

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.5.60

中图分类号: TM08

文献标志码: A

# 宇称-时间对称电场耦合无线电能传输系统 电场分布特性研究

郑小瑶, 江彦伟(中国电源学会会员), 疏许健, 周 阳, 赵小光  
(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

**摘要:** 电场耦合无线电能传输 ECPT(electric-field coupled wireless power transfer)系统具有耦合极板轻便、跨金属传能、涡流损耗可忽略等优点。其中, 宇称-时间对称电场耦合无线电能传输 PT-ECPT(parity-time symmetric ECPT)系统具有在耦合极板间距发生变化时保持恒定输出的特性, 具有广泛的应用前景。基于此, 研究了 PT-ECPT 系统的电场辐射分布。理论分析、仿真及实验结果表明, 在强耦合区域且输出功率相同的情况下, PT-ECPT 系统的电场分布在耦合系数较小时比传统的谐振式 ECPT 系统更为集中, 使得 PT-ECPT 在小耦合系数时安全性更高。

**关键词:** 电场耦合; 电场泄露; 无线电能传输系统; 宇称-时间对称; 电场分布

## Study on Electric-field Distribution Characteristics of Parity-time Symmetric Electric-field Coupled Wireless Power Transfer System

ZHENG Xiaoyao, JIANG Yanwei, *Member, CPSS*, SHU Xujian, ZHOU Yang, ZHAO Xiaoguang  
(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The electric-field coupled wireless power transfer(ECPT) system possesses several advantages, including lightweight coupling pole plates, cross-metal power transmission and negligible eddy current losses. Specifically, the parity-time symmetric ECPT(PT-ECPT) system characterized by its capability to maintain a constant output under variations in the coupling pole plate spacing exhibits promising application prospects. Consequently, the electric-field radiation distribution of the PT-ECPT system was studied. The theoretical analysis, simulations and experimental results indicate that compared with those of the conventional resonant ECPT systems, the electric-field distribution of the PT-ECPT system is more concentrated in the regions of strong coupling while maintaining identical output power. This concentration is particularly pronounced when the coupling coefficient is small, which makes the PT-ECPT system more secure under conditions of reduced coupling coefficients.

**Keywords:** Electric-field coupled; electric-field leakage; wireless power transfer system; parity-time symmetry; electric-field distribution

电场辐射被认为是造成环境污染的第四大污染源,同时也影响着接触者的健康<sup>[1-3]</sup>,已成为世界各国共同关注的问题。随着科技的发展与进步,生活中的电场辐射正在慢慢增加,对人类健康的威胁不断加剧,同时也引发了人们对各种设备产生电场辐射的担忧。

电场耦合无线电能传输 ECPT(electric-field coupled wireless power transfer)系统以电场为传输介

质,将电网的电能经发射端电能变换环节变换为高频电能驱动发射极板,并在交流电作用下与接收极板形成交互电场,通过交互电场作用产生位移电流“流过”极板,使接收极板接收到发射端的能量,并经电能变换后传输给负载<sup>[3-5]</sup>。ECPT系统因耦合极板轻便、跨金属传能、涡流损耗可忽略等优点被应用于交通、水下、煤矿等领域的无线供电<sup>[6-10]</sup>。为了确保 ECPT 系统的电场辐射不影响人体和设备,必须严格限制耦合机构的电场辐射,因此研究 ECPT 电场辐射的安全性至关重要。文献[11]对 ECPT

收稿日期:2024-04-01; 修回日期:2024-07-07; 录用日期:  
2024-07-28; 网络首发日期:2024-08-06

系统耦合板间的电场进行了研究,仿真和实验结果表明,耦合板中部的电场大小近似恒定,但在耦合板边缘附近由于边缘效应,电场变大,在耦合板之间呈沙漏状;文献[12]研究了水下耦合电容器的电场分布,在金属极板上增加了厚度为1 mm的绝缘层,以防止人体误触,仿真结果表明电场主要集中于绝缘介质的内部,在金属板之间可看作是1个匀强电场;文献[13]提出1种阵列极板式耦合机构,通过使用多个移相板来降低边缘场强,有效减少了系统外部的电场辐射,结合有限元仿真结果发现,采用这种新型极板可将边缘场降低80%,减轻电场安全要求对电力传输的限制。综上所述,虽然目前对ECPT系统电场分布已有一定的研究,但是其存在的安全问题尚未得到可靠解决。

