

高端装备关键基础理论及技术丛书

传动与控制

极端环境下的 电液伺服控制理论 与性能重构

ELECTRO HYDRAULIC CONTROL THEORY AND ITS PERFORMANCE
RECONSTRUCTION UNDER EXTREME ENVIRONMENT

阎耀保 原佳阳 李长明



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了极端环境下的电液伺服控制理论与性能重构。主要内容有概论、三通射流管阀、四通射流管阀、射流管电液伺服阀及其尺寸链分析方法、极端温度下电液伺服阀尺寸链重构与零偏漂移、随机振动环境下电液伺服阀的零偏漂移、三维离心环境下电液伺服阀的零偏漂移、电液伺服阀的冲蚀磨损与黏着磨损、紧凑型旋转直驱式压力伺服阀、极端小尺寸双级溢流阀、振动环境下的极端小尺寸减压阀、液压伺服作动器等。附录列出了新型工作介质[液压油、磷酸酯液压油、喷气燃料(燃油)航空煤油、航天煤油、淡水与海水、压缩气体、燃气发生剂]的牌号、成分与性能。本书内容翔实、图文并茂、深入浅出,侧重系统性、逻辑性、专业性、前沿性,前瞻性理论与实践试验案例紧密结合,重大装备核心基础零部件(元器件)事例丰富、翔实。

本书可供从事重大装备、重大工程、重点领域整机用高端流体传动与控制系统和装置的研究、设计、制造、试验及管理的科技人员阅读,也可供航空、航天、舰船、机械、能源、海洋、交通等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

极端环境下的电液伺服控制理论与性能重构 / 阎耀保, 原佳阳, 李长明著. -- 上海: 上海科学技术出版社, 2023. 1

(高端装备关键基础理论及技术丛书. 传动与控制)
ISBN 978-7-5478-5914-8

I. ①极… II. ①阎… ②原… ③李… III. ①电液伺服系统—控制系统—研究 IV. ①TH137.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第220221号

极端环境下的电液伺服控制理论与性能重构

阎耀保 原佳阳 李长明 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 29.75

字数 750千字

2023年1月第1版 2023年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5914-8/TH·98

定价: 238.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

前言 | FOREWORD

高端装备高新技术处于价值链的高端和产业链的核心环节。核心基础零部件(元器件)是国家“制造强国战略”“工业强基”和我国高端装备制造产业的重点突破瓶颈之一。在极端环境下服役,为重大装备配套的高性能、高可靠性的电液伺服系统及其元件必须具备机载振动、冲击、极端温度等特殊环境下的服役性能。这里所指的极端环境包括极端环境温度、极端介质温度、振动、冲击、加速度、极端尺寸、特殊流体等特殊服役过程。只有追根溯源,弄清定律、定理的由来,阐释原理和机理机制,尤其是定律是如何发现的、元件是如何发明的,在实践中碰到新问题、新需求,才能在传承前人知识的基础上创造新原理、新元件和新装置。专注于第一线现场如极端环境背后的“真问题”并静心研究,方能取得“真成果”。著者十年如一日潜心研究极端环境下的电液伺服控制理论与高端液压元件,这些实际经验和成果难以只从书面上学来,也不能从外国买来,只能靠自己在实践中总结并精心梳理,靠自己全面、系统地归纳科学研究中建立和应用的基础理论与设计方法。

针对百余年来高端装备一直被国外垄断和我国国家重大需求的现状,本书著者结合多年来从事重大装备和系统研制过程中的实践经验,包括所承担的国家重点研发计划、国家自然科学基金、航空基金、上海市浦江人才计划、科研院所基础研究和型号任务,及时地总结了三十余年潜心研究电液伺服控制理论的基础成果与实践案例,涉及航空、航天、舰船、智能机械和海洋装备等方面。

全书共分为12章。第1章着重阐述了液压流体力学与流体传动与控制的由来及其史学史,即该学科历史背后的人物史,以及极端环境下电液伺服控制理论与性能重构的演变过程,读者可以了解古往今来人们认识问题、分析问题和解决问题的背景与过程,以及科学精神与文化遗产。第2、3章主要介绍了两种典型基础射流元件的数学模型、基本特征特性及实践试验案例。第4章叙述了射流管伺服阀数学模型、动静态特性及尺寸链分析方法,以及力矩马达气隙和射流前置级不对称性对零偏的影响。第5章阐述了高温环境下的尺寸链重构、极端低温下温漂的线性回归分析方法、极端温度下零偏漂移机理及实践试验案例。第6、7章着重介绍了振动环境和离心环境下的分析方法、数学模型和特征特性、零偏漂移的抑制措施。第8章介绍了射流前置级和液压滑阀功率级的冲蚀磨损机理与计算方法、反馈杆小球黏着磨损量计算方法、性能重构及其实践试验案例。第9章描述了研制的旋转直驱式压力伺服阀原理、数学模型、稳定性判据和优化设计实践试验案例。第10、11章介绍了极端小尺寸双级溢流阀与振动环境下的极端小尺寸减压阀,包括极端小尺寸液压阀的特殊性和分析方法。第12章阐述了并

联双杆液压伺服作动器、集成式伺服作动器能源配置方法,液压伺服作动器自动回中与锁紧协同,宽温域下电磁液动换向阀的尺寸链与设计案例。为便于读者了解电液伺服系统的新型工作介质,附录列出了新型液压油、磷酸酯液压油、喷气燃料(燃油)航空煤油、航天煤油、自然水(淡水与海水)、压缩气体(空气、氮气、惰性气体)、燃气发生剂的成分和特性。

本书旨在为我国从事重大装备和系统研究、设计、制造、试验和管理的技术人员提供有益的前瞻性基础理论和实践案例,也希望对探索极端环境下电液伺服控制及其高端元件目前未知的基础理论、技术途径或解决方案,破解重大装备、重点领域整机理论和关键技术难题,提高我国核心基础零部件(元器件)的原始创新能力起到一定的促进作用。

