

# 基于载人潜水器的深海资源勘探作业技术研究\*

陈 鹰 杨灿军 顾临怡

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

叶 瑛

(浙江大学)

摘要：研究大深度的载人潜水器，对于我国深海资源勘探和科学考察意义重大。作业技术在深海资源勘探工作中具有不可替代的作用。该载人潜水器的研究，将资源勘探的作业技术与深潜器一体化作为一项重要的技术特色提出，充分显示了国家对深海资源勘探事业的重视。针对我国自行研制的大深度载人潜水器，在借鉴国外研究工作的基础上，开展作业系统技术中的水下作业机械手、物理化学量异常检测设备、采样技术以及其他相关技术，如深海无线耦合传输系统及触发技术的研究与讨论。

关键词：深海技术 作业工具 载人潜水器 水下作业机械手 采样技术

中图分类号：TH39 TH766

## 0 前言

海洋覆盖了地球表面积的 71%，蕴藏着丰富的资源。对海洋，尤其是深海资源的积极探索与开发，能够为人们普遍关心的一些全球性问题的最终解决，如地球上生命的起源探索、新药品研制、新资源和新能源开发、人类生存环境改善和社会可持续发展促进等问题，提供理想的解决方案<sup>[1,2]</sup>。

在很长的一段时间内，国内外人士都将把目光聚焦在这样几项大洋资源：锰结核、富钴结壳、热液硫化物、生物基因和天然气水合物等。九五期间在中国大洋矿产资源研究开发协会的组织下，我国科学家们在锰结核、富钴结壳方面做了大量的研究工作，为我国将来进行矿产开采奠定了基础。十五期间，大洋协会和海洋 863 启动了针对热液硫化物和生物基因的研究项目，与此同时，国家地质调查局又立项开展了针对天然气水合物资源的勘探工作。

资源勘探的基本手段可归纳为这样三种：一是实地观察，二是获取样品，三是物理与化学量的原位探测。然而，由于中国没有将科学家运送到深海底的运载工具，资源勘探的手段十分有限。国际海洋界有一句名言：“There is no authority higher than the human eye. (只有亲临海底，才是最为权威的)”。目前所开展的大洋资源勘探工作非常困难。国内目

前使用的海洋高新技术装备 90% 以上是进口的。

载人潜水器能够将人送到数千米的海底，对科学家们开展科学研究、进行资源勘探意义十分重大。为此，863 计划立项开展载人潜水器的研制，同时，将资源勘探作业技术与深潜器一体化作为一项技术特色提出<sup>[3]</sup>。

载人潜水器作业系统的功能是根据大深度载人潜水器的设计任务要求，依靠液压系统提供的液压力完成一系列的作业任务<sup>[6,7]</sup>。作业系统包括：机械手及配件常规作业工具和非常规作业工具。常规作业工具包括：高精度温度传感器、沉积物保真采样器、水体(含热液)保真采样器和水体(含热液)化学传感器。而非非常规作业工具包括：潜钻、微生物取样器和宏生物捕获器等等<sup>[1~3,5]</sup>。文中将对作业系统技术中的水下机械手、物理化学量检测、水体采样技术以及其他相关技术进行讨论。

## 1 水下机械手技术

机械手是载人潜水器作业系统中的重要组成部分，它扮演着操纵其他具体作业工具的角色。机械手的作业范围、动力性和控制灵巧性等决定着整个作业系统的性能<sup>[6]</sup>。

国际上有很多专业的水下机械手生产研制公司，他们所研制的水下机械手大部分是应用于 ROV 上的。例如：美国 ALSTOM Automation Schilling Robotic 公司的 CONAN 遥控机械手、ORION 遥控机械手和 RigMaster 遥控机械手<sup>[8]</sup>；美国 Deep Sea System International 公司装载在 Max 2000 上的机械

\* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家“863”高科技资助项目(2001AA612024、2001AA612042、2002AA401002-04 和 2002AA401002-05)。20030616 收到初稿，20030830 收到修改稿

