

DOI: 10.7652/xjtuxb201704005

采用元胞遗传算法的无线电能传输网路径寻优

孙跃, 夏金凤, 唐春森, 向丽娟

(重庆大学自动化学院, 400030, 重庆)

摘要: 为快速寻找无线电能传输网中传输效率最大、能量损耗最小的传输路径,提出了使用元胞遗传算法对传输路径进行寻优的方案。通过对无线电能传输网数学模型的分析,分别建立了有源注入和无源注入无线电能传输网的目标函数,并将目标函数作为元胞遗传算法的适应度函数,采用重复消除的修复方案将不可行解转化为可行解,以提高种群中的有效个体比例,从而提高搜索效率。元胞遗传算法将遗传算法和元胞自动机进行有效结合,中心个体和邻居之间形成一个小生境,优良个体得以在种群中缓慢扩散,算法能够有效突破局部最优解的限制,迅速收敛至全局最优解。仿真结果显示,在有源注入和无源注入无线电能传输网中,元胞遗传算法都能准确找到最优路径,表明元胞遗传算法用于无线电能传输网路径寻优具有可行性。

关键词: 无线电能传输;无线电能传输网;路径优化;元胞遗传算法

中图分类号: TM743;TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0030-07

Path Optimization for Wireless Power Transfer Networks with Cellular Genetic Algorithm

SUN Yue, XIA Jinfeng, TANG Chunsen, XIANG Lijuan

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To quickly find a path of wireless power transfer networks, which can maximize the transmission efficiency and minimize electrical energy loss, the cellular genetic algorithm (CGA) is chosen to optimize the transfer link. Analyzing the mathematical model of wireless energy transmission network, the objective function of the active injection and the passive injection wireless power transfer networks is established, and the objective function is taken as the fitness function of the cellular genetic algorithm. To heighten the proportion of effective individuals in the population and improve the searching efficiency, a duplicate elimination scheme is proposed to transform infeasible solution into feasible solution. Genetic algorithms and cellular automata are combined by the cellular genetic scheme, a niche thus forms between individuals and their neighbors, the good individuals spread slowly in the population, so the algorithm can effectively break the restriction of local optimal solution and quickly converge to the global optimal solution. Simulation results show that the cellular genetic algorithm can accurately find the optimal path in both the active injection and the passive injection wireless power transfer networks, which verifies the feasibility of this cellular genetic algorithm for path optimization of wireless power transfer networks.

收稿日期: 2016-08-08。 作者简介: 孙跃(1960—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2015AA010402);国家自然科学基金资助项目(51277192,51377183)。

网络出版时间: 2017-02-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170209.1830.008.html>

Keywords: wireless power transfer; wireless power transfer networks; path optimization; cellular genetic algorithm

无线电能传输技术的出现改变了电能只能依靠金属导线的传输模式,其安全、便捷、绿色的特点,引起了各国学者的极大关注^[1-3]。然而,无线电能传输系统的传输距离和传输效率之间的矛盾一直制约着该技术的应用和推广,相同硬件条件下提高传输效率需要缩短传输距离,增加传输距离势必降低传输效率^[4-5]。在一定传输距离内,电能的传输效率能够达到一个比较理想的值,一旦超过某个传输距离,传输效率将会急剧降低,发射极和接收电极之间的电能传输十分有限。

为提高发射极和接收极之间的传输距离并同时保持较高的传输效率,作者所在的团队提出了无线电能传输网的概念^[6],距离相距较远的发射节点和接收节点之间通过多个中继节点^[7-9]传递能量,实现电能传输。文献[7]中,发射线圈通过多个中继线圈将电能传输至 2 m 以外的接收线圈,大大提高了无线电能的传输距离。无线电能传输网在建立链路时,中继节点的选取是随机的,导致发射节点和接收节点之间存在冗余节点,造成不必要的能量损耗,传输路径的优化就成了一个很重要的问题。文献[10]使用了交叉熵算法寻优路径,交叉熵算法是一种随机优化算法,计算过程中随机性较大,收敛速度缓慢。文献[11]使用了蚁群算法优化路径,蚁群算法采用信息素更新机制使得计算速度慢,而且容易陷入局部最优解。

