

“十二五”国家重点图书出版规划项目
黑龙江省精品图书出版工程

船舶控制原理

(第二版)

金鸿章 姚绪梁 编著

CHUANBO KONGZHI YUANLI



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

“十二五”国家重点图书出版规划项目
黑龙江省精品图书出版工程

船舶控制原理

(第二版)

金鸿章 姚绪梁 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以船舶控制的理论研究和工程应用需要为基础,介绍了船舶的动力学模型、船舶受到的海洋扰动及它们的模型、船舶运动控制装置。本书还介绍了船舶航向控制和横摇减摇原理,自动舵原理和减摇装置原理以及潜艇的空间运动模型和近水面扰动力。

本书在介绍船舶控制的理论时,着重介绍了这些理论的工程应用。

本书可供从事船舶、船舶装置及船舶设计和建造的工程技术人员使用,也可作为船舶类院校的自动控制、船舶电气、船舶装置和船舶工程等专业的高年级学生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

船舶控制原理/金鸿章,姚绪梁编著.—2版.—哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2013.1
ISBN 978-7-5661-0530-1

I. ①船… II. ①金…②姚… III. ①船舶操纵-自
动控制系统-高等职业教育-教材 IV. ①U664.82

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第019867号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街124号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 14.75
字 数 362千字
版 次 2013年4月第2版
印 次 2013年4月第2次印刷
定 价 32.00元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

第二版前言

本教材第一版出版至今已有十一年了。在十余年间,本教材在船舶自动化和船舶运动控制方向的本科生和硕士研究生的教学中作为教材应用,取得了良好的教学效果。此教材还被船舶行业的一些研究所和企业作为研究人员进修的培训教材和工程设计的参考资料,得到了很好的反映。

本教材出版后的十余年,我国的船舶工业、海洋工程和海军装备得到了迅速的发展。我国的船舶工业已在产业规模、结构调整、市场竞争力、科学技术等方面都得到了长足的发展,已成为国际上名副其实的造船大国。但是由于我国船舶工业的自主创新能力不足,船舶配套能力和水平较低,减缓了我国成为国际上第一造船强国的进程。目前我国在船舶工业、海洋工程和海军装备建设中,急需一批掌握船舶控制和特辅装置专门知识的高端技术人员,以适应船舶工业配套设备自主研究、设计和生产方面的需求。

由于教材内容涉及到控制理论和控制系统设计、涉及到船舶耐波性和操纵性的交叉学科的知识,使学生在学时会产生一定的困难。经十余年的使用,表明教材较好地处理了船舶动力学和运动模型的建立、海洋环境扰动及其在船舶运动控制中的应用、主要船舶运动控制系统的控制原理和控制方法这三个方面的关系,在交叉学科知识的处理也是成功的。

在教材第二版的再编写中,作者注意到船舶工业的科技发展趋势,结合作者近年在船舶控制理论研究和船舶特辅装置设计方面的成果,充实了一些章节。这些充实的内容已经在船舶控制中得到应用。

针对角速度较快的鳍的静态水动力和动态水动力的很大的不同,在第4章中,作者补充了鳍的动态水动力方面的内容。这部分的内容对转动角速度较快的减摇鳍控制系统鳍升力的计算是非常重要的。这方面的内容也可以为其他转动速度较快的控制翼应用。考虑到船舶电力推进在船舶推进中的快速发展,在第4章中作者补充了船舶电力推进方面的内容。这部分的内容为船舶电力推进系统的设计提供了基础知识。近十多年智能控制在船舶控制中得到了广泛应用,作者在第5章中增加了减摇鳍的智能控制的内容。这部分的内容可以使读者了解船舶智能控制的特点和应用方法。零航速减摇鳍是近十多年减摇鳍的一个最重要的成果,在国外已有应用,在第5章中增加了零航速减摇鳍的原理及设计方法。

