

# 涌浪控制海域典型海港工程总平面布置<sup>\*</sup>



张宏铨，张军，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：**对于涌浪控制海域，国内外规范中尚未有成熟、详细的海港工程总平面布置方法。结合几内亚湾海港工程，以业主对年不可作业率小于1%的要求为出发点，遵循国际通用规范标准中平面布置原则，以连续23年的风、浪、潮、流后报资料为基础，采用波浪数学模型，针对主力船型的操纵及系泊分析、龙骨下水深研究等多种手段对总平面布置进行优化。结果表明，优化后的方案具有便于使用、工期短、工程量省等优点，可为类似工程提供参考。

**关键词：**涌浪；平面布置；波浪数学模型；船舶操纵；系泊分析；龙骨下水深

中图分类号：U 651<sup>+</sup>.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)04-0065-06

## General layout arrangement of typical sea port engineering in swell dominated sea area

ZHANG Hong-quan, ZHANG Jun, XU Jian-wu

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

**Abstract:** For swell dominated sea areas, no matured and detailed general layout design method for sea port engineering exists in domestic and foreign codes. Taking a specific sea port in Gulf of Guinea as an example, based on the owner's requirement of the project's downtime ratio shall be less than 1%, we investigate the 23 years hindcast time series data of concurrent wind, wave, tide, and current following the basic principles of layout arrangement in the international codes and guidelines, and optimize the general layout arrangement by the means of numerical wave model, ship maneuvering and mooring analysis, under keel clearance analysis for the main design vessels. The results show that the optimized layout scheme has the advantages of user friendly, short construction period and low cost, which can be used as a reference for the similar projects.

**Keywords:** swell; layout arrangement; numerical wave model; ship maneuvering; mooring analysis; under keel clearance

随着我国水运建设业务在全球的拓展，水运工程逐渐涉及波浪动力以涌浪为主的海域，如大西洋、印度洋沿岸等海域，典型国家如安哥拉、斯里兰卡、喀麦隆、科特迪瓦、加纳等，这些国家的海况特征与东南亚国家有显著不同，最突出的特征是以周期偏长的涌浪为主。

涌浪是由大洋风暴所产生海浪脱离其发源地经过长距离传播形成的波浪。涌浪波能大且传播过程中耗散很小，可以影响到非常远的区域。我

国东海沿海有宽广大陆架及诸多岛屿构成的岛链，其沿岸的涌浪不显著<sup>[1]</sup>。然而，对于没有大陆架和岛链掩护的海域，近岸海况常以涌浪为主，典型海域如前所述。

在涌浪控制海区开展的设计和施工与风浪为主的海区有较大不同。我国在风浪为主的海域建设港口已有较成熟经验并已形成规范，设计和施工过程中按规范指导基本可以完成。但对于涌浪为主的海区，我国规范的适用性受到了限制，如

收稿日期：2021-07-22

\*基金项目：国家自然科学基金面上项目(52071060)

作者简介：张宏铨(1973—)，男，硕士，高级工程师，从事港口工程项目策划、实施及管理。

泊位的可作业波高限值会降低，船舶自由航行时的升沉值会增加等。因此，需要针对具体工程开展针对性的研究确定平面设计尺度、验证设计成果。本文以非洲西部某海港工程为例，回顾和阐述实施过程中为确定防波堤对泊位掩护效果及进港航道水深相关的总平面布置所开展的研究，并总结一般应对策略，可供类似工程参考。

## 1 工程概况

工程位于西非几内亚湾，业主为欧洲大型航运公司及当地港务局联营体。工程内容包括约3.8 km长的深水防波堤、1 400 m长的15万吨级集装箱泊位、进港航道及陆域形成等。

工程的功能要求为泊位和航道的年不可作业率均不大于1%。按菲迪克设计-施工合同的模式<sup>[2]</sup>，承包商可以在满足业主对功能要求的前提下，提出新的平面布置。业主提出的原平面布置如图1所示。

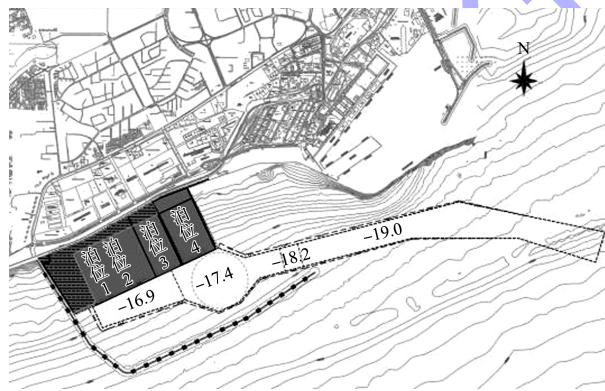


图1 原平面布置 (高程: m)

