



第二十一届全国水动力学研讨会暨
第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶
与海洋工程水动力学研讨会文集

朱德祥 周连第 刘 桦
程 林 陈建宏 杨显成

主编

第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届 全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海 洋工程水动力学研讨会文集

Proceedings of the 21st National Conference on Hydrodynamics and 8th
National Congress on Hydrodynamics and the Cross-Strait Conference
on Ship and Ocean Engineering Hydrodynamics

朱德祥 周连第 刘 桦 主编
程 林 陈建宏 杨显成

《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

山东大学

台湾海洋大学

台湾大学

主办

海洋出版社

2008年·北京

内 容 摘 要

本书是《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、中国造船工程学会和台湾海洋大学联合举办的第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会文集,共选收 130 余篇论文。主要反映水动力学基础;计算流体力学;船舶与海洋工程水动力学;水电与河流水动力学;海岸、环境与地球物理水动力学;工程流体力学;近代测试设备与技术等方面的新进展、新水平、新面貌,可供有关专业科研和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

第 21 届全国水动力学研讨会暨第 8 届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会文集/朱德祥等主编. —北京:海洋出版社,2008. 8

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7062 - 4

I. 第… II. 朱… III. ①水动力学 - 学术会议 - 文集
②船舶工程 - 学术会议 - 文集③海洋工程 - 学术会议 - 文集 IV. TV131.2 - 53 U66 - 53 P75 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099027 号

责任编辑:方 菁

责任印制:刘志恒

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

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:62

字数:1600 千字 定价:160.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

目 次

大会报告

海上风电场建设与海洋工程装备研发中若干水动力学关键技术问题.....	缪国平 朱仁传 程建生 等 (1)
出水空泡流动的一些研究进展.....	颜 开 王宝寿 (9)
换热设备中水垢的物相分析及与换热面的界面结合状态.....	程 林 (17)
簡介台灣海洋大學水下噪音暨流體動力研究狀況.....	柯永澤 (19)
流动与传热问题的高阶紧致差分逼近研究.....	田振夫 梁 贤 葛永斌 等 (28)
不可压流体中扰动源生成的波动.....	卢东强 (33)
海啸预警与海岸带减灾研究进展.....	刘 桦 赵 曦 王本龙 (41)
江苏沿岸海域海洋动力环境的计算分析.....	余锡平 汪 洋 (48)
微纳米尺度流场滑移-过渡流区流动和传热特性的研究	林建忠 包福兵 (57)

水 动 力 学 基 础

基于熵的油耗率相对增量理论模型的建立及分析	王 青 雷 丽 (64)
两种无界流动稳定性问题的计算.....	谢明亮 周怀春 张引弟 (69)
非线性波流相互作用问题的同伦近似解	徐 航 牛 照 汪 淳 等 (75)
原始变量定常 Navier-Stokes 的广义边界元方法.....	汪 淳 林志良 樊 涛 (82)
空间发展的湍流平板边界层的数值模拟.....	林传塔 吴 峰 朱祚金 (88)
截断圆柱绕射解析解中水线上速度势及其 Z 向偏导数的收敛性研究.....	耿宝磊 勾 莹 滕 斌 (93)
Lie 对称性与 KdV 孤立波计算中的非线性不稳定问题	张华彦 冉 政 (102)
锥柱组合形体出水水流场理论研究.....	易淑群 王宝寿 马 琳 (110)
高分子湍流减阻流的黏度分布研究.....	吴桂芬 李昌峰 黄东升 等 (117)
湍流 ESS 标度律和层次结构理论普适性研究.....	黄 鑫 傅 强 (123)
剪切流中红细胞的坦克履带式运动特性.....	宫兆新 鲁传敬 曹嘉怡 (131)
胸鳍模型划动运动的推进机制研究.....	胡文蓉 (136)
有限深分层流体中高阶内孤立波的演化方程.....	程友良 吴英杰 (144)

