

基于模糊聚类分析的水电站日初水位估算

李辉, 申建建, 廖胜利, 武新宇, 程春田

(大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁省 大连市 116024)

Estimating the Initial Water Level of the Next Day for Day-ahead Hydropower Generation Dispatch Based on Fuzzy Cluster Analysis

LI Hui, SHEN Jianjian, LIAO Shengli, WU Xinyu, CHENG Chuntian

(Institute of Hydropower & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: For daily regulation power station and run-off hydroelectric station, initial water level is of great importance for day-ahead schedule. Because of the influence of output course scheduling and some other influencing factors which can hardly improved, the computation results of NHQ method has low precision. A fuzzy cluster analysis based on matching of related factors was presented which is capable of forecasting the next-day average water consumption rate and then initial water level was estimated by water balance principle. First, the weight coefficients were decided from the existing data. Then average water consumption rate was forecasted basing on the doctrine of fuzzy cluster analysis and initial water level was calculated. The result shows that comparing to NHQ method, this method, getting more accurate results, is valid and feasible.

KEY WORDS: initial water level estimating; hydropower station; fuzzy cluster analysis; operational characteristic curve of turbine set (NHQ method); progressive optimal algorithm

摘要: 对于日调节或径流式电站而言, 调度期初始水位估算的准确与否直接影响其日前计划执行的可行性。考虑到水轮机运转特性曲线(NHQ)方法受计划出力过程影响较大, 导致水位估算精度不高, 而且其影响因素改进空间有限, 故引入1种基于相关因素匹配的模糊聚类分析方法预测电站在调度期的平均耗水率, 并利用水量平衡原理计算其初始水位。该方法首先利用已有资料对影响耗水率的所有因素进行权重率定, 然后根据所得的最佳权重值通过聚类分析原理预测调度期的平均耗水率, 最终得到电站的日初水位。实际算例

表明, 与NHQ水位估算方法相比, 该方法得到的水位估算值满足精度要求, 是可行且有效的。

关键词: 日初水位估算; 水电站; 模糊聚类分析; 水轮机运转特性曲线方法; 逐步优化算法

0 引言

近10年是我国水电高速密集发展的黄金时期, 随着雅砻江流域锦屏一级、二级逐步开工, 乌江流域构皮滩、思林电站陆续建成, 红水河巨型梯级水电站天生桥一级(天一)、天生桥二级(天二)、龙滩相继投产, 澜沧江流域小湾、漫湾进入联合运行, 我国水电正逐渐形成“一库多级式”调度局面。这些库群的特点是以调节性能较好的大型水电站为龙头, 下游往往具有一级或多级水头较高, 但库容较小、调节性能较差的水电站。日常调度过程中, 下游电站需要完全利用上游电站的调节能力进行优化调度, 以充分发挥整体梯级的补偿能力及水头优势, 最大限度地利用有限的调节库容达到系统调峰调频的目的, 一直是电网水电站群短期调度的研究热点和重点。

调度期起始库水位(一般为一日, 下称日初水位)的确定是日前计划制作的首要任务, 常规NHQ方法是从某一时刻的实际库水位开始, 通过逐时段以电定水的方式对日初水位进行估算。但是, 由于入库水量难以估算、计划制定存在偏差、实际运行往往执行简化处理等因素导致日初水位估算存在一定的偏差。库容较大、调节性能较好的电站全天水位波动较小, 日初水位的估算精度也较高, 即使估算值存在一定的偏差对日前计划的制定和执行影响也较小; 而日调节或径流式电站, 由于其调节库

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909011); 国家杰出青年科学基金(51025934); 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB226111)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50909011); National Science Fund for Distinguished Young Scholars(51025934); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB226111)。