手；美国 Western Space and Marine 公司的 MK37 等机械手；美国 Kodiak 5 自由度(7 自由度)遥控机械手；英国 Hydro-Lek 公司的系列机械手等。考虑到功率重量比、动力适配性和经济指标等综合因素，机械手多采用液压方案。

图 1 所示是安装在美国 Alvin 号载人潜水器上的液压机械手，有 7 自由度。均采用高强度防腐钛合金材料，其主要技术指标为：最大举力为 1 kN；最大伸距为 1.75 m；最大夹紧力矩为 40 N·m；自重低于 160 kg。从图中还可以看到，机械手臂上还装有一台摄像机和化学传感器<sup>[4]</sup>。



图 1 美国 Alvin 号载人潜水器上的右舷机械手

Alvin 载人潜水器是美国海洋科学界最重要的科学考察装备之一，它近年来下潜工作了近 4 000 次，为人类探索深海未知世界，立下了不可磨灭的功勋。所配置的两只机械手，在无数次的科考活动中发挥了不可或缺的作用。在我们自己的载人潜水器的设计中，我们参考了这艘潜水器的机械手配置。

在调研的基础上，为载人潜水器所设计的液压机械手方案是这样的：两只机械手一为主从式机械手；一为开关式机械手。液压动力源的功率不大于 4.5 kW。这种方案兼顾了技术指标和经济指标，为国外大多数载人潜水器所采用。两只机械手分别完成各自的功能，主从式机械手具有 7 自由度；开关式机械手主要具有锚定功能，同时具备 7 个动作功能，两只机械手的全伸长距离和全伸长时举力都有明确的要求，最大举力(正常工作状态下)可达 2 500 N。机械手材料选用钛合金。考虑到作业活动需要有一定的作业空间，选用的主从式机械手和开关式机械手长度分别为 1 850 mm，1 500 mm。其作业空间仿真图如图 2 所示。

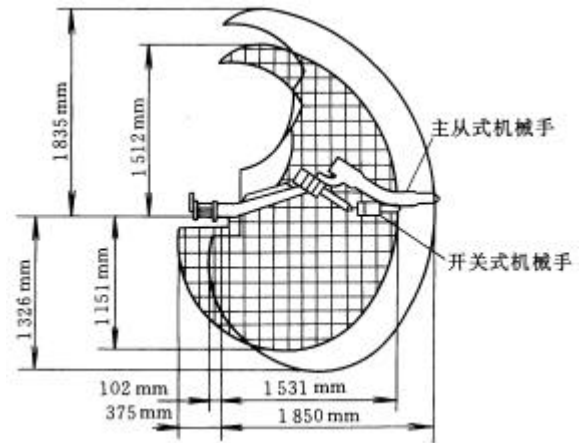


图 2 作业机械手作业空间示意图

## 2 物理化学量异常原位检测技术

水体(含热液)的物理化学量异常检测设备，分成高精度温度传感器及化学传感器两个方面。原位检测就是实地在线测量。温度异常的测量是海洋及其资源勘探研究中最基本的手段之一。温度发生异常也较为容易测出。在设计中我们这样考虑，由于需要对海底热液进行测量，测温要求高达 400℃。如果针对热液扩散区，那么传感器的分辨率要求就很高，应该能够感知 0.005℃ 的温度变化，并能适用于水下数千米大深度条件下进行工作。同时要求具有一定的数据存储功能，数据容量要有 MB 级容量；可连续工作时间 24 h 以上。

化学传感器可用来探测海水中的 pH 值以及海水中溶解氧、 $H_2S$ 、 $HS^-$ 、 $S_2^{2-}$  和  $SO_4^{2-}$  等化学量。作为海洋及其资源探测手段之一，各种原位传感器可以十分有效地解决传统的离线采样—分析方法不能完全反映海洋真实状况的问题。而且，化学传感器具有个体轻便、操作简单、高灵敏度和高反应速率等优点。与现代数据存储和通信技术相结合后，还能做到在线、实时探测的目的。原位传感器的应用将极大地促进海洋资源的探测、海洋环境的监测和保护、海洋科学的研究，对国家的经济和社会的可持续发展具有十分重要的意义。

从图 1 中可以看到，在美国 Alvin 载人潜水器上，化学传感器已作为常规作业工具固定安置在液压机械手上，广泛应用于各种作业活动中。该化学传感器由美国明尼苏达大学海底热液研究小组研究成功，也是世界上第一个能够在火山热液口进行实际化学量探测的设备。所检测的成分有 pH、 $H_2$  和  $H_2S$ ，同时还能检测到温度量变化。温度变化测量有两个目的：一是进行热液喷口具体方位的确定；二是对化学测量值进行补偿。该传感器为获取海底

热液真正的化学成分提供必不可少的工具<sup>[1]</sup>。

作为我国载人潜水器上的作业技术的重要组成部分的研制，我们在 863 项目的支持下，对相关物理化学量异常检测设备进行了初步研究，其总体结构原理设计如图 3 所示。

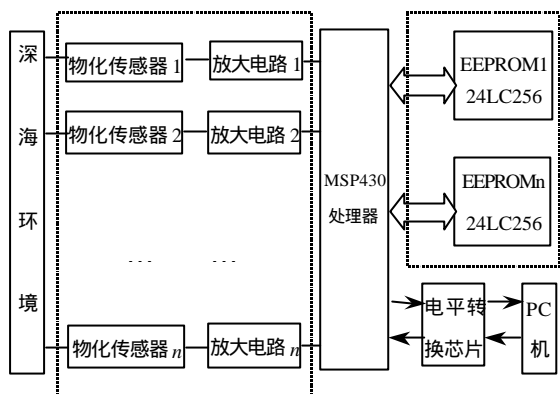


图 3 物理化学量传感器信号处理结构原理图

通过我们自行研制的电化学探头探测深海热液环境下的物理化学参数，并将这些参数适当放大，通过 MSP430 微处理器的数据转换处理成相应的数字信号，一方面存储在 EEPROM 中，一方面可以通过 ICL(非接触式深海传输装置)及 RS232 接口传输到载人潜水器内的计算机上进行实时数据处理。

由于现有的集成电路一般都很难做到耐高压、耐海水，因此设计了以下封装结构，如图 4 所示。

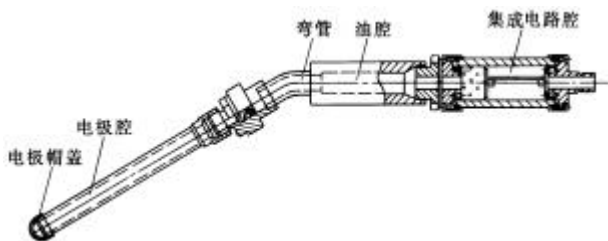


图 4 手持式传感器系统

因为在热液口附近大部分是海底岩石，为了防止传感器探头被破坏，在传感器探头顶上加装一半球型电极帽盖，在帽盖的四周都打了斜孔，辅之流道设计，以便海水流动充分。为了保护探头电极棒，我们设计了一电极防护套管即电极腔。

同时，为使集成电路腔免受高温影响，在探头电极腔和电路腔之间增加一缓冲油腔，为使机械手比较方便地抓取，在油腔的前一部分设计了一个弯管。并且为确保电路腔不漏水，我们设计了集成电路保护腔，并在集成电路腔的两端设计了耐高压密封机构。信号线通过水密接插件引出，通过无线信号通讯方式传入载人潜水器内部。

### 3 采样技术

对于载人潜水器来说，由于潜水器可以到达海底任意指定位置，其采样对象可包括海水、气体、沉积物、生物及微生物、岩石和矿石样品等等。采样装置主要有这样几种：水样采集、气相组分采样、沉积物采集、矿物采样、微生物悬浮物采集以及宏生物捕捉等等。这些装置大多是通过潜水器上的两个作业机械手的操作实现对对象的采样。

