



长周期波作用下强输沙率海岸 岛式防波堤平面设计

马 林¹, 李 皓², 吴哲丰¹, 张延辉¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100038)

摘要: 针对长周期涌浪作用下强输沙率海岸的码头总平面设计问题, 以贝宁湾某配套工作船码头项目为例, 采用岛式防波堤方案。利用波浪数模试验、泥沙冲淤数模试验等方法验证岛堤平面设计的合理性, 解决了平面布局问题。基于日本规范对船舶竖向位移进行初步计算, 并利用水动力有限元分析方法对规范计算结果进行对比验证, 解决了长周期波条件下的航道设计水深问题。结果表明: 1) 在长周期波、强输沙率条件下, 波浪掩护决定口门朝向、岛堤轴线等布局条件; 2) 岛堤与破波线距离、进港航道水深是决定岛式防波堤平面位置的控制性因素, 须合理论证和计算; 3) 日本规范计算方法较适用于长周期波条件下的航道水深设计, 建议在类似工程中使用。

关键词: 沿岸输沙; 长周期波; 岛式防波堤; 平面布置; 航道水深

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0111-08

General layout design of coastal island-type breakwater with strong sediment transport rate under long period wave

MA Lin¹, LI Hao², WU Zhe-feng¹, ZHANG Yan-hui¹

(1.CCCC Water Transportation Consultants, Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.Center of Construction Management & Quality & Safety Supervision, Ministry of Water Resources, PRC, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the general layout design problem of the coastal wharf with strong sediment transport rate under long-period swells, taking a supporting boat wharf project in the Benin Bay as an example, the island breakwater scheme is adopted. The rationality of the general layout design of the island breakwater is verified by using wave numerical model test and sediment scouring and silting numerical model test, so as to solve the general layout problem. A preliminary calculation of the ship's vertical displacement is carried out based on the Japanese code, and the hydrodynamic finite element analysis method is used to compare and verify the calculation results of the code, which solves the problem of channel design water depth under the condition of long-period waves. The results show that: 1) Under the conditions of long-period wave and strong sediment transport rate, the wave protection determines the layout conditions such as the harbor entrance orientation and breakwater axis. 2) The distance between the breakwater and the surf zone and the water depth of the approach channel are both the controlling factors to determine the plan position of the breakwater, which must be reasonably justified and calculated. 3) The Japanese code calculation method is more suitable for the design of channel water depth under the condition of long period waves, and it is recommended to be used in similar projects.

Keywords: coastal sediment transportation; long period wave; island-type breakwater; general layout; channel depth

近几年，随着“一带一路”倡议在非洲大陆不断推进，西非区域已成为国内企业“走出去”的重点关注地区，尤其在港口建设方面具有较好的发展潜力。西非海岸线较长，其自然条件具有显著的复杂性和多样性特征，其中，以贝宁湾尤为典型，海岸动力极为强劲，湾顶 300 km 海岸是世界上最长的沙坝-泻湖海岸之一，而且由于其直面大西洋，常年受外海长周期涌浪作用，形成了湾内长周期波、强输沙率的特点。目前，对于上述条件下的防波堤和码头平面布置研究较少，如何综合考虑上述因素的影响，已成为总平面设计需要解决的问题。本文依托贝宁某配套工作船码头工程，综合考虑长周期波和沿岸强输沙因素，形成了较合理的平面设计方案，可为类似工程设计提供借鉴。

1 工程概况

某原油外输管道项目拟在尼日尔建设输油管道首站，在贝宁沿海建设港口末站，原油经陆上管道到达末站，再由海底管道运输至外海 15 万吨级单点系泊进行装船外运。单点处用拖轮进行辅助靠泊作业，为满足辅助作业的便捷性、时效性及拖轮停靠和补给需求，拟建设一处工作船专用码头。为兼顾末站和码头的统一运营管理，配套码头选址在末站南侧的无掩护海域。

2 自然条件特点

2.1 外海涌浪特征

南大西洋在中高纬度区域受温带气旋影响产生风浪，在长距离传播过程中，高频波浪衰减较快，至几内亚湾转变为长周期涌浪。据统计，外海年平均波高 1.34 m，年平均周期 8.6 s。常浪向与强浪向均为 SSW 向，发生频率约为 61.37%，次常浪向与次强浪向表现为 S 向，发生频率约为 38.34%。周期 8 s 以上所占概率是 63%，周期 10 s 以上所占概率是 11%，见图 1、2。经波浪数模论证，工程海域-50 m 等深线处重现期 50 a SSW 向波高为 4.33 m，平均周期 15.78 s；S 向波高为

