

# 基于仿电磁学算法的梯级水电站 多目标短期优化调度

吴杰康, 郭壮志

(广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

## Electromagnetism-like Mechanism Based Multi-objective Short-term Optimization Scheduling for Cascade Hydro Plants

WU Jiekang, GUO Zhuangzhi

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** A novel multi-objective short-term optimization scheduling model was proposed by considering maximum power generation and the coordinability condition. A novel stochastic optimization algorithm called electromagnetism-like mechanism (ELM) was applied to solve the optimization model with complex constraints efficiently. Space reduction, self-adaptive steps and mutation strategy were also employed for improving the algorithm convergence rate. To enhance the performance of the algorithm, the recursion method was applied for reducing the dimensionality of variables. An example calculation for eight hydro-plants proved the effectiveness of the algorithm in solving the large scale optimization problems and the model in water resource distribution and enhancement of synthesis benefit of cascade hydro plants.

**KEY WORDS:** cascade hydro plant; multi-objective; short-term optimization scheduling; electromagnetism-like mechanism (ELM)

**摘要:** 在以水定电的调度策略下, 建立水电站获得单时段最佳发电效益的水头和发电流量协调条件, 以此为基础构建一

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50767001); 国家 863 高技术基金项目(2007AA04Z197); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094501110002); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划项目(RC20060808002); 广西壮族自治区教育厅科研项目(200808MS150)和广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(105930901001, 105930904068)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50767001); The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA04Z197); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20094501110002); Program for 100 Young and Middle-aged Disciplinary Leaders in Guangxi Higher Education Institutions (RC20060808002); Science and Technology Project Plan of Guangxi Education Administration (200808MS150); Innovation Project of Guangxi Graduate Education (105930901001, 105930904068).

天内梯级水电站发电量最大和发电流量正的偏差平方和最大的多目标短期优化调度模型, 并采用仿电磁学算法(electromagnetism-like mechanism, ELM)对其求解。采用自适应步长、空间缩减和变异等策略来改善仿电磁学算法的性能。通过递归策略将蓄水量、水量平衡等约束转化为由发电流量表示的约束条件, 以达到降低变量维数及提高算法效率的目的。以一个 8 级梯级水电站为例进行仿真, 结果表明仿电磁学算法可有效求解具有复杂约束的非线性优化问题, 也验证了所建模型可通过抬高水电站平均发电净水头及降低发电流量, 实现对发电量和发电用水量之间的协调, 提高梯级水电站运行的综合经济性。

**关键词:** 梯级水电站; 多目标; 短期优化调度; 仿电磁学算法

## 0 引言

水电站的梯级开发已成为水资源综合利用的一种重要途径, 理论和实践表明: 充分利用水能, 提高水能利用率, 对于合理开发和使用其他非可再生能源如燃煤资源等具有重要作用<sup>[1-5]</sup>。梯级水电站短期优化调度作为水资源管理的一种重要手段, 是在满足安全约束、水库约束和运行约束等条件下, 通过优化的方法确定水库最佳放水策略, 以实现水电站短期的经济运行。从本质上是一个具有复杂约束条件的动态非线性规划问题, 其主要涉及如何构建合理的优化调度模型和如何对其进行有效求解。目前, 围绕着调度期内发电量最大<sup>[6]</sup>、调峰效益最大<sup>[7]</sup>、蓄能最大化<sup>[8]</sup>、耗水量最小<sup>[9]</sup>及收益最大化<sup>[10-12]</sup>等, 建立了大量优化模型, 其中一些已应用到工程实践中, 提高了水电站运行的经济性。为对模型进行快速有效求解, 非线性规划<sup>[13-14]</sup>、动态规

划<sup>[15]</sup>、人工智能算法<sup>[16-19]</sup>等众多优化方法已应用到该领域。非线性规划对模型具有严格凸性要求，且在求解过程中存在着收敛速度慢、处理约束条件比较复杂等缺点；动态规划存在维数灾问题；人工智能算法由于比较适用于求解非凸、非线性规划问题，已成为研究的热点，但存在着效率不高的缺陷。

根据水能到电能的转换机制，水头和发电流量是影响水电站经济运行的 2 个重要因素，目前对如何协调水头和发电流量之间关系的研究比较少。本文在考虑水电站发电量最大的前提下，构建单时段水电站发电量最大的最优条件，确定水头和发电流量间的协调关系，以此为基础建立整个调度时段内发电量最大和发电流量正的偏差平方和最大的多目标短期优化调度数学模型。针对所建模型非凸、非线性的特点，利用仿电磁学算法(electro-magnetism-like mechanism, ELM)原理简单、鲁棒性强、求解迅速、可以有效求解非凸非线性问题及具有全局收敛性等优点，本文采用该方法对所建多目标优化模型进行求解，并对一个 8 级梯级水电系统进行仿真分析，以验证模型的正确性和算法的有效性。

