

# Rec. 34 标准波浪数据更新对船舶波浪载荷的影响

徐敏<sup>1,2</sup>

(1. 中国船级社规范研究所, 上海 200135;  
2. 船舶与海上设施结构安全实验室, 上海 200135)

**摘要:** 国际船级社协会(IACS)更新了北大西洋波浪散布图及补充要求。在对比新旧波浪散布图差异的基础上, 以散货船、油船、集装箱船、矿砂船、液化气体船、汽车运输船和客船等系列主流船型作为实例, 通过波浪载荷长期极值预报, 分析散布图更新对船舶波浪载荷的影响。结果表明: 相比原北大西洋波浪散布图, 新散布图及补充要求降低了船舶的波浪载荷, 不同船型的影响存在一定区别, 减少幅度大致在 0~40% 范围内。本研究结果为新散布图下的船舶波浪载荷设计极值的确定提供了参考。

**关键词:** 国际船级社协会; 北大西洋散布图; 波浪载荷; 长期预报

中图分类号: U661.43 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.007

## Impact of Rec. 34 standard wave data update on ship's wave loads

XU Min<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Rules & Research Institute of CCS, Shanghai 200135, China;  
2. Ships and Offshore Installations Structural Safety Laboratory, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The International Association of Classification Societies has updated the North Atlantic wave scatter diagram and supplementary requirements. A series of ships, including bulk carriers, oil tankers, container ships, ore carriers, LNG carriers, PCTC ships and passenger ships, were used to analyse the influence of the updated wave scatter diagram on a ship's wave load through long-term wave load prediction. The results of the analysis show that, compared with the original North Atlantic wave scatter diagram, the new diagram and supplementary requirements have a different impact on different ship types, typically decreasing by 0~40%. The results of this study provide a reference for determining the extreme wave load of ships above the new scatter diagram.

**Key words:** IACS; North Atlantic wave scatter diagram; wave load; long-term prediction

国际船级社协会(International Association of Classification Societies, IACS)在1992年发布并于2001年修订了建议书 No. 34 北大西洋标准波浪数据(简称 Rec. No. 34 Rev. 1<sup>[1]</sup>), 该建议一直作为 IACS 制定波浪载荷统一要求的基础波浪数据, 并在业界广泛使用。2016年国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)对 IACS 审核中, 专家提出由于地球变暖, 全球平均波高应该增大和出现了更多的极端天气, 因此, 目前的 Rec. No. 34 Rev. 1 数据过时, 要求 IACS 对其更新维护。对此, IACS 制订了针对该意见的纠正计划。根据该计划, IACS 于

2017年成立工作组来负责对 Rec. No. 34 Rev. 1 的更新。船舶对恶劣天气有一定的规避行为, 但其受到多种因素的影响, 无法用统一的模式来描述。工作组经过研究并建立一套新的方法, 即通过将船舶位置信息即 AIS 数据与最新统计的海况数据在时间和空间上进行匹配, 从而得出航行于北大西洋的船舶经历的海况, 以此制定了新的北大西洋波浪散布图(简称 Rec. No. 34 Rev. 2)<sup>[2]</sup>。新波浪散布图于2022年底获得 IACS 通过而发布。由于新的波浪散布图基于最新的浮标监测、卫星监测和数值后报海况数据, 并考虑船舶的规避行为, 因此与船舶实际航

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4300101; KGWRSR20230008)

作者简介: 徐敏(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为波浪载荷、船体结构分析。E-mail: xumin@ccs.org.cn

引用格式: 徐敏. Rec. 34 标准波浪数据更新对船舶波浪载荷的影响[J]. 中国航海, 2025, 48(2): 45-51.

