

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2014.08.001

作者简介:高殿荣,男,1962出生,辽宁盖州人,工学博士,燕山大学机械工程学院机电控制工程系教授,博士生导师。主要研究领域为流体传动及控制系统、复杂流道流场的CFD模拟与PIV可视化、新型(海淡水)流体元件、重型数控机床液体静压导轨等。中国机械工程学会高级会员;中国机械工程学会流体传动及控制分会第四届、第五届委员会常务委员;中国机械工程学会流体传动及控制分会第五届液压专业委员会委员;中国力学学会第七届流体控制工程专业委员会副主任委员。主持和参与完成国家自然科学基金项目、科技部973项目、教育部高等学校博士学科点基金项目、河北省自然科学基金项目、企业合作项目等40余项。获省部级科技进步一等奖1项、二等奖4项、三等奖2项。主编和参编教材、手册专著等共5部,在国内外科技期刊和国际会议上发表学术论文130余篇,其中SCI/EI收录40余篇。授权国家发明和实用新型专利20余项。



水压马达的研究进展与展望

高殿荣,王志强

(燕山大学 机械工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:水压马达是以淡水或海水为工作介质,并能将水压能转换为机械能实现连续回转运动的水压执行元件,在水压传动系统中有着广泛的应用。本文对国内外在高速水压马达,如水压柱塞马达、水压叶片马达,以及在低速大扭矩的径向柱塞多作用内曲线水压马达方面的研究成果进行综述,并对其发展前景进行展望,供水压传动的研究人员参考。

关键词:水压柱塞马达;水压叶片马达;径向柱塞马达;低速大扭矩;进展与展望

中图分类号:TH137 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2014)08-0001-08

Research Progress and Development Prospect of Water Hydraulic Motors

GAO Dian-rong, WANG Zhi-qiang

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004)

Abstract: The water hydraulic motor is a kind of water hydraulic actuator with fresh water or sea water as the working fluid, which can rotate continuously and transfer water hydraulic energy into mechanical energy, applied widely in water hydraulic transmission system. In this paper, the research achievements on water hydraulic motors are summarized, especially on high-speed water hydraulic motors such as the water hydraulic piston motor and the water hydraulic vane motor, and on low-speed high torque water hydraulic motors such as the radial piston motor with multi-action inner curve stator. The development prospect of water hydraulic motor is presented. The paper is a reference for researchers of water hydraulic transmission.

Key words: water hydraulic piston motor, water hydraulic vane motor, water hydraulic radial piston motor, low speed high torque, progress and prospect

引言

水压元件是水压传动系统不可缺少的组成部分。作为水压传动系统中的能量转换装置,水压马达将水压能转换为机械能,是水压系统中的重要执行元件,是

收稿日期:2014-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075348);河北省自然科学基金资助项目(E2011203151);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20101333110002)

人们研究的热点和重点。但由于水的黏度低、润滑性能差、气化压力高等性质,使得水压元件的研制面临着诸多的问题,如摩擦磨损问题、零部件腐蚀问题、泄漏问题、气蚀问题以及水击问题等^[1-5]。其中关键摩擦副结构的设计、材料的选用及配副间隙的控制等都是亟需解决的问题。最近20多年来,随着工程陶瓷与高分子材料等新型材料的发展、加工制造技术的进步和新结构液压元件的研制成功,早期水压元件存在的诸如易腐蚀、易磨损、泄漏大、效率低等问题得到改进,使水压马达的研制取得了长足的进步,并已有产品问世。本文将详细介绍水压马达近十几年来国内外取得的成果和研究的进展。

1 国外研究现状

国外对水压马达的研究较早,其中处于领先地位的有美国、英国、丹麦、德国、日本等。

为了满足深海开发和水下作业的需要,美国 Westinghouse Oceanic Division 在1980年研制出压力7 MPa、流量22.7 L/min的海水驱动叶片马达^[6]。此后,又对双向海水叶片马达及其潜水作业系统进行了研究,并于1984年研制出压力为14 MPa,流量为45 L/min的海水液压系统^[7]。图1和图2所示为美国 Wolfhart Industries 公司生产的压力6.9 MPa、排量6 mL/r、最大转速5000 r/min的水压柱塞马达外形图和零部件图^[8]。



