·综　合·

不同混合浪表征方法下系泊船运动数值模拟*

孙鹏德[1]，黄　帆[1]，杨　珏[1]，王　飞[1]，郑振钧[2,3]，马小舟[3]
（1. 中广核研究院有限公司，广东 深圳 518000；2. 海南大学 海洋技术与装备学院，海南 海口 570228；
3. 大连理工大学，海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：针对采用传统的总体表征法在描述混合浪时忽略频谱双峰特征，导致系泊船运动响应预报失真的问题，开展了基于多波系表征法的系泊船运动响应特性研究。采用数值模拟方法，以秘鲁钱凯湾实测波浪数据为输入，通过重构 3 个典型混合浪波谱，系统分析了总体表征法与多波系表征法对于系泊船响应特征模拟结果的差别。结果表明：总体表征法因过度简化能量分布，在以短波为主的工况下会人为导致能量集中，致使运动响应计算值偏大；而在含有长周期涌浪的工况下，多波系表征法能够精准分离出诱发系泊船低频共振的长波组分，有效避免了低估风险。多波系表征法能更精确地捕捉混合浪对系泊系统的动力影响，建议在复杂海况工程设计中替代传统总体表征法，以提高设计安全裕度。

关键词：混合浪；总体表征法；多波系表征法；系泊船；运动响应
中图分类号：U661.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0019-08

Numerical simulation of moored ship motions with different mixed wave representation methods

SUN Pengde[1], HUANG Fan[1], YANG Jue[1], WANG Fei[1], ZHENG Zhenjun[2,3], MA Xiaozhou[3]
(1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;
2. School of Marine Technology and Equipment, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To address the inaccuracy in predicting the motion responses of moored ships caused by the traditional overall wave representation method, which neglects the bimodal spectral characteristics of mixed waves, this study investigates the motion response characteristics of moored ships based on the multimodal wave representation method. Numerical simulations are performed, with field-measured wave data from Chancay Bay, Peru, as input. Three representative mixed wave spectra are reconstructed to systematically analyze the differences in the simulated results of moored ship response characteristics between the overall and the multimodal wave representation method. The results indicate that the overall method oversimplifies wave energy distribution. In conditions dominated by short waves, this approach artificially concentrates wave energy, resulting in an overestimation of the calculated motion response. Conversely, in scenarios involving long-period swells, the multimodal wave representation method can accurately isolate the long-wave components causing low-frequency resonance of the moored ship, effectively avoiding underestimation risks. The multimodal wave representation method can more accurately capture the hydrodynamic impact of mixed waves on mooring systems. Thus, it is recommended to replace the traditional overall representation method with it in engineering designs for complex sea states to enhance safety margins.

Keywords: mixed waves; overall characterization; multi-system characterization; moored ship; motion response

收稿日期：2025-11-21　　**录用日期：**2026-01-23
*基金项目：海岸与海洋工程全国重点实验室开放基金项目(LP2510)
作者简介：孙鹏德(1988—)，男，硕士，工程师，研究方向为核工程研究。
通信作者：郑振钧(1994—)，男，博士，副研究员，研究方向为近岸波浪非线性变形。E-mail:zjzheng@hainanu.edu.cn

水运工程

海浪通常包含多个波系，包括风浪和涌浪，每一个波系都表现出不同的方向和周期。风浪是指由当地风产生并持续受到风作用的波浪。涌浪是指在地方风力改变后仍存在的波浪或从遥远的海域传播过来的波浪[1]。海面上的强风会导致海浪大幅上升，达到几米的高度，并损坏船只和海洋结构。长波涌浪对近岸结构和港口作业有重大影响。风浪和涌浪在其衰减、动力机制和对工程的影响方面表现出不同的特性。因此，在海洋研究和应用中需要对它们区别对待[2]。

