

高端装备关键基础理论及技术丛书

传动与控制

高端液压元件 理论与实践

THEORY AND APPLICATION OF ADVANCED
HYDRAULIC COMPONENT

阎耀保



上海科学技术出版社

高端装备关键基础理论及技术丛书·传动与控制

高端液压元件理论与实践

Theory and Application of Advanced Hydraulic Component

阎耀保 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系统地论述高端液压元件的理论与实践,主要内容有: 高端液压元件的由来及其演变过程,新型工作介质,射流管伺服阀及冲蚀磨损数值模拟方法,射流管压力伺服阀,偏转板伺服阀,直接驱动式电液伺服阀,飞行器单级溢流阀,极端小尺寸双级溢流阀,飞行器液压减压阀,非对称液压阀与对称不均等正开口液压滑阀,增压油箱与液压附件,双边气动伺服阀与四边气动伺服阀等。书后附有我国电液伺服阀代表单位的系列产品结构与参数。本书内容翔实,图文并茂,深入浅出,侧重系统性、专业性、前沿性,前瞻性理论与实践案例紧密结合,国家重大装备核心基础零部件(元器件)案例丰富、翔实。

本书可供从事重大装备、重点领域整机和武器系统用高端液压气动元件和装置的研究、设计、制造、试验和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

高端液压元件理论与实践 / 阎耀保著. —上海: 上海科学技术出版社, 2017. 4

(高端装备关键基础理论及技术丛书. 传动与控制)

ISBN 978-7-5478-3402-2

I. ①高… II. ①阎… III. ①液压元件—研究
IV. ①TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 309602 号

高端液压元件理论与实践

阎耀保 著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行

200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26.5

字数: 650 千字

2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3402-2/TH·64

定价: 148.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

纵观世界液压元件发明史,经历了从原理到元件、从复杂高端元件到一般工业基础件的发展过程。古希腊数学家阿基米德发现浮力定律,15 世纪初法国物理学家帕斯卡(Blaise Pascal)发现静止流体可以传递力和功率的规律以来,欧洲人和美国人在 16 世纪末至 20 世纪中叶相继发明了各种液压元件。如 1795 年英国人 Joseph Braman 发明水压机,1905 年将工作介质由水改为油,1911 年英国人 H. S. Hele-Shaw 申请径向柱塞泵与马达专利,1935 年瑞士人 Hans Thoma 发明斜轴式轴向柱塞泵与马达,1931 年美国 H. F. Vickers 发明先导式溢流阀并用于液压泵的压力控制,1942 年美国 Jean Mercier 发明皮囊式蓄能器,1950 年美国发明自增压油箱与冷气挤压式液压能源为飞行器供油。

20 世纪 40 年代以来,高端电液伺服元件原理相继诞生。德国 Askania 发明射流管阀,美国 Foxboro 发明单喷嘴挡板阀,德国 Siemens 发明双喷嘴挡板阀。1946 年英国 Tinsley 获得两级阀专利,美国 Raytheon 和 Bell 发明两级电液伺服阀,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。从此拉开了高端液压元件及其在重大装备、航空航天及舰船等领域的应用序幕。第二次世界大战前后,出于军事和宇航开发的需要,美国空军先后组织四十余个早期机构,研制了各种形式的单级和双级电液伺服阀,形成了电液伺服元件新结构、新原理、试制产品,并撰写了包括各类电液伺服元件数学模型、传递函数、功率键合图、实验等内容的国防科技报告,但保密 30~50 年。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。多年来,极端温度、极端尺寸、极端环境、高性能的高端液压元件理论和技术已经被列为各国重点研究的课题,公开著作尚不多见。

核心基础零部件(元器件)已列为《中国制造 2025》实施工业强基工程的重点突破瓶颈之一。针对百余年来高端装备一直被国外垄断的现状,本书作者结合多年来从事重大装备和武器系统研制过程中的实践成果,包括作者所承担的国防武器系统、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、航空科学基金、上海市浦江人才计划项目,系统地及时地总结了二十余年潜心研究高端液压元件的基础理论与实践案例,涉及航天能源与舵机、航空装备、智能工程机械、海洋工程装备和智能装备等方面。全书共分为 14 章。第 1 章绪论,着重阐述液压元件的由来,电液伺服元件和高端液压元件的演变过程,主要介绍世界液压元件的产生背景及过程。第 2 章工作介质,介绍新型液压油、磷酸酯液压油、喷气燃料(燃油)、航天煤油、自然水(淡水与海水)、压缩气体(空气、氮气、惰性气体)、燃气发生剂与燃气介质等的成分和特性。第 3、4 章射流管伺服阀和压力伺服阀,叙述射流管伺服阀数学模型、压力特性、射流负压现象以及

