

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306606

MCR-WPT 系统接收线圈偏移角度的测量方法研究*

江 兵 王子博 俞子豪 袁 明

(南京邮电大学自动化学院 南京 210046)

摘 要:针对磁耦合谐振式无线电能传输(magnetically coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)系统接收线圈相对于发射线圈偏移角度的不确定性,导致系统传输效率波动较大的问题,提出了一种基于反射阻抗的MCR-WPT系统接收线圈偏移角度计算方法。根据基尔霍夫电压定律建立发射线圈反射阻抗与线圈互感之间的关联,再根据空间两线圈的互感公式推导互感与线圈偏移角度之间的关系式,从而建立反射阻抗与偏移角度的表达式。利用Maxwell和Simplorer仿真软件搭建线圈模型和外围电路进行联合仿真,同时搭建了完整的MCR-WPT系统实验装置,在两线圈距离不同的情况下做了多组实验。仿真结果显示两线圈设定角度与计算角度平均绝对误差为 2.57° ,实验结果显示设定角度与计算角度平均绝对误差为 2.94° 。通过上述方法可以较为精确地计算出短距离无线电能传输系统接收线圈的偏移角度。

关键词:无线电能传输;角度偏移;反射阻抗;互感

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.99

Research on the measurement method of receive coil offset angle in MCR-WPT system

Jiang Bing Wang Zibo Yu Zihao Yuan Ming

(School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty of the offset angle of the receiving coil relative to the transmitting coil in the magnetically coupled resonant wireless power transfer (MCR-WPT) system, which leads to large fluctuations in the transmission efficiency of the system, a method for calculating the offset angle of the receiving coil in MCR-WPT system based on the reflection impedance is proposed. According to Kirchhoff's voltage law, the relation between the reflection impedance of the transmitting coil and the mutual inductance of two coils is established, then the relation equation of the mutual inductance and the coil offset angle is derived according to the mutual inductance formula of two coils. Therefore, the expression for the reflection impedance and the offset angle is derived. The coils model and peripheral circuits are built using Maxwell and Simplorer simulation software for co-simulation. Meanwhile, a MCR-WPT experimental system is built, and multiple sets of experiments are conducted under different coil distances. The simulation results show that the mean absolute error between the set angle of two coils and the calculated angle is 2.57° . The experimental results show that the aforementioned mean absolute error is 2.94° . The offset angle of the receiving coil of the short-distance wireless power transmission system can be calculated accurately through the above method.

Keywords: wireless power transmission; angle offset; reflected impedance; mutual inductance

0 引 言

近些年来,随着全球对绿色清洁能源的重视,无线充电方式有了较大规模的应用。自从2007年提出磁

耦合谐振技术,开拓了无线电能传输的新领域,使无线充电迅速成为汽车、机器人等领域的研究热点^[1-3]。目前较为成熟的技术有智能手机设备领域、工业制造领域,正高速发展的领域有植入式医疗设备和电动汽车领域^[4-6]。磁耦合谐振式无线电能传输系统中,在系统

电路达到谐振状态时,固定线圈的相对位置,改变电路中的其他参数,能够使电能传输效率达到最大值^[7-8]。但实际情况是接收线圈的位置并非固定不变,发射线圈与接收线圈的相对位置在不同工作情况下需要动态变化,从而导致了系统传输效率产生波动,造成系统不稳定^[9-10]。

目前,国内外学者在提高 WPT 系统的输出功率和传输效率、增加系统抗偏移能力等方面做了大量研究^[11-12]。孙跃等^[13-15]提出了一种基于环形偶极组合式线圈及三维旋转磁场的全角度偏移适应性 WPT 系统,成功实现了系统可在任意偏移角度下进行能量传输,且具有良好的传输性能。贾智伟等^[16]设计了一种基于三维发射线圈的肠道机器人无线供能系统,实现了 WPT 系统在姿态自由变换和不同位置下稳定的电能传输。赵靖英等^[17]进行了不对称 WPT 系统设计方法研究,设计了初级谐振补偿电容,并验证了系统在工作频率为 85 kHz 时的恒流输出特性,设计的不对称谐振补偿结构提高了系统的最大输出功率和稳定性。麦建伟等^[18]提出了一种新的具有强抗偏移能力的串/串并 (series/ series-parallel, S/SP) 补偿系统,采用罐型磁芯和新型 S/SP 补偿拓扑实现了多方向偏移下高效率、低波动的无线电能传输。以上研究从补偿拓扑的角度和设计 WPT 系统的硬件部分来达到研究目的,但也增加了系统的设计难度。

