



国内外船舶风荷载计算方法对比

李 欣, 夏运强, 王海峰, 赵 晶

(中国人民解放军 91053 部队, 北京 100070)

摘要: 针对船舶风荷载计算中引用规范的范围不全、版本更新和船型应用局限等问题, 选取中国、英国、美国以及 OCIMF 等 4 种现行主流行业规范进行分析研究, 并以 2.0 万吨级杂货船为案例进行计算对比。结果表明计算结果有较大差异: 对于横向分力, 英美规范结果接近, 中国规范明显偏大。对于纵向分力, 艏向风时英国规范结果显著大于中美规范; 艏向风时中英规范结果接近, 均小于美国规范。建议根据适用船型、船舶数据的翔实程度、主风向角和管理要求等因素合理选用计算方法, 有条件时采用数值模拟方法。

关键词: 港口工程; 船舶风荷载; 阻力系数; 计算方法; 杂货船

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0079-04

Comparison of ship wind load calculation methods in China and abroad

LI Xin, XIA Yunqiang, WANG Haifeng, ZHAO Jing

(No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100070, China)

Abstract: In view of the problems such as incomplete reference standards, version updates, and limited ship type applications in ship wind load calculation, this paper selects four current mainstream industry standards of China, the United Kingdom, the United States, and OCIMF for analysis and takes a 20,000-ton general cargo ship as a case for comparison. The results show that the calculation results are quite different. For the lateral component force, the results by standards of the United Kingdom and the United States are close, and that by the standard of China is obviously larger. For the longitudinal component, the results by the standard of the United Kingdom are significantly greater than those by the standard of the United States in the case of stern wind, and the results by standards of China and the United Kingdom are close in the case of bow wind, and both are smaller than those by the standard of the United States. The paper suggests that the calculation methods should be reasonably selected according to factors such as the applicable ship type, the fullness of ship data, the main wind angle, and management requirements, and the numerical simulation method should be used when conditions permit.

Keywords: harbor engineering; ship wind load; drag coefficient; calculation methods; general cargo ship

船舶风荷载是港口工程码头设计的主要荷载之一, 在规范应用和数值模拟时参与船舶系缆力、挤靠力、撞击力计算, 是码头结构设计及系船柱、靠船构件和护舷选型的重要依据^[1-2], 是确定码头泊稳和作业条件的重要影响因素^[3-4]。

风荷载属于流体动压力, 基本表达形式为风压强和受风面积的乘积, 另外还需考虑结构物的体形系数、风速修正系数等影响参数, 其中风压强按照贝努利公式计算, 与空气密度和风速的二次方成正比。

收稿日期: 2022-09-05

作者简介: 李欣 (1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口工程、水文研究。

通讯作者: 夏运强 (1971—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口海岸及近海工程工作。E-mail: okxyq@126.com

国内外相关行业规范和标准对风荷载计算均有规定,但表达形式和计算结果有一定的差异,相关文献^[5-10]对其差异性进行了个案阐述,但是这些研究存在引用规范的范围不全、规范的版本更新等问题,且现有研究主要以油轮和集装箱船为主,对货船的计算对比研究相对较少。基于上述问题,选取具有代表性的中国、英国、美国以及 OCIMF 等主流行业规范的现行计算方法进行分析,全面分析其表达方法和形式的差异性,并以可比性较强的货船为例进行计算,进一步比较其差别,为风荷载计算方法的合理选取和正确使用提供参考和借鉴,为国内企业开拓和服务海外行业市场等提供技术支持。

1 国内外船舶风荷载计算方法

1.1 中国《港口工程荷载规范》

中国现行行业标准 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[11]在附录 E 中对船舶风荷载计算规定:

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

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

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用在船舶上风压力的横向分力和纵向分力, kN; A_{xw} 、 A_{yw} 分别为船体水面以上的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; 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 英国 Maritime Works