计算流体力学

- SPH 方法模拟复杂自由表面流动的研究 刘恩洲 张 健 陆利蓬 (151)
- 基于加权平均格式的二维溃坝模型 向小华 王船海 吴晓玲 (158)
- 拉格朗日、欧拉和任意拉格朗日-欧拉描述的有限元分析 ... 孙江龙 杨文玉 杨 侠 (164)
- Y 型加糙体绕流特性数值研究 朱代臣 王家生 朱勇辉 等 (170)
- 长江感潮河段径流与河口海岸动力作用机制的数值模拟... 张金善 孔 俊 章卫胜 (178)
- 流体偏心环空螺旋流动压力梯度的数值计算 王 健 修德艳 蔡 萌 (190)
- 无网格伽辽金法在波浪作用下海床动力响应问题中的应用 华蕾娜 余锡平 (196)
- 二维对流扩散方程随机游动解 孙秀丽 冯民权 郑邦民 (202)
- 多段翼型襟翼滑动非定常黏性流数值模拟 付艳丽 李孝伟 (208)
- 二维多圆柱涡激运动的数值模拟 万德成 (214)
- 均匀流中圆柱横向受迫振荡数值模拟 梁亮文 万德成 (220)
- 钝体势流绕流的有限元并行计算 王吉飞 万德成 (227)
- 建桥对钱塘江涌潮影响的数值分析 鲁海燕 潘存鸿 曾 剑 (234)
- 颅内动脉瘤病人局部血流动力学状态的数值模拟 王盛章 陈家亮 丁光宏 等 (240)
- Simulation of Lagrangian dispersion using a Lagrangian stochastic model and DNS in a turbulent channel flow Luo Jian-ping Qiu Xiang Lu Zhi-ming et al. (247)
- 仿生拍动翼流场的数值模拟研究 潘定一 邵雪明 邓 见 (253)
- 浅水流动底坡项处理的通量数值修正法 于守兵 (260)
- 快速多极子边界元方法求解大规模二维多圆柱绕流问题 ... 林志良 汪 淳 廖世俊 (265)
- 流体在内管带环槽环空流场的数值模拟 裴晓含 王 野 崔海清 等 (271)
- 几种 PTV 算法的比较研究 胡永亨 邵建斌 陈 刚 (277)
- 线性波作用下层流与紊流边界层的数值模拟 袁 容 林鹏智 (285)
- 交替分层法解决河口海岸三维 Z 坐标水流模式底边界拟和问题 包芸 (292)
- 系泊系统有限元模拟及分析 袁 梦 范 菊 缪国平等 (299)
- 基于高阶和高分辨率格式的自然空泡流数值模拟 郭建红 鲁传敬 陈 鑫 等 (308)
- 带自由液面的 RANS 方法比较 赵发明 陈京普 高成君 (315)
- CFD 在船舶工程中的实际运用 黄少锋 李百齐 陈京普 (323)
- 波物相互作用的三维时域数值模拟 朱海荣 朱仁传 缪国平 (333)
- 基于非结构网格的黏性流场大涡模拟 黄振宇 韦喜忠 洪方文 (341)
- 一种改进的 SPH 固壁边界处理方法 龚 凯 刘 桦 (347)
- 颈动脉分叉个体实例模型的数值模拟 王 青 王炜哲 费智敏 等 (353)
- 不可压缩 SPH 数学模型的并行求解 王本龙 D.C. Causon 刘 桦 (362)
- 应用移动粒子法模拟浮体于波浪中横摇运动之计算 郭真祥 简鸿斌 张春中 等 (366)

水动力学试验与测试技术

- 绕水翼云状空化流动结构的数值与实验研究 王国玉 张博 黄彪等 (373)
- 提高平流式沉沙池沉沙效率的模型试验研究 朱炳泉 黄国富 (385)
- 微管中去离子水流动的减阻实验研究 宋付权 (392)
- 卡基瓦水电站泄洪洞消力池体型优化试验研究 李鹏 戴光清 杨庆 (398)
- 高速突扩流空化初生及比尺效应试验研究 杨庆 张建民 戴光清等 (408)
- 循环水槽中分层流模拟试验与CFD研究 陈作钢 马宁 桥诘泰久等 (417)
- 附加装置对箱式货车气动性能影响的试验研究与数值模拟
..... 李莉 马永坤 李永卫等 (430)
- 基于NS方程的数值波浪水池构建 吴乘胜 朱德祥 顾民 (438)
- 螺旋桨尾流场PIV与LDV对比测试研究 张国平 陆林章 李广年等 (449)
- 拖曳水池随车式PIV系统测量不确定度分析研究 张军 张志荣 朱建良等 (456)
- 明流泄洪洞中掺气水流断面平均流速的试验研究 黄小琴 刘善均 汤君等 (464)
- 湍流边界层标度律和间隙性的实验研究 张珂 李万平 (469)
- 回转体尾流非定常特性试验研究 姚惠之 田于逵 夏贤等 (475)
- 长渠道桥墩群阻水及补救措施物理模型试验研究.....
..... 吉红香 邱静 黄本胜等 (485)
- 波浪在有植物滩地上的传播与变形试验研究 吉红香 黄本胜 邱秀云 (492)
- 4250TEU集装箱船舵空泡试验研究 陈建挺 虞赉 胡平 (499)
- 规则床面形态对水流结构影响试验研究 王宪业 杨青远 卢伟真等 (504)
- 自由表面附近小攻角翼型流场的PIV实验研究 代钦 赵莉莉 (510)
- 侧风环境下湿式冷却塔性能参数变化规律的试验研究
..... 高明 孙奉仲 史月涛等 (521)
- 具环型聚光镜之高解析度微质点影像测速仪 黄祖虹 沈志忠 赵胜裕 (528)
- 船舶水动力性能虚拟测试系统的设想 范余明 缪国平 杨素军等 (534)

