

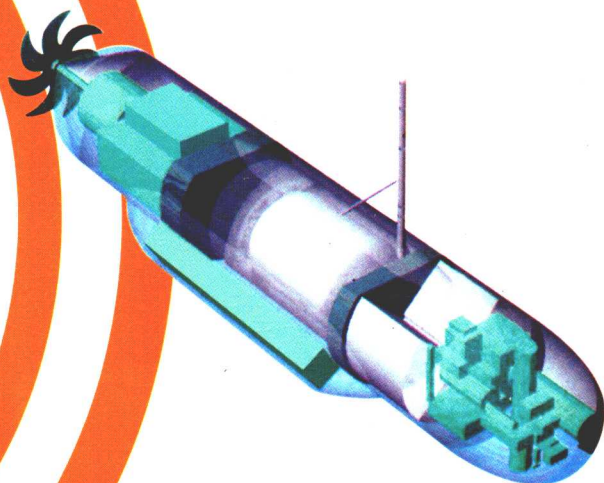
SHUIXIA YUNZAIQI

CAOZONG KONGZHI JI MONI FANGZHEN JISHU

水下运载器

操纵控制及模拟仿真技术

马 骋 连 璁 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

水下运载器操纵控制及 模拟仿真技术

马·骋 连·璉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书通过水下运载器空间运动模型研究、海底三维地形模型研究、水下运载器地形跟踪控制规律研究、操纵运动性能模拟计算和虚拟视景仿真系统开发,系统地介绍了操纵控制及模拟仿真技术。全书共分六章,分别为绪论;水下运载器空间运动方程;水下运载器操纵控制方法;水下运载器空间运动的物理仿真技术;水下运载器空间运动的计算机模拟仿真;水下运载器空间运动模拟仿真实例。

本书可作为相关专业科研工作者、工程技术人员的参考用书,以及大专院校相关专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

水下运载器操纵控制及模拟仿真技术 / 马骋, 连琰编
著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 12
ISBN 978 - 7 - 118 - 06210 - 6

I. 水... II. ①马...②连... III. ①水下运行器—操纵系统: 控制系统②水下运行器—计算机仿真 IV. P754.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 016875 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 13½ 字数 308 千字

2009 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前言

21 世纪是海洋的世纪,水下运载器作为人类走向深海的重要工具,其发展和应用为海洋探索、海洋资源的开发利用和维护海洋权益提供了有效保障,在人类发展进程中将扮演越来越重要的角色。操纵性是船舶的基本航行控制性能,由于水下运载器主要机动方式是垂直面的深度机动和水平面内的航向机动以及它们的联合机动,其操舵控制系统在一般水面船舶对航向的控制基础上,还需对深度进行控制,因此,其操纵性能、操舵系统更加复杂,而且还需考虑近海底和近水面对操纵控制的影响。此外,水下运载器的均衡也是其操纵控制的重要方面。

从设计原理上分析,水下运载器操纵控制系统的发展可分为四个阶段:第一阶段,用经典控制理论设计相互独立的深度自动操舵仪和航向自动操舵仪;第二阶段,利用现代控制理论设计水下运载器自动操舵仪;第三阶段,利用自适应、鲁棒控制、变结构控制及智能控制进行水下运载器自动操舵仪的设计;第四阶段,通过人工神经网络系统(ANS)解决复杂系统的控制问题,并实现智能控制。

本书通过水下运载器空间运动模型研究、海底三维地形模型研究、水下运载器地形跟踪控制规律研究、操纵运动性能模拟计算和虚拟视景仿真系统开发,系统地介绍了操纵控制及模拟仿真技术。可作为相关专业科研工作者、工程技术人员的参考用书,以及大专院校相关专业的教学用书。

本书整体编排如下:

第一章,绪论。简要介绍水下运载器操纵性研究历史和发展现状。

第二章,水下运载器空间运动方程。介绍了水下运载器空间运动方程的一般形式,并从船舶操纵性学科的角度,对运载器所受外力进行全面的分类研究,建立了完整的水下运载器六自由度空间运动方程。

第三章,水下运载器操纵控制方法。着重研究常用的水下运载器运动

控制系统的控制原理以及设计方法。

第四章,水下运载器空间运动的物理仿真技术。介绍了水下运载器实物仿真试验、模型试验(包括直线拖曳试验、旋臂试验、平面运动机构试验和圆周运动试验),以及模拟器仿真试验的基本构成和技术要点。

第五章,水下运载器空间运动的计算机模拟仿真。介绍了基于 MATLAB 和 SIMULINK 图形化的水下空间运动数字仿真技术,以及虚拟现实(VR)技术在水下运载器运动仿真中的应用。

