

文章编号: 1000-7709(2018)08-0069-05

# 基于并行小种群差分进化算法的水火 电力系统短期优化调度

叶圣永<sup>1</sup>, 林 爽<sup>2</sup>, 张文涛<sup>1</sup>, 孙绪江<sup>3</sup>, 张 伟<sup>3</sup>, 张景瑞<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司 经济技术研究院, 四川 成都 610041;

2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005; 3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 为解决水火电力系统短期发电优化调度中存在的问题, 提出基于 MPI 平台的并行小种群差分进化算法。该算法将进化种群分为若干个小种群(单个种群规模为 3~10 个), 每个进化种群由不同的 CPU 进程独立执行差分进化算法, 并在种群间引入集合、分散操作以协调各小种群的寻优过程; 为降低小种群初始化和进化过程中多样性的损失, 引入正交化初始化方法和种群重构技术; 最后以典型案例验证了算法的有效性。结果表明, 该方法在求解精度、收敛速度和求解耗时上均较有竞争力。

关键词: 优化调度; 水火电力系统; 并行; 差分进化算法; 小种群

中图分类号: TM732

文献标志码: A

## 1 引言

水火电力系统短期发电优化调度(SGSHPS)是电力系统调度的重要内容, 其指在一段时期内(常为一天)通过合理安排水电站发电流量和火电站出力使整个系统的所有约束得到满足, 并按某一调度准则达成系统的最优运行<sup>[1]</sup>。我国已建成十三大水电能源生产基地, 水能资源丰富, 通过合理的协调水、火出力, 对减少氮、硫等污染气体和温室气体排放及提高经济效益具有重要意义。近年来, 进化算法在 SGSHPS 问题上获得了广泛研究和应用。遗传算法<sup>[1]</sup>、粒子群算法<sup>[2]</sup>、和声搜索算法<sup>[3]</sup>、教学算法<sup>[4]</sup>、差分进化算法<sup>[5]</sup>等先后被应用于水火电力系统优化调度的求解。为保证算法的寻优能力, 通常需要设置一定规模的种群。然而, 种群规模越大运算量负担和计算时间开销越大, 制约了电力优化调度问题的快速求解<sup>[6]</sup>。减小种群规模是提高进化算法求解速度最直接有效的办法, 但速度提高的同时, 小种群也可能导致严重的种群趋同化现象, 引起早熟收敛, 不利于求解精度的提高。为此, 本文以差分进化算法为例,

提出基于 MPI 并行框架的并行小种群差分进化算法(MPDE-SP), 设计集合和分散操作实现并行小种群间的协同进化, 并引入正交初始化和种群重构技术, 以标准测试案例对所提的方法进行验证。

## 2 并行小种群差分进化算法

### 2.1 正交初始化种群

(1) 产生正交矩阵。正交初始化之前, 根据不同实际问题生成对应的正交矩阵。用  $L_R(H_C)$  表示水平数为  $H$  的正交矩阵,  $H$  为奇数; 正交矩阵行数  $R = H^J$ ,  $J$  为正交指数, 是一个正整数;  $C$  为正交矩阵列数,  $R, C$  需满足以下条件:

$$R = H^J \geq N_p \quad (1)$$

$$C = (H^J - 1)/(H - 1) \geq D \quad (2)$$

式中,  $N_p$  为种群规模;  $D$  为优化问题的维数。

(2) 搜索空间量化。正交矩阵只能应用于离散自变量, 而 SGSHPS 问题控制变量为连续变量, 故需将连续自变量空间进行量化。假设某一个自变量的可行域范围是  $[l_i, u_i]$ , 将其量化成  $H$  个水平值:  $\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{iH}, \delta_{ij}$  的计算表达式为:

$$\delta_{ij} = l_i + (j - 1)(u_i - l_i)/(H - 1) \quad (3)$$

收稿日期: 2017-10-15, 修回日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403321); 广东省自然科学基金项目(2014A030310003)

作者简介: 叶圣永(1974-), 男, 博士, 研究方向为电力系统优化规划, E-mail: yeshengyong410@126.com

通讯作者: 张景瑞(1983-), 男, 博士、助理教授、硕导, 研究方向为水火电力系统调度、微电网能量管理、主动配电网优化, E-mail: zjrhust@gmail.com

式中,  $\delta_{ij}$  为第  $i$  个自变量的第  $j$  个取值水平对应的值, 连续空间  $[l_i, u_i]$  被量化为  $H-1$  个相等的部分。

