

基于改进粒子群优化算法的无线电能传输系统最大功率点跟踪

赵越, 沈艳霞

江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573167, 61572237)

通信作者: 沈艳霞, shenyx@jiangnan.edu.cn 收稿/录用/修回: 2020-06-15/2020-07-14/2020-07-31

摘要

针对磁耦合谐振式无线电能传输(MCRWPT)系统在线圈过耦合时输出功率骤降的问题, 提出了以粒子间方差衡量算法进程的自适应粒子群优化(APSO)算法. 考虑频率分裂时系统功率和效率的特性, 选定跟踪目标点为固有谐振频率右侧的最大功率点. 所提的方差型 APSO 根据方差型算法进程因子动态调整参数, 提高算法前期的全局性和后期的收敛性. 仿真实验结果表明, 所提的方差型 APSO 在实现 MCRWPT 系统的最大功率点跟踪时, 稳态精度更高, 收敛代数更少, 算法的优势具有统计学意义.

关键词

无线电能传输
频率分裂
最大功率点跟踪
粒子群优化(PSO)算法
中图法分类号: TM724
文献标识码: A

Maximum Power Point Tracking of Wireless Power Transmission System Based on Improved Particle Swarm Optimization

ZHAO Yue, SHEN Yanxia

Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract

To solve the problem that the output power of the magnetically coupled resonant wireless power transmission (MCRWPT) system drops sharply when the coils are over coupled, we propose an adaptive particle swarm optimization (APSO) algorithm that measures the algorithm process by particle variance. Using frequency splitting to consider the power and efficiency characteristics of the system, the tracking target point is selected as the maximum power point on the right side of the inherent resonance frequency. The proposed variance APSO algorithm dynamically adjusts the parameters according to its variance process factor, which improves its global performance in the early stage and its convergence in the later stage. Simulations verify that the proposed variance APSO algorithm has higher steady-state accuracy and fewer convergence algebras when implementing the maximum power point tracking of the MCRWPT system, and the advantages of the algorithm are statistically significant.

Keywords

wireless power transmission (WPT);
frequency splitting;
maximum power point tracking;
partical swarm optimization (PSO)

0 引言

无线电能传输(WPT)的安全性和灵活性优于有线电能传输, 在一些无法布置线路的输电场所具有不可替代的优势. 2007年MIT团队提出的磁耦合谐振式无线电能传输(MCRWPT)系统, 实现了线圈弱耦合条件下电能的大功率传输, 成为了电气工程领域中最引人瞩目的研究方向之一^[1]. 但受导磁技术^[2-3]和控制方法^[4-6]的制约, MCRWPT技术始终存在着传输效率及功率低、稳定性差等问题^[7].

在MCRWPT系统中, 传输距离的变化会导致系统耦合

情况的改变, 进而造成系统最佳工作点偏移, 降低传输性能^[8-9]. 频率跟踪控制技术是改善最佳工作点偏移问题的有效手段^[10], 其中最大功率点跟踪技术可通过改变系统工作频率实现特定耦合情况下的最高功率输出, 解决过耦合时由于功率极值点产生分裂所引起的输出功率骤降的问题^[11].

从硬件解决方案上, MCRWPT系统的最大功率点跟踪可以采用锁相环(PLL)技术, 控制两个最大功率点处初次侧电压 V_1 和初次侧电流 I_1 的相位差均为 0° 来实现. 文[12]利用PLL实现了SS型和SP型拓扑的 V_1-I_1 零相位差跟踪. 但是文[13]指出 V_1-I_1 零相位差跟踪无法区分左右

两个最大功率点,导致频率在两个最大功率点之间跳变.文[14]发现了初次侧电压 V_1 和二次侧电流 I_2 在左右两个最大功率点处的相位差不同,分别为 180° 和 0° ,根据该特性对右侧最大功率点进行跟踪,有效地避免了频率在两个最大功率点之间的跳变,但是该方案需要增加一次侧和二次侧的通信环节,增加了系统设计难度.硬件方案虽具有稳定的控制效果,但是大大提高了系统复杂程度和成本.因此文[15]采用扰动法对频率分裂时的最大功率点进行追踪,但扰动法无法兼顾快速性和稳态精度,并且极易陷入局部最优.文[16]和文[17]分别采用基于最大间距和基于欧几里得距离的自适应粒子群算法(APSO)实现最大功率跟踪,相比于扰动法提高了最大功率点的全局搜索能力,加快了收敛速度.在 PSO 算法中进程是由所有粒子的位置共同决定,同时也和粒子的初始状态有关,而文[16]的算法进程只取决于距离最大的两个粒子,文[17]的算法进程则只取决于当代粒子,这种不合适的算法进程衡量标准影响了算法的精度和快速性.文[18]以适应度方差减小到阈值作为 APSO 算法进行到后期的判断条件,但是基于适应度方差衡量算法进程的能力还需验证.自适应粒子群(APSO)算法在传统 PSO 的基础上考虑种群整体在迭代过程中的变化,动态调整算法参数.算法初期粒子需具有全局搜索能力,而到后期,粒子群需要快速收敛从而结束优化过程,因此合理的算法进程衡量标准对于自适应优势的发挥非常重要.

