

## 基于群搜索算法的电力系统无功优化

刘华臣, 王锡淮, 肖健梅, 王海锋

(上海海事大学电气自动化系, 上海 201306)

**摘要:** 为了提高电力系统的运行效率和经济性能, 用群搜索优化算法(Group Search Optimizer)对电力系统各控制变量进行合理配置, 以此减少电力系统无功损耗。群搜索优化算法是一种新兴的群智能优化算法, 该算法把群成员分为发现者、追随者和游荡者三种, 其中游荡者的位置随机选定, 这有效地避免了其他算法容易陷入局部最小值问题。选定电力系统中无功投入量、电压变比、发电机端电压等作为控制变量, 通过群搜索优化算法对控制变量进行迭代计算和潮流计算, 最终计算出最小的网络损耗及其对应的控制变量值。最后用 Matlab7.6 对 IEEE-14、30 节点系统进行仿真, 并与其他群智能优化算法进行对比, 结果显示, 群搜索算法的收敛较快且稳定, 最终证明了群搜索算法对无功优化的优越性。

**关键词:** 群搜索优化算法; 电力系统无功优化; 潮流计算; Matlab; IEEE 节点系统

### Reactive power optimization based on group search optimizer

LIU Hua-chen, WANG Xi-huai, XIAO Jian-mei, WANG Hai-feng

(Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to increase the operating efficiency and economic performance, this paper uses the group search optimizer to optimize the control variable of power systems so as to decrease the reactive loss. Group search optimizer is a new kind of swarm intelligence optimization algorithm, which divides group members into three types: producer, scrounger and ranger. The location of rangers is random, which can avoid entrapment in local minima effectively. The input of reactive power and the voltage transformer ratios, and the terminal voltage of generator are designated as control variables, after the iterative computations and power flow calculation by using the swarm search optimization algorithm, the minimum of the reactive loss and the corresponding control variable can be figured out. At last, the IEEE14-bus system and IEEE30-bus system are simulated with Matlab7.6 and contrasted with the others optimizers, the results show that the convergence rate of the group search optimizer is fast and stable, and superior in reactive power optimization.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61175044).

**Key words:** group search optimizer; reactive power optimization; power flow calculation; Matlab; IEEE bus system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0093-07

## 0 引言

电力系统无功优化是指在电网正常运行前提下, 通过合理选择变压器接头、发电机末端电压以及平衡节点的无功补偿量等措施, 使电力系统潮流分布平衡、电网线路的有功损耗达到最小, 这对于提高电力系统电压质量, 保证电网安全、经济和可靠运行有着重要作用。电力系统无功优化问题是典

型的非线性规划问题, 具有多目标、多变量、多约束、非线性等特点, 特别是动态无功优化<sup>[1]</sup>问题的求解更是复杂, 针对该问题已有多种计算方法得到运用<sup>[1-3]</sup>, 并取得了较好的优化结果, 但是这些算法很容易由于初始值选取不当而陷入局部最优值<sup>[4]</sup>。

群搜索优化算法(Group Search Optimizer, GSO)<sup>[5-6]</sup>是一种新型的人工智能优化算法, 这种算法是在 PS 模型(Producer-Scrounger Model)的基础上演变而来的, 最早由 S.He、Q.H.Wu 等在 2006 年首先提出, 其原理与粒子群优化算法<sup>[7]</sup>、蚁群优化算法<sup>[8]</sup>有相似之处。该算法源于动物觅食行为: 根据动物行为学研究, 动物为了尽快搜索到最优目标,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61175044); 上海市教委科研创新重点项目(12ZZ158); 上海海事大学校基金项目(20130054)