## 1 水头与发电流量协调条件

设水电站总水头为  $H_Z$ ，水能到电能转换过程中的水头损失为  $\Delta H$ ，则水电站的发电净水头为

$$H = H_Z - \Delta H \quad (1)$$

对已建水电站，水头损失  $\Delta H$  主要与发电流量  $Q$  的大小有关， $Q$  越大， $\Delta H$  值就越大，它们之间呈非线性关系。若将水头损失  $\Delta H$  表示为发电流量  $Q$  的二次函数关系<sup>[20-22]</sup>，则  $\Delta H$  可表示为

$$\Delta H = a_2 Q^2 + a_1 Q + a_0 \quad (2)$$

式中  $a_2$ 、 $a_1$ 、 $a_0$  为水头损失的拟合系数。若发电总效率系数为  $\eta$ ，则水电站的出力方程为

$$P = 9.81\eta QH = 9.81\eta Q(H_Z - \Delta H) = 9.81\eta Q[H_Z - (a_2 Q^2 + a_1 Q + a_0)] \quad (3)$$

假定在单调度时段内总水头  $H_Z$  保持不变，则式(3)中仅发电流量  $Q$  为决策变量，要获得最大的机组出力，则出力  $P$  对发电流量  $Q$  的导数应为 0，即

$$\frac{dP}{dQ} = H_Z - (3a_2 Q^2 + 2a_1 Q + a_0) = 0 \quad (4)$$

式(4)即为水电站单时段出力最大时总水头  $H_Z$  和发电流量  $Q$  的最佳协调关系。由式(2)和式(4)可得到总水头  $H_Z$ 、水头损失  $\Delta H$  和发电流量  $Q$  之间的近似协调关系：

$$\Delta H = (H_Z + a_1 Q + 2a_0) / 3 \quad (5)$$

式(4)蕴含的意义为在固定总水头  $H_Z$  下，有一最佳发电流量  $Q$  与该水头相对应，使水电站获得最大机组出力，当实际发电流量小于该最佳发电流量时，由于发电流量偏小，水电站不能获得最大出力，而当实际发电流量大于该最佳发电流量时，由于水头损失  $\Delta H$  过大，水电站出力反而会减少。

水电站在整个调度时段的运行过程中，总水头  $H_Z$  总处在不断变化之中，实际应用中通常采用平均水头来表示单时段水头，若调度时段初的前池水位为  $Z_i$ ，调度时段末的前池水位为  $Z_{i+1}$ ，假定水电站尾水水位为  $Z_D$  且保持不变，则总水头  $H_Z$  可表示为

$$H_Z = Z_i + Z_{i+1} / 2 - Z_D \quad (6)$$

因此，单调度时段内可认为总水头  $H_Z$  保持不变，可将式(4)~(5)的结果作为协调条件应用到水电站的优化运行。

## 2 梯级水电站多目标短期优化策略

### 2.1 数学模型

#### 2.1.1 目标函数

在考虑水电站水库一天来水的情况下，根据以水定电的原则，充分发挥水电站发电效益，以实现调度周期内水电站发电量最大，构造的目标函数为

$$f_1 = \max \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_n} 9.81\eta_{n,l} Q'_{n,l} H'_{n,l} \quad (7)$$

式中： $N$  为梯级水电站总数； $T$  为调度时段总数； $L_n$  为水电站  $n$  的机组总数； $\eta_{n,l}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  的发电效率； $Q'_{n,l}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  在  $t$  时段的发电流量； $H'_{n,l}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  在  $t$  时段的发电净水头。

在假定单时段内水电站总水头不变的情况下，根据式(4)可确定实现单一水电站单时段发电量最大的最优发电流量。为实现水资源可持续利用，在追求整体发电效益最大的同时也要求水资源的利用最少，此时若实际的发电流量与式(4)确定的发电流量正的偏差越大，则所消耗的水资源就越小，水电站运行越经济。以此为基础建立的目标函数为

$$f_2 = \max \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_n} g'_{n,l,+} (Q'_{n,l})^2 \quad (8)$$

$$g'_{n,l,+} (Q'_{n,l}) = \max(Q'_{n,l} - Q'_{n,l}^{\text{best}}, 0) \quad (9)$$

式中： $Q'_{n,l}^{\text{best}}$  为式(4)确定的水电站  $n$  的机组  $l$  在时段  $t$  获得最大发电量的发电流量，根据式(4)得到； $g'_{n,l,+} (Q'_{n,l})$  为发电流量正的偏差量。

### 2.1.2 约束条件

#### 1) 水量平衡约束。

具有龙头水电站及具有调节能力的其他梯级水电站水量平衡约束分别为

$$V_n^{t+1} = V_n^t + q_n^t - \sum_l^{L_n} (Q_{n,l}^t) - S_n^t \quad (10)$$

$$V_n^{t+1} = V_n^t + q_n^t + \sum_l^{L_{n,u}} (Q_{n,u,l}^{t-\tau}) + S_{n,u}^{t-\tau} - \sum_l^{L_n} (Q_{n,l}^t) - S_n^t \quad (11)$$

径流式梯级水电站的水量平衡约束条件为

$$q_n^t + \sum_l^{L_{n,u}} (Q_{n,u,l}^{t-\tau}) + S_{n,u}^{t-\tau} = \sum_l^{L_n} (Q_{n,l}^t) + S_n^t \quad (12)$$

