



第二十五届全国水动力学研讨会暨 第十二届全国水动力学学术会议文集

Proceedings of the 25th National Conference on Hydrodynamics &
12th National Congress on Hydrodynamics

吴有生 颜 开 谢永和 主编

(上 册)



海军出版社

第二十五届全国水动力学研讨会 暨 第十二届全国水动力学学术会议文集

Proceeding of the 25th National Conference on Hydrodynamics &
12th National Congress on Hydrodynamics

(上册)

吴有生 颜开 谢永和 主编

主办单位
《水动力学研究与进展》编委会
中国力学学会
中国造船工程学会
浙江海洋学院



海洋出版社

2013年·北京

图书在版编目(CIP)数据

第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集/吴有生, 颜开, 谢永和主编. —北京: 海洋出版社, 2013. 9

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8628 - 1

I. ①第… II. ①吴… ②颜… ③谢… III. ①水动力学 - 学术会议 - 文集
IV. ①TV131.2 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 178979 号

责任编辑: 方 菁

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

上海交大印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 81.25

字数: 2000 千字 定价(上下册): 180.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

第二十五届全国水动力学研讨会
暨
第十二届全国水动力学学术会议文集

承 办 单 位

浙江海洋学院

船舶与海洋工程学院

化工与能源工程学院

上海《水动力学研究与进展》杂志社

中国力学学会水动力学专业组

中国造船工程学会船舶力学委员会

中国船舶科学研究中心水动力学重点实验室

上海市船舶与海洋工程学会船舶流体力学专业委员会

第二十五届全国水动力学研讨会
暨
第十二届全国水动力学学术会议文集
编辑委员会

主任委员:吴有生

副主任委员:颜 开 谢永和 竺柏康 周连第

委 员:(以姓氏笔画为序)

刘 桦 任永华 孙 奕 宋付权 竺柏康

范余明 吴有生 杨显成 周连第 徐宗孟

谢永和 缪国平 颜 开 戴世强

主 编:吴有生 颜 开 谢永和

目 录

大会报告

波浪环境下超大型浮式结构物的水弹性响应研究	吴有生 田超 宗智 段文洋 顾学康 (1)
拖网渔船水动力节能技术研究	谢永和 (14)
Practical evaluation of the drag of a ship for design and optimization.....	Yang Chi Huang Fu-xin Francis Noblesse (21)
油气开发中的多相流问题.....	吴应湘 许晶禹 李华 钟兴福 李东晖 石在虹 (34)
自由表面格林函数—分类计算及其船海工程中的应用	朱仁传 缪国平 (42)
微纳米流体力学研究进展及其在非常规油气资源开发中的应用	宋付权 竺柏康 (53)
Rayleigh-Bénard 湍流热对流系统的边界层结构	周全 (61)

水动力学基础

Hamilton 流固多物体系统的非定常动力学问题之 2—两种等价的描述体系	孙仁 白帆 (68)
EFDC 模型在三维水动力学及溢油扩散预报中的应用	陈少峰 严烈 (75)
无穷多海洋表面波相互作用的动量守恒和共振条件.....	黄虎 (82)
绕平头回转体初生空化形态及流场特性研究.....	胡常莉 王国玉 黄彪 (87)
声介质中船舶三维水弹性力学的时域分析技术 ...	邹明松 吴有生 司马灿 孙建刚 (95)
空腔不可压缩流动特征及其声学特性研究.....	刘聪尉 吴方良 李环 彭娅玲 李万平 (102)
基于广义阻滞原理的流阻计算及检验.....	冷学礼 田茂诚 张冠敏 (111)
页岩气渗流中的力学模型分析	刘禹 王常斌 文建军 宋付权 (117)
液体在微纳米管道中的非线性流动特征	袁琳 王常斌 徐士元 宋付权 (123)
平板上突出圆柱的水动力噪声特性分析研究	李霖 李光明 季刚 (129)
不同长细比突出体的漩涡特性研究	岳蕾 张志国 (135)
二维振荡水翼推进效能数值模拟及分析	倪阳 魏泽 邱耿耀 (141)
黑色素瘤在附着血管壁面的白细胞上的水动力附着特性.....	秦一 陆家丰 李昂 孙仁 (148)
高航速翼身融合航行体兴波阻力特性研究.....	吴小翠 王一伟 黄晨光 胡志强 杜特专 廖丽涓 (152)
Blake 简化翼型壁面湍流脉动压力的大涡模拟研究	张晓龙 张楠 吴宝山 (158)
利用离散涡方法模拟圆柱绕流及涡激振动	黄熙龙 王嘉松 (167)
翼型参数变化对其辐射噪声影响的数值分析研究	翟树成 刘登成 刘竹青 (173)
基于大涡模拟与声学类比的二维空腔流动特性与水动噪声研究	孙霖 陈敏 张志国 王先洲 冯大奎 (179)
多目标粒子群算法在翼型优化的应用	黄胜 任万龙 王超 何新 (185)
船舶近场格林函数内在特性研究	杜君君 王星 孙珍丽 章社生 金升平 (191)

