

# 基于改进粒子群算法的无线充电系统参数优化

王成亮<sup>1</sup>, 潘志新<sup>1</sup>, 翟学锋<sup>1</sup>, 肖宇华<sup>2</sup>, 刘琦<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 基于LCC-S型补偿拓扑的磁耦合谐振式无线充电(MCR-WPT)系统, 建立其数学模型, 从工作频率、补偿电感和负载阻抗三个方面分析其对系统传输性能的影响。针对目前高阶补偿拓扑的参数难以达到最优配置的问题, 以提高系统的传输效率为优化目标, 以输出功率为约束条件, 建立其优化模型, 对高阶非线性参数最优配置问题进行优化。为避免优化结果陷入局部最优, 提出一种基于种群进化的混合粒子群优化(HPSO)算法, 并基于LCC-S型无线电能传输(WTP)系统优化模型对传统的粒子群算法和改进的算法进行仿真对比。结果表明改进的粒子群算法可有效地避免优化结果陷入局部最优。最后, 搭建了无线充电系统实验平台, 对系统的工作频率特性和负载阻抗特性进行实验分析, 实验结果与理论分析和仿真优化结果一致。

**关键词:** 无线电能传输; 补偿拓扑; 粒子群算法; 非线性优化

**中图分类号:** TM724 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24024

## Parameter Optimization of Wireless Charging System Based on Improved PSO Algorithm

WANG Chengliang<sup>1</sup>, PAN Zhixin<sup>1</sup>, ZHAI Xuefeng<sup>1</sup>, XIAO Yuhua<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, Jiangsu, China)

**Abstract:** The mathematical model of magnetic coupled resonant wireless power transfer (MCR-WPT) system based on LCC-S compensation topology was established. Meanwhile, the influence on the transmission performance of the system was analyzed from three aspects: operating frequency, compensating inductance and load impedance. Aiming at the problem that the parameters of higher-order compensation topology are difficult to achieve the optimal configuration, taking improving the transmission efficiency of the system as the optimization objective, and taking output power as the constraint condition, the optimization model was established to optimize the optimal configuration of high-order nonlinear parameters. A hybrid particle swarm optimization (HPSO) algorithm based on population evolution was proposed to avoid the optimization result falling into local optimum. The traditional PSO algorithm and the improved algorithm were simulated and compared based on the LCC-S type wireless power transfer (WTP) system optimization. The result shows that the improved HPSO algorithm can effectively avoid the optimization result falling into local optimum. Finally, the experimental platform of WPT system was built, and the operating frequency characteristics and load impedance characteristics of the system were analyzed experimentally. The experimental results are consistent with the theoretical analysis and simulation optimization results.

**Key words:** wireless power transmission(WTP); compensation topology; particle swarm optimization(PSO); nonlinear optimization

与传统有线充电方式相比, 无线电能传输(wireless power transfer, WPT)避免了充电接口反复插拔, 更加灵活安全。近年来, 无线电能传输技术快速发展, 在功率、距离和效率等传输性能上不断突破, 在电动汽车、手机充电和植入性医

疗设备等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。磁耦合谐振式无线电能传输(magnetic coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)系统因具备大功率、高效率的优点, 近年来被广泛研究<sup>[4-7]</sup>。该系统中原边、副边线圈均需要补偿拓扑以提高传

**基金项目:** 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020008)

**作者简介:** 王成亮(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: 15905166871@126.com

输性能,而补偿拓扑的选择与参数优化均影响系统的传输性能。文献[8]分析了传统的串联型(S型)和并联型(P型)为组合的低阶补偿拓扑,提出了无线充电系统低阶补偿拓扑参数优化的方法。文献[9]采用遗传算法对无线充电系统的低阶补偿拓扑参数进行了参数优化配置,实现了满足电压增益下的最远传输距离,但对系统的最低传输效率并未做出限制。文献[10]采用传统的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法以S-S型补偿拓扑为对象,以系统的传输效率为优化目标,同时考虑了传能线圈的趋肤效应与临近效应。文献[11]通过对LCC-S型补偿网络参数配置和工作频率设置,实现了系统在不同工作模式下可以实现恒压或恒流输出的特性,但对系统的传输功率并未做出特定约束。

