

集装箱船波浪载荷的研究

孙倩¹, 罗萍萍², 周宏², 顾钦平²

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

[摘要] 通过船舶三维运动程序进行了船舶运动与波浪载荷的初步分析. 以一艘5 500 TEU 集装箱实船为例, 通过设置不同航行条件来确定与运动和载荷最大值对应的航向角, 得到了单位规则波作用下的运动振幅以及各种航向角下中剖面的受力转换函数和受力转换频谱, 得到了主要载荷参数最大值所在位置、数值以及相应的航行条件, 最后运用波谱理论进行了长期波浪载荷分析, 并与现行规范进行了比较. 该结论可用于集装箱船极限载荷分析, 也可为船体结构设计提供参考.

[关键词] 集装箱船; Green 函数; 波浪载荷; 船舶运动响应; 长期预报

[中图分类号] U 661.4

[文献标志码] A

Research on the Wave Loads of Container Ship

SUN Qian¹, LUO Ping-ping², ZHOU Hong², GU Qin-ping²

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Naval Architecture and Ocean Engineering Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In this article ship motions and wave loads were analyzed by using three dimensional motion of the ship program. As an example of a 5500TEU container ship, the heading angles of maximum motions and loads, amplitude of movement under the action of unit regular wave, load conversion functions, conditions and RAO (Response Amplitude Operator) of middle section at different angles had been determined. The maximum dominant load parameters were also obtained. At the end the long-term wave loads were calculated through the spectrum theory, and the results were compared with the values of classification rules. The conclusions can be used to analyze ultimate loads of the container ships, and can also be the reference for ship structural design.

Key words: Container Ship; Green Function; Wave Load; Ship Motion Response; Long-term Forecast

0 引言

集装箱船属于大开口船舶, 在设计过程中除了要考虑垂向弯矩之外, 还须考虑斜浪在船体上产生的扭矩和水平弯矩等^[1]. 目前一般商船的结构是依据船级社规范^[2-3]进行设计的. 由于规范中数据和公式是根据大量的统计资料、实践经验和基本理论得出的, 并没有全面考虑到具体的船体线型、尺寸、船速、海况等因素, 因此按规范计算出来的船体剪力、弯矩和扭矩等并不是很精确^[4]. 如果计算值偏大, 据此设计的船体结构会造成材料浪费和载质量降低; 计算值偏小, 据此设计的船体结构强

度就会不够^[5]. 所以有必要先计算具体船舶的波浪载荷, 再依据长期分析统计预估极限值, 最后用动态载荷法进行结构分析. 这种方法能够得到比经验公式更准确的船体结构受力情况, 也能够降低船体结构设计的成本, 提高设计效率.

目前三维水动力理论研究方法主要有两种: 自由面 Green 函数法和 Rankine 源法^[6]. 自由面 Green 函数法中流场速度势是通过在船体湿表面分布源汇来确定的, Green 函数可满足除物面条件以外的所有定解条件, 该方法通过 Green 第二公式将速度势表达为分布源强沿船体湿表面的面积分和水面与船体交线的线积分之和. Rankine 源法是在物面和自由面上都分布奇点的一种计算方法. 该方法在分布奇点计算上较为简单, 可考虑船舶的航速效应. 这两种方法近几年来都取得了一些研究进展: 孙藏等^[7]开发了基于瞬时格林函数方法的三维时域计算程序, 并对 Wigley 型船进行了数值计算; 唐恺等^[8-9]开发了基于混合格林函数法对初边值问题进行求解的程序, 有效解决了外飘船型的数值发散问题; 李辉^[6]将 Rankine 源理论与三维水弹性理论结合对中高航速情况进行了研究; 王伟飞^[10]利用 Rankine 源法在线性时域范围内求解浮体在有航速条件下的运动与波浪载荷, 在求解基本势时考虑了方艏的影响; 李霞丽^[11]利用 Rankine 源法对三体船波浪载荷进行数值计算, 并基于长期预报的结果进行了片体布局优化和航速优选. 目前常用的船舶三维运动和波浪载荷预报软件有 SESAM^[12]、SCADIS^[5]和 HSC^[13]等.

本文的主要工作就是采用船舶三维运动程序 (HSC) 对 5 500 TEU 集装箱船波浪载荷进行短期和长期预报, 并与现行规范的计算值进行对比. 该程序采用自由面 Green 函数法对船舶的 6 个自由度和波浪载荷进行计算^[13].

1 航行条件设置

本文分析的船舶是一艘 5 500 TEU 集装箱船, 主要参数: 总长 277.350 m; 水线长 268.657 m; 垂线间长 264.000 m; 船宽 40.000 m; 船深 24.000 m; 设计吃水 12.000 m; 方形系数 0.6136; 水线面系数 0.853.

为了获得船体各部位的最大波浪载荷, 应该在不同海况、不同航向等组合条件下, 设定主要的载荷参数, 进行结构响应分析. 对于大开口的集装船来说, 最重要的载荷参数为: 垂向波浪剪力、垂向波浪弯矩和波浪扭矩.

