



长周期重力波影响下的港区平面布局策略

葛斌¹, 付博新², 杨欣², 周剑³, 施凌²

(1. 中远海运港口有限公司, 上海 200127; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 长周期重力波会显著加剧港区内系泊船舶的运动量, 影响装卸效率, 甚至引发断缆及船舶和码头损坏事故。以秘鲁钱凯项目为例, 结合世界范围内受长波影响的工程案例, 开展港区平面布局方案优化研究。通过动态系泊分析模型对不同布局方案进行对比验证, 逐步优化平面布局方案。结果表明, 长波成因复杂, 弧形海岸地形、口门尺度、狭窄水域及转角水域的波能集中是影响泊稳条件的关键因素。优化策略包括采用全包围形式的非透水构筑物掩护、合理控制口门尺度、减少狭窄水域设计及避开波能集中区。研究成果可为长波影响下的港区规划设计提供参考。

关键词: 长周期重力波; 港区平面布置; 共振; 泊稳

中图分类号: U652.7+2; P731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0078-09

Strategies for layout of port area under influence of long-period infragravity wave

GE Bin¹, FU Boxin², YANG Xin², ZHOU Jian², SHI Ling²

(1. COSCO SHIPPING Ports Limited, Shanghai 200127, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Long-period infragravity wave can significantly increase the movement of moored ships in ports, affecting loading and unloading efficiency, and even causing cable breaks and damage to both ships and terminals. Taking the Chancay project in Peru as an example, combined with engineering cases worldwide that are affected by long wave, study on optimization of the layout plan of the port area is carried out. Dynamic mooring analysis models are used to compare and validate different layout schemes, leading to gradual optimization. The results show that the causes of long wave are complex, and the key factors affecting mooring stability include curved coastal topography, entrance dimensions, and wave energy concentration in narrow and cornered waters. Optimization strategies include adopting fully enclosed impermeable structures, controlling entrance dimensions, minimizing narrow water areas, and avoiding zones with concentrated wave energy. The research results can provide a reference for the planning and design of port areas under the influence of long wave.

Keywords: long-period infragravity wave; layout of port area; resonance; mooring stability

长周期波(简称“长波”)是波周期在 30 s 以上的波动, 不同于短周期的风浪和涌浪(简称“短波”), 其周期介于风成重力波与潮波之间^[1]。长波波速较大, 能量显著, 即使振幅较小, 也容易引发近岸水域或港内剧烈的水波振荡, 特别是在入射波周期与海湾或港池固有周期接近时, 会引发共振现象, 严重影响港内泊稳条件, 甚至导致

断缆、船舶和码头损坏等事故^[2]。近年来, 随着港口规模的扩大和船舶大型化趋势的加剧, 长波对港区规划设计的影响愈发受到关注。

影响港内泊稳的长波动力因素多种多样, 主要包括: 1) 长波成因。长波的形成主要与阵风、大气压梯度变化、不规则波破碎后反射等因素有关^[3]。此外, 外海长波可通过港口口门传入港池,

收稿日期: 2024-10-28

作者简介: 葛斌(1982—), 男, 高级工程师, 从事港口水运工程管理工作。

近岸长波则可能由局部地形和波浪反射作用衍生。

2) 地形特征。弧形海湾、狭长水域等特殊地形容易引发长波共振, 导致波能集中, 显著影响泊稳条件^[4]。3) 口门尺度。港口口门的大小直接影响长波的传入和反射。口门过大可能导致更多长波进入港池, 而口门过小则可能加剧港池内的波能反射和振荡^[5]。4) 狭窄水域和转角水域。这些区域容易形成波能集中效应, 即使远离口门, 仍可能对港内泊稳产生显著影响^[6]。

国内外关于长波影响下港区泊稳的研究主要集中在以下方面:

1) 国外研究进展。国外学者较早关注长波对港区的影响, 研究内容涵盖长波的成因、传播特性及其对港内泊稳的作用机制。如 Kofoed-hansen 等利用时间域 Boussinesq 模型模拟港内长波振荡特性, 揭示了长波共振对泊稳的显著影响; Briggs 等通过数值模拟研究长波在港内的传播规律, 并提出优化港区布局以减少长波影响的策略。此外, Gabriel 等^[7]研究长波共振的抑制方法, 提出通过调整港池几何形状和防波堤布置来降低长波波高的方案。

2) 国内研究进展。近年来国内学者也逐渐重视长波对港区的影响, 研究内容主要集中在长波共振机理、数值模拟方法及工程应用等方面。王岗等系统回顾了长波共振的激发因素及模拟方法, 并指出港区规划阶段考虑长波影响的重要性; 谭忠华等^[8]研究了抛石堤对长波透浪作用的影响, 为港区防波堤设计提供参考。然而, 国内关于长波影响下港区平面布局优化的研究仍较少, 尤其是在新建港区选址和规划阶段即充分考虑长波影响的工程案例更为稀缺。

本文以秘鲁钱凯新建港区起步工程为例, 结合全球范围内受长波影响的工程经验, 通过动态系泊分析模型对不同平面布局方案进行对比验证, 探究影响泊稳条件的关键因素, 提出长波影响下的港区平面布局优化策略, 以为后续同类设计提供参考。

1 长波影响下海湾及港区布局研究案例

1.1 案例分析

已有研究表明, 受长波影响的港区通常在建设

初期未充分考虑长波的作用, 导致建成后出现泊稳问题, 需通过后期改造解决。利用 Google 地图观察、对比各海湾及港口的平面布局形态, 见表 1。

表 1 世界典型海湾和沿海港口观测的长波振动周期
Tab. 1 Observed oscillation periods of long wave in typical bays and coastal ports worldwide

