DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.286 中图分类号：TM724 文献标志码：A

无线电能传输宽有效磁耦合区域线圈结构设计与优化

高义博[1](中国电源学会学生会员)，薛 明[2]，侯 虎[1]，
朱高嘉[1](中国电源学会会员)，杨新生[2]
(1.天津市电气装备智能控制重点实验室(天津工业大学)，天津 300387； 2.省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)，天津 300130)

摘要：针对磁耦合谐振式无线电能传输系统内收发线圈相对位置发生偏移导致传输功率及效率迅速下降的问题，从线圈物理参数优化的角度，构造宽有效磁耦合区域的电能传输机构，旨在提升能效波动允许范围内的系统抗偏移能力。首先，推导了系统参数与能效的映射关系，并分析影响系统高功效传输的线圈参数；然后，以系统高功效传输为目标界定电能传输的有效磁耦合区域，并以此为标准分析和优化耦合线圈参数，形成具有一般性的收发线圈参数选取的最优策略；最后，搭建无线电能传输样机验证有效磁耦合区域定量分析的正确性及线圈参数优化的有效性。结果表明，在耦合距离为5 cm、系统工作在效率高于85%、功率波动范围小于25%的情形下，当耦合线圈为正四边形结构，且收发线圈面积比为1∶2.89时，电能传输机构具有最大的有效磁耦合区域。

关键词：无线电能传输；磁耦合线圈；有效磁耦合区域

Design and Optimization of Coil Structure for Wide Effective Magnetic Coupling Region in Wireless Power Transfer

GAO Yibo[1], *Student Member*, *CPSS*, XUE Ming[2], HOU Hu[1], ZHU Gaojia[1], *Member*, *CPSS*, YANG Xinsheng[2]
(1. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Aiming at the problem that the relative position deviation of the transceiver coil in the magnetic coupling resonance wireless power transfer system leads to the rapid reduction of transmission power and efficiency, A power transfer mechanism with wide effective magnetic coupling region is constructed from the perspective of coil physical parameter optimization. The aim is to increase the anti-offset ability of the system under the allowable range of energy efficiency fluctuation. Firstly, the mapping relationship between system parameters and energy efficiency is derived, and the coil parameters which affect the high efficiency transfer of the system are analyzed. Then, the effective magnetic coupling region of power transmission is defined with the goal of high power and high efficiency transfer of the system. Based on this, the coupling coil parameters are analyzed and optimized, and an optimal strategy for selecting universal transceiver coil parameters is formed. Finally, in order to verify the correctness of the quantitative analysis of the effective magnetic coupling region and the effectiveness of the coil parameter optimization, a wireless power transfer system prototype is built. The results show that when the coupling distance is 5 cm and the efficiency is higher than 85% and the power fluctuation range is less than 25%, when the coupling coil is a regular quadrilateral structure and the

收稿日期：2023-11-22；**修回日期：**2024-02-14，2024-03-07，2024-04-11；**录用日期：**2024-04-26；**网络首发日期：**2024-06-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077153)；河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2021043)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077153; Colleges and Universities in Hebei Province Science and Technology Research under the grant QN2021043

area ratio of the transmitting and receiving coils is 1:2.89, the power transfer mechanism has the largest effective magnetic coupling area.

Keywords: Wireless power transfer; magnetic coupling coil; effective magnetic coupling region

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术作为一种新兴的电能传输方式，被广泛应用于电动汽车[1]、便携式电子设备[2]及植入式医疗器械[3]等领域。然而，实际应用中耦合机构间不可避免的位置偏移会削弱系统的耦合效果。基于此，提高系统工作中电磁耦合的可靠性，以保证其在复杂环境中保持高功效传输，一直是该领域的研究重点。

针对收发端线圈位置偏移对系统耦合性能的影响问题，在静态 WPT 场景中，已有文献从补偿拓扑[4-5]和耦合机构[6-7] 2方面展开研究。在补偿拓扑方面，文献[8]分析了 4 种不同拓扑的输出电流特性，对比得出 PS/S 拓扑在负载大范围变化下具有最小的输出电流波动；文献[9]基于双边 LCC 拓扑，利用一次侧与二次侧的传输线圈和补偿电感构造电能传输双途径，提高了系统抗偏移性；文献[10]通过分析 SPS 型拓扑的输入端阻抗角，利用非谐振参数方法降低了输出功率对耦合系数变化的敏感度。在耦合机构方面，文献[11]分别提出 DD 和 DDQ 线圈结构，解决了特定方向线圈偏移时耦合系数下降过快的问题；文献[12]提出一种由 QD 线圈和方形线圈构成的 QDQP 线圈结构，有效提高了全方向的抗偏移特性。对于动态 WPT 场景，文献[13]提出阵列式电能发射机构，将正方形线圈作为最小发射单元在二维平面拓展，通过发射单元物理位置的叠加，构造空间平稳磁场，满足负载大范围偏移下稳定受电的需求；文献[14]提出新型的四边形重叠螺旋接收线圈，耦合横向磁场增强了抗偏移能力；文献[15]基于 LCC-LC 串联混合拓扑参数优化设计，实现 DDQ 线圈耦合机构同侧和异侧交叉解耦，横向偏移 50%范围下系统输出电流仍能保持较好的稳定性；文献[16]提出双边 LCC 补偿电路的二次线圈结构，其横向偏移 200 mm 时系统功率仍可达 22.5 kW，效率为 90%。以上研究均从加入高阶补偿拓扑和优化耦合机构的角度，有效提升了系统抗偏移能力。

