

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190754

磁耦合谐振无线传输系统传输特性的研究及优化

焦宇峰¹, 李锐杰², 宋国兵³

(1. 国网陕西省电力公司检修公司, 陕西 西安 710075; 2. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 陕西 西安 710032; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 以提高磁耦合谐振式无线电能传输系统的传输效率为目标, 对系统多参数匹配问题进行优化, 使得无线电能传输系统整体工作在最佳状态。利用 Matlab 仿真软件对影响磁耦合谐振式无线电能传输系统效率的频率、传输距离、负载阻值 3 个关键参数进行研究。然后以提高系统传输效率为目标, 利用自适应粒子群优化算法, 寻找这 3 个关键参数的最优匹配值。最后对自适应粒子群优化算法进行仿真, 得到了最优解对应的参数值。仿真结果证明该方法的有效性, 研究对磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化有指导意义, 具有一定的实用价值。

关键词: 磁耦合谐振; 无线能量传输; 传输特性; 效率优化; 自适应粒子群算法

Research and optimization of transmission characteristics of magnetically coupled resonant wireless transmission system

JIAO Yufeng¹, LI Ruijie², SONG Guobing³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Maintenance Company, Xi'an 710075, China; 2. Xi'an Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the transmission efficiency of the magnetically coupled resonant radio energy transmission system, the paper optimizes the multi-parameter matching problem of the system, so that the radio energy transmission system works in an optimal state. The Matlab simulation software is used to study the three key parameters affecting the efficiency of this magnetically coupled resonant radio energy transmission system: frequency, transmission distance and load resistance. Then, with the goal of improving system transmission efficiency, the adaptive particle swarm optimization algorithm is used to find the optimal matching values of these three key parameters. Finally, the adaptive particle swarm optimization algorithm is simulated, and the parameter values corresponding to the optimal solution are obtained. The simulation results prove the effectiveness of the method, and the research has certain guiding significance for the efficiency optimization of the magnetic coupling resonant radio energy transmission system, which has certain practical value.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. U1766209).

Key words: magnetic coupling resonance; wireless energy transfer; transmission characteristics; efficiency optimization; adaptive particle swarm optimization

0 引言

在全球经济化高速发展的今天, 世界各国都在经受着能源短缺及环境污染的巨大压力。对于我国这样的人口大国而言, 经济增长所带来的环境污染问题尤为突出^[1]。

电动汽车无线充电技术是一种新型的充电方式, 它避免了传统有线充电方式的电源电线频繁拔

插, 解决了不安全、不美观、不可靠及易磨损等问题, 使系统的工作变得简单, 同时有利于后期的运行维护; 与此同时, 新型的无线电能充电方式有着输出功率大、传输效率高且无需额外安装场地等优点, 对于用户来说可以实现即停即充, 大大简化了电动汽车无线充电的操作过程, 具有良好的市场应用前景。传统有线充电和新型无线充电两种方式的对比如表 1 所示^[2]。

磁耦合谐振式无线电能传输 (Magnetically-Coupled Resonant Wireless Power Transfer, MCR-

WPT)技术的原理是利用高频交流电源在初级侧产生高能量密度交变磁场, 同时在次级侧谐振网络的交变磁场作用下耦合到能量, 并将耦合能量输送给电动汽车负载。因为在磁耦合谐振线圈中初级侧和次级侧谐振网络谐振频率一致, 所以初级侧与次级侧线圈产生“磁共振”的现象, 这种方式的无线传输目前是电动汽车无线充电领域里效果最为显著的。正是由于磁耦合谐振式无线电能传输技术的诸多优点, 也成为电动汽车无线充电技术重点研究领域^[3]。磁耦合谐振式 WPT 系统能量传输框图如图 1 所示。

表 1 两种充电方式对比

Table 1 Comparison of two charging methods	
传统有线式充电	新型无线式充电
手动电气连接	无需电气连接、即停即充
恶劣天气不宜使用	无暴露单元、不受天气限制
需要额外安装场地	场地要求小
存在安全隐患	安全隐患小
机械易磨损、维修几率大	维修几率小

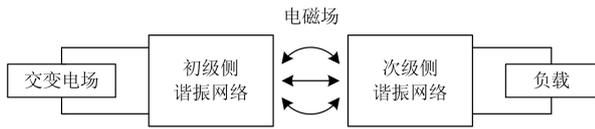


图 1 MCR-WPT 系统能量传输机构

Fig. 1 MCR-WPT system energy transmission mechanism

现如今, 国内外对磁耦合谐振式无线电能传输的研究仍旧存在很多问题^[4], 比如系统传输特性、生物安全问题、电磁屏蔽问题、缺乏标准化问题等。文献[5]研究了磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性; 文献[6]研究了无线电能有效传输距离及影响因素问题; 文献[7]研究了无线电能传输中的高频阻抗匹配特性分析; 文献[8]研究了两线圈磁耦合谐振式无线电能传输的效率分析; 文献[9]研究了无线电能传输系统中影响传输功率和效率的因素分析。这些研究对无线电能传输特性的提升具有十分重要的意义, 但其都是对影响无线电能传输特性的因素进行单独的研究及分析, 然而无线电能传输特性是受多种因素共同影响的^[10]。因此本文将以上述的研究为基础, 以提高磁耦合谐振式无线电能传输系统的传输效率为目标, 对影响系统传输效率的多个参数的匹配问题进行优化, 找出一组最优的参数匹配值, 使得无线电能传输系统整体工作在最佳状态, 对磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化有一定的指导意义。