前置级冲蚀磨损数值模拟方法,压力伺服阀结构与特性。第5章阐述偏转板伺服阀原理与静态特性,流场规律与卡门涡街现象。第6章直接驱动式电液伺服阀,包括由来、旋转直接驱动式电液伺服阀、大流量电气四余度液压双余度两级直接驱动伺服阀。第7、8、9章介绍飞行器单级溢流阀、极端小尺寸的集成式双级溢流阀、飞行器液压减压阀,着重介绍新结构和整体集成式一体化设计方法,包括新原理、振动环境下的数学模型、双级溢流阀稳定性与极端尺寸之间的关系,典型应用案例。第10、11章描述非对称液压阀和对称不均等正开口液压滑阀的新原理、阀特性与阀控缸特性。第12章介绍闭式液压系统增压油箱与液压附件结构与原理。第13、14章阐述双边气动伺服阀与四边气动伺服阀结构、特性及气动阀控缸典型案例。为便于读者了解电液伺服阀结构、性能,附录列出了电液伺服阀术语与定义,以及我国电液伺服阀高端产品。本书旨在为我国重大装备和武器系统的研究、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,也希望为探索高端液压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、重点领域整机核心元件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。

本书根据作者多年来在国外和国内的实践经验和理论成果系统地凝练、归纳而成,包括作者与南京机电液压工程研究中心郭生荣、上海航天控制技术研究所傅俊勇等同仁的共同研究成果。附录由上海航天控制技术研究所张鑫彬、南京机电液压工程研究中心方向、中航工业西安飞行自动控制研究所牛世勇、中国运载火箭技术研究院第十八研究所王书铭、上海衡拓液压控制技术有限公司金瑶兰、上海诺玛液压系统有限公司曹涌提供素材编写而成。在出版过程中得到了上海科学技术出版社、上海市教育委员会和上海市新闻出版局“上海高校服务国家重大战略出版工程”、同济大学研究生教材出版基金的大力支持和帮助。同济大学閻耀保教授研究室博士研究生原佳阳、王玉、李长明、张曦,硕士研究生张鹏、傅嘉华、张晓琪、张阳进行成果归纳工作,2009—2016年硕士生进行资料整理工作。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。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

著者

2016年10月

第 1 章 绪论	1
1.1 液压元件的由来	1
1.1.1 流体静力学	1
1.1.2 柱塞机械与液压泵液压马达	2
1.1.3 溢流阀	5
1.1.4 蓄能器	8
1.1.5 增压油箱	8
1.2 电液伺服元件及其演变过程	11
1.3 高端液压元件及其演变过程	15
参考文献	16
第 2 章 液压与气动系统的工作介质	19
2.1 液压油	19
2.2 磷酸酯液压油	21
2.3 喷气燃料(燃油)	22
2.4 航天煤油	24
2.5 自然水(淡水与海水)	25
2.6 压缩气体(空气、氮气、惰性气体)	26
2.7 燃气发生剂	27
参考文献	28
第 3 章 射流管伺服阀	29
3.1 概述	29
3.2 射流管伺服阀前置级压力特性	31
3.2.1 数学模型	33
3.2.2 压力特性	35
3.3 射流管伺服阀前置级冲蚀磨损数值模拟	39
3.3.1 射流管伺服阀冲蚀机理	40
3.3.2 射流管伺服阀冲蚀磨损理论	41

