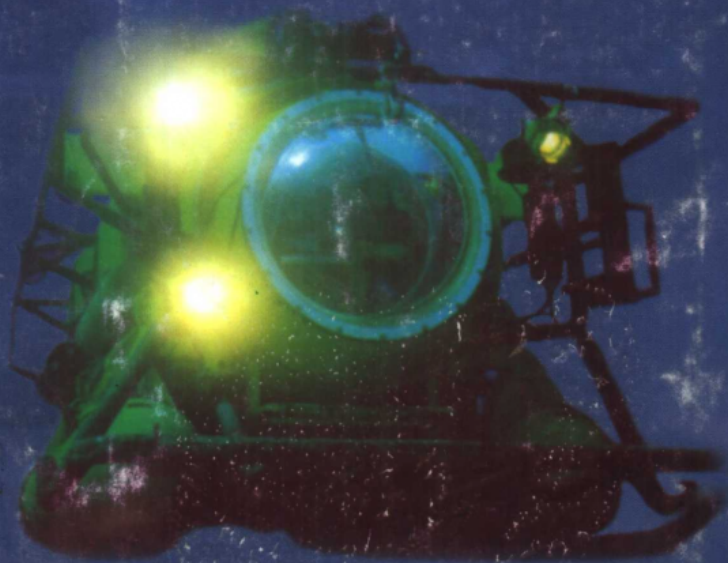



主 编 张铭钧  
副主编 张仁存 李广君 尚淑巧

# 水下机器人

---



 海洋出版社

# 水下机器人

主 编 张铭钧

副主编 张仁存 李广君 尚淑巧

海洋出版社

2000年·北京

TP241

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了水下机器人的特点、结构、能源与动力装置、推进系统、导航定位与操纵控制、吊放回收系统、机电系统与设备,以及水下机器人的应用等内容。附录收录了国外至 20 世纪 90 年代末期为止各类水下机器人综合情况的有关资料。本书取材新颖,重点着眼于 20 世纪 80 年代末期以来水下机器人的新发展、新成果,并注重内容的先进性、科学性和实用性。

本书可供从事水下机器人研究、设计和使用部门的工程技术人员参考,亦可作为高等院校相关专业本科生、研究生的阅读材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

水下机器人/张铭钧主编. —北京:海洋出版社,2000

ISBN 7-5027-4959-4

I. 水... II. 张... III. 水下作业机器人 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19723 号

责任编辑:阎 安

责任印制:严国晋

**海洋出版社 出版发行**

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

中国人民解放军第 4210 工厂印刷 新华书店发行所经销

2000 年 4 月第 1 版 2000 年 4 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11

字数:260 千字 印数:1—500 册

定价:14.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

## 《水下机器人》编委会

主 编	张铭钧		
副主编	张仁存	李广君	尚淑巧
编 委	何明国	王立权	王启明
	刘志河	郭占军	邹俊前
主 审	孟庆鑫		

## 序 言

随着社会的发展和科学技术的进步,人类的活动范围日益扩大。目前地球表面及各层次的空间已被人类开发利用,而海洋还处于待开发状态。科学家预测,21世纪人类将全面进入海洋科学技术和海洋经济的时代。水下机器人(潜器)是随着海洋研究和开发的不断深入以及国防的需要而产生和发展起来的高新技术,是海洋高科技的重要组成部分。水下机器人技术在很大程度上反映了一个国家海洋高科技的发展水平。我国海域辽阔,海洋资源丰富。但是,由于经济和技术上的原因,我国对海洋的开发和利用还远远不够。为了充分利用海洋资源,发展海洋高科技是当务之急,其中必须优先发展我国自己的水下机器人,这已成为我国海洋工作者的共识。

美国人威廉·比勃于20世纪30年代研制了世界上第一艘有实用价值的载人潜器。50年代,瑞士科学家奥古斯特·毕卡第设计并建造了几艘深潜器,如“的里雅斯特”、“FRNS”等,当时已能下潜到世界上最深的海底。同时期,前苏联、日本等国家也以系缆深潜球的方法来进行深海研究。1959年,法国人柯斯特研制了一艘能下潜300m的双人潜器,当时引起全世界的注意。但这些都属于观察型潜器。1953年美国研制出第一艘作业型潜器。1966年,美国海军的“CURV”号潜器在西班牙附近海域打捞出失落在856m水深的一颗氢弹头,引起世界瞩目。直到20世纪70年代中期,潜器主要用于军事领域。1974年以后,由于世界形势的变化,出现了世界范围内的石油危机,使得海洋石油天然气业得以迅速发展,从而也促进潜器的飞速发展。到了1981年,仅无人遥控潜器就发展到400多艘,1991年,又增加到1000余艘,其发展速度十分迅猛,在其他行业实属罕见。