本文提出使用元胞遗传算法来寻找最优路径,元胞遗传算法将元胞自动机原理和遗传算法有效结合,中心个体和邻居形成一个小生境,使得优良个体在种群中缓慢扩散,能够有效突破局部最优解的限制,快速收敛至全局最优解。本文通过仿真将元胞遗传算法和交叉熵算法、蚁群算法进行了比较,验证了元胞遗传算法在无线电能传输网(WPTNs)路径寻优中的可行性。

1 无线电能传输网

1.1 无线电能传输网的架构及基本概念

无线电能传输网是一种平面型自组织网络架构^[6,10-11],网内节点即为无线供电设备,例如无线传感器网络中的传感器、机器人足球比赛中的机器人都可以看作是一个无线电能传输网的节点,每个节点都有 3 种职能,即能量发射、能量接收、能量中继。

对于分布在一定空间范围内的有限节点,电能从发射节点发出,以一对一的方式经过若干个中继节点传递,到达接收节点,发射节点和接收节点之间就形成了一条电能传输链路,若干条传输链路就形成了无线电能传输网的网络拓扑,如图 1 所示。

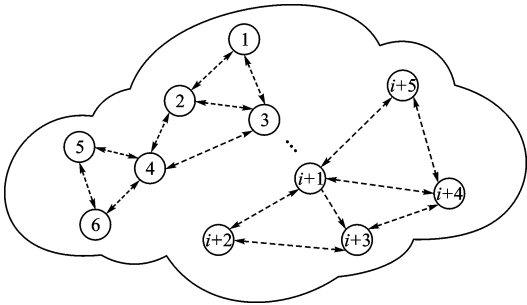


图 1 无线电能传输网网络拓扑示意图

本文中 WPTNs 每个节点都存储一定电能,这些电能称作 WPTNs 的设备初始电能。节点仅仅依靠初始电能在网络中流通以维持正常运行,没有外部电源注入的网络称为无源注入 WPTNs,有外部电源注入的网络称为有源注入 WPTNs。有源注入和无源注入的 WPTNs 分别如图 2 所示,图中 P_1 、 P_2 、 $\dots$ 、 P_{10} 表示节点初始电能。

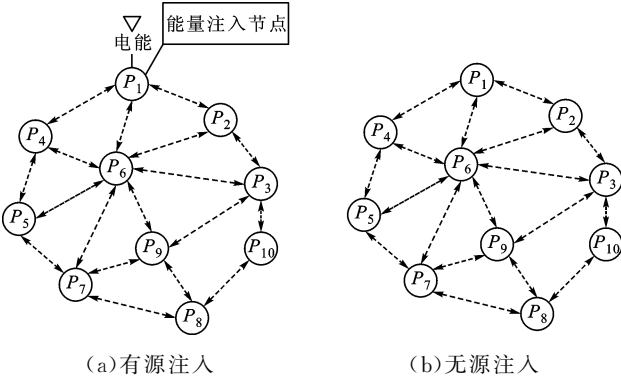


图 2 有源注入和无源注入的 WPTNs 结构图

无线电能传输网的几个重要概念及其定义。

链路传输效率:电能从发射节点经过中继节点到达接收节点,接收节点线圈拾取的电能与发射节点线圈发出的电能之比即为链路的传输效率。节点之间的效率和线圈之间的互感有关,互感越大,线圈之间的耦合越强,传输的效率越高,而线圈之间互感与距离有关,距离越大互感越小。文献[12]已经推导出任意线圈之间的互感计算公式,本文依据该公式计算节点之间的互感,进而求出节点之间的效率,