容较小，水位波动十分频繁，在其日前计划制作过程中，如果日初水位估算偏高则实际运行中由于水头偏低将无法完成计划任务；而日初水位估算偏低则实际运行中由于水位过高可能产生大量弃水，因此必须控制这类电站的水位估算精度^[1-6]。事实上这类电站的水位估算不但受其自身特性的影响，同时受上游出库影响，尤其是上游为调节性能较好的电站时，上游出库流量的很小偏差就可能导致该电站库水位的很大偏差。以天生桥梯级为例，天一为不完全多年调节，其下游电站天二为日调节。以 1 天为周期的计算结果显示，天一出库偏差为 10 m³/s 对自身库水位的影响最大仅为 0.02 m，而对天二库水位影响却达到 1 m 左右。这给天二次日初始水位估算的准确性带来了很大的困难。

针对上述问题，本文在分析 NHQ 方法在水位估算过程中存在严重局限性的基础上，采用基于相关因素匹配的模糊聚类分析方法对上游存在较好调节性能水库的下游电站初始水位进行估算，该方法可以很好地处理各相关因素对计算结果的影响，从而提高计算精度，具有很强的实用性。

1 问题描述

日前计划是在满足电网、电站实际需求和运行安全的条件下确定一定调度期内水电站机组的运行状态和出力过程，一般要求在当日上午 10 时之前提交，而科学合理地安排日前计划，需准确估算出电站在调度期内的起始库水位。如图 1 所示，调度期一般取次日 0 时至次日 24 时；另将当前时刻至次日 0 时定义为估算期。已知条件包括：待估算电站今日 0 时水位或当前时刻水位 Z_1 ，今日的预报区间流量 Q_{qi} ，计划出力过程(计划电量 E)以及上游电站计划出力过程(计划电量 E)；问题的关键在于寻找合理有效的方法利用上述已知条件确定该电站次日 0 时水位 Z_2 。

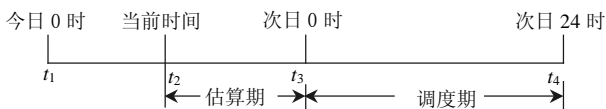


图 1 计算过程示意图

Fig. 1 Calculation process schematic diagram

2 日初水位估算的NHQ方法

该方法主要是根据电站当日 96 点的计划出力过程，利用机组发电特性曲线(NHQ 曲线)，逐时段

采用动态规划方法，以耗水量最小为优化目标确定各时段末水位。目标函数和递推方程组如下：

$$\min q(p) = \sum_{i=1}^n q_i(p_i) \quad (1)$$

$$\begin{cases} q_i^*(\bar{p}_i) = \min[q_i(p_i) + q_{i-1}^*(\bar{p}_{i-1})] \\ \bar{p}_{i-1} = \bar{p}_i - p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ q_0^*(\bar{p}_0) = 0, \quad \forall \bar{p}_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中目标函数采用发电流量最小准则；以机组编号为序，机组台数 i 为阶段变量；前 i 台机组的总负荷为状态变量 \bar{p}_i ；第 i 号机组的负荷为决策变量 p_i ；状态转移方程为 $\bar{p}_{i-1} = \bar{p}_i - p_i$ ；初始条件为 $q_0^*(\bar{p}_0) = 0$ 。 $q(p)$ 表示出力为 p 时对应的发电流量； $q_i^*(\bar{p}_i)$ 表示前 i 台机组总负荷 \bar{p}_i 对应的最小发电流量。

从当前时间开始，采用 NHQ 方法估算日初水位的步骤如下：

- 1) 设时段 $t = t_0$ ， t_0 表示当前时间对应时段， $0 \leq t \leq 96$ ；
- 2) 确定时段 t 的可用机组，根据计划出力 利用式(2)确定最优开机台数与机组最优出力 $P_{i,t}$ ；
- 3) 利用机组 NHQ 曲线插值得出各机组发电流量 $q_{i,t}$ ，求和得到电站发电流量 Q_t ；
- 4) 利用水量平衡方程确定时段 t 的末水位 Z_t ；
- 5) 令 $t = t + 1$ ，如果 $t < 96$ ，转至步骤 2)，否则 Z_{95} 即为所求末水位。

