

散货船水尺计量中浅水水流影响船体下沉量修正

李国定, 孙洪波, 刘 瑞, 陈传仁

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了减少散货船运输短货事件的发生, 分析浅水水流导致船体下沉对货物水尺计量的影响。对第23届ITTC(International Towing Tank Conference)操纵技术委员会提出的计算公式作了适用性选取探讨, 提出不同船型参数船体下沉量的适用计算公式, 并给出选择方法及步骤, 供船方和公估人员使用。

[关键词] 散货船; 水尺计量; 船体下沉量; 短货

[中图分类号] U 661.32

On Squat Correction of Bulk Carrier Draft Measurement in Shallow Water Flow

LI Guoding, SUN Hongbo, LIU Rui, CHEN Chuanren

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to reduce the shortage of this paper analyses the influence of hull squat caused by shallow water flow on the measurement of cargo by draft, with selective reference to the applicability of the calculation formula brought forward by the Maneuvering Technique Committee of the 23rd ITTC. The applicable calculation formulas for hull squat of different ship type parameters and the selecting methods and steps are proposed for ship officers and surveyors.

Keywords: bulk carrier; draft measurement; squat; cargo shortage

0 引言

散货是指不加包装的货物, 如煤炭、谷物、矿砂、盐、水泥、河沙等大宗货物。国际海上货物运输中, 由于散货船货运量大, 货源充足, 航线固定, 装卸效率高等因素, 散货船已成为运输船舶中的主力军。2017年全球1万载重吨以上的船舶, 共计25 714艘, 其中干散货船9 992艘、占38.85%^[1]; 2019年初, 全球干散货船舶总计运力8.4亿载重吨, 占货船总计运力的42.6%^[2]。可见散货船运输在经济发展中的作用日益重要。

散货船货物计量多以观测船舶水尺为主, 由于水流影响会导致船体下沉, 使得船舶卸空压载情况下水尺观测数值增大导致计量短少, 从而发生短货现象。

关于航行中船体下沉量的计算国内外学者多有研究。Tuck^[3]基于细长体理论, 提出了一种解决浅水中船舶动态下沉和纵倾的方法, 对下沉表达式进行了量纲分析, 给出相应计算公式。基于Tuck理论, Hooft^[4]和Huuska^[5]导出船体下沉纵倾角公式。Barrass^[6]根据不同的船舶尺寸模型, 做了大量

[收稿日期] 2019-08-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51879119)

[作者简介] 李国定(1963—), 男, 副教授, 硕导, 船长, 从事交通运输工程研究。E-mail: liguoding@jmu.edu.cn

实验,得出浅水下船体最大下沉量简易公式。基于前人的研究成果,第23届国际船模拖曳水池会议(ITTC)操纵技术委员会提出了一些实际应用比较广泛的计算公式^[7]。文献[8]推荐了3个经验公式,但仅能提供粗略计算。厂家一般也会应船东要求提供船舶船体下沉量,但多以Barras简易公式计算^[9]。Mohammadreza Fathi Kazerooni^[10]应用油轮模型实验得出公式。Zhou等^[11]以集装箱船型为例,采用一种一阶Rankine源面元法,对限制水域航行船舶的下沉量进行预报,分别计算了浅水和浅窄航道中的船体下沉量,得到了船速、水深和船-岸距离对船体下沉量的影响。章文俊等^[12]应用3艘5~15吨级散货船进行实测,并将实测数值结果与其他典型公式相比较,可以验证散货船船体下沉量公式的适用性。文献[13]结合我国《海港总体设计规范》和最新的国外相关规范,以船速6kn为例,对比分析了国内外各种有关航体下沉量的计算和确认方法的适用范围,得出我国规范计算值非限制性航道高出国外规范计算均值,而限制性航道低于国外规范计算值。Bechthold^[14]采用基于RANSE的计算流体动力学(CFD)方法,对3艘极浅受限水域(水深吃水比小于1.2)的大型集装箱船进行了下沉量和纵倾模式预报^[2]。

