

文章编号:1007-6735(2013)05-0469-06

基于混合智能算法的电力系统经济调度优化模型研究

宋文字¹, 袁光辉², 蒋 艳²

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 宜昌 443002; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在以电力系统的发电总燃料量、氮氧化物排放量和电价等3个因素为目标函数,以系统有功平衡、系统正负备用、输出功率以及输出功率上升速率等相关约束条件的基础上建立了电力系统经济调度的加权优化模型.同时,在综合了粒子群-人工鱼群算法的基础上构建了混合智能算法.最后,用10个机组所组成的火电厂的优化调度问题作为案例,采用混合算法进行求解及结果分析,以说明电力系统经济调度加权优化模型的有效性以及综合智能算法的收敛性和稳定性.

关键词: 电力系统; 经济调度; 加权优化模型; 混合智能算法

中图分类号: O 224 **文献标志码:** A

Economic Dispatch Weighted Optimization Model of Power System Based on Hybrid Intelligent Algorithm

SONG Wen-yu¹, YUAN Guang-hui², JIANG Yan²(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An economic dispatch weighted optimization model of power system was set up, considering the power generation of the total amount of fuel, nitrogen oxides emissions and electricity prices as objective functions and considering the system energy balance, system plus or minus standby, output power and increasing rate of output power as constraint conditions. Furthermore, a hybrid intelligent algorithm was designed based on particle swarm-artificial fish swarm algorithm. A scheduling problem of thermal power plants of 10 units was simulated to demonstrate the effectiveness of the weighted optimization model, and the convergence and stability of the hybrid intelligent algorithm.

Key words: power system; economic dispatch; weighted optimization model; hybrid intelligent algorithm

电力系统调度的中心任务是在保证电网安全、发电量满足需求等因素的情况下,尽可能地使发电费用

降低,电力系统调度模型及其算法的研究是一个具有较强应用背景的重要课题.为保证各发电企业公平竞

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 上海市一流学科(系统科学)建设资助项目(XTKX2012);上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1302)

第一作者: 宋文字(1992-),女,本科.研究方向:电力系统调度与优化算法研究. E-mail: anne_602@163.com

通讯作者: 蒋 艳(1962-),女,副教授.研究方向:复杂系统建模、决策与优化. E-mail: ppjyan@usst.edu.cn

争及实时经济调度,其调度原则、方案应模型化.

电力市场下的经济调度是保证电力市场稳定、有序运行的关键问题之一.经典经济调度是指系统中参加运行的机组已经预先确定的情况下,系统的发电容量大于负荷需求时,将负荷优化分配给各发电机组,达到全系统的燃料消耗量或发电费用最小.采用经济调度方法进行电力调度的确能为电力系统节省很多发电费用,因此经典经济调度得到了广泛的应用.与此同时,各种电力系统调度模型得到了发展,当前各国电力公司采用的实时优化调度程序多数是基于经典经济调度的数学模型,也已经提出了许多优化模型和算法^[1-4].本文提出以煤耗量、污染排放量以及购电费用最小为目标的加权经济调度优化模型,并结合粒子群-人工鱼群算法进行优化计算.实证研究表明:粒子群-人工鱼群算法具有良好的稳定性,其计算结果及收敛性等都比单独使用粒子群算法或人工鱼群算法更优.

1 电力系统网络优化调度模型设计

本文提出以煤耗量、污染排放量以及购电费用最小为目标的加权经济调度优化模型.该模型考虑的约束条件有节点潮流平衡、系统有功平衡、系统正、负备用约束、线路输送容量约束、机组输出功率约束、节点电压约束、机组输出功率上升速率约束、机组最小运行和最小停机时间约束等因素.

已知某电网系统中的发电机组为 m 台,时段数为 T (T 的取值一般为 24, 48, 96), G 为一个机组 24 时段发电量的随机向量, $P_{Gi}(t)$ 为第 i 号机组在时段 t 的输出功率(即上网电量).