### 2.2 基于 MPI 的并行差分进化框架

消息传递接口(MPI)是不同于串行编程的一种解决问题的并行模式<sup>[7]</sup>。消息传递模式需要对问题进行分解, 组织不同进程间的数据交换, 并行计算粒度大, 特别适合于大规模可扩展并行计算, 与进化算法契合度高。在 MPI 计算平台中, 将进化算法的种群分成多个小种群, 每个小种群占用计算机不同的进程(也可以是计算机集群不同计算节点的不同进程)按照正交方法分别进行初始化, 再按照各自的交叉变异概率及选择策略独立寻找优化问题最优结果。此外, 通过在根进程(可以是任意进化种群)中引入集合和发散操作协调各进化小种群, 以避免陷入局部最优。集合操作是从各进化种群收集候选解信息, 并利用收集来的信息在总种群层次进行交叉、变异和选择操作; 发散操作是将经过集合操作的个体再发送到各进化种群, 从而更新各进化子种群的个体信息, 避免进化子种群的早熟收敛。并行小种群差分进化算法示意图见图 1。图 1 中,  $I$  为初始化;  $F$  为适应值评估;  $M$  为变异操作;  $C$  为交叉操作;  $S$  为选择操作;  $S_1^*$  为判断集合操作条件是否满足;  $S_2^*$  为收集进化种群信息;  $S_3^*$  为根进程通过变异生成变异个体;  $S_4^*$  为根进程执行交叉操作;  $S_5^*$  为执行分散操作, 将根进程中的个体发到各进化子种群。集合和发散操作实际上都是对参变量占用内存空间的操作, 具体集合、分散操作的内存传送示意图见图 2。

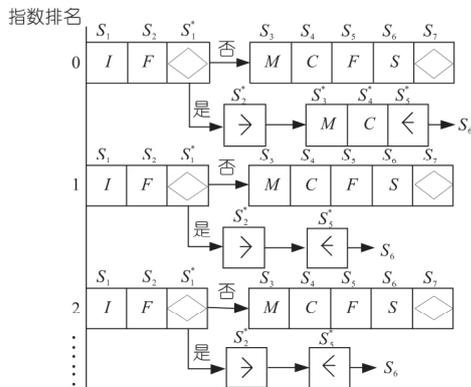


图 1 并行差分进化算法流程示意图  
Fig. 1 Procedure of parallel DE algorithm

### 2.3 种群重构技术

采用集合和发散操作虽在一定程度上减小了并行差分进化算法早熟收敛的可能, 然而受通讯开销限制, 集合、发散频率不能太高。为进一步增

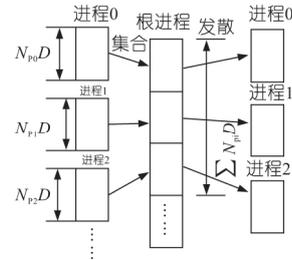


图 2 种群参数集合发散操作内存信息传送示意图  
Fig. 2 Gather and scatter methods on memory information transferring for population

强种群多样性, MPDE-SP 算法引入种群重构技术, 该技术针对进化小种群, 通过强制操作使算法在某个范围内重新产生均匀分布的个体, 打破原来趋于相近的种群, 增加种群多样性。以  $\rho$  表征小种群的聚集度, 则其表达式为:

$$\rho = \frac{1}{DN_p} \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^{N_p} \eta(X_{i,j}^g) \quad (4)$$

$$\text{其中 } \eta(X_{i,j}^g) = \begin{cases} 1 & \frac{|X_{i,j}^g - X_{\text{gbest},j}^g|}{|X_{\text{gbest},j}^g|} < \epsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $x_{i,j}^g$ 、 $x_{\text{gbest},j}^g$  分别为第  $g$  次迭代个体  $i$ 、最优个体 gbest 第  $j$  维变量的值;  $D$  为优化问题的维数;  $\epsilon$  为衡量个体第  $j$  维变量靠近程度的成熟因子。

以  $\delta$  表征最大可容忍的种群聚集度, 当  $\rho > \delta$  时, 可通过下式在当前最优解附近随机生成新种群:

$$\hat{X}_{i,j}^g = \begin{cases} X_{\text{gbest},j}^g + \lambda(X_j^g |_{\max} - X_{\text{gbest},j}^g) & \hat{\lambda} > \frac{X_j^g |_{\max} - X_{\text{gbest},j}^g}{X_j^g |_{\max} - X_j^g |_{\min}} \\ X_{\text{gbest},j}^g + \lambda(X_{\text{gbest},j}^g - X_j^g |_{\min}) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$ 、 $\hat{\lambda}$  均为  $[0, 1]$  上服从均匀分布的随机数;  $X_j^g |_{\min}$ 、 $X_j^g |_{\max}$  分别为第  $g$  次迭代第  $j$  维变量的最小值、最大值。