3.3.3	射流管伺服阀冲蚀磨损仿真	44
3.3.4	案例分析	48
	参考文献	50
第4章	压力伺服阀	52
4.1	概述	52
4.1.1	压力伺服阀的由来	52
4.1.2	压力伺服阀的工程应用案例	56
4.2	压力伺服阀的基本原理与结构	63
4.2.1	弹簧式单级减压阀	63
4.2.2	喷嘴挡板式压力伺服阀	65
4.2.3	射流管压力伺服阀	67
4.3	带动压反馈的射流管压力伺服阀数学模型与特性	69
4.3.1	力矩马达与反馈杆组件力矩方程	69
4.3.2	射流管阀前置级控制压力方程	69
4.3.3	反馈阀芯组件力平衡方程	70
4.3.4	滑阀力平衡方程	70
4.3.5	压力特性与频率特性	71
4.3.6	射流管压力伺服阀控单作用液压缸	72
4.3.7	油温对射流管伺服阀力矩马达振动特性的影响	75
	参考文献	78
第5章	偏转板伺服阀	79
5.1	偏转板伺服阀的由来与演变	79
5.2	偏转板伺服阀工作原理及特点、应用	89
5.2.1	结构分类及工作原理	89
5.2.2	主要特点与应用	91
5.3	偏转板伺服阀压力特性	93
5.3.1	接收器有效接收面积	93
5.3.2	压力特性模型	94
5.3.3	压力特性及其影响因素	96
5.3.4	工程应用案例	99
5.4	偏转板伺服阀数学模型与频率特性	100
5.4.1	力矩马达与反馈杆组件	100
5.4.2	偏转板射流前置级模型	101
5.4.3	圆柱滑阀功率级模型	102
5.4.4	偏转板伺服阀频率响应特性	103
5.5	偏转板伺服阀前置级流场	108
5.5.1	偏转板伺服阀前置级流场模型	108

5.5.2	流场分布规律	109
5.5.3	偏转板伺服阀气穴现象与改善措施	112
5.5.4	工程应用案例	115
5.6	偏转板伺服阀旋涡现象	115
5.6.1	流体绕曲面流动的旋涡现象	115
5.6.2	偏转板伺服阀的旋涡现象	116
5.6.3	偏转板伺服阀的卡门涡街现象	118
	参考文献	121
第6章	直接驱动式电液伺服阀	123
6.1	概述	123
6.1.1	直接驱动式电液伺服阀的由来	123
6.1.2	直接驱动式电液伺服阀结构演变	127
6.1.3	直接驱动式电液伺服阀国外专利	130
6.1.4	直接驱动式电液伺服阀在航空飞行器上的应用	133
6.2	直接驱动式电液伺服阀的原理与特点	136
6.2.1	分类及工作原理	136
6.2.2	特点及关键技术	137
6.3	旋转直接驱动式电液伺服阀	138
6.3.1	工作原理	138
6.3.2	数学模型	139
6.3.3	稳定性	142
6.3.4	基本特性	144
6.3.5	振动冲击环境下旋转直接驱动式电液伺服阀的特性	145
6.4	大流量电气四余度液压双余度两级直接驱动式电液伺服阀	147
6.4.1	工作原理	148
6.4.2	数学模型	149
6.4.3	基本特性	151
6.4.4	传递函数	153
6.4.5	结构参数对性能的影响	154
	参考文献	155
第7章	飞行器单级溢流阀	157
7.1	概述	157
7.2	带平衡活塞固定节流器单级溢流阀结构与原理	158
7.3	工作点、基本方程与基本特性	159
7.3.1	工作点	159
7.3.2	基本方程	160
7.3.3	基本特性	162

7.4	数学模型、动态特性及其影响因素	164
7.4.1	数学模型	165
7.4.2	稳态工作点	167
7.4.3	动态特性影响因素	167
7.5	振动环境下的单级溢流阀	171
7.5.1	振动环境下阀芯开启前阀的数学模型	172
7.5.2	振动环境下阀芯开启后溢流阀的数学模型	173
7.5.3	振动环境下动态特性	174
7.5.4	耐振动环境的制振措施	176
7.6	单级溢流阀液压系统的工程应用案例	177
7.6.1	导弹电液能源系统频率特性理论分析	177
7.6.2	数值计算及其程序	179
7.6.3	工艺措施	180
7.6.4	案例分析	181
	参考文献	181
第8章	极端小尺寸的集成式双级溢流阀	183
8.1	概述	183
8.2	双级溢流阀先导阀与主阀的匹配关系	185
8.2.1	双级溢流阀数学模型	186
8.2.2	主阀尺寸和先导阀尺寸对先导阀稳定性的影响	188
8.2.3	双级溢流阀主阀与先导阀匹配关系	191
8.2.4	空间尺寸限制时双级溢流阀存在的问题	192
8.3	主阀与先导阀之间串加阻尼的极端小尺寸集成式双级溢流阀	192
8.3.1	先导阀前腔串加阻尼孔的双级溢流阀	192
8.3.2	普通双级溢流阀与新型双级溢流阀动态特性	195
8.3.3	案例与设计方法	196
8.4	振动环境下集成式双级溢流阀的数学模型与特性	198
8.4.1	振动环境下溢流阀的数学模型	200
8.4.2	案例与特性	202
8.5	集成式双级溢流阀先导阀供油流道布局	206
8.5.1	双级溢流阀主阀与先导阀内部流道	206
8.5.2	先导阀供油流道的流场	208
8.5.3	工程应用案例	210
	参考文献	211
第9章	飞行器液压减压阀	213
9.1	结构特点和工作原理	213
9.2	数学模型	215

