DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.258 中图分类号：TM910.6;U469.72 文献标志码：A

基于垂直解耦线圈组的 WPT 系统金属异物检测方法

项 飞，钟文兴(中国电源学会会员)
(浙江大学电气工程学院，杭州 310027)

摘要：针对单个平面方形线圈的无线电能传输系统，提出 1 种基于垂直解耦线圈组的金属异物检测MOD(metal object detection)方法。检测线圈通过合理组合形成检测线圈组，与发射线圈和接收线圈同时实现解耦。在无金属异物时，检测线圈组的感应电压接近 0，且受接收线圈偏移影响小。当金属异物落在发射线圈顶部时，会产生涡流，在检测线圈组中感应出电压。所提方法的检测准确度基本不受接收线圈偏移的影响，无需针对不同的线圈偏移位置进行检测电路置零或调整阈值。检测线圈的参数通过有限元仿真进行优化设计。基于 300 W 无线充电系统进行 MOD 实验，结果表明所提方法可以在偏移情况下实现准确的金属异物识别。所提方法解决了平面检测方案受接收线圈偏移影响的问题，检测灵敏度高，具有较高工程应用价值。

关键词：金属异物检测；无线电能传输；解耦线圈组

Metal Object Detection Method for WPT System with Vertically Decoupled Coil Sets

XIANG Fei, ZHONG Wenxing, *Member*, *CPSS*
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For a wireless power transfer system with one single planar rectangular pad, a metal object detection (MOD) method based on vertically decoupled coil sets is proposed. The detection coils are combined in a reasonable manner to form a detection coil set, which is decoupled from the transmitting and receiving coils simultaneously. When there is no metal object, the induced voltage of the detection coil set will be close to zero and minimally affected by the offset of the receiving coil. When a metal object falls on the top of the transmitting coil, eddy currents will be generated and induced voltage will appear in the detection coil set. The detection accuracy of the proposed method is not significantly affected by the offset of the receiving coil, and there is no need to reset the detection circuit or adjust the threshold for different offset positions. The parameters of the detection coil are optimized by finite element simulations. Based on a 300 W wireless charging system, MOD experiments were conducted, and results show that the proposed method can accurately identify metal objects even in offset situations. This method solves the problem of a planar detection scheme being affected by the offset of the receiving coil, with high detection sensitivity and great engineering application value.

Keywords: Metal object detection (MOD); wireless power transfer (WPT); decoupled coil set

近年来，无线电能传输技术凭借其便利性与安全性[1-2]，受到了极大关注，并应用于诸多领域，如便携设备、机器人与电动汽车等的无线充电[3-5]。制约无线电能传输技术应用的最大问题之一是金属异物检测 MOD(metal object detection)[3, 6-8]。一方面，金属异物落在发射线圈顶部时会产生涡流，造成功率损耗，降低系统效率[9-10]；另一方面，涡流使金属异物发热，可能会损坏充电设备，甚至引发

收稿日期：2022-12-14；**修回日期：**2023-02-23，2023-03-22，2023-04-20；**录用日期：**2023-05-08；**网络首发日期：**2023-06-28
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021FZZX001-12)
This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant 2021FZZX001-12

火灾[9-10]。

目前，MOD 方法主要分为 3 类：一是通过系统的电气参数变化来实现识别，如系统工作频率[11]、功率损耗[12]、功率线圈的电压、电流、阻抗、品质因数等[13-15]，这类方法不需要额外装置，便于实施，但容易受系统工况与功率线圈偏移影响，检测准确度低；二是通过传感设备实现识别，如温度传感器、热感摄像机、热敏电阻、图像识别、雷达、压力传感器等[16-18]，这类方法检测灵敏度高，不区分金属与非金属异物，但占用空间大且成本较高；三是通过检测线圈实现识别[19-22]，这类方法成本低、检测灵敏度高、工程应用价值高。检测线圈方法又可以分为有源检测与无源检测。有源检测方法通过给检测线圈施加额外激励，根据检测线圈阻抗变化实现金属异物识别[19]，这类方法无检测盲区、抗干扰能力强，但检测灵敏度不高，检测系统较复杂；无源检测方法通过功率线圈与检测线圈的互感变化实现金属异物识别[20-22]，这类方法功耗小、检测灵敏度高，但存在盲区与检测准确度受接收线圈偏移影响的问题。其中，文献[20-21]提出的非重叠检测线圈与文献[22]提出的对称检测线圈通过双层结构消除检测盲区，并设计数字电位器调零电路在每一次充电前对检测线圈的电压信号进行校零。检测线圈法识别金属异物需要依赖准确的接收线圈位置识别，这使得检测系统过于复杂，不利于实际工程应用。

