



# 电站下游航道设计最低通航水位推算方法

刘晓帆, 曹树涛, 李家世

(四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川成都610017)

**摘要:** 对嘉陵江下游受电站下泄非恒定流影响严重的河段的设计最低通航水位进行研究。在深入分析嘉陵江桐子壕电站2009—2010年大坝下游水位、出库流量和电站调度运行方式的基础上, 采用不同时间尺度的流量资料推求电站下游航道设计最低通航流量, 通过建立滩险处基本水尺与电站坝下水位相关线来推求整治滩险的设计最低通航水位。

**关键词:** 设计最低通航水位; 电站下游航道; 非恒定流

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0131-005

## Design lowest navigable stage of downstream waterway of hydropower station

LIU Xiao-fan, CAO Shu-tao, LI Jia-shi

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** The design lowest navigable stage of Jialing river downstream waterway affected by unsteady flow of hydropower station is researched. Based on the analysis of the downstream water stage of hydropower station, storage outflow in the period of 2009—2010 and hydropower station operation mode in the Jialing river, we calculate the design lowest navigable discharge of downstream waterway of hydropower station using storage outflow in different time scales, and calculate the design lowest navigable stage of downstream waterway of hydropower station by water stage linear correlation between water gauges.

**Key words:** design lowest navigable stage; downstream waterway of hydropower station; unsteady flow

嘉陵江发源于陕西省秦岭南麓, 由北向南流经陕西、甘肃、四川和重庆三省一市, 其干流分东西两源, 东源起自陕西省凤县以北的秦岭镇, 向南流经甘肃省徽县境, 于陕西略阳与西源西汉水汇合, 经阳平关入川, 然后向南流经广元、昭化、苍溪、阆中、南部、蓬安、南充、武胜等两市六县, 在合川入渝, 在重庆汇入长江, 全长1 119 km, 落差2 300 m, 平均比降2.05‰。嘉陵江入川后沿程在昭化接纳了白龙江、在阆中、南部分别接纳了东、西两河, 进入重庆后又接纳了渠江和涪江, 流域面积15.98万km<sup>2</sup>。广元至合川段为中游, 河谷逐渐开阔, 两岸多丘陵平坝, 台地多, 河床开阔, 边滩发育低坦, 漫滩多, 水流分散,

河床质多为砂卵石, 水面宽一般在200~800 m。嘉陵江广元至合川段共规划15个枢纽, 分别为上石盘、亭子口、苍溪、沙溪、金银台、洪岩子、新政、金溪场、马回、凤仪场、小龙门、青居、东西关、桐子壕和利泽, 其中上石盘和利泽2个枢纽为拟建梯级, 其余13个梯级均为已建和在建梯级。全河段渠化后航道等级达到IV级, 航道尺度为2.0 m×50 m×500 m(水深×直线段宽度×弯曲半径)。

本次整治的嘉陵江武胜段中心北门滩位于桐子壕枢纽坝下2 km, 由于利泽枢纽尚未修建, 滩险处为枢纽坝下的天然航道。目前嘉陵江桐子壕枢纽下游天然航道枯水维护尺度为1.2 m×

收稿日期: 2012-11-19

作者简介: 刘晓帆(1982—), 女, 1982, 博士, 工程师, 从事港口与航道工程。

30 m × 260 m (水深 × 航宽 × 弯曲半径)。本研究在深入分析嘉陵江桐子壕电站2009—2010年大坝下游水位、出库流量和电站调度运行方式的基础上,采用不同时间尺度的流量资料推求电站下游航道设计最低通航流量,通过建立滩险处基本水尺与电站坝下水位相关线来推求整治滩险的设计最低通航水位<sup>[1-4]</sup>。

### 1 资料收集

#### 1.1 气象

据武胜气象台1960—1990年实测资料统计:多年平均气温17.5℃,极端最高气温41.3℃,极端最低气温-2.4℃。多年平均降雨量1 054.6 mm,历年最大一日降雨量182.7 mm(1989年)。多年平均蒸发量1 070.7 mm。多年平均风速1.5 m/s,最大风速18.0 m/s,最多风向北偏东。

