DOI: 10.3901/JME.2014.02.028

海水液压技术在深海装备中的应用*

刘银水^{1,2} 吴德发^{1,2} 李东林^{1,2} 赵旭峰^{1,2} 李晓晖^{1,2}

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074;

2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 海水液压技术由于其与海洋环境相容、具有海深压力自动补偿功能、运行成本低、工作介质易处理、难燃、系统组成简单、清洁等优点,已在国内外的深海装备中得到了成功应用。介绍海水液压技术的优点及国内外研究简况。分析液压元件与系统采用海水直接作为工作介质所面临的关键技术问题,同时分析深海环境对元件的性能产生影响,包括海深压力和温度对介质特性的影响、海水介质的颗粒污染、海深压力对摩擦副的影响等;从新原理、新材料、新结构、新工艺等方面分析相应的解决措施。介绍几个海水液压技术在深海装备中应用的实例:① 潜水器浮力微调采用海水液压浮力调节系统,替代油压和气压浮力调节系统,具有结构简单,性能可靠等优点,是目前大深度潜器普遍采用的形式;② 海水液压驱动水下作业机械手,是今后水下作业机械手驱动方式发展的新方向;③ 海水液压水下作业工具,直接以海水作为工作介质,同油压工具相比,具有系统组成简单、压力损失小、效率高、维护方便等优点。

关键词: 海水液压传动;深海装备;浮力调节系统;水下作业工具;机械手

中图分类号: TH137

Applications of Seawater Hydraulics in Deep-sea Equipment

LIU Yinshui^{1,2} WU Defa^{1,2} LI Donglin^{1,2} ZHAO Xufeng^{1,2} LI Xiaohui^{1,2}

(1. School of Mechanical Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Seawater hydraulics is successfully used in deep-sea equipment because of its environmental friendliness, seawater pressure automatic compensation, low operating cost, easy disposal of working media, simpleness of system composition and cleanliness. The advantages of seawater hydraulics and research profile are introduced. The key technical challenges and countermeasure of seawater hydraulics used in deep sea equipment are analyzed. Meanwhile, the effect of deep sea environment on seawater hydraulic components, such as the effect of seawater pressure and temperature on working media, particle pollution of seawater and the effect of seawater pressure on friction pair are analyzed, the solutions based on new principle, new materials, new structures and new procedures are further proposed. Three applications of seawater hydraulics in deep-sea equipment are presented. One of them is the seawater hydraulic variable ballast system, which is a promising substitute for oil hydraulic buoyancy regulating system and variable ballast system based on pneumatic because of many advantages, such as simple mechanism and high-reliability. Furthermore, seawater hydraulic variable ballast system is a general choice of deep sea submersible vehicles. As new promising driven modes for underwater tools, seawater hydraulic manipulator and seawater hydraulic ray are in the presentation of the applications as well. Seawater hydraulic underwater tool is also a typical application. Compared with oil hydraulic underwater tools, it has simpler system composition, lower pressure loss, more convenient maintenance and higher efficiency.

Key words: seawater hydraulics; deep-sea equipment; variable ballast system; underwater tool; manipulator

0 前言

占地球面积 70% 的辽阔海洋是人类生存和发展

的资源宝库。然而,世界海洋 90% 以上的水深在 200~6 000 m,平均深度达到 3 730 m。深海蕴藏着丰富的海底矿产资源,如多金属结核矿、富钴结壳矿、深海钙磷土、海底多金属硫化矿以及油气资源、可燃冰等。多金属结核矿主要分布于 4 000~6 000 m 的深海,富钴结壳矿主要分布于 400~4 000 m 的海

* 国家自然科学基金(50975101)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2009AA090100)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0231)资助项目。
20130830 收到初稿,20131003 收到修改稿

底^[1]。世界重大油气探明 50%来自于深海。中国、美国、法国、巴西等国都将发展 3 000 m 水深的海底勘探和油气生产能力作为长期目标。深海油气和矿产资源开发的迅速发展已成为趋势和必然。