2016 年, Jiang 等^[19]提出了一种三相 MCR-WPT 系统,由 3 个矩形发送线圈和 1 个矩形接收线圈组成,采用相位角控制方法,研究了系统传输特性与发射线圈和接收线圈之间角度偏差的关系。但三相 MCR-WPT 系统发射端的互感耦合降低了系统的传输效率,且没有对线圈偏移角度的精确测量做进一步分析。2021 年, Wang 等^[20]提出了一种基于电子罗盘的无线充电线圈偏移角检测策略,该算法通过对电流进行测量,得到一个与磁感应强度成正比的电压信号,并将这个信号转换成旋转矩阵;根据旋转矩阵计算出两个不同方向上的磁场分量。利用地磁和矢量理论来确定两个线圈之间的偏置角,实现了充电线圈的角度定位。但是此方法操作较为复杂,并且只适用于特定的场合,具有一定的局限性。

以往的这些工作通常聚焦于改变模型的结构或是电磁场控制方法来达到提升传输效率的目的,未对系统线圈偏移角度的测量进行深入研究。本文从基尔霍夫电压方程入手,通过计算系统工作时发射端的反射阻抗来确定接收线圈偏移发射线圈的角度,推导了接收线圈偏移角度与发射端反射阻抗的关系式。利用 Maxwell 和 Simplerer 分别搭建了线圈仿真模型和外围电路模型,同时搭建了实验平台。仿真和实验结果均验证了方案的正确性。

1 MCR-WPT 系统及理论推导

本文采用的 MCR-WPT 系统等效电路模型如图 1 所示。

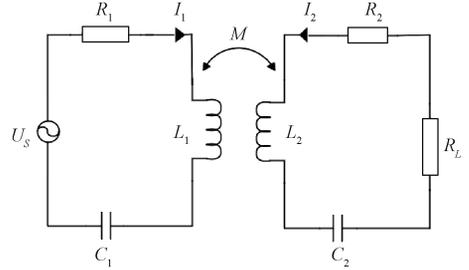


图 1 MCR-WPT 系统等效电路模型

Fig. 1 MCR-WPT system equivalent circuit model

其中, U_s 为交流电压源, L_1 、 L_2 为发射线圈和接收线圈电感, R_1 、 R_2 为发射线圈和接收线圈等效电阻, C_1 、 C_2 为发射线圈和接收线圈串联谐振补偿电容, R_L 为接收端串联负载电阻, I_1 、 I_2 分别为两线圈中的电流, M 为发射线圈和接收线圈之间的互感。

根据基尔霍夫电压理论,分别对发射线圈和接收线圈建立方程:

$$(R_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1}) I_1 - j\omega M I_2 = U_s \quad (1)$$

$$(R_L + R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}) I_2 - j\omega M I_1 = 0 \quad (2)$$

根据上述方程可以计算出发射端的阻抗 R_w :

$$R_w = \frac{U_s}{I_1} = R_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1} + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}} \quad (3)$$

式中: $R_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1}$ 属于发射线圈的固有阻抗,

$\frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}}$ 为发射线圈反射阻抗。由于

MCR-WPT 系统工作于谐振频率,所以线圈感抗与容抗相等,即发射端的反射阻抗^[21-22]可以简化成:

$$R_f = \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L} \quad (4)$$

空间中任意位置的两线圈的互感系数 M 可以表示为^[19]:

$$M = \frac{\mu_0 n_1 n_2}{4\pi} \iint \frac{dl_1 dl_2}{D} \quad (5)$$

式中: n_1 、 n_2 为两线圈匝数, μ_0 为真空磁导率, dl_1 和 dl_2 为两线圈的最小切割单元, D 为两最小切割单元的距离。

发射线圈和接收线圈采用相同的规格,线圈位置示意图如图2所示,图中TX和RX分别表示发射线圈和接收线圈。

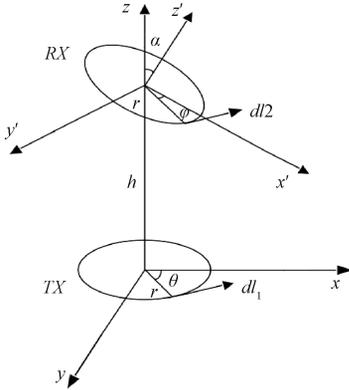


图2 线圈位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coil position

此时两同轴线圈互感可表示为:

$$M = \frac{\mu_0 n^2 r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi\cos\alpha) d\theta d\varphi}{\left[2 - 2\cos(\theta - \varphi) + \frac{h^2 - r\sin\theta\sin\alpha}{r^2}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

式中: n 为两线圈匝数, r 为线圈半径, h 为发射线圈和接收线圈间距离, α 为接收线圈相对于 Z 轴的偏移角度, θ 、 φ 分别是两个最小积分单元偏移各自水平面 X 、 X' 轴的角度。

将式(4)和(6)联立可得:

$$\frac{\sqrt{R_f(R_2 + R_L)}}{\omega} = \frac{\mu_0 n^2 r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi\cos\alpha) d\theta d\varphi}{\left[2 - 2\cos(\theta - \varphi) + \frac{h^2 - r\sin\theta\sin\alpha}{r^2}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,在系统基本参数不变的情况下,接收线圈偏移角度 α 仅与发射端的反射阻抗 R_f 有关。当 MCR-WPT 系统工作时,测量发射线圈的电压和电流,计算出系统工作时的阻抗,再减去发射线圈的原生阻抗就可以得到发射端的反射阻抗,代入到式(7)中计算就可以求出接收线圈的偏移角度 α 。

2 仿真和实验分析

2.1 仿真分析

为了验证上述理论公式推导的正确性,本文采用了电磁仿真软件 Maxwell 和 Simplorer 进行仿真实验。首先在 Maxwell 中创建两个线圈,并对其表面进行光滑处理。

两线圈半径均为 80 mm,匝数为 20 匝。为了直观地观察反射阻抗的大小,在 Simplorer 软件中搭建线圈外围电路。其中接收线圈串联负载阻抗为 20Ω ,输入电压有效值 12 V、谐振频率为 44.24 kHz 的交流电,将接收线圈分别放置在相对于发射线圈偏移 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 的位置,如图3所示。在此过程中,首先保持两线圈中心点间距离不变,分别测量系统运行后发射端的电压和电流值,计算不同位置发射线圈反射阻抗大小。接着,改变两线圈中心点间距离,测量在不同距离下,偏移角度发生变化时,系统的电压和电流值。

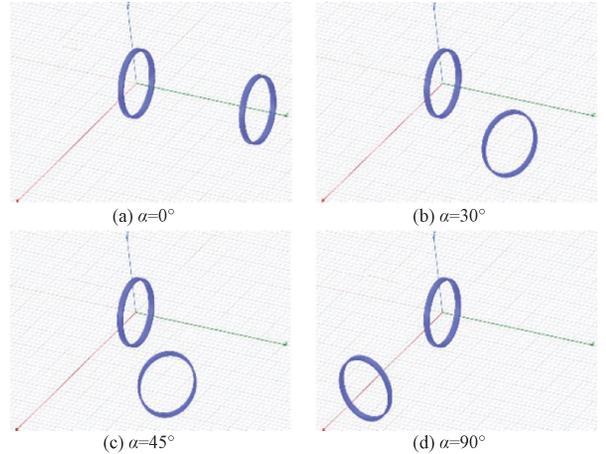


图3 各偏移角度仿真模型

Fig. 3 Simulation model for each offset angle

使用 Maxwell 和 Simplorer 进行联合仿真,得到系统运行时发射线圈工作电流,通过式(3)计算发射线圈的反射阻抗。当线圈间距离为 10 cm、接收线圈偏移角度 $\alpha = 90^\circ$ 时,仿真电流为 59.905 A,可得反射阻抗为 $0.3166 \text{ m}\Omega$ 。将计算出的反射阻抗代入式(7)中可得偏移角度为 83.7° ,分别设置线圈距离 8、10、12、14、16、18 和 20 cm,设置角度 0° 、 5° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° ,并进行多组仿真实验。设置线圈间距离为 10 cm 时,仿真结果如表1所示。

