

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241178

# 基于多感测线圈协同的无线充电系统 发射线圈输出功率测量方法

谭林林 王嘉琦

(东南大学电气工程学院 南京 210096)

**摘要** 为了降低无线充电系统耦合线圈上高频高压直接测量的技术复杂度和经济成本,该文首先提出一种多感测线圈协同的无线充电系统发射线圈输出功率非接触测量方法。相比于传统的直接测量方式,该方法仅需若干组独立的感测线圈,无需专用的大功率高频电流、电压传感器,同时可以很好地适应于不同功率等级、汽车水平与垂直地面方向的位置偏移以及屏蔽材料等实际场景。该文首先利用电磁感应定律,通过在线圈表面设置多组感测线圈进行测量,建立了考虑水平、垂直偏移及功率变化的各感测线圈电压相量与发射线圈输出功率之间的耦合矩阵模型。然后给出了多感测线圈的参数设计依据,并进行了仿真与实验验证。接着探讨感测线圈的形状、数目与采样点数量对测量精度的影响。最后进一步探讨实际场景将多感测线圈水平放置,可以避免垂直叠放高度影响收发线圈短距离测量的问题。实验结果表明,在不同功率等级下,无线充电系统在水平与垂直地面方向同时发生偏移时,所提方法的最大计量误差在1.5%以内,具有较高的测量准确性和实用价值。

**关键词:** 无线充电 感测线圈 输出功率 非接触测量

**中图分类号:** TM724

## 0 引言

无线充电技术能够弥补传统有线充电方式的诸多不足,使得充电更加安全、便捷,因此被广泛应用于电动汽车、移动设备、机器人以及工业自动化等领域,尤其在电动汽车领域,无线充电技术日趋成熟<sup>[1-6]</sup>。然而无线充电系统具有的地面端和车载端分离的特点,不像现有的传导式充电设施,在电网侧或车载电池侧直接计量即可。无线充电系统的地面端包含地面端功率变换装置、谐振网络以及发射线圈;车载端包含接收线圈、谐振网络以及车载端功率变换装置。因此无线充电系统的地面端和车载端的产权和使用有可能归属于多方,如地面端可能归属于充电运营商,车载端可能归属于车主<sup>[7-8]</sup>。如果依然采用类似传导式充电设施车载电池侧的计量

方式,可能由于车主停车行为、车载设备性能不同等<sup>[9]</sup>,造成对充电运营商利益方面的不公平。同样地,在电网侧计量,用户接收到的电能也由于各种因素不一致,对用户也存在利益不公平的问题。因此,针对大功率无线充电系统功率计量点的选择和计量问题,一直未能有效地推进与解决。

将无线充电系统的测量位置设置在发射线圈上,测量的功率即发射线圈的输入功率。地面端功率变换装置以及谐振网络的损耗需由运营商自行承担,而发射线圈的输入功率有多少能充到自身车辆电池上,不仅取决于发射线圈自身损耗、车载端损耗,还依赖于充电时的停车位置偏移带来的收发线圈间空气损耗,这些损失均需由车主承担。计量发射线圈输入功率的方式对运营商和车主利益均有一定的兼顾<sup>[10]</sup>,但在发射线圈上测量的问题在于大功率充电系统中,发射线圈的电流和电压都比较高,电压可能高达几kV,频率在85kHz左右,直接利用传感测量,导致传感器成本过高,且测量电路的引入对无线充电系统的运行参数可能带来影响,导

江苏高校“青蓝工程”、国家自然科学基金(52277004)和江苏省智能电网技术与装备重点实验室课题资助项目。

收稿日期 2024-07-04 改稿日期 2024-07-25

致系统性能下降<sup>[6]</sup>。因此,需要寻求一种成本较低、简单、高效的测量技术手段。

近年来,国内外学者针对大功率无线充电系统的功率测量已开展了部分研究,总体上处于探索阶段,也取得了很多成果。文献[12]在静止式和移动式电动汽车-无线电能传输(Electric Vehicles Wireless Power Transfer, EV-WPT)负荷波形特性分析的基础上,提出了电能测量整体方案。方案中电能测量点可选择在电网侧和车载电池侧。文献[13]针对发射线圈输入功率测量方式和车载电池侧测量方式,提出了两种电动汽车无线充电的价格引导策略。文献[14]分析得到在地面端实际传输的功率为发射线圈的输出功率,即发射线圈输入功率减去发射线圈自身损耗,并提出在EV-WPT系统的收发线圈之间使用感测线圈来计量发射线圈的输出功率,计量精度受汽车停车偏移、工作频率等因素的影响很小,但文献[14]只考虑了汽车平行于地面方向的偏移,没有考虑汽车垂直于地面方向的偏移,此外也没有考虑磁心和铝板屏蔽,是一种较为理想条件下的方法。测量发射线圈输出功率,相比测量发射线圈输入功率,更加平衡了运营商和车主的利益,因此本文研究测量的对象为发射线圈输出功率。

利用感测线圈测量是无线充电系统电参数测量的一种主要研究方向,如在异物检测、线圈定位等领域<sup>[15-20]</sup>,一直是一种低成本有效的解决手段。异物检测通常将感测线圈放置在发射线圈上方,当金属异物靠近感测区域时,感测线圈的电参数会发生改变,从而实现异物检测<sup>[16]</sup>。定位技术可通过在车载端增加感测线圈,利用三边测量原理实现接收线圈的定位<sup>[18]</sup>。对于发射线圈输出功率的测量,使用感测线圈测量也是一种很好的解决思路,国内外研究尚处于探索阶段。如何在实际场景下平衡耦合线圈间的偏移、传输距离的变动、参数的变化等问题,达到较高的测量准确度,还需要不断的探究。

本文在感测线圈用于功率测量研究的基础上,考虑了实际场景下的磁心和铝板屏蔽,围绕大功率无线充电系统在水平偏移、垂直偏移以及功率全范围的发射线圈输出功率测量需求,提出了一种基于多感测线圈协同的无线充电系统发射线圈输出功率测量方案。该方案建立了各感测线圈与发射线圈输出功率的耦合矩阵模型,对水平和垂直偏移量了解耦,分析对比了圆形感测线圈和方形感测线圈在实际系统中的测量精度,探究了收发线圈位置偏移与功率等级采样数量点对测量精度的影响等。本文

采用标准3.7 kW车用无线充电装置进行测试,具有较高的测量精度,可为实际的功率测量提供理论指导。

## 1 无线充电系统及发射线圈输出功率测量问题描述

为了进一步明确本文对所述问题的描述,本节以图1所示的无线充电系统进行说明,图1为无线充电系统的各组成部分。地面端功率变换装置将电网侧的工频电转换成无线充电系统用的高频79~90 kHz交流电,用于驱动发射端的谐振补偿网络,再经过收发线圈、车载端谐振补偿网络和功率变换装置,最终输出直流电提供给车载电池<sup>[21-22]</sup>。图2直观描述了无线充电系统的能流,红色箭头标出了车载端电池获得能量的传输路径,蓝色箭头标出了无线充电系统各部分的损耗。图2中, $P_{\text{grid}}$ 为电网侧发出的功率, $P_{\text{T}}$ 、 $P_{\text{R}}$ 分别为发射线圈、接收线圈的输入功率, $P_{\text{M}}$ 、 $P_{\text{N}}$ 分别为发射线圈、接收线圈的输出功率, $P_{\text{Rt}}$ 、 $P_{\text{Rr}}$ 分别为发射和接收线圈自身损耗, $P_1$ 和 $P_2$ 分别为地面端和车载端功率变换装置、谐振网络的损耗, $P_{\text{air}}$ 为收发线圈间空气损耗, $P_{\text{L}}$ 为电池收到的功率。测量发射线圈输出功率, $P_1$ 以及 $P_{\text{Rt}}$ 由运营商承担, $P_{\text{air}}$ 、 $P_2$ 以及 $P_{\text{Rr}}$ 由用户承担。

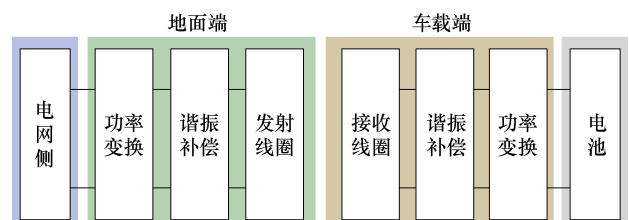


图1 WPT系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of WPT

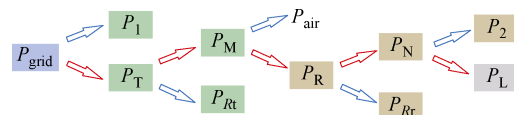


图2 WPT系统能流

Fig.2 WPT system energy flow

将图1所示的系统,转化成图3所示的两线圈之间的耦合电路原理进行分析, $R_t$ 、 $R_r$ 分别为发射和接收线圈内阻, $I_t$ 、 $I_r$ 分别为流经发射与接收线圈的电流, $L_t$ 、 $L_r$ 分别为发射与接收线圈自感。由图3不难发现,发射线圈输出功率 $P_{\text{M}}$ 与发射线圈的补偿电路的拓扑和参数关联不大。无论系统采用何种补偿拓扑, $P_{\text{M}}$ 仅与流经收发线圈的电流,收发线圈互感系数 $M_{\text{tr}}$ 及线圈电压 $U_t$ 、 $U_r$ 相关。

