

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.005

考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法

董增川,陈牧风,倪效宽,姚弘祎,贾文豪,杨 光

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为有效解决多目标决策中存在的不确定性问题,提出考虑主客观因素模糊区间的综合赋权方法。首先利用模糊层次分析法确定反映决策者主观偏好的主观权重,其次引入区间数的相离度概念提取客观决策信息,最后利用基于博弈论的综合赋权方法确定综合权重,并根据综合权重选出最佳调度方案。该方法在金沙江下游梯级水库群多目标优化调度中的应用结果表明:综合的赋权法在多目标调度方案优选中具有可行性,综合权重选出的调度方案能同时体现决策者偏好和各指标客观特征,所选方案在各指标上表现均衡,为流域水资源多目标综合调度决策提供了新的思路。
关键词:水库群;多目标决策;模糊层次分析;区间数离散度;博弈论

中图分类号:TV697.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2021)03-0233-08

Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval

DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, YAO Hongyi, JIA Wenhao, YANG Guang
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To effectively solve the uncertainty problems in the multi-objective decision-making, a comprehensive weighting method considering the fuzzy interval of subjective and objective factors is proposed in this study. The fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was used to determine the subjective weight reflecting the subjective preference of decision makers, and the concept of distance degree of interval number was introduced to extract objective decision information. Then, with an improved comprehensive weighting method based on the game theory, the comprehensive weighting value is determined, and in accordance with this, the scheduling scheme is optimized. The method is applied to the multi-objective optimal scheduling of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River, and the results show that the comprehensive weighting method is feasible in the multi-objective scheduling scheme optimization. The scheduling scheme selected by the comprehensive weight can simultaneously reflect the preference of decision makers and the objective characteristics of each index and has a balanced performance on all indicators. This method provides a new idea for the multi-objective comprehensive operation decision-making of water resources in the basin.

Key words: reservoir group; multi-objective decision; FAHP; interval number dispersion; game theory

近年来,随着我国各流域具有较强调节能力的控制性梯级水库的完善,流域水资源的时空调配能力得以增强,水资源开发利用方式更加多样化,流域水资源综合效益增加^[1],流域内各水库在运行时不仅承担发电任务,同时在保证流域供水充足、航道畅通、维持生态多样性等方面也发挥重要作用。因此,水库群多目标优化问题的重要性日益突出,相关的研究也日益深入^[2-7]。确定合理的水库调度方式也随之更加复杂,而解决这一问题的关键在于确定评价多种调度方案的指标,并合理赋权以体现指标在不同方案中的差异性和在优化结果中的重要性。由于指标的权重影响多指标决策的准确性和可靠性^[8],因此确定合理指标权重是对多目标决策研究的重点。目前对于指标权重的确定方法已有了丰富的研究成果,主要有主观赋权和客观赋权两大类。常用的主观赋权法包括德尔菲法、层次分析法等,张利升等^[9]构建丹江口水库考虑供水、发电等多目标的决策指标体系,并利用层次分析法得到了均衡多目的优化调度方案,为丹江口水库的调度运行提供了

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (B200203055); 国家重点研发计划 (2016YFC0402209); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX20_0541)

作者简介: 董增川(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zcdong@hhu.edu.cn

引用本文: 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240.
DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):233-240.

科学指导。但是,主观赋权法依赖于决策者深厚的工作经验,存在赋权结果偏离客观现实的缺点。常用的客观赋权法包括主成分分析法、熵值法等,周惠成等^[10]将熵权的概念引入水库防洪调度多目标决策模型中,利用方案集中各评价指标的具体变异程度反映信息的效用程度,优选出最佳防洪调度方案。但客观方法只注重评价指标的客观特征,无法避免当指标特征存在较极端的取值时与现实情况不符的问题。为了克服各方法存在的问题,将主客观赋权相结合的组合赋权方法,成为发展趋势。董增川等^[11]以可供水量、利津入海水量等 10 项指标为评价体系,利用有序二元法和熵值法的组合赋权模型优选出黄河流域水资源综合效益最大的水量调度方案;纪昌明等^[12]将层次分析法和离差最大化法相结合以确定指标权重,给出了发电风险率、负荷变动风险率等新指标,评价了雅砻江流域锦官电源组梯级水电站负荷调整方案。总体上,现有的针对水库调度决策的研究已较为全面,但在分析指标权重的合理性时,决策者意向和评价指标的不确定性没有得到充分考虑,有待进一步研究。

