

基于改进粒子群算法的主动配电网网架优化研究

张思东, 陈后全, 唐超, 喻恒凝, 黄力, 黄云辉

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘要: 粒子群算法作为一种随机搜索的算法, 适合于求解主动配电网网架优化方案。由于算法的收敛速度过快, 导致计算过程中粒子容易陷入局部收敛、收敛准确度不高和收敛能力不强的问题, 因此需要改进标准粒子群算法。针对主动配电网网架结构优化问题, 建立了一个以经济性为目标函数, 并考虑潮流方程及功率平衡等约束条件的主动配电网数学模型, 对标准粒子群算法进行了指数递减的惯性权重和种群的平均极值项的改进, 并在迭代计算中加入了交叉、变异和扰动操作。以某典型配电网进行算例分析, 将标准粒子群算法与改进粒子群算法的计算结果进行对比, 结果表明了改进粒子群算法不仅有效地改善了粒子容易陷入局部最优而无法跳出的问题, 同时增强了算法的计算准确度与搜索能力。

关键词: 改进粒子群算法; 主动配电网; 配电网规划

Research on optimization of active distribution network frame with improved particle swarm optimization algorithm

ZHANG Sidong, CHEN Houquan, TANG Chao, YU Hengning, HUANG Li, HUANG Yunhui

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Particle swarm optimization (PSO), as a random search algorithm, is suitable for the optimization of active distribution network. Because the convergence speed of the algorithm is too fast, the particles in the calculation process are easy to fall into the local convergence, the convergence precision is not high and the convergence ability is not strong, so the standard particle swarm optimization algorithm needs to be improved. In view of the active power grid structure optimization problem, A economy as the objective function and the consideration of conditions such as tidal current equation and power balance of the mathematical model of active power is established the exponential decline inertia weight and the average extremum of population are improved for the standard particle swarm algorithm, and the crossover mutation and are joined the perturbation operation in the iterative calculation. Taking a typical distribution network as an example, the results of the standard particle swarm optimization algorithm and the improved particle swarm optimization algorithm are compared. The results show that the improved particle swarm optimization algorithm can not only effectively improve the problem that particles are prone to fall into the local optimal but also enhance the calculation accuracy and search ability of the algorithm.

Key words: improved particle swarm optimization algorithm; active distribution network; distribution network planning

0 引言

随着目前电网规模与负荷需求的不断发

国家自然科学基金资助项目 (51607130)

展, 分布式电源、电动汽车等各类用电负荷的接入规模正在逐步扩大。截至2018年年底, 我国分布式光伏发电装机容量达1.74亿kW, 分散式风电装机容量达1.84亿kW, 电动汽车保有

量为261万辆。大规模分布式电源和多元化负荷的接入,使得放射状的主动配电网结构将变成多电源结构,其中配电网的潮流分布、电压降和网损等均会发生显著的变化,这些电气特性的变化都会给主动配电网的可靠运行和网架规划带来巨大的影响。在电网规划的求解问题上,主要根据已知的规划期间的负荷分布和电源容量等条件,由现有的电网框架,重新选择合理的输电线路^[1]。粒子群算法(PSO)^[2]是求解电网规划最优方案的典型方法之一。

目前国内外专家学者对粒子群算法进行了大量的研究。文献[3-5]都是在粒子计算迭代中加入变异操作,得到了一种自适应变异的粒子群改进算法,根据不同最优解的大小确定的变异概率,虽然提高了算法的全局搜索能力,但是无法保证计算结果的准确性。文献[6]在标准粒子群算法中增加了粒子的繁殖与子代种群的概念,虽然改善了算法的收敛性能,但是算法仍存在会陷入局部最优而无法跳出的问题。文献[7-8]提出二进制量子粒子群算法,虽然改进了算法的收敛速度,增加了算法的全局搜索能力,但算法计算的稳定性不高。文献[9]则加入了小生镜技术,与粒子交叉操作应用于二进制粒子群算法,更好地加强了粒子群算法的全局搜索能力。由于粒子群算法本身的局限性,粒子求解过程中易陷入局部最优解,所以通过对粒子群算法的不断改进来达到寻优效果一直是未来的研究方向。

