DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2018. 02. 017

一种求解热电联产经济调度问题的改进粒子群算法

李磊1,吴亚丽2

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048;2. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:随着热电联产系统在火电厂发电过程中所占比重的不断提高,热电联产经济调度(CHPED) 问题的解决迫在眉睫。本文在二阶振荡粒子群算法的基础上,对算法的两个重要参数的惯性权重 和学习因子进行改进,并对粒子群算法更新迭代后的个体引入差分变异操作,使得算法在最优解寻 找过程中的性能得到提升。为了证实该算法在热电联产经济调度系统中的有效性,该算法被应用 到一个 24 机组热电联产测试案例中。实例证明,相比于其他进化算法,本文提出的融合差分变异 操作的改进二阶振荡粒子群算法(DEPSO)在热电联产经济调度问题中可以得到很好的结果。 关键词:热电联产;经济调度;二阶振荡;粒子群优化算法;差分变异操作 中图分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1006-4710(2018)02-0228-07

An improved particle swarm optimization algorithm for combined heat and power economic dispatch

LI Lei1, WU Yali2

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of complex system control and intelligent information processing, Xi'an

710048, China)

Abstract: With the increasing proportion of combined heat and power in power system, it is urgent to solve the problem from the combined heat and the problem from the power economic dispatch(CHPED). The article is on the base of two order oscillation particle swarm optimization algorithm, with the inertia weight and learning factor of the two important parameters improved. In addition, the differential mutation operator is introduced to the particle swarm algorithm, with the performance of the algorithm improved in the process of finding the optimal solution. In order to prove the effectiveness of the algorithm in the economic dispatch system, the algorithm is applied to a 24 unit cogeneration test case, with the result showing that the algorithm proposed in this paper(DEPSO) can achieve good results in the combined heat and power economic dispatch problem when compared with other evolutionary algorithms.

Key words: combined heat and power; economic dispatch; two order oscillation; particle swarm optimization algorithm; differential mutation operation

热电联产(combined heat and power, CHP)与 传统的纯电生产相比,能够同时产生电能和热能两 种形式的能量,可显著提高能源利用率,减少温室气 体排放量。据相关统计,传统电力系统机组的能效 不足 60%,而热电联产机组的能效可达到 90%^[1]。 在热电联产经济调度系统中,需在满足电力和热力 需求及运行约束的前提下,确定出电力和热力资源 处理的最优组合,这样才能够充分利用系统能源。

在实际热电联产系统中,需考虑传统电力机组 的阀点效应,这使得目标花费函数变为非线性,从而 使热电联产问题的求解变得相当复杂。传统的数学 方法如二次规划法^[2]、梯度下降法、拉格朗日松弛

收稿日期: 2017-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61503299)

作者简介: 李磊, 男, 硕士生, 研究方向为电力系统经济调度。E-mail: 442968853@qq. com

通讯作者:吴亚丽,女,副教授,博士,研究方向为系统建模、优化调度、群智能进化算法理论与应用。E-maill:yliwu@ xaut. edu. cn

229

法^[3]已被广泛应用到 CHPED 问题中,但在面对非 线性复杂问题优化时,传统的数学方法在最优解求 解方面较为困难。为了克服传统数学方法的不足, 众多的群智能优化算法被提出用来解决 CHPED 问 题。Huen S^[4]等引入了一种新的交叉机制,提高了 遗传算法精确度,并应用到 CHPED 问题中,取得了 良好结果。Basu M^[5]等首次将差分进化算法应用 到 CHPED 问题中并取得一定的成果。Behnam M^[6]等设计了加速度系数随时间变化的粒子群优化 算法(TVAC-PSO),该算法使两个加速度系数随着 迭代次数增加而进行调整,在一定程度上克服了标 准粒子群算法(CPSO)的早熟早收敛。Agrawal S^[7] 等设计了基于模糊聚类的粒子群算法,该算法在求 解热电联产问题时其收敛速度比标准粒子群优化算 法更快。除此之外,还有一些其他的启发式搜索算 法,例如蚁群算法(BCO)^[8]、改进蚁群算法(ACO)^[9]、 人工免疫算法(AIS)^[10]等等,相比于传统数学方法, 群智能优化算法在求解非线性 CHPED 调度问题中 取得了重要的进展,但在求解高维复杂 CHPED 问 题时仍易陷入局部最优。

