

# 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

王跃跃, 夏能弘

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:**磁谐振式无线电能传输基于高频交变磁场耦合, 当有金属异物侵入时, 异物产生的涡流效应会给系统带来不可忽视的安全隐患。目前无线电能传输系统金属异物的检测主要基于异物造成的功率损耗和热效应, 存在延时性高、参数提取复杂等缺陷。在此背景下, 提出一种基于三级线圈的新型金属异物定位检测系统, 第 1、2 级线圈均由 2 个并列矩形单元检测线圈构成, 两级线圈布置方向相互垂直, 实现金属异物在充电范围四分之一区域内的简单定位; 第 3 级线圈由刚好覆盖发射线圈的 4 个等腰三角形单元检测线圈构成, 实现金属异物在充电范围八分之一区域内的定位检测。以发射线圈面积为  $340\text{ mm} \times 280\text{ mm}$  的无线电能传输系统为载体进行验证, 实验结果表明: 当检测阈值电压低至  $1.4\text{ V}$  时, 该异物检测系统能够有效检测到边长仅为  $20\text{ mm}$  的正方体铁块。

**关键词:**磁谐振式无线电能传输; 金属异物; 三级检测线圈; 单元检测线圈

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.024 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2022)02-0205-08

## A design of three-stage location and detection system for the metallic foreign body applied in the wireless power transfer system

WANG Yueyue, XIA Nenghong

(Electrical Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The magnetic resonant coupling based wireless power transfer utilizes the high-frequency alternating magnetic field coupling fundamentally. Once a metallic foreign body invades, the eddy current effect generated by the foreign body may bring considerable security risks to the system. At present, the detection methods of metallic foreign body in this wireless power transfer system are mainly based on power loss and thermal effect caused by foreign body. Its dominate disadvantages relay mainly on the high delay and complex parameter extraction. Under the background, a new detection system of metallic foreign body location based on three-stage coil is proposed in this paper. The first and second stage coils are composed of two parallel rectangular unit detection coils. The second stages coils are arranged perpendicular to each other to achieve the simple positioning of metallic foreign body in a quarter of the charging range. The third stage coil is composed of four isosceles triangular unit detection coils that just cover the transmitting coil. The locating detection of metallic foreign body within one eighth of the charging range is then realized.

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51607110)

通信作者: 夏能弘(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电磁场数值计算、无线电能传输的研究; E-mail: academicship@163.com

Finally, a magnetic resonant coupling based wireless power transfer system with an area of  $340\text{ mm} \times 280\text{ mm}$  transmitting coil is applied for verification. It is shown that a square iron block with side length as small as  $20\text{ mm}$  can be detected by the system when the threshold voltage is  $1.4\text{ V}$ .

**Key words:** MRC-WPT; metallic foreign body; three-stage detection coil; unit detection coil

无线电能传输技术具有方便、灵活、可靠的供电特点,改善了传统有线输电线路老化、场地受限等缺陷,受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。发展至今,该技术在功率、效率和传输距离等方面的研究日趋成熟,各种无线电能传输产品相继问世,并能较好满足用户需求<sup>[2-4]</sup>。磁耦合谐振式无线电能传输技术(wireless power transfer via magnetic resonance coupling, WPT/MRC)利用具有相同谐振频率线圈经高频交变磁场耦合实现电能的无接触式传输<sup>[5-8]</sup>。WPT/MRC相较于电磁感应式和电场耦合式,不仅可以减小系统对周围环境的磁场辐射,且因其在传输距离、传输功率以及传输效率等方面的均衡表现,使其特别适用于电动汽车等较大功率、中远距离无线充电领域,成为无线电能传输技术的研究热点<sup>[9]</sup>。

实际应用中 WPT/MRC 仍需克服一些重要问题。侵入系统中的金属异物在交变磁场作用下会产生涡流损耗,研究表明,在不考虑散热、厚度为  $15\text{ }\mu\text{m}$  的铝箔侵入传输功率为  $6.6\text{ kW}$  的系统时,其温度能够在  $4\text{ min}$  内提升到  $130\text{ }^\circ\text{C}$ ,如不及时处理,不仅造成系统的功率损耗,降低系统传输效率,还对系统运行的安全性和可靠性造成影响<sup>[10-12]</sup>。

为保证系统传输效率,提高系统安全性和可靠性,采用不同原理的金属异物检测方法成为无线电能传输技术研究的热点。根据传输功率的变化对金属异物进行检测是最常见的方法,但由于体积小的金属异物造成的功耗有限,在大功率传输系统中检测精度较低<sup>[13]</sup>。还有研究人员提出热成像探头检测法,该方法和常见方法相比,检测灵敏度有一定的提高,但热成像探头脆弱易损坏,检测只能在异物造成功耗、温度升高后进行,存在延时性。

