

汉江兴隆水利枢纽泄流曲线率定探讨

王超¹, 袁泽雄¹, 吴铮¹, 王合凡²

¹湖北省汉江兴隆水利枢纽管理局, 湖北 武汉

²长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年9月9日; 录用日期: 2022年11月29日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

兴隆水利枢纽工程出流量的正确与否, 直接关系到工程的正常运行以及防洪调度效益。本文基于原型观测的实测流量观测数据, 采用简洁、易于使用的方法对泄洪闸和发电流量的泄流曲线进行率定, 并结合实际出流过程进行误差分析, 其推求成果满足工程调度运行需求, 使兴隆水利枢纽更好地发挥兴利除害的作用。

关键词

兴隆水利枢纽, 泄流曲线, 率定, 误差分析

Discussion on Discharge Curve Calibration of the Hanjiang Xinglong Water Control Project

Chao Wang¹, Zexiong Yuan¹, Zheng Wu¹, Hefan Wang²

¹Hanjiang Xinglong Water Control Project Administration Bureau, Wuhan Hubei

²Hydrology and Water Resources Survey Bureau of the Middle Reaches of the Yangtze River, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: Sep. 9th, 2022; accepted: Nov. 29th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

Whether the outflow of Xinglong water control project is correct or not directly related to the normal operation of the project and the benefit of flood control and dispatch. Based on the measured flow observation data of the prototype observation, this paper adopts a simple and easy-to-use method to calibrate the discharge curve of the flood gate and power generation and generation flow. Combined with the actual outflow process, the error analysis is carried out, and the inferred results meet the needs of project scheduling and operation, so that the Xinglong water control project can better play the role of promoting interests and eliminating harm.

作者简介: 王超(1977-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事大型水利枢纽工程运行管理、建设管理、防汛调度以及安全监测等工作, Email: 493243511@qq.com

Keywords

Xinglong Water Control Project, Discharge Curve, Calibration, Error Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 研究背景

兴隆水利枢纽工程是南水北调中线一期工程汉江中下游四项治理工程之一。工程位于汉江中下游河段湖北省潜江、天门市境内，上距丹江口水利枢纽 378.3 km，下距河口 273.7 km，工程于 2013 年建成蓄水。其开发任务是以灌溉、航运为主，兼顾发电。工程正常蓄水位 36.20 m，相应库容 2.73 亿 m^3 。电站装机容量 40 MW。枢纽拦河水闸最大过闸流量约 14,000 m^3/s 左右，为 I 等工程。

泄流曲线是兴隆水利枢纽工程防洪、运行调度的基础资料之一，也是工程进行水量平衡计算不可缺少的参数。该曲线精度准确与否，直接关系到工程出入库水量数据的真实性，也关系工程本身及下游地区防洪安全。为了确保工程运行安全及电站正常工作，优化工程调度、提高发电效率及工程效益，更好发挥工程兴利除害的作用，需要确定工程闸坝推流公式及电功率推流相关系数，综合确定泄流曲线。

2. 率定方案

常用的泄流曲线率定方法主要有理论计算、水工模型试验和原型观测三种[1]。对于已建枢纽工程，且下游控制条件较好的河段，可以利用原型观测的水文方法来进行率定。考虑到兴隆水利枢纽泄流设备运行频率、自身状况及河流测流条件等因素，初步选定两个测验断面，分别位于电站泄水出口处、枢纽工程下游 2 km 处，断



Figure 1. Schematic diagram of the layout of the hydrological test section under the dam of the Xinglong water control project

图 1. 兴隆水利枢纽坝下水文测验断面布置示意图

面分别命名为 D1 和 D2 断面,分布图见图 1。D1 断面所测流量即为电站发电流量, D2 断面为枢纽总下泄流量; D2 断面减去 D1 断面的流量即为枢纽工程泄洪流量。如此枢纽各种泄水情况下的组合流量均可测得。