由于海洋开发以及国防需要,我国从20世纪70年代开始研究和发展干转移型载人潜器,70年代末和80年代初,又开始了无人无缆水下机器人的设计和研究工作。先后开发研制了“HR-01”号、“探索者”号等水下机器人。经过我国从事水下装备研制、使用人员的不懈努力,我国水下机器人技术取得了令人鼓舞的快速发展,在许多方面达到了国际先进水平,同时在水下机器人研制和应用方面也取得了比较丰富的经验。

我国水下机器人技术的研究和开发起步较晚,但发展较快。随着国防事业和海洋事业的迅速发展,急需有现代化的技术和装备能够使用。提供一本水下机器人方面内容丰富新颖、系统性强、有价值的参考资料无疑是十分有益的。

《水下机器人》这本书是编者通过水下机器人设计实践,并收集了其他国家在设计、研究水下机器人方面的经验编写而成的。这本书综述了水下机器人的特点、设计方法、应用实例等,并对设计和建造过程中所遇到的复杂问题作了较详细的阐述。为水下机器人的开发、研制提供了较详细的资料,这本书对了解和掌握水下机器人的设计、制造和使用都会有一定的帮助,也将对我国海洋工程技术的发展起到一定的参考和借鉴作用。

杨印本

## 前 言

近 20 年来,为了满足日益增长的认识、开发海洋的需要和保卫海洋权益的更高要求,一种新型的水下运行器——水下机器人(亦称潜器或潜水器)得到了快速发展。水下机器人属于技术密集度高、系统复杂的高技术领域。它所表现出的优越性、效益和巨大的潜力,引起了世界许多国家的重视。

由于海洋开发及国防需要,我国从 20 世纪 70 年代初期即开始研究和发 展干转移型载人潜器,70 年代末和 80 年代初又开始了无人遥控水下机器人的设计和研究工作。水下机器人种类繁多,并且从设计方法到设计特征与一般潜艇又有很大差异。有关水下机器人方面的比较系统的资料很少。本书是编者通过水下机器人的设计实践,并收集了其他国家的水下机器人研究方面的经验编写而成。编写中,在重视系统基础知识的同时,重点着眼于 20 世纪 80 年代后期以来国内外水下机器人技术的新发展和新成果,力求做到内容的先进性、科学性和实用性相统一。目的在于为从事水下机器人(潜器)设计、制造、使用和维护方面的工程技术人员提供一份内容新颖、系统性强、有价值的科技参考资料。

本书由张铭钧主编,张仁存、李广君、尚淑巧副主编。其中第 1、5 章由张仁存、尚淑巧、何明国编写,第 2、6、7 章由张铭钧编写,第 3、8 章由李广君编写,第 4 章由王立权、王启明、刘志河编写,第 9 章由李广君、郭占军、邹俊前编写,附录由张铭钧、王立权、王启明编写。全书由张铭钧统稿,由孟庆鑫主审。何明国通读了全书并提出了一些修改意见。本书在编写过程中得到了上海交通大学朱继懋教授的大力支持,也得到了哈尔滨工程大学海洋智能机械研究室的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

由于水平有限,书中难免存在不足甚至错误,敬请读者不吝指正。

编 者  
1999 年 10 月

# 目 次

第 1 章 概述 .....	( 1 )
1.1 水下机器人的产生与发展 .....	( 1 )
1.2 水下机器人的分类与用途 .....	( 4 )
1.3 水下机器人的特点 .....	( 5 )
第 2 章 水下机器人结构 .....	( 8 )
2.1 重量特征 .....	( 8 )
2.2 耐压结构 .....	( 9 )
2.3 舱口盖 .....	( 18 )
2.4 观察窗 .....	( 20 )
2.5 压力平衡结构 .....	( 22 )
2.6 安全性和可靠性 .....	( 25 )
第 3 章 能源及动力装置 .....	( 26 )
3.1 电池能源 .....	( 26 )
3.2 内外燃机 .....	( 31 )
3.3 电力装置 .....	( 40 )
3.4 液压装置 .....	( 43 )
第 4 章 推进器与舵 .....	( 48 )
4.1 水下机器人的各种推进器 .....	( 48 )
4.2 航向控制及推进器的配置 .....	( 57 )
4.3 轴的密封方法 .....	( 60 )
第 5 章 导航与定位系统 .....	( 63 )
5.1 推算导航 .....	( 63 )
5.2 水声导航与定位 .....	( 65 )
5.3 典型导航系统 .....	( 69 )
5.4 终端导航 .....	( 72 )
第 6 章 操纵与控制 .....	( 74 )
6.1 水下机器人的操纵性 .....	( 74 )
6.2 水下机器人的控制 .....	( 77 )
第 7 章 吊放回收系统 .....	( 88 )
7.1 吊放回收系统概述 .....	( 88 )
7.2 吊放回收装置 .....	( 89 )
7.3 吊放回收中的连接装置 .....	( 93 )
7.4 有缆式水下机器人的控缆系统 .....	( 95 )
第 8 章 系统及设备 .....	( 98 )