工业流体力学

- 砂岩油藏大孔道形成的随机模拟 胡书勇 张烈辉 姚恒申 (543)
- 幂律流体偏心环空螺旋流的内管壁受力分析 崔海清 樊宇 裴晓含等 (549)
- 瓦棱状多杯等流型气锚的脱气效率分析 王研 傅程 崔海清等 (555)
- 低渗透油田提捞采油合理提捞周期的确定 殷代印 郭永贵 黄伟明 (562)
- 火电厂冷却水系统水柱分离的预测 王松岭 吴正人 王震 (569)
- 油气水砂多相分离的新方法 张军 郑之初 郭军等 (574)
- T型多分岔管路中的油水两相流动实验研究 王立洋 郭军 张军等 (582)

混流式水轮机转轮叶片的延伸	张礼达 廉玲军 任腊春 (589)
泥浆帽控制压力钻井水力模型研究	郝希宁 汪志明 (594)
用多孔介质模型对火电厂空冷系统进行整体数值模拟的研究	蒋 燕 李永光 丁永航 等 (601)
气-粉两相流中浓度测量元件的阻力特性模拟	范明秀 田茂诚 张冠敏 (608)
聚合物水溶液在带有喷嘴的圆柱腔室中流动的数值模拟	崔海清 孙玉豹 裴晓含 等 (615)
单向高速路双车道交通流扰动数值模拟	夏玉显 陈伯文 刘 章 等 (621)
右转车流对城市道路交叉口交通的影响	盘佳秀 康三军 梁玉娟 等 (627)
公交车站及停靠时间对混合交通流的影响	梁玉娟 盘佳秀 薛 郁 (633)
信息对人群疏散动力学行为的影响	田欢欢 曾广湘 薛 郁 (639)
高速铁路火车流场分析	王伟辉 辛敬业 (645)

船舶与海洋工程水动力学

带尾翼高速航行体的水动力学布局结构设计	易文俊 熊天红 王中原 (651)
海洋平台圆柱桩脚周围的局部流场模拟研究	朱红钧 陈小榆 王 怡 (657)
赛艇黏性流场的数值模拟	高玉玲 陈克强 (664)
拖式吊舱推进器直航状态下水动力性能数值计算	郭春雨 杨晨俊 马 宁 (670)
波浪作用下水平柱体水动力系数研究	李 勇 林 緬 (678)
悬跨海管外部流场的数值模拟	李 磊 林 緬 (684)
吊舱推进器水动力性能研究	闯振菊 黄 胜 胡 健 (689)
带前置定子导管桨梢隙流动数值分析	刘登成 张志荣 黄国富 等 (695)
鱼类游动的水动力学研究综述	曹庆明 (704)
垂荡板受迫振动水动力特性数值模拟研究	吴维武 缪泉明 匡晓峰等 (713)
Spar 平台螺旋侧板绕流场的 CFD 分析	杨 烁 缪泉明 匡晓峰 (719)
桨叶导边粗糙度对空泡和脉动压力影响	陆 芳 董郑庆 黄红波等 (726)
推流器选型技术研究	曾志波 洪方文 熊紫英 等 (731)
潜艇绕流与雷诺数对流场影响的数值模拟研究	张 楠 沈泓萃 姚惠之 等 (738)
超空泡航行体作受迫纵荡运动的数值模拟	潘展程 鲁传敬 李 杰 等 (749)
半潜平台动力定位系统功率消耗时域模拟	周 利 王 磊 陈 恒 (756)
基于 CFD 的船用离心泵水动力振动噪声源分析	黄国富 常 煜 张海民 (765)
螺旋桨扰动流场的特性分析	胡 健 马 骋 钱正芳 等 (775)
自由液面附近的二维水翼空化流场分析	陈建宏 吴炳承 (781)
The propulsion performance of a two phase waterjet propulsion system	TSAI Jing-fa (790)
Investigation on seakeeping performance of the high-speed trimaran	CHOU S K WU H T WU C H et al. (796)

系泊结构物在波浪中的响应分析 范菊 袁梦 朱仁传等 (803)
以计算流体力学方法解析潜艇稳态斜航之流体动力系数 ... 郭真祥 陈彦均 杨名梧 (811)
梢部驱动推进器水动力性能 CFD 预报 胡芳琳 张志荣 辛公正等 (817)