综上所述,计算船舶下沉量的方法很多,绝大多数计算公式都是根据实验结果并考虑主要船舶参数归纳出来的,但这些公式因其假设条件不同,不能适用所有船舶,有的研究成果还停留在学术论证过程中,未付诸于生产实践。同时研究成果和经验公式需得到IMO或船级社的认证才能推广到实践中。因此,给船方和公估人员提供不同船型参数船体下沉量的适用计算公式,以及公式选择和验证的方法很有必要。

1 货物水尺计量方法

影响短货因素很多,如当时的海况、存油水舱的测量、水尺观测、港水密度和压载水密度等,在实践中,浅水水流导致船体下沉对水尺计量的影响更为显著。

散货船货物水尺计量一般是船舶抵港和卸空货各测量一次。

船舶抵港时测量一次,计算公式如下:

船舶载货量=船舶排水量 ∇ -空船质量 W_0 -压载水量 W_b -船存淡水 W_f -船存燃油 W_{oil} -船舶常数 C 。

船舶卸空后测量一次,以验证船方提供的船舶常数,计算公式如下:

船舶常数 C =船舶排水量 ∇ -空船质量 W_0 -压载水量 W_b -船存淡水 W_f -船存燃油 W_{oil} 。

显然由于水流影响,船体下沉,船舶排水量增加,导致船舶常数增加,船舶载货量减少。

关于散货运输的货差国际惯例是小于载货量的0.5%,国内流行做法是小于0.3%,除非合约特别约定。

2 船体下沉量经验公式

Tuck理论是在细长体假定的基础上,将速度势在船体附近及远场作渐近展开,根据两速度势的匹配求解,最终得出浅水航行中船体重心的平均下沉量 S ,其计算公式^[3]为:

$$S = [F_{th}^2 / \sqrt{(1 - F_{th}^2)}] \cdot C_z \cdot \nabla / L_{pp}^2 \tag{1}$$

式中: $F_{th} = V / \sqrt{gh}$ 为水深傅汝德数; V 为航速; h 为水深; C_z 为平均下沉系数; ∇ 为排水体积(m^3); L_{pp} 为船舶两柱间长(m)。

Hoofft将Tuck公式计算值与模型试验结果进行比较,认为式(1)中 $C_z = 1.46$ 可获得最佳近似值,即 $S = 1.46 [F_{th}^2 / \sqrt{(1 - F_{th}^2)}] \cdot \nabla / L_{pp}^2$ 。

文献[15]考虑船型和水深因素以及船舶吃水比,给出关于浅水区船体下沉量计算式为:

$$S = 1.5L(d/H) \cdot [C_b / (L/B)] \cdot F_n^2 \tag{2}$$

式中: H 为水深 (m); d 为船舶吃水 (m); C_b 为方形系数; L 为船长; B 为船宽; 傅汝德数 $F_n = V/\sqrt{gL}$ 。

第 23 届 ITTC (International towing Tank Conference) 操纵技术委员会提出了一些实际应用比较广泛的计算公式^[7]。

1) Hooft 公式

Hooft 用 Tuck 和 Taylor 提出的计算方法, 将 C_z 取 1.4 ~ 1.53, 吃水差变化量系数 C_θ 取 1.0, 给出了适用开敞水域的浅水中船首下沉量 S_b 的计算公式

$$S_b = 1.46 [F_{nh}^2 / \sqrt{(1 - F_{nh}^2)}] \cdot \nabla / L_{pp}^2 + 0.5 L_{pp} \sin[(\nabla / L_{pp}^3) \cdot (F_{nh}^2 / \sqrt{1 - F_{nh}^2})]。 \quad (3)$$