8.1	水下机械手	(98)
8.2	重量与浮力调节系统	(108)
8.3	纵倾调节系统	(115)
8.4	生命支持系统	(118)
<b>第9章</b>	<b>水下机器人的应用</b>	<b>(123)</b>
9.1	有人水下机器人的应用	(123)
9.2	无人有缆水下机器人的应用	(123)
9.3	无人无缆水下机器人的应用	(127)
附录	国外水下机器人一览	(129)
主要参考文献		(134)



# 第 1 章 概 述

## 1.1 水下机器人的产生与发展

水下机器人的历史可以追溯到公元前 4 世纪。当时的亚历山大大帝 (Alexander, 公元前 356 年至公元前 323 年) 用一个大的玻璃容器, 内部用驴皮衬垫, 外面装有铁架, 下潜到 30m 的水深, 进行海底采集活动, 因而闻名于世。但这种水下机器人 (或称潜器、潜水器) 只是潜水员在水下把头伸进里面去进行换气和呼吸用的, 真正有意义的潜水器的出现, 应该从 16 世纪开始算起。

1578 年在英国人威廉·伯恩出版的书中, 介绍了真正能够潜入水中, 并能自行推进的潜艇设计方案, 有的方案在当时还造出了模型。

1616 年德国人费朗兹·开司勒 (Franz Kessler) 操作过一艘有机动能力的潜水钟, 它无缆绳和水面联接, 上浮依靠抛重, 壳体为木质的圆锥体, 外面包皮, 并有两个像眼睛似的观察窗。

18 世纪 70 年代, 美国独立战争时, 美国人戴维·布什内尔 (David Bushnell) 建造了一艘小型木质潜艇“海龟”号 (Turtle)。它用人力螺旋桨推进, 可以在水下航行 30min。他在经历了几次失败后, 终于炸毁一艘英国机帆船, 这是世界历史上第一次潜艇攻击。

19 世纪初, 罗伯特·富尔顿 (蒸汽机船的发明者) 建造了两艘铜质壳板、铁质肋板的潜艇——“鳐鱼”号 (Nautilus) 和“哑子”号 (Mute)。但这两艘潜艇均未能投入实际使用。

通常认为第一艘“现代化”的潜器是 1890 年下水的, 由西蒙·莱克制造的“阿尔戈纳特 I”号 (Arogant The First)。它是一艘小型潜艇, 看上去很笨拙, 用厚木板制成, 用沥青水密, 由一台汽油机作为动力, 潜航时用一条通向水面并有浮力支持的软管作通气管, 有压载水舱。此外, 它还装有动力驱动的滚轮和一个可以打开的底部舱口盖。当舱内压力与外界压力平衡后, 可以把舱口盖打开, 让潜水员采集海底标本。

真正第一艘现代潜艇是一位爱尔兰教师霍兰 (Holland) 设计的。这艘潜艇长 16m, 5 个艇员, 1 个鱼雷发射管, 33kW (45hp) 的汽油机, 水面航速 7kn, 续航力达 1 000n mile, 水下用蓄电池作为动力, 可以达到 5kn 的航速, 续航力是 50n mile。1900 年 4 月 18 日, 美国海军购买了这艘潜艇, 它是编入美国海军的第一艘军事潜艇。

1929 年, 美国海洋科学家威廉·比勃 (Beebe) 与奥梯斯·巴顿 (Barton) 建造了第一个深潜球 (Bathysphere)。它是一个铸钢的球壳 (内径 1.37m, 壁厚 32 ~ 38mm), 上面装有 3 个观察窗, 它挂在  $\phi 22\text{mm}$  的钢缆前, 1934 年 8 月下潜到了 914m 的水深, 这是第一次在深海环境中进行生物观察, 亦是第一次有意义的深潜器潜水活动。

1948 年, 瑞士物理学家奥古斯特·毕卡第 (Auguste Piccard) 开始从事深潜器的研究。他原来是研究宇宙射线的, 发明过同温层气球。由于他的研究经费是从比利时国家科学基金会 (Belgian National Fund for Scientific Research, FNRS) 得到的, 所以他的气球用 FNRS 命名。为了继续研究宇宙射线, 他决定要进行深海测量, 因此发明了深潜船 (Bathyscaph)——FNRS-2。它是一艘真正的深潜器, 它的设计原理基本和同温层气球相同, 是一个密封的金属载人球以及支持

它重量的一个大浮力袋。浮力袋内充满了汽油,体积是  $36\text{m}^3$ ,总重量是  $9\text{t}$ ,有两个操纵员,设计的最大下潜深度为  $5\,200\text{m}$ ,实际下潜到了  $3\,000\text{m}$ 。

FNRS-2 在早期试验时被损坏。后来法国海军购买了它,并进行了改进,命名为 FNRS-3。它在 1954 年试验时下潜到了  $4\,050\text{m}$  的深度。