采用 NHQ 方法估算日初水位理论上比较准确，但在电站实际运行中往往受到各方面因素的影响，使其精度大大降低。一方面 NHQ 方法是逐时段进行调节计算，根据电站各时段总出力确定相应的开机方式，而实际运行中由于开停机方式变化引起的耗水却很难在计算中量化考虑，由此导致各时段误差累积而使水位估算出现较大偏差；另一方面，电网调度员在实时调度中根据系统负荷变化情况、电网及梯级电站运行需求等因素，在尽量保证电站日计划电量不变的条件下，对其发电计划过程进行适当调整，如此也会影响 NHQ 方法的估算结果，故需寻找一种精度较高的日初水位估算方法。

3 基于相关因素匹配的模糊聚类方法

3.1 求解思路

由于日前计划要求当日上午提交，即估算水位的目标时间 t_3 与已知水位的时间 t_2 相距较远，因此可以采用日平均耗水率的方式对初始水位进行估

算,这种方式无须考虑电站的日计划过程,只需考虑该过程的几个关键特征值(日电量、最大值、最小值)即可,同时避免了水位估算中开停机方式改变引起的耗水影响,而此时问题的关键转化为如何准确确定当日的平均耗水率。本文通过采用基于相关因素匹配的模糊聚类分析法^[7-12]寻找与当日各相关因素最相近的历史上某日,并取该日实际平均耗水率作为当日平均耗水率进行日初水位的估算。

3.2 特征量的选取

影响耗水率的相关因素在某日的取值称为该日的特征量。利用模糊聚类分析方法估算电站日初水位,需首先确定影响日初水位或耗水率的特征量。由水量平衡方程式(3)可知电站的初始水位、入库流量和出库流量是主要影响因素,其中出库流量由计划电量确定,而各时段计划出力的大小又会影响到机组的最优分配结果,进而影响电站的发电流量;另一方面,入库流量为区间流量与上游出库流量之和,而上游电站的出库流量同样受到其日初水位、区间流量、日电量、计划出力的最大值和最小值的影响,具体关系见式(3)~(6)。综上所述,可以确定待估算电站及上游电站的初始水位、区间流量、日电量、计划出力的最大值和最小值共10个因子作为计算日的特征量 X_i 。

$$W(Z_2) = W(Z_1) + Q_{in}\Delta t - Er \quad (3)$$

$$Q_{in} = Q'_{out} + Q_{qi} \quad (4)$$

$$Q_{out} = Q_{qi} + Q_{fa} \quad (5)$$

$$Q_{fa} = \frac{Er}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: Q_{in} 为电站入库流量; Q'_{out} 为上游电站出库流量; Q_{qi} 为本电站区间流量; Q_{qi} 为弃水流量; Q_{fa} 为发电流量, r 为电站计算日平均耗水率。

3.3 模糊聚类分析原理

将研究或处理的对象(样本)按照一定的条件或属性进行分类的数学方法是聚类分析。在聚类分析中,基本的思想是认为所研究的样本或指标(变量)之间存在相似性,其中,样本特征向量的选取非常重要,决定计算结果的好坏。聚类分析方法具有广泛的实际应用,然而现实的分类问题往往具有模糊性,分类依据的并不是有无关系,而是关系的深浅度,故采用模糊数学语言更为自然和符合实际。模糊聚类分析是根据事物特性指标的模糊性,应用模糊数学的方法确定样本的亲疏程度而实现分类的

方法。

假设共有 n 个特征量影响日平均耗水率,并把 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 记为第 i 日的特征量, r_i 为第 i 日的耗水率,则可将第 i 日的所有量化指标记为: $D_i = [X_i, r_i]$ 。为描述任意 2 日之间特征量的相似程度,特引入“相似度”的概念。设有 i, j 2 天,其因素量化指标分别为 X_i, X_j , 则这 2 天的相似度指标如式(7)所示:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{ik}^2 \sum_{k=1}^n x_{jk}^2}} \quad (7)$$