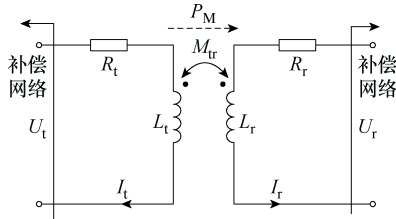


图 3 发射线圈输出功率原理

Fig.3 Principle of transmission power on the transmitting coil

通过图 3，可获得电路方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_t \\ \dot{U}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t + j\omega L_t & j\omega M_{tr} \\ j\omega M_{tr} & R_r + j\omega L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_t \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $\omega$  为系统工作电流角频率。

如果直接测量发射线圈的输入功率，则有

$$P_T = \text{Re}(\dot{U}_t \dot{I}_t^*) = P_{Rt} + P_M = \underbrace{I_t^2 R_t}_{\text{发射线圈自身损耗}} + \underbrace{\text{Re}[j\omega M_{tr} \dot{I}_t \dot{I}_r^*]}_{\text{发射线圈输出功率}} \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出该功率包含两个部分：一部分是发射线圈自身损耗的功率；另一部分是发射线圈输出给车载端的功率。而对于车主而言，更希望能够准确测量出发射线圈的输出功率，而不需要为运营商的充电线圈损耗买单。基于式 (2)，若想准确测量出发射线圈的输出功率，需要明确知道发射线圈的电流和发射线圈与接收线圈的互感系数。而实际上，收发线圈的电流可以通过内置传感器获得，但线圈间互感因受停车偏移、线圈尺寸等因素影响而不同，很难获得。为此，本文借鉴感测线圈定位的思路，采用附加感测线圈进行测量。

## 2 感测线圈与发射线圈输出功率耦合分析与建模

### 2.1 感测线圈与发射线圈输出功率的对应关系分析

假设在收发线圈之间增加  $q$  个感测线圈，且放置在发射线圈表面，带多个感测线圈的收发线圈耦合原理如图 4 所示。

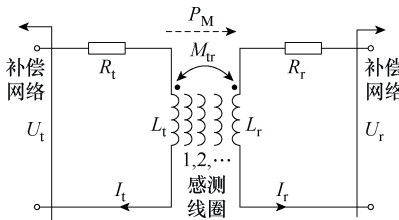


图 4 带多个感测线圈的收发线圈耦合原理

Fig.4 Principle of coupling of transmitting and receiving coils with multiple sensing coils

如果忽略感测线圈的内阻，以及感测线圈回路中电流带来的交叉影响，则可知第  $m$  和  $n$  个 ( $m, n \in \Omega$ ,  $\Omega = \{m < n, m=1, 2, \dots, q, n=1, 2, \dots, q\}$ ) 感测线圈的开路端电压  $U_m$  和  $U_n$  由发射、接收线圈与其互感作用产生。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_m \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega M_{tm} & j\omega M_{rn} \\ j\omega M_{tn} & j\omega M_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_t \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， $M_{tm}$ 、 $M_{rn}$ 、 $M_{tn}$ 、 $M_{rm}$  为收发线圈和对应线圈间互感系数，可进一步得到发射线圈输出功率表达式为

$$P_M = \text{Re}(j\omega M_{tr} \dot{I}_t \dot{I}_r^*) = \frac{M_{tr}}{\omega(M_{tm}M_{rn} - M_{tn}M_{rm})} \text{Im}(\dot{U}_m \dot{U}_n^*) \quad (4)$$

式中，互感  $M$  中带下标  $r$  的变量与接收线圈相关，是与接收线圈水平偏移  $x$  及垂直偏移  $z$  有关的变量，带下标  $t$  的可认为是不变量。不妨引入互感系数隐函数  $F_{mn}(x, z)$ ，则

$$F_{mn}(x, z) = \frac{M_{tr}}{\omega(M_{tm}M_{rn} - M_{tn}M_{rm})} \quad (5)$$

通过式 (4) 和式 (5) 可以看出，在收发线圈以及探测线圈几何参数确定的情况下，发射线圈的输出功率与感测线圈的电压乘积存在对应关系，输出功率大小仅与任意两感测线圈电压有关。下边将进一步探讨  $F_{mn}(x, z)$  的处理问题。

### 2.2 互感系数的拟合与分析

将  $F_{mn}(x, z)$  函数在坐标零点处展开，得到

$$F_{mn}(x, z) = F_{mn}(0, 0) + \frac{\partial F_{mn}}{\partial x} x + \frac{\partial F_{mn}}{\partial z} z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial x^2} x^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial z^2} z^2 + 2 \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial x \partial z} xz + \dots \quad (6)$$

对于存在  $q$  个感测线圈的系统来说，在某一位置  $(x_0, z_0)$  处可获得的感测电压值为  $q$  个，根据式 (4) 可获得  $C_q^2$  个电压的乘积。为了构建  $C_q^2$  个感测线圈电压与发射线圈输出功率的关系，引入拟合系数  $\lambda_{mn}$  对式 (4) 进一步改写

$$P_M = \sum_{m, n \in \Omega} \lambda_{mn} F_{mn}(x, z) \text{Im}(\dot{U}_{m(x, z)} \dot{U}_{n(x, z)}^*) \quad (7)$$

式中， $U_{m(x, z)}$  和  $U_{n(x, z)}$  为接收线圈在位置偏移  $(x, z)$  处的感测线圈电压。结合式 (6) 和式 (7) 进一步可得

$$P_M = \sum_{m,n \in \Omega} \lambda_{mn} \text{Im}(\dot{U}_{m(x,z)} \dot{U}_{n(x,z)}^*) \cdot \left( F_{mn}(0,0) + \frac{\partial F_{mn}}{\partial x} x + \frac{\partial F_{mn}}{\partial z} z + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial x^2} x^2 + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial z^2} z^2 + 2 \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial x \partial z} xz + \dots \right) \quad (8)$$

为了进一步对式(8)化简,需要拟合出具体的互感系数隐函数  $F_{mn}(x, z)$ 。根据标准 SAE J2954<sup>[23-24]</sup>,对于边长 450 mm 的接收线圈,接收线圈最大水平偏移  $x$  不超过 100 mm。此外,本文设置收发线圈垂直偏移  $z$  不超过 40 mm,并根据实物装置进行仿真分析<sup>[25-26]</sup>,仿真模型如图 5 所示,收发线圈仿真参数见表 1。

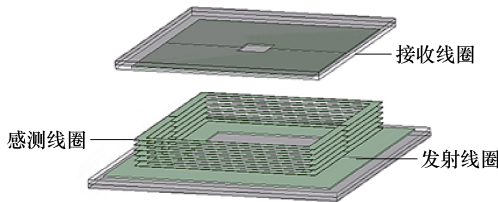


图 5 含感测线圈的 EV-WPT 仿真模型

Fig.5 EV-WPT simulation model with sensing coils

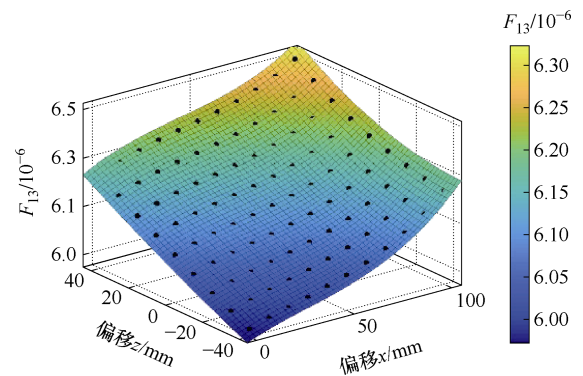
表 1 收发线圈仿真参数

Tab.1 Transceiver coil parameters

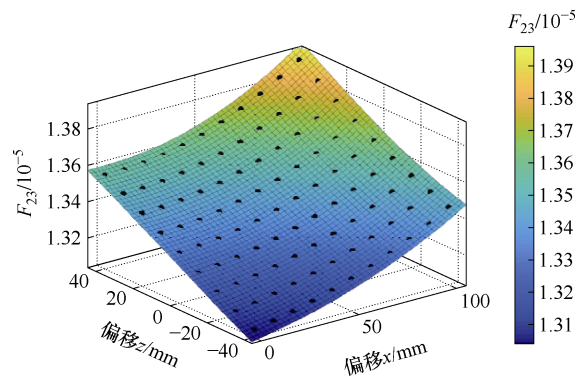
参数	数值
发射线圈外圈、内圈边长/mm	500, 290
接收线圈外圈、内圈边长/mm	400, 60
感测线圈边长/mm	400
发射线圈、接收线圈高度/mm	3, 3
感测线圈高度/mm	1
收发线圈距离/mm	200
发射线圈与第 $m$ 个感测线圈距离/mm	10 $m$
发射线圈、接收线圈匝数	9, 15
感测线圈匝数	1