4.25 m，平均周期 15.27 s^[1]。

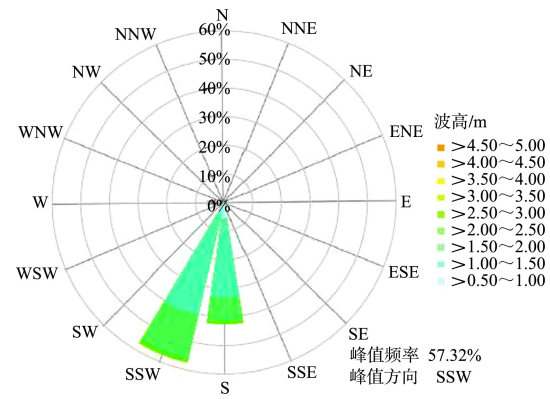


图 1 外海波高玫瑰图

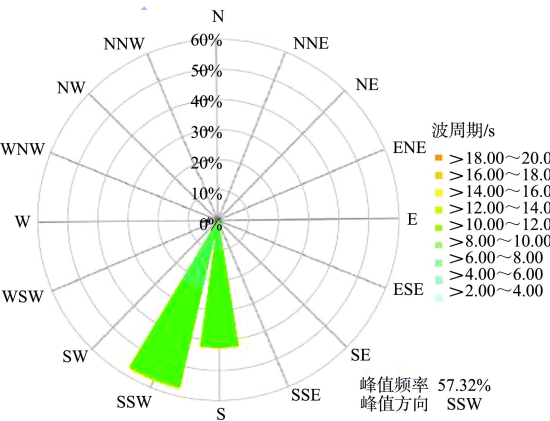


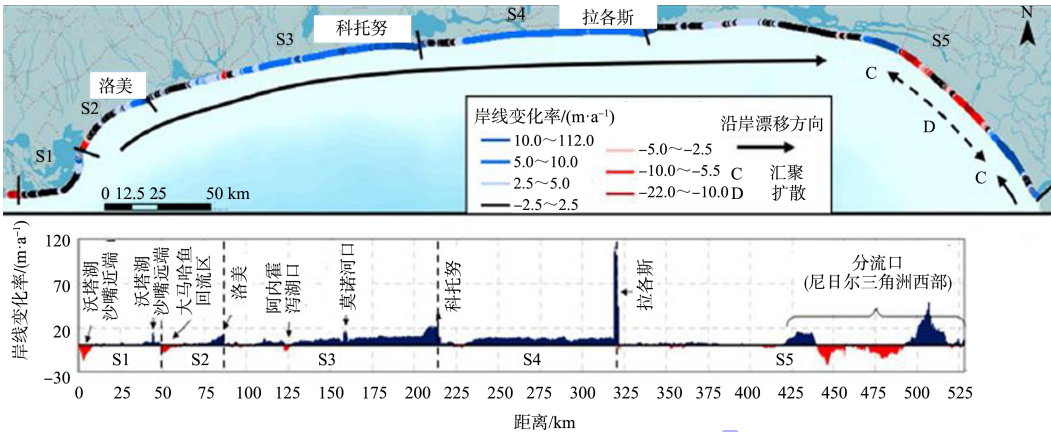
图 2 外海波周期玫瑰图

本工程外海波浪传至近岸浅水区受水下地形影响导致水流质点流速不等，致使波浪发生破碎，海区近岸常年呈现较强的破波带，破波带宽度在 100~180 m。

2.2 泥沙动力特征

拟建工程位于贝宁湾湾顶中部，沿岸地貌的塑造主要是由于远海传来的长周期涌浪能量较强，可大量掀动床面泥沙，而且入射波行为和沿岸输沙系统又紧密联系在一起，呈现了一个典型的强浪主导的沿岸飘沙海岸形态。相关研究针对贝宁湾内 1990—2015 年的岸线演变进行分析，沿海岸线划分为 5 个区段(S1~S5)，其中 S1~S4 对应于带有边界的单个沉积物单元，见图 3。结果表明，贝宁湾的海岸线变化率和净变化率呈现出显著的沿岸输运模式^[2]。由于潮流动力较弱，而近岸海域受长周期涌浪作用有一定输沙补充，形成了充足的海向泥沙来源。因此，一旦自西向东沿岸输