进化出了优化自身搜索行为的搜索策略，并根据这种搜索策略利用生物学的视觉搜索原理，把群成员分为发现者、追随者和游荡者三类。在每次迭代时，群成员中适用值最优者为发现者，剩下的群成员按一定比例随机分为追随者和游荡者，新一轮迭代过程中，每个成员都会在这三种角色中切换。这种搜索模式能很好地避免陷入局部最优值，并快速地在整个搜索空间找出最优解，因此，GSO 算法对于多模态高维非线性函数的优化问题有很明显的优势<sup>[9]</sup>，目前，该算法已在一些工程领域取得很好的效果，也在解决分布式电源配置<sup>[10]</sup>、结构设计<sup>[11]</sup>、弹簧设计及其压力容器设计<sup>[12]</sup>中取得了良好的效果。

## 1 电力系统无功优化模型

电力系统无功优化的最终目的是在保证电网安全运行的前提下，通过调节控制变量来减少电网有功损耗，其数学模型包括目标函数、功率方程约束和变量约束<sup>[13]</sup>。这是一个典型的非线性问题，可调节变压器的分抽头和补偿电容投切都是离散化量，约束条件包括等式约束和不等式约束两种，而且其规模会随着电网规模的扩大而愈加复杂。

### 1.1 目标函数

无功优化的目标函数可以有多种，其中包括电网有功网损最小、电网无功补偿费用最小<sup>[14]</sup>、电压质量最好，系统总费用最小等等。从经济性考虑，本文无功优化目标函数选取电网有功网损最小，目标函数为

$$\min(P_{\text{Loss}}) = \min \sum_{i,j \in N_L} G_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}] \quad (1)$$

其中： $U_i$ 和 $U_j$ 分别为节点 $i$ 和 $j$ 的电压； $G_{ij}$ 为节点 $i$ 和 $j$ 之间的导纳； $\theta_{ij}$ 为节点 $i$ 和 $j$ 之间的相角差； $N_L$ 为支路集合。

如果考虑系统的安全性能，经常选取节点电压偏离作为目标函数

$$\min(\Delta U) = \min \sum_{i \in N} \left| \frac{U_i^{\text{spec}} - U_i}{U_{i\text{max}} - U_{i\text{min}}} \right| \quad (2)$$

其中： $U_i^{\text{spec}}$ 为节点电压基准值； $U_i$ 为节点电压实际值； $U_{i\text{max}}$ 和 $U_{i\text{min}}$ 分别为节点电压最大与最小值； $N$ 为节点集合。

### 1.2 控制变量与状态变量约束

选取发电机端电压 $U_G$ 、变压器分接头 $T_i$ 、平衡节点无功补偿容量 $Q_C$ 为控制变量，发电机无功出力 $Q_G$ 、负荷节点电压 $U_L$ 为状态变量。这一类约束属于不等式约束。

控制变量约束为

$$U_{Gi}^{\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi}^{\max} \quad (3)$$

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad k \in N_T \quad (4)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} \quad i \in N_C \quad (5)$$

其中： $U_{Gi}^{\max}$ 、 $U_{Gi}^{\min}$ 、 $T_k^{\max}$ 、 $T_k^{\min}$ 、 $Q_{Ci}^{\max}$ 、 $Q_{Ci}^{\min}$ 分别为对应控制变量的上下界； $N_G$ 、 $N_T$ 、 $N_C$ 分别为发电机集合、变压器集合、并联电容器集合。

状态变量约束为

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i \in N_G \quad (6)$$

$$U_{Li}^{\min} \leq U_{Li} \leq U_{Li}^{\max} \quad i \in N_L \quad (7)$$

其中： $Q_{Gi}^{\max}$ 、 $Q_{Gi}^{\min}$ 、 $U_{Li}^{\max}$ 、 $U_{Li}^{\min}$ 分别为对应状态变量的上下界； $N_L$ 为负荷节点集合。

### 1.3 功率潮流约束

在电力系统无功优化模型中，通常考虑有功和无功功率平衡约束作为等式约束条件，即

$$P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in N} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in N \quad (8)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in N \quad (9)$$