仿真采用六组感测线圈,图 6 随机给出四组拟合出的  $F_{mn}(x, z)$  的函数值随  $x$  和  $z$  变化的三维图。其各展开项对应的系数见表 2。

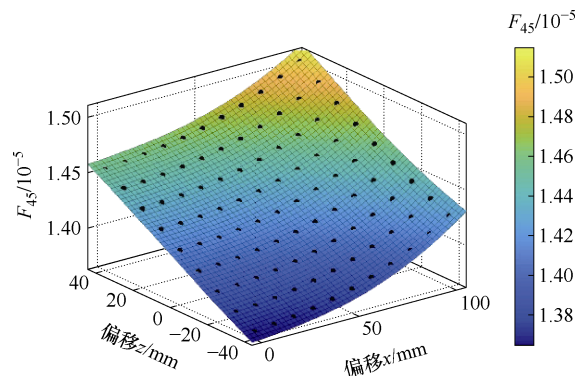
从表 2 可以看出,  $F_{mn}(x, z)$  的展开项,在其一次及以上展开项中的系数远小于零次项,因此式(8)可简化为



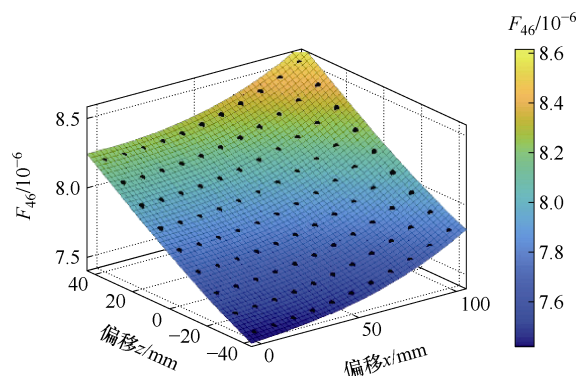
(a) 第 1、3 感测线圈之间  $F_{13}$  函数



(b) 第 2、3 感测线圈之间  $F_{23}$  函数



(c) 第 4、5 感测线圈之间  $F_{45}$  函数



(d) 第 4、6 感测线圈之间  $F_{46}$  函数

图 6 任意两感测线圈之间  $F_{mn}$  函数

Fig.6  $F_{mn}$  function between any two sensing coils

表 2 任意两感测线圈之间  $F_{mn}$  函数各展开项对应系数  
Tab.2 Corresponding coefficients of each expansion term of the  $F_{mn}$  function between any two sensing coils

系数	数值
$F_{13}(0, 0)$	$6.07 \times 10^{-6}$
$\partial F_{13}/\partial x$	$1.505 \times 10^{-9}$
$\partial F_{13}/\partial z$	$2.215 \times 10^{-9}$
$\partial^2 F_{13}/\partial x^2$	$-2.079 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{13}/\partial x \partial z$	$5.746 \times 10^{-12}$
$\partial^2 F_{13}/\partial z^2$	$3.965 \times 10^{-12}$
$F_{23}(0, 0)$	$1.331 \times 10^{-5}$
$\partial F_{23}/\partial x$	$5.588 \times 10^{-10}$
$\partial F_{23}/\partial z$	$5.993 \times 10^{-9}$
$\partial^2 F_{23}/\partial x^2$	$2.223 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{23}/\partial x \partial z$	$-2.428 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{23}/\partial z^2$	$6.33 \times 10^{-13}$
$F_{45}(0, 0)$	$1.411 \times 10^{-5}$
$\partial F_{45}/\partial x$	$7.748 \times 10^{-10}$
$\partial F_{45}/\partial z$	$1.072 \times 10^{-8}$
$\partial^2 F_{45}/\partial x^2$	$1.565 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{45}/\partial x \partial z$	$9.381 \times 10^{-13}$
$\partial^2 F_{45}/\partial z^2$	$3.416 \times 10^{-12}$
$F_{46}(0, 0)$	$7.796 \times 10^{-6}$
$\partial F_{46}/\partial x$	$5.044 \times 10^{-10}$
$\partial F_{46}/\partial z$	$9.416 \times 10^{-9}$
$\partial^2 F_{46}/\partial x^2$	$1.109 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{46}/\partial x \partial z$	$-1.034 \times 10^{-11}$
$\partial^2 F_{46}/\partial z^2$	$2.05 \times 10^{-11}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m,n \in \Omega} F_{mn}(0,0) \approx c_{mn} \\ \sum_{m,n \in \Omega} \frac{\partial^{(n)} F_{mn}}{\partial x^{(n)}} \approx 0 \\ \sum_{m,n \in \Omega} \frac{\partial^{(n)} F_{mn}}{\partial z^{(n)}} \approx 0 \\ \sum_{m,n \in \Omega} \frac{\partial^{(m+n)} F_{mn}}{\partial x^{(m)} \partial z^{(n)}} \approx 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

式中,  $c$  为常数。对于式 (9) 所示的结果, 如果选取对应的拟合系数  $\lambda_{mn}$  使得  $\lambda_{mn} c_{mn} \approx 1$ , 则式 (8) 可改写为

$$P_M \approx \sum_{m,n \in \Omega} \lambda_{mn} \text{Im}(\dot{U}_{m(x,z)} \dot{U}_{n(x,z)}^*) \quad (10)$$

综上所述, 结合式 (10) 可以看出, 在探测线

圈和发射线圈的位置固定时, 拟合系数  $\lambda_{mn}$  是一个不随接收线圈偏移的固定常数。

### 2.3 拟合系数矩阵的获取与求解

通过上述的分析, 对于  $q$  个感测线圈, 可知拟合系数  $\lambda_{mn}$  是一个  $C_q^2$  列的数组。本节讨论如何求解拟合系数  $\lambda_{mn}$ 。根据式 (10), 可以得到

$$U\lambda = P \quad (11)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} \text{Im}(\dot{U}_{1(x_1, z_1, v_1)} \dot{U}_{2(x_1, z_1, v_1)}^*) & \cdots & \text{Im}(\dot{U}_{m(x_1, z_1, v_1)} \dot{U}_{2(x_1, z_1, v_1)}^*) \\ \vdots & & \vdots \\ \text{Im}(\dot{U}_{1(x_j, z_j, v_k)} \dot{U}_{n(x_j, z_j, v_k)}^*) & \cdots & \text{Im}(\dot{U}_{m(x_j, z_j, v_k)} \dot{U}_{n(x_j, z_j, v_k)}^*) \end{bmatrix}$$

$$\lambda = [\lambda_{12} \cdots \lambda_{mn}]$$

$$P = \begin{bmatrix} P_M(x_1, z_1, v_1) \\ \vdots \\ P_M(x_j, z_j, v_k) \end{bmatrix}$$

式中,  $U$ 、 $P$ 、 $\lambda$  分别为感测线圈电压矩阵、标准发射线圈输出功率矩阵和拟合系数矩阵;  $v$  为除  $x$  与  $z$  偏移以外的条件, 如功率等级。对变量  $x$ 、 $z$ 、 $v$  进行网格划分, 网格划分后的  $x$ 、 $z$  和  $v$  分别用下标数字的方式表示, 如  $x_1, x_2, \dots, x_i$ 。式 (11) 中,  $P_M$  是按照式 (2) 中发射线圈输出功率计算公式, 根据实际测得的收发线圈电流和收发线圈互感计算求得。显然对于式 (11) 的方程,  $\lambda_{mn}$  可以通过对发射线圈输出功率  $P_M$  和对应位置两两之间的感测线圈的电压求得。但式 (11) 整个方程具有不唯一解, 为了找到一组更合适的拟合系数, 需要使得式 (10) 的结果满足一定的误差, 如式 (12) 所示。各误差等级可参考文献[27]。

$$\left| \frac{P_M - \sum_{m,n \in \Omega} \lambda_{mn} \text{Im}(\dot{U}_{m(x,z)} \dot{U}_{n(x,z)}^*)}{P_M} \right| \leq \varepsilon \quad (12)$$

为此, 本文采用矩阵的最小二乘法对式 (11) 进行求解。对于式 (11) 中的第一行矩阵方程, 所选择的  $\lambda_{mn}$  函数应该使所有观察值的残差二次方和达到最小。即

$$\min \delta = |U\lambda - P|^2 = \lambda^T U^T U \lambda - 2\lambda^T U^T P + P^T P \quad (13)$$

