



上海交通大学学位论文

基于重叠网格方法的船舶砰击载荷数值研 究

- **姓 名:** 王澳
- 学号: 121010910133
- **导 师:**王建华
- **学 院:**船舶海洋与建筑工程学院
- 学科名称: 土木水利 (船舶与海洋工程)
- 学位类型:专业型
- **申请学位层次:**硕士

2023年12月





A Dissertation Submitted to

Shanghai Jiao Tong University for Master Degree

Numerical study of ship slamming load based on overset grid method

Author: Ao Wang Supervisor: Jianhua Wang

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering Shanghai Jiao Tong University Shanghai, P.R.China December 26th, 2023





上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明: 所呈交的学位论文, 是本人在导师的指导下, 独立进行研 究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其他 个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个 人和集体, 均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由 本人承担。

学位论文作者签名: 王 澳

日期: 2024年1月22日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校 保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅 和借阅。

本学位论文属于 口公开论文

□内部论文,□1年/□2年/□3年 解密后适用本授权书。
□秘密论文,____年(不超过10年)解密后适用本授权书。
□机密论文,____年(不超过20年)解密后适用本授权书。
(请在以上方框内打"√")

学位论文作者签名: 王奥 指导: 日期: 2014 年 1 月 12 日 日期:

指导教师签名: 2014年 日期: 2014年 1 月22日



上海交通大学硕士学位论文答辩决议书



	土木水利	所在 学科	121010910133	学号	王澳	名	姓
	木兰船建大楼A208	答辩 地点	2024-01-22	答辩 日期	王建华	教师	指导。
	平击载荷数值研究	方法的船舶征	基于重叠网格			题目	论文
-	平击载荷数值研究 员数)答辩结论: V道过 口	方法的船舶码 员数/应到委!	基于重叠网格 同意票数/实到委	15 (1	·····································	题目 表决结	论文

恶劣海况下的船舶砰击问题是船舶航行安全的关键问题,论文针对不同浪向规则波和 聚焦波下的船舶砰击问题开展研究,选题正确,具有重要的研究意义和应用价值。

论文主要工作和创新如下:

(1)应用动态重叠网格方法,开展了船舶运动和砰击载荷数值预报结果与试验结果 的对比研究,验证了数值方法的正确性;

(2)针对规则波下的船舶砰击问题,开展了迎浪和斜浪工况下的船舶运动和砰击载 荷数值预报,分析了波长、波高、浪向等因素对船舶运动和砰击载荷的影响规律;

(3)针对极端波浪下的船舶砰击问题,开展了聚焦波下的船舶运动和砰击载荷数值 预报,分析了船舶遭遇极端波浪时的运动响应和砰击载荷特性,研究了聚焦波高以及航速 对砰击载荷的影响,对船舶砰击载荷下的结构安全性分析评估具有重要的参考价值。

论文研究内容丰富,技术路线正确,内容翔实,结果可信。论文结构完整,条理清晰, 逻辑性强。论文撰写行文流畅,图表规范。论文已达到硕士学位论文的要求。论文工作表 明作者已掌握本学科坚实的基础理论和系统的专业知识,具有较强的独立从事科研工作的 能力。

论文作者在答辩中思路清晰,回答问题正确。经答辩委员会投标决议,全票(5票) 同意通过论文答辩,并建议授予工学硕士学位。

2024年1月22日

答	职务	姓名	职称	单位	签名
辩	主席	邹早建	教授	上海交通大学	24418
委日	委员	陈伟民	研究员	上海船舶运输科学研究所	(horze
会	委员	王金宝	研究员	中国船舶集团第七〇八研究所	202
成员	委员	张怀新	教授	上海交通大学	14247.35
签	委员	朱仁传	教授	上海交通大学	千小店
名	秘书	庄园	助理研究员	上海交通大学	21/2]



摘要

航行在恶劣海况下的船舶在波浪作用下容易发生大幅度垂向运动,船体出水后又 快速拍击水面,波浪与船体之间发生剧烈冲击从而产生砰击现象。砰击使得船体局部 结构特别是船艏或船艉承受极大的瞬时砰击力,这可能导致船体结构破坏、船用设备 损坏、船舶被迫减速等,严重威胁船舶航行安全。合理评估砰击载荷对船体结构设计 具有重要意义。

本文基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器对恶劣海况下 KCS 船的波浪砰击问题进行数 值模拟,采用重叠网格技术处理船舶大幅度运动。首先通过系列数值计算工作验证了 数值波浪水池的准确性和可靠性;在此基础上又针对波浪中的船舶运动进行了计算, 并与实验结果进行了对比,保证了船舶水动力求解的准确性;最后采用楔形体入水砰 击模型对砰击压力进行了计算并与实验结果进行对比,验证了砰击载荷计算的准确性。

针对规则波中的船舶砰击研究,分别讨论了波长、波高和浪向角对船舶运动和砰击载荷的影响。在迎浪工况中仅放开垂荡和纵摇两个自由度,在斜浪工况中又放开横摇运动。在迎浪工况中,垂荡和纵摇运动幅值随波长增加明显增大,但最大砰击载荷出现在波长接近于船长的工况,特别是波长为1.0或1.2倍船长的工况,此时船波之间的相对运动更加剧烈。波高对运动砰击载荷的影响规律基本相同,运动幅值和砰击载荷大小均随波高增加呈线性递增的趋势。在斜浪工况中,船舶运动幅度和砰击载荷较迎浪工况明显增加,但当波浪接近于横浪时,由于纵摇运动减小,砰击载荷大小也随之减小并小于迎浪工况。

针对不规则波中的船舶砰击研究,对船舶在迎浪聚焦波工况下的运动和砰击过程 进行了分析,讨论了波高和航速对运动响应和砰击载荷的影响。结果显示,波高对运 动和砰击载荷的影响同样均表现为线性增长的趋势。在航速不高时,增加航速对运动 的影响较小,但使得砰击载荷却明显增大。

综上所述,本文基于 CFD 方法研究了不同波浪环境下的船舶砰击载荷特性,对 砰击过程中的船舶运动、自由面发展和船体压力变化进行了分析,总结了波浪环境对 砰击载荷的影响,为船舶砰击载荷的准确预报提供参考。

关键词: 重叠网格, KCS 船, 运动响应, 砰击载荷, 载荷时空分布

I





ABSTRACT

Ships sailing in rough sea conditions are prone to significant vertical motion under the action of waves. After the hull is lifted out of the water, it quickly hits the water surface, causing severe impact between the waves and the hull, resulting in a slamming phenomenon. The phenomenon of slamming can generate significant instantaneous force on the local structure of the ship, especially on the bow or stern, which may lead to structural damage, equipment damage, deceleration of the ship and so on. And it seriously threatens the safety of ship navigation. Reasonably evaluating the impact load is of great significance for the design of ship structures.

This article simulated the wave slamming problem of the KCS ship under various sea conditions based on the naoe-FOAM-SJTU solver. And the overset grid technique is used to handle the large motion of the ship. Firstly, the accuracy and reliability of the numerical wave tank were verified through a series of numerical calculations. Then, calculations for ship motion in waves were conducted and compared with experimental results to ensure the accuracy of ship hydrodynamic solutions. Finally, the water entry model of wedge bodies was used to calculate the slamming pressure, and the accuracy of the slamming load prediction was verified by comparing it with experimental results.

For the study of ship slamming in regular waves, the effects of wavelength, wave height, and wave direction angle on ship motion and slamming loads were discussed. In the head wave condition, only heave and pitch motions were released, while the roll motion was also released in the oblique wave condition. In the head wave condition, the amplitude of heave and pitch motions increased significantly with the increase of wavelength, but the maximum slamming load occurs in the condition where the wavelength is close to the length of the ship, especially in the condition where the wavelength is 1.0 or 1.2 times of the length of the ship. At this time, the relative motion between ship and waves becomes more intense. The influences of wave height on ship motion and slamming load were basically the same, and the amplitude of motion and slamming load both show a linear increasing trend with the increase of wave height. In the oblique wave condition, the amplitude of ship motion and slamming load significantly increase compared to the head wave condition. However, when



the waves approach the transverse wave, due to the decrease in pitch motion, the slamming loads decrease and become smaller than the head wave condition.

For the study of ship slamming in irregular waves, the analysis was conducted on the motion and slamming process of the ship under the focused wave condition, and the effects of wave height and the speed of the ship on motion response and slamming load were discussed. The results showed that the influence of wave height on motion and slamming load also showed a linear increasing trend. When the speed is not high, increasing the speed has a smaller impact on the motion while it resulted in significant increase on the slamming loads.

In summary, this paper investigates the characteristics of ship slamming loads under different wave environments based on CFD methods. The ship motion, free surface development, and changes of pressure on hull during the slamming process are analyzed, and the influence of wave environment on slamming loads is summarized. This provides a reference for accurate prediction of ship slamming loads.

Key words: Overset grid, KCS ship, Motion response, Slamming load, Load spatiotemporal distribution



论文

摘	要]
ARS	
ADS	
第一	章 绪论1
1.1	研究背景与意义1
1.2	国内外研究现状2
1	2.1 理论研究
1	2.2 模型试验
1	2.3 数值模拟
1.3	本文主要工作
第二	章 数值计算方法10
2.1	流体控制方程10
2.2	数值造波与消波方法11
2.3	动态重叠网格技术13
2.4	船舶六自由度运动14
2.5	本章小结17
第三	章 船舶砰击载荷预报方法验证18
3.1	数值造波与消波计算验证18
3	1.1 计算模型18
3	1.2 网格收敛性分析19
3	1.3 不同消波松弛方式的对比21
3	1.4 造波松弛区长度的影响
3.2	波浪中的船舶运动计算验证24



3.3 楔形体落体砰击计算验证	26
3.3.1 计算模型	
3.3.2 网格收敛性分析	
3.3.3 入水砰击流场分析	
3.4 本章小结	32
第四章 迎浪规则波中的砰击载荷数值研究	
4.1 计算模型与工况	
4.2 数值仿真设置	34
4.3 波长对砰击载荷的影响分析	
4.4 波高对砰击载荷的影响分析	43
4.5 本章小结	47
第五章 斜浪规则波中的砰击载荷数值研究	
5.1 计算模型与工况	48
5.2 浪向角对船体运动的影响分析	50
5.3 浪向角对砰击载荷的影响分析	52
5.4 本章小结	58
第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究	
6.1 聚焦波模拟	59
6.2 计算模型与工况	60
6.3 聚焦波波幅对砰击载荷的影响分析	63
6.4 航速对砰击载荷的影响分析	67
6.5 规则波与聚焦波下的砰击载荷对比	70
6.6 本章小结	73
第七章 总结与展望	74
	74
7.1 尽结	/4



参	考 文	〕献	76
攻读	学位其	期间学术论文和科研成果目录	81
致	谢		82



冬	录
---	---

图 1-1	船舶砰击现象及造成的结构破坏	1
图 1-2	结构物入水砰击实验	4
图 1-3	船舶波浪砰击试验 ^[27]	5
图 1-4	聚焦波下的甲板上浪现象 ^[45]	6
图 1-5	交叉浪下的非对称船舶砰击 ^[50]	7
图 1-6	本文结构	9
图 2-1	松弛区示意图	12
图 2-2	不同松弛因子表达式对比	12
图 2-3	重叠网格示意图	14
图 2-4	六自由度坐标系示意图	15
图 3-1	数值水池示意图	19
图 3-2	数值水池网格示意图	20
图 3-3	不同网格密度下的计算结果对比	20
图 3-4	零入流松弛方式在不同消波区长度下的数值结果	22
图 3-5	目标波浪松弛方式在不同消波区长度下的数值结果	23
图 3-6	不同消波松弛方式的对比	23
图 3-7	不同入口松弛区长度的数值结果	24
图 3-8	KCS 船模几何形状	24
图 3-9	垂荡和纵摇运动时历曲线	25
图 3-1(0 一个遭遇周期内的自由面波形	26
图 3-11	1 实验楔形体模型	27
图 3-12	2 数值模拟计算域	27
图 3-13	3 计算域网格	
图 3-14	4 不同网格尺寸下的砰击压力对比	29
图 3-15	5 自由面和压力云图	31
图 4-1	计算域及边界条件	35
图 4-2	松弛区的布置	35
图 4-3	计算网格示意图	

论文

21003369

图 4-4 船艏压力测点位置示意图	36
图 4-5 不同波长下的船体垂荡和纵摇时历曲线	38
图 4-6 不同波长下的砰击压力时历	39
图 4-7 λ/LPP=1.0 工况下的船波相对运动和压力分布	40
图 4-8 不同波长下的砰击压力峰值对比	42
图 4-9 不同波长下的自由面和压力云图	43
图 4-10 不同波高下的船体垂荡和纵摇时历曲线	44
图 4-11 不同波高下的砰击压力时历	45
图 4-12 不同波高下的砰击压力峰值对比	46
图 4-13 不同波高下的自由面和压力云图	47
图 5-1 浪向角的定义	49
图 5-2 计算域示意图	49
图 5-3 松弛区的布置	50
图 5-4 不同浪向角下的运动响应	51
图 5-5 不同浪向角下的砰击压力时历	54
图 5-6 不同浪向角下的砰击压力峰值对比	56
图 5-7 不同浪向角下的自由面和压力云图	58
图 6-1 不同航速下的计算域布置	61
图 6-2 不同航速下的网格划分	61
图 6-3 不同波幅下的波面时历	62
图 6-4 不同波高下的运动响应时历	63
图 6-5 聚焦波下的船舶运动过程	64
图 6-6 不同波高下的砰击压力时历	65
图 6-7 聚焦波下的船波相对运动和压力分布	66
图 6-8 不同波高下的砰击压力峰值空间分布	67
图 6-9 不同航速下的运动响应时历	68
图 6-10 不同航速下的砰击压力时历	69
图 6-11 不同航速下的砰击压力峰值空间分布	70
图 6-12 聚焦波和规则波下的波浪时历对比	71
图 6-13 聚焦波和规则波下的船体运动响应对比	71
图 6-14 聚焦波和规则波下的垂向相对运动和砰击压力对比	72
图 6-15 聚焦波和规则波下的压力峰值空间分布对比	73





表 录

表 3-	1 数值波浪水池网格尺寸划分	. 19
表 3-2	2 KCS 船主尺度参数	. 25
表 3-	3 楔形体网格尺寸划分	. 28
表 4-	1 KCS 船主尺度参数	. 33
表 4-2	2 迎浪规则波计算工况汇总	. 34
表 5-	1 斜浪规则波计算工况汇总	. 48
表 6-	1 聚焦波计算工况汇总	. 60