本文对标准粒子群算法进行了优化和修正,包括指数递减的惯性权重、种群的平均值项和交叉变异扰动操作。粒子群算法在改进后的全局搜索能力得到增强,粒子的收敛准确度得到提高,从而得到的计算结果更加准确。以经济性的主动配电网模型为目标函数,将本文提出的改进粒子群算法与标准粒子群算法分别对主动配电网网架优化问题进行求解,通过对比两种算法的计算结果后,发现了改进粒子群算法相比较标准粒子群算法在主动配电网网架优化问题上寻求最优解更具优势。

1 考虑经济性的配电网规划模型

传统配电网的规划主要考虑以经济性为指标,最优方案为投建费用最小方案^[10]。本文经济性指标主要包括网架优化方案的线路投资成本与运行成本。其中,运行成本即为网损和阻塞费用。

1.1 目标函数

(1) 投资费用

在实际的配电网规划中,购买、安装及调试成本通常转换为线路的投资成本。折算后的投资成本数学表达式为

$$f_{\text{inv}} = K \sum_{i=1}^n C_i n_i \quad (1)$$

$$K = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2)$$

式中, r 为贴现率,通常取10%; n 为分摊年限,一般选20年; C_i 为线路 i 投资费用,单位为元; n_i 为线路走廊 i 上的新建线路回数。

(2) 网损费用

网损费用主要指电网运行中网络有功损耗,网损费用 f_{loss} 的数学表达式为

$$f_{\text{loss}} = C_p \sum_{i \in \Omega} I_i^2 R_i \quad (3)$$

式中, C_p 为电价系数,单位为元/(kW·h); Ω 为线路集合。

(3) 阻塞费用

阻塞费用为发电机出力的费用之差,阻塞费用 f_{conges} 数学表达式为

$$f_{\text{conges}} = \sum_{i=1}^n (a_i g_i - a_i g_{i_lim}) \quad (4)$$

式中, n 为系统发电机的总数; g_{i_lim} 、 g_i 分别为有无线路约束下的发电机出力; a_i 为发电机出力成本。

通过上述经济成本构成及计算方法分析,电网规划模型如下。

目标函数为

$$\min K \sum_{ij \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + P_e \sum_{l=1}^s T^l \sum_{ij \in \Omega} (f_{ij}^l)^2 R_{ij} + \sum_{l=1}^s T^l \sum_{i=1}^{n_g} (a_i g_i^l - a_i g_{i_lim}^l) \quad (5)$$

式中,以经济性为目标函数三部分先后表示系统投资费用、网损费用和阻塞费用。

1.2 约束函数

(1) 等式约束

支路潮流方程为

$$f_{ij}^l - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 - n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad l=1, \dots, s \quad (6)$$

功率平衡方程为

$$Sf^l + P^l = d^l \quad l=1, 2, \dots, s \quad (7)$$

式中, γ_{ij} 为支路 ij 单条线路的电抗; n_{ij}^0 为支路 ij 原有线路数; S 为注入支路功率和节点功率的灵敏度矩阵; P 为发电机出力矢量; d 为负荷功率矢量。

(2) 不等式约束

1) 支路潮流约束。

2) 发电机出力约束。

$$|f^l| \leq \bar{f} \quad 1, 2, \dots, s \quad (8)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (9)$$

3) 支路新增线路数约束。

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (10)$$

式中, $\bar{f}$ 支路潮流上限; $P_g^{\max}$ 、 $P_g^{\min}$ 为发电机出力上下限; $\bar{n}_{ij}$ 为支路 ij 最多可建的线路数。

2 粒子群算法的改进及求解流程

2.1 标准粒子群算法

粒子群算法是一种针对全局进行优化的粒子算法,其中每一个粒子代表着优化问题的一个潜在解,通过粒子的不断迭代计算对比寻求最优解以解决优化问题^[11]。

计算过程中,最优解由各个粒子的个体极值 P_{best} 和种群的全局极值 g_{best} 不断更新自身最后得到的^[12]。

粒子在某一时刻的位置 X_i^t 与速度 v_i^t 的向量为 $X_i^t = (X_{i1}^t, X_{i2}^t, \dots, X_{iD}^t)$, $i=1, 2, \dots, N$; $v_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$, $i=1, 2, \dots, N$ 。其中, D 为搜索空间维度, N 为种群规模。

粒子在某一时刻的个体极值 P_{best} 及粒子种群的全局极值 g_{best} 为: $p_{best}^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)$, $i=1, 2, \dots, N$; $g_{best}^t = (p_{11}^t, p_{12}^t, \dots, p_{1D}^t)$, $i=1,$

