

文章编号: 1001-0920(2011)03-0407-06

水火电力系统短期优化调度的一种改进粒子群算法

张景瑞¹, 龙健², 岳超源¹, 王健², 陈阳¹, 李武³

(1. 华中科技大学 系统工程研究所, 武汉 430074; 2. 华能澜沧江水电有限公司, 昆明 650214; 3. 湖南理工学院 信息与通信工程学院, 湖南 岳阳 414006)

摘要: 针对水火联调问题, 建立满足电量平衡、水量平衡、机组特性及综合利用要求的短期优化调度模型, 提出了一种改进粒子群算法(MPSO)。MPSO针对粒子群算法易早熟收敛的弊端, 引入了变异操作, 使粒子以一定的概率向其他粒子个体最好解学习; 针对粒子群算法在进化后期多样性受损易陷入局部最优的缺陷, 引入了迁徙操作, 在种群聚集程度不能容忍时重新生成解空间内均匀分布的粒子。对某典型水火电力系统优化问题的求解结果表明, MPSO比其他方法更有效。

关键词: 优化调度; 水火电力系统; 粒子群算法; 变异; 迁徙

中图分类号: TP301

文献标识码: A

A modified particle swarm optimizer for short-term hydrothermal scheduling with cascaded reservoirs

ZHANG Jing-rui¹, LONG Jian², YUE Chao-yuan¹, WANG Jian², CHEN Yang¹, LI Wu³

(1. Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Huaneng Lancang River Hydropower Co Ltd, Kunming 650214, China; 3. School of Information and Communication Engineering, Hu'nan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China. Correspondent: ZHANG Jing-rui, E-mail: zjrhust@gmail.com)

Abstract: An operation optimization model minimizing the thermal cost for short-term hydrothermal system with cascaded reservoirs is established in the paper. Several constraints, such as power balance, water balance and the physical characteristics of the plants, are considered. To overcome the shortcomings of a standard particle swarm optimizer(PSO), a modified PSO(MPSO) is developed to solve this scheduling problem. Mutation and migration operators are introduced respectively in the proposed method. The mutation operator makes particles learn others' personal best solution with a dynamically decrease probability. The migration operator regenerates a newly diverse population of individuals, once the crowding level is smaller than the desired tolerance of population diversity. In order to inspect and verify the reasonable of the operation optimization model and the validity of the proposed method, a famous hydrothermal power system in the literatures is tested. The simulation results show that MPSO is more effective than other algorithms.

Key words: optimal operation; hydrothermal power systems; particle swarm optimizer; mutation; migration

1 引言

水火电力系统优化调度是电力系统经济调度中普遍存在的重要优化问题。短期优化调度是指一段时期内(多为一天)在满足水、火电各种复杂约束条件的情况下, 合理确定各电站的调度方案, 以最大程度地利用水力资源, 节约火电的煤耗成本, 使整个系统运行费用最小。由于水、火电子系统间存在复杂的水力、电力联系和综合利用要求, 其发电调度实际上是

一个高维、非线性、强约束优化问题。对于此类问题, 国内外研究者提出了不同的求解方法, 如动态规划法^[1]、网络流法^[2]、分解协调法^[3]等。这些方法取得了一定的效果, 但在处理约束时大都作了一些不合实际的假设。动态规划法虽然在处理复杂约束条件时较为方便, 但易出现“维数灾”问题。

近几年出现的智能进化算法, 如遗传算法^[4]、差分进化^[5-7]和粒子群算法^[8-12]等, 由于不要求目标函数

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-03-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774084, 60975049).

作者简介: 张景瑞(1983-), 男, 博士生, 从事梯级水电站群优化调度、群体智能算法的研究; 岳超源(1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事多目标优化、决策与评价等研究.