其中： $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ 分别为发电机节点发出的有功功率与无功功率； $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$ 分别为负荷节点的有功与无功功率； $Q_{Ci}$ 为并联电容器的无功补偿容量； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$ 分别为为节点 $i$ 和 $j$ 之间的电导、电纳、相角差。

## 2 群搜索优化算法

达尔文的“物竞天择，适者生存”理论是自然界进化的基本规则，最终使生物群体进化出了最优的搜索策略，常见的搜索行为包括寻找食物、产卵地、栖息地。动物群居也是一种常见的自然现象，群成员经过信息共享及分工合作来提高搜索效率，常见的分工有两种，即发现者(Producer)和追随者(Scrounger)，这是一种典型的PS模型(Producer-Scrounger Model)<sup>[15]</sup>，GSO算法<sup>[5-6]</sup>的灵感就源自动物的搜索行为，是从动物在自然界的搜索行为模拟而来的，该优化算法主要用于连续空间的优化问题。GSO算法中由一定数目(Population size)的个体(Member)组成一个群(Group)。在第 $k$ 次迭代过程中，每个个体 $i$ 均有四个属性：位置(Position)  $X_i^k \in i^n$ 、搜索角度(Angle)  $\varphi_i^k = (\varphi_{i1}^k, \dots, \varphi_{i(n-1)}^k) \in i^{n-1}$ 、搜索方向(Search direction)  $D_i^k(\varphi_i^k) = (d_{i1}^k, \dots, d_{in}^k) \in i^n$ 以及适应度(Fitness value)  $f_{\text{value}} = f(X_i^k)$ 。由目标函数 $f$ 根据群成员位置 $X_i^k$ 计算而来，搜索方向是一个单位向量，由搜索角度计算而来，过程如下：

$$d_{i1}^k = \prod_{p=1}^{n-1} \cos(\varphi_{ip}^k) \quad (10)$$

$$d_{ij}^k = \sin(\varphi_{i(j-1)}^k) \cdot \prod_{p=i}^{j-1} \cos(\varphi_p^k) \quad (11)$$

$$d_{in}^k = \sin(\varphi_{i(n-1)}^k) \quad (12)$$

在 GSO 算法中每个群包括三类成员: 发现者、追随者和游荡者(Rangers)。在每次迭代过程中, 适应度最大的群成员为发现者, 剩下的群成员随机地按一定比例分配为追随者和游荡者, 通常其比例为 4:1。在第  $k$  次迭代中发现者的位置为  $X_p^k$ , 搜索角度为  $\varphi_p^k$ , 发现者的搜索行为如下:

1) 发现者从当前位置开始搜索, 然后在搜索空间中当前位置的前方、左侧、右侧分别进行扫描, 在三个方向分别更新位置, 然后计算各自的适应度, 三个位置按照如下公式更新。

在前方的样点为

$$X_z = X_p^k + r_1 l_{\max} D_p^k(\varphi_p^k) \quad (13)$$

在右侧的样点为

$$X_r = X_p^k + r_1 l_{\max} D_p^k(\varphi_p^k + r_2 \theta_{\max} / 2) \quad (14)$$

在左侧的样点为

$$X_l = X_p^k + r_1 l_{\max} D_p^k(\varphi_p^k - r_2 \theta_{\max} / 2) \quad (15)$$

其中:  $r_1 \in R^1$  是一个平均值为 0, 标准差为 1 的正态分布的随机数;  $r_2 \in R^{n-1}$  是均匀分布在 (0,1) 的随机数;  $l_{\max}$  为最大转移距离;  $\theta_{\max}$  为最大转移角度, 均为标量, 在 3D 空间中, 其示意图如图 1 所示。

