



长周期波海域泊位作业效率计算方法

肖鑫, 卢昭, 郭延祥, 周剑
(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 长周期波对船舶作业影响较大。针对受长周期波影响的泊位作业效率问题, 提出了一种全新的解决方法。即通过海洋、港航领域的多个数学模型、特征分析等一系列方法得到受长周期波影响的泊位作业效率。通过对某港口进行一系列的计算分析, 得出了不同控制标准下平均泊位作业效率, 验证了方法的合理性和可操作性。该方法对受长周期影响且无实测资料或实测资料周期较短的港航工程建设有重要的意义, 也为业内类似工程提供参考。

关键词: 长周期波; 系泊分析; 泊位作业效率

中图分类号: U 652; P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0131-05

Calculation method of berth operation efficiency in long period wave sea area

XIAO Xin, LU Zhao, GUO Yan-xiang, ZHOU Jian

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

Abstract: Long-period waves have a great impact on ship operations. A new solution to the problem of berth operation efficiency affected by long-period waves is proposed. That is, through a series of methods such as multiple mathematical models and feature analysis in the ocean and port, the operation efficiency of berths affected by long-period waves is obtained. Through a series of calculations and analyses of a certain port, the average berth operation efficiency under different control standards is obtained, which verifies the rationality and operability of the method. This method is of great significance to the construction of port projects that are affected by a long period and have no measured data or a short measured data period. It also provides a reference for similar projects in the industry.

Keywords: long-period wave; mooring analysis; berth operation efficiency

随着优质岸线逐渐占用殆尽, 港口建设逐渐往深海和自然条件恶劣的海域扩张, 而且近年来国内外港口断缆的事故时有发生, 因此长周期波对系泊的影响也成为业内关注的重点问题之一。目前, 国内学者关于泊位作业效率的研究通常集中在短周期的水域, 针对长周期波影响下泊位作业效率的研究很少。我国《海港总体设计规范》中只给出了周期小于 8 s 的船舶作业标准^[1], 对于这种短波周期的情况, 通常采用 OPITMOOR 软件进行系泊分析。对于受长周期波影响的码头, 由于波浪条件相对复杂、船舶运动量大, 更适合采用

动力模型的系泊分析软件。本文采用由 DHI 公司开发的 MIKE 21 MA 动态模型系泊分析软件进行系泊模拟^[2]。

1 研究方法及流程

1.1 远海波浪数学模型

对于缺乏实测资料或实测资料较少的海域, 建立 WW3 海浪数值模型, 以 CFSR 再分析气象数据为驱动, 计算工程区海域波浪要素, 计算时间段须大于 20 a。后报具体方法可参考《风浪后报系统研究与开发》^[3]等文献。

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 肖鑫(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水动力模拟工作。

1.2 工程区外海波浪特征分析

海浪模型输出变量为波高、周期、波向，每3 h输出1次，20 a的数据量非常庞大，因此需要将波浪数据进行离散，选取典型的波浪条件。

首先将所有数据导入三维图，根据散点波高、周期、波向的分布密度及范围，将其分成100~300个区，在每个分区的中心位置附近选取一个波浪条件作为代表，最终得到100~300个典型波浪条件。波向的分布特点是决定分区数量的关键，如果波向分布较为集中，分区数量可设100~200个；如果波向分布范围较大，分区数量应大于200个。

1.3 港内波浪模型

建立 MIKE21BW 模型，将典型波浪条件分别输入模型，得出港内波浪条件。

1.4 系泊数学模型

确定计算工况，将 BW 模型输出的波浪场输入 MIKE 21 MA 软件进行系泊分析。

比较系泊分析与控制标准，将典型波浪条件映射回波浪原数据，根据作业标准统计泊位作业效率。主要研究方法及流程见图1。

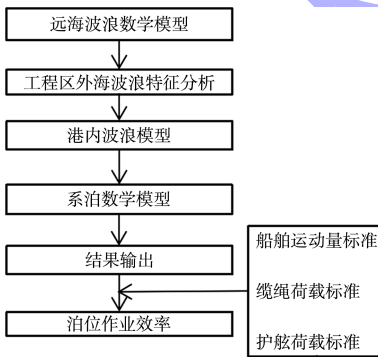


图1 研究方法流程

2 算例分析

某国外码头工程计划建设9 100 TEU 的集装箱泊位2个，码头平面布置见图2。码头面顶高程4 m，前沿水深-17.8 m。

工程海域风速较弱，全年平均风速不超过22 km/h。降雨量很小，月平均降雨量小于18 mm。流速较弱，平均流速在1.85 km/h 以内。工程海域

长周期波的作用较为明显。波高分布在1.0~2.8 m，谱峰周期90%以上分布在17 s 以下。码头外海侧A点(-25 m)31 a 波要素波玫瑰图见图3。从图3可以看出波向分布集中，主要分布在225°~240°。