论文

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

船舶在海洋环境中常常与波浪之间发生砰击作用,船体局部结构因此会承受较大的砰击压力,对船舶航行安全造成严重威胁。一方面,巨大的瞬时砰击载荷可能会直接破坏船体外板,造成船舶进水甚至沉没,在大型船舶中还可能引起整船的"颤振"响应,使得船体有折断的风险;另一方面,砰击过程可能伴随着甲板上浪现象,上浪水体冲击对船上的设备和人员生命财产安全造成威胁。在经济贸易全球化发展的背景下,集装箱船等大型运输船舶逐渐走向深远海,恶劣海况下的船舶砰击问题越来越受到船舶设计人员的重视。



图1-1 船舶砰击现象及造成的结构破坏 Fig. 1-1 Ship slamming phenomenon and structural damage

海洋中的船舶砰击是一个涉及多因素的复杂流固问题,其是波浪环境、船舶运动、 船体形状等多个因素共同作用的结果,想要准确预报砰击载荷是一项具有挑战性的工 作。经过几十年的发展,已经有许多学者提出了不同的砰击载荷预报方法,主要可以 分为理论方法、模型试验和数值模拟三大类。这些方法在一定程度上可以解释砰击产 生的机理,如结构物的入水砰击过程,但对于波浪中的船舶砰击仍然没有一个较为完 整的解释,如船底砰击、外飘砰击、甲板上浪和船艉砰击等。因此,进一步深入研究 波浪中的船舶砰击载荷特性以及载荷预报方法是具有重要工程意义的。





1.2 国内外研究现状

关于船舶砰击载荷的研究主要分为船舶局部结构入水砰击和波浪中的船舶砰击 两个方面。前者简化了结构物砰击过程,重点关注砰击产生的流动现象和砰击载荷预 报,后者模拟实际船舶航行中的砰击,重点关注波浪中的船舶运动响应和砰击发生的 位置。针对以上问题,目前的研究方法主要分为理论研究、模型试验和数值方法三类, 下面就这三类方法的研究进展与现状进行介绍。

1.2.1 理论研究

砰击问题最早是从 Von Karman^[1]研究水上飞机降落时浮箱所受到的冲击力开始的,他利用动量定理得到了砰击载荷的计算公式,对二维楔形体的入水砰击力进行了预报。这种砰击模型忽略了液面抬升的影响,在斜升角较小时得到的砰击力会偏小。Wagner^[2]对 Von Karman 的砰击模型进行改进,将楔形体等效为平板并考虑液面抬升,在势流的框架下求解了平板上的冲击压力,计算所得结果更接近于实际。此后 Wagner 的砰击模型成为一种经典理论砰击预报模型并被后来的许多学者进行研究和改进。

Dobrovol' Skaya^[3]将 Wagner 理论转化为一个微积分形式的函数,提出了一种楔 形体匀速垂直入水的分析方法。Wu 等^[4]进一步发展自相似理论,对楔形体自由落体 过程中的变速入水问题进行了研究。Zhao 和 Faltinsen^[5]结合非线性边界元法提出了适 用于求解任意二维形状入水问题的分析方法,并对斜升角在 4 度到 81 度范围内的楔 形体入水砰击问题进行了计算。Mei 等^[6]采用保角映射技术提出了一种求解任意截面 形式的入水砰击解析方法,给出了船形截面的解析解,研究了砰击对二维物体的影响。 卢炽华和何友声^[7]提出了一种求解弹性结构物入水冲击的数值方法,采用边界元法求 解水动力载荷,采用有限元法求解结构响应,分析了斜升角的大小对二维弹性楔形体 入水砰击流固耦合效应的影响。Wang 和 Guedes Soares^[8]结合模态分析和压力解析模 型建立了一种简化的弹性楔形体入水冲击模型,分析了斜升角、入水速度及边界条件 对楔形体挠度的影响。

以上研究都是对静水中的结构物入水冲击问题进行求解,没有考虑船舶运动的影响,在船舶波浪砰击预报中仍存在不足。为此,一些学者开始结合船舶耐波性理论和 入水冲击理论来预报波浪中的船舶砰击载荷。

Hermundstad 和 Moan^[9]提出了一种基于非线性切片法和广义 Wagner 公式的船体 砰击载荷预报方法,对一艘滚装船在斜浪规则波中的外飘砰击载荷进行了计算,将切 片法计算的到的船波相对运动作为砰击计算输入来求解砰击载荷,在对三维效应进行

修正后所得到的砰击压力与试验结果吻合良好。在此基础上,Hermundstad 和 Moan^[10] 又提出了一种不规则波中的船舶砰击高效载荷预报方法,为提高计算效率,在计算中 先计算了船体剖面与水之间的单位相对速度的速度势,然后将速度势与实际相对速度 结合得到砰击压力,最终计算结果与试验测量值吻合良好。胡嘉骏和蔡新钢^[11]基于线 性切片理论得到了船舶表面点与波面之间的相对速度,然后结合二维入水砰击理论对 船舶表面的砰击压力进行了预报。陈胜男^[12]应用基于三维势流理论的 Wasim 软件计 算船舶运动,根据 Wagner 理论计算船艏外飘砰击压力,分析了不规则波下的外飘砰 击概率问题。田喜民等^[13]基于三维时域势流 Rankine 源方法求解船舶运动并求得船波 之间的相对速度,通过选取砰击压力系数的形式得到了船艏外飘砰击压力并与规范值 进行了对比。

1.2.2 模型试验

论文

模型试验是检验理论方法合理性的重要技术手段,鉴于理论方法的复杂性,许多 关于砰击载荷的研究成果都是在模型试验下得到的。由于船舶波浪砰击试验对波浪环 境要求较高,难度较大,落体砰击试验成为研究的首选形式。

Ochi 和 Motter^[14]通过总结系列试验数据得到了船底砰击压力的经验公式。 Stavovy 和 Chuang^[15]对不同斜升角的楔形体进行了系列落体砰击模型试验,总结并拟 合得到了砰击压力系数公式。Yettou 等^[16]同样开展了楔形体的落体砰击试验,研究了 下落高度、楔形体斜升角以及楔形体质量对砰击压力系数的影响,同时还分析了楔形 体边缘的峰值压力演化过程。Huera-Huarte 等^[17]针对刚性平板进行了系列落体砰击实 验,结果表明,在小升角和高速条件下,平板下方的滞留空气会砰击压力的影响显著。 Stenius 等^[18]对倾斜 10°弹性平板的入水砰击过程进行了实验研究,分析了水弹性效 应的重要性。Peseux 等^[19]对系列不同斜升角和厚度的刚性和弹性锥体进行了落体砰 击实验,分析了砰击时的压力分布和演化,并和有限元数值结果进行对比。陈小平等 ^[20]对大尺度楔形体进行模型试验和数值仿真对比,讨论了不同落体高度和楔形体刚 度下的结构弹性效应,分析了弹性效应对砰击压力和结构应力的影响。

Luo 等^[21]对 V 型三维楔形体进行了落体实验,提出了一种结合 Wagner 理论和有限元方法的解耦方法,数值预报结果与实验结果吻合良好。Duan 等^[22]通过系列刚性和弹性楔形体落体砰击实验研究了楔形体斜升角、入水速度以及结构弹性对砰击压力传播特性的影响,当斜升角大于 0.2°时才会出现压力传播过程,弹性对压力传播的影响主要体现在斜升角较小的情况。Wang 等^[23]对三维船艏模型进行了一系列落体砰击实验,分析了倾斜角度和落体速度对砰击压力的影响。Xie 等^[24]提出了一种通用船

3



艏外飘形状的比较实验研究,对比了底部是否含有球状结构对砰击载荷的影响,并对 两者的流体动力特性进行了分析。Liu 等^[25]对截断船尾模型进行了一系列自由落体试 验,详细介绍了砰击特性,包括下落运动和砰击压力。为了讨论三维效应的影响,将 二维 CFD 数值结果与实验结果进行对比,结果表明数值结果平均比实验大了 21%。 Zong 等^[26]利用模型试验研究了三体船表面测量点的压力、垂直加速度以及不同下落 高度下流体粒子的速度。结果表明,船底附近的压力曲线形状比其他位置更清晰。此 外,三体船模型底部和主船体与片体之间的自由表面的流体粒子速度较高。在连接桥 甲板砰击后,其下方产生了大量的气泡。



(a) 楔形体入水砰击^[20]



(b) 三维船艏入水砰击^[23]

图1-2 结构物入水砰击实验 Fig. 1-2 Water entry test of structure

随着物理波浪水池技术的成熟,船舶波浪砰击试验的数量和类型也逐渐增多。 Kim 等^[27]实验研究了规则波和不规则波中 10000TEU 集装箱船在不同航速、波高、波 长和浪向角下的砰击载荷,结果显示斜浪中的砰击载荷可能会高于迎浪。Hong 等^[28] 通过实验证明船在较低的航速下航行时,即使增大波幅,船舶的砰击载荷也会急剧减 小。Ha^[29]对某船型浮式生产储卸船(FPSO)在破浪和不规则波浪条件下船首的砰击 载荷特性进行了试验研究,采用聚焦波产生破波,并应用 3 种不同的航向角,结果显 示最大砰击载荷的位置随航向角而变化。Greco 等^[30]采用模型试验和数值方法研究了 波浪中的船舶砰击和甲板上浪问题,对航速、波长船长比以及波陡进行系统全面的分 析,根据砰击位置的不同确定了不同的砰击特征。陈占阳等^[31]对某集装箱船进行了砰 击模型试验,结合试验数据和船底砰击的三角脉冲函数形式建立了外飘砰击压力时间 分布模拟。Li^[32]以船尾长而平的大型游轮为研究对象对船尾砰击和全局响应进行了实 验研究,建立了船尾砰击时可再现船波相对运动的计算模型,分析了瞬时冲击速度和 纵向斜升角对局部砰击压力分布的影响。Lavroff 等^[33]进行了双体船的水弹性试验,



研究表明规则波中的砰击压力主要取决于波高大小和遭遇频率。Lin^[34]通过实验研究 了不对称冲击对水弹性响应影响。试验中采用了不同的波向角和波长,在迎浪条件下, 参数横摇现象与不对称砰击力同时发生,右舷和左舷的冲击力表现出交替的不对称周 期性变化。



图1-3 船舶波浪砰击试验^[27] Fig. 1-3 Ship wave slamming test^[27]

1.2.3 数值模拟

理论方法在处理某些强非线性问题如甲板上浪、波浪破碎时存在较大的局限性, 而试验方法需要更高成本的人力和物力,因此数值方法开始受到人们的重视。随着计 算机技术的发展,计算流体力学方法的计算效率得到极大提升并在许多工程领域得到 广泛应用。

Gong 等^[35]基于粒子法(SPH)研究了二维楔形体的入水问题,分析了初始入水 速度对最大砰击力的影响。Vandamme 等^[36]采用弱可压缩光滑粒子法(WCSPH)研究 了楔形体和圆柱体的入水问题,数值计算结果与其他已经发表的实验和数值结果一致。 Zhong 等^[37]分别采用粒子法和有限体积法数值模拟了三维 SYSU 船的入水砰击过程, 对比分析了船舶入水后的动力响应和砰击流动现象。何广华等^[38]在 LS-DYNA 软件中 对 S175 集装箱船的三种船形截面开展二维入水砰击数值模拟。Wen 等^[39]采用有限体 积法(FVM)结合流体体积法(VOF)对匀速楔块入水进行数值研究,分析了三维效 应对入水过程中总砰击系数、横向砰击系数以及楔形表面的压力减小的影响。吴巧瑞 等^[40]基于重叠网格方法对三维楔形体入水砰击进行了数值模拟,分析了斜升角、初始 速度和下落高度对砰击压力的影响。Brizzolara 等^[41]使用 BEM、LS-DYNA、FLOW-3D、FLUENT 和 SPH 预报了船艏的砰击压力并与实验结果进行了对比验证。

Shen 等^[42]使用两个 CFD 软件 Open FOAM 和 STAR CCM+预报了一艘 10K TEU 集装箱船的砰击压力,两种软件均与实验具有良好的一致性。Xie 等^[43]结合线性耐波

5



理论和 CFD 方法提出了一种混合两步法来预报船舶在斜浪中的不对称砰击载荷。Lin 等^[44]采用势流和 CFD 方法计算了规则波中集装箱船在参数横摇下的非对称运动和砰 击压力。Liu 等^[45]应用数值方法研究了恶劣海况下的甲板上浪及砰击载荷。计算结果 表明,与第一甲板上浪相比,第二甲板上浪持续时间更长,强度更猛烈。采用 FFT 方 法分析了频率谱中运动和砰击载荷的特征,结果表明,船首和甲板区域的峰值压力频 率受畸形波高频分量的影响显著,而上层建筑区域的峰值压力主要受低频影响。



图1-4 聚焦波下的甲板上浪现象^[45] Fig. 1-4 The phenomenon of green water on the deck under focused wave^[45]

Acharya 等^[46]通过系统的参数化研究,研究了波陡度、波长、船速、相对速度等 各种物理几何参数对船艏砰击载荷的影响。采用基于 CFD 的单向耦合方法,船舶的 垂荡和纵摇运动由势流理论求解,随后将估计值用作商业 CFD 求解器的输入,并用 于计算砰击压力。基于该参数研究并借助曲线拟合方法,提出了一个砰击载荷经验公 式,该公式与 CFD 结果和船级社规则吻合较好,可用于快速预测船艏砰击压力。Li 等^[47]结合适航理论和 CFD 技术,建立了斜长波不对称砰击载荷预测数值方法。应用 位于波面的参考坐标系,将船舶砰击问题转移到不对称入水工况中,其中包括倾角波



论文

体界面和不对称船舶运动。以某 21K TEU 集装箱船为例,结合自由表面演化和压力 分布,进一步探讨了斜长波下砰击载荷的特点。

Xie等^[48]在商业代码FLUENT中,采用CFD方法研究了超大型集装箱船(ULCS) 全尺寸船首喇叭形截面的不对称入水问题。在数值模拟中综合考虑了两种不对称性, 即作为几何不对称的角度和作为运动不对称的水平速度,并重点讨论了它们对冲击流 体动力学的影响,包括堆积水、压力和砰击力。结果表明,如果不发生流动分离,几 何不对称性对这些流体动力学很重要。否则,运动学不对称性会显着影响堆积水的形 式,并进一步决定压力和砰击力。Chen等^[49]采用STARCCM+研究了三体船在交叉 波浪中的适航性和砰击问题。对相对位置、波长和前进速度等不同参数下三体船在交 叉波场中的运动和冲击响应进行分析,观察和分析了三体船的影响和绿水特性,比较 了三体船在短波峰交叉波和长波峰规则波中的运动响应和压力分布。Huang等^[50]基于 CFD方法对S175集装箱船在交叉波浪中的运动响应和砰击压力进行了数值研究。



图1-5 交叉浪下的非对称船舶砰击^[50] Fig. 1-5 Asymmetric ship slamming under cross waves^[50]