## 2 问题分析

工程量主要体现在防波堤、疏浚、陆域形成和码头4个方面。陆域形成和码头基本不可优化。但在疏浚方面，航道经过浅水区域，疏浚量大，通过航道截弯取直，可以减少疏浚量，且有利于船舶进出港；以泊位年不可作业率1%为标准，研究防波堤长度或走向上的可优化空间。

确定优化思路：1)在原平面布置基础上进行优化，航道和防波堤轴线不改变，优化防波堤长度；2)替代方案调整防波堤轴线和航道走向，及防波堤长度，港内陆域回填向东扩展约80 m。泊位和航道的年不可作业率限制是研究平面方案是否可行的最终标准。替代方案的平面布置如图2所示。

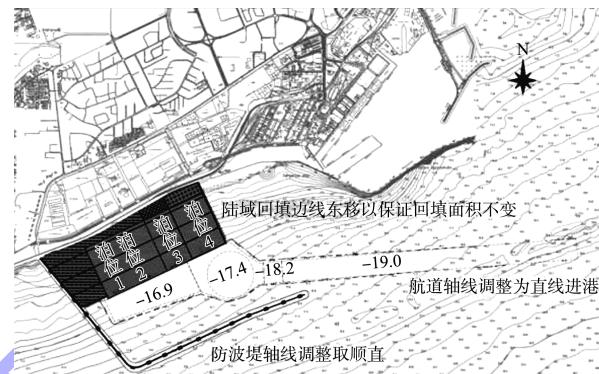


图2 替代方案的平面布置 (高程: m)

## 3 试验研究

### 3.1 波浪研究和初步系泊分析

为得到定量的结果，进一步开展波浪、船舶操纵及系泊试验、龙骨下水深研究，对方案进行分析和验证。

防波堤外-20 m等高线处1992—2014年共23年后报波高-波向联合分布数据见表1，波高-周期联合分布数据见表2。可以看出，工程区域谱峰周期  $T_p$  大于8 s的波浪约90%，大于12 s的波浪约50%，工程海域受涌浪控制。

表1 工程位置附近-20 m等高线处波高-波向联合分布

$H_s/m$	波向				合计
	SSE 向	S 向	SSW 向	SW 向	
0~0.5	0.006	0	0.007	0	0.013
0.5~1.0	9.045	16.651	1.353	0.024	27.073
1.0~1.5	16.593	42.711	0.493	0.013	59.810
1.5~2.0	3.428	8.947	0.077	0	12.452
2.0~2.5	0.262	0.372	0.003	0	0.637
2.5~3.0	0	0.015	0	0	0.015
合计	29.334	68.696	1.933	0.037	100.000

表 2 工程位置附近-20 m 等高线处波高-周期联合分布

$H_s/m$	$T_p/s$										合计
	<6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	>22	
0~0.5	0	0.007	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0.013
0.5~1.0	1.870	2.565	6.682	9.139	5.748	0.742	0.244	0.061	0.018	0.003	27.073
1.0~1.5	1.649	3.401	7.496	17.730	23.006	4.584	1.565	0.321	0.049	0.007	59.810
1.5~2.0	0.079	0.673	0.196	2.587	5.778	2.183	0.760	0.190	0.006	0	12.452
2.0~2.5	0	0.015	0.004	0.039	0.284	0.174	0.076	0.043	0.001	0	0.637
2.5~3.0	0	0	0	0	0	0	0.009	0.006	0	0	0.015
合计	3.598	6.661	14.385	29.495	34.816	7.684	2.654	0.622	0.074	0.010	100.000

2014 年波况时间序列为基准, 通过 HARES 波浪数学模型计算获得不同平面布置及防波堤不同长度时(图 3), 港内各泊位处的波况, 为后期计算不可作业率提供基础<sup>[3]</sup>。

