

# 第十届全国水动力学 学术会议文集

主 办

《水动力学研究与进展》编委会

中 国 力 学 学 会  
山 东 工 业 大 学

主 编

周连第 邵维文 陆 煜

海洋出版社

ISBN 7-302-74198-4



9 787302 741983 >

# 第十届全国水动力学 学术会议文集

主 办

《水动力学研究与进展》编委会  
中 国 力 学 学 会  
山 东 工 业 大 学

主 编

周连第 邵维文 陆 煜

海洋出版社  
1996 年 · 北京

## 内容简介

本书是《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、山东工业大学联合主办的第十届全国水动力学学术会议的论文集,选收论文共 115 篇,主要反映船舶与海洋工程水动力学、水工水力学、工业与环境流体力学、计算流体力学、现代测试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

第十届全国水动力学学术会议文集/周连第 邵维文 陆煜主编

北京: 海洋出版社 1996. 9

ISBN 7-5027-4198-4/P·383

I. 第… II. ①周…②邵…③陆… III. 水动力学—学术会议—中国—文集

### 第十届全国水动力学学术会议文集

主编: 周连第 邵维文 陆煜

海洋出版社 出版发行

(100860 北京市复兴门外大街 1 号)

中船印刷厂印刷

1996 年 9 月第 1 版 1996 年 9 月上海第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 42

字数: 900 千字 印数: 0—350 册

定价: 60 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

## 前 言

为了促进水动力学跨学科交叉学术交流,为广大教学和科研设计人员提供发表最新研究成果和交换研究信息的机会,《水动力学研究与进展》编委会等单位先后已在无锡、广州、青岛、郑州、西安、成都、秦皇岛、黄山、大连召开了全国水动力学研讨会,根据广大水动力学工作者的建议,从1996年起,全国水动力学研讨会更名为全国水动力学学术会议。本《文集》是1996年9月在济南市召开的第十届全国水动力学学术会议的论文集,共收编学术论文115篇,内容涉及:(1)水工水力学;(2)船舶与海洋工程水动力学;(3)理论与计算流体力学;(4)近代测试技术;(5)工业流体力学;(6)海洋与大气动力学;(7)传热、传质、环境;(8)水动力学基础研究;(9)其它与水动力学有关的边缘问题。这说明近年来我国水动力学队伍已有极大的发展,学术水平也有了很大的提高。它已在我国的经济和国防建设中做出了重要的贡献。在水动力学领域,每年都有大量具有一定实际意义和学术价值的科研成果问世,这是值得庆贺的。

值此机会谨向关心和支持第十届全国水动力学学术会议的各单位、个人和论文作者表示衷心感谢!

祝第十届全国水动力学学术会议圆满成功!

编者

1996年7月

# 目 录

|                             |                  |
|-----------------------------|------------------|
| 近岸波、流、泥沙和海岸形态动力学的研究发展       | 陶建华(1)           |
| 旋涡与行进表面水波相互作用研究             | 王琳琳 马晖扬(8)       |
| 移动性扰动生成向上游前进孤立波的数值研究        | 徐银梓 卞维林(14)      |
| 海洋波浪资源信息与分析系统的研制与应用         | 卢 苇(20)          |
| 三维移动脉动源兴波速度势数值计算方法改进        | 王少新 黄鼎良(27)      |
| 潜艇运动的重力内波尾迹分析               | 马晖扬(32)          |
| 稳态船舶兴波势问题边界元分析方法            | 臧跃龙 嵇 醒(38)      |
| 珠江三角洲快速客船行波对岸坡作用观测分析        | 谢凌峰 程 健(46)      |
| 粘性不可压缩圆柱绕流的数值模拟             | 林长圣 郭木香 杨桂芝(52)  |
| 不可压缩粘性流动的数值方法及其应用           | 朱 斌 徐星仲 王红苗等(58) |
| 船舶周围粘性流场计算                  | 许 晶 周连第 赵 峰(66)  |
| 船尾粘流场的数值模拟与试验验证             | 周连第 赵 峰 高秋新等(72) |
| 复合 Weis-Fogh 振动机构流体动力       | 章社生 吴秀恒 王献孚(77)  |
| 广义浅水强非线性方程组的推导              | 林建国 许维德 陶尧森(80)  |
| 分区法、块迭代与串、平行计算              | 任安禄 傅汉章(85)      |
| 常用奇点分布单元在无界域中的诱导速度势和诱导速度    | 贺五洲 曾 婷(91)      |
| 各向异性 K- $\epsilon$ 湍流模型及其应用 | 朱广圣 张月林 赵 刚(97)  |
| 特征理论求解对流扩散问题的新探索            | 茅泽育(103)         |
| 总波速不变原理的提出及流体不变论的创立         | 廖铭声(109)         |
| 关于曼宁粗糙系数的研究与思考              | 王 英 孙良刚(118)     |
| 局部摩阻相邻影响的研究与应用              | 毛世民(123)         |
| 二维平行壁面剪切流动一种非线性转捩理论         | 杨 立 杜先之(130)     |
| 对海河、黄河治理规划的意见               | 彭瑞善(138)         |
| 整体重力坝在库水作用下抗震性能研究           | 吴寿荣 俞亚南(143)     |
| 构皮滩高拱坝表孔体型布置研究              | 陈 建(151)         |
| 低 Froude 数 T 型墩消力池体形设计探讨    | 苗隆德 徐祥利(156)     |
| 三门峡水库汛期发电控制条件的研究            | 梁国亭 钱意颖 曲少军(160) |
| 铁路桥渡洪水完善风险分析                | 胡敏良(166)         |

