



港口工程中船舶所受风荷载的理论计算分析

何蔚华

(大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 港口工程设计中船舶所受风荷载计算对系船设施选取起控制作用, 作用于船舶上的风荷载计算值由计算常数、船体水面以上受风面积、设计风速、风压不均匀折减系数和风压高度变化修正系数确定。针对港口工程设计中容易出现的参数取值错误问题, 对规范中风荷载的理论计算公式进行研究, 通过对公式中5个参数进行逐个分析, 结合设计经验, 得出船舶受风面积选取的注意事项, 推导出风压不均匀折减系数和风压高度变化修正系数的选用标准, 提出船舶水面以上代表高度的估算公式, 为未来规范中相关参数的修订和工程设计提供参考。

关键词: 风荷载; 受风面积; 风压高度变化修正系数; 船舶水面以上高度

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0053-03

Analysis of theoretical calculation of wind force on ships in port engineering

HE Wei-hua

(The Design Institute of Civil Engineering & Architecture of Dalian University of Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: In the design of port engineering, the calculation of wind force on the ship controls the selection of mooring facilities. The calculated value of wind force on the ship is determined by calculation constant, windage area of the ship above water, velocity of the wind, reduction coefficient of nonuniform wind pressure and correction coefficient of wind pressure height change. To avoid the error of parameter value in port engineering design, we study the theoretical calculation formula of wind force in the code. Through the analysis of five parameters in the formula one by one and combined with design experience, we obtain the precautions for the selection of windage area of ship, deduce the selection standard of reduction coefficient of nonuniform wind pressure and correction coefficient of wind pressure height change, and put forward the estimation formula of the representative ship height above water, so as to provide some references for the revision of relevant parameters in the code and engineering design.

Keywords: wind force; windage area; correction coefficient of wind pressure height change; ship height above water

港口工程中系船设施上受到的船舶荷载为由风和水流产生的船舶系缆力, 而一般情况下作用于船舶上的风荷载在船舶系缆力中起主导作用。风对船舶的作用主要受风速、风向和船舶受风面积的影响。

我国现行的JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[1]给出了作用在船舶上的计算风压力公式, 其中的多个参数需要通过其他统计数据、经验分析

等方式确定。由于相关条文未对各参数的选取方法进行详细说明, 工程设计时容易出现参数取值错误的情况。现有的研究, 如文献[2]对船舶水面以上高度的理论计算进行研究。本文对规范给出的公式参数进行详细阐述和分析, 使得各个参数在理论计算公式中的意义更清晰明了, 同时对容易出现取值错误的参数做出提醒, 并提出相关估算方法以及取值标准, 可为相关设计提供建议和

借鉴，也希望为规范中船舶荷载计算相关参数的修订提供参考。

1 理论计算公式

我国的《港口工程荷载规范》1998 版中给出的风压力计算公式与国际上其他规范或标准基本一致，由于在压载情况下的计算结果偏小，在现行的 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》引入了风压高度变化修正系数。根据现行规范的附录 E，作用于船舶上的风荷载可按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计算，公式为：

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

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

式中： F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用在船舶上的计算风压力的横、纵向分力(kN)； A_{xw} 、 A_{yw} 分别为船体水面以上横、纵向受风面积(m^2)； v_x 、 v_y 分别为设计风速的横、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。

2 参数分析

2.1 计算常数

根据伯努利公式可以得到基本风压计算式：

$$W_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

式中： W_0 为基本风压(kPa)； ρ 为空气质点密度(kg/m^3)； v 为设计风速(m/s)。

已知 760 mm 梅柱气压、常温 15 ℃ 干燥的情况下 $\rho = 1.226 \times 10^{-3} kg/m^3$ ，代入式(3)得：

$$W_0 \approx \frac{1}{1600} v^2 \quad (4)$$

由于港口工程计算中，船舶在水面以上均具有一定高度，故规范赋予了船舶受风面积离水面的基础高度 5 m，此时风压高度变化系数取 1.17，高于 5 m 再用 ζ_2 做进一步修正，与式(4)相乘得计算风压 W ：

$$W = 73.125 \times 10^{-5} v^2 \quad (5)$$

式(5)的常数项与式(1)基本相同，可认为式(1)的计算常数源于以上推导。另外根据《建筑结构荷载规范》^[3] 船舶所受风荷载大小，与风荷载

体形系数相关。通过式(5)与(1)的比较可知，我国现行规范中计算船舶风荷载的横向分力时，风荷载体形系数取 1.0。

根据 *Port Designer's Handbook*^[4] 关于船舶所受风荷载计算的通用标准公式，其对风荷载系数推荐值：垂直于船舶纵向时为 1.3；平行于船舶纵向时，对船首取 0.9，对船尾取 0.8。由此可知，在设计风速相同的情况下，船舶纵、横向单位受风面积所受计算风荷载的比值为 0.615 ~ 0.692。式(2)与(1)中的常数之比为 0.666 是合理的。

