



国内外船舶水流力计算方法对比

夏运强¹, 王海峰¹, 李欣¹, 沈雨生², 赵晶¹

(1. 中国人民解放军91053部队, 北京100070; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京210024)

摘要: 针对船舶水流力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(石油公司国际海事论坛)4种现行主流行业规范进行分析研究, 并以2万吨级杂货船为案例进行计算对比分析。结果表明: 各国行业标准计算原理、表达形式和实例计算结果均有较大差异, 美国规范考虑因素相对全面合理, 英国规范在易用性方面有一定优势。横向和纵向分力曲线分布呈不同的规律。建议根据适用船型、船舶数据的翔实程度、主流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。

关键词: 港口工程; 船舶水流力; 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)07-0048-05

Comparison of ship flow force calculation methods at home and abroad

XIA Yunqiang¹, WANG Haifeng¹, LI Xin¹, SHEN Yusheng², ZHAO Jing¹

(1. No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100070, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Regarding the problems of incomplete scope, updated version and limited application of ship type in the calculation of ship flow force, this paper selects four current mainstream industry specifications of China, the United Kingdom, the United States and OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) for analysis and research, and takes the general cargo ship of 20,000 tons as a case for comparative analysis. The results show that there are great differences in the calculation principle, expression form and calculation results of industrial standards in different countries. The American standard has relatively comprehensive and reasonable considerations, while the British standard has certain advantages in ease of use. The distribution of transverse and longitudinal component curves is different. It is suggested that the above calculation method should be reasonably selected according to the applicable ship type, the degree of information of ship data, the mainstream direction angle and the management requirements. The numerical simulation method should be adopted when possible.

Keywords: harbor engineering; ship flow force; drag coefficient; calculation method; general cargo ship

船舶水流力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、挤靠力和撞击力计算, 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]。水流力属于流体动压力。作用船舶上的水流力受来流方向和码头结构形式等影响, 可存在摩擦阻

力、形状阻力和兴波阻力等不同性质的阻力, 不同情况下各类阻力成分占比不同。水流力计算相对复杂, 通常采用半理论半经验公式表达。目前, 物理模型试验仍是研究船舶水流力的主要手段, 用于解决具体工程问题^[5], 验证和修正理论计算公式^[6-7]。

国内外相关行业规范或标准^[8-11]对船舶水流力

收稿日期: 2022-09-22

作者简介: 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。

计算均有规定,但表达形式和计算结果不同。韩亚男^[12]、秦晓宇^[13]、宗婧慧等^[14]、栗珂等^[15]、李叶兴等^[16]对其差异性进行了个案阐述,研究表明,我国规范公式计算结果与国外规范差异较大,李叶兴认为我国规范计算方法存在缺陷。现有研究存在引用规范范围不全、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(石油公司国际海事论坛)等现行主流行业规范的计算方法进行对比,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对比,进一步比较差别和适用性,为水动力计算方法的合理选用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 国内外船舶水动力计算方法

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》附录 F 中对船舶水动力计算做出了规定,来源于天津水运工程科学研究所 20 世纪 90 年代初的专题实验研究成果^[17-18]。

1) 当水流与船舶纵轴平行或流向角 $\theta < 15^\circ$ 或 $\theta > 165^\circ$ 时,按下列公式计算:

$$F_{xsc} = C_{xsc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \quad (1)$$

$$F_{xmc} = C_{xmc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \quad (2)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 S \quad (3)$$

式中: F_{xsc} 、 F_{xmc} 分别为水流对船首和船尾横向分力, kN; F_{yc} 为水流对船舶作用产生的水流纵向分力, kN; C_{xsc} 、 C_{xmc} 分别为水流对船首和船尾横向分力系数; C_{yc} 为水流力纵向分力系数; ρ 为水的密度, t/m^3 , 海水 $\rho = 1.025 t/m^3$, 淡水 $\rho = 1.000 t/m^3$; v 是水流速度, m/s; B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积, m^2 ; S 为船舶吃水线以下的表面积, m^2 。

2) 当水流与船舶纵轴斜交,即流向角为

$15^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ 时,按下列公式计算:

$$F_{xc} = C_{xc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{yc} \quad (4)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{xc} \quad (5)$$

$$A_{xc} = B' \sin \theta \quad (6)$$

$$A_{yc} = B' \cos \theta \quad (7)$$

式中: F_{xc} 、 F_{yc} 分别为水流对船舶产生的水流力的横向和纵向分力, kN; C_{xc} 、 C_{yc} 分别为水流力的横向和纵向分力系数; A_{xc} 、 A_{yc} 分别为船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积, m^2 ; B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积, m^2 。

