

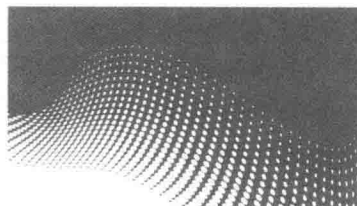


船舶在波浪上的 运动理论

朱仁传 缪国平 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



船舶在波浪上的运动理论

朱仁传 缪国平 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

全书共 12 章,内容涵盖船舶运动的力学和数学基础、船舶在波浪上的运动问题的求解方法及其相关的研究进展,重点研究了船舶微幅摇荡的辐射问题、绕射问题、切片理论、船舶在波浪上运动的时域计算等关键问题。

本书可作为船舶与海洋工程专业教材,也可供船舶与海洋工程专业和相关专业的研究技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶在波浪上的运动理论/朱仁传,缪国平编著.

—上海:上海交通大学出版社,2019

ISBN 978-7-313-20259-8

I. ①船… II. ①朱… ②缪… III. ①波浪—作用—船舶运动—研究 IV. ①U661.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 055570 号

船舶在波浪上的运动理论

编 著:朱仁传 缪国平

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:上海春秋印刷厂

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:473 千字

版 次:2019 年 4 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-20259-8/U

定 价:49.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:19.25

印 次:2019 年 4 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33854186

前 言

船舶在波浪上的运动问题,是船舶适航性、耐波性的基础,一直以来备受关注,随着频谱技术和高性能计算技术越来越成熟,关于船舶在波浪上的运动理论也得到了迅速发展,各种理论方法和计算方法开始成功地应用于船舶运动问题的研究分析,如切片理论与高速细长体理论、三维频域理论、三维时域理论、非线性理论等。当前,应用快速的势流理论计算方法预估某一船舶在指定海况中的运动特征,在船舶设计方案比较阶段用理论手段对其耐波性能进行比较和选择,已经成为船舶设计流程中的常规环节。此外,随着工程上对船舶运动性能预测的要求日益增高,必将促进船舶在波浪上运动理论研究进一步发展。

为结合上述发展趋势,编者及所在研究室持续围绕船舶在波浪上运动所涉及的理论问题进行了积极的探索和研究,将其中的基本原理与相关的新应用发展。《船舶在波浪上的运动理论》(刘应中,缪国平编)一书注重理论系统,物理诠释细致,利于学习,出版发行30年来极大地促进了我国船舶海洋工程领域学者和工程人员理论素质的提高。本书保留了其易于学习的特点,并全面增补了覆盖海洋工程的理论研究和计算方面的最新进展:

全书共12章。第1、2章介绍基础知识,包括船舶运动的若干总体概念与理论研究进展和必要的基础知识:数学和流体力学基础理论、格林函数法、必要的数学预备公式。第3章介绍波浪理论知识,介绍水波的分类等基础知识,给出了分离变量法推导一阶波浪速度势等。第4章介绍了引入参考坐标系来研究船舶在波浪上运动时的流体动力学问题。第5章和第6章在三维频域的意义阐述了船舶运动时所受流体作用力的计算方法及其物理意义。第7章主要讨论建立了船舶在波浪上运动的频域方程。第8章中引入了细长体假定,在三维理论的基础上顺理成章地导出了广泛应用的切片法。第9章主要介绍了随机波浪中船体运动响应,是第7章和第8章船体频域运动结果在不规则波上的预报应用。第10章介绍了船舶运动的时域理论和计算。第11章主要介绍了船舶运动方程及其理论的进一步应用拓展。第12章探讨了二阶非线性波浪力问题和当前研究较多的波浪中阻力增加问题。

新书将编者及所在研究室在格林函数法及其在水动力计算理论和应用方面取得的新进展尽可能地考虑进来,加入了三维有航速频域、时域的理论 and 数值计算、多体水动力干扰、非线性阻尼和非线性回复力引起的非线性横摇、参数横摇,波浪中的阻力增加等。这

些进展的取得离不开朱海荣、林兆伟、袁梦、黄昊、常永全、王迎晖、李成成、李裕龙、杨春蕾、唐恺、洪亮、陈曦、蒋银、周文俊、杨云涛、赵骥、高阳、黄山、汪小佳等研究生们的贡献，在文字输入和排版上，在读研究生也给予了较多帮忙，在此表示诚挚的感谢。

在编写出版过程中，上海交通大学出版社编辑张潇同志从各方面提供了帮助，谨在此表示深切的谢意。

希望本书的出版能够为船舶和海洋工程专业的研究生提供船舶在波浪上运动方面具有一定深度的教材。此外，编者也希望本书能对从事相关理论研究和教学的研究人员、教师有一定的参考价值，并对相关专业工程技术人员和大学高年级学生提高理论修养有所裨益。

尽管在成书过程中，编者根据历年的教学和科研实践的经验，对内容、体系等作了认真的考虑和权衡，但限于学识，加上当前理论本身的不断发展和完善，书中存在的缺漏和不妥之处，恳请读者批评和指正。

编者

2018年10月于

上海交通大学

目 录

第 1 章	船舶在波浪上运动理论概述	1
1.1	船舶在波浪上运动的若干总体概念	1
1.2	船舶运动理论研究	4
第 2 章	数学基础与几个预备公式	11
2.1	波浪与物体相互作用的初边值问题	11
2.1.1	均匀、不可压缩理想流体的无旋运动	11
2.1.2	拉普拉斯方程解的唯一性	13
2.1.3	边界条件和初始条件的初步考察	14
2.2	格林函数法	19
2.2.1	格林公式	19
2.2.2	单层势与双层势	23
2.2.3	边界积分方程法	24
2.3	摄动理论	25
2.4	斯托克斯公式及其推广	28
2.5	驻相法	30
第 3 章	水波理论基础	33
3.1	水波的种类	33
3.2	线性波浪定解问题的分离变量求解	34
3.3	平面前进波、波浪的基本性质	36
3.4	波浪能量与波能传递	42
3.5	高阶波浪	46
第 4 章	船舶运动流体动力问题的一般提法	56
4.1	坐标系选取和运动量的描述	57
4.2	角速度与欧拉角的关系	60
4.3	自由面条件的摄动展开	64
4.4	物面条件的摄动展开	67
4.5	线性速度势的分解	75
附录	速度势的变换	79

第 5 章 船舶微幅摇荡的辐射问题	81
5.1 无航速船舶简谐振荡时产生的速度势	81
5.2 无航速船舶辐射势的格林函数解法	84
5.2.1 规范化辐射势的格林函数解法	84
5.2.2 三维脉动点源速度势	86
5.3 附加质量阻尼系数	94
5.4 航行船舶辐射问题	99
5.5 有航速船舶辐射势的格林函数解法	104
5.5.1 有航速辐射规范化速度势的格林函数解法	104
5.5.2 移动脉动源格林函数	107
5.5.3 移动脉动源的波形	114
5.6 辐射问题的求解与数值算例	118
5.6.1 方程离散	118
5.6.2 格林函数的处理	119
5.6.3 数值算例	124
附录 距离倒数的傅里叶重积分表达式	130
第 6 章 绕射问题和波浪力	132
6.1 遭遇频率和自然频率	132
6.2 绕射问题的数学提法	135
6.3 波浪力的表达	137
6.4 波浪力的数值结果	141
第 7 章 船体在波浪上的运动	144
7.1 船体运动方程的一般描述	144
7.2 流体作用力	147
7.2.1 流体动力	148
7.2.2 流体静恢复力	150
7.3 船体线性运动方程	153
7.4 参考坐标系下船体运动方程	154
第 8 章 切片理论	160
8.1 附加质量和阻尼系数的表达	161
8.2 波浪力的计算	166
8.3 二维辐射势的求解	169
8.4 切片法结果与实验及三维理论比较	175
第 9 章 随机波浪中船体运动	179
9.1 不规则波的表达	179

9.2	随机过程谱分析	180
9.3	海浪谱密度的表达式	184
9.4	线性系统及其响应关系	186
第 10 章	船舶在波浪上运动的时域计算	191
10.1	时域问题的提法和格林函数解	192
10.2	时域格林函数	197
10.3	无航速问题的求解	200
10.3.1	辐射问题的线性时域解	200
10.3.2	绕射问题的线性时域解	204
10.3.3	船体的流体作用力与时域运动方程	207
10.4	间接时域法	209
10.4.1	辐射力的频时域转换与时延函数	209
10.4.2	波浪力的频时域转换	210
10.5	有航速问题的求解	211
10.6	物体大振幅运动的线性理论	215
10.7	简单格林函数法	217
10.8	混合格林函数法	219
10.8.1	流域的划分及混合混合格林函数法	219
10.8.2	辐射脉冲分解与数值离散求解	221
10.8.3	绕射势的求解	224
10.9	一些数值计算与结果	225
10.9.1	时域格林函数的数值处理	225
10.9.2	时延函数	227
10.9.3	混合格林函数法与时域运动计算	229
附录	变化率公式	232
第 11 章	船舶运动的综合分析	233
11.1	高速船运动的二维半理论	233
11.2	横摇阻尼的非线性与横摇运动微分方程	235
11.2.1	横摇阻尼	235
11.2.2	横摇阻尼的模型试验与经验公式	236
11.3	回复力的非线性与参数横摇	239
11.3.1	参数横摇的研究进展	239
11.3.2	参数横摇的多水平预报方法	240
11.4	多浮体间的水动力相互作用	242
11.4.1	多浮体水动力相互作用问题	243
11.4.2	作用在浮体上的流体动力	244
11.4.3	相邻两浮体在波浪中耦合运动的时域方程	244

11.4.4	一些算例与分析	245
第 12 章	二阶波浪力理论计算与波阻增加	248
12.1	二阶力的压力积分法(近场法)	250
12.2	不规则波的二阶力问题	257
12.3	二阶速度势的定解问题	259
12.4	波群的诱导长波	264
12.5	远场积分法	267
12.6	波浪中航行船舶的阻力增加	272
12.6.1	经典的波浪增阻计算方法	274
12.6.2	三维散射能量	276
12.6.3	短波增阻	279
参考文献		281
索引		297

