



浦阳江航道设计最高通航水位计算分析

朱军政^{1,2,3}, 刘冰^{1,2}

(1. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022;

3. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 浦阳江航道水位既受到上游径流洪峰流量的影响, 又受到下游潮水顶托, 高水位成因复杂。为加强航道和桥梁等涉航建筑物的管理, 进一步提升浦阳江航道通行能力, 迫切需要对浦阳江航道进行通航水位论证。根据《内河通航标准》中的各级洪水重现期的水位采用设计流量法推求设计最高通航水位的方法, 通过建立二维水动力数学模型, 模拟计算 5 a、3 a 及 2 a 洪水重现期工况下的沿程水位。考虑浦阳江河道状况、航道等级、水流条件和桥梁通航净空等条件, 结合上下游河段设计水位、防汛特征水位、历时水位统计等资料, 经综合分析, 推荐浦阳江 2 a 洪水重现期水位作为设计最高通航水位。

关键词: 最高通航水位; 浦阳江; 洪水重现期; 水动力数学模型

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0145-05

Calculation and analysis of designed highest navigable stage of Puyang River waterway

ZHU Jun-zheng^{1,2,3}, LIU Bing^{1,2}

(1. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The stage of the Puyang River waterway is not only influenced by the runoff peak discharge in the upstream regions, but also supported by the tidal water in the downstream regions. Thus, the reasons for the high stage are complex. It is very urgent to demonstrate the navigable stage of the waterway for strengthening the management of navigation-related structures such as navigation channels and bridges and further enhancing the capacity of the waterway. In the Navigation Standard of Inland Waterway, the designed highest navigable stage is deduced by the design flow method with the stages in flood recurrence periods at different levels. In light of this, we establish a two-dimensional hydrodynamic mathematical model to calculate the designed highest navigable stage for 5-year, 3-year and 2-year flood recurrence periods. Taking into account the river channel conditions, channel grades, flow conditions and bridge's navigation clearance, we recommend the stage of Puyang River in the 2-year flood recurrence period as the highest designed navigable stage by referring to the data of designed stages upstream and downstream, characteristic stage under flood control and historical stage statistics.

Keywords: the highest navigable stage; Puyang River; flood recurrence period; hydrodynamic mathematical model

浦阳江流域位于浙江省中北部、萧绍宁地区西部, 西、南两面靠龙门山及余脉, 东接会稽山, 北滨太湖杭州湾, 主流长 151 km, 流经义乌、浦江、诸暨、萧山 4 个县、市(区)。浦阳江系天然

渠化航道, 是浙江省 20 条内河骨干航道之一, 起源于绍兴诸暨境内, 沿江而下经过萧山后与富春江一起汇入钱塘江, 过三堡船闸和京杭运河进入浙北内河航道网。

根据《浙江省内河航运发展规划》和《浙江省内河水运“十二五”发展规划》，浦阳江是钱塘江的主要支流，连接钱塘江和杭甬运河，沿线地区经济发达、资源较丰富，近年来货运量得到了一定发展。浦阳江航道现为 VI 级及以下航道，考虑该航道的开发条件和运输需求，纳入骨干航道规划布局，规划为 IV 级航道。

浦阳江航道养护工程将对金浦桥至杭甬运河新坝船闸上游引航道喇叭口段按天然Ⅳ级航道标准进行养护疏浚，全长约 23.16 km。金浦桥至杭甬运河新坝船闸的航道升级改造工程将有效提高浦阳江全线的航道等级，进一步改善浦阳江航道通航条件。同时由于浦阳江航道的改造升级，原有航道设计通航水位应适时进行相应调整^[1]。