海岸、环境与地球物理流体力学

台湾海峡温跃层季节变化的数值研究 郑沛楠 吴德星 陈学恩等 (825)
导流板的影响因子的研究 范术芳 冯民权 郑邦民 (831)
填海工程对半封闭海湾水动力环境的影响分析 何杰 辛文杰 (838)
日本海大和海盆内上层特征水浅析 宋翔洲 林霄沛 张爽等 (844)
基于涡相关法和惯性耗散法的海面拖曳系数比较 张政 赵栋梁 (851)
不同尺度海底沙波运移动力学模型研究 林 緬 李 勇 邹舒冕 (859)
长江口河口段重大工程的建设对水动力的影响 黄 静 顾 杰 韩 冰 (865)
复合折射—绕射模型在深水航道对波浪传播影响规律研究中的应用
..... 庞红犁 安哲 邵兰竹 (876)
海岸带下垫面特性对海陆风环流的影响 耿晓婧 余锡平 (882)
圆弧型浮式多孔介质防波堤防浪效果的解析研究 程建生 缪国平 王景全等 (889)

水利水电与河流水动力学

河道糙率反问题在实时洪水预报中的应用 吴晓玲 王船海 (902)
广州港南沙港区深水航道潮流数学模型研究 李孟国 李文丹 (908)
上海市临港新城滴水湖水系水利调度模式研究 尹海龙 徐祖信 危 忠等 (914)
用关联矩阵研究天津港的水交换 袁德奎 吕迎雪 孙 健等 (922)
工业污染源对区域地下水的影响研究 严瑞平 张新华 李能川等 (928)
河流交汇分离区特性试验及数值模拟研究 冯镜洁 黄 宇 王协康等 (934)
排水管网明满交替非恒定流数学模型 耿艳芬 (940)
河道非恒定流的数值模拟研究 龙吉平 张新华 李能川等 (948)
新型 X 宽尾墩—台阶溢流坝流场的三维数值模拟 许玲君 李国栋 陈 刚等 (954)
斜坡弯道的水面形状研究 童思陈 许光祥 钟 亮 (961)
立面溃坝水气两相流计算 汪迎春 汪德耀 (968)
虎门—鳧洲射流体系水动力结构研究 许炜铭 包 芸 (973)
溃坝流量过程数值研究 王 鑫 岳志远 曹志先 (980)
龙口垂向二维流场数值模拟 赵庚润 吴 卫 刘 桦 (986)
复合模型在惠州电厂冷却水工程研究中的应用 江 洧 林佑金 陆耀辉 (992)

计算流体力学 (续)

蒙特卡罗法的改进: 一种新型的快速算法 周 泉 陈植武 詹杰民 (1000)

工业流体力学 (续)

强化沸腾传热表面的研究进展 赵红霞 韩吉田 徐永田 等 (1009)

船舶与海洋工程水动力学 (续)

Propulsion Calculation of Container Ship Equipped with Triangular Fin near Stern
..... CHAU Shiu-wu, FANG Jih-hong, CHEN Po-fan et al. (1017)

海上风电场建设与海洋工程装备研发中 若干水动力学关键技术问题

缪国平¹，朱仁传¹，程建生²，王景全²

(¹上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200030，

²解放军理工大学工程兵工程学院，南京 210007)

摘要：结合我们近年来在海洋资源开发相关的水动力学方面开展的研究工作和对国内外研究进展的认识，结合海上风电设备研制和风电场的建设，就海洋工程装备研发中水动力学关键技术及其可能的发展方向作一简要的评述，以期引起有关方面对海洋工程装备研发中的关键技术研究的重视。

关键词：海上风电；海洋工程；水动力学

1 落实科学发展观，提升海上风电场和海洋工程装备设计研发能力， 推进我国海洋资源综合开发的全面发展

当前，全球所消耗的油气中约有 30%以上来自海底油田，未来人们对海洋油气资源的依赖程度越来越高。我国的能源形势总体来说十分严峻，陆地和近海的石油资源有限，石油战略储备不足。尽管我国南海海域（主要在深海）有丰富的油气和碳氢水化物资源。石油地质储量约在 230 亿-300 亿 t 之间，但开发的难度相当大。日前我国油气资源开发仍主要集中在 500m 水深以下的近海海域；尚缺乏有效的深海油气开发能力。因此，优化能源结构，提高能源效率，开发可再生能源，已成为我国贯彻落实科学发展观、实施能源可持续发展战略的重要内容。

