

基于回归分析的龙泉港出海闸高淹没度下水位流量关系率定

高晨晨^{1,2}

(1.上海市水利工程设计研究院有限公司,上海市 200061;2.上海滩涂海岸工程技术研究中心,上海市 200061)

摘要: 龙泉港出海闸排水受外海潮汐影响显著,不适宜采用堰闸流量系数法进行推流。结合龙泉港出海闸水文过程试验的实测资料,以水力学公式为基础,采用回归分析法率定得到了高淹没度状态下的水位流量关系式,并对关系式进行了符号检验、适线检验、偏离检验和精度分析。结果表明:回归分析法率定得到的出海闸高淹没度状态下的水位流量关系成功通过了3项检验,定线精度能够达到一类精度标准,可以在受潮汐影响的出海闸水位流量关系率定中推广使用。

关键词: 淹没式堰流;水位流量关系;出海闸;回归分析;率定

中图分类号: P33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0099-05

0 引言

水闸过闸流量的分析计算是实现水闸科学运行调度的基础。合理的过闸流量可以在确保水闸消能防冲安全的前提下发挥水闸防洪排涝最佳效益。目前,常用的过闸流量分析方法有在线监测法、水文水动力学模型法和水力学公式法等^[1]。在线监测法主要是通过安装在闸门上安装声学多普勒流速仪 ADCM 来实现对过闸流量的实时监控。水文水动力学模型法将水文学模型与水动力学模型两者进行耦合,由水文学模型进行产汇流计算,并将径流过程作为旁侧入流输入到水动力模型中,由水动力模型求解圣维南方程组得到闸门处的过闸流量^[2-5]。上述两种方法需投入的资金成本较高,同时对技术人员的业务水平要求很高,因此在实际中应用不多。目前,应用最为广泛的过闸流量确定方法是水力学公式法^[6-9]。该方法是以水力学公式为基础,根据实测数据分析过闸流量的影响因素并率定得到不同流态下的过闸流量计算公式。水力学公式法最大的缺陷在于所用的公式及相关参数需要事先根据经验进行选取,同时为保证公式的计算精度,需要专业技术人员定期

根据最新实测数据修订公式中的相关参数,操作不便且灵活性较差。

近年来,随着回归分析理论的发展,越来越多的学者开始将回归分析应用于过闸流量的分析计算中,取得了诸多成果。Ghodsian^[10]通过回归拟合发现水闸流量系数与主槽傅汝德数、上游水深和开度的比值有关。Kim^[11]采用回归分析法研究了闸孔出流的收缩系数、流量系数、闸门壁面时均压力之间的关系,得到了流量系数和压力分布的计算公式。叶云涛等^[12]根据平板闸门宽顶堰模型试验数据,提出了闸孔出流流态简易判别方法,并采用回归分析法得到了自由出流、淹没出流流量计算公式。

本文结合上海市龙泉港出海闸水文过程试验的实测资料,以水力学公式为基础,采用回归分析法对龙泉港出海闸高淹没度下的水位流量关系进行了率定,取得了良好的效果,可为龙泉港出海闸运行调度提供依据,也可同类出海闸设计与运行提供参考。

1 龙泉港出海闸概况

龙泉港出海闸位于上海市金山区山阳镇,是上海市14个水利分片之一的浦南东片内唯一的出海口门。龙泉港出海闸为3孔节制闸,单孔净宽10 m,总净宽30 m,闸底板高程-2 m(上海吴淞零点基面,下同),闸门顶高程6.6 m,设计排涝流量为360 m³/s,24 h排水泄量大于1 991.6万 m³,排水泄量受杭州湾潮汐影响显著。出海闸自建成以来,在浦南东片的防

收稿日期:2023-01-06

基金项目:上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”科研项目(19DZ1201500,22DZ1202606);上海市浦江人才计划(20PJ1418000)

作者简介:高晨晨(1991—),男,硕士,工程师,从事水工结构、海岸防护工程设计工作。

洪、挡潮、排涝、水资源调度等方面发挥了重要作用,但由于区域排涝需要,实际排涝流量常常超过设计与消能防冲控制值,造成闸外侧河道存在一定冲刷。为精确掌握水位流量关系,便于水闸调度运行,专门进行水文过程试验,根据试验成果推算水位流量关系。

