

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230696

瀑布沟水电站特性曲线验证研究

陈在妮¹, 杜昊², 邱斌², 王超³, 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 100048)

摘要: 径流非一致性溯源及其校正的前提是具有准确可靠的长系列实测流量序列作为校正基准, 对于无长系列实测流量数据的流域, 可通过短时、典型的测验数据对水电站计算出库流量的准确性进行验证, 从而获得校正基准。基于部分时段的超声波测流流量, 结合稳定工况和突变工况下的尾水位流量关系分析, 对瀑布沟机组特性曲线和闸门泄流曲线的准确性进行了验证与分析。研究结果证明了瀑布沟计算出库流量的准确性, 为该梯级径流非一致性溯源和校正工作提供了基础支撑。

关键词: 超声波流量; 机组特性曲线验证; 闸门泄流曲线验证; 稳定工况; 突变工况

中图分类号: TV551; TV697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0187-04

1 引言

近年来, 我国各大流域上下游断面径流非一致性现象较为常见, 对梯级水库的生产调度造成了一定困扰^[1], 亟需进行径流非一致性溯源与校正研究。对于缺少长系列实测流量作为校正基准流量的梯级, 可选择特性曲线相对准确的水电站, 经验证后将其出库流量作为径流非一致性校正的基准。其特性曲线的准确性验证可借助模型试验或实测流量来进行, 如董新亮等^[2]通过机组发电耗水曲线模型试验对桐子林水电站的机组特性曲线进行了率定; 李香丽等^[3]提出了通过试算法验证机组特性曲线的方法; 陈超等^[4]基于洪水调度资料和退水方程对大花水电站泄流曲线进行了率定; 刘和咏等^[5]选用水位流量关系和流量系数法对锦屏二级拦河闸坝泄流曲线进行了率定。为此, 本文结合发电机组超声波测流和水电站尾水位流量关系曲线, 对瀑布沟机组 NHQ 曲线和闸门泄流曲线的准确性进行验证, 旨在证明瀑布沟出库流量的准确性, 为流域径流非一致性溯源及误差校正提供基准。

2 研究方法

水电站采用超声波测流计对机组发电流量进行监测的结果准确性较高, 本文据此拟定了水电站特性曲线准确性验证方法, 具体步骤如下。

步骤 1 验证机组特性曲线准确性。使用水位数据、机组出力数据和机组 NHQ 曲线计算各机组发电流量, 并与超声波流量进行对比, 确定性系数计算公式为:

$$R = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_c^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

式中, Q_m^t 为 t 时段超声波流量; Q_c^t 为 t 时段计算发电流量; \bar{Q}_m 为超声波流量平均值。

超声波流量与计算流量吻合越好, 确定性系数越接近 1, 证明机组特性曲线越准确。

步骤 2 在完成步骤 1 且证明电站机组特性曲线准确性的前提下, 用电站坝下水位与尾水位流量关系曲线计算出枯期电站出库流量序列, 结合已验证准确的发电流量, 验证尾水位流量关系曲线的准确性。

步骤 3 在完成步骤 2 且证明电站尾水位流量关系曲线可靠性的前提下, 查找和识别电站水位、机组出力、闸门开度保持相对稳定的工况, 将时段内电站计算出库流量与参考流量(由尾水位流量关系曲线得到)进行对比, 以验证闸门泄流曲线的准确性。

收稿日期: 2023-05-03, 修回日期: 2023-06-11

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: 陈在妮(1984-), 女, 工程师, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 461054765@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: zqjzq@hust.edu.cn

步骤 4 查找和识别机组出力增大、减小及闸门打开、闭合等工况突变的时段,观察计算流量与参考流量之间的误差变化是否符合工况突变下的流量变化逻辑,对流量误差进行合理性解释。

3 瀑布沟水电站机组特性曲线准确性验证

3.1 数据选择

瀑布沟水电站共有 6 台机组,其中# 1、# 3、# 5 机组型号相同,# 2、# 4、# 6 机组型号相同;共有 3 个溢洪道和 1 个泄洪洞,溢洪道全开为 17 m,泄洪洞全开为 11.5 m,放空洞流量可忽略不计。瀑布沟各机组超声波测流数据见表 1,综合数据时段长度及数据质量,选择 2019 年 7 月、2022 年 9 月作为汛期数据进行验证,选择 2022 年 4 月、2022 年 11 月作为非汛期数据进行验证。其中,2022 年 4 月缺少# 2 机组超声波流量,用计算流量替代。所有数据均为小时尺度数据。

