

基于融合数值计算和船模实验的 超大型油轮下沉量计算研究

张焯¹, 史欣怡²

(1. 国家管网集团南山(山东)天然气有限公司, 山东烟台 264000; 2. 山东港通工程管理咨询有限公司, 山东烟台 264000)

摘要: 随着全球低碳经济的发展, 船舶大型化的趋势越加明显, 船舶航行安全问题日益突出, 尤其是在受限水域的研究方面。针对超大型油轮在受限水域中的航行安全问题, 本文融合数值模拟和船模实验针对超大型油轮下沉量计算进行了深入研究, 以超大型油轮为研究对象, 进而基于缩尺船模试验得到了超大型油轮的下沉量与航速、水深、航道宽度等影响因素的关系和变化规律。

关键词: 超大型油轮; 下沉量; 数值模拟; 船模试验

中图分类号: U676.1 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 12—0085—03

近年来, 随着全球低碳经济的发展以及各国之间贸易往来更加频繁, 船舶逐渐朝大型化方向发展。超大型船舶由于其巨大的装载能力使得船舶运输货物的效率提升, 降低了航运行业的运营成本, 推动了经济的发展。但是伴随着超大型船舶的迅速发展, 运输安全矛盾突显。尤其是超大型船舶航行在受限水域时, 其下沉量、岸壁效应和浅水效应等变化十分明显。在受限水域航行的超大型船舶, 由于船底水深变浅, 船体水流流速增加, 船底受到的压力减小, 产生较为明显的船体下蹲现象, 进而造成搁浅等事故。

对于船体下蹲的计算方法主要有以下四种: 理论计算、经验公式、船模试验和数值模拟。现阶段, 国内大多数研究都仅存在于理论计算和经验公式方面。本文以超大型油轮为研究对象, 分别通过数值计算和船模试验的方法, 对不同的航速、水深、航道宽度以及船舶偏离航道中心的距离等情景下船舶的下蹲量开展研究。

1 数值计算模型及求解

1.1 数值求解方法

本文基于商业 CFD 软件 STAR-CCM+ 完成了数值计算模型的前处理、数值计算以及后处理。利用 STAR-CCM+ 求解 RANS 方程, 基于有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 来做流体计算域的离散。基于一阶欧拉差分法做时间离散; 基于二阶梯度来做扩散项, 捕捉自由液面通过采用 VOF 法。自由液面的确定是利用了 VOF 网格单元中流体的体积分数, 其守恒形式的输运方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \alpha)}{\partial x_i} = 0$$

其中, α 为体积分数, 其值为 0~1, 表示网格中不同相流体的体积与网格体积的比值。

1.2 船型参数

本文针对超大型油轮标准船模进行数值计算。通过 SIMMAN2014 得到超大型油轮的船体模型, 如表 1 所示。

表 1 船型参数

船型	超大型油轮
垂线间长 L_{pp} (m)	320.0
型宽 B (m)	58
方形系数 CB (-)	0.8098
设计吃水 T (m)	20.8
排水体积 V (m^3)	312,622
惯性矩 K_{xx} (B)	0.4
惯性矩 K_{yy} (L_{pp}), K_{zz}	0.25
湿面积 S (m^2)	27194
重心高度(相对于龙)	18.6
LCB (%LPP), fwd+	3.48

1.3 计算设置与网格划分

基于超大型油轮的模型试验 ($\lambda=75$) 数据进行验证数值计算的结果。在矩形水池中进行模型试验, 设置固定的航速 U 和不同的偏移量 y_{wall} , 如图 1 所示。水池的宽度 W 可在 $2.5B$ 与 $9.05B$ 之间变化, 水深在 $1.1T$ 到 $8T$ 的范围之内。详细参数如表 2 所示。

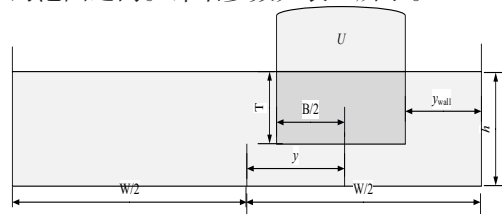


图 1 模型试验参数示意图

表 2 数值计算参数表

U (实船)	U (试验)	W	h	m_b	F_{fb}	y	y_{wall}
节	m/s	-	-	-	-	-	m
7	0.416	9.05B	1.2T	0.092	0.230		
			1.5T	0.074	0.203		
			3T	0.037	0.146		
15.5	0.921	9.05B	1.2T	0.092	0.510		
			1.5T	0.074	0.456		
			3T	0.037	0.323		
8	0.475	5B	1.1T	0.182	0.275		
			1.35T	0.148	0.248		
			1.5T	0.133	0.235		
8	0.475	5B	1.5T	0.133	0.235	1.526	0.02
						1.352	B/4
						0.773	B