2 龙泉港出海闸水位流量关系率定

堰闸、涵管、隧洞等水工建筑物既是泄水建筑物,又是理想的量水建筑物,根据建筑物型式、闸门开启情况、流态等因素,经过率定便可采用水力学公式推算其过水流量^[13]。

龙泉港出海闸为平底闸,在落潮排水期间,过闸出流一般为堰流,且外海潮位淹没堰顶影响出流,因此落潮排水期间发生的堰流一般为高淹没度状态下的淹没式堰流。

根据《水文资料整编规范》(SL/T 247—2020)^[14],平底闸淹没式堰流通常采用堰闸流量系数法进行推流,其淹没式堰流状态下的定线流量公式为:

$$Q = C_2 B h_1 \sqrt{\Delta Z} \tag{1}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; C_2 为淹没式堰流流量系数; B 为闸孔总宽或开启净宽, m ; h_1 为下游水头, m ; ΔZ 为

上下游水位差, m 。

根据实测流量资料计算流量系数,选取一两个能经常观察到的主要因素,与流量系数建立相关关系;再利用已经建立的相关关系,查出与主要因素相对应的流量系数,并代入到式(1)中,即可推算出该时刻的过闸流量。

根据龙泉港出海闸水文过程试验实测得到的39个测次的堰流流量及上下游水位资料,计算各测次相应的流量系数(见表1);根据表1中的数据所点绘的流量系数 C_2 与上下游水位差 ΔZ 之关系图见图1;流量系数 C_2 与 $h_1 \sqrt{\Delta Z}$ 关系图见图2。由图1、图2可知,因图中实测数据点较为散乱,呈现出非单值化关系,故无法拟合出合适的水位流量关系曲线。分析原因,一方面是龙泉港出海闸排水受外海潮水顶托;另一方面是本次水文试验进行上下游水位观测时采用了人工读取水尺读数的方法,观测精度仅达到1 cm。对于出海闸而言,当下游潮位涨落急剧时,水位观测误差较大,再加上淹没式堰流时的上下游水位落差较小,观测误差会很大程度地影响校正流量的精度,从而导致流量系数与上下游水位差之间的关系非常离散。因此,龙泉港出海闸不适宜采用堰闸流量系数法进行定线推流。

表1 龙泉港出海闸高淹没度下堰流流量定线表

序号	$\Delta Z/\text{m}$	实测流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	下游水头 h_1/m	流量系数 C_2	序号	$\Delta Z/\text{m}$	实测流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	下游水头 h_1/m	流量系数 C_2
1	0.28	256	3.86	4.18	21	0.21	223	3.76	4.31
2	0.43	270	3.26	4.23	22	0.23	231	3.68	4.36
3	0.42	314	3.74	4.32	23	0.32	230	3.40	3.99
4	0.44	320	3.62	4.47	24	0.34	240	3.32	4.13
5	0.53	328	3.40	4.44	25	0.36	244	3.26	4.16
6	0.56	323	3.30	4.36	26	0.18	200	4.24	3.71
7	0.64	320	3.10	4.30	27	0.15	221	4.16	4.57
8	0.22	232	4.06	4.06	28	0.23	228	4.02	3.94
9	0.29	245	3.82	3.97	29	0.23	242	3.95	4.25
10	0.33	271	3.75	4.19	30	0.32	258	3.68	4.12
11	0.37	266	3.60	4.05	31	0.34	260	3.57	4.16
12	0.42	272	3.44	4.07	32	0.12	190	4.32	4.22
13	0.47	274	3.33	4.00	33	0.14	210	4.22	4.43
14	0.10	160	4.12	4.09	34	0.18	215	4.12	4.10
15	0.14	184	4.00	4.10	35	0.23	248	3.96	4.34
16	0.17	205	3.88	4.27	36	0.27	266	3.80	4.49
17	0.26	236	3.48	4.43	37	0.30	266	3.70	4.38
18	0.25	234	3.45	4.52	38	0.34	275	3.60	4.37
19	0.16	196	4.12	3.96	39	0.36	279	3.54	4.38
20	0.20	208	3.83	4.05					

