

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221789

大渡河中下游梯级水电站特征曲线校正研究

朱艳军¹, 杜昊², 邱斌², 王超³, 何珊珊², 蒋志强²

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:为解决梯级水电站区间流量倒挂问题,以大渡河流域中下游梯级水电站为例,开展该流域6库梯级水电站特征曲线校正工作,以区间谬误率最小为目标,提出了曲线单点离散优化、曲线多点离散优化、曲线簇整体平移优化和分水头/水位平移优化等多种特征曲线校正方法,以通过校正各特征曲线实现对各水库出入库流量的准确推算,并使各区间的区间谬误率满足要求。模拟计算发现,虽然各曲线校正方法均有一定效果,但分水头/水位平移校正方法效果最优,在采用该方法校正特征曲线后,瀑深、龚铜区间的区间流量谬误率分别由初始53.0%、77.96%降至校正后的13.93%、4.37%,剩余区间的区间流量谬误率虽然校正后略有上升,但均在合理范围内。可见,曲线校正方法有效降低了区间流量谬误率,提高了径流序列的一致性,可为大渡河流域梯级水电站的精确水量调度提供数据基础。

关键词: 流量倒挂; 特征曲线校正; 径流非一致性; 区间流量谬误率; 梯级水库; 大渡河

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0061-04

1 概况

大渡河为岷江最大支流,干流河道全长1 062 km,总流域面积为 $7.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。截至2021年底,其干流已建成14座水电站,投产装机约 $1 744 \times 10^4 \text{ kW}$ 。瀑布沟水电站为大渡河中游的控制性水库,至下游铜街子电站共计6座电站(图1)。目前在大渡河中下游梯级水电站中,受水库调蓄、数据监测误差、流量计算方法及特征曲线等诸多因素影响,得到的计算流量过程倒挂现象严

重,不符合径流逻辑,对水库调度及水情分析造成了困扰。分析认为造成流量倒挂现象的原因主要是相关特征曲线的误差,主要包括机组的“出力—水头—流量关系曲线”(简称NHQ曲线)、闸门开度—泄流量关系曲线(简称泄流曲线)^[1]及水库水位库容曲线。因此,本文拟校正大渡河中下游梯级水电站的特征曲线,以准确计算水库的出入库流量过程,以期消除或减轻其径流非一致性现象,为水电站调度运行提供数据保障。

2 基于区间谬误率最小的曲线校正方法

2.1 曲线校正目标

以区间谬误率平方和最小为目标修正曲线。假设修正某电站的特征曲线时,其上游区间谬误率为 P_u ,其下游区间谬误率为 P_d ,则在修正该电站的特征曲线时,优化目标为 $(P_u^2 + P_d^2)$ 最小。此外,在修正水文站上游相邻电站的特征曲线时,应考虑其下泄流量过程与水文站流量过程的一致性,在修正水文站下游相邻电站的特征曲线时,要



图1 大渡河中下游梯级电站分布图

Fig. 1 Distribution of cascade hydropower stations in the middle and lower reaches of Dadu River

收稿日期: 2022-08-30, 修回日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179016); 湖北省自然科学基金项目(2021CFB597)

作者简介: 朱艳军(1982-), 男, 工程师, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 76388320@qq.com

通讯作者: 蒋志强(1986-), 男, 副教授, 研究方向为水库优化调度, E-mail: zjqzq@hust.edu.cn

考虑其反推入库流量与水文站流量过程的一致性。采用确定性系数来描述其一致性程度,确定性系数 R^2 计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (1)$$

式中, n 为总数据量; $y_c(i)$ 为下泄流量或反推入库流量; $y_0(i)$ 为水文站流量; \bar{y}_0 为水文站流量的均值。

因此,假设修正水文站上游相邻电站的特征曲线时,考虑其下泄流量过程与水文站流量过程的一致性,得到的确定性系数为 R_u^2 ;假设修正水文站下游相邻电站的特征曲线时,考虑其反推入库流量与水文站流量过程的一致性,得到的确定性系数为 R_d^2 。则对于梯级系统,综合考虑水文站流量和区间谬误率后的目标函数 J 可构造为:

$$J = \begin{cases} \min [(P_u^2 + P_d^2) / R_u^2] & \text{修正水文站上游电站曲线时} \\ \min [(P_u^2 + P_d^2) / R_d^2] & \text{修正水文站下游电站曲线时} \\ \min (P_u^2 + P_d^2) & \text{修正其他电站曲线时(非两端)} \\ \min (P_u^2) & \text{修正梯级最上游电站曲线时} \\ \min (P_d^2) & \text{修正梯级最下游电站曲线时} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 曲线校正流程

