



第七届全国水动力学学术会议暨 第十九届全国水动力学研讨会文集

Proceedings of the 7th National Congress
on Hydrodynamics and 19th National
Conference on Hydrodynamics

(下册)

朱德祥 鲁传敬 周连第 邵维文 段文洋 主编



海洋出版社

第七届全国水动力学学术会议暨 第十九届全国水动力学研讨会文集

(下册)

Proceedings of the 7th National Congress on Hydrodynamics
and the 19th National Conference on Hydrodynamics

朱德祥 鲁传敬 周连第 邵维文 段文洋 主编

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
哈尔滨工程大学
黑龙江省造船工程学会

主办

海洋出版社

2005年·北京

目 次

大会报告

- 若干高速与高性能排水式舰船船型的近期发展 黄德波 (1)
黏弹性流体周期性运动规律的探讨 牛小静 余锡平 (9)
A Numerical Tank Through Linear and Quadratic Finite Element Method
..... Wu Guo-xiong Hu Z. Z. Wang C. Z. Drake K. R. (21)
水流中谐波能量交换的数值模拟 王本龙 刘桦 (35)
水流作用下网衣的水动力特性数值分析 李玉成 赵云鹏 桂福坤,等 (41)
洱海水质预测模型研究 彭文启 (48)
Accurate Computation of Second-order Low-frequency Loads
..... Chen Xiao-bo Duan Wen-yang Dai Yi-shan (57)

水动力学基础

- 水下超音速气体射流 施红辉 王柏懿 戚隆溪,等 (75)
分子间作用力对微管道流动的影响 包福兵 林建忠 (82)
非线性渗流与非线性化学波耦合问题的研究 姜元勇 徐曾和 (90)
使用 RANS 方程及动网格方法模拟圆柱体的涡激振动 潘志远 崔维成 (100)
湍流的概率密度函数模型及其检验 钱俭 (109)
泥沙云团扩散的双流体模型 吴珂 孙志林 毛根海 (114)
Bingham 流体冲击挡墙的流、固耦合计算研究 冯军 张亚军 张梦萍,等 (122)
交通流流体力学模型在道路交叉口的应用 韦艳芳 郭四玲 薛郁,等 (131)
一维元胞自动机交通流模型时空间距分布的研究 郭四玲 韦艳芳 薛郁,等 (140)
剪切力作用下血管内皮细胞分泌 ATP 的数学模型 覃开蓉 许喆 吴昊,等 (147)
二维波动板绕流场的 DLM/FD 模拟 邵雪明 刘卉 余钊圣 (154)
雷诺方程组的封闭与应用及其在紊流研究中的作用
..... 张玉清 张蕴华 张景霞,等 (162)
紊流和泥沙运动的随机理论 李元亚 (170)
基于几何独立的高阶面元法的多体水动力分析 戴愚志 余建星 (177)
Kdv Soliton in a New Continuum Model Ge Hong-xie Dai Shi-qiang (186)
一类求解二维三温辐射热传导方程的保对称有限元方法
..... 江军 舒适 黄云清,等 (193)

元胞自动机模型中减速带对交通流的影响研究	孟剑平 张解放 (203)
弱非线性内波在台阶直壁处反射和透射的渐近分析	魏岗 苏晓冰 尤云祥,等 (209)
均匀流作用下有自由液面的陷落式腔体侧壁压力分布研究	姚熊亮 戴伟 康庄,等(216)
液体在有自由液面的陷落腔内晃荡的数值计算和实验研究	姚熊亮 康庄 戴伟,等 (223)
Research on Boundary Condition and its Influence on Sloshing in Flow past a Square Cavity with Free Surface	Salman Sadiq Yao Xiong-liang Kang Zhuang et al. (230)
均匀流场中串列双圆柱尾流速度的数值模拟	姚熊亮 戴绍仕 (238)

计算流体力学

Application of an Exponential Type Scheme to Incompressible Navier-Stokes Equations	Feng Xiu-fang Tian Zhen-fu Dai Shi-qiang(247)
用 Level-Set 方法模拟气泡在水中运动的过程	朱琳 田振夫 王燕 (256)
数值模拟凹槽流道内修正上随体 Maxwell 流体的流动	付春权 钟会影 尹洪军 (263)
Navier-Stokes 方程组的一种四阶紧致交替方向隐式差分方法	王燕 田振夫 魏剑英 (269)
圆柱绕流旋涡脱落的数值模拟	洪文鹏 周云龙 刘巍 (276)
拦河闸引水口三维流场的数值模拟	陈虹 余金星 (282)
垂直环空顶替界面稳定性数值模拟研究	孙宝江 高永海 刘东清,等 (288)
污染物对流扩散方程的 Hopscotch 方法及几种改进格式	林建国 谢志华 由晓丹 (297)
大汾北水道大桥防洪影响数值计算和研究	黄智敏 何小惠 倪培桐 (307)
基于 Auto CAD VBA 和 MATLAB 的河流数值模拟前后处理方法研究与应用	廖小龙 严军 孙东坡,等 (315)
重力沉降分离的数值模拟	龚道童 吴应湘 郑之初,等 (322)
暖通空调领域 CFD 的湍流模型应用分析	李锐 员东照 (331)
浅水型海湾排污扩散器初始稀释度的数值模拟	卢士强 林卫青 矫吉珍 (338)
基于斜对角笛卡尔方法的分蓄洪区水流数学模型研究	穆锦斌 张小峰 张艳霞,等 (346)
基于无结构网格的二维浅水间断流动数值模拟	泮存鸿 戴世强 (356)
摄动有限元法在潜水动态模拟中的应用	陈家军 李森 (364)
Numerical Prediction of 3-D Unsteady Turbulent Flow and Pressure Fluctuation within Francis Turbines for LES	Liu Xiao-bing Zeng Yong-zhong Wang Tao, etc. (375)