针对上述问题,以金沙江下游为研究区,以乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座水库组成的梯级水库为研究对象,以梯级发电总量、适宜生态偏离度和通航保证率为目标,构建多目标优化调度模型。选取发电、生态、航运 3 个效益目标为评价指标,利用模糊层次分析法确定主观权重,引入区间数相离度的概念计算客观权重,并引入基于博弈论的组合赋权法,确定了均衡主客观权重的综合指标权重,从而对求解模型所得的多目标优化调度方案集进行优选分析。

1 研究区概况

金沙江为长江流域上游河段,是我国最大的水电基地,其中攀枝花以下至宜宾河段为金沙江下游,河段全长 783 km,落差 729 m,是金沙江流域水能资源最丰富的河段。目前,金沙江下游由上至下建设了乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座水库,其中乌东德、溪洛渡和向家坝水库已正式投产发电,白鹤滩水库将于 2022 年计划完工。梯级水库群概化图如图 1 所示,4 座水库的特征参数见表 1。

金沙江下游梯级水库群为长江上游水电开发作出巨大贡献,除了发电效益外,各个水库还兼具防洪、航运、灌溉、拦沙、鱼类保护等综合作用,是金沙江流域水资源综合利用的重要工程性措施。

2 研究方法

2.1 多目标优化模型

选择流域发电、生态、航运效益作为金沙江下游梯级水库群调度的优化目标,分别以梯级总发电量最大、生态适宜偏离度最小以及通航保证率最大为优化目标函数,构建梯级水库多目标优化模型,求解梯级水库优化调度方案集。目标函数如下:

a. 发电:梯级发电总量最大。

f_1 = \max E = \max \sum_{g=1}^4 \sum_{t=1}^T (N_{g,t} \Delta t) \tag{1}

式中: E ——梯级总发电量; $N_{g,t}$ ——第 g 库在 t 时段的出力; t ——时段数; g ——水库数; T ——总时段数; Δt ——某一时段长度。

b. 生态:适宜生态偏离度最小。

f_2 = \min E_{co} = \min \sum_{g=1}^4 \frac{1}{12} \sum_{t=1}^T \left(\frac{|q_{g,t} - Q_{e_{g,t}}|}{Q_{e_{g,t}}} \right)^2 \tag{2}

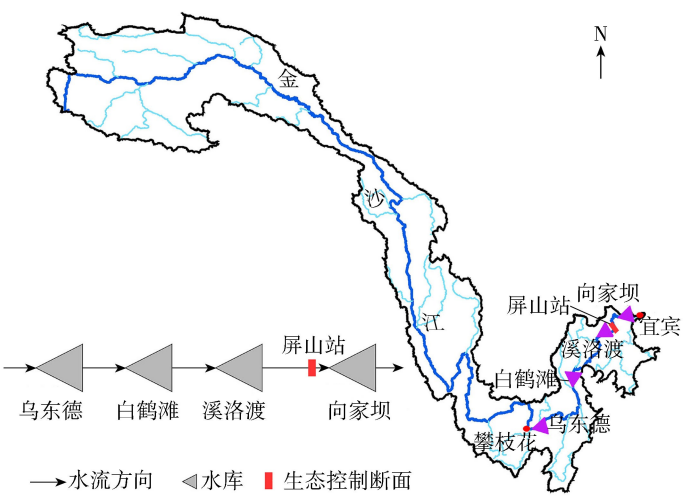


图 1 金沙江下游梯级水库群概化图
Fig. 1 Generalization of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River

表 1 金沙江下游梯级水库特征参数

水电站	正常高水位/m	汛限水位/m	装机容量/MW	多年平均发电量/(亿 kW·h)
乌东德	975	952	8 700	387
白鹤滩	825	785	14 000	602
溪洛渡	600	560	13 860	571
向家坝	380	370	6 400	307

式中: E_{co} ——适宜生态偏离度; $q_{g,t}$ 、 $Q_{e_{g,t}}$ ——第 g 库下游的第 t 月的月平均流量和生态适宜流量,其中生态适宜流量通过取 50% 频率的逐月频率法^[13]计算得出。

