

Joint Operation of Cascade Reservoirs' Hydropower Generation in the Upper Yantze River Reach^{*}

Jianzhong Zhou, Qingqing Mu, Yu Feng, Yongchuan Zhang

School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan
Email: jz.zhou@hust.edu.cn

Received: Dec. 3rd, 2012; revised: Dec. 13th, 2012; accepted: Dec. 29th, 2012

Abstract: Along with the Jinsha River downstream cascade built and put into operation, the comprehensive control pattern of the Yangtze River valley cascade reservoirs will be changed, and the original single power station has been difficult to conventional power generation scheduling scheme optimum. So Joint Operation of Hydropower Generation for multi-reservoir of Upper Yangtze River in China was studied in this paper. Choosing maximum hydropower generation as objective function under the considering firm power, a optimal model were established for joint operation of Upper Yangtze River, the model was solved by improved particle swarm optimization. The result shows that compared with the conventional dispatching the joint optimal dispatching of six reservoirs could Sends more electricity, creating better economic benefits, satisfying the demand of power system load better, and improving Water resources utilization effectively; and compared with the individual operation of three Gorges cascade, the power generation of three Gorges cascade increases 25.41 kWh, growing rate run at 3.05%. The compensation benefit of the Three Gorges cascade is significant.

Keywords: Jinsha River Downstream Cascade; Three Gorges Cascade; Particle Swarm Optimization; Optimal Dispatching; Benefit Analysis

长江上游梯级水库联合发电调度研究^{*}

周建中, 穆青青, 冯宇, 张勇传

华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉
Email: jz.zhou@hust.edu.cn

收稿日期: 2012年12月3日; 修回日期: 2012年12月13日; 录用日期: 2012年12月29日

摘要: 随着金沙江下游梯级水库的相继建成和投运, 将逐渐改变长江流域梯级水库综合调度格局, 原有的单个电站常规发电调度方案已难以达到全局最优。由此, 针对长江上游水库群联合发电调度问题, 提出以发电量最大为目标且兼顾保证出力要求的长江上游六库联合发电优化调度模型, 并采用改进粒子群优化算法进行求解。结果表明: 在均满足保证出力的情况下, 六库联合优化调度方案比常规调度方案发电量大, 不仅能够获得较好的发电效益, 有效提高水能资源利用率, 而且联合调度后, 已投入生产的三峡梯级可增发电量 25.41 亿千瓦时, 新增效益 3.05%, 由此可见, 六库电站联合运行对三峡梯级的电量补偿效益巨大。

关键词: 金沙江下游梯级; 三峡梯级; 粒子群算法; 优化运行; 效益分析

^{*}基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239004), 水利部公益性行业科研专项(20100108), 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)。

作者简介: 周建中(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水电能源科学研究。

1. 引言

水电站群优化调度是水资源系统优化的核心, 合理的调度策略不仅能够有效利用水力资源, 增加经济效益, 而且能够提高供电可靠性, 保证电网的稳定运行^[1]。随着长江上游水库群的建设和投产运行, 以三峡梯级为核心的长江上游大型水利枢纽系统逐渐形成。流域水电站群联合优化调度, 不再单独追求单个电站发电量最大, 而是综合考虑整个库群的发电效益和容量效益。然而, 水库群联合发电优化调度受水文, 水库特性、电站机电特性、电网架构以及用水特性等因素影响, 其联合调度是一类高维、动态、强耦合、非线性的优化问题, 且梯级水电站间存在复杂的水力联系和电力联系, 约束条件众多, 使得梯级库群联合优化调度模型的求解成为学术和工程界研究的热点和难点问题^[2]。