式中:  $V_n^t$ 、 $V_n^{t+1}$  分别为水电站  $n$  时段初末水库蓄水量;  $S_n^t$  为水电站  $n$  在时段  $t$  的弃水流量;  $L_{n,u}$  为水电站  $n$  上级水电站  $u$  的发电机组总数;  $Q_{n,u,l}^{t-\tau}$  为水电站  $n$  上级水电站  $u$  的机组  $l$  在  $t-\tau$  时段的发电流量;  $S_{n,u}^{t-\tau}$  为水电站  $n$  的上级水电站  $u$  在  $t-\tau$  时段的弃水流量;  $\tau$  为时滞系数。

#### 2) 机组的发电流量约束。

$$Q_{n,l}^{\min} \leq Q_{n,l}^t \leq Q_{n,l}^{\max} \quad (13)$$

式中:  $Q_{n,l}^{\min}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的发电流量下限;  $Q_{n,l}^{\max}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的发电流量上限。

#### 3) 弃水流量约束。

$$S_n^t \geq 0 \quad (14)$$

#### 4) 蓄水量约束。

$$V_n^{\min} \leq V_n^t \leq V_n^{\max} \quad (15)$$

式中:  $V_n^{\min}$  为水电站  $n$  的水库蓄水量下限;  $V_n^{\max}$  为水电站  $n$  的水库蓄水量上限。

#### 5) 机组输出功率约束。

$$p_{n,l}^{\min} \leq p_{n,l}^t \leq p_{n,l}^{\max} \quad (16)$$

式中:  $p_{n,l}^t$  为水电站  $n$  的机组  $l$  在  $t$  时段的输出功率;  $p_{n,l}^{\min}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的输出功率下限;  $p_{n,l}^{\max}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的输出功率上限。

#### 6) 水头约束。

$$H_{n,l}^{\min} \leq H_{n,l}^t \leq H_{n,l}^{\max} \quad (17)$$

式中:  $H_{n,l}^{\min}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的水头下限;  $H_{n,l}^{\max}$  为水电站  $n$  的机组  $l$  允许的水头上限。

### 2.2 蓄水量模型

调度时段初, 水库初蓄水量  $V_n^{\text{ini}}$  已知, 根据水量平衡条件, 用递归方法可得到由发电流量和弃水流量表示的任意时段  $t$  的蓄水量方程, 以达到减少变量的目的。根据式(11)得到的蓄水量模型为

$$V_n^t = V_n^{\text{ini}} + \sum_1^t q_n^t + \sum_1^t \sum_l^{L_{n,u}} (Q_{n,u,l}^{t-\tau}) + \sum_1^t S_{n,u}^{t-\tau} - \sum_1^t \sum_l^{L_n} (Q_{n,l}^t) - \sum_1^t S_n^t \quad (18)$$

### 2.3 水位模型

不考虑发电流量及下游电站对尾水水位的影响(即尾水水位不变), 前池水位  $Z_n^t$  仅和水库的蓄水量  $V_n^t$  有关, 可采用幂函数表示:

$$Z_n^t = k_0 (V_n^t)^{k_1} + k_2 \quad (19)$$

式中  $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  为水库的特征系数。

### 2.4 机组输出功率模型

根据式(3)和式(6), 机组输出功率模型为

$$P_{n,l}^t = 9.81 \eta_{n,l} Q_{n,l}^t \left( \frac{Z_n^{t-1} + Z_n^t}{2} - Z_{n,D} - \Delta H_{n,l}^t \right) \quad (20)$$

式中:  $Z_{n,D}$  为水电站  $n$  的尾水水位;  $\Delta H_{n,l}^t$  为水电站  $n$  的机组  $l$  的水头损失。

## 3 求解方法

### 3.1 仿电磁学算法

仿电磁学算法<sup>[23]</sup>是 Birbil 博士提出的一种随机全局优化算法。该算法通过模拟电荷间作用力的吸引和排斥机制, 采用记忆和回馈机制, 对解决梯级水电站短期优化调度这类大规模、带有大量约束条件、目标函数具有非凸非线性特点的优化问题比较有效, 且比较容易处理两界约束条件。求解过程中, ELM 算法将每个个体  $\mathbf{X}_k^i$  看作一个带电粒子, 其基本的粒子寻优公式为

$$\mathbf{X}_{k+1}^i = \mathbf{X}_k^i + \lambda \frac{\mathbf{F}_k^i}{\|\mathbf{F}_k^i\|} \mathbf{R} \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{F}_k^i = \sum_{j \neq i}^m \begin{cases} \frac{q_k^i q_k^j (\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i)}{\|\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i\|^2}, & f(\mathbf{X}_k^j) < f(\mathbf{X}_k^i) \\ -\frac{q_k^i q_k^j (\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i)}{\|\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i\|^2}, & f(\mathbf{X}_k^j) \geq f(\mathbf{X}_k^i) \end{cases} \quad (22)$$

$$q_k^i = \exp\left(-n \frac{f(\mathbf{X}_k^i) - f(\mathbf{X}_k^{\text{best}})}{\sum_{i=1}^m (f(\mathbf{X}_k^i) - f(\mathbf{X}_k^{\text{best}}))}\right) \quad (23)$$

$$\mathbf{R} = \begin{cases} \mathbf{X}_k^i - \mathbf{L}_k, & \mathbf{F}_k^i < 0 \\ \mathbf{U}_k - \mathbf{X}_k^i, & \mathbf{F}_k^i > 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $q_k^i$  为第  $k$  次迭代中粒子  $i$  具有的电荷值;  $m$  为种群中粒子总数;  $n$  为粒子维数;  $f(\bullet)$  为种群中粒子的评价函数;  $\mathbf{X}_k^i$  为第  $k$  次迭代中的第  $i$  个粒子;

