

Underwater Bionic Robot

水下仿生机器人

娄保东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水下仿生机器人

娄保东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以实验室研制的仿生机器人样机为依托,对仿生机器人的姿态控制和返航系统进行了研究,主要内容包括:从仿生学的角度对仿生机器人进行分析,建立运动姿态的数学模型;水下仿生机器人机械结构分析与设计;水下机器人的硬件控制系统设计,包括主控制模块与子模块设计;基于硬件控制平台的程序设计,以流程图的形式对加入控制算法的控制系统的设计进行分模块介绍;介绍水下机器人上搭载的传感器;对水下机器人三种运动姿态的控制以及返航系统进行实验验证,通过实验数据对比验证控制算法与返航系统理论上的可行性。

本书既有理论研究,又有工程实践,图文并茂,体例完整,具有较强的系统性、实用性和可操作性,既可以作为高校工科相关的自动化控制、机械工程、计算机软件设计、嵌入式系统等专业研究生学习、科研的参考教材,也可供工程建设领域项目开发人员进行参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水下仿生机器人 / 姜保东著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5170-6783-2

I. ①水… II. ①姜… III. ①水下作业机器人—仿生机器人—研究 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第202101号

书 名	水下仿生机器人 SHUIXIA FANGSHENG JIQIREN
作 者	姜保东 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 6.5印张 154千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水下仿生机器人是一个水下高技术仪器设备的集成体，在军事和民用领域都有很大的应用前景。目前，水下仿生机器人在速度、灵活性以及能源利用率方面与水下生物还存在较大差距，为了提高水下仿生机器人的水下运动能力和续航时间，本书以实验室研制的仿生机器鱼样机为依托，对仿生机器鱼的姿态控制和返航系统进行了研究。

本书先对水下机器人进行了概述。水下机器人，也称作无人水下潜水器或水下航行器，分为载人潜水器和无人潜水器两种，其中无人潜水器又分为有缆水下机器人和无缆水下机器人，本书介绍的水下仿生机器人属于无缆水下机器人。

接着，本书从仿生学角度介绍了水下仿生机器鱼，它通过模仿鱼类摆动来实现推进。然后根据 Lighthill 等人提出的细长体理论对仿生机器鱼的物理模型进行坐标建立，在该物理模型中将鱼体简化成无限柔软的二维样条曲线，该曲线与鱼体的对称中心线重合。尾鳍简化成刚性的波板，其绕自身的转轴做旋转运动，并随鱼体做平动运动。头部简化成刚性的直线，其与鱼体的样条曲线连接，连接点为鱼体运动的波动起点。为了减小仿生机器鱼头部的晃动，推导出尾部的运动模型，尾部运动方程等于身体波方程减去头部晃动方程。通过这一模型的优化，使仿生机器鱼关节摆动的范围增大，关节摆动范围越大，仿生机器鱼所获得的推力越大，游动速度相应地也加快。

从仿生学角度来说，仿生机器鱼的外形和游动姿态越接近真实的鱼类，设计出的机器鱼将越能够模拟鱼的游动曲线。所以本书又对仿生机器鱼的机械结构进行分析，本书所用的仿生机器鱼样机采用三关节结构，并对运动机构进行模块化设计。3个运动关节采用主从结构设计，能够更好地模拟鱼类运动曲线。调节上浮下潜的装置采用重心调节，并建立了上浮下潜运动模型对重力块位置进行分析。关于尾鳍的研究是对比了几种尾鳍形状，根据相关公式给出了适合本书中所用机器鱼样机的尾鳍参数。

介绍完仿生机器鱼的硬件结构后，接着介绍了仿生机器鱼的控制系统。本书中的仿生机器鱼样机采用嵌入式控制系统，并且嵌入式系统采用模块化编程思想。经过嵌入式平台的对比，选择了 BeagleBone Black 作为主控制板控制各个子模块。同时也介绍了各个子模块的工作原理。

有了嵌入式系统的控制平台后，仿生机器鱼还需要相关的运动控制算法。本书针对仿生机器鱼直游、C形转弯和上浮下潜3种姿态进行了详细分析，同时还对仿生机器鱼的返航系统进行了初步探索。在直游运动学建模中，考虑了仿生机器鱼头部晃动和转动中心偏移量这两个因素，对已有的运动学模型进行了修正，并利用最小误差法进行曲线拟合，减小了仿生机器鱼头部晃动的角度，提高了游动速度。在C形转弯运动学建模中，在传统C形控制算法上进行改进的一种具有角速度反馈的模糊控制算法，优化了仿生机器鱼的C形转弯姿态。本书选用重心偏移法设计仿生机器鱼上浮下潜结构，并根据所设计的结构建立上浮下潜运动学模型，采用PID控制算法对仿生机器鱼的深度进行控制。仿生机器鱼的返航系统是利用GPS实现初步定位，再利用红外实现精确定位。

