



许德章

# 水下作业灵巧手水压驱动系统的设计与工程实现

许德章<sup>1,2</sup>, 汪步云<sup>1,2</sup>, 张庆<sup>1,2</sup>, 葛运建<sup>3</sup>, 曹会彬<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>先进数控和伺服驱动技术安徽省重点实验室, 芜湖 241000;

<sup>2</sup>安徽工程大学机械与汽车工程学院, 芜湖 241000; <sup>3</sup>中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 鉴于水下作业灵巧手的特殊要求, 匹配合适的驱动系统显得尤为重要。笔者详细阐述了水下作业灵巧手水压驱动设计, 探讨了工程实现, 在水下特定作业环境有着良好的应用前景; 以此为基础, 组建了水压伺服控制回路, 构建了力控制系统。

**关键词:** 水下作业灵巧手; 水压驱动; 力控制系统

中图分类号: TP241.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-8728(2011)02-0181-04

## Design and Implementation of the Driving System for Underwater Operation Dexterous Hands

Xu Dezhang<sup>1,2</sup>, Wang Buyun<sup>1,2</sup>, Zhang Qing<sup>1,2</sup>, Ge Yunjian<sup>3</sup>, Cao Huibin<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Key Laboratory of Advanced Numerical Control and Servo Technology, Wuhu 241000;

<sup>2</sup> School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000;

<sup>3</sup> Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** For the special requirements for the underwater operation dexterous hands, designing an appropriate driving system is very important. We present the design of the operation hands' driving systems and their engineering implementation. On the basis of it, we establish the hydraulic pressure control loop and design the force control system. Experiments show that the design is correct.

**Key words:** underwater operation dexterous hands; hydraulic pressure driving; force control system

目前,水下机器人是海洋开发和利用的重要技术平台,而水下作业灵巧手是水下机器人的重要组成部分,也是高效的水下作业工具,它的应用涉及到商业、军事、科学研究、资源等众多领域。但若想完成复杂的水下作业,如打捞、救助、考古等,作业工具必须匹配合适驱动方式,因此水下作业灵巧手驱动设计与工程实现极具研究价值和实际意义。

### 1 驱动方式的选取

水下作业灵巧手在特定水下工作环境,要求体积小、效率高、负荷大、结构相对简单,且需要满足水下精细作业的要求,能够比较精确地控制手指与目

标间的接触力与操纵力。图1所示是水下作业灵巧手。



图1 水下作业灵巧手

在现有技术条件下,较为成熟可靠的关节驱动一般有两种动力形式。一是电磁驱动,如电机、

收稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家“863”项目(2006AA04Z244)和安徽省自然科学基金项目(11040606M144)资助

作者简介: 许德章(1964-),教授,博士,研究方向为智能机器人的研究与开发, xdz@auts.edu.cn

电磁铁等,二是流体驱动,包括气动、液压和水压驱动。液压传动与电动及气动工具相比,使用寿命长,性能可靠,能均匀调速,不需要减速装置,具有单位功率重量轻、体积小、输出功率大、输出平稳等优点<sup>[2]</sup>,已广泛应用于中浅深度作业,并开始用于大深度到极限深度作业,在水下作业中使用最多<sup>[3]</sup>,水下机器人及灵巧手使用的几乎全部是液压力工具。另外,水下作业通常要求灵巧手负荷比较大,且结构紧凑,因此关节一般采用流体传动。

### 2 灵巧手关节驱动液压系统设计

根据项目任务书确定的性能指标灵巧手一般有旋转、移动两种基本关节类型,本项目研制的机械灵巧手采用6关节3手指结构,本灵巧手的根关节为旋转关节,3个根关节共用1只摆线马达驱动,属于欠驱动;3个指关节为移动关节,采用3只液压缸驱动,属于独立驱动。以液压马达和液压缸为执行元件的液压伺服系统,只能控制执行元件的运动方向、运动速度、负载驱动能力3个基本物理量,即液压马达的正转与反转、转动的速度、输出转矩;液压缸活塞杆的正向与反向移动、活塞杆的移动速度和驱动力。据此,灵巧手执行目标抓取与操纵任务的动作虽然复杂,但应由根关节液压马达旋转和指关节液压缸活塞移动的基本动作组合实现<sup>[4]</sup>。

根据以上关节运动功能分析,液压系统需要满足如下要求:

(1) 为了实现手指趋近和离开目标两个基本动作,液压马达和液压缸需具备正、反两个方向的运动功能,即液压回路具备流体介质换向功能。

(2) 为了满足手指趋近和离开目标运动速度的控制要求,液压回路需具备流体流量控制功能。根据精细作业任务的要求,流量必须连续控制,且应由控制器自动完成。

(3) 为了实现手指与目标间力伺服控制功能,液压驱动元件进出口间的压力差必须连续可控。

图2所示为水压驱动系统原理图。其中虚线部分为液压力源 PPH4,驱动手指1、手指2、手指3的3个液压缸分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ ,其流量通过节流阀  $F_6$  初步设定;液压马达 MAH 是根关节驱动元件,其流量通过  $F_4$  初步设定。液压缸和液压马达流量的精细调节通过液压伺服阀  $F_3$ 、 $F_5$ ,由 DSP 自动控制。节流阀  $F_3$ 、 $F_4$  为三只液压缸  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  和液压马达 MAH 提供背压。

根据理论设计,其中液压泵 PA 输出的高压流

体经单向阀  $F_1$  后分两路,一路经比例伺服阀  $F_5$  后,给3只指关节液压缸供液,另一路经三位电磁换向阀  $F_3$  后向液压马达 MAH 供液。三位电磁换向阀  $F_3$  可以控制进出液压马达流体的流向,从而控制液压马达正、反转,实现3只手指张开与收拢控制。比例伺服阀  $F_5$  集三位换向与流量比例控制功能于一体,不仅能控制液压缸活塞杆伸、缩,同时也可以通过压力连续调节,控制液压缸活塞杆的驱动力,实现手指与目标间接触力连续控制。 $F_7$ 、 $F_8$  与  $F_9$  是二位电磁换向阀,分别控制各自指关节液压缸流体的通断,实现3只手指独立驱动。 $F_4$  与  $F_6$  是节流阀,分别用以调整液压马达和液压缸出液口的背压。 $F_2$  是安全阀,在确保高压回路溢流的同时,初步设定高压回路的工作压力; $M_1$  是监测高压回路工作压力的压力表。

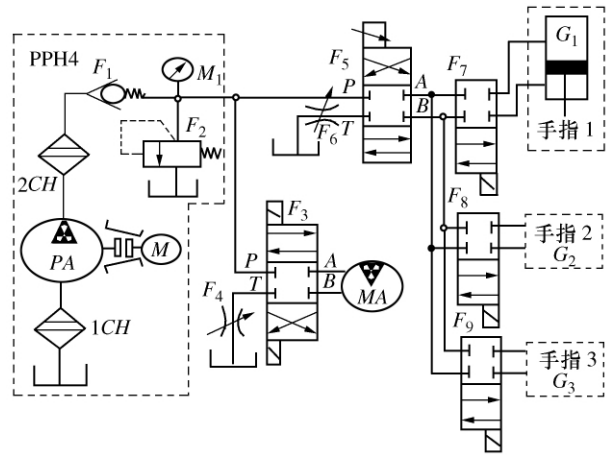


图2 水压驱动系统原理图

借助  $F_3$  和  $F_5$  对流量和压力的连续控制,其响应频率高,调节范围大,精度高,其工作原理图和外形图如图3、图4。

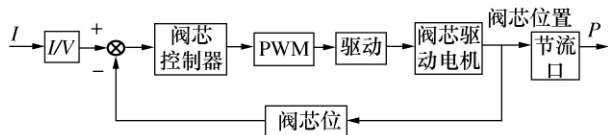


图3 伺服阀内部控制流程

伺服阀驱动与控制电路根据控制指令和传感器的反馈信号,调控伺服阀,对压力和流量进行连续的反馈控制,用以控制水下灵巧手的指关节执行器的运动速度和方向<sup>[5]</sup>,这是针对灵巧手能够进行力伺服操作,从而实现手指接触力精确控制,也是扩大作业范围,胜任水下、深海精细作业的机器人智能手爪的先决条件。