沙被阻断, 海岸线将迅速侵蚀萎缩后退。在沙源供给不足区域表现出严重的海岸侵蚀和岸线后退, 其显著特点即是逼近沿海城市和村庄的居民区、道路以及基础设施。



注: 本工程位于图中 S4 区。实线箭头表示当前占主导地位的沿岸泥沙输移方向, 虚线箭头表示假设方向。

图 3 贝宁湾内自 1990—2015 年的岸线演变分析

3 码头功能需求和系泊标准

3.1 功能需求

本工程为 5 000 HP (3 677.5 kW) 全回转拖轮工作船码头, 主要为单点系泊处大型油船提供助泊、拖带、掉头、护航、值守、应急救援等辅助功能。根据单点的运营需求, 每月平均两艘油船到达单点进行油品装船作业, 拖轮应随时保证对油船的辅助作业功能, 并且在非作业期停靠在港内。

3.2 系泊标准

由于国内外标准中尚无对小型工作船系泊标准的规定或建议, 本工程利用系泊物理模型试验的方法, 根据不同的系缆布置, 以缆绳受力限制和护舷变形限制作为控制条件, 得到了在 S 向波浪不同周期-10.5 m 等深线处的系泊标准^[3], 见表 1。

表 1 工作船系泊允许波高

波浪平均周期/s	8	10	12	14
系泊允许波高/m	≤2.0	≤1.8	≤1.5	≤1.2

4 防波堤平面布置

4.1 平面布置形式选择

防波堤按平面布置可分为两类, 即突堤和岛堤。突堤为防波堤一端与岸连接、另一端伸向海域。岛堤为防波堤两端均不与岸连接, 整体位于离岸一定距离的水域中。其中突堤一般常见单堤

和双堤两种形式^[4]。对于本工程, 如采用双堤或单堤布置, 堤内波高小, 掩护效果较好, 可降低波浪对近岸泥沙运动的影响。但防波堤接岸直接阻碍沿岸输沙, 将造成严重的上游淤积、下游冲刷, 一旦该布局确定后, 港内的淤积情况基本无法改变, 只能通过备淤和维护性疏浚来克服淤积对通航的影响, 且堤身较长、投资较高。如采用岛式防波堤, 通过选择合理的防波堤线形、轴向及长度, 既能够满足掩护需求, 又不阻碍沿岸输沙, 避免港池回淤, 对岸线影响较小, 经济性较好, 因此本项目选择岛式防波堤方案。

4.2 岛式防波堤布置

4.2.1 保证系泊时间, 优化总体布局

据数模统计, 外海波浪经折射变形传至近岸, S 向波浪占比 87%, SSW 向占比约 12%, 基于此条件, 岛堤初始平面方案采用半圆形布置, 口门朝向避开常浪向和强浪向, 西侧堤头较东侧堤头向岸侧延伸 50 m, 以减弱 SSW 向波浪绕射对泊稳的影响(图 4)。模型采用 2016—2018 年 3 a 的波浪时序过程进行损失天数的判断, 由于 SSW 向波浪绕射较强, 最大全年系泊损失时间较多, 可达 39 d。因此, 进一步将西侧堤身延长 100 m(图 5), 计算最大全年系泊损失时间降至 12.5 d, 总体满足拖轮系泊功能要求。

