



第十一届全国水动力学学术会议暨 第二十四届全国水动力学研讨会 并周培源诞辰110周年纪念大会文集

Proceeding of the 11th National Congress on Hydrodynamics &
24th National Conference on Hydrodynamics and
Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Pei-yuan's Birth

吴有生 周如莘 颜 开 周连第 杨显成 主编

(上 册)



海军出版社

第十一届全国水动力学学术会议暨 第二十四届全国水动力学研讨会 并周培源诞辰 110 周年纪念大会文集

Proceeding of the 11th National Congress on Hydrodynamics &
24th National Conference on Hydrodynamics and
Commemoration of the 110 Anniversary of Zhou Pei-yuan's Birth

(上册)

吴有生 周如莘 颜开 周连第 杨显成 主编

主办单位
中国力学学会
《水动力学研究与进展》编委会
中国造船工程学会
周培源基金会
中国船舶科学研究中心

海洋出版社

2012 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰 110 周年纪念大会文集/吴有生等主编:—北京:海洋出版社,2012.8

ISBN 978-7-5027-8319-8

I. ①第… II. ①吴… III. ①水动力学-学术会议-文集②周培源(1903~1993)-纪念文集 IV. ①TV131.2-53②K826.11-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 158466 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

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 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

开 幕 词

吴有生

各位专家、各位代表：

今天我们全国水动力学界 160 多位专家和代表聚汇在太湖之滨，举办第十一届全国水动力学学术会议暨第 24 届全国水动力学研讨会，同时，隆重纪念我国近代力学的奠基人周培源先生诞辰 110 周年。我们借这样一个内容十分丰富的学术活动，表达我国水动力学后辈对周培源先生的缅怀之情。

周培源先生是我国著名的科学家、教育家和社会活动家，他在国际和国内知识界都有很高的声誉和崇高的威望。他一生热爱祖国、热爱人民、热爱和平；他从事学术研究工作 70 余年，在理论物理学和流体力学领域作出了卓越的贡献；他在高等教育领域辛勤耕耘，桃李芬芳，培养了我国一批科学教育事业中的杰出人物。周培源先生无愧于“科坛泰斗，学宇柱梁”的美誉。

70 多年前，周培源先生就开始在流体力学，特别是水动力学领域纵横驰骋，取得了举世瞩目的成就。他独树一帜，开创了湍流模式理论的先河，研究成就得到了学术界的普遍公认，载入了湍流研究的史册。

长期以来，他一直关注我国水动力学事业的发展，不仅在耄耋之年还亲力亲为，从事相关研究，而且高屋建瓴地提出了水动力学的发展方向和研究战略。1981 年他在担任中科院副院长期间，发起组织了全国水动力学研讨班，邀请了国际知名的水动力学专家美国的易家训、吴耀祖和梅强中教授到北京讲学，培养了一批研究骨干，大大推动了我国水动力学研究的进展。1986 年，在我们的《水动力学研究与进展》杂志创刊之际，周培源先生欣然为我为刊题词，指出：“力学是一门古老而又充满活力的学科，它的出现和发展是与整个自然科学和生产事业的发展紧密相联的。水动力学是流体力学中的重要分支之一，《水动力学研究与进展》作为水动力学专业学术刊物的创刊，标志着我国水动力学事业的日益兴旺昌盛。这也是我国水动力学界同仁团结奋斗的结果。我深信这个刊物必将在促进流体力学的国内外交流，提高

学术水平，服务‘四化’建设中发挥积极作用。我衷心祝贺这个刊物的成功！”这一题词言简意赅，意味深长，成为《水动力学研究与进展》办刊的精神力量。30 多年来，编委会和广大的作者与读者牢记周培源先生的亲切关怀和殷切期望，刊物越办越好，已经在国内外水动力学界产生了重大影响；与刊物同时创办的国际水动力学学术会议和全国水动力学研讨会经久不衰，越办越红火。饮水思源，我们怀念周培源先生，更要实现周培源先生的遗愿，为使我国水动力学事业更加兴旺昌盛，把刊物和学术会议办得更好。

不久之前，我国科学技术界几乎同时向全国人民奉献了“上九天揽月”和“下五洋捉鳖”的科学盛宴，“神九”飞船成功与“天宫一号”对接，“蛟龙”号载人潜器成功深潜 7062 米。这两大成就是我国科学技术的胜利，其中当然包括了力学研究的胜利。周培源先生在天堂，当会为这些成就拊掌，为祖国后辈的努力和成功解颐。

在这里，我们要感谢周培源基金会和北京大学陈耀松教授为推动我国水动力学事业的发展所作的努力。20 年前，为弘扬周培源教授发展流体力学和水动力学事业所做出的杰出贡献，奖励在水动力学事业中做出重要贡献的科技人员，以促进我国科技事业的繁荣，推动国民经济的发展，周培源基金会决定设立“周培源优秀水动力学论文奖”。陈耀松教授不仅曾积极推动《水动力学研究与进展》刊物的创刊，并于 1991 年为“周培源优秀水动力学论文奖”捐赠基金，周培源基金会为支持陈教授的义举，为“周培源优秀水动力学论文奖”追加了本金。

