



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.030

罗京蕾, 黄显峰, 方国华. 电力市场交易背景下水电站优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 184-188. LUO Jing lei, HUANG Xiar feng, FANG Guo hua. Study on optimal operation of hydropower station in the background of electricity market transaction model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 184-188. (in Chinese)

电力市场交易背景下水电站优化调度研究

罗京蕾, 黄显峰, 方国华

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 电力市场交易是影响我国未来电力体制改革走向的重要落地措施之一。通过对电力市场交易背景下水电站优化调度特点分析, 构建了分时电价下水电站优化调度模型。在粒子群算法基础上, 提出了改进惯性因子、加速因子以及迭代速度的改进策略, 并将其运用于模型求解, 以广东省梅州市青溪水电站为实例进行了研究, 验证了模型和算法的有效性和适用性, 该研究成果为电力市场背景下的水电站优化调度提供了新思路。

关键词: 电力市场; 水电站调度; 粒子群算法; 改进粒子群算法; 分时电价

中图分类号: TV 697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0184-05

Study on optimal operation of hydropower station in the background of electricity market transaction model

LUO Jing lei, HUANG Xiar feng, FANG Guo hua

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Electric power market transaction is one of the important measures for the reform of the electric power system in China. In this paper, the characteristics of the optimal reservoir scheduling in the electric power market transaction model were analyzed, and the optimal operation model of the reservoir was established. Based on the standard particle swarm optimization, the improved particle swarm optimization algorithm was proposed, which was based on the improvement of the inertia factor, the acceleration factor and the iteration speed. Taking Qingxi Reservoir, which locates in Meizhou City, Guangdong Province, as an example, the validity and applicability of the model and algorithm were verified. This research provides a new idea for reservoir optimization scheduling in the background of electric power market.

Key words: power market; hydropower station dispatching; particle swarm optimization algorithm; improved particle swarm optimization algorithm; peak and off peak electricity price

随着我国电力市场改革的推进和电力系统规模的日益复杂, 电力行业正在逐步落实市场机制, 水电作为电力系统的重要组成部分也必将按照“公平、公正、公开”的原则参与市场竞争^[1-2]。传统的发电计划是基于全信息的调度决策, 其目标函数是全网的总发电成本最小, 而在电力市场背景下, 把电能真正

视为商品来看待, 电价和电量均存在不确定性, 电能交易中心根据各电站申报发电容量及价格进行市场出清计算, 公布市场出清价格和中标容量, 水电站不再只接受调度命令被动发电, 而要参与市场交易, 随着“竞价上网”政策的试行, 以及水电站自身运行负荷需求的变化, 水电站在电力市场环境下如何建立

收稿日期: 2015-12-08 修回日期: 2016-04-07 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.1506.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279047); 江苏省自然科学基金(BK20130849); 江苏省水利科技项目(2014064)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51279047); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20130849); Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province(2014064)

作者简介: 罗京蕾(1992), 女, 江苏扬州人, 主要从事水库优化调度方面研究。E-mail: 936537525@qq.com

通讯作者: 黄显峰(1980), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 主要从事水资源规划与水库优化调度方面研究。E-mail: hxhhuang2005@163.com

符合电网运行规则、水库调度规律,并遵循电力市场交易的新模式,使发电效益最大,是水电站优化调度运行的一个研究新方向^[3,6]。

国外的电力市场主要是为了适应政治改革以及能源工业改革的需求,英国电力市场改革的成功令各国看到了市场体制的巨大潜力,进入2000年后,拉美各国、美国、欧盟、亚洲国家等都在尝试电力市场化改革。国外在电力市场水电站调度研究方面取得一些成果:2008年Vicuna考虑了峰谷电价对水库调度的影响,2009年Madani和Lund深入探讨了每小时电价的不同对每月水力发电的收益产生的影响^[7]。在借鉴国外电力市场水电站调度经验基础上,国内在水电站调度方面研究也取得了一些成果:2012年冯权龙和张玉惠提出了在丰枯分时电价条件下水电站水库长期优化调度模型,在实际运用中取得了显著效果,为水电站在分时电价下调度奠定基础。2014年李佳、王黎、马光文等人研究了电力市场交易环境下的水电站年度发电计划制定问题^[8]。