与低阶拓扑相比,高阶拓扑可变参数更多,在其数学模型中呈现出非线性特点,这为系统的参数设计与优化配置带来了一定的困难。在以往人工设计的过程中很难得到系统最优的参数配置,尤其是在含有多种约束条件的情况下,传统的参数配置方法往往会捉襟见肘,无法达到最优配置。因此,以LCC-S型高阶补偿拓扑为研究对象,对其进行建模分析,并提出适用于高阶非线性模型的参数优化算法,使得系统传输性能达到最优。

### 1 LCC-S型WPT系统建模

LCC-S型谐振拓扑的等效电路如图1所示。图1中 $U_{IN}$ 为谐振网络的输入电压; $L_1, L_2$ 分别为一次侧发射线圈与二次侧接收线圈的自感; $R_1, R_2$ 分别对应两个线圈的寄生电阻; $L_p$ 为一次侧补偿电感,作为可调节的关键参数,可用以调节系统的输入电流; $R_p$ 为补偿电感的寄生内阻; $C_p$ 为一次侧补偿电容; $C_1, C_2$ 分别为一次网络和二次侧网络的谐振电容; $M$ 为线圈的耦合互感; $R_L$ 为负载侧等效电阻,负载等效内阻与电路的匹配程度影响着系统的传输效率。

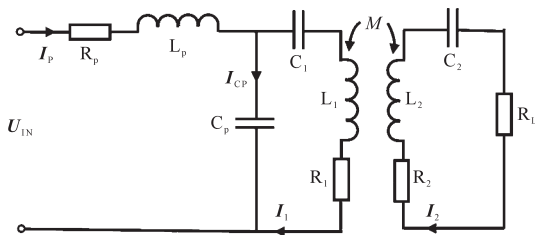


图1 LCC-S型WPT系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of LCC-S WPT system

根据KVL方程,求解得系统阻抗为

$$\begin{cases} Z_s = j\omega L_2 + 1/(j\omega C_2) + R_2 + R_L \\ Z_r = \frac{-j\omega M I_2}{I_1} = \frac{-j\omega M}{I_p} \cdot \frac{j\omega M I_1}{Z_s} = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \\ Z_{IN} = R_p + j\omega L_p + \frac{1/(j\omega C_p)[1/(j\omega C_1) + R_1 + j\omega L_1 + Z_r]}{1/(j\omega C_p) + 1/(j\omega C_1) + R_1 + j\omega L_1 + Z_r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z_s$ 为系统的二次侧阻抗; $Z_r$ 为二次侧在一次侧的反应阻抗; $Z_{IN}$ 为等效为T型网络后系统的输入阻抗。

设系统的谐振频率为 $\omega_0$ ,则有:

$$\begin{cases} \omega_0 L_2 = \frac{1}{\omega_0 C_2} \\ \omega_0 L_p = \frac{1}{\omega_0 C_p} \\ \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = \frac{1}{\omega_0 C_p} \end{cases} \quad (2)$$

在谐振状态下,忽略寄生参数,可得输出功率 $P_{OUT}$ 和传输效率 $\eta$ :

$$P_{OUT} = \frac{(\omega_0^2 L_p M)^2 U_{IN}^2 R_L}{[|Z_{IN}|(R_p + |Z_r|)(R_2 + R_L)]^2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{(\omega_0^2 L_p M)^2 R_L}{|Z_{IN}|[(R_p + |Z_r|)(R_2 + R_L)]^2} \times 100\% \quad (4)$$

与低阶补偿拓扑相比,当元件参数存在一定的偏差时,对系统的输出性能影响不大,可以联合调整发射端处的补偿电感与负载端处阻抗匹配电路参数调节系统的输入输出增益,因而系统工作在谐振点附近时可获得较高的效率。