9.2.1	阀芯移动前的动态特性	215
9.2.2	工作压力下的动态方程	217
9.2.3	工作压力下的稳态特性	217
9.3	基本特性及其影响因素	218
9.3.1	出口压力特性和固定节流器的影响	218
9.3.2	固定节流口的影响	219
9.3.3	压力感受腔的影响	219
9.3.4	出口压力恒定	220
	参考文献	220
第 10 章	非对称液压阀	222
10.1	零开口非对称液压阀控非对称缸的动力机构	222
10.1.1	液压缸换向前后的压力突变	224
10.1.2	负载边界	226
10.2	非对称液压阀控制系统速度增益特性	226
10.2.1	零开口阀控液压缸动力机构速度增益特性	227
10.2.2	正开口阀控液压缸动力机构速度增益特性	229
10.2.3	负载力边界	231
10.2.4	案例分析	232
10.3	液压缸和气缸的固有频率	232
10.3.1	液压缸和气缸的分类	233
10.3.2	活塞初始位置对气缸固有频率的影响	233
10.3.3	活塞初始位置对液压缸固有频率的影响	237
10.3.4	液压缸系统和气动气缸系统比较	239
	参考文献	240
第 11 章	对称不均等正开口液压滑阀	242
11.1	对称不均等液压滑阀及其压力特性	242
11.2	零位压力值与零位泄漏量	246
11.2.1	零位压力值	246
11.2.2	零位泄漏量	246
11.3	工程应用案例	246
	参考文献	247
第 12 章	增压油箱与液压附件	249
12.1	增压油箱结构及原理	249
12.1.1	飞行器液压系统增压油箱结构与分类	249
12.1.2	气体增压油箱	250
12.1.3	自增压油箱	251

12.1.4	具有增压油箱的飞行器液压能源系统	253
12.1.5	增压油箱关键技术	255
12.1.6	增压油箱应用案例	256
12.2	液压过滤器	268
12.3	液压压力开关	270
12.3.1	活塞式压力开关	270
12.3.2	弹簧管压力开关	270
12.3.3	压力计隔离阀	271
	参考文献	271
第 13 章	双边气动伺服阀	272
13.1	对称双边气动伺服阀	272
13.1.1	具有不均等正开口量的对称双边气动伺服阀结构	272
13.1.2	滑阀式对称双边气动伺服阀数学模型	273
13.1.3	滑阀式对称双边气动伺服阀基本特性	275
13.2	非对称双边气动伺服阀	277
13.2.1	非对称双边气动伺服阀结构	277
13.2.2	数学模型	279
13.2.3	压力特性与泄漏量特性	280
13.2.4	试验装置及实践案例	282
13.3	非对称双边气动伺服阀控气动压力控制系统	284
13.3.1	非对称气动伺服阀控缸压力控制系统	284
13.3.2	非对称气动伺服阀基本特性	285
13.3.3	数学模型	286
13.3.4	气动压力控制系统基本特性	291
	参考文献	292
第 14 章	四边气动伺服阀	295
14.1	对称均等负重合型四边气动伺服阀	295
14.1.1	数学模型	296
14.1.2	控制口压力特性与节流口流动状态	297
14.1.3	零位特性	299
14.2	对称负重合型四边气动伺服阀零位流动状态	300
14.2.1	负重合量不均等系数与供、排气压力比	300
14.2.2	数学模型	301
14.2.3	各阀口可能的流动状态	302
14.2.4	计算案例	306
14.2.5	案例及其分析	309
14.3	对称不均等负重合型四边气动伺服阀	310

