

基于改进灰狼算法的充电桩供电线路规划研究

战彦君¹, 张玲华^{1,2}

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;
2. 江苏省通信与网络工程技术研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要:针对城市电动汽车共享充电桩分布的随机性和不均匀性,为了以最高效率和最低成本对区域中充电桩供电,将灰狼算法应用于充电桩供电线路规划中。针对传统灰狼算法易陷入局部最优解、初始种群分布不均匀和后期收敛速度慢等问题,提出了一种基于 Tent 映射和非线性收敛因子的改进灰狼算法。通过 Tent 混沌映射产生种群初始解以丰富种群多样性,采用非线性收敛因子和加入随机扰动的位置更新公式来避免陷入局部最优和加快算法后期收敛速度。对城市充电桩进行供电线路实例仿真,并将改进算法与传统灰狼算法、粒子群算法、遗传算法、免疫算法、模拟退火算法、布谷鸟算法、教与学算法进行比较。实验结果表明,改进算法收敛速度快,稳定性好,可以很好地应用于充电桩供电线路规划。

关键词:充电桩;灰狼优化算法;Tent 混沌映射;非线性收敛因子;线路规划

中图分类号: TP181

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2023)08-0186-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2023.08.027

Research on Power Supply Line Planning of Charging Pile Based on Improved Gray Wolf Algorithm

ZHAN Yan-jun¹, ZHANG Ling-hua^{1,2}

(1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Communication and Network Technology Engineering Research Center, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the randomness and unevenness of the distribution of shared charging piles for urban electric vehicles, gray wolf algorithm is applied to the power supply line planning of charging piles in order to achieve the lowest cost and highest efficiency of power supply. Aiming at the problems such as local optimal solution, uneven initial population distribution and slow convergence, an improved gray wolf algorithm based on Tent mapping and nonlinear convergence factor is proposed. The Tent chaotic map is used to generate the initial population solution to enrich the diversity of the population. The nonlinear convergence factor and the position update formula with random perturbation are used to avoid falling into the local optimum and speed up the later convergence of the algorithm. The improved algorithm is compared with the traditional gray wolf algorithm, particle swarm optimization algorithm, genetic algorithm, immune algorithm, simulated annealing algorithm, cuckoo algorithm and teaching and learning algorithm. The experimental results show that the improved algorithm has fast convergence speed and good stability, which can be well applied to the problem of power supply line planning of charging pile.

Key words: charge pile; gray wolf optimization algorithm; Tent chaotic map; nonlinear convergence factor; line planning

0 引言

近年来,煤炭、石油、天然气等化石燃料的大量消耗,使得能源危机和环境问题日益严重^[1]。为了有效应对,中国提出了碳达峰、碳中和目标,致力于构建以电能为核心的清洁、低碳、高效能源体系,大力推广电动汽车是其中的重要一环。与燃油汽车不同的是,电

动汽车续航能力较差,因此要在城市中布设充电桩。由于实际城市中建筑的限制以及区域需求不同,充电桩的分布具有随机性和不均匀性,假如充电桩和电力调度中心之间供电线路规划不合理,必然会大大增加建设成本和电力传输过程中的损耗。为此,研究合适的充电桩供电线路模型,以最高效率和最低成本对充

收稿日期: 2022-10-02

修回日期: 2023-02-07

基金项目: 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金(HBSEES202113)

