

基于遗传算法和数据包络分析法的水火电力系统发电多目标经济调度

吴杰康¹, 唐利涛¹, 黄奂¹, 卢永文²

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004;

2. 大化供电公司, 广西壮族自治区 河池市 530800)

Multi-objective Economic Scheduling for Hydrothermal Power Systems Based on Genetic Algorithm and Data Envelopment Analysis

WU Jiekang¹, TANG Litao¹, HUANG Huan¹, LU Yongwen²

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China;

2. Dahua Power Supply Company, Hechi 530800, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: To fully increase the benefit of electricity generation and implement energy saving and loss reduction, a multi-objective economic scheduling model, in which the generated energy by cascade hydroelectric stations is maximized and the coal consumption of thermal power generating units is minimized, is proposed, and genetic algorithm (GA) and data envelopment analysis (DEA) is used to solve the proposed model. By means of penalty factors, the constraint conditions are merged into the objective function, then through setting different weight coefficient ten scheduling schemes are obtained. Comparing objective values and DEA estimation values of different scheduling schemes and according to the preference of different decision-makers, the optimal decision-making scheme can be chosen. The effectiveness of the proposed method is verified by results of case calculation.

KEY WORDS: hydrothermal power systems; multi-objective optimization; genetic algorithm; data envelopment analysis(DEA)

摘要: 为充分提高水电站发电效益及达到节能降耗目的,建立了以梯级水电站发电量最大和火电机组煤耗量最小的水火电力系统短期发电多目标经济调度模型,并利用遗传算法与数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)法求解该模型,并通过惩罚因子法将各约束条件融合到目标函数中,通过设置不同权重系数获得10种调度方案。比较不同调度方案的目标值和DEA评估值,并依据决策者喜好选取最优

决策方案。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 水火电力系统; 多目标优化; 遗传算法; 数据包络分析

0 引言

随着非可再生能源的不断减少,为大力推动水电开发及优化煤电发展,有必要开展水火电力系统优化调度研究。水火电力系统发电计划优化调度^[1]是在调度周期内各水电厂发电流量及各火电厂承担负荷量满足要求的情况下,充分利用水力资源,最大限度地节省火电燃料成本,使系统运行成本最小。水火电力系统发电优化调度为复杂非线性优化问题,其数学模型包含物理约束、电力约束、系统约束、水头约束等。实践表明,对水电和火电进行统一调度可充分发挥水电和火电的互补效益,减少燃煤,提高电力系统运行的综合经济性。目前,水火电力系统联合调度的数学建模及求解方法的研究已取得了众多成果,并已应用到实际工程中,获得了较好的经济效益^[1-4]。电力系统联合调度问题求解方法众多^[5-9],如等微增率法、线性规划法、非线性规划法、动态规划法等。等微增率法以数学极值理论为基础,该方法普遍适用于耗量特性为凸函数的火电机组经济分配问题,工程上常用其来求解负荷分配问题,但在求解具有复杂约束条件的水火电力系统调度问题时存在一定局限性。线性规划法建立的优化模型难以反映水火电系统的强非线性因素。非线性规划法计算量相对较大,计算大规模优

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767001); 高等学校博士学科点专项科研项目(20094501110002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50767001); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20094501110002).

化问题时存在收敛特性不稳定的缺点,且运算速度慢。动态规划法易陷入“维数灾”。以人工智能为基础的群体智能算法^[10-18]理论上具有全局收敛性,对初始点无严格要求且无需导数信息,适合求解非线性优化问题,已成为近几年的研究热点,遗传算法、粒子群算法等已用于水火电力系统发电优化调度问题求解中,应用效果良好,同时该类算法的群体特性为多目标优化问题的求解提供了有效途径。

数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)法为评价具有多输入、多输出生产活动的经济方法,可按照决策者偏好对决策单元进行排序,且决策单元与多目标 Pareto 解具有等价性,适于多目标问题求解。

为充分发挥水电的补偿效益,提高水火电力系统运行的经济性,本文将建立水火电力系统发电多目标经济调度模型,结合遗传算法 DEA 法对其进行求解,依据决策方案目标函数值、DEA 评估值及决策者喜好选择最优决策方案。

