



普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等院校机电工程类规划教材

流体力学与流体传动

Hydrodynamics and Fluid Transmission

马恩 等 编著

清华大学出版社

普通高等院校机电工程类规划教材

流体力学与流体传动

Hydrodynamics and Fluid Transmission

马恩 等 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

(Brief introduction of contents)

本书为普通高等教育“十三五”规划教材,是针对 21 世纪人才培养和教学改革的需要,配合教育部实施的“质量工程”,在总结国内外众多院校教学实践和科学研究成果的基础上编写的,并配有多媒体课件。全书共分为 16 章。第 1 章概述液压与气压传动的工作原理、组成、图形符号、优缺点、应用和发展;第 2 章讲述液压传动工作介质的性质和选用等;第 3 章介绍液压流体力学基础知识;第 4~7 章分别讲述液压动力元件、液压执行元件、液压控制元件和液压辅助元件;第 8 章讲述液压传动基本回路;第 9 章讲述典型液压传动系统分析;第 10 章讲述液压传动系统的设计与计算;第 11~16 章分别讲述气压传动基础知识、气源装置与辅助元件、气动执行元件、气动控制元件、气动基本回路和控制系统分析。每章都有学习指南、能力培养目标、案例教学实例、重点和难点课堂讨论及小结,每章后附有思考题和习题。附录 A 中简明扼要地介绍了最新国家推荐性标准 GB/T 786.1—2009 中规定的部分液压与气压传动图形符号,附录 B 为关键词和术语的中英文对照。

本书可作为我国高等学校机械设计制造及其自动化、动力与车辆工程、汽车服务工程、机械工程及自动化和机械电子工程等专业的教材,也可供从事液压技术的工程技术人员和研究人员学习和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与流体传动/马恩等编著. —北京:清华大学出版社,2018

(普通高等院校机电工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-49095-1

I. ①流… II. ①马… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 298806 号

责任编辑:许 龙 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:26

字 数:630 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:59.80 元

产品编号:075067-01

前 言

(Foreword)

本书是普通高等教育“十三五”规划教材。为了适应我国现代工业自动化飞速发展的要求,满足 21 世纪人才培养和教学改革的需要,作者在多年教学、科研和生产实践的基础上总结同类教材的编写经验,并汲取本学科国内外最新的教学和科研成果精心组织编写。

流体力学与流体传动技术是自动化和智能制造生产中的先进科学技术之一,在现代科学技术发展中占有非常重要的地位。

本书包含流体力学、液压传动和气压传动三部分内容,全书共分 16 章。每章都有学习指南、能力培养目标、案例教学实例、重点和难点课堂讨论及小结,每章后附有习题。本书配有电子课件,使用本教材的任课老师可向作者或出版社索取,邮箱地址:maenmaen@163.com。

在编写过程中,力求贯彻少而精、系统性强、理论联系实际的原则,紧密结合液压与气动技术最新成果,注重理论教学和实训教学密切结合,突出最新液压气动元件、技术及其应用,注重学生在知识的应用和解决实际问题的能力,注重工程应用素质等方面的培养,使学生具有独立从事液压气动系统工程设计、制造、安装、调试、试验、维修保养和应用的综合能力。

本书适用于普通工科院校机械设计制造及其自动化、机械工程及自动化、汽车服务工程、机械电子工程、动力与车辆工程等专业,也适用于各类成人高校和参加自学考试的机械类学生,还可供从事液压技术的工程技术人员和研究人员学习和参考。在教学过程中,可以针对不同专业的要求和特点,有所侧重地加以选择。

参加本书编写的有:南阳理工学院马恩教授(第 1、3、4、6、9、10、16 章、附录 B),洛阳拖拉机研究所李素敏高级工程师(第 2 章),河南科技大学曹艳玲副教授和南阳师范学院马世榜副教授(第 5 章),宿迁学院唐友亮副教授和南京工程学院高佩川教授(第 7 章),西安交通大学马宇骋博士(第 8、13、14、15 章、附录 A),洛阳理工学院吴锐副教授和河南科技学院安爱琴副教授(第 11 章),湖南工学院崔晓利教授和徐州工程学院张元越副教授(第 12 章)。全书由马恩教授完成英文翻译、统稿和修改定稿,由河南科技大学博士生导师周志立教授主审。