14.3.1	数学模型	311
14.3.2	压力特性与泄漏量特性	313
14.3.3	工程应用案例	316
	参考文献	317
附录	320
附录 1	电液伺服阀术语与定义	320
附录 2	上海航天控制技术研究所电液伺服阀	326
2.1	小流量电液伺服阀	326
2.2	工业用电液伺服阀	327
2.3	动压反馈式电液流量伺服阀	328
2.4	冗余电液流量伺服阀	330
2.5	直驱式电液流量伺服阀	331
2.6	射流管伺服阀	332
2.7	压力电液伺服阀	333
附录 3	上海衡拓液压控制技术股份有限公司射流管伺服阀	335
3.1	CSDY 型射流管电液伺服阀	335
3.2	DSDY1 三线圈电余度射流管电液伺服阀	341
3.3	CSDK 系列抗污染电液伺服阀	342
3.4	CSDY2-70G 型高温电液伺服阀	344
3.5	YF-60 型电液伺服阀	345
3.6	YF415B 型高压电液伺服阀	346
3.7	YF425B 型高压大流量电液伺服阀	347
3.8	WS113 系列燃油电液伺服阀	348
3.9	YS-187 型压力伺服阀	349
附录 4	上海诺玛液压系统有限公司电液伺服阀	350
4.1	双喷嘴挡板两级电液伺服阀	350
4.2	射流管伺服阀	355
附录 5	中国运载火箭技术研究院第十八研究所电液伺服阀	359
5.1	产品代号示例	359
5.2	主要产品及性能	361
附录 6	中航工业西安飞行自动控制研究所电液伺服阀	377
6.1	喷嘴挡板式双级电液伺服阀	377
6.2	喷嘴挡板主备式自检测双级电液伺服阀	378
6.3	喷嘴挡板式高压双单级电液伺服阀	379
6.4	偏转板射流电液伺服阀	380
6.5	射流管电液伺服阀	381
附录 7	南京机电液压工程研究中心特殊电液伺服阀	382
7.1	燃油介质电液伺服阀	382
7.2	磷酸酯介质电液伺服阀	384

7.3	高抗污能力电液伺服阀	385
7.4	防爆电液伺服阀	387
7.5	水下用电液伺服阀	388
7.6	高响应电液伺服阀	389
7.7	压力-流量电液伺服阀	391
7.8	压力电液伺服阀	392
7.9	特殊单级伺服阀	395
7.10	余度电液伺服阀	401
7.11	廉价电液伺服阀	404
7.12	耐高压电液伺服阀	404
7.13	其他特殊电液伺服阀	405
7.14	零偏手动可调电液伺服阀	407
7.15	大流量电液伺服阀	408
7.16	偏导射流电液伺服阀	410

1.1 液压元件的由来

1.1.1 流体静力学

流体静力学可追溯到古希腊哲学家阿基米德(前 287—前 212)。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“Eureka(恍然大悟、顿悟)”,意思是“找到办法了”。阿基米德浮力定律 1627 年才传入中国。我国流体静力学应用事例,有秦昭王(前 325—前 251)将水灌入洞中利用浮力寻找木球,曹冲(196—208)称象,书籍记载“置象于船上,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”等典故。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)在 1646 年表演了著名的裂桶试验。如图 1.1 所示,他将 10 m(32.8 ft)长的空心

