DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.174 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

基于 IPSO-BP 算法的 WPT 系统结构参数优化方法

李振杰(中国电源学会会员)，白玉鸿，刘一琦，班明飞
(东北林业大学计算机与控制工程学院，哈尔滨 150040)

摘要：以提高无线电能传输 WPT(wireless power transfer)系统的传输效率为目标，对 WPT 系统的结构参数进行优化。针对 WPT 系统结构参数设计领域内的传统优化方法效率低、全面性差的问题，建立 SS 型 WPT 系统的参数优化模型，确定优化参数。在此基础上，提出 1 种综合了正交试验、有限元仿真及改进的粒子群优化-反向传播神经网络算法的 WPT 系统结构参数优化方法。实验结果表明，预测结果与实验结果间的平均误差值为 4.3%，该优化方法合理可行，对 WPT 系统的结构参数优化具有参考意义。

关键词：无线电能传输；粒子群优化算法；神经网络；结构参数优化

Optimization Method for Structural Parameters of WPT System Based on IPSO-BP Algorithm

LI Zhenjie, *Member*, *CPSS*, BAI Yuhong, LIU Yiqi, BAN Mingfei
(College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To improve the transmission efficiency of a wireless power transfer (WPT) system, its structural parameters were optimized. Considering the low efficiency and poor comprehensiveness of the traditional optimization methods when designing the WPT system's structural parameters, a parameter optimization model for an SS-type WPT system was established to determine the optimization parameters. On this basis, a structural parameter optimization method for the WPT system was proposed, which integrated orthogonal experiments, finite element simulation and improved particle swarm optimization-backpropagation neural network algorithm. Experimental results show that the average error between the predicted and experimental values was 4.3%, indicating that the proposed optimization method is reasonable, feasible and of reference significance for the structural parameter optimization of WPT systems.

Keywords: Wireless power transfer (WPT); particle swarm optimization algorithm; neural network; structural parameter optimization

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术[1-2]是指通过发射端将电能转化为磁场能量、电场能量、激光、超声波等其他类型的能量，被接收端接收后再转化为电能的 1 种无接触的能量传输技术。如今，随着工业生产和日常生活中各种各样耗电设备的增多，能够增强耗电设备灵活性和便利性的 WPT 技术的应用范围也逐渐扩大。2007 年，Kurs 等[3]使用谐振式 WPT 技术点亮了 1 颗 2 m 远处的灯泡，开辟了新的 WPT 系统研究方向。随着 WPT 技术的应用范围逐渐扩大，WPT 系统参数设计与优化的相关研究也越发重要。2012 年，李阳等[4]分析了谐振式 WPT 系统中影响传输功率和效率的因素，为提高无线电能传输功率和效率提供了参考；2022 年，王展等[5]提出以平均功效积作为

收稿日期：2024-02-04；**修回日期**：2024-03-14；**录用日期**：2024-03-24；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572023CT15)；国家自然科学基金资助项目(52107001)
This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant 2572023CT15; National Natural Science Foundation of China under the grant 52107001

优化目标的谐振网络参数设计方法，提升了 LCC-S 型 WPT 系统在全功率范围下的整体输出特性；2023 年，张智翔等[6]基于理论计算，采用穷举法分析线圈参数对无线充电系统抗偏移性能的影响；李阳等[7]针对无人机的轻量化需求，对无线充电耦合机构的接收端质量、抗偏移性能和传输能效同时进行优化；2024 年，徐先峰等[8]在具有空间约束的情况下设计优化了 1 款应用于电动汽车的无线充电系统磁耦合机构。但是，传统的 WPT 系统参数设计方法十分依赖设计者的知识储备与设计经验，不仅效率低下，也很容易陷入局部最优解。随着 WPT 系统应用场景的日益增多，该设计方法也越来越难以满足 WPT 系统参数设计的多样性需求和数量需求，人们开始尝试使用智能算法来部分代替设计人员的工作。2019 年，Otomo 等[9]使用遗传算法优化了双面绕组线圈无线电能传输磁心的形状，使发射和接收线圈之间的耦合系数达到最大；2023 年，谭平安等[10]提出 1 种组合串绕六边形线圈耦合机构的设计思路，并运用遗传算法实现了其线圈参数的自适应优化；2024 年，Chen 等[11]使用迁移学习设计了 1 种基于钳位电路的感应式能量传输系统，具有很强的耦合系数变化抵抗力。

