

闽江水口水电站下游航道设计最低通航水位确定方法

林金裕

(福建省港航勘察设计院有限公司, 福建 福州 350002)

摘要:为了给闽江航道整治、码头建设、防洪、船闸设计提供技术参数,在外业资料缺乏情况下,采用数值模拟、外业观测、相关分析相结合的方法计算闽江水口水电站下游航道设计最低通航水位。基于非结构网格、有限体积法建立闽江干流水口水电站至马尾河段的二维水动力数学模型,通过数学模型推算闽江水口水电站下游航道沿程临时站点逐时水位,将沿程临时站点逐时水位与竹岐站、文山里站、白岩滩站等长期水文站(基准站)水位建立相关关系,采用累积频率法计算低潮累积频率90%的水位特征值作为基准站设计最低通航水位,通过该相关关系计算沿程临时站设计最低通航水位。计算结果表明,临时站逐时水位与基准站逐时水位线性相关关系较好,相关系数基本在0.9以上,由该相关关系及基准站设计最低通航水位获得的闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位值相对合理可靠。

关键词:设计最低通航水位;相关分析法;累计频率法;二维数学模型;水口水电站下游航道

中图分类号:U612.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0054-06

Calculation method of design lowest navigable water level for downstream channel of Minjiang Shuikou Hydropower Station//LIN Jinyu (Fujian Port & Waterway Investigation and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to provide technical parameters for waterway regulation, wharf construction, flood control and lock design of the Minjiang River, in the absence of field data, numerical simulation, field observation and correlation analysis were used to calculate the lowest navigable water level in the downstream channel of Minjiang Shuikou Hydropower Station. Based on unstructured grid and finite volume method, a two-dimensional hydrodynamic numerical model was established from Shuikou Hydropower Station at the Minjiang River to the Mawei River, which was used to calculate the hourly water level at the downstream channel of the hydropower station. The hourly water level of the downstream channel was used to establish the correlation with the water level of Zhuqi, Wenshanli, Baiyantian and other long-term hydrological stations (base station). The cumulative frequency method is used to calculate the water level characteristic value of 90% of the cumulative frequency of the low tide as the design lowest navigable water level of the reference station. The calculation results show that the linear relationship of the hourly water level is well correlated between base stations and temporary stations with a correlation coefficient higher than 0.9, indicating a rational and reliable design lowest navigable water level.

Key words: design lowest navigable water level; correlational analysis method; cumulative frequency method; 2D numerical model; downstream channel of Shuikou Hydropower Station

闽江是福建省最大的河流,全长约562 km,流域面积约60 992 km²。闽江发源于闽、赣、浙三省交界的武夷、杉岭等山脉,自北向南流,上游沙溪、建溪、富屯溪三大支流在南平延平区汇合后进入闽江干流,沿途纳尤溪、古田溪、梅溪、大樟溪等支流,流经福州市区后由长门入海。水口水电站位于闽江干流

中段,下游距福州市约84 km,距闽江口的长门入海口约112 km,距梅花入海口约118 km,是以发电为主、兼顾航运效益的大型水力枢纽,担负福建电网调频、基荷、调峰和事故备用等任务,也是我国华东地区最大的常规水电站和国家重点工程。水口水电站于1993年下闸蓄水,由于其控制的流域面积占闽江

流域面积的 86%, 水口水电站建成后改变了库区河段的水流条件和泥沙运动规律, 电站下游河道的水动力条件也发生了较大变化; 另一方面, 伴随着社会经济的高速发展, 对优质“闽江砂”需求骤增, 使得闽江下游河道的沙石“入不敷出”, 导致水口水电站下游水位持续下降, 从 1996 年至 2013 年, 水口坝下至竹岐沿程河床下跌幅度在 3m 以上, 严重影响了闽江航运发展。近年来, 在各级政府部门的重视下, 加强了对闽江的保护和治理, 闽江河床逐渐趋于稳定。目前闽江水口坝下最低通航水位仍采用 1996 年推算值, 与闽江河床现状不相适应, 已不能满足航运发展需求, 加上闽江水口坝下河段桥梁众多、地势多变、比降较为复杂, 因此为保障船舶通航安全, 同时为闽江航运工程建设、运营等提供必要的基础资料和依据, 需开展闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位分析研究。