本文采用走航式声学多普勒流速剖面仪(简称: ADCP)流量测验数据分别对泄洪及电站发电流量的泄流曲线进行率定。

3. 率定过程及分析

3.1. 率定过程

2019 年至 2021 年,采用走航式 ADCP [2] [3]施测兴隆水利枢纽坝下流量总计 66 次,其中泄洪流量 32 次,电站发电流量 25 次,敞泄流量 9 次。率定期间,坝上水位变幅为 34.32~39.23 m, 闸门开高变幅为 0.5~3.0 m。率定期间,兴隆水利枢纽水调信息等具体数据见表 1。

Table 1. Information table of discharge curve calibration of Xinglong water control project from 2019 to 2021

表 1. 2019~2021 年兴隆水利枢纽泄流曲线率定信息表

| 要素名称 | 范围 |
|---------|-------------------------------|
| 坝上水位 | 34.32~39.23 m |
| 上下游水位落差 | 0.56~5.5 m |
| 泄洪闸门开高 | 0.5~3.0 m |
| 泄洪流量 | 1060~11,000 m ³ /s |
| 发电总功率 | 2.6~30 MW |
| 发电流量 | 320~879 m ³ /s |

3.2. 测验数据整理

泄洪曲线率定工作需要收集的数据有枢纽工程闸上水位、闸下水位、泄洪孔闸门开启数、闸门开启高度、发电机组开启数、各机组发电电功率、流态记录、出流断面流量等。测次布置充分考虑上下游落差、闸门开高、发电机组开启台数及发电功率的变幅,力求涵盖枢纽工程运行不同工况。

3.3. 综合泄流曲线率定

3.3.1. 泄洪曲线率定[4]

通过收集枢纽工程运行资料可知,在非特大洪水期存在淹没孔流和自由孔流两种状态。本次率定的闸门开启高度均小于上游水头和下游水头,故为典型的淹没孔流。因此本文只分析闸孔淹没在水中时出流流态为孔流的情况。

参考借鉴《水工建筑物与堰槽测流规范》SL 537-2011 [5]中经验淹没系数计算方法,将其定为变量系数 K 。在中低水期泄洪流量计算公式也可定为:

$$Q = Mnbe(2g\Delta Z)^{0.5} \quad (1)$$

$$M = K \left(\frac{e}{H} \right)^{0.038} \quad (2)$$

式中: b ——闸门单宽(m); n ——闸门开启台数; e ——闸门开启高度; M ——流量系数; ΔZ ——上下游水位差(m); K ——经验系数(需要率定); H ——上游水头(m)。

泄洪曲线定线需要率定的参数为经验系数 K 。初步以 $e/\Delta Z$ 与 M 建立关系。通过试错发现，经验系数为 0.92 时，关系点据分布带较为窄长，且流量系数分布范围在 0.83~0.90 之间，较为适中。拟合关系曲线如图 2 所示。

3.3.2. 电站发电曲线率定

枢纽电站多机流量计算公式[6]为：

$$Q = M_2 N_s^m \Delta Z^n \tag{3}$$

式中： N_s ——总电功率(KW)； M_2 ——综合效率流量系数(需要率定)； ΔZ ——上下游水位差(m)； n ——落差指数(需采用多组数据试算)； m ——电功率指数(需要采用多组数据试算)。

电站泄流曲线率定的参数为综合效率系数 M_2 及落差指数 n 和电功率指数 m 。初步以总电功率与综合效率系数 M_2 建立关系。通过试错发现，当落差指数 n 为-0.5、电功率指数为 2 时，关系线较为平滑，且流量系数的分布范围在 1.5~75 之间。拟合关系曲线如图 3 所示。