第六章,水下运载器空间运动模拟仿真实例。着重针对某水下运载器的水平面建立运动仿真模型,设计航向 PID 控制器,并利用频域设计的方法实现 PID 参数的整定,从而全景式展现水下运载器空间运动模拟仿真过程。

本书由马聘、连琰编著,参加编写工作的还有李英辉、陈科、钱正芳、邓德衡、杜度、卢军等。

由于时间所限,书中疏漏、错误之处恳请读者批评指正。

作者

2009 年 1 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 水下运载器操纵性研究的历史	1
1.2 水下运载器近水面和近海底航行的研究现状与趋势	2
1.3 水下运载器操纵控制方法的历史与现状	2
1.4 系统仿真技术的研究现状与趋势	5
参考文献	6
第二章 水下运载器空间运动方程	8
2.1 坐标系和空间运动主要参数	8
2.1.1 坐标系	8
2.1.2 空间运动主要参数	9
2.2 定系与动系间的坐标变换	10
2.2.1 坐标轴变换	10
2.2.2 两个坐标系间的坐标变换关系式	11
2.3 动力学方程的坐标变换	12
2.3.1 动量定理	12
2.3.2 动量矩定理	13
2.4 作用于水下运载器的水动力的一般表达式	14
2.4.1 缓慢运动假设	14
2.4.2 水动力分类	14
2.4.3 水动力的一般表达式	14
2.4.4 水动力系数	15
2.5 空间运动受力分析	16
2.5.1 静力	16
2.5.2 惯性水动力	18
2.5.3 黏性水动力	20
2.5.4 黏性水动力中包含惯性水动力的情况	26

2.6	空间运动方程	27
2.7	近水面和近海底的空间运动方程	29
2.7.1	边界条件对水动力系数的影响	29
2.7.2	波浪对运载器空间运动的影响	30
	参考文献	33
第三章	水下运载器操纵控制方法	34
3.1	水下运载器运动控制的原理	34
3.1.1	航向控制的原理	34
3.1.2	深度控制的原理	36
3.1.3	纵倾控制的原理	37
3.2	水下运载器运动控制的数学模型	38
3.2.1	水下运载器水平面运动控制的数学模型及其表示方法	38
3.2.2	水下运载器垂直面运动控制的数学模型及其表示方式	43
3.3	水下运载器运动控制器的设计	45
3.3.1	水下运载器运动控制的性能指标确定	45
3.3.2	水下运载器运动控制器的时域分析法	47
3.3.3	水下运载器运动控制器的频域分析法	50
3.3.4	水下运载器运动控制实例	52
3.4	水下运载器运动控制技术的发展	56
3.4.1	滑模控制在水下运载器运动控制中的应用	56
3.4.2	H^∞ 控制器在运动控制中的应用	61
3.5	智能控制技术在 水下运载器运动控制中的应用前景	81
3.5.1	模糊控制技术的应用	84
3.5.2	神经网络控制技术的应用	92
	参考文献	100
第四章	水下运载器空间运动的物理仿真技术	102
4.1	水下运载器空间运动物理仿真的目的和内容	102
4.1.1	物理仿真的目的	102
4.1.2	物理仿真的内容	102
4.2	实物仿真试验	103
4.2.1	水下运载器实物试验的目的	103
4.2.2	试验条件和要求	104
4.2.3	各类试验方法和内容	104
4.3	模型试验	112
4.3.1	引言	112
4.3.2	相似理论	113
4.3.3	模型设计	114

4.3.4	自由自航模试验	115
4.3.5	模型试验的尺度效应	117
4.3.6	约束模试验	117
4.4	模拟器仿真试验	131
4.4.1	模拟器的发展	131
4.4.2	模拟器的基本构成	132
4.4.3	模拟器的功能和用途	133
4.4.4	技术要点	134
	参考文献	135
第五章	水下运载器空间运动的计算机模拟仿真	136
5.1	计算机仿真基本概念	136
5.1.1	什么是计算机仿真	136
5.1.2	计算机仿真技术的发展概况	136
5.1.3	计算机仿真模型与方法	137
5.1.4	计算机仿真的步骤	139
5.2	基于 MATLAB 的数字仿真	140
5.2.1	MATLAB 概述	140
5.2.2	MATLAB 中的模型与仿真方法	148
5.3	基于 SIMULINK 的图形化数字仿真技术	149
5.3.1	SIMULINK 交互环境的概述	149
5.3.2	SIMULINK 基本操作	150
5.3.3	水下运载器运动仿真器的 SIMULINK 表示	158
5.3.4	水下运载器运动控制器的 SIMULINK 表示	162
5.4	虚拟现实(VR)技术在水下运载器运动仿真中的应用	164
5.4.1	虚拟现实技术概述与发展	164
5.4.2	MultiGen Creator/Vega 虚拟软件平台介绍	166
5.4.3	基于 MultiGen Creator 的三维建模技术	168
5.4.4	MultiGen Vega 视景驱动技术	173
	参考文献	181
第六章	水下运载器空间运动模拟仿真实例	183
6.1	水下运载器水平面运动 MATLAB 仿真实例	183
6.1.1	水下运载器 SIMULINK 运动仿真模型建立	183
6.1.2	水下运载器运动性能分析的 MATLAB 实现	185
6.1.3	水下运载器频域分析的 MATLAB 实现	186
6.1.4	控制器模型设计与优化	187
6.2	水下运载器垂直面运动的 SIMULINK 仿真实例	190
6.2.1	SIMULINK 仿真模型的建立	190