近年来国内外许多学者、研究机构针对设计通航水位展开了一定的研究。徐军辉等^[1]采用入库流量与坝前水位组合保证率的计算方法确定了梯级电站变动回水区设计最低通航水位。何洋等^[2]采用长河段一维水流数学模型研究了整体炸礁方案对最低通航水位的影响, 并对炸礁方案实施后的整体效果进行了校核。陈希等^[3]基于大河家水电站、寺沟峡水电站的运行特征, 通过建立数学模型计算了黄河大河家至寺沟峡河段设计最低通航水位。谢平等^[4]基于分解合成思想和二阶矩变异概念, 提出了考虑水位过程变异的非一致性最低通航水位设计方法, 即频率-保证率法。陈一梅等^[5]采用 BP 神经网络模型计算了闽江水口坝下游受电站日调节影响的近坝段河道设计最低通航水位。王冬等^[6]利用水库下游河床的渐进性调整原理, 提出了通过分析河段水位下降趋势、河床冲刷趋势及数学模型, 量化水库下游冲刷河段枯水期同流量下水位随蓄水时间变化的方法来推求设计最低通航水位。杨首龙等^[7]通过建立数学模型探索了在天然径流和东海潮流共同作用下, 闽江水口水电站坝下水位未来的变化规律, 并根据闽江下游河沙的储藏量和特点, 预测了人为采砂对水口水电站最低通航和发电水位的影响以及水口水电站坝下极限最低水位。陈兴伟等^[8]建立了闽江下游河道一维非恒定流数学模型, 对枯水大潮条件下闽江下游河道沿程各断面的潮位、流量变化过程进行了模拟, 并结合历史实测资料, 对闽江下游河道枯水条件下水动力特性及其变化进行了分析。黄永葛等^[9]针对闽江水口枢纽坝下水位降落幅度及河床地质条件, 采用 1 : 100 正态物理模型与遥控自航船模相结合的研究手段, 提出了若坝下水

位降落幅度较小, 且坝下河床冲刷已基本稳定, 可采取潜坝或明渠及溢流坝方案治理, 若坝下水位降落幅度较大, 且坝下河床冲刷仍在继续, 单纯解决通航问题可采取船闸改造或船闸加中间渠道方案治理。徐军辉等^[10]以临淮岗复线船闸为例, 针对枢纽的建设、运行和非汛期蓄水导致水位样本出现非一致性, 综合考虑上游变化趋势、人为因素对水位的影响程度、近远期的调度方案以及工程的实际情况, 确定设计最低通航水位采用的代表性资料, 并计算得到闸上、闸下设计最低通航水位。冯小香等^[11]采用一维泥沙数学模型预测了三峡单库运行、三峡与上游控制性水库联合运行两种情况下, 长江中游主要水文站的水位变化趋势, 结合近期三峡电站日调节对下游各站的影响情况, 预报了三峡蓄水后 20 年、30 年宜昌到武汉河段的设计最低通航水位。

上述研究大部分是基于—维数值模型和经验公式推算河道设计最低通航水位, 然而闽江水口水电站下游河段较长、通航环境较为复杂, 且外业资料相对缺乏, 采用—维数值模型和经验公式难以精确推算闽江下游设计最低通航水位, 因此本文基于非结构网格、有限体积法建立了闽江干流水口水电站至马尾河段二维水动力数学模型, 通过二维数学模型推算闽江水口水电站下游航道沿程临时站点逐时水位, 应用沿程临时站点逐时水位与基准站水位建立相关关系, 选取低潮累积频率 90% 的水位特征值作为基准站设计最低通航水位, 通过相关关系计算闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位。

1 二维水动力数学模型的建立与验证

1.1 二维浅水控制方程

对于实际地形水流的计算, 可以采用二维浅水方程, 其具体形式为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + fv - ru \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} - fu - rv \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial [(d+z)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+z)v]}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; x 、 y 分别为水平面横向坐标和纵向坐标; u 、 v 分别为 x 方向和 y 方向的流速; d 为水深; z 为瞬时水位; f 为柯氏参数; r 为底摩擦系数; g 为重力加速度。

