

2020年深海潜水器热点回眸

崔维成^{1,2*}, 姜哲², 王芳², 李维¹, 宋长会¹, 宋婷婷², 沙金余¹

1. 西湖大学工学院, 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 杭州 310024
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海深渊科学技术研究中心, 上海 201306

摘要 2020年, 国内外在深海装备研发领域取得显著的进展。围绕载人/无人潜水器的研发, 重点介绍了2020年国际和国内的研究热点和亮点工作, 分析了中国海洋技术所处的国际地位, 并对中国深海潜水器领域未来的发展方向提出了建议。

关键词 深海; 潜水器; 仿生智能机器鱼

随着陆地资源开采的日趋枯竭, 人类正面临着人口爆炸、资源短缺、环境污染的重大问题。在人类发展的4大战略空间(陆/海/空/天)中, 海洋是第二大空间。它是生物资源、能源、水资源、金属资源的开发基地, 也是当前最现实和最有发展潜力的战略空间。

1 潜水器技术发展概述

加快深海装备体系建设, 是满足中国对深海矿产资源调查、深海科学研究、海洋资源开发和海洋权益维护等需求的前提。深海装备体系包括用于勘查和作业的各类潜水器, 如载人潜水器(HOV)、无人遥控潜水器(ROV)、无人自治潜水器(AUV)、无人复合型潜水器(ARV)、水下滑翔机(glider)、水

下着陆器(lander)及智能剖面浮标(float or buoy)等, 搭载潜水器进行作业的水面支持母船, 进行水下勘查和作业的通用或专用深海作业工具, 进行海洋环境长期观测的海底观测站, 在真实深海环境条件下能进行科学研究的深海实验室, 可用于深海环境观测、科学试验、深海资源开发的大型深海工作站等^[1]。

“十三五”期间, 科学技术部加大了对于潜水器装备及技术的支持力度, 布局了一系列全海深的载人/无人潜水器, 这些项目在2020年取得了重要的进展, 解决了一系列技术问题。本文围绕深海装备体系的研发, 重点介绍2020年国际和国内的装备研制进展、技术研究热点和亮点工作, 分析中国海洋技术装备所处的国际地位, 并对中国潜水器未来的发展方向提出建议。

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-01-11

作者简介: 崔维成, 讲席教授, 研究方向为深海探测技术, 电子信箱: cuiweicheng@westlake.edu.cn

引用格式: 崔维成, 姜哲, 王芳, 等. 2020年深海潜水器热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 126-136; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.01.010

2 2020年深海潜水器领域的主要亮点

2.1 载人潜水器

载人潜水器是最早发展起来的潜水器类型,它可以运载科学家、工程技术人员、各种电子装置和

特种设备,快速、精确地到达各种深海复杂环境,进行高效的勘探、科学考察和开发作业。

深海载人潜水器一般由载体系统、能源系统、导航和通讯系统、工具和作业系统、生命维持系统、应急安全系统等组成(图1)。

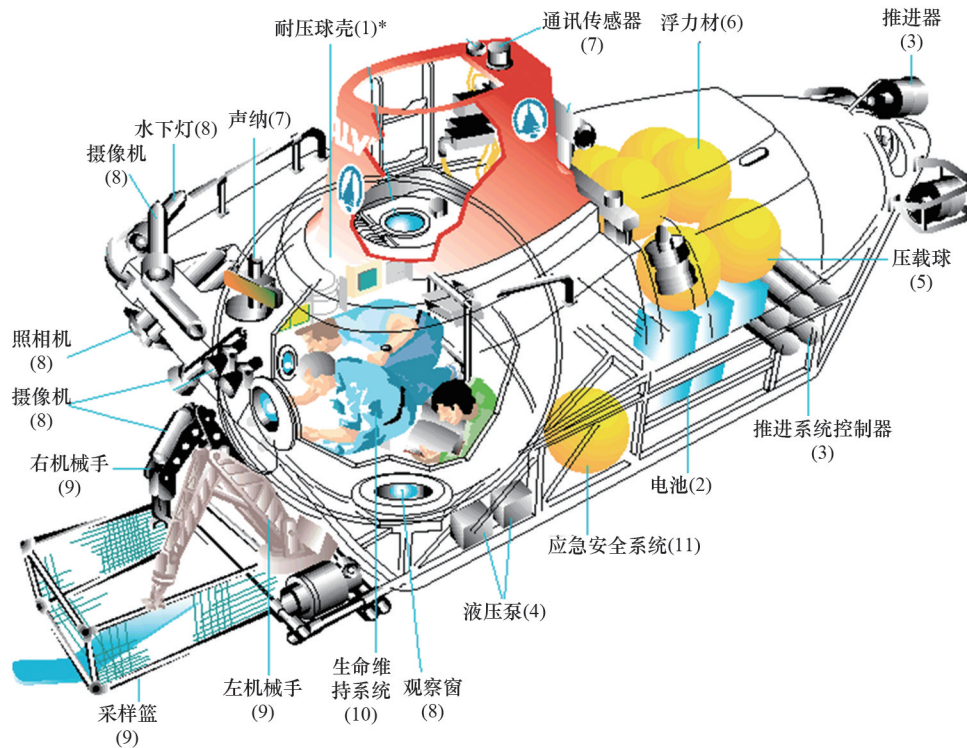


图1 深海载人潜水器示意

2020年,载人潜水器领域的主要亮点是美国的“深潜限制因子”号(DSV Limiting Factor)双人作业型载人潜水器完成了5大洋最深处的下潜,以及中国“奋斗者”号3人作业型载人潜水器成功到达“挑战者深渊”(Challenger Deep)。