深海资源开发离不开现代化的水下作业装备,如海上采矿设备、深水钻探设备、海底采油装置、各种潜水器、水下作业及维护设备等。液压传动具有刚性好、结构紧凑、承载能力高、功率重量比大、响应速度快、远距离控制灵活等特点,在深海装备上得到广泛的应用。然而,传统的液压系统以矿物油作为工作介质,存在着环境污染(工作介质与海洋环境不相容)、结构复杂(需要压力补偿、油箱和回油管等)、工作可靠性差(密封要求严格,海水侵入到系统引起油液变质、元件腐蚀磨损加剧)等问题。

为了适应深海环境,满足大深度、大范围水下作业的需要,美国早在 20 世纪 60 年代末就开展了这方面的研究。1982 年,在美国海军海洋系统司令部的支持下,土木工程实验室研究出试验用的海水液压工具系统^[2]。

1978 年英国海军委托英国工程实验室研制用海水液压驱动的水下作业工具。1985 年英国 Shell 与 ESSO 两大著名石油公司出资 40 万英镑,与土木工程实验室合作研制海水液压泵和马达,1988 年研制出压力分别为 14 MPa 和 10 MPa 的柱塞式海水液压泵和马达,并开发相应的海水液压水下动力工具^[3]。

芬兰 Tampere 科技大学参与欧洲尤里卡计划,并与 Hytar Oy Water Hydraulics 公司合作从事海(淡)水液压系统的研究与应用工作,于 1994 年开始研制开发用于驱动水下作业工具及水下机器人的自持式海水液压水下动力站,1995 年研制出压力 14~21 MPa、流量 30 L/min 的新型轴向柱塞式海水液压泵及马达^[4]。

德国 Hauhinco 公司 1995 年推出了 RKP 系列海水液压径向柱塞泵,成功应用在海底管道维修系统中。泵采用 5 或 7 柱塞,阀配流方式,工作压力可以达到 32 MPa,其中 RKP-160 型泵在 21 MPa 压力下容积效率 94%^[5]。

日本小松工业株式会社、三菱重工、萱场工业株式会社等于 20 世纪 80 年代开始相继研制出轴向柱塞式海、淡水液压泵^[6]。

国内,华中科技大学于 1990 年在国内率先开始海水液压技术的研究,已研制出一系列海(淡)水液压元件,并形成多种型号的产品投入现场应用。此外,浙江大学、大连海事大学、西南交通大学、中国海洋大学、北京工业大学、燕山大学、南昌大

学等也结合自己的优势相继开展了海水或淡水液压技术研究^[7-9]。

海水液压技术在深海装备中的应用不仅具有液压传动的优点,而且克服了油压系统的缺点,具有十分突出的优越性,分别如下^[10]。

(1) 系统直接从海洋中吸水,做功后直接排回海洋,系统内外海深压力平衡,不需要压力补偿装置。

(2) 系统不用配备水箱和回水管,结构简单。

(3) 系统与海洋环境完全兼容,海水的侵入或外泄漏不会影响系统的工作可靠性及污染环境。

(4) 节省了购买、运输、储存液压油以及废油处理所需的费用和麻烦。

(5) 系统使用和就地维护方便。

因此,海水液压是深海作业装备的理想驱动方式,是当今国际上水下作业装备动力驱动的最新发展方向。

1 海水液压关键技术及解决措施

采用海水液压驱动的深海装备面临的技术问题主要来自于两个方面,一是海水介质的特性带来的问题;二是由于深海环境因素带来的问题。

海水的理化性能与传统矿物油介质相比存在很大差别,主要表现为:① 由于海水含有氯离子等多种离子,其腐蚀性强;② 海水的黏度很低,仅为液压油的 1/30~1/50,在对偶摩擦副中很难形成流体润滑,往往产生干摩擦;③ 海水的汽化压力(50 ℃时为 0.012 MPa)比液压油(50 ℃时为 1.0×10^{-9} MPa)高 10^7 倍,很容易产生气穴;④ 海水的密度比油大 10%,导热系数是油的 4~5 倍,比热容是油的 2 倍,弹性模量比油大 50%,水中声速比油大 10%。由此而带来的问题包括如下方面。

