

从有缆遥控水下机器人到自治水下机器人

封锡盛

(中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 文章给出了水下机器人的定义, 依据定义进行了分类, 简要回顾了几类重要水下机器人的进展, 指出了无人无缆自治水下机器人(AUVs)是当今水下机器人研究与开发的热点, 介绍了最近20年沈阳自动化研究所与国内外有关单位合作, 在水下机器人领域从无人有缆遥控水下机器人(ROVs)到AUVs的研究开发工作, 它从一个侧面反映了我国在这一领域的进展情况。

[关键词] 水下机器人; AUVs; ROVs; 潜水器; 海洋开发; 海洋工程

1 引言

21世纪是人类向海洋进军的世纪, 地球的表面积为 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$, 其中海洋的面积为 $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占地球总表面积的71%。海洋作为人类尚未开发的宝地和高技术领域之一, 已经成为各国的重要战略目标, 是近几年国际上激烈竞争的焦点之一。

我国不仅是大陆国家, 也是海洋国家, 拥有32 000 km的海岸线和 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上的蓝色国土, 蓝色国土约为我国陆地国土面积的三分之一, 其中水深4 000m以内的海域约占90%。在这辽阔的海域内蕴藏的极其丰富的资源, 仅以油气资源为例: 已探明的石油储量达 $(150 \sim 200) \times 10^8 \text{ t}$, 天然气储量 $63 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些资源是我们中华民族未来赖以生存和发展的物质基础。

认识海洋、开发海洋需要各种高技术手段, 发展这些手段是建设海洋强国、捍卫国家安全和实现可持续发展的伟大目标所必不可少的。作为探索内空间的最重要手段之一的水下机器人技术与探索外空间的运载火箭技术有同等重要的意义, 因此, 水下机器人的发展一直为世界各海洋强国所关注。

2 水下机器人概述

水下机器人一词源于机器人学。在自动化领域, 水下机器人(Undersea Robots or Underwater Robots)被看作是机器人中的一类, 属于特种机器人范畴。但在海洋工程界, 通常将这类装置称为“水下运载器”或“无人潜水器”(Unmanned Underwater Vehicles, UUVs)。而不用“水下机器人”这一词, 两个不同名词反映了两种不同的出发点。从事自动化研究的学者常使用“水下机器人”一词, 他们把视觉和机械手看作是这类装置的主体, 把携带机械手的载体看作是运送机械手到现场的移动部件, 这与陆上“移动机器人”的概念相同。海洋工程学者从船舶或潜艇技术的角度出发, 认为这种装置是船舶或潜艇技术的延伸和发展。换句话说, 他们把载体看作是主体。机械手只是载体上携带的一种作业工具。

为了确定水下机器人的范畴, 有必要给出水下机器人的定义: 水下机器人是一种可在水下移动、具有视觉和感知系统、通过遥控或自主操作方式使用机械手包括其它工具, 代替或辅助人去完成某些水下作业的装置。基于上述定义, 将水下机器人分

[收稿日期] 2000-05-19; **[修回日期]** 2000-07-11

[基金项目] “八六三”高技术资助项目(863-512-15)

[作者简介] 封锡盛(1941-), 男, 辽宁海城市人, 中国工程院院士, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 博士生导师

类如图1所示,图中细缆遥控是指自带动力、电缆仅用于遥控的一类水下机器人,大多用于反水雷。按照定义载人潜水器亦可以纳入水下机器人范畴,关于这一点学者们是有争议的。在各类水下机器人中载人潜器、无人有缆遥控水下机器人(Remotely Operated Vehicles, ROVs)和自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicles, AUVs)是最为重要的三大类水下机器人。载人潜器的造价、运行和维护成本很高,同时出于安全的考虑,一般情况下使用较少,其发展基本上处于停滞状态。限于篇幅,本文不讨论载人潜器有关内容。

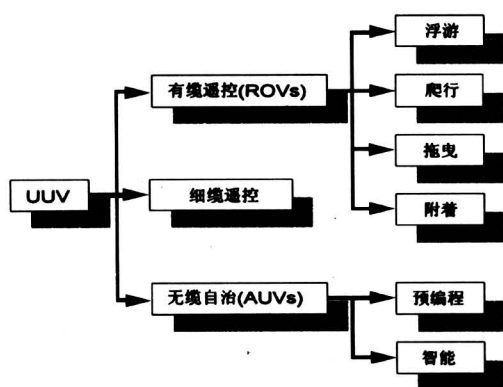


图1 水下机器人分类

Fig.1 classify of the UUV

现在,ROVs技术最成熟且应用范围最广泛。它的操作由人通过主缆和系缆(又称脐带电缆)进行遥控,人的参与使得ROVs能完成复杂的水下作业任务。目前,小型ROVs的质量仅10多kg,大型ROVs超过20000kg,其作业深度达到10000m,几乎可到达任何海洋深度。ROVs的型号在250种以上,全世界超过400家厂商提供各种ROVs整机、零部件以及ROVs服务^[1]。经过半个世纪的发展,ROVs已经形成一个新的产业部门,国外称之为“ROVs工业”。