为了解决检测线圈法受接收线圈偏移影响较大的问题，本文针对单个平面方形线圈 RP(rectangular pad)的无线电能传输系统，提出了 1 种基于与功率线圈垂直解耦的检测线圈方案。检测线圈组制作于双层印刷电路板 PCB(printed circuit board)上，与发射线圈和接收线圈基本实现解耦。本文所提方法无需在不同偏移情况下对检测电路进行校零，或针对不同偏移设置不同的阈值电压，简化检测系统，更利于工程应用。

1　与功率线圈垂直解耦的检测线圈

磁耦合式无线充电技术通过发射线圈与接收线圈之间的磁场耦合实现电能传输。当金属异物混入充电区域时，会在金属内部产生涡流。由法拉第电磁感应定律知，涡流产生的磁场 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}$ 总是削弱原磁场 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}$ 的变化，如图 1 所示。当金属异物厚度 h 小于集肤深度 δ 时，涡流损耗 P_{eddy}[22]可以表示为

$$P_{\mathrm{eddy}}=\frac{\sigma k^2 f^2 \boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}^2 l^3 w^2}{12(l+w)}h \tag{1}$$

当金属异物厚度 h 大于集肤深度 δ 时，涡流损耗 P_{eddy} 可以表示为

$$P_{\mathrm{eddy}}=\frac{\sigma k^2 f^2 \boldsymbol{B}_{\mathrm{t}}^2 l^3 w^2}{12(l+w)}\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{2}$$

式中：σ 为集肤深度；k 为耦合系数；f 为工作频率；l 为金属异物的长度；w 为金属异物的宽度；ω 为角频率；μ 为磁导率。

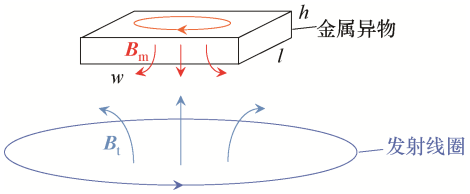


图 1　涡流损耗示意

Fig. 1 Schematic of eddy current loss

除了金属异物的涡流效应，接收线圈的偏移也会使磁感应强度分布发生改变，本文搭建有限元仿真模型分析金属异物与接收线圈偏移对磁感应强度分布的影响，如图 2 所示，有限元仿真所用参数见表 1，接收线圈电源滞后发射线圈电源 90°。图 2 中，磁场检测面距离发射线圈上表面 2 mm。图 2(a)展示了无线充电系统无偏移无异物工作时磁感应强度 Z 方向分量 $\boldsymbol{B}_z$ 在检测面处的分布。当接收线圈发生偏移(X方向偏移 30 mm，Y方向偏移 30 mm)或发射线圈表面存在金属异物时，$\boldsymbol{B}_z$ 分布均会发生改变，如图 2(b)和(c)所示。图 2(d)展示了系统无偏移无异物工作时磁感应强度 Y 方向分量 $\boldsymbol{B}_y$ 的分布。当接收线圈发生偏移时(X方向偏移 30 mm，Y方向偏移 30 mm)，$\boldsymbol{B}_y$ 分布基本不变，如图 2(e)所示。当发射线圈表面存在金属异物时，$\boldsymbol{B}_y$ 分布在异物位置处发生了明显改变，如图 2(f)所示。由以上结果可见，相比 $\boldsymbol{B}_z$，$\boldsymbol{B}_y$ 仅在有金属异物时变化明

显。因此，本文提出 1 种与功率线圈垂直解耦的检测线圈组(见图 2)，其线圈环路与 *XOZ* 平面平行，与 *Y* 轴垂直。因此，检测线圈仅对 $\boldsymbol{B}_y$ 变化敏感。下文将介绍垂直解耦检测线圈组的设计原则。