智能算法通过分析和处理数据的方式模仿和扩展人类智能，实现各种各样的复杂任务和功能，在各个领域都能产生重大的影响和作用。近年来，关于粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法[12]、反向传播 BP(back propagation)神经网络[13-14]等智能算法的研究与应用蓬勃发展，这些应用也给 WPT 系统的结构参数优化提供了新的解决思路。2020 年，杨建[15]使用改进粒子群优化 IPSO (improved particle swarm optimization)算法完成了无线电能传输系统功率和效率同步频率跟踪，提高了过耦合运行状态下无线电能传输负载端接收功率及效率；Choi 等[16]应用强化学习算法来寻找 WPT 系统中发射线圈和接收线圈之间具有最佳耦合系数的铁磁磁心结构。2021 年，尹煌飞等[17]利用 PSO 算法对谐振式 WPT 系统的传输效率进行优化；闻枫等[18]使用改进的 BP 神经网络对接收线圈的最优半径随线圈参数变化的规律进行拟合，精确预测了在不同影响参数下接收线圈的最优半径。2023 年，Zhao 等[19]提出了 1 种基于 PSO 算法的新的谐振式 WPT 系统设计方法，旨在获得特定的频带。

在上述研究的基础上，为了提高 WPT 系统结构参数设计优化的效率和可靠性，降低人为因素的影响，本文提出 1 种新型的 WPT 系统结构参数优化方法。该方法综合正交试验、有限元仿真及 IPSO-BP 算法，首先使用正交试验方法设计有代表性的待优化参数的组合，然后对这些参数组合进行仿真，再基于仿真数据用神经网络拟合其输入输出，用于简化并替代复杂的有限元仿真，最后基于神经网络模型搜索全部的可行解空间，将得出的最佳参数设计组合作为优化结果。该方法保证了 WPT 系统结构参数优化的高效性与可靠性。

1　WPT 系统参数优化模型

WPT 系统的基础组成部分包括电源、逆变器、双端补偿网络、磁耦合机构、整流器和负载。为了简化分析，选取串串 SS(series-series)型 WPT 系统作为研究对象，基于消去了逆变器和整流器的简化电路模型对系统的传输特性进行分析，确定各个参数对系统运行效率的影响。SS 型 WPT 系统电路模型如图 1 所示。图中：u_0 为高频交流电源；R_0 为输入电路简化部分等效电阻；R_1、R_2 分别为发射端和接收端线圈电阻；L_1、L_2 分别为发射端、接收端线圈电感；C_1、C_2 分别为发射端、接收端耦合电容；i_1、i_2 分别为发射端、接收端线圈电流；R_{L} 为负载等效电阻；M 为发射端、接收端线圈之间的互感。

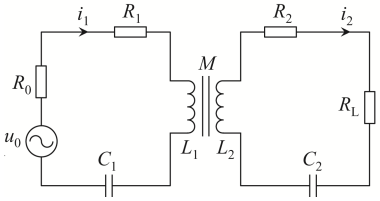


图 1　SS 型 WPT 系统电路

Fig. 1 Circuit of SS-type WPT system

由基尔霍夫电压定律可得

$$u_0+\mathrm{j}\omega Mi_2=\left(R_0+R_1+\mathrm{j}\omega L_1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}\right)i_1 \tag{1}$$

$$\mathrm{j}\omega Mi_1=\left(R_2+R_\mathrm{L}+\mathrm{j}\omega L_2+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}\right)i_2 \tag{2}$$