Investigation of transient cavitating flows around a fast pitching hydrofoil	Huang Biao Wu Qin Wang Guo-yu (197)
泡泡间相互作用的理论及数值研究	张凌新 王文凤 邵雪明 (206)
被动俯仰拍动翼的运动特性研究	张晓龙 余钊圣 邵雪明 (213)
颗粒惯性对湍槽流影响的数值研究	林昭武 余钊圣 邵雪明 (220)
层流圆管潜射流生成蘑菇形涡结构特性实验与数值研究	陈云祥 陈科 尤云祥 胡天群 (227)
基于 CFD 的空腔几何结构对流动和减阻特性的影响研究	陈曦 吴哲 张志国 王先洲 冯大奎 (236)

计算流体力学

动力定位铺缆船环境载荷数值模拟	倪歆韵 倪阳 魏泽 邱耿耀 (242)
船舶驶出船闸时的水动力数值预报	王宏志 邹早建 (249)
基于有限元法的孤立波和二维结构物非线性相互作用的数值模拟	王赤忠 程烨 魏亮 (255)
鱼雷垂直入水过程数值模拟	储慧林 朱仁庆 (261)
基于CFD的桨-毂帽鳍-舵性能研究	杨帆 陈昌运 陈霞萍 (268)
下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟	周胡 万德成 (277)
湍流模型对风力机叶片数值模拟的影响	赵文超 周胡 万德成 (284)
基于重叠网格技术的运动船舶黏性流场数值模拟	孟庆杰 隋智享 万德成 (291)
并行 MPS 方法数值模拟三维溃坝流动	张雨新 唐振远 万德成 (299)
锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算	刘远传 万德成 (306)
基于 OpenFOAM 的螺旋桨空泡数值模拟方法研究	郑巢生 张志荣 (313)
抽吸控制翼板结合部马蹄涡的大涡模拟研究	张胜利 张楠 刘君 (319)
导管桨推进水下航行体艇体推进器相互作用分析研究	司朝善 姚惠之 张楠 (328)
双尾鳍集装箱船的参数化设计与数值模拟研究	陈京普 蒋武杰 魏锦芳 (337)
海洋环境下多体运动的数值模拟	叶俊杰 李廷秋 (343)
集装箱船纯稳性丧失薄弱性衡准计算研究	王田华 顾民 鲁江 (349)
施加电磁搅拌的板坯连铸结晶器内金属液流动的数值模拟	房心强 郭加宏 雷作胜 (356)
岩屑床清除钻杆流场的数值模拟与分析	房亮 李孝伟 狄勤丰 (363)
扰动风作用下微型旋翼流场的数值模拟研究	赵贺 李孝伟 李亮 (370)
有限水深两层流体中内孤立波数值造波方式比较研究	王旭 林忠义 尤云祥 胡天群 (376)
面元法分析 Kappel 桨时的尾涡修正	王睿 熊鹰 时立攀 (383)
使用一阶面元法与高阶面元法求解船舶兴波问题的比较研究	张伟 邹早建 (389)
高精度VOF方法在自由面流动问题中的应用	赵西增 (395)
滑艇静水阻力及航行姿态 CFD 预报研究	常亮 魏泽 倪阳 孙华伟 (401)
浅水流动的分涡模拟	张景新 刘桦 (407)
空化器舵角对超空泡航行体水动力特性的影响研究	陈鑫 陈瑛 李杰 宫兆新 鲁传敬 (413)
高速可压缩空泡流数值模拟方法	陈瑛 鲁传敬 陈鑫 曹嘉怡 李杰 (419)
基于 LES 的潜艇扰流特性分析研究	高顺凯 蒋奉兼 张志国 王先洲 冯大奎 (427)
基于大涡模拟的螺旋桨水动力噪声预报研究	陈敏 姚喜 葛怡君 何然 王国栋 (433)

带内部结构的三维液舱晃荡数值计算研究	徐国徽 胡嘉骏 顾学康 (439)
三维水翼梢涡空化的数值模拟	刘志辉 王亚赞 王本龙 (450)
数值水池的概念与发展路线探讨	赵 峰 吴乘胜 黄少锋 张志荣 (456)
大型集装箱船三维波浪载荷的数值模拟	李再庆 李廷秋 (462)
OpenCL-based acceleration of SPH method in free surface flow simulation	 QIU Liu-chao (470)
电磁力控制高雷诺数圆柱体绕流场特性数值模拟	尹纪富 尤云祥 胡天群 (476)

