

# 深海 AUV 发展趋势研究

胡庆玉,舒国平,冯朝

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所,湖北宜昌 443000)

**摘要** 介绍了国内外各型深海 AUV 产品的基本参数、配置、功能和使用方式,论述了深海 AUV 发展现状及发展趋势,并着重阐述了深海 AUV 在深海探测、目标识别、深海反制等领域的应用,在此基础上深入分析了深海 AUV 在能源、控制、导航、通行等方面的关键技术,并阐明当前关键技术的现状以及未来的发展方向,同时根据国内外发展趋势提出了深海 AUV 经过 3 个阶段的发展,最终向着使用便捷化、重量轻量化、外形小型化、智能化、网络信息化的方向发展。

**关键词** 深海 AUV;Bluefin-21;REMUS 6000;海神 6000

**中图分类号** TP242.3 **文献标识码** A

## Research on Development Trend of Deep-sea AUV

HU Qingyu, SHU Guoping, FENG Zhao

(No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** This paper introduces the basic parameters, configuration, function and operation mode of deep-sea AUV products at home and abroad, discusses the development status and development trend of deep-sea AUV, and focuses on the application of deep-sea AUV in deep-sea detection, target recognition, deep-sea anti system and other fields. On this basis, the key technologies of deep-sea AUV in energy, control, navigation and traffic are deeply analyzed, and the current status and future development trend of key technologies are clarified. According to the development trend at home and abroad, it is pointed out that after 3 stages of development, deep-sea AUV tends to be convenient, lightweight, compact, intelligent, and networked.

**Key words** deep-sea AUV; Bluefin-21; REMUS 6000; Haishen 6000

## 0 引言

随着世界各国对海洋权益的日益重视,海军装备中反潜反水雷装备也逐步向现代化、低成本和低伤亡方向发展<sup>[1]</sup>,因此,水下无人作战系统成为世界各国军事装备研发的重点,并逐步向深海领域延伸发展。由于深海 AUV 在深水中作业需要承受高压,且深海水下的地形、水文环境等非常复杂,许多关键技术需要突破,深海 AUV 则成为该领域的发展热点。深海 AUV(Autonomous Underwater

Vehicle)是深海水下无人航行器,其主要任务包括深海探测、目标识别、深海反制等。

深海 AUV 在研制和使用上与浅海 AUV 有显著不同。在结构方面,既考虑耐压舱承压还要考虑舱体受压后的形变产生的密封性下降而发生漏水风险;在总体平衡方面,随着下潜的深度加大,海水密度随之发生很大变化影响了 AUV 的浮力,使其受力不平衡,这需要在设计过程中充分考虑浮力调节的问题;在导航定位方面,潜入深海的 AUV 无法采用传统方式校准惯导,需要采用新方式实现该功

能。由此可见,深海 AUV 与浅海 AUV 相比有诸多自身的特点。

## 1 深海 AUV 的发展现状及特点

### 1.1 国内外发展现状

随着海洋工程技术的发展,深海 AUV 的许多关键技术不断突破,许多国家都在研究自己的深海 AUV 用于军事或者民用,初步估计全世界已有十几种不同类型的深海 AUV。例如法国的 ECA 公司,美国的 Hydroid 公司,金枪鱼机器人公司,挪威的 HUGIN 系列等,均深入研究并成功开发出深海 AUV,国内也有许多科研院校在深入研究深海 AUV。因此,当前包括中国在内的各个国家对深海 AUV 非常重视,深海 AUV 的应用领域也越来越广阔。

### 1.2 国内外深海 AUV 的发展状况

#### 1.2.1 REMUS6000

REMUS6000 自主无人水下航行器是 Hydroid 公司的系列产品中工作深度最大的 AUV。其外形及相关组成如图 1 所示。



图 1 REMUS 6000 外形图

Fig. 1 Outside drawing of REMUS 6000

由于 REMUS 6000 自主水下无人水下航行器自主海底跟踪航行,可携带有效载荷,最大 6 000 m 水深作业,以测量海水的特性,包括电导率、温度、化学成分,并且通过测深、声呐侧扫、磁学、重力学以及照相术绘制成像海底。REMUS 6000 自主水下无人水下航行器的基本形式包括航行器、测深仪、侧扫和沉积层穿透声呐、导航装置和通信装置以及其他相关设备。REMUS 6000 自主水下无人水下航行器也可根据用户需求配置专用传感器,以适应特殊要求。REMUS 6000 的主要参数如下:航行器直径 71 cm,航行器长度 3.96 m,航行器空气中重量 862 kg,最大工作深度 6 000 m,续航力 22 h(典型速度),航速最大 4.5 kn。