$X_k^{\text{best}}$  为第  $k$  次迭代中评价函数值最好的粒子； $\|\bullet\|$  为向量的欧氏范数； $F_k^i$  为第  $k$  次迭代中第  $i$  个粒子的向量力； $\lambda$  为权重因子，为一 0~1 之间的随机数； $U_k$ 、 $L_k$  为变量的上下界。

### 3.2 模型转化

$f_1$ 、 $f_2$  为性质冲突的目标函数，利用权重系数将多目标转化为单目标优化问题。通过罚函数法将机组输出功率约束和蓄水量约束等融入目标函数中；对于水量平衡约束，根据式(18)直接在目标函数中消去；由于仿电磁学算法具有便于处理两界约束条件的特点，因此不对发电流量和弃水流量约束条件进行转化。 $M$  为罚系数，转化后的优化模型为

$$f = \max (1-\omega)f_1 + \omega f_2 - M \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{24} \sum_{l=1}^{L_n} [g^+(p_{n,l}^t)^2 + g^-(p_{n,l}^t)^2] + \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{24} [g^+(V_n^t)^2 + g^-(V_n^t)^2] \right\} \quad (25)$$

$$g^+(p_{n,l}^t) = \min(p_{n,l}^t - p_{n,l}^{\min}, 0) \quad (26)$$

$$g^-(p_{n,l}^t) = \max(p_{n,l}^t - p_{n,l}^{\max}, 0) \quad (27)$$

$$g^+(V_n^t) = \min(V_n^t - V_n^{\min}, 0) \quad (28)$$

$$g^-(V_n^t) = \max(V_n^t - V_n^{\max}, 0) \quad (29)$$

### 3.3 求解策略

基本 ELM 算法寻优过程中都要进行局部搜索、个体评价和粒子更新 3 个过程：局部搜索作用是找到全局最优；个体评价是为寻求最优个体；粒子更新目的是提高算法效率及找到近似全局最优解。理论上通过上述过程反复迭代可找到全局最优解，其不足之处在于局部搜索耗时随变量个数增加呈指数规律增长，对于具有高维变量的梯级水电站短期优化问题来讲，若每次都调用局部搜索程序，则将大大降低算法的效率，对基本算法进行改进的策略为：

1) 采用自适应步长策略。

利用动态迭代步长代替局部搜索。在优化阶段初期，根据搜索空间采用较大的迭代步长，一旦出现算法停滞达到设定次数，步长按一定比例缩减，文中缩减比例系数取为 0.05。

2) 搜索空间缩减策略。

搜索空间范围影响着算法的收敛速度，空间越小，越易找到最优解，耗时越短。若出现算法停滞达到规定的次数时，则进行搜索空间的缩减，若初始搜索空间为  $[Q_{\min}^k, Q_{\max}^k]$ ， $\lambda$  为比例系数，则缩减后的搜索空间可以表示为  $[Q_{\min}^{k+1}, Q_{\max}^{k+1}]$ 。

$$Q_{\min}^{k+1} = Q_{\min}^k + (Q_{\max}^k - Q_{\min}^k)\lambda \quad (30)$$

$$Q_{\max}^{k+1} = Q_{\max}^k - (Q_{\max}^k - Q_{\min}^k)\lambda \quad (31)$$

直接使用式(30)–(31)可能造成最优搜索空间的丢失，需要对上述缩减后的空间进行修正。若当前最优解为  $Q^{\text{best}}$ ，则修正搜索空间的公式为

$$\begin{cases} Q_{\min}^{k+1} = Q^{\text{best}}, & Q^{\text{best}} < Q_{\min}^{k+1} \\ Q_{\max}^{k+1} = Q^{\text{best}}, & Q^{\text{best}} > Q_{\max}^{k+1} \end{cases} \quad (32)$$

3) 变异策略。

为避免算法陷入局部最优，借鉴遗传算法变异思想，对种群个体进行变异操作。与遗传算法的变异有所不同，其变异过程为：当算法停滞达到所设定次数时产生新的正态分布种群，并以一定概率用新种群中的个体代替当前种群中差的个体。

