



潟湖港区通航运河岸坡护底结构设计计算

马 勇, 张宏铨, 黄丹萍, 王 馨, 覃 杰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 大型潟湖港区往往通过狭长的运河航道与外海相连, 运河内面临外海波浪、涨落潮流和船舶航行的多重影响, 显著的波流耦合作用以及船舶螺旋桨射流冲刷给运河岸坡的护底防护提出了较高的要求。为了解决这种复杂水力环境下护底保护问题, 通过对国际通用规范中相关计算理论的研究, 总结提出了一套适宜的计算方法, 便于工程人员更好地运用国际规范解决相关问题, 同时可为国内规范的修编提供参考、助力中国规范与国际接轨。

关键词: 潟湖港区; 运河航道; 波流耦合作用; 船舶螺旋桨射流冲刷, 护底块石; 计算方法

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0135-06

Calculation on bottom protection design for navigable canal bank slope in lagoon port area

MA Yong, ZHANG Hong-quan, HUANG Dan-ping, WANG Xin, QIN Jie

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Large lagoon port areas are often connected to seas through narrow but long canal channels, and canals are confronted with multiple influences brought by offshore waves, ebb and flow of tides, and ship navigation. The significant wave-current coupling effect and the erosion caused by the ship propeller jet put forward high requirements for the bottom protection of canal bank slopes. In order to solve the bottom protection problem under this kind of complex hydraulic environment, this paper studies relevant calculation theories in the international standards and proposes a suitable calculation method, which can help engineers make better use of international standards to solve related issues. At the same time, the paper can provide a reference for revising Chinese norms and help them to be in line with international standards.

Keywords: lagoon port area; canal channel; wave-current coupling effect; erosion caused by ship propeller jet; bottom protection stone; calculation method

潟湖港区往往通过狭长的运河航道与外海连通。潟湖水域广阔但运河区段水域狭长, 因此在水道束窄效应作用下, 运河航道内会产生较强的涨落潮流; 同时, 外海涌入的波浪与涨落潮流相互耦合, 使得运河内的水力环境尤为复杂。此外, 作为进出港通道, 运河航道内船舶通航繁忙, 船舶螺旋桨的射流冲刷影响显著。基于上述工程条件, 在潟湖港区通航运河岸坡的护底结构设计中, 需综合考虑波浪耦合作用和船舶螺旋桨射流引起的冲刷影响。

对于护岸结构, 为了抵御坡脚地基土的冲刷破坏, 往往采用块石作为护底防护措施。对于水流或波浪作用下护底块石的稳定质量计算, 国内外均开展了大量研究, 总结提出了多种较为成熟的计算理论, 在诸多国际通用规范中均给出了计算公式, 但大部分计算方法仅适用于水流或波浪的单独作用, 针对波流耦合作用的计算方法较少。此外, 针对船舶螺旋桨射流引起的冲刷破坏, 随着船舶大型化、机动化的发展, 该问题在国际上的关注度越来越高, 目前国外已开展了多年的研

究，并得出了较为成熟的计算理论，国际航运协会 PIANC 为此编制了专门的指导手册，但国内尚欠缺相关的研究成果。

针对波浪耦合作用和船舶螺旋桨射流作用下护底块石的稳定质量计算，分析国际通用规范中相关计算理论，并结合科特迪瓦阿比让港潟湖航道扩建升级项目的工程应用，提出一套适宜的计算方法，可为工程设计人员解决同类问题提供借鉴，也希望为国内规范的修编提供参考、助力中国规范与国际接轨。

1 计算原理

1.1 波流耦合作用下护底块石计算方法

关于波浪和水流耦合作用下护底块石的结构设计，国内规范暂无相关的计算方法，仅在国际通用手册 *Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering* (CIRIA, 1991)^[1] (简称 *The Rock Manual* (CIRIA, 1991)) 和 *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd edition) (CIRIA C683, 2007)^[2] (简称 *The Rock Manual* (CIRIA, 2007))、以及美国海岸防护手册 EM1110-2-1100 *Coastal Engineering Manual* (简称 CEM) 中给出了明确的计算方法。