海湾及港区类型	名称	所在国家和地区	振动周期 (近似值)/min
入口狭小的天然海湾、河口、潟湖或人工形成的狭长水域	圣约翰斯港	加拿大芬迪湾	42, 74
	措斯明纳港	丹麦	0.5~1.0
	瓜尼卡	波多黎各	45
	莱威克	苏格兰	28~30
	莱肖埃斯港	葡萄牙	3~5, 13~15, 20~25
	图蒂科林	印度	180
	大船渡海湾	日本本州	5~6, 12~17, 36~39
	长崎海湾	日本九州	22~25, 32~38, 40
	尼可尔逊湾	新西兰	28
	利特尔顿	新西兰	156
天然弧形海湾	花莲港	中国台湾	1.67~2.67
	圣佩德罗湾	美国加州	2~5, 9~11, 15, 27~30
	纳拉甘西德湾	美国罗德岛	44, 46
	希洛湾	美国夏威夷	7, 10, 20~25
	那不勒斯湾	意大利	17~18, 48
	阿尔及尔	阿尔及利亚	20~26
	卡萨布兰卡	摩洛哥	18~20, 35~40
	桌湾	南非	10~11, 14~17, 18~21
	伊丽莎白港	南非	16~17, 20~25, 35,
	塔马塔夫港	马达加斯加	1~2, 8~10, 15
	函馆海湾	日本北海道	21~24
	杰拉尔顿港	澳大利亚	0.4~2.5
	萨拉拉港	阿曼	0.5~5.0
	友谊港	毛里塔尼亚	0.67~3.33

注: 从观测到的振动周期值可以看出, 除包含长周期重力波, 还包含了副振荡作用下的长波。

从平面布局上观察, 结合相关研究和项目资料, 得出受长波影响的海湾及港区类型主要分 2 类:

1) 入口狭小的天然海湾、河口、潟湖或人工形成的狭长水域。这类海湾或港区多半因外海长波传入引起共振, 多为口门朝向开敞外海, 水域形状较为规则, 口门较窄, 天然掩护较好, 封闭性较好。长波外海传入港内水域并来回反射, 经过港内边壁反射的波浪在经过港湾口门处时, 部分波浪又被反射回来, 使得长波能量被限制在港湾或港池内不易消散, 当长波周期

与港湾或港池的固有周期一致或呈倍数关系时，引发共振，见图 1。

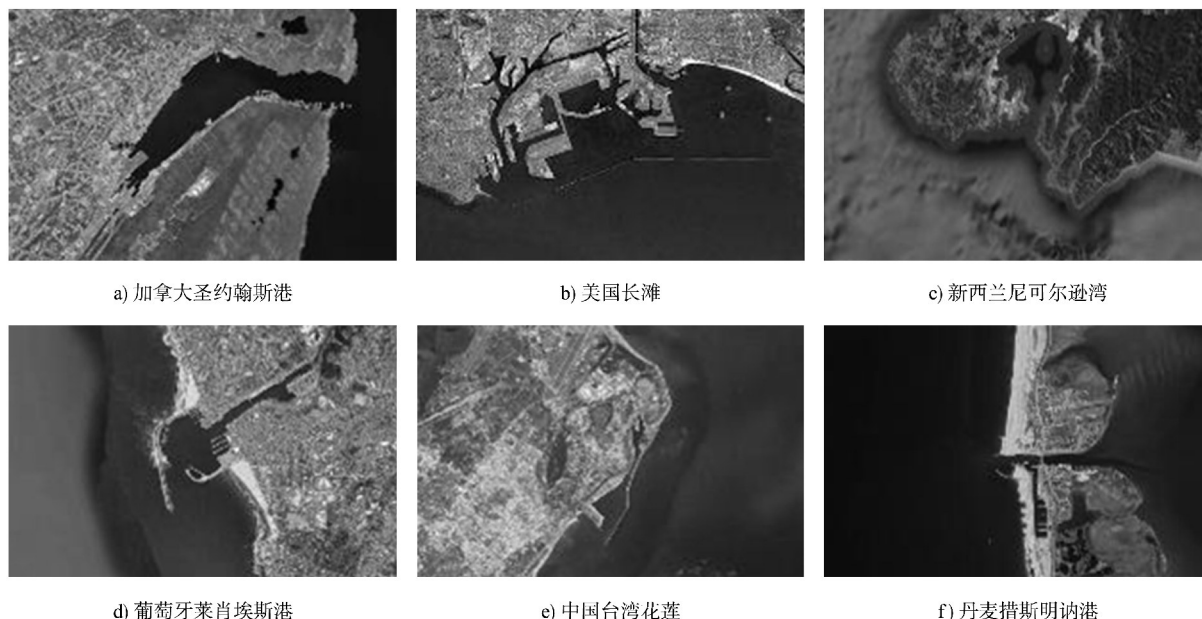


图 1 受长波影响的天然或人工形成的狭长水域

Fig. 1 Natural or artificial narrow waterways affected by long wave

丹麦措斯明讷港(图 2)通过防波堤优化改造,阻挡了长波波能传入,进而改善了泊稳条件;中国台湾花莲港(图 3)比选了波能疏导通道、局部港池浚深和港池根部消能结构方案等方式,数模结果显示波能疏导效果不佳,反而传入更多能量,而港池根部消能结构可起到改善作用^[9],但目前