1.2 参数处理

计算范围为闽江干流水口水电站至马尾青州作业区河段(图 1), 上边界为水口水电站下泄逐时流量, 下边界为马尾青州作业区附近河流断面逐时水位, 岸边

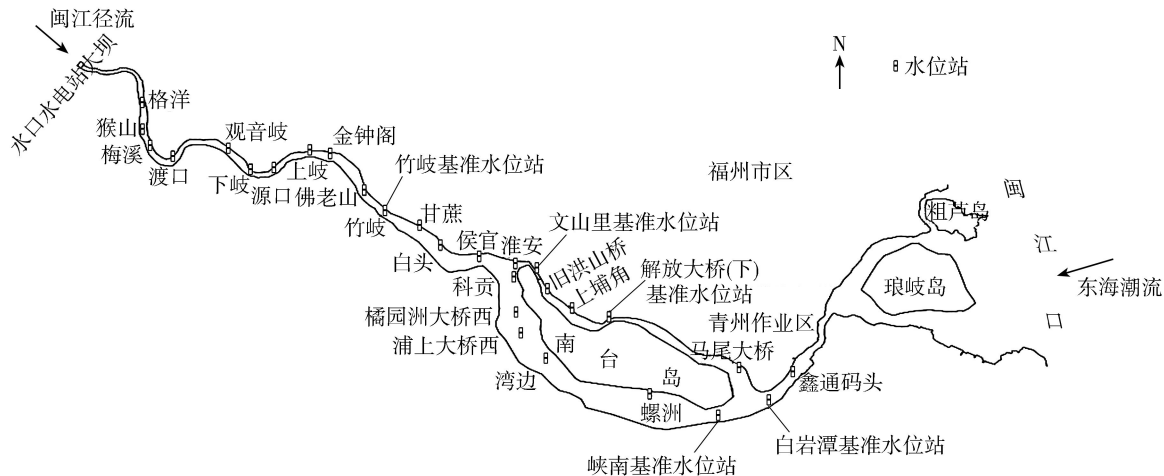


图1 模型计算区域示意图

界采用水流无滑移条件,动边界采用干湿边界处理。计算时间为2017年11月1日1时至2018年2月28日23时,水下地形资料为2016年(局部2014年)1:1000实测水深测图,河道糙率系数经率定为0.033。