使用时需特别注意:区别于其它国家规范,对于斜向流公式中横向和纵向分力分别定义为垂直和平行于水流方向的作用力,计算时需先分解、再合成为船舶横轴和纵轴上的分力。

1.2 英国 Maritime Works(BS-6349)

英国行业规范 *Maritime Works* 现行版本为 BS 6349-1-2:2016+A1:2017,在附录 Annex G 中作为资料性信息提供了船舶水动力计算方法:

$$F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4} \quad (9)$$

式中: F_{TC} 为作用于船舶上的横向分力, kN, 分为船首和船尾横向分力; F_{LC} 为作用于船舶上的纵向分力, kN; C_{TC} 、 C_{LC} 分别为横向和纵向水流阻力系数; C_{CT} 、 C_{CL} 分别为横向和纵向水流力深度修正因子,在水深/吃水小于 6 时,需考虑水深修正; L_{BP} 为船舶的垂线间长, m; d_m 为船舶的平均吃水, m; v_c' 为船舶平均吃水处的流速, m/s, 取计算方向上的流速。

1.3 OCIMF Mooring Equipment Guidelines

OCIMF 的 *Mooring Equipment Guidelines* 现行版本为 MEG 4—2018,在其附录 Appendix A3 和 A4 中对大型油轮和气体运输船水动力计算的规定为:

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c v_c'^2 L_{BP} T \quad (10)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c v_c'^2 L_{BP} T \quad (11)$$

$$M_{XYc} = \frac{1}{2} C_{XYc} \rho_c v_c^2 A_L L_{BP}^2 T \tag{12}$$

式中： F_{xc} 、 F_{yc} 分别为作用于船舶上的纵向和横向水流力，N； M_{XYc} 为船舶因水流产生的艏艉摇力矩，(N·m)； C_{xc} 、 C_{yc} 分别为纵向水流阻力系数和横向水流阻力系数； C_{XYc} 为艏艉摇力矩阻力系数； ρ_c 为水的密度，t/m³； L_{BP} 为船舶的垂线间长，m； T 为吃水，m。

1.4 美国 UFC MOORINGS

美国国防部 UFC (通用设施标准) 的 *Moorings* 现行版本为 UFC 4-159-3—2020，CHAPTER 4 中关于水流力计算方法为：

$$F_{xc} = F_{xForm} + F_{xFriction} + F_{xProp} \tag{13}$$

$$F_{xForm} = 0.5 \rho_w v_c^2 B T C_{xcb} \cos \theta_c \tag{14}$$

$$F_{xFriction} = 0.5 \rho_w v_c^2 S C_{xca} \cos \theta_c \tag{15}$$

$$F_{xProp} = 0.5 \rho_w v_c^2 A_p C_{Prop} \cos \theta_c \tag{16}$$

$$F_{yc} = 0.5 \rho_w v_c^2 L_{wL} T C_{yc} \sin \theta_c \tag{17}$$

$$M_{xye} = F_{yc} \left(\frac{e_c}{L_{wL}} \right) L_{wL} \tag{18}$$

式中： F_{xc} 、 F_{yc} 分别为作用于船舶上的纵向水流力和横向水流力，N； M_{xye} 为船舶因水流产生的艏艉摇力矩，N·m； F_{xForm} 、 $F_{xFriction}$ 、 F_{xProp} 分别为因形状阻力、摩擦阻力和螺旋桨阻力引起的纵向水流力，N； B 为船舶吃水处的最大船宽，m； T 为平均吃水，m； C_{xcb} 、 C_{xca} 、 C_{Prop} 分别为纵向流形状阻力系数、摩擦阻力系数和螺旋桨阻力系数； θ_c 为水流角度 (°)； S 为船舶的湿表面积，m²； A_p 为螺旋桨桨叶面积，m²； C_{yc} 为横向水流阻力系数； L_{wL} 为船舶水线长度，m； e_c 为横向水流力的偏心率。