斯坦福大学教授 Assaworarat S 等<sup>[14]</sup>于2017年首次将量子力学中的宇称-时间 PT (parity-time) 对称原理引入到磁场耦合式无线电能传输系统中,发现磁耦合无线电能传输系统的功率和效率可在一定范围内随距离的变化保持不变。文献[15-16]发现当 ECPT 系统满足 PT 对称条件时,系统可在耦合极板间距发生变化的情况下保持恒功率和恒效率输出,因此宇称-时间对称电场耦合无线电能传输 PT-ECPT (PT symmetric ECPT) 系统具有广泛的应用前景。基于目前尚无对 PT-ECPT 系统电场分布的研究,本文通过与谐振式 ECPT 系统对比,详细研究了 PT-ECPT 系统的电场分布特性。

## 1 PT-ECPT 与谐振式 ECPT 系统的工作原理

### 1.1 拓扑结构

PT-ECPT 系统和谐振式 ECPT 系统的基本拓扑分别如图1和图2所示。PT-ECPT 系统主要包括发射端用以提供交流电源的负电阻电路、发射电容极板和补偿电感,以及接收端的电容极板、补偿电感和负载;谐振式 ECPT 系统直接采用交流源提供能量,其他元件与 PT-ECPT 系统相同。

### 1.2 工作频率对比

根据图1所示系统拓扑,可得电路方程

$$\begin{bmatrix} \frac{j\omega}{\omega_1} - \frac{j\omega_1}{\omega(1-k^2)} + \frac{1}{Q_{ST}} & \frac{j\omega_1 C_M}{\omega C_2(1-k^2)} \\ \frac{j\omega_2 C_M}{\omega C_1(1-k^2)} & \frac{j\omega}{\omega_2} - \frac{j\omega_2}{\omega(1-k^2)} + \frac{1}{Q_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中: $j$ 为虚数单位; $\omega$ 为 PT-ECPT 系统的工作角频率; $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别为发射侧和接收侧的固有谐振频率; $k$ 为耦合系数; $Q_{ST}$ 为发射侧品质因数, $Q_{ST} = \omega_1 L_1 / (-R_0 + R_1)$ ,其中 $L_1$ 为发射侧补偿电感, $-R_0$ 为发射侧提供功率的负电阻, $R_1$ 为发射侧内阻; $Q_R$ 为接收侧品质因数, $Q_R = \omega_2 L_2 / (R_2 + R_L)$ ,其中 $L_2$ 为接收侧补偿电感, $R_2$ 为接收侧内阻, $R_L$ 为接收侧电路消耗功率的负载电阻; $C_1$ 和 $C_2$ 分别为发射侧和接收侧的电容; $C_M$ 为发射侧极板与接收侧极板之间的互电容; $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 分别为发射侧和接收侧的电流。

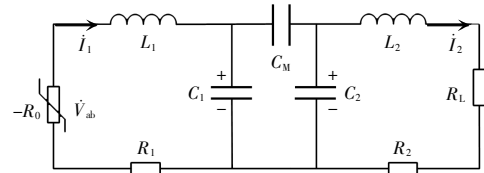


图1 PT-ECPT 系统结构

Fig. 1 Architecture of PT-ECPT system

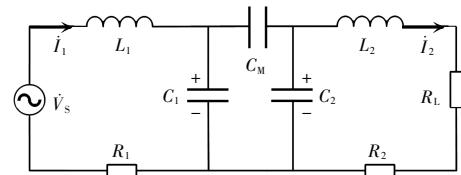


图2 谐振式 ECPT 系统结构

Fig. 2 Architecture of resonant ECPT system

在 ECPT 系统中, $C_M \ll C_1, C_2$ , 即  $k^2 \ll 1$ , 因此  $(1-k^2) \approx 1$ , 式(1)可化简为

$$\begin{bmatrix} \frac{j\omega}{\omega_1} - \frac{j\omega_1}{\omega} + \frac{1}{Q_{ST}} & \frac{j\omega_1 C_M}{\omega C_2} \\ \frac{j\omega_2 C_M}{\omega C_1} & \frac{j\omega}{\omega_2} - \frac{j\omega_2}{\omega} + \frac{1}{Q_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

要使所述系统方程存在非零解,则式(2)的行列式应为0<sup>[17]</sup>,同时在 PT 对称条件下要求发射侧和接收侧的固有谐振频率相同,即  $\omega_1 = \omega_2$ , 由此可得

$$-\left(\frac{\omega}{\omega_1}-\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 + j\left(\frac{\omega}{\omega_1}-\frac{\omega_1}{\omega}\right)\left(\frac{1}{Q_{ST}}+\frac{1}{Q_R}\right) + \frac{1}{Q_{ST}Q_R} + \left(\frac{\omega_1}{\omega}k\right)^2 = 0 \quad (3)$$

分离式(3)的实部和虚部,可得

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}-\frac{\omega_1}{\omega}\right)\left(\frac{1}{Q_{ST}}+\frac{1}{Q_R}\right) = 0 \quad (4)$$

$$-\left(\frac{\omega}{\omega_1}-\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{Q_{ST}Q_R} + \left(\frac{\omega_1}{\omega}k\right)^2 = 0 \quad (5)$$

对于上述条件,分 2 种情况( $\omega \neq \omega_0$  和  $\omega = \omega_0$ )进行讨论。

情况 1: 当系统工作角频率不等于系统固有谐振角频率即  $\omega \neq \omega_0$  时,由式(4)可求得  $-R_0$  为

$$-R_0 = -R_1 - \frac{C_2}{C_1}(R_1 + R_2) \quad (6)$$

由式(5)可推导出系统的工作角频率为

$$\omega = \omega_1 \sqrt{\frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4(k^2 - 1)}}{2}} \quad (7)$$

式中,  $B = 2 - [(R_2 + R_1)/(\omega_1 L_2)]^2$ 。

要使系统的工作角频率为实数,须满足条件

$$\begin{cases} \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4(k^2 - 1)}}{2} \geq 0 \\ B^2 + 4(k^2 - 1) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

经化简求得

$$k > k_c = \omega_2 C_2 (R_2 + R_1) \quad (9)$$

式中,  $k_c$  为临界耦合系数。

可知,当  $k > k_c$  时,系统工作在强耦合区域;当  $k < k_c$  时,系统工作在弱耦合区域,不满足 PT 对称条件。

情况 2: 当系统工作角频率等于系统固有谐振角频率即  $\omega = \omega_0$  时,认为系统处于破碎的 PT 对称态。

对于图 2 所示的谐振式 ECPT 系统,其工作角频率始终为系统固有谐振角频率,即  $\omega = \omega_0$ 。

## 2 PT-ECPT 与谐振式 ECPT 系统的极板电压分析

### 2.1 极板电压求解

ECPT 系统的电场辐射主要来源于耦合极板的

电压。为了研究谐振式 ECPT 系统和 PT-ECPT 系统的电场辐射,本节利用电路理论对比分析 2 种系统极板电压  $V_{CM}$  的特性。

根据图 1 所示系统拓扑,可得电路方程

$$\begin{cases} \left(j\omega L_1 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \dot{I}_{1-} - \frac{1}{j\omega C_1} \dot{I}_M = \dot{V}_{ab} \\ -\frac{1}{j\omega C_1} \dot{I}_{1+} + \left(\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_M} + \frac{1}{j\omega C_2}\right) \dot{I}_{M-} \\ \frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_2 = 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_{M+} + \left(j\omega L_2 + R_2 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\dot{I}_M$  为流过电容  $C_M$  的电流;  $\dot{V}_{ab}$  为 PT-ECPT 系统中负电阻两端的电压。