正当 FNRS-3 建造时,毕卡第到了意大利,申请资金建造了“的里雅斯特 I”号(Trieste the First)深潜器(Bathyscaph)。它的载人球是在邓尼(Turni)锻造的,所以又称“邓尼”球。“的里雅斯特 I”号 1957 年被美国海军买去,更换了载人球,1960 年在目前已知的海洋最深的海沟——太平洋的马里亚纳海沟下潜到了  $10\,913\text{m}$ ,这一深度也被称为太平洋挑战者深度(Challenger Deep)。

“的里雅斯特 I”号在 1964 年建造了新的浮力舱,它和邓尼球组成了“的里雅斯特 II”号深潜器。1964 年夏天进行了对失事潜艇“长尾鲨”号(Thresher)的失事原因调查,不仅拍了照,而且还将一段“长尾鲨”号潜艇的破损海水管子带到水面,取得了很大成就。目前已退役,存放在美国海军博物馆内。

1958 年,法国建造了一艘新的潜水器——“阿基米德”号(Archimede)。1962 年,它在千岛海沟(Kurile Trench)下潜到了  $9\,543\text{m}$  的水深。

“阿基米德”号和“的里雅斯特 II”号是仅有的两艘深潜器(Bathyscaph)。由于它有很大的浮力舱,又要在海上装载大量的汽油,所以建造与使用均很不方便,而且它在水面和深水的操纵都很困难,活动范围亦非常有限。基于上述原因,此类深潜器发展不快,更多的是发展了自由自航式潜水器。

如果把带浮力舱的深潜器作为第一代载人潜水器的话,那么从 20 世纪 50 年代末开始出现,到 60 年代中期得到迅猛发展的自由自航式潜水器可以作为第二代潜水器。此类潜水器的典型代表是美国的“阿尔文”号(Alvin)潜器。建于 1964 年,最大下潜深度为  $1\,829\text{m}$ ,排水量是  $12\text{t}$ 。1968 年在吊放时沉没,1969 捞起,1973 年重建,此后其最大下潜深度增加到了  $3\,658\text{m}$ 。“阿尔文”(Alvin)号的命名是为了纪念海洋开发领域的著名学者 Alyn Collins Vine。这种潜器有动力,耐压体可容纳操作人员,并有上浮、下潜系统和多个自由度的机动能力。根据用途不同还装备有多种设备和装置,例如监视器、机械手等。此类潜器用途十分广泛,不仅可作为观察用,还可进行一些简单的水下作业和执行海底资源调查任务等。

此后,各国陆续研制了与“阿尔文”号结构相似的潜器(水下机器人),如日本的“深海 6500”。潜航深度较浅的水下机器人很多,这里就不赘述了。现在还在服役的潜航深度较深的比较典型的水下机器人如表 1-1 所示。

表 1-1 典型的水下机器人

机器人	最大潜航深度(m)	国家	应用部门
深海 6500	6 500	日本	海洋科学技术中心
海崖	6 092	美国	美国海军
Nautili	6 000	法国	法国国立海洋研究所
Mir II	6 000	俄罗斯	俄罗斯科学院

由于 1963 年美国核潜艇“长尾鲨”号失事,造成 29 人丧生,促使美国研究深水遇难潜艇艇

员的营救问题。美国原有的救生装备只有工作深度为 270m 的“麦生坎”潜水钟,显然不能满足现代潜艇的保障要求。1964 年美国海军专门成立了“深海技术规划局”(Deep Submergence Systems Project Office),总共花费 2.2 亿美元的研制经费发展深潜救生系统。1970 年,深潜救生艇“DSRV I”下水。1979 年 5 月,美、英联合进行了用深潜救生艇实施潜艇救生的演习并获得成功。这次演习成功也是人类历史上首次实现在水下由一艘潜艇向另一艘潜艇进行人员的干转移(干救)。

从 1975 年开始,由于海洋工程和近海石油开发的需要,无人遥控潜器(Remotely Operated Vehicles, ROV)得到了迅速发展。第一艘无人遥控潜器于 1953 年研制成功,由于“无人遥控潜器”具有结构简单、造价低廉、维修方便,以及无人员生命危险等优点,所以从 1975 年以来发展尤为迅速。当前,由于海洋开发和水下作业的需要,单人潜器(包括拟人和非拟人的常压潜水服)也得到了较大的发展。

我国从 20 世纪 60 年代中期开始对水下机器人(潜器)进行了探索性研究,70 年代研制了拖曳式深潜器,从 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,随着工业机器人技术发展,以及海上救助打捞和海洋石油开采的需要,我国也积极地开展了水下机器人的研制与应用工作。在“七五”期间,水下机器人产品开发被列入了国家重点攻关任务。目前我国的水下机器人技术日趋成熟,有些已达到了当代世界水平。

我国水下机器人的成果如下:

(1)有人潜器。

我国第一艘有人潜器于 20 世纪 70 年代开始研制,80 年代完成试验并投入试用。

(2)无人有缆潜器 ROV。

上海交通大学和中国科学院联合研制了我国第一艘无人遥控潜器——“HR-01”号。其主要特点是机械手为双向位置力反馈、有力感和触觉、主从控制方式,是当今 ROV 中较先进的。它分别于 1985 年底和 1986 年底在我国渤海湾和南海进行了深潜试验,分别下潜到 59m 和 199m。

中国科学院沈阳自动化研究所在开发“HR-01”号的基础上,先后研制出 RECON-IV-300-SIA 的 01、02、03 型无人遥控水下机器人。其特点是装有多功能主从机械手,能进行洗、磨、割、爆破等工作。

1993 年 11 月,我国进行了“8A4 水下机器人”海上试验,这标志着我国在无人有缆水下机器人方面的研究进入了一个新的阶段。“8A4 水下机器人”的特点是结构紧凑、操作灵活、维修管理方便,具有较强的水下作业能力。它主要用来进行援潜救生,兼顾平台作业。其性能已达到 20 世纪 80 年代国际水平。

(3)自主式水下机器人 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)。

1987 年,国家人工智能专家组提出了关于研制一台无人无缆自主式水下机器人实验床作为中国 AUV 技术开发的关键性起步的建议。中国的 AUV 开发计划已经列入国家自动化领域的研究项目中。沈阳自动化研究所研制的潜深为 1 000m 的“探索者”号已通过国家鉴定。我国在无人无缆智能水下机器人方面也进行了研究,并取得了一定的研究成果。

## 1.2 水下机器人的分类与用途

水下机器人的种类繁多,其分类可如图 1-1 所示。

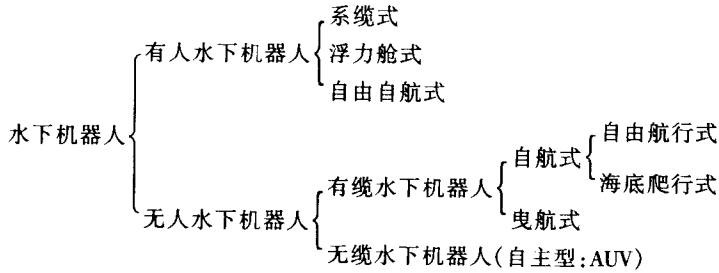


图 1-1 水下机器人的分类

水下机器人通常可分为无人和有人两大类。无人水下机器人又称遥控水下机器人,可以归纳为带缆自由航行、海底爬行、曳航和无缆四大类。其中以带缆自由航行式潜水器为最多。

无人遥控水下机器人用于军事目的、科学研究以及海洋石油工业等。所有带缆自航水下机器人中有 90% 以上是用于完成观察工作,操作任务的比重正逐步在提高。

海底爬行式水下机器人主要用于完成海底推土、挖沟、检查,以及海底的一些操作作业。曳航式水下机器人用于军事目的和科学研究的居多,主要用作观察识别、搜索、测绘、取水样、放射性测量等。在科学研究方面,主要用在地质、地球物理方面的研究,以及大面积的搜索和水质分析、生物取样、地质取样、生物测定、锰结核的观察和研究。

无人无缆水下机器人主要用于海洋传导性、温度等测量,还可以做尾流扰动测量、冰下声学剖面特性测绘等工作。

有人水下机器人可以分为系缆式、浮力舱式和自由自航式三种。

系缆式有人水下机器人又有深潜球、曳航式和自航式之分。

深潜球和曳航水下机器人本身没有动力,依靠拖带和吊放入海,进行水下观察及其他水下活动,系缆自航式水下机器人的能源主要依靠脐带(或电缆)由水面支持母船提供。如“黑潮 II”号和“皮格”号以及“OpSub”等水下机器人均属此类。这类水下机器人由于都有脐带或缆绳和水面母船相连,所以潜深不能很大,一般都小于 300m。但无人有缆水下机器人除外,它目前可下潜到 7 600m 的深度。

浮力舱式水下机器人是最早发展起来的潜水器,一般潜水深度可大于 4 000m,最大可达 11 000m,排水量达 100t,小的耐压体直径为 2m 左右,其中有 2~3 人,再加以一个很大的提供浮力的浮力舱。由于耐压体厚度在相同材料的情况下和潜深成正比,当深度增大后,耐压体的厚度随之也增大。“的里雅斯特”号的“邓尼”球为 90mm,“克虏伯”球为 120mm,而“阿基米德”号为 150mm。耐压体的相对密度可以达到 3.0,这样重的耐压体一般有一个很大的充满汽油、煤油或乙烷等轻液体的浮力舱,以提供正浮力。比较多的是用汽油,尽管汽油在浅水中没有空气提供的浮力大,但在任何深度都能保留大部分浮力。石油碳氢化合物的密度可以低达  $660\text{kg/m}^3$ ,要比海水的密度( $1\,025\text{kg/m}^3$ )小得多。但是这种潜水器的操作非常复杂,如美国的

