

# 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

修春波, 陆丽芬

(天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津 300160)

**摘要:** 为减少现有混沌优化方法在搜索空间内的盲目重复搜索, 提高寻优效率, 提出了一种改进的混沌优化算法, 并用于电力系统经济负荷分配这类复杂、非线性问题的求解中。该算法根据当前寻得的最优解确定精搜索空间, 并根据精搜索空间与原空间的比例大小确定各自的搜索概率, 并分别以不同的搜索概率同时对原空间和精搜索空间进行混沌搜索。这样即可避免传统混沌优化算法中因过早缩小搜索空间而造成的遗失全局最优解的缺点, 又可提高算法的寻优速度。实验结果表明, 该方法收敛速度快, 寻优效率高, 可有效解决电力系统经济负荷分配等复杂的优化问题。

**关键词:** 经济负荷分配; 电力系统; 混沌; 优化算法

## Chaos optimization algorithm and its application in economic load dispatch on power system

XIU Chun-bo, LU Li-fen

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract:** In order to avoid blind and repeated searching of chaos optimization in searching space, an improved chaos optimization algorithm is proposed to improve searching efficiency and solve the complicated and nonlinear problems of economic load dispatch on power system. The algorithm determines the fine searching space based on the optimal solution, and defines each search probability according to the ratio of fine searching space to the origin space. The fine searching space and the origin space are searched simultaneously according to different search probabilities. This method can overcome the shortcoming of losing the global optimal points owing to prematurely shrinking the searching space of the variables optimized in conventional chaos optimization algorithm. Simulation results show that the improved chaos optimization method has good performance, such as fast convergence and high search efficiency. The problem of economic dispatch of power systems can be resolved by the methods successfully.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.60808020).

**Key words:** economic load dispatch; power system; chaos; optimization algorithm

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0109-04

## 0 引言

电力系统经济负荷分配是一种具有现实意义的复杂非线性优化问题, 其目标是在满足电力系统运行约束条件的基础上组合机组, 使发电成本最低。由于经济负荷分配问题的重要性, 各国学者展开了大量的研究。基于经典优化算法的方法有: 简单梯度法、线性规划法、非线性规划法、动态规划法、拉格朗日乘数法等。但由于该问题的复杂性, 传统方法很难求得满意解。近年来, 人工智能技术的发展以及多学科的交叉融合为该问题的求解提供了新方法<sup>[1-3]</sup>。进化规划、遗传算法、粒子群算法、蚁群

算法、人工神经网络和混沌优化方法等许多方法在该问题的求解中都取得了一定的进展。

在这些方法中, 混沌优化算法因其具有实现简单、寻优效率高等优点而得到学者的深入研究。

混沌优化是按混沌运动自身规律在解空间进行遍历寻优的新型搜索算法, 可有效地对各类复杂寻优函数实现有效求解。目前, 混沌优化算法有多种形式。最早的混沌优化算法是采用混沌载波的方法实现的<sup>[4]</sup>。在此基础上, 张彤等人结合变尺度的思想提出了变尺度混沌优化方法, 以提高算法寻优效率<sup>[5]</sup>。修春波等<sup>[6]</sup>则采用两种混沌序列同时在解空间进行搜索的方法提高算法的通用性。这些算法存在一个共同的缺点: 在寻优过程中, 前期搜索如果不够充分, 缩小搜索空间后, 最优值就有可能被遗

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60808020)

漏在当前搜索空间之外而无法求得,这一缺点在一些复杂问题的求解过程中影响了算法的应用性能。

针对这一问题,本文提出一种概率混沌优化算法(Probability Chaos Optimization Algorithm, PCOA)。算法以当前最优解为中心,确定一个精搜索空间,根据精搜索空间与原搜索空间的比例,确定各自的搜索概率,算法按照各空间的搜索概率,同时在精搜索空间和原搜索空间进行搜索。由于算法始终保持对原搜索空间进行搜索,即使全局最优解被遗漏在精搜索空间之外,算法仍然有机会寻得最优解,这样就可避免因参数选取不当或搜索不够充分使算法陷入局部极小而无法获得全局最优解的情况发生。另外,随着寻优过程的进行,精搜索空间的范围逐渐缩小,而搜索概率逐渐增大,从而确保了算法具有较快的收敛速度。

