



第二十三届全国水动力学研讨会暨 第十届全国水动力学学术会议文集

Proceedings of the 23rd National Conference on Hydrodynamics
and 10th National Congress on Hydrodynamics

吴有生 刘 桦 程 文 周连第 主编



海洋出版社

第二十三届全国水动力学研讨会暨 第十届全国水动力学学术会议文集

Proceedings of the 23th National Congress on Hydrodynamics and
10nd National Conference on Hydrodynamics

吴有生 刘 桦 程 文 周连第 主编

主办单位
《水动力学研究与进展》
中国力学学会 编委会
中国造船工程学会
西安理工大学

海洋出版社

2011 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

第二十三届全国水动力学研讨会暨第十届全国水动力学学术会议文集/吴有生等主编. —北京:海洋出版社,2011.8

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8084 - 5

I. ①第… II. ①吴… 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(2011)第 164412 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

2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:44.5

字数:1100千字 定价:130.00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

目 录

大会报告

太子河流域水生态承载力的研究	周孝德	(1)
船型演化与船舶水动力学基础共性技术研究	缪国平 范菊 朱仁传 范余明	(7)
黄河下游洪峰增值研究综述	江恩惠 李军华 董其华 赵连军	(19)
基于PAT修复物理试验的BTEX迁移转化模拟及过程控制思路	秦俊杰 尹冬勤 黄跃飞	(27)
气液两相及多相流相界面非线性动力学行为研究	郭烈锦	(41)

水动力学基础

微尺度下液体启动压力梯度的分子动力学研究	陈晓星 宋付权	(46)
空泡流计算的线性与非线性湍流模式比较	陈 瑛 鲁传敬 陈 鑫 潘展程	(52)
涡环对气泡夹带作用的数值模拟	王智伟 内山知实 陈斌	(61)
被动标量的任意阶 Hilbert 谱分析	黄永祥 Francois G. Schmitt 卢志明 刘宇陆	(67)
椭圆余弦内波与多个墩柱的作用	程友良 郭飞 党岳	(74)
浅水中绕二维楔自然空泡流的边壁效应研究	陈鑫 陈瑛 鲁传敬 胡世良 程闻	(80)
两个周期性膨胀、收缩的运动物体在无黏性流体中的动力学行为	马鸿宇 孙仁	(88)
不同雷诺数的圆柱绕流比较计算与分析	黄苗苗 缪泉明 吴维武	(94)
子母管结构尾迹涡脱落的近壁面效应	臧志鹏 高福平 崔金声 唐驰	(100)
连续分层流中源致内波的 CFD 模拟方法	姚志崇 赵峰 洪方文	(106)
旋转坐标系下的湍流模式修正研究	马峰 张伟 陈红勋	(113)
流固耦合问题的非边界适应方法及无网格方法的研究进展	吴兴 李志鹏 王昌生	(121)

计算流体力学

Numerical Study of Focused Wave Impact on a 2-D Floating Body Using CIP-based Method	Xizeng Zhao, Sheng Dong	(130)
基于有限水深 Kelvin 源的船舶兴波及兴波阻力计算	缪涛 张志宏 顾建农 刘巨斌 王冲	(137)
基于拟谱方法的 fKdV 方程数值模拟研究	陈琪 王松岭 吴正人	(143)
伴流中螺旋桨非定常力黏性数值方法研究	刘登成 洪方文 张志荣 胡芳琳	(148)
改进的 MPS 方法在晃荡问题中的应用	张雨新 万德成	(156)
均匀流场中桨毂帽鳍流动特征的数值模拟	吴琼 冯学梅 丁举 蔡荣泉	(163)
孤立波作用下水—浮泥流场两相 SPH 模拟	王本龙 P. L. F. Liu 刘桦	(170)
液舱晃荡数值计算方法的一些探讨	李裕龙 朱仁传 缪国平 范菊 洪亮	(176)
三维水翼空化流场的数值模拟研究	赵伟国 张凌新 邵雪明	(184)
小振幅平面运动机构试验粘性流场数值模拟	杨勇 邹早建 楼鹏宇	(190)
高充水情况下二维晃荡的数值模拟	郭晓宇 王本龙 刘桦	(196)

水动力学试验与测试技术

- 海洋环流模式正压模经济时间积分方案试验..... 刘喜迎 刘海龙 李薇 (202)
- 水基纳米分散液双重减阻机制的实验验证 王新亮 狄勤丰 张任良 顾春元 丁伟朋 龚玮 (210)
- Experimental Research on Water Entry of a 3-Dimensional Body WEI Zhao-yu HU Chang-hong Makoto Sueyoshi SHI Xiu-hua (217)
- 风洞循环水槽的 CFD 辅助设计..... 李金成 陈作钢 代焱 (223)
- 空泡两相流场 PIV 测试技术研究..... 吴颖昕 张国平 (234)
- 一种管道式导流片型油水分离器研究..... 史仕炎 吴应湘 马乃庆 王淑京 (242)
- 吊舱推进器敞水试验方法研究..... 沈兴荣 范余明 蔡跃进 (252)
- 越浪水体的流速特征探讨 朱伟娜 吴卫 房詠柳 (259)
- 矩形通道中螺旋线圈扰流特性 PIV 实验研究..... 唐玉峰 田茂诚 张冠敏 (264)
- 加装矩形翼纵向涡发生器翅片间层流流场 PIV 实验研究 张冠敏 刘建 田茂诚 (271)
- 圆柱体横向涡激振动试验与测试技术研究..... 吴维武 王艳霞 缪泉明 黄苗苗 (277)
- 湍流积分长度新型联合测试方法研究..... 刘建华 谢 华 田于逵 (283)
- 应用 TR-PIV 技术进行水翼尾流 TILS 测量分析..... 翟树成 张军 赵峰 陆林章 (290)
- 水下运动体体效应内波理论分析研究..... 洪方文 姚志崇 高丽瑾 王小青 (298)

工业流体力学

- 基于 APDL 的悬浮隧道管段的可靠度分析..... 罗刚 周晓军 (306)
- 容器内隔板对液体晃荡影响的模拟研究..... 宁德志 宋伟华 刘玉龙 滕斌 (313)
- 仿生水龟机器人的设计和研究..... 赵泰磊 宋付权 (320)
- 油田注水管网系统水力参数的数值计算..... 王玉晶 甄贵男 梅雪松 崔海清 (326)
- 抽油机井抽汲参数优化设计方法..... 董振刚 李洋 崔海清 (332)
- 柱型旋流器结构参数对其分离性能的影响..... 刘海飞 吴应湘 许晶禹 张健 张军 郭军 (339)
- 一种新型油水两相流分离计量方案的研究 张健 吴应湘 李东晖 许晶禹 刘海飞 李华 (346)
- 管道旋流中油芯的形成条件与形态研究..... 孙焕强 吴应湘 张军 马乃庆 钟兴福 (352)
- 改善水流特性提高超声波热量表精度的研究..... 沈芳 杜广生 刘永辉 翟成园 (359)
- 82000DWT 散货船螺旋桨毂帽鳍节能技术研究 施小勇 马艳 (365)
- 油井产出液不加热不加压集输可行性的数值分析 刘俊龙 杨棕景 张伟 闫月娥 崔海清 (373)
- 粉末活性炭在原水输水渠道中的沉降研究 尹海龙 郁达 徐祖信 李怀正 (379)
- 粉末活性炭在原水输水渠道中的冲刷研究 尹海龙 杨扬 徐祖信 李怀正 (390)
- 浮子参数对波浪能吸收效能的影响分析..... 倪歆韵 缪泉明 (399)
- 不同大气条件下隧道风塔废气扩散研究..... 姜利 王嘉松 肖进 余斌 叶国强 (405)
- 螺旋桨与毂帽鳍的优化匹配设计..... 黄国富 马艳 辛公正 陆芳 施小勇 (411)
- 某 82000T 散货船节能装置研究..... 黄少锋 杨奕 黄国富 曾志波 黄树权 (417)

船舶与海洋工程水动力学

- 大型 LNG 船液体晃荡及其波浪载荷影响的模型试验研究.....

.....	汪雪良 顾学康 徐春 胡嘉骏 (423)
侧斜与纵倾对螺旋桨水动力性能的影响分析.....	王超 何苗 周剑 常欣 黄胜 (431)
不同载荷工况下敞水螺旋桨尾流场的数值研究.....	何苗 王超 郭春雨 常欣 黄胜 (437)
垂荡板结构参数变化对 Truss Spar 平台水动力性能的影响研究	
.....	桑松 姜雪亮 徐学军 (443)
民船螺旋桨空泡与脉动压力特征关系研究.....	黄红波 陆芳 施小勇 韦喜忠 (450)
带自由液面的艇/桨干扰特性数值模拟与验证研究.....	张楠 沈泓萃 姚惠之 杨仁友 (459)
螺旋桨空化初生和空化斗的数值求解.....	杨琼方, 王永生, 张志宏 (467)
新概念 FPSO 方案的完整稳性与破舱稳性研究	王天英 刘海芳 (475)
基于黏流水动力计算的单体复合船型运动预报	孙树政 缪泉明 李积德 (482)
波浪中三体船水动力布局优化研究	吴乘胜 王迎晖 高雷 兰波 周德才 (488)
基于 Bezier Patch 几何重构技术的船舶球艏构型优化设计研究.....	李胜忠 赵峰 (496)
基于 Rankine 源法的船体艏部优化.....	徐力 陈作钢 (503)
斜航状态下吊舱推进器的横向力数值预报.....	胡芳琳 张志荣 (514)
基于 FINE/Marine 的水面高速航行器的水动力数值模拟.....	贾力平 康顺 (525)
集装箱船参数横摇的非线性时域模拟.....	陈京普 苏甲 徐杰 朱德祥 (532)
三体船在斜浪规则波中运动响应预报方法研究	马山 段文洋 周立师 王瑞锋 周耀华 (539)
大涡模拟风浪中动物体的流固耦合问题.....	李廷秋 (545)
有升力势流三维面元法计算与分析三体船操纵性水动力	詹金林 卢晓平 崔焰 (551)
基于 CFD 的拖式吊舱推进器尺度效应研究.....	车霖源 陈昌运 (558)
风帆助推船舶操纵性预报研究.....	陈纪军 吴宝山 沈定安 赵桥生 杨立 (566)
对转吊舱推进器水动力性能预报与模型试验.....	辛公正 刘登成 施小勇 韦喜忠 (573)
深水铺管起重船运动性能预报与铺管作业率评估.....	张进丰 祁江涛 许文兵 缪泉明 (585)
不同类型船舶伴流数值模拟研究.....	于海 吴琼 冯学梅 王金宝 蔡荣泉 (594)

海岸环境与地球物体流体力学

南海海啸反问题预报模式.....	李林燕 毛献忠 (603)
连云港港 30 万吨级航道一期工程二维潮流泥沙数值模拟研究.....	谢军 丁琦 (609)
莱州湾东北部人工岛群建设对水动力环境影响的数值研究	
.....	张立奎 吴建政 李巍然 安永宁 (618)
斜向波与双层水平板潜堤相互作用的理论研究.....	刘勇 李玉成 (626)
钱塘江闻堰至仓前河段涌潮数值模拟.....	王灿星 陈菊芳 金晗辉 王玉芝 (633)
波浪与振动柱体相互作用的数值模拟研究.....	詹杰民 韩毅 李毓湘 苏炜 (639)

