



船舶所受水流力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：码头结构设计和系船柱选型以船舶系缆力为重要条件，而各国规范中的船舶系缆力计算方法不尽相同。针对船舶所受水流力的计算方法差异，选取中国 JTS、西班牙 ROM、OCIMF 指南、英国 BS 6349 共 4 种常用码头结构设计规范进行对比，并以 30 万 t 油船为例进行水流力的计算和分析。结果表明：1) 各国规范对于船舶所受水流力的计算公式、相对水深比、设计流速、适应范围等均存在一定差异；2) 对于 30 万 t 油船，ROM 计算所得的船舶所受水流力最大，BS 6349 最小。结论可供类似工程设计参考。

关键词：船舶所受水流力；国内外规范；计算公式

中图分类号：U 653.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)11-0093-06

Comparison of current force on ships in Chinese and foreign codes

CHEN Zhi-le, YANG Jing-si

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

Abstract: Mooring force is an important factor in wharf structure design and mooring bollards selection. The calculation methods of ship mooring force are different between different codes. Regarding the differences in current force calculation, this paper selects four wharf structural design specifications for comparison, namely JTS of China, ROM of Spain, OCIMF Guide and BS 6349 of Britain, and takes a 300,000-ton tanker as an example. The results show that: 1) there are some differences in the calculation formula, relative water depth ratio, design current velocity and adaptive range of the current force on ships; 2) The current force of the 300,000-ton tanker calculated by ROM is the largest, while the BS 6349 result is the smallest. The conclusion can be used as references for similar engineering design.

Keywords: current force on ships; foreign and Chinese codes; calculation formula

码头结构设计和系船柱选型以船舶系缆力为重要条件，而各国规范中的船舶系缆力计算方法不尽相同。随着海外工程业务的不断拓展，设计人员必须掌握相应的国外规范标准。目前，对于系缆力中外规范对比主要集中在中英规范间，例如：叶银苗^[1]对油船所受风荷载进行对比；许松乔^[2]对油船和集装箱船所受风荷载、水流力进行对比；韩亚男^[3]对散货船、油船、集装箱船所受风荷载、水流力进行对比。而目前少有对西班牙规范和 OCIMF 指南的对比。本文选取了中国 JTS 规范、西班牙 ROM 规范、OCIMF 指南、英国 BS 6349 4 种规范，分析各国规范在船舶所受水流力计算方面的异同，对船舶所受水流力的计算公式、输入变量、适应范围进行对比分析，以 30 万 t 油船为例，将水流力计算结果进行对比分析，可为类似工程提供设计参考。

1 船舶所受水流力计算公式

1.1 中国规范

JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[4]（以下

简称 JTS)认为, 船首、尾方向来流时, 以摩擦阻力为主, 而水流来自船舶侧向时, 以形体阻力为主。

根据 JTS, 开敞式海港透空式系、靠船结构, 流向角<15°或>165°时水流对船舶产生的船首、尾横向和纵向分力分别按下式计算:

$$\begin{cases} F_{xsc} = C_{xsc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \\ F_{xmc} = C_{xmc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \\ F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 S \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{xsc} 、 F_{xmc} 、 F_{yc} 分别为水流对船首横向分力、船尾横向分力、船舶纵向分力(kN); C_{xsc} 、 C_{xmc} 、 C_{yc} 分别为水流对船首横向分力系数、船尾横向分力系数、船舶纵向分力系数; ρ 为水的密度(t/m³), 对海水可取 1.025 t/m³; v 为水流速度(m/s); B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积(m²); S 为船舶吃水线以下的表面积(m²)。

开敞式海港透空式系、靠船结构, 流向角为 15°~165°时, 水流对船舶作用产生的横向与纵向分力按下式计算:

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

式中: F_{xc} 、 F_{yc} 分别为水流对船舶作用产生的水流力的横向和纵向(kN); C_{xc} 、 C_{yc} 分别为水流对船首横向、纵向分力系数; ρ 为水的密度(t/m³), 对海水可取 1.025 t/m³; v 为水流速度(m/s); A_{yc} 、 A_{xc} 分别为相应装载情况下的船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积(m²)。