本文在二阶振荡粒子群算法的基础上,通过对 迭代后的粒子进行差分变异操作,来增加种群多样 性以避免早熟早收敛。为证实融合差分变异操作的 改进二阶振荡粒子群算法(DEPSO)在求解 CHPED 问题时的有效性,本文将该算法应用到热电联产 24 机组测试案例中,验证 DEPSO 算法在求解 CHPED 问题时的优越性。

1 热电联产经济调度问题的数学模型

1.1 目标函数

CHPED 问题的目标函数为:

min $\sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i^p) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(P_j^c, H_j^c) + \sum_{k=1}^{N_b} C_k(H_k^h)$ (1) 式中, C_i 、 C_j 、 C_k 分别是纯凝机组、热电联产机组、供 热机组的耗能花费; P_i^p 是第*i*台纯凝机组输出的电 能; P_j^c 和 H_j^c 是第*j*台热电联产机组输出的电能和 热能; H_k^h 是第*k*台供热机组的输出热能; N_p , N_c , N_b 分别为三种类型机组数目。各类型机组花费函 数分别为:

$$C_i(P_i^{\mathrm{p}}) = \alpha_i(P_i^{\mathrm{p}})^2 + \beta_i P_i^{\mathrm{p}} + \gamma_i \qquad (2)$$

$$C_k(H_k^{\rm h}) = \varphi_k(H_k^{\rm h})^2 + \eta_k H_k^{\rm h} + \lambda_k \tag{3}$$

$$C_{j}(P_{j}^{c}, H_{j}^{c}) = a_{j}(P_{j}^{c})^{2} + b_{j}P_{j}^{c} + c_{j} + d_{j}(H_{j}^{c})^{2} + e_{j}H_{j}^{c} + f_{j}P_{j}^{c}H_{j}^{c}$$
(4)

式中, α_i , β_i , γ_i 是对应纯凝机组花费系数; φ_k , η_k , λ_k 是对应供热机组花费系数;热电联产机组对应的花

费系数是 $a_i, b_j, c_i, d_j, e_i, f_i$ 。

实际热电联产系统中,机组调门的开放数量随 着发电单元的功率增加而增多,当前级调门开启时, 蒸汽流通受到阻碍,使得耗能增加,产生阀点效应, 耗能特性曲线向上凸起,如图1所示。



仅使用光滑的二次函数^[12]是无法表达发电机 组实际的输入输出特性的,需在原有的纯凝机组花 费函数基础上添加一个正弦函数。考虑阀点效应后 的纯凝机组花费函数表达式扩展为:

$$C_i(P_i^{\mathrm{p}}) = \alpha_i(P_i^{\mathrm{p}})^2 + \beta_i P_i^{\mathrm{p}} + \gamma_i + \gamma_i$$

$$|ee_{i}\sin[ff_{i}(P_{i}^{\text{pmin}}-P_{i}^{\text{p}})]|$$
(5)

式中, ee_i , ff_i 为第i 台纯凝机组阀点效应耗能 系数。

1.2 约束条件

1) 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i^p + \sum_{j=1}^{N_c} P_j^c = P_d \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\rm c}} H_j^{\rm c} + \sum_{k=1}^{N_{\rm h}} H_k^{\rm h} = H_d \tag{7}$$

式中, P_d, H_d分别为总电能和热能需求。

2) 机组输出上下限约束

$$P_i^{\text{pmin}} \leqslant P_i^{\text{p}} \leqslant P_i^{\text{pmax}} \tag{8}$$

$$H_k^{\rm hmin} \leqslant H_k^{\rm h} \leqslant H_k^{\rm hmax} \tag{9}$$

$$P_j^{\text{cmin}}(H_j^{\text{c}}) \leqslant P_j^{\text{c}} \leqslant P_j^{\text{cmax}}(H_j^{\text{c}}) \tag{10}$$

$$H_i^{\text{cmin}}(P_i^c) \leqslant H_i^c \leqslant H_i^{\text{cmax}}(P_i^c) \tag{11}$$

