

红山窑节制闸改建后淹没式孔流水位流量关系单值化分析

刘美丽¹, 湛忠宇¹, 朱庆云¹, 于飞龙¹, 韩天²

¹江苏省水文水资源勘测局南京分局, 江苏 南京

²江苏省防汛防旱抢险中心, 江苏 南京

收稿日期: 2022年4月23日; 录用日期: 2022年6月7日; 发布日期: 2022年6月29日

摘要

为了推求红山窑闸淹没式孔流这一主要流态下的水位流量关系, 选取2012~2019年实测淹没式孔流流量资料, 利用堰闸流量系数法和堰闸过水平均流速法两种方法分别进行分析计算。结果表明, 两种方法率定出的水位流量关系均符合《水文资料整编规范》要求, 可以用于水文资料整编。本文对条件类似的水文站率定堰闸水位流量关系有一定的参考价值。

关键词

红山窑闸, 淹没式孔流, 水位差, 流量系数, 闸孔过水平均流速

Analysis on Single-Valued Stage-Discharge Relation in Submerged Sluice Flow Type of Reconstructed Hongshanyao Sluice

Meili Liu¹, Zhongyu Zhan¹, Qingyun Zhu¹, Feilong Yu¹, Tian Han²

¹Nanjing Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Provincial Flood Control and Drought Relief Center, Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 23rd, 2022; accepted: Jun. 7th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

Abstract

To identify the stage-discharge relation of reconstructed Hongshanyao Sluice under its main flow regime,

作者简介: 刘美丽(1988-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水文测报工作, Email: 582821441@qq.com

文章引用: 刘美丽, 湛忠宇, 朱庆云, 于飞龙, 韩天. 红山窑节制闸改建后淹没式孔流水位流量关系单值化分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(3): 311-319. DOI: 10.12677/jwrr.2022.113034

i.e., the submerged sluice flow, the measured discharge data of submerged sluice flow from 2012 to 2019 were collected and used to calibrate the stage-discharge relationship by the weir sluice discharge coefficient method and the average horizontal flow velocity passing through sluice method, respectively. The results show that the stage-discharge relationship obtained by the two methods are in line with the requirements of the Code for Hydrologic Data Compilation, and can be used for hydrologic data compilation. This paper is valuable to an extent for the hydrological stations with similar conditions to identify their stage-discharge relation.

Keywords

Hongshanyao Sluice, Submerged Sluice Flow Type, Difference of Stage, Discharge Coefficient, Average Horizontal Velocity of Flow Passing through Sluice

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/>



Open Access

1. 概述

1.1. 工程概况

红山窑闸位于江苏省南京市六合区南部瓜埠境内,是滁河流域入江主要控制工程之一,堰闸为节制闸(平底闸),闸门型式及堰顶形状为直升,矩形,共6孔,单孔净宽8.0 m,闸底高程为0.00 m(吴淞高程),设计排水量 $550 \text{ m}^3/\text{s}$,工程主要作用为防洪、灌溉、航运、供水等。

红山窑水利枢纽节制闸工程节制闸原为8孔,每孔宽6.0 m,2004年改建后为6孔,每孔宽8.0 m,原水力出流条件发生了变化。改建完成后,先后遭遇滁河流域2016年、2020年大洪水,最大分洪流量 $427 \text{ m}^3/\text{s}$ (2020年7月19日),防洪效益得到较好发挥。近年来,六合区优化调度红山窑闸水利枢纽,改善滁河六合城区段水环境。红山窑闸具体位置见图1。

1.2. 测站概况

红山窑闸水文站于1972年5月由江苏省水文总站设立。该站为滁河流域出口控制站,控制流域面积 1408 km^2 ,距长江入江口10 km,为国家基本水文站,三类精度站。流量测验断面位于闸下游271 m处,测验方式为水文缆道,测验河段顺直,河面宽阔,河床由粘壤土、红砂土组成,复式梯形,两岸块石护坡,断面控制作用较好。