超大型油轮计算域和边界条件如图 2 所示。速度入口边界在船体前方，压力出口边界在船体后方；船体表面、水池两侧壁和水池底部均为无滑移壁面边界；模拟自由表面基于 VOF 法。在入口和出口处分别设置长度为 10m 的数值阻尼消波器，是为了减少入口和出口边界处波的反射。

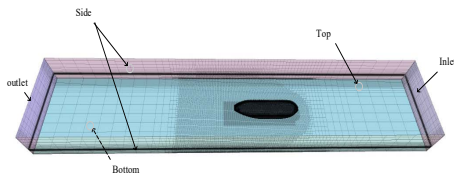


图 2 KVLCC2 的计算域及边界条件

2 结果分析

2.1 W=9.05B, 船位于航道中心

船舶在不同航速下，不同水深吃水比的总阻力数值计算结果和实验结果和总下沉量的数值计算结果与实验结果如下图所示，可以明显得出，计算流体力学（CFD）与实验流体力学（EFD）吻合度较好。

船舶在不同水深吃水比、航速和傅汝德数时的阻力系数以及总下沉量的数值计算结果如下图所示。受水深的影响较为明显的是阻力系数，且随水深的增大而减小；随航速和傅汝德数的增大而增大的是下沉量，且随水深的增大而减小。

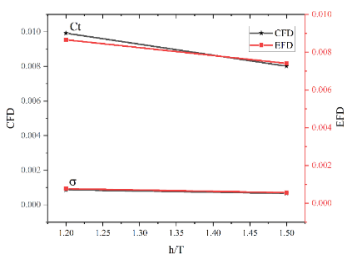


图 3 不同 h/T 下总阻力和总下沉量数值计算结果与实验结果图

2.2 W=5B, 船位于航道中心

在窄航道，不同水深（1.1T~1.5T）情况下，超大型油轮阻力和下沉量的数值计算结果分别如下图所示。对比 Lataire 的试验数据和由 D&F 法得到的结果与数值计算结果。数值计算的下沉量其值较实验结果偏小，但与实验和半经验公式的结果在变化趋势上一致。

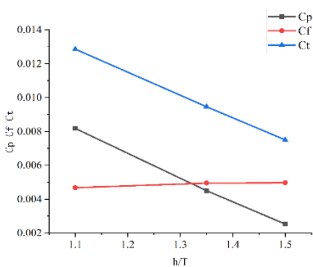


图 4 阻力系数与 h/T 的关系

2.3 W=5B, 船舶偏离航道中心

数值计算的值低于 Lataire 等的结果的原因是由于理论结果考虑了螺旋桨的作用。结果表明 ywall 会影响船体所受的水动力，当船舶靠近岸壁时，水动力会增大。

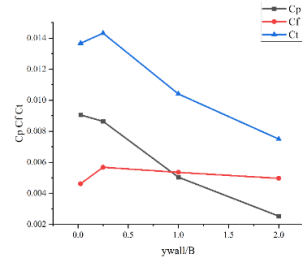


图 5 数值计算的阻力系数与 ywall 的关系

3 船模试验

试验拟采用模型缩尺比 1:90 的超大型油轮为研究对象进行船池试验，同时数值模拟全速、中速和半速航行在不同水深条件下的航行特性。通过系列计算，得到超大型油轮在三种航速下、四种水深吃水比情况下的无因次和有因次的船体下沉量，据此得到船体下沉量随航速和水深变化规律。



图 6 船模试验

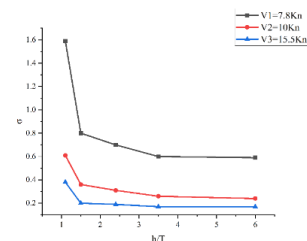


图 7 超大型油轮在不同速度和水深与下沉量的变化规律

通过对比数值实验和船模试验结果可知，船舶在不同速度和水深情况下，下沉量的变化趋势上基本一致，船模试验较数值计算结果偏大。

4 结论

本文通过数值模拟、船模试验的方法，对船舶在不同工况下的阻力和下蹲特性进行了研究，数值计算和船模试验的结果吻合较好。

根据计算结果可以得到以下结论：对于超大型油轮，影响船体下沉量的重要因素是航速和水深吃水比。水深吃水比一定时，船体下沉量随着航速的增大逐渐增加；航速恒定时，船体下沉量随着水深吃水比的减小也是逐渐增加，且水深吃水比越小，下沉量的增加越快。