有了以上的控制算法，那么选择合适的编程语言以及编程思想去实现以上控制算法就很重要。本书的机器鱼样机的主控制模块采用Python语言编写，子模块采用C语言编写。关于机器鱼上的每个模块本章将对程序流程图进行相应的介绍。

本书中的仿生机器鱼样机不仅能够完成在水下游动，还需要采集水下相关的数据。所以在仿生机器鱼样机上搭载了红外传感器、温度传感器和深度传感器。红外传感器可以获知障碍物的位置，温度传感器可以获取水的温度，深度传感器可以获取机器鱼当前所处的深度。通过这些传感器数据的采集与运用，仿生机器鱼周围的环境可以初步展现出来。

最后的章节是搭建实验环境、搭建硬件和软件平台后，对前几章所提出的各种控制算法进行实验验证，主要进行4个实验验证，包括直游姿态实验对比、C形转弯实验对比、上浮下潜运动实验对比和水下自主返航充电实验对比，通过实验数据验证理论的可行性。

娄保东

2018年1月

目 录

前言

概要	1
第 1 章 水下机器人概述	2
1.1 应用背景和意义	2
1.2 研究现状	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	6
第 2 章 水下仿生机器人建模分析	8
2.1 仿生学理论	8
2.1.1 仿生学研究进展	8
2.1.2 水下仿生学概述	9
2.1.3 鱼类的生理机构及运动模式	12
2.2 水下仿生机器人的仿生学理论	13
2.2.1 水下仿生机器人的物理模型简化	14
2.2.2 水下仿生机器人的物理模型坐标建立	15
2.3 仿生机器鱼的运动模型	15
2.3.1 仿生机器鱼的原始运动模型	16
2.3.2 仿生机器鱼运动模型的修正	16
第 3 章 典型的水下仿生机器人机械结构分析与设计	20
3.1 水下仿生机器人的整体结构设计	20
3.2 水下仿生机器人的运动结构设计	21
3.2.1 主驱动关节设计	22
3.2.2 驱动杆受力分析	23
3.2.3 从动关节设计	25
3.3 重心调节装置的结构设计	28
3.4 尾鳍的设计	31
第 4 章 水下机器人的硬件控制系统	33
4.1 水下机器人的嵌入式系统总框架	33
4.2 嵌入式系统中的主控制模块	34
4.2.1 嵌入式平台的选择	35
4.2.2 基于 BeagleBone Black 的嵌入式平台设计	36

4.3	嵌入式系统中的子模块	38
4.3.1	红外检测模块	38
4.3.2	运动模块	39
4.3.3	充电模块	40
4.3.4	通信模块	44
第5章	水下机器人的运动控制算法	46
5.1	直游姿态的控制学研究及优化	46
5.1.1	仿生机器鱼的运动曲线拟合	46
5.1.2	误差分析	49
5.2	快速转弯的运动姿态控制研究与改进	51
5.2.1	C形转弯模式	51
5.2.2	基于模糊控制算法下的C形转弯	52
5.3	上浮下潜控制研究与改进	56
5.3.1	上浮下潜的模型建立	57
5.3.2	基于PID控制器的上浮下潜运动	58
5.4	水下机器人的返航系统设计	59
5.4.1	返航系统的定位原理	59
5.4.2	返航系统模块设计	62
第6章	基于硬件控制平台的程序设计	64
6.1	常用编程语言	64
6.2	水下机器人的编程思想	65
6.2.1	主控制模块	66
6.2.2	运动模块	66
6.2.3	传感器模块	68
6.2.4	重心调节模块	69
6.2.5	总线式模块通信	69
第7章	水下机器人的感觉系统——协作传感器	72
7.1	常用的水下传感器	72
7.1.1	水下传感器的种类	72
7.1.2	水下传感器的检测原理	74
7.2	水下机器人上应用的传感器	77
第8章	联调测试与实况试验	80
8.1	模块调试	80
8.2	实验平台搭建	80
8.2.1	硬件平台搭建	81
8.2.2	软件设计与实现	82
8.3	姿态控制实验及分析	84

8.3.1 直游姿态实验及分析	84
8.3.2 C形转弯实验及分析	86
8.3.3 上浮下潜运动实验及分析	87
8.4 返航系统实验及分析	88
参考文献	91

概 要

随着经济社会的发展，人类活动对资源的需求不断增加。从人类活动开始到现在，其资源开发主要集中在陆地范围。而海洋面积接近陆地面积的 2.5 倍，广袤的海洋中储存着丰富的矿产资源、空间资源和物质资源等，可以看出海洋资源的丰富性及开发的必要性。伴随着陆地资源不断减少，人类所需资源的扩增，科技的不断进步，陆地上水资源严重缺乏，先污染后治理的工业发展模式也带来了更多的浪费和污染，使得脆弱的水生态环境面临更严峻的考验，所以要有效地管理水资源，可以对水质进行分析，检测水质环境，了解水质整体状况以及变化趋势。同时海洋资源的应用前景和巨大的潜在价值，也吸引人们更多的注意力。