“周培源优秀水动力学论文奖”的评审共举办了七届，在水动力学界赢得了广泛的关注。为开创我国水动力学研究新局面，2011 年，周培源基金会作出了进一步做好这一奖项的重大决策，将原“周培源优秀水动力学论文奖”改名为“周培源水动力学奖”，由《水动力学研究与进展》挂靠单位中国船舶科学研究中心和《水动力学研究与进展》杂志社每年各捐赠人民币拾万元，五年共壹佰万元，作为“周培源水动力学奖”的基金，并成立了评审委员会，按严格的章程，开展每三年一次的评审奖工作。本次会议将举行 2011 年度周培源水动力学的颁奖仪式，这次将有三名优秀水动力学工作者获奖。

本次学术研讨会得到了全国许多单位和水动力学界同仁的大力支持。会议共收到 50 多个单位的 166 篇论文，论文集篇幅 1295 页，将分成上、下两集出版，为历次会议之最。

本次会议期间，我们还将前往宜兴瞻仰周培源故居和参加周培源雕像揭幕仪式。

周培源先生的一生是光辉多彩的一生，他的为人治学，值得我们后辈景仰和学习，他的宝贵精神财富，应由我们努力传承和发扬。在纪念周培源先生 110 周年诞辰之际，我想借用两句话，深切缅怀周培源先生，并结束我的开幕词。“披肝沥胆同舟义，谋深虑远国士情。盛世更忆真风骨，旷宇何处览先生。”

谢谢大家！

目 录

大会报告

中国船舶科学研究中心近期空化流动研究进展	(1)
..... 洪方文, 褚学森, 彭晓星, 颜 开, 刘登成, 陈玮琪	
纤维悬浮湍流场湍动模型的研究及应用	(20)
..... 林建忠	
近期船舶耐波性研究进展与展望	(31)
..... 缪国平	
Transport of bicomponent contaminant in free-surface wetland flow	
..... CHEN Bin, ZENG Li, CHEN Guo-qian, WU Yi-hong, JI Ping, ZHAO Yi-jun, WU Zi, FENG Le	(45)
水下航行体出水空泡溃灭过程及其特性研究	(54)
..... 鲁传敬, 李 杰	
Dispersion due to electroosmotic flow in a circular microchannel with slowly varying wall potential and hydrodynamic slippage	(68)
..... NG Chiu-On, ZHOU Qi	
接触角控制滑移模型在微管道减阻技术中的应用	
..... 狄勤丰, 张任良, 王新亮, 龚玮, 程毅翀, 华帅	(78)
掺气减蚀技术及其研究	(87)
..... 吴建华	

水 动 力 学 基 础

流体应力方向、运动方程、广义应力公式综述	(96)
..... 刘福祥	
Hamilton 流固多物体系统的动力学问题	(100)
..... 孙 仁	
重力场中非定常垂直空泡长度时滞微分方程	(108)
..... 陈玮琪, 王宝寿, 颜开, 易淑群	
Influence of amplitude on locomotor batoid	(115)
..... WU Zhi-jun, CHEN Wei-shan	
液体在润湿性微管中流动的边界负滑移特征	(124)
..... 于玲 宋付权	
方柱与圆柱涡激运动的比较分析	(132)
..... 谷家扬, 渠基顺, 杨建民	
湍流与耗散结构理论	(140)
..... 邵珠峰, 杜广生, 刘正刚	
南极绕极流的理论模型—改进 Fourier 方法的一个应用	(147)
..... 张庆华, 曲媛媛, 尹训强	
潜意识作用下室内人群疏散的研究	(156)
..... 岑华舵, 薛 郁	
坡面薄层水流的流速分布特征分析	(162)
..... 安翼, 刘青泉	
二维方腔热对流羽流流动特性及平均场传热特性	(168)
..... 宁 浩, 包 芸	
海豚外型阻力特性分析研究	(177)
..... 刘明月, 王国栋, 叶东辉, 张志国, 冯大奎	
基于 NaSch 模型十字道路启动能耗的研究	(184)
..... 梁家源 薛 郁	
水下回转航行体云状空化回射流运动特征研究	

..... 王一伟, 黄晨光, 方 新, 杜特专, 于嫻嫻	(191)
基于黏性耗散极值原理的流动与对流传热过程的减阻优化	
..... 丁开强, 田茂诚, 张冠敏, 冷学礼	(200)
水下回转体边界层通气减阻的研究	于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 杜特专 (205)
二维类圆柱边界的有限变形运动对其尾迹空间动力学行为的影响	
..... 陈瑜, 谢锡麟, 麻伟巍	(212)
现代张量分析在连续介质力学中的若干应用	谢锡麟 (224)
圆球绕流的大涡模拟分析研究	岳蕾, 张志国, 蒋奉兼 (237)
三维球体倾斜入水的试验研究	闫发锁, 王宏伟, 张钧, John M. Niedzwecki (245)
高速航行体自然超空泡数值模拟研究	易文俊, 张木, 谭俊杰, 陈志华 (251)
鲨鱼盾鳞覆瓦结构流动减阻机理的数值仿真和实验研究	
..... 童 刚, 杨 建, 鲁毅, 孙志伟, 龚开元	(258)
孕酮诱发精子钙离子动力学响应的数学模型	李龙飞, 覃开蓉 (266)
液滴热毛细迁移研究进展	武作兵 (276)