波浪的表征方法是波浪相关研究的基础。在很长一段时间里，对于波浪的表征方法采用的是总体表征法，即使用一组典型的波浪参数来表征波浪[3]（如谱峰周期、平均波向和有效波高）。然而，一组波浪参数不足以精确表征多个波系共存的复杂海况。因此，混合浪中波系的划分是必不可少的[4]。通过谱分割的方法可以实现波系的划分，根据海浪谱的维数，谱分割方法分为一维谱方法和二维谱方法。一维谱方法通过求解分离频率[5]或者使用双峰谱模型拟合谱型[6]的方式来划分波系。与一维谱相比，二维谱方法利用图像方法（如分水岭算法）[7]将海浪谱划分为独立的波系。这类方法同时考虑了波浪频域和方向的信息，能够给出更准确的结果。

研究系泊船舶在外力（如风、流、浪）作用下的运动响应有助于改善设计，避免发生严重事故，如系泊绳断裂。王炜正等[8]研究了较长周期波浪作用下系泊船舶装卸作业波浪标准；Zou 等[9]开发了一个数学模型来模拟停泊在港口码头岸壁的船舶；Ma 等[10]利用数值方法研究了波群效应对系泊船舶的影响；Rosa-Santos 等[11]设计了物理模型试验来评估护舷和预张力对船舶运动的影响；Zheng 等[12]采用混合 Boussinesq-panel 模型研究了地震诱发港湾振荡下系泊船舶的瞬态水动力特性，其中水体自由表面振荡采用全非线性 Boussinesq 波模型模拟，并进一步用于驱动船舶运动。

在系泊船舶中，液化天然气（liquefied natural gas，LNG）船的远海作业平台缺乏防波堤的保护，面临着更复杂的海况。此外，LNG 船所携带的液化气危险性更大，因此确保系泊 LNG 船的安全至关重要。胡士博等[13]采用数值模拟试验分析了岸端船对 LNG 船加注时的系泊布置；耿宝磊等[14]研究了泊位长度对 LNG 船系泊的影响；Wang 等[15]采用水动力分析软件 AQWA 研究了 LNG 船在风、浪、流联合作用下的运动响应；Ji 等[16]研究了在不同波况下停靠在码头的 LNG 船的动态响应；van der molen 等[17]研究了涌浪作用下 LNG 船的运动特性；Shi 等[18]也进行了物理实验，研究了长周期波对系泊 LNG 船的动态响应。

尽管众多学者已针对浪向、长周期波等因素对 LNG 船的影响进行了深入分析，但目前多数系泊响应研究仍习惯性地采用总体表征法来定义入射波条件，这种简化处理忽略了混合浪中不同波系能量的耦合作用，可能导致对船舶系泊张力和运动响应的评估偏离实际，难以指导高风险 LNG 码头的精确作业。本文针对上述研究不足，以秘鲁某海域的 LNG 船为研究对象，基于谱分割的结果，使用多组波浪统计参数来表征混合浪（即多波系表征法）[19]，通过对实测二维波浪谱进行精细化分割，采用混合浪的形式作为波浪输入，对比分析多波系表征法与传统总体表征法在系泊响应中的差异。研究结果旨在揭示混合浪内部动力结构对船舶运动的影响规律，为复杂海况下的系泊安全评估提供更精准的科学依据。

1 混合浪条件分析

秘鲁钱凯湾位于南美洲西海岸，直面东南太平洋。受南半球西风带和亚热带东南太平洋反气旋等气象活动的影响，不同起源的波系交汇，形成了复杂的混合浪[20]。其中来自南半球西风带的涌浪常年存在，且周期较长（可达 20 s 以上），给当地的工程建设及港口运营造成极大困扰。本文基

于 2018 年实测数据开展分析，观测点位置见图 1。港外波浪的观测时间从 7 月 19 日持续到 10 月 10 日，观测设备采用挪威 Nortek 公司的声学波浪与流速剖面仪（acoustic wave and current，AWAC）传感器，采样频率为 4 Hz，每 2 h 采集 1 次波面和流速，采集时长为 64 min。

根据实测的波浪数据，经过处理后最终得到 938 个有效方向谱。利用系泊作业规程（mooring operational procedure，MOP）方法[21]对波浪谱进行波系划分，根据所含波系数量，将波浪谱分为单峰谱、双峰谱和多峰谱 3 类。其中单峰谱、双峰谱及多峰谱占比分别为 59.9%、37.7% 和 2.4%。考虑到双峰谱占比远高于多峰谱，本文从实测数据中选取 3 个典型的具有双峰特征的波浪谱为试验对象，分别针对两种方法表征的波浪参数进行模拟。

