DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.284 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

磁耦合谐振式无线充电线圈的优化方法研究

余庆昌[1]，李浩然[1,2]，朱玉玉[1]

(1.西南科技大学信息工程学院，绵阳 621000；2.西南科技大学成都创新研究院，成都 621010)

摘要：在磁耦合无线充电系统中，传输线圈是实现电能高效传输的重要部分，线圈的品质因数直接影响整个系统的效率。为了满足高效率传输的需求，首先通过对串串补偿拓扑系统建立等效电路模型，经理论推导得到线圈传输效率与线圈品质因数的关系，即最大化线圈互感和内阻的比值，实现高效率传输。然后针对线圈设计优化的主要目标：互感与内阻，理论推导其与线圈几何参数之间的关系，深层次提炼为线圈效率与线圈参数之间带约束的多参数最优函数求解问题。最后提出基于粒子群优化算法进行迭代求解，按照求解得到的线圈几何参数绕制不同规格的线圈，测试求解结果的最优性。

关键词：无线充电；线圈效率优化；多参数寻优；粒子群优化算法

Research on Optimization Method for Magnetic Coupling Resonant Wireless Charging Coil

YU Qingchang[1], LI Haoran[1,2], ZHU Yuyu[1]

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;
2. Chengdu Institute of Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 621010, China)

Abstract: In a magnetic coupling wireless charging system, the transmission coil is an important part for improving the efficient transmission of electric energy, and its figure of merit directly affects the efficiency of the whole system. To meet the demand of high-efficiency transmission, first, an equivalent circuit model for an S-S compensation topological system was established, and the relationship between the coil's transmission efficiency and figure of merit was obtained through theoretical derivation, i.e., maximizing the ratio of the coil's mutual inductance to its internal resistance can achieve high-efficiency transmission. Then, aimed the mutual inductance and internal resistance which were also the main optimization objectives for coil design, the relationship among the coil's mutual inductance, internal resistance and geometric parameters was deduced theoretically, and it was further refined into a multi-parameter optimal function problem with constraints between the coil's efficiency and its parameters. Finally, an iterative solution based on the particle swarm optimization algorithm was proposed, and the winding coils with different specifications were made according to the obtained geometric parameters, so as to test the optimization results.

Keywords: Wireless charging; coil efficiency optimization; multi-parameter optimization; particle swarm optimization algorithm

收稿日期：2023-08-22；**修回日期**：2023-11-12，2023-12-26；
录用日期：2024-01-28；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：四川省重点研发计划资助项目(2022YFG0259)；西南科技大学博士基金资助项目(23zx7102)
This work is supported by Sichuan Province Key Research and Development Program under the grant 2022YFG0259; Doctoral Fund of Southwest University of Science and Technology under the grant 23zx7102

无线电能传输技术 WPT(wireless power transfer)是当前备受关注的研究领域。完成电能无线传输的方式多样，其中一大主流研究方向是磁耦合方式，也是目前应用较多的方 式[1-3]。传输效率是评价无线充电系统的关键因素之一，主要由发射与接收侧转换器效率和传输线圈效率决定。转换器效率通过实现开关器件的软开关降低损耗得到提升，已

有较多成熟的方法。传输线圈间的效率与线圈的品质因数息息相关，线圈的品质因数和线圈间互感与线圈内阻的比值正相关，即最大化线圈间互感、最小化线圈内阻可以实现线圈间能量传输的高效性。线圈间互感和内阻受线圈参数的影响且线圈参数多样，故需要研究有效的方法来设计线圈参数，以保证电能高效率传输。

诸多学者就线圈传输效率和互感的关系进行了研究，通过分析线圈参数对互感的影响，进而得出了一些方法优化线圈设计。文献[4]对方形、圆形 2 个常用线圈形状建立自感和互感的解析模型，进而得到互感与各参数之间的变化趋势，并研究了 2 类线圈的横向偏移容忍度；文献[5]分析了线圈横向或角度偏移时的互感公式及输出功率、传输效率与互感和负载内阻的关系，提出了不同应用和特定偏移范围的最优传输效率方法；文献[6]探讨了无线充电系统中互感和传输距离之间的关系，分析了传输距离与传输效率之间的相互影响，并提出了 1 种基于电压增益和输出功率最优点的设计方法。但上述文献并未研究线圈内阻对传输效率的影响，实际应用中由于趋肤效应和邻近效应的存在，线圈交流内阻变化不可忽略，因此在线圈优化方法中还需充分考虑内阻的影响。文献[7]针对高频电流下螺旋型线圈的损耗计算方法进行研究，并提出了优化线圈关键参数的方法；文献[8]分析了利兹线电阻的组成，通过推导得出线圈内阻的计算式，并针对平面矩形线圈和 DD 线圈提出优化方法。