### 2 系统传输特性分析

基于互感原理建立了无线电能传输系统LCC-S型拓扑的数学模型,下面从频率、阻抗和补偿电感三个方面探究系统的传输特性。参照SAE—J2954车用无线充电标准建立LCC-S型WPT系统仿真模型,各物理量标示在图1中给出,其具体参数设置为: $L_1=70.31 \mu\text{H}, L_2=71.56 \mu\text{H}, R_p=R_1=R_2=0.15 \Omega, R_L=3.6 \Omega, M=11.75 \mu\text{H}, U_{IN}=400 \text{V}$ ,系统谐振频率设置为 $f_0=85 \text{kHz}$ 。

图2为系统工作频率对传输特性的影响曲线。当系统工作在谐振频率附近时,系统工作在全谐振状态,此时损耗最少,传输效率到达最大值(96.25%),传输功率在谐振频率达到极值点(4.25 kW),但并未达到传输功率的最大值,故在进行系统频率参数优化配置时需要兼顾传输效

率和传输功率,在两者之间达到目标要求的平衡。

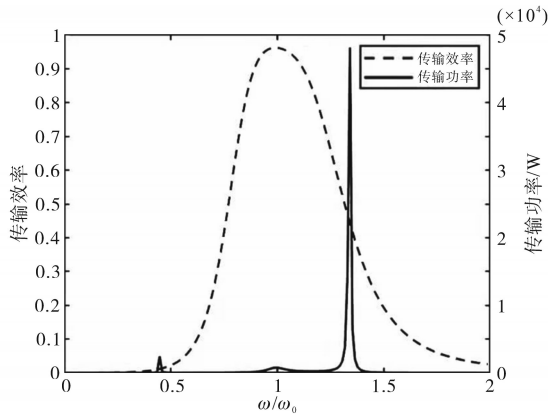


图2 传输特性与工作频率的曲线图

Fig.2 Curves of operating frequency and transmission characteristic

研究系统的补偿电感对传输特性的影响,对于LCC型拓扑网络,系统发射端的补偿电感 $L_p$ 应小于发射线圈的自感 $L_1$ ,在仿真中设置 $L_p = pL_1$  ( $0 < p < 1$ )。根据 $L_p$ 同时调整 $C_p$ 和 $C_1$ 的值,使得系统工作频率稳定在85 kHz并保持在谐振状态,输出功率与传输效率随补偿电感的变化关系如图3所示。从图3可以看出,起初系统的传输效率随补偿电感增加而迅速增加,在达到某一临界值后,传输效率的增加愈发平缓。输出功率在增加到某一临界值后迅速减小,系统存在输出功率最大值。因此,在参数设计时有必要对补偿电感的值进行优化配置,使其满足系统的传输性能。

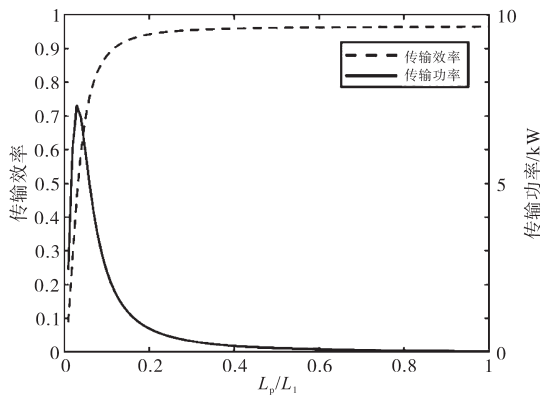


图3 传输特性与补偿电感的曲线图

Fig.3 Curves of compensating inductance and transmission characteristic

在实际的无线充电应用中,由于充电对象的状态时常发生变化,负载阻值常在一定范围内波动。设系统工作在谐振频率,负载 $R_L = 0 \sim 100 \Omega$ ,仿真参数与上文相同,图4为系统在全谐振状态下传输性能随负载阻值变化关系。从图4可以看出,当系统在全谐振状态下时,起初系统的传输效率随负载阻值增大而迅速增加,在效率到达最

大值后,传输效率随负载阻值的增加缓慢降低;与之相反,起初系统的输出功率随负载阻值增大迅速下降,这是因为当系统工作在谐振频率且忽略寄生参数的影响,输出可以看作恒压源,所以输出功率与负载阻值的平方近似呈现反比。