在科技飞速发展的 21 世纪，为了开发和利用海洋资源，水下探测仪器不断迭代更新，水下机器人也应运而生。具有海底勘察、海底打捞、海洋搜救以及水下侦查和水下跟踪功能的水下机器人，是目前海洋搜查、海洋开发和海洋防卫的重要工具。水下机器人可以在危险恶劣的水下环境中完成人类无法进行的工作，进行极限作业。但随着海洋研究和开发的不断深入，水下机器人面临更高智能水平的要求。在水下生态系统中，许多水下生物经过亿万年的进化，在水中高效灵活的游动能力，被研究人员学习利用，开阔了仿生学的思路，将仿生学运用到水下机器人中。

鱼类作为海洋生态系统中的主要物种，具有游动效率高、灵活性好、噪声小等非凡的水下运动能力，这是长期进化和自然选择的结果。鱼类进化出了能实现良好运动性能的柔性身体和运动脊骨，以及辅助运动的尾鳍、胸鳍、背鳍，已经成为水下生物中运动能力最佳的物种之一。因此，在水下机器人上结合鱼类的水下运动能力引起了研究者的注意，推动了水下机器人的进一步发展。仿生机器鱼作为水下机器人中灵活性高、机动性强的一类，完全避免了大部分水下机器人由于体积庞大，不便于在水下狭小区域工作的缺陷。

关于水下仿生机器鱼的研究学科，主要包括仿生学、流体力学、机械学、电子信息学、材料学等，作为一个综合系统，各种学科相互交叉融合，共同推进了仿生机器鱼理论的探索及其样机的研制。其中，仿生学的研究是指导这些学科的宗旨，其他所有的学科为其服务，以研制出性能更好的机器鱼，从而推进水下机器人的研究，更加推进海洋资源的开发。近年来，国内外针对仿生机器鱼的研究也层出不穷，各种不同的仿生机器鱼样机相继被开发出来。而要将鱼类游动的高效性运用到仿生机器鱼上，对其建模分析、硬件结构设计以及姿态控制算法等进行研究是必然的要求。

第1章 水下机器人概述

1.1 应用背景和意义

海洋面积广阔，蕴藏着丰富的资源，如石油、天然气以及各种各样的矿产等，因此21世纪又被称为海洋的世纪^[1]。现如今随着人口的急剧增加，陆地上的资源消耗速度急剧增加，导致能源供给十分紧张，但由于目前科学技术的发展还没有达到利用太空资源的水平，因此人类加大了对海洋资源的探索力度。地球的表面积为5.1亿 km^2 ，其中海洋面积占70%，其总面积约为3.6亿 km^2 ^[2-3]，总体积约有14亿 km^3 。海洋中蕴藏着丰富的资源，其中海底石油约有3000亿t，占全球石油资源总量的34%，天然气资源约有140亿 m^3 ，海洋中的锰存储量约为陆地存储量的68倍，铜的存储量约为陆地存储量的22倍，锂的存储量约为陆地存储量的274倍，对比陆地资源，可以看出海洋中富含丰富的资源。同时，中国的海岸线长达18000多千米，管辖海域约300万 km^2 ，相当于我国陆地面积的1/3，还分布着面积大于500 m^2 的岛屿5000多个，属于海洋大国。由上述信息可以看出中国海域蕴藏着丰富的资源，因此制定正确的海洋发展战略，积极开发利用海洋资源，对我国经济的可持续发展具有重要意义。

目前，海洋资源已经被一些发达国家所开采，海洋资源已经成为了各个国家争夺的重点，海洋已经成为国际战略的重点，所以水下探测技术以及海洋的开发手段已经成为研究人员继续研究的课题。与一些发达国家相比，中国虽然是一个海洋大国，但人们对于海洋资源的探索还处于萌芽阶段。近年来，随着海洋研究和开发的不断深入，人们更加重视对水下探测工具的研究，为了更好地探索海洋、开发海洋和维护我国的海洋资源权益，研制出智能、多用途的水下机器人是大势所趋。

水下机器人作为人类探测和开发海洋的工具，是一种无人水下潜水器^[4]，具有感知系统，通过遥控或者自主的操作方式，使用机械手或者其他工具去完成水下作业的装置。水下机器人的应用对于人们充分利用海洋资源，发展国民经济有着重大意义。目前水下机器人的应用范围有海洋环境检测、海底资源调查、海洋开发、水下数据采集等。水下生物在水下运动时具有高效性、高机动性能，随着仿生学、机器人学、流体力学、电磁学、自动控制理论等学科的不断进步，新型高速、机动灵活的水下仿生机器人，成为科学家的研究重点。水下仿生机器人是人工智能、自动控制、模式识别等技术的集成体，它的系统具有非线性、时变性、不确定性等特点，同时水下的环境也具有不可预测性和复杂多变性，因此，充分了解水下仿生机器人的外部结构和内部控制算法是保证水下仿生机器人准确、安全、稳定工作的前提要求，这也正是水下仿生机器人研究的目的。

