



长周期波下大型集装箱船锚地水深 概率设计研究

孙铁军¹, 谷文强², 祝绪阳¹, 王 烽²

(1. 中信缅甸(香港)控股有限公司, 北京 100004;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对长周期波浪影响下锚地的水深设计问题, 进行船舶在波浪作用下的竖向运动以及触底概率研究, 通过对水文条件的详细分析确定设计工况, 同时考虑风成浪和季风期的长周期涌浪, 采用 UNDERKEEL 软件开展锚地水深的概率设计, 模型计算采用标准线性波理论和势流理论。模型计算包括船舶6种方位的运动, 并考虑各方位的波浪力作用。在指定可接受的触底概率条件下, 计算得出不同波高和周期条件下20万吨级集装箱船的安全锚泊水深, 根据计算结果得出平均周期超过13.0 s的长周期波浪对于锚泊的20万吨级集装箱船竖向运动影响越来越大, 并且补充了相关规范未给出的平均周期16.0 s的长周期波浪对20万吨级集装箱船竖向运动的影响分析结果, 相关研究方法可以作为其他项目的参考。

关键词: 长周期波; 集装箱船; 锚地水深; 概率设计

中图分类号: U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0094-05

Probability design of anchorage depth for large container ships under long-period wave

SUN Tiejun¹, GU Wenqiang², ZHU Xuyang¹, WANG Feng²

(1. CITIC Myanmar(Hong Kong) Holdings Limited, Beijing 100004, China;

2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Regarding the design of anchorage depth under the influence of long-period waves, a study was conducted on the vertical motion of ships under wave action and the probability of bottoming out. The design conditions are determined through a detailed analysis of hydrological conditions, taking into account both wind-induced wave and long-period surges during monsoon periods. The probability design of anchorage depth is carried out using the UNDERKEEL software, and the model calculations are based on standard linear wave theory and potential flow theory. The model calculation includes the motion of the ship in 6 different directions and considers the wave forces in each direction. Under the specified acceptable probability of bottoming out, the safe anchorage depth of 200,000-ton class container ships under different wave heights and periods is calculated. Based on the calculation results, it is concluded that long-period wave with an average period of more than 13.0 s have an increasingly significant impact on the vertical motion of the anchored 200,000-ton class container ships. The analysis results of the impact of long-period wave with an average period of 16.0 s on the vertical motion of the 200,000-ton class container ships, which are not provided in relevant specifications, are also supplemented. The relevant research methods can be used as a reference for other projects.

Keywords: long-period wave; container ship; anchorage depth; probability design

缅甸皎漂深水港位于缅甸若开邦西海岸皎漂县, 是“一带一路”倡议下中缅经济走廊的重要项

目。缅甸皎漂深水港工程锚地水域在季风期涌浪周期达到16.0 s, 对应有效波高达到2.0~3.0 m,

收稿日期: 2024-11-20

作者简介: 孙铁军(1970—), 男, 高级工程师, 从事海外港口项目投资及管理工作。

波浪条件非常复杂,已超出现有规范锚地设计参数的取值规定范围。根据初步调研,船舶运营或管理公司一般均有船舶锚泊制度,这些制度可能要求龙骨下富余深度较20%的船舶静态吃水更大,如某些船东公司制度规定锚泊时最小龙骨下富余深度最小应为25%的船舶静态吃水。国际船级社协会规范 *History files (HF) and technical background (TB) documents for Urs concerning mooring and anchoring (URA)*^[1] 规定了锚泊时最小龙骨下富余深度最小应为50%的船舶静态吃水。《基于国内外规范和标准的海港工程总平面设计指南》^[2] 提出国内外锚地水深设计方法的对比,2021年最新发布的中国规范 JTS/T 177—2021《海港锚地设计规范》^[3] 也给出了最新的锚地水深设计方法。上述相关设计方法差异较大,尤其是针对长周期涌浪缺少相关规定和计算方法。

