

下一代海洋机器人 写在人类创造下潜深度世界记录 10912 米 50 周年之际

封锡盛, 李一平, 徐红丽

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 人类探索、认识和利用海洋的活动历史很漫长, 最近 50 年, 各种海洋机器人及相关装备的助推, 使这种活动达到了前所未有的高峰阶段, 未来社会进步的需求和科学技术发展的牵引将会使这种活动达到新的高度。本文简要回顾了世界和我国海洋机器人的发展历史, 分析了各种类型海洋机器人的现状, 并对其未来作了展望。

关键词: 海洋机器人; 载人潜水器; 遥控水下机器人; 自主水下机器人; 无人水面机器人

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-01-0113-06

The Next Generation of Unmanned Marine Vehicles Dedicated to the 50 Anniversary of the Human World Record Diving 10912 m

FENG Xisheng, LI Yiping, XU Hongli

(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: It's a long history for human being to explore, understand and use oceans. With the help of a variety of unmanned marine vehicles or related equipments, these activities have reached an unprecedented peak stage in the past 50 years, and the future demands from social progress and scientific and technological developments will drive these activities to a new height. This paper reviews the development history of unmanned marine vehicles at home and abroad, analyzes the status of various unmanned marine vehicles, and tries to prospect their future developments.

Keywords: unmanned marine vehicle (UMV); human occupied vehicle (HOV); remotely operated vehicle (ROV); autonomous underwater vehicle (AUV); unmanned surface vehicle (USV)

近年, 国外一些文献将“水下机器人”(UUV)与“水面机器人”(USV)合称为“海洋机器人”(UMV)^[1-2].

根据《潜水器与水下装置术语》^[3], “水下机器人”应称为“无人潜水器”。但是, 多年来, 国内大多数作者仍习称“水下机器人”, 鉴于这一习惯以及国标中的某些内容与现况不适应, 为了与机器人学领域称谓一致, 本文仍使用水下机器人这一名称。考虑到在技术和功能上的共性, 本文亦将载人潜水器(DOV, direct operated vehicle, 或 HOV)纳入水下机器人类。

1 引言 (Introduction)

1960 年, 两名美国探险者乘坐“特里亚斯特”号载人潜水器, 在马里亚纳海沟下潜到 10912 m, 创

造了下潜深度的世界纪录, 50 年来没有人突破这一纪录。之后, 日本科学家研制出了“海沟”号遥控水下机器人(ROV), 于 1995 年 3 月下潜到 10911.4 m。美国的 6000 m 级自主水下机器人 ABE 已经完成了 200 多次的下潜作业, 取得了多项重要成果, 尽管后来“海沟”号和 ABE 都丢失了, 但这并不能掩盖其光芒。这些是人类探索、认识和利用海洋的伟大进程中的里程碑事件。我国的自主水下机器人(AUV)“CR-01”于 1997 年在太平洋中部下潜到 5300 m, 虽然也闪烁过光辉, 但尚需时间历练, 以丰富自己的阅历。2010 年, 一些美国团体将举行下潜马里亚纳海沟的竞赛以纪念 50 年前的壮举, 此时, 我们撰写本文也是一种感怀和纪念。

本文在简要回顾世界及我国海洋机器人历史的基础上, 对海洋机器人的发展作了展望。

2 海洋机器人发展历史 (Phylogeny of UMV)

文 [4] 将水下机器人的发展历史称为三次革命: 第一次革命出现在 20 世纪 60 年代, 以潜水员潜水和载人潜水器的应用为主要标志。第二次革命出现在 20 世纪 70 年代, 以遥控水下机器人迅速发展成为一个成熟的产业为标志。第三次革命发生在 20 世纪 90 年代以后, 以自主水下机器人走向成熟为标志, 今后将进入各种类型机器人的混合时代。该文是对水下机器人发展历史的概括总结。

2.1 水下机器人

水下机器人以操作者(人)与被操作对象(机器人水下载体)之间的相对位置分类。人位于机器人载体内直接操作称为载人潜水器, 人在机器人载体外部(如母船上)通过电(光)缆操作称为遥控水下机器人, 由载体内的计算机控制系统代替人自主操作称为自主水下机器人。上述 3 类装备在实际应用中各有优势, 又都有其局限性, 在性能和功能上既有重叠又各有特点, 见表 1。