1.2 研究现状

水下机器人，也称为无人水下潜水器（Underwater Vehicle）或水下航行器，更确切地说，水下机器人是一种水下推进装置，能够在水下危险的环境、人类难以存活的环境中协助或者替换人类完成特殊作业任务，其外形可以像潜水艇，也可以像水下鱼类，根据水下环境的不同，可以采用仿生学设计外形。

水下机器人种类很多，如图 1.1 所示，按照是否载人可以分为载人潜水器（Human Occupied Vehicle, HOV）和无人潜水器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV）^[5]。按照与平台或者水面母船的连接方式又可以将无人水下潜水器分为有缆水下机器人（Remotely Operated Vehicle, ROV）和无缆水下机器人（Unmanned Untethered Submersible, UUS）^[6]。其中，ROV 是通过电缆与水面的母船连接起来的，其动力是从水面上母船获得的，需要人的参与。有缆水下机器人的优点是能够在复杂的海洋中长时间工作，但它存在局限性，电缆限制了有缆水下机器人的运动范围和一定的灵活性。UUS 又可分为水下自主航行器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）和水下滑行器（Autonomous Underwater Glider, AUG）^[7]。UUS 因为不需要水面母船的支持，不受电缆线的约束，不会受电缆线缠绕拉断问题影响，活动范围变大，使用起来更加方便，在复杂的海洋环境中能够独立地完成水下作业，具有较强的适应性。其中，AUV 因其体积小、重量轻、噪声低、隐蔽性好、更加智能化的优点，得到了广泛应用^[8-9]。

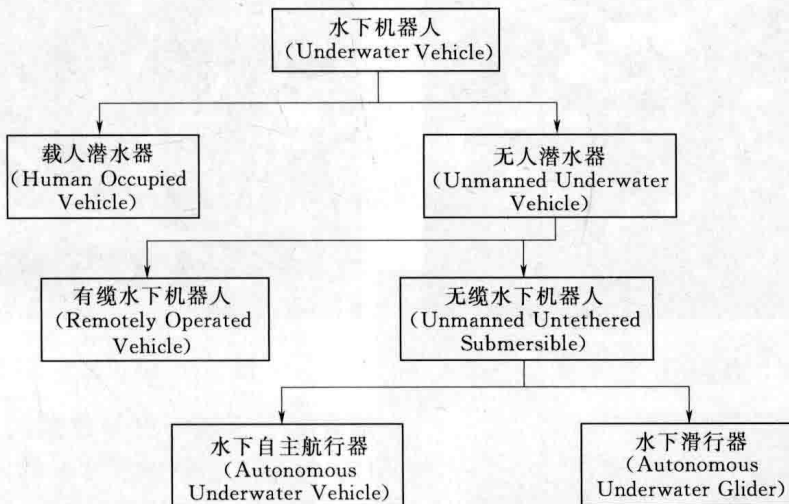


图 1.1 水下机器人分类

1.2.1 国外研究现状

目前，西方发达国家在水下机器人领域经过长时间的研究，取得了很多研究成果，拥有了很多先进技术^[10]。与其他水下机器人相比，载人潜水器出现得最早，这是在设计潜水球和潜艇微型化的基础上研制出来的，主要是替代潜水员在深海中进行潜水作业。1890 年，西蒙·莱克制造了世界上第一台载人潜水器——Argonaut the First，如图 1.2 所示。图 1.3 为法国 Nautile 载人潜水器。从 20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期是载人潜水器发展的鼎盛

时期，其技术发展得较为成熟，然后逐渐进入低谷^[11]。随着计算机技术的发展，美国、俄罗斯、日本等国先后研制出无人潜水器。1960 年，美国研制成功了世界上第一台 ROV，命名为 ROV-CURV1，如图 1.4 所示，它与载人潜水器配合，在西班牙外海找到了一颗失落在海底的氢弹，由此引起了极大的轰动，ROV 技术开始引起人们的重视。另外，当时发生的石油短缺使得油价提高，刺激着近海石油开发业的发展，同时也促进了 ROV 的迅猛发展。到了 70 年代，ROV 产业已开始形成，ROV 在海洋研究、近海油气开发、矿物资源调查取样、打捞和军事等方面都获得了广泛的应用^[12]，是目前使用最广泛、最经济实用的一类潜水器。ROV 的最大下潜深度可达 1 万 m。图 1.5 和图 1.6 为美国 CURV2 和 CURV3 型 ROV，这是在 ROV-CURV1 的基础上不断改进而产生的功能更完善的 ROV。

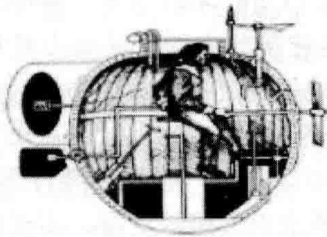


图 1.2 第一台载人潜水器——Argonaut the First

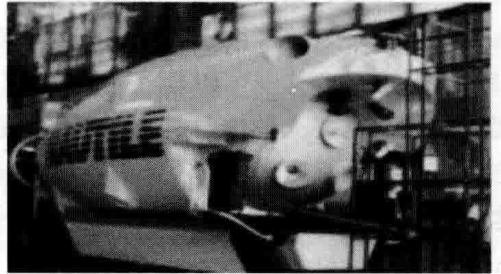


图 1.3 法国 Nautilite 载人潜水器

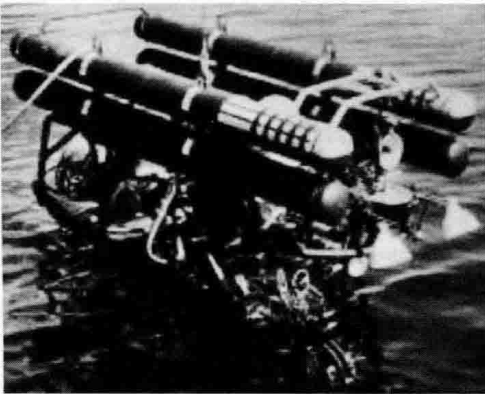


图 1.4 第一台 ROV——ROV-CURV1

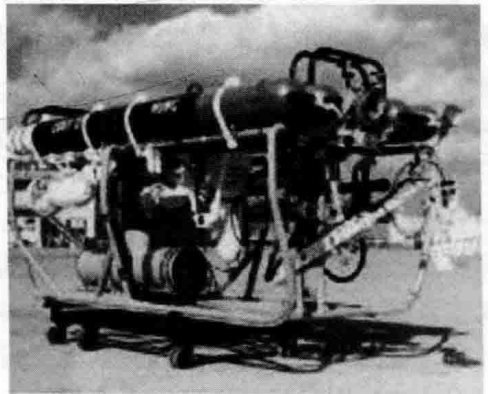


图 1.5 ROV-CURV2

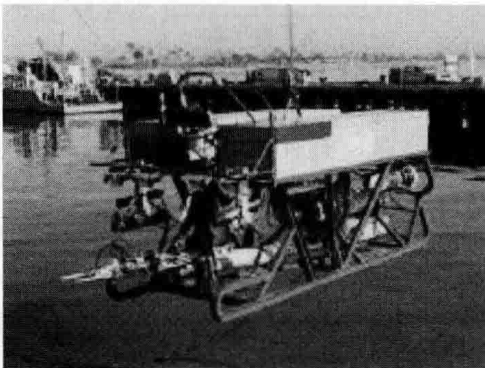


图 1.6 ROV-CURV3

随着电子、计算机等技术的飞速发展，鉴于 AUV 在海洋工程和军事上的巨大发展潜力，很多发达国家如美国、英国、加拿大、日本都成立了专门的机构研究与开发水下机器人。其中比较有名的研究所有美国麻省理工学院的 Sea Grant's AUV 实验室、美国佛罗里达大西洋大学的高级海洋系统实验室 (Advanced Marine Systems Laboratory)、英国的海事技术中心 (Marine Technology Center) 等。

第一艘 AUV 由美国华盛顿大学在 20 世纪 50

年代研制出来,命名为 SPURV,这艘 AUV 主要用于水文调查。美国研制的比较有代表性的 AUV 是由美国海军研究生院自行设计制造,分别为凤凰号 (Phoenix) AUV 和白羊座号 (ARIES) AUV。图 1.7 是凤凰号 AUV,图 1.8 是白羊座号 AUV。这两种 AUV 主要用于人工智能、控制技术以及军事等领域的研究中,具体可以实现的项目有导航、避障、数据分析、动力运动控制等^[13-14]。

