



三峡船闸上游待闸锚地抵坡丁靠锚位 结构设计方案

孙辉¹, 方庆媛¹, 易琛¹, 赵振²

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443000; 2. 长江航运发展研究中心, 湖北武汉 430014)

摘要: 针对传统抵坡丁靠锚位结构受三峡库区水位周期变化影响, 出现周边土体淘刷流失导致结构设计受力条件严重恶化, 暴露出的高强度混凝土结构易导致船舶底部损坏等问题, 依托实际工程, 按三峡坝区 50 a 一遇水流流速 1.0 m/s、风速 22.0 m/s 环境条件, 以靠泊 5 000 吨级干散货船为代表船型, 进行适用于坝区待闸锚地大型船舶抵坡丁靠锚位结构设计研究, 重点对抵坡丁靠锚位尺度、船舶停泊方式、系缆力计算、护坡结构、施工工艺等进行系统论述。采用系缆桩两侧设置防护带, 并将系缆设施布置为内嵌结构形式, 系船柱顶部不超出坡面的设计方法。结果表明: 该抵坡丁靠锚位结构形式既能满足锚泊结构稳定的要求, 又能有效防止结构周围水土流失, 可在水位落差大、水流流速小的库区船舶锚泊设施建设工程中进行复制推广。

关键词: 三峡坝区; 大型船舶; 抵坡丁靠

中图法分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0131-06

Design scheme of T-shaped berthing to reach slope anchorage berth structure for upstream anchorage area of Three Gorges Ship Lock

SUN Hui¹, FANG Qingyuan¹, YI Chen¹, ZHAO Zhen²

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China;

2. Shipping Development Research Center of Yangtze River, Wuhan 430014, China)

Abstract: According to the periodic changes of water level in the Three Gorges Reservoir area, the traditional slope-buttress anchorage structure is affected by the surrounding soil erosion, which leads to the serious deterioration of the structural design stress conditions, and the exposed high strength concrete structure is easy to cause the damage of the bottom of the ship. This article is based on the actual project and takes the 5, 000-ton dry bulk cargo ship as the representative ship type under the environmental conditions of the water flow velocity of 1.0 m/s and the wind velocity of 22.0 m/s once every 50 years in the Three Gorges Dam area. The design of the slope-buttress anchorage structure for large ships in the dam area is studied. The slope-buttress anchorage scale, ship berthing mode, mooring force calculation, slope protection structure, construction technology and other aspects are systematically discussed. The design method of setting protective belt on both sides of mooring pile, arranging mooring facilities as embedded structure, and the top of mooring pillar not exceeding the slope surface is adopted. The results show that the structure of anchorage position against slope can not only meet the requirements of anchorage structure stability, but also effectively prevent water loss and soil erosion around the structure. It can be replicated and promoted in the construction project of ship mooring facilities in the reservoir area with large water level drop and small water flow velocity.

Keywords: Three Gorges Dam area; large vessel; T-shaped berthing to reach the slope

收稿日期: 2024-01-12

作者简介: 孙辉 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事水上交通工程及枢纽通航研究。

库区水位自三峡大坝蓄水成库以来，呈阶段性急剧变化特点，即水位落差高达 30 m，水流流速缓慢，基本为静水。基于该水文特点，目前库区船舶主要的锚泊方式包括抛锚自泊、抵坡丁靠、顺岸靠泊、趸船靠泊等，对锚泊方式研究主要处于经济性、实用性的对比上，而对于锚泊方式匹配船舶船型、锚泊设施结构改进、施工工艺等方面还未十分深入。近年来，随着船舶数量逐年增多，而库区锚泊资源有限，抵坡丁靠已成为库区船舶主要锚泊方式之一^[1]。在水流速度较小水域，船舶宜使用该锚泊方式，具有占用水域范围小、锚泊容量大、建设成本低等优势。但随着三峡库区船舶日益大型化、标准化，传统简易的抵坡丁靠设施越来越难以满足大型船舶在库区的锚泊需求。另外系缆桩受库区水位涨落因素影响，岸坡基础淘刷严重，土体颗粒大部分流失，相当数量的系缆桩基础裸露，主体结构倾斜，坡岸防护结构体下陷、断裂、破损，船舶无法有效系固，锚泊安全受到威胁。