式中, P_i^{pmax} 和 P_i^{pmin} 是第*i*台纯凝机组输出电能的 最大、最小值; H_k^{hmin} 和 H_k^{hmax} 是第*k*台供热机组输 出热能的最大、最小值; $P_j^{\text{cmin}}(H_j^c)$ 和 $P_j^{\text{cmax}}(H_j^c)$ 表示 第*j*台热电联产机组电力输出的最大、最小值; H_j^{cmin} (P_j^c)和 $H_j^{\text{cmax}}(P_j^c)$ 表示第*j*台热电联产机组的热力 输出最大、最小值。

在热电联产系统中,电力和热力是不可分开且 相互关联的,图 2 为热电机组适宜运行区域。图 2^[13]曲线 ABCDEF 显示了热电机组的适宜运行区 域及范围边界。



图 2 热电机组适宜运行区域 Fig. 2 Heat-power feasible operation region for cogeneration unit

2 融合差分变异操作的改进二阶振荡粒子 群算法

2.1 基于二阶振荡的改进粒子群算法[14]

在标准 PSO 算法的速度更新部分引入二阶振荡环节,可提高群体多样性,改善算法的全局收敛性。引入二阶振荡环节后的速度更新公式为:

 $v(g+1) = \omega v(g) + c_1 r_1 [P_{\text{best}}(g) - (1+\xi_1)x(g) + \xi_1 x(g-1)] + c_2 r_2 [G_{\text{best}}(g) - (1+\xi_2)x(g) + \xi_2 x(g-1)]$ (12) 其中 ξ_1, ξ_2 为随机数,在算法迭代前期取:

 $\xi_1 > (2\sqrt{c_1r_1}-1)/(c_1r_1), \xi_2 > (2\sqrt{c_2r_2}-1)/(c_2r_2)$ 在算法迭代后期取:

 $\xi_1 \leq (2\sqrt{c_1r_1} - 1)/(c_1r_1), \xi_2 \leq (2\sqrt{c_2r_2} - 1)/(c_2r_2)$ 式中,v(g), x(g)分别为粒子的当前速度和位置; ω 是粒子的惯性权重值; c_1, c_2 为加速度常数,或者称 为学习因子; r_1, r_2 是介于 0 和 1 之间的随机数; P_{best} 为局部最优,即迭代后自身的最好位置; G_{best} 为 全局最优,即全局的最好位置,是整个群体所经历的 最好位置。

在算法迭代前期 ξ₁、ξ₂ 较大,根据改进后的速 度更新公式可知,算法全局搜索能力较强;在迭代后 期 ξ₁、ξ₂ 较小,能够增强算法的局部搜索能力,易于 寻找最优解。如图 3 所示,引入二阶振荡后,粒子的 飞行速度同当前位置和当前位置的变化有关,这可 使粒子向更好的方向运动。





 ω 是平衡算法搜索能力的重要参数。如果 ω 随

迭代次数增加而递减,则算法在初期有较大的ω,增 强了算法全局搜索能力,在算法后期ω较小,增强 了算法局部搜索能力。

$$\omega = \omega_{\max} - \left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{max_iter}\right) \times iter$$
(13)

式中, ω_{max} 和 ω_{min} 分别是迭代的初始和最终惯性权重, 取 $\omega_{max} = 0.9$, $\omega_{min} = 0.4$; max_iter 是最大迭代 次数; iter 是当前迭代次数。

标准 PSO 算法中的 c1 和 c2 代表着当前粒子对 个体位置和全局位置的认知。本文对两个学习因子 采用如下更新方式:

$$c_1 = \frac{c_{1,\text{ini}} + (c_{1,\text{fin}} - c_{1,\text{ini}}) \times iter}{max_iter}$$
(14)

$$c_2 = \frac{c_{2,\text{ini}} + (c_{2,\text{fin}} - c_{2,\text{ini}}) \times iter}{max_iter}$$
(15)

式中, $c_{1,ini}$ 和 $c_{1,fin}$ 分别为 c_1 的初始值和最终值,取 $c_{1,ini} = 2.5, c_{1,fin} = 0.5; c_{2,ini}$ 和 $c_{2,fin}$ 分别为 c_2 的初始 值和最终值,取 $c_{2,ini} = 0.5, c_{2,fin} = 2.5$ 。

由改进后的更新公式可以看出,随着迭代次数 增加,c₁下降而 c₂增加,使得算法在迭代初期粒子 的全局搜索能力很强,而在迭代后期算法的局部搜 索能力很强。

2.2 融合差分变异策略的二阶振荡粒子群算法

标准二阶振荡 PSO 算法在参数方面的改进可 以很大程度提高算法的性能,但是无论如何改进,粒 子之间的信息交流始终是在种群内部自身原有粒子 之间进行,一旦产生错误的信息,容易被错误信息误 导。针对这种不足,本文对改进后的二阶振荡 PSO 算法引入差分变异操作,通过种群内粒子产生新解, 从而在算法的整个生命周期中增加种群多样性,有 效避免了陷入局部最优。

差分变异操作为:

0

$$\begin{cases} rand(L_{d}, H_{d}) & rand(0, 1) < p_{r} \\ x_{id} + rand(0, 1) \times (x_{ad} - x_{bd}) & rand(0, 1) > p_{r} \end{cases}$$

$$(16)$$

式中, y_{id} 是产生的新个体; x_{id} 是当前个体; x_{ad} 和 x_{bd} 是从当前代随机选择的两个个体; L_d 和 H_d 是原有群 体的上下界; P_r 是一个选择概率,通常设定为 0.005。

式(16)中,当在0到1之间随机产生的数小于 P_r,则按原有的法则产生新个体;如果随机产生的 数大于 P_r,则按照差分变异操作产生新个体。经分 析可知,在整个种群迭代初期,x_{ad}-x_{bd}较大,而产生 的新个体差异性越大,多样性越强;在整个种群迭代 后期,种群多样性会减小,x_{ad}-x_{bd}也会较小,产生的 新个体差异性较小,能够接近全局最优。所以,随着 迭代过程的进行,差分变异操作能够使算法较好的 平衡全局最优和局部最优。

对改进的二阶振荡 PSO 算法进行融合差分变 异操作后,得到融合差分变异操作的改进二阶振荡 粒子群算法,步骤如下:

 1) 对种群规模、种群维数、最大迭代次数、仿真 轮数等参数进行设置;

2) 初始化种群速度和位置,初始化适应度值;

3) 评价每个粒子的适应度值,将当前粒子的位置和适应度值存储在 P_{best}中,将所有 P_{best}中最优个体的位置和适应度值存储在 G_{best}中;

4) 对个体按照式(12)进行速度和位置更新;

5) 根据式(13)~(15)更新惯性权重系数ω和 学习因子 c₁、c₂;

6) 将每个粒子的适应度值与当前最优适应度 值作比较,将较好的值作为当前最好位置 *P*_{best};

7) 对粒子按照公式(16)进行变异操作,并计算 变异后个体的适应度值,若变异后个体值更优,则取 变异后个体位置存储在 P_{best};

8) 比较所有的 P_{best} 和 G_{best} ,更新 G_{best} ;

9)迭代次数加1,查看是否满足停止条件,若满 足则搜索结束,否则返回第4步。

3 基于 DEPSO 算法的热电联产经济调度问题的实现

基于 DEPSO 算法的热电联产经济调度问题实现的具体步骤为:

1) 初始化种群和适应度值

热电联产经济调度问题的最优解由群体迭代最 终的最优个体决定,个体的各维信息代表着热电联 产经济调度系统的资源分配信息和解决方案。第 m 个个体的表达式为:

$$oldsymbol{X}_{m}=ig[P^{ ext{p}}_{m1} ext{,}\cdots ext{,}P^{ ext{p}}_{mN_{ ext{p}}} ext{,}P^{ ext{c}}_{m1} ext{,}\cdots ext{,}P^{ ext{c}}_{mN_{ ext{c}}} ext{,}$$

 $H_{m1}^{c}, \cdots, H_{mN_{c}}^{c}, H_{m1}^{h}, \cdots, H_{mN_{h}}^{h}] \qquad (17)$

对个体 X_m 的每维信息的初始化,需分别满足 总供能平衡、电能供需平衡、热能供需平衡。

2) 初始化 P_{best} 和 G_{best} ;

3) 按公式(12)对粒子的速度和位置进行更新;

 4) 对产生的新个体速度和位置进行范围约束, 对不同机组按照具体参数进行相应的越界处理;

5) 将更新后的位置代入到适应度值求取函数 中,与当前最优适应度值比较,选取较优适应度值和 对应个体位置存储在 P_{best};

6) 按照公式(16)进行差分变异操作;

7) 将变异后的个体按照第4步进行范围约束;

8)将变异后个体代入适应度值求取函数中,与 当前最优适应度值比较,选取较优适应度值和对应 个体的位置存储在 P_{best};

9) 比较所有的 P_{best} 和 G_{best} ,更新 G_{best} ;

10) 查看是否满足停止准则,若满足,则算法结 束运行,否则跳转到步骤 3。

4 仿真实例及结果分析

本案例是 24 机组热电联产测试系统,案例参数 设置为:max_iter = 1000,种群大小 swarmsize = 100,案例考虑了阀点效应,24 机组包括 13 个纯凝 机组、6 个热电联产机组和 5 个供热机组。其中,各 热电联产机组适宜运行区域如图 4 所示,14 号和 16 号机组选择 A 型热电联产机组模型;15 号和 17 号 机组选择 B 型热电联产机组模型;18 号机组选择 C 型热电联产机组模型,19 号机组选择 D 型热电联产 机组模型,系统的总电需求为 2350 MW,总热需求 1250 MWth。

表 1~表 3 为各类型机组系统参数,表 4 是各 类型算法花费及运行时间,表 5 为各类型算法仿真 结果。



图 4 四种不同类型热电机组适宜运行区域^[6] Fig. 4 Heat-power feasible operation for four types

			,	1			
纯凝机组	α_i	β_i	$\pmb{\gamma}_i$	ee_i	ff_i	$P_i^{ m pmin}$	$P_i^{ m pmax}$
1	0.000 28	8.10	550	300	0.035	0	680
2	0.000 56	8.10	309	200	0.042	0	360
3	0.000 56	8.10	309	200	0.042	0	360
4	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
5	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
6	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
7	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
8	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
9	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
10	0.002 84	8.60	126	100	0.084	40	120
11	0.002 84	8.60	126	100	0.084	40	120
12	0.002 84	8.60	126	100	0.084	55	120
13	0.002 84	8.60	126	100	0.084	55	120

表1 纯凝机组系统参数 Tab. 1 Power supply unit cost function parameters of 24-units system

表 2 热电联产机组系统参数 Tab. 2 CHP unit cost function parameters of 24-units system

热电机组	a_j	b_j	C_j	d_{j}	e_j	f_j	适宜运行区域[15]
14	0.034 5	14.5	2 650	0.030	4.2	0.031	[98,0],[81,104.8],[215,180],[247,0]
15	0.043 5	36.0	1 250	0.027	0.6	0.011	[44,0],[44,15.9],[40,75],[125.8,0], [110.2,135.6],[125.8,32.4]
16	0.034 5	14.5	2 650	0.030	4.2	0.031	[98,0],[81,104.8],[215,180],[247,0]
17	0.043 5	36.0	1 250	0.027	0.6	0.011	[44,0],[44,15.9],[110.2,135.6], [40,75],[125.8,32.4],[125.8,0]
18	0.103 5	34.5	2 650	0.025	2.203	0.051	[20,0],[10,40],[45,55],[60,0]
19	0.072 0	20.0	1 565	0.020	2.340	0.040	[35,0],[35,20],[90,45],[90,25],[105,0]