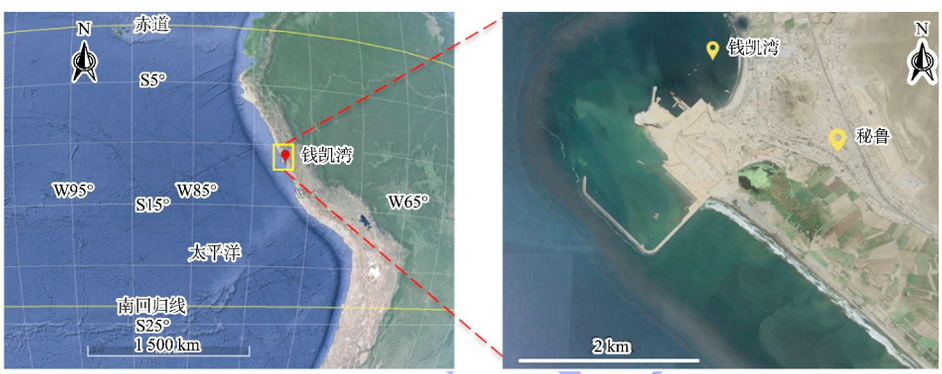
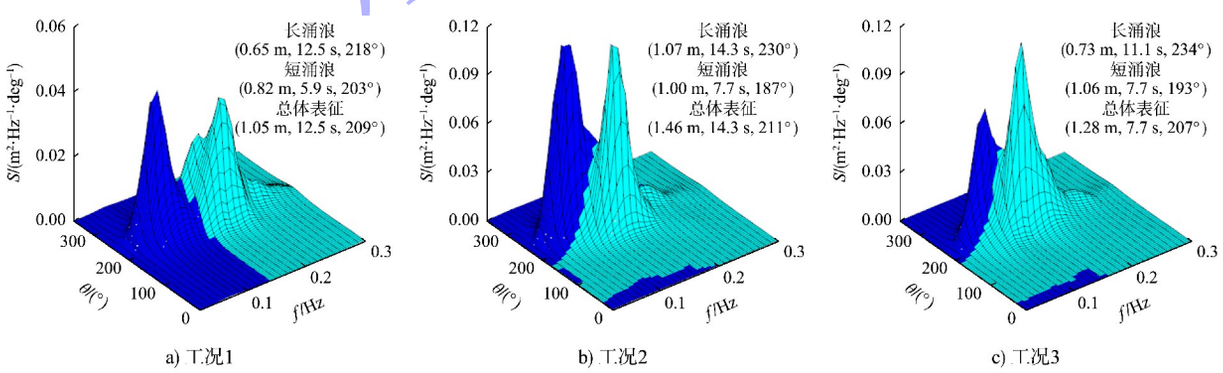


图 1　研究海域位置及波浪观测点

Fig. 1　Location of the studied sea area and wave observation points

整体表征法不考虑海浪内部的波系构成，通过对二维谱进行全频域和全方向的积分计算一组反映整体特征的波浪统计参数，对波浪进行综合性描述。多波系表征法则是利用谱分割技术识别海浪的波系组成，然后将方向、周期等特性不同的波系分别进行参数化表征（如有效波高 $H_{S,i}$、峰值周期 $T_{P,i}$、平均波向 $\theta_{m,i}$，其中 i 为波系序号），因此给出了多组波浪统计参数。3 个波浪谱的谱密度在频率和方向域中的分布情况见图 2。



a) 工况1　　b) 工况2　　c) 工况3

两种颜色区域分别表示识别出的两大波系；长涌浪和短涌浪分别代表多波系表征方法处理后的结果；S 为海浪方向谱；θ 为波向；f 为频率。

图 2　双峰谱及两种表征方法下的波浪参数结果

Fig. 2　Bimodal wave spectrum and wave parameters obtained by two representation methods