本文介绍一种应用于三峡待闸锚地船舶抵坡丁靠锚泊设施结构，并进行计算分析，总结归纳设计及施工要点。与传统抵坡丁靠设施结构相比，它可以有效解决库区水位变化导致系缆桩结构周围水土流失的问题，确保船舶锚泊安全，为类似坝区水域船舶锚泊设施工程建设及推广提供参考借鉴。

1 工程概况

1.1 主体结构方案

抵坡丁靠系泊是船首伸出缆绳系于岸上，船

身与岸坡呈丁字形的一种锚泊形式，见图 1。丁靠锚位宜选择在自然岸坡较稳定、坡度为 20°~30° 的岸线范围。若坡度太缓，无法满足船舶中尾部吃水的要求，且船舶离岸过远，不易系缆；若坡度太陡，则不利于系缆桩的布置、船舶系缆、船员上岸。



图 1 丁靠系泊实景

依托工程为三峡船闸上游水域建设的待闸锚地，分别在 148、168、174 m 高程处设置 350 kN 系缆桩，见图 2。系缆桩上设置尺寸为 2.2 m×2.2 m×1.5 m 的钢筋混凝土桩帽，桩帽上设置 350 kN 系船柱 1 个，桩帽下设置 $\phi 1\ 600$ mm 挖孔(钻孔)灌注桩。在系缆桩桩基左右各 5 m，高程分别自 145~174 m 之间的坡面范围内设置钢筋混凝土格构式锚杆护坡，格构梁截面尺寸为 0.50 m×1.00 m，格构梁之间设置厚 0.4 m 的钢筋混凝土护坡，护坡下部及格构梁下部设置间距为 2.5 m 的锚杆，锚杆嵌固长度 6.00 m 呈矩形布置。为方便系缆作业，护面上系缆桩旁边设置 1.2 m 宽人行步梯。



图 2 抵坡丁靠锚位结构平面

1.2 锚位岸坡稳定性

锚地位于长江右岸斜坡地带，水上岸坡相对较为平缓，坡度为 20°~30°；近岸水下岸坡较缓；

侧岸为侵蚀性风化花岗岩，岩壁较为致密坚固。勘区岸线曲折，区域构造稳定，构造性滑坡、崩塌等不良地质条件未发育，目前自然边坡稳定性较好^[2]。

1.3 锚位尺度

船舶抵坡丁靠时, 船首底部与岸线轻微接触后停泊, 考虑每 3 艘船舶为 1 组, 设置 1 个主系缆桩, 每组之间留一定的安全距离, 库区一段天然岸线船舶抵坡丁靠示意图 3^[3]。

抵坡丁靠泊位面积 A_m 按式(1)计算:

$$A_m = L_s a \quad (1)$$

式中: L_s 为锚位长度, m, 包括 5 000 t 干散货船船长、船宽、船首到岸坡的水面距离 (b) 3 个数值的总和, 岸坡坡比按 1:2 考虑; a 为锚地宽度, m, 按每组船舶总宽度和每组之间的净距之和考虑, 每组之间不少于 4 m, 满足各船不少于 1 m 净距。

经计算, 5 000 t 干散货船抵坡丁靠时单个锚位尺度见表 1。

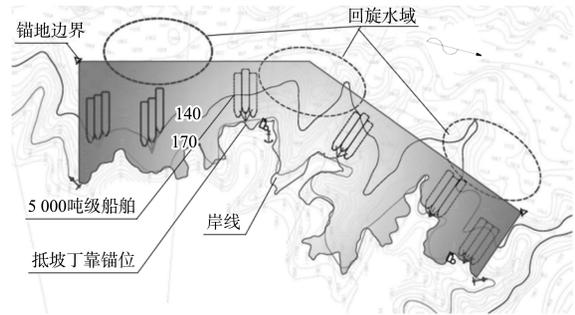


图 3 船舶抵坡丁靠示意

表 1 抵坡丁靠锚位尺度

船型	船长 L/m	船宽 B/m	b/m	L_s/m	a/m	锚位面积 A/m^2
5 000 t 干散货船	110	19.2	10.6	139.8	≥ 61.6	$\geq 8\ 611.68$