为此,本文通过对 MCRWPT 系统频率分裂特性的分析,提出一种根据位置方差衡量算法进程的自适应粒子群(APSO)算法,定义位置方差型算法进程因子,动态调整参数,以实现右侧最大功率点的快速、准确跟踪.

1 频率分裂现象和最大功率点

串-串(SS)型四线圈 MCRWPT 系统简化的双线圈模型如图 1 所示^[19],包括发射回路和接收回路.发射回路由正弦交流源 V_{in} 、发射线圈 L_1 、补偿电容 C_1 及回路电阻 R_1 组成,接收回路由接收线圈 L_2 、补偿电容 C_2 、回路电阻 R_2 及负载电阻 R_L 组成,耦合线圈间的互感为 M .

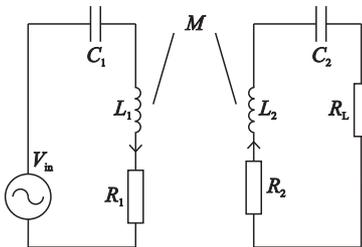


图1 MCRWPT 系统的简化电路图

Fig.1 Simplified circuit diagram of MCRWPT system

设初次侧回路阻抗为 Z_1 , 阻抗的虚部为 x ; 二次侧回路阻抗为 Z_2 , 阻抗的实部为 R_s , 虚部为 y ; 系统工作频率为 ω . 则:

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = R_1 + jx \\ Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = R_s + jy \end{cases} \quad (1)$$

由电路理论解得输出功率为

$$P_L = \text{Re}(V_L I_2^*) = \frac{\omega^2 M^2 V_{in}^2 R_L}{(\omega^2 M^2 + R_1 R_s - xy)^2 + (R_s x + R_1 y)^2} \quad (2)$$

其中, V_L 和 I_2 分别是负载两段的电压和流过负载的电流.互感 M 是 L_1 、 L_2 的几何平均值和耦合系数 k 的乘积.由式(2),输出功率 P_L 与耦合系数 k 、频率 ω 的函数曲线如图 2 所示.

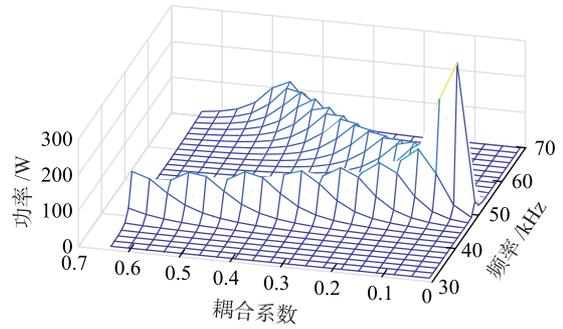


图2 功率随耦合系数和频率变化的三维图

Fig.2 Three-dimensional diagram of power varying with coupling coefficient and frequency

可见,功率 P_L 的两个极大值点和一个极小值点^[20],分别对应着功率的极大值点和极小值点.两个极大值点对应的频率称为“脊频率”,分别是:

$$\omega_{R1} = \left[\frac{(2 - Q^{-2}) + \sqrt{(2 - Q^{-2})^2 - 4(1 - k^2)}}{2(1 - k^2)} \right]^{0.5} \omega_0 \quad (3)$$

$$\omega_{R2} = \left[\frac{(2 - Q^{-2}) - \sqrt{(2 - Q^{-2})^2 - 4(1 - k^2)}}{2(1 - k^2)} \right]^{0.5} \omega_0 \quad (4)$$

式中, ω_0 为系统固有的谐振频率, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$; Q

为接收回路的品质因数, $Q = \frac{\omega_0 L_2}{R_L}$; k 为线圈的耦合系数.

极小值点对应的频率称为“谷频率”:

$$\omega_T = \left[\frac{-(2 - Q^{-2}) \pm \sqrt{(2 - Q^{-2})^2 + 12(1 - k^2)}}{2(1 - k^2)} \right]^{0.5} \omega_0 \quad (5)$$

欠耦合情况下脊频率 ω_{R1} 、 ω_{R2} 和谷频率 ω_T 与固有频率 ω_0 相等,而过耦合时脊频率和谷频率分离,即 $\omega_{R1} < \omega_T \approx \omega_0 < \omega_{R2}$,被称作 WPT 系统的“频率分裂”.脊频率始终对应功率的极大值,被称为最大功率点.