水动力学试验与测试技术

- 气液两相流不稳定特性的实验研究 程文 村井一 木俊男,等 (388)
- 新液固分离系统实验进展 郭军 张军 郑之初,等 (398)
- Experimental Study on Relative Eddy by PIV System
..... Yin Jing Zhao Qin Deng Wan-quan (405)
- 正态模型泡漩水相似性探讨 彭凯 张秀芳 尹崇清 (412)
- 各种间隙比下水平圆柱绕流旋涡特性的实验研究 齐鄂荣 李炜 李国亚,等 (417)
- 龙潭水电站枢纽试验研究 陈灿辉 罗岸 钟伟强,等 (426)
- 挑流与宽尾墩联合消能的试验研究 朱超 宋莉萱 李远发,等 (431)
- 循环流化床过渡区固粒速度分布 PIV 测试 石惠娴 (438)
- 基于 PIV 测试系统的叉管交汇处湍流研究 邓万权 刘小兵 王靖,等 (444)
- 输水工程中压力管道出口水流消能方法的试验研究 卢绮玲 陈刚 (450)
- 复合式油气水分离器研究进展之二——分离器样机试验
..... 郑之初 张军 郭军,等 (458)
- 波浪对承台冲击作用的试验研究 兰雅梅 刘桦 (468)
- 窄缝裂隙水流雷诺数的实验研究 刘咏 钱家忠 赵卫东 (475)
- 圆孔和条形孔泄压减阻特性的探讨 杜广生 刘立宁 刘正刚,等 (481)

工业流体力学

- 复合管道内浆体水击压强计算与分析 周云龙 杨志行 洪文鹏,等 (489)
- 液气混抽改善高气油比井抽汲效率的机理研究 罗洪斌 李根生 牛继磊 (496)
- 耳蜗中基底膜振动的研究 陶明德 吴云岗 张天宇,等 (503)
- 管道泄漏水力瞬变模拟 李均峰 邓松圣 聂平,等 (507)
- 管道堵塞检测水力瞬变理论与数值模拟 邱正阳 李均峰 邓松圣,等 (514)
- 管道堵塞检测水力瞬变实验研究 李均峰 邱正阳 邓松圣,等 (519)
- 在轴向应力应变下海底沉积物声速及其响应 卢博 李赶先 黄韶健 (524)
- 微重时带隔板球腔横向振动时其内液体的晃动特性 程绪铎 (535)
- 低渗透多孔介质一维水驱油特征 宋付权 许友生 (543)
- 液滴在重力场和温度梯度场中的液体里所受到的力 孙仁 沈海东 (551)
- 压裂水平井压力动态分析 付春权 刘宇 尹洪军 (558)
- 深海洋集矿机·输送软管多体系统计算机仿真的动力学分析
..... 何永森 高宇清 刘邵英 (564)
- 水力脉冲诱发振动钻井研究 马清明 王瑞和 (571)

流体在内管做轴向往复运动的偏心环空中非定常流的流量分布	崔海清 郭军辉 郑晓松,等 (576)
斜流式水轮机转轮准三维设计方法研究	张礼达 陈冬冬 代应,等 (583)
螺旋管道内幂律流体流动压力梯度的计算	王克亮 崔海清 吴辅兵,等 (595)
水平圆管油水两相变质量分层流压降计算研究	魏建光 汪志明 王小秋,等 (603)
高压射流作用下的岩石渗流压力分析	龙芝辉 汪志明 魏建光,等 (611)
高水头大流量竖井式泄洪洞的脉动压力试验研究	罗立群 顾志刚 孟北方 (617)
基于多 Agent 理论的电厂机组负荷分配系统	赵廷红 吴疆 满自斌,等 (623)
黏弹流体偏心环空流动的数值计算	杨树人 王春生 崔海清,等 (630)
Research and Design of Multi-balls Check Valve	Wang Jing Liu Xiao-bing Fu Jie, etc. (637)
考虑启动压力梯度变化和表面活性剂驱油数值模拟研究	殷代印 高潘青 (643)
不等温输油管道故障诊断中的水力参数法研究	董莉莉 孙会 崔莉 (652)
吸气旋涡的研究与展望	李海峰 陈红勋 马峥,等 (660)
轴流泵内部流动特性的数值研究	马峥 朱兵 陈红勋 (672)
虹吸管出水断流装置的流体力学相似分析及其试验验证	李百齐 (681)
三维非轴对称局部狭窄动脉内非牛顿血液脉动流的动态数值模拟	杜健航 包芸 (686)
Experimental Study on Relative Eddy by PIV System	Yin Jing Zhao Qin Deng Wan—quan, et al. (694)
利用机械和水力能量提高深井钻井速度	张召平 李根生 牛继磊,等 (700)
水力过渡过程数字仿真中水轮机特性曲线的数值处理	雷恒 余波 张礼达,等 (707)

