

《现代船舶力学》丛书

Potential Flow Theory of Ship Motions in Waves

# 船舶在波浪中运动的势流理论

戴遗山 段文洋 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press



《现代船舶力学》丛书

# 船舶在波浪中运动的 势流理论

Potential Flow Theory of  
Ship Motions in Waves

戴遗山 段文洋 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

船舶在波浪中运动的势流理论/戴遗山,段文洋著.  
北京:国防工业出版社,2008.1  
(现代船舶力学丛书)  
ISBN 978-7-118-05315-9

I. 船... II. ①戴... ②段... III. 船舶-位势流动-研究  
IV. U661.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第118994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100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 17 字数 312千字

2008年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价60.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 锺

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元	王小谟	甘茂治	刘世参	李德毅
杨星豪	吴有生	何新贵	佟玉民	宋家树
张立同	张鸿元	陈冀胜	周一宇	赵凤起
侯正明	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
舒长胜				

本书主审委员 吴有生

# 《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

(以下按姓名笔画排序)

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委员会的赞同。



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委员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

《船舶在波浪中运动的势流理论》是在 1998 年出版的《舰船在波浪中运动的频域与时域势流理论》的基础上进行修订的。一方面,本书增加了近年来新发展的理论和方法,删去了部分应用不广的内容。另一方面,作者重新安排了各章节的内容,特别是浮体在随机海浪中的受力和运动及浮体在波浪中受力和运动的时域分析。

根据第 24 届国际船模拖曳水池大会报告(Proceedings of 24<sup>th</sup> ITTC, 2005),船舶在波浪中运动水动力学理论和实验研究的热点问题主要有波浪载荷和船舶运动,波浪增阻,高速船和多体船波浪响应,参数横摇,砰击、上浪及船体动力响应等。针对这些问题的理论研究可分为势流理论方法和黏流理论方法。基于求解雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)的计算流体力学(CFD)预报波浪中船体总体响应的研究还很有限,人们采用黏流等非势流理论,主要用于研究甲板上浪和液舱晃荡等伴随波面重入、渗气和破碎等强非线性局部冲击问题。本书没有涉及砰击、上浪和参数横摇的内容。与本书讨论的势流理论有关的部分主要进展如下:关于船舶线性运动预报的三维频域有航速格林函数方法,Chen(2001 年)和 Nobless 等(2003 年)分别提出了格林函数的不同表述,关于边界积分方程中线积分项的性质及其数值处理仍有待探明;采用时域格林函数,Kataoka 等(2001 年)、Sen(2002 年)、Kara 等(2003 年)分别进行了时域线性、物面非线性水动力问题的计算,这些研究仍沿用 Lin 等(1990 年)提出的数值模型。在处理大外飘船型时,会遇到水动力计算发散的困难,本书给出了解决该问题的途径。为了考虑自由面条件的非线性影响,Shirakura 等(2002 年)研究采用简单格林函数(Rankine 源)和混合欧拉-拉格朗日(MEL)方法进行全非线性问题计算,在有航速时,时域计算难以稳定,因此,不少研究(Yasukawa, 2002 年; Hermans, 2004 年)将自由面条件简化到静水面处理。Rankine 源方法的困难在于自由面条件的稳定性和远方辐射人工边界条件的处理,本书针对线性问题提出了新的解决方法。为模拟波浪载荷的非线性,不少研究者采用时域非线性切片方法,共同特点是计及瞬时位置入射波作用力的非线性,而水动力部分的处理有的考虑了记忆效应,有的近似地考虑了物面变化的非线性,其中航速效应的处理有的沿用 STF 切片理论,有的采用统一细长体理论,有的对高速船采用线性二维半理论。本书给出了对高速船和多体船十分有效的二维半理论

的数值解法。

本书各章内容如下。第一章保持原貌,给出了后续各章中应用的几个重要数学公式及推导过程。第二章分析了无界流中运动物体的受力问题,阐述了势流理论中受力公式的一般推导方法和附加质量等基本概念,给出了面元法的基本公式和数值方法要点。本书从第三章开始,阐述了具有自由面影响的水动力学问题。第三章讨论了线性和非线性自由面条件,给出了波浪中运动物体的一般性受力计算公式,该公式对讨论单个和多个浮体受到的漂移力问题,有着十分重要的意义。本章中以潜体为例,但不计及扰动势的自由面效应,讨论规则波中运动物体的水动力问题。第四章以规则波中零航速浮体为对象,讨论了一阶和二阶频域水动力问题的求解方法,阐述了频域解中的不规则频率问题,分析了频域解水线附近的奇异特性和非直壁情况的特征。第五章阐述了浮体在随机海浪中的受力和运动问题,讨论了用平稳随机过程的基本理论导出长峰不规则波的表达式及特征值公式,给出了潜体在不规则波中受到的一阶力和二阶力的概率特性和浮体在不规则波中运动及特征值的概率分析。从第六章开始介绍时域分析方法。从线性系统分析入手,阐述了辐射问题和绕射问题线性时域解的结构和解的奇异特性问题,给出了分别采用时域格林函数和简单格林函数求解时域流场的两种边界元法,其中基于积分形式自由面条件的内外场耦合边界元法和人工边界条件是近年来针对非直壁船型而发展的新方法,还讨论了不规则频率对时域解的影响。第七章讨论了有航速船舶的受力和运动问题,给出了有航速时水动力问题的自由面条件和物面条件及目前船舶运动预报应用最普遍的 STF 切片方法,阐述了针对高速船和多体船运动预报十分有效的二维半水动力问题求解方法,讨论了一般的三维有航速辐射问题和绕射问题求解的时域格林函数方法。尤其是对于非直壁型浮体在时域计算中出现的振荡发散问题,提出了解决问题的途径。