“的里雅斯特Ⅱ”号的浮力舱内需携带  $205\text{m}^3$  的航空汽油(密度为  $760\text{kg}/\text{m}^3$ ),一般在海上(潜器从母船上下水后)灌注,操作过程大约需要  $15\sim 20\text{h}$ 。回来后还要将汽油排干,充入氮气使箱内有一定的压力和防止油气燃烧,这样差不多要经过相同的时间,可以收回  $4.5\sim 9.1\text{m}^3$  的汽油(损失了大部分)。所以支持母船上需要携带大量的汽油。同时由于汽油比起海水更容易被压缩,所以在下潜过程中会不断损失一部分浮力,这样就要求操纵人员不时地抛弃一些铁丸压载以补偿这部分正浮力的损失。在上浮时,又要放掉一些汽油以控制上浮速度,因此这类潜水器目前已很少建造。

目前大多数有人水下机器人属于自由自航式。它自带能源,在水面和水下有多个自由度的机动能力,主要依靠耐压体或部分固体材料提供浮力,最大下潜深度亦可达到  $5\ 000\sim 6\ 000\text{m}$ ,没有浮力舱或者没有那么庞大的浮力舱,因此机动性较好,运载与操作也较为方便。根据自由自航式水下机器人使用任务的不同,有观察型、水下作业型、潜水员水下出入型以及下转移(水下对接)型等多种类型。它主要应用于海洋开发中勘探和测绘、施工期间的水下交通、基地人员的补给、水下系统装置的安装与检修等。在军事上,水下机器人可以直接为海底军事基地、仓库建设服务,担负勘探、施工、人员输送,以及设备的安装和维修等工作,还可以直接参与现代水雷战,完成潜艇救生和水下救捞等任务。

有人水下机器人的鼎盛时期是在 20 世纪 60 年代,1966 年美国在西班牙的 Palamres 失落了一颗氢弹,是由“阿尔文”号(Alvin)潜器与 CURV 无人遥控潜器配合,将其从  $856\text{m}$  的水深处打捞起来的。1968 年 10 月,潜器“阿尔文”号从母船“露露”号(Lulu)上起吊时,不慎失事沉没,1969 年 8 月由“阿鲁明诺”号(Aluminaut)和打捞船“密执安”号相互配合,将“阿尔文”号从  $1\ 538\text{m}$  的水深处打捞起来。“深探”号(Deep Quest)于 1970 年曾把坠落在太平洋  $1\ 037\text{m}$  的水深的一架海军飞机打捞上来。

美国深潜救生艇 Avalon 号于 1979 年 5 月在  $120\text{m}$  水深和英国潜艇“奥丁神”号对接成功,并把“奥丁神”号上的全部艇员转移到另一艘潜艇上去,实现了人类历史上的第一次“内空”对接和人员转移。这两艘造价昂贵的潜器把有人水下机器人的技术推到新的高度。近年来,无人遥控水下机器人发展很快,但是载人水下机器人仍有其独特的用途,估计在相当长的时期内,有人和无人水下机器人技术将会共存,并相互渗透,共同发展。

## 1.3 水下机器人的特点

### 1.3.1 水下机器人的特点

随着社会的发展和科学技术的进步,机器人技术已经广泛应用于各个领域,工业机器人已经可以替代或模仿人类进行某些作业,并且效率很高。对水下机器人来说,它是接近人类所不能到达的水下空间的惟一手段。正因为如此,它与替代人进行工作的工业机器人相比有很大的差异。这些差异主要有以下几点:

①航天飞行器工作时的最大外压为绝对真空,机体内的压力为 1 个大气压( $0.1\text{MPa}$ ),也就是说只要求飞行器能承受  $0.1\text{MPa}$  的内压即可。对水下机器人来说,水深每增加  $10\text{m}$ ,水压就要增加 1 个大气压,因此对于水下机器人(特别是潜航深度较深的水下机器人)必须充分考虑其承压问题。

②水中的视程很短,一般只有几米,最好也不过几十米,有些情况下视程可能为零(根本看

不清)。因为光在水中的透射率较低,在悬浮物较多的混水中其透射率更低,并且照明灯光易被悬浮粒子反射发散,故机器人在水中的视觉能力较差。

③陆上机器人及航天航空飞行器的位置测量和通信,可以利用电磁波,在水中由于电磁波的衰减很大而不能使用,所以水下机器人的位置测量和通信等要应用水声技术。

④由于作业任务和使命不同,往往要求水下机器人具有很好的自由运动能力。

### 1.3.2 水下机器人的构成

水下机器人根据其作业任务和使命不同,除机器人本体和控制系统之外,还应装备有相应的装置和系统。主要包含以下几个部分:

①光学观察装置(包括观察窗、照明灯、摄像机、照相机等)。

②推进装置。

③姿态和位置检测装置、目标检测装置。

④采集、设置和回收作业装置(包括机械手等)。

⑤通信系统。

⑥能量系统(包括自备能源和外部输入能源等)。

以上的①、②、⑤、⑥为水下机器人的基本装置和系统,随着水下机器人的机能不同(如是否载人、能源是自备还是外部输入、作业功率要求大小等),水下机器人的规模和大小也有很大的不同。不带能源的无人有缆水下机器人重量有几千克,几吨和十几吨重的。载人水下机器人一般是自带能源,最轻的也有几吨重,观光型水下机器人由于搭载的乘客较多,即使潜航深度不深也需几十吨,乘载2~3人的深海调查用水下机器人的重量一般为10~25t。

