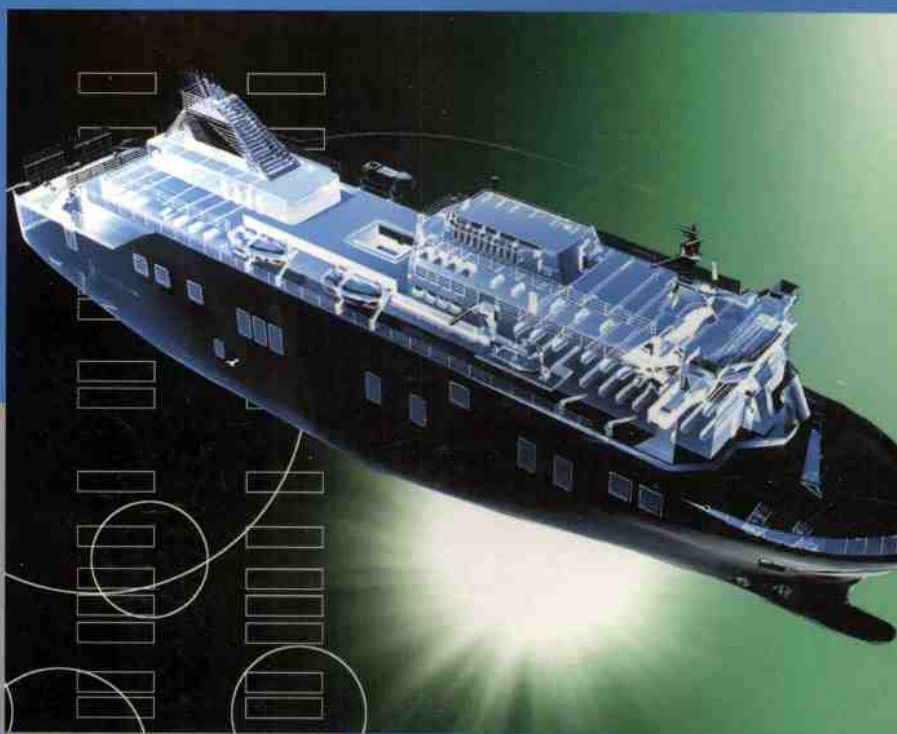


船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



海洋运动体 控制原理

● 王科俊◎主 编 姚绪梁 金鸿章◎副主编



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

船舶与海洋工程系列

CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



海洋运动体 控制原理

● 王科俊◎主 编 姚绪梁 金鸿章◎副主编

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

内 容 简 介

本书以海洋运动体控制的理论研究和工程应用需要为基础,介绍了海洋运动体的动力学模型、海洋运动体受到的海洋扰动及它们的模型、海洋运动体运动控制装置,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,以及智能技术在海洋运动体减摇系统中的应用。本书还介绍了潜艇的空间运动模型、潜器均衡控制及其数学模型、潜艇深度、纵倾及纵倾均衡的自动控制以及深潜救生艇动力定位系统控制模型及控制。

本书在介绍海洋运动体控制的理论时,着重介绍了这些理论的工程应用。

本书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教材,也可供从事船舶、船舶装置及船舶设计和建造的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

海洋运动体控制原理/王科俊主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007

ISBN 978 - 7 - 81073 - 139 - 3

I. 船… II. 王… III. 船舶操纵 - 控制系统 - 理论
IV. U664.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 14931 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 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 16.5
字 数 390 千字
版 次 2007 年 10 月第 2 版
印 次 2007 年 10 月第 2 次印刷
定 价 32.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



前 言

海洋以其极其丰富的资源吸引着人类。特别是可利用能源日趋枯竭的今天,各国都把目光投到海洋这个地球上最后的能源宝库。人类目前已经制造了各种海洋运动体,由于受到风、浪的影响,在海上运行的海洋运动体会产生各种摇荡。为了完成海洋运动体的各种复杂的使命,它们的运动姿态必须得到控制。另外剧烈摇荡对海洋运动体的安全航行,对其上的设备、货物及乘员都产生了不利影响。人们一直进行如何有效地控制海洋运动体运动姿态,减小海洋运动体摇荡的研究,并取得了一定成就。本书中所介绍的海洋运动体运动模型、海洋扰动、控制原理等知识,都是研究和设计海洋运动体的航向和运动姿态控制系统所必需的。本文所介绍的理论和方法已广泛应用到海洋运动体的航向和运动姿态控制系统研究和设计中,并已取得很好的效果。