风能作为一种清洁的可再生能源，具有相当广阔的应用前景。经过几十年的研发，陆地风能开发已经具备工业价值。近年来，海上风能开发也取得了令人瞩目的进展。

海上风电有其独特的优势。海上风速、风向相对稳定，风切变和湍流度较小，总体风况优于陆地。将风电场建在海上，可利用海上得天独厚的广阔空间和风力资源，实现规模化效益，降低风力发电的成本。据有关估计，在年均风速 9.5m/s 区域的装机容量为 10 万 kW 的海上风电场每年能生产 3.6 亿 kWh 的电力。随着科技进步，可以预期海上风电产能将进一步增加。

海上风电有其特殊的技术难点。海上风能开发面临的环境条件十分复杂，我们必须要考虑风、浪、流等主要气象、水文要素对风电机设施的作用和载荷，对浮基风电机组还必须考虑其运动特性和定位要求。海床地质构造对固基风电机组和海底电缆网络铺设是十分重要的，包括基床冲刷、淘空等长期效应。冰区海域还应充分考虑海冰的因素。海上施工周期长、工艺复杂，对作业船舶的载荷和运动特性控制要求高。系统长期稳定运行中维护保养带来一系列的技术问题。

目前海上风电场大都位于水深 20m 左右的近海海域，采用固基的着底式风电机组。今后将逐步向水深 100m 甚至几百米的海域发展，浮基海上风电场将是一种经济性和实用性兼顾的重要发展方向。

海上风电设备研制和风电场的建设可以说是海洋工程装备设计研发的一个重要领域，或者说是海洋工程装备的重要拓展领域。从保证海上风电塔（固基或浮基）、锚碇系统有效运行的观点而言，除了其本身的特殊要求外，与传统的海洋工程装备（如各类海洋石油平台）有相当多的共性关键技术问题。结合我们近年来在海洋资源开发相关的水动力学方面开展的研究工作和对国内外研究进展的认识，结合海上风电设备研制和风电场的建设，就海洋工程装备研发中水动力学关键技术及其可能的发展方向作一简要的评述，以期引起有关方面对海洋工程装备研发中的关键技术研究的重视。

2 非线性水动力学关键技术问题研究是海洋资源综合开发中重要的共性研究领域

海上风电设施、海洋平台必须具备进入和驻定于特定海域，在恶劣的海洋环境下长期有效地稳定作业和运行的能力。水动力学问题的研究是近海、深海和超深海资源开发中的一个重要的前提性的共性关键技术领域。在海洋环境条件中，最重要的当首推海洋波浪，即水波；风、流等主要水文要素也须充分考虑。归纳起来，大致上有下列四大类问题。

2.1 非线性水波演化及其与其他环境条件的耦合影响

水波动力学研究的是以水波为中心的海洋环境条件本身的机理、理论与数值分析手段和实验模拟技术。理论上讲，水波动力学中边界条件和物理量间的关系是非线性的主要来源；尤其在自由面上，不仅自由面条件是非线性的，而且满足条件的自由面边界形状也是事先未知的。“一波才动万波随”，可以毫不夸张地说，论研究的难度和表现的丰富多彩，水波动力学未必亚于湍流。

在迄今为止的海洋工程实践中，应用最为普遍和直接的还是基于永形波的波浪理论。大多数确定性的深水波理论本质上是通过速度势或流函数（仅对二维平面波）求解建立起来

的,其主要差别在于如何处理自由面条件和处理中引进的基本假设。风、浪、流等环境条件之间的非线性耦合导致的水波弱非线性演化,包括水波调制、边带不稳定性,一直是水波动力学的传统研究领域^[1,2]。

近年来,CFD在自由面追踪方面出现了很多技术,如VOF法、Level Set方法、SPH方法等等,为水波非线性演化的研究注入了新的活力^[3]。

2.2 海洋环境条件(风、浪、流、内波)作用下海上风电场结构物运动响应及受力分析

依水深不同,海上风电机组的基础大致上可分为固基和浮基两类。固基有重力式结构和支柱式结构两种。浮基则由浮体及锚泊系统构成。从力学或结构特性上看,与相应的海洋石油平台是类似的。准确地预报结构物在海洋环境条件(风、浪、流、内波)联合作用下的运动响应及受力分析研究则可为海上风电设施等海洋资源开发装备设计提供直接的指导,具有重要的工程实际意义。

与波浪特征长度相比,除SPAR平台和支柱式固基外,大部分海洋平台都可归类为大尺度海洋结构物。与小尺度管柱(缆索、立管)情况不同,大尺度海洋结构物的存在和运动对波流场的影响(即绕射和辐射)不可忽略,然而,一般而言,除局部区域外,流体的黏性影响倒是可以略去的。

