



高等学校统编教材

船舶操纵性

(修订本)

苏兴翹 高士奇 黄衍顺 编

国防工业出版社

U661.3
588
(1.1)

425309

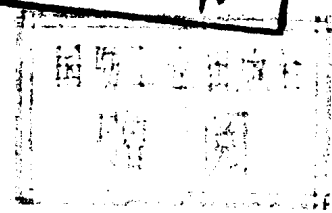
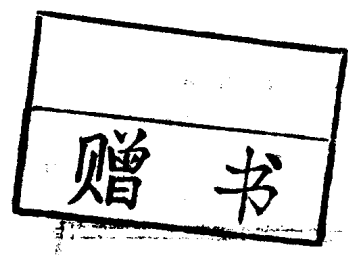
船舶操纵性

(修订本)
(1.1)

苏兴翹 高士奇 黄衍顺 编



00425309



国防工业出版社

田家荣

内 容 简 介

应用水动力模型和运动响应模型两种方法,从稳定性和机动性两方面讨论了船舶受控运动的规律、表征船舶操纵性的各种特征参数以及在船舶设计中预报操纵性能和满足操纵性要求的方法。

本书可作为高等学校造船专业本科高年级学生和研究生教材,也可供从事船舶设计和研究工作的技术人员参考。

船 舶 操 纵 性

(修订本)

苏兴通、高士奇、黄绍周 编

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

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15 344千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷 印数: 0,001— 2,000册

ISBN 7-118-00553-3/U·50 定价: 8.00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

再版前言

自本书第一版出版以来,船舶操纵性学科又有了相当大的进展。作为一本专业教材,限于篇幅,在修订中仍不能包括现代关于操纵性领域的全部重要成果。编者的意图是能在比较严格的基础上介绍关于船舶操纵性的基本原理、基本的研究方法以及这一学科的大致轮廓。在介绍中着重阐述了表征船舶操纵性的各种特征参数的物理概念。正是这些参数的物理意义构成了操纵性学科的核心。

再版时,仍保持了第一版的体系,只在内容上作了些必要的增删和调整。最大的变化是根据近十年来的发展,增加了操纵性预报一章,介绍了一种在船舶初步设计阶段预报操纵性的方法。因为这部分内容在工程中比较实用。为了不增加篇幅,只好删去了“关于船舶操纵性的一些特殊问题”一章(包括在限制水域中的操纵性、两船接近时的相互作用、被拖和倒航时的操纵性、在波浪上的操纵性和动力定位等问题)。应该说明,并不是这些问题不重要,相反它们正是当前许多学者着重研究的新课题。

为了适应不同学时数的教学需要,把一些比较严格的推导和较完整的表达列在附录中;同样原因,有些章节也以*标出。作为基本教学内容可不涉及它们。

受船舶工程教材委员会委托,上海交通大学陆惠生副教授担任本书主审。陆惠生同志仔细地审阅了书稿,纠正了原稿中的若干错漏之处,并提出许多宝贵的修改意见,给编者以极大的帮助。编者谨此对陆惠生同志表示深切的谢意。

兄弟院校的专家和教授们——吴秀恒、钟国平、范尚雍、施生达、徐玉如等也对本书的第一版和修订再版提供了宝贵意见;船舶工业总公司教材编审室、船舶工程教材委员会为本书再版创造了条件,编者在此一并表示感谢。

参加本书再版修订的有苏兴翹、高士奇、黄衍顺,由苏兴翹主编。

限于编者水平,书中错谬之处仍在所难免,望广大读者批评指正。

编 者

于天津大学

目 录

绪 论	船舶操纵性概述	1
第一章	船舶运动方程式	8
§ 1-1	船舶运动的描述和运动方程式	8
§ 1-2	作用于船舶的水动力、水动力系数与水动力导数	13
§ 1-3	扰动运动方程式	22
第二章	船舶直线运动稳定性	28
§ 2-1	船舶运动稳定性和稳定的种类	28
§ 2-2	直线运动稳定性的判别	30
* § 2-3	稳定程度和过渡过程特征	37
* § 2-4	船舶的航向保持性	41
第三章	船舶的回转运动与机动性	45
§ 3-1	回转过程、回转圈及其特征	45
§ 3-2	稳定回转运动	47
§ 3-3	回转过程中的其它运动	56
* § 3-4	船舶的航向机动性	60
* § 3-5	传递函数与频率特性	67
第四章	船舶的操纵性试验	72
§ 4-1	回转试验	72
§ 4-2	螺旋、逆螺旋及回直试验	77
§ 4-3	Z 形试验及 K 、 T 分析	81
* § 4-4	非线性模拟和相平面分析	86
* § 4-5	确定频率特性的正弦操舵试验和平行移船试验	89
§ 4-6	停船试验与航速的机动性	93
§ 4-7	自航船模试验与相似准则	95
第五章	水动力导数的理论计算	99
§ 5-1	计算水动力导数的流体动力学方法	99
§ 5-2	线性水动力导数的估算	108
第六章	水动力导数的试验确定	116
§ 6-1	直线拖曳试验和回转臂试验	116
§ 6-2	平面运动机构试验：纯横荡和纯首摇运动	122
* § 6-3	平面运动机构试验：相位分离与非线性导数测定	136
第七章	控制面的设计	138
§ 7-1	概述	138
§ 7-2	舵的水动力特性	143
§ 7-3	自由表面、船体和螺旋桨对舵水动力特性的影响	149
§ 7-4	舵参数的选择	154