本文在传统水电站调度模型上增加价格影响因素,以发电经济效益最大为目标函数,并考虑一些约束条件,构建了考虑丰枯分时电价的水电站优化调度模型并求解。对于优化调度模型求解方法,目前已提出动态规划、遗传算法及蚁群算法等优化算法,但这些算法存在维数灾、计算时间长、处理约束复杂等问题。粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)具有原理简单、收敛速度快且通用性强等优点,已经在水库调度中得到广泛应用^[9,11],但其也存在容易陷入局部最优解的缺点,故本文在基本粒子群算法上对其加以改进,提高了算法的计算精度和收敛速度,最后以青溪水电站为实例进行研究。

1 水电站优化调度模型构建

在一价制下,水电站效益最大其实就是发电量最大,而在电力市场交易背景下,由于存在着分时电价差,发电量最大并不意味着效益最大,在此背景下构建考虑电价因素的水电站优化调度模型^[12,16]。

(1) 目标函数。

$$F = \text{Max} \sum_i^T (A \cdot Q_i \cdot H_i \cdot T_i) \quad (1)$$

在分时上网电价 $B_i, i = 1, 2, \dots, T$ 给定的前提下,水电站年收益决定于年内所有时段电价与上网电量的乘积之和,即最优化的目标为:

$$M = \text{Max} \sum_i^T (A \cdot Q_i \cdot H_i \cdot T_i \cdot B_i) \quad (2)$$

式中: A 为电站出力系数; Q_i 为电站第 i 时段引水流

量(m^3/s); H_i 为电站第 i 时段平均发电净水头(m); T 为水电站调度年内计算总时段(本文中计算时段为月, $T = 12$); T_i 为电站第 i 时段的发电小时数; B_i 为分时上网电价; M 为 T 个时段的发电总效益。

(2) 约束条件。

a. 水量平衡约束。

$$V_i = V_{i-1} + Q_{\text{入}} - Q_{\text{放}} - ZF_i - L_i \quad (3)$$

式中: V_i 为水库第 i 时段末的蓄水量(m^3); V_{i-1} 为水库第 i 时段初的蓄水量(m^3); $Q_{\text{入}}$ 为水库第 i 时段入库水量(m^3); $Q_{\text{放}}$ 为水库第 i 时段放水量(m^3); ZF_i 为第 i 时段蒸发水量(m^3); L_i 为第 i 时段渗漏损失水量(m^3)。

b. 库容限制约束。

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \quad (4)$$

式中: $V_{i, \min}$ 为水库 i 时段允许最小蓄水量(m^3); $V_{i, \max}$ 为水库 i 时段允许最大蓄水量(m^3)。

c. 发电引水流量限制约束。

$$Q_{i, \min} \leq Q_i \leq Q_{i, \max} \quad (5)$$

式中: $Q_{i, \min}$ 为 i 时段水库保证最小引水流量(m^3/s); $Q_{i, \max}$ 为 i 时段最大允许引水流量(m^3/s)。

d. 电站出力约束。

$$N_{i, \min} \leq A Q_i H_i \leq N_{i, \max} \quad (6)$$

式中: $N_{i, \min}$ 为水电站允许最小出力限制,一般为保证出力(kW); $N_{i, \max}$ 为允许的最大出力,一般为装机容量(kW);

e. 电价约束。

$$B = \begin{cases} B_f \\ B_p \\ B_k \end{cases} \quad (7)$$

式中:本文中只考虑将丰枯电价分为三个时段, B_f 为丰水期电价(元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)); B_p 为平水期电价(元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)); B_k 为枯水期电价(元/($\text{kW} \cdot \text{h}$))。

f. 所有参数均非负。

2 改进粒子群优化算法

2.1 粒子群算法原理

PSO 算法是一种源于对鸟类飞行进行研究的集群智能优化算法,在 D 维目标空间中,有 N 个粒子组成的群体,其中第 i 个粒子的位置为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$,飞行速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$,当其迭代到第 h 次时的最优位置为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{id})$,整个粒子群迭代到第 h 时最优位置为 $P_{gd} = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd})$,其基本公式如下:

$$v_{id}^{(k+1)} = w v_{id}^{(k)} + c_1 r_1^{(k)} (P_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2^{(k)} (P_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \quad (8)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \quad (9)$$