2 计算方法对比

将上述国内外计算方法进行对比，见表 1。

表 1 国内外水流力计算方法对比

标准	总体表达形式	阻力系数形式	阻力组成性质	流向角定义	力/力矩作用点	船型差别
中国行业标准	横向+纵向分力，小角度流时又分艏横向+艉横向分力	准变量 (小流向角时为定量，横/斜向流时为变量)	小角度流时，纵向分力为摩擦阻力，其它均为形状阻力	艏向流为 0°	小角度流时，艏艉处；斜向流时计算确定，与流向角相关	分海港和河港两大类，大类内细分船型
英国 BS-6349	横向+纵向分力，横向可分船首横向和船尾横向分力	变量	均为形状阻力	艏向流为 0°	艏/艉垂线	分干货船、油轮和集装箱船三大类
OCIMF MEG4	横向分力+纵向分力+艏摇力矩	变量	均为形状阻力	艉向流为 0°	中站面	分油船和气体运输船两大类
美国 UFC	横向分力+纵向分力+艏摇力矩	定量，不含流向角因素	纵向水流力由摩擦阻力、形状阻力和螺旋桨阻力三部分构成，其它均为形状阻力	艉向流为 0°	重心	根据不同计算内容，分 3~6 类，军用舰船为主
标准	装载状态	投影面积采用	与流向角相关性	水深/吃水 (水深修正系数) 范围	适用流速范围	流速选用
中国行业标准	通过相对水深参数考虑	对应方向的投影面积	15°~165°时考虑	海港船舶 1.1~1.5；河港船舶 1.2~2.0	未限定	空间流速
英国 BS-6349	分压载和满载，同时考虑相对水深参数	均采用水下侧向投影面积	考虑	≤6，超过 6 无影响	未限定	计算方向上的流速
OCIMF MEG4	油船考虑压载和满载，气体运输船不考虑，同时均考虑相对水深参数	对应方向的投影面积	考虑	油轮 1.02~6.00；气体运输船 1.05~3.00	未限定	空间流速
美国 UFC	通过相对水深参数考虑	对应方向的投影面积	考虑	未明确规定	≤1.5 m/s	空间流速

由表 1 可见, 不同规范主要差别为: 1) 从阻力组成性质分析, 各国规范均以形状阻力为主, 其中对于纵向分力, 中国规范小角度流时仅考虑摩擦阻力, 美国规范考虑摩擦阻力、形体阻力和螺旋桨阻力, 相对全面合理; 2) 从流向角方面, 中国规范按小角度和斜向角两类提供不同计算方法, 其它规范统一考虑; 3) 从易用性方面, 英国规范表达形式相对简单, 易用性最好; 中国行业规范和美国 UFC 规范表达形式均较复杂, 涉及参数多, 使用难度较大, OCIMF 易用性居于上述两

者之间; 4) 从适用船型方面, 中国和英国规范通用性相对较好, OCIMF 仅适用于大型油气船, 应用对象相对单一, 美国规范侧重于军用船舶计算。

3 计算实例

3.1 实例参数

为比较不同计算方法的差异性, 结合通用性和可比性, 选取 2 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, 数据主要来自我国规范和 PIANC。

表 2 2 万吨级杂货船参数

载质量/ 万吨级	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	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吃水为满载状态参数; ③水下横向投影面积按我国规范散货船公式计算。

实例计算环境条件参数: 码头泊位水深 15 m, 流速 1.5 m/s, 流向角 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 、 120° 、 135° 、 150° 、 165° 、 180° 共 11 个方向。

各国规范对流向角定义有所不同, 中国和英国规范均规定艏向流为 0° , 美国规范规定艮向流为 0° 。为便于比较, 按右手坐标系法则, 将流向角统一定义为水流方向(流去的方向)与船舶纵轴线(自艮至艏)之间角度, 即艮向流为 0° , 艏向流为 180° , 据此对各国规范计算结果进行相应调整。

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

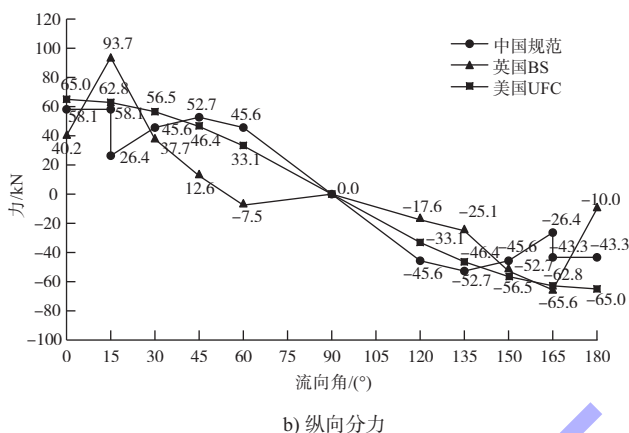
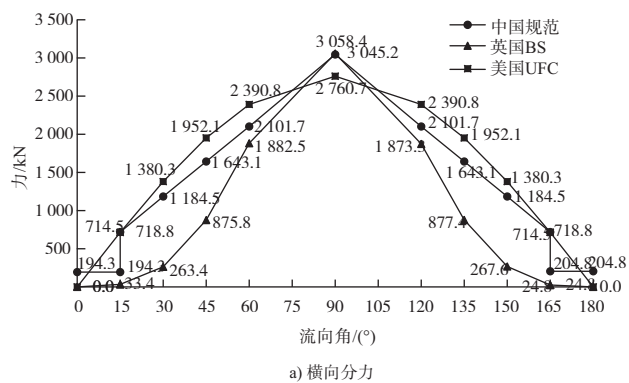
3.2 计算结果对比分析