|                             |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| 从 1982 年型洪水看淮河中游退堤效益·····   | 邵东超 陈先朴 梁 斌(174)  |
| 淮河干流中游上段整治后百年一遇洪水演进研究·····  | 梁 斌 陈先朴 邵东超等(180) |
| 斜槽排洪的试验研究·····              | 宋 毅 崔 莉(186)      |
| 空间水跃消能研究·····               | 吴建平 高双聚(192)      |
| 底流水跃消能研究应用与发展·····          | 韩继斌(197)          |
| 泄水工程戽流消能研究与应用的发展·····       | 全宝芬(203)          |
| 平底闸水力计算与消能研究·····           | 陈红霞(209)          |
| 构皮滩水电站表中孔水舌碰撞消能·····        | 徐汉珍(215)          |
| 雪龙滩水电站消能问题的试验研究·····        | 苗隆德 江 锋 徐祥利(221)  |
| 棉花滩水电站消能防冲试验研究·····         | 吴福生 陈惠玲(226)      |
| 皂市水利枢纽的消能防冲问题·····          | 杨文俊 陈 俊 周明健(232)  |
| 三门峡水库控制运用以来潼关河床冲淤变化的研究····· | 曲少军 钱意颖 梁国亭(240)  |
| 丁坝防冲促淤试验研究·····             | 伍冬领 林炳尧 陈 武等(246) |
| 冲积河流平面二维非恒定流全沙数学模型研究·····   | 刘开平 陈国祥(252)      |
| 洪泽湖混合流数值模拟·····             | 姜加尧 黄 群(259)      |
| 坝体缺口泄流的试验研究·····            | 吴文平 徐天有 刘发权(266)  |
| 滩地树丛对复式河道过流能力的影响·····       | 李克锋 李 嘉 邓 云等(270) |
| 曲线形布置溢流堰过流能力的研究·····        | 韩 瑜 李德惠 李松德等(276) |
| 溢流坝下游导水建筑物对流态的影响·····       | 汪 霞(282)          |
| 减速流绕平板流动的研究·····            | 罗才茂 张国莉(287)      |
| 接触线问题的流动数值模拟·····           | 卢作伟 崔桂香 张兆顺(293)  |
| 黄浦江二维有限元水流数学模型·····         | 陈美发 卢永全(299)      |
| 葛州坝枢纽下游水流特性研究·····          | 师 哲 韩明辉(305)      |
| 闸孔出流流量系数研究·····             | 吴建平(311)          |
| “龙抬头”式溢洪洞的水跃现象·····         | 韩 瑜 李建中 张志昌等(317) |
| 长有压管导流孔试验研究·····            | 罗佩金 王业红(323)      |
| 三峡水利枢纽永久船闸廊道输水特性研究·····     | 吴英卓 江耀祖(328)      |
| 水电站输水管道水锤现象的模型研究·····       | 曾 祥 夏 煜(334)      |
| 大型渠道倒虹吸水力特性试验研究·····        | 周 赤 何 勇 黄 徽(340)  |
| 长距离大流量输水管道若干水力学问题研究·····    | 孙万功 张红云(346)      |

|                              |     |     |           |
|------------------------------|-----|-----|-----------|
| 三峡升船机卧倒闸门水动力特性试验研究·····      | 刘敦煌 | 周 赤 | (352)     |
| 彭水(长溪坝址)电站过渡过程的水力学研究·····    |     | 吴爱生 | (358)     |
| 水力模型中码头桩群阻力模拟·····           | 赵晓冬 | 洪大林 | 朱立俊(364)  |
| 电站冷却水系统的设计参数分析·····          | 张开菊 | 赵燕云 | 李冬梅(369)  |
| 横向扩散系数与水力参数的定量关系研究·····      | 张玉清 |     | 张晓华(372)  |
| 江岸林带的水力学效应及流速分布模拟·····       | 程根伟 | 何毓成 | 钟祥浩(377)  |
| 颗粒流动的一般本构关系及试验分析·····        | 王光谦 | 熊 刚 | 方红卫(383)  |
| 推移质造床河流上取水口布置研究·····         |     | 戴文鸿 | (389)     |
| 从两峡水电站运行看泥沙学科特性·····         | 贺济生 | 刘 峡 | (396)     |
| 潮汐水域中泥沙淤积及温排水运动的试验研究·····    | 乾爱国 |     | 李瑞生(400)  |
| 浪店水源引水工程泥沙处理技术研究·····        | 张崇山 |     | 谢根博(406)  |
| 关于泥沙扬动指标与悬浮临界指标的探讨·····      | 洪大林 | 赵晓冬 | 朱立俊等(414) |
| 球体的沉速·····                   |     | 孙志林 | (420)     |
| 泄水建筑物曲面紊流场的数值分析·····         | 李国栋 | 陈 刚 | 李建中(425)  |
| 泄洪建筑物下游导墙脉动压力特性的研究·····      |     | 张声鸣 | (432)     |
| 单相和两相流体多维渗流问题·····           |     | 刘慈群 | (439)     |
| 非饱和土有压水流的排气入渗·····           | 邵龙潭 | 郭 莹 | 韩国城(446)  |
| 泄洪深孔突扩及渗气减蚀设施水工模型试验研究·····   | 周 赤 | 何 勇 | 陈义东(452)  |
| 用声学法测量和判断水轮机空化·····          | 刘克煌 | 徐 琳 | 夏 煜等(458) |
| 空蚀荷载的量测与估计·····              | 梁 川 | 周 晖 | 吴持恭(466)  |
| 新开挖渠道原状起动试验研究·····           | 朱立俊 | 洪大林 | 赵晓冬(471)  |
| 长江河口左岸演变规律分析兼论长江河口的综合整治····· | 邹德森 |     | 陶晓东(477)  |
| 长江大通—江阴段河床演变研究·····          |     | 刘开平 | (484)     |
| 长江口风浪特性研究·····               | 刘 桦 | 何友声 | 吴 卫等(490) |
| 长江口盐水入侵数值模拟研究·····           | 刘 桦 | 何友声 | 袁建忠等(496) |
| 水库悬移油滴运动的数值模拟·····           | 武周虎 | 郑林平 | 李建中(503)  |
| 含油泥沙在水中的解吸特性·····            |     | 晁晓波 | 赵文谦(509)  |
| 污水处理稳定塘沉积分布的水动力学模型研究·····    | 杨美卿 | 王桂玲 | 镇芙蓉(515)  |
| ZMP 智能污水排量计的研制 ·····         |     | 杭传儒 | (521)     |
| 废水管渠中的水质计算·····              | 徐祖信 | 刘遂庆 | 林荷娟(526)  |