李远鹤^[51]基于 STAR-CCM+对一艘艏外飘型滚装船在不同波浪参数下的砰击载 荷进行了预报,基于数值计算结果提出了基于人工神经网络的砰击压力预报方法。 Takami 等^[52]开发了一种基于 CFD-FEA 的耦合模型,对一艘 6600 TEU 集装箱船在恶 劣海况下的砰击压力和船舶响应进行了研究,数值与实验结果吻合良好。Jiao 等^[53]开 发了一种 CFD-FEA 的耦合模型,分析了考虑水弹性效应的 S175 集装箱船在规则波 下的运动响应、波浪载荷以及砰击和上浪问题,提出了一种基于入射波和船舶全局运



动适航数据的简化船艏外飘和底部砰击压力估计方法,这可以减轻双向流固耦合仿真的计算负担。

从以上调研来看,数值方法特别是计算流体力学方法(CFD)作为一种新兴技术 正在成为船舶砰击问题研究的重要手段。本文将基于重叠网格方法开展不同波浪环境 下的船舶砰击载荷数值预报研究,对砰击载荷的时空特性进行分析,为砰击载荷预报 提供参考。

1.3 本文主要工作

本文采用计算流体力学方法针对 KCS 船开展了波浪砰击载荷数值研究。基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器求解粘性流场,分析了不同波浪环境下的船舶运动响应和砰 击压力的大小以及时间和空间分布规律,包括迎浪规则波、斜浪规则波和聚焦波环境,讨论了波长、波高、浪向角和航速对砰击载荷的影响。

基于以上研究内容,本文主要分为七个章节,各章节之间的关系如图 1-6 所示。

第一章主要介绍了船舶砰击载荷的研究背景和现实意义, 梳理了目前国内外关于 砰击载荷预报的研究方法和载荷变化规律。

第二章介绍了本文数值仿真的所用到的主要技术,包括 naoe-FOAM-SJTU 水动 力求解器的功能、粘性流场求解的基本控制方程、两相流界面捕捉的 VOF 方法、基 于 waves2Foam 的数值波浪水池、动态重叠网格技术和船舶六自由度运动求解方法。

第三章主要对船舶波浪砰击预报方法进行了验证。首先对数值波浪水池的造波与 消波效率以及准确性进行了讨论,然后在此基础上计算了 KCS 船在波浪中的运动并 于实验结果进行对比,最后对于采取入水砰击的形式探讨了楔形体砰击压力预报的准 确性。

第四章介绍了研究中采用的 KCS 船主要参数,数值仿真的基本设置,包括计算 域和网格布置情况、边界条件设定、时间步长、计算工况和压力监测点的位置,分析 了 KCS 船在迎浪规则波不同波长和波高下的运动响应和砰击载荷。

第五章研究了不同浪向规则波下 KCS 船的运动和砰击载荷特性。介绍了斜浪环 境下的计算域及边界条件设置,分析了浪向角对船舶运动和砰击压力的影响,讨论了 斜浪下砰击载荷的非对称性。



第六章研究了迎浪聚焦波下 KCS 船的运动和砰击载荷特性。介绍了数值波浪水 池中聚焦波的生成理论和方法,验证了聚焦波模拟的准确性,分析了波高和航速对运 动响应和砰击载荷的影响。

第七章对全文研究内容进行了总结和归纳,对于研究中的不足进行了探讨,提出 了未来值得深入研究的方向。

本文的创新点在于针对波浪中的船舶砰击问题,考虑多种波浪环境开展了船舶砰击过程的数值模拟分析,详细研究了砰击过程中的流场变化和船艏部砰击载荷的分布规律。分析了波长、波高、浪向等因素对船舶运动及砰击载荷的影响规律,以及极端 波浪下的船舶运动和砰击载荷特性。本文的研究工作可为船舶砰击载荷预报及砰击载 荷的特性研究提供借鉴和参考。



图1-6本文结构 Fig. 1-6 Structure of the paper



第二章 数值计算方法

本文基于 CFD 方法研究船舶在波浪中的运动和砰击问题,采用基于 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行数值计算。该求解器沿用 OpenFOAM 的有限体 积法和离散格式,并在此基础上还添加了数值造波与消波、重叠网格技术和物体六自 由度运动等模块,方便模拟结构物在波浪中的大幅度运动,目前该求解器中的重叠网 格技术已经在船舶水动力计算方面积累了许多经验^[54-56]。下面就本文所使用的流体控 制方程、数值造波与消波方法、重叠网格技术和船舶六自由度运动进行介绍。

2.1 流体控制方程

波浪与结构物相互作用问题属于两相流介质问题,不考虑流体密度变化,则非定 常不可压两相流体的控制方程可由连续性方程和动量方程表示:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \mathbf{0} \tag{2-1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U})$$
(2-2)

式中, U 为速度场, ρ 为流体密度, p 为动压力, g 为重力加速度, μ 为动力粘性系数。

在两相流问题中,不同介质之间的界面捕捉非常关键。本文中采用了在 OpenFOAM 中广泛应用的一种添加人工压缩项的 VOF (Volume of Fluid)方法来捕捉 自由面,该方法通过划分网格单元中不同流体介质的体积来确定交界面的位置。在 VOF 方法中定义了一个体积分数 α 来表征网格中流体的体积占比,α 的取值介于 0 和 1 之间,α=0 表示网格中为空气,α=1 表示网格中为水,0<α<1 表示网格中为交界面, 本文以 α=0.5 作为自由面。一个网格单元中的流体密度和粘度可由以下式子来表示:

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air}$$

$$\mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air}$$
(2-3)

式中, ρ_{water} 为水的密度, ρ_{air} 为空气的密度, μ_{water} 为水的粘度, μ_{air} 为空气的粘度。体积分数 α 可通过相分数方程求解得到:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) + \nabla \cdot [\mathbf{U}_{\mathbf{r}}(1-\alpha)\alpha] = 0$$
(2-4)

方程中的最后一项为人工压缩项,由于(1-α)α存在,它仅在自由面处生效。U_r为界面 压缩速度场,它的值可以通过以下公式求得:



$$\mathbf{U}_{r,f} = \mathbf{n}_{f} \min \left\{ C_{\alpha} \frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_{f}|}, \max \left(\frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_{f}|} \right) \right\}$$
(2-5)

其中,下标*f*表示网格面物理量, ϕ 为速度通量, S_f 为网格单元面的方向向量, $|S_f|$ 等于网格单元面的面积, C_{α} 为自由面压缩系数,其值越大压缩效果越明显,本文中 C_{α} 取为1, n_f 为自由面上的单元法向量。与原始的 VOF 方法相比,引入人工压缩项通过 对界面附近的相分数进行挤压,可以较好的抗衡由于相分数的数值耗散带来的界面模 糊,提高了界面的捕捉精度。

2.2 数值造波与消波方法

在船舶耐波性问题中,按照指定要求生成准确的波浪环境是船舶水动力计算的基础,为此构建可靠的数值波浪水池是有必要的。波浪环境涉及到造波和消波两个过程,前者产生波浪场,后者则消除波浪传播到计算域边界所产生的反射波干扰。

本文中采用开源波浪工具箱 waves2Foam^[57]建立数值波浪水池。在 waves2Foam 中采用了一种松弛区技术来同时实现造波与消波功能,这意味着造波区域可以消除结 构物与波浪相互作用所产生的辐射波干扰,从而保证波浪生成的稳定性。松弛区技术 是基于物理量(如速度)的数值解和目标解间的加权。目前松弛区方法分为显示和隐 式(时间积分)松弛两种方法,waves2Foam采用的是显示松弛方法。显示松弛方法 在松弛区内的表达式为:

$$\phi = \omega_R \phi_{computed} + (1 - \omega_R) \phi_{target}$$
(2-6)

式中, *ϕ* 是流体速度或体积分数, *ω_R* 是松弛因子且介于 0 和 1 之间。松弛区的布置如 图 2-1 所示, 在入口处的松弛区将流体速度和体积分数从目标解逐渐松弛到数值解, 在出口处的松弛区则从数值解松弛到目标解。





图2-1 松弛区示意图 Fig. 2-1 Schematic diagram of relaxation zone

松弛因子的选择有多种, waves2Foam 中共提供了三种选择,分别为:

$$\omega_R = 1 - \frac{\exp(\sigma^p) - 1}{\exp(1) - 1} \tag{2-7}$$

$$\omega_{R} = 1 - \sigma^{p} \tag{2-8}$$

$$\omega_{R} = -2(1-\sigma)^{3} + 3(1-\sigma)^{2}$$
(2-9)

其中, σ 是松弛区内的相对位置且介于 0 和 1 之间, 当 σ =0 时, ω_R =1, 当 σ =1 时, ω_R =0。waves2Foam 中默认选择式 (2-7) 作为松弛因子, 指数 p 取为 3.5, 其他公式 中无默认取值, 这里将 p=3.5 时各公式随相对位置的变化情况进行对比, 如图 2-2 所 示。可以看到,指数形式的松弛因子在数值解和目标解之间的过渡相对平滑, 根据田 康^[58]的研究结果,指数形式松弛因子的造波和消波效果最佳, 因此在后续研究中均采 用指数形式的松弛因子。



Fig. 2-2 Comparison of different relaxation factor expressions



2.3 动态重叠网格技术

在采用网格类方法求解物体运动时,如何考虑物体运动是计算的关键。动态变形 网格技术是船舶运动求解中的一种常用网格技术。船体在运动时,物体表面的网格节 点带动周围的网格节点拉伸,从而使得物体附近的网格发生变形。这种方式在在物体 小幅度运动时是比较适用的,但在大幅度运动时可能会出现网格严重变形导致计算发 散或者计算精度降低的情况。在船舶砰击问题中,船体的大幅度运动是不可避免的, 因此本文中采用了另一种适用于处理物体大幅度运动的动态重叠网格技术。

重叠网格技术的原理是将不同的物体单独划分网格,不同的网格之间相互独立且存在重叠部分,网格间的信息交换通过在网格重叠区域建立插值关系完成。通过这种手段,重叠网格技术可以实现多个网格间的无约束运动,因为网格不会发生变形,网格质量和计算精度也得到了保证。虽然重叠网格技术容易处理各种无约束运动,但是网格间的信息交换却是一大难题,如何处理好不同网格之间的数据传递关系成为重叠网格技术实现的关键问题。

为了建立网格间的插值关系,在重叠网格中,网格单元被划分为活动单元、洞单 元、插值边界单元、贡献单元和孤点单元。活动单元正常参与流场计算;洞单元不参 与计算,一般是计算域外、结构物内部或者多余的重叠区域内的单元;插值边界单元 用来接收其他网格的信息,位于网格重叠区域内的洞单元附近;贡献单元是给插值边 界单元提供流场信息的活动单元;孤点单元是没有找到足够的贡献单元的插值边界单 元,通过增加网格间的重叠区域或该区域内的网格数量可以减少孤点单元,在计算中 应尽量避免孤点单元的出现。在实际应用中,一般会建立整个流场域的背景网格和运 动物体的子网格。在各部分网格生成后,会执行"挖洞"和插值过程,即去掉洞单元 并找到插值边界单元和贡献单元。图 2-3 是完成挖洞和插值后的网格,黑色为背景网 格,蓝色为子网格,船体内部的洞单元被删除。为了完成这个过程,需要计算网格间 的流场信息(Domain Connectivity Information, DCI),本文中是采用 SUGGAR++^[59] 程序来完成的。SUGGAR++求解 DCI 的主要步骤如下:

(1)寻找洞单元:在全域单元中找到洞单元并将其附件的单元定义为插值边界 单元;

(2)寻找贡献单元:在插值边界单元附近分别从背景网格和子网格中找到合适的贡献单元;

(3) 求解权重系数:根据插值边界单元和贡献单元的相对位置求解两者间的插 值权重系数,通过加权求和完成插值,本文采用的是 Laplace 算子权重方法。



(4)重叠区域优化:在上述三个步骤的基础上进一步寻找最佳插值边界单元和 贡献单元,减小网格重叠区域,提高插值精度。

完成 DCI 求解后需要将其与流场计算结合起来。在计算流程中首选需要计算 DCI, 然后接收 DCI 数据并完成流场的计算,在物体六自由度求解完成后重新计算 DCI, 循环执行上述流程便可完成流场的插值和求解,更具体的求解过程可参考沈志荣的博 士论文^[60]。



Fig. 2-3 Schematic diagram of overset grid

2.4 船舶六自由度运动

采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器中的六自由度模块计算船舶在波浪中的运动。六 自由度即将物体的运动分为纵荡、横荡、垂荡三个平移运动和横摇、纵摇、艏摇三个 旋转运动。为求解这些运动,建立大地坐标系和船体坐标系如图 2-4 所示。大地坐标 系的位置固定不动,船体坐标系始终固定在船体上,其坐标原点一般位于重心处。为 方便理解船舶运动过程,一般将坐标系 X 轴沿船舶纵向布置, Y 轴沿船宽方向布置, Z 轴沿吃水方向布置,在船舶处于正浮状态时,大地坐标系与船体坐标系各坐标轴的 正方向一致。





图2-4 六自由度坐标系示意图

Fig. 2-4 Schematic diagram of coordinate system of six degree of freedom

船舶在大地坐标系下的运动过程即船体坐标系相对大地坐标系的运动过程,船舶 在大地坐标系下的位移可表示为:

$$\boldsymbol{\eta} = (\boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$$
(2-10)

其中,六个参数分别表示船舶沿 X、Y、Z 轴的线位移(纵荡、横荡、垂荡),以及绕 X、Y、Z 轴的角位移(横摇、纵摇、艏摇)。在船体坐标系中,三个线速度和三个角 速度分别表示为:

$$\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = (u, v, w, p, q, r)$$
 (2-11)

大地坐标系和船体坐标系下的速度可以通过船体的三个角运动(欧拉角)建立联系:

$$\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{J}_1^{-1} \cdot \boldsymbol{\dot{\eta}}_1 \quad \boldsymbol{v}_2 = \boldsymbol{J}_2^{-1} \cdot \boldsymbol{\dot{\eta}}_1$$

$$\boldsymbol{\dot{\eta}}_1 = \boldsymbol{J}_1 \cdot \boldsymbol{v}_1 \quad \boldsymbol{\dot{\eta}}_1 = \boldsymbol{J}_2 \cdot \boldsymbol{v}_2$$
 (2-12)

式中, $J_1 \pi J_2$ 为转换矩阵, 其具体表达式如下: $J_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} (2-13)$ $J_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} (2-14)$