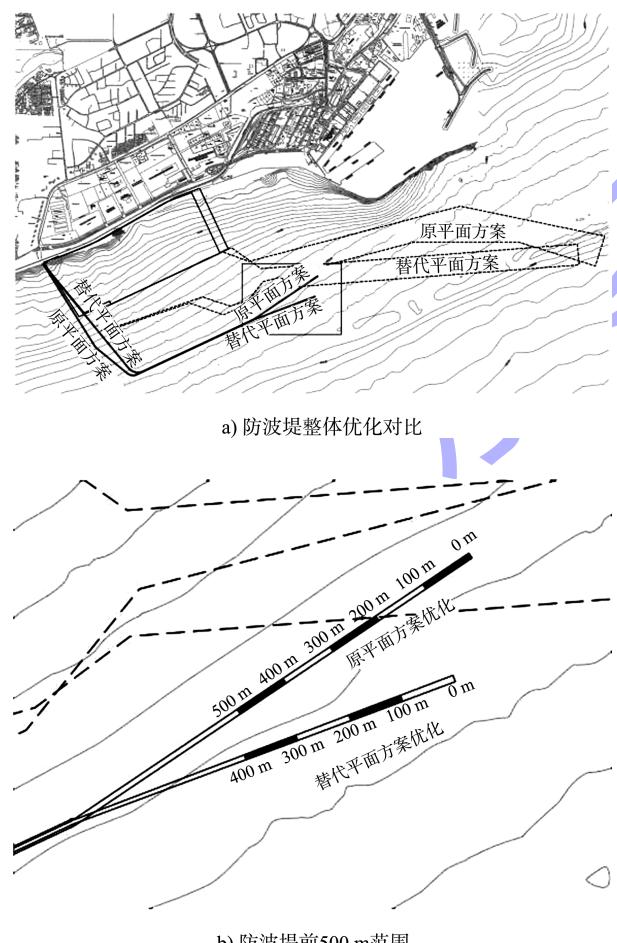


图 3 原方案和替代方案的防波堤优化

采用 Shipmooring 系泊模型对各泊位前不同波浪引起的船舶运动量和受力等进行试算, 得到可作业的临界波况为  $H_s = 0.65 \text{ m}$  和  $T_p = 13 \text{ s}$ 、 $H_s =$

0.50 m 和  $T_p = 15$  s,  $H_s = 0.30$  m 和  $T_p = 17$  s, 相比于国标规范中的集装箱船可作业波高<sup>[4]</sup>, 涌浪条件下可作业波高显著降低, 船舶作业受涌浪影响明显。综合分析后认为可按波高  $H_s$  不大于 0.58 m 作为初步判定港内波况是否满足 1% 年不可作业率的标准。

结合上一步波浪数学模型得到的 9 个不同防波堤布置条件下各泊位的波况，统计得到 23 年中波浪超过  $0.58\text{ m}$  的频率，即泊位的年不可作业率 见表 3。

表 3 防波提优化方案泊位的年不可作业率 %

方案	优化方式	泊位 1	泊位 2	泊位 3	泊位 4
原方案 (防波堤 3.848 km)	不缩短	0	0	0	0
	缩短 100 m	0	0	0	0
	缩短 200 m	0.3	0.2	0.1	0.3
	缩短 300 m	0.1	0	0.1	0.7
	缩短 400 m	0.2	0	0.2	3.8
	缩短 500 m	0.1	0.2	0.3	3.7
替代方案 (防波堤 3.658 km)	不缩短	-	-	-	-
	缩短 100 m	0.8	0.9	0.9	0.9
	缩短 200 m	0.6	0.7	1.2	3.5
	缩短 300 m	0.8	1.3	3.4	6.8
	缩短 400 m	-	-	-	-
	缩短 500 m	-	-	-	-

注：“-”指未对该方案进行计算。

通过表 3 比较, 可以得出防波堤长度在原方案、替代方案基础上分别可缩短 300、100 m<sup>[5]</sup>, 即缩短至 3.548、3.558 km。考虑替代方案有节省疏浚量且避免炸礁的优势, 后续工作以替代方案为基础展开。

进一步采用 MIKE21 BW 模型进行分析，得到

替代平面方案防波堤在 3.558 km 长时, 泊位 1~4 的年不可作业率(波高超过 0.58 m 的频率)分别为 0.23%、0.49%、0.69% 和 0.42%。因涌浪对船舶系泊有较大影响, 考虑留有一定的富余, 对替代方案的防波堤长度不再进行优化。

### 3.2 操船模拟和系泊分析

在替代平面方案的基础上, 考虑最大的设计船型为长 367 m、宽 51 m 的集装箱船, 将掉头圆直径和航道宽度减少了 25 m。优化后的掉头圆直径为 500 m、航道宽度为 225 m, 形成了优化后替代平面布置方案, 如图 4 所示。