表 1 各类水下机器人适应性和局限性对比

Tab.1 Adaptability and limitations of various types of underwater vehicles

项目	HOV	ROV	AUV
1. 动力连续供应, 持续作业间长	☆		
2. 活动范围大		☆	
3. 能使用机械手	☆	☆	
4. 操作员安全	☆	☆	
5. 不绑定母船	☆		☆
6. 实时直接观察	☆		
7. 综合费用低		☆	☆
8. 甲板设备简单			☆
9. 作业时不需要母船动力定位	☆		☆
10. 操作员紧张程度低			☆
11. 回收难度小		☆	
12. 适宜结构复杂的空间作业			☆
13. 适合多机器人联合作业			☆
14. 作业时不受海面气象影响	☆		☆
15. 作业中意外丢失风险小		☆	

注: 表中所列各项是指性能、功能和尺度大体有可比性的 3 类装备的粗略对比。

就技术而言, 载人潜水器总体上是成熟的, 目前还在运行的载人潜水器为数极少, 且大多都有几十年的历史。人的安全性考虑以及庞大的建造、运行、支持和维护费用是其不足, 一般来说, 载人潜水器的功能基本上可由遥控水下机器人和自主水下机器人替代, 这导致载人潜水器数量的锐减。

20 世纪 60 年代, 海洋石油工业的发展促进了遥控水下机器人的迅猛进步, 并在 70、80 年代逐步形成遥控水下机器人产业。据不完全统计, 到 2009 年底, 大约有 461 个型号近 6 000 台遥控水下机器人在运行, 全球有超过 300 家专业从事遥控水下机器人研制、生产和售后服务的企业, 图 1 列出了 2002 年和 2008 年遥控水下机器人数量按深度的分布情况, 从图中可以看出潜深小于 1 000 m 的机器人占总量的 40% 左右, 这是由于绝大多数海洋资源在近海和近海水下生产活动多, 需求量最大。中等潜深 (2 000 m ~ 4 000 m) 的大约占 26%, 主要服务于深水油气生产及大洋中脊的科学活动, 潜深大于 7 000 m 的占 3.1%。

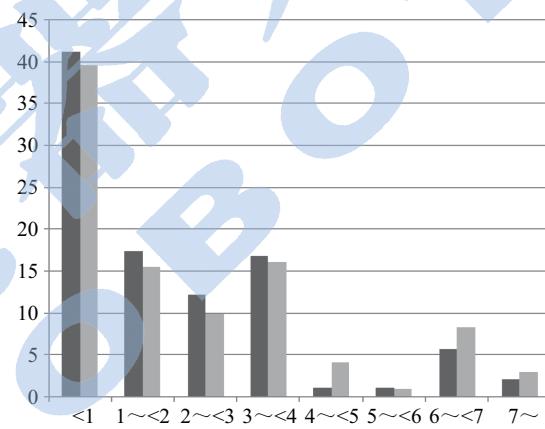


Fig.1 Quantitative distribution of ROV by depth (%)

注: 图中深色为 2002 年数据, 浅色为 2008 年数据, 纵坐标为数量/总量的百分比, 横坐标 $\times 1000\text{ m}$ 为深度。根据文 [5] 数据绘制。

自主水下机器人基于自身的自主能力即知识和智能执行使命, 不需要操作者实时干预执行过程 [6]。与遥控水下机器人相比, 自主水下机器人具有自主执行使命、作业范围不受缆的约束、功能多样(能浅能深、可远可近、亦单亦群、可主可辅等)、隐蔽性好、可由多平台支持等优点。

当今世界约有 100 种自主水下机器人, 其中半数为试验床。总体看, 自主水下机器人还没有达到成熟阶段, 目前只有少数厂商能提供商业化产品。

我国自 20 世纪 80 年代初开始研究开发遥控水下机器人。1984 年, 我国第一台遥控水下机器人“海人一号”在中国科学院沈阳自动化研究所诞生。1987 年, 中国科学院沈阳自动化研究所与美国 Perry 公司合作生产出我国第一台中型遥控水下机器人产品“RECON-IV-SIA300”。近年来, 上海交通大学研制的潜深 3 500 m 的遥控水下机器人已投入运行, 目前, 我国在遥控水下机器人技术水平、设计能力、总

体集成和应用等方面与国际水平相齐。

我国自主水下机器人的研究与开发始于 20 世纪 80 年代。1987 年, 中国科学院沈阳自动化研究所在国家 863 计划支持下建成我国第一个自主水下机器人试验床 HR-02; 1994 年与中国船舶科学研究中心等单位合作研制出我国第一台自主水下机器人“探索者”号; 1995 年联手国内多家单位和俄罗斯合作研制开发出潜深 6 000 m 的实用型自主水下机器人“CR-01”并于 1997 年赴太平洋用于海底多金属结核的调查^[7]; 经过改进, 2000 年又研制出“CR-02”6 000 m 自主水下机器人。

2.2 无人水面机器人 (USV)

无人水面机器人是一种靠遥控或自主方式在水面航行的小型无人智能装备^[8]。

它的发展主要源于军事的需求, 在二战诺曼底登陆战役期间, 盟国曾设计出一种形如鱼雷的无人水面艇, 可按预先设定的航向机械地驶往计划登陆的海滩施放烟幕^[9]。20 世纪 50 年代以后, 无人水面机器人在扫雷等危险任务中的应用受到重视。美国海军开发了包括小型“靶机小艇 (drone boat)”和更大一些的扫雷靶机 (mine sweeping drone, MSD) 在内的数种 USV。

进入 20 世纪 90 年代, 随着制导和控制技术的日渐成熟, 出现了 R/C DYADS、MOSS、ALISS 等更复杂的无人水面机器人扫雷系统。美国海军开发的远程猎雷系统 (remote mine-hunting system, RMS), 被认为是真正意义上的自主无人水面机器人之一。但迄今为止, 只有美国和以色列等国的无人水面机器人已进入试验阶段并有一些实际应用^[12]。

近几年, 我国才开始重视无人水面机器人的研究和开发, 目前尚处于起步阶段。无人水面机器人作为一种新概念装备, 其在海战中的应用还有待攻克一些关键技术。但军事专家认为, 水面机器人未来将和无人机 (UAV)、无人战车 (UGV)、水下机器人 (UUV) 协同作战, 共同构筑起无人化战场。

当前, 海洋机器人的应用和开发非常活跃。人们已经发展了各式各样的具有感知、决策和作业能力的海洋机器人, 除遥控水下机器人、自主水下机器人、无人水面机器人外, 还出现了两栖水下机器人、仿生水下机器人、自主/遥控混合式水下机器人等一些新型海洋机器人。

3 下一代海洋机器人展望 (Expectation of the next generation UMV)

总的来说, 海洋仍是未被充分认识和利用的空

间, 随着陆地资源的减少, 人类生存对海洋的依存度空前地增长, 这就决定了海洋机器人必将会快速发展以适应这种增长的需求, 因为海洋机器人是满足这种需求的不可或缺的有效工具。能源生产、海底通信、军事应用和海洋科学研究仍将是最大的社会需求部门, 应用范围还将向其它产业部门扩展, 海洋机器人将成为海洋装备制造业的一个支柱。

下一代机器人的走向取决于未来的社会需求和科学技术创新发展的牵引, 需求拉动创新, 创新开辟新的需求空间, 同时, 下一代机器人的发展必将与时代要求 (如: 低碳和环保等) 相适应。已经出现的一些苗头, 可为我们判断未来走势提供依据。

(1) 遥控水下机器人绿色化

遥控水下机器人绿色化是时代要求, 降低能源消耗和延长使用寿命以减少材料消耗, 使之更符合环保要求。目前大功率的遥控水下机器人多采用液压系统, 其能耗要比电气系统低, “液变电”总效率可提高 2~3 倍, 提高效率不仅节省能源, 也将因减少设备的总重量而节省材料。另外, 在水下机器人结构材料中用耐腐蚀的高分子材料代替易腐蚀的金属材料, 延长寿命, 减少材料消耗, 实现“塑料化”, 以及利用清洁能源 (太阳能或其它海洋动力) 的水下机器人将受到重视。

(2) 遥控水下机器人向大深度、大功率或大推力发展

深度是水下机器人重要的标志性指标, 向更大深度发展仍是今后的方向, 不同应用领域对大深度的理解是不一样的, 表 2 列出了几项与海洋机器人相关的具有标志意义的深度。促进遥控水下机器人向大深度发展的主要动力来自海洋油气生产转向深水, 其次是海上救生、海洋资源调查和科学研究所。

表 2 有标志意义的深度

Tab.2 The depth with landmark significance

深度 /m	意义
300	常规潜艇最大深度
500	我国援潜救生艇最大深度
600	核潜艇最大深度
3 000	中国海洋石油钻井平台最大深度
3 500	我国遥控潜水器最大深度
5 300	我国自主水下机器人最大下潜深度
6 000	世界海洋总面积的 97% 小于这个深度
10 911 ^[10]	载人潜水器最大下潜深度
10 911.4	遥控潜水器最大下潜深度