采用改进仿电磁学算法求解梯级水电站短期优化调度问题的基本步骤为：

1) 参数初始化。设置种群规模  $N$ 、决策变量的上下限、最大迭代次数及初始迭代步长等。

2) 以梯级水电站的发电流量和弃水流量作为决策变量，利用均匀随机数及载波方法产生满足上下限约束的初始种群。

3) 计算种群中个体的评价函数值、个体电荷值及其总受力大小。

4) 利用粒子更新公式产生新的种群，并将新种群和上代种群的目标函数值进行比较，进行种群更新，保存当前代最优解。

5) 判断进化是否达到停滞代数，若已达到则进行步长的改变、变异策略和寻优空间的缩减。

6) 判断是否达到算法的终止条件，若没有，则转入步骤 3) 继续重复迭代步骤，若已满足终止条件，则输出最优解及其最终目标函数值。

## 4 算例分析

### 4.1 算例 1

采用一个 8 级梯级水电站来验证本文所提出模型和算法的有效性。表 1 所示为水电站基本参数。仿真分析时，假定水电站尾水水位不变，水电站空间独立来水量  $q_n^t$  由历史数据得到。水电站水库前池水位  $Z_n^t$  和蓄水量  $V_n^t$  之间的关系采用幂函数表示；水头损失  $\Delta H_n^t$  与发电流量  $Q_n^t$  之间的关系采用二次函数表示，为简化计算，不考虑式(2)中的系数  $a_0$  和  $a_1$ 。水电站水库的详细特征系数如表 2 所示。以一天 24 个时段为调度周期，采用 Matlab 7.0 进行编程仿真，初始种群  $N$  为 400，改变步长和缩减优化空间的停滞代数为 10，终止条件为算法连续停滞代

表1 梯级水电站基本参数  
Tab.1 Parameters of cascade hydro plants

水电站	性质	正常蓄水位/亿 m <sup>3</sup>		死水 库容/ 亿 m <sup>3</sup>	调节 库容/ 亿 m <sup>3</sup>	总库 容/ 亿 m <sup>3</sup>	单机 容量/ MW	机组 个数/ 台	设计 水头/ m	
		调节 蓄水位/ m	正常蓄 水位/ m							
一级	多年	780	83.95	731.0	25.990	57.960	102.60	300.0	4	110.7
二级	日	645	0.26	637.0	0.076	0.184	0.88	220.0	6	176.0
三级	日	440	2.11	437.5	1.842	0.268	2.78	135.0	3	34.0
四级	年	375	162.10	330.0	50.000	112.100	162.10	700.0	7	125.0
五级	季	223	26.12	212.0	16.120	10.500	33.80	302.5	4	60.8
六级	日	157	4.19	153.0	3.230	0.960	8.76	114.0	4	22.0
七级	日	125	3.40	124.0	3.353	0.047	3.40	32.0	6	9.7
八级	日	112	4.02	110.0	3.560	0.460	9.50	150.0	4	18.3

表2 水库特征系数  
Tab.2 Characteristic parameters of reservoirs

水库	k <sub>1</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>
水库1	-448.400	-0.301 70	898.20	6.20×10 <sup>-4</sup>
水库2	-7.755	-0.388 00	658.10	4.60×10 <sup>-3</sup>
水库3	425.600	0.044 77	0.00	6.31×10 <sup>-5</sup>
水库4	3.305×10 <sup>-22</sup>	9.204 00	0.00	1.42×10 <sup>-4</sup>
水库5	-225.000	-0.188 50	343.50	7.56×10 <sup>-5</sup>
水库6	-389.100	-3.489 00	159.63	2.40×10 <sup>-5</sup>
水库7	61.690	0.577 00	0.00	2.50×10 <sup>-5</sup>
水库8	91.110	0.148 30	0.00	8.00×10 <sup>-6</sup>

数达到 3 000。通过改变目标函数中的权重  $\omega$  的大小，对  $\omega=0$ 、 $\omega=0.5$  及  $\omega=1$  三种不同情况下的调度方案进行仿真分析，并从日用水量、日弃水量、日平均发电水头和日发电量 5 个方面进行比较。其中： $\omega=0$  表示以 24 个调度时段内梯级水电站发电量为优化目标； $\omega=1$  表示以发电流量与最佳发电流量的偏差平方和为优化目标； $\omega=0.5$  表示将 2 个目标函数的加权和作为优化目标。表 3 为梯级水电站的优化调度结果；图 1 为 1 天内梯级水电站动态发电净水头；图 2 为 1 天内梯级水电站动态蓄水量；图 3 为 1 天内梯级水电站时段发电量。

由表 3 可知：对于一级水电站， $\omega=0$  时的日用

水量最小，为 0.364 亿 m<sup>3</sup>， $\omega=1$  时的日用水量最大，为 0.382 亿 m<sup>3</sup>，3 种情况下的优化目标对四级和五级水电站的日用水量影响较小；其他几个梯级水电站都以  $\omega=0$  时的日用水量最大，以  $\omega=1$  时的日用水量最小。总体来说，8 个梯级水电站都是  $\omega=0$  时的总日用水量最大，为 4.579 亿 m<sup>3</sup>； $\omega=1$  时的日用水量最小，为 3.169 亿 m<sup>3</sup>。