1.3 模型验证

为了验证数学模型计算结果的准确性、可靠性和稳定性,对模型的潮位、流速计算值进行验证,结果见图2和图3。由图2和图3可知,模拟结果与实

• 实测值 — 计算值

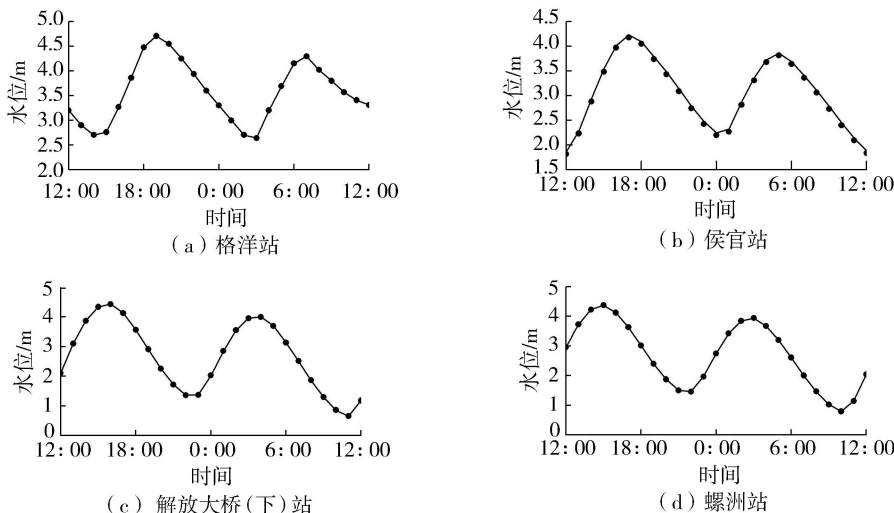


图2 2017年11月25—26日典型站潮位验证

• 实测值 — 计算值

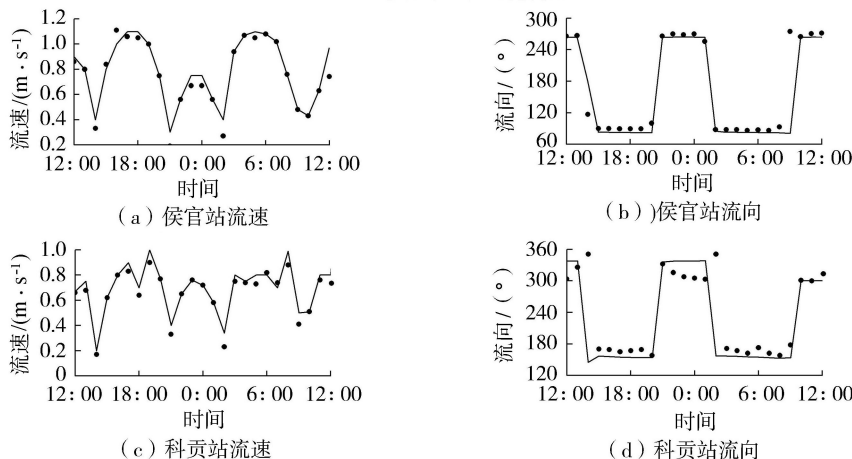


图3 2017年11月25—26日典型站流速验证

测值吻合较好,说明该模型的建立和数值计算方法合理,可进行下一步设计最低通航水位计算。

2 设计最低通航水位计算分析

2.1 设计水位计算方法

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[12],受潮汐影响的河段设计最低通航水位可采用低潮累积频率法计算确定,Ⅲ、Ⅳ级航道低潮累积频率为 90%~95%,闽江干流基准站设计最低通航水位取低潮累积频率 90% 的水位特征值。进行低潮累积频率分析需要各水文站一年以上的长系列高、低潮位资料,闽江干流水口水电站下游航道长期水文站点仅有竹岐、文山里、峡南、解放大桥(下)、白岩潭 5 个固定水文站。考虑到要获得沿程各计算站点一年以上的实测资料需要大量的人力、财力和物力,另一方面,根据相关理论及以往经验证明^[13-16],各种自然因素相差无几的同一河流不同站点之间同一潮次的高潮与高潮(或低潮与低潮)之间存在很好的线性关系,相关性分析具有较强的现实意义,因此本文采用相关分析的方法研究闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位。

2.2 基准站低潮累积频率分析

根据基准水文站文山里站、峡南站、解放大桥(下)站 1 年、白岩潭站 2 年、竹岐站 4 年完整逐时水位资料进行低潮累积频率分析计算,筛选水文年内基准站低潮水位值,并选取低潮累积频率 90% 的水位特征值作为设计最低通航水位。经计算,竹岐站、白岩潭站、文山里站、峡南站、解放大桥(下)站 5 个基准水文站低潮累积频率 90% 的水位值(即设计最低通航水位)分别为 224 cm(基面:罗星塔零点,下同)、45 cm、139 cm、66 cm、62 cm。

2.3 沿程临时水位站逐时水位获取

闽江水口水电站至马尾航段距离相对较长,为了准确反映沿程最低通航水位状况,必须选取约 20 个计算站点,但外业测量费用较高,因此仅于 2017 年 11 月 1 日至 2018 年 2 月 28 日在闽江干流格洋、侯官、螺洲、鑫通码头附近水域布置 4 个临时水位站获取其 3 个月逐时水位,同时在侯官、文山里、科贡布置 3 个测流断面开展 27 h 同步流速观测,然后建立水口水电站至马尾青州河段二维水动力数学模型,通过实测站点资料率定和验证模型后,由模型计算闽江沿程猴山站、梅溪口站、渡口站、观音岐站、下岐站、源口站、上岐站、金钟阁站、白沙站、佛老山站、甘蔗站、白头站、淮安站、科贡站、橘园洲大桥桥西站、浦上大桥桥西站、湾边站、旧洪山大桥(上)站、旧洪山大桥(下)站、上埔角站、解放大桥(上)站

21 个计算站点 3 个月逐时水位。

2.4 线性回归理论

线性回归(相关直线)的方程为

$$y = a + bx \tag{4}$$

式中: y 为倚变量,即临时观测站的高、低潮位; x 为自变量,即基准站的高、低潮位; a 、 b 分别为直线的截距和斜率。

某一实测点 (x_i, y_i) 与相关直线之间的纵向离差为

$$y_i - y = y_i - a - b x_i \tag{5}$$

根据最小二乘法原理,要使直线为“最佳配合线”,须使所有点据与相关直线之间的离差的平方和 S 最小,即

$$\min S = \min \sum (y_i - y)^2 = \min \sum (y_i - a - b x_i)^2 \tag{6}$$

若使 S 为最小,须令

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum (y_i - y)^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \sum (y_i - y)^2}{\partial b} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

