

基于回溯迭代搜索 - 粒子群算法的配电网无功优化研究

杨春生, 周巍巍, 魏海春, 赵希宝, 黄浩军

(中海石油(中国)有限公司天津分公司工程建设中心, 天津 300459)

摘要: 在考虑配电网电压质量和无功补偿设备容量限制的条件下, 以有功网损最小为优化目标、网络拓扑结构为约束条件建立了无功优化模型。针对粒子群算法存在着早熟现象、收敛速度慢和易陷入局部最优解的特点, 提出了一种基于回溯迭代的粒子群算法(BPSO)。该算法采用回溯迭代的“0-1”特性, 在寻优过程中通过剪枝函数避免无效搜索, 改善了优化的路径, 从而提高了 PSO 全局寻优性能。通过 IEEE 30 节点配电网算例的仿真, 验证了 BPSO 算法的优越性, 并与常规 PSO 算法对比证明所提算法的优越性。

关键词: 配电网; 回溯迭代; 粒子群算法; 无功优化

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)01-0001-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.001

Research of Reactive Power Optimization in Distribution Network Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Integrated with Backtracking Iterative Search

Yang Chunsheng, Zhou Weiwei, Wei Haichun, Zhao Xibao, Huang Haojun

(Engineering Construction Center, CNOOC (China) Co., Ltd. (Tianjin Branch), Tianjin 300459, China)

Abstract: A comprehensive optimization model of distribution network is established which takes active power loss minimization as the optimization objective and network topology as constraint conditions, under considering the voltage quality of distribution network and the capacity limitation of reactive power compensation equipment. According to the characteristics of particle swarm algorithm (PSO), that is, premature phenomenon, slow convergence and easily getting the local optimal solution, a particle swarm algorithm based on backtracking iteration (BPSO) is proposed. The algorithm adopts the "0-1" characteristic of backtracking iteration, avoids the invalid search by pruning function in the process of optimization, and improves the optimization path, thus the global optimization performance of PSO is improved. The simulation of IEEE 30 node distribution network example verifies the optimal solution of BPSO algorithm, and the comparison results with the conventional PSO algorithm show the superiority of the proposed algorithm.

Key words: distribution network; backtracking iteration; particle swarm optimization algorithm; reactive power optimization

0 引言

无功优化是实现电网经济调度的重要手段之一, 对保障电网的电压质量、降低系统网损有着重大意义^[1]。无功优化过程具有多目标、多约束、同时含有连续变量和离散变量等特点^[2,3], 是典型的非线性规划问题。传统的无功优化算法(如线性规划法、非线性规划法、内点法^[4-6]等)对于离散变量的

处理存在一定的局限性。因此, 近年来国内外学者对于智能算法在无功优化中的应用研究层出不穷, 如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[7-8]等。其中, 粒子群算法相比其他的优化算法具有优化效率高、收敛速度快、鲁棒性强的特点, 但是标准的粒子群算法容易受当前最优位置的影响, 易陷入局部最优解^[9]。

为了克服容易陷入局部最优解这个缺点, 许多文献提出了改进的粒子群算法。文献[10]针对粒子群算法容易陷入局部最优和收敛速度较慢的缺点, 提出了一种改进的粒子群优化算法, 以达到降低

项目名称: “十三五”国家科技重大专项“海上油田区域供电工程技术研究及应用”(2016ZX05058-004-008)

配电网有功网损的目的。文献[11]采用多种群协同优化的方法,同时兼顾了算法全局搜索和局部搜索的能力,与常规粒子群算法相比稳定性较好。文献[12]将邻居学习策略融入粒子群优化算法的速度更新中,使用“最坏替换”策略来更新群,群中最差粒子的位置被更好的新生成的位置所取代,比传统的群更新方案具有更好的性能。文献[13]通过阿尔及利亚西部电力系统中无功功率控制为背景,提出了基于PSO的启发式算法,且算法在最小功率损耗方面有优越的表现。

回溯迭代算法作为一种类似枚举法的选优搜索法,在搜索区域缩减确定和搜索速度提升上都有良好的性能,多用于解决较为复杂、规模庞大的问题。下面利用回溯迭代算法的优点,对常规的PSO算法进行改进:将回溯迭代算法融合于粒子群速度和位置更新策略,得到一种改进的粒子群优化算法。通过在IEEE 30节点配电网进行无功优化仿真,验证该算法具有较好的全局收敛性,且可以快速准确地搜索到最优值。对比常规PSO算法,所采用的改进粒子群算法的收敛速度和精度更好,优化后有功网损值也得到改善。