希望本书除作为船舶院校的自动控制、船电和电气自动化及其他相关专业的高年级学生和研究生的教材外,还能为从事海洋运动体运动控制和海洋运动体控制装置研究、设计和生产的工程技术人员提供帮助。

编 者



目 录

第 1 章 海洋运动体概述	1
1.1 研究海洋运载器的意义	1
1.2 海洋运动体	2
1.3 海洋运动体的运动及其控制	5
第 2 章 海洋运动体的运动力学综述	7
2.1 海洋运动体运动分析中的坐标系	7
2.2 海洋运动体运动方程的建立	9
2.3 作用于海洋运动体的力和力矩	14
2.4 海洋运动体运动方程的线性化	19
2.5 海洋运动体运动方程的无因次化	22
2.6 有时变系数的海洋运动体模型	24
第 3 章 海浪、海风及海流	26
3.1 平面进行波	26
3.2 随机海浪	28
3.3 随机海浪的统计特性和谱分析	32
3.4 海风和海流的谱分析	39
3.5 海流	41
3.6 有海流时的海浪	42
第 4 章 海洋扰动对海洋运动体的作用及分析方法	46
4.1 海洋运动体在波浪中的航行	46
4.2 海浪作用于海洋运动体的扰动力和扰动力矩	49
4.3 海浪的漂移力及对海洋运动体的影响	54
4.4 风和海流对海洋运动体的扰动力和扰动力矩	61
4.5 长峰波随机海浪的仿真	63
4.6 海浪成形滤波器及对海浪的仿真	67
4.7 海浪对船舶的干扰力和干扰力矩的仿真和频谱分析	72
4.8 海洋运动体的随机运动姿态的统计分析	81
第 5 章 海洋运动体运动控制装置	88
5.1 海洋运动体运动控制装置概述	88
5.2 控制翼面的水动力特性	89
5.3 舵的静态水动力特性	98
5.4 鳍和鳍的水动力特性	100

5.5 螺旋桨及其水动力特性	109
5.6 可调螺距螺旋桨及其控制	114
5.7 船体和螺旋桨对舵水动力的影响	120
5.8 推力器及其控制	123
第6章 船舶运动控制模型和控制系统	130
6.1 船舶航向控制原理	130
6.2 船舶自动舵的控制原理	132
6.3 船舶航向控制中的数学模型	139
6.4 船舶航向控制中的环境扰动模型	145
6.5 船舶航向控制中的性能指标	147
6.6 船舶横摇运动数学模型	154
6.7 船舶横摇减摇原理	164
6.8 常用的船舶横摇减摇装置	167
6.9 回归神经网络与船舶横摇运动预报	172
6.10 利用神经网络辨识建立船舶横摇运动模型	182
6.11 智能技术在船舶减摇系统中的应用	188
第7章 水下海洋运动体空间运动及控制	215
7.1 潜艇空间运动模型	215
7.2 潜器均衡控制	221
7.3 潜艇行进间的均衡控制数学模型	226
7.4 潜艇深度、纵倾及纵倾均衡的自动控制	229
7.5 深潜救生艇动力定位系统的控制模型	240
结束语	254
参考文献	255



第 1 章

海洋运动体概述

1.1 研究海洋运载器的意义

海洋一方面关系到国家的安全,保卫海疆不受侵犯是一个国家主权、尊严的重要体现;另一方面,海洋以其具有的巨大资源深深吸引着人类,为了发展海洋高新技术,开发海洋资源,促进国民经济建设、国防建设,必须要发展各类海洋运载器。

当各国领土范围基本确定和陆地资源日趋减少时,强国必然把争取战略资源的竞争焦点集中在极地、空间和海洋。因为海洋占地球表面积 71%,且已探知在海水中和海底下蕴藏着丰富的人类赖以生存的战略资源,所以人们认识到海洋必然会成为人类赖以生存和发展的第二物质空间。人们称 21 世纪为海洋世纪,即表达了各国关注海洋开发的热情,也表现了在 21 世纪要大规模进军海洋的决心。