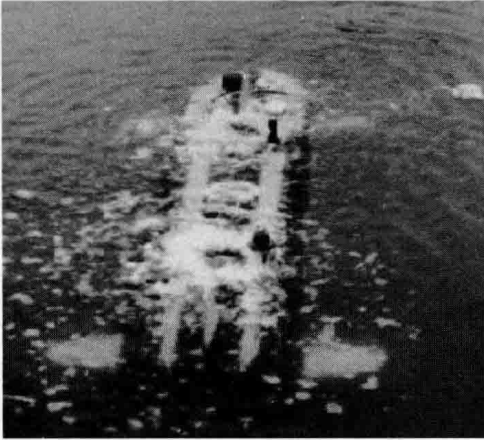


图 1.7 凤凰号 AUV

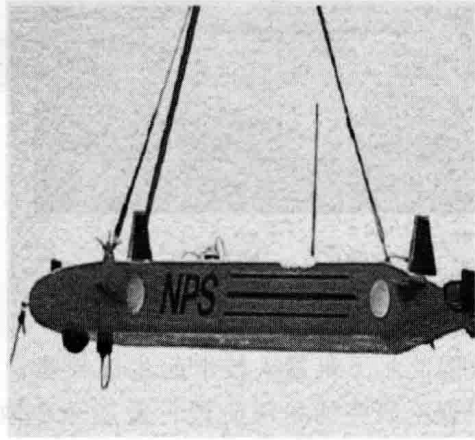


图 1.8 白羊座号 AUV

英国在 1995 年研发的 AUTOSUB-1 AUV,主要用于海洋环境科学的研究,如图 1.9 所示。该 AUV 长 6.8m,重 1.7t,最大下潜深度为 500m,续航时间为 50h,截至 1999 年,已经完成了英国沿海的 179 项科学项目^[15]。

加拿大在水下机器人方面的研究也取得了突破性进展,为了在北冰洋海域铺设海底光缆,研制出了一种水中机器人,命名为 Theseus AUV,如图 1.10 所示。该机器人配备了一块 70kW·h 的铝氧燃料电池,续航能力达到 36h。后来该机器人的能源装置不断升级,到 1997 年完成第二代电池试验,续航能力较第一代显著提高^[16]。

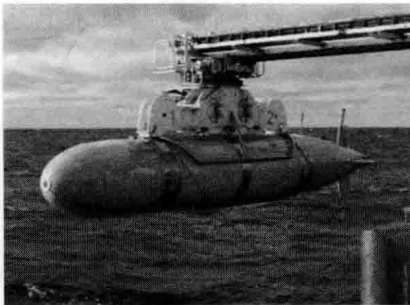


图 1.9 AUTOSUB-1 AUV

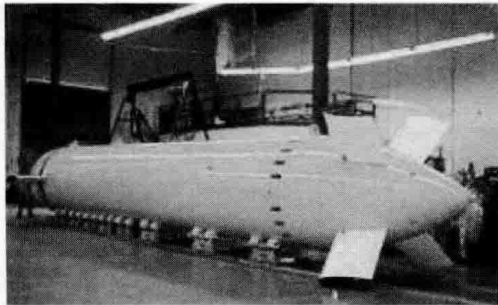


图 1.10 Theseus AUV

日本近年来研制了多种型号的水下机器人。2003 年日本海洋科学技术中心研制出世界上第一艘以燃料电池为动力的 AUV,命名为浦岛号,如图 1.11 所示。专门用于海洋探测的 R₂D₄是由东京大学研发出来的,如图 1.12 所示,主要利用声纳成像原理对海

洋环境进行探测，通过水下拍摄技术获得实物照片，利用机械手对海洋物体进行采样^[17]。

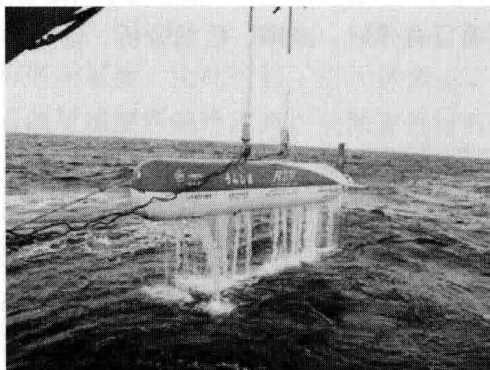
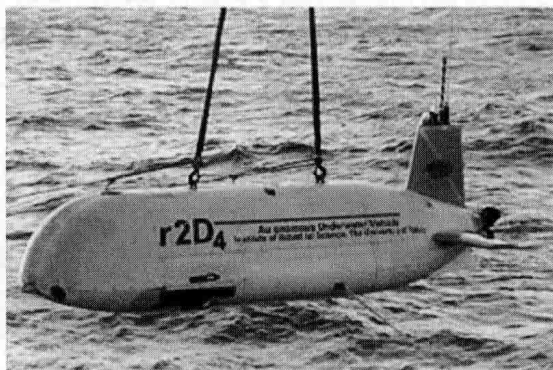