本书由阎耀保教授(同济大学)、原佳阳博士(中航工业南京伺服控制系统有限公司)、李长明博士(航空工业金城南京机电液压工程研究中心)根据多年的实践经验和科学研究成果,系统凝练撰写而成,包括著者与上海航天控制技术研究所傅俊勇研究员、张鑫彬研究员,中国航发长春控制科技有限公司肖强研究员、徐杨高级工程师、陆畅高级工程师,同济大学阎耀保教授研究室毕业生王玉博士等同仁的共同研究成果。第1、6、7、11、12章由阎耀保撰写,第2、3、4、5章由李长明撰写,第8、9、10章及附录由原佳阳撰写。同济大学阎耀保教授研究室博士研究生李双路、郭文康、李聪、刘小雪、张玄、王东,硕士毕业生何承鹏、章志恒、谢帅虎、邹为宏、夏飞燕、张小伟进行成果归纳和资料整理工作。在出版过程中得到了上海科学技术出版社、中国学位与研究生教育学会研究重点课题、同济大学研究生教育研究与改革项目和上海市教育委员会的大力支持和帮助。

本书素材来源于我国第一线科技工作者的基础理论和实践成果,力图记述已形成和显现的典型事实和理论体系,探索将我国科学研究成果向研究生教材转化。本书作为同济大学博士研究生教材、硕士研究生教材已在教学中连续使用,旨在立德树人,激发和培养科学精神、家国情怀和使命担当。

限于著者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

著者

2022年4月

目录 | CONTENTS

第 1 章	概论.....	1
1.1	液压流体力学与液压元件.....	1
1.1.1	液压流体力学.....	1
1.1.2	液压元件.....	4
1.2	极端环境下电液伺服元件的性能演化与系统的性能调控.....	12
1.2.1	极端环境下电液伺服元件的性能演化.....	12
1.2.2	极端环境下电液伺服系统的性能调控.....	26
	参考文献.....	28
第 2 章	三通射流管阀.....	31
2.1	概述.....	31
2.2	数学模型.....	33
2.2.1	圆形射流基础.....	33
2.2.2	空载接收流量计算方法.....	34
2.2.3	断载恢复压力计算方法.....	42
2.2.4	静态特性.....	51
2.3	推荐结构及其特性.....	74
2.3.1	最优结构.....	75
2.3.2	Ⅲ型三通射流管阀及其特性.....	78
2.4	实践试验.....	81
2.4.1	试验装置及方法.....	81
2.4.2	试验结果与分析.....	82
	参考文献.....	84
第 3 章	四通射流管阀.....	86
3.1	概述.....	86
3.2	数学模型.....	87
3.2.1	单孔空载接收流量、能量计算方法.....	88
3.2.2	单孔断载恢复压力计算方法.....	88
3.2.3	全工作行程的数学模型.....	90

3.3	典型结构及其特性	97
3.3.1	对称均等型	98
3.3.2	对称不均等型	99
3.3.3	均等不对称型	100
3.4	对称均等型四通射流管阀冲蚀磨损后的结构及其特性.....	102
3.5	实践试验.....	104
3.5.1	对称均等型四通射流管阀压力特性	104
3.5.2	对称不均等型四通射流管阀压力特性	106
	参考文献	110
第4章	射流管电液伺服阀及其尺寸链分析方法.....	112
4.1	工作原理与数学模型.....	112
4.1.1	四通射流管阀的三系数	113
4.1.2	永磁动铁式力矩马达	123
4.1.3	衔铁组件	126
4.1.4	四通射流管阀控制功率级滑阀	127
4.1.5	主阀芯	127
4.2	理论特性.....	128
4.2.1	静态特性	128
4.2.2	动态特性	131
4.2.3	实践试验	133
4.3	精密零部件公差及装配尺寸链对电液伺服阀零偏的影响.....	136
4.3.1	具有不对称尺寸时的装配尺寸链	138
4.3.2	考虑尺寸不对称性时的射流管伺服阀模型	144
4.3.3	考虑装配尺寸公差及其分布概率时的零偏	150
4.3.4	导致零偏的制造装配因素分析及零偏抑制措施	154
4.3.5	实践试验	156
4.4	力矩马达气隙误差对电液伺服阀零偏的影响.....	159
4.4.1	力矩马达及气隙对力矩马达零位的影响	159
4.4.2	理论特性	162
4.4.3	实践试验	165
4.5	射流前置级不对称性对电液伺服阀零偏的影响.....	166
4.5.1	基本方程	167
4.5.2	理论分析	172
4.5.3	实践试验	176
	参考文献	178
第5章	极端温度下电液伺服阀尺寸链重构与零偏漂移.....	180
5.1	概述.....	180

5.2	高温环境下的尺寸链重构.....	181
5.2.1	特性不规则且不重复现象	181
5.2.2	规则金属体的变形机理	183
5.2.3	精密偶件的尺寸链重构	189
5.2.4	射流管伺服阀的性能重构与改进措施	195
5.3	极端低温下温漂的线性回归分析方法.....	197
5.3.1	温漂试验现象	198
5.3.2	温漂的线性回归分析方法	199
5.3.3	试验结果与分析	202
5.4	射流管伺服阀零偏漂移机理.....	203
5.4.1	温度对材料性能及零件尺寸的影响	204
5.4.2	加工装配误差导致的结构尺寸不对称性	208
5.4.3	精密偶件间的相对热位移	215
5.4.4	数学模型及温漂机理	225
5.4.5	温漂的理论结果	238
5.5	实践试验.....	241
5.5.1	射流管伺服阀常温特性试验	241
5.5.2	射流管伺服阀小信号空载流量特性试验	243
5.5.3	射流管伺服阀温漂试验	244
	参考文献	249
第 6 章	随机振动环境下电液伺服阀的零偏漂移.....	251
6.1	分析方法.....	251
6.2	数学模型.....	253
6.3	导致零偏漂移的因素.....	257
6.3.1	滑阀阀芯质量	259
6.3.2	衔铁组件质量中心与旋转中心距离	260
6.3.3	衔铁组件质量	261
6.4	实践试验.....	261
6.4.1	试验装置及方法	262
6.4.2	试验结果与分析	263
	参考文献	265
第 7 章	三维离心环境下电液伺服阀的零偏漂移.....	267
7.1	概述.....	267
7.2	电液伺服阀的特征位移与离心环境下的空间姿态.....	268
7.2.1	电液伺服阀的三个特征位移	268
7.2.2	空间姿态	268
7.2.3	两种典型的离心环境	269