式中，ω 为 WPT 系统的角频率，$\omega=2\pi f$。

为使 WPT 系统运行效率最优，需要使其达到谐振状态。此时有 $\mathrm{j}\omega L_1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}=\mathrm{j}\omega L_2+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}=0$，则

$$u_0+\mathrm{j}\omega Mi_2=(R_0+R_1)i_1 \tag{3}$$

$$\mathrm{j}\omega Mi_1=(R_2+R_\mathrm{L})i_2 \tag{4}$$

从而得到发射端、接收端的线圈电流模值分别为

$$I_1=\frac{(R_\mathrm{L}+R_2)u_0}{(R_0+R_1)(R_\mathrm{L}+R_2)+(\omega M)^2} \tag{5}$$

$$I_2=\frac{\omega Mu_0}{(R_0+R_1)(R_\mathrm{L}+R_2)+(\omega M)^2} \tag{6}$$

当系统处于谐振状态时，输入、输出功率分别为

$$P_\mathrm{in}=U_0I_0=\frac{(R_\mathrm{L}+R_2)u_0^2}{(R_0+R_1)(R_\mathrm{L}+R_2)+(\omega M)^2} \tag{7}$$

$$P_\mathrm{out}=I_2^2R_\mathrm{L}=\frac{(\omega Mu_0)^2R_\mathrm{L}}{[(R_0+R_1)(R_\mathrm{L}+R_2)+(\omega M)^2]^2} \tag{8}$$

式中，U_0 为交流电源的电压模值。

系统的传输效率为

$$\eta=\frac{P_\mathrm{out}}{P_\mathrm{in}}=\frac{\omega^2M^2R_\mathrm{L}}{(R_\mathrm{L}+R_2)[(R_0+R_1)(R_\mathrm{L}+R_2)+(\omega M)^2]} \tag{9}$$

常规 WPT 系统的工作频率 ω 由行业标准决定，而 R_L 与 R_0 取决于蓄电池或工作电路的理化性质，故认定二者为常量。因此 WPT 系统效率和输出功率优化的主要相关参数包括 M、R_1 和 R_2，这 3 个参数的取值均与磁耦合机构的结构设计直接相关。因为 R_1 和 R_2 数值一般较小，相比于 R_0 与 R_L 可以忽略，故系统传输效率的表达式可以简化为

$$\eta\approx\frac{\omega^2M^2}{R_0R_\mathrm{L}+\omega^2M^2}=1-\frac{R_0R_\mathrm{L}}{R_0R_\mathrm{L}+\omega^2M^2} \tag{10}$$

由式(10)可知，在 R_0、R_L 及 ω 为定值的情况下，最大化 WPT 系统的传输效率 η 可以大致等效为最大化互感 M。

2 WPT 系统结构设计参数优化方法

2.1 WPT 系统结构设计参数优化方法流程

WPT 系统结构设计参数优化方法综合了正交试验、有限元仿真及上述 IPSO-BP 算法，具体流程如下。

(1)基于 WPT 系统的结构设计参数选取合适的正交表，并基于正交表生成合适的样本输入集，然后通过有限元仿真软件仿真计算样本输入集对应的 WPT 系统电气参数，作为样本输出集。

(2)基于样本集，使用 IPSO-BP 算法创建并训练神经网络模型，建立 WPT 系统在结构参数设计阶段的优化模型。

(3)基于神经网络模型，以最大化互感为优化目标，在结构设计参数的取值范围内进行网格搜索，最终找到最优的结构设计参数。

2.2 正交试验与有限元仿真

正交试验法是 1 种数理统计方法，基于特定的“正交表”从全面试验中挑选出部分具备“均匀分散、整齐可比”性质的有代表性的点来安排多因素实验，并基于实验结果来分析数据特征，找出最优或较优的解决方案。

有限元仿真法是 1 种离散化的数值计算方法，通过将关于某一特定结构的连续的物理问题转换为离散化的问题，并求解离散问题的解来得到连续的物理问题的解。该方法可以对复杂结构进行准确的数值模拟，助力设备的分析与设计。

2.3 IPSO-BP 算法

2.3.1 IPSO-BP 算法流程

IPSO-BP 算法是指使用 IPSO 算法作为 BP 神经网络的学习训练函数，来优化构建神经网络的 1 种方法。在 BP 神经网络的训练过程中，连接权重与阈值的随机初始化会导致每次训练的结果之间存在误差，并且神经网络训练常用的梯度下降方法

存在收敛速度慢、易收敛至局部极小值的缺点，难以达到全局最优。使用 IPSO 算法来优化 BP 神经网络的连接权重和阈值，可以提高神经网络的稳定性、预测精度和泛化能力。具体算法流程如图 2 所示。