通过附加检测线圈,利用金属异物涡流和磁效应对异物进行检测具有良好的实时性和灵敏性。WiTricity 公司提出一种利用平衡检测线圈对金属异物进行检测的方法,具有较高灵敏性和可靠性<sup>[14]</sup>。韩国科学技术院(KAIST)提出了一种双用途非重叠金属异物检测系统,不仅实现了一个硬币

的定位检测,而且可以确定接收线圈的位置,及时对偏移进行调整保证系统的传输效率<sup>[15]</sup>。但该系统输出参数多,参数提取困难,增加了后续传感电路设计复杂度和故障机率,且该方法存在检测死区,降低了系统的可靠性。

本文提出一种利用三级线圈实现金属异物检测及定位的方法。该检测线圈由单匝利兹线绕成,造价低、绕制简单。紧贴发射线圈的检测线圈通过金属异物引起的感应电压变化检测异物,并通过三级线圈相互配合实现异物定位。用户可根据自身需求调整检测精度,具有较高的灵活性。该检测方法参数提取简单、检测实时性高、无检测死区,可为异物后续处理创造有利条件。

## 1 异物侵入磁场特性分析

为分析金属异物对系统磁场特性的影响,并获得可靠的检测方法。本文在 Maxwell 中搭建磁耦合执行机构模型,如图 1 所示,仿真分析金属异物在不同情况下对系统原磁场磁感应强度的影响。模型参数如表 1 所示。

本次仿真主要从金属异物材质、异物面积和厚度及异物所处位置这 3 个方面对系统原磁场磁感应强度受异物的影响机制进行比较分析。为使仿真结

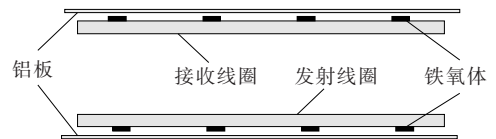


图 1 无线电能传输系统磁耦合机构仿真模型

Figure 1 Simulation model of magnetic coupling mechanism in wireless power transfer system

表 1 模型仿真参数

Table 1 Parameters of simulation model

发射、接收线圈尺寸/ $\text{mm}^2$	一次侧工作电流/ $\text{A}$	传输距离/ $\text{mm}$	线圈匝数		工作频率/ $\text{kHz}$
			发射	接收	
$340 \times 280$	2	100	20	20	500

果更加直观精确,在不同情况下,通过发射线圈上表面穿过异物几何中心的磁感应强度观测线反应金属异物对系统原磁场磁感应强度的影响程度。

在高频交变磁场环境中,金属异物主要通过涡流和磁效应对磁场产生影响。系统工作时发射线圈中的交流电  $I_1$  产生交变磁场  $B_1$ , 处于  $B_1$  中的非铁磁性金属(铜)感应出涡电流  $I_2$ ,  $I_2$  产生一个与系统原磁场  $B_1$  方向相反的新磁场  $B_2$ , 金属附近磁场变成  $B_1 - B_2$ , 如图 2(a)所示。由于铁磁特性,铁磁性金属对原磁场的影响和非铁磁性金属大不相同。铁磁性金属(铁)处于  $B_1$  中被磁化,磁化后的金属内部磁偶极子对齐排列产生附加磁场  $B_2$ ,  $B_2$  与原磁场  $B_1$  方向一致,金属附近磁场变为  $B_1 + B_2$ , 如图 2(b)所示。

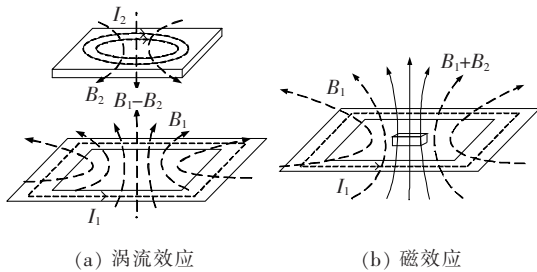


图 2 金属异物产生的附加磁场与原磁场叠加示意

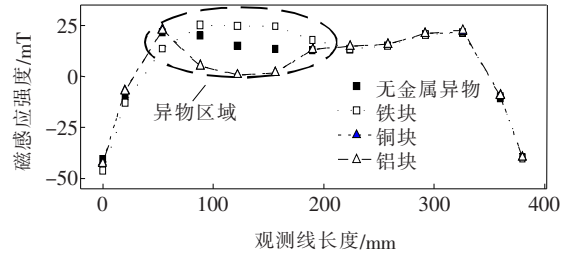
Figure 2 Diagram of magnetic field superposition of metallic foreign body