相邻两个节点传输效率依次相乘^[6,13-14],得到链路的传输效率。

链路生存周期:WPTNs 的链路根据当前网络中节点的电能需求在动态变化,传输链路从形成到传能结束这段时间称为链路的生存周期。

自修复能力:链路在传输过程中出现故障不能正常运作时,链路自我修复并恢复传输电能的能力。

不可交叉性:WPTNs 中节点之间以一对一的传输模式进行电能传输,并且一个节点只能工作在一个状态,同一时间可以有多条传输链路,但是传输链路之间互不交叉。

阈值电能:节点的储能只有高于阈值电能时才能参与 WPTNs 的电能传输。

1.2 无线电能传输网的组网原理

WPTNs 建立链路时,接收节点向外发出能量请求信号,相邻的节点接收到能量请求信号,根据自身的工作状态与储能情况做出回应,接收节点收到相邻节点反馈给它的信号,在众多可行的节点中选取一个节点提供能量。

节点由能量电路、控制模块和通信模块 3 个部分组成。能量电路又有接收电能、传递电能和发射电能 3 个职能,这意味着节点有 3 种工作状态,节点可以在这 3 种状态之间切换,但节点工作时只有一个职能,即接收电能或传递电能或发射电能。如图 3 所示,这是由 3 个节点构成的无线电能传输链路,接收节点的控制模块给通信模块相应指令,通信模块向周围节点发出电能需求信息,中继节点和发射节点的通信模块接收到信息后上传给各自的控制模块,接收节点与中继节点都确认连接后,分别控制其能量电路工作在接收电能和传递电能状态。3 个节点间的电能传输链路由此建立。

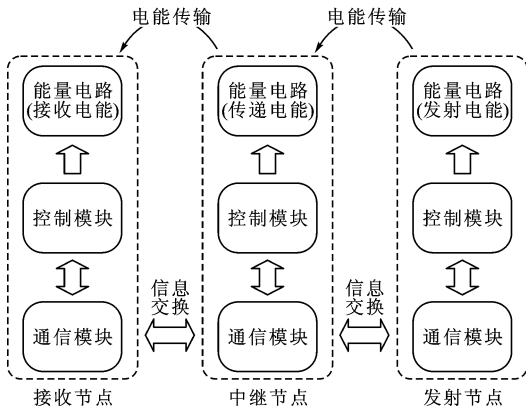


图 3 3 节点的传输链路

1.3 无线电能传输网的数学模型

为进一步分析 WPTNs,需要对其进行数学建模,将 WPTNs 抽象成一个有权图 $N(S,L)$,如图 4 所示。其中 $S(N)$ 是 N 的节点集, $L(N)$ 是 N 的边集,元素 $s \in S$ 为 N 的一个节点,元素 $l_{ij} (l_{ij} \in L, l_{ij} = s_i s_j, i \neq j)$ 为从 s_i 到 s_j 的边, $R = \{s_1, s_2, \dots, s_d\}$ 表示 WPTNs 的传输路径。令元素 $s \in S$ 的属性 p (p 表示节点的剩余电能)具有可加性, p 越大整条传输路径上的电能储量越多,发射节点向接收节点提供的电能越多,链路的生存周期越长; l 的属性 e (e 为边上两节点之间的电能传输效率)具有可乘性, e 越大电能传输路径上的传输效率越高,电能传输过程中损耗越小。 p 和 e 的表达式为

$$p_{s_1, s_d}(R) = \sum_{i=1}^{d-1} p_{s_i} \quad (1)$$

$$e_{s_1, s_d}(R) = \prod_{i=1}^{d-1} e_{s_i, s_{i+1}} \quad (2)$$

路径 $R = \{s_1, s_2, \dots, s_d\}$ 的目标是 p 和 e 尽可能大。

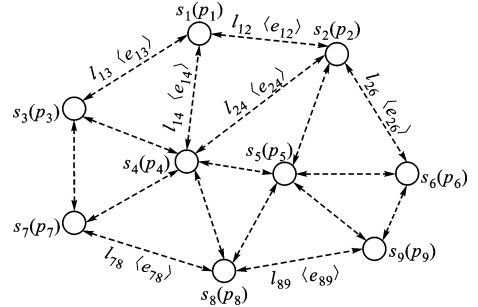


图 4 自组织无线电能传输网数学模型

1.4 有源注入 WPTNs 和无源注入 WPTNs 的目标函数

对于有源注入的 WPTNs,默认外电源注入节点为发射节点,如图 5a 所示,能够提供无限电能,发射节点和接收节点之间的传输路径有多种,传输链路中继节点的剩余能量不再成为链路节点选择的影响因素,此时的目标即为寻求发射节点与接收节点之间传输效率最高的路径 $R = \{s_1, s_2, \dots, s_d\}$ 。目标函数为