|                                 |     |                |
|---------------------------------|-----|----------------|
| 河流型水库水质演算方法.....                | 林荷娟 | 徐祖信(532)       |
| 钱塘江水质和污染源.....                  | 应晶扬 | 祁国伟 吴静波(538)   |
| 水力机械中液流的螺旋运动分析.....             | 齐学义 | 李小敏 聂先桥(544)   |
| $S_1$ 流面上叶片设计的一种方法 .....        | 罗兴琦 | 廖伟丽 梁武科(549)   |
| 柴油机活塞环组油膜厚度的测量.....             | 周美荣 | 钮心宪(555)       |
| 应用涡叠加方法模拟自由射流流场的初步研究.....       | 李兆敏 | 刘成文 徐依吉(562)   |
| 喷射泵水力特性的描述方法.....               | 王常斌 | 陈涛平 郑俊德等(567)  |
| 射流泵外特性与其内部流场关系的研究.....          | 龙新平 | 刘景植 陆宏圻等(572)  |
| 供、排水射流泵相似律 .....                | 沈 东 | 张思青 王难贵等(578)  |
| 有限空间射流数值模拟的混合有限分析解.....         | 龙新平 | 李 炜 陆宏圻(581)   |
| 幂律流体绕楔形物体流动时层流边界层的理论分析与计算 ..... |     |                |
| .....                           | 刘存芳 | 杜楣年 潘继红(587)   |
| 矩形封闭空腔内变物性可压缩流体的自然对流传热.....     | 潘继红 | 王振树(593)       |
| 射水抽气器的动力特性分析.....               | 孙奉仲 | 吕 伟(598)       |
| 热网水力计算的进一步讨论.....               |     | 华丹坡(601)       |
| 流体包裹体研究及应用中的几个问题.....           |     | 华丹坡(605)       |
| 冰球蓄冷过程传热方程的摄动解.....             | 龚延凤 | 刘全祥(609)       |
| 热油管道不稳定启动过程的数值模拟.....           | 史秀敏 | 张国忠 安家荣(615)   |
| 热油管道停输时的启动压力波速.....             | 张国忠 | 安家荣(619)       |
| 稠油热采井中分层注汽量的确定方法.....           | 石在虹 | 李 满 芮松云等(623)  |
| 井筒中温度计算精度对压力梯度预测结果的影响.....      | 廖锐全 | 张柏年 汪崎生(628)   |
| 预测井筒中压力梯度的综合机理模型.....           | 廖锐全 | 汪崎生 张柏年等(633)  |
| 一种可以产生自激压力脉动的水嘴的水力特性分析.....     | 崔海清 | 申福轩 王显诚等(639)  |
| 热敏电阻器模型问题的有限差分解法及其收敛性分析.....    |     | 赵卫东(645)       |
| 地下水向耕层补给水量测试装置设计.....           | 王俊华 | 于兰发 曹志超等(651)  |
| 闽江下游防洪岸线与河流动力作用.....            |     | 李怀根(655)       |
| 包气带水分运移的非平衡过程热力学研究.....         |     | 易立新(661)       |
| 力学、力学家与信息 .....                 |     | 陈耀松(667)       |
| From CS—solitons to eddy .....  |     | C. B. Lee(671) |

# 近岸波、流、泥沙和海岸形态动力学的 研究进展

陶建华

(天津大学力学系, 天津 300072)