表1 $h=10 \text{ cm}$ 时仿真设置角度与计算反射阻抗、计算偏移角度

Table 1 Simulate setting angle, calculating reflection impedance and calculating offset angle when $h=10 \text{ cm}$					
仿真设置角度/ $(^\circ)$	发射线圈电压/V	发射线圈电流/A	反射阻抗/ $\text{m}\Omega$	计算偏移角度/ $(^\circ)$	误差/ $(^\circ)$
0	12	59.767	0.778 7	3.8	3.8
15	12	59.769	0.772 1	16.7	1.7
30	12	59.776	0.751 3	29.6	-0.4
45	12	59.798	0.677 3	47.3	2.3
60	12	59.821	0.596 4	58.1	-1.9
75	12	59.868	0.442 6	72.8	-2.2
90	12	59.905	0.316 6	83.7	-6.3

根据表 1 中的数据,仿真设置角度为 30° 时,计算偏移角度为 29.6° ,两者相差仅为 0.4° 。当仿真设置角度逐渐增加到 90° 时,与计算偏移角度之间的误差呈增大趋势。

不同距离下设定角度和反射阻抗的关系如图 4 所示。

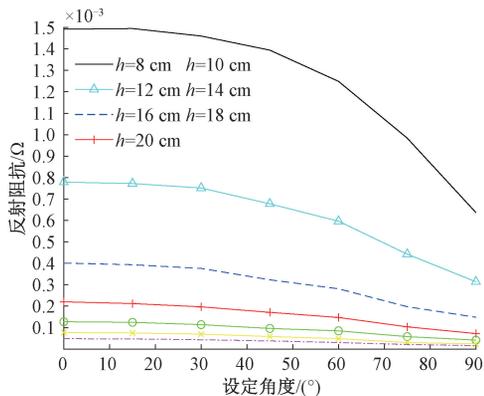


图 4 不同距离下设定角度和反射阻抗的关系
Fig. 4 The relationship between setting angle and reflection impedance at different distances

由图 4 可以看出,在同一距离下,反射阻抗随接收线圈偏移角度的增大而单调减小;在设定角度相同、距离不同下,可以得到反射阻抗随距离的增大同样减小。

不同距离下计算角度、角度的绝对误差与设定角度的关系如图 5 和 6 所示。

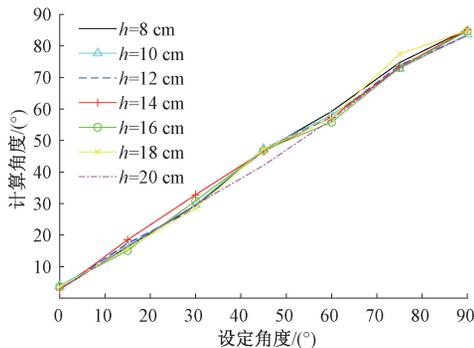


图 5 各距离计算角度对比

Fig. 5 Comparison of calculation angles for each distance

根据图 5 和 6 的仿真数据可计算出偏移角度的设定值与计算值的平均绝对误差为 2.57° 。由图 5 可知,计算角度随设定角度的变化趋势大致相同。由图 6 可以看出,偏移角度在接近 0° 和 90° 时误差会增大,在 30° 和 60° 之间误差较小。

2.2 实验分析

实验采用的线圈均由漆包铜线绕制而成,线圈内阻

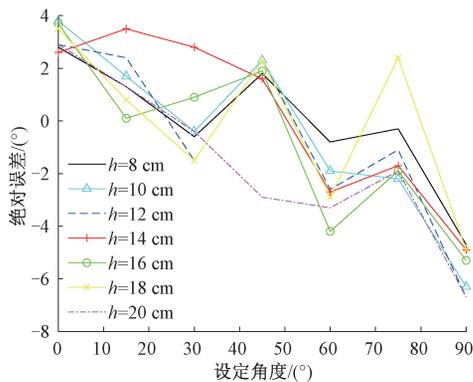


图 6 各距离计算角度的绝对误差对比
Fig. 6 Comparison of absolute error of each distance calculation angle