(1) 腐蚀与磨损。腐蚀的具体形式主要有电化学腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等。同时由于水的黏度低,摩擦副之间难以形成完整的流体润滑膜,从而加剧了摩擦副材料的磨损。因此,在水液压技术研究中,一个重要内容是寻找可以承受较大的负载而又耐磨的材料配对副。而且对海水和淡水而言,其磨损特性是不同的。有些材料在海水中的摩擦因数小,但磨损率大;而在淡水中摩擦因数大,而磨损率小。

(2) 泄漏与效率。常温下海水的黏度只有矿物油的 1/30~1/50,因而在相同过流面积和压差作用下,海水的泄漏量比油大。泄漏会对海水液压元件造成以下影响:① 元件和系统的容积效率下降,进

而总的效率降低;② 元件的加工困难,为了减小泄漏,势必要提高加工精度,这将使加工难度和加工成本提高;③ 在压力很高的情况下,通过微小缝隙泄漏的流速非常高,易造成拉丝侵蚀。

(3) 气穴与噪声。由于水的汽化压力高,而在水压元件节流口处的流速也很高,很容易产生气穴。气穴发生过程中气泡崩溃产生很大的压力冲击波,一方面会对零件表面产生很强的破坏作用,另一方面会产生很大的气穴噪声。

(4) 冲击与振动。海水泵柱塞腔压力的交变会产生很大的压力冲击。水的压力冲击比油大,主要是由于两方面的原因:一是水的密度比油大;二是水的压缩性比油小。因而,水的流动惯性大,易产生水锤。压力冲击使得振动加剧,促使零件的磨损加快。

除此之外,深海环境还会对元件的性能产生如下影响,主要包括以下几点。

(1) 深海压力和温度对介质特性的影响。海水的密度、黏度、体积弹性模量等理化性均随环境而变化,而且跨度大(环境压力最大跨度达 100 MPa,海水温度最大跨度达 20 °C 以上,如考虑气候温度变化,最大温度跨度将达 60 °C 以上)。如在 70 MPa,水温 4 °C 时,与 1 个标准大气压,20 °C 环境相比,海水的黏度增大近 60%,密度增大约 3%。体积模量受含气量影响较大,同样含气量的海水,高低压情况下的体积弹性模量可能相差 10 倍甚至更多。

(2) 海水介质的颗粒污染。由于天然海水介质中含有大量悬沙,对海水液压元件的抗磨粒磨损提出了更高的要求。不同水域,不同季节,不同深度条件下,悬沙存在巨大的差异,如东海和黄海春季在不同水域就存在较大差异。表 1 为我国东海某处天然海水中颗粒污染物的含量及对应的污染等级,该污染等级即使对一般低压油液压元件也难以满足要求^[11]。

表 1 天然海水的污染等级

水样	ISO4406 污染等级
天然悬沙溶液 54 mg/L	23/23/20

对于污染物的控制,采用过滤器进行过滤是一种方式,但这将使得过滤器的更换频繁,降低了系统的可靠性。更好的办法是深入地研究污染颗粒对磨损的影响,包括不同材料副、不同粗糙度、不同形貌、不同工艺在不同悬沙浓度下的摩擦磨损特性,从而筛选出抗磨粒磨损性能较好的材料配副,满足海水液压元件在特殊工况下的更高要求。