XU M. Impact of Rec. 34 standard wave data update on ship's wave loads[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 45-51. (in Chinese)

行更加匹配,数据更加准确、合理。但新的波浪散布图在形式和波浪统计资料组合分布上也与原散布图有比较大的差异,势必会对未来海船结构规范标准及设计产生深远的影响,需尽快开展研究以应对这一变化。本文首先对 Rec. No. 34 Rev. 1 和 Rec. No. 34 Rev. 2 两个散布图及补充要求进行差异性对比,总结出 5 个主要差异。然后,通过选取散货船、油船、集装箱船、矿砂船、液化气体船、汽车运输船和客船这些主流船型作为样船,开展 2 种散布图下船体结构典型位置的波浪载荷长期预报极值计算,分析散布图更新对海船波浪载荷的影响。

## 1 波浪散布图及其用途

航行于海上的船舶,在其整个服役期中,可能会以各种不同的航速、不同的航向角和不同的装载状况遭遇各种不同的海况。波浪载荷是评估船体结构安全性的关键性载荷。波浪载荷的极值预报,最常用的是基于频域载荷响应的谱分析法,分为短期预报和长期预报两类。戴仰山等<sup>[3]</sup>在《船舶波浪载荷》指出,短期预报的时间范围为 30 min 到数小时,在此时间内,船的装载状态、航速、航向角和海况都可认为是固定不变的;长期预报的时间范围是数年或整个寿命期,在此时间内,上述因素均会发生变化,显而易见,长期预报是由许许多多的短期预报组成。DENIS 等<sup>[4]</sup>提出船舶在海浪中的运动和载荷可按照随机海浪力作用下(输入),经过船舶线性动力系统的传递所产生的随机响应(输出)来确定。当对船舶波浪载荷进行长期预报时,如果不具体指明计算中所选取的海浪谱形式与载荷传递函数的确定方法以及分析中采用的海浪长期统计资料,将会使所得结果存在很大的不确定性。海浪谱和海浪长期统计资料是进行波浪载荷长期预报的 2 个基本输入条件。针对海浪谱,当前业界开展广泛的研究,如:朱绍华等<sup>[5]</sup>基于双峰海浪谱开展风浪和涌浪分离应用研究;杨志钢等<sup>[6]</sup>开展海浪谱的海浪仿真;MAZZARETTO 等<sup>[7]</sup>开展 JONSWAP 在沿海海域的适用性研究;米晓林等<sup>[8]</sup>对 JONSWAP 谱海面散射特性受相关参量的影响进行分析;张学敏等<sup>[9]</sup>开展基于 JONSWAP 谱的海面浪形模拟。针对海浪长期统计资料,研究时通常将海浪长期统计资料汇总,继而离散成由有义波高  $H_s$  和平均跨零周期  $T_z$  组合的海浪离散图该离散图,被称为波浪散布图。当前业界也已发展了许多波浪散布图。在 IACS 层面,在 Rec. No. 34 Rev. 2 发布之前,一直将 Rec. No. 34 Rev. 1 包含的北大西洋波浪散布图和 Pierson-

Moskowitz 谱作为无限航行船舶波浪载荷制定的波浪环境基础。

## 2 Rec. No. 34 Rev. 1 和 Rec. No. 34 Rev. 2 波浪散布图差异分析

根据 IACS 公布的技术背景资料<sup>[10]</sup>,对比 Rec. No. 34 Rev. 1 和 Rec. No. 34 Rev. 2 建议案的内容,本文分析得到 2 个波浪散布图的差异主要表现在 5 个方面:

### 2.1 海况数据源

1) Rec. No. 34 Rev. 1 散布图的海况数据来源于 100 多年来船上人员的肉眼观测,数据最新到 1984 年,虽然应用了一些校正,但这些视觉观察的准确性有限,特别是关于波周期。

2) Rec. No. 34 Rev. 2 散布图的海况数据来源于法国海洋开发研究所近 8 a 用于地球物理和其他应用的综合海浪数据。该数据基于数值后报技术,与测量结果之间的误差小于 15%,具有比视觉观测更高的模拟精度。同时,Rec. No. 34 Rev. 2 散布图还把海量船舶航行位置信息与海况数据进行匹配,使船舶规避恶劣海况的行为更加清晰。

### 2.2 海区范围的选择

根据 HOBGEN 等<sup>[11]</sup>提供的全球海况统计资料(Global Wave Statistics, GWS),全世界海区共分成 104 个。经对比分析,虽然 Rec. No. 34 Rev. 1 和 Rec. No. 34 Rev. 2 都选择北大西洋海域作为船舶航行最恶劣的目标海域,但 2 个散布图的海区有所差异。Rec. No. 34 Rev. 1 散布图的海区范围是 8/9/15/16 海区,IACS 根据对船舶位置信息的统计和研究,将 Rec. No. 34 Rev. 2 散布图海区范围确定为 8/9/15/16/24/25 海区,相对 Rec. No. 34 Rev. 1 增加了 24 和 25 两个海区。通常,选择一个天气更恶劣的小区域将产生包含更多高海况的散布图。扩大海区范围后,Rec. No. 34 Rev. 2 海况程度有所下降。