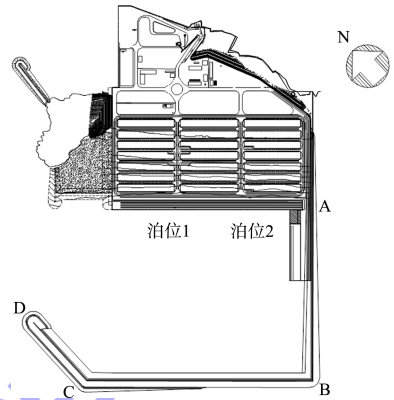


图2 码头平面布置

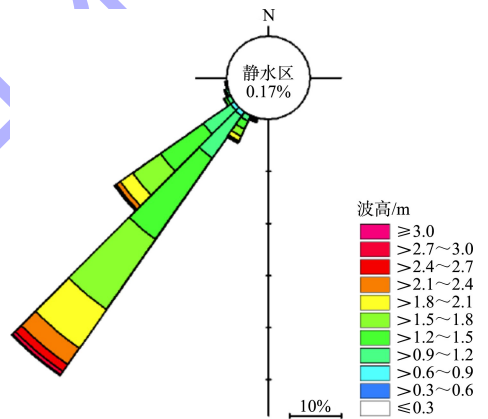


图3 A点1979—2009年波玫瑰图

2.1 远海波浪数学模型

WW3 (WAVEWATCH III) 由 NOAA/NCEP 在 Delft WAVEWATCH I 和 NASA WAVEWATCH II 的基础上开发。属于第3代海浪模式，以描述二维海浪谱演进的动谱平衡方程为基础，可以模拟以风为主要动力源的海浪发生、发展、消亡的整个过程及波浪的非线性作用^[4]。

采用海浪模型 WW3 模拟工程区远海海域1979—2009年波浪场。输入项主要包括地形网络和风场，输出项为波浪频谱和方向谱以及平均波要素。采用 CFSR 再分析风场作为背景风场。模型结果提取码头外海侧A点(水深-25 m)1979—2009连续31 a波要素，数据间隔为3 h，见图4。

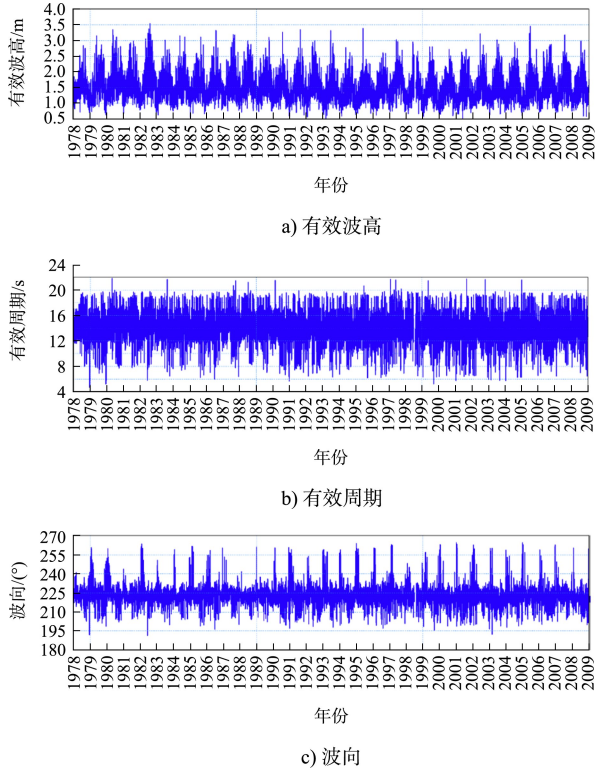


图 4 A 点 1979—2009 年波浪要素

2.2 工程区外海波浪特征分析

首先将 31 a 的波浪要素共 9 万多个数据(波高、周期、波向)导入三维图中, 见图 5。通过波玫瑰图(图 3)可以看出, 波向较为集中, 主要分布在西南向。将图中的数据分成 173 个区, 再从每个区中的中心位置附近选取一个典型波浪条件, 得到 173 个典型波浪条件。