在对许多复杂优化问题的求解中,该算法表现出了良好的寻优性能。在实际应用中,通过构建罚函数的方法,算法可有效求解机组组合优化问题。

## 1 电力系统经济负荷分配的数学模型

### 1.1 目标函数

电力系统经济负荷分配问题的优化目的是在满足系统运行约束条件下,优化组合机组的发电机出力,从而使得系统的总发电成本最低,其目标函数如下:

$$F = \min \sum_{i=1}^{N_g} F_i(p_i) \quad (1)$$

式中:  $F$  为系统发电总费用;  $N_g$  为系统内发电机总数;  $p_i$  为第  $i$  台发电机有功功率;  $F_i(p_i)$  为第  $i$  台发电机耗量特性。对于  $F_i(p_i)$  一般用二次函数近似表示为<sup>[7]</sup>:

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

式中,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为参数。

### 1.2 约束条件

电力平衡约束条件为:

$$\sum_{i=1}^{N_g} p_i = P_S + P_D \quad (3)$$

发电机运行约束条件为:

$$P_{i\min} < p_i < P_{i\max}, i = 1, 2, \dots, N_g \quad (4)$$

式中:  $P_D$  为系统总负荷需求;  $P_S$  为系统总网损;  $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$  为第  $i$  台发电机的最小与最大有功功率输出。系统总网损可采用 B 系数法计算<sup>[8]</sup>, 其关系式为:

$$P_S = p^T B_{gg} p + p^T B_{g0} + B_{00} \quad (5)$$

式中:  $P_S = (p_1, p_2, \dots, p_{N_g})^T$  为  $N_g$  维发电机有功

率矢量;  $B_{gg}$ 、 $B_{g0}$ 、 $B_{00}$  为网损系数,也称为 B 系数。其中,  $B_{gg}$  为  $N_g \times N_g$  维对称方阵;  $B_{g0}$  为  $N_g$  维列矢量;  $B_{00}$  为常数。

### 1.3 阀点效应

在汽轮机进汽阀突然开启时出现的拔丝现象会在机组的耗量曲线上叠加一个脉动效果,即产生所谓的阀点效应。阀点效应可表示为:

$$E_{vi} = |g_i \sin(h_i(p_i - p_{i\min}))| \quad (6)$$

式中:  $E_{vi}$  为阀点效应引起的第  $i$  台发电机耗量特性变化;  $g_i$ 、 $h_i$  为效应系数。

## 2 概率混沌优化算法

为求解上述优化问题,同时为提高混沌优化算法的寻优效率,本文提出如下改进混沌优化算法。选择式(7)的映射作为混沌变量的产生机制。

$$y_i^{k+1} = \sin[2/y_i^k], i = 0, 1, 2, \dots, y_i^k \in [-1, 1], y_i^k \neq 0 \quad (7)$$

由于该映射在区间 $[-1, 1]$ 内有无穷多个不动点和零点。因此,利用该映射产生混沌变量时应满足以下两个条件:

1) 迭代的初始值不能选为 0;

2) 初始值不能取为无穷多个不动点中的任何一个,否则为稳定轨道,不能产生混沌。不动点为方程  $x = \sin(2/x)$  的解。

设优化函数为

$$F = \min f(x_i), x_i \in [a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

本文提出的优化方法步骤如下:

Step1 初始化  $k=0$ ,  $r=0$ ,  $y_i^k = y_i(0)$ ,  $a_i^r = a_i$ ,  $b_i^r = b_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

这里  $k$  为混沌变量迭代标志;  $r$  为精搜索标志;  $x_i^*$  为当前最优解;  $f^*$  为当前最优值。

Step2 将混沌变量  $y_i^k$  以概率  $p$  和  $1-p$  分别映射到当前搜索空间  $x_i^k$ 。

$$x_i^k = \begin{cases} a_i + y_i^k (b_i - a_i), & \text{if } (\text{random}(0,1) < p) \\ a_i^r + y_i^k (b_i^r - a_i^r), & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$p$  的取值根据精搜索空间与原空间范围大小的比例给出。

$$p = \left( \frac{\prod_{i=1}^n (b_i^r - a_i^r)}{\prod_{i=1}^n (b_i - a_i)} \right) \quad (10)$$

Step3 利用式(8)计算  $f(x_i^k)$ 。

如果  $f(x_i^k) < f_x^*$  则  $f_x^* = f(x_i^k)$ ,  $x_i^* = x_i^k$ , 然后转至 step4; 否则直接转 step4。