$$f(R) = e_{s_1, s_d}(R) = \prod_{i=1}^{d-1} e_{s_i, s_{i+1}} \quad (3)$$

约束条件为

$$\max \prod_{i=1}^{d-1} e_{s_i, s_{i+1}}$$
$$p_i > p_{\text{valve}}$$

式中: p_{valve} 为节点的阈值电能。

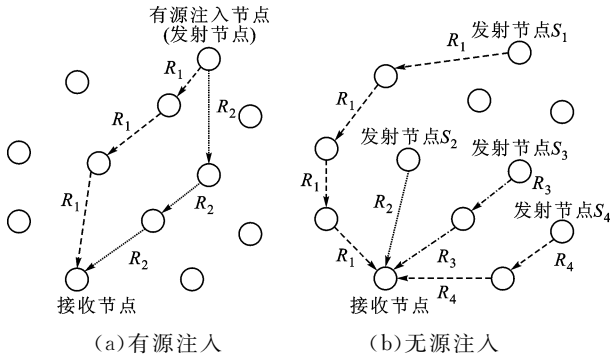


图5 有源注入和无源注入 WPTNs 的传输路径

对于无源注入的 WPTNs,所有节点的电能储量均为有限值,在接收节点确定的情况下,发射节点并不确定,如图 5b 所示,发射节点有多种选择(S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4),到达接收节点的传输路径对应有多条(R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4),接收节点根据所需的能量选择发射节点。此时的目标即为寻求一条路径,使得发射节点到达接收节点的能量总和满足接收节点的需求,并且使传输路径上的能量损失最小。目标函数为

$$p(R) = p_{s_2} e_{s_1, s_2} + p_{s_3} e_{s_1, s_3} + \cdots + p_{s_d} e_{s_1, s_d} \quad (4)$$

$$p(R) = p_{s_2} e_{s_1, s_2} + p_{s_3} \prod_{i=1}^2 e_{s_i, s_{i+1}} + \cdots + p_{s_d} \prod_{i=1}^{d-1} e_{s_i, s_{i+1}} \quad (5)$$

$$p_{\text{loss}}(R) = p_{s_2} (1 - e_{s_1, s_2}) + p_{s_3} (1 - e_{s_1, s_3}) + \cdots + p_{s_d} (1 - e_{s_1, s_d}) \quad (6)$$

$$p_{\text{loss}}(R) = p_{s_2} e_{s_1, s_2} + p_{s_3} (1 - \prod_{i=1}^2 e_{s_i, s_{i+1}}) + \cdots + p_{s_d} (1 - \prod_{i=1}^{d-1} e_{s_i, s_{i+1}}) \quad (7)$$

$$f(R) = p_{\text{loss}}(R) \quad (8)$$

约束条件为

$$p(R) \geq p_{\text{need}}$$

$$\min f(R)$$

$$p_i > p_{\text{valve}}$$

2 元胞遗传算法用于 WPTNs 路径寻优

综上所述,在无线电能传输网接收节点和发射节点之间建立传输链路时,中继节点的选取具有随机性和不确定性等特性,导致发射节点和接收节点之间存在冗余节点,造成不必要的能量损耗,传输路径的优化就成了一个很重要的问题,本文引入了元胞遗传算法来优化路径。

2.1 遗传算法和元胞遗传算法

为提高遗传算法(GA)的寻优能力,改进算法性能,引入了元胞遗传算法(CGA)^[15-18]。元胞遗传算

法是一种将遗传算法和元胞自动机原理相结合的进化算法。CGA 与 GA 最大的不同在于:GA 中种群个体分布是无序的,CGA 种群个体分布是规则有序的,如图 6 所示。CGA 种群中的个体分布在一个环形联通的网络拓扑中,每个个体分布在网络的格点上,个体与它周围的个体就形成了一个小生境,中心个体仅限于与它的邻居进行选择、交叉、变异,使得优良的个体得以在种群中缓慢扩散。