本书中新发展的研究成果主要是作者在国家自然科学基金(No. 19802008, No. 10272035)和教育部全国优秀博士学位论文作者专项基金(No. 199927)资助下取得的,作者在此深表谢意。

作者

## 内 容 简 介

本书由以下内容组成。船舶运动的频域稳态解,时域中的线性与非线性非定常解,速度势一阶解与二阶解,一阶力与二阶平均力,和频与差频响应,伏尔泰拉非线性展开式,一阶力和二阶力的随机分析和统计特性,速度势的奇异特性,非直壁船水动力的特殊性质,边界元计算与各种格林函数。

本书可供船舶与海洋工程、水动力学专业的研究生选课使用,也可供有关专业教师和科学研究人员参考。

This book consists of the following topics. The stable solution of ship motion in frequency domain, linear and nonlinear unsteady solution in time domain, the first order and second order solution of velocity potential, first order force and the mean of second order force, the quadratic response of sum frequency and difference frequency, Volterra non-linear expansion, the stochastic and statistical analysis of the first order and second order forces, the singular behavior of the velocity potential, the special property of the hydrodynamic force on non-wall sided ship, the boundary element method and various Green's functions.

This book is intended to be selective textbook for graduate students majoring in ship and ocean engineering, hydrodynamics. It can also be reference book for professors and scientists in related fields.

# 目 录

第一章 几个数学公式	1
1.1 三维格林公式	1
1.2 二维格林公式	4
1.3 变形斯托克斯公式	5
1.4 变化率公式	8
第二章 无界流中运动物体的受力分析	11
2.1 无界流中运动物体所受的力	11
2.2 附加质量及其性质	16
2.3 物体的质量力	19
2.4 分布源的诱导速度	20
2.5 分布偶极的诱导速度	23
2.6 四边形上均匀分布奇点的诱导速度公式	24
2.7 赫斯-史密斯方法	28
第三章 自由面条件和波浪中运动物体的受力公式	36
3.1 线性自由面条件	36
3.2 平面进行波	38
3.3 非线性自由面条件	43
3.4 波浪中运动物体受到的力	46
3.5 定深恒速航行潜体受到的波浪力(不计自由面效应)	48
3.6 定深恒速运动球体受到的波浪力公式(不计自由面效应)	55
第四章 浮体在规则波中受力和运动的频域分析	63
4.1 浮体在规则波中线性响应的定解条件	63
4.2 浮体在规则波作用下的线性运动微分方程	71
4.3 三维无航速频域格林函数及其应用	78

4.4	其他各种频域格林函数 .....	84
4.5	频域解中的不规则频率问题 .....	90
4.6	简单格林函数方法 .....	98
4.7	阻尼系数的远场表达式 .....	104
4.8	一阶势对二阶力的贡献 .....	107
4.9	二阶定常力 .....	113
4.10	二维二阶辐射势 .....	124
4.11	二维二阶绕射势 .....	129
4.12	三维二阶势 .....	131
4.13	关于奇异性的一些说明 .....	140
<b>第五章 浮体在随机海浪中的受力与运动</b> .....		<b>146</b>
5.1	不规则波的表达方式 .....	146
5.2	平稳过程的谱展式 .....	151
5.3	平稳正态过程 .....	152
5.4	随机海浪的平均周期和平均波长 .....	155
5.5	极值分布与 $h_{1/n}$ .....	156
5.6	随机海浪的谱展式 .....	160
5.7	长峰波作用下的一阶波浪力的概率特性 .....	165
5.8	长峰波作用下的二阶波浪力的概率特性 .....	167
5.9	浮体在长峰波作用下的随机运动 .....	171
<b>第六章 浮体在波浪中受力的时域分析</b> .....		<b>173</b>
6.1	线性系统 .....	173
6.2	辐射问题的线性时域解 .....	174
6.3	克拉梅尔斯-克罗尼格(Kramers-Kronig)关系 .....	182
6.4	线性时域解的奇异特性 .....	186
6.5	绕射问题的线性时域解 .....	192
6.6	时域格林函数及其阶分析 .....	199
6.7	时域格林函数应用举例 .....	207
6.8	计及瞬时湿表面的水动力问题时域解 .....	210
6.9	时域解的简单格林函数方法和人工边界条件 .....	214