为 0.2Ω ,直径为 80 mm ,接收线圈与发射线圈参数完全一致,发射线圈串联 2Ω 电阻,输入电源为 12 V ,谐振频率设置为 44.24 kHz 。搭建的实验环境如图 7 所示。实验测试了当线圈距离为 10 cm 时,不同偏移角度放置情况下的计算结果,如表 2 所示。

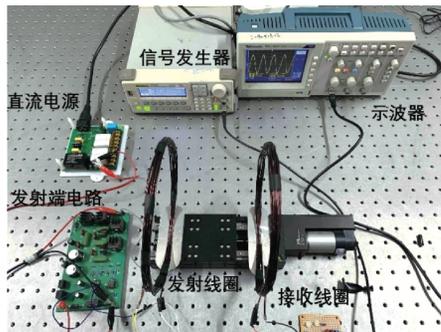


图 7 MCR-WPT 系统实验环境

Fig. 7 MCR-WPT system experimental environment

表 2 $h = 10 \text{ cm}$ 时实验设置角度与计算角度对照
Table 2 Comparison between experimental setting angle and calculating angle when $h = 10 \text{ cm}$

实验设置角度/ $(^\circ)$	发射线圈电压/V	发射线圈电流/A	反射阻抗/ $\text{m}\Omega$	计算偏移角度/ $(^\circ)$	误差/ $(^\circ)$
0	12	59.768	0.777 6	4.7	4.7
15	12	59.771	0.767 0	17.5	2.5
30	12	59.779	0.745 1	30.4	0.4
45	12	59.802	0.671 2	46.6	1.6
60	12	59.817	0.621 5	57.6	-2.4
75	12	59.863	0.476 9	71.5	-3.5
90	12	59.903	0.318 9	83.6	-6.4

当线圈距离为 $8, 10$ 和 12 cm 时,反射阻抗与实验设定角度关系如图 8 所示。

由图 8 可知,在设定角度相同、距离不同下,反射阻

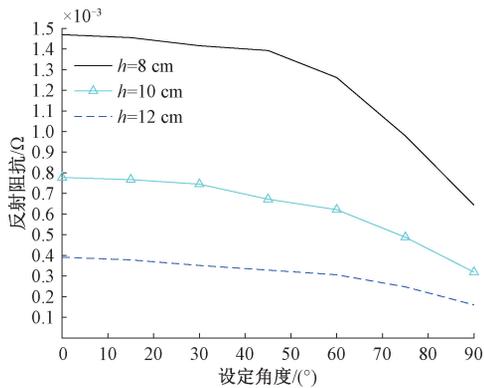


图 8 不同距离下反射阻抗与实验设定角度关系
Fig. 8 Relationship between reflection impedance and experimental setting angle at different distances

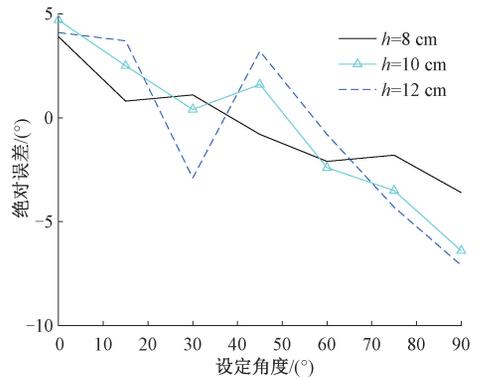


图 10 各距离实验绝对误差对比
Fig. 10 Comparison of experiment absolute error of each distance

抗随距离的增大而减小,这与图 4 得出的结论一致。此外,从图中能够直观地看出,线圈距离越大,线圈偏移角度对反射阻抗的影响越小。

线圈距离为 8、10 和 12 cm 时,由式(7)计算出的角度与实验设定角度示意图如图 9 所示,实验绝对误差角度与实验设置角度示意图如图 10 所示。由图 9 和 10 可以看出,线圈距离为 12 cm 时,绝对误差的变化幅度相对于线圈距离为 8 cm 时较大,由此可知,本文所提出的接收线圈偏移角度计算方法更适用于线圈的传输距离较短的无线电能传输系统。

