

《现代船舶力学》丛书

气垫船总体性能与 围裙气垫系统流体动力设计

马涛 邬成杰 编著

Hovorcraft Performance and
Skirt - Cushion System
Dynamics Design



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《现代船舶力学》丛书

气垫船总体性能与围裙 气垫系统流体动力设计

Hovorcraft Performance and Skirt-Cushion
System Dynamics Design

马 涛 邬成杰 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

气垫船总体性能与围裙气垫系统流体动力设计/马涛,
邬成杰编著. —北京:国防工业出版社,2012.8

(现代船舶力学丛书)

ISBN 978-7-118-08135-0

I. ①气... II. ①马... ②邬... III. ①气垫船—流体动
力学—船舶设计 IV. ①U674.943

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 172692 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 15¼ 字数 274 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

《现代船舶力学》丛书 编辑委员会

名誉主任委员 黄平涛

顾问 姜来根

主任委员 吴有生

(以下按姓氏笔画排序)

副主任委员 王国强 吴德铭 翁长俭 盛振邦

委员 尤子平 石仲堃 冯丹宇 许西安

刘应中 纪卓尚 杨士莪 吴秀恒

何友声 张圣坤 陈铁云 耿广生

徐秉汉 郭日修 崔维成 董世汤

彭华良 戴仰山 戴遗山

秘书 陈燮麟 赵德会 康伯霖

总 序

历史上蒸汽动力装置在船舶推进中的应用,改变了船舶在波浪中的航速与航线,也促进了 19 世纪中期船舶运动理论的诞生。从此,在牛顿力学的基础上,开始了船舶力学漫长的发展历程。于 20 世纪上半叶形成了自身较为系统的专业格局,并且在 20 世纪下半叶取得了突飞猛进的发展。

在 20 世纪后 40 年,随着世界经济大循环模式的形成,船舶的产量、品种大幅增长,船舶设计制造技术频频更新,改变着船舶与海上运输的面貌。21 世纪将是海洋的世纪,海洋经济、海洋开发与海洋军民装备的发展需求更将给海洋运载器技术的进步以前所未有的巨大动力。船舶力学是一个与船舶工程紧密结合的力学领域。船舶类型的每一步更新与发展,都包含着在船舶力学的领域中认识与把握船舶所遭受的随机、复杂、险恶的环境载荷,改进航行性能,保证船体安全可靠等方面的科学与技术的进步。凡是船舶力学研究最活跃的地方,往往就是需求最明确、船舶新技术出现最快的地方。可以说,现代船舶发展的历史,也就是船舶力学发展的历史,船舶力学是船舶技术创新的重要源泉之一,而船舶的工程需求又是船舶力学发展的基石,两者紧密结合,与时俱进。因此,可以预见,进入 21 世纪以后,不用太长的时间,船舶力学发展的历史必将翻到崭新的一页。

面对这样的历史机遇,有必要对世纪之交船舶力学若干主要领域的前沿内容,以及我国船舶科技工作者希望有更多了解的新内容作一些归纳与介绍。这不仅是我国广大船舶科技工作者的愿望,也有助于为进一步发展船舶力学打好基础。

20 世纪 80 年代初以来,我国的船舶工业与船舶技术取得了迅速的发展,船舶总产量在 20 世纪末已稳居世界第三位。为奠定我国船舶技术与船舶工业发展的基础,我国的船舶力学工作者含辛茹苦,摩胼胝地工作,取得了丰硕成果,有的领域接近和达到了国际先进水平。本世纪初是我国船舶工业和船舶技术跨越式发展的重要历史时期,为进一步振兴我国的船舶技术与船舶工业,有必要把所取得的成果与国际动向结合起来,作必要的提炼与总结,供我国船舶与海洋工程界科技人员和高等学校师生参考。

本着上述目的,中国造船工程学会船舶力学学术委员会及部分船舶力学工作者倡议,在世纪之交,组织国内船舶力学的专家们,集体编著一套《现代船舶力学》丛书。这个倡议很快得到了原国防科工委和国防科技图书出版基金评委会的赞

同。1996 年成立了编委会。编委会的日常工作挂靠在中国造船工程学会船舶力学学术委员会,并在中国船舶科学研究中心的大力支持和国防科技图书出版基金评委会与国防工业出版社的指导下开展工作。

《现代船舶力学》丛书包括船舶水动力学、船舶结构力学、船舶设计和制造工艺中的力学问题等方面的专著。丛书注重理论与应用相结合,着眼于选题内容相对新颖与先进,并不追求覆盖范围全面与广泛。丛书内容难免会有缺陷与不足,但编委会希望在我国船舶科技界各有关院所、高校与造船企业的关怀和参加编著的专家学者的共同努力下,它的出版能够对推动我国船舶与海洋工程技术的发展,促进我国船舶工业的技术创新,以及加强中外船舶工程界的学术交流有所贡献。

吴有生

2002 年 9 月 8 日

前 言

气垫船是以静态空气压力支撑的一类高性能船,随速度与支撑类型的差异又分为三种:以部分浮力辅助支撑速度相对较低的侧壁式(或双体)气垫船 SES;全部静态空气压力支撑速度较高的全垫升气垫船 ACV;低速时以静压空气支撑,高速时以动态升力支撑的动力增升地效翼船 WIG。本书所述及的气垫船是指在军事与民用上都取得广泛应用的全垫升气垫船 ACV。

气垫船通过垫升风机向船体气道与围裙气垫内供气,将船全部托离水面,可以高速运行于水面或陆地各种表面,具有两栖超越能力。气垫船是所有船舶中流体动力特性最为复杂的一种船型。气垫船由气垫支撑于水表面,由风机—风道—围裙—气垫构成的内部空气动力学以及围裙柔性结构动力学是其基础,决定了其垫升性、稳性、快速性、耐波性与操纵性等各项船舶性能。气垫船高速运行于水气界面,下表面气垫与围裙触水的兴波以及围裙湿表面的摩擦构成了其水动阻力,气动阻力包括气垫空气的上表面进气与下表面泄流构成的动量阻力,以及全船的外部空气动力阻力,在波浪上由于围裙触水与船体运动还会产生很大的波浪附加阻力,而这又与围裙对波浪的随波起伏响应能力密切相关。

高速运行于水气界面的气垫船,相对常规排水船型其水动阻力很小,受风浪干扰的影响较大。顺风高速航行时在气动力作用下船易低头使围裙触水,围裙在水动力作用下易发生缩进失稳(Tuck under),从而造成船纵向埋首失稳(Plough in)。气垫船水动阻尼小,航向稳定性差,易发生严重侧滑,横稳性随侧滑速度变化很大,低速兴波较大时甚至会大幅降低而造成翻船事故。气垫船“高速埋首低速翻船”是其动稳性不足的重大安全性问题。此外,气垫船在回转操纵不当时还易发生高速甩尾(Broaching to)的风险,在急速回转的同时纵横倾会发生大幅变化,在风浪中很易造成翻船事故。气垫船设计不当还会发生船体蹦蹦跳的“鹅卵石效应”(Cobblestone effect)或全船围裙的低频“颤振”(Bounce)这些垂向不稳定性问题。气垫船的这些运动特性反映了该船型的航行动稳性的基本特点。

本书作为气垫船的基础设计理论,其编写密切结合了国内外的最新技术和研究成果,以总体性能与围裙气垫系统设计技术的相关理论为主线,详尽介绍了气垫船所特有的各种流体动力特性、物理力学原理以及相关的理论计算与试验预报方法。对与气垫船阻力、稳性、耐波性密切相关的围裙响应动力学设计原理做了详尽

介绍,并针对气垫船特有的各种航行动稳性、操纵性与安全性理论上做了系统论述。作为一本系统与实用的气垫船专著,可供具有一定气垫船总体设计基础的专业人员阅读与应用。

在此对我的同事邬成杰研究员表示至诚的感谢,是他竭力推动我对国内外气垫船技术研究成果做一系统的总结,最终促成了这本书的编著,而且他本人也参与了本书部分章节的编写。同时作者也希望表达对吕世海、张宗科、刘春光、卢军、袁知星等年轻一代气垫船科研技术人员的谢意,是他们的学位论文科研成果丰富了本书的部分内容,他们的工作在气垫船的总体性能优化方法,响应围裙气弹与水弹动力学对气垫船阻力、静动稳性与适航性能的影响,以及气垫船操纵性运动特性与安全性等方面的研究取得了深入的发展,没有他们的工作,本书是无法完成的。

本书编著过程中受到了孙永华主任与陶平平研究员的大力支持,本书书稿的打印、编辑与绘图等大量的工作是由高瑞、张海鹏等人完成的,作者也一并表示感谢。

最后,对作者从事气垫船设计与研究工作 40 余年的中国船舶及海洋工程设计研究院的大力支持表示衷心的感谢。

马涛

2012 年 5 月 18 日

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 国内外气垫船设计技术概况	1
1.2 本书各章节编写的技术特点	2
第 2 章 气垫船技术发展现状	4
2.1 总体性能	6
2.2 围裙气垫系统	7
2.3 纵稳性与适航性	11
2.4 操纵性与横侧安全性	17
2.5 气垫船技术发展综述	20
第 3 章 气垫船阻力与总体性能优化	22
3.1 气垫船的运输效率与有效阻升比	22
3.2 影响气垫船阻力的基本参数	23
3.2.1 静水阻力	23
3.2.2 风浪附加阻力	27
3.3 基本气垫参数的优化	29
3.4 推进与垫升功率优化	35
3.4.1 推进效率与静推力	35
3.4.2 垫升效率	38
3.5 无因次图谱的总体性能优化方法	39
3.5.1 设计参数分析	40
3.5.2 无因次图谱优化方法	40
第 4 章 气垫船总体方案设计	44
4.1 主机选型与动力系统	44
4.2 船体结构与外载荷	47
4.2.1 结构型式与重量	47
4.2.2 结构外载荷	49
4.3 垫升系统	54

4.3.1	气垫泄流与飞高	54
4.3.2	垫升风机型式	57
4.3.3	垫升流道损失计算	63
4.4	推进系统	65
4.4.1	导管空气螺旋桨	65
4.4.2	桨后整流支臂	70
4.4.3	导管桨设计技术要求	72
4.5	操纵面与机动性	75
4.5.1	侧漂横倾与回转性能	75
4.5.2	桨后空气舵	78
4.5.3	艏部旋转喷管	80
4.5.4	侧风门	82
第5章	围裙气垫系统与垂向动力学	85
5.1	响应围裙设计概念与气弹、水弹响应度	85
5.2	围裙几何成形受力分析与参数设计要求	91
5.2.1	围裙几何成形受力分析	91
5.2.2	围裙几何参数设计要求	98
5.3	气垫分割与纵横静稳性	102
5.3.1	气垫分割与围裙变形对倾斜稳性的影响	102
5.3.2	静横稳性计算	105
5.3.3	套指围裙稳性计算	108
5.4	高速低头埋首与低速横侧翻船	111
5.4.1	艏裙响应度、抗缩进与高速低头埋首	111
5.4.2	低速侧滑横稳性与失稳翻船	118
5.5	升沉静稳性与动稳性	122
5.5.1	气垫阻抗概念与升沉静稳性	122
5.5.2	鹅卵石效应及颤振动稳性	125
5.6	波浪上升沉与纵摇运动特性	129
5.6.1	围裙响应度对升沉运动的影响	129
5.6.2	不计及围裙变形影响的升沉纵摇运动	131
5.6.3	响应围裙对升沉纵摇耦合运动的影响	136
5.6.4	围裙气垫系统的主动控制	142
第6章	横向动力学与安全驾控	146
6.1	操纵性运动方程	146
6.1.1	操纵运动水动力特性	147

6.1.2	操纵运动气动力特性	150
6.2	航向稳定性与甩尾动稳性	152
6.2.1	航向稳定性	152
6.2.2	甩尾动稳性	155
6.3	回转特性与回转时横稳性	159
6.3.1	回转特性	159
6.3.2	回转时横稳性	161
6.4	航行安全限界与自动驾控技术	164
6.4.1	航行安全限界	164
6.4.2	自动驾控协调控制策略	167
第7章	风浪中六自由度运动力学	173
7.1	运动坐标系	173
7.2	六自由度运动方程	175
7.3	六自由度运动计算框图	176
7.4	流体动力模块数学模型	176
7.4.1	操控力模块	176
7.4.2	外部气动力模块	178
7.4.3	水动力模块	178
7.4.4	气垫动力模块	182
7.4.5	围裙运动模块	190
7.5	各浪向运动与操纵力特性	191
第8章	模型试验相似准则及预报	198
8.1	气垫船模型试验的基本相似准则	198
8.2	垫升系统的相似准则及试验预报	199
8.2.1	垫升风机的相似要求	199
8.2.2	垫升流道相似及试验预报	200
8.2.3	围裙成形与变形相似要求	201
8.3	水池试验模型流体动力相似要求及预报	201
8.3.1	水池试验模型的相似要求	201
8.3.2	水池试验的预报与修正	203
8.4	风洞试验模型气动力相似要求及预报	206
8.4.1	风洞试验模型的气动力相似要求	206
8.4.2	风洞试验模型的气动力预报	207
8.5	导管空气螺旋桨风洞试验的相似要求及预报	208