7.2.4	离心环境下的加速度合成定理	269
7.3	数学模型	270
7.3.1	匀速圆周运动离心环境情况	270
7.3.2	匀加速圆周运动离心环境情况	275
7.4	实践试验	279
7.4.1	试验装置	279
7.4.2	试验方法及结果	279
7.4.3	零偏漂移及其抑制措施	281
	参考文献	285
第 8 章	电液伺服阀的冲蚀磨损与黏着磨损	286
8.1	概述	286
8.2	射流前置级冲蚀磨损机理与计算方法	287
8.2.1	冲蚀磨损机理	288
8.2.2	冲蚀磨损理论	290
8.2.3	冲蚀磨损量数值计算方法	293
8.2.4	实践试验	297
8.3	液压滑阀功率级冲蚀磨损机理与计算方法	300
8.3.1	冲蚀磨损理论	301
8.3.2	冲蚀磨损量数值计算方法	310
8.3.3	冲蚀磨损量的影响因素及讨论	313
8.3.4	实践试验	321
8.4	冲蚀磨损引起的液压滑阀功率级性能重构	326
8.4.1	滑阀阀口冲蚀圆角计算模型	327
8.4.2	四边滑阀的形貌和性能演化过程	332
8.4.3	实践试验	335
8.5	电液伺服阀反馈杆小球黏着磨损量计算方法及影响因素	337
8.5.1	黏着磨损量计算方法	337
8.5.2	黏着磨损量影响因素	342
8.5.3	实践试验	344
	参考文献	345
第 9 章	紧凑型旋转直驱式压力伺服阀	347
9.1	概述	347
9.2	工作原理与数学模型	348
9.2.1	工作原理	348
9.2.2	非线性数学模型	350
9.3	稳定性判据与参数匹配设计方法	354
9.3.1	稳定性判据	354

9.3.2	电机转角内闭环对稳定性的影响	356
9.4	偏心驱动机构优化设计	358
9.4.1	小球球心偏心距对响应速度的影响	358
9.4.2	偏心小球与圆柱孔配合间隙对负载压力突跳的影响	358
9.4.3	偏心小球耐磨损及其改进措施	359
9.5	实践试验	359
9.5.1	样机及试验系统	359
9.5.2	样机实测性能	361
	参考文献	363
第 10 章	极端小尺寸双级溢流阀	365
10.1	概述	365
10.2	双级溢流阀及其失稳现象	365
10.3	稳定性判据与参数匹配设计方法	367
10.3.1	数学模型	367
10.3.2	先导阀的稳定性判据	371
10.3.3	主阀的稳定性判据	373
10.3.4	基于稳定工作的双级溢流阀结构参数匹配设计方法	375
10.3.5	稳定性问题	376
10.4	先导阀前腔串加阻尼孔的极端小尺寸集成式双级溢流阀	377
10.4.1	先导阀前腔串加阻尼孔的双级溢流阀	377
10.4.2	新型集成式双级溢流阀的稳定性	378
10.4.3	普通集成式双级溢流阀与新型集成式双级溢流阀的稳定性对比	380
10.5	实践试验	381
	参考文献	382
第 11 章	振动环境下的极端小尺寸减压阀	383
11.1	概述	383
11.2	结构与工作原理	384
11.3	数学模型	385
11.3.1	整机无振动时的数学模型	385
11.3.2	整机振动时的数学模型	389
11.4	理论特性	390
11.4.1	整机无振动时弹簧刚度对特性的影响	390
11.4.2	整机无振动时压力感受腔容积对特性的影响	392
11.4.3	整机振动时振动频率和幅值对特性的影响	393
11.5	实践试验	394
	参考文献	395

第 12 章 液压伺服作动器	397
12.1 概述	397
12.1.1 推力矢量控制技术	397
12.1.2 功能结构	399
12.1.3 国外先进作动器材料及表面处理技术	406
12.1.4 极端温度下燃油动密封材料、密封形式和防尘方法	407
12.2 并联双杆液压伺服作动器偏载力和径向力	412
12.2.1 数学模型	413
12.2.2 偏载力和径向力	415
12.2.3 实践试验	422
12.3 集成式伺服作动器能源配置与压力损失	424
12.3.1 能源配置	424
12.3.2 选择活门及其压力损失	426
12.3.3 压力损失对作动器活塞速度的影响	430
12.4 自动回中与锁紧协同	435
12.4.1 自动回中功能与锁紧功能	435
12.4.2 锁紧机构结构与力学模型	437
12.4.3 自动回中功能与锁紧结构设计	442
12.5 宽温域下三位四通电磁液动换向阀的几何尺寸链与卡滞特性	443
12.5.1 滑阀结构与工作原理	444
12.5.2 温度和残余应力对滑阀副尺寸链和配合间隙的影响	445
12.5.3 不均匀油液压力对滑阀副配合间隙的影响	447
12.5.4 滑阀卡滞及其解决措施	449
参考文献	451
附录 工作介质	453
1. 液压油	453
2. 磷酸酯液压油	456
3. 航空煤油: 喷气燃料(燃油)	457
4. 航天煤油	460
5. 自然水(淡水与海水)	462
6. 压缩气体(空气、氮气、惰性气体)	463
7. 燃气发生剂	465