针对上述问题, 国内外学者在传统求解方法基础上提出了逐步优化算法(POA)^[3]、逐次逼近动态规划法(DPSA)^[4]等。随着智能优化计算的发展, 智能优化算法被广泛的应用于水库优化调度, 杨俊杰等^[5]提出了一种新的多目标粒子群优化(MOPSO)算法, 对三峡梯级多目标优化调度问题进行求解; 陈立华等^[6]提出了采用超立方体浮点数编码自适应遗传算法(AGA)和遗传模拟退火算法(SA-GA), 在水库群联合优化调度中取得较好的应用; 周建中等^[7]提出多目标混合粒子群算法以求解梯级水电站多目标联合优化调度模型。黎育红等^[8]提出了混沌粒子群微分进化算法(CPSO-DE), 建立了基于 CPSO-DE 算法的水库优化调度数学模型与求解算法, 并以某水库为例验证了该算法的可行性与有效性。但上述研究多局限于单个水库或梯级水库单独运行情景, 未充分考虑流域梯级水库群联合运行的整体效益, 目前有关三峡梯级与金沙江下游梯级联合发电调度的研究工作较少。随着金沙江下游四个大型水利枢纽的相继建成和投运, 亟需开展金沙江

下游四库与三峡梯级联合发电调度的研究。

为此, 本文选取金沙江下游四库梯级与三峡梯级为研究对象, 考虑流域梯级水库群联合调度过程的不同约束条件, 提出了以发电量最大为目标且兼顾保证出力要求的长江上游六库联合发电优化调度模型, 采用自适应惯性权重粒子群优化算法对模型进行优化求解, 分析梯级联合调度对三峡梯级的电力和效益补偿, 并将联合优化调度的结果与联合常规调度结果进行比较分析。

2. 研究背景

位于长江上游的金沙江流域, 具有径流丰沛稳定、河道落差大、水能资源丰富、开发条件好等特点, 是我国最大的水电基地, 尤其是金沙江下游, 也是近年来我国水电能源开发的重心。金沙江下游河段起于攀枝花, 止于宜宾, 河道长度 782 千米, 水位落差 729 米, 依次兴建向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩等四座大型水电站, 开发的任务主要是发电、防洪、航运和水土保持等, 规划总装机容量为 4116 万千瓦, 多年平均年发电量为 1753.6 亿千瓦时^[9]。

长江中上游六库梯级拓扑关系如图 1 所示。其中金沙江下游四库是一个完整的梯级串联水库。三峡水库上游的乌江和岷江支流汇合于长江干流, 三峡水库的入库径流则为金沙江、乌江、岷江径流以及区间入流之和。金沙江四库梯级的运行方式会很大程度的影响三峡水库的径流大小和来水时空分布。

参照《金沙江干流综合规划报告》^[10], 金沙江下游梯级水库特征参数见表 1。

3. 联合发电调度模型的建立及求解

3.1. 模型描述

梯级水库群联合运行, 不仅具有水文补偿和库容补偿效益, 而且还具有显著的电力补偿效益。在给定

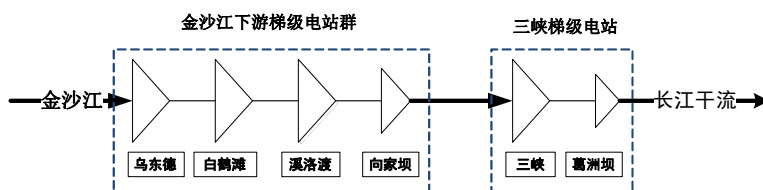


Figure 1. Topology of the six reservoirs of upper middle Yangtze River
图 1. 长江中上游六库拓扑图

Table 1. Characteristic parameters of the reservoirs in the Upper Yantze River basin
表 1. 长江上游水库特征参数

水库	正常蓄水位(m)	防洪限制水位(m)	枯季消落水位(m)	保证出力(MW)	装机容量(MW)	出力系数
乌冬德	950	930/935	920	2188.1	7400	8.70
白鹤滩	820	780/810	760	4999.4	13,200	8.70
溪洛渡	600	560	540	5382.8	14,400	8.70
向家坝	380	370	370	2634.0	7200	8.70
三峡	175	145	155	4990.0	22,400	8.54
葛洲坝	66	-	63	1040.0	2715	8.50