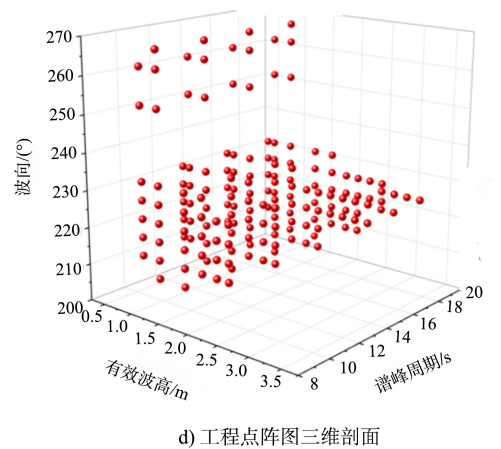
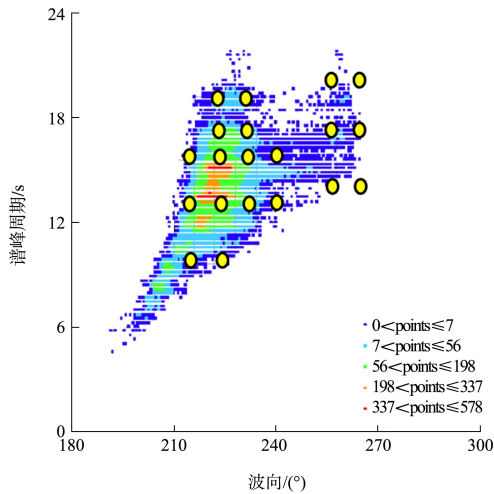
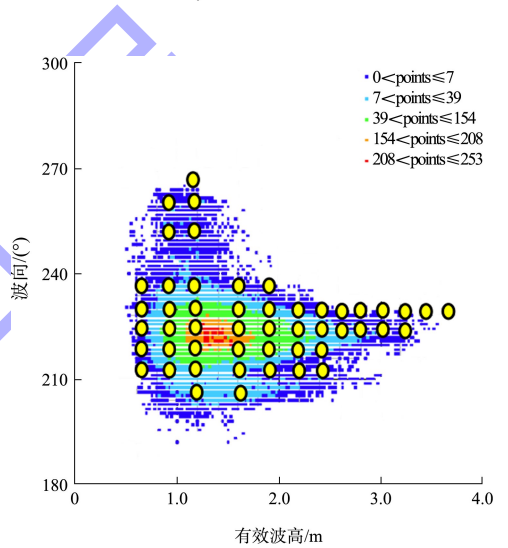
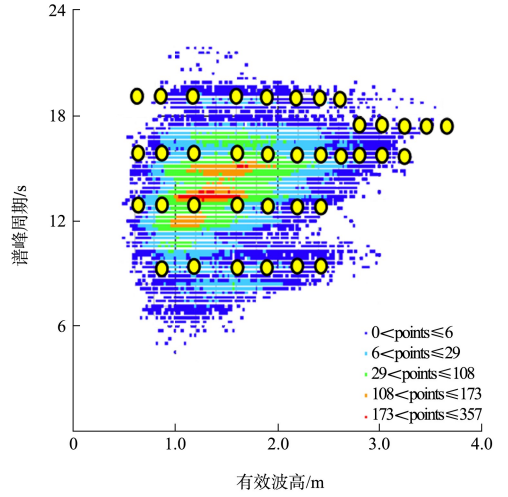


图 5 A 点 1979—2009 年的波要素序列和选取的典型代表波浪条件

2.3 港内波浪数学模型

2.3.1 BW 模型

MIKE21 BW 模型建立在 Boussinesq 方程基础上，能够较为准确地模拟近岸港区内多种波浪的组合影响，如波浪的反射、折射、绕射、浅水变形、底摩阻及破碎耗散等复杂的波浪变形现象^[5]。

BW 地形采用四边形网格，网格尺寸大小为 7.5 m×7.5 m，网格数量为 1 280×726，计算步长为 0.1 s，计算范围见图 6，反射系数的选取见表 1。在模型域应用了随空间变化的底摩阻设置，模型区域底摩阻采用 60 m^{1/3}/s，入射边界附近底摩阻采用 5 m^{1/3}/s。计算水位采用与平均潮位相等的恒定水位 0.50 m。