式中: c_1, c_2 为加速系数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; ω 为惯性因子, 是控制速度的权重。

2.2 粒子群算法改进策略

(1) Clerc 和 Kennedy 提出一种采用压缩因子的 PSO 算法, 这种调整方法通过合适选取参数, 可以确保 PSO 算法的收敛性^[17]。

$$x_{id}^{(k+1)} = \chi \{ \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 [P_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}] + c_2 r_2 [P_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}] \}$$

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (10)$$

式中: χ 为压缩因子。

一般情况下将 ω 的初始值取 0.9 并使其随迭代次数的增大递减至 0.4, 惯性因子 ω 的选择这样的取值首先是为了侧重于全局搜索使搜索空间快速收敛到某个特定的区域, 然后再采用局部精细搜索来获得更高精度的解^[18], 采用进化因子 f 来调节权重的变化, 具体公式如下:

$$\omega(f) = \frac{1}{1 + 1.5e^{-2.0f}} \in [0.4, 0.9], \forall f \in [0, 1] \quad (11)$$

为保证算法的顺利求解, $c_1 + c_2$ 必须大于 4, 在本文中 c_1, c_2 采用公式(12)进行计算。

$$c_i = \frac{C_i}{c_1 + c_2} \times 4.0, i = 1, 2, c_1, c_2 \in [1.5, 2.5] \quad (12)$$

(2) 将粒子群算法与遗传算法中的自然选择原理相结合, 得到基于自然选择的粒子群算法, 在迭代过程中将整个粒子群按照适应值大小进行排序, 用适应值好的一半粒子的位置和速度替换适应值较差的一半粒子并保留每个个体的历史最优值^[19]。

结合上述策略, 改进粒子群算法具体计算步骤见图 1。

经过多次演算, 改进粒子群算法参数设置: $\omega = 0.9, c_1 = c_2 = 2$, 种群数量为 50, 迭代 2 000 次, 测试 20 次取平均值, 利用优化中常用的 Rastrigin、DeJong、Sphere、Griewank、Rosenbrock 测试函数对基本粒子群、卡尔曼群、改进粒子群算法进行测试^[20], 计算结果见表 1。

由表 1 结果可看出, 改进粒子群算法计算结果更加接近于极值点, 搜索精度更高, 迭代速度更快, 充分证明其优越性。

3 实例研究

青溪水电站位于广东大浦镇, 距离大浦县城 40 公里, 是韩江支流至汀江干流上的第二个梯级水电站, 坝址以上的流域面积为 9157 km², 装机容量为

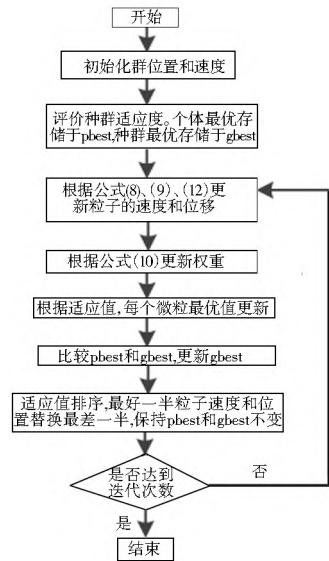


图 1 改进粒子群算法计算步骤

Fig. 1 Flow chart of the improved particle swarm optimization algorithm

表 1 测试结果

Tab. 1 Test results

算法	Rastrigin	DeJong	Sphere	Griewank	Rosenbrock
基本粒子群算法	1.07E+02	4.35E+02	3.70E+02	2.61E+07	1.39E+01
卡尔曼群	5.33E+01	4.61E+00	4.72E+00	3.28E+03	9.96E-01
改进粒子群算法	7.91E+00	1.29E-02	1.90E-01	1.75E-01	6.88E-01