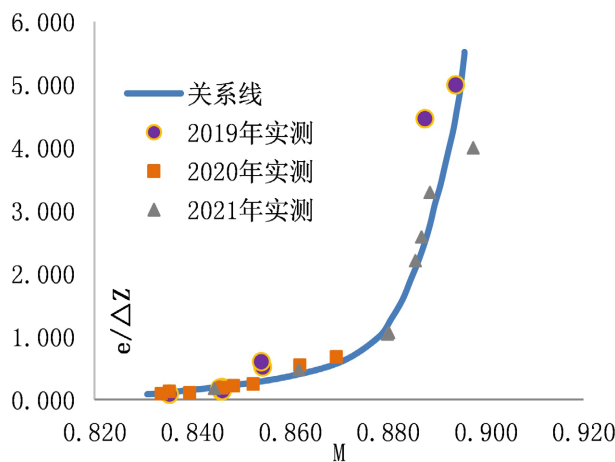


Figure 2. Relationship diagram of flood discharge curve of Xinglong water control project

图 2. 兴隆水利枢纽泄洪曲线关系图

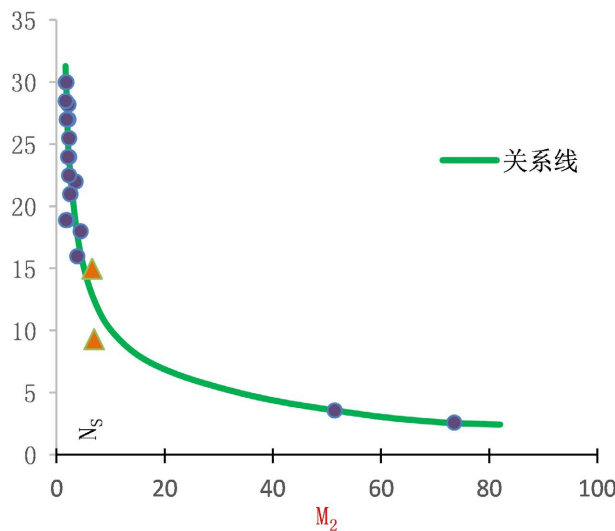


Figure 3. Relationship between the power generation discharge and push flow curve of Xinglong water control project

图 3. 兴隆水利枢纽发电泄水推流曲线关系图

3.4. 评定检验及误差分析

根据《水文资料整编规范》SL247-2020 [7]规定,结合本工程实际情况,关系线为单一曲线,且测点在 10 个以上应做符号检验、适线检验和偏离数值检验。分别对泄洪曲线(见表 2)、电站发电泄流曲线(见表 3)、及单孔流速-闸门开高关系曲线(见表 4)进行三项检验(符号检验显著水平 α 取 0.25; 适线检验显著水平 α 取 0.05; 偏离数值检验显著水平 α 取 0.10)。

从检验结果可知,初步率定的三条关系线三项检验均合格。计算系统误差分别为-0.2%、4.6%及-0.1%,随机不确定度分别为 1.2%、44.4%和 42.8%,后两种的标准差相对较大。其中:偏差 $\leq 15\%$ 的合格率分别为 79%、39%;偏差 $\leq 20\%$ 的合格率分别为 79%、67%。其中电站推流有 4 个点据,相对误差均超过 30%。考虑到整个测验河段不同水位级存在宽度不等的回流区,测验时存在一定难度,在后续的工作中如能采取先进的措施解决此问题,比测精度将进一步提高。

总体来说,可认为率定过程在总体上与实测点据无明显差异,即关系线具备一定精度,其推流结果基本可靠,泄洪推流曲线和电站发电推流曲线关系良好。

Table 2. Three-line inspection results of the flood discharge and push flow relationship line of Xinglong water control project
表 2. 兴隆枢纽泄洪推流关系线三线检验成果表

| | | | |
|---------|--------------|-----------------------------------|---------------|
| 样本容量: | N = 26 | 正号个数: 15 | 符号交换次数: 9 |
| 符号检验: | u = 0.59 | 允许: 1.15 (显著性水平 $\alpha = 0.25$) | 合格 |
| 适线检验: | U = 1.20 | 允许: 1.64 (显著性水平 $\alpha = 0.05$) | 合格 |
| 偏离数值检验: | t = 0.83 | 允许: 1.70 (显著性水平 $\alpha = 0.10$) | 合格 |
| 标准差: | Se (%) = 0.6 | 随机不确定度(%): 1.2 | 系统误差(%): -0.1 |