表 1 超声波流量数据

Tab. 1 Ultrasonic flow data

年份	时间段	时间尺度/h	数据情况
2019	07-12-0:00~07-22-17:00	1	偶尔缺失
2020	07-12-0:00~07-22-12:00	1	每日仅 0:00~12:00 有数据
2021	07-14-0:00~07-22-17:00	1	偶尔缺失,但天数较短
2022	07-12-0:00~07-22-12:00	1	每日仅 0:00~12:00 有数据
2022	4、9、11 月	1	4 月缺少# 2 机组

3.2 枯期及汛期机组特性曲线准确性整体验证

2022 年 4 月、2022 年 11 月、2019 年 7 月、2022 年 9 月全站超声波流量与计算发电流量误差比例分布见图 1。

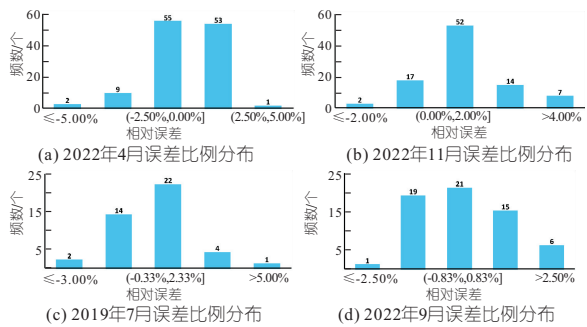


图 1 各时段误差比例分布

Fig. 1 Distribution of error proportion of different time period

各时段平均流量误差、确定性系数及 t 检验参数见表 2。由表 2 可知,4 月平均绝对流量误差为 6.14 m³/s,90%的误差比例集中分布在相对误差的(-2.5%, 2.5%)之间,确定性系数为 0.999 6;11 月平均绝对流量误差为 9.82 m³/s,90%的误差比例集中分布在相对误差的(-2%, 4%)之间,确定性系数为 0.998 3;7 月平均绝对

流量误差为 17.54 m³/s,90%的误差比例集中分布在相对误差的(-3%, 5%)之间,确定性系数为 0.999 6;9 月平均绝对流量误差为 11.32 m³/s,90%的误差比例集中分布在相对误差的(-2.5%, 2.5%)之间,确定性系数为 0.998 3。t 检验中,设定原假设 H₀,平均相对误差不小于 5%;备择假设 H₁,平均相对误差小于 5%。4 个月份的 t 统计量分别为 -40.13、-18.92、-3.87、-15.65,均小于 -t_{0.05}(n-1),因此拒绝原假设,认为平均相对误差小于 5%。从整体上看说明枯期及汛期机组特性曲线是准确的。

表 2 各时段平均流量误差及确定性系数
Tab. 2 Average flow error and deterministic coefficient of different time period

时段	平均误差	平均绝对误差	确定性系数	t 统计量	-t _{0.05} (n-1)
2022 年 4 月	0.69	6.14	0.999 6	-40.13	-1.98
2019 年 7 月	2.10	17.54	0.991 3	-18.92	-2.02
2022 年 9 月	3.51	11.32	0.998 2	-3.87	-1.99
2022 年 11 月	8.20	9.82	0.998 3	-15.65	-1.99

注:平均误差、平均绝对误差单位均为 m³/s。

3.3 机组特性曲线准确性单独验证

分别统计不同时段单个机组计算流量与超声波流量之间的误差及误差比例情况,见表 3。由表 3 可知,各机组流量误差均在 15 m³/s 以下,平均误差比例均在 7%以下,均在可接受范围内。