本书是在河南省科技厅重点科技攻关计划项目(142102210313)、河南省教育厅重点科学技术研究计划项目(14A460026)、河南省教育厅高等学校重点科学技术基础研究计划项目(18A460026)和南阳理工学院教育教学改革研究计划项目(NIT2017JY-039)的资助下完成的。

由于编者水平有限以及液压技术发展迅速,加之时间仓促,书中难免存在错误、疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

马 恩
2018 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学研究的内容和方法	1
1.2 液压与气压传动的研究内容	2
1.3 液压与气压传动的工作原理及基本特征	2
1.3.1 液压与气压传动的工作原理	2
1.3.2 液压与气压传动的基本特征	3
1.4 液压传动系统的组成	5
1.5 液压传动系统的图形符号表示	6
1.6 液压传动的控制方式	6
1.7 液压传动的优缺点	7
1.8 液压传动技术的历史进展和发展趋势	8
1.8.1 液压传动技术的历史进展	8
1.8.2 液压传动技术的发展趋势	9
1.9 液压传动的应用	9
重点和难点课堂讨论	10
典型案例分析	10
本章小结	10
思考题和习题	11
第 2 章 液压传动工作介质	12
2.1 液压传动工作介质的性质和选用	12
2.1.1 液压传动工作介质的种类	12
2.1.2 液压传动工作介质的物理性质	13
2.1.3 液压传动工作介质的化学性质	18
2.1.4 液压传动系统对工作介质的主要性能要求	19
2.1.5 液压传动工作介质的选择	20
2.1.6 液压传动工作介质的使用	21
2.2 液压传动工作介质的污染和控制	22
2.2.1 液压传动工作介质污染物的种类	22
2.2.2 液压传动工作介质污染的原因	22
2.2.3 液压传动工作介质污染度的等级	23
2.2.4 液压传动工作介质污染度的测定	25
2.2.5 液压传动工作介质污染的危害	25

2.2.6 液压传动工作介质污染的控制及措施	26
重点和难点课堂讨论	28
典型案例分析	28
本章小结	29
思考题和习题	29
第3章 液压流体力学基础知识	30
3.1 液体静力学基础知识	30
3.1.1 液体静压力及特征	30
3.1.2 重力作用下静止液体中的压力分布和静力学基本方程	31
3.1.3 液体静压力的传递	32
3.1.4 绝对压力、相对压力和真空度	33
3.1.5 液体静压力作用在固体壁面上的力	33
3.2 液体动力学基础知识	34
3.2.1 流动液体的基本概念	35
3.2.2 流量连续性方程	36
3.2.3 伯努利方程	38
3.2.4 动量方程	42
3.3 液体在管路中流动时的压力损失	44
3.3.1 层流、紊流和雷诺数	45
3.3.2 沿程压力损失	46
3.3.3 局部压力损失	49
3.3.4 管路系统总压力损失	50
3.4 液体流经小孔的流量	50
3.5 液体流经缝隙的流量	52
3.6 空穴现象	60
3.7 液压冲击	61
重点和难点课堂讨论	65
典型案例分析	65
本章小结	66
思考题和习题	66
第4章 液压动力元件	68
4.1 液压泵概述	68
4.1.1 液压泵的工作原理	68
4.1.2 液压泵的分类	69
4.1.3 液压泵的图形符号	69
4.1.4 液压泵的基本性能参数和计算公式	70
4.1.5 液压泵的特性曲线和检测	71