对于不同材质的金属异物仿真结果如图 3(a)所示,正常情况下系统磁场以发射线圈中心为轴对称分布。异物存在时铜块和铝块侧明显低于无异物侧磁感应强度,而铁块侧明显高于无异物侧磁感应强度,与理论分析结果一致。值得一提的是铜和铝的电导率数量级都为  $10^8$ , 在系统参数一定的情况下,2 种金属因涡流产生的反向磁场  $B_2$  相同,仿真结果显示铜块和铝块附近磁感应强度曲线重合。

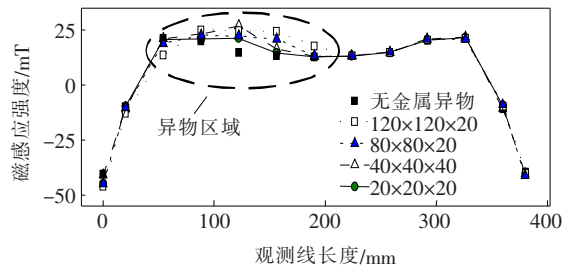
材质相同、面积( $\text{mm}^2$ )和厚度(mm)不同的金属异物对磁场造成的影响不同。如图 3(b)所示,厚度一定时铁块对原磁场磁感应强度的影响随铁块面积增大而增强;面积一定时铁块对原磁场磁感应强度的影响随铁块厚度的增加而增强。

系统正常工作时系统磁场是对称而不均匀的,同一金属异物处于同一分区、不同位置时异物对磁场的影响程度不同。为明确此影响机制,分别在不同大小的磁场中放置同一金属异物进行仿真,仿真

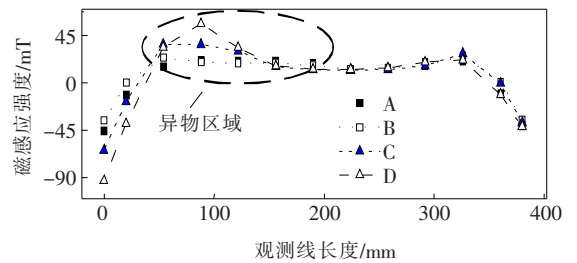
结果表明,金属异物对原磁场磁感应强度的影响随着原磁场磁感应强度的增大而增强。如图 3(c)所示,发射线圈由外到内,原磁场磁感应强度从最小值增大到最大值又降至一个稳定值,当异物处于 B、C、D 原磁场磁感应强度较强的外围区域时,异物对原磁场的影响越大。



(a) 同一位置、大小相同、材质不同的异物



(b) 同一位置、大小不同的铁块



(c) 同一分区、不同位置、大小相同的铁块

图 3 不同情况下发射线圈上表面特定取值线上的磁感应强度仿真结果

Figure 3 Simulation results of magnetic induction intensity under different conditions

## 2 三级线圈检测系统结构设计

### 2.1 系统结构及检测原理

如图 4 所示,本文提出的金属异物检测系统由三级线圈组成。第 1 级线圈由并行放置且刚好覆盖发射线圈的 2 个矩形单元检测线圈构成,定义该级 2 个单元检测线圈为  $1_1$ 、 $1_2$ 。每个单元检测线圈都是平衡线圈,即线圈两侧采用反向绕制的方式,等效电路模型如图 5 所示。

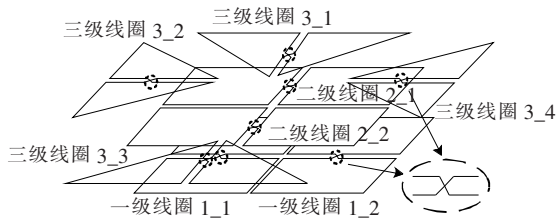


图4 三级检测线圈结构

Figure 4 Structure of three-stage detection coil

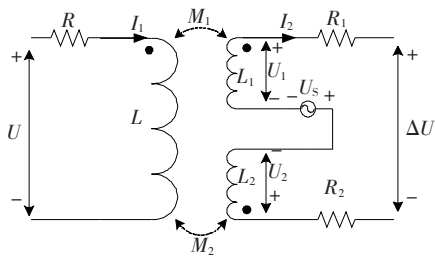


图5 单元检测线圈等效电路模型

Figure 5 Equivalent circuit model of unit detection coil

当单元检测线圈两侧磁通变化率相同时,两侧产生大小相同、方向相反的感应电压  $U_1$  和  $U_2$ 。测量整个单元检测线圈的输出感应电压,两侧产生的感应电压相互抵消,每个单元检测线圈的输出感应电压为  $0\text{ V}$ ,即  $\Delta U = U_1 - U_2 = 0\text{ V}$ 。当金属异物侵入系统时,改变所处区域原磁场磁感应强度,进而打破与该区域对应的单元检测线圈原本平衡的状态,单元检测线圈输出的感应电压不再是  $0\text{ V}$ ,即  $\Delta U = U_1 - U_2 - U_s \neq 0\text{ V}$ ,其中  $U_s$  为受金属异物影响的单元检测线圈感应电压。因此,测量各单元检测线圈的输出感应电压就可以对侵入系统的金属异物进行检测。