### 2.4 MPDE-SP 算法流程

基于 MPI 的并行小种群差分进化算法流程图见图 3。

## 3 水火电力系统短期优化调度

水火电力系统短期发电优化调度, 一般指在规定的调度周期内(如一天), 通过制定各电站现实可行的发电计划, 最大程度地利用水力资源, 降低火电比重, 使系统运行成本最小。假设以一天为一个调度周期, 分成  $t = 1, 2, \dots, T$  个时段, 每一时段为 1 h;  $j = 1, 2, \dots, N_h$  为参与调度水电站;  $i =$

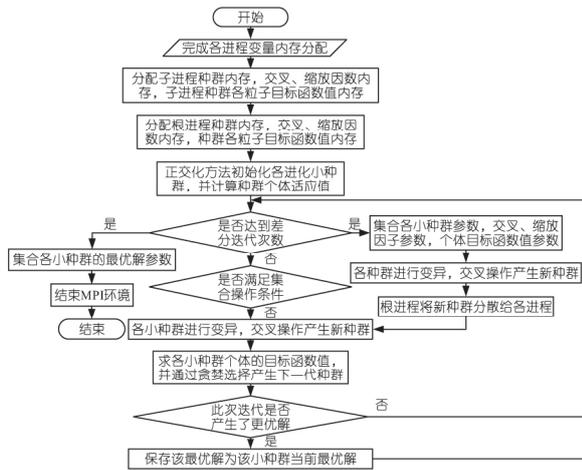


图 3 并行小种群差分进化算法流程图

Fig. 3 Flowchart of parallel differential evolutionary algorithm using small population

1, 2, ...,  $N_s$  为火电站;  $P_{hj,t}$ 、 $Q_{hj,t}$ 、 $V_{hj,t}$ 、 $I_{hj,t}$ 、 $S_{hj,t}$  分别为第  $j$  水电站第  $t$  时段的出力、发电流量、水库库容、区间径流、弃水流量;  $P_{si,t}$  为第  $i$  火电站第  $t$  时段出力, 则水火电力系统短期发电调度的优化目标函数和约束条件如下。

### 3.1 目标函数

以整个调度期内火电站煤耗量最小为目标, 则目标函数可表示为:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} \{ a_i + b_i P_{si,t} + c_i P_{si,t}^2 + | d_i \sin[ e_i ( P_{si,t}^{\min} - P_{si,t} ) ] | \} \quad (6)$$

式中,  $F$  为系统总煤耗量;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $d_i$ 、 $e_i$  均为煤耗系数。

### 3.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束。公式为:

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{si,t} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{hj,t} = P_{D,t} + P_{L,t} \quad (7)$$

式中,  $P_{D,t}$  为第  $t$  时段的有功负荷;  $P_{L,t}$  为第  $t$  时段的有功损耗, 计算方法参考文献[8]。

(2) 水电站期初、期末库容约束。公式为:

$$V_{hj,0} = V_{hj}^{\text{begin}}, V_{hj,T} = V_{hj}^{\text{end}} \quad (8)$$

式中,  $V_{hj}^{\text{begin}}$ 、 $V_{hj}^{\text{end}}$  分别为第  $j$  水电站的调度期初、末储水量。

(3) 水电站水量平衡约束。公式为:

$$V_{hj,t+1} = V_{hj,t} + I_{hj,t} - Q_{hj,t} - S_{hj,t} + \sum_{l \in R_{uj}} ( Q_{hl,t-\tau_l} + S_{hl,t-\tau_l} ) \quad (9)$$

式中,  $R_{uj}$  为第  $j$  水电站直接上游水电站集合;  $\tau_l$  为第  $l$  水电站泄水到其直接下游电站的延迟时间。

(4) 水电能源关系约束。公式为:

$$P_{hj,t} = c_{1j} V_{hj,t}^2 + c_{2j} Q_{hj,t}^2 + c_{3j} V_{hj,t} Q_{hj,t} + c_{4j} V_{hj,t} + c_{5j} Q_{hj,t} + c_{6j} \quad (10)$$