为实现负载运行过程中的高功效稳定受电，需研究其运行的有效偏移范围。文献[17]以满足机器人额定功率需求为基准，界定有效耦合区域的划分方法，并设计阵列式电磁发射模组，满足了机器人在工作区域任意位置实时补给电能的需求；文献[18]基于系统输出功率及效率在线圈偏移过程中的波动特性，给出有效耦合区域的评价方法，并确定了发射端线圈的开关切换点，获得了平稳的输出功率及传输效率。以上文献从不同角度确定了有效磁耦合区域范围，实现了系统性能优化目标，满足了负载受电的需求。

本文从线圈空间形状及物理结构的维度，通过建立单发射-单接收耦合机构模型，从功率及效率角度界定收发端有效磁耦合区域范围并定量描述耦合机构的抗偏移性能，继而给出宽偏移范围的设计方法。首先，根据等效电路模型推导出系统能效解析表达式，分析系统高效率运行的条件。其次，界定收发端的有效磁耦合区域，并通过定量表述有效磁耦合区域评价收发端的抗偏移能力，进而对比分析线圈空间形状及物理结构参数，优化设计具有宽有效磁耦合区域的磁耦合机构。最后，搭建 WPT 样机装置进行偏移实验，证明理论与仿真分析的正确性。采用临界耦合距离下归一化有效耦合区域定量描述的方法，囊括了给定系统耦合距离及线圈尺寸等参数，可对不同耦合系统的耦合性能及偏移特性进行有效评价，具有较强的可拓展性。与目前普遍采用的以偏移距离描述耦合系统抗偏移能力或偏移容忍度，而不声明线圈结构参数的方法相比，该方法更为严谨、形象和精确。

1　WPT 磁耦合系统建模与分析

WPT 系统从结构上可分为电能发射端与电能接收端 2 部分，电能发射端包括发射端整流电路、发射端滤波电路、逆变电路、发射端补偿电路和电能发射机构，电能接收端包括电能接收机构、接收

端补偿电路、接收端整流电路、接收端滤波电路、DC-DC 变换电路和受电负载。结合文献分析，综合考虑系统成本、体积、性能等因素，为满足系统轻量化、小型化等要求，采用 LCC-S 型补偿拓扑网络，建立单发射与单接收磁耦合系统等效电路模型，如图 1 所示。图中：U_1 为系统交流电压源；I_{inv}、I_1 和 I_2 分别为发射回路总电流、发射侧谐振电流和接收回路总电流；L_f 为发射侧线圈补偿电感；L_1、L_2 为线圈谐振电感；C_f 为发射侧并联补偿电容；C_1、C_2 分别为发射侧、接收侧串联补偿电容；M_{12} 为线圈间互感；R_1、R_2 分别为收、发侧谐振线圈等效内阻；R_L 为等效负载电阻。系统工作角频率为 ω。

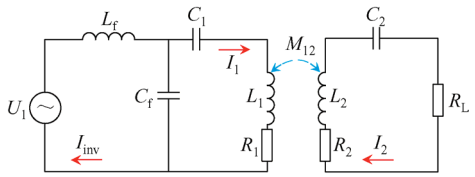


图 1 系统等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of WPT system

工作过程中，L_f、C_f 构成的谐振电路的谐振角频率为 ω_1；L_1、C_1、C_f 构成的谐振电路的谐振角频率为 ω_2；L_2、C_2 构成的谐振电路的谐振角频率为 ω_3。在参数选择配置中，应保证 3 个回路谐振角频率与电源工作角频率 ω 相同，即 $\omega=\omega_1=\omega_2=\omega_3$。此时有

$$\begin{cases} C_1=\dfrac{1}{(L_1-L_f)\omega^2} \\ C_2=\dfrac{1}{\omega^2 L_2} \\ C_f=\dfrac{1}{\omega^2 L_f} \end{cases} \tag{1}$$

系统传输效率为

$$\eta=\frac{\omega^2 M_{12}^2 R_L}{R_1(R_2+R_L)^2+\omega^2 M_{12}^2(R_2+R_L)} \tag{2}$$

由式(2)可知，互感、负载电阻对传输效率具有较大影响，为实现系统最大传输效率，对 R_L 求导数，获取负载电阻匹配至最优状态系统参数需满足的条件，即

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}R_L}=\frac{M_{12}^2\omega^2[R_1(R_L^2-R_1^2)-M_{12}^2\omega^2(R_2+R_L)(1-R_L)]}{[R_1(R_2+R_L)^2+M_{12}^2\omega^2(R_2+R_L)]^2} \tag{3}$$

令式(3)右部分等于 0，求解最优负载匹配条件，其结果为

$$R_L=R_2\sqrt{1+\frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2}} \tag{4}$$

负载满足该条件时系统可以运行在最大效率。将式(4)代入式(2)，得到最优负载条件下系统传输效率表达式为

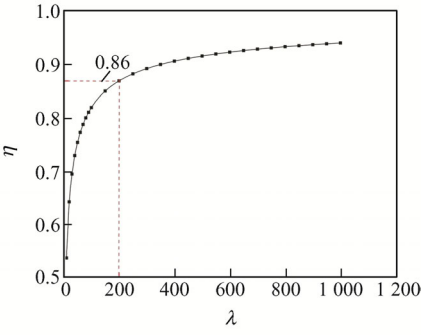
$$\eta=\frac{\lambda}{2\sqrt{(1+\lambda)}+\lambda+2} \tag{5}$$