第2级线圈构造同第1级线圈,但2个单元检测线圈布置方向垂直于第1级线圈中2个单元检测线圈布置方向,定义该级2个单元检测线圈为 2\_1、2\_2。当金属异物侵入系统时,1、2级线圈都有与异物侵入区域对应的单元检测线圈,其通过输出感应电压做出反应,1、2级线圈相互配合实现异物的简单定位,即充电范围四分之一区域内的定位检测。

第3级线圈由顶点相交、刚好覆盖发射线圈的4个等腰三角形单元检测线圈构成,定义该级4个单元检测线圈为 3\_1、3\_2、3\_3、3\_4。等腰三角形单元检测线圈以底边高为轴,同样采用两侧反向绕制

的方式,等效电路模型见图5。第3级线圈和前两级线圈相互配合,在前两级线圈实现金属异物简单定位的基础上,将充电范围分割成8个检测分区 a、b、c、d、e、f、g、h,实现充电范围八分之一区域内的金属异物定位检测,如图6所示。该金属异物检测系统具有零检测死区的特性,即实现了覆盖范围内的全检测,系统的检测性能不会因异物某些特殊位置而受到影响,可靠性高。

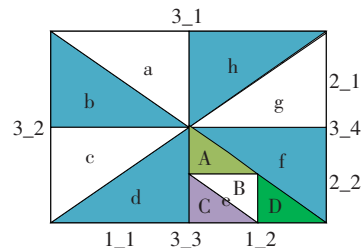


图6 检测分区

Figure 6 Diagram of detection partition

## 2.2 系统等效电路模型分析

对带有单个单元检测线圈的无线电能传输系统进行分析,其等效电路模型如图7所示,  $U_s$  为高频电源,  $U_0$  为检测线圈输出感应电压,  $R_L$  为负载电阻;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  以及  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为发射线圈、接收线圈和检测线圈回路等效电阻和电感;  $M_{12}$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{23}$  分别为发射与接收、发射与检测以及检测与接收线圈之间互感;各谐振回路串联补偿电容为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ,  $\omega$  为系统谐振角频率,满足  $\omega = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2} = 1/\sqrt{L_3 C_3}$ 。

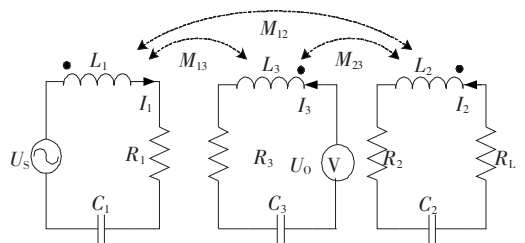


图7 系统等效电路模型

Figure 7 Equivalent circuit model of MRC-WPT system

流过各线圈的电流分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ (图7),根据基尔霍夫电压定律(KVL)得:

$$\begin{cases} Z_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 + j\omega M_{13} I_3 = U_s \\ j\omega M_{12} I_1 + Z_2 I_2 + j\omega M_{23} I_3 = 0 \\ j\omega M_{13} I_1 + j\omega M_{23} I_2 + Z_3 I_3 + U_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1$ ,  $Z_2 = R_2 + j\omega L_2 +$



$1/j\omega C_2 + R_L$ ,  $Z_3 = R_3 + j\omega L_3 + 1/j\omega C_3$ 。系统谐振时有  $j\omega L_i + 1/j\omega C_i = 0 (i = 1, 2, 3)$ , 求解式(1)得到:

$$\begin{cases} I_1 = [R_3(R_2 + R_L) + \omega^2 M_{23}^2] U_S / [R_1(R_3 \cdot \\ (R_2 + R_L) + \omega^2 M_{23}^2) + \omega^2 M_{13}^2(R_2 + \\ R_L) + \omega^2 M_{12}^2 R_3 - j2\omega^3 M_{13} M_{12} M_{23}] \\ I_2 = \frac{-\omega^2 M_{13} M_{23} - j\omega M_{12} R_3}{R_3(R_2 + R_L) + \omega^2 M_{23}^2} I_1 \\ I_3 = \frac{-\omega^2 M_{12} M_{23} - j\omega M_{13}(R_2 + R_L)}{R_3(R_2 + R_L) + \omega^2 M_{23}^2} I_1 \end{cases} \quad (2)$$