英国行业规范 *Maritime Works* 现行版本为 BS 6349-1-2: 2016+A1: 2017^[12], 在其附录 Annex G 中作为资料性信息提供了风荷载计算方法:

$$F_{TW} = C_{TW} \rho_A A_L v_w^2 \times 10^{-4} \quad (3)$$

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

式中: F_{TW} 为作用在船首或船尾的横向分力, kN; C_{TW} 为横向风力系数; ρ_A 为空气密度, 取 1.24 kg/m^3 ; A_L 为船舶在水面以上的侧面投影面积, m^2 ; v_w 为水面以上 10 m 高度处的设计风速, m/s; F_{LW} 为纵向分力, kN; C_{LW} 为纵向风力系数。

英国规范的风荷载计算与中国规范的不同之处在于, 其将作用于船舶的横向力分为船首、船尾横向分力, 适用船型主要包括干货船、小型油轮及尾楼结构的大型油轮和集装箱船 3 类。

1.3 OCIMF Mooring Equipment Guidelines

OCIMF(石油公司国际海事论坛)的 *Mooring Equipment Guidelines*^[13]最新版本为 MEG 4—2018, 在其附录 Appendix A3 和 A4 中对大型油轮和气体运输船风荷载计算的规定如下。

$$F_{Xw} = \frac{1}{2} C_{Xw} \rho_w v_w^2 A_T \quad (5)$$

$$F_{Yw} = \frac{1}{2} C_{Yw} \rho_w v_w^2 A_L \quad (6)$$

$$M_{XYw} = \frac{1}{2} C_{XYw} \rho_w v_w^2 A_L L_{BP} \quad (7)$$

式中: F_{Xw} 、 F_{Yw} 分别为作用于船舶的纵向分力和横向分力, N; M_{XYw} 为艏艉摇力矩, $N \cdot m$; C_{Xw} 、 C_{Yw} 、 C_{XYw} 分别为纵向风阻系数、横向风阻系数和艏艉摇风阻系数; ρ_w 为空气密度, 取 1.24 kg/m^3 ; v_w 为水面以上 10 m 高度处的风速, m/s; A_T 、 A_L 分别为纵向投影面积和横向投影面积, m^2 ; L_{BP} 为垂线间长, m。

OCIMF *Mooring Equipment Guidelines* 规范适用于计算载重吨为 1.6 万~50.0 万 t 油船和 7.5 万~26.6 万 m^3 的液化气船, 该规范除了计算作用于船舶的横向分力和纵向分力外, 还需计算作用于船舶中站面的艏艉摇力矩。

1.4 美国 UFC Moorings

美国国防部 UFC(通用设施标准)的 *Moorings*^[14]现行版本为 UFC 4-159-03—2020, 在其 CHAPTER 4 中关于风荷载计算方法如下。

$$F_{xw} = 0.5 \rho_a v_w^2 A_x C_{xw} f_{xw}(\theta_w) \quad (8)$$

$$F_{yw} = 0.5 \rho_a v_w^2 A_y C_{yw} f_{yw}(\theta_w) \quad (9)$$

$$M_{xyw} = 0.5 \rho_a v_w^2 A_y L C_{xyw}(\theta_w) \quad (10)$$

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用于船舶的纵向分力和横向分力, N; M_{xyw} 为艏艉摇力矩, $N \cdot m$; C_{xw} 、 C_{yw} 分别为纵向风阻系数和横向风阻系数; v_w 为风速, m/s; A_x 、 A_y 分别为船舶的纵向投影面积和横向投影面积, m^2 ; $f_{xw}(\theta_w)$ 、 $f_{yw}(\theta_w)$ 分别为纵

向分力和横向风力的形状函数; θ_w 为风向角, 即风向与船舶纵轴线(自艏至艉)之间的角度, ($^{\circ}$); L 为船长, m; $C_{xyw}(\theta_w)$ 为艏艉摇力矩系数。

该规范主要按船舶上层建筑分类对风载荷计算进行规定, 适用于具有单一和分布式上层建筑的船型, 风荷载作用力表达方式与 OCIMF 规范类似, 均包括横向分力、纵向分力和艏艉摇力矩, 但力矩计算作用点不同。

2 计算方法对比

将上述国内外计算方法进行对比, 见表 1。由表 1 可见, 中国行业规范表达形式最为简单, 考虑因素相对较少, 使用简便; 美国 UFC 规范表达形式最为复杂, 考虑影响因素最多, 且以军用舰船为主, 使用难度较大; 英国 BS 6349 介于二者之间, 其通用性相对较好; OCIMF 仅适用于大型油气船, 应用对象相对单一。