1 水火电力系统发电多目标优化调度模型

1.1 目标函数

本文从充分挖掘水电发电能力及减少非可再生资源消耗方面考虑,建立水电站发电量最大、火电机组煤耗量最小的多目标优化模型。

以梯级水电站发电量最大为目标函数,其数学模型可表示为

$$f_1 = \max \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{t=1}^T N_i(t)M(t) \quad (1)$$

式中: N_h 为水电站总数; T 为调度周期内时段总数,本文 $T=24$; $N_i(t)$ 为水电机组 i 在 t 时段的出力; $M(t)$ 为时段 t 内的小时数。

水火电联合运行时,为实现节能目标要求火电机组的煤耗量最小,其数学模型为

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_t} a_j P_j^2(t) + b_j P_j(t) + c_j \quad (2)$$

式中: N_t 为火电机组个数; a_j 、 b_j 、 c_j 为火电机组 j 的燃料耗量特性系数; $P_j(t)$ 为火电机组 j 在调度时段 t 的出力。

1.2 约束条件

约束条件如下。

1) 系统功率平衡约束。

电力不易存储要求电力生产与消费具有同时性,因此要保证机组出力和系统负荷需求实时平

衡,即在整个优化时段内,系统所有机组的输出功率必须与系统负荷平衡,在不考虑系统网损时该约束可表示为

$$\sum_{i=1}^{N_h} N_i(t) + \sum_{j=1}^{N_t} P_j(t) = P_L(t) \quad (3)$$

式中 $P_L(t)$ 为 t 时段的总负荷。

2) 水量平衡约束。

梯级水电站的显著特点为:上一级水电站的发电用水及水库弃水经过一定时滞仍可被下一级水电站使用,即相邻水电站存在水力耦合联系,该约束可表示为

$$V_i(t+1) = V_i(t) + q_i(t) - Q_i(t) - S_i(t) + Q_{i-1}(t-\tau) + S_{i-1}(t-\tau) \quad (4)$$

式中: $V_i(t)$ 为 t 时段水电站 i 的库容; $q_i(t)$ 为 t 时段水电站 i 的天然来水量; $Q_i(t)$ 为 t 时段水电站 i 的发电流量; $S_i(t)$ 为 t 时段水电站 i 的弃水量; τ 为时滞系数。对于发电优化调度,平水期及枯水期一般不会有弃水产生,因此式(4)可简化为

$$V_i(t+1) = V_i(t) + q_i(t) - Q_i(t) + Q_{i-1}(t-\tau) \quad (5)$$

3) 火电机组出力最大与最小约束。

火电机组运行时均有最小及最大出力的限制,该约束可表示为

$$P_{j\min}(t) \leq P_j(t) \leq P_{j\max}(t) \quad (6)$$

式中 $P_{j\min}(t)$ 、 $P_{j\max}(t)$ 分别为机组 j 允许的最小及最大出力。

4) 水库蓄水量约束。

$$V_{i\min}(t) \leq V_i(t) \leq V_{i\max}(t) \quad (7)$$

式中 $V_{i\min}(t)$ 、 $V_{i\max}(t)$ 分别为 t 时段允许的最小及最大水库蓄水量。

5) 水电站的发电流量约束。

$$Q_{i\min}(t) \leq Q_i(t) \leq Q_{i\max}(t) \quad (8)$$

式中 $Q_{i\min}(t)$ 、 $Q_{i\max}(t)$ 分别为 t 时段水电站 i 应保证的最小及最大发电引用流量。

6) 水电站出力约束。

$$N_{i\min}(t) \leq N_i(t) \leq N_{i\max}(t) \quad (9)$$

式中 $N_{i\min}(t)$ 、 $N_{i\max}(t)$ 分别为 t 时段水电站 i 应保证的最小及最大允许出力。

7) 水库净水头约束。

$$h_{i\min}(t) \leq h_i(t) \leq h_{i\max}(t) \quad (10)$$

式中: $h_i(t)$ 为 t 时段水电站 i 的发电净水头; $h_{i\min}(t)$ 、 $h_{i\max}(t)$ 分别为 t 时段水电站 i 允许的最小及最大发电净水头。