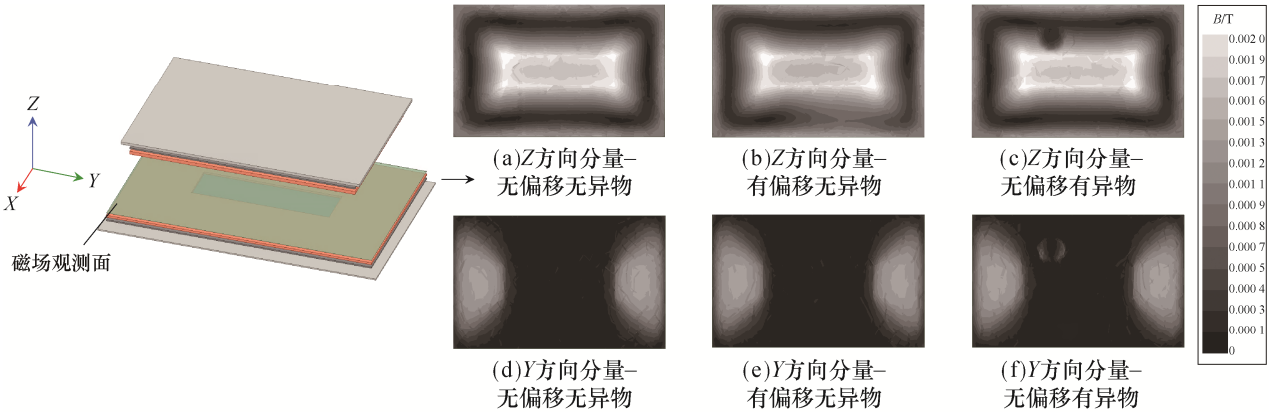


图 2 观测面上的磁感应强度

Fig. 2 Magnetic field intensity on observation plane

表 1 无线充电系统与金属异物检测系统参数

Tab. 1 Parameters of wireless charging system and MOD system

参数	数值
一次侧铝板尺寸/mm	200×125×2
一次侧磁心尺寸/mm	200×125×2
铝板与磁心间距/mm	5
发射线圈尺寸/mm	200×125
发射线圈匝数	30
发射线圈电流/A	2
气隙/mm	50
长检测线圈组/mm	125×12
长线圈组间距/mm	5
发射线圈与检测线圈间距/mm	1
异物与检测线圈间距/mm	2
铜片尺寸/mm	30×30×0.5
二次侧铝板尺寸/mm	170×110×2
二次侧磁心尺寸/mm	170×110×2
磁心与线圈间距/mm	2
接收线圈尺寸/mm	170×110
接收线圈匝数	16
接收线圈电流/A	5
工作频率/kHz	200
短检测线圈组长度/mm	20×18
检测线圈匝数	8
检测线圈高度/mm	2
金属异物材料	铜
铜币尺寸/mm	*Φ*25×2

1.1 与发射线圈解耦

由图 2(d)可见，在接收线圈正对且无金属异物时，$\boldsymbol{B}_y$ 在 *X* 轴两侧较远处的区域内较高，检测线圈与功率线圈耦合较大。为实现检测线圈与发射线圈的解耦，检测线圈采用“8”字形绕线方式，如图 3(a)所示。2 个检测线圈环关于 *Y* 轴对称，所感应到的电压可互相抵消，总感应电压 v_s=0。为方便展示原理，图 3 中检测线圈仅有 1 匝，实际应用中可增加匝数以增加检测信号强度。

1.2 与接收线圈解耦

检测线圈通常安装在发射线圈侧，功率线圈偏移不会改变发射线圈与检测线圈的耦合，仅需讨论接收线圈与检测线圈的解耦。当接收线圈与发射线圈对准或仅存在 *Y* 方向的偏移时，图 3(a)中的检测线圈与接收线圈也是解耦的。但当接收线圈存在 *X* 方向的偏移时，接收线圈在图 3(a)检测线圈中所感应的电压 v_s 不再为 0。为消除检测线圈与接收线圈的耦合，将相邻的 2 组检测线圈进行反向串联，如图 3(b)所示，图中，$\boldsymbol{B}$ 为磁场。由于接收线圈距离检测线圈较远，相邻 2 组检测线圈的磁通基本相等，反向串联后感应电压相互抵消，可实现检测线圈与接收线圈的解耦。

