

《现代船舶力学》丛书

船舶波浪载荷

Ship Wave Loads

戴仰山 沈进威 宋竞正 著

国防工业出版社

·北京·

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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡镛			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

《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,船舶力学开始了漫长的发展历程,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

与其他工程结构物一样,在船舶结构的安全性评定中,确定作用于结构物上的载荷(外力问题),在已知载荷情况下分析结构的应力、变形和疲劳寿命(内力问题),以及制定相应的评定衡准(强度标准问题),是三个缺一不可而又相互关联的重要方面。其中,如何合理地确定载荷,又是能否正确评定安全性的基础和关键。

在 20 世纪后期,由于新型、高速、超规范船舶的不断涌现,以及高强度钢材的广泛使用,国际上各大船级社相继开发了船舶结构的直接计算法。在这些直接计算法中,各船级社都对载荷的确定给予了极大的关注,提出了所谓的第一原则,即:在结构设计时,必须首先合理地确定作用于船体和局部结构上各种实际可能的动态载荷,包括它们的最大值以及各载荷分量间的适当组合;然后,在此基础上,才能进一步讨论怎样选择合适的内力分析方法和建立可接受的强度标准。

对航行于海洋中的船舶而言,波浪载荷是所有船舶载荷中最为重要的载荷。因此,怎样合理地计算和预报作用于船体上的各类波浪载荷,便成为船体结构安全性分析中必须首先回答的问题。由于海洋波浪的随机性、船体结构的复杂性以及航行工况的多样性,这个问题的解决往往并非易事。

限于科学技术的发展水平,在 20 世纪 50 年代之前,船舶波浪载荷的确定一直是采用在物理直观基础上建立的一种半经验性做法——将船静置于某个特定的规则波上。直至 1955 年切片理论问世之后,船舶波浪载荷的计算才开始真正建立在科学分析的基础上。

随着科学技术的进步,船舶波浪载荷的计算目前发生了根本性的变化。从线性方法到非线性分析,从二维理论到三维估算,在各方面都取得了巨大的进展。

也就是在这种背景下,在中国造船工程学会船舶力学学术委员会的支持下,《现代船舶力学》丛书编辑委员会组织了本书的编写。

本书作者虽分属两个单位,但相互间的合作已近 30 年之久。共同的事业,共同的目标,把我们结合在一起,相互学习,取长补短。

在本书的编写过程中,整个书稿前后经过了三四次大的修改,个别章节甚至改了七八次之多。所幸的是,这本书现在总算可以和读者见面了(虽然我们仍不十分满意)。

根据《现代船舶力学》丛书编辑委员会的要求和船舶力学工作者的需要,本书共分为 8 章。编写方式是:分头执笔、共同讨论、合成统稿。具体分工是:第一章由

戴仰山执笔;第二章由沈进威执笔;第三章和第四章由宋竞正执笔;第五章和第六章由沈进威和戴仰山共同执笔;第七章由戴仰山执笔;第八章由沈进威执笔。

第一章介绍船舶波浪载荷研究的历史发展过程以及当前所达到的水平,特别指出了在这个过程中一些有代表性的研究成果。

第二章介绍海浪谱的不同表达形式和有关的海浪长期统计资料,它们是对船舶波浪载荷进行短期和长期预报的基础。

第三章介绍船舶在规则波中的运动与流场速度势的表示,非定常扰动势的定解条件与面元法以及船舶运动的稳态解与波浪诱导载荷的概念。

第四章介绍一些波浪载荷计算的工程实用方法,其中包括基于二维线性势流理论的切片法、非线性切片理论的时域与频域方法、高速细长体理论以及三维线性势流理论的数值解法。

第五章介绍应用随机过程理论,对船舶波浪载荷进行短期和长期预报,其中还讨论了波浪载荷极值预报的一些问题。

第六章介绍船舶在波浪中砰击的类型及危害、冲击理论的演变与发展以及目前在船舶结构设计中砰击的实用计算方法。

第七章介绍确定波浪载荷设计值时应遵循的一些原则以及当今在船舶建造规范中波浪载荷设计值规定的依据。

第八章介绍在实船试验和水池模型试验时,有关测试方法和数据处理等方面的一些问题,还给出了国内外一些典型的船舶试验结果。

需要说明的是,考虑到习惯上的用法和编写上的方便,各章符号的规定并不完全一致。

在本书出版之际,我们要特别感谢吴有生院士。没有他的关心和鼓励,我们不会接受本书的编写任务;即使接受了,也未必能最终完成。吴院士是本书的主审,他仔细地审阅了书稿,提出了许多极其宝贵的意见。如果说这本书还有点用处的话,吴院士是功不可没的。

我们还要感谢国防科技图书出版基金委员会和国防工业出版社的支持,感谢为本书的出版付出辛劳的张晓洁女士,顾学康、陈瑞章和胡嘉骏三位研究员,以及马山、葛菲、王辉、朱加刚和董丽娜等多名研究生。