#### 1.2 水文

##### 1) 水文站。

整治河段上游有金溪水文站,集水面积73 527 km<sup>2</sup>,下游有武胜水文站,集水面积为79 714 km<sup>2</sup>,中心北门滩至武胜水文站区间无大支流汇入。各水文站观测项目主要有水位、流量、泥沙、水温等。水文站的基本情况见表1。

表1 研究河段主要水文站基本情况

站名	设立日期	集水面积/km <sup>2</sup>	至河口距离/km	资料年限	基面
金溪	1965-01	73 527	400	1965-01至今	吴淞
武胜	1940-05	79 714	172	1940-05至今	黄海

##### 2) 电站。

本次整治嘉陵江武胜段位于桐子壕电站坝下,其流量、水位等水文要素受到桐子壕电站调峰运行、下泄非恒定流的影响,使得水文站的资料不能完全反应本河段的水文特征。因此本研究收集了桐子壕电站2009—2010年大坝下游水位、出库流量和电站调度运行方式。桐子壕电站位于武胜县中心镇秀观村附近的嘉陵江小中坝河段,坝址处控制流域面积78 926 km<sup>2</sup>,距河口里程172 km,正常蓄水位为224.00 m,正常蓄水位以下库容9 900万m<sup>3</sup>,回水长度43.87 km,汛限水位222.00 m。

电站单机引用流量375 m<sup>3</sup>/s,设计水头10 m。桐子壕电站近期(约30 a以前)运行方式:1)入库流量小于7 000 m<sup>3</sup>/s电站维持正常蓄水位224.00 m运行发电,允许消落水位223.60 m;2)入库流量大于7 000 m<sup>3</sup>/s上下水头小于机组最小水头电站停机,在7 000 m<sup>3</sup>/s到上游航运最大通航流量之间,保持上游不低于223.00 m最低通航水位,超过10 000 m<sup>3</sup>/s,全闸打开敞泄。

### 1.3 泥沙资料

#### 1) 悬移质泥沙。

根据武胜水文站1957—1995年共39 a实测资料统计分析,得到多年平均输沙量为6 560万t,含沙量2.41 kg/m<sup>3</sup>,实测最大断面平均含沙量为60.6 kg/m<sup>3</sup>(1984年8月7日)。武胜站多年平均输沙量、含沙量逐月分配见表2。

表2 武胜站多年平均输沙量、含沙量逐月分配

月份	含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	输沙量/万t	占全年沙量比/%
1	0.003	0.159	0.002
2	0.002	0.099	0.002
3	0.035	2.06	0.031
4	0.411	44.6	0.680
5	1.430	289	4.400
6	1.660	435	6.600
7	4.390	2 300	35.100
8	3.930	1 750	26.700
9	2.900	1 450	22.100
10	0.872	255	3.900
11	0.208	29.8	0.450
12	0.021	1.72	0.026
年平均	2.410	6 560	100

## 2 设计最低通航水位的推求

### 2.1 水文站综合历时曲线<sup>[5-6]</sup>的统计

根据JTS 145-1—2011《内河航运工程水文规范》<sup>[7]</sup>的规定选用金溪站1989—2008年逐日平均水位、逐日平均流量资料进行综合历时曲线统计,统计结果见表3。表3中北门滩流量由金溪水文站流量综合历时统计结果采用水文比拟法计算得到。北门滩位于桐子壕电站坝下约2 km,其集水面积取桐子壕电站坝址的集水面积78 926 km<sup>2</sup>,面积指数取1.0。

表3 金溪水文站、北门滩流量综合历时统计结果

保证率/%	金溪站水位/m	金溪站流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	北门滩流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
70	294.31	248	266
75	294.24	228	245
80	294.15	209	224
85	294.00	186	200
90	293.80	164	176
95	293.47	134	144
98	293.26	107	115

2.2 电站出库流量综合历时曲线的统计

根据桐子壕电站2009—2010年每15 min大坝下游水位、出库流量, 采用算术平均法统计逐时、逐日大坝下游水位和出库流量。对不同时间尺度的水位、流量资料进行综合历时曲线统计, 统计结果如表4和表5所示。图1给出了2009—2010年不同时间尺度流量综合历时曲线。