图1 六柱塞水压马达

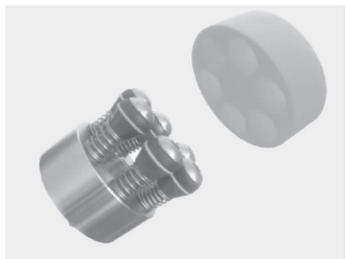


图2 六柱塞水压马达的零部件

该水压马达类似于弯轴式的轴向柱塞马达,马达的缸体相对于驱动轴和柱塞转子倾斜 5° ,柱塞转子中

安装有螺旋状的连接杆,驱动轴、柱塞盘与缸体均旋转。马达的缸体没有旋转轴支承,靠柱塞的旋转驱动。同时柱塞杆、柱塞盘和驱动轴之间没有任何轴承。

英国的 Fenner 公司于1988年研制出压力10 MPa,流量40 L/min,最高转速3000 r/min的海水轴向柱塞液压马达。该马达采用轴配流,其滑靴底面、球窝、缸孔套等均采用碳纤维增强聚醚醚酮,斜盘、滑靴、柱塞、缸体、轴等采用不锈钢316^[9]。图3和图4所示分别为英国 Fenner 公司及 Water Hydraulics 公司生产的水压马达。

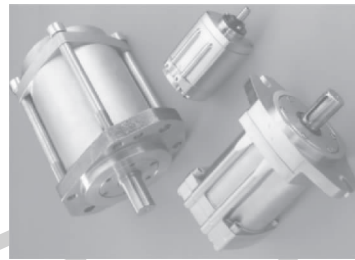


图3 Fenner 水压轴向柱塞马达



图4 M型水压轴向柱塞马达

Fenner 公司生产的马达采用没有任何添加物的清洁水作为介质,马达的转速为4000 r/min,输出扭矩为162 N·m,压力为14 MPa。英国的 Water Hydraulics 公司也是世界上研制生产水压元件比较早的公司之一,已有30多年的经验,致力于水压泵、水压马达、水压控制阀、水压附件等全系列的水压介质系统用元件。其中M型海淡水轴向柱塞马达的主要性能参数如表1所示^[10]。

丹麦的 Danfoss 公司在众多行业的研究、开发和生产领域都处于领先地位,水压技术的研究也不例外。1994年丹麦 Danfoss 公司研制生产出第一代以纯水为介质的轴向柱塞泵及柱塞马达^[11]。1997年又研制开发出双向自来水叶片马达,马达的刚体、端盖等主要部件采用不锈钢316,叶片采用聚醚醚酮高聚物材料^[12]。而如今 Danfoss 公司已经开发出一系列的纯水及海水液压元件,并销往全球各地,投入到实际的生产

表1 M型海淡水轴向柱塞马达的主要性能参数

型号		M3	M6	M15	M30	M60	M180
排量/ $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$	最大	3.3	6	18.6	34.6	70.3	225
	最小	—	4.6	15	30	63	104
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	最大	4000	4000	4000	4000	4000	2000
	最小	500	500	500	500	500	300
最大输出功率/kW		2.7	5.4	17.5	31	67	108
最大输入流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$		12	24	72	132	292	430
最大工作压力/ MPa		16	16	16	16	16	16
质量/kg		1.5	2.2	6	10	19	82
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大	50	50	50	50	50	50
	最小	2	2	2	2	2	2

与应用当中。图5~图8所示为Danfoss公司生产的以自来水为介质及海水为介质的轴向柱塞泵、轴向柱塞马达及叶片式低速大扭矩水压马达^[13]。



图5 PAH系列水压轴向柱塞泵



图6 APM系列高压海水轴向柱塞马达

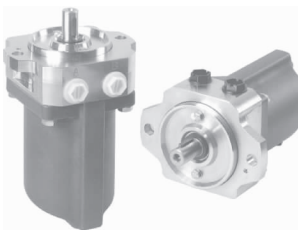


图7 MAH高速轴向柱塞水压马达



图8 叶片式低速大扭矩水压马达

Danfoss公司生产的PAH系列水压轴向柱塞泵的额定压力16 MPa,最高可达22 MPa,流量1~150 L/min,排量2~100 mL/r,泵的壳体采用不锈钢304;APM系列高压海水轴向柱塞马达的额定压力1~8 MPa,柱塞马达的材料采用不锈钢SAF2507和碳纤维增强聚醚醚酮高分子聚合物材料。高速轴向柱塞水压马达是以自来水为介质的纯水马达,其压力为14 MPa,排量为4~12.5 mL/r,转速为300~3000 r/min,该马达的主要性能参数如表2所示^[14];叶片式低速大扭矩水压马达,其最大压力可达50 MPa,转速为15~200 r/min,排量为36 mL/min,但是其体积与重量都比较大,表3为该马达的主要性能参数^[15]。