计 算 流 体 力 学

分块法求解圆球强迫对流场	任安禄, 邓 见 (281)
三维方腔涡旋流场大涡模拟研究	张胜利 张 楠 (290)
多物体出入水砰击的两相流数值模拟	李廷秋, 常杏 (298)
A CFD model for numerical simulation of violent impact flow	
..... ZHAO Xi-zeng, HU Chang-hong	(304)
基于MPS方法数值模拟三维液舱晃荡	张雨新, 万德成, 日野孝则 (310)
大涡模拟风浪流下沉管周围流场变化	李廷秋, 张华, 常 杏, 方 田 (319)
深吃水平平台立柱周围的绕射和辐射波浪高程数值模拟	张磊, 李彬彬, 欧进萍 (325)
基于 SPH 并行算法的数值波浪水槽研究	金钊, 任冰, 徐志林, 王国玉 (332)
张力腿平台四柱绕流的数值模拟	谷家扬, 卢燕祥, 杨建民 (340)
基于分块紧耦合方法的流-固耦合运动的数值模拟	
..... 胡世良, 鲁传敬, 潘展程, 秦楠	(348)
双柱体结构流场干扰的 CFD 分析	吴波, 缪泉明, 周德才 匡晓峰 (355)
基于 AQWA 的经典 SPAR 平台垂荡-纵摇耦合运动分析	桑松, 李长东, 李磊 (363)
舵翼压力脉动及流噪声特性数值分析	陈曦, 王国栋, 胡婧, 王先洲, 冯大奎 (370)
低雷诺数下具有不同直径和间隙比的串联双圆柱绕流数值研究	
..... 刘名名, 吕林, 滕斌, 唐国强	(377)
液舱晃荡的无网格法数值模拟	高松强, 张志国, 王先州, 冯大奎, 赵伟文 (385)
基于 FEM/Level Set 方法的液滴下落参数影响研究	杨冯超, 陈效鹏 (392)

大尺度高雷诺数下水下航行体的数值模拟分析研究	司朝善 姚惠之 张楠	(399)
襟翼型首舵与水下航行体水动力干扰特性的数值研究 ..	杨立 张华 王小庆	(409)
翼板结合部涡旋流场大涡模拟研究	李胜忠 张胜利 张楠	(415)
椭球体横荡运动的数值模拟	程捷, 蒋奉兼, 张志国, 王先洲	(422)
短波增阻计算方法初探	魏锦芳 陈京普 周伟新	(427)
一种新的组合型二阶 TVD 差分格式的研究	郑瀚旭 王嘉松	(434)
时域高阶边界元法在两层流体中波浪辐射问题的应用		
.....	陈新佳, 勾莹, 滕斌, 郑艳娜	(442)
数值波流水池的构建和验证	秦楠, 鲁传敬, 王本龙, 胡世良	(450)
大规模带状线性方程组混合编程并行求解 ..	徐磊, 郑汉垣, 刘智翔, 封卫兵, 张武	(457)
深水网箱圆形框架受力的三维数值模拟分析 ..	李天赠, 李雨田, 廖振英, 詹杰民	(464)

水动力学试验与测试技术

浮筒式防风单点系泊系统系泊力计算关键参数试验研究	夏运强 唐筱宁	(470)
分层流体中拖曳潜体激发内波转旋特性实验		
.....	王进, 尤云祥, 胡天群, 朱敏慧, 重劲松, 王小青	(476)
两层流体中内孤立波造波实验	黄文昊, 尤云祥, 王竞宇, 胡天群	(485)
分层流体中组合式动量尾迹演化特性实验		
.....	陈科, 尤云祥, 胡天群, 朱敏慧, 重劲松, 王小青	(493)
内孤立波沿缓坡地形浅化与破碎的实验研究	杜辉 魏岗 张原铭 徐小辉	(502)
Experimental investigation on drag coefficient for a Truss Spar subjected to vortex induced motions	ZHANG Hui, YANG Jian-min, XIAO Long-fei, LU Hai-ning	(509)
以纽带起旋的气液螺旋流实验研究	王树立, 饶永超, 武玉宪, 周诗崇, 孙璐	(516)
波浪发电系统振荡浮子运动特性实验研究		
.....	臧志鹏, 高福平, 漆文刚, 韩希霆, 唐驰, 彭燕	(524)
潜水器坐离底吸附力模型试验研究	李迎华 潘子英 李 龙	(530)
桨盘面湍流积分长度 PIV 测量及螺旋桨低频宽带噪声预报		
.....	薛庆雨, 张 军, 张国平, 黄振宇	(538)
过饱和水播核系统气核测量	徐良浩, 彭晓星, 张国平, 赵文峰	(545)
实验研究正交圆柱尾迹的空间动力学行为	余宇轩, 麻伟巍, 谢锡麟	(551)
波浪水槽中孤立波的生成方法研究	宣瑞韬, 吴 卫, 房詠柳, 刘桦	(566)
平面对称剪切流中螺旋涡的实验研究	蒋运幸, 谢锡麟, 余飞龙, 麻伟巍	(575)
微气泡除油浮选技术优化实验研究		
.....	张 军, 郑晓辉, 许晶禹, 郭 军, 王淑京, 郑之初	(585)