要求解船的运动,首先需要得到船体的受力。全局流场是在大地坐标系下求解,因此需要在大地坐标系求得船体受到的力和力矩,然后根据式(2-13)将其转换到船体坐标系下:



$$\boldsymbol{F}_{s} = (\boldsymbol{X}_{s}, \boldsymbol{Y}_{s}, \boldsymbol{Z}_{s}) = \boldsymbol{J}_{1}^{-1} \cdot \boldsymbol{F}_{e}$$

$$\boldsymbol{M}_{s} = (\boldsymbol{K}_{s}, \boldsymbol{M}_{s}, \boldsymbol{N}_{s}) = \boldsymbol{J}_{1}^{-1} \cdot \boldsymbol{M}_{e}$$
(2-15)

式中, **F**为力, (*X*, *Y*, *Z*)为三个方向的分力, *M*为力矩, (*K*, *M*, *N*)为三个方向的分力 矩,下标 s 表示船体坐标系下的参数,下标 e 表示大地坐标系下的参数。

定义船体的质量 m, 重力加速度为 g, 船体坐标系下的速度可以由刚体六自由度 运动方程求解:

$$\begin{cases} \dot{u} = X_{s} / m + vr - wq + x_{g} (q^{2} + r^{2}) - y_{g} (pq - \dot{r}) - z_{g} (pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = Y_{s} / m + wp - ur + y_{g} (r^{2} + p^{2}) - z_{g} (qr - \dot{p}) - x_{g} (qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = Z_{s} / m + uq - vp + z_{g} (p^{2} + q^{2}) - x_{g} (rp - \dot{q}) - y_{g} (rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_{x}} \{ K_{s} - (I_{z} - I_{y})qr - m[y_{g} (\dot{w} - uq + vp) - z_{g} (\dot{v} - wp + ur)] \} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_{y}} \{ M_{s} - (I_{x} - I_{z})rp - m[z_{g} (\dot{u} - vr + wq) - x_{g} (\dot{w} - uq + vp)] \} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_{z}} \{ N_{s} - (I_{y} - I_{x})pq - m[x_{g} (\dot{v} - wp + ur) - y_{g} (\dot{u} - vr + wq)] \} \end{cases}$$

式中, (*x_g*, *y_g*, *z_g*)表示船舶重心到旋转中心的位置, (*I_x*, *I_y*, *I_z*)表示船体基于转动中心的 主转动惯量, 其与船舶重心之间由以下式子关联起来:

$$\begin{cases} I_x = I_{xcg} + m(y_g^2 + z_g^2) \\ I_y = I_{ycg} + m(x_g^2 + z_g^2) \\ I_z = I_{zcg} + m(x_g^2 + y_g^2) \end{cases}$$
(2-17)

其中, (Ixcg, Iycg, Izcg)为基于船体重心的主转动惯量。

在计算得到六个自由度的加速度后,对其进行积分即可得到船体坐标系下的速度, 通过转换矩阵即可得到大地坐标系下的速度,对速度进一步积分可得到位移,根据速 度或者位移可计算得到网格节点的位移。

六自由度模型的基本求解步骤如下:

- (1) 根据上一个时间步的网格节点位移移动网格;
- (2) 求解全局流场并得到船体在大地坐标系下的力和力矩;
- (3) 根据转换矩阵得到船体坐标系下的力和力矩;
- (4) 根据刚体六自由度方程求解船体的加速度;
- (5) 加速度积分得到速度并转换到大地坐标系下;
- (6) 将速度积分得到位移并移动网格;



(7)回到第一步,开始下一个时间步的计算。

2.5 本章小结

本章节主要对本论文中进行船舶砰击载荷数值模拟所用到的计算流体力学基本 理论和数值方法进行了简要介绍。主要内容包括粘性流场求方法、数值波浪水池的构 建以及船舶的运动求解方法。在流场求解中介绍了流体的控制方程和对方程的离散方 法,采用了较高精度的带人工压缩项的 VOF 方法来处理两相流中的自由面捕捉问题。 在数值波浪水池中介绍了基于开源工具 waves2Foam 实现数值造波以及消波的基本原 理。在船舶运动求解中介绍了动态重叠网格技术和结构物六自由度运动求解的方法。 这些理论方法是船舶水动力学计算和分析的基础,为后续开展船舶砰击载荷研究提供 了技术支撑。



第三章 船舶砰击载荷预报方法验证

采用 CFD 方法模拟船舶在波浪中的砰击问题涉及到波浪环境、船舶运动响应以 及砰击力预报三个方面的问题。准确的波浪模拟对自由面网格和造波消波方法有较高 的要求,需要根据波浪参数进行合理的设置。船舶在波浪中的运动情况会影响船体周 围的压力分布进而影响砰击力的分布,正确反映船舶运动响应是砰击力预报的前提。 砰击力是一个瞬时变化的力,砰击现象发生时,结构物附近流场变化剧烈,在复杂流 场下正确反映压力变化过程具有一定的挑战性。目前国内外关于波浪中的船舶砰击直 接实验数据较少,公开发表文献中的船模没有型线数据,大多数文献采用船截面或楔 形体入水这一简化形式来验证砰击力预报的准确性,本文中同样采用楔形体入水的形 式进行验证。针对上述三个问题,本章首先对数值波浪水池的造波消波效果进行了验 证,并且还对自由面网格进行了网格收敛性验证,以此确保波浪环境的准确性。随后 在此基础上以 KCS 集装箱船为对象对迎浪规则波下的运动响应进行了模拟,验证重 叠网格和六自由度求解的准确性。最后对楔形体的入水砰击过程进行了模拟,分析了 入水过程中的流场和压力变化情况以及网格尺度对砰击压力的影响。

3.1 数值造波与消波计算验证

3.1.1 计算模型

基于 waves2Foam 进行波浪的数值模拟。对于单向波浪而言,Y 方向对波浪传播 的影响较小,为减少计算量建立二维数值水池,如图 3-1 所示。计算域长 30m,深 10m,坐标系原点位于左侧边界的静水面处(Z=0m),X 轴正方向指向右,Z 轴正方 向垂直向上,波浪沿 X 轴正方向传播。计算域左侧为入口边界,指定波浪速度和体积 分数;右侧为出口边界,与消波区内的速度匹配;顶部为大气边界,底部为壁面边界, 两侧为空边界。分别在入口边界和出口边界处布置松弛区,入口松弛区的长度设置为 1 倍波长,出口松弛区的具体长度会在后续讨论。




图3-1 数值水池示意图 Fig. 3-1 Schematic diagram of numerical tank

在波浪砰击问题中,波高与波长的比值往往较大,此时线性波理论不再适用,需要选择更高阶的波浪理论,本文中选择五阶 stokes 波理论生成波浪。用于波浪分析的 波浪参数为: 波高 H=0.2m,波长 λ=5m,周期 T=1.78s,波陡 H/λ=0.04。在距离入口 边界 2 倍波长的位置设置浪高仪监测波浪时历。

3.1.2 网格收敛性分析

波浪的传播过程对自由面网格有较高的要求,一般需要在自由面处进行多次网格加密以减少数值耗散。增加波高方向和波长方向的网格密度可以提高波浪模拟精度, 但同时也会导致计算成本增加,为此需要选择一个合理的网格布局来平衡精度和效率。 在自由面处按照三种网格布局进行加密, Δz 表示波高方向的网格尺寸, Δx 表示波长 方向的网格尺寸,计算时间步长选择为 0.002s,约为波浪周期的 1/900,具体网格尺 寸如表 3-1 所示,网格布局如图 3-2 所示。

Table 3-1 Mesh size of numerical wave tank					
网格类型	${ m H}/{\Delta z}$	$\lambda/\Delta x$	$\Delta x/\Delta z$	网格总数	
Mesh A	10	80	3.1	1.6 万	
Mesh B	12	100	3.2	2.6 万	
Mesh C	14	120	2.9	3.0 万	

表3-1 数值波浪水池网格尺寸划分





图3-2 数值水池网格示意图 Fig. 3-2 Schematic diagram of numerical tank mesh

图 3-3 为不同网格密度下的数值结果与理论结果的对比。可以看到, 三个网格下的结果均非常接近于理论值。粗网格、中等网格和密网格下的计算波高与理论波高的误差分别为-0.4%、0.13%、0.3%, 三者的误差均在 1%以内。随着网格密度增加, 计算波幅逐渐接近甚至高于理论解。在局部放大图中还可以发现, 粗网格比其他两个网格有更大的相位差。从计算结果来看三套网格均能保持比较好的波高, 综合考虑相位差和计算波高误差, 这里选择中等网格密度作为后续计算的参考, 即保证一个波高内至少有 12 个网格, 一个波长内至少有 100 个网格。



Fig. 3-3 Comparison of numerical results under different mesh densities



3.1.3 不同消波松弛方式的对比

消波效果的好坏也是影响波浪模拟的重要因素,若无法完全吸收入射波,反而会 产生反射波使得波浪偏离理论解。waves2Foam 在出口松弛区有两种设置,一种是将 入射波松弛到零入流条件,另一种是松弛到与入射波相同的理论解条件。前者在出口 松弛区内逐渐过渡到静水面,后者则逐渐过渡到理论波面,这要求波浪在传播过程中 波面的轮廓不能与入射波相差太远。另外,对于初始流场的处理两种办法,一种是初 始化为静水面,一种是初始化为目标波面,后者可以缩短波浪稳定发展的过程,节省 了计算时间,在后续计算中均采用这种方式。下面对这两种松弛区的效率进行对比。

对不同消波区长度下的消波效率进行对比。图 3-4 为零入流松弛方式在不同消波 区长度下的波浪时历曲线对比,可以看到在消波区长度小于 2 倍入射波长时,在 11 个波浪周期内波浪仍处于不稳定发展阶段,且计算波高都小于理论波高,这可以认为 是由于消波区出现反射波导致的波浪相互干扰。当消波区长度大于 2 倍波长时,波浪 发展趋于稳定且计算波高向理论波高靠近,2 倍消波区长度以后的消波效果基本相当。 在使用这种消波方式时,消波区长度应至少取为 2 倍入射波长。









图 3-5 为目标波浪松弛方式在不同消波区长度下的波浪时历曲线对比,可以看到 在消波区长度为 0.5 倍入射波长时,在大约 8 个波浪周期后,计算波高会逐渐小于理 论波高。当消波区长度大于 0.5 倍入射波长时,不同消波区长度的消波效果基本相同, 波高没有出现明显减小的现象。因此可以认为在使用这种消波方式时,消波松弛区的 长度应至少大于 1.0 倍入射波长。



(a) 消波区长度 L=0.5-1.0λ







Fig. 3-5 Numerical results of target wave relaxation method under different lengths of relaxation zones

图 3-6 为空间上不同消波方式的对比。松弛到静水面的形式在松弛区内波高逐渐 降低,而松弛到目标波浪的形式则继续保持在目标波浪。总的来说,两种松弛方式在 合理布置消波区长度后均能得到较好的消波效果。采用目标波浪松弛方式可以在较小 的计算域内有较高的消波效率,这样可以减小总的计算域长度,减少了计算量,因此 本文在后续计算种均采用这种方式来消波。



图3-6 不同消波松弛方式的对比 Fig. 3-6 Comparison of different wave absorbing relaxation methods

3.1.4 造波松弛区长度的影响

造波松弛区与消波松弛区具有相同的功能,消波区长度会影响波浪的吸收效率, 那么造波区长度是否会影响波浪产生的精度,这里对不同的造波区长度进行分析。图 3-7 为不同造波松弛区长度下的计算波高对比,可以看到松弛区长度基本不影响波浪



生成。可以认为基于 waves2Foam 进行波浪模拟的质量主要取决于自由面网格密度和 出口松弛区的消波效率。





Fig. 3-7 Numerical results under different lengths of inlet relaxation zones

3.2 波浪中的船舶运动计算验证

船体运动是影响砰击载荷的关键因素,因此有必要验证波浪中的船舶运动响应。 KCS 船是由韩国 KRISO 设计的一艘 3600TEU 集装箱船,该船具有集装箱船共有的 肥大特征,船艏具有球鼻艏结构,被主要用于 CFD 技术的船舶水动力对比验证。KCS 船的几何形状如图 3-8 所示。



图3-8 KCS 船模几何形状 Fig. 3-8 KCS ship model geometry

为验证本文数值方法和 naoe-FOAM-SJTU 求解器的准确性,参考 2015 Tokyo Workshop 会议中 KCS 船的耐波性实验,选择了缩尺比为 37.9,迎浪工况,航速 Fn=0.261,波陡 H/λ=1/60,波长船长比 λ/L_{PP}=1.15 的工况作为校验工况,在这个工况 下船舶的运动响应比较剧烈。该缩尺比下的船舶主尺度参数如表 3-2 所示。

论文

Table 3-2 Main parameters of KCS ship					
主尺度	符号及单位	实船	模型		
垂线间长	$L_{PP}\left(m ight)$	230	6.0702		
水线宽	$B_{WL}(m)$	32.2	0.8498		
吃水	T (m)	10.8	0.2850		
排水体积	∇ (m ³)	52030	0.9571		
重心垂向位置(距基线)	KG (m)	-	0.378		
重心纵向位置(距船舯,向船艏为正)	LCG/L_{PP} (%)	-1.48	-1.48		
王田次妹动业汉	K_{xx}/L_{PP}	0.40	0.40		
九四认荐幼十任	K_{yy}/L_{PP}	0.250	0.252		

表3-2 KCS 船主尺度参数 Table 3-2 Main parameters of KCS shi

在计算中放开船舶垂荡和纵摇运动,其他自由度固定。定义遭遇周期 $T_e=1/(\sqrt{g/2\pi\lambda}+U/\lambda),U$ 为航速,波幅 $\zeta_s=H/2$,波数 $k=2\pi/\lambda$,无因次化的垂荡和纵摇表示为:

$$TF_3 = z/\zeta_s$$

$$TF_5 = \theta/k\zeta_s$$
(3-1)

式中,TF₃为垂荡,TF₅为纵摇。图 3-9 是一个遭遇周期内计算得到船舶运动与实验的 对比,可以看到两者在相位和大小上均吻合良好,垂荡幅值误差为 2.7%,纵摇幅值 误差为-2.4%,这表明本研究的数值方法可以较好的模拟波浪中的船体运动。



图3-9 垂荡和纵摇运动时历曲线 Fig. 3-9 Time history of heave and pitch motion

图 3-10 展示了一个遭遇周期内船舶周围的自由面变化情况。可以看到,在波浪 中航行的船舶在船尾有明显的开尔文波,船艏穿过波浪波峰时其周围流场变化比较剧 烈。







3.3 楔形体落体砰击计算验证

3.3.1 计算模型

对文献^[61]中的楔形体入水砰击模型进行模拟,将计算结果与实验结果进行对比。 所选择的楔形体三维尺寸为1.5m×0.9m×0.75m,总质量为553kg,底部升角为45°。 实验中压力监测点的位置和楔形体的三维结构如图 3-11 所示。实验中沿着斜升角表 面共布置了 5 个压力监测点,并且还对比了弹性和刚性楔形体在入水过程中的不同, 本文不涉及结构物弹性效应的研究,仅针对刚性入水问题进行对比。





