

DOI: 10.7667/PSPC151119

# 一种改进型粒子群优化算法在电力系统 经济负荷分配中的应用

吴辰斌<sup>1</sup>, 李海明<sup>1</sup>, 刘栋<sup>2</sup>, 吴正阳<sup>1</sup>, 武蕾<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对机组数不同的电力系统设计优化方案, 提出将基于有效群体利用策略的粒子群算法应用到经济负荷分配问题的解决中。该改进算法通过有效改变粒子数目, 并改进了速度位移方程, 加快了算法的收敛速度, 同时提高其收敛精度。为验证该算法的有效性, 针对机组数不同的电力系统经济负荷分配进行了测试, 并与其他优化算法进行了比对测试。结果证明了该算法可高效准确地找到最优解, 有效避免了陷入局部最优的问题, 并保证了较快的运行速度。

**关键词:** 经济负荷分配; 粒子群优化算法; 有效群体利用策略; 电力系统; 阀点效应

## Application of improved particle swarm optimization algorithm to power system economic load dispatch

WU Chenbin<sup>1</sup>, LI Haiming<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, WU Zhengyang<sup>1</sup>, WU Lei<sup>1</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The efficient population utilization strategy for particle swarm optimization (EPUSPSO) is proposed to solve the economic load dispatch (ELD) problem of power system with different units. This algorithm improves the accuracy and the speed of its convergence by changing the number of particles effectively and improving the velocity and position equation. To verify the effectiveness of the algorithm, this algorithm is tested in the ELD case of power system with different units, and the obtained results are compared with those obtained from other algorithms. The compared results show that the algorithm can find the optimal solution effectively and accurately, avoid falling into the local optimal problem; meanwhile, faster speed can be ensured in the case.

**Key words:** economic load dispatch; particle swarm optimization; efficient population utilization strategy; power system; valve point effect

## 0 引言

电力系统的经济负荷分配(Economic Load Dispatch, ELD)是电力系统负荷规划和运行调度中的典型优化问题之一, 解决好此类优化问题可有效提高电力系统运行的经济性以及可靠性。该问题的优化目标是针对一定配网范围内的各机组进行合理的负荷分配, 使其目标系统在满足负荷需求、运行约束要求等条件下, 所产生的发电成本降至最低。通过对电力系统进行相关针对性的研究发现: 由于发电机组存在有阀点效应(Valve Point Effect)<sup>[1]</sup>的情况, 故对应的机组输出特性曲线往往呈现出非线性、非凸不可导的特点; 由于存在配电网输送能力限制

和系统稳定性要求等电力系统运行条件的约束, 故对应的问题函数呈现出不可微不可导的特点<sup>[2]</sup>; 另外考虑到配网系统中机组数量较多, 故对应的发电机组输入输出特性具有维数较高并且大量存在局部极值的特点<sup>[3]</sup>。因此在对维数和精度的高要求下, 以线性规划法<sup>[4]</sup>、二次规划法<sup>[5]</sup>、动态规划法<sup>[6]</sup>、拉格朗日乘数法<sup>[7]</sup>等为代表的经典分配优化算法已经无法很好地解决 ELD 优化问题。

近年来, 各类智能算法因具有良好的全局收敛性、不受求解对象函数特性限制等优点, 被广泛应用于 ELD 优化问题求解。其中, 常见的智能优化算法有蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法、人工神经网络算法、混沌算法等。文献[3]综合考虑了系

统非凸非线性的约束优化特点, 成功地将广义蚁群算法应用到 ELD 优化求解问题中, 证明了该算法的收敛性; 文献[8]将自调节粒子群算法应用到 ELD 优化求解问题中, 克服了粒子群算法早熟收敛的缺陷, 并提高了最优解的精度, 证明了该算法的有效性; 文献[9-10]成功地将混沌优化方法引入到 ELD 优化求解问题中。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是 Kennedy 和 Eberhart<sup>[11-12]</sup>于 1995 年提出的一种生物进化方法, 具有简便易行、优化效率高、收敛速度快等特点。它的优点是收敛速度快、需要参数少、容易实现。但当 PSO 应用于高维复杂的优化问题时, 容易过早收敛以及陷入局部最优。本文提出了将一种改进型粒子群算法应用到 ELD 优化问题之中, 该方法具有全局收敛性, 使粒子不易陷入局部最优, 并且收敛效果更好。通过在不同维度条件下与其他粒子群算法进行比较, 并基于考虑阀点效应的 3 机组、13 机组和 40 机组系统进行仿真, 结果验证了该方法是成功的、可行的。