尚无针对长波有效且易于实现的结构形式;长滩港一直存在长波共振,特别是 1992 年 J 泊位集装箱码头投用后,经常出现达 3 m 以上、周期数分钟的纵荡,研究得出主力船型的纵摇周期为 100 s,与港内共振周期 130 s 接近,后通过港外新增防波堤使得该泊位共振周期达到 170 s,泊稳条件得以改善。

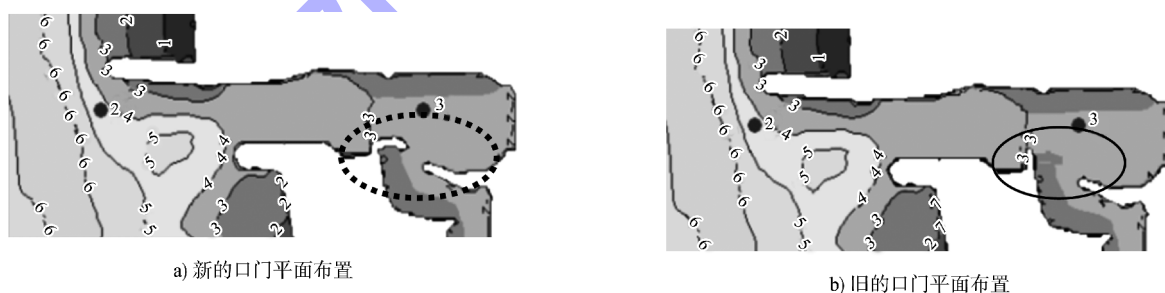
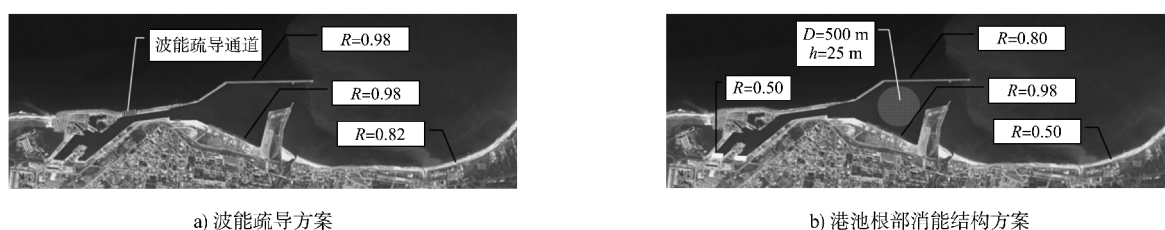


图 2 丹麦措斯明讷港工程改造方案数学模型

Fig. 2 Mathematical model of engineering modification scheme for Søsvinge Port, Denmark



注: D 为回旋圆直径, m; h 为水深, m; R 为反射系数。

图 3 中国台湾花莲港优化方案

Fig. 3 Optimization scheme for Hualien Port, Taiwan, China

2) 天然弧形海湾。码头多位于海岸两端,对短波掩护良好。多个港口外海综合波高大,港内实测波高小,但系泊船舶位移大,严重影响码头正常作业。此类天然弧形海湾水下地形由深变浅,且弧形海湾对波浪有聚拢作用,在此类水文气象和地形地貌条件下,外海传入、波波作用、波浪破碎均可能生成长波,引发水波共振,而港区恰恰建设在其影响范围内,见图4。

澳大利亚杰拉尔顿港(图5)通过数模模拟不同防波堤布置或开通波能疏导通道的方案,相比现状方案

A0,方案A7效果最佳(长波波高降低31.2%),方案A2次之(长波波高降低19.2%);阿曼萨拉港6—9月经常受到S-SE向长波(周期30~300 s)影响,根据模型研究成果,建设北防波堤后,港内长波波高大幅度减小,系泊船舶纵移可减少50%以上,改善明显^[10]。当然也不乏失败案例,如南非桌湾开普敦港建成后存在周期1~10 min的共振,引起靠泊船舶大幅晃动并导致港口口门出现激流,影响通航安全,为此在港外新建防波堤,但由于波浪周期与港湾的固有周期非常接近或呈倍数关系,反而加剧了港内共振^[3]。