校正 NHQ 曲线、泄流曲线时,以区间谬误率最小为目标,拟定优化步骤如下。

步骤 1 计算各水库出入库流量,即由出力推算发电流量、由闸门开度推算泄流量,再由水位、库容曲线等反推入库。此过程中用到了 NHQ 曲线、泄流曲线、水位库容曲线。

步骤 2 计算出梯级流量倒挂情况,即区间谬误率情况。

步骤 3 若得到的区间谬误率不满足要求,则校正水库特征曲线,分别采用曲线单点离散优化校正方法、曲线多点离散优化校正方法、曲线簇整体平移优化校正方法和分水头/水位平移优化校正方法进行校正,校正后重新计算区间谬误率。

步骤 4 若前后两次优化后的区间谬误率差异满足要求,则停止优化,输出优化后的曲线和结果。具体流程见图 2^[2]。

2.3 多种曲线校正方式

(1)单点离散优化校正方式(方式 1)。在校正特征曲线的过程中,从一条曲线的第一个点开始,在该点可行范围内离散,得到多个离散点,根据得到的离散点依次修改原曲线,重新计算对应

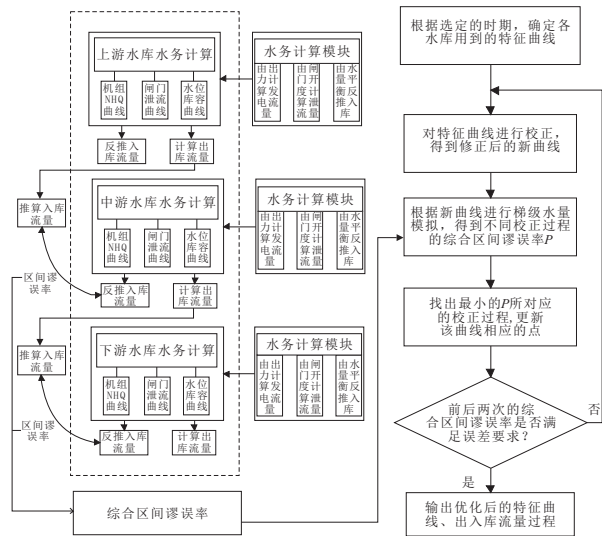


图 2 基于区间谬误率的水库特征曲线优化流程图
Fig. 2 Flow chart of reservoir characteristic curve optimization based on flow inversion rate

的区间谬误率,比较各离散点对应的区间谬误率,以谬误率最低值所对应的离散点作为修正值。以此类推,直至全部曲线点修改完成。一次迭代完成后,判断前后两次的区间谬误率是否满足要求,若满足要求,则输出优化后的特征曲线、出入库流量过程等,否则再一次迭代,直至满足条件。

(2)多点离散优化校正方式(方式 2)。在单点离散基础上,前后两点或四点线性插值,提升曲线变动幅度,使区间谬误率的改变更加明显。

(3)曲线整体平移优化校正方式(方式 3)。在可行范围内选定多个系数,将曲线整体乘以该系数并平移,平移后重新计算区间谬误率。比较不同系数对应的区间谬误率,以区间谬误率最低的系数作为该曲线的校正系数。一次修正完毕后,判断修改后的区间谬误率是否满足要求,若满足要求,则输出对应特征曲线和出入库流量过程,若不满足,则修改曲线变动范围,再次计算,直至满足要求。

(4)分水头/水位平移优化校正方式(方式 4)。在曲线整体平移优化基础上,考虑到不同水头或水位下曲线偏差的大小不同,对 NHQ 曲线和闸门曲线进行分水头或水位单独校正,即对不同水头/水位下的曲线分别乘以不同系数,以更精细化校正。

3 大渡河中下游梯级水电站特征曲线校正

3.1 初始倒挂情况

根据电站出力、闸门开度数据和特征曲线等,

计算 2019 年 7 月至 2020 年 12 月各电站的日尺度出入库流量过程,再计算区间谬误率,结果见表 1。可以发现,大渡河流域中下游 6 个电站均发生了不同程度流量倒挂(区间流量谬误率不为 0),其中瀑布沟至深溪沟区间、龚嘴至铜街子区间的倒挂率较高,分别为 53.00%、77.96%,其余区间的区间谬误率相对较低,均在 10% 以下。需说明的是,初始谬误率为反推得到的入库流量与上游出库流量之间的倒挂率,代表流量倒挂的数据量的占比,不代表实际水文监测精度、实际梯级电站的水情数据精度均满足相关规范精度要求。

表 1 各区间初始流量倒挂情况

Tab. 1 Initial flow inversion rate in each section

区间	初始的区间流量	考核要求的区间
	谬误率/%	流量谬误率/%
瀑深区间	53.00	<20
深枕区间	3.64	<10
枕沙区间	6.74	<10
沙龚区间	5.83	<10
龚铜区间	77.96	<10