1.4 锚位结构受力情况

锚地建设区域位于三峡大坝上, 三峡成库后, 流速较小, 工程区往年最大流速为 0.57 m/s, 本次水工建筑物设计按流速 1.00 m/s 计算; 工程区 50 a 一遇基本风压为 0.3 kPa, 对应设计风速为 22.0 m/s。即按水流流速 1.0 m/s, 风速 22.0 m/s 的组合, 以靠泊 5 000 吨级干散货船为代表船型, 按 3 艘 1 组进行抵坡丁靠进行受力计算。

抵坡丁靠系缆桩所承受系缆力按式(2)计算:

$$N = \frac{\sum F_y}{\cos\alpha\cos\beta} \quad (2)$$

式中: N 为系缆力标准值; α 为系船缆绳的水平投影与锚地前沿所形成的夹角, 取 $\alpha=45^\circ$; β 为系船缆绳与水平面之夹角, 取 $\beta=25^\circ$; $\sum F_y$ 为同时出现的风和水流对船舶作用产生的纵向分力总和。

作用于船舶上的计算风压力的纵向分力 $F_{y,w}$ 按式(3)计算:

$$F_{y,w} = 49.0 \times 10^{-5} A_{y,w} v_y^2 \zeta \quad (3)$$

式中: $A_{y,w}$ 为船体水面以上的纵向受风面积, m^2 ; v_y 为计算风速, 取 22 m/s; ζ 为风压不均匀折减系数。

水流对船舶作用产生的水流力纵向分力按式(4)计算:

$$F_{y,c} = C_{y,c} v^2 S \rho / 2 \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度, $\rho=1.0\ t/m^3$; v 为水流速度, 取 1.0 m/s; $C_{y,c}$ 为水流力纵向分力系数; S 为船舶吃水线以下的表面积, m^2 。

根据船舶所受的风荷载及水流力, 计算系缆力为 349.32 kN, 设计采用 350 kN 系缆力。

2 锚位防护结构方案

在锚地水位变动区斜坡面设置 3 根系缆桩, 系缆桩顶部四周区域设置钢筋混凝土防护结构, 钢筋混凝土防护结构和系缆桩所围成的顶部区域内设置楔形槽, 见图 4。系缆桩为圆柱结构的钢筋混凝土灌注桩, 其顶部嵌入固定在钢筋混凝土桩帽的底端, 钢筋混凝土桩帽为长方体结构, 顶部通过预埋固定有系船柱, 系船柱为按标准加工的定型产品^[4]。

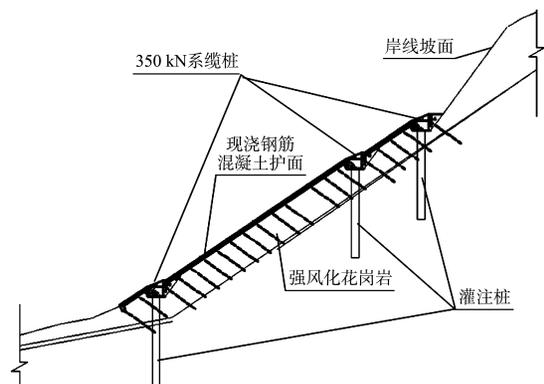


图 4 水位变动区抵坡丁靠锚位斜坡面系缆桩防护结构

钢筋混凝土桩帽顶部与楔形槽底部高程一致，见图5。楔形槽底部水平，楔形槽在靠江侧与钢筋混凝土防护结构表面高程一致，系缆桩位于楔形槽中部，系缆桩的系船柱全部没入楔形槽内；钢筋混凝土防护结构四周与天然地面交界处均设置钢筋混凝土格构梁，且全部嵌入天然地面；其余部位为厚度相同的钢筋混凝土面板。楔形槽的平面尺寸根据系船柱尺寸确定，以便于系缆作业。库区水位在蓄水期及消落期会快速变化，船舶在抵坡丁靠锚泊期间要及时调整船位，在蓄水期将缆绳从快淹没的系缆桩解开并移位至上一级系缆桩顶，在消落期松放缆绳，缆绳不够长时可解开并移位至下一级系缆桩顶。