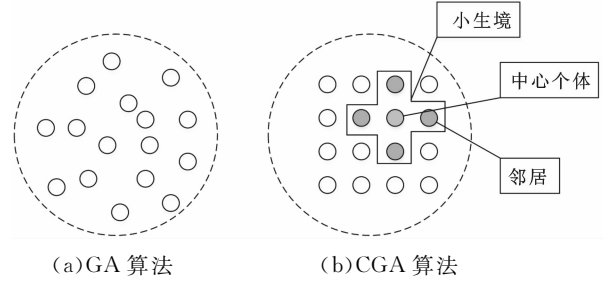


图6 GA 和 CGA 的种群个体分布

2.2 不可行解的修复

遗传算法应用于无线电能传输网进行路径寻优时,根据 WPTNs 的不可交叉性,遗传操作过程的随机性将导致产生大量不可行解(环状结构),这些不可行解增大了搜索范围,降低了搜索效率,并最终导致无法进行有效的搜索寻优。

针对这个问题,本文提出了重复消除的修复方案。该修复方案将路径中重复出现的节点直接消除,这样就将环状路径修复为线状通路,如图 7a 所示的路径 $\{1, 2, 7, 6, 3, 2, 5, 10\}$ 中存在环状结构,根据第 1 节中的不可交叉性,这是一个不可行解。使用重复消除的修复方案之后得到的路径为 $\{1, 2, 7, 6, 3, 5, 10\}$,实现了不可行解的处理,还将不可行解转换为可行解,增加了种群中可行解的比例,提高了搜索效率。

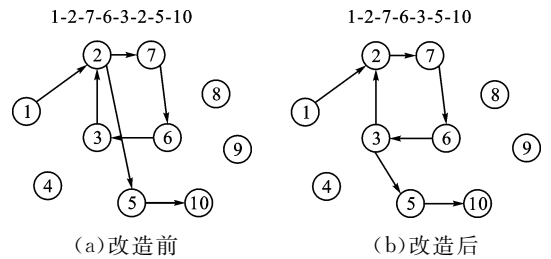


图7 路径修复对比图

2.3 WPTNs 路径寻优步骤

使用遗传算法进行路径优化有两个要素:个体的二进制编码和适应度函数的确定。在 WPTNs 的路径优化中,路径是优化对象,本文模型中路径 R 为数组 $\{s_1, s_2, \cdots, s_d\}$,可作为遗传算法的个体进行

二进制编码。路径的优劣是通过传输效率和剩余电能两个指标来进行评估的,因此 WPTNs 的目标函数 $f(R)$ 可作为算法的适应度函数。下面是元胞遗传算法寻优 WPTNs 路径的算法步骤。

步骤 1 CGA 算法参数初始化,包括种群数、最大迭代次数等。将 WPTNs 的传输路径 $R=\{s_1, s_2, \cdots, s_d\}$ 作为个体进行编码,节点编号 s_d 用 b 位二进制表示,编码后的个体即为一个长度为 db 的二进制向量。随机生成初始种群 $(db)q$ 的二进制矩阵, q 为种群中个体的数量。

步骤 2 CGA 算法初始种群中个体按照 ab 网格排列,对个体按照 von Neumann 规则分配邻居,即个体 c_{ij} 的邻居为 $c_{i-1,j}, c_{i+1,j}, c_{i,j-1}, c_{i,j+1}$,并创建种群的邻居矩阵。

步骤 3 按照个体排列方阵从左至右从上到下依次取出中心个体,从中心个体的 4 个邻居中选择一个邻居个体,在中心个体和邻居个体之间进行交叉、变异操作,生成两个全新的个体。

步骤 4 用 WPTNs 的目标函数 $f(R)$ 作为适应度函数,算出个体的适应度,将两个新个体中适应度较大的个体与中心个体比较,用适应度较高的新个体代替适应度较低的个体,依次对个体进行比较更新,如此便产生了新的种群。