144 MW, 保证出力为 11.91 MW, 正常高水位为 73.0 m, 兴利库容为 6 008 万 m³, 死水位 69.0 m, 死库容为 4 280 万 m³, 多年平均径流量为 87.4 亿 m³, 多年平均降雨量为 1 600 mm, 多年平均入库流量为 277 m³/s, 此水库主要承担任务是发电, 不承担下游的防洪, 为日调节水库。

利用 1951 年 4 月- 2012 年 3 月共 62 年的青溪水电站天然径流及其年径流计算结果, 选择丰水年 ($P = 25\%$)、平水年 ($P = 50\%$)、枯水年 ($P = 75\%$) 三个典型频率的水文年份, 分别为 2010 年、2005 年、2003 年, 被选定的水文年天然径流量见图 2。

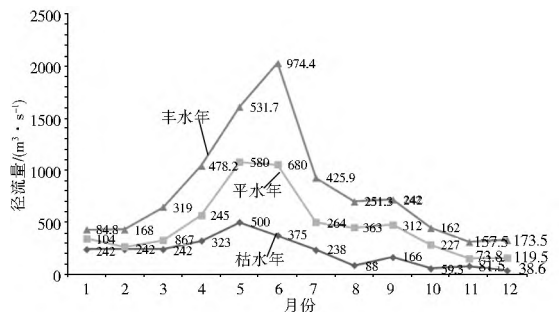


图 2 典型水文年天然径流

Fig. 2 Natural runoff of typical hydrological year

电力市场交易背景下受市场波动以及水电站自身运行负荷的变化, 电价随之变化, 但目前我国还不具备实行实时电价的条件, 不同时段电价变化多样计算复杂, 为了方便计算, 本文对电价进行简化, 将一价制电价作为平水期电价, 为 0.35 元/(kW·h), 丰水期电价下浮 25%, 即

0.26 元/(kW·h), 枯水期电价上浮 50%, 即 0.53 元/(kW·h), 以青溪水电站为实例进行计算, 改进粒子群算法与基本粒子群算法求得年收益对比见表 2, 各典型年数据在不同计价方式下用改进粒子群算法计算得出年发电效益, 具体结果见表 3。

表 2 不同算法年收益对比

Tab. 2 Annual income comparison table of different algorithms

计算方法	一价制下的收入/ 亿元			丰枯电价下的收入/ 亿元		
	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年
基本粒子群算法	2.803	2.756	3.280	2.838	3.301	3.793
改进的粒子群算法	2.814	2.766	3.284	2.855	3.312	3.799

表 3 典型水文年年发电效益

Tab. 3 Table of typical annual hydrological electricity generation benefits

月份	发电量(万 MW·h)			一价制下的收入/ 亿元			丰枯电价下的收入/ 亿元		
	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年
4	8.64	8.69	8.69	0.30	0.30	0.30	0.22	0.23	0.23
5	8.69	8.69	8.69	0.30	0.30	0.30	0.23	0.23	0.23
6	8.69	8.69	8.69	0.30	0.30	0.30	0.23	0.23	0.23
7	8.69	8.69	8.69	0.30	0.30	0.30	0.23	0.46	0.30
8	3.90	8.69	8.69	0.14	0.30	0.30	0.21	0.46	0.30
9	7.31	8.69	8.69	0.26	0.30	0.30	0.39	0.46	0.30
10	2.64	8.69	7.13	0.09	0.30	0.25	0.14	0.46	0.38
11	3.62	3.28	6.94	0.13	0.11	0.24	0.19	0.17	0.37
12	2.14	5.28	7.63	0.07	0.18	0.27	0.11	0.28	0.40
1	8.69	4.60	3.76	0.30	0.16	0.13	0.30	0.16	0.20
2	8.69	1.38	7.51	0.30	0.05	0.26	0.30	0.05	0.40
3	8.69	3.65	8.69	0.30	0.13	0.30	0.30	0.13	0.46
总计	80.41	79.04	93.83	2.81	2.77	3.28	2.85	3.31	3.80

由表 2 分析可知, 对于不同典型水文年, 改进的粒子群算法无论在一价制下还是在丰枯分时电价下的年收益都比基本粒子群的年收益大, 由此进一步证明了本文中改进的粒子群算法在模型求解中具有优势。