表 3 不同时段各机组流量对比

Tab. 3 Comparison of flow of each unit of different time period

不同时段	项目	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
2019 年 7 月	计算平均	257.77	240.17	207.85	124.83	288.20	313.45
	超声平均	270.23	253.07	211.75	134.07	296.99	311.18
	作差结果	12.46	12.89	3.91	9.25	8.72	-2.25
2022 年 4 月	计算平均	190.73		142.81	93.64	153.03	173.76
	超声平均	197.16		141.32	93.81	151.96	165.24
	作差结果	6.43		-1.49	4.67	-1.07	-8.52
2022 年 9 月	计算平均	111.81	149.79	85.99	43.57	114.76	56.56
	超声平均	113.55	150.48	85.68	46.11	113.84	53.03
	作差结果	1.74	0.69	-0.31	2.54	-0.92	-3.53
2022 年 11 月	计算平均	213.86	117.77	6.37	166.47	157.98	170.35
	超声平均	219.06	119.59	6.29	166.25	156.51	160.57
	作差结果	5.20	1.82	-0.08	-0.22	-1.47	-9.78
误差比例/%		2.63	1.47	-1.63	-0.25	-0.62	-6.19

注:计算平均、超声平均、作差结果单位均为 m³/s。

3.4 不同流量级别下机组特性曲线验证

6 台机组的平均误差均在可接受范围内,证明机组特性曲线总体上是准确的,但局部准确性仍需进一步验证,尤其是不同的流量级别下。因此,将不同流量等级下机组发电流量与超声波流量进行了对比,各机组发电流量情况见表 4。由表 4 可看出,各机组在不同流量级别下的流量误差均比较小。随着流量级别的增大,流量误差略

表 4 单个机组不同流量级别下发电流量误差

Tab. 4 Flow error under different flow levels of single unit

机组	流量等级	m ³ /s		
		计算流量	超声波流量	流量误差
# 1	0~10	6.50	7.16	0.66
	10~50	26.00	27.27	1.27
	50~200	113.64	116.34	2.70
	200~500	307.24	316.05	8.81
# 2	0~10	4.25	2.29	-1.96
	10~50	27.50	37.00	9.50
	50~200	110.49	120.26	9.77
	200~500	291.78	274.22	-17.56
# 3	0~10	5.90	6.88	0.98
	10~50	34.15	34.97	0.82
	50~200	106.74	106.62	-0.12
	200~500	332.86	328.75	-4.11
# 4	0~10	4.42	5.10	0.68
	10~50	27.12	26.84	-0.28
	50~200	109.11	109.92	0.81
	200~500	325.99	333.95	7.97
# 5	0~10	7.43	12.20	4.77
	10~50	30.97	30.70	-0.26
	50~200	110.22	108.26	-1.95
	200~500	315.39	312.93	-2.46
# 6	0~10	6.17	5.71	-0.46
	10~50	29.32	26.57	-2.75
	50~200	107.44	98.64	-8.80
	200~500	311.38	298.49	-12.88

微增大,但仍不足 15 m³/s,证明单个机组的特性曲线在局部是准确的。

4 瀑布沟水电站泄流曲线准确性验证

4.1 尾水位流量关系曲线可靠性验证

以瀑布沟 2019~2020 年日尺度数据为例,用瀑布沟坝下水位和尾水位流量关系曲线求出瀑布沟出库流量序列(称为“待验证流量”),再用机组特性曲线和待验证的泄流曲线计算出另一套出库流量序列(称为“计算流量”),枯期(11月~次年2月)两个序列的比较情况见图 2,其流量误差分布情况见图 3。

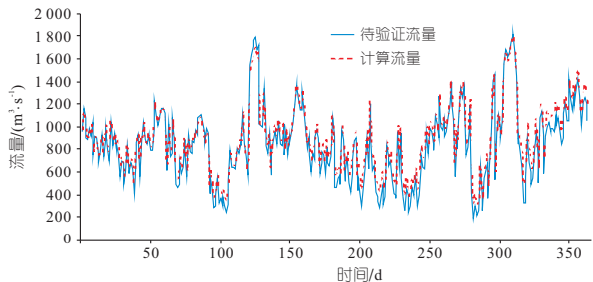


图 2 枯期计算流量、待验证流量

Fig. 2 Calculate and undetermined flow during dry period

由图 2、3 可知,枯水期待验证流量和计算流量的过程线基本吻合,计算流量比待验证流量约大 57 m³/s,占总流量的 6.35%。在 t 检验中,设定原假设 H₀,平均相对误差不小于 5%;备择假