$2, \dots, N$ 。

取得个体极值与全局极值后,第 i 个粒子在 $t+1$ 时刻的位置可根据下式更新,即

$$v_{id}^{t+1} = v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (11)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (12)$$

式中, c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为均匀随机数; v_{id} 为粒子的速度, $v_{id} \in [v_{\min}, v_{\max}]$ ^[13]。

2.2 改进粒子群算法

标准粒子群算法收敛速度虽然很快,但依旧存在着易局部收敛等缺点,导致计算结果的准确性不高。这是由于在求解过程中,所有粒子都是以当前适应度值最优的粒子为目标的,仅朝着同一个方向搜索而无法向四周区域搜索,这会导致计算后期陷入局部最优^[14]。针对标准粒子群部分缺陷,以免寻优求解的计算过程中粒子陷入局部最优导致结果有所偏差,本文对标准粒子群算法提出了如下几点改进。

(1) 指数递减的惯性权重

为增强标准算法的计算准确度,将粒子进行惯性权重改进^[15],改进方程为

$$v_{id}^{t+1} = w v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (13)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (14)$$

式(13)中,权重部分代表了粒子群算法在全局求解空间的搜索能力;第二部分、第三部分代表了粒子群算法在局部求解空间的搜索能力。当 w 越大时,算法的全局搜索能力将会增强,同时算法的局部搜索能力则会减弱,反之亦然。

但是由于典型的线性递减的惯性权重策略自身存在缺陷,为了解决迭代过程中粒子一旦陷入局部最优而难以跳出的问题,本文采用了指数递减的惯性权重方法。其数学表达式为

$$w_t = w_{\text{end}} + (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \exp(-k(\frac{t}{t_{\max}})^2) \quad (15)$$

式中, $t_{\max}$ 为算法的最大迭代次数; t 为当前的迭代次数; w_{start} 、 w_{end} 分别为典型的线性递减

的惯性权重初始值、终止值。

通过控制因子 k 使其线性递减的惯性权重改进为指数递减,从而增强粒子在求解过程中的全局搜索能力,以避免粒子陷入局部最优而无法求得最优解。

(2) 种群的平均极值项

本文为了改进算法陷入局部最优的可能,提高了算法在计算过程中的全局搜索能力,改进了标准粒子群算法的速度公式,主要加入种群的平均极值项^[16]。

本文根据迭代后的粒子个体极值进行排序,在算法计算过程中种群极值会被一定比例的粒子个体极值平均值所代替。

则第 t 次迭代时粒子个体极值的平均值为

$$pa'_{best} = (pa'_{i1}, pa'_{i2}, \dots, pa'_{id}) \quad (16)$$

其中

$$pa'_d = (pa'_{1d}, pa'_{2d}, \dots, pa'_{gd}) / g \quad (17)$$

将加入种群的平均极值项算法速度公式进一步改进,即同时采用改进内容(1)中的惯性权重,则粒子改进过后的速度公式为

$$v'_{id} = w'v'_{id} + c_1r'_1(p'_{id} - x'_{id}) + c_2r'_2(p'_{gd} - x'_{gd}) \quad (18)$$

(3) 交叉、变异和扰动操作

本文通过交叉因子来生成新的解集种群,从而以新的种群在不断的迭代计算中来降低粒子陷入局部极值的可能性。

交叉操作即是通过交叉率 q_c ,任意选择两个父代个体,同交叉位的位串进行互换。父代个体通过交叉操作之后,得到两个子代个体,其中优秀子代个体将会替换掉父代个体。本文交叉操作采用两点交叉。

变异操作是通过变异率 q_m 来确定,随机在粒子种群中选取部分进行变异,本文变异操作采用一点均匀变异。

扰动操作是在交叉与变异操作之后进行的。计算过程中的每一次迭代都会进行交叉变异操作,同时还要进行适应度值的优劣对比,若在连续 m 次迭代之后全局极值仍保持不变,则下一步进行扰动操作^[17]。通过不断地变异干

扰后,观察结果是否保持稳定,进而判断最终结果是否为最优解。

本文主旨以改进的惯性权重、极值的平均化及新增交叉变异扰动这三点改进内容加强粒子群算法在优化问题的精确性。在计算过程中提升粒子收敛准确度、增强粒子全局搜索能力和优化算法计算准确度,能够通过改进粒子群算法在主动配电网网架优化问题上得到最优解。