连续可微,且具有灵活、易于扩展、鲁棒性好等优点而被应用于水火电力系统优化.其中粒子群算法原理简单、收敛快、易于实现,受到了广大学者的青睐.Mandal等人^[10]分别采用粒子群算法、模拟退火算法、进化规划求解联调问题,结果表明粒子群算法无论收敛速度还是准确度都优于另外两种算法.Yu等人^[11]应用不同的粒子群优化模型求解水火电短期优化问题,最终结果显示局部最优模型更适合此问题.Hota等人^[12]在粒子群算法中引入动态调整搜索空间策略,也取得了较好效果.

综上所述,粒子群算法及其诸多改进型大都直接以全局最优解为飞行向导,收敛速度过快,不利于对搜索空间进行全面搜索;在进化后期,大量粒子可能聚集在一个较小的范围内,导致搜索空间变小,种群多样性受损,增大陷入局部最优的可能.针对这些缺陷,本文在惯性权重线性递减粒子群算法中引入变异和迁徙操作,以增强粒子的探索能力,并保持种群的多样性.为了验证和比较MPSO求解短期水火联调的效果,对某经典测试系统进行案例研究,结果表明本文提出的方法是可行而有效的,且系统煤耗成本低于现有方法.

2 优化调度数学模型

水火电力系统短期优化调度是在满足水力联系、电量平衡、水火发电机组的物理特性及各种综合利用要求下,最大程度地减少煤电耗量,使总运行成本最小.

2.1 目标函数

优化调度的目标为最小化煤耗成本,即

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T f_i(P_s(i, t)). \quad (1)$$

式中: $P_s(i, t)$ 为第 i 火电站在第 t 时段内的平均出力, $i = 1, 2, \dots, N_s, t = 1, 2, \dots, T$. 火电站煤耗成本是关于出力的带阀点二次函数,以 P_s 表示火电出力,则第 i 个火电站煤耗函数如下:

$$f_i(P_s) = a_i + b_i P_s + c_i P_s^2 + |d_i \sin(e_i (P_s^{\min}(i) - P_s))|. \quad (2)$$

式中: a_i, b_i, c_i, d_i, e_i 为常数; $P_s^{\min}(i)$ 为第 i 个火电站最小出力.

2.2 约束条件

水火电力系统调度是一个复杂的非线性强约束优化问题,需要考虑以下约束条件.

2.2.1 水量平衡

水电站间存在复杂的水力联系,上游电站的发电流量和弃水经过一定时间的延迟后成为下游电站入库流量的组成部分.对 $\forall i = 1, 2, \dots, N_h, t = 1,$

$2, \dots, T$, 水量平衡约束如下:

$$\begin{aligned} V_h(i, t) = & V_h(i, t-1) + I_h(i, t) - Q_h(i, t) - S_h(i, t) + \\ & \sum_{m=1}^{R_u(i)} (Q_h(m, t - \tau_m) + S_h(m, t - \tau_m)). \end{aligned} \quad (3)$$

$V_h(i, t)$ 为第 i 水电站在第 t 时段末的水库库容,其中

$$V_h(i, 0) = V_h^{\text{begin}}(i), \quad (4)$$

$$V_h(i, T) = V_h^{\text{end}}(i); \quad (5)$$

$I_h(i, t)$ 为第 i 水电站在 t 时段内的区间径流; $Q_h(i, t)$ 为时段发电流量; $S_h(i, t)$ 为弃水流量; τ_m 为第 m 电站泄流量到其下游电站的时间延迟; $R_u(i)$ 为第 i 电站上游电站集合.

2.2.2 系统电量平衡

水电站群和火电站总出力需时时满足负荷需求和传输损耗,对 $\forall t = 1, 2, \dots, T$, 有

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_s(i, t) + \sum_{j=1}^{N_h} P_h(j, t) = P_D(t) + P_L(t). \quad (6)$$

式中: $P_D(t)$ 为 t 时段内电力需求; $P_L(t)$ 为传输损耗; $P_h(j, t)$ 为第 j 水电站时段出力,是发电流量和净水头的函数.对于大型水库,短期调度水头变化不大,出力为库容和发电流量的函数,可按下式计算:

$$\begin{aligned} P_h(i, t) = & c_{1i} V_h(i, t)^2 + c_{2i} Q_h(i, t)^2 + c_{3i} V_h(i, t) Q_h(i, t) + \\ & c_{4i} V_h(i, t) + c_{5i} Q_h(i, t) + c_{6i}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, c_{4i}, c_{5i}, c_{6i}$ 为常数.