在海洋工程崛起之际,水波与大物体相互作用的势流理论和计算方法在船舶工程中已经有了成功的发展,包括频域线性理论范畴中的切片理论(或各种细长体理论)、有速或零速三维源汇分布理论等等^[4]。20世纪90年代,在弱非线性假定下,精确到波陡的二阶量,频域理论已经拓展来研究船舶和海洋结构物所受的二阶定常力和二阶低频慢漂力,应该说,这方面的理论问题当时已经基本上得到解决^[5];近年来,由于浮式深海平台系统的自振频率越来越低,低频慢漂力引起系统共振的危险性也越来越大。二阶低频慢漂力的准确估计又重新受到关注。频域分析法通常只适用于稳态问题;对瞬态或强非线性问题,必须发展直接时域分析法。时域分析法有很大的自由度,原则上可处理全非线性和物体任意运动的问题。按问题的性质和要求,时域法可以有不同层次的处理方法,如时域线性理论、物体大幅度运动理论和全非线性理论等等。这些方法目前正在发展之中^[6]。

随着计算机速度的提高和容量的不断扩充,用CFD技术直接求解黏性流场中水波与结构物的相互作用也日益受到重视,特别在甲板上浪、船首砰击、液舱晃荡等强非线性现象的模拟上已经取得了可喜的进展,但离工程要求的实用化和反应的快速化上仍然有很大的距离^[7]。在深海域,密度分层海洋可以在外界因素的诱导下产生内波。工程界已经有内波造成海上直接经济损失的报道。内波水动力学问题无论是机理上还是分析手段上,人们的认识还远不够充分,都有待于深入的研究^[8]。

当今,非线性水波动力学理论研究及其在工程中的应用已经成为国内外学术界和工程界

极为重视的前沿研究领域之一。可以预料，在未来的若干年中，以直接时域法和 CFD 技术研究深海结构物在风、浪、流和内波作用下的受力和运动特性，包括极端海况下海洋结构物运动响应预报、强非线性现象、大型海洋结构物水弹性分析，将会受到国际学术界和工程界的极大重视。

2.3 海上风电场建设中水动力学关键技术问题

2.3.1 海上施工作业的水动力学关键技术

海洋石油平台海上施工建造技术对海上风电场建设可提供借鉴。按风电机组平台形式不同，要寻求最为可靠、方便、安全和经济的施工方案。

按平台构型，海上施工除传统的吊装工艺外，大多采用半潜式安装(Semi-Submersible Installation)与漂浮式安装(Float-Over Installation)技术。半潜式安装：基座定位安置后，用半潜驳将上层设施一次浮运就位位于基座，然后半潜驳撤离安装位。漂浮式安装：上层设施直接浮式拖运，通过压载调整浮态，使之就位位于基座。

海上风电场施工周期长，定位要求高，工艺复杂，对作业船舶的载荷和运动特性控制要求高（系统长期稳定运行中维护保养有类似的技术问题）。这中间的关键技术问题大致有：风浪中施工船舶的定位、风浪中作业时施工船舶的运动特性与控制、风浪中多体的水动力耦合和干扰、定位缆索受力的确定、特殊作业工况（如下水、扶正、吊装、浮式就位等）下的流体动力特性与工艺流程确定等等。

2.3.2 海上风电设施部件或整体海上驳运和拖运的水动力学关键技术

无论是固基还是浮基海上风电设施，都有海上运输问题。大致有两种选择：（1）部件驳运或拖运至设置现场，就位组装；（2）设施整体（或基础结构整体）驳运或拖运至设置现场，就位组装。海上驳运和拖运都有很多水动力学关键技术需要解决，包括拖轮选型与拖运时拖轮布置、多体的水动力耦合和干扰、风浪中的稳性与操纵性、风浪中拖轮（队）与拖体的运动特性与控制、风浪中拖体的航行稳定性、拖缆受力的确定、承载物体受力与固定、甲板上浪及其冲击载荷等重要方面。

2.3.3 海上施工船舶的设计建造

离岸风机的海上设置和安装远比陆地困难。浮吊船的起吊功率和提升高度应具备提升风机主要部件（塔架、机舱、叶轮等）的能力，此外还必须保证在限定的海况下起吊和安装作业时有足够的稳性和抗风浪能力，运动性能符合作业要求。现有的浮吊船大多不是专门为海上风电场的风机安装而设计制造的，外海作业有一定的难度。

对于大型海上风电场，为控制建设周期和成本，设计和建造专用安装船来完成建设任务

应该说是合适的。对风电场的长期运行中的维护也能提供必要的手段。例如, 某一自升式安装船: 集运输、起重、安装功能于一体。4 组吊舱推进器, 最大航速 10.5kn。6 根液压桩腿可将船体提升 20 多米作为海上工作平台; 甲板面可装载 100 只集装箱和风力发电设备; 主吊额定负荷 300t, 副吊 50t。