接收和检测线圈之间的距离较远且检测线圈为单匝,  $M_{23}$  忽略不计, 传输效率为

$$\eta = I_2^2 R_L / [I_1^2 R_1 + I_2^2 (R_2 + R_L) + I_3^2 R_3] = \omega^2 R_L M_{12}^2 R_3^2 / [R_3(R_2 + R_L)(R_1 R_3(R_2 + R_L) + \omega^2 M_{13}^2(R_2 + R_L) + \omega^2 M_{12}^2 R_3)] \quad (3)$$

由式(3)可知,  $\eta$  与发射、接收及检测线圈回路多个参数有关。为明确检测线圈对  $\eta$  的影响, 将  $\eta$  对  $R_3$  求偏导,  $\partial\eta/\partial R_3$  恒大于 0, 且  $\eta$  存在极大值, 可见  $\eta$  随  $R_3$  增大而增大, 并最终趋于不加检测线圈时系统的传输效率  $\eta_0$ 。  $\eta$  随  $R_3$  变化趋势如图 8 所示, 检测线圈和电压表串联, 检测线圈回路的电阻  $R_3$  非常大, 因此, 三级检测线圈对于系统传输效率几乎没有影响。

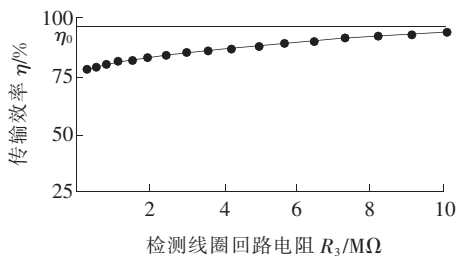


图 8 系统传输效率曲线

Figure 8 System transmission efficiency curve

### 2.3 确定最佳阈值电压

当三级线圈工作于完全对称的磁场中, 各单元检测线圈输出的感应电压为 0 V, 但系统实际磁场难免存在一些微小误差, 导致单元平衡检测线圈的输出感应电压略高于 0 V。为确定有效的阈值电压, 本文对 Maxwell 磁耦合执行机构模型和 Simpler 外电路建立联合仿真, 在不同情况下, 将金属异物对系统磁感应强度的影响反映到检测线圈的感应电压中。

本次仿真分别采用  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  铁、铜和铝块模拟金属异物, 分别置于图 6 中 e 分区的中心区域。仿真结果如图 9(a) 所示, 当放入铝和铜块时, 单元检测线圈 1\_2、2\_2、3\_3 的输出电压相同且比放入铁块时大得多。根据处于同一分区、不同位置的异物对系统原磁场磁感应强度影响程度不同的结论, 以检测线圈输出较小的铁块为参照异物, 当铁块处于同一分区、不同位置时, 仿真分析检测线圈的输出情况。仿真结果如图 9(b) 所示, 当铁块处于图 6 中 B、C、D 磁感应强度较强的外围区域时, 检测线圈输出感应电压明显大于处于 A 区域时的输出感应电压。假设发射线圈输入的是正弦电流, 则发射线圈产生的原磁场受铁块影响的变化量为

$$\Delta B = A_1 \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中  $A_1$  为铁块影响发射线圈原磁场磁感应强度变化量的幅值;  $\omega$  为系统谐振角频率;  $\theta$  为发射线圈原磁场的初始角。

穿过检测线圈的磁通变化量为

$$\Delta\phi = \Delta B \cdot S = A_1 \cos(\omega t + \theta) \cdot S \quad (5)$$

式中  $S$  为铁块覆盖面积。

匝数为单匝的检测线圈中产生的感应电压  $U$  为磁通变化量对时间的导数, 即

$$U = \frac{d\Delta\phi}{dt} =$$

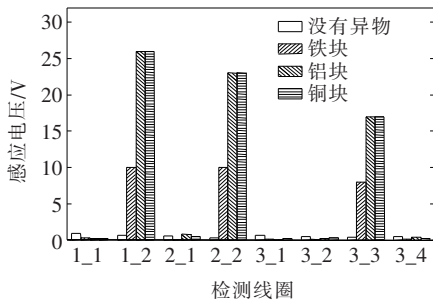
$$\frac{d\Delta B \cdot S}{dt} = -S \cdot A_1 \omega \sin(\omega t + \theta) \quad (6)$$