若将 8 个梯级水电站看作一个整体，只要末级水电站不产生弃水，就可认为整个调度时段梯级水电站没有产生弃水，从这个角度上讲，3 种情况下梯级水电站都无弃水产生。对单一水电站而言，下泄流量只要没被本级水电站用来发电就认为是弃水。由表 3 可知，梯级水电站弃水主要集中在一级、二级和六级水电站， $\omega=0$  时的日弃水量最小，为 33.16m<sup>3</sup>/s， $\omega=1$  时的日弃水量最大，为 107.95m<sup>3</sup>/s。弃水产生的本质是水资源在梯级水电站间的再分配，以发电量最大作为优化目标时弃水产生的目的就是通过弃水实现水资源的再分配，以便获得最大的发电量。以发电流量正的偏差平方和作为优化目标时弃水产生的目的就是通过弃水实现水资源的再分配，以便获得最佳的用水效益。

由表 3 可知，采用发电流量正的偏差平方和作为优化目标时，可以有效地提高每个水电站在调度时段内的发电净水头，虽然当  $\omega=0.5$  时一级和八级水电站的平均日发电净水头比  $\omega=1$  时的平均日发电净水头大，但对整个梯级水电站而言， $\omega=1$  时比  $\omega=0.5$  时的发电净水头要大。如图 1 所示， $\omega=0.5$  及  $\omega=1$  时的发电净水头与  $\omega=1$  时相比得到了较大的提高。由表 3 可知，不同的目标函数对四级和五级水电站的日发电量没有影响，其他的梯级水电站都是以发电量最大作为优化目标时的日发电量最大，8 个梯级水电站总发电量以  $\omega=0$  时的日发电量最大，为 0.77 亿 kW·h，其单位用水的电量为 0.168 kW·h；

表3 梯级水电站优化结果  
Tab.3 Optimization results of cascade hydro plants

水电站	日用水量/亿 m <sup>3</sup>			日弃水量/(m <sup>3</sup> /s)			日平均水头/m			日发电量/亿 kW·h		
	$\omega=0$	$\omega=0.5$	$\omega=1$	$\omega=0$	$\omega=0.5$	$\omega=1$	$\omega=0$	$\omega=0.5$	$\omega=1$	$\omega=0$	$\omega=0.5$	$\omega=1$
一级	0.364	0.374	0.382	1.76	22.25	36.76	155.7	158.5	158.1	0.130	0.109	0.088
二级	0.383	0.368	0.284	7.84	35.90	36.95	237.8	242.7	245.1	0.194	0.105	0.105
三级	0.479	0.178	0.178	0.00	0.00	0.00	47.0	51.1	51.0	0.046	0.019	0.019
四级	0.541	0.540	0.540	0.00	0.00	0.00	185.8	185.8	185.8	0.235	0.235	0.235
五级	0.295	0.294	0.294	0.00	0.00	0.00	90.5	90.5	90.5	0.058	0.058	0.058
六级	1.118	0.819	0.606	23.56	23.01	34.24	28.3	29.5	31.2	0.056	0.039	0.029
七级	0.623	0.450	0.373	1.65	0.00	0.00	14.0	14.4	14.5	0.017	0.013	0.011
八级	0.776	0.513	0.512	0.00	0.00	0.00	25.7	26.3	26.2	0.042	0.029	0.028

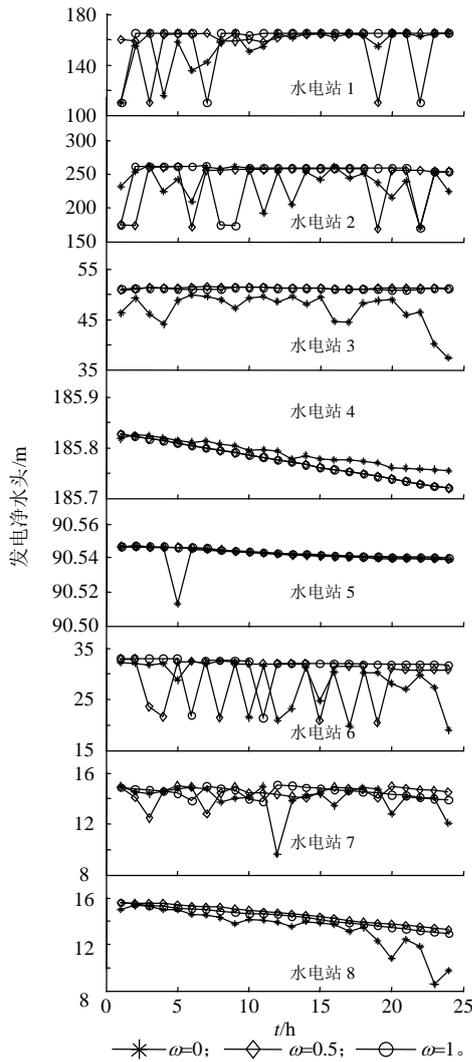


图 1 梯级水电站动态发电净水头  
Fig. 1 Net water head of cascade hydro plants

$\omega=0.5$  时的日发电量为 0.61 亿 kW·h, 其单位用水的发电量为 0.173 kW·h;  $\omega=1$  时的日发电量最小, 为 0.57 亿 kW·h, 其单位用水的发电量为 0.183kW·h。

