

YEYAQIDONGJISHUSHOUCE

液压气动 技术手册

路甬祥 主编

 机械工业出版社
China Machine Press

YEYAQIDONGJISHUSHOUCE

YEYAQIDONGJISHUSHOUCE

液 压 气 动 技 术 手 册

路甬祥 主编



机 械 工 业 出 版 社

本手册共六篇。第一篇介绍液压与气动系统中的流动理论和流体力学基本公式。第二篇介绍经典和现代控制理论以及流体参数和机械量的测量, 液压系统的监测与故障分析。第三篇和第四篇分别介绍了液压、气动系统的工作介质及动力源; 主要液压、气动元件和辅件的结构和工作原理; 液压、气动系统基本回路和系统设计方法。第五篇向读者提供了若干液压、气动应用系统的实例。第六篇是参考资料篇, 包括设计理论与方法, 液压、气动图形符号及名词术语等。

本手册可供液压、气动技术的研究、教学、设计、维修人员及大专院校有关专业的师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压气动技术手册/路甬祥主编. —北京: 机械工业出版社, 2002.1

ISBN 7-111-09510-3

I. 液... II. 路... III. ①液压传动-技术手册②气压传动-技术手册
IV. TH13-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 075693 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 盛君豪 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣 张 媛

封面设计: 陈 沛 责任印制: 路 琳

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·78 印张·2 插页·2459 千字

0 001—4 000 册

定价: 128.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

《液压气动技术手册》编辑委员会、 篇主编、篇主审名单

主 编 路甬祥

副主编 吴根茂

编 委 陈启复 陈瑞藻 陈 鹰 陈卓如 冯培恩 葛宜远
黄人豪 黄 谊 李从心 李壮云 林建亚 林建忠
骆涵秀 聂崇嘉 邱敏秀 宋鸿尧 王益群 王 意
王占林 王祖温 吴元道 许仰曾 杨华勇 钟廷修
焦宗夏

名誉顾问 雷天觉

顾 问 史维祥 刘庆和 许耀铭 杨尔庄 张志英 陆元章
范宏才 曹 泛 盛敬超

第一篇 基础篇

主 编 林建忠 主 审 许耀铭 苏尔皇

第二篇 控制与检测

主 编 徐 立 傅周东 主 审 王占林 熊诗波

第三篇 液压元件与系统

主 编 葛宜远 杨华勇 骆涵秀 主 审 林建亚 聂崇嘉
官忠范 王占林

第四篇 气动元件与系统

主 编 黄 谊 陆鑫盛 陶国良 主 审 徐炳辉

第五篇 应用实例

主 编 吴根茂 张光琼 陶国良 主 审 王益群 宋鸿尧
黄人豪 徐炳辉

第六篇 参考资料

主 编 陈 鹰 邱敏秀 主 审 陈贞发 吴志明 钟廷修

《液压气动技术手册》编写人员名单

第一篇

- 第一章 陈邦国
第二章 林建忠
第三章 阮晓东
第四章 张京平 邵雪明

第二篇

- 第一章 丁 凡
第二章 徐 立
第三章 顾越洲 徐 立
第四章 宋开臣
第五章 朱世强
第六章 朱世强
第七章 傅周东
第八章 傅周东 周 文
第九章 杨洁明 黄克强
第十章 阮晓东
第十一章 陈章位

第三篇

- 第一章 张铁华 李壮云 夏志新 苍秋菊
第二章 李世伦 王庆丰
第三章 蒋晓夏 金 波 王宣银 许仰曾 郁凯元 邱敏秀 吴根茂
魏建华 李世伦 王荣良
第四章 葛宜远 王 意 吴根茂
第五章 陈卓如 俞浙青
第六章 陈尧明
第七章 冉隆林 沙道航 徐 兵 王 亮 周 华 邵大文 杨华勇
第八章 骆涵秀 王旭永 郑金传 王少丹 王旭东 徐 兵 沙道航
第九章 沙道航 徐 兵 王 亮

第四篇

- 第一章 周瑞章
 第二章 黄 谊
 第三章 陆鑫盛
 第四章 任伯航
 第五章 陆鑫盛
 第六章 王祖温
 第七章 陶国良
 第八章 周 洪
 第九章 王宣银

第五篇

- 第一章 阎丽娟 胡景清 黄宗益 吴仁智 陈顺牛 冯培恩 吴根茂
 张柏清 李从心 魏建华 任志宇 王文富 詹永麒 金安石
 郭振华 张玉振 吴万荣 吴江宁 卢长耿 余金海 喻飞鹏
 罗永德 蒋志勤 孔向东 乌建中 黄 谊 苗香文
- 第二章 陶国良