2.3.4 新型海上风机的研发的关键技术

除了传统的水平轴风机外, 近期一种可能的选择是所谓的垂直轴风机。无论是哪种构型, 我们追求的应该是高效率风电机的整体构型, 有最佳叶片、翼型的流体动力学设计和回转过程中叶片方向的最佳控制。

2.3.5 超大型浮式海洋结构物作为海上风电场浮基的相关关键技术^[9]

超大型浮式海洋结构以模块连接构成, 总尺度以千米计 (例如: $3000 \times 1500\text{m}$)。它可以独立设置, 也可以以岛屿为依托设置。用超大型浮式海洋结构可设置变电站与控制设施、技术管理中心、维修中心、航空港、船队基地、生活支撑设施等相关设施和基地; 甚至可建设旅游设施。其中的关键技术问题有: 模块与连接装置设计、超大型浮式海洋结构风浪中的受力与运动特性 (多体的水动力耦合和干扰)、超大型浮式海洋结构的水弹性问题、系泊系统构型与受力特性、海上拼装工艺与拼装过程中的受力与运动特性、防波堤设置及其本身的流体动力问题等等。

2.4 海洋系泊系统和电缆、立管系统等挠性部件水动力学问题

系泊系统是海上浮式结构整体设计中不能忽视的重要环节。电缆、立管系统也是海洋石油开采和风电场建设中的重要系统之一。它们的共同特点是极度细长、富有挠性, 属于小尺度管柱。流体动力载荷中必须计入流体的黏性影响, 包括柱后涡泄出。对波浪场的影响可以忽略。通常认为系泊缆索不能传递弯矩和剪力, 而立管则必须考虑弯矩和剪力。从一般意义上建模, 两者的处理方式事实上是共通的。

系泊结构物在风、浪、流等环境条件的作用下可作顺应式的运动。准确预估结构的运动响应和系统的动力特性对海洋工程和海上风电设施系泊系统的合理设计和系统的正常运行有着重要的意义^[10]。

海洋环境条件 (包括风、浪、流、密度分层海洋中的内波) 严酷, 深海系泊的需求使得系泊缆的长度、尺寸、重量以及缆索 (包括海洋立管) 内部的负荷急剧增加; 以海流影响为例, 流速剖面沿水深方向的变化、流导致的缆索和海洋立管的涡激振动都可以对系统产生不利的影响; 作为一种复杂的工作系统, 海洋浮式结构物与系泊系统、立管的耦合影响 (包括环境条件的耦合影响、系统刚度、低频响应载荷与运动阻尼的影响等等) 对设计和研究提出了巨大的挑战。寻求一种高效、安全、经济的深海平台和系泊系统成了海洋工程界和学术界

一个重大课题。在相对浅的水域，大多采用以普通链/钢缆为锚泊线、呈悬链线状辐射分布的伸展系泊系统（Spread mooring system），主要靠悬链线的重量提供回复力。钢缆本身的自重也导致了锚泊线内部较高的张力水平，使得悬链线状的伸展系泊系统不能适应深海系泊。张紧式系泊系统（Taut Mooring System, TMS）是新一代的深海系泊系统之一。它以轻质的合成纤维（例如聚酯纤维）绳索作为系泊缆索，从被系浮体呈辐射状地以基本张紧的形式斜拉固定于海底锚碇装置上，依靠绳缆索的弹性特性提供浮体的回复力。合成纤维缆索比重与水相近，在水中可有效地降低缆索的内部应力水平。相比钢缆有非常低的轴向刚度和更好的柔性，强度、刚度和弹性也不同。合成纤维缆绳的变形与作用的张力呈现时间变化的特性。因而张紧式轻质合成缆绳与普通链/钢缆悬链线系泊系统有不同的动力特性。采用轻质的合成纤维缆索的深海张紧式系泊系统（TMS）国际上相应的研究正处于起步阶段，工作并不系统，国内尚未开展研究；对深海系泊系统动力特性机理上的认识也还是不充分的，还不足以对工程实践有普遍的指导作用。

深海系泊系统在实验验证上也存在需要克服的技术问题。模型实验无法模拟千米的水深，也就无法模拟几千米的张紧轻质缆绳。目前国内外都是采用混合模型实验的方法。主要有两种：被动式和主动式。前者运用截断的锚系模型实验和与其一致的完全耦合的数值模型结果比较，将符合良好的数值模型外推到深水情况。后者由计算机控制的主动式激励器（active actuator）提供模型实验时的深水锚系的动力。实验结果可直接与深水数值模拟结果进行比较。但目前这两种技术均需进一步发展。