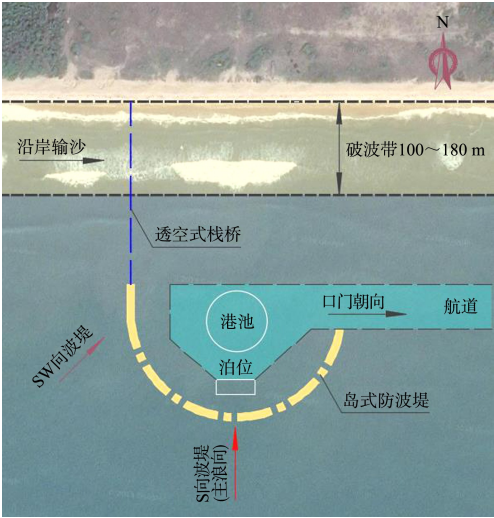


图 4 初始平面布置方案

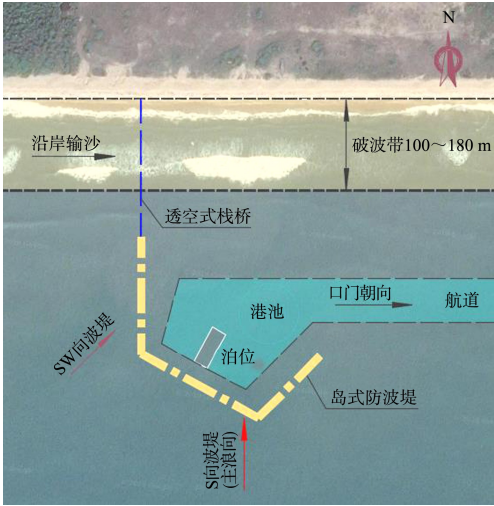


图 6 线型调整方案

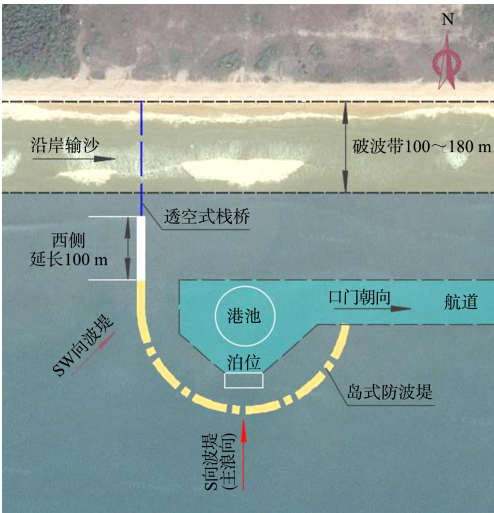


图 5 西侧堤身延长方案

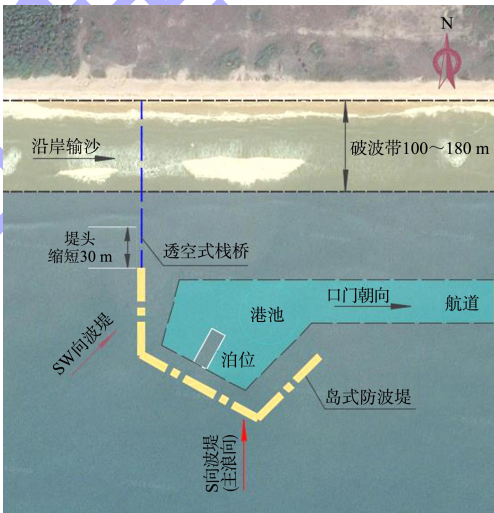


图 7 最终优化方案

在保证掩护效果的条件下，从优化防波堤长度以降低投资且有利于施工的角度，将弧形调整为折线形，并调整内侧泊位轴线方向，使其与风向、绕射波向一致，更有利于泊稳(图 6)。根据系泊物理模型试验统计结果显示，西侧防波堤缩短 30 m 对掩护效果影响非常小，因此，调整形成最终的优化布置方案(图 7)。

4.2.2 维护岸线稳定,避免港池淤积

本工程岛堤西侧堤头与陆域间接设岸透空式栈桥，不会阻碍沿岸输沙。由于岛堤布局会导致绕射波浪及其生成的沿岸流使泥沙向堤后掩护区输移，同时绕射波在堤后以相对岸线一定角度破碎，波浪动力减弱，使泥沙在波影区易于沉积^[5]，见图 8。输沙量较大的情况下，当岛堤离岸距离

