



船舶所受风荷载国内外规范对比分析

陈志乐, 杨静思

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 船舶系缆力是码头结构设计和系船柱选型的重要条件, 风、流、浪为船舶系缆力主要控制因素。针对国内外码头设计规范中船舶系缆力的计算方法差异, 选取了码头结构设计常用的国内外规范(中国 JTS 规范、西班牙 ROM 规范、OCIMF 指南、英国 BS 6349 规范)对船舶所受风荷载的计算公式进行对比分析, 并结合工程实例对不同风向角下的风荷载进行了计算。结果表明: 1) 不同规范在船舶适应范围、风速选取、船舶受风面积、风压修正系数方面存在明显差异。2) ROM 计算得出的 30 万吨级油船的风荷载最大, JTS 计算结果最小。

关键词: 船舶所受风荷载; 国内外规范; 计算公式

中图分类号: U 656; U 661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0070-05

Comparative analysis of Chinese and foreign standards for wind load on ships

CHEN Zhi-le, YANG Jing-si

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

Abstract: The mooring force of ships is an important condition for wharf structure design and mooring bollards selection. The wind, current and wave are the main controlling factors of ship mooring force. Regarding the differences in the calculation methods of ship mooring force in Chinese and foreign wharf structure design standard, the Chinese and foreign codes commonly used in the design of wharf structures(China JTS, Spanish ROM, OCIMF guideline, British BS 6349) are selected to compare and analyze the calculation formulas of wind loads on ships, and the wind loads under different wind direction angles are calculated combined with engineering examples. The result shows that: 1) There are obvious differences among different standards in the adaptability range of ships, the selection of wind speed, the area of ships subjected to wind and the wind correction coefficient. 2) The wind load of the 300,000 t tanker calculated by ROM is the largest, and the calculation result of JTS is the smallest.

Keywords: wind load on ships; foreign and Chinese standard; calculation formula

船舶系缆力是码头结构设计和系船柱选型的重要条件, 风、流、浪为船舶系缆力主要控制因素, 国内外码头设计规范中船舶系缆力的计算方法有所不同。伴随着工程行业走向海外的步伐, 设计人员也需要掌握相应的国际规范标准。目前对于船舶风荷载研究对比大多集中于中英规范^[1-2], 鲜有对西班牙规范的对比。为进一步比较各规范船舶系缆力计算方法及结果的差异, 本文

选取了码头结构设计常用的国内外规范进行对比, 即: JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[3](简称 JTS)、西班牙 ROM0.2-90 海事及海港工程设计规范^[4](简称 ROM)、石油公司国际海事论坛 OCIMF (MEG4 2018) 系泊设备指南^[5](简称 OCIMF)、英国 BS 6349-1-2: 2016 规范^[6](简称 BS 6349), 就船舶所受风荷载的计算公式、输入变量、适应范围的异同点进行对比分析, 并以 30 万吨油船为例

进行了风荷载计算和结果对比分析。

1 船舶所受风荷载计算公式

1.1 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》

根据 JTS, 作用于船舶上的计算风压力垂直于码头前沿线的横向分力和平行于码头前沿线的纵向分力可按下列公式计算:

$$F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} A_{xw} v_x^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (1)$$

$$F_{yw} = 49.0 \times 10^{-5} A_{yw} v_y^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (2)$$

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用在船舶上的计算风力的横向和纵向分力 (kN); A_{xw} 、 A_{yw} 分别为船体水面以上横向和纵向受风面积 (m^2); v_x 、 v_y 分别为设计风速的横向和纵向分量 (m/s), 采用离地 10 m 高重现期 50 a 10 min 平均最大风速; ζ_1 为风压不均匀折减系数; ζ_2 为风压高度变化修正系数。

1.2 西班牙 ROM0.2-90 海事及海港工程设计规范

根据 ROM, 作用于船舶上的风荷载可按下列公式计算:

$$R_v = \frac{\rho}{2} \cdot C_v \cdot v_v^2 \cdot (A_T \cdot \cos^2 \alpha + A_L \cdot \sin^2 \alpha) = \frac{C_v \cdot v_v^2}{16000} \cdot (A_T \cdot \cos^2 \alpha + A_L \cdot \sin^2 \alpha) \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{A_L}{A_T} \cdot \tan \alpha \quad (4)$$