为求取各主要载荷参数的最大值, 可由船体运动频率响应函数着手, 假定单位波高的正弦波频率 (W) 范围为 0.05 ~ 2.00 rad/s, 且由不同方向与航行中的船体相会, 船速假定为 75% 设计船速, 则沿不同的迎波角可以计算出不同的频率响应函数^[13]. 针对本文中算例, 航行条件制定如下: 航速 9.6 m/s; 航向角分别为 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°; 相位角 -180° ~ 180°; 波浪频率 0.05 ~ 2.00 rad/s.

本文采用的船舶三维运动程序^[13] 小板分布图如图 1 所示.

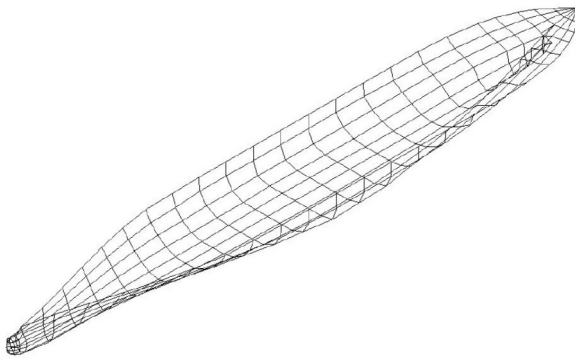


图 1 水面下船型小板分布图

Fig.1 Distribution diagram of small shell of ship under water

2 船体在单位波振幅 (ξ_0) 规则波作用下的运动振幅

图 2 为船体在各航向角纵荡运动振幅 (ξ_1); 图 3 为船体在各航向角横荡运动振幅 (ξ_2); 图 4 为船体在各航向角垂荡运动振幅 (ξ_3); 图 5 为船体在各航向角横摇运动振幅 (ξ_4); 图 6 为船体在各航向角纵摇运动振幅 (ξ_5); 图 7 为船体在各航向角首摇运动振幅 (ξ_6).