### 2.3 散布图中海浪谱的表达形式

1) 经对比分析,Rec. No. 34 Rev. 1 给出的海浪谱为 Pierson-Moskowitz 谱,其海浪谱的公式见式(1),扩散函数取为  $\cos^2\theta$ , $\theta$  为组合波与波浪主方向的夹角。

2) Rec. No. 34 Rev. 2 给出的海浪谱为 JONSWAP 谱,其海浪谱的公式见式(2),扩散函数取为  $\cos^3\theta$ 。JONSWAP 谱相比 Pierson-Moskowitz 谱来说为窄谱。根据海浪谱的理论,当采用更高阶的扩散函数和更大的谱峰参数后,海浪谱将变得更窄,使船舶载荷响应的能量更加集中,出现更大的响应



式(3)和式(4)中: $H_{1/3}$ 为有义波高; $T_z$ 为平均跨零周期; $i$ 为第*i*个海况; $\beta_j$ 为浪向角; $v_k$ 为航速; $p_i(H_{1/3}, T_z)$ 为海况概率; $p_j(\beta)$ 为浪向角概率; $p_k(v)$ 为航速概率。

周期法在短期分布函数和平均跨零周期间需建立关系为

$$\sum_n \frac{p_n \cdot R}{T_n} (1 - P_n(X_R)) = 1 \quad (5)$$

式(5)中: $n$ 为第*n*个浪向、航速、波高和周期下的海况; $p_n$ 为海况概率与浪向角概率的乘积; $R$ 为周期即年限; $s$ ;  $T_n$ 为载荷响应的平均跨零周期; $s$ ;  $P_n(X_R)$ 为短期分布函数见  $F_0(x)$ ;  $X_R$ 为长期极值。

### 3 Rec. No. 34 Rev. 1 和 Rec. No. 34 Rev. 2 波浪散布图对实船波浪载荷影响分析

#### 3.1 样船及其主参数

在分析并总结了图1和图2及补充要求的差异后,本文通过搜集选取22艘样船,开展满载和压载2种典型装载工况下的波浪载荷长期极值预报,来比较2种散布图对船舶波浪载荷的影响。系列样船的船舶类型组成见图5,样船部分主参数如船长*L*、船宽*B*、结构吃水系数*T*、方形系数*C<sub>b</sub>*和水线面系数*C<sub>w</sub>*等的分布范围见图6~图8。

