



# 航电枢纽调节山区航道 设计最高通航水位的确定

尤克诗, 王 峰, 方向征  
(金华市港航管理局, 浙江 金华 321025)

**摘要:** 航电枢纽人工调节将引发下游航道水位和流速的变化, 对船舶通航条件带来较大影响。针对航电枢纽调节下典型山区航道——兰江航道, 采用数值模拟手段, 计算航道上游规划姚家枢纽和灵马枢纽建成后, 不同重现期洪水下的水位、流速分布等水力特性, 最终得到航道设计最高通航水位。计算结果表明: 10 a 和 5 a 重现期下航道特征水位超过警戒水位较多, 不利于河道防洪和航行安全; 3 a 重现期洪水对应水位的局部分航段流速较大, 影响航道运行安全和航道运输的综合效益; 结合航道建设和运行的经济效益、航道以及行船安全, 认为以 2 m/s 适航流速作为参考条件、经试算获得的 90% 洪水频率对应的特征水位作为兰江航道设计最高通航水位较为合理。

**关键词:** 山区航道; 设计最高通航水位; 航电枢纽调节; 数值模拟  
**中图分类号:** U 612.31      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-4972(2015)11-0125-05

## Determination of designed highest navigable water level of mountainous waterway due to navigation-power junction regulation

YOU Ke-shi, WANG Feng, FANG Xiang-zheng  
(Jinhua Port and Waterway Administrative Bureau, Jinhua 321025, China)

**Abstract:** The navigation-power junction artificial regulation will cause the change of water level and velocity in the downstream channel, and affect the the condition of navigation. Based on the the typical mountainous waterway, Lanjiang under the navigation-power junction regulation, a numerical model is established to study the hydraulic characteristics of water level and velocity change under different return periods after the completion of Yaojia hub and Lingma hub, and the designed highest navigable water level is obtained from the simulation. The results show that: The characteristic water level under the flood of once 10 years and once 5 years is much bigger than the warning water level, and the velocity of partial area is large under the case of the flood of once 3 years; These go against the safety of navigation; Combining the construction of waterway and economic benefits and the safety of running, and according to the control velocity obtained by the synthetic duration curve method, the water level under the case of 90% flood frequency should be considered as the designed highest navigable water level.

**Keywords:** mountainous waterway; designed highest navigable water level; navigation-power junction; numerical simulation

兰江位于浙江省中西部, 属于钱塘江水系范围, 由主流衢江、一级支流金华江在兰溪市区城西南侧汇合至钱塘江中游, 全长 45 km。兰江航道起自兰溪市城区的兰江大桥上游 1.4 km 处, 经女

埠、洲上、下埠头至将军岩往北入建德市境内, 流经三河、麻车、大洋至建德梅城“三江口”(兰江、新安江、富春江), 贯通兰溪和建德两市, 是浙江省骨干航道钱塘江航道的一部分, 航道宽度

最大处约 1 100 m、最窄处约 370 m。根据浙江省航道建设规划,兰江航道经整治改造后将由 V 级航道升级为 IV 级航道,因此航道特征水位需要重新拟定<sup>[1]</sup>。

兰江航道属富春江库区回水范围,航道槽窄、坡陡流急,并且沿程有多个弯道和险滩,属于典型山区航道。根据 JTS 145-1—2011《内河航运工程水文规范》<sup>[2]</sup>及 GB 50139—2004《内河通航标准》<sup>[3]</sup>,IV 级航道内河航道设计最高通航水位可采用 10 a 一遇洪水重现期特征水位,而山区航道可考虑 5 a 一遇或 3 a 一遇洪水重现期特征水位。由于山区河流洪水过程历时短、峰值高,以目前国标规定的洪水频率来确定的山区河流设计最大通航水位仍然偏高<sup>[4-5]</sup>。航段上游拟规划建设姚家、灵马两座枢纽,下游现有新安江水库泄水和富春江回水(图 1),经各枢纽联合调蓄后,洪峰过流期间流速和水位都会发生显著变化。考虑流速变化对航道通航条件的影响和行船安全<sup>[6]</sup>,结合航道建设和运行的经济效益航道,经调研和专家咨询,认为兰江航道航行区域内适航流速不宜大于 2 m/s。



注:虚线框表示拟规划建设枢纽,实线框表示现有枢纽。

图 1 兰江航道、航电枢纽布置

## 1 计算模型

### 1.1 数学模型

假设  $z$  方向的速度和加速度可以忽略,以单宽流量  $q_1$ 、 $q_2$  和自由表面水位  $z_w$  为待求变量,则恒定不可压缩水流控制方程为:

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m \quad (1)$$

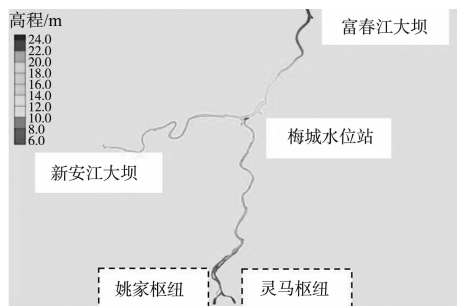
$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial y} + \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (3)$$

式中:  $x$ 、 $y$ 、 $t$  分别为空间直角坐标系和时间坐标;  $q_1 = UH$ 、 $q_2 = VH$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的线流量;  $\beta$  为考虑流速垂向变化的各向同性动量通量校正系数;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水体密度;  $p_a$  为水面气压;  $\Omega$  为科氏力系数;  $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  为  $x$ 、 $y$  向的底床切应力;  $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  为  $x$ 、 $y$  方向的表面切应力;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{yy}$  为湍流引起的各个方向的切应力。

### 1.2 模型范围、边界条件及模型率定

根据地形条件、水文数据等资料,考虑航电枢纽的调度模式(含规划建设枢纽)以及新安江水库和富春江水库回水的影响,模型上游边界分别取至新安江水电站、姚家枢纽和灵马枢纽,下游边界取至富春江大坝(图 2)。计算区域内河道总长约 98.5 km,由于复杂的计算区域和曲折的岸线,模型计算单元采用三角形 6 节点单元和四边形 9 节点单元。



注:虚线框表示拟规划建设枢纽。

图 2 枢纽间整体模型计算范围

根据模型上下游汇流情况,将上游姚家枢纽、灵马枢纽及新安江电站边界条件定义为第 2 类边界,即 Neumann 边界;将下游富春江电站定义为第 1 类边界,即 Dirichlet 边界。将新安江电站的

发电流量与姚家枢纽和灵马枢纽设计下泄流量作为上游边界条件, 考虑航道沿线支岔河流流量及下游富春江水电站在正常蓄水位工况下发电时水位变化情况, 模拟枢纽间模型运行, 分析富春江水库回水情况。

以天然河道低水位为计算边界条件率定粗糙度, 经模型率定后, 模拟河段河槽糙率采用 0.001 5~0.021, 边滩糙率采用 0.022~0.030。并用天然河道较高水位时工况进行验证, 计算值与实测值吻合较好, 说明该模型具有较好的适用性。

1.3 模拟工况

由于兰江航道洪水过程历时短、峰值高、流速急、流态复杂, 按标准计算的设计最高通航水位可能难以满足通航要求。研究根据 GB 50139—2004《内河通航标准》及 JTJ 145-1—2011《内河航运工程水文规范》, 采用 *P*-III 曲线优化适线法获取 10、5 和 3 a 一遇洪水重现期航道特征水位。结合各航电枢纽运行调度方案, 考虑航道建设和运行的经济效益、航道以及行船安全, 分析兰江

航道专家建议的 2 m/s 适航流速对应洪水频率, 试算 70%、80% 和 90% 洪水频率条件下满足通航需求的航道设计最高通航水位。

研究考虑航电枢纽运行调度方案, 确定各枢纽边界条件 (表 1)。同时考虑各枢纽区间较大支流的来水情况, 利用小流域设计洪水计算方法, 对研究区内支流 10、5 和 3 a 一遇洪水重现期, 以及 70%、80% 和 90% 频率条件下洪水设计流量进行推算, 输入模型作为源汇项 (表 2)。

| 表 1 洪水重现期推求最高通航水位计算工况组合 |            |                                        |        |       |              |
|-------------------------|------------|----------------------------------------|--------|-------|--------------|
| 工况<br>(HG-SNJ-)         | 洪水<br>频率/% | 流量/( m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |        |       | 下游边界<br>水位/m |
|                         |            | 兰江上游边界                                 |        |       |              |
|                         |            | 灵马枢纽                                   | 姚家枢纽   | 新安江枢纽 | 富春江枢纽        |
| F10                     | 10         | 5 390                                  | 10 250 | 2 860 | 23.5         |
| F20                     | 20         | 4 070                                  | 8 520  | 1 200 | 23.5         |
| F33                     | 33         | 3 125                                  | 7 160  | 1 000 | 23.5         |
| F70                     | 70         | 1 809                                  | 5 096  | 1 000 | 23.5         |
| F80                     | 80         | 1 592                                  | 4 540  | 1 000 | 23.5         |
| F90                     | 90         | 1 414                                  | 3 926  | 1 000 | 23.5         |