文[21]给出了效率 η 的表达式:

$$\eta = \frac{\omega_0^2 M^2}{\omega_0^2 M^2 + A - B\xi^2 + C\xi^2} \quad (6)$$

其中,

$$A = R_1(R_2 + R_L), B = R_1 R_2 Q_1 Q_2$$

$$C = [R_1(R_2 + R_L)Q_1 + R_1 R_2 Q_2]Q_2$$

$\xi = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$ 为失谐因子.效率关于失谐因子的偏导数 $\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = 0$ 只有一个零点,所以无论耦合情况如何,效率的极值点仅存在于 $\xi = 0$ 即 $\omega = \omega_0$ 处,系统的传输效率呈现出单峰特性,且在失谐程度相当的情况下,右侧失谐具有比左侧失谐更

高的传输效率. 为使 WPT 系统在不同的耦合情况下都能输出最大的功率并保证传输效率, 需对右侧最大功率点进行寻优.

2 基于粒子方差的自适应粒子群算法

粒子群(PSO)算法^[22]是一种群体智能的随机算法, 通过模拟自然界鸟类捕食的机制, 寻找问题的全局最优解, 具有收敛速度快、计算量小的优点. 在粒子群算法中, 用“粒子”来模拟鸟类, 粒子的位置向量 \mathbf{X} 中的每一个元素 $X(i)$ 代表着一个可行解, 粒子的速度向量 \mathbf{V} 中的每一个元素 $V(i)$ 代表着位置的变化量, 当下粒子的位置取决于上一代粒子的位置和当下粒子的速度, 而粒子的速度受粒子个体最优位置向量 \mathbf{pbest} 中的 $\mathbf{pbest}(i)$ 和全局最优位置 \mathbf{gbest} 的调节. 粒子的迭代过程可以表示为

$$\begin{cases} V(i+1) = \omega'V(i) + c_1r_1(\mathbf{pbest}(i) - X(i)) + \\ \quad c_2r_2(\mathbf{gbest} - X(i)) \\ X(i+1) = X(i) + V(i+1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, i 是粒子当前的代数, c_1 是个体最优加速常数, c_2 是群体最优加速常数, ω' 是惯性权重系数, r_1 和 r_2 是两个在 $[0, 1]$ 区间内的均匀随机数. ω' 越大, 算法受之前速度的影响越大, 对算法的全局性和收敛性都有影响, 对全局性的影响更大; c_1 越大, 粒子朝着自身最优位置迁移的可能性越大, 算法的全局性越好, 相应地收敛性变差; c_2 越大, 粒子朝着群体最优位置迁移的可能性越大, 算法的收敛性越好, 相应地全局性变差.

本文提出了位置方差型 APSO 算法, 并与现有 APSO 进行对比. 定义位置方差型进程因子 θ 为

$$\theta = \frac{\sum_{j=1}^N (X(j) - \bar{X})^2}{N} \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^N (X_0(j) - \bar{X}_0)^2}{N}$$

式中, \bar{X} , \bar{X}_0 分别代表当代粒子和初始粒子位置的均值; $X(j)$, $X_0(j)$ 分别代表第 j 个粒子的当代位置和初始位置; N 代表粒子总数. 取:

$$\begin{cases} \omega' = \omega'_{\max} - (\omega'_{\max} - \omega'_{\min}) \cos\left(\frac{\pi}{2}\theta\right) \\ c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \cos\left(\frac{\pi}{2}\theta\right) \\ c_2 = c_{2\min} + (c_{2\max} - c_{2\min}) \cos\left(\frac{\pi}{2}\theta\right) \end{cases} \quad (9)$$

ω' , c_1 , c_2 分别在 $[\omega'_{\min}, \omega'_{\max}]$, $[c_{1\min}, c_{1\max}]$, $[c_{2\min}, c_{2\max}]$ 的区间内取值. 算法初始化时, 当代粒子群的位置 \mathbf{X} 同时也是初始粒子群的位置 \mathbf{X}_0 , 位置方差型进程因子 θ 为 1; 随着算法的进行, 位置 \mathbf{X} 中的元素逐渐向全局最优解靠近, 位置方差型进程因子 θ 总体上呈现减小的趋势; 算法即将收敛时, 位置 \mathbf{X} 中的元素汇聚在全局最优解附近, 位置方差型进程因子 θ 动态接近于 0. 随着算法从初期进行到后期, θ 从 1 逐渐减小为 0, 而 ω' 从 ω'_{\max} 变化到 ω'_{\min} , c_1 从 $c_{1\max}$