Fig. 3-11 Experimental wedge model

实验在楔形体两侧加装了挡板以模拟二维流动,但在挡板之间仍存在三维流动状态,因此在数值模拟中仍采用三维模型,在建模时去掉两侧挡板。采用重叠网格建立计算模型,背景计算域大小为 5m×5m×7.2m,重叠区域大小为 2.8m×2m×1.7m,计算域 X 轴沿楔形体长度方向, Y 轴沿宽度方向, Z 轴指向正上方,计算域的布置如图 3-12 所示。与实验对比的工况为楔形体从距离静水面 1m 的高度开始自由落体,在数值模拟中为了加快计算时间,采用自由落体公式计算出距离静水面 0.12m 高度处的速度为 4.155m/s,在该位置给定初速度后释放楔形体,楔形体仅做垂直方向的运动。



图3-12 数值模拟计算域 Fig. 3-12 Computational domain in numerical simulation

重叠网格的分布情况如图 3-13 所示。对楔形体运动路径上的背景网格进行加密 并使其与楔形体网格的大小接近,以此保证重叠网格的插值精度。为捕捉入水过程中 的射流和飞溅现象,对楔形体表面附近的网格进行加密。





Fig. 3-13 Computational domain mesh

3.3.2 网格收敛性分析

为了得到准确可靠的计算结果,需要对砰击压力的网格依赖性进行分析,以此确 定最佳网格尺寸。这里对三种网格尺度下的砰击压力进行了计算并分析了两者之间的 关系,这将为后续开展船舶砰击仿真提供参考。三种网格的具体尺寸如表 3-3 所示。

Table 3-5 Wesh size of wedge					
网格类型	X 方向 最小网格尺寸	Y 方向 最小网格尺寸	Z 方向 最小网格尺寸	网格总数	
	(mm)	(mm)	(mm)	(\mathbf{M})	
Mesh A	14	10	10	60	
Mesh B	10.5	7.5	7.5	135	
Mesh C	7	5	5	491	

表3-3 楔形体网格尺寸划分 Table 3-3 Mesh size of wedge

基于三种不同尺寸的网格开展网格收敛性验证,五个砰击压力测点位置的砰击时 历曲线对比如图 3-14 所示。从时历对比上来看,三种不同网格尺度下的砰击压力时 历数据表现出良好的收敛特性,且与试验监测数据吻合良好,砰击压力峰值及时历曲 线演化趋势一致。

此外,从时历曲线可以看出,随着楔形体的下落,砰击压力测点自下而上依次出 现砰击压力峰值,且压力峰值的高度逐渐降低,这是由于初始状态下水面静止,楔形 体下落到接触水面的状态时具有最高的砰击相对运动速度,整个系统具有最大的动能, 因此从砰击压力时历曲线上来看,位于底部的测点监测到更大的砰击压力。而随着楔 形体的逐渐下落,原本静止的水面被排开而激发出运动速度,系统的动能和势能一部



分转化为楔形体与水体之间的内能而产生损失,因此随着落体砰击的发展演化,系统 的动能出于逐渐损失状态,因此高度较高的压力测点监测到的砰击压力较小。



Fig. 3-14 Comparison of slamming pressure at different grid sizes



3.3.3入水砰击流场分析

选取中等尺寸网格开展数值计算结果分析,针对入水砰击过程,选取了典型时刻 下楔形体与自由面相互作用的流场演化,以及楔形体底部砰击压力分布开展对比分析, 如图 3-15 所示。









图3-15 自由面和压力云图 Fig. 3-15 Free surface and pressure cloud map

从图 3-15 中可以发现,楔形体的入水砰击过程大致可以分为两个阶段,首先在 楔形体底部接触静止水面以及向下运动的初期,水面静止而不发生运动,因此与下落 的楔形体存在一个很大的相对运动速度,砰击初始状态下在整个楔形体底部的较小范 围内,都存在一个相当大的高压力区域,表明与水面接触的楔形体底部小面积区域普 遍承受较高的砰击压力。之后,随着楔形体的继续深入,原本出于静止状态的水面被 排开,一部分水体沿着楔形体表面倾斜而迅速发展形成射流,逐渐具有了越来越大的 运动速度,此时楔形体底部的压力分布转变为楔形体底部和射流根部位置出现最大压 力分布区域,而其他位置的砰击压力较小。这是由于在砰击过程中,砰击压力的大小 与楔形体运动速度和射流水体沿楔形体表面运动速度相关,在楔形体底部,受到静水 压力和楔形体运动速度的影响,会出现一个高压区分布;在射流根部,此处水体与楔 形体之间的相对速度较大,也会在云图上呈现一个高压力区域分布;而在其他位置, 水体与楔形体之间的相对运动速度并不突出,因此在云图上呈现面积较大的中等压力 分布区域。



3.4 本章小结

本章节主要对目前采用的数值方法进行对比验证。首先通过网格无关性验证得到 了适用于数值造波的自由面网格布局,然后对 waves2Foam 中两种消波方式的效率进 行了对比,若将入射波松弛为静水面至少需要2倍波长的消波区长度,松弛为理论入 射波至少需要1倍波长的消波区长度。随后在数值水池中计算了波浪中的船舶运动并 与实验结果进行了对比,数值结果与实验结果吻合良好,验证了求解器在船舶耐波性 问题中的准确性。最后模拟了楔形体的入水砰击过程,通过网格无关性验证得到了适 用于砰击压力预报的网格尺寸,计算得到的砰击压力峰值与实验结果吻合良好。上述 方法验证为基于 CFD 方法的船舶砰击载荷预报提供了参考。



第四章 迎浪规则波中的砰击载荷数值研究

本章采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器的重叠网格技术,以 KCS 集装箱船为对象模 拟其在恶劣海况下的船艏砰击问题,分析砰击过程中的艏部压力分布特性和流场变化 情况。分别计算了 KCS 船在 4 种波长和 3 种波高下的运动响应和砰击压力,分析了 波长和波高对船舶运动和砰击压力影响规律。

4.1 计算模型与工况

选用上一章节中的 KCS 船模型,采用 1:85.2 缩尺比的船模进行数值模拟,船模的主尺度参数如表 4-1 所示。

Table 4-1 Main parameters of KCS ship					
主尺度	符号及单位	实船	模型		
垂线间长	$L_{PP}(m)$	230	2.700		
水线宽	$B_{WL}(m)$	32.2	0.378		
吃水	T (m)	10.8	0.127		
排水体积	∇ (m ³)	52030	0.084		
重心垂向位置(距基线)	KG (m)	-	0.168		
重心纵向位置(距船舯,向船艏为正)	LCG/L_{PP} (%)	-1.48	-1.48		
于田次妹动业久	K_{xx}/L_{PP}	0.4	0.39		
九因伏将幼干性	K_{yy}/L_{PP}	0.250	0.250		

表4-1 KCS 船主尺度参数

针对船舶在波浪中的砰击问题,根据海况等级表,本文以8级海况(浪高9-14m) 作为输入波浪环境。为方便做参数化分析,以波长船长比为1,波陡为0.04的波浪工 况为基准,此时实尺度浪高为9.2m。为研究波长和波高对砰击载荷的影响,在基准工 况上通过改变波长和波高共设置了6组计算工况。具体工况参数如表4-2所示。基于 五阶斯托克斯理论生成波浪,在迎浪工况中仅放开垂荡和纵摇两个自由度,其他自由 度被固定。



Table 4-2 Summary of calculation conditions in regular head waves							
	实船航速	模型波高	实尺度波高	波长	波陡		
工况	V (kn)	H (m)	$H_{s}(m)$	(λ/L_{PP})	(H/λ)		
Case1	24kn	0.108	9.2	0.8	0.05		
Case2	24kn	0.108	9.2	1.0	0.04		
Case3	24kn	0.108	9.2	1.2	0.033		
Case4	24kn	0.108	9.2	1.4	0.029		
Case5	24kn	0.081	6.9	1.0	0.03		
Case6	24kn	0.135	11.5	1.0	0.05		

表4-2 迎浪规则波计算工况汇总

4.2 数值仿真设置

迎浪规则波条件下的计算域如图 4-1 所示。计算域原点位于艏垂线与静水面的交 点,X 轴指向船尾,Y 轴沿船宽方向,Z 轴指向正上方。背景计算域的尺寸为:-1.0Lpp <X<3.5Lpp,-1.0Lpp<Y<1.0Lpp,-2.0Lpp<Z<1.0Lpp。本文中采用拖船的方式实现 船舶航行,背景网格跟随船体网格一起在水平方向运动,计算域左侧入口边界仅提供 波浪生成,入口设置为波浪速度和零梯度压力条件,出口和两侧设置为零梯度速度和 压力条件,顶部为大气边界,底部为水底边界,船体表面为无滑移边界。在计算域入 口和出口分别设置造波和消波松弛区,造波松弛区长度设置为 0.5Lpp,消波松弛区设 置为 1.5Lpp,松弛区的具体布置如图 4-2 所示。初始时刻船舶位于静水面处(Z=0)。





图4-1 计算域及边界条件





图4-2 松弛区的布置 Fig. 4-2 Layout of relaxation zone

采用 OpenFOAM 中的 blockMesh、toposet 和 snappyHexMesh 工具生成网格。首 先由 blockMesh 生成基础网格,然后使用 toposet 完成背景网格和船体网格的加密, 网格加密区域包括船体表面和自由面,最后使用 snappyHexMesh 在船体网格中完成 几何捕捉。为尽量减小波浪传播过程中的数值耗散,这里采用前文数值波浪水池中的 网格布置,一个波高范围内至少有 12 个网格,自由面处的网格在 X 方向和 Z 方向的 比值为 3.2。为保证背景网格和船体网格间的插值精度,背景与船体网格重叠区域的 网格大小尽量保持一致。完成挖洞和插值后的背景网格与重叠区域网格布局如图 4-3 所示。最终网格量为 366 万,其中背景网格量为 226 万,船体网格量为 140 万,计算 中时间步长均取为 0.001s。



文

Fig. 4-3 Schematic diagram of computational mesh

为研究船艏外飘区域的砰击载荷特性,在船艏 10%船长范围内等间距布置一系列压力测点,船体与波浪之间的相互作用关于船舶中纵剖面呈对称特性,压力测点仅 布置在船体一侧,一共布置了 25 个压力测点,具体位置如图 4-4 所示。压力测点是 采用 OpenFOAM 中的 probe 函数实现的,该函数可以监测指定测量点处的物理量。



图4-4 船艏压力测点位置示意图 Fig. 4-4 Schematic diagram of the position of pressure sensors at the bow



4.3 波长对砰击载荷的影响分析

本节在 KCS 船设计航速下研究了不同波长船长比(λ/Lpp=0.8-1.4)下的船舶运动 响应和砰击载荷特性,重点分析了波长对砰击载荷特性的影响。图 4-5 为不同波长下 的船体的垂荡和纵摇运动时历曲线。在规则波入射条件下,船舶的垂向运动具有明显 的周期性特征,且随着波长改变而发生变化。随着波长增加,垂荡和纵摇运动的变化 周期明显增大,短波下的运动频率更快。这是因为波长变短后,船舶遭遇波浪的频率 增大,从而运动周期更短。

船体的垂荡运动幅值和纵摇运动幅值均随波长增加逐渐增大。波长在 0.8-1.2 倍 船长范围内,船体运动的变化幅度明显,当波长大于 1.2 倍船长时船体运动变化平缓。 在波长船长比 λ/Lpp=0.8 时出现最小垂向运动,垂荡幅值约为 0.007m,纵摇幅值约为 1.199°,在波长船长比 λ/Lpp=1.4 时出现最大垂向运动,垂荡幅值约为 0.0467m,纵 摇幅值约为 4.793°。值得注意的是,λ/Lpp=0.8 和 λ/Lpp=1.0 这两个波长下的垂向运动 差异明显,前者的垂荡和纵摇幅值减小了一半,这可能是由于船舶航速较高,加上波 长小于船长,船体在还有没有发生大幅度运动时就已经接触到下一个波浪,此时船体 在一个遭遇周期内受到的水动力差异较小,因而运动幅度不大。另外,在所有波长下, 垂荡运动的谷值均高于峰值,这同样可以由高航速来解释。船舶在高航速下一般会有 一个下沉,在波浪中的垂向运动中则体现为垂荡平均位置的下沉。







图4-5 不同波长下的船体垂荡和纵摇时历曲线 Fig. 4-5 Time history curves of ship heave and pitch under different wavelengths

统计不同波长工况下船艏压力测点的砰击压力,图 4-6 为首部 19 号站以前 15 个 砰击压力测点的压力时历曲线对比。从图中可以看到,在高海况环境下,船艏压力会 有一个明显的脉冲变化过程,压力会从零瞬时增大到某一个极大值,随后减小至零。 压力上升至零过程基本上是以线性形式变化的,而压力下降至零的过程相对平缓,是 一个非线性的变化过程,且下降过程的时间要明显大于上升时间。砰击压力的脉冲变 化周期与船舶垂向运动周期基本一致,即在一个运动周期内发生了一次砰击现象。在 同一个船体剖面上,越靠近船底的位置,其砰击压力峰值一般会更大,最先出现压力 峰值。最先入水的位置与波浪接触时间更长,压力脉冲的持续时间更长。随着波长增 加,不同测点的砰击压力峰值有所增加,砰击压力的变化形状发生改变。短波下的压 力下降过程相对平滑,类似于抛物线的形式,随着波长增加,压力在下降过程中逐渐 出现一段压力缓慢减小的时间,甚至还会再次增大。







Fig. 4-6 Time history of slamming pressure at different wavelengths

对于二次峰值线性,越靠近船底越明显。图 4-7 为一个砰击周期内船体与波浪的 相对运动过程和压力云图,结合两者可以发现,第一个峰是由于水的直接冲击力所导 致,即波浪快速砰击船体表面,引发一个瞬时的高峰;此压力峰后,砰击压力快速回 落,但并不会回落至零,而是维持在一个相对较大的值,并保持稳定或者略有抬升, 这是由于在砰击发生后,船艏部继续下落,浸没在水中的深度增加,此时静水压力成 分逐渐占据压力成分的主导,因此由静水压力主导的压力是相对稳定的,且由于船艏 由下沉状态转变为抬升状态的过程相对耗时较长,因此从时历曲线上表现出一个较长 时段的高压稳定区域。在此之后,船艏继续抬升直至出水,此时压力减小为零。





Fig. 4-7 Relative motion and pressure distribution of between ship and wave at $\lambda/L_{PP}=1.0$

