



研究生用书
机械科学与工程研究生教学用书

水液压传动技术

Water Hydraulic Power Transmission Technology

唐群国 编著 李壮云 主审



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



研究生用书

机械科学与工程研究生教学用书

水液压传动技术

Water Hydraulic Power Transmission Technology

唐群国 编著 李壮云 主审



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

水液压传动技术是近二三十年来流体传动与控制研究领域的前沿研究方向之一,在国内外已经得到越来越多的应用。本书主要介绍水液压传动的发展背景、主要特点、研究中的关键技术问题、近年来作者及所在课题组和国内外的最新研究成果。内容主要包括:摩擦、磨损及润滑的基本原理,水润滑条件下材料的摩擦学特性,金属的腐蚀机理及耐海水腐蚀的金属材料,水液压泵、水液压马达和水液压控制阀等水液压元件的设计方法及设计实例,水液压系统维护及水的污染控制,水液压传动的应用实例等。

本书可作为流体传动与控制专业的研究生教学教材,也可供高年级本科生或相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水液压传动技术/唐群国 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2013. 11
ISBN 978-7-5609-8827-6

I. 水… II. 唐… III. 水压力-液压传动-研究生-教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 080539 号

水液压传动技术

唐群国 编著

策划编辑:万亚军

责任编辑:周忠强

封面设计:刘 卉

责任校对:李 琴

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北万隆印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:10.75 插页:2

字 数:208千字

版 次:2013年11月第1版第1次印刷

定 价:25.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序

今天,我国的教育正处在一个大发展的崭新时期,高等教育已跨入“大众化”阶段,蓬蓬勃勃,生机无限.在高等教育中,研究生教育的发展尤为迅速.党的十七大报告提出,要“努力造就世界一流科学家和科技领军人才,注重培养一线的创新人才”,强调了在建设创新型国家中教育的优先发展地位.我们可以清楚地知道,研究生教育是培养创新人才的主渠道,对走自主创新道路,建设创新型国家,具有重要的战略意义.

前事不忘,后事之师.历史经验已一而再、再而三地证明:一个国家的富强,一个民族的繁荣,最根本的是要依靠自己,要以自力更生、自主创新为主.《国际歌》讲得十分深刻,世界上从来就没有什么救世主,只有依靠自己救自己.寄希望于别人,期美好于外援,只是一种幼稚的幻想.内因是发展的决定性的因素.当然,我们绝不应该也绝不可能采取“闭关锁国”、自我封闭、故步自封的方式来谋求发展,重犯历史错误.外因始终是发展的必要条件.改革开放三十年所取得的辉煌成就,谱写的中华民族历史性跨越的壮丽史诗,就是铁证.正因为如此,我们清醒看到了,自助者人助天助,只有独立自主,自强不息,走以自主创新为主的发展道路,才有可能在向世界开放中,争取到更多的朋友,争取到更多的支持,充分利用好外部的各种有利条件,来扎扎实实而又尽可能快地发展自己.这一切的关键就在于,我们要有数量与质量足够的高级专门人才,特别是拔尖创新人才.何况,在科技高速发展与高度发达,而知识经济已初见端倪的今天,更加如此.人才、高级专门人才、拔尖创新人才、领导人才,是我们一切事业发展的基础.

“工欲善其事,必先利其器.”自古凡事皆然,教育也不例外.教学用书是培育人才的基本条件之一.“巧妇难为无米之炊.”特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多越快,人才的知识基础及其要求越来越广越高,因此,我一贯赞成与支持出版研究生教学用书,供研究生自己主动地选用.早在1990年,《机械

《工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:

一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见.但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为.如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书.

这就是我赞成要为研究生编写系列的《机械科学与工程研究生教学用书》的主要原因.今天,我仍然如此来看.