基于各电站初始区间谬误率情况,以降低瀑布沟至深溪沟区间的谬误率降至 20%、其他区间降至 10% 为目标,开展各电站特征曲线校正研

表 2 各区间校正后的区间流量谬误率结果—单点离散

Tab. 2 Results of flow inversion rate after correction for each interval

区间	单点离散优化	多点离散优化	NHQ 曲	整体平移	泄流曲	整体平移	分水头/水位
	曲线后的区	曲线后的区					
	间谬误率/%	间谬误率/%	系数	率/%	系数	误率/%	调整后全年
							谬误率/%
瀑深区间(调深溪沟)	52.36	50.54	1.070	27.47	0.910	19.13	13.93
深枕区间(调枕头坝)	3.82	3.82	1.023	2.20	0.913	9.02	5.46
枕沙区间(调沙南)	5.63	5.63	1.018	7.14	0.939	9.56	9.02
沙龚区间(调龚嘴)	1.63	1.63	1.018	6.59	0.942	9.02	7.38
龚铜区间(调铜街子)	83.09	82.91	1.149	10.44	0.879	8.20	4.37

注:表中第 2 列数据为校正方式 1 数据;第 3 列数据为校正方式 2 数据;第 4~7 列数据为校正方式 3 数据;最后一列为校正方式 4 数据。

3.3 结果分析

由表 2 可知,在进行单点离散优化校正后,大部分区间的谬误率有一定程度降低,说明曲线校正方法有效。但由于曲线多、点据多,单点优化效果有限,该方法下第一、五区间的谬误率仍较大。由单点离散优化改为多点离散优化后,校正效果有一定提升,在瀑深、沙龚、龚铜区间,谬误率均有一定程度降低,但是第一、五区间谬误率较高。曲线整体平移校正后,瀑深、龚铜区间的区间谬误率迅速下降,在分水头/水位细化校正后,区间谬误率进一步降低,其区间谬误率不仅比初始谬误率和离散优化的谬误率大幅下降,且满足了区间流量谬误率考核要求,分别由初始谬误率 53.00%、77.96% 降到了校正后的 13.93%、4.37%。此外,其他区间的区间谬误率虽在校正后略有上升,但其上升幅度不大,且其值均在允许范围内。因

此外,考虑到瀑布沟特征曲线相对较准,在本研究中不对其修正。同时,考虑到沙坪水文站为国家基本水文站,其监测流量精度较高,因此校正过程除考虑区间流量谬误率外,结合公式(2)将沙坪水文站作为电站曲线校正的一个基准点。

3.2 曲线校正结果

(1)单点离散优化结果。根据原始数据,采用单点离散优化法校正各电站的 NHQ 曲线、泄流曲线和库容曲线,校正后计算得到的区间流量谬误率见表 2。

(3)曲线整体平移优化结果。采用曲线整体平移优化法校正各电站的 NHQ 曲线和泄流曲线,优化后各电站特征曲线调整系数及校正后计算得到的区间流量谬误率见表 2。其中,由于库容曲线相对准确,且其整体平移后对流量影响较大,可能会导致流量不合理,因此库容曲线校正采用离散优化的校正结果,不进行整体平移优化。

(4)分水头/水位优化结果。在曲线整体平移优化基础上,对各水头/水位下的 NHQ 曲线和泄流曲线进行单独平移优化校正,校正后计算得到的各区间流量谬误率见表 2。

此,总的来讲,本文提出的四种曲线校正方法均有一定效果,但相比而言,分水头/水位校正方法最优。

在进行曲线校正后,为保证校正后的流量不偏离实际,计算沙南出库流量、龚嘴入库流量并与水文站流量对比,见图 3。由图 3 可知,校正后的水库出入库流量过程与水文站流量过程无较大偏

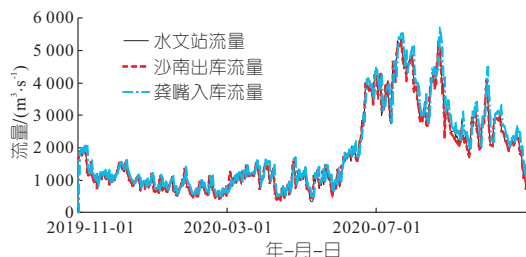


图 3 沙南出库流量、龚嘴入库流量与水文站流量对比图
Fig. 3 Comparison between the output of Shan'an, the inflow of Gongzui and the flow of hydrological station

差,三个流量过程的趋势基本一致,大小基本吻合,这说明本文提出的流量校正方法能有效、合理降低区间谬误率。

4 结 论

a. 与传统径流非一致性修正方法相比,本文采用校正水库水电站特征曲线的方式获取准确的出入库流量过程,该方法不仅使各区间的流量过程更贴合实际,且区间谬误率有效降低,同时也发现分水头/水位校正方法最优。

b. 将本文方法应用到梯级水电站径流逻辑非一致性处理工作中,可有效提高径流过程的合理性,为流域水量调度工作提供更准确的基础数据。

参考文献:

[1] 陈超,方国华,颜敏,等. 基于洪水调度资料的水库闸门泄流曲线率定方法研究[J]. 水电能源科学, 2022,40(6):24-27.