求解方程组(7),可得:

$$\begin{cases} a = \bar{y} - b\bar{x} \\ b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中: $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为 x 、 y 序列值的平均值。

相关直线代表两变量之间的相关关系,但不能直接说明相关程度是否密切。描述相关程度的特征值可用相关系数 r 表示

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \tag{9}$$

r^2 越接近于 1,说明两变量的线性关系越好; $r^2 = 1$,说明两变量具有直线函数关系,即完全线性相关; $r^2 = 0$,说明两变量线性零相关,即不存在线性相关。

2.5 各临时站最低通航水位计算

根据基准水文站点位置情况,将格洋站、猴山站、梅溪口站、渡口站、观音岐站、下岐站、源口站、上岐站、金钟阁站、白沙站、佛老山站、甘蔗站、白头站、侯官站、淮安站、科贡站、橘园洲大桥桥西站、浦上大桥桥西站 18 个临时水位站逐时水位与竹岐基准水文站逐时水位进行相关分析,将湾边站、螺洲站、鑫通码头站临时水位站逐时水位与白岩潭基准水文站逐时水位进行相关分析,将旧洪山大桥(上)站、旧洪山大桥(下)站、上埔角站、解放大桥(上)站 4 个临时水位站逐时水位与文山里基准水文站逐时水位进行相关分析,然后依据相关关系分别计算各个临时站点设计

最低通航水位特征值,结果见表 1。水口水电站下游航道设计最低通航水位沿程变化曲线见图 4。

表 1 临时站与基准站水位相关关系

水位站	最低通航水位/m	相关关系	相关系数
竹 岐*	2.04		
格 洋	2.59	$y = 0.94x + 48.54$	0.98
猴 山	2.52	$y = 0.95x + 37.99$	0.99
梅溪口	2.50	$y = 0.95x + 36.56$	0.99
渡 口	2.38	$y = 0.95x + 24.87$	0.99
观音岐	2.36	$y = 0.95x + 23.76$	0.99
下 岐	2.34	$y = 0.95x + 21.24$	0.99
源 口	2.33	$y = 0.63x + 85.62$	0.90
上 岐	2.32	$y = 0.96x + 16.93$	0.99
金钟阁	2.30	$y = 1.00x + 7.65$	0.99
白 沙	2.27	$y = 1.00x + 1.33$	0.99
佛老山	2.25	$y = 1.01x - 0.42$	0.99
甘 蔗	2.22	$y = 0.99x + 1.19$	0.99
白 头	2.19	$y = 0.99x - 0.99$	0.99
侯 官	2.12	$y = 0.86x + 18.67$	0.93
淮 安	1.94	$y = 0.98x - 25.81$	0.99
科 贡	1.90	$y = 0.961x - 25.62$	0.99
橘园洲大桥桥西	1.81	$y = 0.95x - 31.49$	0.98
浦上大桥桥西	1.57	$y = 0.92x - 49.34$	0.94
峡 南*	0.66		
白岩潭*	0.45		
湾 边	1.24	$y = 0.88x + 84.46$	0.94
螺 洲	0.76	$y = 0.92x + 33.97$	0.97
鑫通码头	0.35	$y = 0.90x - 5.50$	0.92
文山里*	1.39		
旧洪山大桥(上)	1.30	$y = 0.55x + 54.33$	0.89
旧洪山大桥(下)	1.10	$y = 0.53x + 35.88$	0.89
上埔角	1.09	$y = 0.54x + 34.47$	0.92
解放大桥(上)	1.01	$y = 0.54x + 25.93$	0.93
解放大桥(下)*	0.62		