| 表 2 各支流洪水频率设计值 |            |                                       |     |     |     |     |       |     |     |
|----------------|------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|
| 工况             | 洪水<br>频率/% | 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |     |     |     |     |       |     |     |
|                |            | 甘溪                                    | 梅溪  | 马达溪 | 大溪  | 胥溪  | 前+后源溪 | 富春江 | 寿昌溪 |
| F10            | 10         | 490                                   | 790 | 365 | 347 | 515 | 675   | 505 | 745 |
| F20            | 20         | 360                                   | 573 | 265 | 253 | 377 | 488   | 368 | 540 |
| F33            | 33         | 282                                   | 453 | 208 | 200 | 298 | 385   | 290 | 427 |
| F70            | 70         | 132                                   | 212 | 97  | 95  | 140 | 182   | 136 | 200 |
| F80            | 80         | 107                                   | 175 | 80  | 76  | 115 | 146   | 111 | 165 |
| F90            | 90         | 85                                    | 135 | 62  | 60  | 90  | 115   | 86  | 127 |

2 计算结果分析

2.1 洪水重现期推求最高通航水位

以兰江起点为里程编号零点 (K0+000), 往下游方向对兰江航道进行里程编号, 其中衢江、金华江和兰江交汇口位于起点下游 0.148 km (K0+148)。以三江口 (K0+148) 为起点, 衢江段往上游方向里程编号为负。选取三江口 (K0+148)、黄湓大桥、下埠头、麻车大桥、大洋弯道和建德市梅陈活性炭厂 6 个控制性断面, 分析航道流速特征, 确定不同洪水频率对应航道特征水位。

10 a 一遇、5 a 一遇和 3 a 一遇重现期对应兰

江航道特征水位计算结果见图 3, 6 个控制断面的流速分布见表 3。从模拟结果来看, 10 a 一遇、5 a 一遇和 3 a 一遇重现期对应兰溪水文站 (K1+100) 航道特征水位均大于警戒水位 (27.64 m), 6 个控制断面流速均大于 2 m/s (表 3)。10 a 一遇、5 a 一遇或者 3 a 一遇重现期洪水推求航道设计最高通航水位值偏高, 对航道船舶通行与河道防洪造成很大压力。因此, 山区航道特征水位计算不仅需要参考内河航运工程水文规范和内河通航标准确定, 还需要结合航道运行、建设和规划进行合理性论证。