变化到 $c_{1\min}$, c_2 从 $c_{2\min}$ 变化到 $c_{2\max}$. 值得一提的是, 由于粒子迁移的随机性, 位置方差型进程因子 θ 可能在迭代初期出现大于 1 的情况. 当 $\theta > 1$ 时, $\omega' > \omega'_{\max}$ 且 $c_1 > c_{1\max}$ 且 $c_2 < c_{2\min}$, 算法初期的全局性得到了更好的改善. 综上, 采用位置方差型进程因子 θ 的 APSO 同时兼顾了初期的全局搜索能力和后期的收敛性.

3 MCRWPT 最大功率点跟踪的方差型 APSO 算法实现

采用位置方差型 APSO 实现最大功率点跟踪是一个以功率为目标函数, 以系统频率为解空间的单变量单目标寻优过程. 进行右侧最大功率点跟踪的算法实现伪代码如算法 1 所示.

算法 1 右侧最大功率点跟踪算法

1. 算法初始化: 粒子个数为 $N=4$; 最大迭代次数为 $M=30$; 个体加速常数的最大值 $c_{1\max}=3$, 最小值 $c_{1\min}=1$; 群体加速常数最大值 $c_{2\max}=3$, 最小值 $c_{2\min}=1$; 惯性权重系数的最大值 $\omega'_{\max}=1$, 最小值 $\omega'_{\min}=0.5$; 粒子位置的取值范围是 $[48 \text{ kHz}, 70 \text{ kHz}]$; 粒子速度的取值范围是 $[-11 \text{ kHz}, 11 \text{ kHz}]$; 初始粒子位置 \mathbf{X}_0 和速度 \mathbf{V}_0 ; 初始化个体最优 \mathbf{pbest} 和群体最优 \mathbf{gbest}
2. for 代数 $i \leftarrow 1$ to M
3. 将第 i 代粒子位置 $X(i)$ 代入式(9)求出第 i 代算法进程因子 θ ; 将 θ 代入式(8)更新个体最优加速常数 c_1 , 群体最优加速常数 c_2 , 惯性权重系数 ω'
4. for 粒子 $j \leftarrow 1$ to N
5. 系统在粒子 j 对应的频率下工作, 采样电流和电压并计算功率, 功率作为粒子 j 的适应度 $\text{fitness}(i, j)$
6. if $\text{fitness}(i, j) > \mathbf{pbest}(j)$
7. 更新粒子 j 的个体最优值 $\mathbf{pbest}(j)$
8. end if
9. if $\text{fitness}(i, j) > \mathbf{gbest}$
10. 更新群体最优值 \mathbf{gbest}
11. end if
12. end for
13. for 粒子 $j \leftarrow 1$ to N
14. 为求 $X(i+1)$ 和 $V(i+1)$, 将 c_1 , c_2 , ω' , $X(i, j)$ 和 $V(i, j)$ 代入式(7)更新粒子 j 的速度和位置. 若超过取值范围, 取边界值
15. end for
16. end for

4 优化结果及分析

设计 WPT 系统的固有谐振频率为 51 kHz, 直流侧输入电压为 100 V, 电感量为 50 μH , 负载电阻为 20 Ω . 系统的交流输入需要由 PWM (pulse width modulation) 逆变电路生成, 采用同步调制, 固定载波比为 729. MCRWPT 系统的最大功率点位置随耦合情况的变化而变化, 如图 3 所示.