水利水电和河流动力学

取排水布置对水域环境的影响.....	程友良 刘丽丽 郝青哲 (647)
数值分析长江口深水航道上段淤积的原因	陈维 顾杰 秦欣 马丹青 (653)
弯曲明槽水流运动的三维数值模拟.....	凡伟 槐文信 杨洪武 (662)
浮体一字门动水启闭过程的数值模拟研究.....	黄树权 黄少峰 黄国富 徐杰 (669)
缺水河流水质改善方案研究—以合肥市南淝河为例	尹海龙 叶之 徐祖信 (676)
槽道中跌坎附近水流运动的实验研究与数值模拟.....	张康乐 范敏 刘士和 罗秋实 (690)
生态丁坝对河道水流形态及泥沙沉降的影响规律研究	
.....	王沛芳 杨传清 王超 艾小榆 李丽娜 (697)

驶经桥墩船体非定常水动力相互作用数值预报.....	张晨曦 邹早建 (702)
基于有限体积法的渭河河道洪水运动数值模拟.....	范敏 周晓岚 刘士和 (708)

太子河流域水生态承载力的研究

周孝德

(西安理工大学, 西安 710048)

1 流域水生态承载力理论基础

1.1 流域水生态承载力内涵

“承载力”在生态学概念中,是指一个生态环境所能支持的某一物种的最大量。随着人们对社会可持续发展与生态环境相互关系认识程度的提高,承载力的概念越来越广泛的被应用于各个研究领域。

水生态承载力研究尚处于起步阶段,只有个别的研究涉及到与水有关的生态环境承载力研究,完整的理论体系还没有形成。流域水生态承载力应既考虑水资源量上的满足,又考虑水环境质上的保证,同时强调有关生态系统的健康发展。因此,将水生态承载力定义为:在一定历史阶段,某一流域的水生态系统在满足自身的健康发展前提下,在一定的环境背景条件下,所能持续支撑人类社会经济发展规模的阈值。

根据本文对水生态承载力的定义,水生态承载力的内涵包含以下几个方面:①是“在一定历史阶段,某一流域的水生态系统”的承载力,具有明显的时序性和空间性。首先,水生态承载力是一定区域尺度上水生态系统自身的承载力,具有相应的空间性;其次,水生态承载力是相对于一定时期而言的,不同时期水生态的内涵和外延以及人类的观念是不断发展的;最后,水管理和社会经济也存在明显的时空差异。②“一定的环境背景”包括社会环境和自然环境,其中社会环境包括经济发展水平、科学技术水平及人为对水生态系统造成影响的活动;自然环境包括水、大气、生态系统等的状况。③“自身的健康发展”包括水作为资源在量上的保证以及作为纳污主体在环境质量上符合一定的标准,同时作为一个生态系统,在结构上自我调节、维持平衡(水生生物资源、生物多样性等);④水生态承载力是持续的,包括水生态系统对社会经济系统的持续承载、社会经济可持续发展和水生态承载力持续增强三方面。

随着社会的发展和人类认识的进步,水生态承载力是承载力概念的进一步发展,是在水环境承载力、水资源承载力研究基础上发展而来的流域综合管理概念,是研究与水有关的生态环境承载力,既考虑水资源量上的满足,又考虑水环境质上的保证,同时又强调了与水有关生态系统的健康发展。水生态承载力在内涵和意义上较水资源承载力、水环境承载力扩大了水生态这以系统,较生态环境承载力具体到水环境这一领域。水资源承载力是水生态承载力的基础条件,水环境承载力是生态承载力的约束条件,生态弹性力是水生态承载力的支持条件。

*基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-004-T005)。

1.2 流域水生态系统承载机制研究

由前面的概念可知,流域水生态承载力研究面对的是一个由社会、经济、水资源和生态环境构成的纷繁复杂的巨系统,他们之间的关系错综复杂,根据对水生态系统的影响,将其分为支撑体系和约束体系。系统关系如图 1 所示。其中水资源系统对人口、工业、农林牧渔业、水生态系统具有支持作用,水资源量越大,越能促进它们的发展,另外水资源的开发利用程度能影响到水生态系统结构的变化;人口、工业、农林牧渔业构成的社会经济系统对水资源的索取程度反应水资源量的供需平衡关系,同时工业废水排放对水环境造成污染,对水生态系统有约束作用,此外人类活动在破坏水生态环境的同时,又会采取补救措施减小对水生态系统的影响;水环境系统为水生生物提供生长环境,水质的优劣会影响渔业的发展,以及水生态系统的健康程度,此外还会影响到可用水资源的量,进而影响整个社会经济发展;水生态系统的结构变化会反应水环境的质量,同时也会通过自身的生化作用影响到水环境的质量。

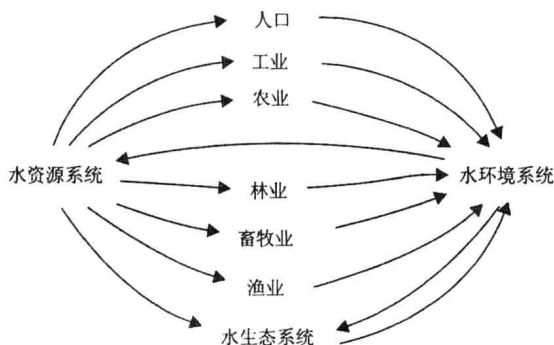


图 1 水生态系统结构分析

由以上分析可知,任何一个子系统都对水生态系统有两面性作用,过度强调有利的一面或不利的一面都是不合理的,过度保护水生态系统会影响到社会经济的发展,完全不理睬水生态系统的健康程度,水生态环境遭到破坏又会反过来影响社会经济的发展,因此在研究时应找到一个二者协调发展的平衡点,在最小程度影响水生态环境的基础上,保证社会经济稳定发展。