8) 调度周期末水库蓄水量约束。

日调节水电站的调度周期较短,期望在调度周期末水库的蓄水量恢复到调度周期初的蓄水量,该约束可表示为

$$V_{i,T}=V_{i,1} \quad (11)$$

式中: $V_{i,1}$ 为第 i 个水库的起始库容量; $V_{i,T}$ 为第 i 个水库调度末时段的库容量。

2 模型求解

2.1 求解算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)由 Holland 教授首次提出,其模仿生物在自然环境中的遗传和进化机制,将遗传算子、交叉算子、变异算子反复作用于群体,最终得到问题的最优解或近似最优解。虽然该算法的思路及结构较简单,但其在复杂系统的优化计算问题中具有一定的实用价值^[17-18]。

DEA 由统筹学家 A. Charnes、W. W. Cooper 和 E. Rhodes 首先提出,主要用以评价决策单元的相对有效性^[19-20]。CCR(Charnes Cooper Rhodes)模型为第 1 个 DEA 模型,其可用于处理具有多输入(输入愈小愈好)、多输出(输出愈大愈好)的多目标决策问题。由文献[19-20]可知,若决策单元的 DEA 评价结果为有效,则该决策单元等价于多目标规划问题中的 Pareto 有效解。

本文选择 CCR 对偶线性规划模型评价待求解的多目标优化问题。

$$\min \theta \quad (12)$$

$$\sum \lambda_j X_j \leq \theta X_0, \lambda_j \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum \lambda_j Y_j \geq Y_0, \lambda_j \geq 0 \quad (14)$$

式中: θ 为决策单元 D_0 的有效值(指投入相对于产出的有效利用程度); λ_j 是第 j 个决策单元 D_j 的组合比例(评估参数), D_j 为重新构造的类似于决策单元 D_0 的有效决策单元, $\lambda_j \geq 0$, 且其取值无上限; X_j 为决策单元 D_j 的投入要素集合; Y_j 为决策单元 D_j 的产出要素集合。根据 DEA 原理,输入愈小愈好、输出愈大愈好,即希望目标函数输入最小值、输出最大值,则以上模型要求 X_j 最小、 Y_j 最大。

遗传算法种群多且具有全局收敛性,DEA 法可为决策者提供多种决策方案,为此本文将结合遗传算法与 DEA 法求解水火电力系统发电多目标优化调度模型。

水火电力系统发电多目标优化调度问题含有大量非线性等式和不等式约束条件,本文采用罚函数法对约束条件进行转化。若 $g_j(x)$ 为不等式约束,

$h_i(x)$ 为等式约束,转化后的目标模型可表示为

$$F(x)=f(x)+M_0 \sum_{i=1}^k |h_i(x)|+M_1 \sum_{j=1}^m \min[0, g_j(x)] \quad (15)$$

式中: $f(x)$ 为 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的混合函数; M_0 为等式约束的惩罚系数; k 为等式约束的个数; M_1 为不等式约束的惩罚系数; m 为不等式约束的个数。

对于非线性不等式约束(6)—(10)及等式约束(3)、(11),可采用罚函数法选取适当的惩罚系数 M_0 、 M_1 将不等式约束、等式约束及 2 个目标函数融合到式(15)中,形成遗传算法的新适应度函数。由于各水电站水库初始蓄水量和天然来水量已知,根据文献[21]可将式(5)表示为发电流量的函数,然后再用罚函数法将其融入到目标函数式(15)中。

为将多目标问题转化为单一目标问题进行求解,本文采用权重系数法设置 10 种不同的权重系数以获取 10 种不同的调度方案。由于决策者偏好不同,为选择综合效益最佳方案,采用 DEA 法对 10 种决策方案进行评估,根据目标函数和 DEA 评估值选择满足要求的决策方案,为决策者提供决策理论依据。

2.2 求解步骤

为有效求解水火电力系统发电优化调度问题,首先要确定优化问题的内生变量即决策变量。对于水电站,在水电站初始蓄水量和天然来水量已知情况下,其他变量均可由发电流量 $Q_i(t)$ 表示。对于火电机组,发电煤耗特性由火电机组出力 $P_j(t)$ 表示。因此,决策变量可由发电流量和火电机组出力组成。具体求解步骤为:

1) 参数初始化。设置种群规模 N 、权重系数 ω 、权重系数迭代步长 $\Delta\omega$ 、决策变量的上下限、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、算法终止条件等。

