang G C, Jeong S Y, et al. Symmetric sensing coil design for the blind-zone free metal object detection of a stationary wireless electric vehicles charger [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35 (4): 3466-3477.
- [15] 刘志远 (Liu Zhiyuan). 基于四线圈电压实时监测的电动汽车无线充电系统异物检测方法 (Foreign object detection method for electric vehicle wireless charging system based on four-coil real-time voltage monitoring) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2019.

Method for detecting metal foreign object by array differential coil in wireless power transfer system

ZHANG Xian, FU Zhi-yuan, XUE Ming, REN Nian-zhen, WANG Feng-xian
(Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,
Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the problem of metal foreign object detection in wireless power transfer system, a metal foreign object detection system by array differential coil is designed based on magnetic coupling resonance. Through the establishment of coil model, this paper analyzes the influence of metal foreign object on detecting coil impedance, and according to the law of the influence a symmetrical tightly array differential coil detection structure placing on the surface of transmitter coil is designed, and the metal foreign objects in detecting coil will change output voltage so as to detect the metal foreign objects. The results show that the absorption power of the detection structure is significantly lower than that of the single-coil detection structure, and has the advantages of having less influence on the system and low absorption power. It can be used to detect nickel-plated alloy with a diameter of 25 mm and thickness of 1.85 mm, and the detection accuracy is 93%.

Key words: wireless power transfer; foreign object detection; differential coil; array structure