统计了不同工况条件下,不同站位的测点砰击压力随波长的分布,如图4-8所示。 从图中可以看到,对于所布置的绝大多数砰击压力测点,波长船长比为1.0和1.2的 工况下,其砰击压力峰值较高,表明此工况下的船舶与波浪相互作用诱发的船体表面 载荷较为剧烈。波长船长比为0.8时,最大砰击压力峰值出现在18号站,约为1.3kPa, 波长船长比为1.0-1.4时,最大砰击压力峰值均出现在19号站,分别为2.8kPa、3.0kPa、 2.1kPa。对比不同站位下砰击压力峰值分布,可以发现砰击压力峰值在19站位处出 现最大值,而不是出现在最先与波浪发生相互作用的20站位;此外,与楔形体入水 过程所体现的规律不同的是,在一些站位下,尤其是19站位,并不是越靠近底部的 砰击压力其峰值越高。一方面这与船舶的型线有关,船舶的复杂型线会改变砰击发生 时水体沿船体表面上升的演化过程及速度分布;另一方面,与静止水面下楔形体入水 过程不同,在船舶与波浪相互作用问题中,波浪以一定的相对运动速度向船舶靠近, 船体表面与波面接触的相对位置不同,不同位置处的水体速度不同,这在一定程度上 可以解释并非最靠前的站位监测到的砰击压力最大。

论文







图4-8 不同波长下的砰击压力峰值对比 Fig. 4-8 Comparison of peak slamming pressure at different wavelengths

图 4-9 为不同波长下的船艏典型砰击自由面云图和压力云图。可以看到,不同波 长下船艏入水砰击的位置不同,短波中船艏主要在波峰处开始砰击,随着波长增加, 船艏砰击的位置逐渐远离波峰并向波谷靠近。从压力云图上看,迎浪下船艏的压力分 布趋势基本相同,高压区域随着波长增加逐渐靠近甲板,在 MLPP=1.2 工况下出现最 大高压区面积。



(b) $\lambda/L_{PP}=1.0$





(d) λ/L_{PP}=1.4
 图4-9 不同波长下的自由面和压力云图
 Fig. 4-9 Free surface and pressure cloud maps at different wavelengths

4.4 波高对砰击载荷的影响分析

本节在相同波长船长比 (λ/L_{PP}=1.0)条件下,研究了不同波高下船舶运动和砰击 载荷特性,重点分析了波高对砰击载荷特性的影响。不同波高下的船舶垂荡和纵摇时 历曲线如图 4-10 所示。可以看到,波高的改变不会影响船舶的遭遇频率,因而垂荡 和纵摇运动周期基本一致。随着波高的增加,船舶的垂荡和纵摇运动幅值都呈现增大 的趋势,这种趋势近似于线性关系。三种波高下的垂荡幅值分别为 0.0251m、0.0299m、 0.033m,纵摇幅值分别为 2.448°、2.975°、3.319°。







图4-10 不同波高下的船体垂荡和纵摇时历曲线 Fig. 4-10 Time history curves of ship heave and pitch under different wave height

统计不同波高工况下船艏压力测点的砰击压力,图 4-11 为首部 19 号站以前 15 个砰击压力测点的压力时历曲线对比。总体上看,波高的改变对于砰击压力的峰值的 影响较大,压力峰值的大小随着波高增加明显增大。但对于压力脉冲的持续时间影响 较小,压力曲线的形状没有明显改变。







Fig. 4-11 Time history of slamming pressure under different wave height

统计了不同工况条件下,不同站位的测点砰击压力随波高的分布,如图 4-12 所示。从图中可以看到,随着波高的增加,大多数测点的砰击压力峰值有所增加,且呈线性递增趋势。不同波高下最大砰击压力峰值均出现在 19 号站的 12 号测点,最大值分别为 1.9kPa、2.8kPa、3.0kPa。



45





图4-12 不同波高下的砰击压力峰值对比 Fig. 4-12 Comparison of peak slamming pressure at different wave heights

图 4-13 为不同波高下的船艏典型砰击自由面云图和压力云图。不同波高下船艏入水砰击的位置不变,均位于波峰处。艏部高压区域随波长增加逐渐靠近甲板,在 H=0.135m 工况下出现最大高压区面积。



(b) H=0.108m





(c)H=0.135m 图4-13 不同波高下的自由面和压力云图 Fig. 4-13 Free surface and pressure cloud maps at different wave height

4.5 本章小结

本章采用标准船舶 KCS 集装箱船开展了迎浪规则波下的船舶波浪砰击研究。首 先介绍了 KCS 船以及船模的主要参数、计算工况和数值仿真的基本设置。随后基于 基准工况(波长船长比为1,波陡为0.04),计算了设计航速下 KCS 船在不同波长和 波高下的船舶运动响应和砰击载荷,结果显示波长显著影响船舶的运动和砰击压力大 小,当波长船长比大于1时,船体垂向运动幅值随波长增加逐渐增加,但砰击压力峰 值在波长为1.0或1.2倍船长时达到最大;当波长船长比小于1时,船体垂向运动幅 值明显减小,仅有波长为1.0倍船长的一半。波高变化对于船体垂向运动幅值和砰击 压力大小的影响是线性的,两者随波高增长呈线性增加的趋势。

第五章 斜浪规则波中的砰击载荷数值研究



第五章 斜浪规则波中的砰击载荷数值研究

船舶在真实海况下可能会遭遇各种浪向的波浪,又或者根据海况和航线来调整航向,因此船舶不可避免地会遭遇斜浪问题。本章讨论了斜浪下 KCS 船的运动和砰击问题。介绍了斜浪工况的计算域设置,放开垂荡、横摇和纵摇三个自由度,计算了 KCS 船在不同浪向下的运动响应和砰击载荷,展示了不同浪向的自由面和压力云图。

5.1 计算模型与工况

在斜浪中,波浪与船舶航向呈一定的夹角,这里用浪向角χ来表示,浪向角的具体指向如图 5-1 所示。本章采用上一章中的 KCS 模型, KCS 船在固定波长船长比 (λ/L_{PP}=1.0)的规则波下航行,浪向角分别为 22.5°、45°、67.5°、90°,具体工况参数如表 5-1 所示。

	Table 5-1 Summary of calculation conditions in regular oblique waves							
	实船航速	模型波高	实尺度波高	波长	波陡	浪向角		
工况	V (kn)	H (m)	H_s (m)	(λ/L_{PP})	(H/\lambda)	χ(°)		
Case1	24kn	0.108	9.2	1.0	0.04	22.5		
Case2	24kn	0.108	9.2	1.0	0.04	45		
Case3	24kn	0.108	9.2	1.0	0.04	67.5		
Case4	24kn	0.108	9.2	1.0	0.04	90		

表5-1 斜浪规则波计算工况汇总





图5-1 浪向角的定义 Fig. 5-1 Definition of wave direction angle

建立斜浪工况下的计算域,坐标系满足右手定则。与迎浪工况不同,斜浪存在波 浪的横向传播,因此需要在迎浪计算域的基础上进一步扩大船宽方向的计算域长度, 以此减小计算边界对计算的影响,计算域如图 5-2 所示。这里将计算域尺寸设置为: -1.0Lpp<X<3.5Lpp,-2.0Lpp<Y<2.0Lpp,-2.0Lpp<Z<1.0Lpp。边界条件与迎浪略有 差别,在两侧边界处需要加上入口和出口边界条件,其他边界条件与迎浪相同。为了 模拟斜浪,在计算域两侧边界分别设置造波和消波松弛区,松弛区的具体布置如图 5-3 所示。斜浪工况的计算网格仅扩大了背景计算域的 Y 方向尺寸,船体网格没有变 化,计算时间步长也没有改变。



Fig. 5-2 Computational domain





图5-3 松弛区的布置 Fig. 5-3 Layout of relaxation zone

斜浪工况存在非对称砰击的问题,因此需要在船体两侧均布置压力测点。压力测 点的具体位置与第四章中的一致,只是在船体两侧对称布置了相应的压力测点,为了 区分船左舷和右舷的测点,以S(Starboard)为后缀表示右舷测点,以P(Port)为后 缀表示左舷测点。

5.2 浪向角对船体运动的影响分析

在 KCS 船设计航速下分析了不同浪向角 (χ=22.5-90°) 下的船舶运动响应。图 5-4 为不同浪向角下的垂荡、纵摇和横摇运动时历曲线,将斜浪的结果与上一章中的 迎浪结果进行对比。斜浪规则波下的船舶运动响应同样呈现周期性变化规律,随着浪 向角增加,垂荡运动幅值逐渐增加并在 χ=67.5°时达到最大值,最大值为 0.061m, 此后垂荡幅值开始减小;纵摇运动幅值逐渐增大并在 χ=45°时达到最大值,最大值 为 4.121°;横摇运动幅值逐渐增大并在 χ=90°达到最大值,最大值为 3.522°。可 以看到,三种运动不是出现在同一个浪向角下,浪向对三种运动的影响程度不同。在 横摇运动中,当浪向角小于 45°时,横摇响应总是偏向于负值,即船向右舷倾倒,当 浪向角大于 45°时,横摇响应逐渐偏于正值,即船向左舷倾倒。另外还可以发现,当 浪向角为 90°时,也即船模遭遇横浪作用时,纵摇响应并不为零,这体现了船舶六自 由度运动之间的相互影响。





Fig. 5-4 Motion response at different wave angles



5.3 浪向角对砰击载荷的影响分析

斜浪对于船舶的影响主要体现在船体左右两侧的水动力不平衡,此时会产生横摇运动。在船舶砰击过程中,横摇运动的出现就意味着砰击过程中存在一个倾角,砰击时船体两侧的流动状态不同,砰击压力呈现非对称分布。

统计不同浪向角工况下船艏压力测点的砰击压力,图 5-5 为首部 19.5 号站船体 两侧砰击压力测点的压力时历曲线对比。由于横向波浪的影响,船体一侧将直接受到 波浪砰击作用。在 0° 浪向角至 45° 浪向角的范围内,随浪向角的增大,测点砰击压 力时历曲线的第一砰击压力峰逐渐突出,表明随着浪向角增加,对于布置在船艏的砰 击压力测点而言,波浪逐渐由"侧向"砰击转为"正面"砰击,因此迎面砰击所产生 的砰击压力具有更高的压力峰。造成这一现象的主要原因在于船艏具有复杂的曲线形 状,在迎浪状态下,流体的流动方向和砰击测点位置的法线方向上存在一定的夹角, 由于这个夹角的存在,流体能够更加"光顺"地过渡并向船艉流动,从而降低船舶行 进过程中遭受的阻力。但是对于斜浪工况,水体的砰击更接近"正面"直接砰向测点, 由此带来的船体表面砰击载荷响应自然表现更高的压力峰值。在 45°至 90° 浪向角 下,砰击压力时历的第一个压力峰逐渐平缓而不明显,甚至消失,压力时历曲线上体 现出的主要是静水压力峰值变化,因此表现为峰值较低、相当平缓和较长作用时间的 时历曲线,此时砰击现象已经逐渐消失。













统计不同工况条件下,不同站位的测点砰击压力随浪向角的分布,如图5-6所示。 从图中可以看到,随着浪向角的增加,船体两侧的砰击压力峰值变化规律基本相同, 都呈现出先增加后减小的趋势。在浪向角小于 45°范围内,最大砰击压力峰值均出 现在船体左舷 19号站 12号压力测点位置,最大压力分别为 3.0kPa 和 2.9kPa;在 67.5° 浪向角,最大砰击压力峰值出现在船体右舷 19.5 号站 6 号压力测点位置,最大值为 1.1kPa; 90° 浪向角此时可以认为已经没有明显的砰击现象。



(a) 20站


















(e) 18 站图5-6 不同浪向角下的砰击压力峰值对比Fig. 5-6 Comparison of peak slamming pressure at different wave angles

图 5-7 为不同浪向角下的船艏典型砰击自由面云图和压力云图。可以看到,随着 浪向角增大,船艏砰击的位置逐渐远离波峰。从压力云图上看,小于 45° 浪向角情况 在船体左舷有更大的高压区域,大于 45° 浪向角情况两侧的压力分布差异较小,这 与前面的压力空间分布一致。



(a) $\chi=22.5 \text{ deg}$





(c) χ =67.5 deg







(d) χ=90 deg
 图5-7 不同浪向角下的自由面和压力云图
 Fig. 5-7 Free surface and pressure cloud maps at different wave angles

5.4 本章小结

本章对 KCS 船在斜浪中的波浪砰击问题进行了数值模拟,计算了不同浪向角下的船体垂荡、纵摇、横摇运动和砰击压力,讨论了三种运动随浪向角的变化规律,与迎浪相比,斜浪下的垂荡运动幅值可增加103.2%,纵摇运动增加38.5%。由于砰击时刻下船体没有较大幅度的横摇出现,船体面向来波一侧的砰击压力会高于另一侧,斜浪下的最大砰击压力相比迎浪可增大7.1%,当浪向角偏向于横浪时砰击压力峰值大小逐渐减小,压力峰值特征减弱,横浪时砰击现象基本消失。



第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究

聚焦波是不规则波中的一种极端波浪,其在波高上会远远高于周围的波浪,对海洋结构物的安全造成严重威胁。本章针对极端海况下的船舶运动响应和砰击载荷特性进行研究。基于 JONSWAP 风浪谱,采用线性波叠加的方式生成了三种不同波幅的聚焦波,模拟了船舶在零航速和有航速条件下的船舶的运动和砰击。分析了零航速下波高对砰击载荷的影响,随后固定波高,分析了航速对砰击载荷的影响。

6.1 聚焦波模拟

在数值上为了复现极端波浪,常用的手段是将不同频率下的规则波通过调整相 位使其在某个时刻和某个位置上同时达到最大的波幅,从而得到一个更大的波幅。本 文中基于线性波和不规则波理论得到聚焦波,每个规则波的波幅和频率由不规则波 风浪谱来得到。

基于 JONSWAP 谱完成线性波参数的离散化,其谱公式如下:

$$S(f) = 0.204 H_s^2 f_p^4 f^{-5} \left(-\frac{5}{4}\right) \exp\left(\left(\frac{f}{f_p}\right)\right) \gamma^r$$
(6-1)

$$r = \exp\left[\frac{-\left(f - f_p\right)^2}{2\sigma^2} f_p^2\right]$$
(6-2)

式中, H_s 为有义波高, $f_p=1/T_p$ 为谱峰频率, T_p 为谱峰周期, γ 为谱峰提升因子,一般 取为 3.3, σ 为谱峰形状因子,定义为:

$$\sigma = \begin{cases} 0.09f \ge f_p \\ 0.07f < f_p \end{cases}$$
(6-3)

由规则波叠加的形式得到聚焦波,其波面方程 $\eta(x,t)$ 可表示为:

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \cos(k_i x - 2\pi f_i t + \varphi_i)$$
(6-4)

