



湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁汉 孙容磊



高机动仿生机器鱼设计与控制技术

喻俊志 谭民 王硕◎著

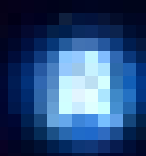


GAOJIDONG FANGSHENG JIQIYU
SHEJI YU KONGZHI JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



中国海洋工程与海洋技术

CHINA OCEAN ENGINEERING AND TECHNOLOGY



高机动仿生机器鱼设计与控制技术

张洪波 张洪波 王洪波



机械工业出版社



机械工业出版社



湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

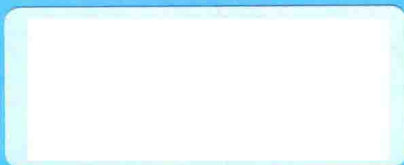
总主编 丁 汉 孙容磊

高机动仿生机器鱼设计 与控制技术

喻俊志 谭 民 王 硕◎著



GAOJIDONG FANGSHENG JIQIYU
SHEJI YU KONGZHI JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书围绕仿生机器鱼的高机动运动,结合仿生技术和智能控制方法,对仿生机器鱼的研制过程和机动控制进行了系统阐述,主要包括六方面内容:仿生鱼体波及鱼体形态学设计、机器鱼二维高机动精准控制、基于仿生 CPG 的机器鱼运动控制、机器鱼的三维机动转向控制、机器海豚俯仰及滚翻控制、机器海豚跃水运动控制。本书的每一章对所用机器鱼及机器海豚的平台研制、算法实现及实验验证均进行了详细介绍。各部分的内容既相互联系又相互独立,读者可根据自己的需要选择学习。

本书内容全面、系统、新颖、实用,不仅适用于普通高等院校信息科学、自动化、机电工程及相关专业的研究生、本科生及专科生的机器人学习课程,也可作为广大致力于机器人研究的科研人员和技术工作者了解水下仿生机器人基础知识及关键技术的参考资料和辅助读物。

图书在版编目(CIP)数据

高机动仿生机器鱼设计与控制技术/喻俊志,谭民,王硕著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.1

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-2758-8

I. ①高… II. ①喻… ②谭… ③王… III. ①仿生机器人-海洋机器人-设计 ②仿生机器人-海洋机器人-机器人控制 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 081410 号