脐带电缆为ROVs提供动力、遥控、信息交换和安全保障,但脐带电缆限制了ROVs的活动范围,因此不要脐带电缆、自带能源、依靠自治力工作的AUVs自然地成为了人们努力的目标。然而发展AUVs遇到的技术难度很大,这使得AUVs的发展过程出现曲折。直到最近20年AUVs技术才迅速发展并开始走向成熟。从国际上对AUVs的关注情况来看,在各类水下机器人中,AUVs的研究与开发是当前和今后一段时间的主流,目前世

界各国正在竞相展开研究工作,AUVs是一个热点研究领域,AUVs的特点是活动范围广、体积小、重量轻、机动灵活、噪音低、隐蔽性好,其应用不仅限于民用领域,在军事上,它将成为一种有效的水中兵器。军用AUVs将是AUVs的一个重要分支。AUVs的另一大特点是造价低,与载人潜器和ROVs相比,能完成类似使命的AUVs的体积和重量大约要比载人潜器小一个数量级,且不需要价格昂贵的生命维持系统和水面支持系统。显然AUVs有极好的潜在应用前景。

目前AUVs技术尚在发展中,若要满足商业化应用还需要几年时间。

关于载人潜器、ROVs和AUVs的进一步介绍参见文献[2]。

以下主要结合沈阳自动研究所与国内外有关单位合作,从ROVs到AUVs的发展历程介绍几种水下机器人。

3 我国的ROVs进展

从70年代末起,中国科学院沈阳自动化研究所和上海交通大学开始从事ROVs的研究与开发工作,合作研制了“海人一号”ROVs。它是一台原理样机,以海洋石油开发、打捞救生和发展水下智能机械为应用背景。“海人一号”是一台典型的无人遥控浮游式水下机器人,其简化的工作原理图如图2所示,主要由五个子系统组成:驾驶与导航和运动控制;信息交换;视觉、触觉与监视;主从机械手;系缆和水面支持(图中未示出)。1985年12月“海人一号”在我国大连海域进行了海试,根据海试发现的问题进行了大幅度的改进,将原来以模拟技术为主的控制、水上水下通信、主从机械手等子系统改进为以多微机组成的控制系统。其改进后的重量和体积分别减少了三分之二和二分之一,性

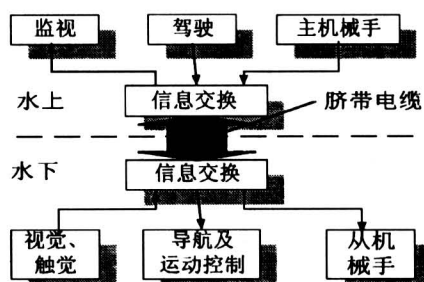


图2 “海人一号”原理框图

Fig.2 “HR-01” concept diagram

能也有了明显提高。1986 年 12 月“海人一号”在我国南海再次进行了海试，取得成功。“海人一号”是我国独立自主研制的第一台大型水下机器人，在我国这是一项开拓性工作，它的成功开辟了一个新领域。

为了使样机能转化为产品并推向市场，1986 年沈阳自动化研究所从美国 Perry 公司引进了中型 ROVs“RECON-IV”，经过二次开发，目前能向国内外用户提供中型 ROVs 产品及售后服务。