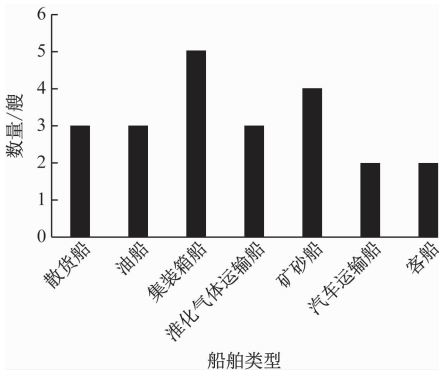


图5 船舶类型组成  
Fig. 5 The types of ship

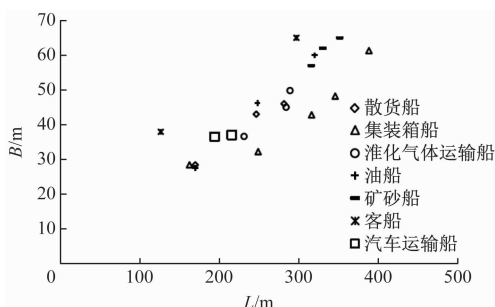


图6 *L*和*B*分布范围

Fig. 6 The distribution range of *L* and *B*

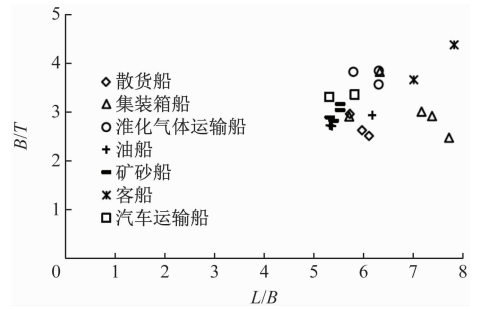


图7 *L/B*、*B/T*分布范围

Fig. 7 The distribution range of *L/B* and *B/T*

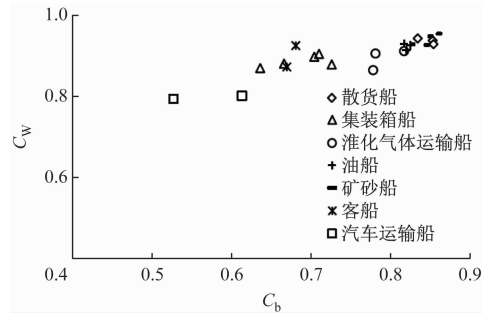


图8 *C<sub>b</sub>*、*C<sub>w</sub>*分布范围

Fig. 8 The distribution range of *C<sub>b</sub>* and *C<sub>w</sub>*

#### 3.2 样船计算及分析

由于北大西洋散布图及要求更新之后, IACS明确是基于船舶设计寿命这一目标来确定载荷极值,因此,比较2种散布图对船舶波浪载荷的影响采用的是周期法预报方法,周期法设定的年限为25 a。经过对系列实船满载和压载2种典型装载工况下的波浪载荷长期预报,分别获得波浪载荷各载荷分量的长期预报极值。通过引入折减系数*R<sub>i</sub>*来反映新散布图对波浪载荷的影响。*R<sub>i</sub>*的定义见式(6),*R<sub>i</sub>*与1的差的绝对值越大,说明影响越大。

$$R_i = \frac{L_{i-\text{Rec. No. 34 Rev. 2}}}{L_{i-\text{Rec. No. 34 Rev. 1}}} \quad (6)$$

式(6)中: $L_{i-\text{Rec. No. 34 Rev. 2}}$ 为图2计算得到的第*i*个载荷分量的长期极值; $L_{i-\text{Rec. No. 34 Rev. 1}}$ 为图1计算得到的第*i*个载荷分量的长期极值;*i*为不同载荷分量,包括0.50*L*处垂向波浪弯矩(Vertical Bending Moment, VBM),0.75*L*处垂向波浪剪力(Vertical Shear Force, VSF),0.50*L*处水平波浪弯矩(Horizontal Bending Moment, HBM),0.25*L*处波浪扭矩(Torsional Moment, TM),重心处横摇角(roll),重心处纵摇角(pitch),重心处纵荡加速度( $a_{\text{surge}}$ ),重心处横荡加速度( $a_{\text{sway}}$ ),重心处垂荡加速度( $a_{\text{heave}}$ ),重心处横摇加速度( $a_{\text{roll}}$ ),重心处纵摇加速度( $a_{\text{pitch}}$ ),0.25*L*处水线舷外水动压力(pressure1),0.50*L*处水线舷外水动压力(pressure2),0.75*L*处水线舷外水动压力(pressure3)。