2.2.3 电站物理特性约束

各水、火电站需满足其自身的技术出力约束,水电站发电流量应满足其水轮机过水能力要求.对 $\forall t = 1, 2, \dots, T$, 各电站自身物理特性约束如下:

$$P_s^{\min}(i) \leq P_s(i, t) \leq P_s^{\max}(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_s; \quad (8)$$

$$P_h^{\min}(i) \leq P_h(i, t) \leq P_h^{\max}(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_h; \quad (9)$$

$$Q_h^{\min}(i) \leq Q_h(i, t) \leq Q_h^{\max}(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_h. \quad (10)$$

式中: $P_s^{\min}(i)$ 和 $P_h^{\min}(i)$ 分别为水、火电站的最小出力; $P_s^{\max}(i)$ 和 $P_h^{\max}(i)$ 分别为水、火电站的最大出力; $Q_h^{\min}(i)$ 和 $Q_h^{\max}(i)$ 分别为水电站的最小、最大发电引用流量.

2.2.4 综合利用要求

对 $\forall i = 1, 2, \dots, N_h, t = 1, 2, \dots, T$, 需满足

$$V_h^{\min}(i, t) \leq V_h(i, t) \leq V_h^{\max}(i, t), \quad (11)$$

$$D_h^{\min}(i, t) \leq D_h(i, t) \leq D_h^{\max}(i, t). \quad (12)$$

式中: $V_h^{\max}(i, t)$ 和 $V_h^{\min}(i, t)$ 分别为第 i 水电站第 t 时段满足综合利用要求的库容上、下限; $D_h^{\max}(i, t)$ 和

$D_h^{\min}(i, t)$ 分别为时段泄流量上、下限. 泄流量与发电、弃水流量之间的关系为

$$D_h(i, t) = Q_h(i, t) + S_h(i, t). \quad (13)$$

弃水模型如下:

$$S_h(i, t) = \begin{cases} D_h(i, t) - Q_h^{\max}(i), & D_h(i, t) > Q_h^{\max}(i); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

3 粒子群算法及其改进思路

3.1 粒子群算法

粒子群算法是由 Eberhart 等人^[13]于 1995 年提出的一种模仿鸟群觅食的随机搜索算法. 从本质上讲, 粒子群算法是一种基于群体智能的进化算法, 它以粒子的位置(优化问题的解)为运算对象, 使各粒子不断以自身最好位置(个体最好解)和种群最好位置(种群最好解)为导引, 调整飞行速度和方向, 并在迭代飞行中更新个体最好和全局最好, 最终逼近全局最优解. 假设 $X_k^i = \{x_{1,k}^i, x_{2,k}^i, \dots, x_{n,k}^i\}$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子在 n 维空间的位置, $x_{d,k}^i$ 为粒子 i 第 d 维分量, 则粒子在第 $k+1$ 次迭代中的速度更新和位置更新公式分别为

$$v_{d,k+1}^i = \omega v_{d,k}^i + c_1 r_1 (x_{d,k}^{i_p} - x_{d,k}^i) + c_2 r_2 (x_{d,k}^{g_{\text{best}}} - x_{d,k}^i), \quad (15)$$

$$x_{d,k+1}^i = x_{d,k}^i + v_{d,k+1}^i. \quad (16)$$

式中: c_1, c_2 为常系数; r_1, r_2 为相互独立且服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; i_p 为粒子 i 的当前最优解; g_{best} 为种群当前最优解.