6.2.2	设置 SIMULINK 仿真参数	190
6.2.3	滑模控制器设计	190
6.2.4	SIMULINK 仿真结果的观察与记录	194
6.3	水下运载器虚拟视景仿真系统	197
6.3.1	虚拟视景仿真系统总体设计	197
6.3.2	仿真系统人机交互界面介绍	198
6.3.3	仿真系统使用方法	200
6.3.4	仿真系统实景展示	206
	参考文献	208

第一章 | 绪 论

随着地球上人口的急剧膨胀,陆上资源供应已趋极限,各国都把经济发展的重点转移到海洋,因此,21 世纪是海洋的世纪。海洋的总面积为 $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占地球总面积的 70.8%。在这一广阔的水域空间,蕴藏着丰富的矿物资源、海洋生物资源和其他能源,是人类社会可持续发展的重要财富。我国是一个濒临太平洋的国家,拥有 1.8 万多千米的海岸线,约 $3 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的海洋国土,是一个名副其实的海洋大国。我国的可持续发展将越来越依靠海洋资源和海洋空间的开发和利用,探索海洋、开发海洋和维护我国海洋权益将成为我国社会发展的重要活动之一。水下运载器,主要包括潜艇和各种各样的水下机器人,将成为我们在海洋活动中的重要工具和得力助手。

在各种海洋技术中,水下机器人能在一般潜水技术不可能达到的深度进行综合考察和研究并能完成多种作业,使海洋开发进入了新时代。无论是海洋石油的勘探开采、海底管道的铺设维修、海洋考察以及军事上的需求,都需要水下机器人的参与。而且随着机器人功能的增强,人工智能的进步,它所应用的范围也越来越广,逐渐地形成了一个综合应用各种知识服务于工业生产和人民生活的学科,它在很大程度上反映了一个国家海洋高科技的发展水平,越来越受到人们的重视。

1.1 水下运载器操纵性研究的历史

船舶操纵性是一门比较年轻的学科。直到第二次世界大战后操纵性的研究主要是针对回转性,实际上只是确定高速舰艇的定常回转直径及其舵的设计。在船舶操纵性早期的研究中比较重要的工作有:1912 年,霍夫加特(W. Hovgard)建立了计算定常回转直径的实用方法和图谱;1911 年,布赖恩(G. H. Bryan)首先提议用“缓慢运动导数”来表示流体动力;1932 年,肯普夫(Kempf)提出用 Z 形试验结果来评价船舶操纵性,等等。这些工作的结果有些至今还在应用,但当时未能建立完整的操纵运动方程式,也未能给出一个完整的操纵性概念。

现代船舶操纵性的研究,从对操纵性的认识、水动力的确定和数学模型的建立,大致经历了三个深化发展的阶段。

第一阶段(1946 年—1957 年)是对操纵性的全面认识时期,建立了完整的操纵性概念。

第二阶段(1957 年—1978 年)是操纵性迅速发展时期,形成了预报操纵性的有效方法和手段。有了充分理论依据的数学模型和基于拘束船模试验的比较完整、精确的水动力系数,加上计算机的发展和应用,从而形成了目前广泛使用的预报船舶操纵性的有效模式,即“拘束船模试验+数字模拟计算”方法。

第三阶段(1978 年至今),操纵性研究得到进一步深化、完善、扩展,舰船水动力的理论计算越来越受到人们的重视,多种试验技术相互验证、配套联合预报实船的操纵性和船舶的操纵性设计。