c. 航运:通航保证率最大。

$$f_3 = \max H = \max \left(\frac{T_H}{T} \times 100\% \right) \tag{3}$$

其中 $T_H = \{t \mid Q_{H,\min} < q_{g,t} < Q_{H,\max}, t \in T\}$

式中: H ——通航保证率; $Q_{H,\min}$ 、 $Q_{H,\max}$ ——通航河段适宜流量的上限、下限; T_H ——保证通航时间。

将各个水库的汛期防洪要求和流域供水控制断面的流量要求设为多目标优化模型的约束条件,此外约束条件还包括水库水量平衡约束、水库水位、出流流量约束等^[14]。

2.2 多目标决策优选方法

2.2.1 基于三角模糊数的模糊层次分析法

专家在评判多个指标间的相对重要程度时,思维一致性难以保证,传统的层次分析法无法反映现实中人们评价事物重要性时的模糊思想,将具有不确定性的判断绝对化,并且传统方法在保证判断矩阵一致性上难度大,现有判断标准 $CR < 0.1$ 缺乏科学依据^[15]。水库调度中评价指标间的重要性难以绝对量化,传统层次分析法忽视了其间的模糊性。三角模糊数是将模糊不确定的语言变量转化成确定数值的一种方法,用于解决具有不确定性的模糊评价问题^[16]。因此,引入三角模糊数表征两两指标间重要程度的比判,构成模糊层次分析法(FAHP)。设指标集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,式(4)为模糊三角函数表达形式:

$$F_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

式中: F_{ij} ——指标 u_i 与 u_j 间重要性比较的模糊三角函数; l_{ij} 、 m_{ij} 、 u_{ij} ——指标 u_i 相对于 u_j 可能的重要程度的上界、中值和下界,其中两两指标间重要性定量比较 1~9 中的整奇数分别表示同等重要、比较重要、一般重要、强烈重要、极端重要,整偶数表示重要性介于相邻判断标准之间,若 u_i 对 u_j 的重要性为 λ ,则 u_j 对 u_i 的重要性为 $1/\lambda$ 。

对各指标进行两两比较,形成判断矩阵 F :

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & \cdots & F_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ F_{n1} & \cdots & F_{nn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

各指标的初始权重为

$$\gamma_i = (l_i, m_i, u_i) = \frac{\sum_{j=1}^n F_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij}} \tag{6}$$

式中: γ_i ——指标 u_i 的初始权重; l_i 、 m_i 、 u_i ——指标 u_i 初始权重的上界、中界和下界。

根据三角模糊函数的定义,一个指标与其他指标相比更重要的程度为

$$\tau_i = v(\gamma \geq \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) = \min v(\gamma \geq \gamma_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{7}$$

其中
$$v(\gamma_i \geq \gamma_j) = \begin{cases} 1 & m_i > m_j \\ \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)} & m_i \leq m_j, u_i \geq l_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: τ_i ——指标 u_i 相对其他所有指标的重要程度; $v(\cdot)$ ——相对重要程度的计算通式。

最后进行归一化处理得到各指标归一化权重 $\bar{\tau}_i$,进而得到主观指标权重 Γ :

$$\Gamma = (\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \dots, \bar{\tau}_n) \tag{8}$$

2.2.2 基于区间数相离度的客观赋权方法

在水库调度模型计算中,一方面由于参数选取差异、系统误差、模型概化等因素,使得计算的指标值与实际情况存在一定的误差;另一方面,由于天然的径流过程存在随机性,导致计算出的调度方案集无法精确描

述水库实际运行时各评价指标的真实表现^[17]。因此本研究通过区间数的形式表示各方案的指标值,从而更加贴近真实调度情况。

设多指标决策的 z 个待评价方案集为 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_z\}$,而 n 个评价指标对应的权重向量 $\zeta=(\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_n)$ 为待求量。将各指标值模糊化处理使各方案 s_i 关于指标 u_j 的指标值为区间数 $(x_{ij,L},x_{ij,U})$,形成指标矩阵,并利用区间数运算法则,分别对效益型指标和成本型指标进行规范化处理,以消除不同物理量纲对结果造成的影响,处理后的指标值为 $[r_{ij,L},r_{ij,U}]$,即可得规范化指标矩阵。

区间数相离度是指有区间数 $a=[a_L,a_U]$ 、 $b=[b_L,b_U]$,令范数 $\|a-b\|_2=\sqrt{(b_U-a_L)^2+(b_L-a_U)^2}$,则称 $D(a,b)=\|a-b\|_2$ 为区间数 a,b 的相离度。在多指标决策问题中,若所有决策方案在指标 u_j 下的指标值间的总差异越小,说明该指标对方案评价与选择中起较小作用,则评价时赋予的权重较小;反之,说明该指标在方案评价与选择中起较大作用,则评价时赋予的权重较大。