根据式(6), 结合同一异物对磁场越强区域影响越大的结论, 可知检测线圈输出的感应电压大小和发射线圈产生的磁场的幅值成正比。所以异物越靠近线圈外侧磁感应强度较强区域, 对应的单元检测线圈输出的感应电压越大。

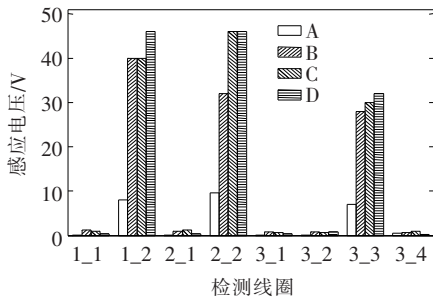
为得到有效的阈值电压, 需要确定对原磁场磁感应强度影响最小的金属异物处于磁感应强度最小区域时检测线圈能够检测出的异物最小面积和厚度。对于异物面积和厚度的仿真, 本文将不同规格铁块置于磁感应强度最弱的 A 区域(图 6), 仿真结果如图 9(c) 所示。当  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  铁块置于 A 区域时, 对应单元检测线圈 1\_2、2\_2、3\_3 的输出电压远远大于其他单元检测线圈的输出电压。随着铁块面积和厚度减小, 单元检测线圈 1\_2、

2\_2、3\_3 的输出电压减小,其他单元检测线圈的输出电压增大。当 20 mm×20 mm×10 mm 铁块置于 A 区域时,单元检测线圈 1\_2 的输出电压小于没有异物时单元检测线圈 1\_2 的输出电压,而单元检测线圈 2\_1 的输出电压超过单元检测线圈 1\_2 的输出电压,此时系统失去检测功能。

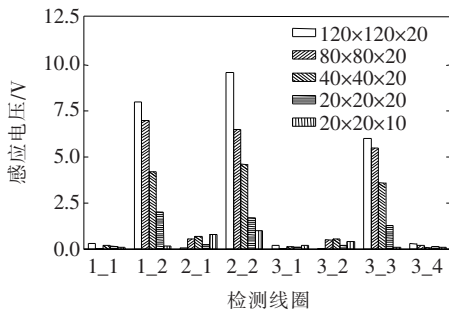
综上所述,当本文取 20 mm×20 mm×20 mm 的铁块处于 e 分区 A 区域时,与 e 分区对应的 3 个单元检测线圈中输出感应电压最小的单元检测线圈输出电压为阈值电压,即 1.4 V。



(a)同一位置、大小相同材质不同的异物



(b)同一分区、不同位置、大小相同的铁块



(c)同一位置、大小不同的铁块

图 9 不同情况下检测线圈输出电压的仿真结果

Figure 9 Simulation results of detection coil output voltage in different conditions

### 3 实验结果与分析

基于三级线圈的结构设计,拟定金属异物位置

参照,如表 2 所示。当金属异物侵入充电范围某分区时,对应该分区的单元检测线圈输出电压升高(√表示),达到异物定位检测的目的。

表 2 金属异物位置参照

Table 2 Reference table for location of metallic foreign body

分区	1_1	1_2	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	3_4
a	√	—	√	—	—	—	√	—
b	√	—	√	—	—	√	—	—
c	√	—	—	√	—	√	—	—
d	√	—	—	√	—	—	—	√
e	—	√	—	√	—	—	—	√
f	—	√	—	√	√	—	—	—
g	—	√	√	—	√	—	—	—
h	—	√	√	—	—	—	√	—

为验证该检测系统的实际有效性,搭建谐振式无线电能传输实验平台,如图 10 所示。实验平台几何尺寸和仿真模型参数保持一致,系统工作频率为 500 kHz,输入电流为 2 A,检测线圈紧附于发射线圈上表面。为保证实验效果,减小趋肤效应对载流导线造成的损耗,实验所用的发射、接收及检测线圈均用 250 股半径为 0.1 mm 的导线组成的利兹线(截面积为 1.962 mm<sup>2</sup>)绕制而成。系统工作过程中 E 类逆变器工作于 ZVS 状态,大大降低了开关损耗,提高了工作可靠性。

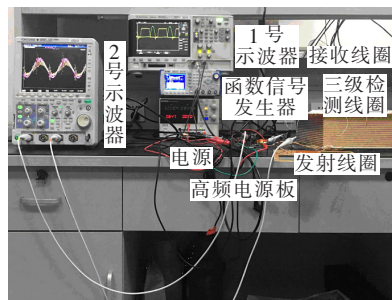
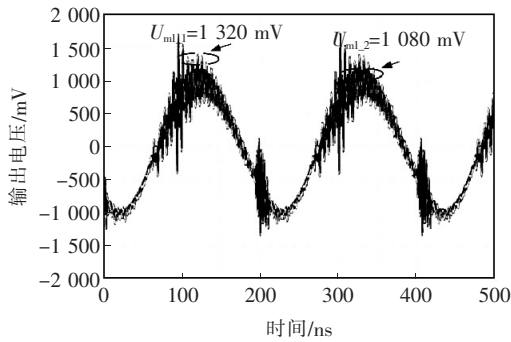