图 1.11 浦岛号

图 1.12 R₂D₄

1.2.2 国内研究现状

我国的水下机器人技术起步比较晚，20世纪六七十年代，我国的水下机器人研究还处于理论研究的初级阶段，发展至今取得的主要成就来自于蒋新松院士等前辈们的辛勤工作和无私奉献。1980年，蒋新松将“智能机器人在海洋中的应用”作为研究重点。1982年，蒋新松担任总设计师，设计了中国首台水下机器人——“海人一号”，如图1.13所示，为我国水下机器人的研发奠定了基础。AUV在国内的研究基本围绕两个中心进行，一个是以中国科学院沈阳自动化研究所为核心研制出的“探索者”号，如图1.14所示。“探索者”号成功下潜到5300m，初步完成了海底探测地形任务。第二个中心是以哈尔滨工程大学为中心，并与华中理工大学合作研制出“智水”系列的智能水下机器人。此后，我国研发了CR-01，如图1.15所示，在5300m深的海底，成功观察到锰结核，并拍摄了照片。它的两次成功下水印证了我国在水下机器人方面的技术已经进入成熟期。而后进一步研发了CR-02，多次完成深海环境的勘察和测绘工作。如今我国的载人潜水器“蛟龙号”，下潜深度已达到载人潜水器的世界最深^[18]。这些水下机器人的出现标志着我国研制的智能水下机器人在智能控制技术上达到了世界先进水平。

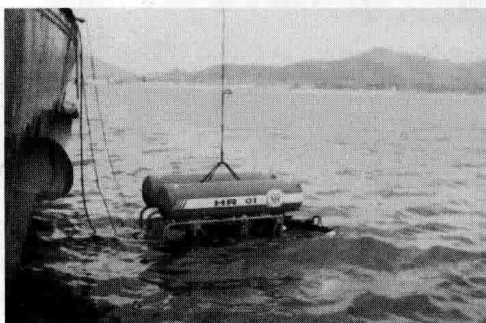


图 1.13 “海人一号”

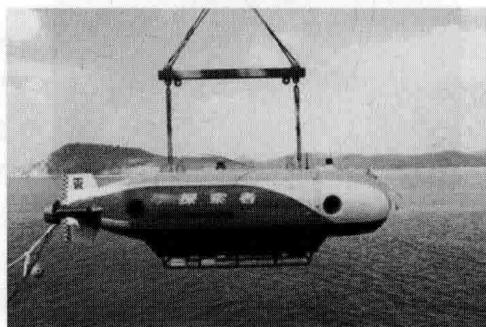


图 1.14 “探索者”号

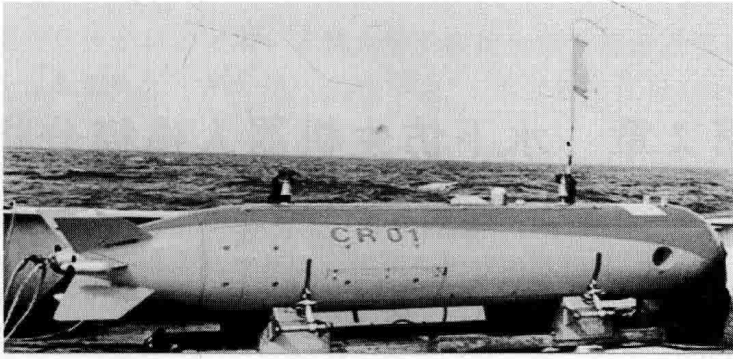


图 1.15 CR-01

第 2 章 水下仿生机器人建模分析

2.1 仿生学理论

自然界中的物种种类繁多，大都是经过了亿万年的进化，能够适应环境的变化，得到了生存和发展。经过漫长的进化之后，生物体的身体结构达到最合理状态，并发展了灵巧的运动模式。自然界中丰富的生物物种，一直是人们发明创造的源泉。随着生产的需要和科学技术的进步，人们利用化学、生物学、物理学等对自然界中的生物系统进行研究，将从生物界中获得的知识应用到设计、研制新的机器、设备、材料中，并在航空、航海等领域中取得了成功。于是，生物学、信息科学、数学与力学等互相结合、互相渗透孕育出一门新的学科——仿生学^[19]。

仿生学的内容包括力学仿生、分子仿生、能量仿生、信息与控制仿生、细胞仿生等。其中，力学仿生主要研究生物的宏观结构性能，包括生物的大体结构、静力学特性和动力学性质，例如建筑上模仿贝壳修造的大跨度薄壳建筑；分子仿生主要研究生物的微观特性，包括生物体内酶的催化作用、生物膜的选择性、通透性等，例如研究清除森林害虫引诱激素的化学结构，合成一种有机化合物用于诱杀田间的害虫；能量仿生主要是对生物体内能量转换过程和新陈代谢进行研究，包括生物肌肉的化学能、机械能之间的能量转换，生物电器官的发光等；信息与控制仿生主要研究生物对信息的处理，包括生物的感觉器官、神经元与神经网络以及高级中枢的智能活动等，例如人工智能、智能机器人模拟人类大脑的学习记忆和思考功能；细胞仿生主要研究细胞的特性，包括细胞的薄膜、光合作用等，例如利用细胞薄膜特性将脏水、海水过滤等^[23]。