从图 2 中可以看出，使用整体表征法描述时会出现一些误差，具体说明如下。

图 2a)：谱中两个波系的波向接近，仅相差 15°，短涌浪的波能占据优势，为主波系。整体表

征法在计算平均波向方面产生的误差较小，可以忽略。然而，在确定全谱的峰值周期时，由于次波系(长涌浪)的谱峰值更高，整体表征法以该波系的周期(12.5 s)作为全谱的峰值周期，即认为波浪能量主要集中在 12.5 s 附近，而不是主波系(短涌浪)的峰值周期(5.9 s)，造成了峰值周期的错配和放大，进而导致对次波系能量的高估。

图 2b)：海浪谱由两个能量相近但波向明显不同的波系组成。如果不将各个波系分别表征，而采用整体表征法对整个谱进行积分，计算的平均波向将失真(211°)，即与任一波系的波向(230°和 187°)都不一致。

图 2c)：短涌浪为波能占据优势的主波系，且其谱峰值也显著高于长涌浪，因此整体表征法给出的全谱的峰值周期与主波系 WS2 的峰值周期(7.7 s)一致，没有出现对峰值周期的夸大。然而，整体表征法忽略了低频波系长涌浪的能量存在，尽管它在谱中并不占主导地位，但考虑其周期(11.1 s)较长，对其能量的忽略可能产生不利影响。

在总体表征中，峰值周期定义为谱密度最大值所对应的周期。在图 2a)和 2b)中，低频波系的谱密度峰值占据主导，因此总体峰值周期与长涌浪一致；而在图 2c)中情况相反，短涌浪的谱密度峰值更高，因此决定了总体的峰值周期。

2　系泊模型建立

2.1　船型和系泊布置

本文基于丹麦水利研究所(DHI)开发的系泊分析模型 MIKE 21 MARITIME(MA)[11]进行系泊船舶动力响应模拟。模拟对象为一艘 LNG 船，船舶的相关参数见表 1，船舶的网格模型见图 3，系泊布置见图 4。系泊缆绳由钢缆和 11 m 长的尼龙材质尾缆组成，每根缆绳均施加了 100 kN 的预张力，共计 12 根缆绳。护舷采用 SCN1300 型护舷，可提供 1 357 kN 反力。

表 1　船舶主要参数

Tab. 1　Main parameters of the ship

排水量/m³	吃水/m	总长/m	型宽/m	型深/m	横摇回转半径/m	纵摇回转半径/m	艏摇回转半径/m
55 392	9.8	223.8	32.4	21.4	8.95	55.95	55.95

图 3　船舶网格模型

Fig. 3　Ship mesh model

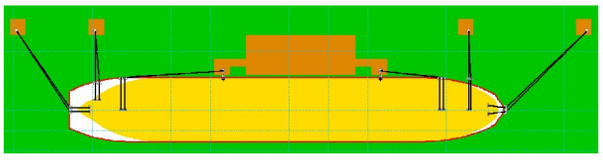


图 4　系泊布置

Fig. 4　Mooring arrangement

2.2　计算工况设置

本文中使用的各参数波的定义如下：

$$m_n = \int_0^{\infty}\int_{-}^{\pi} \pi f^n E(f,\theta)\,\mathrm{d}f\mathrm{d}\theta \tag{1}$$

$$H_S = 4.0\sqrt{m_0} \tag{2}$$

$$\theta_m = \frac{180}{\pi}\arctan\left[\frac{\iint \sin\theta E(f,\theta)\,\mathrm{d}f\mathrm{d}\theta}{\iint \cos\theta E(f,\theta)\,\mathrm{d}f\mathrm{d}\theta}\right] \tag{3}$$