作者简介: 战彦君(1999-),男,硕士研究生,研究方向为能源互联网;通讯作者: 张玲华(1964-),女,教授,博导,研究方向为智能信号处理、能源互联网。

电桩供电十分重要。

受到灰狼围捕和狩猎的行为启发,Mirjalili 等人于2014 年提出了灰狼算法^[2] (gray wolf optimization, GWO)。相较于粒子群算法^[3]、遗传算法^[4]、蚁群算法^[5]等经典智能优化算法,该算法具有结构简单、参数少、求解精度高且速度快^[6]等优点,被广泛应用于经济调度^[7]、作业车间调度^[8]、图像分割^[9]和云计算资源负荷预测^[10]等诸多领域。但是,GWO 算法存在易陷入局部最优解、初始种群分布不均匀和后期收敛速度慢^[11]等缺点。该文提出一种基于 Tent 混沌映射^[12]和自适应收敛因子的改进灰狼优化算法(ITAGWO),将其应用于城市电动汽车充电桩供电线路规划中。首先,针对初始种群分布不均匀,采用 Tent 混沌映射来产生种群初始可行解,以丰富种群的多样性;其次,将线性收敛因子改为非线性自适应收敛因子,平衡其局部搜索和全局搜索能力,加快收敛速度;最后,改进灰狼围捕猎物时的位置更新公式,以不同权重采纳三类头狼的经验,并加入随机扰动因子。对区域的充电桩进行供电线路规划仿真,与传统灰狼算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、免疫算法^[13] (immune algorithm, IA)、模拟退火算法^[14] (simulated annealing algorithm, SA)、布谷鸟算法^[15] (cuckoo search algorithm, CSA)、教与学算法^[16] (teaching-learning-based optimization, TLBO)进行了对比。在到达全局最优解的前提下,该算法迭代次数少、收敛速度快且稳定性好,相比于其他智能算法具有明显优势。

1 模型构建

该文主要提出一种充电桩供电线路规划模型,在连接区域中所有充电桩的同时,以路径最短为目标。模型可以描述为:在区域中有 n 个充电桩,并且充电桩坐标位置已知,供电线路从其中某一充电桩出发,依次为区域中所有充电桩输电,每个充电桩都只被经过一次。当区域中充电桩数目过多时,单线路输电效率过低,此时将区域分成多个子区域,每个子区域采用一条供电线路将区域内的充电桩遍历,可以显著缩短供电时间,提高充电桩输电效率。为构建适当模型,作以下假设:

(1)不考虑实际的交通道路情况,仅以直线距离为例;

(2)不考虑线路中仅有部分充电桩需要供电的情况,假设每次输电每个充电桩都需要被充电;

(3)假设电力调度中心距离哪个充电桩近,就以该充电桩为起点;

(4)不考虑充电桩需求量超过线路输送容量的情

况,假设每次输电都能满足所有充电桩的需求;

(5)当划分子区域时,假设各子区域中的供电线路都与单调度线路模型一致。

1.1 单调度线路模型构建

(1)区域中第 i 个充电桩和第 j 个充电桩之间的距离 D_{ij} 的计算公式为:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i, j \in n \quad (1)$$

其中, x_i 和 y_i 表示充电桩 i 的横纵坐标; x_j 和 y_j 表示充电桩 j 的横纵坐标; n 表示区域中的充电桩个数。

(2)定义 0-1 变量来判断是否经过某个充电桩:

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{从充电桩 } i \text{ 到充电桩 } j \\ 0, & \text{未从充电桩 } i \text{ 到充电桩 } j \end{cases} \quad (2)$$

(3)为了以最小运输成本给充电桩输电,就要使供电线路的总路径长度最小,所以目标函数的函数表示为:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot Z_{ij} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \sum_{j \neq i} Z_{ij} = 1, i \in n \\ \sum_{i \neq j} Z_{ij} = 1, j \in n \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,约束条件表示调度线路必须经过每个充电桩,并且只经过一次。

1.2 多调度线路模型构建

当区域中充电桩数量过多时,为了有效提高输电效率,将区域划分成多个子区域,分多条线路对供电桩进行高效率输电。在充电桩总数为 n 的情况下,将区域分成 p 个子区域,第 k 个子区域中的充电桩个数为 x_k ($k = 1, 2, \dots, p$)。

(1)在第 k 个子区域中,第 i 个充电桩和第 j 个充电桩之间的距离 D_{ijk} 计算公式为:

$$D_{ijk} = \sqrt{(x_{i_k} - x_{j_k})^2 + (y_{i_k} - y_{j_k})^2}, \quad i_k, j_k \in x_k \quad (4)$$

其中, x_{i_k} 和 y_{i_k} 表示第 k 个子区域中充电桩 i 的横纵坐标; x_{j_k} 和 y_{j_k} 表示第 k 个子区域中充电桩 j 的横纵坐标。

(2)定义 0-1 变量来判断是否经过第 k 个子区域中某个充电桩。

$$Z_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{从充电桩 } i_k \text{ 到充电桩 } j_k \\ 0, & \text{未从充电桩 } i_k \text{ 到充电桩 } j_k \end{cases} \quad (5)$$