“深潜限制因子”号由美国佛罗里达州的 Triton Submarines 公司研制,于2019年5月4次潜入“挑战者深渊”,最大下潜深度10928 m,完成了海底视频拍摄和生物样本获取等。“深潜限制因子”号重11.7 t,载人舱直径1.5 m,厚90 mm,最多允许2人同时下潜;有3个观察窗,方便潜航员观察海底情况;10个推进器,帮助潜水器完成海底巡航。“深潜限制因子”号万米潜次下潜和上浮共需7 h,海底

巡航时间一般为4~5 h。“深潜限制因子”号目前已通过了所有必要的商业认证测试,成为商业产品对外出售,售价为4800万美金。

“奋斗者”号项目于2016年立项,由中国船舶集团公司第702研究所牵头,中国科学院深海科学与工程研究所等20家科研院所、13家高校、60余家企业共同参与,是国家“十三五”重点研发计划“深海关键技术与装备”专项支持的深海重大科技装备项目。“奋斗者”号重36 t,载人舱直径1.8 m,可以同时搭载3名潜航员和科学家下潜。万米海试期间共成功完成13次下潜,其中8次突破万米,11月10日下潜深度10909 m,创造了中国载人深潜新纪录。此次海试由“探索一号”和“探索二号”2条科

考船为“奋斗者”号保驾护航,由搭载了高清相机的“沧海”号着陆器在万米洋底为“奋斗者”号拍照录影,“沧海”号内部还配备了移动机器人“凌云”号,可以在海底为“奋斗者”号补光。

全海深载人潜水器所涉及到的关键技术几乎代表了深海潜水器的所有关键技术。这2台作业型载人潜水器的研制成功,标志着人类在深海技术领域取得了重要突破,中国在深海技术领域也进入国际领先行列。

全海深载人潜水器的研制同时带动了总体设计技术、可靠性设计技术、高强度材料及加工工艺技术、深海液压技术、水下导航定位技术、水声通信技术、低密度浮力材料技术、高密度能源技术、航行控制技术、水下照明摄像技术、水下作业技术等深海技术的发展和运用。深海用钢、钛合金等金属材料在多因素耦合条件下材料组织、性能演变及失效机制,以及有机玻璃、浮力材料等非金属材料在深海环境下的力学性能变化规律、耐久性和作用机理得到进一步揭示^[2-4];材料省、重量轻、受力效果更好的新型耐压结构构型设计分析理论,以及强度、稳定性和长期服役性能评估理论的研究更加深入^[5-6]。

2.2 无人遥控潜水器

无人遥控潜水器的研究起始于20世纪50年

代,是潜水器中种类最多、技术最完善、应用最广泛的种类,也是最早得到开发和应用的无人潜水器,图2为主要深海ROV发展历程^[7]。ROV通过脐带缆与水面支持母船相连接,由脐带缆为其提供电力能源和信息通信功能,操作人员在水面支持母船上可观看潜水器搭载的声学、光学等传感器实时采集的海底状况,并通过发送远程指令遥控操作潜水器本体、机械手、任务载荷和作业工具执行相应的动作。

日本将ROV作为深潜装备研究重点,先后研制了多型万米级ROV产品。1991年,日本海洋地球科学技术局(JMASTEC)开始建造世界上第一台全深海无人遥控潜水器KAIKO,在1995年3月24日KAIKO成功下潜到马里亚纳海沟(Mariana Trench)10911 m处^[8],但2003年因中继器与ROV的二级电缆断裂而导致该ROV丢失。2005年,JMASTEC开始研制全海无人遥控潜水器ABISMO,2008年海试中ABISMO成功下潜至9707 m深度并完成采样^[9]。在此基础上,JMASTEC在2017年5月14日,开展了新型UROV11K的深潜试验,成功下潜到10899 m深度,但ROV在完成试验后上浮到5230 m时停止上浮而丢失^[10]。与此同时,法国、英国、德国等海洋技术强国均研制了6000米级的大深度ROV。图2为国内外主要深海ROV的发展历程。



图2 主要深海ROV发展历程

中国 1983 年开始研制第一台 200 米级无人遥控潜水器原理样机“海人一号”,实现了中国 ROV 领域零的突破,为后续深海无人遥控潜水器发展打下了坚实基础。1993 年,研制成功 600 米级 8A4 作业型无人遥控潜水器。最近十几年,中国深海无人遥控潜水器技术才取得了长足进步,紧跟世界先进水平,先后研制成功“海星”系列、“海马”系列、“海龙”系列无人遥控潜水器^[7]。2018 年 9 月 10 日,上海交通大学葛彤团队研发的深海装备“海龙 11000”ROV,在西北太平洋海山区完成 6000 米级大深度试验潜次,最大下潜深度 5630 m,创造了中国 ROV 装备深潜纪录。“海龙 11000”ROV 何时下到“挑战者深渊”将是未来 ROV 领域需要关注的一个亮点。

2.3 无人自治潜水器

无人自治潜水器是不带缆绳、自带电池,采用预编程模式进行水下巡航和部分特定作业的潜水器。2020 年的主要亮点是俄罗斯的新型无人自治潜水器“Vityaz-D”号于 2020 年 5 月 8 日成功下潜到马里亚纳海沟 10028 m 的深度,并按设定程序执行了自主航行任务。由于国内对俄罗斯的潜水器研制工作了解很少,在这里略作深度介绍。图 3 为俄罗斯典型水下无人自治潜水器的产品。