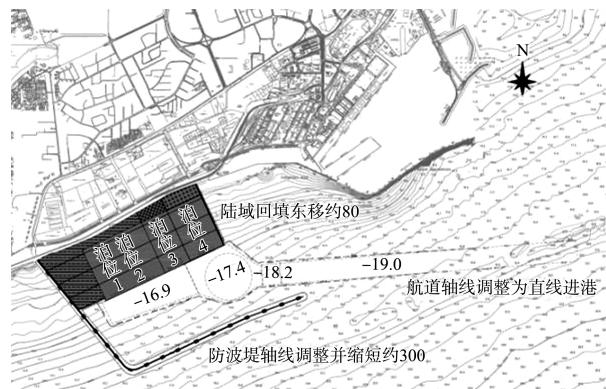
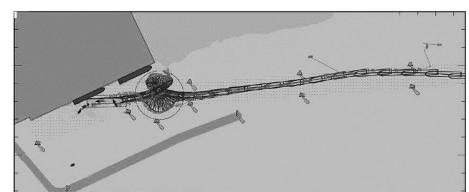


图 4 优化后替代平面布置方案 (单位: m)

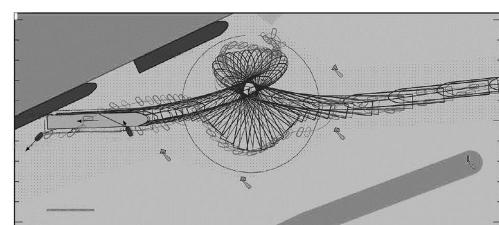
为验证优化后航道的适用性, 在欧洲著名船舶研究所开展了全任务实时操船模拟研究<sup>[6]</sup>, 船舶参数为: 总长 368.5 m, 型宽 51 m, 舵幅吃水均为 16 m, 排水量 19.85 万 m<sup>3</sup>, 纵、横向受风面面积分别为 2 152、12 670 m<sup>2</sup>, 方形系数为 0.69, 推进器数量、功率分别为 1 个、63.25 MW, 舵数量、面积分别为 1 个、96.5 m<sup>2</sup>, 最大舵角、舵转速分别为 35°、2.1°/s, 舵侧推数量、单个功率分别为 2 个、1.8 MW, 并配置 2 条 70 t 全回转拖轮。

船舶操纵研究结果表明, 优化后的航道有利于船舶进出港。试验中还验证了集装箱船在风、浪、流条件下船舶进出港和紧急工况下的船舶操纵, 并评估得到该航道平面不可航行的时间约为 0.3%, 典型船舶进港操作航迹见图 5。该方案比

原平面方案航道布置节省疏浚量 160 万 m<sup>3</sup>。



a) 整体



b) 回旋圆

图 5 典型进港操作船舶轨迹

为检验船舶在港内的系泊作业效果, 采用了船舶动态响应模拟器(dynamic vessel response simulator, DVRS)系泊模型研究针对 1% 波浪的工况进行评估。DVRS 软件包括两个模块: 船舶频率响应引擎(frequency vessel response engine, FVRE)及船舶动态响应引擎(dynamics vessel response engine, DVRE), 前者在频域内计算系泊船舶对波浪等动力的响应; 后者基于前者的计算结果, 在时域计算在波浪和风作用在系泊船舶上的力及变形响应。DVRS 输出结果是船体的六运动量数值及护舷、缆绳的应力<sup>[7]</sup>。

试验共研究了 3 种代表的设计船型, 分别为 500 TEU(泊位 1)、3 000 TEU(泊位 4)和 1.4 万 TEU(泊位 4), 泊位平面布置见图 6, 码头采用 Trelleborg SCN1800-F2.0 型护舷。3 种船型的参数见表 4。

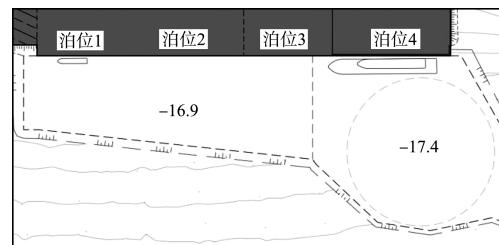


图 6 泊位平面布置 (高程: m)

