



大型油轮水流力试验研究

李叶兴^{1,2}, 陈国平¹, 严士常¹, 林在彬¹

(1. 河海大学 港口海岸及近海工程学院 海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 中国人民解放军92858部队, 浙江 宁波 315812)

摘要: 大型油轮的水流力是开敞式深水码头设计中的重要参数之一。分别对JTS 144-1—2010《港口荷载工程规范》、OPTIMOOR计算软件、英国BS 6349规范、石油公司国际海运论坛《系泊设备指南》以及MIL-HDBK等5种船舶水流力计算方法进行对比分析, 并通过物理模型试验进行验证。研究结果表明: 我国现行《港口工程荷载规范》关于船舶水流力的计算公式当 $15^\circ < \theta < 165^\circ$ 时与试验结果相差较大, 而国外规范计算结果与试验结果符合较好。因此, 建议船舶水流力的纵向分力采用英国BS6349规范计算, 横向分力采用OCIMF《系泊设备指南》中的公式来计算。

关键词: 船舶水流力; 大型油轮; 流向角

中图分类号: U 661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2012) 09-0012-06

On ship current force under different current angles

LI Ye-xing^{1,2}, CHEN Guo-ping¹, YAN Shi-chang¹, LIN Zai-bin¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. 92858 PLA Troops, Ningbo 315812, China)

Abstract: The current force on a ship is one of the most important design factors of open sea terminal. With the comparison on calculation method in *Load Code for Harbor Engineering* (JTS 144-1—2010), OPTIMOOR calculation software, BS 6349, *Mooring Equipment Guidelines* (OCIMF-MEG3—2008) and MIL-HDBK in a same example condition, the calculation results are analyzed and verified by physical model test. The study result shows that the error of calculation in *Load Code for Harbour Engineering* (JTS 144-1—2010) is large, when the current angle is between 15° and 165° , but some foreign standards' calculation results are identical with the physical model test data. Therefore, it is better that transverse current force is calculated by the formula in BS 6349 and longitudinal current force is calculated by the formula in *Mooring Equipment Guidelines* (OCIMF-MEG3—2008).

Key words: current force; VLCC; current angle

大型油轮的水流力是开敞式深水码头设计中的重要参数之一, 当研究系泊船舶的运动量、系缆力和撞击能量时, 必须要考虑水流对船舶的作用。我国现行JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[1]给出了不同流向的水流作用于船舶上的水流力计算公式, 该公式在计算形式和系数选取都与国外规范存在很大的不同。因此, 对各种船舶水流力计算方法进行研究比较对生产实际具有重要意义。

为了解各国规范有关船舶水流力计算的区别, 本文分别对《港口荷载工程规范》、OPTIMOOR计算软件^[2]、英国BS 6349规范^[3]、石油公司国际海运论坛《系泊设备指南》^[4]以及MIL-HDBK^[5]等5种船舶水流力计算进行了对比分析。同时依托《日照岚山港区30万t系泊油轮泊稳的物理模型试验》项目, 选取30万t油轮模型, 进行了船舶水流力的物理模型试验, 测得不同流向、不同流速、不同载度情况下船舶水流力的试验值。根据物理模型试

收稿日期: 2012-04-07

作者简介: 李叶兴(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港口、海岸工程研究。

验证测值与计算值的对比分析结果, 推荐上述5种方法中比较合理的计算方法作为大型船舶水流力的计算方法。

1 船舶水动力算法概述

1.1 我国《港口工程荷载规范》公式

对于开敞式海港透空式系船、靠船构件的水流力计算, 我国现行JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》中根据流向角进行分类。当水流与船舶纵轴平行或流向角 $\theta < 15^\circ$ 和 $\theta > 165^\circ$ 时, 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 F_{xc} 和平行于结构前沿线的纵向分力 F_{yc} 可按以下公式计算:

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

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

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

式中: F_{xsc} , F_{xmc} , F_{yc} 分别为水流对船首横向分力、船尾横向分力和纵向分力(kN); C_{xsc} , C_{xmc} , C_{yc} 分别为水流力船首横向分力系数、船尾横向分力系数和纵向力分项系数; ρ 为水的密度(t/m^3); v 为水流速度(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)。

当水流与船舶纵轴斜交, 即夹角为 $15^\circ \sim 165^\circ$ 时, 按下式计算:

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

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

式中: F_{xc} , F_{yc} 为水流对船舶作用产生的水流力的横向分力和纵向分力(kN); C_{xc} , C_{yc} 为水流力横向分力系数和纵向分力系数; A_{xc} , A_{yc} 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(m^2):