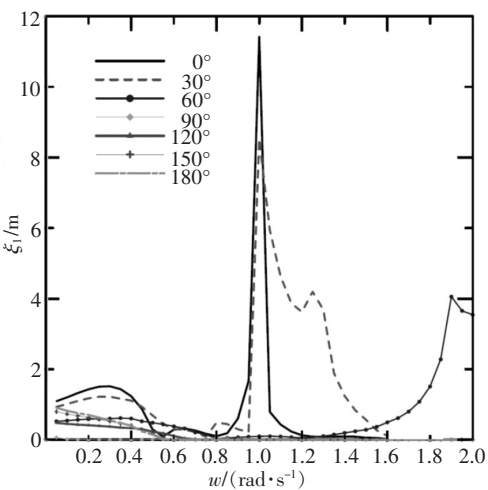


图 2 船体在各航向角纵荡运动振幅

Fig.2 Surge amplitude of the ship at different heading angles

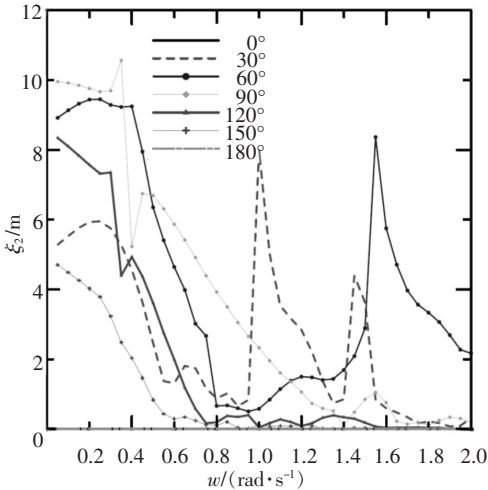


图 3 船体在各航向角横荡运动振幅

Fig.3 Sway amplitude of the ship at different heading angles

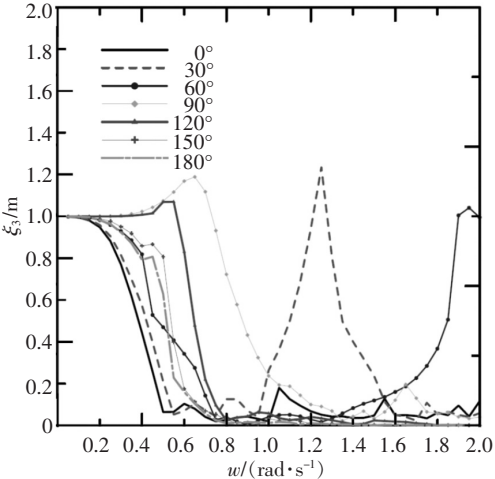


图 4 船体在各航向角垂荡运动振幅

Fig.4 Heave amplitude of the ship at different heading angles

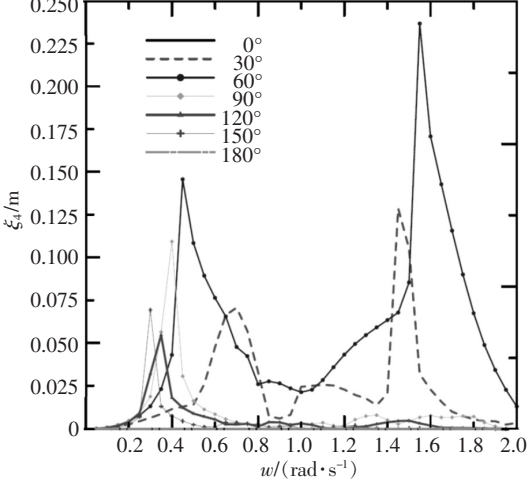


图 5 船体在各航向角横摇运动振幅

Fig.5 Roll amplitude of the ship at different heading angles

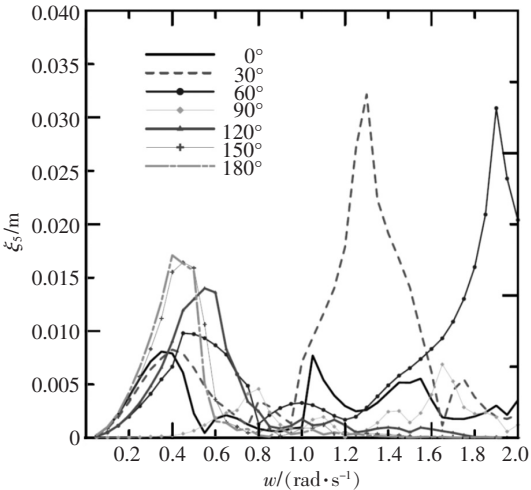


图 6 船体在各航向角纵摇运动振幅

Fig.6 Pitch amplitude of the ship at different heading angles

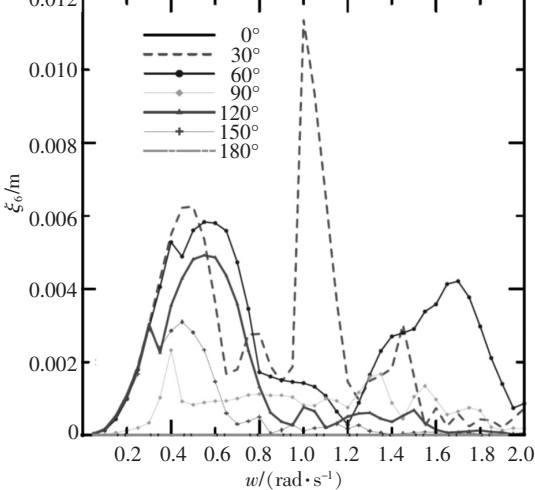


图 7 船体在各航向角首摇运动振幅

Fig.7 Yaw amplitude of the ship at different heading angles

从图2—图7可以看出船舶各方向运动振幅最大时的航向角分别为0°, 90°, 30°, 60°, 30°, 30°.

3 内力转换函数

图8至图13为各种航向角下, 中剖面133 m处的受力转换函数的相位频谱, 其中: F_1 为纵向剪切力; F_2 为横向剪切力; F_3 为垂向剪切力; F_4 为扭转力矩; F_5 为垂向弯矩; F_6 为水平弯矩.

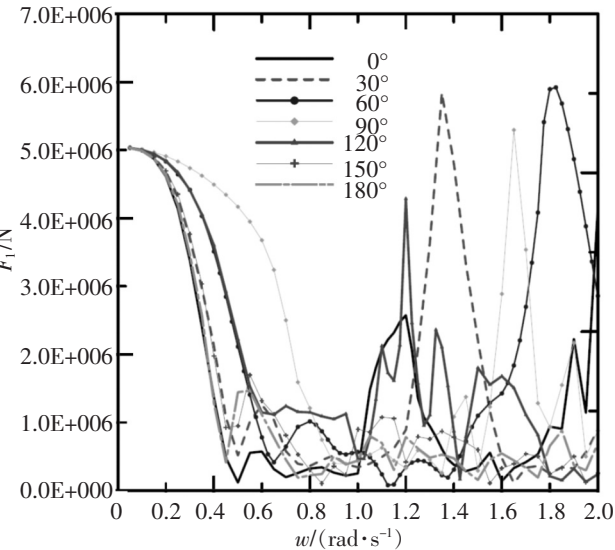


图8 各航向角纵向剪切力(F_1)频谱图
Fig.8 Longitudinal shear force (F_1) spectrum at different heading angles

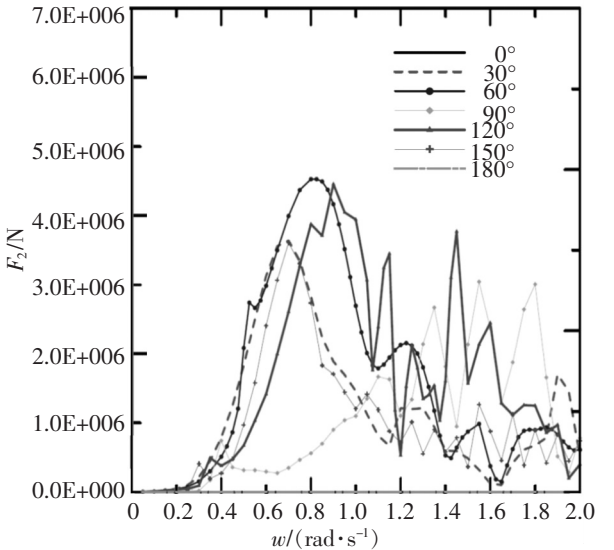


图9 各航向角横向剪切力(F_2)频谱图
Fig.9 Transverse shear force (F_2) spectrum at different heading angles