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这很有道理;但是,必须补充一句,“学中做”.既要在学习实践中学习,又要在实践中学习,学习与实践紧密结合,方为全面.重要的是,结合的关键在于引导学生思考、积极独立思考.我一贯认为,要造就一个人才,学习是基础,思考是关键,实践是根本,三者必须结合,缺一不可.当然,学生的层次不同,结合的方式、深度与广度就应不同,思考的深度也应不同.对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应是“研中学,学中研”,就更须而且也更应是“研中思,思中研”,在研究这一实践中,甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事了.正因为如此,《机械科学与工程研究生教学用书》就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用.

在此,还应讲一点.作为一个研究生来读《机械科学与工程研究生教学用书》中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读.因为知识是基础,有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识.但是,对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力来体悟知识所承载的思维、方法、原则与精神等内涵,体悟知识所蕴含的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华.《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语.语之所贵者意也,意有所随.意之所随者,不可以言传也.”这个“意”,就是知识所承载的内涵,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上.它比语言、比书本、比具体的知识,重要多了.当然,要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可缺的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想.如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识

所驾驭,为知识所奴役,成为计算机存储装置。

《机械科学与工程研究生教学用书》是《研究生教学用书》的延续和发展。《研究生教学用书》自从1990年问世以来,到今年已经历了不平凡的18个春秋,已出版了用书80多种,有5种已被教育部研究生工作办公室列入向全国推荐的研究生教材,即现在的“教育部学位管理与研究生教育司推荐研究生教学用书”。为了满足当前的研究生教育培养创新人才的要求,华中科技大学出版社在已出版的机械类研究生教学用书的基础上进一步拓展,在全国范围内约请一大批著名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地出版《机械科学与工程研究生教学用书》系列教材。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。这套《机械科学与工程研究生教学用书》更不会例外。本套书出版后,这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批评。当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声。”这就是我们的肺腑之言。

当然,在这里,还应该深深感谢《机械科学与工程研究生教学用书》的作者、审阅者、组织者与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及其全体同志);深深感谢对本套研究生教材的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的《机械科学与工程研究生教学用书》。让我们共同努力,深入贯彻落实科学发展观,建设创新型国家,为培养数以千万计高级人才,特别是一大批拔尖创新人才、领导人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而作出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士
丛书主编

前 言

水液压传动是一门既古老又崭新的技术。近二三十年来,由于人类社会对环境保护、可持续发展、安全生产等方面的要求不断提高,水液压传动以其阻燃、绿色、清洁、节能等突出特点受到世界各国液压行业的瞩目,成为流体传动及控制领域的研究热点之一。

本书主要介绍水液压传动的相关基础理论知识、主要液压元件的设计方法、设计实例及代表性产品的结构特点。

本书是作者在近几年为研究生开设的“水液压传动技术基础”课程的基础上,经过对讲义的整理、补充、完善编写而成的,内容主要取材于作者所主持的国家863计划项目“深海作业全海水润滑液压泵关键技术研究及样机研制(2008AA09Z202)”,以及作者所在课题组最近几年的研究成果,同时,也注意吸收了国内外有关研究的最新成果。对本书中所引用资料的原作者,作者表示诚挚的感谢。

本书的编写得到了华中科技大学研究生院的大力支持,同时也得到了课题组李壮云、朱玉泉、杨曙东、刘银水等全体同事,以及浙江大学周华教授、北京工业大学聂松林教授的热情帮助,李壮云教授对全书进行了认真审阅,研究生孙旭东、白宗、苏畅对书中部分插图进行了编辑,在此一并深表谢意。