系统性能好坏取决于海洋环境、浮体和缆索所受的环境作用力、缆索的组件成分和动力特性、布置形式、水深等多种复杂因素^[1]。对海上风电设施，由于这些因素都有很大的变化，因而，必须建立和开发合适的数学模型和分析技术，从机理上深入地研究海洋系泊系统的动力特性，并能真实地预报出它们的系泊性能，从而进一步指导工程设计和施工。

3 统筹规划，深化对海上风电场和海洋工程装备共性水动力学关键技术问题的研究

海上风电场开发的总体目标应该是：探讨并提出具有前沿性和先进性的海上风电场平台构型；研究、建立和开发海上风电场建设中相关系统运动和受力特性的分析方法、数理模型和计算技术，完善海洋环境条件与海上风电设施相互作用的理论；全面考察海洋环境条件、固基与浮基结构物及系泊系统相关参数对海上风电设施运输、定位、施工、运行和动力稳定性的影响，探讨浮基海洋结构物系泊系统有效设计准则，为包括风电在内的海洋资源综合开发、深远海水域重大工程的规划设计和深远海海军基地建设提供技术指导。

具体来说,或许应该:(1)借鉴国际上近期研发的 Spar 平台、半潜式平台、深海 FPSO 系统等新型海洋平台,探讨并提出具有前沿性和先进性的新的适应海上风电场建设的平台构型。(2)对海上风电场建设与海洋工程装备研发中的水动力学关键技术问题开展深化研究,包括海洋环境条件演化;海洋环境条件(风、浪、流、内波)作用下结构物运动响应及受力分析;海上风电场的建设中的特殊水动力学技术问题(含海上运输、定位、施工、运行、动力稳定性等关键技术)。(3)开展新型海上风机的研发,对其流体动力特性和关键技术进行深化研究。(4)探讨并提出超大型浮式海洋结构物作为海上风电场浮基的实施方案,对相关关键技术进行梳理和研究。(5)进一步探讨浮基海洋结构物系泊系统有效设计准则。提出和开发具有自主知识产权的浮基风电设施系泊系统运动和受力特性计算的数值方法及相应的计算软件。(6)研究和开发混合模型试验技术;使理论和实验的验证具有可行性,以验证数值模型精度和适用范围,深入研究和探讨浮基海洋结构物系泊系统的运动和受力特性。

4 结束语

能源问题是我国面临的迫切的战略问题。我们必须从国际竞争的紧迫性、民族生存的严峻性、国家战略的全局性、经济发展的持续性、技术层面的挑战性、学术层面的前沿性的高度来认识风电开发的重要性。风电场建设及海洋工程装备研发涉及的学科面和技术领域非常广泛。在相关工程装备共性水动力学关键技术研究中,论述所涉及的领域只是整个开发技术中的一小部分,然而海上风能开发利用的前提,是不可忽视的关键技术之一,符合国家中长期科学和技术发展规划。

参考文献

- 1 梅强中.水波动力学.北京:科学出版社,1984.
- 2 刘应中, 缪国平. Nonlinear water waves and their related problems. Advances in Science of China: Vol 2, 北京: 科学出版社, 1990.
- 3 刘儒勋, 舒其望. 计算流体力学的若干新方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- 4 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- 5 缪国平, 刘应中. 船舶与海洋工程中的二阶波浪力理论. 船舶工程, 1993,4: 15-26.
- 6 缪国平, 刘应中. 水波及其与结构物的相互作用——新时期海洋高科技中的水波动力学问题之一. 水动力学研究与进展: A 辑, 2000, 15 (2): 156-162.

- 7 朱仁传, 缪国平, 向红贵, 等. 数值水池及其在船舶与海洋工程中的应用. 上海造船, 2007 (4): 21-23.
- 8 徐肇廷. 内波动力学. 北京: 科学出版社, 1999.
- 9 缪国平, 刘应中. 征服海洋之梦——超大型浮式海洋结构物. 自然杂志, 1996 (1): 26-30.
- 10 缪国平, 朱仁传. 深海工程装备研发中若干共性水动力学问题. 上海造船, 2007 (2): 1-4.
- 11 缪国平. 挠性部件力学导论. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.

Some key technological problems in hydrodynamics for the construction of offshore wind power plants and the developments of ocean engineering equipments

MIAO Guo-ping¹, ZHU Ren-chuan¹, CHEN Jian-sheng², WANG Jing-quan²

(¹School of NAOCE, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030,

²Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Science and Technology, Nanjing 210007)

Abstract: A brief state-of-art review is given on some key technological problems and their developing trends in hydrodynamics for the construction of offshore wind power plants and the developments of ocean engineering equipments, based on the survey on the recent research progress over the world and our own research activities in the specified field. The present review is aimed to arouse attentions to the investigation and development of the technology in the offshore wind power aspect.

Key words: offshore wind power; ocean engineering; hydrodynamics