1 谐振式无线电能传输补偿结构理论研究

磁耦合谐振式无线电能传输方式是以谐振为基

础, 依靠工作在同一频率下的发射线圈与接收线圈发生的谐振, 实现无线电能的传输。当系统处于理想谐振状态时, 由于感性负载与容性负载间相互抵消, 所以系统呈阻性状态。此时发射端与接收端的阻抗最低、负载电流最大, 磁场能量以最低程度的损耗在发射端与接收端之间传递。当系统失谐时, 将会阻碍能量的传输, 甚至造成无法传递^[11]。因此, 磁耦合谐振式无线电能传输系统的核心问题就是保证发射端与接收端频率相等, 使其处于谐振状态。

无线电能传输系统的结构由两部分谐振网络构成^[12], 分别是耦合机构的原边及副边谐振, 为了有效提高系统的传输功率、传输效率, 并使其在较远距离时也能达到良好的传输性能, 因此需要对发射线圈和接收线圈加以补偿电容, 使两者工作在谐振状态。

目前, 由补偿电容的不同连接方式, 可以将谐振补偿结构分为以下四种类型^[13]: S-S 耦合结构(原边串联-副边串联)、S-P 耦合结构(原边串联-副边并联)、P-S 耦合结构(原边并联-副边串联)、P-P 耦合结构(原边并联-副边并联), 如图 2 所示, U_{in} 、 I_{in} 为高频电源; L_1 、 L_2 为发射线圈、接收线圈的电感; C_1 、 C_2 为发射线圈、接收线圈的等效电容; R_1 、 R_2 为发射线圈、接收线圈在高频下的等效电阻; R_L 为负载电阻。为了方便计算及分析, 将系统负载设定为纯阻性。

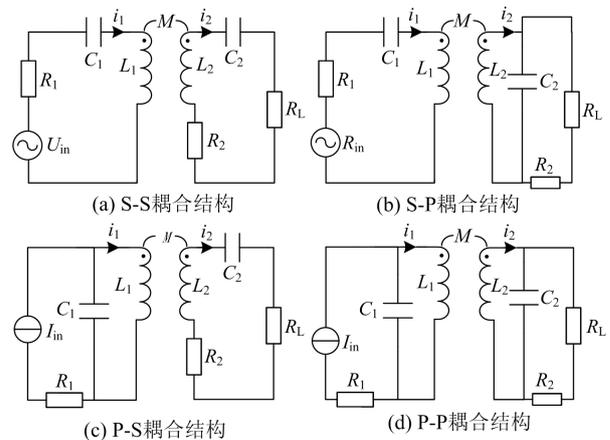


图 2 四种传输结构图

Fig. 2 Four transmission structures

基于上述对谐振网络的分析, 由于本系统是对电动汽车蓄电池进行充电, 原边电源为恒压源, 因此将谐振系统的原边选用串联谐振补偿结构^[14]。即本文只针对串-串(S-S)、串-并(S-P)两种传输结构利用耦合理论展开详细的建模、特性分析及验证。

1.1 串联-串联补偿拓扑分析

串-串补偿结构如图3所示。

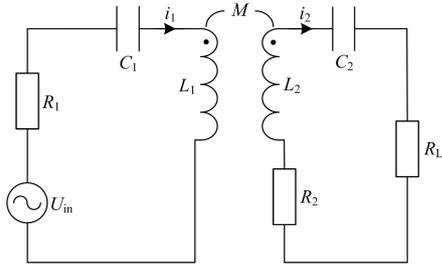


图3 串-串结构

Fig. 3 Series-series structure

原边、副边的等效阻抗分别为

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (2)$$

SS结构的KVL方程为

$$\begin{cases} Z_1 \cdot \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_{in} \\ Z_2 \cdot \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

磁耦合谐振式无线电能传输系统的核心问题就是保证发射端与接收端频率相等,使其处于谐振状态。

当系统处于谐振状态,即

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可得:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{R_2 + R_L}{R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \dot{U}_{in} \\ \dot{I}_2 = \frac{j\omega M}{R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \dot{U}_{in} \end{cases} \quad (5)$$

输出电压为

$$\dot{U}_{out} = \dot{I}_2 \cdot R_L = \frac{j\omega M R_L}{R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \dot{U}_{in} \quad (6)$$

输入功率为

$$P_{in} = \dot{U}_{in} \cdot \dot{I}_1 = \frac{R_2 + R_L}{R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \dot{U}_{in}^2 \quad (7)$$