作者还要特别感谢华中科技大学出版社对本书出版的支持与帮助。

由于水液压传动还是一门不断发展中的新技术,有关问题正在或尚待深入研究,加上作者学识水平有限,书中难免存在疏漏甚至错误,恳请读者批评指正。

作 者

2012年9月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 水液压传动技术的研究背景及其特点	(1)
1.1.1 水液压传动技术兴起的背景	(1)
1.1.2 水液压传动的特点	(4)
1.2 水的主要特性及水液压传动的关键技术问题	(5)
1.3 水液压传动技术发展概述	(7)
第 2 章 摩擦学基本原理	(11)
2.1 摩擦学及其研究内容	(11)
2.2 材料的表面特征	(12)
2.2.1 零件表层的结构特征	(12)
2.2.2 表面粗糙度	(13)
2.2.3 界面自由能	(17)
2.2.4 固体表面的润湿性及润湿角	(18)
2.3 表面的接触状态	(18)
2.4 摩擦机理	(18)
2.5 磨损机理	(21)
2.6 润滑理论及水润滑的特点	(28)
2.7 常用材料的摩擦磨损特性	(33)
2.7.1 金属材料	(34)
2.7.2 聚合物材料	(34)
2.7.3 陶瓷材料	(36)
第 3 章 水润滑下材料的摩擦学研究	(39)
3.1 温度、压力对水的密度、黏度等物理性能的影响	(39)
3.2 选择水液压元件摩擦副材料应注意的问题	(41)
3.3 工程塑料的分类及性能特点	(42)
3.4 水润滑下工程塑料的摩擦学研究概述	(43)
3.5 工程塑料应用于水液压元件时应注意的问题	(44)
3.6 工程陶瓷在水润滑下的摩擦学研究概述	(46)
3.7 工程陶瓷用于水液压元件尚存在的问题及解决策略	(48)

3.8	等离子喷涂陶瓷用于水液压零件应注意的问题	(49)
3.9	碳纤维增强聚醚醚酮的摩擦磨损特性实验研究	(50)
3.9.1	与工程陶瓷配组	(50)
3.9.2	与不锈钢配组	(60)
3.9.3	与铝青铜配组	(61)
3.10	等离子喷涂陶瓷涂层的摩擦特性研究	(63)
3.11	等离子渗氮不锈钢的摩擦磨损特性	(67)
第4章	金属腐蚀与常见的耐蚀金属材料	(70)
4.1	海水的特性及腐蚀特点	(70)
4.2	不锈钢在海水中的腐蚀	(71)
4.2.1	不锈钢的分类	(71)
4.2.2	不锈钢的腐蚀机理	(73)
4.3	非铁金属及其合金在海水中的腐蚀	(79)
4.3.1	铜及铜合金的腐蚀	(79)
4.3.2	铝及铝合金	(81)
4.3.3	钛及钛合金的腐蚀	(84)
4.3.4	镍及镍合金的腐蚀	(84)
第5章	水液压柱塞泵、马达及液压缸	(86)
5.1	水液压泵的结构类型	(86)
5.2	油水分离式柱塞泵	(86)
5.3	油水分离柱塞泵主要结构设计	(90)
5.3.1	配流阀	(90)
5.3.2	配流阀的常见结构及特点	(91)
5.3.3	平板配流阀配流过程的仿真分析	(92)
5.3.4	配流阀的结构设计	(98)
5.3.5	柱塞副的密封	(99)
5.4	全水润滑水液压轴向柱塞泵	(100)
5.4.1	有关研究概述	(100)
5.4.2	全水润滑水液压泵的设计	(104)
5.5	水液压马达	(119)
5.6	水液压缸	(121)
第6章	水液压控制阀	(124)
6.1	水液压控制阀设计中的主要问题	(124)
6.2	水液压控制阀研究概述	(125)