1.2 西班牙规范

根据 ROM0.2-90 海事及海港工程设计规范^[5](以下简称 ROM), 作用于船舶上的水流力可能存在水流压力、水流拖曳力和自振阻力。而由水流压力和水流拖曳力产生的水流合力可分解为横、纵向水流力以及横摆力矩。

其中, 水流压力可按下列公式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{TC} = \frac{\rho_w}{2g} C_{TC} v_c^2 A_{LC} \sin \alpha \\ F_{LC} = \pm \frac{\rho_w}{2g} C_{LC} v_c^2 A_{TC} \\ A_{LC} = L_{pp} D \\ A_{TC} = BD \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: F_{TC} 、 F_{LC} 分别是作用在船舶上的横、纵向水流力(t); ρ_w 为水的密度, 海水取 1.03 t/m³, 淡水取 1.00 t/m³; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s²; C_{TC} 、 C_{LC} 分别是作用在船舶上的横、纵向水流力形状系数, C_{LC} 的取值范围为 0.2~0.6, 传统型船首可取 0.6; v_c 为设计流速, 取船舶吃水 50% 处的 1 min 平均流速; α 为流向与船舶纵轴线(船尾至船首)的夹角(°); A_{LC} 、 A_{TC} 分别为船舶受水流作用的纵、横向投影面积(m²)。 B 为船舶的型宽(m); D 为船舶吃水(m); L_{pp} 为船舶垂线间长(m)。

水流拖曳力可按下式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} F'_{TC} = \frac{\rho_w}{2g} C_r v_c^2 A'_{TC} \sin^2 \alpha \\ F'_{LC} = \frac{\rho_w}{2g} C_r v_c^2 A'_{LC} \cos^2 \alpha \\ A'_{TC} = (L_{pp} + 2D) B \\ A'_{LC} = (B + 2D) L_{pp} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: F'_{TC} 、 F'_{LC} 分别为作用在船舶上的横、纵向水流拖曳力(t); C_r 为摩擦系数, 运行中的船舶取 0.004, 新船取 0.001; A'_{TC} 、 A'_{LC} 分别为船舶湿表面积的横、纵向投影(m²); B 为船舶的型宽(m); D 为船舶吃水(m)。

1.3 OCIMF 指南

根据石油公司国际海事论坛 OCIMF(MEG4 2018) 系泊设备指南^[6](以下简称 OCIMF), 船舶所受横、纵向水流力可按下式进行计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T \\ F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: F_{xc} 为船首或船尾的横向水流力(kN); F_{yc} 为纵向水流力(kN); C_{xc} 为船首或船尾的横向水流力阻力系数; C_{yc} 为纵向水流力阻力系数; C_{xyc}

为力矩水流力阻力系数; ρ_c 为海水的密度 (t/m^3), 可取 $1.025 t/m^3$; L_{BP} 为船舶垂线间长 (m); T 为船舶的平均吃水 (m); v_c' 为船舶吃水线处的平均流速 (m/s), 由船舶平均深度方向流速确定。

1.4 英国规范

根据英国 BS 6349-1-2: 2016 规范^[7] (以下简称 BS 6349), 作用在船舶上的水流力可按下式计算:

$$\begin{cases} F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4} \\ F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_{TC} 为船首或船尾的横向水流力, 总横向水流力将两者相加 (kN); F_{LC} 为纵向水流力 (kN);

C_{TC} 为船首或船尾的横向水流力阻力系数; C_{LC} 为纵向水流力阻力系数; C_{CT} 、 C_{CL} 分别为横、纵向水流力的水深校正系数; ρ 为海水的密度, 可取 $1.025 t/m^3$; L_{BP} 为水线处的船长 (m); d_m 为船舶的平均吃水 (m); v_c' 为平均流速 (m/s), 可由船舶平均深度方向流速确定。