第 1 章

概 论

1.1 液压流体力学与液压元件

1.1.1 液压流体力学

纵观世界液压元件发明史,其经历了从流体力学到流体控制、从原理到元件、从复杂高端元件到一般工业基础件的发展过程。人们从最初接触自然界中的水开始,到认识和归纳流体静力学、流体动力学的知识,形成了较为完整的液压流体力学,包括流体的物理性质,液压流体力学基础如流体连续性方程、伯努利方程、动量定理,管道中流液特征,孔口流动和缝隙流动如薄壁小孔、缝隙、平行平板间隙和圆柱环形间隙的流动,以及平行圆盘间和倾斜平板间隙的流动、气穴现象和液压冲击等典型液压流体力学现象。

公元前 1500 年,古埃及人发明了用于计时的水钟,在中国也称“刻漏”“漏壶”。人们利用特殊容器来记录将水漏完的时间(泄水型),或者利用底部不开口的容器来记录将水装满的时间(受水型),如图 1-1 所示。中国的水钟,最初为泄水型,后来泄水型与受水型同时并用或两者合一。水钟最初用于祭祀,用于了解夜晚的时间。水钟在希腊和罗马宫廷发挥了宝贵的作

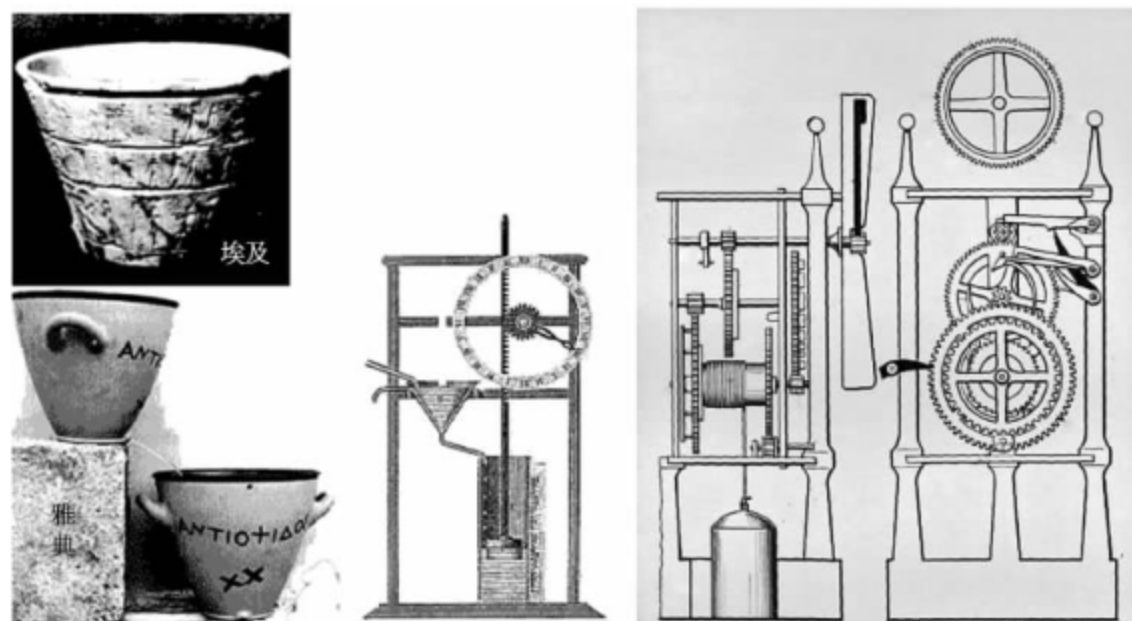


图 1-1 古代水钟及其水压伺服机构

用,被用来确保发言者讲话不超时;如果议程临时中断,譬如中途研究一下文件等,就要用蜡将出水管堵住,直到发言重新开始。在罗马举行运动会时,水钟被用来为赛跑计时。后来,人们发明了利用虹吸现象、杠杆原理、齿轮传动来实现泄水型容器与受水型容器之间水的反馈的机构,并实现连续计时,这是人类发明的第一个液压伺服机构。

流体静力学可追溯到古希腊哲学家阿基米德定律。有一天,他在踏入澡盆发现水位随之上升后,想到可以用测定固体在水中排水量的办法,突然悟出了浮力定律,大声喊出了“Eureka(恍然大悟、顿悟)”,意思是“找到办法了”(图 1-2)。阿基米德浮力定律一直到 1627 年才传入中国。阿基米德(公元前 287—公元前 212),古希腊哲学家、数学家、物理学家、力学家,静态力学和流体静力学的奠基人,并且享有“力学之父”的美称。阿基米德和高斯、牛顿并列为世界三大数学家。阿基米德曾说过“给我一个支点,我就能撬起整个地球”。阿基米德确立了静力学和流体静力学的基本原理,给出许多求几何图形重心,包括由一抛物线和其平行弦线所围成图形的重心的方法。阿基米德证明物体在液体中所受浮力等于它所排开液体的重量,这一结果后被称为阿基米德定律。他还给出正抛物旋转体浮在液体中平衡稳定的判据。阿基米德发明的机械有引水用的水螺旋,能牵动满载大船的杠杆滑轮机械,能说明日食、月食现象的地球-月球-太阳运行模型。但他认为机械发明比纯数学低级,因而没写这方面的著作。阿基米德还采用不断分割法求椭球体、旋转抛物体等的体积,这种方法已具有积分计算的雏形。