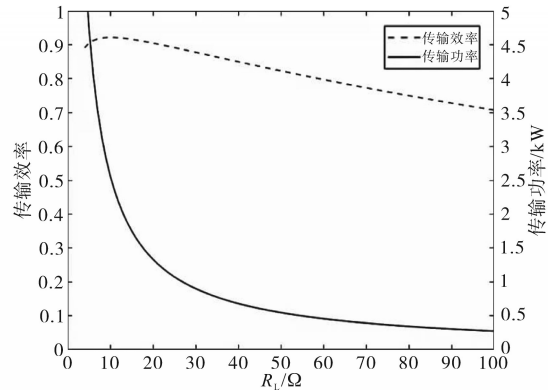


图4 传输特性与负载阻值的曲线图

Fig.4 Curves of load resistance and transmission characteristic

### 3 参数优化配置

#### 3.1 HPSO算法原理

粒子群算法来源于生物种群协作捕食原理,该仿生算法通过粒子间信息共享,不断通过最佳适应度的迭代来寻找求解域的最优解,具有计算简单、收敛迅速等优点<sup>[12-14]</sup>。算法对较高难度的高阶非线性优化问题具有较大优势,通过将粒子随机分布于寻优空间,在寻优迭代过程中,每个粒子到最优解的距离视作每个粒子对函数的适应度。粒子的速度更新公式如下式所示:

$$v_i(t+1) = \lambda v_i(t) + c_1 r_1 [p_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [g_i(t) - x_i(t)] \quad (5)$$

式中: $t$ 为迭代数; $v_i, x_i$ 分别为第 $i$ 个粒子的速度和位置; $p_i$ 为第 $i$ 个粒子的个体历史最优解; $g_i$ 为当前全局最优解; $r_1, r_2$ 为随机数,一般为 $0 \sim 1$ ; $\lambda, c_1, c_2$ 分别为速度惯性因子、局部因子和全局因子,为可调参数,该参数的设置合理性是算法能否收敛至全局最优的关键。

采用传统的PSO算法在处理LCC-S型系统最优参数配置问题时容易陷入局部最优<sup>[15]</sup>。针对这一问题,提出了改进的混合种群粒子群优化(hybrid particle swarm optimization, HPSO)算法。该算法在传统的随机权重粒子群算法的基础上,引入小生化种群优化策略,将局部求解域中相似的粒子划入一个小生境,每次迭代时不同的小生境相对独立搜索寻优,迭代一定次数之后,通过小生化种群进化策略将处在适应度较低的种群

(可行解)淘汰去除,这样的策略可以避免粒子快速聚集,避免陷入局部最优,其迭代示意图如图5所示。

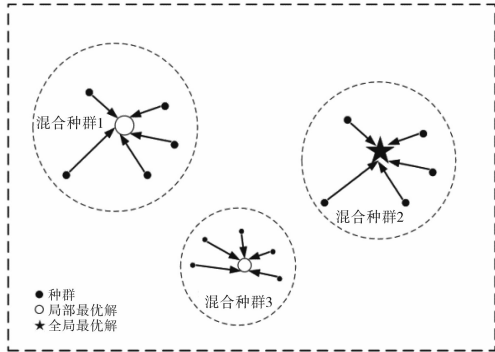


图5 HPSO算法迭代策略

Fig.5 HPSO algorithm iteration strategy

不同于PSO, HPSO在粒子在速度更新过程中引入了局部社会因子。改进的HPSO算法速度更新公式如下式所示:

$$v_j(t+1) = \lambda v_j(t) + c_1 r_1 [p_j(t) - x_j(t)] + c_2 r_2 \{ q \cdot [g_j(t) - x_j(t)] + (1-q) \cdot [p_{lj}(t) - x_j(t)] \} \quad (6)$$