水动力节能装置在波浪中节能效果的试验分析	陆志妹, 张越峰, 夏召丹	(593)
多泡溃灭过程中气泡间相互作用的研究	闻仲卿, 张凌新, 邵雪明	(601)

工 业 流 体 力 学

WEIS-FOGH 机构水动力学研究与发展	李梦玉, 刘超, 章社生	(608)
乳化剂对油水乳化液流变性的影响		
..... 张健, 许晶禹, 朱平辉, 高梦忱, 郭军, 王淑京, 吴应湘		(614)
风帆助推船舶定功率航行控制节能评估	陈纪军, 韩阳, 潘子英, 陈鲁愚	(621)
风机叶片三维绕流场数值模拟	周胡, 王强, 万德成	(627)
大型风机叶片的气动和结构性能耦合分析研究	刘小龙, 胡芳琳, 盛振国	(637)
灯泡式水轮机三维过渡过程 CFD 模拟	张晓曦, 程永光	(650)
喷口直径及导流帽对高速混流泵推进性能的影响分析		
..... 李鑫, 王志东, 凌宏杰, 吕红龄		(658)
水平管道中油水旋流稳定性研究	孙焕强, 许晶禹, 张 军, 吴应湘, 郭 军	(665)
除水孔结构对管道式导流片型分离器油水分离影响研究		
..... 史仕荧, 吴应湘, 许晶禹, 李华, 李东晖, 马乃庆		(671)
稠油聚驱的最优浓度与最优段塞尺寸	胡江平, 孙德军	(679)
泥沙对电厂重叠式取排水布置的影响分析	程友良, 涂春民, 刘丽丽	(686)
倾斜管路中超稠油水两相流动研究	刘海飞, 朱平辉, 许晶禹	(693)
拖缆冲击张力和拖体运动的求解	王志博, 顾华, 侯德永, 王芳	(700)
拖曳系统运动传递计算	马利斌, 王志博, 顾华, 侯德永	(711)
船体结构单元风载荷数值模拟研究	陈鲁愚 潘子英	(718)
单边流板式换热器流动换热特性	张井志, 田茂诚, 张冠敏, 冷学礼	(724)
混水管网混水泵连接方式的节能优化	刘恒, 张冠敏, 田茂诚, 冷学礼	(731)
不同雷诺数下 90° 弯管内二次流的数值模拟	陈敏, 刘明月, 张志国, 王先洲	(739)
圆锥塞式喷管水下喷气推进高速射流场特性的数值研究	何淼生, 覃粒子, 刘 宇	(746)
复合材料浆纤维铺层对水动力性能影响研究	黄 政, 熊 鹰, 孙海涛	(756)
潜射导弹空泡形态与阻力特性研究	刘维, 袁绪龙, 王亚东, 刘传龙	(762)
回转体高速入水数值模拟方法	朱珠, 袁绪龙, 闫云聚	(767)
水下滑翔机的水动力性能和滑翔性能分析研究	李霖 陈进 张志国 冯大奎 姚喜	(774)
自扶正船性能探索分析	吴俊松, 张志国, 吴传涛	(781)
梯度流下隔水管涡激振动的三维数值模拟	詹禄禄, 王嘉松, 杨 睿	(788)
新型截止阀水动力特性数值模拟分析	刘源, 杨琴, 张志国, 王先洲, 冯大奎	(796)

液舱隔板开孔对晃荡影响数值模拟与分析	胡腾飞, 张志国, 高松强, 王先洲, 冯大奎	(803)
异型管外降膜蒸发液膜流动数值模拟分析	罗林聪, 张冠敏, 潘继红, 田茂诚	(810)
Effect of Streamlined Optimization on Large-Scale Vortices in Junction Flows	LIU Jian-hua, ZHANG Nan, TIAN Yu-Kui	(818)
半浸桨驱动装置设计软件	贺晓燕, 赵文峰, 田志峰, 孙佳新, 黄树权	(825)
粉末活性炭自絮凝机制与沉降速率研究	尹海龙 徐祖信	(832)
粉末活性炭在原水输水渠道中的输移研究	尹海龙 徐祖信	(841)
油层压裂后抽油机系统抽汲参数优化方法	王涛, 汤永, 崔海清	(850)
永磁联轴器的散热及噪声分析	匡俊, 马峥, 马玉顺, 李启飞, 余天乐, 朱 兵	(858)