1.2 水下运载器近水面和近海底航行的研究现状与趋势

由于海底的影响使得水下运载器周围的流场有很大的改变,不仅对水下运载器的水动力系数产生较大影响,而且水下运载器还会受到一个垂向力和俯仰力矩的作用,而该垂向力有将水下运载器吸向海底的趋势,严重时会导致其触底沉没。因此对水下运载器近海底航行和近水面航行操纵性开展研究具有重要的现实意义。

在研究海底和水面对水下运载器的水动力影响以及水下运载器相互之间的影响方面,国内外研究人员做了大量的工作。David Clarke 运用保角变换方法对深水操纵性方程的水动力导数进行修正,使其适合任何水深。Shih - An Yang, Pan - An Lu 运用拉格朗日运动方程对池底(海底)效应问题进行了数值模拟,但池底(海底)被视为平面。B. Carstens 和 P. G. Sayer 运动线性势流理论对两垂直圆柱体在线性振动流中的相互水动力影响进行了研究。Wu Jiankang, T. S. Lee, C. Shu 提出了一种波浪方程模型以求解具有移动表面压力的浅水方程,并运用具有移动网络的 Galerkin 有限元法对两艘在浅水中平行运动的船舶所产生的波浪作用进行了数值计算。David Clark 运用 Schwarz - Christoffel 方法发展了一套估算浅水中椭球体附连质量的技术,这种技术与其早先开发的估算半圆形截面附连质量的方法完全不同,可以给出全新的结果,同时还可以考虑曲面或平面边界的存在。D. B. Lopes 和 A. J. N. A. Sarmento 在 Linto 有限水深中原球体所产生的辐射和绕射波的研究基础上,运用多极点方法对有限水深中脉冲振动圆球体所产生的水波辐射问题进行了分析建模。这些方程均为线性方程,易于数值求解,表征圆球体的水动力特性的表达式也比较简单。研究结果给出脉冲振动圆球体的浸没深度和水深的变化对其水动力系数的影响。廖世俊和曾一非分别对两个水下物体及水下多物体的相互作用力进行了分析和求解。

综上所述,无论是水面和海底对水下运载器的影响还是水下运载器之间的相互作用力方面的研究已趋于成熟。但是海底地形变化对水下运载器的影响的相关研究并不多,而海底的这一影响将关系到水下运载器安全稳定地在近海底区域的航行,因此本书对海底地形变化对水下运载器航行的影响进行了较为深入的研究。

1.3 水下运载器操纵控制方法的历史与现状

水下运载器的主要机动方式是垂直面的深度机动和水平面内的航向机动以及它们的联合机动。因此,水下运载器操舵控制系统一般涉及深度和航向的控制。同时,对于定深稳定的水下运载器,要根据航速、纵倾角和舵角的大小,计算出剩余浮力和剩余力矩的大小,以便实现水下运载器的均衡。水下运载器的均衡也是其控制的重要方面。深度自动操舵仪只能在均衡良好的前提下实施深度和航向的控制,才能保持它们足够的精度和动

态指标。现代潜艇的深度自动操舵仪,不仅可以长时间地保持定深航行而且能稳定可靠地自动潜浮,大大地减轻了舵手的劳动强度。所以,通常都是在水下运载器均衡良好的前提下,实施深度和航向控制。从设计原理上分析,水下运载器的操纵控制系统的发展状况可分为四个阶段。

第一阶段,用经典控制理论设计相互独立的深度自动操舵仪和航向自动操舵仪。

水下运载器操纵自动化的广泛研究开始于 20 世纪 50 年代。美国在其实施的“潜艇集中控制”(SUBIC)计划中,一项主要的工作就是研究运动控制系统。1959 年在“乔治·华盛顿”(SSBN598)核潜艇上装备的“潜艇航向和深度自动保持系统”是美国第一代潜艇自动控制系统,它可以同时或分别自动保持潜艇航向和深度,但改变潜艇航向和深度则要人工控制。1961 年,K. J. 科肯伯格等人用经典的 PID 控制理论对 108 级潜艇的自动舵进行了系统研究,具有重要的参考价值。在此基础上,美国后来的 SSN594 艇和“鳄鱼”号(SSN639)等潜艇改进了自动控制系统,提高了大浪中近水面低速航行时的深度保持能力。但 PID 控制系统的参数随环境变量变化的整定优化比较麻烦,不易确定。