该站暴雨洪水特性属平原区雨洪特性,且降水多集中在汛期(5~9月),主要承接滁河流域六合段来水,汛期行洪易受长江潮汐顶托影响,过闸流量受上、下游水位及工程调度综合影响。由于影响因素较多,河段情况复杂,该站原水位流量关系无明显规律,一般采用连实测流量过程线法推求流量。近几年,该站流量测验与节制闸水利工程调度密切配合,及时掌握闸门启闭信息,科学调度与精准测量为该站水位流量关系的分析积累了科学有效的资料。

1.3. 流态说明

水闸的过水水流一般分为堰流和闸孔出流2种形式,当 $e/h_u \leq 0.65$ 时,为孔流; $e/h_u > 0.65$ 时,为堰流。闸孔出流根据流态是否受下游水位影响,可以分为自由式、淹没式孔流。自由孔出流时,闸下水位低于闸门底边,淹没孔流时闸下水头高于闸门底边,即闸下水头大于闸门开启高度($h_1 > e$),其中, e 为闸门开高; h_u 为上游水头; h_1 为下游水头。

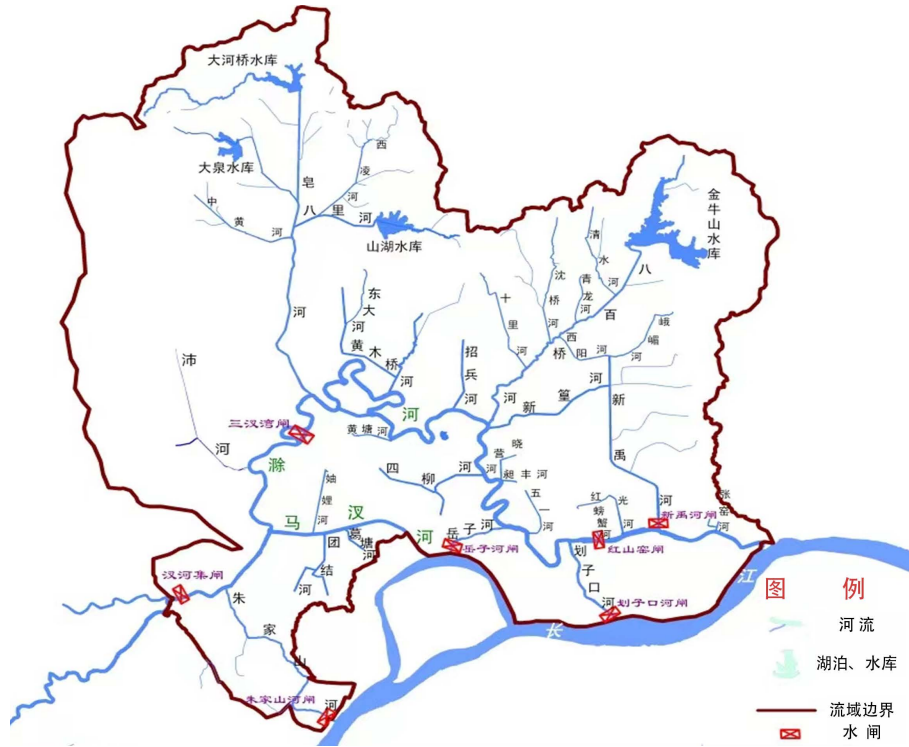


Figure 1. The sketch map of Hongshanyao Sluice location
图 1. 红山窑闸位置示意图

红山窑闸下水位淹没闸孔，下泄流量受下游影响较大，因此红山窑闸出现较多的流态为淹没式孔流。

2. 堰闸站淹没式孔流定线原理

利用水工建筑物推流，就是根据各种水利条件下实测流量，率定出相应流量系数，并用基本公式推求不同时刻的流量，常有堰闸流量系数法、堰闸过水平均流速法等[1] [2]。

2.1. 堰闸流量系数法

根据实测流量率定流量系数，分析获得不同出流情况下水力因素与流量系数的关系曲线或方程式。根据 SL/T247-2020 《水文资料整编规范》(以下简称《规范》)要求，淹没孔流的计算公式为式(1)

$$Q = M_2 B e \sqrt{\Delta Z} \tag{1}$$

式中： M_2 为淹没式孔流流量系数； Q 为过闸流量， m^3/s ； B 为闸孔开启净宽， m ； e 为闸门开启高度， m ； ΔZ 为闸上下游水位差， m 。