令 $d(r_{ij},r_{kj})=\|r_{ij}-r_{kj}\|_2=\sqrt{(r_{ij,L}-r_{kj,L})^2+(r_{ij,U}-r_{kj,U})^2}$ 表示规范化指标矩阵中各元素之间的相离度。定义 $D_{ij}(\zeta)=\sum_{k=1}^zd(r_{ij},r_{kj})\zeta_j(i,k\in Z,j\in N)$ 表示对于指标 u_j ,决策方案 s_i 与其他所有方案的差异程度,进而可用 $D_j(\zeta)=\sum_{i=1}^z\sum_{k=1}^zd(r_{ij},r_{kj})\zeta_j(j\in N)$ 表示对于指标 u_j 而言,所有决策方案与其他决策方案的总差异。权重向量 ζ 的选择应该使得所有指标对所有决策方案的总差异最大,以体现不同方案间的差异。则问题转换为求解如下单目标优化问题:

$$\max D(\zeta)=\sum_{j=1}^z\sum_{i=1}^n\sum_{k=1}^nd(r_{ij},r_{kj})\zeta_i \tag{9}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^z\zeta_j^2=1 \\ \zeta_j\geq 0,j\in Z \end{cases} \tag{10}$$

求解此优化问题,并进行归一化处理后得到各属性的最优权重为

$$\zeta_j=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{k=1}^nd(r_{ij},r_{kj})}{\sum_{j=1}^z\sum_{i=1}^n\sum_{k=1}^nd(r_{ij},r_{kj})} \tag{11}$$

2.2.3 博弈论综合赋权方法

为综合主观权重和客观权重,引入一种基于博弈论的综合赋权方法。该方法将综合赋权问题变成一个多人优化问题,目的是在不同的权重之间寻找一个均衡一致的解,使得最终的可能的权重与各个基本权重之间的偏差极小。该方法的求解可转换成对式(12)中 e 个线性组合系数 α_e 进行优化,使得 ω 与各个不同方法计算得的 ω_l 的离差最小,本研究中 $\omega_1=\Gamma,\omega_2=\zeta$ 。

$$\omega=\sum_{e=1}^2\alpha_e\omega_e^T \tag{12}$$

则该问题可以转化成下式所表示的优化问题:

$$\min \|\sum_{e=1}^2\alpha_e\omega_e^T-\omega_e\|_2 \tag{13}$$

求解上式可以得到一个使多种权重赋值方法相协调均衡的综合权重结果。根据矩阵的微分性质,可得与式(12)最优化的一阶导数等价的方程组为

$$\begin{bmatrix} \omega_1\omega_1^T & \omega_1\omega_2^T \\ \omega_2\omega_1^T & \omega_2\omega_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1\omega_1^T \\ \omega_2\omega_2^T \end{bmatrix} \tag{14}$$

求解该方程组,即可得到最终的综合赋权值。

3 结果与分析

3.1 多目标优化模型计算结果

本研究以金沙江平水年2016年实测径流作为模型输入条件,其中汛期(7月1日至9月10日)以天为

计算步长,旬末蓄水期(9 月 11—30 日)以旬为计算步长,其余时期以月为计算步长,以水库各时段水位为决策变量,总计为 332 个。采用 NSGA-III 优化算法求解该模型,设置种群数为 120,即有 120 个备选方案,得到该多目标优化调度问题的 Pareto 前沿,如图 2(a)所示。将 Pareto 前沿两两投影在二维平面上,即可辨识多目标间的相互作用关系,如图 2(b)所示的矩阵散点图。