对式 (13) 的  $\lambda$  求偏导, 使其偏导数为 0 即可

得到最小残差和二次方和<sup>[28]</sup>。即

$$\lambda = (U^T U)^{-1} U^T P \quad (14)$$

综上所述,通过构建  $U$  和  $P$  矩阵,可实现  $\lambda$  的获取。显然为了  $\lambda$  矩阵中各系数更能够满足式(11),在整个系统收发线圈偏移范围以及功率等级范围内,收集到的电压矩阵和功率矩阵越多,实际拟合效果会越精确。

### 3 感测线圈位置与大小的最优选取讨论

感测线圈的位置和大小有可能会引起  $F_{mn}$  函数拟合是否有效问题,即 2.2 节所示结果成立与否,这也是式(9)整理的前提。本节以可决系数  $R_{F_{mn}}$  作为  $F_{mn}$  函数是否有效拟合的指标。由于  $F_{mn}$  是关于  $x, z$  的函数,不同采样点  $(x, z)$  均有唯一的  $F_{mn}$  与之对应。设  $F_{mn}$  为互感函数的实际值,  $\hat{F}_{mn}$  为互感函数拟合值,残差二次方和  $\lambda_{F_{mn}}$ <sup>[29]</sup>为

$$\lambda_{F_{mn}} = \sum_{x=1}^i \sum_{z=1}^j (\hat{F}_{mn}(x, z) - F_{mn}(x, z))^2 \quad (15)$$

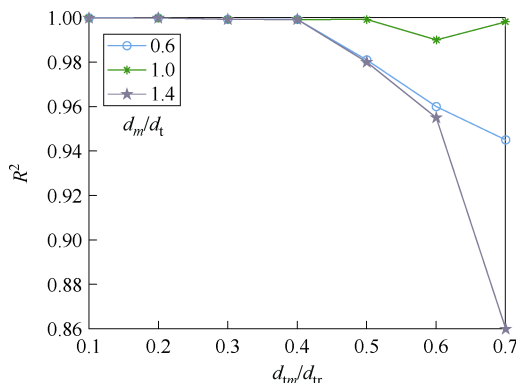
设  $\bar{F}_{mn}$  为  $i \times j$  个采样点处  $\hat{F}_{mn}$  的平均值,样本的拟合值与其平均值的离差二次方和  $T_{F_{mn}}$  为

$$T_{F_{mn}} = \sum_{x=1}^i \sum_{z=1}^j (\hat{F}_{mn}(x, z) - \bar{F}_{mn})^2 \quad (16)$$

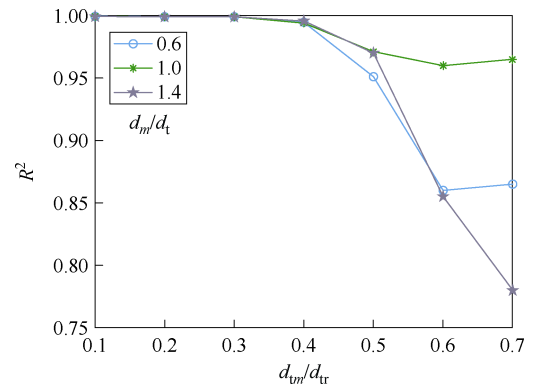
那么  $F_{mn}$  函数的可决系数  $R_{F_{mn}}$  为

$$R_{F_{mn}} = 1 - \frac{\lambda_{F_{mn}}}{T_{F_{mn}}} \quad (17)$$

本节采用不同尺寸和形状的感测线圈进行仿真对比研究,仿真模型如图 5 所示。感测线圈分别采用了方形线圈和圆形线圈,仿真结果如图 7 所示,图 7 中,  $d_{tr}$  为收发线圈距离,为固定值 20 cm,  $d_{tm}$  为第  $m$  个感测线圈与发射线圈的距离,  $d_t$  为发射线圈的边长或者最大外尺寸,  $d_m$  为圆形感测线圈的直径或方形感测线圈的边长或者外尺寸。



(a) 方形感测线圈



(b) 圆形感测线圈

图 7 不同形状感测线圈的拟合误差结果

Fig.7 Fitting error results of sensing coils with different shapes

通过图 7 可以看出,感测线圈的尺寸与位置均会对  $F_{mn}$  函数的拟合结果具有一定的影响。具体表现为感测线圈与发射线圈尺寸越相近,且离发射线圈越近,  $F_{mn}$  函数的拟合效果越好。在本文示例下,  $d_{tm}/d_{tr} < 0.4$  时,方形和圆形感测线圈的尺寸对拟合结果已不太敏感,均具有较高的拟合结果,其中方形线圈的适用性更好。对于收发线圈都是方形线圈的耦合装置,采用方形感测线圈的拟合效果整体优于圆形感测线圈。

## 4 实验验证与结果分析

### 4.1 验证平台的设计

为了验证本文提出的测量方法的可行性,根据表 1 所示的仿真参数,本节搭建了如图 8 所示实物验证平台。无线充电系统采用 LCC-LCC 拓扑,系统原理如图 9 所示,系统参数见表 3<sup>[30-31]</sup>。分别探讨感测线圈形状、数目与采样点数量对功率计量结

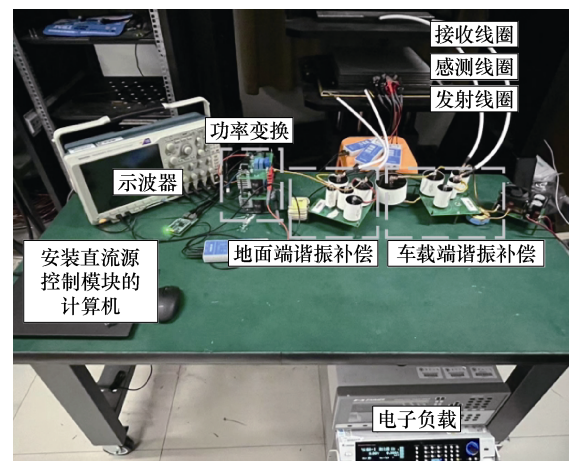


图 8 实物验证平台

Fig.8 Physical verification platform

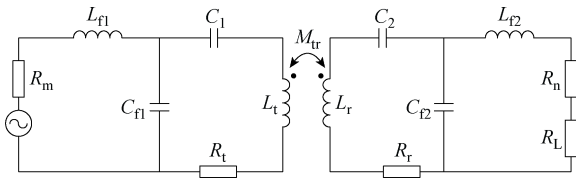


图 9 双边 LCC 无线充电系统原理

Fig.9 Principle of bilateral LCC wireless charging system

表 3 系统元件参数

Tab.3 System component parameters

参 数	数 值
系统工作频率 $f/\text{kHz}$	86.1
发射线圈自感 $L_t/\mu\text{H}$	96.35
接收线圈自感 $L_r/\mu\text{H}$	90.6
发射线圈内阻 $R_t/\Omega$	0.195
接收线圈内阻 $R_r/\Omega$	0.203
发射端谐振电感 $L_{f1}/\mu\text{H}$	20
接收端谐振电感 $L_{f2}/\mu\text{H}$	21
发射端谐振电感内阻 $R_m/\Omega$	0.048
接收端谐振电感内阻 $R_n/\Omega$	0.034
发射端谐振电容 $C_{f1}/\text{nF}$	165.42
接收端谐振电容 $C_{f2}/\text{nF}$	157.54
发射端补偿电容 $C_1$	43.47
接收端补偿电容 $C_2$	41.99
等效负载 $R_L/\Omega$	12
互感 $M_{tr}/\mu\text{H}$	12.08
输入电压幅值/V	$180+2.5t$ ( $t=1, 2, 3, \dots, 8$ )

果的影响。

#### 4.2 感测线圈形状及数目对测量结果的影响

为了讨论感测线圈形状及数目对测量结果的影响，本节实验共计 270 个采样点，其中  $x$  方向偏移在  $0\sim 100\text{ mm}$  范围内每隔  $20\text{ mm}$  进行采样， $z$  方向偏移在  $-40\sim 40\text{ mm}$  范围内每隔  $20\text{ mm}$  进行采样，功率变化范围在  $400\sim 2\ 500\text{ W}$  范围内采样 9 次，输入方波电压幅值分别为  $180+2.5t$  ( $t=1, 2, 3, \dots, 8$ )。各感测线圈位置分布及偏移方向如图 10 所示。

首先结合实物平台，说明采用本文的测量方法计量功率的过程。图 11 描述了拟合系数  $\lambda_{mn}$  的计算流程。

以输入电压幅值  $180\text{ V}$ ， $x=100\text{ mm}$ ， $z=40\text{ mm}$  这一采样点为例，在实物平台测得收发线圈互感  $M=6.2\ \mu\text{H}$ ，流经发射线圈电流  $I_t$  幅值为  $19.8\text{ A}$ ，流经接收线圈电流  $I_r$  幅值为  $12.7\text{ A}$ ，电流波形结果如