船舶与海洋工程水动力学

小水线面双体船自控模型的试验研究	朱炳泉 睦爱国 魏纳新,等 (713)
11.5 万吨级油船线型优化试验研究	周占群 胡平 杨波,等 (722)
MCAD 数控网络制造系统动力学研究	周跃华 黄剑斌 李田田,等 (730)
高速登陆运输船内蜗尾船型阻力试验研究	林钧 殷铁成 石仲堃 (739)
三峡水利枢纽双线连续五级船闸模型试验控制及数据采集系统的应用	董红燕 郭红民 杨伟 (744)
不同阻尼模型下船舶非线性大幅横摇近似解析解研究	胡开业 丁勇 杨博 (751)
减摇鳍绕轴摆动时的水动力试验研究	张洪雨 汤振明 (762)
吊舱推进器水动力性能研究	胡健 黄胜 苏玉民 (769)
高速船兴波阻力计算	高高 (776)
高速排水型船舶水弹性力学分析	马山 段文洋 宋竞正 (784)
高耐波性单体复合船型的水动力数值模拟	李积德 程红霞 田明琦,等 (792)

Numerical Simulation of Water Wave by using Non-reflective Wave Maker	Zeng Yi-fei Zhu Ji-mao (799)
基于 NURBS 高阶面元法的有航速辐射问题数值解	王化明 邹早建 (807)
驳船零航速下波浪中的运动响应计算对比	盛庆武 朱德祥 缪泉明,等 (815)
全方向推进器水动力性能的面元预报方法	常欣 黄胜 贡毅敏 (822)
黏性流场中二维摆动水翼的水动力分析	杨亮 苏玉民 秦再白 (830)
动力外荷载作用下浮式板瞬态水弹性分析	邱流潮 刘桦 (839)
三体船黏流数值模拟	李云波 冯国秦 (846)
单点系泊系统的 Liapunov-Schmidt 约化与奇异性分析	杜度 张旭 马骋,等 (852)
波浪对承台冲击作用的试验研究	兰雅梅 刘桦 (862)
两层流体中垂直圆柱浮体的波浪力	尤云祥 石强 魏岗,等 (869)
小间隙对多浮体系统水动力性能的影响	朱仁传 缪国平 尤云祥,等 (878)
动力定位船舶二阶低频慢漂力模型试验研究	王磊 王先福 杨建民 (886)
一种计算长方浮体在流中阻力的方法	王经博 王磊 (894)
基于桨一舵一舵球干扰分析的螺旋桨水动力性能改进研究	马骋 钱正芳 王文初,等 (900)
水面舰船尾流的气泡分布对其电导率的影响	朱江江 陈伯义 (911)

海岸、环境与地球物理流体力学

汽车排放污染物的迁移扩散特征	王嘉松 黄震 (920)
The Element-free Method and Its Application in Tidal Current and Sediment Transportation	Chen Hong (929)
A New Approach on Simulating Two Dimensional Shallow-water Flow with Uneven Bottom	Dong Li-Yun Lu Wei-zhen Andrew YT Leung (936)
利用 Hilbert-Huang 变换的随机波浪的最优滤波	乐嘉春 (945)
波浪斜向入射对斜坡作用的研究	徐绩青 杨斌 杨成渝,等 (952)
海岸河口“五场”数学模型研究及其应用	李孟国 蒋厚武 吴以喜 (960)
南海海流对风场响应的数值研究	黄克 付强 张铭 (969)
墩基局部冲刷中潮流与单向水流的试验比较	卢中一 高正荣 黄建维,等 (974)
淹没丁坝后护坦动水压力试验研究	朱衍美 彭凯 (982)
上海洋山深水港区海域的泥沙环境特征	吴明阳 冯玉林 (988)
不规则波作用下近岸区直墙波浪力的模拟	王登婷 沈英 (996)
层化海中非线性绕射波对含孔结构的作用	黄华 詹杰民 (1004)
航道整治建筑物安全稳定性的灰关联评定	傅华 王渺林 王平义 (1011)
潮流河道上建码头对防洪影响的有限元算法	吴祥华 陈风玉 (1017)
圆弧型贯底式多孔介质防波堤波浪绕射的解析研究	程建生 缪国平 王景全,等 (1024)

球面正压大气扰动传播的谱元方法数值模拟	刘喜迎 (1037)
含淹没植物的河流垂向紊动结构	李艳红 (1045)
海洋内波与海底地形相互作用的几个算例	张庆华 马建 曲媛媛 (1050)
海湾围涂和堵港对海床淤积的影响	伍冬领 谢亚力 唐子文 (1057)
吐噶喇海峡温、盐、流变化分析	马超 吴德星 林霄沛 (1066)
二维对流扩散方程的高精度紧致隐格式及其多重网格算法	葛永斌 田振夫 冯秀芳 (1073)
琼州海峡对北部湾潮汐和潮余流的影响	俎婷婷 郭心顺 鲍献文,等 (1082)
渤海环流季节变化的数值研究	林霄沛 吴德星 鲍献文,等 (1089)
复合索链锚泊线的静特性分析	王冬姣 余国稳 (1096)
基于 Monte-Carlo 法的含水层渗透系数的随机性模拟	李成柱 周志芳 (1103)
江浙来水对黄浦江水质影响研究	尹海龙 徐祖信 (1110)
黄浦江水环境模拟计算边界条件影响分析	徐祖信 尹海龙 (1117)
杭州湾大桥对水环境的影响	熊绍隆 曾剑 韩海骞 (1127)
杭州市新水源水质论证研究	张舒羽 程杭平 (1137)
定常流中立桩基础近似平衡冲坑的数值模拟	陈兵 姜萌 刘亚坤 (1145)
水域分层时电厂取水问题分析	程友良 应博芬 范忠瑶,等 (1152)
大庆市西部地区地下水资源多目标动态规划管理模型	王红旗 舒艳 (1157)