在美国 Alvin 潜水器上，主要使用三种采样装置：一是采集热液口的水样；二是采集指定地点的气相组份。采气装置具有保压功能，保证采集上来的气样不会被泄露；三是名为 Slurp 的装置进行微生物样品的采集。该装置具有如同吸尘器的功能，在深海底的指定地区大量地过流该地区的水体，将含在水体中的大量悬浮生物沉积在过流区的特制膜上，从而采集微生物样本。

在海底底部还有必要采集底部沉积物，从而开展底栖生物、天然气水合物勘探等研究，需要开展沉积物保真采样器的研制。为了对海底的富金属结壳进行钻探取样，还必须开展深海结壳钻探取样器(潜钻)的研究。同时，还有悬浮生物采样系统等等。在此，保真的概念是保压、采样时周边无扰动、样品无污染和被动保温。被动保温是考虑经济指标和轻量化，故仅采取隔热、防热辐射两项措施，而不考虑主动加温(或降温)措施。限于篇幅，这里就只对水体采样器和沉积物保真采样器的设计展开讨论。

#### 3.1 水体(含热液)保真采样器

水体采样器设计容量可以容纳的水体体积为 500 ml，考虑到需要采样热液，采样器的工作温度在  $-2 \sim 400$  之间。考虑水下工作深度很深，最大保持压力设计为 70 MPa。由于考虑载人潜水器的搭载重量有限，采样器的重量应当有所限制。借鉴美国水体采样器的结构<sup>[5]</sup>，水体(含热液)保真采样器原理图初步设计如图 5 所示，

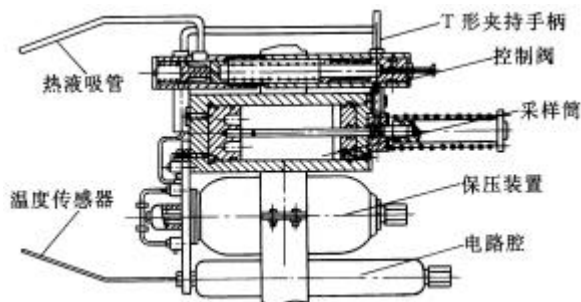


图 5 水体采样器结构

当对海底热液口进行采样时，用一只机械手的

手爪抓住采样器的 T 型夹持手柄,使得手臂上的触发液压缸对准控制阀的采样触发器按钮实施控制。机械手伸出,将采样器的吸水口对准热液喷口。在采样触发器动作之前,通过吸水口进入管道的热液全部从卸压口旁路掉。同时,通过安装在采样管上的温度传感器检测温度,当所检测温度达到采样要求时,打开控制阀,采样筒在弹簧的作用下开始采样,采样完成后,关闭控制阀,通过保压装置进行保压。

### 3.2 沉积物采样器

沉积物采样器设计容量为 500 ml 的沉积物(含微生物)及 3 500 ml 的上覆水,并具有压力保持功能,并设计最高保持压力为 70 MPa。由于载人潜水器的搭载有效重量有限,采样器的重量应当有所限制。

沉积物保真采样器初步设计如图 6 所示,该沉积物采样器采用双层筒结构。内侧样品衬筒为外径 60 mm,壁厚 4 mm 的有机玻璃筒,用于采集并保存沉积物样品,有效采样深度为 250 mm;外侧为刀筒与保压筒体,均采用高强度的 TC4 钛合金材料,其中刀筒外径为 66 mm,壁厚为 3 mm,主要起保护内部衬筒和确保保压筒下封口清洁的作用;保压筒体外径为 180 mm,壁厚为 20 mm,用于采样沉积物的上覆水与保持样品的压力。压力补偿器与保压筒体直接相连。上端盖装有机手夹持与操作作用的 T 形手持杆。