2 计算公式对比

对比分析各规范对于船舶所受水流力的计算公式, 各公式都包括水密度、水流流速、船舶横纵向受水流作用的面积、水流力系数等变量, 但各变量的算法及取值存在差异, 见表 1。

表 1 计算公式总结

规范	总公式模型	系数	水流力系数 C	水流力作用面积/ m^2	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	设计流速 $v/(m \cdot s^{-1})$
JTS	$F = C \frac{\rho}{2} v^2 A$					
	$F_{xc} = \frac{1}{2} (C_{xsc} + C_{xmc}) \rho v^2 B'$ $F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho v^2 S$	1/2	$C_{xsc} + C_{xmc}$ (0.12~0.22) C_{yc} (0.005~0.021)	B'	$S = 1.7LD + C_b LB$	按港口结构所 海水: $1.025 t/m^3$ 处范围内可能 淡水: $1.000 t/m^3$ 出现的最大平 均流速设计
ROM	$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho v^2 A_{yc}$ $F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho v^2 A_{xc}$	1/2	C_{xc} (0.05~2.98) C_{yc} (0.10~3.11)	$A_{yc} = B' \sin\theta$ $A_{xc} = B' \cos\theta$		按港口结构所 海水: $1.025 t/m^3$ 处范围内可能 淡水: $1.000 t/m^3$ 出现的最大平 均流速设计
	$F_{TC} = \frac{\rho_w}{2g} C_{TC} v_c^2 A_{LC} \sin\alpha$ $F_{LC} = \pm \frac{\rho_w}{2g} C_{LC} v_c^2 A_{TC}$	1/2	$C_{TC} \sin\alpha$ (0~7)	$\pm C_{LC}$ (0.2~0.6)	$A_{LC} = L_{pp} D$ $A_{TC} = BD$	海水: $1.030 t/m^3$ 取船舶吃水 淡水: $1.000 t/m^3$ 50%处的 1 min 平均流速
OCIMF	$F'_{TC} = \frac{\rho_w}{2g} C_r v_c^2 A'_{TC} \sin^2\alpha$ $F'_{LC} = \frac{\rho_w}{2g} C_r v_c^2 A'_{LC} \cos^2\alpha$	1/2	$C_r \sin^2\alpha$ (0~0.004)	$C_r \cos^2\alpha$ (0~0.004)	$A'_{TC} = (L_{pp} + 2D) B$ $A'_{LC} = (B + 2D) L_{pp}$	海水: $1.03 t/m^3$ 取船舶吃水 淡水: $1.000 t/m^3$ 50%处的 1 min 平均流速
	$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T$ $F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T$	1/2	C_{xc} (-0.146~0.288)	C_{yc} (0~2.914)	$L_{BP} T$	海水: $1.025 t/m^3$ 取船舶吃水范 围内的流速积 淡水: $1.000 t/m^3$ 分中值
BS 6349	$F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4}$ $F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m v_c'^2 \times 10^{-4}$	1/10	$C_{TC} C_{CT}$ (0~15.798)	$C_{LC} C_{CL}$ (-0.875~0.438)	$L_{BP} d_m$	海水: $1.025 t/m^3$ 取船舶吃水范 围内的流速积 淡水: $1.000 t/m^3$ 分中值

注: 系数是将海水密度单位统一为 t/m^3 后整理的结果。

各公式存在的差异主要有:

1) 公式适用的相对水深比 (水深与船舶吃水比) 差异显著。中国规范列举出的相对水深比有

1.1、1.3、1.5。ROM 规范列举的相对水深比范围为 1.0~7.0。OCIMF 指南列举的相对水深比有 1.02、1.05、1.1、3.0、6.0。BS 6349 列举的相

对水深比有 1.1、1.2、1.5、2.0、3.0。比较可知, ROM 和 OCIMF 列举的相对水深比范围更为完整; 而 JTS 和 BS6349 提供的相对水深比则存在局限性, 实际压载工况下相对水深比很容易超出其列举范围, 致使计算结果产生误差。