1.1 目标函数的确定

a. 发电总燃料量目标函数

用 $f_1(G)$ 表示该电网系统发电总燃料量的目标函数,则 $f_1(G)$ 可表示为

$$f_1(G) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m [a_i P_{Gi}^2(t) + b_i P_{Gi}(t) + c_i] \quad (1)$$

式中, a_i, b_i, c_i 为表征消耗量曲线特性的常系数.

b. 氮氧化物排放量目标函数

用 $f_2(G)$ 表示该电网系统氮氧化物排放量的目标函数,则 $f_2(G)$ 可表示为

$$f_2(G) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m [u_i P_{Gi}^2(t) + v_i P_{Gi}(t) + w_i] \quad (2)$$

$$\mu(f_i(G)) = \begin{cases} 1, & f_i(G) < f_{i,\min} \\ \frac{f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} - f_i(G)}{\beta_i f_{i,\min}}, & f_{i,\min} \leq f_i(G) \leq f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} \quad (i = 1, 2, 3) \\ 0, & f_i(G) > f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中, u_i, v_i, w_i 为表征此二次曲线特性的常系数.

c. 电网购电费用目标函数

用 $f_3(G)$ 表示该电网系统电网购电费用的目标函数,则 $f_3(G)$ 可表示为

$$f_3(G) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m [P_{Gi}(t) \rho_{Gi}(t)] \quad (3)$$

式中, $\rho_{Gi}(t)$ 为各机组在时段 t 的上网电价,可表示为

$$\rho_{Gi}(t) = \max_{1 \leq i \leq N_G} \{h(P_{Gi}(t)) S_{it}\} \quad (4)$$

其中, N_G 为系统注册机组数目, $h(P_{Gi}(t))$ 为第 i 台机组 t 时段的报价函数, S_{it} 为第 i 台机组 t 时段的运行标志量,满足

$$S_{it} = \begin{cases} 1 & \text{当时段 } t \text{ 机组 } i \text{ 运行时} \\ 0 & \text{当时段 } t \text{ 机组 } i \text{ 停机时} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 约束条件的确定

a. 系统有功平衡

设 $P_d(t), P_{rc}(t)$ 分别为时段 t 时的系统总需求和网络有功总损耗,则系统的有功平衡需满足

$$\sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi}(t) S_{it}) = P_d(t) + P_{rc}(t) \quad (6)$$

b. 系统正、负备用约束

设 $P_{i,\max}, P_{i,\min}$ 分别为机组 i 最大、最小输出功率; R_t^+, R_t^- 分别为系统正、负备用率,则系统的正、负备用需满足

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi,\max}(t) S_{it}) \geq P_d(t)(1 + R_t^+) \\ \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi,\min}(t) S_{it}) \geq P_d(t)(1 + R_t^-) \end{cases} \quad (7)$$

c. 机组输出功率约束

对于机组 i ,其输出功率需满足

$$P_{Gi,\min}(t) \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi,\max}(t) \quad (8)$$

d. 机组输出功率上升速率约束

设 D_i^-, D_i^+ 分别为机组 i 在一个时段内出力的下降、增加幅度,则机组输出功率上升速率需满足

$$P_{Gi}(t-1) - D_i^- \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}(t-1) + D_i^+ \quad (9)$$

1.3 综合加权优化调度模型

对于第 i 个目标函数 $f_i(G)$, 设 $f_{i,\min}$ 为第 i 个目标的最优解,满足 $f_{i,\min} > 0$; β_i 为第 i 个目标的弹性程度,其弹性区间为 $(-\infty, f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min})$,则目标函数 $f_i(G)$ 的转换函数 $\mu(f_i(G))$ 为

$$\mu(f_i(G)) = \begin{cases} 1, & f_i(G) < f_{i,\min} \\ \frac{f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} - f_i(G)}{\beta_i f_{i,\min}}, & f_{i,\min} \leq f_i(G) \leq f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} \quad (i = 1, 2, 3) \\ 0, & f_i(G) > f_{i,\min} + \beta_i f_{i,\min} \end{cases} \quad (10)$$