一般根据历史资料，建立闸门相对开度 $e/\Delta Z$ 和流量系数 M_2 的关系曲线，利用已建立的相关因素系数曲线，查出不同情况下流量系数，代入公式可求出各时刻流量。当关系线比较散乱时，可采用 ΔZ 作为新的水力要素[3]。

2.2. 堰闸过水平均流速法

本方法是通过对流量与其主要影响因素之间的相关分析建立经验公式来推求流量系数，并据以推求流量。基于连续性方程 $Q = A_1 V_1 = Q_2 V_2$ ，利用实测流量 Q 和闸门过水面积 A 直接推求闸孔过水的平均流速 $\bar{V} = Q/A$ ，点绘 $\Delta Z - \bar{V}$ 关系曲线，据此进行推流，推流时，用实测 ΔZ ，在相应曲线上查出 \bar{V} ，再乘以闸孔过水面积 A ，即

可得实时流量。

$$Q = Be\bar{V} \tag{2}$$

式中： Q 为过闸流量， m^3/s ； B 为闸孔开启净宽， m ； e 为闸门开启高度， m ； \bar{V} 为闸孔过水断面平均流速， m/s 。

3. 定线过程

根据红山窑闸流速仪实测流量资料系列，选取历年(2012~2019 年)实测淹没式孔流流量资料，推算各水力要素，资料系列包括丰、平、枯年份，闸门开启孔数为 1~6 孔，开启高度 0.25~8.0 m 不等，闸上下游水位差变幅为 0.05~2.72 m，具有很强的代表性。流态处于淹没孔流时，一般采用相关关系为闸门开启高度(e)与水位差 ΔZ 比值与流量系数建立关系线或关系式，以 $e/\Delta Z$ 为相关因素，进行 $e/\Delta Z \sim M_2$ 相关分析如图 2。从图 2 可以看出，流量系数与相对开度关系点据比较散乱，且分布不均匀，下部点据密集，上部点据稀少，有一些点据的流量系数超出了正常范围(平底闸淹没孔流的流量系数应稳定在 3~4 之间)，关系线没有存在对应关系，不具有统计分析特征。