2.3 改进粒子群算法的流程

算法计算流程如图1所示,具体计算流程步骤如下:

- 1) 输入配电网的原始数据。
- 2) 初始化粒子各参数。
- 3) 计算各个方案的投资、网损和阻塞费用,对比并更新全局极值。
- 4) 计算迭代中进行交叉变异操作。
- 5) 更新粒子的速度和位置。
- 6) 判断全局极值能否保持不变。
- 7) 若受到干扰后的全局极值保持不变,则输出最优规划方案;否则,返回步骤3)。

3 基于改进粒子群算法的网架优化

本文以某典型配电网作为算例,其配电网网架如图2所示。系统各节点负荷与发电机出力数据如表1所示。在配电网中分布式光伏在节点23~41均采用T接方式,可就地消纳。表2给出了各类装机容量的发电费用。表3为可扩展线路的具体数据。

此外在计算中取功率基准值为100 MW,在主动配电网中10 kV、110 kV和220 kV线路投资单价分别为100万元/km、160万元/km和260万元/km。本文贴现率为10%,分摊年限为10年。单位电价取0.176元/(kW·h)。在改进粒子群算法求解过程中,具体参数如表4所示。

图3为标准粒子群算法与改进粒子群算法的适应度值曲线,两种算法的结果比较如表5所示。

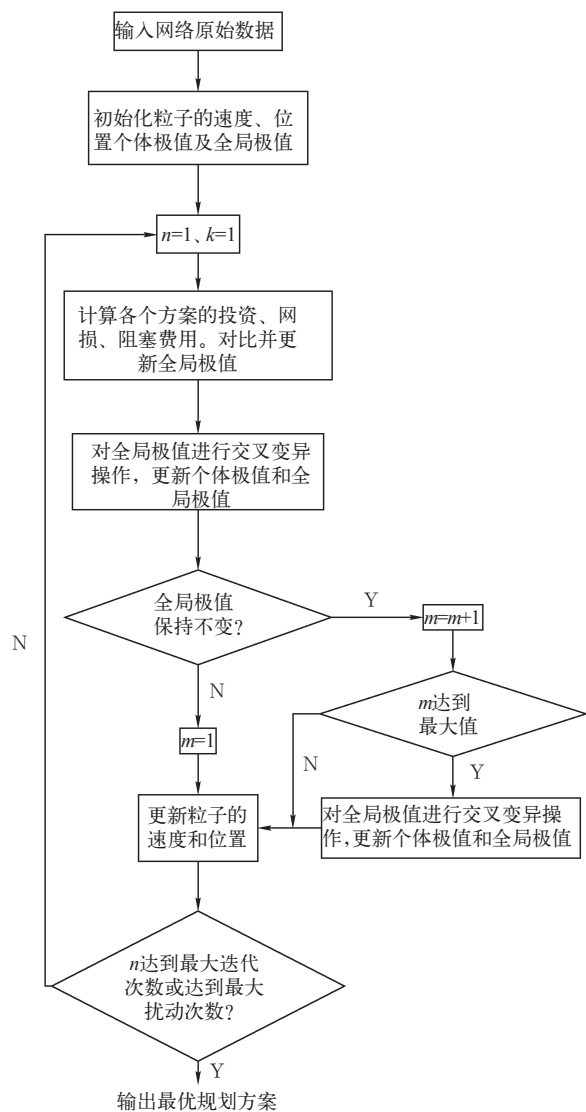


图1 基于改进粒子群算法的主动配电网经济性规划流程
Fig. 1 Economic planning process of active distribution network based on improved particle swarm optimization algorithm