输出功率为

$$P_{out} = \dot{I}_2^2 \cdot R_L = \frac{(\omega M)^2 R_L}{[R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2]^2} \dot{U}_{in}^2 \quad (8)$$

效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{[R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2](R_2 + R_L)} \quad (9)$$

1.2 串联-并联补偿拓扑分析

串-并补偿结构如图4所示,由KCL、KVL定理可知:

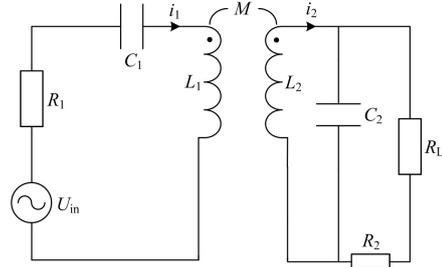


图4 串-并结构

Fig. 4 Series-and-parallel structure

原边、副边的等效阻抗分别为

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (10)$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (11)$$

SS结构的KVL方程为

$$\begin{cases} Z_1 \cdot \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_{in} \\ Z_2 \cdot \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)解得

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\omega L_2 C_1 \dot{U}_{in}}{\omega(\omega M)^2 C_1 C_2 R_L + j\frac{L_2^2 L_1}{L_2 L_1 - M^2} - jL_2 - j(\omega M)^2 C_1} \\ \dot{I}_2 = \omega^2 M C_2 \dot{I}_1 \end{cases} \quad (13)$$

输入功率为

$$P_{in} = \dot{U}_{in} \cdot \dot{I}_1 = \frac{\omega L_2 C_1 \dot{U}_{in}^2}{\omega(\omega M)^2 C_1 C_2 R_L + j\frac{L_2^2 L_1}{L_2 L_1 - M^2} - jL_2 - j(\omega M)^2 C_1} \quad (14)$$

输出功率为

$$P_{out} = \dot{I}_L^2 \cdot R_L = \frac{1}{R_2 + R_L + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \dot{I}_2^2 = \left(\frac{\omega^3 M L_2 C_1 C_2 \dot{U}_{in}}{\omega(\omega M)^2 C_1 C_2 R_L + j\frac{L_2^2 L_1}{L_2 L_1 - M^2} - jL_2 - j(\omega M)^2 C_1} \right)^2 R_L \quad (15)$$

效率为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\omega(\omega M)^2 R_L C_1 C_2 + j \frac{L_2^2 L_1}{L_1 L_2 - M^2} - j L_2 - j(\omega M)^2 C_1}{\omega^3 (\omega M)^2 C_2^2 L_2 C_1 R_L} \quad (16)$$

1.3 补偿结构的选择

在电动汽车无线充电系统工作时, 随着充电电流和充电电压的不断变化, 系统等效负载阻值也将时刻发生变化^[15]。当系统等效负载阻值取 0~100 Ω 时, 利用 Matlab 仿真软件对串-串(S-S)和串-并(S-P)两种谐振补偿结构研究负载阻值变化对系统传输特性的影响。设系统采用 220 V/50 Hz 电源供电, 谐振频率为 51 kHz, 耦合系数为 0.1, 原副边谐振线圈内阻 $R_1=R_2=0.02 \Omega$, 电感 $L_1=L_2=13.63 \mu\text{H}$ 。如图 5 和图 6 为两种补偿结构下负载阻值与输出功率、传输效率的关系曲线。

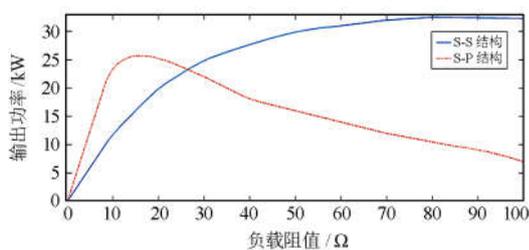


图 5 两种谐振结构负载-功率特性对比

Fig. 5 Comparison of load-power characteristics of two resonant structures

由图 5 可以看出, 负载阻值在 0~100 Ω 内变化时, S-S 和 S-P 补偿结构的最大输出功率均在 2.5 kW 以上, 可以达到系统充电功率的要求, 不同的是两种补偿结构在最大输出功率时的匹配负载阻值不同。S-S 谐振补偿结构中, 系统的输出功率随负载阻值的增大呈增长趋势, 当负载阻值超过 60 Ω 后, 输出功率变化缓慢, 所以串-串谐振拓扑结构比较适合负载阻值较高、传输功率要求较大的场合; S-P 谐振补偿结构中, 系统输出功率对负载阻值的增大呈现先增大后减小的趋势, 当负载阻值为 14 Ω 时, 输出功率达到最大值。

由图 6 可以看出, 当负载阻值在 0~100 Ω 内变化时, S-S 谐振补偿结构中, 系统传输效率随负载阻值的增大呈现先增大后减小的趋势。当负载阻值很小时, 传输效率会迅速达到 90% 以上的较高值, 之后随负载阻值的增大而缓慢下降。S-P 谐振补偿结构中, 系统传输效率随负载阻值的增大而增大,