1.1.1 国际通用手册 *The Rock Manual* 推荐计算方法

国际通用手册 *The Rock Manual* (CIRIA, 1991) 的第 5.1.3.12 节和 *The Rock Manual* (CIRIA, 2007) 的 5.2.1.3 节均给出水流和波浪共同作用下块石稳定质量的计算方法，两种方法都是基于临界起动剪切应力理论，原理相同、计算公式基本一致，*The Rock Manual* (CIRIA, 2007) 只是针对部分计算参数的取值进行了修正更新。结合两本规范的相关内容，总结在水流和波浪共同作用下护底块石的稳定质量计算方法。

1) 块石中值粒径与临界起动剪切应力之间的关系：

$$D_{50} = \frac{k_w \tau_{cr}}{(\rho_r - \rho_w) g \psi_{cr}} \quad (1)$$

2) 水流和波浪共同作用下块石起动的临界剪

切应力：

$$\tau_{cr} = \bar{\tau}_{ew} = \tau_c + \frac{1}{2} \hat{\tau}_w \quad (\tau_c > 0.4 \hat{\tau}_w) \quad (2)$$

3) 水流作用对块石的剪切应力：

$$\tau_c = \rho_w g \frac{U^2}{C^2} \quad (3)$$

4) 波浪作用对块石的最大剪切应力：

$$\hat{\tau}_w = \frac{1}{2} \rho_w f_w u_0^2 \quad (4)$$

式中： D_{50} 为块石的中值粒径 (m)； ρ_r 为块石的密度 (kg/m^3)； ρ_w 为水体的密度 (kg/m^3)； g 为重力加速度 (m/s^2)； ψ_{cr} 为无量纲的剪切参数 (希尔兹系数)， $\psi_{cr} = 0.03$ ； k_w 为波浪与水流叠加引起的剪切应力放大系数， $k_w = 1 + \frac{1}{2} f_w \frac{C^2}{2g} \left(\frac{u_0}{U} \right)^2$ ； U 为水深范围内的平均水流流速 (m/s)； C 为谢才系数， $C = 18 \lg(12h/k_s)$ ； h 为水深 (m)； k_s 为水力糙率 (m)， $k_s = 4 D_{50}$ ； u_0 为波浪引起的泥面附近的轨道峰值速度 (m/s)，由线性波理论确定， $u_0 = \frac{H}{2} \omega \cdot \frac{1}{\sinh(kh)}$ ，其中 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 为波浪运动的圆频率 (s^{-1})， $k = \frac{2\pi}{L}$ 为波数 (m^{-1})； a_0 为水平波浪运动在泥面处的振幅， $a_0 = u_0 T / (2\pi)$ ； f_w 为摩阻系数：

$$f_w = \begin{cases} 0.237 \left(\frac{a_0}{k_s} \right)^{-0.52} & (a_0/k_s > 0.636) \\ 0.3 & (a_0/k_s \leq 0.636) \end{cases} \quad (5)$$

上述计算公式中，因水力糙率 k_s 的取值与块石的中值粒径相关，计算过程中需采用迭代求解。

1.1.2 美国规范 CEM 推荐计算方法

美国海岸防护手册 CEM^[3] 的 VI-5-3 节和 Table VI-5-49 也给出了波浪和水流共同作用下护底块石稳定质量的计算方法。

1) 步骤 1。按照公式 (6) ~ (8) 计算波浪和水流共同作用下的修正稳定数 (N_s)_c：

$$(N_s)_c = a \left(\frac{U+u}{\sqrt{gh_s}} \right) \quad (6)$$

其中：

$$u = \frac{gH_b T}{2L} \quad (7)$$

$$a = 51.0 \left(\frac{h_b}{h_s} \right) - 26.4 \quad (8)$$

式中: u 为浅水区的最大波浪轨道速度 (m/s); U 为水流流速 (m/s); g 为重力加速度 (m/s^2); h_s 为护底结构前方的水深 (m); h_b 为护底结构上方的水深 (m); H_b 为破碎波高 (m); a 为计算系数; T 为波浪周期 (s); L 为波浪波长 (m)。

2) 步骤 2。按照公式 (9), 计算护底块石的等效中值粒径 D_{n50} :

$$D_{n50} = \frac{H}{\Delta(N_s)} \quad (9)$$

式中: H 为护底结构前的波浪有效波高 (m); Δ 为块石的相对浮力密度, $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$, ρ_w 为水体质量密度 (kg/m^3), ρ_s 为块石质量密度 (kg/m^3)。

3) 步骤 3。根据步骤 2 计算的块石尺寸, 计算护底块石上方水深 h_b , 查阅图 1, 对照抛石斜坡堤对应的曲线, 按照水深系数 $\frac{h_b}{h_s}$ 计算稳定数 N_s 。

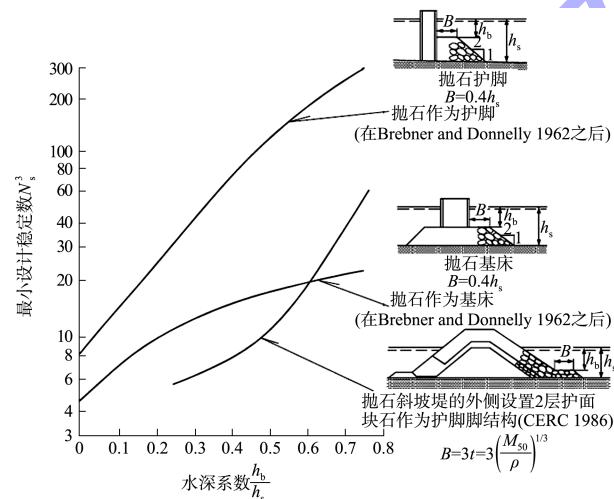


图 1 稳定数 N_s 计算取值

4) 步骤 4。对比 $(N_s)_c$ 和 N_s , 如果 $(N_s)_c > N_s$, 则步骤 2 计算的护底块石尺寸不满足要求, 需选择更大的护底块石, 然后按照步骤 3 重新计算, 直至 N_s 大于 $(N_s)_c$, 从而确定适宜的护底块石。

1.1.3 两种计算方法对比分析

上述两种计算方法均存在一定的适用条件,

The Rock Manual 推荐方法要求水流作用强度不能显著小于波浪作用强度, 适用条件为 $\tau_c > 0.4 \tau_w$; 美国规范 CEM 推荐方法的研究背景是针对防波堤堤头位置的波浪和水流共同作用, 且图 1 仅适用于 $\frac{h_b}{h_s} < 0.8$ 的工况。

对于濱湖港区的通航运河, 通常水流强度与波浪强度不会存在过大差距, 但要求护底结构不能高出航道底高程, 这使得 $\frac{h_b}{h_s} < 0.8$ 的条件无法满足, 因而 *The Rock Manual* 推荐方法具有更好的适用性。

1.2 船舶螺旋桨射流作用下护底块石计算方法

1.2.1 螺旋桨射流流速分布规律及冲刷机理

船舶的螺旋桨射流主要由船舶的主推进器和横向助推器两部分推进系统引起^[4]。

1) 主推进器。通常在船尾沿船舶纵向布置, 提供行进的动力, 见图 2; 最常见的是螺旋桨, 此外还有明轮、喷水推进器、喷气推进器等。



a) 有导管主推进器



b) 无导管主推进器

图 2 船舶主推进器

2) 横向助推器。通常在船尾或船头沿船舶横向布置, 提供侧向推力, 以增强船舶航行的机动性, 多采用螺旋桨, 见图 3。

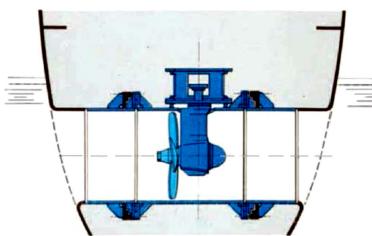
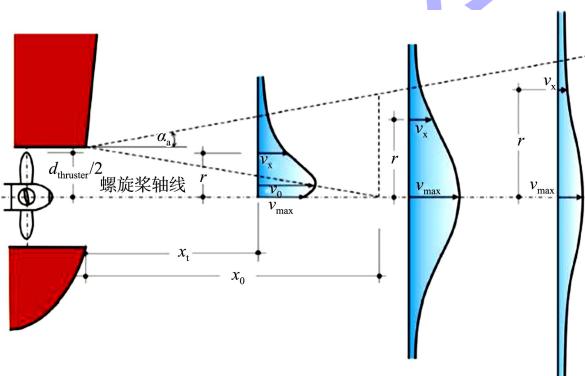


图 3 船舶横向助推器

船舶在运河中行驶时,螺旋桨叶片在水中旋转,发动机转动功率转化为推进力,在螺旋桨高速扰动下产生以螺旋桨旋转平面为初始平面的射流,这是堤底抛石受到冲刷的根本原因。射流平面后一定距离的水域因射流形成复杂的紊流场^[5]。

物理模型试验研究发现,螺旋桨射流场按桨轴线中心对称分布、整体呈圆锥形,可分为起始段和主体段两个发展阶段。起始段为流速发展的初始阶段,靠近螺旋桨平面,桨轴线处因桨毂作用存在低速区,断面最大流速出现在桨叶中部,流速分布呈双峰型,沿桨轴线对称分布。射流沿轴向发展过程中,桨毂影响逐渐减小,桨轴线上流速逐渐增大,侧向扩散的高速水流与低速区内的低速水流相互掺混。经过一段流程后,高速流体只向外扩散,桨轴处出现唯一最大的流速,射流进入主体段,射流形态趋于稳定。螺旋桨产生的射流流速分布见图 4^[6]。



注: d_{thruster} 为螺旋桨直径; α_a 为螺旋桨射流场的扩散角度; x_i 为距离螺旋桨射流喷射口的水平距离; r 为距离螺旋桨轴线的径向距离; v_x 为射流场中 (x_i, r) 位置处的流速; v_{ax} 为螺旋桨轴线上的流速; v_0 为距离螺旋桨射流喷射口水平距离 x_i 的射流场断面中的最大流速; v_{max} 为进入射流场主体段后螺旋桨轴线上出现的唯一最大流速; x_0 为螺旋桨轴线上最大流速对应的距离螺旋桨射流喷射口的水平距离。

图 4 螺旋桨射流的流速分布

1.2.2 螺旋桨射流作用下护底块石稳定质量计算

欧美国家很早就意识到螺旋桨射流对水工建

筑物产生的冲刷危害,通过大量的试验研究和理论分析,对螺旋桨射流的冲刷问题有了较为深入的研究,EAU^[7]、PIANC、*The Rock Manual* (CIRIA, 2007) 以及 *Port Designer's Handbook*^[8] 等规范或设计手册中均对螺旋桨射流作用下护底结构的设计方法有所介绍。综合比较,国际航运协会编制的 PIANC WG 180-*Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships* (简称 PIANC WG 180) 是针对该问题的专项技术指导手册,其中介绍的计算方法和原理更为详尽系统,国际上的认可度较高,推荐用于解决通航运河的岸坡护底问题,相关计算方法如下:

1) 推进器射流速度。主推进器射流速度公式:

$$v_o = C_3 \left(\frac{f_p P_{\text{main}}}{\rho_w D_{\text{main}}^2} \right)^{0.33} \quad (10)$$

式中: P_{main} 为主推进器的最大输出功率 (W); f_p 为主推进器输出功率比率, $f_p = 15\%$; D_{main} 为主推进器直径 (m); ρ_w 为水体密度 (kg/m^3); C_3 为系数,对于无导管螺旋桨 $C_3 = 1.48$, 对于有导管螺旋桨 $C_3 = 1.17$ 。

横向助推器射流速度公式:

$$v_o = 1.15 \left[\frac{P_{\text{thruster}}}{\rho_w D_{\text{thruster}}^2} \right]^{0.33} \quad (11)$$

式中: P_{thruster} 为横向助推器的最大输出功率 (W); D_{thruster} 为横向助推器直径 (m); ρ_w 为水体密度 (kg/m^3)。

2) 水底处最大流速及护底块石设计。关于推进器射流在水底处引起的最大流速及对应的护底块石设计,PIANC WG 180 中给出了两种计算理论,即 German 法与 Dutch 法,推荐采用两种方法进行并行计算,并选取较大的计算结果用于工程设计。

① German 法。推进器射流在水底处引起的流速公式:

$$v_b(x) = \begin{cases} v_0 \exp(-22.2 h_p^2/x^2) & (x/D_p < 2.6) \\ 2.6 v_0 \left(\frac{x}{D_p} \right)^{-1} \exp(-22.2 h_p^2/x^2) & (x/D_p \geq 2.6) \end{cases} \quad (12)$$

护底块石的尺寸公式:

$$D_{85} = \frac{v_{b,\max}^2}{B_{\text{crit}}^2 g \Delta} \quad (13)$$

②Dutch 法。推进器射流在水底处引起的流速

公式:

$$v_b(x) = \begin{cases} 2.0v_0 \left(\frac{D_p}{x} \right) \exp(-15.4 h_p^2/x^2) & \text{(对于无导管推进器)} \\ 2.8v_0 \left(\frac{D_p}{x} \right) \exp(-15.4 h_p^2/x^2) & \text{(对于有导管推进器)} \end{cases} \quad (14)$$

护底块石的尺寸确定公式:

$$D_{50} = \frac{1}{B_{\text{crit},\text{Iz}}^2} \frac{V_{b,\max}^2}{2g\Delta} \quad (15)$$

式中: $v_b(x)$ 为推进器射流在水平距离 x 位置的水底处引起的流速 (m/s); $v_{b,\max}$ 为推进器射流在水底处引起的最大流速 (m/s); h_p 为推进器转轴到水底的高度 (m); D_p 为推进器直径 (m); Δ 为块石的相对浮力密度, $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$, ρ_w 为水密度 (kg/m^3), ρ_s

为块石密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); B_{crit} 为 German 法对应的稳定系数, 对于无中央舵的船舶取 0.90, 有中央舵的船舶取 1.25; $B_{\text{crit},\text{Iz}}$ 为 Dutch 法对应的稳定系数, $\frac{1}{B_{\text{crit},\text{Iz}}^2} = 3.0$; D_{85} 为细粒质量占比为 85% 对应的块石粒径 (m); D_{50} 为块石的中值粒径 (m)。

2 工程应用

科特迪瓦的阿比让港位于非洲西海岸的艾布里耶潟湖内, 属于典型的潟湖港区, 整个港区通过唯一的运河航道与外海大西洋相连。在该港区的运河航道扩建升级工程中, 浚深后航道底高程为 -18.0 m、底宽 250 m, 两侧边坡采用块石防护, 坡度为 1:2.5, 极端高水位为 1.78 m、极端低水位为 0.55 m, 运河内最大水流流速为 3.2 m/s; 涌入运河内的最大波浪参数为有效波高 3.2 m、周期 15.4 s; 扩建后航道内通行的最大船舶为 15 万吨级集装箱船。针对上述工程条件, 采用本文介绍的方法进行岸坡护底块石设计, 计算结果见表 1。

表 1 护底块石计算过程

影响因素	计算方法	过程计算参数	护底块石设计
波浪和水流作用	The Rock Manual 推荐计算方法	<p>波浪引起的泥面附近的轨道峰值速度: $u_0 = 1.11 \text{ m/s}$</p> <p>谢才系数: $C = 35.08$</p> <p>摩阻系数: $f_w = 0.24$</p> <p>波浪与水流叠加引起的剪切应力放大系数: $k_w = 1.89$</p> <p>水流作用对块石的剪切应力: $\tau_e = 83.67 \text{ N/m}^2$</p> <p>波浪作用对块石的最大剪切应力: $\tau_w = 149.21 \text{ N/m}^2$</p> <p>波流共同作用下块石起动的临界剪切应力: $\tau_{cr} = 158.27 \text{ N/m}^2$</p>	<p>块石中值粒径 $D_{50} = 0.63 \text{ m}$</p>
船舶螺旋桨射流作用	PIANC WG 180 推荐计算方法	<p>◆ 主推进器射流影响</p> <p>主推进器直径: $D_{\text{main}} = 9.45 \text{ m}$</p> <p>主推进器的最大输出功率: $P_{\text{main}} = 94000 \text{ kW}$</p> <p>计算系数: $C_3 = 1.17$</p> <p>主推进器转轴到水底的高度: $h_p = 7.78 \text{ m}$</p> <p>主推进器射流速度: $v_0 = 6.2 \text{ m/s}$</p> <p>水底处最大流速: German 法 —— $v_{b,\max} = 1.8 \text{ m/s}$</p> <p>Dutch 法 —— $v_{b,\max} = 2.3 \text{ m/s}$</p> <p>◆ 横向助推器射流影响</p> <p>横向助推器直径: $D_{\text{thruster}} = 3.25 \text{ m}$</p> <p>横向助推器的最大输出功率: $P_{\text{thruster}} = 3463 \text{ kW}$</p> <p>横向助推器转轴到水底的高度: $h_p = 4.68 \text{ m}$</p> <p>横向助推器射流速度: $v_0 = 7.7 \text{ m/s}$</p> <p>水底处最大流速: German 法 —— $v_{b,\max} = 1.3 \text{ m/s}$</p> <p>Dutch 法 —— $v_{b,\max} = 1.6 \text{ m/s}$</p>	<p>German 法:</p> <p>细粒质量占比 85% 对应的块石粒径为 $D_{85} = 0.13 \text{ m}$</p> <p>Dutch 法:</p> <p>块石中值粒径为 $D_{50} = 0.51 \text{ m}$</p>

护底块石设计选型：护底块石规格为 300~600 kg，块石中值质量 $M_{50} = 512$ kg，块石中值粒径 $D_{50} = 0.7$ m。上述计算方法成功应用于科特迪瓦阿比让港的潟湖航道扩建升级工程，良好的工程应用效果验证了设计方案的安全可靠。

3 结语

1) 针对大型潟湖港区的通航运河，在运河岸坡的护底防护设计中，需特别考虑波流耦合效应和船舶螺旋桨射流冲刷的多重影响。

2) 波流耦合作用下的护底块石设计，推荐采用 *The Rock Manual* (CIRIA, 2007) 的 5.2.1.3 节给出的计算方法，该方法基于临界起动剪切应力理论，在使用中应注意水力糙率 k_s 的取值与块石的中值粒径相关，计算过程中需迭代求解，同时应满足 $\tau_c > 0.4 \tau_w$ 的适用条件。

3) 船舶螺旋桨射流冲刷作用下的护底块石设计，需分别考虑主推进器和横向助推器的作用影响，推荐采用 PIANC WG 180 给出的计算方法，并选取 German 法与 Dutch 法两种理论并行计算，选取两种计算结果的较大值。

4) 因船舶不会在极端天气下进出港，波流耦合效应与船舶螺旋桨的射流冲刷无需组合叠加考

虑，护底块石的设计应单独考虑两种作用效应并选取最大计算结果。

参考文献：

- [1] CUR, CIRIA. Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering[M]. London: CIRIA, 1997.
- [2] CUR, CIRIA, CETMEF. The Rock Manual-the Use of Rock in Hydraulic Engineering [M]. 2nd ed. London: C683, CIRIA, 2007.
- [3] U. S. Army Corps of Engineers(USACE). Coastal Engineering Manual: EM1110-2-1100[M]. Fort Belvoir: USACE, 2002.
- [4] 万家高.船舶螺旋桨射流特性试验研究及应用[D].长沙:长沙理工大学, 2015.
- [5] 郑天立.船舶螺旋桨和助推器对港口水工建筑物的危害及工程措施[J].水运工程, 2001(7): 29-32.
- [6] PIANC. Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships[M]. Brussels: PIANC, 2015.
- [7] The Committee for Waterfront Structures of the German Port Technology Association and the German Geotechnical Society. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways [M]. Berlin: Federal Republic of Germany, 2012.
- [8] THORESEN C A. Port designer's handbook [M]. 4th ed. London: ICE Publishing, 2018.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 120 页)

5 结语

1) 基于浅水方程建立了丹溪口航道整治二维水流数学模型，流速、流向验证表明计算值与实测值吻合良好，可用于整治方案比选。

2) 对丹溪口 4 个整治布置方案开展了多级流量数值模拟，比较流速、流向和极限冲刷深度等指标，推荐方案为：顺直斜坡式护岸结构阻止丹溪口左岸持续崩塌，锁坝防止左汊进一步发展和江心洲头鱼嘴形护坝减小冲刷。

参考文献：

- [1] 杨忠超, 黄秋杰. 佛面滩炸礁优化方案的数值模拟[J].

水运工程, 2019(6): 119-125.

- [2] 曹晓萌. 丁坝群作用尺度理论及累积效应机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [3] 张帅帅, 刘勇, 王涛, 等. 三峡水库外梁河段航道整治数学模型研究[J]. 水运工程, 2014, (7): 93-98.
- [4] 冯小香, 李建兵, 樊建超. 三峡两坝间水田角河段航道整治三维水流数学模型应用研究[J]. 水道港口, 2010, 31(6): 577-582.
- [5] 张明进, 伍文俊. 浅谈数值模拟技术在长江中下游航道整治中的应用[J]. 水道港口, 2010, 31(2): 102-107.

(本文编辑 武亚庆)