沈保根等^[2]探讨采用水位频率法和设计流量法所确定的设计最高通航水位对涡河航道通航的影响；郑静等^[3]针对平原河网地区跨航道桥梁改建实施难度大的问题，探讨降低设计最高通航水位取值的可能性，并提出按通航保证率进行设计最高通航水位取值；王国欣等^[4]采用高潮位频率法分别计算剡江、东江控制点的设计最高通航水位；李国通等^[5]通过对西江航运干线跨河桥梁现状、水文特征、不同洪水重现期水位及历时、不同洪水重现期水位与封航水位对比、降低跨河桥梁高度对社会经济的影响等分析，结合航道最高通航水位要求，提出符合西江航运干线实际的跨河桥梁最高通航水位标准。本文采用 GB 50139—2014《内河通航标准》^[6]中的高潮位频率法，通过建立二维水动力数学模型进行通航水位计算，考虑浦阳江河道状况、航道等级、水流条件和桥梁通航净空等条件，结合上下游河段设计水位、防汛特征水位、历时水位统计等资料，提出符合浦阳江实际的最高通航水位。

1 水文情势

浦阳江系钱塘江支流，在闻家堰上游约 3 km 的三江口汇入钱塘江，三江口距钱塘江河口的激

浦 118 km(图 1)。东海潮汐沿途受杭州湾特别是钱塘江河段内的地形、流量的影响，潮汐上溯一直影响到浦阳江的临浦、湄池。郑国诞等^[7]指出，浦阳江临浦、湄池站的洪水位除受浦阳江上游洪峰流量影响外，还受汇合口处闻家堰洪水位的控制，而闻家堰的洪水位变化又受钱塘江上游洪水流量大小、下游潮汐强弱和江道冲淤变化等多种因素所影响，导致临浦、湄池站的洪水位变化规律十分复杂。

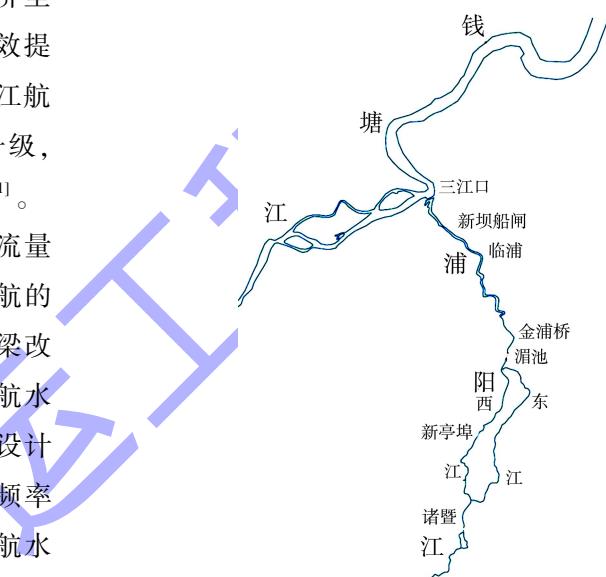


图 1 浦阳江水系及航道位置

浦阳江湄池以下至临浦段河床的冲淤幅度较小，各段容积的变化幅度均小于 5%。各断面滩槽基本稳定，主槽基本呈“U”形，多年来冲淤幅度一般在 2.0 m 以下，且主槽位置变化不大。该河段江道较为稳定，多年维持动态平衡。

2 通航水位计算方法

最高通航水位是设计采用的允许标准船舶或船队正常通航的最高水位，根据《内河通航标准》，不受潮汐影响和受潮汐影响不明显的河段，设计最高通航水位采用表 1 规定的各级洪水重现期的水位。对于潮汐影响明显的河段，设计最高通航水位采用年最高潮位频率为 5% 的潮位，按极值 I 型分布律计算确定。

表1 设计最高通航水位的洪水重现期

航道等级	I~III	IV、V	VI、VII
洪水重现期/a	20	10	5

注: 对出现高于设计最高通航水位历时很短的山区性河流, III级航道洪水重现期可采用10 a; IV级和V级航道可采用3~5 a; VI级和VII级航道可采用2~3 a。