式中,  $c_{1j}$ 、 $c_{2j}$ 、 $c_{3j}$ 、 $c_{4j}$ 、 $c_{5j}$ 、 $c_{6j}$  均为水电站  $j$  的发电系数。

(5) 水电站出力约束。公式为:

$$P_{hj}^{\min} \leq P_{hj,t} \leq P_{hj}^{\max} \quad (11)$$

(6) 火电站出力约束。公式为:

$$P_{si}^{\min} \leq P_{si,t} \leq P_{si}^{\max} \quad (12)$$

(7) 水电站库容约束。公式为:

$$V_{hj}^{\min} \leq V_{hj,t} \leq V_{hj}^{\max} \quad (13)$$

(8) 水电站发电流量约束。公式为:

$$Q_{hj}^{\min} \leq Q_{hj,t} \leq Q_{hj}^{\max} \quad (14)$$

(9) 火电出力爬坡约束。公式为:

$$-U_{Di} \leq P_{si,t} - P_{si,t-1} \leq U_{Ri} \quad (15)$$

式中,  $U_{Ri}$  为机组  $i$  出力增加、减小速度的上限。

### 3.3 基于 MPDE-SP 算法的 SGSHPS 问题求解

基于 MPDE-SP 算法求解水火电力系统短期发电优化调度问题步骤如下。

步骤 1 初始化 MPI 环境变量。具体包括进程编号、进程总数、根进程编号等。

步骤 2 设置水火电力系统参数及算法参数, 初始化集合发散操作需要的数据长度信息等参数。

步骤 3 为各进程需要进行集合和分散操作的变量事先分配内存空间。

步骤 4 采用正交化方法初始化各子进程种群, 用惩罚函数法处理约束违背量, 计算种群中所有个体的适应度初值, 比较设计各子种群最优解。

步骤 5 各小种群开始并行执行差分进化算法迭代求解, 并判断是否满足集合操作条件。若满足该条件, 则收集各子进程的小种群相应信息至根进程, 并在根进程中执行差分进化操作生成新的总种群, 再将新总种群分散给各子进程; 若不满足条件, 则各子进程的小种群独自进行变异交叉操作, 产生新种群。

步骤 6 采用罚函数处理约束, 计算新种群个体的适应度值。

步骤 7 比较各子进程新种群的适应度值与原种群的适应度值的优劣, 保存较好值, 并更新小种群最好值。

步骤 8 判断并行各进程的小种群是否满足种群重构条件。若某进程的种群聚集程度超过设定的上限值, 则在该小种群当前最优解附近重新生成均匀分布的种群。

步骤 9 判断是否进行了种群重构操作, 若是则重新运行步骤 6。

步骤 10 判断是否达到最大迭代次数, 若否, 则跳到第五步; 否则, 将各个进化小种群的最

优结果、适应度值与迭代次数的关系以及取得最优解的个体参数等信息集合到根进程。

步骤 11 在根进程中比较各进程种群最优值,取其中最优值作为并行算法的最优解。

## 4 算例分析

### 4.1 案例 1

采用文献[1,5]中两个经典案例对本文所提算法的可行性与有效性进行验证。MPDE-SP 算法运行计算机 CPU 主频为 3.3 GHz、内存 8 G、逻辑内核数为 4;算法参数中子种群规模为 10、总进程数为 4、算法迭代 2 000 次、集合分散操作频率为每 10 次迭代进行一次集合差分。表 1 为 MPDE-SP 算法 10 次独立求解结果与现有方法求解结果比较,其中最优化结果收敛曲线见图 4,最

表 1 案例 1、2 上不同算法优化结果比较

Tab.1 Comparison of optimization results for different algorithms for example 1 and 2

| 案例 | 算法                   | 耗能成本优化结果/元 |            |            | 平均耗<br>费时间/s |
|----|----------------------|------------|------------|------------|--------------|
|    |                      | 最小值        | 最大值        | 平均值        |              |
| 1  | MPDE-SP              | 917 276.50 | 917 622.30 | 917 446.30 | 2.00         |
|    | GA <sup>[1]</sup>    | 926 707.00 |            |            |              |
|    | MDE <sup>[8]</sup>   | 922 555.44 |            |            | 45.00        |
|    | IPSO <sup>[9]</sup>  | 922 553.49 |            |            | 38.46        |
|    | IFEP <sup>[10]</sup> | 930 290.13 | 930 881.92 | 930 290.13 | 1 033.20     |
|    | SPPSO <sup>[6]</sup> | 922 336.31 | 923 083.48 | 922 668.45 | 16.30        |
| 2  | TLBO <sup>[4]</sup>  | 922 373.49 | 922 462.24 | 922 873.81 |              |
|    | MPDE-SP              | 168 769.20 | 177 777.70 | 173 034.60 | 5.00         |
|    | MDE <sup>[11]</sup>  | 170 964.15 |            |            | 96.40        |