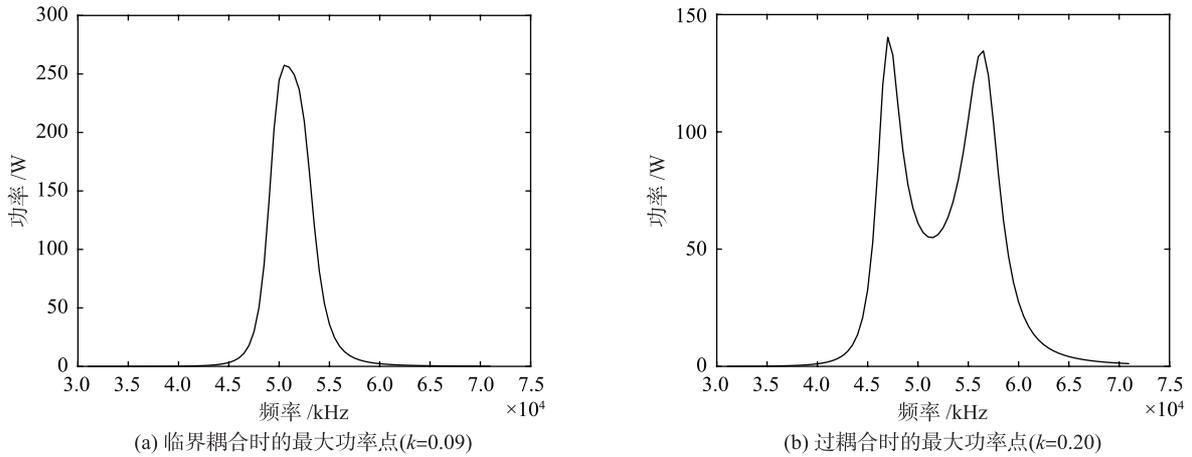


图3 临界耦合和过耦合时的最大功率点

Fig.3 Maximum power point for critical coupling and over coupling

如图3(a)所示, 临界耦合的最大功率点在固有谐振频率 51 kHz 处取得; 图3(b)中过耦合的最大功率点位于固有谐振频率两侧. 运用4种APSO算法对临界耦合、过耦合情况下的最大功率点进行跟踪的功率波形如图4、图5所示.

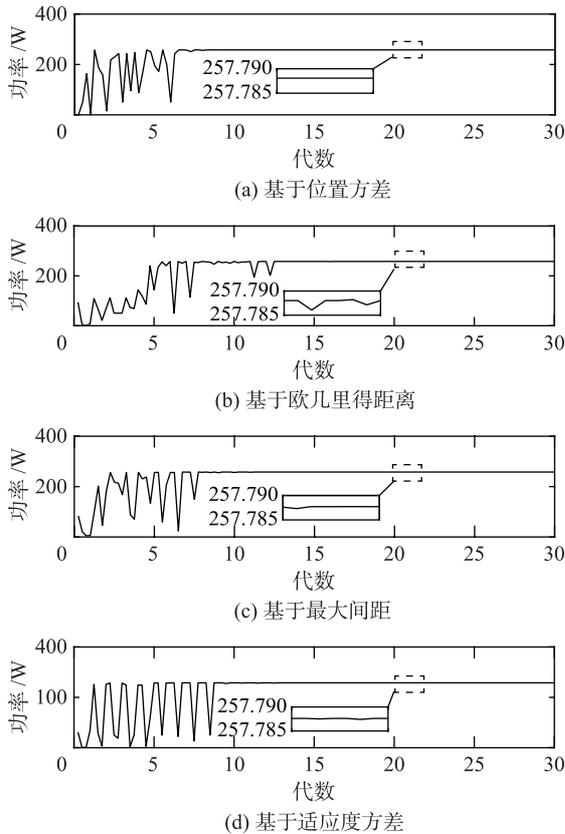


图4 4种APSO的最大功率点跟踪波形($k=0.09$)

Fig.4 Maximum power point tracking waveforms of four APSO algorithms ($k=0.09$)

图4和图5显示, 位置方差型APSO在完成优化后功率的波动最小, 虚线框表示算法收敛后功率的波动范围. 利用

平均纹波比衡量4种算法在实现收敛之后的误差水平:

$$P_{osc} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{maxi} - P_{mini}}{N} \quad (10)$$

式中, N 是算法收敛后剩余的迭代次数, P_{maxi} 和 P_{mini} 是第 i 代功率的最大值和最小值. 利用式(10)求出4种APSO算法功率波动的平均值, 如表1所示, 位置方差型APSO可以实现更精确的最大功率跟踪.

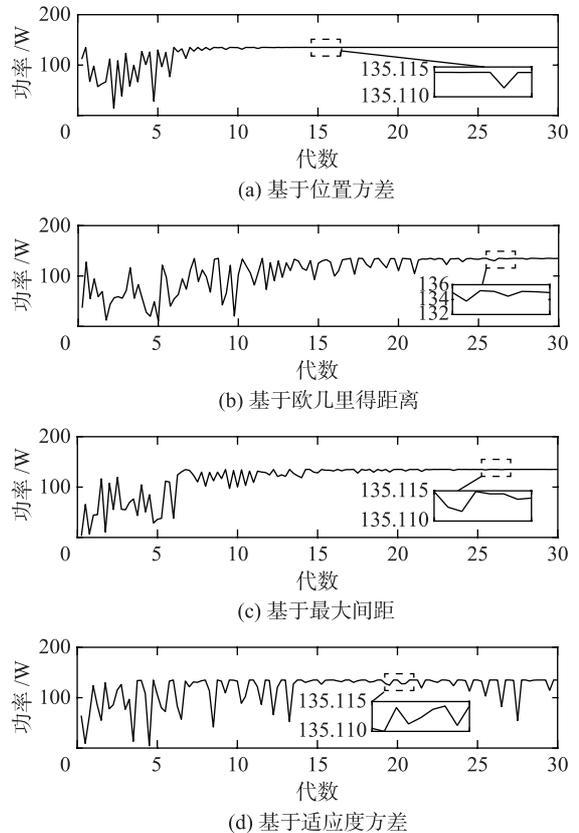


图5 4种APSO的最大功率点跟踪波形($k=0.2$)