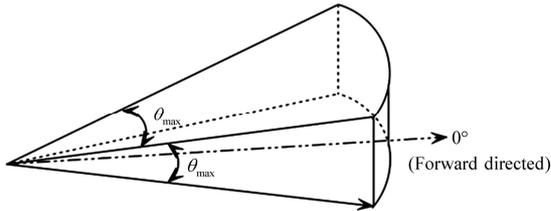


图 1 3D 空间搜索区域示意图

Fig. 1 Scanning field in 3D space

2) 分别计算三个位置的适应度, 选取其中适应度最优的位置与当前适应度进行比较, 若这优于当前适应度, 则发现者位置转移到相应最优适应度的位置; 否则, 发现者的位置不移动, 仅改变其搜索方向为

$$\varphi^{k+1} = \varphi^k + r_2 \alpha_{\max} \quad (16)$$

其中,  $\alpha_{\max}$  为最大转向角。

3) 经过连续的  $a$  次迭代后, 如果发现者均没有找到更好的位置, 发现者的搜索角度将更新为

$$\varphi^{k+a} = \varphi^k \quad (17)$$

其中,  $a$  为一个常数。

群中的其他成员也按照一定规律进行移动: 在第  $k$  次迭代中, 若第  $i$  个成员为追随者, 其位置为

$X_i^k$ , 搜索角度为  $\varphi_i^k$ , 它将会向本次迭代过程中的发现者移动一定距离, 并按照式(18)更新位置。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + r_3 (X_p^k - X_i^k) \quad (18)$$

其中,  $r_3 \in R^n$  是均匀分布在 (0,1) 的随机数。若第  $i$  个成员为游荡者, 其搜索角度将根据式(16)进行更新, 并随机选择一个距离:  $l_i = \alpha \cdot r_1 l_{\max}$  从而转移到一个新的位置。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + l_i D_i^k(\varphi^{k+1}) \quad (19)$$

游荡者的加入有效地解决了优化问题陷入局部最小值的问题, 使群搜索算法的优势更加突出。在搜索过程中要保证群成员在限定范围内搜索, 若搜索跃出边界时, 它就回到搜索空间的初始位置, 经过一定次数的迭代后计算结束, 此时发现者的适应度为目标函数的最优值, 发现者的位置为优化问题的最优解。

### 3 基于群搜索优化算法的无功优化数学模型

对于给定电力系统, 要计算系统线路有功损耗的最小值, 首先进行潮流计算, 潮流计算是一种多元非线性问题, 是电力系统分析中最广泛、最重要的一种电气计算, 也是研究电力系统稳态运行的一项基本运算。综合各种潮流计算方法<sup>[6]</sup>, 本文选用牛顿-拉夫逊法, 简称牛顿法。牛顿法对于非线性问题有良好的收敛性, 有很高的收敛速度, 特别是引用最佳顺序消去法后, 由于其占用内存小而且计算速度快而沿用至今。

根据对无功优化和群搜索方法的叙述, 确定无功优化寻优过程步骤如下:

Step1. 读入电力系统参数, 包括系统支路参数、节点参数、控制变量和状态变量约束条件; 设置群规模  $M$  及  $l_{\max}$ 、 $\alpha_{\max}$ 、 $a$  等其他限制条件。

Step2. 确定控制变量为群成员, 在搜索空间内随机初始化  $M$  个群成员, 分别把  $M$  个群成员进行潮流计算并计算网损, 比较各成员的网损值, 找出发现者, 并随机分配追随者和游荡者。

Step3. 分别根据式 (13)、式 (15)、式 (18)、式 (19) 对发现者、追随者和游荡者进行位置更新, 如果  $a$  次迭代后发现者的搜索角度根据式 (17) 进行更新, 判断群成员新位置是否溢出, 如果溢出在搜索空间内随机初始化位置。