综合上述文献的研究，在线圈优化设计中通常未同时考虑互感和内阻的变化。然而，线圈参数的改变不仅会影响互感，还影响内阻。例如，减小线圈匝间距可以增大互感，但同时造成了更明显的邻近效应，让线圈的交流内阻增大[9]。在实际应用场合中，线圈的设计通常需要满足一些约束条件，如线圈的尺寸、传输距离、工作频率和负载电阻等。在满足约束条件下，本文综合考虑线圈参数对互感和内阻的影响，从而完成高效率充电线圈的设计。首先通过对 WPT 系统的等效电路分析，确定线圈传输效率主要与线圈品质因数有关，即互感与内阻的比值。随后理论推导线圈互感与交流内阻计算式，同时为验证交流内阻计算式的准确性，进行了实验测试和理论计算的比较。在约束条件下，基于粒子群算法对线圈参数进行寻优，最终获得符合条件的最优线圈参数。

1　谐振式无线充电系统理论分析

1.1　无线充电系统工作原理

谐振式 WPT 系统的基本结构如图 1 所示，主要由直流电源、高频逆变器、发射侧补偿、发射和接收线圈、接收侧补偿和整流滤波电路等组成。

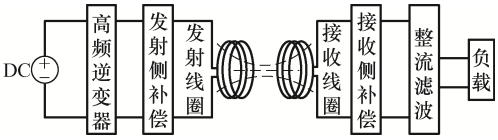


图 1　WPT 系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of WPT system

直流电源输入经高频逆变器变为方波交流电，再在线圈和补偿网络谐振作用下，实现电能的无线传输，最后再经整流滤波给负载使用。

1.2　线圈传输效率分析

对于 WPT 系统，通常采用等效电路理论进行分析，如图 2 所示。

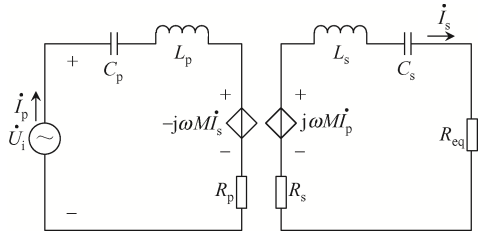


图 2　串−串补偿拓扑等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of S-S compensation topology

根据基尔霍夫电压定律，可得

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_i\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_p+j\omega L_p+\dfrac{1}{j\omega C_p} & -j\omega M\\ -j\omega M & R_s+j\omega L_s+\dfrac{1}{j\omega C_s}+R_{eq}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_p\\\dot{I}_s\end{bmatrix}. \tag{1}$$

式中：$\dot{U}_{\mathrm{i}}$ 为逆变器等效交流电源电压；C_{p}、L_{p} 和 R_{p} 分别为发射侧补偿电容、发射侧线圈自感和内阻；ω 为谐振角频率；M 为发射和接收线圈的互感；C_{s}、L_{s} 和 R_{s} 分别为接收侧补偿电容、接收侧线圈自感和内阻；$\dot{I}_{\mathrm{p}}$ 为发射侧电流；$\dot{I}_{\mathrm{s}}$ 为接收侧电流；由基波近似等效法[10]，整流桥等效为 R_{eq}，可表示为

$$R_{\mathrm{eq}}=\frac{8}{\pi^2}R_{\mathrm{L}} \tag{2}$$

式中，R_{L} 为电阻负载。

当系统发生谐振时，即 $\omega L_{\mathrm{p}}=\dfrac{1}{\omega C_{\mathrm{p}}}$、$\omega L_{\mathrm{s}}=\dfrac{1}{\omega C_{\mathrm{s}}}$，则可得到

$$\begin{cases}\dot{I}_{\mathrm{p}}=\dfrac{\dot{U}_{\mathrm{i}}}{R_{\mathrm{p}}+(\omega M)^2/(R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{eq}})}\\ \dot{I}_{\mathrm{s}}=\dfrac{\mathrm{j}\omega M\dot{I}_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{eq}}}\end{cases} \tag{3}$$

系统输入、输出功率分别为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{in}}=\dot{I}_{\mathrm{p}}^2\left[R_{\mathrm{p}}+\dfrac{(\omega M)^2}{R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{eq}}}\right]\\ P_{\mathrm{out}}=\dfrac{(\omega M)^2\dot{I}_{\mathrm{p}}^2R_{\mathrm{eq}}}{(R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{eq}})^2}\end{cases} \tag{4}$$