式中，λ 为关键耦合因子。

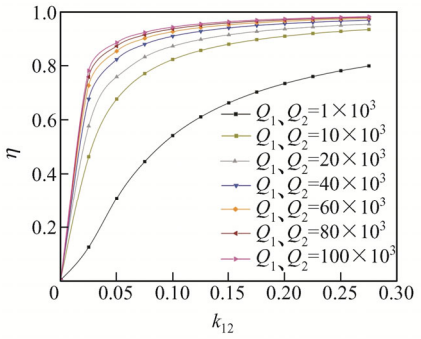
由式(5)可知，最优负载条件下传输效率仅与 λ 有关，将其用耦合系数 k_{12} 及品质因数 Q_1、Q_2 表示，具体表达式为

$$\lambda=k_{12}^2 Q_1 Q_2 \tag{6}$$

进一步分析式(5)和式(6)中传输效率与关键耦合因子、耦合系数及品质因数的关系，并绘制关键耦合因子与传输效率及不同线圈品质因数下，系统传输效率与耦合系数的关系曲线，如图 2 所示。图 2(a)为关键耦合因子与系统传输效率的映射曲线，可知系统传输效率以 $\lambda\approx200$ 为转折点先急剧上升后逐渐趋于稳定。进一步，分析不同线圈品质因数下系统传输效率随耦合系数的变化曲线，如图 2(b)，可知系统传输效率与耦合系数及线圈品质因数均呈正相关。



(a) 传输效率与关键耦合因子关系



(b) Q_1、Q_2取不同数值下系统传输效率与耦合系数k_{12}关系

图 2　传输效率与关键耦合因子、耦合系数及品质因数的关系

Fig. 2 The relationship between transmission efficiency and key coupling factor, coupling coefficient, and quality factor

收发端耦合系数由互感与线圈自感表示，可得到线圈偏移前、后关键耦合因子的比值为

$$\frac{\lambda'}{\lambda}=\frac{k_{12}'^2}{k_{12}^2}=\frac{M_{12}'^2}{M_{12}^2} \tag{7}$$

式中，λ'、k_{12}'、M_{12}'分别为线圈偏移后关键耦合因子、耦合系数、线圈间互感。

负载接收功率可表示为

$$P_{\mathrm{L}}=\frac{\omega^2 M_{12}^2 I^2 R_{\mathrm{L}}}{(R_2+R_{\mathrm{L}})^2} \tag{8}$$

式中，I为电流。

由于负载移动过程中负载阻抗耦合线圈参数不变，故负载移动前、后接收功率P_{L}与P_{L}'的关系为

$$\frac{P_{\mathrm{L}}'}{P_{\mathrm{L}}}=\frac{\dfrac{\omega^2 M_{12}'^2}{R_1 R_2}}{\dfrac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2}}=\frac{k_{12}'^2}{k_{12}} \tag{9}$$

由式(9)可知，受电负载偏移过程中传输功率主要与耦合系数k_{12}有关。因此，系统传输功率与效率主要取决于耦合系数与线圈品质因数。在收发线圈满足高品质因数条件下，通过限定功效波动区间，即可实现负载运动中的高效受电。

2　有效磁耦合区域的定义及划分准则

2.1　有效磁耦合区域定义

基于第 1 节的理论分析，本文采用系统传输功率及效率作为表征参数划定有效磁耦合区域，即限定传输距离的条件下，以收发线圈轴线重合状态下的功率P_0为标准值，接收线圈偏移过程中，接收功率P_{valid}允许波动的范围为标准值的 25%，同时传输效率$\eta_{\mathrm{valid}}\geqslant 85\%$。图 3 为有效磁耦合区域示意图，其中$S_1$为仅满足传输效率参数波动条件的区域，$S_2$为同时满足传输效率与接收功率波动范围的区域，即有效磁耦合区域，此时有

$$\begin{cases}0.75P_0\leqslant P_{\mathrm{valid}}\leqslant 1.25P_0\\ \eta_{\mathrm{valid}}\geqslant 85\%\end{cases} \tag{10}$$

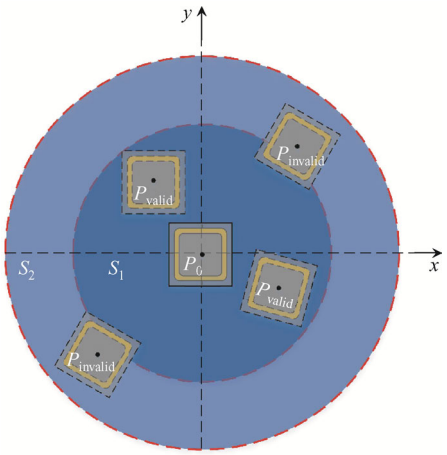


图 3　有效磁耦合区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of effective magnetic coupling region

2.2　归一化有效磁耦合区域

为从物理结构的角度优化设计具有宽耦合范围的线圈结构，同时定量表述磁耦合系统的抗偏移能力，提出耦合系统在固定临界耦合点处的归一化有效磁耦合面积的评价方法。其中，归一化有效磁耦合面积S_{norl}为有效磁耦合面积S_2与发射线圈外边界面积S_0的比值，即

$$S_{\mathrm{norl}}=\frac{S_2}{S_0} \tag{11}$$

借助有限元数值分析软件，对耦合距离参数化扫描获得给定耦合系统临界耦合点位置，以及接收线圈所在平面全向偏移下系统接收功率与传输效率的数值。根据式(10)和式(11)，计算得到给定系统中磁耦合机构归一化有效磁耦合面积。

