

水动力数值模型在码头建设方案 比选中的应用*

朱政涛^{1,2,3}, 江青蓉^{1,3}, 黄东^{1,3}, 李海彬^{1,3}, 陈鑫池^{1,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院,广东广州 510635; 2. 中山大学 土木工程学院,广东 珠海 519082;3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室,广东 广州 510635)

摘要:以北江左岸某码头工程为例,采用有限体积法分别建立北江韶关(二)水文站—濛浬水电站长约 37.0 km 河段的 一维水动力模型及工程上下游长约 4.6 km 河段的二维水动力模型,定量研究不同建设方案下河道行洪水位、流速分布、蓄 洪容积的差异。结果表明:当洪水频率在 50 a 一遇至 10 a 一遇时,码头工程各方案下河道水位壅高值不超过 0.02 m;水流 流速和流态变化主要位于码头上游 100 m 至下游 260 m 的局部河段,不同方案下河道高流速区域变化较小,主槽动力轴线在 工程前后不会发生重大调整;同时在港池清淤疏浚作用下工程后该河段实际蓄洪容积增加。最终从行洪安全及码头货物安 全角度考虑,方案 2 为推荐方案,相关研究方法可为类似码头建设提供科学借鉴。

关键词:水动力数值模型;码头;洪水影响;方案比选 中图分类号:U65;TV131.2
文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0072-09

Hydrodynamic numerical model used for schemes comparison of dock construction

ZHU Zhengtao^{1,2,3}, JIANG Qingrong^{1,3}, HUANG Dong^{1,3}, LI Haibin^{1,3}, CHEN Xinchi^{1,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

3. National and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Water Technology, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Taking a dock project on the left bank of the Beijiang River as an example, the finite volume method is used to establish the one-dimensional hydrodynamic model for the 37.0 km long section of the Shaoguan (II) hydrological station to Mengli hydropower station, and the two-dimensional hydrodynamic model for the 4.6 km long section of the project. A quantitative study is conducted on the differences in flood level, flow velocity distribution, and flood storage capacity of river channels under different construction schemes. The results show that when the flood frequency ranges from once every 50 years to once every 10 years, the increment of flood level is lower than 0.02 m under different schemes. The changes in flow velocity and pattern are mainly concentrated in the local river section from 100 m upstream to 260 m downstream of the dock. However, the changes in high flow velocity areas of the river are relatively small, as well as the changes in the dynamic axis of the main channel. Meanwhile, the actual flood storage capacity of the river has increased under the action of dredging in the harbor. From the perspective of flood safety and cargo safety, scheme 2 is a recommended plan, and relevant research methods can provide scientific reference for similar dock construction plans.

Keywords: hydrodynamic numerical model; dock; flood impact; scheme comparison

收稿日期: 2024-04-26

^{*}基金项目:广东省水利科技创新项目(2023-06);2023 年省科技创新战略专项资金科研项目(sky2023-05) 作者简介:朱政涛(1993—),男,博士,研究方向为水力学及河流动力学。

码头工程建设会占用部分河道过水面积,对 河道行洪水位、河势稳定性、堤岸安全等造成一 定影响^[1]。明确涉水工程建设对河道行洪安全的 影响程度及范围是工程建设的重要依据,常用的 研究方法包括物理模型和数学模型^[2],其中物理 模型优点在于易于理解和直观感知,但费时费力; 数学模型具有成本低、周期短、精度高、灵活性 强等优点,大量研究成果表明数值模型能够有效 模拟河流湖泊的水流运动过程^[34],因此众多学者 采用水动力数值模型分析码头工程对河道行洪的 综合影响^[58]。

北江是珠江水系的第二大河流,干流全长 468 km,流域面积 4.671 万 km²,占珠江流域面 积的 10.3%。北江水运历史悠久,是承接粤北山 区与珠三角城市群的重要运输通道,随着北江沿 江经济带的不断推进,港口建设对沿线经济的推动将起到更为重要的作用^[9-10]。本研究采用一、二 维水动力数值模型,全面量化某码头工程不同建 设方案对所在河道上下游行洪水位、流速、场区 蓄洪容积等的影响程度及范围,旨在为行政主管 部门决策提供支撑,为同类工程建设提供科学 参考。