小于 10 Ω 时传输效率增长较快, 超过 10 Ω 后增长趋势缓缓变小。从两种谐振拓扑结构的传输效率曲线可以看出, 当等效负载阻值小于 30 Ω 时, S-S 拓扑结构的传输效率总体高于串-并拓扑结构; 当等效负载阻值大于 30 Ω 时, 采用 S-P 谐振拓扑结构在提高传输效率方面更有优势。

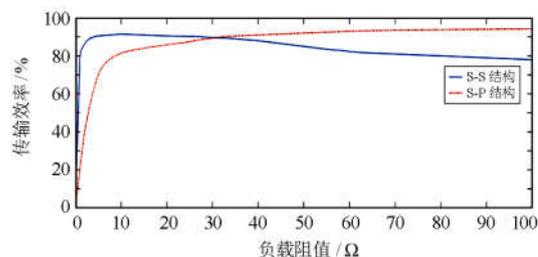


图 6 两种谐振结构负载-效率特性对比

Fig. 6 Comparison of load-efficiency characteristics of two resonant structures

针对小型电动汽车的无线充电系统展开研究, 在充电过程中, 汽车电池的等效电阻值在 2.9~25 Ω 之间变化, 其最大充电功率 8 000 W^[16]。从 S-S 谐振拓扑结构及 S-P 谐振拓扑结构的负载阻值变化对传输特性的影响曲线上可以看出, 两种拓扑结构都可以达到最大充电功率, 但 S-S 拓扑结构在要求的负载阻值范围内传输效率基本能够维持在 90% 以上, 而 S-P 拓扑结构的传输效率最高只达到 80% 左右, 因此在电动汽车无线充电系统的研究中, 将采用 S-S 谐振拓扑结构。

2 系统传输特性的研究及分析

2.1 频率特性研究

系统电源为 220 V/50 Hz, 耦合系数 k 取 0.1, 线圈 $R_1=R_2=0.02 \Omega$, 负载阻值 R_L 取 10 Ω , 通过 Matlab 仿真软件研究系统工作频率在 0~100 kHz 变化时与输出功率、传输效率的关系。如图 7 和图 8 即系统频率与传输特性的曲线图。

由图 7 和图 8 系统传输特性曲线可以知道, 系统存在最大功率点和最大效率点, 并且其对应的系

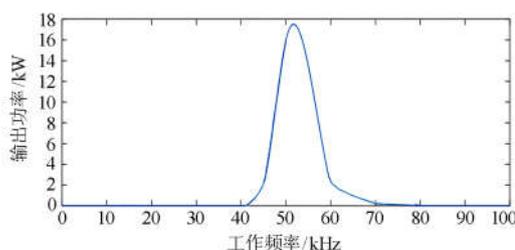


图 7 输出功率与谐振频率的曲线图

Fig. 7 Graph of output power and resonant frequency

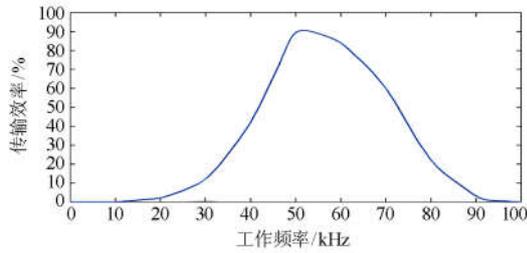


图 8 传输效率与谐振频率的曲线图

Fig. 8 Graph of transmission efficiency and resonant frequency

统工作频率大致相同，当系统工作频率处于 51~60 kHz 之间时，传输效率基本保持在 80% 以上，输出功率为 2~16 kW，可以达到小型电动汽车对充电功率的要求^[36]。

2.2 负载阻值特性研究

当一套系统成型后，相应的自阻抗值也已确定，系统传输效率达最高时所对应的负载阻值是系统的阻抗匹配值。但在无线电能传输系统的实际应用中，负载阻值是在一定范围内变化的^[17]。为了保证系统能够灵活地适应负载，有必要研究负载阻值和系统传输效率之间的关系。

系统仿真参数的设置与上文基本相同，系统谐振频率为 51 kHz，图 9 为系统在谐振频率下工作时，传输效率随负载阻值变化的关系曲线图。

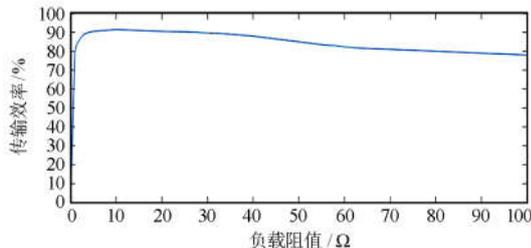


图 9 传输效率与负载阻值的曲线图

Fig. 9 Graph of transmission efficiency and load resistance

从图 9 中可看出：当系统工作在谐振频率时，在系统负载阻值增大的初期，系统的传输效率首先随之急剧增大，在负载阻值增大到某一点后，相应的系统传输效率也达到最大，之后系统传输效率就随着负载阻值的增大而逐渐下降。