$$F_{tv} = R_v \sin \varphi \quad (5)$$

$$F_{lv} = R_v \cos \varphi \quad (6)$$

式中: R_v 为作用在船舶上的总风力 (kN); F_{tv} 、 F_{lv} 为作用在船舶上的横向分力、纵向分力; φ 为总风力与船舶纵轴线的夹角; ρ 为空气密度, 取 1.225 kg/m^3 ; C_v 为形状系数, 一般取 $1.0 \sim 1.3$, 缺少准确数据时, 可以直接取 1.3; v_v 为设计风速, 取海面上高 10 m 处的平均风速, 船长大于 25 m 时采用 60 s 平均风速, 船长小于 25 m 时采用 15 s 平均风速; α 为风向与船舶纵轴线 (船首至船尾) 的夹角 ($^\circ$); φ 为风荷载合力与船舶纵轴线的夹角; A_L 为暴露在风中的纵向投影面积 (m^2); A_T 为暴露在风中的船舶横向投影面积 (m^2)。投影面积按下列公式计算:

$$A_T = B \cdot (G + h_T) \quad (7)$$

$$A_L = L_{pp} \cdot (G + h_L) \quad (8)$$

式中: B 为船舶的型宽; G 为船舶吃水; L_{pp} 为船舶垂线间的长度; h_T 、 h_L 分别为船舶甲板以上超大结构的横向、纵向投影平均高度。

1.3 石油公司国际海事论坛 OCIMF (MEG4 2018) 系泊设备指南

根据 OCIMF, 船舶所受风荷载的横向和纵向风力可按下式进行计算:

$$F_{xw} = C_{xw} \cdot \frac{\rho_A}{2} A_T v_w^2 \quad (9)$$

$$F_{yw} = C_{yw} \cdot \frac{\rho_A}{2} A_L v_w^2 \quad (10)$$

式中: C_{xw} 、 C_{yw} 为风荷载纵向系数、风荷载横向系数, 这几项系数均由查图表所得; ρ_A 为空气密度, 取 1.28 kg/m^3 ; A_L 为水面以上纵向压载投影面积; A_T 为水面以上横向压载投影面积; L_{BP} 为船舶首柱到尾柱的间距; v_w 为海面以上 10 m 处的 30 s 平均风速。之所以取 30 s, 是由系泊系统对风速变化做出反应所需的时长决定, 30 s 对应的是压载巨型油船, 小点的船反应更快, 满载巨型油船则可能需要 60 s。然而, 对所有船型和不同压载情况来说, 30 s 可以取做平均值。如有其他风时对应的风速, 可以根据 OCIMF 的风时转换系数图表查询转换。

1.4 英国 BS 6349-1-2:2016 规范

根据 BS 6349, 作用在船舶上的风荷载 F_{tw} 可按下式计算:

$$F_{tw} = C_{tw} \rho_A A_L v_w^2 \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$F_{tw} = F_{tw}^{\text{Aft}} + F_{tw}^{\text{Forward}} \quad (12)$$

$$F_{lw} = C_{lw} \rho_A A_L v_w^2 \times 10^{-4} \quad (13)$$

式中: F_{tw} 为横向风力合力; F_{tw}^{Forward} 为船首横向风力合力; F_{tw}^{Aft} 为作用在船尾横向风力合力 (kN); F_{lw} 为纵向风力 (kN); C_{tw} 为横向风力系数 (合力, 船首或船尾); C_{lw} 为纵向风力系数; ρ_A 为空气密度 (t/m^3), 随温度变化而变化, 0 °C 时为 1.3096 kg/m^3 , 30 °C 时为 1.1703 kg/m^3 ; A_L 为水面以上船舶的纵向投影面积 (m^2); v_w 为水面以上 10 m 处 1 min 平均风速 (m/s)。