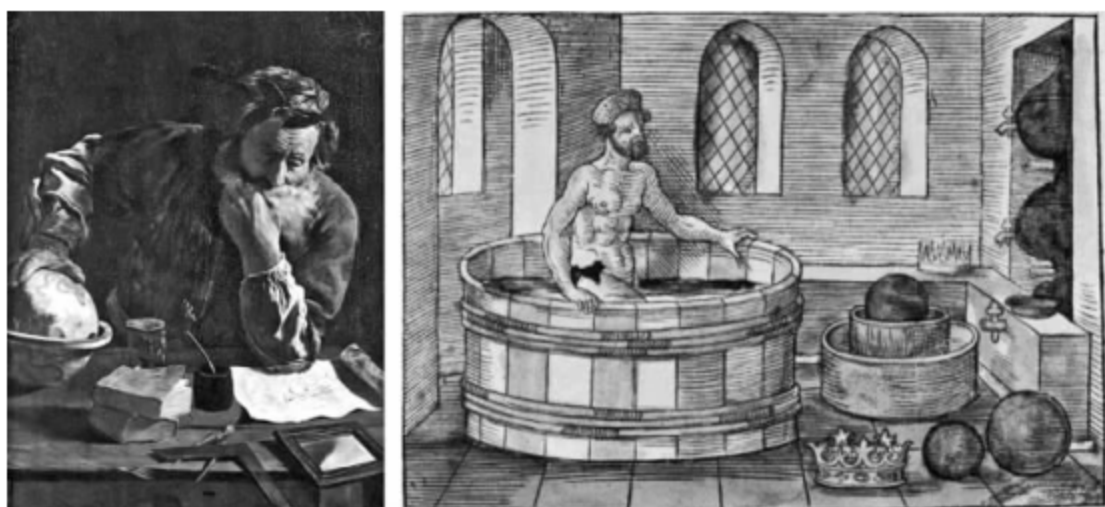


图 1-2 古希腊哲学家阿基米德发现浮力定律

我国流体静力学应用事例有秦昭王(公元前 325—公元前 251)将水灌入洞中利用浮力寻找木球的事例,还有曹冲(196—208)称象。“二十四史”之前四史《三国志》有文字记载:“冲少聪察,生五六岁,智意所及,有若成人之智。时孙权曾致巨象,太祖欲知其斤重,访之群下,咸莫能出其理。冲曰:‘置象大船之上,而刻其水痕所至,称物以载之,则校可知矣。复称他物,则象重可知也。’太祖大悦,即施行焉。”该书记载说,孙权送给曹操一头大象,成年人都想不出方法称象。曹冲有着超出其年龄的聪慧,用物理方法完成了称象。实际上,曹冲所用的方法就是利用流体力学的浮力定律和数学的等量代换法。用许多石头代替大象,在船舷上刻划记号,让大象与石头产生等量的吃水深度效果,再一次一次称出石头的重量,使“大”转化为“小”,分而治之,这一难题就得到圆满的解决。

液压理论和应用技术的发源可追溯到 17 世纪的欧洲。法国人帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662)在 1646 年演示了著名的裂桶试验。如图 1-3 所示,他将 10 m(32.8 ft)长的空心

细管垂直插入装满水的木桶中并做好密封,之后向细管加水。尽管只用了一杯水注入垂直的空心细管,但随着管子中水位上升,木桶最终在内部压力下被冲破开裂,桶里的水就从裂缝中流了出来。这证明了所设想的静水压力取决于高度差而非流体重量,当时这个结果对许多人来说是不可思议的。在此基础上,帕斯卡在1654年发现了流体静压力可传递力和功率,封闭容腔内部的静压力可以等值地传递到各个部位,即帕斯卡定律。帕斯卡1623年出生于法国多姆山省,法国数学家、物理学家、哲学家、散文家。16岁时发现著名的帕斯卡六边形定理:内接于一个二次曲线的六边形的三双对边的交点共线。17岁时写成《圆锥曲线论》(1640),是研究德札尔格(G. Desargues)射影几何工作心得的论文。这些工作是自希腊阿波罗尼奥斯(Apollonius)以来圆锥曲线论的最大进步。1642年,他设计并制作了一台能自动进位的加减法计算装置,被称为世界上第一台数字计算器。1654年,他开始研究几个方面的数学问题,在无穷小分析上深入探讨了不可分原理,得出求不同曲线所围面积和重心的一般方法,并以积分学的原理解决了摆线问题,于1658年完成《论摆线》。他的论文手稿对莱布尼茨(G. Leibniz)建立微积分学有很大启发。在研究二项式系数性质时,写成《算术三角形》向巴黎科学院提交,后收入他的全集,并于1665年发表。其中给出的二项式系数展开后人称“帕斯卡三角形”,实际它已在约1100年由中国的贾宪所知。在与费马(P. Fermat)的通信中讨论赌金分配问题,对早期概率论的发展颇有影响。他还制作了水银气压计(1646),写了液体平衡、空气的重量和密度等方向的论文(1651—1654)。自1655年隐居修道院,写下《思想录》(1658)等经典著作。1662年,帕斯卡逝世,终年39岁。后人为纪念帕斯卡,用他的名字来命名国际单位制中压强的基本单位“帕斯卡”(Pa),简称“帕”(1 Pa=1 N/m²)。