为了进一步扩展 ROVs 的应用领域，沈阳自动化研究所还先后开发了小型 ROVs“金鱼”系列、

“HR1”和“HR1-100”，其主要功能是水下观察作业，潜深 100~200m，其特点是适用于狭小空间进行检查作业，这种机器人已经用于水电部门和部队。

六足步行水下机器人“海蟹号”，是一种海底爬行类水下机器人，也于 1984 年研制成功。另一种海底水下机器人自行式海底电缆埋设机正在研制中。

表 1 列出了沈阳自动化研究所研制出的几种 ROVs 的主要技术参数。

表 1 沈阳自动化研究所研制的几种 ROV 的主要技术指标

Table 1 Main specification for several tapes of underwater vehicles by SIA

项目	海人一号	RECON-IV-SIA	金鱼三号	HR-1-100
时间	1979-1986	1986-1991	1987-1989	1996-1997
类型	作业型	作业型	观察型	观察型
工作深度/m	200	300	100	100
速度/ $m \cdot s^{-1}$	1	1.4	1	1
推力器总功率/kW	20	6	0.2	1.5
空气中质量/kg	2198	800	34	32
水中重力/N	-180	-100	-5	-17
水下载体尺度 $m \cdot m \cdot m$	$2.7 \times 1.59 \times 1.95$	$2.12 \times 1.03 \times 0.96$	$06 \times 0.58 \times 0.35$	
定向/ $^{\circ}$	± 2.5		± 4	± 3.5
定深/m	2	0.1	0.2	0.2
定高/m	0.5			
机械手	6 功能双向反馈主从手	6/5 功能主从手	无	无
视觉	双	单	单	单
触觉	有	无	无	无

此外，上海交通大学、中国船舶科学研究中心等单位也研制成功了不同类型的 ROVs。

经过十多年的努力，我国能够生产和制造大、中、小型的各类 ROVs，在 ROVs 的研制与开发方面基本上能够满足国内市场的需要，在国际市场上也占有一席之地。拖曳式的 ROVs、爬行 ROVs 也开始进入开发和应用阶段。

4 我国的 AUVs 研究开发工作

在国家“八六三”计划支持下，沈阳自动化研究所从 1987 年开始 AUVs 的研究与开发，用了 3 年时间建成了 AUVs 试验床——HR-02，并通过试验床开展了 AUVs 的体系结构、驾驶控制、导航和水声通信等项关键技术的预研工作，这项工作

为以后的研制工作打下了良好的基础。

1990 年 10 月，沈阳自动化所与中国船舶科学研究中心等单位开始研制我国第一台自治水下机器人“探索者”号。“探索者”是一台原理样机，其目的是从系统的角度验证所采用的各种方法和技术的可行性。

“探索者”号以水下调查和搜索失事目标为应用背景，其组成如图 3 所示，包括水下载体、水声通信、导航定位和水面支持（含水下回收器）四大部分。其主要技术指标见表 2。

“探索者”可执行以下 5 种作业使命：大范围海底搜索；小范围精细搜索；接近目标调查；现场海洋要素测量和投放小型设备。操作者只需给定使命类型、使命参数和设备参数，“探索者”将自治

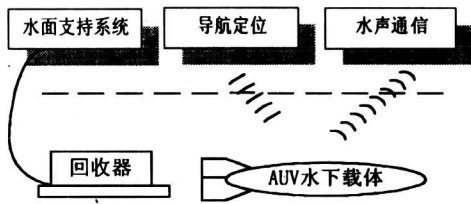


图3 “探索者”组成示意图

Fig.3 Schematic drawing for “explorer” composition

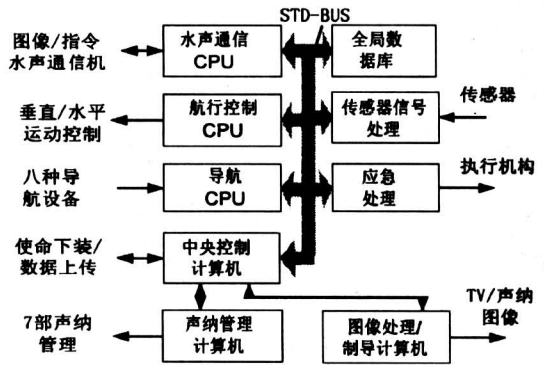


图4 “探索者”号自动驾驶硬件图

Fig.4 Hardware plot for autopilot for “explorer”

表2 “探索者”号和“CR-01”(6000m)自治水下机器人的主要技术指标

Table 2 Main specifications for “explorer” and CR-01 (6000 m)

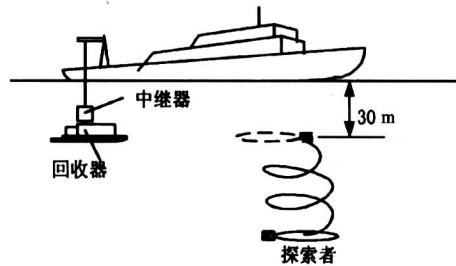
AUVs	探索者	CR-01
工作深度/m	1000	6000
最大航速/ $m \cdot s^{-1}$	2	1
侧移速度/ $m \cdot s^{-1}$	0.5	
水声通信速度/ $b \cdot s^{-1}$	1200	无
水声通信距离/m	1000	无
质量/kg	2112	1300
尺度/ $m \cdot m \cdot m$	$4.4 \times 0.92 \times 1.07$	$4.37 \times 0.8 \times 0.93$
短基线、超短基线声纳定位精度/m	$(0.02 \sim 0.05) L^*$	无
长基线定位精度/m	无	15
回收海况/级	4 (自动回收)	4 (人工)
能源/ $kW \cdot h$	充油铅酸电池 10	银锌电池 4.8