表2 MAH高速轴向柱塞水压马达的主要性能参数

MAH型号	4	5	6.3	10	12.5
排量/ $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$	4	5	6.3	10	12.5
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	300~ 4000	300~ 4000	300~ 4000	300~ 3000	300~ 3000
最大扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	8	10	12.5	20	25
最大压差下的启动扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	2.5	3.0	3.5	10	12.5
空载下的启动压力/MPa	8	8	8	5	5
最大转速下的最大功率/kW	3.2	4.1	5.2	6.3	7.8
最大工作压力/MPa	14	14	14	14	14
最大流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	17.5	21.5	26.8	33	40
空载下的最大系统压力/MPa	14	14	11.5	12.5	10.5
14 MPa, 1500 r/min下的泄漏流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	<1	<1	<1	<1.5	<1.5
质量/kg	4.1	4.1	4.1	6.3	6.3

表3 叶片式低速大扭矩水压马达的主要性能参数

参数	数值	参数	数值
排量/ $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$	160	最大回水压力/MPa	5
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	15~200	最大泄漏压力/MPa	0.2
最大流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	36	5 MPa 下的泄漏流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	1
5 MPa 下的启动扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	80	5 MPa 下的内部泄漏流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	0.3
启动压力/MPa	1	最大径向力/N	500
最大压差/MPa	5	最大轴向力/N	0
200 r/min 时的压力损失/MPa	0.3	200 r/min 下的最大功率/kW	2.5
最大扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	100	质量/kg	17.5

德国对水压技术的研究也非常早,其中 Hauhinco、SPECK、KAMAT 等企业均有海、淡水液压元件产品。图9所示为德国哈莫尔曼公司生产的水压马达,该马达的最高压力为 50 MPa,流量 180 L/min ($\Delta p = 0.1$ MPa),最大转速 500 r/min,扭矩 25 $\text{N} \cdot \text{m}$ [16]。



图9 哈莫尔曼水压马达

日本非常重视海洋资源的开发与利用,从上个世纪 80 年代开始,陆续有多家企业及研究机构开始从事水压技术的研究,并获得了许多突破,取得了许多成果 [17-21]。

日本的荏原综合研究所在 1999 年研制出了以自来水为介质的不平衡式低压叶片马达的物理样机 [22],样机的压力为 2 MPa,转速为 1500 r/min,但马达样机的容积效率(65%)与机械效率(60%)都很低。对水压马达的研究主要是集中在高校中,如图 10 所示为日本沼津工业高等学校的 OSHIMA 等 [23] 研制出的一种低水压行星齿轮马达,该马达转子和定子材料为不锈钢 304,星形齿轮为不锈钢 316,同时为了减小啮合齿之间的摩擦力,在星形齿轮的表面分别用石墨、PEEK 和黄铜作为固体润滑剂对其进行工艺处理,发现石墨与 PEEK 可以很好地降低啮合齿之间的摩擦力。表 4

所示为不同固体润滑膜下水压马达在转速 1 r/min 时的输出扭矩 [23]。

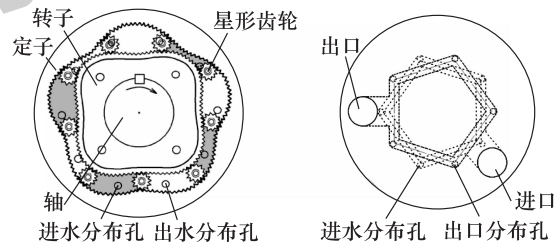


图10 水压行星齿轮马达

表4 不同润滑膜材料下行星水压马达的平均输出扭矩

星形齿轮表面 润滑膜材料	不同输入压力时的马达扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$		
	0.2 MPa	0.25 MPa	0.3 MPa
无润滑膜	0.87	1.11	1.26
石墨	0.99	1.28	1.55
PEEK	1.06	1.34	1.60
黄铜	0.91	1.16	1.38

日本横滨国立大学的 Wang 等对水压马达的静密封轴承件的承载力进行了研究,发现可压缩材料比不锈钢能更好地改善静密封轴承件的承载力,这对设计一个轻便的水压马达非常有效 [24,25]。日本上智大学的 Ito [26] 等进行了将扰动观察器引入滑模控制对水压伺服马达的转角进行鲁棒控制的研究。日本东京工业大学的 Tsukagoshi 等 [27] 研制出以自来水为工作介质的“IP 马达”,该马达的驱动原理如图 11 所示。