第六篇

- 第一章 焦宗夏 王少萍 檀润华 杨灿军 周 洪 赵长春 王林翔
 谢英俊 叶 冰 陈 鹰
- 第二章 邱敏秀
 第三章 邱敏秀
 第四章 邱敏秀

序 言

流体传动与控制技术是现代机械工程的基本技术构成，也是现代控制工程的基本技术要素。由于其本身独特的技术优势，使得它在现代农业、制造业、能源工程、化学与生化工程、交通运输与物流工程、采矿与冶金工程、油气探采与加工、建筑与公共工程、水利与环保工程、航天与海洋工程、生物与医学工程、科学实验装置、军事国防工程等领域获得了广泛的应用，成为农业、工业、国防和科学技术现代化进程中不可替代的一项重要的基础技术，也是当代工程师希望掌握的重要基础技术知识。

流体传动与控制技术是依靠液体或气体作为介质，实现信息、运动、力能传递与控制的技术。它基于流体力学、机械制造、机械学、运动学、动力学、工程材料学、控制理论等学科。由于其应用的多样化，流体传动与控制系统的机构、功能与特性又必须满足不同工作机器与工作环境的要求。20世纪下半叶以来流体传动与控制技术又与电子和信息技术相结合，发展了机械电子一体化的器件与系统。应用了计算机仿真与设计、计算机集成制造、计算机智能控制及现场总线控制与实时监测等技术，实现了流体传动与控制技术的机电一体化、智能化与网络化。由于人类社会对生态环境保护重要性认识的深化，流体传动与控制技术从20世纪70年代起，也从主要关注功能与效率，转变为同时关注其对生态环境的影响。不但致力于消除泄漏、降低噪声，而且致力于发展环境友好的介质与工艺、可再生循环的材料，发展环境友好的产品、系统、生产工艺、运行排放及遗骸处理等。

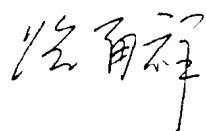
因此，流体传动与控制技术也是一门学科交叉、应用广泛、发展迅速的工程技术。

基于上述原因，《液压气动技术手册》将自身定位于尽可能为各类读者提供该技术的基本知识及新进展，相关的基础知识如流体力学、控制理论、传感与转换器件、计算机仿真、设计及控制、相关的技术标准以及典型的应用实例等。尽可能地体现基础性、系统性、

先进性与工程应用性的特点。以满足从事流体传动控制技术工程应用、设计、制造、实验、维护的工程技术人员需要。

该技术手册编撰过程历时5年，前后有几十位同志参与了编写、审核和修改工作，付出了艰辛的劳动。副主编吴根茂教授自始至终承担了协调、统稿工作。没有他们的努力，本手册的出版是不可能的。机械工业出版社将本手册列为重点计划，并对编辑出版工作作了精心的安排。香港蒋氏工业慈善基金会、浙江大学机械电子控制工程研究所为手册的编撰提供了资助与支持。在此，我谨对他们的贡献表示衷心的感谢。

由于技术的飞速发展和我们知识水平所限，手册中难免存在错误和不足之处，诚望读者教正。



2001年7月6日

目 录

序言

第一篇 流体传动基础理论

第一章 液压与气动工作介质流动的基本方程 1

1.1 压力与流量的基本性质 1
1.1.1 压力及其性质 1
1.1.2 流量与平均流速 2
1.1.3 帕斯卡原理 2
1.2 连续性方程 3
1.3 运动方程 4
1.3.1 纳维-斯托克斯方程 4
1.3.1.1 斯托克斯近似 5
1.3.1.2 奥森近似 6
1.3.2 欧拉运动方程 6
1.3.3 动量方程 7
1.4 能量方程 7
1.4.1 一般能量方程 7
1.4.2 伯努利方程 8
1.4.3 粘性流体中的伯努利方程 9
参考文献 10

第二章 液压与气动工作介质的流动状态 11

2.1 定常流动与非定常流动 11
2.2 层流与紊流 11
2.3 可压缩流动与不可压缩流动 14
2.3.1 压缩系数与体积模量 14
2.3.2 波动方程 14
2.3.3 可压缩流场举例——喷嘴出口流场 15
2.4 相似性准则 16
2.4.1 力学相似 16
2.4.2 基本量纲与白金汉 π 定理 16
2.4.3 与流动有关的量纲为 1 的