粒子群算法以种群当前最好解和个体最好解作为启发式因子, 搜索速度快、鲁棒性好, 且易于实现, 在复杂约束优化问题^[14]上得到了一定的应用. 但基本粒子群算法直接以种群最好解作为群体飞行的向导, 收敛速度过快^[15], 特别是迭代后期种群趋同化严重, 多样性受损, 易于早熟收敛. 现有文献大都从惯性权重^[16]、收缩因子、选择杂交算子以及邻域结构上对基本粒子群算法进行改进. 本文在惯性权重线性递减粒子群算法的基础上引入变异和迁徙操作, 以增强粒子探索能力, 并保证种群的多样性.

3.2 变异操作

变异操作大多通过施加扰动项作用在优化问题的解上, 但需设置合理的扰动步长, 否则, 步长过大则可能使求解偏离最优区域, 过小则作用效果不大. MPSO 算法结合粒子群算法的特点引入一种隐式的变异操作, 该变异操作不需调整扰动步长, 通过以一定概率选择粒子个体最好为其他粒子的方式作用在粒子的飞行速度上. 为了不影响算法的收敛性,

MPSO 算法随迭代进行逐渐降低学习其他粒子个体最好的概率, 直至概率为 0, 变为传统粒子群算法. 引入该变异操作后, 粒子个体最好解按下式选择:

$$p_{\text{best}}(i, k) = \begin{cases} i, & r \geq \tilde{r}(k); \\ \text{randni}(1, M, i), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

式中: M 为种群规模; $\text{randni}(1, M, i)$ 为 $[1, M]$ 上服从均匀分布且不等于 i 的随机整数; r 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数; $\tilde{r}(k)$ 为其上限, 并随迭代次数线性递减, 其具体定义如下:

$$\tilde{r}(k) = \tilde{r}^{\max} - \frac{k(\tilde{r}^{\max} - \tilde{r}^{\min})}{\text{iteration}^{\max}}. \quad (18)$$

其中: iteration^{\max} 为最大迭代次数, \tilde{r}^{\max} 和 \tilde{r}^{\min} 分别为 $\tilde{r}(k)$ 上、下限. 引入该操作后, 粒子速度更新公式变为

$$v_{d,k+1}^i = \omega v_{d,k}^i + c_1 r_1 (x_{d,k}^{p_{\text{best}}(i,k)} - x_{d,k}^i) + c_2 r_2 (x_{d,k}^{g_{\text{best}}} - x_{d,k}^i).$$

3.3 迁徙操作

在进化后期, 大量粒子聚集在一个小范围内, 群体多样性变差, 粒子将在小范围内进行搜索, 若粒子一旦陷入局部最优, 则很难跳出. MPSO 算法引入迁徙操作, 每当粒子群聚集程度不能容忍时, 该操作便在当前种群最好解周围重新生成在解空间内均匀分布的粒子群, 并保持原有搜索方向和速度继续迭代. 以 ρ 表示粒子聚集程度, 当 $\rho > \delta$ 时, 迁徙操作按下式对种群中粒子位置进行更新.

$$\hat{x}_{j,k}^i = \begin{cases} x_{j,k}^{g_{\text{best}}} + \gamma(x_{j,k}^{\max} - x_{j,k}^{g_{\text{best}}}), & \hat{\gamma} > \frac{x_{j,k}^{\max} - x_{j,k}^{g_{\text{best}}}}{x_{j,k}^{\max} - x_{j,k}^{\min}}; \\ x_{j,k}^{g_{\text{best}}} + \gamma(x_{j,k}^{g_{\text{best}}} - x_{j,k}^{\min}), & \text{other.} \end{cases}$$

式中: γ 和 $\hat{\gamma}$ 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数; $x_{j,k}^{\max}$ 为种群在第 k 次迭代中第 j 维的最大值, $x_{j,k}^{\min}$ 为最小值. 粒子群聚集程度指标 ρ 按下式定义:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \eta(x_{j,k}^i)}{N \times M}. \quad (19)$$

其中: M 为种群规模; N 为优化问题维数; 而

$$\eta(x_{j,k}^i) = \begin{cases} 1, & \frac{|x_{j,k}^i - x_{j,k}^{g_{\text{best}}}|}{|x_{j,k}^{g_{\text{best}}}|} < \varepsilon; \\ 0, & \text{other.} \end{cases}$$

ε 为衡量粒子分量靠近程度的因子, δ 为最大可容忍聚集程度, ε 和 δ 均为 $[0, 1]$ 上的小数.

