



高等学校统编教材

船舶操纵与摇荡

(修订本)

冯铁城 朱文蔚 顾树华 编

国防工业出版社

U 75.9
F 52

458227

1 5

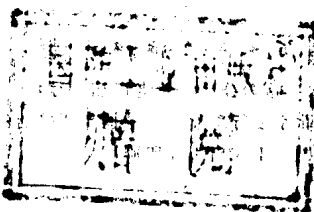
船舶操纵与摇荡

(修订本)

冯铁城 朱文蔚 顾树华 编



00458227



国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍船舶在静水中的操纵性和在风浪中的摇荡性。内容包括：船舶操纵性的基本概念、试验及舵设计方法；谱分析及数理统计在耐波性中的应用；船舶横摇、纵摇和垂荡的基本理论、试验分析及计算方法。

本书力求简明扼要，概念清楚，密切结合船舶设计需要。同时也介绍了国外本学科的新发展及我国的科研成果。

本书是高等学校船舶设计与制造专业本科生教材，也可以供有关的工程技术人员参考。

DWBS/32/2

船舶操纵与摇荡

(修 订 本)

冯铁城 朱文蔚 顾树华 编

国防工业出版社

(北京市车公庄西路老悦庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张12¹/₄ 280千字

1989年5月第二版 1989年5月第一次印刷 印数：0.001—3,180册

ISBN 7-118-00474-X/U·45 定价：2.50元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应，二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书是根据高等学校船舶设计与制造专业本科生的教学要求编写的,适用于少学时课程的教学需要。

船舶在海上的航行性能大体上分为两大类:一类是研究静止船舶或匀速直线运动船舶的性能,如船舶静力学和船舶快速性;另一类是研究具有变速运动的船舶性能,习惯称为船舶操纵和摇荡。从动力学观点来看,船舶操纵和摇荡具有相同的力学特性,都必须考虑惯性的影响,因此,我们把两者作为一体进行介绍。同时,船舶操纵和摇荡也存在明显区别,船舶操纵是研究驾驶者根据航线要求通过操纵装置进行控制的船舶运动,而船舶摇荡是研究由于风浪扰动产生的船舶运动,这种运动是驾驶者难以控制的。

本书是在冯铁城编《船舶摇摆与操纵》(国防工业出版社,1980年)的基础上,根据近年来的教学实践修订而成的。在修订过程中,内容上作了适当补充和加强,力求密切结合船舶设计的需要,反映出本学科的基本内容及最新发展,在叙述上力求概念清晰、层次分明、重点突出。

本书共分六章。第一章介绍了船舶操纵与摇荡的概貌。第二章从船舶操纵运动的基本方程出发,分析了船舶操纵性的基本概念、操纵性衡准和试验方法,并着重介绍了舵的设计。第三、四、五章主要讨论船舶摇荡,重点是横浪中的横摇与顶浪中的纵摇和垂荡。这部分内容是从不规则海浪出发,根据统计分析理论进行叙述的,提供了必要的实用成果、设计资料和理论计算方法。第六章介绍了在船舶设计中对耐波性的考虑及实船试验的分析方法。

我们非常感谢主审范尚雍教授,他对本书原稿进行了详尽而细致的审阅,提出了许多宝贵意见,他的严谨学风和广博学识使我们受益匪浅。

由于编者的水平有限,本书一定存在很多缺点和错误,希望读者和使用本教材的师生提出批评指正。

作 者

目 录

第一章 绪 论

§ 1.1 概述	1
1.1.1 船舶运动	1
1.1.2 船舶操纵	2
1.1.3 船舶摇荡	3
§ 1.2 附加质量和附加惯性矩	6

第二章 船舶操纵

§ 2.1 船舶操纵的基本概念	8
2.1.1 表征操纵运动的坐标系及主要参数	8
2.1.2 船舶操纵运动的线性方程式	10
2.1.3 航向稳定性	15
2.1.4 转首性、跟从性和回转性	17
§ 2.2 操纵性衡准	18
2.2.1 船舶回转圈	18
2.2.2 操纵性特征曲线	22
2.2.3 K 、 T 指数	23
2.2.4 转首指数 P	27
§ 2.3 操纵性试验	27
2.3.1 回转试验	28
2.3.2 Z 形操纵试验	30
2.3.3 其它试验方法	33
§ 2.4 舵的设计	34
2.4.1 舵的作用	34
2.4.2 舵设计的基本思想	34
2.4.3 舵的数目、形式与位置的选择	35
2.4.4 舵参数的选择	36
2.4.5 舵的水动力和舵机转矩的计算	44
2.4.6 舵设计计算举例	53
§ 2.5 改善操纵性的措施	55
2.5.1 船舶主尺度和形状对操纵性的影响	55
2.5.2 特种操纵装置	56