表 1 国内外船舶风荷载计算方法对比

标准	总体 表达形式	阻力 系数形式	力/力矩 作用点	船型差别	风速标准	装载状态	投影面积	与风向角 相关性
中国规范	横向分力+ 纵向分力	定量	不详	不考虑,仅考虑船长 影响风压的不均匀 折减系数	考虑风压高度 变化修正,采用 分量风速	间接考虑	对应方向 投影面积	通过风速 分量间接 考虑
英国 BS 6349	艏/艉横向 分力+纵向 分力	变量	艏/艉垂线	干货船、油轮和集装 箱船 3 大类	水面上 10 m, 时距 60 s;采用 空间风速	分压载和满载	侧向投影 面积	考虑
OCIMF MEG4	横向分力+ 纵向分力+ 艏摇力矩	变量	中站面	油船(载重吨 1.6 万~ 50 万 t)和气体运输船 (7.5 万~26.6 万 m ³) 2 大类	水面上 10 m, 时距 30 s;采用 空间风速	油船考虑压载 和满载,气体运 输船不考虑	对应方向 投影面积	考虑
美国 UFC	横向分力+ 纵向分力+ 艏摇力矩	变量	质心	根据上部结构分布 情况分 3 大类(军用 舰船为主)	水面上 10 m、 时距 30 s;采用 空间风速	间接考虑	对应方向 投影面积	考虑

3 计算实例

3.1 实例参数

为比较不同方法计算结果的差异性, 考虑通

用性和可比性, 选取 2.0 万吨级杂货船作为计算船型。该船主尺度和满载状态参数见表 2, 数据主要来自中国规范和 PIANC(国际航运协会)。

表 2 杂货船参数

载重吨 DWT/万 t	排水量/ 万 t	总长 L / m	垂线间长 L_B /m	型宽 B / m	型深 H / m	吃水 d / m	干舷高/ m	受风面积/m ²		水下横向 投影面积/m ²
								横向	纵向	
2.0	2.84	170	161	24.9	14.1	10.4	3.9	1 760	466	1 306

注: 1. 船长等参数保证率为 75%; 2. 水下横向投影面积按我国规范散货船公式计算。

计算环境条件参数: 风速取 9 级风中值为 22.6 m/s, 风向角取 0 $^{\circ}$ 、30 $^{\circ}$ 、60 $^{\circ}$ 、90 $^{\circ}$ 、120 $^{\circ}$ 、150 $^{\circ}$ 、180 $^{\circ}$, 码头泊位水深 15 m。

由于 OCIMF 专门针对油气行业大型运输船, 不适用于杂货船, 因此仅对 3 种计算方法进行实例计算比较。

3.2 计算结果对比

实例计算结果对比见表 3 和图 1, 分析得出, 在上述计算环境条件下, 对于 2 万吨级杂货船: 1) 中国规范计算结果是横向分力以风向角 90 $^{\circ}$ 为

对称轴呈正对称分布, 纵向分力呈反对称分布, 英国和美国规范计算结果分布未严格对称, 特别是纵向分力, 0 $^{\circ}$ 时分力(艏向)大于 180 $^{\circ}$ 分力(艉向); 从船型受力分析, 英美规范相对合理; 2) 对于横向分力, 风向角在 60 $^{\circ}$ ~120 $^{\circ}$ 之间时, 中国规范结果大于英美规范, 最大值较英美规范偏大约 30%; 3) 对于纵向分力, 中国规范总体小于英国和美国规范, 0 $^{\circ}$ 时(艏向力)三者差别较大, 英国规范最大, 美国次之, 中国最小, 偏差最大幅度达 57%; 180 $^{\circ}$ 时(艉向力), 中国规范结果较最大值偏小约 15%。

表 3 计算结果对比

风向角/ (°)	分力 方向	力/kN		
		中国规范	英国 BS 6349	美国 UFC
0	横向	0.00	0.00	0.00
	纵向	88.64	139.34	116.25
30	横向	125.71	189.50	189.98
	纵向	66.67	117.04	96.66
60	横向	377.12	342.76	363.61
	纵向	22.16	94.75	44.49
90	横向	502.83	378.99	379.95
	纵向	0.00	11.15	-15.91
120	横向	377.12	353.91	363.61
	纵向	-22.16	-61.31	-59.79
150	横向	125.71	222.94	189.98
	纵向	-66.67	-89.17	-90.63
180	横向	0.00	0.00	0.00
	纵向	-88.64	-80.81	-101.72