$$T_{m,02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \tag{4}$$

式中：m_n 为波谱的 n 阶矩；$E(f,\theta)$ 为二维谱密度函数。

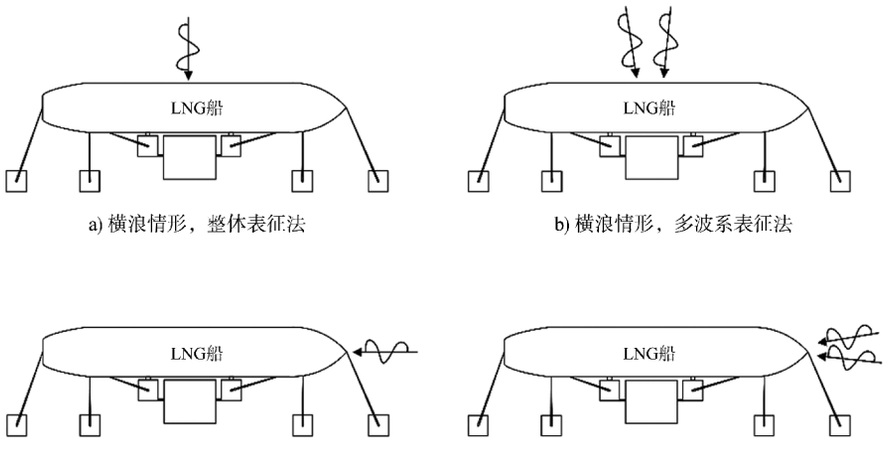
针对 3 个典型工况，分别使用两种表征方法获取相应的波浪参数，见表 2。波向设置见图 5，将入射波的波向分别设置为横浪和顺浪，以研究船舶运动响应对波浪方向的敏感性，并进一步划分为总体表征和多波系表征两种情形。

表 2　入射波浪参数

Tab. 2　Incident wave parameters

工况	多波系表征法						总体表征法		
	$H_{S,1}$/m	$T_{P,1}$/s	$D_{M,1}$/(°)	$H_{S,2}$/m	$T_{P,2}$/s	$D_{M,2}$/(°)	H_S/m	T_P/s	D_M/(°)
A-1	0. 65	12. 5	218	0. 82	5. 9	203	–	–	–
A-2	–	–	–	–	–	–	1. 05	12. 5	209
B-1	1. 07	14. 3	230	1. 00	7. 7	187	–	–	–
B-2	–	–	–	–	–	–	1. 46	14. 3	211
C-1	0. 73	11. 1	234	1. 06	7. 7	193	–	–	–
C-2	–	–	–	–	–	–	1. 28	7. 7	207