1 工程概况

某码头工程位于北江中游广乐高速白土特大桥下右岸,计划布置 8 个 1 000 吨级码头,码头 泊位长 615 m,采用顺岸式布置,该码头以件杂 货和集装箱运输为主,采用重力式空心方块结 构,码头陆域纵深布置在 76~361 m,可形成陆 域 22.35 万 m²,工程所在位置见图 1。



c) 码头布置

b) 工程地形

图 1 工程位置 Fig. 1 Project location

基于 2019 年实测地形资料的工程场区及港池 疏浚区地形见图 2a)。对于工程建设场区,上游码 头前沿高程主要为 49.00~50.45 m,下游码头前 沿及场区中部地形高程均高于 51.80 m,场区西部地

形低于中部,现状地形高程主要为47.50~51.80 m。 在现有地形基础上,综合考虑3种建设方案,见 图 2b)、c)。

方案1:工程建设后A区域设计高程为40.30m,

B 区域设计高程为 49.49 m, C、D、E 区域设计高程均 50.45 m。

方案 2: 工程建设后 A 区域设计高程为 40.30 m, B 区域设计高程为 49.49 m, C、D、E 区域设计高 程均为 51.80 m。 方案 3: 工程建设后 A 区域设计高程为 40.30 m, F 区域设计高程为 49.49 m, G 区域采用 8‰坡度 整体放坡,自 51.80 m 高程放坡至 F 区后沿挡墙 处 50.55 m 高程, H 区域设计高程为 50.55 m, I 区域设计高程为 51.80 m。





2 模型构建

2.1 一维模型控制方程

一维模型采用的控制方程为经典的圣维南方

 $\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S_{\rm b} + S_{\rm f}$

程,基本控制方程为:

其中:

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}$$
(2)
$$F(U) = \begin{bmatrix} Q \\ Q^2 / A \end{bmatrix}$$
(3)
$$S_{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gA \frac{\partial Z_{b}}{\partial x} \end{bmatrix}$$
(4)
$$S_{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gA \frac{n^{2} Q |Q|}{R^{4/3} A^{2}} \end{bmatrix}$$
(5)

式中: *t* 为时间变量; *x* 为沿着河道深泓线的坐标; *U* 为守恒量; *F*(*U*) 为通量向量; *S* 为源项向量; *A* 为断面过流面积, *Q* 为断面过流流量; *q*_{in} 为旁 侧入流单宽流量; *g* 为重力加速度, *S*_b 为地形源 项向量, *z*_b 为河床高程; *S*_f 为摩阻源项向量, *n* 为曼宁糙率系数, *R* 为水力半径。

2.2 二维模型控制方程

二维模型采用的控制方程为平面二维浅水方

程,守恒形式的二维浅水方程表达式为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S_{\rm b} + S_{\rm f}$$
(6)

$$: \quad \boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{h} \\ \boldsymbol{h}\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{h}\boldsymbol{v} \end{bmatrix}$$
(7)

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U}) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huy \end{bmatrix}$$
(8)

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{U}) = \begin{bmatrix} hv \\ hvu \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}$$
(9)

$$S_{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ -\partial z_{b} / \partial x \\ -\partial z_{b} / \partial y \end{vmatrix}$$
(10)

$$\mathbf{S}_{\rm f} = \begin{bmatrix} 0 \\ -n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \\ -n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \end{bmatrix}$$
(11)

式中: *h* 为水深; *F*(*U*)和*G*(*U*)分别为*x*、*y*方向的对流通量向量; *h* 为水深; *u* 和 *v* 分别为*x*、*y* 方向的流速。

2.3 数值计算方法

对于一维圣维南方程及二维浅水方程,均采

用有限体积法对控制方程进行离散求解^[11]。在一 维模型中首先将研究区域沿河道纵向划分为多个 控制体,对每个控制体进行积分。以第*i*个控制体 为例,将式(1)沿*x*方向从控制边界*i*-1/2 到控制 边界*i*+1/2 进行积分,并认为变量在单位控制体内 是平均分布的,最终得到守恒变量*U*的更新方 程为:

$$\boldsymbol{U}_{i}^{n+1} = \boldsymbol{U}_{i}^{n} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\boldsymbol{F}_{i-1/2} - \boldsymbol{F}_{i+1/2}) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \int_{i-1/2}^{i+1/2} \boldsymbol{S} dx \quad (12)$$