注: “/” 前后分别为前、后汛期防洪限制水位; 其中, 保证出力、装机容量均采用联合调度方案的参数。

控制期内确定径流过程条件下, 本文的研究以控制期内兼顾保证出力要求的梯级发电量最大为目标建立优化调度模型。

3.1.1. 目标函数

以梯级水库群在调度期内发电量最大为目标建立目标函数, 如下式:

$$\max \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T N_{t,i} \Delta t \quad (1)$$

其中

$$N_{t,i} = K_i Q_{t,i} H_{t,i} \quad (2)$$

式中: T 为调度时段数; M 为参与联合调度的水库个数; $N_{t,i}$ 为第 i 个水库第 t 时段的出力; $C_{t,i}$ 为第 i 个水库第 t 时段的电价; K_i 为第 i 个水库的综合出力系数; $Q_{t,i}$ 为第 i 个水电站第 t 时段的发电引用流量; $H_{t,i}$ 为第 i 电站第 t 时段的出力水头。

3.1.2. 约束条件

长江上游六库梯级联合发电调度模型中有诸多约束条件需要考虑, 主要包括水库的水量平衡条件, 最高水位、最低水位限制, 最大流量、最小流量限制, 出力限制等, 模型的约束描述如下:

水库间的水力联系:

$$I_{i,t} = Q_{i-1,t} + S_{i-1,t} + R_{i,t} \quad (3)$$

水库水量平衡约束:

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (I_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t}) \times \Delta t \quad (4)$$

库容约束:

$$VL_{i,t} \leq V_{i,t} \leq VU_{i,t} \quad (5)$$

流量约束:

$$QL_{i,t} \leq (Q_{i,t} + S_{i,t}) \leq QU_{i,t} \quad (6)$$

出力约束:

$$PL_{i,t} \leq A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq PU_{i,t} \quad (7)$$

式中, A_i 为第 i 水电站的综合出力系数; $Q_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水电站的发电流量; $H_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水电站的平均发电水头; $I_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水库的入库流量; $S_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水电站的弃水流量; $R_{i,t}$ 为 $i-1, i$ 水库之间的区间入流; $V_{i,t}$ 、 $VL_{i,t}$ 、 $VU_{i,t}$ 分别为 t 时段末第 i 水库的蓄水量、蓄水容量的最小值和最大值 $QL_{i,t}$ 、 $QU_{i,t}$ 分别为 t 时段第 i 水电站下泄流量的下限和上限; $PL_{i,t}$ 、 $PU_{i,t}$ 分别为 t 时段第 i 水电站的保证出力 and 装机容量; Δt 为时段长。

3.2 模型求解方法

梯级水库群联合发电优化调度是一个高维、离散的非线性优化调度问题, 约束条件众多且相互制约, 快速求解极为困难, 传统的数学方法在工程应用中受到限制, 而以粒子群优化算法为代表的智能进化算法, 由于操作简单、易实现、收敛性强而被广泛关注。为此, 本文通过自适应惯性权重将粒子群算法进行改进, 使之具有更强的全局搜索能力, 并将其应用于长江上游六库联合发电调度优化问题中, 以快速获得全局最优解。

3.2.1. 粒子群算法

1995 年, 在鸟类种群协作行为的启发下, 美国心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 提出了粒子群优化算法^[1]。粒子群优化算法的基本思路是: 问题的每一个解被称为一个微粒, 算法首先在可行解空间和速度空间初始化微粒群(初始解), 粒子的位置用于表

征问题解。 D 维搜索空间的第 i 个微粒的位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 速度表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, 经历过的历史最优位置表示为 $p = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$, 群体内所有微粒经过的最优位置表示为:

$$p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})。$$

微粒的速度和位置变换公式如下:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \varepsilon (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \theta (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (8)$$