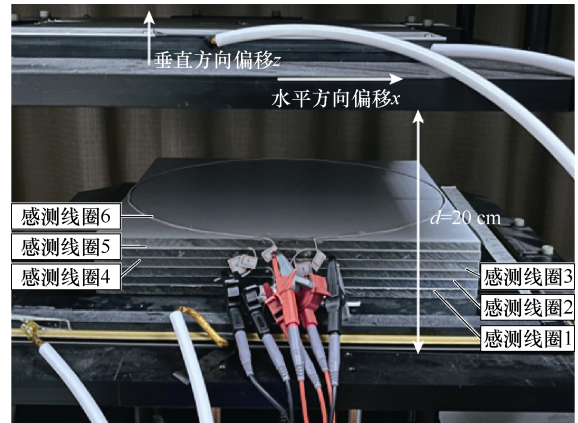


图 10 各感测线圈位置分布及偏移方向

Fig.10 Offset direction and offset direction of each sensing coil

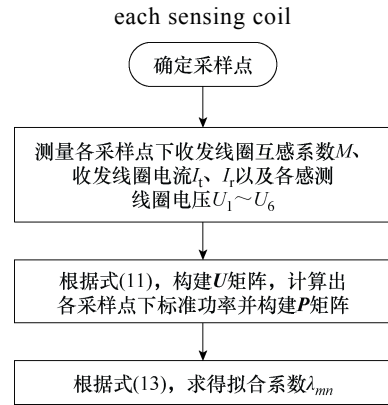


图 11  $\lambda_{mn}$  计算流程

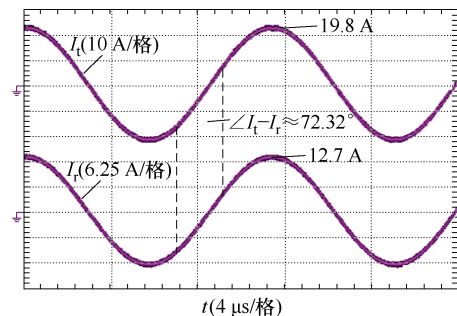
Fig.11  $\lambda_{mn}$  calculation flowchart

图 12a 所示，根据式 (2) 可以计算出该采样点下标准功率为  $411\text{ W}$ 。

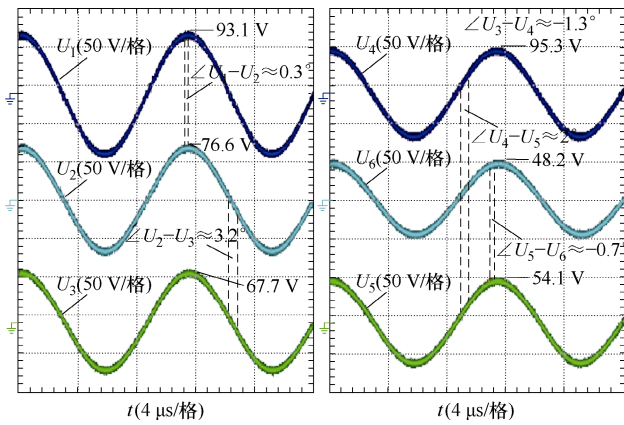
接着测出该采样点下各感测线圈电压  $U_1\sim U_6$ ，电压波形以及幅值、相位差如图 12b 所示。

表 4 展示了  $x=100\text{ mm}$ ， $z=40\text{ mm}$  这一采样点下 6 个感测线圈电压幅值及相位差的仿真值。

将图 12b 和表 4 的电压幅值及相位差分别进行对比可以发现，在线圈尺寸相同的情况下，由于仿真时对实际线圈绕组采用简化模型，忽略了线圈绕制方法对耦合系数的影响，使得感测线圈和收发线



(a) 收发线圈电流波形



(b) 第1~6个感测线圈电压波形

图12  $x=100\text{ mm}$ ,  $z=40\text{ mm}$ , 6个感测线圈实验波形

Fig.12  $x=100\text{ mm}$ ,  $z=40\text{ mm}$ , experimental waveforms diagram of six sensing coils

表4 6个感测线圈电压幅值及相位差的仿真

Tab.4 Simulation values of voltage amplitude and phase for six sensing coils

电压	幅值/V	相位差	平均数值/(°)
$U_1$	107.92	$\angle U_1-U_2$	0.657
$U_2$	95.29	$\angle U_2-U_3$	0.761
$U_3$	84.71	$\angle U_3-U_4$	0.879
$U_4$	75.80	$\angle U_4-U_5$	1.004
$U_5$	68.34	$\angle U_5-U_6$	1.141
$U_6$	62.11		

圈间的耦合系数的仿真值大于实测值，从而各线圈电压仿真值均大于实测值。在实际测量线圈相位的过程中，由于各感测线圈电压相位会在某一范围内快速波动，没有固定值，因此实验测得的相位均为波动范围内的平均值，从而跟仿真中的相位会存在一定误差。

实验共计 270 个采样点，各采样点的互感系数、收发线圈电流及各感测线圈电压的实际测量步骤同上，再根据图 11 所示流程，可以得到 6 个感测线圈拟合系数见表 5。

以输入电压幅值 180 V， $x=100\text{ mm}$ ， $z=40\text{ mm}$  这一采样点为例，将表 5 所示拟合系数以及图 12b 所示电压代入式 (10)，可以计算出这一采样点下发射线圈输出功率计量值为 416.09 W，和实际标准功率误差为 1.24%。误差来源有示波器对感测电压相位的测量误差、感测线圈数目、采样点的数目等。

下面讨论感测线圈形状及数目对测量结果的影响。

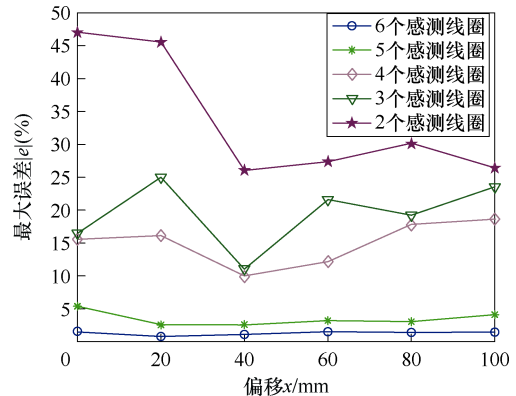
同样地，分别以六组圆形线圈和方形线圈进行

表5 6个感测线圈拟合系数

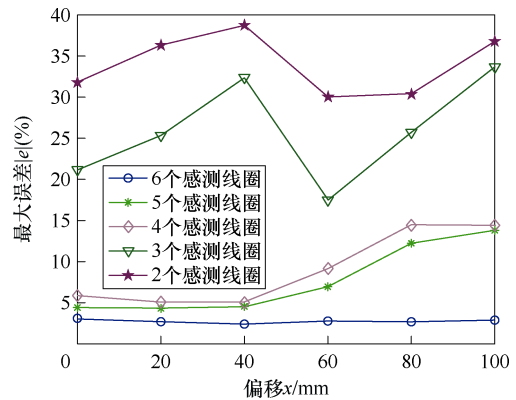
Tab.5 Fitting coefficient table for six sensing coils

系数	数值
$\lambda_{12}$	-21.03
$\lambda_{13}$	-19.15
$\lambda_{14}$	65.50
$\lambda_{15}$	37.50
$\lambda_{16}$	-60.48
$\lambda_{23}$	85.51
$\lambda_{24}$	-147.42
$\lambda_{25}$	-117.21
$\lambda_{26}$	153.44
$\lambda_{34}$	92.39
$\lambda_{35}$	24.92
$\lambda_{36}$	-42.97
$\lambda_{45}$	103.35
$\lambda_{46}$	-93.55
$\lambda_{56}$	47.41