通过该转换函数,电力系统的综合加权优化调度模型可表示为

$$\begin{aligned} \min & [\alpha_1 \mu(f_1(\mathbf{G})) + \alpha_2 \mu(f_2(\mathbf{G})) + \alpha_3 \mu(f_3(\mathbf{G}))] \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi}(t) S_{it}) - P_d(t) - P_{rc}(t) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi, \max}(t) S_{it}) \geq P_d(t)(1 + R_{t^+}) \\ \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi, \min}(t) S_{it}) \leq P_d(t)(1 + R_{t^-}) \\ P_{Gi, \min}(t) \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi, \max}(t) \\ P_{Gi}(t-1) - D_{i^-} \leq P_{Gi}(t) \leq \\ P_{Gi}(t-1) + D_{i^+} \\ 0 \leq t \leq T, S_{it} \in (0,1), i = 1,2,\dots,N_G \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

其中, α_i 为各目标函数相对重要性的权系数,满足

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, i = 1,2,3, \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1.$$

2 混合智能算法设计

求解电力系统的经济调度问题,计算方法的选取尤为重要.虽然单个的智能优化算法及其改进算法可以解决电力系统调度问题,但不能很好地解决其缺点,为此,很多学者尝试将不同的优化算法相混合^[5-8].

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是 Kennedy 和 Eberhart 受人工生命研究结果的启发,通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法,它与其它进化算法一样,是基于“种群”和“进化”的概念,通过个体间的协作与竞争,实现复杂空间最优解的搜索.同时,PSO 又不像其它进化算法那样对个体进行交叉、变异、选择等进化算子操作,而是将群体(swarm)中的个体看作是在 D 维搜索空间中无质量和体积的粒子(particle),每个粒子以一定的速度在解空间运动,并向自身历史最佳位置和邻域历史最佳位置聚集,实现对候选解的进化. PSO 算法具有易理解、参数少、容易实现等优点,对非线性、多峰问题均具有较强的全局搜索能力,在科学研究与工程实践中得到了广泛关注^[9-10].

人工鱼群算法是由李晓磊、邵之江、钱积新等于 2002 年提出的一种新的群智能优化算法^[11].它采用了自上而下的寻优模式去模仿自然界鱼群的觅食行为,主要利用鱼的觅食、聚群和追尾现象,构造个体的底层行为,通过鱼群中各个体的局部寻优,达到全局最优值在群体中凸现的目的.

人工鱼群算法与粒子群算法都是以研究生物群体行为为基础,主要来源于人工生命和演化计算理

论.研究表明:人工鱼群算法具有较好的收敛性,但寻找最优解时,具有较高的时间复杂性,不利于高维数问题的求解;而粒子群算法则通过模拟鸟群集体的协作使群体达到最优,但仅通过更新位置和速度来不断进化到全局最优解,可调参数少,无需梯度信息,因此常造成结果早熟,从而常常无法收敛到全局最优.本文通过将两种算法的结合使用,以获得较高效的且结果优秀的收敛算法.

2.1 算法原理

假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个粒子组成一个群落,其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量: $\mathbf{X}_i = \{x_{ij}\}, i = 1,2,\dots,D$.

第 i 个粒子的“飞行”速度也是一个 D 维的向量,记为: $\mathbf{V}_i = \{v_{ij}\}, i = 1,2,\dots,N; j = 1,2,\dots,D$.

第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置称为个体极值向量,记为: $\mathbf{P}_{\text{best}} = \{p_{ij}\}, i = 1,2,\dots,N; j = 1,2,\dots,D$.

整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为全局极值,为一个 D 维的全局最优向量,记为: $\mathbf{G}_{\text{best}} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}) = \{p_{gj}\}, j = 1,2,\dots,D$.

在找到这全局极值和个体极值时,粒子根据如下的式(12)和式(13)来更新自己的速度和位置,即

$$v_{ij} = wv_{ij} + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}) + c_2 r_2 (p_{gj} - x_{ij}) \quad (12)$$

$$x_{ij} = x_{ij} + v_{ij} \quad (13)$$

其中, w 为惯性系数; c_1 和 c_2 为学习因子,也称加速常数(acceleration constant); r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 范围内的均匀随机数. 根据经验,通常 $c_1 = c_2 = 2$, w 在 $[0.5,1]$ 中取值. $i = 1,2,\dots,D$. v_{id} 是粒子的速度,设 $v_{\max}$ 是常数,则 $v_{id} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$,由用户设定用来限制粒子的速度. r_1 和 r_2 是介于 $[0,1]$ 之间的随机数.

