



# 中英规范下大型集装箱船靠泊开放式码头的水流力计算

秦晓宇<sup>1,2</sup>

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063;  
2. 上海海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200063)

**摘要:** 针对大型集装箱船靠泊码头时产生的水流力进行研究, 分别依据 JTS 144-1—2010《港口荷载工程规范》、英国 BS 6349-1 规范对水流力的计算方法及公式中采用的相关系数做了无因次化比较。结合工程实例, 应用 OPTIMOOR 软件对大型集装箱船舶在不同流向角下的水流力进行计算和模拟。结果表明: 1) 水流力的大小对相对水深比非常敏感。2) 英标计算得出的横向水流力结果大于国标计算结果, 而英标计算出的纵向水流力计算结果远小于国标。3) 应用国标计算水流力时, 船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积需要修正。

**关键词:** 系缆力; 水流力; 大型集装箱船; 水工建筑物

中图分类号: U 656

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2021)09-0044-05

## Current force calculation of large container ships berthing at open wharf under Chinese and British standards

QIN Xiao-yu<sup>1,2</sup>

(1. CSSC China Shipbuilding NDRI, Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Research Centre of Ocean & Shipbuilding Maritime Engineering, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The current force generated by large container ships when berthed at the jetty is studied. By discussing the formula in JTS 144-1-2010 *Load Code for Harbor Engineering* and formula in British Standard BS6349-1, a dimensionless comparison about the calculation method of current force and the related coefficients is carried out. Combined with engineering examples, the OPTIMOOR software is used to calculate and simulate the current forces of large container ships under different current angles. The results show that: 1) The current force is very sensitive to the relative water depth ratio. 2) The transversal current force calculated by the British Standard is greater than the calculation result of the national standard, while the longitudinal current force calculated by the British Standard is much smaller than the national standard. 3) When the national standard is applied to calculate the current force, the projected area of the vertical and parallel water flow directions of the underwater part of the ship needs to be corrected.

**Keywords:** mooring force; current force; large container ship; marine structure

系缆力是作用在港口工程结构上的重要荷载之一, 而水流力则是系缆力计算中的重要组成部分。通常推荐新建码头的前沿线平行于当地水流常流向<sup>[1]</sup>, 因为当垂直于码头的流速大于 0.5 m/s

时, 船舶将很难靠泊。我国现行的 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[2]</sup>, 根据工程实际情况, 按照不同的流向角度, 将开放式海港透空式码头结构的水流力计算划分为 0~15°(或 165°~180°)

和  $15^\circ \sim 165^\circ$  两种计算工况, 但与国外水流力计算规范有很大不同<sup>[3-4]</sup>。

张福然等<sup>[5]</sup>对水流力作用在顺岸码头靠泊驳船和货船的情况进行了试验分析; 栗珂等<sup>[6]</sup>通过试验对小流向角下的 30 万吨级油船展开论证; 李叶兴等<sup>[7]</sup>通过大型油轮的水流力试验对  $0^\circ \sim 180^\circ$  流向角下的水流力进行比较分析; 刘必劲等<sup>[8]</sup>对潮流作用下 20 万吨级油轮系缆力进行了试验模拟; 许松乔<sup>[9]</sup>通过对 30 万吨级油船的计算对比了中英规范下的系缆力计算结果; 宗婧慧<sup>[10]</sup>通过实例计算 5 万吨级油船, 比较了中英规范中的船舶水流力计算。

然而, 目前对基于系缆力计算的水流力研究大多集中于大型油轮, 并未对集装箱船进行分析, 在同等尺寸条件下, 集装箱船所受的水流力要大于油轮。本文将依据《港口工程荷载规范》及英国规范 BS 6349-1 对大型集装箱船进行水流力分析, 并通过 OPTIMOOR 软件<sup>[11]</sup>进行模拟计算, 根据不同的流向角度, 对不同计算方法中的分力系数及船舶的横向及纵向水流力进行对比研究, 为港口工程设计提供参考。