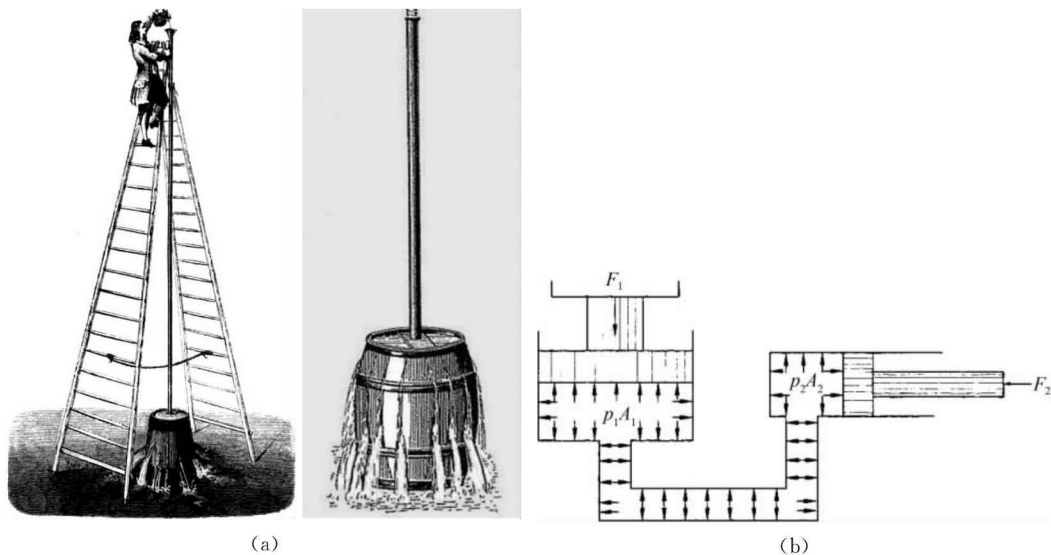


图 1.1 流体静压力传递的帕斯卡定律

(a) 流体静压力的帕斯卡裂桶实验(帕斯卡,1646); (b) 帕斯卡定律(帕斯卡,1654)

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。尽管只往垂直的空心细管中注入了一杯水,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,桶内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。后来,为纪念法国物理学家帕斯卡,国际单位制中压强的基本单位采用帕斯卡(Pa)表示,简称帕($1\text{ Pa}=1\text{ N/m}^2$)。

1795 年英国人布拉曼(Joseph Braman)基于帕斯卡定律利用水作为工作介质,发明了水压机。如图 1.2 所示,由人工操作并往复提压操纵杆将水箱中的液体通过管道压入缸筒中,继而推动液压缸活塞杆 6 伸出,完成重物抬升并在静止的桁架顶板之间形成对重物的挤压作用。由于活塞 2 的直径小于活塞 6 的直径,因此仅需要较小的驱动力就可产生较大的挤压作用。1905 年人们将工作介质由水改为油,由此诞生了以液压油作为介质的液压传动。

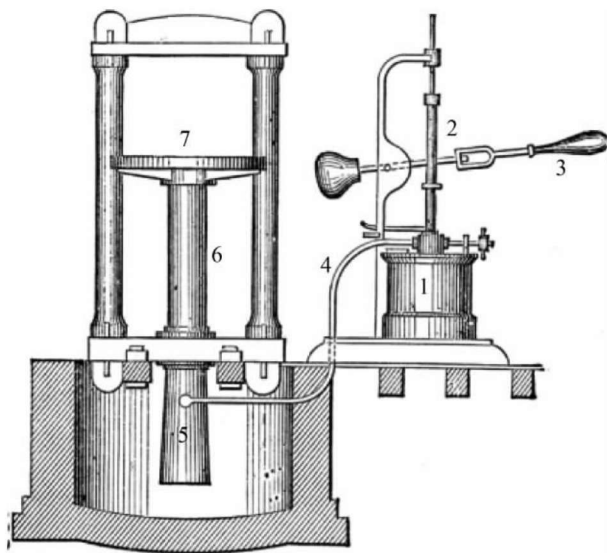


图 1.2 水压机(英国人布拉曼,1795)

1—水箱; 2、6—活塞; 3—操纵杆; 4—管道; 5—缸筒; 7—重物

1.1.2 柱塞机械与液压泵液压马达

近代历史上,英美发明的典型液压元件相继问世。1911 年英国人 H. S. Hele-Shaw 申请了初期的径向柱塞泵与马达专利。如图 1.3 所示,提出在传动轴与径向柱塞组件之间设置一定的偏心量,当传动轴转动时,带动柱塞组件转动的同时,柱塞由于偏心布局而在径向产生一定位移的运动,形成柱塞和柱塞缸体之间的容腔体积变化,产生配油的供给过程。

1935 年瑞士人 Hans Thoma 在德国发明了斜轴式轴向柱塞泵与马达。如图 1.4 所示,将传动轴与缸体布置在不同轴线且通过曲柄连杆相连接,柱塞与缸体在同一轴线上,当传动轴旋转时,曲柄连杆带动活塞在缸体内做轴向相对运动,形成柱塞与缸体之间体积的变化,实现吸排油过程。1960 年,Hans Thoma 又发明了斜盘式轴向柱塞泵。如图 1.5 所示,将传动轴与缸体布置在同一轴线上,斜盘与缸体轴线之间具有一定倾斜角度。当传动轴转动时,带动缸体转动,柱塞