Step4. 在群成员的新位置下计算各自对应的无功网损, 并重新分配发现者、追随者和游荡者。

Step5. 判断是否达到最大迭代次数, 如果没有达到则转入 Step3, 如果达到转入 Step6。

Step6. 把发现者的位置视为最优解, 发现者对

应的潮流计算最小网损视为最有结果，输出结果。

### 4 算例分析

为了验证群搜索算法的优越性，本文利用群搜索优化算法对 IEEE-14、30 节点系统<sup>[17]</sup>进行优化计算，并与基本遗传算法(GA)、基本粒子群优化算法(PSO)和改进的粒子群算法(CLSPSO)进行比较。利用 Matlab7.6 分别编写牛顿-拉普逊法潮流计算程序和四种优化算法程序<sup>[18]</sup>。功率基准值为 100 MW，并采用标么值表示各参量。

#### 4.1 IEEE14 节点系统

IEEE14 系统有 14 个节点，包括五台发电机(节点 1、2、3、6、8，其中节点 1 为平衡节点，其余节点为 PV 节点)、三台可调变压器(支路 4-7、4-9、5-6)及一个无功补偿节点 9(通过并联电容器调节)，系统的接线图如图 2，控制变量上下限及调节档位见表 1。

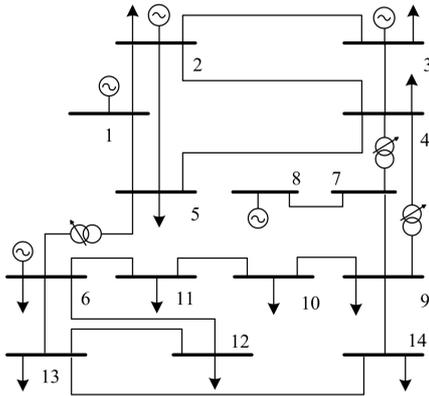


图 2 IEEE14 节点系统接线图

Fig. 2 IEEE14-bus system

表 1 IEEE14 节点系统控制变量约束条件

Table 1 Limits of control variables of IEEE14-bus system

变量名称	发电机节点电压	变压器变比	无功补偿设备
上限值	1.1	1.1	0.5
下限值	0.9	0.9	0
步长	连续调节	0.012 5	0.1
调节档次	—	17	5

根据文献[5-6]，设置初始搜索角度  $\varphi_0$  为  $(\pi/4, \dots, \pi/4)$ ；常数  $a$  为  $round(\sqrt{n+1})$ ，其中  $n$  为搜索空间维数； $\theta_{max}$  为  $\pi/a^2$ ； $\alpha_{max}$  为  $\theta_{max}/2$ ；群规模为 48； $l_{max}$  通过式(20)获得。

$$l_{max} = \|U - L\| = \sqrt{\sum_{i \in N} (U_i - L_i)^2} \quad (20)$$

其中， $U_i$  和  $L_i$  为搜索空间第  $i$  维向量的上下界。

进行对比的基本遗传算法的基因个数为 48，基因交叉概率为 0.8，变异概率为 0.2；基本粒子群优化算法的粒子数为 48，学习因子  $c_1$  和  $c_2$  均为 2，惯性权重为 0.5；改进的粒子群优化算法采用混沌粒子群优化算法 (CLSPSO)，选取粒子数为 48，学习因子为  $c_1$  和  $c_2$  均为 2，惯性权重为 0.5，混沌搜索最大次数为 20。

把初始数据分别带入四种算法后在 Matlab7.6 中进行运算，迭代次数均选为 200，有功网损结果和各控制量状态值的标么值如表 2 所示，收敛特性图见图 3。

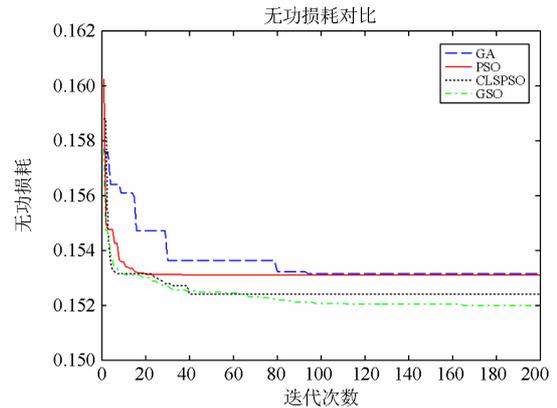


图 3 IEEE14 节点系统的优化算法收敛特性曲线

Fig. 3 Performance characteristics curve of  $P_{Loss}$  for four optimization algorithms