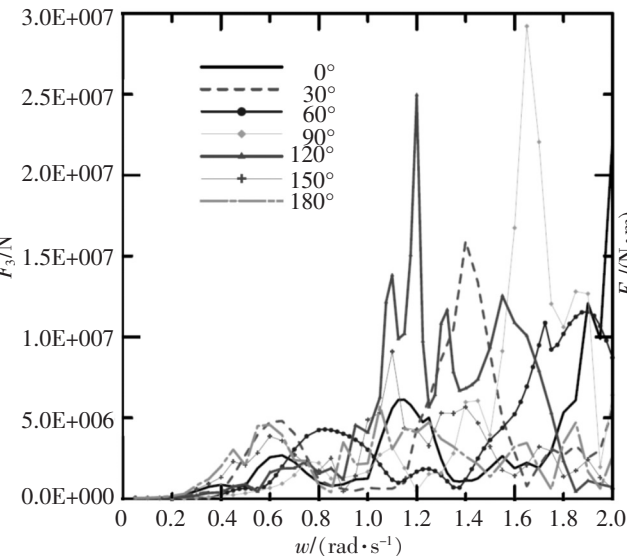


图10 各航向角垂向剪切力(F_3)频谱图
Fig.10 Vertical shear force (F_3) spectrum at different heading angles

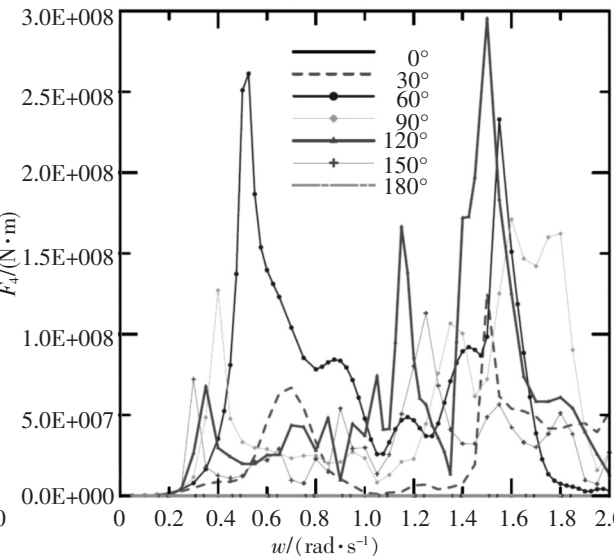
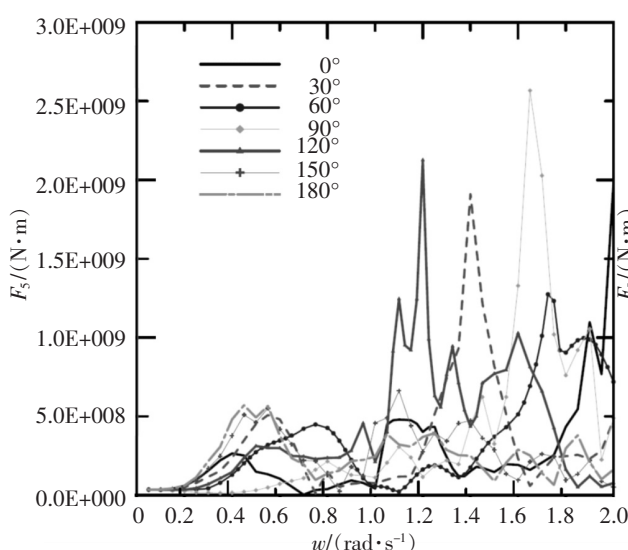
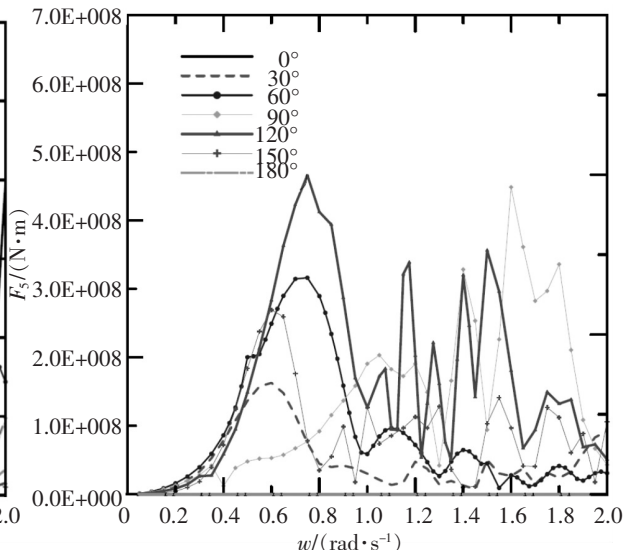