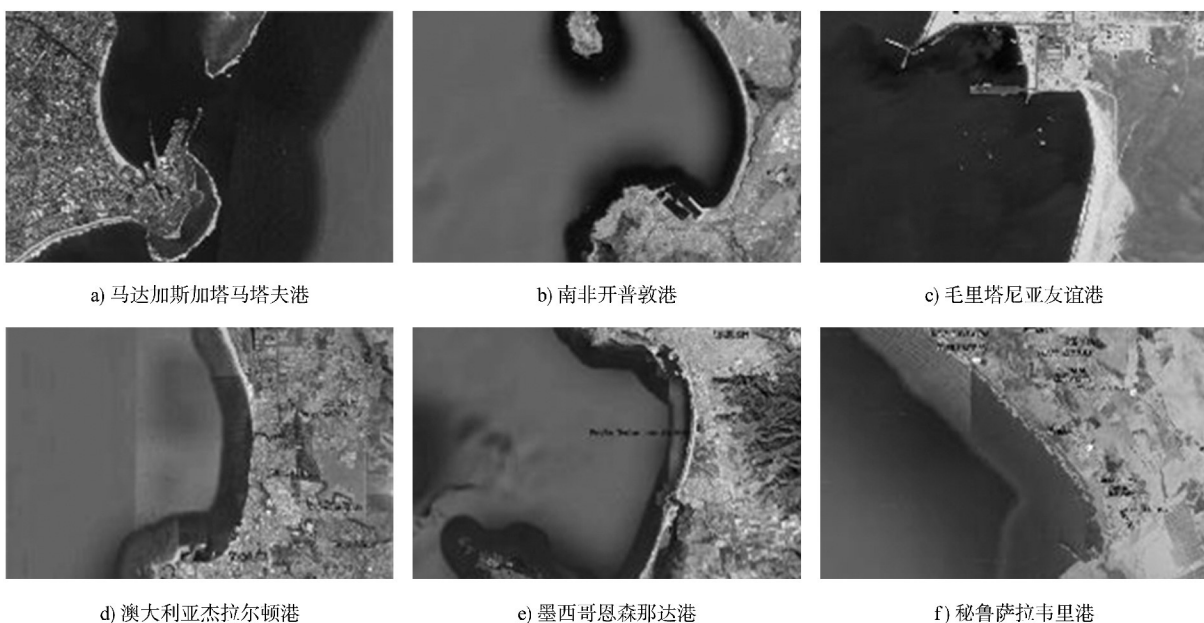


图4 受长波影响的天然弧形海湾
Fig. 4 Natural curved bays affected by long wave

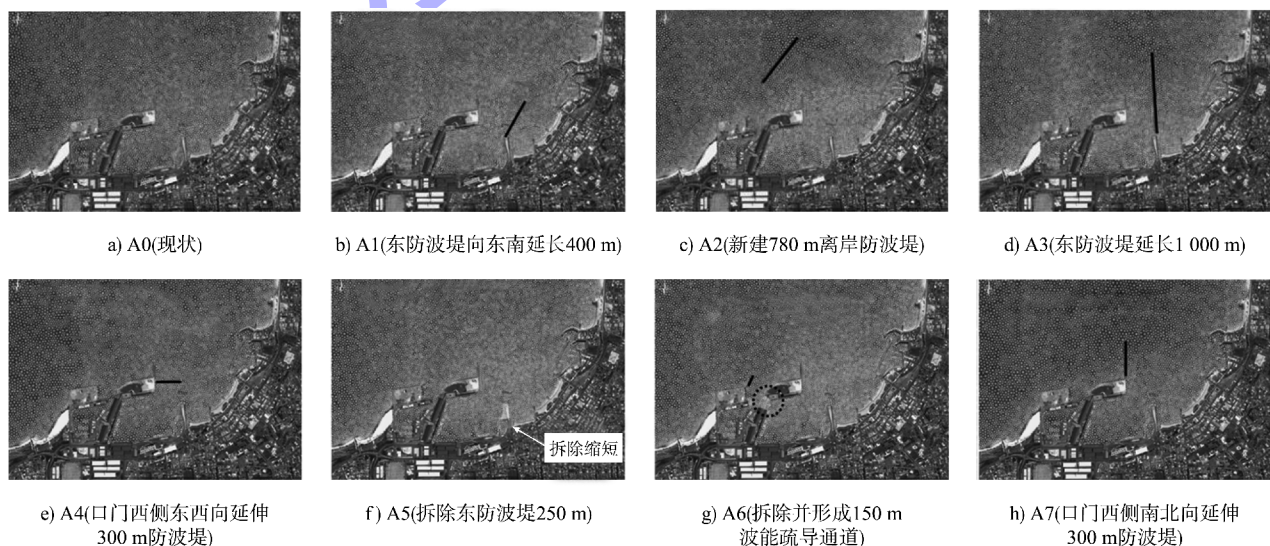


图5 澳大利亚杰拉尔顿港优化方案

Fig. 5 Optimization schemes for Geraldton Port, Australia

1.2 案例研究总结

1.2.1 已有案例研究总结

对于入口狭小的天然海湾、河口、潟湖或人工形成的狭长水域，长波的影响主要为口门传入引起的港湾共振，可能发生于形状较为规则、口门较窄、封闭性较好的港湾，阻止外部传入或改变港湾共振固有周期是较为有效的方式，而消能方式不甚理想。

一些学者通过不同的数学方法证明波群及约束于其中的长周期重力波在非线性作用下引起长波港湾共振，如 Okihiro 与 Guza 研究夏威夷的 Barbers Point 港时发现，外海长波能量仅为全部能量的 1%，而港内长波能量达 75%，是导致共振的主因；再者，长波具有较强的穿透性，可通过渗透和绕射防波堤作用于港湾内，抛石堤透射系数随波高的增大而减小，随周期的增大而增大，周期越长，船舶允许作业波高越小；还有一些研究发现，在某些条件下如口门缩窄、狭长水域与外海相连、外港对内港的庇护等，不仅无法减缓内部水域的共振反而有加剧的效果。一些研究者认为，自由长周期重力波由浪涌区域内束缚长周期重力波释放^[11]，随后在海岸线上反射产生，可能会逸

出近岸区域并向更深的水域传播，如图 6a) 所示，这些自由的长周期重力波被称为泄漏波；或者，波浪折射可以将反射的自由长周期重力波捕获在近岸区域中，这些捕获的长周期重力波被称为边缘波。如图 6b) 所示，对于随时间变化的断点机制生成的自由长周期重力波，因为向海传播的长周期重力波可能以边缘波的形式被困在近岸，或者可能以泄漏波的形式向深处传播。