式中: $p_{lj}$ 为局部最优解; $q$ 为群体因子。

式(6)中,每个粒子都有各自的局部最优解,可以理解为以该粒子为中心, $R$ 为半径的范围内包含的所有粒子中最优粒子的位置。同时,引入群体因子 $q$ ,表示群体因子中的全局因子与局部因子的占比,比例越高表示粒子的全体性越高。 $R$ 的取值与全体粒子的平均密度有关。局部最优解 $p_{lj}$ 可用下式表示:

$$p_{lj} = \text{avg} \{ \min [F(p_i)] \mid \|p_i - p_j\| \leq R \} \quad (7)$$

式中: $F(p_i)$ 为以第 $j$ 个粒子为中心、以 $R$ 为半径的范围内粒子的适应度。

### 3.2 基于改进PSO算法的参数优化

采用混合HPSO算法对谐振式LCC-S型无线充电系统进行参数优化配置。在工程实际中,在既定的尺寸约束下,实现对WPT系统传输功率或者传输效率的指标的优化,其具体过程如下:

1)建立目标函数。根据LCC-S型WTP系统的数学模型,将系统的传输效率作为优化目标,即

$$\text{Max}(f) = \frac{|I_2|^2 R_L}{\text{real}(U_{IN} \cdot I_p^*)} \quad (8)$$

2)选取优化变量。对谐振式LCC-S型WPT系统传输特性分析可知,系统的频率、负载阻抗、补偿电感对输出功率和传输效率有着显著的影响,故选取上述三个参数作为优化变量,即

$$x = [\omega \ R_L \ L_p]^T \quad (9)$$

3)建立约束条件。确定系统输出功率的最小值 $P_{\min}$ 和最大值 $P_{\max}$ ;考虑到发射线圈的绝缘问题,设传能线圈可承受的最大电压为 $V_{L-\max}$ ,则约束条件为

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ |j\omega L_1 I_1| - V_{L_1-\max} \leq 0 \\ |j\omega L_2 I_2| - V_{L_2-\max} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 仿真分析

在PSO和HPSO中,设置种群数 $N=500$ ,迭代次数为 $D=200$ ,自适应惯性权重 $\lambda_{\max}=0.8, \lambda_{\min}=0.5, c_1=c_2=1.5$ 。在HPSO中,小生半径 $R=0.3(x_{\max}-x_{\min})$ 。设置传输功率不小于1 kW为约束条件,PSO和HPSO算法的适应度(传输效率)曲线如图6所示。

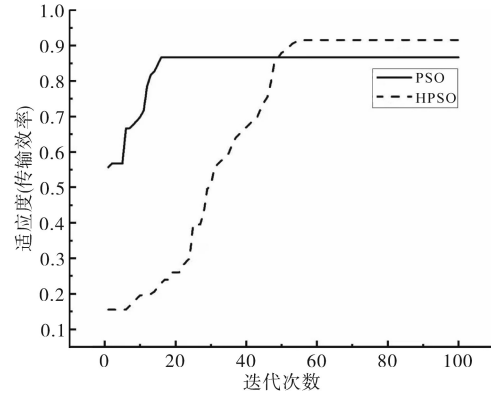


图6 PSO和HPSO的收敛曲线

Fig.6 Convergence curves of PSO and HPSO

从图6可知,PSO算法迭代速度较快,在迭代次数到达16次时收敛到最大适应度(86.67%),HPSO算法迭代速度则较慢,在第56次迭代时收敛到最大适应度(91.51%)。最优适应度下系统的优化参数为: $f=85.3 \text{ kHz}, L_p=28.15 \mu\text{H}, R_L=10.15 \Omega$ 。考虑到算法的种群分布的随机性,分别对两种算法进行5次计算,其Matlab中设置时钟记录收敛到最大适应度的次数,将仿真结果记录在表1中。

表1 HPSO与PSO仿真结果对比

Tab.1 Comparison of HPSO and PSO results

序号	迭代数	适应度	迭代数	适应度
1	5	0.767 5	66	0.901 2
2	16	0.866 7	56	0.915 1
3	PSO 22	0.851 3	HPSO 72	0.862 8
4	13	0.736 6	67	0.915 1
5	14	0.822 4	52	0.915 1

对比两种算法的结果可知,PSO算法收敛速

度快,在某一粒子达到较高适应度时,其他粒子会快速聚集在该位置,容易在局部最优解处收敛。HPSO算法因为引入局部社会因子,在迭代过程中避免种群快速聚集而陷入局部最优,但这样的进化的策略使得收敛速度有所降低。