1.3 消除检测盲区

当金属异物关于 *Y* 轴对称时，*Y* 轴两侧检测线

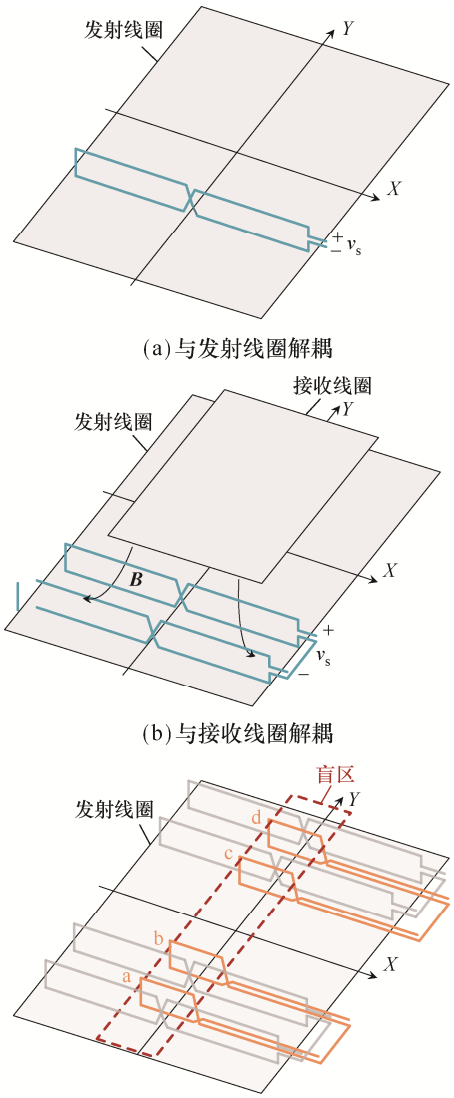


图 3　检测线圈与功率线圈解耦

Fig. 3 Decoupling of detection coil set from power coils

圈中由于金属异物引起的感应电压变化一致，因此最终的检测电压信号不会产生变化，仅靠图3(a)和(b)中的检测线圈无法识别到 Y 轴上的金属异物。为消除 Y 轴上的检测盲区，在 Y 轴额外添加短检测线圈，如图 3(c)所示。为与发射线圈解耦，原则上将关于 X 轴对称的 2 个短检测线圈进行反向串联；为与接收线圈解耦，将相邻 2 个短检测线圈进行反向串联。如图 3(c)所示，线圈 a 与线圈 b 反向串联，线圈 c 与线圈 d 反向串联，然后线圈组 a-b 与线圈组 c-d 再反向串联形成最终的检测线圈组。由于线圈组 a-b 与线圈组 c-d 在空间上相隔可能较远，为避免连线引入干扰，可分别检测其电压信号，再在单片机中进行相减。

2　仿真参数设计

检测线圈组由覆盖发射线圈平面的 12 组长检测线圈与 6 组短检测线圈组成，整体布局如图 4(a)所示。其中，线圈组 13 与 18，线圈组 14 与 17 在单片机内部进行互减计算。此外，由于线圈组 15 与 16 靠近线圈中心，与发射线圈基本解耦，因此无需互减。为验证所提检测线圈的可行性并对检测线圈的参数进行优化设计，搭建有限元仿真模型。检测线圈具体参数定义如图 4(b)所示，检测线圈制作于双层 PCB 上，检测线圈高度等于 PCB 的板厚。l_{c1} 与 l_{c2} 分别为长检测线圈与短检测线圈的长度，为实现全范围的检测，l_{c1} 与发射线圈宽度相等，l_{c2} 设置为 20 mm；n_1 与 n_2 分别为长检测线圈与短检测线圈的匝数，w_{c1} 与 w_{c2} 分别为长检测线圈与短检测线圈组的宽度，线圈匝数与线圈宽度均通过有限元仿真进行设计；w_b 为检测线圈组间距。检测线圈走线宽度为 0.254 mm (10 mil)，走线间距为 0.254 mm (10 mil)，厚度为 PCB 铜厚 0.035 mm，孔径为 0.2 mm。