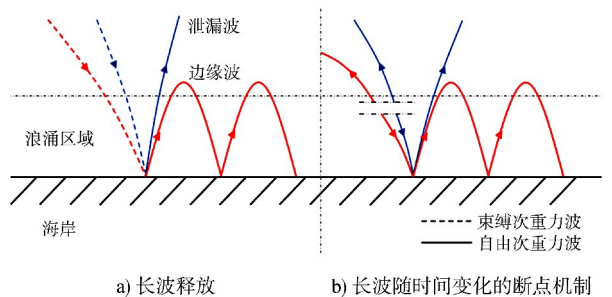


图 6 泄漏波和边缘波在近岸传播的方式
Fig. 6 Propagation pattern of leaky wave and edge wave along coast

1.2.2 关键影响因素

由上节分析可知，港内长波既可能是外海传入，也可能为近岸多种因素衍生，其成因多样且复杂。典型案例及其关键影响因素的总结见表 2。

表 2 典型案例关键影响因素
Tab. 2 Key influencing factors of typical cases

关键影响因素	典型案例	优化策略
天然海湾与狭长水域	天然弧形海湾、狭长水域易引发长波共振，导致波能集中。如夏威夷 Barbers Point 港因天然海湾形态导致长波共振，需通过调整港池布局降低波高	通过调整港池几何形状或增加防波堤减少波能集中
口门尺度与波能传入	口门过大易导致长波传入，过小则加剧港池内波能反射。如澳大利亚杰拉尔顿港通过优化口门尺寸有效降低了长波波高	合理控制口门尺度，避免波能过度传入或反射
狭窄水域与转角水域	狭窄水域和转角水域易形成波能集中，即使远离口门，仍对泊稳条件产生显著影响。如智利圣安东尼奥港在狭窄水域布置非集装箱泊位以降低泊稳要求	减少狭窄水域设计，或在转角水域布置泊稳要求较低的船型泊位

考虑到长波成因的复杂性，需要具体问题具体分析，开展多方案比选和评估，寻根源、找规律，最大限度优化设计方案。基于上述对长波的认识，在秘鲁项目伊始阶段，项目组即搜集、整理、分析世界范围内的工程案例，在港区规划和起步工程阶段，从港区布局角度着手开展平面布置方案优化研究，提出不同的平面布置方案，根据海洋水文气象数值模拟的动态系泊模型进行分析对比，通过不断调整、完

善，得到优化的平面设计方案。

2 项目背景及数学模型模拟

工程位于秘鲁钱凯岬角附近，南侧为平直的沙质海岸，岬角北侧为弧形海湾，见图 7。方案阶段采用声学多普勒流速剖面仪 (acoustic Doppler current profiler, ADCP) 原始数据的分析和结果进行长期波浪特征验证；建立深水区域长期波浪数据库，以及大小范围波浪模型，模拟钱凯湾常海况

及工程位置极端波浪条件; 进而采用 Boussinesq Wave(BW)模型评估各平面方案港内各泊位的短波和长波扰动特征^[12-13]; 然后将布局方案和设计船型放置在 BW 模型中, 进行时域动态系泊模拟, 分析模拟结果, 提出改进方案并再次代入模型, 如此往复, 直至确定推荐方案。

秘鲁钱凯海域波浪波向分布集中, 主要在 SW—SSW 向。谱峰周期 T_p 分布范围在 1~24 s, 90%的 $T_p < 17$ s, 但整体周期比较长, 平均 $T_p > 14$ s。该海域存在长波, 波周期长达 30~100 s。工程近岸水域有效波高值平均值在 1.4 m, 90%的波高值小于 2.0 m, 极少出现大浪。波浪在向海岸传播过程中长波波高有增大趋势, 短波波高有减弱趋势, 整体综合波高呈现减弱趋势。短波平均有效波高 H_{m0} 和长波平均有效波高 H_{M0} 之比数模结论为 9%~12%, 观测结论为 5%~13%, 两者能量比约 1%。长波没有明显的季节性分布, 大部分波高值在 0.1~0.3 m, 波高均值在 0.15~0.2 m, 不超过 0.5 m。

长波波周期集中分布在 100 s 附近, 波周期小于 300 s。长波分布在各个方向, 集中分布在 SW—NE 向, 波高量级不大, 基本在 0.4 m 以内, 在近岸水域岸线边界呈现峰值。

从钱凯湾卫星图(图 7)中可以看出, 钱凯湾属典型的弧形海湾, H_{m0} 大波波高遍布整个港湾水域, 弧形海湾端部波高较小; 而 H_{M0} 大波高主要分布在近岸(图 8 深色水域), 尤其在海湾中部及岬角附近水域较为密集, 岬角南端的顺直岸线大波分布逐渐减少。



