



装备科技译著出版基金

【美】恽良 Alan Bliault Johnny Doo 著
吕世海 张宗科 陈德娟 张平 乔筠 译
邬成杰 梁启康 校审

地效翼船（地效飞机）及其技术

WIG Craft and Ekranoplan Ground Effect Craft Technology



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

地效翼船(地效飞机) 及其技术

WIG Craft and Ekranoplan
Ground Effect Craft Technology

[美] 恽良 Alan Bliault Johnny Doo 著

吕世海 张宗科 陈德娟 译

张平 乔筠

邬成杰 梁启康 校审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2011-155号

图书在版编目(CIP)数据

地效翼船(地效飞机)及其技术/(美)恽良,(美)布里奥特(Bliault,A.),
(美)屠增培(Doo,J.)著;吕世海等译.—北京:国防工业出版社,2013.11
书名原文:WIG Graft and Ekranoplan, ground effect craft technology
ISBN 978-7-118-08712-3

I. ①地... II. ①恽... ②布... ③屠... ④吕...
III. ①气翼船-研究 IV. ①U674.942

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第139149号

Translation from the English language edition:

WIG Graft and Ekranoplan. Ground Effect Craft Technology

by Yun Liang, Alan Bliault, and Johnny Doo

© Springer Science + Business Media, LLC 2010

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media, LLC 授权国防工业出版社出版。
版权所有,侵权必究。

※

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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本710×960 1/16 印张23¼ 字数431千字

2013年11月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价78.00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

原著者序

第二次世界大战后,由于科学和工业技术的迅猛发展,为高性能船的发展提供了极为有利的条件,如优质的船体材料(铝合金、钛合金、优质钢材、复合材料等)、主机(高速柴油机、燃气轮机等)、推进器(喷水推进、超空泡可调螺距螺旋桨、大负荷导管空气螺旋桨等)、性能优良的航行自控系统、计算机及力学计算技术、各种试验设备等都得到长足发展,使高性能船迅速从实验室过渡到实用阶段,于是一批高性能船,如气垫船、高速双体船、水翼艇、地效翼船(飞行器)在过去 50 年~60 年应运而生。

同时,这些船的型式虽然种类繁多,但无非是采用静水浮力、气垫力、水动力、气动力等支持船重。因此随着采用各种支持力和支持方式,又可将上述高性能船以不同的支持方式杂交成五花八门的复合型高性能船,如双体水翼船、双体气垫船、小水线面水翼船、小水线面气垫船、动力气垫地效翼船等。

因此,应该说,高性能船有着辉煌的发展过程与光辉灿烂的发展远景。

但是它也确实双面刃,一方面由于其“高性能”为人类创造了许多优秀的军、民用船,发展了水上航运事业,同时由于其复杂的技术和随之而来的昂贵研发费用,使其在发展过程中走过了苦难而漫长的历程。一批批卓越而锲而不舍的工程技术人员和航运人员为此付出辛勤的劳动、心血,虽也获得成功的喜悦,但也可带来一些困惑!

其中典型的就是本书所述的俄罗斯(前苏联)地效翼船的发展过程,虽然起步较早,但由于其技术的极端复杂,使其经历了漫长而苦难的历程,并也曾导致数次翻船和船体破损的航行事故,从而使苏联杰出的地效翼船创始人和奠基者,著名的科学家阿列克谢耶夫由于上述事故而遭非议和不公正的待遇,最后郁闷而终,享年仅 64 岁!

这样事情也同样发生在其他国家,如美国的 W. R. Bertelsen 费其毕生精力与全家财力致力于地面管道气垫运输系统的发展,但长期得不到资助和市场响应,结果在晚年由于夫人的病亡而失去最后的精神支柱,从而放弃该项目的研发工作。

事实上高性能船在我国的发展也是漫长的和崎岖不平的。笔者在其 50 年漫长的高性能船研发过程中也亲眼目睹中国船舶及海洋工程设计研究院尊敬的同事们在上级领导下,在实船试航过程中经受了多次磨难,如:

711-I 型全垫升试验艇在淀山湖高速航行时发生突然埋首、横倾、翻船,幸未伤人(1966 年)的事故。

717C 型侧壁式气垫试验客船在金沙江甲等滩“锁滩”,俗称为鬼门关,因该处河道一边为悬崖峭壁,另一边为浅滩,江中尚有一深达 50 余米的深洞、漩涡,而江中急流流速达 20km/h,过去多艘船舶在此沉没,故当时该处尚无航线。而该艇为测试气垫船在如此险恶的环境下的航行通过能力,于 1977 年 12 月在此处试航,在归航顺水航行时由于舵效降低,为免于进入漩涡,驾驶员误将此艇绕航而冲上岸边巨石,船首搁置于巨石之上横倾达 20°,干舷仅数厘米,情况极端危险,如翻船则无一幸免,但全体参试机驾人员全部坚守岗位,毫不畏惧,直至各方鼎力相助才使船脱离巨石而重返江中,同时又借助气垫升力,重新起飞,当日返回宜宾。

722-I 型(60t 级全垫升试验艇),1980 年 7 月从塘沽港出发单艇横渡渤海湾进行海上长航试航,由于途中围裙破裂,孤舟漂航于茫茫渤海中,后借助残余气垫升力,依然横渡茫茫渤海而在龙口强行登陆。

同样,此艇为测试耐波性,在长江口风浪中孤舟试航(1982),围裙大面积破裂,后经参试人员在水中经过 20 多小时的修复后,强行借自身气垫登陆脱离险境。

1998 年地效翼试验客艇“天鹅”号在高速航行时($>120\text{km/h}$),由于某些原因产生大仰角尾倾($>25^\circ$),险些后滚翻船等。

幸运的是上述事故皆未造成人员伤亡。这些事故虽然危险,但由于参试研发人员的不屈不挠和坚韧不拔,取得了大量极为有价值的科技资料,为今后发展创造了有利条件。

我深信此类事件也曾同样发生在我国与国际同行。英国气垫船的发明人与奠基人考克莱(他因发明气垫船而获英女皇加爵)曾有一句话,即“在前沿领域从事研发的人员,如想看到其梦想得以实现,就需借助于长寿”。

在学术方面,高性能船由于其卓越的令人向往的性能,几乎每年都有这方面的国际和国内会议,事实上笔者也长期参与组织类似的国际国内会议,也发现有大量文献发表于此类会议上,但综合性、系统性的专著却寥若辰星。

作者长期从事于高性能船的研发工作逾 50 余载,现年事已高,由于上述原因,深感应在余生中总结这方面的学术工作,故虽然学疏才浅,但愿抛砖引玉,与国内外同行同享有关高性能船舶的技术专著,在国内外发表,如:

(1)《气垫船原理与设计》1990 年在国防工业出版社出版,其英文版《Theory and Design of Air Cushion Craft》2000 年在美国 Arnold 及 Elsevier 出版社出版。

(2) 本书英文版《WIG Craft and Ekranoplan, Ground Effect Craft Technology》2010 年初在美国 Springer 出版社出版,其余著作者为 Alan Bliault(英国)及 Johnny Doo(美国)等;本书俄文译本将于 2014 年在俄罗斯莫斯科出版,美国纽约 Springer 出版社已在 2012 年 7 月与俄罗斯莫斯科 Technosphera 出版社签定俄译本出版合

译者序

地效翼船是介于常规排水船型和飞机之间的一种较新型运载工具。相比于常规船,地效翼船因巡航时脱离水面运行而具有航速高、适航性好及两栖性等优势;相比于飞机,地效翼船因运行于地效区而具有运输效率高、装载能力强、隐蔽性好等优良性能。因此,地效翼船自其诞生以来一直受到各军事强国的重视。

本书对国际上地效翼船的发展和技术进行了全面总结,内容涵盖了地效翼船发展历程、原理与设计方法、船体材料与结构、动力与传动以及船型的发展展望等,是一本不可多得的全面且专门介绍地效翼船的技术专著,可供高性能船舶专业人员参考或作为该专业学生的教材。