由上述分析可知:  $\omega=0$  时, 梯级水电站的总发电量最大, 但它在调度时段内的发电用水量也最大, 同时, 由于其水电站的平均发电净水头偏低, 因此单位用水的发电量最小, 发电效益最差;  $\omega=1$  时, 虽然总发电量最小, 但在整个调度时段内其发电用水量最小, 且对水电站的平均发电净水头有很大提高, 它的单位用水的发电量也最大, 因此其发电效益也最好, 梯级水电站运行也最经济。在梯级水电站实际运行中, 为了满足负荷的需求及节约燃煤等非可再生资源, 要求梯级水电站发挥最大的发电能力, 但是水资源时间和空间分布的不均衡性及水资源可持续利用的特点, 使得梯级水电站在运行的过程中用水量尽量少, 两者是一个相互影响又相

互冲突的目标。根据仿真结果, 当采用发电量最大和发电流量最大作为优化目标时, 既可以满足发电要求, 又可兼顾用水的要求, 可以实现两者的协调, 从而提高水电站运行的综合经济性; 同时, 由图 2 的梯级水电站动态蓄水量可以看出, 通过发电流量偏差平方和最大目标函数的引入, 可以提高单一水电站的弃水量, 从而改变各水电站水库的动态蓄水规律, 提高水电站水头, 减少发电用水量, 实现水资源在梯级水电站间的动态再分配, 以实现梯级水电站运行的经济性。

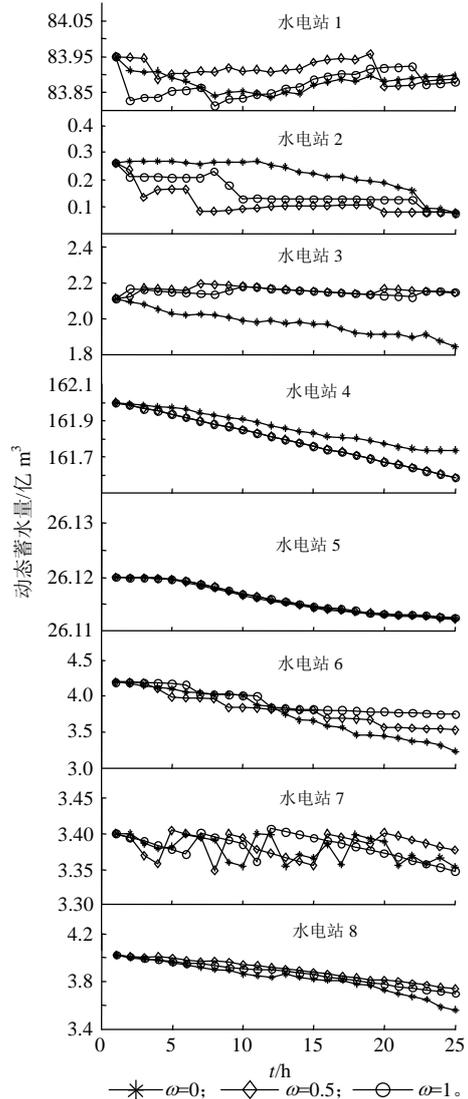


图 2 梯级水电站动态蓄水量  
Fig. 2 Dynamic store water of cascade hydro plants

#### 4.2 算例 2

为验证仿电磁学算法求解短期优化调度问题的有效性, 对  $\omega=0.5$  时的情况分别采用遗传算法和仿电磁学算法进行求解。2 类算法的初始种群设为 400, 终止条件设为 100 代, 其运行结果如图 3 所

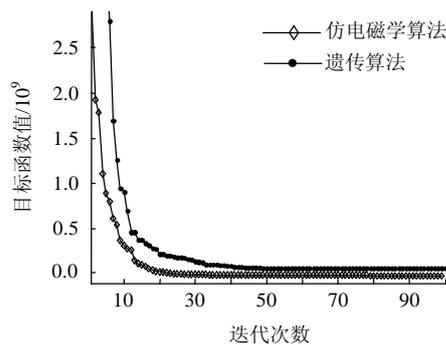


图3 仿电磁学算法与遗传算法比较

Fig. 3 Comparison between ELM and GA

示。遗传算法和仿电磁学算法的目标函数值分别为  $6.749 \times 10^7$  和  $-1.38 \times 10^7$ 。可看出：仿电磁学算法比遗传算法收敛性好，在求解梯级水电站短期优化调度问题时具有明显的优越性，但在进化后期算法存在收敛速度慢的问题，需进一步对其进行研究改进。

## 5 结论

1) 围绕水电站发电量最大构建的水头和发电流量最佳协调条件，可有效反映水电站单时段发电流量、发电总水头和水头损失之间的协调关系。

2) 以最佳协调条件为基础构建的发电流量正的偏差平方和最大的目标函数，有利于实现水资源的可持续利用。这样可改变水电站水库的动态蓄水规律，提高水电站发电水头、减少发电用水量及提高单位用水发电量，提高水电站的发电效益。

3) 以梯级水电站发电量最大和发电流量正的偏差平方和最大为目标的多目标短期优化调度模型，可兼顾发电要求及用水要求，通过选择不同的权重可以实现两者的协调，提高水电站运行的综合经济性。