式中: *n* 为时间层; Δ*t* 为时间步长; *F*_{*i*-1/2} 和 *F*_{*i*+1/2} 为边界处的对流通量向量。

对于二维浅水方程,采用基于非结构网格的 Godunov 有限体积法对方程进行空间离散,Song 等^[12]提出任意三角形网格中守恒变量 *U* 的更新 方程:

$$\boldsymbol{U}_{i}^{n+1} = \boldsymbol{U}_{i}^{n} - \frac{\Delta t}{A_{i}} \sum_{j=1}^{3} \boldsymbol{T}(\theta_{j})^{-1} \boldsymbol{F}(\overline{\boldsymbol{U}}_{j}) \quad l_{j} + \Delta t(\overline{\boldsymbol{S}}_{b} + \overline{\boldsymbol{S}}_{f})_{i}$$
(13)

式中: *i* 为单元编号; *j* 为单元边界编号, 对于三 角形网格 *j*=1~3; *A* 表示单元面积; 将原有守恒 量 *U* 投影至 *j* 边界得到守恒量 \overline{U}_{j} ; *T*(θ) 为角度为 θ 的旋转变换矩阵, *T*(θ)⁻¹ 为 *T*(θ) 的逆矩阵; l_{j} 为 *j* 边界的长度, \overline{S}_{b} 和 \overline{S}_{f} 为 S_{b} 和 S_{f} 在控制单元 内的均值。

在得到一、二维模型守恒量的更新方程后, 采用 HLLC 近似黎曼算子求解方程中的对流通量 向量,并采用 MUSCL-Hancock 方法对守恒量进行 线性重构^[13-14],实现数值求解格式在空间具有二 阶精度,各参数的详细求解方式及模型应用情况 可参考文献[15-16]。

2.4 模型布置与验证

 4.6 km 的河段,采用三角形网格剖分计算区域, 三角形单元总数为1.6986万个,对拟建码头区域 河段进行加密处理,计算单元边长为2~10 m,远 离项目区的最大网格单元边长最大约为40 m。模 型采用2020年的1:2000河道实测地形资料。

采用"22.6"北江特大洪水实测水文资料率 定模型得到河道糙率,一维模型计算结果与实测值 的对比见图3,总体上模型计算值与实测值较为吻 合,计算得到的 Nash-Sutcliffe 效率系数为0.956, 误差较小,符合相关规程、规范要求,可以认 为模型的参数选取适宜,基本能够反映该河段 的水流动力特性,可以进行行洪影响数值模拟 计算。



2.5 计算工况

根据实测资料,"22·6"北江特大洪水韶关(二) 站实测最大流量为9320m³/s,超过20a一遇洪 水。根据河道情况与工程防洪标准,采用P=2%、 5%和10%3组设计频率洪水计算分析拟建工程所 处河段水流变化,且一维水动力模型计算结果可 为二维局部模型提供计算边界。模型计算水文边 界条件见表1。

表 1 模型计算水文边界条件 Tab. 1 Hydrological boundary conditions for model calculation

设计 洪水 频率	韶关(二) 站流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	南水河汇入 北江处流量/ (m ³ ・s ⁻¹)	濛浬水电站 坝上水位/ m					
P=2%	10 623	215	48.38					
P=5%	9 298	188	47.17					
<i>P</i> = 10%	8 215	166	46. 21					

3 模拟成果分析

3.1 水位变化

拟建工程的水位变化主要受码头红线及港 池高程变化的综合影响,一维水动力数值模型 的计算结果表明,拟建工程实施后,工程所在 局部河段水位发生变化,最大变幅均出现在工程近区,且工程对行洪水位的影响随着与工程距离的增大向上、下游方向逐渐衰减,符合水流运动的基本规律。工程前后各方案水位变化见图4及表2。

表 2 工程建设后北江局部水位变化 Tab. 2 Local water level changes in Beijiang after project construction

G J G I J G									
设计洪水	水位	工程前	方案 1		方案 2		方案 3		
标准	变化	水位/m	水位/m	差值/m	水位/m	差值/m	水位/m	差值/m	
<i>P</i> =2%	水位最大壅高	51.799	51.811	0.012	51.815	0.016	51.814	0.015	
	水位最大跌落	51.608	51.603	0.005	51.600	0.008	51.601	0.007	
<i>P</i> =5%	水位最大壅高	50. 652	50. 659	0.007	50. 661	0.009	50.660	0.008	
	水位最大跌落	50. 429	50. 426	0.003	50. 424	0.005	50. 425	0.004	
<i>P</i> =10%	水位最大壅高	49.665	49.668	0.003	49. 668	0.003	49. 668	0.003	
	水位最大跌落	49. 451	49. 449	0.002	49. 449	0.002	49. 449	0.002	







总体上,不同设计洪水频率下码头上下游水 位变化趋势基本一致,不同方案工程运行前后水 面线计算结果较为接近,码头局部位置及上游河 段发生壅水,最大壅水高度出现在码头上游最近 一个断面,壅水高度从码头处向上游逐渐减小; 对于工程所在的主要河段,受港池清淤疏浚后行 洪断面面积增大的影响,局部水位跌落;对于工 程下游河段,断面行洪水位则基本不受影响。 在 P=2%设计洪水条件下,与工程前天然水 位相比,方案1水位最大壅高值为0.012 m,水位 最大跌落值为0.005 m,随着洪水频率的减小,工 程对水位的影响也同步减小,在 P=10%设计洪水 条件下,工程水位变幅在±0.003 m 以内。在 P= 2%、5%设计洪水条件下,方案 2、3 工程所在河 段过流面积低于方案1,工程影响增加,因此水位 最大壅高、跌落值均较方案1有所增加,但增幅 均在0.005 m 以内,总体变化较小;在 P=10%设 计洪水条件下,红线区基本不受洪水影响,工程 影响主要体现在港池清淤疏浚,因此工程河段方 案2、3 水位变化与方案1差异较小。

3.2 流速变化

不同设计洪水条件下工程前二维模型计算河 段流场对比见图 5,计算河段为微弯河段,流态相 对平顺,存在 3 个流速较大值区域,在 *P* = 2%、 5%、10%设计洪水条件下,流速最大值均超过 3.0 m/s,分别位于北江大桥上游约1 150 m 的河 道左岸及右岸局部水域、工程邻近河段中部及计 算河段出口。





图 5 工程前二维模型计算河段流场对比 Fig. 5 Comparison of flow field calculated by two-dimensional model before project construction

在 P=2%设计洪水条件下,工程前后流场差 异在上游侧码头(24[#]~27[#])前沿平台及港池清淤疏 浚区最为显著。工程前在 24[#]码头附近前沿平台存 在明显绕流,在方案 1 条件下,24[#]附近前沿平台

仍存在绕流但强度有所减弱, 25#~27#码头附近流 速偏转则相对较小, 且由于工程后场区高程低于 设计洪水位,水流向场区内部流动,并在场区西 部形成流速较小的滞水区;在方案2条件下,由 于场区地形高程较高, 流场变化局限在码头前沿 平台,工程后绕流强度较方案1进一步减小, 24#~27#码头前沿平台流场以向河道方向偏转为 主: 方案3 对流场的影响介乎方案1 与2 之间, 同样表现为上游前沿平台绕流减弱,下游侧流场 流向以向河道方向偏转为主。在各方案下,工程 河段主河道流场均未发生明显偏转, 流向差基本 在3°以内。

各方案工程前后局部流速差等值线见图 6, 以 变幅±0.05 m/s 为临界值, 仅对比工程前后流速变 幅高于±0.05 m/s 的区域。在 P=2%设计洪水条件 下,各方案均表现为码头前沿平台及港池上游河



总体来看,工程建设对河道流场的影响随着 洪水频率的降低而逐渐减小,工程影响主要位于 工程上游 100 m 至下游 260 m 河段, 目对主河道 流场影响较小,在不同方案下河道高流速区域基 本不变,河道主槽动力轴线在工程前后不会发生 大的调整,可以认为各方案均不会从整体上改变 工程河段的流态,不会对工程所在河道的整体河 势稳定造成显著影响。



c) P=2%, 方案3





d) P=5%, 方案1





图 6 各方案工程前后局部流速差等值线 (P=2%) Fig. 6 Isoline of local flow velocity difference before and after construction of different schemes (P=2%)

3.3 蓄洪容积

采用二维水动力模型计算不同设计洪水频率 下区域水深空间分布,与计算单元面积相乘可得 到单元对应水体容积,对工程前后红线及清淤疏 浚区的总蓄洪容积变化进行对比,计算结果见 表3。

在 P=2%设计洪水条件下,研究区域工程前 总蓄洪容积为 44.157 20 万 m³,在码头前方港池 清淤疏浚及工程场区高程调整的综合影响下,方 案1 总容积为 78.593 33 万 m³, 较工程前增加 78.0%; 方案2总容积为53.95671万m3, 较工程 前增加 22.2%; 方案 3 总容积为 58.241 21 万 m³, 较工程前增加 31.9%。在 P=5%设计洪水条件下, 研究区域工程前总蓄洪容积为 29.860 31 万 m³, 在码头前方港池清淤疏浚及工程场区高程调整的 综合影响下, 方案1 总容积为 47.730 65 万 m³, 较工 程前增加 59.8%; 方案 2 总容积为 46.723 91 万 m³, 较工程前增加56.5%; 方案3 总容积为47.469 59 万 m³, 较工程前增加 59.0%。在 P=10% 设计洪水条件 下,研究区域工程前总蓄洪容积为 20.415 88 万 m³, 红线区基本不受洪水影响,工程影响主要体现在 港池清淤疏浚,因此各方案总容积差异较小。