6.3	水液压阀的阀口流动特性	(128)
6.3.1	阀口流动特性实验系统	(129)
6.3.2	常见阀口的流量系数	(129)
6.4	水液压方向控制阀	(136)
6.4.1	二位三通先导式水液压电磁控制阀的结构原理	(136)
6.4.2	材料的选择	(137)
6.4.3	阀口流场仿真	(138)
6.5	水液压流量控制阀	(145)
6.6	水液压溢流阀	(146)
第7章	系统维护与水的污染控制	(149)
7.1	水液压系统的维护	(149)
7.2	水液压系统的污染控制	(150)
7.2.1	水液压系统的微生物控制	(150)
7.2.2	水的硬度控制	(151)
第8章	水液压传动技术的应用	(152)
8.1	海水液压水下作业工具系统	(152)
8.2	基于水液压传动技术的固定式船用高压单相细水雾灭火系统 ..	(156)
8.3	食品机械中的水液压传动系统	(158)
8.4	水液压驱动的污泥泵系统	(159)
8.5	水液压驱动在感光胶卷生产线上的应用	(160)
参考文献		(161)

第 1 章 绪 论

1.1 水液压传动技术的研究背景及其特点

1.1.1 水液压传动技术兴起的背景

流体传动是与电气传动、机械传动并存的三种主要传动方式之一,具有功率密度高、容易控制、适于中短距离传动、布置灵活等特点,在现代工业、农业、国防等领域都有着广泛应用。

根据传递能量的介质不同,流体传动可分为液体传动和气体传动,而液体传动又分为液压传动和液力传动。作为液压传动的工作介质,液压油和难燃液体最为常见,且很长时间以来以液压油的使用最为广泛。

纯水液压传动是以经过过滤的、不添加任何辅助成分的天然淡水或海水作为能量转换、传递和控制介质的流体传动方式,是近二三十年来发展起来的一种绿色、安全的传动技术。

尽管目前纯水液压传动技术还是一个新的研究领域,但在二百多年前,取用方便且价廉的天然淡水已经是液压传动的主要工作介质。1795 年英国工程师 Joseph Bramah 研制成功了第一台水压机,主要用于钢铁轧制和羊毛打包,被视为液压传动技术的开始。闻名世界的英国伦敦泰晤士桥的开启装置也是采用水压驱动控制的。然而,在随后的一百多年时间里,水液压传动技术发展非常缓慢,应用范围极为有限,这与当时科学技术整体发展水平较低有直接关系。水的黏度低、润滑性差,对一般金属材料有强烈的腐蚀性,受加工制造能力和材料研究水平的限制,早期液压传动的压力一般低于 10 MPa,液压泵转速低于 100 r/min,且容积效率低、可靠性差。后来,由于远距离电力传输技术的突破,电气传动得到普及,液压传动技术几乎陷入停滞不前的状态。

20 世纪初,随着石油开采和提炼技术的迅速发展,矿物油得到推广应用,由于它具有黏度大、润滑性好、对金属材料无腐蚀等优点,用于液压传动极大地提高了液压元件和系统的性能,同时,耐油橡胶的研制成功促进了密封技术的发展,使液压传动向高速、高压和大功率化发展成为可能,系统工作压力可达 50 MPa 甚至更高,泵的转速可达 4 000 r/min 以上,系统的功率增长了 1~2 个数量级。1906 年,

美国 Williams 教授与 Janney 工程师研制成功第一台端面配流斜盘式轴向柱塞泵,并用于舰船火炮俯仰调节控制系统中。此后几十年,随着工业、农业和国防技术发展的需要,特别是在第一次世界大战和第二次世界大战期间,以液压油作为传动介质的液压传动技术得到突飞猛进的发展,各种液压元件的性能不断提高,并成功研制出先导式溢流阀、电液伺服阀等新型液压元件。油压传动的迅速发展,使本来就先天不足的水液压传动处于更少有人问津的境地,直到 20 世纪 80 年代之前,水液压传动的应用还主要限于重型锻压机、采矿机械及钢铁行业,而且所采用的介质也并非纯水,而是在水中添加了各种用以改善润滑性、防锈性和黏性等的添加剂。