**摘要** 本文介绍欧洲联盟“海洋科学技术研究”计划 MAST 中“海岸形态动力学”的研究和其中关于波、流、泥沙和海岸形态动力学的新近研究成果。

**关键词** 近岸波, 近岸流, 泥沙, 海岸形态动力学

## 1 概述

欧洲联盟于 1990-1992 和 1992-1995 建立了“海洋科学技术研究”计划 Mast I Mast II。该计划第一部分是欧洲沿海的海洋物理学研究, 第二部分是海岸科学工程, 第三部分是海洋观测仪器。G6, G8 海洋形态动力学是总研究计划的第二部分。G6 是从 1990-1992, G8 是从 1992-1995。欧盟各国中有 35 个研究单位, 100 多名科学工作者参加这项研究, 共耗资 1600 万欧洲货币单位 (16MECU), 历时 6 年。G6、G8 海岸形态动力学的研究主要是为发展海岸形态动力学的数学模型, 提供物理现象的机理。研究包括近岸波、流、泥沙运动的基本规律及其相互作用, 从而研究海岸岸线数学模型和海岸区域数学模型。海岸动力学模型的研究大大推动了对波、流、泥沙的基本规律研究。研究手段包括理论研究、实验验证、现场监测和数值模拟。通过这次研究目前欧盟中各国主要水力研究所 (大学) 都建立了自己独具特色的海岸形态动力学的数学模型, 这些模型经过了实验室和现场大量资料的验证, 已投入使用。

海岸岸线模型和海岸区域数学模型主要是研究中期模型, 预报时间为几周到几个月。长期模型主要是指大尺度模型, 涉及范围很大, 时间是几年到几十年, 主要用来研究例如气候变化、海平面上升对大面积海岸的影响。长期模型的研究还在初期阶段。

## 2 近岸波浪

这部分研究主要是研究波浪在破碎区的机理, 它涉及到非线性波的破碎和激浪。研究包括现场观测、实验研究、理论研究和数值模拟。

### 2.1 近岸波浪理论的进展

#### 2.1.1 Boussinesq 理论和应用的改善

Boussinesq 方程描述非线性长波运动, 其特性介于线性色散波和非线性无色散浅水波

之间,在时域的非线性模型中起着重要作用。1967年 Peregrine 推出了浅水 Boussinesq 方程的标准形式后,在工程中得到应用。最近五年来 Boussinesq 方程的理论和应用有很大的发展,成了非线性波的热点,形成了 Boussinesq 类方程。Madsen 等 (1991) 提出了修正的 Boussinesq 方程,改进方程的色散性质,使之能用于较深的水域。Nwogu (1993) 推导 Boussinesq 方程不用水深平均流速做为方程的变量而用一定深度  $Z = -\alpha h$  处的流速做变量,色散特性也大大改善。

Madsen 的修正后的色散关系:

$$C^2 = \frac{w^2}{k^2} = gh \frac{1 + B(kh)^2}{1 + (B + \frac{1}{3})(kh)^2}$$

Nwogu 公式的色散关系:

$$C^2 = \frac{w^2}{k^2} = gh \frac{1 - (\alpha + \frac{1}{3})(kh)^2}{1 - \alpha(kh)^2}$$

Madsen 公式中如果  $B = 1/15$  修正后的色散关系相当于线性色散波 (Airy 波) 的色散关系展开式取到  $(kh)^4$ , 如果  $B = 1/21$  色散特性进一步改善,波可以传到深水 ( $d/1 < 0.5$ )。Nwogu 的公式中若  $\alpha = -0.39$  其色散特性也可改善至波传到深水。

### 2.1.2 Serre 方程

为了使模型方程更好地描述波在中等水深、浅水和破碎后的传播,将方程保留到高阶项  $\varepsilon \mu^2$ , 为的是模拟当参数  $\varepsilon \rightarrow 1$  在破碎区非线性项较强的现象。相当与在 Boussinesq 方程中加高阶项 Sue Garner 项,即

$$h \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{2}{3} h \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (\frac{\partial u}{\partial x})^2) \quad (\text{Serre 近似})$$

Brocchini et.al(1992)对 Boussinesq 方程和 Serre 方程的特征和结果做了比较。Barhilemy et.at (1993) 在 G8 项目的支持下对两方程进行了理论和实验结果的比较。所用的 Serre 方程的形式:

$$h_t + (hu)_x = 0$$

$$u_t + uu_x + g\eta_x + 1/h(\frac{h^3}{3} GG + \frac{h^2}{2} M)_x = H_x [\frac{h}{2} GG + M] - \frac{P_x}{\rho} + BH^2[u_{xx} + g\eta_{xxx}]$$

$$GG = -u_{xt} + uu_{xx} + u_x^2$$

$$M = -H_x(u_t + uu_x) - u^2 H_{xx}$$

这里  $h$ —总水深,  $\eta$ —自由水面的位移,  $H(x)$ —静水深,  $P(x)$ —压力分部,  $B$ —改善色散性的系数 (Madsen 1991)。

针对孤立波的浅水变形,进行了  $1/76$ — $1/60$  的各种坡度的实验。在小振幅的情况下 ( $A/d = 0.088$ — $0.091$ ) 两种波剖面几乎没有区别,对坡度  $1/60$  而且是大振幅情况下, Serre 方程的数值剖面更近于实验资料。随着振幅增加在接近破碎点附近 Boussinesq 方程的差别更大。