2) 采用权重系数法将多目标函数转化为单一目标函数,同时采用罚函数法将约束条件加入目标函数,构造出适合遗传算法的新的适应度函数。

3) 利用评价函数计算种群中所有个体的适应度。

4) 利用遗传算法的交叉操作、变异操作产生新种群,利用评价函数计算新个体适应度。

5) 比较新个体的目标函数值与前次迭代个体的目标函数值,如果新个体目标函数值更优,则令新个体替代前次迭代个体,并保存新个体及其目标函数值进行下一次迭代。

6) 判断算法是否满足权重系数为 ω 时的迭代终

止条件，不满足则执行步骤 4) 继续重复迭代，若已满足则执行步骤 7)。

7) 判断 ω 是否达到最大，若未达到最大，则令 $\omega = \omega + \Delta\omega$ ，转入步骤 2) 继续迭代；否则算法结束，输出与 ω 对应的多目标优化函数值 f_1 、 f_2 及其对应的决策变量。

8) 将各权重系数对应的决策变量及对应的目标函数值作为 DEA 的输入和输出，对不同的决策方案利用式(12)—(14)计算 DEA 评估值。

9) 根据决策者偏好及 DEA 评估值综合选择最优决策方案。

3 算例分析

3.1 算例参数

本节采用包含 3 级梯级水电站和 3 个火电厂组成的水火电力系统来验证本文所建模型及求解算法的有效性。表 1 为由历史数据得到的水火电力系统的典型日负荷，表 2 为梯级水电站基本参数，表 3 为火电机组基本参数^[10]。设初始种群为 50，交叉概率 P_c 为 0.8，变异概率 P_m 为 0.01，最大进化代数为 600，即迭代 600 次时算法终止。

表 1 水火系统典型日负荷
Tab. 1 Typical daily load of hydro-thermal power system

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负荷/GW	2508	2463	2384	2308	2239	2232	2282	2337	2433	2702	2814	2660
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
负荷/GW	2891	2700	2753	2849	2865	2979	2867	2768	3018	3062	2993	2788

表 2 梯级水电站基本参数
Tab. 2 Parameters of cascade hydroelectric plants

水电站 i	调节性质	正常蓄水位/m	兴利库容/亿 m^3	死水位/m	死库容/亿 m^3
$i=1$	多年	780	83.95	731.0	25.990
$i=2$	日	645	0.26	637.0	0.076
$i=3$	日	440	2.11	437.5	1.842

水电站 i	调节库容/亿 m^3	总库容/亿 m^3	单机容量/MW	机组个数/台	设计水头/m
$i=1$	57.960	102.60	300	4	110.7
$i=2$	0.184	0.88	220	6	176.0
$i=3$	0.268	2.78	135	3	34.0

表 3 火电厂基本参数
Tab. 3 Parameters of coal-fired plants

火电机组 j	煤耗系数/($t \cdot h^{-1}$)			出力极限/MW	
	a_j	b_j	c_j	P_{Gmin}	P_{Gmax}
$j=1$	0.000 175	0.11	3.0	310	570
$j=2$	0.000 230	0.15	5.0	250	425
$j=3$	0.000 116	0.07	7.0	350	700

3.2 优化结果分析

各约束违背值及火电发电燃料消耗量如图 1 所

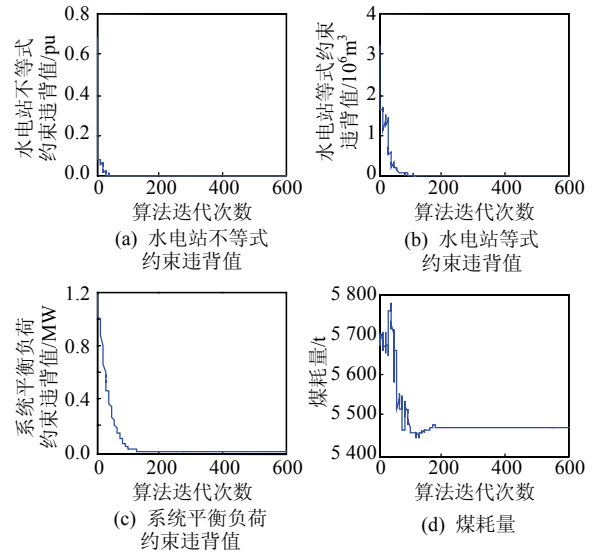


图 1 约束违背及火电燃料耗量
Fig. 1 Constraint violations and fuel consumptions for coal-fired plants