4 基于 MPSO 的水火电力系统短期优化调度

令 $X_i = [Q_h(1, 1), \dots, Q_h(1, T), \dots, Q_h(N_h, 1), \dots, Q_h(N_h, T), P_s(1, 1), \dots, P_s(1, T), \dots, P_s(N_s, 1), \dots, P_s(N_s, T)]$ 为第 i 个粒子的位置, 是优化问题的一

个解向量,水火电力系统短期优化调度的目标便是寻找一满足所有约束的 X_i 最小化火电耗量成本. 求解该问题的 MPSO 的关键步骤如下:

Step 1 初始化. 在解空间内按下式随机生成初始解:

$$Q_h(i, t) = \ell_1(D_h^{\max}(i) - D_h^{\min}(i)) + D_h^{\min}(i), \quad (20)$$

$$P_s(i, t) = \ell_2(P_s^{\max}(i) - P_s^{\min}(i)) + P_s^{\min}(i), \quad (21)$$

式中 ℓ_1 和 ℓ_2 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数.

Step 2 修正候选解. 优化问题的解需满足的等式约束包括水量平衡、电量平衡以及初末库容边界条件. 对于水量平衡,可在求解过程中得以保证,故只需处理期末库容和电量平衡. 对于期末库容,由水量平衡公式得第 i 水库期末库容为

$$V_h(i, T) = V_h(i, 0) + \sum_{t=1}^T I_h(i, t) - \sum_{t=1}^T D_h(i, t) + \sum_{m=1}^{R_u} \sum_{t=1}^T D_h(m, t - \tau_m). \quad (22)$$

对 $\forall i = 1, 2, \dots, N_h$, 可随机选取一时段 d 为依赖时段, 计算其依赖泄流量为

$$D_h(i, d) = V_h(i, 0) - V_h^{\text{end}}(i) + \sum_{t=1}^T I_h(i, t) + \sum_{m=1}^{R_u} \sum_{t=1}^T D_h(m, t - \tau_m) - \sum_{t=1, t \neq d}^T D_h(i, t). \quad (23)$$

检验其是否满足泄流量约束,若不满足,则令其为界限值,再随机不重复地选择其他时段进行依赖泄流量计算,直至满足约束.

对于电量平衡约束,考虑到电力系统火电容量较大的特点,对 $\forall t = 1, 2, \dots, T$, 随机选取一 d 火电站为依赖电站,按下式计算其依赖出力:

$$P_s(d, t) = P_D(t) - \sum_{i=1, i \neq d}^{N_s} P_s(i, t) - \sum_{i=1}^{N_h} P_h(i, t). \quad (24)$$

若依赖出力不满足约束,则令其为界限值,再随机不重复地选取其他火电站为依赖电站进行依赖出力计算,直至满足约束.

Step 3 适应值评价. 要找到一个满足水火电调度的各种约束的解相当困难,本文对违背不等式约束的候选解进行惩罚,则适应度函数表述如下:

$$F = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T f_i(P_s(i, t)) + \sum_{z=1}^{N_z} \lambda_z |\text{VIO}_z|. \quad (25)$$

式中: λ_z 为惩罚因子, N_z 为违反约束的个数, VIO_z 为约束违背量.

Step 4 停止准则. 目前,进化算法停止准则一般有两种:其一为连续多次迭代优化目标没有明显改进;其二为设定一定的迭代次数. 本文采用后者.