## 1 水流力计算方法

### 1.1 国内规范计算公式

对于开敞式海港透空式系船、靠船结构, 当流向角度小于  $15^\circ$  或大于  $165^\circ$  时, 或水流与船舶纵轴平行时, 水流力可按下式计算:

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

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

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

$$S = 1.7LD + C_b LB \quad (4)$$

$$C_{yc} = 0.046 Re^{-0.134} + b \quad (5)$$

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力纵向分力(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;  $\rho$  为水的密度, 海水  $\rho = 1.025 \text{ t/m}^3$ ;  $B'$  为船舶吃水线下

的横向投影面积( $\text{m}^2$ );  $S$  为船舶吃水线以下的表面积( $\text{m}^2$ );  $L$  为船长(m);  $D$  为船舶吃水(m);  $C_b$  为船舶方形系数;  $v$  为水流速度(m/s);  $B$  为船宽(m);  $Re$  为水流对船舶作用的雷诺数;  $b$  为系数, 可查表获得。

对于开敞式海港透空式系船、靠船结构, 当水流与船舶纵轴斜交, 夹角为  $15^\circ \sim 165^\circ$  时, 水流力可按下式计算:

$$F_{xc} = C_{xc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{yc} \quad (6)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{xc} \quad (7)$$

$$C_{xc} = a_1 \cdot \frac{\pi \theta}{180} + b_1 \quad (8)$$

$$C_{yc} = a_2 \cdot \frac{\pi \theta}{180} + b_2 \quad (9)$$

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分力(kN);  $C_{xc}$ 、 $C_{yc}$  分别为水流力横向和纵向分力系数;  $A_{yc}$ 、 $A_{xc}$  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( $\text{m}^2$ );  $\theta$  为流向角( $^\circ$ );  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为系数。

### 1.2 英国规范计算公式

根据英国规范 BS 6349-1, 船舶所受到的水流力可利用下式计算:

$$F_{tc} = C_{tc} C_{ct} \rho L_{bp} d_m v_c^2 \times 10^{-4} \quad (10)$$

$$F_{lc} = C_{lc} C_{cl} \rho L_{bp} d_m v_c^2 \times 10^{-4} \quad (11)$$

式中:  $F_{tc}$ 、 $F_{lc}$  分别为水流对船舶作用的横向和纵向分力(kN);  $C_{tc}$ 、 $C_{lc}$  分别为水流力的横向和纵向分力系数;  $C_{ct}$ 、 $C_{cl}$  分别为水流力的横向和纵向水深修正系数;  $v_c$  为船舶在平均吃水下的平均水流速度(m/s);  $L_{bp}$  为船舶的垂线间长(m);  $d_m$  为船舶的平均吃水(m)。

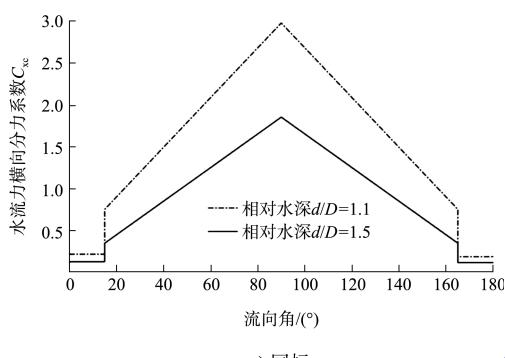
## 2 中英规范中采用的不同分力系数及相关参数

### 2.1 水流力横向分力系数

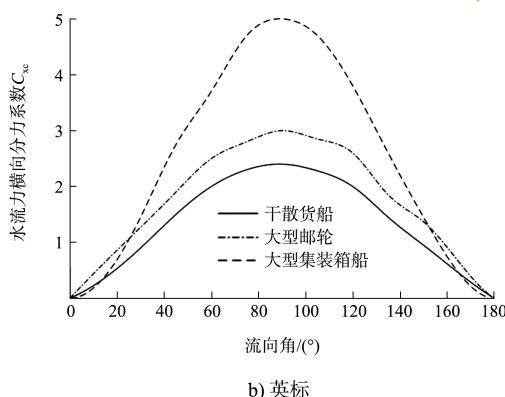
水流力的横向分力系数可通过对船首及船尾的横向分力系数加和求得<sup>[12]</sup>。国标中的水流力横向分力系数根据不同的系靠船结构前沿水深与船舶计算装载度相对应的平均吃水之比, 即相对水