注：* 为基准水文站。

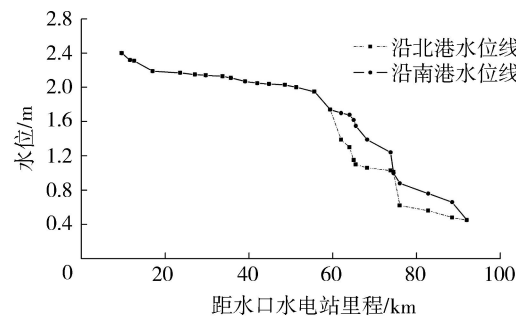


图 4 闽江水口水电站下游航道设计最低通航水位沿程变化曲线

由图 4 和表 1 可知,临时水位站逐时水位与基准水位站逐时水位线性相关关系较好,相关系数基本在 0.9 以上,因此由该相关关系及基准站设计最低通航水位获得的闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位值相对合理可靠。

3 结 语

本文采用数值模拟法和相关分析法相结合的方

法计算闽江干流水口水电站下游航道沿程设计最低通航水位。以竹岐站、峡南站、文山里站、白岩潭站、解放大桥(下)站为基准站,通过低潮累积频率法计算保证率为 90% 的低水位特征值作为基准站设计最低通航水位,以格洋、侯官、解放大桥(下)、螺洲等测站为验证站点,通过二维潮流数学模型推算闽江沿程猴山站、梅溪口站、渡口站、观音岐站、下岐站、源口站、上岐站、金钟阁站、白沙站、佛老山站、甘蔗站、白头站、淮安站、科贡站、橘园洲大桥桥西站、浦上大桥桥西站、湾边站、旧洪山大桥(上)站、旧洪山大桥(下)站、上埔角站、解放大桥(上)站 3 个月逐时水位,再与基准水文站水位值建立线性相关关系,然后依据该相关关系和基准站设计最低通航水位特征值计算闽江干流水口水电站下游航道设计最低通航水位。计算成果为以后闽江航道整治、码头建设、防洪、船闸设计奠定了良好的基础,为闽江流域的水动力和生态环境变化研究提供了参考依据,同时也为闽江沿岸经济的发展提供了一定的技术支撑。

参考文献：

[1] 徐军辉,邓伟. 梯级电站变动回水区设计最低通航水位确定方法[J]. 水运工程, 2020 (4): 109-114. (XU Junhui, DENG Wei. Determination method of design lowest navigable water level standard for fluctuating backwater area of cascade hydro-power station[J]. Port & Waterway Engineering, 2020 (4): 109-114. (in Chinese))

[2] 何洋,张帅帅. 碍航礁石河段最低通航水位和整治效果分析[J]. 水运工程, 2015 (6): 137-142. (HE Yang, ZHANG Shuaishuai. Designed lowest navigable level of navigation obstruction reef reach and regulation effect[J]. Port & Waterway Engineering, 2015 (6): 137-142. (in Chinese))

[3] 陈希,曾涛,张文江. 黄河大河家至寺沟峡河段设计最低通航水位的推求[J]. 水运工程, 2014 (7): 124-126. (CHEN Xi, ZENG Tao, ZHANG Wenjiang. Calculation of design lowest navigation water level of river reach from Dahejia to Sigouxia river reach on Yellow River[J]. Port & Waterway Engineering, 2014 (7): 124-126. (in Chinese))

[4] 谢平,王路,桑燕芳,等. 考虑水位过程变异的非一致性最低通航水位设计方法[J]. 水利学报, 2020, 51 (4): 379-390. (XIE Ping, WANG Lu, SANG Yanfang, et al. Method for designing the lowest navigable water level considering the variation of water level process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (4): 379-390. (in Chinese))

[5] 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. (CHEN Yimei, XU Zaolin. Study