然而,液压油取代水作为液压介质在使用过程中也存在诸多问题,主要表现在以下方面。

(1) 液压油易燃易爆的特点限制了液压系统的使用范围 在高温、易燃易爆、安全性要求高的生产场所,如采矿、冶金、注塑等,若使用油压传动,一旦元件和系统发生泄漏或管路破裂失效,漏油将可能导致燃烧、爆炸等灾难性事故,同时,过高的环境温度会造成液压油黏度降低,使系统的性能降低。

(2) 液压油的泄漏会造成严重的环境污染危害 尽管流体传动与控制领域一直致力于零泄漏液压传动研究,但密封和泄漏的矛盾在液压元件和系统中至今仍未有彻底解决,特别是随着液压传动技术向高压、大功率的方向发展,“跑冒滴漏”的问题将更加突出。另外,在安装及维修过程中也很难避免液压油的泄漏。泄漏不仅降低了系统的容积效率和控制性能,还造成资源的浪费和工作场地的污染,空气中的油蒸气也会危害工人的身体健康。液压油的泄漏或不经处理的随意排放,会对人类赖以生存的生态环境带来严重的污染。美国的一项研究表明,1 L 液压油会造成 1 000 000 L 水的污染,泄漏的油液还将危及周围动物和植物的生存。

(3) 油压传动系统在使用中很难避免对产品的污染 污染会使产品的质量达不到要求、降低产品品质,甚至使产品成为废品。在一些对清洁卫生要求严格的行业,如食品、纺织、制药、造纸、化工等,油压传动往往被排除在应用范围之外。

(4) 石油是一种不可再生的自然资源 随着人类工业化进程的加快,石油越来越成为一种战略性紧缺资源,油压传动对石油资源的依赖不符合当今人类社会可持续发展的要求,石油资源的日渐枯竭必将使油压传动陷入难以为继的困境。

(5) 在原子能动力厂、核反应堆等存在辐射的场所,液压油中的大分子会因受到辐射而发生分解、裂变,造成黏性等物理性能降低,因此,油压传动不适合用于这些场合。

为了解决油压传动在冶金、采矿等场所使用时的安全问题,人们研制出了成本低、难燃或不燃的液压介质,按照介质的成分不同,分为合成型、油水乳化型和高水

基型。合成型难燃液主要包括水-乙二醇、磷酸酯液和硅油,油水乳化型根据水与矿物油的组成比例分为水包油乳化液和油包水乳化液。

水-乙二醇液含有 35%~55% 的水,其余为乙二醇及各种添加剂,如增稠剂、抗磨剂、耐蚀剂等。水-乙二醇液凝点低($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$),黏度指数高($\text{VI}=130\sim 170$),使用温度范围为 $-18\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$,但价格高、润滑性差。水-乙二醇会使许多普通油漆和涂料软化或脱落。

磷酸酯液为化学合成液,抗燃性好,使用温度范围宽($-54\sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$),抗氧化性和润滑性好。但其价格为液压油的 5~8 倍,且对人体有毒性,与多种密封材料(如丁腈橡胶和氯丁橡胶)的相容性很差。

乳化液是互不相溶的油和水混合而成的液体,其特征是一种液体以微细液滴的形式均匀分布在另一种液体内部。其中,水包油乳化液含水 90%~95%,其余 5%~10%为矿物油,以及各种添加剂,如乳化剂、防锈剂、助溶剂、防霉剂、抗泡剂等。水包油乳化液润滑性差、抗燃性好,广泛用于煤矿液压支架液压系统和水压机系统等需要防燃防爆的场所。

油包水乳化液则是以矿物油(约 60%)为主,其余 40%为水和各类添加剂,其特点是润滑性、防锈性好,抗燃性较好,但使用温度一般不能高于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

高水基型难燃液并不含油,而是以水(约 95%)为主,另加约 5%的各类添加剂,具有价格低、对环境污染小、抗燃性好等优点,但黏度低、润滑性差。

上述各种难燃液虽然降低了存储、运输成本,避免了高温环境下燃烧、爆炸的危险,但是与环境并不完全相容,会污染某些产品,如使纸张变色、食品变质等,因此,难以在食品机械、医疗器械、纺织机械、木材加工机械中使用。高水基型难燃液的各组分分配比有严格的规定,使用中由于水的蒸发或外界水分的侵入都会影响介质的使用性能,使其容易变质,因此,在使用中的监测、更换等维护要求甚至比液压油还高。难燃液对环境也有危害,使用后同样不能随意排放,处理成本较高。

为了避免液压介质泄漏或排放对环境造成的污染,世界各国液压界一直在探索研制与环境相容的“绿色”液压介质,目前主要有三类:聚乙二醇(polyglycol)、植物油和合成脂(synthetic ester)。其主要特征是可以被生物降解,对生态环境无危害,但目前这些介质的生产成本很高,应用不多。

各类常见难燃液压介质的特性参数见表 1-1。

人类社会迈入 21 世纪后,经济发展与环境污染,资源短缺与可持续发展等问题日益突出。在此背景下,20 世纪 80 年代以来,古老的水液压传动技术重新吸引了人们的目光,同时,在经过了一百多年的发展之后,材料科学和机械制造科学的进步为发展现代水液压传动奠定了坚实的物质和技术基础。因此,水液压传动技术的发展并不是简单的回归,而是一次新的技术飞跃。

表 1-1 常见难燃液压介质的特性参数

类型	成 分	水的质量 分数/(%)	运动黏度/(mm ² /s)	工作温度/℃
HFA-E	水包油乳化液*	<95	1	5~50
	水包油乳化液	<80	10,15,22,32,46	5~50
HAF-M	水包油微乳化液*	<95	1	5~50
HFA-S	合成液,不含油*	<95	1	5~50
HFB	油包水乳化液	<40	46,68,100	5~50
HFC	水-乙二醇,聚合物水溶液	35~80	22,32,46,68	-20~50
HFD-R	合成油,磷酸酯	0	15,22,32,46,68,100	-20~70
HFD-U	其他合成液,不含水	0	15,22,32,46,68,100	0~50

注:带“*”者为高水基型难燃液,运动黏度小于 5 mm²/s。

1.1.2 水液压传动的特点

与油压传动相比,水液压传动的特点主要体现在以下几个方面。

(1) 经济性 水液压传动采用的水,可以是自来水,也可以直接取自江河湖泊和海洋,只需按使用要求进行过滤,因此来源广泛、取用方便,可以说取之不尽,用之不竭,而且不需要加工提炼、运输和存储,使用后也不需要进行任何处理即可排放,使用成本较油压传动大为降低。通常,介质的购买成本与处理成本相近,水的购买和使用成本约为液压油的 1/5 000,对于钢铁、煤炭等采用大型液压系统的行业,若采用水液压传动,将节省大量液压油,经济和社会效益将十分可观。但由于水液压传动尚处于初期发展阶段,使用范围还很有限,且水液压元件的制造需要采用特殊材料。目前,它的加工制造成本大大高于同类的油压元件,但可以预见,随着水液压传动技术的发展完善和应用范围的日益扩大,其制造成本将会逐渐降低。

(2) 环保性 进入 21 世纪,人与自然和谐相处的发展观日益深入人心,人们的环保意识不断提高,油压传动对环境造成的危害也越来越引起人们的关注,因此,各国对液压油的排放都已经或即将制定严格的法律法规,要求生产企业承担生产过程中对环境带来的负担,除了缴纳环境税外,还必须回收生产过程中产生的对环境有害的物质,否则,将处以高额罚款。目前,我国也制定了“谁污染谁治理”、“谁污染谁缴费”的环境保护政策。水液压传动系统以水作为液压介质,不添加任何辅助成分,其泄漏不会对周围环境造成任何危害,因此,水液压传动将成为实现清洁生产、对环境零污染的绿色传动技术。