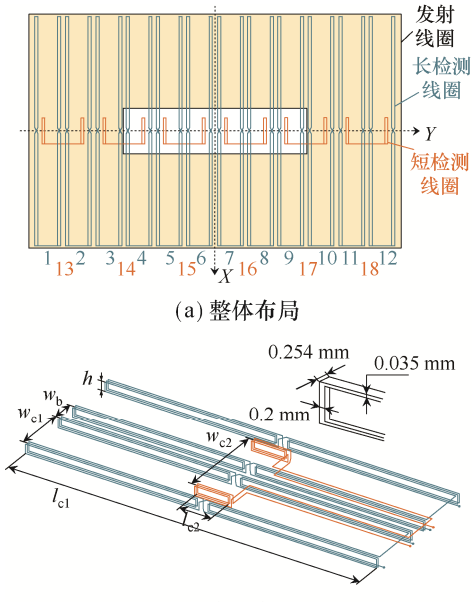


图 4　检测线圈

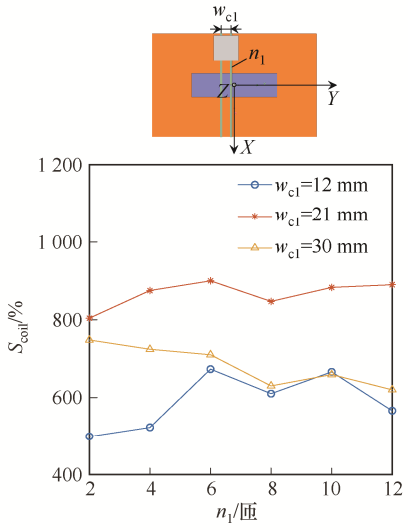
Fig. 4 Detection coil

取检测线圈在接收线圈不同偏移位置下(无金属异物)的感应电压最大值作为阈值电压 $V_{\text{threshold}}$，检测线圈的灵敏度 S_{coil} 定义为

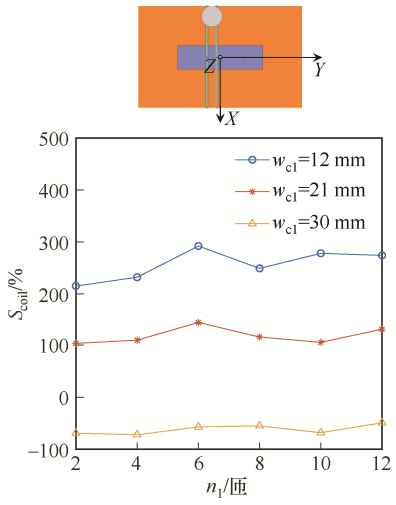
$$S_{\text{coil}}=\frac{V_{\text{metal}}-V_{\text{threshold}}}{V_{\text{threshold}}}=\frac{\Delta V}{V_{\text{threshold}}} \tag{3}$$

式中，V_{metal} 为存在金属异物时检测线圈组的感应电压。

利用 ANSYS MAXWELL 2022 对 2 种尺寸的金属异物进行仿真。基于发射线圈平面大小与金属异物尺寸，检测线圈宽度选取 12、21、30 mm 进行仿真；基于常见检测线圈匝数与 PCB 走线间距，匝数选取 2、4、6、8、10、12 进行仿真，仿真结果如图 5 所示。对于铜片，在 w_{c1}=21 mm 时，检测效果最优；对于铜币，在 w_{c1}=12 mm 时，检测效果最优。将 w_{c1} 设置为 12 mm 时，检测线圈对铜片与铜币均有不低于200%的检测灵敏度。对于铜币与铜片，线圈匝数对灵敏度的影响比线圈宽度小，适当增加线圈匝数可以增加检测信号值，便于后续电路对检测信号的处理，故将匝数 n_1 设置为 8 匝。基于同样的分析，设置 w_{c2}=18 mm，n_2=8 匝。通过发射线圈长度与检测线圈宽度计算得到检测线圈组间距 w_b=5 mm，最终检测线圈参数设计结果见表 1。



(a)铜片落在检测线圈上(30 mm×30 mm×0.5 mm)



(b)铜币落在检测线圈上(Φ25 mm×2 mm)