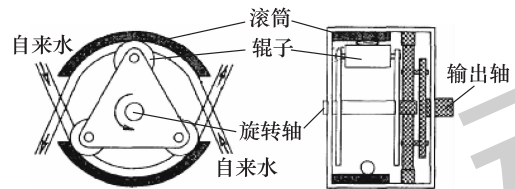


图11 水压“IP 马达”驱动原理

新加坡南洋理工大学的 Chen 等 [28-34] 从 2001 年开始对水压轴向柱塞马达的振动特性、柱塞断裂的检测、滑靴和球铰磨损的监测及整个水压马达的故障诊断等进行了详细的研究。韩国机械与材料研究所的 Kim 等人 [35] 在 2009 年开发出用水压轴向柱塞马达在小型反渗透淡化系统中进行能量回收的系统。

2 国内研究现状

国内虽然对水压元件的研究起步较晚,但在国家有关部门和基金委的大力支持下,华中科技大学、浙江

大学率先开展研究,相继做出了水压柱塞泵、水压柱塞马达、水压控制阀、水压试验台等相关水压元件及水压系统的产品并在国防工业及机械工程领域得到了应用^[36-42]。

华中科技大学是国内最早倡导并一直坚持水压传动及其相关基础理论研究的院校。李壮云教授、朱玉泉教授等带领课题组成员自上世纪90年代初开始长期承担国家关于水压技术的攻关课题,并且取得了一系列具有国际先进水平的研究成果^[36-38]。1995年课题组成员聂松林教授开始从事海水轴向柱塞马达的研究^[43],并在2002年研制出额定工作压力10 MPa,最大工作压力14 MPa,排量16 mL/r的斜盘式海水轴向柱塞马达^[44](如图12),容积效率为86%,机械效率为80%,总效率为70%,最大输出扭矩能达到19.5 N·m,最大转速可达3000 r/min,而且还对马达的配流盘结构、滑靴结构及马达转矩特性等^[45-48]进行了研究,自2002年,该马达成功应用在水压作业工具系统^[49]。

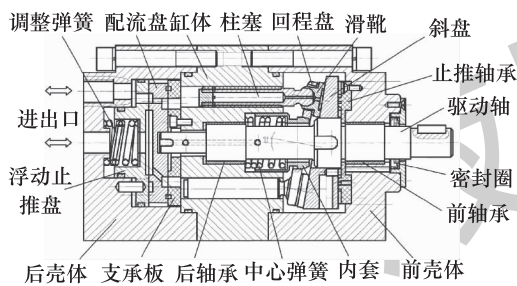


图12 斜盘式海水轴向柱塞马达

西安交通大学的卢勇、赵远扬等人设计了一种适用于海水淡化系统的高度集成叶片泵-叶片马达原理样机(如图13),并对其流量、体积效率、能量损耗等问题进行了分析^[50]。

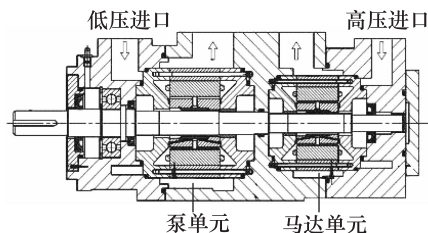


图13 水压叶片泵-叶片马达原理样机

北京工业大学的聂松林教授除前期在华中科技大学长期从事水压传动方面的研究工作并取得了卓越的成绩外^[51-54],现如今在国家海洋领域863计划的资助下,正研制具有广泛应用前景的中高压深海水压动力系统的的核心基础元件,并于2012年研制出额定压力