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

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

式中: B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积(m^2); θ 为流向角($^\circ$), 见图1。

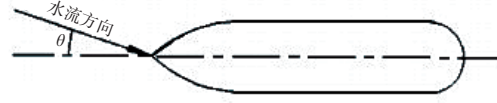


图1 水流方向与船舶纵轴的夹角

1.2 《系泊设备指南》(OCIMF)

水流力计算公式:

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T \quad (8)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c v_c^2 L_{BP} T \quad (9)$$

式中: F_{xc} , F_{yc} 分别为纵向水流力和侧向水流力(kN); C_{xc} , C_{yc} 分别为纵向和侧向水流力系数, 其值与船首结构类型(传统型和圆柱形)、流向角、相对水深有关; v_c 为水流速度(m/s); ρ_c 为水的密度(kg/m^3); L_{BP} 为垂线间船长(m); T 为平均吃水(m)。

1.3 英国标准规范

总的水流力的计算结果, 可表现为一纵向力和作用于船两端的两个横向力(每端一个)或一个合成横向力, 其计算公式如下:

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

$$F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m v_c^2 \times 10^{-4} \quad (11)$$

式中: F_{TC} , F_{LC} 分别为船首或船尾的横向水流力、纵向水流力(kN); C_{TC} , C_{LC} 分别为船首或船尾的横向水流力系数、纵向水流力系数。其值与流向角大小和船型有关; C_{CT} , C_{CL} 分别为横向和纵向水流力深度校正系数; ρ 为水的密度(kg/m^3); L_{BP} 为垂线间船长(m); d_m 为船舶的平均吃水(m); v' 为平均流速(m/s)。

1.4 OPTIMOOR软件算法

OPTIMOOR软件算法关于水流力的计算公式其结构形式与《系泊设备指南》(OCIMF)中水流力计算公式结构基本相同, 但是两者纵向和侧向的水流力系数的取值方式不同, OCIMF是查找相应水深, 相应流向角对应的曲线图, 得到 C_{xc} , C_{yc} 值; 而OPTIMOOR则查表, 得出 C_{xc} , C_{yc} 值。

1.5 美国海军设计手册(MIL-HDBK)

水流力的公式为:

$$F_{xc} = F_{x\text{FORM}} + F_{x\text{FRICION}} + F_{x\text{PROP}} \quad (12)$$

$$F_{x\text{FROM}} = \frac{1}{2} \rho_w v_c^2 B T C_{xcb} \cos \theta_c \quad (13)$$

$$F_{x\text{FRICION}} = \frac{1}{2} \rho_w v_c^2 S C_{xca} \cos \theta_c \quad (14)$$

$$F_{x\text{PROP}} = \frac{1}{2} \rho_w v_c^2 A_p C_{\text{PROP}} \cos \theta_c \quad (15)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} \rho_w v_c^2 L_{\text{WL}} T C_{yc} \sin \theta_c \quad (16)$$

式中： F_{xc} 、 F_{yc} 为水流对船舶作用产生的水流力的纵向分力和横向分力（kN）； $F_{x\text{FROM}}$ 、 $F_{x\text{FRICION}}$ 、 $F_{x\text{PROP}}$ 分别为纵向的形体阻力、摩擦力和螺旋阻力（kN）； C_{xca} 、 C_{xcb} 、 C_{PROP} 分别为纵向形体阻力系数，摩擦阻力系数和螺旋阻力系数； C_{yc} 为横向水流力分项系数； S 为船舶吃水线以下的表面积（ m^2 ）； A_p 螺旋桨阻水面积（ m^2 ）； B 为船宽（m）； ρ_w 为水的密度（ kg/m^3 ）； L_{WL} 为垂线间船长（m）； T 为船舶的平均吃水（m）； v_c 为平均流速（m/s）。

1.6 计算方法对比

前文介绍了《港口工程荷载规范》、英国规范、OCIMF、OPTIMOOR和MIL-HDBK中作用于船舶上的水流力公式。各家规范结构形式相似，但各分项系数的选取区别较大。《港口工程荷载规范》根据流向角 θ 分两种情况分别给出了水流力的计算公式，其中 $\theta < 15^\circ$ 和 $\theta > 165^\circ$ 时，横向力分船首和船尾横向力计算；英国规范与国内规范 $\theta < 15^\circ$ 和 $\theta > 165^\circ$ 时的计算相似，需分别计算船首、船尾横向分力^[6]；OCIMF和OPTIMOOR计算形式基本上相似，直接给出了横向分力和纵向分力的计算公式，船舶水流力分项系数通过查图或查表形式选取；MIL-HDBK中直接给出了水流力纵横向力的计算公式，以及横向分项系数的计算公式，在纵向力计算方面考虑了螺旋阻力和摩擦阻力在整个过程中的作用。