线圈的传输效率为

$$\eta_{\mathrm{coil}}=1\Bigg/\left\{1+2\frac{R_{\mathrm{p}}R_{\mathrm{s}}}{(\omega M)^2}+R_{\mathrm{eq}}\frac{R_{\mathrm{p}}}{(\omega M)^2}+\frac{1}{R_{\mathrm{eq}}}\left[R_{\mathrm{s}}+\frac{R_{\mathrm{p}}R_{\mathrm{s}}^2}{(\omega M)^2}\right]\right\} \tag{5}$$

对式(5)关于 R_{eq} 求导，得到最优负载为

$$R_{\mathrm{eq,opt}}=\sqrt{\frac{(\omega M)^2R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{p}}}+R_{\mathrm{s}}^2} \tag{6}$$

此时，线圈具有最大传输效率为

$$\eta_{\mathrm{coil,max}}=\frac{F_{\mathrm{FOM}}^2}{F_{\mathrm{FOM}}^2+2+2\sqrt{F_{\mathrm{FOM}}^2+1}}\approx\frac{F_{\mathrm{FOM}}}{F_{\mathrm{FOM}}+2} \tag{7}$$

式中，F_{FOM} 为线圈品质因数，可表示为

$$F_{\mathrm{FOM}}=\sqrt{\frac{(\omega M)^2}{R_{\mathrm{p}}R_{\mathrm{s}}}} \tag{8}$$

2 谐振线圈的优化方法

由式(7)可以得到线圈最优传输效率仅与 F_{FOM} 相关，即当系统的工作频率固定时，线圈传输效率在不同负载下仅与互感 M 和线圈内阻 R 的比值有关。不同负载条件下 M/R 的值与线圈传输效率的关系如图 3 所示。

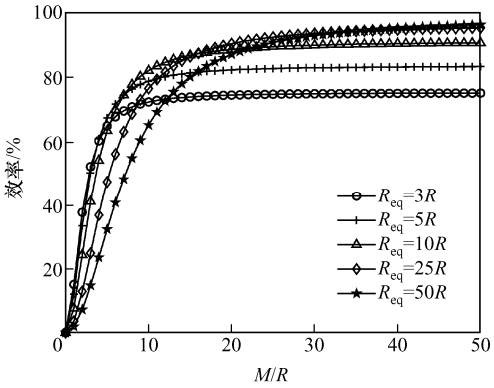


图 3 不同负载下 *M/R* 与传输效率曲线

Fig. 3 Curves of *M/R* vs transmission efficiency under different loads

由图 3 可见，系统在不同负载条件下，线圈效率均随 M/R 的变大而提高，最优负载时系统效率最高。这意味着在系统工作频率和负载均确定的情况下，设计高效率的无线充电传输线圈，需要 M/R 的值最大化，即最大化互感值和最小化线圈交流内阻。

2.1 线圈互感和交流内阻计算

2.1.1 线圈互感计算

无线充电系统最基础常见的平面圆形线圈如图 4 所示。线圈模型涵盖了 3 个关键参数，分别为外径 R_{out}、绕线匝数 N 和匝间距 s，匝间距是指相邻匝线中心之间的距离。通常情况下，确定这 3 个参数，就确定了 1 个平面圆形线圈。

基于毕奥-萨伐尔定律，2 个线圈间的互感可以通过单匝线圈模型的互感求得[11]，即

$$M=\frac{\mu_0}{4\pi}\iint_{l_1l_2}\frac{\mathrm{d}l_1\mathrm{d}l_2}{l} \tag{9}$$

式中：μ_0 为绕线磁导率；l_1 和 l_2 为单匝线长；l 为

线圈间距；$\mathrm{d}l_1$ 和 $\mathrm{d}l_2$ 为线元。

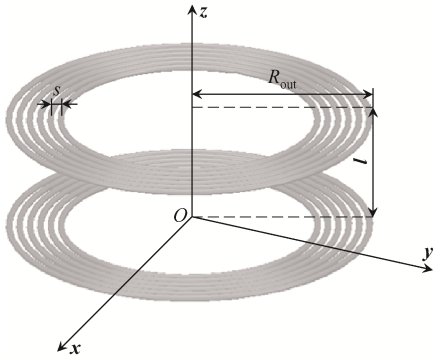


图 4　同心圆线圈模型

Fig. 4 Concentric coil model

多匝线圈间的互感可以通过每匝线圈间的互感求和得到[12]。发射和接收线圈一致时，可将其简化为

$$M=\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\frac{\mu_0}{4\pi}\oint\oint\frac{\mathrm{d}l_1\mathrm{d}l_2}{l}\approx\frac{\mu_0\pi N^2L_\mathrm{T}^4}{2(\sqrt{l^2+L_\mathrm{T}^2})^3} \tag{10}$$