深  $d/D$ ，分别规定了不同的计算系数，不同流向角下横向分力系数见图 1a)。但国标中对水流力横向分力系数的确定并未考虑不同船型的影响。

英标对干散货船、大型油轮及大型集装箱船分别通过图表规定不同的船首横向分力系数及船尾横向分力系数。其中深水条件下，各流向角对应的横向分力系数见图 1b)。考虑浅水对水流力的影响，将英标中的横向分力系数乘以相应水深修正系数，可以得到大型集装箱船、大型油船在不同水深下的横向分力系数，见图 2。

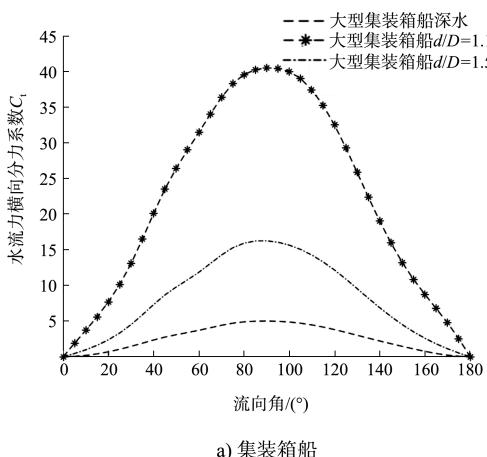


a) 国标

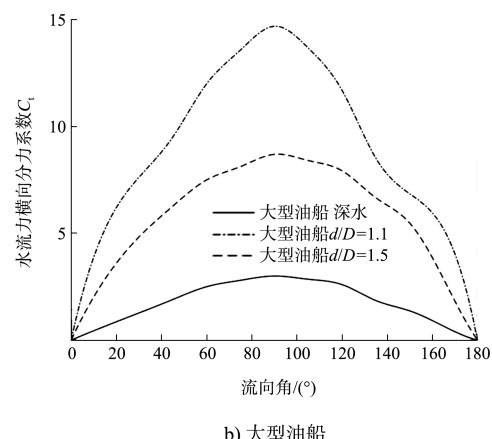


b) 英标

图 1 不同标准水流力横向分力系数



a) 集装箱船



b) 大型油船

图 2 不同船舶英标水流力横向分力系数

从图 1、2 可以看出，国标中水流力的横向分力系数在 0~15° 以及 165~180° 之间为常数，并不随流向角的改变而变化。国标中的水流力横向分力系数大小接近于英标中大型油轮深水状况，而英标中集装箱船的水流力横向分力系数要远大于国标中的系数。

## 2.2 水流力纵向分力系数

国标中，当水流与船舶纵轴平行，或流向角度小于 15° 或大于 165° 时，水流的纵向分力系数通过水流对停靠船舶长度的雷诺数确定，并受船型尺度的影响，对于集装箱船考虑方形系数在 0.5~0.7<sup>[13-14]</sup>；当流向角在 15°~165° 时，水流的纵向分力系数受泊位的相对水深比影响，且为相对流向角变化的线性函数，见图 3。