(3)要遍历子区域中的每个充电桩,同时供电线路总长度最短,目标函数表达式为:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k=1}^p \sum_{i_k=1}^{x_k} \sum_{j_k=1}^{x_k} D_{ijk} \cdot Z_{ijk} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \sum_{j_k \neq i_k} Z_{ijk} = 1, i_k \in x_k \\ \sum_{i_k \neq j_k} Z_{ijk} = 1, j_k \in x_k \\ \sum_{k=1}^p x_k = m \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, p 表示所划分的子区域个数; x_k 表示第 k 个子区域中充电桩的个数; 约束条件表示第 k 条供电线路必须经过子区域 k 中每个充电桩, 且只经过一次, 所有子区域中充电桩总数为 m 。

2 传统灰狼算法

2.1 灰狼种群的等级制度

灰狼种群具有十分严格的等级制度, 狼群具体划分为 α 狼、 β 狼、 δ 狼、 ω 狼四类^[17]。其中 α 狼是种群中的最高领导者, 负责管理种群和各项重要决策事务; β 狼的职责是协助 α 狼做出决策和管理整个种群, 传送上级指令并反馈信息; δ 狼服从前两类狼的调度命令, 从事侦查、放哨等底层管理事务, 能力不足或者生病的 α 狼、 β 狼也会降级成 δ 狼; 而 ω 狼是种群的基本组成成员, 等级最低且数量最多, 需要服从三类头狼的命令, 对于维持种群平衡有着不可或缺的作用。

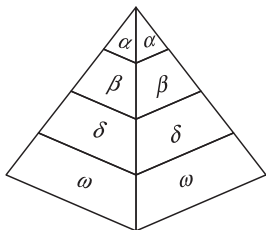


图 1 灰狼种群等级金字塔

灰狼狼群的捕猎行为分成跟踪、包围和猎杀三个阶段。首先, 灰狼群体会对目标猎物进行追踪; 之后, 由 α 狼带领整个狼群对目标猎物进行全方位的包围; 最后, α 狼指挥最靠近猎物的 β 狼、 δ 狼对猎物进行猎杀, 若是猎物逃脱, 由狼群中其余灰狼继续进行围猎, 直到最终捕获猎物。

2.2 灰狼算法 GWO

假设搜索空间为 D 维, 数量为 N 的灰狼组成种群, 其中第 i 只灰狼的位置记为: $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id})$, 将种群中适应度值前三个分别记为 α 狼、 β 狼和 δ 狼, 种群中其它个体全部记为 ω 狼。

(1) 在跟踪和包围猎物的过程中, 相应的数学模型为:

$$\vec{D} = |\vec{C} * \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} * \vec{D} \quad (8)$$

其中, t 表示当前的迭代次数, \vec{A} 和 \vec{C} 是系数向量, \vec{X}_p 和 \vec{X} 分别是是目标猎物和灰狼的位置向量, 系数向量的定义如式(9)和式(10)所示:

$$\vec{A} = 2\vec{a} * \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (9)$$

$$\vec{C} = 2 * \vec{r}_2 \quad (10)$$

其中, \vec{a} 为收敛因子, 随着迭代次数从 2 线性递减到 0;

\vec{r}_1 和 \vec{r}_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

(2) 在狼群锁定目标猎物的位置后, α 狼会带领 β 狼和 δ 狼包围猎物。通常这三类狼对目标猎物的潜在位置更加了解, 所以狼群其他成员根据三者的位置判断猎物的位置并不断更新自身位置, 向着目标猎物靠近。狼群围猎行为的数学模型如式(11)~式(13)所示:

$$\begin{cases} D_\alpha = |\vec{C}_1 * \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ D_\beta = |\vec{C}_2 * \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ D_\delta = |\vec{C}_3 * \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (11)$$

其中, D_α 、 D_β 、 D_δ 表示狼群其它个体和 α 狼、 β 狼、 δ 狼的距离; \vec{X}_α 、 \vec{X}_β 、 \vec{X}_δ 分别表示 α 狼、 β 狼、 δ 狼的当前位置。

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - A_1 * (\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - A_2 * (\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - A_3 * (\vec{D}_\delta) \end{cases} \quad (12)$$