### 1.3.3 小型轻量化

除一些特殊用途的水下机器人(如海底采矿机器人、海底电缆铺设机器人等)要求自重较重之外,一般的运动型水下机器人都要求体积小、重量要轻,即小型轻量化。

对水下机器人来说,每一部分的结构重量在满足使用性能的前提下,必须减少到最低程度。并且,为实现水中的自由航行,其自身的重量和浮力必须是平衡的。每增加一定的重量就需要相应的浮力材料,机器人的总重量和体积随之增加,这将使得运动惯性增加,相应地要求驱动力增加,也使得能量消耗增加、自备能源增加,陷入了这种恶性循环。因此,应该充分考虑有利于水下机器人作业使命和任务,在保证必须的情况下,严格限制水下机器人的重量和体积。这不仅有利于水下机器人的运动,同时也有利于水下机器人的吊放和回收作业。

### 1.3.4 工作母船的作用

水下机器人自身的作用是无须质疑的,在水下机器人执行作业任务过程中工作母船也具有很大的作用,归纳起来可以有以下几点:

(1)出海手段。

一般海洋用水下机器人都不是从港口和码头开始操纵的,需要由工作母船带到要工作的海域。

(2)吊放和回收(详见第7章)。

搭载在工作母船上的水下机器人到达工作海域之后的下水,以及工作结束后回到工作母

船上,需要由工作母船的吊放回收装置来完成。

(3)海上的维护保养场所。

在一次潜航结束后,维护与保养可以在工作母船上进行。

(4)指挥中心。

水下机器人受自身机能的限制,难以把握潜航地点的整体情况。工作母船可以通过相应的仪器和设备,掌握和协调(包括水下机器人在内的)整个系统,起到指挥中心的作用。

(5)海上研究所。

工作母船上配备的仪器和设备对水下机器人取得的数据和资料可以进行现场的分析 and 处理(有些数据和资料往往必须进行现场分析和处理)。

一般来说,重量较小、作业任务简单、操作比较方便的水下机器人不需要专用的工作母船,出海和吊放等工作可以由一般船舶来完成。对于体积和重量较大、作业任务比较复杂的水下机器人(如深潜水下机器人)一般有专用的工作母船,如日本“深海 6500”水下机器人所用工作母船为“横须贺”号等。

## 第2章 水下机器人结构

水下机器人顾名思义就是在水下工作的机器人,它除了具有起思维、判断机能的“大脑”(控制系统)之外,还应有其本体结构以及能源系统、通信系统等,以构成完整的水下机器人。从本体结构来说,水下机器人的工作环境决定了水下机器人的结构要充分考虑其重量特征、耐压特征、材料防腐、可靠性和水密性等等。以下分别作以介绍。

### 2.1 重量特征

任何运行器为了能在某个特定的空间运行,并能完成一定的使命任务,必须具有某些重量特征。汽车、火车在地面上运行依靠地面的支承反力来支持它的重量。在空中飞行的飞机、导弹则依靠其流体动力和发动机的推力来支持它的重量。在水中航行的船舶由于支承重量的方式不同,则可以分为气垫船(空气静力支承)、水翼艇、滑翔艇(水动力支承)和排水量船(静水力支承)。一般水面航行的船舶包括双体船、小水线面船以及潜水艇(艇)均属于排水量船。水下机器人和一般水面排水量船的区别在于后者支承船舶重量的静水力(浮力)可以由吃水变化进行调节,所以对重量和容量的要求并不那么敏感,而水下机器人则要求静水力(浮力)和重力严格平衡。流体动力往往仅作为水下机器人操纵和控制机动性的手段。

一般战斗潜艇由于下潜深度不大(通常为300~500m),故其耐压体的相对重力(即重力与浮力之比)不大(约40%左右),所以目前战斗潜艇被设计成它的重力的百分之九十五以上是依靠耐压体的静水力来支承的。非耐压结构、凸出体和舷外设备所提供的浮力仅占不到百分之五。对于水下机器人,随着其下潜深度的增加,耐压体壳体厚度成比例地增加,耐压体本身的重力增加很快。图2-1表示钢制球形耐压体相对重力 $\gamma'_c = P_c / \gamma V_c$  ( $P_c$ 表示耐压体重力; $V_c$ 表示耐压体的排水体积; $\gamma$ 为海水重力密度,其标准重力密度可取 $\gamma = 10.045 \text{ kN/m}^3$ ),其随下潜深度、材料屈服极限的变化关系。