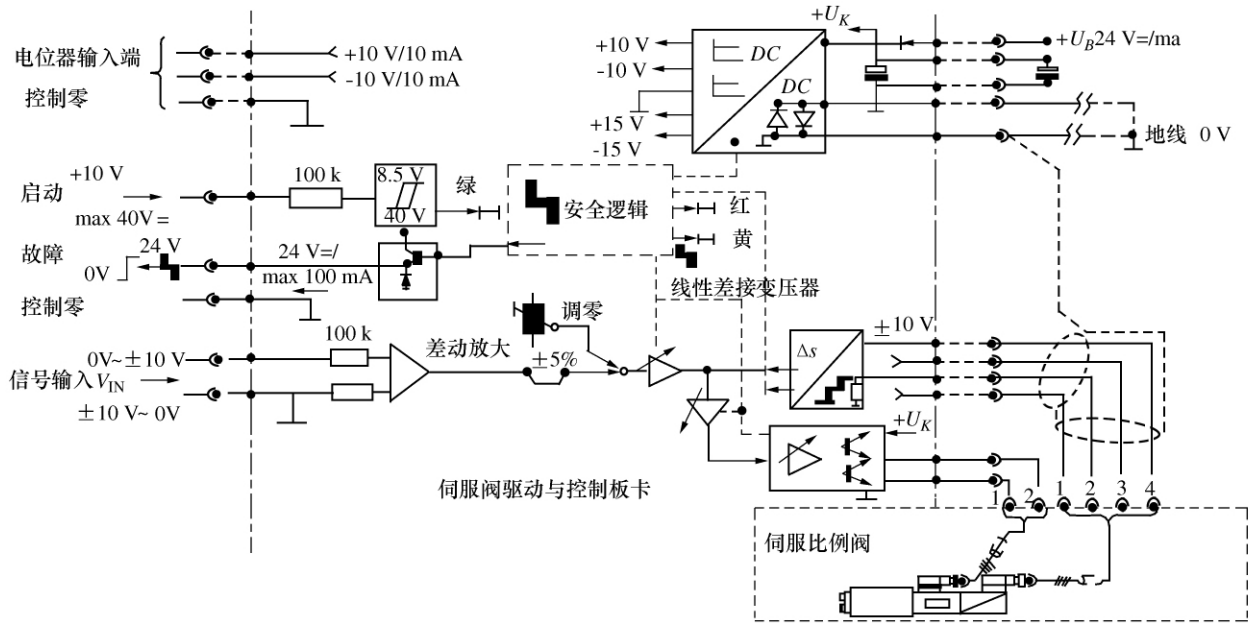


图 4 伺服阀驱动与控制原理图

### 3 流体传动介质的选择

流体介质包括气体、矿物型液压油和水。在水下作业环境下,携带足够的气体介质或从水面输送空气到水下作业现场都很不方便,难以应用。而矿物型液压油作为介质的液压驱动比较常见,技术非常成熟,油压元件选择非常方便,是目前绝大多数水下作业系统的首选方案,但矿物型液压油与海水不相容,且液压油和海水不可避免地会相互渗漏,其泄漏和污染问题难以从根本上克服,同时系统必须设计成闭式循环系统<sup>[6]</sup>需要携带液压油,配置油箱等辅助装置,整个系统显得比较庞大。另外,水下载体空间有限,难以携带比较庞大的水下液压系统。若采用水压驱动则不然,水压可以取用工作现场的水源,不需要携带工作介质,也不需要配置水箱,简化了液压系统,但水压驱动面临较多技术困难,主要表现如下:

#### (1) 水的粘性低

纯水在 50 °C 时的粘度为  $(0.55 \sim 1.0) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 而油的粘度则为  $(15 \sim 70) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。从水/油特性比较看,水动力粘度(40 °C)为矿物型液压油的  $\frac{1}{106}$ , 水的运动粘度(50 °C)为矿物型液压油的  $\frac{1}{120}$  至  $\frac{1}{130}$ 。在压力相同的条件下,通过相同间隙时,水的泄漏量比油大 10 至 20 倍<sup>[7]</sup>。

#### (2) 磨损性

水介质的粘压系数只有液压油的 1/30,在同等工作情况下,水的最小润滑膜厚度只有液压油的 0.16 倍,润滑膜厚度的减小伴随摩擦副表面的直接

接触,引起边界摩擦或干摩擦,产生严重的粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损。同时,低粘度会导致高速水流,引起冲蚀磨损,这些磨损将大大缩短摩擦副寿命,进一步扩大工作表面之间的配合间隙并加剧内部泄漏,从而使元件和系统失效。

#### (3) 腐蚀性

水介质的导电率是液压油的 1010 倍,腐蚀性强,极易引起水压系统元件的电化学腐蚀。

#### (4) 气蚀性与水击

水介质的蒸汽压是液压油的 107 倍,更易汽化和沸腾。水的密度较液压油大,高速流动时惯性大,容易在元件和系统的过流通道中形成局部真空,使水汽化或使水中溶解的气体气析产生大量气穴并在高压区溃灭,从而导致过流表面的严重气蚀,引起水液压系统的振动与噪声、缩短元件寿命、降低容积效率和工作性能。此外,水的弹性模量是液压油的 1.5 倍~2.4 倍,水的压缩性小、刚性大,当系统中水流速度和方向突然变化时会产生压力冲击,其形成的水击在系统中会导致振动与噪声,降低元件和系统的性能与可靠性。