表4 桐子壕电站坝下水位历时统计结果

年份	时间	保证率/%						
		70	75	80	85	90	95	98
2009	15 min	210.48	210.36	210.29	209.97	209.81	209.62	209.52
	1 h	210.49	210.36	210.29	209.99	209.81	209.63	209.53
	1 d	210.50	210.44	210.37	210.25	210.16	210.01	209.73
2010	15 min	210.50	210.37	210.27	210.06	209.83	209.70	209.57
	1 h	210.50	210.37	210.28	210.07	209.85	209.72	209.58
	1 d	210.59	210.53	210.43	210.30	210.17	209.97	20.79
2009—2011	15 min	210.49	210.36	210.28	210.03	209.81	209.64	209.57
	1 h	210.49	210.36	210.28	210.04	209.82	209.65	209.57
	1 d	210.54	210.48	210.39	210.28	210.17	209.99	209.73

表5 桐子壕电站出库流量历时统计结果

年份	时间	保证率/%						
		70	75	80	85	90	95	98
2009	15 min	315	268	262	130	126	84.2	82.4
	1 h	315	269	261	132	127	84.4	82.6
	1 d	332	310	295	268	235	202.0	171.0
2010	15 min	308	266	260	130	127	84.5	83.0
	1 h	311	266	260	133	127	84.8	83.2
	1 d	344	316	287	261	236	187.0	151.0
2009—2011	15 min	312	267	261	130	126	84.4	82.9
	1 h	313	267	261	132	127	84.6	83.0
	1 d	337	316	289	263	236	195.0	152.0

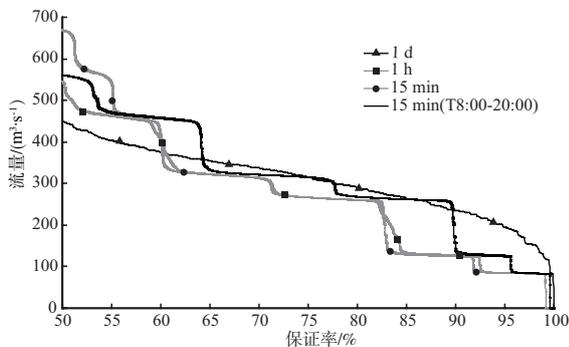


图1 桐子壕坝下不同时间尺度流量综合历时曲线

测资料点绘坝下水位流量关系曲线(图2)。图2中水位为黄海高程系统(下同)。

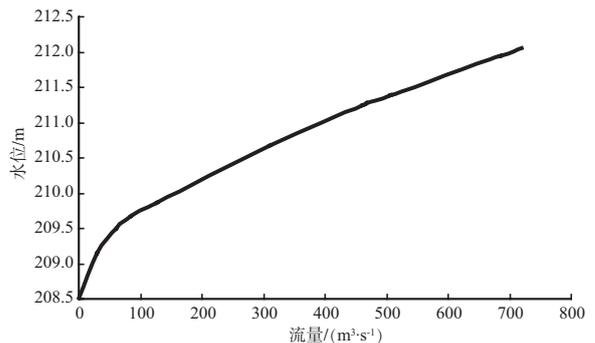


图2 桐子壕电站坝下水位流量关系曲线

2.3 电站坝下水位流量关系曲线建立

根据桐子壕电站2009—2011年的水位流量观

### 2.3 水位相关线的建立

为了获得桐子壕坝下北门滩的设计最低通航水位,本研究根据2011年5月桐子壕电站坝下和北门滩基本水尺的瞬时水位观测资料,摘录峰谷点绘二者水位相关线<sup>[8]</sup>,如图3所示。