4.2 齿轮泵	73
4.2.1 外啮合齿轮泵的工作原理	73
4.2.2 外啮合齿轮泵的排量和流量公式	73
4.2.3 外啮合齿轮泵的结构特点分析	74
4.2.4 提高外啮合齿轮泵工作压力的措施	76
4.2.5 渐开线内啮合齿轮泵	78
4.2.6 摆线内啮合齿轮泵	79
4.2.7 配装有溢流阀的内啮合齿轮泵	80
4.2.8 齿轮泵的主要性能	81
4.2.9 齿轮泵的优缺点	81
4.2.10 螺杆泵	81
4.3 叶片泵	82
4.3.1 单作用叶片泵	82
4.3.2 限压式变量叶片泵	84
4.3.3 双作用叶片泵	86
4.3.4 叶片泵的主要性能	89
4.3.5 叶片泵的优缺点	90
4.4 柱塞泵	90
4.4.1 径向柱塞泵	90
4.4.2 斜盘式轴向柱塞泵	92
4.4.3 斜轴式轴向柱塞泵	95
4.4.4 通轴式轴向柱塞泵	96
4.4.5 柱塞泵的主要性能	97
4.4.6 柱塞泵的优缺点	97
4.5 各类液压泵的主要性能及应用	97
重点和难点课堂讨论	98
典型案例分析	98
本章小结	98
思考题和习题	99
第5章 液压执行元件	100
5.1 液压缸	100
5.1.1 液压缸的分类及特点	100
5.1.2 液压缸的结构形式及安装方式	102
5.1.3 液压缸的设计与计算	107
5.1.4 液压缸的安装和常见故障分析及排除方法	111
5.2 数字控制液压缸和模拟控制液压缸	113
5.2.1 数字控制液压缸	113
5.2.2 模拟控制液压缸	114

5.3	液压马达概述	115
5.3.1	液压马达的特点和分类	115
5.3.2	液压马达的基本性能参数	115
5.4	高速液压马达	117
5.4.1	齿轮液压马达	117
5.4.2	叶片液压马达	117
5.4.3	轴向柱塞液压马达	118
5.5	低速液压马达	119
5.5.1	单作用曲轴连杆径向柱塞液压马达	119
5.5.2	多作用内曲线径向柱塞液压马达	120
	重点和难点课堂讨论	122
	典型案例分析	122
	本章小结	122
	思考题和习题	123
第6章	液压控制元件	124
6.1	液压控制阀概述	124
6.1.1	液压控制阀的基本结构和工作原理	124
6.1.2	液压控制阀的分类	124
6.1.3	液压控制阀的基本性能参数	126
6.1.4	对液压控制阀的基本要求	126
6.2	压力控制阀	126
6.2.1	溢流阀	127
6.2.2	顺序阀	133
6.2.3	减压阀	134
6.2.4	压力继电器	138
6.3	方向控制阀	139
6.3.1	单向阀	140
6.3.2	换向阀	141
6.4	流量控制阀	149
6.4.1	节流口的形式和流量特性	149
6.4.2	节流阀	152
6.4.3	调速阀	153
6.4.4	溢流节流阀	154
6.4.5	分流集流阀	155
6.4.6	限速切断阀	158
6.5	插装阀	159
6.5.1	插装阀的概述与优点	159
6.5.2	插装阀的组成和工作原理	159

6.5.3 插装压力阀	160
6.5.4 插装方向阀	160
6.5.5 插装流量阀	161
6.6 叠加阀	162
6.7 多路阀	163
6.8 电液伺服控制阀	164
6.8.1 伺服控制元件的基本类型	164
6.8.2 电液伺服控制阀	168
6.8.3 机液伺服控制阀	171
6.9 电液比例控制阀	172
6.9.1 电液比例控制阀的主要性能指标	173
6.9.2 电液比例压力控制阀	175
6.9.3 电液比例方向控制阀	176
6.9.4 电液比例流量控制阀	177
6.10 电液数字控制阀	179
6.10.1 电液数字控制阀的特点及分类	179
6.10.2 增量式电液数字控制阀	179
6.10.3 脉宽调制式电液数字控制阀	181
重点和难点课堂讨论	182
典型案例分析	182
本章小结	183
思考题和习题	184
第7章 液压辅助元件	186
7.1 过滤器	186
7.1.1 过滤器的基本性能参数	186
7.1.2 过滤器的分类和结构特点	188
7.1.3 过滤器的选用	191
7.1.4 过滤器的安装	191
7.2 蓄能器	192
7.2.1 蓄能器的类型、结构和工作原理	192
7.2.2 蓄能器参数的计算	194
7.2.3 蓄能器的安装和使用	196
7.2.4 蓄能器的用途	196
7.3 液压密封装置	197
7.3.1 密封件的分类	197
7.3.2 对密封装置的基本要求	198
7.3.3 常用密封件的材料	198
7.3.4 常见的密封方法	199