其中, \vec{X}_1 、 \vec{X}_2 、 \vec{X}_3 表示灰狼个体向着 α 狼、 β 狼、 δ 狼的移动步长; A_1 、 A_2 、 A_3 表示灰狼个体向着 α 狼、 β 狼、 δ 狼的移动方向。

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (13)$$

根据式(13)所求步长, 最终确定灰狼个体下一步的更新位置。

3 改进灰狼算法 (ITAGWO)

3.1 Tent 混沌映射

针对 GWO 随机产生初始可行解导致的初始种群分布不均匀、物种多样性差的缺陷, 采用 Tent 混沌映射的方法产生初始种群, 其良好的多样性和遍历性有效提高了求解精度和收敛速度。Tent 映射也即帐篷映射, 是一种分段的线性映射, 因其函数图像酷似帐篷而得名, 其函数表示如下:

$$x_{t+1} = \begin{cases} \frac{x_t}{u}, & 0 \leq x_t < u; \\ \frac{1-x_t}{1-u}, & u \leq x_t \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

由于 $u = 1/2$ 时, Tent 映射是具有均匀分布的典型序列, 对不同的参数有近似一致的分布密度, 因而该文引用 $u = 1/2$ 的 Tent 映射公式, 如式(15)所示:

$$x_{t+1} = \begin{cases} 2x_t, & 0 \leq x_t < \frac{1}{2} \\ 2(1-x_t), & \frac{1}{2} \leq x_t \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

3.2 非线性收敛因子

在灰狼算法中,收敛因子 a 的选取决定算法的局部和全局搜索能力^[18]。传统灰狼算法的收敛因子是从 2 线性递减到 0 的,而在实际优化问题中灰狼算法的搜索过程比较复杂,线性递减的收敛因子导致算法的搜索能力弱^[19]。该文采用非线性递减的方式改进收敛因子^[20]:前期递减速度慢,较大的 a 值增强全局搜索能力,避免陷入局部最优解;后期收敛速度慢,较小的 a 值增强局部搜索能力,加快收敛速度。这种非线性收敛机制可以协调灰狼算法的局部和全局搜索能力,并且 a 值切换具备自适应性。改进收敛因子表达式如式(16)所示:

$$a = 2 - 2 * \frac{k_{\max}^t - 1}{k - 1} \quad (16)$$

其中, k 为调节系数,它的取值决定着 a 随着迭代次数增加而递减的速度,该文取为 $e^{[6]}$; t 为当前迭代次数; t_{\max} 为最大迭代次数。

3.3 随机扰动

传统灰狼算法中, ω 狼的位置更新是等权重地参考三类头狼的位置信息,在搜索后期所有灰狼都会向 α 狼、 β 狼、 δ 狼附近区域靠拢,这样极易陷入局部最优,影响算法的收敛速度。该文采用的位置更新公式采用不同的权重参考三类头狼的位置信息,对级别越高的狼参考权重相应越大,以加快收敛速度;并加入了随机扰动以防止陷入局部最优解,其公式表达如下:

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1}{2} + \frac{\vec{X}_2}{3} + \frac{\vec{X}_3}{6} + \frac{\text{randn}}{10} \quad (17)$$

3.4 改进灰狼算法流程

改进灰狼算法流程如图 2 所示。

4 仿真实验及分析

4.1 实验参数设置

实验仿真软件为 Matlab R2018b。参照元启发式算法比较文献[21]和各算法的参考文献中对实验参数的设置,结合实际实验过程中算法的性能和收敛效果,对各个算法的参数设置如下:GWO 和 ITAGWO 的种群大小为 100;CSA 的种群大小为 100,鸟蛋被发现概率为 0.3,步长因子 α 为 0.015,莱维飞行中的 β 因子为 1;PSO 中粒子数量为 500,个体学习因子为 0.1,社会学习因子为 0.075,惯性因子为 1;IA 的抗体种群个数为 100,免疫选择比例为 20%,抗体克隆扩增倍数为 5,种群刷新比例为抗体种群的 30%;SA 的初始温度为 1 000,终止温度为 $1e-3$,降温因数为 0.9,Metropolis 准则链长为 200,种群大小为 100;GA 的种群规模为 100,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.001;TLBO 的种群大小为 100。查阅群智能算法相关文献