在开展水动力载荷预报和整理后,满载工况和压载工况下各载荷分量的折减系数  $R-i$  见图 9 ~ 图 22。

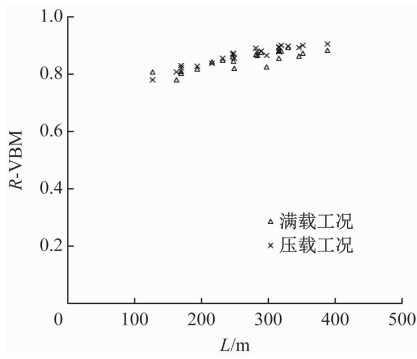


图 9 垂直波浪弯矩折减系数

Fig. 9 The ratio of VBM

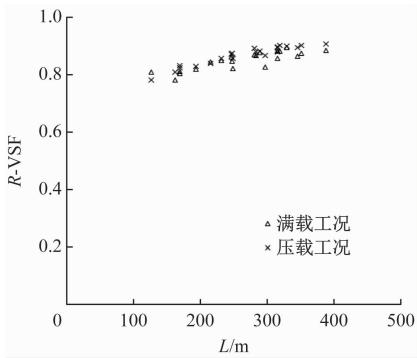


图 10 垂直波浪剪力折减系数

Fig. 10 The ratio of VSF

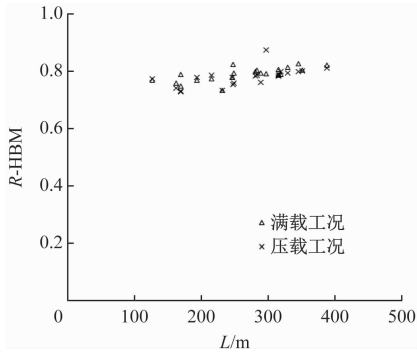


图 11 水平波浪弯矩折减系数

Fig. 11 The ratio of HBM

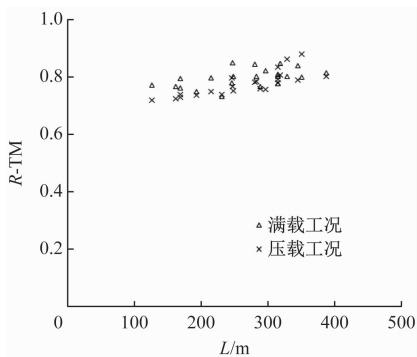


图 12 波浪扭矩折减系数

Fig. 12 The ratio of TM

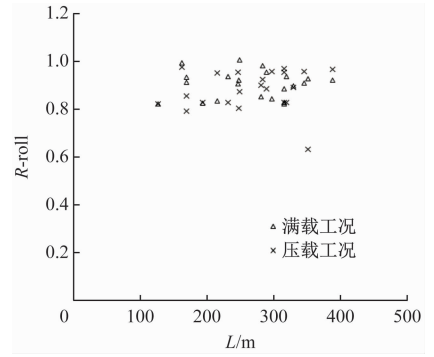


图 13 横摇角折减系数

Fig. 13 The ratio of roll

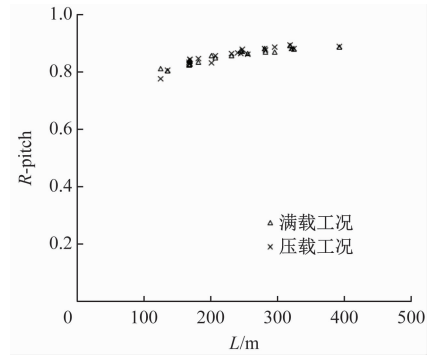


图 14 纵摇角折减系数

Fig. 14 The ratio of pitch

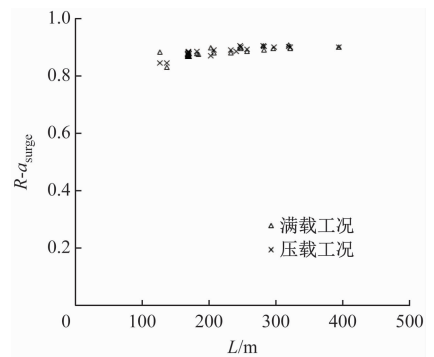


图 15 纵荡加速度折减系数

Fig. 15 The ratio of  $a_{\text{surge}}$

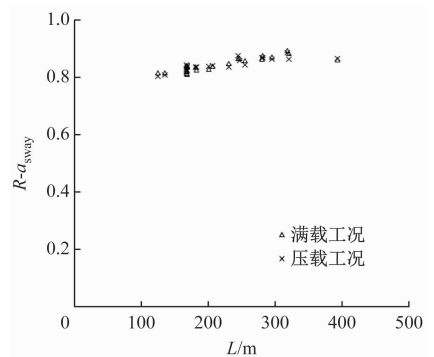


图 16 横荡加速度折减系数

Fig. 16 The ratio of  $a_{\text{sway}}$

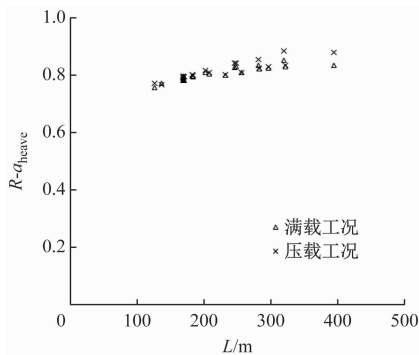


图 17 垂荡加速度折减系数