X_B 与堤长 L_B 的比值在1~2时, 堤后将形成由岸伸向海的沙嘴, 当 $X_B/L_B < 1$ 时, 沙嘴将发展成连岛沙坝^[6], 见图9。

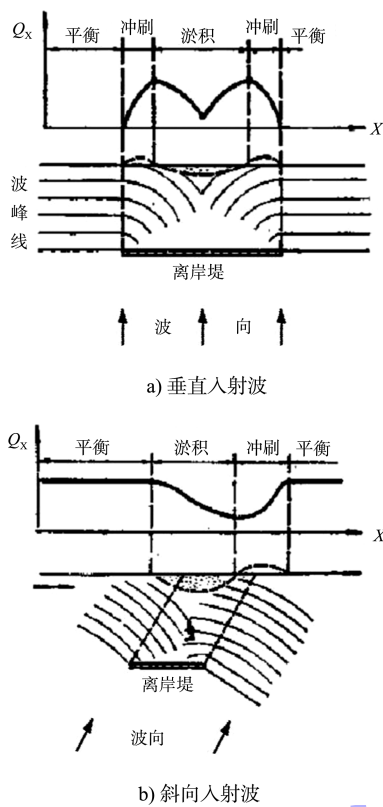


图 8 岛堤影响下岸线演变理论形态

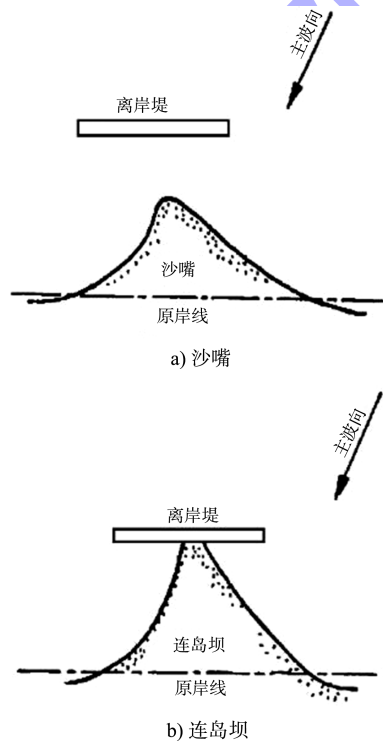


图 9 岛堤堤后淤积发展形态

相关研究也给出了不同堤长 L_B 和离岸距离 X_B 与沙嘴长度 X_s 的关系式^[7]:

$$\begin{cases} X_s^* = 0.156 L_B^* & (X_b^* < 0.5) \\ X_s^* = 0.317 L_B^* & (0.5 \leq X_b^* < 1.0) \\ X_s^* = 0.377 L_B^* & (X_b^* \geq 1.0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_b^* = X_b/X_B$ 、 $X_s^* = X_s/X_B$ 、 $L_B^* = L_B/X_B$ 为无量纲参数; X_b 为破波线与岸线间的距离; X_s 为沙嘴突出于岸线的长度。本工程破碎带宽度在100~180 m, X_B 约为300 m, L_B 约为280 m, 初步估算其堤后将形成单淤积沙嘴, 突出岸线长度约88.4 m, 因此, 认为不会形成连岛坝。岸线演变和泥沙冲淤数模试验结果也表明工程建设后下游海岸表现为侵蚀后退的趋势, 上游海岸表现为输沙堆积的淤涨趋势, 使用年限内堤后将形成稳定的沙嘴, 形成连岛沙坝的可能性极小, 见图10。



图 10 工程区岸线演变模型计算结果

模型计算显示年淤积最大出现于栈桥接岸处以东约50 m处, 最大年淤强约0.42 m/a, 最大年冲刷出现于栈桥接岸处以东200~350 m处, 最大年冲刷深度约0.45 m。

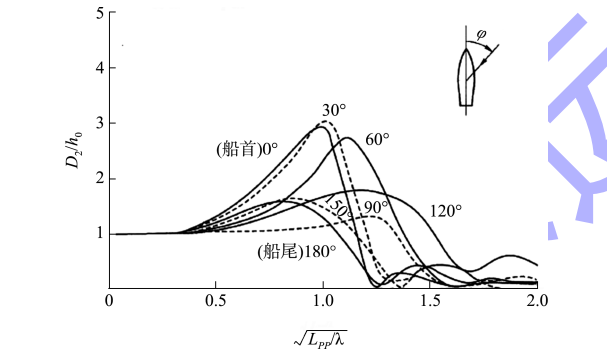
4.2.3 航道设计水深的确定

从上述形成的平面布置可知, 破波带宽度和对波浪绕射的掩护决定了西侧堤头的位置, 口门处进港航道水深决定东侧堤头的位置, 进而决定防波堤整体水深, 由于贝宁地区石料缺乏, 防波堤造价受水深影响较大, 因此, 进港航道水深的确定对工程投资起主导作用。

本工程平均波周期已达到15.27 s, 根据《海港总体设计规范》^[8]规定, 对于波浪富余深度 Z_2 的计算仅适用于 $T \leq 10$ s的情况, 当 $T > 10$ s时, 应进行专门论证。国际航运协会(PIANC)规范

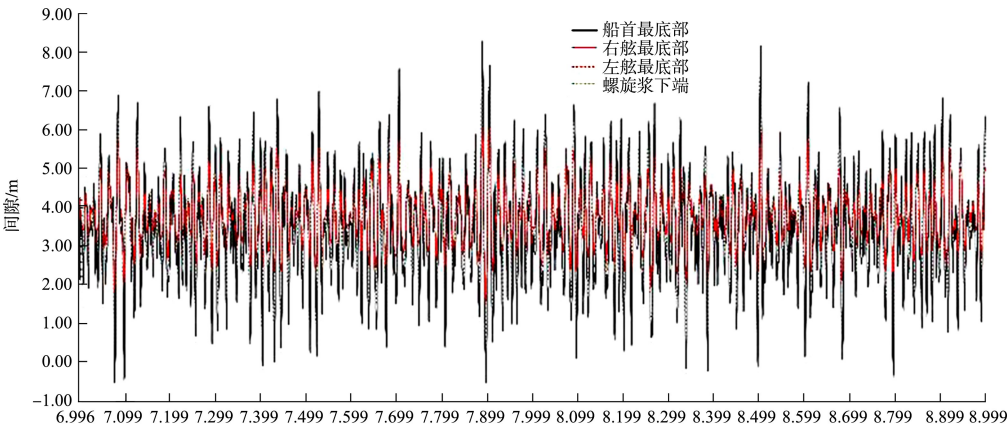
Harbour Approach Channels—Design Guidelines^[9]