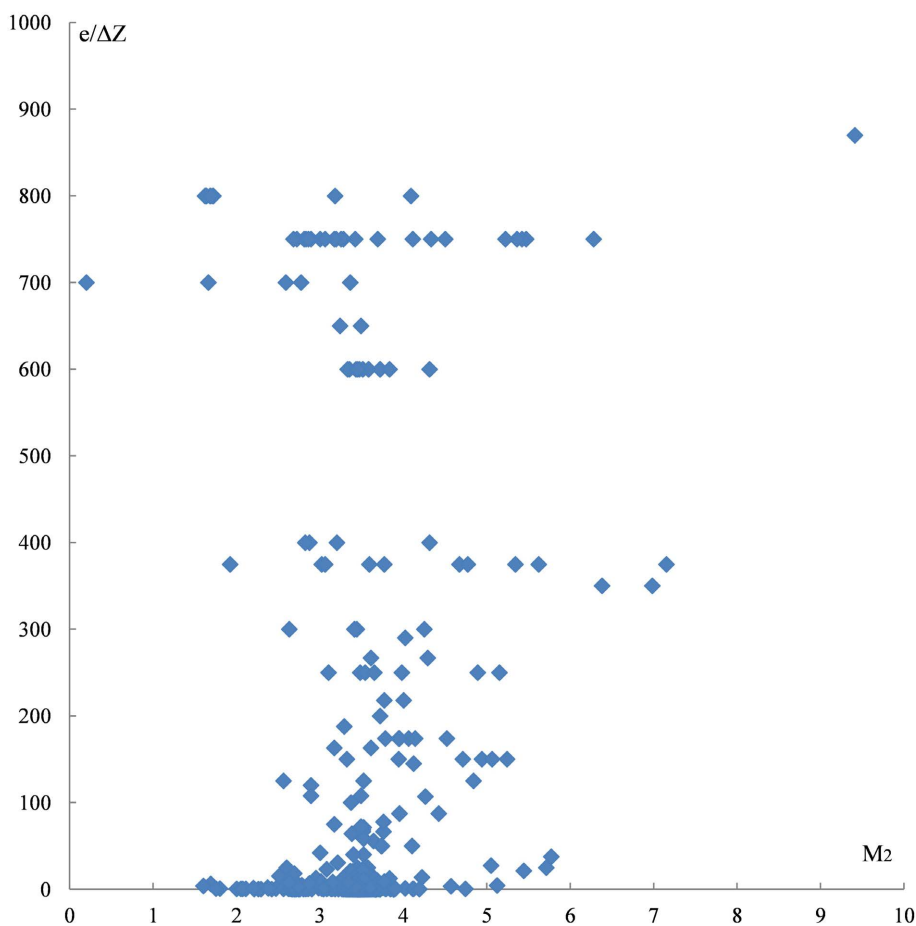


Figure 2. Correlation curves of $e/\Delta Z \sim M_2$ from 2012 to 2019

图 2. 2012~2019 年 $e/\Delta Z \sim M_2$ 相关曲线

以水位差 ΔZ 与上游水头 h_u 比值与流量系数建立关系线，将公式 $Q = M_2 Be\sqrt{\Delta Z}$ 调整为 $Q = M_2 Be\sqrt{h_u}$ ，建立 $\Delta Z/h_u \sim M_2$ 相关关系线，如图 3。两者点与点之间比较紧密，下部变化缓慢，上部逐渐变陡，中部逐渐向右，呈带状。与图 2 相比，采用新的水力因素拟合曲线分布均匀。