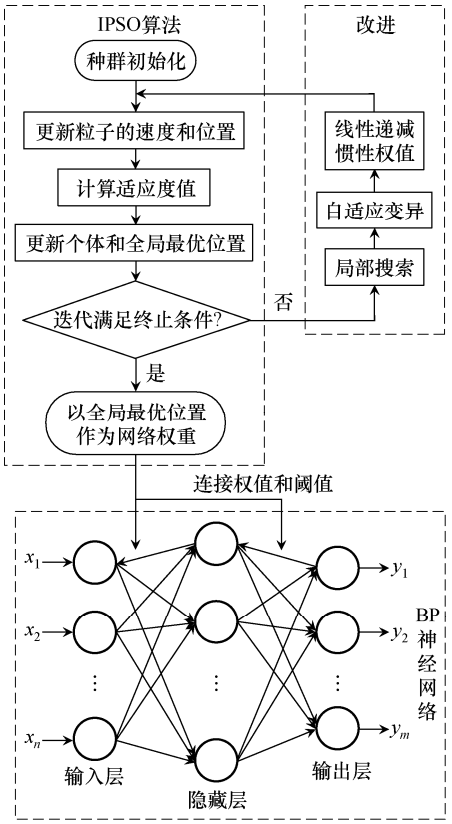


图 2　IPSO-BP 算法流程

Fig. 2 Flow chart of IPSO-BP algorithm

2.3.2　BP 神经网络模型

神经网络是 1 种运算模型，不需要事先计算出精确的数学方程，而是通过基于样本数据的迭代训练过程来拟合输入数据与输出数据之间的某种映射关系。其中，BP 神经网络是如今应用最广泛的神经网络结构之一。

BP 神经网络的结构如图 3 所示，其一般包括输入层、隐藏层、输出层 3 层网络结构，使用误差反向传播算法来训练网络。其输入层节点数 m 和输出层神经元节点数 n 由实际问题决定，而隐藏层节点数 l 由经验公式决定，即

$$l=\sqrt{m+n}+\alpha \tag{11}$$

式中，α 为 1~10 之间的整数。

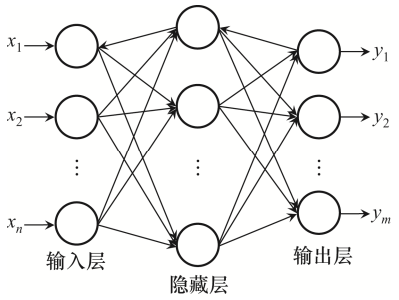


图 3　BP 神经网络结构

Fig. 3 Structure of BP neural network

使用包含磁耦合机构结构参数与互感的样本数据进行 BP 神经网络训练，就可以建立起拟合二者映射关系的计算模型。BP 神经网络具有优良的多维函数映射能力和高效的计算能力，是参数优化模型的优秀载体。

2.3.3　IPSO 算法

PSO 算法的基本思想是在可能的解空间内随机选取一定数量的初始解粒子，然后根据适应度目标函数计算各个解粒子的适应度，记录每个解粒子的历史最优解位置和全部解粒子的全局最优解位置，并基于以上记录的解粒子位置迭代更新各个解粒子的当前位置，直到有解粒子收敛到具有最优适应度的位置或迭代次数达到上限。

设在 N 维空间中共有 M 个粒子，粒子 i 的位置记为 $X_i=(x_{i1}, x_{i2},\cdots, x_{iN})$，粒子 i 的速度记为 $V_i=(v_{i1}, v_{i2},\cdots, v_{iN})$，粒子 i 的历史最优位置记为 $p_{\text{best},i}=(p_{i1}, p_{i2},\cdots, p_{iN})$，粒子群的全局最优位置记为 $g_{\text{best}}=(g_1, g_2,\cdots, g_N)$。通常需要将粒子的位置和速度限定在一定范围内，设位置的限制范围为$[X_{\min}, X_{\max}]$，速度的限制范围为$[V_{\min}, V_{\max}]$。