2) 公式适用的船舶类型与吨级大小不同。JTS 主要针对散货船与油船; ROM 适用于多种类型和吨级的船舶; OCIMF 适用于大型油船(1.6 万~50 万 t)和天然气船(7.5 万~26.6 万 t); BS 6349 适用于大型及小型油船、典型集装箱船舶。

3) 水流力修正系数。JTS 横向水流力修正系数与相对水深比相关; 纵向水流力系数与水流流速、船舶吃水线长度、水温、船舶方形系数相关, 如果流向角在 $15^\circ \sim 165^\circ$ 内, 水流力修正系数主要与相对水深比相关。ROM 横向水流力系数与相对水深比相关, 纵向水流力系数与船头形状相关; 水流拖曳力系数与船舶的摩擦系数相关。OCIMF 水流力修正系数与船型、装载情况、相对水深比相关。BS 6349 水流力修正系数与船型相关, 并单设水深修正系数。

4) 水流力作用方向。JTS 中 F_{xc} 、 F_{yc} 是水流对船舶作用产生的水流力垂直于结构前沿线的横向分力和纵向分力; 其他规范计算的 F_{tc} 、 F_{lc} 是船舶所受的水流力沿船舶横向和纵轴的横纵分力。两者间存在差异, 当船的纵轴与码头平行时两者才相同。

5) 水流流速。JTS 按使用期内码头处可能出现的最大平均流速设计, 未明确流速的具体位置。ROM 明确取船舶 50% 吃水处的流速作为设计流速。OCIMF 取船舶吃水范围内流速的积分中值作为设计流速, 且提供了不同位置处流速转换为积分中值的计算方法。BS 6349 取船舶吃水范围内流速的积分中值作为设计流速。

6) 水流力作用面积。对于水流力作用面积, 有的公式采用投影面积, 有的采用船舶吃水线以下的表面积, 这主要与水流力的类型相关。ROM 采用船舶吃水线以下的横纵向投影面积, 分别是

垂线间长与平均吃水之积、船宽与平均吃水之积; 计算水流拖曳力时采用的是船舶吃水线以下的表面积。OCIMF 和 BS 6349 均采用船舶吃水线以下的横向投影面积, 即垂线间长与平均吃水之积。

7) 横摆力矩。同风荷载一样, ROM 和 OCIMF 考虑了水流力作用下的船舶绕中心垂直轴的横摆力矩, JTS 和 BS 6349 均未考虑。

3 工程案例

3.1 计算条件

各规范均适用于 16 万~50 万 t 大型油船。目前国内大型原油码头多为 30 万吨级, 故选用 30 万 t 油船进行案例分析, 对其在满载、压载工况下的水流力进行计算, 船型参数为: 总长 L 为 334 m; 垂线间长 L_{pp} 为 322 m; 型宽 B 为 60.0 m; 型深 H 为 31.2 m; 满载吃水 T 为 22.5 m。

由于各规范最大平均流速选取的对应位置不同, 该算例选取 1.0 m/s 作为 JTS 设计流速, 其他规范参照流速修正系数进行对应换算, 流速换算见表 2。

表 2 流速换算

规范	流速取值方式	流速修正系数	设计流速/(m·s ⁻¹)
JTS	可能出现的最大平均流速	1.27	1.00
ROM	50% 吃水处流速	0.98	0.77
OCIMF	吃水范围积分中值	1.00	0.79
BS 6349	吃水范围积分中值	1.00	0.79

3.2 水流力比较

为进行计算结果对比, 海水密度、设计流速分别参照表 1、2 取值, 选取满载与压载工况进行计算。结合 30 万 t 油船的吃水及设计水深, 满载、压载状态的相对水深比分别取 1.1、3.0。由于 JTS 规范无相对水深比 3.0 的对应系数取值, 采用已有的最大相对水深比对应的数值。另外, 各规范采用不同的流向角坐标系, 本次计算参照 ROM 和 BS 6349 流向角坐标系取法, 即以船舶纵轴线(船首指向船尾)与流向的夹角为流向角, 以船舶正迎面来流为 0° , 流向角逆时针旋转。水流力计算结果见图 1。