3 有效磁耦合区域定量分析

有效耦合区域为 WPT 系统参数设计及性能评价的重要指标，在对有效耦合区域性能参数评价前，必须对耦合距离和线圈尺寸参数等限制条件进行声明。根据第 2 节的分析，对于特定的无线供电系统，当电源激励、工作频率、补偿拓扑和负载电阻一定时，传输距离及线圈品质因数是影响有效磁耦合区域的关键因素。传输距离主要与线圈匝数、线径、谐振角频率、半径等因素有关[19]。因为线圈品质因数由耦合线圈自身物理参数综合决定，所以需探究耦合线圈的形状、尺寸对有效磁耦合区域的影响。

3.1 临界耦合距离的选取

考虑实际应用中漏磁的影响，在收发线圈背面添加厚度为 3 mm、相对磁导率为 2 500 的铁氧体屏蔽层。为了准确定量描述动态耦合机构的有效耦合区域，并将其作为优选发射线圈单元结构的评价标准，对系统临界耦合点参数化扫描，以获得给定耦合系统临界耦合点处对应的耦合距离。WPT 系统磁耦合收发端传输距离不同，导致系统效率在临界耦合点处最高。两侧依据此点可将系统耦合状态分为欠耦合、临界耦合和过耦合 3 种情况。

利用有限元仿真进行计算，仿真参数为：收发线圈均为正四边形；电压源为 50 V；负载电阻为 10 Ω；耦合线圈采用 300 股线径为 2.5 mm 的利兹线绕制，匝间距取 1 mm，耦合线圈内、外直径分别为 130 mm 和 200 mm，匝数为 10 匝。以 1 cm 为步长在[1, 15] cm 区间内对耦合距离参数化扫描，计算系统传输功率及传输效率，得到给定耦合系统临界耦合点处对应的临界耦合距离，计算结果如图 4 所示。可以看出，系统传输功率在 3 cm 处达到最大，分析其原因是铁氧体屏蔽层的加入，与线圈相交链的磁路有较大变化，收发线圈自感、互感及耦合系数也随之改变。由效率曲线可以看出，耦合距离约为 5 cm 时，传输效率达到峰值，因此选择 5 cm 作为临界耦合距离。

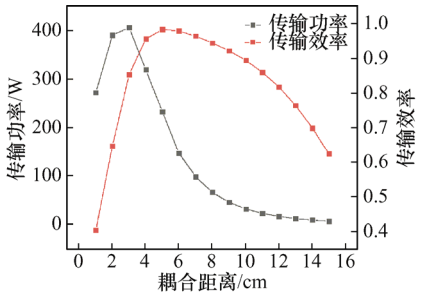


图 4 传输功率及效率随耦合距离变化曲线

Fig. 4 Curvers of transmission power and efficiency versus coupling distance

3.2 线圈形状对有效磁耦合区域的影响

第 3.1 节明确了 WPT 系统临界耦合距离为 5 cm，在此基础上探究耦合线圈的固有参数对系统抗偏移能力的影响。以发射单元归一化有效磁耦合面积最大化为目标，选择正四边形、正六边形、正八边形及圆形收发线圈为研究对象，将问题转化为对比分析不同线圈形状的归一化有效磁耦合面积的变化情况。图中所示为线圈的几何模型。图中：w 为线径；s 为匝间距；d_{in}、d_{out} 分别为线圈的内、外直径。为方便分析，保证 4 种线圈结构除物理结构参数及相应的补偿参数之外，其他参数具有一致性。

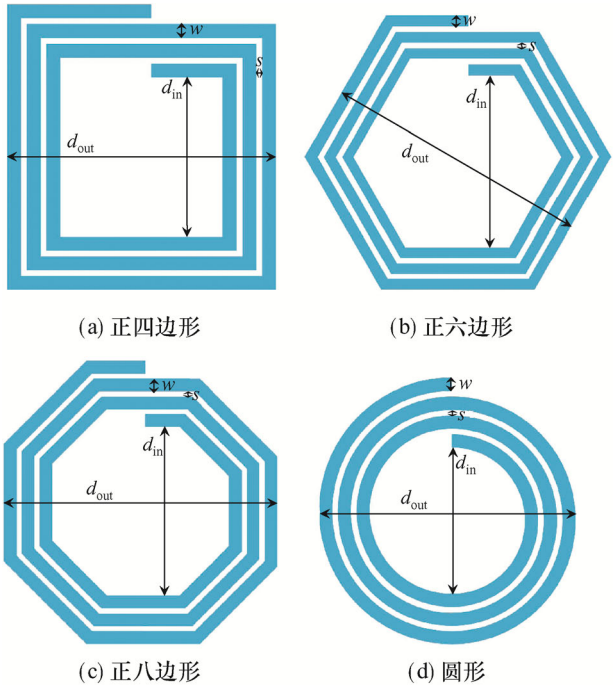


图 5 线圈几何模型

Fig. 5 Geometric models of coils

利用仿真软件对 WPT 系统建模，仿真参数与第 3.1 节一致。此外，根据不同形状线圈需重新匹配补偿电路参数，收发线圈谐振电路参数见表 1。保持发射线圈位置不变，以 1 cm 为步长横向移动接收线圈位置，记录过程中系统功效变化，结果如图 6 所示。可以看出，系统功率及效率均随多边形线圈边数的增加而减小，且在[0, 6] cm 传输区间可保持高效率传输状态，随着偏移距离的继续增加传输效率急剧下降，且线圈边数越多下降幅度越大。