## 1 经济负荷分配模型

### 1.1 目标函数

ELD 优化问题的目标是在满足电力系统运行约束的条件下, 优化系统中机组所带负荷的配额, 使系统产生的发电成本降至最低, 其数学模型为

$$\min F = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_i) \right\} \quad (1)$$

式中:  $F$  为系统总发电费用;  $N_G$  为系统内发电机总数;  $P_i$  为第  $i$  台发电机输出的有功功率;  $F_i(P_i)$  为第  $i$  台发电机耗量特性函数。

在机组热运行测试阶段, 可以得到单台发电机耗量特性  $F_i(P_i)$ , 一般用二次函数近似表示为

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

式中,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为第  $i$  台发电机耗量曲线系数。

当汽轮机下级进气阀突然开启时出现的拔丝现象会使机组耗量特性产生阀点效应<sup>[1]</sup>, 忽略阀点效应会导致求解精度受到显著影响<sup>[9]</sup>。考虑阀点效应时的耗量特性为

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + E_i \quad (3)$$

$$E_i = |e_i \sin(f_i(P_i - P_i^{\min}))| \quad (4)$$

式中:  $E_i$  为阀点效应引起的耗量特性变化;  $e_i$ 、 $f_i$  为第  $i$  台发电机的阀点效应参数;  $P_i^{\min}$  为第  $i$  台发电机输出的有功功率下限。

### 1.2 约束条件

发电机运行约束为

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (5)$$

式中,  $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$  为第  $i$  台发电机输出的有功功率上、下限。

电力平衡约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_i = P_L + P_D \quad (6)$$

式中:  $P_L$  为系统总网损;  $P_D$  为系统总负荷。网损一般采用潮流计算或 B 系数法<sup>[13]</sup>求得。

当电力系统配电网覆盖密集时, 可以忽略网损<sup>[8-9]</sup>, 本文针对对象为含不同机组数的配网系统, 计算中忽略网损量, 进而简化后的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} P_i = P_D \\ P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (7)$$

## 2 EPUSPSO 算法

粒子群算法在对动物集群行为观察基础上, 利用群体中的个体对信息的共享使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程, 从而获得最优解。基于有效群体利用策略的粒子群算法(Efficient Population Utilization Strategy for Particle Swarm Optimization, EPUSPSO)<sup>[14]</sup>是一种通过有效改变粒子数目的改进型粒子群算法, 本文将这种改进粒子群算法应用于电力系统的经济负荷分配中, 实现了电力系统经济负荷分配的性能提升, 并取得了良好的优化效果。

粒子群优化算法是一种通过总结鸟类群体搜索食物的行为方式而提出的算法, 利用共享群体之间的信息和个体自身的经验的方式来调整自己的位置, 进而最后求得所需的最优解。该算法首先对一群随机粒子(随机解)初始化, 然后通过迭代的过程找到最优解。在每次迭代过程中, 粒子通过跟随两个“极值”来更新自己, 一个极值是粒子本身寻找到的最优解, 称作个体最优解  $P_{best}$ , 另一个极值是整个种群当前找到的最优解, 称作全局最优解  $G_{best}$ 。

$$v_{i,j}(s+1) = w \cdot v_{i,j}(s) + c_1 r_1 \cdot [P_{best_{i,j}}(s) - x_{i,j}(s)] + c_2 r_2 \cdot [G_{best_j}(s) - x_{i,j}(s)] \quad (8)$$

$$x_{i,j}(s+1) = x_{i,j}(s) + v_{i,j}(s+1) \quad (9)$$

式中:  $x$  表示为粒子当前所在的位置;  $v$  为粒子当前的速度;  $i$  和  $j$  分别代表第  $i$  个粒子的第  $j$  个维度;  $s$  是当前的迭代次数;  $w$  为惯性权重;  $c$  为学习因子;

$r$  是 0 到 1 之间的随机数。

式(8)为速度公式, 它表示每个粒子在迭代的过程中依照上次迭代的两个最优解来更新自己的速度; 式(9)为位置公式, 粒子再以此来更新自己所在的位置, 进而多次迭代后得到最终的最优值。

虽然粒子群算法可解决多变量寻优问题, 但是其在解决高复杂度的问题时容易陷入局部最优, 一般在迭代后期, 普通粒子群算法无法取得较快的收敛效果, EPUSPSO 则很好地解决了上述问题。