优水电站出力见图 5(a)。图 5 中,T 为火电站;H 为水电站。图 4 中, Micro-GA 算法数据源于文献[11]。

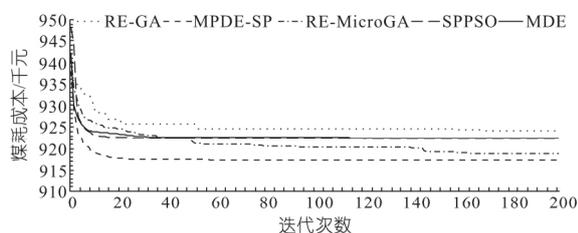


图 4 案例 1 不同算法最优收敛曲线

Fig.4 Optimal convergence of fuel cost for example 1

由表 1 可知,MPDE-SP 方法最小、最大和平均耗能优化成本优于其他方法,且所耗时间远小于其他方法。由图 4 知,MPDE-SP 方法在求解水火电力系统短期优化调度上,无论是收敛速度还是求解精度均优于其他方法。

### 4.2 案例 2

为进一步验证 MPDE-SP 方法在大规模系统上的效果,采用经典“四水十火”案例进行计算。MPDE-SP 方法与 MDE<sup>[8]</sup>方法结果比较见表 1,

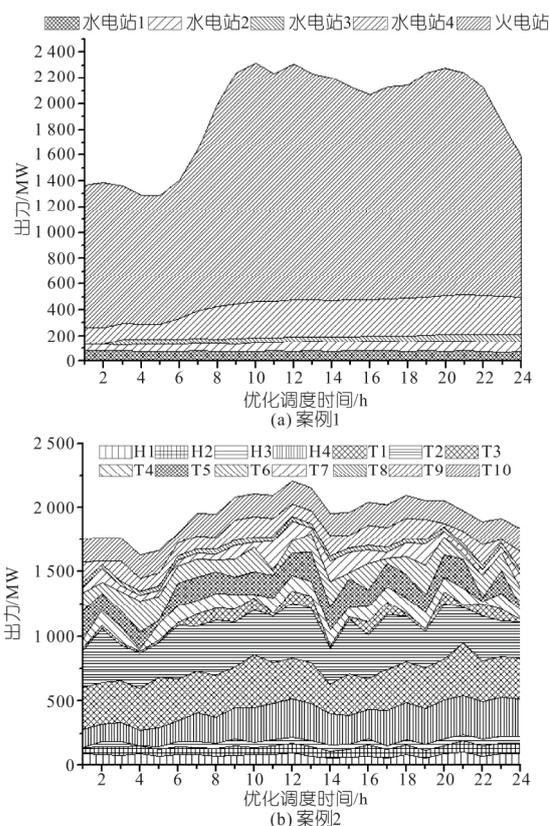


图 5 案例 1、2 最优水电站出力

Fig.5 Optimal power generation of hydro and thermal stations for example 1 and 2

最优结果水电站出力见图 5(b)。由表 2 可知,MPDE-SP 算法结果优于 MDE 算法,且在运行时间上具有明显优势。

## 5 结论

a. 本文提出了基于 MPI 的并行小种群差分进化算法(MPDE-SP)的框架,为水火电力系统发电优化调度求解提供了一个新的研究思路。

b. 为改善进化算法初始种群的多样性与均匀性,为并行差分进化算法的并行小种群引入正交初始化方法;为进一步增强进化过程中小种群的多样性,引入种群重构技术。

c. 采用典型案例对所设计的方法进行验证,结果表明,MPDE-SP 算法结果较优,且运行时间短。本文虽在并行种群间引入集合和发散操作,仍有待进一步深化研究协调进化机制以减小通讯开销。

参考文献:

[1] Orero S O, Irving M R. A Genetic Algorithm Modelling Framework and Solution Technique for Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998, 13(2):501-518.  
 [2] 余炳辉,王金文,权先璋,等. 求解水火电力系统

短期发电计划的粒子群优化算法研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(6):84-87,94.