图 3 俄罗斯典型水下无人自治机器人产品

俄罗斯在 AUV 方面的研究始于 20 世纪 70 年代,在 20 年间开发出多款水下机器人产品,包括 SKAT、SKAT-GEO、L-1、L-2、MT-88、Tiflonus、MT-GEO、R-1、R-2 等产品。SKAT 是一款扁平型 AUV 产品,工作深度为水下 300 m;L-1 和 L-2 在 SKAT 系列研制经验的基础上开发,改用了鱼雷状外形,并且在动力上进行了升级,L-1 下潜深度为 2000 m,而 L-2 更是提升到 6000 m,L-2 多次执行水下救援任务,包括在 K-8 核潜艇和 K-219 潜艇失事海底进行搜查和拍摄任务,完整采集到调查区域全景图像和超过 4 万幅图片信息^[11]。在最新研究中,Harpsichord 2P-PM 是俄罗斯海军现役最大、最先进的 AUV,可由水面舰船或潜艇搭载,具备较强的情报侦察能力,既可以从事巡航任务,也可用于大深度科学考察,该潜航器长 6.5 m,直径 1 m,空气中重量约 3.7 t,续航力约 27 n mile,工作深度 6000 m (另有报告认为 2000 m)^[12]。Surrogates 是红宝石设计局正在研制的模拟潜艇噪声和电磁特性的长航程无人潜航器,具备情报搜集、侦察和海底地形测绘功能,潜航器长 17 m,重约 40 t,5 kn 航速下续航力 600 n mile,最大航速达 24 kn,最大潜深 600 m^[13]。Cephalopod 为俄罗斯海军公布的无人水下新概念武器,装备大型声呐和鱼雷发射装置,使其可单独承担反潜任务^[14]。

在深潜器研究方面,Vityaz-D 是由俄罗斯中央海洋工程设计局(RUBIN)研制的新型无人自治潜水器(图 4),能够实现全海深海洋测量功能,在 2020 年 5 月 8 日成功下潜到马里亚纳海沟 10028 m 的深度,并按设定程序执行了自主航行任务。此套深潜系统由 1 台无人自治航行器、1 台深海沉底工作站和控制设备构成。Vityaz-D 长 5.7 m、直径 1.3 m、空中重量 5.7 t,结构上采用类潜艇外形,应用可渗透结构实现水中零浮力状态,承重结构由钛合金制造而成,安装了 4 个电力单元 10 个推进器,航行速度 1 m/s 时最大续航时间可以达到 24 h;Vityaz-D 控制系统中搭载了人工智能(AI)航行控制模块,使得航行器在水下狭窄空间中航行时可以自动规避遇到的障碍物;Vityaz-D 将航行中实时检测到的信息通过水声通信系统发送给深海沉底工作站,再由工作站



(a) Vityaz-D

(b) 深海沉底工作站

图4 俄罗斯新型无人自治潜水器

转发到工作母船上;Vityaz-D配备了4部摄像机、1套双频侧扫声纳、4套回声测深仪、1台多普勒计程仪,以及海洋环境传感系统和其他辅助设备。

2020年7月,开发商在莫斯科举办的Army-2020国际军事技术论坛上展出了Vityaz-D潜水器,宣称将在2020年8月对Vityaz-D系统进行升级,使得无人航行器能够在深海沉底工作站辅助通信的情况下,依赖自身的通信系统执行自主任务。同时,俄罗斯海军表示,计划采用Vityaz-D航行器替换现役无人深海潜水器装备,以进行军事和救援行动^[15]。

2.4 无人复合型潜水器

复合型无人潜水器的概念最早是由McFarlane于1990年提出^[16],2008年美国伍兹霍尔研究所研制出了首台全海深的复合型无人潜水器“海神”号并下到了挑战者深渊^[17-18],但该潜水器在2014年的一次应用中丢失。2008年,工业和信息化部首次支持上海交通大学牵头研究该类型的全海深无人潜水器,2012年完成样机,但没有开展海上试验^[19]。上海海洋大学在2013年开始也启动了该方向的研制工作,2016年研制了首台样机“彩虹鱼ARV-I”,海试到达深度6300 m^[20]。中国科学院先导计划项目资助沈阳自动化研究所研制了“海斗”号样机,于2016年6~8月航次中到达了挑战者深渊^[21]。在“十三五”期间,科技部资助上海交通大学和中国科学院沈阳自动化研究所各牵头研制一台ARV。2018年上海海洋大学与西湖大学合作,进行第2台ARV研制。

2020年的最主要亮点是中国科学院沈阳自动化所的“海斗”号4次到达了挑战者深渊,但仍有一些故障需要再去马里亚纳海沟进行海试验证。上海海洋大学和西湖大学的“逐梦”号也去挑战者深渊进行了海试,因为“沈括”号母船续航力和挑战者深渊海况条件,只有3 d可以试验的时间窗口,2020年海试中的3个潜次未能到达挑战者深渊,需要在2021年再安排航次继续开展试验。上海交通大学的复合型无人潜水器计划于2021年冲击挑战者深渊。

2.5 水下滑翔机

水下滑翔机是一种依靠浮力驱动的新型潜水器,具有续航能力强、噪音小和费效比低等优势,近年来成为国内外研究热点。水下滑翔机可实现海洋环境、声学要素等观测,能为海洋大数据分析、数值预报等重要领域提供准实时测量数据,具有极为重要的应用价值。中国的水下滑翔机研究起步较晚,开展此研究的科研单位有天津大学、中国海洋大学、西北工业大学、中国科学院海洋研究所、中国科学院沈阳自动化研究所等。2020年,中国滑翔机研制工作取得重大进展,7月16日,天津大学“海燕滑翔机”下潜到10619 m,达到目前中国万米级深海水下滑翔机的最大下潜深度,并获得大量深渊温盐、声学、以及影像等同步调查资料,这标志中国在万米级水下滑翔机关键技术方面取得重大突破^[22]。