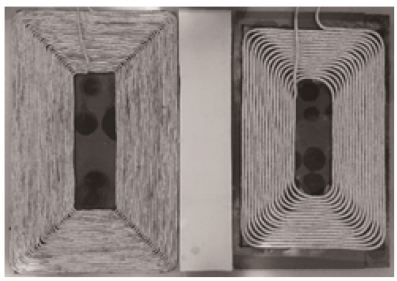
图 5 仿真设计 w_{c1} 和 n_1

Fig. 5 Simulation design of w_{c1} and n_1

3 实验验证

3.1 实验平台

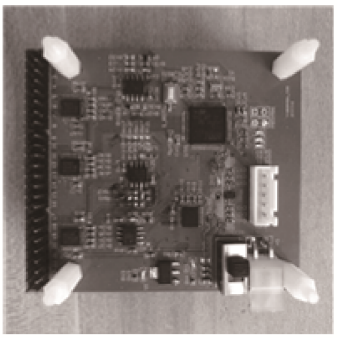
本文搭建 300 W 无线充电系统与金属异物检测系统进行实验验证。无线充电系统由直流电源、逆变器、发射线圈及谐振电容、接收线圈及谐振电容、整流器与负载组成。金属异物检测系统由检测线圈、检测电路组成。系统具体参数见表 1，功率线圈如图 6(a)所示，检测线圈组如图 6(b)所示，上下层线圈通过过孔连接。检测电路由选通模块、滤波放大电路、峰值检波电路、单片机等组成，如图 7 所示。选通模块包含 3 个 8 通道多路复用开关芯片(ADG708)，每一时刻选择 1 组检测线圈接入，其余检测线圈处于开路状态。滤波放大电路由低通滤波器与同相比例放大电路组成，低通滤波器消除高频信号的干扰，同相比例放大电路输入阻抗高，对信号影响小，并对检测信号进行适当放大。峰值检波电路将信号由交流信号转为直流信号，并接入单片机(STM32F334R8T6)的 ADC 模块。检测电路实物如图 6(c)所示。



(a)功率线圈



(b)检测线圈组



(c)检测电路

图 6　实验装置

Fig. 6 Experimental equipment

3.2　实验结果

3.2.1　阈值确定

在进行金属异物检测实验前，需要确定检测线圈电压信号的阈值。如前所述，在不同偏移情况下，测量各组检测线圈在无金属异物时的感应电压，取其中最大值为对应检测线圈组的阈值。图 8 展示了 16 组检测线圈在不同偏移情况下的检测电压信号。可以看出，所有检测线圈组的检测电压信号受接收线圈偏移影响较小，与前文分析相符。长检测线圈组信号皆在 20 mV 以下，阈值电压可以设置为 25 mV；第 13 短检测线圈组阈值设置为 65 mV；第 14 短检测线圈组阈值设置为 35 mV；第 15~16 短检测线圈组阈值设置为 25 mV。

3.2.2　金属异物在不同位置的实验结果

金属异物采用尺寸为 30 mm×30 mm×0.5 mm 的铜片。在发射线圈上选择 10 处位置进行金属异物检测，如图 9 所示，比较在接收线圈对准与偏移时的异物检测效果。各组检测线圈的阈值电压由 3.2.1 节所述确定。当金属异物处于位置 2 时，第 2 检测线圈组感应电压的示波器波形如图 9(c)所示。实验结果表明，无论在接收线圈对准还是偏移时，各组检测线圈的感应电压在有金属异物时均超出了阈值电压，能实现全范围的金属异物检测。此外，金属异物越接近发射线圈中心，涡流越严重，检测线圈的感应电压越高，检测灵敏度越高。