水利水电和河流动力学

论河流动床泥沙模型相似性问题	王学功 葛国兴 吴其保 (1168)
长江河口地区地下水运移规律探讨	陈静 周志芳 贾锁宝 (1176)
黄河下游河势及洪水遥感监测技术	王震宇 孙振谦 (1184)
荆山湖行洪区进洪闸消能防冲与控制运用试验研究	葛国兴 王久晟 (1190)
淮河干流方临河段河工模型设计	杨兴菊 (1195)
黄河下游窄河段挖河减淤综述	侯志军 伊晓燕 李岩 (1199)
黄河山东济南堰工程动床模型试验研究	陈书奎 张俊华 马怀宝,等 (1205)
京沪高速铁路王家庄桥位排冰模型试验	马怀宝 张俊华 陈书奎 (1212)
西江河道某段砂源勘察成果分析	谢新明 刘超常 (1219)
游荡性河道新的整治方法研究	武彩萍 陈俊杰 郭慧敏,等 (1225)
太湖典型入湖河道生态修复工程对水流流速的影响研究	田伟君 王超 翟金波,等 (1230)
珠江网河广州区域二维水动力计算	包芸 马岳雄 姚冬静 (1237)
黄河河口的出汉摆动与稳定性	王开荣 茹玉英 (1244)
坡沟系统坡面流能量变化过程与特征	李勉 姚文艺 陈江南,等 (1250)
潮汐河口盐度紊动扩散系数探讨——以长江口盐度数学模型为例	罗小峰 辛文杰 陈志昌 (1258)

汕尾发电厂循环水泵房前池及流道优化研究	邱静 杜涓 黄本胜,等	(1264)
荷树园电厂取水口引水防沙工程措施研究	黄本胜 邱静 杜涓,等	(1272)
水厂扩建工程取水规模的合理确定	杜涓 黄本胜 邱静	(1280)
涉水建筑物局部阻力简化计算研究	郑国栋 黄本胜 赖冠文,等	(1290)
佛山中油高富码头工程行洪影响评价	黄东 张政 赖冠文,等	(1297)
潼关高程出现历史新高成因	侯素珍 王平 楚卫斌	(1305)
黄河下游泥沙冲淤数学模型在小浪底水库调水调沙方案计算中的运用		
.....	韩巧兰 杨明 王艳平,等	(1312)
小浪底水库初期运用效果分析	茹玉英 尚红霞 韩巧兰	(1318)
潮汐河网地区一维、二维水流、盐度耦合模型研究		
.....	杨莉玲 徐峰俊 王运洪,等	(1323)
西霞院工程泄水坝段上游左导墙冲刷与防护试验研究		
.....	勾兆莉 宋莉莹 郭慧敏,等	(1331)
浅析某工程引水闸的有关水力学问题	宋莉莹 勾兆莉 夏传星,等	(1339)
黄河东明滩区防滚河及其治理措施分析	顾志刚 吴国英 董年虎,等	(1346)
伊洛河至京广铁桥河段修建大型河道缩窄工程洪水期河势和河床及河床变形试验研究		
.....	吴国英 顾志刚 董年虎,等	(1352)
黄河下游河道九年设计水沙系列水位变化试验研究		
.....	赵新建 董年虎 夏修杰	(1357)
黄河河口段河道冲淤特性浅析	夏修杰 赵新建	(1362)
小浪底水库对黄河下游水沙的调控作用	尚红霞 苏运启 李勇	(1368)
黄河首次调水调沙试验下游河道沙量平衡法冲淤计算分析		
.....	汪大鹏 李小平 汪峰	(1375)
黄河下游河道未来 15 年冲淤变化试验研究	董年虎 高际平 夏修杰,等	(1381)
设计引水有利年小北干流放淤实体模型试验研究		
.....	陈孝田 罗立群 赵新建,等	(1388)
长江中下游大型河网水沙数模的建立与验证	宫平 黄煜龄 万建蓉	(1394)

小水线面双体船自控模型的试验研究

朱炳泉 眭爱国 魏纳新 盛庆武

(中国船舶科学研究中心,江苏无锡 214082)

摘要 本研究提出了一个小水线面双体船纵向运动控制系统的数学模型,建立了小水线面双体船纵向运动控制系统试验平台。开展了前后鳍静态和动态水动力学特性试验,证实了设计的前后鳍具有对船的控制能力;然后分别进行了无控前后鳍和单前鳍控制船模在不规则波中的耐波性试验。试验结果表明,前后鳍控制的实船在波高 5m 平均海浪周期 9.5s 的海区作业时,升沉和纵摇有效值分别下降了 13.8% 和 35.2%,单前鳍控制的实船的升沉和纵摇有效值分别下降 1.5% 和 17.4%。

关键词 小水线面双体船,纵向运动,控制系统

1 引言

小水线面双体船是一种高科技、高附加值的高性能船舶,由于其具有良好的耐波性,因而出航率高、晕船率低,被誉为“全天候”船型。然而,事物总是一分为二的。小水线面双体船在高速航行时有可能发生纵向运动失稳。为了避免这一现象的发生,科研人员采取了一些有效措施。其中广为设计工程师们采纳的方法是在其潜体的内侧前后分别安装了一对合理设计的稳定鳍。稳定鳍不仅可以调整船的航行姿态和提高发生埋艏现象的航速,同时还可减小船的纵向运动响应幅值,参考文献[1]详细介绍了有关研究成果。

为了适应特殊作业平台和高舒适性要求(前者如水文调查、水声监听、海洋考察和军用辅助等,后者如观光游览、客渡和娱乐等),有的小水线面双体船还采取手控或自控方式进一步减小船的纵向运动幅值。据不完全统计,直至 2000 年 6 月,世界上已建造的小水线面双体船为 53 艘,其中具有控制系统的达 37 艘,占总建造量的 70%^[2]。由此,控制系统对进一步降低船的运动幅值的重要性可见一斑。