化简式(10)可得

$$\dot{V}_{CMPT} = \frac{\dot{V}_{ab}}{\frac{C_M}{C_1} + \frac{C_M X_2}{C_2 X_1} - \left(\frac{C_M}{C_1} + \frac{C_M}{C_2}\right) X_2} \quad (11)$$

式中:  $\dot{V}_{CMPT}$  为 PT-ECPT 系统中电容  $C_M$  两端的电

压;  $X_1 = \left(-\frac{\omega^2}{\omega_1^2} + j\frac{1}{Q_R} \frac{\omega}{\omega_1} + 1\right)$ ,  $Q_R = \frac{1}{\omega C_2 (R_2 + R_1)}$ ;  $X_2 =$

$\left(-\frac{\omega^2}{\omega_1^2} + j\frac{\omega}{\omega_1} \frac{1}{Q_{ST}} + 1\right)$ ,  $Q_{ST} = \frac{1}{\omega C_1 R_1}$ 。

根据图 2 所示系统拓扑,可得电路方程

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_{1-} - \frac{1}{j\omega C_1} \dot{I}_M = \dot{V}_s \\ -\frac{1}{j\omega C_1} \dot{I}_{1+} + \left(\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_M} + \frac{1}{j\omega C_2}\right) \dot{I}_{M-} \\ \frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_2 = 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_{M+} + (R_2 + R_1) \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\dot{V}_s$  为谐振式 ECPT 系统中的输入交流电压。

化简式(12)可得

$$\dot{V}_{CMR} = \frac{Q_{ST} \dot{V}_s}{-\frac{C_M}{C_1} Q_{ST} - \frac{C_M}{C_2} Q_R + j\left(\frac{C_M}{C_1} + 1 + \frac{C_M}{C_2}\right)} \quad (13)$$

式中:  $\dot{V}_{CMR}$  为谐振式 ECPT 系统中电容  $C_M$  两端的电压;  $Q_{ST} = \omega_1 L_1 / R_1$ ;  $Q_R = \omega_2 L_2 / (R_2 + R_1)$ 。

### 2.2 电路仿真和实验验证

本文采用的系统电路参数见表 1。根据式(11)和式(13)可分别求得 PT-ECPT 系统和谐振式 ECPT 系统的极板电压理论值;将表 1 所示电路参数输入仿真软件 Ansys Maxwell 可得其极板电压的仿真值。为了测试实际极板电压应力,本文搭建了实验样机平台,如图 3 所示。

表 1 系统电路参数

Tab. 1 Circuit parameters of system

参数	数值
发射端电容 $C_T/\mu\text{F}$	783.3
接收端电容 $C_R/\mu\text{F}$	783.3
发射电路内阻 $R_1/\Omega$	0.8
接收电路内阻 $R_2/\Omega$	0.8
接收端额定谐振频率 $(\omega R_0/2\pi)/\text{kHz}$	500
电感 $L_1/\mu\text{H}$	124
电感 $L_2/\mu\text{H}$	124
负载电阻 $R_L/\Omega$	13

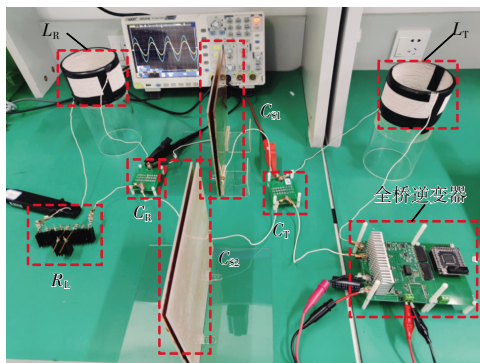


图 3 实验样机

Fig. 3 Experimental prototype

实验样机由发射端电感  $L_T$ 、发射端电容  $C_T$ 、接收端电感  $L_R$ 、接收端电容  $C_R$ 、全桥逆变电路和耦合极板组成,其中耦合极板为 4 块 20 mm×20 mm 的方形铜片。当全桥逆变电路工作在 PT-ECPT 系统中时,通过控制其输出电压、电流相位使其等效为 1 个负电阻<sup>[18]</sup>,为 PT-ECPT 系统工作提供能量。

图 4 为输出功率为 50 W 时,PT-ECPT 系统和谐振式 ECPT 系统极板电压随耦合系数  $k$  变化的曲线。可以看出,存在 1 个耦合系数  $k_c=0.034$ ,其将 PT-ECPT 系统工作区间分为强耦合区域和弱耦合

区域。在弱耦合区域( $k < 0.034$ ),PT-ECPT 系统具有与谐振式 ECPT 系统相同的工作频率和极板电压应力;在强耦合区域( $k > 0.034$ ),PT-ECPT 系统的极板电压应力在耦合系数较小时更低,而谐振式 ECPT 系统的极板电压应力在耦合系数较大时更低。同时可以看出,理论结果、电路仿真结果和实验结果具有较好的一致性。

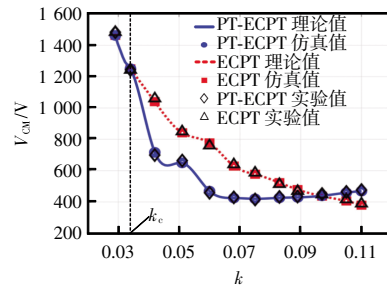


图 4 输出功率为 50 W 时,不同耦合系数  $k$  下 PT-ECPT 系统与谐振式 ECPT 系统的极板电压应力

Fig. 4 Voltage stress on pole plates of PT-ECPT system and resonant ECPT system with different coupling coefficients ( $k$ ) at output power of 50 W

## 3 PT-ECPT 与谐振式 ECPT 系统的电场分布仿真分析

### 3.1 电场辐射标准

表 2 为国际非电离辐射防护委员会 ICNIRP (international commission on non-ionizing radiation protection)指南中一般公众接触的时变电场和磁场参考水平<sup>[19]</sup>。

表 2 时变电场和磁场公众暴露的参照水平<sup>[19]</sup>

Tab. 2 Reference levels for public exposure to time-varying electric and magnetic fields<sup>[19]</sup>

频率范围/Hz	电场强度 $E/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	磁感应强度 $B/\text{T}$
1~8	5	$4 \times 10^{-2} f^2$
8~25	5	$5 \times 10^{-3} f$
25~50	5	$2 \times 10^{-4}$
50~400	$2.5 \times 10^2 f$	$2 \times 10^{-4}$
400~3 000	$2.5 \times 10^2 f$	$8 \times 10^{-3} f$
3 000~10 000 000	$8.3 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-5}$

### 3.2 电场分布仿真

根据表 2 所示国际电磁辐射标准,在 3 kHz~

10 MHz, 电场强度不应超过 83 V/m。因此本文定义电场强度高于 83 V/m 的区域为非安全区, 电场强度低于 83 V/m 的区域为安全区, 安全区与非安全区的交界线为安全区域分界线, 安全区域分界线到耦合极板的距离为电场辐射距离。为了不失一般性, 在分析对比 2 种系统耦合机构电场分布时, 采用相同的电路拓扑和系统参数, 电路固有谐振频率设定为 500 kHz, 通过计算和仿真得出 2 种系统的极板电压应力, 输入仿真软件, 对上述 2 种系统的耦合机构模型进行电场分布仿真。

图 5 为输出功率为 50 W 时, PT-ECPT 系统和谐振式 ECPT 系统电场辐射距离随耦合系数  $k$  变化的曲线。可以看出, 在弱耦合区域 ( $k < 0.034$ ), PT-ECPT 系统具有与谐振式 ECPT 系统相同的工作频率和电场辐射距离; 在强耦合区域 ( $k > 0.034$ ), PT-ECPT 系统的电场分布在耦合系数较小时更集中, 而谐振式 ECPT 系统的电场分布在耦合系数较大时更集中。由于 ECPT 系统主要工作在耦合系数较小的区域, 因此采用 PT-ECPT 系统的安全性更高。

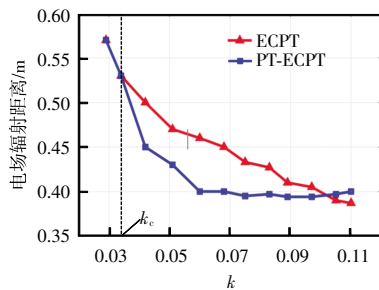


图 5 输出功率为 50 W 时, 不同耦合系数  $k$  下 PT-ECPT 系统与谐振式 ECPT 系统的电场辐射距离

Fig. 5 Electric-field radiation distance for PT-ECPT system and resonant ECPT system with different coupling coefficients ( $k$ ) at output power of 50 W

图 6 为 PT-ECPT 系统和谐振式 ECPT 系统在耦合系数  $k=0.068 27$  时, 电场辐射距离随输出功率变化的曲线。可以看出, 在相同耦合系数下, 2 种系统随着输出功率的增加, 电场辐射距离都增大, 即产生了更大的电场辐射。

图 7 和图 8 分别为输出功率为 50 W 时, 2 种系统在不同耦合系数下的电场辐射分布。由图 7 可以看出, 当耦合系数  $k=0.041$  时, 谐振式 ECPT 系统

和 PT-ECPT 系统耦合机构产生的电场辐射距离分别为 0.50 m 和 0.45 m。由图 8 可以看出, 当耦合系数

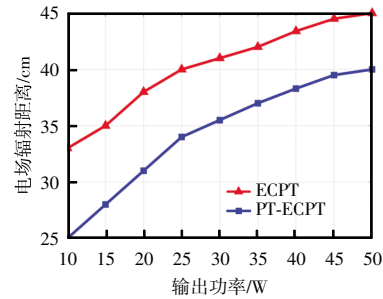
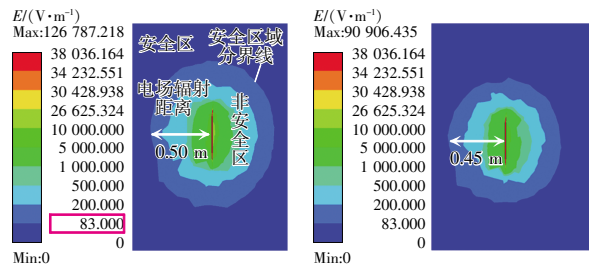


图 6  $k=0.068 27$  时, 不同输出功率下 PT-ECPT 系统与谐振式 ECPT 系统的电场辐射距离

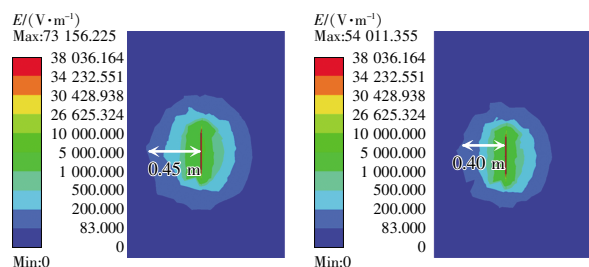
Fig. 6 Electric-field radiation distance for PT-ECPT system and resonant ECPT system at different values of output power when  $k$  is 0.068 27



(a) 传统 ECPT 耦合机构 电场分布 (b) PT-ECPT 耦合机构 电场分布

图 7  $k=0.041$ , 输出功率为 50 W 时传统 ECPT 耦合机构和 PT-ECPT 耦合机构电场分布

Fig. 7 Electric-field distribution of traditional ECPT coupling mechanism and PT-ECPT coupling mechanism at output power of 50 W when  $k$  is 0.041



(a) 传统 ECPT 耦合机构 电场分布 (b) PT-ECPT 耦合机构 电场分布

图 8  $k=0.068 27$ , 输出功率为 50 W 时传统 ECPT 耦合机构和 PT-ECPT 耦合机构电场分布

Fig. 8 Electric-field distribution of traditional ECPT coupling mechanism and PT-ECPT coupling mechanism at output power of 50 W when  $k$  is 0.068 27

$k=0.06827$ 时,谐振式 ECPT 系统和 PT-ECPT 系统耦合机构产生的电场辐射距离分别为 0.45 m 和 0.40 m。

图 9 为耦合系数  $k=0.06827$ ,输出功率为 20 W 时,2 种系统的电场辐射分布。可以看出,谐振式 ECPT 系统和 PT-ECPT 系统耦合机构产生的电场辐射距离分别为 0.38 m 和 0.31 m。对比图 7 和图 8 可以看出,在相同耦合系数、不同输出功率下,PT-ECPT 系统产生的电场辐射明显小于谐振式 ECPT 系统。

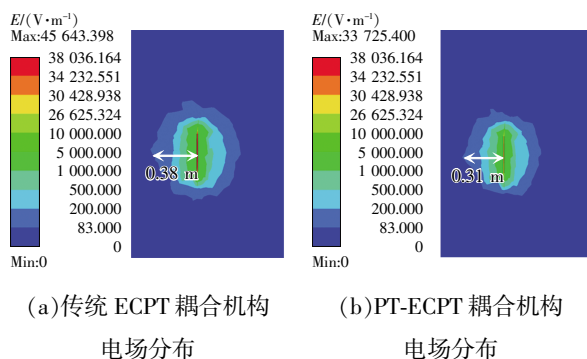


图 9  $k=0.06827$ 时,输出功率为 20 W 时传统 ECPT 耦合机构和 PT-ECPT 耦合机构电场分布

Fig. 9 Electric-field distribution of traditional ECPT coupling mechanism and PT-ECPT coupling mechanism at output power of 20 W when  $k$  is 0.06827

## 4 结语

本文通过电路理论分析了 PT-ECPT 系统与谐振式 ECPT 系统的 SS 型拓扑,推导了 PT-ECPT 系统的工作频率和临界耦合系数。同时,给出了 2 种系统的极板电压表达式,并通过仿真和实验验证了理论分析的正确性。结果表明:在强耦合区域且输出功率相同的情况下,PT-ECPT 系统的电场分布在耦合系数较小时更为集中,而谐振式 ECPT 系统的电场分布在耦合系数较大时更为集中,由于 ECPT 系统主要工作在耦合系数较小的区域内,因此采用 PT-ECPT 系统安全性更高。通过本文的分析和验证,总结了 PT-ECPT 系统与谐振式 ECPT 系统的电场分布特征,可为今后的研究提供参考。

### 参考文献:

[1] Zhai Z, DeMeester G, Shvartsman S, et al. FDTD calcula-

tions of B1-field and SAR for 3T whole body coil [J]. Proceedings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 2002, 10.

[2] 祝青鸾,李俊堂,高春芳.电磁辐射对生物体损伤的研究进展[J].实用医药杂志,2015,32(2):100-102.

Zhu Qingluan, Li Juntang, Gao Chunfang. Progress about biological damage effect of electromagnetic radiation [J]. Practical Journal of Medicine & Pharmacy, 2015, 32(2): 100-102 (in Chinese).

[3] 卿晓东,苏玉刚.电场耦合无线电能传输技术综述[J].电工技术学报,2021,36(17):3649-3663.

Qing Xiaodong, Su Yugang. An overview of electric-filed coupling wireless power transfer technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3649-3663 (in Chinese).

[4] 苏玉刚,钱林俊,刘哲,等.水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J].电工技术学报,2022,37(10):2399-2410.

Su Yugang, Qian Linjun, Liu Zhe, et al. Underwater electric-filed coupled wireless power transfer system with rotary coupler and parameter optimization method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2399-2410 (in Chinese).

[5] 潘文璇,刘超,张艺明,等.电动汽车磁场与电场混合耦合型无线电能传输技术综述[J].电源学报.2022,20(6):34-41.