#### 1.2.2 Bluefin-21

金枪鱼机器人公司是美国一家知名的自主无人水下航行器的设计和制造商,该公司推出的无人水下航行器包括小型的 Bluefin-9、中型的 Bluefin-12、大型的 Bluefin-21。Bluefin-21 是一种高度模块化的自主无人水下航行器,可以携带多种传感器和有效载荷。其电源容量大,即使在最大水深也可长期工作,并可由各种应急船舶操作使用。

自由更换模块——无人水下航行器的设计包括可在使命现场更换的有效载荷段和电池模块,各种子系统均可接触,以便加快周转时间,并允许在现场维修,从而加速作业速度。其外形如下图 2 所示。



图 2 Bluefin-21 布放入水

Fig. 2 Deploying Bluefin-21 into water

Bluefin-21 的主要用途是近海勘测、搜索和救捞、反水雷、未爆武器处理、海洋学考察以及考古和探测。该型 AUV 主要技术参数有:航行器直径 533 mm,长度 4 930 mm,空气中质量 750 kg,最大工作深度 4 500 m;续航力:标准有效载荷 3 kn 时为 25 h;航速 4.5 kn;传感器:侧扫声呐、浅层海底剖面仪以及多波束回声测深仪。

#### 1.2.3 HUGIN 系列 AUV

挪威的 HUGIN 系列自主水下航行器在 21 世纪问世以来,从原型 AUV,逐步发展了 HUGIN 1000、3000、4500 以及 HUGIN-MR 等型 AUV。HUGIN 4500 型 AUV 外形如图 3。

HUGIN4500AUV 是 HUGIN 系列中最大的,航行器的结构形式与该系列中的其他航行器相同,只不过体积更大、质量更重,主要不同之处在于采用了功率更大的半燃料电池,容量比 HUGIN 3000AUV 多 30%。航行器的尺寸和电池容量允许航行器携带工作能力更强的传感器,例如高分辨率

浅层海底剖面仪和侧扫声呐。目前,HUGIN 4500AUV 只作为美国 C&C 技术公司的“勘测者 III”使用,最大工作水深 4 500 m。HUGIN 4500AUV 主要参数有:航行器直径 1 000 mm;长度 6 400 mm;空气中重量 1 500 kg;最大工作深度 4 500 m;传感器侧扫声呐,工作频率为 230 kHz 或 410 kHz,作用距离 225 m,分辨率 7 m 以及工作频率为 1 ~ 6 kHz 的浅层海底剖面仪。航行器上还可安装摄像机系统、多波束测深系统、CTD、深度传感器、多普勒计程仪、超短基线水声定位系统、水声数据调制解调器。



图 3 HUGIN 4500 AUV 布放入水

Fig. 3 Deploying HUGIN 4500 AUV into water

目前挪威海军拥有 2 套休金 4500AUV 系统,用于反水雷和环境快速评估,配有 HISAS 1030 高分辨率合成孔径声呐,以 3.5 kn 航速在 400 m 水深工作,每小时可探测 2 700 km<sup>2</sup>,续航力 17 h,利用侧扫声呐的续航力为 24 h,两次使命之间的维护保养时间为 1 h。

#### 1.2.4 探索者级 AUV

加拿大 ISE 公司的 AUV 长约 4.5 m,直径 0.69 m。根据搭载负载的不同,其空气中重量在 580 ~ 800 kg 之间,其最大潜深为 3 000 m。其巡航速度在 1 ~ 5 kn 之间,在 AUV 的负载段可携带各种不同的负载。1.1 m 长的可伸缩通信天线,此天线有助于任务的再规划并且可以增加母船和航行器之间的通信距离。壳体包括 1 个 7075-T6 的铝质圆柱段和 2 个 7075-T6 型的铝质端部封盖,内部可使用的直径为 61 cm,长度为 159.5 cm。端部封盖利用铝质夹紧装置与圆柱体连接起来。自由进

水分段采用玻璃钢制造。航行器续航力:120 km@3 kn。配置的传感器:多普勒计程仪、深度传感器、高度计、固定在桅杆上的 GPS 天线和超短基线应答器作为定位装置、导航装置、无线电通信和铱星通信系统。此外,应急设备包括应答器、定位器、闪光灯和射频无线电信标。