第八章 船舶操纵性预报	164
§ 8-1 船舶操纵性预报概述	164
§ 8-2 在初步设计中预报船舶操纵性的方法	166
第九章 特种操纵装置概述	179
* § 9-1 旋转导管螺旋桨和 Z 形推进器	179
* § 9-2 槽道式侧推力器和直翼推进器	184
* § 9-3 特种舵	189
附 录	193
* 附录一 描绘船舶在 6 个自由度内运动的非线性运动方程的推导	193
* 附录二 船舶在水平面内运动时所受到的水动力及其力矩的非线性表达式	196
* 附录三 刚体在无限流体中作空间运动时所受到的流体惯性力	198
* 附录四 选择不同坐标原点时水动力导数的变换	204
* 附录五 短翼的升力面理论——Bollay 积分方程的建立及其解	209
* 附录六 细长体绕流的速度势与水动力	215
* 附录七 舵面积选择及船舶操纵性计算例题	221
参考文献	231

绪论 船舶操纵性概述

一、船舶操纵性的含义

在船舶航行的过程中,为了尽快到达目的地和减少燃料消耗,驾驶者总是力求使船舶以一定的速度沿直线航行;而当在预定的航线上发现障碍物或其它船舶时,为了避免碰撞,驾驶者又要使船舶及时改变航速或航向。在这两种情况下,驾驶者所采取的操作,称为对船舶的操纵;船舶在运动上对驾驶者的操纵作出反应的能力则称为船舶的操纵性。或者说,船舶操纵性是船舶受驾驶者的操纵而保持和改变其运动状态的性能。很明显,它是船舶的运动性能之一,是船舶受控运动的性能。

这里所谓的“运动状态”,是指由作为时间函数的船舶所处的位置以及线速度、线加速度、角速度、角加速度等矢量所决定的运动状况。它们同时也就决定了船舶运动的轨迹。

在航行过程中,驾驶者对船舶运动的要求不外乎是保持一定的运动状态不随时间变化,或者随时间按一定规律改变运动状态两种。例如,一艘船启动、加速、匀速直线航行、转向、减速、停止以致后退等,都属于上述两者之一。

一艘操纵性好的船,应既能按驾驶者的要求,方便、稳定地保持运动状态;又能按驾驶者的要求,迅速、准确地改变运动状态。

就本书所讨论的水面船舶来说,在实际使用过程中,最经常要保持的运动参数是航向^①,最经常要改变的运动参数也是航向。对于这种船舶,在比较狭义的范围,操纵性也就成了保持和改变航向的性能。本书将主要讨论这种意义下的操纵性,只在个别地方涉及到超出这一范围的问题。应该说那些问题也是船舶操纵性问题。

在“船舶原理”的各学科中,操纵性是一门新近才发展起来,并且还很不完善的一个学科。关于操纵性的定义,仍在讨论和发展中。1946年戴维逊(K. S. M. Davidson)⁽¹⁾首先从运动稳定性理论出发,说明了船舶操纵性应包含航向稳定性和回转性两个互相制约的方面,为操纵性的研究奠定了理论基础。航向稳定性就是保持航向的性能,回转性则是改变航向的性能。1970年藤井齐和野本谦作等人⁽²⁾根据船舶的使用要求,提出船舶操纵性应包括转小舵角时的航向保持性,转中等舵角时的航向机动性和转大舵角时的紧急规避性能三个方面。他们认为同时具有这三方面性能,船舶才能满足驾驶者的使用要求。

戴维逊的定义着重于从力学上规定操纵性的含义,藤井等人的定义则偏重于使用要求。应该指出,两者都是从比较狭义的范围定义操纵性的,后者规定的三个方面的性能只包括了一般的使用要求,而且船舶并非都是用舵来操纵的。

我国船舶标准化委员会建议在广义的范畴中定义船舶操纵性,即泛指保持和改变航

① “航向”一词,在不同的文献中常有不同的含义。在关于航海学的文献中,它常指船首相对于地球真北的方向;在造船文献中,它常指船舶上某一定点(通常指重心点)合速度矢量相对地球的方向。本书中均指后者。