2 计算公式对比

计算公式见表 1。

表 1 计算公式

| 规范 | 总公式模型 $F = KC\rho \cdot \text{Area} \cdot v^2$ | 系数 K | 风压修正系数 C | 空气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 气温/℃ | 离地 10 m 处最大风速 v 对应的时长平均值/s |
|---------|--|--|--|--|------|---------------------------------------|
| JTS | $F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} A_{xw} v_x^2 \zeta_1 \zeta_2$ $F_{yw} = 49.0 \times 10^{-5} A_{yw} v_y^2 \zeta_1 \zeta_2$ | $\frac{73.6}{10^5 \rho}, \frac{49.0}{10^5 \rho}$ | $\zeta_1 = 0.6 \sim 1,$ $\zeta_2 = 1.0 \sim 1.54$ | 1.202 | 15 | 600 |
| ROM | $R_v = \frac{\rho}{2} \cdot C_v v_v^2 (A_T \cos^2 \alpha + A_L \sin^2 \alpha)$ $F_{TV} = R_v \sin \phi, F_{LV} = R_v \cos \phi$ | 1/2 | $C_v = 1.0 \sim 1.3$ | 1.225 | - | 60(船长 ≥ 25 m) 15(船长 < 25 m) |
| OCIMF | $F_{xw} = C_{xw} \cdot \frac{\rho_A}{2} A_T v_w^2$ $F_{yw} = C_{yw} \cdot \frac{\rho_A}{2} A_L v_w^2$ | 1/2 | $C_{xw} = -0.94 \sim -0.78,$ $C_{yw} = 0 \sim 0.99$ | 1.280 | 20 | 30 |
| BS 6349 | $F_{TW} = C_{TW} \rho_A A_L v_w^2 \times 10^{-4}$ $F_{LW} = C_{LW} \rho_A A_L v_w^2 \times 10^{-4}$ | $1/10^4$ | $C_{LW} = -1.4 \sim -1.81,$ $C_{TW} = 0 \sim 4.77$ | (1.309 6, 1.170 3) (0, 30) | | 60 |

对比 4 组船舶所受风荷载的计算公式, 所有计算公式都包含船舶横纵向受风面积、空气密度、风压力系数等因素, 但各个因素的取值和算法存在差异, 各规范手册公式存在的差异主要有:

1) 风压修正系数。JTS 中风压高度变化修正系数考虑船舶水面以上高度的变化, 对船舶在不同装载情况下的风荷载进行修正。风压不均匀折减系数考虑水面以上最大轮廓尺寸的区别, 对不同吨级船舶所受风荷载进行修正。ROM、OCIMF、BS 6349 将风速、船舶受风面积变量之外的变化因素统一到风压修正系数, 该修正系数综合考虑了风向与船舶纵横轴的夹角变化、船舶装载情况变化、船型尺寸变化、船舶类型变化等因素需要的修正, 且 OCIMF 还考虑了船头形状(传统型或椭圆形)不同引起的变化。

2) 公式适用的船舶类型及尺寸范围。不同公式适用的船舶类型及船舶尺寸不同, JTS 和 ROM 可以计算多种类型、不同尺寸的船舶。BS 6349 公式适用的船舶类型有小型油船、大型油船、典型集装箱船舶。OCIMF 公式适用的船舶类型有大型油船(1.6 万~50 万 t)和天然气船(7.5 万~26.6 万 t)。

3) 空气密度。因为风荷载计算必然涉及空气密度, ROM、OCIMF、BS 6349 的公式中均有空气密度变量。除了英标给出的 0~30 ℃ 范围内的变化空气密度, 其他均为给定温度下的空气密度, JTS 采用的是绝对干燥空气密度, 且将空气密度提前代入公式进行了计算简化, 公式中未体现空气

密度变量。

4) 风速。各国规范对风速的选取略有差异。《港口工程荷载规范》采用的是离码头附近地面高 10 m 处的 10 min 平均年最大风速, 重现期 50 a。ROM 分两种情况, 船长大于 25 m 采用的是 60 s 平均风速; 船长小于 25 m 的采用的是 15 s 平均风速。BS 6349 采用的是海面以上高 10 m 处的 60 s 平均风速, 重现期 50 a。OCIMF 采用的是海面以上高 10 m 处的 30 s 平均风速。

5) 船舶受风面积。JTS 分别给出了保证率为 50% 及 75%、压载及满载时不同类型及尺寸船舶组合下的船舶横纵向受风面积; ROM、OCIMF 均按照船舶的横纵向投影面积进行计算, BS 6349 也采用船舶投影面积, 但在计算横向风力时采用的纵向投影面积作为输入参数进行计算。需要注意的是, 船舶受风面积不仅包括船舶干舷部分的区域, 还包括甲板上的构筑物, 堆箱等部分区域。

6) 横摆力矩。ROM 和 OCIMF 考虑了风作用下船舶绕中心垂直轴的横摆力矩, JTS 和 BS 6349 未考虑。

3 工程案例

3.1 计算条件

由各规范船舶适用范围的比对可知, 4 种公式均适用的范围是 15 万~30 万吨级的大型油船。目前国内原油码头大部分为 30 万吨级, 故选取 30 万吨级油船为典型船型进行案例对比分析, 分别对其

在满载、压载工况下的风荷载进行计算。30万吨级油船船型参数为: 总长 $L=334.0\text{ m}$, 型宽 $B=60.0\text{ m}$, 型深 $H=31.2\text{ m}$, 满载吃水 $T=22.5\text{ m}$ 。