图11 各航向角扭转力矩(F_4)频谱图
Fig.11 Torsional moment (F_4) spectrum at different heading angles

图 12 各航向角垂向弯矩 (F_5) 频谱图Fig.12 Vertical bending moment (F_5) spectrum at different heading angles图 13 各航向角水平弯矩 (F_6) 频谱图Fig.13 Horizontal bending moment (F_6) spectrum at different heading angles

通过图 8—图 13 可得到各方向载荷最大值所对应的航向角分别为 60° , 60° , 180° , 60° , 180° , 120° 。由于计算的频谱图在 1.0 rad/s 以上常会出现不明或不合理的波峰, 因此波浪频率范围重点考虑 $0 \sim 1.0 \text{ rad/s}$, 而 $1.0 \sim 2.0 \text{ rad/s}$ 则仅做参考^[13]。

4 受力转换频谱

计算出各方向的船体运动频谱与船体受力频谱后, 还需选取主要载荷参数的受力转换频谱 (Response Amplitude Operator RAO)。本文分析对象为大开口集装箱货船, 主要载荷选为垂向剪切力 (F_3)、扭转力矩 (F_4) 与垂向弯矩 (F_5)。

因为船舶三维运动程序输出的受力转换频谱沿船长分为多段, 所以必须对输出数据进行分析, 选取 RAO 振幅最大的船段, 经过数据分析得知垂向剪切力 (F_3) 最大值发生在距尾垂线 (A. P.) 165 m 的船段, 扭转力矩 (F_4) 的最大值发生在 A. P. 66 m 的船段, 垂向弯矩 (F_5) 的最大值发生在 A. P. 133 m (船中) 的船段。依照以上条件, 可以得到 3 个受力转换频谱图 (RAO), 如图 14—图 16 所示。本文选取的 RAO 只考虑 $0 \sim 1.0 \text{ rad/s}$ 波浪频率范围。

选定好三个船段的最大的频谱图, 根据频谱图选出振幅最大的航向角、振幅与频率, 如图 14—图 16 圆圈所标示的位置。垂向剪切力 (F_3) 在航向角为 180° , 频率为 0.55 rad/s 时产生最大振幅 $8.11 \times 10^6 \text{ N}$; 扭转力矩 (F_4) 在航向角为 60° , 频率为 0.5 rad/s 时产生最大振幅 $2.05 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$; 垂向弯矩 (F_5) 在航向角为 180° , 频率为 0.45 rad/s 时产生最大振幅 $5.71 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

每一个受力转换函数频谱图, 都有一个对应的相位频谱图, 能够获得不同频率所产生的不同相位角, 如图 17—图 19 所示。图 17 中频率为 0.55 rad/s 时相位角为 -0.627° ; 图 18 中频率为 0.5 rad/s 时相位角为 80.5° ; 图 19 中频率为 0.45 rad/s 时相位角为 -179.87° 。

5 长期波浪载荷分析

5.1 长期波浪载荷分析

船舶在整个使用期内 (通常为 20 年) 可能遇到各种不同的海况, 在恶劣海况下, 尽管营运时间短, 但载荷响应值可达到极值。据统计推测, 船舶在恶劣海况中的营运时间占总航行时间的 5% 左

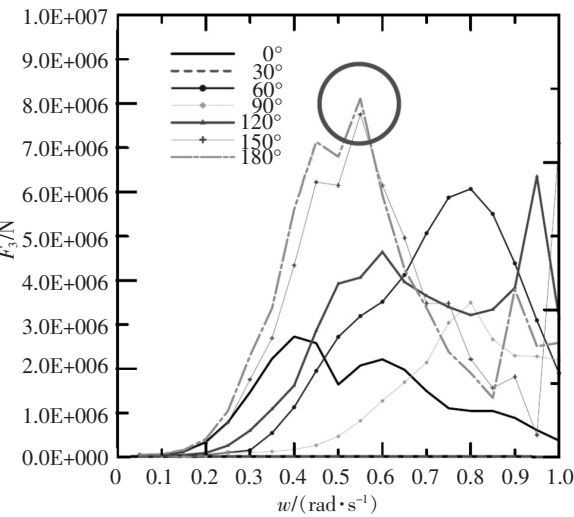


图 14 垂向剪力 RAO(A.P.165 m 处)

Fig.14 Vertical shear force RAO at A.P.165 m

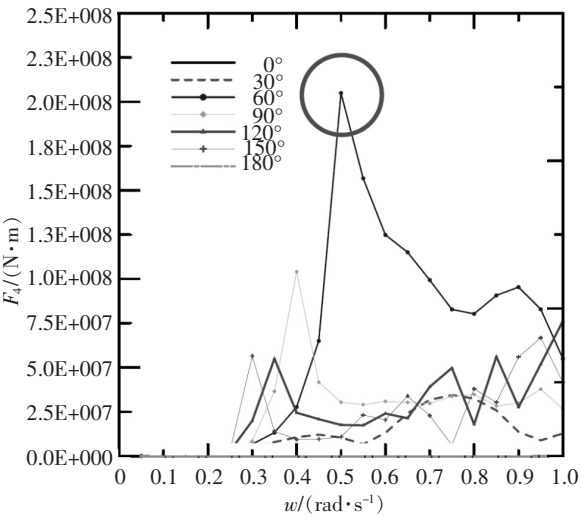


图 15 扭转力矩 RAO(A.P.66 m 处)