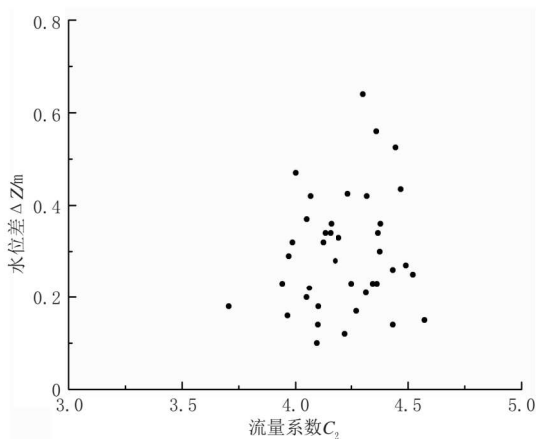


图1 流量系数 C_2 与上下游水位差 ΔZ 关系图

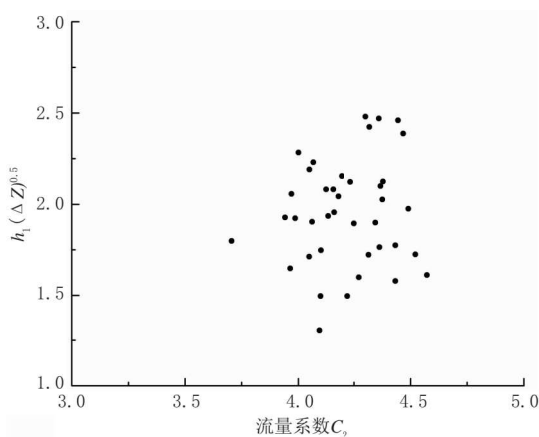


图2 流量系数 C_2 与 $h_1 \sqrt{\Delta Z}$ 关系图

《水文资料整编规范》指出,水闸亦可根据关系方程式进行水位流量关系的率定。该方法根据不同流态,以水力学公式为基础,采用回归分析法拟合相应的关系方程式进行定线推流。

此种情况下,淹没式堰流状态下的定线流量公式可用下式表示:

$$Q = C_c B h_1^\alpha \Delta Z^\beta \quad (2)$$

式中: C_c 为流量系数; α 、 β 为指数;其余符号含义同前。

根据式(2),以最小二乘法为原理,求出使实测数据离差平方和最小的回归方程各参数(即公式(2)中的 C_c 、 α 、 β),得到水位流量关系式,再将某一时刻实测的下游水位和上下游水位差代入到公式(2)中,即可求出该时刻的流量。

根据表1中39个测次的实测堰流流量及上下游水位资料,点绘水位流量关系点,并拟合关系曲线,见图3。由图3可知,龙泉港出海闸高淹没度下堰流时,上下游水位差 ΔZ 与 $Q/(139 h_1^{0.936})$ 曲线关系点密集,其趋势线呈指数型,所有实测数据平均分布于趋势线两侧,正偏和负偏测点数大致相等,与趋势线吻合度良好。

图4给出了流量实测值与多元回归拟合值的对

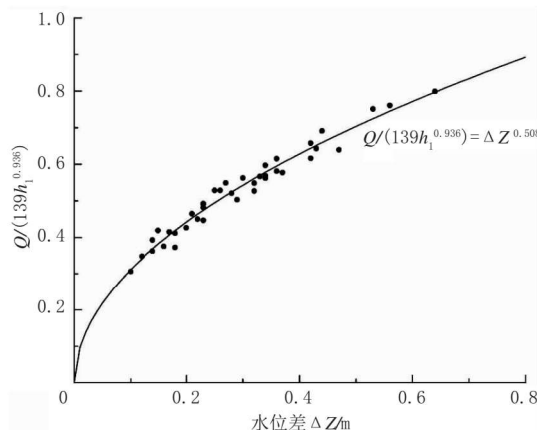


图3 龙泉港出海闸水位流量关系图

比及相对误差;图5给出了流量实测值与堰闸流量系数法计算值的对比及相对误差。对比图4和图5可以直观地看到,过闸流量的多元回归拟合值与实际测量值更为接近,两者的相对误差一般不超过5%,相对误差最大值不超过12%;而堰闸流量系数法计算值与实际测量值的相对误差较大,普遍在5%以上,最大相对误差超20%。由此可见,对于龙泉港出海闸,采用堰闸流量系数法进行定线推流的精度较差,而多元回归分析法计算值相对而言更为贴近实际测量结果。