式中,*i*表示第*i*个线性波,*N*为线性波的总数,*a_i*为波幅,*k_i*为波数,*f_i*为波浪频率, 波数与波浪频率满足色散关系 $\omega_i^2 = (2\pi f_i)^2 = gk_i \tanh k_i h$, ω_i 为波浪圆频率,*g*为重力 加速度,*h*为水深。对于所需要的目标最大波幅*A_c*,其是所有*a_i*的和,*a_i*可以根据谱 公式得到:



第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究

$$a_{i} = A_{c} \frac{S(f_{i})\Delta f}{\sum_{n=1}^{N} S(f_{n})\Delta f}$$
(6-5)

式中, $\Delta f = f_i - f_{i-1}$ 为线性波的频率离散间距,一般为等间距离散,具体间距由线性波的总数和截断频率决定。将谱公式带入 a_i 的计算公式中可以发现,谱公式中的 H_s 被约掉, a_i 的结果仅和谱峰频率有关。对于离散频率上下限,参考文献^[62]中的设置,本文中的下限为 0.3 f_p ,上限为 4.0 f_p ,这样可以覆盖谱密度函数的绝大部分峰值范围。对于线性波的总数,本文中选择为 100 个。

为了在给定位置和时刻达到最大波幅,需要使得波面方程满足以下条件:

$$\cos\left(k_{i}x - 2\pi f_{i}t + \varphi_{i}\right) = 1 \tag{6-6}$$

这样一来波面方程可以表示为:

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \cos\left(k_i \left(x - x_f\right) - 2\pi f_i \left(t - t_f\right)\right)$$
(6-7)

式中,xf为波浪聚焦位置,tf为波浪聚焦时刻。

6.2 计算模型与工况

本章采用的 KCS 船模参数与第四章中的相同。在聚焦波模拟中,为保证波浪能 够聚焦完成,聚焦位置到入口边界的距离应足够长,具体的计算域尺寸设置为:-1.5Lpp<X<3.5Lpp,-1.0Lpp<Y<1.0Lpp,-2.0Lpp<Z<1.0Lpp。在计算域入口设置长 0.5Lpp 的造波松弛区,出口设置长 1.0Lpp 的消波松弛区。为研究聚焦波下的船舶砰击 载荷特性,参考第四章中规则波工况的波高,共设计了 4 个计算工况,聚焦波幅对应 的波峰和波谷之差约为规则波波高的 1.64 倍,具体参数如表 6-1 所示。

表6-1 聚焦波计算工况汇总

Table 6-1 Summary of	f calcu	lation	conditions	under	focused	waves
----------------------	---------	--------	------------	-------	---------	-------

工况	模型航速 (m/s)	实船航速 (kn)	模型波幅 (m)	实尺度波幅 (m)	聚焦位置 (m)	聚焦时刻 (s)
Casel	0	0	0.081	6.9		
Case2	0	0	0.108	9.2	0	10
Case3	0	0	0.135	11.5	0	
Case4	0.279	5	0.108	9.2		



在考虑船舶航速时,由于波浪聚焦位置固定,让背景网格跟随船体运动的方法会 让船远离聚焦位置,可以将船的初始位置设置在离聚焦位置一定距离出,然后让船舶 逐渐加速最终在聚焦位置和聚焦时刻之前达到目标航速,不同航速下的计算域布置 如图 6-1 所示。根据船舶初始位置的不同,在有航速条件下需要对船舶航行路径上的 背景网格加密,两种网格划分情况如图 6-2 所示。



确定波浪参数后首先需要对聚焦波的生成进行验证。考虑计算效率的问题,进行 二维聚焦波的数值模拟。根据聚焦理论可以知道,聚集波的生成和有义波高无关,因 此仅需要给定聚焦波幅和谱峰频率。从以往的经验来看,当聚焦波的波幅增大时,谱 峰频率需要相应减小,否则会在波浪聚焦时发生波浪破碎从而无法达到需要的波幅。 本文中选择谱峰频率为 0.54Hz,对应的谱峰波长约为 2 倍船长,对所设置的聚集波 幅而言,波浪聚焦时刻的波陡不会过大,相应的截断频率区间为 0.16Hz - 2.15Hz。数 值水池的尺寸与三维计算域保持一致,参考规则波中自由面的网格设置,最终一个波

图 6-3 为三种波幅的聚焦波在聚焦位置的时历曲线对比。可以看到,在聚焦波生成前一段时间内,数值解与理论解吻合良好,在聚焦时刻前后的波形上开始出现偏差,且这种偏差会随着聚焦波幅的增大而更加明显。最大波峰之前的第一个波峰和波



谷都会高于理论解,最大波峰的聚焦时刻会比理论解提前,最大波峰之后的第一个波 谷也会高于理论解,这导致数值解关于聚焦时刻是非对称的。这种现象可能是由于最 大波峰的波陡较大,各子波间的干扰增强,进而导致聚焦时刻附近的波浪变得不稳 定。在最大波峰经过之后,数值解与理论解又吻合良好。



Fig. 6-3 Time history of wave surface under different wave amplitudes



总体上看,虽然数值解与理论解存在偏差,但最大波幅的误差不超过 2%,聚焦 时刻的误差不超过 1%,聚焦波的主要特征被保留下来,这表明当前的数值方法可以 较为准确的模拟聚焦波,这为后续开展聚焦波下的研究提供支撑。

6.3 聚焦波波幅对砰击载荷的影响分析

零航速下三种聚焦波下的船舶运动响应如图 6-4 所示。从图中可以看到,在大幅 度波浪作用下,船舶产生了明显的垂荡和纵摇运动。由于船舶处于零航速状态,船舶 的运动主要受到波频作用影响,船体的垂荡运动时历形状与波浪时历形状相似。三种 聚焦波下垂荡最大值分别为 0.0421m、0.0574m、0.0734m,最大纵摇角分别为 4.53°、 6.18°、7.82°, 垂荡和纵摇运动随波高增加呈线性增长的趋势。



图6-4 不同波高下的运动响应时历 Fig. 6-4 Time history of motion response under different wave heights

船舶遭遇聚焦波的过程如图 6-5 所示。从图中可以看到,在波浪接触船艏之前, 船艏正处于聚焦波的前一个波谷,此时船舶处于艏倾状态。当波浪聚焦后,船艏遭遇 最大波浪并从中穿过,巨大的波浪使得船体开始抬升并开始艉倾。当波浪运动到船中



位置,船体被抬升至最高处且达到最大艉倾状态,此时整个船艏被抬离水面。波浪继续向船艉运动,船舶开始艏倾直至接触到下一个波谷达到最大值,此时船艏入水并发 生严重的砰击。



(d)T=11s 图6-5 聚焦波下的船舶运动过程 Fig. 6-5 Ship motion process under focused wave

对船艏部的砰击压力进行分析,压力测点的布置与第四章中的一致。图 6-7 为不同聚焦波波幅下艏部 20 站到 19 站之间压力测点的时历曲线。从图中可以看到,在8s-12s 之间出现了两次压力峰值,第一次是在船艏遭遇最大波峰之前,第二是船艏遭



第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究

遇最大波峰之后,且第二次压力峰值明显高于第一次。与规则波中的空间分布类似,随着空间位置远离自由面,砰击压力的峰值逐渐减小。在所有的压力测点中,并没有 观测到压力曲线出现明显的二次峰值现象。在同一位置,不同波高下的压力时历曲线 形状相似,只是在峰值大小上不同。



Fig. 6-6 Time history of slamming pressure at different wave heights

图 6-7 为船体穿过聚焦波后的艏部入水砰击过程的压力云图。可以发现,与规则 波下的砰击相比,船体侧面的外飘区域并没有出现局部高压区,压力分布与水深呈正 相关,静水压力是砰击压力的主要贡献部分,这与上面压力时历曲线的平缓变化过程 相对应。





(c) T=11.2s 图6-7聚焦波下的船波相对运动和压力分布

Fig. 6-7 Relative motion and pressure distribution of between ship and wave at focused wave

统计不同工况条件下,不同站位的测点砰击压力随波高的分布,如图 6-8 所示。 从图中可以看到,绝大多数测点的砰击压力峰值随着波高增加以线性关系递增,不同 测点的增长幅度也几乎相同。不同波高下最大砰击压力峰值均出现在 20 号站的 1 号 测点,最大值分别为 0.9kPa、1.1kPa、1.3kPa。相比于规则波高航速下的砰击,最大 砰击压力位置更靠前。



第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究



图0-8 不问波向下的平古压力率值至问分型 Fig. 6-8 Spatial distribution of peak slamming pressure at different wave heights

6.4 航速对砰击载荷的影响分析

不同航速下的船舶运动响应如图 6-9 所示。可以看到,两者的运动过程很相似, 但是由于船舶是从更远处向聚焦位置靠近,相比于零航速状态,船体遭遇最大波峰之 前的运动会延后,在遭遇之后会提前。另外,增加航速会导致遭遇聚焦波之后的最大



垂荡和纵摇运动幅值有所增加, V=0.279m/s 时最大垂荡值为 0.0611m, 是零航速时的 1.06 倍, 最大纵摇角为 6.38°, 是零航速时的 1.03 倍。在航速增加不大时,聚焦波下的船舶运动幅度基本没有差异。



Fig. 6-9 Time history of motion response under different speeds

图 6-10 为不同航速 20 站到 19 站之间测点的砰击压力时历曲线。与前面的规律 相同,在 8-12s 之间均有两个压力峰值,且第二个峰值高于第一个峰值。在航速作用 下,船艏与波浪作用时间更短,船艏能够更快出水,这导致第二个峰值的持续时间更 短。此外,压力的上升过程开始显现出更陡峭的变化,直接冲击压力占总压力的比重 增大,砰击更加剧烈。



第六章 聚焦波中的砰击载荷数值研究



Fig. 6-10 Time history of slamming pressure at different speeds

图 6-11 为不同航速下的艏部砰击压力空间分布。可以看到,在同一空间高度位置,砰击压力峰值沿船长方向的分布呈线性关系,靠近艏垂线的砰击压力峰值最大, 最大砰击压力同样出现在 20 站位,这与前面规则波中的最大砰击位置不同,说明增加航速会使得最大砰击位置向着船舯靠近。在同一剖面上,砰击压力峰值随空间高度 增加而减小。航速对砰击压力峰值的影响是以近似于相等增幅的形式作用到所有空间位置的。



69





图6-11 不同航速下的砰击压力峰值空间分布 Fig. 6-11 Spatial distribution of peak slamming pressure at different speeds

6.5 规则波与聚焦波下的砰击载荷对比

为了对比规则波和聚焦波下的砰击特性,将规则波等效为规则波,从前文中可知 规则波波高约为 1.64 倍聚焦波幅,以聚焦波幅两侧波谷的时间差作为波浪周期,规 则波工况的参数为 H=0.178m、λ/L_{PP}=1.4、V=0m/s,聚焦波工况的参数为 A=0.108m、 V=0m/s。

图 6-12 为规则波工况和聚焦波工况下的空场造波波浪时历曲线, 浪高仪的位置 均位于船艏。聚焦波最大波峰的变化时间与规则波波峰相似, 聚集波最大波幅附近的 波面高度差与规则波波高基本相同, 等效后的规则波相当于将多个聚集波连接起来 了。







Fig. 6-12 Comparison of the free surface elevations between focused wave and regular wave

图 6-13 为规则波和聚焦波下的船体运动响应对比。可以看到,聚焦波下的垂荡 幅值要大于规则波,垂荡幅值增加了约 11.1%,但纵摇幅值反而小于规则波,纵摇幅 值减小了约 17.3%。这说明突然遭遇大波浪会使得船体垂荡幅度更大,连续遭遇大波 浪使得船体纵摇幅度更大。



Fig. 6-13 Comparison of ship motion response between focused wave and regular wave



图 6-14 为聚焦波和规则波下船艏 P1 测点与波浪之间的垂向相对运动、垂向相 对速度和砰击压力时历曲线。可以看到,聚焦波下 P1 点的相对运动幅值要小于规则 波工况,结合前面规则波工况的纵摇运动更大,这说明纵摇运动是影响相对运动的关 键因素。与规则波工况相比,聚焦波下的相对垂向运动变化相对平缓,相对速度大小 明显偏小,而相对速度是决定砰击载荷大小的关键因素,这就导致聚焦波下的砰击压 力峰值大小偏低。两者的压力曲线形状基本一致,其中聚焦波下的压力持续时间略微 偏大。







图 6-15 为聚焦波和规则波下船艏的砰击压力峰值空间分布,这里对压力进行无 因次化处理。可以发现,聚焦波和规则波下的压力分布基本上一致,在靠近船艏和船 底的位置更大,这与前文中压力分布是一致的,此时静水压力占主要成分。







Fig. 6-15 Comparison of spatial distribution of peak pressure between focused wave and regular wave

6.6本章小结

本章节主要讨论了数值水池中的聚焦波生成方法以及聚焦波下的船舶运动响应 和砰击载荷。采用线性波叠加的方式,基于 JONSWAP 风浪谱完成了数值水池中的 聚焦波模拟并与理论解进行了对比。分析发现在聚焦波波幅较大时,聚焦波的非线性 增强,数值解与理论解的相位差以及波高误差逐渐增大。随后分析了聚焦波下的船舶 运动响应和砰击载荷的时空分布规律。在聚焦波下,船舶垂荡和纵摇运动的最大值相 比波浪聚焦时刻存在延后,其中最大纵摇角度出现在最大垂荡之后,最大纵摇角为艏 倾角。零航速下,船艏各部分砰击压力随着聚焦波幅的增加而增大,总体上呈线性递 增的趋势,压力变化过程相对平缓;在航速作用下,船舶遭遇频率增大,砰击压力的 持续时间更短,压力峰值特征更加突出,砰击压力峰值大小增大,外飘各位置处的砰 击压力以相同的增长幅度增大。与规则波工况相比,聚焦波下的纵摇运动偏小,砰击 压力更小。



第七章 总结与展望

7.1总结

本文采用 CFD 方法研究了 KCS 船的波浪砰击问题。基于开源工具 waves2Foam 构建三维数值波浪水池来模拟不同的波浪环境,采用刚体六自由度运动模型和重叠 网格方法计算波浪中的船体大幅度运动,对楔形体入水砰击问题进行模拟验证砰击 压力求解的准确性,完成了 KCS 船在不同波长、波高、浪向角的规则波中的运动和 砰击载荷数值模拟。此外还研究了聚焦波下不同波高和不同航速对船舶运动和砰击 载荷的影响。研究得到的主要结论如下:

(1) 基于 waves2Foam 构建的数值波浪水池有两种消波松弛方法,松弛到静水 面的方式需要至少给定 2 倍入射波松弛区长度,松弛到入射波浪的方式需要至少给 定 1 倍入射波松弛区长度。