水动力学试验与测试技术

通气超空泡水洞试验阻塞效应影响研究	周景军 项庆睿 吕瑞 (484)
桨舵相互干扰的水动力特性模型试验研究	季少鹏 朱爱军 王文涛 (493)
大型散货船波激振动和砰击振动模型试验研究	丁军 汪雪良 田超 胡嘉骏 (502)
船舶风载荷数值计算及风洞试验	蔡文山 董国祥 杨春勤 高家镛 (511)
水平运动超空泡的实验和数值研究	 施红辉 胡俊辉 胡青青 周素云 王昀 高聚瑞 陈波 贾会霞 (518)
二维类圆柱尾迹的空间动力学行为研究 I 局部空间动力学行为	 陈瑜 谢锡麟 麻伟巍 (524)
长时间多数据动态实验的热线分析	马云驰 蒋运幸 余宇轩 谢锡麟 麻伟巍 (534)
坐底式平台基础冲刷的模型试验研究	赵静 王世澎 袁振宇 闫云 (547)
沙坝海岸沿岸流速度剖面特征	王彦 邹志利 (555)
中型豪华游船线型优化与模型试验研究	陈京普 王艳霞 蒋武杰 程红蓉 (564)
分层流水槽中风生水面微尺度随机波 CCD 图像反演内孤立波的研究初探	 陈祥瑞 魏岗 李万鹏 屈子云 靖树 (570)
渐扩非均匀水流紊动强度试验研究	杨明哲 文传平 董思陈 (576)
柱状气浮分离器处理含油污水实验研究	张军 许晶禹 郭军 王淑京 郑之初 (582)
集装箱船模型螺旋桨空泡与脉动压力比对试验研究	 马艳 陆芳 黄红波 丁恩宝 曾志波 C. Johannsen (588)
发展空化及其不稳定现象研究	彭晓星 (595)
波浪在滨海生态防护植物群落内传播特性的实验研究	郭晓宇 王本龙 刘桦 (602)
垂直入汇河段流速分布特性试验研究	李世荣 马腾飞 钟博刚 程文 (608)
孤立波水槽造波方法的比较实验研究	张金牛 吴卫 刘桦 房咏柳 (614)

工业流体力学

平面被动式减摇水舱减摇效果的模型试验研究	张进丰 赵战华 周国平 刘长德 (621)
Spar 型浮式风机平台耦合动力响应分析	唐耀 邹早建 范菊 缪国平 (628)
新型防泥沙装置优化改进研究	赵璐 黄国富 苗飞 (634)
水平井与直井不规则井网水平井注聚合理配注量的确定方法	孙哲 崔海清 (643)
丛式井集油环温降压降的数值计算	张悦 金丽 崔海清 吕素萍 刘丽 (650)
吊舱推进器中鳍的变化对水动力性能的影响研究	胡芳琳 张志荣 (656)
基于 CFD 的不同介质液舱晃荡比较分析	陆志妹 范余明 朱仁传 (665)
垂直管道内油-水两相环状流的流动特征	 张健 许晶禹 陈小平 高梦忱 黄玉彤 (673)

低温液体在节流过程中的空化现象数值模拟	刘海飞 陈虹 杨潞锋 雷刚 许晶禹 吴应湘 (680)
导流片型管道式油水分离器的压降特性研究	史仕炎 许晶禹 高梦忱 黄玉彤 陈小平 马乃庆 (687)
深水钻井隔水管段岩屑运移特性研究	翟羽佳 汪志明 张权 郝希宁 (695)
泵站蜗形进水池不同水位三维紊流数值模拟	周孝华 刘厚林 王凯 王文博 (701)
风浪流作用下 LNG 船舶系泊试验研究	王兴刚 琚烈红 (708)
船舶风帆、风电综合应用初步数值研究	刘德兴 郑艳娜 彭海婷 温铂洋 (716)
水下滑翔器滑翔翼水动力布局对航行性能影响研究	李迎华 陈鲁愚 张波 张华 (723)
考虑流固耦合的立管涡激振动研究	魏东泽 白兴兰 顾恩凯 (730)
含不凝气体饱和蒸汽圆管内凝结数值模拟	房达 田茂诚 冷学礼 (736)
管形对水平管外降膜流动流型及波长的影响	罗林聪 张冠敏 潘继红 田茂诚 (743)
脉动流通过螺旋翅片管流动特性分析	屈晓航 田茂诚 冷学礼 (750)
深水钢悬链线立管与海床动力相互作用	白兴兰 段梦兰 (758)
Study about the effects of waves and currents on flexible pipe system	JING Kun CHEN Zheng-shou (767)
基于动态空化模型绕数值研究扭曲三维翼型的非稳态空化过程	张伟 张瑞平 陈建业 熊炜 张小斌 邱利民 (774)
淹没条件下前混合磨料射流的数值模拟	赵艳红 沈艳霞 (781)
深海浮动式平台与系泊/立管系统动力响应异步耦合分析研究	马山 段文洋 (786)
Labview 的海上溢油虚拟实验平台	王怀栋 白莉 张鹏 任东亮 刘书龙 宫名 (793)
Stop-and-go waves in traffic flow through power spectral density analysis	ZHU Huibing GAO Jianbo JING Huimin (801)
关于超声波热量表准确度检测的几个问题	耿介 周春丽 杜广生 徐广祥 邵珠峰 (807)
不同地形条件下潮流对电厂差位式取排水特性的影响分析	程友良 张国峰 涂春民 (816)
热镀锌锅内锌液流动和传热规律研究	袁硕 杨芃 刘池 周新平 (823)
基于管网水力模型的雨水系统混接分流改造方案研究	尹海龙 李新建 (829)