粒子 i 的第 n 个维度的速度更新公式为

$$v_{in}=wv_{in}+c_1r_1(p_{in}-x_{in})+c_2r_2(g_n-x_{in}) \tag{12}$$

式中：w 为速度惯性权重；c_1、c_2 为学习因子；r_1、r_2 为取值范围为[0, 1]的 2 个随机数。

粒子 i 的第 n 个维度的位置更新公式为

$$x_{in}=x_{in}+v_{in} \tag{13}$$

然而，PSO 算法本身存在容易陷入局部最优解、在后期收敛速度慢、搜索精度不高等问题，仍

有改进的余地。本文使用的改进方法如下。

(1)自适应变异。设定 1 个变异概率 k，在粒子每次迭代更新完之后，以概率 k 对粒子的位置作随机变异，并计算适应度值。自适应变异可以增强算法的全局搜索能力，降低粒子陷入局部最优解的风险。

(2)线性递减惯性权重。惯性权重随迭代次数递减，较大的权重能增强迭代前期的全局搜索能力，较小的权重能提高迭代后期的收敛精度。

(3)局部搜索。在每次迭代找到当前的全局最优解 g_{best} 后，在最优解点附近占整体可行解空间一定比例 r 的局部搜索空间内随机取点，计算这些点的适应度值，从而更新 g_{best}。局部搜索能提高算法的搜索精度。

2.4 网格搜索

网格搜索是指通过指定参数的候选值列表和循环遍历，对所有可能的参数组合进行穷举搜索，然后对每种参数组合的性能进行评价，表现最好的参数组合就是最终的结果。该方法具有简单直观、能保证在指定的参数范围内找到最佳的参数组合的优点。

3 仿真分析

3.1 正交试验与有限元仿真

磁耦合机构的基本组分包括发射线圈、接收线圈和电磁屏蔽结构，其电磁特性是影响 SS 型 WPT 系统传输效率的主要因素。其构型与结构设计参数数量繁多且相互影响，大大增加了设计工作的复杂性与计算量。为简化分析，将磁耦合机构的构型设置为 2 个中心对准的带方形屏蔽背板的圆形线圈，其侧视图、俯视图及仿真实例如图 4 所示。

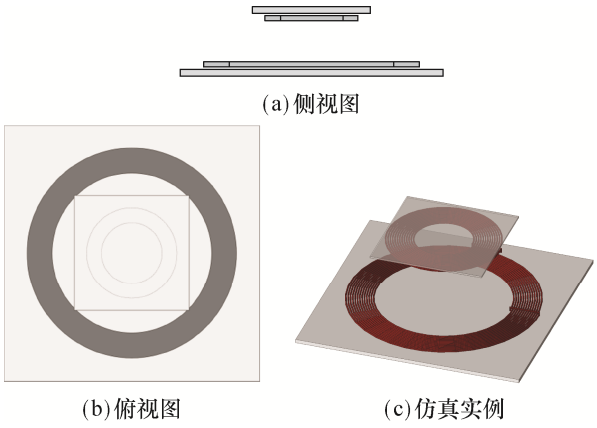


图 4 磁耦合机构的结构

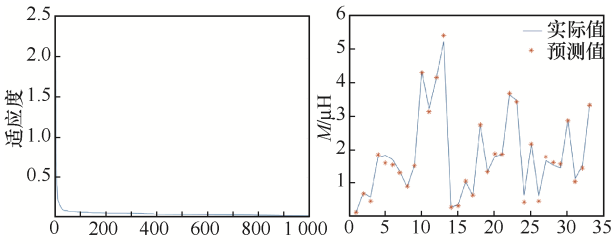
Fig. 4 Structure of magnetic coupling mechanism