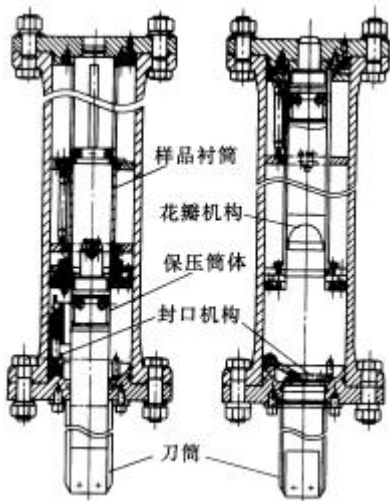


图 6 沉积物保真采样器初步结构

衬筒上部由衬筒盖、金属滤网和挡圈构成,可防止沉积物样品溢出并可排出衬筒内海水。衬筒盖与衬筒间用螺纹联接。衬筒下部固定花瓣用于切断样品并封口。刀筒底部有 60°的刀口,便于插入沉积物内采样。刀筒上部则用螺纹与保压筒的下端盖联接。保压筒体下端盖装有翻盖机构,在样品衬筒

完全进入保压筒后能自动盖上并密封。

采样前,有机玻璃衬筒处于刀筒内。采样时,用一只机械手的手爪抓住夹持手柄,机械手伸出,将采样器的下口对准感兴趣的沉积物。机械手下压,将采样器竖直插入沉积物,样品进入采样衬筒。采样完成后,首先机械手向上提起,将采样器从沉积物中拔出,花瓣合拢,切断样品并封口;然后机械手上的触发缸动作,将样品衬筒拉到保压筒体内,上下封口自动盖上,实现了样品的保压。

## 4 深海无线耦合信号传输系统及触发技术

在对海洋及其资源勘探研究中,还有许多必要的相关技术。对于载人潜水器来讲,建立载人舱内外各种设备之间的通信是十分必要的,因为这是科学家控制作业工具或者进行数据采集的必不可少的手段。这就是深海无线耦合信号传输系统及触发技术。

载人潜水器对其作业工具的操作、动作触发以及潜水器内部与作业工具之间的信号传输是作业工具包的基本要素之一,但常规的通过电缆给出控制信号进行触发或信号传输的方式并不适用于载人潜水器的作业工具包,其原因是载人潜水器需要方便地更换作业工具。同时,考虑到作业工具在工作过程中有可能出现各种各样的意外情况,如被水草缠住、夹在沉积物或岩石缝隙中无法拔出等,也要求作业工具的机械手持部分可以方便地抛弃。建立作业工具与舱内控制人员之间的通信关系,用无线通信方式是最为安全的。因此,载人潜水器对其作业工具的操作与动作触发需要通过触发液压缸实现,两者之间的信号交换也需要通过无线耦合信号传输方式实现<sup>[9,10]</sup>。

根据电磁感应的原理,主线圈内电流变化会在其周围产生交变的磁场,这个交变的磁场使次级线圈产生感应电动势。这一现象称为电感耦合(Inductive coupling)。本装置采用了这一原理,用交变的磁场作为媒介,进行信号传递。

如图 7 所示,深海无线耦合传输系统装置(矩形框所包含部分)将使深潜器内的计算机和各类探测设备以半双工的方式通信。下面按图 7 标出的(1)、(2)、(3)、(4)、(5)和(6)来说明应用的基本结构:(1)和(2)之间可以集成在一起,也可以通过 RS—232 串口线连接如果采用串口线连接,需要进行 TTL 电平与 RS232 电平的转换;线圈(3)和(4)之间是非接触式信号传递环节,线圈本身以及与调制解调装置(2)和(5)的连接都采用抗腐蚀的潜水电线;(5)和(6)之间通过