(3) 海深压力对摩擦副的影响。液压元件摩擦

副众多,在深海温度和压力联合作用下,其变形的尺度、方向性和一致性差异很大。同时,以海水作为工作介质时,摩擦副的间隙比油压元件小。在大深度环境下,元件结构尺寸产生的形变是不可忽视的。如海水泵柱塞副的配合间隙为 1~10 μm 级,而柱塞或柱塞套的结构变形也可能达到这个数量级,由此必然造成精密配合的形变失调;同时,由于海水元件对配合间隙的敏感性,摩擦副流场的流态会发生改变(如从湍流到层流或从层流到湍流),润滑状态可能存在流体润滑到混合润滑之间的转化。相比较而言,油压元件由于摩擦副的间隙大一些(10 μm 级以上),对形变的敏感度要小得多。

对这些问题,其解决措施可以粗略地概括为以下几个方面。

(1) 新原理。油压系统在海洋中使用均采用封闭系统。海水液压系统应用于深海环境,则一般采用开式系统,具体有两种实现形式:一种形式是系统直接从海洋中吸水,做功后直接排回海洋;另一种形式是系统仍然保留进水管、回水管和水箱,但水箱和海洋环境沟通,这样可以减小对过滤装置的要求。无论哪一种形式,系统内外海深压力均平衡,因而不需要深海环境中油压系统的压力补偿装置,从而避免了海水渗入到系统或油液泄漏到海洋的危险。

(2) 新结构。如采用二级节流或多级节流等形式减小气穴的发生^[12];对摩擦副表面进行微观改形,从而改善其摩擦性能^[13];为了克服滑靴的倾覆,采用三腔独立静压支承的滑靴结构等^[14]。

Waterhydraulics 公司 Janus 系列水液压泵采用图 1 所示的配流盘形状。同传统的配流盘相比,该配流盘不是一个完整的圆形,而是去除了低压区的配流窗口,只保留了如图 1 所示的高压区腰形配流窗口。从泵的吸入口进入泵的水不经过配流盘,而是直接进入泵腔,这对减小吸入口的压力损失、改善泵的吸入性能有利。

图 1 Janus 系列水液压泵配流盘

(3) 新材料。新型工程材料的应用是海水液压技术的一大特色和亮点。国内外的研究者对此进行

了大量的研究。目前应用的材料主要包括耐蚀合金、工程塑料、工程陶瓷等。

耐蚀合金是海水液压元件中应用最广泛的一种材料。耐蚀合金的种类很多, 钛及其合金、哈氏合金具有优秀的耐蚀性能; 其次是镍基合金和铜合金; 而依靠氧化膜提供耐蚀性的不锈钢, 由于氧化膜相对较薄, 氯离子对其易产生点蚀和缝隙腐蚀破坏, 只有在流速较高、供氧充分的状态下, 钝化膜才能提供良好的保护性; 铝合金的腐蚀行为与不锈钢基本相同, 但更容易遭受电偶腐蚀。

(4) 新工艺。新材料的应用必然涉及与之相适应的工艺。目前常用的陶瓷工艺方法有等离子喷涂、火焰喷涂、电弧喷涂及整体烧结等。在海水环境中, 表面喷涂陶瓷零件的主要失效形式是涂层特定相的选择析出和结合界面的缝隙腐蚀, 从而引起涂层的剥落和热裂纹^[15]。

对于金属材料, 盐浴复合处理(Quench-polish-quench, QPQ)是一种先进的金属熔盐表面强化改性技术。将工件在两种不同性质的熔融盐液中先后进行处理, 使多种元素同时渗入金属表面, 形成由几种化合物组成的复合渗层, 使金属表面得到强化改性, 耐磨性、抗蚀性和耐疲劳性同时得到大幅度提高, 主要用于要求高耐磨、高抗蚀、微变形的各种钢、铁及铁基粉末冶金零件, 如模具钢、不锈钢、耐热钢、结构钢、工具钢、铸铁、纯铁、铁基粉末冶金件等。