EPUSPSO 算法是一种采用有效改变粒子数目方式的改进型粒子群算法, 其最大改进在于利用群体的全局最优值变化来有效改变粒子的数目, 该改进方法称为群体管理规则, 具体规则如下: (a) 若在连续两次迭代过程中全局最优解的适应度值均未更新, 则在群体中加入一个粒子, 其对应的位置为

$$x = \frac{Pbest(a_1, j) + Pbest(a_2, j)}{2} \quad (10)$$

式中,  $a_1$  和  $a_2$  表示从当前群体中随机抽取两个粒子的序号。(b) 若在连续两次迭代过程中全局最优解的适应度值均得到了更新, 则表明此时的粒子数目已足够, 则去除粒子群中适应度值最差的那个粒子。

另外, 为防止出现粒子陷入局部最优的“早熟”情况, 本算法中还引入了搜索范围共享策略和解共享策略, 其中搜索范围共享策略的激活概率为  $Pr(s)$ , 其公式为

$$Pr(s) = 0.03 + \frac{0.07s}{iteration} \quad (11)$$

式中,  $iteration$  表示迭代的最大次数。

搜索范围共享策略是在某一特定的解空间内重新设定单个粒子的所有维度, 依据解空间搜索范围的不同分为全局模式和局部模式, 在全局模式下, 粒子搜索的范围就是粒子的初始设定范围( $xmin, xmax$ ); 在局部模式下, 则从所有粒子的个体最优解  $Pbest$  中选出最大值  $Pbestmax$  和最小值  $Pbestmin$ , 组成( $Pbestmin, Pbestmax$ ), 以此作为粒子位置新的解空间。

解共享策略的设定则改进了原有粒子速度更新过程的单一性, 其计算公式为

$$v_{i,j}(s+1) = \begin{cases} \omega v_{i,j}(s) + c_1 r_{1i}(s)[Pbest_{i,j}(s) - x_{i,j}(s)] + \\ c_2 r_{2i}(s)[Gbest_j(s) - x_{i,j}(s)], rand > Ps_i \\ \omega v_{i,j}(s) + c_1 r_{1i}(s)[Pbest_{i,j}(s) - x_{i,j}(s)] + \\ c_2 r_{2i}(s)[Pbest_{a,j}(s) - x_{i,j}(s)], 否则 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $a$  表示随机从群体中抽取某一粒子的序号;  $rand$  是一个 0 到 1 之间的随机数;  $Ps_i$  的公式为

$$Ps_i = 0.5 \times \frac{(D-1) \cdot \exp\left(\frac{i-1}{s-1}\right) - 1}{2D} \quad (13)$$

式中,  $D$  是粒子的维度。

### 3 算例分析

为了对算法进行较好的评估和比较, 分析算法求解不同问题的效果, 研究者们提出了许多测试函数。这些测试函数集包含了非线性约束优化问题领域的基本知识, 针对不同测试函数在相同条件下进行测试, 相关比较结果详见参考文献[14]。

本文为了验证 EPUSPSO 算法针对电力系统 ELD 问题优化的有效性, 在 Inter Core i7 3.4G 的 PC 机上采用 Matlab 8.1 编程, 针对不同维度、不可导和多约束优化的典型 ELD 问题进行了仿真验证, 仿真示例均考虑耗量曲线的阀点效应, 忽略网损。本文设计算法(EPUSPSO)还与其他两种粒子群算法进行了对比实验, PSO 算法(一种普通粒子群优化算法)和 SAPSO 算法(一种自适应粒子群优化算法), 在比较中各算法粒子数目均为 64 个, 迭代次数为 1000 次, 其中 PSO 与 SAPSO 算法的参数设置及编写方法参见文献[15-19]。为避免算法随机性问题的存在, 在验证过程中分别对三种算法分别单独执行 50 次, 比较数据包括以下内容: 平均总费用

$$F_{mean} = \sum_{i=1}^{50} F_i / 50、最低总费用 F_{min} = \min(F_1, \dots, F_{50}),$$

$$平均耗时 T_{mean} = \sum_{i=1}^{50} t_i / 50、最短耗时 T_{min} =$$

$\min(t_1, \dots, t_{50})$ , 其中:  $F_i (i=1, \dots, 50)$  为算法第  $i$  次单独执行得到的最优解, 即 ELD 优化问题的最低系统发电总费用;  $t_i (i=1, \dots, 50)$  为算法第  $i$  次单独执行寻找最优解的过程所耗的时间。