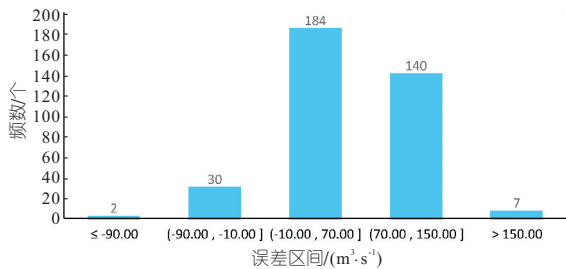


图 3 枯期误差分布情况

Fig. 3 Distribution of error during dry period

设 H₁,平均相对误差小于 5%。t 统计量为 -2.54,小于 -t_{0.05}(n-1),因此拒绝原假设,认为平均相对误差小于 5%。因枯期未通过闸门泄流,出库流量仅由发电流量组成,计算出库流量可视为真值。

2019~2020 年汛期(5~10 月)计算流量与参考流量之间的误差分布情况见图 4、5。由图 4、5 可知,汛期参考流量和计算流量的流量误差在 500 m³/s 以上的有 64 个,在排除掉这些工况突变导致的极大误差后,平均流量误差为 -50.9 m³/s,误差比例不足 3%。因此在去除因工况突变带来的极端情况后,汛期误差也在可接受的范围内。

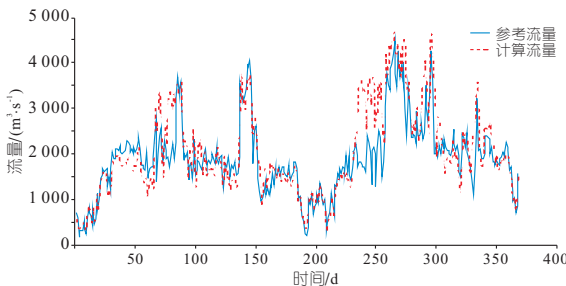


图 4 汛期计算流量、参考流量

Fig. 4 Calculate and undetermined flow during flood period

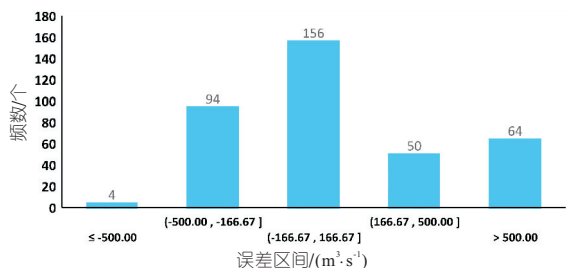


图 5 汛期误差分布情况

Fig. 5 Distribution of error during flood period

4.2 泄流曲线准确性验证

4.2.1 稳定工况下泄流曲线准确性验证

由尾水位流量关系曲线推算得到的出库流量序列在水位相对稳定、机组和闸门工况不发生突变的情况下,可作为径流非一致性校正的基准流量(参考流量),以验证泄流曲线的准确性。

由于要观察水位、机组和闸门的稳定状态和

变化情况,因此需选择 5 min 尺度的数据序列进行精细分析。识别和提取的稳定工况下各闸门在不同开度下单独工作及共同工作的典型工况见表 5。

表 5 稳定工况及误差

Tab. 5 Stable working conditions and the errors

工况 序号	坝下水位	#1溢 洪道	#2溢 洪道	#3溢 洪道	泄洪 洞	误差比 例/%	t 统 计量	$-t_{0.05}(n-1)$
1	略有上升	3 m	3 m	3 m	关闭	<3	-16.06	-2.07
2	略有下降	6 m	5 m	6 m	关闭	<3	-35.76	-2.08
3	略有波动	7 m	7 m	7 m	关闭	<5	-22.74	-2.04
4	略有波动	9 m	9 m	9 m	关闭	<4.5	-14.59	-2.07
5	略有波动	关闭	关闭	关闭	3 m	<3	-33.60	-2.07
6	略有上升	关闭	关闭	关闭	4 m	<4.5	-7.61	-2.26
7	略有上升	关闭	关闭	关闭	7 m	<4.5	-11.60	-2.16
8	较为稳定	7 m	7 m	7 m	4 m	<3	-35.72	-2.08