2) Huuska (1976) 公式

Huuska 提出了适用开敞水域条件、挖槽航道以及限制性航道的公式:

$$S_b = 2.4 (\nabla / L_{pp}^2) \cdot (F_{nh}^2 / \sqrt{1 - F_{nh}^2}) \cdot K_s。 \quad (4)$$

其中: K_s 为航道系数, 但计算颇为复杂, 不适用于航海人员计算, 开敞水域时 $K_s = 1$ 。

3) Barrass (1981) 公式

Barrass 在实船和模型实验基础上, 给出了适合于 $h/d = 1.08 \sim 2.78$ 、 $C_b = 0.50 \sim 0.90$ 的船舶在水深受限开阔水域船首下沉量的公式, 并简化为:

$$S_b = (1/100) \cdot C_b \cdot V^2。 \quad (5)$$

当 $1.1 < h/d < 1.2$ 时,

$$S_b = (1/50) \cdot C_b \cdot V^2。 \quad (6)$$

其中: V 为船速 (kn); C_b 为方型系数; h 为水深; d 为船舶吃水。

4) Eryuzlu 和 Hausser (1978) 公式

此公式是在三艘有球鼻首的油轮模型试验基础上研究获得的, 适用于 h/d 在 1.08 ~ 2.78 之间, 超大型油轮 (VLCC) 在无限水域的浅水船首下沉量的计算

$$S_b = 0.113 (h/d)^{-0.27} B \cdot F_{nh}^{1.8}。 \quad (7)$$

5) Millward 公式

Millward 在 Tuck 公式基础上, 对公式进行修正, 给出如下公式:

$$S_b = [(61.7 C_b \cdot (B/L_{bp}) - 0.6)] (F_{nh}^2 / \sqrt{1 - F_{nh}^2}) \cdot (L_{bp}/100)。 \quad (8)$$

6) Eryuzlu (1994) 公式

在船模试验基础上, 给出适合 $h/d = 1.1 \sim 2.5$, $C_b \geq 0.8$, $L/B = 6.7 \sim 6.8$, $B/d = 2.4 \sim 2.9$ 的散货船船首下沉量计算公式

$$S_b = 0.298 (h^2/d) (V/\sqrt{g \cdot d})^{2.289} \cdot (h/d)^{-2.972} K_b。 \quad (9)$$

当 $W/B < 9.61$ 时, $K_b = 3.1/\sqrt{W/B}$; 当 $W/B \geq 9.61$ 时, $K_b = 1$ 。式中: K_b — 航道系数; W — 航道宽度。

3 船体下沉量修正方法

3.1 选择适当的公式

式 (3) ~ 式 (9) 是第 23 届 ITTC 操纵技术委员会提出的一些实际应用比较广泛的计算公式, 这些计算公式都是根据实验结果并考虑主要船舶参数、水深吃水比等因素归纳出来的, 每艘船舶应根据本船特性来选择恰当的公式。

章文俊等^[12]分别选用 5 万 t、10 万 t 和 15 万 t 级散货船, 在水深吃水比 $h/d > 2.5$, 航速 0 ~ 6 kn 范围内, 对船舶下沉量进行观测, 将观测值与式 (3) ~ 式 (9) 的计算值分别进行比较, 结果如图 1 ~ 图 3 所示。

从图 1 ~ 图 2 可以看出, 实测值接近于式 (3) 和 Barrass 公式 (5); 图 3 实测值接近于公式

(4)。笔者根据文献分析及实际工作经验, 得出以下结论:

- 1) 当 $1.1 < h/d < 1.2$ 时, 5 万 t 至 10 万 t 级散货船应适用于公式 (3) 和公式 (6);
- 2) Hooft 公式 (4) 比较适合巴拿马型船^[16];
- 3) 鉴于暂无超大型船舶实船数据可适用 Eryuzlu 和 Hausser (1978) 公式, 公式 (4) ~ 式 (7) 需换算成平均下沉量 S ,

$$S = S_b - 0.5L_{pp}\sin\left(\left(\nabla/L_{pp}^3\right) \cdot \left(F_{nh}^2/\sqrt{1-F_{nh}^2}\right)\right);$$