* L 为短基线或超短基线声纳的作用距离

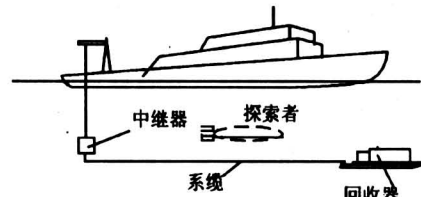
地完成给定的使命。载体上安装了三对推力器，可实现四个自由度运动，其底层运动控制与“海人一号”相似。5部防碰声纳用于自动回避有先验模型的障碍，遇到其它类型的障碍被认为无能力回避而转入应急程序处理。其它设备还有：短基线定位声纳、超短基线定位声纳、通信声纳、多普勒测速声纳、声像声纳和光学调查设备。“探索者”上安装的设备与国外同类型 AUVs 相比是最多的。

“探索者”自动驾驶控制器的核心部分由6台计算机组成见图4，其中4台CPU以多机共用总线方式工作，分别用于任务分解、垂直面和水平面运动控制、信息融合和导航、电视和声纳图像处理、目标信息提取、回避障碍、故障诊断和应急处理。为了克服恶劣海况给 AUVs 回收带来的困难，

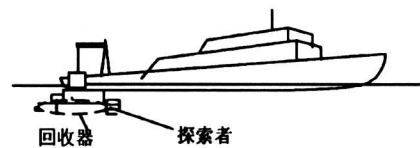
采用以视觉导引技术为核心的水下对接自动回收方法，其回收过程参见图5。南海试验表明，该方法原理上是可行的，但也存在不足，由于试验区水浅，使得摄像机对外界光线的强弱过于敏感，导致图像处理数据不够稳定，因而回收成功率差。



a “探索者”作业结束后盘旋上升至30m处。母船放出中继器和回收器至35m



b 回收器离开中继器，“探索者”寻找系绳，并跟踪系绳行至回收器上方对准下落，完成对接



c 探索者、回收器和中继器一起起吊至甲板

图5 “探索者”号的水下回收过程

Fig.5 Undersea recovery of “explorer” vehicles

通过水声信道在水下传送图像，是国际上的前沿课题之一，“探索者”号进行的图像传送试验获得良好结果。图 6 是水平传送 1 050 m 的声纳图像照片。

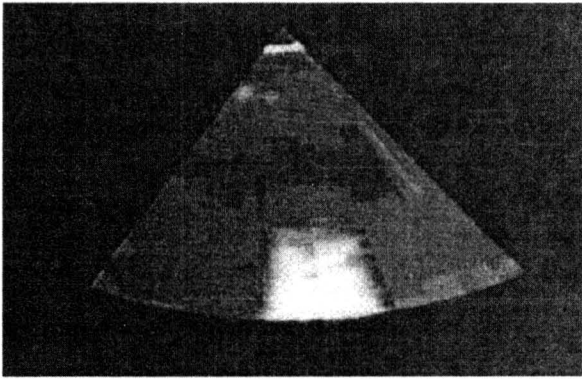


图 6 母船控制台收到的 1 050m 处“探索者”号发回的海底声纳图像

Fig.1 Ship received bottom sonar image given by “explorer” vehicle at depth of 1 050m

“探索者”的实践，在 AUVs 的总体、载体水动力特性、推进、结构、线性、总体布置、导航与控制、水声通信、水下回收等方面积累了有益的经验。

从 1992 年起，在“探索者”的基础上，开始研制 AUVs 的实用型 CR-01 (6 000 m)。它用在太平洋我国保留区调查海底多金属结核。其要求是实用、安全和可靠。该海区海底地势平坦，基本无海流，水质清洁，其它干扰因素少，比浅海更有利于 AUVs 的作业，这是有利因素，不利因素是 60 MPa 深水压力带来的困难。虽然有了研制“探索者”的基础，但是，从原理样机转变成实用样机尚需多次海上试验、评价和改进，需要大量的经费支持，也需要相当长的时间。我国研究人员与俄罗斯有关单位专家进行了有效地合作，这些对于缩短这一进程起到了重要作用。中俄专家进行了四次联合设计。俄方提供了一些材料、设备和部件以及经验，俄方专家还应邀参加我方湖试和太平洋海试。