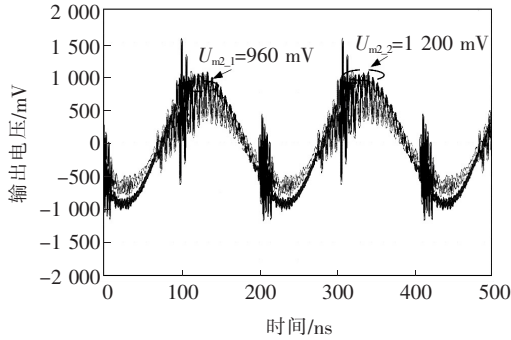
图 10 实验原型实物

Figure 10 Experimental prototype

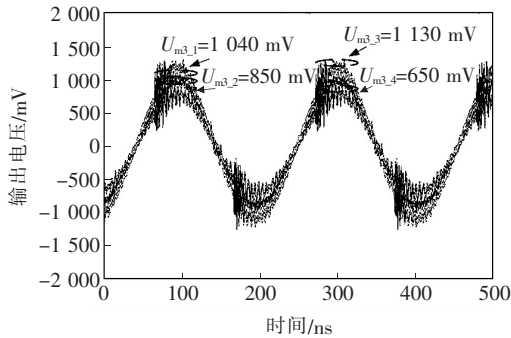
没有异物侵入时各单元检测线圈输出电压波形如图 11 所示。同一级中的单元检测线圈输出电压大小相同,输出电压最大的单元检测线圈 1\_1 输出电压峰值为 1 320 mV,小于阈值电压 1.4 V,与仿真结果一致,符合检测要求。



(a) 一级检测线圈输出波形



(b) 二级检测线圈输出波形

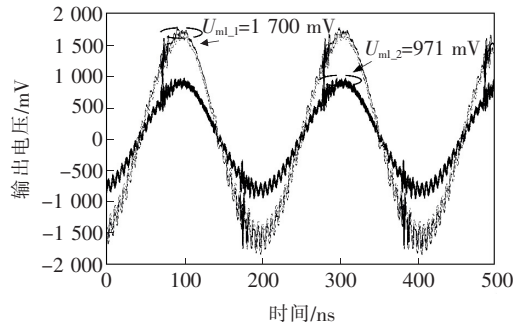


(c) 三级检测线圈输出波形

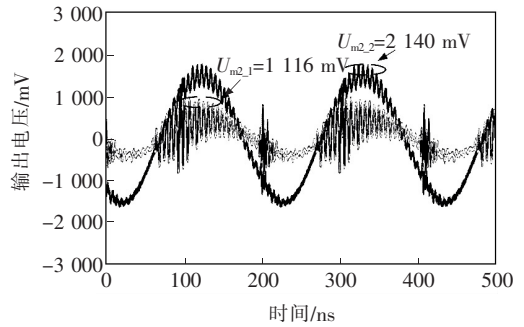
图 11 无异物时检测线圈输出电压波形

Figure 11 Output voltage waveform of coil with no foreign body

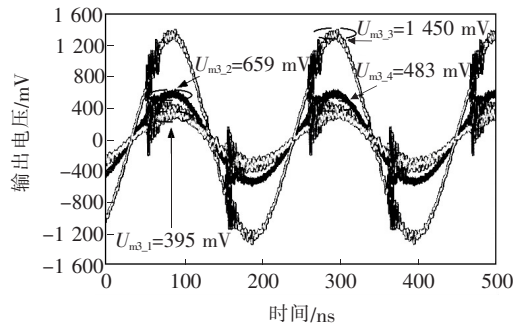
将  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  铜片置于发射线圈表面 d 分区(图 6),各单元检测线圈输出电压波形如图 12 所示。受铜片影响各单元检测线圈输出电压发生了明显变化。铜片所处区域对应的单元检测线圈输出电压明显高于无异物时各自的输出电压,而非异物区域对应的单元检测线圈输出电压比在无异物时各自的输出电压低,且输出电压升高的单元检测线圈输出电压峰值均高于阈值电压  $1.4\text{ V}$ ,符合检测要求。实验结果表明,三级线圈检测系统可对侵入系统的金属异物做出灵敏反应,且输出电压升高的单元检测线圈与拟定的金属异物位置参照表一致,进一步证明了该系统对于金属异物定位检测的有效性。