实验比对，采用本文的测量方法计量的测量误差结果如图 13~图 15 所示。



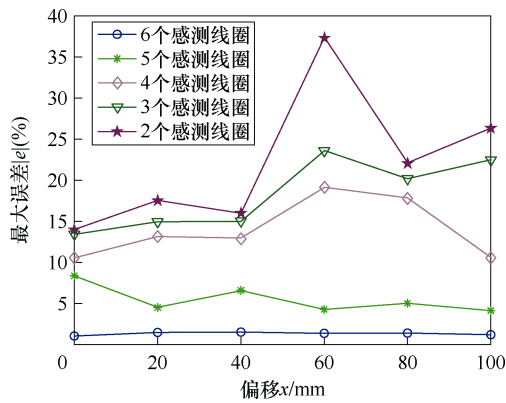
(a) 方形感测线圈



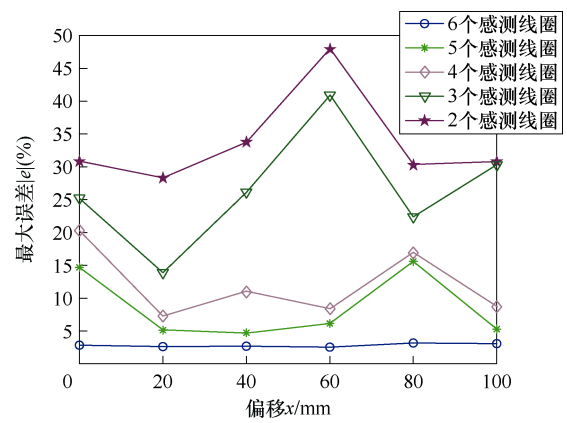
(b) 圆形感测线圈

图13  $z$ 方向偏移-40 mm时测量误差

Fig.13 Measurement error when  $z$ -direction offset is -40 mm



(a) 方形感测线圈



(b) 圆形感测线圈

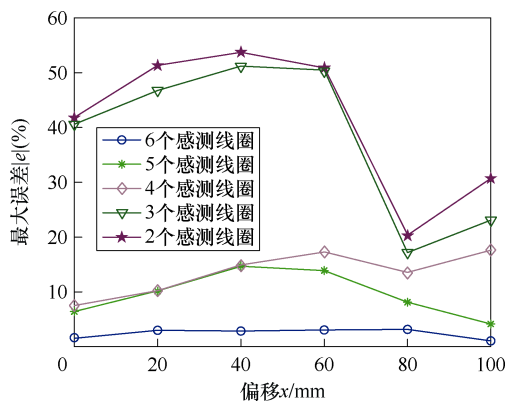
图 15 z 方向偏移 40 mm 时测量误差

Fig.15 Measurement error when z-direction offset is 40 mm

线圈数量的继续增加, 测量精度会进一步提升, 但带来的问题是求解拟合系数矩阵的工作量也成倍增加。

对比图 13~图 15 可以看出, 随着感测线圈数量的增加, 采用方形感测线圈的计量误差整体上低于圆形感测线圈的计量误差。对于收发线圈都是方形线圈的耦合装置, 采用方形感测线圈的测量精度更加理想, 这与采用方形感测线圈拟合  $F_{mn}$  函数效果整体优于圆形感测线圈一致。

另一方面, 可以看出, z 方向的偏移对计量误差的影响不大。在 6 个感测线圈的情况下, z 的偏移对测量误差的影响如图 16 所示, z 从-40~40 mm 偏移过程中, 功率的测量误差最大波动仅有 0.76%。

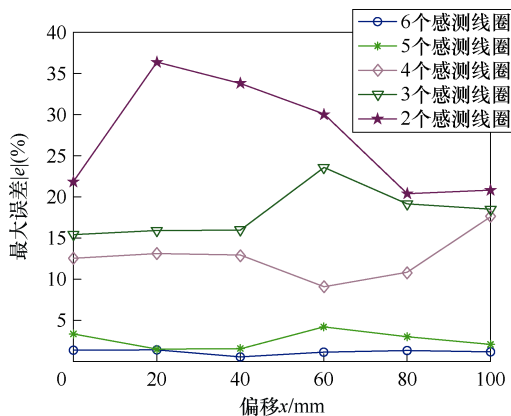


(b) 圆形感测线圈

图 14 z 方向偏移 0 mm 时测量误差

Fig.14 Measurement error when z-direction offset is 0 mm

通过图 13~图 15 可以看出, 无论是圆形感测线圈还是方形感测线圈, 感测线圈的数量是决定测量精度的决定性因素。在 2 个方形线圈的条件下, 功率的测量最大误差为 47%, 当线圈个数增加到 6 个时, 最大误差降低至 1.5%以内。同样地, 2 个圆形线圈条件下, 测量的最大误差为 53%, 当线圈个数增加到 6 个时, 最大误差仅为 3.1%, 在非接触的情况下可实现较高的测量精度。不难发现, 随着感测



(a) 方形感测线圈

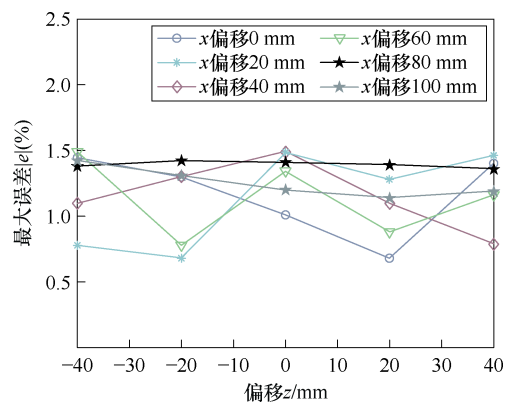
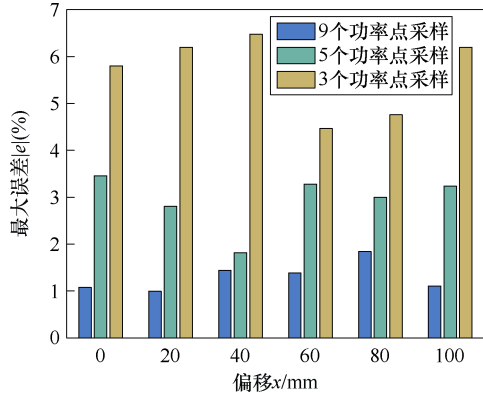


图 16 z 偏移 (6 个感测线圈) 对功率测量误差的影响  
Fig.16 The influence of z-offset (six sensing coils) on power measurement error

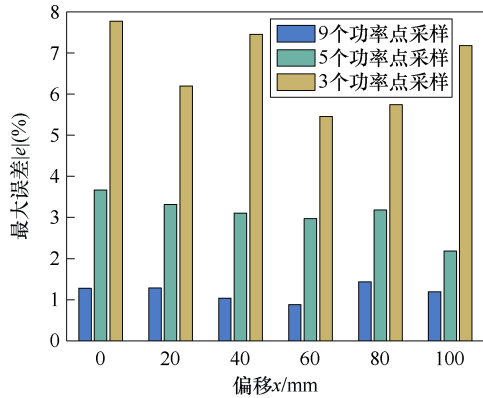
### 4.3 参数采样点数的对测量结果影响

在实际的拟合系数采样求解过程中, 为了进一

步探求采样点数量对模型准确度的影响，本文在实验过程中以6个探测线圈为例，功率采样点分别为3、5、9个。分别对比了在 $z$ 方向偏移-40 mm和40 mm下的误差结果，如图17所示。



(a)  $z$ 方向偏移-40 mm时



(b)  $z$ 方向偏移40 mm时

图17 不同功率采样点数对测量误差影响

Fig.17 The influence of different power sampling points on measurement error

通过图17可以看出，在本文所示的6个探测线圈的情况下，被测功率范围内分别采用3、5、9个功率采样点，功率测量的最大误差分别为7.8%、3.6%、1.5%，表明本文所示的模型采样点越多，模型越精确。表6进一步给出了9功率采样点下， $x$ 与 $z$ 轴偏移方向各采样点功率测量的具体误差，进一步验证了采样点个数对系统模型精度的影响。

表6 各采样点功率测量的精确误差

Tab.6 Accurate error in power measurement at each sampling point

偏移 $x/mm$	偏移 $z/mm$	误差 $e(%)$
0	-40	1.44
0	0	1.01
0	40	1.4
20	-40	0.78

(续)

偏移 $x/mm$	偏移 $z/mm$	误差 $e(%)$
20	0	1.48
20	40	1.46
40	-40	1.1
40	0	1.49
40	40	0.59
60	-40	1.49
60	0	1.34
60	40	1.16
80	-40	1.38
80	0	1.41
80	40	1.36
100	-40	1.42
100	0	1.2
100	40	1.24

### 5 感测线圈布局方式讨论

第4节不仅验证了本文所述测量方法的可行性，也分析了影响测量结果的相关因素，但在实际布局时，垂直叠放感测线圈的布局对短距离无线充电系统会造成测量影响。

为了解决上述问题，本节将多个感测线圈的布局从垂直叠放改成边长递减的水平放置，并搭建了如图18所示的仿真模型，收发线圈参数同表1，有关感测线圈的仿真参数见表7，测量原理及方法和