本 ELD 问题算例优化对象分别为: 算例 1, 3 机组系统, 发电机承担的总负荷为  $P_D = 850$  MW, 维数  $D$  取 3; 算例 2, 13 机组系统, 发电机承担的总负荷为  $P_D = 1800$  MW, 维数  $D$  取 13; 算例 3, 40 机组系统, 发电机承担的总负荷为  $P_D = 10500$  MW, 维数  $D$  取 40。在仿真试验中考虑了耗量曲线的阀点效应, 忽略网损, 算例中的各发电机的耗量特性原始数据参数可参考文献[20]。

图 1 为算例 1 中三种粒子群算法的收敛比较图, 图 2 为算例 2 中三种粒子群算法的收敛比较图, 表 1 为算例 3 中三种粒子群算法的运行结果比较, 图 3 为算例 3 中三种粒子群算法的收敛比较图。

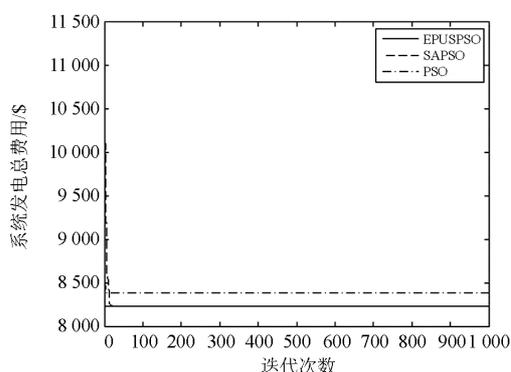


图1 算例1中 EPUSPSO、SAPSO 与 PSO 收敛对比图

Fig. 1 Convergence comparison of EPUSPSO, SAPSO and PSO in case 1

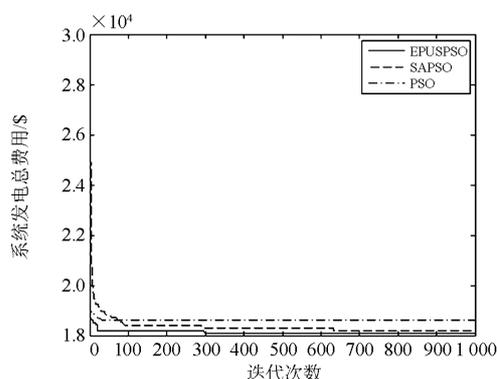


图2 算例2中 EPUSPSO、SAPSO 与 PSO 收敛对比图

Fig. 2 Convergence comparison of EPUSPSO, SAPSO and PSO in case 2

表1 算例3 计算结果比较

Table 1 Results comparison of case 3

粒子群算法	$F_{mean} / \$$	$F_{min} / \$$	$T_{mean} / s$	$T_{min} / s$
PSO	128 613.47	127 453.51	7.39	7.12
SAPSO	124 985.46	124 390.72	18.56	17.91
EPUSPSO	123 121.78	122 897.69	8.63	8.55

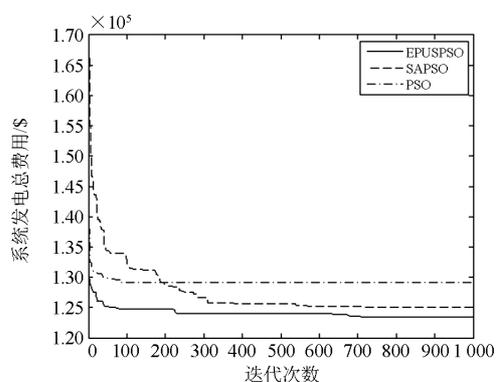


图3 算例3中 EPUSPSO、SAPSO 与 PSO 收敛对比图

Fig. 3 Convergence comparison of EPUSPSO, SAPSO and PSO in case 3

图1、图2和图3的收敛对比图可表明,在不同维度的电力系统ELD优化问题中,EPUSPSO算法均表现出更好的效果,收敛速度更快,收敛精度更高。表1的结果比较数据表明,在针对高维度电力系统ELD优化问题上,EPUSPSO算法表现出更好的效果,更适用于工程实践当中。在总费用寻优表现上,EPUSPSO算法的平均总费用和最低总费用均较其他两种算法更低,效果更优;在耗时表现上,虽EPUSPSO算法的平均耗时和最短耗时均比PSO算法结果略高,但很明显PSO算法的寻优结果为局部最优,未达到全局最优,而EPUSPSO算法求得的最优值比SAPSO算法求得的更低一些,而且耗时明显减少。图3的收敛对比图更可直观表明,EPUSPSO算法在高维条件下比其他粒子群算法更容易得到全局最优解。