Fig.5 Maximum power point tracking waveforms of four APSO algorithms ($k=0.2$)

表1 4种 APSO 功率波动的平均值

Tab.1 Average value of power fluctuation of four APSO algorithms

耦合情况	欧几里得距离型 /W	最大间距型 /W	适应度方差型 /W	位置方差型 /W
$k=0.09$	0.003	0.001	0.001	<0.001
$k=0.2$	1.800	0.004	0.004	0.003

过耦合导致最大功率点突变, 需重启最大功率跟踪算法, 重启条件为

$$\frac{|P_0 - P_1|}{P_0} < 5\% \quad (11)$$

式中, P_0 是一个算法周期后功率的全局最优值, P_1 是系统当前功率. 为临界耦合时的 MCRWPT 系统施加耦合系数突变的扰动, 耦合系数再以第 1 次优化结束后从 0.09 突变至 0.2, 位置方差型 APSO 在突变耦合情况下最大功率点跟踪的功率波形如图 6 所示.

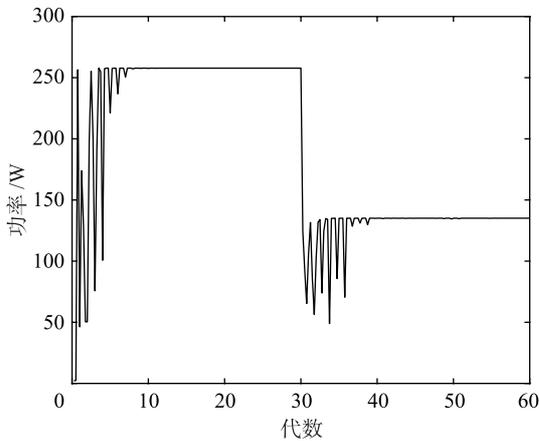


图 6 位置方差型 APSO 的最大功率点跟踪波形 ($k=0.09 \rightarrow k=0.2$)
Fig.6 Maximum power point tracking waveform of APSO algorithm based on variance of locations ($k=0.09 \rightarrow k=0.2$)

算法独立运行 30 次, 取算法重启后的收敛代数的平均值作为平均收敛代数. 以基于适应度方差、最大间距和平均欧几里得距离的 APSO 作为对照组与位置方差型 APSO 的平均收敛代数作对比. 4 种算法的平均收敛代数如图 7 所示, 30 次独立运行中收敛代数的分布如图 8 所示.

由图 7 可见位置方差型 APSO 平均在第 14 代达到最优, 基于最大距离的 APSO 平均在第 19 代达到最优, 基于欧几里得距离的 APSO 平均在第 28 代达到最优, 基于适应度方差的 APSO 平均在第 22 代达到最优.

表 2 算法的 t 检验和 F 检验结果

Tab.2 The results of t -test and F -test of algorithms

对照组	检验结果	F 检验	t 检验
最大距离	检验统计量	1.73	9.67
	置信区间	$[-\infty, 1.43]$ 或 $[6.31, +\infty]$	$[2.82, 6.72]$
欧氏距离	检验统计量	1.70	31.62
	置信区间	$[-\infty, 1.38]$ 或 $[6.10, +\infty]$	$[13.6, 17.4]$
适应度方差	检验统计量	2.84	5.77
	置信区间	$[-\infty, 1.35]$ 或 $[5.97, +\infty]$	$[4.53, 9.34]$