## 2.2 近岸波浪破碎的数值模拟

主要是发展时域模型,特别是用时变的 Boussinesq 方程模拟波浪破碎。第一种方法是 Madsen (1983) 用表面水滚提取能量的方法。速度剖面分为两部分,旋涡区的速度等于相速度  $c$ , 旋涡下的速度在垂直面上为常值  $u_0$ 。此值适于崩波型的破碎。另一种方法是借助湍流模型,陶建华 (1984) 用湍流模型加上窄缝技术模拟了波浪的爬高和破碎。Karambas 等 (1992) 用涡粘模型来计算破波能量。Karambas (1995) 最近的文章将表面的水滚和湍流模型综合起来模拟波浪破碎。

谱模型用来计算破波时的波浪场。主要考虑如何模拟波驱动流的模型,改进了 Battjes 等 (1978) 的能量耗散模型,把表面水滚考虑进去。Roelink (1993) 发展了这一概念,能量衰减、群速变化被考虑。这一模型还应用到波浪破碎区的拍岸现象。

Hamro 等 (1994) 在频域上发展了非线性波浅水和破碎区模型,考虑了表面水滚的影响,可计算浅水变形、波高衰减、爬高和深度平均回流。

## 2.3 波的实验和现场观测

Particle Image Velocimetry (PIV) 是一个重要的新的测量技术,它可提供详细的频谱分布的信息。此技术可以用于浅水破波区、深水区、中等水深区和淹没式防波堤掩护区 (Petti 等 1994),但它不能测出自由表面的精确形状、旋涡和破碎区的速度场。

Florence 大学和 Bristol 大学在实验室测量了中等坡度时波高的衰减和拍岸 (Waston 等 1994)。SOGREAH 实验室在三维水池中测量了波流绕射防波堤 (Mory 等 1995)。

欧盟大型设备计划中大型水槽各种实验结果 (Sanchez—Arcilla 1994) 分析出时域中高、低能量分量,分析破碎区湍流脉动,在频域中分离出线性谱和强制的高阶分量 (Petti 1994)。

## 3 近岸流

波流相互作用有现场观测、实验室试验和理论研究等方法等的研究。

### 3.1 波流相互作用的垂直结构

Klopman (1994) 的水槽试验给出了不规则波波流相互作用的平均水平流速剖面。可以看出波的存在强烈的影响流速剖面,不仅在边界层内而且在边界之外也有很大影响。平均水平流速变化主要取决于波能量和波谱形状关系不大。在纯波 (无流情况下) 波将引起底层的流。

### 3.2 波流相互作用的底部剪应力

在不规则波和不同角度流的相互作用下测量了底部剪应力,进一步证实波强烈地影响底部剪应力 (Simons 1994)。Arnskov 等 1993 年在光滑底的水池中用高分辨率的传感器得出的结果表明,波抑制了流中的湍流,湍流的过渡是波和流速的复杂函数,剪应力的突然增长导致湍流。

现场实测了波加流的情况,分析了波流相互作用的影响。Stapleton 等 1995 用三种能量的方法计算剪应力并给出了比较结果。Ockenden 等 1994 用各种湍流模型封闭的波浪边界层模型计算不规则波剪应力并和观测资料比较,并用这些结果进一步对底部剪应力模型参数化。观测资料建立了波流相互作用的数据库,用以建立边界层模型和剪应力公式的参数化。

### 3.3 三维、拟三维波一流模型

法国的 SOGREAH 等实验室建立了三维波一流模型并和实验结果比较:二维模型和三维模型平面上流速有很大的不同,特别是近底流速分布。拟三维模型则是综合水平流速分布和垂直的不均匀流(二次)流。一般垂直方向上分上中下三层。三维和拟三维模型的建立是为了进行海岸动力学计算。

## 4 泥沙

### 4.1 无粘性泥沙

主要是研究泥沙在波流作用下的运动,分为底沙和悬沙。底沙的运动和形态动力学关系很大。在英国的 Wallingford 实验室和法国的 Chatou 实验室进行了大量实验工作。

在高剪应力情况下底沙运动包括几层的泥沙颗粒,这个现象称为片流,它对底面形状变化影响很大。在 G6、G8 项目中都进行了研究(Redsoe1993)。最近丹麦技术大学用轻质煤颗粒进行试验,片流产生不会有大量悬移颗粒。

对悬沙进行了大量研究,悬沙垂直分布模型用扩散概念和湍流模型,在波一流相互作用下悬沙模型和实验室及现场资料进行了比较。在 Delft 水力研究所大型水槽中进行底沙的验证(Ribberink 等 1992),实验和理论结果很接近。在荷兰还进行了悬沙的现场观测,并和早期的资料一起进行了分析。

波一流一底部相互作用主要是研究底部的沙纹对泥沙输移的影响,进行了定床和动床试验,并用 PIV 和激光系普勒流速仪测量,结果和数值模型(湍流扩散模型)进行比较,(Hassen 等 1994)在大尺度上研究了在真实环境中沿岸泥沙的输运。