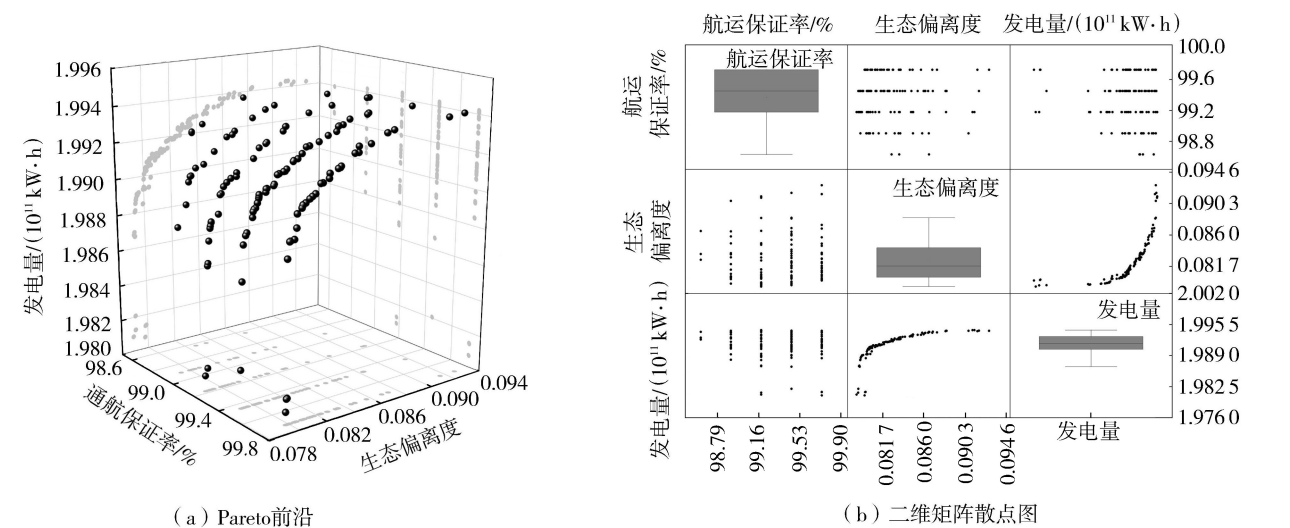


图 2 多目标优化调度 Pareto 前沿及二维矩阵散点图

Fig.2 Pareto Frontier and two-dimensional matrix scatter diagram of multi-objective optimal scheduling

根据图 2 可以发现发电与生态间有明显的竞争关系,当水库选择发电量大的方案时,生态遭到破坏的程度增加。这主要是因为,在枯水期,梯级水库运行时需要减小下泄,抬高水头以增加水库发电的水头效益,而在来水较多的时期则在保持一定水头的基础上,选择加大下泄以更好的利用水库发电的流量效益,这 2 种调度方式都会对水流的天然径流过程造成明显的改变,经水库调度后的下泄量与生态适宜流量存在较大的差别。而另外 2 组目标发电-航运和生态-航运间虽没有明显的竞争关系,但在选择方案时,仍不能保证同时达到最优,多个目标之间存在相互影响作用。

3.2 多目标决策方案优选结果

为实现水资源多目标综合利用,通过比较不同调度方式在多目标效益中获益的大小是否满足决策者要求和指标客观特征来评判其优劣,本研究选择发电量、生态偏离度和通航保证率作为方案决策评价指标,各指标的表达式同优化模型目标函数的表达,各指标值为模型优化计算结果相应值。

首先利用模糊层次分析法进行主观赋权,请多位专家对 4 个评级指标的重要程度进行打分,每次打分给出可能相对重要程度的上下界和中值,最终形成判断矩阵如式(15)所示,其中 $C_1 \sim C_3$ 分别表示发电量、生态偏离度和通航保证率 3 个指标:

$$F_T = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ \begin{bmatrix} [1,1,1] \\ [0.2,0.33,0.5] \\ [0.25,0.4,0.5] \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [2,3,4] \\ [1,1,1] \\ [1,2,3] \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [1,2.5,4] \\ [0.33,0.5,1] \\ [1,1,1] \end{bmatrix} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

对以上判断矩阵进行规范化处理后,再利用式(6)、式(7)得到各指标大于其他指标的重要程度,进行归一化后,可以计算得基于模糊层次分析法的主观权重为

$$\boldsymbol{\Gamma} = (0.568, 0.092, 0.340)$$

由于在当前经济快速发展的趋势下,决策者更希望通过水库的调控作用加大流域发电效益和航运效益,以提高流域的经济实力,因此主观赋权的结果中发电效益指标和航运效益指标占比较大。

其次,利用基于区间数相离度的客观赋权法,首先对各指标值模糊化处理,本研究中取±0.2%作为指标值模糊化的上下界展开范围,模糊化后各方案的指标值见表 2。

将表 2 转化为决策矩阵,其中梯级发电效益和通航保证率为效益型指标,生态适宜偏离度为成本型指标,将决策矩阵转化为规范化决策矩阵,再根据区间数相离度的概念,利用式(11)求得客观权重为

$\zeta = (0.033, 0.892, 0.075)$

根据客观权重可见生态效益占比最大。这主要是因为3个指标值中,发电和航运指标在各方案间的差距相对较小,而生态指标在各方案之间的差距远大于发电和航运指标,对方案的区分与选择起更明显的作用,因此生态目标的权重最大。