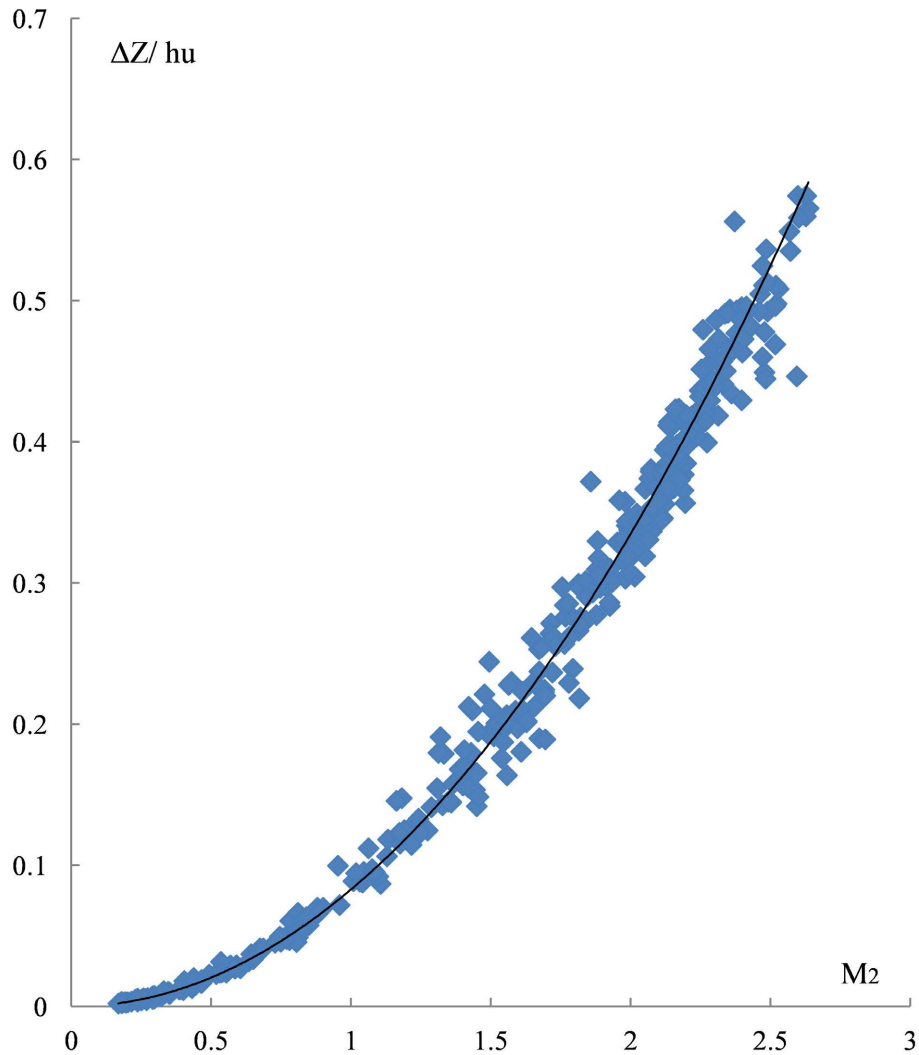


Figure 3. Correlation curves of $\Delta Z/h_u \sim M_2$ from 2012 to 2019

图 3. 2012~2019 年 $\Delta Z/h_u \sim M_2$ 相关曲线

建立 ΔZ 与 \bar{v} 相关关系, 点绘闸孔平均流速与上下游水位差关系曲线如图 4, 关系点据呈点带状, 分布均匀合理, 曲线拟合较好。

4. 成果检验与分析

按照《规范》对资料整编有关要求, 对上述率定出的红山窑闸淹没式孔流的关系曲线进行单值化定线精度检验, 检验结果见表 1。

4.1. 三项检验

红山窑闸站属三类精度水文站, 流量测验布置以满足定线、推求逐日流量和各项特征值为原则。红山窑闸水文站流量测验设施现为水文缆道, 适用于所有水位级, 其相关因素定线允许误差依据《规范》[4]。

4.1.1. 符号检验

为了检验本次水位流量关系曲线两侧测点数目分配是否均衡合理, 从而借以判断所定关系曲线是否正确, 需要对关系曲线进行符号检验。统计量公式为:

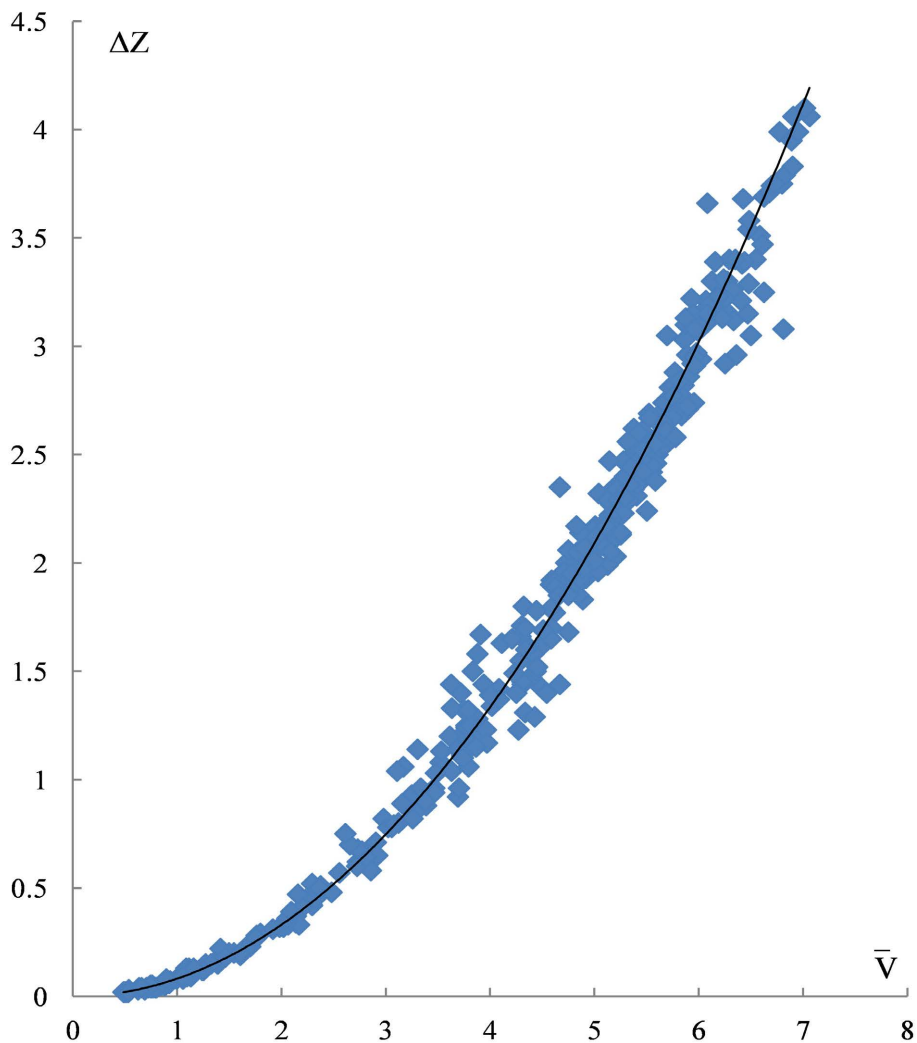


Figure 4. Correlation curves of $\Delta Z \sim \bar{V}$ from 2012 to 2019
 图 4. 2012~2019 年 $\Delta Z \sim \bar{V}$ 相关曲线

$$u = \frac{|K - 0.5n| - 0.5}{0.5\sqrt{n}} \tag{3}$$

式中： u 为统计量； K 为正偏数或负偏数； n 为测次总数。

经过计算其统计量，堰闸流量系数法 $u = 0.40$ ，堰闸过水平均流速法 $u = 0.51$ ，显著性水平 α 取 0.25，从表 1 中可见，其临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 为 1.15，均满足 $u < u_{1-\alpha/2}$ 的定线合理的判定条件，关系曲线通过了符号检验。

4.1.2. 适线检验

适线检验是按相关因素递升次序，通过检验实测点偏离关系曲线正负符号的排列情况，借以检查定线有无明显的系统偏离。在适线检验中，分别将上下游水位差、上下水位差与上游水头比值按从低到高排列，统计出红山窑闸淹没孔流实测点偏离关系曲线的正负符号变动次数。经排序统计，堰闸流量系数法变换正负号次数为 185 次，堰闸过水平均流速法正负号次数为 187 次，需要做适线检验。

$$u = \frac{0.5(n-1) - k - 0.5}{0.5\sqrt{n-1}} \tag{4}$$

经计算，堰闸流量系数法 $u = 0.96$ ，堰闸过水平均流速法 $u = 0.76$ ，显著性水平 α 取 0.1，其临界值 $u_{1-\alpha}$ 为 1.28，均满足 $u < u_{1-\alpha}$ 的定线合理的判定条件，关系曲线通过了适线检验。

4.1.3. 偏离数值检验

偏离数值检验是检查测点偏离关系曲线的平均偏离值(即平均相对误差)是否在合理范围以内，借以用数据论证关系曲线定的是否合理的一种检验方法。

在对图 3、图 4 中淹没孔流关系曲线的偏离数值检验中，经过对 391 个测次的相对偏离值进行计算比较，其平均相对偏离值、标准差公式分别为：

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{5}$$

$$S_{\bar{P}_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}{n(n-1)}} \tag{6}$$

$$t = \frac{\bar{P}_i}{S_{\bar{P}_i}} \tag{7}$$

式中： P_i 为相对偏离值； \bar{P}_i 为平均相对偏离值； n 为测次总数； $S_{\bar{P}_i}$ 为平均相对偏离值的标准差。

经计算，堰闸流量系数法 $t = 0.45$ ，堰闸过水平均流速法 $t = 0.48$ ，显著性水平取 0.2，其临界值为 1.28，均满足 $|t| < t_{1-\alpha/2}$ 的定线合理的判定条件，故此次率定的红山窑闸淹没孔流水位流量关系曲线通过了偏离数值检验。

Table 1. Statistical test results of submerged flow relationship curve of Hongshanyao Sluice from 2012 to 2019