1 配电网无功优化的数学模型

1.1 目标函数的构造

为了提高配电网的供电可靠性和经济性,传统无功优化通常有以下几种目标函数:1) 电网有功网损最小;2) 电压质量最好;3) 电容器和变压器分接头投切次数最少;4) 电网无功补偿容量最小;5) 系统总的费用最少。

对配电网进行无功优化时,考虑全网有功网损最小,建立无功优化数学模型的目标函数为

$$f = \min P_{\text{Loss}} \quad (1)$$

式中 P_{Loss} 为系统有功网损。

考虑电压质量和无功补偿设备的容量限制,目标函数可改写为

$$f = \min P_{\text{Loss}} + \lambda_1 \sum \left(\frac{V_i - V_{i\text{lim}}}{V_{i\text{max}} - V_{i\text{min}}} \right)^2 + \lambda_2 \left(\frac{Q_{Ci} - Q_{Ci\text{lim}}}{Q_{Ci\text{max}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: V_i 为节点 i 的运行电压; $V_{i\text{max}}$ 、 $V_{i\text{min}}$ 为节点运行电压的允许上、下限; Q_{Ci} 为节点 i 的无功补偿容量;

$Q_{Ci\text{max}}$ 为节点无功补偿上限值; λ_1 、 λ_2 分别为节点电压越限与节点无功补偿容量越限的惩罚因子。

$$V_{i\text{lim}} = \begin{cases} V_{i\text{max}} & (V_i > V_{i\text{max}}) \\ 0 & (V_{i\text{min}} < V_i < V_{i\text{max}}) \\ V_{i\text{min}} & (V_i < V_{i\text{min}}) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{Ci\text{lim}} = \begin{cases} Q_{Ci\text{max}} & Q_{Ci} > Q_{Ci\text{max}} \\ Q_{Ci} & Q_{Ci} < Q_{Ci\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 约束条件的建立

配电网无功优化时,各节点处于功率平衡状态,其等式约束为

$$\begin{cases} P_{Ci} = P_{Di} + V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Ci} + \Delta Q_{Ci} = Q_{Di} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{Ci} 、 Q_{Ci} 分别为节点 i 处发电机的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导、电纳和相角差; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压。式(5)也是潮流计算的基础。

配电网中,配电网各节点电压不等式约束为

$$V_{i\text{min}} \leq V_i \leq V_{i\text{max}} \quad (6)$$

各补偿点补偿容量的不等式约束为

$$Q_{Ci\text{min}} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\text{max}} \quad (7)$$

2 改进的粒子群算法

PSO作为一种启发式智能算法,它源于对鸟类捕食行为的研究^[14]。其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解^[15]。基于PSO的寻优算法流程如图1所示。

回溯迭代算法是一种选优搜索法,按选优条件向前搜索,以达到目标^[16-17]。回溯迭代算法实际上是一个类似枚举法的搜索尝试过程,回溯迭代寻优过程如图2所示。图2中:A、B、C、D为步骤名称;1和0分别表示满足条件与否,当发现不满足求解条件时,就“回溯”返回,尝试别的路径。许多较为复杂、规模庞大的问题都可以使用回溯法去解决^[18]。其基本思想包括以下3个特征:

- 1) 为要解决的问题定义了解决方案;
- 2) 确定易于搜索的解空间结构;
- 3) 以深度优先方式搜索空间,并在搜索过程中

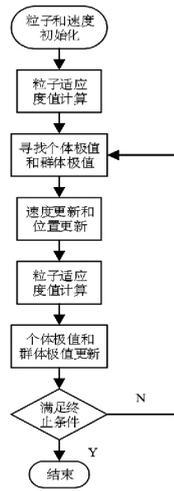


图 1 标准 PSO 算法寻优流程

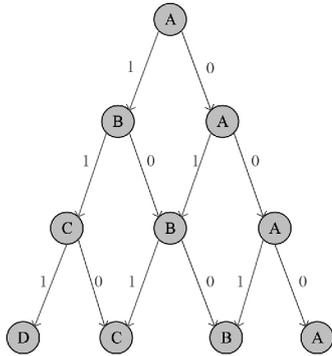


图 2 回溯迭代剪枝搜索数枝

通过剪枝函数避免无效搜索。

将回溯迭代算法融合于粒子群速度和位置更新策略,可以得到一种改进的粒子群优化算法即基于回溯迭代的粒子群算法(backtracking particle swarm optimization, BPSO)。该算法具有较好的全局收敛性,且可以快速准确地搜索到最优值。应用基于回溯迭代的粒子群算法解决无功优化问题,将电容器容量 Q_c 对应粒子群中粒子的位置,即 $X_i = Q_c$,可行域的边界由 Q_c 的上下限确定。

3 基于回溯迭代的粒子群算法无功优化流程

运用 BPSO 算法求解无功优化问题的流程如图 3 所示。图中: X_i 、 X_n 为每个粒子的适应值; pbest 是粒子 i 个体经历过的最好位置; gbest 是种群所经历过的最好位置。其算法具体步骤描述如下:

1) 输入系统数据(系统的结构、网络数据和控制参数);

- 2) 初始化粒子群;
- 3) 计算目标函数值;
- 4) 评价每一个粒子;
- 5) 更新每一个粒子的速度和位置;
- 6) 检验是否符合结束条件;

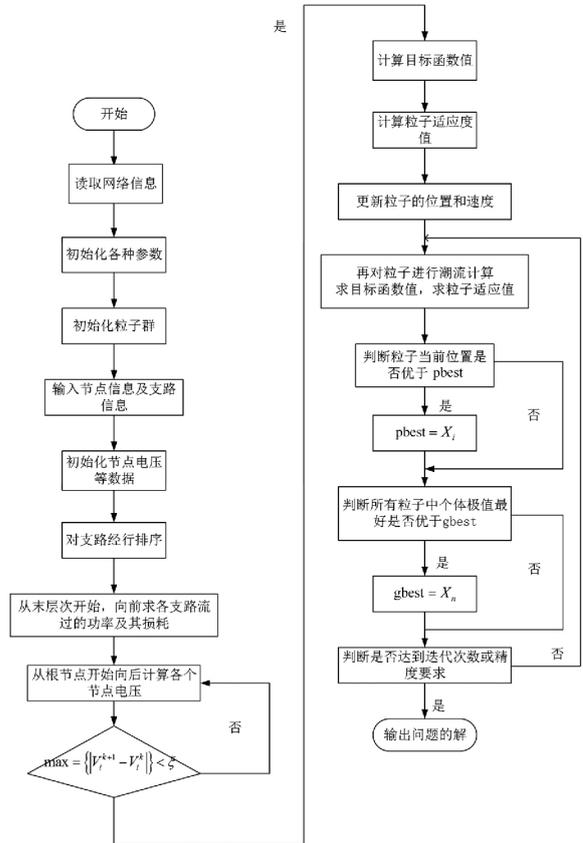


图 3 BPSO 算法无功优化流程

7) 如果当前迭代次数达到最大预定次数(或最小误差要求),则停止迭代并输出最优解,否则将转到步骤 2);

8) 输出问题的解,包括系统网损值及系统最高电压值和最低电压值。

4 算例分析

采用 IEEE 30 算例,该系统是一个额定电压为 23 kV 的实际配电网系统。将系统的变电站设为 0 号节点,实际上该系统是一个包含 31 个节点、30 条支路和 5 个无功补偿点(分别为节点 13、15、19、23、24)的配电系统。系统的接线如图 4 所示。系统的网络参数如表 1 所示。