[2] 张明,王随玲,蒋志强,等. 基于动态规划算法的额勒赛下游水电站防洪优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 127-131.

Study on Characteristic Curve Correction of Cascade Hydropower Stations in the Middle and Lower Reaches of Dadu River

ZHU Yan-jun¹, DU Hao², QIU Bin², WANG Chao³, HE Shan-shan², JIANG Zhi-qiang²

(1. CHN Energy Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to solve the problem of interval flow inversion of cascade hydropower stations, taking the cascade hydropower stations in the middle and lower reaches of the Dadu River basin as an example, the characteristic curve correction of the six reservoirs in the basin was carried out. In order to accurately calculate the inflow and outflow of each reservoir by correcting each characteristic curve, and make the flow inversion rate of each interval meet the requirements, four correction methods of characteristic curve correction methods were proposed with the goal of minimizing the flow inversion rate, which includes single-point discrete optimization, multi-point discrete optimization, curve cluster overall translation optimization, and distinguishing different water head/water level translation optimization. The simulation calculation shows that although each curve correction method has certain effect, the distinguishing different water head/water level translation optimization method has the best effect. After using this method to correct the characteristic curve, the interval flow inversion rates of PuSheng and GongTong decreased from 53% and 77.96% to 13.93% and 4.37%, respectively. Although the flow inversion rates in the remaining intervals has slightly increased after correction, they are all within a reasonable range. It can be seen that the curve correction method effectively reduces the inversion rate of interval flow and improves the consistency of runoff series, which can provide a data basis for the accurate water regulation of cascade hydropower stations in the Dadu River basin.

Key words: flow inversion; characteristic curve correction; runoff inconsistency; interval flow inversion rate; cascade reservoirs; Dadu River



(上接第 52 页)

[2] 林峰竹,王慧,张建立,等. 中国沿海海岸侵蚀与海平面上升探析[J]. 海洋开发与管理,2015,32(6):16-21.

[3] 叶玮. 中国省市地理:浙江地理[M]. 北京:北京师范大学出版社,2013.

[4] 王永红. 海岸动力地貌学[M]. 北京:科学出版社,2012.

[5] 罗时龙. 海岸侵蚀风险评价模型构建及其应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.

[6] 刘述锡,孙钦邦,孙淑艳,等. 海岸带开发强度评价研究——以温州为例[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(2): 9-15.

[7] 程武凤. 岬湾海滩的稳定性与沉积行为[D]. 上海:

华东师范大学, 2017.

[8] 张小玲. 华南弧形海岸近期稳定性分析[D]. 上海:华东师范大学, 2013.

[9] HSU J R C, EVANS C. Parabolic bay shapes and applications[J]. Proceedings of the institution of civil engineers,1989, 87(4): 557-570.

[10] 曹惠美,蔡锋,苏贤泽,等. 海滩养护和修复工程的动态平衡滨线设计研究——以浙江省苍南县炎亭湾海滩修复工程设计为例[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(2): 185-193.

[11] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志·第六分册·浙江省南部海湾[M]. 青岛:海洋出版社, 1993.

Analysis of Characteristics of Beach Profile Changes in Wenzhou Area

ZHANG Shi-an¹, BU Yu-hui²

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

2. Surveying and Design Institute of Qiantang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 321000, China)

Abstract: This paper selected 6 typical cape-bay sandy beaches in Wenzhou area to sort out the natural environment. The parabolic plane morphology model (MEPBAY) was used to compare the relative positions of the static simulated shoreline with the recent actual shoreline. The advancing and retreating trend of the coastline of the shaped sandy coast was analyzed. The current stability of the coastal beaches of Cape Bay in Wenzhou area was discussed. The results show that the coastline is in a stable state as a whole, and the profile of sandy beaches is mainly divided into four types: concave downward, upward convex, slope, and slope + upward convex combination. The characteristics of the interannual erosion and deposition changes of the profile are mainly divided into three modes: the upward erosion and the downward siltation, the overall erosion type and the basic stable type.

Key words: cape bay coast; coastal erosion; profile morphology; parabolic model