示。由图 1 可知，各约束违背值在迭代过程中下降速度比较明显，且在迭代 200 代后违背值基本为 0，所有约束条件均得到了较好满足，火电发电燃料消耗量由 5 878.926 t 减少到 5 476.753 t。当遗传算法运行到约 200 代时，火电发电燃料消耗量变化已经比较小，而约束违背值也在允许范围内，因此遗传算法运行到约 200 代时即可得到较好的水火电联合发电调度策略。

水火电联合发电优化问题追求火电机组不可再生能源消耗量最小、可再生能源高效利用的目标，即实现节能发电的目的，水火电联合发电理论上要求火电出力主要承担基荷，而水电出力主要进行调峰。图 2 为 $\omega=0.7$ 时系统负荷、火电机组及水电站的总出力。由图 2 可知，火电出力变化幅度较大，这是由于受本文所建模型，火电机组最小出力约束条件，水电站的初始蓄水水位、末期蓄水水位以及来水量等约束条件的限制所致，因此火电机组也需要参与调峰，从而使得火电机组出力曲线变

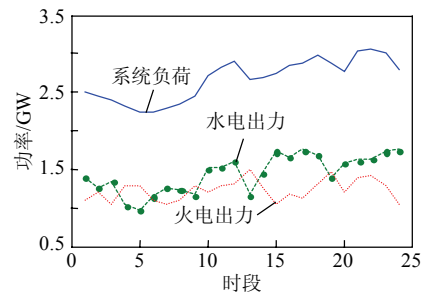


图 2 系统负荷、火电机组总出力及水电站总出力
Fig. 2 Load demand, total output of coal-fired plants and hydroelectric plants

化幅度较大。由式(3)可知，忽略网损情况下水电站及火电机组出力之和刚好等于系统总负荷，图2中火电机组及水电站总出力之和与系统总负荷相等，系统功率平衡约束条件得到了较好满足。

表4为 $\omega=0.7$ 且迭代次数为600时梯级水电站在各个时段出力及火电机组的时段出力情况。

表4 水电站和火电机组各时段出力

Tab. 4 Power output of generating units in hydroelectric plants and coal-fired plants

小时	水电站 <i>i</i> 出力/MW			火电机组 <i>j</i> 出力/MW		
	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>j</i> =1	<i>j</i> =2	<i>j</i> =3
1	366.3	602.490	151.40	358.0	365.60	663.30
2	357.8	904.260	64.88	468.8	281.50	385.60
3	801.5	86.200	120.90	401.8	326.25	646.40
4	317.5	777.670	173.30	336.4	257.30	445.80
5	639.3	129.730	160.60	396.9	416.40	497.30
6	562.1	484.350	116.10	363.2	289.00	418.40
7	875.4	265.930	108.80	380.6	271.30	379.90
8	434.0	717.450	58.78	407.3	347.40	371.90
9	932.5	416.170	97.22	323.9	275.30	389.00
10	1018	57.505	206.10	550.2	405.60	464.60
11	804.5	713.760	167.00	388.0	356.00	384.80
12	1140.0	169.800	156.30	472.4	260.40	693.30
13	572.3	875.500	172.30	352.1	289.90	397.70
14	859.9	658.100	80.34	379.0	262.90	458.70
15	687.6	727.200	215.60	370.8	318.40	433.20
16	925.3	540.000	142.30	541.4	278.50	421.50
17	744.6	586.100	260.80	404.2	401.20	468.30
18	378.8	1145.600	80.74	333.5	419.90	620.28
19	1110.0	520.600	85.75	467.4	319.30	364.80
20	361.2	1069.100	88.39	540.2	326.50	383.40
21	752.2	668.400	324.00	479.4	406.70	387.60
22	946.4	734.500	90.37	356.1	354.80	579.81
23	687.6	971.390	171.70	329.9	269.10	562.80
24	477.0	836.200	259.80	332.5	272.10	411.00