表 1. 2012~2019 年红山窑闸淹没孔流关系曲线检验成果统计表

定线方法	符号检验		适线检验		偏离数值检验	
	统计值	临界值	统计值	临界值	统计值	临界值
堰闸流量系数法	0.40	1.15	1.56	1.28	0.45	1.28
堰闸过水平均流速法	0.51	1.15	0.76	1.28	0.48	1.28

注：符号检验 α 取 0.25，适线检验 α 取 0.10，偏离数值检验 α 取 0.20。

4.2. 精度分析

根据现行误差检验方法，对测验成果分别进行系统误差、随机不确定度计算，其平均相对偏离值即平均相对误差计算。

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n P_i^2} \tag{8}$$

$$X_{Q'} = 2S_e \tag{9}$$

式中： S_e 为系统标准差； n 为测次总数； P_i 为相对误差； $X_{Q'}$ 为随机不确定度。经过计算，堰闸流量系数法系统标准差为 4.5%，随机不确定度为 9%，堰闸过水平均流速法系统标准差为 4.5%，随机不确定度为 9%，均小于三类精度站 18%，系统误差小于 $\pm 3\%$ ，精度满足要求。计算结果见表 2。

Table 2. Comparison of comprehensive alignment error and accuracy of Hongshanyao Sluice from 2012 to 2019

表 2. 2012~2019 年红山窑闸综合定线误差和精度对照表

定线方法	系统误差(%)	标准差(%)	随机不确定度(%)
堰闸流量系数法	1.0	4.5	9.0
堰闸过水平均流速法	1.1	4.5	9.0

4.3 相关关系分析

由水文统计学知道，两种变量相关系数 r 的平方越接近于 1，则表示它们之间相关关系越密切。相关关系计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{xi} - 1)(K_{yi} - 1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_{xi} - 1)^2 \sum_{i=1}^n (K_{yi} - 1)^2}}, K_{xi} = \frac{xi}{\bar{x}}, K_{yi} = \frac{yi}{\bar{y}} \quad (10)$$

式中： r ——相关系数； x, y ——两种变量。

通过计算，得到 $\Delta Z/h_u \sim M_2$ 相关系数 $r^2 = 0.9959$ ， $\Delta Z \sim \bar{v}$ 相关系数 $r^2 = 0.9957$ ，这说明 $\Delta Z/h_u$ 与 M_2 、 ΔZ 与 \bar{v} 关系密切，相关关系较好。

经过上述计算，堰闸流量系数法和堰闸过水平均流速法定出的水位流量关系曲线通过了三项检验，定线精度满足三类精度站精度要求，且相关关系较好，说明该水位流量关系曲线均能够满足要求。

4.4. 检验对比

此次率定资料为 2012~2019 年的实测资料，为了能够更好地判别此关系曲线是否满足流量推算，用 2020 年作为典型年，与此次率定的关系曲线进行检验对比分析，见表 3。

从表 3 中可以看出，用 2020 年的实测流量和本次率定的水位流量关系线推算的流量相比较，过水平均流速法两者相对误差在 5% 以下的占比 83%，10% 以下的占比 100%；流量系数法两者相对误差在 5% 以下的占比 83%，10% 以下的占比 100%。说明水位流量关系曲线均能够满足红山窑闸水文站淹没式孔流的流量推求要求。

Table 3. Comparison of calibrated curve with actual flow data of Hongshanyao Sluice in 2020