### 4.2 有粘性泥沙

主要研究纵向特性,底面上的过程和底面下的过程三个问题。

纵向特性的基本过程是泥沙颗粒的絮凝,这一现象是由物理、化学和生物因素决定。絮凝现象很脆弱,对其进行观察要以无扰动为先决条件,在湍流影响下,泥沙浓度可用代数涡粘模型、 $K-\varepsilon$  雷诺应力模型和高分辨率的两相模型。Teison 等 1993 为了了解海岸地区水平运动引起的垂向泥沙和海底的交换过程,进行了现场观测,还在实验和现场进行了沙和淤泥混合海底的冲刷研究(Williamson 等 1993)。沙和淤泥的比例大大影响栏门沙的冲刷和栏门砂以外的冲刷。

法国 SOGREAH 水工研究所进行了沟槽垂直于水流方向的大尺度淤积试验,数据库用来验证淤泥输移模型。淤泥地形学也进行了研究(Hamm 等 1994)。Winterwerp 等(1994)在环形水槽中进行了非常软的淤积实验并和湍流动能模型比较,淤泥层大大影响了表面波的衰减,淤泥可相当于粘性流体。

软淤泥层在重力的影响下运动(例如有底坡),实验表明流的内部结构(层流、湍

流) 取决于淤泥层上初始泥沙的浓度。床底面上的固结大大的影响海底变化过程, Huysentruyt (1994) 进行了大量的淤泥和沙、淤泥混合物的固结实验。Toorman (1994) 进行了淤泥流变学的基础研究。

## 5 海岸形态动力学

海岸形态动力学主要研究中期海岸线模型、海岸区域模型和长期模型, 中期模型大约为几天、几周或几个月, 长期模型则为几年或几十年。

### 5.1 中期岸线模型

当存在均匀或近似均匀的沿岸流的情况下, 可用岸线模型来模拟岸线变形。其基础是波、流、泥沙输移和它对底部地形的作用。特别注意到沙丘、干岸坡和沙纹的形成, 并考虑了波运动学、低频波和波破碎过程, 底部流和底部边界层、坡度影响和泥沙输移机理。在 Mast I 中建立了一系列岸线模型 Roelvink (1993)。在 Mast II 这些模型又发展了, 大量的现场观测资料和实验室资料建立了数据库, 用新的资料对模型进行了验证和改进。

### 5.2 中期海岸区域模型

当不存在均匀的沿岸流的情况下需要建立海岸区域模型。海岸区域模型主要是针对那些有防波堤和海上结构的问题。数值模拟结果得到一个有趣的结论, 即当模型运行的时间是很长时, 海底初始冲淤状况对底部变形没有大影响。Damgaard (1994) 对此进行了理论分析。海岸区域模型的研究表明三维流场模型和有坡度时重力的影响十分必要和重要。

### 5.3 长期模型

长期模型主要是针对大的空间范围, 例如研究气候变化、海平面上升对海岸形态的影响, 即长期大范围水动力和海底相互作用的结果。对于长期大尺度问题, 将小尺度中的变量视为扰动, 不讨论详细过程。长期模型的研究关键是简化信息, 基本上包括四个水平, 即输入、物理系统或它的模型、输出和分析 (De.vriend 1993)。例如输入的简化不直接输入波、流及其综合, 而是经过滤波后考虑余流。长期模型还处于初期阶段。

## 参考文献

1. Anskov, M.M., Fredso, J. and Sumer, B.M., 1993. Bed shear stress measurements over a smooth bed in three-dimensional wave-current motion. *Coastal Engineering*, 20:277-316.
2. Barthelémy E. etc. 1993. A theoretical and experimental Comparison of the Boussinesq and Serre equation MAST G8M. overall workshop, Grenoble.
3. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.E.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, New York, P.569-587.
4. Brochini M. etc. The modeling of short wave in shallow waters, Comparison of Numerical models based on Boussinesq and Serre equation Proc. 23th Conf. on Coastal Eng. Vol.1. 1993.
5. Damgaard Christensen, E., Deigaard, R. and Fredsøe, J., 1994. Sea bed stability on long strait

- coasts. In: B.L. Edge (editor): "Coastal Engineering '94", ASCE, New York (in press).
6. De Vriend, H.J., 1993. G6 / G8 Coastal Morphodynamics. Proceeding of the MAST -days, Brussels, Belgium, P.441-463.
  7. Hamm, L., Peronnard, C., 1994. Modelisation numerique de la houle et des niveaux dans la zone de deferlement. Proc. 4emes Journees de l'Hydrodynamique, Rouen, France.
  8. Hamm, L., Chester, T.J., Fettweis, M., Pathirana, K.P.P. and Peltier, E., 1994. An intercomparison exercise of cohesive sediment transport numerical models. In: W.R. Parker et al. (editor): Proceedings IntercoH '94 (in press).
  9. Hadsen, P.A., Fredsoe, J. and Desigarrd, R., 1994. Distribution of suspended sediment over wave generated ripples. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 120 (1): 37-55.
  10. Huysteruyt, H., 1994. Experiments on consolidation of natural mud; effect of composition, mixtures with and layering. In: W.R. Parker et al (Editors): "proceedings intercoH '94" (in press).
  11. Karambas, Th. V. and Koutitas, C. 1992. A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equation. Coastal Eng. 18, pp 1-19
  12. Karambas Th. V. etc. 1995. Breaking wave in the Surfzone Submitted to Coastal Eng.
  13. Klopman, G., 1994. Vertical structure of the flow due to waves and currents; Part II : Laser-Doppler flow measurements for waves flowing or opposing a current. Delft Hydraulics, Report H840.330-II.
  14. Madsen, P.A. Svendsen I.A. (1983) Turbulent bores and hydrologic jump. J.F.M. Vol 129 pp 1-25.
  15. Madsen, P.A. etc. A New form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion Characteristic 'Coastal Engineering' 15(c) pp 371-388.
  16. Mory, M. and Hamm, L., 1995. Experimental study of wave propagation, set-up and currents around a detached breakwater. Paper to be presented at "Coastal Dynamics '95", Gdansk, Poland, September 1995.
  17. Nwogu, O. 1993. An alternative form of the Boussinesq equation for modelling the propagation of wave from deep to shallow water. J. of waterway. Port and Coastal Eng. 119(6) pp. 618-638.
  18. Ockenden, M.C. and Soulsby, R.L., 1994. Sediment transport by currents plus irregular waves. HR Wallingford, Report SR 376.
  19. Petti, M., 1994. Third-order analysis of nonlinearities bounded to narrow-banded spectra. Int. J. Offshore and Polar Eng. (accepted for publication).
  20. Ribberink, J.S. and AL-Salem, A.A., 1992. Time-dependent sediment transport phenomena in oscillatory boundary-layer flow under sheet flow conditions. Delft Hydraulics, Data Report H840.20, part II.
  21. Roelvink, J.A., 1993. Surf beat and its effects on cross-shore profiles. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 150pp.
  22. Roelvink, J.A. and Broker, I., 1993. Cross-shore profile