注：1. 中国规范计算中，风压高度修正系数取 1.0，风压不均匀折减系数取 0.76；2. 英国规范计算中，空气密度取平均值，横向分力将首、尾横向分力叠加；3. 美国规范按船舶上部结构靠近艏部类型选取参数。

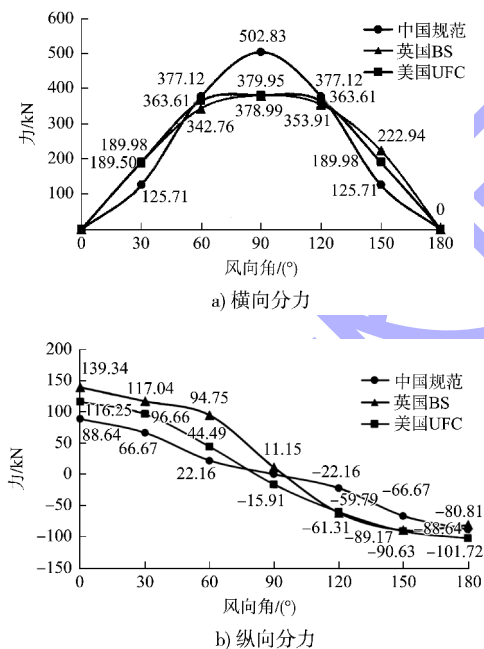


图 1 不同规范下船舶风荷载计算结果对比

4 结论

1) 各国行业标准计算原理相同，但表达形式差异性较大，重点适用船型有所不同。中国标准简单易用，美国 UFC 最为复杂，英国 BS 6349 介于二者之间。

2) 案例计算结果有较大差异，对于横向分力，英美规范结果接近，中国规范最大值明显偏

大；对于纵向分力，艏向风时英国规范结果显著大于中美规范，艏向风时中英规范结果接近，均小于美国 UFC 规范。

3) 建议根据适用船型、船舶数据的翔实程度、主风向角和管理要求等因素合理选用上述计算方法，有条件时采用数值模拟方法。

参考文献：

- [1] 杨兴晏. 船舶风荷载算法的比较研究[J]. 港工技术, 2006(2): 12-13.
- [2] 张万威, 王晟, 王静, 等. 大型原油码头船舶系泊试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(6): 739-745.
- [3] 赵光泽. 油轮系泊物理模型试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1612-1617.
- [4] 李焱, 王智勇, 郑宝友. 大型开敞式原油码头船舶作业和系泊安全条件试验研究[J]. 水道港口, 2015, 36 (3): 185-190.
- [5] 张露露, 单恒年, 潘滢. 作用于船舶上风荷载及参数的拟合分析计算[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 49-53.
- [6] 江伟, 张露露, 潘滢. 作用于船舶上风荷载及参数的理论计算[J]. 水运工程, 2019(9): 20-26.
- [7] 韩亚男. 国内外码头工程的船舶荷载设计计算方法比较研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [8] 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.
- [9] 汤本靖, 陈德春, 周益人, 等. 系泊船舶试验中风荷载的模拟[J]. 水运工程, 2013(12): 30-34.
- [10] 赵明志, 王震, 周益人, 等. 两种风荷载模拟方法下的邮轮系泊撞击能量试验研究[J]. 水运工程, 2013(4): 89-92, 186.
- [11] 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.
- [12] British Standards Institution. Maritime Works-Part 1-2: 2016+A1: 2017: General-Code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2 [S]. London: BSI, 2017.
- [13] Oil Companies International Marine Forum. OCIMF Mooring equipment guidelines (MEG4) [M]. Witherby: Witherby Seamanship International, 2018.
- [14] United States Department of Defense. UFC: Moorings: UFC 4-159-03—2020[S]. Washington: [s. n.], 2020.

(本文编辑 王传瑜)