式中：N_1 和 N_2 分别为发射和接收线圈匝数；L_T 为线圈的平均半径，可表示为

$$L_\mathrm{T}=R_\mathrm{out}-\frac{(N-1)s}{4} \tag{11}$$

由式(10)和式(11)可得，若使线圈互感变大，可以通过增大 L_T 和 N，减小 l 来实现。然而，线圈互感不能过大，容易造成系统处于过耦合状态，使系统发生频率分裂的现象[13]。因此，在进行线圈设计时应确保互感合适，并且最好让系统处于临界耦合状态。

2.1.2　线圈内阻计算

线圈的交流电阻由导体本征电阻和电流流过产生的趋肤效应、邻近效应和涡流损耗组成，即

$$R_\mathrm{ac}=R_\mathrm{cond}+R_\mathrm{prox}+R_\mathrm{eddy}+R_\mathrm{ferrite} \tag{12}$$

式中：R_cond 为欧姆损耗，包括导体本征电阻和趋肤效应损耗；R_prox 为邻近损耗，由相邻匝间的外部磁场邻近效应产生；R_eddy 为对侧线圈的涡流损耗；R_ferrite 为铁氧体材料中的涡流损耗。

通常涡流效应的影响较小，故 R_eddy 和 R_ferrite 可忽略，线圈交流电阻主要受趋肤效应和邻近效应影响，其表达式为

$$R_\mathrm{ac}=R_\mathrm{cond}+R_\mathrm{prox} \tag{13}$$

趋肤效应与邻近效应共存。趋肤效应是高频电流在导体内流动，大部分电流集中在导体表面。邻近效应是由于相邻两导体间的交流磁场相互作用，使电流集中分布在导体表面相对的内侧[14]。通常为了减小线圈的趋肤效应，线圈采用利兹线绕制而成[15]。单位长度利兹线导体电阻和邻近电阻可分别表示为

$$R_{\mathrm{cond},i}=\frac{1}{\pi r_\mathrm{s}^2\sigma}\cdot\Phi_\mathrm{cond}\left(\frac{r_\mathrm{s}}{\delta}\right) \tag{14}$$

$$R_{\mathrm{prox},i}=\frac{\omega^2n_\mathrm{s}\pi\mu^2r_\mathrm{s}^4\sigma H_\mathrm{avg}^2}{4} \tag{15}$$

式中：r_s 为利兹线单股的线径；σ、μ 分别为导体的电导率和磁导率；δ 为趋肤深度，$\delta=\dfrac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}$，$f$ 为交流频率；$\Phi_\mathrm{cond}\left(\dfrac{r_\mathrm{s}}{\delta}\right)$ 为贝塞尔函数式，当 $r_\mathrm{s}<\delta$ 时，$\Phi_\mathrm{cond}\left(\dfrac{r_\mathrm{s}}{\delta}\right)\approx1$；$\omega$ 为角频率；n_s 为利兹线的股数；H_avg^2 为线圈横截面上磁场强度平均值。

则对于平均长度 $L_\mathrm{MTL}=2\pi L_\mathrm{T}$ 的 N 匝线圈，导体电阻和邻近电阻可分别表示为

$$R_\mathrm{cond}=\frac{N}{n_\mathrm{s}}\cdot R_{\mathrm{cond},i}\cdot L_\mathrm{MTL} \tag{16}$$

$$R_\mathrm{prox}=N^3\cdot R_{\mathrm{prox},i}\cdot L_\mathrm{MTL} \tag{17}$$

线圈横截面上磁场强度平均值的计算过于繁琐，通过 Ansys Maxwell 仿真软件辅助可以简便得到，如图 5 所示。在实际应用中，无线充电系统线圈的尺寸大小通常是已知条件，故可在软件中建立