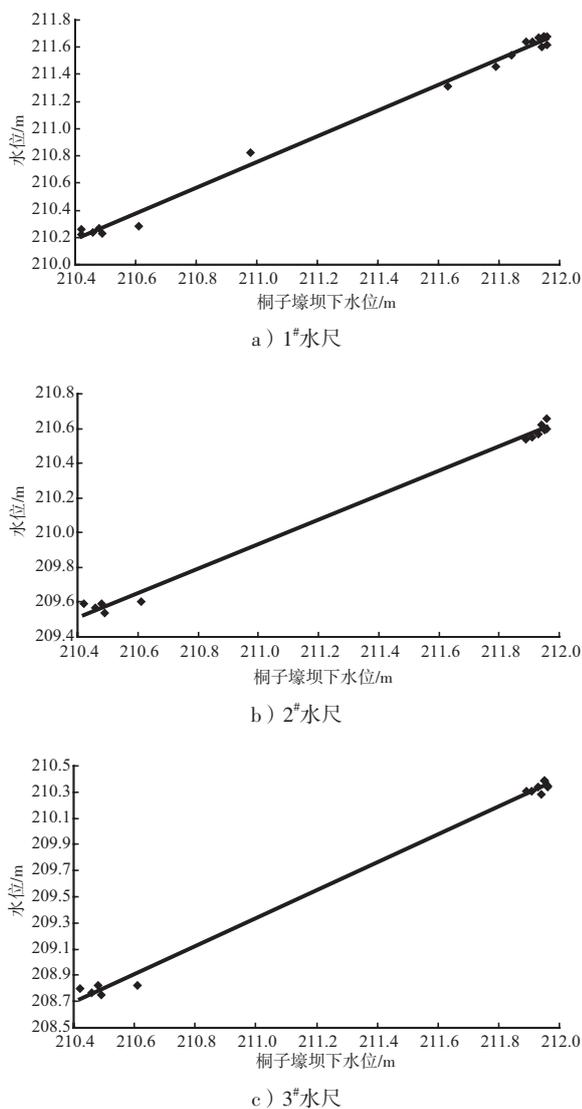


图3 桐子壕坝下水位相关线

### 2.4 电站下游设计最小通航流量的确定

桐子壕电站单机发电流量为 $375 \text{ m}^3/\text{s}$ ,天然河流状态下航道保证率95%流量为 $144 \text{ m}^3/\text{s}$ 。当上游来水量小于单机发电流量时,必然存在电站停机蓄水时段。由于电站没有以设计最小通航流量作为下泄基流,其大坝下游设计最低通航水位也就无法保证,因此不能采用天然河流状态下保证率95%流量 $144 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为电站坝下设计最小通航流量。

桐子壕电站运行以来,改变了其下游河段水

流的天然特性。由于电站担负电网的调峰任务,除了大洪水外,大部分时间均对天然来水量进行日调节。一般日负荷变化特点是从晚22时起至次日6时为负荷低谷,电站下泄流量较小,多小于 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。从桐子壕坝下水位、流量资料来看1 d内最大水位变幅可达到3 m,流量介于 $0 \sim 700 \text{ m}^3/\text{s}$ ,电站坝下航道受电站调峰发电的影响,需采用“等水通航”的方式才能满足V级航道300吨级船舶通行。本研究根据桐子壕电站2009—2010年每15 min出库流量资料统计出15 min、逐时、逐日保证率95%流量分别为 $84.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $84.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $195 \text{ m}^3/\text{s}$ 。15 min和1h流量综合历时曲线成果在小流量时比较接近,小时尺度的流量资料能够反映该电站下泄不稳定流的特性,而日尺度的流量资料不能反映电站对流量的调节。以2010年3月10日为例,图4给出了电站24 h下泄流量过程,该日平均流量 $196 \text{ m}^3/\text{s}$ 是由 $84 \text{ m}^3/\text{s}$ 变到 $260 \text{ m}^3/\text{s}$ 的一个瞬时值,对于15 min流量综合历时曲线来说,其保证率仅为83.4%,因此流量 $196 \text{ m}^3/\text{s}$ 也不适宜作为本段航道的设计最小通航流量。15 min保证率95%流量 $84.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 能够反映电站下游河段流量特性,但该流量过小,通过航道整治技术很难实现本河段的维护水深1.2 m的要求。

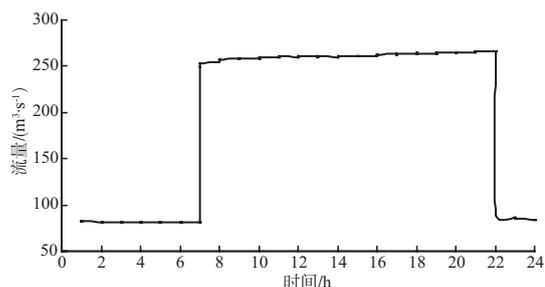


图4 桐子壕电站2010年3月10出库流量过程线

目前,国内对电站下游河段受非恒定流影响的最低通航水位没有明确的规范要求,致使工程设计研究时,对如何衡量航道尺度变得尤为困难。由于利泽枢纽还未建设,嘉陵江武胜段北门滩维护整治工程的建设规模为内河V级航道,通行300 t及300 t以下船舶,水位综合历时保证率95%时,航道尺度为 $1.3 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 270 \text{ m}$ (水深 $\times$ 航宽 $\times$ 弯曲半径)。目前嘉陵江武胜段水运以货