相似度 R_{ij} 越大表示 i, j 2 天各影响因素越接近。一般地,由于各特征量的量纲不尽相同,应将所有的 x_{ik}, x_{jk} 归一化处理,使各量之间在数值上有可比性;但是为了体现各个因素影响程度的不同,各因素归一化处理时应乘以相应的权重值 λ_k 。因此将式(7)修正为

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \lambda_k \frac{(x_{ik} - x_{ik}^{\min})}{(x_{ik}^{\max} - x_{ik}^{\min})} \frac{(x_{jk} - x_{jk}^{\min})}{(x_{jk}^{\max} - x_{jk}^{\min})}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n [\lambda_k \frac{(x_{ik} - x_{ik}^{\min})}{(x_{ik}^{\max} - x_{ik}^{\min})}]^2 \sum_{k=1}^n [\lambda_k \frac{(x_{jk} - x_{jk}^{\min})}{(x_{jk}^{\max} - x_{jk}^{\min})}]^2}} \quad (8)$$

3.4 权重率定方法及步骤

设权重向量为 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_n]$, 则 $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$ 。考虑到不同特征量的权重值可能受到季节特性的影响,故本文将率定样本类型划分为汛期、枯期与过渡期 3 种,根据估算日期所属类型,选择合适的样本(一般为 1 个月)进行权重率定。其率定思想是采用模糊聚类方法逐日估算样本数据的日初水位,再结合实际水位找出误差最小的一组权重值。权重率定的目标函数如式(9)所示:

$$\min_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \left[\frac{(Z_t - Z'_t)}{(Z_{\max} - Z_{\min})} \right]^2 \quad (9)$$

式中: M 为 M 组权重; T 为试算权重值的天数; Z_t 为第 t 天的实际初始水位; Z'_t 为第 t 天的计算初始水位; Z_{\max} 和 Z_{\min} 分别为这段时间(T 天)内实际初始水位的最大值和最小值。

本文采用逐步优化算法(POA)^[13]对权重进行率定,运用 POA 方法率定权重时需首先固定 λ_{k-1} 和 λ_{k+1} , 然后调整 λ_k , 为保持 $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$ 不被破坏,特

引入决策向量的概念。设决策向量 $A=[a_1, a_2, \dots, a_n]$, 其中 $0 \leq a_k \leq 1$ 且 $\sum_{k=1}^n a_k \neq 0$, 则权重向量 λ 和决策向量 A 之间的转化关系为

$$\lambda_k = \frac{a_k}{\sum_{k=1}^n a_k} (k=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

权重率定的步骤为:

1) 生成初始解。首先通过分析实际运行中各特征量对估算水位影响的重要程度, 确定每个决策变量 a_k 的初始取值范围 $[a_k^0, \bar{a}_k^0]$, 如估算电站的日电量大小对估算水位的影响较大, 其范围可取 $[0.5, 1.0]$; 再如上游电站的调节性能较好, 其区间流量对下游电站估算水位影响较小, 其范围可取 $[0, 0.5]$ 。并设定一个较大的步长(如 0.1 或 0.05)将所取权重范围离散, 然后采用动态规划方法获得初始解 $\{a_k^0\}$, 并用式(8)~(10)求初始目标函数值。

2) 采用 POA 方法固定 a_{k-1}^d 、 a_{k+1}^d 2 个值, 以较小步长(如 0.01)调整 a_k^d , 并求解对应的目标函数值, 得到最优目标函数值对应的 a_k^{*d} , 令 $a_k^d = a_k^{*d}$ 。