2 物理模型试验

2.1 仪器设备

船舶水流力物理模型试验在河海大学江宁校区试验大厅波浪港池中进行。港池长40 m，宽30 m，高1.2 m。为产生所需要的水流条件，在水池两侧和后部分别安置多台大流量潜水泵。根据不同波

向与水流的交角，用导流墙调整流向，可产生正向和逆向水流。为了验证各种规范计算结果的合理性，物理模型试验采用的船型与计算实例船型一致，试验采用30万吨级油轮，船型尺寸见表1。

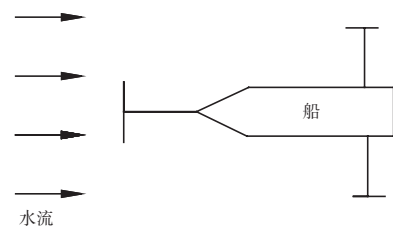
表1 30万吨级设计船型尺度 m

总长	型宽	型深	吃水线长	满载吃水	压载吃水
334	59	31.5	324	22.2	9

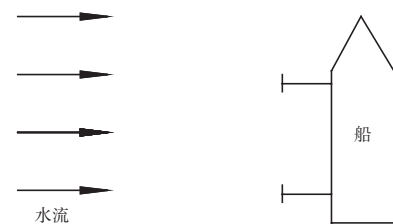
船舶模型采用玻璃钢制作，与原型保持几何相似；水流满足重力相似。试验中通过调节进水阀门控制流速，流速误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。试验遵循《港口工程技术规范》及《波浪模型试验规程》相关规定，采用正态模型，按重力相似设计，模型比尺为1:8。水流力采用天津港湾研究所研制的缆绳力传感器测量，并通过该所研制的水工数据采集系统，所有数据利用计算机进行处理和统计。测力传感器为应变式，用悬臂梁作弹性体。变形传感器为电容式传感器。

2.2 试验方法

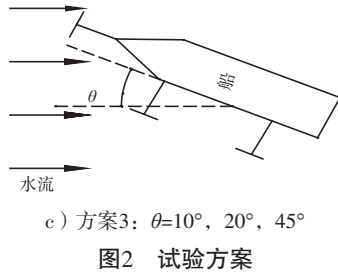
船舶水流力试验要求试验船舶远离港池边壁，置于港池中心位置。根据原型流速要求，率定水流速度的试验值。试验组次：流速0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s；流向角 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ；相对水深 $d/D = 3.39$ （压载）， $d/D = 1.37$ （满载），其中 d 为码头前沿水深， D 为船舶吃水。每组试验重复6次，以保证试验数据的可靠性。采集频率为50 Hz。试验方案见图2。



a) 方案1: $\theta=0^\circ$



b) 方案2: $\theta=90^\circ$



3 成果分析

3.1 计算条件

计算选取30万吨级油轮作为研究对象, 船型设计尺度根据《日照岚山港区30万t系泊油轮泊稳的物理模型试验》项目要求选取, 见表1。为同物模试验保持可比性, 计算相对水深分别按物模试验取值, 计算时相对水深选为(压载) $d/D=3.39$, (满载) $d/D=1.37$, 流速分别取0.25~2 m/s。