最近,中国船舶科学研究中心开展了小水线面双体船纵向运动控制系统的研究。由于该控制系统具有多输入和多输出(MIMO)的特征,因此本研究采用状态空间的方法,设计了“比例+微分(即 PD)”反馈控制系统^[3],建立了小水线面双体船纵向运动控制系统试验模型,并在中国船舶科学研究中心 01 号试验室开展了比较系统的试验(试验限于顶浪情况)。其中,控制方式不仅有美国在 20 世纪 90 年代开展的单前鳍控制^[4],还有前后鳍控制;试验内容不仅有规则波中耐波性试验^[5],还有不规则波上耐波性试验。这里仅介绍无控、单前鳍控制和前后鳍控制船模在不规则波上的试验结果,并分别预报实船在不规则波中的有效值。试验结果表明,在系统输入经初步调试获得的优化控制规律后,运动状态均有较明显的改善。

2 小水线面双体船纵向运动控制系统的状态方程

假定小水线面双体船是对称的,流体介质是均匀的,可以认为船的纵向运动和横侧运动是可以解耦的。如果研究的情况是垂直面内的小扰动,那么可以建立小水线面双体船纵向运动控制系统的状态方程^[6]:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ U = -KX \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)$,

式中: $x_1 = \bar{h}$ (无量纲升沉), $x_2 = \dot{\bar{h}}$ (无量纲升沉速度), $x_3 = \theta$ (纵摇), $x_4 = \dot{\theta}$ (无量纲纵摇角速度)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{z_{\bar{h}}}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} & \frac{z_{\dot{\bar{h}}}}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} & \frac{z_{\theta} + z_{\dot{\theta}}}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} & \frac{z_{\dot{\theta}} + \dot{z}_{\dot{\theta}}}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m_{\bar{h}}}{\mu r_y^2(1+\bar{\lambda}_{44})} & \frac{m_{\dot{\bar{h}}}}{\mu r_y^2(1+\bar{\lambda}_{44})} & \frac{m_{\theta} + m_{\dot{\theta}}}{\mu r_y^2(1+\bar{\lambda}_{44})} & \frac{m_{\dot{\theta}} + \dot{m}_{\dot{\theta}}}{\mu r_y^2(1+\bar{\lambda}_{44})} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} \cdot \frac{2S_{ff}}{S} \cdot C_{lf}^{\delta} & \frac{1}{\mu(1+\bar{\lambda}_{22})} \cdot \frac{2S_{af}}{S} \cdot C_{la}^{\delta} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\mu r^2(1+\bar{\lambda}_{44})} \cdot \frac{2S_{ff}}{S} \cdot \frac{l_{ff}}{C} \cdot C_{lf}^{\delta} & -\frac{1}{\mu r^2(1+\bar{\lambda}_{44})} \cdot \frac{2S_{af}}{S} \cdot \frac{l_{af}}{C} \cdot C_{la}^{\delta} \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} \delta_{ff} \\ \delta_{af} \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{pmatrix}, \text{控制矩阵。}$$

矩阵 A 和 B 中各符号详见参考文献[6]。

式中, δ_{ff} 和 δ_{af} 分别为前鳍角和后鳍角与初始安装角的偏差,向上为正,向下为负。实际上

$$\delta_{ff} = -(k_{11}\bar{h} + k_{12}\dot{\bar{h}} + k_{13}\theta + k_{14}\dot{\theta})$$

$$\delta_{af} = -(k_{21}\bar{h} + k_{22}\dot{\bar{h}} + k_{23}\theta + k_{24}\dot{\theta})$$

显然,方程(1)是一个比例+微分(PD)反馈控制系统。微分控制的作用具有预测性,这正是增稳系统所希望的;其次,这是多自由度控制系统,这也是采用状态空间来表达本控制系统的原因^[3]。

总之,本次试验的目的—是建立小水线面双体船纵向运动控制系统试验平台,二是探讨控制效果。

小水线面双体船纵向运动控制系统的方块图如图 1 所示

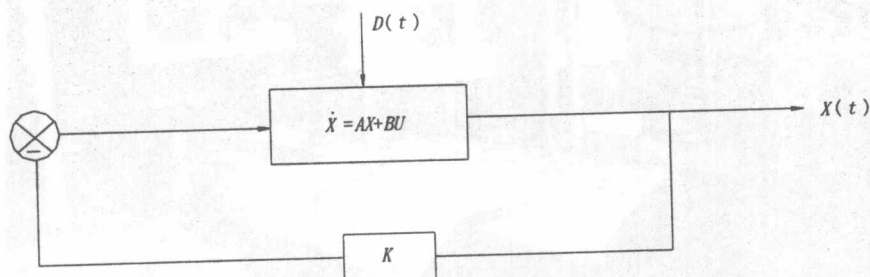


图 1 小水线面双体船纵向运动控制系统方块图

3 小水线面双体船纵向运动控制系统试验模型

小水线面双体船纵向运动控制系统试验模型由 4 部分组成,即带可控鳍的船模、适航仪、计算机实时采样和控制系统以及导航机构。

3.1 带可控鳍的船模

试验船模包括船体、前后鳍及其执行机构。船模(含前后鳍)为一初步设计方案缩尺为 25 的模型,该模型用玻璃钢制作而成。其中前后鳍的执行机构采用的是数码舵机,它较步进电机重量轻、体积小、功率大,且可由计算机控制直接操作。

3.2 适航仪

本试验的拖曳装置是日本生产的 GEL-430-5 型 4 自由度适航仪。该适航仪可自由升沉、纵摇、横摇和前后移,且自带升沉和纵摇信号传感器。

3.3 计算机实时采样和控制系统

计算机实时采样和控制系统由信号传感器、数据采集和处理、前后鳍控制以及数据记录和瞬态曲线显示等部件组成。

计算机数据采集频率为 100Hz。

3.4 导航机构

导航机构是提供船模在拖曳过程中的航向稳定性。它由固定在船模中剖面艏部的导航板和固定在适航仪上的导航杆以及尾舵组成。

安装在 01 号试验室拖车上的自控小水线面双体船船模照片见图 2。

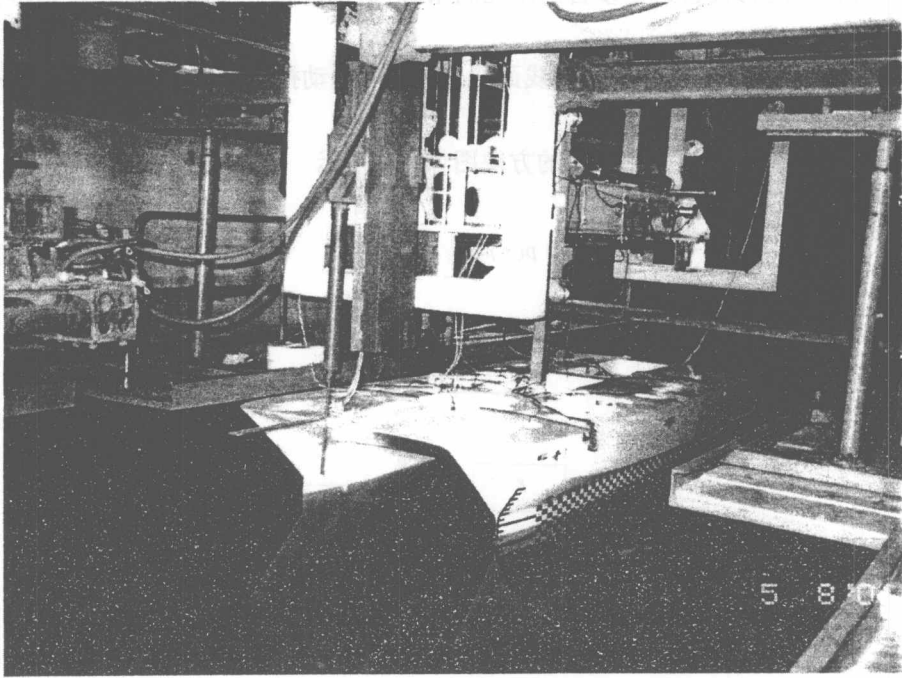


图 2 安装在拖车上的自控小水线面双体船船模

4 试验结果及分析

4.1 可控鳍的静态水动力特性

在本试验中先进行了前后鳍的静态水动力特性试验。试验结果见图 3 和图 4。其中 δ_f 和 δ_a 分别为前后鳍的安装角, Δh 和 $\Delta\theta$ 为相对于设计安装角的升沉和纵倾变化。从中可以看出, 分别改变前后鳍的安装角均对船的升沉和纵摇产生作用。相对而言, 对升沉的影响比较小些。

4.2 可控鳍的动态水动力特性

除了前后鳍的静态水动力特性试验外, 本试验中还进行了动态水动力特性试验(即强迫振荡试验)。试验结果见图 5 和图 6。其中 ω_f 和 ω_a 分别前后鳍强迫振荡频率, h_a 和 θ_a 分别为稳态升沉和纵摇幅值, φ_h 和 φ_θ 分别为升沉和纵摇的相位角。