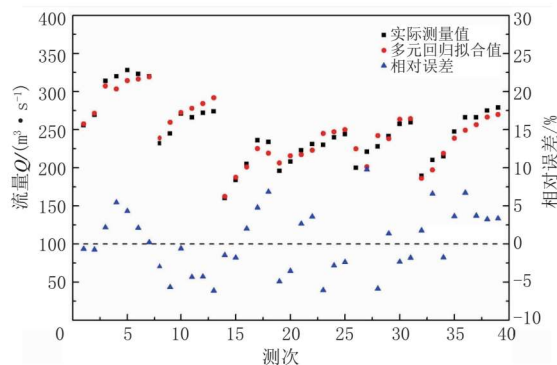


图4 流量实测值与多元回归拟合值的对比及相对误差

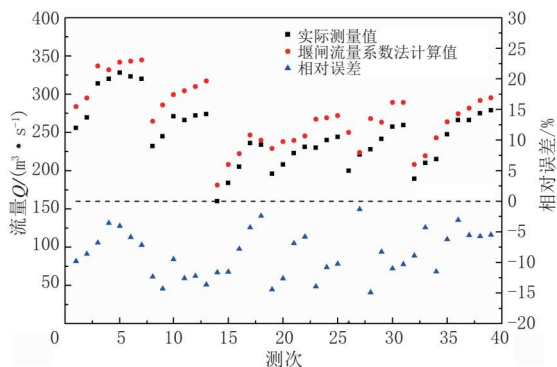


图5 流量实测值与堰闸流量系数法计算值的对比及相对误差

3 成果检验与分析

上述按多元回归分析法初步率定出了龙泉港出海闸高淹没度下的水位流量关系曲线:

$$Q = 139 h_1^{0.936} \Delta Z^{0.508} \quad (3)$$

为判断上述水位流量关系曲线是否合理,需对公式(3)做符号检验、适线检验和偏离检验^[14]。

3.1 符号检验

符号检验,即检验初步率定的水位流量关系曲线两侧实测数据的数目分配是否合理。具体做法是分别统计测点偏离曲线的正、负号个数,按公式(4)计算统计量 u 值,并将其与查表2所得的临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 比较。当 $u < u_{1-\alpha/2}$ 时,则认为合理,即通过符号检验,反之则认为不合理,未通过符号检验。

$$u = \frac{|k_1 - 0.5n| - 0.5}{0.5\sqrt{n}} \quad (4)$$

式中: u 为统计量; n 为测点总数; k_1 为正号或负号个数。

图3所示的水位流量关系图中39个测次有19个正偏,20个负偏,经计算其统计量 u 为0;取显著性水平 $\alpha=0.25$,查表2可得置信度为0.75时的临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 为1.15,满足 $u < u_{1-\alpha/2}$ 的定线合理判别条件,因此图3中的水位流量关系曲线通过了符号检验。

3.2 适线检验

适线检验,即根据实测数据偏离水位流量关系曲线正、负符号的排列情况,检验定线是否有明显系统偏离。具体做法是将上下游水位差按从小到大的顺序排列,从次小的水位差开始统计实测数据偏离曲线的正负符号变换次数,按公式(5)计算统计量 u 值,并将其与查表2所得的临界值 $u_{1-\alpha}$ 比较。当 $u < u_{1-\alpha}$ 时,则认为合理,即通过适线检验,反之则认为不合理,未通过适线检验。