(2)在迎浪规则波条件下,船舶的垂荡和纵摇运动幅值随波长增加而增加。在 较高航速下且波长小于船长时船体垂向运动幅值明显小于波长大于或等于船长的情况。与船舶运动响应不同的是,砰击压力峰值的最大值出现在波长为1.0或1.2倍船 长的工况,最大压力位置位于19号站位,此后减小波长或增大波长均会导致砰击压 力减小。波高对船体垂向运动和砰击压力的影响近似于线性变化,两者均随波高增加 线性递增。

(3)与迎浪运动相比,艏斜浪和横浪均会导致垂荡运动幅值增大,最多可增大 103.2%,纵摇运动在浪向角变化中会先增大后减小,其中横浪下的纵摇运动最小。小 于 45° 浪向角的艏斜浪环境下,砰击压力会高于迎浪环境,船体面向来波一侧受到 的砰击压力会高于另一侧;继续增大浪向角船体背向来波一侧的压力会略高于船体 但此时砰击特征已逐渐减弱,压力变化过程相对平缓。

(4)聚集波下船体垂向运动出现最大值的时刻会稍晚于波浪聚焦时刻,最大砰击压力出现在船舶驶过最大波峰之后。聚焦波波高的改变对于砰击压力的影响呈线性关系。低航速下的船艏波浪砰击近似于楔形体的入水砰击,航速增加使得砰击压力增大且持续时间减小。

74



7.2展望

本文对 KCS 船在不同波浪环境下的船舶运动和砰击载荷进行了研究与分析。但仍有许多有待完善的工作,具体为以下几个方面:

(1)在规则波波浪砰击中没有细致研究航速以及波陡对砰击载荷的影响,斜浪 下仅考虑了一种波长下的波浪砰击,未来可进一步研究不同航速、波陡和波长环境下 砰击载荷特性。

(2)当前研究中船舶的上浪现象并不明显,未来可考虑研究不同波浪环境下的船艏上浪砰击问题和上浪砰击载荷对上层建筑的影响。

(3)本文中针对不规则波仅研究了极端海况下的砰击载荷,这是一种短时间的 分析,研究不规则波中的砰击载荷概率特性对于工程实际应用具有更大的价值。

(4)本文中使用的船体为刚体船,而实际情况下的船体为弹性体,船体外板在 巨大的砰击力作用下会发生变形,此时外板受到的砰击压力大小及其空间分布会发 生改变,另外大型船舶在恶劣海况下遭遇巨大的砰击力时船体结构可能会出现"颤 振"响应,因此考虑水弹性效应的船舶砰击载荷研究是未来的重要研究方向。



参考文献

- [1] Von Karman T. The impact on seaplane floats during landin[R]. National Advisory Committee for Aeronatics. Techinical note No. 321, 1932: 309-313.
- [2] Wagner H. Uber stoss- und gleitvergange an der oberflache von flussigkeiten[J]. ZAMM, 1932, 12(4): 193-235.
- [3] Doborvolskaya Z N. On some problems of similatiry flow of fluid with a freesurface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 36(11):805-829.
- [4] Wu G X, Sun H, He Y S. Numerical simulation and experimental study of water entry of a wedge in free fall motion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(3): 277-289.
- [5] Zhao R, Faltinsen O. Water entry of two-dimensional bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 246(1): 593-612.
- [6] Mei X, Liu Y, Yue D K P. On the water impact of general two-dimensional sections[J]. Applied Ocean Research, 1999, 21(1): 1-15.
- [7] 卢炽华,何友声.二维弹性结构入水冲击过程中的流固耦合效应[J].力学学报,2000,32(2):12.
- [8] Wang S, Soares G C. Simplified approach to dynamic responses of elastic wedges impacting with water[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 81-93.
- [9] Hermundstad O A, Moan T. Numerical and experimental analysis of bow flare slamming on a Ro– Ro vessel in regular oblique waves[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2005, 10(3):105-122.
- [10] Hermundstad O A, Moan T. Efficient calculation of slamming pressures on ships in irregular seas[J]. Journal of marine science and technology, 2007, 12: 160-182.
- [11] 胡嘉骏, 蔡新钢. 船舶表面点砰击压力的预报方法[J]. 船舶力学, 2005, 9(1): 63-70.
- [12] 陈胜男, 高志龙, 牟立伟等. 大型集装箱船迎浪航行的外飘砰击压力研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(S1): 25-27+46.
- [13] 田喜民, 邹早建, 王福花. 大型船舶外飘砰击压力计算研究[J]. 中国造船, 2014, 55(01):1-10.
- [14] Ochi M K, Motter L E. Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design[J]. Transactions SNAME, 1973, 81: 144-177.
- [15] Stavovy A B, Chuang S L. Analytical determination of slamming pressures for high speed vessels in waves[J]. Journal of Ship Research, 1976, 20: 190-198.



- [16] Yettou E M, Desrochers A, Champoux Y. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge[J]. Fluid Dynamics Research, 2006, 38(1): 47.
- [17] Huera-Huarte F J, Jeon D, Gharib M. Experimental investigation of water slamming loads on panels[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(11-12): 1347-1355.
- [18] Stenius I, Rosén A, Battley M, et al. Experimental hydroelastic characterization of slamming loaded marine panels[J]. Ocean Engineering, 2013, 74: 1-15.
- [19] Peseux B, Gornet L, Donguy B. Hydrodynamic impact: numerical and experimental investigations[J]. Journal of fluids and structures, 2005, 21(3): 277-303.
- [20] 陈小平, 李军伟, 王辉等. 大尺度楔形体板架钢模落体试验和仿真研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(10):1152-1163.
- [21] Luo H, Wang H, Soares C G. Numerical and experimental study of hydrodynamic impact and elastic response of one free-drop wedge with stiffened panels[J]. Ocean Engineering, 2012, 40: 1-14.
- [22] Duan L, Zhu L, Chen M, et al. Experimental study on the propagation characteristics of the slamming pressures[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107868.
- [23] Wang Y, Wu W, Wang S, et al. Slam induced loads on a 3D bow with various pitch angles[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142(1): 014502.
- [24] Xie H, Liu F, Yu P, et al. Comparative study on fluid dynamic behavior and slamming loads of two bow-flare sections entering into water[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 166: 105177.
- [25] Liu X, Liu F, Ren H, et al. Experimental investigation on the slamming loads of a truncated 3D stern model entering into water[J]. Ocean Engineering, 2022, 252: 110873.
- [26] Zong Z, Sun Y, Jiang Y, et al. Evolution of slamming load and flow field in water-entry process of trimaran ship section[J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107319.
- [27] Kim K H, Kim B W, Hong S Y. Experimental investigations on extreme bow-flare slamming loads of 10,000-TEU containership[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 225-240.
- [28] Hong S Y, Kim K H, Kim B W, et al. Experimental study on the bow-flare slamming of a 10,000 TEU containership[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2014: ISOPE-I-14-337.
- [29] Ha Y J, Kim K H, Nam B W, et al. Experimental study for characteristics of slamming loads on bow of a ship-type FPSO under breaking and irregular wave conditions[J]. Ocean Engineering, 2021, 224: 108738.

参考文献



- [30] Lavroff J, Davis M R, Holloway D S, et al. Wave slamming loads on wave-piercer catamarans operating at high-speed determined by hydro-elastic segmented model experiments[J]. Marine structures, 2013, 33: 120-142.
- [31] Greco M, Bouscasse B, Lugni C. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. Part 2: Experiments and physical investigation[J]. Journal of fluids and structures, 2012, 33: 148-179.
- [32] 陈占阳, 任慧龙, 孙芳胜. 外张砰击压力时间分布的模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(06):904-908.
- [33] Li H, Zou J, Deng B, et al. Experimental study of stern slamming and global response of a large cruise ship in regular waves[J]. Marine Structures, 2022, 86: 103294.
- [34] Lin Y, Ma N, Gu X, et al. Experimental study on the asymmetric impact loads and hydroelastic responses of a very large container ship[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12: 226-240.
- [35] Gong K, Liu H, Wang B. Water entry of a wedge based on SPH model with an improved boundary treatment[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(6): 750-757.
- [36] Vandamme J, Zou Q, Reeve D E. Modeling floating object entry and exit using smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(5): 213-224.
- [37] Zhong S Y, Sun P N, Peng Y X, et al. An SPH study of slamming and splashing at the bow of SYSU vessel[J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113581.
- [38] 何广华, 张子豪, 武雨嫣等. S-175 船关键剖面的入水砰击模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(6): 1058-1064.
- [39] Wen X, Ong M C, Yin G. On the three-dimensional effects of the water entry of wedges[J]. Applied Ocean Research, 2023, 138: 103649.
- [40] 吴巧瑞, 陈明辉, 张珍等. 基于重叠网格法的结构物入水砰击研究[J]. 中国造船, 2022, 63(01):102-112.
- [41] Brizzolara S, Couty N, Hermundstad O, et al. Comparison of experimental and numerical loads on an impacting bow section[J]. Ships and offshore structures, 2008, 3(4): 305-324.
- [42] Shen Z, Hsieh Y F, Ge Z, et al. Slamming load prediction using overset CFD methods[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2016: D011S014R004.
- [43] Xie H, Liu F, Liu X, et al. Numerical prediction of asymmetrical ship slamming loads based on a hybrid two-step method[J]. Ocean Engineering, 2020, 208(2): 107331.



- [44] Lin Y, Ma N, Gu X. Potential -flow and CFD investigations of bow-flare slamming on a container ship in regular heading waves[J]. Ocean Engineering, 2020, 219: 108278.
- [45] Liu D, Li F, Liang X. Numerical study on green water and slamming loads of ship advancing in freaking wave[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 111768.
- [46] Acharya A, Datta R. Parametric study of bow slamming for a KRISO container ship[J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110420.
- [47] Li P, Xie H, Liu F, et al. Numerical approach for predicting the slamming loads in oblique long waves considering the wave-body interface[J]. Ocean Engineering, 2022, 262: 112089.
- [48] Xie H, Ren H, Li H, et al. Numerical prediction of slamming on bow-flared section considering geometrical and kinematic asymmetry[J]. Ocean Engineering, 2018, 158: 311-330.
- [49] Chen Z, Zhao N, Zhao W, et al. Numerical prediction of seakeeping and slamming behaviors of a trimaran in short-crest cross waves compared with long-crest regular waves[J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115314.
- [50] Huang S, Jiao J, Chen C. Numerical prediction of ship motion and slamming load characteristics in cross wave[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2022: 1-21.
- [51] 李远鹤. 艏外飘型船舶波浪砰击载荷预报[D]. 江苏科技大学, 2020.
- [52] Takami T, Matsui S, Oka M, et al. A numerical simulation method for predicting global and local hydroelastic response of a ship based on CFD and FEA coupling[J]. Marine Structures, 2018, 59: 368-386.
- [53] Jiao J, Huang S, Tezdogan T, et al. Slamming and green water loads on a ship sailing in regular waves predicted by a coupled CFD-FEA approach[J]. Ocean engineering, 2021, 241: 110107.
- [54] Liu C, Wang J, Wan D. CFD computation of wave forces and motions of DTC ship in oblique waves[J]. International journal of offshore and polar engineering, 2018, 28(02): 154-163.
- [55] Wang J, Zou L, Wan D. Numerical simulations of zigzag maneuver of free running ship in waves by RANS-Overset grid method[J]. Ocean Engineering, 2018, 162: 55-79.
- [56] Wang J, Zhao W, Wan D. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31: 1-20.
- [57] Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2012, 70(9): 1073– 1088.
- [58] 田康. 基于 OpenFOAM 的月池共振问题研究[D]. 上海交通大学, 2021.



- [60] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D]. 上海交通大学. 2014.
- [61] Dong C, Sun S, Song H, et al. Numerical and experimental study on the impact between a free falling wedge and water[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11(1): 233-243.
- [62] Zhou Y, Xiao Q, Peyrard C, et al. Assessing focused wave applicability on a coupled aero-hydromooring FOWT system using CFD approach[J]. Ocean Engineering, 2021, 240: 10998.

21003369

论文

攻读学位期间学术论文和科研成果目录

- [1] 王澳, 王建华, 万德成. 集装箱船外飘砰击载荷的 CFD 数值分析. 中国造船. 2024.(已录用)
- [2] 王澳,王建华,万德成. 规则波下中型邮轮运动响应及砰击载荷的 CFD 数值预报. 第三十三 届全国水动力学研讨会论文集,2022 年 10 月 28 日-10 月 31 日,重庆, pp.987-996.
- [3] Ao Wang, Hao Guo, Jianhua Wang, Decheng Wan, CFD Prediction of Slamming Loads on KCS in Oblique Waves, Proceedings of the Thirty-third (2023) International Ocean and P olar Engineering Conference, Ottawa, Canda, June 19–23, 2023, PP.2299-2305.



致 谢

转眼间两年半的研究生生活就要结束了,回顾这段校园时光,心中感慨万千。这 一路走来我遇到了许多良师益友,正是在他们的帮助下我才能顺利完成学业,在此我 想对他们表达最衷心的感谢。

首先我要感谢万德成教授。万老师严谨的工作态度和学术素养使我获益匪浅,促 使我在学术研究中刻苦努力、不断进步。在组会交流中,他总是能够敏锐地察觉到目 前工作存在的问题以及值得深入挖掘的地方,为同学们的研究工作提供具体建议。感 谢您给我们提供了优良的科研环境,包括鼓励参加各种学术会议增长科研见识、提供 高性能计算集群帮助加快数值计算、组织春游和秋游排解科研的苦闷等等。

感谢王建华老师对我工作和论文的指导。在我遇到问题时,您总能及时为我解答 疑惑,帮助我调整错误的算例,指出我在报告以及论文撰写中不足。感谢您关注我的 日常生活状态和身心健康,对我的职业选择提供了许多建议和帮助。同时也感谢赵伟 文老师、曹刘帅老师、庄园老师和朱政老师对我的帮助和支持,感谢你们为我提供技 术上的指导,辛苦保障课题组的日常工作运转。

感谢张文杰师兄对我的无私帮助。师兄把我从一个 CFD 小白引进了门,从 Linux 系统到 OpenFOAM 软件、从算例设置到论文修改,师兄总是耐心地给我指出问题并 提出意见。我在生活和科研上遇到的问题师兄也会一一回复,他是我遇到的一位好大 哥。感谢陈松涛、于连杰、郭浩、董亦清、魏亚博、马云鹏等师兄师姐们为我指点迷 津,让我少走一些弯路。感谢薛瑛杰、贺帆、柴冰、肖家伟、邵聿明、高港、霍帅文、 李仁祥、吴萌萌、王魁、和康健等同学,感谢你们的陪伴和帮助,让我的生活增添一 份快乐和欣喜。感谢周子轩、王一、冯朔等和我继续保持密切交流的朋友们,希望我 们以后能够继续维持这份友谊。

最后,我要感谢我的家人朋友,感谢你们这些年的培养和教育,你们一如既往的 支持和关怀是我完成学业的动力,祝愿你们身体健康、万事如意。

82