通过上述算例可以发现,EPUSPSO算法收敛速度快,收敛精度高,尤其在在高维条件下具有很好的稳定性,是一种可用于解决电力系统经济负荷分配问题的良好方法。

#### 4 结论

本文提出将一种改进型粒子群算法(EPUSPSO算法)应用到电力系统经济负荷分配问题中,利用这种算法可以解决高维、非凸、非线性约束的优化问题。与传统的粒子群算法相比,该算法克服了普通粒子群算法易于陷入局部最优极值的“早熟”缺点,原理上可以以较大的概率找到优化问题的全局最优解,提高了计算精度,且计算效率较高,易于实现。用该算法对电力系统经济负荷优化问题进行仿真测试,在试验中考虑发电机组调点效应、线路容量约束及系统稳定性约束等条件,实验结果证明了该算法的可行性和有效性。由于改进粒子群算法的通用性,该算法也将会更加广泛地应用于其他各种复杂的优化问题当中。

#### 参考文献

- [1] DAVID C W, GERALD B S. Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1325-1332.
- [2] WHEIMIN L, FUSHENG C, MINGTONG T. Nonconvex economic dispatch by integrated artificial intelligence[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 307-311.
- [3] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 广义蚁群与粒子群结合算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 34-38.

HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xinyin, et al. Application of generalized ant colony optimization algorithm integrated with particle swarm optimization algorithm in economic

- dispatch of power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 34-38.
- [4] RABIN A J, ALUN H C, BRIAN J C. A homogenous linear programming algorithm for the security constrained economic dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 930-936.
- [5] JIYUAN F, LAN Z. Real-time economic dispatch with line flow and emission constrains using quadratic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 320-325.
- [6] ROSS D W, KIM S. Dynamic economic dispatch of generation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(6): 2060-2068.
- [7] WANG S J, SHAHIDEPOUR S M, KIRSCHEN D S. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1294-1301.
- [8] 张雪雯, 李艳君. 基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 8-13.  
ZHANG Xuewen, LI Yanjun. Self-adjusted particle swarm optimization algorithm based economic load dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 8-13.
- [9] 唐巍, 李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 36-40.  
TANG Wei, LI Dianpu. Chaotic optimization for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 36-40.
- [10] 修春波, 陆丽芬. 改进的混沌优化算法及其在电力系统负荷分配中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 109-112.  
XIU Chunbo, LU Lifen. Chaos optimization algorithm and its application in economic load dispatch on power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 109-112.
- [11] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C] // Proceeding of the 1995 IEEE International Conference on Neural Network. Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [12] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1-7.  
ZHOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load frequency control of power systems with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1-7.
- [13] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.  
HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xinyin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [14] SHENGTA H, TSUNGYING S, CHANCHENG L, et al. Efficient population utilization strategy for particle swarm optimizer[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, 2009, 39(2): 444-456.
- [15] 罗新, 牛海清, 来立永, 等. 粒子群优化自适应小波神经网络在带电局放信号识别中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 326-333.  
LUO Xin, NIU Haiqing, LAI Liyong, et al. Application of adaptive wavelet neural network based on particle swarm optimization algorithm in online PD pattern recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 326-333.
- [16] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.  
ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [17] 姚玉海, 王增平, 郭昆亚, 等. 基于E占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 76-81.  
YAO Yuhai, WANG Zengping, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration using a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 76-81.
- [18] 王永强, 谢军, 律方成. 基于改进量子粒子群优化稀疏分解的局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 320-329.  
WANG Yongqiang, XIE Jun, LÜ Fangcheng. PD signal denoising method based on improved quantum-behaved particle swarm optimization sparse decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 320-329.
- [19] 刘欢, 刘志刚. 基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 87-94.  
LIU Huan, LIU Zhigang. An improved particle swarm algorithm study on optimization model of maintenance schedules for railway traction substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 87-94.
- [20] NIDUL S, CHAKRABARTI R, CHATTOPADHYAY P K. Evolutionary programming techniques for economic load dispatch[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(1): 83-94.

收稿日期: 2015-07-01; 修回日期: 2016-01-11

作者简介:

吴辰斌(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统与智能电网; E-mail: wuchenbin1988@163.com

李海明(1964-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网;

刘 栋(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为新能源与智能电网。

(编辑 周金梅)