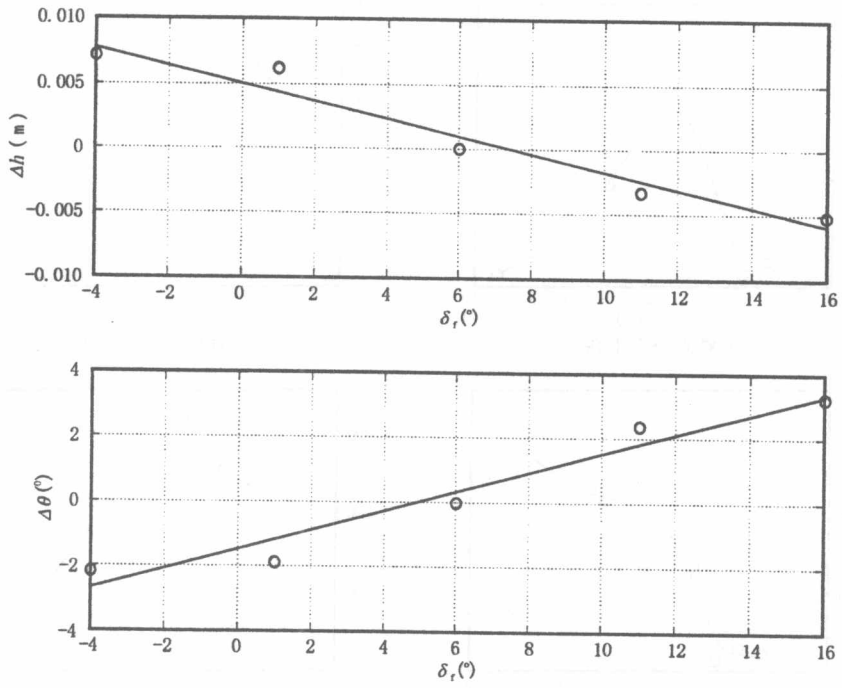


图3 前鳍静态水动力特性

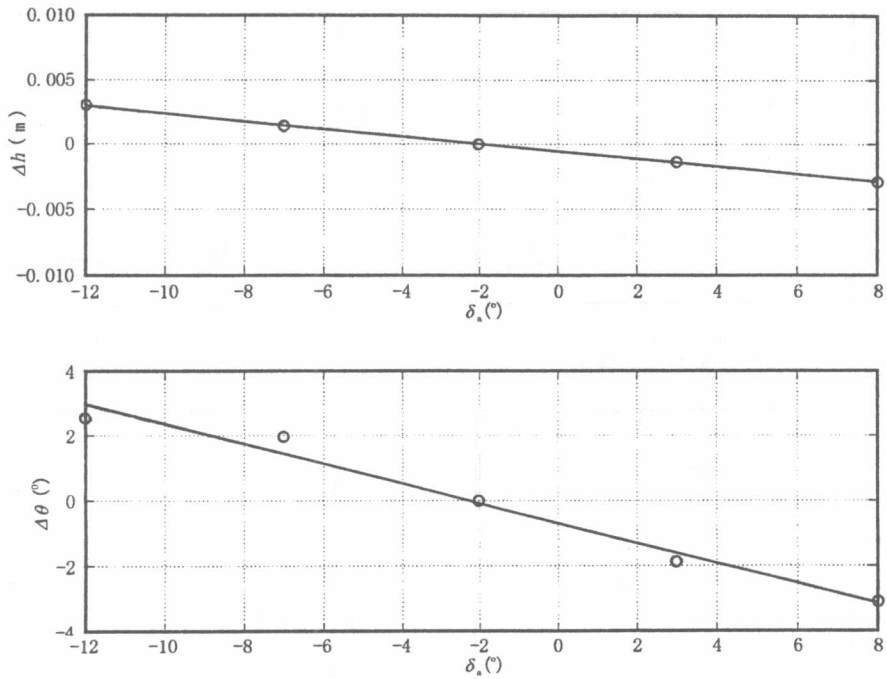
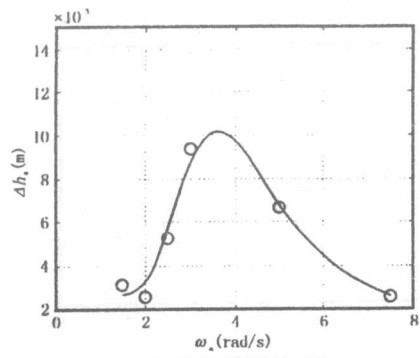
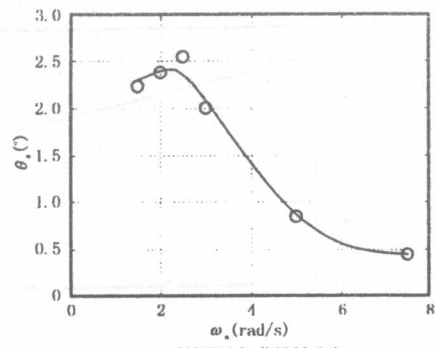