DEA法要求输入最小、输出最大，且各变量取非负值， θ 无符号限制。然而本文目标函数中要求火电机组煤耗量最小(即输出最小)，则该目标函数不符合DEA法输入最小、输出最大的要求。因此求解煤耗量最小目标函数时将式(14)两边乘以-1(即 $\sum(-\lambda_j Y_j) \leq -Y_0$)，将求解输出最小转化为求解输出最大。但此时式(14)不等式两边存在负数，违背了DEA模型的变量系数为正数的要求。为此本文采用指数法将DEA模型中两边存在负数的不等式进行转化(即 $\sum e^{-\lambda_j Y_j} \leq e^{-Y_0}$)，以达到DEA模型要求。多目标优化结果如表5所示。

由表5可知，决策方案的DEA评估值越大，则该方案中所有优化目标的综合协调性越好，但由于决策者对优化目标的偏好不同，因此决策者并不一定选择协调性最好的决策作为最终决策，其可根

表5 多目标优化结果

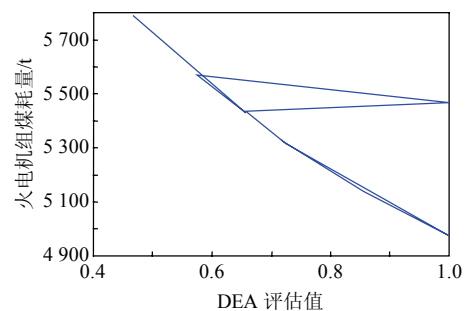
Tab. 5 Optimization results for multi-objective problems

决策方案	权重系数取值	发电量 f_1 /(MW·h)	煤耗量 f_2 /t	DEA评估值
1	0.1	32 963.7	5 787.0	0.468 17
2	0.2	34 681.0	5 428.5	0.658 53
3	0.3	34 032.2	5 570.2	0.574 97
4	0.4	34 500.5	5 467.2	1.000 00
5	0.5	34 666.0	5 432.4	0.656 76
6	0.6	35 083.0	5 314.2	0.725 78
7	0.7	36 675.6	4 972.6	1.000 00
8	0.8	35 817.8	5 138.4	0.855 93
9	0.9	35 021.6	5 321.9	0.720 25
10	1.0	35 162.2	5 326.3	0.718 15

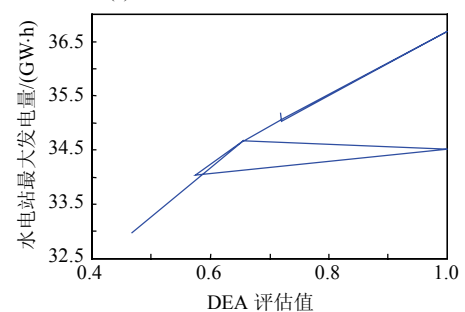
据自身偏好选择综合协调性较好同时又有利于自身追求目标实现的决策作为最终决策。

遗传算法的随机性使目标函数优化结果在一定范围内存在一定误差，因此可通过多次运行程序使决策方案逐步趋于决策者希望的结果。如决策者要在DEA评估值大于0.9的决策方案中选取最终方案，且决策者追求发电量最大，则可选择方案7作为最终调度方案；若决策者追求发电成本最小，则仍可选择方案7作为优化调度最终方案。

图3给出了水电发电量、煤耗量与DEA评估值的关系曲线。理论上DEA评估值越大对应的目标函数值越大，但由图3可知，2曲线具有非线性特性，水电发电量、煤耗量与DEA评估值并非一一对应关系，某DEA值有可能对应多个水电发电



(a) 水电发电量与DEA评估值的关系



(b) 煤耗量与DEA评估值的关系

图3 水电发电量、煤耗量与DEA评估值的关系
Fig. 3 Relations between power generation, coal consumption and DEA values

量和煤耗量。因此不能从单一的 DEA 评估值或目标函数值中选取合适方案,而要根据优化结果选择综合协调性较好同时有利于自身追求目标实现的决策作为最终决策方案。

4 结论

遗传算法对优化模型无连续性、光滑性及凸性要求,适于求解具有复杂约束条件的非线性优化问题;DEA 法简单易行,能够有效评估输入和输出之间的效率关系。本文采用遗传算法与 DEA 法融合的混合算法求解水火电力系统优化调度多目标优化模型,可为决策者提供多种选择方案,根据决策者偏好挑选出符合实际情况的最优方案。