RS—232 串口线连接。

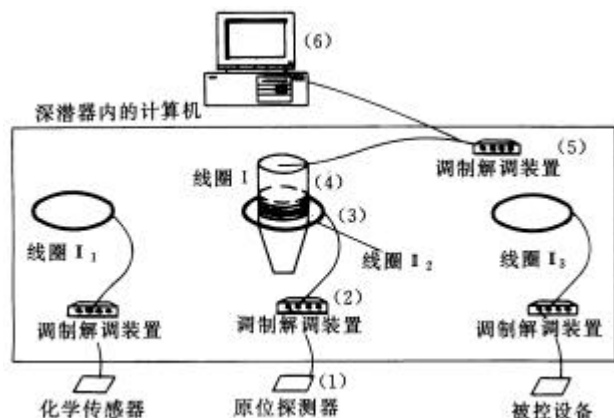


图7 深海无线耦合传输系统示意图

## 5 结论

对载人潜水器作业系统技术中的水下机械手、采样技术以及其他相关技术进行了讨论。并为大深度载人潜水器作业系统，进行了初步选型与设计研究。作业技术范畴较大，根据科学考察及资源勘探工作的需要，还可包括以下一些内容：海底岩芯钻取技术，宏生物捕获技术，各种长期原位观测与测量技术，天然气水合物勘探技术(如海底表面以下沉积物采样与化学量原位测量技术)，热液流量测量技术，热液口临界流体的研究，海底底部流体的采样与观察技术等。

基于载人潜水器的深海资源作业技术的科学问题可归纳为这样三个方面：在结构技术方面，有高压高温下装备的机械强度和耐腐蚀技术，高压高温密封技术，机电系统的封装和轻量化技术，多种物理化学探头集成与复合技术等等。在控制技术方面，有超高压液压控制器件技术、水下耐高压机电控制与执行器件技术、无压力突变的缓慢减压技术、深海液压系统压力补偿技术、保真样品的无压力变化转移技术和沉积物无边界扰动的采样技术等等。在其他方面，应考虑海底岩土特性的机电装备的设计，低耗节能及能量供给技术，与生物、化学技术的学科交叉等等。

## 参 考 文 献

- 1 Ding K, Seyfried W. Direct pH measurement of NaCl-bearing fluid with an in situ sensor at 400°C and 400 megapascals. *Science*, 1996, 272(6): 1 634 ~ 1 636
- 2 Chapelle F, O'Neill K, Bradley P, et al. A hydrogen-based

subsurface microbial community dominated by methanogens. *Nature*, 2002, 415(1): 312 ~ 314

- 3 陈鹰. 海底热液科学考察中的机电装备技术. *机械工程学报*, 2003, 38(增刊): 207 ~ 211
- 4 <http://www.whoi.edu>
- 5 <http://sio.ucsd.edu>
- 6 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000
- 7 Louis L Witcomb. Underwater robotics: out of the research laboratory and into the field. In: *Industrial Robotics IEEE 2000 International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, California, 2000: 1 ~ 8
- 8 <http://www.schilling.com>
- 9 Fornari D, Bradley A, Humphris S. Inductively coupled link(ICL) temperature probes for hot hydrothermal fluid sampling from ROV Jason and DSV Alvin. *RIDGE Events*, 1997, 8(1): 26 ~ 31
- 10 卫桦林. XR2206 和 XR2211 调制解调器在远距离点对点通信中的作用. *电力系统通信*, 1999(5): 40 ~ 44

## DSV-SPECIFIC TOOL-BOX FOR THE DEEP-SEA RESOURCES EXPLOITATION

Chen Ying Yang Canjun Gu Linyi Ye Ying  
(Zhejiang Univeristy)

**Abstract**: DSV (Deep-sea submersible vehicle)-specific tool-box is irreplaceable in the deep-sea resources exploitative activities. Considering the tool-box as an indivisible part of the DSV is one of significant factor of DSV principle design, which means that the deep-sea resources exploitation will be one of most important activities for the coming DSV. Based on the investigation of DSV Alvin of Woods Hole Oceanographic Institution, the USA, underwater manipulators, sensors, sampling devices, and relevant technology for our own DSV are investigated. And the selections and schematic designs for main parts of the tool-box are put forward as well.

**Key words**: Deep-sea technology Tool-box DSV

Underwater manipulator Sampling device

作者简介:陈鹰,1962年出生,工学博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为机电控制集成、流体传动及控制、深海作业技术和气动汽车。