发现,其迭代次数一般设置为 100 ~ 500,结合实验迭代终止时次数均在 50 以内的情况,考虑到未来更复杂区域和更庞大数量充电桩的场景,该文所有算法的终止迭代次数均为 300 次,种群搜索维度为 10。

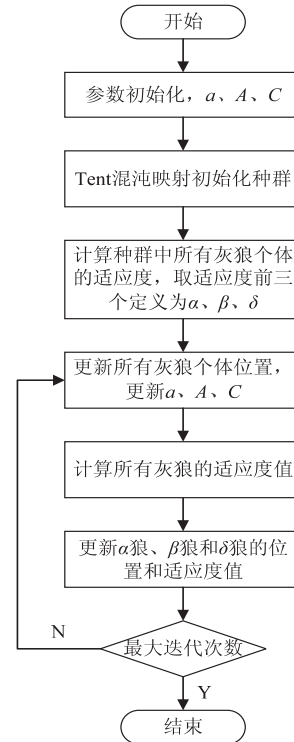


图2 改进灰狼算法流程

假设空间中存在一个 100 km * 100 km 的正方形区域,坐标范围为 (0,0) 到 (100,100),将空间划分成四个子区域,每个子区域中有 10 个充电桩,以区域中充电桩全部连接时总线路长度最小为目标进行实例仿真,各区域充电桩的坐标见表 1。

表1 各区域充电桩坐标

区域	坐标/km				
一	(10,19)	(18,8)	(15,12)	(13,37)	(22,46)
	(32,41)	(44,29)	(28,6)	(37,21)	(46,17)
二	(58,3)	(53,25)	(62,37)	(52,12)	(70,8)
	(88,12)	(78,7)	(82,44)	(92,36)	(84,33)
三	(21,89)	(28,92)	(36,82)	(38,70)	(45,64)
	(35,58)	(9,78)	(14,74)	(15,68)	(20,66)
四	(52,98)	(64,97)	(72,88)	(90,82)	(95,95)
	(86,70)	(90,50)	(66,65)	(60,85)	(62,76)

区域中所有充电桩的坐标位置分布情况见图 3。

4.2 算法对比分析

利用 ITAGWO 和七种比较算法对表 1 中的充电桩仿真五次,虽然各种算法求得最优解的迭代次数不同,但其所求的最优解是相同的,且其最优供电线路也一致。各算法五次仿真的平均迭代次数和最优迭代次数见表 2,最优供电线路规划方案见图 4。