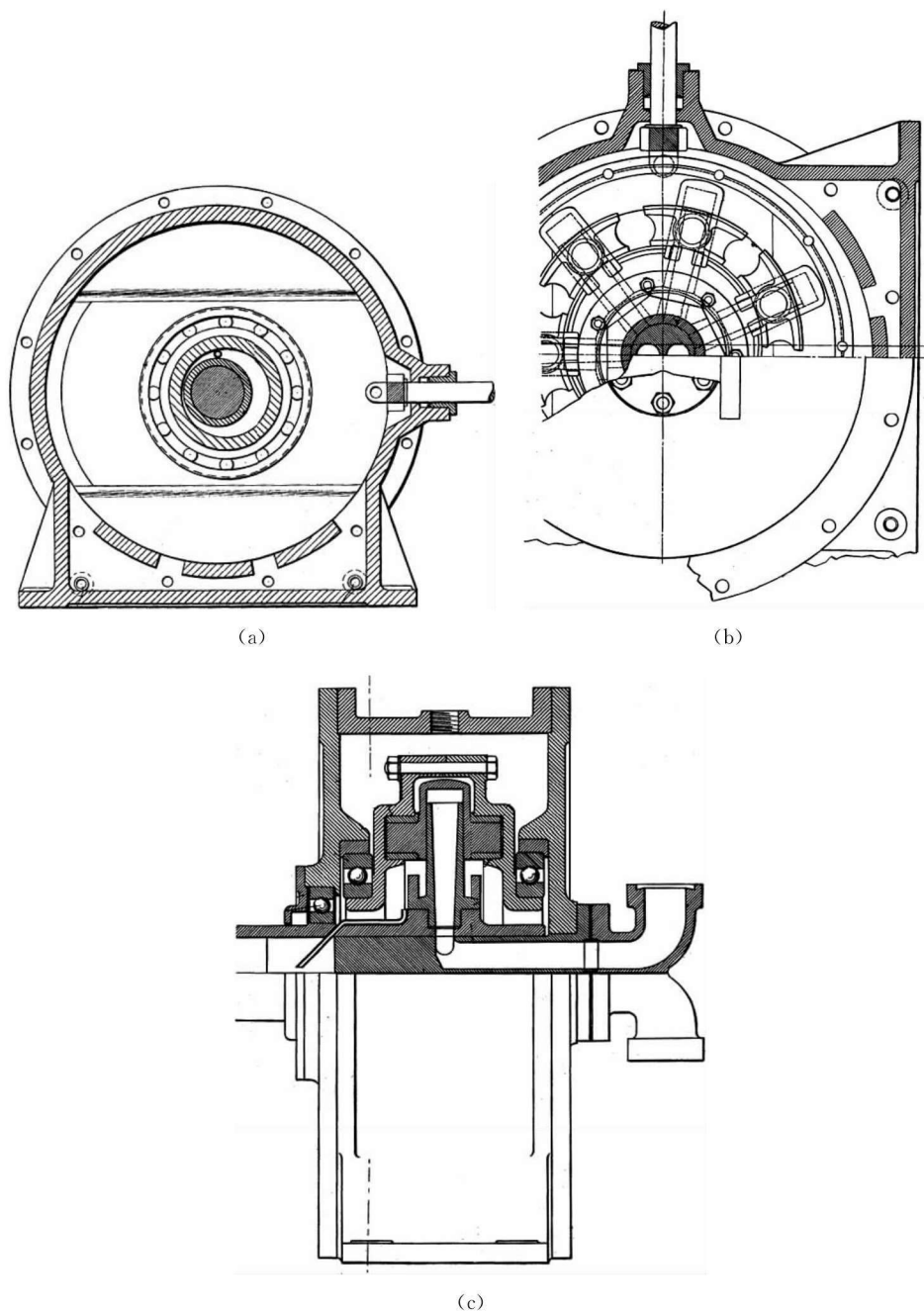


图 1.3 初期的径向柱塞泵与马达专利(英国人 H. S. Hele-Shaw, 美国专利 US1077979, 1911—1913)

(a) 传动轴与径向柱塞组件的偏心机构; (b) 径向柱塞布局; (c) 柱塞容腔配油过程

在缸体内随缸体转动的同时,由于柱塞球头一端与斜盘端面相约束,形成柱塞在缸体内的轴向往复移动,造成柱塞与缸体之间封闭容腔体积的变化,实现吸排油动作。同时还提出了双缸体组合式轴向柱塞泵结构,实现了大排量输出功能。