济宁现代港航物流发展思路与对策研究

高峰¹, 石国安¹, 张英明¹, 路英杰²

(1. 济宁市港航事业发展中心, 山东 济宁 272019; 2. 济宁能源发展集团有限公司, 山东 济宁 272073)

摘要: 发展现代港航物流是济宁经济社会高质量发展的重要引擎。本文根据济宁港航物流发展现状, 分析面临形势及存在问题, 通过参考借鉴内河先进港城主要经验做法, 进而提出济宁港航物流发展思路与对策。

关键词: 现代港航物流; 发展思路; 对策研究

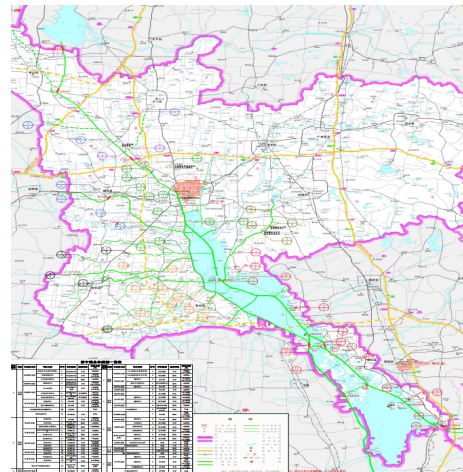
中图分类号: F550 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 12—0087—05

济宁依运河而建、因运河而兴。作为京杭运河最北端通航城市、淮海经济区和鲁南经济圈核心城市, 济宁煤炭资源丰富, “公铁水空”综合交通体系完善。济宁港是全国内河 36 个主要港口、国家确定的京杭运河 6 个重点建设港口之一, 是“北煤南运、南货北调”的大型航运物资集散地。随着交通强国山东示范区加快建设、黄河流域生态保护和高质量发展以及济宁现代港航物流突破战略的实施, 港航物流业已成为推动济宁产业转型升级、塑造新发展优势和融入“双循环”格局的重要引擎。

1 济宁港航物流发展现状

近年来, 济宁市立足强港航、畅物流、兴产业, 大力实施现代港航物流突破战略, 经过不断发展积蓄, 目前到了乘势而上、跨越升级的关键阶段。

(1) 规划政策引领港航发展。部省联合批复《济宁港总体规划(2035年)》, 划定了港口岸线和 8 大港区 25 个作业区。出台《现代物流产业发展“三年行动计划”》《关于加快推进济宁内河水运高质量发展的意见》等政策, 下发《关于创新支流航道投融资模式的批复》《关于扶持水路集装箱运输发展的意见》等文件, 推动了港航物流蓄势升级。



济宁市港口航道分布图

(2) 水运基础设施提档升级。规划航道 47 条, 覆盖 10 个县市区, 总里程 1100 公里, 京杭运河主航道 210 公里, 在运河沿线 12 个港城中居第 1 位。建立“十四五”项目库, 谋划水运项目 29 个, 概算投资 269.56 亿元。6 条干支航道完成改造, 高等级航道达 352 公里, 济宁以南段船闸双线运行, 通航能力翻倍, 逐步形成干支衔接、通江达海的高等级航道网, 构建起上承“晋陕蒙”、下达“苏浙沪”和长江经济带的水上物流大通道。

船舶靠近岸壁航行时, 下沉量受岸壁效应的影响也会增加。因此, 船舶航行在浅航道和窄航道时的下蹲现象不容忽视。

此外, 对于超大型油轮而言, 在水池宽度较大时, 压阻力占主导地位。通过与试验数据的对比可知, 数值计算的结果具有较高的可靠性。因此, CFD 可以作为研究船舶阻力和下蹲的有力工具。

参考文献:

[1] Scully B, Young D. Evaluating the Underkeel Clearance

of Historic Vessel Transits in the Southwest Pass of the Mississippi River[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2021, 147(5): 05021008.

[2] 郭威治, 刘敬贤, 刘文等. 受限水域超大型船舶富裕水深定量计算研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1491-1497.

[3] 张云鹏, 张吉平. 大型船舶沿岸航行富余水深的研究[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(3): 33-36.

[4] 晏林. 渤海海域 VLCC 安全富余水深研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.