浮力材料的设计与优化对于水下滑翔机来说至关重要,因为水下滑翔机借助浮力材料物理参数改变和其自身调节实现升降。天津大学王树新团

队通过建立 MIS 和浮力耐压壳力学模型,实现了对于压力壳的有效分析,建立了浮力材料设计与优化的方法^[23]。中国船舶科学研究中心^[24]综合考虑了海水密度变化情况、耐压舱与气囊弹性压缩变形等因素,提出了针对水下滑翔机的浮力调节能力优化设计方法,为改性水下滑翔机浮力驱动系统设计及航行性能预报提供参考。水下滑翔机的运动性能设计是其研制的基础工作,随着滑翔机下潜深度的增加,它的运动稳定性面临更大的挑战,目前科学家们正在寻找一种能够让滑翔机在深海保持平稳运动的方法^[25-26]。但是目前科研人员在应用中遇到一些挑战,包括海水温差变化梯度小、能量密度不足以支撑水下滑翔机的运行需求、能源转化有效率低等问题。未来科研工作者应当努力攻克温差能转化技术、能量高效转化技术、能源混合供应技术难题,让温差能在未来长时间、高效驱动滑翔机运行成为现实^[27]。

2.6 水下着陆器

水下着陆器是一种实现水下采样、检测等功能的自动化设备,具有结构简单、系统可靠、经济性高的特点,是海洋生物学、海洋地质学研究的重要工具^[28],也是水下深潜科学试验系统的重要组成部分。着陆器通常由主体结构、浮力材料、采样及检测仪器、控制系统、水下应答器和抛载系统构成。水下着陆器从水面释放后,在自身重力的作用下将逐渐下沉直到水底,在完成水下作业任务后,通过接收水面指令或按照预设程序完成抛载动作,在浮力作用下逐渐浮出水面。着陆器可在水下全过程开展试验,包括下降过程、沉底过程和上浮过程,只需设定好试验设备的开启工作深度。水下着陆器不需要与母船进行物理连接,只在投放和回收设备时需要母船协助,在长时间的工作中完全自主,不影响母船的其他科考工作;着陆器可以用于诱捕海洋生物,长期监测海底板块运动、海底生物行为等,多个海底着陆器可以组成水下观测网,与其他潜水器协同完成更加复杂的水下作业任务^[29]。

英国阿伯丁大学和日本东京大学于2006年合作开展的“HADEEP”项目研制了2套全海深着陆器系统 Hadal Lander,在马里亚纳海沟、汤加海沟

和日本海沟等地进行了试验,获取了很多海水和海洋生物样本^[30]。美国国家科学基金会支持的“HADES”计划于2014年组织了克马德克海沟和马里亚纳海沟的深渊科考航次,使用的装备中就包括2台水下着陆器^[31]。2016年,“探索一号”在马里亚纳海沟开展的万米深渊科考试验中,就包括2台水下着陆器“天涯号”和“海角号”。上海海洋大学深渊技术研究中心团队自主研发了两代着陆器装备,第2代着陆器实现了上浮后不依赖于小艇的回收功能,在2018年11月完成了马里亚纳海沟深海作业验证,采集到了丰富的海底矿物质、泥沙、海水和海生物样品。2020年11月13日,中国科学院深海科学与工程研究所牵头研制的“沧海”号着陆器下潜到马里亚纳海沟底部,与“奋斗者”号载人潜水器实现联合作业,并通过搭载全海深高清相机将万米洋底的实时画面直播回传,而且记录下深海中“奋斗者”号的一举一动,验证了全海深视频直播系统关键技术,为万米载人深潜的电视直播提供了技术保障^[32]。图5是这些水下着陆器实物样机。

2.7 智能剖面浮标

深海智能剖面浮标是一种新型海洋观测平台设备,在投入水后根据预先设定的参数,采用浮力驱动方式实现浮标平台的自主下潜、上浮CTD测量、定深漂流、水面通信、再下潜的剖面循环过程。智能浮标可搭载不同类型的传感器,实现对于海洋环境要素的剖面测量,借助卫星系统将采集的数据传送到地面岸站;进行可靠性设计与实现控制系统超低功耗,提高浮标使用寿命;地面岸站对接收到的数据进行分析、处理、显示、发送控制参数,借助卫星系统实现对浮标的控制^[33]。1998年全球海洋观测试验项目(Argo计划)推出,各国家在全球各大洋布放大约4000枚自持式剖面观测浮标,该项目大大提升了人们对于深海数据的获取能力。中国海洋大学吴立新团队加入深海智能剖面浮标的研制,目前其团队有成员参与到4000米级深海Argo浮标的研发和科学应用中,希望今后能将自主研发的深海Argo浮标投入到全球深海大洋,实现中国深海大洋观测研究跨越式发展,掌握全球海洋科学研究的主导权^[34]。