船舶与海洋工程水动力学

一艘高速排水型船舶的波浪载荷预报和实测比较	邱强 (840)
4500T 全回转起重船运动性能研究	范亚丽 匡晓峰 张凤伟 徐华 (849)
扩展 MLM 入水砰击模型及其应用	朱鑫 段文洋 (856)
不同船型静水阻力性能的 RANS 数值模拟	查若思 冯观 何佳益 叶海轩 万德成 (866)
导管间隙对带前置定子导管桨水动力性能的影响研究	刘登成 洪方文 (873)
船舶最小推进功率跟踪研究	魏锦芳 王杉 苏甲 陈京普 (881)
海洋平台三用工作船的线型优化研究	苏甲 陈京普 杨奕 (887)
基于 CFD 的船舶阻力三因次预报方法研究	沈兴荣 范余明 吴琮 (893)
某集装箱船调整设计航速的线型优化研究	于海 陈红梅 熊小青 孔为平 (901)
基于 OSHIP 软件的 KCS 算例数值模拟	孙海素 (907)
船舶耐波性评价方法综述	祁江涛 王迎晖 顾民 张进丰 (917)
船舶低速作业操纵性水动力研究	赵桥生 江伟 韦喜中 杜荣 (923)
静水阻力和波浪增阻集成优化系统开发与应用研究	王杉 陈京普 魏锦芳 黄国富 (928)
基于面元法的桨后舵附推力鳍尾流场的研究	张旭婷 苏玉民 刘业宝 王影 (934)

- 低阻高耐波性排水式新船型构型及水动力性能研究 ... 李积德 孙树政 赵晓东 田博 (940)
- 双桨式吊舱推进器水动力性能 CFD 预报建模方法研究 庄光宇 蔡昊鹏 马骋 陈科 钱正芳 陈科 尹宝瑞 (947)
- 一种优化螺旋桨侧斜分布的数值方法 蔡昊鹏 马骋 陈科 钱正芳 张赫 (955)
- 两船会遇黏性水动力数值计算 周琦 王化明 李旭辉 (964)
- 船间水动力作用数学模型及其在拖轮模拟器中的应用 任俊生 张祥伟 (972)
- 船舶参数横摇薄弱性衡准计算研究 卜淑霞 顾民 鲁江 王田华 (979)
- 顶浪规则波中参数横摇数值方法研究 鲁江 顾民 卜淑霞 王田华 (986)
- 组合式水动力节能装置在 5.7 万吨散货船上的设计与应用 黄国富 黄振宇 马艳 张海华 杨奕 (992)
- 航行船舶频域运动计算比较与分析 洪亮 朱仁传 缪国平 范菊 (1000)
- 不同风向角下集装箱船风阻力数值模拟研究 赵强 苏甲 陈京普 (1008)

海岸环境与地球物体流体力学

- 长江口长兴岛东岸圈围对横沙通道影响分析 谢慧姣 沈薇 (1013)
- 数值模拟南海复杂海底地形上的波浪演化 曹洪建 张晨亮 万德成 (1019)
- Rheological investigation of natural mudflow at Lian-yun Harbor in China Xu Jing-yu Zhang Jian Tang Chi Huhe Aode (1025)
- 海啸预警研究进展与南海海啸预警方法研究 任智源 赵曦 刘桦 (1040)
- 徐圩航道淤泥流变特性研究 许晶禹 呼和敖德 唐驰 张健 (1049)
- Kappel 型螺旋桨敞水性能数值分析研究 孙群 吴琼 (1057)
- 数值模拟长江口北支潮波变化 马丹青 顾杰 王晓莉 杨继忠 胡田 王媛 (1063)
- 基于高斯统计方法的地下水空间参数场参数率定 柏睿 黄跃飞 尹冬勤 王光谦 (1070)
- 数值模拟长江口滞流点的季节变化 王晓莉 顾杰 马丹青 杨继忠 胡田 王媛 (1081)
- 海平面上升对杭州湾盐水入侵的影响 鲁海燕 潘存鸿 史英标 (1088)
- 动水条件下泥水界面附近溶解态无机磷释放研究 程鹏达 林卫青 卢士强 王道增 (1094)
- 波浪与潜堤和水面浮体作用的数值模拟 陈学彬 陈志涯 詹杰民 (1100)
- 波浪作用下高桩码头承台浮托力计算 刘长根 邵万骏 崔可夫 (1109)
- 天津近岸海域生态环境特性研究与模拟 陶建华 (1117)
- 海面油污扩散的力学建模及相关数值研究 张大鹏 史倩 陈瑜 谢锡麟 (1125)
- 福建平潭海坛湾潮流场数值模拟 王彬谕 匡翠萍 单云驰 郑吉祥 (1140)
- 黄骅港潮流场二维数值模拟及分析 钱从锐 匡翠萍 姚凯华 刘鹏晨 (1146)