表 5 为水位保持相对稳定、机组和闸门工况未发生突变的情况,其中,工况 1、2、3、4 为溢洪道在低、中、较高、高开度下单独运行的情况,工况 5、6、7 为泄洪洞在低、中、高开度下单独运行的情况,工况 8 为溢洪道和泄洪洞共同运行的情况,通过各工况下的流量及水位发现,在各种稳定工况下,汛期参考流量与计算流量均能较好地吻合,误差有正值和负值,整体分布在 0 左右,误差除以计算出库得到的误差比例均小于 4.5%,t 统计量均小于相应的 $-t_{0.05}(n-1)$ 。这表明溢洪道和泄洪洞的泄流曲线在不同开度下均是较准确的,且两者共同工作时计算得到的流量也是可靠的。

4.2.2 工况突变情况下流量误差分析

为验证在机组、闸门工况发生变化或在下游水电站坝上水位存在顶托作用下的流量变化是否符合逻辑^[6-7],识别和提取工况发生变化的样本,其工况和误差变化情况见表 6。

表 6 突变工况

Tab. 6 Sudden working conditions

序号	工况	误差
9	闸门开度降低	突然增大,随后减小至正常水平
10	闸门开度提高	突然增大,随后减小至正常水平
11	出力增加,深溪沟水位抬高	由正常水平减小至 -200 m ³ /s 左右
12	出力减小,深溪沟水位降低	由正常水平增大至 200 m ³ /s 左右

工况 9、10 描述的情形见图 6(a)、(b),闸门开度突然降低或提高,出库流量骤变,但坝下水位不会随之骤变,而是缓慢变化,这一变化过程持续时间更长,这期间流量误差突然增大,随后减小至正常水平。工况 11、12 所述时段见图 6(c)、(d),瀑布沟机组出力增大或减小,下游深溪沟入库流量随之变化,其水位对瀑布沟坝下水位产生顶托作用,瀑布沟尾水位一流量关系被改变,产生误差。由此可知,汛期的流量误差随着工况的突变

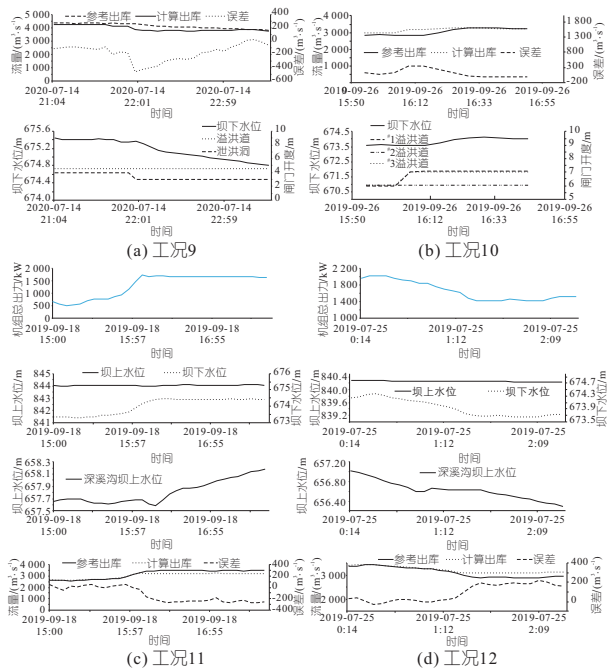


图 6 突变工况下流量、水位及闸门开度

Fig. 6 Flow, water level and gate opening in sudden working conditions

产生不同变化,其变化均符合流体及水位的变化逻辑。

5 结论

- a. 瀑布沟水电站计算发电流量与汛期出库流量误差比例小于 5%,突变工况下流量变化符合水位变化逻辑,特性曲线准确性较高,可作为径流非一致性校正的基准流量。
- b. 本文借助少量超声波测流数据,逐层推进分析,对瀑布沟各特性曲线的准确性进行了验证,该方法可适用于实测资料不充分的站点和区域。
- c. 本文提出的方法需要上一步骤的肯定性结论作为下一步骤的前提,上一步骤的结论若为否定时的应对方案有待进一步研究。

参考文献:

[1] 马钰其,陈元芳,张学成. 沁河年径流量非一致性水文频率分析[J]. 人民黄河,2021,43(7):24-27,50.
 [2] 董新亮,何朝晖. 基于原型工况测验的桐子林电站机组发电用水曲线率定[J]. 四川水力发电,2019,38(2):120-123.
 [3] 李香丽,叶坤. 试算法在计算发电流量及绘制 NHQ 曲线中的应用[J]. 科技创新与应用,2015, 148(36):38-39.
 [4] 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.