2.2 船体水面以上受风面积

船体水面以上受风面积推荐根据设计船型及其装载度按《海港总体设计规范》^[5] 附录 A 确定。港口工程中，需要注意泊位等级是按停泊船舶的吨级确定的，而查询船体水面以上受风面积时查询的是特定载质量的船舶。另外，各类船舶中，基本上压载状态下受风面积大于满载状态，但集装箱船却相反，满载状态下的集装箱船，甲板上方层叠的集装箱将大幅增加集装箱船的受风面积。2021-03-23 集装箱船“长赐号”在苏伊士运河搁浅，其原因之一就是强风，正是集装箱船满载的受风面积很大，增加了其在此类事故中搁浅的概率。

杂货船受风面积规律和普通船舶类似，但特别需要注意的是，一些运输重大件的杂货船尤其是用于远洋运输的此类船，船舶甲板上方的一个重大件其受风面积就可能为 2 000 ~ 3 000 m^2 ，故遇到此类船舶时应按实际资料取用船舶受风面积。

2.3 设计风速

对于没有特殊要求的港口，可按 9 级风考虑，9 级及以上时船舶才开始避风，建议工程设计时按 9 级风最大风速 24.4 m/s 设计。

2.4 风压不均匀折减系数

风压不均匀折减系数可按 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》附录 E 选用，需要注意规范中系数选取的依据是船舶水面以上最大轮廓尺寸。

2.5 风压高度变化修正系数

在一定高度范围内，风压随高度的增加而增大。港口工程设计中，船舶所处环境为海面，根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》，其地面

粗糙度分类为 A。风速沿高度的变化，规范采用指指数率表示，A 类地区高度 Z 处 (m) 的风压高度变化系数 μ_{ZA} 表示为：

$$\mu_{ZA} = 1.379 \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.24} \quad (6)$$

由 2.1 节可知，规范中理论计算公式的常数项已经考虑 5 m 的水面高度，此时经计算可得 $\mu_{ZA} = 1.168$ ，且规范规定船舶水面以上高度 ≤ 5 m 时 ζ_2 取 1，故船舶水面以上高度 > 5 m 时式(1)(2)的风压高度变化修正系数应为：

$$\zeta_2 = 1.181 \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.24} \quad (7)$$

JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》附录 E 中风压高度变化修正系数即由式(7)计算得出。

港口工程设计中，部分工程存在以船舶干舷高度为船舶水面以上高度的情况，对比实际船舶可以发现，干舷高度不足以代表船舶水面以上高度。根据 2.2 节可知，对于集装箱船和部分杂货船，用船舶干舷高度为船舶水面以上高度计算风压高度变化修正系数，取得的系数偏离式(7)较大，从而使风荷载计算结果出现严重错误。为了计算简便，船舶水面以上高度建议由下式计算：

$$h = \frac{A_{xw}}{L_e} \quad (8)$$

式中：h 为船舶水面以上代表高度 (m)； L_e 为船舶柱间距 (m)。

式(8)计算结果为简单的估算值，更准确的计算方式可参考文献[2]。式(8)得出的估算值与文献[2]的横向受风计算高度结果基本一致，故其结果在工程设计中是可行的。

以载质量 6 万 t 的集装箱船为例，满载干舷高度 9.2 m (75% 保证率)，满载横向受风面积 6 610 m²，柱间距 271 m，代入式(8)可得 $h = 24.4$ m，再代入式(7)得 $\zeta_2 = 1.463$ 。若以船舶干舷高度代表船舶水面以上高度 $h' = 9.2$ m，代入式(7)得 $\zeta'_2 = 1.158$ 。 $\zeta'_2/\zeta_2 \times 100\% = 79\%$ ，即以船舶干舷高度代表船舶水面以上高度计算所得的风荷载被低估了 21%。因此按照式(7)(8)计算风压高度变化修正系数是非常必要的。

3 结论

1) 在设计风速相同的情况下，作用于船舶纵向单位受风面积上的风荷载为横向的 0.666，故式(1)(2)的风压不均匀折减系数 ζ_1 和风压高度变化修正系数 ζ_2 应采用同一标准选用。规范中 ζ_1 的选用依据是船舶水面以上最大轮廓尺寸，即按船舶横向受风考虑，但 ζ_2 的选用标准不够明确。由于总体来看，纵向荷载的计算公式(2)由式(1)折减得出，故本文认为 ζ_2 的选用也应按船舶横向受风考虑。建议未来规范修订时能明确 ζ_2 的选用标准。

2) 工程设计中应注意船舶所受风荷载计算时集装箱船和部分杂货船存在压载状态下受风面积小于满载状态的情况；我国现行规范中统计的杂货船受风面积与重大件杂货船尤其是远洋运输重大件杂货船的实际情况不符，建议在未来规范修订中增加对此类船舶相关数据的统计。

3) 实际工程设计中，设计人员对 ζ_2 的选用存在较大差异，本文提出了船舶水面以上代表高度的简单估算公式，同时建议在未来规范修订中增加相关计算公式。

4) 风速沿高度呈增大趋势，规范中 ζ_2 的选用使得船舶水面以上部分所受风压全按最高处修正，式(1)(2)的计算结果也因此可能偏大。建议未来规范修订中风压高度变化修正系数可考虑按船舶水面以上高度内的加权平均值调整。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 刘胜. 港口系泊船舶受风高度取值问题研究[J]. 水运工程, 2013(6): 46-48.
- [3] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] THORESEN C A. Port designer's handbook [M]. 3rd ed. London: ICE Publishing, 2014.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.