(a) 一级检测线圈输出波形



(b) 二级检测线圈输出波形



(c) 三级检测线圈输出波形

图 12  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  铜片于 d 分区时检测线圈输出波形Figure 12 The output voltage waveform of the coil with  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  copper sheet in d partition

## 4 结语

针对磁谐振式无线电能传输系统金属异物侵入问题,本文设计了一种基于三级线圈的新型金属异物定位检测系统;分析了金属异物在不同情况下对系统原磁场磁感应强度的影响机制,并基于上述分析结果,阐述了三级线圈金属异物定位检测系统的工作原理。该系统能够在零检测死区的情况下实现充电范围八分之一区域内的金属异物定位检测,具有良好的适用性和灵敏性,且对电能的传输功率和效率不会产生影响。最后,通过仿真和实验验证了

系统的有效性。该新型金属异物定位检测系统能够提高现今飞速发展的磁谐振式无线电能传输技术的安全性和可靠性,具有广阔应用前景。

### 参考文献:

- [1] 范兴明,莫小勇,张鑫.无线电能传输技术的研究现状与应用[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2584-2600.  
FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [2] CHENG Y H, WANG G F, GHOVANLOO M. Analytical modeling and optimization of small solenoid coils for millimeter-sized biomedical implants[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(3):1024-1035.
- [3] 秦伟,张文杰,吝艳艳,等.基于失谐的无线电能传输系统抗偏移性研究[J].电测与仪表,2022,59(3):32-37.  
QIN Wei, ZHANG Wenjie, LIN Lingyan, et al. Research on anti-misalignment of wireless power transfer system based on detuning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3):32-37.
- [4] 杨阳,崔金龙,崔信.电动汽车无线充电系统磁耦合线圈耦合系数的研究[J].智慧电力,2020,48(8):56-62+115.  
YANG Yang, CUI Jinlong, CUI Xin. Coupling coefficient of magnetic structure coil for wireless charging system of electric vehicles[J]. Smart Power, 2020, 48(8):56-62+115.
- [5] 焦宇峰,李锐杰,宋国兵.磁耦合谐振无线传输系统传输特性的研究及优化[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):112-120.  
JIAO Yufeng, LI Ruijie, SONG Guobing. Research and optimization of transmission characteristics of magnetically coupled resonant wireless transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9):112-120.
- [6] ESKANDARIAN N, HARCHEGANI A T, KAZEMI S S. A novel structure for high step-up DC-DC converter with flexibility under the variable loads for EV solar charging system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(6):e12375.
- [7] SHI S S, ZHANG Y, FU Z J, et al. Optimal configuration of energy storage system capacity in PV-integrated EV charging station based on NSGA-III[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1993(1):012013.
- [8] 李阳,杨庆新,闫卓,等.磁耦合谐振式无线电能传输方向性分析与验证[J].电工技术学报,2014,29(2):197-203.  
LI Yang, YANG Qingxin, YAN Zhuo, et al. Analysis and validation on characteristic of orientation in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):197-203.
- [9] BI Z C, KAN T Z, MI C T C, et al. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility[J]. Applied Energy, 2016, 179:413-425.
- [10] JANG G C, JEONG S Y, KWAK H G, et al. Metal object detection circuit with non-overlapped coils for wireless EV chargers[C]//IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, SPEC 2016, Auckland, New Zealand, 2016.
- [11] 王黎明,李宗,孟晓波,等.一种交流电场无线取能电源的优化设计[J].高压电器,2020,56(5):121-127.  
WANG Liming, LI Zong, MENG Xiaobo, et al. Optimization design of an AC electric field wireless power supply [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):121-127.
- [12] 陈晓娟,贾敏,李明晨.基于线圈偏移的无线电能传输系统参数优化方法[J].中国电力,2021,54(7):125-131.  
CHEN Xiaojuan, JIA Min, LI Mingchen. Coil offset based wireless power transfer system parameter optimization[J]. Electric Power, 2021, 54(7):125-131.
- [13] 林光,姚益彬,樊昌,等.中短波发射台供电故障定位研究[J].电网与清洁能源,2020,36(3):49-54.  
LIN Guang, YAO Yibin, FAN Chang, et al. Research on location of power supply faults of the medium and short wave transmitting station[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3):49-54.
- [14] ROY AM, KATZ N, KURS A B. Foreign object detection in wireless energy transfer systems[P]. United States Patent: US10686337B2, 2020-06-16.
- [15] JEONG S Y, 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.