



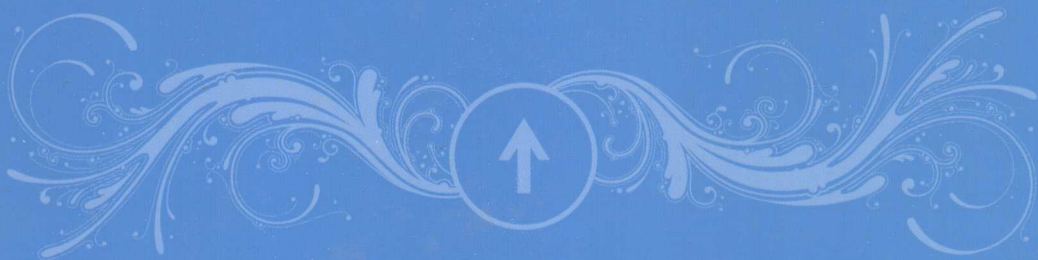
国防科技图书出版基金

《现代船舶力学》丛书

地效翼船稳定性和操纵性

袁昌华 编著

Philosophies of the
Stability and Control
of WIG Craft



国防工业出版社
National Defense Industry Press

014036645

U674
22

《现代船舶力学》丛书

地效翼船稳定性和操纵性

Philosophies of the Satbility and Control of WIG Craft

袁昌华 编著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1723496

U674

22

图书在版编目(CIP)数据

地效翼船稳定性和操纵性/袁昌华编著. —北京:国防工业出版社, 2014. 2

(现代船舶力学丛书)

ISBN 978-7-118-09119-9

I. ①地... II. ①袁... III. ①气翼船—船舶稳定性②气翼船—船舶操纵性 IV. ①U674

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309756 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公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 14½ 字数 243 千字

2014 年 2 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

IV

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

地效翼船被誉为 21 世纪的新船型,因为它可以飞行,所以是目前世界上最快的船。地效翼船的基本动力学特性既和一般的高速水面船有重大区别,也和普通的飞机显著不同。和船的区别是它在巡航状态下完全在空气中飞行,不再与水面接触,环绕它的运动介质是空气而不是水;和飞机的区别是它为了充分利用地面效应的有利影响而紧贴水面在所谓地效区内飞行,机翼地效状态的气动特性与在空中自由飞行状态有着显著的差别。

对这种新船型的研发,国外以俄罗斯为代表,从苏联时期开始就相继开发成功了几百吨重的大、中型地效翼船,如“里海怪物”、“小海雕”、“雌鹱”,以及多条小型地效翼船,如“雨燕”、“伏尔加-2”、“两栖星”等。国内以中国船舶科学研究中心为代表,从 1967 年开始就组织起一支研发地效翼船技术的队伍,先后研制出几型试验性地效翼船,现在已有一型交付实际使用。到目前为止,国内已有几家单位从事过和正在从事地效翼船技术的研究和开发。

有关地效翼船技术的论文,见于各类杂志和会议论文集的很多,但是比较系统地论述地效翼船技术的专著却极少,尤其是涉及地效翼船设计的图书则更是少之又少。这对刚开始从事地效翼船技术研究和开发的工程技术人员增添了不少困难。鉴于此,作者根据自己四十多年从事地效翼船设计研究工作的心得和体会编写了这本书,希望对正在从事和将要从事地效翼船技术开发的年轻工程技术人员有所帮助。

全书共 9 章。第 1 章是引论,扼要介绍地效翼船技术发展的历史和现状,对地效翼船的基本特征和可能的用途作了简要的分析和说明,给出了书中用到的坐标系的定义和转换公式。第 2 章定义了描述机翼地效状态的参数,分析了地效产生的气动效率增益以及地效状态机翼的纵向气动特性随转轴位置移动而变化的规律。第 3 章讨论了地效翼船的不定常运动,对相关的动导数概念作了简要的说明并给出了粗估式子,为后面的扰动运动稳定性计算作准备。第 4 章~第 6 章,分别讨论了地效翼船纵向和横侧的静态稳定性和操纵性,定义了静态稳定性和操纵性指标,其中,对于纵向静态操纵性指标,采用文献[1]所用的 TV 平面,进行了详细的分析,并对这些指标与气动设计参数之间的关系以及为满足静

态稳定性和操纵性指标要求可以采取的设计措施进行了讨论。第7章用较大的篇幅讨论地效翼船6自由度扰动运动线性微分方程组的建立以及纵向和横侧扰动运动方程的耦合和分离,并详细分析了扰动运动稳定性的判别准则与静态稳定性指标之间的关系,对如何满足运动稳定性的相关条件作了深入的讨论,为稳定性设计指明了方向。第8章简略讨论带理想自控系统的地效翼船运动特性,把地效翼船与自控系统作为整体加以分析,有助于研究自控系统设计参数的选配。第9章对地效翼船纵向松杆稳定性方面的一些问题作了初步探讨。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者指正。

编者

本书采用的主要符号

$A = b^2/S$ ——展弦比

b ——展长

S ——翼面积

$q = \frac{1}{2} \rho V^2$ ——速度头

ρ ——空气密度

V ——速度

$\bar{h} = h/\bar{C}$ ——机翼的相对飞高

h ——机翼平均气动弦上某一点(一般为后缘)离支承表面的高度

$\bar{C}$ ——机翼的平均气动弦长

$\bar{H} = H/\bar{C}$ ——地效翼船重心离支承表面的相对飞高

H ——重心离支承表面的高度

α ——迎角

β ——侧滑角

ϕ ——横倾角

ϑ ——俯仰角

ψ ——偏航角

ε ——平尾处的平均洗流角

X ——迎面阻力

Y ——升力

Z ——侧向力

M_x ——横倾力矩

M_y ——偏航力矩

M_z ——俯仰力矩

$C_x = \frac{X}{qS}$ ——迎面阻力系数

$C_y = \frac{Y}{qS}$ ——升力系数

$C_z = \frac{Z}{qS}$ ——侧力系数

$$m_x = \frac{M_x}{qSb} \text{——横倾力矩系数}$$

$$m_y = \frac{M_y}{qSb} \text{——偏航力矩系数}$$

$$m_z = \frac{M_z}{qSb} \text{——俯仰力矩系数}$$

$$C_x^\theta, C_y^\theta, m_z^\theta \text{——}\bar{H} \text{ 保持不变时, 相应气动系数对俯仰角的偏导数}$$

$$C_x^{\bar{H}}, C_y^{\bar{H}}, m_z^{\bar{H}} \text{——}\theta \text{ 保持不变时, 相应气动系数对相对飞高的偏导数}$$

$$C_x^{\dot{H}}, C_y^{\dot{H}}, m_z^{\dot{H}} \text{——}\theta \text{ 保持不变时, 相应气动系数对无量纲垂向速度的偏导数} (\dot{H} = \dot{H}/V_0)$$

$$C_x^{\dot{\vartheta}}, C_y^{\dot{\vartheta}}, m_z^{\dot{\vartheta}} \text{——相应气动系数对无量纲角速度的偏导数} (\dot{\vartheta} = \dot{\vartheta}/V_0)$$

$$\bar{X}_T = X_T/\bar{C} \text{——重心在平均气动弦上离前缘的无量纲距离}$$

$$\bar{X}_{F\theta} = \bar{X}_T - m_z^\theta/C_y^\theta \text{——对俯仰角的焦点在平均气动弦上的位置离前缘的无量纲距离}$$

$$\bar{X}_{FH} = \bar{X}_T - m_z^{\bar{H}}/C_y^{\bar{H}} \text{——对飞高的焦点在平均气动弦上的位置离前缘的无量纲距离}$$

$$\bar{X}_{F\dot{H}} = \bar{X}_T - m_z^{\dot{H}}/C_y^{\dot{H}} \text{——对垂向速度的焦点在平均气动弦上的位置离前缘的无量纲距离}$$

$$\Delta \bar{X}_{F\theta H} = \bar{X}_{F\theta} - \bar{X}_{FH} \text{——焦点间距}$$

$$\bar{X}_{F\theta-T} = -m_z^\theta/C_y^\theta \text{——俯仰静稳定裕度}$$

$$\bar{X}_{F(\theta-T)} = \Delta \bar{X}_{F\theta H} \text{——飞高静稳定裕度之定义 1}$$

$$\bar{X}_{T-FH} = m_z^{\bar{H}}/C_y^{\bar{H}} \text{——飞高静稳定裕度之定义 2}$$

$$\omega_x, \omega_y, \omega_z \text{——绕 } OX, OY, OZ \text{ 轴的角速度}$$

$$\bar{\omega}_x = \frac{b}{2V_0} \omega_x, \bar{\omega}_y = \frac{b}{2V_0} \omega_y, \bar{\omega}_z = \frac{\bar{C}}{V_0} \omega_z \text{——无量纲角速度}$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{\bar{C}}{V_0} \dot{\vartheta} \text{——无量纲俯仰角速度}$$

$$\ddot{H} = \frac{\bar{C}}{V_0^2} \ddot{H} \text{——无量纲垂向加速度}$$

$$T \text{——发动机推(拉)力}$$

$$C_T^{\bar{V}} = \frac{2T^v}{\rho S V_0} \text{——推力系数对相对速度的导数} (\bar{V} = V/V_0)$$

内 容 简 介

这是一本介绍地效翼船飞行稳定性和操纵性的专著。书中分析了地效飞行机翼气动系数随地效状态参数的变化,用气动系数对状态参数的偏导数定义了各类气动焦点、纵向和横向的静态稳定性和操纵性,研究了横轴位置前后移动引起的气动焦点和纵向稳定性的变化,得到了不以横轴位置变化的偏导数组合 Δ_4 。在此基础上,详细讨论了扰动运动稳定性的充分必要条件,分析了各类静态稳定性指标与运动稳定性的关系以及如何通过气动布局设计来满足运动稳定性要求。书中对自控系统的作用和纵向松杆稳定性问题也作了简略的讨论。

本书可供从事地效翼船研发的工程技术人员参考,对高等院校中高性能船舶相关专业的师生以及对地效翼船感兴趣的广大科技工作者和其他人员也会有所裨益。

This monograph deals with aerodynamic stability and control of WIG craft in ground effect flight. It is discussed that the aerodynamic coefficients of a wing flying in ground effect vary with the parameters of ground effect condition. Using the partial derivatives of the aerodynamic coefficients with respect to ground effect condition parameters, aerodynamic focuses, conceptions of longitudinal and lateral static stability and control are defined. The changes of aerodynamic focuses and longitudinal static stability with the movement of pitch axis are analysed and it is proved that the combined value of aerodynamic derivatives Δ_4 remains unchanged when the pitch axis moving fore and after. Necessary and sufficient conditions of moving stability of WIG craft in disturbed motion are analysed and the aerodynamic configuration design philosophies of WIG craft's stability and control are researched. The functions of the automatic control systems in improving performance and the longitudinal stability with the control stick-free are briefly discussed.

The monograph is written to serve the needs of the scientific workers and engineers who take part in the work of the design and construction of WIG craft, and it may be helpful for the students and teachers of colleges and universities and the others who take an interest in WIG craft.

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 国内、外地效翼船技术发展概况	1
1.2 地效翼船的技术特点	4
1.3 地效高度和地效翼船的分类	5
1.4 地效翼船的可能用途	8
1.5 坐标系	9
1.5.1 体轴坐标系 $O-XYZ$	9
1.5.2 风轴坐标系 $O-X_a Y_a Z_a$	9
1.5.3 半体轴坐标系 $O-X_c Y_c Z_c$	10
1.5.4 水平面坐标系 $O-X_w Y_w Z_w$	10
1.5.5 几个相关角度	10
1.5.6 坐标系之间的转换关系	11
1.5.7 一些运动学关系	15
1.6 关于静态稳定性和操纵性的概念	17
第 2 章 地效飞行状态机翼气动特性的改变	18
2.1 机翼的地面效应现象	18
2.2 处于地效状态机翼获得的气动效能增益	23
2.3 地效状态机翼的纵向气动特性	25
2.4 机翼的气动焦点和压力中心	29
2.5 气动导数组合量 $(C_y^h m_z^{\theta} - C_y^{\theta} m_z^h)$ 的特点	36
2.6 机翼后面的平均下洗角	38
2.7 地效状态横侧运动参数对纵向气动特性的影响	40
2.8 地效飞行状态的偏导数 m_x^{ϕ}	42
第 3 章 不定常飞行和定常曲线飞行作用在地效翼船上的气动力和力矩	45
3.1 前面机翼在水平尾翼处产生的平均下洗角	46
3.2 绕横轴 OZ 以角速度 ω_z 旋转引起的附加气动力和力矩	49
3.3 垂向速度 $\dot{H}$ 引起的气动力和力矩	52

3.4	绕纵轴 OX 以角速度 ω_x 旋转引起的附加气动力和力矩	54
3.5	绕立轴 OY 以角速度 ω_y 旋转引起的附加气动力和力矩	58
3.6	计及 $\alpha_0 \neq 0$ 的修正	61
3.7	垂向加速度 $\ddot{H}$ 对气动特性的影响	63
第4章	地效翼船纵向运动的静态稳定性和操纵性	65
4.1	整船的纵向气动系数和气动焦点	65
4.2	定常水平直线飞行状态外力的平衡	69
4.3	纵向平衡状态的静态稳定性	71
4.3.1	对速度的静态稳定性	72
4.3.2	对俯仰角的静态稳定性	73
4.3.3	对飞高的静态稳定性	76
4.3.4	不计速度变化影响的静态稳定性	78
4.4	地效翼船纵向静态操纵性	80
4.4.1	定常直线平飞状态升降舵的平衡舵角	80
4.4.2	纵向静态操纵性	81
4.5	重心与气动焦点位置的排列	86
4.6	水平尾翼对提高纵向静态稳定性的作用	88
第5章	地效翼船纵向静态操纵性指标	91
5.1	需用推力曲线族和可用推力曲线族	92
5.2	用推力曲线网求纵向静态操纵性指标	95
5.2.1	固定舵角操纵发动机油门的纵向静态操纵性指标	96
5.2.2	固定发动机油门操纵舵角的纵向静态操纵性指标	97
5.2.3	协同操纵油门和舵角保持速度不变的 纵向静态操纵性指标	98
5.2.4	协同操纵油门和舵角保持飞高不变的 纵向静态操纵性指标	98
5.2.5	协同操纵油门和舵角保持俯仰角不变的 纵向静态操纵性指标	99
5.2.6	同时独立操纵油门和舵角的纵向静态操纵性指标	100
5.3	需用推力曲线的斜率	102
5.4	油门操纵效率局部指标	106
5.5	舵面偏转效率局部指标	108
5.6	油门和舵角协同操纵时的纵向静态操纵性指标	110

第 6 章	地效翼船横侧运动的静态平衡、稳定和操纵	116
6.1	带横倾和侧滑的定常直线水平飞行力的平衡	116
6.2	带横倾和侧滑的定常水平盘旋力的平衡	120
6.3	带横倾和侧滑的定常水平盘旋半径	123
6.4	横侧运动的静态稳定性	127
6.4.1	对侧滑角的静态稳定性指标	127
6.4.2	对横倾角的静态稳定性指标	128
6.4.3	横倾、侧滑交叉静态稳定性指标	129
6.4.4	侧滑、横倾交叉静态稳定性指标	130
6.4.5	横滚静态稳定性指标	131
6.4.6	侧滑静态稳定性指标	132
第 7 章	地效翼船扰动运动与稳定	134
7.1	运动方程	134
7.2	纵向运动和横侧运动的耦合和分离	140
7.3	6 自由度扰动运动稳定的充要条件及方程的解	145
7.4	纵向扰动运动与稳定	148
7.4.1	纵向扰动运动方程	148
7.4.2	纵向扰动运动方程组的解	150
7.4.3	纵向快速变化运动	156
7.4.4	纵向慢速变化运动	158
7.4.5	纵向稳定充分必要条件的进一步讨论	159
7.4.6	非周期稳定条件	164
7.4.7	振荡稳定条件	168
7.4.8	快变运动的稳定区域边界	170
7.4.9	风洞“自由飞”模型试验和地效翼船快变运动稳定性	172
7.5	横侧扰动运动稳定性	173
7.5.1	横侧扰动运动方程组	173
7.5.2	横侧扰动运动方程组的解	174
7.5.3	横侧运动稳定的充分必要条件	176
7.5.4	横侧运动非周期稳定边界	176
7.5.5	横侧运动振荡稳定边界	178
第 8 章	带自控系统的地效翼船的运动特性	185
8.1	纵向自控运动	185
8.1.1	纵向运动控制机构及作用	185