10 MPa,输出扭矩12.5 N·m,转速1500 r/min的浮动配流斜盘式水压柱塞马达^[55],如图14所示。同时自行研制了海淡水液压综合试验台用于测试所研制的水压泵、水压马达、水压阀等元件^[56,57],如图15所示。

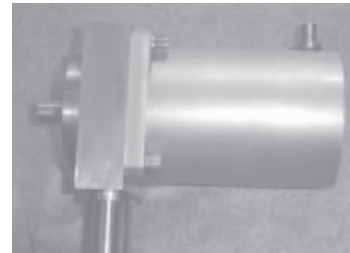


图14 斜盘式水压轴向柱塞马达

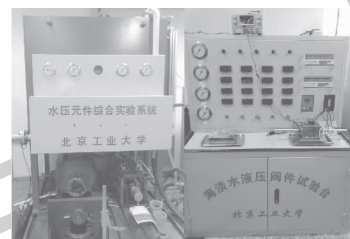


图15 水压元件综合试验台

中国海洋大学的杨友胜副教授主要从事水压元件的研发、喷水推进系统以及水下仿生机器人驱动系统的研究^[58-63],目前负责北京工业大学聂松林教授主持的国家863计划项目“高可靠海水液压传动关键技术及其产业化研究”的子课题,并完成了深海水压轴向柱塞马达的物理样机^[64],该马达的额定压力为14 MPa,额定扭矩为12.5 N·m,转速为1500 r/min。图16所示为深海水压轴向柱塞马达样机实物。

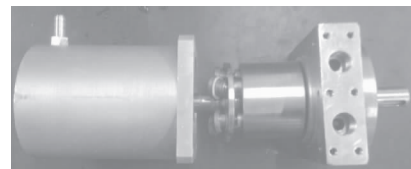


图16 深海水压轴向柱塞马达

2010年,燕山大学高殿荣课题组开展了径向活塞滚球静力平衡式低速大扭矩海淡水压马达设计理论及关键技术研究,并采用理论分析和试验研究的方法,从水压马达各关键摩擦副的间隙、定子内曲线的类型、材料的选择、摩擦磨损与润滑特性入手,探索适合于海水为传动介质的低速大扭矩水压马达的设计理论及关键技术问题^[65-73]。同时在2013年12月研制出径向柱塞式多作用内曲线式低速大扭矩海、淡水液压马达物理样机,如图17和图18所示。并在华中科技大学液

压气动技术研究中心的水压综合试验台上对研制的马达物理样机进行了空载和加载性能试验。

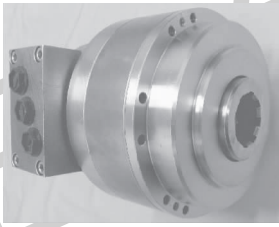


图 17 内曲线式径向低速大扭矩水压马达物理样机



图 18 低速大扭矩水压马达配流体定子部分

由于该马达采用端面配流,因此配流副的摩擦磨损比较大,而配流体端面上静压支承槽的设计及可换耐磨盘的加入则可以很好的解决这一问题。马达定子内曲面采用等加速、等减速与阿基米德螺旋线相结合的复合曲线,不仅保证了多作用结构下的低速稳定性,而且减小了滚球与定子之间的接触应力,延长了马达的使用寿命。

图 19 所示为内曲线式径向低速大扭矩马达空载时容积效率随转速的变化曲线。当转速为 200 r/min 时,水压马达的容积效率最高为 94.71%,很好地解决了以水为介质,黏度低、泄漏重的问题。

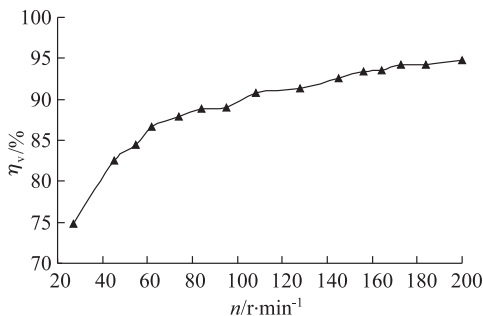


图 19 空载时水压马达容积效率随转速的变化

3 展望

综上所述可知,目前以海水或淡水为工作介质的液压马达种类还比较少,主要集中在轴向柱塞式和叶片式。对于水压轴向柱塞马达,产品已较为成熟,国外不少公司均有供应,对于叶片马达只有 Danfoss 公司的 MVM 型低速大扭矩水压叶片马达已产品化,而对于齿

轮式、多作用内曲线式等其他形式的水压马达基本还处于研制开发阶段。但从发展趋势看,水压传动是液压传动的重要发展方向之一,也有可能最终取代油压传动,水压马达作为水压系统中的执行元件起着重要的作用,因此广泛开展对各类型水压马达的基础理论及关键技术研究是十分必要的。

参考文献:

- [1] 杨署东,李壮云,朱玉泉. 水压传动的主要课题与研究进展[J]. 中国机械工程,2000,11(9):1070-1073.
- [2] 杨华勇,周华. 纯水液压传动的若干关键问题[J]. 机械工程学报,2002,38(增刊):96-100.
- [3] 邵晓光,马军,吴张永,等. 纯水液压传动技术所要解决的一些问题[J]. 流体传动与控制,2006,(5):45-46.
- [4] Striker S. Advances Make Tap Water Hydraulics More Practical[J]. Hydraulics & Pneumatics,1996:29-32.
- [5] Trostmann E, Clausen P M. Hydraulic Components Using Water as Pressure Medium[C]. Proc. 4th Scandinavian Int. Conf. On Fluid Power. Tampere, Finland, Sept. 1995:942-954.
- [6] Black S A. Development and Evaluation of an Experimental Seawater Hydraulic Tool System for U. S. Navy Divers[C]. Offshore Technology Conference. Houston, USA, Apr. 1984:135-139.
- [7] 周华,贺晓峰,李壮云. 海水液压传动技术的研究与应用[J]. 液压与气动,1995,(3):3-4.
- [8] Wolfhart Industries. Water Hydraulic Motor [EB/OL]. [2014-01-20]. <http://www.wolfhartindustries.com/wolfhart.htm>.
- [9] Currie J A. The Development of Raw Water Hydraulics[C]. Proc. of 1st Bath Int. Fluid Power Workshop, Univ. of Bath, UK,1988:126-130.
- [10] The Water Hydraulics Co. Ltd. . Water Hydraulic Pumps and Motors[EB/OL]. [2014-01-22]. <http://www.waterhydraulics.co.uk/new2/motors.php>.
- [11] Trostmann E. Water Hydraulics Control Technology[M]. Marcel Dekker. Inc. ,New York,1996:64-85.
- [12] Conrad F, Adelstorp A. Tap Water Hydraulic Control Systems for Medium Power Application Areas[C]. 10th Bath International Fluid Power Workshop, University of Bath, England, UK,1997:117-130.
- [13] Danfoss. Water Hydraulic Pumps and Motors [EB/OL]. [2014-01-22]. <http://www.danfoss.com>.
- [14] Danfoss. MAH high-speed motor [EB/OL]. [2014-01-22]. http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/5AAF21FA-4F25-44C5-A7E4-4C3F5CF150EB/0/521B0750_DKCFNPD031A902_MAH456310125_GB.pdf.