运为主,主要是区间短途运输,主要以矿建材料为主,客运主要为沿江两岸人们出行和部分观光旅游运输,多数船舶不夜航,采用等水通航的模式。根据该段航道的航运现状,结合电站调峰运行方式,本研究提出了该段航道设计最小通航流量的确定方法。不考虑夜晚20时至次日8时的流量资料,仅对白天8:00至20:00的流量资料进行综合历时曲线统计,成果如图1所示,相应保证率95%流量 $126\text{ m}^3/\text{s}$ 作为该段航道的设计最小通航流量。

### 2.5 北门滩设计最低通航水位的推求

研究河段现状航道等级为V级,根据JTS 145-1-2011《内河航运工程水文规范》的规定,枢纽下游V级航道设计最低通航水位可按保证率95%分析选定设计流量,并考虑河床下切和电站日调节的影响推算确定。根据2.4节分析,本研究采用时间尺度为15 min的8:00至20:00保证率95%的流量 $126\text{ m}^3/\text{s}$ 作为该河段的设计最小通航流量。根据桐子壕电站坝下水位流量关系曲线(图2)及北门滩基本水尺和桐子壕坝下水位相关线推算北门滩设计最低通航水位如表6所示。

表6 北门滩设计最低通航水位

水尺名称	设计水位/m
桐子壕坝下	209.87
1#水尺	209.67
2#水尺	209.15
3#水尺	208.13

### 3 结语

GB 50139—2004《内河通航标准》<sup>[9]</sup>规定枢纽瞬时下泄流量不应小于原天然河流设计最低通航水位时的流量,但很多电站在实际运行中不能满足上述要求,本研究对桐子壕电站坝下河段提出采用“等水通航”的模式,是符合客观实际的。

嘉陵江桐子壕电站下游航道,受电站下泄非恒定流的影响十分明显,设计最低通航水位计算条件复杂。在深入分析嘉陵江桐子壕电站2009—

2010年大坝下游水位、出库流量和电站调度运行方式的基础上,采用不同时间尺度的流量资料推求电站下游航道设计最低通航流量,最终根据桐子壕电站坝下河段的航运现状,结合电站调峰运行方式,提出不考虑夜晚20:00至次日8:00电站负荷低谷时的流量资料,仅对白天8:00至20:00的流量资料进行综合历时曲线统计,其保证率95%的流量作为该段航道的设计最小通航流量,而后通过建立滩险处基本水尺与电站坝下水位相关线来推求整治滩险的设计最低通航水位。本研究对于瞬时流量小于原天然河流设计最小通航流量的电站下游航道的设计最低通航水位的推求提出了一个思路,为同类航道的设计最低通航水位确定提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 王秀英,李义天,王东胜,等. 水库下游非平衡河流设计最低通航水位的确定[J]. 泥沙研究, 2008(6): 61-67.
- [2] 陈一梅,徐造林. 水利枢纽下游河段设计最低通航水位推算方法探讨[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(2): 259-263.
- [3] 李宇. 梅江、汀江调峰影响河段设计水位的推算及航道整治研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [4] 李顺超,刘晓帆. 金沙江(水富至宜宾)航道整治工程设计最低通航水位的推求[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 483-487.
- [5] 闵朝斌. 关于最低通航设计水位计算方法的研究[J]. 水运工程, 2002, 336(1): 29-33.
- [6] 贡炳生,蔡国正,张贤明. 论天然河流设计最低通航水位两种确定方法的矛盾与统一[J]. 水运工程, 2005 (2): 47-51.
- [7] JTS 145-1-2011 内河航运工程水文规范[S].
- [8] 杨琳文,邓年生,曾雪涛. 采用相关分析法计算清远站最低通航水位[J]. 水运工程, 2009, 425(3): 105-108.
- [9] GB 50139—2004 内河通航标准[S].

(本文编辑 郭雪珍)