2.3 传输距离特性研究

磁耦合谐振式无线电能传输系统中的核心部分是磁耦合机构，磁耦合机构主要由发射线圈和接收线圈组成，两线圈间不同的轴向距离会影响耦合系数的大小及系统的传输效率^[18]。假设发射线圈和接收线圈的参数相同，研究两线圈间不同轴向距离时系统传输效率的变化情况。如图 10 所示的线圈传输距离与传输效率的关系曲线。

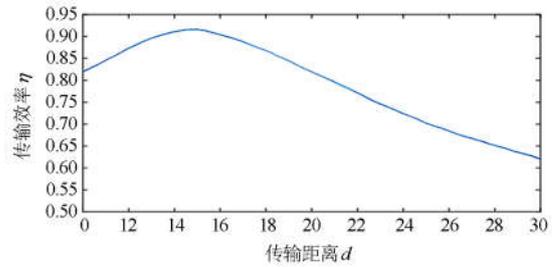


图 10 传输效率与传输距离的曲线图

Fig. 10 Curve of transmission efficiency and transmission distance

两线圈耦合系数 k 的表达式为： $k = M\sqrt{L_1L_2}$ ，分为过耦合、临界耦合、欠耦合三种状态^[19]。从图 10 中可看出，当选用相同结构参数的发射线圈和接收线圈时，系统传输效率 η 在两线圈间的轴向距离增大的初期会随之升高，当传输效率随线圈间距增大到最大值之后，就开始呈现下降趋势。这是由于耦合机构中两线圈间的距离越近中，其相应的耦合率也越大，当增大到某个点时耦合率达到最大，该点即为临界耦合点，过了临界耦合点后，系统进入过耦合状态，即随着两线圈间距离的减小，耦合率也开始减小。

因此要想达到提高系统传输效率的目的，就需要让无线电能传输的耦合机构达到临界耦合的状态，那么找到这个临界耦合点就变得尤为重要了。

3 基于自适应粒子群算法的系统参数优化

在磁耦合谐振式无线电能传输系统中，系统谐振频率、负载阻值、传输距离是影响系统传输效率的三个关键因素。本节将利用自适应粒子群优化算法，以提高系统传输效率为目的，研究这三个关键参数的最优匹配问题^[20-22]，得到一组最优参数匹配解，使得系统传输效率达到最高，对磁耦合谐振式无线电能传输系统的系统参数选取具有一定的参考价值。

3.1 自适应粒子群算法介绍

粒子群优化算法^[23]是 1995 年由 Kennedy 和 Eberhart 两位美国学者提出的一种新的进化思想方法，现在已发展成一种常用的基于迭代的优化工具。粒子算法的概念来源于自然界中的鸟群及鱼群等生物的社会行为模式。在规定的求解空间内，粒子通过不断地迭代来搜寻最优值。与其他算法相比，粒子群算法不仅拥有较快的搜索最优解速度，还具备有较强的寻优能力，因此在多参数匹配问题中得到了广泛的应用。

(1) 粒子群算法数学模型

粒子群算法的思想是在最初先给解空间随机赋予一群粒子, 之后用迭代出的新的粒子群对其附近范围进行搜索, 直到找到解空间的最优粒子群, 即通过不断地迭代以求得最优解^[24]。

用数学描述即为: 有一个大小为 M 的种群, 每个粒子都处在 D 维的搜索空间内, 在不断地迭代过程中, 粒子 i 进行 n 次迭代后的位置为 $x_{i,n} = (x_{i,n}^1, x_{i,n}^2, \dots, x_{i,n}^D)$, 相应粒子的速度为 $v_{i,n} = (v_{i,n}^1, v_{i,n}^2, \dots, v_{i,n}^D)$, 在每次的迭代过程中, 粒子根据粒子本身周围的最优解以及整个种群迭代前(包括此迭代)通过比较找出的最优解, 这两种最优解来替换自身的解, 其中粒子本身周围的最优解就是个体中的极优解 P_{best} , 整个种群迭代前通过比较找出的最优解就是全局中的最优解 G_{best} 。每次迭代的过程根据式(17)和式(18)来更新各自的位置 x 和速度 v 。

$$x_{id}(n+1) = x_{id}(n) + v_{id}(n+1) \quad (17)$$

$$v_{id}(n+1) = v_{id}(n) + c_1 rand(P_{best_{id}} - x_{id}(n)) + c_2 rand(g_{best_{id}} - x_{id}(n)) \quad (18)$$