水利水电和河流动力学

- 蓝藻控制曝氧设备性能试验 严烈 黄国富 赵璐 陈少峰 严周广 (1152)
- 基于 EFDC 的宽浅型湖泊水动力水质模拟——以乌梁素海为例 尹冬勤 黄跃飞 柏睿 王寅 (1160)
- 植被水流的糙率系数研究 王伟杰 王坤鹏 马雨露 槐文信 (1173)
- 基于无结构网格 WAF 格式及其在二维溃坝问题中的应用 杨金波 短文刚 黄国兵 李订芳 (1179)
- 基于 ArcGIS 的坡面细沟分形研究 张攀 (1187)
- 金塘水道水动力特性分析 蔡相芸 张金善 王金城 张清扬 (1193)

沉螺池连接段水流结构分析	刘家栋 卢金友 曹夏飞 曾庆芳(1200)
突扩突跌段弧形闸门局开工况的数值模拟	李国栋 叶龙斌 胡琴芬 白祖辉 胡元 陈刚(1207)
压力弯道偏流特性研究	张宏伟 刘之平 张东 吴一红(1216)
窄缝式表孔泄流水力特性数值模拟	肖潇 吴时强 周辉 樊新建 曹伟岳(1222)
异型门槽水力特性的数值模拟研究	章晋雄 张东 吴一红 张文远 张宏伟(1229)
物理模型几何变态对复式明渠水流水力要素相似性的影响	薛娇 刘士和(1237)
掺气设施底坡设计反问题	樊博 吴建华 许唯临(1244)
阶梯消能工水力特性研究综述	聂境 张建民 栗帅(1253)
尾水河段情势变化的影响及治理数值模拟研究	栗帅 张建民 石旭芳(1259)
岸坡崩塌回填体加固措施试验研究	何小泷 张建民 栗帅 汪旭(1265)

波浪环境下超大型浮式结构物的水弹性响应研究

吴有生^[1], 田超^[1], 宗智^[2], 段文洋^[3], 顾学康^[1]

(1. 中国船舶科学研究中心, Email: ctian@cssrc.com.cn; 2. 大连理工大学, 3. 哈尔滨工程大学)

摘要: 为开发海洋岛礁珊瑚礁盘周围丰富的渔业和旅游资源, 并充分发挥礁盘消波护岛的作用, 可在岛礁附近布置超大型浮体作为保障与物流基地。当大型或极大型浮体布置在岛礁近旁时, 需要解决以下几个方面的问题: ① 非均匀海底问题, 需考虑复杂海底形态对浪流的影响; ② 复杂入射波影响分析, 应考虑来波的空间特性变化的影响等; ③ 水弹性力学问题, 要考虑水动力载荷与结构变形的耦合响应。本研究将基于三维船舶水弹性力学理论, 考虑非均匀海底和复杂入射波作用, 对近岛礁波浪环境下超大型浮体 (VLFS) 的水弹性响应进行了理论推导, 得到在近岛礁波浪环境下, 超大型浮体水弹性响应: 包括运动、外载荷及应力的理论预报方法; 然后采用工程简化估算方法, 对典型岛礁环境下超大型浮体的运动响应进行了分析, 所得结论为后续超大型浮体的载荷确定、结构设计等奠定了基础。

关键词: 近岛礁; 大型浮体; 水弹性; 运动; 载荷

1 引言

海洋面积占地球表面的 2/3, 如果能在海洋上建造出“浮动的陆地”, 人类的生存空间便会得以无限地扩展。目前人们首先想到形成海上空间的主体为填海造地, 特别是在都市及工厂附近的沿岸海域中更是以这种填海造地的形式为主。另一方面, 随着社会经济的发展和城市功能的高性能化, 人们对生活环境、住宅、交通和物流设施等的要求越来越高, 对具备亲水活动的海上空间的需求更是与日俱增。由于海洋岛礁周边往往都环绕着宽度数百到数千米、水深很浅的珊瑚礁盘, 这些礁盘不仅具备丰富的渔业和旅游资源, 而且发挥着消波、护岛的重要作用。为开发海洋资源, 需要充分利用造船工业的优势, 在岛礁附近布置超大型浮体, 在超大型浮体上可构筑形成包括机场、渔船和执法船等船只补给、海洋环境观测、海洋石油和矿产开发、海洋环境能利用等各项功能的物流和保障基地。

由于这类大型浮体的尺度可以达到数千米, 在进行分析时, 应当考虑其水弹性的影响, 对于深远海条件下的超大型浮体水弹性响应, 美、日、中等多国学者已进行了多年的研究^[1-4]。然而对近岛礁波浪环境下超大型浮体 (VLFS) 动响应研究的报道尚很少。

*国家重点基础研究发展计划 (2013CB036100) 资助。

当大型与极大型浮体布置在岛礁近旁时,需要解决以下几个方面的问题:① 非均匀海底问题,需考虑复杂海底形态对浪流的影响;② 复杂入射波影响分析,应考虑来波的空间特性变化的影响等;③ 水弹性力学问题,要考虑水动力载荷与结构变形的耦合响应。

本研究首先基于三维船舶水弹性力学理论,考虑非均匀海底和复杂入射波作用,对近岛礁波浪环境下超大型浮体(VLFS)的水弹性响应进行了理论推导,得到在近岛礁波浪环境下,超大型浮体水弹性响应:包括运动、外载荷及应力的理论预报方法;然后采用工程简化估算方法,对典型岛礁环境下超大型浮体的运动进行了分析,所得结论为后续超大型浮体的载荷确定、结构设计等奠定了基础。