Fig.15 Torque moment RAO at A.P.66 m

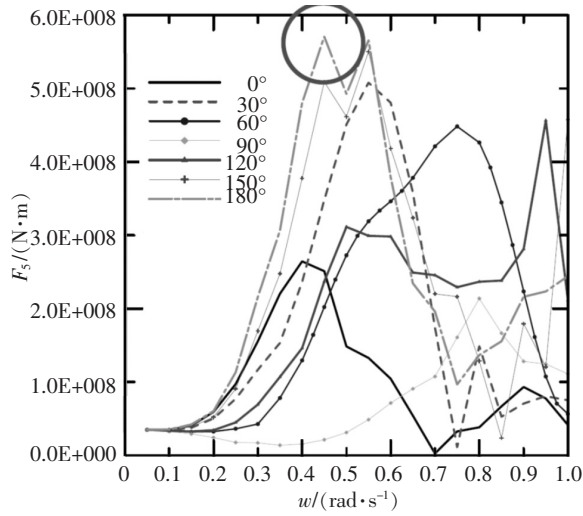


图 16 垂向弯矩 RAO(A.P.133 m 处)

Fig.16 Vertical bending moment RAO at A.P.133 m

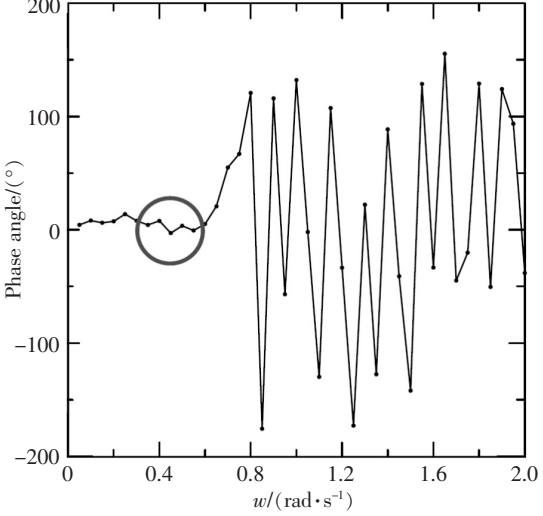


图 17 垂向剪力 (F_3) 相位频谱

Fig.17 Vertical shear force (F_3) phase spectrum

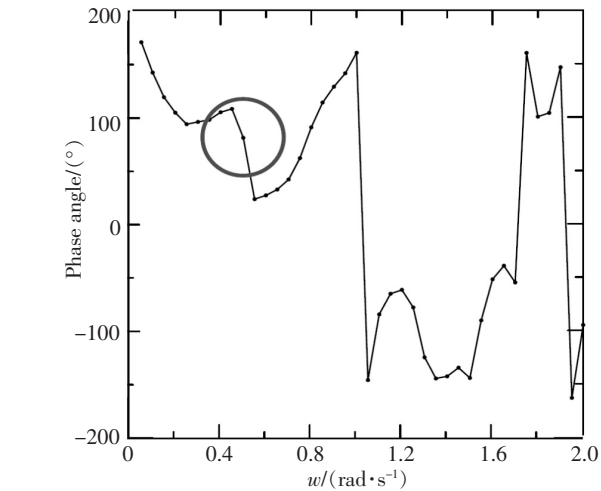


图 18 扭转力矩 (F_4) 相位频谱

Fig.18 Torsional moment (F_4) phase spectrum

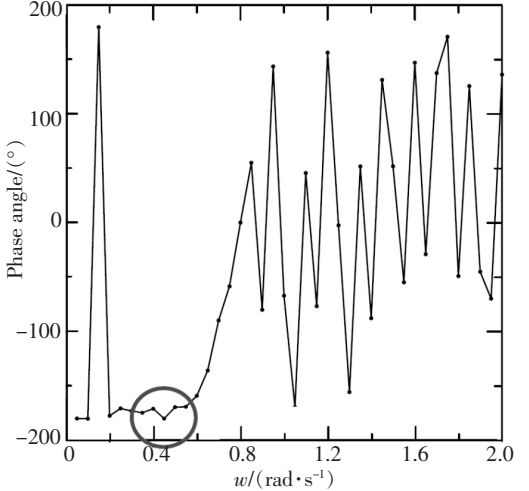


图 19 垂向弯矩 (F_5) 相位频谱

Fig.19 Vertical bending moment (F_5) phase spectrum

右^[14]。所以对于船舶设计人员来说，必须要重视船舶在整个使用期内可能出现的最大波浪载荷。长期波浪载荷分析，需要选取波谱与波浪频度，PM 波谱法为观测大西洋开阔海域充分成长海浪归纳而成的经验公式，而本集装箱货船就航行于该海域，所以笔者在长期波浪分析程序中选取 PM 波谱作为分析波谱^[2,13]。程序计算中所需用到的波浪频度表，本文选取 IACS WP/S 委员会推荐的大西洋波浪频度表^[14]，经过计算，可以得到每一个船段所受到的不同方向的载荷，如表 1 所示。