2 太子河流域水生态承载力指标体系

影响水生态承载力的因素复杂多变,包括水资源量、水资源、水环境、水生态、土地资源以及人口、社会经济领域的各种指标,如果都将其考虑在内,就会出现指标繁杂,难以量化等问题。因此应根据科学性、全面性、层次性等准则并结合流域实际情况对指标进行筛选,同时也参照中国水科院的意见,构造了一个具有三层递接层次结构,包含 13 个单项指标的太子河流域水生态承载力指标体系(图 2)。

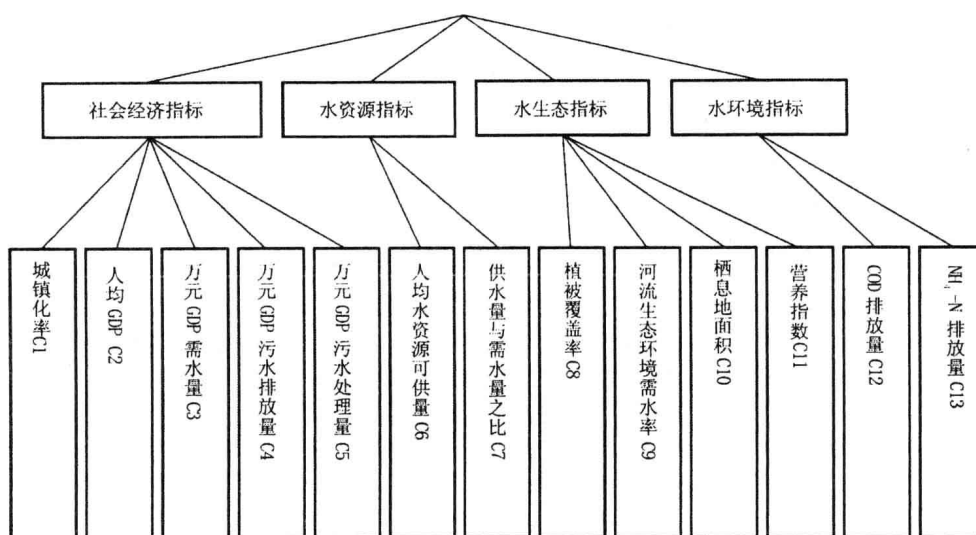


图 2 流域水生态承载力指标体系

太子河流域水生态承载力系统动力学模型见图 3。

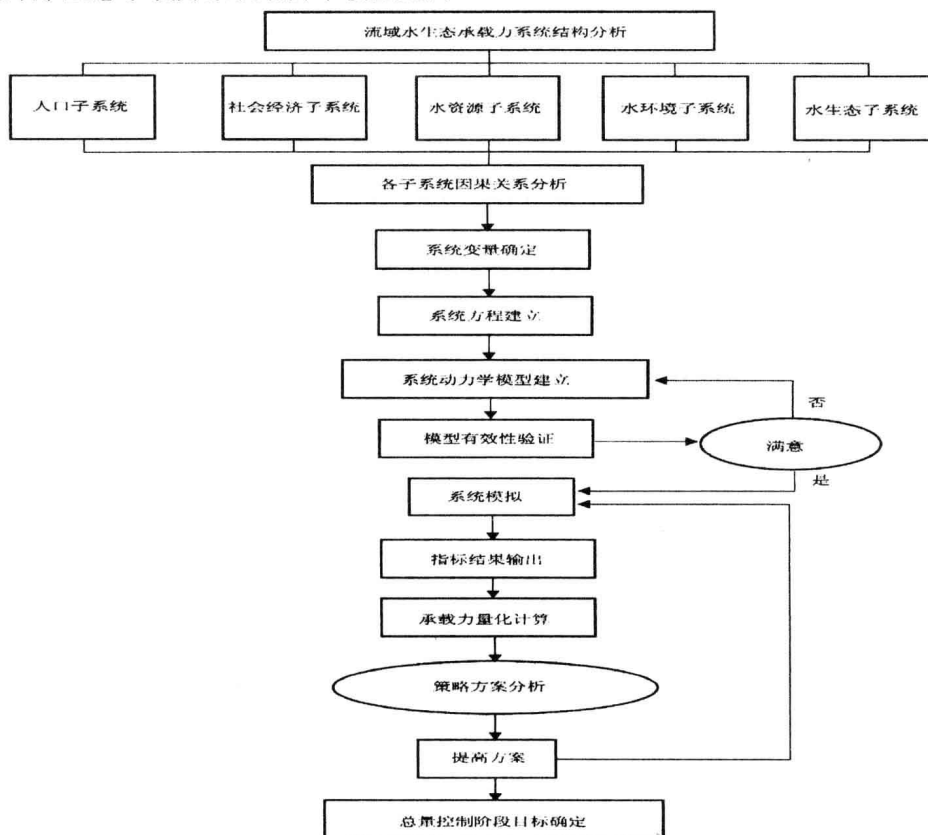


图 3 流域水生态承载力系统动力学流程

3 太子河流域水生态承载力现状评价与发展预测

3.1 预测情境设计

根据太子河流域各生态分区的特点,以及各子系统之间的关系可以看出,经济社会子系统的产业结构和经济发展速度一方面关系着用水量的大小,同时还关系着水污染排放情况,因设计经济调控措施可以调节各水生态分区的水生态承载状态;经济社会子系统的生产、生活用水水平直接影响了水资源子系统的供需平衡,进而影响缺水限制因子,又反过来影响人类社会的生产生活,因此设计节水措施应该可以调节各水生态分区的水生态承载状态;此外,直接调控水污染的排放情况能更直接有效的调节承载状态。

通过以上分析,结合辽宁省的水资源规划,从经济调控、节水、污染控制等角度来设计方案模拟 2007—2015 年的指标变化情况,通过水生态承载度来分析太子河流域各生态分区在不同情境下的水生态承载力发展趋势,从而得出对各生态分区的水生态承载力改善效果较好的措施。具体方案见表 1:

表 1 流域水生态承载力提高方案设计

方案	策略	途径	措施
规划方案	无	无	不做任何调控。
方案 1	经济调控	产业结构调整	限制高用水工业、污染严重工业企业的发展速度,高用水工业比重(本溪、汤河、辽阳、柳壕河、鞍山)每年递减 0.01
方案 2		控制经济增长速度	GDP 年均增长率降低 0.5%
方案 3	节水	工业节水	高用水工业用水定额和一般工业用水定额分别每年递减 $8.75 \text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $2.62 \text{ m}^3/\text{万元}$
方案 4		农业节水	控制农业灌区(汤河、北沙河、柳壕河、鞍山)的用水定额,水田灌溉定额、水浇地灌溉定额、菜田灌溉定额分别每年递减 $3 \text{ 万 m}^3/\text{万亩}$ 、 $1.6 \text{ 万 m}^3/\text{万亩}$ 和 $1.7 \text{ 万 m}^3/\text{万亩}$
方案 5	污染控制	控制排放	工业废水排放系数每年递减 0.01
方案 6		污水回用	污水回用率每年递增 0.03
综合方案	综合	综合 1-6	综合 1-6 措施

3.2 预测结果分析

(1) 根据各水生态分区的水生态承载力的现状评价结果,可以看出:现状年天然生态区(观音阁水库下游区)水资源量充沛,生态指标较好,水生态承载度最高;侵窝水库区和汤河水库区略有轻度富营养问题,但总体上承载度较好;城市生态区中本溪城区、鞍山城区的城镇化进程较快,GDP 水平较高,污染物排放量大,对水环境压力较大,水生态承载度较低,而辽阳城区植被覆盖率高,污染物排放量相对小一些,因此水生态承载度稍人一点;农业生态区中北沙河区的水生态承载力较差,柳壕河区水生态承载力较好。

(2) 从分区分期计算结果中可以看出,观音阁水库下游区、农业生态区(北沙河区、柳壕河区)、汤河区和鞍山城区的水生态承载度最小值出现在 6 月份,这是由于这几个生态区在 4-10 月份的需水量比较大,面源污染也相对比较严重,而 6 月份的水资源量又最小,这些都是影响水生态系统承载力的不利因素,因此对天然生态区和农业生态区水生态系统的治理保

护应该重点加大节水力度和农业面源污染控制上。城市生态区（本溪城区、辽阳城区）和侵窝水库区的水生态承载力最小值均出现在 1—2 月份，这是由于在用水水平变化不大的城市生态区和水库生态区，冬季处于冰封期的水生态系统的水资源量较小、水体自净能力较差，水生态指标也较小，因此对于这三个生态区水生态系统的治理保护应该把重点放在点源污染物控制上。

(3) 从方案设计下的各分区的水生态承载力模拟计算结果可以看出，综合方案对任何一个水生态分区的水生态承载力提高效果都最好，但针对不同分区，侧重点则不同。根据各水生态分区的特点，提出各水生态分区的水生态承载力提高措施和水污染控制目标（表 2）。

表 2 各分区水生态承载力提高措施

生态分区	提高措施	水污染控制目标
观音阁下游区	工业节水	保持现状
本溪城区	工业节水、产业结构调整、控制排污	COD、NH ₃ -N
侵窝水库区	工业节水	TN、TP
汤河区	工业节水、产业结构调整	保持现状
辽阳城区	工业节水、产业结构调整	COD、NH ₃ -N
北沙河区	工业节水、农业节水、污水回用	NH ₃ -N
柳壕河区	工业节水、农业节水	COD、NH ₃ -N
鞍山城区	工业节水	COD、NH ₃ -N

4 太子河流域水生态系统健康评价

根据调查结果可以看出，太子河流域内水生生物类群分布呈现较强的空间分异特征：河道水体与水库水体差异显著，尤其是在浮游动物方面，水库内种数、属数、生物量及密度均显著高于河道；河道水体总体上可划分为本溪河段及侵窝以下河段两大类，其中，本溪河段内硅藻占优势，自上而下逐步降低，绿藻逐渐上升；浮游动物、鱼类种数自上而下逐渐降低，生物量及密度则自上而下成偏 U 型；侵窝以下河段绿藻占优势，硅藻所占百分比不断下降；浮游动物种数、属数变化特征不显著，总密度、总生物量自上而下逐渐降低；鱼类自上而下种数逐渐降低，在小姐庙最低。

5 太子河流域水污染物总量控制措施研究

从 COD 排放量及相应的 COD 环境容量承载率的预测结果可以看出，随着经济社会的发展，太子河流域各生态分区的 COD 排放量在逐年增加，尤其三个城市生态区的增长速度较快，而其 COD 环境容量承载率在逐年降低，其中观音阁水库下游区的 COD 环境容量承载率虽然在降低，但一直大于 1，不需采取措施，侵窝水库区和北沙河区的 COD 环境容量承载率分别在 2016 年和 2025 年后小于 1，其他生态分区的 COD 环境容量承载率一直小于 1，因此需要采取调控措施使之满足容量总量控制要求。

从 NH₄-N 排放量及相应的 NH₄-N 环境容量承载率的预测结果可以看出，随着经济社会的发展，太子河流域各生态分区的 NH₄-N 排放量在逐年增加，尤其本溪城区、鞍山城区、侵窝水库区和北沙河区的增长速度较快，而其 NH₄-N 环境容量承载率在逐年降低，其中观音阁

水库下游区的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 环境容量承载率虽然在降低,但一直大于 1,不需采取措施,其他生态分区的 $\text{NH}_4\text{-N}$

6 结论

(1) 在总结了承载力概念的演变过程的基础上,针对太子河流域的生态环境特点提出了水生态承载力的概念,并阐述了水生态承载力的内涵,比较了与水资源、水环境、生态环境承载力之间的关系,分析其特性和影响因素。

(2) 根据科学性、全面性、层次性等准则并结合太子河流域实际情况对指标进行筛选,构造了一个具有三层递接层次结构,包含 13 个单项指标的太子河流域水生态承载力指标体系。并采用层次分析法对各指标的权值确定。

(3) 基于水生态环境系统的复杂性,利用系统动力学的原理和方法,从分析流域的人口、社会经济、水资源、水环境、水生态系统之间的相互关系入手,考虑到各分区之间的水流、水质交替关系,建立了基于水生态分区的太子河流域水生态承载力系统动力学仿真模型。在对模型有效性验证后,模拟了各指标在 50%、75%、95%水文频率下的 2007—2015 年的变化情况;对其 8 个水生态分区的水生态承载力进行计算比较。计算了太子河流域各水生态区水生态承载度的年内变化情况,确定了各水生态区水生态承载力最小值出现的月份。

(4) 基于流域系统动力学模型,设计了经济社会调控、节水、治污等 7 个发展方案,并对每一种发展方案的提高水生态承载力效果进行预测评价,根据各分区的特点提出相对应的水生态承载力的提高措施,为流域可持续发展战略的实施提供科学依据。

(5) 在讨论流域水生态健康内涵及评价方法的基础上,确定了太子河流域水生态健康评价方法,根据辽宁师范大学生命科学学院对“典型区太子河流域水生态调查”的调查报告,对太子河流域水生态系统健康进行了评价。

(6) 根据辽宁省“十一五”发展规划,预测了太子河流域各生态分区在不同频率下的 COD 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 排放量,确定了总量控制项目及目标,并根据各生态分区废水排放结构及多情境下各生态分区的水生态承载力计算结果,设计污染物总量控制措施,使得各分区的污染物排放满足其容量总量控制需求。

参 考 文 献

- 1 王俊英,杜金辉,吕培茹,等. 山东省水生态环境承载力探讨. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 94-98.
- 2 陈艳霞. 渭河流域关中地区水环境承载力研究. 陕西: 西北农林科技大学, 2007.
- 3 赵青松. 汉江上游流域水环境承载力研究. 西安: 西安理工大学, 2006.
- 4 刘启明,张晨岚,林锦美,等. 厦门城市水环境承载力综合指标体系评价. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 94-96.
- 5 李吉玖,徐海量,宋郁东,等. 伊犁河流域水资源承载力的综合评价. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 39-43.
- 6 王书转. 生态承载力研究方法探析. 三峡环境与生态, 2009, 2(5): 1-4.
- 7 程占红,王言荣,苏志珠,等. 山西昕水河流域生态环境承载力的研究. 山西大学学报(自然科学版), 2006, 29(3): 326-329.
- 8 王其藩. 高级系统动力学. 北京: 清华大学出版社, 1995.

船型演化与船舶水动力学基础共性技术研究

缪国平*, 范菊*, 朱仁传*, 范余明*

(1 上海交通大学 2 中国船舶工业集团公司第七〇八研究所)

摘要: 本文以船型演化的历史轨迹为出发点, 力图以科学发展观为指导, 考察后金融危机时代的船型发展趋势, 并论述船舶水动力学基础共性技术研究的发展对船型研发的引领和推动作用。

关键词: 科学发展观, 船型演化, 水动力学, 共性技术, 发展趋势

1 引言

中国的工业化造船或可追溯到 19 世纪中叶。1865—1866 年, 清政府相继创办江南制造总局和福州船政局, 建造了“保民”、“建威”、“平海”等军舰和“江新”、“江华”等长江客货船。江南制造总局是中国近代工业史上的“中国第一厂”。造船业也孕育了中国第一代产业工人, 成为中国早期无产阶级的中坚组成部分。从此, 中国无产阶级作为中国新生产力的代表登上了历史舞台, 导致了生产力和生产关系的飞跃和变革。

新中国成立后, 船舶工业有了很大发展。20 世纪 50 年代建成一批沿海客货船、货船和油船。60 年代以后, 中国的造船能力提高得很快, 陆续建成多型海洋运输船舶、长江运输船舶、海洋石油开发船舶、海洋调查船舶和军用舰艇, 大型海洋船舶的吨位已达 30 万以上载重吨。经过近 30 年的艰苦奋斗, 基本建成了门类齐全的船舶工业体系, 奠定了中国现代船舶工业的基础。改革开放以来, 中国的船舶工业进入了快速发展时期, 造船产量持续增长, 呈现出良好的发展势头, 并已成为中国机电行业中重要的出口支柱产业。除豪华游轮等少数特殊船型外, 当前中国已能设计制造各种军用舰艇和民用船舶, 包括 30 万吨级超大型原油船、8000 箱级超大型集装箱船和 LNG 船。船用柴油机、甲板机械等产品的制造水平已达到或接近当代世界先进水平。在浮式生产储油轮 FPSO 和海洋石油平台等海洋工程装备建造方面, 也已经取得了重要的突破和进展。然而, 我们还应清醒地认识到, 尽管我国的船舶工业已经取得了令世人瞩目的巨大成绩, 但我们在综合竞争能力方面(包括科技创新能力、产品结构档次、制造与管理水平、生产效率、市场占有率、经济效益水平等)与发达国家相比仍存在着较大差距。其中, 科技创新能力不强, 产品结构改善和技术水平提高不快, 是制约我国船舶工业发展的重要瓶颈问题之一。