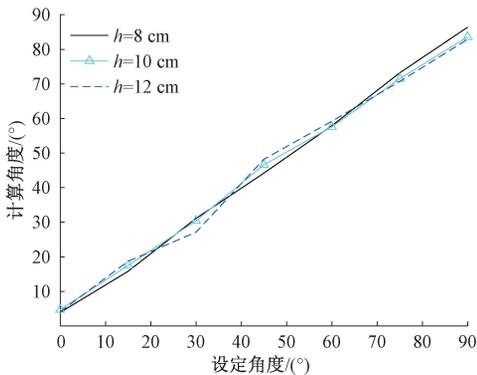


图 9 各距离实验设定角度与计算角度对比
Fig. 9 Comparison of experimental setting angles and calculated angles for each distance

根据测量的数据可得,各偏移角度的平均绝对误差为 2.94°。当线圈距离为 8 cm 时,实验平均绝对误差为 2.01°,当线圈距离为 10 cm 时,实验平均绝对误差为 3.07°,当线圈距离为 12 cm 时,实验平均绝对误差为 3.73°。可以看出误差随着距离的增加而增大,分析其原因有两点,一是根据图 4 和 8 可以看出,当线圈距离增大时,发射线圈反射阻抗越来越小,且曲线趋势越来越平

缓,使得线圈中电流变化不明显,检测和计算时误差较大。二是实验器材自身有误差,比如线圈自感和串联电阻与谐振的参数有偏差,同时当距离增大时,对测量的精度要求较高。

此外,根据上述数据可以看出,当放置角度在 0°~60°范围内时,仿真和实验计算角度的误差较小,当放置角度继续增大时,计算的结果误差较大,初步分析原因是当 $\alpha = \pi/2$ 时线圈互感极小,此时相对误差较大造成反射阻抗计算偏差较大,但总体变化趋势保持一致。

3 结论

本文提出了一种基于发射线圈反射阻抗的接收线圈偏移角度计算方法,首先建立 MCR-WPT 系统等效电路模型,根据基尔霍夫电压方程,推导发射线圈反射阻抗关系式,接着根据线圈互感公式推导互感与接收线圈偏移角度之间的关系,最后建立反射阻抗与偏移角度的表达式。利用 Maxwell 和 Simplerer 搭建系统仿真模型,并搭建了实验平台。在谐振频率 44.24 kHz 下,对不同线圈距离和不同偏置角度的收发线圈进行仿真和实验分析,仿真结果显示偏移角度设定值与计算值的平均绝对误差为 2.57°,实验结果显示偏移角度设定值与计算值的平均绝对误差为 2.94°,通过上述方法可以较为精确地计算出短距离无线电能传输系统中接收线圈相对发射线圈的偏移角度。

参考文献

[1] 杨明博,管延智,李强,等. 磁共振无线能量传输拓扑结构特性研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(10): 2382-2391.
YANG M B, GUAN Y ZH, LI Q, et, al. Research on key topologies of the wireless power transmission system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):