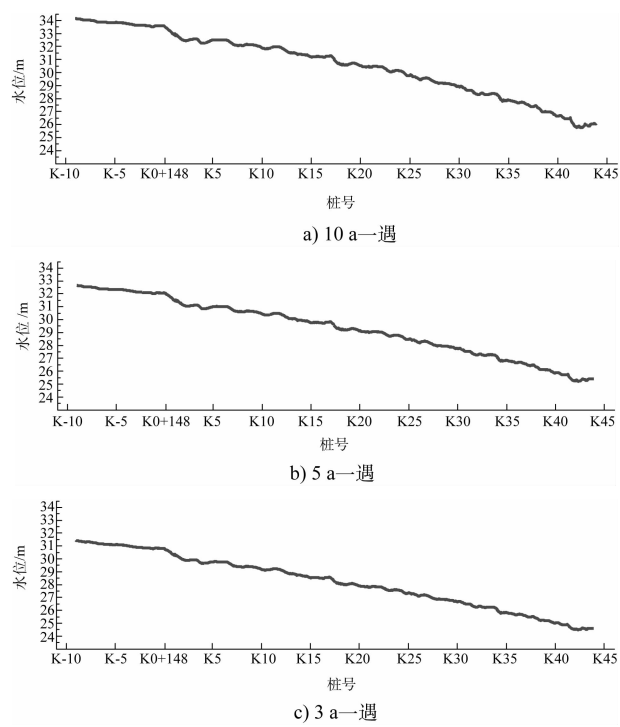


图3 不同洪水重现期对应航道特征水位计算结果

表3 10、5、3 a一遇洪水重现期对应控制断面的流速

| 洪水重<br>现期/a | 断面流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |          |      |           |           |        |
|-------------|---------------------------------------|----------|------|-----------|-----------|--------|
|             | K0 + 148                              | K4 + 457 | K18  | K29 + 932 | K33 + 154 | K41    |
|             | 三江口                                   | 黄湓大桥     | 下埠头  | 麻车大桥      | 大洋弯道      | 梅陈活性炭厂 |
| 10          | 1.65                                  | 2.83     | 2.51 | 3.15      | 3.02      | 3.68   |
| 5           | 1.58                                  | 2.60     | 3.21 | 2.77      | 2.70      | 3.16   |
| 3           | 1.52                                  | 2.42     | 2.96 | 2.47      | 2.46      | 2.79   |

注：三江口为衢江、金华江和兰江交汇口，位于兰江航道起点下游 148 m。

2.2 适航流速 2 m/s 推求最高通航水位

根据兰江航道 V 级升 IV 级建设需求，考虑航道建设和运行的经济效益、航道以及行船安全，经现场调查和专家咨询后建议以 2 m/s 作为适航流速，通过试算进一步验证满足通航需求的航道设计最高通航水位。通过模型试算，获取 70%、80% 和 90% 洪水频率条件下兰江航道 6 个控制断面的流速分布见表 4。结果显示，70% 频率洪水条件下，黄湓大桥、下埠头和建德梅陈活性炭厂附近控制断面流速均大于 2 m/s，其中下埠头附近流速接近 2.5 m/s，不利于船舶上行；80% 频率洪水条件下，航道大部分控制断面已经满足 2 m/s 适航流速，但下埠头附近流速仍然较大；90% 频率洪水条件下，仅下埠头附近航段流速略大于 2 m/s 适航流速。进一步研究全航段流速分布，分析结

果见图 4。结果显示，除兰江大桥下游局部航段接近通航限制流速<sup>[6]</sup>外，绝大部分航段流速维持在 2 m/s 适航流速内。偏于安全和航道建设需要考虑，建议以 90% 频率洪水对应特征水位作为航道设计最高通航水位。

表4 70%、80% 和 90% 洪水频率对应控制断面的流速

| 洪水<br>频率/% | 断面流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |          |      |           |           |        |
|------------|---------------------------------------|----------|------|-----------|-----------|--------|
|            | K0 + 148                              | K4 + 457 | K18  | K29 + 932 | K33 + 154 | K41    |
|            | 三江口                                   | 黄湓大桥     | 下埠头  | 麻车大桥      | 大洋弯道      | 梅陈活性炭厂 |
| 70         | 1.38                                  | 2.08     | 2.44 | 1.88      | 1.92      | 2.02   |
| 80         | 1.32                                  | 1.98     | 2.29 | 1.71      | 1.76      | 1.81   |
| 90         | 1.25                                  | 1.88     | 2.11 | 1.54      | 1.58      | 1.60   |

注：三江口为衢江、金华江和兰江交汇口，位于兰江航道起点下游 148 m。

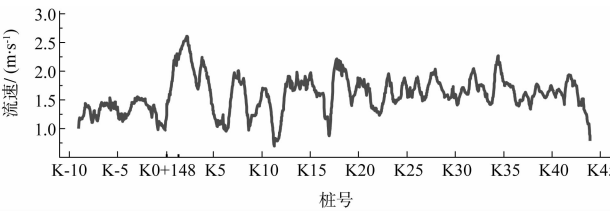


图4 90% 频率洪水对应航道流速分布计算结果

2.3 兰江航道设计最高通航水位的确定

计算结果表明，10 a 一遇、5 a 一遇和 3 a 一遇重现期对应航道特征水位均不适合作为兰江航道设计最高通航水位，该洪水条件下航道部分航段特征水位超过警戒水位，航道部分控制断面流速均接近甚至超过 3 m/s，对航道通行安全和河道防洪不利。70%、80%、90% 频率洪水条件下，整个航段大部分断面接近或满足 2 m/s 适航流速，但偏于安全考虑和航道建设需要，建议以 90% 频率洪水对应特征水位作为航道设计最高通航水位，该条件下航道特征水位曲线见图 5。