4.1 BPSO 算法目标函数选取

利用 Matlab7.0 编写了基于 BPSO 的配电网无

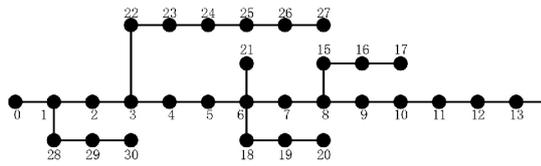


图4 IEEE 30算例系统接线

表1 系统网络参数

支路序号	支路电阻 /Ω	支路电抗 /Ω	有功负荷 /kW	无功负荷 /kVA
0-1	0.196	0.655	0	0
1-2	0.279	0.015	522	174
2-3	0.444	0.439	0	0
3-4	0.864	0.751	936	312
4-5	0.864	0.751	0	0
5-6	1.374	0.774	0	0
6-7	1.374	0.774	0	0
7-8	1.374	0.774	0	0
8-9	1.374	0.774	189	63
9-10	1.374	0.774	0	0
10-11	1.374	0.774	336	112
11-12	1.374	0.774	657	219
12-13	1.374	0.774	783	261
13-14	1.374	0.774	729	243
8-15	0.864	0.774	477	159
15-16	1.374	0.774	549	183
16-17	1.374	0.774	477	159
6-18	0.864	0.751	342	114
18-19	0.864	0.751	672	224
19-20	1.374	0.774	495	165
6-21	0.864	0.751	207	69
3-22	0.444	0.439	522	174
22-23	0.444	0.439	1917	639
23-24	0.864	0.751	0	0
24-25	0.864	0.751	1116	372
25-26	0.864	0.751	579	183
26-27	1.374	0.774	792	264
1-28	0.279	0.015	882	294
28-29	1.374	0.774	882	294
29-30	1.374	0.774	882	294

功优化计算程序。在程序中,将节点电压的上、下限设置为额定值的0.9和1.1,粒子群体规模取 $M=30$,最大和最小惯性常数分别设置为 $\omega_{max}=0.9$ 、 $\omega_{min}=0.4$ 。将学习因子 c_1 、 c_2 的取值设置为 $c_1=c_2=2$,粒子的速度限定分别为 $V_{max}=0.6$ 、 $V_{min}=-0.6$ 。

首先计算出算例优化前系统的有功网损为1.0599 MW,最低电压为19.2835 kV,出现在14号节点。配电网采用改进的粒子群无功优化算法后,其具体结果如分析如下:

1) 先不考虑罚函数影响,即不考虑节点电压越限和无功补偿容量越限的问题,取 $\lambda_1=\lambda_2=0$ 。

表2 BPSO算法无功优化结果($\lambda_1=\lambda_2=0$)

迭代次数	P_{loss} /MW	V_{min} /kV	ΣQ_c /MVA
20	0.9038	20.0604	4.9571
30	0.9037	20.1463	4.9443
50	0.9036	20.1633	4.9837
100	0.9036	20.1907	4.9813
150	0.9036	20.1921	4.9812
200	0.9036	20.1921	4.9812

表2中: P_{loss} 为系统的有功网损值; V_{min} 为在完成迭代时(即系统达到有功网损最小时)系统节点电压的最低值; ΣQ_c 为系统在达到有功网损最小时补偿装置向系统提供的总的补偿容量。

通过分析可得,当迭代次数设为50时,系统有功网损已到达最低值,即粒子已经寻得全局最优解;随着迭代次数的增加,系统的节点电压有所改善,同时补偿容量有所增加。由表2可看出,当迭代次数为100时,系统已有较好的电压,并且随着迭代次数的增加对系统节点电压的改善变小。可得出当迭代次数设为100时,系统有较好的优化结果。

2) 取最大迭代次数 $T_{max}=100$,不考虑补偿容量越限的限制,即将罚因子 λ_2 设为0,考虑罚因子 λ_1 取不同的值对优化结果的影响。

表3 BPSO算法无功优化结果($\lambda_2=0$, λ_1 任意取值)

λ_1	P_{loss} /MW	V_{min} /kV	ΣQ_c /kVA
20	0.9325	20.5924	6.6476
30	0.9401	20.6420	6.8601
50	0.9436	20.6620	6.9542
100	0.9468	20.6807	7.0322
200	0.9484	20.6896	7.0746

由表3可以看出,当罚因子 λ_1 的取值越来越大

时,系统的节点电压越来越好,但是系统的有功网损也越来越高,同时补偿容量也越来越大。综合考虑,当 $\lambda_1 = 10$ 时系统可以获得比较好的解。

3) 取最大迭代次数 $T_{max} = 100$, 不考虑节点电压越限的限制,即将罚因子 λ_1 设为 0,考虑罚因子 λ_2 取不同的值时对优化结果的影响。

表 4 BPSO 算法无功优化结果 ($\lambda_1 = 0$ λ_2 任意取值)