各种情况下水流引起的船舶作用力计算结果和试验值如图3~6所示。

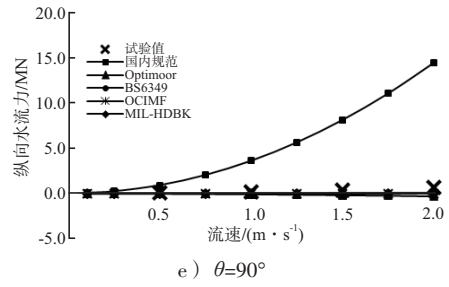
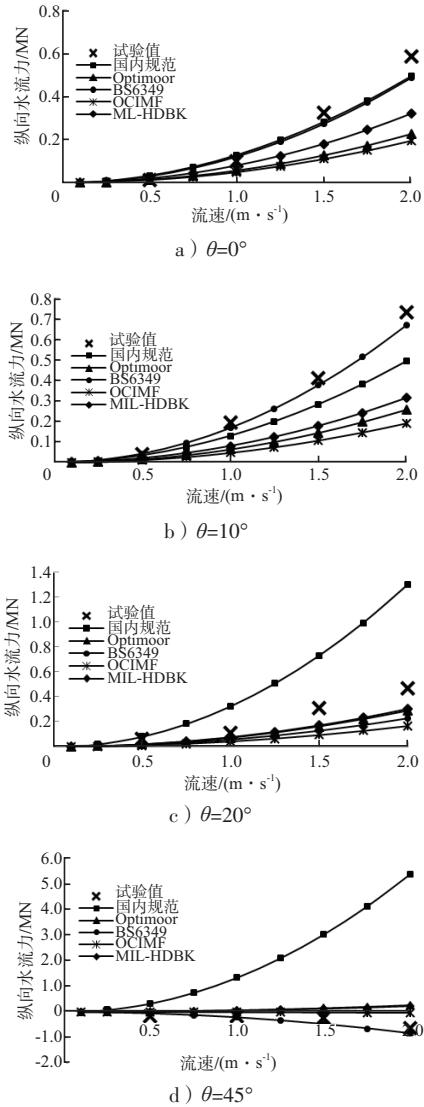


图3 相对水深 $d/D=3.39$ (压载) 不同方向船舶纵向水动力

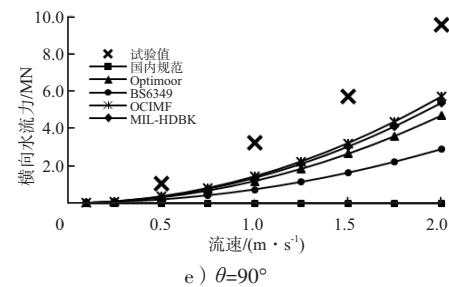
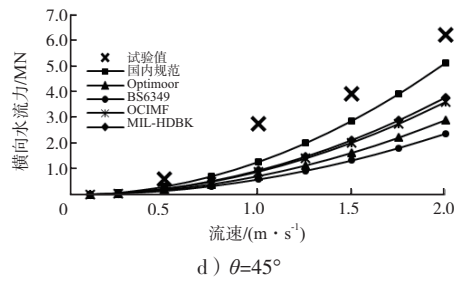
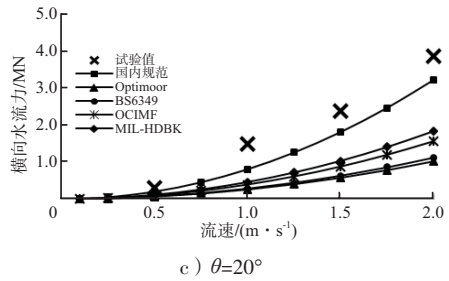
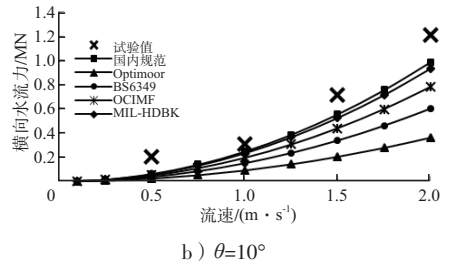
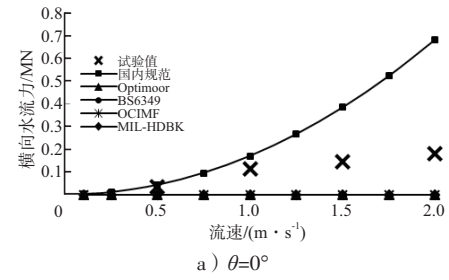
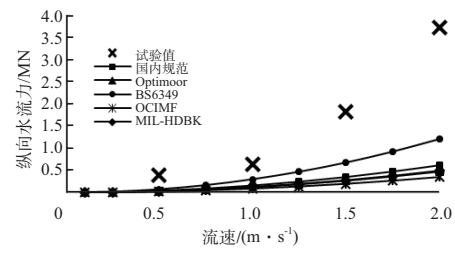
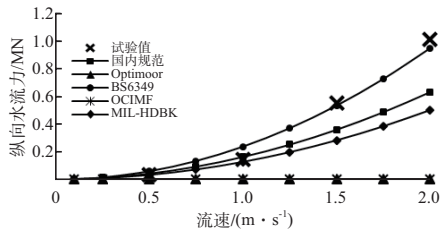