基于此基本结构设计磁耦合机构的相关仿真参数，磁耦合机构中待优化的结构参数设置为接收线圈的匝数 N_R 与内径 r_R，以及发射线圈的匝数 N_T 与内径 r_T，其具体参数设置如下。设定 4 个待优化参数的可行取值范围分别为[5, 12]、[8, 40]、[5, 12]、[72, 120]，其中 r_R 与 r_T 的单位为 mm。将 r_R 的可行取值范围分别划分为 2 个子区域：[8, 24]和(24, 40]；r_T 的可行取值范围分别划分为 3 个子区域：[72, 88)、[88, 104)和[104, 120]。对 r_R 和 r_T 的子区域进行完全组合，得到总计 6 个子区域。在 SPSSAU 网站[20]获取 4 因素 8 水平的正交表 $L_{64}(8^4)$，分别对 6 个子区域基于正交表进行参数设计，得到 1 个包含 384 组参数组合的仿真参数设计表作为样本集的输入。在 Ansys Maxwell 3D 有限元仿真软件[21]中，使用涡流场求解器，工作频率设置为 85 kHz，屏蔽背板的材质设置为铁氧体，线圈导线的材质设置为 0.05 mm×1 000 股规格的利兹铜线，接收端的屏蔽背板大小为 159 mm×159 mm×3 mm，发射端的屏蔽背板大小为 318 mm×318 mm×6 mm，屏蔽背板与线圈间的气隙为 0.9 mm，导线直径为 2.2 mm，每匝导线间的中心距离为 3.15 mm，两线圈间的距离为 93 mm，计算互感 M 作为样本集的输出。

3.2 IPSO-BP 网络训练

设置 BP 神经网络输入层、隐藏层和输出层节点数分别为 4、12 和 1，以 BP 神经网络的连接权重和阈值作为粒子位置，预测值的均方根误差为适应度函数，则 IPSO 算法的粒子维度为 73，设置粒子个数为 100，粒子的位置范围为[−3, 3]，粒子的速度范围为[−0.5, 0.5]，最大训练次数为 1 000，个体学习因子与社会学习因子为 2，惯性权重为从 0.9 线性衰减到 0.4，自适应变异概率为 0.15，局部搜索空间占整体可行解空间的比例为 0.01。对样本集进行归一化，使用正交试验得到的仿真数据作为样

本集，创建神经网络并使用 IPSO-BP 算法进行训练，实现结构参数与线圈互感间的非线性映射。然后从中随机选取 33 组参数组合，对比这 33 组参数的网络预测值与仿真实际值，以此来验证神经网络的映射精度。网络训练结果如图 5 所示，其中，训练误差收敛曲线如图 5(a)所示，表明训练误差在训练前期快速下降，并且其下降过程在训练后期误差值较低时也不会停止；图 5(b)为网络精度验证结果，结果表明神经网络的预测输出与样本真值间的误差较小，可以较好地拟合仿真样本中的参数映射关系。



(a) 训练误差收敛曲线　　(b) 网络精度验证

图 5　网络训练结果

Fig. 5 Network training results

3.3 最优参数组合搜索

用神经网络代替有限元仿真，对待优化参数的全部可行解空间进行网格搜索。优化目标函数可描述为

$$\begin{cases} \max M \\ \text{s.t. } 5 \leqslant N_{\mathrm{R}} \leqslant 12 \\ 5 \leqslant N_{\mathrm{T}} \leqslant 12 \\ 8 \leqslant r_{\mathrm{R}} \leqslant 40 \\ 72 \leqslant r_{\mathrm{T}} \leqslant 120 \\ N_{\mathrm{R}}, N_{\mathrm{T}}, r_{\mathrm{R}}, r_{\mathrm{T}} \in N \end{cases} \tag{14}$$

经过搜索，得到参数 N_{R}、r_{R}、N_{T} 及 r_{T} 在可行范围内的最优参数组合为[12, 40, 12, 102]。

4　实验验证

4.1 实验装置

在通过上述 WPT 系统结构设计参数优化方法得到最优参数组合之后，搭建如图 6 所示的实验装置进行实验验证。

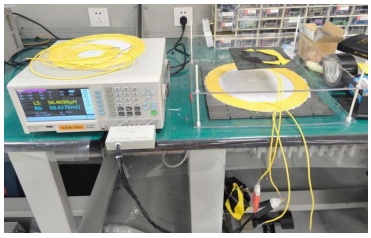


图 6　实验装置

Fig. 6 Experimental device

实验装置中的线圈使用套热缩管的利兹线绕制，屏蔽背板的材质为 PC95 锌锰铁氧体，其结构设计与工作条件均与仿真环境相同，采用胜利仪器的 LCR 数字电桥 VC4092E 测量在最优参数组合下磁耦合机构的互感。实验时，分别测量发射线圈与接收线圈的自感 L_{T} 和 L_{R1} 及短接发射线圈后接收线圈的自感 L_{R2}，互感 M 的计算式为