2 岛礁附近波浪流时空演化

海流和波浪在复杂海洋地形中传播时,需要经过多变的海底和复杂岛礁地形,而岛礁附近一般有几千米的珊瑚礁浅滩,这导致流和波浪在岛礁附近的绕流和传播极其复杂,存在过顶绕流和三维绕流现象,伴随有爬坡、折射,绕射、波浪破碎等非线性复杂问题。海洋岛礁近岸水波的数学建模应该能够准确地描述水波运动的主要特征(波形的传播、弥散、波的折射、反射和绕射,波能的传播,浅水效应,波的衰减,扩散,破碎、爬坡等)。由于岛礁附近波流演化过程的大量非线性问题,不能仅用规则波演化进行简单描述,需要使用不规则波时序进行数值演化计算。另外由于复杂海洋环境中一般是浪流同时存在,它们之间经过复杂地形的演化过程以及对海洋结构物的力学作用是存在耦合现象的。因此对海流和波浪在复杂地形下的时空演化过程和耦合作用机理进行研究具有重要意义。

按照对物理现象的分辨能力,近岸水波数学模型通常被区分为局部模型,中尺度模型和广域模型。局部模型是完全三维的,能揭示流场的细节,能描述建筑物附近的波动,但由于计算机时的限制,对象问题的空间尺度和时间尺度都较小,如求解 RANS 方程的 FVM-VOF 模型、SPH 模型等。广域模型是平面二维的,假设波动流场在垂直方向上具有某种相似性。它能很精确地模拟远场情况,但急剧变化的地形和结构复杂的建筑物会使其在局部失真。广域模型在海洋岛礁远场波浪传播特征分析等实际问题中有着广泛的应用。中尺度模型是准三维的,能分辨波动流场的呈层结构。其适用范围介乎局部模型和广域模型之间。如 Boussinesq 理论模型、Green-Naghdi 理论模型。Webster 等(2011)^[5]将 GN 方程进行了简化,这使得更高级别的 GN 理论(GN-5, GN-7)可以应用于水波问题的研究。高级别的 GN 理论计算结果更为准确,这已经被赵彬彬和段文洋^[6]进行了证实。

2.1 水波数学模型

2.1.1 波浪谱计算模型

第三代波浪模型,可以根据深水的波谱分布和台风分布,对所感兴趣的海域进行波浪的计算,从而推断出该区域的波浪分布。本研究探讨根据谱作用量平衡原理来计算西沙海域波浪的统计分布方法,给出感兴趣点的波谱,为进一步的设计提供参考数据。本研究的计算表明采用计算方法计算波谱,必须使用高性能计算。

采用谱作用量平衡方程。则波谱演化的基本控制方程为:

$$\frac{dN}{dT} = \sigma$$

其中 $N(k, \theta) = F(k, \theta) / \sigma$ 为谱作用量密度, $\omega = \sigma + k \cdot U$ 为遭遇频率, S 代表与海浪谱有关的源和汇的总和:

$$S = S_{in} + S_m + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$$

其中, S_{in} 为线性输入; S_m 为为风能输入项; S_{nl} 为为波波非线性相互作用项; S_{ds} 为为耗散项; S_{bot} 为海底摩擦项。

控制方程在直角坐标下欧拉形式的平衡方程可写为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} kN + \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{s}{\omega}$$

式中

$$\dot{x} = c_g + U$$

$$\dot{k} = \sigma \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s}$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right]$$

其中群速 c_g 由幅值 c_g 和角度 θ 确定, s 是与 θ 同向的坐标, m 是与 s 垂直的坐标。

2.1.2 GN水波理论

GN 理论只是引入垂向速度分布的速度假设, GN 方程的整个推导过程中没有忽略任何高阶项。以 GN-2 理论为例, 假设速度变化是 $u(x, z, t) = u_0(x, t) + u_1(x, t)z + u_2(x, t)z^2$, 通过将该速度假设带入描述流体运动的连续性方程, 欧拉方程, 准确的自由面和底部边界条件, 就可以得到 GN-2 方程。需要指出的是, 在动量守恒方程的处理上, 进行垂向积分的同时, 也使用了伽略金法思想, 得到足够数目的方程以求解未知速度系数 $u_0(x, t), u_1(x, t), u_2(x, t)$, 同时对动量守恒也满足得更好。未知速度系数得到以后, 就可以利用速度假设 $u(x, z, t) = u_0(x, t) + u_1(x, t)z + u_2(x, t)z^2$ 得到任意位置处的速度, GN 方程没有引入无旋假定, 可以处理有旋流动问题。通过对 GN 理论速度假设及 GN 方程整个推导过程的理解, 可以认为整个流动过程中, GN 理论的速度近似都是在用最小二乘法思想去逼近真实流场。随着 GN 理论级别的增加, 比如 GN-3 理论, 速度假设是 $u(x, z, t) = u_0(x, t) + u_1(x, t)z + u_2(x, t)z^2 + u_3(x, t)z^3$, 虽然理论更为复杂, 但它将能够描述更为复杂的流场。GN 水波理论并不倾向于某一种特定的环境流场, 只要给出合理的速度假设, 它可以适用于各种物理背景的流场结构。GN 理论不仅适用于浅水和有限水深波浪问题, 也适用于无限水深情况下的流动问题。