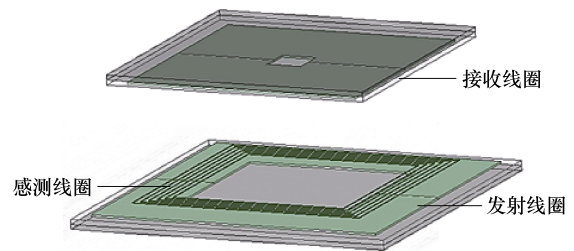


图18 多感测线圈水平放置的EV-WPT仿真模型

Fig.18 EV-WPT simulation model with multiple sensing coils placed horizontally

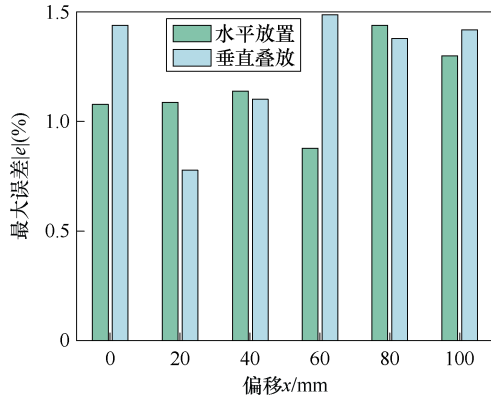
表7 多感测线圈仿真参数

Tab.7 Multi sensing coil parameter

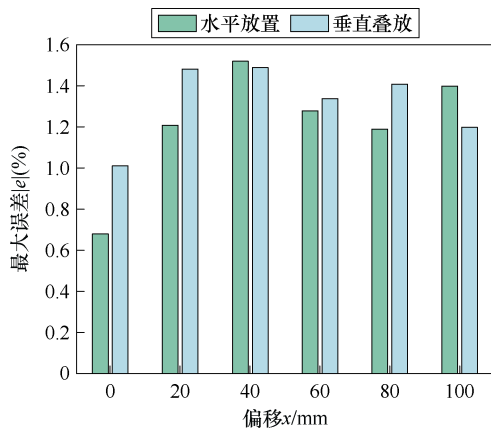
参数	数值
第 $m$ 个感测线圈边长/mm	420~20m
感测线圈高度/mm	1
发射线圈与多个感测线圈距离/mm	10
感测线圈匝数	1
感测线圈数量	6

感测线圈垂直叠放是相同的。

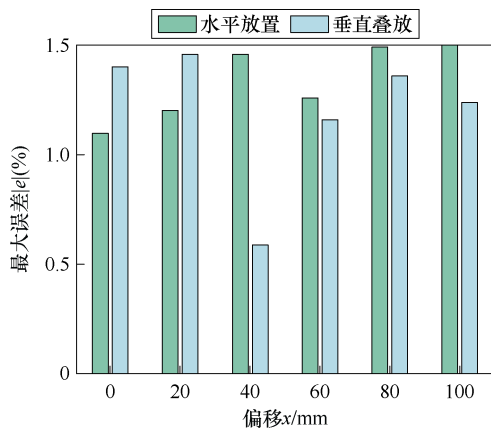
图 19 分别给出了 9 个功率采样点下, 6 个感测线圈垂直叠放和水平放置下功率测量的具体误差。



(a) z 方向偏移-40 mm 时



(b) z 方向偏移 0 mm 时



(c) z 方向偏移 40 mm 时

图 19 多感测线圈垂直叠放和水平放置测量误差

Fig.19 Measurement error of multiple sensing coils vertical stracking and placed horizontally

从图 19 可以看出, 多感测线圈水平布局, 跟垂直叠放一样都能实现较高精度的功率测量, 因此本文提出的发射线圈输出功率测量方法对于水平和垂直的感测线圈布局具有通用性。实际场景将多感测

线圈水平放置, 可以避免垂直叠放高度影响收发线圈短距离测量的问题, 关于水平布局方式的具体细节如线圈位置、线圈厚度还有待后续研究。

## 6 结论

针对无线充电系统发射线圈输出功率测量的问题, 本文不仅考虑了电动汽车水平和垂直方向上的偏移, 还考虑了实际场景下的磁心和铝板屏蔽, 提出了一种多线圈协同的无线充电系统发射线圈输出功率非接触测量方法。本文的测量方法与现有的法拉第线圈传输功率测量 (Faraday Coil Transfer Power Measurement, FC-TPM) 方法<sup>[9]</sup>的比较见表 8。

表 8 与现有方法比较

Tab.8 Comparison table with existing methods

比较内容	FC-TPM	本文方法
接收线圈水平偏移范围/mm	0~100	0~100
接收线圈垂直偏移范围/mm	无	-40~40
是否考虑磁心和屏蔽材料	否	是
收发线圈形状	圆形	方形
感测线圈形状	圆形	圆形、方形
功率等级范围/W	60~1 000	400~2 500
精度(%)	0.1	1.5
传输效率损耗(%)	≈0	≤0.02

由于收发线圈包含的磁心和屏蔽铝板在大功率下不确定损耗更高, 因此最大测量误差在 1.5% 以内, 更加接近实际值。此外, 由于感测线圈是开路的, 没有电流通过, 所以感测线圈自身不产生任何损耗, 潜在损耗是由收发线圈电流产生的时变磁场引起的感测线圈涡流损耗。本文在验证过程中, 均使用线径 1 mm 的电缆绕制感测线圈, 产生了不超过 0.02% 的传输效率损耗。

本方法通过仿真与实验分析, 证明了该方法的有效性。通过结果对比分析, 可以得出以下结论:

1) 探测线圈的尺寸和数量是保证模型精度的关键。通过实验研究不难发现, 与发射线圈尺寸相似的感测线圈, 以及足够多的感测线圈数量会带来更高的模型精度, 但同时也会带来模型求解过程中采样数量的增加, 因此, 在实际中可根据测量的功率误差需求进行合理选择。

2) 对于收发线圈都是方形线圈的耦合装置, 采用方形感测线圈的测量精度相比于圆形感测线圈更加理想。

3) 模型求解中足够多的采样点数量亦会影响整

个系统模型的精度,在实际中可根据测量的功率误差需求进行合理选择。

4)多感测线圈水平放置,跟垂直叠放一样都能实现较高精度的功率测量。实际布局时考虑将多感测线圈水平放置,可以避免垂直叠放高度影响收发线圈短距离测量的问题。

虽然本文所属的模型在解决单峰值磁场的线圈以及规格接近于圆形线圈的耦合机构中具有很好的适应性,但在多峰磁场线圈(如DD型线圈)或其他类型线圈上仍有待于进一步探索。

### 参考文献

- [1] 杨庆新,张献,章鹏程.电动车智慧无线电能传输云网[J].电工技术学报,2023,38(1):1-12.  
Yang Qingxin, Zhang Xian, Zhang Pengcheng. Intelligent wireless power transmission cloud network for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 1-12.
- [2] 荣灿灿,严俐慧,路聪慧,等.基于超材料与超表面的无线电能传输技术研究现状与进展综述[J].电工技术学报,2023,38(20):5369-5384.  
Rong Cancan, Yan Lihui, Lu Conghui, et al. Overview on research status and progress of wireless power transfer technology based on metamaterials and metasurfaces[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5369-5384.
- [3] 杨继鑫,史黎明,殷正刚,等.感应电能传输系统多并联拾取模块电流和输出功率均衡方法[J].电力系统自动化,2024,48(5):120-127.  
Yang Jixin, Shi Liming, Yin Zhenggang, et al. Current and output power balancing method for multiple parallel pickup modules in inductive power transfer system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 120-127.
- [4] 周少聪,俞小明,王骏,等.基于原副边协同控制的无线充电系统能效提升方法[J/OL].电源学报,1-12 [2025-03-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20241204.1536.010.html>.  
Zhou Shaocong, Yu Xiaoming, Wang Jun, et al. Energy efficiency improvement method for wireless charging system based on primary and secondary edge collaborative control[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12 [2025-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20241204.1536.010.html>.
- [5] 孙天,宋贝贝,崔淑梅,等.电动汽车无线充电系统接收端位置大范围唯一性辨识系统设计[J].电工技术学报,2024,39(21):6626-6635,6792.  
Sun Tian, Song Beibei, Cui Shumei, et al. Design of wide range unique identification system for receiving terminal location of wireless charging system for electric vehicles[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 39(21): 6626-6635, 6792.
- [6] 余庆昌,李浩然,朱玉玉.磁耦合谐振式无线充电线圈的优化方法研究[J/OL].电源学报,1-14 [2025-03-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240425.1639.002.html>.  
Yu Qingchang, Li Haoran, Zhu Yuyu. Research on optimization method of magnetic coupling resonance wireless charging coil[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-14 [2025-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240425.1639.002.html>.
- [7] 范宏,李嘉晖,郭琦.考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J].电力工程技术,2023,42(4):23-30.  
Fan Hong, Li Jiahui, Guo Qi. Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision behavior[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 23-30.
- [8] 夏鑫,钟浩,张磊,等.计及动态电价的电动汽车参与微电网调度双层优化策略[J].电力工程技术,2024,43(3):140-150.  
Xia Xin, Zhong Hao, Zhang Lei, et al. Dual layer optimization strategy for electric vehicles participating in microgrid scheduling considering dynamic electricity prices[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 140-150.
- [9] González-González J M, Triviño-Cabrera A, Aguado J A. Assessment of the power losses in a SAE J2954-compliant wireless charger[J]. IEEE Access, 2022, 10: 54474-54483.
- [10] Nakutis Ž, Lukočius R, Girdenis V, et al. A measurement method of power transferred to an electric vehicle using wireless charging[J]. Sensors, 2023, 23(24): 9636.
- [11] Zhu Guodong, Gao Dawei. High-frequency voltage and current sense circuits for inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11352-11362.