在河口地区, 设计通航水位的计算首先要分析判断河段的感潮属性。潮汐影响明显的河段指多年月平均潮位年变幅小于或等于多年平均潮差的河段。

根据JTS 145-1—2011《内河航运工程水文规范》^[8], 受潮汐影响河段有明显和不明显的区别, 主要取决于月平均水位年变幅多年平均值 ΔZ_1 与多年平均潮差 ΔZ_2 之比。对于设计通航高水位, $\Delta Z_1/\Delta Z_2 \geq 1$ 时, 属潮汐影响不明显的河段, 反之则属潮汐影响明显的河段; 对于设计通航低水位, 根据二者之比可分为常年潮流段、季节性潮流段和常年径流段, 其中 $\Delta Z_1/\Delta Z_2 < 1$ 为潮汐影响明显河段, $1 \leq \Delta Z_1/\Delta Z_2 \leq 5$ 时为季节性潮流段, $\Delta Z_1/\Delta Z_2 > 5$ 时为不受潮汐影响的常年径流段。月平均潮位年变幅多年平均值 ΔZ_1 按式(1)计算:

$$\Delta Z_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{i1} - Z_{i2}) \quad (1)$$

式中: n 为统计年数; Z_{i1} 为统计年内某年最高月平均潮位(m); Z_{i2} 为统计年内某年最低月平均潮位(m)。

依据GB 50139—2014《内河通航标准》和JTS 145-1—2011《内河航运工程水文规范》, 关于水文资料应以工程所在和相邻水文站的水文实测资料为主要依据, 统计相关水位站的特征值水位。当基本站资料具有良好的一致性时, 应取近期连续资料系列, 取用年限不短于20 a。浦阳江临浦设有长期水文观测站。选取浦阳江临浦站1990—2012年实测资料进行统计分析, 该站点 $\Delta Z_1/\Delta Z_2$ 为2.31, 月平均水位变幅大于多年平均潮差, $\Delta Z_1/\Delta Z_2$ 值在1~5, 由此判断该河段属于季节性潮流段, 受潮汐影响不明显, 因此设计最高通航水位论证采用表1规定的各级洪水重现期的水位。

3 数学模型计算

3.1 二维数学模型

浦阳江江道相对较为宽浅, 其水流运动可用非恒定沿垂线积分的平面二维守恒型浅水运动方程来描述:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 + \frac{1}{2} g^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (uv) &= -g \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2} \right) + \\ f v + W_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uv) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 + \frac{1}{2} g^2 \right) &= -g \left(\frac{\partial z_0}{\partial y} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2} \right) - \\ f u + W_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) & \end{aligned} \quad (4)$$

式中: z_0 为河床高程(m); u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的垂线平均流速分量(m/s); h 为水深(m); g 为重力加速度; f 为柯氏力参数($f=2\omega\sin\varphi$, φ 为纬度, ω 为地球自转速度); c_z 为谢才系数, 取 $c_z = \frac{1}{n} h^{1/6}$, n 为糙率系数; ε_x 、 ε_y 分别为 x 、 y 方向的涡动扩散系数; W_x 、 W_y 分别为 x 、 y 方向的风应力分量; x 、 y 为直角坐标; t 为时间。

上述方程组的初始条件:

$$\begin{cases} h(x, y) |_{t=0} = h_0(x, y) \\ u(x, y) |_{t=0} = u_0(x, y) \\ v(x, y) |_{t=0} = v_0(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

边界条件:

水边界

$$z(x, y, t) = z^*(x, y, t) \quad (6)$$

式中: “*”表示已知值;

陆边界

$$V_n = 0 \quad (7)$$

法线方向流速为0。

有了以上条件, 即可用一定的离散格式求出方程的解。鉴于三角形网格具有比较容易拟合复杂的边界、网格布设灵活、局部加密方便、适应性强的特点, 本次计算选用基于三角形网格的有限体积法离散。