- 4) 船方和公估人员能够准确获得航道资料, 并具备一定的数理基础时, 可以应用公式 (9) 进行测算和验证。

3.2 实测验证方法

从文献 [12-13] 的船模和实船实验中得出: 航速 2 kn 以下, 水流影响船体下沉量均在 2~3 cm 以下, 低于货差小于 3‰ 载货量规定值, 而船速大于 2 kn 时, 船体下沉量急剧增加。例如: 360 m 长集装箱船航速 2 kn 时, 船体下沉 2.3 cm, 2.4 kn 时下沉已达 3.7 cm^[14]。“清华山”轮水深吃水比为 1.1, 泊位流速 2 kn 时平均吃水增加 1.86 cm, 流速 3 kn 时吃水已达 4.2 cm^[16]。因此主要考虑水流大于 2 kn 情况下船体下沉量的验证。

关于船舶下沉量有如下几个实测验证方法及步骤:

- 1) 在静水港泊位空船时测算本船船舶常数。
 - 2) 在有流港口泊位船舶卸空后根据船舶空船质量、压载水、存油水及船舶常数总和计算船舶平均吃水及首吃水。
 - 3) 观测船舶六面吃水, 计算得出船舶实际观测平均吃水与首吃水。
 - 4) 平均吃水和首吃水观测值与计算值比较, 其差值即分别为船体观测平均下沉量和首下沉量。
 - 5) 水流流速观测, 可用抛木块法测算, 有水压式计程仪可以直接读数。水深观测可以用测深锤测量, 如测深仪量程能探测到浅水水深, 可直接读数。
 - 6) 将观测的水流流速、水深和相应船舶参数代入相关计算公式, 并加以验证, 得出的船体平均下沉量和首下沉量与观测船体平均下沉量和观测首下沉量进行比较, 取最接近的计算公式。
 - 7) 选定的经验公式用于日后计算浅水船体下沉量, 以修正船舶排水量。
- 有条件的船舶, 如备有雷达式液位传感器, 可以采用文献 [17] 提出的测量船舶下沉量的实测方法, 精确测量船舶在浅水航行中的实际下沉量。

4 结束语

散货船水尺计量中由于水流影响船体下沉导致短货的现象不可忽视。船方和公估人员掌握船体下

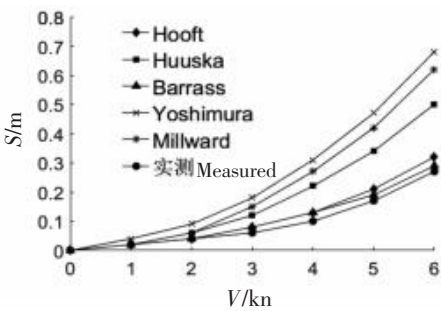


图 1 5 万 t “德峰”轮船体下沉量的估算值与实测值对比

Fig.1 Comparison of the estimated and measured hull squat of 50 000 tons M.V “Defeng”

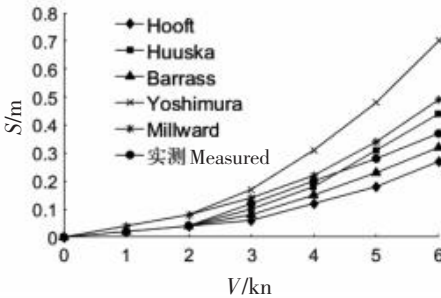


图 2 10 万 t “D”轮船体下沉量的估算值与实测值对比

Fig.2 Comparison of the estimated and measured hull squat of 100 000 tons M.V “D”