- models. *Coastal Engineering*, 21(1-3):163-191.
23. Sanchez-Arcilla, A., Roelvink, J. A., O'Connor, B. A., Reniers, A. and Jimenez, J., 1994. The Delta Flume '93 experiment. In: A. S. - Arcilla, M. J. F. Stive and N. C. Kraus (Editors): "Coastal Engineering '94", ASCE, New York (in press). Stapleton, K. and Huntley, D. A., 1995. Stress determinations using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method. *Earth surface processes and Landforms*, Technical Special Issue (submitted).
  24. Simons, R. R., 1994. Bottom stresses under random wave with a current Superimposed *Coastal Eng. '94'* ASCE, New York
  25. 陶建华 1984 波浪在岸滩上爬高和破碎的数值模拟. *海洋学报*. Vol. 6. NO. 5
  26. Teisson, C. and Simonin, O., 1993. Simulating turbulent vertical exchanges of mud concentration and bed consolidation with a two-phase flow model. In: M. Belorgey et al. (Editors): "Euromech 310- Sediment transport mechanisms in coastal environments and rivers", World Scientific, Singapore.
  27. Toorman, E. A. and Huysenruyt, H., 1994. A new constitutive equation for effective stress. In: W. R. Torfs, H., 1994. The erosion of layered sand-mud beds in uniform flow. In: W. R. Parker et al. (Editor): "G8 Coastal Morphodynamics-Overall workshop 1994", Delft Hydraulics, Emmeloord, The Netherlands, Abstract 3.1.
  28. Watson, G., Peregrine, D. H. and Barnes, T. C. D., 1994. The generation of low-frequency waves by a single wave group incident on a beach. In: B. L. Edge (Editor): "Coastal Engineering '94", ASCE, New York (in press).
  29. Williamson, H. J. and Ockenden, M. C., 1993. Laboratory and field investigations of mud sand mixtures. In: S. Y. Wang (editor): "Hydro-Science and Engineering", p. 622-629.
  30. Winlerwerp J. C. and Kranenburg, C., 1994. On the erosion of fluid mud layer due to entrainment *Proc. Intercoast '94'*

# 旋涡与行进表面水波相互作用研究<sup>1</sup>

王琳琳 马晖扬

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 采用 Navier-Stokes 方程的有限差分数值解研究水下生成的旋涡在浮升过程中与行进表面水波的相互作用。行进表面水波为有限深单色波, 旋涡的初始模型为 Oseen 涡。数值模拟表明旋涡与水波的相互作用引起了水波形态的特定变化。文中分析了涡波相互作用的机理及旋涡轨迹的变化, 讨论了 Froude 数、初始涡的几何位置、行进波的振幅、位相对水面变形的影响。

**关键词** 旋涡, 表面重力波, 有限差分。

## 0 前 言

旋涡与自由表面(水面)的非定常、非线性相互作用是当前流体力学中一个十分活跃的前沿领域的研究课题, 它具有深刻的理论意义和重要的应用背景, 受到人们的广泛注意。该项研究直接与正在发展的、具有重要战略意义的潜艇非声学探测方法息息相关。在当代空间高技术迅速发展的推动下, 一种全新的、在全球海洋范围内探测潜艇的非声学方法正在积极开展研究, 其中该方法的流体力学机制成为水动力学的一个研究热点。一种主要的观点认为潜艇在水下运动对水面形成的扰动主要是由潜艇运动时产生的各种旋涡系统与水面相互作用引起的。因此, 旋涡与自由面的相互作用成为非声学潜艇探测方法流体力学机理的一个主要的力学模型, 并在此基础上开展了广泛的实验研究、理论分析和数值模拟<sup>[1][2]</sup>。这些研究揭示出, 旋涡在水中向上浮升, 与水面相互作用, 确实会使水面发生特定的变形, 可以由雷达加以识别的变形。