基本量 16
2.4.4 与热传递有关的量纲为 1 的 基本量 18
参考文献 19

第三章 实用流体力学理论 20

3.1 管内定常流与非定常流 20
3.1.1 管内定常流 20
3.1.1.1 管内的流速和压力损失 20
3.1.1.2 管内层流 20
3.1.1.3 管内紊流 21
3.1.1.4 进口起始段 23
3.1.1.5 管路中的各种损失 24
3.1.2 管内非定常流 28
3.1.2.1 不可压缩粘性流体 28
3.1.2.2 可压缩流体 28
3.1.2.3 管端压力与流量的关系 31
3.2 缝隙流 33
3.2.1 圆柱形节流孔 33
3.2.2 两平行平板间的流动 34
3.2.3 圆柱环形间的流动 36
3.2.3.1 同心圆柱环形间的流动 36
3.2.3.2 偏心圆柱环形间的流动 36
3.2.4 变间隙宽度中的流动 36
3.2.4.1 倾斜平板间隙流动 36
3.2.4.2 几种同心环形变间隙流动 37
3.2.4.3 偏心环形变间隙流动 38
3.2.5 两平行圆盘间的放射状流动 38
3.2.5.1 两圆盘固定的情况 38
3.2.5.2 上圆盘以 ω 等角速度旋转, 下圆盘固定的情况 39
3.2.6 挤压流动 40

3.2.7 阻塞现象	42	4.1.5 液压执行元件中的气蚀现象	56
3.2.8 间隙中的油温上升	42	4.2 射流	57
3.2.8.1 两平行平板间的压差流	42	4.2.1 自由射流	57
3.2.8.2 两平行平板间的剪切流	43	4.2.2 半射流	58
3.2.8.3 具有压差和相对运动面的间隙流	43	4.2.3 附壁射流	59
3.2.9 静压支承	44	4.2.4 对平板的冲击射流	60
3.2.10 动压支承	46	4.2.5 阀开口处的射流	61
3.3 淹没射流	47	4.3 通过多孔介质的流动	61
3.3.1 圆柱滑阀阀口的流量计算	48	4.3.1 过滤过程的类型	61
3.3.2 圆锥阀阀口的流量计算	48	4.3.2 多孔介质的几何参数	61
3.4 动量定理	48	4.3.3 达西定律和渗透系数	62
3.4.1 动量理论	49	4.3.4 通过多孔介质的流体运动方程式	62
3.4.1.1 控制体静止不动的情况	49	4.3.5 滤饼过滤理论	63
3.4.1.2 控制体运动的情况	49	4.3.6 通过多孔介质的实用公式	63
3.4.2 动量矩理论	49	4.4 润滑、摩擦与磨损	64
3.4.3 动量理论的应用举例	49	4.4.1 润滑	64
3.4.3.1 射流与挡板的作用力	49	4.4.1.1 流体润滑	64
3.4.3.2 流体对弯管的作用力	49	4.4.1.2 固体润滑	66
3.4.4 液动力现象	50	4.4.2 摩擦	66
3.4.4.1 作用在滑阀上的液动力	50	4.4.2.1 干摩擦机理	67
3.4.4.2 作用在锥阀上的液动力	51	4.4.2.2 边界摩擦的机理	67
参考文献	52	4.4.2.3 流体摩擦	68
第四章 液压与气动工作介质的流动现象	53	4.4.3 磨损	68
4.1 气蚀	53	4.5 凝露	69
4.1.1 气泡的产生	53	4.5.1 蒸气气体混合物	69
4.1.2 气泡破坏和金属的侵蚀	54	4.5.2 露点	69
4.1.3 节流部位和阀中的气蚀现象	55	4.5.3 湿空气	69
4.1.4 液压泵中的气蚀现象	55	4.5.4 湿空气的状态参数	70
		参考文献	70

第二篇 控制与检测

第一章 经典控制理论	72	1.3.1 瞬态响应的典型输入信号	76
1.1 概述	72	1.3.2 一阶系统的瞬态响应	77
1.2 反馈控制系统	72	1.3.3 二阶系统的瞬态响应	77
1.2.1 反馈控制系统的基本组成	72	1.3.4 高阶系统的瞬态响应	78
1.2.2 控制系统的动态数学模型	72	1.3.5 系统的时域性能指标	79
1.2.3 传递函数	74	1.3.6 根轨迹法	79
1.2.4 方块图	74	1.3.7 系统闭环零、极点的分布对系统瞬态响应的影响	81
1.3 控制系统的瞬态响应	76	1.4 控制系统的频率特性	81