表 1 长期波浪载荷分析得到的沿船长不同方向的载荷

Tab.1 Loads in different directions along the length of ship by long term wave load analyses

距尾垂线距离 Distance from A. P./m	纵向剪切力 Longitudinal shear force/N	横向剪切力 Transverse shear force/N	垂向剪切力 Vertical shear force/N	扭转力矩 Torsional moment /(N·m)	垂向波浪弯矩 Vertical bending moment/(N·m)	水平波浪弯矩 Horizontal bending moment/(N·m)
-5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.65	6.22 × 10 ⁶	3.17 × 10 ⁶	2.72 × 10 ⁷	9.83 × 10 ⁷	1.95 × 10 ⁸	2.63 × 10 ⁷
24.35	1.92 × 10 ⁷	1.18 × 10 ⁷	4.87 × 10 ⁷	2.40 × 10 ⁸	6.77 × 10 ⁸	1.22 × 10 ⁸
38.72	3.10 × 10 ⁷	1.77 × 10 ⁷	5.78 × 10 ⁷	3.34 × 10 ⁸	1.39 × 10 ⁹	3.21 × 10 ⁸
56.70	4.20 × 10 ⁷	2.34 × 10 ⁷	6.12 × 10 ⁷	6.40 × 10 ⁸	2.43 × 10 ⁹	6.96 × 10 ⁸
66.00	4.70 × 10 ⁷	2.42 × 10 ⁷	6.22 × 10 ⁷	8.69 × 10 ⁸	2.94 × 10 ⁹	8.99 × 10 ⁸
74.10	5.00 × 10 ⁷	2.38 × 10 ⁷	5.88 × 10 ⁷	1.03 × 10 ⁹	3.47 × 10 ⁹	1.09 × 10 ⁹
88.94	5.36 × 10 ⁷	2.39 × 10 ⁷	4.95 × 10 ⁷	1.09 × 10 ⁹	4.23 × 10 ⁹	1.40 × 10 ⁹
99.00	5.57 × 10 ⁷	2.28 × 10 ⁷	4.16 × 10 ⁷	1.12 × 10 ⁹	4.65 × 10 ⁹	1.60 × 10 ⁹
103.00	5.67 × 10 ⁷	2.25 × 10 ⁷	3.87 × 10 ⁷	1.12 × 10 ⁹	4.77 × 10 ⁹	1.66 × 10 ⁹
118.00	5.74 × 10 ⁷	2.21 × 10 ⁷	3.04 × 10 ⁷	1.04 × 10 ⁹	5.03 × 10 ⁹	1.81 × 10 ⁹
133.34	5.78 × 10 ⁷	2.05 × 10 ⁷	3.04 × 10 ⁷	1.02 × 10 ⁹	5.07 × 10 ⁹	1.86 × 10 ⁹
148.14	5.57 × 10 ⁷	2.02 × 10 ⁷	4.35 × 10 ⁷	1.10 × 10 ⁹	4.76 × 10 ⁹	1.78 × 10 ⁹
162.90	5.23 × 10 ⁷	2.11 × 10 ⁷	6.21 × 10 ⁷	1.21 × 10 ⁹	4.10 × 10 ⁹	1.60 × 10 ⁹
165.00	5.14 × 10 ⁷	2.12 × 10 ⁷	6.44 × 10 ⁷	1.22 × 10 ⁹	3.98 × 10 ⁹	1.57 × 10 ⁹
177.00	4.62 × 10 ⁷	2.24 × 10 ⁷	6.22 × 10 ⁷	1.31 × 10 ⁹	3.11 × 10 ⁹	1.34 × 10 ⁹
192.54	3.87 × 10 ⁷	2.24 × 10 ⁷	6.13 × 10 ⁷	1.40 × 10 ⁹	1.98 × 10 ⁹	1.05 × 10 ⁹
198.00	3.53 × 10 ⁷	2.26 × 10 ⁷	5.97 × 10 ⁷	1.37 × 10 ⁹	1.47 × 10 ⁹	9.23 × 10 ⁸
207.34	2.94 × 10 ⁷	2.16 × 10 ⁷	5.23 × 10 ⁷	1.27 × 10 ⁹	9.62 × 10 ⁸	7.37 × 10 ⁸
222.14	2.05 × 10 ⁷	1.82 × 10 ⁷	3.99 × 10 ⁷	9.51 × 10 ⁸	4.27 × 10 ⁸	4.58 × 10 ⁸
236.94	1.29 × 10 ⁷	1.36 × 10 ⁷	1.59 × 10 ⁷	4.91 × 10 ⁸	4.80 × 10 ⁸	2.50 × 10 ⁸
250.70	7.93 × 10 ⁶	7.14 × 10 ⁶	3.45 × 10 ⁶	8.74 × 10 ⁷	3.89 × 10 ⁸	1.64 × 10 ⁸
271.40	7.64 × 10 ⁵	1.18 × 10 ⁶	2.63 × 10 ⁶	5.89 × 10 ⁷	3.76 × 10 ⁸	1.70 × 10 ⁸