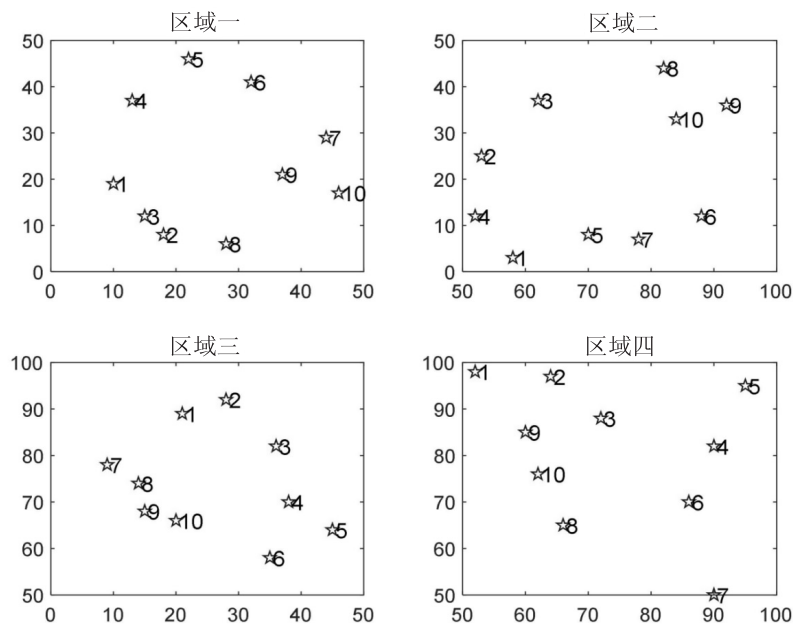


图 3 区域充电桩位置分布

表 2 各算法在四区域的迭代次数

区域一最优解:122.434 7 km								区域二最优解:135.015 1 km							
算法	一	二	三	四	五	平均	最优	算法	一	二	三	四	五	平均	最优
CSA	10	19	29	24	26	21.6	10	CSA	24	15	13	40	31	24.6	13
GWO	13	11	10	11	15	12	10	GWO	8	12	17	13	12	12.4	8
PSO	23	16	42	26	44	30.2	16	PSO	17	25	26	35	27	26	17
IA	13	13	21	15	11	14.6	11	IA	5	11	22	10	14	16.4	10
SA	47	48	48	46	49	47.6	47	SA	41	28	44	49	46	43.6	38
GA	35	76	41	50	29	46.2	29	GA	27	36	64	50	35	42.4	27
TLBO	24	21	28	25	17	23	17	TLBO	43	9	22	24	42	28	9
ITAGWO	6	7	11	7	10	8.2	6	ITAGWO	8	11	9	8	10	9.2	8
区域三最优解:104.618 9 km								区域四最优解:159.588 9 km							
算法	一	二	三	四	五	平均	最优	算法	一	二	三	四	五	平均	最优
CSA	13	19	19	26	15	18.4	13	CSA	33	14	28	19	28	24.4	14
GWO	13	13	10	11	8	11	8	GWO	23	10	9	23	11	15.2	9
PSO	28	23	29	22	16	23.6	16	PSO	25	48	32	32	29	33.2	25
IA	10	15	9	10	10	10.8	9	IA	41	16	18	33	27	27	16
SA	46	40	42	29	47	40.8	29	SA	51	47	40	47	40	45	40
GA	22	23	37	41	18	28.2	18	GA	50	45	30	62	37	44.8	30
TLBO	9	12	21	22	14	15.6	9	TLBO	59	15	18	21	9	24.4	9
ITAGWO	7	10	12	9	6	8.8	6	ITAGWO	10	6	9	8	13	9.2	6

由表 2, ITAGWO 与其他七种比较智能算法都可以找到最优解,但 ITAGWO 的迭代次数更少,收敛速度更快,且迭代次数间方差较小,更具稳定性。

在区域一,各比较算法中 GWO 的平均迭代次数和最优迭代次数均最少,ITAGWO 的平均迭代次数和最优迭代次数分别比 GWO 提高了 31.6% 和 40%;在区域二,各比较算法中 GWO 的平均迭代次数和最优

迭代次数均最少,ITAGWO 的最优迭代次数虽然与 GWO 一致,但平均迭代次数提高了 25.8%;在区域三,各比较算法中 IA 的平均迭代次数最少,GWO 的最优迭代次数最少,ITAGWO 的平均迭代次数比 IA 提高了 18.5%,最优迭代次数比 GWO 提高 25%;在区域四,各比较算法中 GWO 的平均迭代次数和最优迭代次数均最少,ITAGWO 的平均迭代次数和最优迭