表 1　收发线圈谐振电路参数

Tab. 1 Parameters of transceiver coil resonant circuit

线圈形状	L_1/μH	Q	L_f/μH	C_f/nF	C_1/nF	C_2/nF	R_L/Ω
正四边形	51.89	277.2	20	175.3	109.9	67.56	10
正六边形	47.01	251.1	20	175.3	129.8	74.58	10
正八边形	45.76	244.4	20	175.3	136.1	76.61	10
圆形	44.29	236.5	20	175.3	144.4	79.16	10

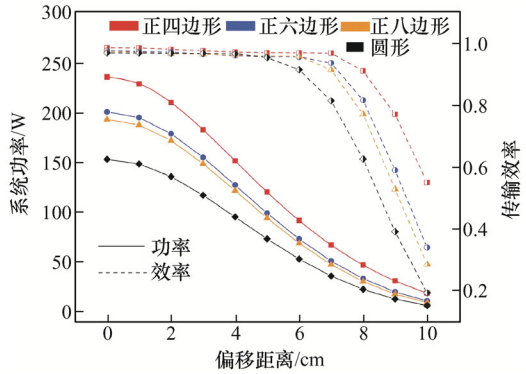


图 6　传输功率和效率随线圈偏移的变化曲线

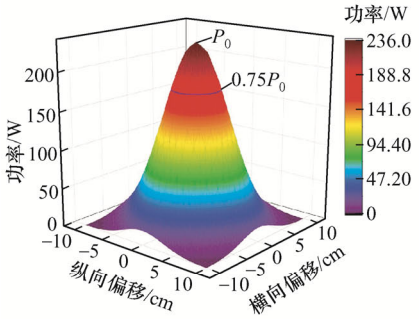
Fig. 6 Curves of transmission power and efficiency with coil offset

根据式(10)中功率及效率区间要求，绘制不同耦合线圈形状下，接收线圈在其自身平面内任意方向偏移时的系统接收功率的分布云图，如图 7 所示。同时计算系统有效磁耦合区域，结果见表 2。对比结果可知，在平面螺旋线圈线径、匝间距和线圈内外直径保持一致的前提下，正四边形线圈结构的品质因数、接收功率能力及有效磁耦合面积等方面优势明显，从而证明了该耦合机构具有较强抗偏移能力。

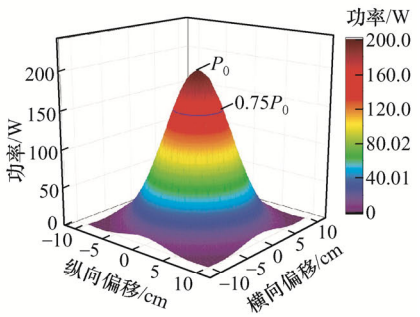
3.3　线圈尺寸对有效磁耦合区域的影响

实际应用中，接收线圈尺寸往往受负载体积、重量等因素限制，优化空间较小，而发射线圈尺寸要求相对宽松。因而，本文通过界定发射线圈与接收线圈面积比参数 β，探究发射线圈尺寸变化对系统有效磁耦合区域的影响。

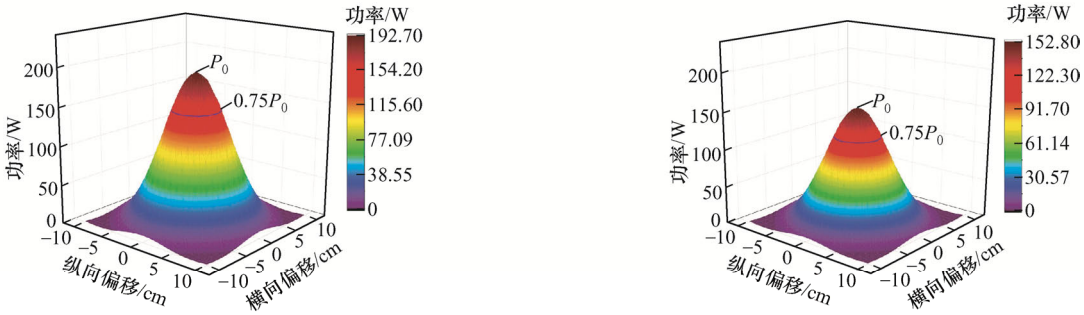
根据上述分析选取同等条件下，有效磁耦合区域最大的正四边形线圈作为耦合系统的收发线圈，首先在 $\beta\in[1, 4]$区间内展开分析，接收线圈以 1 cm 为步长进行平面偏移，然后计算系统输出功率及传输效率，最终结果如图 8 所示。在图 8(a)与(b)中分别标注功率波动为 25%对应的偏移距离及效率为 85%对应的直线。由图可知，β=3.06 时收发线圈几何中心点处的传输效率小于 85%，不满足效率波动范围。随着 β 的增大，功率波动小于 25%对应的偏移距离呈先增后减的趋势，表明在[2.25, 3.06)区间