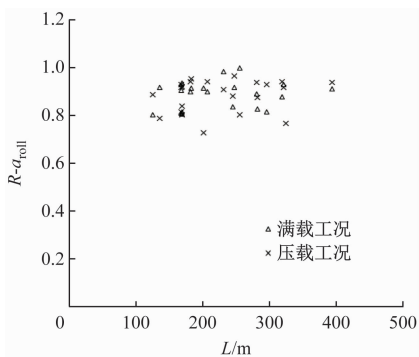
Fig. 17 The ratio of  $a_{heave}$ 

图 18 横摇加速度折减系数

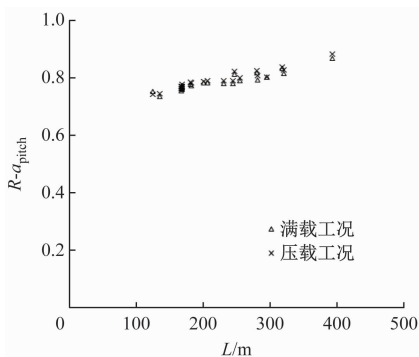
Fig. 18 The ratio of  $a_{roll}$ 

图 19 纵摇加速度折减系数

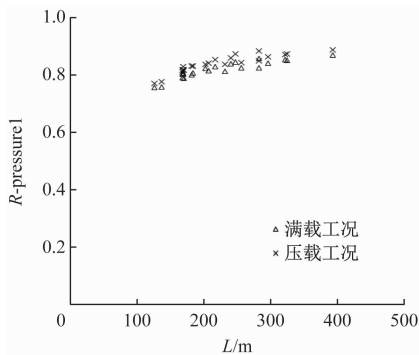
Fig. 19 The ratio of  $a_{pitch}$ 

图 20 舷外水动压力点 1 折减系数

Fig. 20 The ratio of pressure 1

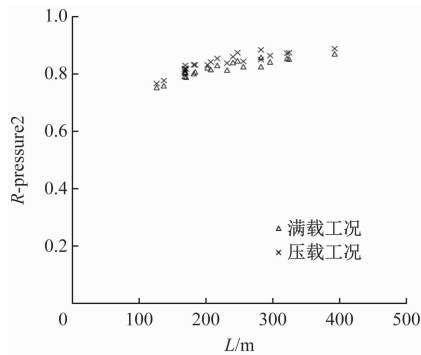


图 21 舷外水动压力点 2 折减系数

Fig. 21 The ratio of pressure 2

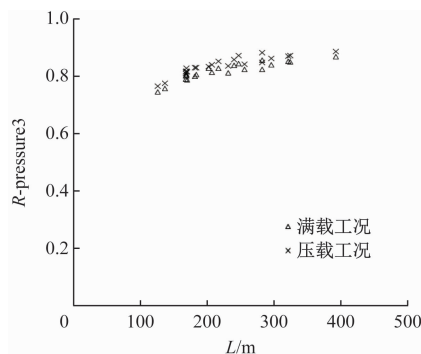


图 22 舷外水动压力点 3 折减系数

Fig. 22 The ratio of pressure 3

由图 9 ~ 图 12 可知:对于船体梁载荷,垂向波浪弯矩和垂向波浪剪力的折减系数的变化规律相似,折减系数表现出随着船长的增加而增加的趋势,船长 100 ~ 300 m 内的折减幅度要大于船长超 300 m 的折减幅度,通常垂向波浪弯矩和垂向波浪剪力的压载工况的折减幅度要大于满载工况的折减幅度,总体的折减率在 10% ~ 25%;水平波浪弯矩和波浪扭矩的折减系数在 100 ~ 200 m 内的变化规律相似,在 200 m 以上变化规律不同,折减系数在满载工况下表现出随着船长的增加而增加的趋势,在压载工况下随着船长的增加变化趋势不明显,通常水平波浪弯矩和波浪扭矩的压载工况的折减幅度与满载工况的折减幅度变化类似,总体的折减率在 10% ~ 35%。