在以上变换完之后,根据 AF_{prey_1} 或 AF_{prey_2} 变换粒子所在位置. 变换后速度和位置如式(12)和式(14)所示,即

$$x_{id} = \alpha x_{id} + \beta (AF_{\text{prey}_1} \text{ or } AF_{\text{prey}_2}) \quad (14)$$

其中, α 和 β 为位置转换权重 ($\alpha + \beta = 1$),使用该权重主要是避免粒子群的早熟或局部最优解. 该权重在变化时, α 的值为增函数.

2.2 基于混合智能算法的综合加权综合调度模型的算法设计

电力系统调度问题主要是根据约束条件,开始随机生成一群智能粒子,并根据目标函数值对问题进行评价,随后进行智能粒子的值的变更粒子群—人工鱼群算法. 对于式(11)所示的综合加权综合调度模型,其算法流程设计如下页图 1 所示.

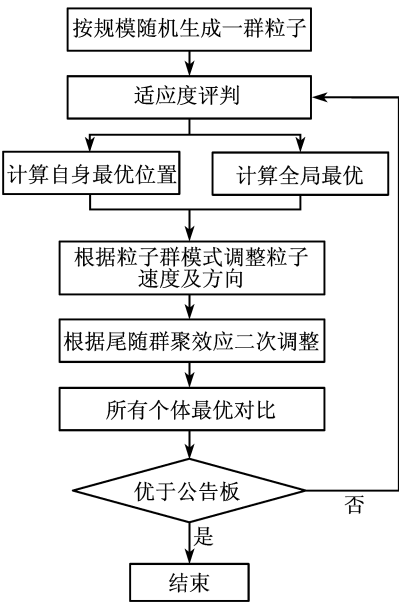


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

3 基于混合算法的电力系统优化调度模型算例

在针对电力系统调度问题建立动态经济调度模型后,同时针对粒子群和人工鱼群求解该问题的困难所在,提出了粒子群-人工鱼群算法来求解这一问题.通过对综合粒子群算法和人工鱼群算法所得到的混合智能算法进行编程计算,可求解由10个火

电竞争商所组成的电力系统调度问题.采用由10个火电竞争商所组成的电力系统进行调度模拟,在文中求解过程中智能粒子群使用200,50,30的3组种群规模进行计算.初始位置及初始速度随机生成.

对于一个包括10个火电竞争商的电网系统,每一个竞争商等值为一台机组.为简化计算,在一日内各时段采用相同的上网电价,未计及网损,时段数选为24,取 $\beta=0.2$.采用本文所述方法,使用种群量为200,50,30的3个种群计算,并对结果进行对比.算例系统参数及各时段的用电需求见表1和表2^[12].

在种群规模为200时,通过粒子群-人工鱼群算法对10个机组,24时段问题进行求解.其中污染量、煤耗量及总购电费用收敛分别如图2所示.

基于种群规模为200,50和30时各项指标计算结果及用时比较见表3和表4.

从计算结果可以看出种群规模越小计算时间越短,但是当种群规模小于20时计算结果的稳定性变差,故该算法的种群规模宜选在25~50之间.通过3种种群规模量的计算结果比较可得:种群规模为50和30的结果优于种群规模为200的情况,且种群规模为50和30时结果的波动不超过10%.故在使用粒子群-人工鱼群算法时,种群规模不宜过大.种群规模为200时计算时间大约为45 min;而种群规模为50时计算时间约为11 min;种群规模为30时,计算时间约为8 min.由此种群规模不宜过大.