最后利用基于博弈论的综合赋权方法,得到均衡主观和客观因素的综合权重为

$\omega = (0.279, 0.524, 0.197)$

根据综合权重,借助加权的TOPSIS法^[18]在120个方案中选出相应的最优方案,优选的方案指标值如下:发电量为 $1.9809 \times 10^{11} \text{ kW} \cdot \text{h}$,生态适宜偏离度为0.079,通航保证率为99.178%。

该方案下4座水库的水位过程和水库出流过程如图3所示。

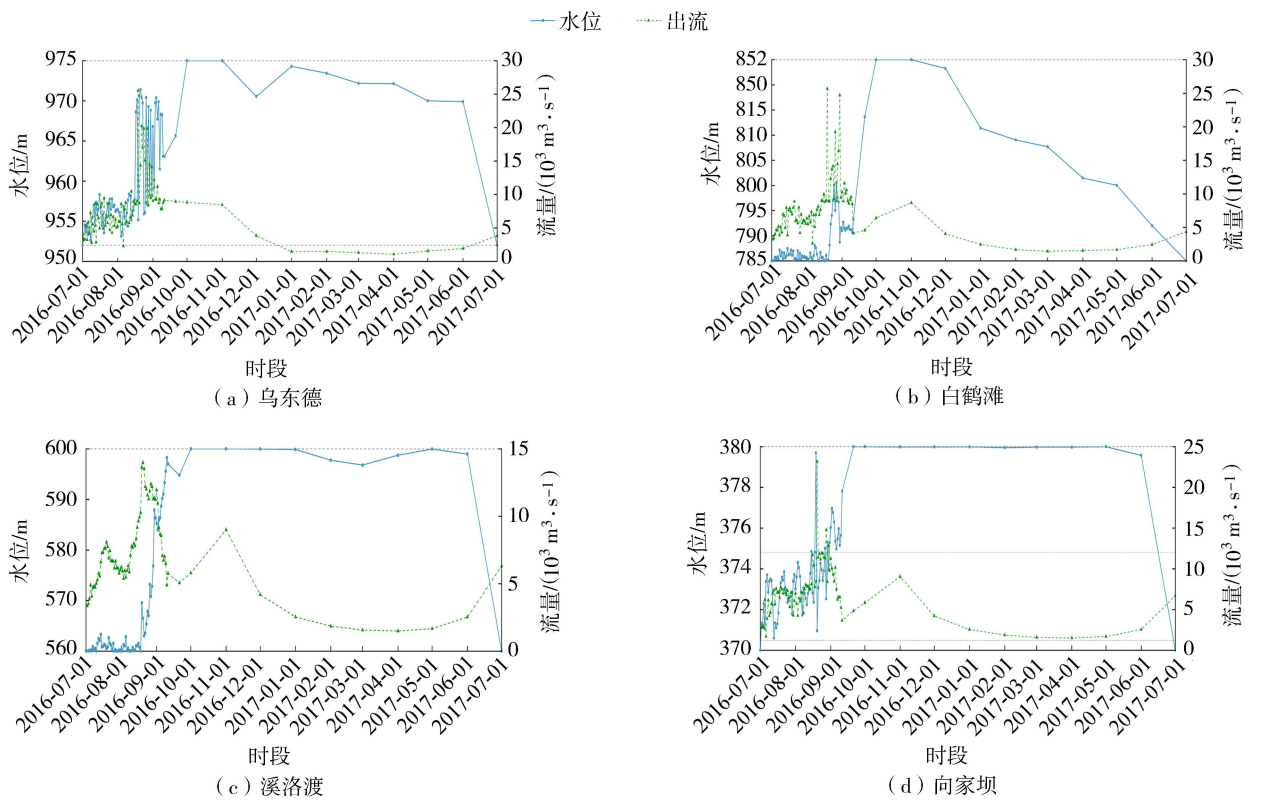


图3 优选调度方案下各库的水位过程和流量过程

Fig.3 Water level process and discharge process of each reservoir under optimal operation scheme