第二阶段,利用现代控制理论设计水下运载器自动操舵仪。

以状态空间形式为分析手段的现代控制理论为水下运载器控制的研究提供了新的方法和手段。进入 20 世纪 80 年代后,国外许多学者用现代控制理论研究了潜艇近水面波浪干扰下的定深问题,如 R. J. Richard 等用随机最优控制方法研究了某一潜艇模型在波浪干扰下的定深控制。文中波浪干扰力被近似地表示为波高的线性函数,从而可以将波浪干扰作为一种新的状态变量放进线性化的增广控制方程中。G. F. Gueler 用同样的方法在 1989 年研究了某一实艇在波浪力干扰下的定深控制和斜流干扰下的潜浮运动航迹控制。瑞典的 L. 比斯特龙采用自适应卡尔曼滤波器和线性二次型控制器,研究了潜艇在波浪中通气管状态的自适应控制,研究中假定了二阶波浪力与波型包络线的平方成正比,并指出在通气管状态下有效操纵潜艇的问题实际是滤波器的问题。英国的 T. B. Booth 及剑桥大学工程系有关成员针对潜艇在大浪中作低速潜航时难以保持精确深度这一问题,提出了一种将该问题线性化的方法,并设计了一种以卡尔曼滤波器和最优控制器为基本组件的自动舵。该方法已在哈斯拉尔得以应用,做出了一系列设计方案。

国内有关近水面水下运载器操纵控制的研究也很多。缪国平和刘应中基于严格的量级分析,将细长体的高阶修正与波陡的高阶修正分离开来,建立了水下运载器在波浪中近水面航行时一阶、二阶波浪力的切片理论和二阶势的求解方法,这一理论适用于中等航速情况下除迎浪和随浪外的任意浪向,同时也适用于水面船舶。1997 年,孙伯起等人利用波浪上任意低航速三维物体波浪力的计算方法来计算近水面水下运载器的波浪力,并与 Newman 计算的椭球结果、冯和缪等试验结果进行比较,结果吻合。1998 年,林青山等利用二阶波浪力的切片理论计算水下运载器在近水面航行时受到的二阶定常力和倍频力,对水下运载器设计和航态控制有积极的指导意义。这种二阶非线性波浪力切片理论可有效地估算水下运载器在不同浪向近水面航行时的线性和二阶非线性波浪力,并通过系列计算考察其力学机理,还可推广应用于水面船舶的线性和二阶非线性波浪力估算。1999 年,罗凯、李俊、许汉珍考虑了水下运载器于近水面航行时波浪对深度测量的干扰,在分析水下运载器运动特性的基础上,针对高频操舵问题,提出了一种“开环补偿+闭环增量修正”的定深控制方法。仿真结果表明其控制算法效果良好。参考罗开等系统进行解耦控

制规律的综合,形成联合操舵规律,研究了水下运载器在近水面波浪干扰下的定深控制问题。2000年,王正国、许汉珍针对水下运载器的垂直面运动控制系统在运动中存在严重的耦合问题,忽略运动特性中的非线性因素,运用解耦控制方法进行垂直面的运动控制,将系统分解为两个 SISO 系统进行水下运载器运动特性分析,该控制算法可应用于深水及近水面的水下运载器运动控制,其控制效果良好。

以上的控制设计都是基于被控对象的精确数学模型来进行的,由于水下运载器这一被控对象是具有严重非线性、强耦合的对象,故对其近水面的控制效果尚难令人满意。

第三阶段,利用自适应、鲁棒控制、变结构控制及智能控制进行水下运载器自动操舵仪的设计。

变结构控制起源于 Bang - Bang 控制的研究。进入 20 世纪 80 年代,随着计算机技术的迅猛发展和高速切换电路的产生,变结构控制的应用也得到了进一步的发展,D. R. Yoerger 在 1985 年用变结构方法研究了水下探测船航迹控制的鲁棒性。自 80 年代以来,滑模控制方法在水下机器人(AUV, ROV)的研究中得到了深入研究和发展,这种方法适合于处理水下运载器操纵运动的控制问题。此后,W. B. Mashfield 用 H_∞ 理论研究了潜艇在通气管状态下的鲁棒定深控制;1990 年,Cristi 等人把自适应滑模控制应用到水下机器人(AUV)的垂直面运动控制领域;1993 年,A. J. Healey 也对此做了大量的工作;1995 年,E. L. Castro 等用 O'Reilly 和 W. E. Leithead 提出的独立通道设计方法,将经典的波特图奈奎斯特分析方法应用于潜艇多变量深度控制系统的设计中。