规定计算波浪引起的船舶竖向运动可以采用三角函数法、基于最危险组合的日本规范计算方法、西班牙规范 ROM3.1 的半概率设计方法、概率设计方法。本项目拖轮船型尺度较小，在长周期波作用下极易发生船舶升沉、横摇和纵倾。日本规范计算方法中考虑了船长与波长的相对关系，更适用于小型船舶的航道水深计算，因此，初步采用日本规范进行计算。其规定最大的竖向位移假定是由于升沉和纵倾产生的船首下沉量 D_2 ，以及由于升沉和横摇产生的船舶左舷和右舷的龙骨下沉量 D_3 两者中的较大值。当涌浪波长 $\lambda > 0.45L_{pp}$ 时，采用图表法(图 11)得到本工程 $D_2 = 1.76\text{ m}$ ，经查拖轮自振周期一般为 $5\sim 7\text{ s}$ ，进港航道中的波浪周期为 $13\sim 16\text{ s}$ ，二者不会发生共振情况，故 D_3 不存在达到峰值的条件。综合其他设计要素，计算本工程航道设计底高程为 -6.1 m 。



注： D_2 为由于船舶升沉和纵倾产生的船首下沉量(m)； L_{pp} 为设计船型垂线间长(m)； λ 为涌浪波长(m)； h_0 为波幅($h_0 = H/2$)， H 为波高(m)； C_b 为船舶的方形系数， $C_b = 0.7$ ； F_n 为相对船速， $F_n = 0.1$ ； φ 为波浪夹角($^\circ$)。

图 11 D_2 与波浪振幅比值



时间/s
a) 0°

图 11 曲线仅表示在 $C_b = 0.7$ 、 $F_n = 0.1$ 情况下的 D_2 与波浪振幅关系，但因其代表的是船舶在深海中的情况(深海条件下的船舶运动尺度大于浅海条件下的船舶运动尺度)，因此，对于其他类型船舶采用上图得到的船首下沉值结果也是比较典型的，可以用来作为 D_2 的一个初步估算值。

为论证规范计算结果的可靠性，利用水动力有限元分析软件采用响应振幅算子(RAO)技术对本工程航道中长周期波条件下拖轮的水动力响应进行频域和时域仿真计算，基于 PIANC 中提出的概率设计方法对 -6.1 m 底高程做进一步试算对比验证。有限元模型见图 12。