表 2 四种算法对 IEEE14 节点系统无功优化对比

Table 2 Optimal results of four optimization algorithms for reactive optimization

变量	变量名	初始值	优化算法			
			GA	PSO	CLSPSO	GSO
发电机	$U1$	1.0600	1.0742	0.9855	1.0207	1.0130
	$U2$	1.0451	1.0419	1.0431	1.0421	1.0429
	$U3$	1.0103	1.0032	1.0112	1.0111	1.0097
机端电压	$U6$	1.0705	1.0419	1.0334	1.0575	1.0695
	$U8$	1.0907	1.0484	1.0618	1.1000	1.0987
	$T4-7$	0.9625	1.0375	1.0500	1.0500	1.0375
变压器变比	$T4-9$	1.0750	1.0875	1.0250	0.9875	1.0875
	$T5-6$	0.9375	0.9000	0.9375	1.0000	0.9750
无功补偿量	$Q9$	0	0.1	0.2	0.1	0.1
有功损耗	$P_{Loss}$	0.15470	0.15314	0.15311	0.15240	0.15197

经过多次运行后，GSO 算法总能够搜寻到较好

的结果, 收敛速度较快, 而且每次搜寻到的控制变量结果相差很小, 离散的变控制量保持恒定。选取最有代表性的图 3 做进一步分析: 由优化效果可知, 在经过 200 次迭代后, 四种算法的优化结果均优于初始值, 其中 GSO 优化算法的优化效果最好。由图 3 可知, 基本遗传算法由于交叉和变异, 其找到下一个最优结果是随机的, 这也是导致其图形为阶梯状的原因, 其收敛速度比较慢, 产生最优结果有很大的随机性; 基本 PSO 算法的收敛速度很快, 在第 18 次迭代时就已经达到了最优值, 这说明基本 PSO 算法很容易陷入局部最优值, 对于多目标、多变量、多约束、非线性的规划问题优化效果不理想; 混沌粒子群优化算法收敛速度也很快, 和基本粒子群优化算法一样容易陷入局部最小值, 但是在第 40 次迭代时由于混沌算法的重新规划, 使粒子跳出局部最优, 但是很快又重新陷入新的最优值, 这说明混沌粒子群算法对基本 PSO 算法有一定改进, 但是其搜索寻优过程找到最优解带有一定随机性, 不适于电力系统无功优化; 基本 GSO 算法的收敛速度最快, 由于游荡者的随机性及其发现者的局部寻优, 优化速度很快, 这个全局搜索一直维持, 所以整个迭代曲线持续下降, 不会陷入局部最优。由此可见, GSO 优化算法对于求解电力系统无功优化问题有很大的优势, 特别是随着电网规模的增加, 其搜索优越性更加明显。