高机动仿生机器鱼设计与控制技术

喻俊志 谭 民 王 硕 著

Gaojidadong Fangsheng Jiqiyu Sheji yu Kongzhi Jishu

策划编辑:俞道凯

责任编辑:戴凤平

封面设计:原色设计

责任校对:张 琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:13.5

字 数:230 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:108.00 元



华中大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



智能制造与机器人理论及技术研究丛书

专家委员会

主任委员 熊有伦（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）

朱 荻（南京航空航天大学）

阮雪榆（上海交通大学）

杨华勇（浙江大学）

张建伟（德国汉堡大学）

邵新宇（华中科技大学）

林忠钦（上海交通大学）

蒋庄德（西安交通大学）

谭建荣（浙江大学）

顾问委员会

主任委员 李国民（佐治亚理工学院）

委 员 （按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

王田苗（北京航空航天大学）

尹周平（华中科技大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

史铁林（华中科技大学）

朱向阳（上海交通大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

孙立宁（苏州大学）

李 斌（华中科技大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

张 丹（北京交通大学）

孟 光（上海航天技术研究院）

姜忠平（美国纽约大学）

黄 田（天津大学）

黄明辉（中南大学）

编写委员会

主任委员 丁 汉（华中科技大学） 孙容磊（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

王成恩（东北大学）

方勇纯（南开大学）

史玉升（华中科技大学）

乔 红（中国科学院自动化研究所）

孙树栋（西北工业大学）

杜志江（哈尔滨工业大学）

张定华（西北工业大学）

张宪民（华南理工大学）

范大鹏（国防科技大学）

顾新建（浙江大学）

陶 波（华中科技大学）

韩建达（中国科学院沈阳自动化研究所）

蔺永诚（中南大学）

熊 刚（中国科学院自动化研究所）

熊振华（上海交通大学）

作者简介



▶ **喻俊志** 中国科学院自动化研究所研究员，博士生导师。国家杰出青年基金获得者，IEEE高级会员，洪堡学者，担任多个国际期刊包括IEEE Transactions on Robotics、IEEE/ASME Transactions on Mechatronics的编委。主要研究方向为智能机器人、机电一体化、计算智能等。先后主持国家和省部级以及应用科研项目20余项，包括国家自然科学基金重点项目、863项目等。在机器人与自动化领域国际知名SCI期刊上发表论文70余篇，包括IEEE汇刊论文35篇，9次获IEEE ROBIO、IEEE-CYBER等会议最佳论文奖。获得授权发明专利22项、软件著作权12项、制定地方标准1项，部分成果已在水质监测和水中机器人大赛上得到应用，部分成果已实现产业化。获北京市科学技术一等奖（排名第二）、北京市科技新星、中国自动化学会青年科学家奖等。

■



▶ **谭民** 中国科学院自动化研究所研究员，博士生导师。国家杰出青年基金获得者，国家基金委创新研究群体负责人，国务院学位委员会第七届学科评议组成员，新世纪百千万人才工程国家级人选，中国科学院“百人计划”入选者。曾担任国家“十五”863计划机器人技术主题专家组成员，国家“十一五”863计划先进制造领域专家组成员。近年来在先进机器人控制、仿生机器人、多机器人协调与控制等方面开展研究与开发工作，负责和参加国家863计划项目、973项目、自然科学基金项目等20余项。发表SCI收录论文100余篇，获授权国家发明专利50余项。担任多个学术期刊的编委和多个专业委员会的委员。

■



▶ **王硕** 中国科学院自动化研究所研究员，博士生导师，国际标准化组织ISO/TC 299专家，中国机电一体化技术应用协会第六届理事会常务理事，中国人工智能学会智能机器人专业委员会委员，中国宇航学会机器人专业委员会委员。主要从事水下仿生机器人、智能机器人控制、多机器人系统研究。主持和参加973项目、国家安全重大基础研究项目、自然科学基金重点和面上项目、国家863计划项目、支撑计划项目、国际合作项目等20余项。合著图书3本，发表SCI/EI学术论文70余篇，获授权国家发明专利20项，软件著作权登记7项，主持制定机器人国家标准2项。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,它也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,《Cybernetics》与《Engineering Cybernetics》等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎专家、教授从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成型和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、车联网、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版社等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,各界人士、高校师生、各领域专家和科技工作者对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者、编者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

熊有伦

2017年9月



前言

“海阔凭鱼跃,天高任鸟飞”,大自然给人类带来了无限的梦想和启示。随着科技的蓬勃发展和经济、军事等领域应用需求的拉动,以“学习自然、认识自然、模仿自然、超越自然”为主旨的仿生学备受关注。通过研究、学习生物体的形态结构、功能及运动机理,提供人工系统新的设计思想和控制理念,不仅是提升人工系统性能的有效途径,也是仿生机器人研究的重要使命。

在水下仿生领域,针对鱼类和海豚等水生动物的仿生推进研究是当今的研究热点之一。亿万年的进化赋予鱼类及海豚高效、高速、高机动的游动技能,其性能远超目前各种人造水下航行器。生物学家和工程学者尝试从生物学、力学、机械学、人工智能等角度来探索鱼类及海豚的高性能水下推进机制,并希望借鉴到水下航行器的研制中,提高当前水下航行器的推进性能。20世纪90年代,美国麻省理工学院通过研制仿生金枪鱼来探究鱼类减阻机制与推进效率,拉开了机器鱼研究的序幕。世界各地的研究机构及大学纷纷加入到水下仿生推进的研究队伍中,并推动这个领域快速发展。特别是近十年,随着科技发展带来的技术革新,仿生机器鱼/机器海豚的性能得到了有效提升。人们针对仿生机器鱼/机器海豚的研究不再局限于简单的行为模仿,而是逐渐向感知—结构—材料—控制一体化方向发展。

本书作者及其科研团队在国家自然科学基金项目(61375102, 61333016, 61421004, 61633020)、北京市自然科学基金项目(3141002, 4161002)等的大力支持下,在水下仿生推进领域,历经十余年的潜心耕耘,通过刻苦钻研、大胆创新、自主研发、广泛交流,取得了一批科研成果。本书是作者在总结水下高机动仿生推进理论和技术方面的研究成果及多年科研实践经验的基础上撰写而成的,其中部分内容是已经公开发表的学术论文,部分内容则是作者对水下仿生推进技术的深度思考和见解。