λ_2	P_{loss} / MW	V_{min} / kV	$\Sigma Q_C / \text{kVA}$
10	0.904 4	20.179 7	4.603 3
20	0.904 4	20.165 4	4.621 5
30	0.904 4	20.180 9	4.620 5
50	0.904 4	20.179 5	4.628 2
100	0.904 4	20.175 1	4.619 8

由表 4 分析可得,当 λ_2 取不同值时,系统有功网损值不变,综合考虑节点电压质量及无功补偿容量,可知当 $\lambda_2 = 10$ 时系统有比较好的解。

综上所述,在对 IEEE 30 节点配电网进行无功优化时,选取迭代次数 $T_{max} = 100$, 惩罚因子 λ_1, λ_2 都取 10 时,优化效果最佳。

4.2 BPSO 算法最优补偿

在算例配电网无功优化过程中,选取迭代次数 $T_{max} = 100$, 惩罚因子 $\lambda_1 = \lambda_2 = 10$ 时,采用 BPSO 算法对系统无功优化。可以得到:系统有功网损 P_{loss} 为 0.906 7 MW, 最低节点电压值 V_{min} 为 20.286 5 kV, 系统补偿总容量 ΣQ_C 为 4.980 4 MVA。

为验证 BPSO 算法的优越性,在相同条件下运行常规 PSO 算法和 BPSO 算法,得到电压曲线比较如图 5 所示,可以看出:PSO 算法和 BPSO 算法对配电网电压质量都起到明显改善作用,但 BPSO 相对电压曲线更趋稳定,优化效果更好。

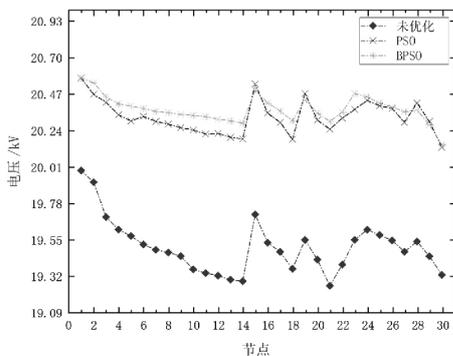


图 5 PSO 和 BPSO 算法电压曲线比较

常规 PSO 算法和 BPSO 算法的网损优化结果见表 5,有功网损的收敛曲线如图 6 所示。

通过对 PSO、BPSO 两种算法的无功优化结果的

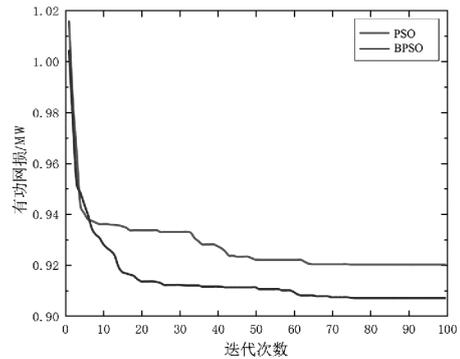


图 6 PSO 和 BPSO 的收敛曲线

比较,可以得出:

表 5 优化结果比较

指标	PSO	BPSO
最优网损/MW	0.919 9	0.906 7
最差网损/MW	0.935 8	0.912 7
平均网损/MW	0.927 8	0.909 7

1) PSO 算法在对配电网无功优化过程中,往往会陷入局部最优值,导致优化停滞不前;

2) BPSO 算法在前期优化时,收敛速度与精度都表现不错,且随着迭代次数增加,回溯迭代使得搜索区间缩减,收敛速度变快,收敛精度也大幅提升;

3) 通过两种算法的无功优化,配电网系统的有功网损值都得到大幅降低,但 BPSO 算法优化后的有功网损值相比 PSO 算法较小。

5 结 语

针对配电网节点多、结构复杂的特点,在充分考虑有功网损、电压质量和无功补偿设备容量限制的基础上,选取合适的优化目标函数,通过基于回溯迭代的粒子群算法对 IEEE 33 节点配电网系统进行无功优化,并验证该方法的可行性。主要结论如下:

1) 在配电网无功优化过程中,合理地选取有功网损、电压质量和无功补偿设备容量作为优化目标函数,优化效果更优越;

2) BPSO 优化算法与常规的粒子群算法相比,其收敛速度与精度都具有较好的效果,且优化后的有功网损幅值得到一定改善。

参考文献

[1] 陈琳,钟金,倪以信,等.含分布式发电的配电网无功优化[J].电力系统自动化,2006,30(14):20-24.