参考文献

- [1] 哈比比, 余贻鑫. 一种新的水火电力系统优化潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 37-45.
Alhabib Binkou, Yu Yixin. A novel formulation of optimal hydrothermal power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 37-45(in Chinese).
- [2] 吴至复, 曾鸣, 刘宝华, 等. 电力市场中的水火电优化调度模型及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 45-49.
Wu Zhifu, Zeng Ming, Liu Baohua, et al. An optimum dispatching model of hydro-thermal power system in market environment and its application[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 45-49(in Chinese).
- [3] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 基于水火电置换的发电权调节市场[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 131-136.
Wang Yanling, Zhang Lizi, Yang Yihan. Adjusting market of generation rights based on hydro-thermal exchange[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 131-136(in Chinese).
- [4] 马瑞, 贺仁睦, 颜宏文, 等. 考虑水火协调的多目标优化分段竞标模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 53-57.
Ma Rui, He Renmu, Yan Hongwen, et al. A novel multi-objective optimal group and block bidding model for hydrothermal power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 53-57(in Chinese).
- [5] Farooqi M R, Jain P, Niazi K R. Using Hopfield neural network for economic dispatch of power systems[C]//IEEE Trans on National Power and Energy Conference, Bangi, Malaysia: IEEE, 2003: 31-35.
- [6] Lowery P G. Generating unit commitment by dynamic programming[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1986, 10(2): 891-897.
- [7] Khodr H M, Gómez J F, Barnique L, et al. A linear programming methodology for the optimization of electric power-generation schemes[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 864-869.
- [8] 甘应爱, 田丰, 李维铮, 等. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 1-466.
- [9] Wei H, Sasaki H, Kubokawa J, et al. Largescale hydrothermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear programming [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 396-403.
- [10] 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 Youlin, Zhou Jianzhong, Qin Hui, et al. Short-term scheduling optimization for hydro-thermal power systems based on adaptive hybrid differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 32-36(in Chinese).
- [11] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
Guo Zhuangzhi, Wu Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40(in Chinese).
- [12] 苏鹏, 刘天琪, 赵国波, 等. 基于改进粒子群算法的节能调度下多目标负荷最优分配[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 48-53.
Su Peng, Liu Tianqi, Zhao Guobo, et al. An improved particle swarm optimization based multi-objective load dispatch under energy conservation dispatching[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 48-53(in Chinese).
- [13] Wu Y G, Ho C Y, Wang D Y. A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydrothermal system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1268-1274.
- [14] 陈华根, 吴健生, 王家林. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 802-805.
Chen Huagen, Wu Jiansheng, Wang Jialin. Simulated annealing algorithm mechanism research[J]. Tongji University: Natural Science Edition, 2004, 32(6): 802-805(in Chinese).
- [15] 伍永刚, 王定一. 基于遗传算法的梯级水电厂自动发电控制算法研究[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 35-38.
Wu Yonggang, Wang Dingyi. A genetic algorithm based automatic generation control for cascaded hydroelectric stations[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 35-38(in Chinese).
- [16] 杨俊杰, 周建中, 吴玮, 等. 改进粒子群优化算法在负荷经济分配中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 1-4.
Yang Junjie, Zhou Jianzhong, Wu Wei, et al. Application of improved particle swarm optimization in economic dispatching[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 1-4(in Chinese).
- [17] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-107.
- [18] 吴文江. 数据包络分析及其应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002: 64-128.
- [19] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1-64.
- [20] 王小安, 周建中, 王慧, 等. 遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用[J]. 计算机仿真, 2003, 20(10): 120-122.
Wang Xiaohan, Zhou Jianzhong, Wang Hui, et al. The research and application for cascaded hydroelectric short-term optimized scheduling-based on genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2003, 20(10): 120-122(in Chinese).
- [21] Arakawa M, Nakayama H, Hagiwara I, et al. Multiobjective optimization using adaptive range genetic algorithms with data envelopment analysis[C]//A Collection of Technical Papers on Seventh Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (TP98-4970). Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998: 2074-2082.



吴杰康

收稿日期: 2010-07-23。

作者简介:

吴杰康(1965), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与分析, E-mail: wujiekang@163.com;

唐利涛(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析。

(编辑 徐梅)