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

其中: ω 为惯性权重因子; c_1 和 c_2 称为正的加速常数, 一般取 $c_1 = c_2 = 2$; ε 和 θ 为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数; v_{id}^k 为粒子 i 第 k 次迭代时在 D 维空间上的飞行速度。

由式(8)可知, 粒子的速度更新由以下三部分构成: 第一是粒子飞行中的惯性作用, 第二是反映微粒自我“认知”模式的影响, 第三是反映微粒“社会”模式的影响。这三部分可以使粒子既联系到当前的状态, 又可以根据自己的历史经验和微粒间的信息共享, 以此不断更新位置来搜索问题的最优解。

3.2.2. 基本粒子群算法的改进

与其它进化类算法一样, 基本粒子群算法也存在不足, 如收敛快, 导致局部搜索能力较差。因此为增强局部改良能力需对其做必要的改进, 尽量避免收敛“早熟”, 以提高搜索精度。由前文介绍知, 算法全局和局部搜索能力可以通过惯性权重因子来调整。在算法的迭代中, 通过早期采用较大惯性权重因子以提高算法全局搜索能力, 而后期则采用较小惯性权重因子以改良算法的局部精细搜索能力。因此, 本研究采用基于上述思想的自适应调整的惯性权重方法^[12], 其计算公式如下:

$$w(t) = 0.9 - \frac{k}{\max T} \cdot 0.5 \quad (10)$$

其中: k 为当前迭代次数; $\max T$ 为最大迭代次数。

3.2.3. 粒子群算法在梯级联合发电优化调度模型中的应用

为了将粒子群优化算法应用到长江上游六库联合优化调度中, 首先需要确定适应函数, 并对约束条件进行处理, 然后进行模型的求解计算。结合研究目标, 选取目标函数(1)作为适应函数。

1) 约束条件的处理

长江上游六库梯级联合调度是一类多阶段、多约束的复杂非线性优化问题, 本文选取水电站时段初坝前水位为决策变量, 运用水量平衡方程和水库特征曲线, 将梯级电站长期发电调度问题中的出力、流量等不等式约束转化为对坝前水位的约束, 并与原决策空间取交集形成水位约束廊道, 当决策变量超出廊道约束时, 直接将其置于边界上。

2) 模型求解步骤

基于改进粒子群算法的模型求解计算步骤如下:

- 对种群中粒子的位置和速度进行随机初始化;
- 由优化调度的时间维确定微粒的维数, 由式(1)计算每个微粒的适应值, 并计算每个粒子的最大发电量, 取其最优值作为局部最优 $pBest$, 在所有局部最优值中选取最大发电量作为全局最优值 $gBest$;
- 对每个微粒的当前目标值与其 $pBest$ 进行比较, 选择两者中更优结果来更新 $pBest$;
- 根据公式(8)和公式(9), 更新各个微粒的速度和位置;
- 若满足终止条件, 即达到最大搜索次数, 则输出 $gbest$ 及其目标值并停止寻优, 否则转向步骤 d)。

3.3. 研究结果分析

除金沙江来流外, 三峡水库上游还有乌江和岷江支流汇入, 而三峡梯级三峡水库与葛洲坝水库相距约 30 km 且无大的支流汇入, 故其区间入流可忽略不计。本文选取 1981 年、1987 年和 2000 年三个典型年份的长江上游历史径流作为调度模型的输入, 以月为调度步长, 运用改进粒子群算法对模型进行求解。其中, 根据文献^[13]的研究成果, 算法参数设置如下: 种群规模设定为 20, 加速常数为 $C_1 = C_2 = 2.0$ 。金沙江下游四库梯级和三峡梯级联合发电优化调度和三峡梯级单独优化调度结果如表 2 和表 3 所示。

由表 2 可知, 在均满足保证出力要求的情况下, 联合优化调度结果与常规调度结果相比, 发电量增加 40.83 亿千瓦时, 增幅 1.17%, 多年平均发电效益增加 9.90 亿元, 增幅 1.34%, 结果表明, 与常规调度方案相比, 优化调度方案增发电能, 提高了发电效益和水资源利用率; 由表 3 可知, 与三峡梯级单独优化运行相比, 六库联合优化调度使得三峡梯级增加发电量