5 案例研究

以文献[4]中水火电力系统为例,应用 MPSO 算法进行水火电力系统短期优化调度仿真计算. 该系统由 4 个水电站和 1 个等值火电站组成,其各部分详细参数及约束条件见文献[4]. 在采用 MPSO 算法求解时,设定种群规模为 50,最大迭代次数为 20 000,惯性权重系数从 0.9 到 0.4 线性递减,变异概率 $\hat{r}(k)$ 随迭代次数从 0.3 到 0.0 线性递减,粒子分量靠近程度界限为 0.02,种群聚集不能容忍程度为 0.65. 共求解 10 次,取最好值作为优化调度结果. 针对同一水火电力系统,采用 MPSO 算法所获得的优化结果与以往文献中其他方法求得的煤耗成本比较如表 1 所示,各时段发电流量和出力分别如表 2 和表 3 所示. 图 1 为采用 MPSO 算法所得最好解的库容过程曲线,图 2 为相应的适应值随迭代次数变化曲线.

表 1 不同算法优化结果比较

优化方法	煤耗成本/\$
MPSO	921598.51
MHDE ^[6]	921 893.94
IPSO ^[12]	922 553.49
PSO ^[11]	925 618.50
IFEP ^[18]	930 129.82
GA ^[4]	926 707.00
NP ^[17]	924 249.48
DP ^[17]	928 919.15

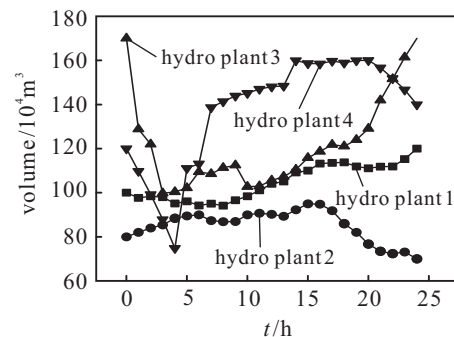


图 1 库容过程曲线

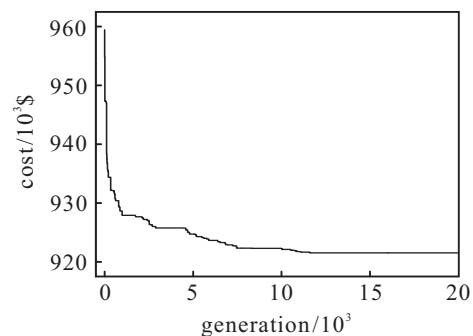


图 2 适应值迭代曲线

表2 时段发电引用流量 10^4 m^3

时段	发电引用流量			
	水电站1	水电站2	水电站3	水电站4
1	12.33	6.00	30.00	13.00
2	8.28	6.00	15.08	13.00
3	8.42	7.62	30.00	13.00
4	9.87	6.00	15.68	13.00
5	5.03	6.95	15.64	13.00
6	8.84	6.49	14.20	13.00
7	7.22	8.62	14.90	13.00
8	9.85	7.50	15.06	13.00
9	7.58	7.90	13.51	13.07
10	9.16	6.00	29.23	13.00
11	9.30	8.26	15.85	13.00
12	7.05	8.49	16.44	14.02
13	9.99	8.89	17.61	13.13
14	7.91	6.01	15.13	17.70
15	10.17	6.30	16.11	17.12
16	6.78	8.17	15.98	16.67
17	8.71	9.94	15.06	16.36
18	7.73	11.91	15.83	15.91
19	8.91	10.96	14.94	15.01
20	6.83	13.26	13.53	15.96
21	6.26	12.26	10.00	18.42
22	7.87	10.09	10.16	20.65
23	5.67	7.24	10.71	20.04
24	5.24	11.13	11.54	20.26