第三章 海浪与统计分析

§ 3.1 海浪	60
3.1.1 概述	60
3.1.2 余弦波	61
3.1.3 风级和浪级	63
§ 3.2 不规则波的理论基础	66
3.2.1 不规则波的基本概念	66
3.2.2 随机过程	67
3.2.3 随机过程的概率分布	68
3.2.4 瑞利分布	72
3.2.5 多年一遇的波浪预报	75
§ 3.3 谱分析的基本概念	75
3.3.1 频域分析和时域分析	75
3.3.2 谱密度函数	76
3.3.3 风浪的谱密度公式	81
§ 3.4 线性系统的响应关系	86
3.4.1 线性系统与线性变换	86
3.4.2 频率响应法和脉冲响应法	87
3.4.3 频率响应函数和频率转换	90
3.4.4 船舶摇荡预报的一般程序	91
3.4.5 设计极值预报	93

第四章 船舶横摇

§ 4.1 由线性理论确定横摇频率响应函数	96
4.1.1 船舶在波浪上的运动特点	96
4.1.2 横摇的受力分析	98
4.1.3 横摇微分方程的解及频率响应函数	100
4.1.4 横摇的谐振状态及临界状态	103
§ 4.2 由模型试验确定横摇频率响应函数	106
4.2.1 横摇模型试验的相似关系	107
4.2.2 规则波中横摇试验方法	108

§ 4.3 横摇水动力系数的确定	108
4.3.1 横摇惯性矩	108
4.3.2 横摇固有周期	110
4.3.3 线性阻尼力矩系数	113
4.3.4 非线性阻尼力矩系数	115
4.3.5 由模型试验确定阻尼系数	117
4.3.6 航速对无因次衰减系数的影响	119
§ 4.4 船舶横摇幅值的估算	120
4.4.1 极限横摇幅值的确定	120
4.4.2 横摇估算图谱	123
§ 4.5 横摇减摇装置	128
4.5.1 减摇装置概述	128
4.5.2 减摇龙骨	130
4.5.3 减摇鳍	133
4.5.4 被动式减摇水舱	134

第五章 船舶纵摇和垂荡

§ 5.1 不规则波中的纵摇和垂荡	140
5.1.1 概述	140
5.1.2 用模型试验确定频率响应函数	143
5.1.3 谐摇状态与临界状态	144
§ 5.2 纵向运动性能的近似估算	147

5.2.1 莫尔公式的适用范围	147
5.2.2 莫尔回归公式	148
§ 5.3 耐波性的理论计算	150
5.3.1 概述	150
5.3.2 二元切片上的流体动力	153
5.3.3 垂荡和纵摇的计算	163
5.3.4 横荡、首摇和横摇的计算	170
§ 5.4 斜浪中的船舶摇荡	172
5.4.1 斜浪中波浪扰动力周期	172
5.4.2 遭遇浪向对扰动力幅值的影响	173

第六章 耐波性设计考虑及实船试验

§ 6.1 纵向运动的设计参考	175
6.1.1 船舶运动的标准差	175
6.1.2 耐波性设计参考	177
§ 6.2 船舶主要尺度和形状对耐波性的影响	179
6.2.1 船舶主尺度对耐波性的影响	179
6.2.2 船舶形状对耐波性的影响	181
§ 6.3 实船的耐波性试验	182
6.3.1 静水中的横摇衰减试验	182
6.3.2 风浪中的耐波性试验	183
6.3.3 实船测试的谱分析	187

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

1.1.1 船舶运动

在海上航行的船舶,像任何刚体一样,可以产生六个自由度的运动。在这些运动中,除了前进的匀速直线运动之外,也包括具有非零的角速度、变化的角加速度和线加速度的运动。对于后一种运动形式,大致可以分为以下两类。

1. 操纵运动

它是指驾驶者借助于操纵装置,通常是用舵来保持或改变船的运动状态。一般暂不考虑波浪的影响。

2. 摇荡运动

它是指由风浪的扰动产生的船舶运动,对于这种运动,驾驶者是难以控制的。

为了研究船舶的运动,需要选取适当的坐标系。目前,在研究船舶操纵运动和摇荡运动时,习惯上采用的坐标轴方向是不同的,我们将分别叙述。在研究船舶摇荡运动时,通常采用以下三个右手坐标系(见图 1.1.1):