柯维林等^[4]在采用 UKC 模型及概率方法优化航道设计水深中以加纳特马新集装箱码头项目为例,采用 UKC 模型开展概率设计方法优化航道水深;宋伟华等^[5]在长周期波浪对船舶系泊稳定性的影响中,利用 OPTIMOOR 软件计算分析长周期波浪作用下周期、波高、入射角度对船舶系泊稳定的影响;刘擎波等^[6]在中长周期波浪作用下的系泊船舶响应特性研究中,采用数值分析方法研究系泊船舶在中长期波浪作用下的响应特性;程晗怿等^[7]在中长周期波浪作用下系泊系统动力响应试验与建模研究中,探讨中长周期波浪周期和方向对于系泊集装箱船运动响应的影响;李龙浩^[8]在长周期波对航道波浪富余深度的影响中,基于势流理论采用理论分析和数值模拟相结合的方法,研究长周期风浪和涌浪的单独和联合作用对航道波浪富余深度的影响。上述研究均针对波浪对于系泊船舶或航道中通航船舶的竖向运动响应的影响,而针对波浪对于锚泊在锚地的船舶竖向运动影响分析较少,本文采用基于概率设计方法,通过分析不同周期、波高和方向波浪作用下的船舶竖向运动确定最优设计水深,尤其针对长周期涌浪开展了深入研究和分析,通过分析发现平均周期 13.0~16.0 s 的波浪对于 20 万吨级集装

箱船的竖向运动影响很大,通过 UNDERKEEL 软件开展锚地水深概率设计方法,指定可接受的触底概率标准,得出复杂波浪环境条件下 20 万吨级集装箱船的安全锚泊水深,旨在为长周期涌浪水域的锚地设计提供参考。

1 水文条件

由于风和流对于船舶竖向运动影响很小,因此一般船舶锚地的水深仅需要研究波浪对于船舶竖向作用的影响。

缅甸皎漂深水港工程区主要受 NW—SSE 向小风区浪的影响。根据 2007 和 2022 年的波浪观测资料,波高由外海到湾内明显递减,外海 2 a 测站可观测到有效波高为 1~3 m。

缅甸皎漂深水港工程区外海 3 a 实测最大周期超过 16.0 s,且集中在 SW—W 向,相应有效波高最大可达 2.0~3.0 m。因此,设计波浪要素,有效波高考虑 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m。波浪周期考虑 5.3、7.0 和 16.0 s。

外侧水深大部分在 40 m 以上,最浅部分接近 20 m,波高对水位不敏感,因此,同一重现期各水位的波高和周期采用相同值,波长和前沿水深有关,给出了两种底高程的波长。

2 设计船型

远洋干线运输船型以 12 000 TEU 以上大型船为主,现役最大载箱量 241 960 TEU 的集装箱船主要用于远东与欧洲往来集装箱运输,3 000~5 999 TEU 的中型船主要服务于中程航线和近洋航线,1 000~2 999 TEU 以下的小型集装箱船则主要用于支线喂给运输。

结合缅甸皎漂深水港的区位条件和水深条件,集装箱最大设计船型考虑 20 万吨级。根据交通运输部关于发布 JTS 165—2013《海港总体设计规范》局部修订(20 万吨级集装箱船设计船型尺度部分)的公告,20 万吨级集装箱船设计船型尺度见表 1。锚地水深设计按照最大设计船型考虑,采用 20 万吨级集装箱码头。

表 1 20 万吨级集装箱船设计船型尺度
Tab. 1 Design ship dimensions of 200,000-ton
class container ships

船舶吨级/ DWT	设计船型尺度/m				载箱量/ TEU
	总长	型宽	型深	满载	
	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	吃水 <i>T</i>	
200 000 (175 001 ~ 225 000)	400	61.5	33.5	17.0	15 501 ~ 22 000

注:1. 集装箱码头设计标准以船舶吨级(DWT)对应的设计船型尺度为控制标准,其载箱量(TEU)为参考值。
2. 据统计,20 万吨级集装箱船满载吃水为 16~17 m;20 万吨级集装箱船设计船型的具体尺度可参照上表,并考虑各港实际情况经分析论证确定。

3 设计标准选取

国际航运协会(PIANC)规范 *Harbour approach channels design guidelines*^[9] 针对航道允许的触底概率提出规定标准为 3×10^{-5} , 谷文强等^[10] 在海港锚地最小设计水深计算方法的数学模型研究中考虑船舶在锚地锚泊时间较长, 建议锚地允许触底概率标准为 1×10^{-5} 较为合适, 本研究中采用此标准。

4 概率设计

采用 UNDERKEEL 软件针对皎漂深水港锚地水深进行概率设计分析, 该软件由英国 HR Wallingford 公司开发, 主要分析波浪对于船舶竖向运动的影响, 在船舶运动和波浪力研究基础上发展起来, 特别适用于浅水区域。模型计算采用标准线性波理论和势流理论。模型计算包括船舶 6 种方位的