图 7 钱凯湾卫星图

Fig. 7 Satellite image of Chancay Bay

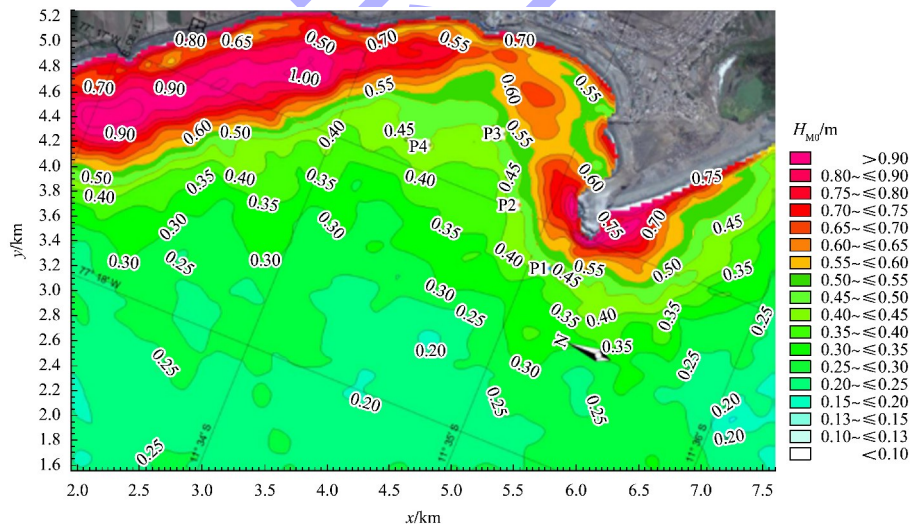


图 8 天然地形下钱凯湾长波波高分布

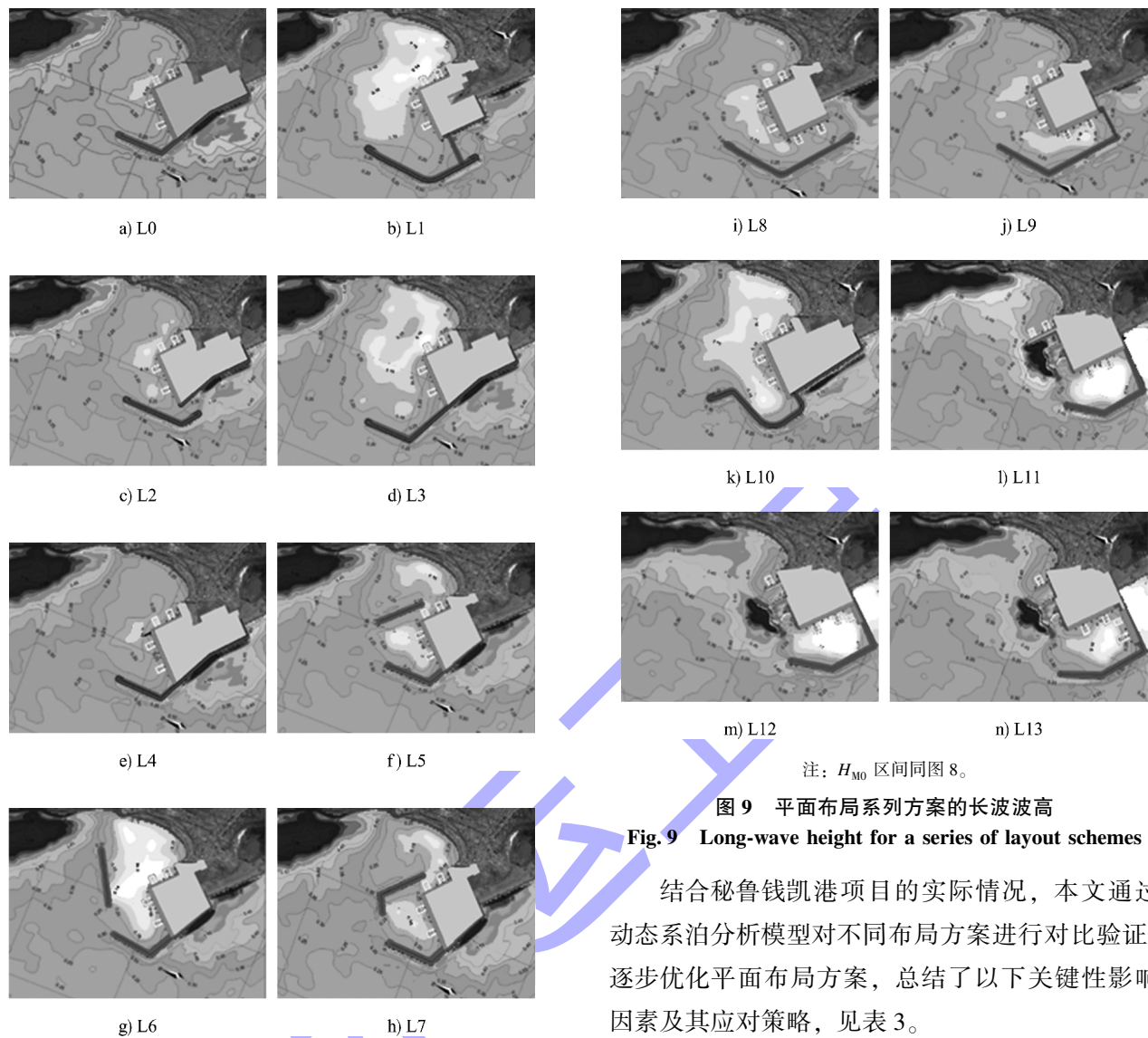
Fig. 8 Distribution of long-wave height in Chancay Bay under natural topography

3 平面布局方案演变

考虑到稳态下的长波共振与不同类型的船舶、船型大小、载质量状态均有关^[1], 很难完全规避港内固有周期, 但可以通过优化港池水域布置, 使得其固有周期在外海传入及港池内衍生的波浪周期分布中占比较小。本工程平面布局方案优化的核心是降低港内长波波高, 且

尽可能规避主力船型受长波引发港池固有周期共振的影响。

平面方案的演变过程见图 9, 上述方案对短波均具有较好的掩护效果, 但对长波效果不一。长波对港区平面布局的影响显著, 优化布局方案的核心在于明确影响布局的关键因素, 并针对性地提出优化策略。