(3) 安全性 水本身是不燃的,它可以直接应用于高温、易燃易爆的场所。

(4) 卫生性 水液压传动在生产过程中不会对产品造成污染,因此可以应用于纺织、化工、食品加工、制药、海水淡化、水上娱乐、消防等设备,同时工人的操作环境也大为改善。

(5) 维护方便 对水液压元件和系统的日常维护、拆检、维修等工作都很方便,维护成本低。

(6) 应用于水下作业工具系统中的方便性 相关内容参见第8章。

(7) 黏度低 水的黏度低,黏度受温度、压力的影响小,因此,水液压传动系统的工作稳定性较油压传动好,控制性能好。

1.2 水的主要特性及水液压传动的关键技术问题

无论是系统的组成,还是液压元件的结构原理,水液压传动与油压传动都没有本质差别,然而对水液压传动技术的研究却困难得多,这主要是由于介质特性的差异。水、矿物油和乳化液主要物理性能的比较见表1-2。

表 1-2 水、矿物油和乳化液主要物理性能的比较

介 质 种 类	海 水	淡 水	矿物油	水包油 乳化液
50℃时运动黏度/(mm ² /s)	0.6	0.55	15~70	≈1
15℃时密度/(g/cm ³)	1.025	1	0.87~0.9	≈1
50℃时汽化压力/Pa	12 200	12 000	0.001	10 000
体积弹性模量/(×10 ⁹ N/m ²)	2.43	2.4	1.0~1.6	2.5
20℃时热传导系数/(W/(m·℃))	0.56	0.598	0.11~0.14	0.598
20℃时恒压下的比热容/(J/(kg·℃))	4 000	4 180	1 890	598
工作温度范围/℃	3~50	3~50	20~90	5~55
燃点/℃	—	—	320~360	—
闪点/℃	—	—	210	—
声速(20℃时,m/s)	1 480	1 522	1 300	—
电导率(25℃时,S/cm)	<1.0×10 ⁻³	0.053	10 ⁻¹³	—
表面张力(25℃时,N/m)	0.072	0.073	0.034	—

由表1-2可以看到,水的黏度很低,仅为矿物油的0.7%~3.6%。黏度低则流体内部及流体与固壁面间的黏性摩擦低,在同样条件下水液压传动系统中的流动能量损失大大降低,因此更利于远程动力传输。但黏度低也意味着润滑性差,高压

时极易造成两相对运动表面的直接接触,引起固体表面的摩擦磨损,降低元件的使用寿命。黏度低还使得通过元件缝隙的泄漏增大、流速加快,造成密封困难和容积效率降低,对过流表面容易造成侵蚀。

尽管常温常压下空气在水中的溶解度仅为 2%,低于其在液压油中的溶解度(5%~12%),但水的汽化压力约为矿物油的 10^7 倍,而且水的汽化压力随水温升高增加很快,使得水液压传动中的气蚀问题更加突出,因此,水作为液压介质时的使用温度范围有限,一般为 3~50℃。

水的体积弹性模量高于矿物油,能够减小液压泵中的闭死容积损失,并有利于提高控制精度,但会使水击现象变得更剧烈,由此导致管路和系统产生更强烈的振动噪声。

水的导热性能好、具有较高的热容,使水液压系统中的温升较低,降低了系统的散热要求。

水的黏度较稳定,受温度、压力影响很小,因此,水液压系统的控制特性受环境温度、系统发热的影响较小。

应该指出,水的各项性能指标与水源有一定的关系,即使对于自来水,其水质也会随地理位置及取用水源地的改变而变化。目前,对于自来水的水质标准,不同的国家和地区不尽相同,欧洲国家采用的是欧盟的饮用水标准(80/778/EEC, 1980),国际上著名的水液压元件公司丹麦的 Danfoss 公司就以此作为水液压系统的介质标准,参见表 1-3。水的以下参数也对液压元件和系统的性能有影响。