迄今为止, 绝大多数的旋涡与自由面相互作用研究考虑的是旋涡与平的、静止水面的相互作用。实际上, 由于风生波等多种原因, 海水水面上总是行进着各种尺度的表面波, 因此, 研究旋涡与行进表面水波的相互作用就是一个更接近于真实情况的力学模型。从学术上讲, 该项研究属于流体力学中极富挑战性的研究方向之一。开展旋涡与行进表面水波相互作用的研究将丰富对波、涡相互作用的认识, 有可能揭示出更深刻的涉及潜艇非声学探测方法的流体力学机制。目前关于旋涡与行进表面水波相互作用的研究有 Fish 的实验研究<sup>[3]</sup>和用摄动方法进行的理论分析<sup>[4]</sup>。这些研究表明, 旋涡与行进表面水波相互作用的机制, 和旋涡与静止水面的相互作用相比较, 物理机制有所不同。旋涡与静止水面相互作用时, 较强的旋涡可以使水面发生隆起。而当旋涡与行进表面水波相互作用, 改变的是波的形态, 这种变化当旋涡较弱时也可以观察到。

在前人工作的基础上, 为了使该领域的研究更加深入, 我们采用数值分析方法, 考虑粘性流体, 采用 Navier-Stokes 方程为控制方程, 考虑的旋涡为有涡量分布的 Oseen 涡, 表面行进波为有限深单色表面重力波。应用数值造波技术形成满足要求的表面波, 然后用数值方法研究在旋涡的作用下, 表面波波形的变化, 并讨论 Froude 数、旋涡的初始位置、行进波的振幅、位相等对结果的影响。数值计算的结果和 Fish 的结果进行了比较。

<sup>1</sup>国家自然科学基金委员会资助项目

# 1 数学模型和数值方法

考虑粘性流体的二维流动,自由面上传播着有限水深的单色行进波(线性波),在水面下深度为  $H$  处生成一对强度为  $\Gamma$  的旋涡。在旋涡的相互诱导下,涡对向上浮起,与表面行进波作用,使其发生变形(图 1)。定义波长  $\lambda$  为特征长度,涡在涡对连线中点处的初始诱导速度  $V_0$  为特征速度。控制方程为 Navier-Stokes 方程,方程中出现两个无量纲参数, Froude 数  $Fr$  和 Reynolds 数  $Re$ , 它们的定义为:

$$Fr = \frac{V_0}{g\lambda^{1/2}}, \quad Re = \frac{V_0\lambda}{\nu}.$$

采用有限差分方法数值求解非定常的 Navier-Stokes 方程。这里的关键问题是如何处理自由面,本文采用流体体积法(The Fractional Volume-of-Fluid Method),定义流体体积函数  $F(x, y, t)$  为单元体内流体所占有的体积与该单元可容纳流体体积之比。由定义可知:若单元体被流体占满,  $F(x, y, t) = 1$ ; 空单元  $F(x, y, t) = 0$ ;  $0 < F(x, y, t) < 1$  的单元体为含有表面的单元体,这些单元或是与自由面相交,或是含有比单元尺度小的气泡。自由表面单元的定义为含有非零的  $F$  值,且与它相邻的单元中至少有一个是  $F$  值为零的空单元。流体体积函数  $F(x, y, t)$  随网格和时间而变化,在变化中它应满足如下方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial y}(vF) = 0, \quad (1)$$

由于  $F$  函数是阶梯函数,不能采用一般的差分方法,在 VOF 方法中是应用施主与受主单元模型来计算  $F$  函数的变化以保持其不连续的特征。

有限差分的差分网格采用交错网格。压力  $p_{i,j}$  和流体体积函数  $F_{i,j}$  定义在网格中心,速度分量  $u_{i+\frac{1}{2},j}$  与  $v_{i,j+\frac{1}{2}}$  分别定义在网格右边界及上边界的中点。Navier-Stokes 方程中,时间项采用时间向前差分格式,对流项采用基于迎风差分与二阶中心差分的混合差分格式,粘性项采用二阶中心差分格式。

用数值方法研究旋涡与表面行进水波的相互作用,关键问题是如何生成表面行进水波。本文中采用的是数值造波技术。在计算域的左边界加上按特定规律的水平方向的速度  $U$ , 模拟真实波浪水槽的推板运动规律,从而在水面上生成行进表面水波 [5]。

由线性造波机理论,对于平衡位置在原点,冲程为  $X_0$ , 角频率为  $\omega$  的活塞式造波机,其推板作简谐运动的速度为:

$$U(t) = \frac{X_0\omega}{2} \cos \omega t, \quad (2)$$

在水深为  $d$  的波浪水槽中距造波板  $x$  处的波面  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{X_0}{2} \left\{ \frac{4 \sinh^2 kd}{2kd + \sinh 2kd} \cos(kx - \omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin^2 \mu_n d}{2\mu_n d + \sin 2\mu_n d} e^{-\mu_n x} \sin \omega t \right\}, \quad (3)$$

式中波数  $k$  满足:

$$kg \tanh kd - \omega^2 = 0, \quad (4)$$

而  $\mu_n$  为下面方程的第  $n$  个根:

$$\mu_n g \tan \mu_n d + \omega^2 = 0, \quad (5)$$