7.3.5	常用密封件的结构与性能	199
7.4	管道及管接头	206
7.4.1	管道的种类及材料	206
7.4.2	管道内径及壁厚的确定	207
7.4.3	管道安装要求	208
7.4.4	管接头	208
7.5	液压油箱	211
7.5.1	液压油箱的功能与类型	211
7.5.2	液压油箱容积的计算	212
7.5.3	液压油箱的设计要点	213
7.6	加热器	214
7.7	冷却器	214
7.7.1	无冷却介质冷却器	214
7.7.2	有冷却介质冷却器	215
7.7.3	冷却器的计算	216
	重点和难点课堂讨论	217
	典型案例分析	217
	本章小结	218
	思考题和习题	218
第8章	液压传动基本回路	220
8.1	压力控制回路	220
8.1.1	调压回路	220
8.1.2	卸荷回路	222
8.1.3	减压回路	223
8.1.4	增压回路	224
8.1.5	保压回路	224
8.1.6	释压回路	225
8.1.7	平衡回路	226
8.2	速度控制回路	227
8.2.1	概述	227
8.2.2	节流调速回路	228
8.2.3	容积调速回路	233
8.2.4	容积节流调速回路	238
8.2.5	快速运动回路	240
8.2.6	速度换接回路	241
8.3	方向控制回路	242
8.3.1	换向回路	242
8.3.2	浮动回路	243

8.3.3	锁紧回路	243
8.3.4	制动回路	244
8.4	多执行元件运动控制回路	245
8.4.1	顺序运动回路	245
8.4.2	同步运动回路	247
8.4.3	互不干扰回路	250
8.4.4	多路换向阀控制回路	252
	重点和难点课堂讨论	252
	典型案例分析	253
	本章小结	254
	思考题和习题	254
第9章	典型液压传动系统分析	257
9.1	YT4543型组合机床动力滑台液压传动系统分析	258
9.1.1	概述	258
9.1.2	YT4543型组合机床动力滑台液压传动系统的工作原理	259
9.1.3	YT4543型组合机床动力滑台液压传动系统的特点	261
9.2	3150kN 液压机液压传动系统分析	262
9.2.1	概述	262
9.2.2	液压机液压传动系统及其工作原理	262
9.2.3	液压机液压传动系统的主要特点	266
9.2.4	液压机插装阀集成液压传动系统及其工作原理	266
9.3	Q2-8型汽车起重机液压传动系统分析	270
9.3.1	概述	270
9.3.2	Q2-8型汽车起重机液压传动系统的工作原理	270
9.3.3	Q2-8型汽车起重机液压传动系统的特点	273
9.4	XS-ZY-250A型塑料注射成型机液压传动系统分析	273
9.4.1	概述	273
9.4.2	塑料注射成型机液压传动系统及其工作原理	274
9.4.3	塑料注射成型机液压传动系统的主要特点	278
9.5	机电一体化液压挖掘机液压传动系统分析	278
9.5.1	概述	278
9.5.2	机电一体化液压挖掘机液压传动系统组成	279
9.5.3	机电一体化液压挖掘机液压传动系统工作技术特点	281
9.6	带钢光电液伺服跑偏控制系统分析	282
9.6.1	概述	282
9.6.2	带钢光电液伺服跑偏控制系统组成及工作原理	282
9.7	液压助力器伺服控制系统分析	284
9.8	计算机电液控制技术分析	285

9.8.1	概述	285
9.8.2	液压泵控制容积调速计算机液控系统组成	285
9.8.3	液压泵控制容积调速计算机液控系统软件设计	285
9.8.4	液压泵控制容积调速计算机液控系统硬件设计	287
	重点和难点课堂讨论	287
	典型案例分析	287
	本章小结	290
	思考题和习题	290
第 10 章	液压传动系统的设计与计算	292
10.1	液压传动系统的设计概述	292
10.2	明确设计要求,进行工况分析	293
10.3	确定液压传动系统的主要性能参数	296
10.4	液压传动系统原理图的拟定	298
10.5	液压元件的计算与选择	300
10.6	液压传动系统的性能验算	301
10.7	绘制工作图与编写技术文件	303
	重点和难点课堂讨论	304
	典型案例分析	304
	本章小结	313
	思考题和习题	313
第 11 章	气压传动基础知识	315
11.1	概述	315
11.1.1	气压传动系统的组成及工作原理	315
11.1.2	气压传动的优缺点	316
11.1.3	气压传动的应用和发展	317
11.2	气动工作介质的性质	317
11.2.1	气动工作介质的组成	317
11.2.2	气动工作介质的基本状态参数	317
	重点和难点课堂讨论	319
	典型案例分析	320
	本章小结	320
	思考题和习题	320
第 12 章	气源装置和辅助元件	321
12.1	气源装置	321
12.1.1	气源装置的组成及工作原理	321
12.1.2	空气压缩机	322