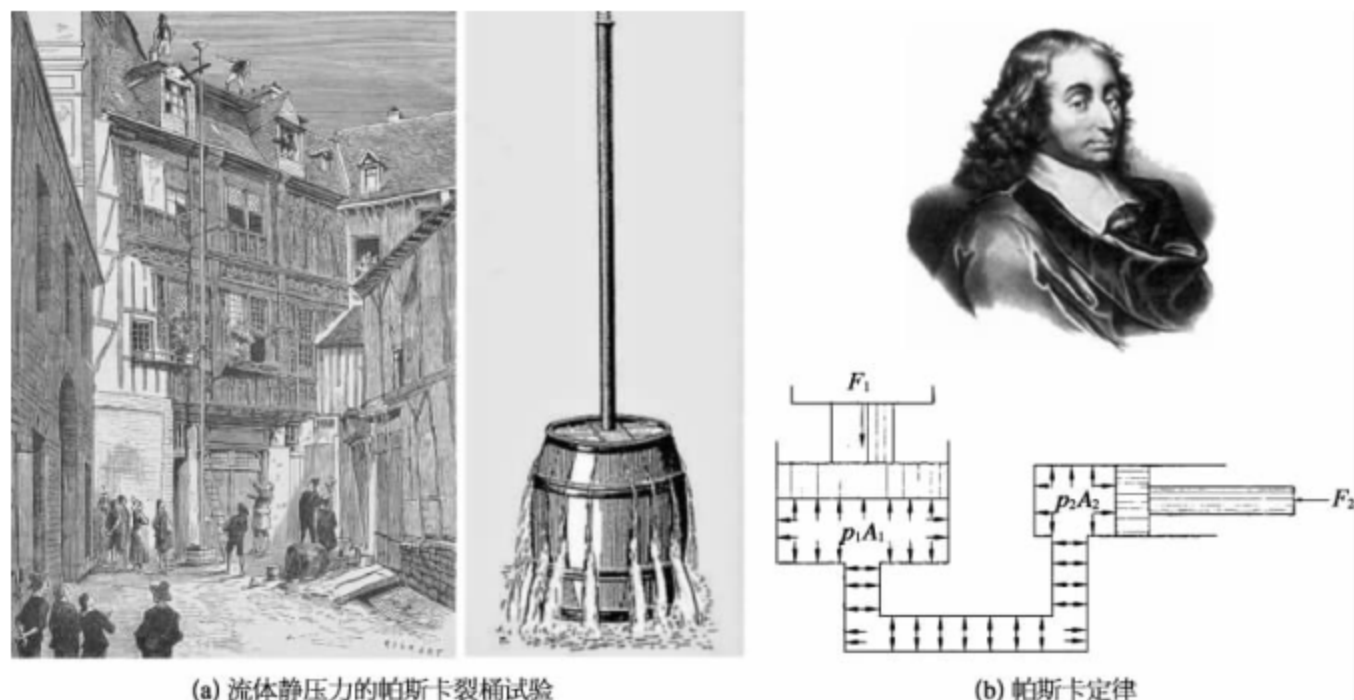


图 1-3 流体静压力传递的帕斯卡定律

流体力学是研究流体的平衡和流体的机械运动规律及其在工程实际中应用的一门学科。流体力学研究的对象是流体,包括液体和气体。流体力学在许多工业部门都有着广泛的应用。从古代流体力学看,16世纪以后西方国家处于上升阶段,工农业生产有了很大的发展,对于流体平衡和运动规律的认识才随之有所提高。

18—19 世纪,人们沿着两条途径建立了流体运动的系统理论。一条途径是一些数学家和力学家,以牛顿力学理论和数学分析为基本方法,建立了理想液体运动的系统理论,称为“水动力学”或古典流体力学。代表人物有瑞士物理学家伯努利(D. I. Bernoulli, 1700—1782)、瑞士数学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)等。1738 年,伯努利给出理想流体运动的能量方程;1755 年,欧拉导出理想流体运动微分方程。1827—1845 年,纳维(C. L. M. H. Navier, 1785—1836)和斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)导出纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations),描述黏性不可压缩流体动量守恒的运动方程,简称 N-S 方程。黏性流体的运动方程首先由法国力学家纳维在 1827 年提出,只考虑了不可压缩流体的流动。法国数学家泊松(S. D. Poisson, 1781—1840)在 1831 年提出可压缩流体的运动方程。法国力学家圣维南(Saint-Venant, 1797—1886)与英国数学家斯托克斯在 1845 年独立提出黏性系数为一常数的形式。2000 年,三维空间中的 N-S 方程组光滑解的存在性问题被美国克雷数学研究所设定为七个千禧年大奖难题之一。

另一途径是一些土木工程师根据实际工程的需要,凭借实地观察和室内试验,建立实用的经验公式,以解决实际工程问题。这些成果被总结成以实际液体为对象的重实用的水力学。代表人物有皮托(H. Pitot)、谢才(A. de Chezy)、达西(H. Darcy)等。1732 年,皮托发明了量测流体流速的皮托管。1856 年,达西提出了线性渗流的达西定律。1883 年,雷诺(O. Reynolds)发表了关于层流、紊流两种流态的系列试验结果,又于 1895 年导出了紊流运动的雷诺方程。1904 年,普朗特(L. Prandtl)提出边界层概念,创立了边界层理论。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算实际物体运动时的阻力。

侧重于理论分析的流体力学称为理论流体力学;侧重于工程应用的流体力学称为工程流体力学,其中采用各种元器件控制封闭空间内流体运动的流体力学称为液压流体力学。最早的流体力学又称为水力学,主要研究没有摩擦的理想流体的流动,且局限于数学分析,局限在水及其应用领域。经典分析理想流体运动的水力学与实际流体(液体和气体)研究相结合,形成流体力学。现代流体力学是水动力学的基本原理与试验数据的结合,试验数据可以用来验证理论或为数学分析提供基础数据。