3) 重复第 2) 步直至 $k=n$, 此时第 d 次大循环结束得到决策序列 $\{a_k^d\}$, 转至第 4) 步。

4) 用新的决策序列做初始轨迹重复第 2) ~3) 步再次完成一轮大循环, 得到决策序列 $\{a_k^{d+1}\}$, 然后比较相邻 2 次大循环的绝对误差, 若 $|a_k^d - a_k^{d+1}| \leq \varepsilon$ (ε 为收敛精度)成立, 则 $\{a_k^{d+1}\}$ 即为所求的决策向量, 转至第 5) 步; 反之, 以 $\{a_k^{d+1}\}$ 做初始轨迹重复第 2) ~4) 步。

5) 用式(10)计算权重向量 $\{\lambda_k\}$ 。

3.5 水位估算步骤

取计算日前 p 天的数据作为计算的样本集, 已知条件包括: 历史上各日的特征量 $x_{ik} (i=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$ 与平均耗水率 r_i , 计算日的特征量 $x_{0k} (k=1, 2, \dots, n)$, 待求解的量为计算日的平均耗水率 r_0 。这里 n 为特征量的数目, 水位估算步骤如下:

1) 确定影响耗水率的相关因素, 并用式(9)中目标函数和以上权重率定步骤来确定各因素的权重值 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, n)$;

2) 采用式(8)计算历史上各日与计算日的相似度 R_{i0} , 并找出相似度最大的一天, 取其平均耗水率作为计算日的平均耗水率 r_0 ;

3) 用水量平衡方程式(3)计算当日的末水位。

4 应用分析

4.1 工程背景

本文以天生桥一级和二级电站为例分析研究“一库多级式”电站下游水库日初水位的估算方法及计算结果, 表 1 给出了 2 个电站的基本特征参数。天一为天二的直接上游, 且距离很近, 因此不考虑水流滞时的影响。

表 1 天一、天二电站基本参数
Tab. 1 Basic parameters of TSQ-1 and TSQ-2 power stations

参数	天一	天二
装机方式/MW	4×300	6×220
水库调节性能	不完全多年调节	日调节
库容/亿 m ³	102.512 5	0.294 6
正常蓄水位/m	780	645
死水位/m	731	637
多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	598	600

4.2 水位估算结果及分析

为使水位估算结果具有代表性, 分别在枯期、汛期和过渡期各选 1 个月进行计算分析, 即 4 月、8 月和 10 月, 首先进行权重率定。

根据天一、天二调节性能与实际运行情况, 确定天一初始水位、日电量、天二初始水位、日电量、区间流量 5 个特征量对应的决策变量的初始解范围为 $[0.5, 1.0]$, 其余特征量为 $[0, 0.5]$ 。按初始水位、区间流量、日电量、最大出力、最小出力的特征量顺序, 利用动态规划生成天一与天二的决策向量初始解为 $A = \{0.60, 0.25, 0.70, 0.45, 0.25, 0.70, 0.55, 0.80, 0.35, 0.35\}$, 利用式(10)将其转化为权重向量, 得到 $\lambda = \{0.12, 0.05, 0.14, 0.09, 0.05, 0.14, 0.11, 0.16, 0.07, 0.07\}$ 。给定收敛精度 $\varepsilon = 0.01$, 按权重率定方法可得到这 3 个月(共 92 天)的 92 组权重值, 表 2 给出了具有代表性的 3 组权重值。从获得的最优权重值可以看出, 给定的初始解的范围比较合理, 初始水位与日电量是影响耗水率最主要的因素; 天二调节库容较小, 故其区间流量的影响也不容忽视; 实际

表 2 影响耗水率各因素的权重值

Tab. 2 Weight value of each influence factor

日期	电站	初始水位	区间流量	日电量	出力最大值	出力最小值
4 月 16 日	天一	0.17	0.02	0.15	0.05	0.03
	天二	0.19	0.11	0.17	0.06	0.05
8 月 11 日	天一	0.14	0.04	0.19	0.04	0.03
	天二	0.16	0.12	0.20	0.04	0.04
10 月 13 日	天一	0.17	0.03	0.15	0.05	0.04
	天二	0.18	0.10	0.18	0.06	0.04