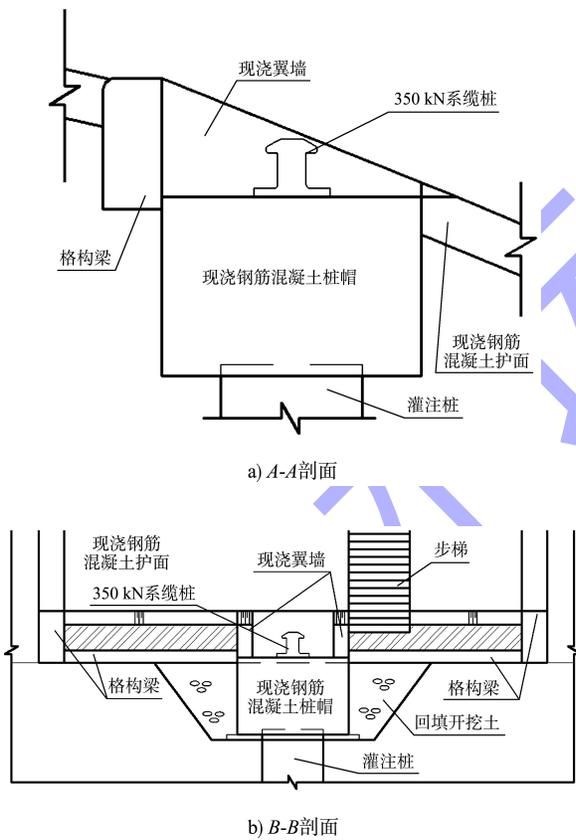


图5 系缆桩桩帽结构

根据地质条件和岸坡冲蚀程度、维护周期因素等，确定钢筋的格构梁高度和钢筋混凝土防护结构的防护范围。通常岸坡冲蚀速度越快，维护周期越长，钢筋和格构梁的高度越高，则钢筋和防护结构的防护范围越大；以系缆船的撞击力大小决定钢筋混凝土面板的厚度和钢筋混凝土格构

梁的配筋，船舶的撞击力越大说明钢筋混凝土面板越厚，以及钢筋混凝土面板和格构梁的配筋越多。楔形槽两侧及岸侧立面均为垂直面，其基础设置在钢筋混凝土桩帽外侧，楔形槽阳角均采用圆弧面^[5]。

沿同一斜坡面轴线设置多级系缆桩时，可将多级系缆桩作为整体设置钢筋混凝土防护结构，钢筋混凝土防护结构横断面每隔一定间距增设钢筋混凝土次梁；在系缆桩位轴线对应的钢筋混凝土防护结构表面设置步梯，便于系缆时行走。钢筋混凝土防护结构通过锚杆维持结构稳定，通过结构断面设置的排水管降低水压力，另外通过结构底部与基础接触部位设置的土工布和排水管倒滤层防止下部土体流失^[6]。

3 水位变动区锚位结构施工技术

3.1 桩基工程

桩基为钻孔灌注桩和挖孔灌注桩，系缆桩适用范围为高程148、168、174 m。钻孔灌注桩可采用冲击钻机泥浆护壁成孔，见图6，挖孔灌注桩施工采用人工成孔，人工挖孔护壁采用厚度150 mm的钢筋混凝土。钢筋笼现场制作，打好孔后进行清孔处理，下好钢筋笼后进行二次清孔处理，随后浇注混凝土^[7]。

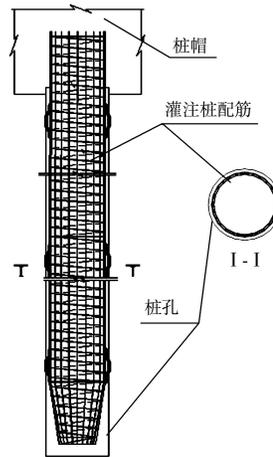


图6 灌注桩结构

3.1.1 钻孔灌注桩成孔

1) 完成放线定位后需要进行验线以及开钻前的校桩，做到桩位准确无误；在成孔过程中，要

经常观察、检查冲击钻的稳定性, 以防冲击钻移位, 确保桩位准确无误。

2) 在钻机开孔的时候, 应使用低锤进行密击, 只有当钻孔开到一定深度时才能进行正常撞击。钻孔成形过程中, 应根据土质的软硬程度, 在防止出现空锤现象的同时, 调整好合适的冲程范围, 最大不超过 4~6 m。冲击面为斜岩面或有漂石时, 在上部表面投入黏土混合小石片进行垫平处理, 再进行钻孔。