### 4 实验验证

为验证建模理论分析与HPSO算法仿真优化的正确性,搭建了LCC-S型WPT系统实验平台,如图7所示。该实验系统的装置包括频率可调的逆变电源、LCC型一次侧补偿网络拓扑、一次侧发射线圈、二次侧接收线圈、S型二次侧补偿网络拓扑、整流电路以及阻值可调的直流电子负载。



图7 LCC-S型WPT系统实验平台

Fig.7 LCC-S type WPT system experimental platform

传能线圈参考SAE—J2954标准设计,形状为方形盘式,其设计参数为:传能线圈尺寸400 mm×400 mm×6 mm,匝数16,线径6 mm,铁氧体尺寸420 mm×420 mm×5 mm,传能距离190 mm。

采用同惠TH2838-A型号阻抗分析仪对传能线圈以及补偿拓扑网络中电容元件的电气参数进行测量,各元件参数为: $L_1=70.31 \mu\text{H}$ , $L_2=71.56 \mu\text{H}$ , $C_1=88.70 \text{nF}$ , $C_2=53.19 \text{nF}$ , $C_p=132.85 \text{nF}$ , $U_{\text{IN}}=400 \text{V}$ , $R_p=R_1=R_2=0.15 \Omega$ , $M=11.75 \mu\text{H}$ , $L_p=28.15 \mu\text{H}$ 。

负载电阻 $R_L$ 设置为15  $\Omega$ ,其他参数保持不变,设置逆变电源的工作频率 $f$ 的范围为10~120 kHz,得到系统的输出功率和传输效率的实验结果如图8所示。由图8可以看出,系统传输效率随工作频率增加先增大后减小,在85 kHz处存在效率峰值,系统最高效率可达89.67%,系统传输功率曲线因为频率分裂现象而存在三个峰值,在85 kHz处达到中间的极值点,此时系统传输功率达1.977 kW,满足优化模型中提出的至少1 kW的输出功率约束。实验结果与第2节的理论分析一致。

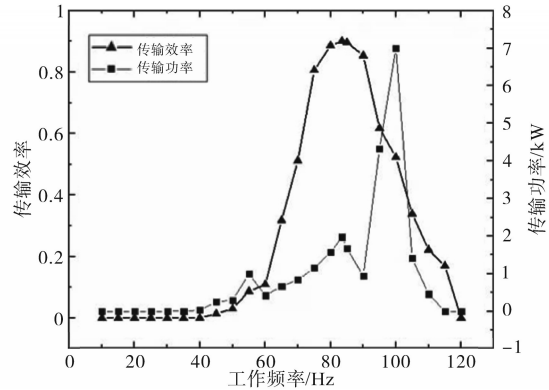


图8 工作频率对传输效率和传输功率的影响曲线

Fig.8 Influence curves of operating frequency on transmission efficiency and transmission power

设置系统工作频率为85 kHz,其他参数保持不变,设置直流电子负载的阻值在5~50  $\Omega$ 范围内变化,得到系统传输特性的实验结果如图9所示。由图9可以看出,系统传输效率在 $R_L=10 \Omega$ 时达到最大,为89.12%,随后随负载阻值增加,效率缓慢减小。因为在谐振时系统输出电压具有恒压特性,所以在负载阻值增加时,系统输出功率近似呈反比式降低,与前述的理论分析相一致。

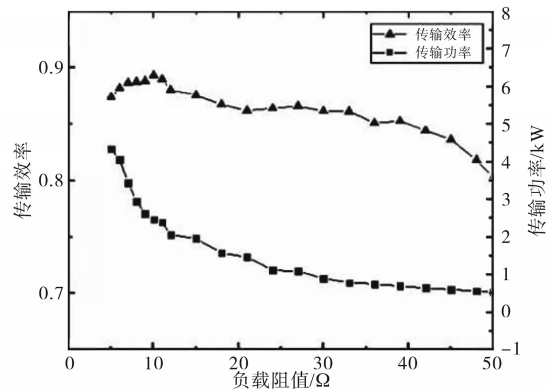


图9 负载阻抗对传输效率和传输功率的影响曲线

Fig.9 Influence curves of load resistance on transmission efficiency and transmission power

### 5 结论

首先,基于电路互感耦合理论,对LCC-S型补偿拓扑的无线电能传输系统建立了完整的数学模型,对影响系统传输性能的关键参数进行分析,得出不同参数对传输性能的特性曲线,为LCC-S型无线电能传输系统优化设计提供了理论依据。其次,由于基于经验的优化方法不能达到最佳的效果,为实现高效的参数优化配置,对粒子群优化算法进行研究,针对传统的PSO算法容易陷入局部最优收敛的问题,提出了一种基于小生化种群进化的混合粒子群优化算法,并对

PSO算法和改进的HPSO算法进行仿真对比,仿真结果表明引入局部迭代因子的HPSO算法降低了优化模型的收敛速度,但可以有效地避免高阶非线性优化问题陷入局部最优。最后,搭建了LCC-S型WPT系统实验平台,研究了工作频率和负载阻抗对系统传输特性的影响,验证了理论和优化模型的结果的有效性。

#### 参考文献

- [1] 黄学良,谭林林,陈中,等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报,2013,28(10):1-11.  
HUANG Xueliang, TAN Linlin, CHEN Zhong, et al. Review and research progress on wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 1-11.
- [2] 范兴明,莫小勇,张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2584-2600.  
FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [3] 仲崇德,朱武,张乐. 谐振耦合式无线电能传输系统谐振线圈的优化设计[J]. 电测与仪表,2017,54(21):116-121.  
ZHONG Chongde, ZHU Wu, ZHANG Le. Optimal design of the resonant coil of resonant coupling wireless power transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(21): 116-121.
- [4] CHEN Y, ZHANG H, SHIN C S, et al. A comparative study of S-S and LCC-S compensation topology of inductive power transfer systems for EV chargers[C]//2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, IEEE, 2019.
- [5] LI W, ZHAO H, DENG J, et al. Comparison study on SS and double-sided LCC compensation topologies for EV/PHEV wireless chargers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4429-4439.
- [6] LI Z, ZHU C, JIANG J, et al. A 3 kW wireless power transfer system for sightseeing car supercapacitor charge[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3301-3316.
- [7] WANG Zhenshi, WEI Xuezhe, DAI Haifeng. Design and control of a 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles[J]. Energies, 2015, 9(1): 10.
- [8] SALLAN Jesús, VILLA J L, LLOMBART Andrés, et al. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2140-2149.
- [9] KIANI M, JOW U M, GHOVANLOO M. Design and optimization of a 3-coil inductive link for efficient wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits & Systems, 2011, 5(6): 579-591.
- [10] LI Y, LIU L, ZHANG C, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for adaptive frequency-tracking control in wireless power transfer systems[J]. Journal of Power Electronic, 2018, 18(5): 1470-1478.
- [11] 国玉刚,崔纳新. LCC-S型无线电能传输系统优化配置及特性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(18):3723-3731.  
GUO Yugang, CUI Naxin. Research on optimal configuration and characteristics based on LCC-S type wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3723-3731.
- [12] GOKEN C, GEZICI S, ARIKAN O. Optimal stochastic signaling for power-constrained binary communications systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(12): 3650-3661.
- [13] WEI G, JIN X, WANG C, et al. An automatic coil design method with modified AC resistance evaluation for achieving maximum coil-coil efficiency in WPT systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6114-6126.
- [14] 徐俊俊,黄永红,王琪,等. 基于自然选择粒子群算法的含DG接入的配电网无功优化[J]. 电测与仪表,2014,51(10):33-38,50.  
XU Junjun, HUANG Yonghong, WANG Qi, et al. Reactive power optimization in distribution network with DG based on natural selection particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(10): 33-38, 50.
- [15] 甘江华,徐长福,刘振威,等. 基于效率寻优算法的无线充电系统设计与仿真[J]. 电气传动,2019,49(10):108-112.  
GAN Jianghua, XU Changfu, LIU Zhenwei, et al. Design and simulation of wireless charging system based on efficiency optimization algorithm[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 108-112.

收稿日期:2021-10-14

修改稿日期:2021-10-29