12.1.3 主要压缩空气净化设备	323
12.2 辅助元件	328
12.2.1 分水滤气器	328
12.2.2 油雾器	329
12.2.3 消声器	331
重点和难点课堂讨论	332
典型案例分析	332
本章小结	332
思考题和习题	332
第 13 章 气动执行元件	334
13.1 气缸	334
13.1.1 气缸的分类	334
13.1.2 气缸的工作原理	334
13.1.3 气缸的输出力和耗气量计算	336
13.2 气马达	338
13.2.1 气马达的分类	338
13.2.2 气马达的工作原理	338
13.2.3 气马达工作特性与工作压力的关系	339
重点和难点课堂讨论	339
典型案例分析	339
本章小结	340
思考题和习题	340
第 14 章 气动控制元件	341
14.1 压力控制阀	341
14.1.1 减压阀	341
14.1.2 安全阀	343
14.1.3 单向顺序阀	345
14.2 方向控制阀	345
14.2.1 单向阀	346
14.2.2 换向阀	347
14.3 流量控制阀	350
14.3.1 节流阀	350
14.3.2 单向节流阀	351
14.3.3 排气消声节流阀	351
重点和难点课堂讨论	351
典型案例分析	352
本章小结	352

思考题和习题	352
第 15 章 气动基本回路	354
15.1 压力控制回路	354
15.1.1 一次压力控制回路	354
15.1.2 二次压力控制回路	354
15.1.3 高低压选择回路	355
15.2 方向控制回路	355
15.2.1 单作用气缸的换向回路	355
15.2.2 双作用气缸的换向回路	356
15.3 速度控制回路	356
15.3.1 单作用气缸的节流调速控制回路	357
15.3.2 双作用气缸的双向调速控制回路	357
15.4 气-液联动控制回路	358
15.4.1 气-液增压控制回路	358
15.4.2 气-液联动速度控制回路	358
15.4.3 气-液缸同步运动控制回路	359
15.5 连续往复运动回路	359
重点和难点课堂讨论	360
典型案例分析	360
本章小结	360
思考题和习题	361
第 16 章 气动控制系统分析	362
16.1 气动控制系统举例	362
16.1.1 数控加工中心换刀气动系统分析	362
16.1.2 工件夹紧气动系统分析	363
16.2 气动行程程序控制系统的 X-D 线图法设计	364
16.3 气动控制系统的安装、调试、使用与维修	365
重点和难点课堂讨论	370
典型案例分析	370
本章小结	373
思考题和习题	373
附录 A 部分液压与气压传动图形符号	374
附录 B 液压与气压传动主要符号、关键词和术语中英文对照	379
参考文献	388

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Study on fluid mechanics	1
1.2 Study on hydraulic and pneumatic transmission	2
1.3 Operating principles and basic features of hydraulic and pneumatic transmission	2
1.3.1 Operating principles of hydraulic and pneumatic transmission	2
1.3.2 Basic features of hydraulic and pneumatic transmission	3
1.4 Components of hydraulic transmission system	5
1.5 Diagram symbols of hydraulic transmission system	6
1.6 Control modes of hydraulic transmission	6
1.7 Advantages and disadvantages of hydraulic transmission	7
1.8 Development history and trend of hydraulic transmission	8
1.8.1 Development history of hydraulic transmission	8
1.8.2 Trend of hydraulic transmission	9
1.9 Applications of hydraulic transmission	9
Important and difficult understanding knowledge points discussion in this chapter	10
Typical troubleshooting analysis	10
Summary	10
Review questions	11
Chapter 2 Hydraulic transmission operating medium	12
2.1 Characteristics and selection and application of hydraulic transmission operating medium	12
2.1.1 Classification of hydraulic transmission operating medium	12
2.1.2 Physical characteristics of hydraulic transmission operating medium	13
2.1.3 Chemical characteristics of hydraulic transmission operating medium	18
2.1.4 Main performance requirements of hydraulic transmission operating medium	19
2.1.5 Selection of hydraulic transmission operating medium	20
2.1.6 Application of hydraulic transmission operating medium	21
2.2 Pollution and control of hydraulic transmission operating medium	22