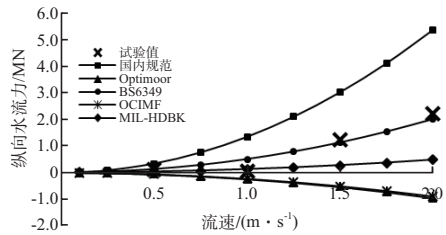
图4 相对水深 $d/D=3.39$ (压载) 不同方向船舶横向水动力



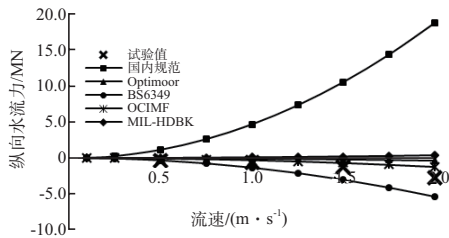
a) $\theta=0^\circ$



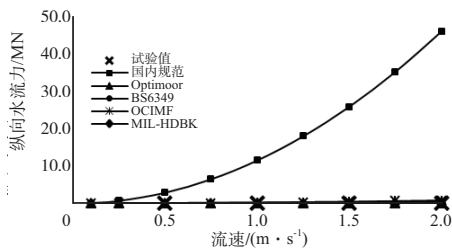
b) $\theta=10^\circ$



c) $\theta=20^\circ$

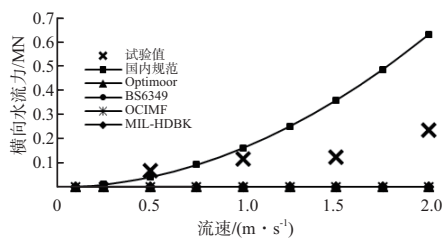


d) $\theta=45^\circ$

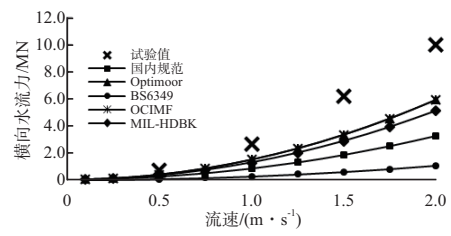


e) $\theta=90^\circ$

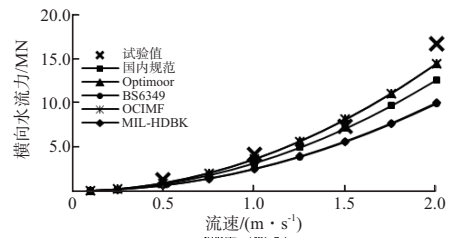
图5 相对水深 $d/D=1.37$ (满载) 不同方向船舶纵向水水力



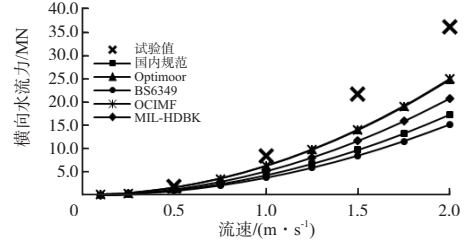
a) $\theta=0^\circ$



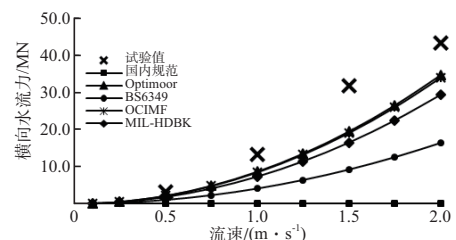
b) $\theta=10^\circ$



c) $\theta=20^\circ$



d) $\theta=45^\circ$



e) $\theta=90^\circ$

图6 相对水深 $d/D=1.37$ (满载) 不同方向船舶横向水水力

3.2 实例计算结果的比较

1) 相对水深 (d/D) 对船舶水流力的影响很大, 不同相对水深船舶水流力纵横向力的分布规律基本相同, 水流力随着相对水深的减小而增大。上述5种计算方法都有这一规律。

2) 英国规范、OCIMF和OPTIMOOR这三种计算方法的计算结果接近, 不同流向角船舶水流力的纵向分力、横向分力分布变化规律基本相同。MIL-HDBK公式在纵向分力计算时与上面3种方法略有不同, 没有得到反向的纵向水流力, 其他规律基本相同。