(下转第 46 页)

[12] 卢明,李瑶琴,李黎,等.哈郑特高压直流负极线路上U70BL型绝缘子自然积污规律[J].高电压技术,2016,42(2):557-563.

[13] 王彬,梁曦东,张轶博,等.交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J].高电压技术,2009,35(9):2322-2328.

[14] 李震宇,梁曦东,王彬,等.直流电压下复合绝缘子的自然积污试验[J].电网技术,2007,31(14):10-14.

[15] 律方成,秦春旭,郭文义,等.高海拔地区±800 kV特高压直流输电系统绝缘子带电自然积污特性[J].高电压技术,2013,39(3):513-519.

[16] 吕玉坤,李金岗,刘云鹏,等.低风速下瓷三伞绝缘子

积污特性数值模拟研究[J].华北电力大学学报,2016,43(5):55-61.

[17] 杨帅,周文俊,李涵,等.±800 kV 楚穗特高压直流线路复合绝缘子自然积污特性[J].高电压技术,2018,44(3):952-958.

[18] 李恒真,刘刚,李立涅.广州地区线路盘式防污型玻璃绝缘子的自然积污规律[J].中国电机工程学报,2011,31(25):118-124.

作者简介:

李世平(1963),高级工程师,主要研究方向为电气设备的高压绝缘技术及状态评估技术。

(收稿日期:2018-12-06)

(上接第5页)

[2] 祝洪博,徐刚刚,海冉冉,等.基于云自适应梯度粒子群算法的无功优化[J].电网技术,2012,36(3):162-167.

[3] 陈前宇,陈维荣,戴朝华,等.基于改进PSO算法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):8-13.

[4] 邓佑满,张伯明,相年德.配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法[J].中国电机工程学报,1995,15(6):375-383.

[5] Edimar J. Oliveira, Leonardo W. Oliveira, J. L. R. Pereira, et al. An Optimal Power Flow Based on Safety Barrier Interior Point Method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 977-985.

[6] 刘明波,程莹,林声宏.求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J].电力系统自动化,2002,26(1):22-26.

[7] 蒋平,梁乐.基于内点法和遗传算法相结合的交流系统无功优化[J].高电压技术,2015,41(3):724-729.

[8] 董海龙,奚慧兴,付立思,等.基于混合PSO-ACO算法的含DG配电网无功优化[J].电网与清洁能源,2017,33(1):50-56.

[9] 肖军,刘天琪,苏鹏.基于双种群粒子群算法的分时段电力系统无功优化[J].电网技术,2009,33(8):72-77.

[10] 李珂,郗能灵,张沈习.基于改进粒子群算法的配电网综合运行优化[J].上海交通大学学报,2017,51(8):897-902.

[11] 张涛,徐雪琴,史苏怡,等.基于改进多种群量子粒子群算法的STATCOM选址及容量优化[J].中国电机工程学报,2015,35(S1):75-81.

[12] Leilei Cao, Lihong Xu, Erik D. Goodman. A Neighbor-based Learning Particle Swarm Optimizer with Short-term

and Long-term Memory for Dynamic Optimization Problems[J]. Information Sciences, 2018, 453: 463-485.

[13] Kalfallah Naima, Benzergua Fadela, Cherki Imene, et al. USE of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Methods for the Optimal Control of the Reactive Power in Western Algerian Power System[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 265-272.

[14] 刘佳,李丹,高立群,等.多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):22-28.

[15] MehdiMehdinejad, Behnam Mohammadi - Ivatloo, Reza Dadashzadeh - Bonab, et al. Solution of Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Imperialist Competitive Algorithms[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 83: 104-116.

[16] 任小康,吴尚智,苟平章.基于动态状态树的回溯算法[J].计算机工程与设计,2007,28(4):755-756.

[17] Debao Chen, Feng Zou, Renquan Lu, et al. Learning Backtracking Search Optimisation Algorithm and Its Application[J]. Information Sciences, 2017, 376.

[18] A. E. Chaib, H. R. E. H. Bouchekara, R. Mehasni, et al. Optimal Power Flow with Emission and Non-smooth Cost Functions Using Backtracking Search Optimization Algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 81: 64-77.

作者简介:

杨春生(1979),高级工程师,从事海上油田电力系统设计及电网智能控制研究管理工作。

(收稿日期:2018-09-16)