- on method of calculating designed lowest navigable stage at downstream stretch of hydro-junction [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32 (2): 259-263. (in Chinese))
 - [6] 王冬,李义天,邓金运,等. 水库下游冲刷河道最低通航水位确定方法[J]. 水力发电学报, 2014, 33 (1): 120-126. (WANG Dong, LI Yitian, DENG Jinyun, et al. Study on calculation method of design lowest navigable stage in scouring channel downstream of dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33 (1): 120-126. (in Chinese))
 - [7] 杨首龙,林琳,吴时强,等. 水动力与人为挖砂共同作用下水口水电站坝下水位变化规律[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (4): 137-142. (YANG Shoulong, LIN Lin, WU Shiqiang, et al. Water level change downstream of Shuikou Hydropower Station caused by sand mining and flow scour [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (4): 137-142. (in Chinese))
 - [8] 陈兴伟,刘梅冰. 闽江下游感潮河道枯水动力特性变化分析[J]. 水道港口, 2008, 29 (1): 39-43. (CHEN Xingwei, LIU Meibing. Study on variation of hydrodynamic characteristics during dry season in the lower reach of Minjiang River [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29 (1): 39-43. (in Chinese))
 - [9] 黄永葛,王义安,章日红,等. 闽江水口枢纽坝下水位降落整治方法研究[J]. 水道港口, 2007, 28 (4): 257-260. (HUANG Yongge, WANG Yian, ZHANG Rihong, et al. Study on regulation method of fall in water level of the Shuikou Hydro-junction in the Minjiang Rive [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28 (4): 257-260. (in Chinese))
 - [10] 徐军辉,王平,刘长波. 临淮岗复线船闸设计最低通航水位分析[J]. 水运工程, 2020 (6): 137-141. (XU Junhui, WANG Ping, LIU Changbo. Analysis of design lowest navigable water level of Linhuai gang second ship lock [J]. Port & Waterway Engineering, 2020 (6): 137-141. (in Chinese))
 - [11] 冯小香,张明. 三峡蓄水后长江中游设计最低通航水位预报[J]. 水道港口, 2017, 38 (1): 49-53. (FENG Xiaoxiang, ZHANG Ming. Prediction of the design lowest navigable stage in the middle reaches of Yangtze River after Three Gorges Reservoir impoundment [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38 (1): 49-53. (in Chinese))
 - [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 内河通航标准: GB 50139—2014 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
 - [13] 刘晓帆,曹树涛,李家世. 电站下游航道设计最低通航水位推算方法[J]. 水运工程, 2013 (6): 131-135. (LIU Xiaofan, CAO Shutao, LI Jiashi. Design lowest navigable stage of downstream waterway of hydropower station [J]. Port & Waterway Engineering, 2013 (6): 131-135. (in Chinese))
 - [14] 徐锡荣,白金霞,陈界仁,等. 韩江干流航道设计最低通航水位探讨[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (6): 66-68. (XU Xirong, Bai Jinxia, CHEN Jieren, et al. On the lowest design navigable stage of main stream of Hanjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (6): 66-68. (in Chinese))
 - [15] 吴玲莉,张玮,高龙琨,等. 长江下游感潮河段设计通航水位计算方法比较[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25 (4): 36-38. (WU Lingli, ZHANG Wei, GAO Longkun, et al. Comparison of calculation methods for navigable stage design of tidal reach of the lower Yangtze River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (4): 36-38. (in Chinese))
 - [16] 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范 JTS 145—2015 [S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
(收稿日期: 2020-07-06 编辑: 雷燕)
- +++++
- (上接第 27 页)
- [19] 周维垣,黄岩松,林鹏. 三维无单元伽辽金法及其在拱坝分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36 (6): 645-649. (ZHOU Weiyuan, HUANG Yansong, LIN Peng. Three-dimensional element-free Galerkin method and its application in analysis of arch dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (6): 645-649. (in Chinese))
 - [20] 沈振中,张鑫,孙粤琳. 岩体力学劈裂的应力-渗流-损伤耦合模型研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26 (4): 523-528. (SHEN Zhenzhong, ZHANG Xin, SUN Yuelin. Research on stress-seepage-damage coupling model of hydraulic fracturing for rock mass [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26 (4): 523-528. (in Chinese))
 - [21] 甘磊. 水工混凝土结构水力劈裂试验及数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2013.
 - [22] GAN Lei, ZHANG Kailai, ZHANG Hongwei, et al. Coupling analysis of hydraulic fracturing computation base on element-free method [J]. Cluster Computing, 2017, 20 (4): 3213-3224.
 - [23] 沈心哲,甘磊,李舸航,等. 基于无单元法的混凝土结构水力劈裂数值分析模型[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40 (3): 5-9. (SHEN Xinzhe, GAN Lei, LI Gehang, et al. Analysis model of hydraulic fracturing in concrete structures base on EFM [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40 (3): 5-9. (in Chinese))
 - [24] 任青文,钱向东,赵引,等. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报, 2002, 33 (2): 1-7. (REN Qingwen, QIAN Xiangdong, ZHAO Yin, et al. Methods for analyzing sliding resistance stability along the base surface of high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (2): 1-7. (in Chinese))
(收稿日期: 2019-11-10 编辑: 雷燕)