3) 《港口工程荷载规范》^[1]与其他几种规范的分布变化规律存在明显的不同, 以下分别就横

向分力和纵向分力分析:

横向分力:在《港口工程荷载规范》中,当水流的流向角为 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 时,横向力大小与流向角无关,为定值。当流向角为 $15^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,横向力变化规律复杂,从图中分析得,当流向角为 90° 时,横向力按现有规范公式计算,其值为零;而其他几种计算方法中,当流向角为 0° 时,横向分力为零。横向分力随流向角的增大而增大,当流向角为 90° 时,横向分力达最大值。

纵向分力:在《港口工程荷载规范》中,当流向角为 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 时,纵向力与流向角无关,计算得到最小的纵向水流力。当 $15^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$ 时,船舶水流力纵向分力随流向角 θ 的增大而增大,当流向角为 90° 时,规范公式计算得到船舶水流力纵向分力的最大值;而国外的几种规范分布规律则相反,当流向角 $\theta=0^{\circ}$ 时,得到船舶水流力纵向分力的最大值,随着流向角的增大纵向力逐渐减小,当 $\theta=45^{\circ}$ 时,英国规范和OCIMF甚至出现负值,即反向绕流,当流向角为 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,纵向分力变化不再明显,接近为零。

由以上分析得出,《港口工程荷载规范》^[1]中给出的船舶水流力计算公式可能有误。特别是不同角度船舶水流力的纵向分力明显偏大,考虑船舶系缆的实际情况,船舶水流力的纵向值一般较小,纵向力值不可能无限制增大,甚至在 45° 和 90° 时,纵向力值大于横向力。若不是印刷问题,则国内规范公式需要进行修改。

3.3 试验值与计算值的比较

由图3~6可以看出,船舶水流力物理模型试验测得的试验值与《港口工程荷载规范》^[1]的理论计算值纵横向力的分布规律差别较大,试验值横向分力的最大值出现在流向角为 90° 时,而该角度《港口工程荷载规范》^[1]的横向分力计算值为零;试验值最大纵向分力出现在流向角为 0° 时,而国内规范的最大纵向分力出现在流向角为 90° 时。并且两者纵横向力的分布变化规律差别很大。因此,《港口工程荷载规范》^[1]中对作用于船舶上的水流力计算公式存在缺陷。

试验值比英国规范、OCIMF、OPTIMOOR和MIL-HDBK这4种规范的计算结果略微偏大,特

别是水流速度越大试验值偏大更为明显。试验值中不同角度船舶水流力纵横向分力的分布变化规律与4种国外规范的分布规律较为接近,只有在 $\theta=0^{\circ}$ 横向分力上差别虽然较大。分析原因主要是横向力量级较小,且试验时水体存在紊动,造成 $\theta=0^{\circ}$ 时船体横向移动,因此测得试验值不等于零,而且流速越大紊动状态越明显。比较试验值与4种规范的计算结果:英国规范的纵向分力计算结果与试验值吻合最为理想;《系泊设备指南》^[2](OCIMF)的横向分力计算结果与试验值吻合最为理想。

4 结论

1) 通过规范公式计算值与试验值的比较,现行JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[1]关于作用于船舶上的水流力计算公式存在缺陷,当 $15^{\circ} < \theta < 165^{\circ}$ 时不同流向的船舶水流力纵横向分力的分布变化规律不符合客观实际。有待进一步修订规范公式。

2) 通过对各种规范公式理论计算结果和试验值的比较分析,得出国外的几种规范的计算结果与试验值的分布变化规律比较接近,数值吻合较为理想。建议船舶水流力的纵向分力采用英国BS6349规范计算,横向分力采用OCIMF《系泊设备指南》^[2]中公式来计算。

参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] Optimoor Users Guide. Oil Companies International Marine Forum[R]. London: Tention Technology International Ltd, 2003.
- [3] BS 6349-1:2000 Maritime structures—Part 1: Code of practice for general criteria[S].
- [4] Oil Companies International Marine Forum. Mooring Equipment Guidelines[M]. 3rd ed. Edinburgh UK: Witherby Seamanship International, 2008.
- [5] MIL-HDBK-1026.4A. Department of Defense Handbook, Mooring Design.[EB/OL](1999-01-01)[2011-12-15] http://www.vulcanhammer.net/marine/1026_4A.pdf.
- [6] 杨国平,李荣庆,曹凤帅.港作拖船拖力配置计算[J].水运工程, 2011(11): 13-20.

(本文编辑 武亚庆)