对工程塑料, 目前材料较多的是注塑工艺。将塑料注塑于柱塞套内壁、配流盘表面、滑靴球窝等, 既避免了利用整体塑料带来的强度和变形等问题, 又充分利用了工程塑料良好的耐磨性。

2 海水液压技术在深海装备中的应用举例

2.1 海水液压浮力调节系统

深潜器在水下作业时, 一些因素会引起其储备浮力发生变化。例如, 取样后潜器重量的增加; 环境因素(如压力、温度)引起海水密度的变化; 随着下潜深度的增加, 潜水器耐压结构发生弹性变形而引起排水体积变化等。为确保潜水器在一定深度具有相对稳定的作业姿态, 需要对其进行浮力微调。目前常见的浮力调节有如图 2 所示的三种方案。

图 2a 是利用高压气瓶中的高压空气来排放水箱中的海水, 从而实现浮力调节。此时气压必须高于水深压力, 当水深增加到一定程度时, 气源发生

图 2 潜水器浮力调节系统

装置的体积急剧增加, 能耗也急增, 所以大深度作业时无法采用。

图 2b 是采用软、硬两只油箱, 当所有的油都在耐压油箱里时, 橡皮囊受到压缩, 排水体积最小, 浮力小; 当油泵把压力油输送到安放在潜水器舷外的橡皮囊里时, 排水体积增加, 而重量未变, 所以浮力增加。这种浮力调节系统复杂、笨重, 而且液压油和海水要严格分离。

图 2c 是在潜水器内放置耐压水箱, 其容积等于所要求的最大浮力调节量。需要调节浮力时, 用容积式海水泵将水箱中的水排出, 或者从外界注入水, 使潜水器的重量发生变化, 以此来控制潜水器的沉浮。

比较上述三种调节方案后可以看出, 采用高压水泵方案时, 结构最简单、体积小、重量轻, 潜水深度可以很大, 被认为是最佳方案, 特别是在潜水器重量大、潜水深度深的情况下, 其优越性更加突出。美国 1973 年首先将海水液压系统应用于载人深潜器“Alvin”号的浮力调节, 系统最高工作压力为 46 MPa, 从而使得使其下潜深度由 1964 年建造时的 2 000 m 增加到 4 500 m, 大大提升了它的科学考察能力, 迄今已进行过几千次的深海考察。“New

Alvin”是美国正在研制的 6 500 m 深海载人潜水器,其特点是将潜浮抛载、可调压载、压载水箱注排水、纵倾调节以及横倾调节合为一个系统,采用唯一的压载水舱不等量注水式压载系统来实现 5 个系统的功能。系统包括多个压载水舱和多台较大流量的超高压海水泵,从而使得潜水器本身需要携带的有效配载大大降低^[16]。

日本川崎重工业株式会社于 1987 年研制了应用于 6 500 m 载人深潜器“Shinkai 6500”浮力调节的柱塞式海水液压泵,输出压力 68.5 MPa,流量 5 L/min,寿命 200 h^[17]。

我国 7 000 m 载人潜水器“蛟龙号”也采用海水浮力调节系统,其中超高压海水泵从俄罗斯进口^[18],如图 3 所示,该泵采用卧式三柱塞结构,高压时总效率较低。

图 3 “蛟龙”号使用的海水泵

华中科技大学在 863 计划,国家自然科学基金的资助下,针对 4 500 m 级深潜器的要求,开展了浮力调节超高压海水泵的研究。如图 4 为该泵的样机,其转速为 1 000 r/min,空载流量为 6.3 L/min,48 MPa 时为 5.7 L/min; 48 MPa 时总效率为 81%,容积效率为 91%,机械效率为 90%。