采用改进的粒子群算法进行计算, 对表 3 中三种情况进行对比分析, 丰枯分时电价下枯水年收益为 2.85 亿元, 平水年为 3.31 亿元, 丰水年为 3.80 亿元, 在一价制下的年收益分别是枯水年为 2.81 亿元, 平水年为 2.77 亿元, 丰水年为 3.28 亿元, 各典型年在分时电价下的发电效益明显高于一价制下的发电效益, 枯水年发电效益增加了 1.42%, 平水年发电效益增加了 19.49%, 丰水年发电效益增加了 15.85%。由上述分析可知考虑电价因素的年发电效益明显优于单纯以发电量最大为目标的发电效益, 因此在电力市场交易背景下, 水电站优化调度工作不能只考虑水量因素, 还需考虑电价因素, 从市场需求及水电站自身负荷能力出发, 按照丰谷上网电

价浮动政策对水库调度运行, 以取得较大经济效益。

结合图 2 和表 3, 对每一典型年份数据分析, 一价制下收益只与发电量相关, 丰水期发电收益高, 枯水期发电收益低, 而电力市场背景下发电收益不完全依据发电量而变化, 丰水期电价低, 枯水期电价高有利于促进充分利用丰水期电量, 从而在一定时期内让电力负荷均匀分布, 通过丰枯分时电价有效的避免水库在丰水期损失大量的弃水电量, 减少水库在枯水期的调峰机组投资。

4 结语

(1) 传统以发电量最大为目标的水电站调度准则已不再适应电力系统市场化改革的趋势, 实行市场电价指导下以发电效益最大为目标的水电站调度成为解决问题的重要措施。

(2) 本文针对我国电力交易市场的实际情况, 构建了考虑丰枯分时电价的水电站优化调度模型, 并

采用改进的粒子群算法对模型进行求解,结果表明分时电价能够达到提高水电站经济效益以及使水资源优化配置的目的,并验证了算法的有效性和适用性。

(3) 本文还存在许多不足之处,在今后的研究中,可深入探索在电力市场背景下如何使水电站出力最小,厂内机组如何经济运行,以及如何实现实时电价等问题,使得市场背景下的水电站调度更加细化,更适应于调度的实际操作,节约发电成本。

参考文献(References):