3) 孔深达到设计要求后, 用探孔器检查孔深、孔位、孔径、垂直度, 达到质量要求后, 再进行一次钻孔清理, 并在导管放置好后进行二次清孔, 为提升清孔效果, 可在清孔过程中将导管多次向上、向下提拉。孔底沉渣经清孔后, 厚度不应超过 100 mm。

4) 钻孔时相邻钻孔应保持一定间隔, 避免钻孔过程中相互影响而发生踏孔现象。

3.1.2 挖孔灌注桩成孔

1) 人工挖孔桩护壁使用厚 150 mm 的 C30 混凝土, 通过振捣保证密实; 护壁的配置构造钢筋直径不小于 8 mm, 另外竖向筋采用上下搭接或拉接的方式。

2) 开孔前要对桩位进行精确定位放样, 定位基准桩设置在桩位外, 安装护壁模板时, 须用桩中心点来校正模板的位置, 并由专人负责。

3) 挖到设计高程后, 应将护壁上的泥土、孔底的残渣、积水等清除干净, 并对隐蔽工程进行验收。验收合格后, 立即对桩体混凝土进行封底、灌注。

3.1.3 钢筋笼制作与安装

1) 按图计算钢筋下料长度后, 再将钢筋下料, 各断面接头数不超过 50%, 相邻接头断面间距不小于 35 倍钢筋直径。若采用单面搭焊的方式进行焊接, 焊缝长度应不小于钢筋直径的 10 倍。

2) 钢筋笼通过专用托架进行起吊, 平板车运送到现场, 将骨架吊在孔洞口。在吊装过程中须保证骨架不变形, 在进行钢筋笼节段焊接时, 应使上下两节骨架处于同一轴线上, 焊接主筋对位后进行单面搭焊, 焊接长度不应小于 10 倍钢筋直径。

3) 将钢筋笼放至在孔内位置后, 应尽快进行

二次清孔, 要求柱底沉渣厚度达到设计要求, 验收合格后, 立即对孔内进行浇注。

3.1.4 钻孔桩混凝土浇注

1) 采用导管法进行水下混凝土浇注, 且每根桩的水下混凝土在浇注过程中应防止中断, 另外严禁出现夹层、断桩, 所用水泥不得低于 42.5 级水泥强度^[8]。

2) 在埋设首批混凝土埋管时, 深度应不小于 1.0 m。混凝土浇注过程中, 埋管深度应保持在 2.0~6.0 m, 孔内混凝土表面最终高度应适当高于设计桩顶高程, 以确保强度达标, 无浮浆、裂缝或夹渣等缺陷。

3) 灌注桩桩身强度等级为 C30, 施工时桩顶灌注高度应比设计桩顶高程高出一定距离, 根据施工经验可确定, 但必须保证设计桩顶高程以下混凝土强度不低于设计强度, 并进行灌注。

3.1.5 挖孔桩混凝土浇注

1) 桩身混凝土灌注时, 须将混凝土从溜槽中通过, 混凝土落距在 3 m 以上时, 应采用筒体, 且筒体末端距孔底高度不应超过 2 m, 宜采取导管泵送的方式。

2) 对渗水过大的地方须采取有效措施, 如场地截水、水下灌注混凝土等。严禁在桩孔内 (包括相邻桩) 灌注中, 边抽水、边开挖、边灌注。

3.2 护面结构

3.2.1 现场浇筑混凝土结构

现浇混凝土上部结构构件包括桩帽、格构梁、护面板等, 着重注意以下事项:

1) 浇筑上部结构混凝土时, 应按下列规定进行验收: 模板、钢筋、预留孔、预埋铁件等, 在浇筑前应先验收合格; 施工中使用的预埋铁件应避免裸露在外, 对铁件必须裸露在外的, 应做好防腐措施; 在施工中要掌握水位变化规律, 防止对混凝土质量造成影响^[9-10]。