(a) 正四边形



(b) 正六边形



(c) 正八边形 (d) 圆形

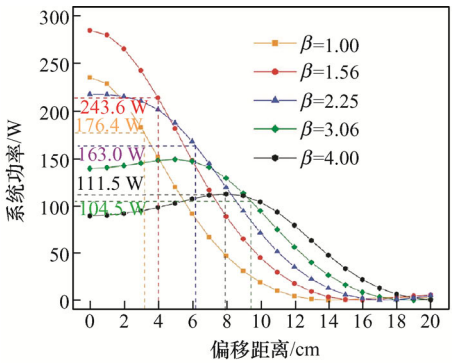
图 7 不同形状下系统接收功率分布云图

Fig. 7 Distribution of system received power under different shapes

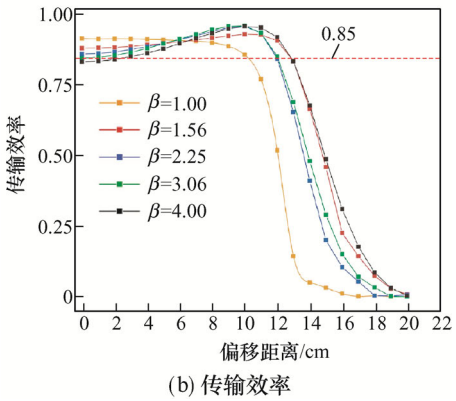
表 2 线圈磁耦合区域计算结果

Tab. 2 Calculation results of coil coupling region

线圈形状	P_0/W	S_1/cm^2	S_2/cm^2	S_{norl}
正四边形	235.23	1605.21	941.94	2.36
正六边形	200.04	1176.90	679.44	1.96
正八边形	192.73	1056.16	611.93	1.85
圆形	152.84	874.67	537.21	1.71



(a) 系统功率



(b) 传输效率

图 8 不同 β 下系统功效变化

Fig. 8 Curves of Changes in system power and efficiency under different β

内存在 1 个最优 β，因此，对此区间内 β 展开分析，不同 β 下收发线圈耦合参数见表 3。由表可知，β 在[2.25, 3.06)区间，系统功率及传输效率均随 β 的增大而减小，且当 β=2.89 时，系统功率及传输效率均满足式(10)功效允许的波动范围，且有效磁耦合区域取得最大值，对应的发射线圈尺寸为 34×34 cm^2。

表 3 不同 β 下收发线圈耦合参数

Tab. 3 The coupling parameters of transmitting and receiving coils under different β

β	P_0/W	η/%	S_2/cm^2
2.25	217.40	86.29	1 295.24
2.40	196.89	85.87	1 388.70
2.56	180.29	85.54	1 471.79
2.72	164.66	85.26	1 568.50
2.89	150.24	85.19	1 652.41
3.06	139.35	84.58	—

4 实验验证

为验证理论与仿真分析的正确性，搭建系统实验平台，如图 9 所示，耦合线圈不同形状与面积比下的实验参数分别见表 4 和表 5，其中 L_n 为归一化电感系数。

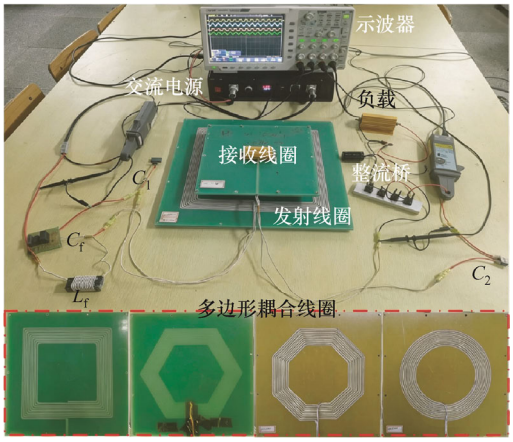


图 9　无线电能传输系统实验平台

Fig. 9 Experimental platform of WPT system

表 4　不同形状耦合线圈实验参数

Tab. 4 Experimental parameters of coupling coil with different shapes

线圈形状	L_n/μH	L_f/μH	C_1/nF	C_2/F	C_3/nF	R_L/Ω
正四边形	54.13	20	175.30	102.72	64.77	10
正六边形	49.26	20	175.30	119.82	71.17	10
正八边形	47.70	20	175.30	126.57	73.50	10
圆形	45.56	20	175.30	137.16	76.95	10

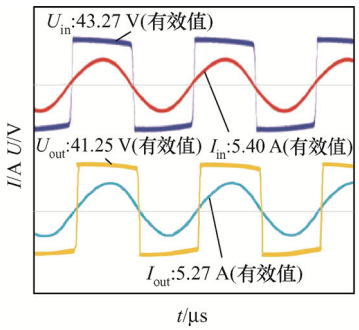
表 5　不同面积比下耦合线圈实验参数

Tab. 5 Experimental parameters of coupling coils with different area ratio

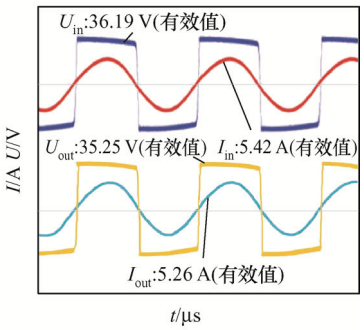
β	L_n/μH	L_f/μH	C_1/nF	C_2/F	C_3/nF	R_L/Ω
1.00	54.13	20	175.30	102.72	64.77	10
1.56	84.35	20	175.30	54.48	64.77	10
2.25	106.51	20	175.30	40.53	64.77	10
2.89	123.34	20	175.30	33.93	64.77	10