Table 3. Results of the third-line inspection of the relationship between power generation, discharge and push flow of Xinglong water control project

表 3. 兴隆枢纽发电泄水推流关系线三线检验成果表

| | | | |
|---------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 样本容量: | N = 21 | 正号个数: 10 | 符号交换次数: 12 |
| 符号检验: | u = 0.00 | 允许: 1.15 (显著性水平 $\alpha = 0.25$) | 合格 |
| 适线检验: | U = -1.12 | | 免检 |
| 偏离数值检验: | t = 0.99 | 允许: 1.70 (显著性水平 $\alpha = 0.10$) | 合格 |
| 标准差: | Se (%) = 22.2 | 随机不确定度(%): 44.4 | 系统误差(%): -4.6 |

Table 4. Three-line inspection results of the relationship between single-hole flow velocity and gate opening height of Xinglong water control project

表 4. 兴隆枢纽泄洪单孔流速与闸门开高关系线三线检验成果表

| | | | |
|---------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| 样本容量: | N = 26 | 正号个数: 12 | 符号交换次数: 14 |
| 符号检验: | u = 0.20 | 允许: 1.15 (显著性水平 $\alpha = 0.25$) | 合格 |
| 适线检验: | U = -0.80 | | 免检 |
| 偏离数值检验: | t = 0.02 | 允许: 1.70 (显著性水平 $\alpha = 0.10$) | 合格 |
| 标准差: | Se (%) = 21.4 | 随机不确定度(%): 42.8 | 系统误差(%): -0.1 |

4. 成果验证

为了验证上述率定成果的合理性,需要将通过率定关系式推算出的枢纽工程出流流量和实测流量进行对比分析。目前已从兴隆枢纽管理局获取 2021 年 10 月 6 日至 26 日的枢纽发电和泄洪相关实时统计参数,考虑到缺

少对应的枢纽泄洪弃水和发电弃水实测流量资料，初步采用兴隆枢纽下游约 25 km 处的兴隆水文站测验断面的整编相应流量代替出流流量。

枢纽泄洪流量和发电弃水的流量合程算出的总流量与兴隆水文站测验断面整编计算流量进行对比分析。考虑到洪水传播特性，初定两个断面的传播时间为 5 h。采用上述方法进行统计分析计算，结果如下：枢纽推算流量计算相对误差大于 0 的占比 94%；相对误差小于 20%的占比 69.1%；相对误差小于 30%的占比 97.7%。两种流量的过程线对比见图 4。从图中可知，两种流量过程线的变化趋势较为一致，枢纽推流流量普遍大于下游 25 km 兴隆水文站断面的整编流量。2021 年 10 月 7 日 20 时至 10 月 9 日 20 时全程敞泄，没有推流数据。枢纽推流过程线呈锯齿状变化、兴隆水文站断面流量变化则较为平滑，锯齿状变化系由推流的参数(如闸门开启数、开启高度、电站电功率等)正常调度变化导致。从大于 0 的相对误差占比为 94%的结果，初步分析是洪水波坦化效果的体现。