4 结论

本文采用改进麻雀搜索算法 (ISSA) 对门控循环单元 (GRU) 的参数进行寻优, 构建了基于 ISSA-GRU 的大坝变形预测模型, 并通过实例验证了该模型的可行性和有效性, 为大坝变形预测提供了一种有效的方法。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2020 全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.

[2] 范哲南, 刘小生. NARX 神经网络在大坝变形预测中的应用[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 125-128.

[3] 黄永涛, 刘晓青, 季威, 等. HCM-PSO-GRU 组合预测模型在大坝变形预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 120-123, 61.

[4] 刘永利, 朱亚孟, 晁浩. 多策略 MRFO 算法的卷积神经网络超参数优化[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 83-88, 95.

[5] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems science & control engineering, 2020, 8(1): 22-34.

[6] 李雅丽, 王淑琴, 陈倩茹, 等. 若干新型群智能优化算法的对比研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 1-12.

[7] 段玉先, 刘昌云. 基于 Sobol 序列和纵横交叉策略的麻雀搜索算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(1): 36-43.

[8] 李明军, 王均星, 王亚洲. 基于改进粒子群优化算法和极限学习机的混凝土坝变形预测[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2019, 52(11): 1136-1144.

[9] CHEN G, TANG B, ZENG X, et al. Short-term wind speed forecasting based on long short-term memory and improved BP neural network[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2022, 134: 107365.

[10] SEYYEDABBASI A. WOASCALF: A new hybrid whale optimization algorithm based on sine cosine algorithm and levy flight to solve global optimization problems[J]. Advances in engineering software, 2022, 173: 103272.

[11] YU Z, SUN Y, ZHANG J, et al. Gated recurrent unit neural network (GRU) based on quantile regression (QR) predicts reservoir parameters through well logging data[J]. Frontiers in earth science, 2023, 11: 1087385.

Study on Dam Deformation Prediction Based on ISSA-GRU

LI Shu-jian, LIU Xiao-sheng

(School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficulty in determining the optimal parameters and low accuracy of the deep learning method in dam prediction, the sparrow search algorithm (SSA) was improved, and the parameters of the gated recurrent unit (GRU) were optimized by the improved sparrow search algorithm (ISSA). Then a dam deformation prediction model based on the ISSA-GRU was constructed, and this model was applied to the deformation prediction of the Longyangxia Dam of Qinghai Section in the upper reaches of the Yellow River. The results show that the dam deformation prediction model based on ISSA-GRU has higher prediction accuracy and stability, which can be used as a reference for dam deformation prediction.

Key words: dam deformation prediction; gated loop network; improved sparrow search algorithm; prediction accuracy

(上接第 190 页)

[5] 刘和咏, 王伟, 胡晨贺, 等. 基于关系曲线和水力学法的泄洪闸门泄流曲线率定[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(1): 99-103, 84.

[6] 俞洪杰, 纪昌明, 张验科, 等. 反调节作用下的梯级

水库短期优化调度研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 185-190.

[7] 陈欢. 考虑动库容及回水顶托作用的三峡梯级短期优化调度研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

Verification Study on Characteristic Curve of Pubugou Hydropower Station

CHEN Zai-ni¹, DU Hao², QIU Bin², WANG Chao³, JIANG Zhi-qiang²

(1. Guoneng Dadu River Basin 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 100048, China)

Abstract: The premise of non-conformity traceability and correction of run-off is that there is an accurate and reliable long series measured flow sequence as the calibration reference. For watersheds without long series of measured flow data, the accuracy of calculated flow can be verified through short-term and typical test data to obtain a calibration benchmark. In this study, the accuracy of NHQ curves and discharge curves of Pubugou Reservoir was analyzed and verified based on the ultrasonic flow, combined with the analysis of the level-flow relationship under stable and sudden change working conditions. The research results have proven the accuracy of the outflow calculation of Pubugou reservoir, which provided basic support for tracing and correcting the non-uniformity of cascade runoff.

Key words: ultrasonic flow; unit characteristic curve verification; gate curve verification; stable working conditions; mutated working conditions