图 10 所示为系统工作在谐振频率时，4 种不同耦合线圈轴线重合时，发射端与接收端的输入、输出电压 (U_{in}、U_{out}) 和电流 (I_{in}、I_{out}) 波形，可以看出，系统可较好地工作于谐振状态。

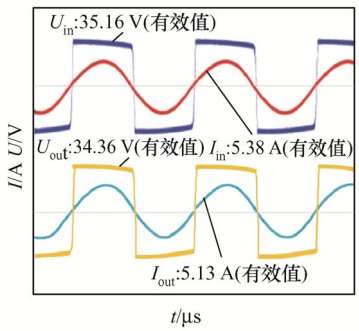
保持收发线圈间隙为 5 cm，以 1 cm 为步长移动接收线圈位置，实时记录负载侧及电源侧功率，进而计算不同情况下的系统有效磁耦合面积。耦合线圈有效磁耦合区域定量计算结果如图 11 所示，可以看出，中心点功率及有效磁耦合区域的仿真值略大于实验值，系统功率及有效磁耦合区域大小变化趋势与仿真结果基本一致，这说明正四边形结构线圈具有更高的耦合性能。



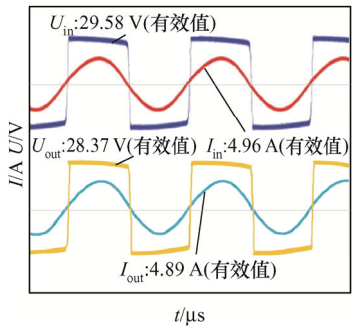
(a) 正四边形



(b) 正六边形



(c) 正八边形



(d) 圆形

图 10　线圈实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of coil

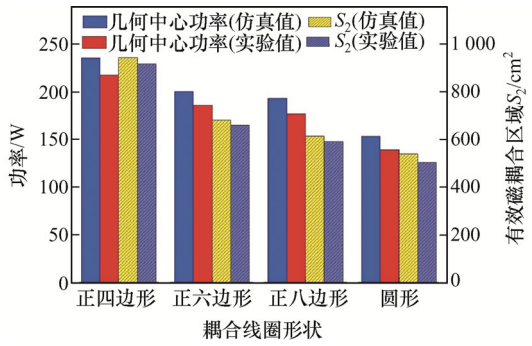


图 11 耦合线圈有效磁耦合区域定量计算结果

Fig. 11 Quantitative calculation results of effective magnetic coupling regions of coupling coils

验证发射线圈尺寸对有效磁耦合区域的影响，对比不同收发线圈面积比下的耦合性能，实验结果如图 12 所示。有效磁耦合区域最大相对误差为 2.8%。当收发线圈面积比为 1:2.89，即发射线圈尺寸为 34×34 cm^2 时，有效磁耦合区域最大。

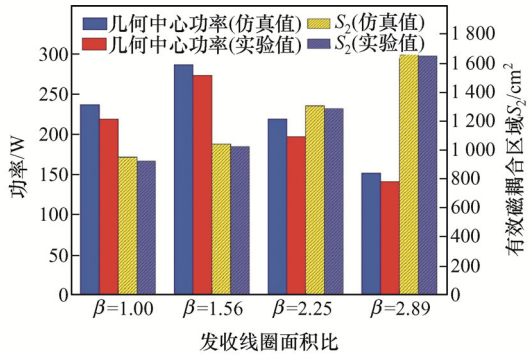


图 12 发收线圈面积比实验结果

Fig. 12 Experimental results on area ratio of transmitting and receiving coils

图 13 为正四边形收发线圈面积比为 1:2.89 时，线圈偏移距离的实验结果，可以看出，当接收线圈相对发射线圈偏移 8.65 cm 时，系统仍能保持 85%以上的传输效率，且接收侧功率波动率小于 25%。

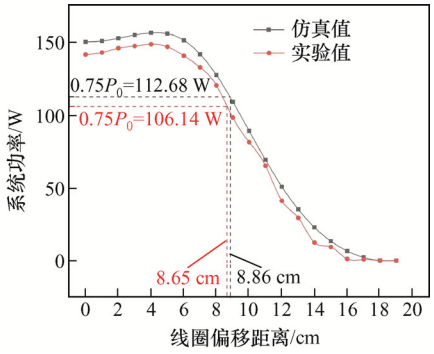


图 13 正四边形线圈偏移特性实验结果

Fig. 13 Experimental results on offset characteristics of regular quadrilateral coil

5 结论

本文从线圈物理参数优化的角度，构造宽有效磁耦合区域的电能传输机构，分析能效波动允许范围下系统抗偏移能力。通过理论推导及有限元数值计算方法对影响系统耦合性能的参数定量分析，得出系统的最优取值，最后搭建了实验平台对仿真计算结果进行验证，得出结论如下。

(1)系统传输效率主要与关键耦合因子有关，且效率值与其呈正相关。当关键耦合因子大于某一值时，系统可维持在一个高效率传输状态，此时传输效率受关键耦合因子的影响较小。

(2)当收发线圈间耦合系数减小导致系统传输效率下降时，不同品质因数下线圈传输效率的衰减程度不同，耦合系数越小，衰减越快。

(3)从有效磁耦合区域定量分析的角度看，当耦合距离为 5 cm、耦合线圈为正四边形，收发线圈面积比为 1:2.89 时，具有较好的耦合效果。在接收线圈相对发射线圈偏移 8.65 cm 时，系统仍能保持 85%以上的传输效率，且接收侧功率波动率小于 25%。

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. (in Chinese)

[2] Zhan Bihong, Liu Sheng. Efficiency analysis of 13.56 MHz flexible wearable electronic magnetically coupled resonance wireless energy transfer [C]// 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Dalian, China, 2022: 1-4.