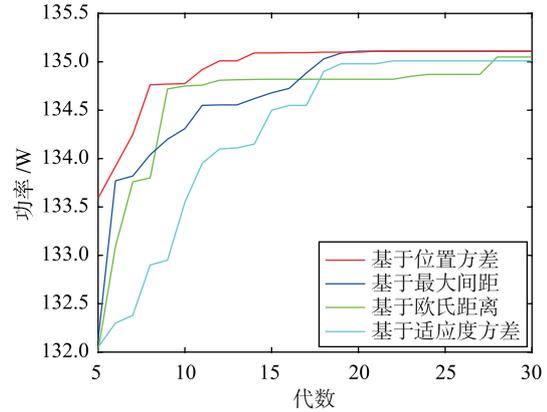


图 7 平均收敛代数

Fig.7 The average numbers of convergence iterations

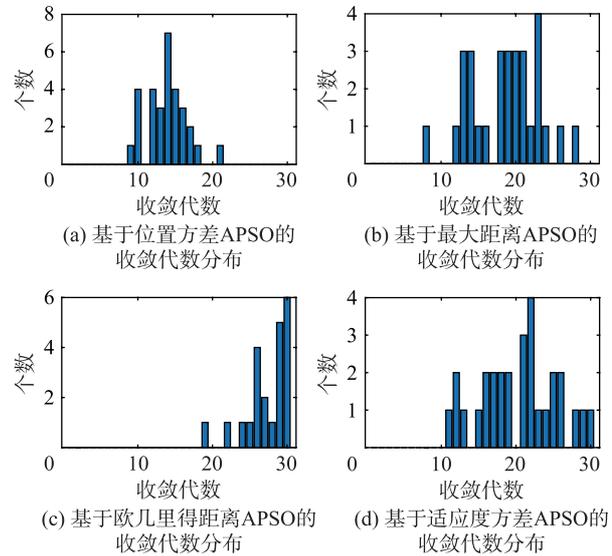


图 8 收敛代数的分布

Fig.8 The distribution of convergence iterations

由图 8 可知, 4 组样本均有正态分布的趋势, 因此可利用 t 检验和 F 检验衡量三种算法的性能本质上是否存在不同. 以基于位置方差的样本为实验组, 分别与基于最大距离、基于欧几里得距离和基于适应度方差的样本进行独立样本检验. F 检验的假设为“两个样本的方差具有显著差异”, t 检验的假设为“两个样本的均值不具有显著差异”, 显著性 α 设为 0.05. 检验结果如表 2 所示.

表 2 中的常数代表检验统计量的值, 区间代表该检验的置信区间. 由于显著性水平为 0.05, 因此根据表 2 可判断是否有 95% 的把握认为 4 种算法在收敛代数上存在显著差异. 在最大距离型和位置方差型的检验中, F 值 1.73 未落在 F 检验的置信区间内, 因此应拒绝 F 检验的原假设“两个样本的方差具有显著差异”, 即应认为“最大距离型和位置方差型的方差不具有显著差异”; t 值 9.67 未落在 t 检验的置信区间内, 因此拒绝 t 检验的原假设“两个样本的均值不具有显著差异”, 即应认为“最大距离型和方差型的均值具有显著差异”. 同理, 在欧几里得距离型和位置方差型的检验中, 也应认为“欧几里得距离型和位置方差型的方差不具有显著差异”, “欧几里得距离型和位置方差型的均值具有显著差异”; 在适应度方差型和位置方差型的检验中, 也应认为“适应度方差型和位置方差型的方差

不具有显著差异”, “适应度方差型和位置方差型的均值具有显著差异”. 因此, 图 7 所体现的 4 种算法在最大功率跟踪性能上的差异具有统计学意义, 其中位置方差型 APSO 能够更快速地实现最大功率跟踪.

5 结论

MCRWPT 系统频率分裂的数学模型显示, 系统在过耦合情况下会分裂出两个最大功率点. 本文在已有的采用 PSO 跟踪最大功率点的方案基础上, 提出一种基于位置方差衡量算法进程的自适应 (APSO) 粒子群算法, 用所提算法实现了对 WPT 系统频率分裂时右侧的最大功率点快速跟踪. 通过对比, 本文所提的位置方差型 APSO 在实现 MCRWPT 系统的最大功率点跟踪时, 稳态精度更高, 收敛代数更少, 其所具有的优势具有统计学意义.