综合的权重均衡了主、客观的特点,既保留了生态指标在区分方案时的重要作用,也考虑了决策者对经济效益的重视程度,据此所优选出的方案也综合了主客观权重的不同侧重点。由于生态偏离度的客观权重结果远大于其余2个属性,为了证明该权重计算结果的可行性,对属性 C_2 进行敏感性分析。根据计算结果,不考虑生态偏离度属性权重低于另外两个属性的情况,取 $[0.3, 1)$ 为区间,0.0001为步长,改变客观权重中生态偏离度的权重值,重新计算规范化的客观权重以及综合权重,并借助与研究中的同样的加权TOPSIS法在120个方案中优选最佳方案,发现最优方案的选择结果仍与文中选择结果相同,说明生态偏离度属性具有鲁棒性,其权重的变化对最优方案的选择没有影响,也说明了该属性对于区分方案的优劣有突出作用。由此可以证明本文中客观权重体现了属性值的客观特征,而由该权重确定的最优方案也是合理的。

优选方案的发电量仅低于所有方案中的发电量最大方案0.6%,但与通航保证率最高的方案相比仅相差2d,且该方案的适宜生态偏离度为所有方案中最小,既保障了流域水资源经济效益的发挥,同时也保护了

流域生态系统的稳定。由图 3 的水位、流量过程线,可以看出各个水库在汛期前期基本保持较低水位以完成防洪的任务,同时通过较大的下泄流量增加发电效益,汛期后期水位逐渐抬高直至正常高水位。汛期过后,由于来水减少,水库保持较高的水位,利用水头差加大发电,同时控制水库下泄流量满足航运和生态对流量的需求,实现流域水资源的综合优化利用。

4 结 语

构建了基于区间数相离度理论和模糊层次分析法的多目标调度方案优选方法,并将其应用于金沙江下游梯级水库群。该方法考虑了径流随机性和模型概化及计算时的误差造成的评价指标值浮动对评价结果的影响,解决了传统层次分析法对主观判断模糊性的绝对化问题。而基于博弈论的综合赋权法,在主观权重和客观权重之间找到一个均衡解,综合反映了决策者偏好和指标值客观离散特征,增强了决策优选中权重确定的合理性。

根据本文所述方法得到优选调度方案中的发电量为 1 980.0 亿 kW · h、生态偏离度为 0.079、通航保证率为 99.178%。所选方案既获得了较高的发电效益和通航效益,又能更好地维持流域的生态环境,具有综合协调性。同时水库运行方式符合各水库在不同阶段的任务需求,具有一定的实用性。因此,本文的计算方法可行并且能对指导梯级水库群多目标优化调度决策提供一定的指导。

参考文献:

[1] 翁文林,王浩,张超然,等. 基于梯级水电站群联合调度的长江干流“龙头水库”综合效益分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6):53-60. (WENG Wenlin, WANG Hao, ZHANG Chaoran, et al. Analysis on comprehensive benefits of leading reservoir on Yangtze River in joint operation of cascaded hydropower stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6) : 53-60. (in Chinese))

[2] 周研来,郭生练,陈进. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1135-1144. (ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, CHEN Jin. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10) : 1135-1144. (in Chinese))

[3] 刘强,钟平安,徐斌,等. 三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 62-70. (LIU Qiang, ZHONG Pingan, XU Bin, et al. Joint operation strategy of water impoundment period of Three Gorges-Jinsha River lower reach cascade reservoirs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14 (5) : 62-70. (in Chinese))

[4] 郭生练,何绍坤,陈柯兵,等. 长江上游巨型水库群联合蓄水调度研究[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 6-10,35. (GUO Shenglian, HE Shaokun, CHEN Keping, et al. Joint impoundment operation of mega reservoir groups imposed of 30 reservoirs in upper Yangtze River[J]. Yangtze River, 2020, 51(1) : 6-10,35. (in Chinese))

[5] 陈悦云,梅亚东,蔡昊,等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638. (CHEN Yueyun, MEI Yadong, CAI Hao, et al. Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5) : 628-638. (in Chinese))

[6] 孔波,付少杰,黄强. 大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J]. 水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo,FU Shaojie,HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects[J]. Water Resources Protection,2020,36(6) :67-72. (in Chinese))

[7] 高玉琴,周桐,马真臻,等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resources Protection,2020,36(4) :60-67. (in Chinese))

[8] 邱颖,王丽萍,阎晓冉,等. 基于区间数组合赋权的水库调度方案评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, 438(4):24-30,35. (QIU Ying, WANG Liping, YAN Xiaoran, et al. Research on reservoir operation schemes assessment based on interval-number combination weighting[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, 438(4) :24-30,35. (in Chinese))

[9] 张利升,张睿,王学敏,等. 丹江口水利枢纽多目标兴利调度决策模型[J]. 人民长江, 2016, 47(22): 105-109. (ZHANG Lisheng, ZHANG Rui, WANG Xuemin, et al. Decision-making model of multi objective profit making operation of Danjiangkou Water Control Project [J]. Yangtze River, 2016, 47(22) : 105-109. (in Chinese))

[10] 周惠成,张改红,王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 100-106.