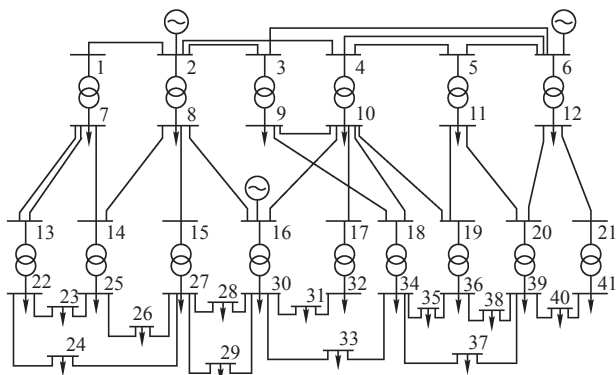


图2 某一区域配电网网架模型
Fig. 2 A regional distribution network frame model

表1 母线负荷

Tab. 1 Bus load

母线节点	有功负荷/MW	母线节点	有功负荷/MW
7	80	30	170
8	190	31	30
9	88	32	55
10	66	33	26.5
11	70	34	112
12	220	35	10
22	50	36	50
23	6	37	10.5
24	8	38	10
25	50	39	69
26	8	40	8
27	50	41	43
28	12		
29	8.58	Total	1 500.58

表2 发电机出力费用数据

Tab. 2 Generator output cost data

装机容量/MW	费用 /[元/(MW·h)]	装机容量/ MW	费用 /[元/(MW·h)]
1 320	231.1	80	133.2
1 200	187.0	25	105.2

表3 可扩展线路的具体数据

Tab. 3 Specific data of extendable lines

两端节点	可建回数	两端节点	可建回数
1—2	2	22—23	2
2—3	2	22—24	2
2—4	2	23—25	2
3—6	2	24—27	2
4—6	2	25—26	2
4—5	2	26—27	2
5—6	2	27—28	2
7—13	2	27—29	2
7—14	2	28—30	2
8—14	2	29—30	2
10—17	2	34—37	2
10—18	2	36—38	2
10—19	2	38—39	2
11—19	2	37—39	2
11—20	2	39—40	2
12—20	2	40—41	2
12—21	2		

表4 粒子群算法求解过程参数表

Tab. 4 Process parameters of particle swarm optimization algorithm

参数	取值
种群规模/个	100
最大迭代次数/次	100
权重	0.9、0.4
学习因子	0.5、2.5
扰动次数/次	10
粒子群向量维度/维	40
变异概率/(%)	10

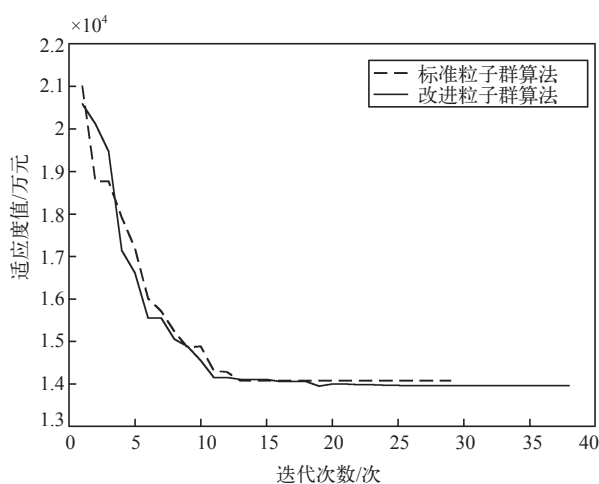


图3 适应度值迭代曲线

Fig. 3 Iteration curve of fitness value

表5 标准粒子群算法与改进粒子群算法的结果比较

Tab. 5 Comparison of results between the standard particle swarm optimization algorithm and the improved particle swarm optimization algorithm

比较项目	标准粒子群算法	改进粒子群算法
粒子规模	100	100
迭代次数/次	29	38
计算总耗时/s	6 890.07	9 747.56
年规划费用/万元	14 081.71	13 963.58

由表5可知,采用改进粒子群算法时,耗时为9 747.56 s。其数据结果均要高于标准粒子群算法的结果。主要是因为交叉、变异以及扰动等操作的加入,计算步骤的增加导致计算时长增加。通过图3的适应度值迭代曲线可以看出,改进粒子群算法有效地增强了全局搜索能力,并且在粒子多次迭代之后更趋于最优解。

此外,由表5可知,改进粒子群算法的费用比标准粒子群算法的低118.14万元,这说明了在改进粒子群算法的计算下,所求的解比标准粒子群算法要好,通过本文改进粒子群算法相对于标准粒子群算法能够获得更优的网架优化方案结果。表6为具体的经济性模型的网架优化方案结果。具体配电网网架接线方式如图4所示。

由表6可知,方案结果数据的年阻塞费用几乎为零,这说明了改进粒子群算法在求得最优解的过程中,规划方案的趋势倾向于线路阻塞损耗较小的方向,最终得到配电网网架优化方案。