4) 仿电磁学算法作为一种新型随机全局优化算法，具有原理简单、实现方便等优点，通过和遗传算法相比较可知，该方法在求解非凸非线性优化问题时具有一定的优越性，有良好的发展前景。

## 参考文献

- [1] 谢永胜, 孙洪波, 徐国禹. 基于模糊来水量模糊负荷的短期水火电调度[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 430-433.  
Xie Yongsheng, Sun Hongbo, Xu Guoyu. A short term hydrothermal scheduling with fuzzy inflows and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6): 430-433(in Chinese).
- [2] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的水火机组检修计划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 14-19.  
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Hydro-thermal generator maintenance scheduling based on credibility theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 14-19(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] 韩冬, 蔡兴国. 综合环境保护及峰谷电价的水火电短期优化调度[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 78-83.  
Han Dong, Cai Xingguo. Short-term scheduling of hydrothermal power system considering environment protection and time-of-use price[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 75-83(in Chinese).
- [6] 胡国强, 贺仁睦. 基于自适应蚁群算法的水电站水库优化调度[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 48-50.  
Hu Guoqiang, He Renmu. Optimal scheduling of hydroelectric power plant based on self-adaptive ant colony algorithm[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 48-50(in Chinese).
- [7] 吴正佳, 周建中, 杨俊杰, 等. 调峰容量效益最大的梯级电站优化调度[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 74-76.  
Wu Zhengjia, Zhou Jianzhong, Yang Junjie, et al. Optimal regulation for maximization of peak energy capacity benefits in cascade hydropower stations[J]. Water Power, 2007, 33(1): 74-76(in Chinese).
- [8] 曾勇红, 姜铁兵, 张勇传. 三峡梯级水电站蓄能最大长期优化调度模型及分解算法[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 5-8.  
Zeng Yonghong, Jiang Tiebing, Zhang Yongchuan. A long-term scheduling model for stored energy maximization of three gorges cascade hydroelectric stations and its decomposition algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 5-8(in Chinese).
- [9] 胡国强, 贺仁睦. 梯级水电站多目标模糊优化调度模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 154-158.  
Hu Guoqiang, He Renmu. Model and algorithm of multi-objective fuzzy optimal scheduling for cascaded hydroelectric power plant [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 154-158(in Chinese).
- [10] Horsley A, Wrobel A J. Profit-maximizing operation and valuation of hydroelectric plant: a new solution to the Koopmans problem [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2007, 31(3): 938-970.
- [11] Ladurantaye D D, Gendreau M, Potvin J Y. Optimizing profits from hydroelectricity production[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(2): 499-529.
- [12] 吴杰康, 朱健全. 机会约束规划下的梯级水电站短期优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 41-46.  
Wu Jiekang, Zhu Jianquan. A new strategy for short-term scheduling optimization of cascade hydro plants based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 41-46(in Chinese).
- [13] Arnold E, Tatjewski P, Wolochowicz P. Two methods for large-scale nonlinear optimization and their comparison on a case study of hydropower optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1994, 81(2): 221-248.

- [14] Oliveira A R L, Soares S, Nepomuceno L. Short term hydroelectric scheduling combining network flow and interior point approaches [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(2): 91-99.
- [15] 王金文, 袁晓辉, 张勇传. 随机动态规划在三峡梯级长期发电优化调度中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8): 54-56.  
Wang Jinwen, Yuan Xiaohui, Zhang Yongchuan. Long term generation optimization of Three-Gorge cascade using stochastic dynamic programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 54-56(in Chinese).
- [16] 武新宇, 程春田, 廖胜利, 等. 两阶段粒子群算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 25-28.  
Wu Xinyu, Cheng Chuntian, Liao Shengli, et al. Application of two-stage particle swarm optimization algorithm in optimized dispatching of hydropower station group[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 25-28(in Chinese).
- [17] 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).
- [18] 袁晓辉, 袁艳斌, 权先璋, 等. 基于混沌进化算法的梯级水电系统短期发电计划[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-38.  
Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Quan Xianzhang, et al. Hybrid chaotic evolutionary algorithm to short-term cascaded hydroelectric scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-38(in Chinese).
- [19] Naresh R, Sharma J. Short term hydro scheduling using two-phase neural network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24(7): 583-590.
- [20] Alexander K V, Giddens E P. Optimum penstocks for low head microhydro schemes[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3): 507-519.
- [21] Lidgate D, Amir B H. Optimal operational planning for a hydroelectric generation system[J]. IEE Proceedings, 1988, 135(3): 169-181.
- [22] Soares S, Salmazo C T. Minimum loss predispach model for hydroelectric power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(3): 1220-1228.
- [23] Birbil S I, Fang S C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3): 263-282.



吴杰康

收稿日期: 2010-08-31。

作者简介:

吴杰康(1965), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是现代电力系统分析与控制、电力市场、电力系统经济性与信息化、电力电子技术在电力系统中应用, wujiekang@163.com;

郭壮志(1983), 男, 博士研究生, 主要研究方向是电力系统分析与控制、大型水火电力系统联合优化及配电网自动化, gzz\_412@163.com。

(责任编辑 刘浩芳)