附录 A 响应围裙动力学.....	211
A. 1 柔性囊指围裙动力学	211
A. 2 围裙外囊张力膜动力学	215
附录 B 气垫船术语索引	218
参考文献.....	221

CONTENTS

Chapter1	Introduction	1
1.1	The Development of Hovercraft Design Technology	1
1.2	Technical Features of Chapters Draw Up	2
Chapter2	Up-Dated Technology of Hovercraft	4
2.1	Overall performance and Specials	6
2.2	Skirt Cushion System	7
2.3	Longitudinal Stability and Seakeeping	11
2.4	Maneuverability and Lateral Safety	17
2.5	Comment on Hovercraft Technology Development	20
Chapter3	Drags and Performance Optimization of Hovercraft	22
3.1	Transport Efficiency and Effective Drag/Lift Ratio	22
3.2	Principal Parameters Effecting Operating Drags	23
3.2.1	Resistance on Water	23
3.2.2	Resistance on Waves	27
3.3	Design optimization of Principal Cushion Parameters	29
3.4	Propulsive and Lifting Power Optimization	35
3.4.1	Propulsive Efficiency and Static Thrust	35
3.4.2	Lifting Efficiency	38
3.5	Performance Optimization Method of Non-Dimensional Graph	39
3.5.1	Analysis of Design Parameters	40
3.5.2	Parameters Optimization Method of Non-Dimensional Graph	40
Chapter4	Overall Project Design of Hovercraft	44
4.1	Power Plant and Machinery	44
4.2	Hull Structure and External Loads	47
4.2.1	Structural Mode and Weight	47
4.2.2	External Loads of Structure	49
4.3	Lifting System	54

4.3.1	Cushion Air Escaping and Hovergap	54
4.3.2	Lifting Fan Mode	57
4.3.3	Calculation of Lifting Duct Loss	63
4.4	Propulsion System	65
4.4.1	Ducted Air Propeller	65
4.4.2	Fairing Stators	70
4.4.3	Design Requirement of Ducted Air Propeller	72
4.5	Maneuverability and Control Surface	75
4.5.1	Sliding Rolling and Turning Performance	75
4.5.2	Air Rudder	78
4.5.3	Bow Thruster	80
4.5.4	Jettied Rudder	82
Chapter5	Skirt Cushion System and Vertical Dynamics	85
5.1	Design Concept of Responsive Skirt and Aeroelastic Hydroelastic Responsiveness	85
5.2	Analysis of Skirt Configuration Under Forces and Parameters Design Requirement	91
5.2.1	Analysis of Skirt Configuration under Forces	91
5.2.2	Design Requirement of Skirt Geometry	98
5.3	Cushion Division and Longitudinal Transverse Stability	102
5.3.1	Cushion Division and Skirt Deformation Effect on Stability	102
5.3.2	Calculation of Transverse Stability	105
5.3.3	Calculation of Pericell Bag Finger Skirt Stability	108
5.4	High Speed Plough-in and Low Speed Capsizing Roll	111
5.4.1	Responsiveness, Anti Tuck-under and Plough-in of Bow Skirt at High Speed	111
5.4.2	Sliding Transverse Stability and Roll Capsizing at Low Speed	118
5.5	Heave Static and Dynamic Stability	122
5.5.1	Cushion Impedance Concept and Heave Stability	122
5.5.2	Cobblestone Effect and Skirt Bounce	125
5.6	Heave and Pitch Responsive Characteristics on Waves	129
5.6.1	Effect of Skirt Responsiveness on Heave Motion	129
5.6.2	Heave Pitch Motion Without Skirt Deformation Effect	131
5.6.3	Effect of Skirt Responsiveness on Heave Pitch	