图 4 4 500 m 级浮力调节超高压海水泵

同时,华中科技大学还研制成功了 600 m 级的

中浅深度海水泵、压力阀、平衡阀、电磁阀和系统,如图 5~7 所示,其压力为 6.3 MPa,流量为 25 L/min,泵组的噪声控制在 65 dB(A)以内。在完成了湖试、海试等现场试验后,已经小批量地生产应用^[19-21]。

图 5 海水液压浮力调节系统

图 6 海水液压平衡阀和安全阀

图 7 四合一海水液压电磁阀

2.2 海水液压机械手

大深度作业不可能靠潜水员来操作工具直接完成,必须依靠机械手,通过遥控来完成规定的作业任务。国内外现有的水下作业机械手绝大部分采用油压驱动方式。国产的“兰鲸号”打捞潜水器既能载人在水下直接作业,又能通过装设于水面母船上的集控台遥控操作,同时配备了两个机械手:打

捞机械手和作业机械手, 其中打捞机械手安装于潜水器正前方, 作业机械手安装于潜水器的右前方, 其主要任务是用于水下沉物的探测和打捞, 兼顾其他一些作业如缆绳剪切、挂钩等^[22]。

在海水液压机械手方面, 英国 DSEL 公司于 1987 年研制成功一种新型水下机器人 DUPLUSII, 作业深度为 750 m, 该机器人上装有三支标准海水液压机械手来完成多种工作, 一只机械手抱住水下物体稳定潜水器, 另两只机械手既可从事拧螺钉、阀门等作业, 也可在机械手上加装一些切割刀、钢丝刷等工具, 完成不同类型的水下作业^[23]。1993 年, 英国 Hull 大学的 TAYLOR 等^[24]也研制了一种海水液压水下机器人。

日本小松制作所的吉滩裕撰文介绍了日本通产省工业技术院大型计划“极限作业机器人的研究与开发”(S58-H2), 该计划研制了采用海水液压驱动的水下作业机械手^[25], 该机械手的自由度为 7, 手部自由度为 11, 最大作用范围 1 m, 总质量 18 kg, 可搬质量 5 kg。使用结果证明, 海水液压系统的位置控制精度比油压系统高。图 8 是该手的样机构造, 它的各关节由海水液压马达驱动。

图 8 海水液压驱动水下作业机械手

Festo 公司于 2007 年研制成功了水压驱动遥控鳐鱼(Aqua_ray), 如图 9 所示, 外形为流线型, 除了可以完成水下滑行动作, 还可以模仿空中小鸟拍打翅膀, 进行水下“飞翔”。其水压驱动单元的动力源由无刷电动机驱动叶片泵组成, 作动器采用仿生水压人工肌肉, 由水压阀控制。整个鱼的质量为 10 kg, 水下最大速度约为 1.8 km/h, 需求电压为 24 V, 电流为 10 A^[26]。

2.3 海水液压作业工具

工具是直接用来对工件进行作业的系统终端。如前文所提到的机械手上加装的切割刀、钢丝刷等均属于工具。水下作业时工具可由潜水员操作, 也

(a) 加装皮肤

(b) 未加皮肤

图 9 水压驱动仿生机器鱼

可加装在机械手的终端, 由机械手操作。深海作业工具以液压工具为主, 而目前更多的液压工具是以矿物油作为工作介质。在海水液压工具方面, 1982 年, 在美国海军海洋系统司令部的支持下, 土木工程实验室研究出试验用的海水液压工具系统。系统动力源由内燃机提供, 采用叶片泵, 作业工具有旋转式冲击扳手和螺旋桨清洗刷, 系统压力 14 MPa, 流量 45 L/min。1989 年又研制出多功能海水液压工具系统, 系统仍由内燃机提供动力, 系统压力 14 MPa, 流量 53 L/min, 作业工具包括旋转式冲击工具、带锯、盘形工具和冲击钻等^[2]。