粒子群算法中对种群大小 M 的选择十分重要, 其值过大或过小都会带来不利的影响, M 值较小时相应的寻优空间就有限, 会增加计算; M 值较大时会带来资源浪费的问题, 因此在优化目标确定后, 考虑其规模并对 M 值的大小做出谨慎的选择。式(15)和式(16)中, c_1 、 c_2 是学习因子, 同 M 值的选择一样, 选择一个适合于优化系统的学习因子将会提升算法的优化性能, 其一般取 1~2。式中 $X_{id}(n)$ 表示粒子的当前位置, $P_{best_{id}}$ 表示粒子的个体最优位置, P_{best_d} 表示粒子的全局最优位置, $rand$ 取 0~1 之间的随机数, 粒子速度的上下限一般为: $v_{i,n}^j \in [-v_{max}, v_{max}]$, 当速度更新之后, 对粒子速度的上下限约束为

$$\text{if } v_{id} < -v_{max} \text{ then } v_{id} = -v_{max} \quad (19)$$

$$\text{if } v_{id} > v_{max} \text{ then } v_{id} = v_{max} \quad (20)$$

为了使粒子群算法的优化效果得到进一步提升, 当前很多研究人员都在尝试在粒子群算法的基础上对其进行改进。本文采用的自适应粒子群算法就是基于粒子群算法的一种改进优化算法, 这种算法将自适应优化和粒子群优化两者相结合, 其显著优点是避免了在寻优过程中陷入局部最优的问题。本节将采用自适应粒子群优化算法, 在磁耦合谐振式无线电能传输系统中找到一组合适的系统参数匹配值, 达到对系统传输效率优化的目的。

(2) 自适应粒子群算法优化模型

本文研究的磁耦合谐振式无线电能传输系统

中, 约束条件可以选为传输距离、负载阻值、谐振频率等, 优化目标则是提高系统传输效率。

以此建立的优化目标函数形式为

$$\begin{aligned} \min F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)] \\ \text{s.t.} &\begin{cases} g_{j(x)} \geq 0, & j=1, 2, \dots, q \\ h_{p(x)} = 0, & p=1, 2, \dots, m \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, & i=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R$ 是 n 维实向量 $F(x)$ 为优化目标(适应值)函数; $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 等是多目标函数中的一个分函数; $h_{p(x)}$ 和 $g_{j(x)}$ 分别代表等式约束和不等式约束。

对优化目标函数的求解, 就是在设定的可行域范围内, 让多目标的优化函数可以在关键参数组成的向量下结果最优。对于多目标函数的最优值求解实际上是一个不断试凑的过程, 其实通常不存在最佳解, 所谓的最优解也只是在计算过程中满足设定

的条件而已, 可表示为 $\begin{cases} F_i(x^*) \leq F_j(x) \\ F_i(x^*) \leq F_k(x) \end{cases}$ 。

自适应粒子群优化算法以粒子群算法为基础, 第 i 个粒子在 D 维的搜索空间中位置为 $X_i = [x_{i,1}, \dots, x_{i,d}]$, 速度为 $V_i = [v_{i,1}, \dots, v_{i,d}]$, t 时刻时每个粒子的最佳位置为 $P_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,d}]$, 群体的最佳位置为 $P_g = [p_{g,1}, \dots, p_{g,d}]$, 惯性因子 $\bar{\omega}$ 表示为

$$\bar{\omega} = 2 - \omega_0 \left(1 + \alpha \frac{(g_{av})^{n_c}}{(g_{max} - g_{min})^{n_c} + (g_{av})^{n_c}} \right) \quad (22)$$

式中: ω_0 为初始惯性权重; g_{max} 表示当前适应值函数最大值; g_{min} 表示当前适应值函数最小值; g_{av} 表示所有粒子适应值函数的平均值。式(21)、式(22)分别表示更新后粒子的位置和速度。

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (23)$$

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (24)$$

以下是在利用自适应粒子群优化算法求解目标函数最优值时的基本步骤:

(1) 在求解空间中随机定义一群粒子并进行初始化;

(2) 将更新前的所有粒子的信息储存在 P_{best} 中, 再将所有粒子中最优粒子的 P_{best} 所对应的信息储存在 G_{best} 中;

(3) 按式(22)一式(24)对群体中各粒子的速度和位置进行更新;

(4) 对群体中的所有粒子进行评价;

(5) 将群体中每个粒子的当前目标值与 P_{best} 的目标值进行比较, 如果当前目标值更优, 则使用粒子当前的位置和目标值更新 P_{best} ;

(6) 比较当前所有 P_{best} 和 G_{best} 的目标值, 更新 G_{best} ;

(7) 若终止准则满足, 则输出并停止算法, 否则转向步骤(3)。

3.2 自适应粒子群算法在效率优化中的应用

对磁耦合谐振式无线电能传输系统进行参数优化的目标, 是在系统参数达到要求的条件下, 对系统传输效率进行提高。具体优化过程如下:

(1) 选取优化变量

在影响系统传输效率的众多因素中选择最重要的几个作为优化变量。这里将前文分析过的传输距离 d 、谐振频率 ω 、负载阻值 R_L 这三个参数选为优化变量, 即

$$x_i^3 = [d, \omega, R_L]$$

(2) 建立目标函数

提高系统的传输效率并使其达到最大是优化的最终目的, 因此将适应度定义为传输效率, 适应度的表达式为

$$\text{Max}(f) = \frac{R_L |I_2|^2}{\text{real}(U_s \cdot I_1^*)} \quad (25)$$

此式即为目标函数, 表示负载有功功率 $R_L |I_2|^2$ 和发射部分有功功率 $\text{real}(U_s \cdot I_1^*)$ 的比值。

其中

$$\begin{cases} \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_{\text{in}} \\ \left(R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{[R_1(R_2 + R_L) + (\omega M)^2](R_2 + R_L)} \quad (27)$$

$$M = \frac{\pi \mu_0 R_1^2 R_2^2 N_1 N_2}{2d^3} \quad (28)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq \omega \leq 100 \\ 0.1 \leq d \leq 0.3 \\ 2.9 \leq R_L \leq 25 \\ R_1 = R_2 = 0.02 \\ N_1 = N_2 = 15 \\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \end{cases} \quad (29)$$

将上述的目标函数在 Matlab 软件中进行编写, 以便于适应度的求解。

4 优化结果分析

在 Matlab 中将自适应粒子群优化算法的粒子数和迭代次数设为 20、权重为 0.5、 $c_1=c_2=1.5$ 。利用自适应粒子群优化算法计算得到选定的参数最优值为 $[0.18 \text{ m}、51 \text{ kHz}、11 \Omega]$, 即当传输距离为 0.18 m, 工作频率为 51 kHz, 负载阻值为 11Ω 时, 系统的传输效率达到最大。图 11 为适应度(系统传输效率)曲线。

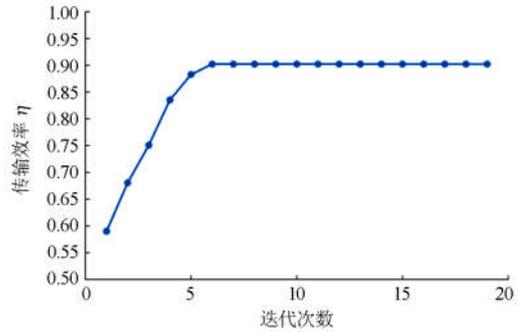


图 11 适应度(系统传输效率)曲线

Fig. 11 Fitness (system transmission efficiency) curve

从图 11 可看出, 当算法的迭代次数逐渐增加时, 系统传输效率也随之升高, 当迭代次数为 6 时, 系统传输效率基本稳定为 0.9, 从而证明了在磁耦合谐振式无线电能传输系统中利用自适应粒子群优化算法可以对其性能带来优化。

5 结论

利用电路互感耦合理论对磁耦合谐振式无线电能传输方式的原理进行系统的理论分析, 在 Matlab 中对比采用不同拓扑结构时的负载对输出功率和传输效率的影响, 选择了适用于电动汽车无线充电系统的 S-S 谐振拓扑结构, 为电动汽车无线充电系统的设计提供理论指导。