1.1.2 液压元件

1) 流体传动与控制学科的由来

从公元前到公元后人类开始认识自然,大约 5 000 年前发明了文字,逐步形成文化和自然科学,走进了文明。源于人们对地球生活的认知,公元前 250 年古希腊数学家阿基米德发现浮力定律,202 年曹冲称象,其中阿基米德浮力定律直到 1627 年才传入中国,这距离发现该定律约 1 880 年的时间。1654 年,法国物理学家帕斯卡发现静止流体可以传递力和功率的规律。1738 年,伯努利建立无黏性流体的能量方程。1821—1845 年,纳维和斯托克斯导出了黏性流体的运动方程,即 N-S 方程。1883 年,雷诺提出了层流、紊流两种流态及其判定准则。1904 年,普朗特提出边界层概念,明确了理想流体的适用范围,可用于计算实际物体运动时的阻力。至此,薪火相传,人们花了 200 多年时间就已经形成了较为完善的流体力学理论。此后的近百年,相继发明了各种液压元件。1911 年,英国 H. S. Hele Shaw 申请径向柱塞泵与马达专利;1935 年,瑞士 Hans Thoma 发明斜轴式轴向柱塞泵;1931 年,美国 H. F. Vickers 发明先导式溢流阀;1942 年,美国 Jean Mercier 发明皮囊式蓄能器。后来发现了电、磁现象和磁材料。

1925年,德国 Askania 发明射流管阀结构;1946年,英国 Tinsley 获得两级阀专利;1950年,美国 W. C. Moog 发明双喷嘴挡板式电液伺服阀;1957年, R. Atchley 研制两级射流管伺服阀;1970年,Moog 公司开发两级偏转板伺服阀;1996年,日本 K. Araki 研制气动伺服阀;1995年,S. Hayashi 研究双级溢流阀的稳定性与现象。1965年以来,我国航天第 803 所、第 18 所,航空第 609 所等相继研制各种液压伺服机构及其电液伺服阀,并为国家重大工程提供了具有自主知识产权的核心元器件保障。日新月异,科学家发明各种液压元件和机器,形成工业基础并改变世界只用了 80 多年的时间。

流体传动与控制专业是以流体(液体、气体)作为工作介质,进行液、气、机、电的能量与信息一体化传递和控制的交叉学科。机械学是利用物理定律研究各类机械产品功能综合、定量描述和性能控制,应用机械系统相关知识和技术,发展新的设计理论与方法的基础技术科学。从流体传动与控制专业的历史来看,美国 MIT 的 Blackburn 等总结前人所做的大量液压技术和实践的成果,1960 年撰写了液压理论和技术专著《流体动力控制》,为后继液压产品的基础研究和应用研究做了良好的铺垫,从此开始可以在大学课堂上集中讲授流体传动与控制的相关知识,教育史上直接通过高校来培养液压专业的技术人才,并形成了流体传动与控制专业。

从我国流体传动与控制专业历史来看,1981 年开始招收和培养本专业硕士研究生,1983 年开始招收和培养本专业博士研究生,上海交通大学、西安交通大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、浙江大学成为我国第一批流体传动与控制专业博士学位授权点。我国高校和工业界最初是将苏联、美国、德国、日本等地的著作翻译成中文版,同时我国科技工作者结合自己所取得的科研成果和大学人才培养需要,组织集体撰写和编著了一些代表性著作和专业教材,这些初期的编著和教材为我国专业人才培养和工业进步发挥了重要作用。西安交通大学史维祥从苏联留学回国后,以苏联军工机床与工具中的液压传动为例,归纳撰写了关于流体传动控制方面的专著《液压随动系统》(上海科学技术出版社,1965);上海交通大学严金坤编写教材《液压元件》(1979),还将非对称阀、蓄能器与管路系统科研成果撰写编著《液压动力控制》(1986);曲以义翻译日本荒木献次论文并撰写专业教材《气压伺服系统》(1986);陆元章以煤炭机械为主编著《液压系统的建模与分析》(1989);哈尔滨工业大学李洪人参考美国 H. E. Merritt 书籍主编教材《液压控制系统》(1981);北京航空航天大学王占林等编写专业教材《飞机液压传动与伺服控制》(1979);浙江大学盛敬超编写《液压流体力学》(1980)。我国航天科技工作者在中华人民共和国成立以来坚持独立自主、自力更生方针,走出了自己的技术道路,形成了重要的理论体系与实践经验。20 世纪 80 年代,国家组织专家和工程技术人员,编著了《导弹与航天丛书》;宇航出版社出版了液体弹道导弹与运载火箭系列丛书,包括流体传动与控制专业的经典著作《电液伺服机构制造技术》(1992)、《电液伺服阀制造工艺》(1988)、《推力矢量控制伺服系统》(1995)等。

典型的液压传动系统由能源部分、控制部分、执行机构、辅助装置和工作介质五个部分组成(图 1-4)。其中能源部分由电动机或柴油机或燃气轮机等初级能源、液压泵组成,将电能等能源转换为机械能驱动液压泵,再转换为液压能,电动机等驱动液压泵高速旋转并从油箱吸油,通过液压泵的出口排出液压油,将承载能量和信息的流体工作介质输送至控制部分。控制部分由各种控制阀组成,如溢流阀、单向阀、减压阀、分流阀、节流阀等,实现液压负载需要的流体的参数控制,包括压力、流量、方向。执行机构主要有与负载直接相连接的液压马达、液压油

缸等,用于传递液体压力或流量,实现负载的运动控制。辅助装置由油箱、油滤、管件、蓄能器、冷却器、密封件等组成。工作介质是指液压系统中传递能量和信息的液压油,流体传动系统按工作介质可分为液压系统(日本等地称为油压系统)、水压系统和气动系统。与机械传动、电传动相比,液压传动具有重量轻、结构紧凑的特点,例如采用相同功率的液压马达的体积只有电动机的12%~13%。液压泵转速2500~3000 r/min,额定压力24 MPa,其功率重量比为1.5~2 N/kW,而相同功率的电动机的功率重量比为15~20 N/kW,液压泵功率重量比只有电动机的10%。此外,液压传动转动惯量小、快速性好,可以实现大范围的无级调速,传递运动平稳、安全,便于实现自动化,具有溢流阀过载保护,安全性高。