表1 算例系统参数

Tab.1 System parameters of the example

编号	煤耗量系数			氮氧化物排放量系数			输出功率极限/MW	
	a_i	b_i	c_i	u_i	v_i	w_i	$P_{Gi,min}$	$P_{Gi,max}$
1	0.216 0	3	6.490	-5.554	4.091	150	470	0.000 43
2	0.210 5	5	5.638	-6.047	2.543	135	460	0.000 63
3	0.208 1	7	4.586	-5.094	4.257	73	340	0.000 39
4	0.239 0	3	3.380	-3.550	5.326	60	300	0.000 70
5	0.216 2	5	4.586	-5.094	4.258	73	600	0.000 79
6	0.178 1	4	6.490	-5.554	4.091	57	570	0.000 56
7	0.165 1	6	5.638	-6.047	2.543	20	700	0.002 11
8	0.232 3	5	4.586	-5.094	4.257	47	425	0.004 80
9	0.195 8	3	3.380	-3.550	5.326	20	660	0.109 08
10	0.225 4	4	4.586	-5.094	4.258	55	610	0.009 51

表2 24时段需要的负荷量

Tab.2 Amount of load required for 24 time periods

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负荷量/MW	1 306	1 510	1 258	1 406	1 480	1 628	1 036	1 510	1 258	1 048	1 628	1 306
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
负荷量/MW	1 510	1 258	1 406	1 480	1 628	1 036	1 510	1 258	1 048	1 628	1 306	1 510

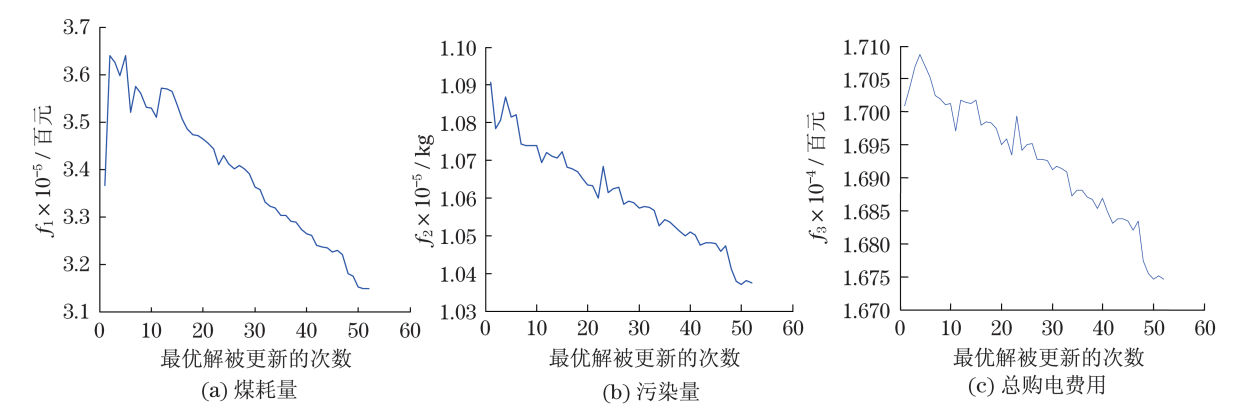


图 2 煤耗量、污染量及总购电费用收敛图

Fig.2 Coal consumption ,convergence figure of pollution and totally cost

表 3 种群规模为不同时的各项指标计算结果比较
Tab.3 Results comparison of the indicators for different population size

指标	200	50	30
f_1 /百元	313 054.491 0	284 132.216 0	292 211.612 0
f_2 /kg	103 982.056 2	108 203.284 0	109 212.136 0
f_3 /百元	16 754.790 0	16 534.280 0	16 521.560 0

通过对种群规模为 200,50 和 30 的 3 组结果的对比分析,得到最优调度方案如表 5 所示.在这组数

据求解时,通过粒子群算法求解 7 次才收敛得到最优解,而人工鱼群算法求解时间更长.应用粒子群-人工鱼群算法进行 3 次计算,计算结果趋于稳定,其计算结果可信,算法设计合理.