- [15] Danfoss. Danfoss Nessie Water Motors [EB/OL]. [2014 - 01 - 22]. http://www.mandmcontrols.co.uk/images/products/Danfoss_Nessie_MAH_MVM_Motors.pdf.
- [16] Hammelmann. Water Hydraulics [EB/OL]. [2014 - 01 - 20]. www.hammelmann.com.
- [17] Hicks D C, Pleass C M. Development and Testing of a Composite/Plastic High Pressure Seawater Pump [J]. *Engineer optimization*, 1986, 3(12): 69 - 78.
- [18] 阮俊. 全水润滑斜盘式海水轴向柱塞泵的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [19] 易春昌. 低噪音柱塞配流海(淡)水泵的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- [20] Yoshinada H, Yamazaki T, Suwa T, et al. Seawater Hydraulic Actuator System for Subsea Manipulator [C]. *International Symposium on Advanced Robot Technology*, 1991: 559 - 566.
- [21] He X, Zhu B, Liu Y, et al. Study on a Seawater Hydraulic Piston Pump with Check Valves for Underwater Tools [C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2012, 226(1): 151 - 160.
- [22] Shinoda M, Yamashina C, Miyakawa S. Development of Low-pressure Water Hydraulic Motor [C]. *The Sixth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Tampere, May 26 - 28 1999: 243 - 254.
- [23] Oshima S, Hirano T. Investigation for Output Torque of a Low Pressure Water Hydraulic Planetary Gear Motor [J]. *Vodna Hidravlika*, 2012: 26 - 35.
- [24] Wang X, Yamaguchi A. Characteristics of Hydrostatic Bearing/Seal Parts for Water Hydraulic Pumps and Motors. Part 1: Experiment and Theory [J]. *Tribology International*, 2002, 35(7): 425 - 433.
- [25] Wang X, Yamaguchi A. Characteristics of Hydrostatic Bearing/Seal Parts for Water Hydraulic Pumps and Motors. Part 2: On Eccentric Loading and Power Losses [J]. *Tribology International*, 2002, 35(7): 435 - 442.
- [26] Ito K, Takahashi H, Ikeo S, et al. Robust Control of Water Hydraulic Servo Motor System Using Sliding Mode Control with Disturbance Observer [C]. *SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan, Korea, 2006: 4659 - 4662.
- [27] Tsukagoshi H, Nozaki S, Kitagawa A. Versatile Water Hydraulic Motor Driven by Tap Water [C]. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems*, 2000: 1949 - 1954.
- [28] Chen H X, Chua Patrick S K, Lim G H. Dynamic Vibration Analysis of a Swash-plate Type Water Hydraulic Motor [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(5): 487 - 504.
- [29] Chen H X, Chua Patrick S K, Lim G H. Adaptive Wavelet Transform for Vibration Signal Modelling and Application in Fault Diagnosis of Water Hydraulic Motor [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(8): 2022 - 2045.
- [30] He Y B, Lim G H, Chua P S K, et al. Monitoring the Condition of Loaded Modern Water Hydraulic Axial Piston Motor and Cylinder [C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, Hangzhou, China, 2001: 447 - 451.
- [31] Chen H X, Chua P S K, Lim G H. Dynamic Vibration Analysis of a Swash-plate Type Water Hydraulic Motor [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(5): 487 - 504.
- [32] Chen H X, Chua P S K, Lim G H. Fault Degradation Assessment of Water Hydraulic Motor by Impulse Vibration Signal with Wavelet Packet Analysis and Kolmogorov-Smirnov Test [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22: 1670 - 1684.
- [33] Tan A C X, Chua P S K, Lim G H. Fault Diagnosis of Water Hydraulic Actuators under Some Simulated Faults [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138: 123 - 130.
- [34] Chen H X, Chua P S K, Lim G H. Fault Diagnosis of Water Hydraulic Motor by Adaptive Wavelet Analysis Optimized by Genetic Algorithm [J]. *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 2: 57 - 78.
- [35] Kim Y C, Ham Y B, Park S J. Energy Recovery through a Water-hydraulic Motor in a Small-scale RO Desalination System [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 15: 172 - 177.
- [36] 王东, 李壮云. 水液压系统的特性及关键技术的研究分析 [J]. *现代机械*, 2000, (4): 45 - 49.
- [37] 喻国哲. 全水润滑斜轴式海水柱塞泵改进及其可靠性分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 4 - 6.
- [38] 周华, 杨华勇. 重新崛起的现代水压传动技术 [J]. *液压气动与密封*, 2000, (4): 6 - 9.
- [39] 范明豪, 周华, 陈远玲, 等. 纯水液压试验系统的调试与分析 [J]. *液压与气动*, 2001, (8): 21 - 23.
- [40] Yang Huayong, Yang Jian, Zhou Hua. Research on Materials of Piston and Cylinder of Water Hydraulic Pump [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2003, 55(1): 38 - 43.
- [41] 翟江. 海水淡化高压轴向柱塞泵的关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 158 - 160.
- [42] 宋伟. 渐开线水液压内喷合齿轮泵研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 119 - 121.
- [43] 聂松林, 张铁华, 李壮云. 水压传动及柱塞泵(马达)的现状和发展 [J]. *机械工程师*, 2000, (9): 8 - 10.