船舶与海洋工程水动力学

船体剖面水动力系数数值计算方法分析	孙树政, 缪泉明, 李积德	(866)
基于 CFD 的螺旋桨布局对船舶推进效率影响研究	吕续舰, 孙江龙	(873)
集装箱船在波浪中大幅度运动的计算分析	叶海轩, 沈志荣, 万德成	(880)
船艏螺旋桨激振力的数值预报	丁科, 王永生, 魏应三	(887)
CSSRC 民用船舶螺旋桨应用研究 ...	黄红波, 陆芳, 丁恩宝, 辛公正, 施小勇, 黄少峰	(894)
黏性流中三维船体横摇运动数值模拟及阻尼计算	朱仁传, 杨春蕾, 缪国平, 傅慧萍, 吕烈彪	(903)
液舱晃荡与船舶耦合运动的数值模拟与应用	洪亮, 朱仁传, 缪国平, 范 菊	(913)
随机波浪下的船舶非线性横摇和倾覆研究	柴威, 范菊, 黄祥鹿, 朱仁传, 缪国平	(923)
基于势流理论的船体型线自动优化	陈红梅, 黄蔚, 蔡荣泉	(931)
两艘散货船水动力性能数值计算研究	杜云龙, 陈霞萍, 陈昌运	(938)
基于 CFD 计算的 spar 平台螺旋侧板水动力优化设计研究	魏泽, 邱耿耀, 匡晓峰, 吴维武	(947)
扁平型水下航行体操纵性水动力 CFD 预报方法研究	王小庆 潘子英 陈鲁愚	(954)
大侧斜螺旋桨水动力及变形特性研究	孙海涛, 熊 鹰, 黄 政	(961)
船体与螺旋桨相互干扰流动数值模拟在船型开发中的应用	苏甲, 程红蓉, 王艳霞, 黄振宇	(968)
带自由液面的水面舰船回转运动水动力数值计算方法研究	蒋奉兼, 陈敏, 程捷, 张志国, 王先洲, 冯大奎	(975)
顶浪规则波中波浪增阻计算方法研究	鲁江 顾民	(982)
二维水翼推力特性 CFD 计算研究	胡子俊 吴乘胜 兰波 张华	(990)

围壳舵不同高度和边界下的数值计算	卢俊尹, 张志国, 王先洲, 冯大奎	(996)
全附体潜艇+螺旋桨水动力仿真分析研究		
.....	杨琴, 王国栋, 张志国, 王先洲, 冯大奎	(1002)
船与附体阻力计算与流场分析	魏琳, 董国祥, 金允龙	(1009)
基于 CFD 计算的集装箱船功率性能/航速预报	邱耿耀, 吴乘胜, 兰波	(1017)
应用 CFD 计算研究浮心位置变化对船舶性能的影响		
.....	程红蓉, 杨佑宗, 苏 甲, 王艳霞, 赵强	(1024)
三体船操纵性旋转水动力的势流计算和分析	詹金林, 卢晓平, 李光磊, 张树龙	(1030)
船舶阻力计算中边界层特性的影响分析	吕鸣鹤, 张志国, 蒋奉兼	(1039)
大盘面比螺旋桨敞水性能的数值预报技术研究	胡芳琳, 张志荣	(1046)
集装箱船风阻力的数值模拟研究	赵强, 苏 甲, 陈京普	(1054)
基于 CFD 技术的工程船线型优化研究	王艳霞, 陈京普	(1060)
20 万吨级垂直直艏散货船艏部线型对阻力性能的影响研究		
.....	孙海素, 陈京普, 魏锦芳	(1067)
高效扭曲舵水动力特性数值分析	刘登成 黄国富	(1074)
船模自航试验数值模拟研究	沈兴荣, 范余明, Michal Orych	(1082)
斧艏船阻力性能的模型试验研究	高霄鹏, 武庆威, 董祖舜	(1091)

海岸环境与地球物体流体力学

Numerical simulation of water waves generation due to deformable granular landslides	QIU Liu-chao	(1096)
近海长线垂下式养殖场对波浪场的影响及数值模拟	王绿卿, 夏运强, 唐筱宁	(1102)
宁波港口海水泥沙与实船淤沙调研分析	严烈, 黄国富	(1111)
双色波与水流相互作用的模拟研究	宁德志, 石进, 张晓, 滕斌, 赵海涛	(1118)
基于格子涡法研究振荡流作用下波状底床上流场涡动力特性及其挟沙效应		
.....	许雷阁 林緬	(1126)
高风速下海面飞沫水滴对拖曳系数的影响	史 剑 孔丛颖	(1133)
斜坡堤堤顶及后坡越浪流的初步数值分析	曾婧扬 吴 卫 刘 桦	(1140)
基于 Godunov 格式和浅水方程的波浪爬高数值模拟方法探讨		
.....	董 杰 王本龙 刘 桦	(1147)
日本东部地震海啸对我国沿海地区影响的数值分析	任智源 刘桦	(1155)

分层流中涡对演化特性数值研究	姚志崇, 赵峰, 洪方文, 张 军	(1162)
透空四面体群构成特征对护岸的影响研究	吴龙华, 周春天, 杨校礼	(1172)