表 4 种群规模为 200,50,30 时种群规模计算耗时比较
Tab.4 Calculation time-consuming of population size 200,50,30

种群大小	200	50	30
计算耗时/min	45	11	8

表 5 在表 2 负荷情况下最优调度方案
Tab.5 Optimal scheduling scheme under load in table 2

时段	各机组最优输出功率/MW									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	318.159 3	309.116 7	203.706 0	171.325 7	338.371 1	300.794 5	349.914 6	253.563 7	284.480 7	326.695 5
2	297.628 9	302.503 3	192.299 8	184.447 2	332.002 2	307.752 5	358.162 1	205.452 6	285.634 4	339.739 2
3	290.035 4	302.757 4	189.185 2	165.497 8	354.769 5	311.484 7	366.312 0	208.075 2	238.168 9	350.071 4
4	284.656 5	286.763 5	213.659 7	167.660 6	318.466 2	312.730 6	339.055 6	243.067 7	271.438 4	338.391 4
5	312.148 2	299.237 7	196.714 9	186.730 9	320.762 0	336.782 0	319.205 6	240.974 5	291.609 6	307.598 5
6	310.224 5	297.848 4	190.980 9	180.950 8	290.573 5	307.040 5	345.279 7	238.430 3	298.039 4	330.440 4
7	281.557 1	289.812 5	200.111 3	188.877 8	306.971 7	313.515 9	368.593 2	231.235 3	308.434 1	297.121 7
8	284.023 3	287.143 5	196.844 5	175.024 5	321.918 0	279.495 1	366.730 4	236.191 8	305.264 6	324.507 6
9	288.876 7	279.113 6	214.694 5	168.742 4	303.625 4	279.236 8	349.060 1	236.327 9	312.494 6	333.037 8
10	315.482 6	268.590 6	200.263 4	167.410 0	304.435 2	301.400 3	339.502 1	244.434 8	290.762 4	325.509 9
11	314.886 1	271.633 7	196.720 1	180.954 1	339.061 2	311.359 7	316.294 9	234.513 1	298.293 7	302.388 5
12	316.333 2	284.257 4	197.699 9	179.357 9	328.081 3	263.631 9	327.514 9	218.915 8	308.922 7	322.271 8
13	291.994 3	281.454 2	191.290 5	188.969 0	345.494 9	300.021 1	301.396 9	211.255 6	294.859 8	328.147 8
14	310.886 9	281.583 0	211.590 2	175.731 8	333.951 6	292.846 6	315.904 9	226.141 4	274.550 6	320.707 6
15	287.307 5	302.938 0	190.346 4	188.760 2	300.145 9	271.203 5	330.819 8	220.161 0	301.109 9	321.120 1
16	282.613 5	271.702 2	208.711 2	170.042 9	296.101 9	310.519 5	360.669 8	235.775 9	261.172 9	326.311 6
17	311.198 9	287.709 0	195.069 3	164.867 7	335.337 8	309.074 8	366.467 6	215.422 9	297.598 7	327.032 1
18	331.778 5	288.421 2	208.913 2	183.936 6	330.371 7	316.424 3	342.838 8	225.223 2	255.634 8	319.004 3
19	307.549 4	274.078 1	212.227 8	166.833 8	348.233 9	288.214 8	342.200 5	237.805 5	288.391 8	289.686 4
20	313.260 5	294.276 6	200.435 6	169.794 7	319.377 9	288.119 6	356.440 5	245.807 5	253.092 0	322.037 5
21	286.256 2	274.927 0	206.921 2	185.239 6	309.005 0	329.935 2	356.580 5	230.291 1	302.272 2	311.288 2
22	305.245 9	291.829 2	201.866 4	191.532 6	347.533 7	315.256 0	383.286 2	251.013 4	257.462 5	314.758 1
23	322.121 1	313.136 6	204.768 5	189.458 2	340.044 0	311.613 1	381.884 6	214.739 9	295.964 6	309.439 1
24	296.165 1	309.931 9	204.290 3	177.603 6	302.667 8	319.661 1	374.834 8	216.859 8	324.925 8	287.430 4

注:在表中 1 个时段代表 1 个小时,即表中是以每 1 个小时为 1 个计算时段的.

4 结 论

针对当前电力市场研究领域,同时考虑多个目标情况下的不同时段负荷分配问题,提出对各个目标设置不同权重,运用最大满意度的思想来求解多目标经济优化问题.在此基础上,针对当前电力系统调度问题求解较难等提出了粒子群-人工鱼群算法.根据计算结果的比较,发现人工鱼群-粒子群算法在计算时间上有明显优势.多次试验的结果证明了该算法具有良好的收敛性和稳定性.