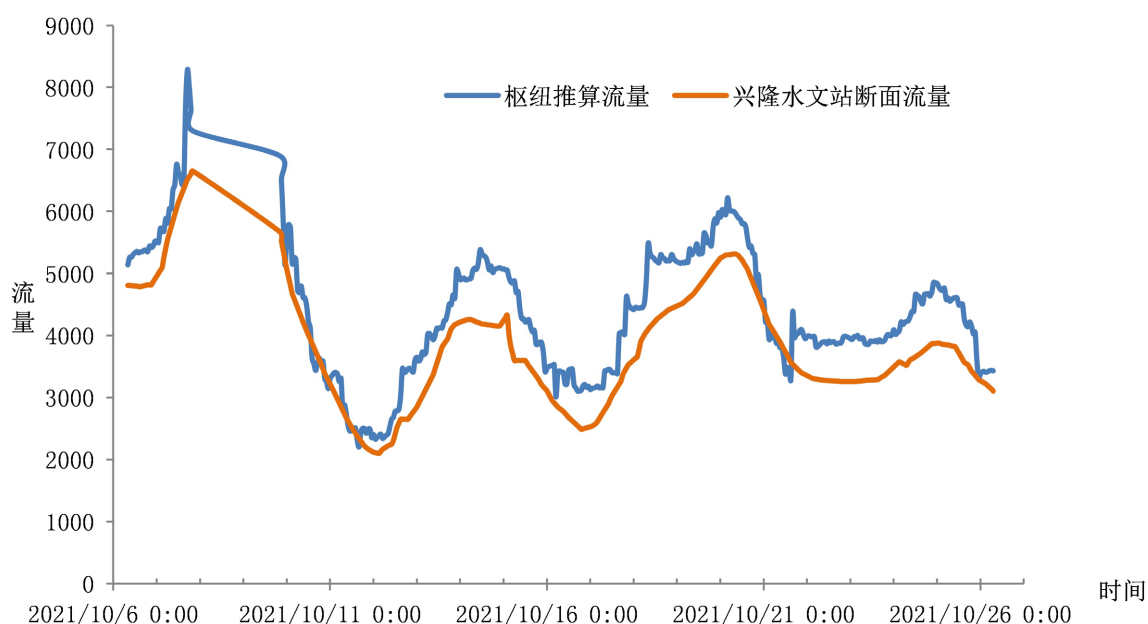


Figure 4. Comparison of the estimated flow of Xinglong water control project and the hydrograph of Xinglong hydrological station

图 4. 兴隆水利枢纽推算流量与兴隆水文站断面流量过程线对比图

5. 结语

1) 本次率定有效测流成果 66 份，测验数据基本能够满足分析的要求，总体来说可认定率定过程与实测数据无明显差异，即关系线具备一定精度，其推流结果基本可靠。

2) 本次率定分析确定的兴隆水利枢纽单孔泄流落差(开度)与流量系数关系曲线、单台机组落差与流量系数关系曲线、单孔泄流流速与闸门开度关系曲线，由于受上下游河道行洪能力变化影响，在实际应用过程中，会出现一定的偏差，需要定期比测并做适当修正。

3) 影响现场测验精度及定线精度因素较多，如流量测验精度受所设测验断面位置限制，离闸门较近，靠近两岸边出现回水或紊流现象，影响 ADCP 测验精度，需通过增加比测次数来减少率定误差。

参考文献

- [1] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
WU Chigong. Hydraulics. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

- [2] 水利部水文局, 主编. GB50179-2015. 河流流量测验规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Bureau of Hydrology of the Ministry of Water Resources, Chief Editor. GB50179-2015. River flow test specification. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 水利部长江水利委员会水文局, 主编. T/CHES 61-2021. 声学多普勒流量测验规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Chief Editor. T/CHES 61-2021. Acoustic Doppler flow test specification. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [4] 汪正学. 溧河上游磨子潭水电站发电综合效率系数的率定[J]. 江淮水利科技, 2012(1): 25-26.
WANG Zhengxue. Determination of power generation comprehensive efficiency coefficient of Mozitan hydropower station upstream of Pihe River. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2012(1): 25-26. (in Chinese)
- [5] 水利部水文局, 主编. SL537-2011. 水工建筑物与堰槽测流规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
Bureau of Hydrology of the Ministry of Water Resources, Chief Editor. SL537-2011. Code for flow measurement of hydraulic structures and weirs. Beijing: China Water & Power Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 黄翠红, 陈丰仓, 刘红广, 等. 效率系数法在孤石滩水库电站流量计算中的应用[J]. 河南水利, 2006(8): 62.
HUANG Cuihong, CHEN Fengcang, LIU Hongguang, et al. Application of efficiency coefficient method in discharge calculation of Gushitan reservoir power station. Henan Water Conservancy, 2006(8): 62. (in Chinese)
- [7] 水利部长江水利委员会水文局, 主编. SL247-2020. 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Chief Editor. SL247-2020. Code for compilation of hydrological data. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese)