



船舶螺旋桨作用下透空式码头的防冲刷设计

刘 庄, 许建武

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 船舶螺旋桨的射流冲刷作用是透空式码头结构的主要危害之一, 现行的国内港口与航道工程规范并未涉及相关流速的计算和防护块石稳定性的设计。国内关于螺旋桨射流的防冲刷设计研究也主要集中在直立式码头结构, 对透空式码头的防冲刷设计研究较少。通过分析国外规范和螺旋桨射流研究成果, 并以某 LNG 码头防冲刷块石尺寸计算为例, 总结归纳了船舶主螺旋桨和侧向推进器作用下透空式码头的防冲刷设计方法, 为类似工程设计提供了依据。

关键词: 透空式码头; 防冲刷设计; 螺旋桨作用; 冲刷流速

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0061-05

Protection design of open quay structures from scour caused by ships

LIU Zhuang, XU Jian-wu

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

Abstract: Scour caused by ship propeller jets is one of the major concerns of open quay structures. The current domestic port and waterway engineering specifications do not involve the calculation of the relevant flow velocity and the design of the stability of the anti-scour protective block stone. Domestic researches related to ship propeller scour are mainly for solid vertical quay structures, but research on open quay structures scour problem is rare. By analyzing the research results of foreign specifications and propeller jets, and taking the calculation of the anti-scouring block size of an LNG terminal as an example, the anti-scouring design method of the permeable wharf under the action of the ship's main propeller and lateral thruster are summarized, which provides the basis for similar projects.

Keywords: open quay; scour protection design; propeller scour; scouring velocity

随着全球贸易和区域经济的发展, 船舶日趋向大型化和高速化发展, 船舶螺旋桨功率和尺寸也大幅提高。虽然大型船舶的靠离泊配有拖轮辅助, 但不能完全排除船舶使用其自身的推进系统, 例如人为因素、紧急情况等。船舶的主螺旋桨和侧向推进器产生的高速射流不仅会对重力式和板桩码头基床产生严重的冲刷, 对透空式码头岸坡的危害也不容忽视。调查显示, 英国 43% 的滚装码头是高桩透空式结构, 其中 28% 存在射流冲刷产生的危害, 受危害的部位通常是码头下方的

岸坡^[1]。

在目前国内现行的港口与航道工程规范中, JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[2]中有关于堤前最大波浪引起的底流速的防冲刷设计, 而对船舶螺旋桨冲刷设计未有规定, 仅在已作废的 JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》^[3] 5.3 护底结构设计章节中规定“码头护底结构的稳定性宜根据螺旋桨产生的射流中心速度确定, 采用块石护底时, 块石质量可按表 5.3.1 确定”, 并在附录 B 中提供螺旋桨产生的中心速度计算公式。该设计

收稿日期: 2020-09-14

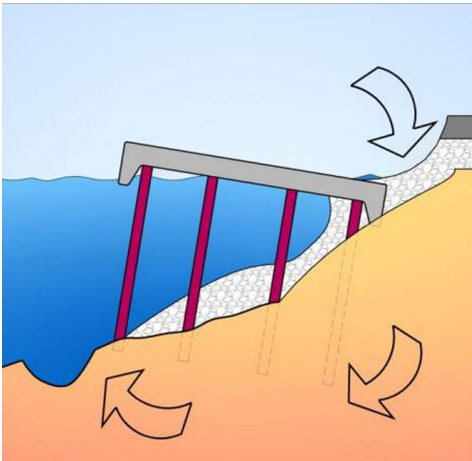
作者简介: 刘庄(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、海岸工程结构设计工作。

方法仅按照射流中心速度考虑块石稳定质量，并未涉及射流的流速分布、码头结构形式对射流分布的影响和射流冲刷基床和岸坡的作用机理等。近年来，我国多处港口发生抛石基床被高速水流冲刷破坏，螺旋桨射流的防冲刷设计越来越受到重视。多位学者^[4-6]基于国外规范和数值模拟等归纳出了适用于直立式码头的防冲刷设计方法，但对于透空式码头涉及较少。因此，有必要对螺旋桨作用下透空式码头的防冲刷设计进行总结和研究。

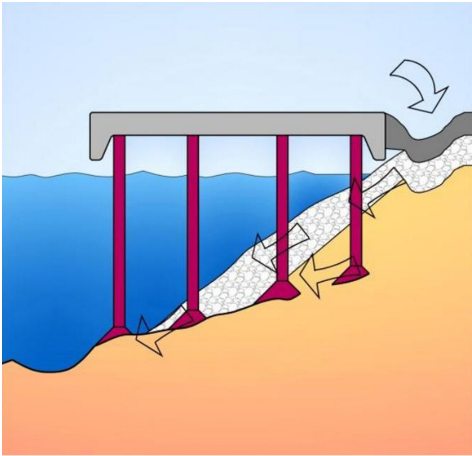
本文主要基于 PIANC N° 180-2015^[7] 和前人关于螺旋桨射流的研究成果，并结合多个已实施的工程设计实例，总结归纳了船舶主螺旋桨和侧向推进器对透空式码头的防冲刷设计，并利用该方法计算了某透空式码头的防冲刷块石尺寸，为类似工程设计提供了参考和借鉴。

1 透空式码头结构的冲刷破坏机理

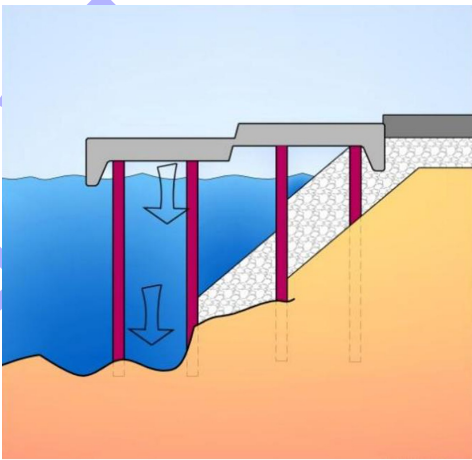
透空式码头结构的潜在破坏机理与码头下方的岸坡有关，如果码头前方岸坡被冲刷侵蚀，则可能发生以下 4 种结构破坏：1) 岸坡坡脚发生冲刷侵蚀，岸坡的被动土压力降低，导致码头岸坡整体失稳；2) 岸坡本身或护面发生冲刷侵蚀，侵蚀逐渐向上发展，导致码头和后方陆域破坏；3) 桩基周围土体发生冲刷侵蚀，危及桩基承载力以及桩的稳定性和完整性；4) 冲刷侵蚀使桩基埋深减少、悬臂变长，从而增加桩基弯矩导致桩基屈曲。见图 1。



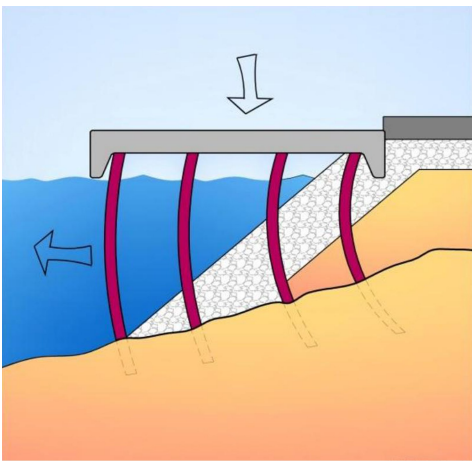
a) 第1种



b) 第2种



c) 第3种



d) 第4种

图 1 透空式码头的冲刷破坏机理

2 透空式码头结构的冲刷流速计算

目前几乎所有船舶螺旋桨射流的设计方法都采用相同的理论。PIANC N° 180-2015 规定了两种

计算方法: 荷兰方法和德国方法。这两种方法都是基于 Froude 的轴向动量理论, 但两种方法计算所需流速的推导方式不同, 采用的经验常数也不同, 所以这两种方法不能混合使用。

荷兰方法和德国方法在速度计算上存在差异, 德国方法比荷兰方法计算得到的基床底流速更大, 然而德国方法采用了更小的块石稳定系数补偿了相应的影响, 最终得到了类似的块石稳定直径。Augustin 通过研究给出了造成两种设计方法不同的原因, 德国方法是基于各个方面的深入研究, 从出口流出速度到基床保护; 荷兰方法则是专门针对防护块石尺寸预测开发的。荷兰方法在荷兰鹿特丹港维修中得到了成功的运用。因此, 对于岸坡防冲刷块石的设计, 推荐采用荷兰方法计算其流速。

2.1 初始射流速度

1950 年, Albertson 等^[8] 基于轴向动量理论, 采用平面射流研究了螺旋桨射流流速分布, 得到螺旋桨自由射流条件下的初速度公式, 为螺旋桨射流方程的后续推导奠定了基础。后来的几位学者采用物理模型试验对 Albertson 经验公式进行修正, 提高了射流速度的计算精确度。根据 PIANC N° 180-2015 方程 8-6 和 8-10, 主螺旋桨和侧向推进器的初始射流速度 v_0 可合并采用如下公式计算:

$$v_0 = C_1 \left(\frac{f_p P}{\rho_w D^2} \right)^{1/3} \tag{1}$$

式中: C_1 为系数, 对于主螺旋桨有管道时取 1.17、无管道时取 1.48, 对于侧向推进器取 1.15; f_p 为发动机装机功率百分比, 当无实测资料时, 主螺旋桨推荐采用 5% ~ 15%, 侧向推进器推荐采用 100%; P 为主螺旋桨或侧向推进器最大装机功率; ρ_w 为海水密度; D 为主螺旋桨或侧向推进器直径。

2.2 冲刷流速计算(荷兰方法)

2.2.1 基床上冲刷流速计算

根据 PIANC N° 180-2015 方程 8-37, 主螺旋桨和侧向推进器作用于透空式码头基床上的冲刷速度 $v_{\max, \text{bed}}$ 可用式(2)计算, 具体设计参数见图 2。

$$v_{\max, \text{bed}} = C_2 v_0 \frac{D}{h} \tag{2}$$

式中: C_2 为系数, 对于主螺旋桨无管道时取 0.216, 对于主螺旋桨有管道时或侧向推进器取 0.306; h 为主螺旋桨或侧向推进器轴线至基床距离。

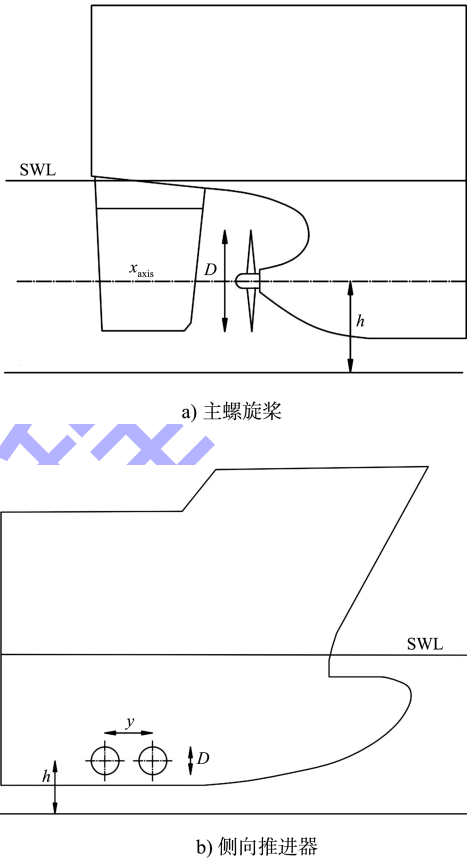


图 2 主推进器和侧向螺旋桨基床冲刷设计参数

2.2.2 岸坡上冲刷流速计算

根据 PIANC N° 180-2015 方程 8-19 ~ 8-20 和 Van Doorn^[9] 的物理模型研究成果, 主螺旋桨和侧向推进器作用于透空式码头岸坡上的冲刷速度可用式(3)、(4)计算, 具体设计参数见图 3。

$$\frac{x_{v\max}}{L} = K \left(\sqrt{1 + \frac{2}{K}} - 1 \right) \tag{3}$$

$$K = \frac{b}{a (\cot \alpha)^2} \tag{4}$$

式中: $x_{v\max}$ 为根据射流方程斜坡上出现最大流速的 x 轴坐标; $a=1$; $b=15.4$; α 为坡度; L 为沿射流轴线从岸坡到主螺旋桨或侧向推进器射流起点的水平距离。

$$v_{\max} = f a v_0 \left(C_3 \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{L}{x} \right)^m \cdot \exp \left[-\frac{b}{\alpha_m^2} \cdot \left(\frac{L}{x} - 1 \right)^2 \right] \tag{5}$$

式中： v_{\max} 为岸坡上最大流速； $a=2.8$ ； $m=1$ ； $b=15.4$ ； C_3 为系数，对于主螺旋桨无管道时取0.707，对于主螺旋桨有管道时或侧向推进器取1； α_m 为坡角的余切； x 为轴向坐标； L 为沿射流轴线从岸坡到主螺旋桨或侧向推进器射流起点的水平距离； f 为岸坡影响系数，对于1:2.5光滑岸坡取1.1，对于1:1.5光滑岸坡取1.1~1.2，对于1:1.5块石保护的岸坡取1.25，对于1:1.5有桩基光滑岸坡取1.4，对于1:1.5有桩基块石保护的岸坡取1.64~1.70。

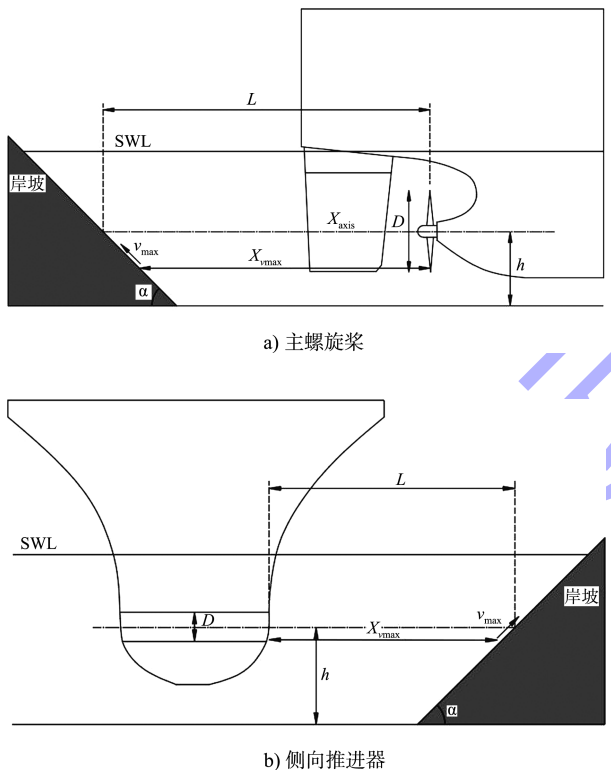


图3 主推进器和侧向螺旋桨岸坡冲刷设计参数

2.2.3 多个螺旋桨冲刷流速计算

根据 PIANC N° 180-2015 章节 8.3.5.1 和 8.2.4，对于两个主螺旋桨或侧向推进器的冲刷速度可用如下公式计算：

当 $h/y < 0.578$ 时，取 $v_{b,\max} = v_{b,\max,\text{single}}$ (6)

当 $h/y = 0.578 \sim 1$ 时，取

$$v_{b,\max} = \frac{2h}{r} \cdot v_{b,\max,\text{single}}, r = \sqrt{h^2 + y^2}$$
 (7)

当 $h/y > 1$ 时，取 $v_{b,\max} = \sqrt{2} v_{b,\max,\text{single}}$ (8)

式中： $v_{b,\max}$ 为最大冲刷流速； $v_{b,\max,\text{single}}$ 为单个螺旋

桨或推进器的最大冲刷流速； y 为螺旋桨或推进器轴与船轴之间的距离； h 为螺旋桨或推进器轴与基床之间的距离。

2.3 防冲刷块石计算

根据公式的匹配性，冲刷流速采用荷兰方法计算，防冲刷块石设计也应采用荷兰方法。荷兰方法采用 Izbash 或 Pilarczyk 公式计算块石稳定。本文以 Izbash 公式为例进行介绍，具体如下：

$$\Delta D_{50} = \frac{1}{B_{\text{crit},Iz}^2} \cdot \frac{v_{\text{bottom}}^2}{2g}$$
 (9)

$$D_{n50} = 0.843 D_{50}$$
 (10)

$$W_{50} = \rho_s D_{n50}^3$$
 (11)

式中： v_{bottom} 为冲刷流速； $B_{\text{crit},Iz}$ 为系数，对于标准情况下取 $(1/B_{\text{crit},Iz})^2 = 3.0^{[10]}$ ； D_{50} 为块石中值粒径； D_{n50} 为块石公称直径； W_{50} 为块石中值质量； ρ_s 为块石密度。

3 工程案例

3.1 工程概况

某正在实施的 LNG 码头项目采用高桩墩台式结构，设计最大船型为 22 万 m^3 LNG 船，船型参数为：船长 $L_{\text{oa}} = 315 \text{ m}$ ，船宽 $B = 50 \text{ m}$ ，设计吃水 $T = 12 \text{ m}$ ；主螺旋桨为两个无管道螺旋桨，螺旋桨直径 7.7 m，两个螺旋桨间距 16 m，装机功率为 $2 \times 17.5 \text{ MW}$ ；侧向推进器为有管道推进器，推进器直径 3 m，装机功率为 2.6 MW。

3.2 计算过程

3.2.1 靠离泊过程分析

根据操船试验结果，LNG 船舶靠离泊过程由 4 艘拖轮辅助实施，LNG 船主螺旋桨采用 12.5% 的装机功率，侧向推进器采用 100% 的装机功率。整个过程中，侧向推进器会对码头下方基床和有桩基及块石保护的岸坡产生冲刷，主螺旋桨会对基床和块石保护的岸坡产生冲刷。

3.2.2 初始射流速度计算

主螺旋桨和侧向推进器的初始射流速度采用式(1)计算，其中对于发动机装机功率百分比 f_p ，主螺旋桨和侧向推进器按照操船试验结果分别采

用 12.5% 和 100% (该装机功率百分比取值也符合 PIANC N° 180-2015 中无实测资料时的取值范围), 此功率为正常靠离泊条件取值, 并不包含更恶劣的人为因素或紧急情况。

3.2.3 冲刷速度计算

主螺旋桨和侧向推进器对基床和岸坡上的冲刷流速采用公式 (2) ~ (5) 计算, 对于两个主螺旋桨对冲刷流速增大的影响采用式 (6) ~ (8) 计算。本项目码头下方疏浚边坡为 1:5, 保守考虑, 对有

桩基及块石保护的岸坡 f 取 1.64, 对块石保护的岸坡 f 取 1.25。

3.2.4 防冲刷块石计算

防冲刷块石稳定质量采用式 (9) ~ (11) 计算。

3.3 计算结果

按照推荐的透空式码头防冲刷设计方法, 该 LNG 码头冲刷流速和防冲刷块石稳定质量计算结果见表 1, 码头设计防冲刷块石实际采用 200~300 kg 块石, 满足主螺旋桨和侧向推进器射流冲刷作用。

表 1 码头防冲刷设计计算结果

冲刷作用	初始射流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	基床冲刷流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	岸坡冲刷流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	稳定块石质量/kg	设计块石质量/kg
主螺旋桨	4.83	1.58	2.37	248	200~300
侧向推进器	7.4	1.06	2.44	173	200~300

4 结论

1) 船舶靠离泊时, 主螺旋桨和侧向推进器产生的射流会对透空式码头岸坡产生冲刷破坏, 危害透空式码头的安全和使用, 分析总结了 4 种透空式码头冲刷破坏的机理。

2) 分析了常用于计算螺旋桨冲刷流速和块石稳定的尺寸的荷兰方法与德国方法的差异, 两种方法计算获得的块石稳定尺寸类似, 但德国方法计算的底流速更大, 块石稳定系数较小, 提醒两种方法不能混用。对于采用块石防护的冲刷设计, 建议采用专门针对块石防护开发的荷兰方法。

3) 基于 PIANC N°180-2015 和前人关于螺旋桨射流的研究成果, 并结合多个已实施的工程设计实例, 总结归纳了船舶主螺旋桨和侧向推进器对透空式码头的冲刷流速计算和防冲刷块石计算方法。

4) 采用本文推荐的透空式码头冲刷流速和块石稳定计算方法, 对某 LNG 码头进行了防冲刷设计, 并成功用于实际工程。

参考文献:

[1] 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.

[2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

[3] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 滚装码头设计规范: JTS 165-6—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

[4] 高超, 陈旭达. 船舶螺旋桨作用下直立式码头的护底流速计算[J]. 水运工程, 2017(7): 82-86.

[5] 李勇. 船舶尾流对抛石基床冲刷的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[6] 陆澄. 直立式码头在船舶推动器射流作用下的防冲刷设计[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(3): 147-148, 151.

[7] PIANC. N°180-2015: Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships[S]. Brussels: PIANC, 2015.

[8] Albertson M L, Dai Y B, Jensen R A, et al. Diffusion of submerged jets[J]. Transactions of the American society of civil engineers, 1948, 115(1): 1571-1596.

[9] DOORN V R. Bow thruster currents at open quay constructions on piles[D]. Delf: Delf university of technology, 2012.

[10] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual, the use of rock in hydraulic engineering[M]. 2nd ed. London: CIRIA C683, 2007.

(本文编辑 武亚庆)