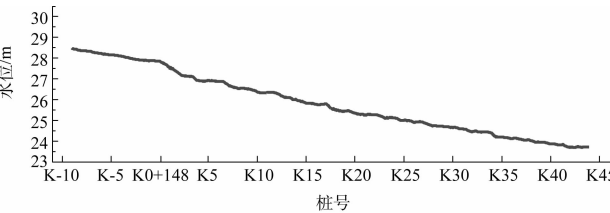


图5 90% 频率洪水对应航道特征水位计算结果

3 结语

1) 考虑山区航道复杂地形条件、枢纽调节以及航道建设规划需求，以综合历时曲线为依据的流速控制条件，兰江航道依据内河航运工程水文

规范中重现期为 5 a 或 3 a 一遇洪水对应特征水位的标准所得的设计最高航道水位有所偏高。

2) 根据数值分析结果, 兰江航道部分航段 10 a 一遇、5 a 一遇和 3 a 一遇洪水对应特征水位已超过该航段警戒水位, 而且局部控制断面流速大于 3 m/s, 不利于船舶航行和河道防洪安全; 90% 频率洪水对应特征水位下, 兰江航道绝大部分控制端面均满足 2 m/s 适航流速, 因此建议 90% 频率洪水对应特征水位作为兰江航道设计最高通航水位。

3) 库区航道特征水位论证需要同时考虑库区回水及航电枢纽联合调度, 由于大多数航电枢纽工程运行时间较短, 而且很多枢纽还处于规划建设阶段, 水文监测数据相对匮乏。利用数值模型计算库区回水, 对航道设计最高特征水位进行模

拟预测, 可有效解决这一问题, 但后期需结合实测水文数据加以论证。

#### 参考文献:

- [1] 张幸农, 吴建树. 枢纽及其上下游河段通航设计水位确定若干问题探讨 [J]. 水道港口, 2008 (S1): 130-132.
- [2] GB 50139—2004 内河通航标准 [S].
- [3] JTJ 145-1—2011 内河航运工程水文规范 [S].
- [4] 郝岭, 谭先泽, 吴文凤. 山区河流船闸设计最高通航水位研究 [J]. 水运工程, 2005 (4): 52-55.
- [5] 唐存本, 贡炳生, 张贤明. 山区天然河流设计最高通航水位确定方法的探讨 [J]. 水运工程, 2007 (4): 66-69.
- [6] 姚仕明, 王兴奎, 张超, 等. 两坝间河段通航水流条件的三维数值模拟 [J]. 水科学进展, 2007 (3): 374-378.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 124 页)

## 5 结论与建议

1) 从演变特征上看, Ahsan 航道与 Khuddi Creek 河口拦门沙在 70 年代较为稳定, 冲刷速率不大。1997 年后的冲刷速率明显高于 70 年代。主要原因在于人为影响的增多以及受自然环境的影响, 加上 Khuddi Creek 河口泥沙运动影响 Ahsan 航道轴线的变化。

2) Ahsan 航道轴线的变化与拦门沙滩槽变化的趋势吻合。主要表现为由于拦门沙东边滩向西淤进, 同时为了避开航道中间段西侧泥沙的逼近, 人为进行航道轴线的相应调整, 并由原来的 2 个直线段成为 3 段, 其中中间直线段与南北两段的夹角大, 影响了船舶的航行安全。

3) 从 Ahsan 航道两侧的等深线分布看, 5 m 和 10 m 等深线已经非常接近航道边线, 为使 Ahsan 航道维持 13.5 m 的水深, 每年或一定时期内需进行大量的维护。

4) 由 Ahsan 航道演变分析可知, 为确保航道的正常使用, 必须建立在经常性的维护基础上, 同时需在航道的北段东侧和中间段西北侧设置拦沙堤, 以阻止泥沙进一步向航道运动。

#### 参考文献:

- [1] 刘杰, 乐嘉海, 胡志峰, 等. 长江口深水航道治理一期工程实施对北槽拦门沙的影响 [J]. 海洋工程, 2003, 21(2): 58-64.
- [2] 钮新强, 徐建益, 李玉中. 长江水沙变化对河口水下沙洲发育影响的研究 [J]. 人民长江, 2005 (8): 31-33.
- [3] 韦直林, 王运辉, 付小平. 河口拦门沙问题初探 [J]. 海河水利, 2002 (1): 33-34.
- [4] 和玉芳, 程和琴, 陈吉余. 近百年来长江河口航道拦门沙的形态演变特征 [J]. 地理学报 2011, 66(3): 305-312.
- [5] 张莉莉, 李九发. 长江口拦门沙研究情况综述 [J]. 上海水务, 2001 (4): 44-46.

(本文编辑 郭雪珍)