注：“-1”表示多波系表征法的参数，“-2”表示总体表征法的参数。



a) 横浪情形，整体表征法　　b) 横浪情形，多波系表征法

c) 顺浪情形，整体表征法　　d) 顺浪情形，多波系表征法

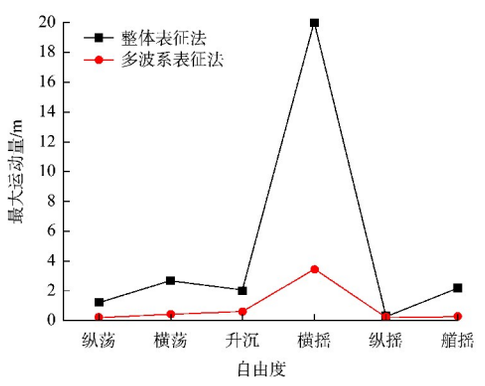
图 5　波向设置

Fig. 5　Wave direction setting

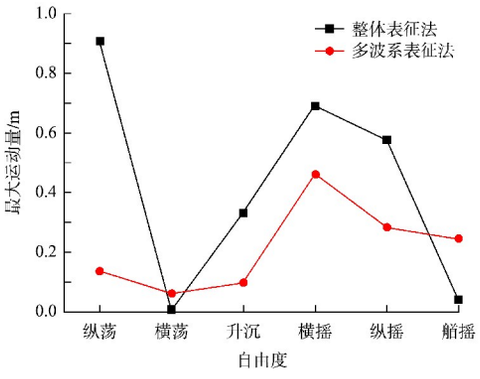
3　结果和讨论

3. 1　能量分布形态对运动响应的影响

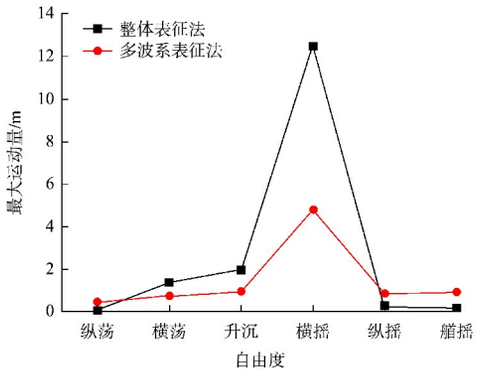
在混合浪以短波为主导的工况下，总体表征法倾向于将波浪能量在频域上进行平滑处理，从而导致能量在单一谱峰周期处的人为集中。当该人为构造的谱峰周期与船舶固有周期接近时，极易诱发虚假共振。工况 1 中横浪情形下系泊船六自由度运动的极值分布结果见图 6a)。由图 6a) 及相关数据可知，采用总体表征法时，系泊船的横摇响应出现了异常的剧烈放大，甚至导致了缆绳断裂。为解析这一现象，需结合船舶的横摇幅值响应算子进行分析。船舶的横摇响应幅值算子(response amplitude operator，RAO)曲线与极值对应的周期关系见图 7。由图 7 对比分析可知，总体表征法给出的波浪谱峰周期(12. 5 s)恰好与船舶横摇的固有周期(12. 4 s)高度重合，从而在数值计算中激发了强烈的共振响应。然而，实际海况(即多波系表征法描述)中，波浪能量是被分散在长涌浪(12. 5 s)和短涌浪(5. 9 s)两个频段的，且主能量集中在非共振区的短涌浪上。多波系表征法准确还原了这种能量分散特征，避免了与船舶固有周期的共振，因此其计算出的横摇运动幅值较总体表征法降低了 80% 以上，更符合工程实际。



a) 横浪情形



b) 顺浪情形



a) 横浪情形

图 6　工况 1 条件下系泊船六自由度运动极值分布

Fig. 6　Extreme value distribution of six-degree-of-freedom motions of moored ship under Working Condition 1

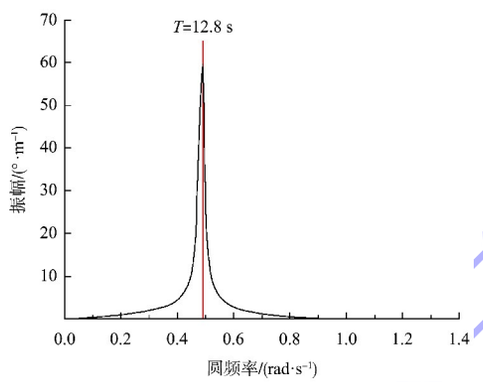
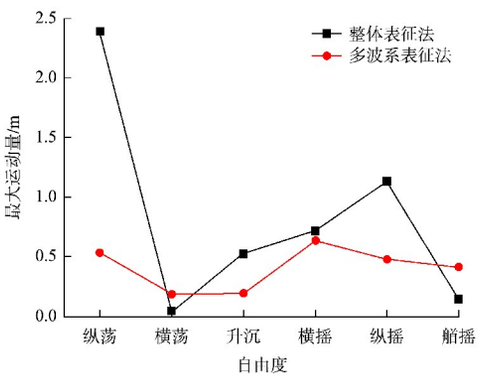


图 7　船舶横摇 RAO 曲线及极值对应周期

Fig. 7　Roll RAO curve of ship and period corresponding to the extreme value



b) 顺浪情形

图 8　工况 2 条件下系泊船六自由度运动极值分布

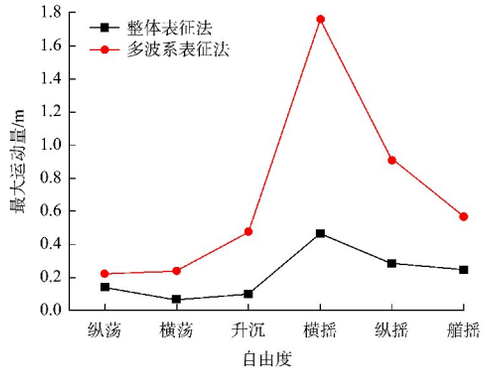
Fig. 8　Extreme value distribution of six-degree-of-freedom motions of moored ship under Working Condition 2