- [44] 聂松林,焦启民,余祖耀,等.一种新型滑靴静压支承在水压马达中的应用研究[J].机械科学与技术,2004,23(7):777-782.
- [45] Nie Songlin, Li Zhuangyun, Yang Shudong. Investigation of Valve Plate in Water Hydraulic Axial Piston Motor[J]. Journal of Shanghai University, 2002, 6(1): 73-78.
- [46] Nie S L, Huang G H, Li Y P. Tribological Study on Hydrostatic Slipper Bearing with Annular Orifice Damper for Water Hydraulic Axial Piston Motor[J]. Tribology International, 2006, 39(11): 1342-1354.
- [47] 陈春,聂松林,万志勇,等.海水轴向柱塞马达偏心配流盘的研究[J].机床与液压,2005,(8):53-55.
- [48] 聂松林,李壮云,余祖耀.轴向柱塞式液压马达转矩特性的理论研究[J].液压与气动,2002,(7):7-9.
- [49] Nie S L, Huang G H, Zhu Y Q, et al. SEWHAPM: Development of a Water Hydraulic Axial Piston Motor for Underwater Tool Systems[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(7): 639-655.
- [50] Lu Yong, Zhao Yuanyang, Bu Gaoxuan, et al. The Integration of Water Vane Pump and Hydraulic Vane Motor for a Small Desalination System[J]. Desalination, 2011, 276: 60-65.
- [51] 刘谦.斜轴式海水柱塞泵的研制及可靠性分析[D].武汉:华中科技大学,2009:65-67.
- [52] 胡罡.斜轴式海水液压柱塞泵的理论研究[D].武汉:华中科技大学,2007:55-62.
- [53] 阮俊,聂国念,聂松林,等.船用细水雾灭火系统用海水轴向柱塞泵设计及其实验研究[J].液压与气动,2010,(4):75-78.
- [54] 李晓晖,聂松林,朱玉泉.斜盘连杆式水压柱塞泵噪声的实验研究[J].液压与气动,2007,(8):7-10.
- [55] 杨立洁,聂松林,张小军,等.全水润滑的斜盘式水液压柱塞马达的试验研究[J].北京工业大学学报,2013,39(7):981-985.
- [56] 申凤梅,聂松林,董武涛,等.海淡水液压综合试验台的集成研究[J].液压与气动,2013,(1):65-68.
- [57] Yu Guozhe, Nie Songlin, Liu Huajiang, et al. Repair and Experimental Study on the Key Frictional Pairs of DANFOSS Water Pump[J]. Hydromechatronics Engineering, 2013, 40(19): 72-76.
- [58] 刘银水,杨友胜,朱小明,等.中高压水压减压阀的研制[J].流体机械,2007,35(3):10-13.
- [59] 杨友胜,贾晓君,朱玉泉.正排量泵喷水推进理论研究[J].中国机械工程,2011,22(24):2977-2981.
- [60] 杨友胜,朱玉泉,罗小辉.正排量泵喷水推进技术[J].船舶工程,2011,33(5):31-34.
- [61] Yang Y S, Guglielmino E, Dai J S, et al. Water vs. Oil Hydraulic Actuation for a Robot Leg[C]. The 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009: 1941-1946.
- [62] Yang Y S, Semini C, Tsagarakis N G, et al. Water Hydraulics-A Novel Design of Spool-type Valves for Enhanced Dynamic Performance[C]. Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xi'an, China, 2008: 1308-1314.
- [63] Yang Y S, Nie S L, Zhu Y S, et al. Reaction Thrust of Submerged Water Jets[J]. Journal of Power and Energy, Proc IMechE, Part A, 2007, 221(4): 565-573.
- [64] 夏贵兵.海水柱塞马达的研究[D].青岛:中国海洋大学,2013:57-62.
- [65] Wang Zhiqiang, Gao Dianrong. Comparative Investigation on the Tribological Behavior of Reinforced Plastic Composite under Natural Seawater Lubrication[J]. Materials and Design 2013, 51: 983-988.
- [66] Wang Zhiqiang, Gao Dianrong. Friction and Wear Properties of Stainless Steel Sliding Against Polyetheretherketone and Carbon-fiber-reinforced Polyetheretherketone under Natural Seawater Lubrication[J]. Materials and Design 2014, 53: 881-887.
- [67] 王志强,高殿荣,黄瑶.水膜厚度对低速大扭矩水压马达支承轴转子副性能的影响[J].农业机械学报,2013,44(4):262-267.
- [68] 王志强,高殿荣,黄瑶.低速大扭矩水压马达柱塞副的结构优化及性能研究[J].煤炭学报,2013,38(S2):536-542.
- [69] Wang Zhiqiang, Gao Dianrong, Fei Jiahuan. Analysis and Numerical Simulation of Leakage Flow of Low Speed High Torque Water Hydraulic Motor's Plain Flow Distribution Pair[C]. 16th International Conference on Fluid Dynamic and Mechanical and Electrical Control Engineering, Chongqing, China, 2012, (233): 204-207.
- [70] 高殿荣,王志强,黄瑶.基于动网格技术的低速大扭矩水压马达配流盘结构改进[J].农业机械学报,2013,44(12):307-313.
- [71] 王志强,高殿荣.基于正交试验的水压马达止推环参数优化[J].中国机械工程,2013,24(24):3360-3365.
- [72] 高殿荣,王志强,赵一楠.径向低速大扭矩水液压马达定子曲线特性分析[J].机械设计,2012,29(9):29-35.
- [73] Gao Dianrong Wang Zhiqiang, Huang Yao. Analysis and Numerical Simulation of Leakage Flow of Low Speed High Torque Water Hydraulic Motor's Piston Pairs[C]. 8th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang, China, 2013: 233-236.