国内对于变结构这一控制方法也进行了大量的研究,取得了许多成果。1994 年,赵国良等用滑模控制方法设计了一种水下运载器空间运动的集中操舵系统,该系统对水下运载器特有的侧洗流干扰有较好的抑制作用,体现了较强的鲁棒性;牟军则将自由递阶的多变量滑模控制方法用于水下运载器的运动控制中,使艏艉操纵面实现了协调动作;1997 年,牟军采用线性模型设计了一种水下运载器航向、横摇控制器,对于非线性特征不明显、工作点变化范围较小的潜艇方程并不适用;1997 年,牟军、许汉珍提出了一种联合控制系统,其中水平面控制系统能对横摇运动施以主动控制,垂直面控制系统采用了自主递阶设计思想从而有效地抑制了运动耦合。系统仿真表明,所设计的控制系统动态品质良好,有较强的鲁棒性。2001 年,金鸿章等人利用水平面非线性方程,设计了变结构的、具有横摇补偿的方向舵控制器。这些方法都解决了以前水下运载器水平面控制系统仅依赖航向角 ψ 和航向角速度 r 两种反馈信号,横摇运动的暂态特性完全是被动的问题。

第四阶段就是人工神经网络系统(ANS),当解决一些传统方法难以解决的复杂系统的控制问题时,就要用到智能控制。

智能控制是在人工智能及自动控制等多学科基础上发展起来的前沿交叉学科,它主要包括五大系统:递阶智能控制系统、专家控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统及学习控制系统。它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,所研究的对象具备以下三大特点:① 不确定性的模型;② 高度的非线性;③ 复杂的任务要求。

目前,智能控制理论的神经网络控制已被用于研究水下运载器的运动控制,Uram. T. Sutot. 在 1992 年用神经网络控制器研究了水下机器人的导引控制。K. P. Venugopal 用一种前馈神经网络研究了水下机器人。对于大攻角机动,多采用智能

控制理论中的“专家系统”来实现。此外,还有学者将变结构控制和模糊控制、神经网络控制等结合起来用于对潜艇操纵的控制,并且取得了较大的进展。

人工神经网络已经证明了是一种成功的水下运载器实时模拟方法,它的优势是:①以试验为基础;②实时控制;③在相反模式里可接近实时控制(不仅可以通过已知的、目前的状态和控制变量,预测水下运载器未来运动的航迹,反过来,也可以确定水下运载器要到达预定位置所需要的控制变量)。

Xiaoshu Xu, Hans Vanderveldt 和 Vince Whited 使用了一种新的神经网络训练算法,克服了传统的 ANS 训练算法的一些不足,即采用最优化熵(平均信息量)。这种算法把误差 δ (平均差)以及“熵”当作纯驱动力,这样一来,比传统方法大大缩短了时间,通过减少一些非关键性的节点提高了效率。

将变结构控制和智能控制结合起来设计水下运载器的操纵控制系统,是目前水下运载器操纵控制研究领域的一个热点,也是今后的研究方向。用它设计出的控制器具有较强的鲁棒性,且抑制干扰能力强,控制性能优越,但它也存在许多的问题,如变结构控制固有的缺点造成的抖振现象等。

1.4 系统仿真技术的研究现状与趋势

系统仿真技术最具有实用的领域之一,当属各类训练仿真器系统。自 20 世纪 40 年代美国林克公司开发出林克飞机驾驶模拟器以来,已历经 60 余年。在此期间,训练仿真器技术获得了空前的发展,并迅速扩展应用于各种行业和部门,如海陆空三军指挥员的各类武器、装备操纵和战术训练系统等,以至著名的英国简氏武器年鉴专门编辑出版了军训仿真器期刊。在工业领域中,核电站、火电站、水电站、变电站、电网调度、石油、化工厂等连续生产部门,相继开发出操作人员训练仿真系统。交通部门则已拥有了飞机、船舶、火车、地铁和汽车驾驶培训仿真器,以及航空港指挥调度仿真系统、城市交通管理仿真中心、集装箱码头的岸吊仿真器等。

现代化潜艇对艇员的实际操作水平提出了很高的要求,而常规的海上训练经费高、周期长、风险大,特别是对于像战术对抗、应急操纵等情况则无法在海上进行实际训练。对此,很多研究单位都对训练模拟器的视景仿真进行了研究。

哈尔滨工程大学设计的潜艇航行训练模拟器视景系统,以 Visual C++ 和 DirectX 为开发平台,混合调用了 Direct 3D 的立即模式和保留模式,既发挥了保留模式开发 3D 程序快速简洁的优点,又充分利用了立即模式直接访问硬件、灵活性高的特点。