类似地，工况 2 在横浪情形下系泊船六自由度运动的极值分布结果见图 8a)。在该工况下，总体表征法同样因能量集中效应，导致大部分自由度的运动幅度略大于多波系表征法。但值得注意的是，由于此时驱动周期未接近共振区，未出现工况 1 中数量级的差异。此外，图 8a)显示在纵荡和纵摇自由度上，多波系表征法的响应反常地大于总体表征法，这表明当避开共振区后，多波系法中特定的波浪分量对纵向运动产生了更复杂的激励作用。

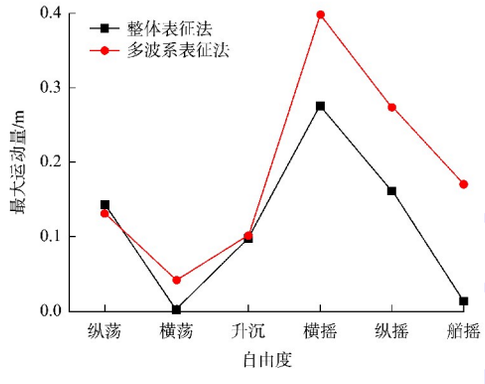
3.2　长周期涌浪成分的主导作用

当混合浪中含有能量占比虽小但周期较长的涌浪成分时，总体表征法的积分平均处理往往会抹平这一低频特征，导致对长周期动力响应的严重低估。工况 3 在横浪情形下系泊船六自由度运动的极值分布结果见图 9a)。与前两组工况截然相反，图 9a)显示在该组工况下，多波系表征法计算出的六自由度运动响应均显著大于总体表征法。究其原因，总体表征法将波谱平均后的峰值周期定为 7.7 s，完全忽略了周期为 11.1 s 的长涌浪成分。而对于大型 LNG 船而言，长周期波浪是激发其低频慢漂运动的关键因素。多波系表征法成功

分离并保留了这一长周期组分，使其主导了系泊船的动力响应，从而揭示了总体表征法在此类海况下存在偏不安全的低估风险。



a) 横浪情形



b) 顺浪情形

图 9　工况 3 系泊船六自由度运动极值分布

Fig. 9　Extreme value distribution of six-degree-of-freedom motions of moored ship under Working Condition 3

3.3　浪向对运动响应敏感性的综合分析

除波谱形态外，波浪入射方向也对两种方法的差异程度产生影响。前文所述的显著差异主要集中在对波浪频率敏感的横浪工况。3 种工况在顺浪情形下系泊船六自由度运动结果分别见图 6b)、8b)和 9b)。综合对比 3 张图可以看出，在顺浪情形下，船舶的纵荡运动固有周期较长，其运动幅度主要受波幅(能量大小)控制。因此，在总体表征法积分能量偏保守(偏大)的情况下，其纵荡响应通常略大于或接近多波系表征法的结果，见图 6b)和 8b)。虽然多波系表征法在横荡和艏摇等自由度上因波向的非对称性提供了额外的驱动力，但总体而言，顺浪情形下两种表征方法带来的运动响应差异不如横浪情形下剧烈，未出现数量级上的突变。

4　结论

1）当波浪的谱峰频率较大或者接近系泊船的固有频率时，由于整体表征法下波浪能量更加集中，会导致系泊船较大的运动响应甚至产生共振效应。相比之下，多波系表征法的波浪能量更分散，系泊船的响应会显著降低。

2）当波浪的谱峰频率较小时，多波系表征法可能会分离出较长周期的组分，而该组分将主导系泊船的运动响应，在此情况下，多波系表征法下系泊船的响应将大于整体表征法的结果。

3）不同的波浪表征方法对系泊船的响应有非常深刻的影响，准确的表征波浪可以有效地预报系泊船的响应幅度，避免系泊船因运动剧烈导致的生命财产损失。

参考文献：

[1] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(1): 107-122.

[2] GUACHAMIN-ACERO W, PORTILLA J. Prediction of dynamic responses for execution of marine operations using partitioning of multimodal directional wave spectra and machine learning regression models [J]. Ocean engineering, 2022, 262: 112157.