3.2 模型验证

二维数学模型上边界为富阳，下边界为闸口，浦阳江上边界在湄池，二维数学模型主要计算浦阳江各代表点通航水位。模型计算区域见图 2。

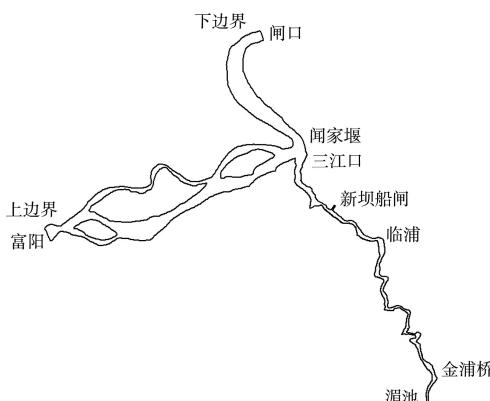


图 2 模型计算区域概化

验证采用 2011 年 6 月的实际洪水过程，上边界富阳站和湄池站采用一维水动力数学模型推算的 6 月 13—18 日流量过程，下边界闸口采用实测潮位过程。计算地形富春江采用 2011 年 3 月 1:10 000 的实测地形，浦阳江以 2008 年 4 月 1:5 000 的实测地形。经多次试算，确定糙率 0.025~0.035，沿程各站点水位过程验证结果见图 3。由图 3 可知，计算值与实测值吻合良好，最大计算误差为 0.08 m。水位验证和流量验证结果表明，二维水动力模型计算精度良好，符合《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》^[9]的要求，可用于方案计算。

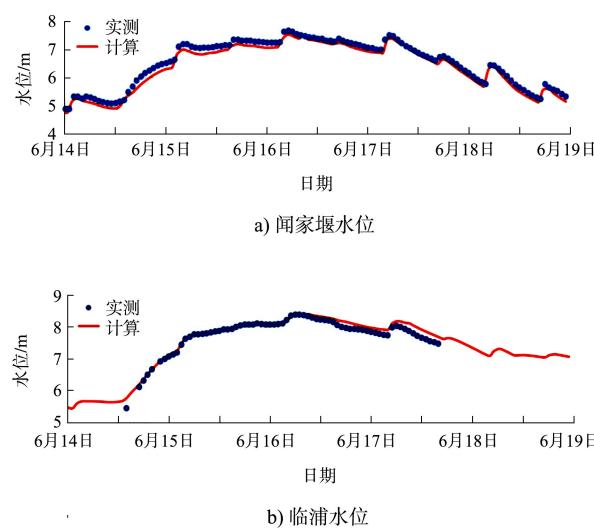


图 3 2011 年 6 月洪水过程验证

3.3 设计最高通航水位计算

按照 JTS 145-1—2011《内河航运工程水文规范》，在计算设计最高通航水位时，对于Ⅳ级航道采用 10 a 洪水重现期的洪水流量，但山溪性河流可下降到 3~5 a 洪水重现期；对于Ⅵ级航道采用 5 a 洪水重现期的洪水流量，山溪性河流可下降到 2~3 a 洪水重现期。

为便于航道管理和上下游航道的衔接，本次设计通航高水位论证采用二维数学模型分别计算了流量为 720、620、540 m^3/s 的 5、3 和 2 a 洪水重现期洪水条件下浦阳江沿程的洪水位。浦阳江湄池至闻家堰长 31.2 km，其沿程洪水位计算结果见图 4。由图 4 可知，各工况下沿程水位总体上有自上游向下游降低的趋势，水面较为平顺，上下游形成较明显的水面坡降。

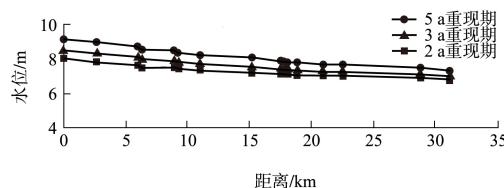


图 4 设计最高通航水位沿程分布

3.4 设计最高通航水位推荐值

根据浙江省水文局提供的数据资料^[10]，浦阳江临浦站和闻家堰站警戒水位分别为 7.18 和 7.06 m，当航道水位达到控制水位时，将限制浦

阳江中的船舶通航,以保证通航安全。分析发现,5、3 a洪水重现期条件下,临浦站水位均超出警戒水位值;而2 a洪水重现期条件下,临浦站水位为7.18 m,与警戒水位值刚好相吻合,闻家堰站计算水位为6.95 m,亦低于警戒水位值。故2 a洪水重现期方案时沿程计算水位均能满足防洪要求,保证船舶通航安全。