Table 2. Result of joint optimal and conventional operation of six cascade reservoirs in the upper stream of Yantze River
表 2. 长江上游六个梯级水库联合优化调度和常规调度结果

电站	平均发电量(亿千瓦时)			平均发电效益(亿元)		
	常规	优化	增量	常规	优化	增量
乌冬德	461.51	462.55	+1.05	92.3	92.51	+0.21
白鹤滩	733.92	728.24	-5.68	146.79	145.65	-1.14
溪洛渡	736.43	748.7	+12.27	147.29	149.74	+2.45
向家坝	384.90	389.50	+4.60	76.98	77.9	+0.92
三峡	975.74	1007.84	+32.1	243.94	251.96	+8.02
葛洲坝	192.83	189.32	-3.51	30.85	30.293	-0.56
总和	3485.33	3526.16	+40.83	738.15	748.05	+9.90

Table 3. Results of the individual operation of three gorges cascade and the joint optimal of six cascade reservoirs
表 3. 三峡梯级单独与六库联合优化调度结果

三峡梯级优化运行	三峡梯级独立运行	六库联合优化运行	增量	增幅
发电量(亿千瓦时)	1161.55	1196.96	25.41	3.05%
发电效益(亿元)	272.92	282.25	9.33	3.42%

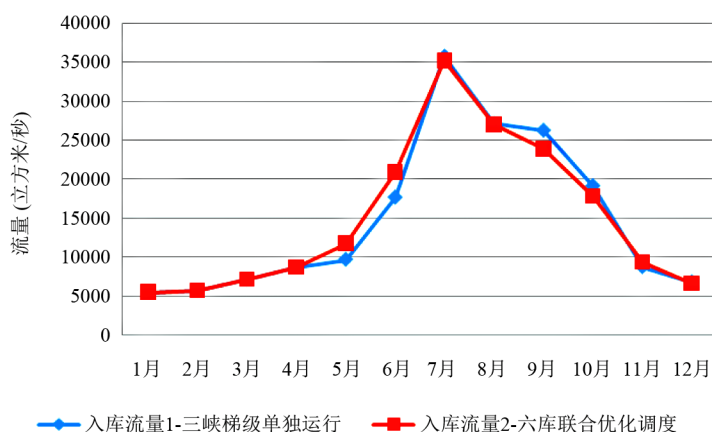


Figure 2. Comparison of inflows for the three gorges before and after six-reservoir joint operation
图 2. 六库联调前后三峡入库流量对比

25.41 亿千瓦时, 增幅 3.05%, 增加经济效益 9.33 亿元, 增幅 3.42%, 长江上游梯级联合运行对三峡梯级的电量补偿效益与经济补偿效益相当显著。

此外, 金沙江下游四库梯级投运后势必会对川江径流起到调蓄作用, 从而影响三峡梯级的运行。为此, 从三峡水库入库流量变化, 对比分析了六库联合调度前后三峡梯级调度运行的发电量与发电效益的变化。

由图 2 知, 经过金沙江下游四库的调蓄, 三峡的入库流量在汛前 4、5、6 月份和汛后 11 月份增加, 而在汛期 8、9 月份减少, 能够有效减小三峡水电站汛期的防洪压力, 减少汛期弃水, 且多余的径流分配到高水头运行期, 增加了三峡水电站的发电量。

综合以上出力结果和入库流量分析, 六库联合调度后, 三峡梯级汛期入库流量减少, 而汛前和汛后入库流量增加, 不仅减少了弃水, 而且还增加了三峡电站在高水位运行的时间, 提高了发电量, 获得了更优化的出力结果。

4. 结论

本文针对长江上游六库的流域梯级联合发电优化调度问题, 建立了以发电量最大为目标且兼顾保证出力要求的长江上游六库联合发电优化调度模型, 采用改进粒子群算法进行求解, 得到了六库梯级整体发电量最大的优化方案, 并与常规发电调度结果进行比