- 2382-2391.
- [2] 沈娜, 李长生, 张合. 磁耦合共振无线能量传输系统建模与分析 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33 (12): 2735-2741.
- SHEN N, LI CH SH, ZHANG H. Modeling and analysis of wireless power transmission system based on magnetic coupling resonance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (12): 2735-2741.
- [3] 汪佐儿, 王志武, 汪炜, 等. 用于胃肠道机器人的 C 型组合式无线能量发射线圈的设计与实验 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (9): 255-265.
- WANG Z ER, WANG ZH W, WANG W, et al. Design and experiment of C-shaped combined wireless power transmitting coils for the gastrointestinal capsule robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (9): 255-265.
- [4] OJO J, LIN X, LANG H. Resonant-inductive wireless power transfer for autonomous mobile robots [J]. Instrumentation, 2019, 6 (1): 5584.
- [5] 黄学良, 王维, 谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (2): 2-14, 141.
- HUANG X L, WANG W, TAN L L. Technical progress and application development of magnetic coupling resonant wireless power transfer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (2): 2-14, 141.
- [6] 程靖宜, 武小兰, 白志峰. 基于耦合系数估计的电动汽车无线电能传输最大效率跟踪 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34 (3): 180-186.
- CHENG J Y, WU X L, BAI ZH F. Maximum efficiency tracking of wireless power transfer for electric vehicles based on coupling coefficient estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (3): 180-186.
- [7] 李中启, 熊鑫博, 孔彭生, 等. 无线充电系统电磁屏蔽与效率优化技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (5): 151-162.
- LI ZH Q, XIONG X B, KONG P SH, et al. Research on electromagnetic shielding and efficiency optimization technology of wireless power transfer system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (5): 151-162.
- [8] 韩茜茜, 路向阳, 刘生. 负载对磁耦合谐振式无线电能传输效率的影响研究 [J]. 自动化应用, 2019 (6): 149-150.
- HAN Q Q, LU X Y, LIU SH. Research on the influence of load on the efficiency of magnetic coupled resonant radio energy transmission [J]. Automation Application, 2019 (6): 149-150.
- [9] KIM T H, YUN G H, LEE W Y, et al. Asymmetric coil structures for highly efficient wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66 (7): 3443-3451.
- [10] LIU F, YANG Y, JIANG D, et al. Modeling and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with varying spatial scales [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32 (4): 3240-3250.
- [11] FENG J, LI Q, LEE F, et al. Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (8): 4656-4664.
- [12] WOO D H, CHA H R, KIM R Y. Resonant network design method to reduce influence of mutual inductance between receivers in multi-output omnidirectional wireless power transfer systems [J]. Energies, 2020, 13 (21): 5556.
- [13] 廖志娟, 孙跃, 叶兆虹, 等. 无线电能传输系统共振机理及共振点分布特性研究 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (2): 215-224.
- LIAO ZH J, SUN Y, YE ZH H, et al. Research on resonance mechanism and resonant point distribution characteristic of magnetic coupling wireless power transfer systems [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (2): 215-224.
- [14] 孙跃, 张路, 王智慧, 等. 交流包络调制无线电能传输系统的负载稳压输出研究 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (2): 33-37, 120.
- SUN Y, ZHANG L, WANG ZH H, et al. Research on load stabilized output of AC envelope modulation radio energy transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (2): 33-37, 120.
- [15] 冯天旭, 孙跃, 王智慧, 等. 基于环形偶极组合式线圈及三维旋转磁场的全角度偏移适应性 WPT 系统 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (16): 6104-6115, 6184.
- FENG T X, SUN Y, WANG ZH H, et al. An angular misalignment insensitive WPT system based on a combined circular and dipole coils and a 3-D rotating magnetic field [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (16): 6104-6115, 6184.
- [16] 贾智伟, 符涛. 基于三维发射线圈的肠道机器人无线供能系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (2): 291-296.
- JIA ZH W, FU T. Wireless power transmission system of intestinal robot based on three-dimension transmitting coil [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

- 2016,30(2):291-296.
- [17] 赵靖英, 赵纪新, 崔玉龙, 等. 不对称补偿 MCR-WPT 系统的传输特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(2):106-112.
- ZHAO J Y, ZHAO J X, CUI Y L, et al. Research on transmission characteristics of MCR-WPT system with asymmetrical compensation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (2): 106-112.
- [18] 麦建伟, 曾宪瑞, 刘治钢, 等. 基于 S/SP 补偿拓扑的强抗偏移感应式无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(4):1525-1537.
- MAI J W, ZENG X R, LIU ZH G, et al. An IPT system based on S/SP compensation topology with high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(4):1525-1537.
- [19] JIANG C, LIU F, RUAN X, et al. Transmission characteristics analysis of a three-phase magnetically coupled resonant wireless power transfer system [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016: 1-6.
- [20] WANG R, HUANG X, LI J, et al. Accurate offset angle detection strategy for wireless charging coils based on electronic compasses [J]. IEEE Access, 2021, 9: 58579-58588.
- [21] 谈龙照. 多方向无线电能传输技术研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- TAN L ZH. Research on multidirectional radio energy transmission technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [22] GAO X, LIU C, ZHOU H, et al. Design and analysis of a new hybrid wireless power transfer system with a space-saving coupler structure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(5): 5069-5081.

作者简介



江兵(通信作者), 2007年于中国科学技术大学获博士学位, 现为南京邮电大学副教授, 主要研究方向为智能仪器与测控系统。

E-mail: jiangb@njupt.edu.cn

Jiang Bing (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2007. Now he is an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include intelligent instruments and measurement & control systems.