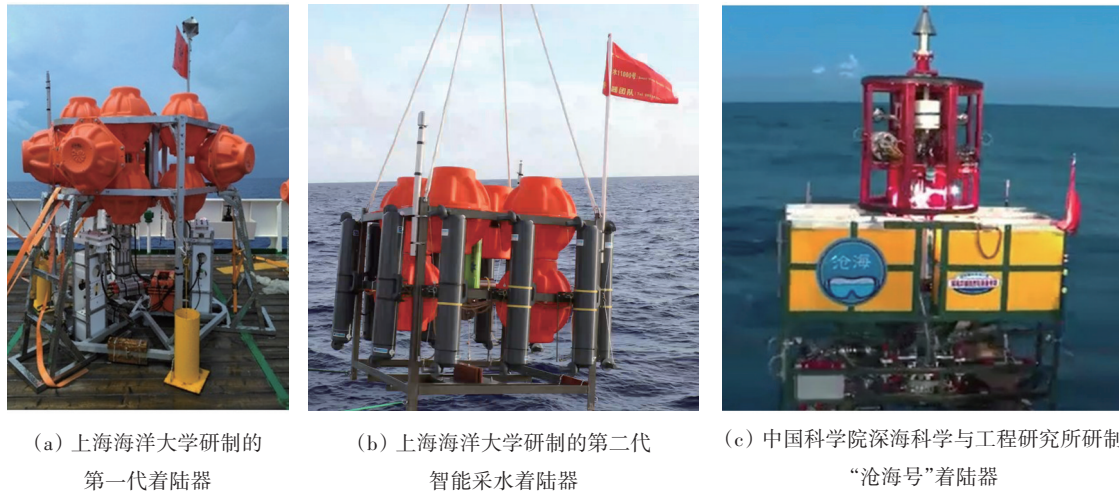


图5 水下着陆器实物样机

剖面浮标通过周期性上浮下潜完成目标海域海洋参数的测量工作,浮标在这一过程中消耗大量的能量。上海交通大学连珺课题组构建浮标运动模型和能耗模型,经过理论推导与计算,得到当最低速度设定值较小时,具有较佳的节能效果。该研究为减少浮力调节过程中能源的消耗提供了新思路^[35]。提高剖面浮标柱塞泵的容积效率对于降低剖面浮标的运行能耗、提升剖面浮标的续航能力也有重要的意义。赵艳龙等^[36]将天津大学自主研发的深海自持式剖面浮标“浮星”作为研究对象,建立进油口压力力学模型,然后建立 AMESim 模型,仿真了液压系统排油过程和回油过程的流量特性,搭建试验平台,最后验证了仿真结果和计算结果,该研究对提高柱塞泵的容积效率及降低液压系统的能耗提供了理论依据。目前成熟的剖面浮标观测平台已实现 2000 m 内的定深控制,因此对于更大深度的深度控制研究具有重要的价值。天津大学张博伟等^[37]在前人研究的基础之上,构建潜标运动非线性模型,研究自抗扰控制算法,基于自抗扰控制设计,通过 MATLAB 进行仿真验证了大尺度深度控制系统的可行性与优越性。

3 中国的深海技术发展现状

为叙述方便,根据材料和制造工艺等特点建议把潜水器的研制划分为 3 代。第 1 代是完全的载人

潜水器,从 20 世纪 30 年代钢缆悬挂深水球下潜开始至 20 世纪 70 年代第 1 代全海深载人潜水器“的里雅斯特”号和“阿基米德”号退役为止。这一代的潜水器,钢质载人舱,主要依靠航空汽油提供浮力,潜水器非常笨重,几乎没有自航能力。技术高峰是 1960 年美国的“的里雅斯特”号载人潜水器下到马里亚纳海沟的最深处。第 2 代无人/载人潜水器采用固体浮力材料提供浮力,采用超高强度钢、铝合金和钛合金等作耐压舱,从而实现了潜水器的小型化,提高了自航能力。从载人潜水器的小型化^[38],到无人遥控潜水器^[39],再到无人自治潜水器^[40],再到复合型的无人潜水器^[41],国际上的几次标志性技术成就有 1989 年日本研制出最大深度的载人潜水器“深海 6500”号,1995 年研制出全海深遥控潜水器“海沟”号,美国 2008 年研制出复合型的全海深无人潜水器“海神”号,2012 年研制出单人探险型全海深载人潜水器“深海挑战者”号,2019 年研制出双人作业型全海深载人潜水器“深潜限制因子”号。

第 2 代潜水器的特点,总体来说,种类繁多,功能各异,并在自然科学的研究和资源调查等方面开展了许多卓有成效的工作,取得了很多前所未有的新发现^[42],而且还将会发挥越来越重要的作用。对于海洋科学家来说,目前最为理想的配置是如图 6 所示的可以在全海深全海域开展科考调查和作业的深渊科学技术流动实验室^[43]。现代化的科考

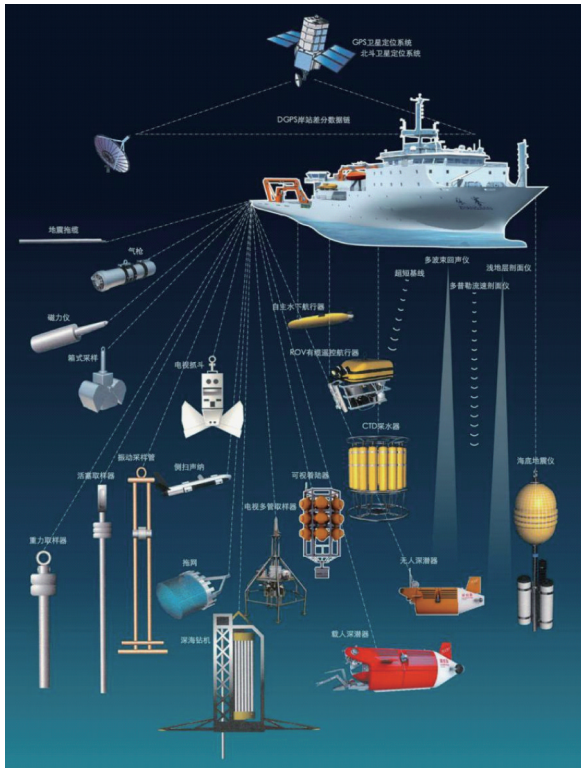


图6 深渊科学技术流动实验室示意

船上配备有:(1) 13000 m长铠装钢缆,用于吊放重力柱、抓斗、深拖等;(2) 13000 m光电复合缆,用于11000 m CTD和11000 m复合型无人潜水器的布放和回收;(3) 全海深多波束系统、超短基线/长基线定位系统;(4) 系列着陆器、水下滑翔机、浮标和自治潜水器、遥控潜水器等;(5) 11000米级全海深作业型载人潜水器。