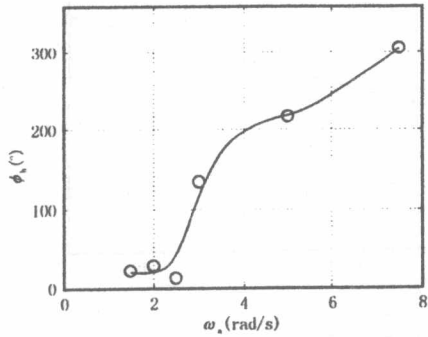
图4 后鳍静态水动力特性



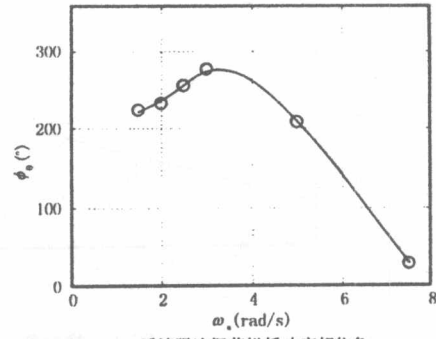
后鳍强迫振荡升沉响应



后鳍强迫振荡纵摇响应

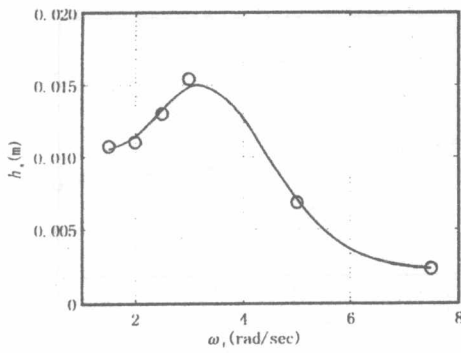


后鳍强迫振荡升沉响应相位角

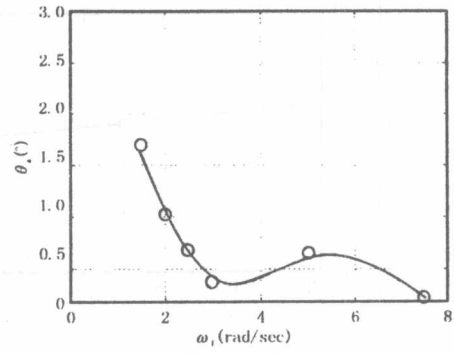


后鳍强迫振荡纵摇响应相位角

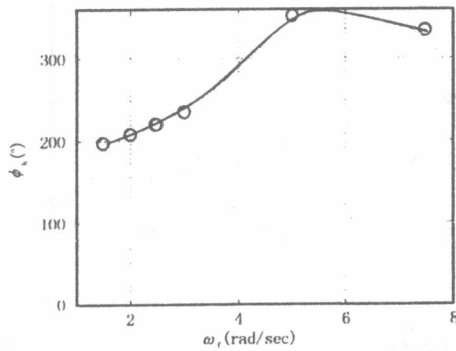
图5 前鳍动态水动力特性



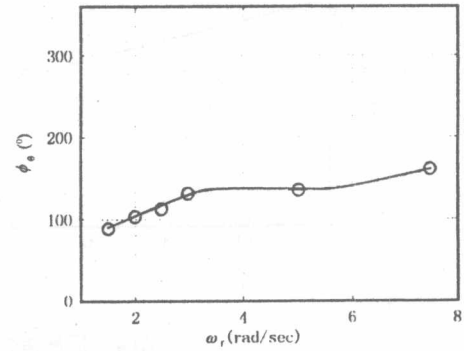
(a) 前鳍强迫振荡升沉响应幅值



(c) 前鳍强迫振荡纵摇响应幅值



(b) 前鳍强迫振荡升沉响应相位角



(d) 前鳍强迫振荡纵摇响应相位角

图6 后鳍动态水动力特性

4.3 船模在不规则波中的耐波性试验结果与分析

上述前后鳍的静态和动态水动力特性试验结果表明,设计的前后鳍在其正常工作范围内对船模纵摇和升沉运动具有控制力,这是进一步开展控制船模试验的前提。

初步设计方案的设计航速和作业海况为:① 航速 15kn;② 有效波高 5m;③ 平均海浪周期 9.5sec。

船模在不规则波中的耐波性试验分三种情况,即无控,前后鳍控制和单前鳍控制,试验结果见表 1。控制矩阵 K 的选取方法可见参考文献[5]。

表 1 无控和有控船模不规则波中耐波性试验结果

受控情况	序号	$\zeta_{m1/3}$ (m)	$h_{m1/3}$ (m)	$\theta_{m1/3}$ (°)
无控	1	0.0842	0.0874	2.750
	2	0.0917	0.0915	3.021
	3	0.0818	0.0757	2.596
	4	0.0813	0.0776	2.896
	5	0.0835	0.0783	2.710
	6	0.0898	0.0813	3.088
前后鳍控制	1	0.0895	0.0686	1.996
	2	0.0924	0.0767	1.850
	3	0.0820	0.0703	1.740
	4	0.0933	0.0848	2.338
	5	0.0954	0.0752	1.882
	6	0.0849	0.0697	1.794
单前鳍控制	1	0.0886	0.0835	2.549
	2	0.0847	0.0821	2.395
	3	0.0943	0.0874	2.348
	4	0.0895	0.0855	2.281
	5	0.0884	0.0921	2.456
	6	0.0872	0.0729	2.595

根据上述试验结果和耐波性理论^[7],可以对上述三种情况的模型试验结果分别预报实船运动特性,详见表 2。

表 2 无控和有控实船运动特性预报(由不规则波试验结果得出)

受控情况/控制效果	$h_{m1/3}$ (m)	$\theta_{1/3}$ (°)
无控	2.400	3.300
前后鳍控制	2.068	2.158
相对控制效果(%)	13.8	35.2
单前鳍控制	2.363	2.750
相对控制效果(%)	1.5	17.4

从表 2 中可以看出:

(1) 与规则波试验一样(见参考文献[5]),前后鳍控制的初步设计方案实船在要求的海域作业时升沉和纵摇均有不同程度的改善,这再一次证实了本次试验中所取的初步优化控制矩阵不仅对纵摇控制有效,而且对于一般认为较难实现的升沉控制也有效。

(2) 单前鳍控制亦对纵摇具有降幅效果,但同前后鳍控制相比,其控制效果相对较差。

5 结语

(1) 我所建立了一套较为完善的小水线面双体船纵向运动控制系统试验平台,解决了诸多试验技术,其中最主要的是适用于船模试验且性能可靠和安装方便的执行机构以及计算机实时采样和控制系统。该试验方法同样也适用于其他高性能船舶的控制系统试验研究。

(2) 经初步优化的前后鳍控制后,试验方案实船在波高 5m、平均海浪周期 9.5s 的作业海区顶浪中航行时不仅纵摇有效值下降 35.2%,且升沉有效值也下降了 13.8%;单前鳍控制时,纵摇有效值下降 17.4%。

(3) 试验研究也发现了许多有待进一步研究的课题。诸如小水线面双体船有关运动导数和前后鳍升力特性较精确的测试;如何确定控制矩阵与航行状态(如平台航行还是爬坡航行,还是二者兼顾)之间的关系和进一步研究适用于小水线面双体船的其他先进控制方法与技术等。

参 考 文 献

- 1 朱炳泉. 小水线面双体船纵向运动稳定性的灵敏度分析[J]. 中国造船, 2004, 45(2): 14-23.
- 2 郑明, 刘淮, 倪冶, 王绍明. 世界小水线面双体船图集[M]. 北京: 中国船舶工业综合技术经济研究院, 2002.
- 3 Katsuhiko Ogata, 卢伯英, 于海勋等译. 现代控制工程. 第三版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- 4 Edvard M. Lewandowski. Experimental Study of an Automatic pitch control system on a SWATH model. AD-A282716. June, 1994.
- 5 朱炳泉, 眭爱国, 魏纳新, 等. 小水线面双体船纵向运动控制系统的试验研究[J]. 中国造船(待发表).
- 6 朱炳泉, 郭值学, 盛庆武. 小水线面双体船最优控制规律初步研究[R]. 中国船舶科学研究中心技术报告, 2004.