图 10 为华中科技大学研制的水压液压水下作业工具系统^[27]。该系统通过过滤器从海洋或江湖直接吸水, 输出的高压水通过流量调节阀及高压软管后被传送到往复型作业工具(如钢缆切割器), 完成切割钢缆等水下作业任务; 或被传送到旋转型作业工具(如清刷、打磨器), 在海水液压马达的驱动下可完成清刷、打磨、钻孔等作业任务。高压水做功后直接排回海洋环境。水泵的出口压力由溢流阀调节, 工具的转速由流量调节阀调节。该系统已开发出下列十种海水液压工具, 往复型工具四种: 海水液压钢缆切割器、海水液压软缆割刀、海水液压扩张器、海水液压扭矩扳手。旋转型工具 6 种: 海水液压冲击扳手、海水液压无齿锯、海水液压钻、海水液压清刷器、海水液压外圆打磨器、海水液压链锯。

如果该系统由普通船用电动机或内燃机来驱

图 10 海水液压水下作业工具系统

动海水液压泵，可放置在母船甲板、码头或岸边，动力源与工具通过高压软管相连，用于浅海或近海作业。如果海水泵由潜水电动机驱动，则系统可以放置于潜水器舱内或舱外，为工具或其他执行元件提供动力。

随着我国海洋开发事业的迅速发展，这种新型水下作业工具在海上救捞、海洋资源调查、船舶工程、海洋建筑等领域均具有广阔的应用前景。同时，海水液压动力工具还可以直接以淡水作为工作介质，用于内陆水库大坝、港口码头和河道工程等的检测与维护。

3 结论

海水液压技术由于其与海洋环境相容、具有海深压力自动补偿功能、运行成本低、工作介质易处理、系统组成简单等优点，已在国内外的深海装备中得到了成功应用。介绍了海水液压技术的优点及国内外研究简况，分析了深海条件下海水液压元件与系统所面临的关键技术问题，从新原理、新材料、新结构、新工艺等方面分析了相应的解决措施。最后，介绍了海水液压技术在潜水器浮力调节系统、水下作业机械手、水下作业工具中的应用。目前，海水液压技术在深海装备中的应用可分为两种类型：一是原来油压传动应用的场合，采用海水压传动技术，如前文介绍的几个应用例子；另外一种是由于海水液压技术的突出优势而拓展出来的新领域，如海水淡化、细水雾消防等，本文尚未涉及。可以预测，随着海洋开发的大力发展，海水液压技术将拥有更加广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Permanent Mission of the People's Republic of China to the International Seabed Authority. Polymetallic nodules [EB/OL]. [2013-11-27]. [http : //china-isa.jm.china-embassy.org/chn/gjhd/hdzy/t218968.htm](http://china-isa.jm.china-embassy.org/chn/gjhd/hdzy/t218968.htm).
- [2] KUNSEMILLER J P, BLACK S A. Seawater hydraulics: a multi-function tool system for U.S. Navy construction divers[R]. Port Hueneme, California : Naval Civil Engineering Laboratory, May 1991. AD-A237947,
- [3] BROOKES C A, FAGAN M J, JAMES R D. The development of water hydraulic pumps using advanced engineering ceramics[C]//Proc. of 4th Scandinavian International Conference of Fluid Power. 1995, Finland, Tampere. 1995: 965-977.
- [4] TERÄVÄ J, KUIKKO T, VILENIUS M. Development of seawater hydraulic power pack[C]//Proc. of 4th Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, Sept. 26-29, 1995, Finland, Tampere. 1995: 978-991.
- [5] YANG Shudong, LI Zhuangyun. Seawater hydraulic drive and its application in ocean exploitation[J]. Ocean Engineering, 2000, 18(1): 81-85.
- [6] KITAGAWA A. Co-operation between university and water hydraulic company in Japan[C]// Proc. of 6th Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, May 26-28, 1999, Finland, Tampere. 1999: 35-50.
- [7] 刘银水. 水液压传动技术基础及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- LIU Yinshui. The fundamentals of water hydraulics and its engineering applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [8] YANG Huayong, ZHOU Hua. New achievements in water hydraulics[J]. Chinese Hydraulics&Pneumatics, 2012(2): 1-6.
- [9] ZHU Bihai, HE Wei, HE Xiaofeng, et al. Simulation and experimental study of pilot operated water hydraulic pressure relief valve with diaphragm seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 179-185.
- [10] LIU Yinshui, GUO Zhanjun, ZHU Bihai, et al. Underwater tool system driven by seawater hydraulic power[J]. Ocean Technology, 2006, 25(4): 65-69.
- [11] WU Defa, LIU Yinshui, YANG Shudong, et al. Friction and wear characteristics of WC-10Co-4Cr/Si3N4 tribopair lubricated under silt-laden water[J]. Wear, 2012, 294-295: 370-379.
- [12] GONG Yongjun. Investigation into the key problems of water hydraulic control valves[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [13] WANG Xiaolei, LIU Wei, ZHOU Fei, et al. Preliminary investigation of the effect of dimple size on friction in line contacts[J]. Tribology International,