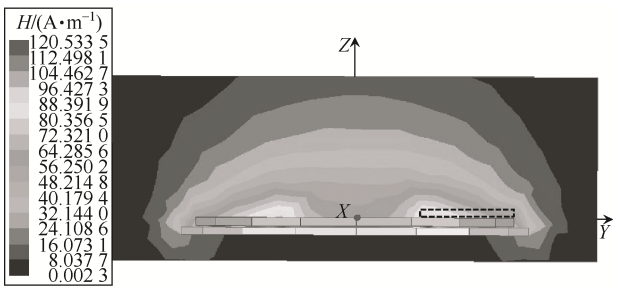


图 5　线圈横截面磁场强度分布

Fig. 5 Magnetic field intensity distribution across coil cross-section

线圈的简化模型，选取图中虚线区域所示横截面，通过场计算器得到磁场强度平均值。

互感计算公式的准确性已被大量验证，但内阻的估算准确性有待考量。为了验证估算公式的准确性，对现有实际线圈进行测试，线圈参数见表 1。

表 1 实验线圈参数

Tab. 1 Coil parameters used in experiment

参数	数值
r_s/μm	80
n_s/股	105
N/匝	10

测量值和计算值结果如图 6 所示，可以看到，有无铁氧体时电阻的测量结果和估算结果曲线变化趋势近似吻合，故可凭借计算式进行后续的优化设计。

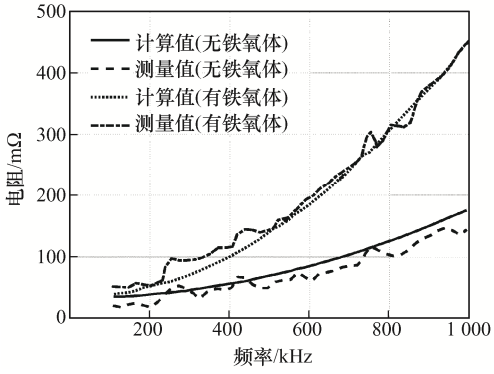


图 6 线圈计算电阻和测量电阻随频率变化的曲线

Fig. 6 Curves of calculated and measured coil resistances varying with frequency

2.2 线圈参数优化

通过式(10)和式(11)可以得出，线圈之间的互感受到匝数、外径、匝间距和传输距离等因素的共同影响，即

$$M = M(N, R_{\text{out}}, s, l) \tag{18}$$

一般根据系统的功率等级确定线圈使用的利兹线规格，即利兹线径和股数已知，通过式(12)~式(17)可得，线圈的交流电阻由角频率、匝数和线圈平均长度决定，即

$$R = R(\omega, N, L_{\text{T}}) \tag{19}$$

线圈平均长度由外径、匝数和匝间距表示，根据式(18)和式(19)，线圈互感和内阻的比值由外径、匝数及匝间距 3 个线圈参数决定。根据前面的推导，线圈传输效率与线圈互感和内阻的比值相关，要获得最优传输效率就需要对这 3 个参数进行最优设计。在无线充电系统实际应用的场合中，有诸多约束条件，如汽车、手机和工业机器人等需要满足线圈的尺寸限制和符合系统工作频率范围。因此，线圈的设计问题最终可以表示为

$$\begin{cases} \text{MAX}_{\omega,s,N,R_{\text{out}}}\eta(\omega,s,N,R_{\text{out}}) \\ R_{\text{out}} \leqslant R_{\text{out max}} \\ s \geqslant 2r_{\text{w}} \\ \omega_{\text{L}} \leqslant \omega \leqslant \omega_{\text{H}} \end{cases} \tag{20}$$

式中：r_{w}为导线半径；ω_{L}为系统工作最小角频率；ω_{H}为系统工作最大角频率。

即在约束条件最大外径、最小线间距下和工作频率范围内寻求最优传输效率的线圈参数。对于具有约束条件的多参数最优解问题可基于粒子群算法展开。粒子群算法是基于鸟群随机觅食而提出的 1 种进化算法，群体中的粒子通过信息共享和位置更新迭代地向最优位置移动，粒子群算法具有实现容易、收敛速度快、精度高等优点[16-19]。针对上述问题采用传统的粒子群算法求解，其构造如下。

(1)确定粒子个数 P、最大迭代数 T 及每个粒子的初始参数，定义参数矩阵为

$$\boldsymbol{p}_{\text{pop}} = \begin{pmatrix} s^1 & s^2 & \cdots & s^P \\ N^1 & N^2 & \cdots & N^P \\ R_{\text{out}}^1 & R_{\text{out}}^2 & \cdots & R_{\text{out}}^P \end{pmatrix}$$

(2)第 i 个粒子的更新方程为

$$p_{\text{pop}_{t+1}}(j,i) = p_{\text{pop}_t}(j,i) + v_{t+1}(j,i) \tag{21}$$

式中：j=1, 2, 3；t 为迭代次数；$v_{t+1}(j, i)$为第 i 个粒子的第 j 个参数的变化率，在粒子群算法中称为速度。各参数的速度可表示为

$$v_{t+1}(1,i) = \alpha v_t(1,i) + c_1 r_1[p_{\text{best}_t}(1,i) - p_{\text{pop}_t}(1,i)] + c_2 r_2[g_{\text{best}_t}(1) - p_{\text{pop}_t}(1,i)] \tag{22}$$

$$v_{t+1}(2,i) = \text{round}[\alpha v_t(2,i)] + c_1 r_3[p_{\text{best}_t}(2,i) - p_{\text{pop}_t}(2,i)] + c_2 r_4[g_{\text{best}_t}(2) - p_{\text{pop}_t}(2,i)] \tag{23}$$

$$v_{t+1}(3,i)=\alpha v_t(3,i)+c_1r_5[p_{\text{best}_t}(3,i)-p_{\text{pop}_t}(3,i)]+ c_2r_6[g_{\text{best}_t}(3)-p_{\text{pop}_t}(3,i)] \tag{24}$$