《联合国海洋法公约》将总面积 3.61 亿平方公里的海洋分为国家管辖海域、公海和国际海底三类区域后,位于国家管辖海域以外的国际海底域面积约为 2.52 亿平方公里、占地球表面积 49%,这一广阔的区域将是各国以实力进行战略资源竞争的集中点。这一区域将存在表面上有序的竞争与合作掩盖着实质性的国际战略资源分配与开发上的权利和利益之争,以美国为首的西方国家已把占有和开发国际海洋资源问题视为国家海洋战略的重要组成部分,积极发展海洋开发技术,以提高和带动海洋整体的国际竞争能力,抢占和开发国际海洋区域及其资源。

我国作为国际海洋开发先驱投资国,按照国际法要求开展国际海域活动,加速进行深海资源的勘察开发技术的研究,既是维护我国国际海域开发权益的需要,也是反对少数大国在合法外衣下实现其国际海底与公海霸权的需要。“以维护权益为中心,以资源开发为目的,以技术发展为保障”是我国的国际海底区域基本战略。首先要在探索、研究、评价国际海底区域资源的基础上占有资源,为 21 世纪经济可持续发展积极拓展新的发展空间。

国际海域的竞争归根到底是高科技的竞争,只有掌握、了解和开发了高技术,才能在人类共同的财富中获取其应得的份额。我国在空间技术、核能利用等高新技术领域已跻身于世界强国之林,那么立足海洋高新技术最前沿、抢占海洋高新技术的制高点,又能形成一个新的与空间开发、核能利用等高新技术相关联的领域,成为我国有国际影响的高新技术支撑点,辐射和带动相关领域的高新技术发展,并在这一过程中形成一支面向国际与未来的海洋高科技队伍,以提高我国在占有和开发海洋资源方面的国际竞争力和参与国际海底事务与合作的应有的大国地位。随着海洋开发上国际斗争的日趋激烈,我国急需加大力度,集中地、有计划地开展这一领域的研究工作,发展各类海洋运载器。

国际海底资源的开发活动,具有空间的广阔性和时间的长期性,研究内容丰富,相关学

科多而密切,这就形成了海洋运载器的多样性、多学科性和复杂性。

海上运输是一种很重要的运输手段,与航空、铁路和公路运输比较,它的运输量大,运输成本低。随着经济建设的发展和繁荣,海上运输也迅速地发展,各种海上运输船也得到了发展。同时,为了满足海上运输的需要,各种特种海洋运载器也得到了应用。

我国是一个海洋大国,有着辽阔的海疆,海岸线长达 8 000 余公里,还有众多的岛屿,其中的一些岛屿受到周边国家的蚕食。为了保卫祖国海疆的安全,维护祖国领土的完整,保护我国海洋资源不受侵犯,我们必须建立强大的国防力量,其中,海军起着尤其重要的作用。海军是一支体现国家工业和科技实力的战斗力量,是一个技术十分复杂的军种,潜艇更是我国海军的主战兵力,它装备有各种水下探测、侦察、通讯、指控设备与各种水下武器装备。长期以来,为了提高海军舰艇的战斗能力,我国科研、工业部门和使用部队对海军舰艇进行了大量的研究及试验工作,使海军的各类舰艇和特种海洋运载器得到了长足的发展。

海洋资源的开发、海上运输和国防建设的需要,推动了海洋运载器研究、设计和生产的发展,推动了造船工业的发展。

在研究海洋运载器时,一个重要的方面是要控制海洋运载器的运动,也就是海洋运动体的控制问题。

本教材就是根据这个需要,介绍海洋运动体的动力学特性以及它们受到的海洋环境扰动,介绍海洋运动体的建模方法及控制原理。教材中充分考虑了国防建设的需要,尽可能充实有国防特色的海洋运载器的控制原理。体现国防特色是本教材的一个特点。

1.2 海洋运动体

在海洋上为了完成各种功能,人们使用着各式各样的运动体。为了完成货物的运输,有着各种货船;为了运送旅客,有着各种客船,或客货兼用的客货船;为了保卫国防,有着各种军用舰艇;对于水下运行的,有各种潜艇和潜器。近年来还出现了水下机器人等多种高性能的海洋运动体。

虽然海洋运动体的形式多种多样,但是它们仍有着一些共同的特性。对于水面海洋运动体,它必须具有保持正浮状态的能力,能以足够的速度航行,能在各种水域行动自如地航行;它还必须有充分的强度能经得起在各种海洋环境中运行的考验,能经受各种风浪的冲击。对于水下工作的海洋运动体,除了像对水面海洋运动体一样的要求外,它还必须有足够的强度能承受水下的压力。

本教材的主要任务是研究这些海洋运动体的动力学特性,研究海洋运动体的运动控制所必需的数学模型,研究海洋环境中海浪、海风和海流等对海洋运动体的作用。

1.2.1 常规排水型水面运动体

常规排水型水面运动体可以分成排水型水面船舶、各种作业运动体及各类排水型水面军用船舶。

(1) 排水型水面船舶

民用排水型水面船舶主要有以运输货物为主要目的的各类货船。例如:散装货船、油轮、集装箱货船、海峡渡轮、滚装船、驳船、供应船等;也有以运送旅客为主要目的的客船、游览船、邮轮及装货和载客兼有的客货船;还有以捕鱼为目的的各类渔船、捕鲸船等。

(2) 排水型作业运动体

排水型作业运动体是以在海上完成某种特定的作业为目的的运动体。例如:电缆敷设船、渔业加工船、拖船、测量船、钻井船、维修船、救捞船、调查船、破冰船等等。在作业运动体中,有的外形与常规船舶差别较大,但水下部分还是和排水型船的水下部分较相似。例如:浮吊、钻井平台等。

(3) 排水型水面军用船舶^[46]

军用船舶的目的主要是为了在海上实施军事目的,完成一定的军事使命。军用船舶的使命有:

- ① 实施海军控制、保持海洋优势;
- ② 实施战略威慑;
- ③ 快速反应,从海到陆进行兵力投送;
- ④ 战略海运;
- ⑤ 完成机动性强的“海上基地”作用;
- ⑥ 参与国际多边军事行动。

为完成以上使命,需要各种各样的军用船舶。目前使用的排水型水面军用船舶主要有航空母舰、巡洋舰、驱逐舰、护卫舰、两栖攻击舰、船塢登陆舰、坦克登陆舰、登陆艇、布雷舰、反水雷舰、猎扫雷舰,还有如运输舰、训练舰、维修舰、战斗补给舰等各种军辅船。

1.2.2 水下运动体^[47]

水下运动体由潜艇和各种水下潜器组成。

(1) 潜艇

潜艇主要是军用的,目前在役的有弹道导弹潜艇、巡航导弹潜艇、攻击型潜艇、辅助潜艇;按动力的形式又可以分为核动力潜艇和常规动力潜艇。

(2) 潜器

水下潜器可从事水下调查,海洋开发,水下作业,海底工程施工、维修和保养以及水下救捞等。水下潜器集现代自动化技术、计算机技术、人工智能技术、新材料技术、能源技术和通信技术为一体,它的自动化程度高,对它的运动控制尤为重要。

水下潜器大致有以下三类。

① 载人潜水器,它又有常压潜水器、闸式潜水器和湿式潜水器之分。排水量一般为几吨到几十吨,载人2~5人,下潜深度几百米,但现在最深的已达6千米。

② 无人潜水器,它可分为有缆式和无缆式两种。目前世界上已有1200多艘遥控无人潜水器,但仅仅少数是无人无缆潜水器。这种潜水器最大特点是无需人员在潜水器里直接操作,而只需在水面母船上通过电缆和电视对潜水器的运动和作业进行遥控操作。目前此类潜器最大潜深已达1万米。

③ 水下机器人

它是无人水下潜器向人工智能化的新发展。水下机器人一般配备有多关节的机械手,能模仿人手和臂的运动,完成各种水下作业的动作。

1.2.3 高性能海洋运载体

高性能海洋运载体如图 1-2-1 所示

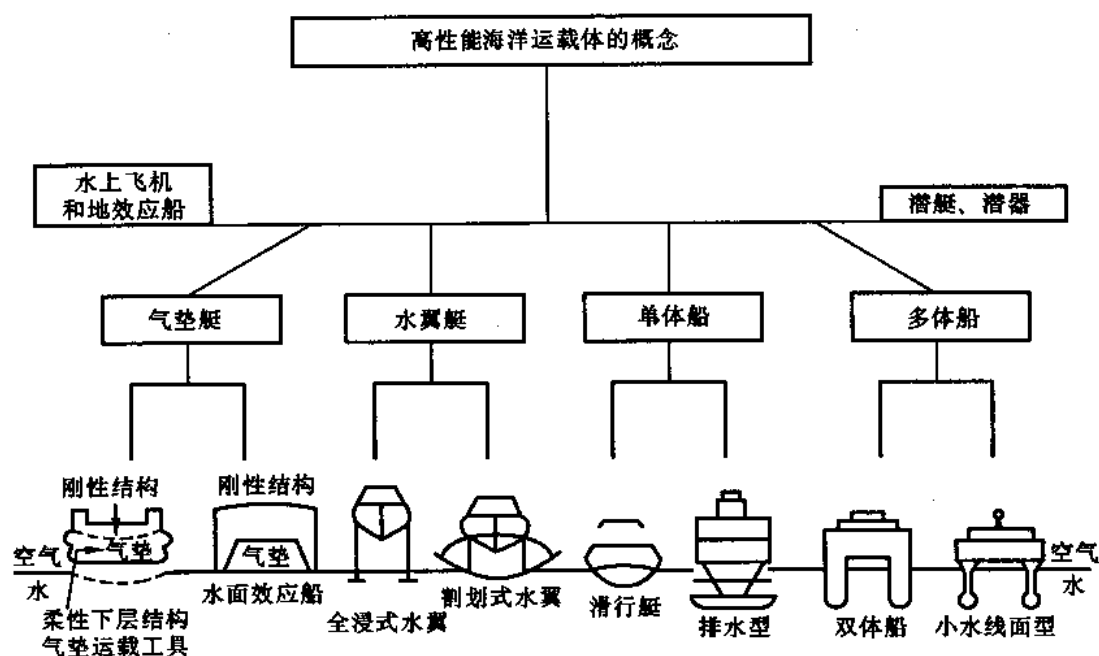


图 1-2-1 高性能海洋运载体的概念

水面高性能海洋运载体主要有五类船，即气垫船、水翼艇、新型单体船、多体船和水上飞机、地效应船。水上飞机、地效应船和气垫船的运动原理和控制方式与其它海洋运动体差别很大，本书不作叙述。单体船可分成两类：排水船和滑行艇。多体船也有两种形式，即常规的双体型船和小水线面双体船(SWATH)。气垫运动工具分成气垫艇和直壁式水面效应船，而水翼艇则有全浸翼式和割划水翼式两种。按海洋运动体在海洋上工作状况的不同，可以分成：浮动式运动体，半潜式运动体，深潜式运动体三类，见图 1-2-2。

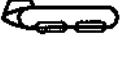
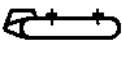
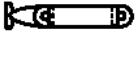
1.0 浮动式		2.0 半潜式		3.0 深潜式		
1.1 船体型	1.2 通海型	2.1 浮动式	2.2 沉底式	3.1 全方位	3.2 有限控制	3.3 底爬式
1.1.1 单体	1.2.1 单体	2.1.1 单体	2.2.1 沉脚式	3.1.1 多向推进器	3.2.1 有限垂直运动	3.3.1 底爬式潜器
水线	水线	(a) 可变吃水	水线		(a) 被动推进和控制	
1.1.2 两体和多体	1.2.2 多体	工作	2.2.2 沉垫式	3.1.2 定向推进器	(b) 主动推进和控制	3.3.2 水下机器人
水线	水线	航行	水线	(a) 控制外表		
水线		(b) 可翻转	工作	(b) 定推力		3.3.3 海洋工作站
		航行	航行			
		工作				
		2.1.2 多体				
		可变几何形状				
		(a) 可变吃水				
		水线				
		(b) 可翻转				
		航行				
		工作				

图 1-2-2 海洋运动体的分类

1.3 海洋运动体的运动及其控制

海洋运动体的种类是很多的,所要完成的工作任务也是多种多样的。大到几十万吨的油轮,小到几吨重的水下潜器。为了完成各种复杂的作业和安全航行,就必须按要求作出运动姿态,所以它们的运动姿态都要受到控制。另一方面,海洋运动体在海上运动时,不可避免地要受到海浪、海风和海流等海洋环境的扰动。为了克服海洋扰动对它们的影响,也必须由控制装置来实现对它的运动姿态的控制。

海洋运动体执行作业时,必须进行种种复杂的机动。由人或控制装置操纵,使其准确而迅速的响应的能力叫做操纵性。航向控制是海洋运动体机动的最重要的手段,也是最基本的控制,航向控制一般由舵来完成,舵的使用已经有二千多年历史。现在绝大部分的海洋运动体利用自动操舵仪自动控制航向。

在水面上运动的运动体,还必须克服海洋环境扰动对运动体产生的不利运动。例如,水面船舶在风浪中会产生很大的横摇运动,为了减小横摇运动,在船舶上装备了减摇鳍或减摇水舱等减摇装置。海洋作业工具为了安全、准确地完成作业,它们的信息必须不变,姿态也应受到控制,这样就需要有动力定位系统。对于水下海洋运动体,它在水下的三维空间中运动,所以除了控制三维空间水平面上的运动姿态外,还要控制垂直面上的运动姿态;在水下,还必须对运动体的质量或体积进行控制,使它受到的重力等于浮力,这也就是水下运动体的均

衡问题。

现代船舶的自动化技术已成为核心内容,也是船舶现代化程度的重要标志之一。它把船舶运动控制和其它控制集成为一个复杂的网络化的控制网,以计算机通讯网络为主线,将各被控制的装置的子自动化装置通过网络实行船舶各系统的全面的计算机网络控制、监测和管理,达到全船设备集中管理、信息共享的目的,提高船舶航行的安全性和运输效率。目前,先进的船舶自动化设备可以进行船舶及其机舱设备的全面控制,逐步从对船舶自动化操纵到对船舶的主机、电站、损管、消防、液位、货物管理等单一自动控制,发展到采用不同层次的计算机网络实行全系统的控制,实现船舶的模块化、系列化、网络化控制,形成“一人驾驶船舶航行综合系统”。

用于水下海洋资源开发的深海运动体,更是需要在深海环境中完成各种作业,对于它们的控制有许多特殊的要求。有些无人潜水器的运动姿态是由母船进行遥控的,在水下,还必须有一套极为复杂的航向控制、纵倾和均衡控制装置。

要很好地控制海洋运动体,我们就必须要研究它们的运动特性、动力学特性,还要研究海洋环境的特性和它们对海洋运动体的扰动作用,以便能抑制海洋扰动对海洋运动体的影响;我们也必须研究用什么样的控制装置来控制海洋运动体的运动,这些控制装置的特性又是什么样的;我们还要研究海洋运动体的控制装置的控制原理,以及常用什么样的控制系统来控制海洋运动体。

虽然海洋运动体是多种多样的,它们的运动也各有特点,但是,它们还是有着许多共同的特性。本书根据海洋运动体的特点,研究它们具有共性的东西,讲述它们共同的控制原理。



第 2 章

海洋运动体的运动力学综述

海洋运动体航行时,由于风浪等环境因素的影响,也由于螺旋桨、舵等海洋运动体自身的各种推动和控制作用,会产生复杂的运动。海洋运动体的外形是很复杂的,它在水中运动时,运动体和流体之间的作用也是很复杂的。为了研究海洋运动体的运动和建立控制系统,必须建立海洋运动体的运动方程。

本章以牛顿动力学定律为基础,分析海洋运动体在坐标系中的运动和动力学特性,讨论作用于海洋运动体的各种力和力矩,并且对海洋运动体的运动方程作线性化和无因次化处理。

2.1 海洋运动体运动分析中的坐标系

为了研究海洋运动体运动及它的受力情况,了解海洋运动体在每个时刻的各种运动参数的方向和大小,需要建立适用于海洋运动体运动控制的坐标系。下面两种坐标系在海洋运动体运动分析中得到了很好的应用。

2.1.1 地面坐标系(静坐标系)

如图 2-1-1(a) 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, $E\xi$ 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。

2.1.2 海洋运动体坐标系(动坐标系)

海洋运动体坐标系(以下简称动坐标系)的原点 O 可以取在海洋运动体上任何一点(见图 2-1-1(b)),纵轴 Ox 平行于海洋运动体横摇轴并指向海洋运动体体首,横轴 Oy 轴平行于纵摇轴并指向右舷,垂直轴 Oz 指向海洋运动体底部。 $O-xyz$ 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 取在海洋运动体质心 G 上,并认为坐标轴 Ox 、 Oy 和 Oz ,分别为海洋运动体的横摇轴、纵摇轴和艏摇轴。 $O-xyz$ 坐标系不是一个惯性坐标系。

海洋运动体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,这也是通常所说的海洋运动体六自由度运动。海洋运动体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 2-1-1(b) 所示,它们的名称和符号见表 2-1-1。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。

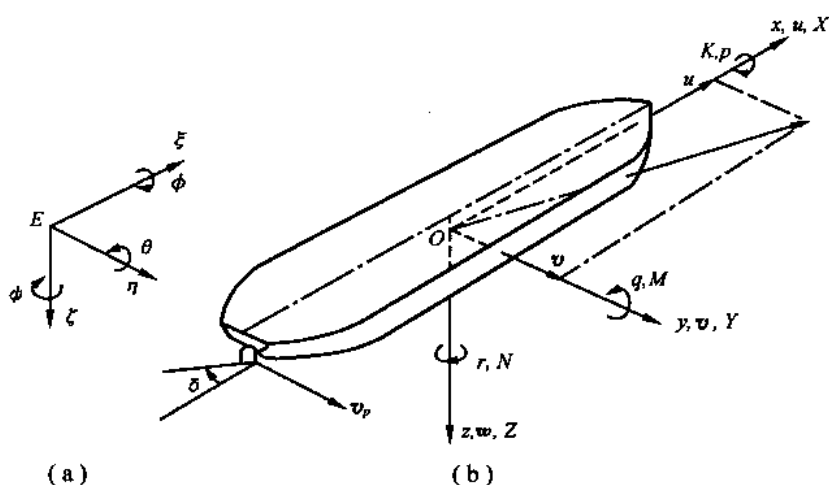


图 2-1-1 地面坐标系和海洋运动体坐标系

表 2-1-1

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 在运动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。

2.1.3 坐标系的变换

海洋运动体在海洋中任何一点的位置与姿态,可以用动坐标系原点 O 在地面坐标系上的坐标值(ξ_0, η_0, ζ_0)以及动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 $xO\xi$ 之间的夹角,也即 xOz 平面的法线 Oy 与 $xO\xi$ 平面的法线之间的夹角(设地面坐标系与动坐标系的原点重合)。

在海洋运动体运动研究中,应用的海洋运动体动力学方程是在动坐标系中建立的。如果需要把海洋运动体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

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2-1-1)$$

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

其反变换为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (2-1-3)$$

式中

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (2-1-4)$$

在海洋运动体运动控制中,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,而海洋运动体上的角速度陀螺测量的是运动体坐标系中的海洋运动体摇摆角速度。两个坐标系中的转动角速度的关系可用下式表示

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2-1-5)$$

其反变换为

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2-1-6)$$

2.2 海洋运动体运动方程的建立

利用动力学的基本原理,可以推导出海洋运动体在动坐标系内的六自由度运动方程。在分析中,把海洋运动体看成一个具有一定质量和质量分布的刚体。

2.2.1 作用于海洋运动体的微元上的速度和加速度

在海洋运动体上任取一微元 S_i , 设它的体积为 S_i , 在动坐标系中的坐标为 (x, y, z) , 设 S_i 相对于地面坐标系的运动速度矢量为 V_i , 则 V_i 可以写成

$$V_i = V_0 + \Omega \times R_i \quad (2-2-1)$$

这里 V_0 为动坐标系原点 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; Ω 为微元 S_i 绕原点 O 的转动角速度。因为海洋运动体可以作为一个刚体, 故在同一时刻, 海洋运动体上各点的运动角速度相同。 R_i 为微元 S_i 到原点 O 的矢径。

设 i, j 和 k , 为运动体坐标系 x 轴、 y 轴和 z 轴上的单位矢量, 则(2-2-1)式可以用下式表示

$$V_i = (ui + vj + wk) + (pi + qj + rk) \times (xi + yj + zk) \quad (2-2-2)$$

展开(2-2-2)式,并考虑到矢量积的法则

$$\begin{cases} i \times i = j \times j = k \times k = 0 \\ i \times j = k, j \times k = i, k \times i = j \\ j \times i = -k, k \times j = -i, i \times k = -j \end{cases} \quad (2-2-3)$$

则有

$$V_i = (u + qz - ry)i + (v + rx - pz)j + (w + py - qx)k \quad (2-2-4)$$

因为 i, j 和 k 是单位矢量,其模等于1,但它们的方向是随着动坐标系变化的。当动坐标系以角速度 Ω 旋转时,由矢量系数法则

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \Omega \times i = (pi + qj + rk) \times i = rj - qk \\ \frac{dj}{dt} = \Omega \times j = (pi + qj + rk) \times j = -ri + pk \\ \frac{dk}{dt} = \Omega \times k = (pi + qj + rk) \times k = qi - pj \end{cases} \quad (2-2-5)$$

把(2-2-4)式对 t 求导,并把(2-2-5)式代入,则微元 S_i 的加速度

$$\begin{aligned} a_i = \frac{dV_i}{dt} = & \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x(q^2 + r^2) + y(pq - \frac{dr}{dt}) + z(pr + \frac{dq}{dt}) \right] i + \\ & \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y(r^2 + p^2) + z(qr - \frac{dp}{dt}) + x(qp + \frac{dr}{dt}) \right] j + \\ & \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z(p^2 + q^2) + x(rp - \frac{dq}{dt}) + y(rq + \frac{dp}{dt}) \right] k \end{aligned} \quad (2-2-6)$$

2.2.2 作用于海洋运动体的力和力矩

设微元 S_i 的质量为 dm_i , 于是有

$$dm_i = \rho S_i = \rho dx dy dz \quad (2-2-7)$$

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

$$dF_i = a_i dm_i \quad (2-2-8)$$

整个海洋运动体所受的力为

$$F = \int_{\Delta} dF_i = \int_{\Delta} \rho a_i dx dy dz \quad (2-2-9)$$

式中 Δ 为海洋运动体的整个体积所及的范围。把(2-2-6)式代入上式,有

$$\begin{aligned} F = \int_{\Delta} \rho \{ & \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x(q^2 + r^2) + y(pq - \frac{dr}{dt}) + z(pr + \frac{dq}{dt}) \right] i + \\ & \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y(r^2 + p^2) + z(qr - \frac{dp}{dt}) + x(qp + \frac{dr}{dt}) \right] j + \\ & \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z(p^2 + q^2) + x(rp - \frac{dq}{dt}) + y(rq + \frac{dp}{dt}) \right] k \} dx dy dz \end{aligned} \quad (2-2-10)$$

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

$$\begin{cases} \int_{\Delta} \rho dx dy dz = m \\ \int_{\Delta} \rho x dx dy dz = mx_c \\ \int_{\Delta} \rho y dx dy dz = my_c \\ \int_{\Delta} \rho z dx dy dz = mz_c \end{cases} \quad (2-2-11)$$

式中 m 为海洋运动体质量; x_c, y_c, z_c 为海洋运动体质心在动坐标系中的坐标。(2-2-10) 式可以写成

$$F = Xi + Yj + Zk \quad (2-2-12)$$

式中

$$\begin{cases} X = m \left[\left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - x_c (q^2 + r^2) + y_c \left(pq - \frac{dr}{dt} \right) + z_c \left(pr + \frac{dq}{dt} \right) \right] \\ Y = m \left[\left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) - y_c (r^2 + p^2) + z_c \left(qr - \frac{dp}{dt} \right) + x_c \left(qp + \frac{dr}{dt} \right) \right] \\ Z = m \left[\left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - z_c (p^2 + q^2) + x_c \left(rp - \frac{dq}{dt} \right) + y_c \left(rq + \frac{dp}{dt} \right) \right] \end{cases} \quad (2-2-13)$$

在研究海洋运动体运动时, 为了简化运动方程, 常常把运动体坐标系的原点设在海洋运动体质心处, 于是 $x_c = y_c = z_c = 0$, 则(2-2-13) 式简化成

$$\begin{cases} X = m \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) \\ Y = m \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right) \\ Z = m \left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) \end{cases} \quad (2-2-14)$$

从上式中可以看到, $\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}$ 和 $\frac{dw}{dt}$ 为海洋运动体在动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 $(pv - qu)$ 是由于动坐标系相对于地面坐标系运动而在海洋运动体上引起的向心加速度分量。

作用于微元 S_i 的力 F_i 对动坐标系原点 O 的力矩 dG_i 为

$$dG_i = R_i \times dF_i \quad (2-2-15)$$

式中 $R_i = (xi + yj + zk)$, F_i 如(2-2-10) 式所示。作用于海洋运动体的总力矩 G 为

$$\begin{aligned} G = \int_{\Delta} dG_i = \int_{\Delta} R_i \times dF_i = \\ [I_x \frac{dp}{dt} + (I_x - I_y)qr - I_x \left(\frac{dr}{dt} + pq \right) + I_x (r^2 - q^2) + I_y \left(pr - \frac{dq}{dt} \right) + \\ my_c \left(\frac{dw}{dt} + pv - qu \right) - mz_c \left(\frac{dv}{dt} + ru - pw \right)]i + [I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z)rp - \\ I_y \left(\frac{dp}{dt} + qr \right) + I_x (p^2 - r^2) + I_x \left(qp - \frac{dr}{dt} \right) + mz_c \left(\frac{du}{dt} + qw - rv \right) - \end{aligned}$$