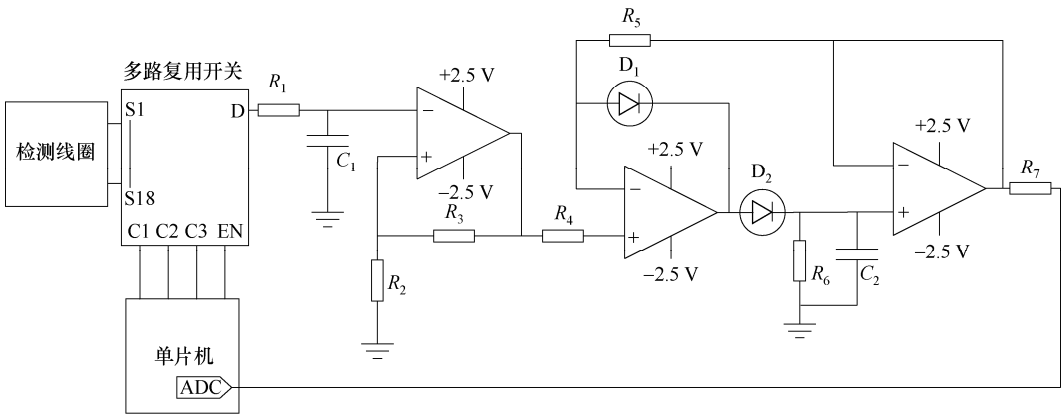


图 7　检测电路原理

Fig. 7 Schematic of detection circuit

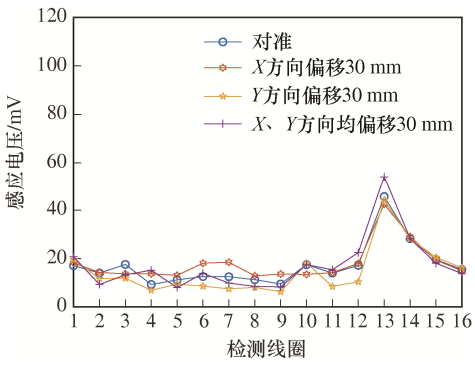


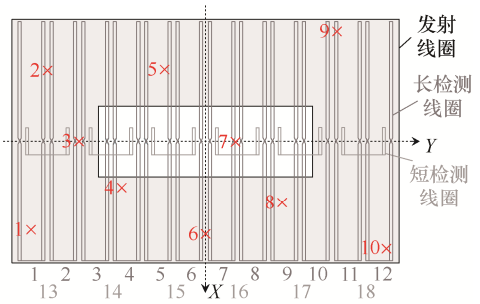
图 8　检测线圈在接收线圈不同偏移下的感应电压

Fig. 8 Induced voltage of detection coil under different offsets of receiving coil

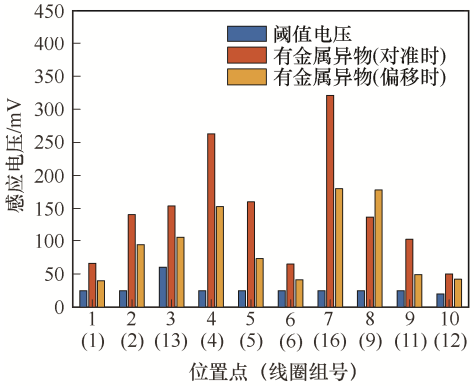
3.2.3　不同金属异物的实验结果

选取 1 元硬币、螺栓、1 角硬币分别进行金属

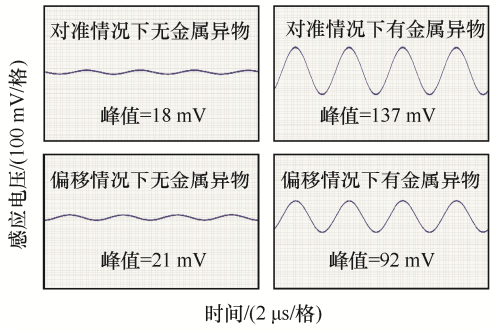
异物检测实验，实验结果见表 2。由此可以看出，本文提出的检测线圈可以对常见的金属异物进行有效识别，可用于手机、智能机器人、电动汽车等设备的无线充电系统中，提升系统的安全性。



(a) 异物位置



(b) 实验结果



(c) 第2检测线圈组感应电压波形

图 9 金属异物检测实验

Fig. 9 Experiment of MOD

表 2 检测不同金属异物的实验结果

Tab. 2 Experimental results when detecting different metal objects

测试金属物体	检测线圈感应电压/mV
1 元硬币	162
螺栓(30 mm×5 mm)	50
1 角硬币	36

4 结语

本文提出了 1 种基于垂直解耦线圈的用于方形线圈结构的无线充电系统金属异物检测方法。检测线圈与发射线圈垂直，可制作于 1 块双层 PCB 上，上下层线圈通过过孔连接。本文在分析无线充电系统磁场分布的基础上，提出垂直解耦检测线圈的概念。通过对称位置检测线圈的两两组合，抵消发射线圈或接收线圈在检测线圈上形成的感应电压，使检测线圈组与发射线圈和接收线圈皆解耦。因此，垂直解耦检测线圈可减小接收线圈偏移所引入的感应电压，实现偏移情况下的金属异物识别。最后，搭建样机系统对所提 MOD 方法进行实验验证。实验结果表明，本文所提 MOD 方法无需针对接收线圈不同偏移位置进行检测电路置零或调整阈值，在接收线圈偏移下能实现可靠的金属异物识别，成本较低，有较高的工程应用价值。

参考文献：

[1] 夏晨阳, 赵书泽, 杨颖, 等. 电动汽车无线充电系统研究综述[J]. 广东电力, 2018, 31(11): 3-14.
Xia Chenyang, Zhao Shuze, Yang Ying, et al. Research review on electric vehicle wireless charging system [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(11): 3-14. (in Chinese)

[2] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
Zhao Zhengming, Liu Fang, Chen Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40. (in Chinese)

[3] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547-1568. (in Chinese)

[4] 何欣悦, 方赞峰, 黄天浩, 等. 互操作电动汽车无线充

电系统设计方法[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 84-92.
He Xinyue, Fang Zanfeng, Huang Tianhao, et al. Design method for interoperable EV wireless charging system [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 84-92. (in Chinese)