由人工鱼群-粒子群算法构成的混合智能算法能够大大提高计算效率,对于解决目前在求解最优潮流问题时常常遇到的诸如计算量大、计算速度慢、无法在较短的时间内完成优化计算等问题有很大帮助,故在计算电力系统调度问题中能够得到广泛应用.在实际应用中,可以根据当时当地的情况,动态地调整各个目标对应的权系数,继而动态地分配各机组的出力,已达到利用资源和设备的最佳组合来获得系统最大利润的目的.

参考文献:

- [1] 吴杰康,唐力.含不确定性负荷的水火电力系统随机优化调度[J].中国电机工程学报,2012,32(28):36-42.
- [2] 张志刚,马光文.基于NSGA-II算法的多目标水电站群优化调度模型研究[J].水力发电学报,2010,29(1):213-218.

- [3] 田廓.基于混沌例子优化-情景约简算法的混合电力系统机组组合模型及其求解[J].电网技术,2013,37(4):1020-1024.
- [4] 温丽丽,刘俊勇.混合系统中长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J].电力系统保护与控制,2008,36(24):24-29.
- [5] 郝玉国,张靖,于尔铿,等.最优潮流实用化研究[J].中国电机工程学报,1996,16(6):388-391.
- [6] Garnier S, Gautrais J, Theraulaz G. The biological principles of swarm intelligence [J]. Swarm Intelligence,2007,30(1):3-31.
- [7] 马慧民,叶春明,张爽.二进制改进粒子群算法在背包问题中的应用[J].上海理工大学学报,2006,28(1):31-34.
- [8] 马慧民,吴勇,叶春明.车辆路径问题的并行粒子群算法研究[J].上海理工大学学报,2007,29(5):435-439.
- [9] 王万良,唐宇.微粒群算法的研究现状与展望[J].浙江工业大学学报,2007,35(2):136-141.
- [10] Banks A, Vincent J, Anyakoha C. A review of particle swarm optimization, Part I: background and development [J]. Natural Computing,2007,45(6):467-484.
- [11] 李晓磊,邵之江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J].系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38.
- [12] 毛弋,刘文春,张鹏飞.利用模糊算法对电力市场下纯火电系统多目标综合经济负荷进行分配[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(6):22-29.

(编辑:丁红艺)

(上接第468页)

4 结束语

利用着色Petri网中颜色集的优势简化了生产调度模型,利用CPN Tools建模仿真软件对生产调度过程以及A星算法实例建模,使得基于A星算法的生产调度研究能够在统一的着色Petri网平台上进行,克服了跨平台研究的不便.

参考文献:

- [1] 刘长平,叶春明.求解置换流水车间调度问题的布谷鸟算法[J].上海理工大学学报,2013,35(1):17-20.
- [2] 傅家旗,叶春明,赵伟民.混合量子算法在生产调度中的应用[J].上海理工大学学报,2009,31(6):557-561.
- [3] 马正元,王伟玲,王玉生.生产调度问题的系统研究[J].成组技术与生产现代化,2005,22(1):10-14.
- [4] 徐俊刚,戴国忠,王宏安.生产调度理论和方法研究综

- 述[J].计算机研究与发展,2004,41(2):257-267.
- [5] 王国新,宁汝新,王爱民.基于仿真的生产调度优化技术研究[J].计算机集成制造系统,2007,13(7):1419-1427.
- [6] 郝东,蒋昌俊,林琳.基于Petri网与GA算法的FMS调度优化[J].计算机学报,2005,28(2):201-208.
- [7] 周卫东,杨加敏,贾磊,等.一种Petri网结合遗传算法的优化方法及应用[J].山东大学学报(工学版),2005,35(4):59-63.
- [8] 薛雷,郝跃.基于Petri网的启发式生产调度[J].自动化学报,2002,28(5):827-831.
- [9] 江志斌.Petri网及其在制造系统建模与控制中的应用[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [10] Jensen K. Colored Petri nets: a high-level language for system design and analysis [J]. Computer Science, 1991(483):342-416.
- [11] 蔡自兴.人工智能及其应用 [M].北京:清华大学出版社,2007.

(编辑:石 瑛)