运动, 并考虑各方位的波浪力作用。因此模型可以计算任何波浪输入条件下的船舶运动。

由于波浪可以用瑞利分布表示, 船舶的垂向运动也可以采用瑞利分布表示。基于瑞利分布, 船舶垂向运动振幅 A_p 可以按照式(1)计算:

$$A_p = A_{m0} \sqrt{\frac{-\ln P_z}{2}} \quad (1)$$

式中: A_{m0} 为最大的有效垂向运动振幅; P_z 为运动频率, 可以按照式(2)计算:

$$P_z = 1/N_0 N_p N_y \quad (2)$$

式中: N_0 为锚地中船舶的垂向运动次数或者与波浪会遇次数; N_p 为船舶在锚地每年平均锚泊次数; N_y 为风险重现期。

在确定船舶超过 UKC(龙骨下富余深度, under keel clearance)的概率时, 可以采用瑞利分布来表示船舶的垂向运动。假设 UKC 等于 A_p , 则可以利用式(1)反推概率 p 。例如 $A_p/A_{m0} = UKC/A_{m0} = 2$, 则 $p = \exp[-2(UKC/A_{m0})^2] = \exp[-2(2)^2] = 3.35 \times 10^{-4}$ 。这表示在此特定的 UKC 水深值下, 从统计学角度来看, 在 2 981 次船舶垂向运动中, 会发生 1 次超过 UKC 限值事件。

利用 UNDERKEEL 软件评估计算 20 万吨级集装箱船在缅甸皎漂港锚地的竖向运动, 可得出不同水深条件下的触底概率, 经过模型计算得出结果见表 2。

表 2 20 万吨级集装箱船 UNDERKEEL 评估结果
Tab. 2 Evaluation results of UNDERKEEL software for 200,000-ton class container ships

H_s/m	T_m/s	不同水深下的触底概率						
		1. 20 <i>T</i>	1. 25 <i>T</i>	1. 30 <i>T</i>	1. 35 <i>T</i>	1. 40 <i>T</i>	1. 45 <i>T</i>	1. 50 <i>T</i>
1.0	5.3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
1.5	5.3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.0	5.3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.5	5.3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
3.0	5.3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
1.0	7.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
1.5	7.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.0	7.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.5	7.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
3.0	7.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
1.0	16.0	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
1.5	16.0	1.78×10 ⁻³	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.0	16.0	0.50	1.33×10 ⁻²	9.75×10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
2.5	16.0	1.00	0.60	4.73×10 ⁻²	1.28×10 ⁻³	1.85×10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
3.0	16.0	1.00	1.00	0.80	0.10	7.26×10 ⁻³	2.80×10 ⁻⁴	<10 ⁻⁵

注: H_s 为有效波高; T_m 为平均周期; T 为船舶满载吃水。

根据 UNDERKEEL 软件计算结果, 可以看出当波浪不大于 7.0 s, 即主要为风浪影响时, 即使有效波高达到 3.0 m, 20 万吨级集装箱船在水深 1.20T(20.40 m) 条件下, 能满足锚泊要求。但是当遭遇涌浪, 波浪周期达到 16.0 s 时, 有效波高 1.5 m, 水深 1.25T(21.25 m) 才能满足 20 万吨级集装箱船的安全锚泊要求; 16.0 s 周期对应有效波高 2.0 m 时, 水深 1.35T(22.95 m) 才能满足 20 万吨级集装箱船的安全锚泊要求; 16.0 s 周期对应有效波高 2.5 m 时, 水深 1.45T(24.65 m) 才能满足 20 万吨级集装箱船的安全锚泊要求; 16.0 s 周期对应有效波高 3.0 m 时, 水深 1.50T(25.50 m) 才能满足 20 万吨级集装箱船的安全锚

泊要求。

根据现场水文观测, 在季风期即使没有发生台风情况, 缅甸皎漂深水港外侧水域波浪周期可达 16.0 s, 对应的有效波高可达 2.0~3.0 m, 因此为了保证锚泊安全, 需考虑长周期涌浪 16.0 s 及其对应的有效波高 3.0 m 的工况, 锚地水深设计应为 1.50T(25.50 m)。

5 与《海港锚地设计规范》的对比分析

JTS/T 177—2021《海港锚地设计规范》附录 A 中给出 20 万吨级集装箱船(满载状态)在不同有效波高和平均周期情况下的锚地水深系数要求, 见表 3。

表 3 JTS/T 177—2021《海港锚地设计规范》中的锚地水深系数
Tab. 3 Anchorages depth coefficient in JTS/T 177-2021 Design code for anchorage area of sea ports

船舶类型 与吨级	T_m/s	锚地水深系数				
		$H_s=1.0\text{ m}$	$H_s=1.5\text{ m}$	$H_s=2.0\text{ m}$	$H_s=2.5\text{ m}$	$H_s=3.0\text{ m}$
20 万吨级 集装箱船	4.5	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	5.0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	6.0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	7.0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	8.0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	10.0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	13.0	1.20	1.20	1.25	1.30	1.35