步骤 5 用新的种群作为目标种群,重复步骤 1~步骤 4,依次迭代直到结束条件,适应度值最大的个体对应的 $R=\{s_1, s_2, \cdots, s_d\}$ 便是所求的最优路径。

3 仿 真

3.1 仿真背景

根据上文建立一个如图 1 所示的随机分布在 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 中由 10 个节点组成的 WPTNs,节点的拓扑在文献[6]中已有论述,节点的物理属性包括线圈的匝数、半径、内阻、电流等,在仿真的时候都有具体的设计,本文中的路径寻优是以效率为导向,在文中只体现了效率。仿真针对有源注入和无源注入两种情况下的 WPTNs,分别使用元胞遗传算法(CGA)、蚁群算法(ACO)和交叉熵算法(CE)进行路径寻优,以验证元胞遗传算法在 WPTNs 中路径寻优的可行性。CGA 仿真参数见表 1。

3.2 有源注入 WPTNs 最优路径仿真

有源注入 WPTNs 的目标函数为式(3),为了消除随机因素带来的影响,在相同初始种群条件下,元胞遗传算法、蚁群算法、交叉熵算法各计算 100 次,求得传输效率的平均值如图 8 所示,3 种算法都能

表 1 CGA 仿真参数

参数	数值	参数	数值
种群大小	30	计算次数	100
迭代次数	100	二进制位数	50
选择概率	0.9	变异概率	0.1
种群长度	6	种群宽度	5

够收敛至最优路径(1-4-3-9-10)。结合表 2 可知,100 次计算中蚁群算法和交叉熵算法搜寻到最优路径的次数分别为 44 和 83,元胞遗传算法搜索到最优路径的次数达到 99。由 3 种算法比较可知,元胞遗传算法能够有效突破局部最优解的限制,并能够快速收敛至传输效率最大的路径。

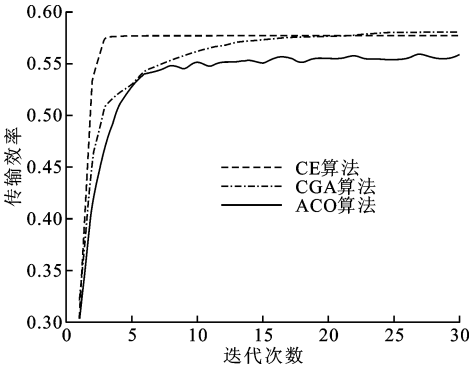


图 8 算法的迭代收敛过程

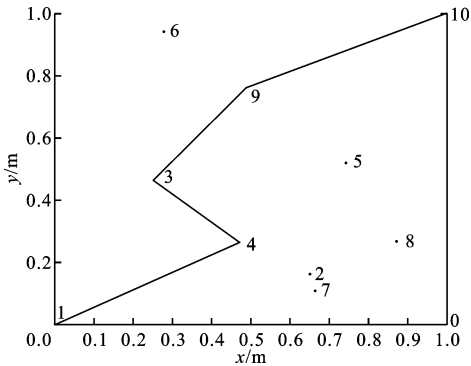


图 9 算法优化的传输路径

表 2 3 种算法优化结果比较

算法	收敛路径	收敛至最优路径的次数
CGA	1-4-3-9-10	99
ACO	1-4-3-9-10	44
CE	1-4-3-9-10	83

3.3 无源注入 WPTNs 最优路径仿真

无源注入 WPTNs 的目标函数为式(8),为了消除随机因素带来的影响,在相同初始种群条件下,设置接收节点所需能量 $p_{\text{need}}=1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时,元胞遗传算法、蚁群算法、交叉熵算法各计算 100 次,求得能

量损耗的平均值如图 10 所示。结合表 3 可知:交叉熵算法找到的路径传输能量达不到需求,并且能量损耗较大;蚁群算法用于无源注入无线电能传输网路径寻优不收敛;元胞遗传算法能够成功找到满足能量需求并且能量损耗最小的路径,见图 11。3 种算法中只有元胞遗传算法能够用于无源注入的无线电能传输网路径寻优。