1.4.1	频率特性的基本概念	81	2.4.1	状态反馈	95
1.4.2	频率响应的极坐标图和对数坐 标图	81	2.4.2	单输入系统的闭环极点配置	95
1.4.3	控制系统的闭环频率响应	82	2.4.3	静态特性	96
1.5	控制系统的稳定性分析	82	2.4.4	状态观测器及其反馈系统	96
1.5.1	系统稳定性的一般概念	82	2.5	线性系统二次型性能指标的 最优控制	97
1.5.2	劳斯稳定判据	83	2.5.1	有限时间最优状态调节器	97
1.5.3	乃奎斯特稳定判据	83	2.5.2	无限时间最优状态调节器	97
1.5.4	对数频率特性的稳定性判据	83	参考文献	98	
1.5.5	控制系统的相对稳定性	83	第三章 离散系统控制理论	99	
1.6	控制系统的误差分析	84	3.1	概述	99
1.6.1	系统稳态误差的基本概念	84	3.1.1	数字控制系统的结构	99
1.6.2	系统稳态误差的计算	84	3.1.2	数字控制系统与连续控制 系统	99
1.7	控制系统的校正	85	3.1.3	离散系统的分析方法	99
1.7.1	系统校正概述	85	3.2	信号采集与保持	99
1.7.2	串联校正	85	3.2.1	采样周期的选取	100
1.7.3	并联校正	87	3.2.2	信号保持	100
1.8	非线性控制系统的分析方法 ——描述函数法	88	3.3	线性数字控制系统的 Z 变换 分析	101
1.8.1	描述函数	88	3.3.1	Z 变换	101
1.8.2	描述函数法分析非线性系统的 稳定性	88	3.3.2	脉冲传递函数	101
参考文献	91	3.3.3	线性离散控制系统的稳定性 分析	101	
第二章 现代控制理论	92	3.3.4	线性离散控制系统的稳态 误差	102	
2.1	状态空间基础	92	3.4	数字控制器设计	103
2.1.1	状态空间模型	92	3.4.1	数字控制器的模拟化设计	103
2.1.2	转移矩阵及其性质	92	3.4.2	数字控制器的数字化设计	104
2.2	系统结构分析	93	3.4.3	数字 PID 控制	105
2.2.1	非奇异变换及其性质	93	3.5	线性离散系统的状态空间分 析法	108
2.2.2	系统的对角规范型	93	参考文献	109	
2.2.3	能控性和能观性	93	第四章 系统辨识	110	
2.2.4	对偶原理	94	4.1	辨识的基本概念	110
2.2.5	卡尔曼结构原理	94	4.1.1	辨识的定义	110
2.2.6	传递函数分子分母的零极点相消 与能控能观性	94	4.1.2	数学模型及其分类	110
2.3	系统稳定性分析	94	4.1.3	误差准则	110
2.3.1	李亚普诺夫稳定性定义	94	4.1.4	辨识的基本原理	111
2.3.2	李亚普诺夫第二方法	95	4.1.5	辨识的内容和步骤	111
2.3.3	李亚普诺夫第二方法用于线性 定常系统	95			
2.4	系统综合理论	95			