限于作者的学术水平,加之作者分居各地的不便,本书不完善甚至错误之处在所难免,恳请广大读者批评指教。

作者
2006年7月

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	5
第二章 海浪	7
2.1 海浪谱的表达式	7
2.1.1 单一方向传播的长峰波谱	7
2.1.2 各方向传播的短峰波谱	8
2.2 海浪长期统计资料的选用	9
2.2.1 世界各主要船级社所采用的海浪长期统计资料	9
2.2.2 1991 年 IACS 推荐的标准海浪资料 No. 34	11
2.2.3 90 年代后期海浪资料研究工作的新进展	11
2.3 与我国船体设计有关的几个主要海浪统计资料	13
参考文献	21
第三章 三维线性势流理论基础	23
3.1 船舶在规则波中的运动与流场速度势的表示	23
3.1.1 基本假定	23
3.1.2 船舶在规则波中的运动	23
3.1.3 流场速度势的表示及边界条件	26
3.2 非定常扰动势的定解条件与面元法	27
3.2.1 非定常扰动势的定解条件	27
3.2.2 三维频域格林函数	31
3.2.3 分布源积分方程与面元法	32
3.3 船舶运动的稳态解与波浪诱导载荷	32
3.3.1 船舶运动的稳态解	32
3.3.2 船体表面的波动压力	35
3.3.3 船体横剖面的波浪载荷	35
参考文献	37
第四章 规则波中的波浪载荷计算	38

4.1	概述	38
4.2	基于线性势流理论的切片法	39
4.2.1	切片法的基本原理	39
4.2.2	确定二维水动力系数的数值方法	50
4.2.3	波浪诱导载荷的计算实例	64
4.2.4	切片法与三维方法的关系	64
4.3	非线性波浪载荷计算的时域方法	69
4.3.1	扩展的非线性切片理论	69
4.3.2	船舶非线性运动与波浪载荷的时历模拟	71
4.3.3	船体表面瞬时波动压力的估算	74
4.4	非线性波浪载荷计算的频域方法	77
4.4.1	所考虑的非线性因素与二阶波浪理论	77
4.4.2	流体力的摄动展开	81
4.4.3	船体梁的运动方程与动态响应	86
4.5	高速细长体理论(2½维理论)	89
4.5.1	定解条件	89
4.5.2	分布源积分方程的导出	91
4.5.3	二维时域格林函数的数值计算	92
4.5.4	应用高速细长体理论的数值实例	93
4.6	三维线性势流理论的数值计算	96
4.6.1	船体剖面载荷计算的三维方法与二维方法的比较	96
4.6.2	船体脉动压力数值计算实例	99
	参考文献	101
第五章	波浪载荷的短期及长期预报	104
5.1	线性波浪载荷情况	104
5.1.1	短期预报	104
5.1.2	长期预报	105
5.2	非线性波浪载荷情况	108
5.2.1	短期预报	108
5.2.2	长期预报	109
5.3	波浪载荷的极值预报	109
5.4	非线性波浪载荷长期极值的简化计算	110
5.4.1	航速数目的简化	111

5.4.2	航向数目的简化	111
5.4.3	海情数目的简化	113
	参考文献	113
第六章	砰击载荷	114
6.1	砰击的类型与危害	114
6.2	二维水动力冲击理论	115
6.3	二维水动力冲击理论的演变	119
6.3.1	Wagner 拟合理论的推广	119
6.3.2	二维水动力冲击的数值计算	121
6.3.3	楔形体入水冲击的水弹性理论	126
6.3.4	平底入水冲击的气垫效应	128
6.4	水动力冲击的试验研究及与理论计算的比较	129
6.4.1	庄生仑的系列试验研究	129
6.4.2	MARINTEK 的试验研究	133
6.4.3	国际性比较研究	133
6.5	船舶砰击的实用计算	138
6.5.1	发生砰击的条件	139
6.5.2	砰击次数与砰击概率	140
6.5.3	砰击时的水动力压力	143
6.5.4	砰击时作用于剖面的水动力	155
6.5.5	船体对砰击的整体响应	157
	参考文献	158
第七章	波浪载荷的设计值	160
7.1	确定波浪载荷设计值的原则	160
7.2	剖面波浪载荷的设计值	161
7.3	低频波浪载荷分量之间的组合	164
7.4	砰击载荷的设计值	166
7.5	极限强度校核中的波浪载荷	169
7.6	疲劳强度分析中的波浪载荷	172
	参考文献	175
第八章	波浪载荷的试验研究	176
8.1	实船试验及模型试验的必要性和意义	176
8.2	实船海上试验	177

8.2.1	短期试验	177
8.2.2	中期试验	183
8.2.3	长期试验	185
8.3	水池模型试验	187
8.3.1	相似理论及船模设计	188
8.3.2	典型模型试验介绍	191
	参考文献	212