表6 经济性模型的规划方案结果

Tab. 6 Results of economic model planning scheme

(单位:万元)

新增线路方案	年总规划费用	年等值投资费用	年阻塞费用	年网损费用
10-17(1)、25-26(1)、 26-27(1)、30-31(2)、 31-32(2)、34-37(1)、 37-39(1)	13 963.58	1 573.5	0.043 7	12 390.03

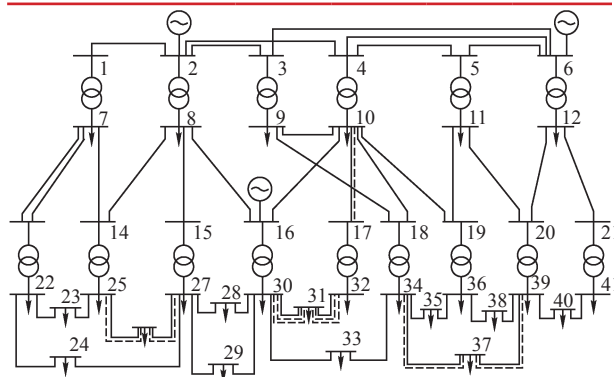


图4 规划方案结果的接线方式

Fig. 4 Wiring of the result of the plan

4 结束语

本文研究了基于改进粒子群算法的主动配电网网架优化方法。首先建立了以投资费用、网损费用和阻塞费用为目标函数的配电网规划模型,同时考虑潮流方程及功率平衡等约束条件。其次,在标准粒子群算法基础上进行了惯性权重和种群的平均极值项的改进,并增加了交叉、变异和扰动操作。将改进的粒子群算法用于主动配电网规划方案的求解,得到了改进粒子群算法在求解配电网网架优化问题的主要步骤及流程图。最后,通过典型配电网算例分析,比较了标准粒子群算法和改进的粒子群算法,求解得到网架最优方案,通过分析发现改进粒子群算法比标准粒子群算法更有效地改善了粒子容易陷入局部最优而无法跳出的问题,同时增强了算法的计算准确度,提高了粒子的搜索能力,能够使计算的结果更准确,从而验证了所提出的改进粒子群算法的可行性与有效性。

参考文献

[1] 王茜,张粒子,舒隽,等.基于阈值选择策

- 略的改进混合蛙跳算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 34-39.
- [2] 许君, 鲁海燕, 石桂娟. 限制速度粒子群优化和自适应速度粒子群优化在无约束优化问题中的应用[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 668-674, 684.
- [3] 邬开俊, 鲁怀伟, 王铁君. 基于自适应变异粒子群算法的铁路空车调配[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(2): 102-105.
- [4] 吕振肃, 侯志荣. 自适应变异的粒子群优化算法[J]. 电子学报, 2004(3): 416-420.
- [5] 庞松岭, 张超, 张帝, 等. 基于自适应变异粒子群算法的居民小区电动汽车优化充电策略[J]. 电气应用, 2015, 34(20): 85-89.
- [6] NAKES. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 60-68.
- [7] 马草原, 孙展展, 葛森, 等. 改进二进制粒子群算法在配电网重构中的应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7): 84-88, 94.
- [8] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.
- [9] 王浩磊, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进二进制量子粒子群算法的核心骨干网架搜索[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6127-6133.
- [10] 何晓阳. 电力市场环境下基于成本一效益分析的电网规划[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [11] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
- [12] 邱飞岳, 胡烜, 王丽萍, 等. 分组分解的多目标粒子群进化算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(8): 1824-1828.
- [13] 陈云凤, 云挺, 周宇, 等. 基于PSO优化SVM的纹理图像分割[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(4): 214-218.
- [14] 姜惠兰, 陈平, 王敬朋, 等. 改进粒子群算法在电网无功优化中的应用[J]. 中国电力, 2011, 44(12): 11-15.
- [15] 王庆荣, 王瑞峰. 基于改进粒子群算法的配电网重构策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2720-2724.
- [16] 倪瑞君. 基于改进粒子群算法的输电网扩展规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [17] 何剑, 程林, 孙元章. 电力系统运行可靠性最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 15-21.

作者简介



张思东

张思东(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子化电力系统研究。

(收稿日期: 2019-04-06) **EA**