4.2 IEEE30 节点系统 (见图 4)

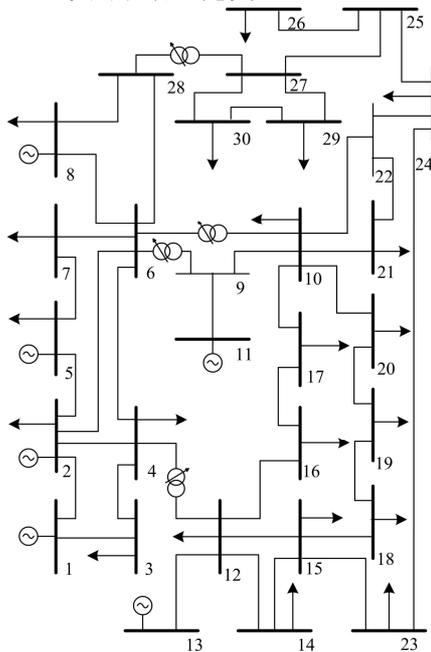


图 4 IEEE30 节点系统接线图

Fig. 4 IEEE30-bus system

IEEE30 系统有 30 个节点, 包括六台发电机 (节

点 1、2、5、8、11、13, 其中节点 1 为平衡节点, 其余节点为 PV 节点)、四台可调变压器 (支路 6-9、6-10、4-12、27-28) 及五个无功补偿节点 3、5、6、7 和 10 (通过并联电容器调节), 系统的接线图如图 4, GSO 算法的初始参数及其控制变量的约束条件与 IEEE14 节点的一致, 对比用的算法设置也同 IEEE14 节点一致。四种优化算法收敛特性曲线如图 5, 四种算法对 IEEE30 节点系统无功优化对比如表 3。

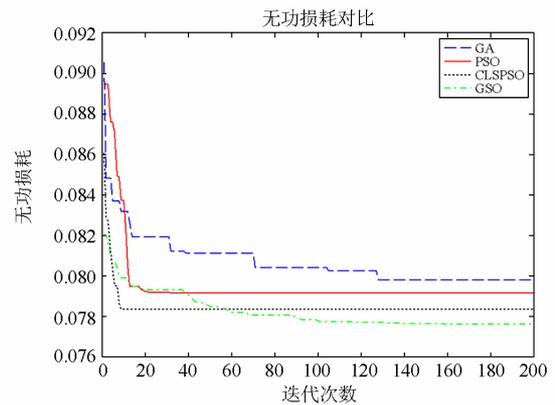


图 5 四种优化算法收敛特性曲线

Fig. 5 Performance characteristics curve of  $P_{Loss}$  for four optimization algorithms

表 3 四种算法对 IEEE30 节点系统无功优化对比  
Table 3 Optimal results of four optimization algorithms for reactive optimization

变量	变量名	初始值	优化算法				p.u.
			GA	PSO	CLSPSO	GSO	
发电机机端电压	U1	1	1.0161	1.1000	0.9000	0.9553	
	U2	1	0.9903	0.9929	0.9852	0.9925	
	U5	0.9820	0.9774	0.9688	0.9642	0.9681	
	U8	0.9610	0.9903	0.9805	0.9755	0.9798	
变压器变比	U11	0.9810	0.9968	1.1000	0.9495	1.0692	
	U13	1	1.0484	1.0635	1.0778	1.0998	
	T6-9	0.9280	1.0625	0.9000	0.9000	0.9000	
	T6-10	0.9350	1.0125	1.1000	1.0500	1.0625	
无功补偿量	T4-12	0.9690	0.9875	0.9000	0.9000	0.9125	
	T27-28	0.9360	1.0500	1.1000	1.1000	1.1000	
	Q3	0	0	0.4	0.1	0.1	
	Q5	0	0	0.3	0.2	0.4	
	Q6	0	0	0.1	0.3	0.1	
有功损耗	Q7	0	0.1	0.1	0.2	0.1	
	Q10	0	0.5	0	0.5	0.3	
	P <sub>Loss</sub>	0.08550	0.07980	0.07918	0.07837	0.07761	

在多次运行后,对于 IEEE30 节点系统图,群搜索优化算法也是能够找到最优结果,而且最优控制变量也保持在很接近的范围内,由图 5 可知,其优化结果和 IEEE14 节点类似,群搜索算法的迭代曲线一直下降,但是其他三种算法很快就陷入了局部最优,这也显现出游荡者的随机游动的作用,如果更多次数迭代,群搜索算法会有更理想的结果。