表2 临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 与 $u_{1-\alpha}$

显著性水平 α	置信水平 $1-\alpha$	$u_{1-\alpha/2}$	$u_{1-\alpha}$
0.05	0.95	1.96	1.64
0.10	0.90	1.64	1.28
0.25	0.75	1.15	

$$u = \frac{0.5(n-1) - k_2 - 0.5}{0.5\sqrt{n-1}} \quad (5)$$

式中: k_2 为变换符号的次数, $k_2 < 0.5(n-1)$ 时作此检验,否则不作此检验;其余符号含义同前。

经排序统计,测点偏离曲线的正负符号变换次数 k_2 为20次,满足 $k_2 > 0.5(n-1)$ 的免检条件,即认为图3中的水位流量关系曲线通过了适线检验。

3.3 偏离检验

偏离检验,即检查实测数据偏离关系曲线的平

均相对误差是否在合理范围内。具体做法是按公式(6)和公式(7)分别计算 t 值和 $s_{\bar{p}}$ 值,并将 t 值与查表3所得的临界值 $t_{1-\alpha/2}$ 比较。当 $|t| < t_{1-\alpha/2}$ 时,则认为合理,即通过偏离检验,反之则认为不合理,未通过偏离检验。

表3 临界值 $t_{1-\alpha/2}$

α	K							
	6	8	10	15	20	30	60	∞
0.05	2.45	2.31	2.23	2.13	2.09	2.04	2.00	1.96
0.10	1.94	1.86	1.81	1.75	1.73	1.70	1.67	1.65
0.20	1.44	1.40	1.37	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28
0.30	1.13	1.11	1.09	1.07	1.06	1.06	1.05	1.04

注:表中 K 为自由度, $K=n-1$ 。

$$t = \frac{\bar{p}}{s_{\bar{p}}} \quad (6)$$

$$s_{\bar{p}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

式中: t 为统计量; p_i 为测点与关系曲线的相对偏离值; $\bar{p}$ 为平均相对偏离值; $s_{\bar{p}}$ 为 $\bar{p}$ 的标准差;其余符号含义同前。

39个测次的流量相对偏离值如表4所示,据此计算得到流量的平均相对偏离值为0.07%,其标准差为0.0072。根据公式(6)计算得到统计量 t 为0.10,小于查表3所得的临界值 $t_{1-\alpha/2}=1.31$,满足偏离数值检验合理判别条件,因此图3中的水位流量关系曲线通过了偏离检验。

3.4 精度分析

龙泉港出海闸高淹没度状态下所率定的水位流量关系曲线成功通过了符号检验、适线检验和偏离检验,表明该关系曲线可以用于龙泉港出海闸高淹没度下的流量推算,推算流量的平均相对偏离值(即相对误差的平均值)为0.07%。

实测点对关系曲线的标准差和随机不确定度计算式分别为:

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n p_i^2} \quad (8)$$

$$X_Q = 2S_e \quad (9)$$

式中: S_e 为实测点标准差; X_Q 为置信水平为95%的随机不确定度;其余符号含义同前。

经计算,实测点对关系曲线的标准差 S_e 为4.6%,随机不确定度 X_Q 为9.1%,符合《水文资料整编规范》规定的定线精度指标,达到一类精度标准。

表 4 龙泉港出海闸高淹没度下堰流偏离检验计算表

序号	$\Delta Z/m$	实测流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	线上流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$p_i / \%$	p_i^2	$(p_i - \bar{p})^2$	序号	$\Delta Z/m$	实测流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	线上流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$p_i / \%$	p_i^2	$(p_i - \bar{p})^2$
1	0.28	256	258	-0.65	0	0.000 1	21	0.21	223	217	2.64	0.000 7	0.000 7
2	0.43	270	272	-0.75	0.000 1	0.000 1	22	0.23	231	223	3.58	0.001 3	0.001 2
3	0.42	314	307	2.16	0.000 5	0.000 4	23	0.32	230	245	-6.08	0.003 7	0.003 8
4	0.44	320	303	5.45	0.003 0	0.002 9	24	0.34	240	247	-2.82	0.000 8	0.000 8
5	0.53	328	314	4.32	0.001 9	0.001 8	25	0.36	244	250	-2.38	0.000 6	0.000 6
6	0.56	323	316	2.09	0.000 4	0.000 4	26	0.18	200	225	-11.04	0.012 2	0.012 3
7	0.64	320	319	0.21	0	0	27	0.15	221	201	9.77	0.009 6	0.009 4
8	0.22	232	239	-2.94	0.000 9	0.000 9	28	0.23	228	242	-5.87	0.003 4	0.003 5
9	0.29	245	260	-5.69	0.003 2	0.003 3	29	0.23	242	238	1.35	0.000 2	0.000 2
10	0.33	271	273	-0.59	0	0	30	0.32	258	264	-2.35	0.000 6	0.000 6
11	0.37	266	278	-4.35	0.001 9	0.002 0	31	0.34	260	264	-1.83	0.000 3	0.000 4
12	0.42	272	284	-4.30	0.001 9	0.001 9	32	0.12	190	186	1.76	0.000 3	0.000 3
13	0.47	274	292	-6.14	0.003 8	0.003 9	33	0.14	210	197	6.59	0.004 3	0.004 2
14	0.10	160	162	-1.48	0.000 2	0.000 2	34	0.18	215	219	-1.76	0.000 3	0.000 3
15	0.14	184	187	-1.81	0.000 3	0.000 4	35	0.23	248	239	3.63	0.001 3	0.001 3
16	0.17	205	201	1.99	0.000 4	0.000 4	36	0.27	266	249	6.70	0.004 5	0.004 4
17	0.26	236	225	4.78	0.002 3	0.002 2	37	0.30	266	257	3.70	0.001 4	0.001 3
18	0.25	234	219	6.84	0.004 7	0.004 6	38	0.34	275	266	3.22	0.001 0	0.001 0
19	0.16	196	206	-4.93	0.002 4	0.002 5	39	0.36	279	270	3.34	0.001 1	0.001 1
20	0.20	208	216	-3.54	0.001 3	0.001 3							

4 结 语

(1)根据龙泉港出海闸水文过程试验实测得到的 39 个测次的堰流流量及上下游水位资料,采用回归分析法率定得到了龙泉港出海闸高淹没度状态下的水位流量关系曲线,率定成果成功通过了 3 项检验,定线精度能够达到一类精度标准,表明回归分析法可以在受潮汐影响的出海闸水位流量关系率定中推广使用。

(2)建议在上下游水尺断面处各安装 1 套遥测水位仪,通过施测较易获得的上下游水位来推求龙泉港出海闸高淹没度状态下的过闸流量,一方面实现了水闸过闸流量的实时监测,另一方面也降低了流量自动化监测系统的购买和维护成本,具有一定的推广应用价值。

参考文献:

[1] 周全,杨笛音,孟钰秀.平原感潮河网地区边界水闸流量计算方法[J].水电能源科学,2014,32(5):19-22.
[2] 黄琳煜,聂秋月,周全,等.基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究[J].水电能源科学,2011,29(8):21-24.
[3] 黄会勇,刘子慧,范杰,等.南水北调中线工程总干渠水力学仿真模

型研究[J].水利水电技术,2013,44(12):111-115,122.
[4] 邢宝龙,薛联青,陈奕,等.基于 SCE-UA 算法的河网水系水闸调度模拟[J].水资源保护,2013(6):26-30.
[5] 徐贵泉,陈长太,唐迎洲.上海市分片水资源调度方案优化[J].水资源保护,2013(6):80-84.
[6] 徐苏,窦明,米庆彬,等.五种过闸流量计算方法在槐店闸的适用性及改进的杜屿公式精度分析[J].水电能源科学,2016,34(3):36-39,10.
[7] 万晓凌,陆小明,周毅,等.感潮水闸引水量计算方法研究[J].长江科学院院报,2013,30(4):17-20.
[8] 姚建栋.二河闸丰水期淹没式堰流水位流量关系初探[J].水文,2012,32(1):69-72,91.
[9] 王成,孙正兰,李江艳,等.落差指数法在沿江大型水闸淹没堰流定线中的应用[J].江苏水利,2017(8):11-15.
[10] GHODSIAN M. Flow through side sluice gate [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2003,129(6):458-463.
[11] KIM D G.Numerical analysis of free flow past a sluice gate [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2007,11(2):127-132.
[12] 叶云涛,何建京.宽顶堰平板闸门闸孔出流水力计算的实验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(2):138-141.
[13] 潘杰.江苏省沙河水库水位流量关系率定研究[J].人民长江,2014,45(增刊 2):30-32,41.
[14] 水利部水文司.水文资料整编规范:SL/T 247—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2021.