[3] 郭琦, 卢意力, 李珺, 等. 基于和声搜索算法的水库发电优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12):63-65,73.

[4] Roy P K. Teaching Learning Based Optimization for Short-term Hydrothermal Scheduling Problem Considering Valve Point Effect and Prohibited Discharge Constraint[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(1):10-19.

[5] Mandal K K, Chakraborty N. Differential Evolution Technique-based Short-term Economic Generation Scheduling of Hydrothermal Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11):1 972-1 979.

[6] Zhang J R, Wang J, Yue C Y. Small Population-Based Particle Swarm Optimization for Short-Term Hydrothermal Scheduling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):142-152.

[7] Wang Z J, Zhan Z H, Zhang J. Parallel Multi-strategy Evolutionary Algorithm using Message Passing Interface for Many-objective Optimization [C]// Computational Intelligence, IEEE, 2017:1-8.

[8] Lakshminarasimman L, Subramanian S. Short-term Scheduling of Hydrothermal Power System with Cascaded Reservoirs by Using Modified Differential Evolution [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(6):693-700.

[9] Hota P K, Barisal A K, Chakrabarti R. An Improved PSO Technique for Short-term Optimal Hydrothermal Scheduling [J]. Electric Power System Research, 2009, 79(7):1 047-1 053.

[10] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Fast Evolutionary Technique for Short-term Hydrothermal Scheduling [J]. Power System, IEEE Transactions on, 2003, 18(1):214-220.

[11] Burhan M, Chua K J E, Ng K C. Sunlight to Hydrogen Conversion: Design Optimization and Energy Management of Concentrated Photovoltaic (CPV-Hydrogen) System Using Micro Genetic Algorithm [J]. Energy, 2016, 99:115-128.

### Parallel Differential Evolution Algorithm Based on Small Population for Short-term Hydrothermal Scheduling

YE Sheng-yong<sup>1</sup>, LIN Shuang<sup>2</sup>, ZHANG Wen-tao<sup>1</sup>, SUN Xu-jiang<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, ZHANG Jing-rui<sup>2</sup>  
 (1. Economic Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Jicheng Electronics Corporation, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Aiming at the solution of short-term optimal generating scheduling problem for hydrothermal power system, this paper proposed a MPI based parallel differential evolution using small population size. The proposed algorithm divided the evolution population into several subpopulations with a small population size (3-10). Each small population implemented the differential evolution independently on different CPU processes. In addition, the operations of gather and scatter were introduced into the parallel algorithm to cooperation these different subpopulations for searching the optimization result. Moreover, an orthogonal method and a regenerating technique were employed to enhance the diversity of small population in the procedures of initialization and evolution of the algorithm. Finally, some hydrothermal test systems were employed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed MPDE-SP algorithm. The results show that the proposed method has high competitive performances on the accuracy, the convergence speed and the CPU time consuming.

**Key words:** optimal scheduling; hydrothermal power system; parallel; differential evolution; small population

\*\*\*\*\*  
 (上接第 97 页)

### Inversion Analysis of Initial Geostress of Long Water Conveyance Tunnel in Lanzhou Water Source Projects

YANG Feng-wei<sup>1</sup>, FANG Jing-nian<sup>1</sup>, YANG Ji-hua<sup>1</sup>, YANG Fan-jie<sup>2</sup>, ZHANG Chuan-qing<sup>2</sup>  
 (1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The total length of water conveyance tunnel in Lanzhou water source projects is 31.29 km, and the geologic conditions along the tunnel layout line are complex. For accurately determining the distribution of initial geostress field, multiple linear regression method (method 1) and particle swarm-neural network intelligent inversion method (method 2) were adopted to analyze the initial geostress field. Results show that the geostress magnitude of water conveyance tunnel in Lanzhou water source projects belongs to medium level. The horizontal tectonic stress is dominated in the geostress field, but gradually dominated by gravity stress field after the depth is larger than 380 m. The geostress calculation values of two methods are both close to the measured values. The method 2 is better than method 1 in calculation accuracy, while the calculated amount of method 2 is about 4 times than method 1. Therefore, if geostress calculation is done in wide range, the method 1 is more suitable due to the smaller calculation amount and good calculation precision. But, if geostress precise calculation is demanded in a local scope, the method 2 can guarantee the calculation accuracy better.

**Key words:** Lanzhou water construction projects; water conveyance tunnel; initial geostress; regression analysis; neural network