为了安全可靠，“CR-01”与“探索者”相比简化了功能，减少了机载设备。载体采用了模块化结构和充油密封技术。“CR-01”的作业使命由操作员离线分解，用专门定义的函数预先编制程序，编译后下载到“CR-01”的自动驾驶控制器，自动驾驶控制器用的计算机与“探索者”相同，采用

STD-BUS，单 CPU 工作。调查设备共四种：摄像机、照相机、旁侧声纳和浅地层剖面仪。主要技术参数见表 2。

1995 年“CR-01”首次在太平洋进行试验，获得成功。试验中也发现若干问题，如：上浮压载抛不掉，险些丢失，“CR-01”回到水面后不易被寻找等。1996 年对“CR-01”进行了若干重要改进，1997 年再次赴太平洋进行试验并执行调查任务，获得圆满成功。

根据中国大洋矿产资源研究开发协会的要求，新一代的 6 000 m AUVs 的“CR-02”正在研制中，新 AUVs 应具备在复杂海底如海底火山上进行调查的能力，这对 AUVs 的性能提出了新的要求，为此，改进了推进系统和总体结构的设计，增加了垂向对转桨，研制了新型测深侧扫声纳，为适应爬山的需要将底层闭环调节器由 PID 改为自校正调节器等。预计今年年底新型 6 000 m 的 AUVs “CR-02”开始进行湖试，明年进行太平洋海试。

上述工作是由沈阳自动化研究所、中国船舶科学研究中心、中国科学院声学研究所、上海交通大学和哈尔滨工程大学等单位在国家“八六三”计划支持下，经过十多年的努力共同完成的。它虽然不是我国 AUVs 研究工作的全貌，但它从一个侧面反映了我国水下机器人的发展情况。

5 结束语

经过 20 年的发展，我国水下机器人取得了令人瞩目的成就。目前，图 1 所列的各类水下机器人，我国大多数都有能力制造。其中一些还达到国际先进水平，个别技术还具有国际领先水平，我国还有少量水下机器人出口。

但是，我们也必须清醒地看到我国同国际先进水平的差距有越来越大的趋势，其原因是投入的经费有限。以美国为例，1992 年我们访问美国新罕布什尔大学时，了解到美国当年对 AUVs 的投资就达 1.5 亿美元。美国海军无人潜水器计划部安排的一个反水雷计划，1996—2001 年投入 1.4 亿美元研制 AUVs。而我国“八六三”计划在 AUVs 上的投资十年总数大约 3 000 万元人民币。尽管我国的财力有限，适当增加一些资金投入是需要的，水下机器人对国民经济的持续发展和国防安全是有重要意义的项目，应予以重视。

(下转第 58 页)

Development and Suggestion on the Comprehensive Automation of Process Industry

Huang Dao¹, Li Guanghua²

(1. *East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China*;

2. *Shanghai Coking & Chemical Corporation, Shanghai 200241, China*)

[**Abstract**] The rapid development of industrial automation has brought favorable requirements for the chemical enterprises to carry out comprehensive automation. This article brings forward the three-strata structure of the comprehensive automation, describes it in concepts, and discusses the key problems which should be paid attention to during its process. Finally, an example project is briefly introduced on the basis of the understanding which is acquired through practical implementation of comprehensive automation for chemical enterprises.

[**Key words**] process industry; CIMS; comprehensive automation; product data management (PDM)

(上接第 33 页)

参考文献

[1] Remotely operated vehicles of the world [M]. 4th edi-

tion. 888W. Sam Houston Pkwy S. Suite 280 Houston, TX77042, USA: Oilfield Publications Limited, 2000

[2] 封锡盛, 刘永宽. 自治水下机器人研究开发的现状和趋势 [J]. 高技术通讯, 1999, (9): 55~59

From Remotely Operated Vehicles to Autonomous Undersea Vehicles

Feng Xisheng

(*Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China*)

[**Abstract**] A clear definition and a very fine classification of the unmanned undersea vehicles are given in this paper. Following a brief introduction of the advances on the unmanned undersea vehicles the paper points out that the autonomous underwater vehicles at present is a hot spot in the research realm of the unmanned undersea vehicles. This paper describes the research and development achievements pertinent to the unmanned undersea vehicles in Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences with the cooperation of organizations home and abroad in the last two decades. SIA started to be engaged in the research and development of the remotely operated tethered vehicles in the end of 1970's. This paper gives a wide introduction of the critical characteristics and technical descriptions of the first remotely operated tethered vehicle "HR-01" in China, the first autonomous underwater vehicle "Explorer" and the autonomous underwater vehicle CR-01 (6 000 m).

[**Key words**] undersea vehicles; ROV; AUV; ocean engineer; ocean resources exploration