(ZHOU Huicheng, ZHANG Gaihong, WANG Guoli. Multi-objective decision making approach based on entropy weights for reservoir flood control operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(1): 100-106. (in Chinese))

[11] 董增川,马红亮,王明昊,等. 基于组合决策的黄河流域水量调度方案评价方法[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 89-94. (DONG Zengchuan, MA Hongliang, WANG Minghao, et al. Evaluation on water regulation scheme in Yellow River Basin based on portfolio decision-making model[J]. Water Resources Protection, 2015,31(2): 89-94. (in Chinese))

[12] 纪昌明,李荣波,刘丹,等. 梯级水电站负荷调整方案评价指标体系及决策模型[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 261-269. (JI Changming, LI Rongbo, LIU Dan, et al. Assessment index system and decision-making model for load adjustment schemes of cascade hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 261-269. (in Chinese))

[13] JIA W, DONG Z, DUAN C, et al. Ecological reservoir operation based on DFM and improved PA-DDS algorithm: a case study in Jinsha river, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2019,1:1-19.

[14] CHEN M, DONG Z, JIA W, et al. Multi-objective joint optimal operation of reservoir system and analysis of objectives competition mechanism: a case study in the upper reach of the Yangtze River[J]. Water, 2019, 11(12): 2542.

[15] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[16] 黄智力,罗键. 属性值为三角模糊数的决策对象可能度关系模型[J]. 控制与决策, 2018, 33(11):1931-1940. (HUANG Zhili, LUO Jian. Probability relation model of decision object with attribute value of triangular fuzzy number[J]. Control and Decision, 2018, 33(11):1931-1940. (in Chinese))

[17] 翟成林,司鸽,胡凌,等. 基于滑坡灾害输电网的预警模型[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 223-229. (ZHAI Chenglin, SI Hu, HU Ling, et al. Early warning model of transmission network based on landslide disaster[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 223-229. (in Chinese))

[18] 李继伟. 梯级水库群多目标优化调度与决策方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.

(收稿日期:2020-09-23 编辑:张志琴)

· 简讯 ·

江苏省水利学会农村水利专业委员会 2021 年度第一次会议暨专题学术报告会在河海大学举行

2021 年 4 月 29 日,江苏省水利学会农村水利专业委员会 2021 年度第一次会议暨专题学术报告会在河海大学举行。江苏省水利学会理事长叶健、河海大学副校长徐卫亚出席大会并讲话,来自江苏省水利系统的委员和农村水利行业专家学者等 50 余人参加会议。

江苏省水利学会理事长叶健对本次大会的召开表示祝贺,对河海大学筹办第九届农村水利专业委员会所做的工作表示感谢,他介绍了江苏省水利学会的发展历程以及历届专业委员会对江苏省农村水利发展所做出的贡献,希望本届专委会要进一步切实加强自身建设,特色鲜明,方向明确,不断增强专委会的凝聚力和向心力,发挥专委会的优势,扎实有效地开展科技活动,注重策划产学研合作项目、促进技术推广和转化,全面推动农村水利专业领域的科技进步和改革发展,为加快农村水利事业发展作出应有的贡献。

江苏省水利学会秘书长张明宣读了江苏省水利学会关于专业委员会组成人员调整的通知,专委会主任陈菁报告了委员组成及 2021 年农村水利专业委员会活动计划,各位委员开展了交流讨论。

学术报告会上,江苏省水利厅农村水利与水土保持处沈建强处长作题为《江苏省农村水利条例解读》的报告,河海大学陈菁教授作题为《河海大学农业科学与工程学院简介》和《乡村振兴背景下的灌区发展与管理》的报告,专委会副主任南通市水利勘测设计院有限公司陶晓东总经理作题为《南通区域治水实践——新时代平原河网复杂水问题的治理探索》的报告。

江苏省水利学会农村水利专业委员会挂靠在河海大学,旨在团结和凝聚同行的力量和智慧,科学制定发展规划,汇集农村水利专业人才,广泛开展学术交流和科研合作,大力培养专业人才,促进农村水利研究的发展和推广,为加快江苏水利改革发展、建设“强富美高”新江苏、实现中华民族伟大复兴中国梦作出新的更大贡献。

(本刊编辑部供稿)