运行计划基本都安排在机组的最优出力范围,因此最大最小出力对估算结果的影响最小。

在权重率定的基础上利用模糊聚类分析方法估算各日初始水位,同时采用 NHQ 方法估算这 3 个月各日的初始水位。图 2 中(a)–(c)分别给出了 2 种方法的各月逐日初始水位估算值与实际值的对比关系;表 3 统计了水位估算值与实际值之间的各种评价指标,其中 N_{DS} 表示估算值与实际值差值的绝对值大于 0.5 m 的天数;平均绝对误差 M_{AE} 指估算值与实际值的绝对误差取绝对值之后的平均值,如式(11);误差均方根 R_{MSE} 反映误差幅度的平均状况^[14],如式(12);相关系数 R 的平方反映 2 个变量之间相关关系的密切程度,如式(13)。式中 X_i 为第 i 天初始水位的估算值, Y_i 为第 i 天初始水位的实际值, \bar{X}, \bar{Y} 则分别为 n 天的平均值。

$$M_{AE} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (11)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

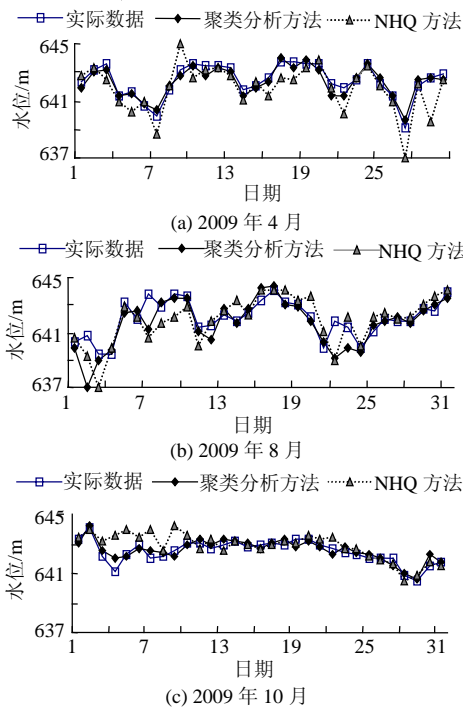


图 2 各月份实际与计算日初水位过程
Fig. 2 Comparison of calculating results with practical data

表 3 日初水位计算结果统计
Tab. 3 Statistics of the calculation results

方法	日期	N_{DS}	M_{AE}	R_{MSE}	R^2
NHQ 方法	2009.4	12	0.78	1.05	0.69
	2009.8	16	0.90	1.19	0.51
	2009.10	7	0.53	0.78	0.45
聚类分析方法	2009.4	2	0.31	0.37	0.91
	2009.8	8	0.66	1.08	0.66
	2009.10	2	0.27	0.33	0.83

分析图 2 与表 3 可知:基于相关因素匹配的模糊聚类分析方法计算结果普遍比 NHQ 方法好,聚类分析法的 N_{DS} 、 M_{AE} 、 R_{MSE} 3 个指标明显小于 NHQ 方法,说明其估算值与实际值偏离较小;而从相关系数指标也可反映出聚类分析方法的优越性。单就聚类分析方法的整体结果来看,4 月份与 10 月份的估算结果明显优于 8 月份,该月的 N_{DS} 达到了 8 天。

再进一步对 8 月份水位估算偏差较大的 8 天进行分析,发现按聚类分析方法得到的耗水率与实际耗水率差别较大,而影响该方法预测结果的特征量中初始水位为实际水位值,可以排除;出力最大值与最小值权重较小,暂不考虑;故需重点分析区间流量、计划电量 2 个特征量。表 4 给出了天一与天二电站 2 个特征量的计划值与实际值。从表 4 可以看出,预报区间流量与实际区间流量相差均小于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$,可以排除;而日计划电量与实际电量相差较大,再加上计划电量在聚类分析方法中的权重值较大,因此很有可能是日电量的偏差影响了结果的准确性。为了验证分析聚类分析方法的合理性及通用性,把 8 月份水位估算值不满足精度要求的 8 天的计划电量直接取为实际电量,然后重新估算其日初水位,并把计算结果与直接用计划电量的计算结果列于表 5 中。从表中可以看出,用实际电量估算