Contents

Chapter 1	Introduction	1
	References	5
Chapter 2	Sea waves	7
2.1	Formula of wave spectrum	7
2.1.1	Long crest wave spectrum of unidirectional waves	7
2.1.2	Short crest wave spectrum of directional waves	8
2.2	Selection of long-term statistic wave data	9
2.2.1	Long-term statistic wave data used by main Classification Society in the world	9
2.2.2	Standard wave data recommended by IACS in 1991	11
2.2.3	The new progress of the research work about the wave data in the late 1990s	11
2.3	The main wave data connected with ship design in our country	13
	References	21
Chapter 3	The basic principle of 3D linear potential flow theory	23
3.1	Ship motions in regular waves and velocity potential expression of flow field	23
3.1.1	Basic assumptions	23
3.1.2	Ship motions in regular waves	23
3.1.3	Velocity potential expression of flow field and it's boundary conditions	26
3.2	Formulation of unsteady perturbation potential and panel method	27
3.2.1	Formulation of unsteady perturbation potential	27
3.2.2	3D Green's function in frequency domain	31
3.2.3	Source distribution integral equation and panel method	32
3.3	Steady state solution of ship motions and wave induced loads	32

3.3.1	Steady state solution of ship motions	32
3.3.2	Hydrodynamic pressure on ship's surface	35
3.3.3	Wave loads of ship's cross section	35
References		37
Chapter 4	The wave loads calculation in regular waves	38
4.1	Summarization	38
4.2	Strip method based on linear potential flow theory	39
4.2.1	Basic principles of strip method	39
4.2.2	Numerical methods for determining 2D hydrodynamic coefficients	50
4.2.3	Numerical examples of wave induced loads	64
4.2.4	Relationship of strip method and 3D method	64
4.3	Nonlinear wave loads calculation method in time domain	69
4.3.1	Expanded nonlinear strip theories	69
4.3.2	Time history simulation of nonlinear ship motions and wave loads	71
4.3.3	Estimation of instantaneous hydrodynamic pressure on ship's surface	74
4.4	Nonlinear wave loads calculation method in frequency domain ...	77
4.4.1	Nonlinear factors considered and second order wave theory	77
4.4.2	Perturbation expansion of fluid forces	81
4.4.3	Motion equations and dynamic responses of ship girder	86
4.5	High speed slender body theory($2\frac{1}{2}$ D theory)	89
4.5.1	Formulation	89
4.5.2	Derivation of source distribution integral equations	91
4.5.3	Numerical calculation of 2D Green's function in time domain	92
4.5.4	Numerical examples based on high speed slender body theory	93
4.6	Numerical calculation of 3D linear potential flow theory	96
4.6.1	Comparison of 3D and 2D calculation methods for	

ship sectional wave loads	96
4. 6. 2 Numerical examples of hydrodynamic pressure on ship hull surface	99
References	101
Chapter 5 Short-term and long-term prediction of wave loads	104
5. 1 Linear wave loads condition	104
5. 1. 1 Short-term prediction	104
5. 1. 2 Long-term prediction	105
5. 2 Nonlinear wave loads condition	108
5. 2. 1 Short-term prediction	108
5. 2. 2 Long-term prediction	109
5. 3 Prediction of wave load extreme values	109
5. 4 Simplified calculation for long-term distribution of nonlinear wave load extreme values	110
5. 4. 1 Simplified calculation for speed numbers	111
5. 4. 2 Simplified calculation for heading numbers	111
5. 4. 3 Simplified calculation for sea state numbers	113
References	113
Chapter 6 Slamming loads	114
6. 1 The category and harmfulness of slamming	114
6. 2 2D hydrodynamic impact theory	115
6. 3 The development of 2D hydrodynamic impact theory	119
6. 3. 1 The extension of Wagner's "fitting" technique	119
6. 3. 2 Numerical calculation for 2D hydrodynamic impact	121
6. 3. 3 The hydroelasticity about the wedge impact	126
6. 3. 4 The air cushion effect offlat bottom impact	128
6. 4 The experimental research on hydrodynamic impact and it's comparison with theoretical research	129
6. 4. 1 A series of study by Dr. Chuang	129
6. 4. 2 The experiments at MARINTEK	133
6. 4. 3 The international comparative study	133
6. 5 The engineering practical calculation for ship slamming	138
6. 5. 1 Proper conditions for slamming occurrence	139

6. 5. 2	Number and probability for slamming	140
6. 5. 3	Slamming hydrodynamic pressures	143
6. 5. 4	Slamming hydrodynamic forces on ship hull sections	155
6. 5. 5	Ship hull response to slamming	157
	References	158
Chapter 7	Design wave loads	160
7. 1	The principle of determining design wave loads	160
7. 2	Design wave loads for section	161
7. 3	The combination of low frequency wave loads	164
7. 4	Slamming design loads	166
7. 5	Wave loads in ultimate strength assessment	169
7. 6	Wave loads in fatigue strength analysis	172
	References	175
Chapter 8	Experimental research of wave loads	176
8. 1	The necessity and significance of the full-scale and model experiments	176
8. 2	The full-scale experiments at sea	177
8. 2. 1	The short-term experiments	177
8. 2. 2	The mid-term experiments	183
8. 2. 3	The long-term experiments	185
8. 3	Model experiments in the tank	187
8. 3. 1	Similarity theory and model design	188
8. 3. 2	Introduction of typical model experiments	191
	References	212