表 1-3 水的各项化学指标

指 标	单 位	取 值 范 围
H ⁺ 浓度	pH 值	$6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$
氯化物浓度	mg/L	≤ 25
硬度	—	$5 \leq \text{硬度} \leq 10$
微生物含量	37℃/22℃(个/毫升)	10/100

(1) pH 值 即水中 H⁺ 的浓度。水对金属材料的腐蚀性与水的酸碱度有直接关系。

(2) Cl⁻ 的浓度 水中 Cl⁻ 的浓度越高,水的腐蚀性就越强。

(3) Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 浓度 水温升高时,部分 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 会以化合物的形态沉积在管道或元件的表面,形成水垢。水垢积累过多时往往会增大水的流动阻力、堵塞过滤器或水液压元件中的细小阻尼孔。

(4) 固体污染物 水中固体颗粒的浓度、尺寸、成分构成、硬度、形态等参数对元件过流表面和摩擦副表面的磨损影响较大。

(5) 细菌和微生物的数量 微生物对水液压元件和系统的危害主要有两点：一是微生物在元件表面或壳体内附着滋生，将在表面形成一层生物膜，从而使材料遭受生物腐蚀；二是当微生物数量过多时，可能造成元件内一些细长孔或狭窄缝隙阻尼结构的堵塞。

概括起来，水液压传动研究中的关键技术问题如图 1-1 所示。

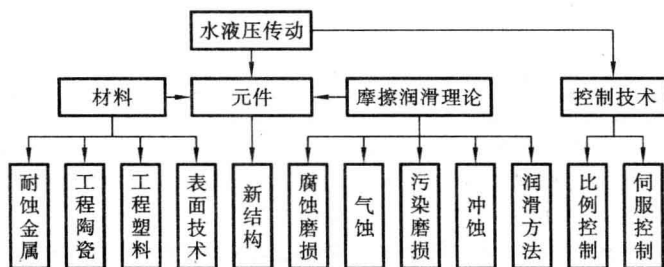


图 1-1 水液压传动研究中的关键技术问题

1.3 水液压传动技术发展概述

美国是世界海洋大国，很早就把发展海洋技术纳入社会发展总体规划。20 世纪 60 年代开始，美国在全球率先开展海水液压传动技术的研究。戴维·泰勒海洋船舶研究和发展中心(David W Taylor Naval Ship Research and Development Center)和美国海军土木工程实验室(Naval Civil Engineering Laboratory)等单位共同开展海水液压基础技术、海水液压元件及系统的研究，并于 90 年代后期成立了全国性的水液压传动委员会，负责组织协调美国水液压传动技术的研究、开发和应用。早期主要是解决海水液压元件关键摩擦副的材料选取问题。随着材料科学的发展，一些性能优良的高分子材料及工程陶瓷材料陆续出现，为高性能水液压元件的研制提供了条件。20 世纪 70 年代中期，美国海军司令部、海军舰船研究中心及海军土木工程实验室等单位为了拓展海洋开发和水下作业的深度，开始进行海水液压驱动的水下作业工具的研究。1973 年，美国海洋舰船研究和开发中心研制出容积式海水泵，用于 4 000 m 深载人潜水器埃尔文号(Alvin)的浮力调节。1980 年，研制成功单向叶片马达，压力为 7 MPa，转速为 1 600 r/min，总效率为 80%，工作寿命为 50 h。1984 年，研制出首套海水液压传动水下作业工具系统，压力为 14 MPa，流量为 30~45 L/min，作业工具有冲击扳手和旋转清洗刷。1988 年又研制出冲击钻、带锯、砂轮切割机等，组成多功能水下作业工具系统(MFTS)，交付美国海军水下工程队使用。表 1-4 所示为美国海军土木工程实验室研制的海水液压水下作业工具主要参数。表 1-5 所示为美国 Steffen 公司生产的油压驱动的水下作