本书翻译工作由张平完成前言、致谢及第10章,乔筠完成第1章、第2章和第7章,吕世海完成第3~6章、词汇和符号表、参考文献,张宗科完成第8章、第9章、第13章及后记,陈德娟完成第11章、第12章;校审工作由邬成杰研究员完成前言、致谢、第1~7章、词汇和符号表,梁启康研究员完成第8~13章、后记及参考文献。尽管翻译、校审人员力求翻译准确,但受专业水平和对原著的理解程度所限,书中难免存在不详尽之处,恳请读者指正。

因苏联地效翼船研制延续至今,现主要工作在俄罗斯开展,所以本书中对其研制主体统一译为俄罗斯。

本书翻译过程中,原著者之一恽良先生多次进行了释疑,在此表示衷心感谢,同时也向以恽良先生为代表的地效翼船技术先驱者们致以崇高的敬意!此外,本书翻译工作获得中国船舶及海洋工程设计研究院的资助以及孙永华主任、陶平平研究员等的大力支持,在此表示诚挚的感谢!

同与俄文译本版权购买合同。

(3) 《High Performance Marine Vessels》(《高性能船》)已于2012年3月在美国 Springer 出版社出版,合著者为 Alan Bliault。

(4) 《高速双体船性能、技术与应用》(英文版)将于2013年在美国纽约 Springer 出版社出版(根据出版合同),其余著作者为 Alan Bliault 与荣焕宗研究员等。

作者及其余作者愿将拙作奉献给这些在特殊技术领域的设计、建造、营运、发展的同行和工程技术人员,并愿他们在艰难而漫长的研发过程中获得共鸣。

同时我们也恳切地希望读者给予批评与指教。

恽良

(Liang Yun)

2010年9月 上海

2012年8月修改

前 言

近半个世纪以来,高速水面运载工具发展迅速。新型高性能船如气垫船(ACV)、侧壁式气垫船(SES)、高速单体船(MHC)、双体船(CAT)、水翼艇(HYC)、穿浪艇(WPC)和小水面双体船(SWATH)等都得到预期发展并取得不同程度的经济效益和军事效益。

虽然气垫船和侧壁式气垫船演示艇在静水中的航速已能达到 100kn,但实际正常航行时的航速仍停留在 35kn ~ 50kn。这一方面是由于此类船在服役海况下阻力增加,另一方面则是受限于此类船的推进系统。例如,喷水推进器或水动螺旋桨在高速时会受到空泡的限制。小水面双体船设计为可减小波浪中的运动响应,但其船体线型不是适合于高速的低阻船型。

由此引出了问题所在——保持与水面的接触,则高海况中无论是水推进系统的超功还是艇的运动和失速都成为难题。看来提高速度的唯一途径就是与水面完全脱离。

作为读者的您也许会提出疑问:比赛用的水上滑艇速度可超过 200km/h。确实如此,但该类赛艇功率与重量比相当高,将其转化为可用的商船是不经济的。

将船舶从水中脱离确实是合乎逻辑的,但也存在一些问题。船既需要空气动力推进也需要空气动力支撑。一种小飞高的飞机?从某种程度上是,但却不同。当飞机贴近地面飞行时,机翼下将产生更高的压力——地面效应。一些早期的全垫升气垫船设计为前行时能够捕获空气从而形成气泡的船。

结合地面效应和特别的几何设计来提高效率,可得到一种更高巡航速度的船型。其飞行于波面以上,可大幅减小艇体运动响应。地效翼船(WIG)即基于这种想法而诞生。

地效翼船的原型可追溯到 20 世纪初。1903 年,莱特兄弟驾驶其首架飞机在表面效应区穿越相对长距离。芬兰工程师 Kaario 于 20 世纪 30 年代中期开始试验地面效应船。然而,受结构材料和可用动力的限制,地效翼船在 20 世纪 60 年代前一直未能进一步发展。

20 世纪 60 年代到 70 年代,俄罗斯 Alexeev 在其学院研发系列水翼艇的基础上受到了启发。Alexeev 和他探索于该项新型运载技术的俄罗斯团队对超高航速较感兴趣,且他们的项目直接发展于水翼艇研究领域。该种船被命名为“地效飞

机”(Ekranoplan)。从 20 世纪 70 年代到 80 年代,基于模型的相似性和理论分析逐渐积累了一些经验和认知,由此产生了首艘服役于里海的军用船。这是一项得力于俄罗斯海军支持而转化成的相当突出的技术成就。

德国于 20 世纪 70 年代开展了应用地面效应的研究和演示验证。与俄罗斯大量可用的军事预算不同,德国的项目是由私人出资,后期仅从政府得到较少赞助。该项研究工作使得地面效应船能够适合于在有限海域高速沿岸巡逻。

20 世纪 70 年代初,俄罗斯工程师 Bartini 和 R. Y. Alexeev 通过在主翼前方安装喷气式发动机将主机废气排到机翼下的气道,发明了地效翼船的动力辅助升力布局,即所谓的动力增升型地效翼船(PARWIG)。该垫升装置通过减小起飞速度和距离来提高起飞和着陆性能。

在第 2 章中,将同国际上的其他发展一同叙述 Alexeev 的船的详细内容。其技术成就相当重要,遗憾的是在 20 世纪 90 年代期间,该项目迫于经济形势而中断。相当长一段时间后才又见到与“里海怪物”号(KM)及“救生者”号(Spasatel)类似的模型。

近年来,中国和俄罗斯的研究人员将气垫技术融合到地效翼船发明了动力气垫船(DACC)和动力气垫地效翼船(DACWIG),上述船型在 150km/h ~ 250km/h 的中等航速下具有两栖性和更高运输效率。

由于地效翼船有多种工作状态(船体浮态、气垫和滑行及气动支撑模式),艇的设计较飞机和其他海上船舶复杂。除地效飞行外,地效翼船一般都在其他模式之间过渡,但不幸的是起飞速度下的阻力和运动是最大的,因此地效翼船设计时以起飞和着陆状态作为有效设计工况显得尤为重要。挑战并不限于此——飞行时,地效翼船的准静态和动态稳定性受飞高和艇纵倾角度影响较大。

该领域的研究还处于早期阶段,这需要其他不同领域的更多知识做支撑。本书对所提内容给出一个概要,鼓励读者以此为起点自己去探索更深层次的内容。

地效翼船实艇上曾发生过一些意外事故,目前对各种操作人员来说,地效翼船的安全性还是存在一些不确定因素。国际海事组织(IMO)技术委员会 2003 年曾以指导文件的形式发表过地效翼船安全条例并提及上述问题。

地效翼船技术其实仍处于试验阶段且需要向实用阶段转换,哪怕这种实用转换的比例相对较小,这样才能通过发展贸易业的信心来获得该种新型运输工具的发展热情。国际海事组织的指导文件在这方面起到了一定的帮助作用,但仍需实际应用来提高它们的作用和社会价值,就像 20 世纪 60 年代到 70 年代的 SR. N6 气垫船批量试验和航行一样。

在国际大背景下,地效翼船目前不仅仅被航空业专家而是被普遍认为、且将被证明,是一种高速海上运输工具。这具有重要的价值和使用优势,并有助于地效翼船的商业化。

地效翼船既基于飞机技术和船舶技术又有别于各自的技术特点,其航行时既在水上又在空气中,同时又处于两种介质的交界处。地效翼船既不是飞机又不是船舶,其既有别于航空业(精细复杂的轻质结构、高能量消耗、自动化、严格的认证要求、昂贵的造价等)又有别于船舶业(依据经验设计、相对重的结构、坚固、低造价等)。借用两者的技术使得地效翼船成为速度高、重量轻且低造价的海上运输工具。

本书以地面效应技术综述和历史发展开篇,给出书中主体所含地效翼船理论和设计方法的背景情况。这是除俄罗斯以外首次就该主题出版的书籍,我们希望能满足世界范围内读者的要求并引起对这种介于航海和航空领域技术的兴趣。

本书包括本前言、13个章节和后记等。第1章、第2章介绍了地效翼船的概念和发展背景,从第3章~第9章介绍了纵倾和纵向力平衡、静起飞性能、气动力特性、稳性、阻力和动力性能、耐波性、操纵性和模型试验研究。第10章、第11章、第12章则分别介绍了材料与结构、动力装置选取、飞升和推进系统选取。在这些章节中有关地效翼船设计的内容直接来自飞机设计和船舶设计,故不作详细论述。第13章叙述了关于地效翼船概念的说明和设计的一般方法。

后记部分讨论了地效翼船的未来发展前景和目前该领域研究人员和工程师们发展地效翼船所面临的一系列技术问题。目前仍需做大量工作。地效翼船设计原理的应用还需考虑航行速度和环境条件的影响,使得其有别于航空业的滑翔机和喷气式飞机。此外,如果为了实现远程运输,地效翼船将需要有国际组织认可并在海图上标注的新形式“通道”。重要的机会在等待着我们!

本书末尾按章节划分列出了参考文献的详细目录,这些对于想要获取更详细信息和支撑分析设计的读者将会很有帮助。

本书作者意为为船舶工程专业对地效翼船研究、设计、建造和操纵感兴趣的工程师、技术人员、教师 and 高校学生提供有用的参考。

由于地效翼船是一门新技术且仍处于初步发展阶段,本书所提出的一些理论仅作为现阶段的一家之言(局限在所难免),读者需自己判断检验本书所提理论的有效性。作者乐于收到读者们的评论和反馈意见。

中国上海 恽良
挪威 Tananger A. Bliault
美国阿拉巴马州墨比尔市 J. Doo
2009年5月

致 谢

本书作者谨以此向中国船舶及海洋工程设计研究院和中国造船学会海上高性能船设计技术委员会的领导和同仁们表示诚挚的感谢,包括邢文华研究员和梁启康研究员(中国船舶及海洋工程设计研究院院长)、王国忠研究员(中国船舶及海洋工程设计研究院副院长,“天鹅”号地效翼船主任工程师)、彭桂华研究员(中国船舶及海洋工程设计研究院 海上高性能船室主任)、谢佑农研究员(“天鹅”号地效翼船副主任工程师)、邬成杰研究员(“天鹅”号地效翼船主要设计者)、胡安定先生(中国船舶及海洋工程设计研究院 750 型地效翼船主任工程师)和李开燮先生(中国船舶科学研究中心“XTW”型地效翼船主任工程师)。写书期间得到了他们的帮助或引用了他们的著作和研究成果。

同时,我们还感谢下列人员提供素材和图表图片资料:Johnny Doo(SSAC),Edwin van Opstal(SE Technology),波音飞机公司(Beoing Aircraft Company),飞船地效有限公司(Flightship Ground Effect Pty Ltd),Fischer Flugmechanik/AFD 机翼发展公司和 Bob Windt(通用气垫船)。

最后,感谢评审团就本书内容和观点提出极有价值的反馈意见。

目 录

第1章 地面效应下的机翼	1
1.1 引言	1
1.2 海上运输和地效翼船的发展	2
1.3 可选技术	3
1.3.1 水翼艇	3
1.3.2 侧壁式气垫船	4
1.3.3 气垫船	5
1.4 追求更高营运速度的地面效应	5
1.5 地效翼船的一些技术术语	7
1.5.1 地面效应	7
1.5.2 动力气垫	8
1.5.3 静力气垫	8
1.6 地面效应的基本原理	8
1.7 地效翼船的类型	13
1.8 传统地效翼船	14
1.9 动力增升地效翼船	15
1.9.1 动力增升地效翼船的特性	19
1.9.2 动力增升地效翼船的局限性	19
1.9.3 军事应用	20
1.9.4 民用	21
1.10 动力气垫船	21
1.10.1 动力气垫船的特性	23
1.10.2 动力气垫船的应用	23
1.11 动力气垫地效翼船	23
1.11.1 动力气垫地效翼船的特性	26
1.11.2 动力气垫地效翼船的应用	28
第2章 地效翼船的发展	29
2.1 引言	29
2.2 俄罗斯地效飞机的发展	29

2.2.1	KM 或“里海怪物”号	36
2.2.2	UT-1	39
2.2.3	“雏鹰”号与“雌鸱”号	39
2.2.4	“雏鹰”号的意外事故	42
2.2.5	“雌鸱”号的开发	44
2.2.6	第二代地效翼船	47
2.2.7	俄罗斯大型民用地效飞机的设计与研究	50
2.2.8	“伏尔加”-2 号	51
2.3	近期小型地效翼船的设计	52
2.3.1	“伊伏尔加”号	52
2.3.2	“两栖星”号	55
2.4	俄罗斯地效翼船技术参数汇总	55
2.5	地效翼船在中国的发展	58
2.5.1	中国船舶科学研究中心的动力增升地效翼船	58
2.5.2	中国科技开发院的动力增升地效翼船	60
2.5.3	中国船舶及海洋工程设计研究院开发的动力气垫地效翼船	60
2.6	地效翼船在德国的发展	67
2.6.1	串翼特种船	67
2.6.2	“莱比锡”号	69
2.6.3	“翱翔翼”号	71
2.7	地效翼船在美国	74
2.8	澳大利亚的地效翼船	77
2.8.1	“海之翼”号	77
2.8.2	“拉达”号	78
2.8.3	“飞船”公司	79
2.9	结论与评语	82
第3章	纵向力平衡和纵倾	84
3.1	引言	84
3.2	运行模式	84
3.3	航行纵倾	86
3.4	作用中心及其估算	90
3.5	作用在地效翼船上力的纵向中心	90
3.5.1	浮心	90
3.5.2	作用在船体和侧浮体上的水动力中心	90
3.5.3	气垫静压力中心	91

3.5.4	地效区外单个机翼的气动力中心	91
3.5.5	带首推进器的地效翼船主翼在地效区内的升力中心	92
3.5.6	运行于地效区内时地效翼船的升力中心	93
3.6	控制装置对船气动力中心的影响	93
3.7	纵向力平衡	96
3.7.1	不同运行模式的正常运行条件	96
3.7.2	内部力平衡方法	98
3.7.3	控制平衡方法	98
3.8	地效翼船起飞过程的操控	100
第4章	垫升和低速性能	101
4.1	引言	101
4.2	垫升性能要求	102
4.2.1	操纵和降落	102
4.2.2	低速运行	102
4.2.3	阻力峰速度的过渡和起飞进入地效区	102
4.2.4	耐波性	103
4.3	20世纪70年代以来的动力增升地效翼船理论	103
4.4	动力气垫地效翼船和动力气垫船的静垫升性能	107
4.4.1	引言	107
4.4.2	动力气垫船或动力气垫地效翼船的气动布局	108
4.4.3	动力气垫船和动力气垫地效翼船的静垫升性能	109
4.5	提高低速性能的方法	117
4.5.1	可胀式气囊	120
4.5.2	围裙	120
4.5.3	船体和侧浮体底部上的层流涂层	122
4.5.4	硬质着陆垫	122
第5章	稳定飞行气动力学	123
5.1	引言	123
5.2	机翼的基本原理	124
5.3	机翼气动力性能试验研究	128
5.3.1	符号和术语	128
5.3.2	基本模型	129
5.3.3	模型试验	131
5.4	讨论	142
5.4.1	升力	142

5.4.2	阻力	143
5.4.3	升阻比	143
5.4.4	纵倾力矩	144
5.4.5	结论	144
5.5	地效翼船气动性能	144
5.6	影响地效翼船气动性能的因素	149
5.6.1	带导流叶片或喷嘴的首推进器	149
5.6.2	特殊的主翼翼型	149
5.6.3	展弦比	149
5.6.4	其他措施	150
第6章	纵向与横向稳定性	152
6.1	引言	152
6.2	力和力矩	152
6.2.1	纵摇中心	153
6.2.2	纵摇稳定性的设计衡准	153
6.2.3	飞高稳定性的设计衡准	153
6.2.4	主翼机翼和形状	154
6.2.5	襟翼的影响	155
6.2.6	尾翼和水平舵	155
6.2.7	重心	155
6.2.8	地效对平衡的影响	155
6.2.9	带喷嘴或导流叶片的首推进器影响	156
6.2.10	自动控制系统	156
6.3	稳定性分析	157
6.4	地效区内、外的纵向静稳定性	159
6.4.1	飞机和地效翼船在地效区外运行的纵向静稳定性	159
6.4.2	基本平衡方程	160
6.4.3	机翼纵摇中心	161
6.4.4	仰角纵摇中心	162
6.4.5	飞高纵摇中心	163
6.4.6	平衡中心的估算	165
6.5	纵向静稳定性衡准	166
6.6	稳定飞行中动力气垫地效翼船的横向静稳定性	169
6.6.1	运行于弱地效区的地效翼船	170
6.6.2	横向稳定性衡准	172

6.6.3	低速横向稳定性	172
6.6.4	回转时的横向稳定性	173
6.6.5	动力增升地效翼船的横向稳定性	173
6.7	静水上的纵向动稳定性	173
6.7.1	基本假设	174
6.7.2	基本运动方程	174
6.8	过渡阶段的瞬态稳定性	178
第7章	静水阻力和功率	179
7.1	引言	179
7.2	地效翼船阻力成分	182
7.3	地效翼船起飞前的阻力	183
7.3.1	阻力峰及其最小化	183
7.3.2	起飞前船的阻力估算	185
7.4	地效翼船起飞后的阻力	188
7.5	地效翼船的功率估算	192
7.5.1	基于首推进器运转模型的风洞试验结果的性能预报	193
7.5.2	地效翼船总阻力的估算	194
7.5.3	与水动力模型试验结果相关的阻力预报	194
7.6	静水阻力和动力配置的影响	196
7.6.1	排水航行状态	196
7.6.2	越主阻力峰速度($Fn=2\sim 4$)	197
7.6.3	起飞中($Fn=4.0\sim 8.0$)	197
7.6.4	飞行状态	198
第8章	耐波性与操纵性	201
8.1	引言	201
8.2	地效翼船波浪中运动的微分方程	202
8.2.1	坐标系统	202
8.2.2	动力气垫地效翼船在波浪中运动的基本纵向微分方程	202
8.3	耐波性模型试验	204
8.4	操纵性和可控性	211
8.5	地效翼船飞行控制	211
8.5.1	阵风对稳态飞行的地效翼船飞行纵倾角的影响	213
8.5.2	船运动的非线性分析	213
8.5.3	船运动的特殊情况	216
8.5.4	排水模式下的操纵	217

8.6	波浪中起飞操纵	217
8.7	回转性能	218
8.8	强地效应区地效翼船的操纵	221
第9章	模型试验与气动——水动力模拟	223
9.1	引言	223
9.2	试验方法	223
9.2.1	刚性地面上的静垫升试验	224
9.2.2	拖曳水池中的模型试验	224
9.2.3	风洞中的模型试验	224
9.2.4	敞水无线遥控模型试验以及地面上的弹射模型	225
9.3	地效翼船模型的缩尺规则	225
9.4	地效翼船的缩尺参数	226
9.4.1	雷诺数	226
9.4.2	欧拉数 H_q 及与气垫压力比的关系	231
9.4.3	风洞试验	231
9.4.4	动力气垫船或动力气垫地效翼船首推进器或垫升风扇的 无因次特性	234
9.4.5	傅汝德数 Fn	235
9.4.6	韦伯数 We	235
9.4.7	拖曳水池模型试验的其他缩尺项目	235
9.4.8	结构模拟	236
9.5	缩尺衡准	237
9.6	模型试验程序	238
第10章	结构设计和材料	240
10.1	引言	240
10.2	设计载荷	242
10.2.1	排水状态载荷和起飞前载荷	242
10.2.2	起飞和着陆载荷	243
10.2.3	地面操纵载荷	245
10.2.4	飞行载荷	245
10.2.5	砰击载荷和货物装卸载荷	246
10.2.6	设计方法	247
10.3	金属材料	248
10.4	复合材料	251
10.5	疲劳、破坏极限和故障安全装置	253