尽管与第1代潜水器相比,第2代潜水器的数量有了几百倍的增加,但人类对浩瀚大海的认识仍非常有限。虽然人类的潜水器技术已经能到达海洋的最大深度——太平洋11000 m深的马里亚纳海沟的最深处,即“挑战者深渊”,但由于第2代潜水器的制造和运行成本的昂贵,6000 m以上的大深度潜水器还非常匮乏。如果把第2代载人/无人潜水器的性能与海洋里的各种鱼类的运动性能相比较,无论是其导航能力、快速性、机动性、推进效率,还是振动噪声的控制等,都有很大的差距。要想大幅度地提高潜水器的性能,降低潜水器的成本,必须学习鱼类的水下运动技巧,充分理解经过

亿万年自然选择和进化之后的鱼类的独特优势和运动机理,并在潜水器设计中加以应用,尽快研制出智能仿生机器鱼型的潜水器,这是潜水器技术发展的必然趋势^[44-45]。因此,把智能仿生机器鱼型的潜水器定义为第3代潜水器,它的特点是用柔性大变形的软体材料替代固体的金属和浮力材料,基于3D打印的制造技术替代传统的焊接和锻铸技术,人工智能技术替代传统的控制技术,基于纳米技术设计制造的传感器替代传统的传感器。由此,智能机器鱼型潜水器作为当前海洋装备技术中的皇冠^[46],这个领域的技术突破可以全面带动深海装备技术的发展,也是保持中国海洋装备领域领先优势的一个重要抓手。

智能仿生机器鱼型潜水器技术同时也是对力学学科挑战最大、最能促进力学学科发展的一个抓手。机器鱼既是仿生物自主水下航行器的典范,也是一种类生命体的力学设计。涉及神经控制(力学与控制)、肌肉收缩(生物力学)、运动传输(力学与运动学)、生物材料性能(材料力学)以及水中推进机制(流体力学、动力学、水弹性力学)与能量效率(力学与设计、力学与信息、力学与测控)、安静性/隐蔽性(振动噪声控制与声学)等相关力学分支交叉与融合的综合问题。为实现不同类型的快速机动推进,根据环境配置结构和运动,并通过鳍面收缩和伸展以及身体的摆动,得以适应、处理和利用复杂的环境^[47]。鱼类的特殊外形和采用的推进方式与第1、2代潜水器完全不同,这也是其高效率、高机动性及高安静性的关键。

第1代潜水器发展时期,中国完全缺席。到第2代中期才正式进入这个领域。中国从“八五”和“九五”期间开始开展载人潜水器技术的研究、开发和应用,开始进入该领域。初期主要集中在援潜救生潜水器的研制上,先后研制成功了200米级两型单人常压潜水装具、600米级深潜救生艇和200米级救生钟等。随后研制成功3500米级遥控潜水器“海龙”号和6000 m自治潜水器“CR-01”号和“CR-02”号。2002年,国家“863计划”启动了7000 m载人潜水器“蛟龙号”的研制。该项目通过全国近百家优势科研院所的联合攻关,历经设计、加工制造、

总装联调、水池功能性试验等研制阶段,于2008年初具备了出海试验的技术条件,并于2009年8~10月、2010年5~7月、2011年和2012年6~7月,分别完成了1000米级、3000米级、5000米级和7000米级的海上试验任务,最大下潜深度达到了7062 m。“蛟龙号”载人潜水器的研制成功使中国的载人深潜技术实现了跨越式发展,挤进了发达国家的俱乐部。在国家科学技术部“十三五”重点研发计划中又专门实施了“深海关键技术与装备”重点专项(2016—2020)。在这个专项结束时,随着中国作业型全海深载人/无人潜水器的研制成功,中国在第2代潜水器技术竞赛中将达到国际领先水平。

4 中国深海技术未来发展建议

根据以上对国际上潜水器发展趋势和2020年亮点分析,已经知道中国在第2代潜水器领域已经达到了国际领先。

1) 从“十四五”时期开始,应该把研制的重点放在第3代仿生智能机器鱼型潜水器上,重点解决传统的第2代潜水器中存在的能量效率问题、机动性问题、复杂流场中的运动问题、环境流场能量的利用问题、速度或加速度问题、噪声/隐蔽性问题、集群作业问题,软体机械手技术,大幅度提高潜水器的性能并降低使用成本,继续保持潜水器领域的国际领先地位。对于仿生潜水器的设计,最为核心的技术仍然是多学科的设计优化^[48]。

2) 要加大潜水器技术的成果转化和应用。过去很多潜水器的部件和传感器都是依赖于进口,这几年科学技术部加大了国产化的支持力度,“深海勇士”号和“奋斗者”号载人潜水器以及其它万米级无人潜水器等都达到了很高的国产化率。但现在研制这些设备的都是科研院所或高校,他们不具备批量生产或提供长期服务的能力,一定要把这些技术转移到企业。可以选择某些有市场开发前景的产品如清洗机器人^[49]作为背景来实现技术转移。

3) 水空两栖航行器是一种既可以在水下又可以在空中航行的运载器,由于其在军事和民用领域的潜在广泛应用前景,这也是一个值得重视的方

向^[50-51]。这种类型的航行器从技术上会带来一系列新的挑战。结合仿生设计的可重构结构,而不是单一的机翼结构,将是在水和空气中具有更好的运动能力并改善跨媒体过程的解决方案。但是复杂的控制算法和轻量级的可重构结构等相关技术仍需要大量研究和探索。除了当前的INS和SLAM,像空中的全球卫星系统一样,完整的水下中继器系统可以成为更快,更准确的通信和导航的未来。更长的续航时间和更好的传感器有效载荷之间的权衡将继续是未来的技术重点。

4) 中国现在采用的集中全国优势兵力攻克重大关键技术的“新型举国体制”模式对于加快研制进度,缩短与发达国家的差距具有重要的作用。但这种模式的一个缺点是投入产出比低,成果转化困难,因为技术分散掌握在不同的科研院所和高校老师手中。今后,通过引入“国家支持+民间投入”的模式,可以克服这2个问题。本文作者团队从2013年采用这种模式推动彩虹鱼挑战深渊极限项目^[43],基本上证明了可以用国家队的1/5人力投入和1/3~1/2的财力投入就可以完成同样的项目目标^[52]。

参考文献 (References)

- [1] 崔维成, 郭威, 王芳, 等. 潜水器技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2018.
- [2] Zhao B X, Wang F, Liu W, et al. Failure process analysis of frustum windows for deep-sea manned cabin[J/OL]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, [2020-11-01]. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1861709>.
- [3] Wang F, Wang M Q, Wang W W, et al. Time-dependent axial displacement of PMMA frustums designed for deep-sea manned cabin[J/OL]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, [2020-11-03] <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786235>.
- [4] Wang F, Cui W C. Recent developments on the unified fatigue life prediction method and its applications[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8: 427.
- [5] Zhang J, Wang X, Tang W X, et al. Non-linear collapse behavior of externally pressurized resin toroidal and cylindrical shells: Numerical and experimental studies[J/OL]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, [2020-11-11]. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1745546>.
- [6] Zhang J, Dai M Q, Wang F, et al. Theoretical and experi-

- mental analyses of the free hydroforming of egg-shaped shell[J/OL]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, [2020-11-14]. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1827637>.
- [7] 曹俊, 胡震, 刘涛, 等. 深海潜水器装备体系现状及发展分析[J]. *中国造船*, 2020, 61(1): 204-218.
- [8] Kyo M, Hiyazaki E, Tsukioka S, et al. The sea trial of "KAIKO", the full ocean depth research ROV[C]// *OCEANS 1995 MTS*, Washington: IEEE, 1995: 1991-1996.
- [9] Itoh K, Inoue T, Tahara J, et al. Sea trials of the new ROV ABISMO to explore the deepest parts of oceans [C]// *The Eighth ISOPE Pacific*. Bangkok: Asia Offshore Mechanics Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008: 10-14.
- [10] Nakajoh H, Murashima T, Sugimoto F. Development of full depth fiber optic cable ROV (UROV11K) system[C]// *OCEANS 2018 MTS*. Charleston: IEEE, 2018: 1-8.
- [11] Zhilenkov A. The study of the process of the development of marine robotics[J]. *Vibroengineering Procedia*, 2016, 8: 17-21.
- [12] Klavesin. Russian harpsichord (Klavesin) large unmanned underwater vehicles carried by nuclear submarines [EB/OL]. (2019-03-30) [2020-12-21]. http://www.hisutton.com/Harpsichord_AUV.html.
- [13] 周念福, 邢福, 渠继东. 大排量无人潜航器发展及关键技术[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(7): 1-6.
- [14] Cephalopod. Russian 'Cephalopod' armed autonomous underwater vehicle (AUV) program[EB/OL]. (2018-07-27) [2020-12-21]. <http://www.hisutton.com/Cephalopod.html>.
- [15] Vityaz. Vityaz-D deep-sea autonomous underwater vehicle[EB/OL]. (2020-09-03) [2020-12-21]. <https://www.naval-technology.com/projects/vityaz-d/>.
- [16] McFarlane J. ROV-AUV hybrid for operating to 38000 feet[J]. *Marine Technology Society Journal*, 24(2): 87-90.
- [17] Bowen A D, Yoerger D R, Whitcomb L L, et al. Exploring the deepest depths: Preliminary design of a novel light-tethered hybrid ROV for global science in extreme environments[J]. *Marine Technology Society Journal*, 38(38): 92-101.
- [18] Fletcher B, Bowen A, Yoerger D R, et al. Journey to the challenger deep: 50 years later with the nereus hybrid remotely operated vehicle[J]. *Marine Technology Society Journal*, 43(5): 65-76.
- [19] Wang B, Wu C, Ge T. Self-repairing control system for a hybrid underwater vehicle[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 834-836: 1256-1262.
- [20] Cui W C, Hu Y, Guo W. Chinese journey to the challenger deep: The development and first phase of sea trial of an 11000-m Rainbowfish ARV[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2017, 51(3): 23-35.
- [21] 水下机器人研究室. 沈阳自动化所研制深海设备下潜深渊, 突破万米[EB/OL]. (2016-08-30) [2020-12-21]. http://www.sia.cas.cn/xwzx/tpxw/201608/t20160830_4657038.html.
- [22] 刘晓艳, 杨绍琼. "海燕"万米级水下滑翔机再破工作潜深世界记录[EB/OL]. (2020-07-21) [2020-12-21]. <http://www.tju.edu.cn/info/1026/3274.htm>.
- [23] Yang M, Yang S, Wang Y, et al. Optimization design of neutrally buoyant hull for underwater gliders[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209: 107512.
- [24] 张安通, 张华, 肖冬林, 等. 基于数值运动仿真的水下滑翔机浮力调节设计及试验研究[J]. *船舶力学*, 2020, 24(9): 1119-1126.
- [25] 叶鹏程, 黄桥高. 大深度水下滑翔机总体设计[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2020, 3(3): 223-229.
- [26] Yang Y, Liu Y, Wang S, et al. Evaluation models and criteria of motion performance for underwater gliders[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 102: 102286.
- [27] Wang G, Yang Y, Wang S. Ocean thermal energy application technologies for unmanned underwater vehicles: A comprehensive review[J]. *Applied Energy*, 2020, 278, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115752.
- [28] Tenberg A, De Bovee F, Hall P, et al. Benthic chamber and profiling landers in oceanography—A review of design, technical solutions and functioning[J]. *Progress in Oceanography*, 2013, 35(3): 253-294.
- [29] Person R, Aoustin Y, Blandin J, et al. From bottom landers to observatory networks[J]. *Annals of Geophysics*, 2009, 49(2): 581-593.
- [30] Jamieson A J, Fujii T, Solan M, et al. HADEEP: Free-falling landers to the deepest places on Earth[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2009, 43(5): 151-160.
- [31] 陈俊, 张奇峰, 李俊, 等. 深渊着陆器技术研究及马里亚纳海沟科考应用[J]. *海洋技术学报*, 2017, 1: 63-69.
- [32] 中国“奋斗者”号载人潜水器万米级海试 总台随船记者直击“沧海”号最新消息[EB/OL]. [2020-11-13]. <http://tv.cctv.com/2020/11/13/VIDErCcX12pWsUy1KVvh654-X201113.shtml>.
- [33] 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室. 深海自持式剖面浮标 [EB/OL]. (2020-01-19). [2020-11-30]. <http://pol.ouc.edu.cn/chenzhaohui/2019/1229/c18375a28-0237/page.htm>.
- [34] 中国海洋大学党委统战部. 国家科技奖获得者吴立新团队专访[EB/OL]. (2019-01-09)[2020-11-03]. <http://tzb.ouc.edu.cn/8d/fd/c10590a232957/page.psp>.
- [35] 王雷, 姚宝恒, 魏照宇, 等. 剖面浮标的分段浮力调节策略研究[J]. *船舶科学技术*, 2020, 42(5): 98-102.
- [36] 赵艳飞, 李醒飞, 杨少波, 等. 剖面浮标“浮星”可变浮力系统性能研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54

- (6): 1240–1248.
- [37] 张博伟, 李醒飞, 李洪宇, 等. 基于 ADRC 深海剖面浮标定深控制[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 100–103.
- [38] Kohonen, W. Human exploration of the deep seas: Fifty years and the inspiration continues[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43: 42–62.
- [39] Christ R D, Wernli R L. ROV Manual (2nd ed)[M]. Oxford, United Kingdom: Butterworth–Heinemann, 2014.
- [40] Wynn R B, Huvenne V A I, Le Bas T P, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. Marine Geology, 2014, 352: 451–468.
- [41] Bowen A D, Yoerger D R, Whitcomb L L, et al. Exploring the deepest depths: Preliminary design of a novel light-tethered hybrid ROV for global science in extreme environments[J]. Marine Technology Society Journal, 2004, 38(2): 92–101.
- [42] Jamieson A J. The hadal zone: Life in the deepest oceans [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
- [43] Cui W C, Hu Y, Guo W, Pan B B, et al. A Preliminary design of a movable laboratory for hadal trenches[J]. Methods in Oceanography, 2014, 9: 1–16.
- [44] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American–SCI AMER, 1995, 272(3): 64–70.
- [45] Triantafyllou M S, Barrett D S, Yue D K P. A new paradigm of propulsion and maneuvering for marine vehicles [J]. Transactions–Society of Naval Architects Marine Engineers, 1996, 104: 81–100.
- [46] Kim Y. Robotic Fish, the prince of ocean[J]. Dong-A Science, 2005, 8: 54–59.
- [47] Katzschmann R K, DelPreto J, MacCurdy R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar3449.
- [48] Pan B B, Cui W C. Multidisciplinary design optimization and its application in deep manned submersible design [M]. Zhejiang: Zhejiang Science and Technology Publishing House Co., Ltd. and Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020.
- [49] Song C H, Cui W C. Review of underwater ship hull cleaning technologies[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19: 415–429.
- [50] Qiu S M, Cui W C. An overview on aquatic unmanned aerial vehicles[J]. Ann Rev Resear, 2019, 5(3): 555663.
- [51] 刘相知, 崔维成. 水空两栖航行器的综述与分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(S2): 1–14.
- [52] Cui W C. On a karmic management approach to push forward a large project[J]. Ann Soc Sci Manage Stud, 2019, 3(1): 555604.

Hot spots of submersible development in 2020: An overview

CUI Weicheng^{1,2*}, JIANG Zhe², WANG Fang², LI Wei¹, SONG Changhui¹, SONG Tingting², SHA Jinyu¹

1. School of Engineering, Westlake University, Key Laboratory of Coastal Environment and Resources Research of Zhejiang Province, Hangzhou 310024, China
2. School of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, Shanghai 201306, China

Abstract Ocean is the most realistic space to solve conflicts among population, resources and environment. The development and utilization of marine resources and space are inseparable from various types of deep-sea equipment. In 2020 significant progress was made in the research and development of deep-sea equipment at home and abroad. Focusing on the research and development of manned/unmanned underwater vehicles, this paper introduces the international and domestic research hotspots and highlights in 2020, analyzes the international status of China's marine technology, and provides some suggestions on future development directions of China's deep-sea submersible field.

Keywords deepsea; submersible; biomimetic intelligent robot fish ●



(责任编辑 祝叶华)