6.10 不规则频率对时域解的影响 .....	217
<b>第七章 船舶在波浪中航行的运动分析</b> .....	<b>222</b>
7.1 有航速情况下的自由面条件和物面条件 .....	222
7.2 STF 方法 .....	225
7.3 二维半方法 .....	235
7.4 用时域格林函数方法解辐射问题 .....	238
7.5 用时域格林函数方法解绕射问题 .....	242
7.6 非直壁型船的数值计算发散问题 .....	247
<b>参考文献</b> .....	<b>251</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1</b>	<b>Some Mathematical Formulas</b> .....	1
1.1	Three Dimensional Green's Formula .....	1
1.2	Two Dimensional Green's Formula .....	4
1.3	Variant Stokes' Formula .....	5
1.4	Formulas of the Rate of Change .....	8
<b>Chapter 2</b>	<b>Force on a Moving Body in an Unbound Fluid</b> .....	11
2.1	Force on a Moving Body in an Unbound Fluid .....	11
2.2	The Added Mass and its Properties .....	16
2.3	The Body Mass Force .....	19
2.4	The Induced Velocity of the Source Distribution .....	20
2.5	The Induced Velocity of the Dipole Distribution .....	23
2.6	The Formula of the Velocity Induced by Uniformly Distributed Singularities over a Quadralateral .....	24
2.7	The Method of Hess and Smith .....	28
<b>Chapter 3</b>	<b>Free Surface Condition and the Forces on a Body Moving in Waves</b> .....	36
3.1	Linearized Free Surface Condition .....	36
3.2	Plane Progressive Waves .....	38
3.3	Nonlinear Free Surface Condition .....	43
3.4	Force on a Moving Body in Waves .....	46
3.5	The Wave Forces on a Submerged Body Moving with Constant Velocity in Constant Depth (Neglecting the Free Surface Effect) .....	48
3.6	The Wave Forces on a Sphere Moving with Constant Velocity in Constant Depth (Neglecting the Free Surface Effect) .....	55
<b>Chapter 4</b>	<b>Forces on a Floating Body and its Motion in Waves in Frequency Domain</b> .....	63
4.1	Formulation of the Linear Response of the Floating Body in Regular Waves .....	63



4.2	The Linear Differential Equations of the Floating Body Motion in Regular Waves .....	71
4.3	Three Dimensional Green's Function in Frequency Domain without Forward Speed and its Application .....	78
4.4	Other Green's Functions in Frequency Domain .....	84
4.5	The Irregular Frequencies Problem in Frequency Domain Analysis .....	90
4.6	Simple Green's Function Technique .....	98
4.7	Far Field Expression of the Damping Coefficients .....	104
4.8	The Contribution of First Order Potential to Second Order Force .....	107
4.9	Second Order Steady Forces .....	113
4.10	Two Dimensional Second Order Radiation Potential .....	124
4.11	Two Dimensional Second Order Diffraction Potential .....	129
4.12	Three Dimensional Potential of Second Order .....	131
4.13	Some Remarks on the Singular Behaviors .....	140
<b>Chapter 5 Forces on a Floating Body and its Motion in Random Ocean Waves .....</b>		<b>146</b>
5.1	The Expressions of Irregular Waves .....	146
5.2	The Spectrum Expansion of the Stationary Process .....	151
5.3	Stationary Gaussian Process .....	152
5.4	Average Period and Average Wave Length of the Stochastic Waves .....	155
5.5	Maxima Value Distribution and $h_{1/n}$ .....	156
5.6	The Spectrum Expansion of the Stochastic Waves .....	160
5.7	The Probabilistic Characteristics of the First Order Wave Force in Long Crested Waves .....	165
5.8	The Probabilistic Characteristics of the Second Order Wave Force in Long Crested Waves .....	167
5.9	The Random Motions of the Floating Body in Long Crested Waves .....	171
<b>Chapter 6 Forces on a Floating Body in Waves in Time Domain .....</b>		<b>173</b>
6.1	Linear System .....	173
6.2	Linear Radiation Problem in Time Domain .....	174
6.3	Kramers-Kronig Relation .....	182
6.4	Singular Behavior of Linear Solution in Time Domain .....	186
6.5	Linear Diffraction Problem in Time Domain .....	192
6.6	Time Domain Green's Function and its Order Analysis .....	199
6.7	An Example of the Application of Time Domain Green's Function .....	207