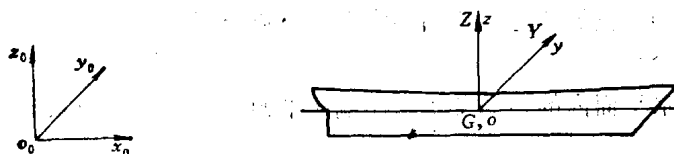


图 1.1.1

(1) 固定坐标系 $O_0x_0y_0z_0$

它是固定在地面上的直角坐标系, x_0y_0 平面与静水面重合, z_0 轴向上为正。

(2) 运动坐标系 $GXYZ$

它是以船舶重心位置 G 为原点而固定于船体上的直角坐标系。 X 轴在中线面内, 平行于基面, 指向船首为正, Z 轴向上为正。 X 、 Y 和 Z 轴可近似认为是船体的三根惯性主轴。

(3) 半固定坐标系 $Oxyz$

它是随船速 V 随船一起运动的直角坐标系, 其位置与在平衡状态的运动坐标系 $GXYZ$ 重合。

船舶任意时刻的运动可以分解为在 $Oxyz$ 坐标系内船舶重心 G 沿三个坐标轴的直线运动及船体绕三个坐标轴的转动。在这些运动中又有单向运动和往复运动之分, 因此共有十二种运动形式, 如图 1.1.2 所示。在造船界中习惯采用的名称见表 1.1.1。



图 1.1.2

表 1.1.1

坐标轴	转 动		直 线	
	单向运动	往复运动	单向运动	往复运动
x	横倾	横摇	前进或后退	纵荡
y	纵倾	纵摇	横漂	横荡
z	回转	首摇	上浮或下沉	垂荡

船舶摇荡运动主要研究由波浪干扰引起的船舶往复运动，其中横摇、纵摇和垂荡对船舶航行影响最大，是研究船舶摇荡运动的主要内容；船舶操纵运动主要研究船舶重心 G 在水平面内的运动及船舶绕 z 轴的回转运动。

1.1.2 船舶操纵

所谓操纵是指船舶按照驾驶者的意图保持或改变其运动状态的性能，即船舶能保持或改变航速、航向和位置的性能。船舶操纵性包括以下三方面内容：

(1) 航向稳定性

它是指船舶在水平面内的运动受扰动而偏离平衡状态，当扰动完全消除后，保持原有航向运动的性能。

(2) 回转性

它是指船舶应舵作圆弧运动的性能。

(3) 转首性及跟从性

它是指船舶应舵转首及迅速进入新的稳定运动状态的性能。前者称为转首性，后者称为跟从性。

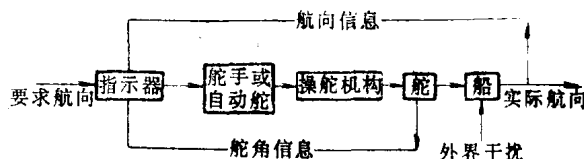
所以，具有良好操纵性的船舶，在直线航行时能保持运动方向，需要转向时能迅速地改变航向，使船舶按照预定的航线航行。

船体的形状对船舶操纵性有重要的影响，但是如果没有专门的操纵装置，船舶是不能按预定的航线航行的。为了使船舶具有合适的操纵性，必须设计专门的操纵装置，以提供按驾驶者的意图迫使船舶改变航向的力矩。操纵装置有舵、可转导管、平旋推进器、主动转向装置等。其中舵的结构简单，工作可靠，造价低廉，是目前应用最广泛的操纵装置。

从使用者的观点看来，船舶操纵包括复杂的具体内容，例如，靠离码头、系带浮筒

在狭窄水道内航行、风浪中操纵、紧急避碰、拖带船舶及海上救助等。而要正确地驾驶船舶需要合理地使用所谓操纵六要素，即舵、车、锚、缆、风和流，其中舵是操纵中的关键性设备。因此，设计工作者设计性能优良的船型和舵是船舶安全而迅速地完成任务的必要的物质基础。

用舵来操纵船舶，大致是按方块图 1 的控制回路实现的：当要求航向与实际航向的差别反映到指示器上之后，舵手通过操舵机构转舵，从而使船产生一个控制力，同时也引起作用在船体上的水动力变化，迫使船舶改变航向。由于在控制力及风、浪等外界干扰的作用下，船舶按新的航向航行，而其与要求航向的差别又反映到指示器上。我们主要讨论控制回路中的最后两部分内容，即船体和舵。



方块图 1

船舶操纵性是船舶的重要性能之一，这一点从任何船舶驾驶者都时刻手不离操舵手柄可以得到证明。船舶操纵性与航行的安全性、经济性以及军舰的战斗力和生命力有着密切关系。船舶一旦丧失操纵能力，航行就缺少了起码的安全保障。对于军舰，良好的操纵性是提高战斗力的重要手段，因此有更高的操纵性要求。

1.1.3 船舶摇荡

船舶摇荡是指船舶在风浪作用下产生的摇荡运动，它们的共同特点是在平衡位置附近作周期性的振荡运动。产生何种摇荡运动形式取决于船首向与风浪传播方向之间的夹角，称为遭遇浪向。所谓首向是船舶首尾线指向船首的方向，即在 $GXYZ$ 坐标系中 X 轴的方向。当首向与风浪传播方向相一致时，遭遇浪向为零度，如图 1.1.3 所示。

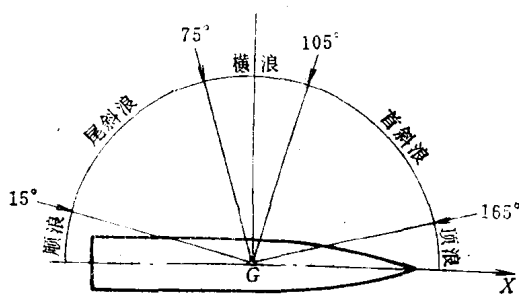


图 1.1.3

当遭遇浪向在左、右舷 $0^\circ \sim 15^\circ$ 之间时称为顺浪。遭遇浪向在左、右舷 $165^\circ \sim 180^\circ$ 之间时称为顶浪。顺浪和顶浪统称纵向对浪，纵向对浪主要产生纵向运动，它包括纵摇、纵荡和垂荡，其中主要是纵摇和垂荡。遭遇浪向在左、右舷 $75^\circ \sim 105^\circ$ 时称为横浪。横浪主要产生横向运动，它包括横摇、首摇和横荡，其中主要是横摇。遭遇浪向在左、右舷 $15^\circ \sim 75^\circ$ 时称为尾斜浪。遭遇浪向在左、右舷 $105^\circ \sim 165^\circ$ 时称为首斜浪。尾斜浪和首斜浪既产生纵向运动，也产生横向运动。

在海洋中，船舶的摇荡是由风浪引起的，由于风浪本身是随机的，船舶摇荡也必然不同于一般的简谐运动而是具有随机性的运动形式。对船舶摇荡问题的研究大致分以下两个阶段：

(1) 1953 年之前，主要在静水中或规则波条件下研究船舶摇荡问题。这种研究方法使复杂的问题得以简化，并在定性方面解决了设计中的一些具体问题。但是对于船舶

在实际风浪中摇荡的估算或预报,除了受涌扰动外,一般情况下是无法实现的。

(2) 1953年丹尼斯(St.Denis)和皮尔逊(Pierson)将随机理论中的线性叠加原理应用到船舶摇荡中来,即假定船舶对实际风浪的响应等于所有组成风浪的各单元波的响应之和。这样就把船舶摇荡问题建立在概率论和数理统计的数学理论之上,使预报船舶在实际风浪中的摇荡及其它性能成为可能。

由于有了这一基本方法,使我们有可能从定量上来估计实际海浪中船舶的各种运动,这就把船舶摇荡的研究大大向前推进一步。近年来,在基本理论、模型试验及计算机应用等方面都取得了很大的进展。

我们以下讨论摇荡问题就是以上述思想作为出发点。首先根据线性叠加原理建立风浪与船舶摇荡之间的关系,然后通过船模在规则波中的试验或理论计算,建立船体要素和摇荡之间的关系,从而得到船舶在不规则波中的摇荡特性,以便在设计中对摇荡进行考虑。

在造船界经常会碰到耐波性这个词。所谓耐波性是研究船舶在风浪中遭受由于外力干扰所产生的各种摇荡运动以及砰击、上浪、失速、飞车和波浪弯矩等条件下,仍能维持一定航速在水面安全航行的性能。耐波性是船舶在风浪中上述性能的总的反应,它包括以下主要内容:

(1) 船舶摇荡

其中运动显著而影响严重的是横摇、纵摇和垂荡。

(2) 砰击

由于严重的纵摇和垂荡,船体与风浪之间产生猛烈的局部冲击现象称为砰击。砰击多发生在船首部。首柱底端或船底露出水面,然后在极短的时间内以较大的速度落入水中而发生猛烈的撞击。

(3) 上浪

船舶在风浪中剧烈摇荡时风浪涌上甲板的现象称为上浪。上浪时船首常常埋入风浪中,海水淹没首部甲板边缘,甲板上水。上浪主要是由严重的纵摇和垂荡引起的。

(4) 失速

它包括风浪失速和主动减速。风浪失速是指推进动力装置功率调定后,由于剧烈的摇荡,船舶在风浪中较静水中航行时航速的降低值。主动减速是指船舶在风浪中航行,为了减小风浪对船舶的不利影响,主动调低主机功率,使航速比静水中速度下降的数值。

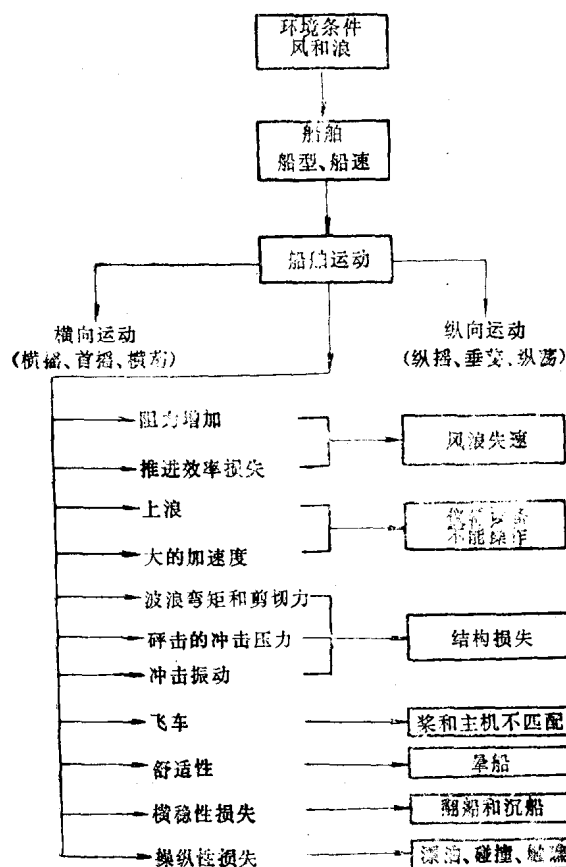
(5) 螺旋桨飞车

船舶在风浪中航行时,部分螺旋桨叶露出水面,转速剧增,并伴有强烈振动的现象称为螺旋桨飞车。

船舶航行的环境条件和耐波性之间的关系,可以用方块图2示意。

船舶大多数情况都是在风浪中航行,因此在设计中必须考虑船在风浪中的性能。一般来说,在静水中诸如稳性、快速性优良的船舶,在风浪的海面上耐波性不一定优良,这种例子是很多的。有些船在风浪中的最大航速不是由主机功率决定,而是由船的耐波性决定的。由此看来,耐波性的优劣是衡量船舶性能好坏的重要指标之一,特别是经常航行于一类航区的船舶和海洋工作船更是如此,对于海洋钻井船,耐波性是最重要的性能。

由以上分析看出, 船舶耐波性和船舶摇荡显然不是一回事, 但是船舶摇荡是耐波性的主要内容, 耐波性所涉及的其它内容主要是由船舶摇荡引起的, 因此估计船舶摇荡是评定耐波性最基本的条件。根据船舶摇荡可以定量地计算出像砰击、上浪、飞车等性能。一般说来, 船舶摇荡较缓和, 则耐波性也较优良。我们将主要介绍横浪中的横摇和纵向对浪中的纵摇与垂荡, 但是可以从中恰当地评价该船的其它耐波性能。



方块图 2

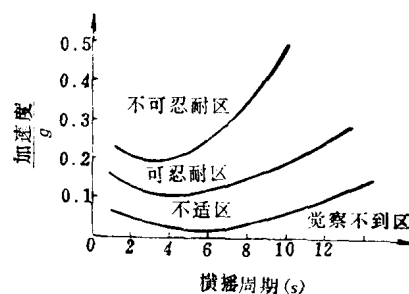


图 1.1.4

剧烈的横摇、纵摇和垂荡对船舶产生一系列有害影响, 甚至引起严重后果, 主要表现在以下三方面:

(1) 对适居性的影响

船舶为了完成一定的任务, 必须给乘员提供一个合适的环境, 使他们能有效地进行工作。乘员的工作能力受两种运动特性的影响, 即加速度和横摇幅值。

加速度引起人们晕船。人的前庭系统, 特别是内耳腔对线加速度和角加速度特别敏感, 超过一定的刺激就要引起晕船。图 1.1.4 是由实测得到的某些船的基本关系。一般说来, 发生晕船的频率随加速度增加而平行增加。最大的加速度发生在船尾或船首, 主要是纵摇和垂荡产生的。某些渔船在激烈的海面上船首加速度可达到 1 个重力加速度, 可见工作条件的恶劣。

横摇角影响人的运动能力, 大致可以分为三个区域: 在 $0^\circ \sim 4^\circ$ 范围内对人的活动没有明显影响, 有些人的工作能力略有提高的趋势; 在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 范围内使人的运动能力明显下降; 10° 以上使乘员吃饭、睡觉及在船上走动都发生困难。

(2) 对航行使用性的影响

船员利用船上的全部设备, 在预定的海洋条件下完成其规定使命的能力称为航行使

用性。剧烈的摇荡对航行使用性产生极为不利的影响。

由于纵摇和垂荡，使船舶造成失速，主机功率得不到充分利用。

严重的砰击使船首部结构损坏，船体颤振。在压载航行时，驾驶人员主动减速，主要是避免首部严重砰击。高速船在汹涌海面上的航速常常是由砰击频度所决定，称为砰击限制航速。

上浪使甲板机械损坏，给船员造成恶劣的工作条件。满载船舶主动减速的重要因素是考虑上浪频度，称为上浪限制航速。

螺旋桨飞车使主轴受到极大的扭转振动，主机突然加速和减速，损坏主机部件，推进效率降低。

过大的摇荡使波浪负荷加大，可能损坏船体结构，甚至裂断。

大的风和浪加上激烈的摇荡，给船舶操纵带来困难，使船舶难于维持或改变航向。

以上各点都是由于剧烈的摇荡给航行使用性带来的影响。为了提高在风浪中的航行使用性就必须改善船舶的摇荡性能。

(3) 对安全性的影响

当激烈的运动损坏了船舶的主要部件，如主机、螺旋桨、舵及导航设备等以后，船可能失去控制而造成惨重后果。

大角度横摇可能使舱室进水、货物移动，由于这些原因造成的海难事件是经常发生的。

横摇降低了船舶的抗风能力，在风和浪的作用下，船舶出现了很大的横摇角。我国1981年海船稳性规范规定，在计算最小倾复力矩时要考虑横摇的影响，即考虑船舶在横摇最大角度时突然受到一个来自入水舷方向的阵风吹袭这种最危险的情况。

我们研究船舶摇荡的目的在于了解其运动规律和影响因素，以寻求有效的方法，避免或减轻摇荡引起的灾害，从而设计和建造耐波性优良的船舶。但是应该指出：耐波性对船体的要求往往和其它性能的要求相矛盾，因而要全面分析，分清主次，以求得到合理的解决。

§ 1.2 附加质量和附加惯性矩

船舶摇荡运动和操纵运动的主要特点是在运动过程中船体本身产生角加速度和线加速度，即属于不定常的运动。因此，为了研究运动规律而确定船体受力时必须考虑惯性的作用。同时船舶浸在水中，这又与真空或空气中摇荡有所不同，须要考虑附加质量和附加惯性矩的影响。

作不定常运动的船舶，除了船体本身受到与加速度成比例的惯性力外，同时船体作用于周围的水，使之得到加速度，根据作用与反作用原理，水对船体存在反作用力，这个反作用力称为附加惯性力。附加惯性力是和船的加速度成比例的，其比例系数称为附加质量。例如，力 f 使质量为 M 的物体作加速运动，如果物体是在真空中而不计阻尼，则加速度为

$$a = \frac{f}{M} \quad (1.2.1)$$

如果该物体在水中，用同样的力作用，所得到的加速度 a' 要比 a 小，即可以写成

$$a' = \frac{f}{m+M} \quad (1.2.2)$$

式中 m 称为附加质量。

船舶六个自由度的运动包括直线运动和转动两种形式，与此相应有线加速度和角加速度。对于沿 x 、 y 和 z 轴的移动，惯性作用表现为力的形式。船体的惯性用船体质量 M 来衡量，附加惯性分别用附加质量 m_x 、 m_y 和 m_z 衡量。

对于绕 x 、 y 和 z 轴的转动，惯性作用表现为力矩的形式，船体的惯性用船体质量惯性矩 I_{xx} 、 I_{yy} 和 I_{zz} 来衡量，它们可以根据船舶的质量分布计算，即

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \int_M (Y^2 + Z^2) dM \\ I_{yy} &= \int_M (Z^2 + X^2) dM \\ I_{zz} &= \int_M (X^2 + Y^2) dM \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

式中 X 、 Y 和 Z 是船舶微质量 dM 在运动坐标系中的坐标。在实际计算时可以按部件进行计算，例如绕 X 轴的惯性矩 I_{xx} ，可以写成

$$I_{xx} = \frac{1}{g} [\sum p_i (Y_i^2 + Z_i^2)] + \sum I_{xi} \quad (1.2.4)$$

式中 p_i —— 各项载荷的重量；

Y_i 、 Z_i —— 重量 p_i 的重心在 $GXYZ$ 坐标系中的坐标；

I_{xi} —— 重量 p_i 对过其重心纵轴的自身惯性矩。

对 I_{yy} 和 I_{zz} 有类似的公式。

从 (1.2.4) 式看出：依据实际载荷分布来计算惯性矩是很繁杂的。对于通常船型都采用经验公式估算惯性矩，对于特殊船型，如钻井船、海上钻井平台等必须按部件进行计算。

附加惯性矩分别用 J_{xx} 、 J_{yy} 和 J_{zz} 表示。

附加质量和附加惯性矩是流体对物体的反作用力，因此它们是水下船体形状的函数。除了少数像球体、回转体等外，用理论计算附加质量和附加惯性矩是相当困难的，一般都由模型试验或经验公式确定。通常船型的附加质量和附加惯性矩的大致变化范围，如图 1.2.1 所示。

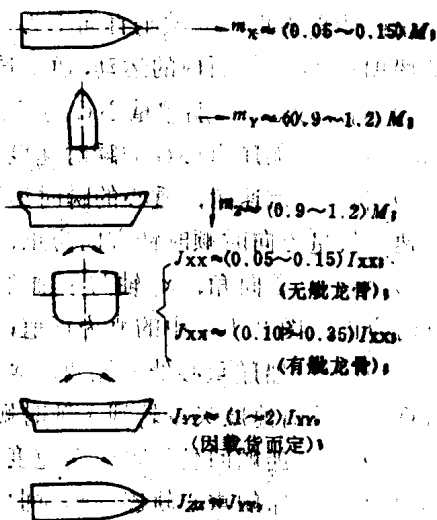


图 1.2.1

第二章 船舶操纵

§ 2.1 船舶操纵的基本概念

2.1.1 表征操纵运动的坐标系及主要参数

为了研究船舶操纵运动，习惯上采用以下两个右手坐标系（见图 2.1.1）。

1. 固定坐标系 $O_0x_0y_0z_0$

它是固定在地球表面的右手坐标系，其原点 O_0 与 $t = 0$ 时刻船舶重心 G 的位置相一致。 z_0 轴垂直向下为正。对于静水中水面船舶的操纵运动，可以认为在所有时刻其重心的轨迹都在 x_0y_0 平面内。

2. 运动坐标系 $Gxyz$

它是船舶重心位置 G 为原点而固定于船体上的直角坐标系。 x 轴在中线面内，平行于基面，指向船首为正， z 轴垂直向下为正。为

了表征船舶在 x_0y_0 平面内的运动，通常选取以下一些参数：

- (1) x_{0G} 、 y_{0G} —— 船舶重心 G 的坐标；
- (2) V —— 船舶重心 G 的瞬时速度，沿重心轨迹的切线方向；
- (3) ψ_0 —— 航速角，重心的瞬时速度矢量与 x_0 轴之间的水平面内夹角，规定由 x_0 轴转到速度矢量方向时顺时针方向为正；
- (4) ψ —— 首向角， x_0 轴与 x 轴之间的水平面内夹角，规定由 x_0 轴转到 x 轴时顺时针方向为正，图 2.1.1 中的 ψ 为正值；
- (5) β —— 船舶重心处的漂角， x 轴与重心处瞬时速度矢量之间的水平面内夹角，规定由重心处瞬时速度矢量转到 x 轴时顺时针方向为正，图 2.1.1 中的 β 为正值；
- (6) r —— 船舶回转的瞬时角速度，顺时针旋转为正；
- (7) R —— 船舶重心轨迹的瞬时曲率半径，规定船向右回转时 R 为正值；
- (8) δ —— 实际舵角，规定舵面偏向右舷为正值。

作为平面运动，三个参数即可以确定船舶的位置，例如 x_{0G} 、 y_{0G} 和 ψ 。因此上述诸参数并不是独立的，而是根据不同需要引用的，它们必然存在一定的关系。

由图 2.1.1 看出，航速角 ψ_0 、首向角 ψ 和漂角 β 之间存在如下关系：

$$\psi = \psi_0 + \beta \quad (2.1.1)$$

参看图 2.1.2，船舶重心 G 在 dt 时间内由 G_1 位置移动到 G_2 位置，所走的路程为 $\widehat{G_1G_2}$ ，显然可以得到

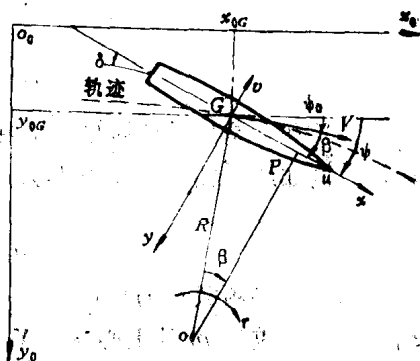


图 2.1.1

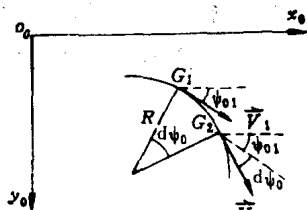


图 2.1.2

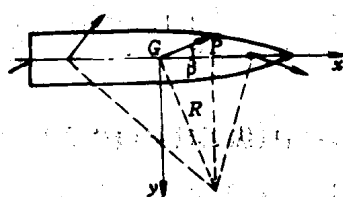


图 2.1.3

又有

故

所以

$$\widehat{G_1 G_2} = V dt$$

$$\widehat{G_1 G_2} = R d\psi_0$$

$$V dt = R d\psi_0$$

$$\frac{d\psi_0}{dt} = \frac{V}{R}$$

(2.1.2)

船舶的转动角速度 r 可以表示为

$$r = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi_0}{dt} + \frac{d\beta}{dt} = \frac{V}{R} + \frac{d\beta}{dt} \quad (2.1.3)$$

船舶在定常回转时, $\frac{d\beta}{dt} = 0$, 则有

$$r = \frac{V}{R}$$

(2.1.4)

由(2.1.2)式可以求出航速角 ψ_0 的表达式为

$$d\psi_0 = \frac{V}{R} dt$$

$$\psi_0 = \int_0^t \frac{V}{R} dt$$

(2.1.5)

由图 2.1.1 看出: 航速在 x_0 轴和 y_0 轴上的分量分别为

$$V_{x_0} = V \cos \psi_0$$

$$V_{y_0} = V \sin \psi_0$$

另一方面, 存在如下关系:

$$V_{x_0} = \frac{dx_{0G}}{dt}$$

$$V_{y_0} = \frac{dy_{0G}}{dt}$$

比较上述二式, 船舶重心 G 的坐标为

$$x_{0G} = \int_0^t V \cos \psi_0 dt$$

(2.1.6)

$$y_{0G} = \int_0^t V \sin \psi_0 dt$$

船舶作操纵运动时, 不仅有移动, 同时还有转动。所以在某一瞬时, 船舶中线面上各点的速度大小和方向是不同的, 如图 2.1.3 所示。

中线面上漂角为零的点, 即在该点上速度的方向与中线面相一致, 横向速度为零, 称为回转枢心。图 2.1.3 中的 P 点即为回转枢心。通常漂角是比较小的, 因此可以得出

$$\overline{GP} = R \sin \beta \approx R\beta \quad (2.1.7)$$

2.1.2 船舶操纵运动的线性方程式

在固定坐标系中, 船舶运动的牛顿方程为

$$\begin{aligned} X_0 &= M\ddot{x}_{0G} \\ Y_0 &= M\ddot{y}_{0G} \\ N &= I_{zz}\ddot{\psi} \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

式中 X_0 和 Y_0 ——水动力在 x_0 轴和 y_0 轴方向上的分量,

M ——船舶质量;

N ——水动力绕 z 轴的回转力矩;

I_{zz} ——船体绕 z 轴的质量惯性矩。

为了应用运动坐标系表示船舶的运动, 假定水动力在 x 轴和 y 轴上的分量分别为 X 和 Y , 根据坐标转换, 参看图 2.1.1, 则可以得到

$$X = X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi \quad (2.1.9)$$

$$Y = Y_0 \cos \psi - X_0 \sin \psi$$

如果把船舶重心处瞬时速度 V 在 x 轴和 y 轴上的速度分量写成 u 和 v , 根据类似的道理, 则可以得到

$$\begin{aligned} \dot{x}_{0G} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{0G} &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned}$$

其两次导数为

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{0G} &= \dot{u} \cos \psi - \dot{v} \sin \psi - (u \sin \psi + v \cos \psi) \dot{\psi} \\ \ddot{y}_{0G} &= \dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi - v \sin \psi) \dot{\psi} \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

把 (2.1.8) 式中前两式和 (2.1.10) 式代入 (2.1.9) 式, 经过简单的归并, 可以得到如下的形式:

$$\begin{aligned} X &= M(\dot{u} - v\dot{\psi}) \\ Y &= M(\dot{v} + u\dot{\psi}) \end{aligned}$$

x 轴方向的运动方程主要反映船舶航速的变化情况。对操纵运动起重要作用的是 y 轴方向的运动方程 (横漂方程) 和绕 z 轴的运动方程 (回转方程)。横漂方程和回转方程如下:

$$Y = M(\dot{v} + u\dot{\psi}) \quad (2.1.11)$$

$$N = I_{zz}\ddot{\psi}$$

方程 (2.1.11) 与方程 (2.1.8) 比较, 我们发现在横漂方程中多了与回转角速度 $\dot{\psi}$ 成正比的项 $Mu\dot{\psi}$, 实际上它是船舶运动时的离心力在 y 轴上的投影。

方程 (2.1.11) 是在坐标原点位于船舶重心的假定下得到的。