在三维场景视景中,由于三维视景仿真对显示卡要求较高,而所采用的便携式加固机的显示卡配置较低,因此在三维图形构造和显示过程中要对三维场景的构造过程进行合理的简化及优化处理。为了创造逼真的潜艇模型和生动的海洋环境,用三维造型工具 3D MAX 创建出潜艇和海底的结构并保存为 .3DS 文件,然后利用 Direct X SCK 工具把 .3DS 文件转变为 Direct 3D 可以识别的 .X 文件。在程序中把 .X 文件调入内存,生成网格式(Mesh)结构,然后用高清晰度纹理贴图覆在模型结构上,加上灯光、雾化效果,使潜艇和海床具有真实感。

为了提高程序的运行速度,减少不必要的系统开销,在海床的贴纹理过程中采用了多

级细化(Mipmap)的纹理过滤技术和多纹理融合技术。多级细化纹理过滤技术的使用既模拟了纹理的透视效果,又减少了处理时的运算量;多纹理融合技术能够在一个通道内使用纹理、阴影、镜面光、慢射光和其他一些特殊效果,提高程序执行时的帧速度。

同时,程序中采用了非线性像素雾化的技术,不仅使海洋环境看起来更加逼真,而且由于雾的遮挡,从能见度为零的位置开始不必再对海床模型进行贴纹理等处理,大大减少了系统的开销。

哈尔滨工程大学仿真中心在充分研究国内外优秀软件的基础上自主开发了通用潜器运动控制系统集成仿真软件 ISSMCS。该软件具有集成化开发环境、合理的数据结构、丰富的库函数、完善的系统管理功能和友好的人机界面。它运用 Windows 窗口技术,把仿真的全过程与计算机图形技术有机地结合起来,实现了多层次建模—仿真—结果分析—图形曲线显示。ISSMCS 可以直接与应用广泛的数据库软件 Foxbase、FoxPro 交互数据,因此,仿真中的数据文件既可以由程序产生,也可以由这些通用数据库软件产生,使 ISSMCS 具有较高的通用性。

海军潜艇学院的李裕农等在潜艇的战法仿真中采取了 OpenGL 三维图形库。场景绘制首先需要设置 OpenGL 的图形环境,定义一个描述像素格式的数据结构,通过 C++ 的 API 函数调用,建立图形环境。然后在程序中规定视窗,调用已建立好的 OpenGL 显示列表,进行目标变换,进行图形显示的自动生成。立体显示时,通过交替产生左右眼不同的视景图像,同时控制红外发射器遮挡相应眼睛的视觉,使观察者产生立体视觉。

虚拟作战视景仿真需要强有力的仿真支撑软件,近年来曾出现多种工具和软件,如 OpenGL、Vetree、3DS MAX 等。而实时三维建模和仿真软件 MultiGen Creator 和 Vega 由于其先进的功能在包括军事各个工程领域的视景仿真开发中得以广泛采用。

其中,MultiGen Creator 是一套高逼真度、最佳优化的实时三维建模工具,拥有强大的多边形建模、矢量建模、大面积地形精确生成功能以及多种专业选项和插件,能高效、优化地生成实时三维(RT3D)数据库,并与后续的实时仿真软件紧密结合,完成视景仿真。它生成的 flt 文件由于高度的逼真感、极小的磁盘空间、最少的多边形等一系列优点而成为三维仿真领域中的标准文件格式。Vega 是开发实时视觉和听觉仿真、虚拟现实应用的业界领先的软件环境,用于虚拟现实和实时仿真软件的开发,它提供了快捷和很容易就可构造出复杂应用程序的手段。

参考文献

- [1] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [2] 陈厚泰. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] Ope D B S I, Sarmento A J N A. Hydrodynamic coefficients of a submerged pulsating sphere in finite depth. Ocean Engineering 29(2002): 1391 - 1398.
- [4] Linto, C. M. Radiation and diffraction of waver waves by a submerged sphere in finite depth. Ocean Engineering, 1996, 61 - 74.
- [5] 廖世俊. 水下物体相互作用力的模拟计算[D]. 上海: 上海交通大学, 1998.
- [6] 曾一非. 水下物体相互作用力的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1993.