向、航速和位置等的性能。

二、操纵性的重要性

操纵性对于船舶的使用效能和安全性都有直接影响。

实际航行中的船舶，无时不在受着风、浪、水流等自然环境和人为的扰动，是不可能按理想的航线航行的。图 0-1 表示两艘航向稳定性不同的船舶在海上的实际航迹。

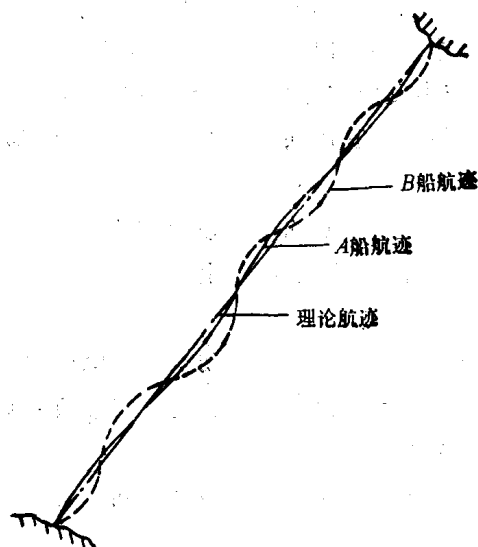


图0-1 航向稳定性不同的船舶在海上的实际航迹

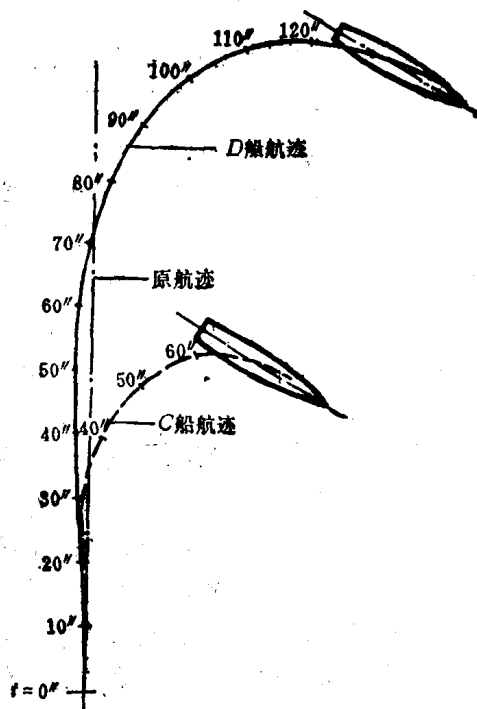


图0-2 机动性不同的船舶改变航向时的不同航迹

其中航向稳定性较好的 A 船，经过很少的操纵即能维持航向，并且航迹也较接近于要求的直线。航向稳定性较差的 B 船，则要频繁地进行操纵，以维持航向和纠正航向偏离，并且要经过一个曲折得多的航迹。实际航迹的曲折一方面增加了航程，另一方面由于校正航向偏差而增加了操纵机械和推进机械的功率消耗。

一般船舶，通常由于上述原因而增加的功率消耗，约占主机功率的 2~3%，对于航向稳定性差的船舶，甚至可高达 20%。

由此可见，操纵性对使用的经济性有重要影响。

图 0-2 表示两艘机动性不同的船舶在改变航向时的不同航迹。

机动性较好的 C 船，经过较短的时间和在较小的空间范围内就能改变航向。而机动性较差的 D 船，则要经过较长的时间和在大得多的水域中才能完成转向。所以后者在曲折、狭窄的航道或船舶较多的水域中航行时，会增加碰撞的危险。

据统计，全世界 100 吨以上排水量的船舶，每年约有 200 艘由于碰撞、搁浅等事故而沉没。造成这些事故的重要原因之一是船舶操纵性不好。

由此可见，操纵性对船舶的使用安全是极为重要的。

随着船舶大型化,特别是大型油轮、液化气船等,一旦发生碰撞、触礁等事故还会污染环境、破坏生态平衡,造成严重的社会问题。

作战舰艇的操纵性,对于提高武器射击的命中率、占据有利阵位和规避敌舰攻击等,更有重要意义。

总之,船舶操纵性是船舶重要的航行性能之一,对于某些船舶(如窄航道中航行的船舶、高速潜艇等),它甚至是最重要的航行性能。近年来,船舶操纵性受到人们日益广泛的重视,随着船舶大型化而产生的一系列操纵性问题,正在被造船界和航海界共同关注和努力研究之中。

三、船舶操纵性研究的历史

几乎在第一艘船舶出现的同时,就有了操纵船舶的手段。我国古代曾创造了许多操纵船舶的设备。在独木舟时代就有“剡木为楫”的说法。楫是一种短划柄桨,它兼作船舶的推进器和操纵器。随后,在东汉时期(约公元25年~221年)出现了橹,这是我国独有的一种推进-操纵器。从现代流体力学观点看,它是一种效率很高的水动力工具。早在西汉时期(约公元前120年)就有了关于舵的记载。它当时称为“秋”,后又改称“柁”或“橈”。最迟在公元3世纪,我国已广泛使用舵来操纵船舶了。而直到13世纪,才由阿拉伯人将这一技术由我国传到欧洲。在整个帆船时代,舵的应用大大提高了船舶的使用性能。由于有了舵才使“船行八面风”得以实现。在长期实践过程中,我们祖先曾对舵作了许多创造性的改进。在宋代(公元13世纪)已使用了适合在深水和浅水航行用的可升降的舵以及能降低转舵力矩的平衡舵。而西方直到18世纪才开始采用平衡舵。至今平衡舵仍是现代船舶普遍应用的一种非常有效和经济的操纵器。