式中：α 为惯性权重参数；c_1 和 c_2 均为加速度常数；$r_i(i=1,2,\cdots,6)$为均匀分布在 0~1 范围内的随机数；$p_{\text{bect}_t}(j,i)(j=1,2,3)$为最大适应度值对应的第 i 个粒子到当前迭代的最佳位置；$g_{\text{best}_t}(j)(j=1,2,3)$为所有粒子到当前迭代生成的全局最佳位置。

(3)此外，为保证全局收敛，α、c_1、c_2 应满足

$$\begin{cases}0\leqslant\alpha<1\\ c_1+c_2>0\\ 0<1-(\varphi^2+K-\alpha)+\alpha(\varphi^2-K-\alpha)-\\ \qquad\alpha^3<\dfrac{c_2^2(1+\alpha)}{6}\\ \varphi=1+\alpha-(c_1+c_2)/2\\ K=(c_1^2+c_2^2)/12\end{cases} \tag{25}$$

为了验证设计算法的实用性，对 P_{out}=200 W、R_{L}=5 Ω、$R_{\text{out,max}}$=120 mm、频率范围为 79~90 kHz、l=50 mm 的 1 个实际应用案例进行优化设计。完整的设计流程如图 7 所示，根据优化参数结果进行仿真和实验。

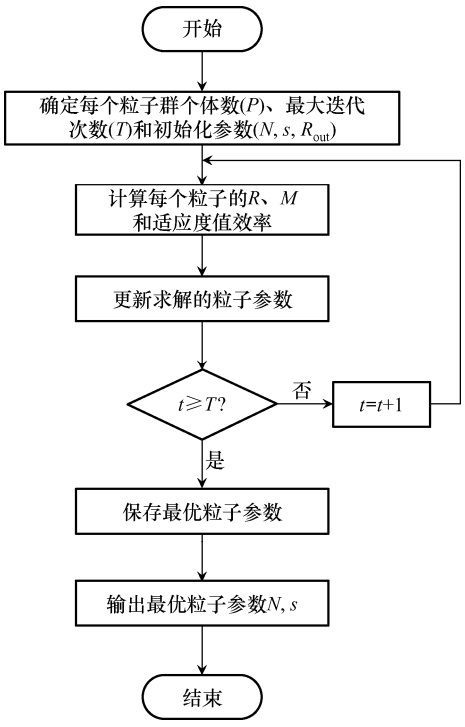


图 7　PSO 优化方法流程

Fig. 7 Flow chart of PSO optimization method

3　仿真与实验验证

根据上述方法得到的符合约束条件的最优参数见表 2，根据这些参数实际制作了线圈模型并搭建了实验样机。为了对比验证结果的最优性，还制作了与所求结果相同匝数和相同匝间距的线圈，所有线圈参数见表 3。

表 2　优化参数结果

Tab. 2 Results of optimization parameters

参数	数值
R_{out}/mm	120
r_{w}/mm	2
ω/kHz	86
N/匝	16
s/mm	5.7

表 3　不同线圈参数

Tab. 3 Parameters of different coils

线圈	匝数/匝	匝间距/mm	M/μH	R/mΩ
1	16	4.0	18.23	127.31
2	16	5.0	14.58	80.13
3	16	5.7	12.33	52.79
4	16	6.0	11.41	50.89
5	16	7.0	8.82	44.42
6	12	5.7	9.78	43.31
7	14	5.7	11.06	48.63
8	18	5.7	12.91	84.39

线圈 1~5 具有相同匝数和相同外径，但匝间距不同；线圈 3 和线圈 6~8 具有相同匝间距和相同外径，但匝数不同。搭建的实验样机由 DC 电压源、全桥逆变器、发射和接收线圈、发射侧和接收侧补偿电容、整流器、电子负载、示波器、电压和电流探头等部分组成，如图 8 所示。在恒负载条件下，仿真与实验测试不同线圈的传输效率，开关器件和电路损耗使传输效率实验值低于仿真值，结果如图 9 所示。可以看到，传输效率在匝间距为 5.7 mm 和匝数为 16 时最优，与迭代输出参数的结果一致。