٠	80	•
---	----	---

construction of different schemes Fig. 3 Total flood storage capacity within red line and dredging area before and after 工程前 方案 1 方案2 方案3 设计洪水 标准 容积/万 m³ 容积/万 m³ 变幅/% 容积/万 m³ 变幅/% 容积/万 m³ 变幅/% P = 2%44.157 20 78.593 33 78.0 53.95671 22.2 58.241 21 31.9 P = 5%29.860 31 47.730 65 59.8 46.723 91 56.5 47.469 59 59.0 P = 10%20.415 88 40.811 28 99.9 40.811 28 99.9 40.811 28 99.9

表 3 工程前后红线及清淤疏浚区总蓄洪容积

4 结语

 1)当洪水频率在50 a一遇至10 a一遇时, 工程各建设方案对该河段行洪水位影响较小,基 本在±0.02 m以内,水位影响按方案1、方案3、 方案2的顺序递增,且主要位于工程局部河段。

2)各方案对流速的影响主要集中在工程上游 100m至下游260m河段,从影响范围来看,方案 1影响最大,方案3次之,方案2最小;河道主槽 动力轴线在各方案建设前后均未发生大的调整, 因此不会对工程所在河道的整体河势稳定造成明 显影响。

3) 在港池清淤疏浚作用下,工程后该河段实际蓄洪容积增加。在10 a一遇及以下洪水时,各 方案无显著差异;当洪水频率高于20 a一遇时, 方案1总蓄洪容积最大,方案3次之,方案2最小。因此从行洪安全及码头货物安全角度考虑, 方案2为推荐方案。

参考文献:

- [1] 胡清玲, 蔺秋生, 高海静, 等. 河道范围内修建码头工程的防洪影响评价[J]. 人民长江, 2008, 39(10): 23-25.
 HU Q L, LIN Q S, GAO H J, et al. Flood control impact assessment of dock construction within the river channel[J]. Yangtze River, 2008, 39(10): 23-25.
- [2] 尹章昭,高柱,陈辉,等. 某 H 码头工程建设对长江行 洪影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(1):6-10.

YIN Z Z, GAO Z, CHEN H, et al. Impact of H wharf construction of flood discharge in Yangtze River [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(1): 6-10.

[3] 逄勇, 濮培民. 太湖风生流三维数值模拟试验[J]. 地理 学报, 1996, 51(4): 322-328. PANG Y, PU P M. Numerical simulation of threedimensional wind-driven current inTaihu Lake [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(4): 322-328.

- [4] DI TORO D M, FITZPATRICK J J, THOMANN R V. Water quality analysis simulation program (WASP) and model verification program (MVP) [A]. Duluth: EPA, 1983.
- [5] 黄本胜,程香菊,哀丽蓉,等.码头桩群对河道行洪与流 场影响的三维数值模拟[J].水动力学研究与进展 (A辑),2010,25(1):99-105.

HUANG B S, CHENG X J, YUAN L R, et al. Three dimensional numerical simulation of the effect of piled wharf on the flood passage ability of river and its flow field wharf [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Part A), 2010, 25(1): 99-105.

[6] 孙东坡,曹兵,王鹏涛,等. 甬江扩建油码头对所在河段的行洪影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2008(3):
 1-7.

SUN D P, CAO B, WANG P T, et al. Influence of oil wharf expansion on the floodway reach [J]. Hydro-science and engineering, 2008(3): 1-7.

 [7] 盛建兴, 徐骏, 王珏. 二维水流数学模型在码头工程防 洪影响计算分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,
 2014, 12(5): 176-179, 193.

SHENG J X, XU J, WANG J. The application of twodimensional mathematical model on the calculation and analysis of wharf engineering flood control [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2014, 12(5): 176-179, 193.

[8] 王玲玲,徐雷诺.周口港弯道码头工程水动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):134-139.
WANG L L, XU L N. Hydrodynamic characteristics of wharf project in bend river at Zhoukou Harbor [J]. Journal of Hohai University (Natural sciences), 2018, 46 (2): 134-139.

(下转第100页)