[3] LOBETO H, MENENDEZ M, LOSADA I J, et al. The effect of climate change on wind-wave directional spectra[J]. Global and planetary change, 2022, 213: 103820.

[4] ZHENG Z J, DONG G H, MA X Z, et al. Investigation of multimodal wave climate using spectral partitioning and wave system tracking algorithms[J]. Ocean modelling, 2024, 188: 102327.

[5] WANG D W, HWANG P A. An operational method for

separating wind sea and swell from ocean wave spectra[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2001, 18(12): 2052-2062.

[6] 朱绍华, 于文太, 李广帅, 等. 基于双峰海浪谱的风浪和涌浪分离应用研究[J]. 中国造船, 2017, 58(4): 160-167.
ZHU S H, YU W T, LI G S, et al. Separation of wind wave and swell based on double peak spectrum[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(4): 160-167.

[7] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(1): 107-122.

[8] 王炜正, 俞武华, 柳淑学, 等. 较长周期波浪作用下系泊船舶装卸作业波浪标准的试验研究[J]. 水运工程, 2025(1): 16-22, 50.
WANG W Z, YU W H, LIU S X, et al. Experimental studies on wave standard for mooring ship operation under longer period wave action[J]. Port & waterway engineering, 2025(1): 16-22, 50.

[9] ZOU Z, BOWERS E C. A mathematical model simulation of a ship moored against a quay in harbour[J]. Ocean engineering, 1995, 22(1): 25-36.

[10] MA X J, SUN Z C, ZHANG Z M, et al. The effect of wave groupiness on a moored ship studied by numerical simulations[J]. Journal of hydrodynamics, 2011, 23(2): 145-153.

[11] ROSA-SANTOS P, TAVEIRA-PINTO F, VELOSO-GOMES F. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships[J]. Coastal engineering, 2014, 85: 60-71.

[12] ZHENG Z J, MA X Z, YAN M Y, et al. Hydrodynamic response of moored ships to seismic-induced harbor oscillations[J]. Coastal engineering, 2022, 176: 104147.

[13] 胡士博, 韩强, 李朋, 等. 岸端船对船 LNG 加注的系泊布置及数值分析[J]. 水运工程, 2025(12): 81-87.
HU S B, HAN Q, LI P, et al. Mooring layout and numerical analysis for STS LNG bukering at berth[J]. Port & waterway engineering, 2025(12): 81-87.

[14] 耿宝磊, 李伟迁, 李焱, 等. 不同泊位长度对 LNG 船系泊的影响[J]. 水运工程, 2019(6): 39-45.
GENG B L, LI W Q, LI Y, et al. Effect of different berth lengths on LNG ship mooring[J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 39-45.

[15] WANG Z Y, WANG C Z, HOU Q F, et al. A hydrodynamical study on motions and mooring loads of the small scale LNG carrier[C]//OCEANS 2019- Marseille. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.

[16] JI C Q, WICHERS J E W. The behaviour of LNG carrier moored to a jetty exposed to waves, swell, unsteady wind and current[J]. China ocean engineering, 1999, 13(1): 81-92.

[17] VAN DER MOLEN W, LIGTERINGEN H, VAN DER LEM J C, et al. Behavior of a moored LNG ship in swell waves[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2003, 129(1): 15-21.

[18] SHI X Y, ZHANG N C, CHEN C Y, et al. Experimental study of characteristics of motions of a large mooring ship in long-period waves[J]. Journal of marine science and technology, 2013, 22: 240-246.

[19] SAULNIER J B, PREVOSTO M, MAISONDIEU C. Refinements of sea state statistics for marine renewables: a case study from simultaneous buoy measurements in Portugal[J]. Renewable energy, 2011, 36(11): 2853-2865.

[20] LOBETO H, MENENDEZ M, LOSADA I J, et al. The effect of climate change on wind-wave directional spectra[J]. Global and planetary change, 2022, 213: 103820.

[21] CHEN Z Z, ZHANG L G, ZHAO C, et al. A practical method of extracting wind sea and swell from directional wave spectrum[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2015, 32(11): 2147-2159.

（本文编辑 王传瑜）