实例计算结果对比见图 1。对于 2 万吨级杂货船, 在上述计算环境条件下, 由图 1 可见:

1) 对于横向分力, 美国规范计算结果以流向角 90° 为轴呈正对称分布, 中国规范在斜向流($15^\circ \sim 165^\circ$)范围内呈正对称分布, 英国规范未严格对称。各国规范均在 90° 时最大, 中国和英国规范最

大值接近, 大于美国规范约 10%; 美国和英国规范在 0° 和 180° 时计算结果为 0 kN, 中国规范数值较大; 中国规范在小角度流($0^\circ \sim 15^\circ$ 和 $165^\circ \sim 180^\circ$)计算结果恒定, 且在 15° 和 165° 数据点出现跳跃; 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 和 $100^\circ \sim 180^\circ$ 大致范围内, 美国规范计算结果最大, 英国规范最小, 中国规范居中。

2) 对于纵向分力, 美国规范计算结果以流向角 90° 为轴呈反对称分布, 中国规范在斜向流($15^\circ \sim 165^\circ$)范围内呈反对称分布, 英国规范未严格反对称; 三国规范均在 90° 时结果为 0 kN; 英国规范计算结果最大值出现在流向 15° 左右, 中国规范出现在 $0^\circ \sim 15^\circ$, 美国规范出现在 0° , 数值上看, 英国规范最大, 中美规范接近, 前者比后者大 40% ~ 60%; 在 15° 和 165° 时, 中国规范出现数据点跳跃, 英美规范数据连续; 除跳跃点外, 中国与英国规范数据曲线分布较为接近, 特别是在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 区间; 美国规范计算螺旋桨阻力在纵向分力中占比较高, 约为 35%。



注: 英国规范未提供货船的水深修正系数, 计算采用了 container 船型资料数据, 将船首和船尾横向分力线性叠加为横向分力。

图1 不同规范计算结果对比

4 结论

1) 各国行业标准计算原理和表达形式差异较大, 美国规范考虑因素相对全面合理, 英国规范在易用性方面有一定优势, 各国规范重点适用船型有所不同。

2) 货船实例计算结果有较大差异, 对横向分力 90° 时中英规范最大且接近, 在其它大多数角度, 中美规范大于英国规范; 对纵向分力, 除跳跃点外, 中美规范数据分布曲线接近, 英国规范最大值较大。

3) 建议根据适用船型、船舶数据的翔实程度、主流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] 杨国平, 张志明, 周丰, 等. 离岸深水港码头系泊船舶系缆力和撞击能量[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 53-59.
- [2] 温过路. 大型船舶系缆力影响因素的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [3] 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.
- [4] 李焱, 陈汉宝, 高峰, 等. 复杂水流作用下船舶系泊条件试验分析[J]. 港口科技, 2019(2): 24-28.
- [5] 韩春晓, 杨艳静, 陈汉宝, 等. 滨海电站取水对港内船舶水流力试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(2): 214-219.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] British Standard. General-Code of practice for assessment of actions: BS 6349, Maritime Works. Part 1-2: 2016+A1 [S]. London: BSI, 2017.
- [10] OCIMF. Mooring Equipment Guidelines (MEG4) [M]. Glasgow: Wither by Seamanship International, 2018.
- [11] UFC. MOORINGS : 4-159-03—2020 [S]. Washington: US Department of Defense, 2020.
- [12] 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.
- [13] 秦晓宇. 中英规范下大型集装箱船靠泊开敞式码头的水流力计算[J]. 水运工程, 2021(9): 44-48.
- [14] 宗婧慧, 韩健铄. 中英规范中船舶水流力计算的对比研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(12): 8-10.
- [15] 栗珂, 郑金海, 严士常, 等. 小流向角下的 30 万吨级油船水流力试验[J]. 水运工程, 2018(11): 60-63, 67.
- [16] 李叶兴, 陈国平, 严士常, 等. 大型油轮水流力试验研究[J]. 水运工程, 2012(9): 12-17.
- [17] 张福然, 赵军, 张学勤. 水流对离岸海港码头系泊船舶作用力的研究[J]. 水道港口, 1995(1): 1-11.
- [18] 张福然, 赵军. 水流对顺岸码头上系泊船舶作用力的研究[J]. 水运工程, 1995(3): 52-55.

(本文编辑 赵娟)