- [12] 袁瑞铭, 姜振宇, 易忠林, 等. 电动汽车无线充电电能计量关键技术研究及探讨[J]. 电测与仪表, 2018, 55(增刊 1): 11-16.
- Yuan Ruiming, Jiang Zhenyu, Yi Zhonglin, et al. Research and discussion on key technologies of wireless charging electric energy metering for electric vehicles[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(S1): 11-16.
- [13] Jiang Zhenyu, Zhao Sixiang, Yuan Ruiming, et al. Research on the transmitting end billing mode and the receiving end billing mode for wirelessly charged electric vehicles[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1176: 062035.
- [14] Chu S Y, Cui Xiaofan, Zan Xin, et al. Transfer-power measurement using a non-contact method for fair and accurate metering of wireless power transfer in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(2): 1244-1271.
- [15] 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.
- [16] Cheng Bo, Lu Jianghua, Zhang Yiming, et al. A metal object detection system with multilayer detection coil layouts for electric vehicle wireless charging[J]. *Energies*, 2020, 13(11): 2960.
- [17] 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.
- [18] Zhang Ruihong, Yao Huawen, Li Jinyu, et al. A coordinate positioning technique based on region partitioning for EV wireless charging system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3): 2443-2453.
- [19] 项飞, 钟文兴. 基于垂直解耦线圈组的 WPT 系统金属异物检测方法[J/OL]. 电源学报, 1-12 [2025-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230628.1332.002.html>.
- Xiang Fei, Zhong Wenxing. Metal foreign object detection method for WPT system based on vertical decoupling coil group[J/OL]. *Journal of Power Supply*, 1-12 [2025-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230628.1332.002.html>.
- [20] 苏文博, 王维, 吕晓飞, 等. 含金属异物的无线充电系统场域等效建模分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 226-232, 249.
- Su Wenbo, Wang Wei, Lü Xiaofei, et al. Equivalent modeling analysis of wireless charging system field containing metal foreign objects[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 226-232, 249.
- [21] 钟文兴, 张波. 电动汽车无线充电技术专辑主编述评[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 1-3.
- Zhong Wenxing, Zhang Bo. Editorial for the special issue on EV wireless charging technology[J]. *Journal of Power Supply*, 2022, 20(6): 1-3.
- [22] Feng Hao, Tavakoli R, Onar O C, et al. Advances in high-power wireless charging systems: overview and design considerations[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(3): 886-919.
- [23] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
- Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: part II [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(8): 1662-1678.
- [24] Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology: J2954\_202208[S]. SAE International, 2022.
- [25] 钱尧, 孙运全, 朱伟. 基于双边 LCC 拓扑结构的无线充电系统集成线圈设计研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 55-60.
- Qian Yao, Sun Yunquan, Zhu Wei. Design of integrated coil for EV wireless charging systems based on bilateral LCC topology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 55-60.
- [26] Delgado A, Salinas G, Oliver J A, et al. Equivalent conductor layer for fast 3-D finite element simulations of inductive power transfer coils[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(6): 6221-6230.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会.

电测量设备(交流) 特殊要求 第 21 部分: 静止式有功电能表: GB/T 17215.321-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- [28] 范兴明, 封浩, 张鑫. 最小二乘算法优化及其在锂离子电池参数辨识中的应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1577-1588.

Fan Xingming, Feng Hao, Zhang Xin. Optimization of least squares method and its application in parameter identification of lithium-ion battery model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1577-1588.

- [29] 王雪平, 林甲祥, 巫建伟, 等. 基于可决系数的自适应关联规则挖掘算法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 352-359.

Wang Xueping, Lin Jiexiang, Wu Jianwei, et al. Adaptive-association-rule mining algorithm based on determination coefficient[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(2): 352-359.

- [30] 黄文聪, 饶天彪, 蒋焯焱, 等. 无线电能传输系统最大效率追踪及恒压输出复合控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3589-3601, 3615.

Huang Wencong, Rao Tianbiao, Jiang Xuanyan, et al. Maximum efficiency tracking and constant voltage output compound control method for wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3589-3601, 3615.

- [31] 杨阳, 王澍, 颜黎明, 等. 电动汽车无线充电系统双边 LCC 型谐振补偿网络及电磁安全性研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 171-180.

Yang Yang, Wang Shu, Yan Liming, et al. Research on double-sided LCC resonant topology and electromagnetic safety for wireless charging system of electric vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 171-180.

#### 作者简介

谭林林 男, 1986 年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为无线电能传输技术、新型电力电子变换技术、智能用电技术等。

E-mail: tanlinlin@seu.edu.cn (通信作者)

王嘉琦 女, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车无线电能传输系统电能计量。

E-mail: 2565490567@qq.com

## Measurement Method for Output Power of Transmitting Coil in Wireless Charging System Based on Multi Sensing Coil Collaboration

Tan Linlin Wang Jiaqi

(School of Electrical Engineering Southeast University Nanjing 210096 China)

**Abstract** Wireless charging technology is safer and more convenient than traditional wired charging, and has been widely used in the field of electric vehicles. However, wireless charging systems have the characteristic of separating the ground end and the vehicle end, and there are issues with the selection and measurement of power metering points. The mainstream approach is to set the measurement position of the wireless charging system on the transmitting coil. However, the current and voltage of the transmitting coil are relatively high, so that directly using sensors for measurement can lead to high sensor costs. To address the aforementioned issues, this paper proposed a non-contact measurement method for output power of transmitting coil of wireless charging systems using multi coil collaboration. This method did not require specialized high-power high-frequency current and voltage sensors, and adapted well to practical scenarios such as different power levels, horizontal and vertical ground displacement of cars, and shielding materials, and had high measurement accuracy.

The paper utilized the law of electromagnetic induction to measure the output power of transmitting coil by setting sensing coils. Firstly, it was inferred that there was a relationship between the output power of transmitting coil and the voltage product of the sensing coil. Secondly, the fitting coefficient was used to fit this relationship, and it was derived that when the positions of detection coils and transmission coil were fixed, the fitting coefficient did not shift with the receiving coil. After obtaining the fitting coefficient, only the terminal voltage of the sensing coil needed to be measured. Finally, by constructing the voltage matrix of sensing coils and the standard output power of transmitting coil matrix, the fitting coefficients were obtained, and a coupling

matrix model was established between the voltage phasor of each sensing coil and the output power of transmitting coil considering horizontal offset, vertical offset, and power variation.

The experimental results show that under different power levels, the maximum measurement error of the proposed method is within 1.5% when the wireless charging system undergoes offset in both horizontal and vertical ground directions. Under the condition of 2 square sensing coils, the maximum error in power measurement was 47%. When the number of sensing coils increased to 6, the maximum error decreased to within 1.5%. This result indicates that as the number of sensing coils increases, the accuracy will further improve. Meanwhile, research has found that when the transmitting and receiving coil are square, using a square sensing coil results in more ideal accuracy. In addition, with the use of 6 detection coils, 3, 5, and 9 power sampling points were used within the measured power range. The maximum errors in power measurement were 7.8%, 3.6%, and 1.5%, respectively, indicating that the more sampling points are, the more accurate the model is. Finally, further exploration is conducted on the practical scenario of placing multiple sensing coils horizontally, which can avoid the problem of vertical stacking height affecting the short distance power measurement.

This method has been proven to be effective through simulation and experimental analysis. Through comparative analysis of the results, the following conclusions can be drawn: (1) The size and quantity of detection coils are key to ensuring the accuracy of the model. A sufficient number of sensing coils will bring higher model accuracy, but at the same time, it will also increase the number of samples in the model solving process. Therefore, in practice, a reasonable selection can be made based on the measured power error requirements. (2) For coupling devices where both the transmitting and receiving coils are square coils, the measurement accuracy using square sensing coils is more ideal compared to circular sensing coils. (3) A sufficient number of sampling points in model solving can also affect the accuracy of the entire system model. In practice, a reasonable selection can be made based on the measured power error requirements. (4) Horizontal placement of multiple sensing coils can achieve high-precision power measurement, just like vertical stacking. In practical scenarios, placing multiple sensing coils horizontally can avoid the problem of vertical stacking height affecting the short distance measurement of the transmitting and receiving coils.

**Keywords:** Wireless charging, sensing coil, output power, non-contact measurement

(编辑 陈 诚)