

## 国外水下作业机械手的特点及发展趋势

杨农林 茅及愚 向忠祥  
(华中理工大学, 武昌)

收稿日期 1989年10月11日

国外水下作业机械手(以下简称机械手)的研究始于50年代。70年代以来,国外许多公司如美国的Schilling公司, Western Space and Marine 有限公司以及英国的 Slingsby 有限公司等,相继研制成功了多种先进的机械手及系列产品,并已投入批量生产,使机械手的研究和生产达到了较高的水平。我国水下作业机械手的研制工作始于70年代,与国外相比还存在着一段差距。本文从水下机械手的结构、液压驱动及控制

三方面,详细分析了国外水下作业机械手的特点及发展趋势。

### I. 水下作业机械手的工作任务

表1列出了海洋开发活动中常涉及的25项水下作业项目及机械手所能完成的作业任务。从中可以看出,机械手在海洋开发工程中起的重要作用。

表1 常见的水下作业项目及机械手的作业能力(N:不适用 P:有限适用 S:适用)

序号	作业项目	能力	序号	作业项目	能力
1	水中摄影(电影、电视)	S	14	钻孔、攻丝	S
2	勘察	P	15	凿岩	P
3	测量	P	16	清除船底上杂物	S
4	检查及检修	P	17	设备清洗	S
5	物体的搬运和回收(轻物体)	S	18	解体作业	P
6	平整海底	N	19	操作阀门	S
7	挂钩(重物体的搬运、回收)	S	20	水中机器的操作	P
8	打桩	S	21	生物采集	S
9	设备的安装	S	22	海底岩心的采取	P
10	水中焊接、切割	S	23	修理渔网	N
11	紧固螺栓	S	24	安装防蚀板	S
12	钢丝、钢索的切割	S	25	水中涂漆	S
13	水中爆破	P			

## II. 国外水下机械手的机械结构特点及发展趋势

### II.1. 采用关节式坐标, 其手臂多采用开式框架结构

为了提高机械手绕越障碍物的能力,多数机械手采用关节坐标式,而不采用直角坐标式和球坐标式。其关节式手臂多采用开式框架结构,以减轻机械手的重

量,增加机械手举力重量比,并使得对机械手的维修、保养比较方便。另外,将液压油管、控制导线装在框架内,可避免和 underwater 物体缠绕。机械手手爪部分则应远离框架结构,尽量暴露出来,以便于操作者观察。

### II.2. 采用强度高、重量轻、耐腐蚀的材料

当今多数水下作业机械手是安装在深潜器上的。过去的深潜器多为载人的,现在多为无人缆控的或无人无缆的。这种发展趋势说明,深潜器逐渐趋于轻量化,当然,安装其上的机械手也应轻量化。由于开式

框架结构的采用,对机械手臂、肩部的强度要求也越来越高,因此采用高强度的合金材料势在必行。如美国 Schilling 公司生产的 HV 型机械手采用优秀的防锈铝<sup>1)</sup>作材料,TITAN 型机械手采用钛合金<sup>2)</sup>。

### II.3. 机械手关节结构的模块化,使互换性不断加强

所谓机械手的模块化,即将机械手设计成许多相对独立的部分,根据水下作业要求,选择这些部分组成具有一定自由度和特定功能的机械手。例如,采用模块化结构的机械手,其六自由度可增加一个关节变成七自由度,而其它关节均不改变。又例如,现代机械手的手腕具有两种操作方式,即连续回转式和主从随动式,若机械手采用模块化结构,就可保持机械手肩部、臂部结构不变,仅将其手腕设计成两种可互换的机械结构以实现上述两种功能。现代机械手一般配有多种型式的手爪,相互可以更换。

### II.4. 机械手的手臂结构和水下作业工具的自动更换

机械手与工具的配合作业方式有两种,一种是用手爪夹持工具进行作业,这样只需把工具放到预先选定的位置,工具的动力由液压源单独供给。另一种是更换手爪,将工具视为手爪。这就存在着如何更换的问题,有的机械手所持的工具是由人工在水上更换的,作业效率不高。现在国外的许多机械手都配置了一种水下工具自动更换系统,机械手能在水下作业现场自动从工具包上取放和更换工具,提高了作业效率。自动更换系统的关键技术是工具与机械手的快速对接,具有自动控制功能的工具包和相应的机械手控制系统。为了保证机械手与工具自动对接成功,机械手与工具的接口部分要有两个作用,其一是能将工具紧锁在机械手上,其二是要保证液压动力传递系统畅通。自动控制工具包的主要作用是防止工具丢失,方便存放。当机械手取工具时,机械手与工具的对接一旦完成,工具包就应自动松开被夹紧的工具;机械手放工具时,工具一旦放回工具包,机械手就应自动将工具夹紧定位。机械手控制系统主要是对各种取放工具的路径进行预先编程。

## III. 国外机械手液压驱动系统的特点及发展趋势

### III.1. 液压元件小型化、集成化

近代机械手关节的驱动电机和液缸都是特制的,其外形尺寸比常规标准小,输出的力(矩)又较大,这可

以认为是液压元件的小型化趋势。

众所周知,液压驱动的机械手与其它驱动系统的机械手相比,有一个较大的不足之处,即控制系统阻力比低。这使得机械手对控制命令的响应慢,延迟调节时间长,机械手振荡较大。造成这一缺点的主要原因是机械手采用串联杆结构,各关节作动器和伺服阀之间由软管连接,液压油及软管皆可胀缩。为了克服这一缺点,现代先进的机械手常把液压作动器和伺服阀结合在一起,省掉了其间的软管,改善了动态响应能力,称之为液压元件的集成化。液压元件集成化的另一特点是液压作动器的嵌套结构,使机械手结构更加紧凑。

### III.2. 液压元件和控制检测元件的一体化

过去常将检测元件装在机械手各关节轴上,测量其旋转角度,再转换成液压作动器的行程,这样在水下对检测元件难以密封保护,而且检测精度也不高。现代机械手的检测元件装在油缸柱塞杆内部,直接测量柱塞杆行程,这样既能保护检测元件,又能使检测结果更加可靠。另外,各关节的液压驱动元件结构、尺寸相同,增加了各关节作动器的互换性,降低了制造成本。

### III.3. 采用各种特殊形状的密封圈或组合密封圈

如此,可增加机械手密封系统的可靠性,减少密封所带来的摩擦损失,提高液压系统的传动效率。随着机械手举力重量比的要求提高,其工作液压不断加大,要求密封更加良好。且随着机械手工作现场水深度的增加,液压系统的密封也更加困难。由于液压元件及检测元件的集成化,需要密封的地方也愈来愈多,而且动密封相对增多,这些都会使液压传动效率下降,作动器额定功率发挥不出来。为了解决这个问题,人们采用了各种特殊形状的密封圈或组合密封圈。

### III.4. 采用海水作为液压驱动系统的工作介质

用海水代替液压油,能简化驱动系统的传递线路,如,可省掉回油管;可以避免由于液压油泄漏对环境造成的污染;减少液压驱动系统的惯性;提高机械手的动态响应能力。缺点是液压元件磨损较大,这是因为海水的粘性较差。其次,市场上买不到水压系统的部件,只能专门设计,提高了成本。

1) 美国 SCHILLING 有限公司, HV5F/6F 机械手系统。

2) 美国 SCHILLING 有限公司 TITAN 七功能遥控机械手。

## IV. 国外水下机械手控制系统的特 点及发展趋势

### IV.1. 机械手广泛采用电液伺服控制, 并使用了微型计算机

最初的机械手常采用开关控制, 其液压控制元件是电磁阀, 控制方式是开环, 这种控制系统的优点是工作可靠, 操作直观、简单; 缺点是控制精度差、流量大小无法控制、液压冲击大、机械手动态响应差。近代的机械手广泛采用电液伺服控制, 它是一种闭环控制, 用电位器检测从动机械手的位置, 并将其位置电信号与主手或计算机发出的控制信号相比较, 用其误差驱动电液伺服阀, 控制从手的运动, 直至误差消除, 这是位置伺服控制, 如后所述, 还有力伺服控制。

机械手的伺服控制, 需要对机械手的位置、压力进行数据采集、A/D、D/A 转换及 PID 调节。要完成这些计算, 必须在很短的时间内处理大量的数据。有的机械手甚至已具有 8—9 个关节, 使数据处理量成倍增加。微型计算机的采用, 大大增加了机械手控制系统的实时处理能力, 使得伺服控制得以实现。

### IV.2. 水下机械手具有示教再现功能

所谓示教, 就是先由操作员通过操纵主手命令从手完成某一动作, 同时, 其路径上的某些点被计算机采集并加以存贮, 以后只需按一下控制开关, 从手就能自动再现上述动作。示教再现主要用于重复性工作, 如机械手的收藏、机械手采样回收等。

### IV.3. 机械手远距离通讯能力不断提高

其通讯距离可达数公里, 信息的传输也更加可靠。若机械手采用主从控制, 主手常装在水面控制舱内, 而从手在水下数百米甚至上千米的作业现场。主手的控制信息如何可靠地传递给从手, 这是一个十分关键的问题。近代的水下主从机械手常采用计算机进行串行通讯, 水上、水下各用一个计算机分别负责信息的接收、发送, 其间仅用一根双绞线连接, 为了工作可靠, 常

采取光电隔离等措施。

### IV.4. 水下主从机械手由开环控制发展成闭环控制, 进而引入双边力反馈

水下液压主从机械手的力感觉判断, 即机械手的力反应性是通过如下方法实现的, 当操作者驱动主动臂时, 误差信号(即主从手间的位置误差信号)就会产生一个与它成正比的力(或力矩)和加速度, 以修正这种误差。这个力既要作用到主动臂的执行机构上, 又要作用到从动臂的执行机构上, 但力的方向相反, 因此, 这两个执行机构力图修正这种位置误差。如果从动臂使出一个向上的力提举载荷, 则主动臂就产生一个向下的力, 使操作者产生一种握着从动臂载荷的感觉。

具有力反馈的主从式机械手有如下特点: (1) 主、从手两端一般都具有相同的伺服元件, 并且两端都在力求修正误差, 不论哪一端都可作输入用, 即驱动从动臂可使主动臂运动。(2) 当从动臂握着一个重物或施力时, 由于输出力正比于输入的位置误差, 所以主从手间总有一个位置误差存在, 又因力对位置误差的增益很大, 所以这种位置差几乎不会被操作者察觉到。

具有双边力反馈的水下主从式机械手, 其作业能力得到较大的提高, 能在水下进行较复杂的装配作业

### IV.5. 水下机械手控制系统趋于多功能集成化、模块化

现代机械手的控制系统结构紧凑、集成度高, 通常是水上、水下各设一个控制装置。水上控制盒负责收集主手信息, 传递主手命令; 水下控制装置则负责接收主手命令, 完成作业机械手的闭环控制。水上控制器通常有一个面板, 通过面板可实现各种控制功能, 如主从控制、计算机控制、主手与从手之间的冻结(即从手不响应主手的运动)、计算机控制的示教再现及双边力反馈等。机械手控制系统采用模块化结构, 操作者可根据不同的作业要求, 选择控制模块, 实现上述的各种功能。这样, 控制系统组态灵活, 既可降低成本, 又便于升级换代。