4.2 系统的数学描述.....	111	5.2.3 控制算法	126
4.2.1 系统的外部描述	111	参考文献	128
4.2.2 系统的内部描述	112		
4.2.3 系统的随机描述	112		
4.3 辨识的经典方法.....	112	第六章 智能控制理论	129
4.3.1 阶跃响应法	112	6.1 概述	129
4.3.2 脉冲响应法	113	6.1.1 智能控制的对象特性	129
4.3.3 频率响应法	113	6.1.2 智能控制系统的功能要求	129
4.3.4 相关分析法	114	6.1.3 智能控制系统的—般结构	129
4.3.5 谱分析法	114	6.2 模糊逻辑控制	130
4.3.5.1 周期图法	114	6.2.1 模糊集合的基本概念	130
4.3.5.2 平滑法	115	6.2.2 模糊控制器的基本结构	130
4.4 最小二乘辨识法.....	116	6.2.3 知识库	131
4.4.1 最小二乘参数估计值的统计		6.2.4 模糊化计算和精确化计算	131
性质	116	6.2.5 模糊推理	132
4.4.2 最小二乘法 (LS)	116	6.2.6 模糊控制与传统控制方法的	
4.4.2.1 最小二乘法基本原理	116	结合	132
4.4.2.2 加权最小二乘法(WLS)	116	6.3 神经网络控制	133
4.4.3 广义最小二乘法 (GLS)	117	6.3.1 神经网络简介	133
4.4.4 辅助变量法 (IV)	117	6.3.2 前馈网络	134
4.4.5 增广矩阵法 (EM)	118	6.3.2.1 多层感知器网络	134
4.4.6 最小二乘类算法的比较	118	6.3.2.2 BP 网络	135
4.4.7 最小二乘法的递推形式	118	6.3.3 反馈网络	135
4.5 极大似然参数辨识方法	119	6.3.3.1 Hopfield 网络	135
4.5.1 极大似然原理	119	6.3.3.2 Boltzmann 机	136
4.5.2 动态系统模型参数的极大似然		6.3.4 神经网络控制器的结构	136
估计	120	6.3.4.1 神经网络监督控制	136
参考文献	120	6.3.4.2 神经网络直接逆控制	137
		6.3.4.3 神经网络自适应控制	137
		6.3.4.4 神经网络内模控制	137
		6.3.4.5 神经网络预测控制	137
第五章 自适应控制和预测		6.4 专家控制	138
控制	121	6.4.1 专家系统概述	138
5.1 自适应控制	121	6.4.2 专家控制系统	139
5.1.1 自适应控制综述	121	6.5 学习控制	139
5.1.2 模型参考自适应控制	122	6.5.1 基于模式识别的学习控制	139
5.1.2.1 自适应控制器及其调节机		6.5.2 迭代自学习控制	140
构的设计	122	6.5.3 联结主义学习控制	140
5.1.2.2 模型参考自适应控制系统		6.6 逆阶智能控制系统	140
中参考模型的选取与系统		6.7 智能控制在液压领域应用	
性能	124	简述	141
5.2 预测控制	124	参考文献	142
5.2.1 内部模型	125		
5.2.2 参考轨迹	126		

第七章 测量的基础	143	8.2.3 动态流量的测量	156
7.1 概述	143	8.3 压力测量	156
7.1.1 测量的目的	143	8.3.1 液柱压力计	157
7.1.2 信号	143	8.3.2 弹性式压力计	158
7.1.3 测量方法的选择	143	8.3.3 压力变送器	159
7.1.4 单位与标准	144	8.3.3.1 膜片电感型压力变送器	159
7.2 测量误差与精度	144	8.3.3.2 电容式压力变送器	160
7.2.1 测量误差	144	8.3.3.3 气动式压力变送器	160
7.2.2 误差的定义	144	8.3.3.4 压力变送器的发展	161
7.2.3 产生误差的原因	145	8.3.4 压力传感器	161
7.2.4 误差的性质	145	8.3.4.1 电阻式压力传感器	161
7.2.5 误差的传递规律	146	8.3.4.2 应变式压力传感器	161
7.2.6 测量精度	146	8.3.4.3 压阻式压力传感器	162
7.3 测量数据的处理和精度		8.3.4.4 压电式压力传感器	163
表示	146	8.3.4.5 集成一体化压力传感器	163
7.3.1 图线法	146	8.3.5 压力测试仪表的标定	164
7.3.2 统计处理法	146	8.3.5.1 静态标定和重锤式	
7.3.3 最小二乘法	147	压力计	164
7.3.4 测量精度的表示方法	147	8.3.5.2 压力传感器的动态标定	164
参考文献	147	8.3.5.3 压力仪表的选用和安装	165
第八章 流体参数的测量	148	8.4 温度测量	166
8.1 流速测量	148	8.4.1 接触式温度测量	167
8.1.1 流速测量概述	148	8.4.1.1 玻璃温度计	167
8.1.2 毕托静压管	148	8.4.1.2 电阻温度计	167
8.1.3 热线、热膜风速计	148	8.4.1.3 热电偶温度计	168
8.1.4 激光流速计	149	8.4.1.4 双金属温度计	169
8.2 流量测量	149	8.4.2 非接触式温度测量	169
8.2.1 流量测量概述	149	8.4.2.1 光学高温计	169
8.2.1.1 流量测量方法及常用		8.4.2.2 辐射式高温计	170
流量计的分类	150	8.4.2.3 红外辐射温度计	170
8.2.1.2 流量测量必须注意的		8.5 粘度测量	171
问题	150	8.5.1 基本概念	171
8.2.2 稳态流量的测量	151	8.5.2 毛细管粘度计	171
8.2.2.1 容积式流量计	151	8.5.3 旋转粘度计	172
8.2.2.2 差压式流量计	152	8.5.4 落体式粘度计	172
8.2.2.3 面积式流量计	154	8.5.5 振动粘度计	173
8.2.2.4 涡轮流量计	155	8.6 密度测量	173
8.2.2.5 电磁流量计	155	8.6.1 基本概念	173
8.2.2.6 超声波流量计	155	8.6.2 液体密度的测量	173
8.2.2.7 旋涡流量计	156	8.6.2.1 比重瓶法	173
		8.6.2.2 浮子式密度计	173
		8.6.2.3 浮计(浮标)测量法	174

