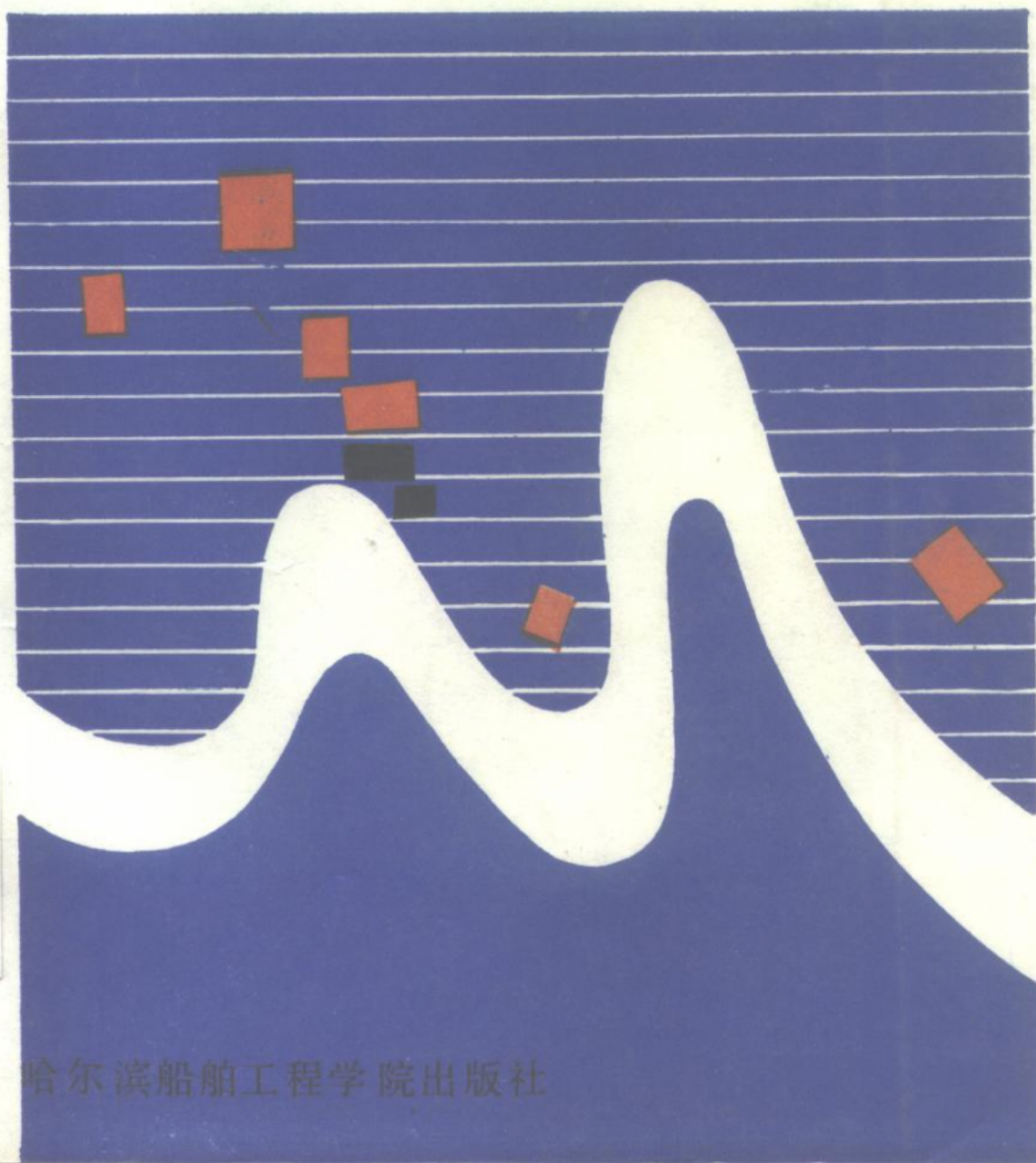


船舶耐波性

李积德 编



哈尔滨船舶工程学院出版社

425274

166-1
126-2

船舶耐波性

李积德 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

田宝荣

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

本书共分九章，分别叙述了船舶耐波性研究的范围及意义、船舶运动及受力分析；海浪的描述；船舶在静水、规则波和不规则波中的线性摇荡运动的性能；非线性横摇的处理方法和性能分析；船舶耐波性理论预报技术；耐波性的试验研究；耐波性在船舶设计中的应用及主要减摇装置的原理和性能。本书是高等院校船舶与海洋工程专业教材，也可供从事船舶与海洋工程领域的研究和设计人员参考。

DV97/21

船 舶 耐 波 性

李积德 编

*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版

新华书店首都发行所发行

绥化县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张12.375 字数284千字

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数：1—1000册

ISBN 7-81007-172-6/U·24

定价：3.25元

序

本书是根据1978年全国造船专业教材会议通过的《船舶耐波性》大纲编写的，作为船舶设计与制造专业的教科书。

鉴于当时关于船舶耐波性这门课，各个院校在教学时数及讲授内容上差异较大，且很难统一。为此，参加大纲讨论的同志一致认为，在内容和取材上尽量全面些，便于各院校进行取舍。

因此，本书编写力求内容的系统性和完整性，并引入耐波性学科现代的发展成果。适当扩充一些内容（带*号）作为深入研究船舶耐波性的参考。

考虑到船舶设计与制造专业学生的特点，着重从物理概念上阐述船舶运动的特性。对于有关流体动力学及数学方面的理论推导作适当的省略。为加深学生对基本内容的理解和训练实际应用的能力，引入了工程上经常采用的一些近似计算方法。

本书主要研究船舶在波浪上的运动性能，重点是讨论船舶横摇、纵摇和升沉运动，对耐波性领域里的其它一些问题，如甲板上浪、砰击、首部加速度以及波浪增阻等作简要说明。

在研究与船舶耐波性密切相关的波浪理论、流体动力学、试验技术与设备以及减摇装置等问题时，要涉及到海洋学、概率与统计理论、计算流体力学，电子技术及自动控制理论诸学科，这已超出本书范围。对书中涉及到的这些方面，主要是引用有关结论，简单叙述它的基本概念，以求在研究船舶耐波性时应用方便。

在过去相当长的一段时间里，人们进行船舶设计时，主要从静水快速性考虑。实际上，船舶经常是航行在波涛汹涌的海面上。一般在静水中航行性能优良的船舶，在波浪中并不一定是优良的。因此，研究船舶在波浪上的运动性能愈来愈显得重要。近年来，由于造船、海洋运输事业和现代武器装备的飞跃发展，对舰船在波浪上的运动性能提出了更高的要求。特别是概率及统计理论，计算技术广泛应用于船舶耐波性的研究，大大促进了本学科理论研究的发展，许多方面已在工程设计中应用。

但是，至今船舶耐波性这门学科的发展还很不完善。很多问题尚在研究之中，如海浪与船舶流体动力学的研究、船舶在恶劣海况中航行时大幅运动预报技术以及如何将船舶耐波性的研究成果应用于船舶设计中去等问题，正是当今世界研究的热点。

编者曾于1981年在国防工业出版社出版过《船舶耐波性》一书。此次是根据近些年教学实践和船舶耐波性的发展重新编写的。在重新编写过程中，大连理工大学邢殿禄同志提出了修改意见。本书稿由武汉水运工程学院王仁康同志负责主审，哈尔滨船舶工程学院夏剑晖同志负责复审，他们都提出了许多宝贵意见，在此一并表示诚挚的谢意。

对中国船舶工业总公司教材编审室、哈尔滨船舶工程学院出版社给予本书出版的支持表示衷心的感谢。

本书不足之处仍在所难免，诚恳希望广大读者和同行提出宝贵意见，使本书再版时得以逐步充实完善，编者将万分感谢。

编 者

1991年4月

目 录

第一章 绪 论	1
§1.1 概 述.....	1
§1.2 表征船舶摇荡特征的要素.....	3
§1.3 船舶运动及其受力分析.....	4
第二章 海 浪	12
§2.1 平面进行波.....	12
§2.2 海 浪.....	18
* §2.3 用相关函数确定波能谱.....	29
* §2.4 风级、浪级和海况.....	30
第三章 船舶在静水中的自由摇荡	34
§3.1 船舶在静水中的自由横摇.....	34
§3.2 船舶在静水中的自由升沉和纵摇.....	42
第四章 船舶在规则波中的摇荡运动	47
§4.1 船舶在正横规则波中的线性横摇.....	47
§4.2 船舶在规则波中迎浪的升沉和纵摇.....	58
§4.3 航向、航速对船舶摇荡运动的影响.....	63
第五章 船舶在不规则波中的摇荡运动	67
§5.1 谱分析.....	67
§5.2 船舶在不规则波中的升沉和纵摇.....	70
§5.3 船舶在不规则波中的线性横摇.....	74
第六章 船舶非线性横摇	80
§6.1 非线性阻尼的船舶非线性横摇.....	82
* §6.2 应用图谱估算非线性横摇幅值.....	91
§6.3 非线性恢复力矩的船舶非线性横摇.....	96
第七章 船舶耐波性理论计算方法	99
§7.1 船舶在规则迎浪中纵摇与升沉运动方程的建立及其解.....	100
* §7.2 船舶在规则斜波中的升沉与纵摇运动方程的建立.....	106
§7.3 二维剖面在静水中作升沉与纵摇运动时的流体动力系数的计算.....	114
§7.4 船舶在不规则波中运动参数的统计值、增阻、上浪、 螺旋桨出水、砰击概率的计算.....	127
第八章 船舶耐波性试验	134
§8.1 概 述.....	134

§8.2 船模试验的基本要求.....	136
§8.3 静水自由横摇衰减试验.....	144
§8.4 船模在波浪中的运动试验.....	147
* §8.5 静水中船模强迫摇荡试验.....	151
* §8.6 波浪中船模强迫摇荡试验.....	156
第九章 船型选择和减摇装置.....	158
§9.1 船型选择.....	158
§9.2 减摇装置.....	168
参考文献.....	190

第一章 绪 论

§1.1 概 述

很久以来,船舶设计师们对船舶性能的研究多侧重在船舶在静水中的性能,特别是静水中航行时的快速性。但是,大量事实表明,一艘在静水中航行性能优良的船舶,在波浪上的航行性能并不一定是优良的。由于船舶实际上是经常航行在波涛汹涌的海面上,因此,研究船舶在波浪上的航行性能愈来愈引起人们的重视。它促使了船舶耐波性这一学科的迅速发展。耐波性能的优劣已成为衡量现代化舰船航行性能的重要衡准之一。

船舶耐波性是指船舶在波浪扰动下,产生各种摇荡运动、砰击、甲板上浪、失速、螺旋桨出水以及波浪弯矩等,仍能维持一定航速在波浪中安全航行的性能。可见,波浪对船舶航行性能的影响是多方面的,而且都是有害的。概括起来可分为三方面:

1. 安全性

船舶在波浪上横摇将使船的稳性降低;剧烈的横摇可能使舱内货物移动,引起船的倾斜,甚至导致翻船。所以在现行的海船稳性规范里,计算稳性必须考虑船的横摇影响。

由船舶在波浪上剧烈的纵摇和升沉运动引起船首底部的砰击,导致船体结构的损伤;甲板上浪可能使舱室进水、破坏甲板上各类设备、使人员在甲板上无法安全工作。

由于船舶在恶劣海况下剧烈摇荡而引起的海难事件时有发生,因此,在船舶设计中都明确指出船舶安全航行的海况等级。

2. 作战或作业使用性

船舶在指定的海况下,舰船人员能运用舰船上设备或武器装备系统完成运输任务或作战使命的能力。

舰船剧烈的摇荡运动使航行性能变坏。主要表现在:严重的纵摇和升沉运动,使船航行阻力增加和船舶失速;船首底部不断地发生砰击以及甲板上浪导致船体结构损伤、甲板装置破坏和船体颤振;螺旋桨出水引起飞车现象,使螺旋桨主轴受极大的扭振,主机工况恶化;剧烈的纵摇、升沉、横摇及首摇都会给舰船操纵带来困难,甚至失控。上述一些不利因素,严重影响舰艇战斗力的发挥(降低火炮与导弹的命中率、舰员作业困难、影响舰载飞机的安全起降和降低作业效率等)。

3. 适居性

舰船是海上的浮动建筑物,必须给船上人员提供较舒适的环境,发挥他们的工作效力;给旅客提供舒适的旅行环境。

舰船人员工作能力主要受两种运动特性的影响,即加速度和横摇幅值。船舶摇荡

的线加速度和角加速度引起船上人员晕船,一般晕船率随加速度增加而增加。大幅横摇将影响船上人员运动能力,有人经试验研究,提出了人员活动对横摇幅值的适应范围,一般横摇角在 $0^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 范围内对人的活动影响很小,在 $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内人的活动能力下降, 10° 以上人的活动已很困难。

研究船舶耐波性目的是研究影响船舶在海上航行性能的主要因素的特性,主要指风浪、船舶自身摇荡性能以及在波浪上摇荡运动规律性。进而寻求改善船舶在波浪中航行性能的方法,设计出耐波性优良的船型和主尺度。有效的减摇装置,为船舶驾驶人员提供安全航行指南。

所谓船舶剧烈的摇荡不仅仅指摇荡幅值过大,还同摇荡的速度和加速度相关。船舶设计师从摇荡运动性能的角度考虑,希望摇荡运动幅值较小而周期较长。一般通过选择合适的船型和主尺度以及设置减摇装置等,可有效地减小运动幅值。摇荡周期主要取决于船的主尺度,而船的主尺度的选择要从多方面综合考虑,从摇荡周期考虑至少不是最主要方面。各类舰船的摇荡周期几乎是依据船的排水量和主要尺度的量级各自落在一定范围内,技术设备不能对周期产生很大的影响。

另外,对船舶摇荡幅值的要求不是越小越好。假如一艘船在波浪中绝对不摇荡,则它在波浪冲击下受到很大的阻力,而且甲板也可能涌上大量的海水。水面船舶对波浪的扰动做适当响应,反而可以改善其航行性能。由此可见,要设计出一艘性能优良的舰船,必须对影响航行性能的各种因素综合考虑。

研究船舶耐波性的基本方法

1. 理论计算与分析法

船舶在波浪上的摇荡运动,从力学观点看,包括两个方面:一个是刚体动力学问题,即船舶作为一刚体在外力作用下,产生运动的问题。船舶在波浪扰动下的摇荡运动同周期性扰动力作用下的振荡器的振动类似。因此,研究船舶摇荡运动归结为建立船舶摇荡运动的微分方程及求解。

另一方面是流体动力学问题。船舶在波浪上运动所受到的外力,主要是流体作用力。这些力的大小和变化与船舶以及流体相对运动有关。一般采用流体动力学方法计算。

这两方面的问题是互相关联的,即船舶运动影响它的受力,而其受力又影响船舶运动。因此解决这类问题通常是寻求船的受力及其运动量间的函数关系。

船舶耐波性理论的发展起源很早,1737年,欧拉已经开始从理论上研究这一问题。但是由于当时的造船工业水平较低,因此在相当长一段时间里,这方面的理论研究工作发展缓慢。这一时期各国学者主要是研究船在静水及规则波中的运动性能。从19世纪末期,由于造船工业的蓬勃发展,钢壳船取代了木质船,船的摇荡阻尼大大降低,船舶摇荡的加剧引起了船舶设计师们的关注。当时英国的傅汝德和苏联的克雷洛夫对船舶摇荡理论作了深入的研究。近30余年来,船舶耐波性理论有了重大的发展,主要表现在如下两个方面:

(1) 流体动力理论的发展。由于科学技术水平的日益提高,特别是流体动力学理论及试验技术的发展,使得有可能对船在波浪上运动引起的船与流体间的相互作用问题进行理论计算。1955年及1957年,科文·克劳科夫斯基提出根据“切片理论”计算船舶的升沉与纵摇运动,它成为用理论方法计算船舶纵向运动的起点。随后,各国学者在此

基础上不断发展“切片理论”，提出了各种切片法。在这方面具有代表性的有渡边惠弘、格里兹玛、田才福造、高木以及赛尔维逊等人。关于“切片理论”将在后面章节里详述。现今已广泛采用切片法预报船舶在波浪上的摇荡运动性能。

(2) 现代研究船舶在波浪上的运动性能，广泛应用概率与数理统计理论。利用谱分析的方法研究复杂的波浪及船舶运动。这一问题的解决使船舶耐波性理论向实际应用更接近了一步，使我们可以应用理论计算方法预报船舶在实际航行的运动性能。

2. 试验方法

在船舶耐波性的研究中，除理论研究外，试验研究也占极重要的地位。试验包括实船试验和船模试验。试验可以帮助我们观察海浪和船的运动现象，寻求内在的规律性，验证理论计算结果。特别是在本学科范围尚存许多问题，目前，还不能完全用理论方法解决，必须依靠试验，例如船舶横摇阻尼系数主要靠试验确定。

随着理论研究的发展，试验技术也有飞跃进展。世界许多国家相继建立了大型耐波性水池、造波技术及测试设备的现代化，以及试验数据处理的计算机化，这些都对船舶耐波性学科的发展起着重要作用。

§1.2 表征船舶摇荡特性的要素

船作为一个刚体在静水或波浪中受到扰动后，可能产生围绕其原始平衡位置做六个自由度的摇荡运动。船沿通过重心 G 的纵轴、横轴与竖轴的往复振荡分别称为纵荡（进退）、横荡和升沉（垂荡）运动。绕上述三个轴的角振荡分别称为横摇，纵摇和首摇，见图（1.2.1）。

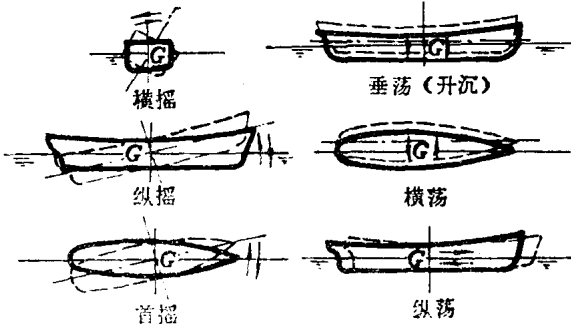


图 1.2.1

研究表明，船舶摇荡运动大多数非常接近简谐振荡，或者可以用若干简谐振荡叠加的结果表示。因此，表征船舶摇荡特性的一些要素同简谐振荡的要素相一致。我们知道，一个物体在其平衡位置作简谐振荡运动，其运动方程为

$$Y = a \sin(\omega t + \varepsilon) \text{ 或 } Y = a \cos(\omega t + \varepsilon)$$

上面方程式同样描述了船舶在某一自由度内的简谐摇荡。

其中 Y ——船舶在其某种形式下摇荡， t 时刻离开平衡位置的位移；

a ——船舶离开平衡位置的最大位移，称为摇荡的振幅；

ω ——振荡的圆频率，它与振荡周期 T 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

振荡的圆频率等于 2π 秒内的完整振荡次数。船舶完成一次完整振荡的时间称为振荡周期。

角 $(\omega t + \varepsilon)$ 称为振荡的相位。角 ε 为船舶起始瞬时 $t = 0$ 时刻的相位，称为初相位。

由此可见，表征船舶振荡特征要素为

- (1) 振荡的振幅；
- (2) 振荡的周期或圆频率；
- (3) 振荡的相位。

除上述各要素外，有时用振荡的最大速度和加速度来表征船舶振荡的特性。例如在简谐振荡的情况下，振荡的速度和加速度可由时间函数的位移对时间微分求得，即

振荡速度为 $\dot{Y} = \partial Y / \partial t$ ，振荡加速度为 $\ddot{Y} = \partial^2 Y / \partial t^2$ 。

§1.3 船舶运动及其受力分析

当船舶在波浪上航行时，受波浪的扰动将产生振荡运动。由于实际海浪情况复杂多变，所以引起船舶的运动也是非常复杂的，其运动往往是几种简单运动的叠加。也就是说，船舶各个自由度的振荡运动不是独立的，相互间存在耦合影响。例如船舶的纵摇和升沉运动往往是互相伴随发生，这是由于船作升沉运动时会产生一纵倾力矩，使船同时发生纵摇，反之亦然，即所谓耦合作用。

另外，由于船舶运动将对周围的流体产生扰动，改变了船体周围流体的速度场和压力场。波浪经过船体时，由于波浪起伏改变了船水下形状和体积，使浮力大小及作用点发生变化，由于波浪下水质点作轨圆运动，将使波浪下的压力分布与静水面下的压力分布不同。由于上述因素，因此，从数学角度要建立一个作用于船上的完整而精确的力学模型是相当困难的。

通常在研究船舶振荡时，作如下假设

- (1) 船舶在波浪中所作的六个自由度振荡运动是互相独立的；
- (2) 波浪是微幅平面进行波；
- (3) 船舶振荡幅值是微幅的。

在上述假定下，问题大大简化，可以分别独立地讨论各个自由度的振荡运动。同时可以线性理论讨论船舶振荡运动方程。

在船舶可能产生的六个自由度的振荡运动中，升沉、横摇和纵摇由于恢复力或恢复力矩作用，产生以平衡位置为中心的周期振荡运动。它们属于纯振荡性的运动，也正是船舶耐波性这门学科研究的重点。在研究各个自由度振荡运动的基础上，进而讨论船舶在波浪上的耦合运动。

1. 坐标系的选择

为了讨论并表征船舶在波浪上的运动特性,通常采用三种坐标系来描述海浪、船和空间某一固定点的关系。三种坐标系均采用垂直轴沿铅垂线向上的右手坐标系。

(1) 空间固定坐标系 $O_1\xi\eta\zeta$ 坐标面 $O_1\xi\eta$ 与静水面重合, $O_1\zeta$ 垂直于静水面,见图(1.3.1),该坐标系用来描述海浪。

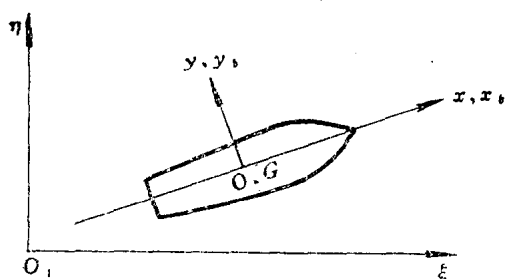


图 1.3.1

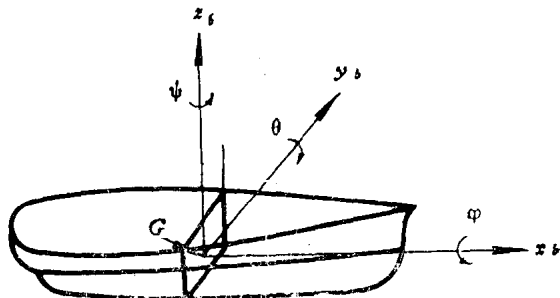


图 1.3.2

(2) 动坐标系 $Gx_b y_b z_b$ 也称联船坐标系。象理论力学常用的方法一样,把联船坐标系原点取在船的重心 G (即质心)上,把坐标轴取作与船的中心惯性主轴相重合。这样,描述船舶摇荡运动简单方便。 Gx_b 在船中线面内与龙骨线平行,向艏为正; Gz_b 在中线面内与 Gx_b 垂直,向上为正; Gy_b 垂直于中线面,向左舷为正。见图(1.3.2)。

由于船体结构及船内载荷是对称于船中线面分布,所以船的一个中心惯性主轴必然与中线面垂直,也就是说 Gy_b 是一惯性主轴。另外两个惯性主轴在中线面内的位置应由船体结构及其内部载荷在船体的高度与船长的分布决定。因为船体的高度与船长相比是小的,所以可以认为 Gx_b 是纵向中心惯性主轴不会引起太大的误差。这样, Gz_b 必然是一中心惯性主轴。

(3) 随船移动的平衡坐标系 当船在静水中以航速 v 航行时,该坐标系 $Oxyz$ 随船同速前进, Oxy 位于静水面上, Ox 正向与航速 v 同向,见图(1.3.1)。当船在波浪上作摇荡运动时,该坐标系不随船作摇荡,仍保持按船的平均速度和原航向前进。

一般坐标系 $Oxyz$ 原点与重心 G 不重合,但在以后讨论中,为进一步简化而不妨碍所研究问题的普遍性,假设船的重心 G 位于静水面上,即使 G 与 O 重合。

根据 §1.2中对船舶摇荡运动的定义,结合上面的坐标系,用以下符号表示船舶六个自由度的摇荡运动

$x(t)$ ——纵荡;	$\varphi(t)$ ——横摇;
$y(t)$ ——横荡;	$\theta(t)$ ——纵摇;
$z(t)$ ——升沉(或垂荡);	$\psi(t)$ ——首摇。

应指出,以上描述角振荡的方法,当三种角振荡同时存在时,只适用于小角度范围内,对于大角度的转动应该用欧拉角来度量。

2. 描述船舶摇荡运动的微分方程式

根据上面叙述的坐标系和假设,建立船舶摇荡运动的微分方程式。船在波浪上的摇荡可以与物体在弹簧下面的强迫振动相类似。如图(1.3.3)所示的装置,设弹簧在悬挂点(基础)作简谐运动,即

$$y(t) = a \sin \omega t \quad (1.3.1)$$

悬挂点的瞬时位移通过弹簧作用于物体一扰动力 F_e ，见图 (1.3.3(b))。即

$$F_e(t) = K_s y(t) = K_s a \sin \omega t$$

其中 K_s —— 弹簧系数。

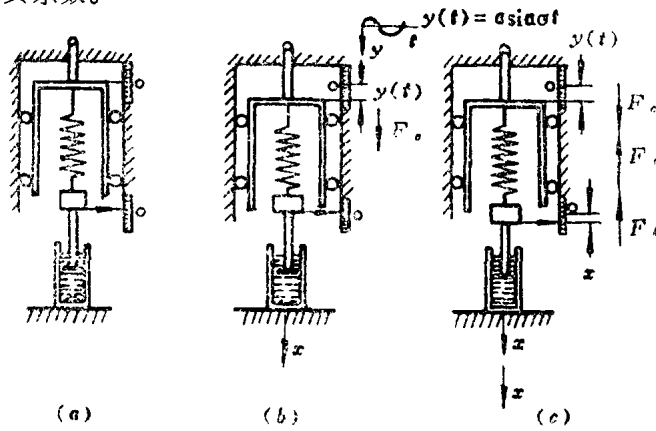


图 1.3.3

当物体不受约束地在此扰动力作用下作简谐振动时，其瞬时位移为 x ，速度为 $\dot{x}$ ，见图 (1.3.3(c))。根据牛顿第二定律有

$$m\ddot{x} = F_r + F_d + F_e \quad (1.3.2)$$

其中 m —— 物体质量；

F_r —— 由物体绝对位移 x 而引起的弹簧作用于物体上的恢复力等于 $(-K_s x)$ ；

F_d —— 由物体绝对速度 $\dot{x}$ 而引起的阻尼力 $(-2N\dot{x})$ ， $2N$ 称为阻尼系数。

描述上面物体的振荡运动微分方程为

$$m\ddot{x} + 2N\dot{x} + K_s x = K_s a \sin \omega t \quad (1.3.3)$$

现在来看船在相对船宽为很长的正横规则波作用下的强迫升沉运动。为使问题更进一步简化，认为波长如此之大以致于在船宽范围内只有水面垂直起伏，没有波面斜率作用，即没有横摇发生，见图 (1.3.4)。

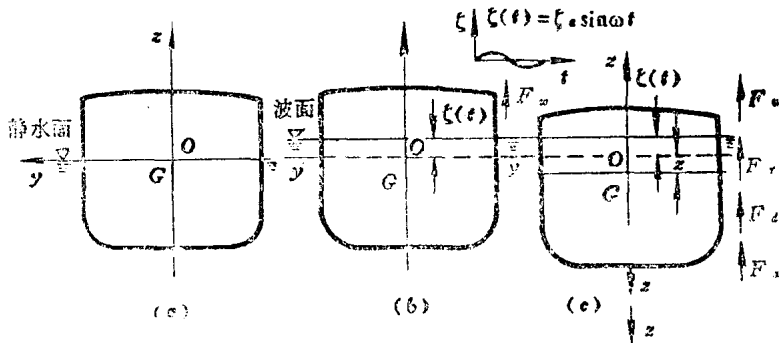


图 1.3.4

当水面按简谐规律起伏时，其表达式为

$$\zeta = \zeta_a \sin \omega t$$

认为船受约束, 见图 (1.3.4(b)), 则水对船的扰动力为

$$F_w(t) = \gamma S_w \zeta(t) = \gamma S_w \zeta_a \sin \omega t$$

其中 γ ——水的重度;

S_w ——船的水线面面积。

当船不受约束, 在扰动力 F_w 作用下作升沉运动时, 对应于任一瞬时状态, 如图 (1.3.4(c)) 所示, 可以建立该船升沉运动的微分方程 (相对于固定坐标 zOy)

$$\frac{D}{g} \ddot{z} = F_r + F_d + F_a + F_w$$

其中 D ——船的重量;

g ——重力加速度;

F_r ——水对船的垂向恢复力, 在吃水改变微小时, 等于 $(-\gamma S_w z)$;

F_d ——水对船的阻尼力, 等于 $(-2N_z \dot{z})$;

F_a ——由水的附加质量引起的惯性阻力, 等于 $(-\lambda_{zz} \ddot{z})$ 。

经整理式 (1.3.4) 可以写为

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{zz} \right) \ddot{z} + 2N_{zz} \dot{z} + \gamma S_w z = \gamma S_w \zeta_a \sin \omega t \quad (1.3.5)$$

式 (1.3.5) 与式 (1.3.3) 完全相似。

式 (1.3.5) 可以写为下面形式

$$M_{zz} \ddot{z} + 2N_{zz} \dot{z} + C_{zz} z = F_{zz} \quad (\text{升沉}) \quad (1.3.6)$$

其中 $M_{zz} = (D/g) + \lambda_{zz}$

$$C_{zz} = \gamma S_w$$

$$F_{zz} = \gamma S_w \zeta_a \sin \omega t$$

类似地可以建立其它几个自由度的摇荡运动微分方程式

$$M_{xx} \ddot{x} + 2N_{xx} \dot{x} + C_{xx} x = F_{xx} \quad (\text{纵荡})$$

$$M_{yy} \ddot{y} + 2N_{yy} \dot{y} + C_{yy} y = F_{yy} \quad (\text{横荡})$$

$$M_{\varphi\varphi} \ddot{\varphi} + 2N_{\varphi\varphi} \dot{\varphi} + C_{\varphi\varphi} \varphi = F_{\varphi\varphi} \quad (\text{横摇})$$

$$M_{\theta\theta} \ddot{\theta} + 2N_{\theta\theta} \dot{\theta} + C_{\theta\theta} \theta = F_{\theta\theta} \quad (\text{纵摇})$$

$$M_{\psi\psi} \ddot{\psi} + 2N_{\psi\psi} \dot{\psi} + C_{\psi\psi} \psi = F_{\psi\psi} \quad (\text{首摇})$$

可见, 船舶任一自由度的摇荡运动, 均可用上述二阶线性微分方程式描述。其中各方程中 M 、 $2N$ 、 C 、 F 分别代表惯性力 (或力矩) 系数、阻尼力 (或力矩) 系数、恢复力 (或力矩) 系数、波浪扰动力 (或力矩), 它们的下脚标表示各个自由度的摇荡运动。

研究船舶摇荡运动, 归结为求解上述二阶线性微分方程。解此方程并不困难, 关键是方程式各系数及波浪扰动力 (或力矩) 的确定。

3. 船舶在波浪上运动的受力分析

船舶在波浪上运动的受力是很复杂的, 但是在上面所述的假设下可认为, 当船在微幅平面进行波作用下, 在其平衡位置附近作微幅摇荡时, 作用在船上的各种力均可以表

示为船离其平衡位置的位移，摇荡速度和加速度的线性函数，并且各种力是互相独立的。这样，我们可以对作用于船上的各种力分别研究确定。即研究波浪扰动力（矩）时，只考虑波浪对于固定船的作用，而忽略船运动对它的影响；研究由船运动引起的各种力（矩）时，忽略波浪扰动力（矩）的影响。然后应用线性叠加原理求总的力（矩）。

关于波浪扰动力与船舶运动引起的各种力相互无关的假说，只有当船作微幅摇荡时，具有一定合理性，在大幅摇荡时就不很合理。

(1) 船舶运动引起的各种力（或力矩）

a. 恢复力（矩）

类似弹簧的恢复力，水对船的恢复力（矩）其大小与摇荡位移有关而方向恒与位移方向相反，所以恢复力（矩）代表船在静水中作线位移（或角位移）引起的力（矩）。当恢复力（矩）的大小与位移成正比时，称为线性恢复力（矩），其比例系数为 C 。

船在零航速时的各方向上的恢复力（矩）完全可以按静力学的方法计算，即

$$\left. \begin{aligned} C_{xx} &= 0 & C_{\varphi\varphi} &= Dh \\ C_{yy} &= 0 & C_{\theta\theta} &= DH_0 \\ C_{\psi\psi} &= 0 & C_{zz} &= \gamma S_w \end{aligned} \right\} \quad (1.3.7)$$

其中 h ——横稳心高；

H_0 ——纵稳心高。

对排水式船，一般认为航速对恢复力（矩）的影响可以忽略。但对一些特种船如滑行艇，水翼艇等，航速高，此时除静浮力外，有动水支持力作用于船上，因此研究这类船时，必须考虑航速对恢复力（矩）的影响。

式(1.3.7)中 $C_{xx}=0$ ， $C_{yy}=0$ 及 $C_{\psi\psi}=0$ ，说明船在静水中受一扰动作用后不能发生自由纵荡、横荡及首摇运动，因为在这三个方向上摇荡无恢复力（矩）存在，而船在静水中受某一扰动后，可产生自由横摇、纵摇和升沉运动，这是由于恢复力矩（或力）的作用使船在平衡位置附近作摇荡。由此可见，恢复力（矩）是使船产生摇荡的重要因素。船舶有恢复力（矩）才能获得在静水中作自由摇荡运动的能力。

b. 阻尼力（矩）

在船舶摇荡中，阻尼力（矩）的大小与摇荡速度相关其作用方向恒与船的摇荡速度向量相反，阻尼力（矩）对船作的功恒为负值。也就是说它是消耗船摇荡能量的因素，使船摇荡运动衰减，称为耗散力。

船所以能在波浪上作稳定的摇荡，是因为波浪扰动力（矩）在每一周期对船所作的净功等于阻尼力（矩）在同一时间内所耗散的能量。增大阻尼力（矩）是减小船舶摇荡幅值的基本措施。

船的阻尼力（矩）按物理性质大致可分为三类：兴波阻尼、旋涡阻尼、摩擦阻尼。当然还有其它类型的阻尼，如表面张力引起的阻尼；舰艇高速航行时（傅汝德数 $F_r > 0.3$ ），会产生动升力阻尼。对于象水翼艇和滑行艇这类高速艇，动升力阻尼显著。对于一般排水式船，主要是考虑前三种阻尼。

摩擦阻尼由水的粘性引起的，计算这部分力是很困难的。但试验证明，摩擦阻尼在总阻尼中占的成分很小，通常可以忽略。它可以通过模型试验得到，傅汝德认为摩擦阻尼与摇荡速度平方成比例。

旋涡阻尼 由水的粘性引起的, 认为它与摇荡速度平方成比例, 甚至有人认为与摇荡速度更高次方成比例。

兴波阻尼 由于船舶运动使水面产生波浪, 消耗船本身的能量所造成的阻尼。傅汝德认为兴波阻尼与速度一次方成比例。

这三种阻尼成分对不同方向的摇荡运动作用不同。对纵摇和升沉运动, 兴波阻尼为主。摩擦阻尼和旋涡阻尼较小, 可以忽略。对横摇运动, 三种阻尼成分作用依船横剖面形状及横摇角幅值不同而异。实际上, 摩擦阻尼仍然是很小的, 可以忽略, 主要是兴波阻尼与旋涡阻尼。当船作小角度横摇时, 兴波阻尼起主要作用, 因此可以认为阻尼力矩是横摇角速度的线性函数。随着横摇幅值增大, 旋涡阻尼成分逐渐增大, 其阻尼力矩与横摇角速度成非线性函数关系。

另外, 横摇旋涡阻尼在很大程度上取决于有无突出体、艏龙骨、轴套以及艏部形状等因素。在同等主尺度条件下, 艏部尖削的横摇阻尼比圆艏的大很多。这里引入“古里也夫”计算绘制的一艘船 ($D=936$ 吨, $h=0.7$ 米, $T_p=8.63$ 秒, $L=49.1$ 米, $B=9.00$ 米, $T=3.68$ 米) 的横摇总阻尼力矩曲线, 见图 (1.3.5)。图中实线为计算值, 虚线表示阻尼的线性关系。由图看出, 在 $\dot{\varphi} \leq 0.15$ 弧度/秒范围内, 阻尼是成线性关系, 即主要是兴波阻尼。随横摇角增大, 阻尼成非线性关系, 旋涡阻尼成分迅速增加。一般认为, 在中等横摇情况下, 旋涡阻尼与兴波阻尼数量级相当。

另外, 摇荡阻尼在很大程度上取决于航速, 关于航速对阻尼力 (矩) 的影响将在以后章节里讲述。总之, 船舶横摇阻尼比较复杂, 至今尚无很好的计算方法, 主要靠船模试验确定。

c. 惯性力 (矩)

惯性是一切有质量的刚体作变速运动的一种属性。当刚体在外力 (矩) $\sum_{j=1}^n \vec{F}_j$ 作用下, 根据牛顿第二定律有

$$M\vec{a} = \sum_{j=1}^n \vec{F}_j$$

其中 M ——刚体的质量或转动惯量;

$\vec{a}$ ——刚体运动的线 (或角) 加速度。

按照理论力学关于动力学问题静力学化的方法, 在工程问题中常把 $M\vec{a}$ 移到等式右边, 而把它看着是一虚拟的外力 (矩)。这样, 所有力 (矩) 组成一平衡系, 即

$$0 = \sum_{j=1}^n \vec{F}_j + M\vec{a} \quad (1.3.8)$$

其中 $M\vec{a}$ 代表虚拟的外力即惯性力。实际上根据作用力与反作用力原理, $\sum_{j=1}^n \vec{F}_j$ 是周围介质对刚体的作用力, 而 $M\vec{a}$ 是刚体对介质的反作用力。把惯性力 $M\vec{a}$ 作为一虚拟的

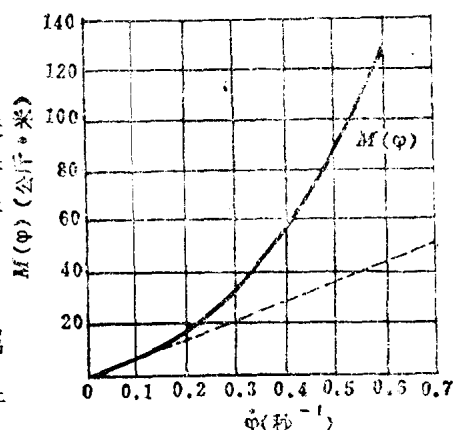


图 1.3.5

由介质加在刚体上的力只有方法上、形式上的意义。也就是说，形式上把刚体的惯性力看着是大小与加速度成正比，而方向上与加速度方向相反的虚拟外力（矩）。

当船作为一刚体在水中运动，除船本身的惯性力（矩）之外，还有真正的来自流体作用的惯性力（矩）。

由于船在水中运动，周围流体质点受扰动，产生相应的运动。根据作用力与反作用原理，流体作变速运动的惯性表现为作用在船体上的流体反作用力。把这一来自流体的，大小与船的运动加速度成正比而方向相反的流体作用力（矩），称为惯性阻力（矩）。惯性阻力（矩）与对应的船舶运动的加速度的比例系数称为附加质量或称附加质量系数，通常记作 λ_{ij} 。附加质量的大小与流体密度及物体尺度的3次方、4次方或5次方成比例。因为水的密度大，所以在水中运动的物体，其附加质量同物体本身的质量同量级，不可忽略。

这里讲的附加质量是广义的，根据它的不同因次而称为附加质量、附加质量静矩或附加质量惯性矩（或附加转动惯量）。附加质量，它对应于线加速度产生的力，如船做升沉运动引起的附加质量记为 λ_{zz} 。附加质量静矩，它对应于线加速度引起的力矩或角加速度引起的力。当考虑船耦合运动时，将出现附加质量静矩。如由于纵摇运动引起的在升沉方向的附加质量静矩记为 $\lambda_{z\theta}$ 或由升沉运动引起的在纵摇方向上的附加质量静矩记为 $\lambda_{\theta z}$ 。附加转动惯量，它对应于角加速度引起的力矩，如纵摇引起的在该方向上的附加转动惯量记为 $\lambda_{\theta\theta}$ 。

关于附加质量系数的详细叙述可参阅有关理论流体力学专著。下面仅就船在零速条件下，说明各单一自由度摇荡时的惯性力（矩）组成。

若船型对称于 $L/2$ ，且船重心 G 也在船中位于平衡水线上，船沿 Gx 、 Gy 或 Gz 作一个自由度的变速振荡运动或绕其轴做一个自由度的变速旋转运动时，将只出现作用在同一方向上的惯性阻力或绕同一轴的惯性阻力矩。这些惯性阻力（矩）的大小正比于对应方向的加速度而方向与之相反，即表示为

$$\left. \begin{aligned} F_{ax} &= -\lambda_{xx}\ddot{x} & F_{a\varphi} &= -\lambda_{\varphi\varphi}\ddot{\varphi} \\ F_{ay} &= -\lambda_{yy}\ddot{y} & F_{a\psi} &= -\lambda_{\psi\psi}\ddot{\psi} \\ F_{az} &= -\lambda_{zz}\ddot{z} & F_{a\theta} &= -\lambda_{\theta\theta}\ddot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (1.3.9)$$

把上面这些惯性阻力（矩）分别同船自身在对应方向上惯性力（矩）相加，统称为惯性项，即

$$\left. \begin{aligned} F_{Ix} &= -\left(\frac{D}{g} + \lambda_{xx}\right)\ddot{x} & F_{I\varphi} &= -(J_{\varphi\varphi} + \lambda_{\varphi\varphi})\ddot{\varphi} \\ F_{Iy} &= -\left(\frac{D}{g} + \lambda_{yy}\right)\ddot{y} & F_{I\psi} &= -(J_{\psi\psi} + \lambda_{\psi\psi})\ddot{\psi} \\ F_{Iz} &= -\left(\frac{D}{g} + \lambda_{zz}\right)\ddot{z} & F_{I\theta} &= -(J_{\theta\theta} + \lambda_{\theta\theta})\ddot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (1.3.10)$$

其中上式括号内的 λ_{ij} 量只取决于船的尺寸与形状，对一定的船是常数。因此，船舶摇荡方程式中的各惯性系数为