$$M = \sqrt{L_{\mathrm{T}} \left| L_{R1} - L_{R2} \right|} \tag{15}$$

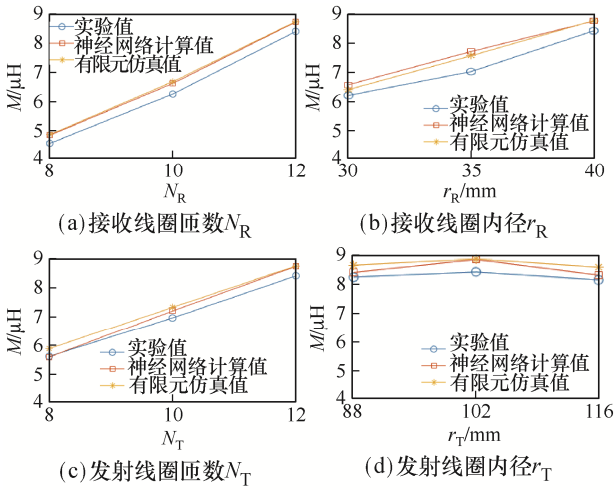
4.2 实验结果

首先，在仿真计算得到的最优参数组合条件 N_{R}=12、r_{R}=40、N_{T}=12 和 r_{T}=102 下，实验测得的互感为 8.449 6 μH，而神经网络的预测值为 8.779 5 μH，预测误差为 3.9%。说明神经网络能够较好地预测磁耦合机构在结构设计参数的可行解空间内的最大互感，初步证明了优化方法的有效性。

然后，分别在 3 个结构参数取最优值的情况下，对剩余的 1 个结构参数变化时的互感 M 的变化情况进行实验测量。其中，N_{R} 的取值范围为{8, 10, 12}，r_{R} 的取值范围为{30, 35, 40}，N_{T} 的取值范围为{8, 10, 12}，r_{T} 的取值范围为{88, 102, 116}。有限元仿真结果、神经网络计算结果和实验结果的对比如图 7 所示。

实验结果表明，神经网络能够很好地拟合有限元仿真的输入输出，并且神经网络计算结果与实验结果的互感数值接近，变化趋势相同。其中，神经网络计算结果与实验结果间的平均误差值为 4.3%，并且在所有参数组合下最大误差均未超过 10%。说明神经网络的计算结果能很好地反映在整体可行解空间内结构参数变化时磁耦合机构的互感变化情况，且对具体互感的预测较为准确，验证

了参数优化方法的合理性和可行性，可以作为参数寻优组合时的参考。



(a)接收线圈匝数N_R (b)接收线圈内径r_R

(c)发射线圈匝数N_T (d)发射线圈内径r_T

图 7 互感变化趋势

Fig. 7 Trend of mutual inductance

5 结语

本文提出了 1 种基于 IPSO-BP 算法的 WPT 系统结构参数优化方法，实现了对 WPT 系统结构参数的高效优化。通过建立 SS 型 WPT 系统的电路模型，推导出对 WPT 系统传输效率影响最大的电气参数为互感。利用以上分析结果，基于磁耦合机构仿真模型进行正交试验，结合 IPSO-BP 算法，使 BP 神经网络拟合 WPT 系统结构参数与互感间的非线性映射关系，并使用网格搜索的方法找到使互感最大的结构参数组合，最后通过实验验证了优化方法的正确性和可行性。该优化方法对于提升 WPT 系统的传输效率和系统参数优化具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 贾金亮, 闫晓强. 磁耦合谐振式无线电能传输特性研究动态[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4217-4231.
Jia Jinliang, Yan Xiaoqiang. Research tends of magnetic coupling resonant wireless power transfer characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4217-4231. (in Chinese)

[2] Dai Zhongyu, Wang Junhua, Zhou Haikuo, et al. A review on the recent development in the design and optimization of magnetic coupling mechanism of wireless power transmission [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4368-4381.

[3] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.