表 3. 率定曲线与 2020 年红山窑闸实测流量资料对照表

序号	日期	时间	实测流量(m ³ /s)	线上流量(m ³ /s)(平均流速法)	相对误差(%)	线上流量(m ³ /s)(流量系数法)	相对误差(%)
1	1月18日	7:45	84.2	83.6	0.77	83.6	0.73
2	1月19日	6:05	77.8	78.1	-0.43	78.2	-0.45
3	1月22日	17:45	49.5	49.5	-0.02	49.5	-0.04
4	1月23日	16:40	55.6	55.0	1.16	55.0	1.15
5	1月29日	10:25	24.9	24.4	2.16	24.4	2.12
6	1月30日	14:35	25.7	26.4	-2.66	26.4	-2.70
7	1月31日	7:35	27.1	27.5	-1.39	27.5	-1.42
8	2月1日	16:15	50.8	50.8	0.04	50.8	0.00
9	2月2日	10:15	53.6	53.2	0.69	53.2	0.67
10	2月23日	15:00	141	146	-3.58	146	-3.61
11	2月25日	9:45	23.1	22.2	4.28	22.2	4.24
12	2月26日	10:05	21.4	21.5	-0.69	21.6	-0.72
13	2月27日	7:15	26.9	26.7	0.94	26.7	0.91
14	6月17日	10:45	153	156	-2.03	156	-2.05
15	6月18日	7:40	108	105	2.59	105	2.56
16	6月18日	12:00	167	169	-1.07	169	-1.09
17	6月18日	20:45	113	118	-4.08	118	-4.11

Continued

18	6月19日 5:45	101	105	-3.53	105	-3.55
19	6月19日 20:45	30.9	29.7	4.01	29.7	3.97
20	6月20日 7:25	24.6	24.7	-0.30	24.7	-0.34
21	6月20日 17:45	67.7	67.5	0.24	67.6	0.21
22	6月23日 11:00	104	96.1	8.17	96.2	8.14
23	6月23日 18:25	80	81.5	-1.86	81.5	-1.88
24	6月24日 21:00	52.1	50.3	3.64	50.3	3.63
25	6月27日 10:50	138	153	-9.62	153	-9.63
26	6月28日 11:20	197	195	0.95	195	0.93
27	6月29日 7:40	172	191	-9.87	191	-9.90
28	6月29日 16:50	225	220	2.22	220	2.18
29	7月24日 15:00	183	180	1.51	181	1.35
30	7月31日 16:20	192	180	6.50	181	6.37
31	8月10日 7:08	267	284	-5.86	284	-5.95
32	8月11日 6:53	237	254	-6.69	254	-6.78
33	8月21日 16:07	74.3	74.7	-0.57	74.8	-0.64
34	8月22日 15:46	32.9	33.5	-1.67	33.5	-1.74
35	8月25日 16:20	134	139	-3.76	139	-3.83
36	8月28日 15:55	151	157	-4.09	158	-4.16

5. 结语

红山窑闸改建完成后,水力条件发生明显变化,根据2012~2019年共391次实测淹没孔流流量资料,分别采用堰闸流量系数法和堰闸过水平均流速法探讨红山窑闸水文站水位流量关系,经单值化定线精度检验和2020年实测流量验证,率定的水位流量关系曲线能够满足红山窑闸水文站淹没式孔流的流量推求要求。由此可见,在改建后的红山窑闸淹没式孔流流量计算中,堰闸流量系数法和堰闸过水平均流速法技术可行,精度较高,可以考虑用于红山窑闸水文站淹没式孔流流量资料的整编。

由于红山窑闸水文站还存在部分淹没式堰流出流情况,淹没式堰流定线有待进一步研究和完善。

参考文献

- [1] 王成,蔡平,李江艳. 闸孔出流定线方法浅谈[J]. 江苏水利, 2012(1): 24-26.
WANG Cheng, CAI Ping and LI Jiangyan. Discussion on the method of gate outlet flow alignment. Jiangsu Water Resources, 2012(1): 24-26. (in Chinese)
- [2] 孙振江,王怀福,王玉顺. 闸孔出流流量推算方法研究[J]. 山东水利, 2008(6): 8-12.
SUN Zhenjiang, WANG Huai fu and WANG Yushun. Research on the calculation method of gate outlet flow rate. Shandong Water Resources, 2008(6): 8-12. (in Chinese)
- [3] 伍勇,李红,陈朝辉. 堰闸站淹没孔流新理论推流方法[J]. 陕西水利, 2019(1): 27-31.
WU Yong, LI Hong and CHEN Chaohui. A new theoretical method of pushing flow for submerged hole flow in weir sluicestation. Shaanxi Water Resources, 2019(1): 27-31. (in Chinese)
- [4] SL/T247-2020 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
SL/T247-2020 Code for hydrological data processing. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese)