DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.293 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

基于线圈切换的 PT 对称空间无线电能传输系统

徐兴鹏(中国电源学会学生会员)，郭 锋，何禧煜
(西南科技大学信息工程学院，绵阳 621010)

摘要：针对接收线圈角度和位置变化导致负载功率波动和效率降低的问题，提出了 1 种基于线圈切换的宇称时间 PT(parity time)对称空间无线电能传输系统。首先建立了正方体结构数学模型，其特征是 6 面均配置双层空间螺旋线圈。通过仿真验证在等匝数和半径条件下，双层线圈比传统单层空间螺旋线圈具有更大的电感和耦合性，且设计更紧凑。然后推导了 SS 补偿在整个耦合区域的工作频率和传输特性，并根据 PT 对称区域存在频率分叉现象，提出了 1 种一次侧频率检测的线圈切换策略，以实现不同供电区域的自适应切换。最后进行实验验证，结果表明在接收线圈满足频率条件的三维空间内，负载能够获得稳定 18 W 功率及 80%以上的效率，且功率波动在 6.7%内，证实了策略的有效性。

关键词：空间无线电能传输；双层空间螺旋线圈；线圈切换；频率分叉

PT Symmetric Spatial Wireless Power Transfer System Based on Coil Switching

XU Xingpeng, *Student Member*, *CPSS*, GUO Feng, HE Xiyu
(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In response to the challenges posed by fluctuating load power and reduced efficiency due to variations in the angle and position of a receiving coil, a parity time (PT) symmetric spatial wireless power transfer system based on coil switching is proposed. First, the mathematical model of a cubic structure is established, which is endowed with double-layer space spiral coils on all of its six sides. Simulation results verify that under the condition of equivalent turns and radius, the double-layer coil exhibits a larger inductance and a better coupling performance than the single-layer space spiral coil, and the corresponding design is more compact. Second, the operating frequency and transmission characteristics of SS compensation throughout the whole coupling region are derived. Given the frequency splitting phenomenon existing in the PT symmetric region, a primary-side frequency detection coil switching strategy is put forward to enable adaptive switching in different power supply regions. Finally, experimental validation was carried out, and results show that under specific frequency conditions in a three-dimensional space, the receiving coil can consistently maintain a stable power output of 18 W and an efficiency exceeding 80%, with power fluctuations remaining within 6.7%, thereby validating the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: Spatial wireless power transfer; double-layer space spiral coil; coil switching; frequency splitting

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术凭借其出色的灵活性和便捷性，在多个领域(如水下探测[1]、智能家居[2-3]和植入医疗[4])中得到了广泛应用。传统 WPT 系统的电磁耦合机构由单对传输线圈组成，只有当传输线圈对齐时系统才能高效传输。若存在一定的角度和位置偏差，则将引起负载功率剧烈波动和效率降低的问题，从而限制了其空间自由度与灵活性[5-7]。

为了提高能量传输的自由度和鲁棒性，学者们

收稿日期：2024-01-23；**修回日期**：2024-03-10；**录用日期**：2024-03-22；**网络首发日期**：2024-04-26

采用多发射线圈空间 WPT 系统进行改善。文献[8-10]利用多维正交空间螺旋线圈，并采用磁场控制方式实现全向能量传输。在此基础上，文献[11]通过引入正交平面螺旋线圈改进发射端，以在空间中产生更加均匀的磁场，增强了系统的全向传输能力。对于管状结构内电子设备的供电挑战，文献[12]结合管状发射线圈和圆形接收线圈，配合三相半桥逆变与 LCC-S 补偿拓扑，降低了角度和位置偏移的影响。但这些方法涉及对多个逆变源的控制和多路采样，导致较高的控制难度和成本。为降低复杂性，文献[13]提出了采用正方体结构的发射线圈设计，其特点在于 6 面均布置有单层空间螺旋线圈，通过分别检测各线圈接通后回路电流的幅值或有效值，可自动切换到耦合最优的线圈以进行能量传输。该方法简单，不需要通信电路，并且该结构显著提高了有效能量传输距离，但并未考虑耦合系数对传输稳定性的影响。

近些年，基于宇称时间 PT(parity time)理论构成的 WPT 系统成为研究热点。该理论利用量子力学中的 PT 对称性，在 P 反演和 T 反演的联合作用下，实现系统增益与损耗间的动态平衡，从而确保系统在长距离传输中的恒功率和恒效率。文献[14]奠定了 PT 对称 WPT 系统的理论基石并突显了其传输上的巨大潜力，但该系统依赖于运算放大器使其功率输出水平受限而难以得到广泛的应用。为了突破这一束缚，学者们采用半桥[15]和全桥逆变器[16-20]替代传统的运算放大器，有效地提升了 WPT 系统的性能与功率水平。这些方案以其简单的控制和对耦合系数变化的鲁棒性，已在二维 WPT 系统研究与应用中得到了扩展。然而，三维空间的复杂度使得 PT 对称理论在三维 WPT 系统中的应用还处于初期阶段。鉴于此，本文提出了 1 种基于线圈切换的 PT 对称空间 WPT 系统。系统的发射端为正方体结构，该结构将传统的每面单层空间螺旋线圈优化为双层线圈，旨在保持线圈匝数和半径不变的情况下，通过增强线圈电感和耦合性能来拓宽 PT 对称区域。此外，还针对 PT 对称区域存在频率分叉的现象，提出了 1 种基于一次侧频率检测的线圈切换策略，使负载在满足频率条件的三维空间内能够高效、均匀地拾取功率。

1 耦合结构与理论分析

1.1 耦合结构

发射线圈采用正方体结构方案，其中心位于坐标轴原点，6 个双层空间螺旋线圈分别位于正方体的 6 个表面上。每个双层线圈共由 $2n$ 匝构成，其匝数平均分布在内层与外层，螺旋间距统一设定为 d_s，以确保线圈绕制的一致性。内层半径 r_2 略小于外层半径 r_1，使其更紧凑，且外层直径 $2r_1$ 等于正方体边长 a。绕制过程分 2 步进行：首先，内层线圈从底部向顶部按顺序绕制 n 匝；其次，外层线圈的绕制紧接内层绕制完成的位置开始，绕制方向不变，再由顶部至底部以完成剩余的 n 匝，从而构成完整的双层线圈。具体结构如图 1 所示。

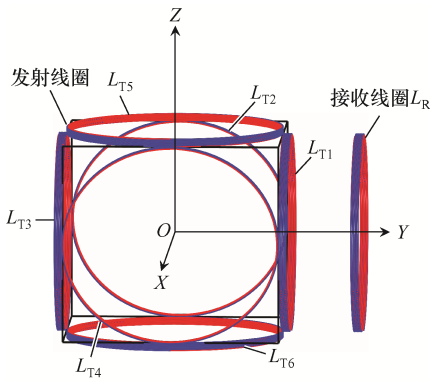


图 1 传输线圈结构

Fig. 1 Structure of transmission coil

该结构的有效能量传输距离是接收线圈到发射线圈表面的距离，相比正交圆环线圈结构到中心距离，有效传输距离大大提升。为了简化考虑，将双层空间螺旋线圈结构视为 2 个单层空间螺旋线圈，其外层和内层的参数方程可描述为

$$\begin{cases} L_{T1}=\begin{pmatrix} r_1\sin\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \\ r_1\cos\varphi \end{pmatrix}, L_{T2}=\begin{pmatrix} \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \\ r_1\sin\varphi \\ r_1\cos\varphi \end{pmatrix} \\ L_{T4}=\begin{pmatrix} \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \\ r_1\sin\varphi \\ r_1\cos\varphi \end{pmatrix}, L_{T3}=\begin{pmatrix} r_1\sin\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \\ r_1\cos\varphi \end{pmatrix} \\ L_{T5}=\begin{pmatrix} r_1\sin\varphi \\ r_1\cos\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \end{pmatrix}, L_{T6}=\begin{pmatrix} r_1\sin\varphi \\ r_1\cos\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \end{pmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} L_{T1}=\begin{pmatrix} r_2\sin\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \\ -r_2\cos\varphi \end{pmatrix}, L_{T2}=\begin{pmatrix} \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \\ r_2\sin\varphi \\ -r_2\cos\varphi \end{pmatrix} \\ L_{T4}=\begin{pmatrix} \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \\ r_2\sin\varphi \\ -r_2\cos\varphi \end{pmatrix}, L_{T3}=\begin{pmatrix} r_2\sin\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \\ -r_2\cos\varphi \end{pmatrix} \\ L_{T5}=\begin{pmatrix} r_2\sin\varphi \\ -r_2\cos\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi+a\pi}{2\pi} \end{pmatrix}, L_{T6}=\begin{pmatrix} r_2\sin\varphi \\ -r_2\cos\varphi \\ \dfrac{d_s\varphi-a\pi-2\pi d_s n}{2\pi} \end{pmatrix} \end{cases} \tag{2}$$

式中，φ 为形式参数，$\varphi\in[0, 2n\pi]$。接收线圈 L_R 采用与一次侧相同的线圈。由于系统采用发射线圈切换策略进行空间能量传输，故在任意时刻仅有单个发射线圈工作，其余线圈均处于开路状态，发射线圈之间不存在互感相互影响。因此，仅需对单一收发线圈分析即可反映正方体其他面的情况。本文通过 Maxwell 软件对等匝数和半径的单层及双层空间螺旋线圈进行仿真，仿真参数见表 1。其中双层线圈的半径指外层半径 r_1。

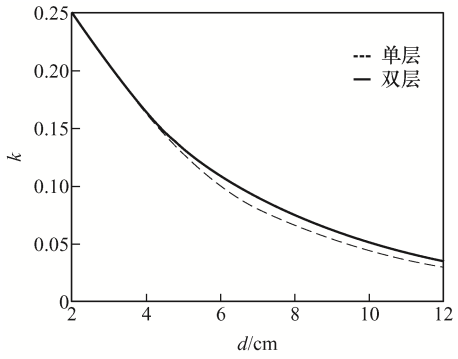
根据表 1 结果可知，双层空间螺旋线圈保持与单层线圈相似的内阻水平，但其电感增加约 22%。并且高度缩减至单层的约 1/2，其设计更为紧凑，更便于正方体 6 面的线圈结构设计。

图 2 为同轴对齐、轴向偏移及角度旋转情况下对 2 种线圈进行的耦合系数 k 仿真，d 为接收线圈与发射线圈间的距离。结果显示，双层线圈在同轴

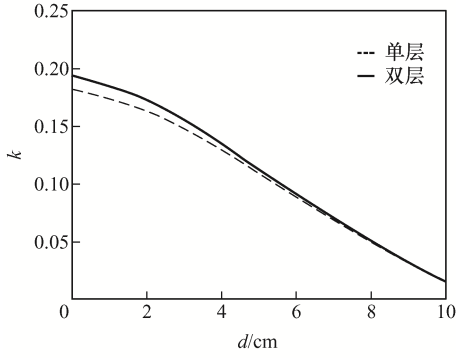
表 1　2 种线圈的仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of two coils

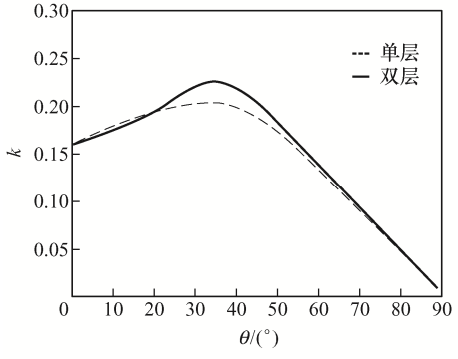
参数	单层空间螺旋线圈	双层空间螺旋线圈
总匝数	12	12
半径/mm	75.0	外层 r_1=75.0 内层 r_2=73.8
螺旋间距/mm	1.1	1.1
线径/mm	1	1
总高度/mm	13.1	6.5
电感/μH	40.6	49.5
内阻/Ω	0.152	0.147



(a) 同轴对齐



(b) 轴向偏移



(c) 角度旋转

图 2　2 种传输线圈耦合系数比较

Fig. 2 Comparison of coupling coefficient between two transmission coils

对齐和轴向偏移下比单层线圈具有更高的耦合系数。尽管在小角度偏转时双层线圈耦合系数略低于单层线圈，但随着角度增加其优势明显。总体上，双层线圈展现出更优的耦合性能。

1.2 理论分析

SS 补偿 PT 对称 WPT 系统等效电路可由图 3 描述。图中：$-R_{\mathrm{N}}$ 为负电阻，在 PT 对称电路中的增益和损耗方面至关重要；R_{L} 为等效负载电阻；C_{R} 和 C_{T}、L_{R} 和 $L_{\mathrm{T}i}$(i=1, 2, ⋯, 6)、r_{R} 和 $r_{\mathrm{T}i}$ 分别为一、二次侧回路的电容、线圈电感和线圈内阻；M_i 为线圈 $L_{\mathrm{T}i}$ 与 L_{R} 间的互感，$M_i = k_i\sqrt{L_{\mathrm{T}i}L_{\mathrm{R}}}$，$k_i$ 为对应线圈的耦合系数。

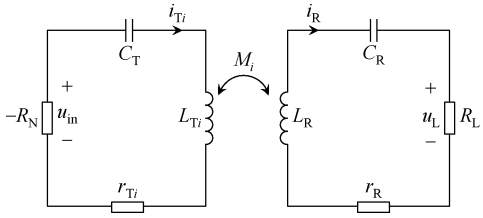


图 3 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit

基于基尔霍夫电压定律 KVL(Kirchhoff's voltage law)对图 3 的等效电路进行描述，具体为

$$\begin{bmatrix} \dfrac{-R_{\mathrm{N}}+r_{\mathrm{T}i}}{L_{\mathrm{T}i}}+\mathrm{j}\left(\omega-\dfrac{\omega_{\mathrm{T}i}^2}{\omega}\right) & \mathrm{j}\omega k_i\sqrt{\dfrac{L_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{T}i}}} \\ \mathrm{j}\omega k_i\sqrt{\dfrac{L_{\mathrm{T}i}}{L_{\mathrm{R}}}} & \dfrac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{R}}}+\mathrm{j}\left(\omega-\dfrac{\omega_{\mathrm{R}}^2}{\omega}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\mathrm{T}i} \\ I_{\mathrm{R}} \end{bmatrix}=0 \tag{3}$$

式中：$\omega_{\mathrm{T}i}$ 和 ω_{R} 分别为一、二次侧的角频率，$\omega_{\mathrm{T}i}=1/\sqrt{L_{\mathrm{T}i}C_{\mathrm{T}}}$，$\omega_{\mathrm{R}}=1/\sqrt{L_{\mathrm{R}}C_{\mathrm{R}}}$；$\omega$ 为工作角频率；$I_{\mathrm{T}i}$ 和 I_{R} 为回路电流有效值。

令 $\omega_{\mathrm{T}i}=\omega_{\mathrm{R}}=\omega_0$，若式(3)存在非零解，则有

$$\begin{cases} \mathrm{Re}:\ \dfrac{-R_{\mathrm{N}}+r_{\mathrm{T}i}}{L_{\mathrm{T}i}}\dfrac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{R}}}-\left(\omega-\dfrac{\omega_0^2}{\omega}\right)^2+\omega^2k_i^2=0 \\ \mathrm{Im}:\ \left(\omega-\dfrac{\omega_0^2}{\omega}\right)\left(\dfrac{-R_{\mathrm{N}}+r_{\mathrm{T}i}}{L_{\mathrm{T}i}}+\dfrac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{R}}}\right)=0 \end{cases} \tag{4}$$

根据式(4)可以求得系统稳态工作频率 f 为

$$f=\begin{cases} f_0 & 0\leqslant k_i<k_{\mathrm{c}} \\ f_{1,2}=f_0\sqrt{\dfrac{2-A^2\pm\sqrt{4(k_i^2-1)+(2-A^2)^2}}{2(1-k_i^2)}} & k_{\mathrm{c}}\leqslant k_i<1 \end{cases} \tag{5}$$

式中：$A=\dfrac{(R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}})}{\omega_0 L_{\mathrm{R}}}$；$f$ 和 f_0 分别为工作频率和固有谐振频率，$f=\omega/2\pi$，$f_0=\omega_0/2\pi$；k_{c} 为临界耦合系数，其计算公式为

$$k_{\mathrm{c}}=\sqrt{A^2-\frac{1}{4}A^4}=\sqrt{\left(\frac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{\omega_0 L_{\mathrm{R}}}\right)^2-\frac{1}{4}\left(\frac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{\omega_0 L_{\mathrm{R}}}\right)^4} \tag{6}$$

从式(5)观察到工作频率 f 被 k_{c} 划分成 2 个区域。当 $0\leqslant k_i<k_{\mathrm{c}}$ 时，该区域称为 PT 破缺区，f 与 f_0 相等；当 $k_{\mathrm{c}}\leqslant k_i<1$ 时，称为 PT 对称区，此时 $f\neq f_0$，存在高频和低频 2 个频率分叉支路。

若 $A=\dfrac{(R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}})}{\omega_0 L_{\mathrm{R}}}\ll 1$，则忽略式(6)的高阶项，可将其简化为

$$k_{\mathrm{c}}=\frac{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}}{\omega_0 L_{\mathrm{R}}} \tag{7}$$

由式(7)可知，在等效负载和频率不变时，内阻减小或电感增加均可使 k_{c} 下降。从表 1 的仿真数据分析可得，双层空间螺旋线圈的 k_{c} 相较于单层线圈下降了约 18%，有效地扩宽了 PT 对称区域，也进一步证实了双层线圈更具优势。

当 $k_{\mathrm{c}}\leqslant k_i<1$ 时，将式(5)和式(4)代入式(3)得到回路电流增益为

$$\frac{I_{\mathrm{R}}}{I_{\mathrm{T}i}}=\sqrt{\frac{L_{\mathrm{T}i}}{L_{\mathrm{R}}}} \tag{8}$$

综合式(3)、式(5)和式(8)求得系统在 PT 对称区域的输出功率和传输效率分别为

$$P_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{R}}{}^2R_{\mathrm{L}}=\frac{R_{\mathrm{L}}U_{\mathrm{in}}^2}{\dfrac{L_{\mathrm{T}i}(R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}})^2}{L_{\mathrm{R}}}+2r_{\mathrm{T}i}(R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}})+\dfrac{L_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{T}i}}r_{\mathrm{T}i}^2} \tag{9}$$

$$\eta=\frac{I_{\mathrm{R}}^2R_{\mathrm{L}}}{I_{\mathrm{R}}^2R_{\mathrm{L}}+I_{\mathrm{R}}^2r_{\mathrm{R}}+I_{\mathrm{T}i}^2r_{\mathrm{T}i}}=\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}}+r_{\mathrm{R}}+r_{\mathrm{T}i}\dfrac{L_{\mathrm{R}}}{L_{\mathrm{T}}}} \tag{10}$$

式中，U_{in} 为输入电压。

从式(9)和式(10)可知，系统处在 PT 对称区域时，P_{L} 和 η 的变化均与 k_i 无关，只与电路参数和等效负载 R_{L} 有关。因此，一旦电路参数与 R_{L} 确定，系统就会表现出较强的抗偏移能力，从而在一定空间内保持恒功率与恒效率的特性。

当 $0 \leqslant k_i < k_{\text{c}}$ 时，同理可求得系统在 PT 破缺区的回路电流增益、输出功率和传输效率为

$$\frac{I_{\text{R}}}{I_{\text{T}i}} = \sqrt{\frac{L_{\text{T}i}}{L_{\text{R}}}} \frac{\omega_0 k_i L_{\text{R}}}{(R_{\text{L}} + r_{\text{R}})} \tag{11}$$

$$P_{\text{L}} = \frac{\omega_0^2 k_i^2 L_{\text{T}i} L_{\text{R}} R_{\text{L}} U_{\text{in}}^2}{[\omega_0^2 k_i^2 L_{\text{T}i} L_{\text{R}} + r_{\text{T}i}(R_{\text{L}} + r_{\text{R}})]^2} \tag{12}$$

$$\eta = \frac{\omega_0^2 k_i^2 L_{\text{T}i} L_{\text{R}} R_{\text{L}}}{\omega_0^2 k_i^2 L_{\text{T}i} L_{\text{R}} (R_{\text{L}} + r_{\text{R}}) + r_{\text{T}i}(R_{\text{L}} + r_{\text{R}})^2} \tag{13}$$

从式(12)和式(13)可以发现，系统处在 PT 破缺区时，传输特性不仅与元件参数有关，还与 k_i 有关，随着传输线圈距离和角度的增加，输出功率将剧烈波动，效率也会随之降低。

2　切换策略与控制电路

2.1　线圈切换策略

根据第 1 节分析可知，本文所建系统必须处在 PT 对称区域才能实现恒功率与恒效率输出。而在 PT 对称区域存在 1 个显著的现象，即频率分叉，如图 4 所示。图 4 由样机参数与式(5)绘制而成。

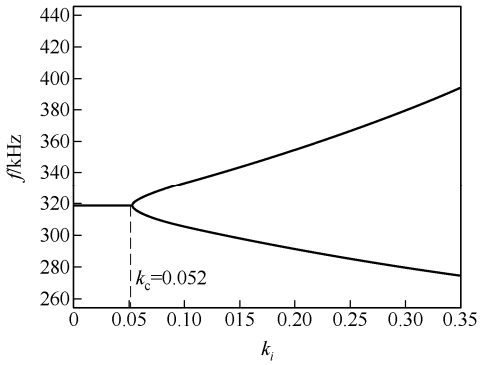


图 4　随 k_i 变化的工作频率

Fig. 4 Operating frequency varying with k_i

因此，根据这一频率分叉现象，提出了 1 种一次侧频率检测的线圈切换策略，以实现不同供电区域的自适应切换。该策略中线圈的切换频率设置在 k_{c} 右侧，留有一定的频率阈值 $\delta(\delta>0)$。该阈值的大小可以根据实际电路的具体情况进行灵活调整，以保证线圈切换时不会因元件参数的误差或温度变化的影响而进行误判，使系统能够工作在 1 个稳定的 PT 对称区域，具体线圈切换流程如图 5 所示。首先导通第 1 个发射线圈，然后检测当前线圈接入系统后谐振网络的工作频率 f。若满足频率条件 $|f-f_0|>\delta$，则始终在当前线圈工作；若不满足频率条件，则系统将轮流切换至下一个发射线圈进行频率检测，以寻找满足条件的线圈；若 6 个发射线圈检测后均不满足条件，则系统将停止工作，防止收发线圈间的 k_i 过小而导致电流过大，造成电路损坏等问题。其中，i=1 定义为已切换的第 1 个线圈。

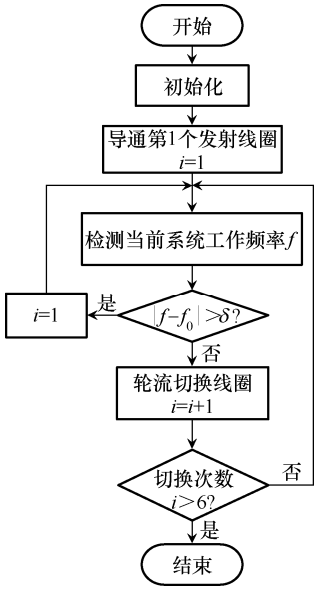


图 5　切换线圈流程

Fig. 5 Flow chart of coil switching

该策略在切换过程中并不需要对全部线圈进行频率检测，只需要寻找到满足频率分叉条件的线圈即可，控制简单且无需通信。相较于电流切换策略，在检测全部发射线圈的电流幅值或有效值之后，选取最佳线圈造成切换速度偏低的问题，所提策略能够进行一定程度的改善。

2.2 控制电路

所提出的基于线圈切换的 PT 对称空间 WPT 系统电路如图 6 所示。其中，负电阻的构建采用自激全桥逆变电路实现，通过将发射端谐振网络中的电流信号转换为方波信号来控制全桥逆变电路，使全桥逆变的输出电压的基波信号与其输出电流之间的相位差始终保持在 180°，构成 1 个负电阻提供增益。一次侧切换开关 S_1~S_6 采用低接触电阻、高动作响应时间的 833H 系列继电器模块构成，而过零比较器的输出一方面为全桥逆变电路提供控制脉冲信号，另一方面则送入控制器对当前发射线圈的工作频率进行检测，以作为线圈切换的依据。

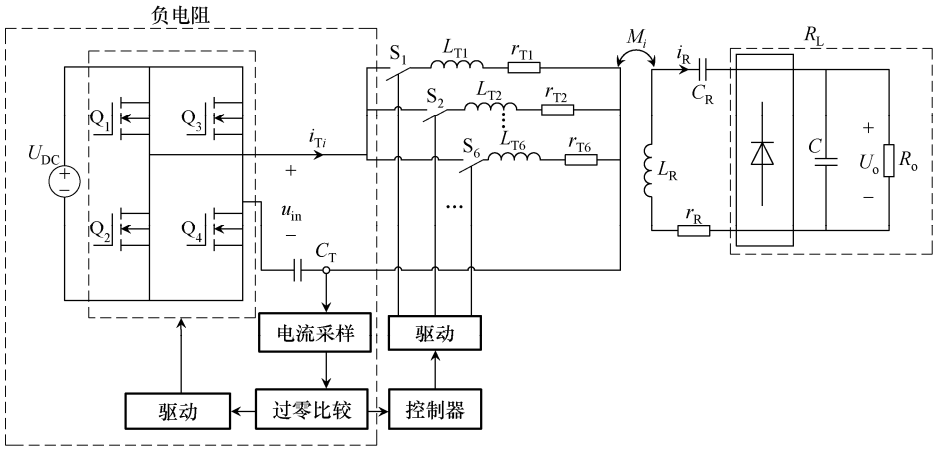


图 6 基于线圈切换的 PT 对称空间 WPT 系统电路

Fig. 6 Circuit of PT symmetric spatial WPT system based on coil switching

3 实验验证

为了验证线圈切换策略和系统的性能，本文搭建了如图 7 所示的实验样机。该样机中的所有双层空间螺旋线圈均是由 1 mm 的铜线绕制而成的，外层半径为 75 mm，内层紧贴外层，共 12 匝。具体元件参数为：U_{DC}=12 V, f_0=318.3 kHz, R_L=5 Ω, L_{Ti}=L_R=50 μH, r_{Ti}=r_R=0.2 Ω, C_T=5 nF, C_R=5 nF。系统设定的频率阈值 δ=6 kHz，故当工作频率在低频分叉支路小于 312.3 kHz 或高频分叉支路大于 324.3 kHz 时满足频率条件，认为系统工作在 1 个稳定的 PT 对称区域，无需进行线圈切换。

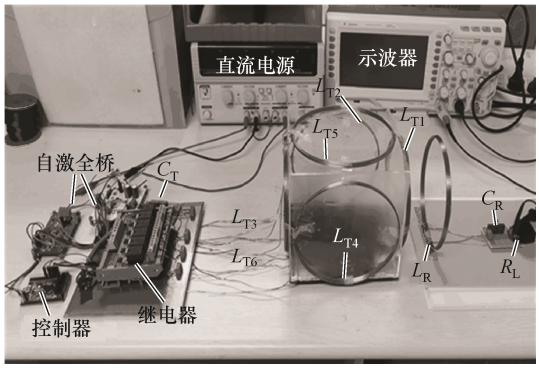
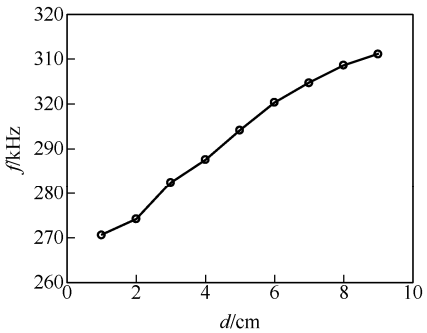


图 7 实验样机

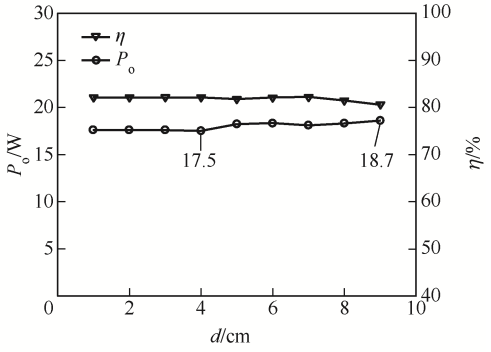
Fig. 7 Experimental prototype

3.1 同轴对齐情景分析

图 8 为接收线圈 L_R 同轴对齐发射线圈 L_{T1} 时，系统工作频率和传输特性随 d 的变化情况。在图 8(a)中，当 L_R 与 L_{T1} 间的 d 小于 9 cm 时，系统实际工作频率只有下分叉频率，且满足频率条件始终在 L_{T1} 处工作；当 d 超出 9 cm 时，工作频率大于 312.3 kHz，分别对其余线圈切换检测，均不满足频率分叉条件，系统停止工作。从图 8(b)知，系统在满足频率条件的 PT 对称区域内，负载获得约 18 W



(a) 工作效率

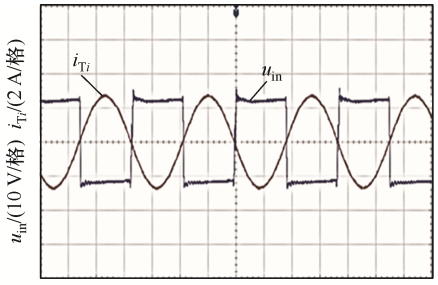


(b) 传输特性

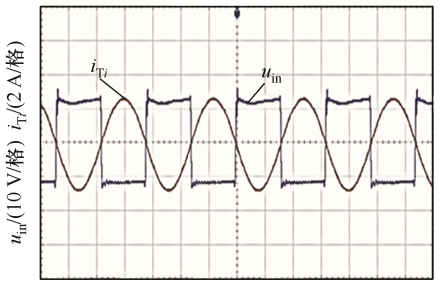
图 8　工作频率和传输特性随 *d* 的变化

Fig. 8 Operating frequency and transmission characteristics varying with *d*

的功率及 80%以上的效率，且功率波动在 6.7%内。图 9 则为同轴对齐下全桥输出电压 u_{in}、谐振回路电流 i_{Ti} 在 1 cm 和 9 cm 情况下的具体相位，可以看到 u_{in} 与 i_{Ti} 的相位相差 180°，符合等效负电阻条件。



(a) 1 cm



(b) 9 cm

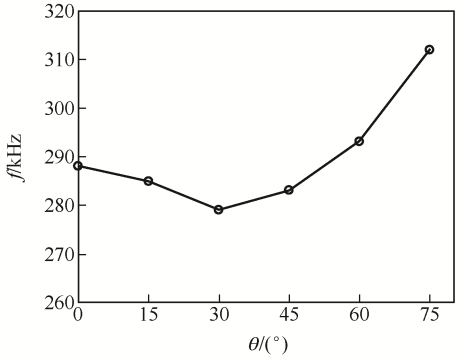
图 9　随 *d* 变化的实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms varying with *d*

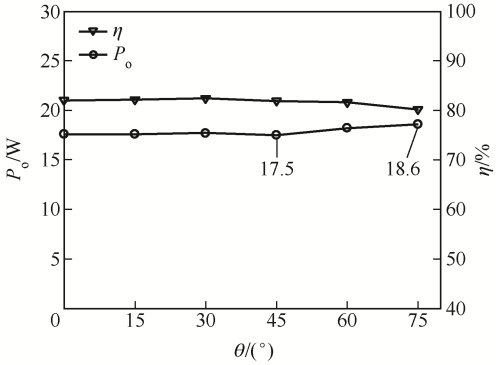
3.2 角度旋转情景分析

图 10 为接收线圈 L_R 与发射线圈 L_{T1} 同轴对齐并保持 4 cm 距离的情况下，随着 L_R 自旋转角度变化的工作频率和传输特性的变化情况。从图 10 中可知，随着 L_R 自旋转角度的增加，工作频率呈现出先下降后上升的趋势，并最终趋于 312.3 kHz。在 0° 至 75° 的自旋转角度范围内系统满足频率条件，保持恒定 18 W 功率，且效率超过 80%。而图 11 则是 0° 和 75° 情况下 u_{in} 与 i_{Ti} 的相位具体情况，同样符合等效负电阻条件。

为验证控制策略的有效性及系统在三维空间上的无线电能传输能力，本文模拟了接收线圈圆心的法向量始终指向正方体中心，恒定距离为 10 cm，从同轴对齐线圈 L_{T1} 开始逆时针旋转 360° 时，系统工作频率和传输特性的具体变化情况如图 12 所示。



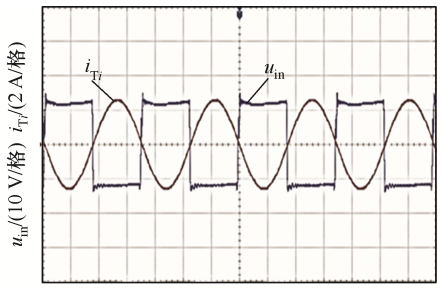
(a) 工作频率



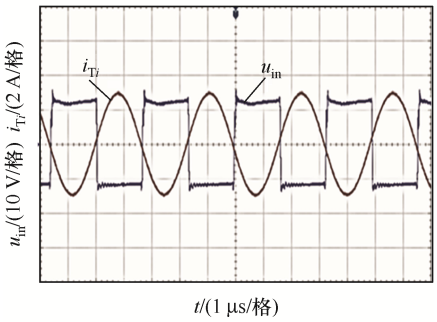
(b) 传输特性

图 10　自旋转角度情况下的工作频率和传输特性

Fig. 10 Operating frequency and transmission characteristics at different spin angles



(a) 0°

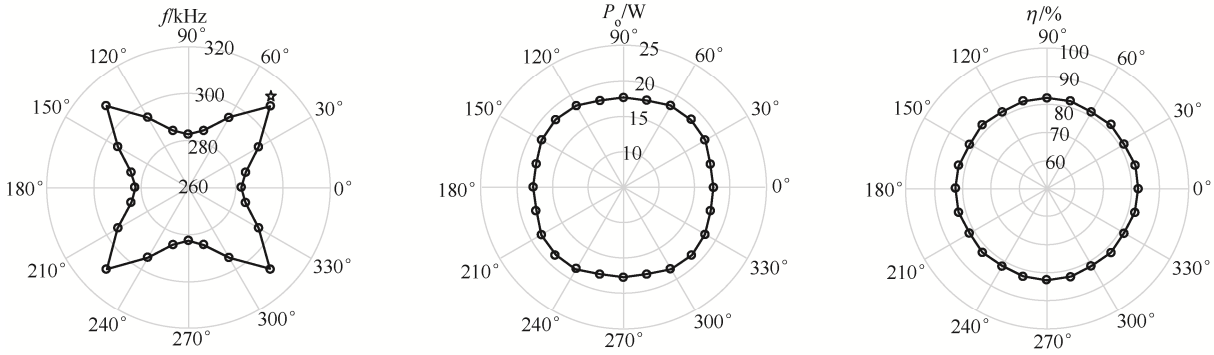


(b) 75°

图 11 随角度变化的实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms varying with angle

从图 12(a)可知，随着接收线圈旋转角度的增加(从 0°开始)，f 逐渐向设定的切换频率靠近，大约旋转至 47°时(五角星)，开始进行线圈切换，以寻找满足频率条件的线圈。接收线圈按轨迹旋转过程中一共经历了 4 次线圈切换，从线圈 L_{T1} 切换至线圈 L_{T4}(L_{T1}→L_{T2}→L_{T3}→L_{T4})，最后又回到线圈 L_{T1}。此外，由于所有线圈均相同，故每次接收线圈旋转过当前工作线圈的 47°时，就会切换到下个满足条件的线圈工作。从图 12(b)和(c)可知，在整个旋转过程中，无论旋转角度如何变化，负载功率仍保持在 18 W 附近，且效率大于 80%，验证了策略的有效性和可行性。



(a) 工作频率 (b) 负载功率 (c) 效率

图 12 随旋转角度变化的工作频率和传输特性

Fig. 12 Operating frequency and transmission characteristics varying with rotation angle

3.3 与现有技术对比分析

表 2 对比了本文与以往文献传输性能的差异，其中 T_x 和 R_x 分别为发射端和接收端的线圈尺寸。

表 2 与其他文献比较

Tab. 2 Comparison with other references

文献	线圈结构	逆变源个数	线圈尺寸 T_X/R_X/cm	工作频率/kHz	传输距离/cm	功率/W	效率/%
[9]	正交	3	30/20	540.0	15	—	55~78
[10]	正交	3	15/15	200.0	14	100	55~80
[12]	管状	3	50/10	100.0	10	11~20	—
[13]	正方体	1	14/5	—	—	—	—
本文	正方体	1	15/15	270.0~312.3	9	18	>80

相较于文献[9-10]及文献[12]，本文所提系统的逆变源个数减少了 2 个，简化了控制方式，降低了制造和维护成本。此外，与文献[9-10]相比，系统效率提高了 20%以上，有效优化了系统功率的稳定性和效率。综合考量，本研究在提升技术效率、降低经济成本及简化系统设计等方面均表现出了显著的优势。

4 结语

本文提出 1 种基于线圈切换的 PT 对称空间无线电能传输系统，能使负载在满足频率条件的

三维空间内高效、均匀地拾取功率，可用于需要一定自由定位且要求功率稳定的场合。首先建立了正方体结构数学模型，其特征是 6 面均配置双层空间螺旋线圈，通过 Maxwell 仿真验证该布局比传统单层线圈更加紧凑，且使得电感增加约 22%，临界耦合系数下降约 18%，有效拓宽了 PT 对称区域。此外，还提出了 1 种一次侧频率检测的线圈切换策略，以实现不同供电区域的自适应切换。最后，基于实验样机从接收线圈同轴对齐和角度旋转的情景出发，验证了策略的有效性和可行性。

参考文献：

[1] Xu Jiayi, Li Xingfei, Li Hongyu, et al. Maximum efficiency tracking for multitransmitter multireceiver wireless power transfer system on the submerged buoy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1909-1919.

[2] Ha-Van N, Liu Yining, Jayathurathnage P, et al. Cylindrical transmitting coil for two-dimensional omnidirectional wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 10045-10054.

[3] 刘耀, 肖晋宇, 赵小令, 等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48-67.
Liu Yao, Xiao Jinyu, Zhao Xiaoling, et al. Development and application review on wireless power transmission technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 48-67. (in Chinese)

[4] 许立业, 白雪, 徐雷钧. 用于植入式医疗的微波无线电能传输系统设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(10): 64-66, 70.
Xu Liye, Bai Xue, Xu Leijun. Design of microwave WPT system for implantable medical treatment [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(10): 64-66, 70. (in Chinese)

[5] Zhang Zhen, Zhang Bowen. Angular-misalignment insensitive omnidirectional wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2755-2764.

[6] Wang Hanwei, Chen Yunsheng, Zhao Yang. A wearable metasurface for high efficiency, free-positioning omnidirectional wireless power transfer [J]. New Journal of Physics, 2021, 23(12): 125003.

[7] 郭海潮, 张献, 杨庆新, 等. 空间全向无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 9006-9021.
Guo Haichao, Zhang Xian, Yang Qingxin, et al. Review of research and application of spatial omnidirectional wireless power transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9006-9021. (in Chinese)

[8] Lin Deyan, Zhang Cheng, Ron Hui S Y. Mathematical analysis of omnidirectional wireless power transfer—Part-I: Two-dimensional systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 625-633.

[9] Wang Hanwei, Zhang Cheng, Yang Yun, et al. A comparative study on overall efficiency of two-dimensional wireless power transfer systems using rotational and directional methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 260-269.

[10] Cha H R, Park K R, Kim T J, et al. Design of magnetic structure for omnidirectional wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8849-8860.

[11] 唐自强, 郭锋, 赖禹同, 等. 多发射线圈准全向无线充电研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(3): 27-30, 35.
Tang Ziqiang, Guo Feng, Lai Yutong, et al. Research on quasi omnidirectional wireless charging with multiple transmitting coils [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(3): 27-30, 35. (in Chinese)

[12] Feng Tianxu, Sun Yue, Zuo Zhiping, et al. Magnetic field analysis and excitation currents optimization for an omnidirectional WPT system based on three-phase tubular coils [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 1268-1278.

[13] 谢文燕, 陈为. 全方向无线电能传输电磁耦合系统仿真分析[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 142-154.
Xie Wenyan, Chen Wei. Simulation analysis of electromagnetic coupling system for omnidirectional wireless power transfer [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 142-154. (in Chinese)

[14] Assawaworrarit S, Yu Xiaofang, Fan Shanhui. Robust

wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit [J]. Nature, 2017, 546(7658): 387-390.

[15] Wang Yijie, Mai Jianwei, Yao Yousu, et al. Analysis and design of an IPT system based on S/SP compensation with improved output voltage regulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3256-3266.

[16] 郑萃翀, 肖文勋, 唐哲人. 基于宇称时间对称原理的无人机无线充电技术[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 61(6): 151-157.
Zheng Cuichong, Xiao Wenxun, Tang Zheren. Wireless charging technology for UAV based on parity-time symmetry [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2022, 61(6): 151-157. (in Chinese)

[17] 郑小瑶, 江彦伟, 疏许健, 等. 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[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 60-66.
Zheng Xiaoyao, Jiang Yanwei, Shu Xujian, et al. Study on electric-field distribution characteristics of parity-time symmetric electric-field coupled wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 60-66. (in Chinese)

[18] 常雨芳, 尹帅帅, 阎晟, 等. 多方位无线电能传输耦合机构设计与分析[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 230-241.
Chang Yufang, Yin Shuaishuai, Yan Sheng, et al. Design and analysis of multi-directional WPT coupling mechanism [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 230-241. (in Chinese)

[19] 李中启, 张晨曦, 王建斌, 等. 基于变频重构 S/SP 拓扑的无线电能传输系统恒流恒压研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4718-4732.
Li Zhongqi, Zhang Chenxi, Wang Jianbin, et al. Research on constant current and constant voltage of WPT system based on variable frequency reconfiguration S/SP topology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4718-4732. (in Chinese)

[20] 黄文聪, 饶天彪, 蒋煊焱, 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. (in Chinese)



徐兴鹏

作者简介：

徐兴鹏(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：无线电能传输技术。E-mail：xingpeng997@mails.swust.edu.cn。

郭锋(1969—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：无线电能传输技术。E-mail：guofen9932@swust.edu.cn。

何禧煜(2000—)，女，硕士研究生。研究方向：无线电能传输技术。E-mail：hxy1588@mails.swust.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)