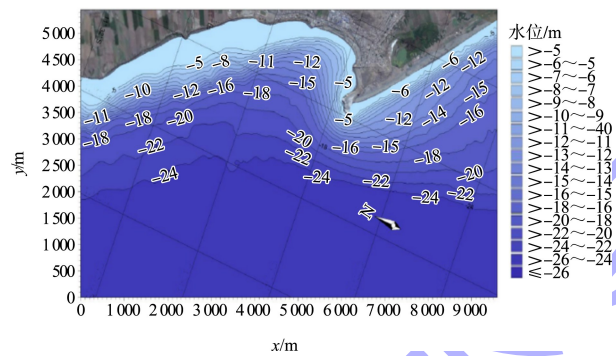


图 6 BW 模型计算范围

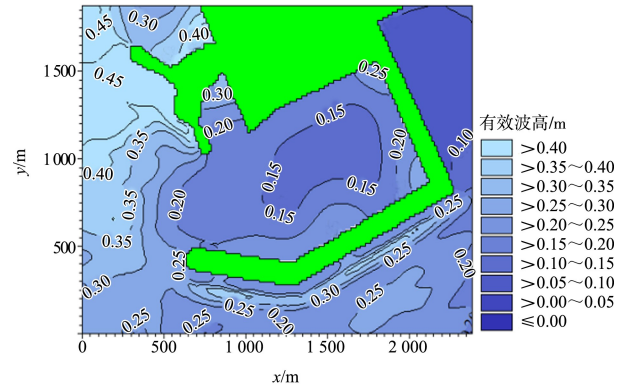
表 1 地形边界反射系数

边界类型	自然岸滩	防波堤	护岸
反射系数	0.1	0.5	0.5

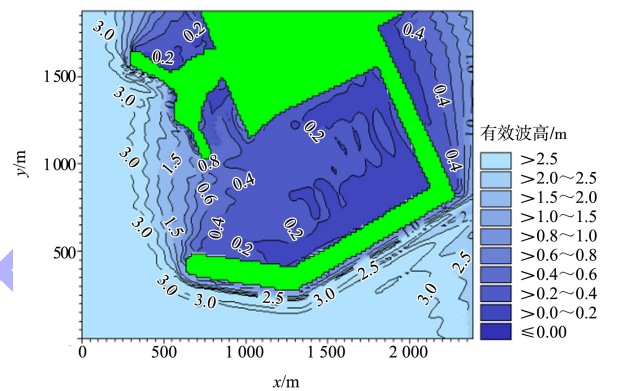
2.3.2 BW 模型计算

本次研究中，将周期为 30 s 以下的波浪定义为短波，研究中不考虑小于 6 s 的波浪。将 173 组典型计算条件分别代入 BW 模型进行计算，得出了 173 组港内波浪分布情况。

波浪条件(波高 $H_{m01} = 3.50$ m, 谱峰周期 $T_{p1} = 17.0$ s, 方向 $\theta = 227.5^\circ$)的波浪情况见图 7，将计算结果以 30 s 为界分成长波、短波波高分布。选取泊位附近的水面波动结果进行频谱分析，结果见图 8，从图 8 可以看出在低频处有能量聚集，主要集中在 0~0.02 Hz，说明港内受到了长周期波影响。



a) 短波



b) 长波

图 7 波高分布

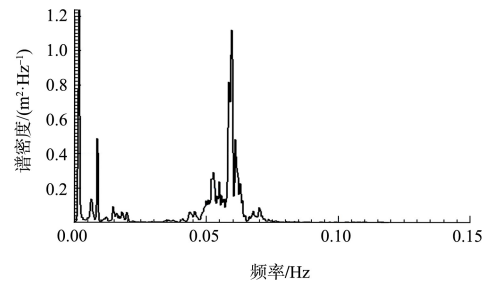


图 8 泊位附近水面波动能量谱曲线

2.4 系泊数学模型

2.4.1 船型及系泊设备

船型选取巴拿马 9 100 TEU 集装箱船，满载集装箱船型参数为：船长 349 m，型宽 45.8 m，吃水 14.5 m。关于满载集装箱船运动量限制标准参考国际航运协会 PIANC 中的规定^[6]：纵荡 < 0.4 m，横荡 < 0.4 m，垂荡 < 0.3 m，横摇 < 1.0°，纵摇 < 0.3°，艏摇 < 0.3°。