由图 13 和图 14 可知:对于船舶运动,横摇角的折减系数未表现出随着船长的增加而变化的趋势,满载工况和压载工况相互交叉,总体的折减率在 0 ~ 40%;纵摇角的折减系数表现出随着船长的增加而增加的趋势,船长 100 ~ 250 m 内的折减幅度要大于船长超 250 m 的折减幅度,通常纵摇运动中压载工况的折减幅度与满载工况的折减幅度变化类似,总体的折减率在 15% ~ 22%。

由图 15 ~ 图 19 可知:对于船舶重心处加速度,

纵荡加速度的折减系数表现出随着船长的增加而增加的趋势,船长 100 ~ 200 m 内的折减幅度要大于船长 200 m 以上范围的折减幅度,通常纵摇加速度的压载工况的折减幅度与满载工况的折减幅度变化类似,总体的折减率在 10% ~ 20%;横荡加速度的折减系数表现出随着船长的增加而增加的趋势,船长 100 ~ 300 m 内的折减幅度要大于船长超 300 m 的折减幅度,横荡加速度的压载工况的折减幅度与满载工况的折减幅度变化类似,总体的折减率在 12% ~ 21%;垂荡加速度的折减系数表现出随着船长的增加而增加的趋势且折减幅度变化比较线性,垂荡加速度的压载工况的折减幅度要大于满载工况的折减幅度,总体的折减率在 12% ~ 25%;横摇加速度的折减系数和横摇运动一样,未表现出随着船长的增加而变化的趋势,满载工况和压载工况相互交叉,总体的折减率在 2% ~ 30%;纵摇加速度的折减系数,表现出随着船长的增加而增加的趋势且折减幅度变化比较线性,纵摇加速度的压载工况的折减幅度要大于满载工况的折减幅度,总体的折减率在 15% ~ 28%。

由图 20 ~ 图 22 可知:对于舷外水压力,3 个压力计算点的折减系数都表现出相同的变化规律;舷外水压力的折减系数随着船长的增加而增加的趋势,舷外水压力的压载工况的折减幅度要大于满载工况的折减幅度,总体的折减率在 12% ~ 24%。

总结 Rec. No. 34 Rev. 2 对海船的船体梁载荷、运动、加速度和舷外水压力影响可知:Rec. No. 34 Rev. 2 总体上降低了海船遭遇的波浪载荷,主要原因是 Rec. No. 34 Rev. 2 新波浪散布图相比 Rec. No. 34 Rev. 1,平均有义波高是减小的;但对不同载荷分量预报极值的影响有一定差异,主要原因是载荷的响应是由海况和船舶特征共同影响的,即使在相同的海况下,2 艘不同的船,也不可能得到相同的载荷响应。

## 4 结束语

通过对 IACS 北大西洋波浪散布图及补充要求更新对船舶波浪载荷的影响这一关键问题的研究,本文获得了以下有价值的结论:

1) 新北大西洋散布图采用更新、更精确的海况数据和更科学、更合理的拟合方法,有效地提高了船舶波浪载荷预报环境输入的精度。相比原北大西洋散布图和补充要求,新北大西洋波浪散布图更新的差异性表现在海况数据源、海域范围选择、海浪谱与参数、散布图波高周期分布形式和极值预报方法 5

个方面。

2) 新北大西洋散布图的更新降低了海船遭遇的波浪载荷,但对不同载荷分量预报极值的影响有一定差异。船体梁载荷中垂向波浪弯矩和剪力的减少幅度大致在 10% ~ 25%,水平波浪弯矩和波浪扭矩的减少幅度大致在 10% ~ 35%;船舶运动中横摇角的减少幅度大致在 0 ~ 40%,纵摇角的减少幅度大致在 15% ~ 22%;重心加速度中纵荡加速度的减少幅度大致在 10% ~ 20%,横荡加速度的减少幅度大致在 12% ~ 21%,垂荡加速度的减少幅度大致在 12% ~ 25%,横摇加速度的减少幅度大致在 2% ~ 30%,纵摇加速度的减少幅度大致在 15% ~ 28%;舷外水压力的减少幅度大致在 12% ~ 24%。