5.2 分析结果与规范公式计算结果对比

由于美国和中国等船级社规范^[2-3,14]仅提供了垂向剪切力和垂向波浪弯矩两个波浪载荷公式，所以本文仅对这两种载荷的计算结果进行对比。

长期波浪载荷分析结果中的垂向剪切力与船级社规范公式计算值相比，两者沿船长分布趋势大致相同。船中部分由 PM 波谱计算的长期载荷值（3.04 × 10⁷ N）与规范值（3.06 × 10⁷ N）非常接近，但在 A. P. 40 ~ 60 m 和 A. P. 150 ~ 210 m 处长期载荷所预估的垂向剪切力，明显高于规范值（以 A. P. 56.7 m 为例，长期载荷值为 6.12 × 10⁷ N，规范值 3.25 × 10⁷ N）。在 A. P. 220 m 处至首部，规范值高于长期载荷所预估的垂向剪切力（以 A. P. 222.14 m 处为例，长期载荷值为 3.99 × 10⁷ N，规范值为 4.38 × 10⁷ N；在 A. P. 250.7 m 处，长期载荷值为 3.45 × 10⁶ N，规范值 1.47 × 10⁷ N）。

长期波浪载荷分析中垂向波浪弯矩值与船级社规范^[2-3,14]公式计算值比较可以得知，两者沿船长的分布趋势基本一致，在船中中垂状态由 PM 波谱计算所得的结果与规范值只相差了 16.31%（长期载荷值为 5.07 × 10⁹ N·m，规范值 4.243 × 10⁹ N·m），中拱状态相差达到 32.46%（规范值为

$3.424 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}$). 中垂状态 A. P. 160 m 至 F. P. 和 A. P. 至 A. P. 40 m 部分船段, 中拱状态 A. P. 175 m 至 F. P. 以及 A. P. 至 A. P. 25 m, 这些船段垂向波浪弯矩规范值大于长期波浪载荷预报值, 其他船段规范值小于长期波浪载荷预报值.

6 结论

综合上述计算结果和数据分析可得出如下结论:

1) 通过船舶运动与波浪载荷分析, 得到了主要载荷参数最大值所在的位置、数值以及相应的航行条件.

2) 通过长期波浪载荷分析结果与船级社的规范计算值进行对比, 可以得出垂向剪切力规范值在船中及首部已达到 20 年长期载荷标准, 但在中前和中后部分低于 20 年标准. 垂向波浪弯矩的规范值在船中低于 20 年标准, 但中垂状态垂向波浪弯矩已接近 20 年计算标准.

3) 根据本文的计算数据经过编程可转化为分布于全船节点的节点力, 用于进行集装箱船的短期和长期波浪载荷的有限元分析.

4) 按 IACS WP/S 委员会推荐的波浪谱和海况统计资料计算所得的长期载荷值比目前船级社规范公式计算所得的设计载荷值大^[14], 按这种海况预报波浪载荷是偏于保守的. 从船体比较强度角度出发, 为了与 IACS 统一标准相协调, 如果用 IACS 推荐的波浪谱和海况计算波浪载荷的长期预报值, 许用应力可适当调高, 如果不提高许用应力, 那么可将概率水平由 10^{-8} 调整为 $10^{-5.5}$, 此时的预报值作为船体波浪载荷的设计值.

[参 考 文 献]

- [1] 朱锡, 吴梵. 舰艇强度 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 中国船级社. 钢质海船入级规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] American Bureau of Shipping. Rules for Building and Classing Steel Vessels [S]. New York: American Bureau of Shipping, 2010.
- [4] 何丽丝. 超大型船舶在波浪中的动力响应分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] 陈超核, 钟伟芳. 集装箱船结构设计波浪载荷计算 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 110-113.
- [6] 李辉. 船舶波浪载荷的三维水弹性分析方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [7] 孙葳, 任慧龙, 李辉, 等. 基于时域格林函数法的船舶有航速问题数值求解 [J]. 船舶力学, 2014, 18(12): 1444-1452.
- [8] 唐恺, 朱仁传, 缪国平, 等. 波浪中浮体运动的时域混合格林函数法 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4): 508-514.
- [9] 唐恺, 朱仁传, 缪国平, 等. 应用混合格林函数法计算波浪中浮体运动及离散参数取值的算例分析 [J]. 中国造船, 2015, 56(1): 102-113.
- [10] 王伟飞. 基于 Rankine 源法舰船有航速时域三维波浪载荷计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [11] 李霞丽. 三体船波浪载荷研究与结构强度有限元分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [12] 唐卫军. 大型集装箱船三维波浪载荷计算 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [13] 顾钦平. 基于波浪载荷的集装箱船船体结构分析与研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
- [14] 中国船舶工业总公司. 船舶设计实用手册 (结构分册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)