表4 系泊试验采用的船舶参数

设计 船型	总长/ m	型宽/ m	吃水/ m	排水量/ 万 m <sup>3</sup>	方形 系数	重心稳 心距/m	浮心高 度/m	浮心稳 心距/m	重心高 度/m	主缆材质	最小破 断力/kN	艉缆 材质	最小破 断力/kN	系泊方式(船 缆/艏倒缆/艉 倒缆/艉缆)
500TEU 货船	100	18	6.5	0.77	0.69	0.33	3.56	3.55	6.79	高强力纱线	812	-	-	4/2/2/4
3 000 TEU 货船	230	32	12.5	6.08	0.69	1.25	6.85	5.81	11.41	超高分子聚乙烯	1 985	聚酯纤维	2 790	4/2/2/4
1.4 万 TEU 货船	367	51	16.0	19.80	0.69	2.40	8.77	11.54	17.91	超高分子聚乙烯	1 985	聚酯纤维	2 790	4/2/2/4

3种船型在水位为0.9 m、满载、风速为7 m/s的情况下, 不同1%波高条件下的运动量见表5。

此外, 还对船舶在不同载度和不同水位条件下的动力响应进行了敏感性分析。

表5 3条试验船舶的运动量

工况条件	船型/TEU	纵移/m	横移/m	升沉/m	横摇/(°)	纵摇/(°)	回转/(°)
PIANC 1995 要求	-	1.00	0.60	0.80	3.0	1.0	1.0
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=16$ s、港外波向165°N	500	0.88	0.24	0.53	2.7	0.9	0.4
	3 000	0.95	0.49	0.29	1.9	0.4	0.6
	1.4万	0.56	0.44	0.17	0.5	0.2	0.3
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=18$ s、港外波向165°N	500	0.71	0.19	0.58	2.8	1.0	0.3
	3 000	0.93	0.60	0.29	1.9	0.4	0.5
	1.4万	0.62	0.38	0.19	0.5	0.2	0.4
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=14$ s、港外波向175°N	500	0.61	0.14	0.41	2.7	0.8	0.2
	3 000	0.59	0.40	0.23	1.3	0.4	0.5
	1.4万	0.35	0.25	0.19	0.5	0.1	0.2
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=16$ s、港外波向175°N	500	0.72	0.15	0.59	2.8	0.9	0.2
	3 000	0.83	0.50	0.26	2.3	0.5	0.6
	1.4万	0.59	0.53	0.20	0.5	0.2	0.3
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=18$ s、港外波向175°N	500	0.64	0.14	0.56	2.8	0.9	0.2
	3 000	0.99	0.59	0.35	2.3	0.4	0.5
	1.4万	0.77	0.60	0.23	0.6	0.2	0.4
$H_s$ 取 $H_{1\%}$ 、 $T_p=16$ s、港外波向185°N	500	0.87	0.22	0.50	2.6	1.0	0.3
	3 000	0.67	0.48	0.28	1.6	0.4	0.5
	1.4万	0.80	0.36	0.19	0.5	0.2	0.2

表5结果表明, 在不同的1%波高条件下, 系泊船舶均满足PIANC 1995<sup>[8]</sup>规定的船舶可作业的运动量条件, 缆绳和护舷也都在其允许受力和变形范围内, 认为该平面防波堤布置对泊位掩护满足年不可作业率的要求。

### 3.3 龙骨下富余水深研究

对于进港航道水深的设计, 国标采用经验公式单独考虑航速、波浪等对船舶升沉的影响后直接将各个影响值相加得到龙骨下富余水深值(under keel clearance, UKC)。国际主流的UKC分析方法则涵盖了较多影响因素分析<sup>[9]</sup>, 见图7。

本工程采用基于概率论原理方法的UKC分析软件进行富余水深研究。UKC分析软件基于频域

上船舶响应算子(response amplitude operator, RAO)在时域上快速计算船舶运动量。该分析的输入条件为的船舶壳文件、船舶在不同位置的航速、船舶响应参数及环境条件的时间序列。输出结果为综合各因素的船舶下沉值。

采用环境条件为1993—2015年连续23年的潮位、风、浪和流的同步时间序列, 针对不同航道水深设计方案的各设计船型, 在23年的时变环境背景下, 每0.5 h模拟1次进港和出港作业, 各设计船型均模拟了约40万次进港和约40万次出港作业, 按给定的船队组合进行计算得到23年内该航道水深设计方案的可作业率。优化后替代方案平面航道的可作业率见表6。可作业率与不可作业率之和为100%。