Pan Wenxuan, Liu Chao, Zhang Yiming, et al. A review of magnetic and electric field hybrid coupling wireless power transfer technology for electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 34-41 (in Chinese).

[6] 顾文超,丘东元,张波,等.水下无线输电技术研究综述[J].电源学报.2023,21(3):125-138.

Gu Wenchao, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. A review of underwater wireless power transfer technology [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 125-138 (in Chinese).

[7] 苏玉刚,檀竹斌,胡宏晟,等.电场耦合电动车动态无线充电系统及耦合机构设计方法 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-12. (2024-01-05)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232022>.

Su Yugang, Tan Zhubin, Hu Hongsheng, et al. Design method of dynamic wireless charging system and coupling mechanism for electric vehicle with electric field coupling [J/OL].

- Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12.(2024-01-05)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232022> (in Chinese).
- [8] Yang Lei, Zhang Yuanqi, Li Xiaojie, et al. Analysis and design of four-plate capacitive wireless power transfer system for undersea applications [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(3): 202-211.
- [9] Zhou Wei, Su Yugang, Huang Liang, et al. Wireless power transfer across a metal barrier by combined capacitive and inductive coupling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4031-4041.
- [10] Lu Fei, Zhang Hua, Hofmann H, et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6011-6014.
- [11] Kumar A, Pervaiz S, Chang C K, et al. Investigation of power transfer density enhancement in large air-gap capacitive wireless power transfer systems [C]// 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference(WPTC). Boulder, CO, USA, 2015: 1-4.
- [12] 高镇, 于广强, 刘宁. 基于 E 类放大器的电场耦合式水下无线电能传输系统设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 560-567.
- Gao Zhen, Yu Guangqiang, Liu Ning. Design of electric-field coupled underwater wireless power transfer system based on class E amplifier [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 560-567 (in Chinese).
- [13] Zou L J, Hu A P, Wang Guoxing, et al. Study of electric and magnetic field distributions between two coupled plates for capacitive power transfer by simulation and practical measurements [C]// 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Seoul, Korea(South), 2020: 395-399.
- [14] Assaworrorarit S, Yu Xiaofang, Fan Shanhui. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit [J]. Nature, 2017, 546(7658): 387-390.
- [15] 张良权, 丘东元, 谢帆. 基于宇称时间对称的电场耦合式无线电能传输系统[J]. 广东电力, 2022, 35(9): 35-45. Zhang Liangquan, Qiu Dongyuan, Xie Fan. Electric field coupled wireless power transfer system based on parity time symmetry [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(9): 35-45 (in Chinese).
- [16] 马帅. PT 对称 CPT 系统分析及设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- Ma Shuai. Analysis and design of PT symmetric CPT system [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022 (in Chinese).
- [17] 张良权. 基于宇称时间对称的电场耦合式无线电能传输系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- Zhang Liangquan. Research on electric field coupled wireless power transmission system based on parity time symmetry [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022 (in Chinese).
- [18] Wu Lihao, Zhang Bo, Jiang Yanwei. Robust parity-time-symmetric WPT system with reduced switching-frequency and improved step-down conversion ratio [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2090-2103.
- [19] Protection N I R. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields(1 Hz to 100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.



郑小瑶

#### 作者简介:

郑小瑶(1998—),女,硕士。研究方向:无线电能传输技术。E-mail:220120042@fzu.edu.cn

江彦伟(1990—),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授。研究方向:无线电能传输技术、电力电子控制技术、分数阶电路及其应用。E-mail:jiangyanwei@fzu.edu.cn。

疏许健(1993—),女,博士,副教授。研究方向:无线电能传输技术、电力电子技术、分数阶电路及其应用。E-mail:xuji an\_shu@fzu.edu.cn。

周阳(1999—),男,硕士。研究方向:无线电能传输技术。E-mail:210127185@fzu.edu.cn。

赵小光(1997—),男,硕士。研究方向:无线电能传输技术。E-mail:210120069@fzu.edu.cn。