8.6.2.4 振动式密度计	174	9.2.1.2 测量方法	191
8.6.3 气体密度的测量	175	9.2.2 机械法测量	192
8.7 湿度测量	175	9.2.2.1 累计式转速计	192
8.7.1 基本概念	175	9.2.2.2 离心式转速计	192
8.7.2 几种测量湿度的仪器	175	9.2.3 电磁法测量	192
8.7.2.1 干湿计	175	9.2.3.1 磁电式直线速度传感 器	192
8.7.2.2 毛发湿度计	176	9.2.3.2 测速发电机	193
8.7.3 湿度传感器	176	9.2.3.3 磁电式脉冲传感器	194
8.7.3.1 电解湿度传感器	176	9.2.3.4 电涡流式脉冲传感器	195
8.7.3.2 电容式湿敏元件	177	9.2.4 光学法测量	195
参考文献	177	9.2.4.1 闪频测速仪	195
第九章 机械量的测量	179	9.2.4.2 光电式脉冲传感器	195
9.1 位移和角位移测量	179	9.2.5 相关法速度测量	196
9.1.1 位移和角位移测量概述	179	9.2.6 激光多普勒测速法	196
9.1.1.1 长度测量的分类	179	9.3 加速度、角加速度和振动 测量	197
9.1.1.2 长度测量的方法	180	9.3.1 惯性式振动传感器的基本 原理	197
9.1.1.3 长度测量装置的结构	180	9.3.2 磁电式拾振器	198
9.1.2 机械法测量	181	9.3.3 压电式加速度计	198
9.1.2.1 利用螺纹测量位移	181	9.3.4 应变式加速度计	200
9.1.2.2 利用齿轮机构测量位移	181	9.3.5 压阻式加速度计	200
9.1.2.3 利用刻度尺测量位移	181	9.3.6 集成一体化拾振器	200
9.1.3 气动测量法	181	9.3.7 涡流式振动位移传感器	200
9.1.4 电磁测量法	182	9.3.8 角加速度测量	201
9.1.4.1 电位计式	182	9.3.9 振动测量系统的组成	201
9.1.4.2 霍尔式	182	9.4 力和转矩的测量	203
9.1.4.3 应变式	182	9.4.1 力的测量	203
9.1.4.4 差动变压器式	183	9.4.2 转矩测量	204
9.1.4.5 差动电感式	184	9.5 噪声测量	206
9.1.4.6 磁栅式	184	9.5.1 噪声测量概述	206
9.1.4.7 电容式	184	9.5.2 噪声测量仪器	206
9.1.4.8 微动同步器	186	9.5.2.1 传声器	206
9.1.4.9 磁感应同步器	186	9.5.2.2 声级计	207
9.1.4.10 电涡流位移传感器	187	9.5.2.3 声级计校准装置	207
9.1.4.11 磁致伸缩式	188	9.5.2.4 频率分析仪	207
9.1.5 光学法测量	189	9.5.3 液压气动设备的噪声测量	207
9.1.5.1 光栅式	189	9.5.3.1 测量标准简介	207
9.1.5.2 光电编码器	190	9.5.3.2 一般的现场测量	207
9.1.5.3 激光测量法	190	9.5.3.3 声功率级测量	210
9.2 速度和角速度的测量	191	参考文献	210
9.2.1 基本概念	191		
9.2.1.1 速度和角速度	191		