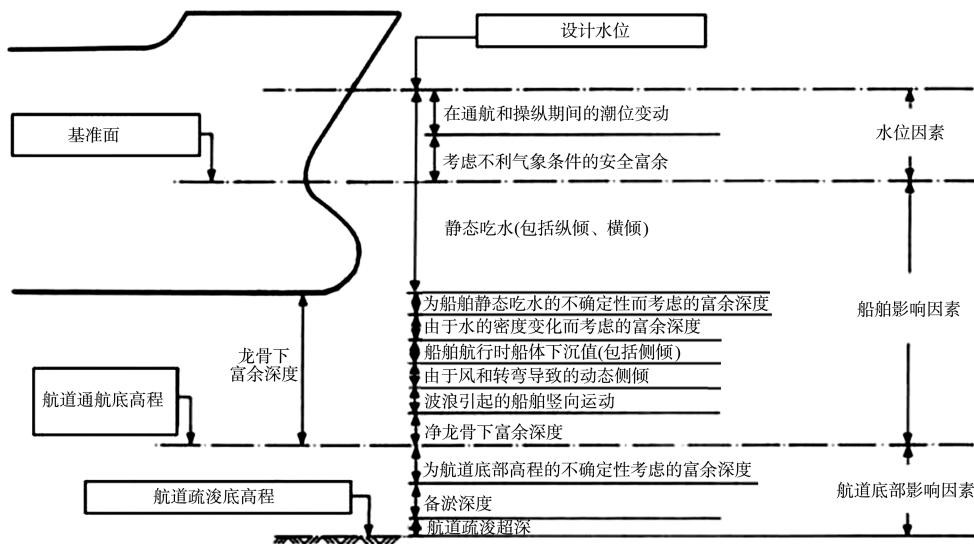


图 7 UKC 分析影响因素

表 6 UKC 软件分析得到的不同船型在航道的可作业率

载箱量	长/m	宽/m	满载吃水/m	排水量/万 t	在船队中占比/%	全年可作业率/%
13 300~14 500	367	51	16.0	19.50	7.5	93.14
7 500~13 299	350	50	15.0	14.50	40.0	99.93
5 100~7 499	300	40	14.0	11.20	30.0	100.00
2 000~5 099	230	32	12.5	6.00	15.0	100.00
100~1 999	100	18	6.5	0.77	7.5	100.00
加权平均						99.46

将外航道和过渡段的底高程统一为-18.7 m, 回旋水域和内港池设计水深不变, 优化结果如图 8 所示。此方案在航道轴线调整的基础上, 进一步节省疏浚量约 30 万 m<sup>3</sup>。得到的综合航道可使用率结果为 99.46%<sup>[10]</sup>, 即不可航行时间约为 0.5%, 加上操船试验得到的年不可作业率 0.3%, 航道的年不可作业率共为 0.8%, 满足小于 1% 的要求。

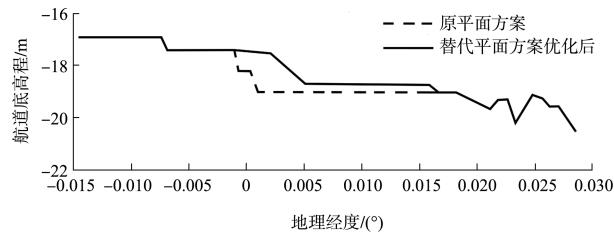


图 8 航道底高程优化结果

#### 4 结语

1) 分析了影响项目工程量和工期的主要因素, 明确以防波堤和疏浚作为平面方案优化的着力点。

2) 采用翔实、可靠的多年水文气象基础数据

进行波浪、系泊、操船及 UKC 模型分析, 准确、定量分析防波堤长度、航道水深等关键设计参数。

3) 通过模型研究, 最终优化平面方案比原平面方案防波堤缩短约 300 m, 疏浚量减少约 190 万 m<sup>3</sup>。

4) 本工程具有一定的代表性, 实施过程中的研究方法对涌浪控制海域海港工程平面布置具有指导意义, 可供类似工程参考。

#### 参考文献:

- [1] KAMPHIUS J W. Introduction to coastal engineering and management[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010.
- [2] 国际咨询工程师联合会中国工程咨询协会. 菲迪克(FIDIC)合同指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] Danish Hydraulic Institute. Global wave model set-up, calibration, validation and hindcast 1979-2014[R]. Copenhagen: DHI, 2015.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘测设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (下转第 93 页)