水利水电和河流动力学

小浪底水库运用情况分析	王 婷, 张俊华, 马怀宝, 蒋思奇	(1178)
改善城市立交桥墩对河道水流影响的方法探讨	宋朋远, 拾兵, 张芝永, 张靖	(1187)
泄洪洞突扩跌段流场特性的大涡模拟研究	李国栋, 叶龙斌, 李永刚, 陈刚	(1193)
阶梯式消能工在水库除险加固工程中的应用	鲍倩, 王月华, 包中进	(1199)
乐昌峡库区松山子滑坡体滑坡涌浪研究	黄智敏, 付波, 钟勇明, 何小惠, 陈卓英	(1205)
水电站过渡过程中事故闸门振动机理研究	陈 龙, 付 亮, 程永光	(1212)
弯道河流水动力学数值模拟	张景新, 周洋, Alexander Sukhodolov, 刘桦	(1222)
黄河上游主要用水区用水特性及用水规律分析	荆新爱	(1229)
斜波输沙规律的初步研究	陈江波, 周济福	(1237)
大中小潮磨刀门水道垂向和纵向盐水运动规律	郭洪志 包 芸	(1243)
渠底形态对弯道水流特性的影响研究	凡伟, 槐文信, 崔丹	(1251)
高水头高转速冷竹关水电站 2#机溜负荷故障分析		
.....	裴海林, 郭俊文, 汪俊波, 江 峰	(1259)
基于混合网格的蓄滞洪区水流运动数值模拟	朱金和 刘士和 梅军亚	(1271)
溢洪道掺气设施空腔流态	吴建华, 马飞	(1277)
多个桥墩对明渠水流特性影响研究	肖洋, 黄振萍, 李亚男	(1285)

中国船舶科学研究中心近期空化流动 研究进展

洪方文、褚学森、彭晓星、颜 开、刘登成、陈玮琪

(中国船舶科学研究中心 无锡 214082)

摘要: 空化是流体中压力降低到临界值时发生的汽液相变过程。空化现象在船舶螺旋桨、高速水中兵器、水力机械叶轮、液体火箭燃料泵、水坝坝体上都可能出现。对于水面船舶和水中航行体螺旋桨,空化是极其重要的问题,具有很大的危害性。空化会造成螺旋桨剥蚀、诱导艇体振动、激发强烈辐射噪声,从而影响船舶的安全性、舒适性和安静性。对于水下高速与超高速航行体,空化问题不可避免,尤其是出入水过程空泡的影响十分强烈,它引起航行体水动力特性的变化和下水载荷、水中运动特性的大幅度变化。长期以来,中国船舶科学研究中心的一支空化研究团队一直从事空化机理及空化效应的研究,重点开展船舶推进器、高速水下航行体以及物体出入水过程的空泡流场的研究,取得了重要进展。本文将首先介绍中国船舶科学研究中心关于螺旋桨空化问题的试验和数值研究方面的主要进展,然后介绍该中心在出入水空泡流动和超空泡流动方面的研究进展。

关键词: 空化流动; 试验研究; 数值分析

1 引言

空化是指流体中压力降低到临界值时,产生液相向气相转变的物理现象。自从 1894 年英国发现空化致使鱼雷驱逐舰“Daring”号无法达到设计航速开始,空化现象就一直受到高度重视。水动力学界以及船舶界等相关工程领域对空化研究给予了持续的广泛关注,国际拖曳水池会议(ITTC)曾多次设立空化委员会或推进器与空化委员会对船舶空化问题进行专题研讨、比较试验和建立相关技术标准;国际空化学术会议从 1996 年开始,已发展为每三年定期召开的大型学术研讨会,至今已有七届。对空化的研究可区分为空化机理的研究、空化流动的研究和空化应用研究,试验和数值模拟是当前空化研究的主要手段。

泡动力学是空化机理研究的基础,1917 年雷利(Rayleigh)计算一个空心的球在无界静止液体中的溃灭问题,1949 年普莱赛特(Plesset)在雷利的基础上,考虑了液体的黏性和表面张力,计算了一个含空气和蒸汽的球形泡的从生长到溃灭的完整过程,从而建立了泡动力学基本方程,这就是著名的 Rayleigh-Plesset 方程。60—70 年代,国际上对空化起始机理研究取得很大的进展,认识到边界层、脉动压力等流动参数对空化起始的影响;80 年代以后,气核对空化

影响的研究逐步深入；进入 21 世纪，随着对船舶节能要求的日益提高，空化发展机理及其对空蚀影响的研究正成为空化研究的热点。

在空泡流及其数值模拟方面，国际上从上世纪五十年代开始，基于势流理论，发展了二维水翼空化的线性化理论（Tulin^[1]）和非线性理论。从上世纪九十年代开始，发展了空化边界元计算方法（Kinnas^[2]），该方法计算速度快，目前在螺旋桨设计中仍得到广泛应用。从上世纪九十年代后期开始，多种基于粘性流动的空化数值模拟研究取得显著进展。比较典型的有状态方程模型（Delannoy and Kueny^[3]）、泡动力学模型（Kubota et. al.^[4]）和蒸发和凝结模型（Merkle et. al.^[5]）。目前全粘流空化问题的数值模拟方法尚处在发展之中，要将其应用于实际问题，还需要结合高性能计算技术的发展。

光学和电子设备的飞速发展使空化实验技术取得很大进展。流态显示技术、数字图像测量、X 射线测量、内窥镜观测等手段被应用到空化机理研究中。高速摄影技术已经被广泛应用于水翼、螺旋桨空泡、超空泡等空泡动态特性的试验研究。PIV 流动测试技术已应用于空泡区外水流场的测量。随着对空化研究的深入，进行多物理量的同步观测已成为复杂机理研究的重要手段，如利用高速摄影和水听器组合测量进行水翼尾流中涡空泡产生、成长、断裂和溃灭过程和其产生的噪声辐射，以及水翼梢涡空化唱音的研究。利用压力和图像同步观测的方法获取水翼云空泡产生的压力脉动的形式和影响区域。