第十章 流动可视化	212	11.1.2 工况监测与故障诊断的基本 概念	219
10.1 壁面流动可视化	212	11.1.3 离线与在线故障诊断	219
10.2 示踪法可视化	212	11.2 工况监测系统的基本结 构	219
10.3 光学显示方法的特点	213	11.2.1 监测系统的组成	219
10.4 图象处理技术在流动可视 化中的应用	214	11.2.2 传感器	220
10.4.1 流动可视化图象的获取	214	11.2.3 记录设备	220
10.4.1.1 光源	214	11.2.3.1 磁带记录仪	220
10.4.1.2 图象获取的方法	214	11.2.3.2 计算机数据采集系统	220
10.4.2 流动可视化图象的数字 处理	215	11.2.4 信号测量与分析设备	221
10.4.2.1 数据压缩	215	11.2.4.1 专用设备	221
10.4.2.2 图象增强	215	11.2.4.2 以计算机为核心的通用 设备	221
10.4.2.3 图象的分割与描述	215	11.3 信号处理的基本概念	222
10.4.2.4 图象分解	215	11.3.1 采样定理	222
10.4.2.5 三维图形显示	216	11.3.2 时域分析方法	222
10.4.3 示踪粒子数字成像测速 技术	216	11.3.3 频谱分析方法	223
10.5 发展中的流动可视化技术 ..	217	11.3.4 卷积定理与相关定理	224
参考文献	218	11.3.5 现代谱分析方法	225
第十一章 液压系统工况监测与 故障诊断	219	11.4 系统特征提取与故障 诊断	225
11.1 概述	219	11.4.1 液压系统的传统故障诊断 方法	226
11.1.1 工况监测与故障诊断的 意义	219	11.4.2 液压系统的精确故障 诊断方法	226
		参考文献	228

第三篇 液压元件与系统

第一章 工作液体	229	1.2.5 温度膨胀	233
1.1 概述	229	1.2.6 热导率	233
1.2 工作液体的物理化学 性质	230	1.2.7 比热容	233
1.2.1 密度	230	1.2.8 凝点或倾点	233
1.2.2 粘度	230	1.2.9 酸值	233
1.2.2.1 粘度的表示方法	230	1.2.10 腐蚀	233
1.2.2.2 粘度-温度特性	230	1.3 工作液体的种类及特性	233
1.2.2.3 粘度-压力特性	232	1.3.1 品种分类	233
1.2.3 可压缩性	232	1.3.2 粘度分类	234
1.2.4 抗燃性	232	1.3.3 命名及代号	235
		1.3.4 液压油(液)品种	236
		1.3.4.1 矿物油型和合成羟型 液压油	236

1.3.4.2 难燃液压油	245	1.4.7 液压系统污染控制与管理	287
1.3.4.3 专用液压油(液)	248	1.4.7.1 污染控制平衡及因素	287
1.3.4.4 液压油(液)的选用	252	1.4.7.2 污染源及控制措施	288
1.3.4.5 其它工作液体	255	1.4.7.3 液压元件和系统的清洗	288
1.4 工作液体的污染及管理	261	1.4.7.4 液压系统污染控制 管理规范	289
1.4.1 工作液体污染及对液压 系统的影响	261	参考文献	291
1.4.1.1 污染物种类与危害	261	第二章 控制放大器与电-机械 转换器	293
1.4.1.2 元件的污染磨损	262	2.1 概述	293
1.4.1.3 滑阀的污染卡紧	263	2.1.1 控制放大器的功能与基本 要求	293
1.4.1.4 油液性能的劣化	264	2.1.2 电-机械转换器的功能与 基本要求	293
1.4.2 工作液体污染分析	264	2.2 控制放大器	293
1.4.2.1 光谱分析	264	2.2.1 分类	293
1.4.2.2 铁谱分析	265	2.2.2 构成及工作原理	294
1.4.2.3 颗粒污染度测定	266	2.2.3 常用控制放大器简介	305
1.4.2.4 水分测定	266	2.2.3.1 伺服控制放大器	305
1.4.2.5 空气含量测定	266	2.2.3.2 比例控制放大器	308
1.4.2.6 红外光谱分析	267	2.2.3.3 全数字式控制放大器	309
1.4.2.7 工作液体的取样	268	2.3 电-机械转换器	309
1.4.3 工作液体的污染度测量	269	2.3.1 分类	309
1.4.3.1 污染度测量方法	269	2.3.2 开关型电磁铁	309
1.4.3.2 自动颗粒计数器	270	2.3.3 比例电磁铁	310
1.4.3.3 滤膜(网)式污染检 测仪	272	2.3.3.1 比例电磁铁的技术要求	310
1.4.4 工作液体的污染度等级	273	2.3.3.2 单向比例电磁铁的结构与 工作原理	310
1.4.4.1 NAS1638 污染度等级	273	2.3.3.3 单向比例电磁铁的分类	311
1.4.4.2 ISO11218 污染度等级	273	2.3.3.4 比例电磁铁的控制特性	312
1.4.4.3 ISO4406 污染度等级	274	2.3.3.5 双向比例电磁铁	315
1.4.4.4 几种污染度等级标准 的对应关系	275	2.3.3.6 比例电磁铁的选用	316
1.4.5 工作液体的净化	275	2.3.4 动铁式力矩马达	317
1.4.5.1 净化方法概述	275	2.3.5 动圈式电-机械转换器	317
1.4.5.2 固体颗粒物的滤除	276	2.3.6 步进电动机	318
1.4.5.3 油液中水的排除	276	2.3.7 其它型式的电-机械转换器	319
1.4.5.4 静电净油法	277	参考文献	319
1.4.6 过滤器与过滤机	278	第三章 液压控制阀	320
1.4.6.1 过滤介质与过滤机理	278	3.1 概述	320
1.4.6.2 过滤器的类型	279	3.1.1 液压阀的分类	320
1.4.6.3 过滤器的结构	280		
1.4.6.4 过滤器的性能及评定 方法	280		
1.4.6.5 过滤器的选用	284		
1.4.6.6 过滤机	286		