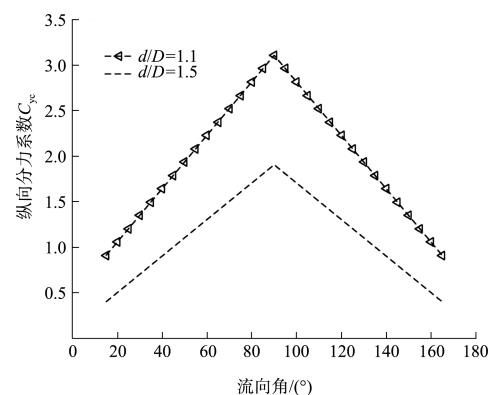


图 3 国标大流向角度下的水流力纵向分力系数

英标中的水流力纵向分力系数可以按照不同的船舶类型查表得到。而英标中提到的各类船型的纵向分力系数均小于 1，同样也小于国标要求。

### 2.3 船舶吃水线下投影面积

国内规范中, 对船舶的水下投影面积, 可以根据不同的船型计算得出。散货船的投影面积按下式计算:

$$\lg B' = 0.484 + 0.612 \lg(DW) \quad (12)$$

油船的投影面积按下式计算:

$$\lg B' = 0.508 + 0.612 \lg(DW) \quad (13)$$

式中:  $DW$  为靠泊船舶的计算载质量。根据不同的载质量, 计算不同的船舶水下投影面积, 见图 4。英标中, 并未对船舶的水下投影面积进行规定, 在计算横向及纵向水流力时仅考虑船舶的垂线间长与船舶吃水的乘积。

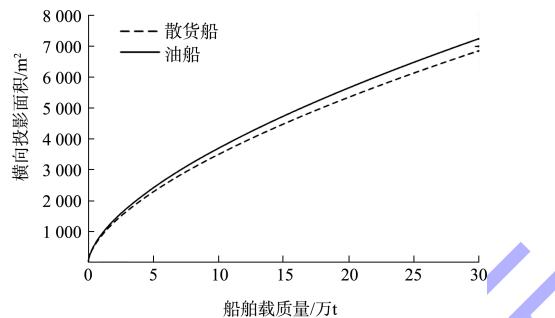


图 4 国标中散货船及油船吃水线以下的横向投影面积

李叶兴等通过模型试验, 明确指出当流向角在  $15^\circ \sim 165^\circ$  时, 国标中的水流力计算公式可能有误, 当流向角为  $90^\circ$  时水流力横向分力应达到最大值, 水流力纵向分力接近于 0。而国标计算中, 水流力的流向角在  $90^\circ$  时, 水流力横向分力为 0, 与实际情况不符。这主要是因为根据现有公式中, 当流向角为  $90^\circ$  时, 垂直于水流方向的投影面积  $A_{yc}$  为 0。现对船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积  $A_{yc}$ 、 $A_{xc}$  进行调整<sup>[15]</sup>, 使在流向角为  $90^\circ$  时, 垂直于水流方向的投影面积  $A_{yc}$  为船舶最大受流面积, 平行于水流方向的投影面积  $A_{xc}$  为 0。

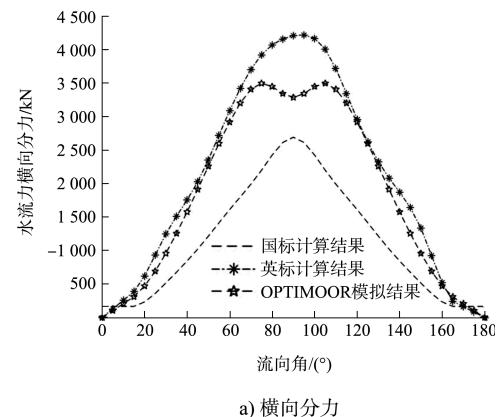
### 3 实例计算分析

以马来西亚某舾装码头为例, 设计靠泊船型为 1.8 万 TEU 集装箱船舶, 压载靠泊, 码头前沿水深 11 m。船型尺度为: 总长 399 m, 型宽 59 m, 型深 30.3 m, 压载吃水 8.5 m, 靠泊排水量 8 万 t。码头周遭无掩护, 当地风、水流、波浪等自然环境条件

良好, 计算流速取该处最大流速 0.8 m/s, 计算流向考虑  $15^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $165^\circ$ , 分别依据国标及英标计算, 并使用 OPTIMOOR 软件 6.7.7(2020 年版)进行模拟。在使用 OPTIMOOR 软件对水流力进行分析时, 选取软件自带的通用水流力计算原理(Generic Data)模拟。水流力见图 5。