2.2 算例验证

2.2.1 水下台阶的波浪传播

考虑一个二维具有水下台阶的波浪传播问题(图1)。假设波浪从深水区(水深80 m)传到浅水区(水深2 m)。波浪在碰到台阶处会发生透射和反射。针对这样的问题, Newman在线性假定下, 得到了透射系数和反射系数的近似解。针对本题, 透射和反射系数如图2所示。

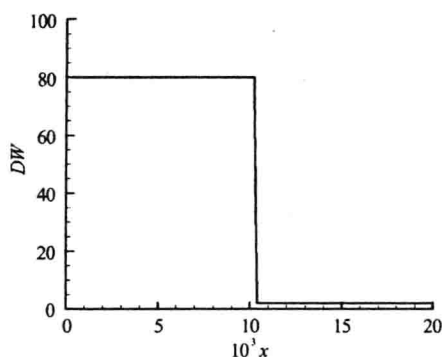


图1 波浪从深水区域(80 m)传播到浅水区(2 m)

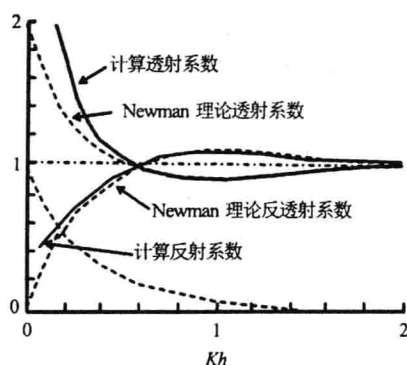


图2 透射系数和反射系数

在图2中, 横坐标是波数 k 和水深 h 的乘积。当 $kh > 0.4$, 计算结果和Newman的结果吻合良好。但是当 $kh < 0.4$ 时, 计算结果和Newman结果有偏离。偏离产生的原因可能是数值方法对于水深非常浅的情况误差较大。总体来讲, 结果还是令人满意。

2.2.2 典型岛礁波浪传播变形计算

以西沙海域赵述岛为典型岛礁, 对其附近的波浪场进行模拟。首先考虑风速 15 m/s 的东北风, 海底为深水, 计算结果如图 3 所示。水面受到风的作用, 逐步产生波浪, 波高逐步增加, 在出口处达到 3 m 左右。

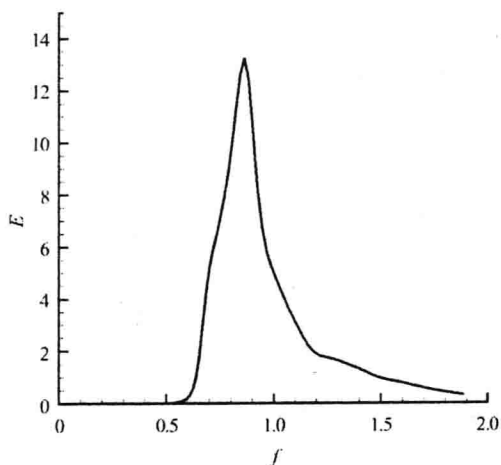
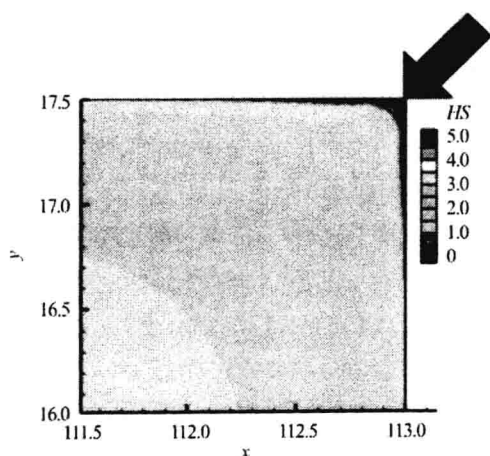


图3 15 m/s 东北风作用下波高(左)和出口处频谱(右)