国内从 60 年代开始跟踪国际空泡流方面的研究，并陆续建立了各类研究空泡的模型试验水筒和水槽。在理论分析方面展开了一系列的工作，发展了基于势流理论的空泡分析数值技术（程晓俊、鲁传敬^[6]），以及基于 NS 方程的黏流方法（吴磊等^[7]、王国玉等^[8]、刘志勇、颜开等^[9]），这些方法基本跟上国际水平，也在工程中得到一定的应用。近期借助商用软件展开了许多有关空泡的数值模拟工作，并且取得了一定的成果。

作为国家船舶基础水动力学研究单位，空化一直是中国船舶科学研究中心研究的主要方向之一，并取得了大量成果。本文将重点介绍中国船舶科学研究中心近期在螺旋桨空化数值模拟技术和试验测试技术方面的研究进展情况以及出入水空泡流动和超空泡流动方面的研究进展情况。

2 简要历史回顾

在上世纪五、六十年代，为提高空化螺旋桨的推进效率、防止剥蚀，中国船舶科学研究中心研究人员应用超空泡水翼理论结合空泡水筒试验，发展了我国自主开发的空泡螺旋桨系列。在上世纪八十年代，中国船舶科学研究中心曾出现过空化研究的高潮，空化研究团队开展了空化核对空化初生的影响，空泡流数值计算，螺旋桨空化尺度效应修正方法，不同材料的抗空蚀能力，泡动力学等方面的研究，为我国在空化研究领域赶上国际先进水平奠定了良好的基础。在螺旋桨空化方面，开展过面元法计算螺旋桨片空泡的研究，以及螺旋桨空化激振力的研究，通过控制螺旋桨上的片空泡降低激振力，取得显著可工程应用的成果，至今仍广泛应用于船舶螺旋桨的设计中。上世纪九十年代，在螺旋桨空泡面元法计算方面取得了较

好的成果，并实现了螺旋桨三维片空泡分析。另外在这一时期，建立了大型空泡循环水槽，为螺旋桨空化试验研究提供了重要设施。这一设施的建立，在大型空化试验能力建设上是个里程碑节点。

进入新世纪以来，为了解决大型高速船舶螺旋桨出现的空化问题，借助高性能计算机和现代化的试验设备，在螺旋桨空化问题的研究方面有了新的进展。空化数值模拟方面，建立了空化流动的数值模拟技术，实现了螺旋桨三维空泡流动的模拟，以及船后螺旋桨空泡演化过程的模拟和二维机翼空泡的产生、发展、脱落的数值模拟。空化试验测试技术方面，引进了数字高速摄影设备，大大提高了空化现象的研究能力，实现了对二维机翼云空泡流动、轴对称体空泡流动、螺旋桨片空泡演化，以及梢涡空泡的产生和发展的观测。同时配置了先进的流场测试 PIV 系统，进行了空泡周围流场的精细测量研究。空化机理方面，初步研究了云空泡的产生、发展和溃灭过程，成功观察到片空泡末端的回射流，并记录下了回射流切断片空泡首部的现象。另外还研究了梢涡空泡尺度效应，提出了空泡水筒中均匀流条件下梢涡空化尺度效应的修正公式。

在出入水空泡流动方面，中国船舶科学研究中心从上世纪六十年代开始研究入水过程空泡的不定常演化过程和出水过程的空泡流动特性，并建设了相应的试验设备。改革开放以后，本中心系统地开展了大规模的入水空泡发展规律、入水空泡模拟试验的相似律、带空泡航行体的流体动力特性与运动特性研究，形成了一系列的试验研究方法和数值模拟方法，提出了完整的入水空泡流动的试验相似律和出入水空泡流动的 BUBMAC 数值模拟方法，对入水空泡流动建立了较为完整的物理认识。对于出水空泡流场的研究，也是始于上世纪六十年代。尤其是八十年代以来，本中心对物体出筒过程、穿越水面过程、水下带空泡航行过程等典型过程的空泡不定常发展规律和溃灭演化机理、不定常流体动力特性、水下载荷特性、水下运动特性进行了一系列研究工作，建立了相应的缩比模型试验手段，探索了基于商用软件的出水空泡流动计算方法，对出水过程的空泡流动建立了一系列新的认识。进入新世纪以来，本中心又集中一部分力量，大规模地开展了超空泡流动的理论、试验和数值模拟方法的研究，建设了超高速水洞、相关的超空泡航行体运动试验装置等，对超空泡流动的生成、发展和稳定规律、超空泡状态下的流体动力特性以及运动特性等有了深刻的认识。

3 螺旋桨的空化试验研究

试验一直是空化研究的主要手段，中国船舶科学研究中心拥有国内最为齐全的船舶空化研究试验设备和先进的测量技术。试验设备有大型循环水槽、减压拖曳水池和各类大小水筒，测试技术有高速摄影、PIV、LDV、频闪仪和气核测量仪等。在近期建造了小型多功能高速空泡水洞，开展了机翼云空化演变和物体出水过程空化演变的高速摄影观测，以及空化流动的 PIV 测量，发展了激光干涉成像和声学气核测量法。