缆绳采用聚丙烯材质，直径为 88 mm，破断拉力 1 085 kN。系缆力限制标准见表 2。护舷采用锥

形护舷, 设计反力 17.3 kN, 设计吸能量 1 249 J。护舷的极限荷载为 1 706 kN。

表 2 系缆力判别条件

判别条件	极限系缆力
SWL	543 kN
大于 SWL 且小于 75%MBL	每次持续时间小于 20 s
75%MBL	814 kN

注: SWL 指安全工作负荷, MBL 指最大极限负荷。

2.4.2 系泊模型建立

系泊分析采 MIKE 21 MA 软件对船舶运动和受力进行评估。MA 由 DHI 公司研发, 用于分析受波浪、水流和风的影响下的系泊运动^[7]。其特点是可以直接调用 MIKE 21 BW 波浪模型的计算结果以反映真实的二维波浪场, 并且通过频域模块、时域模块分析得到系泊物体在风、浪、流作用下 6 个自由度的运动参数、系缆力和护舷反力。

模型中设置船型、缆绳、护舷等参数和位置信息, 缆绳布置见图 9。针对两个不同的泊位, 需要分别将对应位置的二维波浪场代入 MA 模型, 每个泊位需要计算 173 组工况。

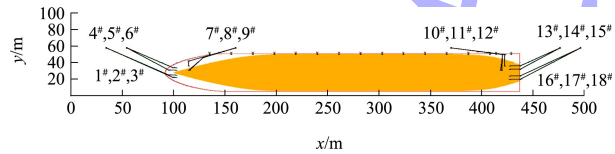


图 9 集装箱船缆绳布置

将其中 1 组典型波浪条件($H_{m01} = 3.50 \text{ m}, T_{p1} = 17.0 \text{ s}, \theta = 227.5^\circ$)的长波波力和船舶运动量(纵荡、横荡)进行能量谱分析对比, 结果见图 10。从图 10 可以看出, 长波和船舶运动量存在共振作用。

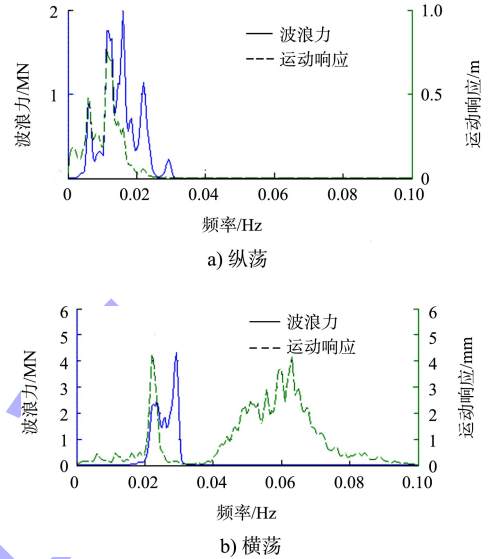


图 10 波浪力和船舶运动响应对比

2.5 泊位作业效率

缆绳、系船柱、装卸效率控制标准及泊位作业效率平均值见表 3, 对 173 组典型波浪条件进行系泊分析后, 得出集装箱船运动量统计结果。再将典型波浪条件映射回 31 a 的波浪数据中, 并统计泊位作业效率的平均值。结果显示在长周期波作用下, 码头总体布置条件较好, 码头可作业率较高。

表 3 控制标准及泊位作业效率平均值

工况	效率/%			泊位作业效率平均值/%	
	缆绳	系船柱	集装箱船装卸	泊位 1	泊位 2
1	最大系缆力小于 SWL	小于压缩极限	>95	98.60	94.10
2	最大系缆力大于 SWL, 每次小于 20 min	-	<50	99.70	98.50
3	-	-	>50	100.00	100.00
4	最大系缆力大于 SWL 且每次大于 20 min 或者 最大系缆力大于 75%MBL	超过压缩极限	-	-	-

3 结论

1) 针对无实测资料或实测资料周期较短的港区泊位作业效率提供了系统的解决方案。建议一般模拟过程为: 以 CFSR 再分析气象数据为驱动, 建立第 3 代海浪模式 WW3 海浪数值模型; 通过工

程区外海浪特征分析得到典型波浪输入条件建立映射关系, 通过 BW 波浪数学模型得到港内波况; 再使用系泊分析(MA)软件进行系泊分析, 将计算结果与控制标准比较分析, 得到泊位作业效率。

(下转第 142 页)