Step4  $y_i^{k+1} = \sin(2/y_i^k)$ ,  $k=k+1$ 。

Step5 重复 step2~step4 到指定次数, 转到 step6。

Step 6 确定新的精搜索空间。

$$a_i^{r+1} = x_i^* - \varepsilon^r (b_i^r - a_i^r) \quad (11)$$

$$b_i^{r+1} = x_i^* + \varepsilon^r (b_i^r - a_i^r) \quad (12)$$

其中  $\varepsilon^r = (r/r+1)^2$ 。

Step 7  $a_i^{r+1} = \max(a_i^r, a_i^{r+1})$ ,  $b_i^{r+1} = \min(b_i^r, b_i^{r+1})$ ,  $r=r+1$ 。

Step 8 返回step2, 直到满足优化结束条件完成寻优过程。

混沌运动能无重复的遍历空间内所有状态。但当搜索空间较大时寻优时间较长。可采用逐渐缩小搜索空间的办法来提高搜索效率。但在缩小搜索空间之后, 如果不再对原空间进行搜索, 则当前期搜索不够充分时, 最优解很容易遗漏在新搜索空间之外, 从而降低了算法的全局寻优能力。

本文提出的概率混沌优化算法, 将缩小后的空间确定为精搜索空间, 根据精搜索空间与原空间大小比例, 以不同的概率同时对原空间和精搜索空间同时进行搜索。并随着优化过程的进行, 精搜索空间范围不断缩小, 而搜索概率逐渐增大。这样, 在寻优过程中, 即可始终保持算法具有良好的全局寻优能力, 又可确保算法具有较高的寻优效率。

### 3 仿真实验

为验证本文算法的有效性, 分别采用传统混沌优化算法 (CCOA) [4]、变尺度混沌优化算法 (MSCOA) [5]、以及本文算法对下列典型测试函数进行优化计算, 并进行性能比较。

$$F_1 = \left[ \frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right]^{-1}, |x_i| < 65536 \quad (13)$$

其中

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} -32 & -16 & 0 & 16 & 32 & -32 & -16 & \dots & 0 & 16 & 32 \\ -32 & -32 & -32 & -32 & -32 & -16 & -16 & \dots & 32 & 32 & 32 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = (x_1^2 + x_2^2)^{0.25} [\sin^2(50(x_1^2 + x_2^2)^{0.1}) + 1.0], |x_i| < 100 \quad (14)$$

$$F_3 = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2 (19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] [30 + (2x_1 - 3x_2)^2 (18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)] \quad (15)$$

采用不同的算法对上述典型函数进行50次寻优计算, 所得比较结果如表1所示。

从仿真结果可以看出, 本文算法具有比传统混沌优化算法更好的性能。由于采用不同的概率同时原空间和精搜索空间内进行搜索, 提高了算法的全局寻优能力, 因此可较快地缩小精搜索空间的范围, 从而提高了算法的寻优效率。

表1 函数优化的平均迭代次数

Tab.1 Average iteration numbers of optimized functions

优化函数	平均迭代次数		
	CCOA	MCOA	PCOA
$F_1$	4 232	2 113	1 641
$F_2$	3 286	1 979	1 082
$F_3$	1 972	922	527

### 4 应用实例

采用本文算法可对电力系统经济负荷分配问题进行有效求解。以文献[9]中的三机六母线系统为例, 发电机承担的总负荷为500 MW, 各单元机组参数列于表2和表3中。

表2 发电机组燃料费用系数

Tab.2 Fuel cost coefficient of generator unit

机组号	燃料费用系数			
	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$g_i$
1	0.001 56	7.92	561	300
2	0.001 94	7.85	310	200
3	0.004 82	7.97	78	150

表3 发电机组出力上下限系数

Tab.3 Up and down limit coefficient of generator output

机组号	机组出力上下限		
	$h_i$	$p_{imax}$	$p_{imin}$
1	0.031 5	600	100
2	0.042	400	100
3	0.063	200	50