作者希望教材的再版能为船舶控制及特辅装置的高端技术人员的培养贡献一份力量。教材的修订主要由金鸿章、姚绪梁完成,金鸿章校对了全书。

作者衷心希望船舶控制方面的同仁们对教材的内容提出宝贵的意见。

编著者

2012年12月

第一版出版说明

根据国务院发(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》,我们开展了全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为了做好教材编审组织工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶与海洋工程”、“船舶动力”、“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“流体传动与控制”、“水中兵器”七个教材委员会,聘请了有关院校的教授、专家50余人参加编审指导工作。船舶类专业教材委员会是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织,主要任务是协助政府机关做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,对提高教材质量起审查把关作用。

经过前四轮教材建设,共出版教材300余种,建立了较完善的规章制度,扩大了出版渠道,在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了卓有成效的改革,这些改革措施为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据原国家教委对“九五”期间高校教材建设的要求:“抓好重点教材,全面提高质量,继续增加品种,整体优化配套,深化管理体制和运行机制的改革,加强组织领导”,船舶总公司于1996年组织制定了“全国高等学校船舶类专业教材(九五)选题规划”。列入规划的选题共129种,其中部委级重点选题49种,一般选题80种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划,为适应社会主义市场经济外部环境,“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指导下,教材编审、出版由主编学校负责组织实施,教材委员会进行质量审查,船舶工业教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材,全面提高教材质量,为此教材建设引入竞争机制,通过教材委员会评审、择优确定主编,实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制,聘请主编校以外的专家审稿,最后教材委员会复审,复审合格后由有关教材委员会发给编者出版推荐证书,作为出版依据。全国高校船舶类专业规划教材,就是通过严密的编审程序,和高标准、严要求的审稿工作来保证教材质量。

为完成“九五”教材规划,主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项是由学校申报,立项后由主编校组织实施,教材出版后由学校组织选用,学校是教材编写与教材选用的行为主体,教材计划的执行主要取决于编写学校的工作情况。希望有关高校切实负起责任,各有关方面积极配合,为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限,教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足,希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见,以便改进提高。

船舶工业教材编审室

一九九九年三月

第一版序言

船舶在海上航行时,由于受到海浪、海风及海流等海洋环境扰动的作用,不可避免地要产生各种摇荡。船舶的剧烈摇荡对船舶的适航性,对船舶的安全航行,对船上设备、货物及乘员都产生了不利的影响。为此,人们一直在寻求减小船舶摇荡和控制船舶运动的方法,并研制出多种船舶运动控制装置来控制船舶运动和减小船舶摇荡。例如,现在在船舶上广泛使用的自动舵和减摇鳍就是用来控制船舶航向和减小船舶横摇的船舶运动控制装置。

为了设计和制造船舶运动控制装置,必须要掌握下面几个方面的知识。

1. 船舶动力学特性

船舶的外形是很复杂的,使船舶产生摇荡的海洋环境扰动也是很复杂的。这样,描述船舶动力学特性的船舶运动方程必定是非常复杂的。许多船舶研究人员对此做了大量的工作,求得了各式各样的船舶运动方程。对于研究和设计船舶运动和船舶运动控制装置的技术人员,必须掌握船舶运动的动力学知识,并能建立适合于所研究的船舶运动控制装置的控制系统的数学模型。缺乏这方面的知识,是无法研究和设计船舶运动控制装置的。

2. 海浪、海风及海流等海洋环境扰动

海浪、海风和海流是引起船舶摇荡的主要扰动,它们对船舶的作用是非常复杂的。为了更好地研究船舶摇荡和设计减小扰动引起的船舶摇荡的控制装置,就必须研究这些海洋扰动本身的特点,研究它们对船舶的作用。

3. 控制理论和控制系统设计方法

船舶运动控制中,许多装置是一个自动控制系统。因为船舶的摇荡运动是一个复杂的多自由度运动,而控制摇荡的执行元件往往有几个,所以在研究和设计船舶运动控制装置及其控制系统时,就要应用各种控制理论知识。

总之,要很好地研究和设计船舶运动控制装置,必须要有船舶运动方面的知识、控制理论方面的知识、电子工程方面的知识和液压工程方面的知识等多学科知识。

在已有的教科书和专著中,有船舶动力学方面的,也有船舶控制系统方面的,但是能把这两方面内容结合起来的教材和专著很少。本书试图把船舶动力学和船舶运动控制装置及其控制系统结合起来,使从事船舶控制的工作者和学习船舶控制的学生能更好地掌握船舶动力学和海洋环境扰动对船舶摇荡的影响方面的知识。为了达到这个目的,本书的各章作如下安排。

第1章简要地介绍了船舶动力学方面的知识,介绍了船舶的六自由度运动方程;第2章介绍了海浪、海风及海流,重点介绍了长峰波海浪;第3章介绍了海洋环境扰动对船舶的作用及其在控制系统设计中的应用;第4章介绍了船舶运动控制中常用的控制装置;第5章介绍了控制船舶航向的自动舵控制模型及控制原理,介绍了船舶的横摇运动模型及横摇减摇

原理;第6章简单地介绍了潜艇的空间运动模型。

通过学习,可使读者掌握船舶动力学和海洋环境扰动的有关知识,以便在研究和设计船舶运动控制装置及其控制系统时,能够建立船舶运动和海洋环境扰动对船舶作用的数学模型,能够对常见的船舶运动控制装置的原理和组成有基本了解,更重要的是使读者能够掌握自动舵和减摇鳍的控制原理。

本书可供从事船舶运动控制研究和船舶运动控制装置设计的工程技术人员及其他有关工程技术人员阅读、参考,也可作为船舶院校的自动控制、电气自动化及其他有关专业的高年级学生和研究生的教材。

本书中,金鸿章撰写了第1章、第2章、第3章及第6章,姚绪梁撰写了第4章和第5章,王科俊为本书的主审。

本书编写时,结合了编著者及同事们三十多年的船舶运动控制研究和特种装置设计的实践,在此,编著者对支持和鼓励本人的同事们表示感谢;本书参考、引用了一些文献资料,在本书问世之际,向这些文献资料的作者表示衷心的感谢。编者真诚希望读者对本书中错误和不妥之处提出指正。

编者

2001年3月

目 录

第 1 章 船舶动力学综述	1
1.1 船舶运动分析中的坐标系	1
1.2 船舶运动方程的建立	3
1.3 作用于船舶的力和力矩	8
1.4 船舶运动方程的线性化	13
1.5 船舶运动方程的无因次化	16
第 2 章 海浪、海风及海流	18
2.1 平面进行波	18
2.2 随机海浪	20
2.3 随机海浪的统计特性和谱分析	23
2.4 海风和海流的谱分析	31
2.5 海流	32
第 3 章 海浪、风和海流对船舶的扰动力和扰动力矩	34
3.1 船舶在波浪中的航行	34
3.2 海浪作用于船舶的扰动力和扰动力矩	37
3.3 海浪的横漂力及对船舶的影响	42
3.4 风和海流对船舶的扰动力和扰动力矩	43
3.5 长峰波随机海浪的实时仿真和频谱分析	47
3.6 利用波谱等能量离散化的海浪仿真	53
3.7 海浪成形滤波器及对海浪的仿真	55
3.8 海浪对船舶的干扰力和干扰力矩的仿真和频谱分析	60
第 4 章 船舶运动控制装置	69
4.1 船舶运动控制装置概述	69
4.2 舵和舵的水动力特性	70
4.3 鳍和鳍的水动力特性	76
4.4 鳍的动态水动力	84
4.5 螺旋桨及其水动力特性	95
4.6 可调螺距螺旋桨及其控制	100
4.7 船体和螺旋桨对舵水动力的影响	107
4.8 推力器及其控制	109
4.9 船舶电力推进	115

4.10	船舶电力推进系统负载模拟	128
第5章	船舶运动控制模型和控制系统的实现方法	138
5.1	船舶航向控制原理	138
5.2	船舶自动舵的控制原理	140
5.3	船舶航向控制中的数学模型	147
5.4	船舶航向控制中的环境扰动的模型	152
5.5	船舶航向控制中的性能指标	156
5.6	船舶横摇运动数学模型	162
5.7	船舶横摇减摇原理	170
5.8	减摇鳍控制系统及最优变参数控制	173
5.9	零航速减摇鳍	187
5.10	常用的船舶横摇减摇装置	200
第6章	潜艇空间运动模型及近水面波浪干扰力的计算	205
6.1	潜艇空间运动模型	205
6.2	潜艇近水面波浪干扰力的计算	211
参考文献		220

第 1 章 船舶动力学综述

船舶航行时,由于风浪等环境因素的影响,也由于螺旋桨、舵等船舶自身的各种推动和控制作用,会产生复杂的运动。船舶的外形是很复杂的,它在水中运动时,船体和流体之间的作用也是很复杂的。为了研究船舶的运动和建立船舶控制系统,必须建立船舶的运动方程。

本章以牛顿动力学定理为基础,结合船舶运动控制的特点,分析船舶在船体坐标系中的运动和动力学特性,讨论作用于船舶的各种力和力矩,并且对船舶运动方程作线性化处理和无因次化。

1.1 船舶运动分析中的坐标系

为了研究船舶运动及其受力情况,了解船舶在每个时刻的各种运动参数的方向和大小,需要建立适用于船舶运动控制的坐标系。下面两种坐标系在船舶运动分析中得到了很好的应用。

1.1.1 地面坐标系(静坐标系)

如图 1-1 所示的三维直角坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ 中, E 为原点,可以取地面或海面上任何一点, $E\zeta$ 轴正向指向地心, $E\xi$ 轴和 $E\eta$ 轴互相垂直且在水平面内,方向可以任选。坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ 是一个惯性坐标系,在此坐标系内可以应用牛顿动力学定律来分析物体的运动情况和受力情况。

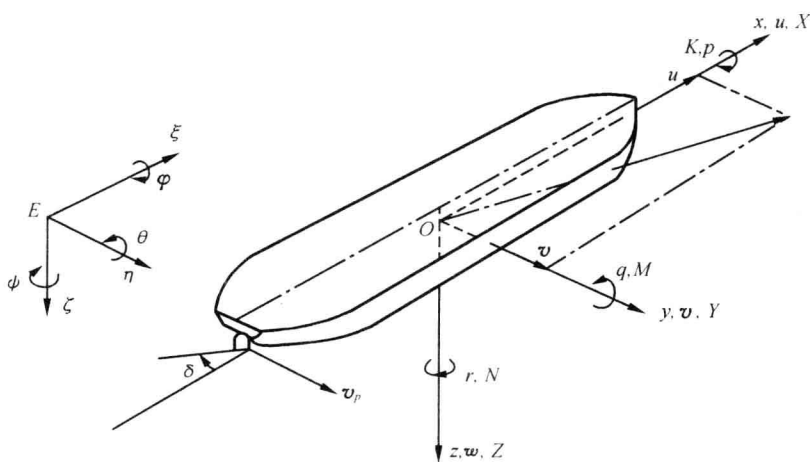


图 1-1 地面坐标系和船体坐标系

1.1.2 船体坐标系(动坐标系)

船体坐标系也称动坐标系,它的原点 O 可以取在船体上任何一点(见图 1-1),纵轴 Ox 平行于船舶横摇轴并指向船首,横轴 Oy 轴平行于纵摇轴并指向右舷,垂直轴 Oz 指向船底。 $O-xyz$ 构成一个右手直角坐标系。一般为了分析问题方便,常把原点 O 取在船舶重心 G 上,并认为坐标轴 Ox, Oy 和 Oz ,分别为船舶的横摇轴、纵摇轴和艏摇轴。 $O-xyz$ 坐标系不是一个惯性坐标系。

船舶的运动是在三维空间中的复合运动,它们包括沿三个坐标轴的直线运动和围绕三个坐标轴的旋转运动,这也是通常所说的船舶六自由度运动。船舶的关于这三个坐标轴的运动及其受到的力和力矩分别如图 1-1 所示,它们的名称和符号见表 1-1。表中的符号采用了国际拖曳水池会议(International Towing Tank Conference 简称 ITTC)所推荐的符号。

表 1-1

运动		x 轴	y 轴	z 轴
直线	位移	x 纵荡	y 横荡	z 垂荡(升沉)
	速度	u	v	w
旋转	角度	ϕ 横摇角*	θ 纵摇角*	ψ 艏摇角*
	角速度	p	q	r
作用力	力	X	Y	Z
	力矩	K	M	N

* 横摇角 ϕ 、纵摇角 θ 和艏摇角 ψ 在船体坐标系和地面坐标系中的表示符号相同,阅读时应注意区别。

1.1.3 坐标系的变换

船舶在海洋中任何一点的位置与姿态,可以用船体坐标系原点 O 在地面坐标系上的坐标值 (ξ_0, η_0, ζ_0) 以及船体坐标系相对于地面坐标系的三个姿态角来确定,这三个姿态角分别称为横摇角 ϕ ,纵摇角 θ 和艏摇角 ψ ,它们的定义如下:

艏摇角 ψ 是 Ox 轴在水平面 $\xi E \eta$ 上的投影与 $E\xi$ 轴之间的夹角;

纵摇角 θ 是 Ox 轴与水平面 $\xi E \eta$ 之间的夹角;

横摇角 ϕ 是 xOz 平面与通过 Ox 轴的垂直平面 $xO\zeta$ 之间的夹角,也即 xOz 平面的法线 Oy 与 $xO\zeta$ 平面的法线之间的夹角(设地面坐标系与船体坐标系的原点重合)。

在船舶运动研究中,应用的船舶动力学方程是在船体坐标系中建立的。如果需要把船舶的运动状态转换到地面坐标系中,那么需要依次把地面坐标系旋转 ψ, θ 和 ϕ 角,把原点 E 移到 O 点,也就是在两个坐标系中作一个线性变换。设两个坐标系的原点 E 和 O 重合,它们之间存在着线性变换矩阵 A ,则

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1-1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

其反变换为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

式中

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

在船舶运动控制中,也常常需要在两个坐标系中进行角速度的转换。例如从罗经上读到的航向是相对于地面坐标的,而船舶上的角速度陀螺测量的是船体坐标系中的船舶摇摆角速度。两个坐标系中的转动角速度的关系可用下式表示

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

其反变换为

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

1.2 船舶运动方程的建立

利用动力学的基本原理,可以推导出船舶在船体坐标系内的六自由度运动方程。在分析中,把船舶看成一个具有一定质量和质量分布的刚体。

1.2.1 作用于船舶的微元上的速度和加速度

在船舶上任取一微元 S_i , 设它的体积为 S_i , 在船体坐标系中的坐标为 (x, y, z) , 设 S_i 相对于地面坐标系的运动速度矢量为 \mathbf{V}_i , 则 \mathbf{V}_i 可以写成

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_i \quad (1-7)$$

这里 \mathbf{V}_0 为船体坐标系原点 O 相对于地面坐标系的运动速度, 或称微元 S_i 的牵连速度; $\boldsymbol{\Omega}$ 为微元 S_i 绕原点 O 的转动角速度。因为船体可以作为一个刚体, 故在同一时刻, 船舶上各点的运动角速度相同。 \mathbf{R}_i 为微元 S_i 到原点 O 的矢径。

设 \mathbf{i}, \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 为船体坐标系 x 轴、 y 轴和 z 轴上的单位矢量, 则(1-7)式可以用下式表示

$$\mathbf{V}_i = (u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}) + (p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k}) \times (x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}) \quad (1-8)$$

展开(1-8)式, 并考虑到矢量积的法则

$$\begin{cases} \mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0 \\ \mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}, \mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}, \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \\ \mathbf{j} \times \mathbf{i} = -\mathbf{k}, \mathbf{k} \times \mathbf{j} = -\mathbf{i}, \mathbf{i} \times \mathbf{k} = -\mathbf{j} \end{cases} \quad (1-9)$$

则有

$$\mathbf{V}_i = (u + qz - ry)\mathbf{i} + (v + rx - pz)\mathbf{j} + (w + py - qx)\mathbf{k} \quad (1-10)$$

因为 \mathbf{i} , \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 是单位矢量, 其模等于 1, 但它们的方向是随着船体坐标系变化的。当船体坐标系以角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转时, 由矢量系数法则

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{i}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{i} = (p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k}) \times \mathbf{i} = r\mathbf{j} - q\mathbf{k} \\ \frac{d\mathbf{j}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{j} = (p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k}) \times \mathbf{j} = r\mathbf{i} + p\mathbf{k} \\ \frac{d\mathbf{k}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{k} = (p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k}) \times \mathbf{k} = q\mathbf{i} - p\mathbf{j} \end{cases} \quad (1-11)$$

把(1-10)式对 t 求导, 并把(1-11)式代入, 则微元 S_i 的加速度

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_i = \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = & \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x(q^2 + r^2) + y(pq - \frac{dr}{dt}) + z(pr + \frac{dq}{dt}) \right] \mathbf{i} + \\ & \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y(r^2 + p^2) + z(qr - \frac{dp}{dt}) + x(qp + \frac{dr}{dt}) \right] \mathbf{j} + \\ & \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z(p^2 + q^2) + x(rp - \frac{dq}{dt}) + y(rq + \frac{dp}{dt}) \right] \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-12)$$

1.2.2 作用于船舶的力和力矩

设微元 S_i 的质量为 dm_i , 于是有

$$dm_i = \rho S_i = \rho dx dy dz \quad (1-13)$$

式中 ρ 为微元 S_i 的密度。

由牛顿第二定律, 作用于微元 S_i 的力为

$$d\mathbf{F}_i = \mathbf{a}_i dm_i \quad (1-14)$$

整个船舶所受的力为

$$\mathbf{F} = \int_{\Delta} d\mathbf{F}_i = \int_{\Delta} \rho \mathbf{a}_i dx dy dz \quad (1-15)$$

式中 Δ 为船舶的整个体积所及的范围。把(1-12)式代入上式, 有

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \int_{\Delta} \rho \{ & \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x(q^2 + r^2) + y(pq - \frac{dr}{dt}) + z(pr + \frac{dq}{dt}) \right] \mathbf{i} + \\ & \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y(r^2 + p^2) + z(qr - \frac{dp}{dt}) + x(qp + \frac{dr}{dt}) \right] \mathbf{j} + \\ & \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z(p^2 + q^2) + x(rp - \frac{dq}{dt}) + y(rq + \frac{dp}{dt}) \right] \mathbf{k} \} dx dy dz \end{aligned} \quad (1-16)$$

由于 u, v, w, p, q 和 r 不随坐标位置 (x, y, z) 而变化, 上式中的这些量可以移到积分号外, 并考虑到

$$\begin{cases} \int_{\Delta} \rho dx dy dz = m \\ \int_{\Delta} \rho x dx dy dz = mx_G \\ \int_{\Delta} \rho y dx dy dz = my_G \\ \int_{\Delta} \rho z dx dy dz = mz_G \end{cases} \quad (1-17)$$

式中 m 为船舶质量; x_G, y_G, z_G 为船舶重心在船体坐标系中的坐标。(1-16) 式可以写成

$$\mathbf{F} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k} \quad (1-18)$$

式中

$$\begin{cases} X = m \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \frac{dr}{dt}) + z_G(pr + \frac{dq}{dt}) \right] \\ Y = m \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \frac{dp}{dt}) + x_G(qp + \frac{dr}{dt}) \right] \\ Z = m \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \frac{dq}{dt}) + y_G(rq + \frac{dp}{dt}) \right] \end{cases} \quad (1-19)$$

在研究船舶运动时,为了简化运动方程,常常把船体坐标系的原点设在船舶重心处,于是 $x_G = y_G = z_G = 0$, 则(1-19) 式简化成

$$\begin{cases} X = m \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) \\ Y = m \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) \\ Z = m \left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) \end{cases} \quad (1-20)$$

从上式中可以看到, $\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}$ 和 $\frac{dw}{dt}$ 为船舶在船体坐标系里的运动加速度在三个坐标轴上的分量,而 $(qw - rv), (ru - pw)$ 和 $(pv - qu)$ 是由于船体坐标系相对于地面坐标系运动而在船体上引起的向心加速度分量。

作用于微元 S_i 的力 \mathbf{F}_i 对船体坐标系原点 O 的力矩 $d\mathbf{G}_i$ 为

$$d\mathbf{G}_i = \mathbf{R}_i \times d\mathbf{F}_i \quad (1-21)$$

式中 $\mathbf{R}_i = (x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k})$, \mathbf{F}_i 如(1-16) 式所示。作用于船舶的总力矩 \mathbf{G} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \int_{\Delta} d\mathbf{G}_i = \int_{\Delta} \mathbf{R}_i \times d\mathbf{F}_i \\ &= \left[I_x \frac{dp}{dt} + (I_z - I_y)qr - I_{xy} \left(\frac{dr}{dt} + pq \right) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy} \left(pr - \frac{dq}{dt} \right) + \right. \\ &\quad \left. my_G \left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - mz_G \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) \right] \mathbf{i} + \left[I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z)rp - \right. \\ &\quad \left. I_{xy} \left(\frac{dp}{dt} + qr \right) + I_{xz}(p^2 - r^2) + I_{yz} \left(qp - \frac{dr}{dt} \right) + mz_G \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - \right. \\ &\quad \left. mx_G \left(\frac{dw}{dt} + vp - qu \right) \right] \mathbf{j} + \left[I_z \frac{dr}{dt} + (I_y - I_x)pq - I_{yz} \left(\frac{dq}{dt} + rq \right) + \right. \\ &\quad \left. I_{xy}(q^2 - p^2) + I_{xz}(rq - \frac{dp}{dt}) + mx_G \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - my_G \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) \right] \mathbf{k} \\ &= K\mathbf{i} + M\mathbf{j} + N\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中 I_x, I_y 和 I_z 分别是船舶质量对 Ox, Oy 和 Oz 轴的惯性矩; I_{xy}, I_{xz} 和 I_{yz} 分别是船舶质量对 xOy, xOz 和 yOz 平面的惯性积, 它们为

$$\begin{cases} I_x = \int_{\Delta} \rho(y^2 + z^2) dx dy dz \\ I_y = \int_{\Delta} \rho(x^2 + z^2) dx dy dz \\ I_z = \int_{\Delta} \rho(x^2 + y^2) dx dy dz \\ I_{xy} = \int_{\Delta} \rho xy dx dy dz \\ I_{xz} = \int_{\Delta} \rho xz dx dy dz \\ I_{yz} = \int_{\Delta} \rho yz dx dy dz \end{cases} \quad (1-23)$$

而横摇力矩 K , 纵摇力矩 M 和艏摇力矩 N 为

$$\begin{cases} K = I_x \frac{dp}{dt} + (I_z - I_y)qr - I_{xy} \left(\frac{dr}{dt} + pq \right) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy} \left(pr - \frac{dq}{dt} \right) + \\ \quad m \left[y_c \left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z_c \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) \right] \\ M = I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z)rp - I_{xy} \left(\frac{dp}{dt} + qr \right) + I_{xz}(p^2 - r^2) + I_{yz} \left(qp - \frac{dr}{dt} \right) + \\ \quad m \left[z_c \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x_c \left(\frac{dw}{dt} + vp - qu \right) \right] \\ N = I_z \frac{dr}{dt} + (I_y - I_x)pq - I_{yz} \left(\frac{dq}{dt} + rp \right) + I_{xy}(q^2 - p^2) + I_{xz} \left(rq - \frac{dp}{dt} \right) + \\ \quad m \left[x_c \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y_c \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) \right] \end{cases} \quad (1-24)$$

如果把船体坐标系的轴选在船舶的惯性主轴上, 原点 O 选在船舶重心上, 则 I_{xy} , I_{xz} 和 I_{yz} , 以及 x_c , y_c 和 z_c 均为零, 于是(1-24)式简化为

$$\begin{cases} K = I_x \frac{dp}{dt} + (I_z - I_y)qr \\ M = I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z)rp \\ N = I_z \frac{dr}{dt} + (I_y - I_x)pq \end{cases} \quad (1-25)$$

从上式可见, $\frac{dp}{dt}$, $\frac{dq}{dt}$ 和 $\frac{dr}{dt}$ 是船舶在船体坐标系中的角加速度, 而 $(I_z - I_y)qr$, $(I_x - I_z)rp$ 和 $(I_y - I_x)pq$ 是由于船体坐标系的转动而产生的回转力矩。

以上推导的是船舶在船体坐标系中的运动方程, 方程(1-19)描述了在力 \mathbf{F} (即 X , Y 和 Z) 作用下的船舶的直线运动, 而(1-24)式描述了在力矩 \mathbf{G} (即 K , M 和 N) 作用下的旋转运动。方程(1-19)和(1-24)可以写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & z_G & -y_G \\ 0 & m & 0 & -z_G & 0 & x_G \\ 0 & 0 & m & y_G & -x_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -x_G & -x_G \\ 0 & 0 & 0 & -y_G & 0 & -y_G \\ 0 & 0 & 0 & -z_G & -z_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I_{yz} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{xz} & 0 & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xy} & I_{xy} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^2 \\ v^2 \\ w^2 \\ p^2 \\ q^2 \\ r^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} up \\ uq \\ ur \\ vp \\ vq \\ vr \\ wp \\ wq \\ wr \\ pq \\ pr \\ qr \end{pmatrix} \quad (1-26)$$

如果船体坐标系原点 O 选在船舶重心处,而坐标系的轴与船舶的惯性主轴重合,则(1-20)式和(1-25)式可以写成

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & \\ & & m & & & \\ & & & I_x & & \\ 0 & & & & I_y & \\ & & & & & I_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -m & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & -m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z - I_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_x - I_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_y - I_x & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} uq \\ ur \\ vp \\ vr \\ wp \\ wq \\ pq \\ pr \\ qr \end{pmatrix} \quad (1-27)$$

在船舶六自由度运动中,有些运动之间的耦合作用很强,但有些比较弱。在船舶运动控制中,根据六个自由度运动耦合的强弱,可以把六个运动方程分成若干组来研究。例如,可以把在推进力(纵向力 X)作用下的推进(纵荡)运动与控制船舶的航向(艏摇)的舵作用下的艏摇运动结合起来设计自动舵及可调螺距螺旋桨控制系统。垂向力 Y 和纵摇力矩 M 作用下的垂荡和纵摇运动有较强的耦合,在设计水翼艇的可控水翼控制系统和潜艇的水平舵控制系统时,应考虑这两组方程。在设计舵及舵和鳍联合控制系统时,经常把船舶横摇、艏摇和横荡运动综合起来考虑。

1.3 作用于船舶的力和力矩

上节中推导了在外力 F 和外力矩 G 作用下船舶的运动方程(1-26),但是由(1-26)式还不能得到船舶在各个时刻的运动情况。为了求得船舶的运动情况,必须知道作用于船舶的力 F 和力矩 G 。

作用于船舶的外力和外力矩由多种因素决定,一般它们可以分成下面几种分量

$$F = F_s + F_H + F_p + F_c + F_D \quad (1-28)$$

$$G = G_s + G_H + G_p + G_c + G_D \quad (1-29)$$

式中 F_s, G_s 分别表示船舶受到的恢复力和恢复力矩; F_H 和 G_H 表示船舶受到的水动力和水动力矩; F_p 和 G_p 表示船舶受到的螺旋桨推力和推力矩; F_c 和 G_c 表示由船舶控制系统提供的控制力和控制力矩,例如舵产生的力和力矩; F_D 和 G_D 表示由于海洋环境的扰动所产生的力和力矩,例如由海浪、海流等环境扰动作用产生的力和力矩(在第3章中介绍)。由螺旋桨、控制系统的控制翼面对船舶的作用力和作用力矩,当介绍相应的控制系统时加以讨论。本节最后介绍作用于船舶的恢复力和恢复力矩。

1.3.1 作用于船舶的水动力和水动力矩

(1) 影响水动力的因素

作用于船舶的水动力和水动力矩是非常复杂的,它们受到许多因素的影响,一般与以下几个因素有关。

① 船舶的特性。包括船舶的质量、转动惯量、重心和浮心的位置几何特征等。

② 船舶的运动情况。船舶的运动是复杂的,它的运动幅度大小及运动频率,船舶航速的大小等直接影响运动方程中的参数值。当船舶运动幅度较大时,往往会产生非线性现象。一般在船舶运动控制的研究中,只讨论在某一运动平衡状态附近的有小幅度变化时的微幅