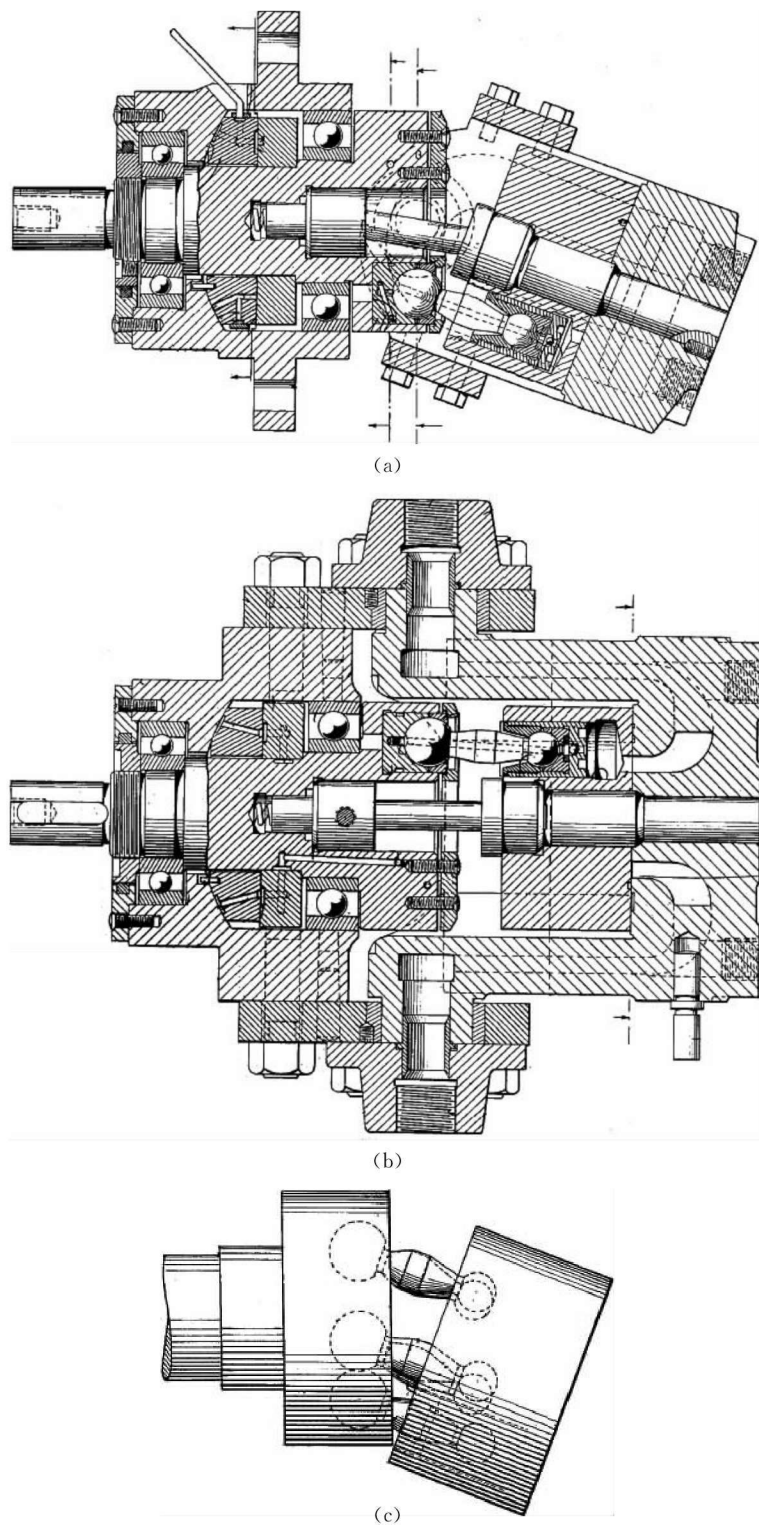


图 1.4 斜轴式轴向柱塞泵与马达(瑞士人 Hans Thoma, 美国专利 US2155455, 1935—1939)

(a) 斜轴式轴向柱塞泵转动轴与缸体组件的连接; (b) 曲柄连杆带动活塞吸排油过程;
(c) 传动轴与缸体组件的曲柄连杆