表 3 供热机组系统参数

Tab 3	Heat supply	unit cost	function	narameters	of 21-unite s	wetom
1 ab. 5	fieat suppry	unit cost	Tunction	parameters	of 24-units s	ystem

供热机组	$arphi_k$	η_k	λ_k	$H_k^{ m hmin}$	$H_k^{ m hmax}$
20	0.038	2.010 9	950	0	2 695.2
21	0.038	2.010 9	950	0	60
22	0.038	2.010 9	950	0	60
23	0.052	3.065 1	480	0	120
24	0.052	3.065 1	480	0	120

Tab. 4 Reat and power total cost and running time results of 24-units system							
花费及时间	CPSO ^[6]	TVAC-PSO ^[6]	$\mathrm{TLBO}^{[16]}$	OBTLBO ^[16]	DEPSO		
最优花费/(\$/h)	59 736.263 5	58 122.746 0	58 006.999 2	57 856.267 6	57 604.571 7		
平均花费/(\$/h)	59 853.478 0	58 198.310 6	58 014.368 5	57 883.210 5	57 855.796 8		
最差花费/(\$/h)	60 076.690 3	58 359.552 0	58 038.527 3	57 913.773 1	58 167.021 9		
运行时间/s	13.34	13.06	9.45	9.70	16.01		

表 4 各类型优化算法的总花费及运行时间 Tab. 4 Heat and power total cost and running time results of 24-units syste

机组序号	$\operatorname{CPSO}^{\llbracket 6 \rrbracket}$	TVAC-PSO ^[6]	$\mathrm{TLBO}^{[16]}$	$OBTLBO^{[16]}$	DEPSO
P_1	680.000 0	538.558 7	628.324 0	538.565 6	449.918 2
P_2	0.000 0	224.460 8	227.358 8	299.212 3	222.554 8
P_3	0.000 0	224.460 8	225.934 7	229.122 0	299.098 6
P_4	180.000 0	109.866 6	110.372 1	109.992 0	105.612 9
P_5	180.000 0	109.866 6	110.246 1	109.954 5	107.955 8
P_6	180.000 0	109.866 6	160.176 1	110.404 2	155.647 9
P_7	180.000 0	109.866 6	108.355 2	109.804 5	155.138 7
P_8	180.000 0	109.866 6	110.537 9	109.686 2	158.556 3
P_9	180.000 0	109.866 6	110.567 2	109.899 2	108.344 4
P_10	50.530 4	77.521 0	75.756 2	77.399 2	40.403 0
P_11	50.530 4	77.521 0	41.869 8	92.399 9	77.286 2
P_12	55.000 0	120.000 0	92.478 9	55.222 5	93.042 9
P_13	55.000 0	120.000 0	57.514 0	55.086 1	50.945 7
P_14	117.485 4	88.351 4	82.562 8	81.752 4	117.421 0
P_15	45.928 1	40.651 1	41.489 1	41.761 5	40.644 1
P_16	117.485 4	88.351 4	84.771 0	82.273 0	88.831 5
P_17	45.928 1	40.561 1	40.587 4	40.559 9	40.017 9
P_18	10.001 3	10.024 5	10.001 0	10.000 2	10.000 0
P_19	42.110 9	40.428 8	31.097 8	31.467 9	37.9807
H_14	125.275 4	108.925 6	105.6717	105.221 9	125.239 7
H_15	80.117 5	75.484 4	76.284 3	76.520 5	75.000 0
H_16	125.275 4	108.925 6	106.912 5	105.514 2	109.195 2
H_17	80.117 4	75.484 0	75.506 1	75.483 3	75.000 0
H_18	40.000 5	40.010 4	39.998 6	39.999 9	40.000 0
H_19	23.232 2	22.467 6	18.220 5	18.394 4	20.736 1
H_20	415.981 5	458.702 0	468.227 8	468.904 3	445.367 6
H_21	60.000 0	60.000 0	59.986 7	59.999 4	60.000 0
H_22	60.000 0	60.000 0	59.981 4	59.999 9	60.000 0
H_23	120.000 0	120.000 0	119.607 4	119.985 4	120.000 0
H_24	120.000 0	120.000 0	119.603 0	119.976 8	119.463 2