参考文献

- [1] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834): 83–86.
- [2] Ahn D, Kim S, Kim S, et al. Wireless power transfer receiver with adjustable coil output voltage for multiple receivers application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(5): 4003–4012.
- [3] 王维, 黄学良, 谭林林, 等. 磁谐振式无线电能传输系统谐振器参数对传输性能的影响性分析[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(19): 1–6.
Wang W, Huang X L, Tan L L, et al. Effect analysis between resonator parameters and transmission performance of magnetic coupling resonant wireless power transmission system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(19): 1–6.
- [4] 黄程, 陆益民. 磁谐振无线电能传输系统的频率跟踪失谐控制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(15): 3102–3111.
Huang C, Lu Y M. Frequency tracking detuning control of magnetic resonant wireless power transfer system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(15): 3102–3111.
- [5] Ren W, Yuan Y. Study on frequency control technology of resonant wireless power transmission system[C]//*IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 878–883.
- [6] Fu M, Yin H, Zhu X, et al. Analysis and tracking of optimal load in wireless power transfer systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(7): 3952–3963.
- [7] 曾玉凤, 丘东元, 张波. 磁谐振无线电能传输系统线圈设计综述[J]. *电源学报*, 2019, 17(4): 94–104.
Zeng Y F, Qiu D Y, Zhang B. Review of coil designs for magnetic resonant wireless power transfer system[J]. *Journal of Power Supply*, 2019, 17(4): 94–104.
- [8] Huang C, James J E, Covic G A. Design considerations for variable coupling lumped coil systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 680–689.
- [9] Lim Y, Tang H, Lim S, et al. An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(8): 4403–4413.
- [10] Diekhans T, Doncker R W D. A dual-side controlled inductive power transfer system optimized for large coupling factor variations and partial load[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6320–6328.
- [11] Huang R, Zhang B, Qiu D, et al. Frequency splitting phenomena of magnetic resonant coupling wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(11): 1–4.
- [12] 程丽敏, 崔玉龙, 闫贯博. 磁耦合谐振式无线电能传输频率跟踪控制研究[J]. *电力电子技术*, 2014, 48(11): 3–6.
Cheng L M, Cui Y L, Yan G B. Research on frequency tracking control of wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. *Power Electronics*, 2014, 48(11): 3–6.
- [13] 韩冲, 张波. 谐振式无线电能传输系统中高频逆变器的特性分析和参数设计[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(21): 5036–5050.
Han C, Zhang B. Characteristics analysis and parameters design of high frequency inverters in magnetic coupling resonance wireless power transfer system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(21): 5036–5050.
- [14] Gati E, Kampitsis G, Manias S. Variable frequency controller for inductive power transfer in dynamic conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(2): 1684–1696.
- [15] Ameri M H, Yazdian Varjani A, Mohamadian M. A novel algorithm for tracking maximum inductive transferred power point[C]//*2013 4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 372–377.

(下转第 128 页)

- cal Design, 2004, 126(4): 763 – 764.
- [19] Lanczos C. The variational principles of mechanics[M]. North Chelmsford, MA, USA: Courier Corporation, 2012.
- [20] Farid Y, Majd V J, Ehsani-Seresht A. Observer-based robust adaptive force-position controller design for quadruped robots with actuator faults[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2018, 32(10): 1453 – 1472.
- [21] Li Z, Ma X, Li Y. Robust tracking control strategy for a quadrotor using RPD-SMC and RISE[J]. Neurocomputing, 2019, 331: 312 – 322.
- [22] Chen X, Komada S, Fukuda T. Design of a nonlinear disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 429 – 437.
- [23] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932 – 938.
- [24] Nikoobin A, Haghghi R, Nikoobin A, et al. Lyapunov-based nonlinear disturbance observer for serial n -link robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2009, 55(2/3): 135 – 153.
- [25] Mohammadi A, Tavakoli M, Marquez H J, et al. Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(3): 253 – 267.
- [26] Zhang F. The Schur complement and its applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 2006: 17 – 21.

作者简介

朱晓璐(1995 –), 男, 硕士生. 研究领域为四足机器人运动控制.

万锦晓(1995 –), 男, 硕士生. 研究领域为四足机器人运动控制.

许威(1982 –), 男, 博士, 研究员. 研究领域为智能机器人系统.

周川(1970 –), 男, 博士, 教授. 研究领域为智能控制, 故障诊断与重构控制, 多智能体控制.

(上接第 118 页)

- [16] 李壮壮. 电动汽车无线充电电磁耦合机构优化及系统控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Li Z Z. Research on optimization of wireless charging magnetic coupling mechanism and system control strategy for electric vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] 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 J. Research on frequency control algorithm for wireless power transmission under interference factors[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 168 – 175.
- [18] 董勇, 郭海敏. 基于群体适应度方差的自适应混沌粒子群算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 854 – 856.
Dong Y, Guo H M. Adaptive chaos particle swarm optimization based on colony fitness variance[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 854 – 856.
- [19] Zhang Y, Zhao Z, Chen K. Frequency-splitting analysis of four-coil resonant wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2436 – 2445.
- [20] Niu W, Chu J, Gu W, et al. Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(6): 1670 – 1677.
- [21] 李阳, 尹建斌, 杨庆新, 等. 非对称耦合线圈内阻与品质因数对传输功率与效率及其频率分裂的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2742 – 2750.
Li Y, Yin J B, Yang Q X, et al. Influence of internal resistance and quality factor on transfer power and efficiency and frequency splitting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2742 – 2750.
- [22] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942 – 1948.

作者简介

赵越(1997 –), 男, 硕士生. 研究领域为无线电能传输.

沈艳霞(1973 –), 女, 博士, 教授. 研究领域为风力发电故障诊断, 电机的非线性控制等.