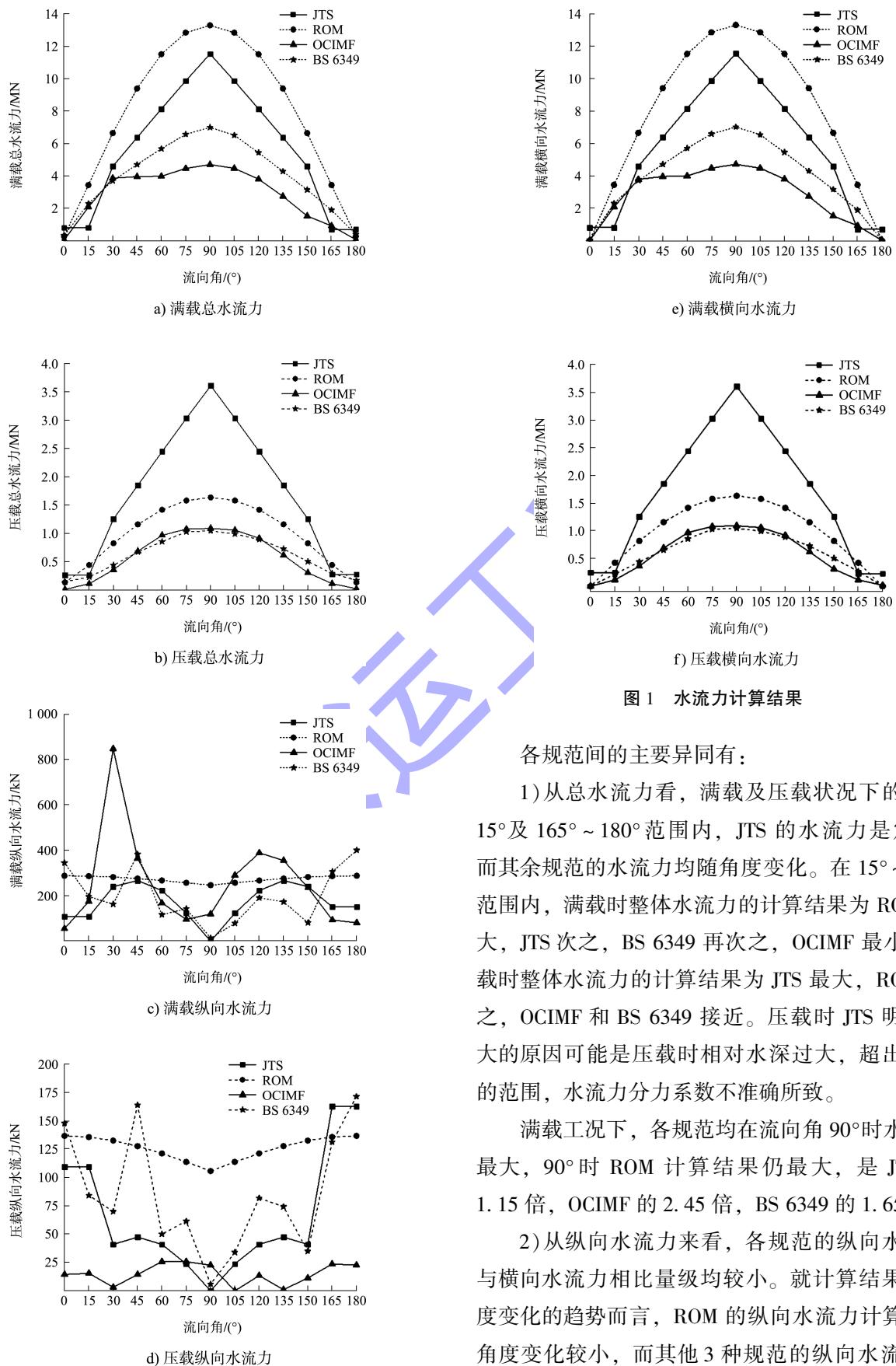


图 1 水流力计算结果

各规范间的主要异同有:

1) 从总水流力看, 满载及压载状况下的 $0^\circ \sim 15^\circ$ 及 $165^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, JTS 的水流力是定值, 而其余规范的水流力均随角度变化。在 $15^\circ \sim 165^\circ$ 范围内, 满载时整体水流力的计算结果为 ROM 最大, JTS 次之, BS 6349 再次之, OCIMF 最小; 压载时整体水流力的计算结果为 JTS 最大, ROM 次之, OCIMF 和 BS 6349 接近。压载时 JTS 明显最大的原因可能是压载时相对水深过大, 超出规范的范围, 水流力分力系数不准确所致。

满载工况下, 各规范均在流向角 90° 时水流力最大, 90° 时 ROM 计算结果仍最大, 是 JTS 的 1.15 倍, OCIMF 的 2.45 倍, BS 6349 的 1.65 倍。

2) 从纵向水流力来看, 各规范的纵向水流力与横向水流力相比量级均较小。就计算结果随角度变化的趋势而言, ROM 的纵向水流力计算值随角度变化较小, 而其他 3 种规范的纵向水流力则

随角度呈现明显波动变化。JTS 认为在流向角为 90° 即横流时, 船舶所受纵向水流力为 0, 而另外 3 种规范中纵向水流力依然存在。OCIMF 第 4 版中提到, 相关研究显示, 当相对水深比为 1.1、流向角为 30° 的满载状态下, 纵向水流力会出现最大峰值。如图 1c) 所示, OCIMF 船舶最大纵向水流力可达 849 kN, 是其所有角度范围内第 2 峰值的 2.18 倍, 其余 3 项规范均未有突出峰值。

3) 从横向水流力来看, 计算结果的趋势基本与总水流力计算结果一致。

4) 对称性。只有 ROM 的横、纵向水流力均关于 90° 对称, 即两流向角互补时, 水流力计算结果绝对值相同。JTS、OCIMF 和 BS 6349 的横纵向水流力均未呈现对称, 说明此三者考虑了水下部分船首尾的差异性, ROM 进行了简化。

5) BS 6349 建议在计算 1.6 万 t 以上油船所受水流力时推荐参照 OCIMF 公式, 保留 BS 6349 计算方法可用于初步评估, 因为 OCIMF 水流力系数表基于实船资料进行了更新。

4 结语

1) 各国公式适用的相对水深比范围差异显著, ROM 提供的最大水深比可达 7.0, 而 JTS 仅为 1.5。该局限性使 JTS 压载工况下的水流力计算产生误差, 建议进一步完善。

2) 各国公式适用的船舶类型和尺寸不同, JTS 适用于散货船与油船, OCIMF 适用于大型油船和天然气船, BS 6349 适用于小型油船、大型油船、典型集装箱船舶。在计算或对比分析时应注意适

应范围的不同。

3) 各国规范在计算船舶水流力时, 在水流力作用方向、流速选取、船舶受流面积、水流力修正系数等方面均存在一定差异。

4) 对比 30 万 t 油船控制工况下的最大水流力计算结果, 可知 ROM 最大, JTS 次之, OCIMF 再次之, BS 6349 最小。ROM 计算结果是最保守的, JTS 计算的最大水流力是 ROM 的 0.87 倍, OCIMF 的 2.45 倍, BS 6349 的 1.65 倍。鉴于各国规范中船舶水流力计算差异较大, 结构设计时宜采用一种规范体系, 避免交叉使用。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] Puertos del Estado. Recommendations for the design of maritime configuration of ports: ROM 0.2-90(1994) [S]. Madrid: Puertos del Estado, 1994.
- [6] OCIMF. Mooring Equipment Guidelines[M]. 4rd ed. London: Witherby Seamanship International, 2008.
- [7] British Standard Institution. Maritime works-Part 1-2: Code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2: 2016[S]. London: BSI Standards Limited, 2016.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。