全书内容共分8章。第1章介绍了水下仿生机器人的基本概念及研究背景,并概括了仿生机器鱼的发展历程及国内外的研究现状。第2章详细论述了



仿生鱼体波及鱼体形态学设计方法,给出了仿生机器鱼实现高效运动的两个必要条件。第3章主要研究鱼类的C形起动,给出了基于动态轨迹法的机器鱼二维高机动精准控制方法。第4章以鱼类倒游机动为研究重点,详细介绍了基于仿生中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)的机器鱼运动控制。第5章重点研究了仿生机器鱼的三维机动转向控制,主要包括S形起动、大范围偏航、俯仰及横滚运动。第6章聚焦于机器海豚的机动运动,先后实现了机器海豚竖直面内的前后滚翻及组合运动。第7章主要研究海豚的跃水运动,给出了高性能机器海豚系统的设计方案及高速、高机动运动控制方法,并首次实现了机器海豚的跃水运动。第8章总结全文,归纳了高机动水下仿生机器鱼的特点,并展望了未来的发展趋势。

本书主要由喻俊志、谭民、王硕撰写。科研团队的同事、博士生及硕士生参与了部分章节的资料整理工作,特别感谢吴正兴、苏宗帅、汪明、袁俊、刘金存、阳翔、陈星宇、庞磊等。同时,特别感谢国家自然科学基金、北京市自然科学基金、国家863计划项目、中国科学院项目的资助。此外,还要感谢那些参加了项目研究的团队人员、博士研究生和硕士研究生。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在疏漏及不妥之处,敬请广大读者和专家不吝批评指正,对此我们表示衷心感谢。

作 者

2016年11月于北京



目录

第1章 绪论 /1

- 1.1 引言 /1
- 1.2 仿生机器人简介 /3
- 1.3 水下仿生机器人简介 /7
 - 1.3.1 鱼类生物学基础 /7
 - 1.3.2 水下仿生机器人的主要研究内容 /10
 - 1.3.3 水下仿生机器人的技术难点 /12
- 1.4 国内外研究现状 /13
 - 1.4.1 机器鱼的研究现状 /13
 - 1.4.2 机器海豚的研究现状 /19

本章参考文献 /23

第2章 仿生鱼体波及鱼体形态学设计 /27

- 2.1 引言 /27
- 2.2 高效游动的必要条件 /28
- 2.3 鱼体波设计 /28
- 2.4 鱼体形态学设计 /30
 - 2.4.1 尾鳍及其对应鳍的生成 /34
 - 2.4.2 胸鳍与其对应鳍的生成 /35
 - 2.4.3 金枪鱼腹鳍的生成 /35
- 2.5 鱼体波仿真 /36
- 2.6 与 Lighthill 鱼体波的关系 /40
- 2.7 应用与讨论 /41



· 2.8 小结 /42

本章参考文献 /42

第3章 机器鱼二维高机动精准控制 /44

3.1 引言 /44

3.2 C形起动的定义 /45

3.3 C形起动各阶段的设计 /45

3.3.1 弯曲阶段 /46

3.3.2 保持阶段 /49

3.3.3 伸展阶段 /51

3.3.4 精准转弯控制策略 /55

3.4 定向游动 /55

3.5 实验 /57

3.5.1 三关节小型机器鱼原地转向实验 /59

3.5.2 四关节大型机器鱼C形起动实验 /61

3.5.3 四关节中型机器鱼高速C形起动实验 /64

3.5.4 四关节中型机器鱼S形起动与定向游动实验 /69

3.6 讨论 /70

3.7 小结 /72

本章参考文献 /72

第4章 基于仿生CPG的机器鱼运动控制 /74

4.1 引言 /74

4.2 仿生CPG模型 /75

4.2.1 Hopf振荡器的CPG模型 /75

4.2.2 引入相位因子的CPG模型 /75

4.3 基于Kane动力学模型的CPG参数优化 /77

4.3.1 Kane动力学建模 /77

4.3.2 CPG参数优化 /82

4.3.3 仿真与实验 /83

4.4 CPG振荡器相位差对游动性能的影响 /86

4.4.1 游动性能指标 /87

4.4.2 一致相位差下的性能分析 /88

4.4.3	非一致相位差下的性能分析	/89
4.4.4	讨论	/91
4.5	机器鱼倒游机动运动控制	/92
4.5.1	倒游机动运动控制	/92
4.5.2	实验结果	/96
4.6	机器鱼直游、倒游运动学分析	/99
4.7	小结	/101
	本章参考文献	/102
第5章	机器鱼的三维机动转向控制	/105
5.1	引言	/105
5.2	机器鱼机构设计	/106
5.2.1	偏航头部设计	/107
5.2.2	多自由度胸鳍机构设计	/108
5.2.3	多关节鱼体及尾鳍设计	/109
5.3	基于CPG的多模态运动控制	/109
5.3.1	CPG网络拓扑结构	/110
5.3.2	多模态运动控制	/110
5.4	机器鱼S形起动运动控制	/113
5.4.1	北美狗鱼S形起动分析	/113
5.4.2	弯曲阶段设计	/114
5.4.3	伸展阶段设计	/116
5.4.4	实验与分析	/121
5.5	机器鱼三维机动运动控制	/124
5.5.1	偏航机动	/124
5.5.2	俯仰机动	/125
5.5.3	横滚机动	/127
5.6	小结	/129
	本章参考文献	/129
第6章	机器海豚俯仰及滚翻控制	/132
6.1	引言	/132
6.2	海豚推进机构	/133



- 6.3 俯仰控制 /134
- 6.4 前滚翻控制 /135
 - 6.4.1 前滚翻实验 /135
 - 6.4.2 前滚翻模型 /137
- 6.5 后滚翻控制 /140
 - 6.5.1 后滚翻实验 /140
 - 6.5.2 后滚翻模型 /142
- 6.6 复合滚翻运动 /142
- 6.7 讨论 /144
- 6.8 小结 /145

本章参考文献 /145

第7章 机器海豚跃水运动控制 /147

- 7.1 引言 /147
- 7.2 海豚跃水建模与分析 /148
 - 7.2.1 生物学特性 /148
 - 7.2.2 三阶段跃水模型 /149
 - 7.2.3 尾关节功率估算 /156
- 7.3 机器海豚机构设计 /158
 - 7.3.1 总体设计 /158
 - 7.3.2 颈关节及头部设计 /162
 - 7.3.3 腰关节及躯干设计 /163
 - 7.3.4 尾关节及尾柄设计 /164
 - 7.3.5 胸鳍设计 /164
 - 7.3.6 背鳍设计 /165
 - 7.3.7 尾鳍设计 /165
 - 7.3.8 平衡块设计 /165
- 7.4 攻角控制算法 /167
 - 7.4.1 攻角变化规律 /168
 - 7.4.2 关节角计算 /169
 - 7.4.3 快速游动反馈控制策略 /171
- 7.5 转向及定向控制策略 /172

7.6	跃水控制	/174
7.6.1	俯仰控制方法	/174
7.6.2	横滚控制方法	/177
7.6.3	偏航控制方法	/177
7.6.4	深度控制方法	/178
7.6.5	跃水控制方法	/178
7.7	实验与讨论	/180
7.7.1	游速测试与分析	/181
7.7.2	跃水测试与分析	/183
7.7.3	讨论	/188
7.8	小结	/189
	本章参考文献	/190
第8章	总结与展望	/192
8.1	仿生机器鱼的特征和优势	/192
8.2	仿生机器鱼的重点发展方向	/195



第 1 章

绪论

1.1 引言

经过亿万年的自然选择,特别是遗传和变异,自然界孕育了各种各样的生物。在漫长的进化进程中,生物种群为适应环境,已经形成了从感知方式、执行方式、控制方式到信息处理、行为决策、组织协调等多方面的优势和长处。通过学习和模仿来复制和再现某些生物特征和功能,进而改进和完善现有的科学技术设备、装置,将极大地提高人类对自然的适应和改造能力,并产生巨大的经济效益。作为一门独立的科学,仿生学诞生于 20 世纪 60 年代。顾名思义,仿生学就是模仿生物的科学。仿生学的定义和包含的内容,至今还没有一个统一的认识。1960 年 9 月,美国空军航空局在俄亥俄州的空军基地戴通(Dayton)召开了第一次仿生学会议。会议讨论的中心议题是“分析生物系统所得到的概念能够用到人工制造的信息加工系统的设计上去吗?”会上,斯梯尔(Jack Ellwood Steele)将仿生学(bionics)定义为“模仿生物系统的原理来制造技术系统。或者使人造科技系统具有或类似于生物系统特征的科学”。确切地说,仿生学是研究生物系统的结构、物质、功能、能量转换、信息控制等各种优异的特征,并把它们应用到技术系统,改善已有的技术工程设备,并创造出新的工艺过程、建筑构型、自动化装置等技术系统的综合性科学。

仿生学综合了生命科学、物质科学、数学力学、信息科学、工程技术及系统科学等多学科的新成就,并将从生物界学习所获得的知识应用到生产实践,成为连接生物和技术的桥梁。鹰击长空,鱼翔浅底,无论是在空中的飞行还是水中的游动,生物体的精巧结构、运动原理和行为方式等都为机器人学提供了模仿和学习的样本,促进了仿生机器学(biomimetics,即将从生物学中提取的原理应用于人造设备,特别是机器人学中)的发展。在现有技术水平下,大部分机器人系统的功能还无法与生物体相媲美。为了能制造出结构、功能、材料、控制、



能耗等诸方面合理的机器人系统,实现在复杂环境下的作业,从仿生的角度对机器人系统进行研究是目前机器人学活跃的研究领域之一。仿生学在机器人学中的应用,推动机器人向适应非结构化环境的方向发展;反过来,仿生机器人学的不断成长,不仅丰富了仿生学的研究内容,而且拓宽了仿生学的应用领域。作为仿生学和机器人学高度发展与相互融合的产物,仿生机器人正在或即将对工农业生产、民用事业及国防安全等方面产生深远的影响。与普通的工业机器人相比,仿生机器人在运动灵活性、机动性、隐形性、适应性及能源供给等方面有明显的优势,可广泛应用于侦察、反恐、搜索救援、星际探索、服务业及娱乐等领域。

近年来,随着 MEMS(micro-electromechanical systems,微机电系统)、制造技术、控制技术、传感技术等持续发展,仿生机器学迅速崛起,适应海、陆、空环境的各种原理性仿生机器也相继问世。在水下仿生领域,许多科学家将目光转向形态和机理更为复杂的水下生物研究。在江河湖海中,为了满足攫取食物、逃避敌害、生殖繁衍和集群洄游等生存需要,鱼类、鲸豚类及头足类软体动物等在漫长的自然选择过程中,其体形和运动器官都进化得特别适合于水中运动,其整体功能渐趋优化,令当前的人造水下航行器望尘莫及。例如,在推进效率方面,依靠尾和鳍的协调运动,鱼类和鲸豚类的流体推进效率可高达 80% 以上,鲹科鱼类的推进效率超过 90%,而普通螺旋桨推进器的平均效率仅 40%~50%。在机动性方面,黄鳍鲷鱼的爆发速度高达 40 节(约为 74 km/h),梭子鱼的瞬时加速性能高达 20g,鱼类的转弯半径仅为 0.1~0.3 BL(body length,体长),且转弯时无须减速;海豚能以 0.11~0.17 BL 的转弯半径进行机动运动,转弯速度高达 450°/s;而普通船舶须以 3~5 BL 的半径缓慢地回转。通过对具有非凡水下运动能力的水生动物的仿生研究,将为研制新一代集机动性、高速性、隐蔽性及低扰性于一体的自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)提供丰富的创意、有益的借鉴,乃至系统原型设计方案。

基于鱼类和鲸豚类独特的推进方式,从形态、结构、功能、控制诸方面对其进行模仿和学习形成的水下推进系统统称为机器鱼。与传统基于螺旋桨推进的水下航行器相比,机器鱼实现了推进器与舵的统一,具有高机动及低扰动等优点,从而更加适合在狭窄、复杂和动态的水下环境中进行监测、搜索、勘探及救援等作业。本书聚焦鱼类和鲸豚类的高机动性,从机器人学的角度出发,开展推进机理、机构设计、运动控制及系统集成等一系列研究,研制开发具有多运动模态的水下高机动仿生机器人。通过理论研究、系统开发到实验研究几方面的工作,本书所总结的研究成果不仅可为研究鱼类和鲸豚类的推进机理、减阻