可以看出, 无论是英标还是软件模拟, 水流力横向分力变化趋势大致相同, 在水流方向平行于船舶纵轴线时, 水流力横向分力较小, 而在流向角达到  $90^\circ$  时, 水流力横向分力最大。其中, 在使用 OPTIMOOR 软件模拟时, 由于船舶线型的影响, 当流向角为  $90^\circ$  时, 横向水流力有所减小。对于集装箱船舶, 英标计算结果及软件模拟结果均大于国标, 软件模拟结果与英标计算结果相接近。

大型集装箱船舶, 在流向角为  $90^\circ$  时, 水流力纵向分力为 0。英标与软件模拟结果中纵向分力均较小, 且变化趋势一致。而国标计算结果在小流向角时, 与软件模拟结果接近, 但是在大流向角时, 计算结果明显大于英标与软件模拟结果。



a) 横向分力

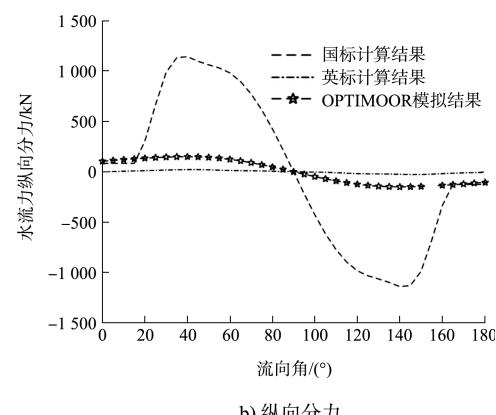


图 5 集装箱船舶实例计算水流力结果

## 4 结论

1) 应用国标在对水流力进行计算时，并未对设计船型进行细分，即不同船型在尺寸一致的情况下，相同流速可能得到相似的结果。而对于大型集装箱船舶来说，英标计算的横向水流力大于国标计算结果，而国标计算的纵向水流力要远大于英标。

2) 水流力的大小对相对水深比非常敏感。

3) 国标中，船舶所受到的水流力在流向角 $0^\circ \sim 15^\circ$ 及 $165^\circ \sim 180^\circ$ 范围内没有变化。而英标中，集装箱船舶水流力在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内随流向角增大而增大；在 $165^\circ \sim 180^\circ$ 范围内，横向水流力随流向角增大而减小，纵向水流力随流向角增大而增大。

4) 对于集装箱船舶，无论是国标还是英标及软件模拟，水流力横向分力要远大于水流力纵向分力。国标中计算的纵向水流力分力系数要远大于英标，计算船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积需要修正，应当引起注意。

## 参考文献：

- [1] THORESEN C A. Port designers' handbook: recommendations and guidelines[M]. London: Thomas Telford, 2007.
- [2] 中交第一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.
- [3] The British Standards Institution. Maritime works-Part 1: Code of practice for general criteria BS 6349-1: 2000 [S].

London: BSI Standards Limited, 2000.

- [4] The British Standards Institution. Maritime works-Part 1-1: General-Code of practice for planning and design for operations BS 6349-1-1: 2013 [S]. London: BSI Standards Limited, 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 刘必劲, 张友权, 万艳. 潮流作用下 20 万吨级油轮系缆力试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(10): 71-72.
- [9] 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.
- [10] 宗婧慧, 韩健钖. 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.
- [11] Tension Technology International Ltd. Optimoor users guide[R]. London: TTI, 2003.
- [12] The oil companies international marine forum. Mooring equipment guideline[M]. 4th ed. London: OCIMF, 2018.
- [13] MAN Diesel& Turbo. Principles of ship propulsion[R]. Copenhagen: MAN Diesel& Turbo, 2012.
- [14] 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.
- [15] WILSON B W. Elastic characteristics of mooring[J]. Waterways and harbors division, 1967(93): 27-56.

(本文编辑 武亚庆)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：[www.sygc.com.cn](http://www.sygc.com.cn)，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部