## 5 结论

由于现有的优化算法不能很好地解决多目标、多变量、多约束、非线性规划问题,而且很容易陷入局部最优值,为了解决此类问题,本文利用 GSO 优化算法对这一类问题进行研究,由于游荡者对全局的不断寻优,避免了陷入局部最优,用 GSO 算法对电力系统 IEEE 标准节点图进行无功优化,其效果非常明显,群搜索算法有很广阔的应用前景,可在基本群搜索算法的基础上进行一定的改进,可改善收敛速度和优化效率,这是一个重要的研究方向。电力系统无功优化是一个非常复杂的问题,如何合理规划各种搜索参数并对其进一步改善也是以后重点研究方向。

## 参考文献

- [1] 缪楠林,刘明波,赵维兴. 电力系统动态无功优化并行计算及其实现[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 150-157.  
MIAO Nan-lin, LIU Ming-bo, ZHAO Wei-xing. Parallel algorithm of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 150-157.
- [2] 姚煜,蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 48-52.  
YAO Yu, CAI Yan-chun. A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 48-52.
- [3] 曾嘉俊,刘志刚,何士玉,等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 37-42.  
ZENG Jia-jun, LIU Zhi-gang, HE Shi-yu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 37-42.
- [4] 刘志文,刘明波,林舜江. REI 等值技术在多区域无功优化计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 191-200.  
LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Research on application of REI equivalent technique into multi-area reactive power optimization computing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 191-200.
- [5] HE S, WU Q H. A novel group search optimizer inspired by animal behavioral ecology[C] // 2006 IEEE Congress Evolutionary Computation, Vancouver, Canada, 2006.
- [6] HE S, WU Q H, SAUNDERS J R. Group search optimizer: an optimization algorithm inspired by animal searching behavior[J]. IEEE Trans on Evolution Computation, 2009, 13(5): 973-990.
- [7] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm: explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [8] DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms[D]. Italy: Politecnico di Milano, 1992.
- [9] 张雯雯,刘华艳. 改进的群搜索优化算法在 Matlab 中的实现[J]. 电脑与信息技术, 2010, 18(3): 44-46.  
ZHANG Wen-fen, LIU Hua-yan. MATLAB implementation of the improved group search optimizer algorithm[J]. Computer and Information Technology, 2010, 18(3): 44-46.
- [10] QI K, TIAN L, YONG Y, et al. Group search optimizer based optimal location and capacity of distributed generations[J]. Neurocomputing, 2012, 78: 55-63.
- [11] 任凤鸣,王春,李丽娟. 多目标群搜索优化算法极其在结构设计中的应用[J]. 广西大学学报, 2010, 35(2): 216-221.  
REN Feng-ming, WANG Chun, LI Li-juan. A multi-objective group search optimizer and its application in structural optimal design[J]. Journal of Guangxi University, 2010, 35(2): 216-221.
- [12] SHEN H, ZHU Y, NIU B, et al. An improved group search optimizer for mechanical design optimization problems[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 91-97.
- [13] 张聪誉,陈民铀,罗辞勇,等. 基于多目标粒子群算法

- 的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 153-158.
- ZHANG Cong-yu, CHEN Min-you, LUO Ci-yong, et al. Power system reactive power optimization based on multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 153-158.
- [14] 黄志刚, 李林川, 杨理, 等. 电力市场环境下的无功优化模型极值求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 79-83.
- HUANG Zhi-gang, LI Lin-chuan, YANG Li, et al. The reactive power optimization model under power market and its solution[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 79-83.
- [15] BARNARD C J, SIBLY R M. Producers and scroungers: a general model and its application to captive flocks of house sparrows[J]. Animal Behaviour, 1981, 29: 543-550.
- [16] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
- ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [17] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Higher electricity network analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1966.
- [18] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- GONG Chun, WANG Zheng-lin. Proficient in MATLAB optimization[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.

---

收稿日期: 2013-09-29; 修回日期: 2014-01-24

作者简介:

刘华臣(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统控制与优化研究; E-mail: sandflying@yeah.net

王锡淮(1961-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事为电力系统建模与控制、系统优化研究;

肖健梅(1962-), 女, 教授, 主要从事电力系统智能控制研究。