3) 本文比较了 Rec. 34 标准波浪数据更新对海船波浪载荷长期预报极值带来的直接影响。虽然新北大西洋散布图相比原北大西洋散布图,波浪诱导的船体梁载荷、运动和加速度舷外水压力极值都下降了,但其是否会影响海船结构设计尺寸现阶段还不得而知,后续仍需开展大量的工作和研究。并且,结构评估时,如何应用新散布图引起的波浪载荷也仍充满挑战。

## 参 考 文 献

- [1] International Association of Classification Societies. NO.34 standard wave data; Rec. 1 Corr. [S]. London: International Association of Classification Societies, 2001.
- [2] International Association of Classification Societies. NO.34 standard wave data; Rec. 2 [S]. London: International Association of Classification Societies, 2022.
- [3] 戴仰山,沈进威,宋竞正.船舶波浪载荷[M].北京:国防工业出版社,2006.  
DAI Y S, SHEN J W, SONG J Z. Ship wave loads [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [4] DENIS M S, PIERSON W J. On the motions of ships in confused seas [J]. Japanese Journal of Phytopathology, 1953, 57(4): 573-576.
- [5] 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. (in Chinese)

- 2021, 41(2): 332-344.
- TAN Z Y, WANG Z P, ZHANG Y W. Integrated optimization of pilots and ships scheduling for ports with complex channels [J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2021, 41(2): 332-344. (in chinese)
- [10] JIA S, WU L, MENG Q. Joint scheduling of vessel traffic and pilots in seaport waters [J]. *Transportation Science*, 2020, 54(6): 1495-1515.
- [11] HOSSEINI S, AL KHALED A. A survey on the imperialist competitive algorithm metaheuristic: implementation in engineering domain and directions for future research[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1078-1094.
- [12] 张军峰, 游录宝, 杨春苇, 等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 475-487.
- ZHANG J F, YOU L B, YANG C W, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective imperialist competitive algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 464-476. (in chinese)
- [13] 张国辉, 陆熙熙, 胡一凡, 等. 基于改进帝国竞争算法的柔性作业车间机器故障重调度[J]. *计算机应用*, 2021, 41(8): 2242-2248.
- ZHANG G H, LU X X, HU Y F, et al. Machine breakdown rescheduling for flexible job shop based on improved imperialist competitive algorithm[J]. *Journal of Computer Application*, 2021, 41(8): 2242-2248. (in chinese)
- [14] NEARCHOU A C, OMIROU S L. Differential evolution for sequencing and scheduling optimization[J]. *Journal of Heuristics*, 2006, 12(6): 395-411.
- 
- (上接第 51 页)
- [6] 杨志钢, 孙鹏. 基于 Gerstner 函数和 JONSWAP 海浪谱的海浪仿真[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(6): 676-682.
- YANG Z G, SUN P. Wave simulation based on combination of Gerstner function and JONSWAP wave spectrum[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2021, 37(6): 676-682. (in Chinese)
- [7] MAZZARETTO O M, MENÉNDEZ M, LOBETO H. A global evaluation of the JONSWAP spectra suitability on coastal areas [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266(9): 112756.
- [8] 米晓林, 王晓冰, 贺新毅, 等. JONSWAP 谱海面散射特性受相关参量的影响分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(6): 971-975.
- MI X L, WANG X B, HE X Y, et al. Sea surface scattering characteristics of JONSWAP spectrum influenced by its parameters [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(6): 971-975. (in Chinese)
- [9] 张学敏, 吴立民, 张丽, 等. 基于 JONSWAP 谱的海面浪形模拟[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(增刊 1): 162-167.
- ZHANG X M, WU L M, ZHANG L, et al. Ocean wave simulation based on JONSWAP spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(Suppl. 1): 162-167. (in Chinese)
- [10] International Association of Classification Societies. History files and technical background documents for recommendation[R]. London: International Association of Classification Societies, 2022.
- [11] HOBGEN N, DACUNBA L F, OLLIVER H N. *Global Wave Statistics (GWS)* [M]. London: Brown Union Publishing, 1986.