所用到的B系数如下所示:

$$B_{gg} = \begin{bmatrix} 0.676 \times 10^{-3} & 0.953 \times 10^{-4} & -0.507 \times 10^{-4} \\ 0.953 \times 10^{-4} & 0.521 \times 10^{-3} & 0.901 \times 10^{-4} \\ -0.507 \times 10^{-4} & 0.901 \times 10^{-4} & 0.294 \times 10^{-3} \end{bmatrix},$$

$$B_{g0} = \begin{bmatrix} -7.66 \times 10^{-2} \\ -0.342 \times 10^{-2} \\ 1.89 \times 10^{-2} \end{bmatrix}, B_{00} = 4.035 7 \quad (16)$$

考虑三种不同情形下的寻优函数如下:  
情形1. 忽略网损, 忽略阀点效应时;

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(p_i) + k \left| \sum_{i=1}^n p_i - p_D \right|^2, i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

情形2. 忽略网损, 计及阀点效应时;

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(p_i) + \sum_{i=1}^n E_i + k \left| \sum_{i=1}^n P_i - P_D \right|^2, i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

情形3. 计及网损, 计及阀点效应时;

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(p_i) + \sum_{i=1}^n E_i + k \left| \sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_S \right|^2, i=1,2,\dots,n \tag{19}$$

其中,  $k$  为约束条件的罚函数系数, 寻优过程中不满足约束的解将得到较大的惩罚值而被淘汰。表4~表6给出了本文算法、文献[9]和文献[10]三种方法对该问题的求解结果。

表4 情形1的结果比较

Tab.4 Results comparison of condition 1

算法	$P_1$ /MW	$P_2$ /MW	$P_3$ /MW	总和	煤耗量
文献[9]	237.73	187.58	74.69	500.00	5 083.04
文献[10]	228.64	202.13	68.80	499.57	5 080.50
本文算法	233.53	198.10	68.07	499.70	5 079.72

表5 情形2的结果比较

Tab.5 Results comparison of condition 2

算法	$P_1$ /MW	$P_2$ /MW	$P_3$ /MW	总和	煤耗量
文献[9]	299.41	100.70	99.90	500.01	5 121.47
文献[10]	199.73	250.18	50.00	499.91	5 094.70
本文算法	249.81	200.20	50.00	500.01	5 092.98

表6 情形3的结果比较

Tab.6 Results comparison of condition 3

算法	$P_1$ /MW	$P_2$ /MW	$P_3$ /MW	总和	$P_4$ /MW	煤耗量
文献[9]	299.46	172.00	98.84	570.30	70.24	5 735.93
文献[10]	199.73	174.80	176.99	551.52	52.22	5 735.80
本文算法	184.10	183.99	185.25	553.36	52.59	5 626.99

从表4可以看出, 本文方法在满足约束条件的情况下所需的煤耗量为5 079.72, 较之文献[9]中的5 083.04和文献[10]中的5 080.50相对较少。

从表5中可以看出, 本文方法相对文献[10]更好地满足约束条件, 并且所需的煤耗量更低。

表6中的数据表明, 本文方法与其他两种方法相比, 在保证较低系统网损的同时, 能够使得各个机组的有功功率之和最低, 并且所需的煤耗量也相对降低。

以上结果表明本文算法在实际问题的应用求解中表现出良好的寻优性能。这是因为本文算法用不同概率对精搜索空间和原空间保持同时搜索, 可在确保全局寻优能力的基础上较快缩小精搜索空间范围, 提高了算法的寻优速度和寻优效率。因此, 寻优性能得到改善。

### 5 结束语

本文提出了一种改进的混沌优化算法, 在寻优过程中, 确定出精搜索空间, 并根据精搜索空间与

原空间的比例确定各自的搜索概率。在整个寻优过程中保持对两个空间同时搜索。在确保全局寻优能力的基础上, 可有效提高算法的收敛速度。在求解电力系统经济负荷分配等问题时, 该算法表现出了良好的应用性能。