[5] 江炳蔚, 魏斌, 蒋成, 等. 电力巡检机器人移动式无线充电系统分析与验证[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 360-368.
Jiang Bingwei, Wei Bin, Jiang Cheng, et al. Analysis and verification of dynamic wireless charging system for substation inspection robot [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 360-368. (in Chinese)

[6] 张彬, 朱翀, 张希. 电动汽车无线充电系统金属异物检测灵敏度优化方法[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 209-218.
Zhang Bin, Zhu Chong, Zhang Xi. Sensitivity optimization method for metal object detection in electric vehicle wireless charging system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 209-218. (in Chinese)

[7] 田勇, 杨昊, 胡超, 等. 基于毫米波雷达的电动汽车无线充电运动异物检测与跟踪[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 297-308.
Tian Yong, Yang Hao, Hu Chao, et al. Moving foreign object detection and track for electric vehicle wireless charging based on millimeter-wave radar [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 297-308. (in Chinese)

[8] 孙瀛, 周天, 宋凯, 等. 提升无线充电异物检测系统灵敏度的高阶复合谐振拓扑[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1541-1552.
Sun Ying, Zhou Tian, Song Kai, et al. Design of high-order composite resonant topology for improving the sensitivity of foreign object detection system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1541-1552. (in Chinese)

[9] 田子建, 杜欣欣, 朱元忠, 等. 障碍物对磁耦合谐振无线输电系统传输效率的影响[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 49-53.
Tian Zijian, Du Xinxin, Zhu Yuanzhong, et al. Impact of obstacles on transmission efficiency of magnetic coupling resonant wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(1): 49-53. (in Chinese)

[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.
Ma Zhongyuan, Liao Chenglin, Wang Lifang. Analysis of metal foreign object setting on electric vehicle wireless power transfer system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(2): 14-20. (in Chinese)

[11] Moghaddami M, Sarwat A I. A sensorless conductive foreign object detection for inductive electric vehicle charging systems based on resonance frequency deviation [C]// 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA, 2018: 1-6.

[12] 杨成蒙, 孙培德. 一种位置自由的低功耗无线充电系统[J]. 电子设计工程, 2014, 22(4): 124-126.
Yang Chengmeng, Sun Peide. A low-power free-positioning wireless charging system [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(4): 124-126. (in Chinese)

[13] 张立新. 低功率无线充电的研究与系统实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
Zhang Lixin. Research of low power wireless charging and system implementation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)

[14] Jafari H, Moghaddami M, Sarwat A I. Foreign object detection in inductive charging systems based on primary side measurements [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6466-6475.

[15] Low Z N, Casanova J J, Maier P H, et al. Method of load/fault detection for loosely coupled planar wireless power transfer system with power delivery tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(4): 1478-1486.

[16] 威德默 H P, 西伯 L, 比特纳 M. 利用热敏材料和电感式感测进行外部物体检测: CN113376708A[P]. 2021-09-10.
Peter W H, Lukas S, Markus B. Foreign object detection using heat sensitive material and inductive sensing: CN113376708A [P]. 2021-09-10. (in Chinese).

[17] 杨海亮. 基于机器视觉与辅助线圈的无线充电系统金属异物检测[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
Yang Hailiang. Metal object detection in wireless charging system based on machine vision and auxiliary coil [J]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020. (in Chinese)

[18] 王宝帅, 兰竹, 李正杰, 等. 毫米波雷达机场跑道异物分层检测算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2676-2683.
Wang Baoshuai, Lan Zhu, Li Zhengjie, et al. A hierarchical foreign object debris detection method using millimeter wave radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(11): 2676-2683. (in Chinese)

[19] Jeong S Y, Thai V X, Park J H, et al. Self-inductance-based metal object detection with mistuned resonant circuits and nullifying induced voltage for wireless EV chargers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 748-758.

[20] Jeong S Y, Kwak H G, Jang G C, et al. Dual-purpose nonoverlapping 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.

[21] Jang G C, Jeong S Y, Kwak H G, et al. Metal object detection circuit with non-overlapped coils for wireless EV chargers [C]// 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC). Auckland, New Zealand, 2016: 1-6.

[22] Thai V X, 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.



项飞

作者简介：

项飞(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：无线充电金属异物检测。E-mail：feixiang@zju.edu.cn。

钟文兴(1984—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：无线电能传输，电动汽车无线充电电力电子技术。E-mail：wxzhong@zju.edu.cn。

(责任编辑：耿越)