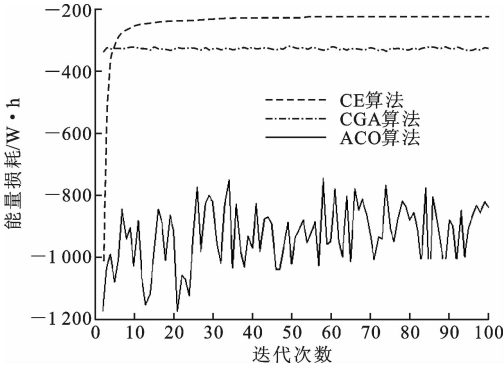


图 10 $p_{\text{need}}=1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时算法的迭代过程

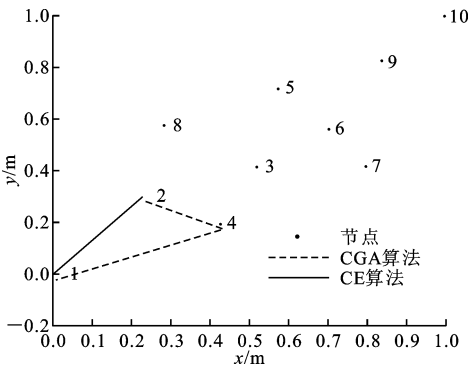


图 11 $p_{\text{need}}=1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时算法优化的传输路径

表 3 $p_{\text{need}}=1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时 3 种算法优化结果比较			
算法	收敛路径	能量损耗/ $\text{W}\cdot\text{h}$	传输能量/ $\text{W}\cdot\text{h}$
CGA	1-4-2	219	1 325
CE	1-2	310	452
ACO	不收敛		

4 结 论

针对无线电能传输网路径寻优算法收敛缓慢并且易陷入局部最优的缺点,本文提出了使用元胞遗传算法对无线电能传输网进行路径寻优的方案。首先,介绍了无线电能传输网的概念和数学模型,构建了有源注入 WPTNs 和无源注入 WPTNs 的目标函数和约束条件,并将目标函数作为元胞遗传算法的适应度函数。然后,针对元胞遗传算法应用于无线电能传输网路径寻优产生的大量不可行解,提出了重复消除的修复方案以提高可行解的比例,进而提

高元胞遗传算法的搜索效率。元胞遗传算法本身结合了元胞自动机和遗传算法的优良性能,能够有效突破局部最优解的限制,快速收敛至全局最优解。仿真结果显示,在有源注入和无源注入无线电能传输网中,元胞遗传算法均能准确找到最优路径,3 种算法中只有元胞遗传算法能够用于无源注入的无线电能传输网路径寻优,表明元胞遗传算法用于无线电能传输网路径寻优具有可行性。

后续将进一步研究无线电能传输网的动态过程和节点工作规律,本文的研究成果可为后续无线电能传输网的理论研究和工程化设计提供理论支持。

参考文献:

[1] GREEN A W, BOYS J T. 10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control [C]// International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives. London, UK: IET, 1994: 694-699.

[2] GREEN A, BOYS J. Inductively coupled power transmission-concept, design, and application [J]. Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand: Electrical/Mechanical/Chemical Engineering, 1995, 22(1): 1-9

[3] LI H L, HU A P, COVIC G A, et al. Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer [J]. Electronics Letters, 2009, 45(1): 76-77.

[4] ZHONG W X, HUI S Y R. Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 4025-4034.

[5] LI H, LI J, WANG K, et al. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3998-4008.

[6] 孙跃,戴欣,唐春森,等. 分布式无线电能传输网[J]. 电力电子, 2010(3): 59-61.

SUN Yue, DAI Xin, TANG Chunsen, et al. Study on distributed wireless power transfer network [J]. Power Electronics, 2010(3): 59-61.

[7] LEE C K, ZHONG W X, HUI S Y R. Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino-resonator systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1905-1916.