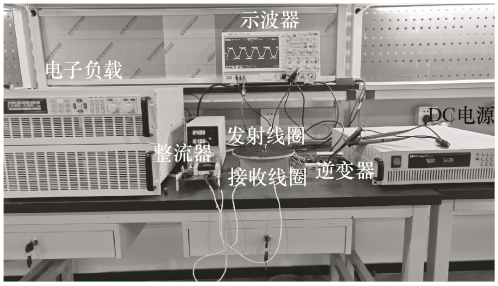
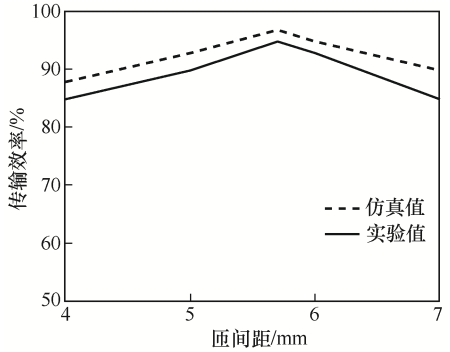
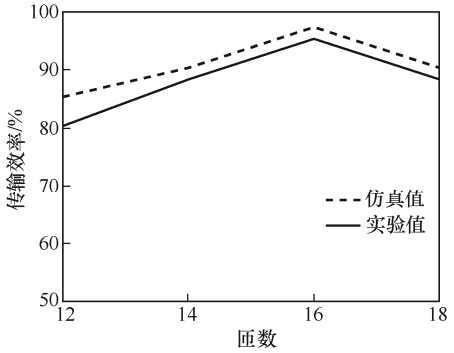


图 8 WPT 系统实验样机

Fig. 8 Experimental prototype of WPT system



(a) 不同匝间距

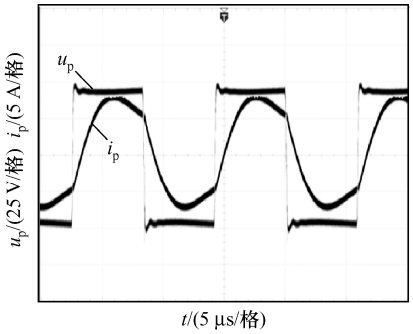


(b) 不同匝数

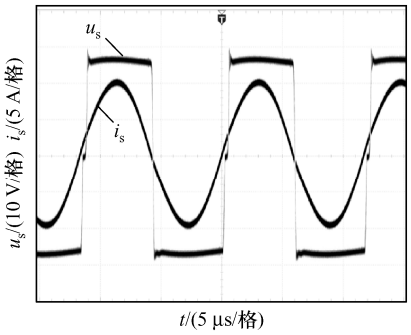
图 9 不同线圈传输效率仿真与测试结果

Fig. 9 Simulation and test results of transmission efficiency of different coils

最优线圈实际充电测试过程中发射侧和接收侧电压与电流的波形如图 10 所示。



(a) 发射侧电压与电流波形



(b) 接收侧电压与电流波形

图 10 发射侧和接收侧电压与电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveforms on transmitting and receiving sides

4 结语

本文通过分析计算，首先得到了磁耦合无线充电系统传输线圈效率与线圈品质因数的关系，即线圈互感和线圈自身交流内阻对传输效率的影响。然后，对常用的平面圆形线圈，理论推导线圈互感和交流内阻的计算式，分析得到线圈互感和内阻与线圈设计参数的关系。此外，结合有限元仿真软件对线圈交流内阻估算式进行了实验验证，估算结果与实测结果近似相等、变化趋势相符。最后，综合考虑线圈效率与线圈参数间的关系，转换为具有约束条件的多参数寻优问题。基于粒子群算法设计了求解具有约束条件的 WPT 系统耦合线圈参数的方法。借助多参数优化算法得到最优线圈设计参数，依据优化算法所得参数，分别绕制目标线圈和对比线圈，将其代入仿真模型进行仿真验证并搭建实验平台实际测试，仿真和实验结果均验证了参数的最优性。

参考文献：

[1] 徐先峰, 吴慧玲, 杨雄政, 等. 空间约束下电动汽车无线充电系统磁耦合结构优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3581-3588.

Xu Xianfeng, Wu Huiling, Yang Xiongzheng, et al. Optimization of magnetically coupled structure of wireless charging system for electric vehicles under space

constraint [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3581-3588. (in Chinese)

[2] 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.
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. (in Chinese)

[3] 王维, 王硕, 吕晓飞, 等. 电动船舶无线充电新型螺线管磁耦合机构设计与优化[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 247-257.
Wang Wei, Wang Shuo, Lü Xiaofei, et al. Design and optimization of novel solenoid magnetic coupler for electric boats wireless charging [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 247-257. (in Chinese)

[4] Luo Zhichao, Wei Xuezhe. Analysis of square and circular planar spiral coils in wireless power transfer system for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 331-341.