较, 进一步分析了六库联合优化调度对三峡梯级的补偿效益。结果表明: 在均满足保证出力要求的情况下, 六库联合优化调度方案与常规调度方案相比, 显著增加了梯级整体的总发电量, 更有效的提高了水能资源利用率, 且六库联合发电优化调度对三峡梯级具有更明显的的电力和效益补偿效果。

考虑到计算复杂度和计算时空代价等因素, 本文模型未考虑雅砻江、大渡河、乌江等支流梯级调度对六库梯级联合优化运行的影响, 考虑上述因素的流域水库群联合优化调度有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 张俊, 程春田, 廖胜利, 等. 改进粒子群优化算法在水电站群优化调度中的应用研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 435-441. ZHANG Jun, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to operation of hydropower station group. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 435-441. (in Chinese)
- [2] 覃晖, 周建中, 李英海, 等. 基于文化克隆选择算法的梯级水电站联合优化调度[J]. 系统仿真学报, 2010, 10: 2342-2346, 2362. QIN Hui, ZHOU Jianzhong, LI Yinghai, et al. Optimal dispatch of cascade hydroelectric stations based on cultured clone select algorithm. Journal of System Simulation, 2010, 10: 2342-2346, 2362. (in Chinese)
- [3] 宗航, 周建中, 张勇传, 等. POA 改进算法在梯级电站优化调度中的研究和应用[J]. 计算机工程, 2003, 29(17): 105-106, 109. ZONG Hang, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Research and application for cascaded hydroelectric optimized scheduling based on modified adaptive POA. Computer Engineering, 2003, 29(17): 105-106, 109. (in Chinese)
- [4] 邹进, 张勇传. 三峡梯级电站短期优化调度的模糊多目标动态规划[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 925-931. ZOU Jin, ZHANG Yongchuan. Short-term optimal scheduling of cascade hydropower stations using fuzzy multi-objective dynamic programming. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 925-931. (in Chinese)
- [5] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. MOPSO 算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 计算机工程, 2007, 33(18): 249-250, 264. YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, FANG Naicun, et al. Multi-objective particle swarm optimization and its application in optimal regulation of reservoir. Computer Engineering, 2007, 33(18): 249-250, 264. (in Chinese)
- [6] 陈立华, 梅亚东, 董雅洁, 等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 550-556. CHEN Lihua, ME Yadong, DONG Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 550-556. (in Chinese)
- [7] 周建中, 李英海, 肖舸, 等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1212-1219. ZHOU Jianzhong, LI Yinghai, XIAO Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1212-1219. (in Chinese)
- [8] 黎育红, 程心环, 周建中, 等. 混沌粒子群微分进化算法及其在水库发电优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011, 12: 167-171. LI Yuhong, CHENG Xinhuan, ZHOU Jianzhong, et al. Chaotic particle swarm optimization and differential evolution algorithm and its application to reservoir optimal scheduling of generation in hydropower systems. China Rural Water and Hydropower, 2011, 12: 167-171. (in Chinese)
- [9] 樊启祥. 金沙江下游水电开发环保管理与实践[J]. 环境保护, 2010, 6: 40-42. FAN Qixiang. Jinsha River downstream hydropower development environmental protection management and practice. Environmental Protection, 2010, 6: 40-42. (in Chinese)
- [10] 水利部长江水利委员会. 金沙江干流综合规划报告[R]. 武汉: 长江水利委员会, 2006. The Ministry of Water Resources of the Yangtze River Water Resources Commission. The Jinsha River comprehensive planning report. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 2006. (in Chinese)
- [11] KENNEDY, J., EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Network, Perth, 1995: 1942-1948.
- [12] SHI, Y., EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69-73.
- [13] KENNEDY, J., EBERHART, R. C. A new optimizer using particle swarm. Proceeding of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, 1995: 39-43.