第 1 章 船舶在波浪上运动理论概述

1.1 船舶在波浪上运动的若干总体概念

海船是在波浪环境中运行的。海上航行的船舶在波浪上的运动包括操纵运动和摇荡运动,本书研究的运动,主要是摇荡运动,是指船舶以某一平均速度前进运动中叠加的摇荡运动。严重的摇荡运动不仅会影响船舶的运营效率,甚至会造成结构毁损或倾覆失事。因此,分析理解船舶在波浪上产生摇荡运动的力学机理,为设计耐波性能良好的船舶提供了可靠的依据,对保证船舶安全性和运营经济性都具有十分重要的意义。从 20 世纪 40 年代以来,许多研究工作者致力于发展和完善船舶在波浪上的运动理论,其目的也在于此,准确预报船舶在波浪上的运动和波浪载荷,是船舶设计过程中的关键。当前对现代船舶的设计,船舶耐波性能计算也已成为标准的设计工具。以下将给出船舶在波浪上运动的部分总体概念。

1) 船舶摇荡运动研究的假定

船舶在波浪中航行时会产生 6 个自由度的摇荡运动,本书研究的船舶摇荡运动是以下列假定为前提的,即:

(1) 船舶在静水中是稳定平衡的,即船舶的重量与静水浮力平衡,并且这种平衡是静稳定的。

(2) 船舶在静水中航行时的定常阻力与螺旋桨(或其他推进装置)产生的推力相互平衡,且忽略推进装置的动作对周围流场引起的扰动。

(3) 船舶摇荡与操纵运动是可以分离的,互相没有干扰。在之后的讨论中,我们总认为船舶的平均直线运动是等速直线运动。船在波浪作用下可能产生的曲线运动由操舵的作用补偿,舵的动作对周围流场的干扰也忽略不计。

这样假定之后,促使船舶摇荡的外力就只有波浪力和船体摇动产生的水动作用力,以及因船体偏离平衡位置而产生的静水回复力。

当然上述假定只是为简化问题而作的。事实上船舶在波浪上运动时会导致阻力增加及螺旋桨特性和推进因子的变化;同时操舵对摇荡运动也有影响,特别是对横摇和艏摇。

2) 船舶摇荡运动研究的坐标系

在摇荡问题的研究中,船舶一般被视为具有 6 个运动自由度的刚体。在地球固定坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 中,若选取一个以船舶平均前进速度移动的参考坐标系 $o'x'y'z'$ ($o'x'$ 轴正向为船舶前进方向)和一个与船体固结在一起的动坐标系 $oxyz$,设两者在没有摇荡运动时互相重合。那么,动坐标系原点 o 在参考坐标系中的纵坐标 \bar{x} 称为纵荡(surge),横坐标 \bar{y} 成为横荡(sway),垂向坐标 \bar{z} 成为垂荡(heave);绕动坐标系三个轴的转动, α 、 β 、 γ 分别为横摇(roll)、纵摇(pitch)和艏摇(yaw),如图 1.1 所示。

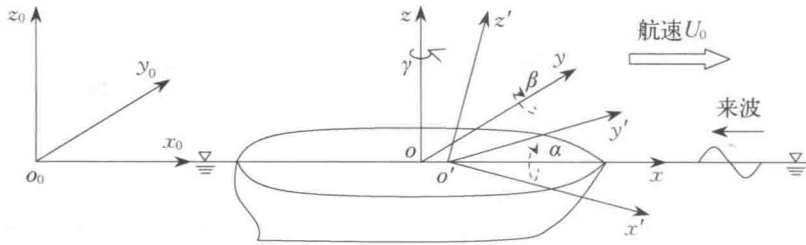


图 1.1 船舶摇荡与坐标系

\bar{x} —纵荡; \bar{y} —横荡; \bar{z} —垂荡; α —横摇; β —纵摇; γ —艏摇

从动力学意义分析,三个线位移振荡应该指船舶重心的位移,但一般将坐标系原点取在无振荡时的静水面处,这样叙述比较简便。只需经过简单的坐标变换即可得重心的位移量。

3) 船舶摇荡运动与线性叠加关系

如果波浪是微幅波,船舶的摇荡不大,可以采用摄动方法得到其摇荡运动的一阶近似线性解,它满足线性的控制方程和边界条件。在线性化假定下,叠加原理成立,因而船舶在规则波中摇荡的动力计算可分成辐射问题(radiation problem)和绕射问题(diffraction problem)来处理。在辐射问题中,只考虑船舶在静水中的强迫振荡,不计来波;在绕射问题中,则假定船舶处于平衡位置,没有摇荡运动,但有入射波作用其上。这两类流体动力与船的静水回复力和船舶摇荡的惯性力达到动力平衡,制约着船体在波浪上的摇荡运动。此外,不规则的海浪可以分解为各个单向的规则余弦波的线性叠加,因而在线性化的前提下,将船舶运动的研究归结于探讨船舶在规则波(regular wave)作用下的摇荡响应(responses),然后利用频谱分析技术得到船舶在不规则波(irregular wave)作用下的运动统计特征量。首次把频谱分析技术引进船舶力学的是圣·丹尼斯和皮尔逊(St. Denis, Pierson, 1953)^[1]。目前线性的频谱分析方法已成为船舶力学研究的经典手段,本书着力于船舶在规则波上的运动研究,特别是水动力学方面的理论阐述。

根据线性叠加原理,波浪中摇荡的船体的受力可由各成分的波浪力叠加求得,根据 Newton 第二定律,参考坐标系中船舶在波浪上的运动方程式为

$$\{\mathbf{M}\} \ddot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{F}_{\text{辐射}} + \mathbf{F}_{\text{静回复}} + \mathbf{F}_{\text{绕射}} + \mathbf{F}_{\text{入射波}} \quad (1.1)$$

式中, \mathbf{M} 、 $\boldsymbol{\xi}$ 分别为广义的质量和位移,方程右端为各成分的水动作用力(或力矩),其中广义的辐射波作用力和静水回复力是方程的未知数——位移的函数,所以计算求解该方程时需要将这部分移到方程的左端。

船舶 6 个自由度的运动也称为 6 个运动模式或模态(mode),其中垂荡、纵摇和横摇运动模态中存在静水回复力(或力矩)。

垂荡的静水回复力与水线面面积 S 的大小成比例,其自振频率 ω_h 大致上等于回复力系数与船舶质量之比的平方根,有以下的数量级:

$$\omega_h = O\left(\frac{\rho g S}{\rho \Delta}\right)^{1/2} = O\left(\frac{g S T}{\Delta T}\right)^{1/2} = O\left(\frac{g}{T}\right)^{1/2}$$

式中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, Δ 为船舶排水体积, T 为船舶吃水。作为量级分析,上式中完全略去了水动力的作用。水动力的效应是增加船的有效质量,从而降低自振频率,但自振频率的量级并不改变。纵摇的静水回复力矩与水线面的纵向惯性矩成比例,其自振频率 ω_p

大致上是回复力矩系数与船体惯性矩之比的平方根,其量级为

$$\omega_p = O \left(\frac{\rho g L^2 S}{\rho L^2 \Delta} \right)^{1/2} = O \left(\frac{g S}{\Delta} \right)^{1/2} = O \left(\frac{g}{T} \right)^{1/2}$$

显然,垂荡和纵摇的自振频率是同量级的。在这个意义上,垂荡与纵摇是动力相似的。较大的回复力(矩)的存在,保证了除自振频率附近以外,垂荡和纵摇振幅都相对较小。共振时的运动幅度取决于阻尼力和当时激振力的大小。垂荡和纵摇的阻尼主要来源于运动激起的波浪的能量辐射,黏性的作用较小,而波浪能量的传播可用势流理论计算。这是纵向运动理论发展较快的一个重要原因。一般说来,垂荡和纵摇的阻尼不算太大,但已足够阻止强烈的共振响应的发生。至于波浪激振力,只是在波长 λ 接近或大于船长 L 时才显得重要。对于深水波,频率与波长的关系是 $\omega^2 = 2\pi/\lambda$,所以激振力比较重要时的频率 $\omega_f \leq O(g/L)^{1/2}$ 。一般船舶的船长 L 远大于吃水 T (即 $L \geq T$),因此 ω_f 远小于纵向运动的自振频率。这意味着,在自振频率附近,纵向运动响应显著时,激振力较小;反之,当激振力重要时,运动的响应又小了,所以,一般不会有明显的共振发生。图 1.2 为数学船模 Wigley III 在傅汝德数 Fr 为 0.2 和 0.3 时的垂荡响应曲线,图中的计算曲线和实验结果都证实了这一点。

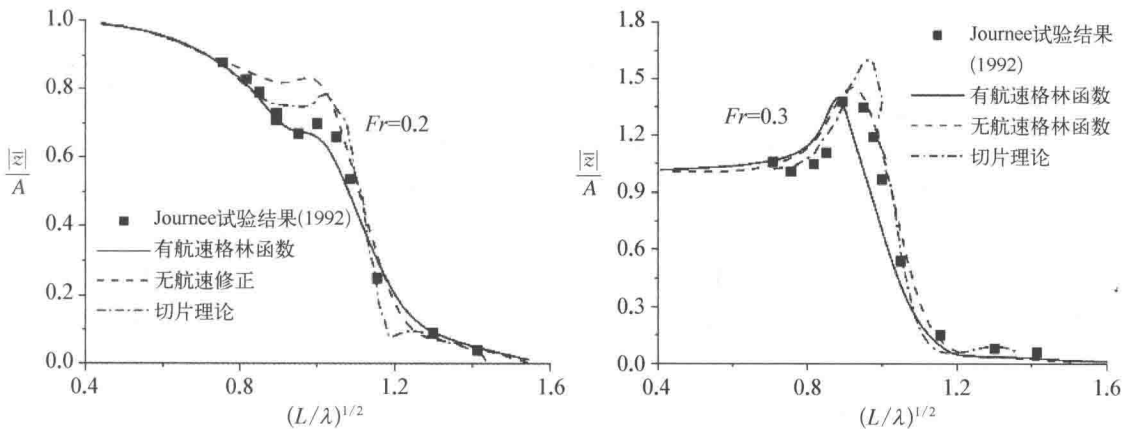


图 1.2 Wigley III 的垂荡响应曲线

$|z|$ —垂荡振幅; A —来波波幅; λ —波长; Fr —傅汝德数(傅氏数); L —船长

4) 遭遇频率与船体运动

然而,当船舶以航速 U_0 航行,与波浪夹角为 γ 时,船所感受到的波浪频率不再是波浪的自然频率 ω ,而是遭遇频率 ω_e ,两者有关系为

$$\omega_e = \omega(1 - U_0 \omega \cos \gamma / g)$$

迎浪时 $\gamma = \pi$,其遭遇频率

$$\omega_e = \omega(1 + U_0 \omega \cos \gamma / g) = \omega(1 + \tau)$$

式中, $\tau = U_0 \omega / g$ 。随浪时 $\gamma = 0$,其遭遇频率 $\omega_e = \omega(1 - \tau)$ 。

由此可见,迎浪航行时提高了有效频率,从而有可能使得波浪激振力变得重要时的频率范围接近或达到船舶的自振频率,产生强烈的共振(见图 1.2)。共振时,船体的运动幅度加速度和结构载荷都比较大,易引起一系列严重的问题,如运动幅度大,会引起螺旋桨出水,造成飞

车;船艏出水易导致船艏底部砰击(slamming),严重时会损坏船部结构;波浪与船部相对运动剧烈时,会引起船部上浪,冲击甲板上结构或机械设施等。这些现象都与纵向运动密切相关。

幸运的是,以摇荡振幅小和流体无黏性为条件的线性理论正好可以描述这种运动幅度相对较小,惯性效应大的运动模态,从而使理论预测获得了成功。受益最大的为船舶总纵强度中的外力计算。原先计算纵强度时需要将船静止地放置在与船长等长、波高为 $L/20$ 的坦谷波上(若波长 ≥ 120 m)^[2]以估算其所受的外力,这种估算尽管经多方修正,也很难认为是合理的。现在,计算船舶运动时,可同时得到船舶浸湿表面上各点的压力,只要经过适当的运算,就能得到所需要的剪力和弯矩。对不同的波长、浪向和航速都可进行计算。同时,进一步应用谱分析方法,还可预报在给定波谱下的运动、受力的短期和长期统计特性。上述线性理论方法的实际应用中虽然还有不少问题有待解决,但其作为一种较为妥善的理论是毋庸置疑的了。

横摇的静回复力矩较小,部分原因是船宽较窄,此外,船舶重心的垂向位置往往高出静水面,横倾时由重心产生的力矩(对坐标原点而言)将抵消一部分回复力矩。这样船舶横摇的周期比较长,即自振频率较低,运动的角加速度较小。船舶横摇时,源自振荡兴波能量辐射的兴波阻尼很小。这主要是因为船舶横剖面形状近乎半圆,横摇只激起不大的波浪。一旦发生共振,横摇振幅可以很大,并伴随着明显的非线性效应和黏性影响。非线性效应一方面来自大角度横摇时回复力矩的非线性,另一方面由黏性阻尼引起。横摇的黏性阻尼包括因表面摩擦、旋涡阻尼和舳龙骨产生的阻尼,它们大致与当地流体同船体表面的相对线速度的平方成比例。由于兴波阻尼小,黏性阻尼就显得比较重要。在实用计算中,需要增加黏性阻尼的修正,可以部分借助于试验或计算流体力学方法。本书中,为保持理论的一致性,讨论主要涉及兴波阻尼理论,实际计算时,需保持实验数据或按半经验公式计入黏性阻尼,这方面的有关内容可参考文献[3,4]。其他几个在水平面内的运动模态,即纵荡、横荡和艏摇,都不具备回复力和力矩,其运动响应不是共振型的。然而,在低频的随浪情况中可能出现大的运动幅值。与横摇类似,这些运动模态也可能受到非线性和黏性效应的严重影响,目前对它们的了解比横摇还要差得多。

随浪航行是个相当危险的状态。由于波面影响导致水线面的变化,可能明显地降低船舶的横稳性,也可能产生参数共振,在某些条件下,产生很大的横摇幅度,甚至造成倾覆。此外,还会由于运动航向的不稳定,在持续单方向的波浪力作用下,导致船体横转(broaching),也容易出现翻沉事故。这些与安全性相关联的重要领域引起人们的关注,已有不少学者对其进行研究,本书将不再做更为细致的分析。

综上所述,本书主要在势流理论的基础上,着重从理论上讨论船舶在波浪上的摇荡运动,力图阐明产生摇荡运动的力学机理和理论预估方法。

1.2 船舶运动理论研究

尽管人们早就意识到船舶在波浪中运动性能的重要性,并在实践中自觉或不自觉的采取某种手段来降低船舶的摇摆(主要是横摇),但在研究船舶性能的各学科分支中,波浪中船舶运动理论的发展是比较晚的。

19世纪中叶,随着蒸汽机船的出现,帆逐渐减小以至取消,原先可用于降低横摇的帆的阻尼不复存在,横摇运动的严重性突出地表现出来。这促使人们力图对横摇运动的机理做出理

论解释,以寻求有效的减摇措施。最早见诸文献的应为傅汝德^①(Froude, 1861)^[5]关于横摇运动的研究。此后随着船舶主机功率和船舶航速的增加,纵摇和垂荡运动及其影响也逐渐引起了人们的重视,克雷洛夫(Krylov, 1896)^[6]曾对此作过研究。

在这些早期研究中,只考虑入射波浪对船体诱导的干扰力,不考虑船体的存在和运动对船体的影响。这部分仅由入射波引起的波浪干扰力现今即被称作傅汝德-克雷洛夫力。傅汝德和克雷洛夫的这些经典研究成为19世纪末到20世纪40年代船舶摇摆运动研究的理论基础。

从20世纪40年代起,人们开始致力于船舶摇荡动力理论的建立,试图通过速度势的线性边值问题的建立和求解,考虑船舶的存在和运动对入射波流场的流体动力影响,从而更加合理地来描述船舶的摇荡运动。其中值得一提的是哈斯金特(Haskind)的研究^[7-8],其应用格林定理来构造因船体存在和运动引起的扰动速度势,并推导了点源格林函数的表达式。按边界条件的提法,最终得到求解速度势的积分方程,并利用窄船假定进一步解出此方程。哈斯金特的一个主要贡献是首次在线性理论范围内,把流场中的扰动速度势分成绕射速度势和辐射速度势分别求解。前一部分只考虑固定的船体的存在对入射波流场的干扰(波的绕射),后者则考虑以不同运动模式摇荡的船体对静水流场的扰动,两者的线性叠加即为流场中总的速度势。这一分解直到目前仍是处理摇荡问题中线性扰动势的典范处理方法。差不多与此同时,海夫洛克(Havelock)、厄塞尔(Ursell)等人也对速度势边值问题的求解进行了研究。厄塞尔利用多极展开法(multipole expansion method)求得静水中简谐强迫振荡的圆柱体所受的流体作用力^[9]。

这些先驱的工作尽管在形式上很优美,但无论是窄船假定或圆柱体,与实际船舶的形状都相去甚远,故而这些方法只能从现象上或定性的方面对船舶摇荡加以描述。对这些理论的进一步发展和改进是20世纪50年代以后的事情。

到20世纪50年代,船舶在波浪上运动的研究在两个方面取得了有意义的突破性进展。第一个进展是频谱分析方法的引入。1953年,圣·丹尼斯和皮尔逊将以往在通信理论中发展起来的处理噪声的理论应用到波浪及船舶摇荡的研究中去,提出了不规则海浪中船舶运动计算的理论方法^[1]。根据这一理论,船舶摇荡运动不再被认为是一种确定性过程,而是一种随机过程,其与海浪的随机性或不规则性联系在一起,从而使人们能够在统计意义上从量的角度考察不规则海浪中船舶的摇荡运动。按照随机理论,不规则波中船舶的摇荡响应与规则波中船舶摇荡响应之间存在一个简单的关系式,因此,这一理论的引入不但没有否定到当时建立在规则波假定上的船舶摇荡运动理论,反而赋予它一种新的实际意义,使得规则波中船舶运动的研究不再是学院式的,同时,使进一步完善规则波中船舶运动理论变得更加迫切和重要。在这一背景下,船舶运动理论有了迅速的发展。第二个进展是切片理论(strip theory)在船舶摇荡问题中的应用。1955年,科文-克劳科夫斯基(Korvin-Kroukovsky)应用空气动力学中的细长体概念首次提出了处理摇荡问题的切片理论^[10]。这一理论假定船体是细长的,可沿纵向(船长方向)将船体分成若干段,各段上截面形状相同,对各截面来说,流动可近似认为是二维的;按二维流动求得各横截面遭受的流体作用力后,沿长度方向积分即可求得船体上总的流体作用力。辅以若干物理直观的考虑,理论中还考虑了前进速度的影响。1957年科文-克劳科夫斯基和雅可布斯(Korvin-Kroukovsky and Jacobs)^[11]对该理论做了进一步的修正,并与实验结果进行广泛的比较。事实上,切片理论在船舶流体力学研究中的提出还要更早些,刘易

① 傅汝德,也称弗劳德,本书中尊重专业习惯,译作傅汝德。

斯(Lewis)在1929年就率先用切片的概念来研究船体结构高频振动时水动力影响问题^[12],并提出了以宽度、吃水、剖面面积等简单的剖面参数定义的剖面系列(刘易斯剖面),然而切片理论在船舶摇荡问题中的应用和真正引起普遍的重视和兴趣则始于科文-克劳科夫斯基的工作。

1) 切片理论与高速细长体理论

由于当时切片法更多地建筑在物理直观的基础上,缺乏系统和合理的推导,因此理论研究者对切片理论价值的认识过程是缓慢的。尽管如此,由于切片理论的计算相对简便和与实验结果的吻合程度较高(特别对迎浪中船舶的纵摇和垂荡),为工程实际问题的研究和解决提供了现实的手段,故而该理论受到船舶工程师们的认可和欢迎。这以后,有许多研究者对切片理论的实验验证进一步做了大量的工作。同时切片理论本身亦得到了迅速的发展和改进,这些发展大致表现在三个方面:一是切片法赖以建立的理论基础的合理化和严密化^[13],由于基础假定的某些差异,出现了多种切片方法,如新切片法^[14]、合理切片法^[15]、STF^①法^[16]等。二是二维剖面流体动力计算的发展,多参数保角变换法^[4]和密切拟合法(close-fit method)^[17]的出现,使得可以在线性的势流理论上严格地求解船形剖面的流体作用力,无须以近似的剖面(如刘易斯剖面)来代替真正的船形剖面。三是切片理论在斜浪中船舶运动计算中的推广,这时不仅船舶有纵摇、垂荡等纵向运动,还有横摇、横荡、艏摇等方向运动。根据切片理论还能计算船体某一横剖面处所受的剪力和弯矩。此外, Meyerhoff 和 Schlachter^[18]、Fujino 和 Yoon^[19]、Guedes Soares^[20]、Chen 和 Shen^[21]和 Petersen^[22]等学者对时域切片法进行了大量的研究; Jensen 和 Pedersen^[23]、Hachmann^[24]、钱昆和王言英^[25]、Adegest^[26]等学者对切片理论进行了非线性推广。切片理论是一个短波理论,一般适合的计算工况为:船体航行速度低,运动振荡频率高。即使有各种计算方法可供选择,对于有航速的船舶,约80%与设计相关的计算仍然是应用切片理论。切片理论的优点是:快速、可靠、适用于广泛的船型。对于常规、中速船舶,切片理论很难被取代。然而,对于高速舰船和严重非直壁式船型,预测的波浪载荷或者极限运动与试验相比差别较大。目前有不少经过考证的切片理论计算机程序和商用软件系统可供利用,特别是有很多基于 STF 法的商用船舶水动力计算软件,如:挪威船级社(DNV)的 Waveship 和澳大利亚 Formation Design Systems 公司的 Maxsurf 等。

为了拓宽切片法的适用范围,克服 STF 法高频低速的限制,学者们进一步提出了高速细长体理论,又称为二维半理论。该理论最早于1975年由 Chapman^[27]率先提出,而后 Faltinsen 等^[28-29]将其应用到高速细长体船舶的水动力问题的求解中。国内不少学者,如 Wang^[30]、马兴磊^[31]、段文洋^[32-33]、马山^[34]等都对二维半理论进行了研究。

2) 三维频域理论

切片理论之所以在20世纪50年代以后迅速发展,主要是因为该方法提供了一种具有一定精度并与当时的计算工具相适应的经济实用的手段,迎合了船舶工程发展的需要。这一现实绝不意味着船舶运动流体动力计算的三维理论在当时并不为人们所知,事实恰恰相反,求解流场振荡速度势的格林函数法早为人们所熟悉,在1940年代末1950年代初, Haskind^[35]、Havelock^[36]、John^[37]等人就已经求解出三维脉动点源格林函数的解析表达式,但当时和以后的一段时间内,由于缺乏大容量、高速度的计算机,三维计算没有实现的可能性。严格意义上的船舶摇荡三维流体动力计算出现在20世纪70年代。电子计算机的问世及其异乎寻常的迅

① STF 是 Salvesen-Tuck-Faltinsen 的缩写。

猛发展,为三维计算的实现创造了条件。三维计算关于无航速的船舶(包括海洋工程结构物)的流体动力和运动的研究比较多,并且自 Hess 和 Smith^[38]首次基于分布奇点方法求解无界流场中的三维无升力绕流问题以来,随着计算机的普及和计算性能的增强,三维频域理论和方法得到了飞速发展。三维频域理论中最常用的数值方法是格林函数法。目前,应用最为广泛的是三维自由面格林函数法和 Rankine 源法。三维自由面格林函数法也称复杂格林函数法,由于所用的自由面格林函数满足除物面条件以外的所有边界条件,因此只需要在船体湿表面上分布源或偶极来计算速度势。利用自由面格林函数法研究船舶在波浪中运动的关键在于格林函数的求解,对于满足自由面和远方条件的格林函数的数值计算问题, Noblesse, Newman 和 Telste 等人做了大量研究,提出了很多快速计算的方法。自由面格林函数法非常适用于无航速浮体与波浪的水动力相互作用问题, Kim^[39]、Faltinsen 和 Michelsen^[40]、Newman^[41]、Ursell^[42]、Hulme^[43-44]、Lau 和 Hearn^[45]、Lee、Newman 和 Zhu^[46]、Wu^[47-48]采用此方法计算了半潜圆球、圆环等刚体的水动力系数。国内学者也作了很多相关研究,方钟圣^[49]运用源偶混合分布法计算了大型海洋浮式结构物上的水动力;孙伯起^[50]、董慎言^[51]用分布面元法对波浪中任意形状三维浮体的二阶力作了计算;王言英和阎德刚^[52]、Qian 和 Wang^[53,54]则计算了浮体在随机海浪中的运动响应谱。时至今日,三维频域格林函数法已经相当成熟,在工程上的应用范围也可以与切片法相提并论。基于这一方法已经研发了很多实用的商业软件,如美国麻省理工学院开发的 WAMIT、挪威船级社的 SESAM(WADAM 模块)和法国船级社的 HYDROSTAR 等。

另一种常用的三维频域方法是简单格林函数法,也称频域 Rankine 源法。由于形式复杂的自由面格林函数难于实现数值计算,因此一些学者尝试使用 Rankine 源来代替它。Rankine 源法需要在整个流场边界上分布源汇,因此需要用适当的方法来处理自由面条件和辐射条件。总体而言,Rankine 源法计算简单,可以进一步计入非线性自由面和定常势的因素;缺点是需要在整个流场边界面上布置奇点,计算量比较庞大。Nakos 和 Scлавounos^[55]应用频域 Rankine 源法分析了流场的定常和非定常速度势;Scлавounos 和 Nakos^[56,57]研究了频域 Rankine 源法数值计算的稳定性,并对 Wigley 和 Series 60 船型的水动力系数和运动响应进行了数值计算。Scлавounos 系统总结了频域 Rankine 源法,并给出指导性的结论。贺五洲和戴遗山用 Rankine 源法求解了零航速浮体振荡的三维水动力系数,辐射条件的处理采用的是匹配法。李谊乐等^[58]应用 Rankine 源和高阶边界元法计算了半球的水动力系数。

有航速问题一直是三维频域方法的难点。满足有航速情况下自由面条件和辐射条件的频域格林函数早在 1946 年由 Haskind^[59]导出,在这之后 Havelock^[60]、高木又男^[61]、缪国平^[62]和 Bessho^[63]等相继推导出 Havelock 型、Michell 型和 Bessho 型有航速频域格林函数(也称移动脉动源)的表达式。洪亮^[64]和朱仁传等对移动脉动源作了系统的数值计算,通过交换物理空间积分和 Fourier 空间积分的次序,提出并推导了分布在水平线段上移动脉动源格林函数的半解析单重积分表达,对应的数值计算精度高、收敛快、稳定性强,并据此提出了一种计算稳定的面元积分离散格式,将其成功地应用于有航速船舶的运动计算。

3) 三维时域理论

虽然频域理论因其成熟简便而应用广泛,但它通常只适合于求解稳态问题,在处理非线性和瞬态等复杂问题时常常力不从心。而船舶流体动力计算的另一重要理论——时域理论在这方面则具有先天优势,不论全非线性还是物体任意复杂运动都可在其范畴内进行研究。时域理论的开创性工作是由 Finkelstein^[65]和 Cummins^[66]完成的。Finkelstein 系统地推导了无限

水深和有限水深情况下满足自由面条件的时域格林函数, Cummins 则创造性地把扰动速度势分解成瞬时效应和记忆效应部分, 这样就把运动与物体的几何形状分开来, 建立了脉冲响应函数法。Ogilvie^[67]在上述理论的基础上讨论了有航速情况的求解方法。Wehausen^[68]基于满足自由面条件的时域格林函数建立了积分方程, 并推导了无航速时的 Haskind 关系。尽管时域理论的提出并不算晚, 但直到 1979 年才由荷兰水池的 Ooeremersen^[69]在计算机上实现了数值计算。这主要是因为时域方法计算量庞大, 只有当计算机性能发展到一定阶段以后, 数值计算才得以实现。之后, Chapman^[70]将 Cummins 的方法加以推广, 计算了二维浮体的大振幅瞬态运动, 后来又研究了三维有航速的情况。

三维时域理论主要包括线性理论和非线性理论。线性理论相对较简单, 自由面和物面上满足的边界条件均简化为线性, 且在平均位置上近似满足。在线性理论范畴内, 常用的时域方法是自由面格林函数法。该方法使用满足线性自由面条件的时域格林函数, 由于时域格林函数具有积分高频振荡及增幅等特性, 导致其数值计算十分困难。针对这一点不少学者提出了各种计算方法。Inglis^[71]、Beck^[72,73]和 Newman^[74]对其采用分区方法进行数值计算。黄德波基于制表插值方法构造了时域格林函数及其导数的快速计算方法。Clement^[75]通过求解 4 阶常微分方程来得到时域格林函数的数值解。Duan 和 Dai^[76]则采用不同方法推导了其所满足的常微分方程式。朱仁传等^[77]提出了一种较为实用的数值计算处理方法, 其结合了制表插值法的高效率和求解常微分方程法的高精度优势。由于时域格林函数自动满足线性自由面条件和辐射条件, 所以只需在物面上分布奇点, 该处理方法计算较为简便, 自从出现以后得到了充分的研究和应用。Beck 和 Liapis^[72]等分别给出了处理无航速浮体辐射问题的源偶混合分布法和分布源法; 且在此基础上 Beck^[73]对波浪中的船舶运动作了预报并将结果和频域方法作了比较。King, Beck 和 Magee^[78]基于上述时域格林函数对线性绕射问题做了求解。在国内, 张亮和戴遗山^[79]给出了用反向辐射势表示绕射力的关系式, 并借此研究了近水面航行物体的绕射问题。周正全等^[80]对船舶在波浪中航行时的线性绕射问题进行了计算。王大云^[81]利用上述时域格林函数, 求解弹性体的辐射和绕射问题, 计算了其水动力系数和波浪力。朱海荣^[82]基于三维时域格林函数法求解多浮体共振与有航速船舶在波浪中运动的问题。不过, 时域自由面格林函数也存在两个突出的缺点: 一是对于外飘非直壁船型, 不论是否有航速, 都会出现数值计算振荡发散的现象, 使得求解无法进行下去; 二是计算仅满足线性自由面条件, 难以考虑自由面非线性因素的影响。

为了克服上述缺点, 就必须改用其他形式的格林函数, 于是 Rankine 源法开始受到研究者的青睐。该方法使用的简单格林函数(Rankine 源), 不满足任何边界条件, 因此要在物面和自由面上都分布源汇。正因为如此, Rankine 源法具有很强的灵活性, 非常适用于非线性问题的研究。完全非线性理论最初由 Longutt-Higgins 和 Cokelet^[83]提出, 此后很多学者对其进行了大量研究。基于 Rankine 源法, 蔡泽伟等^[84,85]研究了近水面三维物体的非线性运动问题; Ferrant^[86]研究了部分非线性的波浪运动问题; Kring 等^[87]考虑了物体瞬时湿表面上的非线性静水回复力和入射波力, 提出了弱散射理论; Yasukawa^[88]提出了计及自由面和物面非线性的时域耐波性计算方法; Kim 等^[89]计算了船舶在波浪中的非线性运动和结构载荷。Rankine 源法的难点在于辐射条件的处理, 为了达到限制计算区域且保证波浪在边界上透射的目的, 需要采取适当的手段。Huang 和 Sclavounos^[90], Kim 和 Kring^[91], 钱昆^[92]以及陈京普^[93]等通过在自由面边界条件上添加阻尼项的方法来满足上述要求, 即所谓的数值海岸法。随着计算机性