[5] Liu Fuxin, Yang Yong, Jiang Dan, et al. Modeling and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with varying spatial scales [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3240-3250.

[6] 陈文仙, 陈乾宏, 张惠娟. 电磁共振式无线电能传输系统距离特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 98-104.
Chen Wenxian, Chen Qianhong, Zhang Huijuan. Distance characteristics analysis of magnetic resonance wireless power transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 98-104. (in Chinese)

[7] Chen Qingbin, Zhang Xu, Chen Wei, et al. Winding loss analysis of planar spiral coil and its structure optimization technique in wireless power transfer system [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 19418.

[8] 薄强, 王丽芳, 张玉旺, 等. 无线充电系统实际 Litz 线绕平面线圈高频电阻分析与计算[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(4): 1-8.
Bo Qiang, Wang Lifang, Zhang Yuwang, et al. Analysis and calculation of high frequency resistance in non-ideal Litz wire planar coils for wireless power transfer systems [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(4): 1-8. (in Chinese)

[9] Yang Lin, Yu Xinyuan, Shi Yanyan, et al. A four-coil structure wireless power transfer system with constant current and constant voltage charging: Analysis, design, and experiment [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2023, 51(1): 32-46.

[10] 杨帆, 张慧芬, 胡明月, 等. 谐振式电动汽车无线充电系统频率分裂抑制方法[J]. 电气自动化, 2022, 44(1): 9-13.
Yang Fan, Zhang Huifen, Hu Mingyue, et al. Method of preventing frequency splitting in resonant wireless charging system for electric vehicle [J]. Electrical Automation, 2022, 44(1): 9-13. (in Chinese)

[11] 王昭淇, 陈梓楠, 强浩, 等. 无线电能传输系统频率分裂现象的分析与优化[J]. 电气技术与经济, 2022(3): 41-43, 68.
Wang Zhaoqi, Chen Zinan, Qiang Hao, et al. Analysis and optimization of frequency splitting in wireless power transfer system [J]. Electrical Equipment and Economy, 2022(3): 41-43, 68. (in Chinese)

[12] 郝文美, 张立伟, 蔡娇, 等. 基于输出能效最优的感应电能传输系统耦合线圈设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1904-1914.
Hao Wenmei, Zhang Liwei, Cai Jiao, et al. Coupling coils design of inductive power transfer system based on optimal output power efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1904-1914. (in Chinese)

[13] Giovannetti G, Wang Yong, Jayakumar N K T, et al. Magnetic resonance wire coil losses estimation with finite-difference time-domain method [J]. Electronics, 2022, 11(12): 1872.

[14] 时辉, 李维汉, 尹安东, 等. 无线充电系统线圈参数优化与偏移特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(9): 1179-1186.
Shi Hui, Li Weihan, Yin Andong, et al. Research on coil parameter optimization and misalignment characteristics of wireless charging system [J]. Journal of Hefei Univer-

sity of Technology (Natural Science), 2021, 44(9): 1179-1186. (in Chinese)

[15] 马艺林, 李锐华, 胡波. 电动汽车无线充电系统磁耦合线圈结构的多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 53-59.
Ma Yilin, Li Ruihua, Hu Bo. Multi-objective optimazation design of magnetic coupling coil structure for wireless charging system of electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6): 53-59. (in Chinese)

[16] 罗建超, 朱心科. 基于改进粒子群优化算法的自主水下航行器深度控制[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 64-68.
Luo Jianchao, Zhu Xinke. Depth control of autonomous underwater vehicle based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(8): 64-68. (in Chinese)

[17] 杨娜, 刘爱华, 易堃, 等. 基于多种群的粒子群优化算法[J]. 制导与引信, 2022, 43(1): 1-4, 28.
Yang Na, Liu Aihua, Yi Kun, et al. Particle swarm optimization algorithm based on multiple swarms [J]. Guidance & Fuze, 2022, 43(1): 1-4, 28. (in Chinese)

[18] 刘廷章, 张子恒. 基于循环迭代粒子群算法对电动汽车无线充电系统的联合参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4548-4564.
Liu Tingzhang, Zhang Ziheng. Online identification of joint parameters of electric vehicle wireless charging system based on loop-iteration particle swarm optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4548-4564. (in Chinese)

[19] Lee J H, Song J Y, Kim D W, et al. Particle swarm optimization algorithm with intelligent particle number control for optimal design of electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1791-1798.



余庆昌

作者简介：

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

李浩然(1992—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力电子技术。E-mail：horn_lee@swust.edu.cn。

朱玉玉(1979—)，男，博士，教授。研究方向：电力电子应用与电磁兼容，先进检测与控制技术。E-mail：zhuyuyu@swust.edu.cn。

(责任编辑：耿越)