对比分析本项目模型计算结果和规范中的结果可以得出如下结论:

1) 对于波浪平均周期不大于 7.0 s 的工况, 结果基本吻合, 水深 1.20T(20.40 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

2) 当波浪平均周期增加到 8.0~10.0 s 时, 根据规范给出的结果, 水深 1.20T(20.40 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

3) 当波浪平均周期增加到 13.0 s 时, 根据规范给出的结果, 水深 1.20T(20.40 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 1.5 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.25T(21.25 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 2.0 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.30T(22.10 m) 可以满足

20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 2.5 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.35T(22.95 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

4) 当波浪平均周期增加到 16.0 s 时, 规范未给出结果, 根据本次计算结果, 水深 1.20T(20.40 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 1.0 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.25T(21.25 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 1.5 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.35T(22.95 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 2.0 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.45T(24.65 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 2.5 m 的锚地水域安全锚泊; 水深 1.50T(25.50 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

可以看出,当波浪平均周期不大于 10.0 s 时,波浪对于 20 万吨级集装箱船的竖向运动影响不明显。但是当平均周期增加到 13.0~16.0 s 时,波浪对于 20 万吨级集装箱船的竖向运动影响越来越大,所需要的锚泊水深也相应增大。

6 结论

1) 考虑到船舶在锚地锚泊的时间一般较长,承受的波浪数量较多,因此在进行锚地水深的概率设计时应提高允许触底概率的要求, 1×10^{-5} 较为合适。

2) 平均周期不大于 10.0 s 的波浪对于 20 万吨级集装箱船的竖向运动影响不显著,水深 1.20T (20.40 m) 可以满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

3) 平均周期 13.0~16.0 s 的长周期涌浪,对于 20 万吨级集装箱船的竖向运动有显著影响。相较于平均周期 13.0 s 的波浪,平均周期 16.0 s 的波浪对于 20 万吨级集装箱船的竖向运动影响更为剧烈,且随着波高的增大竖向运动幅度也迅速增加,导致安全锚泊所需水深增加较大,锚地水深需达到 1.50T (25.50 m) 才能满足 20 万吨级集装箱船在有效波高不大于 3.0 m 的锚地水域安全锚泊。

参考文献:

- [1] History files (HF) and technical background (TB) documents for Urs concerning mooring and anchoring (URA) [S]. London: The Nautical Institute, 2017.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 基于国内外规范和标准的海港工程总平面设计指南 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd. Design guidelines for general layout of sea port based on the Chinese and international codes and standards [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [3] 海港锚地设计规范: JTS/T 177—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Design code for anchorage area of sea ports: JTS/T 177-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [4] 柯维林, 王志刚. 采用 UKC 模型及概率方法优化航道设计水深 [J]. 中国港湾建设, 2018, 38(11): 46-51.
KE W L, WANG Z G. Optimization of channel design depth by using UKC model and probability methods [J]. China harbour engineering, 2018, 38(11): 46-51.
- [5] 宋伟华, 谷文强, 周惊慧. 长周期波浪对船舶系泊稳定性的影响 [J]. 水运工程, 2019(5): 21-26.
SONG W H, GU W Q, ZHOU J H. Influence of long period waves on ship mooring stability [J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 21-26.
- [6] 刘擎波, 谭忠华, 沈文君. 中长周期波浪作用下的系泊船舶响应特性研究 [J]. 中国港湾建设, 2023, 43(11): 31-36.
LIU Q B, TAN Z H, SHEN W J. Response characteristics of moored ships under medium to long period wave action [J]. China harbour engineering, 2023, 43(11): 31-36.
- [7] 程晗怿, 朱峰. 中长周期波浪作用下系泊系统动力响应试验与建模研究 [J]. 中国港湾建设, 2021, 41(3): 1-6.
CHENG H Y, ZHU F. Experimental and modeling study on dynamic response of mooring system under medium long period waves [J]. China harbour engineering, 2021, 41(3): 1-6.
- [8] 李龙浩. 长周期波对航道波浪富余深度的影响 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
LI L H. Impact of long-period wave on the channel wave response allowance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [9] Harbour approach channels design guidelines: report N 121 [S]. Bruxelles: PIANC, 2014.
- [10] 谷文强, 覃杰, 连石水. 海港锚地最小设计水深计算方法的数学模型 [J]. 水运工程, 2020(12): 57-62, 75.
GU W Q, QIN J, LIAN S S. Mathematical model of calculation method for minimum design water depth of seaport anchorage [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 57-62, 75.

(本文编辑 赵娟)