结合秘鲁钱凯港项目的实际情况，本文通过动态系泊分析模型对不同布局方案进行对比验证，逐步优化平面布局方案，总结了以下关键性影响因素及其应对策略，见表 3。

表 3 长波条件下影响港区布局的核心因素

Tab. 3 Core factors affecting layout of port area under long-wave conditions

影响港区布局的核心因素	说明	关键性影响
长波成因及传播特性	长波的成因复杂,主要由外海波浪、潮汐及局地地形特征共同作用引发。长波不易耗散,特别是在弧形海湾和狭长水域容易引发共振,导致波能集中	长波波群的传播路径及其与港池固有周期的耦合是影响泊稳条件的核心问题
地形特征与波能集中	弧形海岸地形和狭窄水域易导致波能集中,即使远离口门区域,长波的能量仍可能在港池内形成显著影响	弧形海岸和狭窄水域的存在加剧了长波的共振效应,对泊稳条件造成不利影响
口门尺度与长波传入	港口口门的大小直接影响长波的传入和反射。口门过大可能导致更多长波进入港池,而口门过小则可能加剧港池内的波能反射和振荡	合理控制口门尺度是优化布局的关键,需在长波传入与反射之间找到平衡
泊位布置与波能分布	泊位布置位置与波能集中区域的关系直接影响泊稳条件。集装箱泊位对泊稳条件要求较高,需避开波能集中区域	泊位布置需结合波能分布特点,合理选择泊位类型和位置

初始方案 L0 口门向岸，4 个泊位的泊稳条件均不够理想，结合对长波的认识和案例研究，平面方案优化主要考虑“扩”“围”“疏”“移”4 项优化策略。“扩”：扩大港池水域范围，削弱港内水域反射和波浪相互作用的影响，提高港池水域

共振周期，但可能导致更多长波传入；“围”：尽量形成环抱式港池，需考虑合理的口门宽度，一方面口门扩大可能增加长波的传入，另一方面口门缩小可能加重港池内长波反射，导致长波不宜消散；“疏”：适当布置波能疏导通道，降低

长波波能集中;“移”:港外避开长波影响的主要区域和入射方向,港池内避开波能集中区域布置泊位。平面布局方案优化措施及方案的主要特性见表 4。

表 4 平面布局方案优化措施及方案特性
Tab. 4 Optimization measures and main characteristics of layout schemes

方案	优化措施	方案的主要特性
L1	L0 基础上“扩”大掩护水域,将泊位“移”出港池波能集中水域	2 个离岸集装箱泊位泊稳不理想
L2	L0 基础上,在港池根部波能集中水域开口“疏”能	泊稳无改善,港池淤积风险增大
L3	L0 基础上,向外海“扩”大防波堤掩护水域	2 个离岸集装箱泊位泊稳不及 L1
L4	L0 基础上,泊位直角转角处增加短防波堤	泊稳无改善
L5	L0 基础上,北侧新建距泊位较近的离岸防波堤,“围”出环抱港池,在近岸泊位考虑开口“疏”能,避免波能集中	泊稳有一定的改善
L6	L0 基础上,北侧新建距泊位较远的离岸防波堤,“扩”大防波堤掩护水域,“围”出环抱港池	泊稳大幅改善,但受沉船、渔港和排污管线搬迁及审批问题,L6 无法实施
L7	L5 基础上,“围”出更小的口门,以减少外部波能输入	泊稳有一定的改善,但不及 L5,主要由于港池范围过小,波浪反射加重
L8	L2 基础上,向外海“扩”大防波堤掩护水域,将 2 个集装箱泊位“移”至西南侧,开口“疏”能,避免和避开港池内波能集中	泊稳有一定的改善
L9	L8 基础上,封闭“疏”能开口	泊稳与 L8 相当,但港池根部情况恶化
L10	L1 基础上,防波堤布置有所变化,以节省投资	泊稳与 L1 相当,整体优于 L1
L11	L8 基础上,2 个集装箱泊位尽量南“移”,避开弧形海湾区,利用天然岬角阻隔北侧长波传入,其他散货泊位按非透水实体建设	2 个集装箱泊位泊稳大幅改善,2 个散货泊位泊稳不理想
L12	L11 基础上,其他泊位均布置在南侧港池内,仅 1 个散货泊位布置在岬角以北,且该泊位考虑透水结构,以利于长波透入码头后的水域,改善泊稳条件,岬角南北端部分别布置短堤防浪	泊稳最为理想
L13	L12 基础上,适度扩大口门宽度,“扩”大港池水域范围	泊稳不如 L12,北侧弧形海湾长波传入主导,非外海传入

为防止港池与外来长周期波产生谐振,避免共振下港内波浪振幅放大,从而影响系泊安全,在确定平面布局方案后,根据文献[1]进行港池水域自振周期验算,基本周期计算值为 333 s,根据 2 个动态系泊分析报告中基于实测资料的波浪数学模型^[14],基本周期占整个长波分布的比重较小,系泊分析结果验证表明,不可作业时长控制在可接受范围内,说明港池内的谐振可控,推荐的港口布局方案是合理可行的。

对长波影响下的港区平面布局策略,总结如下:

1) 长波的成因复杂,多种因素可能同时产生影响,且由于长波不易耗散,在近岸和港池尤其弧形海湾容易引发共振。数学模型分析结果表明,对本工程多个设计方案影响最大的是北侧弧形海湾长周期重力波作用产生的长波波群。因此,远离波群区域(L11、L12 和 L13 的港池内及港池外南侧水域长波 H_{m0} 大幅降低)或改变弧形海岸地形(L6)可有效改善泊稳条件。

2) 长波影响下,平面布局应尽可能形成非透水构筑物掩护的全包围形式,是控制外部长波传入港池的有效措施,但应特别注重对口门尺度的控制,一方面口门扩大可能增加长波的传入,另一方面口门缩小可能加重港池内长波反射,导致港池振荡。

3) 狭窄水域和转角水域易造成波能集中,长波一旦从外部传入港池内,即便狭窄水域远离口门,长波波能集中的影响也十分显著。因此,平面布局时应注意尽量避免设计成狭窄水域,或停泊水域布置时尽量避开波能集中区或布置运动量限制相对宽松的船舶类型。考虑到集装箱班轮需在规定时限内靠离泊,按不乘潮考虑,且作业条件相比大多数其他类型船舶要求更严。因此,在深入港池的转角水域可考虑布置非集装箱泊位,泊稳条件较好的岸线布置集装箱泊位。

4) 开口“疏”能可一定程度上缓解长波在狭窄水域或转角水域形成的波能集中,但由于开口后增加了港池与外部水域的连通,不能有效阻止开口外部水域的长波传入,改善效果有限。此外,

由于开口可能增加外部沿岸输沙造成港池淤积的风险。因此,开口“疏”需谨慎。

4 结论

1) 本文通过归纳世界范围内受长波影响的海湾及港区案例发现,狭长水域和天然弧形海湾区域建港易受长波影响,需在规划阶段充分考虑长波的影响。

2) 长波影响下港区平面布局优化的核心是降低港内长波波高。港区选址应远离波群区域或通过调整弧形海岸地形减少共振风险,同时港池主尺度应避免与主力船型固有周期发生共振。

3) 平面布局优化主要采用“扩”“围”“疏”“移”4项策略。“扩”:扩大港池水域范围,削弱波浪反射,但需权衡长波传入的风险;“围”:形成环抱式港池,合理控制口门宽度,减少长波传入或反射;“疏”:设置波能疏导通道,缓解波能集中,但需注意淤积风险;“移”:避开波能集中区域布置泊位,优化泊位布局。

4) 本文提出的布局优化策略为长波影响下的港区规划设计提供参考,后续研究可结合更多工程案例与数值模拟进一步验证其适用性和可靠性。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Handbook for design of sea harbour [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [2] 吴善翔, 王岗, 郑金海, 等. 美国 Nantucket 岛长周期水波共振特征研究[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2015: 754-762.
WU S X, WANG G, ZHENG J H, et al. Study on resonance characteristics of long-period water waves at Nantucket Island, USA [C]. Proceedings of the 17th China Ocean (Coastal) Engineering Academic Conference (part II). Beijing: China Ocean Press, 2015: 754-762.
- [3] 王岗, 高俊亮, 王培涛, 等. 港湾共振研究综述[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 1-13.
WANG G, GAO J L, WANG P T, et al. Review on harbor resonance[J]. Haiyangxuebao, 2017, 39(11): 1-13.
- [4] BRIGGS M J, DYKSTRA D, BALDWIN T. Modeling of harbor resonance in port of long beach [C]//The International Conference on Civil Engineering in the Oceans VI (CEO6). Baltimore: American Society of Civil Engineers, 2004: 479-493.
- [5] DARBYSHIRE M. Long waves on the coast of the Cape Peninsula [J]. Deutsche hydrografische zeitschrift, 1963, 16(4): 167-185.
- [6] KOFOED-HANSEN H, KERPER D R, Sørensen O R., et al. Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain boussinesq model [C]//Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis -WAVES Madrid: [s. n.], 2005.
- [7] GABRIEL D H, JAVIER L, INIGO L. Extended long wave hindcast inside port solutions to minimize resonance [J]. Journal of marine science and engineering, 2016, 4(1): 4010009.
- [8] 谭忠华, 陈汉宝, 杨会利, 等. 抛石堤长周期波浪透浪作用及对码头系泊条件的影响[J]. 水运工程, 2019(7): 59-65, 104.
TAN Z H, CHEN H B, YANG H L, et al. Riprap dike long period wave penetration and its influence on mooring conditions of wharf [J]. Port & waterway engineering, 2019(7): 59-65, 104.
- [9] XING X Y, LEE J J. A new strategy for harbor planning and design [EB/OL]. (2008-09-30) [2024-08-10] https://www.researchgate.net/publication/267976941_A_New_Strategy_for_Harbor_Planning_and_Design.
- [10] DHI. Infra-gravity waves at Salalah-Analyses of site measurements Khareef[R]. Denmark: DHI, 2010.
- [11] RIJNSDROP D P. Numerical modelling of infragravity waves in coastal regions [R]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [12] PRDW Consulting Port and Coastal Engineers. Chancay multipurpose terminal: long wave analysis with ADCP data [R]. Chile: PRDW Consulting Port and Coastal Engineers, 2019.
- [13] PRDW Consulting Port and Coastal Engineers. Chancay multipurpose terminal: wave agitation and long wave study [R]. Chile: PRDW Consulting Port and Coastal Engineers, 2019.
- [14] Aktis Hydraulics BV. Chancay: metocean & moored ship response study [R]. Zwolle: Aktis Hydraulics BV, 2020.

(本文编辑 王传瑜)