代次数分别比 GWO 提高了 39.5% 和 33.4%。

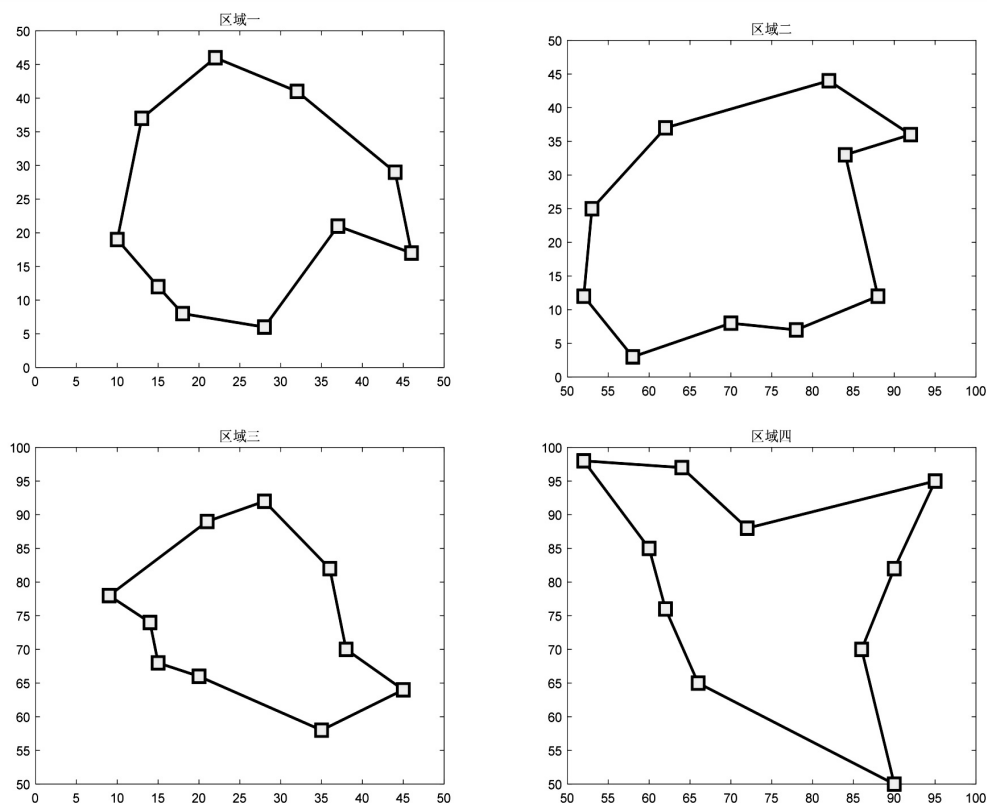


图4 各区域能源调度路线规划

5 结束语

针对城市中电动汽车充电桩分布的随机性和不均匀性,将灰狼算法用于其供电线路规划。GWO 算法存在易陷入局部最优解、初始种群分布不均匀和后期收敛速度慢等缺点,该文提出一种基于 Tent 混沌映射和自适应收敛因子的 ITAGWO 算法。实例仿真结果表明,在到达最优解的前提下,ITAGWO 比其余七种算法的迭代次数少、收敛速度快且稳定性好,可以很好地应用于充电桩供电线路规划。

参考文献:

- [1] 石立国,李延真,关雪琳,等.电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J].供用电,2022,39(5):33-40.
- [2] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Gray wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [3] 吕柏行,郭志光,赵韦皓,等.标准粒子群算法的优化方式综述[J].科学技术创新,2021(28):33-37.
- [4] 李庆,魏光村,高兰,等.用于求解 TSP 问题的遗传算法改进[J].软件导刊,2020,19(3):116-119.
- [5] 杨观富,蔡延光.解决车辆路径问题及其变体的混合粒子群算法综述[J].自动化与信息工程,2021,42(2):7-13.
- [6] 李新宇.改进自适应收敛因子的灰狼优化算法研究[J].信息与电脑:理论版,2021,33(24):91-94.
- [7] INOUE J M, KUTCH J J, VALERO-CUVAS F J. A novel synthesis of computational approaches enables optimization of grasp quality of tendon-driven hands[J]. IEEE Trans on Robot, 2012, 28(4): 958-966.
- [8] 姜天华.混合灰狼优化算法求解柔性作业车间调度问题[J].控制与决策,2018,33(3):503-508.
- [9] 张大明,徐嘉庆,赵彦清,等.基于停滞检测的双向搜索灰狼优化算法[J].计算机应用研究,2022,39(6):1725-1730.
- [10] OU Y J, TSAI L W. Kinematic synthesis of tendon-driven manipulators with isotropic transmission characteristics[J]. ASME J Mech Des, 1993, 115: 884-891.
- [11] 张阳,周溪召.求解全局优化问题的改进灰狼算法[J].上海理工大学学报,2021,43(1):73-82.
- [12] 滕志军,吕金玲,郭力文,等.一种基于 T-ent 映射的混合灰狼优化的改进算法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(11):40-49.
- [13] 贾鹏,管铮,徐善顶,等.基于免疫算法的物流拣货路径优化问题的研究[J].科学技术创新,2020(30):67-69.
- [14] 胡治锋,陈冬方,李庆奎,等.基于模拟退火蚁群算法的拣货路径规划[J].电子设计工程,2021,29(24):80-83.
- [15] RAO A R, REDDY S, VALLI-KUMARI V. Multi-path selection based on fractional cuckoo search algorithm for QoS aware routing in MANET-T[J]. Sensor Review, 2019, 39(2):218-232.

(下转第 198 页)