表3 时段出力 MW

时段	水电站				等值火电站
	1	2	3	4	
1	93.41	50.16	0.00	200.10	1026.33
2	76.34	51.30	43.74	187.75	1030.87
3	77.02	62.89	0.00	173.73	1046.35
4	83.55	53.66	33.59	156.79	962.41
5	51.90	60.79	34.50	201.51	941.31
6	78.09	57.93	40.39	203.84	1029.75
7	68.48	69.95	38.86	230.27	1242.45
8	83.09	62.96	39.66	232.86	1581.43
9	71.37	65.50	42.45	235.93	1824.75
10	81.30	54.46	0.00	236.32	1947.91
11	82.94	69.73	34.32	238.06	1804.95
12	69.83	70.81	33.89	248.80	1886.67
13	87.67	72.55	30.88	240.65	1798.26
14	76.91	55.74	39.18	290.70	1737.46
15	89.99	59.07	39.12	285.13	1656.69
16	69.61	71.35	40.57	281.37	1607.10
17	82.93	79.46	43.72	280.08	1643.81
18	76.63	84.39	41.85	275.62	1661.51
19	83.79	78.14	44.74	268.71	1764.62
20	69.64	82.39	48.30	277.02	1802.65
21	65.27	77.06	50.71	292.55	1754.41
22	77.25	67.81	53.08	301.03	1620.83
23	60.72	52.99	55.78	292.14	1388.37
24	57.21	70.46	58.24	285.76	1118.33

仿真计算结果表明, MPSO 算法可应用于求解水火电力系统短期优化调度问题, 且由表1可知, 所求得火电煤耗成本低于目前文献中已有的结果. 由图2可知, MPSO 算法在迭代后期适应值仍能有所降低, 这主要是由于引入迁徙操作后, 种群多样性能得到较好的保证, 算法在后期仍具有较强的探索能力.

可见, MPSO 算法在求解水火电力系统短期优化调度上是可行而有效的.

6 结 论

本文考虑水火电力系统各种复杂约束条件, 建立了水火电力系统短期优化调度模型. 针对粒子群算法在求解优化问题时易于早熟收敛的弊端, 在惯性权重线性递减粒子群算法基础上引入了变异和迁徙操作. 为了验证本文方法的可行性和有效性, 对某典型水火电力系统进行了案例研究, 结果表明本文所提出的方法比已有相关方法更优.

参考文献(References)

- [1] Yeh W W, Becker L, Hua S Q, et al. Optimization of real-time hydrothermal system operation[J]. J of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(6): 636-653.
- [2] Habibollahzadeh H, Bubenko J A. Application of decomposition techniques to short-term operation planning of hydrothermal power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 41-47.
- [3] Yan H, Luh P B, Guan X, et al. Scheduling of hydrothermal power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1358-1365.
- [4] Orero S O, Irving M R. A genetic algorithm modelling framework and solution technique for short term optimal hydrothermal scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 501-518.
- [5] Yuan X, Zhang Y, Wang L, et al. An enhanced differential evolution algorithm for daily optimal hydro generation scheduling[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 55(11): 2458-2468.
- [6] Lakshminarasimman L, Subramanian S. A modified hybrid differential evolution for short-term scheduling of hydrothermal power systems with cascaded reservoirs[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2513-2521.
- [7] 卢有麟, 周建中, 覃晖, 等. 基于自适应混合差分进化算法的水火电力系统短期发电计划优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 32-36.
(Lu Y L, Zhou J Z, Qin H, et al. Short-term scheduling optimization for hydrothermal power systems based on adaptive hybrid differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 32-36.)
- [8] 蒙文川, 邱家驹. 电力系统经济负荷分配的混沌粒子群优化算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 114-119.
(Meng W C, Qiu J J. Chaotic particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19(2): 114-119.)