3.1 小型多功能高速空泡水洞

为了进一步深入研究空化机理和特性, 2005 年申请立项建设小型多功能高速水筒, 并于 2011 年底完成设备安装, 如图 1 所示。水筒包含两个试验段, 一个为 $225\text{mm} \times 225\text{mm}$ 的方形试验段, 另一个为直径 $\Phi 350\text{mm}$ 圆形试验段。方形试验段的最高水速 25.0m/s , 中心线上理论最低空泡数 0.042 , 主要用于水翼空化等方面的研究。圆形试验段最高水速 15.0m/s , 中心线上理论最低空泡数 0.12 , 可用于回转体空化等方面的研究。

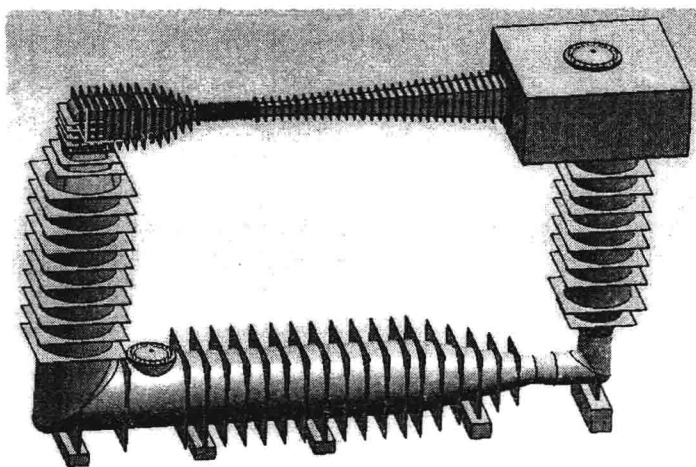


图 1 小型多功能高速空泡水筒示意图

该水洞除一般常规水洞要求的良好流动品质外, 最大的特点是试验水质可控, 从而为空化的机理研究提供了良好的试验条件。我们知道, 空化核、低压及成长时间是空泡产生的三个要素, 即使在其它条件相同的条件下, 若空化核的含量不一样, 也会导致空泡形态的完全不一样。对于空泡水筒而言, 保证来流空化核含量的一致性及能稳定的控制水筒中的气核含量, 对于空化的研究具有重要的意义。该水筒安装了快速除气系统可以有效控制水中溶解气体含量, 点阵式播核系统可控制试验来流的气核谱。

3.2 激光干涉成像测核技术

虽然空化核的控制对空化试验至关重要, 但控制空化核的水筒并不多见, 这主要是因要实现空化核的控制, 必须实时测量空化核, 而实时测量空化核的技术还不是十分成熟。中国船舶科学研究中心近年通过不断探索, 在 PIV 设备基础上, 建立了一套激光干涉成像测核系统 (图 2) (徐良浩等^[10]), 该系统具有实时测量能力, 能为水筒中的气核控制提供基础。

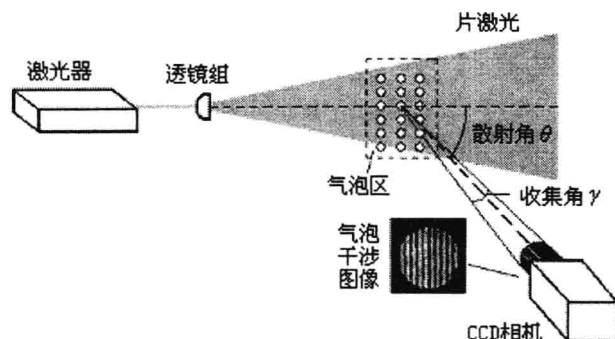


图2 激光干涉成像测核系统

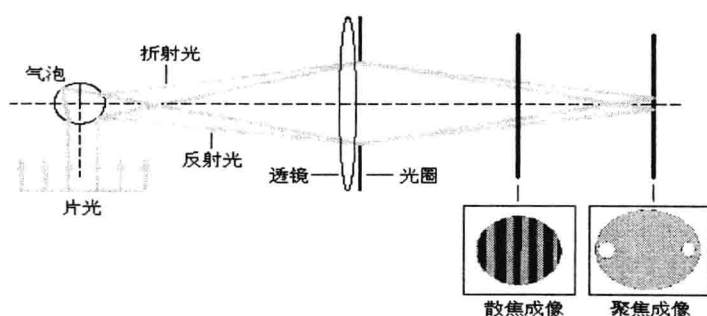


图3 气泡散射光成像光路示意图

激光干涉成像测核系统的基本结构，主要由激光器、透镜组和数码相机组成。激光器发射激光束，透镜组将激光束调整成一定厚度和范围的片光，并照射到气泡所在区域，激光遭遇气泡会发生散射，数码相机在一定的方向上收集气泡的散射光，使其在散焦平面形成干涉图像，根据干涉图像中的条纹信息反演气泡直径和密度。

3.3 云空化高速摄影观测

在过去的一段时间内，云空化的生成机理和特性是国内外研究的热点。云空化是极其不稳定和流动相当复杂的空化现象，高速摄影技术是观察和研究它的理想工具。为了研究云空化的生成机理，依赖空泡水筒和高速摄影构建了机翼空化的观测系统(图4)。