- [7] 杨惠民. 国外核潜艇技术综述[J]. 潜艇, 1986, 1(1): 1-27.
- [8] 夏列国. 美国核潜艇液压及液压舵机系统[J]. 潜艇, 1984, 1(1): 14-24.
- [9] Richards R J, Stoten C P. Depth control of a submersible vehicles. I. S. P. 1981, 28(318): 30-39.
- [10] Gueler G F. Modelling design and analysis of an autopilot for submarine vehicles. I. S. P. 1989, 36(405): 51-85.
- [11] 缪国平, 刘应中, 糜振星. 斜浪中二维潜体的二阶定常力[J]. 中国造船, 1994, 125(5): 20-31.
- [12] 缪国平, 刘应中, 糜振星. 二阶波浪力的切片理论与潜体上的垂向定常力[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(8).
- [13] 缪国平, 刘应中, 王海平. 细长体上的二阶波浪力的切片理论[J]. 自然科学进展, 1996, 5(5).
- [14] 林青山, 缪国平, 李谊乐. 潜艇上二阶波浪力的考察[J]. 船舶力学, 1998, 12(12).
- [15] 罗凯, 李俊, 许汉珍. 潜艇近水面运动的定深控制研究[J]. 船舶工程, 1999, 5(5).
- [16] 罗开, 李俊, 许汉珍. 潜艇垂直面运动的非线性滑动控制[J]. 华中理工大学学报, 1999, 5(5).
- [17] 赵国良, 季鲁慧. 潜艇空间运动的滑动控制[J]. 控制理论与应用, 1994, 6(6).
- [18] 牟军, 许汉珍. 潜艇操纵运动的变结构控制[J]. 华中理工大学学报, 1997, 6(6).
- [19] 牟军. 潜艇操纵运动的变结构控制系统研究[D]. 湖北: 华中理工大学, 1997.
- [20] 牟军, 许汉珍. 潜艇操纵运动的变结构控制[J]. 华中理工大学学报, 1997, 6(6).
- [21] 金鸿章, 王科俊, 梁超. 具有横摇补偿控制的潜艇航向变结构控制[J]. 中国造船, 2001, 6(6).
- [22] 赵国良, 季鲁慧. 潜艇空间运动的滑模控制[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(3): 351-355.
- [23] 赵琳, 刘鹰. 潜艇航行训练模拟器视景系统的设计与实现[D], 黑龙江: 哈尔滨工程大学仿真中心, 1996.
- [24] 张仁忠, 高万里, 马洁. 潜艇六自由度空间机动实时仿真演示系统[D], 黑龙江: 哈尔滨工程大学自动化学院, 1999.
- [25] MultiGen - Paradigm Inc. MultiGen Creator User's Guide [Z]. U S A, 2001.

第二章 | 水下运载器空间运动方程

水下运载器在水中的运动可视为刚体对各种外力主要是水动力的响应。为了研究水下运载器的运动特点,确定其水下运动状态包括位置和姿态等,进而对水下运载器进行操纵控制,首先必须建立其操纵运动数学模型即空间运动方程。本章在空间运动坐标系统的基础上,以刚体力学为研究基础,介绍了水下运载器空间运动方程的一般形式,并从船舶操纵性学科的角度,对运载器所受到外力进行全面的分类研究,从而建立了完整的水下运载器六自由度空间运动方程。

2.1 坐标系和空间运动主要参数

2.1.1 坐标系

研究水下运载器的任意空间六自由度运动时,通常采用两种正交坐标系:一个是空间固定坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ (简称“定系”),其固定于地球,也称为惯性坐标系;另一个是船体运动坐标系 $Oxyz$ (简称“动系”),其固定于运载器,也称为附体坐标系,因其本身随运载器一起运动,故为非惯性坐标系。两种坐标系的定义如图 2-1 所示,各坐标轴均按右手系确定。

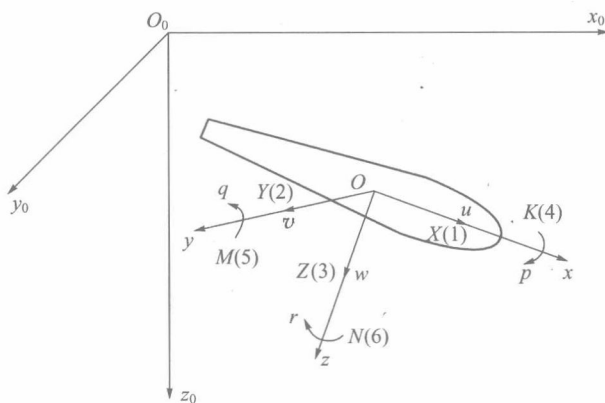


图 2-1 坐标系定义

定系原点 O_0 可以取为空间任意一定点, O_0x_0 轴和 O_0y_0 轴均平行于水平面, O_0z_0 轴指向地心,各坐标轴的单位矢量分别记为 i_0, j_0, k_0 。动系原点 O 通常取在船体的舢船剖面内(一般位于重心处), xOy 平面为水线面, yOz 平面为横剖面, xOz 平面为舢船剖面, Ox 轴指向船艏, Oy 轴指向右舷、 Oz 轴指向船底,各坐标轴的单位矢量分别记为 i, j, k 。