由于浦阳江航道上部分桥梁建设时间较早,桥梁底高程较低,按5、3 a洪水重现期设计最高通航水位值计算,已建桥梁除近年新建的3座外,其余桥梁通航净空均达不到规定的Ⅳ级航道通航净空应大于7.0 m的要求。按2 a设计最高通航水位值计算,新建及已许可的跨河桥梁的通航净空均大于7.0 m,其他桥梁则需结合航道标准按要求逐步分批拆除重建。

以临浦水位为代表站点分析,从通航时间保证率来看,1991—2012年的22 a间浦阳江临浦站水位超过5、3、2 a洪水重现期水位的总天数分别为8、18、28 d,三者的多年平均保证率都在99%以上。

考虑浦阳江河道状况、航道等级、水流条件和重要性等,结合上下游河段设计水位、防汛特征水位、历时水位统计等资料,推荐以浦阳江2 d洪水重现期水位作为设计最高通航水位。部分不满足净空尺度要求的桥梁应按Ⅳ级航道对应的设计高水位标准逐渐完成拆除或重建,规划期内桥梁分批逐步改造的具体思路是:新建或改建桥梁应按照7.0 m净高标准一次到位;其他桥梁选择碍航严重的优先改造,其余逐步分期分批改造到7.0 m净高。

4 结论

1)选取浦阳江临浦站1990—2012年实测资料,统计分析得到该站点月平均水位年变幅多年平均值与多年平均潮差的比值为2.31,由此判断浦阳江临浦河段属于季节性潮流段,受潮汐影响不明显。

2)根据《内河通航标准》中各级洪水重现期水位采用设计流量法推求设计最高通航水位,建立了浦阳江湄池至三江口及钱塘江富阳至闸口段的二维水流数学模型,通过湄池、临浦、闻家堰3个水位站点及闻家堰流量站点长达10 d的实测洪水过程验证,模型计算精度良好。

3)利用二维水流数学模型模拟计算了浦阳江5、3、2 a洪水重现期工况下的沿程水位。考虑浦阳江河道状况、航道等级、水流条件和桥梁通航净空等条件,结合上下游河段设计水位、防汛特征水位、历时水位统计等资料,经综合分析后,推荐浦阳江2 a洪水重现期水位作为设计最高通航水位。

参考文献:

- [1] 朱军政,鲍倩.浦阳江(萧山段)航道通航水位论证[R].杭州:浙江水利河口研究院,2015.
- [2] 沈保根,陈建军.涡河安徽段航道设计最高通航水位分析方法探讨[J].中国水运(下半月),2018,18(4):130-132.
- [3] 郑静,邓丰昌.平原河网地区内河航道设计最高通航水位取值[J].水运工程,2017(11):104-108.
- [4] 王国欣,章琦.奉化剡江、东江航道设计最高通航水位分析[J].中国水运(下半月),2017,17(7):182-184.
- [5] 李国通,韦巨球.西江航运干线(广西段)跨河桥梁最高通航水位标准研究[J].中国水运,2017,38(11):25-28.
- [6] 长江航道局.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [7] 郑国诞,唐子文,金新,等.浦阳江湄池站洪水位特征分析[J].浙江水利科技,2016,44(6):5-8,13.
- [8] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院.内河航运工程水文规范:JTS 145-1—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [9] 交通部天津水运工程科学研究所.内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程:JTS/T 231-4—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [10] 浙江省水利厅.浙江省省级主要水情站防汛水位一览表[R].杭州:浙江省水利厅,1999.

(本文编辑 郭雪珍)