[4] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 7-11.
Li Yang, Yang Qingxin, Yan Zhuo, et al. Characteristic of frequency in wireless power transfer system via magnetic resonance coupling [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 7-11. (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] 张智翔, 张宣. 无线电能传输抗偏移线圈的设计方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 157-165.
Zhang Zhixiang, Zhang Xuan. Design method of anti-offset coil for wireless power transmission [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 157-165. (in Chinese)

[7] 李阳, 安张磊, 孟航, 等. 基于双耦合线圈的无人机轻量化无线充电耦合机构设计[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 168-175.
Li Yang, An Zhanglei, Meng Hang, et al. Design of lightweight wireless charging coupling mechanism for UAVs based on dual coupling coils [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 168-175. (in Chinese)

[8] 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)

[9] Otomo Y, Igarashi H. 3-D topology optimization of magnetic cores for wireless power transfer with double-sided winding coils [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 60: S115-S123.

[10] 谭平安, 许文浩, 上官旭, 等. 无线电能传输系统中组合串绕六边形线圈的互感建模及参数优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2299-2309.
Tan Ping'an, Xu Wenhao, Shangguan Xu, et al. Mutual inductance modeling and parameter optimization of wireless power transfer system with combined series-wound hexagonal coils [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2299-2309. (in Chinese)

[11] Chen Yang, Zhang Zeheng, Yang Bin, et al. A clamp circuit-based inductive power transfer system with reconfigurable rectifier tolerating extensive coupling variations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 1942-1946.

[12] Houssein E H, Gad A G, Hussain K, et al. Major advances in particle swarm optimization: Theory, analysis, and application [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 63: 100868.

[13] 张驰, 郭媛, 黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 57-69.
Zhang Chi, Guo Yuan, Li Ming. Review of development and application of artificial neural network models [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 57-69. (in Chinese)

[14] Ali A, Mohd Yasin M N, Jusoh M, et al. Optimization of wireless power transfer using artificial neural network: A review [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(2): 651-659.

[15] 杨建. 干扰因素下无线电能传输频率控制算法研究[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 168-175.
Yang Jian. Research on frequency control algorithm for wireless power transmission under interference factors [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 168-175. (in Chinese)

[16] Choi B G, Lee E S, Kim Y S. Optimal structure design of ferromagnetic cores in wireless power transfer by reinforcement learning [J]. IEEE Access, 2020, 8: 179295-179306.

[17] 尹煌飞, 程博, 郭桂芳, 等. MCR-WPT 系统传输特性研究及传输效率优化[J]. 电力电子技术, 2021, 55(10): 117-120.
Yin Huangfei, Cheng Bo, Guo Guifang, et al. Research on transmission characteristics of MCR-WPT system and optimization of transmission efficiency [J]. Power Electronics, 2021, 55(10): 117-120. (in Chinese)

[18] 闻枫, 荆凡胜, 李强, 等. 基于改进 BP 神经网络的无线电能传输系统接收线圈参数优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 412-422.
Wen Feng, Jing Fansheng, Li Qiang, et al. Optimization on receiver parameters of wireless power transfer system based on improved BP neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 412-422. (in Chinese)

[19] Zhao Yue, Shen Yanxia. Frequency-band design and parameter optimization of MCRWPT system based on particle swarm optimization [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(3): 2027-2041.

[20] The SPSSAU Project (2024). SPSSAU: Version 24.0 [Z/OL]. QingSi Technology Ltd., 2016. (2024-01-04)[2024-01-26]. https://www.spssau.com.

[21] 姜建国, 曾昭淦, 付月豪, 等. 基于 ANSYS Electronics Desktop/Maxwell3D 的 MCR-WPT 系统仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(6): 634-639.
Jiang Jianguo, Zeng Zhaogan, Fu Yuehao, et al. MCR-WPT system simulation based on ANSYS Electronics Desktop/Maxwell3D [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(6): 634-639. (in Chinese)



李振杰

作者简介：

李振杰(1988—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：多场景无线电能传输技术及其应用等。E-mail：lizhenjie0725@163.com。

白玉鸿(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：无线充电技术。E-mail：2022111829@nefu.edu.cn。

刘一琦(1984—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力系统。E-mail：ee_617@nefu.edu.cn。

班明飞(1988—)，男，博士，副教授。研究方向：电动汽车技术，微电网技术等。E-mail：banmingfei@nefu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)