- [1] 中国投资咨询网. 2006 年中国水电行业分析及投资咨询报告 [EB/OL]. <http://wxdbc.com/newshow.asp?id=130,2006-11-18>. (China Investment Advisory Network. Analysis of China's hydropower industry and investment consultation report in 2006[EB/OL]. <http://wxdbc.com/newshow.asp?id=130,2006-11-18>. (in Chinese))
- [2] 过夏明. 分时电价下多年调节水库年末消落水位研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 27-30. (GU O Xia ming. Study on the regulation of water level of the reservoir at the end of the year by the time of the sub price[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(3): 27-30. (in Chinese))
- [3] 罗云霞, 王万良, 周慕逊. 基于自适应粒子群算法的梯级小水电群优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 7-11. (LUO Yur xia, WANG Warr liang, ZHOU Mur xun. Research on the optimal operation of cascade hydropower station that based on adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 7-11. (in Chinese))
- [4] 马莉, 李英, 刘毓全, 等. 水电参与电力市场竞价的若干问题探讨[J], 电力技术经济 2006, 18(4): 11-14. (MA Li, LI Ying, LIU Yur quan, et al. Research on some problems of hydropower participation in electricity market bidding[J]. Electric Power Technology Economy, 2006, 18(4) 11-14. (in Chinese))
- [5] 姚建刚. 区域电力市场竞价交易结构与模式的探讨[J], 电力系统自动化, 2003(22): 23-26. (YAO Jian gang. Discussion on the structure and mode of regional electricity market bidding[J], Power System Automation, 2003(22): 23-26. (in Chinese))
- [6] 方国华, 吴三潮. 电力市场环境下水电竞价策略研究[J] 水电能源科学, 2009, 27(4): 222-224. (FANG Guo hua, WU Sar chao. Research on bidding strategy of hydropower in power market environmen[J] Hydroelectric Energy Science, 2009, 27(4): 222-224. (in Chinese))
- [7] Silvio J. Pereira Cardenal, Birger Mo, Niels D. Riegels, Karsten Arnbjerg Nielsen, et al. Optimization of Multipurpose Reservoir Systems Using Power Market Models[J]. Water Resour. Plann. Manage., 2015, 141(8): 04014100
- [8] 郑斌, 王秀丽, 王锡凡. 电价的竞价机制及转运电价[J]. 华东电力, 2000(9): 1-3. (JIA Bin, WANG Xir li, WANG Xir fan. The price bidding mechanism and transfer price[J]. East China Electric Power, 2000(9): 1-3. (in Chinese))
- [9] 陈烨兴, 罗云霞, 周慕逊. 弹性粒子群优化算法及其在水电优化调度中的应用[J] 河海大学学报, 2010, 38(6): 604-607. (CHEN Ye xing, LU O Yur xia, ZHOU Mur xun. Resilient particle swarm optimization algorithm and its application in hydropower optimal scheduling of applications[J] Journal of Hohai University, 2010, 38(6): 604-607. (in Chinese))
- [10] 张智晟, 董存, 吴新振. 基于量子粒子群优化算法的水电系统经济运行[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 68-72. (ZHANG Zhi sheng, DONG Cun, WU Xir zhen. The economic operation of hydropower system based on quantum particle swarm optimization [J]. Grid technology, 2009, 33(18): 68-72. (in Chinese))
- [11] Robert F. Cope III, David E. Dismukes and Rachelle F. Cope. Modeling Regional Electric Power Markets and Market Power. managerial and decision economics. Manage. Decis. Econ. 2001(22): 411-429.
- [12] 王蕊, 王丽萍, 姜生斌, 等. 西北电网水电参与市场化运营若干问题的研究[J], 水力发电 2007, 33(5): 7-9. (WANG Rui, WANG Li ping, JIANG Sheng bin, et al. Research on the market operation of hydropower in the Northwest China Power Grid[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 33(5): 7-9. (in Chinese))
- [13] 李帅, 蒋传文. 考虑电价风险的水电站长期优化调度及风险评估[J]. 水电能源科学, 2007, 25(3): 13-15. (LI Shuai, JIANG Chuarr wen. The long term optimal scheduling and risk assessment of hydropower station considering the risk of electricity price[J]. Hydropower Energy Science, 25, 2007(3): 15-13. (in Chinese))
- [14] 练继建, 马超. 市场竞价下梯级水电站短期优化调度研究[J] 水力发电学报, 2007, 26(4): 17-21. (LIAN Ji jian, MA Chao. Market bidding under short term optimal dispatching of cascade hydropower station[J] Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 17-21. (in Chinese))
- [15] 康庆重, 白利超, 夏清, 等. 电力市场中发电商的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 8, 24(8): 1-6. (KANG Qing chong, BAI Li chao, XIA Qing, et al. Risk decision making of power market in the power market[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2004, 8, 24(8): 1-6. (in Chinese))
- [16] Wen Fushuan, David A K. Optimal co-ordinated bidding strategies in energy and ancillary service markets[J]. IEEE Proc Gener. transm, 2002, 149(3): 333-338.
- [17] Krohling, R A, L. dos Santos Coelho, Co-evolutionary particle swarm optimization using Gaussian distribution for solving constrained optimization problems. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern., vol. 36, no. 6, pp. 1407-1416, Dec. 2006.
- [18] Ho S Y, Lin H S, W H, Liah S J, OPPO: Orthogonal particle swarm optimization and its application to task assignment problems. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans, vol. 38, no. 2, pp. 288-298, Mar. 2008.
- [19] 董前进, 曹广晶, 王先甲, 等. 粒子群优化算法在水文科学中的应用进展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(1): 80-84. (DONG Qian jin, CAO Guang jing, WANG Xian jia, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in hydrology science[J]. Chinese Engineering Science, 2010, 12(1): 80-84. (in Chinese))
- [20] LI L X, PENG H P, WANG X D, et al. An optimization method inspired by chaotic ant behavior[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2006, (16): 2351-2364.