表 4 8 月份计算结果偏差较大日期的统计
Tab. 4 Statistics of planning and actual value in August

时间	天一		天二		实际区间/ (m^3/s)	预报区间/ (m^3/s)
	实际电量/ (万 kW·h)	计划电量/ (万 kW·h)	实际电量/ (万 kW·h)	计划电量/ (万 kW·h)		
8月2日	1087.13	919.75	1751.35	1592.50	4.70	4.20
8月5日	1586.81	1638.50	2537.35	2535.50	0.71	1.00
8月6日	1472.16	1515.50	2521.85	2596.00	10.21	10.80
8月7日	1544.66	1576.25	2528.90	2596.00	11.23	10.90
8月12日	1228.97	1192.75	1992.38	2029.50	4.95	5.10
8月16日	809.09	838.00	1256.64	1364.00	6.06	5.70
8月22日	726.31	666.50	1007.62	1061.50	1.90	1.90
8月23日	644.93	617.00	1031.66	984.50	4.39	4.10

表5 计划电量与实际电量对水位估算结果的影响
Tab. 5 Different effects of planning and actual daily power generation to water level estimation

日期	用计划电量估算结果			用实际电量估算结果			实际值		
	天一	天二	天一	天二	天一	天二	天一	天二	天一
	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	末水位/ m	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	末水位/ m	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	耗水率/ (m ³ /(kW·h))	末水位/ m
8月2日	3.73	2.20	637.00	3.63	2.24	640.83	3.63	2.25	640.71
8月5日	3.64	2.23	642.49	3.73	2.17	643.49	3.72	2.18	643.13
8月6日	3.59	2.22	642.56	3.64	2.22	641.68	3.63	2.20	642.03
8月7日	3.53	2.27	641.22	3.63	2.18	643.87	3.62	2.18	643.74
8月12日	3.54	2.19	640.43	3.56	2.20	641.67	3.56	2.21	641.47
8月16日	3.45	2.17	644.32	3.58	2.26	643.38	3.58	2.28	643.32
8月22日	3.26	2.24	639.15	3.54	2.41	641.53	3.55	2.37	641.90
8月23日	3.34	2.23	639.82	3.53	2.30	641.35	3.51	2.29	641.31

的日初水位值满足精度要求；对4月份与10月份估算结果偏差较大的4天按此方式重新估算也得到了满意的结果。由此可见，在计划电量偏差较小时，采用基于相关因素匹配的模糊聚类分析方法进行日初水位估算是可行且有效的。

5 结论

本文在分析日初水位估算特性以及NHQ估算方法缺点的基础上，提出了采用日平均耗水率计算日初水位的方式，该方式成功地避免了NHQ方法受计划出力过程影响较大导致精度不高的情况。而此时水位估算问题转变为如何准确确定日平均耗水率的问题，因此本文又引入了1种基于相关因素匹配的模糊聚类分析方法对影响耗水率的所有因素进行权重率定与聚类分析，从而得到调度期的平均耗水率，实例计算证明在计划电量偏差较小时其计算结果符合精度要求，表明了该方法的适应性和可行性。