#### 1.2.5 CR-02 型深海 AUV

该型深海 AUV 由沈阳自动化研究所研制,可用于深海水下资源调查,海洋环境调查等,主要参数有:最大作业深度 6 000 m,水下最大航速 2 kn,续航力 10 h,直径 800 mm,长度 4.5 m,重量 1 500 kg。根据任务要求,潜航体搭载了水下相机,侧扫声呐,浅剖仪等探测设备。



图 4 探索者 AUV 回收

Fig. 4 Recovery of Explorer AUV



图 5 CR-02 外形图

Fig. 5 Outside drawing of CR-02

#### 1.2.6 海神 6000 型深海 AUV

该型 AUV 应用于深远海搜救型 AUV,是我国首个用于深远海搜救的 AUV,主要参数有:最大工作深度 6 000 m,直径 880 mm,长度 7.5 m,最大航速 5 kn,最大续航力 24 h。根据任务需要搭载了 USBL、飞机黑匣子搜索声呐阵、深海测深侧扫声呐、水下相机、CTD、深海声通机、前视声呐等多个探测设备。



图 6 海神 6000 回收

Fig. 6 Recovery of Haishen 6000

## 2 深海 AUV 关键技术

深海 AUV 的研制需要突破许多技术,而其最关键的技术主要有动力能源技术、导航定位技术、水下通信技术、自主任务控制技术。

### 2.1 动力能源技术

由于深海 AUV 需要工作在深海水下的特殊环境,因此,对动力能源的要求较高,需要能源密度高、安全性好、易于维护、成本低、甚至需要电池承受深海水压等条件,因此,通常选择电池作为动力能源的载体。通常,在深海 AUV 中使用的电池主要有铅酸电池、银锌电池、锂离子电池,而目前,深海 AUV 中使用的锂离子电池居多<sup>[2-4]</sup>。

锂离子电池中的二次电池的比能量和能量密度分别达到铅酸电池和镍镉电池的 4 倍和 2 倍以上,寿命是银锌电池的 130 倍,已成为目前国外应用的主流,美国的 REMUS 系列 AUV 均采用了二次锂离子电池<sup>[5]</sup>。

### 2.2 导航定位技术

由于深海 AUV 在水下航行过程中,普遍采用惯导与计程仪组合的方式进行导航,而深海 AUV 无法实时浮出水面对惯导进行校准,因此,导航定位将是深海 AUV 的关键技术之一。目前国外一些研发机构采用其他设备辅助定位的方式,例如挪威的 HUGIN 系列采用了惯性导航装置,多普勒计程仪的组合下,利用水下超短基线定位装置进行辅助定位的组合导航,其导航精度令人满意。

随着导航定位技术的不断深入研究,未来的深海 AUV 惯性导航装置不断提高纯惯性导航精度使

得深海 AUV 的导航定位精度将提升一个数量级,并有望不依赖多普勒计程仪和卫星定位装置便可达到导航精度要求<sup>[6-7]</sup>。

### 2.3 水下通信技术

深海 AUV 在水下作业过程中,唯一可以与工作母船进行通信的方式是水声通信的方式;而水声通信传输速率低,通信可靠性受到海洋环境影响较大,信号衰减严重,因此,各个国家均投入大量人力物力研究该领域技术。目前典型的该领域技术发展方向包括水声信道编码技术、水声扩频技术等,并逐步改善水声通信的质量<sup>[8]</sup>。

此外,水下无人航行器的通信组网技术也是各国家研究的重点,但目前成功应用于产品的只有少数国家。

### 2.4 自主任务控制技术

自主任务控制技术既是深海 AUV 的关键技术,也是深海 AUV 的核心技术,该技术包括对作业任务的管理,智能规划,自主状态检查和自主故障处理,自主避开障碍物以及自主航行。自主任务控制技术未来将朝着智能分析任务,并根据任务自主规划航路,根据当前的航行状态和设备状态,自主优化作业的时间和路径。

## 3 深海 AUV 的发展趋势

从上述国内外深海 AUV 的发展状况,可以看出深海 AUV 的发展正向着小型化、智能化、快速投送、快速反应的方向发展,其发展大致分为 3 个阶段:

第 1 个阶段,研制可以在深海水下航行的 AUV,解决深海水下航行所需的关键技术,例如大深度耐压舱的设计加工技术,耐压密封技术,以及水下航行控制技术。

第 2 个阶段,在第 1 个阶段的基础上研发负载装备技术,并对探测、目标识别、布放和回收对接等关键技术进行深入研究,并最终形成面向实战应用的,成熟度高的产品。

第 3 阶段,优化深海 AUV。研制小体积、小重量、使用便捷、智能化程度高、使用可靠、水下作业

(下转第 89 页)