以提高磁耦合谐振式无线电能传输系统的传输效率为目标, 对系统多参数匹配问题进行优化, 使得无线电能传输系统整体工作在最佳状态。首先利用 Matlab 仿真软件对影响磁耦合谐振式无线电能传输系统效率的 3 个关键参数: 频率、传输距离、负载阻值进行研究; 然后以提高系统传输效率为目标, 利用自适应粒子群优化算法, 寻找这 3 个关键参数的最优匹配值; 最后对自适应粒子群优化算法进行仿真, 得到了最优解对应的参数值。结果表明, 利用该方法可以较快地使系统传输效率达到最优, 这对磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 许二超, 周从源. 电动汽车充电技术综述[J]. 汽车实用技术, 2016(9): 18-21.
XU Erchao, ZHOU Congyuan. Overview of electric vehicle charging technology[J]. Automotive Practical Technology, 2016(9): 18-21.
- [2] 张宝群, 李香龙. 电动汽车非接触式充电研究概况及实用化分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 1-6.
ZHANG Baoqun, LI Xianglong. A survey and practical analysis of non-contact charging of electric vehicles[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(3): 1-6.
- [3] 苏玉刚, 周川, 闫琳, 等. 基于电场耦合方式的无线电能传输技术综述[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(2): 177-180.
SU Yugang, ZHOU Chuan, LÜ Lin, et al. Overview of radio energy transmission technology based on electric field coupling[J]. World Science and Technology Research and Development, 2013, 35(2): 177-180.
- [4] 黄学良, 王维, 谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 2-14, 141.
HUANG Xueliang, WANG Wei, TAN Linlin. Research trends and application prospects of magnetically coupled resonant radio energy transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 2-14, 141.
- [5] 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. Frequency characteristics of a magnetically coupled resonant radio energy transmission system[J]. Journal of Electric Machinery and Control, 2012, 16(7): 7-11.
- [6] 张晋勇, 麦晓冬, 关曼清, 等. 无线电能传输系统平行多匝线圈空间位置与效率分析[J]. 电子设计工程, 2018, 26(3): 76-80.
ZHANG Jinyong, MAI Xiaodong, GUAN Manqing, et al. Analysis of spatial position and efficiency of parallel multi-turn coils in wireless energy transmission system[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(3): 76-80.
- [7] 卢文成, 丘小辉, 毛行奎. 磁谐振无线电能传输系统的阻抗匹配特性分析[J]. 电器与能效管理技术, 2015(6): 1-5.
LU Wencheng, QIU Xiaohui, MAO Xingkui. Analysis of impedance matching characteristics of magnetic resonance radio energy transmission system[J]. Electrical Apparatus and Energy Efficiency Management Technology, 2015(6): 1-5.
- [8] 谢端. 关于两线圈磁耦合谐振式无线电能传输的效率分析[J]. 电子测试, 2018(16): 40-41.
XIE Duan. Analysis of the efficiency of two-coil magnetic coupling resonant radio energy transmission[J]. Electronic Test, 2018(16): 40-41.
- [9] 李阳, 杨庆新, 陈海燕, 等. 无线电能传输系统中影响传输功率和效率的因素分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(3): 31-34, 39.
LI Yang, YANG Qingxin, CHEN Haiyan, et al. Analysis of factors affecting transmission power and efficiency in wireless energy transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(3): 31-34, 39.
- [10] 王涛, 宁世超. 谐振式无线电能传输技术影响因素[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2015, 34(2): 233-237.
WANG Tao, NING Shichao. Influencing factors of resonant radio energy transmission technology[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2015, 34(2): 233-237.
- [11] 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. A Review of research and application of radio energy transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 1-11.
- [12] 边岗莹, 张灿, 樊波, 等. 谐振式无线电能传输系统的设计[J]. 电气应用, 2015, 34(17): 41-43.
BIAN Gangying, ZHANG Can, FAN Bo, et al. Design of resonant radio energy transmission system[J]. Electrical Applications, 2015, 34(17): 41-43.
- [13] 冯帆, 王俊峰, 王国东. 四线圈谐振式无线电能传输系统的拓扑结构分析[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 131-136.
FENG Fan, WANG Junfeng, WANG Guodong. Topological analysis of four-coil resonant radio energy transmission system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 131-136.
- [14] 邱钊鹏, 王彰云, 李晖, 等. 一种基于串联谐振补偿拓扑的电动汽车变压式无线充电系统[J]. 电子器件, 2018, 41(3): 667-671.
QIU Zhaopeng, WANG Zhangyun, LI Hui, et al. A transformer wireless charging system for electric vehicles based on series resonance compensation topology[J]. Electronic Device, 2018, 41(3): 667-671.
- [15] 张焱强, 金楠, 唐厚君, 等. 无线电能传输基于负载阻抗匹配的最大效率追踪[J]. 电力电子技术, 2018, 52(5): 25-27.
ZHANG Yanqiang, JIN Nan, TANG Houjun, et al.

- Maximum efficiency tracking of radio energy transmission based on load impedance matching[J]. Power Electronics, 2018, 52(5): 25-27.
- [16] 李杨, 李川, 黄焱, 等. 我国发展电动汽车大功率充电技术前景研究与分析[J]. 电工电气, 2018(5): 1-6.
LI Yang, LI Chuan, HUANG Xin, et al. Research and analysis on the prospect of developing high power charging technology for electric vehicles in China[J]. Electrical Engineering, 2018(5): 1-6.
- [17] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
SU Yugang, CHEN Long, WU Xueying, et al. A method for load and mutual inductance recognition of SS type magnetic coupling WPT system based on genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4199-4206.
- [18] 黄云霄, 张强, 徐晨洋, 等. 电动汽车无线充电线圈偏移情况下的效率提升[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 148-151, 155.
HUANG Yunxiao, ZHANG Qiang, XU Chenyang, et al. Efficiency improvement of electric vehicle charging coil offset[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(5): 148-151, 155.
- [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 of effective transmission distance of radio energy and its influencing factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 106-112.
- [20] 周天沛, 孙伟. 基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 115-123.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimization scheduling of electric vehicle charging path based on charging equipment utilization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 115-123.
- [21] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 67-72.
WANG Man, LI Zhengming, WANG Yang. Distributed power supply optimization layout of distribution network considering uncertainty factors of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [22] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50.
DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et al. Electric vehicle charging network planning based on fuzzy multi-objective optimization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 43-50.
- [23] 赵乃刚, 邓景顺. 粒子群优化算法综述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(26): 216-217.
ZHAO Naigang, DENG Jingshun. Overview of particle swarm optimization algorithm[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2015, 12(26): 216-217.
- [24] 曹一家, 曹丽华, 李勇, 等. 改进的自适应多目标粒子群算法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(10): 84-90.
CAO Yijia, CAO Lihua, LI Yong, et al. Improved adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 41(10): 84-90.

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-10-09

作者简介:

焦宇峰(1973—), 男, 本科, 高级工程师、高级技师, 研究方向为电力系统自动化;

李锐杰(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输; E-mail: 414679779@qq.com

宋国兵(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为交、直流输电系统继电保护研究。

(编辑 张爱琴)