*基金项目: 国家自然科学基金(50721005)和“111”引智计划(B06019)。

当前,我国的船舶工业正处在发展的关键历史时期,机遇与挑战并存。在十到十五年的时间内把我国建设成世界第一造船大国和强国的宏伟目标已经成为激励广大造船界同仁为之奋斗的巨大动力。中国船舶工业要做大做强,迫切需要大力提升船舶与海洋工程科学研究水平,推动船舶工业的快速增长,并进一步带动相关产业链的整体发展,从而全面提升我国经济的综合竞争力。在后金融危机时代的今天,以科学发展观来考察船型演化的轨迹与影响因素,并进一步探讨当今船型发展趋势和水动力学基础研究的推动作用有其特殊的意义。

2 船型演化的轨迹与影响因素

船舶的起源已难以考证。人类从远古时代剡木为舟开始,到现今大规模的工业化造船,船舶制造走过了几千年、甚至更漫长的发展历程,这一发展历程同时也是船型演化的历史过程。船型演化当然受社会、政治、经济、文化和科技发展水平的制约和推动,但归根结蒂,社会需求乃是船型和造船技术发展的真正的原动力所在。

人类对船舶最早的需求或许是交通的需求,“舟楫之利,以济不通”就是个写照。在人类文明发展的早期,船舶无疑在文化的交流、信息的传递方面起到了重要的作用。文明的进步使人类的社会需求日益扩大并多样化,包括各种经济需求、资源需求、文化需求、探索未知领域的需求等等,从而衍生出名目繁多的船舶种类和船型。随着商贸活动的发展,作为江湖海最有效和最经济的大宗货物的运输方式,船舶得到了飞速发展。最早出现的商船可能是类似现今所称的散货船。后续运输方式的变革和物流观念的更新导致集装箱船、滚装船和各种专用物资运输船舶的诞生,如矿砂船、运木船、油轮、LNG 船。这些船型的出现相应地也促进了港口技术的发展,包括港口布局、装卸技术、输运技术和相应的装备技术等等。进入 20 世纪,为适应船舶大型化、超大型化的趋势,各种航道疏浚船、挖泥船和工作船也得到了发展,包括满足大型船舶进出港需要的各种拖轮、顶推轮。人类对海洋资源的需求从传统的海洋渔业资源扩展到海洋能源、矿产和生物等新兴资源领域,除了各类渔船得到了快速的发展外,适应海洋石油开发的钻井船、海上油气勘探平台和生产平台、海上生产储油轮不断涌现,同时也促进了特殊的工程船舶的发展,如大型起重船、铺管船、半潜运载船、导管架下水驳船等等。人类文明的发展也进而导致人们生活方式的改变和对高质量生活的追求,例如对海产品鲜度要求的提高,促使冷藏船和渔业加工船的出现;而航空器的出现和普及,则使得纯粹以运送旅客为主的客船逐渐式微,代之以旅游和休闲娱乐为主的游艇、豪华游轮。为满足人类探索未知领域的好奇心和海洋资源调查的需要,各类海洋考察船(包括极区海洋考察船、破冰船等等)则应运而生。

除了上述需求之外,当然还有政治需求,战争是政治的最高斗争形式,衍生了军船的需求。本文只论及民用船舶,军船的发展自有规律,本文暂不讨论。

船型的演化迫随着文明进步的步伐,是一种渐进的、与社会生产力发展阶段相适应的发展过程。

船舶推进动力的发展导致推进方式和推进动力技术的变革。原始的推进动力是靠人力,以使篙、划桨、摇橹为主要的推进方式。从人力推进到使用风帆推进是人类造船史上的一大革命,帆船的出现和进步使得人类可以利用大自然的力量远渡重洋。可以讲,帆船是人类使

用历史最为悠久的外力推进的船种。有可靠的史料表明,我国帆船的使用起码可追溯到春秋战国时代,即公元前 500—400 年间,直至 20 世纪 50 年代,帆船在海洋渔业和长江运输上仍有使用,历时 2000 余年。目前除了体育项目、训练船和休闲的帆艇外,已无实用。18 世纪以蒸汽机的发明为标志的欧洲第一次工业革命之后,到 19 世纪初先后出现了采用明轮推进的蒸汽机船和螺旋桨推进的蒸汽机船,从此船舶进入了以机器为动力的时代。20 世纪初,柴油机动力装置开始用于运输船舶,柴油机热效率高,可靠性高,燃料消耗明显地低于蒸汽机动力装置,导致蒸汽机动力装置逐渐淘汰。当今柴油机动力装置日臻完善,成为目前应用最广的船舶动力装置。此外,燃气轮机动力装置直至核动力装置现在也有应用,但主要不是用于民用船舶的。与机器为推进动力相适应,出现过明轮推进;在螺旋桨的发明和推广之后,明轮逐渐淘汰,螺旋桨成为当今船舶的主流推进方式。近年来,除螺旋桨技术本身的发展外,还出现了与全电力推进相联系的吊舱桨推进技术和以泵为原理的喷水推进技术。

造船材质的发展从另一方面促进了船型的发展。人类造船从木质开始,先是整木,所谓的剡木为舟,后有整木相连的木筏,逐渐发展到以龙骨、横肋骨、横舱壁为骨架,细敷木板条的木壳船。这一基本的壳形结构一直沿用至今。木壳船型的发展由小到大,由简单到复杂;春秋战国时期就有了造船工场,能够制造战船。汉代已能制造带舵的楼船。唐宋时期,河船和海船都有突出的发展,发明了水密隔壁,宋朝的航海帆船排水量已达五百吨量级。到了 18 世纪,木帆船技术已臻完美,沙船、福船、广船是中国三大优秀海洋帆船的代表,航行性能十分优异。明代郑和下西洋的船只以沙船为母型,可有近百米的船长,在尺度、性能和远航范围方面,都居世界领先地位。然而,因木材的强度、连接技术、水密技术所限,船型的水动力性能和尺度、吨位都受到很大的限制。钢铁的出现和冶炼、加工技术的进步,19 世纪世界上第一艘钢船问世,从此船舶进入了以钢船为主,以机器为动力的时代。

造船工艺技术的发展对船型发展起了关键的作用,特别是焊接技术最终替代了铆接技术,从而使船体线型和尺度、吨位的限制获得了一次革命性的解放。一是可以更好地从水动力性能角度出发去设计船型,同时使钢质船舶日益多样化和大型化。目前超大型油轮的排水量可达 30 余万吨,船长可达 200~300 m。步入 20 世纪后期,高强度合金钢、铝合金、玻璃钢、复合材料等新材料逐渐引入到船舶建造领域,结构轻型化和建造工艺的进一步变革,新船型层出不穷。滑行艇、水翼艇出现就是个例证。

当然,船舶水动力学理论和试验技术的建立和发展对近代船型研发起了至关重要的指导和引领作用。19 世纪 70 年代,船舶阻力理论的雏形的形成和模型水池试验技术的推出和实现,奠定了船舶水动力学研究的基础,船型研究进入了一个在经验和理论定性指导下通过试验研究开发船型的时期。一些性能优秀的船型系列纷纷问世,包括著名的 TAYLOR 船型系列和以后的 TODD60 船型系列、BSRA 船型系列、SSPA 船型系列等等。对于主尺度比、船形系数、浮心位置、型线形状等对阻力的影响都有许多指导性的结果可供参考。20 世纪 60 年代以前,这些系列船型和相关的模型试验资料在船舶设计中发挥了重要的作用。进入 20 世纪后,船舶阻力理论取得了突破性的进展^[1]。经过半个多世纪的努力,基于势流框架的线性兴波阻力理论日趋严谨。20 世纪 60 年代,基于波系干扰思想,乾崇夫提出了球首减阻的概念。球首的出现可以说是兴波阻力理论的一个完美的成功应用例子,极大地促进了船型学的发展。在船舶阻力理论发展的同时,船舶推进、船舶操纵和船舶耐波性研究领域也在不同程度上相对独立地得到了发展^[2]。性能优良的 Troost B 系列及日本 MAU 系列螺旋桨设计图谱曾广泛用于商船的

螺旋桨设计。船模自航试验则用于研究船体和螺旋桨的相互作用（伴流、推力减额），并可预报实船航速及判断船体、主机、螺旋桨的匹配问题。船舶耐波性的深入研究始于 20 世纪 50 年代，以 St.Denis 和 Pierson 的不规则海浪中船舶摇荡理论和 Korvin-Kroukovsky 提出的切片理论为代表，两者的结合极大地促进了船舶在波浪中运动理论的发展^[3]。船舶操纵性早期采用线性和非线性的短翼理论、细长体理论，通过尾部的 Kutta 条件、尾涡模型或分离涡模型把问题退化成无粘问题处理，也得到过一些有价值的结果。无粘的势流理论在船型研究的上述四大领域中都发挥了重要的作用。当然，随着船舶的高速化、大型化或肥大化，其局限性也越来越明显。

近年来，计算机科学技术飞速发展，计算速度和容量大幅度提高，计算流体力学（CFD）得到了前所未有的发展。以自由面追踪为例，VOF 法、Level Set 法、SPH 方法等的成功为带自由面的流动研究注入了新的活力。应用 CFD 技术进行船舶与海洋工程结构物流动数值模拟和水动力性能预报的优越性和应用前景日益显现^[4]。计算流体动力学技术（CFD）目前已成为船舶与海洋工程设计和研发的重要工具和手段。

人们审美观的提升在一定程度上也对船型演变起了不可估量的作用。船首的演变可能是典型的例子之一，老式铁甲船多是垂直艏柱，而新型船舶则大都是前倾艏柱。烟囱造型的演变也是明显的例子，与烧锅炉的蒸汽机船相应，烟囱为高大的圆筒形，进入到柴油机船时代，烟囱的功能逐渐退化，主要成为船舶身份的象征，更多地从美学角度去设计烟囱，流线型的烟囱当为首选，使其与现代化造型的上层建筑融为一体。现代船舶像人一样，有的朴实无华，有的雍容华贵，有的飘逸潇洒，有的英气逼人，豪华邮轮的出现更是人们审美观发展的极致。

总起来说，在社会需求的牵引下，随着社会生产力的发展，动力、材质、造船工艺技术、力学理论、航运与港口技术、贸易与物流理念、环保观念、审美观念、计算机与信息技术等科技、人文因素互相制约、互相促进，对船型发展起到了巨大的、有时甚至是革命性的推动作用。可以说，船舶建造的整个历史过程表征了人类征服自然的强烈的渴望和能动性。回顾船舶的发展历程，对我们理性地看待后金融危机时代与低碳经济条件下的船型发展或有很大的启示意义。

3 后金融危机时代低碳经济条件下的船型发展与船舶水动力学基础 共性技术研究

始于 2007 年美国次贷危机到 2008 年雷曼兄弟公司的倒闭，迅即演化为席卷全球的金融危机，一时风声鹤唳，全球经济处于惊惶之中。到 2009 年 4 月中旬，局面似乎有些转机，世界经济的部分先行指标开始向好的方面转变。日前，乐观派人士认为本轮世界性金融危机的最困难时期已经过去，开始讨论后金融危机时代的世界经济格局和走向。然而，今年 2 月，希腊债务危机在欧洲再次引发了一场大规模的金融风暴，是否会继续蔓延从而演变成一场新的全球性的金融危机，使人不敢掉以轻心。

在这场金融危机中，航运业和船舶工业也遭到严重影响。尽管有迹象表明，中国经济目前已处于企稳回升阶段，但对我国船舶工业的影响是否已经见底尚难逆料。