舵、橹与风帆和指南针一样,是中华民族对世界航海和造船事业的伟大贡献。

在船舶操纵性方面早期的理论研究可追溯到18世纪。1776年欧拉(Euler)在《关于造船和驾驶的完整概念》一书中,建立了第一个描述船舶曲线运动的方程式。但在此后的一百年中进展不大。1860年,人们开始使用实船或船舶模型的回转试验来确定回转轨迹。直到本世纪40年代,这仍是研究船舶操纵性的占主导地位的方法。1912年霍夫加特(W. Hovgaard)建立了计算船舶稳定回转直径的实用方法和图谱。随着航空事业的发展,人们把研究飞机和飞艇操纵性的方法和成果引入到造船中来。1911年布朗(G. H. Bryan)在《飞行中的稳定性》一书中首先提议用“缓慢运动导数”来表达流体动力。布朗直观地创立的这一方法,至今仍是船舶操纵性研究中的一个重要手段。在这方面作出贡献的学者还有米诺尔斯基(N. Minorsky, 1922)、库查尔斯基(W. Kucharski, 1932)和温布伦(G. Weinblum, 1938)等人的著作。他们分别把船舶作为类似于机翼和飞艇的物体来研究其操纵性。

此后,1939年巴辛(А. М. Басин)利用里雅普诺夫(А. Ляпунов)的运动稳定性理论,研究了船舶的航向稳定性问题。1944年肯夫(Kempf)提出用Z形操舵试验结果来评价船舶操纵性。他们的工作开创了船舶对操舵的动态响应的研究。

所有这些早期研究工作虽然为后人奠定了基础,但他们都未能建立一个完整地描述船舶受控运动的方程式和给出一个完整的操纵性概念。

现代船舶操纵性的研究开始于戴维逊和许夫(L. I. Schiff)的工作。他们1946年发

表的“回转和航向保持性”一文，第一次给出了运动方程式的正确结构形式和准确的操纵性概念，从而建立了船舶操纵性的线性理论。巴辛1949年发表的“船舶航向稳定性和回转性”一文，在这方面也作出了贡献。与此同时，迪德（J. Dieudonne'）提出了评定船舶航向稳定性的螺旋试验方法。阿勃柯维奇（M. Abkowitz）推导了船舶在6个自由度内的运动方程及用台劳级数表达非线性水动力的方法，从而为讨论非线性运动提供了有力的数学工具。

首先把自动控制理论引入操纵性研究的是野本谦作，他在1957年发表的“船舶操纵特性”一文中，把转舵作为输入，把船的运动作为输出，研究了船舶运动对操舵的频率响应，并在分析Z形操舵试验的基础上提出了一阶的运动响应模型和表征船舶操纵性的 K 、 T 参数。

近30年来船舶操纵性的研究基本上是从两个方面进行的。

一方面是从基本运动方程出发，首先确定方程中所包含的水动力，进而解析运动求得表征操纵性的特征参数。这一方法也称为水动力模型方法。50~70年代，各主要造船国家先后建造了一批专门用于约束模型试验以确定各种水动力导数的大型设备，如回转臂水池、平面运动机构和 X - Y 拖车等。利用这些设备积累了不少试验资料。在这方面应该提到的有1969年第十二届国际拖曳水池会议组织的“航海者”型货船各种水动力导数的世界性比测试验结果。它证实了利用水动力模型方法预报船舶非线性运动的可行性，也揭示了各试验装备所得结果的差异。1968年阿尼西莫夫（Н. И. Анисимов）给出了一组非线性水动力的系列化模型试验结果。1976年起日本的操纵性数学模型小组（M. M. G）用几年时间开发了一个分离式水动力模型，进行了系列化的约束船模试验，系统地研究了船体，螺旋桨与舵的水动力以及它们之间的干扰作用。其后平野雅祥、井上正祐等人利用这些结果建立了预报船舶操纵性的方法。这一方法对常见的单桨运输船取得成功，已可用于船舶设计。

近30年来，在应用流体力学理论计算船舶水动力方面也取得很大进展。比较著名的有纽曼（J. N. Newman）的细长体理论、鲍莱（Bolley）等人的小展弦比机翼理论和费加耶夫斯基（К. К. Федяевский）的分离流理论等。由于粘性影响和船体形状的复杂，水动力的理论计算结果目前还不能达到实用所要求的精度。随着大容量、高速计算机的发展，今后可望取得更大的进展。

另一方面，60年代，野本谦作利用他所提出的一阶运动响应模型，开展了大量的实船试验积累了几百艘船的 K 、 T 值。针对一阶模型的缺陷，人们又发展了二阶的线性响应模型和非线性的响应模型。诺宾（Norrbin）、贝奇和瓦格纳·史密斯（Bech and Wagner Smith）及藤野正隆等人提出了各种通过实船或自航船模试验确定操纵性特征参数的方法。特别是把自动控制理论中的相平面分析方法应用于操纵性研究，为处理非线性运动提供了有力手段。

70年代以来，阿斯特朗（Åström）、卡普兰（P. Kaplam）和阿勃柯维奇等人，又把现代控制理论中的系统辨识技术引入操纵性研究中。它既为运动响应模型的研究开创了新的领域——直接从自航试验得到数学模型的结构形式和水动力导数，也为船舶实现自适应控制创造了条件。目前这一方法还处于初始阶段，取得的成果还有限，但由于它所展示的前景，已受到人们广泛的重视。

近10年来, 操纵性研究不断向新的领域发展。船舶在浅水、窄航道中的操纵性, 在风、浪及水流作用下的操纵性, 两船接近时的操纵性、肥大型船舶的操纵性以及船舶动力定位等新课题的研究, 正在不断取得令人鼓舞的成果。

四、控制回路与船-舵效应

在正式讨论船舶操纵性问题之前, 这里先简单介绍一下驾驶者是怎样操纵船舶的, 以及船舶为什么会受驾驶者的操纵。

驾驶者是利用一系列操纵设备来对船舶进行操纵的。图 0-3 表示一个典型的用舵来操纵船舶的系统方框图。

在人工驾驶时, 驾驶者从显示器得到所要求的航向 (有时也包括航迹) 与实际航向 (或航迹) 之间的差别。为了校正这一差别, 驾驶者要操动舵轮, 发出舵角指令。舵机则按这一指令工作, 转动舵, 产生规定的舵角, 同时也将实际舵角值传送到显示器上, 供驾驶者了解。舵的转动产生作用于舵和船体上的水动力控制力, 使船改变实际航向 (或航迹), 以接近于所要求的值, 同时也把实际航向 (或航迹) 送到显示器以与要求值相比较。由于船舶航行中不断受到外界扰动, 所以上述过程是在不断循环进行的。这样, 包括驾驶者在内, 船舶操纵系统形成了一个闭回路。在自动操纵时, 自动驾驶仪可以代替驾驶员执行比较航向误差和发出舵角指令的任务。

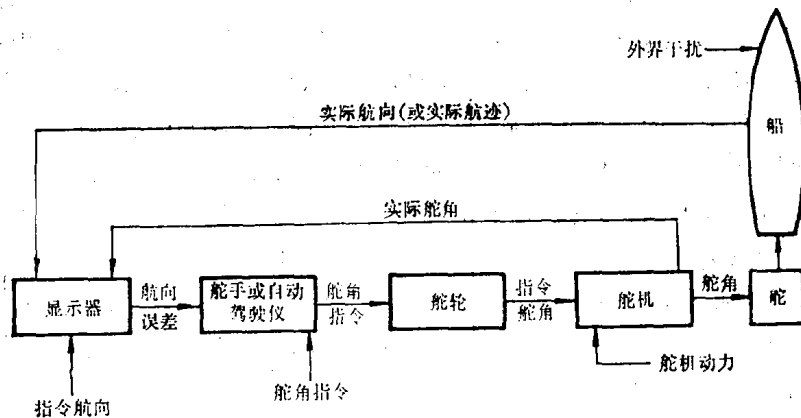


图0-3 典型的船舶操纵系统方框图

在图 0-3 所示的操纵回路中, 每一个黑框表示一个环节, 每一个环节都接受一个 (或几个) 输入信号, 而产生相应的输出信号。这些环节组成一个闭回路系统。这种闭回路系统也称为反馈系统。系统中每个环节的特性都对系统特性有影响, 它们的组合构成系统的特性。原则上, 一艘船操纵性的好坏取决于整个系统的特性。所以在考虑一艘船操纵性时, 不应只片面地追求一个环节的性能而不顾及其它环节。

但上述不同环节涉及到不同的学科领域, 本书将着重讨论其中两个环节——舵与船体的水动力特性。这并不表明其它环节不重要, 只是哪些环节常由其它专业人员去研究。

为什么转舵能对船实现操纵, 这是因为在舵与船体上有一系列水动力作用的结果。图 0-4 表示船与舵之间水动力作用的情况。

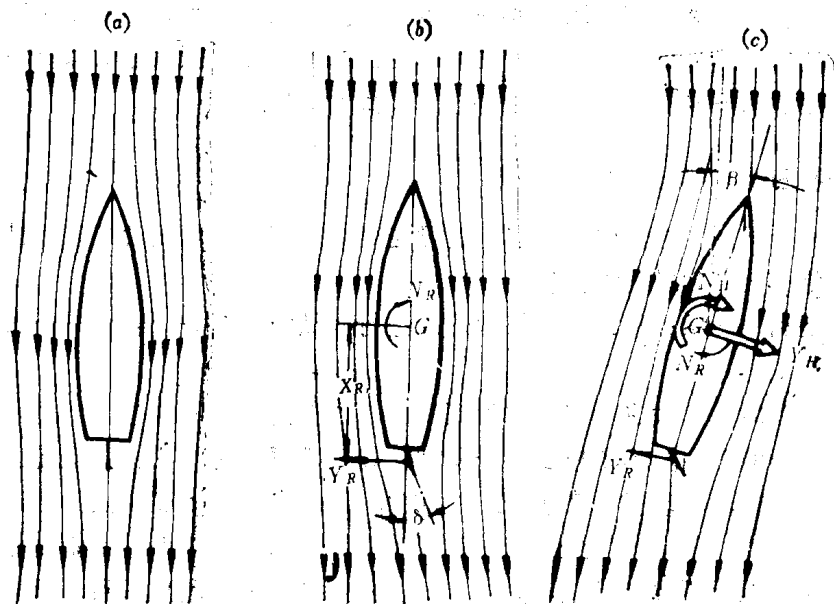


图0-4 船-舵系统的水动力作用

一艘左右舷形状对称的船舶，舵位于中间位置时，如果沿中纵剖面方向直线航行，由于流动的对称性，船舶将不会受到侧向力作用（如图0-4(a)所示）。当舵偏转一个 δ 角时，则破坏了水流的对称性；首先在舵上产生一个侧向力 Y_R ， Y_R 的作用点距船舶重心 G 为 x_R 时，同时也产生一个绕船舶重心的力矩 $N_R = Y_R \cdot x_R$ （见图0-4(b)）。在力矩 N_R 作用下船舶相对于空间会发生偏转而改变船舶方向。同时在侧向力 Y_R 作用下，船舶又会产生侧向速度，它与原来沿中纵剖面方向的速度叠加，从而使船的中纵剖面与水流形成一个漂角 β ，这就进一步破坏了水流的对称性。于是产生一个作用于船体上的侧向力 Y_H 和绕重心的力矩 N_H （参见图0-4）。当舵装于船尾时， N_H 和 N_R 方向是相同的，而 Y_H 与 Y_R 方向则相反。因为船体的尺度比舵大得多，通常 Y_H 、 N_H 也比 Y_R 、 N_R 大得多。此后，船舶就主要在 Y_H 和 N_H 作用下继续转向和横移运动。这就是利用转舵来改变航向的一个水动力过程。

由此可见，虽然转舵是引起船舶转向的原因，但在整个回转过程中起决定作用的往往是船体本身受到的水动力及其力矩。所以船舶操纵性好坏，不仅与舵的大小、形状及位置有关，而且更与船舶的形状、尺度有关。这是研究操纵性时，首先要注意到的。

五、研究操纵性的任务与方法

从工程的角度，研究操纵性的任务在于：

- (1) 通过考察船舶受控运动的规律，找到表征船舶操纵性的主要特征参数，以及为满足各类船舶的使用要求，这些参数所应达到的数量指标；
- (2) 建立评价现有船舶和预报新设计的船舶的受控运动和操纵性特征的方法；
- (3) 建立在船舶设计中满足操纵性要求和改进操纵性的方法。

目前，解决上述问题的方法，大致有下列两类：

其一是应用水动力模型的方法，即基于牛顿定律建立一个描述船舶运动与作用于船

舶的水动力之间关系的数学模型（也称为水动力模型），用理论方法或约束模型试验方法确定作用于船舶的水动力；然后从分析数学模型得到在各种机动下船舶的运动规律和操纵性特征参数。

另一种是应用运动响应模型方法，即进行实船或其物理模型（或称船模）的自航试验，直接求得运动状态与操舵的对应关系，建立反映这种对应关系的数学模型（也称为运动响应模型），再由对这种模型的分析来得到各种表征操纵性的特征参数。

通过这两种方法都能得到船舶及其操纵器特征与船舶操纵性能的关系，从而为进行船舶操纵性设计提供依据。

图 0-5 是表示这两种方法的逻辑方框图。

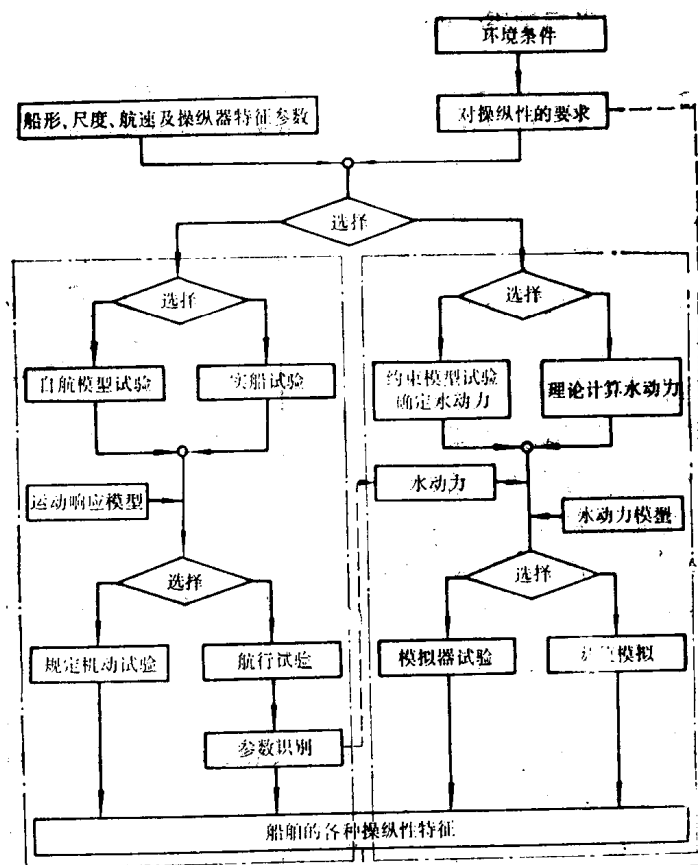


图 0-5 两种研究船舶操纵性方法的典型逻辑框图

上述两种方法，基本上都是半经验的方法。它们是互为补充的。前者便于分析各单独因素对操纵性的影响，但在建立模型和确定水动力时不可避免地要引入一定简化，因而结果有一定的失真。后者能包括各种因素的综合作用，但不便于分析单独因素的影响。

第一章 船舶运动方程式

§1-1 船舶运动的描述和运动方程式

操纵性主要讨论的是船舶的受控运动。为了便于定量地描述这种运动，我们选用下列两种坐标系。

1.1 固定于地球的坐标轴系 $o_0x_0y_0z_0$

如图 1-1 所示， o_0 是任意选定的、固定于地球表面的坐标轴系原点。通常可选择在某一时刻（ $t = 0$ 时）船舶重心 G 所在位置。 o_0x_0 轴在静水平面内，其方向是任意选定的，但一经选定后，相对于地球是固定的。通常，它可选择在船舶总的运动方向上。 o_0y_0 轴选择为 o_0x_0 轴在静水平面内顺时针旋转 90° 的方向上。 o_0z_0 轴垂直于静水平面，以指向地心为正。这样构成一个固定于地球表面的右旋直角坐标系。

对于水面船舶的受控运动，如果忽略它的垂向运动，则在任意时刻 t 船舶运动的状态可以用它的重心位置 x_{0G} 、 y_{0G} 和船舶中纵剖面与 o_0x_0 轴的交角 ψ ，以及它们对时间的导数来表示。其中 ψ 称为首角，以由 o_0x_0 轴至中纵剖面顺时针旋转为正。

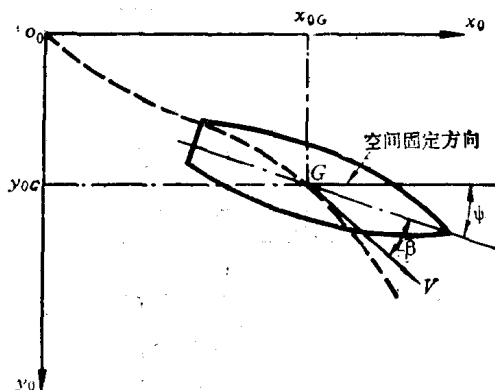


图1-1 船舶在固定于地球的坐标系中

在讨论船舶受控运动时，常把船舶当成刚体，即认为其形状、尺度、质量及质量分布均不随时间改变^①。这样，引用牛顿关于刚体质心运动的动量和动量矩定理，船舶的运动可以用下列方程组来描述：

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= m\ddot{x}_{0G} \\ Y_0 &= m\ddot{y}_{0G} \\ N &= I_x\ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 X_0 ——作用于船舶的外力沿 o_0x_0 轴方向的分量；
 Y_0 ——作用于船舶的外力沿 o_0y_0 轴方向的分量；
 N ——作用于船舶的外力绕通过重心 G 的铅垂轴的力矩；
 m ——船舶的质量；
 I_x ——船舶质量对通过重心的铅垂轴的惯性矩；

$\ddot{x}_{0G}$ 、 $\ddot{y}_{0G}$ 及 $\ddot{\psi}$ ——分别表示 x_{0G} 、 y_{0G} 及 ψ 对时间的二阶导数。即船舶重心 G 点的线

① 由于船舶装载状况以及由于操纵器、推进器的运动而引起的形状、质量、质量分布的变化均另作考虑。

加速度和角加速度分量。

式 (1-1) 虽然表面上看来很简单, 并且可以直接描绘船舶在空间的位置, 但由于其中的外力分量 X_0 、 Y_0 与船舶中纵剖面相对于坐标轴的方向有关, 这就给它们的表达带来很大困难。为了克服这种困难, 我们引入另一种坐标系。

1.2 固定于船舶的坐标系 $oxyz$

取船体上一点 o 为坐标原点 (通常可以取在船舶重心处或取在水线面、中纵剖面与中横剖面的交点处), 一经取定, 它相对于船舶是固定的, 随船一起在空间运动。 ox 轴取为垂直于船舶中横剖面, 以指向船首为正。 oy 轴取为垂直中纵剖面, 以指向右舷为正。 oz 轴取为垂直于水线面, 以指向龙骨为正。这样构成一组右旋的直角坐标系, 如图 1-2 所示。显然这不是一个惯性系统。

在图 1-2 中同时也画出了固定于地球的坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 。如果规定运动坐标系原点 o 取在船舶重心 G 点, 则图 1-2 中 V 表示船舶重心点的线速度矢量。 V 与 ox 轴正方向的交角称为漂角。定义由合速度方向至 ox 轴顺时针旋转时, 漂角 β 为正值, 图 1-2 中所示的 β 为负值。

由图中可见, 作用于船舶的外力合力在两种坐标系轴上的投影有下列关系:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi \\ Y &= Y_0 \cos \psi - X_0 \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 X 和 Y 分别是作用于船舶的外力在动坐标轴 ox 和 oy 上的投影。

同样, 如图所示, 船舶重心 G 点的线速度矢量 V 在两种坐标系轴上的投影有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{0G} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{0G} &= v \cos \psi + u \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 $\dot{x}_{0G}$ 和 $\dot{y}_{0G}$ ——船舶重心 G 点的线速度矢量 V 在 o_0x_0 和 o_0y_0 轴上的投影,

u 和 v ——运动坐标原点 o 的线速度矢量 V 在 ox 和 oy 轴上的投影。

按定义有:

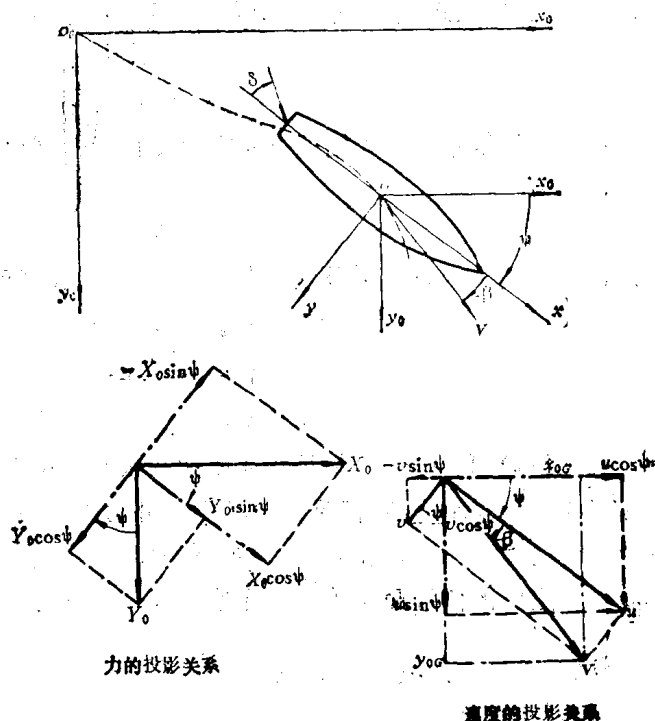


图1-2 固定于船舶的坐标系

$$u = |V|\cos\beta$$

$$v = -|V|\sin\beta$$

$\ddot{x}_{0G}$ 、 $\ddot{y}_{0G}$ 、 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 和 $\dot{\psi}$ 都是时间的函数，为了简便起见都不专门标出了。符号上面的“·”表示它们对时间的导数。

将式 (1-3) 的等号两边分别对时间求导，则得：

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{0G} &= \dot{u}\cos\psi - \dot{v}\sin\psi - (u\sin\psi + v\cos\psi)\dot{\psi} \\ \ddot{y}_{0G} &= \dot{u}\sin\psi + \dot{v}\cos\psi + (u\cos\psi - v\sin\psi)\dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-1)，并引入式 (1-2) 表示的 X_0 、 Y_0 ，经适当整理可得到：

$$X = m(\dot{u} - v\dot{\psi})$$

$$Y = m(\dot{v} + u\dot{\psi})$$

在这两种坐标系中 z 轴的方向没有变化，依据质心运动的动量矩定理，绕 G 点的力矩方程仍为：

$$N = I_x\ddot{\psi}$$

合并这三个式子，我们可得到原点在重心处的动坐标系中船舶的运动方程：

$$\left. \begin{aligned} X &= m(\dot{u} - v\dot{\psi}) \\ Y &= m(\dot{v} + u\dot{\psi}) \\ N &= I_x\ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式 (1-1) 和 (1-5) 都是描述船舶在水平面中运动的方程式。式 (1-5) 比式 (1-1) 虽然形式上稍复杂一些，但是由于其中的外力不再与船舶相对于坐标轴的方向有关，可以得到很大的简化。所以在分析船舶运动时，将广泛应用在动坐标系中的方程。只有在讨论船舶在空间的位置和轨迹时，才使用固定坐标系。

1.3 坐标原点位置的选择

在许多情况下，动坐标原点 o 不取在船舶重心 G 处。一方面因为在船舶使用过程中重心位置可能变化；另一方面，如果原点取在船舶对称平面的交点上，利用这种对称性可使水动力的表达得到简化。

如图 1-3 所示。当取距 G 点距离为 R_G 的 o 点为动坐标原点时，在动坐标系中船舶重心的坐标可记为 $G(x_G, y_G)$ 。以 u_G 和 v_G 表示 G 点运动速度在 ox 和 oy 轴上的投影，以与坐标原点 o 的运动速度在动坐标轴上的投影相区别，后者记为 u 和 v 。

根据刚体平面运动的原理， G 点的绝对速度可以分解为 G 点相对于 o 点的相对速度和 o 点相对于地球的牵连速度。即：

$$\mathbf{V}_G = \mathbf{V}_o + \mathbf{V}_{oG}$$

式中 $\mathbf{V}_G$ —— G 点相对于地球的速度矢量，或绝对速度矢量；

$\mathbf{V}_o$ —— o 点相对于地球的速度矢量，或牵连速度矢量；

$\mathbf{V}_{oG}$ —— G 点相对于 o 点的速度矢量，或相对速度矢量。

它们在动坐标轴上的投影可分别写成：

$$\left. \begin{aligned} u_G &= u + u_{oG} \\ v_G &= v + v_{oG} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$