参考文献

- [1] 吴杰康, 朱建全. 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).
- [2] 马瑞. 电力市场中兼顾环境保护和经济效益的双目标模糊优化短期交易计划新模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 104-106.
Ma Rui. A novel bi-objective fuzzy optimal model of short-term trade planning considering environmental protection and economic profit in deregulated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 104-106(in Chinese).
- [3] 曾勇红, 姜铁兵, 张勇传, 等. 基于线性规划的梯级水电系统短期发电计划[J]. 水电自动化与大坝检测, 2004, 28(4): 59-62.
Zeng Yonghong, Jiang Tiebing, Zhang Yongchuan, et al. Linear programming-based short-term generation scheduling for cascade hydropower system[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28(4): 59-62(in Chinese).
- [4] 梅亚东, 朱教新. 黄河上游梯级水电站短期优化调度模型及迭代解法[J]. 水力发电学报, 2000(2): 1-7.
Mei Yadong, Zhu Jiaoxin. Short-term optimal operation model for the cascade hydroelectric stations on the upper yellow river and its solution[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000(2): 1-7(in Chinese).
- [5] 李安强, 王丽萍, 蔺伟民, 等. 免疫粒子群算法在梯级电站短期优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 426-432.
Li Anqiang, Wang Liping, Lin Weimin, et al. Application of immune particle swarm optimization algorithm to short-term optimal dispatch of cascade hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 426-432(in Chinese).
- [6] Shawwash Z K, Siu T K, Russell S O D, et al. The B.C. hydro short term hydro scheduling optimization model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1125-1131.
- [7] 郑晓雨. 聚类分析在负荷模型分类研究中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
Zheng Xiaoyu. The use of analysis in load classification [D]. Beijing: North China Electric University, 2008(in Chinese).
- [8] 齐敏, 李大健, 郝重阳, 等. 模式识别导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Qi Min, Li Dajian, Hao Chongyang, et al. Pattern recognition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009(in Chinese).
- [9] 康重庆, 程旭, 夏清, 等. 一种规范化的处理相关因素的短期负荷预测新策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 32-35.
Kang Chongqing, Cheng Xu, Xia Qing, et al. A new unified approach to short-term load forecasting considering correlated factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 32-35(in Chinese).
- [10] 黎灿兵, 曲芳, 王晓宁, 等. 基于模糊聚类的电力系统负荷特性分析[J]. 郑州大学学报, 2010, 31(1): 107-110.
Li Canbing, Qu Fang, Wang Xiaoning, et al. Characteristics analysis of power load based on fuzzy clusterin[J]. Journal of Zhengzhou University, 2010, 31(1): 107-110(in Chinese).
- [11] 陈铁华, 陈启卷. 模糊聚类分析在水电机组振动故障诊断中的应

用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 43-47.

Chen Tiejia, Chen Qijuan. Fuzzy clustering analysis based vibration fault diagnosis of hydroelectric generation unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 43-47(in Chinese).

- [12] Li Gang, Cheng Chuntian, Lin Jianyi, et al. Short-term load forecasting using support vector machine with SCE-UA algorithm [C]//Proceedings-Third International Conference on Natural Computation, ICNC 2007, 2007(1): 290-294.

- [13] 秦旭宝, 董增川, 费如君, 等. 基于逐步优化算法的水库防洪优化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 60-62.

Qin Xubao, Dong Zengchuan, Fei Rujun, et al. Research for optimal flood dispatch model for reservoir based on POA[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(4): 60-62(in Chinese).

- [14] 杨昌贤, 郑艳, 林建兴, 等. 数值预报产品检验和评估[J]. 气象研究与应用, 2008, 29(2): 32-37.

Yang Changxian, Zheng Yan, Lin Jianxing, et al. Numerical model output validation and assessment[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2008, 29(2): 32-37(in Chinese).



李辉

收稿日期: 2010-07-15。

作者简介:

李辉(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为梯级水电站短期优化调度, lihui0401@yahoo.cn;

申建建(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为水电系统经济运行, sjj0662400@163.com;

廖胜利(1980), 男, 博士后, 研究方向为省级电网水火协调优化算法研究及系统实现, shengliliao@dlut.edu.cn;

武新宇(1979), 男, 讲师, 研究方向为水电系统经济运行, wuxinyu@dlut.edu.cn;

程春田(1965), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要从事水火电优化调度与电网经济运行, 电网节能算法及智能算法研究等, ctcheng@dlut.edu.cn。

(责任编辑 张媛媛)