表 5 各类型优化算法的 24 机组仿真结果

Tab. 5 Heat and power distribution results of 24-units system

由表 5 可知, TLBO(教与学优化算法)和 OBTL-BO(反向教与学优化算法)中, 19 号机组的热电负 荷优化分配已经越过 D 型热电联产机组的适宜运 行范围, 存在一定的错误之处。

各优化算法对热电联产系统的花费及运行时间 如表 4 所示。结果显示,DEPSO 算法相比于其他优 化算法,其花费最小。

DEPSO 算法收敛图如图 5 所示。由图可知,在 热电联产 24 机组条件下,DEPSO 算法的结果较 TVAC-PSO(加速度系数随时间变化的粒子群优化 算法)更好。







5 结 语

本文针对传统优化方法在求解非线性复杂 CHPED问题中易陷入局部最优以及搜索精度不高 等缺点,提出一种融合差分操作的改进二阶振荡粒 子群算法,并将其应用到 CHPED 实际问题中求解, 结果显示,相较于其他进化算法,本文提出的算法其 仿真结果更优,具有更好的寻优能力,适用于解决复 杂 CHPED 问题。

参考文献:

- [1] VASEBI A, FESANGHARY M, BATHAEE S M T, et al. Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(10): 713-719.
- [2] ROOIJERS F J, VAN AMERONGEN R A M, et al. Static economic dispatch for co-generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1392-1398.
- [3] GUO T, HENWOOD M I, VAN OOIJEN M, et al. An algorithm for combined heat and power economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1778-1784.
- [4] HUANG S H, LIN P C. A harmony-genetic based heuristic approach toward economic dispatching combined heat and power [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(4): 482-487.
- [5] BASU M. Combined heat and power economic dispatch by using differential evolution [J]. Electric Power Components and Systems, 2005, 33(10): 996-1004.
- [6] MOHAMMADI-IVATLOO B, MORADI-DALVAND M, RABIEE A, et al. Combined heat and power economic dispatch problem solution using particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95(1): 9-18.
- [7] AGRAWAL S, PANIGRAHI B K, TIWARI M K, et al. Multiobjective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power dispatch [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12 (5): 529-541.

- [8] BASU M. Bee colony optimization for combined heat and power economic dispatch [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 13527-13531.
- [9] SONG Y H, CHOU C S, STONHAM T J, et al. Combined heat and power economic dispatch by improved ant colony search algorithm [J]. Electric Power Systems Research, 1999, 52(2): 115-121.
- [10] BASU M. Artificial immune system for combined heat and power economic dispatch [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 1-5.
- [11] 崔玉红. 智能算法在经济负荷分配中的应用[D]. 秦皇岛:燕山大学,2008.
 CUI Yuhong. The application of intellegent algorithms in economic dispatch[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2008.
- [12] WALTERS D C, SHEBLÉ G B, et al. Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1325-1332.
- [13] GUO T, HENWOOD M I, VAN OOIJEN M, et al. An algorithm for combined heat and power economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1778-1784.
- [14] 赵乃刚. 自适应二阶震荡粒子群算法 [J]. 电子技术与 软件工程, 2015,(20): 182-183.
 ZHAO Naigang. Adaptive two order oscillating particle swarm optimization [J]. Electronic Technology &. Software Engineering, 2015,(20): 182 -183.
- [15] 梅鹏. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度研究
 [D]. 广州:广东工业大学,2016.
 MEI Peng. Crisscross optimization algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problem[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2016.
- [16] ROY P K, PAUL C, SULTANA S, et al. Oppositional teaching learning based optimization approach for combined heat and power dispatch [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57(5): 392.

(责任编辑 周 蓓)