3.1.2 圆柱滑阀的特性	322	4.1.1 液压泵的分类	470
3.1.3 锥阀和球阀的特性	326	4.1.2 主要参数及计算	470
3.2 液桥与电桥的类比	327	4.1.3 液压泵特性	471
3.2.1 液压半桥	327	4.2 齿轮泵	472
3.2.2 对先导控制液桥的要求	331	4.2.1 分类、工作原理及典型 结构	473
3.2.3 动态阻尼液阻	331	4.2.2 高压齿轮泵的轴向、径向补偿 措施	475
3.2.4 级间动压反馈液阻	331	4.2.3 齿轮泵的困油及流量脉动	479
3.2.5 液压半桥及液阻功能实例	331	4.2.4 主要性能参数	479
3.3 方向控制阀	332	4.2.5 应用	481
3.3.1 单向阀及液控单向阀	332	4.3 叶片泵	482
3.3.2 换向阀	336	4.3.1 工作原理、分类及 基本结构	482
3.3.3 多路换向阀	352	4.3.2 双作用叶片泵	483
3.3.4 方向控制阀的其它品种	361	4.3.3 单作用叶片泵	485
3.4 压力控制阀	367	4.3.4 径向配流叶片泵	488
3.4.1 溢流阀	368	4.3.5 凸轮转子式叶片泵	488
3.4.2 减压阀	375	4.3.6 主要性能参数	490
3.4.3 顺序阀、卸荷阀和平衡阀	379	4.3.7 应用	492
3.4.4 压力继电器	384	4.4 螺杆泵	492
3.5 流量控制阀	388	4.4.1 工作原理及分类	492
3.5.1 节流阀	389	4.4.2 典型结构	492
3.5.2 调速阀	390	4.4.3 主要性能参数	494
3.5.3 溢流节流阀	393	4.4.4 排量计算	495
3.5.4 单路稳流阀	394	4.4.5 应用	495
3.5.5 分流集流阀	395	4.5 柱塞泵	495
3.5.6 限速切断阀	397	4.5.1 工作原理与分类	495
3.5.7 流量阀的选用原则	398	4.5.2 斜盘式轴向柱塞泵	497
3.6 插装阀	398	4.5.3 斜轴式轴向柱塞泵	508
3.6.1 盖板式三通插装阀	399	4.5.4 旋转斜盘式柱塞泵	511
3.6.2 螺纹式插装阀	416	4.5.5 径向柱塞泵	511
3.7 电液控制阀	429	4.5.6 弯曲形缸筒变量柱塞泵	516
3.7.1 电液控制阀先导级的结构 型式及特点	430	4.5.7 主要性能参数	516
3.7.2 电液控制阀的控制特性 与负载特性	431	4.5.8 主要参数的估算	521
3.7.3 电液控制阀的级间耦合	437	4.5.9 应用	524
3.7.4 电液比例阀	437	4.6 液压泵的变量及控制	525
3.7.5 电液伺服阀	458	4.6.1 变量原理与变量泵的 基本类型	525
3.7.6 数字阀	464	4.6.2 排量控制泵	527
参考文献	469	4.6.3 恒压变量泵	529
第四章 液压泵	470	4.6.4 恒流泵	532
4.1 概述	470		