### 参考文献

- [1] ZHANG Zhi-sheng. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37 (2): 1800-1803.
- [2] Basu M. A simulated annealing-based goal-attainment method for economic emission load dispatch of fixed head hydrothermal power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27 (2): 147-153.
- [3] Wang Yu, Li Bin, Weise Thomas. Estimation of distribution and differential evolution cooperation for large scale economic load dispatch optimization of power systems[J]. Information Sciences, 2010, 180 (12): 2405-2420.
- [4] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14 (4): 613-615.  
LI Bing, JIANG Wei-sun. Chaos optimization method and its application[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14 (4): 613-615.
- [5] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14 (3): 285-287.  
ZHANG Tong, WANG Hong-wei, WANG Zi-cai. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. Control and Decision, 1999, 14 (3): 285-287.
- [6] 修春波, 刘向东, 张宇河. 双混沌机制优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 2003, 18 (6): 724-726.  
XIU Chun-bo, LIU Xiang-dong, ZHANG Yu-he. Optimization algorithm using two kinds of chaos and its application[J]. Control and Decision, 2003, 18 (6): 724-726.
- [7] 王凌, 黄付卓, 李灵坡. 基于混合双种群差分进化的电力系统经济负荷分配[J]. 控制与决策, 2009, 24 (8): 1156-1160.  
WANG Ling, HUANG Fu-zhuo, LI Ling-po. Economic distribution of power systems based on hybrid differential evolution with double populations[J]. Control and Decision, 2009, 24 (8): 1156-1160.
- [8] 何大阔, 王福利, 毛志忠. 遗传算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (4): 890-892.

(下转第 117 页 continued on page 117)

供了参考依据。

(2) 既考虑相点间距离又考虑相点演化趋势的预测参考点选取方法,有助于提高风速预测精度。

(3) 按  $m$ 、 $\tau$  的最佳匹配选取样本,一阶局部预测模型和BP神经网络的预测精度均较高,而BP神经网络更有优势。

### 参考文献

- [1] 刘永前,韩爽,胡永生. 风电场出力短期预报研究综述[J]. 现代电力, 2007, 24(5): 6-11.  
LIU Yong-qian, HAN Shuang, HU Yong-sheng. Review on short-term wind power prediction[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(5): 6-11.
- [2] 孙劲松,刘建新,杨宏,等. 基于时间序列分析的风电场短期风速预测研究[D]. 保定: 华北电力大学.  
SUN Jin-song, LIU Jian-xin, YANG Hong, et al. Short-term wind speed forecasting in wind farm based on time series analysis[D]. Baoding: North China Electric Power University.
- [3] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.  
YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5.
- [4] 王明伟. 风电场短期风速预测研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.  
WANG Ming-wei. Short-term wind speed forecasting in wind farm[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [5] 冬雷,王丽婕,高爽,等. 基于混沌时间序列的大型风电场发电功率预测建模与研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 125-129.  
DONG Lei, WANG Li-jie, GAO Shuang, et al. Modeling and analysis of prediction of wind power generation in the large wind farm based on chaotic time series[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 125-129.
- [6] DONG Lei, WANG Li-jie, HU Shi, et al. Prediction of wind power generation based on chaotic phase space reconstruction models[C]. //Power Electronics and Drive Systems 7th International Conference: 2007.
- [7] 吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [8] 谷子,唐巍. 电力短期负荷时间序列混沌相空间重构参数优选法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 18-23.  
GU Zi, TANG Wei. Parameter optimization of phase space reconstruction for short-term load time series[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 18-23.
- [9] 罗海洋,刘天琪,李兴源. 风电场短期风速的混沌预测方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 67-71.  
LUO Hai-yang, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Chaotic forecasting method of short-term wind speed in wind farm[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 67-71.
- [10] HAN Shuang, YANG Yong-ping, LIU Yong-qian. The comparison of BP network and RBF network in wind power prediction application[C]. //BIC-TA Second International Conference: 2007.

收稿日期: 2010-05-06

作者简介:

吕涛(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、混沌理论在电力系统中的应用; E-mail: lvtaoled@163.com

唐巍(1971-),女,教授,博士生导师,研究方向为配电网规划及经济运行、配电网可靠性评估。

(上接第 112 页 continued from page 112)

- HE Da-kuo, WANG Fu-li, MAO Zhi-zhong. Application of genetic algorithm on economic dispatch of power systems[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(4): 890-892.
- [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 Dian-pu. Chaotic optimization for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 36-40.
- [10] 韩芳,王爽心,郭小宝. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 772-777.  
HAN Fang, WANG Shuang-xin, GUO Xiao-bao. Study of chaotic optimization method for power system economic load dispatch[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 772-777.

收稿日期: 2010-04-23

作者简介:

修春波(1978-),男,博士,副教授,研究方向为智能优化计算; E-mail: xiuchunbo@tjpu.edu.cn.

陆丽芬(1984-),女,硕士,主要研究方向为混沌优化计算。