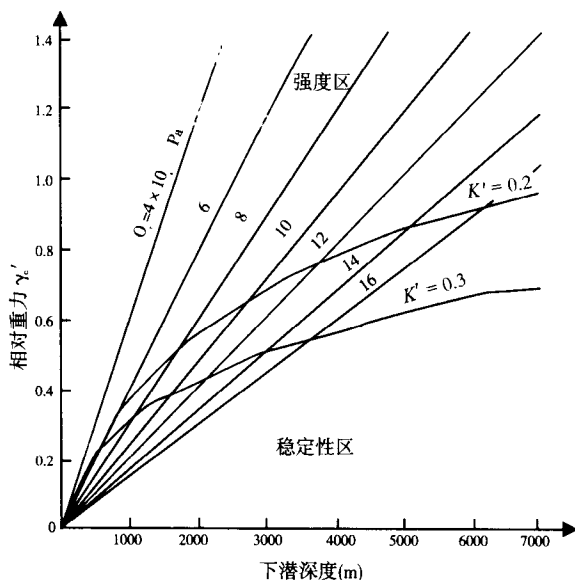


图 2-1 钢制球形耐压体的相对重力与潜深以及材料屈服极限的关系

图中直线是安全系数  $K = 2$ 、结构加强取 20% 时的情况。曲线分别为稳定性系数  $K'$  取 0.2、0.3 时的稳定性曲线。曲线以下可称为壳体的稳定性区,曲线以上则称为壳体的强度区。如图 2-1 所示,在球壳的强度区域内,相同材料的壳体,随着下潜深度的增加,其相对重力  $\gamma'_c$ 。



会成比例增加。例如：用屈服极限为  $8 \times 10^8 \text{ Pa}$  的钢制造的球形耐压体，在潜深为 1 000m 时， $\gamma'_c = 0.135 \times 10^3$ ；当潜深增加到 3 400m 时，其耐压体相对重力  $\gamma'_c$  将等于 1，即  $P_c / \gamma V_c = 1$ 。耐压体此时已不能提供浮力来支持有效载荷的重量；当潜深继续增大时，有些潜水器耐压体相对重力可达 3，即不但不能提供浮力，反而需要把设备装在耐压体外，以提供浮力，并将耐压体设计得尽可能小，以减小水下机器人的排水量，同时需要采用浮力材料来支承水下机器人的重力。这样对水下机器人来讲，有它独特的重力特征、设计规律和分析方法。

## 2.2 耐压结构

水下机器人通常由耐压壳(体)和外部结构组成。前者主要用于承受深水压力(1960 年经过改造的“的里雅斯特 I”号潜水器，在马里亚纳海沟下潜到 10 913m，耐压壳外表约  $11 \text{ kN/cm}^2$  的巨大压力)，为乘员和设备提供合适的生活和工作环境；后者既支承了耐压壳体及外部设备，又减小了潜水器阻力和水下障碍物的缠绕。至于无人水下机器人，大多采用开式框架结构，但也有闭式的，它的某些设备需要用承压壳体加以保护。耐压壳的重量约占整个水下机器人重量的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$  强，因而合理地设计耐压壳将对水下机器人性能有着举足轻重的影响。

### 2.2.1 耐压壳形状

水下机器人耐压壳壳体多数采用球型和圆柱型，或其组合(球-球、球-柱)，也有椭圆型的、球-柱-锥组合的，但为数不多，参见图 2-2。

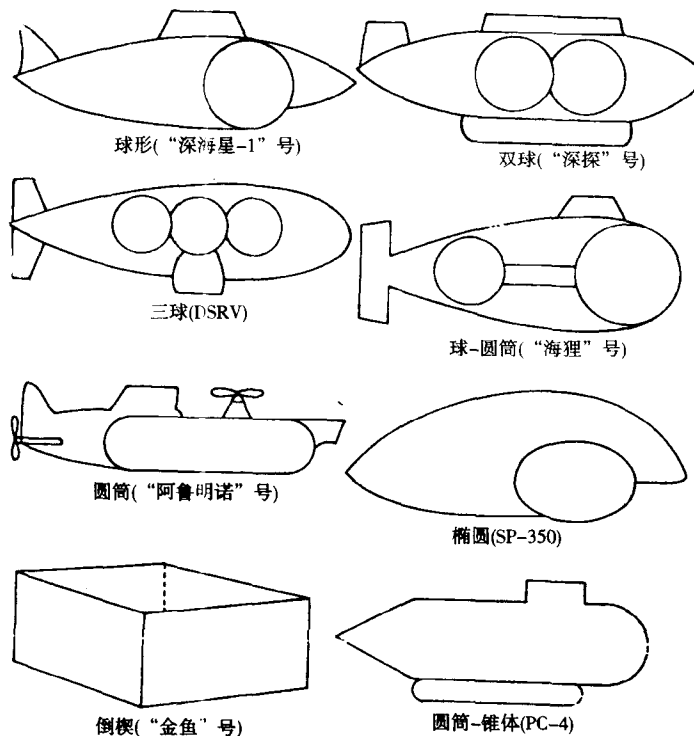


图 2-2 耐压壳的几种基本形状