- 2009, 42(7): 189-197.
- [14] LIU Huanlong, KE Jian, YU Lanying. Research on the anti-turnover characteristics of water hydraulic three-cavity independent bearing slipper friction pairs[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5): 53-58.
- [15] LIU Yinshui, YU Zuyao, TANG Qunguo, et al. Applications of surface engineering technology in water hydraulic elements[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(21): 1996-1999.
- [16] TANG Guowei, QIU Zhongliang, GAO Bo. Design research of trim system in deep-sea manned submersible[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2007(4): 33-35.
- [17] YOSHINADA H, YAMAZAKI T, SUWA T. Seawater hydraulic actuator system for underwater manipulator[J]. Hydraulics & Pneumatics, 1991, 22(6): 48-55.
- [18] QIU Zhongliang. Design and research on a variable ballast system for deep-sea manned submersibles[J]. Journal of Marine Science Application, 2008, 7: 255-260.
- [19] ZHAN Chuanming, LIU Yinshui, WU Defa. Application of seawater hydraulics for submersible[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011(1): 50-52.
- [20] CHEN Jinyue, LIU Yinshui, WU Defa, et al. The development of a buoyancy adjustment system for submersibles[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(1): 79-83.
- [21] HU Yumei, LIU Yinshui, JIANG Tao, et al. Development of seawater hydraulic solenoid valves[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2012(4): 23-27.
- [22] MAO Jiayu, ZHANG Xiangming, XU Guohua. The structuredesign and study of two manipulators on blue whale underwater vehicle[J]. The Ocean Engineering, 1998, 18(1): 80-87.
- [23] USHER S, TAYLOR P M, WILKINSON A J, et al. Towards a water-powered robot[J]. Industrial Robot, 1996, 23(4): 19-23.
- [24] TAYLOR P M, KIEFFER J, OLDAKER R, et al. A water hydraulic robot[C]//Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control, Dec15-17, 1993, San Antonio, Texas. 1993: 1911-1912.
- [25] YOSHINADA H, YAMAZAKI T, SUWA T, et al. Robots in unstructured environments[C]//Fifth International Conference on Advanced Robotics, IEEE, 19 Jun -22 Jun 1991, Pisa, Italy. 1991: 1330-1335.
- [26] Festo. Rays underwater [EB/OL]. [2013-11-27]. http://www.festo.com.cn/cms/zh_corp/9786.htm.
- [27] LIU Yinshui, WANG Xiaobin, WU Defa, et al. Mobile underwater tool system driven by seawater hydraulic power[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(10): 14-17.
-
- 作者简介:** 刘银水, 男, 1973 年出生, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为水液压传动技术、电液控制工程。
E-mail: tywdf2008@163.com
- 吴德发(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为海水液压传动技术及深海装备技术。
E-mail: liuwater@hust.edu.cn