针对上述问题,国外一些发达国家如丹麦、德国、美国、日本、英国、芬兰等从上世纪 80 年代初就开始了水压传动技术的研究,目前已研制和开发出一些水压控制阀产品,其性能已达到或接近同类油压控制阀产品的性能,并在工业生产中得到推广应用。特别是水压驱动元件的商品化取得历史性进展,如德国 Hauhinco 公司、丹麦 Danfoss 公司、美国 Elwood 公司、

日本 Ebara 公司、美国 Moog 公司都推出各类商品化的水压驱动元件。其中, Danfoss 公司的水压驱动元件种类比较全, 包括电磁流量比例控制阀、多位方向电磁控制阀、水压缸、水压马达、水泵、压力控制阀等, 是水压驱动元件的主要供应商<sup>[8]</sup>。

针对水下作业环境下, 手爪关节水压驱动, 选取的主要元件见列表 1, 如图 5 ~ 图 8。



图 5 Danfoss AQ70 型水压缸

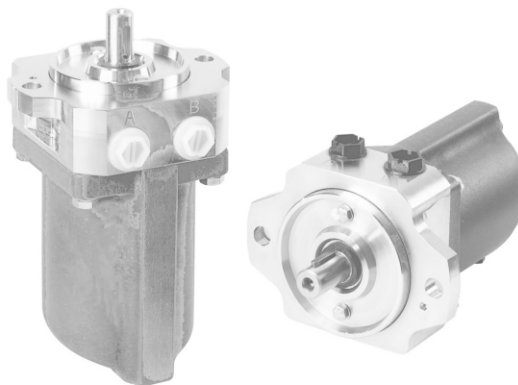


图 6 Danfoss MAH4 型水压驱动马达

表 1 液压系统主要元件型号列表

名称	标号	生产厂家	型号	主要参数	数量
液压动力源	PPH 4/6.3	Danfoss	PPH 4	电机转速 1000 r/min $F_{\max} = 3.5 \text{ L/min}$ $P = 25 \sim 140 \text{ bar}$	1
			旁路电磁阀线圈	24 V d. c.	
			电机	单相交流 220 V $\rho. 75 \text{ kW}$	
节流阀	F3/F4 F5/F6	Danfoss	VOH30M	$P_{\max} = 140 \text{ bar}$ $F_{\min} = 3 \text{ L/min}$	4
液压马达	MAH	Danfoss	MVM160 MAH4	$F_{\max} = 17.5 \text{ L/min}$ $M_{\max} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$ $S_{\max} = 4000 \text{ mm}$ , $P_{\max} = 3.2 \text{ kW}$ $W = 4.1 \text{ kg}$	1
水压缸	G1/G2/G3	Danfoss	AQ70FD 25/12* 100	内径 = 25 mm 活塞杆直径 = 12 mm 行程 = 100 mm	3
压力控制阀	F7/F8	Moog	D6303	$P_{\max} = 350 \text{ bar}$	2

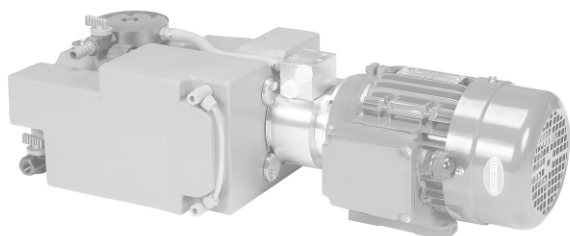


图 7 Danfoss PPHC 型集成水压动力源



图 8 Danfoss VOH30PE 型电磁流量比例阀

#### 4 结语

笔者针对水下作业灵巧手以及工作的特殊环境, 阐明了作业手爪驱动设计与工程实现, 提出了水压驱动方式, 从工程角度做出了具体的探讨, 极具开拓性。

#### [参考文献]

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 王隶棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000
- [2] 王晓东. 水下作业系统及水下对接装置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1998
- [3] Medvick R. Water hydraulics powers sensitive application [J]. *Hydraulics & Pneumatics*, 1999, 52(8): 29 ~ 41
- [4] Kumar V B. *Robotic Grasping and Manipulation* [M]. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2001
- [5] 于延凯等. 液压系统在水下机器人中的应用 [J]. 液压与气, 2002, 11: 24 ~ 25
- [6] 张立勋, 王苗, 王立权等. 自动补偿式深水液压力源及水下作业工具 [J]. 机床与液压, 1999 (2): 39 ~ 401
- [7] Brookes C A, et al. The development of water hydraulic pumps using advanced engineering ceramics [A] *Proceedings of 4th Scandinavian International Conference of Fluid Power* [C], Finland, 1995
- [8] Hitchcox A L. *Water Hydraulics Continues Steady Growth* [M]. *Hydraulics & Pneumatics*, 1999