船舶受风面积一般由船舶厂家提供, 该算例中按照 JTS 进行取值, 见表 2。

表 2 船舶受风面积

| 方向 | 受风面积/ m^2 | |
|----|--------------------|-------|
| | 满载 | 压载 |
| 横向 | 4 600 | 8 180 |
| 纵向 | 1 280 | 1 970 |

由于各规范中离地 10 m 处最大平均风速对应的历时不同, 该算例选取 9 级风最大风速 24.4 m/s 作为 JTS 的设计风速, 其他规范按照风时修正系数进行对应换算, 风速换算结果见表 3^[7]。

表 3 按历时进行风速换算

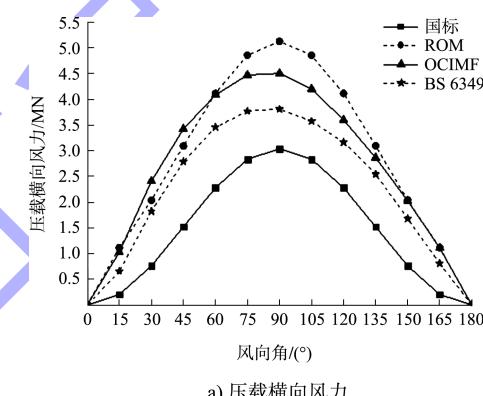
| 规范 | 风速历时/s | 风时修正系数 | 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|---------|--------|--------|---------------------------------------|
| JTS | 600 | 1.00 | 24.40 |
| ROM | 60 | 1.15 | 28.06 |
| OCIMF | 30 | 1.21 | 29.52 |
| BS 6349 | 60 | 1.15 | 28.06 |

3.2 船舶风荷载比较

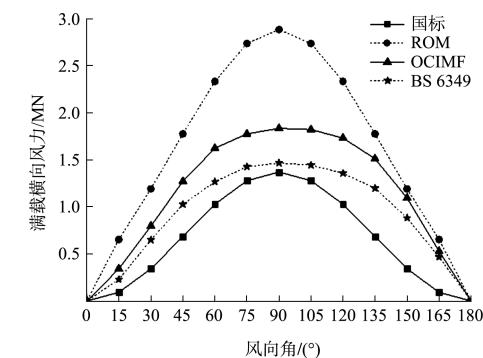
各规范风向角坐标系不统一: JTS 未考虑风向角变量, ROM 和 BS 6349 都以船舶正迎面为 0° , OCIMF 则以船舶正迎面为 180° 。本文参考 ROM 和 BS 6349 风向角取法, 即取船舶纵轴线(从船头指向船尾方向)与风向的夹角为风向角, 船舶正迎面为 0° , 风向角以逆时针旋转。

30 万吨级油船的压载、满载工况下的风荷载绝对值计算结果见图 1。各规范的结果差异如下: 1) 从总风荷载来看, 在压载和满载状态下, 均以船舶受正向横风时为控制工况, 且计算值 ROM 依次大于 OCIMF、BS 6349、JTS。ROM 最大风荷载计算值达 JTS 的 1.69 倍。2) JTS 与 ROM 的横向风力和纵向风力计算值是关于 90° 左右对称的, 即两风向角互补时, 风荷载计算结果相同。OCIMF 和 BS 6349 考虑了船首船尾的差异性, 两者随风向角变化的计算结果趋势表现出高度的相似性。至于两者绝对值存在的差异, BS 6349 中油船风荷载计算时推荐参照 OCIMF, BS 6349 计算公式保留可用于初步评估。3) 从压载工况看, 船舶横向风力中,

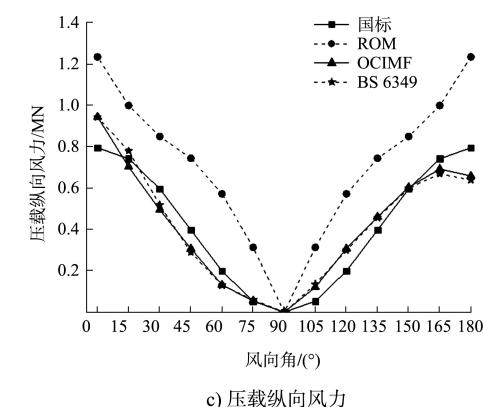
当风向角为 $20^\circ \sim 55^\circ$ 时, OCIMF 的计算值依次大于 ROM、BS 6349、JTS。其他风向角范围内与总风荷载的计算值排序相同, 即 ROM 依次大于 OCIMF、BS 6349、JTS。OCIMF、BS 6349 考虑风入射角度互补时, 认为船首较船尾受风荷载更大。压载工况下的纵向风力计算, ROM 结果明显大于另外三者, 且另外三者结果很接近。4) 满载工况下, 船舶横向风力中, ROM 的计算值依次大于 OCIMF、BS 6349、JTS, ROM 可达 JTS 最大横风计算值的 2.1 倍。对于满载工况下纵向风力, JTS 明显小于另外三者。此外, OCIMF 和 BS 6349 认为船舶受正向横风时, 船舶的纵向风力也不为 0。