从图 1 看出, 到 2008 年, 4 000 m 以浅的遥控

水下机器人的数量在减少，潜深超过 4 000 m 的数量增加。2008 年，除“海沟”号以外，潜深最大的遥控水下机器人是美国 Williamson & Associates Inc 的 BMS，工作深度为 9 000 m。

20 世纪 80 年代以前，浮游式大功率遥控潜水器最大推力一般不超过 56 kW (75 hp)，速度大多为 2 kn，目前已经增加到 110 kW (150 hp)，速度大多数为 3 kn ~ 3.5 kn，2008 年海底行走类的机器人最大功率已达 2 100 kW (Ultra Trencher UT1)。功率大意味着“力气大”，尤其海底管线施工作业对功率的要求越来越大。

(3) 实现更轻松的操作

操作遥控水下机器人是一件繁重的工作，对操作人员的智慧、体力和技术水平要求很高，主要原因是机器人“太笨”，人必须适应“笨拙”的机器人。随着计算机、电子、传感、虚拟现实、人机交互和智能自主等技术的迅速发展和应用于水下机器人，水下机器人将变得聪明起来。机载传感系统会给出环境和对象的模型，甚至实现“零可见度导航”。水下机器人将能主动与操作员配合，友好的人机界面和先进的人机交互技术，将改善操作条件，人和机器人的分工将实现从“人围绕机器人转”向“机器人围绕人转”的转变。操作员的工作将变得越来越轻松和高效，自主与遥控两类机器人的界限将逐步消失。

(4) “力工”变“技工”

按习惯把带有机械手或工具包的水下机器人称为作业型，水下生产和水下施工将要求作业型水下机器人能在复杂的结构物中从事难度较高和精细的作业，要足够强壮以抵抗各种扰动，并具有很大的灵活性，一些在其它类型机器人中已经被采用的先进技术，如：强鲁棒性和高精度的控制系统、智能控制、柔性系统、具有力感/触觉/多手指的机械手和多手或多足等，将被更多采用，今后水下机器人将不仅是只能干“粗活”的“力工”，也将是有技能的“技工”。

(5) 多种类型协作和协同

海洋环境十分复杂，作业对象也千差万别，还没有一种水下机器人是万能的，在实际应用中，每种类型水下机器人都有其适应性和局限性。显然，联合作业可以实现互补和优化，文 [4] 将此称为“混合型”，并以遥控、自主和半潜 3 类水下机器人分别作为正交系的 3 个坐标来表示这种混合，该文作者认为这将是未来发展的主要趋势。例如，水面与水下自主机器人组合将使自主水下机器人摆脱“野鬼孤魂”的处境，融入现代网络系统中。

(6) 自主水下机器人提高自主能力从“信息型”向自主“作业型”发展

提高自主机器人的自主能力始终是最基本和最核心的问题，受这一能力限制，目前自主水下机器人的主要行为表现为水下载体的机动，能够完成的使命非常有限，大体上只能完成低级的信息使命，不能满足水下施工和生产作业的需要，从“信息型”向自主“作业型”转变是智能自主能力的升级，也是重要和必然的发展趋势。典型的作业是机器人能自主地理解环境并实时生成合乎逻辑的可行行为，使用机械手或工具去完成较复杂的使命，成为“水下工人”，这是自主行为能力的重要升级，是自主机器人发展的高级阶段。

(7) 向集群化、网络化方向发展

当前，海洋机器人集群或由各种海洋机器人组成的水下网络属于海洋机器人领域前沿性的研究课题，已出现一些实用性的试验系统，如 1996 年在美国新泽西海湾布设的大陆架观测系统^[11]。未来海洋机器人将更多地以集群、联网的方式执行作业任务。

(8) 超越单一介质空间

目前，已有多种类型的水陆两栖海洋机器人处于研发、试验阶段。未来的海洋机器人将不再局限于海洋这一单一介质空间，将出现既可以在水中或水面航行，又可以在陆上行驶，还能飞上蓝天的超级海洋机器人。

(9) 仿生机器人实用化

人们已经研制了多种仿效海洋生物行为的机器人，如：仿鱼、仿蟹、仿蛇、仿龟等，但大多数未实用化，未来在新材料、新能源、新传感器领域的技术进步，将有可能使其走向实用化。

(10) 海下(矿井水下)采矿机器人

随着陆地矿产资源的减少，海底矿物资源的开发逐渐成为人们关注的热点，应对新矿物资源的开发，如：多金属结核、热液硫化物、富钴结壳等，需要新型机器人，尽管未来十年这些矿物资源未必能进入实质性开发生产阶段，但是为此所需的新技术和新装备至少需要 10 年的准备期。部分陆地矿井可使用水下机器人进行水下采矿，这对于在危险和不适宜人工开采的环境中进行生产将是一个突破。

4 海洋机器人未来发展中的关键技术 (The key technologies of UMV's development in the future)

(1) 智能自主 (intelligent autonomy, IA) 及其度

量和分级。智能自主是所有海洋机器人面临的共性关键技术,其核心技术包括3方面:在线重规划/自主控制、自主应对威胁和分布式多自主水下机器人协同控制。在线重规划/自主控制,主要解决机器人的实时快速应变问题;自主应对威胁是其生存和执行使命的前提和基础;协同控制是群体力量的体现,也是其遇到麻烦时从他方获取帮助的手段。自主程度是模糊概念,需要有量化的表达,以便分析、比较、交流并实现相关模块的互换,对用户而言,可根据需求和对应的机器人能力级别进行合理选择和高效率地使用。2007年,美国试验与材料学会国际组织(ASTM)发表了关于自主的标准指南^[12],该指南用正交坐标表示自主程度,见图2,3个坐标分别表示决策规划与控制、情景感知和外部交互。每个坐标均有刻度表示相应的级别,各级别代表的含义参见表3~5。例如图中A(2,5,3)点表示自适应执行使命,具有推断和全自主作业能力。

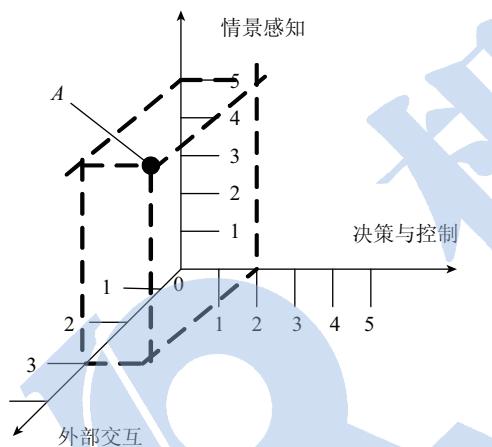


Fig.2 Levels of intelligent autonomy

(2) 能源、能源补充及动力推进

遥控水下机器人由于由母船提供持续的电力供应而不必考虑能源问题,但是对于自主水下机器人来说,要完全依靠自身所带能源完成作业任务,就必须考虑能源和动力推进的效率问题。能源是自主水下机器人的关键技术之一,其续航力、航速和负载能力均受制于可用能源。要使自主水下机器人具有更远的航程,需要研究更高密度、更高效的新型能源,近期燃料电池和半燃料电池可能是未来发展的重点。像空中加油那样为水下机器人补充能源是增加续航力的重要途径,但需要解决快速充电或水下更换电池组的技术问题。

兼顾低速或高速航行的高效率、低噪声的推进系统是未来努力方向。

(3) 先进的电子自动化设备

先进的电子自动化设备包括导航/定位、通信、控制设备和软件,这些是海洋机器人完成预定使命必不可少的核心装备。当前使用的这类装备许多是借用其它领域的现成品,而非专门为海洋机器人配套用,因而存在体积大、功耗高、精度差、响应慢、集成度低以及相互不匹配、不标准、难以互换等缺点,制约了商业化的发展。未来的先进电子自动化设备将大幅度地提高上述各方面的能力。

表3 决策、规划和控制
Tab.3 Decision-making, planning and control

等级	描述
0	直接控制: 执行外部定义使命, 系统无决策生成部分
1	顺序执行使命, 按外部定义的使命顺序行动
2	自适应执行使命
3	将一系列行动组合, 每次完成1个目标
4	多重目标—多种目标的简单组合
5	联合目标—权衡各个目标

表4 情景感知
Tab.4 Situation awareness

等级	描述
0	从传感器采集的原始数据
1	半处理
2	特征: 滤波, 规格化, 特征化
3	统计: 时间, 空间, 和/或特征, 多形态(多传感器)
4	解释
5	推断
6	辨别意图

表5 外部交互
Tab.5 External interaction

等级	描述
0	遥操作(连续)
1	远程控制作业(非连续)
2	半自主作业
3	全自主作业

(4) 释放及回收技术

海洋机器人与水下固定基站对接以及在恶劣海况下的释放与回收是重要的研究课题。这一问题对于自主水下机器人更为重要,尤其在高海情下回收自主水下机器人。目前使用的方法基本上是人工作业,风险很大,这一问题几乎成了自主水下机器人广泛应用的瓶颈。研制安全、可靠、有效的自动或半自动化的释放与回收装置是今后的重要课题。

(5) 传感器及感知

海洋机器人与其它机器人一样,通过各类传感器感知海洋环境、外部物体和自身状态的变化,进而实现与环境和其它海洋机器人的交互。海洋机器人所有使命的成功都依赖于传感器的有效利用。为使海洋机器人具有更强的环境适应能力,传感器技术的研究方向应集中在提高区域覆盖率,改进分类并提高鉴别能力,发展非传统跟踪技术和化学、生物学、核、放射线学传感器。同时,也需大力发展与新型传感器相匹配的传感器信息处理技术、多源信息融合技术、感知与建模技术等。

(6) 标准化与模块化

海洋机器人的标准化将会有益于模块的兼容性。通过开发和遵循标准接口,使用各种通用产品,可以减少甚至不用订制接口,从而大大加快机器人的开发周期,促进机器人的产品化。同时,标准化将确保海洋机器人和其他系统的互通性。

标准化也会促进海洋机器人模块化,使得各种类型海洋机器人内部或类型之间,可以共享核心功能组件。同时,也将减少把一种机器人的软硬件移植到另一种机器人上的花费和时间。

5 结论(Conclusion)

目前,我国海洋机器人的发展方兴未艾,尽管在5~10年内不会发展成为大规模的产业,但它无疑属于战略高技术领域,在这一领域我国已经有了很好的基础,与世界先进水平差距不是很大。我国是制造业大国,海洋机器人的发展将推动我国海洋高技术装备产业发展,并成为这一领域的制造业大国。

参考文献(References)

- [1] 李和平. 2007—2032年美国无人系统发展路线图 [M]. 北京: 海潮出版社, 2006.
- [2] Li H P. Unmanned systems roadmap 2007-2032[M]. Beijing: Haichao Press, 2006.
- [3] GB/T13407-92 潜水器与水下装置术语 [S]. GB/T13407-92 Terminology for submersibles and underwater installations[S].
- [4] McFarlane J R. Tethered and untethered vehicles: The future is in the past[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(2): 9-12.
- [5] Allen R. Remotely operated vehicles of the world, 8th Edition[M]. UK: Oilfield Publications, 2008.
- [6] 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.
- [7] Feng X S, Liu Y K. Status and development trends of autonomous underwater vehicle[J]. High Technology Letters, 1999(9): 55-59.
- [8] 封锡盛. 从有缆遥控水下机器人到自治水下机器人 [J]. 中国工程科学, 2(12): 29-33,58.
- [9] Feng X S. From remotely operated vehicles to autonomous undersea vehicles[J]. Engineering Science, 2000, 2(12): 29-33,58.
- [10] Zhou H G, Ma A M, Xia L. A research on the development of the unmanned surface vehicles[J]. National Defense Science and Technology, 2009, 30(6): 17-20,30.
- [11] 海天. 未来海战的杀手锏: 新概念武器之无人水面艇 [J]. 舰载武器, 2006(3): 77-83.
- [12] Hai T. New concept weapons in the future warfare[J]. Shipborne Weapons, 2006(3): 77-83.
- [13] Forman W. The history of American deep submersible operations[M]. Flagstaff, USA: Best Publishing Company, 1999.
- [14] Glenn S M, Schofield O M E, Chant R J, et al. The New Jersey shelf observing system[EB/OL]. [2010-06-30]. <http://marine.rutgers.edu/cool/coolresults/papers/papers.html>.
- [15] F2541-06 standard guide for unmanned undersea vehicles(UUV) autonomy and control[S].

作者简介:

封锡盛(1941-),男,研究员,博士生导师,中国工程院院士。研究领域:水下机器人总体技术,水下机器人控制。
李一平(1963-),女,研究员。研究领域:水下机器人控制。
徐红丽(1978-),女,副研究员。研究领域:水下机器人控制。