[3] Yang Lei, Feng Baoxiang, Zhang Yuanqi, et al. Single wire capacitive wireless power transfer system for

wearable biomedical sensors based on flexible graphene film material [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(6): 1337-1347.

[4] 苏君平, 邱椿, 张陈涛. 一种拓扑自动重构的恒压恒流无线充电系统[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 226-234.
Su Junping, Qiu Chun, Zhang Chentao. Constant voltage and constant current wireless charging system with automatic reconstruction of topology [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 226-234. (in Chinese)

[5] 王展, 蓝鲲, 张金刚, 等. LCC-S 型箭地无线电能传输系统谐振网络参数优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 197-206.
Wang Zhan, Lan Kun, Zhang Jingang, et al. Parameter optimization method for wireless power transfer system between rocket and ground with LCC-S-type resonant network[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 197-206. (in Chinese)

[6] Ahmad A, Alam M S, Mohamed A A S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 934-945.

[7] Zhang Jixin, Qu Dawei, Wang Zhu, et al. Analytical magnetic field analysis of misalignment tolerance characteristic of double D pad and bipolar pad [C]// 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing, China, 2020: 1573-1578.

[8] Hou Jia, Chen Qianhong, Zhang Zhiliang, et al. Analysis of output current characteristics for higher order primary compensation in inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6807-6821.

[9] 蔡进, 吴旭升, 胡风革, 等. 双边 LCC 感应耦合式无线电能传输系统的稳定性分析与效率优化设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 355-362.
Cai Jin, Wu Xusheng, Hu Fengge, et al. Stability analysis and efficiency optimization design of bilateral LCC inductively coupled power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 355-362. (in Chinese)

[10] 张艺明, 王辉, 沈志伟, 等. 利用混合拓扑实现强抗偏移性能的紧凑型电动汽车无线充电系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2979-2986.
Zhang Yiming, Wang Hui, Shen Zhiwei, et al. Misalignment-tolerant compact electric vehicle wireless charging system by using hybrid topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2979-2986. (in Chinese)

[11] 庄廷伟, 姚友素, 袁悦, 等. 基于 DDQ/DD 耦合机构的强抗偏移电动汽车用无线充电系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5675-5684.
Zhuang Tingwei, Yao Yousu, Yuan Yue, et al. A DDQ/DD-coupler-based wireless power transfer system for electric vehicles charging featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5675-5684. (in Chinese)

[12] Chen Yang, Yang Bin, Zhou Xiaobing, et al. A hybrid inductive power transfer system with misalignment tolerance using quadruple-D quadrature pads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6039-6049.

[13] Zhang Cun, Wang Wei, Xu Chenjin, et al. Research on uniform magnetic field compensation structure of array circular coils for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(6): 8600205.

[14] Wang Xiaotian, Yu Changli, Wu Yuteng, et al. Structure design of quadrilateral overlapped wireless power transmission coupling coil [J]. Sensors, 2022, 22(16): 5955.

[15] 巩兆伟, 李金刚, 同向前, 等. LCC-LC 串联混合型抗偏移恒流无线充电[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1513-1521.
Gong Zhaowei, Li Jingang, Tong Xiangqian, et al. LCC-LC series hybrid wireless charging with misalignment tolerance and constant current output [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1513-1521. (in Chinese)

[16] Abdulhameed M, ElGhanam E, Osman A, et al. Design and tuning of LCC compensation networks for DD-DDQ coils in dynamic wireless EV charging systems [C]// 2022 IEEE/AIAA Transportation Electrification Conference and Electric Aircraft Technologies Symposium (ITEC+EATS). Anaheim, CA, USA, 2022: 579-583.

[17] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 机器人随机位置下动态无线供电阵列式发射模组优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6319-6331.
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Optimal design of dynamic wireless power transmitting array module in random position of robot [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6319-6331. (in Chinese)

[18] 李维汉, 时辉, 尹安东, 等. 基于有效耦合区域的电动汽车动态无线充电系统的研究[C]//中国汽车工程学会. 2020 中国汽车工程学会年会论文集(2). 机械工业出版社, 2020: 458-464.
Li Weihan, Shi Hui, Yin Andong, et al. Research on dynamic wireless charging system of electric vehicle based on effective coupling region [C]// China Society of Automotive Engineers. Proceedings of 2020 China SAE Annual Congress (2). Beijing: China Machine Press, 2020: 458-464.

[19] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 无线电能有效传输距离及其影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 106-112.
Li Yang, Yang Qingxin, Yan Zhuo, et al. Analysis on effective range of wireless power transfer and its impact factors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 106-112. (in Chinese)



高义博

作者简介：

高义博(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。E-mail：13021490602@163.com。

薛明(1987—)，男，通信作者，博士，高级实验师。研究方向：静、动态无线电能传输。E-mail：2023064@hebut.edu.cn。

侯虎(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：无线电能传输。E-mail：houhuyouxiang@163.com。

朱高嘉(1989—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：永磁电机多物理场耦合数值分析及冷却结构设计。E-mail：zhugaojia@tiangong.edu.cn。

杨新生(1986—)，男，博士，助理研究员。研究方向：电磁场数值计算，生物电磁技术，无线电能传输。E-mail：xsyang@hebut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)