[8] ZHANG Fei, HACKWORTH S A, FU Weinong, et al. The relay effect on wireless power transfer using

- witricity [C]//2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2010; 1.
- [9] 戴欣, 施惠, 孙跃. 复合谐振型非接触电能双向传输模式[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 487-493. DAI Xin, SHI Hui, SUN Yue. An LCL composite resonant-type bi-directional contactless power transfer mode [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 487-493.
- [10] XIANG L, SUN Y, DAI X, et al. Route optimization for wireless power transfer network based on the CE method [C]// Electronics and Application Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2015; 630-634.
- [11] 孙跃, 杨芳勋, 戴欣. 基于改进型蚁群算法的无线电能传输网组网[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 146-151. SUN Yue, YANG Fangxun, DAI Xin. Construction of wireless power transfer networks based on improved ant colony optimization [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(10): 146-151.
- [12] BABIC S, SIROIS F, AKYEL C, et al. Mutual inductance calculation between circular filaments arbitrarily positioned in space; alternative to Grover's formula [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(9): 3591-3600.
- [13] 康乐, 胡欲立, 张克涵. 水下磁谐振式无线电能传输系统的分析与设计[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 41-47. KANG le, HU Yuli, ZHANG Kehan. Analysis and design for underwater magnetic resonance-based wireless power transfer system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 41-47.
- [14] 傅文珍, 张波, 丘东元, 等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 21-26. FU Wenzhen, ZHANG Bo, QIU Dongyuan, et al. Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2009, 29(18): 21-26.
- [15] 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 31-35. LIU Xiaomin, ZHANG Wenbin. Multi-objective automatic optimization design of centrifugal impeller based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(1): 31-35.
- [16] 赵志斌, 孙跃, 周诗杰, 等. 非接触电能传输系统参数优化的改进遗传解法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 106-112. ZHAO Zhibin, SUN Yue, ZHOU Shijie, et al. Improved genetic algorithm for parameter optimization in contactless-power-transfer system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 106-112.
- [17] LI M, LU Y, JIE L. Hybrid multipopulation cellular genetic algorithm and its performance [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(4): 405-412.
- [18] CHEN Hao, LI Ming, CHEN Xi. Predator-prey cellular genetic algorithm for solving dynamic optimization problems [J]. Control and Decision, 2012, 27(6): 827-832.

[本刊相关文献链接]

- 赵进全, 尹建华, 夏建生, 等. 一种非对称输电线路参数的在线测量方法. 2016, 50(2): 80-84. [doi:10.7652/xjtuxb201602014]
- 徐海洋, 宋国兵, 樊占峰, 等. 行波波头的参数识别方法在高压直流输电系统中的应用. 2016, 50(2): 85-90. [doi:10.7652/xjtuxb201602015]
- 康乐, 胡欲立, 张克涵. 水下磁谐振式无线电能传输系统的分析与设计. 2015, 49(10): 41-47. [doi:10.7652/xjtuxb201510007]
- 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程. 2014, 48(10): 66-76. [doi:10.7652/xjtuxb201410011]
- 李鹏, 杨玉龙, 黄越辉, 等. 综合热负荷控制下的省级电网风电并网研究. 2014, 48(2): 69-73. [doi:10.7652/xjtuxb201402012]
- 周磊, 汪楚清, 孙清, 等. 玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析. 2013, 47(9): 112. [doi:10.7652/xjtuxb201309019]
- 王宏金, 孟庆丰. 压电振动能量收集器的等效电路建模分析与实验验证. 2013, 47(10): 75-80. [doi:10.7652/xjtuxb201310013]
- 满蔚仕, 张志禹, 康青, 等. 利用快速S变换的电能质量扰动识别方法. 2013, 47(8): 133-140. [doi:10.7652/xjtuxb201308023]
- 赵志斌, 孙跃, 周诗杰, 等. 非接触电能传输系统参数优化的改进遗传解法. 2012, 46(2): 106-112. [doi:10.7652/xjtuxb201202018]
- 蒋国顺, 李建华, 夏道止, 等. 应用牛顿法的高压直流输电系统非特征谐波潮流算法. 2011, 45(6): 10-110. [doi:10.7652/xjtuxb201106019]

(编辑 杜秀杰)