2.1.1 仿生学研究进展

在生命、材料和信息等科学飞速发展的今天，仿生学的研究与应用在国内外都得到了极大的关注和蓬勃的发展。1960年9月，在美国俄亥俄州空军基地召开了第一次世界仿生学大会，此后几十年，世界各国都展开了仿生学的研究，仿生学理论飞速发展，基于仿生学的装置不断涌现出来。我国的仿生学研究始于1964年前后，1975年12月中国科学院在北京主持召开了我国第一次仿生学座谈会，并在1977年的“全国自然科学学科规划会议”上全面制定了我国的仿生学研究规划。自此，仿生学已普遍引起了国内许多学科和部门的关注，并陆续开展了研究工作。我国在2003年召开了两届“香山会议”，即第214届“飞行和游动生物力学和仿生应用”和第220届“仿生学的科学意义与前沿”。此后，又分别在2010年和2011年召开了第387届“分子仿生”、第395届“高效降解生物质的自然生物系统资源利用与仿生”以及第411届“仿生材料与器件：结构、力学与功能”三

届香山会议。为促进仿生学科的发展,吉林大学工程仿生教育部重点实验室联合 15 个国家的仿生学者牵头发起成立了“国际仿生工程学会”,学会秘书处设在中国。这是国际学术界对我国仿生学研究水平和学术地位的认可^[20-22]。

仿生机器人是仿生学和机器人技术相结合的产物,机器人向着智能机器人发展的过程中,模仿生物的某项功能能够让机器人拥有特殊的能力^[24]。例如,模仿蚂蚁,能够使机器人在陌生的环境中拥有超高的探路能力;模仿鸟类翅膀扑动可以进行空中仿生机器人的研制;模仿金枪鱼研发出的水下机器人,灵活性得到很大提升等^[25-26]。

纵观仿生机器人的发展历史,可大致分为四个阶段:第一阶段是探索阶段,在这一阶段,从自然现象或者生物原型中模仿;第二阶段是进入 20 世纪中后期,计算机技术的出现,利用机电控制系统控制机器人实现生物功能,如爬行、飞行等;第三阶段是传统结构和仿生材料相结合,利用机电控制系统与生物材料相结合研发仿生机器人;第四阶段是不仅仅要求仿生机器人拥有生物的外表结构、性能,还能够拥有思考能力,能够自我学习,涉及神经控制系统仿生的领域。

随着科学技术的飞速发展,仿生学已经应用到各个领域,为人类解决各种复杂的问题提供了创新方法的源头,并取得了各种突破性的研究成果。

2.1.2 水下仿生学概述

水下仿生学是仿生学里面的一个分支,是通过研究水下生物的身体构造和运动机理,在工程技术上加以模仿运用,进行水下海洋调研开发的重要学科。

水生动物经过上亿年的进化,在优胜劣汰的环境中将在水中的游动能力进化到了很高的水平。许多鱼类、海龟等海洋哺乳动物能够在特定的季节中按照一定的路线作长距离的洄游并能找到原出生地点进行繁殖;海豚即使蒙上双眼也可以利用体内的声纳系统避开海中的障碍物。这些水下生物的特殊机能和结构系统使人类得到启发,并将其应用到工程技术中^[27]。虽然仿生学形成的时间不长,但目前已取得较多成就,并且有广阔的发展前景。就水下仿生学而言,人类模仿水母接收低声波的机制,研发出了一种风暴警报仪,能够提前 15h 预测到来自某一方向的风暴;模仿海豚能够降低水的阻力的体形、皮肤结构,将人造海豚皮在鱼雷、潜艇上使用,达到减少阻力的目的^[28]。

水下仿生机器人是一个水下高技术仪器设备的集成体,在军事领域和民用领域都有很大的应用前景。水下仿生机器人是从模仿水下生物的游动方式开始的,从流体动力学上更有效地模仿水下生物的推进方式,实现水下机器人高效的航行性能和灵活的操纵性能。

水下仿生机器人模仿不同的水下生物研制出了多种形态:东京工业大学机器人实验室在水下蛇形机器人 HELIX 的基础上,研制出了一种两栖蛇形机器人——ACMR5,如图 2.1 所示,它既可以在陆地爬行,也可以在水中游动。美国东北大学海洋科学中心研制出能够在水下自由行走的仿生机器人——机器龙虾(BUR-001),如图 2.2 所示。该仿生机器龙虾,长 60.96cm,宽 45.72cm,有 8 条腿和 2 个钳子,利用 8 条腿实现爬行功能,利用 3 个关节完成游动的动作。Nekton Research 公司研制出了一种两栖机器人装置 Madeleine——机器龟(Robot Turtle),它的尺寸是 60cm×30cm×15cm,身体两侧各有两个平行的鳍作为驱动装置,游动时功率密度为 5W/kg,突然动作时可达 10W/kg,高功率密度可以让它具有海底生物的灵活性并且能在海底和海滩爬行。这些水下仿生机器人的外壳