2.2.1	Pollution classification of hydraulic transmission operating medium	22
2.2.2	Pollution causation of hydraulic transmission operating medium	22
2.2.3	Contamination grade of hydraulic transmission operating medium	23
2.2.4	Pollution measurement of hydraulic transmission operating medium	25
2.2.5	Pollution hazard of hydraulic transmission operating medium	25
2.2.6	Pollution control and measures of hydraulic transmission operating medium	26
	Important and difficult understanding knowledge points discussion in this chapter	28
	Typical troubleshooting analysis	28
	Summary	29
	Review questions	29
Chapter 3	Hydro-mechanics basic knowledge	30
3.1	Hydro-static mechanics basic knowledge	30
3.1.1	Pressure and characteristics in stationary liquids	30
3.1.2	Pressure spread in stationary liquids and basic equation of hydro-static mechanics	31
3.1.3	Hydro-static pressure transmission of liquids	32
3.1.4	Absolute pressure, relative (gauge) pressure and vacuum (negative pressure)	33
3.1.5	Force in stationary liquids acting on surfaces of the container	33
3.2	Hydro-dynamics basic knowledge	34
3.2.1	Basic concepts of flow liquid	35
3.2.2	Flow continuity equation	36
3.2.3	Bernoulli's equation	38
3.2.4	Momentum equation	42
3.3	Pressure losses at the pipes' surfaces and within the liquids as liquids move in pipes	44
3.3.1	Laminar flow, turbulent flow and Reynold's number of liquids	45
3.3.2	Pressure losses at the pipes' surfaces and within the liquids	46
3.3.3	Pressure losses at a particular location	49
3.3.4	Total pressure losses in pipe-system	50
3.4	Flow of liquid moving through orifice	50
3.5	Flow of liquid moving through narrow clearance	52
3.6	Cavitation	60
3.7	Pressure shock	61

Important and difficult understanding knowledge points discussion	65
in this chapter	65
Typical troubleshooting analysis	65
Summary	66
Review questions	66
Chapter 4 Hydraulic power components	68
4.1 Hydraulic pumps introduction	68
4.1.1 Operating principles of hydraulic pumps	68
4.1.2 Classification of hydraulic pumps	69
4.1.3 Diagram symbols of hydraulic pumps	69
4.1.4 Basic performance and parameters and equations of hydraulic pumps	70
4.1.5 Characteristic curves and measures of hydraulic pumps	71
4.2 Gear pumps	73
4.2.1 Operating principles of external gear pumps	73
4.2.2 Displacement and flow equation of external gear pumps	73
4.2.3 Structure characteristics of external gear pumps	74
4.2.4 Measures to improve operating pressure of external gear pumps	76
4.2.5 Involute internal gear pumps	78
4.2.6 Orbit internal gear pumps	79
4.2.7 Internal gear pumps with pressure relief valves	80
4.2.8 Main performance of external gear pumps	81
4.2.9 Advantages and disadvantages of gear pumps	81
4.2.10 Screw pumps	81
4.3 Vane pumps	82
4.3.1 Single-acting vane pumps	82
4.3.2 Pressure limited variable displacement vane pumps	84
4.3.3 Double-acting vane pumps	86
4.3.4 Main performance of vane pumps	89
4.3.5 Advantages and disadvantages of vane pumps	90
4.4 Piston pumps	90
4.4.1 Radial piston pumps	90
4.4.2 Swash plate axial piston pumps	92
4.4.3 Bent axis axial piston pumps	95
4.4.4 Swash plate axial piston pumps with auxiliary pumps	96
4.4.5 Main performance of piston pumps	97
4.4.6 Advantages and disadvantages of piston pumps	97
4.5 Main property and applications of hydraulic pumps	97