然后取赵述岛附近实际水深进行计算, 计算结果见图 4, 结果表明, 风场引起的波在岛屿附近的波周期在 7 s 左右, 有的位置为 4 s 左右。

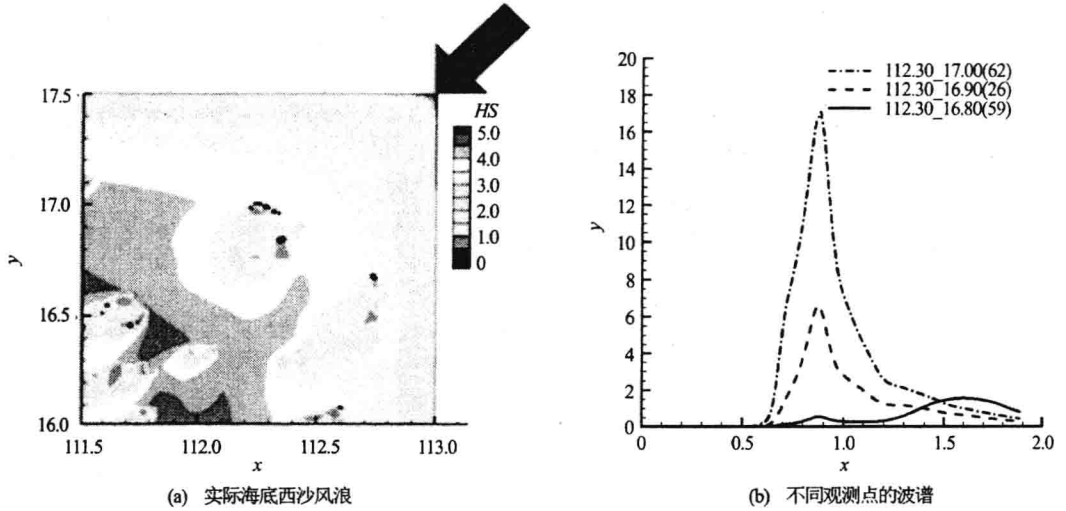


图 4 赵述岛附近的波高分布

3 非均匀海底条件和时空非均匀波浪分布下的浮体水弹性响应

根据线性结构动力学理论, 结构的总变形可以分解为若干主模态的线性叠加, 因此结构弹性变形诱导的辐射势可以表示为 $\phi_r(x, y, z, t)$, 其对应于结构的每一变形主模态, 那么总的速度势可以表示为:

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_l(x, y, z, t) + \phi_D(x, y, z, t) + \sum_{r=1}^m \phi_r(x, y, z, t)$$

其中, $\phi_l(x, y, z, t)$ 为波浪入射势; $\phi_D(x, y, z, t)$ 为波浪绕射势; m 为自由浮体的主模态数, 其中前六阶为刚体运动。

在微幅入射波和微幅运动假设前提下, 各速度势可以使用分离变量法将位置坐标和时间分离开, 其可以表示为:

$$\phi_l(x, y, z, t) = \phi_l(x, y, z)e^{i\omega t}$$

$$\phi_D(x, y, z, t) = \phi_D(x, y, z)e^{i\omega t}$$

$$\phi_r(x, y, z, t) = \phi_r(x, y, z)p_r(t)e^{i\omega t}$$

所有模态线性叠加后, 浮体任一点的位置矢量可以表示为:

$$\bar{u} = \sum_{r=1}^m p_r(t) \bar{u}_r = \bar{\Omega} + \sum_{r=7}^m p_r(t) \bar{u}_r$$

其中: $p_r(t)$ 为 r 阶主模态; $\bar{u}_r = \{u_r, v_r, w_r, \alpha_r, \beta_r, \gamma_r\}$ 为各阶广义位移; $\bar{\Omega} = \{u_0, v_0, w_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0\}$ 为广义刚体位移。

3.1 有限水深(非均匀海底)辐射势求解条件

在近岛礁附近, 海底从几米到几百米不等, 而且呈现不均匀性, 因此海底条件不能按照无限水深或有限水深条件处理, 需要按照法向不可穿透给定, 如下:

$$\begin{aligned} \text{[L]} \quad & \nabla^2 \phi_r(x, y, z) = 0 && \text{在流域内;} \\ \text{[F]} \quad & \frac{\partial \phi_r}{\partial z} - v \phi_r = 0 && \text{在 } z = 0 \text{ 自由面上;} \\ \text{[S]} \quad & \left. \frac{\partial \phi_r}{\partial n} \right|_{S_0} = [i\omega \bar{u}_r] \cdot \bar{n} && \text{在物面上, } \bar{n} \text{ 为物面法向;} \\ \text{[B]} \quad & \left. \frac{\partial \phi_r}{\partial n} \right|_{z=-h(x,y)} = 0 && \text{水底, } z = -h(x, y) \text{ 为池底形状;} \\ \text{[R]} \quad & \lim_{R \rightarrow -\infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_r}{\partial R} - ik \phi_r \right) = 0 && \text{远方辐射条件;} \end{aligned}$$

其中, $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3, yn_3 - zn_2, zn_1 - xn_3, xn_2 - yn_1)$ 为物面法向。

在使用格林函数法求解辐射势时, 我们合适地选取复杂 Green 函数来满足自由面条件、远方辐射条件, 对于无限水深, 还可以让选取的 Green 函数满足池底条件, 无限水深的辐射求解条件为:

$$\begin{aligned} \text{[L]} \quad & \nabla^2 \phi_r(x, y, z) = 0 && \text{在流域内;} \\ \text{[F]} \quad & \frac{\partial \phi_r}{\partial z} - v \phi_r = 0 && \text{在 } z = 0 \text{ 上;} \\ \text{[S]} \quad & \left. \frac{\partial \phi_r}{\partial n} \right|_{S_0} = n_r && \text{在物面上;} \\ \text{[B]} \quad & \lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla \phi_r = 0 && \text{水底;} \end{aligned}$$