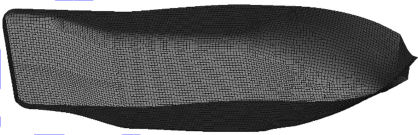
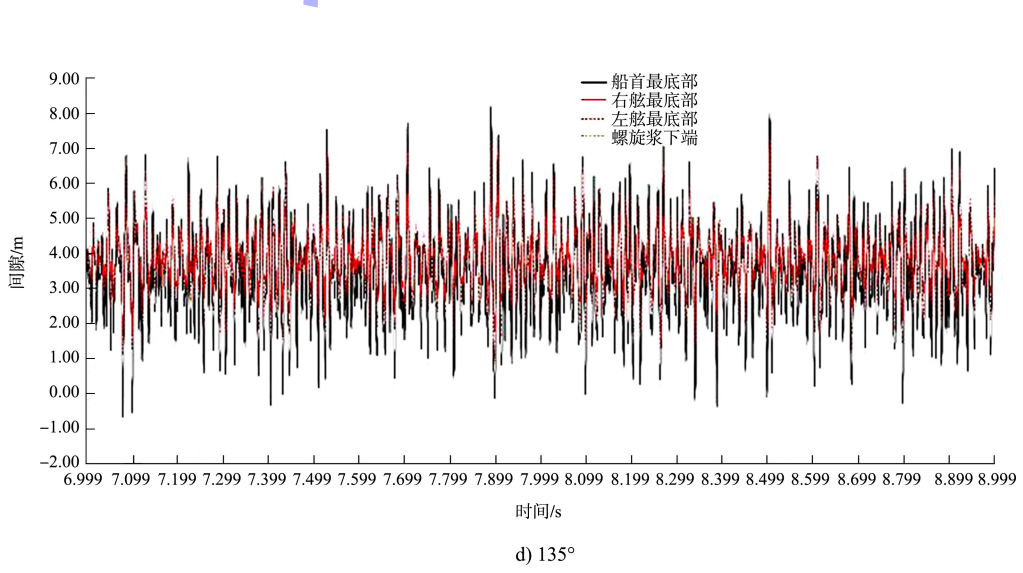
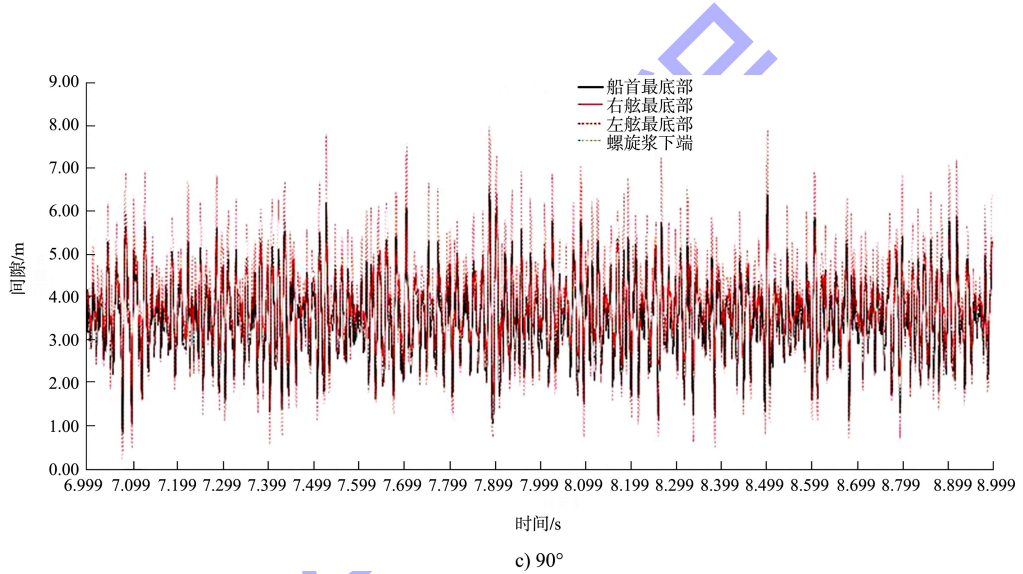
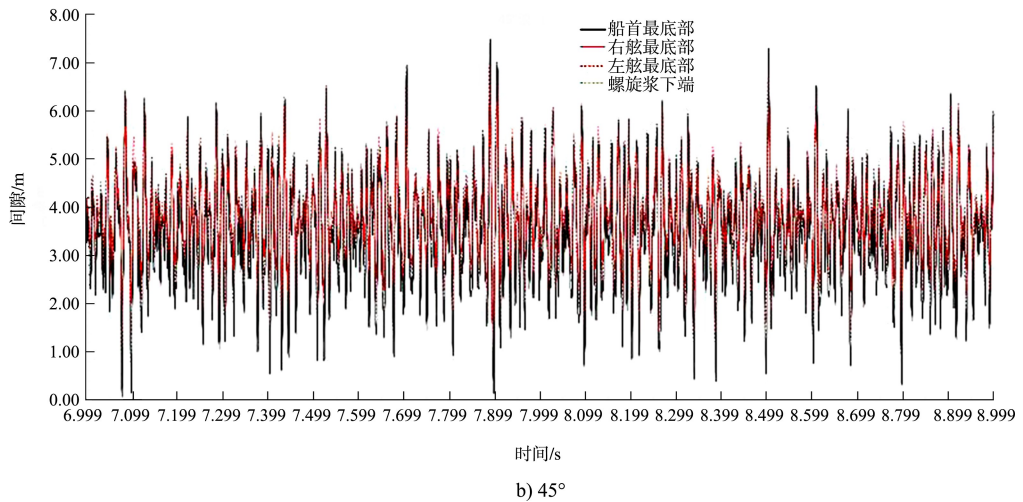


图 12 设计拖轮有限元模型

通过动力响应计算并截取一定时段内各浪向下龙骨 4 个监测点与海床间隙的时间历程，间隙正值表明船舶龙骨边界点位于海床上方，间隙负值表明船舶触底，见图 13。触底概率计算结果见表 2。