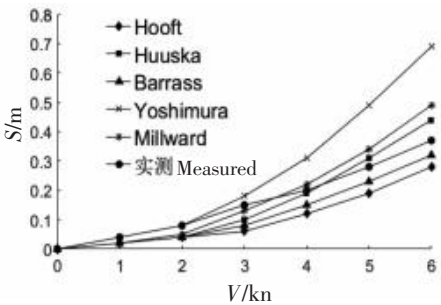


图 3 15 万 t “L”轮船体下沉量的估算值与实测值对比

Fig.3 Comparison of the estimated and measured hull squat of 150 000 tons M.V “L”

沉量的计算并进行水尺修正可以减少承运人与货主的纠纷,船长和驾驶员在浅水和港口航道水域航行时,也要充分考虑由于水流影响而导致的船舶船体下沉量增加所造成的船舶航行安全问题。

散货船大副如没有条件进行实测验证选取适当公式,可以采取文中 3.2 节推荐的方法进行船舶船体下沉量计算,以作货物水尺计量修正。

由于船体下沉量计算过程颇为复杂,实施起来尚有难度,因此研究人员应综合前人的研究成果,根据船舶船型及客观条件开发应用软件,实现浅水航行船体下沉量自动计算功能,供船方和公估人员使用,达到船舶船体下沉量影响水尺计量修正之目的。

[参 考 文 献]

- [1] 码头网. 最详细的全船船舶数据 (包含中国船舶数据) [EB/OL]. (2017-05-26). https://www.sohu.com/a/143694017_776520.
- [2] 信德海事. 2019 全球海运发展评述报告 [EB/OL]. (2019-11-06). <http://www.chinaports.com/portlspnews/2531>.
- [3] TUCK E O. Shallow water flows past slender bodies [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 26: 81-95.
- [4] HOOFT J P. The behaviour of a ship in head waves at restricted water depth [J]. *International Shipbuilding Progress*, 1974, 244: 367-390.
- [5] HUUSKA O. On the evaluation of underkeel clearances in Finnish waterways [R]. Otaniemi: Helsinki University of Technology Ship Hydro-dynamics Laboratory, 1976.
- [6] 洪碧光. 船舶操纵 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2008.
- [7] THE MANOEUVRING COMMITTEE. Final report and recommendations to the 23rd ITTC [R]. Venice: Proceedings of 23rd ITTC, 2002: 223-229.
- [8] 林鹏. 关于福州马尾港航行船舶下沉量的探讨 [J]. *中国水运*, 2012, 12(6): 31-32.
- [9] 吴兆阳. 浅水影响造成的船舶下沉量分析 [J]. *船舶与海洋工程*, 2014(2): 12-14.
- [10] MOHAMMADREZA FATHI KAZEROONI, MOHAMMAD SAEED SEIF. Experimental evaluation of ship squat in shallow waters [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering*, 2014, 36(3): 559-569.
- [11] ZHOU M G, ZOU Z J, YAO J X. Prediction of ship squat in restricted waters [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2013, 17(6): 625-634.
- [12] 章文俊. 船体下沉导致水尺计重误差的修正方法研究 [J]. *船海工程*, 2015, 44(1): 126-130.
- [13] 安翔, 于亮, 杨阳. 国内外主要规范中船舶航行下沉量计算比较研究 [J]. *水道港口*, 2017, 38(4): 368-373.
- [14] BECHTHOLD J, KASTENS M. Robustness and quality of squat predictions in extreme shallow water conditions based on RANS-calculations [J]. *Ocean Engineering, An International Journal of Research and Development*, 2020, 197: 1-12.
- [15] 李国定. 关于提高船舶常数测算精度的研究 [J]. *大连海事大学学报*, 2011(2): 9-11, 20.
- [16] 本田, 启之辅. 操船通论 [M]. 东京: 株式会社成山堂书店, 1986.
- [17] 戴冉, 贾传莹, 孙立成. 船舶下沉量的实测研究 [J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(2): 59-62.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)