a) 压载横向风力



b) 满载横向风力



c) 压载纵向风力

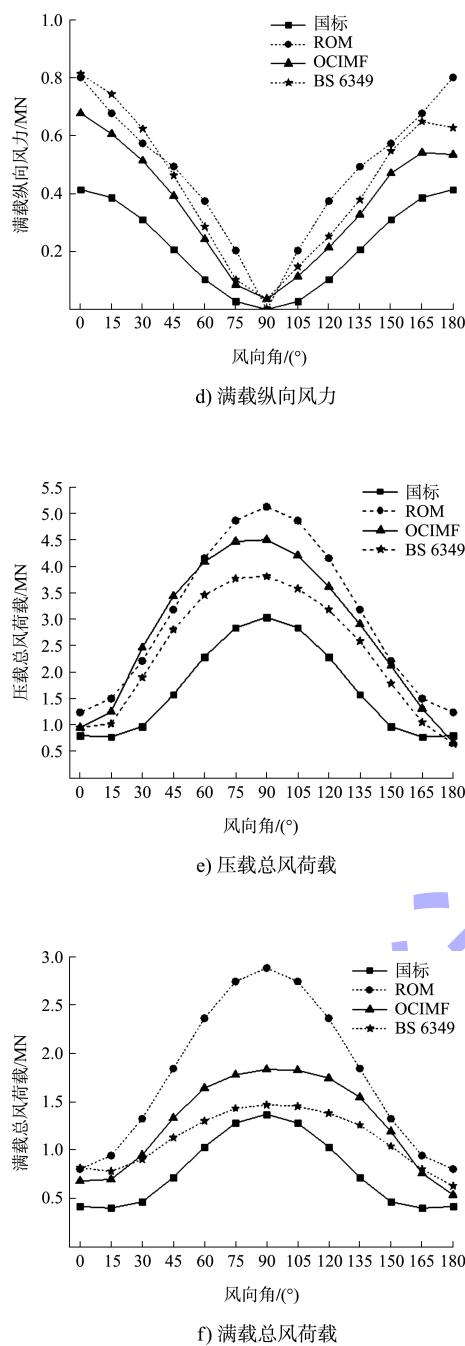


图 1 风荷载计算结果

4 结论

1) 各国的风荷载计算思路不同, 且公式适用的船舶类型和尺寸也不同, 英标公式适合的船舶类型有小型油船、大型油船、典型集装箱船舶。OCIMF 手册公式适合的船舶类型为一定吨级的大

型油船和天然气船。在计算或对比分析时应注意适应范围的不同。

2) JTS 与 ROM 未考虑船首船尾的差异性, 而 BS 6349 和 OCIMF 考虑了差异性, 计算结果在船首尾差异方面考虑得更准确。

3) 各国规范在计算船舶风荷载时, 在风速选取、船舶受风面积、风压修正系数方面均存在一定差异。

4) 根据 30 万吨级油船实例计算结果, 比较控制工况下即风向角为 90° 时的风荷载, 可知 ROM 最大, OCIMF 次之, BS 6349 第三, JTS 最小。ROM 的计算结果最保守, 其最大风荷载是 JTS 计算值的 1.69 倍, OCIMF 是 JTS 的 1.58 倍。因此, 在海外项目系缆力计算时应慎重进行规范的选择和应用。

参考文献:

- [1] 叶银苗. 码头设计中船舶风荷载中英规范标准研究[J]. 水运工程, 2014(7): 46-50.
- [2] 许松乔. 中英规范中船舶系缆力计算比较[J]. 水运工程, 2019(2): 46-51.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [4] Puertos del Estado. Recommendations for the design of maritime configuration of ports: ROM 0.2-90(1994) [S]. Madrid: Puertos del Estado, 1994.
- [5] OCIMF. Mooring Equipment Guidelines[M]. 4th ed. London: Witherby Seamanship International, 2018.
- [6] British Standard Institution. Maritime works-Part 1-2: Code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2: 2016[S]. London: BSI, 2016.
- [7] Amer Society of Civil Engineers. Port designer's handbook[S]. London: Thomas Telford Limited, 2003.