从图 13 可以看出， 0° 浪向时，船首底部和螺旋桨底部局部时点有触底情况发生， 45° 、 135° 和 180° 时仅船首底部在局部时点发生触底， 90° 时无触底情况发生。表 2 统计结果显示，船舶各监测点的平均触底概率均小于 1%，结合本项目建设规模、系泊时间要求、拖轮的操作性能、触底对环境和经济的影响等因素，触底概率在可接受范围，日本规范计算方法所得到的航道设计水深结果较合理。



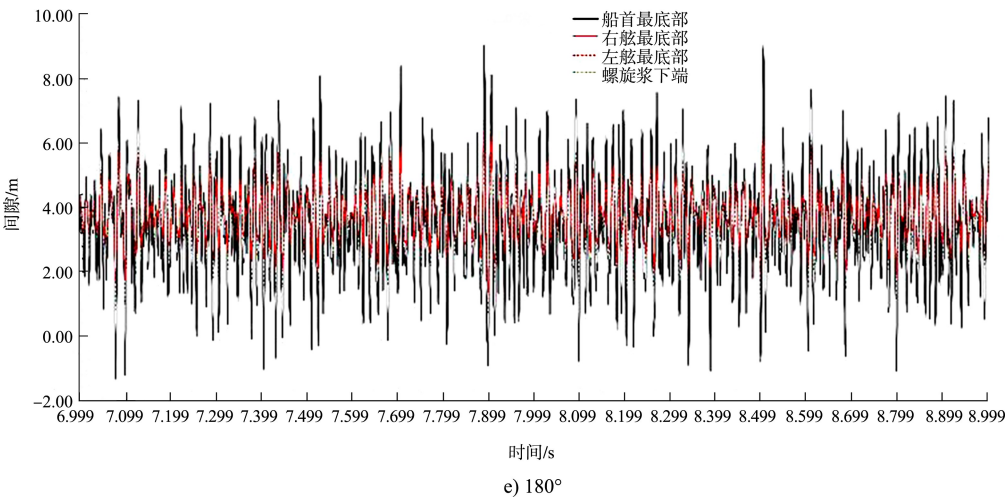


图 13 不同浪向监测点海床间隙时间历程

表 2 监测点间隙值分布概率

监测点位置	间隙 H/m	概率/%				
		浪向 0°	浪向 45°	浪向 90°	浪向 135°	浪向 180°
船首底部	$H \leq 0$	0.59	0.13	0.00	0.59	1.88
	$0 < H < 1$	3.41	1.46	0.28	3.40	5.36
	$H \geq 1$	96.00	98.40	99.70	96.00	92.70
右舷底部	$H \leq 0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$0 < H < 1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$H \geq 1$	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
左舷底部	$H \leq 0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$0 < H < 1$	0.00	0.12	1.09	0.20	0.00
	$H \geq 1$	100.00	99.88	98.81	99.80	100.00
船尾螺旋桨底部	$H \leq 0$	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
	$0 < H < 1$	0.98	0.54	0.02	0.10	0.29
	$H \geq 1$	98.92	99.46	99.98	99.90	99.71

5 结论

1)本工程岛式防波堤方案综合考虑了长周期涌浪和沿岸强输沙率等因素，经过相关试验的论证，平面设计基本合理。

2)对于类似本工程区域具有潮流较弱、长周期涌浪作用、破碎带较宽、泥沙运动以沿岸输沙为主等特征的防波堤平面设计的关键点可总结为：波浪掩护决定口门朝向和岛堤轴线等；堤头与破波线距离和进港航道水深两因素决定岛式防波堤的规模；沿岸输沙量较大时，堤头应至少延伸至破波带以外，避免形成连岛坝而造成港池淤积。

3)日本规范计算方法较适用于长周期波条件下的航道水深设计，也可采用基于数值分析的概率设计方法进行优化，以避免航道水深的过度设计。

4)长周期波条件下，船舶的系泊标准应同时考虑波高和周期两个因素。不同周期下的允许波高应综合各方面因素进行充分的论证，本工程提出的论证思路和方法可供参考。

5)长周期波波能较大，根据局部整体物模试验过程显示，折线形防波堤轴线转角处是波能较集中的位置，越浪量较大，易造成堤后护面失稳，应对轴线转角处进行局部优化调整。

参考文献：

[1] 交通运输部天津水运工程科学研究所.尼日尔-贝宁原油外输管道施工图设计项目配套码头波浪数学模型研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2020. (下转第 124 页)