2) 混凝土浇筑时应特别注意做好防雨、防裂等措施, 为避免出现温度性裂缝, 浇筑后要特别注意养护。

3) 浇筑混凝土前应进行侧模和支承结构的强度及变形检查。现浇结构允许偏差不得超过表 2 的规定。

表2 现浇结构允许偏差

mm

轴线位置	长度	宽度	顶面平整度	顶面高程	搁置面高程	侧面竖向倾斜	预埋铁件位置
50	±20	±15	6	±15	5~10	5H/1 000	20

注: H 为构件高度或厚度。

4) 现浇面板顶面 100 mm 范围内掺入聚丙烯纤维 0.6 kg/m^3 。聚丙烯纤维规格为长度不小于 18 mm, 直径不小于 $30 \mu\text{m}$, 抗拉强度不小于 350 MPa, 弹性模量不小于 3 500 MPa, 断裂延伸率不小于 15%。

3.2.2 锚杆施工

1) 铁丝网要扎牢, 用铁丝连接网间, 铁丝网与坡面保持 2~3 mm 的距离, 制作异型的铁丝网时应加设短锚杆固定铁丝网。尽量从正面喷涂混凝土, 以保证 20 mm 厚的铁丝网基材, 另外对凹凸处、死角等部位进行补喷处理。

2) 注浆采用自然排气法, 通过注浆管从孔底开始注浆, 孔口开始回浆即可认为孔内浆已注满, 必须将注浆管放入孔底。

3) 锚杆施工前须对锚孔清孔处理, 再放上锚杆注浆, 锚杆入孔要求不小于设计孔长的 95%; 砂浆凝固后, 将格构钢筋与锚杆进行连接, 锚孔定位偏差不大于 20 mm、锚孔偏斜度不大于 5%。

3.2.3 系船柱制造及安装

1) 系船柱的材质必须达到设计要求的品种和型号。

2) 系船柱的表面要平整光滑, 不能有裂纹、瘤子等严重缺陷。

3) 系船柱质量标准按照 JTS 257—2008《水运工程质量检测标准》执行。

4) 系船柱表面应作除锈处理, 其防腐蚀涂料应满足设计要求。

4 结语

1) 围绕水域及岸线的最优化使用目标, 在传统抵坡丁靠方式基础上, 提出一种大水位差深水水域锚地的船舶锚泊形式, 实现大水位变幅、深水水域(水位变幅 $\geq 15 \text{ m}$, 最小水深 $\geq 25 \text{ m}$) 条件下的大型船舶安全系靠泊。

2) 以 5 000 吨级干散货船为代表船型, 计算锚位尺度及系缆力, 符合三峡坝区目前大型船舶锚泊实际情况, 类似工程可参考相应计算公式。

3) 将系船柱布置为内嵌结构形式, 并在其两侧沿自然坡面设置钢筋混凝土防护带, 系船柱顶部不超出坡面, 保障系船柱所在坡面的完整性和使用期限, 也减缓了系船柱与船底之间的相互干扰。

4) 提出适用于水位变动区的斜坡面系缆桩防护结构及施工方法, 为抵坡丁靠船舶提供了一种结构有效、停泊安全的系船柱及防护结构方案。

参考文献:

- [1] 闵小飞. 三峡近坝河段船舶待闸锚泊方式[J]. 中国水运(上半月), 2016, 37(5): 39.
- [2] 张毅, 解中柱, 朱俊风. 三峡坝上待闸锚地建设规模探讨[J]. 水运工程, 2013(3): 148-152.
- [3] 皮雳. 三峡坝区待闸锚地完善工程锚泊方式的选取[J]. 中国水运(上半月), 2019(7): 102-103.
- [4] 刘松, 刘声树, 邹艳春. 一种新型系船柱的研究设计[J]. 水运工程, 2015(2): 168-173.
- [5] 吴如松, 戎嘉隆. 船岸系缆设备要充分考虑减少系缆的磨损[J]. 航海技术, 2002(5): 18.
- [6] 杨国平, 周丰, 孙昭晨. 离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术[J]. 水运工程, 2011(11): 106-111.
- [7] 顾宽海, 汪涛, 陈明阳, 等. 装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工[J]. 水运工程, 2021(6): 6-12, 19.
- [8] 林辉湖. 高桩码头工程施工质量控制[J]. 珠江水运, 2021(15): 44-45.
- [9] 张逸帆, 顾宽海. 航道改建工程中护岸结构形式优选[J]. 水运工程, 2020(7): 151-157.
- [10] 张雯燕, 陆敏. 基于水平钢架的全直桩系缆结构优化设计[J]. 水运工程, 2022(1): 82-86.

(本文编辑 赵娟)