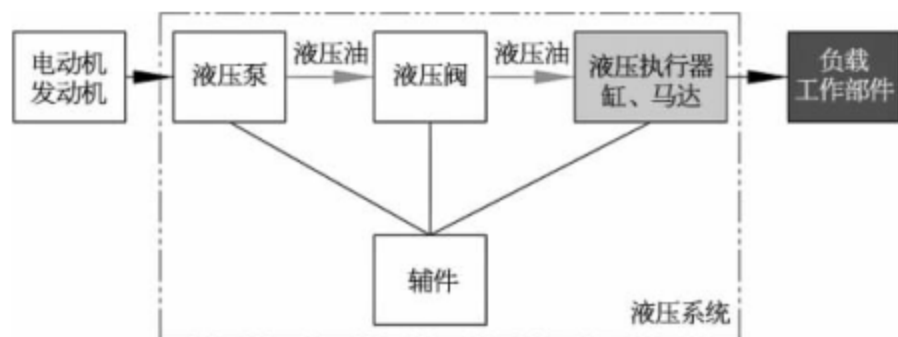


图 1-4 典型液压传动系统构成图

2) 电液伺服阀

18 世纪末至 19 世纪初,欧洲人发明了单级射流管阀及单级单喷嘴挡板阀、单级双喷嘴挡板阀,如图 1-5 所示。第二次世界大战期间,随着新材料的出现,人们发明了螺线管、力矩马达,之后双级电液伺服阀(seroalve)、带反馈的双级电液伺服阀相继问世。例如 Askania 调节器公司及 Askania-Werke 发明并申请了射流管阀的专利。Foxboro 发明了喷嘴挡板阀并获得专利。如今这两种结构多数用于电液伺服阀的前置级,控制功率级滑阀的运动。德国 Siemens 发明了一种具有永磁马达及接收机械与电信号两种输入的双输入阀,并开创性地使用在航空领域。第二次世界大战末期,伺服阀阀芯由螺线管直接驱动,属于单级开环控制。随着理论和技术的成熟,特别是军事需要,电液伺服阀发展迅速。1946 年,英国 Tinsley 获得了两级阀的专利;美国 Raytheon 和 Bell 航空发明了带反馈的两级电液伺服阀;MIT 采用力矩马达代替螺线管,驱动电液伺服阀需要的消耗功率更小、线性度更好。1950 年,W. C. Moog 发明了单喷嘴两级伺服阀。1953—1955 年,T. H. Carson 发明了机械反馈式两级伺服阀;W. C. Moog 发明了双喷嘴两级伺服阀;Wolpin 发明了干式力矩马达,消除了原来浸在油液内的力矩马达由油液污染带来的可靠性问题。1957 年, R. Atchley 利用 Askania 射流管原理研制了两级射流管伺服阀,并于 1959 年研制了三级电反馈伺服阀。

20 世纪 60 年代,电液伺服阀大多数为具有反馈及力矩马达的两级伺服阀。第一级与第二级形成反馈的闭环控制;出现弹簧管后产生了干式力矩马达;第一级的机械对称结构减小了温度、压力变化对零位的影响。航空航天和军事领域出现了高可靠性的多余度电液伺服阀。Moog 公司在 1963 年起陆续推出了工业用电液伺服阀,阀体多采用铝材或钢材;第一级独立,方便调整与维修;工作压力有 14 MPa、21 MPa、35 MPa。Vickers 公司研制了压力补偿比例阀。Rexroth、Bosch 研制了用两个线圈分别控制阀芯两方向运动的比例阀。20 世纪 80 年代之前,电液伺服阀力矩马达的磁性材料多为镍铝合金,输出力有限。目前多采用稀土合金磁性



图 1-5 电液伺服阀的历史

材料,力矩马达的输出力大幅提高。

电液伺服阀种类较多,目前主要有双喷嘴挡板式电液伺服阀、射流伺服阀、直动型电液伺服阀、电反馈电液伺服阀及动圈式/动铁式/单喷嘴电液伺服阀。喷嘴挡板式电液伺服阀的主要特点表现在结构较简单、制造精密、特性可预知、无死区、无摩擦副、灵敏度高、挡板惯量小、动态响应高,缺点是挡板与喷嘴间距小、抗污染能力差。射流伺服阀的主要特点表现在喷口尺寸大、抗污染性能好、容积效率高、失效对中、灵敏度高、分辨力高,缺点是加工难度大、工艺复杂。表 1-1 为喷嘴挡板式电液伺服阀和射流伺服阀的先导级最小尺寸对比。图 1-6 为喷嘴挡板式电液伺服阀、射流管伺服阀和偏转板伺服阀的最小尺寸。可见,喷嘴挡板式电液伺服阀性能好、对油液清洁度要求高,常用在导弹、火箭等的舵机电液伺服机构场合。射流伺服阀抗污染能力强,特别是先通油、先通电均可,阀内没有喷嘴挡板式电液伺服阀那样的碰撞部件,只有一个喷嘴,即使发生堵塞也能做到“失效对中”和“事故归零”,即具有“失效→归零”“故障→安全”的独特能力,广泛应用于各种舰船、飞机及军用战斗机的作动器控制。

表 1-1 喷嘴挡板式电液伺服阀和射流伺服阀的先导级最小尺寸

先导级最小尺寸	位置	大小/mm	油液清洁度要求	堵塞情况
喷嘴挡板式电液伺服阀	喷嘴与挡板之间的间隙	0.03~0.05	NAS6 级	污染颗粒较大时易堵塞
射流伺服阀(射流管伺服阀与偏转板伺服阀)	喷嘴处	0.2~0.4	NAS8 级	可通过 0.2 mm 的颗粒大小