- [9] 朱建全, 吴杰康. 水火电力系统短期优化调度的不确定性模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 51-54.
(Zhu J Q, Wu J K. An uncertainty model for short-term optimization scheduling of hydrothermal power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 51-54.)
- [10] Mandal K K, Basu M, Chakraborty N. Particle swarm optimization technique based short-term hydrothermal scheduling[J]. Applied Soft Computing J, 2008, 8(4): 1392-1399.
- [11] Yu B, Yuan X, Wang J. Short-term hydrothermal scheduling using particle swarm optimization method[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 1902-1908.
- [12] Hota P K, Barisal A K, Chakrabarti R. An improved PSO technique for short-term optimal hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(7): 1047-1053.
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Proc IEEE Int Conf Neural Networks 1995. Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [14] 万芳, 原文林, 黄强, 等. 基于免疫进化算法的粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 202-206.
(Wan F, Yuan W L, Huang Q, et al. Application of particle swarm optimization and immune evolutionary algorithm to optimal operation of cascade reservoirs[J]. J of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 202-206.)
- [15] 朱海梅, 吴永萍. 一种高速收敛粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 20-24.
(Zhu H M, Wu Y P. A PSO algorithm with high speed convergence[J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 20-24.)
- [16] 张顶学, 关治洪, 刘新芝. 一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(11): 1253-1257.
(Zhang D X, Guan Z H, Liu X Z. Adaptive particle swarm optimization algorithm with dynamically changing inertia weight[J]. Control and Decision, 2008, 23(11): 1253-1257.)
- [17] Lakshminarasimman L, Subramanian S. Short-term scheduling of hydrothermal power system with cascaded reservoirs by using modified differential evolution[J]. IEE Proc Gener Trans Distrib, 2006, 153(6): 693-700.
- [18] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(2): 97-103.

(上接第406页)

- [7] 严恭敏, 严卫生, 徐德民. 简化UKF滤波在SINS大失准角初始对准中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(3): 253-264.
(Yan G M, Yan W S, Xu D M. Application of simplified UKF in SINS initial alignment for large misalignment angles[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(3): 253-264.)
- [8] 肖艳霞, 张洪钺. 考虑机翼弹性变形时的传递对准方法研究[J]. 航天控制, 2001, 2(1): 27-35.
(Xiao Y X, Zhang H Y. Study on transfer alignment with the wing flexure of aircraft[J]. Spaceflight Control, 2001, 2(1): 27-35.)
- [9] 胡健, 周百令, 程向红. 考虑载体弹性变形的两种传递对准方法的对比研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(3): 15-18.
(Hu J, Zhou B L, Cheng X H. Comparison on two methods of transfer alignment with carrier flexure[J]. Chinese Inertial Thechnology Transaction, 2005, 13(3): 15-18.)
- [10] 胡健, 周百令, 程向红. 考虑舰船甲板弹性变形时的传递对准方法研究[J]. 舰船电子工程, 2006, 26(3): 65-68.
(Hu J, Zhou B L, Cheng X H. Study on transfer alignment with the flexure of the carrier[J]. Ship Electronic Engineering, 2006, 26(3): 65-68.)
- [11] 夏家和. 舰载机惯导系统的动基座对准技术研究[D]. 西安: 西北工业大学自动化学院, 2007: 52-56.
(Xia J H. The study on transfer alignment technology of carrier aircraft INS with movement[D]. Xi'an: Automatic Institute, Northwestern Polytechnical University, 2007: 52-56.)
- [12] 梁彦, 潘泉, 杨峰, 等. 复杂系统的现代估计理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 153-163.
(Liang Y, Pan Q, Yang F, et al. Theory and application of modern estimation of complex system[M]. Beijing: Science Press, 2009: 153-163.)
- [13] Juler S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE AES, 2004, 92(3): 401-422.
- [14] 张卫明, 张继惟, 范子杰, 等. UKF方法在惯性导航系统初始对准中的应用研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 589-592.
(Zhang W M, Zhang J W, Fan Z J, et al. Research on unscented Kalman filter in initial alignment of inertial navigaiton system[J]. System Engineering and Eelctronics, 2007, 29(4): 589-592.)